



HELIOS



10 Jahre HELIOS    *10 years HELIOS*

10 Jahre HELIOS 10 Years  
Herausgeber: DFVLR Oberpfaffenhofen,  
im Auftrag des Bundesministers für Forschung und Technologie  
Redaktion: Herbert Porsche, DFVLR Oberpfaffenhofen  
Einbandentwurf: Enno Kaczmierzak, DFVLR Oberpfaffenhofen, nach einer Vorlage von Fa. MBB  
Karikaturen: Enno Kaczmierzak  
Graphiken: Andreas Hart, DFVLR Oberpfaffenhofen  
Für die freundliche Überlassung von Abbildungen wird gedankt:  
S. 17, Hirner-Verlag, München  
S. 18, Staatl. Verwaltung Schloß Nymphenburg (Photo: Van der Mülben)  
S. 19, Cecile Moessner, München  
S. 14, 21, 22, 23, 27, 28, 29, 30, 31, Baader-Planetarium, München  
S. 20, Holzforschungsinstitut d. Universität München  
Gesamtherstellung: Wenschow Franzis Druck GmbH, München  
Alle Rechte vorbehalten  
Oberpfaffenhofen 1984  
ISBN 3-88135-156-6

# 10 Jahre *10 Years* HELIOS *HELIOS*

Festschrift aus Anlaß des  
10. Jahrestages des Starts der  
Sonnensonde HELIOS  
am 10. Dezember 1974

*Publication Celebrating  
the 10<sup>th</sup> Anniversary  
of the Launch of HELIOS  
on December 10, 1974*

Herausgeber: Herbert Porsche,  
Deutscher Projektwissenschaftler HELIOS  
im Auftrag des Bundesministers  
für Forschung und Technologie

*Editor: Herbert Porsche  
German HELIOS Project Scientist  
on behalf of the Federal Minister  
for Research and Technology*

BMFT

MPG



MBB

JPL

GSFC

NASA

Etwa drei Monate lang, vom 1. September bis 30. November 1984, war die Zeitspanne, die zur Fertigstellung dieser Festschrift vorgesehen war. Die Zeit war richtig bemessen, und es klappte auch, glücklicher- und dankenswerterweise. Denn als in der Nacht vom 16. auf 17. Oktober ein Notarztwagen den Herausgeber wegen einer plötzlichen akuten

Erkrankung in eine Klinik brachte, schien die vorherige Mühe um das Manuskript vergeblich gewesen zu sein. Was nützt eine Festschrift, die viel zu spät erscheint?

In solcher Not erweist es sich, wie segensreich Helfer und hilfsbereite Freunde sein können. Ihnen ist es vor allem zuzuschreiben, daß dieses Buch trotzdem rechtzeitig erscheinen konnte.

Jedem einzelnen möchte der Herausgeber ein herzliches „Dankeschön“ sagen.

Einige wenige seien hier stellvertretend für viele weitere genannt:

Die Klinik Schindlbeck in Herrsching mit dem Stationsarzt Dr. Deiß und seinen Stationschwestern, die tolerant genug waren, die Krankenstube in ein Büro umwandeln zu lassen, in dem nicht selten bis weit in die Nacht hinein gearbeitet wurde. Vielleicht war das nicht gerade förderlich für die Genesung des Kranken, sicher aber für das rechtzeitige Erscheinen der Festschrift,

Herr Guntsche vom Druckereibetrieb Wenschow-Franzis-Druck GmbH, der es mehrfach auf sich nahm, das Layout für das Buch in einem für solche Arbeiten sehr unbequemen Krankenzimmer statt in der gewohnten, gut ausgestatteten Umgebung einer Druckanstalt herzustellen,

Dr. Häberle, Vorstand der DFVLR und Herr Becher, DFVLR/NE-GS, denen der Herausgeber die Hilfe durch Herrn Büdeler zu verdanken hat,

Herr Büdeler, freier Schriftsteller, der tatkräftig bei der Fahnenkorrektur und bei der Erarbeitung des Fachwörterverzeichnisses mitwirkte,

die unmittelbaren Mitarbeiter des Herausgebers, Frau Guckelsberger und Frau Stanggassing und die Herren Stanggassing und Winkler, die die korrigierten Manuskripte der Festschrift getippt, die tägliche Verbindung zwischen Dienststelle und Klinik aufrechterhalten und alle sonstigen allgemeinen Arbeiten besorgt haben,

Herren Hart und Kaczmierzak, Graphiker in der DFVLR, denen die Gestaltung der Graphiken und Illustrationen in der Festschrift oblag.

Schließlich dankt der Herausgeber dem Bundesministerium für Forschung und Technologie, besonders Reg. Dir. Otterbein, und dem Max-Planck-Institut für Aeronomie, Drs. Rosenbauer und Schwenn, für die administrative Unterstützung bei der Herstellung der Festschrift.

Herbert Porsche  
für alle Autoren dieses Buchs

*It was foreseen that it would require some three months, from 1. September to 30. November 1984, to complete this Anniversary Book. This time was adequate to complete the job as it turned out. However, on the night of 16th October the Editor had to be suddenly taken to hospital with an acute illness and all the hard work on the manuscript appeared to be in jeopardy: What is the good of an Anniversary Book which is published much too late?*

*In such a case one realises how beneficial are helpful and diligent friends and colleagues. And so it is thanks to them that this Book can be published on time.*

*To each and everyone of them the Editor wishes to say a heartfelt "Thank you". Especially I wish to complement the following:*

*The Schindlbeck Clinic in Herrsching with ward doctor Deiß and his nursing staff who were tolerant enough to allow the transformation of the sick-room into an Editor's office where sometimes work continued far into the night. This was perhaps not exactly the way to properly recover from sickness, but certainly it enabled the Book to be finished on time.*

*Mr. Guntsche of the printing Firm Wenschow-Franzis-Druck GmbH, who took upon himself the elaboration of the layout in a very uncomfortable sick-room instead of a well fitted out printing office.*

*Dr. Häberle – Head of DFVLR and Mr. Becher – DFVLR/NE-GS, with whose help the Editor received the counsel of Mr. Büdeler.*

*Mr. Büdeler himself, journalist, who diligently helped with the text correction and the preparation of the "Technical Terms".*

*The Editor's immediate staff, Mrs. Guggelsberger and Mrs. Stanggassing and Messrs. Stanggassing and Winkler, who typed the corrected manuscript of the Book and who daily maintained contact between office and clinic and looked after all the normal office duties.*

*Messrs. Hart and Kaczmierzak, DFVLR commercial artists who prepared the graphics and illustrations of the Book.*

*Finally the Editor wishes to thank the Bundesministerium für Forschung und Technologie especially Reg. Director Otterbein and the Max-Planck Institute of Aeronomie, Dr's Rosenbauer and Schwenn for administrative support in the production of the Book.*

*Herbert Porsche  
in behalf of all authors of this book*

# Inhalt      Contents

Danksagung	5	<i>Acknowledgement</i>
Vorworte	6	Forewords
Einleitung	10	<i>Introduction</i>
<i>Gilbert W. Ousley, HELIOS-Rückblick</i>	10	Gilbert W. Ousley, HELIOS – Looking Back
<b>HELIOS und die Heliosphäre</b>	17	<b><i>HELIOS and the Heliosphere</i></b>
Warum HELIOS?	19	<i>Why HELIOS?</i>
Ants Kutzer, Die HELIOS-Missionen	39	<i>Ants Kutzer, The HELIOS Missions</i>
<b>Interplanetarer Staub</b>	49	<b><i>Interplanetary Dust</i></b>
Christoph Leinert, Eckhard Pitz und Hartmut Link Zodiakallicht – ein Abbild der interplanetaren Staubwolke	50	<i>Christoph Leinert, Eckhard Pitz and Hartmut Link The Zodiacal Light – a Replica of the Interplanetary Dust Cloud</i>
Eberhard Grün, Hugo Fechtig und Jochen Kissel Das Mikrometeoritenexperiment auf HELIOS	58	<i>Eberhard Grün, Hugo Fechtig and Jochen Kissel The Micrometeorite Experiment on HELIOS</i>
<b>Der Sonnenwind</b>	65	<b><i>The Solar Wind</i></b>
Rainer Schwenn und Helmut Rosenbauer 10 Jahre Sonnenwindexperiment auf HELIOS 1 und HELIOS 2	66	<i>Rainer Schwenn and Helmut Rosenbauer 10 Years Solar Wind Experiment on HELIOS 1 and HELIOS 2</i>
F. Neubauer, G. Musmann und G. Dehmel Ergebnisse der Magnetfeldexperimente E 2 und E 4 an Bord von HELIOS 1 und HELIOS 2	80	<i>F. Neubauer, G. Musmann and G. Dehmel Results of the Magnetic Field Experiments E 2 and E 4 on Board HELIOS 1 and HELIOS 2</i>
<i>F. Mariani, N. Ness, B. Bavassano, L. Burlaga, S. Cantarano,     C. Searce, R. Terenzi und U. Villante</i> ROM/GSFC Magnetfeldexperiment: Eine Zusammenfassung von Ergebnissen	90	<i>F. Mariani, N. Ness, B. Bavassano, L. Burlaga, S. Cantarano, C. Searce, R. Terenzi and U. Villante ROME/GSFC Magnetic Field Experiment: A Summary of Results</i>
<i>D. A. Gurnett und R. R. Anderson</i> Plasmawellen im Sonnenwind: 10 Jahre HELIOS-Beobachtungen	100	<i>D. A. Gurnett and R. R. Anderson Plasma Waves in the Solar Wind: 10 Years of HELIOS Observations</i>
<i>Paul J. Kellogg</i> Evidenz für den Entstehungsmechanismus solarer Radioausbrüche Typ III	106	<i>Paul J. Kellogg Evidence Concerning the Generation Mechanism of Solar Type III Radio Bursts</i>
Susan Kayser und Robert Stone, Das Radio-Astronomie-Experiment auf HELIOS	111	<i>Susan Kayser and Robert Stone, The HELIOS Radio Astronomy Experiment</i>
Peter Edenhofer, Plasma-Fernerkundung mit Laufzeitmessungen (Korona-Sondierung)	115	<i>Peter Edenhofer, Remote Sensing of the Plasma with Time Delay Measurements (Coronal Sounding)</i>
H. Volland, G. S. Levy, M. K. Bird, C. T. Stelzried und B. L. Seidel Das Faraday-Rotations-Experiment	118	<i>H. Volland, G. S. Levy, M. K. Bird, C. T. Stelzried and B. L. Seidel The Faraday Rotation Experiment</i>
<b>Kosmische Strahlung</b>	123	<b><i>Cosmic Radiation</i></b>
Horst Kunow und Gerd Wibberenz Die schnellen Individualisten im Sonnensystem – Die kosmische Strahlung	124	<i>Horst Kunow and Gerd Wibberenz The Fast Individualists in the Solar System – The Cosmic Radiation</i>
James H. Trainor, Michelle A. I. Van Hollebeke, Nand Lal und Frank B. McDonald Ergebnisse des galaktischen und solaren kosmischen Strahlungsexperiments (E 7) auf HELIOS	149	<i>James H. Trainor, Michelle A. I. Van Hollebeke, Nand Lal and Frank B. McDonald Results from the HELIOS Galactic and Solar Cosmic Ray Experiment (E 7)</i>
<b>HELIOS und die Beiträge der Industrie</b>	157	<b><i>HELIOS and the Industrial Contributions</i></b>
Ants Kutzer, Die Bedeutung von HELIOS für Europa	159	<i>Ants Kutzer, The Meaning of HELIOS for Europe</i>
Ants Kutzer und Bernd-J. Madauss Gewinn an Managementfähigkeiten durch HELIOS für die europäische Industrie	162	<i>Ants Kutzer and Bernd-J. Madauss Managerial Benefits of HELIOS for the European Industry</i>
Victor Billig, Der technische Nutzen von HELIOS für die europäische Industrie	172	<i>Victor Billig, The Technological Gains of HELIOS for the European Industry</i>
<b>Bodenbetriebssystem</b>	181	<b><i>Ground Operations System</i></b>
Joachim Kehr und Georg Hiendlmeier, HELIOS-Bodenbetrieb	183	<i>Joachim Kehr and Georg Hiendlmeier, HELIOS Ground Operations</i>
Kurt Heftman, Projektunterstützung für HELIOS	189	<i>Kurt Heftman, HELIOS Project Support</i>
Wolfgang Kempe, Wissenschaftliche Datenauswertung	193	<i>Wolfgang Kempe, Scientific Data Evaluation</i>
Einige Fachwörter	195	<i>Some Technical Terms</i>
Register	198	<i>Register</i>

# Vorwort

Die Weltraumforschung hat in wenigen Jahren unser Weltbild ganz wesentlich verändert und unser Verständnis des Universums erheblich erweitert.

In der Bundesrepublik begann das staatlich geförderte Weltraumprogramm vor nunmehr 20 Jahren. Es enthielt von Beginn an eine starke kooperative Komponente, die im wissenschaftlichen Bereich vor allem die USA einschloß.

Eine der großen Probleme unserer Zeit ist es, die Welt in der wir leben, besser verstehen zu lernen, um sie für unsere Nachkommen lebenswert bewahren zu können. Viele Erkenntnisse sind notwendig, um diese Aufgabe erfolgreich zu lösen. Dazu gehören insbesondere auch Fragen, die unser Sonnensystem und den Einfluß der Sonne auf unsere Erde betreffen.

Das gemeinsam in den letzten 10 Jahren mit unseren amerikanischen Partnern durchgeführte Sonnensondenprogramm HELIOS hat zu diesem Problemkreis wesentliche Beiträge geliefert. Ziel dieses Programms war es, mit zwei identischen Sonden die Phänomene des interplanetaren Raumes und die Vorgänge auf und in der Nähe der Sonne zu erforschen.

Daß eine der beiden Sonden auch heute nach nunmehr zehn Jahren und damit weit über die damals projektierte Lebensdauer von 1½ Jahren hinaus noch immer wissenschaftlich interessante Daten liefert, die mittlerweile einen kompletten Sonnenaktivitätszyklus abdecken, ist ein großer Erfolg. Es ist auch ein Beweis dafür, daß der Entwurf und die technische Realisierung der Sonden und ihrer Meßinstrumente, die erstmals und bis heute einmalig in eine Sonnennähe von 0,3 astronomische Einheiten vorgedrungen sind, hervorragend waren.

Der vorliegende Band macht deutlich, welche wissenschaftlichen Erkenntnisse das gemeinsame Programm bis jetzt hervorgebracht hat.

Darüber hinaus dienen mittlerweile die HELIOS-Daten weltweit vielen Wissenschaftlern als Basis für ihre Forschungen auf dem Gebiet der solar-terrestrischen Beziehungen.

Das HELIOS-Projekt führt uns vor Augen, wie erfolgreich wissenschaftliche Zusammenarbeit über Ländergrenzen hinweg sein kann. Daher wurde dieser Weg konsequent mit den kooperativen Projekten AMPTE, GALILEO und ROSAT fortgesetzt.

Viele haben dazu beigetragen, daß wir diese beiden Jubiläen feiern können. Jedem sei aufrichtig gedankt. Der gute Geist der vertrauensvollen Zusammenarbeit zwischen Wissenschaftlern, Ingenieuren und Managern hat das Forschungsabenteuer HELIOS zu einem Erfolg geführt, der für viele, besonders aber für junge Menschen, Vorbild und Ansporn sein möge.



Heinz Riesenhuber  
Bundesminister für Forschung und Technologie

## Preface

*In the last few years space research has changed our view of life significantly and considerably widened our understanding of the universe.*

*In the Federal Republic the government-supported space program started 20 years ago. From the very outset it contained a strong cooperative component in the scientific sector predominantly including the USA.*

*One of the major problems of our times is this: acquiring a better understanding of the world, in which we live, in order to be able to preserve our world worthy for future generations to live in. Much knowledge is required in order to solve this task successfully, including in particular the knowledge of questions concerning our solar system and the influence of the Sun on our planet.*

*The HELIOS sunprobe program which we have jointly accomplished with our American partners over the last 10 years has resulted in important contributions to this task. It was the goal of this program to investigate phenomena of interplanetary space and processes on the Sun and in its vicinity with two identical probes.*

*It is a great success that one of these two probes is still continuing to transmit interesting science data exceeding the proposed life-span of 1½ years by up to 10 years. Meanwhile it is covering a complete solar activity cycle. This is also a demonstration of the extraordinary design and of the excellent technical realization of the probes and of their instrumentation. For the first and only time to date they have pushed forward to a solar proximity of 0.3 Astronomical Units.*

*This publication documents many of the scientific findings of the joint program.*

*Moreover, the HELIOS data are serving meanwhile many scientists worldwide as the basis of research in the field of solar-terrestrial relations.*

*The HELIOS project is proof of just how successful international scientific collaboration can be. This route has, therefore, been continued systematically by the cooperative projects AMPTE, GALILEO and ROSAT.*

*We are able to celebrate these two anniversaries thanks to the contributions of many people. All should be thanked sincerely. The good spirit of trustful cooperation among scientists, engineers and managers has led the HELIOS research adventure to its success. May it be a model and stimulus for many people, especially for the younger generation.*

Heinz Riesenhuber  
Federal Minister for Research and Technology



# Vorwort

An der 10-Jahres-Feier des höchst erfolgreichen deutsch-amerikanischen Raumfahrt-Projektes HELIOS und der Feier der ersten 20 Jahre der sehr ergebnisreichen Zusammenarbeit zwischen der Bundesrepublik Deutschland und den Vereinigten Staaten von Amerika nehme ich gerne teil. HELIOS ist ein hervorragendes Beispiel internationaler Kooperation bester Art. Viele Menschen auf beiden Seiten des Atlantiks haben dazu beigetragen, der gesamten internationalen wissenschaftlichen Gemeinschaft eine Fülle von Meßdaten und wissenschaftlichen Ergebnissen von der Sonne, einen vollen Sonnenfleckenzyklus hindurch, zu vermitteln. Die Verbindungen zwischen unseren beiden Ländern sind fester geknüpft worden, sowohl persönlich-individuell als auch national. Aber HELIOS ist nicht das einzige Beispiel deutsch-amerikanischer Zusammenarbeit in der Weltraumforschung in den vergangenen zwei Dekaden. Das letzte ist es ohnehin nicht. Wenn wir unsere derzeit laufenden Projekte überblicken, sehen wir in eine vielversprechende Zukunft. Die Mission „Active Magnetospheric Particle Tracer Explorer“ (AMPTE) wurde am 16. August dieses Jahres gestartet. Sie wird uns Einsichten über die nahe Erdumgebung und die darin ablaufenden Prozesse vermitteln. Die Mission GALILEO zum Planeten Jupiter wird gerade getestet, um den Start 1986 vorzubereiten. Die ROSAT-Mission für astronomische Röntgenstrahlen-Beobachtungen und das Gammastrahlen-Observatorium werden für Starts in den Jahren 1987 und 1988 entwickelt. Von weiteren Projekten, die derzeit im frühen Diskussionsstadium stehen, können wir erwarten, daß sie die Durchführungsreife erlangen. Kurz gesagt, unsere Zusammenarbeit geht weiter und lebt.

Durch die Erkundung des Weltraums hat der Mensch mehr über diesen Planeten, die nahe Erdumgebung und das Universum erfahren als in all den Jahren der Geschichte zuvor. Unsere

internationalen Raumfahrtaktivitäten sind ein Teil dieser großartigen Erweiterung des menschlichen Wissens. Ich möchte mich Minister Riesenhuber anschließen, um allen zu gratulieren, die internationale Zusammenarbeit im Weltraum Wirklichkeit werden ließen. Mögen jene erfolgreich sein, die diesen Weg weitergehen.

James M. Beggs  
NASA Administrator

## Preface

I am pleased to join in commemorating 10 years of the highly successful German-American space project, HELIOS, and to celebrate the first 20 years of a very productive collaboration between the Federal Republic of Germany and the United States of America. HELIOS is an excellent example of international cooperation at its best.

Through a determined effort by many people on both sides of the Atlantic, the broader international scientific community has received a wealth of data and scientific results on the sun during an entire solar cycle. On both an individual and a national level, the ties between our two countries have been strengthened.

But HELIOS is not the only example of German-American space science cooperation that we have undertaken in the last two decades, nor is it the last. As we survey our projects currently underway we see a future bright with promise. The Active Magnetospheric Particle Tracer Explorers mission was launched on August 16, 1984, and will be providing us with information on the near-earth environment and its processes. The GALILEO mission to Jupiter is undergoing testing in preparation for launch in 1986. The ROSAT x-ray observation mission and the Gamma Ray Observatory are being developed for launches in 1987 and 1988, respectively. Still other projects which are now in the early stages of discussion can be expected to come to fruition. In short, our cooperation is ongoing and vital.

Through space exploration, man has learned more about his planet, the near-earth environment and the universe than in all prior years of history. Our international space activities are a part of this great expansion of human knowledge. I would like to join Minister Riesenhuber in congratulating all who have made international cooperation in space a reality. May all those who will follow in this path be successful.



James M. Beggs  
NASA Administrator

# Vorwort

Der Vorstoß ins Neuland stellt immer ein Wagnis dar. Das Projekt HELIOS führte sowohl wissenschaftlich wie auch technisch in neue Bereiche. Aber der damalige Mut der Wissenschaftler, der Techniker und nicht zuletzt der Politiker hat sich gelohnt. Das Unternehmen HELIOS hat reiche Früchte getragen und liefert sie nach 10 Jahren Betriebszeit immer noch.

Für HELIOS bemerkenswert sind die wissenschaftliche Konzeption, die technische Entwicklung des Raumfahrzeugs und der 10jährige Betrieb im Weltraum in der Umgebung der Sonne.

Im Jahre 1966 wurde Wissenschaftlern in der Bundesrepublik die Chance gegeben, ein großes Weltraumprojekt in Zusammenarbeit mit den USA zu planen. Die Aufgabenstellung blieb den Wissenschaftlern vorbehalten. Erste Erfahrungen in der Erforschung der Erdumgebung mit eigenem Weltraumexperiment waren gerade gewonnen worden, so daß es nahe lag, an die Erforschung des interplanetaren Raumes zu denken, aber die Frage war, ob man von der Erdbahn nach außen oder nach innen vorstoßen sollte. Wissenschaftlich vielversprechender erschien der Raum zwischen Sonne und Erdbahn mit einer möglichst starken Annäherung an die Sonne. Zugleich bedeutete ein solches Ziel wegen der zu erwartenden hohen Temperaturen sowie der Temperaturunterschiede eine besondere Herausforderung an die Techniker. Diese haben das Problem in hervorragender Weise gelöst, so daß HELIOS für 10 Jahre wissenschaftliche Daten lieferte.

Aber nicht nur die Zusammenarbeit zwischen Wissenschaftlern und Ingenieuren war vorbildlich bei diesem Projekt, es ist auch ein eindrucksvolles Beispiel für eine fruchtbare Zusammenarbeit zwischen den USA und der Bundesrepublik Deutschland auf dem Gebiet der Weltraumforschung.

Die Wissenschaftler danken allen, die auf beiden Seiten des Atlantiks zum Gelingen dieses Projekts über einen so langen Zeitraum beigetragen haben. Die deutsch-amerikanische Zusammenarbeit in der Erforschung des Weltraums ist es wert, fortgesetzt zu werden.



Reimar Lüst  
Generaldirektor der Europäischen Weltraum-Agentur (ESA)

## Preface

*The attack into a new territory will always be a hazardous action. The project HELIOS has led into new areas, scientifically as well as technically. But the spirit of the early days of the scientists, the engineers and, of course, the politicians was rewarding. The enterprise HELIOS has brought rich harvest and is still delivering results after 10 years of operation.*

*The remarkable properties of HELIOS are its scientific concept, the technical development of the spacecraft and the 10-years operation in space close to the sun.*

*In 1966 scientists in the Federal Republic of Germany were given the chance to prepare for a great space project in cooperation with the United States of America. Planning the scientific goals was the task of the scientists. First experience in investigating the earth's environment with an own space experiment had just been gained. Therefore it was obvious to look to research of interplanetary space. But the question arose should one proceed outward or inward of earth's orbit. Scientifically more promising appeared the space between the sun and the earth's orbit with a solar approach as close as possible. In addition such a goal meant a special challenge to the engineers, because of the high and different temperatures which were expected. The solutions found for the problems were extraordinarily, so that HELIOS could deliver scientific data for 10 years now.*

*But not only was the cooperation in this project among scientists and engineers exceptional. It is as well an impressive example for a fruitful cooperation between the United States and the Federal Republic of Germany in the field of space research.*

*The scientists give thanks to all on both sides of the Atlantic, who have contributed to the success of this project over such a long time span. The German-American cooperation investigating space deserves to continue.*

Reimar Lüst  
Director General of ESA

# Vorwort

*Dieses Buch beschreibt die Ergebnisse des nunmehr 10 Jahre währenden Betriebs von HELIOS. Es ist wahrhaftig angemessen, der Arbeit des HELIOS-Programms eine Festschrift zu widmen, denn die Erfolge der beiden HELIOS-Missionen hatten einen starken Anteil an unserem Verständnis der Sonne und des interplanetaren Mediums und werden ihn auch weiterhin behalten. Die HELIOS-Raumfahrzeuge haben sich der Sonne bis 0,31 und 0,29 Astronomische Einheiten genähert. Sie sind die ersten und bis in naher Zukunft die einzigen Raumfahrzeuge, die diese Nähe zur Sonne erreicht haben werden. Die direkte Messung in der äußeren Korona der Sonne und die Messung der Ausbreitung solarer Störungen und Stoßwellen durch den interplanetaren Raum haben neue Einsichten über die Struktur des interplanetaren Mediums und über die Entstehung des solaren Windes nahe der Sonne gewährt und grundlegendes neues Wissen über dünne, stoßfreie Plasmen vermittelt. Die Tatsache, daß ein HELIOS-Raumfahrzeug vom solaren Minimum bis und über das solare Maximum hinaus arbeitete, hat der wissenschaftlichen Welt einen detaillierten Einblick in die Sonne während solarer Bedingungen gegeben, die in höchstem Maße schwankten. Sie hat es Wissenschaftlern möglich gemacht, die kosmische Strahlung zu beobachten, die aus unserer Galaxis in das Sonnensystem eindringt und hat in der Kombination mit Ergebnissen von Raumsonden und Erdsatelliten ein genaues Bild der Struktur des Sonnensystems und der Charakteristiken niederenergetischer kosmischer Strahlung entstehen lassen. Bei einer Gelegenheit wie dieser geht man nicht fehl, den vielen hervorragenden Ingenieuren, Technikern und Managern Anerkennung auszusprechen. Sie haben die HELIOS-Mission ermöglicht. Besonders hingewiesen sei auf den Dienst, der vom deutschen Kontrollzen-*

*trum und vom Bodenstationssystem der NASA im Umsorgen der HELIOS-Raumfahrzeuge während der vergangenen 10 Jahre geleistet wurde.*

*Die HELIOS-Mission nahm ihren Ausgang von Diskussionen zwischen Präsident Johnson und Bundeskanzler Erhard im Jahr 1966. Die beiden Hauptprojektziele waren die Erkundung der Eigenschaften des interplanetaren Raums zwischen Erde und Sonne und die Entwicklung der technischen Fähigkeiten in der Bundesrepublik Deutschland, technisch anspruchsvolle Raumfahrtmissionen durchzuführen. Es gibt keinen Zweifel: beide Aufgaben wurden in überragender Weise mehr als erfüllt.*

*Albert G. Opp  
stellvertretender Direktor der Abteilung Astrophysik im NASA-Hauptquartier  
NASA-HELIOS-Programmwissenschaftler*

## Preface

This book describes the accomplishments of 10 years of HELIOS operation. It is entirely appropriate to dedicate a Festschrift to the achievements of the HELIOS program, as the results from the two missions have had, and will continue to have a major impact on our understanding of the Sun and the interplanetary medium. The HELIOS spacecraft have approached the Sun within 0.31 and 0.29 Astronomical Units. These are the first, and in the immediate future, only spacecraft to reach this proximity to the Sun. The direct propagation of solar disturbances and shock waves through interplanetary space have given new insight into the structure of the interplanetary medium, the genera-

tion of the solar wind at the Sun, as well as fundamental new knowledge of tenuous, collisionless plasmas. The fact that the HELIOS spacecraft operated from solar minimum into and through solar maximum, has given the scientific world a detailed close-in view of the Sun over vastly differing solar conditions. It has enabled scientists to observe cosmic rays coming into the solar system from our galaxy, and when combined with results from deep space probes and Earth orbiting satellites, has given a detailed picture of the structure of the solar system and of the characteristics of low energy galactic cosmic rays.

On an occasion such as this, one cannot fail to express appreciation to the many excellent engineers, technicians and managers who made the HELIOS missions possible. Of particular note, one must acknowledge the enormous service performed by the German Space Operations Center and the NASA Deep Space Network in nurturing and caring for the HELIOS spacecraft over the past 10 years.

The HELIOS missions resulted from discussions between President Johnson and Chancellor Erhard in 1966. The twofold objective of the project was to explore the properties of interplanetary space between the Earth and Sun, and to develop the technical capabilities within the Federal Republic of Germany to conduct technically sophisticated space missions. There can be no doubt that both objectives were overwhelmingly fulfilled.



Albert G. Opp  
Deputy Director, Astrophysics Divisions  
NASA/HELIOS Program Scientist

# Einleitung

Lieber Leser,

die große deutsch-amerikanische Mission HELIOS ist nun 10 Jahre alt geworden. Damit reiht sich HELIOS stolz in die Liste der großen Raumfahrtmissionen ein, denen wir ein völlig neues Bild unserer Welt, ihrer Weite und Tiefe, zu verdanken haben. Bereits 1976, also kurz nach dem Start der zweiten HELIOS-Sonde, hat der US-Projektleiter den großen Erfolg der Mission erkannt, wie sein folgender Beitrag zeigt:

## HELIOS – Rückblick

Gilbert W. Ousley, US-HELIOS-Projektleiter

*Im März 1976 habe ich den folgenden Text als Vorwort zur „NASA Honor Awards“-Broschüre für das Projekt HELIOS geschrieben.*

*„Die hervorragende Leistung des HELIOS-Teams wurde von der Leitung der NASA (am 11. November 1975) und vom Goddard-Raumfahrtzentrum (am 1. Dezember 1975) durch die Verleihung des ‚NASA Group Achievement Award‘ offiziell gewürdigt. Diese Auszeichnung will in erster Linie die kooperative Teamleistung von Mitarbeitern aus den Vereinigten Staaten, der deutschen Regierung, aus den Universitäten und aus der Industrie hervorheben. Das sind jene Mitarbeiter, die sich in der Zusammenarbeit für das Projekt bewährt haben. Andere deutsche und amerikanische Mitarbeiter leisteten gleichfalls bedeutende Einzelbeiträge, um ihre nationalen Verantwortlichkeiten erfolgreich zu erfüllen. Der Sinn dieser Auszeichnung ist es jedoch, jene Mitarbeiter zu ehren, die sich durch außerordentlich kooperative Arbeit hervor getan haben in einem gemeinsamen Geist, der typisch war während der Arbeit am Projekt HELIOS. Die Geschichte wird sich der Sonnentsonde HELIOS als einer technischen und wis-*

*senschaftlichen Großtat erinnern, die der Menschheit die erste Annäherung an die Sonne ermöglichte. Wir alle erkennen an, daß dieses Werk das Ergebnis zielstrebigter Tatkraft war. Mit dieser Auszeichnung zollen wir einem menschlichen Triumph Tribut, indem wir einige der Männer und Frauen ehren, die HELIOS zu dem Erfolg verholfen haben, der es geworden ist.*

*Als wissenschaftliches Unternehmen der Sonnenforschung führt HELIOS entscheidend die Forschungen früherer Satelliten und interplanetarer Sonden fort, indem es sich zum ersten Mal bis zu einem Perihel bei ungefähr 0,3 Astronomischen Einheiten, das ist innerhalb der Merkurbahn, vorwagt. Obwohl ein volles Verständnis aller HELIOS-Informationen Jahre des Studiums benötigen wird, ist jetzt schon klar, daß wir wertvolle neue Einsichten in den Sonnenwind und in die dynamischen Eigenschaften der Sonne gewonnen haben. Die wachsende Erkenntnis über den starken Sonneneinfluß auf unser Wetter, auf Nachrichtenverbindungen und auf das tägliche Leben hier auf der Erde wird nun gekoppelt mit der unmittelbaren Erfahrung des ungeheuren solaren Energiepotentials als eine Teilantwort auf die kurzfristige Weltenergiekrise. Diese Erfahrung unterstreicht die grundsätzliche Verantwortung der Vereinigten Staaten und Deutschlands, neue wissenschaftliche Erkenntnisse zum Wohle der ganzen Menschheit nutzbringend einzusetzen.*

*Als ein Vorhaben der Raumfahrttechnologie wurde dieses komplizierte deutsche Raumfahrzeug fehlerlos mit einer amerikanischen Titan-Centaur-Rakete gestartet und erfolgreich näher an der Sonne betrieben als irgendein von Menschen hergestelltes Objekt zuvor. Die Herausforderung des Thermalentwurfs für diese sehr schwierige Umgebung (elf Solarkonstanten) wurde nicht nur erfolgreich gemeistert, sondern*

*tatsächlich sogar übertroffen. Die ursprüngliche Primärmission von vier Monaten Dauer ist mehrere Male überschritten worden. Alle Experimente an Bord arbeiten einwandfrei. Unsere Kollegen in der Raumfahrtgemeinde erkennen uneingeschränkt die großartige technische Leistung der HELIOS-Raumfahrzeuge an.*

*HELIOS war auch ein Triumph des internationalen Managements. Trotz sehr knapper finanzieller Mittel erfüllten die Projektteams ihre Aufgaben uneingeschränkt im Einklang mit dem Zeitplan. Das gibt der Leistung des HELIOS-Projektmanagements den Charakter eines Modells nicht nur für andere kooperative Raumfahrtunternehmungen, sondern auch für internationale technologische Aufgaben auf anderen Gebieten.*

*HELIOS 1, gestartet am 10. Dezember 1974, hat seine wissenschaftlichen und programmatischen Aufgaben voll erfüllt. Die jetzt sich anschließende erweiterte Mission gewährt der wissenschaftlichen Gemeinde und den Steuerzahlern in Deutschland und Amerika den Bonus weiterer Perihel-Durchgänge mit dem gleichen Flug. HELIOS 2 wurde am 15. Januar 1976 gestartet. Dies bietet die einzigartige Gelegenheit, die solare Dynamik mit identischen Experimenten in zwei nahezu identischen Raumfahrzeugen in unterschiedlichen radialen Abständen von der Sonne zu beobachten. Jeder von uns, dem es vergönnt war, an diesem Projekt mitzuwirken, ist sehr stolz auf die große Leistung des HELIOS-Teams – wissenschaftlich, technisch und managementmäßig. Wir sind auch dankbar für den gemeinsamen Einsatz, der uns in künftigen Jahren die Möglichkeit geben wird, zu sagen, wir hatten Anteil am ersten Unternehmen des Menschen auf die Sonne hin.“*

# Introduction

Dear reader,

*The great German-American mission HELIOS is now ten years old. Therewith HELIOS proudly joins the ranks of great space missions which we can thank for having given us a new picture of our world in its breadth and depth. As early as 1976, shortly after the launch of the second HELIOS probe, the U.S. project manager acknowledged the great success of the mission, as his following contribution reports:*

## HELIOS – Looking Back

Gilbert W. Ousley, U.S. HELIOS Project Manager

In March 1976 I wrote the following as the FOREWORD to the NASA Honor Awards Booklet for the HELIOS Project:

„The outstanding HELIOS Team effort has been officially recognized by NASA Headquarters and the Goddard Space Flight Center by the awarding of the NASA Group Achievement Award. This recognition of the United States and German Government/University/Industry team cooperative effort primarily focuses on the individuals who have distinguished themselves in the cooperative aspects of the project. A number of other individual Germans and Americans made significant contributions to successfully accomplish their national responsibilities, but the thrust of this award is to cite those who provided the exceptional cooperative effort and spirit that was typical throughout the duration of the HELIOS Project. History will remember the solar probe HELIOS as an engineering and scientific triumph which gave mankind its first close glimpse of the sun. We all clearly recognize that this accomplishment was the result of human endeavor and with this award we pay tribute to a

human triumph by honoring some of the men and women who made HELIOS the success that it is.

As a scientific achievement in solar research, HELIOS is adding significantly to previous satellite and interplanetary spacecraft data by venturing within the orbit of Mercury for the first time to a perihelion of approximately 0.3 AU. Although a full understanding of all of the HELIOS scientific information will take years of study, it is already clear that we will gain valuable new insights into the solar wind and the dynamic properties of the sun. The growing recognition of the sun's strong influence on our weather, communications, and everyday life here on earth is now combined with the realization of the tremendous potential of solar energy as a partial answer to the near term world energy crisis. This realization increases the basic responsibility of the United States and Germany to utilize the results and knowledge gained by this scientific mission for the benefit of all mankind.

As a technical achievement of space engineering, this complex German spacecraft was launched flawlessly on an American Titan/Centaur rocket and successfully operated closer to the sun than any man-made object ever has before. The thermal design challenge of this very difficult environment (eleven solar constants) was not only successfully met but actually exceeded. The original primary mission of four months has been surpassed several times with all on-board experiments still operating properly. Our colleagues in the space community clearly acknowledge the advanced technical achievements of the HELIOS spacecraft.

HELIOS was also a triumph of international management. The project teams developed and agreed to a restrictive financial plan at the outset, and proceeded to deliver full performance essentially on schedule and cost. This establishes

the HELIOS project management effort as a model, not only for other cooperative space ventures, but also for international technological efforts in other fields.

HELIOS 1, launched on December 10, 1974, has successfully met all of its scientific and programmatic objectives and is now continuing on in an extended mission mode which will provide the scientific community and the German and American taxpayers the bonus of further perihelion passages on the same flight. HELIOS 2 was launched on January 15, 1976 and provides the unique scientific opportunity to observe solar dynamics with identical experiments in two separate spacecraft located at different radial distances from the sun. All of us that were privileged to serve in this program take great pride in the achievements of the HELIOS team – scientific, technical, and managerial. We are also grateful for the forces that have combined to allow us the opportunity in future years to say we were part of man's first venture to the sun.“

The fact that HELIOS 1 is still operating and producing valuable scientific data reenforces every word in my foreword. Together, Germany and America have achieved a space triumph that has been the subject of considerable praise from our peers and colleagues. Together, we have participated in a venture where the total is clearly greater than the sum of the parts and clearly neither country without the other could have accomplished this mission. Someday we can tell our grandchildren – we were part of HELIOS.

*Die Tatsache, daß HELIOS 1 immer noch arbeitet und wertvolle wissenschaftliche Daten liefert, bestätigt und bekräftigt jedes Wort in meinem damaligen Vorwort. Gemeinsam haben Deutschland und Amerika einen Raumfahrterfolg errungen, der bei unseren Mitarbeitern und Kollegen hohe Anerkennung gefunden hat. Gemeinsam haben wir an einem Unternehmen teilgenommen, bei dem das Ganze entschieden größer ist als die Summe seiner Teile. Keines der beiden Länder hätte ohne das andere diese Mission durchführen können. Einstmals werden wir unseren Enkeln erzählen: Wir haben an HELIOS mitgewirkt.*

Dieser Erfolg, der alle Erwartungen weit übertrifft, soll uns ein Grund zum Feiern sein, jedoch mehr noch ein Anlaß, Ihnen, denen wir die finanziellen Voraussetzungen für die Durchführung der Mission zu verdanken haben, zu erzählen und zu berichten, was HELIOS uns und damit auch Ihnen an Neuem gebracht hat. Die Wissenschaftler und Ingenieure, die die Mission zum Erfolg geführt haben, wollen Sie teilnehmen lassen an dem Abenteuer, das die Erforschung der Welt, in der wir leben, immer noch und immer wieder neu darstellt. Sie sollen erfahren, wie die Entwicklung des Projekts und der Betrieb der beiden HELIOS-Sonden abgelaufen ist, welche Art der wissenschaftlichen Untersuchungen sie ausgeführt haben, vor allem aber, welche Erkenntnisse über die Sonne und über den Raum zwischen Sonne und Erde sie uns vermittelt haben. Vielleicht bewundern Sie manchmal die Phantasie von Science-fiction-Autoren. Hier sollen Sie die reale Welt kennenlernen, in der wir leben, und die wir gestalten sollen, soweit unsere

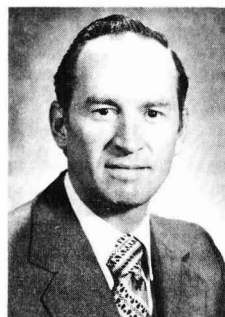
Möglichkeiten dafür ausreichen. Diese reale Welt ist sicher viel interessanter, ja aufregender als das, was uns jene Autoren vorsuggerieren.

Bevor wir jedoch weitererzählen, möchten wir uns Ihnen vorstellen. Wir, das sind

– erstens die beiden Projektleiter von HELIOS, Ants Kutzer, DFVLR-BPT, jetzt MBB-ERNO, Bremen, und Gilbert W. Ousley, NASA-GSFC, und die beiden Projektwissenschaftler Herbert Porsche, DFVLR Oberpfaffenhofen, und James H. Trainor, NASA-GSFC;



*Kutzer*



*Ousley*



*Porsche*



*Trainor*

– zweitens die Wissenschaftler in der Bundesrepublik und in den USA, die die vielen Messungen und Beobachtungen von HELIOS vorbereitet und durchgeführt haben, die die Meßdaten auswerte-

ten und deuteten, deren Beiträge die wissenschaftlichen Kapitel dieses Buches ausmachen;

– drittens die Ingenieure, Techniker, Manager und sonstige Mitarbeiter, die die beiden HELIOS-Sonden gebaut, getestet, gestartet und zehn Missionsjahre hindurch überwacht und gesteuert haben, die über die Bodenstationen Kommandos aussandten und Meßdaten empfangen, die daran anschließend den Meßdatenstrom so aufbereiteten, daß er von den Wissenschaftlern ausgewertet werden konnte.

Der deutsche Projektwissenschaftler von HELIOS hat als Sprecher der am Projekt beteiligten Wissenschaftler die verantwortliche Herausgabe dieser Festschrift besorgt, die verbindenden und erläuternden Texte geschrieben und die übrigen Texte redigiert. Sie sind jeweils in der Sprache verfaßt, die die Muttersprache des Autors ist, also englisch oder deutsch. Eine Zusammenfassung des Inhalts in der anderen Sprache soll auch dem nicht sprachkundigen Leser die Informationen vermitteln, die er zum Verständnis des Ganzen braucht. Angesichts der engen Verkoppelung der Aufgabengebiete mehrerer Autoren kann es nicht ausbleiben, daß Sie bei der Lektüre des Textes und beim Betrachten der Abbildungen dann und wann Wiederholungen finden werden. Immer stellen solche Wiederholungen die Betrachtung ein und desselben Gegenstandes von verschiedenen Seiten und unter anderem Blickwinkel dar. Der Gesamtzusammenhang wird dadurch sicher leichter verständlich. Deshalb haben wir einige Wiederholungen nicht vermieden, sondern sie stehenlassen.

Weßling, 30. September 1984

Herbert Porsche  
Projektwissenschaftler HELIOS

*This success which has surpassed all expectations should be a reason to celebrate, indeed even more, an occasion to tell and to report to those, who are to be thanked for making this mission possible by providing the resources, what is new that HELIOS has brought to us and to them.*

*The scientists and engineers who have carried the mission to a successful conclusion, would like you to take part in the adventure that the research of the world in which we live has always been. You should learn how the development of this project and the operation of the two HELIOS solar probes have evolved, which types of scientific investigations they have carried out, in particular which new understandings they have brought us concerning the sun and the space between the sun and the earth. Perhaps you sometimes marvelled about the fantasy of science fiction authors. Now you will learn something about the real world in which we live and which we should form, in so far as our possibilities allow. This real world is surely more interesting, more exciting than those authors would often have us believe.*

*Before we tell more, however, we would like to introduce ourselves.*

*First of all, we are the two Project Managers of HELIOS, Ants Kutzer, DFVLR-BPT, now MBB-ERNO Bremen and Gilbert W. Ousley NASA-GSFC and the two Project Scientists Herbert Porsche, DFVLR Oberpfaffenhofen und James H. Trainor, NASA-GSFC.*

*Secondly, we are the scientists in the Federal Republic of Germany and the USA, who have planned and observed the measurements and detected data from HELIOS; we have made the analyses and interpretations of these data and have contributed to the scientific section of this book.*

*Thirdly, we are the engineers, technicians, managers and other team personnel who have built the two HELIOS probes and who have tested, launched and, throughout 10 operational years in orbit, have controlled and monitored them: we have manned the ground stations, sending out commands and receiving measurement data which from its original stream of telemetry have been so processed that the scientists have been able to make their evaluations.*

*The German Project Scientists of HELIOS has, as a representative of all investigators of HELIOS, taken care of the responsibility for publishing this book, has written the interrelating and commentary notes and the synopsis and the editing of the original text. The original contributions in this book appear in the mother tongue of the respective authors, this is English or German. A summary of the contents is given in the other language to allow an overall understanding of the contributions also by readers who are not bilingual. In view of the close coupling of the tasks of several authors, it is unavoidable that you will find occasional repetitions when reading the texts or viewing the figures. Always such repetitions of the same object are views from different sides or under different aspects. Surely, the understanding of the whole will thus get easier. Therefore we intentionally did not avoid some of the repetitions but let them stand.*

*Weßling, 30th September, 1984  
Herbert Porsche  
HELIOS Project Scientist*





Die Sonn' erreget alls,  
macht alle Sterne tanzen.  
Wirst du nicht auch bewegt,  
so g'hörst du nicht zum Ganzen.

Angelus Silesius  
(alias Johannes Scheffler, schlesischer Dichter,  
Breslau, 1624–1677)

*The sun it touches all,  
makes all stars to dance their role.  
Should you not too be moved,  
you're not a part of the whole.*

*Angelus Silesius  
(alias Johannes Scheffler, novelist of Silesia, Breslau, 1624–1677)  
(Translation by Michael K. Bird)*

Die Sonne im Licht der  
 $H_{\alpha}$ -Strahlung.

*The sun in the light of  
 $H_{\alpha}$ -radiation.*

Der Gott HELIOS, wie er  
über den Himmel jagt. Dar-  
unter GAIA, die Erde und  
kämpfende Titanen  
(Pergamon-Museum  
Berlin)

*The god HELIOS racing  
across the firmament. Be-  
low GAIA, the earth and  
fighting Titans.  
(Pergamon-Museum  
Berlin)*

# HELIOS und die Heliosphäre

# *HELIOS and the Heliosphere*

Woher kommt der Name HELIOS?

*Where does the name HELIOS come from?*

Was ist die Heliosphäre?

*What is the Heliosphere?*

Welche Eigenschaften hat die Heliosphäre?

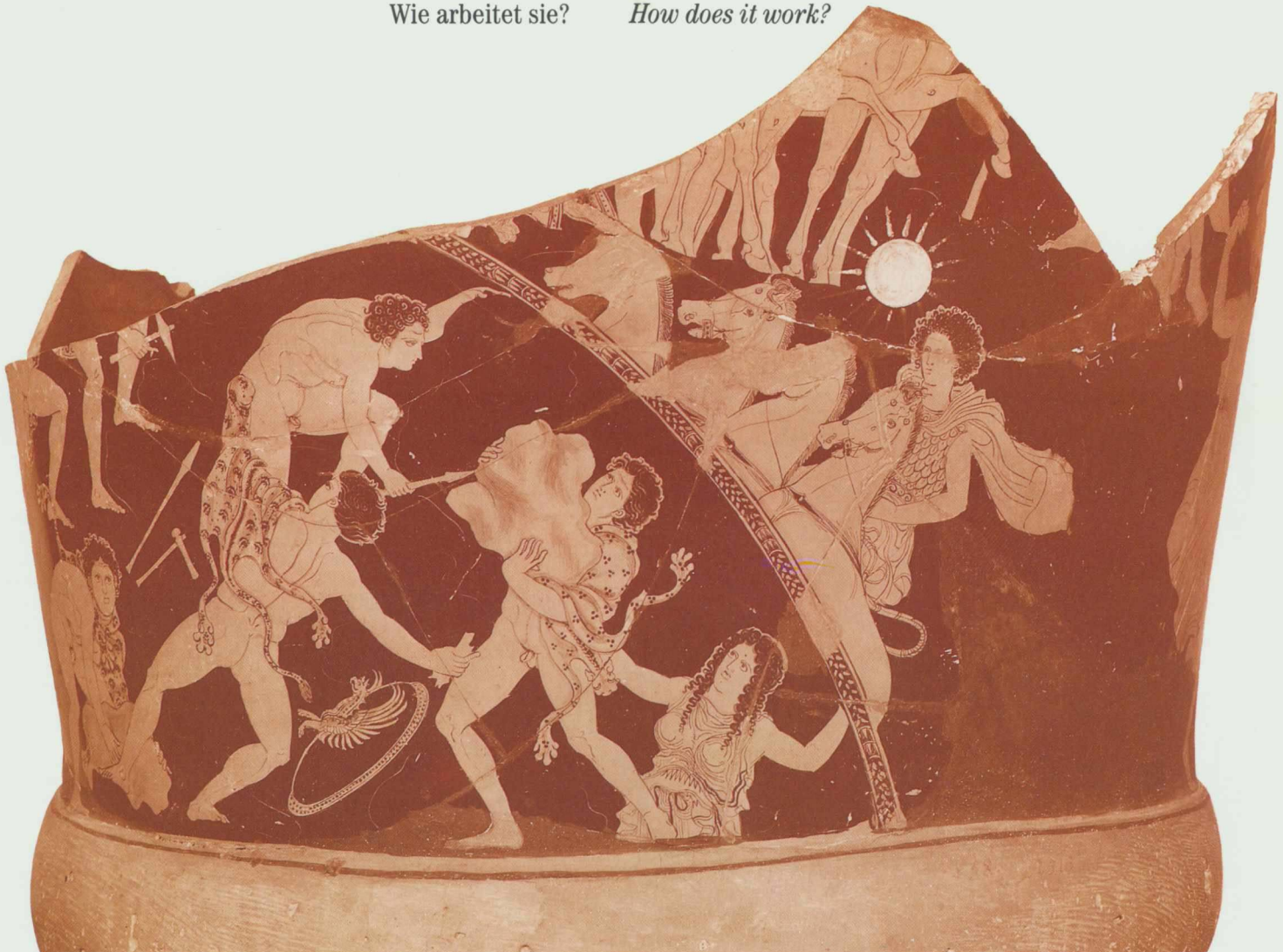
*What properties does it have?*

Wie sieht die Sonnensonde HELIOS aus?

*How does the solar probe HELIOS look like?*

Wie arbeitet sie?

*How does it work?*



Im Barock wurde die Tradition der Antike in allegorischen Gemälden weitergeführt. Hier ist der Gott HELIOS als strahlender Herrscher der Himmelskugel abgebildet (Deckengemälde von Johann Baptist Zimmermann im Schloß Nymphenburg, München).

*During the period of the Barock style the tradition of the Antiques was continued. The god HELIOS is painted as the glorious ruler of the heavenly sphere (painting by Johann Baptist Zimmermann on a ceiling in the castle of Nymphenburg, Munich)*



## Warum HELIOS?

HELIOS war der Name des griechischen Gottes, der nach den Vorstellungen der Antike täglich auf Feuerrossen reitend über den Himmel jagt. Er war der Spender des Lichts und der Wärme, aber auch der alles versengenden Hitze. Dieser Name wurde in Erinnerung an die griechische Mythologie der deutsch-amerikanischen Sonnensonde gegeben. Diese Mythologie beeinflusste jahrtausendlang die europäisch-okzidentale Kultur. Die Namengebung schlägt eine Brücke zurück in die Anfänge und Wurzeln dieser Kultur und fügt die Mission der Weltraumforschung HELIOS ein in die Kette der Jahrtausende währenden Mühen, diese unsere Welt geistig zu erfassen.

## Why HELIOS?

*HELIOS was the name of the Greek god racing across the heavens on fiery stallions according to the beliefs of antiquity. He was the giver of light and of warmth, but also of all burning heat. This name was given to the German-American solar probe to remind us of the Greek mythology. The mythology influenced European and western culture for thousands of years. Giving the name harkens back to the beginnings and roots of this culture and intermeshes the HELIOS mission of space research in the thousand year chain of efforts to intellectually appreciate the world in which we live.*

HELIOS, der allwissende, aber nicht allmächtige Gott, folgt auf seinem Himmelswagen der Göttin Eos, der Göttin der Morgenröte, die nicht nur das Streulicht der Atmosphäre, sondern auch das Zodiakallicht verkörpert.

*HELIOS, the omniscience, but not almighty god, on his heavenly coach, follows the female goddess Eos, god of the aurora, representing not only the straylight of the atmosphere but also the Zodiacal Light.*



Die Namengebung deutet auch an, welche Aufgaben die Mission HELIOS zu erfüllen hatte und noch zu erfüllen hat: eine Forschungssonde soll so nahe wie möglich an die Sonne herangeführt werden, um möglichst viel darüber zu erfahren, wie die Sonne den Raum und durch den Raum hindurch die lebentragende Erde beeinflusst. Die Frage, ob die Sonne scheint und uns durch ihre Wärme am Leben erhält, können wir natürlich auch ohne ein kostspieliges Projekt der Welt- raumforschung beantworten. Schon lange wußten oder vermuteten die Wissenschaftler, daß Wärme und Licht zwar die wichtigsten Einflüsse der Sonne auf die Erde darstellen, nicht aber die einzigen. Seitdem Galileo Galilei die Sonnenflecken entdeckt hatte, erkannte man, daß die Sonne nicht der ständig gleichmäßig und makellos strahlende Heizofen und die unveränderliche Lichtquelle ist, für die man sie ehemals hielt. Viele Phänomene wurden mittlerweile bekannt, die dem veränderlichen Sonneneinfluß zuzuschreiben sind.

Einige Beispiele mögen das verdeutlichen:

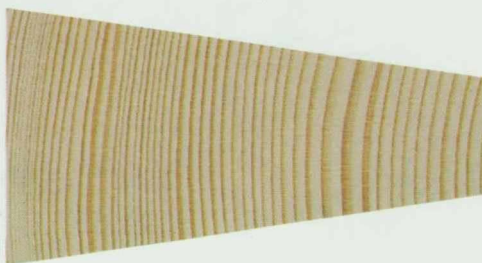
Die Erde hat wiederholt größere und kleinere Änderungen des Klimas erlebt. Wurden diese Klimawechsel von der Sonne verursacht, oder sind andere Einflüsse dafür verantwortlich zu machen? In geschichtlicher Zeit hat Mitteleuropa in der zweiten Hälfte des 17. Jahrhunderts eine Periode deutlich kälterer Witterung durchgemacht, als sie vorher und nachher auftrat. In dieser Periode waren die Flecken auf der Sonne fast vollständig verschwunden. Offenbar besteht eine Einwirkung der Sonnenflecken auf das Klima der Erde. Zum gleichen Schluß kommt man, wenn man die Aufeinanderfolge der Jahresringe von Bäumen vergleicht mit der Zahl und Größe der jeweiligen Flecken auf der Sonne. In sonnenfleckenreichen Jahren zeigt sich ein stärkeres Dickenwachstum der Bäume als in sonnenfleckenarmen Jahren, selbst dann, wenn die gemessenen Temperaturmittelwerte sich nicht oder kaum unterscheiden. In den letzten Jahrzehnten sind allerdings andere Einflüsse auf die Pflanzen ähnlich stark oder stärker geworden als der solare Zyklus. Es bedarf einer sehr komplizierten Analyse, um den Sonnenfleckenzyklus klar davon zu trennen.

Die Erde ist einem ständigen Schauer von atomaren Teilchen ausgesetzt, die mit sehr hoher Geschwindigkeit, nahe der Lichtgeschwindigkeit, einfallen. Man nennt die Teilchenschauer die kosmische Strahlung. Die überwiegende Zahl dieser Partikel hat ihren Ursprung irgendwo in der Tiefe des Milchstraßensystems oder in einer anderen fernen Galaxis. Immer wieder kommt es vor, in Perioden großer Sonnenfleckenzahl häufiger als in sonnenfleckenarmen Phasen, daß der Fluß der kosmischen Strahlung plötzlich stark zurückgeht und sich erst nach Stunden wieder regeneriert. Dieser Effekt tritt in der Folge von Eruptionen auf der Sonne auf. Der Fachausdruck dafür ist Forbush-Decrease. Die von der Eruption ausgehende Stoßwelle beeinflusst die kosmische Strahlung. Sie hindert einen Teil daran, bis zur Erde vorzudringen.

*Assigning of the name HELIOS also revealed the nature of the mission which the satellite had to fulfil: a research probe as near as possible in the vicinity of the sun to obtain as much information as it could get about the sun's influence upon space and through space upon our life-carrying earth. The question whether the sun shines and through its warmth keeps life going of course can be answered without a costly project of space research. Scientists have long believed or have suspected that warmth and light, although the most important influences of the sun upon the earth, are not the only ones. Since the time that Galileo Galilei discovered the sun spots man has known the sun is not*

Jahresringe  
einer Fichte

Annual rings  
of a fir tree



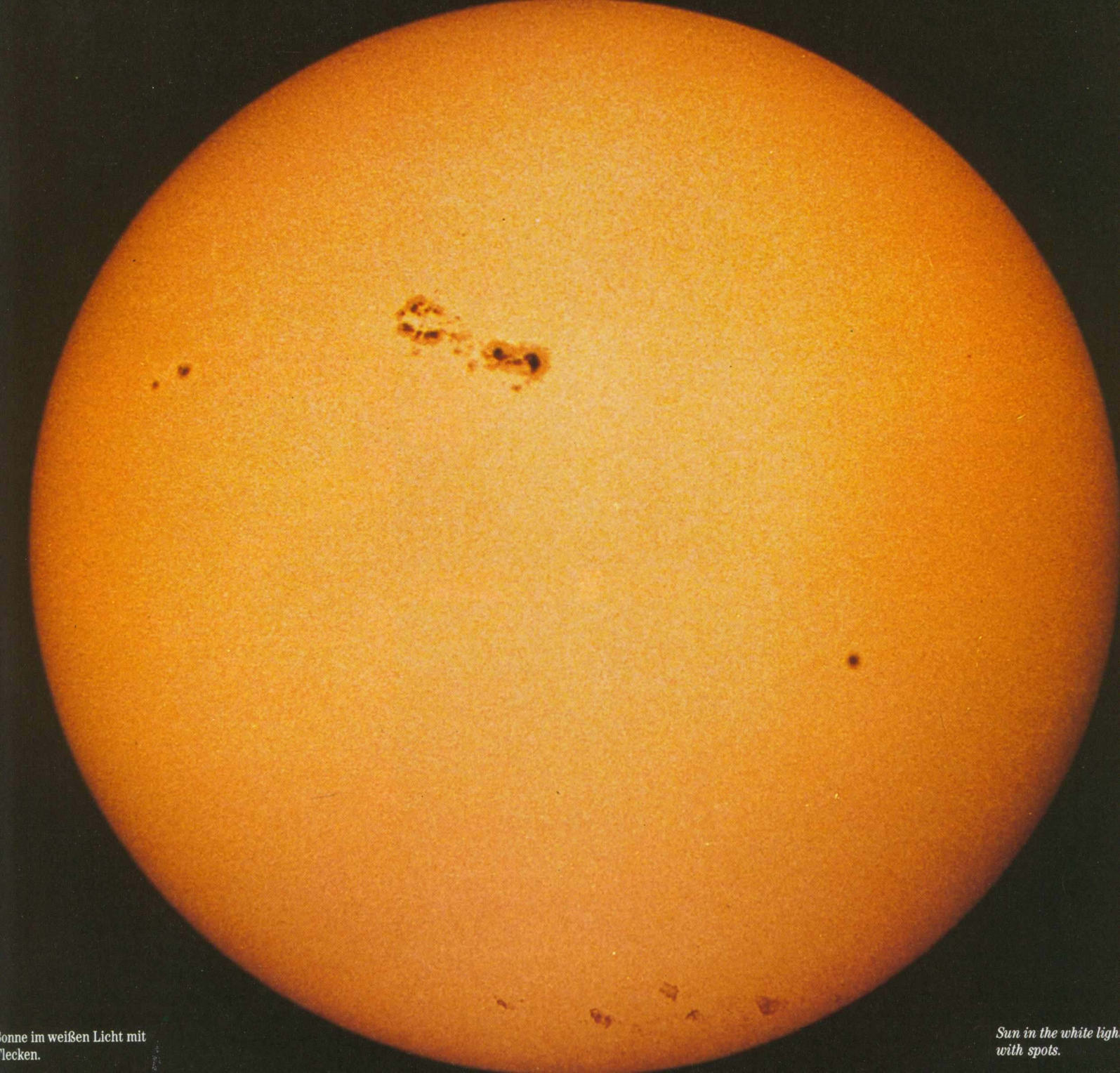
*always a constant and the uniformly radiating heat source, nor a constant light source for which it was previously taken to be. Many phenomena have in the meanwhile been made known which are attributable to the varying solar influences.*

*Several examples are as follows:*

*Earth has repeatedly experienced larger and smaller changes of its climate. Are these changes caused by the sun or are other factors responsible for them? Historically, during the second half of the 17th century middle Europe went through a period of much colder storms than it had experienced prior to and after that time. During this period the sun spots had almost completely disappeared. Apparently, the spots on the sun affect the climate on the earth. One comes to the same conclusion when comparing the successive annual rings on a tree with the number and size of sun spots of the corresponding years. In years of heavy sun spot activity trees grow stronger than in years of light sun spot activity even when the average temperatures remain constant or hardly vary. However, in recent times, other factors beside the solar cycle have played an even more important or equal role on plant life. It would take an extremely complex analysis to isolate the effects of only the sun spot cycle.*

*The earth is constantly exposed to a shower of atomic particles arriving at velocities approaching the speed of light. This shower of particles is called cosmic radiation. The majority of these particles has a source somewhere in the depths of the milky way or in another more distant galaxy. Repeatedly in periods of great sun spot activity and to a lesser extent in periods of weaker sun spot activity it happens that the flow of cosmic radiation suddenly sharply reduces and then after a few hours or days begins to regenerate. This effect occurs as a consequence of eruptions on the sun.*

*The technical term for it is the Forbush Decrease. Evidently the eruption affects the particles in such a way that cosmic radiation can no longer penetrate to earth.*



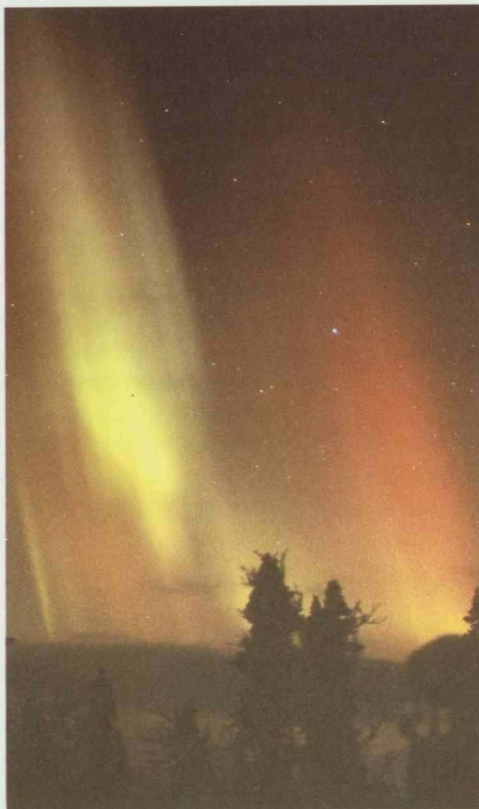
Sonne im weißen Licht mit  
fleckchen.

*Sun in the white light  
with spots.*

Auch die Polarlichter sind Erscheinungen, die ihr Entstehen dem solaren Einfluß auf die Erde zu verdanken haben. In der Folge von Eruptionen auf der Sonne steigt die Polarlichthäufigkeit nicht nur, sondern sie dringt bisweilen aus den nördlichen und südlichen Polarlichtzonen, die Ovale in ungefähr  $20^{\circ}$ – $30^{\circ}$  Winkelabstand um die Magnetpole der Erde bilden, bis weit in die gemäßigten Zonen hinein vor. Inzwischen kennt man die Ursache der Polarlichter. Es sind Teilchen überwiegend solaren Ursprungs, die entlang der magnetischen Feldlinien der Erde in die Hochatmosphäre eindringen. Luftmoleküle, mit denen sie zusammenstoßen, werden zum Leuchten angeregt.

Sendet die Sonne in der Folge von Eruptionen auch Röntgenstrahlen hoher Intensität aus, so beobachtet man auf der Erde starke Dämpfung von Radiowellen in Bereichen der tiefen Ionosphäre (Mögel-Dellinger-Effekt = Sudden Ionospheric Disturbance).

Diese und eine Reihe von anderen Erscheinungen, auf die wir hier nicht eingehen, zeigen, daß der Sonneneinfluß auf den Raum recht komplizierte Vorgänge hervorruft. HELIOS hat die Auf-



Polarlichter

Polar lights



gabe, uns Informationen über die vielfältigen Einflüsse der Sonne auf den Raum zu vermitteln und zu erkunden, wie sich diese Einflüsse durch den Raum hindurch fortpflanzen. Dazu ist es auch nötig, die Struktur und die Eigenschaften des Raumes in enger Nachbarschaft zur Sonne so gut wie möglich kennenzulernen.

*The appearance of northern lights is a phenomenon also attributable to the sun. Following eruptions on the sun not only is the appearance of polar lights more frequent but also they extend from the north/south polar zones far into the temperate zones of the earth. The polar light zones are ovals in approximately twenty to thirty degrees separation formed around the magnetic poles of the earth. We now understand the cause of the northern light phenomenon. They are due to particles which penetrate the high atmosphere of the earth along its magnetic field lines. Molecules of the air which collide with the particles are stimulated to the point of becoming luminous.*

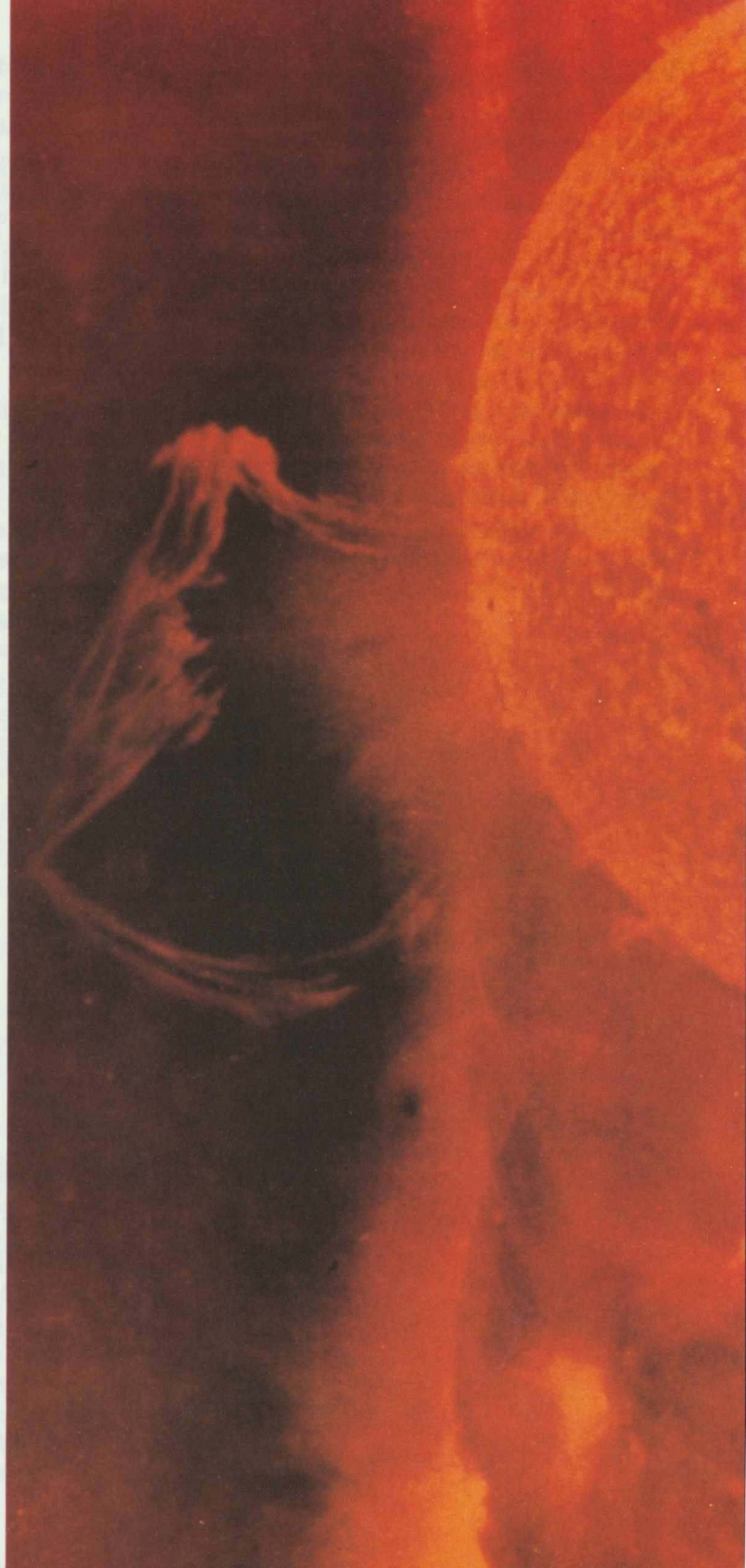
*Whenever the sun casts out high intensity X-rays as a result of eruptions, strong damping of radio waves in the deep ionospheric regions can be observed on earth (Mögel-Dellinger-effect = sudden ionospheric disturbance).*

*These and a series of other phenomena which here are not discussed show that the influence of the sun upon the interplanetary space produces rather complicated processes. HELIOS has the task to explore and to tell us all about the properties of this space and about how the sun in its central position is constantly influencing these properties in a continuous outward propagation of matter and energy. In order to accomplish this, it is necessary for HELIOS to penetrate space as close as possible to the sun.*

Protuberanzen.

Protuberances.





## Das innere Sonnensystem

Legen Sie vor sich auf den Tisch einen Ball, eine Orange oder einen ähnlichen runden Körper von, sagen wir, 10 cm Durchmesser, und stellen Sie sich vor, diese Kugel sei die Sonne. Die Erde müßten Sie sich in diesem Fall als Kügelchen von weniger als 1 mm Durchmesser im Abstand von fast 11 m vorstellen! Der tatsächliche Durchmesser der Sonne beträgt 1,39 Mio. km, der der Erde nur 12750 km und der mittlere Abstand zwischen beiden, auch Astronomische Einheit genannt, 149,6 Mio. km. Somit ist das Volumen der Sonne etwa 1,3 Mio. Mal größer als das der Erde. Wie winzig ist diese Erde in der Weite des Raumes! Zum Vergleich hat der Zeichner die Erde mit der Bahn des Mondes in die Sonne hineingelegt. Die Sonne würde weit über die Mondbahn hinausragen!

Wir wissen, daß diese kleine Erde die Sonne auf einer Ellipsenbahn umrundet. Sie braucht 1 Jahr = 365,24 Tage für einen Umlauf. Der Unterschied der Bahnellipse von einem Kreis ist nur gering. Vielfach genügt es, von der kreisförmigen

Bahn der Erde um die Sonne zu sprechen. So wie die Erde umlaufen noch einige andere Planeten die Sonne: Merkur und Venus innerhalb der Erdbahn in geringerem Abstand als die Erde, weiter draußen die Planeten Mars, Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun und Pluto. Der Richtungssinn aller Planeten ist gleich und mit Ausnahme des innersten und äußersten Planeten laufen alle fast in der gleichen Bahnebene um. Nur Merkur ( $7^\circ$ ) und Pluto ( $17^\circ$ ) weichen stärker davon ab.

Auch die Sonne selbst „läuft um“. Sie rotiert um ihre eigene Achse. Während jedoch die Erde als starrer Körper rotiert, nimmt die Rotationsgeschwindigkeit der Sonne vom Äquator zu den Polen hin ab. Für eine Umdrehung benötigt die Sonne rund 25 Tage. Da die Erde mittlerweile auf ihrer Bahn weitergewandert ist, ergibt sich eine auf die Erde bezogene mittlere Rotationsdauer von etwa  $27\frac{1}{4}$  Tagen.

Die Rotationsachse der Sonne steht nicht senkrecht auf der Bahnebene der Erde. Der Winkel zwischen der Sonnenachse und der Senkrechten auf der Erdbahn ist  $7,3^\circ$ . Im Laufe der Zeit überstreicht deshalb die Erde bei ihrem Lauf um die Sonne einen fast  $15^\circ$  breiten Bereich um den Sonnenäquator.

Die Temperatur der Sonnenoberfläche kann man ermitteln, wenn man die Strahlung untersucht, die die Sonne aussendet und die auch die Erde trifft. Man erhält eine mittlere Strahlungstemperatur der Oberfläche von  $5770\text{ K} \approx 5500^\circ\text{C}$ . Bei genauerem Hinsehen zeigt sich jedoch, daß große Temperaturunterschiede auftreten. Deshalb muß präzisiert werden, was man mit der Strahlungstemperatur meint. Es ist die Temperatur des leuchtenden Balls, so wie man ihn mit bloßem Auge sieht. Die Oberfläche, die man dabei

betrachtet, heißt Photosphäre. Die Energie, die die Sonne ständig von ihrer Oberfläche abstrahlt, ist gewaltig. Sie beträgt  $3,72 \cdot 10^{20}$  Millionen Watt (MW). Davon trifft weniger als ein Milliardstel die Erde. Das ist aber immerhin noch  $3,38 \cdot 10^{11}$  MW. Diese Energie erhellt und wärmt die Erde auf die Temperaturen, die die Lebewesen brauchen, um leben zu können. Die Sonne liefert sie nun schon mehrere Milliarden Jahre lang, ohne daß sich ihre Strahlung stark verändert hätte. Unterschiede geringeren Ausmaßes sind allerdings normal. Die Sonnenflecken z. B. erscheinen dunkel auf der hellen Sonnenoberfläche. Das deutet auf geringere Temperatur der Flecken hin. Tatsächlich wurden in den dunklen Zentren großer Sonnenflecken um bis zu 1000 Grad niedrigere Temperaturen gemessen.

Wie kommt es, daß solche großen Temperaturdifferenzen entstehen und sich oft wochenlang halten können? Von der Erde wissen wir, daß wesentlich geringere Temperaturunterschiede ver-

heerende Stürme und Unwetter auszulösen imstande sind. In der Nähe von Sonnenflecken werden immer starke magnetische Felder beobachtet. Bei der hohen Temperatur der Sonnenoberfläche sind normale Atome, wie wir sie auf der Erde kennen, höchstens über kurze Zeitspannen stabil. Die Mehrzahl wird durch Stöße in elektrisch positiv geladene Ionen und in Elektronen (negativ) zerlegt. Diesen gasähnlichen Zustand der Materie nennen die Physiker ein Plasma. Die magnetischen Felder hindern geladene Teilchen an freier, ungebundener Bewegung. Die Teilchen müssen den Magnetfeldern folgen bzw. schraubenförmige Bahnen um die Feldlinien vollführen. Dabei werden sie weit in die Atmosphäre der Sonne hinein, d. h. von der Oberfläche weggeführt. Es entstehen stark instabile Verhältnisse, die oft zu explosionsartigen Erscheinun-

Modell Sonne – Erde mit  
Mondbahn

*Model sun-earth with  
moon's orbit*



### The inner solar system

Place before you on a table a ball, an orange or a similar round object of about ten centimeters in diameter and imagine that this object is the sun. In that case the earth would have to be a small pellet of less than one millimeter in diameter with a distance of almost 11 meters separating it from the sun. The actual diameter of the sun is 1.39 Million km. That of the earth is only 12,750 km and the average distance between the two, referred also as the Astronomical Unit (AU) is 149.6 Million km. Thus the volume of the sun is about 1.3 Million times larger than

(10,9m  $\hat{=}$  149,6 mio.km)

that of the earth. How small our earth is in the vastness of space! For comparison, if the sun's perimeter were drawn around the earth it would extend far beyond the orbit of the moon.

We know that this small earth moves around the sun in an elliptical orbit. It takes one year = 365.24 days for a complete cycle. The difference of the elliptical orbit from an exact circle is very small. Perhaps it is enough if we talk about the orbit as being nearly circular. Like earth, other planets are also racing around the sun, Mercury and Venus within the orbit of earth, as well as some which are further away, the planets Mars, Jupiter, Saturn, Uranus, Neptune and Pluto. They all rotate in the same direction and with exception of the most outer and most inner planet, they move almost in the same orbital plane. Mercury deviates from this plane by 7° and Pluto by 17°.

The sun itself is spinning around its own axis. However while earth is spinning as a rigid body the sun rotates around its axis with varying speeds, faster at the equator and slower near the poles. For one revolution the sun takes about 25 days. Since during this time the earth in its

orbit has also moved in the same direction, we see here on earth a sun rotational period of about 27 and a quarter days.

The sun's axis of rotation is not vertical to earth's orbital plane. Therefore as we move around the sun we sweep across a region of almost 15° around the sun's equator.

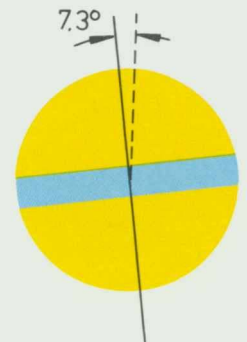
The temperature of the surface of the sun can be determined by examining the radiation which the sun emits and which is received on earth. The impinging radiation tells us that the mean temperature of the surface is 5,770 Kelvin or about 5,500°Celsius. Upon a closer look we see, however, that there are great temperature differences. Therefore we must be more precise about what we mean when we talk of the radiation temperature. It is the temperature of the glowing ball just as we see it with the naked eye. The outer surface which we thus see is called the photosphere. The energy which the sun is constantly giving forth through its outer surface is enormous. It amounts to  $3.72 \cdot 10^{20}$  Million Watts (MW). Of this amount less than one billionth reaches the earth. Nevertheless this is still  $3.38 \cdot 10^{11}$  MW. This energy illuminates and warms up the earth to the temperature needed to maintain life on earth. The sun has been doing this some billion years without great change in its radiating strength. Small changes however are quite normal. Sun spots for example appear as dark patches on the bright outer surface of the sun. They mean lower temperatures within the patches. Actually the dark centres of the large sun spots have temperatures which are up to 1000 degrees less than the bright outer surface.

How does it come about that such great temperature differences exist and often remain for weeks? From the earth we know that consider-

ably less temperature differences can be associated with terrible storms. In the vicinity of the sun spots always strong magnetic fields can be observed. At the high temperatures of the sun's outer surface normal atoms like those we know on earth can be stable for only a short period of time. Most of them are broken apart by collisions into electrically positive ions (+) and electrons (-). This gaslike state of the material is called a plasma by physicists. The magnetic field prevents the free undisturbed movement of charged particles. These particles must follow the magnetic lines of force, resp. follow screw-like tracks leading around the field. Therewith they are propelled far into the sun's atmosphere and far away from its outer surface. This is accompanied by much instability which often appears as explosive behavior, the so-called

Graphik der schiefstehenden Sonne. Der Gürtel im Äquatorbereich der Sonne von knapp 15° Breite deutet den Bereich der Sonne an, der von der Erde bzw. von den beiden HELIOS-Sonden „überflogen“ wird.

Graphics of the oblique sun. The belt around the equatorial region of almost 15° latitude indicates the region of the sun which is overflown by the earth resp. by two HELIOS probes.



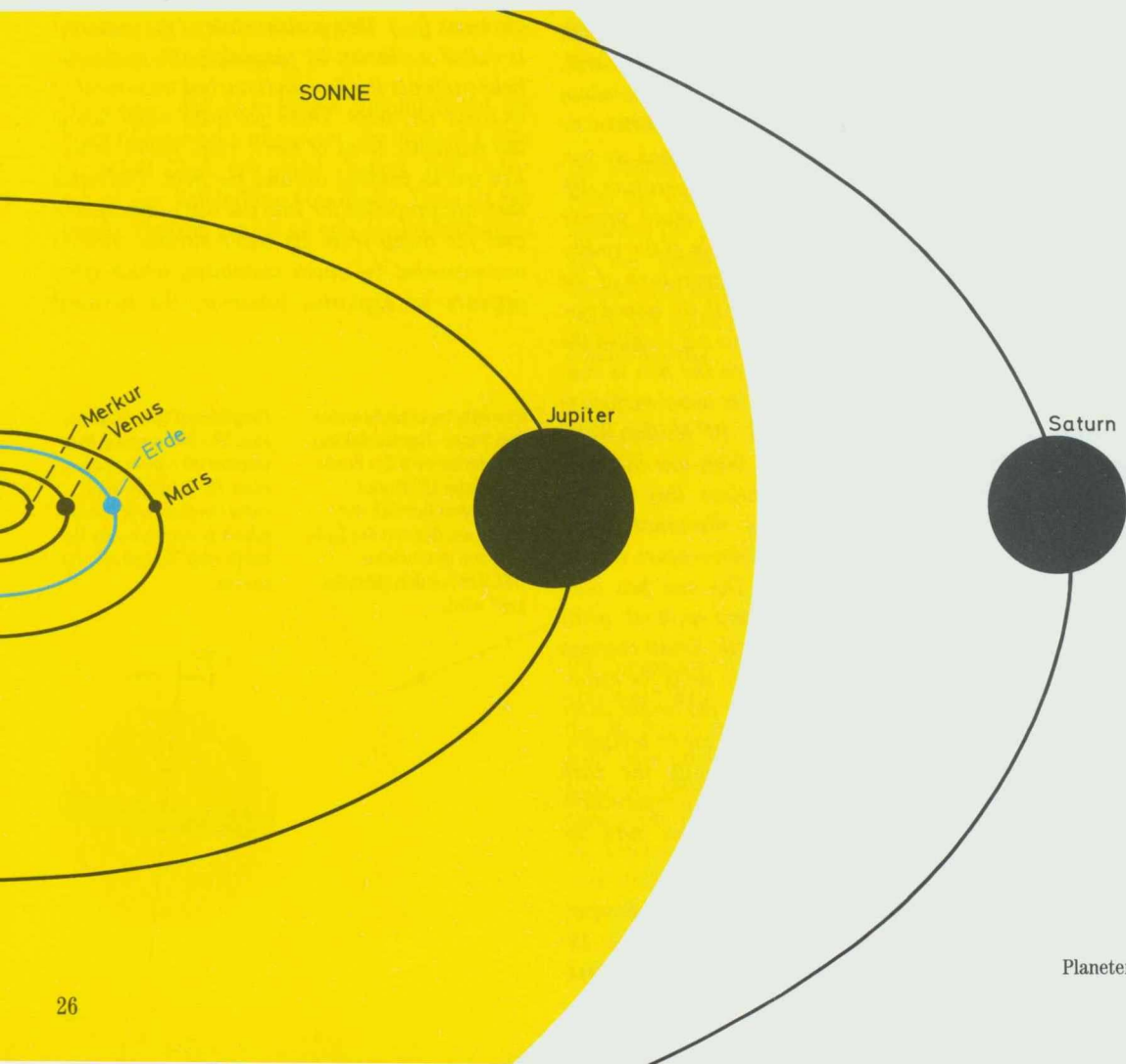
gen, den sogenannten Fackel-Ausbrüchen (Flares) führen. Bei solchen Ausbrüchen wurden in der Atmosphäre der Sonne gelegentlich Temperaturen bis 20 Mio. Grad gemessen.

Wenn von der Sonnenoberfläche und von der Sonnenatmosphäre gesprochen wird, so erscheinen die Verhältnisse einfacher, als sie in Wirklichkeit sind. Wegen ihrer hohen Temperatur kann die Sonne nämlich gar keine feste oder flüssige Oberfläche ausbilden, sondern nur turbulente Schichtungen mit einer Dichte, die von innen nach außen abnimmt. Die Strahlung täuscht dort eine echte Oberfläche vor, wo Plasmodichte und Temperatur gerade noch ausreichen, um das weiße Sonnenlicht auszusenden.

Weiter außen wird die Dichte so gering, daß das Plasma nicht mehr wie ein weiß glühender Körper strahlen kann. Der Abstand zwischen den einzelnen Gasteilchen wächst, und die Kräfte, die sie gegenseitig aufeinander ausüben, nehmen stark ab. Während die Teilchen weiter innen in ständiger enger Wechselwirkung stehen, werden sie außen zu Individuen, die nicht länger gemeinsam, sondern nur als atomare Einzelstrahler Licht aussenden oder absorbieren können. Die Folge davon ist, daß in diesem Atmosphärenbereich nicht nur kein weißes Licht mehr abgestrahlt werden kann, sondern daß einerseits die Intensität des abgestrahlten Lichts stark zurückgeht, während es nur in den Farben ausgesandt

*solar flares. Some flares of the sun cause temporary temperature increases with readings up to 20 Million degrees.*

*When one talks about the outer surface and the atmosphere of the sun the relationships seem to be simpler than they really are. Due to its high temperature the sun cannot have a solid or liquid outer surface, but rather only turbulent layers having densities which get thinner as one goes from the inside outwards. The radiation deceptively presents a true outer surface where the plasma density and the temperature are just sufficient to emit the white sun light. Further outward the density is so small that plasma can no longer radiate like a white*



*glowing body. The separation between the individual gas particles becomes larger and the strength of the mutual attractive force between them becomes smaller. While the particles further inward are in constant close contact, further out they behave no longer collectively but as individual radiators and absorbers of light. The result of this is that in such atmospheric regions not only is white light no longer radiated but also the intensity of the light is strongly reduced. On the other hand there is so much energy being delivered from the center of the sun that the temperature is increased above the temperature of the photosphere. This coloured radiating atmospheric layer of the sun which is*

wird, die den Eigentümlichkeiten der jeweiligen Atom- bzw. Ionenart entsprechen, andererseits aber aus dem Sonneninneren so viel Energie nachgeliefert wird, daß die Temperatur über die Temperatur der Photosphäre anwächst. In der Chromosphäre, so nennt man die farbig strahlende Atmosphärenschicht der Sonne von einigen tausend km Dicke, werden Temperaturen bis etwa 20 000 K erreicht.

Von der Chromosphäre durch eine dünne Übergangsschicht getrennt dehnt sich bis in Entfernungen von einigen Sonnenradien die Korona. Ihre mittlere Temperatur liegt bei 1,2 bis 1,5 Mio. Grad. Sie stellt das Übergangsgebiet zwischen Sonne und interplanetarem Raum dar. Alle Einflüsse der Sonne, die weit draußen im Raum wirksam werden, müssen die Korona durchdringen, es sei denn, sie entstehen dort. In beiden Fällen tragen sie die Prägung der dünnen, heißen koronalen Atmosphäre nach außen.

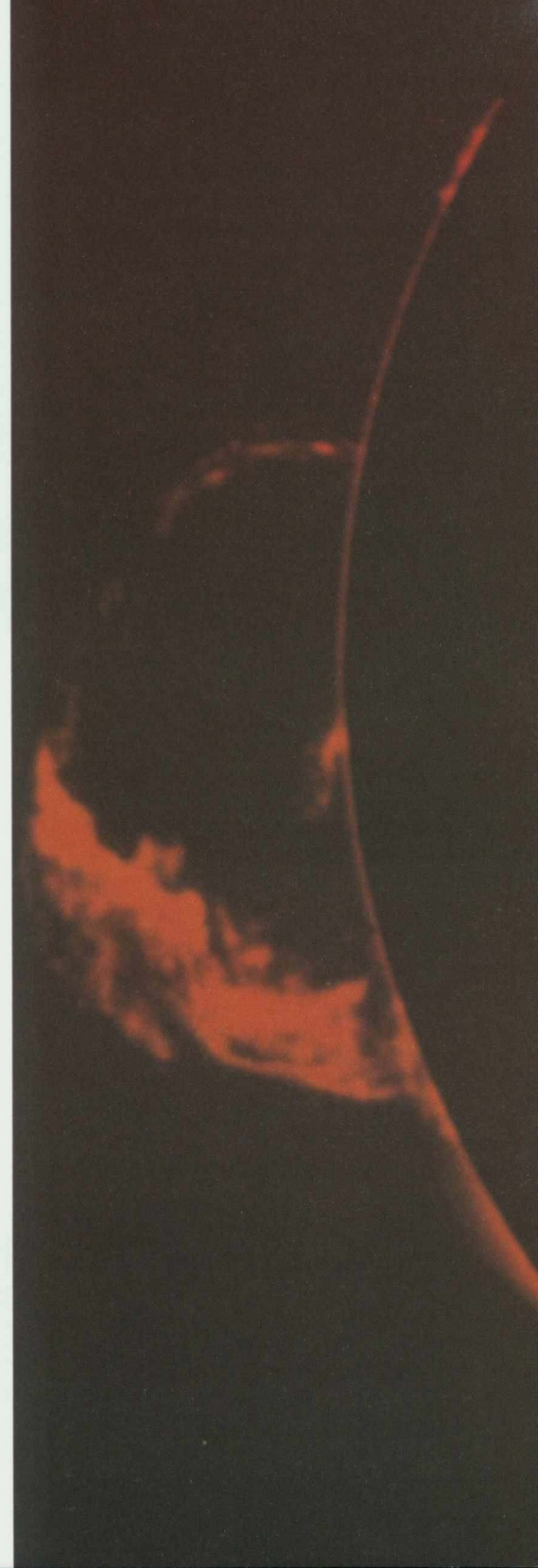
*some thousand kilometers thick is called the chromosphere and here temperatures of about 20,000 Kelvin are reached.*

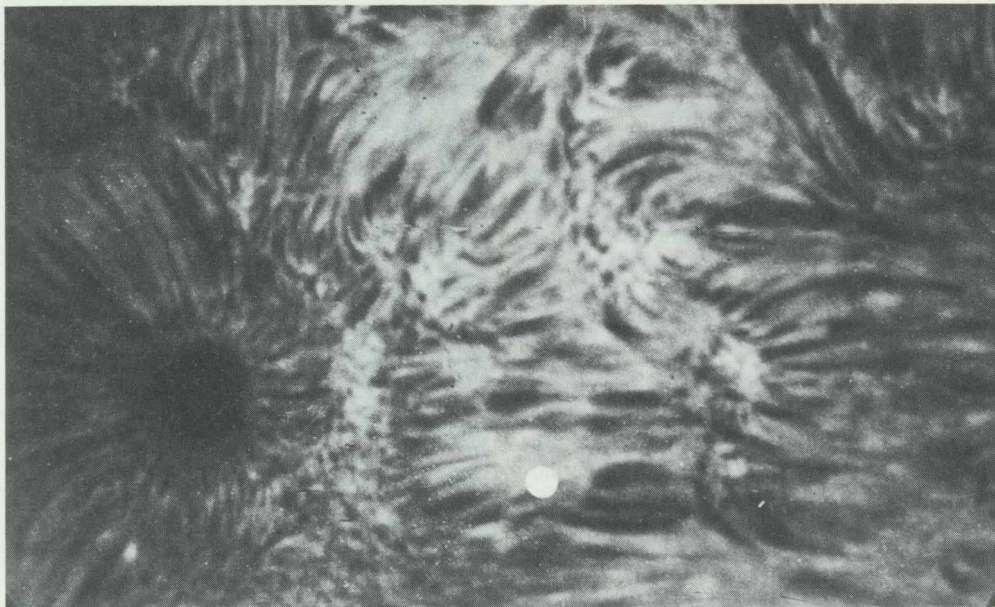
*Separated from the chromosphere by a thin transitional layer is the corona extending out as far as several sun radii. Average temperatures of the corona range from 1.2 to 1.5 Million degrees. This region is the interface to interplanetary space. All influences of the sun which affect the far reaches of our solar system must pass through the corona, unless indeed they originate in the corona itself. Nevertheless, in both cases they carry the signature of this tenuous hot coronal atmosphere outwards into the interplanetary space.*

Uranus

Sonneneruption

Solar eruption





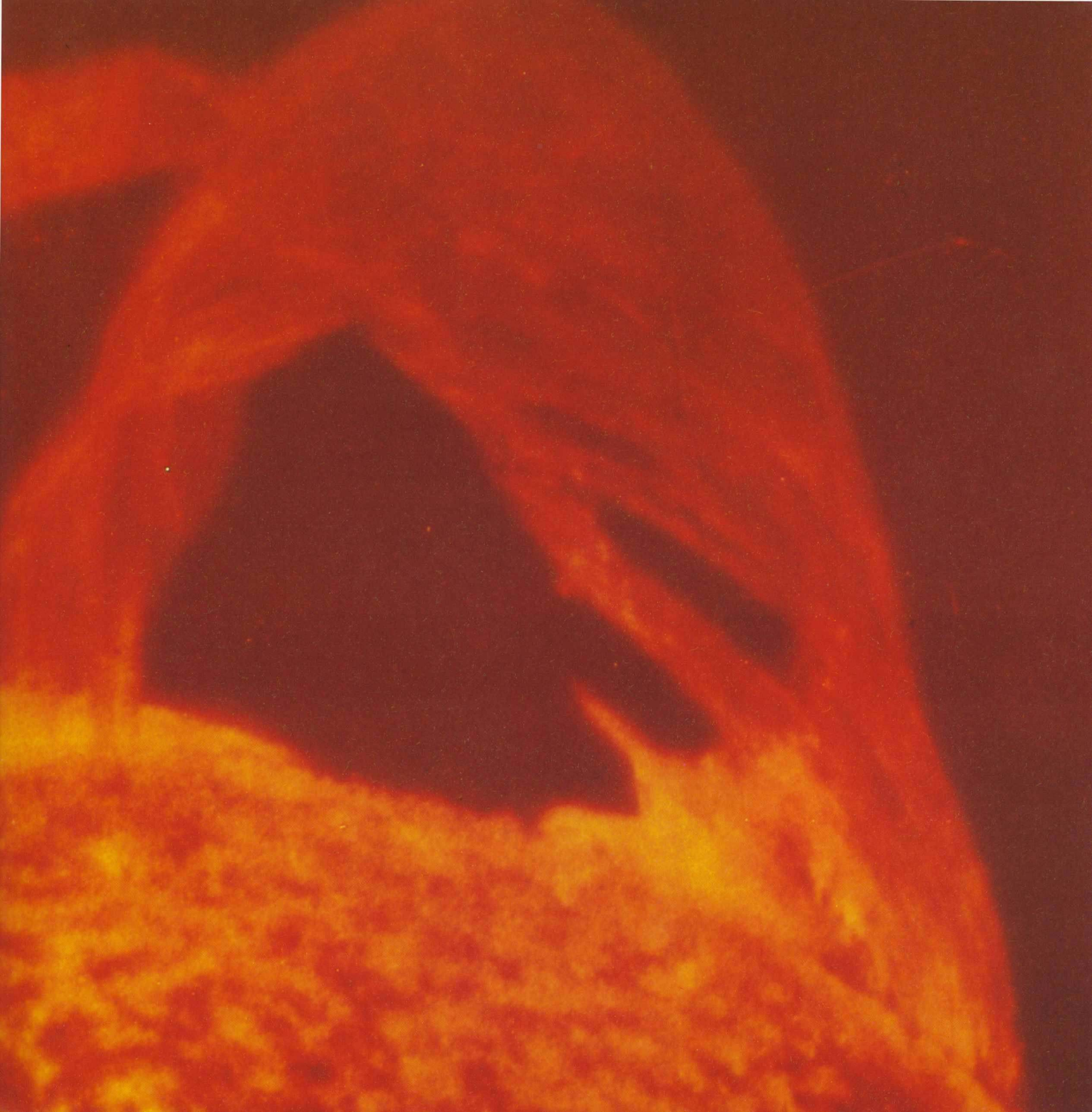
Sonnenflecken. Zum Größenvergleich ist die Erde im oberen Bild als weißer Kreis zu sehen. Die meisten Sonnenflecken erreichen Ausdehnungen, die ein Vielfaches der Größe der Erde ausmachen.

*Sunspots. For comparison of size the earth is seen as a white circle in the upper figure. Most of the sunspots are so large that their extension is multiple of the size of the earth.*

Rechts: Sonneneruption. Die Sonne schleudert große Mengen Materie in den Raum hinaus. Ein Teil davon fällt, von der Sonnenanziehung und von elektromagnetischen Kräften gezwungen, zur Sonne zurück. Meist entweicht ein anderer Teil in den Weltraum.

*Solar eruption (side figure). The sun ejects great amounts of matter into space. Parts thereof, forced by solar attraction and by electromagnetic forces, fall back to the sun. Mostly other parts escape into space.*









Die Chromosphäre, farbig leuchtende, über der Sonnenoberfläche, der Photosphäre, liegende Atmosphärenschicht der Sonne. Ihre Farbigkeit verdankt die Chromosphäre den Ionen und Atomen, die bei der hohen Temperatur in der für die jeweiligen Elemente typischen Farbe leuchten.

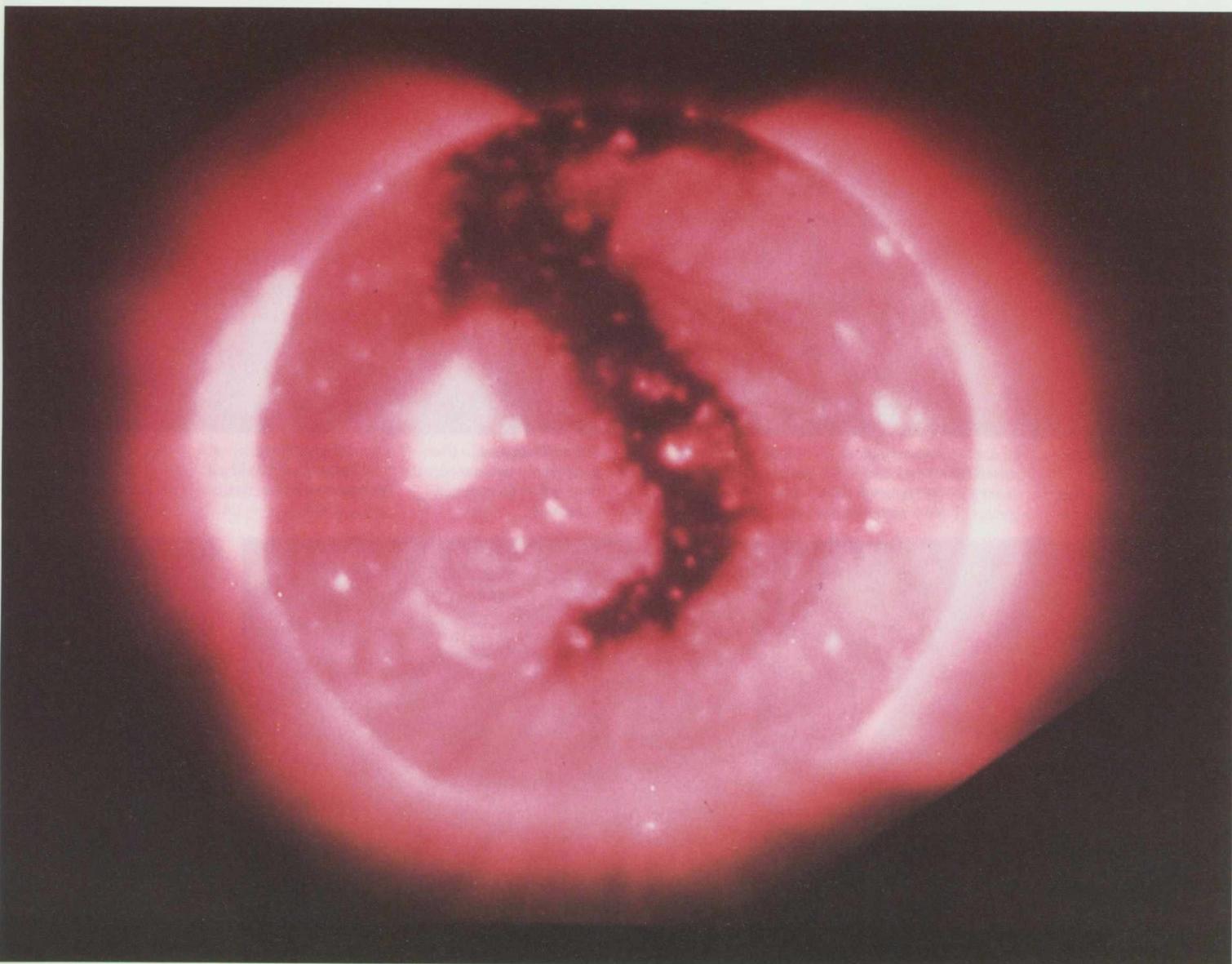
*The chromosphere, atmospheric layer above the solar surface which is colorful lighting. The chromosphere owes its color to the ions and atoms, lighting in colors typical for the respective kind of elements.*

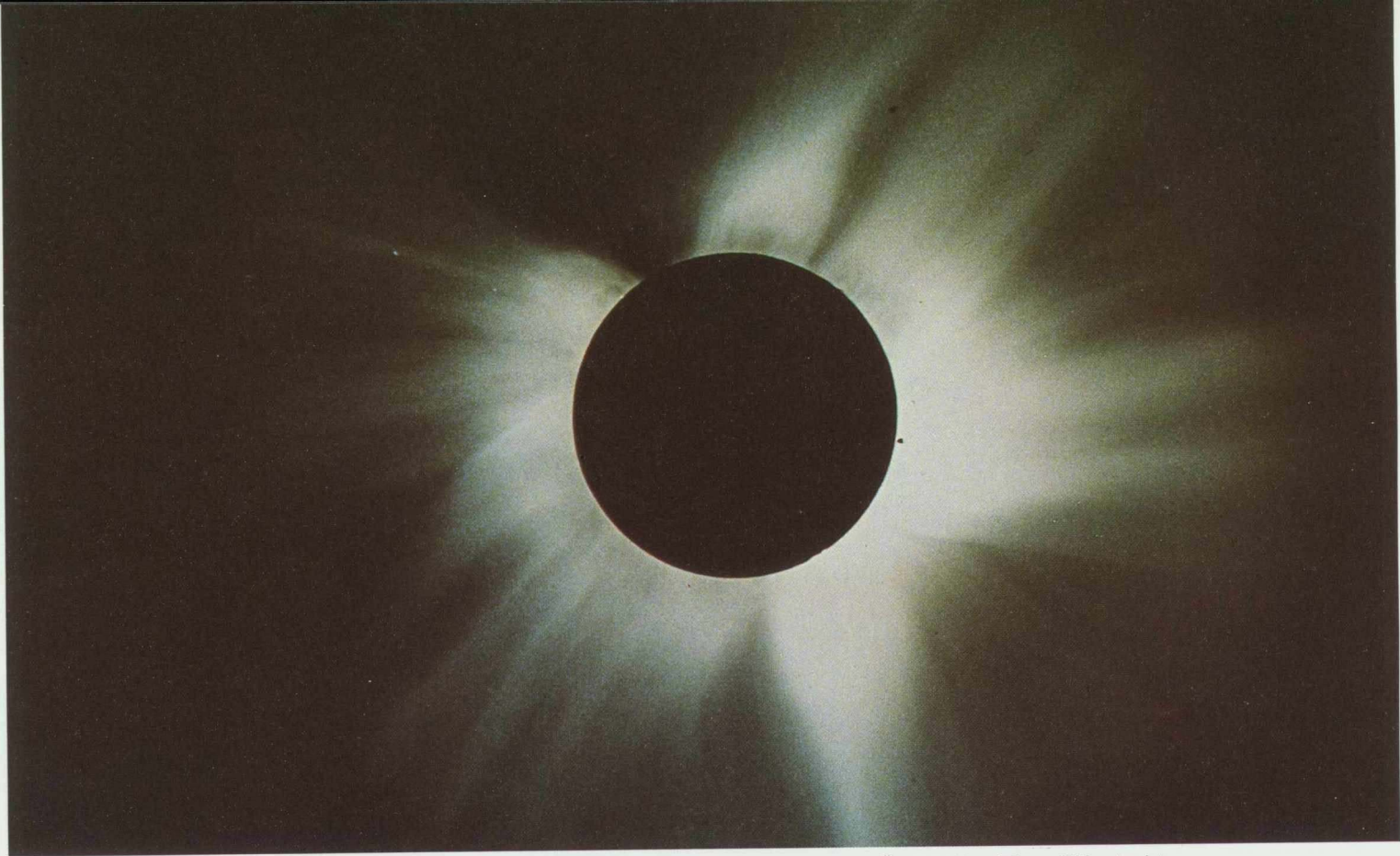
Sonne im Licht der Röntgenstrahlen abgebildet. Von der Nordpolgegend zieht sich ein ausgedehntes, langgestrecktes dunkles Gebiet, ein „Koronaloch“, bis in Zonen südlich des Äquators. Vermutlich würde die Rückseite der Sonne ein ähnliches Loch zeigen, das sich vom Südpol her bis in die Äquator-

gegend zieht. Koronalöcher sind Zonen geringer Atmosphärendichte mit Magnetfeldern, die „offen“ sind, d. h., die sich in die Weite des interplanetaren Raums hinein erstrecken. Die hellen, dichten Bereiche werden von geschlossenen Magnetfeldern beherrscht. Siehe auch Seite 152.

*Sun as seen in X-ray light. From the north pole areas an extended, long dark region, a "coronal hole" stretches down into zones south of the equator. Probably sun's back side would show a similar hole stretching up from the south pole to the equator.*

*rial regions. Coronal holes are zones of low atmospheric density with "open" magnetic fields, i.e. which stretch into the depth of interplanetary space. The bright, dense regions are governed by closed magnetic fields. See also page 152.*





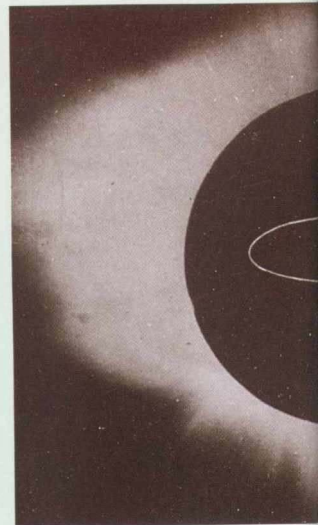
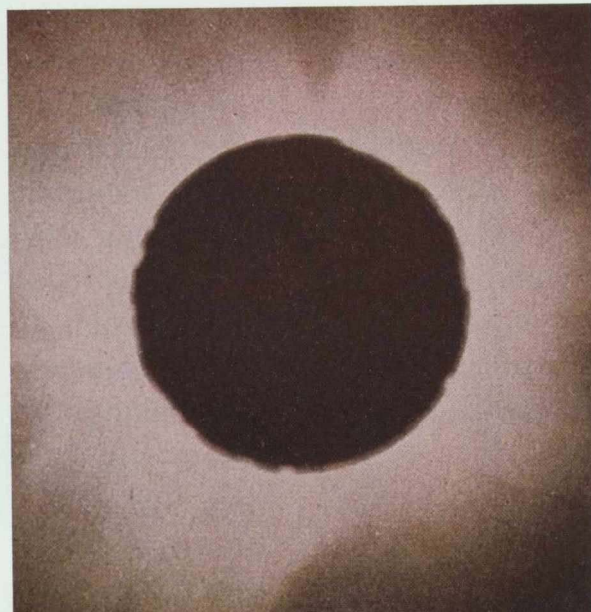
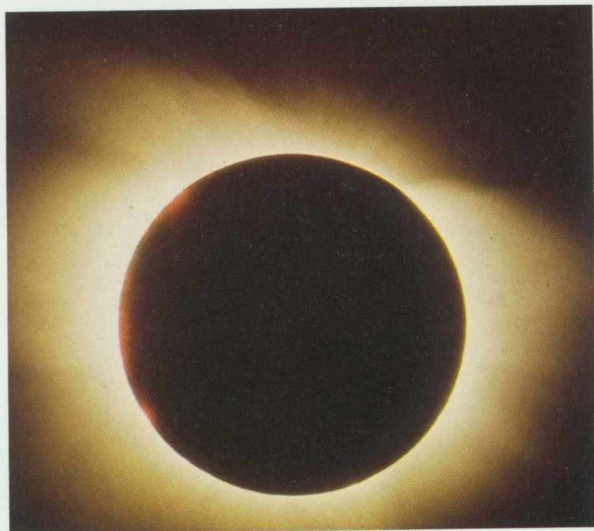
Korona-Bilder. Die beiden oberen größeren Bilder zeigen die Korona der Sonne in den Strukturen, die

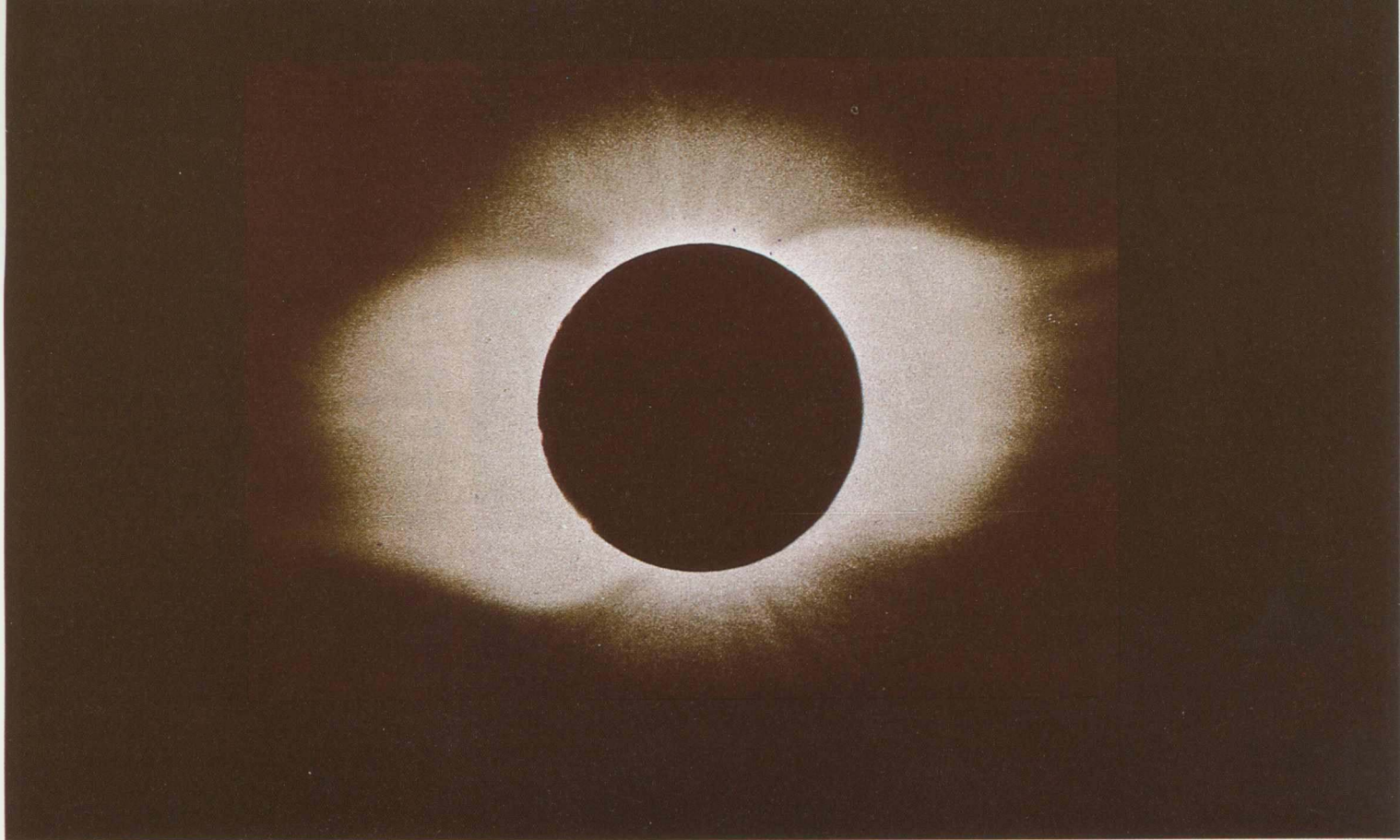
für das Sonnenfleckenmaximum (links) und das Sonnenfleckenminimum (rechts) typisch sind: sehr

bizarre, unregelmäßige Gestalt bzw. ein nahezu symmetrisches Erscheinungsbild. Die anderen fünf

Koronabilder sind in Übergangsjahren zwischen den Sonnenfleckenextremen entstanden.

Im mittleren Bild unten ist zum Vergleich die Erde mit Mondbahn eingezeichnet.





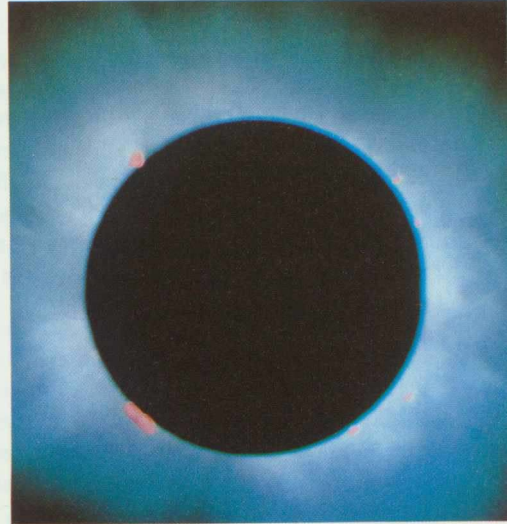
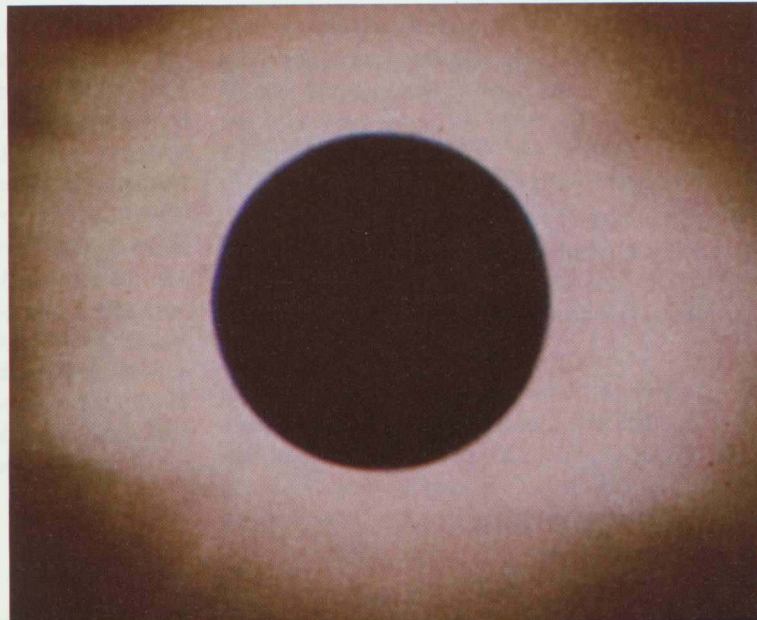
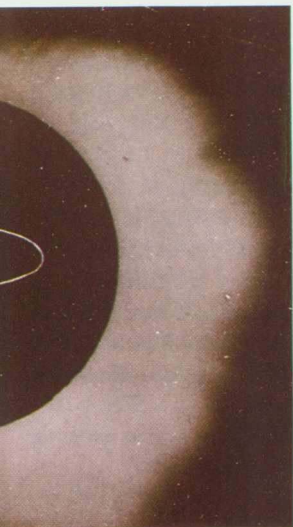
*Corona pictures. The upper two larger pictures show the corona of the sun in structures typical for*

*the sunspot maximum (left) and the sunspot minimum (right): very bizarre irregular shape*

*resp. an almost symmetrical appearance.*

*The other five corona pictures have been taken in years between the extremes of the cycle.*

*In the central picture below earth and moon's orbit is drawn in for comparison.*



Normalerweise kann man die Korona mit freiem Auge nicht erkennen. Ihre Leuchtkraft ist sehr klein im Vergleich zur Leuchtkraft der Photosphäre der Sonne. Man muß entweder auf das seltene Ereignis einer totalen Sonnenfinsternis warten, bei der der Mond das direkte Licht der Photosphäre abdeckt, so daß Chromosphäre und Korona sichtbar werden, oder man verwendet einen Koronagraphen, ein optisches Gerät, bei dem die Photosphäre abgedeckt wird. Mit solchen Geräten werden aus zeitlich aufeinanderfolgenden Koronabeobachtungen über dem Sonnenrand Karten der Sonne hergestellt, wie sie zum Beispiel auf Seite 73 verwendet werden.

Selten ist die Korona ein gleichförmig symmetrisches Gebilde. Meist zeigt sie bizarre, unregelmäßige Gestalt. Sie gibt die Struktur des Magnetfelds der Sonne wieder, das nach außen wandernde geladene Teilchen an die Magnetfeldlinien bindet. Das sichtbare Leuchten stammt von diesen Teilchen. Man beobachtet sowohl stark abgeschwächtes Licht der Photosphäre, das an Elektronen und Staubpartikeln gestreut wird, als auch die Eigenstrahlung der Ionen.

Im Licht der Röntgenstrahlung, das nicht bis zum Erdboden vordringt, kann von Raumfahrzeugen aus die gesamte Korona abgebildet werden. Dabei werden Löcher sichtbar, in denen die Materiedichte wesentlich geringer ist als in den übrigen Bereichen.

Lange Zeit war nicht bekannt, wohin die in der Korona nach außen wandernden Teilchen gelangen: Kehren sie um und fallen sie dann auf die Sonne zurück oder breiten sie sich irgendwohin in den Raum hinein aus? Inzwischen wissen wir, daß beides richtig ist. Die Abb. Seite 23 und 27 zeigen Teilchen, die die Sonne nach außen verlassen und die dann von magnetischen Kräften wieder zur Sonne zurückgelenkt werden. Die

*Normally we are not able to see the corona with the naked eye. Its luminosity is very small in comparison to the bright photosphere of the sun. In order to see the luminous property of the corona one has either to wait for the rare event of a total eclipse of the sun, during which time the moon covers up the photosphere allowing only chromosphere and corona to be seen or one uses a coronagraph, an optical device which blacks out the photosphere. From consecutive corona observations above the solar limb maps of the sun are generated as for instance used on page 73.*

*The corona seldom takes a symmetrical pattern. Usually it shows an irregular form reflecting the structure of the sun's magnetic field which captures the migrant particles wandering outwardly along its lines of force. The emitted visible light originates from these particles. One can observe the highly attenuated light of the photosphere diffracted by electrons and dust particles as well as the "eigen-radiation" of the ions. From the X-rays generated by the sun which are unable to reach the surface of the earth, space vehicles can obtain a picture of the entire sun. In this manner holes are visible as characterised by material densities considerably fainter than that in the surrounding region. For a long time, the destination of the wandering particles within the corona was not known. Do they turn around and fall back into the sun or do they continue in an outward path spurting into space. We know now that both possibilities are correct. Fig. page 23 and 27 show particles spewn out by the sun which are then caught in the magnetic fields and pulled back again towards the center of the sun.*

nächste Abbildung zeigt einen Kometen als sichtbaren Beweis, daß Teilchen von der Sonne aus nach außen in den Raum wandern.

Die Kerne der Kometen bestehen aus Stoffen, die leicht verdampfen. Sie laufen auf langgestreckten Ellipsen, manchmal sogar auf Parabelbahnen um die Sonne. Das heißt, daß sie der heizenden Sonne nur kurze Zeit nahekommen. Nur dann verdampft ihr Kern und gibt dabei Gas und Staub ab. Weil die Kometen nur recht kleine Körper sind – man schätzt den Durchmesser des harten Kerns großer Kometen auf nicht mehr als wenige Kilometer –, reicht ihre Anziehungskraft nicht aus, um dieses Gas und diesen Staub bei sich zu behalten, wie es die Planeten mit ihren Atmosphären tun.

Der Staub streut das Sonnenlicht. Dabei erfährt er einen Impuls von der Sonne weg. Es entsteht ein Staubschweif, der einer Rauchfahne nicht unähnlich ist. Die Moleküle des kometaren Gases sind viel zu klein, um das Sonnenlicht ebenso zu streuen wie die Staubeilchen. Sie werden jedoch von der solaren Ultraviolettstrahlung ionisiert. Dann unterliegen sie den elektromagnetischen Kräften, die im Raum wirksam sind. Die Teilchen, die aus der Korona nach außen wandern, sind selbst als Ionen und Elektronen elektrisch geladen. Während sie am Kometen vorbeifließen, reißen sie die kometaren Ionen nach außen mit: es entsteht ein Atom- bzw. Molekülionenschweif.

Das Spektrum des Lichts, das die Teilchen aussenden, gibt Auskunft über die Zusammensetzung des Schweifs und bei sehr genauer Messung der empfangenen Lichtwellen auch über die Geschwindigkeit, mit der die Ionen nach außen wandern. Der Staubschweif zeigt in der Regel keine oder nur schwach ausgeprägte Strukturen. Nicht so der Ionenschweif. Auch aus der Geschwindigkeit, mit der sich Schweifstrukturen nach außen bewegen, läßt sich auf die Geschwindigkeit der Schweifionen schließen und von da auf die Geschwindigkeiten der solaren Ionen und Elektronen, die diese Bewegungen auslösen. Man mißt Geschwindigkeiten in der Größenordnung von einigen hundert km pro Sekunde.

The next fig. shows a comet as a visible evidence that solar particles travel outward from the sun into space.

The cores of comets are made up of material which is easily evaporated. They run along enormous ellipses, sometimes even parabolic orbits, around the sun. That means that they come close to the blazing sun only for a short time. At that time only the core gives off gas and dust. Since comets are rather small bodies – it is estimated that the diameter of the hard core of a comet is not more than a few kilometers – the gravitational forces are insufficient to keep the gas and the dust together as larger planets are doing with their atmospheres. The dust causes scattering of the sunlight. This imparts an impulse upon the dust causing a spray of dust particles in a direction opposite to the sun, something not unlike a smoke trail. Molecules of the cometary gases are much too small to cause a similar sun light scattering as do the dust particles. Nevertheless they are ionized by the ultraviolet radiation of the sun. Then they are affected by the electromagnetic forces which are present in this space. The particles which wander outward from the corona are themselves as ions and electrons electrically charged. While flying by on their outward paths passing the comet they rip cometary ions along with them: generating thereby an atom or molecule ion trail. The spectrum of light which the particles produce gives information about the composition of the trail and with very exact measurements of the received wave-lengths also about the speed at which the ions are moving outward. While the trail of dust shows generally little or no structure of its own, the same is not so with the ion trail. Also the speed with which the trail's structure moves in an outward direction indicates the speed of the trail ions and from that speed of the solar ions and electrons which have triggered this motion. Speeds on the order of hundreds of kilometers per second have



Komet Mrkos

Den hellen Kopf des Kometen nennt man die Coma. Der (nicht erkennbare) kleine Kern im Zentrum der Coma verdampft unter dem Einfluß der Sonnen-

strahlung. Die entstehende Materiewolke wird von solaren Kräften nach außen beschleunigt und bildet den Ionenschweif (oben, strukturiert) und den Staubschweif (unten, diffus).

Comet Mrkos

The bright head of the comet is called the coma. The small nucleus (not visible) in the center of the coma evaporates under the influence of the solar

radiation. The generated cloud of matter is accelerated outward by solar forces forming the ion tail (upper, structured) and the dust tail (lower, diffuse).

Somit lehren uns die Kometen, die in das innere Sonnensystem eindringen:

- der Raum ist nicht leer; er enthält Staub und Ionen, beides in sehr geringer Dichte;
- solare Ionen und Elektronen bewegen sich mit Geschwindigkeiten von einigen hundert km pro Sekunde nach außen. Man nennt das nach außen strömende, von der Sonne kommende Plasma auch den Sonnenwind.

Natürlich hört auch das Magnetfeld der Sonne nicht mit der Korona auf, sondern erstreckt sich weit in den Raum hinaus. Da die Sonne rotiert, müssen Magnetfeldlinien, die radial nach außen gerichtet sind, sich zu Spiralen verformen.

been measured. Thus we have learned from comets penetrating our inner solar system that

- the space is not empty; it contains dust and ions both in very weak concentrations
- solar ions and electrons move with speeds of hundreds of kilometer per second in an outward direction.

Plasma originating in the sun and streaming outward across space is called the solar wind. The magnetic field of the sun does not end, of course, with the corona. Instead it continues far out into space. As the sun is rotating, the magnetic field lines which extend radially outward deformate into spirals.

## Die Aufgabenstellung von HELIOS

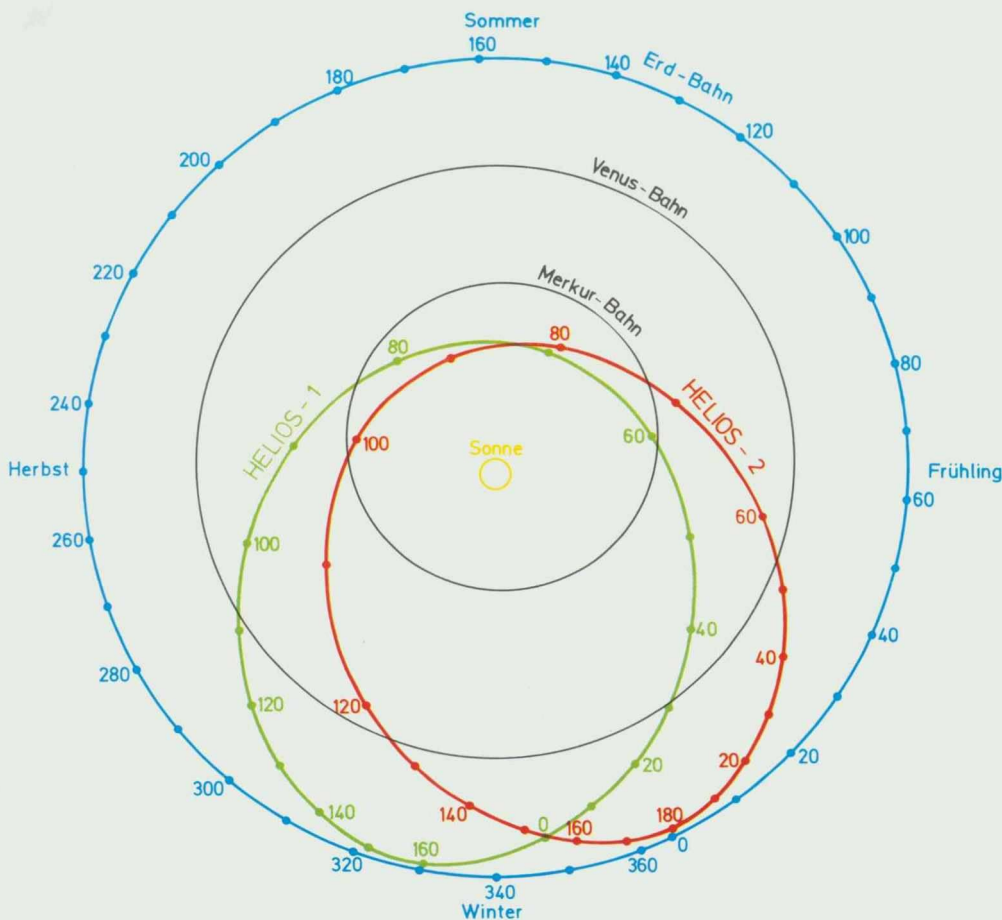
Die Doppelmission HELIOS hatte und hat die Aufgabe, den Raum zwischen Sonne und Erdbahn zu erforschen. Dafür wurden HELIOS 1 am 10. Dezember 1974 und die fast identische Sonde HELIOS 2 am 15. Januar 1976 auf je eine elliptische Bahn um die Sonne gestartet. Die Bahnen und ihre relative Lage zueinander und zu den Bahnen der drei innersten Planeten Merkur, Venus und Erde zeigt die Abbildung.

Für eine Sonnenumrundung braucht HELIOS 1 190 Tage, HELIOS 2 fast 187 Tage. Die elliptische Bahn führt dabei die Sonden periodisch in Sonnennähe (Perihel) und zurück zur Erdbahn, das ist für HELIOS Sonnenferne (Aphel). Die Ebene der Bahnellipse liegt fast in der Erdbahnebene.

## The Task of HELIOS

*The double mission HELIOS had and still has the task to explore the space between the sun and the earth's orbit. To achieve this goal, HELIOS 1 was launched on December 10, 1974 and the almost identical spacecraft, HELIOS 2 on January 15, 1976. Both were placed in elliptical orbits around the sun. The orbits and their relative positions to one another and to the orbits of the three innermost planets, Mercury, Venus and Earth are shown in the figure.*

*For a complete revolution HELIOS 1 takes 190 days, HELIOS 2 almost 187 days. Their elliptical orbits take the probes periodically from the nearest point to the sun (perihelion) back out to the orbit of the earth which for HELIOS is the*



Ihre Forschungsaufgaben nehmen die beiden HELIOS-Sonden mit je zehn Meßgeräten an Bord wahr. Das sind

– Analysatoren für die Teilchen (Protonen, Alphateilchen, Elektronen) des Sonnenwinds, um die Geschwindigkeit, die Richtung und die Zahl der Teilchen zu beobachten (Experiment 1).

– Zwei Magnetometer, mit denen das permanente Magnetfeld und seine langsamen Veränderungen gemessen werden können (Experimente 2 und 3).

– Ein Magnetometer (Induktionsspulen-Magnetometer) zur Beobachtung schneller magnetischer Feldschwankungen (Experiment 4).

– Eine Meßantenne mit angeschlossenen Radiowellen-Empfängern zur Beobachtung langsamer und schneller Schwankungen der elektrischen Feldstärke (Experiment 5).

– Mehrere Teilchen-Teleskope zur Bestimmung der Anzahl, der Richtung und der Energie einfallender atomarer Teilchen mäßig hoher bis hoher Energie (kosmische Strahlung) (Experiment 6, 7 und 8). Bei HELIOS 2 können mit einer zusätzlichen elektronischen Einrichtung auch Intensitätsschwankungen der sehr kurzwelligigen Wellenstrahlung (Gamma-Strahlung) registriert werden.

– Monitor zur Beobachtung der Sonne im Licht der Röntgen-Strahlung (Experiment 7).

– Drei Photometer zur Registrierung der Himmelhelligkeit in drei Richtungen (Zodiakallicht-Photometer) (Experiment 9).

– Zwei Geräte zur Registrierung und Analyse auftreffender Staubpartikel (Experiment 10).

Die Signale der Sonde müssen bei größtmöglicher Entfernung HELIOS–Erde bis zu 300 Millionen km weit laufen, bis sie von einer Boden-

Bahnen von HELIOS 1 und HELIOS 2 mit den Bahnen der inneren Planeten Merkur, Venus und Erde.

*Orbits of HELIOS 1 and HELIOS 2 with the orbits of the innermost planets Mercury, Venus and Earth.*

station empfangen werden. Sie sind auf diesem Weg besonders dann stark störenden Einflüssen ausgesetzt, wenn sie sonnennahe Bereiche durchqueren, weil dort die Materie des interplanetaren Raums besonders heiß, dicht und turbulent ist. Die Untersuchung der zur Erde mitgebrachten Störungen läßt Schlüsse auf die Eigenschaften des interplanetaren Mediums besonders in Sonnennähe (Sonnenkorona) zu (Experiment 12). Der Bereich, in dem HELIOS das innere Sonnensystem erforscht, kann dadurch wenigstens partiell auf die unmittelbare Sonnenumgebung ausgedehnt werden, obwohl die Sonden selbst in diese Gegend hinein nicht vordringen. Während die Übertragung der Meßdaten, die an Bord gewonnen werden, wegen der Störungen des Plasmas in Sonnennähe schwierig wird, kann man Informationen über die Eigenschaften der störenden Zonen sammeln. Beobachtet werden die Drehung der Schwingungsebene (Polarisationsebene) der von HELIOS kommenden Signale (Faraday-Effekt), Änderungen der Wellenlänge (Doppler-Effekt) und der Signallaufzeit zwischen Sender und Empfänger.

Darüber hinaus war vorgesehen, die Sonden als Testobjekte zu benutzen, um die von Albert Einstein entwickelte Theorie der Gravitation besser zu überprüfen, als es mit anderen Methoden möglich ist (Experiment 11). Leider sind bereits im jeweils ersten Missionsjahr Teile der Bord-Empfangsanlage (Transponder) ausgefallen. Das Gesamtsystem wurde dadurch nur wenig beeinträchtigt, wohl aber das Gravitationsexperiment. Immerhin standen die doch noch gewonnenen Ergebnisse dieses Experiments im Einklang mit anderen, vergleichbaren Experimenten zur Prüfung der Gravitationstheorie Albert Einsteins.

*furthest distance (aphelion). HELIOS' orbits lay almost in the same plane as that of the earth.*

*The research task of HELIOS is accomplished with ten instruments on board. They are*

— *particle analyzers (protons, alpha-particles, electrons) of the solar wind which measure the speed and the direction as well as the number of particles observed (experiment 1).*

— *Two magnetometers with which the permanent magnetic field and its slow variations can be measured (experiment 2 and 3).*

— *One magnetometer (search coil magnetometer) for observation of high speed magnetic field changes (experiment 4).*

— *A measurement antenna with a built-in radio wave receiver for observation of slow and fast changes of the electrical field strength (experiment 5).*

— *A set of particle telescopes for determination of the number, the direction and the energy of impinging atomic particles of medium and high energy (cosmic radiation) (experiment 6, 7 and 8).*

— *With an additional device on HELIOS 2, bursts of gamma-rays (electromagnetic waves of extremely short wavelength) can be registered.*

— *Monitoring the sun in the x-ray spectrum (experiment 7).*

— *Three photometers for sensing of sky brightness in three directions (zodiacal light photometers) (experiment 9).*

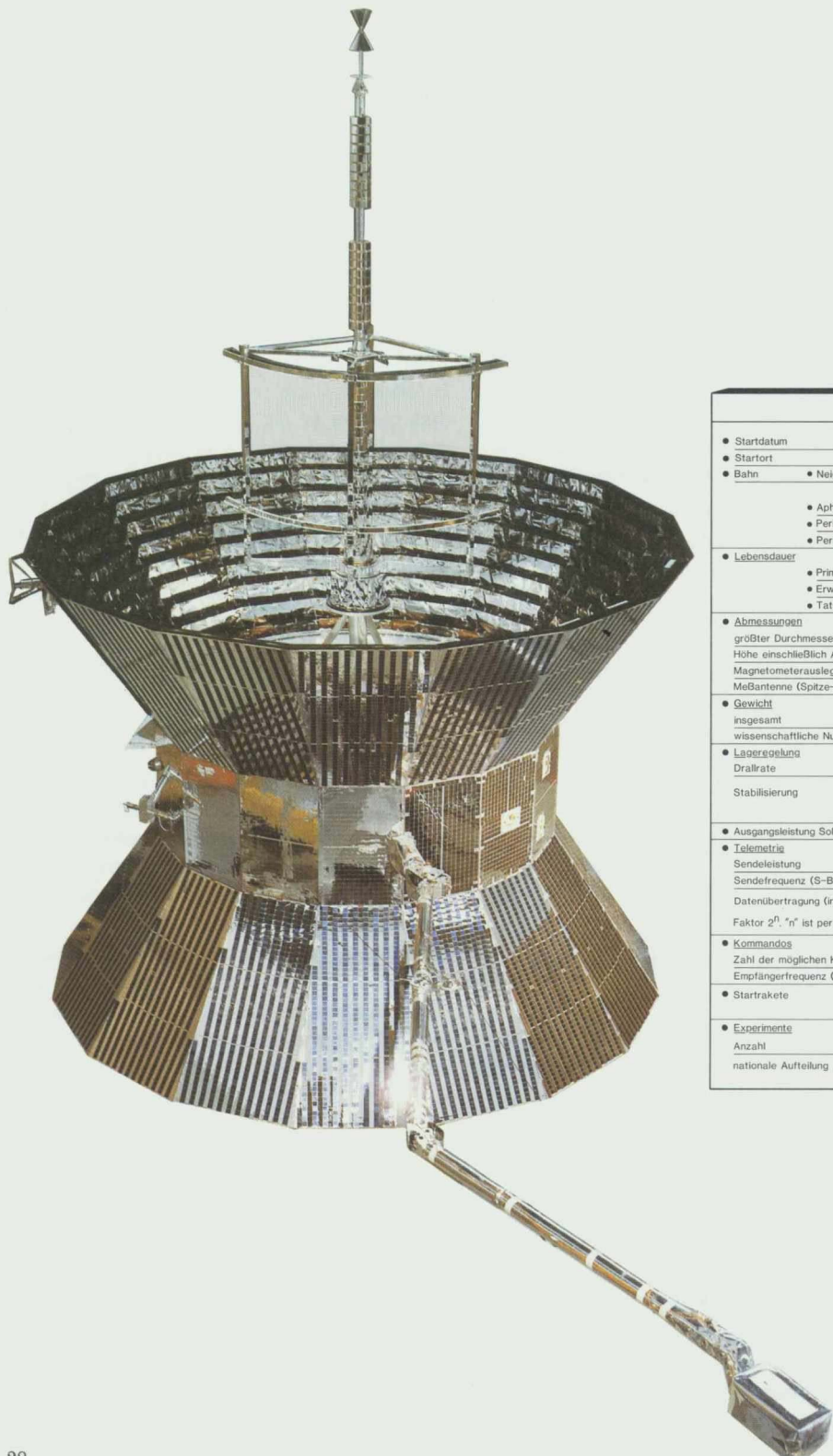
— *Two instruments for recording and analyzing dust particles entering the sensor (experiment 10).*

*The signals transmitted by the HELIOS-spacecraft must from their most distant orbital point to earth cover up to 300 Million km of space in order to reach the ground stations where they are received. Over such a distance they are exposed to strong disturbing effects if they cross through the vicinity of the sun. There the matter*

*of interplanetary space is especially hot, dense and turbulent. An examination of the disturbance in these signals as received on earth provides a key to the characteristics of the interplanetary medium, especially in close proximity to the sun (solar corona, experiment 12).*

*The region of the inner solar system explored by HELIOS can at least partially extend to the immediate vicinity of the sun even though the spacecraft itself does not dare to get that close. While the transmission of measured data which is taken on board becomes difficult because of disturbances in the plasma near the sun, one can collect information of these disturbances. Observation have been made of the turning of the oscillation plane (polarization plane) of the incoming HELIOS-signals (Faraday-effect), changes in signal wave length (Doppler-effect) and the signal transfer-time between the transmitter and receiver.*

*Additionally it was planned to use HELIOS as a test object for verification of Albert Einstein's theory of gravitation with a method heretofore not possible to use (experiment 11). — Unfortunately an auxiliary electronics instrument, the onboard transponder of both solar probes experienced a failure of certain components in the first year of their respective missions. This, although having little impact on the entire system, did affect the gravitation experiment. Nevertheless the results which were obtained through this experiment are in agreement with other comparable investigations implemented to verify the gravitational theory of Albert Einstein.*



	HELIOS 2	HELIOS 1			
● Startdatum	15. Jan. 76	10. Dez. 74	● Launch Date		
● Startort	Eastern Test Range		● Launch Site		
● Bahn	● Neigung	0,039°	0,0011°	● Orbit	● Inclination
	gegen Ekliptik / with Respect to the Ecliptic				
	● Aphel	0,983 AU	0,985 AU	● Aphelion	
	● Perihel	0,290 AU	0,309 AU	● Perihelion	
	● Periode	187 Tage	190 Tage	● Period	
● Lebensdauer			● Life Time		
	● Primärmision	17. Mai 76	17. Apr. 75	● Primary Mission	
	● Erweiterte Mission	Monate 18 months		● Extended Mission	
	● Tatsächliche Mission	Ende: März 1980	wird fortgesetzt	● Actual Mission	
● Abmessungen			● Dimensions		
größter Durchmesser (ohne Ausleger)	2,77m		Maximum Diameter (Without Boom)		
Höhe einschließlich Antenne	4,20m		Height incl. Antenna		
Magnetometerausleger (Spitze-Spitze)	9,35m		Magnetometer Boom (tip-to-tip)		
Meßantenne (Spitze-Spitze)	31,30m		Experiment 5 Antenna (tip-to-tip)		
● Gewicht			● Weight		
insgesamt	376,6 ± 0,55 kg	371,2 kg	Total		
wissenschaftliche Nutzlast	74,2 kg	73,5 kg	Scientific Payload		
● Lageregelung	60 rpm ± 1 rpm		● Attitude Control		
Drallrate	Aktive Kaltgas Drallraten- und Drallachsen- Kontrolle		Spin Rate		
Stabilisierung	Active Cold Gas Spin & Spin Axis Control		Stabilization		
● Ausgangsleistung Solargenerator	240 W		● Solar Array Power Output		
● Telemetrie			● Telemetry		
Sendeleistung	0,5 - 8 - 20 W		RF Power (alternatively)		
Sendefrequenz (S-Band)	2295,370 MHz	2297,592 MHz	Transmitting Frequency (S-Band)		
Datenübertragung (in Schritten von Faktor 2 <sup>n</sup> , "n" ist per Kommando wählbar.)	8 - 4096 bps		Data Transmission (in Steps of the Factor 2 <sup>n</sup> with "n" being selected by Telecommand)		
● Kommandos			● Command Link		
Zahl der möglichen Kommandos	256	256	Number of Commands		
Empfängerfrequenz (S-Band)	2113,653 MHz	2114,699 MHz	Receiving Frequency (S-Band)		
● Startrakete	Titan III E/Centaur D-1T/TE364-4		● Launch Vehicle		
● Experimente	10 Active, 2 Passive		● Experiments		
Anzahl	7 FRG, 3 USA		Number		
nationale Aufteilung	+2 Passive kooperativ		Participation		



# Die HELIOS-Missionen

Ants Kutzer, Deutscher Projektleiter HELIOS, DFVLR-BPT, Köln, jetzt MBB-ERNO, Bremen

## Programmziele

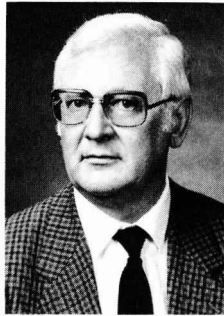
Das Hauptziel des HELIOS-Programms war es, deutschen und amerikanischen Wissenschaftlern die Möglichkeit zu bieten, durch eine Reihe von Experimenten die Eigenschaften und Prozesse im interplanetaren Raum zu untersuchen, wobei man sich der Sonne bis auf eine Entfernung von 0,30 AE näherte.

Als zweites Ziel sollte HELIOS den Wissensstand der Bundesrepublik Deutschland auf den Gebieten Management und Technologie erweitern, damit in Zukunft ähnlich anspruchsvolle Projekte im Rahmen anderer nationaler und internationaler Weltraum- und Technologieprogramme mit hochentwickelter Ausrüstung und verbesserten Techniken durchgeführt werden können. Schließlich erwartete man, daß dieses umfangreiche und viele Organisationen umfassende Programm die Gelegenheit bieten würde, Managementenerfahrungen und -fähigkeiten zu entwickeln, die bei der Lösung unserer sozialen, wirtschaftlichen und technischen Probleme von Nutzen sein können.

## Technische Herausforderung

Die wesentlichen Probleme auf deutscher Seite waren:

a) das Problem der Systemkomplexität bei der Entwicklung, der Integration und beim Test einer interplanetaren Sonde der dritten Generation wie HELIOS, aufbauend auf nur begrenzter Erfahrung mit Raumfahrzeugen der ersten Generation, der Scout- und Delta-Klasse. Daß dieses Problem erfolgreich gelöst wurde, demonstrieren die vorzüglichen technischen Leistungen der



Kutzer

HELIOS-Sonden und die beachtenswerte Managementleistung von BMFT/DFVLR/MBB: der ursprüngliche Zeitplan und der Kostenrahmen wurden nahezu exakt eingehalten.

b) Die extrem feindliche thermische Umgebung aufgrund der bei 0,3 AE elffachen solaren Bestrahlungsintensität verglichen mit der Erde. Neue Hochtemperaturzellen, Klebetechniken und Spiegelfolien (SSM)\* wurden entwickelt und bei beiden Missionen erfolgreich eingesetzt. Tatsächlich führten die hohen technischen Anforderungen/Ziele der thermischen Missionsaspekte zu Neuentwürfen, die zu Beginn des Projekts nicht vorhersehbar waren.

c) Die hohen technischen Ziele des Datenübertragungssystems, den Stand der Technik auf dem Gebiet parametrischer Vorverstärker voranzutreiben, erwiesen sich als verfrüht für die Anwendung bei HELIOS. Der anfängliche Entwurf wurde aufgegeben und durch einen konventionellen transistorbestückten Vorverstärker ersetzt.

Tabelle Seite 38 zeigt primäre HELIOS 1- und HELIOS 2-Systemparameter und -Daten.

## Bahn- und Missionsphasen

Die für HELIOS ausgewählte Mission ermöglichte es, die Erforschung des interplanetaren Raumes über heliozentrische Entfernungen von nominell 1 AE bis 0,3 AE Sonnenabstand auszudehnen.

---

\*) SSM (Second Surface Mirrors) = Hinterglasspiegel; unter günstigen Bedingungen können sie soviel Energie abstrahlen, wie sie von der Sonne erhalten.

## Objective of the Program

*The basic objective of the HELIOS Program was to provide German and U.S. scientists the opportunity of designing and flying a well-integrated set of experiments aimed at specific investigations of the properties and processes in interplanetary space by approaching the sun to 0.30 Astronomical Units (AU).*

*As a secondary objective, HELIOS was intended to advance the managerial and technological expertise of Germany, thus progressing towards more advanced equipment, better techniques and experiments in the future to carry out similar advanced projects in other national and international space and technological programs.*

*Generally, the characteristics of the large, multiple organization program were expected to provide the opportunity to develop more effective management experience and capabilities for the solution of many of the major social, economic and technological problems facing all modern nations.*

## Technical Challenge

*The major spacecraft problems facing Germany were:*

*a. The system/complexity problem associated with developing, integrating, and testing a third generation interplanetary spacecraft like HELIOS, basing on a limited experience of only Scout and Delta class first generation spacecraft. The successful solution to this problem was clearly demonstrated by the technical excellence of the HELIOS spacecraft and the noteworthy BMFT/DFVLR/MBB management record of nearly meeting the original schedule and cost goals.*

*b. The extremely hostile thermal environment resulting from the eleven (11) solar constant exposure at 0.30 AU. New high temperature solar cells, adhesive techniques and second surface mirrors (SSM)\* were developed and suc-*

---

*\*) Under favorite condition these mirrors will reject basically all radiation coming from the sun.*

Die Umlaufbahn von HELIOS 1 und 2 zusammen mit den Bahnen der innersten Planeten Merkur, Venus und Erde zeigt die Abbildung auf Seite 36.

Zum Zeitpunkt des Missionsentwurfs sah die Planung vor, daß 1974/75 zwei Sonden im Abstand von ungefähr einem Jahr von der Eastern Test Range in Florida gestartet werden sollten.

Jeder Flug wurde in drei Phasen aufgeteilt:

**Erdnah:** Start bis ungefähr zwei Wochen danach (die genaue Zeit sollte zwischen den Projektleitern vereinbart werden).

**Primär (Normalbetrieb):** bis zur ersten Sonnenokkultation. Die nominelle Mission ist mit Abschluß der primären Phase beendet.

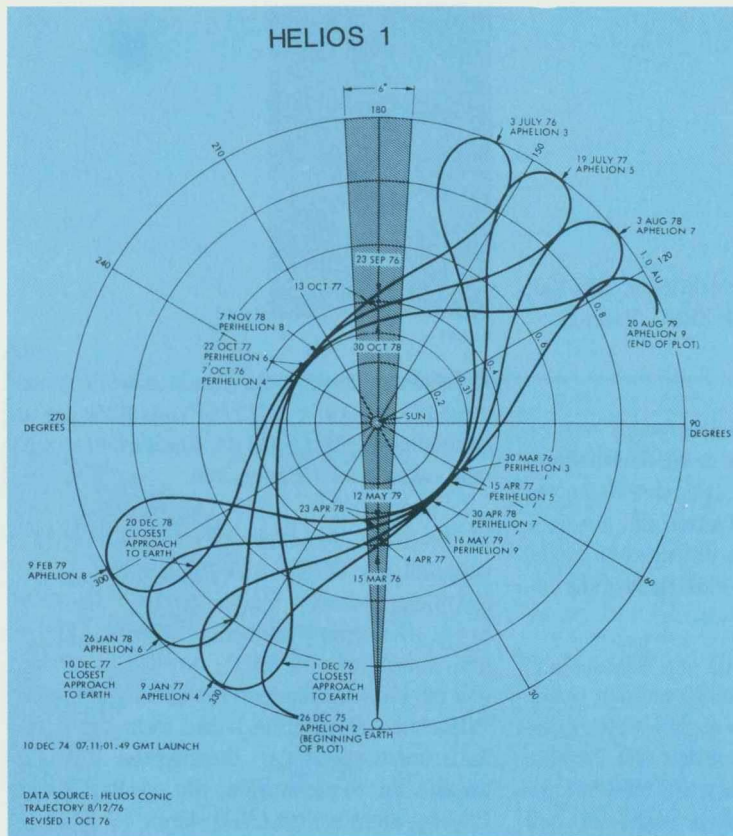
**Erweiterter Betrieb:** vom Ende der Primärmision bis zum von den Projektleitern gemeinsam empfohlenen Missionsende. (Für Entwurfs- und Missionsplanung wurde eine HELIOS-Soll-Lebensdauer von 18 Monaten oder 3 Sonnenumläufen vereinbart).

Die Flugdauer der primären Mission betrug etwa 130 Tage, d. h. bis zur ersten Okkultation, wobei das Hauptinteresse auf dem Teil der stark exzentrischen Bahn in der Nähe des Perihels lag (ungefähr 25 Tage um das Perihel herum).

Die HELIOS-Umläufe (6 Monate) und die Zeiten des Ausfalls der Funkverbindung (blackouts) werden am besten beschrieben, wenn man sich eine Ellipse mit einem Ende als Aphel (1,0 AE) und dem anderen Ende als Perihel (0,3 AE) vorstellt. Ungefähr zum Zeitpunkt des ersten Apheldurchgangs befindet sich die Erde von HELIOS aus gesehen hinter der Sonne, und es tritt eine lange Blackout-Periode ein (ungefähr 20 Tage für HELIOS 1). Ein Jahr nach dem Start hat die Sonde zwei Sonnenumläufe zurückgelegt, während die Erde nur einmal um die Sonne gewandert ist.

#### Kriterien für den Missionserfolg

Das offizielle Missionsziel der zehn aktiven Experimente (vor dem HELIOS-1-Start aufgestellt) bestand darin, die fundamentalen solaren Prozesse sowie die Beziehung Sonne-Erde anhand



Bahn von HELIOS 1 (links) und HELIOS 2 (rechts) in einem gegendrehenden Koordinatensystem. D. h. die Verbindung Sonne-Erde ist festgehalten, so daß der Raum scheinbar um die Sonne rotiert.

*cessfully flown on both missions. Actually the high technical requirements/goals of the thermal aspects of the mission led to redesigns which could not have been anticipated at the beginning of the project.*

*c. High technical goals of the telecommunication system to advance technology in parametric preamplifier design proved to be premature for HELIOS application. The initial design was abandoned and replaced by a more conventional transistorized preamplifier. The table on page 38 shows the primary system parameters and characteristics of the HELIOS 1 and 2 spacecraft and missions.*

#### Orbit and Mission Phases

*The mission selected for HELIOS provides an opportunity to extend the study of interplanet-*

*ary space over a range of heliocentric distances extending nominally from 1 AU to within 0.30 AU of the sun.*

*The orbits of HELIOS 1 and 2 together with the orbits of the innermost planets Mercury, Venus and Earth are given on page 36.*

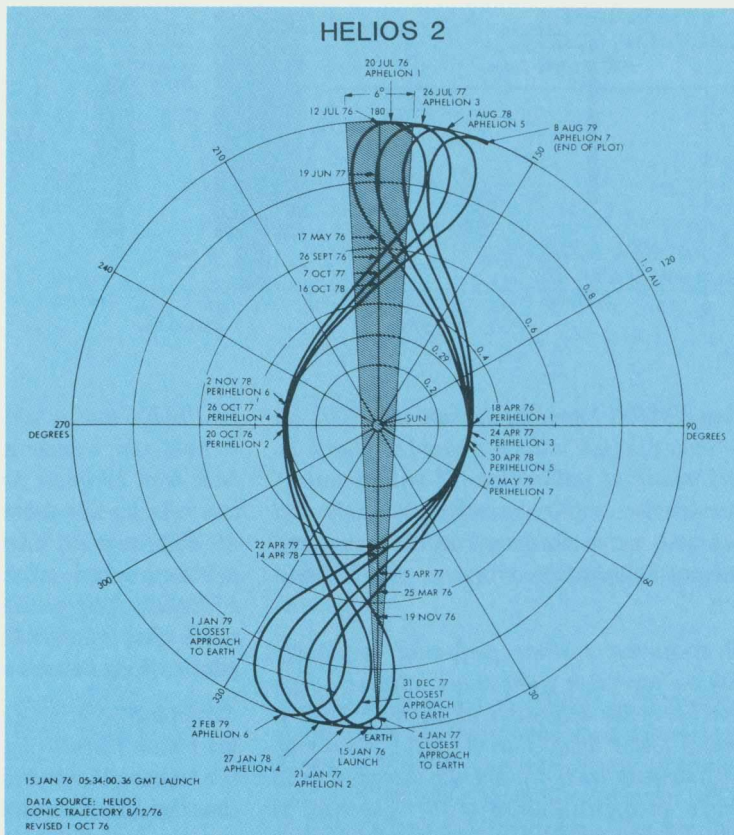
*At the time of the mission design the project was expected to mature in the time period 1974/1975 with launching from Eastern Test Range two spacecraft approximately a year apart.*

*Each flight was divided into three phases:*

*Near Earth: from launch until approximately two weeks later (the exact time to be mutually agreed between the Project Managers).*

*Primary (normal operations): until the first solar occultation. The nominal mission to be complete at the conclusion of the Primary Phase.*

Orbit of *HELIOS 1* (left) and *HELIOS 2* (right) in a counterrotating coordinate system. I.e. the connection sun—earth is fixed so that the space is virtually rotating around the sun.



der Untersuchung von Phänomenen wie Sonnenwind, magnetische und elektrische Felder, kosmische Strahlung und kosmischer Staub zu untersuchen, wobei sich die eigentliche Mission vom Start bis zum ersten Perihel (ungefähr 0,31 Astronomische Einheiten und 90 Tage nach dem Start) erstreckte.

### Das Verhalten von Sonde und Experimenten nach dem Start

#### HELIOS 1

HELIOS 1 wurde am 10. Dezember 1974 nach einem Bilderbuch-Countdown gestartet. Die (fünfstufige) Trägerrakete Titan III E/Centaur/TE-364-4 arbeitete fehlerlos, und HELIOS wurde in eine Bahn mit einem Perihel von 0,3094 AE geschossen. Alle SONDENSYSTEME arbeiteten wie erwartet (ausgenommen die Meßantenne von Experiment 5).

Als HELIOS 1 am 15. 3. 1975 mit 238 000 km pro Stunde in einer Entfernung von ca. 46 Millionen km an der Sonne vorbeiflog, dabei Temperaturen ausgesetzt war, die heiß genug waren, Blei zu schmelzen, und wie erwartet „überlebte“, hatte die Sonde ihre primäre wissenschaftliche Mission erfüllt.

Alle SONDENSYSTEME arbeiteten einwandfrei. Die einzige Ausnahme war der Hardware-Ausfall der ausfahrbaren Antenne von Experiment 5 (Plasmawellen im Sonnenwind). Es war vorgesehen, daß zwei seitlich an der Sonde diametral angebrachte Antennen unabhängig voneinander auf 15 m ausgefahren werden, um Radiowellen niedriger Frequenz für das Experiment 5 zu empfangen. Durch den Kurzschluß eines Antennenmastes mit der Sondenstruktur wurde die Leistungsfähigkeit der Antenne zum Empfang von Niedrigfrequenzsignalen gemindert. Der federführende Experimentator Dr. Gurnett: „Obgleich uner-

*Extended Operations: from completion of the Primary Phase until mutually agreed upon recommendation from the Project Managers. (For design and mission planning a basic HELIOS design life of eighteen months or three spacecraft orbits was agreed).*

*Flight time of the primary mission is approximately 130 days, i.e. until the first occultation with primary interest in the portion of the highly eccentric orbit near perihelion (for approximately twenty-five days around perihelion).*

*The HELIOS spacecraft orbits (six months) and communication blackout periods are best described by imagining an ellipse with one end at aphelion (1.0 AU) and one end at perihelion (0.30 AU). Near the time of this first aphelion the earth is on the opposite side of the sun from HELIOS and we encounter a long blackout period (approximately twenty days for HELIOS 1). One year after launch the spacecraft has made two solar orbits and the earth has completed one solar orbit.*

### Criteria for Mission Success

*The officially agreed mission objectives of the ten active experiments (established prior to HELIOS 1 launch) were to investigate the fundamental solar processes and solar terrestrial relationship by the study of phenomena such as solar wind, magnetic and electric fields, cosmic radiation and cosmic dust with the basic mission extending from launch to the first perihelion (approximately 0.31 Astronomical Units [AU] and 90 days after launch).*

### Spacecraft and Experiment Orbital Performance

#### HELIOS 1

*HELIOS 1 was launched on December 10, 1974 after a textbook countdown. The Titan III E/Centaur/TE-364-4 (five stages) launch vehicle performed flawlessly and HELIOS was injected into a 0.3094 AU perihelion trajectory. All spacecraft systems performed as expected (except Experiment 5 antenna).*

wünscht, hat der Ausfall jedoch keine allzu ernstesten Auswirkungen.“

Als die Hochgewinnantenne (HGA) eingeschaltet wurde, beobachtete Experiment 1 einen erhöhten Strom von Elektronen mittlerer Energie, wodurch die Plasmamessungen ausgelöscht wurden. Beim Radiowellenexperiment (E5) trat eine Erhöhung des Rauschpegels über einen großen Teil seines Frequenzbandes ein.

Um trotz des aufgetretenen Fehlers eine möglichst geringe Missionseinbuße hinnehmen zu müssen, gewährte die NASA einen höheren Einsatz von großen (64 m) Antennen. Die kleinere Sendeleistung von nur 8 Watt wurde dadurch kompensiert. Die niedrigere Bitrate beschränkte sich auf die Intervalle, in denen keine 64-m-Station für HELIOS verfügbar gemacht werden konnte und in denen die ursprünglich vorgesehenen, unter normalen Bedingungen ausreichenden 26-m-Stationen den Datenempfang sicherstellten. Auf jeden Fall konnte die höchste Datenrate während der Perioden empfangen werden, in denen die 100-m-Station Effelsberg Sichtverbindung zu HELIOS 1 hatte.

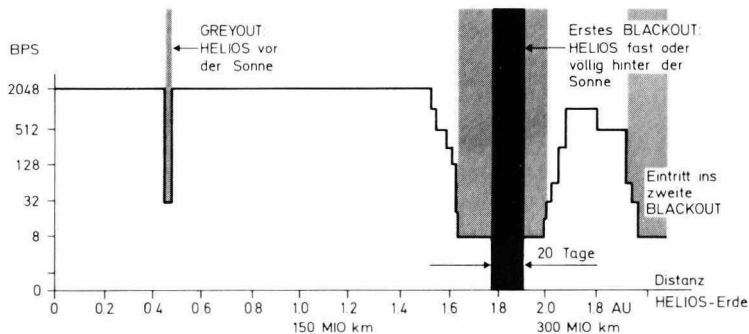
Nach dem Perihel verschwand der Effekt der Hochgewinnantenne, der bei Bodentests als „Multiplikator“-Effekt identifiziert worden war. Während der „Grayout“- und „Blackout“-Phasen, in denen sich die Sonde zwischen der Sonne und der Erde befand (Syzygie = innere oder untere Konjunktion), bzw. in denen die Sonde, von der Erde aus gesehen, hinter der Sonne verschwand (äußere oder obere Konjunktion), konnten natürlicherweise keine Daten empfangen werden.

Abb. Seite 42 zeigt die maximal erreichbaren Datenraten über große Bodenstationen (64 m – DSN und 100 m – Effelsberg).

#### Unterschiede zwischen der HELIOS 1- und HELIOS 2-Mission

Aufgrund des Verhaltens von HELIOS 1 im Welt- raum wurde HELIOS 2 in einigen Details modifi- ziert.

Sowohl HELIOS 1 als auch HELIOS 2 flogen innerhalb der Ebene der Ekliptik, wobei die



Maximal erreichbare Datenübertragungsraten bei Verwendung großer Stationen.

*Maximum achievable data rates when using big ground stations.*

*When HELIOS 1 sped by the sun at 238,000 km per hour (142,000 miles per hour) on March 15, 1975 within 46 million km (28 million miles), encountering temperatures hot enough to melt lead and survived as expected, the spacecraft had accomplished its primary scientific mission.*

*All spacecraft systems performed excellently with the exception of the single hardware malfunction of the extendible antenna for Experiment 5 (solar wind plasma wave). Nominally two antennas are independently extended for 15 meters on opposite sides of the spacecraft to receive low frequency radio waves for Experiment 5. The difficulty by grounding one side of the antenna reduced the antenna's capability of receiving low frequency signals. The principal investigator (Dr. Gurnett) commented: "although undesirable, the effect of this short is not really very serious".*

*When the High Gain Antenna (HGA) was switched on, Experiment 1 observed increased flux of medium energy electrons, which wiped out the plasma measurements, and the Radio Frequency Experiment (E5) experienced an increase of noise level over a wide range of its frequency range.*

*In order to keep the mission loss as small as possible in spite of this failure, NASA assigned more passages of big (64 m) antennas to HELIOS. The smaller transmission power of only 8 Watt was thus compensated. A lower bitrate was restricted to those intervals, in which no 64 m stations could be made available*

*for HELIOS and in which a 26 m station had to be used, which under normal conditions would have been adequate for optimum coverage. At any rate, highest data rate could be received in all those periods, when the 100 m station at Effelsberg had viewing connection with HELIOS 1. After perihelion the High Gain Antenna effect (identified by ground tests as multiplier effect) disappeared completely.*

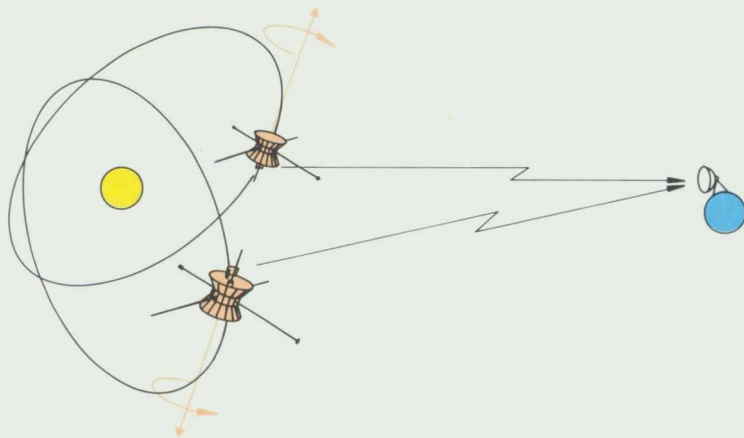
*Exceptions occurred during greyout and blackout phases respectively, where the satellite passes between the earth and the sun (Syzygy = inner or lower conjunction), or the satellite as seen from earth goes behind the sun (outer or upper conjunction).*

*Figure page 42 illustrates the maximum achievable data rates with large ground stations (64 m DSN and 100 m Effelsberg).*

#### Differences between HELIOS 1 and HELIOS 2 Missions

*Based on HELIOS 1 orbital performance some modifications for HELIOS 2 were introduced.*

*HELIOS 1 and 2 both fly within the ecliptic plane with the spin axis (direction of the antenna mast) almost perpendicular to the ecliptic. For the HELIOS 1 mission the positive spin axis pointed north but the scientists wanted the HELIOS 2 spin axis to point south. Therefore reversed turning of the spacecraft after launch resulted in south pointing of the High Gain Antenna reflector, as required for HELIOS 2 (see fig. page 43).*



Relative Stellung von HELIOS 1 und HELIOS 2 zueinander.

Attitude of HELIOS 1 and HELIOS 2 relative to one another.

Spin-Achse (Richtung des Antennenmastes) fast senkrecht zur Ekliptik steht. Bei der HELIOS-1-Mission zeigte die positive Spin-Achse nach Norden. Da die Wissenschaftler jedoch wünschten, daß die Spin-Achse von HELIOS 2 nach Süden zeigt, wurde HELIOS 2 bei den Ausrichtungsmanövern unmittelbar nach dem Start in die umgekehrte Richtung gedreht (Abb. Seite 43).

Um Kreuzkopplungseffekte (gegenseitige Störung von zwei Aktionen, die voneinander unabhängig sein sollten) während der Lageregelungsmanöver auf ein Minimum zu reduzieren, wurde die Ausrichtung der Präzessionsdüse verbessert. Außerdem wurde eine andere S-Band-Frequenz (ungefähr 13 cm Wellenlänge) verwendet, um den gleichzeitigen Betrieb von HELIOS 1 und 2 zu ermöglichen.

Damit Sekundäremissionen von Elektronen aus den Schlitzen der Hochgewinnantenne ausgeschaltet werden konnten (Multiplikatoreffekt, der starke Störung der Experimente 1 und 5 verursachte), wurden die Antennenschlitze von HELIOS 2 vergrößert. Für die sichere Entfaltung der E5-Antenne ging man zu starrer Ionen-Abschirmung der Antenne über.

Die Aktivitäten von Experiment 7 wurden dahingehend erweitert, daß zusätzlich auch Beobachtungen von Gammastrahlen-Ausbrüchen möglich waren. Aufgrund einiger Verbesserungen im Thermalhaushalt (zusätzliche Abschirmung der Ausleger und der an Auslegern montierten Drall-

düsen und Magnetometer E2) wurde entschieden, mit HELIOS 2 noch näher an die Sonne heranzugehen und ein Perihel von 0,29 AE anzustreben.

### HELIOS 2

HELIOS 2 wurde am 15. Januar 1976 gestartet. Der perfekte Countdown und die ausgezeichnete Arbeit des GSOC (German Space Operations Center = Deutsches Kontrollzentrum der DFVLR in Oberpfaffenhofen/Oberbayern) bei der Inbetriebnahme und Kontrolle der Sonde leitete eine ebenfalls erfolgreiche HELIOS-2-Mission ein.

Am 17. April 1976 um 2.29 MEZ durchlief HELIOS 2 zum ersten Mal das Perihel bei 0,29 AE. Alle zehn Experimente (sieben deutsche und drei amerikanische) arbeiteten fehlerfrei, und alle Sondensysteme funktionierten wie erwartet.

Dabei erreichte HELIOS 2 eine Geschwindigkeit von 252 000 km/h in einer Entfernung von 43 432 286 km (0,29 AE). Dem Menschen war damit die größte Annäherung an unseren nächstgelegenen Stern gelungen, trotz der Sonneneinstrahlung, die dort 11,86mal so intensiv ist wie die Strahlung, die die Erde erwärmt.

### Zusammenfassung der Mission

Tabelle 2 zeigt den Missionsablauf von HELIOS 1 und 2.

Gemessen an den vor dem Start von HELIOS 1 festgelegten Kriterien für den Missionserfolg

*To minimize crosscoupling effects during attitude maneuvers the alignment of precession nozzle was improved and to allow for simultaneous HELIOS 1 and 2 operations used different S-band frequency.*

*To eliminate secondary emission of electrons from the slots of the High Gain Antenna (Multiplier-effect, causing severe interference with experiments 1 and 5), the feeder slots were modified (widened) on HELIOS 2. To assure a safe deployment of the E 5 antenna the ion guard design was changed to rigid ion guards.*

*Experiment 7 measurements were extended to additionally allow for Gamma-ray burst measurements. With some improvements in the thermal design (additional shielding, booms and the boom mounted spin thrusters and magnetometer E2) it was decided to make with HELIOS 2 a closer approach to the sun and to aim the HELIOS 2 mission for a perihelion of 0.29 AU.*

### HELIOS 2

*HELIOS 2 was launched on January 15, 1976. The perfect countdown and a very professional spacecraft turn-on and operation performance by GSOC\*) started the successful HELIOS 2 mission.*

*On April 17, 1976 at 02.29 GMT HELIOS 2 successfully made its first perihelion passage at 0.29 AU. All ten experiments (seven German and three U.S.) operated perfectly and all spacecraft systems performed as expected.*

*When HELIOS 2 passed this perihelion at 252,000 km per hour man accomplished his closest approach to our nearest star, within 43,432,286 km (0.29 AU) as compared with the earth 11.86 times the solar heat flux.*

### Mission summary

*Table 2 shows the Mission Sequence of HELIOS 1 and 2.*

\*) German Space Operations Center of DFVLR, Oberpfaffenhofen

wurden beide HELIOS-Missionen von der NASA und dem BMFT bereits 1976 als Erfolg eingestuft.

Bemerkenswert ist, daß die Bedingungen für den wissenschaftlichen Erfolg weit übertroffen wurden. Alle zehn aktiven Experimente lieferten bei beiden Missionen Meßdaten vom Einschuß in die Bahn an bis weit über das erste Perihel hinaus (im Falle von HELIOS 2 mit einem Perihel von 0,29 AE näher als der ursprünglich vorgesehene Abstand von 0,3 AE). Die zwei passiven Experimente brachten ebenfalls wertvolle wissenschaftliche Daten ein.

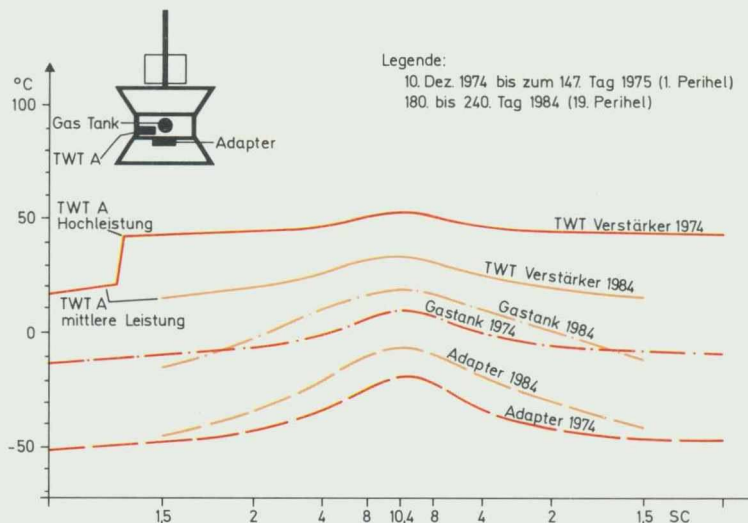
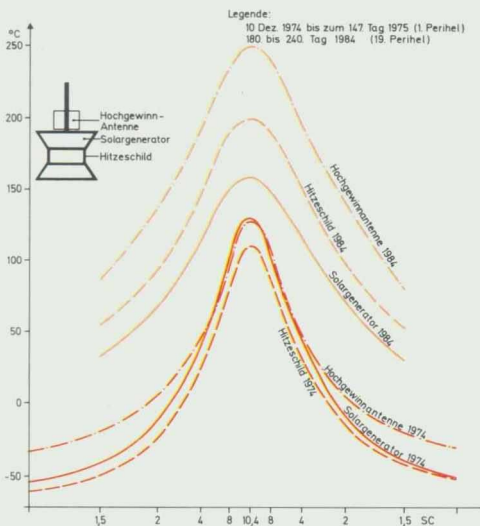
Insgesamt war die Leistung aller SONDENSYSTEME durchweg ausgezeichnet. Die Leistungsaufnahme war nominal, wobei alle Geräte an Bord wie vorgesehen arbeiteten. Die Leistung des Solargenerators war etwas besser als erwartet. Ausnahmen waren die (redundanten) Wanderfeldröhren im Datenübertragungssystem beider Sonden. Die Wanderfeldröhre auf HELIOS 1 fiel nach elf Monaten Betriebsdauer aus, die auf HELIOS 2 nach drei Monaten. Die redundanten Wanderfeldröhren 2 übernahmen die Datenübertragung. Es wurde entschieden, niemals das Perihel in „High Power Mode“ anzugehen; der Ausfall bei HELIOS 1 zeigte ein mögliches Wärmeübertragungsproblem zwischen der Wanderfeldröhre und der Bodenplatte. Die Überprüfung des Be-

Tabelle 2a	Missionsablauf	HELIOS 1	Mission sequence
	Start	10. Dezember 1974, GMT 07 H, 11 Min.	Launch
	Trennung von der letzten Raketstufe	10. Dezember 1974, GMT 07 H, 51 Min.	Separation
	Experimente „an“ für Messungen nahe der Erde	10. Dezember 1974, GMT 07 H, 40 Min.	Experiments for near earth measurements on
	Abschluß der Einschalt- und Konfigurationsphase	14. Dezember 1974	Initial turn-on and configuration complete
	Übergabe der Missionskontrolle nach Oberpfaffenhofen	10. Januar 1975	Mission control transfer to Oberpfaffenhofen
	Erste Syzygie (Greyout) = HELIOS zwischen Sonne und Erde	18. Februar 1975	First Syzygy (Greyout)
	Erstes Perihel (0,31 AE)	15. März 1975 (10,4 Solarkonstante)	First Perihelion (.31 AU)
	erste Okkultation (nicht vollständig hinter der Sonne) Eintritt/Austritt	27. April 1975/ 15. Mai 1975 kleiner Winkel Sonne-Erde-HELIOS	First occultation (not crossing behind the sun) Entry/Exit
	Erstes Aphel (Abstand zur Erde ~ 300 Mio. km)	17. Juni 1975	First Aphelion (Distance to earth ~ 300 Million km)
	Zweite Okkultation Eintritt/Austritt	29. August 1975/ 1. September 1975	Second occultation Entry/Exit
	Zweites Perihel	21. September 1975	Second Perihelion
	Beginn des dritten Sonnenumschlags	25. Dezember 1975	Begin of the third orbit around the sun
	Drittes Perihel	29. März 1976	Third Perihelion
	Viertes Perihel	5. Oktober 1976	Fourth Perihelion
	...	...	...
	Neunzehntes Perihel	28. Juli 1984	Nineteenth Perihelion

Beispiele von Temperaturen, die auf HELIOS 1 im

1. und 19. Perihel gemessen wurden.

Examples of temperatures as measured on HELIOS 1 between 1st and 19th perihelion.



## Missionsablauf HELIOS 2 *Mission Sequence*

Start	15. Januar 1976, GMT 06 H, 34 Min.	<i>Launch</i>
Trennung von der letzten Raketenstufe	15. Januar 1976, GMT 07 H, 20 Min.	<i>Separation</i>
Anfangskonfiguration und komplette Funktionsüberprüfung	20. Januar 1976	<i>Initial configuration and checkout complete</i>
Erste Syzygie (Greyout) = HELIOS zwischen Sonne und Erde	24. März 1976	<i>First syzygy (Greyout)</i>
Erstes Perihel (0,29 AE)	17. April 1976 (11,86 Solarkonstante)	<i>First Perihelion (0.29 AU)</i>
Erste Okkultation Eintritt/Austritt	14. Mai 1976/ 19. Mai 1976 (Winkel Sonne–Erde– HELIOS kleiner als 2,7° zwischen den Okkulationen)	<i>First occultation entry/exit</i>
Zweite Okkultation Eintritt/Austritt	3. Juli 1976/16. Juli 1976	<i>Second occultation entry/exit</i>
Zweites Perihel	19. Oktober 1976	<i>Second Perihelion</i>
Drittes Perihel	23. April 1977	<i>Third Perihelion</i>
Viertes Perihel	21. Dezember 1977	<i>Fourth Perihelion</i>
Achtes (und letztes) Perihel	8. November 1979	<i>Eighth (and last) Perihelion</i>
Tödlicher Sondenfehler	3. März 1980	<i>Lethal Spacecraft Failure</i>
Vorläufiges Missionsende	8. März 1980	<i>Preliminary Mission Termination</i>
Offizielles Missionsende	7. Januar 1981	<i>Final Mission Termination</i>

triebs der Experimenten-Sensoren und der Düse zur Regelung der Drallrate (bei HELIOS 1), die die spezifischen Temperaturen überschritten hatten, ergab eine realistische Chance, daß die beiden Missionen, wie in den beiden Abb. Seite 44 gezeigt, fortgesetzt werden konnten.

Während der Perihel-Durchgänge von HELIOS 1 stiegen die Temperaturen mit zunehmender Sonnenannäherung und lagen beim Erreichen des Perihels (10,4 Solarkonstanten) innerhalb der erwarteten Grenzen, mit Ausnahme des Sensors von Experiment 2. Beim Drall-Antrieb des Lage-regelungssystems war die Temperatur in der Nähe des spezifizierten Grenzwertes.

Die Abbildungen Seite 44 zeigen einige während der HELIOS 1-Mission im ersten und neunzehnten Perihel gemessene Innen- und Außentemperaturen. Obgleich an der Außenseite ein Temperaturwechsel von 200° auftritt (Antennen-Spitze), sind die mittleren Temperaturschwankungen im Innern dank des Thermalkontrollsystems auf etwa 30° reduziert.

Abb. Seite 46 oben zeigt die verbesserte thermische Umgebung für die Drall-Düse und den Experiment-2-Sensor; die Temperatur des Auslegers der Hochgewinn-Antenne zeigt das erwartete Verhältnis zwischen den Temperaturen bei HELIOS 1 und 2.

In den nachfolgenden Periheldurchgängen von HELIOS 2 stieg die Temperatur der Drall-Düse allerdings stark an. Die erwartete Verbesserung war hier leider nicht von Dauer. Dadurch wurden die Temperaturen von HELIOS 1 weit übertroffen.

Im Januar 1981 mußte die Mission HELIOS 2 nach einem Betrieb von insgesamt mehr als 4 Jahren offiziell für beendet erklärt werden. (Zur Erinnerung: die ursprünglich festgelegte Primärphase betrug 3 Monate).

Anläßlich des 10. Jahrestages des Starts von HELIOS 1 (10. 12. 1984) können wir mit berechtigtem Stolz feststellen, daß diese Sonde immer noch in Betrieb ist und wertvolle Daten liefert.

*Based on the performance of HELIOS 1 and 2 both missions were adjudged by NASA and BMFT already by 1976 as successful within the prelaunch objectives stated under Mission Success Criteria.*

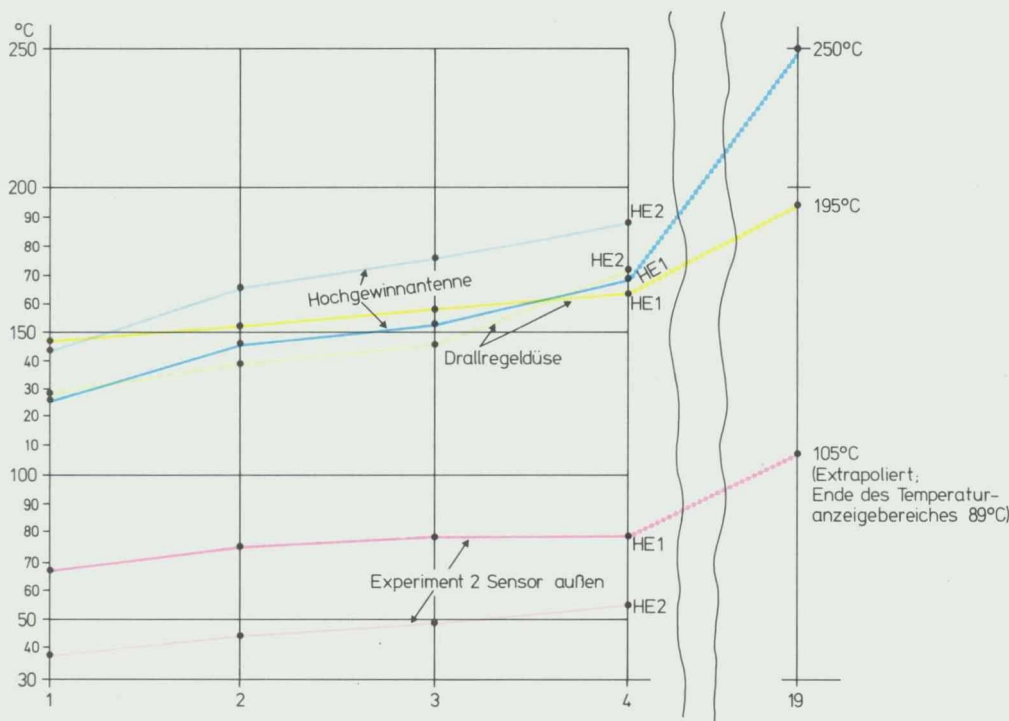
*It should be noted that the scientific success criterion was exceeded because all ten active experiments on both missions produced data from injection through perihelion (in case of HELIOS 2 with a perihelion of 0.29 AU, closer than the original mission target of 0.3 AU!) and valuable data was also received from two passive experiments.*

*In general the performance of all spacecraft subsystems was excellent throughout. Power consumption was nominal with all spacecraft loads working as predicted and solar array performance was slightly better than expected, with the exception of the (redundant) travelling wave tubes (TWT) in the telecom systems of both spacecraft. HELIOS 1 TWT 1 failed after 11 months of operation, HELIOS 2 TWT 1 after 3 months of operation. The redundant (TWT 2) units have been operating; it was decided never to fly into the perihelion in High Power Mode (loss on HELIOS 1 indicated a possible heat transfer problem between TWT and baseplate). The review of the performance of experiment sensors and the spin thruster (on HELIOS 1) having exceeded specified temperatures indicated a realistic chance to continue both missions as shown on page 44.*

*During the HELIOS 1 perihelion passages, temperatures increased according to the increase of solar intensity (10.4 solar constants) within expected limits except for the Experiment 2 sensor and close to the specified limit for the attitude control spin thruster.*

*Figures page 44 show for the first and the nineteenth perihelion internal and external temperatures measured during the mission.*

*Although an external temperature range of 200 °C is reached (antenna tip) the mean temperature variations inside are reduced to about 30 °C by means of thermal control.*



Vergleich von Temperaturen auf HELIOS 1 und HELIOS 2 im Perihel.

Comparison of temperatures measured on HELIOS 1 and HELIOS 2 at the perihelion.

(Obwohl natürlich wegen der Degradation des Energie- und Wärmehaushalts in den sonnenfernen Abschnitten der Bahn „Funkstille“ herrscht).

Abb. Seite 46 unten zeigt die Projektplanung von HELIOS 1 und 2.

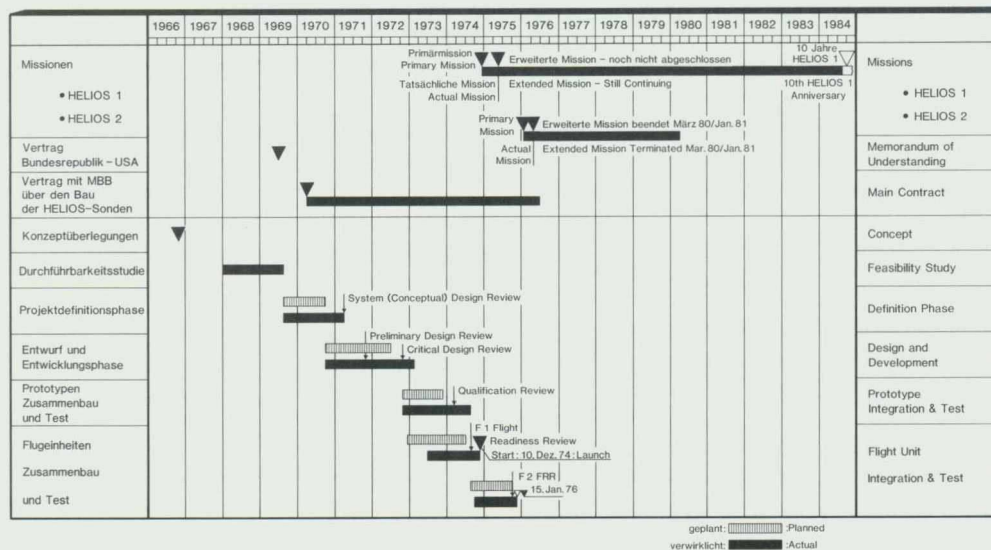
### Schlußfolgerung

Die bei Beginn des Programmes im Jahre 1969 aufgestellten Ziele des HELIOS – Projektes sind voll und ganz erreicht worden. Die nachfolgenden Leistungen können nunmehr als vollendete Tatsache präsentiert werden. In dem deutsch-amerikanischen Gemeinschaftsprojekt HELIOS ergänzten sich die beteiligten Länder zur Verwirklichung ihrer wissenschaftlichen und technischen Ziele im Weltraum in ihren jeweiligen Möglichkeiten. Durch den Austausch der mit verschiedenen Techniken und Instrumenten zu verschiedenen Zeiten des Sonnenzyklus gewonnenen wissenschaftlichen Daten war es möglich, die Korrelation herzustellen, die zum richtigen Verständnis der im Weltraum vorherrschenden komplexen Phänomene erforderlich ist.

Eine richtig zusammengestellte experimentelle Nutzlast hatte die spezielle Untersuchung der Eigenschaften und Vorgänge im interplanetaren Raum zum Ziel; eine Annäherung an die Sonne bis auf 0,3 AE wurde geplant und mit Erfolg ausgeführt.

Erwähnt seien auch noch einige andere Erfahrungen, die für die Arbeit in internationalen kooperativen Projekten wertvoll sind: die allgemeine Gültigkeit genereller Management-Lehrsätze wurde immer wieder bestätigt; und es erwies sich, daß es in Europa und in den USA die gleichen waren.

Es bestanden Unterschiede in den Technologien sowohl innerhalb der europäischen Länder als auch zwischen Europa und den USA. Aber sie waren geringer als erwartet, und HELIOS trug dazu bei, diese weiter zu reduzieren und das Weltraum Know-how Europas zu vergrößern. Der Rat und die Erfahrung der NASA wurden hierfür nach Kräften genutzt.





Es wurde deutlich, daß die Kommunikation einen ebenso wertvollen und wichtigen Projektbeitrag darstellt wie die technischen Aspekte. Die Anerkennung der Gemeinsamkeit der Ziele war wichtig und förderte den kulturellen Austausch. Auch entwickelten sich herzliche, persönliche Freundschaften.

Die Bundesrepublik Deutschland und die Vereinigten Staaten von Amerika haben überzeugend die Fähigkeit zur effektiven Zusammenarbeit bei der Durchführung eines ehrgeizigen Weltraumprojektes demonstriert, das der friedvollen Erkundung des Weltraums diene.

*Figure page 46 top shows the HELIOS 2 improvements of thermal environment for spin thruster and Experiment 2 sensor; the high gain antenna boom temperatures show the normally expected relation between the HELIOS 1 and 2 temperatures.*

*However, in the subsequent HELIOS 2 perihelions the spin thruster temperature increased excessively and the expected design improvement did not materialize. In fact, the temperature increased far above HELIOS 1 values.*

*HELIOS 2 communication links were officially terminated in January 1981. The mission went far beyond any expectation in view of the ambitious environment of HELIOS 2. It lasted in total more than 4 years versus the originally planned primary mission time of 3 months.*

*Today, at the occasion of the 10th HELIOS 1 launch anniversary, we can proudly report that this spacecraft is still alive and producing valuable data (with admittedly identified periods of silence due to the power and thermal systems degradation).*

*Figure page 46 bottom illustrates the HELIOS Project Schedules, from early concept phase to missions.*

#### Conclusion

*The goals and objectives of Project HELIOS as set forth at the inception of the program in 1969 were fully met. The following achievements can now be presented as accomplished facts.*

*The German-American cooperative satellite project HELIOS provided a significant opportunity for supplementing the individual capabilities of the participating countries to attain their scientific and technological goals in space. Sharing the scientific data obtained by different techniques and different instrumentation at varying times during the solar cycle, helped provide the correlation required for an adequate understanding of complex space phenomena.*

*A well integrated set of experiments aimed at specific investigation of the properties and processes in interplanetary space and approaching*

*to 0.30 AU of the sun was designed and successfully flown.*

*Then of course there were the lessons learned on the way together in the environment of international cooperative projects:*

*– the basic value of management fundamentals was many times reaffirmed and they turned out to be basically the same on either side of the Atlantic Ocean;*

*– the differences in technologies between countries within Europe and between Europe and USA were there, but somehow much less than expected, and HELIOS has been part of decreasing such differences by increasing the space oriented know-how in Europe using NASA advice guidance.*

*It became obvious that communication was and is just as valuable and important a contribution to the project as technical aspects, and the appreciation of commonality of purpose added a richness to the cultural interchange over and above the normal pride of completion of a challenging and complex technical project such as HELIOS.*

*The participants in HELIOS project are proud to share such experiences gained and deep personal friendships developed.*

*Germany and the United States of America conclusively displayed the capability to work effectively together in successfully completing a major space project designed to exploit space for peaceful means.*

Experiment 9:  
Zodiaklicht-Photometer  
*Zodiacal Light Photometer*

Experiment 10:  
Mikrometeoriten-Detektor und Analysator  
*Micrometeorite detector and analyzer*

## Interplanetarer Staub

Wie sieht die solar-interplanetare Staubwolke aus?

Wie entsteht sie?

Ändert sie sich im Laufe der Zeit?

Wie bewegen sich die Staubteilchen?

Woraus bestehen sie?

Wie werden sie von der Sonne beeinflusst?

## *Interplanetary Dust*

*What does the solar-interplanetary dust cloud look like?*

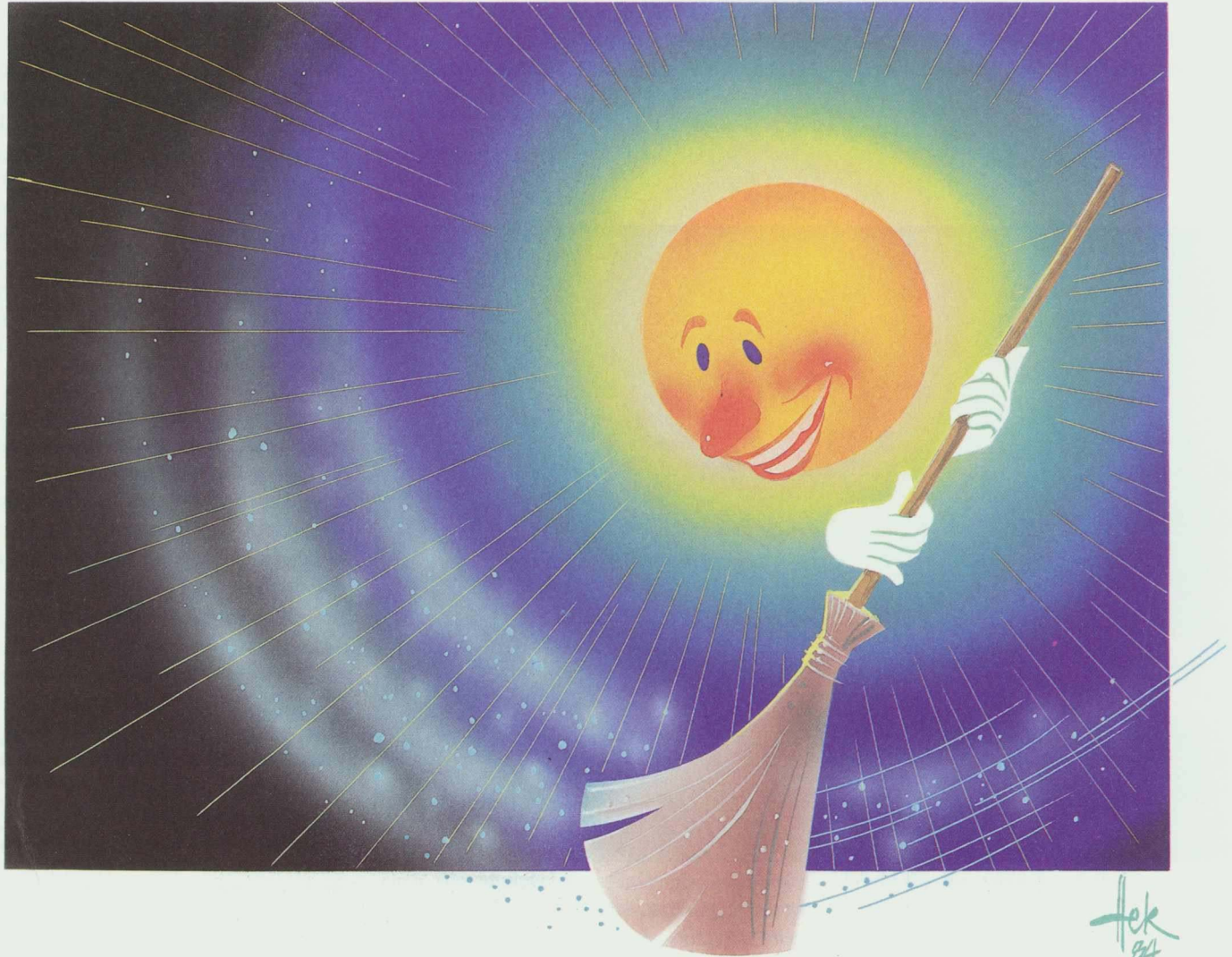
*How did it generate?*

*Does it vary during time?*

*How do the dust particles move?*

*What are they consisting of?*

*How are they influenced by the Sun?*



# Zodiakallicht – ein Abbild der interplanetaren Staubwolke

Christoph Leinert, Eckhart Pitz und Hartmut Link  
Max-Planck-Institut für Astronomie, Heidelberg



Leinert

## Der Blick von der Erde

Das Zodiakallicht ist auch vom Erdboden aus zu sehen, wie die erste Abbildung zeigt. Seine typische kegelförmige Aufhellung, die sich längs der Ekliptik erstreckt (= Erdbahnebene, in der Ab-

bildung durch Mond und Venus markiert), war schon von Cassini, dem Hofastronomen Ludwigs XIV., besprochen worden. In seiner 1683 erschienenen Arbeit wird auch erklärt, weshalb das

*Christoph Leinert, Eckhardt Pitz and Hartmut Link report on their observations of Zodiacal Light, a faint elliptical glow around the sun. The first recorded systematic investigation of this fascinating phenomenon was done by Cassini, the court astronomer of King Louis XIV, in 1683. He gave the explanation of why these lights are seldom to be favorably viewed from high latitudes. He also found a physical meaning for this strange display in the sky which he described as reflections of the sun's rays upon countless minute particles of interplanetary matter. The brightness is an image of the distribution of the particles within the solar system.*

*Today we know that this matter is dust, most of which is in the range of 0.001 to 0.1 mm in size. The particles of dust are so far apart, that only 12 of them occupy a volume of one cubic kilometer! Nevertheless the number of particles in our solar system is very large; some 10 trillion of them taking part in illuminating a 1 degree field of view in figure page 50.*

Das Zodiakallicht, wie es am Abend des 13. Mai 1983 eine Stunde nach Sonnenuntergang vom Gipfel des Mauna Kea (Hawaii, 4200 m) aus über dem Westhorizont zu sehen war. Die untergehende Mondsichel in der Abenddämmerung steht  $19^\circ$  über der Sonne. Venus, an der Spitze des Zodiakallichtkegels, ist  $43^\circ$  von der Sonne entfernt.

*The Zodiacal Light as seen in the evening of May 13, 1983, one hour after sunset from the top of Mauna Kea (Hawaii, 4,200 m) above the western horizon. The setting crescent moon is standing in the evening twilight  $19^\circ$  from the Sun. Venus, at the top of the Zodiacal Light cone, is in a distance of  $43^\circ$  from the sun.*

Ekliptik



○ Sonne

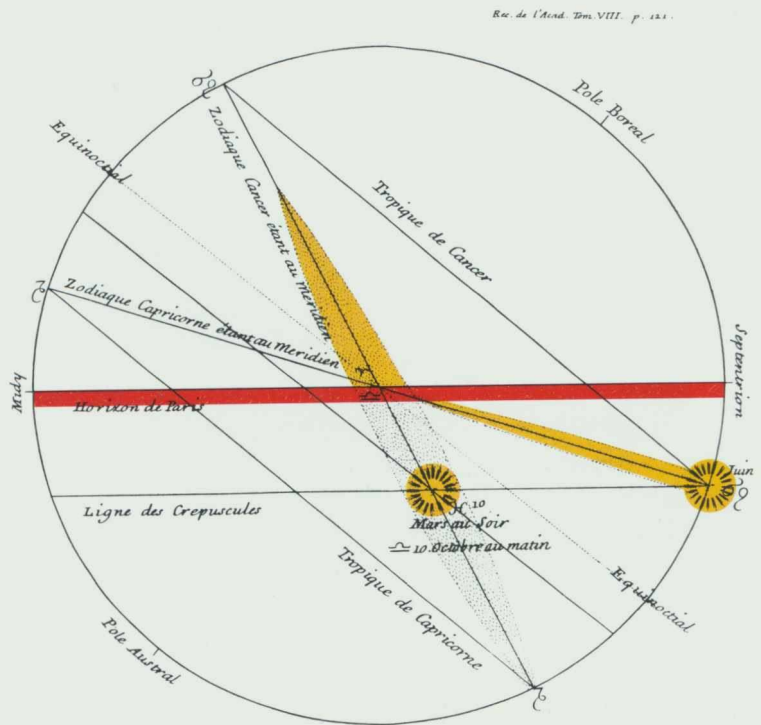
Zodiakallicht in unseren Breiten so schlecht zu sehen ist (Abbildung Seite 51): sinkt die Sonne flach unter den Horizont, wie im Winter und Sommer, dann liegt auch die Ekliptik so flach, daß der helle Teil des Zodiakallichtkegels kaum über den Horizont reicht. Nur im Frühjahr steht abends nach Sonnenuntergang die Ekliptik so steil, daß das Zodiakallicht klar über dem Horizont erscheint, vorausgesetzt, die Luft ist rein und der Himmel wird nicht durch eine nahe Stadt künstlich aufgehellt.

Schon Cassini erkannte, daß das Zodiakallicht durch die Reflexion des Sonnenlichts an zahlreichen kleinen interplanetaren Körpern entsteht und deren Verteilung im Planetensystem widerspiegelt. Wir wissen heute, daß es sich dabei um Staubteilchen handelt, von denen die meisten  $\frac{1}{1000}$  mm bis  $\frac{1}{10}$  mm groß sind. Obwohl ihre Konzentration sehr gering ist, nur etwa ein Dutzend Teilchen pro Kubikkilometer, ist ihre Anzahl im Planetensystem doch beträchtlich: Zur Helligkeit eines  $1^\circ$  großen Gesichtsfeldes in Abbildung Seite 50 tragen etwa  $10^{13}$ , d. h. 10 000 Milliarden Staubteilchen bei.

Zodiakallichtbeobachtungen geben also stets Auskunft über die durchschnittlichen Eigenschaften sehr vieler interplanetarer Staubteilchen in einem großen Volumen. Z. B. läßt sich aus der Abplattung des Zodiakallichtkegels zur Ekliptik hin ableiten, daß die Bahnen der interplanetaren Staubteilchen im Durchschnitt um  $30^\circ$  gegen die Ekliptik geneigt sind, ein Ergebnis, das nur schwer aus Beobachtungen einzelner Staubteilchen zu erhalten wäre. Die einfache Tatsache der Abplattung genügt aber schon festzustellen, daß die hellen „neuen“ Kometen nicht die direkte Quelle des interplanetaren Staubes sein können. Denn ihre Bahnen sind gleichmäßig am Himmel verteilt; sie können keine abgeplattete Staubwolke erzeugen. Damit hat der bloße Blick auf die Erscheinung des Zodiakallichts schon zu einer der wesentlichen Fragen geführt: der nach dem Ursprung des interplanetaren Staubes.

Cassinis Erklärung der Sichtbarkeit des Zodiakallichtes (Entdeckung am 18. März 1683). Gezeigt ist der Blick zum Westhorizont mit Himmelsgewölbe. Die mit „Zodiaque“ bezeichnete schräge Linie durch die Sonne gibt jeweils die Lage der Ekliptik an, rechts für Juni, mehr in der Mitte für März.

*Cassini's explanation of the visibility of the Zodiacal Light (discovery on March 18, 1683). The view to the western horizon with the firmament is shown. The inclined line denoted "Zodiaque" through the sun indicates the respective angular position of the ecliptic, at right for June, closer to the center for March.*



### Die besonderen Möglichkeiten der Raumsonde HELIOS

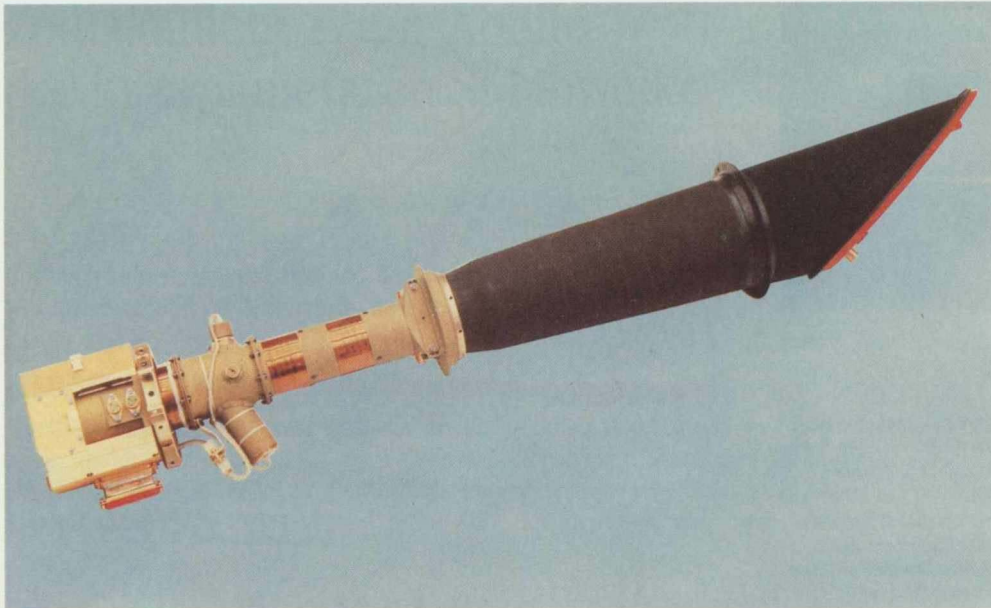
Doch führen hier die Beobachtungen vom Erdboden aus nicht wirklich weiter. Zum Beispiel läßt sich nicht auseinanderhalten, ob die starke Zunahme der Zodiakallichthelligkeit zur Sonne hin daher kommt, daß näher an der Sonne mehr interplanetarer Staub vorhanden ist, oder daher, daß die Staubteilchen das Sonnenlicht unter kleinen Winkeln viel besser reflektieren. Eine Raumsonde wie HELIOS, welche durch die interplanetare Staubwolke hindurchfliegt, kann jedoch durch den Wechsel des Standorts die beiden Effekte trennen und die räumliche Verteilung des Staubes bestimmen.

Die räumliche Verteilung ist aber eine der wesentlichen Informationen über die Herkunft des interplanetaren Staubes. Während die Staubteilchen wie Miniplaneten die Sonne umkreisen, werden sie durch die Sonnenstrahlung, in die sie ständig hineinlaufen, leicht abgebremst, ähnlich

*From the pattern of the Zodiacal Light we are able to determine the most common orbit inclination. Most of the particles run along orbits around the sun which are inclined about  $30^\circ$  to the orbital plane of the earth. This fact leads to the conclusion that the new, young comets which fly through our solar system are not the main source of interplanetary dust. Their orbits cannot account for the flattened shape of the dust cloud. But then, where does this cloud come from?*

### Special Opportunities Offered by the HELIOS Space Probe

*Looking outward from earth it is not possible to tell whether the density of the dust increases toward the sun or whether a deceiving rise in reflective properties makes the particles appear bright in the vicinity of the sun. These two possibilities can be separated by HELIOS when it probes directly through the cloud.*



Eins der drei Kleinfernrohre des Zodiakallichtexperiments auf HELIOS. Die 4 cm große Objektivlinse befindet sich hinter dem in der Mitte herausragenden Ring. Das Bild des Himmels entsteht am vorderen Ende des links sichtbaren viereckigen Teils, der den lichtempfindlichen Fotomultiplier und zugehörige Elektronik enthält. Die Ausstülpungen davor sind ein Motor zum Wechseln von Farbfiltern und eine Eichlampe. Das schwarze Rohr ist eine Blende zur Unterdrückung von störenden Lichtreflexionen am Sondenkörper. Die rote Schutzkappe wird vor dem Start abgenommen.

*One of the small telescopes of the Zodiacal Light experiment on HELIOS. The objective lens (4 cm diameter) is mounted behind the ring protruding in the middle of the telescope. The picture of the sky is generated at the front end of the visible four-cornered part at the left. It contains the light sensitive photomultiplier and the accompanying electronics. The protrusions at the right thereof are a motor to change colour filters and a calibration lamp. The black tube is a diaphragm for the suppression of disturbing light reflexions generated by the spacecraft itself. The red cap is removed prior to launch.*

wie ein Auto, das in einen Regenguß hineinfährt. Dadurch nähern sie sich immer mehr der Sonne, bis sie nach einigen Tausend Jahren ihr so nahe kommen, daß sie verdampfen müssen. Der interplanetare Staub war also nicht wie die Planeten von Beginn des Sonnensystems an dabei, sondern muß dauernd nachgeliefert werden! Aus welcher Quelle der Staub kommt und welchen Veränderungen er während seines langsamen Wegs zur Sonne unterworfen wird, das zeigt sich in der räumlichen Verteilung. Würde er z. B. durch Zusammenstöße von Kleinplaneten im zwischen Mars und Jupiter gelegenen Asteroidengürtel entstehen, so müßte die Dichte zur Sonne hin einfach reziprok zum Abstand zunehmen, so daß bei Halbierung des Abstands sich immer die Teilchenzahl verdoppelt. Eine geringere Zunahme der Teilchenzahl bedeutet, daß viele von ihnen unterwegs von anderen Teilchen bei Zusammenstoßen zertrümmert werden; eine stärkere Zunahme, daß ständig im interplanetaren Raum neue Staubteilchen durch die Zertrümmerung von sogenannten Meteoren oder Meteoriten der Größe von einigen mm oder cm freigesetzt werden. (Diese Meteore verglühen, wenn sie die Erdatmosphäre treffen, als Sternschnuppen). Zum Zodiakallicht tragen die Meteore erst nach

ihrer Zertrümmerung in kleinere Teilchen bei, so wie ein Häufchen Staub am Ende der Straße kaum auszumachen ist, aber sofort sichtbar wird, wenn ein Straßenkehrer es mit seinem Besen aufwirbelt. Da die Zodiakallichthelligkeit der Zahl der Staubteilchen proportional ist, sieht alles ganz einfach aus: wir brauchen nur die Helligkeitszunahme des Zodiakallichts zu messen, wenn HELIOS sich der Sonne nähert, und erhalten schon die räumliche Verteilung des interplanetaren Staubes. Allerdings müssen diese Messungen in Gegenwart der tausend milliardenmal helleren Sonne durchgeführt werden, eine Aufgabe, an der einige der früheren Raumexperimente gescheitert waren. Deshalb haben wir, wie die Abbildungen Seite 52 und Seite 53 zeigen, auf die Unterdrückung des störenden Sonnenlichts sehr großes Gewicht gelegt – mit vollem Erfolg, wie sich zeigte. Dazu mußten wir aber auf Messungen in der Ekliptik verzichten, da dort unsere Fernrohre bei jeder Umdrehung von HELIOS einmal in die Sonne geschaut hätten. Wir beobachteten dafür das Zodiakallicht längs insgesamt sechs zur Ekliptik parallel laufenden Streifen, z. B. bei der ekliptikalen Breite  $-16^\circ$ ; dieser Streifen verläuft in Abbildung Seite 50 senkrecht durch den links sichtbaren hellen gelblichen Stern Beteigeuze im Orion.

*The manner in which the dust is spread out gives clues as to the way it was originally created. The smaller the particle, the greater is the braking force by the sun's rays, causing a reduction in its orbital speed. Thus, it gradually falls closer to the sun. Over thousands of years it spirals inward to the point where it is finally evaporated by the intense heat of the sun. In order that the Zodiacal Light remains constant over a long time, particles must be continuously replenished. Not only can they originate from outside the earth's orbit, for example the asteroid belt, but also there must be micrometeorites generated even within the space between earth and the sun; in fact at the surprising rate of one ton per second. This is made possible by the smashing of larger bodies, meteors. In total, the net density increase of number of particles going toward the sun can be expressed by an exponential function of the distance  $r^{-1.3}$ .*

#### Comets as Sources of Dust

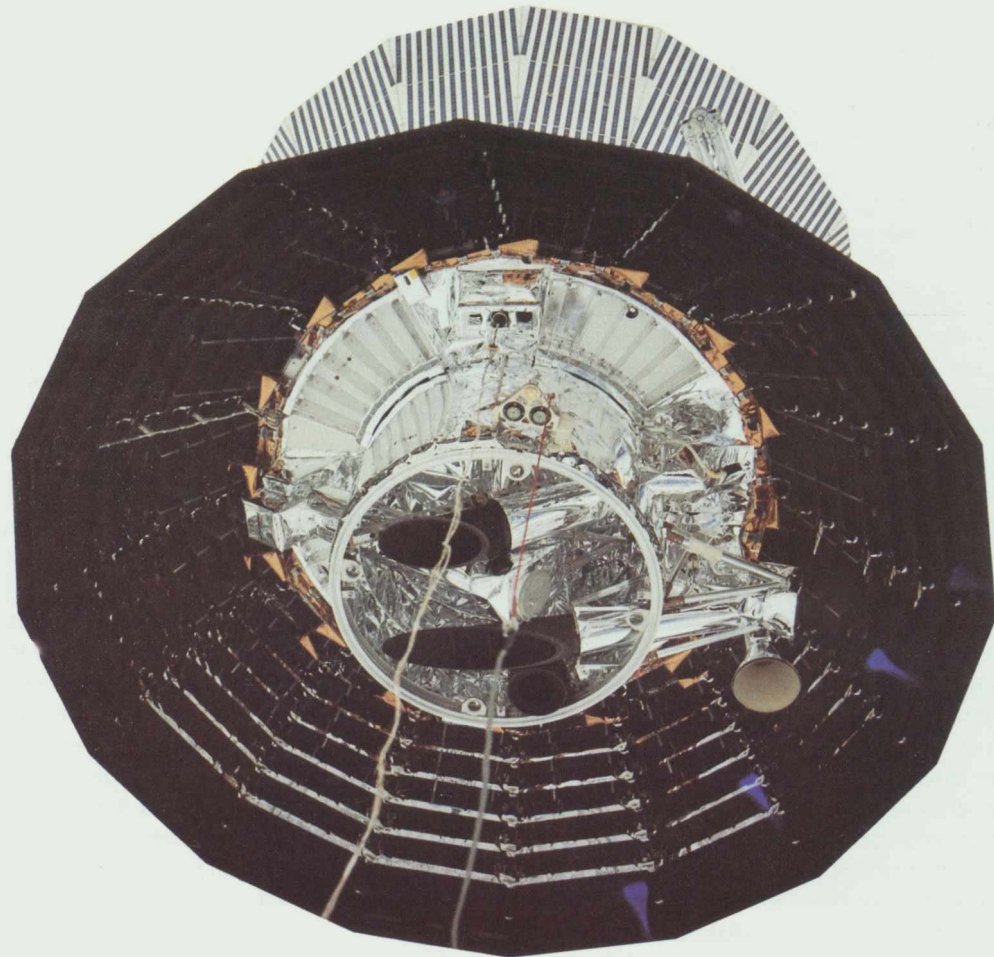
*Most astronomers believe the comets to be the main source of the interplanetary dust. Comets, especially new ones, pour out huge amounts of dust particles (see Comet West). The smaller*

## Dichtezunahme zur Sonne hin

Wenn der interplanetare Staub gleichmäßig im Raum verteilt wäre, müßte die Helligkeit des Zodiaklichts zur Sonne hin um den Faktor  $1/\text{Abstand}$  zunehmen, bis zum Perihel von HELIOS also auf das 3,3fache. Abbildung Seite 54 oben zeigt, daß tatsächlich die Helligkeit viel stärker ansteigt, und zwar auf mehr als das Zehnfache. Die Konzentration des interplanetaren Staubes nimmt also zur Sonne hin zu. Zur genauen Auswertung sind die Meßergebnisse in Abbildung Seite 54 unten getrennt für verschiedene Blickrichtungen in logarithmischem Maßstab aufgetragen. Aus der starken Steigung des Helligkeitsanstiegs folgt, daß die Dichte des interplanetaren Staubes sogar noch stärker als reziprok zum Abstand zunimmt, in einer Formel ausgedrückt, als Potenz des Abstands  $r^{-1,3}$ . Damit wurde diese wichtige Größe zum ersten Mal durch Messungen festgelegt. Das Ergebnis bedeutet, wie oben erwähnt, daß über das ganze Planetensystem hin durch die Zertrümmerung von Meteoriten Staub entstehen muß, davon ein großer Teil, etwa 1 Tonne/sec, innerhalb der Erdbahn. So werden die Verluste durch das Verdampfen von Staubteilchen ständig ausgeglichen.

## Kometen als Quelle des Staubes?

Die Mehrheit der Astronomen hält die Kometen für die eigentliche Quelle des interplanetaren Staubes. Die hellen Schweife, wie bei Komet West in Abbildung Seite 55 oben, zeigen unzweifelhaft, daß die Kometen massenhaft Staubteilchen in den interplanetaren Raum ausschütten. Allerdings werden die kleineren unter diesen Teilchen, getrieben durch die hohe Bahngeschwindigkeit des Kometen und den vor allem auf kleine Teilchen wirkenden Strahlungsdruck der Sonne rasch das Planetensystem wieder verlassen. Außerhalb des Schweifes ist deshalb nicht unbedingt mit einer Anreicherung von Staub in der Kometenbahnebene zu rechnen, und tatsächlich wurde mit dem Zodiakallichtexperiment auch keinerlei Aufhellung beim Blick längs der Bahnebene von Komet West festgestellt. Eher dürfte eine solche Anreicherung in den Bahnen jener Kometen zu finden sein, wel-



che die Sonne schon oft umkreist haben und vielleicht schon zu Schwärmen größerer Teilchen, den sogenannten Meteorströmen, zerfallen sind, von denen die Perseiden, welche die starken Sternschnuppenfälle im August hervorrufen (im Volksmund auch Laurenzitränen genannt), die bekanntesten sind.

Deshalb haben wir in unseren Beobachtungen nach einer Aufhellung durch eine Konzentration von Staubteilchen in einem Meteorstrom gesucht, und zwar in den Quadrantiden, wo sie angeblich ein Drittel der Zodiakallichthelligkeit ausmachen sollte; aber vergeblich, wie Abbildung Seite 55 unten zeigt. Wir verstehen das so, daß von den Kometen zunächst hauptsächlich größere Teilchen, Meteore, im interplanetaren

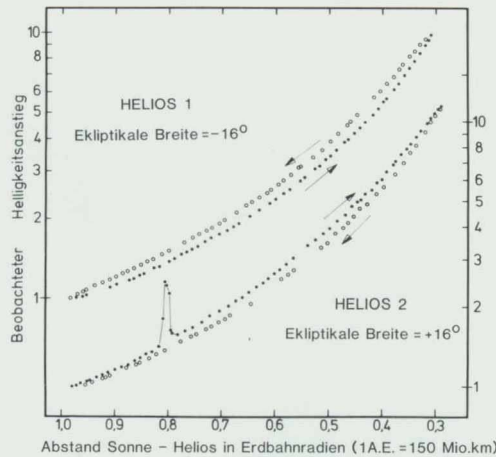
Einbau der Zodiakallichtfotometer (schwarze Blendenrohre) in den unteren Konus der HELIOS-Raumsonde. Nur dadurch, daß sie streng im Schatten gehalten wurden und der meist ein paar cm breit beleuchtete Sondenrand völlig schwarz war, konnte eine Störung der Messungen durch Sonnenlicht vermieden werden.

*The Zodiactal Light photometer (black diaphragm tubes) as integrated in the lower cone of the HELIOS space probe. The experiments are mounted in the shadow of the shielding solar generator, being completely black inside. Thus, the disturbance of measurements by diffracted or reflected sunlight could be avoided.*

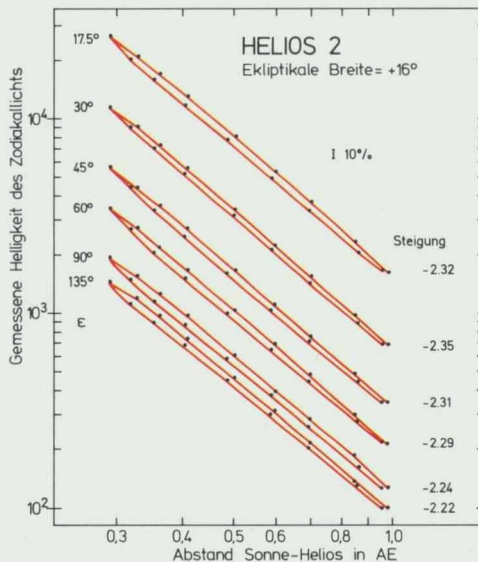
Raum in Umlauf gebracht werden, die dann ein dauerhaftes Reservoir bilden, aus dem ständig durch Zertrümmerung in Stößen Staub nachgeliefert wird. Diese Vorstellung, die auch im Einklang mit der gemessenen Dichtezunahme zur Sonne hin steht, wird durch die Ergebnisse von HELIOS nahegelegt; ob sie wirklich stimmt, können erst zukünftige Messungen zeigen.

### Die Symmetrieebene der Staubverteilung

Die dominierenden Kräfte prägen der interplanetaren Staubwolke ihre Symmetrieebene auf: Wären die Staubteilchen stark elektrisch geladen und neben den von der Sonne ausgehenden Kräften hauptsächlich durch die Wirkung des Sonnenwinds und seines mitgeführten Magnetfelds beeinflusst, so müßte die Symmetrieebene mit dem Sonnenäquator (Neigung  $i = 7,3^\circ$ , Schnittlinie mit Ekliptik  $\Omega = 75^\circ$ ) zusammenfallen. Wäre dagegen die Gravitationswirkung der großen Planeten die wichtigste Zusatzkraft, so ergäbe sich eine ihren Bahnen entsprechende Symmetrieebene mit kleinerer Neigung  $i = 1,6^\circ$ ,  $\Omega = 106^\circ$ . In jedem Fall ist also zu erwarten, daß die Symmetrieebene nicht genau mit der Erdbahnebene (= Ekliptik) zusammenfällt. HELIOS wird sich daher längs seiner in der Ekliptik verlaufenden Bahn teils südlich, teils nördlich der Symmetrieebene des Staubes befinden, so daß die Fernrohre des Zodiakallichtexperiments je nachdem die Symmetrieebene und damit die Gebiete größter Staubbichte miterfassen oder verpassen. Das muß sich in einer Änderung der Helligkeit des Zodiakallichts mit dem Bahnlauf niederschlagen. Tatsächlich zeigt sich in den Abbildungen Seite 54 auch eine Aufspaltung der Kurven in eine Linie für Annäherung an die Sonne und eine Linie für Entfernung von der Sonne. Daraus kann man bereits die Neigung der Symmetrieebene ungefähr abschätzen. Eine genauere Bestimmung wäre möglich, wenn, wie in Abbildung Seite 56 oben gezeigt, HELIOS sich im Bereich der Schnittlinie von Symmetrieebene und Ekliptik befindet. HELIOS steht mit seiner Drehachse senkrecht auf der Ekliptik. Der durch die Blickrichtung des Zodiakallichtexperiments am Himmel überdeckte Kreis ist also parallel zu ihr und geneigt gegen die Symmetrieebene des



Staubes. Wir beobachten somit rechts (westlich) und links (östlich) von der Richtung zur Sonne verschieden nah an der Symmetrieebene und, da in dieser Ebene ja die Staubbkonzentration am größten ist, auch verschiedene Helligkeiten. Könnten wir nur die Drehachse von HELIOS so weit kippen, bis diese Helligkeitsunterschiede verschwinden, dann wüßten wir, daß HELIOS jetzt senkrecht zur Symmetrieebene ausgerichtet ist und hätten deren Neigung bestimmt. Ein Unglücksfall kam uns zu Hilfe: Der Behälter mit Treibgas auf HELIOS wurde gerade im passenden Abschnitt der HELIOS-Bahn leck, und da das Gas



Zunahme der Zodiakallichthelligkeit bei Annäherung von HELIOS 1 und 2 an die Sonne. Die von HELIOS 2 beobachtete Aufhellung bei 0,8 AE. kam durch den - fernen - Vorbeiflug am Kometen West zustande. Die Pfeile zeigen an, in welcher Reihenfolge die Messungen durchgeführt wurden, entsprechend dem Umlauf von HELIOS um die Sonne.

*Increase of the luminosity of the Zodiacal Light during the approach of HELIOS 1 and 2 towards the sun. The peak observed by HELIOS 2 at 0.8 AU was caused by a far flyby of Comet West. The arrows indicate the time sequence of the measurements according to the orbit of HELIOS about the sun.*

*among these particles, however, are driven out of the planetary system due to their high orbital velocity and the solar radiation pressure. They do not contribute appreciably to interplanetary dust. More probable is the particle enrichment along the orbits of periodic comets orbiting the sun many times. Possibly they have released swarms of larger particles, the so-called meteor streams. Nevertheless, the search for a brightening in the Quadrantides meteor stream was not successful. This is understandable under the assumption that only larger particles have survived in that stream. They form a reservoir for smaller particles generated by diffraction. Further measurements are necessary to assure this assumption.*

Helligkeitszunahme des Zodiakallichts für verschiedene Blickrichtungen, in logarithmischem Maßstab aufgetragen. Die Zunahme verläuft in jeder Blickrichtung als Gerade, mit praktisch gleichen Steigungen. Daraus läßt sich ableiten, daß die Dichtezunahme des Staubes in einer solchen Darstellung auch eine Gerade wäre, nur mit einer um 1 kleineren Steigung.  $\epsilon$  ist der Winkel zwischen Sonne und Blickrichtung. Die obere Linie jeder der Haarnadelkurven gehört zum Hinflug von HELIOS zur Sonne, die untere zum Rückflug.

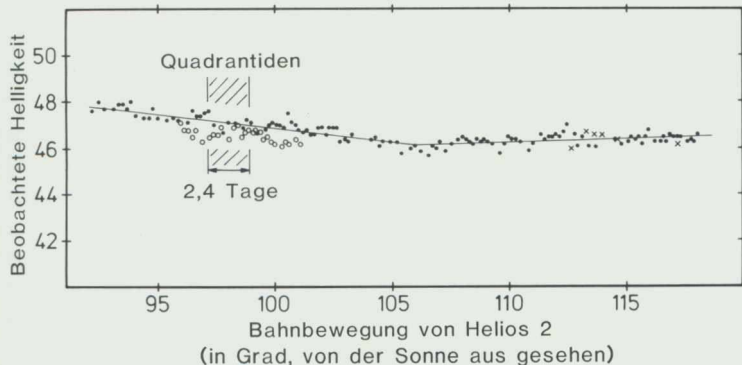
*Increase of the luminosity of the Zodiacal Light for different viewing directions (logarithmic scale). In every direction this increase is an almost straight line, all of them showing an essentially equal gradient. From that one can deduce that the increase of dust density would also be a straight line, but with a gradient which is smaller by 1.  $\epsilon$  is the angle between sun and the viewing direction. The upper line of each curve corresponds to the flight of HELIOS inbound, the lower line to the flight outbound.*



nun sowieso in kontrollierter Weise abgelassen werden mußte, durften wir mit dem Rest die gewünschte Kippung der Drehachse von HELIOS durchführen. Abbildung Seite 56 unten zeigt, wie mit stärker werdender Kippung die Unterschiede der rechts und links der Sonne beobachteten Zodiakallichthelligkeiten abnahmen, verschwanden und schließlich im umgekehrtem Verhältnis wieder auftauchten. Der Winkel, bei dem die Unterschiede verschwanden, ist die Neigung der Symmetrieebene der interplanetaren Staubverteilung, also  $i = 3,0^\circ$ . Mit einem ähnlichen, genauso direkten Verfahren wurde auch der Winkel der Schnittlinie bestimmt,  $\Omega = 87^\circ$ . Die Symmetrieebene des interplanetaren Staubes liegt damit zwischen den Werten, die sich aus magnetischen Kräften bzw. Beeinflussung durch die großen Planeten ergeben würde. Da die kurzperiodischen Kometen, eine wahrscheinliche Quelle des interplanetaren Staubes, im Durchschnitt schon Bahnebenen nahe dieser Symmetrieebene haben, schließen wir daraus, daß die interplanetaren Staubteilchen nicht durch magnetische Effekte, sondern hauptsächlich durch die Gravitationswirkungen der Planeten beeinflusst werden.

### Beständigkeit oder Veränderung?

Vergleicht man Cassinis Beschreibung aus dem 17. Jahrhundert oder die Zeichnung von H. Heis (Abbildung Seite 57 oben) mit der eingangs gezeigten modernen Aufnahme, so scheint über diesen Zeitraum das Zodiakallicht im großen und ganzen sich gleich geblieben zu sein. Über einen viel kürzeren, aber doch einige Jahre überdek-



Komet West am Morgen des 6. März 1976. In den Tagen um dieses Datum durchquerte er auch die Gesichtsfelder des Zodiakallichtexperiments auf HELIOS, wie in Abbildung Seite 54 oben zu sehen. Der helle Schweif besteht aus etwa  $\frac{1}{1000}$  mm großen Staubteilchen. Kometen gelten als die Quelle des interplanetaren Staubes.

*Comet West as seen in the morning of March 6, 1976. In the time period around this date the comet crossed also through the viewing fields of the Zodiacal Light experiment on HELIOS, as is shown in Fig. page 54 top. The bright tail consists of 0.001 mm size dust particles. Comets are supposed to be the source of the interplanetary dust.*

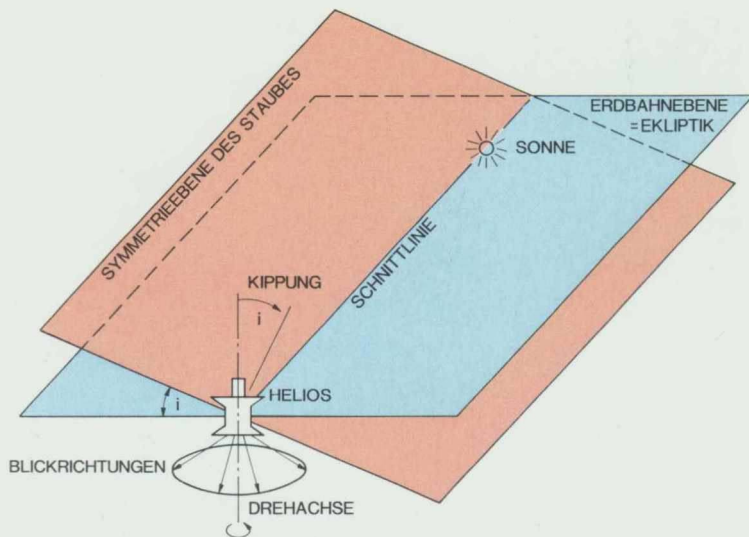
Ergebnislose Suche nach einer Aufhellung durch eine Konzentration kleiner Staubteilchen im Meteorstrom der Quadrantiden. Die Meßergebnisse liegen alle längs der glatt verlaufenden Linie, wegen der notwendig begrenzten Meßgenauigkeit auch ein wenig darüber und darunter. Es war für den Bereich des Meteorstroms eine Aufhellung um 20 Einheiten vorhergesagt worden!



### The Plane of Symmetry of the Dust Distribution

*It was expected that dust particles are affected mainly either by electromagnetic forces, e.g. the solar wind, or by gravitational forces of the planets. In the first case the plane of symmetry would be close to the plane of sun's equator, in the other case close to the average orbit plane of the planets. In both cases it is not identical with earth's orbital plane, the ecliptic. The telescopes of the Zodiacal Light experiment of HELIOS look partly south of the plane of the symmetry, partly north of it as long as the axis of HELIOS is perpendicular to the ecliptic. An accident of HELIOS 2 turned out to be a benefit for the determination of the plane of symmetry. Due to a leakage of the gas tank on board the whole gas content had to be blown off in a controlled*

*Unsuccessful search for a light increase caused by a concentration of small dust particles in the meteor stream called the Quadrantides. All measurement results lie along the smooth line. Small deviations are due to the limited measurement accuracy. But for the region of the meteor stream a straylight increase of about 20 intensity units had been predicted!*



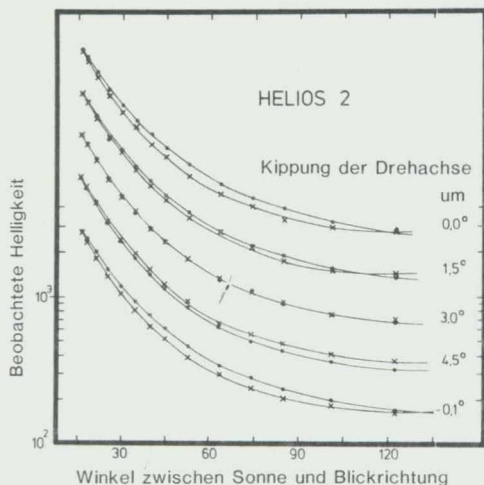
Ausrichtung von HELIOS im Verhältnis zur Symmetrieebene des Staubes, wenn er nahe der Schnittlinie dieser Ebene mit der Ekliptik steht.

*Attitude of HELIOS with respect to the symmetry plane of the dust when standing close to the intersecting line (node) of this plane with the ecliptic.*

kenden Zeitraum liegt nun von HELIOS eine sehr genaue Überprüfung der Konstanz des Zodiakallichts vor. Dabei ergab sich innerhalb von ein, zwei Prozent eine so verblüffende Konstanz der Zodiakallichthelligkeit, daß sie in Abbildung Seite 57 unten selbst einen Vergleich mit den Messungen an dem in Blickrichtung stehenden unveränderlichen Stern Procyon nicht zu scheuen braucht. Nur nahe der Sonne, bei einem Winkelabstand von  $16^\circ$  sieht man eine Zunahme der Helligkeit mit zunehmender Sonnenaktivität. Doch dies ist nicht dem Zodiakallicht zuzuschreiben, sondern gewaltigen von der Sonne ausgesto-

ßenen Plasmawolken. Weitere, noch nicht vollständig ausgewertete Daten zeigen, daß mit abnehmender Sonnenaktivität auch diese Aufhellungen wieder zurückgehen. Damit sind zahlreiche Behauptungen über starke zeitliche Änderungen im Zodiakallicht widerlegt. Die interplanetare Staubwolke ist ein recht stabiles und homogenes Gebilde, in dem kleinräumige Strukturen und zeitlichen Änderungen nur in ganz begrenztem Umfang vorkommen. Im Zusammenhang mit den weiteren Bemühungen, die Herkunft des Staubes zu verstehen, wird man sich auch mit dieser, in den Daten von HELIOS so auffallenden Einfachheit der Verteilung des interplanetaren Staubes befassen müssen.

*manner. This chance was taken to turn the spacecraft axis in a position which was suspected to be perpendicular to the plane of symmetry. In this position the telescopes looked into a cone symmetrical to the dust cloud when scanning the intensity of the zodiacal light. They observed the same intensity on the right (western) and left (eastern) side of the sun, while in all other axis positions these intensities were different. Thus, the inclination of the plane of the symmetry was determined to  $i = 3^\circ$  and the angle of the crossing line of both planes, the ecliptic and the plane of symmetry,  $\Omega = 87^\circ$ . From that result we conclude that the interplanetary dust particles are mainly affected by gravitational forces of the planets and not by electromagnetic influences.*



Bestimmung der Neigung der Symmetrieebene durch Kippung von HELIOS 2. Punkte:

Helligkeit rechts der Sonne (westlich)  
Kreuze:  
Helligkeit links der Sonne (östlich)

Zur besseren Übersicht sind die einzelnen Kurven gegeneinander verschoben eingezeichnet. Der Kippwinkel, der die Rechts-Links-Unterschiede verschwinden läßt, ist gleich der Neigung der Symmetrieebene.

*Determination of the inclination of the symmetry plane by turning of HELIOS 2.*

*Points: brightness right (west) of the sun.*

*Crosses: brightness left (east) of the sun.*

*For a better survey the single curves have been shifted from one another. The turning angle which causes the right-left-differences to disappear, equals the inclination of the symmetry plane.*

#### Constant or Changing Light Intensity?

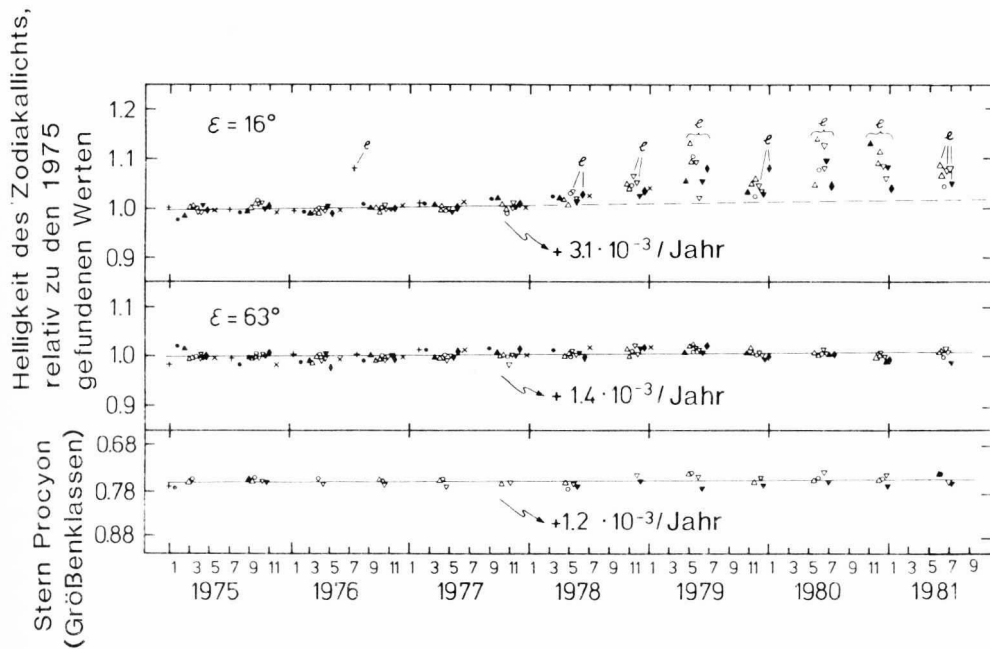
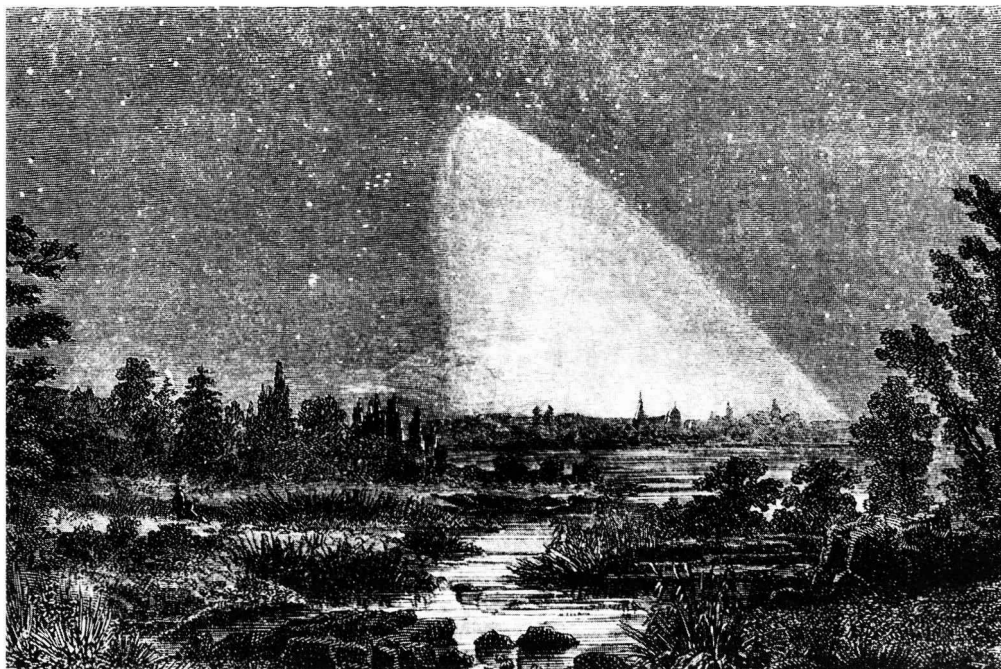
*The comparison of Cassini's description of the zodiacal light with recent observations results in the presumption that not much has changed. Now HELIOS could check very precisely over a time span of several years whether the zodiacal light intensity is constant or not. No variation could be observed within one or two percent. In the  $16^\circ$ -telescope, however, stray light of huge plasma clouds could be seen as an indication of high solar activity during the peak period of the sunspot cycle.*

## Ausblick

Mit den genannten Ergebnissen und einigen weiteren über Farbe und Polarisation des Zodiaklichts, welche die Beschaffenheit der Staubteilchen betreffen, hat das Zodiaklichtexperiment auf HELIOS wesentlich dazu beigetragen, der Diskussion des interplanetaren Staubes ein Fundament solider Beobachtungsdaten zu liefern. Weitere gute Beobachtungen sind wünschenswert; im übrigen haben jetzt Phantasie, Theorie und Erklärung das Wort.

Das Zodiaklicht über der Stadt Münster, nach einer Zeichnung von H. Heis, um 1850.

*The Zodiacal Light above the city of Münster, from a drawing of H. Heis, about 1850.*



Konstanz der Zodiakallichthelligkeit vom Minimum (1975/76) bis zum Maximum (1979/80) des Sonnenfleckenzyklus. „e“ bedeutet Aufhellung durch von der Sonne ausgeschleuderte Wolken von Elektronen und Protonen.  $\epsilon$  ist der Winkel zwischen Sonne und Blickrichtung. Ein Skalenteil entspricht einer Änderung um 10%.

*Constancy of the Zodiacal Light brightness between the minimum (1975/76) and the maximum (1979/80) of the sunspot cycle. „e“ means an increase in brightness by clouds of electrons and protons ejected by the sun.  $\epsilon$  is the angle between the sun and the viewing direction. One length of scale corresponds to a change of 10%.*

# Das Mikrometeoritenexperiment auf HELIOS

Eberhard Grün, Hugo Fechtig und Jochen Kissel  
Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg

## 1. Einleitung

Die ersten direkten Messungen von interplanetaren Staubteilchen (Mikrometeoriten) zu Beginn des Raumfahrtzeitalters dienten der Klärung der Frage einer Gefährdung von unbemannten und bemannten Raummissionen durch Meteoritenbeschuß. Frühe Untersuchungen ergaben zum Teil beängstigend hohe Teilchenflüsse, die sich jedoch nach Verbesserung der Nachweismethoden für Staubteilchen als Fehlmessungen herausstellten, so daß keine wesentliche Gefahr für die Raumfahrt durch Meteoriten besteht.

Bereits viel früher hatte man Kenntnis von der Existenz interplanetarer Staubteilchen aus Zodiakallichtbeobachtungen. Solche Beobachtungen lieferte insbesondere die großräumige Verteilung der interplanetaren Staubwolke mit hoher Zuverlässigkeit. Aus der Verteilung von Mikrokratern auf Mondsteinen konnte die Größenverteilung interplanetarer Staubteilchen ermittelt werden. Will man jedoch Aussagen über die Bahnen, die chemischen und physikalischen Eigenschaften interplanetarer Partikel erhalten, so müssen andere Messungen durchgeführt werden, wie sie zum ersten Mal mit dem HELIOS Mikrometeoritenexperiment im inneren Sonnensystem gemacht wurden.

Die Wolke interplanetarer Staubteilchen ist keine statische Erscheinung, sondern ist ständigen Veränderungen unterworfen. Zusammenstöße untereinander zerkleinern die Teilchen immer weiter, bis der Strahlungsdruck der Sonne ihre Bahnen langsam soweit verändert, daß sie schließlich in der Nähe der Sonne verdampfen. Winzige Teilchen, von wenigen Tausendstel Milli-



Grün



Fechtig



Kissel

meter Durchmesser, werden vom Strahlungsdruck gar aus dem Sonnensystem herausgeblasen.

Die Quelle der interplanetaren Staubteilchen wurde schon früh in den Kometen vermutet. Kometen setzen, als Staubschweif sichtbar, große Mengen von Staubteilchen im inneren Sonnensystem frei. Die Ähnlichkeit der Bahnen von einigen Meteoriten, das sind cm-große Partikel, die beim Eintritt in die Erdatmosphäre verglühen, mit Bahnen von bekannten Kometen ist ein weiterer Hinweis auf den ursächlichen Zusammenhang zwischen Kometen und Mikrometeoriten. Der Untersuchung dieser Prozesse durch die Bestimmung der Bahnen und der physikalischen und chemischen Eigenschaften von interplanetaren Staubteilchen ist das Mikrometeoritenexperiment auf den HELIOS Raumsonden gewidmet.

## 2. Funktionsweise

Das Mikrometeoritenexperiment an Bord der HELIOS-Raumsonden besteht aus zwei Sensoren und einer gemeinsamen Datenaufbereitungsanlage. Abb. Seite 59 oben zeigt einen schematischen Querschnitt von HELIOS mit dem Einbau der zwei Sensoren. Das Gesichtsfeld der Ekliptik-Sensoren (sowohl von HELIOS 1 als auch von HELIOS 2) überstreicht während einer Spindrehung die Ekliptik. Während jeder Umdrehung der Raumsonde sieht dieser Sensor einmal die Sonne. Zum Schutz gegen direkte Sonneneinstrahlung und den Sonnenwind wurde der Ekliptik-

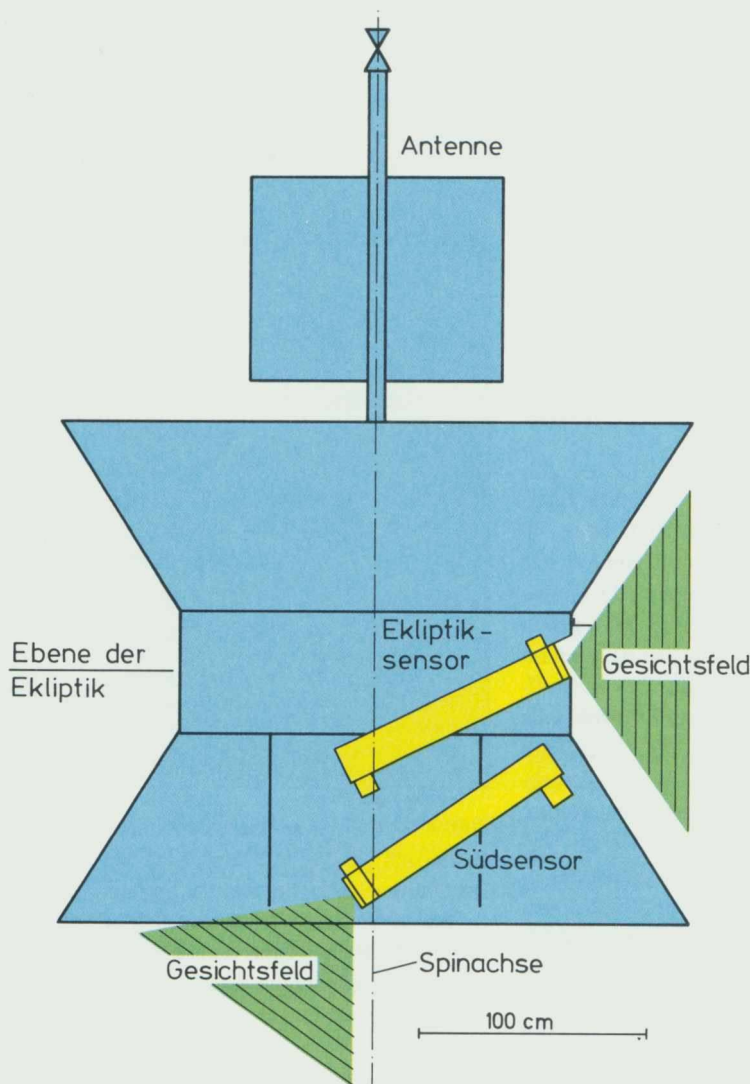
*Eberhard Grün, Hugo Fechtig and Jochen Kissel report on direct observations of dust particles (micrometeorites) by means of HELIOS in the inner solar system. One of the two sensors in each of the two space probes is looking approximately in the direction of the ecliptic plane, the other is tilted to the south (HELIOS 1) resp. to the north (HELIOS 2). To prevent the sunlight and the solar wind penetrating into the ecliptic sensor, it is covered by a thin metalized and therefore opaque plastic foil. The north resp. south sensor is shielded from sunlight by spacecraft's rim. Three main parts together form the experimental device: the protective cover against solar wind and solar radiation (the plastic foil of the ecliptic sensor), the impact ionization detector and the flighttime mass spectrometer. The whole device is supplemented by the electronics, directly mounted at the sensor. The experiment was calibrated by means of dust particle accelerators for several kinds of dust particles in the mass range  $10^{-15}$  grams to  $10^{-9}$  grams and in the velocity region 2 km/sec to 50 km/sec.*

## Impact Rate

*During the mission several hundred micrometeorites have been registered by the detectors on each of the two space probes. The impact rate was up to 10 times higher near the sun than near the earth orbit. However, there are large differences between the ecliptic sensors and the north and the south sensor, respectively. While the tilted sensors register a mono-*

tik-Sensor mit einer dünnen, undurchsichtigen und metallisierten Kunststoffolie bedeckt. Der Süd-Sensor (HELIOS 1) bzw. der Nord-Sensor (HELIOS 2) wird durch den Rand des Raumfahrzeuges vom direkten Sonnenlicht abgeschirmt und hat deshalb nur einen Schutz gegen den Sonnenwind. Der Querschnitt eines Sensors (Ekliptik-Sensor) ist in Abb. Seite 59 unten gezeigt. Er besteht aus drei Hauptteilen: der Schutzeinrichtung gegen Sonnenwind und -strahlung (hier die Eintrittsfolie), dem Einschlags-Ionisierungsdetektor und dem Flugzeit-Massenspektrometer. Vorverstärker und Spannungsversorgungselektronik sind direkt am Sensor befestigt.

Der Einschlags-Ionisierungsdetektor besteht aus einer jalousieförmigen Prallplatte und verschiedenen Gittern, die elektrisch vorgespannt sind und an denen die beim Einschlag entstehende Ladung registriert wird. Aus diesen Ladungssignalen kann die Masse und Geschwindigkeit der auftreffenden Staubteilchen bestimmt werden. Ein Teil der beim Einschlag entstehenden Ionen wird durch elektrische Felder ins Innere des Flugzeit-Massenspektrometers gezogen. Am Ionen-Detektor wird schließlich das Massenspektrum der beim Einschlag erzeugten Ionen registriert, das Hinweise auf die chemische Zusammensetzung der Projektile gibt. Das Experiment wurde mit Hilfe von Staubbeschleunigern im Massenbereich  $10^{-15}$  g bis  $10^{-9}$  g und im Geschwindigkeitsbereich 2 km/s bis 50 km/s für verschiedene Projektilmaterialien geeicht.



Schematische Darstellung des HELIOS 1-Raumfahrzeuges mit dem Einbau der beiden Sensoren des Mikrometeoritenexperimentes. Die Drallachse steht senkrecht auf der Bahnebene (Ekliptik). Die Antenne von HELIOS 1 zeigt zum ekliptischen Nordpol, während die von HELIOS 2 zum Südpol zeigt.

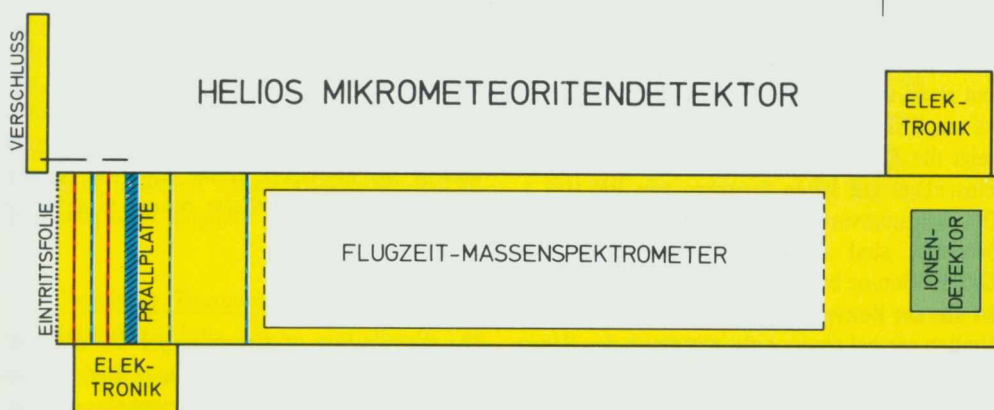
*Sketch of the HELIOS 1 spacecraft showing the mounting of the two sensors of the micrometeorite experiment. The spin axis is perpendicular to the orbit plane (ecliptic plane). The antenna of HELIOS 1 is pointing toward the elliptical north pole, that of HELIOS 2 toward the south pole.*

beim Einschlag entstanden positiven Ionen wird von einem Ionendetektor am Ende der 80 cm langen Flugzeitstrecke gemessen.

*Cross section of the ecliptic sensor. Micrometeorites impact on a lower-like target plate (thin, gold-plated metal sheet) after having passed the sunlight shielding entrance foil. The impact-generated chargings are measured by means of a grid in front of (negative charge) and behind (positive charge) the target plate. A time-of-flight mass spectrum of the impact-generated positive ions is measured by an ion detector at the end of the 80 cm long time-of-flight distance.*

Querschnitt durch den Ekliptik-Sensor. Mikrometeorite schlagen auf eine jalousieförmige Prallplatte (dünnes, vergoldetes Blech) auf, nachdem sie die Eintrittsfolie zum Schutz gegen die Sonnenstrahlung passiert haben. Die beim Einschlag entstehenden Ladungen werden an einem Gitter vor (negative Einschlagsladung) und hinter (positive Einschlagsladung) der Prallplatte gemessen. Ein Flugzeit-Massenspektrum der

## HELIOS MIKROMETEORITENDETEKTOR



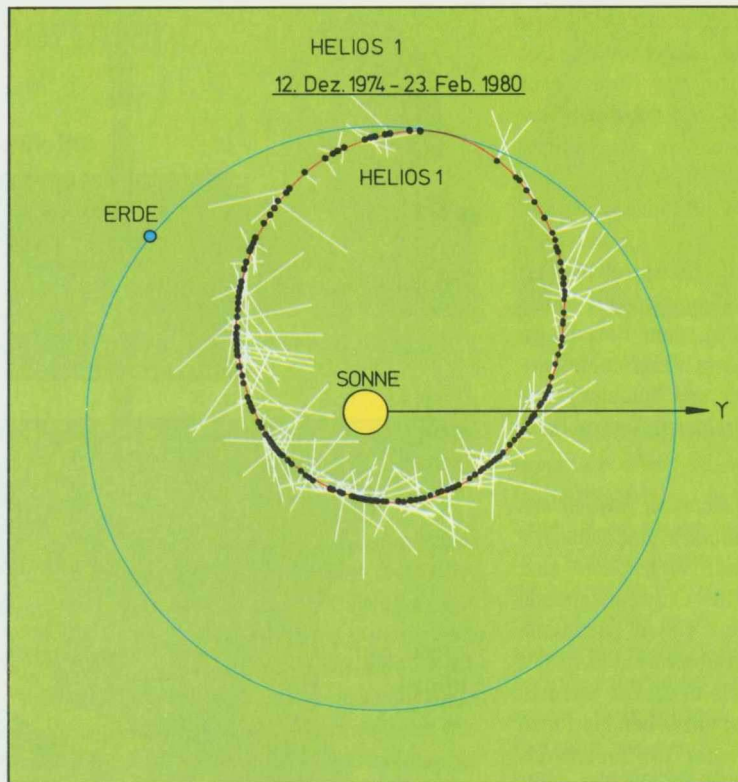
### 3. Ergebnisse

Im folgenden werden die mit dem Mikrometeoritenexperiment auf HELIOS gewonnenen Hauptergebnisse diskutiert. Dies sind die Messung der Auftreffrate von Staubteilchen auf die Sensoren des Experimentes, die Bestimmung ihrer Bahnen und die Ermittlung der chemischen und physikalischen Eigenschaften von Mikrometeoriten.

#### 3.1. Auftreffrate

Mehrere hundert Auftreffer von Mikrometeoriten auf das Experiment wurden im Lauf der HELIOS-Mission registriert.

Einige der gemessenen Eigenschaften dieser Auftreffer auf HELIOS 1 sind in Abb. Seite 60 dargestellt. HELIOS umfliegt, von Norden her gesehen, entgegen dem Uhrzeigersinn die Sonne. Die dicken Punkte auf der HELIOS-Bahn geben den Ort wieder, an dem sich HELIOS 1 zum Zeitpunkt des Einschlags befand. Die Auftreffhäufigkeit ist in Sonnennähe deutlich erhöht. In Sonnennähe wurde eine bis zu 10fach erhöhte Einschlagsrate gegenüber dem Wert in Erdabstand beobachtet. Der radiale Verlauf der gemessenen Einschlagsraten von Teilchen auf die verschiedenen Sensoren ist deutlich unterschiedlich. Während die Ekliptik-Sensoren innerhalb 0,6 AE einen flachen oder gar nach innen abfallenden Verlauf der Einschlagsrate registrierten, ist der Verlauf des Teilchenflusses, den die Süd- bzw. Nord-Sensoren beobachteten, zur Sonne hin weiter monoton ansteigend. Die Blickrichtung der Sensoren zum Zeitpunkt des Einschlags ist in Abb. Seite 60 durch die anhängenden Striche gekennzeichnet. Die Strichlänge repräsentiert die gemessene Meteoritenmasse. Die beobachteten Massen variieren zwischen  $10^{-16}$  g und  $10^{-7}$  g, das entspricht Staubkorngrößen von ca. 0,0001 mm bis 0,1 mm. Für die Auftreffgeschwindigkeiten wurden Werte zwischen 2 km/s und 50 km/s gemessen, wobei für die vom Ekliptik-Sensor registrierten Teilchen die Auftreffgeschwindigkeit von ungefähr 7 km/s in Erdabstand auf 23 km/s in Sonnennähe anwächst. Die vom Süd- bzw. Nord-Sensor gemessenen Teilchen zeigen keine so ausgeprägte radiale Geschwin-



Einschläge, die während der ersten zehn Umläufe von HELIOS 1 um die Sonne registriert wurden. Die dicken Punkte auf der HELIOS-Bahn markieren den Ort, die anhängenden Striche, die auf die Ekliptik projizierte Richtung der Sensorachse zum Zeitpunkt des Einschlags. Die Strichlänge repräsentiert die gemessene Teilchenmasse.

*Impacts which were detected during the first ten orbits of HELIOS 1. The dots on the HELIOS orbit mark the place, the attached lines the direction of the sensor axis projected on the ecliptic plane, at the impact time. The lengths of the lines represent the measured particle mass.*

digkeitsverteilung, sondern schwanken nur unsystematisch um den mittleren Wert von 15 km/s. Der unterschiedliche radiale Verlauf der Auftreffraten und der Geschwindigkeiten bei den verschiedenen Sensoren deutet auf die Zugehörigkeit der Teilchen zu verschiedenen Teilchenklassen hin.

#### 3.2. Teilchenbahnen

Während einer Spindrehung überstreichen beide Sensoren auf den HELIOS Raumfahrzeugen einen vollen Kreis ungefähr in der Bahnebene von HELIOS, der Ekliptik. Abb. Seite 61 oben zeigt die Richtungsverteilung der beobachteten Einschläge auf beide Sensoren von HELIOS 1. Die Richtungsverteilungen für die verschiedenen Sensoren sind deutlich unterschiedlich. Der Ekliptik-Sensor beobachtete die meisten Auftreffer aus der Bewegungsrichtung von HELIOS ( $0^\circ$ ), ähnlich wie bei einem Auto, das durch den Regen fährt und bei dem die meisten Tropfen auf die Vorderfront auftreffen, d. h. diese Teilchen waren

*tonic increase toward the sun, the ecliptic sensors show a flat or even decreasing slope of the impact rate. The observed particle masses vary between  $10^{-16}$  grams and  $10^{-7}$  grams. This relates to dust particle sizes of .0001 mm to 0.1 mm. The impact velocities have been measured between 2 km/sec and 50 km/sec. At the ecliptic sensor the impact velocity increases from about 7 km/sec at earth distance to 23 km/sec close to the sun. The particles observed by the tilted sensor do not show a distinct radial velocity distribution, but vary unsystematically about an average of 15 km/sec. The different radial gradient of the impact rates and of the velocities at the different sensors indicate that the particles belong to different particle classes.*

#### Particle Orbits

*The distribution of directions for the different sensors is rather different. The ecliptic sensor observed the most impacts of particles imping-*

langsamer als HELIOS. Am Süd-Sensor dagegen wurden auch viele Teilchen registriert, die HELIOS überholten ( $180^\circ$ ). Die meisten Teilchen trafen jedoch ungefähr aus Sonnenrichtung ( $90^\circ$ ) auf den Süd-Sensor auf.

Aus diesem Ergebnis wird geschlossen, daß viele der Teilchen, die vom Süd-Sensor beobachtet wurden, sich auf Bahnen bewegten, die aus dem Sonnensystem herausführten. Ein weiterer Hinweis auf solche hyperbolischen Teilchenbahnen sind die Teilchen, die im sonnennächsten Teil der HELIOS-Bahn das Raumfahrzeug überholten. Einige solche Teilchen wurden beobachtet. Hätte HELIOS sie nicht aufgehalten, hätten die meisten von ihnen das Sonnensystem verlassen.

Für jedes von HELIOS gemessene Teilchen konnte die wahrscheinlichste Bahn bestimmt werden, auf der es sich bewegt hatte, bevor es auf HELIOS auftraf. Abb. Seite 61 unten zeigt die Verteilung der reziproken großen Halbachse  $1/a$  von beobachteten Mikrometeoriten für die beiden Sensoren. Große  $1/a$ -Werte, wie sie insbesondere für die Teilchen am Ekliptik-Sensor registriert wurden, bedeuten, daß diese Meteoriten Bahnen um die Sonne durchlaufen, auf denen sie sich nicht allzu weit von der Sonne entfernen. Das können Kreisbahnen sein oder Ellipsenbahnen mit kleiner Exzentrizität. Kleine  $1/a$ -Werte deuten auf Bahnen hin, die weit ins äußere Sonnensystem hinausreichten. Darüber hinaus wurden mit dem Süd-Sensor deutlich mehr Teilchen beobachtet, die sich auf hyperbolischen Bahnen bewegten. Solche Meteoriten müssen entweder kürzlich im Sonnensystem entstanden sein – sei es bei einem Zusammenstoß größerer Meteoriten, sei es dadurch, daß sie von einem Kometen abdampften –, oder, aus dem interstellaren Raum kommend, sich auf dem Durchflug durch unser Sonnensystem befanden. Die Entscheidung zwischen diesen Alternativen ist gegenwärtig nicht möglich.

### 3.3. Chemische Zusammensetzung und Dichte von Mikrometeoriten

Die Analyse der im Flug registrierten Massenspektren erlaubt eine Einteilung der Teilchen in

zwei deutlich voneinander chemisch verschiedene Klassen:

1. in chondritische Teilchen, die den häufigen Steinmeteoriten entsprechen, und die aus verschiedenen Silikaten bestehen. Spektren dieser Teilchen zeichnen sich durch den Hauptanteil ihrer Ionen im Bereich 20 bis 30 u aus, die von Silizium, Magnesium und Natrium herrühren (vgl. Abb. a, c Seite 62).

2. in eisenreiche Teilchen, die den Eisenmeteoriten ähnlich sind. In diesen Spektren ist zwar häufig die Linie bei 40 u am größten, die von geringen Beimengungen von Calcium und Kalium herrührt, jedoch ist der Massenbereich 50 bis 70 u, der Eisen enthält, deutlich gegenüber dem Massenbereich 20 bis 30 u verstärkt (vgl. Abb. b Seite 62 und d Seite 63).

In dieser Abbildung werden theoretische und im Labor gewonnene Massenspektren dieser beiden

Verteilung der reziproken großen Halbachsen  $1/a$  der Bahnellipsen für zwei Teilchenklassen:

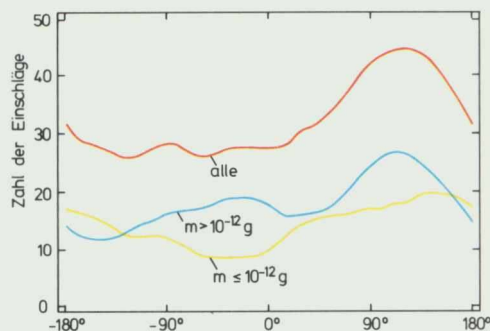
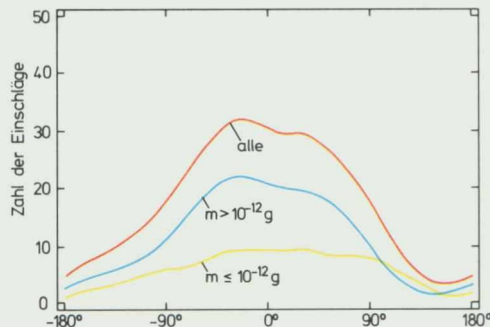
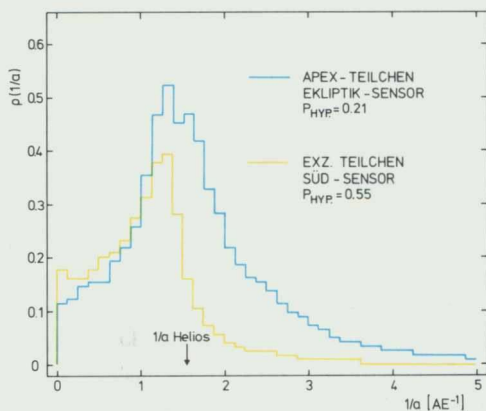
„Apex“-Teilchen, das sind Meteoriten, die aus der Flugrichtung von HELIOS einfielen, und die hauptsächlich vom Ekliptik-Sensor registriert wurden, und „exzentrische“ Teilchen, die sich auf hochelliptischen Bahnen befanden und die ausschließlich vom Süd-Sensor beobachtet wurden.

*Distribution of the reciprocal major semiaxis  $1/a$  of the orbit ellipses for two particle classes:*

“Apex” – particles are meteorites impinging from the flight direction of HELIOS, mainly registered by the ecliptic sensor.

“Excentrial” particles having moved on highly elliptical orbits were exclusively observed by the south sensor.

HELIOS 1

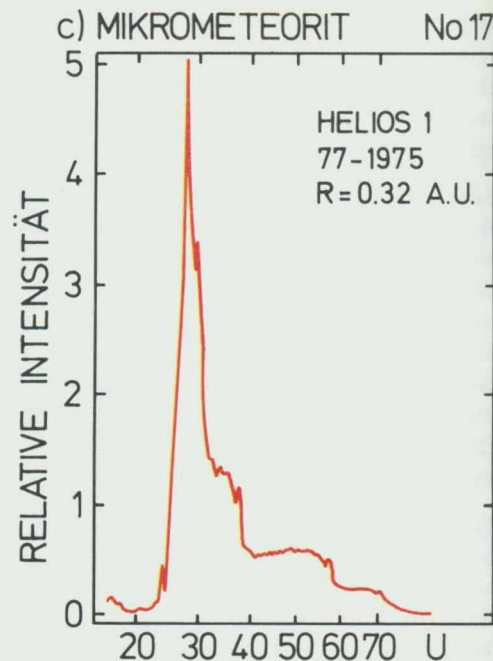
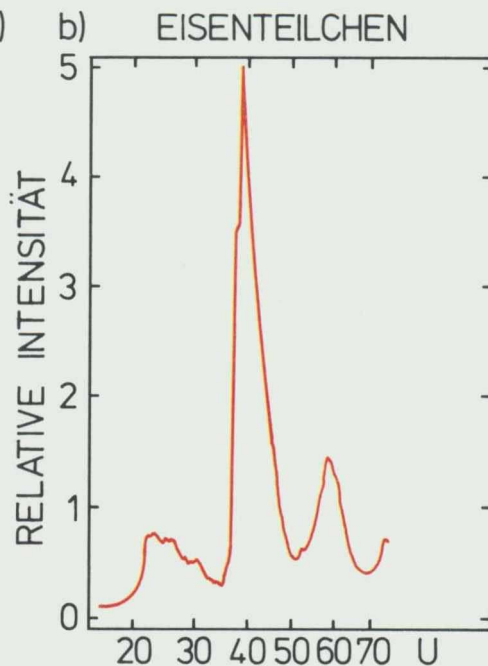
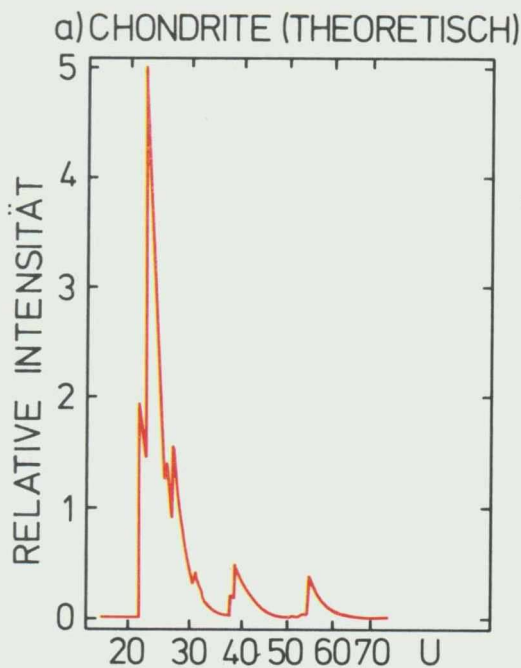


Richtungsverteilung der Einschläge, die von den Sensoren des HELIOS 1-Mikrometeoritenexperimenten beobachtet wurden. Die Flugrichtung von HELIOS entspricht  $0^\circ$ , Sonnenrichtung ist  $90^\circ$ . Oberes Bild: Ekliptik-Sensor, unteres Bild: Süd-Sensor.

*Distribution of impact directions as observed by the sensors of HELIOS 1 micrometeorite experiment. The flight direction of HELIOS relates to  $0^\circ$ , the solar direction is  $90^\circ$ . Upper figure: ecliptic sensor, lower figure: south sensor.*

ing from the flight direction of HELIOS ( $0^\circ$ ). These particles are considered to have had a lower orbital velocity than HELIOS. The south sensor of HELIOS 1 registered also numerous particles which surpassed HELIOS ( $180^\circ$ ). Most particles impacting on the south sensor approximately arrived from solar direction.

These results allow the conclusion that many particles run on hyperbolic orbits aiming out of the solar system. Such particles have either recently been generated in the solar system, e.g. by evaporating from a comet, or, coming from interplanetary space they are penetrating through the solar system. However, the measurements do not allow to decide between these alternatives.



Teilchentypen mit im Flug gewonnenen Spektren verglichen.

Eine Korrelation der chemisch verschiedenen Klassen mit den verschiedenen Bahntypen der Teilchen wurde bisher nicht gefunden.

Messungen mit dem HELIOS Mikrometeoritenexperiment erlauben es, Aussagen über die Materialdichte von interplanetaren Staubteilchen zu machen. Ein Vergleich der Staub-Zählraten an den beiden Sensoren, von denen der eine mit einer dünnen Folie bedeckt ist, zeigt, daß an diesem Sensor deutlich weniger Mikrometeoriten registriert wurden als an dem anderen.

Darüber hinaus wurden am Süd-Sensor zusätzliche Teilchen registriert, die sich auf hochelliptischen, oder hyperbolischen Bahnen befanden, und die mit dem Ekliptik-Sensor nicht beobachtet wurden. Die Massen und Geschwindigkeiten der zusätzlichen Teilchen, die an dem offenen Sensor (Süd-Sensor) gemessen wurden, hätten ausreichen müssen, die Folie zu durchschlagen, wenn diese Teilchen Materialdichten im „normalen“ Bereich ( $1-8 \text{ g/cm}^3$ ) und größer gehabt hätten. Dieses Verhalten war zuvor im

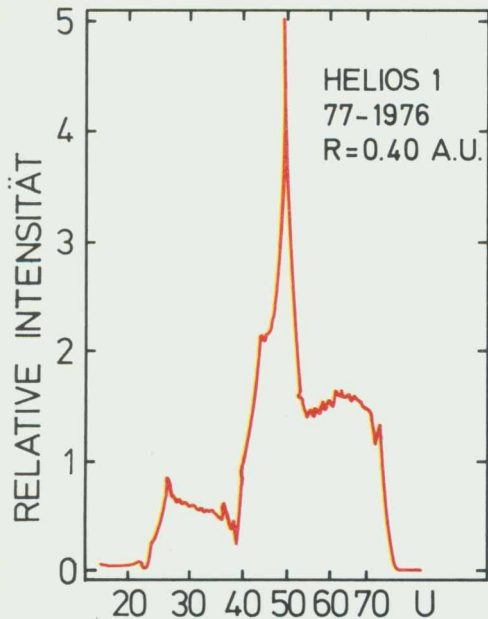
Labor untersucht worden, und es wurde gefunden, daß Teilchen von gleicher Masse und Geschwindigkeit aber geringerer Dichte die Folie nicht mehr durchdringen können. Diese Eigenschaft läßt nun den Schluß zu, daß Teilchen, die denen ähnlich sind, wie sie am offenen Sensor registriert wurden, aber nicht an dem mit der Folie bedeckten Sensor nachgewiesen werden konnten, eine geringe Materialdichte  $<1 \text{ g/cm}^3$  haben müssen. Man stellt sich diese Teilchen als flockige Konglomerate noch kleinerer Teilchen vor. Durch eine solche Struktur erhalten diese Teilchen eine kleine „effektive“ Dichte, obwohl sie aus Bausteinen normaler Dichte aufgebaut sind.

Insbesondere für Teilchen, die sich auf stark elliptischen Bahnen bewegten, wurden geringe Dichten gefunden. Dieser Befund legt die Vermutung nahe, daß dies „junge“ Teilchen sind, die erst kürzlich von einem Kometen ausgestoßen wurden, und die noch nicht durch die rauhe Umwelt des Weltraums (Zusammenstöße mit anderen Staubteilchen und Hitze der Sonnenstrahlung) zu normalen Dichten zusammengebacken sind. Der Bezug zu den Kometen ergibt sich aus

den hochelliptischen Bahnen, die diese Himmelskörper ebenfalls aufweisen. Dagegen sind die hauptsächlich an den Ekliptik-Sensoren registrierten Staubteilchen höherer Dichten „alte“ Teilchen, deren Bahnen sich durch den Einfluß des Strahlungsdrucks von der Sonne verändert haben und die mittlerweile kreisähnlicher geworden sind.



d) MIKROMETEORIT No 71



Einschlags-Massen-  
spektren

a) berechnetes Spektrum  
eines chondritischen Mi-  
krometeoriten

b) Mittelwert aller bei der  
Eichung mit Eisenteilchen  
beobachteten Spektren

c) „chondritischer“ Mikro-  
meteorit Nr. 17

d) „eisenreicher“ Mikro-  
meteorit Nr. 71

Impact mass spectra

a) calculated spectrum of  
chondritic micrometeor-  
ites.

b) Mean values of all  
spectra, observed during  
the calibration with ion  
particles.

c) "Chondritic" micro-  
meteorite no. 17

d) "Iron-rich" micro-  
meteorite no. 71

Chemical Composition and Density  
of Micrometeorites

The observed particles may be divided in two different classes:

1. Chondritic particles, relating to the more frequent stone meteorites. They mainly consist of silicates. In their mass spectra ions in the region 20 to 30 u are predominant, originating from Silicon, Magnesium and Sodium.

2. Iron-rich particles, similar to iron meteorites. Although in their mass spectra the line at 40 u is often predominant, caused by minor admixtures of Calcium and Potassium, the mass region of 50 to 70 u, containing Iron, is rather enhanced compared to the mass region of 20 to 30 u.

A correlation of the chemically different classes with the different orbit types has not yet been found.

The comparison of the different counting rates of the ecliptic sensor and of the tilted sensor allows for conclusions regarding the density of matter of the interplanetary dust particles. Very small particles hardly can penetrate the foil in front of the ecliptic sensor, especially if their density was lower. In the lab such very small particles could be registered as long as their density was in the „normal“ region ( $1-8 \text{ gr/cm}^3$ ), but no longer, if their density was lower. Into the tilted sensor even particles of low density can freely penetrate. They appear to be fluffy conglomerates of even smaller particles.

For particles in hyperbolic or strongly elliptical orbits, especially, low densities have been found. Probably these are "young" particles, recently ejected from a comet, not yet baked together to normal densities. In the contrary, dust particles of higher densities found by the ecliptic sensors are "old" particles.

Experiment 1:

Plasmatdetektor und -analysator  
*Plasma Detector and Analyzer*

Experimente 2 und 3:

Förstersonden-Magnetometer  
*Flux Gate Magnetometers*

Experiment 4:

Induktionsspulen-Magnetometer  
*Search Coil Magnetometer*

Experiment 5:

Plasma- und Radiowellenspektrometer  
*Plasma and Radio Wave Spectrometer*

## Der Sonnenwind

Was versteht man unter Sonnenwind?

Welche Struktur hat die solare Plasmasphäre?

Spielen solare Störungen für die Dynamik des Sonnenwinds eine Rolle?

Welche Bedeutung haben Schwingungen und Wellen?

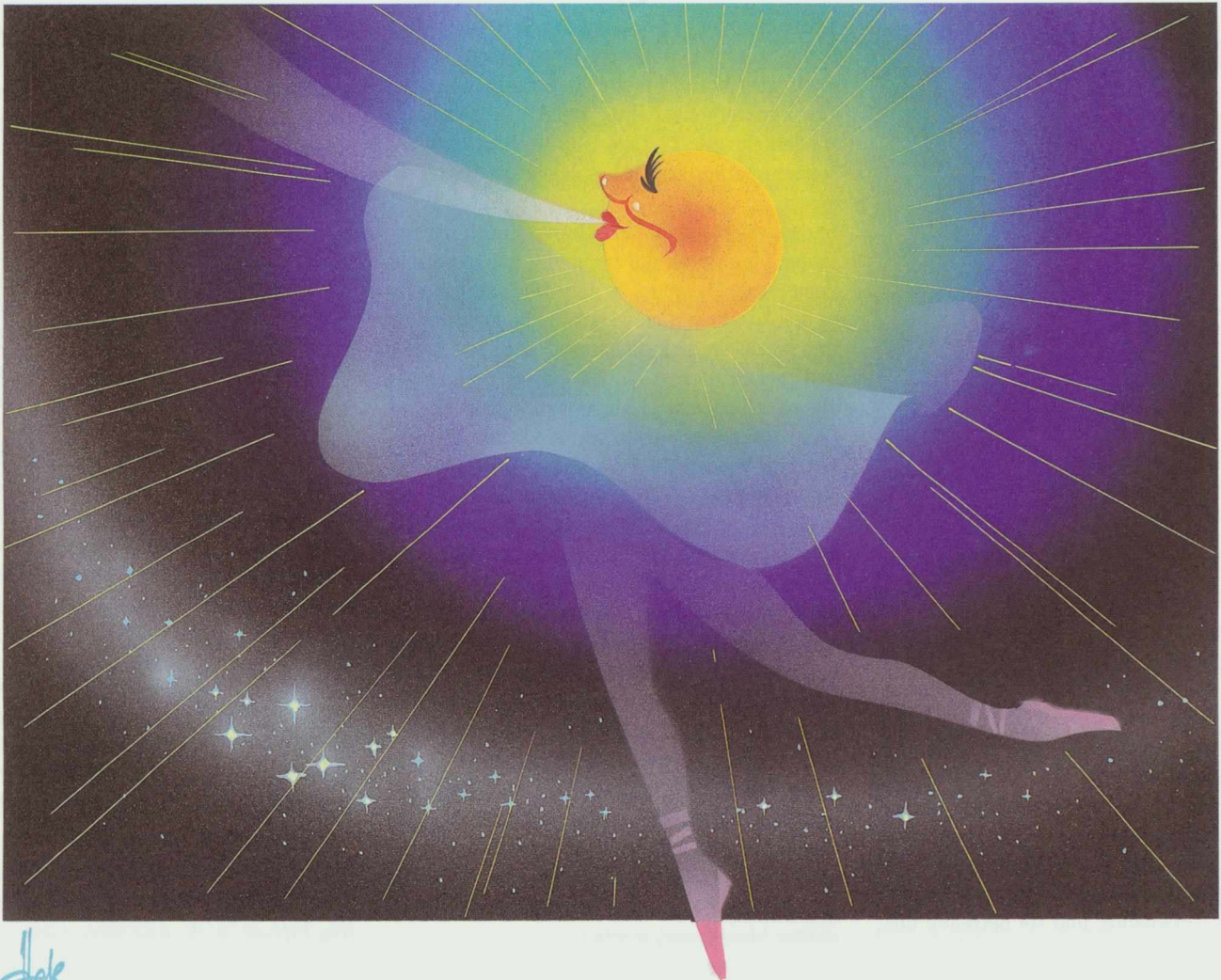
## *The Solar Wind*

*What does Solar Wind mean?*

*Which structure does the solar plasmasphere have?*

*Do solar perturbations play a role for the dynamics of the Solar Wind?*

*Which importance do oscillations and waves have?*



Hok  
84

# 10 Jahre Sonnenwind- experiment auf HELIOS 1 und 2

Rainer Schwenn und Helmut Rosenbauer  
Max-Planck-Institut für Aeronomie,  
Katlenburg-Lindau



Schwenn



Rosenbauer

## Die Sonne und der Sonnenwind

Der Raum zwischen der Sonne und den Planeten sowie deren Monden ist gar nicht leer, wie man lange Zeit geglaubt hat. Tatsächlich ist er von einem wenn auch sehr dünnen Gas erfüllt. Die Sonne dampft es ständig aus ihrer obersten Atmosphärenschicht, der Korona, ab. Denn diese Korona ist so heiß (1–2 Mill. K), daß selbst die gewaltige Schwerkraft der Sonne nicht mehr ausreicht, um alles zusammenzuhalten. Nicht weniger als 1 Million Tonnen Material (ca. 95% Wasserstoffionen – Protonen –, ca. 4% Heliumionen –  $\alpha$ -Teilchen –, verschiedene Sorten schwerer Ionen sowie entsprechend viele Elektronen) verliert die Sonne in jeder Sekunde. Stärke und Richtung des Sonnenwindes – ein treffender Name! – ändern sich dauernd. Mit Geschwindigkeiten von einigen hundert Kilometern pro Sekunde trifft dieser Sonnenwind auch die Erde bzw. deren Magnetosphäre. Sie läßt die geladenen Teilchen des Sonnenwindes sowie auch der kosmischen Strahlung nicht direkt in die Atmosphäre eindringen. Der Sonnenwind drückt auf die Magnetosphäre; dabei verformt er sie dauernd und läßt sie wie eine Wetterfahne weit in den interplanetaren Raum hinausflattern. Dadurch erzeugte Veränderungen der Magnetosphäre aber wirken weiter auf die Ionosphäre, schließlich auf die Atmosphäre, in der wir leben. Auch wenn wir gerade von diesen Zusammenhängen noch wenig im einzelnen durchschaut haben – sie existieren zweifellos, und sie betreffen uns.

Schon 1932 hatte der Göttinger Geophysiker Julius Bartels den Begriff M-Regionen eingeführt. Darunter stellte er sich diejenigen aktiven Gebie-

te auf der Sonne vor, die Ströme von Teilchen aussenden und dadurch auf der Erde geomagnetische Störungen auslösen. Diese äußern sich in verstärkter Nordlichtaktivität sowie in Störungen des Funkverkehrs. Ihre auffällig regelmäßige Wiederkehr alle 27 Tage, also im Rhythmus der Sonnenrotation, war schon lange ein Rätsel gewesen.

Bartels erlebte noch die teilweise Rechtfertigung seiner Idee durch die berühmte amerikanische Venussonde Mariner 2 im Jahr 1962. Sie entdeckte den kontinuierlich wehenden Sonnenwind. In ihm wechseln sich „langsame“ (ca. 300 km/s) und „schnelle“ (bis ca. 900 km/s) Strömungen alle paar Tage mehr oder weniger regelmäßig ab. Diese Ströme scheinen mit der Sonne zu rotieren, wie von einem rotierenden Rasensprenger ausgeschleudert. Alle Tröpfchen fliegen radial nach außen, aber die Stromlinien erscheinen spiralförmig aufgewickelt. Immer, wenn einer der schnellen Ströme die Erde überstreicht, gibt es diese geomagnetischen Störungen. Sogar die zugehörigen M-Regionen kennen wir inzwischen: Es sind die Koronalöcher, die nur im UV-Licht deutlich zu erkennen sind als großflächige, dunkle und auffällig scharf begrenzte Zonen in der oberen Korona (vgl. Abb. Seite 31). UV-Licht dringt bekanntlich nicht durch die Erdatmosphäre. Deshalb konnte man dies alles erst mit Hilfe von Erdsatelliten (OSO, Skylab) entdecken. Inzwischen sind die Koronalöcher zweifelsfrei als die Quellen der besagten schnellen Sonnenwindströme identifiziert worden.

Und wie steht es mit der physikalischen Erklärung von Entstehung und Ausbreitung des Sonnenwindes? Wir müssen eingestehen, daß wir

*Rainer Schwenn's subject is the solar wind. This is the continuous flow of charged particles leaving the sun and propagating outward. In average it consists of 95% Hydrogen ions (Protons), 4% Helium ions (Alpha Particles) and different ions of other elements, with an appropriate charge-equalizing number of free electrons. The velocity of this solar wind varies widely, in general between about 300 km/sec (slow solar wind streams) and about 900 km/sec (fast solar wind streams).*

*The solar wind originates in the very hot corona of the sun. We know that fast streams are released from the coronal hole regions (see fig. page 31) characterized by low densities and open magnetic field structures, whereas slow streams are related to high density regions with closed magnetic field structures.*

*The solar wind experiment, denoted also as E1 or plasma experiment, is a combination of several instruments for the measurement of low energy ions (three instruments) and electrons (one instrument). The measurement principle is simple: the charged particles run through an electrostatic or electrodynamic deflection system. Only those particles arriving from specific directions and having a suitable ratio  $E/Q$  (kinetic energy to charge) can pass through in order to be counted by special detectors. The deflection voltage is varied step by step, thus shifting the transmission region. This results in a stepwise registration of energy spectra. The direction of particle arrival can also be determined.*

*Combining all these information results in velocity distribution functions for the different particle species. These functions are the basic data to deduce all important properties of the solar wind like velocity, density, temperature, composition, etc.*

*Up to the present all ion instruments have operated without any malfunction and without any fatigue. With some minor reservations this is also true for the electron instruments. The very thorough detector screening and handling has paid. Two instruments with overlapping*

noch nicht sehr weit über ein qualitatives Grundverständnis hinausgekommen sind. Zu groß sind noch die Diskrepanzen zwischen den Beobachtungen und den theoretischen Modellen. Das gilt vor allem für die Eigenschaften des Sonnenwindes in Sonnennähe. Nur Messungen an Ort und Stelle können weiterhelfen. Daher die Zielsetzungen der HELIOS-Mission und auch des „Sonnenwindexperiments“, von dem im Folgenden die Rede sein soll.

### Das HELIOS-Sonnenwindexperiment

Dieses Sonnenwindexperiment, auch E1 oder Plasmaexperiment genannt, umfaßt mehrere Instrumente zur Messung von niederenergetischen Ionen (drei Instrumente) und Elektronen (ein Instrument) im Sonnenwind. Das Grundprinzip ist einfach: Die geladenen Teilchen durchlaufen elektrostatische oder -dynamische Ablensysteme. Aber nur Teilchen, die aus bestimmten Richtungen einfallen und deren Verhältnis von Energie zu Ladung in einem geeigneten begrenzten Bereich liegt, können passieren. Nur sie werden von speziellen Detektoren gezählt. Die Ablenspannung wird stufenweise verändert. Dadurch verschiebt sich der Durchlässigkeitsbereich. Somit kann schrittweise ein Energiespektrum aufgenommen werden. Auch die Einfallrichtung der Teilchen kann bestimmt werden.

Aus den für verschiedene Energien und Einfallrichtungen bestimmten Zählraten erhält man die Geschwindigkeitsverteilungsfunktionen verschiedener Teilchensorten. Daraus lassen sich dann alle wichtigen Größen des Sonnenwindes ableiten: Geschwindigkeit, Dichte, Temperatur, Zusammensetzung etc. Regelmäßige Wiederholungen der Messungen lassen zeitliche Veränderungen der Meßgrößen erkennen. Letzten Endes liegen die Ergebnisse dann ausgewertet in anschaulicher Form vor, in Form von Grafiken und Ausdrucken. Sie sind in einem Mikrofilmarchiv gelagert, das bisher rund 140 000 Seiten umfaßt (Es hat übrigens in einer einzigen Schreibtischschublade Platz!). Natürlich ist alles auch auf Datenbändern gespeichert.

Bis März 1982 hatte das Hauptinstrument von HELIOS 1 schon 1 602 231 auswertbare Einzelspektren geliefert. Von HELIOS 2 erhielten wir bis zum Ende dieser Mission (März 1980) 913 142 Spektren. Bis heute haben alle Ioneninstrumente völlig fehlerfrei und ohne jede Ermüdung gearbeitet; das gilt mit kleinen Vorbehalten auch für die Elektroneninstrumente.

Es erscheint uns als besonders bemerkenswert, daß die als besonders kritisch angesehenen Teilchendetektoren (Channeltrons) nicht im geringsten ermüden. Das geschah bei anderen Instrumenten schon nach viel geringeren Belastungen. Erstmals bei einer Raumflugmission können wir aufgrund spezieller Tests die Eigenschaften dieser Detektoren quantitativ messen. Ähnlich wie bei Laborversuchen zeigte sich nach einem anfänglichen Abfall der Leistungsfähigkeit sogar eine deutliche Erholung, und dieser Trend hält heute noch an! Unsere speziellen Vorbehandlungen, Auswahltests und vor allem die Maßnahmen zur völligen Reinhaltung der Sensoren vor dem Start haben sich bezahlt gemacht. Nicht zuletzt wegen dieser Erfahrungen gelten heute Channeltrons und auch ihre jüngeren Verwandten, die MCPs (microchannelplates) für Raumfahrtexperimente als „salonfähig“. Sie werden jetzt überall eingesetzt.

Zwei der Ioneninstrumente arbeiten fast durchgehend parallel, aber völlig unabhängig voneinander. Ihre Meßaufgaben überlappen sich zum Teil. Beim Vergleich der beiden Meßreihen über die ganzen zehn Jahre hinweg läßt sich keinerlei Veränderung der relativen Empfindlichkeit feststellen. Einzig möglicher Schluß: Keines der beiden Instrumente hat sich verändert. Das hat man noch für kein Vorgängerexperiment mit solcher Sicherheit behaupten können! Auch die absolute Empfindlichkeit, die wir in umfangreichen Eichungen im Labor ermittelt haben, scheint recht genau zu stimmen. Das beweisen die HELIOS-Radiowellensexperimente E5a und E5b. Sie können gelegentlich die örtliche Plasmafrequenz messen. Diese ist ein sehr genaues und absolutes Maß für die örtliche Teilchendichte. Sie weicht niemals um mehr als 10% von „unserer“ Dichte ab. Das ist deshalb wichtig, weil alle bisherigen

*measuring tasks but completely independent measuring methods do not show any relative sensitivity change. And this is the only possible conclusion: none of the instruments has changed. Due to the long life of HELIOS 1 it has thus become possible to collect a set of solar plasma data of almost identical quality over the time span of a full activity cycle of the sun. Surely, this is one of the most complete and most comprehensive set of plasma data in the history of this field of research.*

*One of the earliest really new discoveries of HELIOS was that of the “strahl”. Technically speaking, this is evidence for high anisotropy of the solar wind electrons. They exist together with isotropically distributed electrons which do not show distinct direction preferences. Fig. page 68 is a plot of a typical electron distribution. It shows curves of equal particle velocity. Also indicated by an arrow B is the direction of the magnetic field. Obviously the preferred direction is that of the field and we can distinguish between two classes of electrons, one class – they are somewhat faster than the others – following the magnetic field line and another class distributed nearly equally in all directions. It is assumed that those particles which form the strahl by moving parallel to the magnetic field originate directly from the corona without having suffered any disturbance. It happens sometimes that the strahl disappears. In this case we must conclude that the magnetic connection into the corona is interrupted.*

*It was another surprise during the mission to find singly-ionized Helium ( $He^+$ ) in the solar wind. Normally only double ionized Helium ( $He^{2+}$ ) is present. This is rather understandable, because the very hot corona – we have learned that its temperature is of the order of more than a million °C – does not allow  $He^+$  to exist. Fig. page 69 clearly shows a third series of peaks besides those of protons (left) and  $He^{2+}$  (middle). The abundance of  $He^+$  compared to  $He^{2+}$  is 10% till up to 30% in this case while the normal abundance is of the order of one millionth. How can these particles come from the corona of the sun, where they cannot exist? We*

Instrumente sehr unterschiedlich empfindlich und oft auch nicht stabil waren. Folglich waren deren Daten untereinander vielfach nicht vergleichbar. Langsame Trendänderungen, z. B. im Verlauf des Sonnenzyklus, konnten so bisher nicht entdeckt werden.

Noch ein paar Worte zur Qualität der Plasma-meßdaten. Einer der Hauptvorteile ist ihre Kontinuität. Während der Primärmissionen entstanden ohnehin fast keine Datenlücken; später wurde die Zuteilung von Bodenstationen dann knapper. Hier bewährten sich die großen Datenspeicher an Bord der Sonden in einem Maß, wie wir es nicht vorhergesehen hatten. Diese Speicher waren in erster Linie zur Aufnahme von speziellen Daten mit extremer Zeitauflösung im Gefolge von interplanetaren Stoßwellen vorgesehen. Ihr Nutzen für uns aber besteht darin, daß sie für die Zeiten, in denen kein Telemetrieempfang möglich ist, die Daten aller Experimente aufzeichnen können, wenn auch mit geringer Zeitauflösung. Die Übertragung dieser gespeicherten Daten wird dann jeweils später nachgeholt. Das sehr flexible Datensystem an Bord und auch die Geschicklichkeit der Missionskontrolle erlaubten einen außerordentlich effizienten Betrieb der Sonden. Kaum jemals entstanden vermeidbare Datenlücken. So haben wir jetzt einen einzigartigen Satz von Plasmadaten vorliegen, einen der wohl reichhaltigsten und vollständigsten in der Geschichte unseres Forschungsgebiets. Manchmal fehlt über Monate hinweg nicht ein einziger Stundenmittelwert!

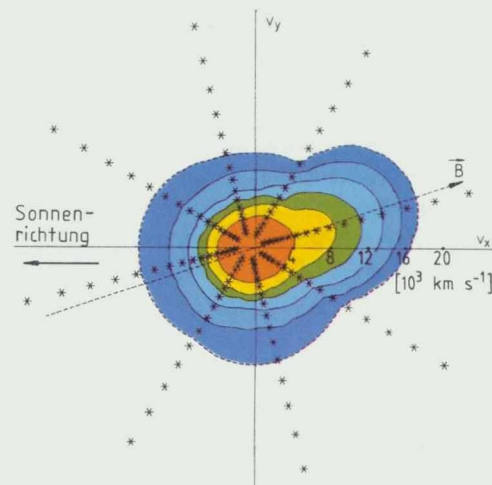
### Ergebnisse

Die wissenschaftlichen Ergebnisse, die das Plasmaexperiment bisher geliefert hat, übertreffen ohne Zweifel alle Erwartungen. Eine große Zahl von Veröffentlichungen liegt schon vor, andere sind in Arbeit. Viele davon entstehen in internationaler Zusammenarbeit. Ein reger Datenaustausch begann gleich zwischen den HELIOS-Experimentatoren selbst. Bald wurden auch Kollegen mit ähnlichen Instrumenten auf anderen Raumsonden in diese Kooperation mit einbezogen (z. B. Pioneer 10/11, IMP 7/8, ISEE 1, 2, 3,

Voyager 1/2, Pioneer Venus, mehrere Prognos-Satelliten). Und schließlich entwickelten sich fruchtbare Kooperationen mit Wissenschaftlern aus „artfremden“ Disziplinen. Wir analysieren jetzt auch optische Beobachtungen der Sonne und solche der Korona (mit Koronagraphen); wichtig für uns sind auch Radioastronomie und Magnetosphärenphysik. In den vergangenen Jahren ist so ein neues Bild der Heliosphäre entstanden; wir werden es später im einzelnen betrachten.

### Der „Strahl“ in den Elektronenverteilungen

An den Anfang wollen wir einige Überraschungen stellen, sozusagen „echte“ Entdeckungen, die für sich stehen. Die erste machten wir schon bei der Durchsicht der allerersten Rohdaten, die nur ein paar Minuten nach dem Anschalten unseres Elektroneninstrumentes aus dem Schnelldrucker liefen. Im größten Teil der Elektronenspektren wies ein einziger Winkelkanal ganz drastisch höhere Zählraten als die anderen Kanäle auf. Offenbar gibt es zusätzlich zu allen anderen, annähernd isotrop (d. h. auf alle Richtungen gleichmäßig) verteilten Elektronen noch einen „Strahl“ etwas energiereicherer Elektronen, die alle in die gleiche Richtung laufen, und zwar von der Sonne weg. Diesen Strahl hatte man mit Instrumenten auf anderen Raumsonden nicht entdeckt; denn diese integrierten über viel größere Einfallswinkel. Dadurch wurde diese Feinheit sozusagen verwischt. Inzwischen haben wir die Eigenschaften dieses Strahls – bei diesem deutschen Namen ist es international geblieben – systematisch untersucht. In Bild Abb. Seite 68 sehen wir ein typisches Beispiel einer solchen Elektronen-Geschwindigkeitsverteilung. Der Strahl zeigt sich in der „Beule“, d. h. in der Abweichung von den Kreisformen rechts. Das bedeutet, daß in diese Richtung viel mehr Elektronen laufen, als überall anders hin. Die eingezeichnete gestrichelte Linie bezeichnet übrigens die momentane Richtung des interplanetaren Magnetfeldes. Wir stellen uns heute vor, daß die Strahlelektronen echte Sendboten aus der Korona sind. Sie gelangen entlang dem interplanetaren Magnetfeld ohne Störung nach außen bis zu HELIOS und sicher noch viel weiter. Sie erfahren



Ein Schnitt durch eine Geschwindigkeitsverteilungsfunktion der Elektronen. Die Konturlinien kennzeichnen gleiche Häufigkeiten (genauer gesagt: gleiche Phasenraumdichten). Jede Linie (vom Zentrum nach außen) bedeutet einen Abfall auf ein Zehntel des vorherigen Wertes. Die Sternchen markieren die Lage der Meßkanäle. Die gestrichelte Gerade entspricht der momentanen Richtung des interplanetaren Magnetfeldes. Man erkennt deutlich die „Beulen“ rechts, auf der von der Sonne abgewandten Seite. In diese Richtung, also entlang dem Magnetfeld laufen viel mehr Elektronen als überall anders hin. Das ist der Strahl in der Elektronenverteilung.

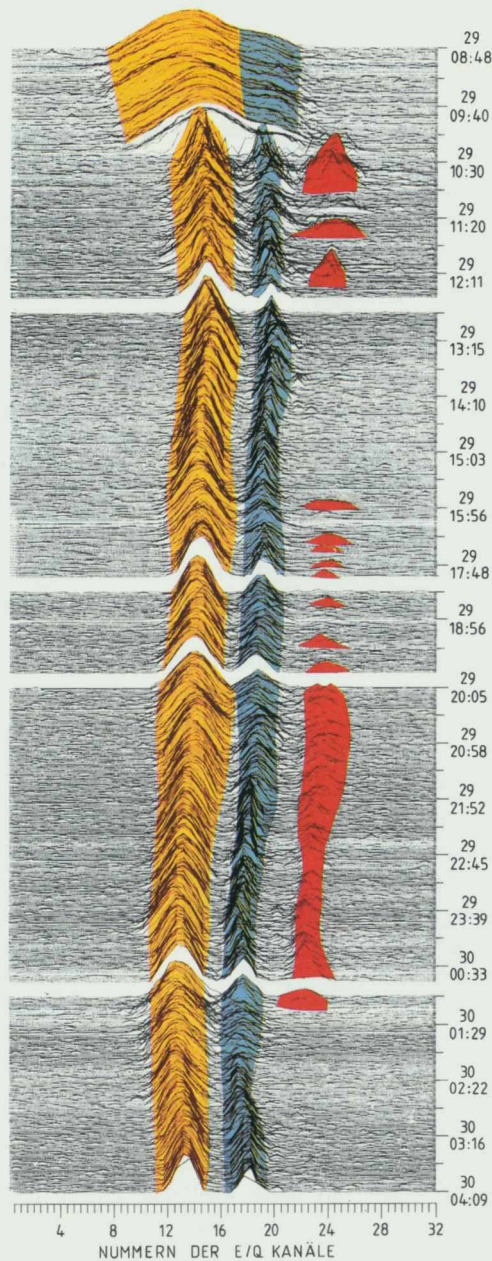
*Cut through a velocity distribution function of the electrons. The contour lines denote equal abundance (more precisely speaking: equal phase space density). Every line (from the center outward) relates to a decay of one tenth of the prior value. The asterisks mark the position of the measuring channels. The dashed line indicates the momentary direction of the interplanetary magnetic field. Regard the "bump" at the right and opposite side of the sun. Into this direction, i.e. into the direction of the magnetic field, many more electrons are running than in any other direction. This is the "strahl" of the electron distribution.*

also keinerlei Streuung, wie alle anderen Elektronen, deren Richtungsverteilung deshalb ziemlich isotrop ist. Das hängt – vereinfacht gesagt – damit zusammen, daß die Wahrscheinlichkeit für Streuung durch Stöße mit anderen Elektronen immer kleiner wird, je größer die Elektronenenergie ist. Bedingung ist natürlich auch, daß die Magnetfeldlinien bis in die Korona reichen. Das ist nicht immer der Fall. Gelegentlich verschwin-

det der Strahl nämlich. Dann muß die magnetische Verbindung zur Korona wohl unterbrochen sein. Davon wird später noch die Rede sein.

### Einfach ionisiertes Helium, $\text{He}^+$

Eine weitere Überraschung fanden wir, als wir die HELIOS-1-Plasmatdaten vom 29. 1. 1977 analysierten. Worin sie besteht, wird anhand von Abb. Seite 69 sofort klar. Eine ganze Reihe von Ionenspektren, die im Abstand von je 81 s aufgenommen wurden, sind untereinander angeordnet. Dabei ist jeweils die Flußdichte von Ionen in Abhängigkeit ihres Verhältnisses Energie pro Ladung ( $E/q$ ) aufgetragen. Das Ungewöhnliche in diesem Fall ist der dritte „Peak“ rechts. Neben den üblichen peaks von Protonen (links) und doppelt ionisiertem Helium- ( $\text{He}^{2+}$ ) Ionen (Mitte) bleibt diese seltsame Komponente mit Unterbrechungen für über 13 Stunden erkennbar. Noch nie zuvor war ähnliches gesehen worden. Das hängt auch damit zusammen, daß diese Art der Darstellung – sie ist wohl eher primitiv, aber eben doch sehr anschaulich – erst von uns eingeführt worden war; bei den üblichen Routineauswertungen fallen solche „Feinheiten“ unter den Tisch. Inzwischen haben sich die Kollegen buchstäblich in die Archive gestürzt und ihre alten Messungen – bis hin zu den ersten Daten seit 1962 – in ähnlicher Weise durchgemustert. Dabei wurde unter Millionen von Spektren (einschließlich der gesamten HELIOS-Mission bis heute) nur ein einziges ähnliches – sogar auffallend ähnliches – Ereignis gefunden: Die Erdsatelliten IMP 7/8 registrierten es am 29. 7. 1977. In beiden Fällen war einige Stunden vor diesen Erscheinungen der Durchgang einer starken interplanetaren Stoßwelle beobachtet worden. Solche Stoßwellen treten häufig im Gefolge von explosionsartigen Massenauswürfen aus der Korona auf. Deren Ursache können Flares oder eruptive Protuberanzen sein. Offenbar war in den beiden Fällen dem ausgeschleuderten Gas eine ungewöhnliche Teilchensorte beigemischt. Nur den besonderen Fähigkeiten unserer beiden simultan messenden HELIOS-Instrumente ist es zu verdanken, daß wir diese Teilchen zweifelsfrei



identifizieren konnten. Es ist einfach ionisiertes Helium,  $\text{He}^+$ . Und das ist die eigentliche Überraschung: In der Millionen Grad heißen Korona kann das Mengenverhältnis  $\text{He}^+$  zu  $\text{He}^{2+}$  kaum über eins zu einer Million hinauskommen, hier aber beträgt es 10% bzw. sogar 30%! Dieses Gas muß aus tieferen Schichten der Sonnenatmo-

Hier ist eine zeitliche Folge von Ionenspektren untereinander angeordnet. Das Ungewöhnliche in diesem Fall ist das Auftreten einer dritten Komponente (rechts), neben den für den Sonnenwind typischen Verteilungen von Protonen (links) und doppelt geladenen Helium-Ionen ( $\alpha$ -Teilchen). Es handelt sich um einfach geladene Helium- ( $\text{He}^+$ ) Ionen, die auf die Herkunft dieses Gases aus der „kalten“ Chromosphäre schließen lassen. Diese Messung wurde von HELIOS 1 am 29. und 30. 1. 1977 durchgeführt.

*This is a consecutive series of ion spectra. Regard the unusual appearance of a third component (right) besides the protons (left) and doubly charged Helium ions (Alpha particles; middle). Only these two species are typical for particle distributions in the solar wind. The particles of the unusual component are singly charged Helium ( $\text{He}^+$ ) ions. This gas is suspected to originate from the "cold" chromosphere. The measurement was made by HELIOS 1 on Jan. 29 and 30, 1977.*

*believe, the solution of this riddle is the magnetic field. In our example of January 29, 1977, a large shock had been observed a couple of hours earlier, following a great flare with a huge explosive mass ejection out of the corona. It could be that magnetically closed bubbles form during such an event. They could transport much cooler matter from chromospheric regions so fast through the hot corona that the material is not or not much heated, like a snow ball which is thrown through a flame. But many problems still exist there; e.g. why are such events so rare, twice in twenty years or so, while flares or protuberances combined with eruptions can be seen every few days?*

*Also "holes" could be found occasionally in the solar wind. During June 1980 suddenly the plasma density decreased dramatically. For nearly two days the instruments found almost no particles. The density went down to less than 1% of the normal. We do not yet have an explanation for this type of event.*

*There are also findings worth putting into a book of records: the slowest solar wind ever seen was measured by HELIOS 1 on November 17, 1979. For four hours its velocity dropped down to 170 km/sec (usually not under 300 km/sec). The highest ever measured plasma density was*

sphäre – der Chromosphäre – stammen. Dort gibt es nämlich noch erhebliche Anteile von  $\text{He}^+$ .

Doch wie kann „kaltes“ chromosphärisches Plasma in den Sonnenwind gelangen, ohne die übliche Aufheizung und Ionisierung in der Korona zu erfahren? Womöglich bilden sich bei bestimmten Protuberanzen magnetische „Blasen“, die dann – etwa wie ein Schneeball, den man durch eine Flamme wirft – sehr schnell die Korona durchqueren, ohne dabei zerstört zu werden. Hier sind noch viele Fragen offen, nicht zuletzt auch diese: Warum treten Protuberanzen alle paar Tage auf,  $\text{He}^+$  aber wird nur zweimal in 20 Jahren gefunden?

### Weitere Überraschungen

Dazu gehören zweifellos auch die „Löcher“ im Sonnenwind. Im Juni 1980 nahm ohne erkennbaren Grund die Plasmadichte auf einmal dramatisch ab. Fast zwei Tage lang fanden unsere Ioneninstrumente beinahe keine Teilchen mehr. Die Flußdichte war mehr als 100mal geringer als normal. Ähnliches hatten wir vorher nur in zwei Fällen gesehen, aber nur für jeweils ein paar Stunden, nach interplanetaren Stoßwellen. Wir haben keine Erklärung dafür, wie der Sonnenwindfluß für so lange Zeit regelrecht unterbrochen werden kann!

Auch Weltrekorde haben wir zu melden: Den langsamsten jemals beobachteten Sonnenwind sah HELIOS 1 am 17. 11. 1979. Seine Geschwindigkeit lag für rund 4 Stunden unter 170 km/s (sonst kaum unter 300 km/s). Fast 15 Stunden lang war damals der Sonnenwind noch langsamer als der Schall, präziser gesagt: er war subalfvénisch. Die höchste jemals gemessene Plasmadichte fanden wir in der Nähe des Perihels am 29. 5. 1980, kurz nach einer Stoßwelle, mit über 1000 Teilchen pro  $\text{cm}^3$ . Das sind rund 10mal mehr als normal für diesen Sonnenabstand.

Einige weitere verblüffende Beobachtungen – gerade auch aus jüngster Zeit – sind so ungewöhnlich, daß wir sie selbst kaum glauben und schon gar nicht verstehen können. Wir wollen erst genauere Analysen abwarten, bevor wir sie präsentieren.

### Protonen und Heliumionen

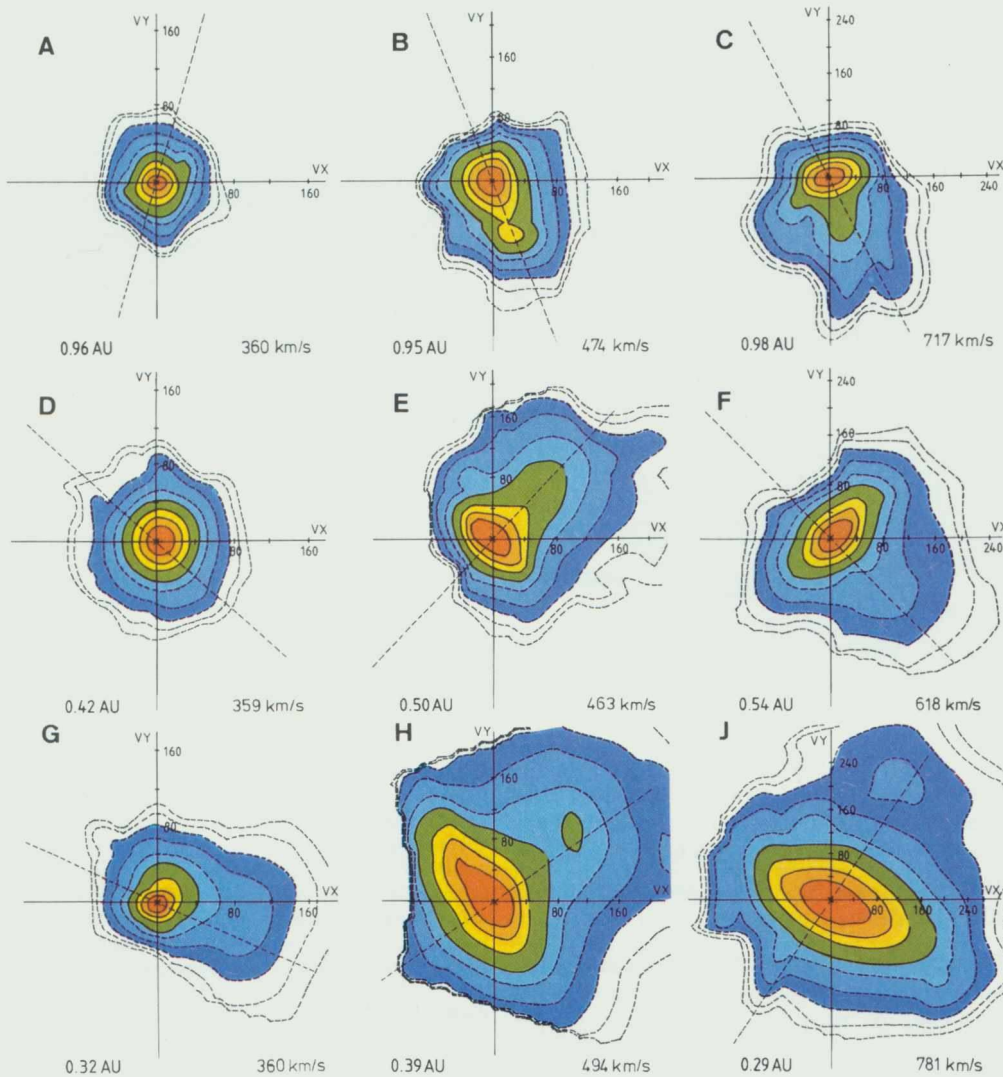
Die Geschwindigkeitsverteilungen von Protonen und Heliumionen – letztere zum ersten Mal überhaupt mit HELIOS gemessen – enthalten eine Vielzahl von Informationen über den Zustand des Plasmas und die Vorgänge darin. Im Grunde erfüllen diese Messungen den Traum jedes Plasmaphysikers: Teilchen für Teilchen wird wirklich einzeln vermessen und entsprechend seinen Eigenschaften einsortiert. Daraus entstehen dann „richtige“ Verteilungsfunktionen, ohne jede Modellannahmen. In allen anderen plasmaphysikalischen Bereichen – seien es nun irdische oder astrophysikalische – muß man sich mit sehr indirekten Mitteln behelfen. Das sind vor allem die verschiedensten Techniken zur Analyse des ausgesandten Lichts. Daraus erhält man wohl integrale Größen wie Temperatur und Dichten. Aber selbst der so geläufige Begriff „Temperatur“ enthält schon eine ganz wesentliche Modellannahme. Von einer Temperatur im üblichen Sinn kann man nur sprechen, wenn die Verteilungsfunktionen rund, d. h. isotrop sind und eine ganz bestimmte Form haben, nämlich die einer Maxwellverteilung. Gerade diese Voraussetzung ist in vielen Plasmen oft nicht erfüllt, so auch in „unserem“ so sehr dünnen Sonnenwind-Plasma. Hier gibt es fast keine Stöße zwischen den Teilchen mehr; andererseits werden die Teilchenbahnen durch das Sonnenmagnetfeld stark „verbogen“. Es muß deshalb geradezu verwundern, daß die von uns beobachteten Verteilungen trotzdem noch relativ „vernünftig“, manchmal sogar wie Maxwellverteilungen aussehen (Abb. Seite 71). Offenbar werden die fehlenden Stöße durch andere Ausgleichsvorgänge ersetzt. Bestimmte Abweichungen von der Maxwellverteilung regen Instabilitäten an, diese wiederum können mit Hilfe von Wellen auf die Teilchen zurückwirken und so die anfänglichen Abweichungen dämpfen. Es würde den Rahmen dieses Berichts sprengen, auch nur die nötigsten Begriffe erklären zu wollen. Man spricht von Welle-Teilchen-Wechselwirkungen, Dispersionsrelationen, Zyklotron-Resonanzen, von Plasmawellen, Ionenschallwellen, Alfvénwellen, um nur einiges zu nennen.

*found close to the perihelion on May 29, 1980 shortly after a shock wave, with more than 1000 particles per  $\text{cm}^3$ . This is about 10 times higher than the normal.*

*Fig. page 71 gives nine examples of velocity distribution functions of protons, as they have been measured directly related to the magnetic field direction. Quite symmetrical distributions can be found as well as strongly irregular distributed directions. Of course, those velocity components are meant which are superimposed on the bulk velocity of the solar wind. Quite often two different kinds of protons occur, one of them up to 60 km/sec faster than the other. This tendency increases closer to the sun: sometimes one sort of protons is about 300 km/sec faster than the other. Helium ions can also be found to be faster. Several questions arise from these findings. Most of them cannot be answered yet. Why, for example, is one portion of the particles accelerated, the other not? How get the particles decelerated on their way out?*

*The overall structure of the heliosphere, especially its central region, can now be far better described than a few years ago, although even now the image is still incomplete (see also page 82). Fig. page 72 shows the  $7^\circ.3$  inclined sun together with the orbiting earth. The polar regions of the sun are covered with large coronal holes. They stretch far down to the equatorial zones. The two polar caps show inverse magnetic polarity. The “active” regions of the sun (e.g. the sun spots etc.) lie along the equatorial belt. Here the magnetic field lines are predominantly closed. Field lines originating in the coronal holes are almost completely “open”. They are pulled far out by the solar wind, possibly to the outermost boundaries of the solar system. Thus a sheet-like, warped boundary layer is generated separating the regions of influence of the northern and southern solar hemisphere. During the last solar minimum, 1975/76, north was magnetically positive, south negative. The field lines directed nearly radially outward from the sun are deformed to archimedean spirals due to the rotation of the sun. The Swedish Nobel Laureat Hannes Alfvén has compared this mod-*





Einige typische Beispiele für Geschwindigkeitsverteilungen von Protonen. Die Darstellungen sind ähnlich wie in Abb. Seite 68. Die Sonne steht jeweils links. Die eigentlich dreidimensionalen Verteilungen sind für diese zweidimensionale Darstellung so geschnitten, daß die Schnittebene jeweils das momentane interplanetare Magnetfeld (gestrichelt) enthält. Die Beispiele sind zeilenweise nach dem Sonnenabstand (1 AE ent-

spricht dem mittleren Sonnenabstand der Erde) bzw. spaltenweise nach der Sonnenwindgeschwindigkeit geordnet. Man sieht z. B. isotrope Verteilungen (A, D), solche mit „Doppelpeak“, d. h. mit schneller zweiter Komponente (B, H, J), starke Anisotropien im Kern der Verteilungen (E, F, H, J).

*Some typical examples of velocity distributions of protons. The plots are similar to those of fig. page 68, although they relate to another particle species.*

*The sun's position is on the left. For these two dimensional plots the distributions, which are really three dimensional, are cut in such a way that every sectional plane contains the momentary interplanetary magnetic*

*field (dashed line). From the top down the examples are arranged for the solar distance (1 AU = average distance sun-earth) resp. from left to right for the solar wind velocity. A and D are isotropic distributions, B, H, J are distributions with a double peak, i.e. with a fast second component, E, F, H, J show strong anisotropies in the center of the distribution.*

el, the “Ballerina-model” of the heliosphere with a dancing girl. Her swinging skirt relates to the warped boundary layer, rotating with the sun and stretching out far into space. The intersecting lines between the magnetic boundary layer are called sector boundaries. It was very surprising for the scientists analyzing the data, when they found that the transfer regions between low and fast solar wind streams get narrower close to the sun than at earth distance. Most theoretical considerations had expected a widening of those regions.

Fig. page 73 explains the ballerina model under another aspect. The lower box shows a coronal map of the sun. The north and south coronal holes are well established. In between regions of closed magnetic fields occur. Included are also the orbit projections of the earth and of HELIOS 1. The tickmarks indicate the passage time of the respective body. Both orbits cross over regions with open and closed magnetic structures. The upper box shows the velocities of the solar wind as measured by HELIOS and close to the earth by IMP 7/8. There is a close correlation visible between high velocity streams and coronal holes. The curves of HELIOS and IMP 7 (Erde) do also not differ too much, except in the region which is indicated by the arrow. Here the earth observes continuously high velocities while the velocity measured on HELIOS drops down to very low speeds. Apparently the earth had continued staying in the regime of the southern coronal hole, whereas HELIOS has changed over into a region of closed field lines.

During the summer of 1976 the very minimum of the solar activity had been reached. The equatorial extensions of the polar coronal holes had retired back to the poles. The skirt of the ballerina sun must have hung almost without folds in the equatorial plane of the sun. Along the orbits of the HELIOS probes the fast streams had disappeared.

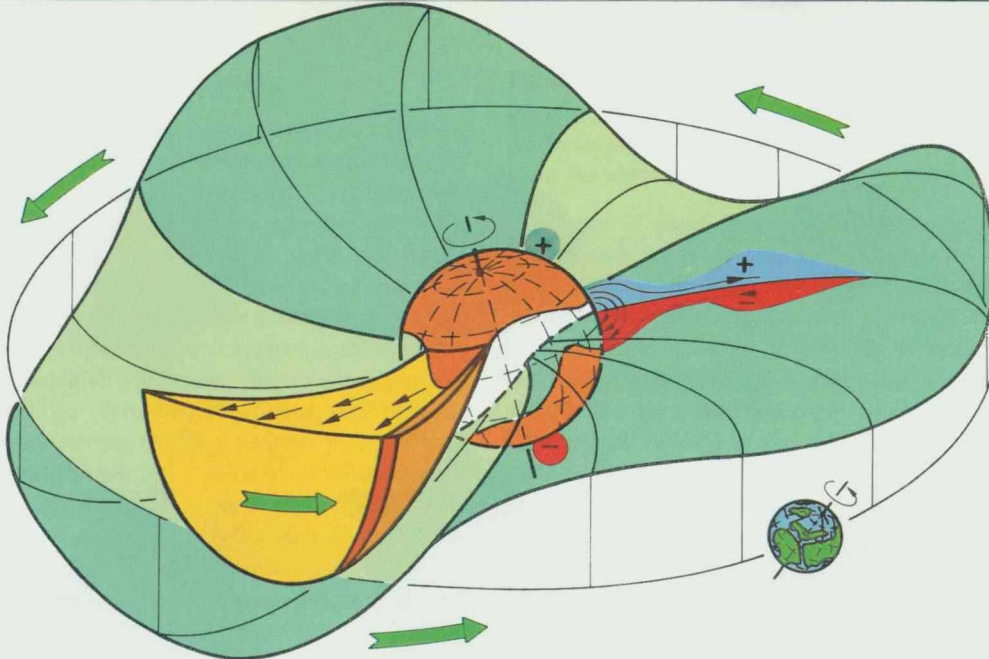
This structure changed when the solar activity began to increase in 1977. The ballerina's skirt must soon have looked very crumpled. As expected, the solar magnetic field's polarity re-

Die Veränderungen der Verteilungsfunktionen mit Annäherung an die Sonne sind besonders aufschlußreich. Ein Beispiel: Bei Messungen nahe der Erdbahn war zwar schon früher aufgefallen, daß Heliumionen oft etwas schneller sind – um die 30 km/s – als Protonen. Auch sah man gelegentlich eine zweite „Sorte“ von Protonen der Hauptmenge voraneilen, mit bis ca. 60 km/s Differenzgeschwindigkeit. Beide Beobachtungen wurden erst richtig gewürdigt, als wir mit HELIOS diese Trends in Sonnennähe ganz dramatisch verstärkt fanden: Manchmal lief die zweite Protonensorte gute 300 km/s schneller als die erste, und auch die Heliumionen waren ähnlich schnell! Wenn wir nun entsprechend gar bis zur Sonne zurückrechnen, erhalten wir geradezu astronomische Werte für die Differenzgeschwindigkeiten. Diese sind aus verschiedenen Gründen unrealistisch. So stehen wir heute vor folgenden Fragen: Wo und wie werden erhebliche Anteile der Protonen und der anderen Ionen so stark beschleunigt? Warum nicht alle? Was bestimmt den oberen Grenzwert? Durch welchen Mechanismus werden die schnellen Anteile auf dem Weg nach außen wieder abgebremst? Mit Sicherheit treten hier mehrere Formen von Welle-Teilchen-Wechselwirkungen auf. Viel Genaueres wissen wir noch nicht.

Dies gilt auch für andere Themen in diesem Zusammenhang, auf die wir an dieser Stelle nicht näher eingehen können. Wir dürfen feststellen, daß HELIOS die Tür zu einem neuen großen Plasmalabor – dem interplanetaren Raum – endgültig aufgestoßen hat.

### Die Sonne als Ballerina

Unsere Vorstellung von der Sonne und der Heliosphäre gleicht einem riesigen Mosaik. Künstler aus der ganzen Welt suchen Steinchen für Steinchen und versuchen, sie in mühsamer, aber doch gemeinschaftlicher Arbeit zu einem einheitlichen Bild zusammenzusetzen. Dies ist nicht ein Feld für großartige Einzelentdeckungen. Denn erst alle die vielen, kleinen Beiträge zusammengenommen lassen ein Bild erkennen. Unser Bild von der Heliosphäre enthält immer noch viele weiße Flecken, aber in den letzten



Jahren – gerade auch durch HELIOS – hat es viele neue Konturen gewonnen. Vor allem: Es wurde jetzt plastisch.

Wir wollen uns nun unser heutiges Bild der inneren Heliosphäre etwas näher betrachten. Zunächst nur für die Zeit eines typischen Minimums der Sonnenaktivität. Das letzte hatten wir 1975/76, gerade rechtzeitig zum Beginn der HELIOS-Mission.

Betrachten wir in Abb. Seite 72 zuerst die Sonne mit ihrer um  $7,3^\circ$  geneigten Drehachse (siehe auch Seite 82). Die Korona ist über den Polregionen von großflächigen Koronalöchern bedeckt. Einige Ausläufer reichen bis in die Äquatorgegend hinein. Die Polkappen haben entgegengesetzte magnetische Polarität. Die „aktiven“ Gebiete der Sonne – dazu gehören auch die Sonnenflecken – liegen im Äquatorgürtel der Sonne, und über ihnen sind die magnetischen Feldlinien vorwiegend „geschlossen“. Die von den Koronalöchern über den Polkappen ausgehenden Feldlinien sind vorwiegend „offen“; denn sie werden durch den Sonnenwind buchstäblich ins Unendliche hinausgezogen. So entsteht eine scheibenartige, gewellte Trennfläche zwischen (nordpolaren) positiven und (südpolaren) negativen Feldlinien. Diese sind alle wegen des schon erwähn-

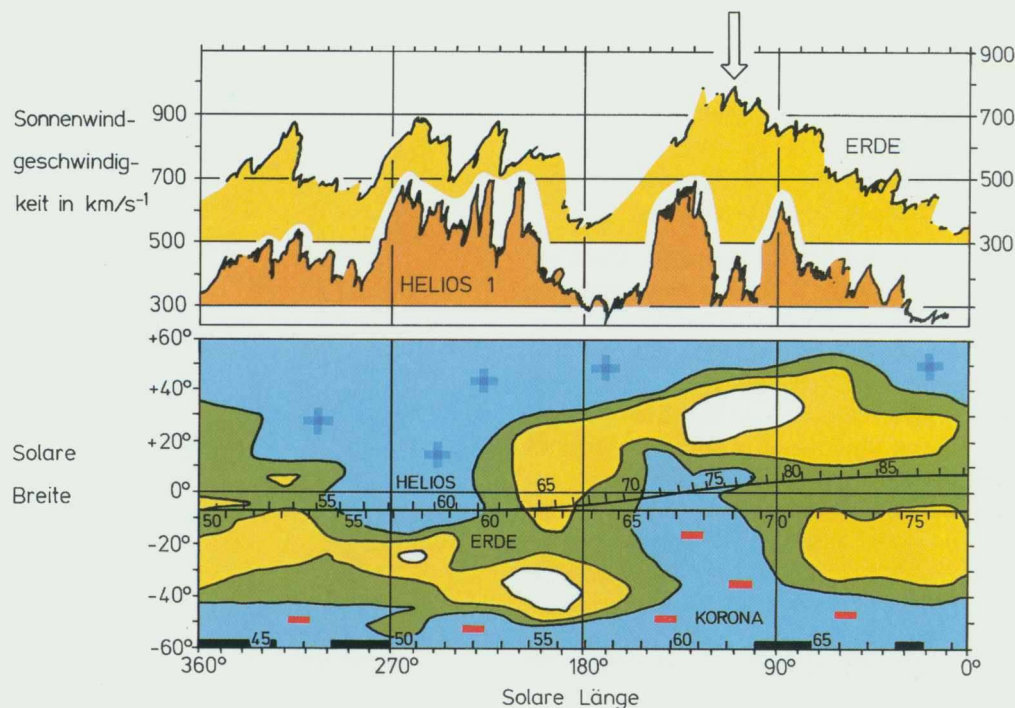
Die Sonne als Ballerina. Dieses Schemabild – nicht ganz maßstabgerecht – ist ein Modell des Sonnensystems nahe einem Minimum der Sonnenaktivität. Über den Polen der Sonne sehen wir Koronalöcher mit entgegengesetzter magnetischer Polarität. Einige Ausläufer reichen bis zum Äquator. Der „Ballerinarock“ ist die Trennfläche zwischen positiven und negativen Magnetfeldlinien, die durch den Sonnenwind nach außen geschleppt werden. Zahl und Größe der Falten entsprechen der Form der Koronalöcher bzw. des dazwischenliegenden aktiven Gürtels. Das ganze Gebilde dreht sich mit der Sonne um deren leicht geneigte Achse. Die Koronalöcher sind Quellen von besonders schnellen Strömungen im Sonnenwind. Ein Ausschnitt aus einer solchen Struktur ist in der linken Bildhälfte angedeutet. An der Vorderfront des schnellen Stromes sammelt sich ein Schwall verdichteten Plasmas an.

*The sun as a ballerina. This sketch – not in scale – is a model of the solar system close to the minimum of sun's activity. Over the sun's poles you can see coronal holes with opposite magnetic polarity. Some excursions reach down to the equator. The "ballerina's skirt" is the separation layer between positive and negative magnetic field lines convected outward by the solar wind. Number and size of the folds relate to the shape of the coronal holes in relation to the active belt in between. The whole structure rotates with the sun about its somewhat inclined axis. The coronal holes are the sources of particularly fast streamers in the solar wind. A sector of such a structure is indicated in the left half of the figure. At the front side of the stream a billow of condensed plasma collects.*

ten Rasensprengereffektes spiralig gekrümmt. Die Form von aktiven Gebieten im Äquatorgürtel und Koronalöchern bestimmt Größe und Zahl der „Wellen“. Das ganze Gebilde dreht sich mit der Sonne, und der schwedische Nobelpreisträger Hannes Alfvén konnte dieses Konzept treffend als „Ballerinamodell“ titulieren. An einigen Stellen kreuzt der schwingende Rock der Ballerina die Erdbahnebene – die Ekliptik. Wenn eine solche Stelle über die Erde streift, beobachten wir einen Vorzeichenwechsel des interplanetaren Magnetfeldes – wir nennen das eine magnetische Sektorgrenze.

Von HELIOS erfuhren wir einiges über die Struktur der Sonnenwindströme in diesem Bild. Am meisten hat überrascht, daß die Grenzschichten beim Übergang von langsamen zu schnellen Strömen in Sonnennähe viel „dünnere“ (oft nur noch 3° in solarer Länge) sind als beim Erdbstand (meist 15–30°). Man hatte allgemein mit dem Gegenteil gerechnet. Das gilt auch für die „seitlichen“ Grenzschichten. Deren Dicke konnte jetzt erstmals bestimmt werden (siehe auch Abb. Seite 73). Die besondere Bahnkonstellation der beiden HELIOS-Sonden wirkte sich dafür günstig aus: Obwohl stets relativ nahe beieinander, sind sie doch meistens wegen der schrägliegenden Sonnenachse um einige Grad in solarer Breite voneinander entfernt. Manchmal konnte dann HELIOS 1 einen deutlich ausgeprägten schnellen Strom durchlaufen, HELIOS 2 aber nicht einmal eine Andeutung davon. Gleichzeitige Koronabeobachtungen zeigten stets einen passenden Koronalochnausläufer, der bis in die Äquatorgegend reichte.

Es fiel uns auf, daß vielfach beim Passieren magnetischer Sektorgrenzen der schon erwähnte Strahl in den Elektronenverteilungen für einige Zeit verschwindet. Die sonst zur Sonne zurückreichenden Feldlinien sind hier offenbar unterbrochen. Man kann sich gut Reconnection vorstellen, d. h. die Durchverbindung zweier benachbarter, aber entgegengesetzter Feldlinien, sozusagen einen magnetischen „Kurzschluß“. Das ist ein aktuelles Thema von ganz allgemeinem Interesse: Auch an der Frontseite der Planeten-Magnetosphäre sowie in deren Schweif sollte



Strukturen im Sonnenwind und ihre Quellen in der Korona. Die untere Bildhälfte zeigt auf einer „Sonnenkarte“ die Lage der Koronalöcher (blau) im März 1975 sowie die Bahnspuren der Erde und von HELIOS 1 mit Tag-Markierungen. Darüber sind die von HELIOS bzw. von den Erdsatelliten IMP 7 und IMP 8 gemessenen Geschwindigkeiten des Sonnenwindes aufgetragen, korrigiert um die Laufzeit des Plasmas von der Sonne bis zum jeweiligen Meßpunkt. Man erkennt gut die Zuordnung von Berei-

chen „schnellen“ Sonnenwindes zu den Koronalöchern. Der Pfeil in der rechten Bildhälfte deutet auf den Zeitpunkt der größten Sonnenannäherung, an dem HELIOS offenbar in den nördlichen Randbereich des schnellen Stromes geraten ist, der die Erde – 10° weiter südlich – weiterhin noch voll trifft. Messungen dieser Art haben gezeigt, daß die Grenzflächen zwischen schnellen und langsamen Strömen kaum dicker als 3° sind.

*Structures in the solar wind and their sources in the corona. The lower part of the figure is a “solar map” showing the extension of the coronal holes (blue) in March 1975 together with the orbit projections of the earth and of HELIOS 1. The tickmarks signify the day of year. In the upper part the velocities of the solar wind are plotted as measured by HELIOS 1 and by the earth satellites IMP 7 and 8, corrected for the plasma time-of-flight between the sun and the measuring position. Easily detectable*

*is the correlation between regions of “fast” solar wind and the coronal holes. The arrow in the right part of the figure is pointing to the time of closest solar approach of HELIOS 1, when the spacecraft apparently had arrived in the northern outer periphery of the fast stream. This stream still hits the earth intensively 10 degrees more to the south. Measurements of this kind have shown that the boundary layers between fast and slow streams are scarcely thicker than 3 degrees.*

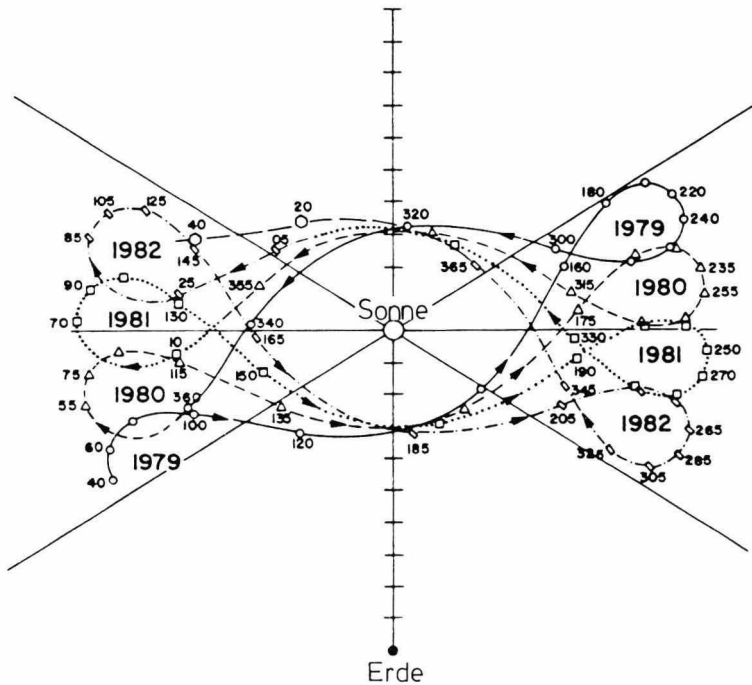
Reconnection auftreten. Nur ist sie experimentell sehr schwer eindeutig nachzuweisen.

Im Sommer 1976 war das absolute Minimum der Sonnenaktivität erreicht. Die äquatorialen Ausläufer der Koronalöcher hatten sich polwärts zurückgezogen. Der Rock der Ballerina Sonne muß wohl fast ohne Falten in der Äquatorebene der Sonne geschwebt haben. Jedenfalls wurden

dort keinerlei schnelle Ströme mehr beobachtet. Im Frühjahr 1976 – also nur kurz vorher – waren HELIOS 1 und HELIOS 2 zeitweilig zwischen 10° und 14° in solarer Breite voneinander entfernt gewesen. Das ist nicht viel. Und doch bewegten sie sich eine Woche lang in Sektoren entgegengesetzter Polarität, also auf verschiedenen Seiten des Ballerinarocks! Pioneer 11 war in diesem

Sommer auf dem Weg zum Saturn und nahm dazu eine „Abkürzung“, die ihn für einige Monate bis auf 16° nördlicher solarer Breite brachte. Dort befand er sich zu 95% der Zeit in einem positiven Sektor, d.h. über dem Ballerinarock. Der hat in dieser ganzen Zeit also nur sehr selten über 16° hinausgeschwungen.

All diese Messungen und Deutungen waren nur möglich, weil in der Zeit des Aktivitätsminimums alle Strukturen über Monate hinweg fast unverändert blieben. Aber das änderte sich mit wachsender Aktivität. Der Ballerinarock sah dann bald recht zerzaust aus. Auch die letzten schnellen Ströme verschwanden. Wie erwartet polte sich das Sonnenmagnetfeld auf dem Höhepunkt der Aktivität um, nämlich im Jahr 1980. Die Periode dieses magnetischen Sonnenzyklus beträgt 22 Jahre. Sie ist also doppelt so lang wie die des allgemein bekannten Aktivitätszyklus.



So sah die Bahn von HELIOS 1 aus der Sicht der Erde (unten) in den Jahren 1979–1982 aus. Mit nur rund 30 Tagen Unterbrechung hielt sich die Sonde fast dauernd in einem engen Bereich über dem linken (Ost-) oder rechten (West-)Rand der Sonne auf.

*This was the orbit of HELIOS 1 as seen from the earth (at bottom) in 1979 to 1982. With interruptions of only about 30 days around the perihelion the spacecraft position was almost constantly in a narrow region over the left (east) or right (west) limb of the sun.*

### Die aktive Sonne

Seit 1977 nahm die Aktivität der Sonne kräftig zu. Sie erreichte 1980 sogar ein unerwartet starkes Maximum. Die Sonnenfleckenrelativzahl – das ist das übliche Maß für die Sonnenaktivität – erreichte einen Höchstwert wie schon seit 23 Jahren nicht mehr. Auch das gehört zu der Serie von Glücksfällen, die die HELIOS-Mission begleiten. Denn wir bekamen dadurch eine reichhaltige Auswahl aller nur denkbarer Effekte – und auch einiger bis dahin undenkbarer! – infolge von Flares und anderen Aktivitäten auf der Sonne serviert. Als besonders vorteilhaft erwies sich obendrein auch noch die langsame Drehung der HELIOS-1-Bahn in Bezug auf die Erde. Die Sonde hielt sich deshalb in diesen Jahren mit nur kurzen Unterbrechungen über dem linken oder rechten Sonnenrand auf (Abb. Seite 74). Die dort registrierten Ereignisse im Sonnenwind, z.B. Stoßwellen, konnten wir zum ersten Mal in eindeutigen Zusammenhang bringen mit Vorgängen in der oberen Korona. Die ist nur sehr schwierig sichtbar zu machen, und dann auch nur über dem Sonnenrand, nämlich bei den sehr seltenen totalen Sonnenfinsternissen, oder mit Koronagraphen. Bei diesen Instrumenten

wird die Sonnenscheibe künstlich abgedeckt. Das außerordentlich schwache Licht der äußeren Korona kann man auch dann nur sehen, wenn das Instrument außerhalb der Atmosphäre arbeitet, z.B. auf einem Erdsatelliten.

Ein solcher Koronagraph befindet sich an Bord des amerikanischen Satelliten P78/1. Seit dem Start Anfang 1979 haben mehrere hundert Massenauswürfe das ringförmige Gesichtsfeld – zwischen 3 und 10 Sonnenradien Abstand vom Sonnenzentrum – dieses Koronagraphen durchquert. Man kann die Bewegung solcher oft blasenförmiger oder auch strahlartiger Leuchterscheinungen deutlich erkennen und sogar ihre Geschwindigkeit messen. Wir fanden heraus, daß den zufällig „richtig“ – d.h. in Richtung auf HELIOS 1 – gezielten Eruptionen mit großer Wahrscheinlichkeit bei HELIOS 1 eine starke Stoßwelle folgt. Die Zuordnung ist nicht immer ganz eindeutig, weil es oft zu viele Ereignisse und Stoßwellen kurz hintereinander gab, oder auch wegen unvermeidbarer Datenlücken in den Beobachtungsreihen. Aus der Laufzeit errechnet sich eine mittlere Geschwindigkeit der Stoßwelle. Sie ist fast

*versed in 1980, at the peak of the sun's activity. The period of this magnetic solar cycle is double that of the well-known cycle, i.e. 22 years.*

*Often when HELIOS passed through a magnetic sector boundary the already mentioned strahl disappeared for some time. Here, apparently, the magnetic field lines normally tracing back to the sun are interrupted. Most probably field line reconnection occurs, the merging of magnetic field lines, as to say a magnetic short circuit.*

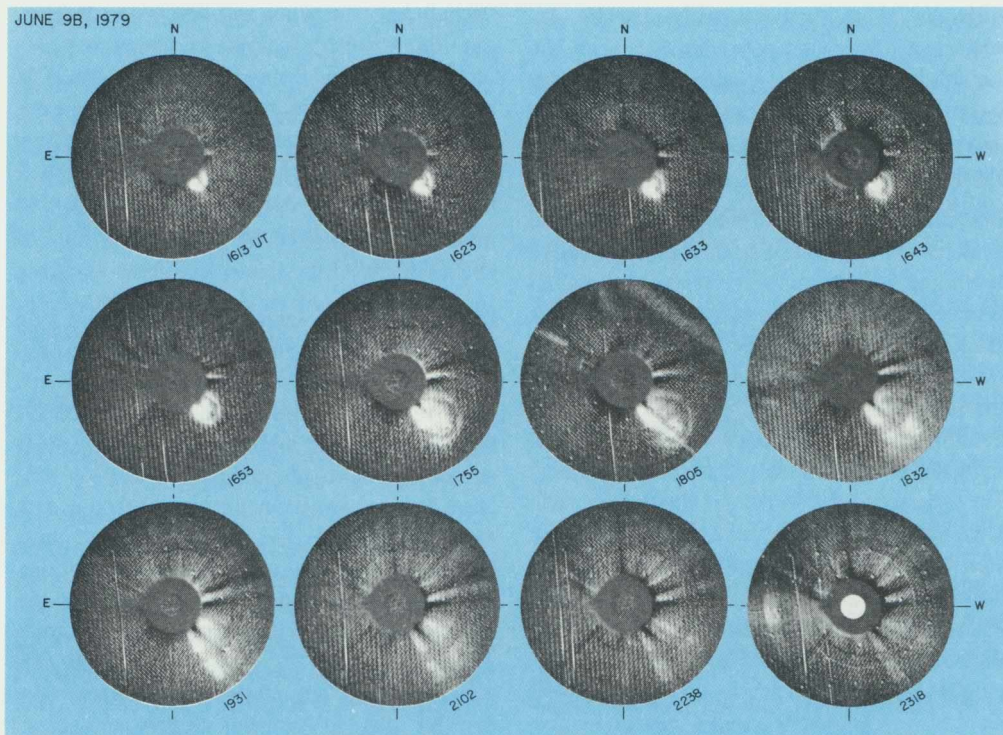
*The solar maximum of 1980 turned out to be higher than expected. The relative sun spot number – this is the common measure for the solar activity – went up to its highest value for 23 years. It was due to the special orbit of HELIOS 1 that it was positioned above the west or east limb of the sun most of the time (the perihelion passage-time, which occurred before or behind the sun in that period is short compared to the rest of the orbit) (fig. page 74). This offered the chance to compare events registered on board directly with coronagraph observations. We found that eruptions releasing parti-*

immer größer als die momentane Stoßgeschwindigkeit am Ort von HELIOS. Die vom Koronagraphen gemessene Geschwindigkeit ist meistens noch größer. Das bedeutet, daß die Stoßwelle zwischen Sonne und Erde abgebremst wird; wie sehr, das hängt von dem Medium ab, das sie durchlaufen muß. Vor allem nach großen Flares können die Geschwindigkeiten sehr hoch sein: Am 26. 11. 1982 haben wir Werte von über 2000 km/s gemessen (den Rekord mit über 2500 km/s hält die Stoßwelle vom 4. 8. 1972). In diesen Fällen rast das ausgeworfene Gas beinahe ungebremst, wie eine gewaltige Kanonenkugel, nach außen und treibt die Stoßwelle vor sich her.

Starke Stoßwellen können übrigens seitlich sehr weit um die Sonne herumreichen. Um dies zu beobachten, war wiederum die Doppelmission HELIOS 1/HELIOS 2 ideal geeignet. Eine Ausbreitung nach jeder Seite vom Flareort über 90° solarer Länge war nicht selten. Nach dem Riesenflare vom 10. 4. 1981 haben wir sogar in 140° Entfernung vom Flareort auf der Sonne – fast in Antipodenstellung! – noch deutlich eine Stoßwelle registriert. Das bedeutet nichts weniger, als daß beinahe die gesamte Heliosphäre von der Stoßwelle nach einem einzigen Flare durchgeschüttelt worden ist! Aber auch das Gegenteil kommt vor: HELIOS 1 fand manchmal eine Stoßwelle, HELIOS 2 in nur 30° Abstand dagegen nicht (und umgekehrt). Offenbar waren die Ausbreitungsbedingungen in dieser Richtung derart, daß die Stoßwelle sich hier schon „verlaufen“ hat.

Es gibt auch sehr langsame Eruptionen. Sie werden weniger durch Flares als durch plötzlich aufbrechende Protuberanzen ausgelöst. Oft nimmt ihre Geschwindigkeit noch im Gesichtsfeld des Koronagraphen deutlich zu. Das ausgeworfene Gas wird also über längere Zeit hinweg angetrieben, nicht wie bei Flares explosionsartig hinausgeschossen. Bis zum Eintreffen bei HELIOS wird auch das langsam gestartete, dann nachbeschleunigte Gas wieder abgebremst (Abb. Seite 75).

Die geometrische Form der Eruptionen ist bis heute sehr umstritten. In der Korona sieht man



meistens bogenförmige Gebilde – Protuberanzen (Abbildungen Seiten 23, 27 und 29). Auch wenn diese aufbrechen und explodieren, erscheinen sie immer noch als „flache“, eher zweidimensionale Gebilde, selbst noch in einigen Sonnenradien Abstand. In dieser Entfernung lassen die Koronagraphen aber auch andere Formen erkennen, z. B. regelrechte kugelförmige Blasen. Man kann sich leicht vorstellen, wie es aussehen muß, wenn eine solche Blase frontal auf einen Beobachter losgeschossen wird: Die Front muß dann aus der Sicht des Koronagraphen scheinbar nach allen Seiten von der Sonne weglaufen. Dies ist tatsächlich so beobachtet worden, und die zugehörige Stoßwelle erreichte die Erde gerade zur erwarteten Zeit.

Wir wissen noch wenig Genaues über die Vorgänge, die Flares auslösen oder Protuberanzen plötzlich aufbrechen lassen. Eine Schlüsselrolle spielt sicher das solare Magnetfeld. Aus dessen gewaltigem Energiespeicher stammt nämlich die Energie, die bei den Eruptionen freigesetzt wird.

Das koronale Ereignis vom 9. 6. 1979 als Beispiel für einen „langsamen“ Massenauswurf. Über Stunden hinweg sah der Koronagraph des NRL (Naval Research Laboratory in Washington, USA) eine große blasenartige Erscheinung wachsen. Die Vorderfront erreichte nach 18.32 den Rand des Gesichtsfeldes, wuchs danach aber noch kräftig weiter. Im Bild rechts unten ist zum Vergleich die Größe der Sonne gezeigt. Man erkennt ohne Mühe, daß anfangs die Geschwindigkeit der Vorderfront gering war (ca. 310 km/s). Zwischen 16.53 und 17.55 Uhr wurde sie deutlich größer (590 km/s). Die zugehörige Stoßwelle erreichte HELIOS 1 in ca. 130 Sonnenradien Abstand 52 Stunden später und hatte sich auf dem Weg dorthin schon wieder deutlich verlangsamt.

*The coronal event of June 6, 1979 as an example of a "slow" mass ejection. For several hours the coronagraph of the NRL (Naval Research Laboratory, Washington D.C.) saw a big bubble-like feature growing. The forefront of this feature arrived at the rim of the viewing field after 18.32 h, but was further growing strongly. In the figure in the lower right the size of the sun is shown for comparison. It is easily seen that at first the velocity of the forefront was low (about 310 km/sec). Between 16.53 h and 17.55 h it grew considerably higher (590 km/sec). The correlating shock arrived at HELIOS 1, 130 solar radii apart, 52 hours later. It had meanwhile clearly again decelerated.*

Auch die Möglichkeit von magnetischen Abschnürungen wird immer wieder diskutiert. Wesentlich ist auch hierbei wieder der Vorgang der Reconnection von magnetischen Feldlinien, selbst wenn er letztlich zu Disconnection – Abtrennung – führt.

Dies sind sehr aktuelle Themen der modernen Sonnenforschung. So erklärt sich auch die starke Beachtung, die zwei unserer jüngeren Arbeiten gefunden haben. Darin wurden wieder Daten von HELIOS, Voyager und dem Koronagraphen von P78/1 kombiniert. Im Gefolge von interplanetaren Stoßwellen haben wir magnetische Wolken identifiziert. Damit meinen wir Gebiete mit „geschlossenen“ Magnetfeld; diese Feldlinien sind also sozusagen ringförmig, sie sind weder nach innen mit der Sonne verbunden, noch hängen sie nach außen in den interplanetaren Raum. In einem besonders schönen Fall haben wir auch den zugehörigen Massenauswurf in der Korona sehen können, der einem Flare folgte.

Es ist bemerkenswert, daß die Idee geschlossener magnetischer Blasen, die von der Sonne „ausgespuckt“ werden, schon älter ist (1954) als die erste Theorie über den kontinuierlichen Sonnenwind (1958) selbst. Was hat es nicht alles schon für Kontroversen um die mögliche Existenz solcher Blasen gegeben!

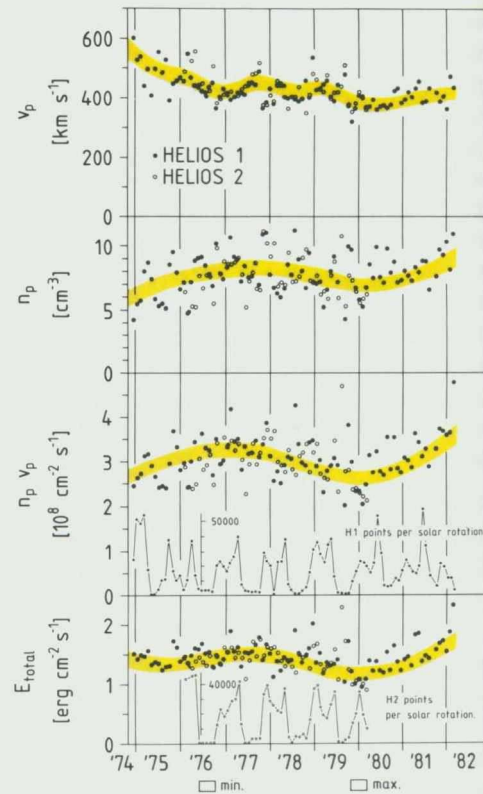
### Der Sonnenwind im Sonnenzyklus

Schon seit vielen Jahren rätselt man über den merkwürdigen Zusammenhang zwischen der Sonnenaktivität und der Stärke der auf der Erde einfallenden galaktischen kosmischen Strahlung. Dabei handelt es sich um sehr energiereiche Teilchen aus fernen Gegenden unserer Milchstraße. Sie dringen in unsere Atmosphäre ein und lösen dort regelrechte Teilchen-„Schauer“ aus. Schließlich kann man sie am Boden nachweisen, z. B. mit Neutronenmonitoren. Der Zusammenhang ist – präzise gesagt – eine Antikorrelation: hohe solare Aktivität – wenig galaktische Teilchen, und umgekehrt. Die Veränderungen von Sonnenaktivität und kosmischer Strahlung erfolgen übrigens auffallend synchron. Die Verbindung schafft der Sonnenwind – wir wissen nur noch nicht wie.

Deshalb hat man schon seit den ersten Messungen 1962 versucht, typische Veränderungen des Sonnenwindes im Sonnenzyklus zu finden. Das gelang nicht, weil es vor HELIOS keine mit der Länge des Sonnenzyklus vergleichbare durchgehende und verlässliche Meßreihe gab und weil die Meßdaten von verschiedenen Instrumenten verschiedener Experimentatoren einfach nicht zusammenpassen.

HELIOS 1 ist nun schon fast einen Zyklus lang unterwegs, hat Minimum und Maximum der Aktivität erlebt. Die Plasmainstrumente haben sich nicht verändert – das wurde oben erläutert –, deshalb können wir erstmals auch „leise“ Trends erkennen. Die Trends sind in der Tat sogar sehr leise! Nur bei genauem Hinsehen erkennt man sie in Abb. Seite 76. Hier stellt jeder Punkt einen Mittelwert über eine ganze Sonnenrotation dar. Am deutlichsten ändert sich die mittlere Geschwindigkeit des Sonnenwindes: von 550 km/s Anfang 1975 auf 370 km/s Anfang 1980. Das hängt natürlich mit dem erwähnten Verschwinden der stabilen schnellen Ströme zusammen. Die anderen für die Modulation als wichtig erachteten Größen Dichte, Teilchenflußdichte, Energieflußdichte ändern sich um nicht mehr als ca. 15% der Mittelwerte. Das ist so wenig, daß sich die kosmische Strahlung davon alleine sicher nicht beeindruckt läßt. Das gilt erst recht auch für die Variation des Heliumanteils: Er wächst von ca. 2,7% im Minimum auf rund 4,3% im Maximum an.

In Abb. Seite 76 fällt dem aufmerksamen Betrachter das Verhalten der mittleren Energieflußdichte auf. Sie gibt an, wieviel Energie die Sonne im Durchschnitt aufwendet, um den Sonnenwind aus ihrem Schwerefeld hinauszuhoben und auf seine Endgeschwindigkeit zu bringen. Diese Energieflußdichte ist aber gerade auf dem Höhepunkt der Sonnenaktivität am niedrigsten. Also gerade dann, wenn praktisch alle paar Stunden irgendwo ein Flare losgeht! Offenbar wird die in diesen Flares freigesetzte zusätzliche Energie in anderen Regionen der Sonnenoberfläche mehr als ausgeglichen! Wir messen bisher den Sonnenwind nur in der Ebene der Ekliptik, also nahe dem Äquator der Sonne. Vielleicht



Hier sind alle 2 515 463 Spektren von Ende 1974 bis 28. 2. 1980 zusammengefaßt (inzwischen haben wir einige mehr). Jeder Punkt stellt einen Mittelwert über eine volle Sonnenumdrehung dar. Die Größe, die sich in dem gesamten Zeitraum am deutlichsten ändert, ist die mittlere Geschwindigkeit des Sonnenwindes (ganz oben). Die Teilchendichte (zweite Reihe) und die Teilchenflußdichte (dritte Reihe) zeigen viel größere Streuung, ihre Mittelwerte schwanken aber nur um ca. 15%. In der untersten Reihe sehen wir, daß die Energie, die die Sonne für die Aussendung des Sonnenwindes aufwendet, um 1979/1980 am niedrigsten ist. Und das zur Zeit des Aktivitätsmaximums, wo es die meisten energiereichen Flares gab!

*Here all 2,515,463 spectra are put together from the end of 1974 until Feb. 2, 1980 (since when we have quite a few more). Each point represents an average over a full solar rotation. The value changing most clearly in the whole time span is the average velocity of the solar wind (top). The particle density (second plot) and the particle flow density (third plot) show much higher scatter. But their averages fluctuate only by about 15%. With the plot at the bottom it is shown that the solar energy afforded to release the solar wind was lowest in 1979/80. This was the period of maximum activity, when the number of energy-rich flares was highest.*

passiert der besagte Ausgleich außerhalb dieses engen Bereichs, womöglich gar erst über den Polen der Sonne! Diesem Problem wird sich eine europäische Raumsonde, die International Solar Polar Mission, widmen (sie heißt seit kurzem Ulysses). Nach dem für 1986 geplanten Start soll diese Raumsonde mit Hilfe eines Umlenkmanövers am Planeten Jupiter die Ekliptik verlassen und zu sehr hohen solaren Breiten vorstoßen. Ulysses müßte einige der durch HELIOS aufgeworfenen Fragen beantworten können. Insofern ist Ulysses ein echter Nachfolger der HELIOS-Mission.

Wie aber schafft der Sonnenwind die Modulation der kosmischen Strahlung denn nun wirklich? Die dafür ausschlaggebende Größe sollte auch selbst starke Veränderungen im Sonnenzyklus erfahren. Dazu fällt uns z. B. das Verhalten der schnellen Ströme ein: Einige Zeit vor einem Aktivitätsminimum werden sie sehr dominierend. Sie bleiben oft für Monate stabil, und ihre Häufigkeit sowie auch ihre „Stärke“ erreichen Höchstwerte. Aber wir wissen schon, daß noch vor dem Minimum ihre Bedeutung nach Anzahl und Stärke wieder abnimmt. Warum diese Zeitverschiebung von rund 2 Jahren zwischen dem Zyklus dieser schnellen Ströme und dem der kosmischen Strahlung? Wir wollen an einen direkten Zusammenhang nicht recht glauben, auch können wir keinen physikalischen Mechanismus erkennen.

Da ist unsere neueste Hypothese schon viel glaubhafter. Sie entstand aus einer Zusammenarbeit zwischen den HELIOS-Kollegen des Experiments E7 zur Messung der kosmischen Strahlung und uns. Bei genauer Betrachtung der Daten von E7 fiel nämlich auf, daß das Abfallen der Intensität der Teilchen der galaktischen kosmischen Strahlung der wachsenden Sonnenaktivität nicht kontinuierlich, sondern in Sprüngen folgte. Diese Sprünge traten meistens dann ein, wenn ein besonders virulentes aktives Gebiet auf der Sonne ein Flare nach dem anderen losließ. Jedes starke Flare erzeugt eine Stoßwelle. Alle Stoßwellen reichen weit um die Sonne herum, wie wir schon gesehen haben, und laufen deshalb auch seitlich ineinander. So kann um die ganze Sonne

herum eine mehr oder minder geschlossene „Schale“ entstehen. Wir stellen uns vor, daß solche Schalen das Sonnensystem gegen das Eindringen der kosmischen Strahlung regelrecht abriegeln können, und zwar für einen Zeitraum von mehreren Tagen bis zu einigen Wochen. Wenn sich währenddessen schon die nächste Schale bildet, summiert sich die Wirkung. So ließe sich qualitativ erklären, warum die Veränderungen von kosmischer Strahlung und Sonnenaktivität annähernd zeitgleich sind.

#### Die Sonne wird gebremst

Hier soll von einem der ungewöhnlichsten, aber auch schönsten Ergebnisse des HELIOS-Plasmaexperimente die Rede sein. Es hat uns mehrere Jahre Arbeit, schier endlose Diskussionen und viele Stunden Rechenmaschinenzeit gekostet. Und doch ist das Ergebnis nur eine einzige Zahl:  $2 \times 10^{22}$  N · m/sterad. Das ist das Maß für den Drehimpuls, den die Sonne dem Sonnenwind mitgibt. Sie selbst wird dadurch in ihrer Drehbewegung abgebremst. Sie muß nämlich das abströmende Gas des Sonnenwindes dauernd von der Oberfläche her nachliefern, d. h. nach außen in die mitrotierende Korona schaffen. Dabei ergeht es ihr genauso wie der Eisläuferin bei einer Pirouette: Wenn sie die Arme nach außen streckt, wird die Drehung verlangsamt. Dafür sorgt das physikalische Gesetz über die Erhaltung des Drehimpulses.

Am kritischen Punkt löst sich der Sonnenwind vom Einfluß der Sonne. Dort erreicht er nämlich „Überschallgeschwindigkeit“ und kann durch keine Wirkung von der Sonne her mehr eingeholt werden. Von dem anfänglichen seitlichen „Schubs“ aufgrund der Sonnenrotation bleibt immer ein Rest erhalten, auch wenn sich die tangentiale Komponente auf dem Weg nach außen immer mehr in eine radiale verwandelt (dies zeigt eine einfache geometrische Überlegung). In der Nähe der Erdbahn beträgt die mittlere Abweichung von der radialen Richtung nur noch Bruchteile eines Grades. Die täglichen Schwankungen der Richtung können aber durchaus bei 20° und mehr liegen. Will man die mittlere Abweichung bestimmen, muß man also über lan-

*cles into the direction toward the spacecraft is mostly followed by a strong shock at HELIOS 1. However, the correlation is not always unambiguous because there were often many shock waves one after the other. From the arrival time at HELIOS the average velocity of the shock can be calculated. In almost every case it was higher than the momentary shock velocity at the position of HELIOS. Mostly the velocity measured by the coronagraph is still higher. That means, the shock wave decelerates when propagating outward; how much depends on the conditions of the medium the shock has to pass through. Especially after giant flares the velocities can be very high: on Nov. 26, 1982, we measured more than 2000 km/sec. (the record is still with the shock of Aug. 4, 1972, when more than 2500 km/sec was determined). In such cases the ejected matter races almost unbraked like the bullet of a gun outward, driving the shock wave in front of it.*

*Strong shocks can stretch out longitudinally far around the sun, as was observable thanks to the double mission of HELIOS 1 and 2. An extension of more than 90° from the flare location was not infrequent. Following the huge flare of April 4, 1981 even at an angular distance of 140° a shock could be registered. The whole heliosphere had been thoroughly shocked by the shock wave of one single flare! But the contrary happened also: HELIOS 1 sometimes found a shock, but not so HELIOS 2 although their distance apart was only about 30°.*

*Very slow eruptions occur also. They are released not so much by flares but by suddenly bursting protuberances. Often their speed rises considerably in the viewing field of the coronagraph. The ejected matter is pushed forward over a long time. It is not a shot out explosion as in the case of a flare. However, when arriving at HELIOS the gas has been decelerated again (fig. page 75).*

*We do not yet know very much about flare releasing or protuberance bursting processes. Obviously, the magnetic field plays a key role with its huge abundance of energy (see figures page 23, 27 and 29).*

ge Zeit mitteln. Und vor allem müssen natürlich die Instrumente außerordentlich genau geeicht sein. Die bisherigen Messungen waren noch recht ungenau. Manchen dieser Resultate nach hätte die Sonne schon längst zum Stillstand gekommen sein müssen!

Die HELIOS-Mission bot auch hier entscheidende Vorteile gegenüber allen früheren Versuchen. Da ist vor allem die Sonnenannäherung. Im Perihel ist die zu messende Abweichung rund dreimal so groß wie in Erdbahnnähe. Auch läßt sich aus dem radialen Verlauf der Messungen die Mißweisung des Instruments recht gut bestimmen, d. h. der Unterschied zwischen der wirklichen Blickrichtung und der aufgrund der Eichung erwarteten. Demnach beträgt die Mißweisung unserer Instrumente auf beiden Sonden je  $1,2^\circ$ . Das ist viel. Wir müssen beschämt zugeben, daß wir bis heute keine Erklärung dafür geben können. Als besonders glücklich hat sich die Entscheidung erwiesen, HELIOS 2 „auf den Kopf“ zu stellen (vgl. Abb. Seite 43). Die beiden Sonden rotieren deshalb gegenläufig, und mit ihnen unsere identisch gebauten und geeichten Instrumente. Falls es systematische Mißweisungen gibt, so sollten sie etwa gleich groß sein, weil ja beide Sonden völlig baugleich sind. Man kann die relative Mißweisung – das ist also die Summe der beiden Einzelwerte – zwischen den beiden Instrumenten bestimmen, wenn die beiden Sonden einmal möglichst nahe zusammenkommen und wirklich denselben Sonnenwind messen. Ein weiterer Glücksfall in der HELIOS-Geschichte hat uns eine solche, eigentlich sehr unwahrscheinliche Konstellation beschert. Das geschah im Herbst 1977. Damals gingen die beiden Sonden auf „Kollisionskurs“. Sie flogen nur wenige Millionen Kilometer aneinander vorbei. Wir bestimmten die Winkelabweichung unserer beiden Instrumente zu  $2,4^\circ$ . Das ist das Doppelte der aus den radialen Profilen gemessenen Einzelmißweisungen, genau wie es sein soll. Entsprechend wurden dann alle Messungen korrigiert, und endlich erhielten wir das erwähnte Ergebnis.

Die genannte Zahl hat einer grundlegenden Theorie aus dem Jahre 1967 wieder voll zur Geltung verholfen. Diese Theorie hat zehn Jahre

lang in Mißkredit gestanden vor allem deshalb, weil sie viel niedrigere Werte für den Drehimpulsverlust der Sonne voraussagte, als die ersten Meßversuche ergaben. Wir haben jetzt den Beweis erbracht, daß diese Theorie quantitativ richtig ist. Das ist deshalb so wichtig, weil man sie nun endlich mit mehr Sicherheit auch auf andere Objekte anwenden kann, etwa auf schnell rotierende magnetische Sterne. Auf diese Weise hat HELIOS einen wichtigen Beitrag zur Astrophysik erbracht.

Übrigens, unsere Sonne dürfte sich unserer Messung nach noch einige Milliarden Jahre so weiter drehen wie bisher, wenn sonst nichts weiter geschieht...

Ein anderer Aspekt verdient noch Beachtung: Der Wert des Drehimpulsverlustes bedeutet, daß der Sonnenabstand des kritischen Punktes im Mittel etwa 12 Sonnenradien betragen sollte. Dies paßt recht gut zu gängigen Koronamodellen. Wir bestimmten den Wert des Drehimpulsverlustes auch in verschiedenen Untergruppen, z. B. getrennt für schnelle und langsame Ströme. Es überraschte uns, daß in Sonnennähe praktisch der ganze Drehimpuls ausschließlich im langsamen Sonnenwind steckt. Dessen kritischer Punkt muß also weiter von der Sonne entfernt sein, vielleicht bei 30–40 Sonnenradien, während der des schnellen Windes viel näher an der Sonne liegt. Beide „Sorten“ Sonnenwind kommen offenbar aus stark unterschiedlichen Höhen in der Korona. Das schließen wir auch aus einer ganz anderen Beobachtung: Schneller Sonnenwind enthält im Durchschnitt 3,6% Helium, langsamer dagegen nur 2,5%. Mit zunehmender Höhe in der Korona kann man eine relative Verarmung an schwereren Heliumionen auch durchaus erwarten. All dies bestärkt unsere schon sehr früh (1977) geäußerte Hypothese: Schneller und langsamer Sonnenwind sind ganz unterschiedlich, was Ort und Mechanismus ihrer Entstehung betrifft.

#### Warum HELIOS weiterleben soll

Immer wieder wird gefragt, wann wir denn endlich genug Daten hätten. Schließlich arbeitet HELIOS 1 nun schon rund sieben Mal so lange

*As another consequence of shock waves magnetic clouds have been found in the interplanetary plasma. These are bubbles of closed magnetic field line rings travelling out into space, also discussed in the article by Mariani et al.*

*Since the early days of space research the problem is open as to how the sun can trigger the intensity of the cosmic radiation arriving in the solar system from far out in the galaxy: the intensity of the cosmic radiation is high when the solar activity is low and vice versa. We know that the solar wind is the connecting link; but how does it act? Fig. page 76 gives the variances of averages of four characteristic parameters of the solar wind from 1974 until 1982: The proton velocity  $v_p$ , the proton density  $n_p$ , the proton flow density  $n_p \cdot v_p$  and the total energy  $E_{total}$ . None of these parameters shows drastic variations, especially compared to the high degree of modulation of the cosmic radiation. The variation of all four parameters is not larger than about 15%. This cannot be significant enough for this triggering. However, there is another explanation. As we have seen already, shock waves can stretch out over nearly the full sphere. They travel outward and by merging together they might form a shell around the whole heliosphere. During solar maximum they are very numerous always soon replacing a decaying shock wave by one which is following. This shell might act like a shield hindering the particles of the cosmic radiation to penetrate into the inner solar system. During solar minimum shock waves are rare events. The shell of shock waves can no longer form out, allowing the particles to move inwards.*

*The high quality of the detectors of the plasma experiment made it possible to determine a very important cosmological number. They succeeded in delivering the fundamental data necessary to calculate the loss of sun's angular momentum caused by the offstreaming solar wind. Each wind particle moves out only almost radially. The small azimuthal component has to be delivered by the angular momentum of the sun. By thorough averaging over many years of data this value has been found to be*



wie ursprünglich geplant. Die Antwort lautet: Solange wir noch immer wieder Neues entdecken, dürfen wir nicht aufhören. Viele unserer wichtigsten Ergebnisse haben wir erst aus Daten lange nach dem ursprünglich geplanten Ende der Mission gewonnen. Es kommen noch mehr! Manche Ereignisse sind noch so unklar, daß wir dringend auf Wiederholung warten. Gibt es wieder ähnliche Riesenergebnisse auf der Sonne, wie damals, im August 1972? Die würden wir gerne aus der Nähe sehen! Wir warten auch auf das Wiedererscheinen der stabilen schnellen Ströme, wie im letzten Sonnenzyklus zur Zeit von Skylab, 1973/74. Was für Auswirkungen hat die Umpolung des Sonnenmagnetfeldes?

Andere Missionen können HELIOS 1 nicht ersetzen – es gibt nämlich seit längerem keine mehr, und es wird bis zum Start der Kometenmissionen (Vega 1/2, Planet A, MS-T5, Giotto) Mitte 1985 auch keine geben. Nur der Erdsatellit IMP 8 liefert gelegentlich noch ein paar Datenpunkte. Sie sind aber wegen der häufigen Magnetosphärenpassagen und wegen der geringen Bedeutung, die NASA dem Satelliten noch beimißt, sehr spärlich. Das Plasmainstrument auf dem Satelliten ISEE 3, der gerade auf dem Weg zum Kometen Giacobini-Zinner ist, arbeitet nur noch teilweise. Auf HELIOS 1 aber läuft in Sonnennähe noch alles ganz vorzüglich. Und gerade dafür ist die Sondenmission ja konzipiert worden! In diesen Teil des Sonnensystems wird bestimmt in den nächsten zehn, zwanzig Jahren keine Mission mehr vorstoßen. Was wir jetzt darüber noch erfahren können, dürfen wir nicht verschenken.

So könnte HELIOS 1 auch noch Wichtiges beitragen zu der breitangelegten Kampagne zur Erforschung des Halleyschen Kometen Anfang 1986. Gerade zur rechten Zeit wird HELIOS 1 das 22. Perihel durchlaufen und könnte uns Auskunft geben über den Sonnenwind, der dann kurze Zeit später auch den Kometen trifft, während dort gerade die fünf Kometensonden ankommen.

Selbst unsere kühnsten Träume würden aber übertroffen, sollte HELIOS 1 sogar noch über den Start von Ulysses (1986) hinaus leben. Dadurch wäre ein direkter Anschluß dieser beiden wich-

tigsten Sonnenmissionen unserer Epoche gewährleistet. Leider sind alle anderen Bemühungen gescheitert, eine Referenzmission für ULYSSES zu schaffen. So würde ULYSSES wahrscheinlich völlig isoliert fliegen, ohne jede direkte Vergleichsmöglichkeit mit früheren Missionen und später, beim Flug über die Sonnenpole – auch ohne Vergleichsmöglichkeit mit Instrumenten, die an die Ekliptik gebunden sind. Die gute alte HELIOS 1-Sonnenmission könnte hier einspringen. Und das beinahe zum Nulltarif! Man bedenke, daß ein ganzes Jahr Verlängerung der HELIOS 1-Mission (davon je sechs Monate Betriebsdauer) für nur etwa ein halbes Promille der bisherigen Gesamtkosten zu haben ist, noch dazu ganz ohne Risiko! Denn der Start ist längst erfolgt, und alles ist so gut ausgetestet, wie selten jemals bei einem Raumfahrtprojekt...

So sehen wir aus der Sicht unseres Plasmaexperimente hoffnungsvoll der Zukunft entgegen. Wir sind darauf genauso gespannt wie auf die Ergebnisse, die noch unentdeckt in den schon gewonnenen Daten aus der Vergangenheit schlummern. Die Faszination, die von diesem einzigartigen Projekt von jeher ausging, ist ungebrochen und läßt uns weiterhin nach vorne blicken.

$2 \times 10^{22} \text{ N} \cdot \text{m/sterad}$ . *This is the continuous average loss of angular momentum of the sun. From this result we know now that the sun is able to stay rotating about its axis for another couple of billion years.*

*The value of the angular momentum defines the critical point, i.e. the distance from the sun, where the solar wind particles are leaving the corotating corona to start travelling outward as the solar wind. This should be at about 12 solar radii. However, if one tries to figure out this distance separately for fast and slow solar wind, one gets the surprising result that close to the sun almost the whole angular momentum loss is given to the slow wind. Its critical point should be as far out as 30–40 solar radii, while the critical point of the fast wind is supposed to lie much closer in. Thus the different kinds of the solar wind originate from different height regions of the corona. We come to this conclusion also by a completely different observation: fast solar wind contains in average 3.6% Helium, slow solar wind only 2.5%*

*Many of the results, especially of the surprises we have presented here, have been gained during mission phases, for which nobody had planned, and when the eighteen months of planned "extended" mission had long passed. Many questions that might have been answered by HELIOS are still open. We therefore hope that HELIOS 1 remains alive at least until the mission ULYSSES, a space probe destined to travel out of the ecliptic plane and over sun's poles, has been launched. This would give us the chance to intercalibrate the plasma-experiments of both missions in order to continue and extend the observations obtained by HELIOS.*

# Ergebnisse der Magnetfeldexperimente E2 und E4 an Bord von HELIOS 1 und HELIOS 2

F. M. Neubauer

Institut für Geophysik und Meteorologie der Universität Köln

G. Musmann, G. Dehmel, Technische Universität Braunschweig



Neubauer



Musmann



Dehmel

## Das interplanetare Magnetfeld

Der Raum zwischen der Sonne und den Planeten des Sonnensystems ist erfüllt vom Sonnenwind, der als heißes, dünnes Plasma mit einer Geschwindigkeit von mehreren 100 km pro Sekunde etwa radial von der Sonne wegströmt und vom interplanetaren Magnetfeld durchsetzt ist. Darüber hinaus finden wir Staubteilchen aller Größen einerseits und geladene atomare Teilchen bis zu sehr hohen Energien andererseits, die von der Sonne oder aus unserer näheren und ferneren Umgebung in der Galaxis stammen. Da das Plasma des Sonnenwindes aus geladenen Teilchen besteht, ist es außerordentlich stark elektrisch leitend. Dies führt zu einer engen Verkopplung zwischen Sonnenwindplasma und Magnetfeld, wobei man von einem „eingefrorenen Magnetfeld“ sprechen kann. Abb. Seite 81 veranschaulicht dieses Konzept. Es bedeutet, daß die Magnetfeldlinien vom Plasma mitgenommen werden, oder umgekehrt, daß das Magnetfeld Plasmaströmungen kanalisiert. Diese Erscheinung ist im Kosmos der Normalfall, während sie unserer alltäglichen Vorstellung von strömenden Medien widerspricht. Zum Beispiel ist die Luft der unteren Atmosphäre – glücklicherweise – so schwach elektrisch leitfähig, daß keine Kopplung vorhanden ist. Sonst würde jede Windbö zu einer Schwankung der Kompassnadel führen, abgesehen davon, daß diese dann zum Finden der Nordrichtung sowieso unbrauchbar wäre.

Der eingefrorene Charakter des interplanetaren Magnetfeldes bringt es mit sich, daß Strömungsvorgänge im Plasma sich auch im Magnetfeld widerspiegeln, so daß dies zum wichtigen diagno-

stischen Hilfsmittel für das Plasma wird. So bewegt sich für einen Beobachter, der mit der Sonne rotiert, das Sonnenwindplasma im Mittel parallel zu den Magnetfeldlinien. Wir erinnern an dieser Stelle daran, daß sich die sichtbare Sonnenoberfläche in der Photosphäre der Sonne (von der Erde aus gesehen) mit Rotationsperioden von 25 bis über 30 Tagen um ihre Achse dreht, wobei die Rotationsperiode vom Äquator zu den Polen monoton zunimmt. (Wegen der Eigenbewegung der Erde erscheinen diese synodischen Perioden etwas länger als die auf den Fixsternhimmel bezogenen siderischen Rotationsperioden.) Somit ist auch ein Beobachtungspunkt im interplanetaren Raum durch eine einwärts oder auswärts gerichtete Feldlinie mit der Quellregion des beobachteten Sonnenwindes auf der Sonne verbunden. Man spricht bei auswärts gerichteten Feldlinien von positiver Polarität (+) und umgekehrt von negativer Polarität (-) bei einwärts gerichteten Feldlinien. Wenn die Sonnenmagnetfelder für einen Beobachter, der mit der Sonne rotiert, zeitlich konstant bleiben, erlebt ein Beobachter auf einem Erdsatelliten in hinreichender Entfernung von der Erde (außerhalb des Erdmagnetfeldes) einen periodischen Wechsel der Polarität von (+) nach (-) und von (-) nach (+) im Rhythmus der synodischen Rotationsperiode der Sonne. Bereits vor etwa zwei Jahrzehnten wurde entdeckt, daß während einer Sonnenrotation typisch zwei oder vier „Sektoren“ mit abwechselnd positiver oder negativer Polarität auftreten.

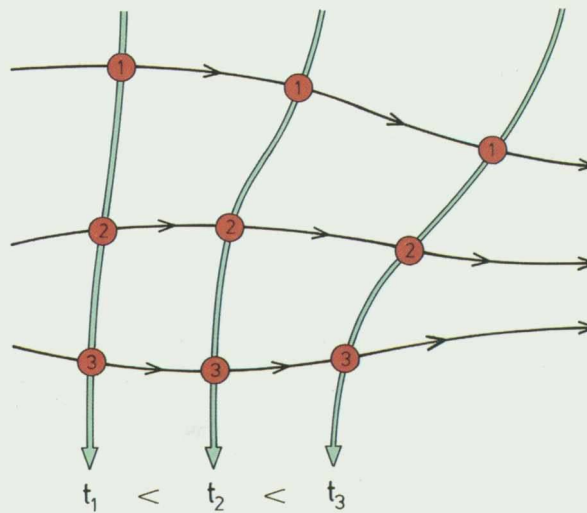
Der Zusammenhang zwischen diesen Sektoren und Magnetfeldstrukturen auf der Sonne wurde erst vor etwas mehr als zehn Jahren aufgeklärt,

*F. M. Neubauer, G. Musmann and G. Dehmel were responsible for the design, for the operation and for the scientific results of two magnetometers, a flux gate magnetometer (E2) and a search coil magnetometer (E4). Another flux gate magnetometer (E3, see page 90) was built and operated by the Goddard Space Flight Center of NASA in cooperation with the Università di Roma, Italy.*

*The solar wind, this flow of atomic particles, streaming continuously outward away from the sun, consists almost exclusively of electrons and ions. Every moving charged particle, negatively charged electrons as well as positively charged ions, generates a magnetic field around itself. Its intensity depends on the amount of charge and on the velocity. The many elementary fields of the solar wind interfere with the magnetic field of the sun. By this fact the magnetic field of the sun is pulled out by the solar wind far into space. This is called "frozen-in magnetic field". Fig. page 81 is a sketch of this state. The close coupling between the solar wind and the magnetic field causes the magnetic field to be an important diagnostic tool in investigating the plasma.*

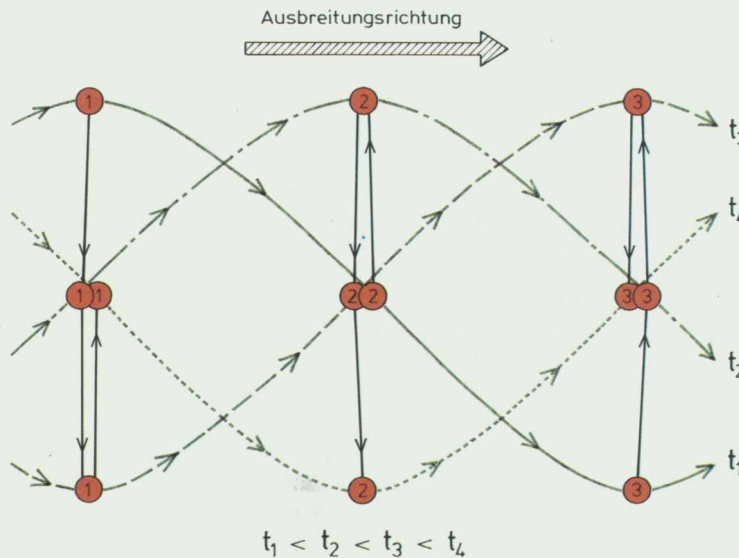
*If the sun were a resting body one would expect a radially outward directed magnetic field. However, the sun rotates (period 30 days near the poles, 25 days at the equator). Therefore the starting points of the outward directed magnetic field lines surround also the sun once per almost four weeks. The magnetic field lines are deformed to Archimedean spirals. One denotes a field positive, if it is directed away from*

als die sogenannten Koronalöcher entdeckt worden waren. Aus optisch-spektroskopischen Beobachtungen des Magnetfeldes der Sonnenoberfläche, der Photosphäre, mit Hilfe des atomphysikalischen Zeeman-Effektes ergibt sich im Zusammenhang mit anderen Beobachtungen und Modellvorstellungen, daß das Sonnenmagnetfeld in der Photosphäre und der darüberliegenden Chromosphäre und Korona sehr kompliziert aufgebaut ist. Die Sonnenoberfläche kann hier unterteilt werden in Gebiete mit geschlossenen Magnetfeldstrukturen (siehe Abb. Seite 82) und in solche mit Feldlinien, die in den interplanetaren Raum hinausgehen bzw. von dorthier kommen. Gebiete mit offenen Feldlinien in der Korona erscheinen bei Röntgenbeobachtungen der Sonne wegen ihrer geringeren Dichte und Temperatur als dunkle Löcher (woraus der Name Koronaloch abgeleitet wurde), umgeben von hell leuchtenden Gebieten (vgl. Abb. Seite 31). Diese Koronalöcher sind wegen ihrer offenen Magnetfeldstrukturen als Quellregion des Sonnenwindes anzusehen. Koronalöcher entgegengesetzter Polarität sind typisch durch arkadenartige Magnetfeldstrukturen getrennt bzw. miteinander verbunden. Außer zwei ständig vorhandenen Koronalöchern an den Polen mit Ausbuchtungen bis in die Äquatorgegenden hinein, treten in niedrigen Breiten öfter auch isolierte Koronalöcher auf. Abb. Seite 82 illustriert die Situation in der Nähe und in einigem Abstand von der Sonne. Die Abbildung zeigt auch, daß in großer Höhe oberhalb der Sonnenoberfläche die Magnetfeldstruktur immer einfacher wird. Schließlich liegen nur noch offene Feldlinien vor. Die Gebiete positiver und negativer Polarität sind durch sogenannte Stromschichten getrennt. Abb. Seite 82 zeigt die einfache aber typische Situation, in der eine Stromschicht nahe dem Äquator der Sonne Bereiche um den Nordpol mit positiver von Bereichen um den Südpol mit negativer Polarität trennt. Die nördlichen und südlichen Ausbuchtungen der Stromschicht in diesem „Ballerinamodell“ führen zur abwechselnden Messung positiver und negativer Polarität auf einem Raumfahrzeug, über das die Struktur wegen der Sonnenrotation hinwegläuft.



a) Beispiel der Feldverzerrung in einer inhomogenen Strömung

a) Example of the field distortion in an inhomogeneous flow

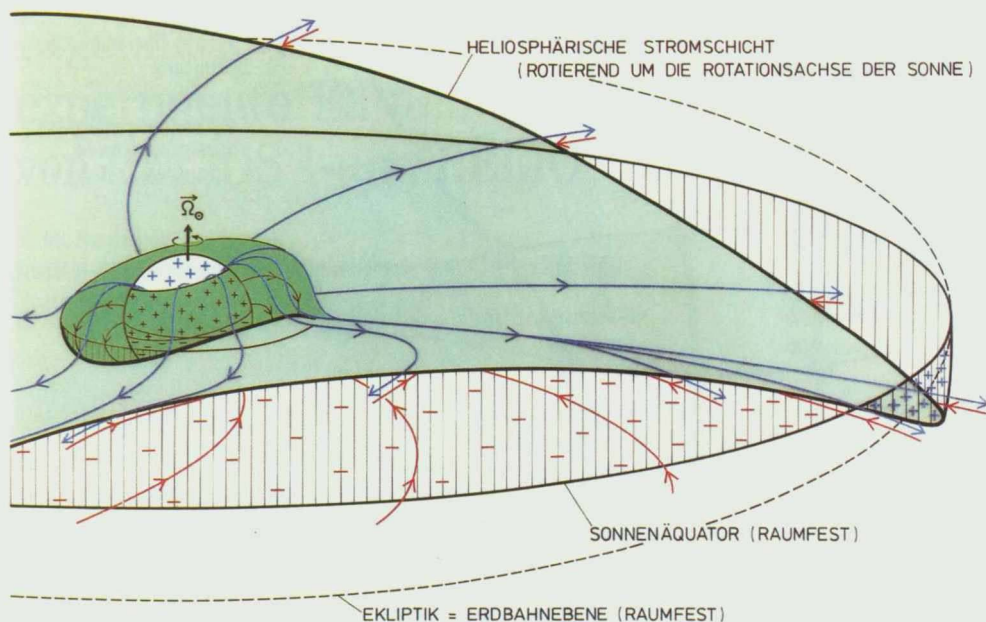


b) Beispiel für eine Alfvénwelle, die sich in Pfeilrichtung (schraffiert) ausbreitet und zwar parallel zum mittleren Magnetfeld. Daher sind die Richtungen der Bewegung und der von der Welle erzeugten Magnetfeldstörung entgegengesetzt.

b) Example of an Alfvén wave propagating in the direction of the shaded arrow parallel to the mean magnetic field. Hence the directions of motion and magnetic field disturbance due to the wave are antiparallel.

Die Abb. versucht an zwei Beispielen, das Konzept der eingefrorenen Magnetfelder zu veranschaulichen. In beiden Teilen a und b sind Magnetfeldlinien grün und Bahnen der mittleren Teilchenbewegung schwarz dargestellt. Plasmamassenelemente sind rot und numeriert. Die Lage wird zu verschiedenen Zeiten  $t_1 < t_2 < t_3$  etc. dargestellt.

The figure attempts to give a conceptual view of the "frozen-in field" concept. In both parts a and b magnetic field lines are shown in green and particle trajectories in black. Plasma mass elements are red and numbered. Their positions at times  $t_1 < t_2 < t_3$  etc. are shown.



In der Abb. wird der Ursprung des interplanetaren Magnetfeldes veranschaulicht. Das großräumige Magnetfeld der Sonne ist in Gebiete positiver (+) und negativer (-) Polarität entsprechend von der Sonne weggehenden und zur Sonne laufenden Feldlinien unterteilt. Magnetfeldlinien können in Sonnennähe geschlossene Feldlinien bilden, die positive und negative Polaritäten verbinden. Diese Gebiete sind grün dargestellt. Die Feldlinien können aber auch als „offene“ Feldlinien in den interplanetaren Raum hinausgehen (blau) oder von dort her kommen (rot). Solche Gebiete „offener“ Feldlinien entsprechen in Sonnennähe den Koronalöchern. Während in der Abbildung Koronalöcher an den Polkappen gezeigt sind, entstehen und vergehen im Laufe des Sonnenzyklus Ausbuchtungen zum Äquator hin und auch von den Polen isolierte Koronalöcher. Im interplaneta-

ren Medium sind die Feldlinien positiver und negativer Polarität durch die heliosphärische Stromschicht getrennt, die oberhalb des „Wulstes“ geschlossener Feldlinien um die Sonne anfängt. Die interplanetaren Feldlinien werden durch die Rotation der Sonne zu Archimedischen Spiralen verformt. Ein Beobachter im interplanetaren Medium „sieht“ positive oder negative Polarität, je nachdem, ob er sich oberhalb bzw. unterhalb der Stromschicht aufhält. Die HELIOS-Raumfahrzeuge bewegen sich in der Erdbahnebene (Ekliptik), die gestrichelt eingezeichnet ist. Die Polaritätsverteilung auf der Sonne mit positiven Polaritäten im Norden und negativen im Süden entspricht der Verteilung während der ersten Jahre der HELIOS-Mission.

*The figure sketches the origin of the interplanetary magnetic field of the sun is subdivided into field lines away from the sun (+) and towards (-) the sun i.e. positive and negative polarity. On one hand magnetic field lines can close near the sun connecting positive and negative polarities. These regions are shown in green. On the other hand field lines can stretch out into interplanetary space (blue) or come from interplanetary space (red) as "open" field lines correspond to coronal holes. Whereas the figure shows polar coronal holes only, extensions of the polar holes toward the equator build up and disappear in the course of the solar cycle. Even isolated holes may appear sometimes. In interplanetary space field lines of positive and negative polarity are separated by the*

*heliospheric current sheet which originates immediately above the torus-like region of closed field lines. The interplanetary field forms spirals due to the rotation of the sun. An observer in interplanetary space can "see" positive or negative polarity depending on whether he is above or below the current sheet. The HELIOS spacecraft orbit in the plane of the earth (ecliptic) which is shown dashed. The sense of polarity on the sun corresponds to the first years of the HELIOS mission with positive polarity in the northern hemisphere and negative polarity in the south.*

Mit der näherungsweise bekannten Form der Feldlinien kann jeweils durch Zurückverfolgen das Gebiet der Korona bestimmt werden, aus dem eine beobachtete Feldlinie stammt. Die Form der Feldlinien stellt sogenannte archimedische Spiralen dar (Abb. Seite 82). Die in der Abb. dargestellte Polaritätsverteilung zwischen Nord und Süd entspricht derjenigen während der ersten Monate und Jahre der Mission HELIOS. Bis über 1980 hinaus herrschte auf der Nordhalbkugel positive Polarität vor.

Der großräumigen Struktur des interplanetaren Magnetfeldes überlagern sich mannigfaltige dynamische Vorgänge wie die nach dem schwedischen Nobelpreisträger Hannes Alfvén benannten Alfvénwellen. Außerdem treten nach Sonneneruptionen Stoßwellen auf, die analog zu anderen explosionsartigen Vorgängen heftige Störungen des interplanetaren Mediums und der Umgebung der Planeten hervorrufen. Das interplanetare Magnetfeld spielt außerdem eine wichtige Rolle bei der Bewegung der energiereichen Teilchen der kosmischen Strahlung. Teilchen mäßiger und hoher Energien werden nur vom interplanetaren Magnetfeld daran gehindert, auf geraden Bahnen zu fliegen. Solche Teilchen vollführen unter dem Einfluß des Magnetfeldes sehr komplizierte Bewegungen. Nur Teilchen extrem hoher Energien lassen sich auch vom Magnetfeld der Sonne nicht beeinflussen.

Im folgenden sollen nach einer kurzen Beschreibung der benutzten Instrumente einige ausgewählte Ergebnisse dargestellt werden.

#### Die Magnetfeldexperimente E2 und E4

Die Magnetfeldexperimente E2 und E4 an Bord von HELIOS 1 und HELIOS 2 unterscheiden sich dadurch, daß E2 die langsamen Variationen des interplanetaren Magnetfeldes bis zu einer Frequenz von ca. 4 Hz mißt. E4 kann als magnetische Antenne angesehen werden zur hochempfindlichen Messung von schnellen Magnetfeldschwankungen bis zu 2.2 kHz (im Bereich der Töne entspricht diese Frequenz einem cis').

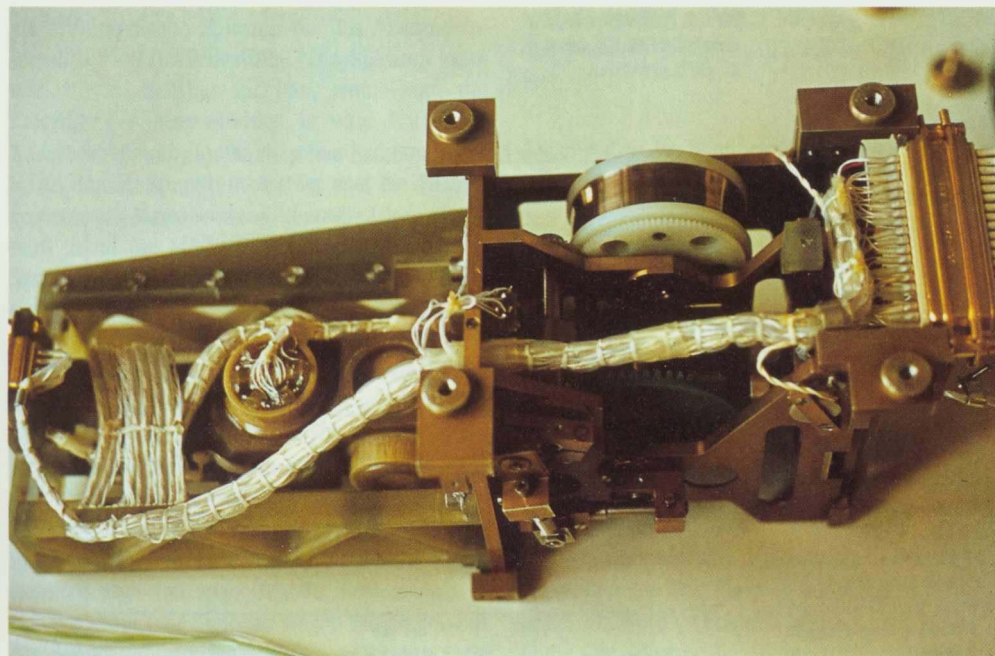
Das Experiment E2 wurde unter Federführung des Instituts für Geophysik und Meteorologie der TU Braunschweig entwickelt. Es besteht aus einem Förstersondensensorsystem zusammen mit einer mechanischen Umklappeinrichtung, die auf Kommando zu Kalibrierungszwecken das Sensorsystem ruckweise um eine Achse dreht. Dies geschieht durch einen unmagnetischen Federmotor, der in Abb. Seite 83 im geöffneten Zustand des Meßsystems zu sehen ist. Dieser Teil des Instruments wurde an einem der Ausleger jedes HELIOS-Raumfahrzeugs angebracht, um den magnetischen Störungen des Raumfahrzeugs zu entgehen. Im Inneren der Raumsonden befindet sich die Elektronik zum Betreiben des Magnetometers. Außerdem gehört dazu die vom Institut für Datenverarbeitungsanlagen der TU Braunschweig entwickelte Digitalelektronik zur Berechnung von Mittelwerten der gemessenen Felder an Bord der Sonden sowie zur Erkennung von Stoßwellenereignissen, deren Meßdaten mit sehr hoher Zeitauflösung in einen Datenspeicher eingelesen werden mußten. Das Magnetometer E2 auf HELIOS 1 arbeitete vom Start bis zum jetzigen Zeitpunkt einwandfrei. Nur der Umklappmechanismus fiel wegen der viel zu hohen

Temperaturen am äußeren Ausleger bereits beim ersten Periheldurchgang aus. Das Magnetometer E2 auf der Raumsonde HELIOS 2 arbeitete nach geändertem Temperaturkontrollsystem des Raumfahrzeugs bis zum Verlust des Raumfahrzeugs einwandfrei einschließlich des Umklappmechanismus.

Das Magnetfeldexperiment E4 (Induktionsspulensexperiment) führte in drei aufeinander senkrechten Achsen Messungen schneller Magnetfeldfluktuationen durch und beobachtete elektromagnetische Wellen im Plasma. Es wurde federführend vom Institut für Nachrichtentechnik der TU Braunschweig entwickelt. Einen dazugehörigen digitalen Spektralanalysator lieferte das Institut für Datenverarbeitung der TU Braunschweig. Bis zum Ausfall durch weit überhöhte Temperaturen arbeiteten die Instrumente E4 auf HELIOS 1 und HELIOS 2 einwandfrei.

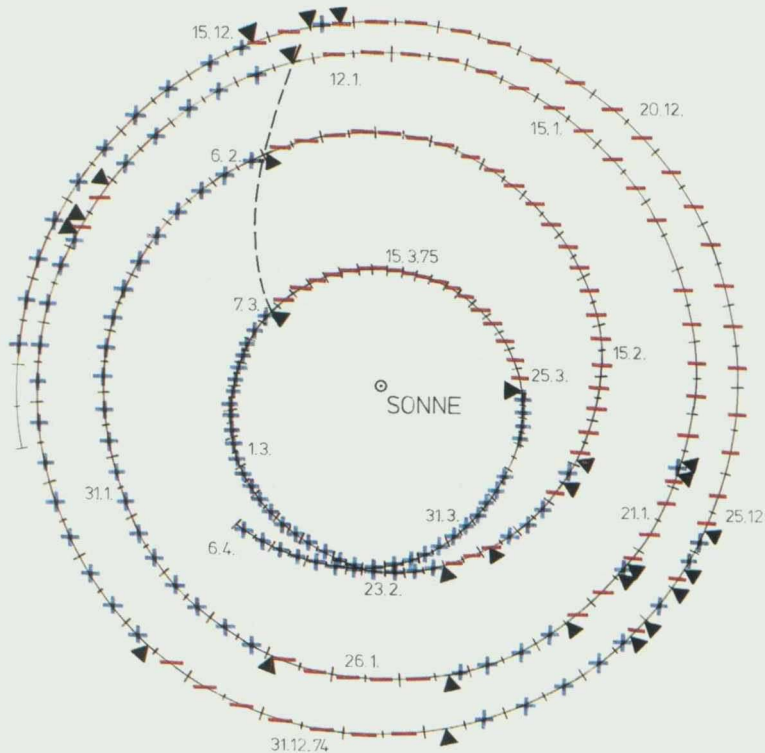
Ein weiteres Magnetometer, E3, das ähnlich arbeitet wie E2, wurde vom Goddard Space Flight Center der NASA in Zusammenarbeit mit der Universität Rom an Bord von HELIOS eingesetzt. Seine Auswertungsergebnisse bestätigen diejenigen der E2-Auswertung, wobei aber auch einige

*the sun and vice versa. It has become common to talk of sectors for regions of uniform polarity. About two decades ago already, it was discovered that two or four sectors appear during a solar rotation alternately at positive and negative polarity. The interrelation between these sectors and the magnetic field structures on the sun was clarified about ten years ago, when during solar observations from Skylab the so-called coronal holes were discovered. Such coronal holes are regions in the sun's atmosphere with very low density, while the regions brightly radiating in the light of X-rays contain substantially denser matter. Plasma is kept densely together and does not flow apart if it is bottled in by strong magnetic fields. Therefore the coronal holes prove themselves to be regions of open magnetic field structures. Closed magnetic field structures can be found in the bright regions. Fig. page 82 explains the facts schematically.*



Ansicht des geöffneten Sensorteils des Magnetfeldexperiments E2. Links sieht man zwei der zueinander senkrechten Magnetfeldsensoren. Rechts befindet sich der durch eine Feder mit konstantem Drehmoment betriebene Umklappmechanismus, der durch die Ausdehnung zweier mit Alkohol gefüllter Balgen ausgelöst wird, wenn diese aufgeheizt werden. Die Balgen sind hinter dem Stecker versteckt. Das System arbeitet auch beim Betreiben der Heizung magnetisch störungsfrei. Das Magnetometer liefert seit dem Start von HELIOS 1 am 10. 12. 74 einwandfreie Daten. Bei HELIOS 2 arbeitete das gesamte Instrument bis zum Verlust des Raumfahrzeuges am 3. 3. 80 einwandfrei.

*Open view of the sensor system of the magnetometer experiment E2. On the left two of the three orthogonal sensors can be seen. On the right the flipper mechanism is shown which is energized by a constant torque spring. The spring is initiated by the expansion of two alcohol filled bellows in response to electrical heating. The bellows are hidden behind the connectors. The electrical heating system produces no magnetic disturbances during operation. The magnetometer provides scientific data since the launch of HELIOS 1 on 10 December, 1974. On HELIOS 2 the magnetometer experiment operated properly until the loss of the spacecraft on March 3, 1980.*



Links:  
 Projektion der Bahn von HELIOS 1 auf die Äquator-ebene der Sonne für einen mit der Sonne rotierenden Beobachter (in etwa 25 Tagen). Aus der elliptischen Bahn der Sonde entsteht in dieser Darstellung durch die Rotation der Sonne eine Spirale, die im Uhrzeigersinn durchlaufen wird. Für jeden Tag ist die Polarität des interplanetaren Magnetfeldes angegeben, wobei „plus“ von der Sonne nach außen zeigende Magnetfeldlinien angibt. Eine Sektorgrenze zeigt sehr schön eine Archimedische Spirale entsprechend der Form der Feldlinien. Da HELIOS 1 sich bei der Annäherung an die Sonne in negativen heliographischen Breiten zwischen 0 und 7°,3 befand und bei Entfernung von der Sonne in positiven Breiten, wird die Darstellung etwas verkompliziert. Diese zweidimensionale Darstellung des interplanetaren Magnetfeldes zwischen 0.3 und 1.0 AE für fast zehn Jahre ist erst durch die HELIOS-Mission möglich geworden.

Left:  
 For an observer rotating with the sun (25 days period) the orbit of HELIOS 1 is shown projected on the equatorial plane of the sun. The rotation produces a clockwise spiral orbit of the spacecraft. For every day the polarity of the interplanetary magnetic field is given, where "plus" denotes magnetic field lines pointing away from the sun. One of the sector boundaries (dashed) shows an Archimedean spiral corresponding to the form of the field lines. Since HELIOS 1 was at negative heliographic latitudes between 0° and -7.3° inbound and at positive latitudes outbound, the polarity structure is in general somewhat more complicated. This twodimensional representation between 0.3 AU and 1.0 AU for almost a decade has only become possible by the HELIOS-mission.

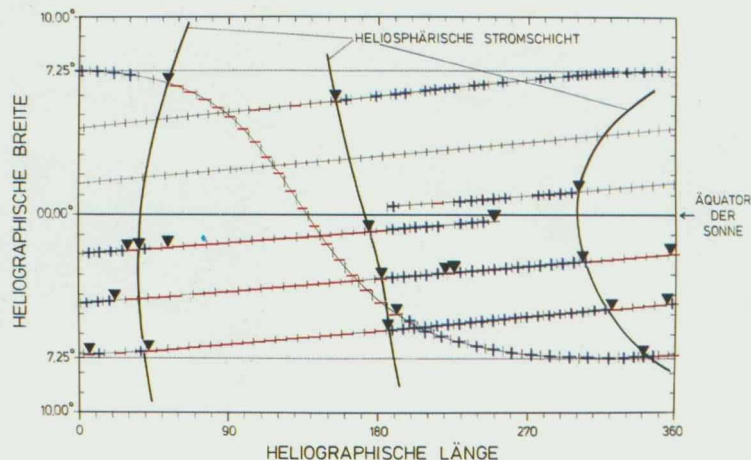
Rechts:  
 Gezeigt wird eine Karte der Umgebung des Sonnenäquators auf einer Kugel um die Sonne in 0.1 AE Abstand (ungefähr 22 Sonnenradien). Die Karte zeigt zunächst eine Abbildung der Bahn von HELIOS 1, wobei jeder Bahnpunkt längs einer berechneten Feldlinie bis zum Abstand 0.1 AE von der Sonne zurückverfolgt wurde. Für jeden Tag ist die Polarität des interplanetaren Magnetfeldes eingetragen. Die Schnittlinie der Stromschiicht, die Bereiche mit Feldlinien trennt, die zur Sonne hin und von der Sonne weglaufen, ist durch dicke

schwarze Striche dargestellt. Für diese Abbildung ist der zeitweise geringe Abstand HELIOS - Sonne und die teilweise schnelle Bewegung in heliographischer Breite außerordentlich günstig, da dies den Vergleich mit beobachteten Sonnenmagnetfeldern erleichtert.

Right:  
 A map of a sphere at 0.1 AU distance from the sun is shown (about 22 solar radii) for latitudes around the equator. Firstly it shows the orbit of HELIOS 1 mapped point

by point from a given orbital position along a computed field line down to the spherical surface at 0.1 AU. For every day the polarity of the interplanetary magnetic field is shown. The intersection between the heliospheric current sheet separating field lines with positive and negative polarity with the sphere at 0.1 AU is shown by thick solid lines. For this type of mapping enabling a comparison with observed solar magnetic fields the close distance to the sun and the fast motion in latitude of HELIOS at certain times are particularly favourable.

HELIOS - 1    ABBILDUNG AUF KUGEL MIT RADIUS = 0.1 AE  
 ZEITINTERVALL : 11. 12. 74 — 11. 6. 75



andere wissenschaftliche Fragestellungen untersucht wurden (siehe Seite 90).

### Die großräumige Struktur des interplanetaren Magnetfeldes innerhalb der Erdbahn

Die Beobachtungen von HELIOS 1 begannen am 10. Dezember 1974. Zunächst einmal interessierte es, ob die großräumige Struktur des interplanetaren Magnetfeldes mit den theoretischen Vorstellungen übereinstimmt. Erwartet wurde eine spiralförmige Struktur mit nach außen abnehmender Magnetfeldstärke. Eine Spirale entsteht dann, wenn bei der Zerlegung der Richtungspfeile der Spirale die radial nach außen bzw. nach innen weisenden Komponenten stärker abnehmen als die dazu senkrechten. Das wurde tatsächlich beobachtet: die radiale Komponente nimmt quadratisch mit der Entfernung von der Sonne ab. In doppeltem Sonnenabstand ist diese Komponente demnach auf ein Viertel abgesunken. Die dazu senkrechten Komponenten dagegen zeigen lineare Abhängigkeit: in doppeltem Abstand ist diese Komponente noch halb so groß. Die HELIOS-Beobachtungen mittels E2 beweisen also, daß diese auf dem Konzept des eingefrorenen Magnetfeldes beruhenden Vorstellungen richtig sind. Damit ist auch die Form der Feldlinien als Archimedische Spiralen für das Abstandsintervall 0.3 – 1.0 AE bestätigt. Die Spiralen kann man direkt sichtbar machen, wenn man die Polarität des Magnetfeldes in eine Karte der Äquatorebene der Sonne zwischen Erde und Sonne an den Meßpunkten einträgt und die Sektorgrenzen als Markierungen benutzt. Diese Karte muß dabei für einen Beobachter, der mit der Sonne rotiert, gezeichnet werden. Abb. Seite 84 links zeigt in diesem rotierenden System zunächst die Bahn von HELIOS 1 vom Start am 10.12.74 bis zum 6.4.75. Das Raumfahrzeug läuft auf einer spiralförmigen Bahn zunächst einwärts (bis zum Perihel) und dann auswärts. Eine der Sektorgrenzen zeigt besonders schön die erwartete Archimedische Spiralstruktur des interplanetaren Magnetfeldes. Meistens ist die Spiralstruktur in Darstellungen dieser Art aber nicht so schön sichtbar. Dies hat zwei Gründe. Erstens ändert sich die räumliche Struktur wegen Vorgängen auf der Sonne oft sehr rasch, während unsere Dar-

stellung von Verhältnissen ausgeht, die über Monate stabil bleiben. Zweitens hängt die Polarität insbesondere bei nur schwach gegen den Sonnenäquator geneigten Stromschichten nach Abb. Seite 82 sehr stark von der heliographischen Breite ab. Wie bereits auf Seite 25 erwähnt, ist der Sonnenäquator gegen die Bahnebene von HELIOS in der Erdbahnebene oder Ekliptik um etwa  $7^{\circ},3$  geneigt. Dadurch bewegen sich die HELIOS-Raumfahrzeuge auf ihrer Bahn um die Sonne zwischen  $-7^{\circ},3$  und  $+7^{\circ},3$ . Diesen Sachverhalt kann man besonders gut sehen, wenn man die Magnetfeldlinien durch jeden Meßpunkt längs einer Spirale zur Sonne zurückverfolgt. Abb. Seite 84 rechts zeigt zunächst einmal die auf eine sonnennahe Kugel im Abstand von 0.1 AE (ca. 22 Sonnenradien) abgebildeten Bahnstücke von HELIOS 1. Die Magnetfeldpolaritäten sind ebenfalls dargestellt sowie die Lage der Stromschicht des „Ballerinamodells“ von Abb. Seite 82. Wie man sieht, hat diese Stromschicht eine komplizierte Struktur, so daß die beobachteten Sektoren positiver und negativer Polarität des interplanetaren Magnetfeldes stark von der heliographischen Breite abhängen. Ähnliche Diagramme, die gute Übereinstimmung mit Modellen des Magnetfeldes der Sonnenkorona zeigen, wurden mit den Messungen von E2 für das gesamte Zeitintervall 1975 – 1980 konstruiert.

### Alfvénwellen im Sonnenwind

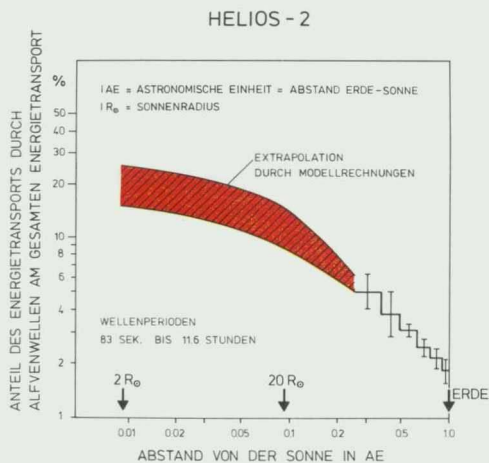
Im vorigen Abschnitt haben wir uns für Strukturen im interplanetaren Magnetfeld interessiert, die das globale Verhalten innerhalb der Erdbahn über mehrere Monate hinweg betreffen. Dieses bedeutet aber nicht, daß über kürzere Zeiten nichts geschieht. Das interplanetare Magnetfeld zeigt eine gewisse „Böigkeit“ bis zu Zeitintervallen von weniger als einer Sekunde. Im Periodenbereich von Stunden bis herunter zu Minuten ist das hervorstechendste Merkmal das Auftreten von Alfvénwellen.

Man kann sie als fortlaufende transversale Schwingungen des Plasmas auffassen. In Abb. b Seite 81 wurde versucht, sie zu veranschaulichen. Die Alfvénwellenfelder sind aus verschie-

*At the poles coronal holes occur always. They often stretch out as far as to the equatorial regions. Besides that in lower latitudes not seldom isolated coronal holes appear. As shown in fig. page 82 the magnetic field structure gets simpler when going outward, finally very far out nothing else than open magnetic field lines can be found. Sectors of negative and positive polarity are separated from one another by so called current sheets. In the example of fig. page 82 they distinguish the north polar region of the sun with positive polarity from the south polar region with negative polarity. Hannes Alfvén (Swedish Nobel laureate) has compared this rotating structure with the swinging skirt of a dancing girl. He called it "Ballerina model". In space by tracing back from a measuring point along an Archimedean spiral one can achieve this at the place where the foot point of the field line lies. The situation of fig. page 82 relates to that structure during the early months (until about 1980) of the HELIOS mission (+) in the north, (-) in the south.*

*The magnetic field experiment E2 observes slow variations of the interplanetary magnetic field up to 4 Hz. E4 can be considered a magnetic antenna. Its measuring range stretches out to 2.2 kHz.*

*E 2 was developed by the Institut für Geophysik und Meteorologie of the Technische Universität Braunschweig. It consists of a flux gate magnetometer together with a flipper mechanism, allowing the interchangeable calibration of the three axis components of the magnetometer (Fig. page 83). These parts of the experiment are mounted on a boom in order to avoid magnetical disturbances by the spacecraft. The electronics of the experiment, assigned to control the function of the experiment and to record and handle the data, has its place in the central compartment of the spacecraft. Up to now the experiment on HELIOS 1 has worked perfectly. However, because of the high temperatures on board, the flipper mechanism meanwhile has ceased flipping. On HELIOS 2 the experiment worked perfectly til the loss of the probe on*



denen Gründen von großer Bedeutung. Sie können im Sonnenwind eine Art „Strahlungsdruck“ bewirken und Energie transportieren. Dabei ist die Beobachtung wichtig, daß sie sich alle von der Sonne weg ausbreiten. Die Kombination von Messungen des Magnetfeldexperiments E2 und des Plasmaexperiments E1 von HELIOS zeigt, daß sich die Eigenschaften der Alfvénwellen bei Annäherung an die Sonne dramatisch ändern. So beginnt etwa der Anteil hochfrequenter d.h. schnell variierender Alfvénwellen innerhalb von 0.4 AE (etwa in der Nähe der Merkurbahn) rapide zuzunehmen. Abb. Seite 86 zeigt außerdem den Energietransport durch Alfvénwellen in Prozenten des gesamten Energieflusses im Sonnenwind. Während in Erdbahnnähe der Anteil mit 2% fast unbedeutend ist, steigt der Energiefluß durch Alfvénwellen auf 5% bei 0.3 AE. Extrapoliert man dieses Ergebnis mit Hilfe verschiedener möglicher theoretischer Modelle, so ergibt sich in jedem Fall ein Anstieg auf ca. 20% oder mehr in der näheren Sonnenumgebung. Alfvénwellen dürften daher die Entwicklung des Sonnenwindes zwischen der Sonne und dem Perihel von HELIOS bei 0.3 AE wesentlich beeinflussen.

#### Ausbreitung von Stoßwellen nach Sonneneruptionen

Eine der spektakulärsten Erscheinungen auf der Sonne sind Sonneneruptionen, die sogenannten Flares. Bei ihnen wird mit einer Energieset-

Der prozentuale Anteil des Energietransports durch Alfvénwellen am gesamten Energietransport von der Sonne weg im solaren Wind ist als Funktion des Abstandes von der Sonne dargestellt. Die Meßergebnisse zwischen 0.29 AE und 1.0 AE beruhen auf Beobachtungen von HELIOS 2. Die Messungen deuten auf eine beträchtliche Verstärkung dieses Anteils bei Annäherung an die Sonne, was nach Modellrechnungen für den Bereich zwischen der Sonne und 0.29 AU darauf schließen läßt, daß der Energietransport durch Alfvénwellen hier eine wesentliche Rolle spielen könnte.

zung gewaltiger Größenordnung Magnetfeldenergie zur Aufheizung und Beschleunigung von Sonnenplasma benutzt. Viele solche Eruptionen und dynamische Vorgänge in der Sonnenatmosphäre haben das Auftreten von Stoßwellen im interplanetaren Raum zur Folge, die auf ihrem Wege dramatische Störungen des Plasmas hervorrufen und bis weit im Bereich der äußeren Planeten von Raumfahrzeugen nachgewiesen worden sind. Mit Hilfe der HELIOS-Daten wurden etwa 150 interplanetare Stoßwellen genauer untersucht. Eine der mannigfaltigen Fragestellungen im Zusammenhang mit der Physik interplanetarer Stoßwellen bezog sich zum Beispiel auf ihre Geschwindigkeit als Funktion des Abstandes von der Sonne. Sie ist von der Sonne weg höher als die Geschwindigkeit des Sonnenwindes. Während dieser „Geschwindigkeitszuschlag“ in Erdbahnnähe etwa 100 km/s beträgt, steigt die Geschwindigkeitsdifferenz zur Sonne hin mit der reziproken Wurzel aus dem Abstand an, also auf das Doppelte bei einem Viertel des Abstands.

Auch die räumliche Form von Stoßwellenfronten wurde untersucht. Das ist mit einem einzelnen Raumfahrzeug allein kaum möglich. Man muß an möglichst vielen Orten im Raum gleichzeitig messen. Der Start der beiden Jupiter-Saturn-Sonden VOYAGER 1 und 2 im Herbst 1977 bot

*The energy transport by Alfvén waves as the percentage of the total energy transport away from the sun in the solar wind is shown as a function of solar distance. Observational results between 0.29 AU and 1.0 AU are due to HELIOS 2. The observations indicate an increasing importance of the Alfvén waves as the sun is approached. Continuing these trends with some simple model calculations one is led to the conclusion that between the sun and 0.29 AU Alfvén waves may play an important role for the energy transport.*

March 3, 1980. The Search Coil experiment E4, developed by the Institut für Nachrichtentechnik of the Technische Universität Braunschweig operated perfectly for several years on HELIOS 1 and 2 until it failed because of getting too hot.

The observations of HELIOS 1 started on December 10, 1974. The shape of the overall structure of the magnetic field had been expected to be an Archimedean spiral, according to the concept of a frozen-in magnetic field. The observations approved this concept (Fig. page 84 left). Moreover they showed that the radial component of the field is decreasing almost proportional to the square of the distance when travelling away from the sun. The azimuthal component decreases only linearly. Because of the spiral-properties of the field the observations far out in space can well be projected back to the vicinity of the sun.

This has been done in fig. page 84 right to 0.1 AU (about 22 solar radii). The figure regards the obliqueness of sun's axis with respect to the ecliptic plane. HELIOS is overflying a region between  $7^{\circ}.3$  south and  $7^{\circ}.3$  north (see figure page 25). The polarities of the field indicate the warped shape of the current sheet.

Different kinds of short period disturbances are superimposed on the overall structures of the solar wind. Particularly important and typical are Alfvén waves (according to the already introduced Hannes Alfvén). They may be considered a propagating transversal oscillation of the plasma (Fig. page 81). They all move away from the sun, causing some kind of "radiation pressure" and transporting energy. Close by the sun their abundance increases strongly.

Near the earth's orbit their portion of the total energy transport, amounting to 2% is not very important. Near the perihelion of HELIOS (0.3 AU = about 66 solar radii) this portion has already increased to about 5%. Close to the sun it is definitely higher than 20% (Fig. page 86). Alfvén waves are therefore suspected to strongly influence the generation process of the solar wind.



dazu eine bisher einmalige Gelegenheit, um zusammen mit den beiden HELIOS-Sonden und den Erdsatelliten IMP-7 und IMP-8 ein Netz von „Meßstationen“ innerhalb von 2.0 AE von der Sonne zu bilden. Im Zeitintervall 24.-26. November 1977 wurde damit ein grundlegender Vorgang der Stoßwellenphysik beobachtet und zum ersten Mal genauer analysiert. Es handelt sich dabei um die Verschmelzung zweier von der Sonne weglaufender Stoßwellen, bei der eine Stoßwelle von einer später entstandenen schnelleren eingeholt wird. Dieser Vorgang wurde theoretisch für den einfachen Fall eines Gases zum ersten Mal im vorigen Jahrhundert von dem Mathematiker Bernhard Riemann behandelt und für den Fall magnetfelddurchgesetzter Plasmen wie im Sonnenwind vor etwa 30 Jahren von sowjetischen Physikern. Abb. Seite 87 zeigt als Beispiel für die Stoßwellenuntersuchungen das Verschmelzen interplanetarer Stoßwellen als Spezialfall des Riemann-Problems. Während HELIOS 2 noch zwei getrennte Stoßwellen registrierte, wurde in Erdnähe und bei den VOYAGER-Sonden nur noch eine beobachtet. Wichtiger aber ist, daß die genauere Analyse die theoretisch entwickelten Vorstellungen bestätigt. Interplanetare Stoßwellen können das Magnetfeld der Erde so stark stören, daß magnetisch-ionosphärische Stürme ausgelöst werden. Für den untersuchten Fall bedeutet dies, daß an Stelle von zwei Stürmen mittlerer Stärke ein besonders starker magnetischer Sturm auftritt.

### Der Sonnenwind als Plasmalabor

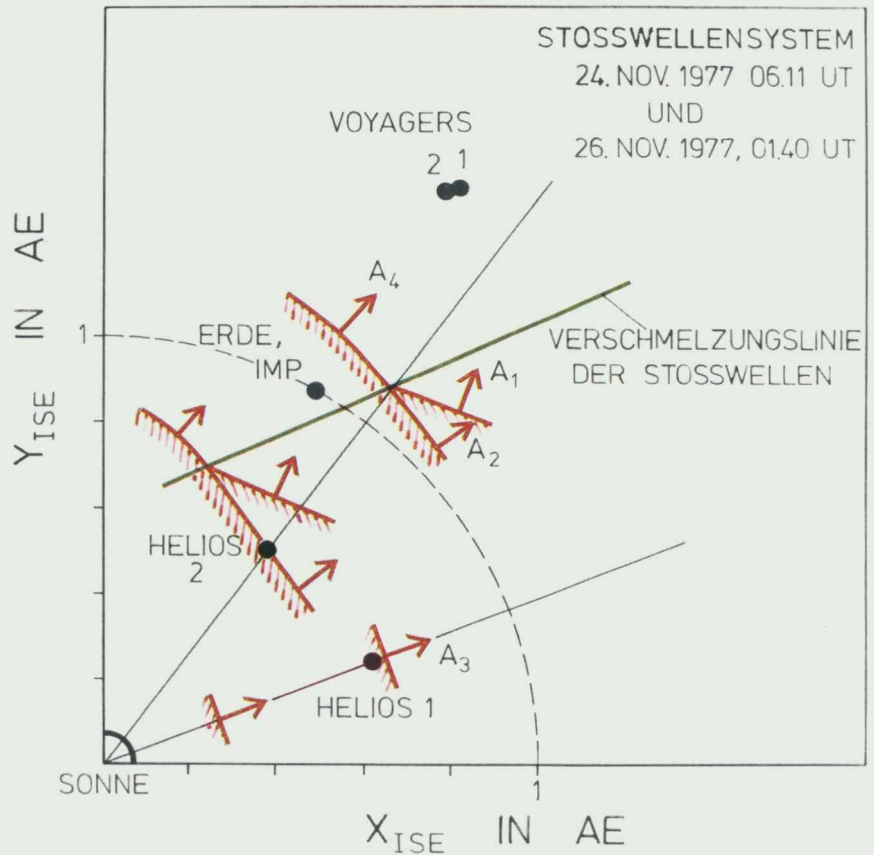
Wir wenden uns nun einem anderen Aspekt der Messungen von HELIOS zu. Die experimentelle Untersuchung von grundlegenden Fragen der Plasmaphysik im Labor stößt auf Probleme, die manchmal unlösbar sind, wie z. B. die Verfälschung der Ergebnisse durch Wandeffekte und durch den Meßvorgang bzw. die Meßapparatur selbst. Diese Schwierigkeiten können bei Messungen mittels Satelliten und Raumsonden vermieden werden. Der solare Wind stellt ein natürliches Plasmalabor dar. Die Feinstruktur von Stoßwellen und anderen ähnlich dünnen Strukturen im Sonnenwind kann im Plasmalabor zum

In einem Quadranten der Ekliptikebene (Ebene der Erdbahn) wird die Ausbreitung von Stoßwellen von der Sonne und ihr Verschmelzen dargestellt. Ursache wenigstens einer der Stoßwellen war eine Sonneneruption großer Stärke am 22. November 1977 um 9.46 UT (Universalzeit). Die Abbildung zeigt die Stoßwellenfronten zu zwei verschiedenen Zeiten nach den Ergebnissen der Stoßwellenanalyse: Auf der Sonne wurden zwei Stoßwellen erzeugt, die von HELIOS 2 beobachtet wurden, wobei die zweite Stoßwelle nach und nach die erste einholte und mit dieser auf der sog. Verschmelzungslinie verschmolz. Am 24. November, 6.11 UT wurde die

zweite Stoßwelle von HELIOS 2 beobachtet. Auf der radialen Linie durch HELIOS 2 holte die spätere Stoßwelle die frühere Stoßwelle am 26. November 01.40 UT ein. VOYAGER 1 und 2 sowie IMP-8 in Erdnähe beobachteten nur eine, nämlich die verschmolzene Stoßwelle in Übereinstimmung damit, daß die Verschmelzungslinie zwischen HELIOS 2 einerseits und IMP-8, VOYAGER 1 und VOYAGER 2 andererseits lag. HELIOS 1 mit nur einer Stoßwellenbeobachtung lag weit abseits. Hier gibt es für die Beobachtung nur einer Stoßwelle mehrere Möglichkeiten.

*The propagation of shocks from the sun as well as their subsequent merging is displayed in a quadrant of the ecliptic (orbital plane of the earth). At least one of the shocks was due to a strong solar eruption (solar flare) on 22 November 1977 at 9.46 UT. The figure shows the shock fronts at two different times following the results of a careful analysis: On the sun two shocks were generated. The second shock then caught up with the first shock merging into one shock at the (green) merging line. The second shock was observed by HELIOS 2 on 24 November at 6.11 UT. On the radial line from the sun through HELIOS 2 the sec-*

*ond shock caught up with the first shock on 26 November at 1.40 UT. VOYAGER 1 and 2 and IMP-8 near the earth observed only one shock i.e. the merged shock in agreement with the location of the merging line between HELIOS 2 on one side and IMP-8, VOYAGER 1 and 2 on the other side. HELIOS 1 with only one shock observation was located far away from the radial line through HELIOS 2. There are several possibilities to explain the observation of one shock only at HELIOS 1.*



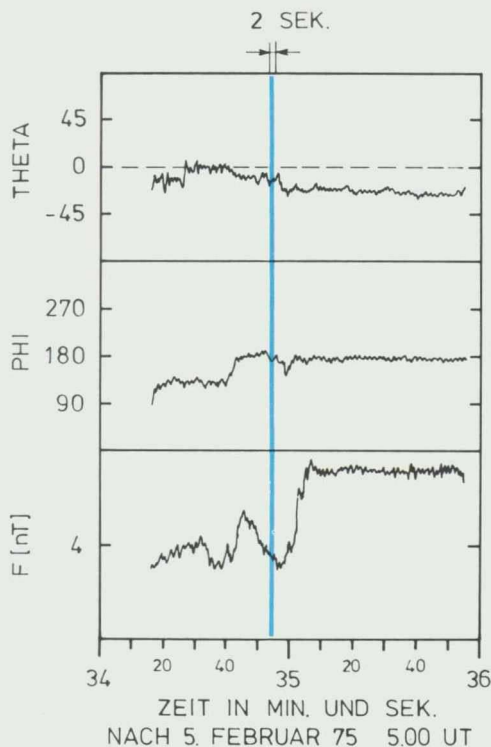


Figure a shows the magnetic field as a function of time for a very thin boundary layer between two regions of plasma in the interplanetary medium.  $F$  is the magnitude of the magnetic field measured in nT i.e. Nanotesla, where 1 nT corresponds to about  $\frac{1}{50000}$  of the terrestrial magnetic field strength. The angles PHI and THETA give the direction of the magnetic field vector (magnetic field arrow). The boundary layer passes by the observer with solar wind flow, where in this case one second corresponds to 100 km depth in the boundary layer. A careful evaluation shows that a strong current perpendicular to the magnetic field flows in the layer. It excites electromagnetic waves of relatively high frequency. Figure b shows these waves observed in the so-called "shock-mode" of the experiment in a plane perpendicular to the direction of propagation. The time interval shown of about 0.4 seconds is only a small fraction of the time interval of 2 seconds of the total wave train observed. The wave rotates in the right-hand sense. The red crosses give the individual measurements. The jump in the magnitude  $F$  of the field in fig. a was identified by an on-board event detector.

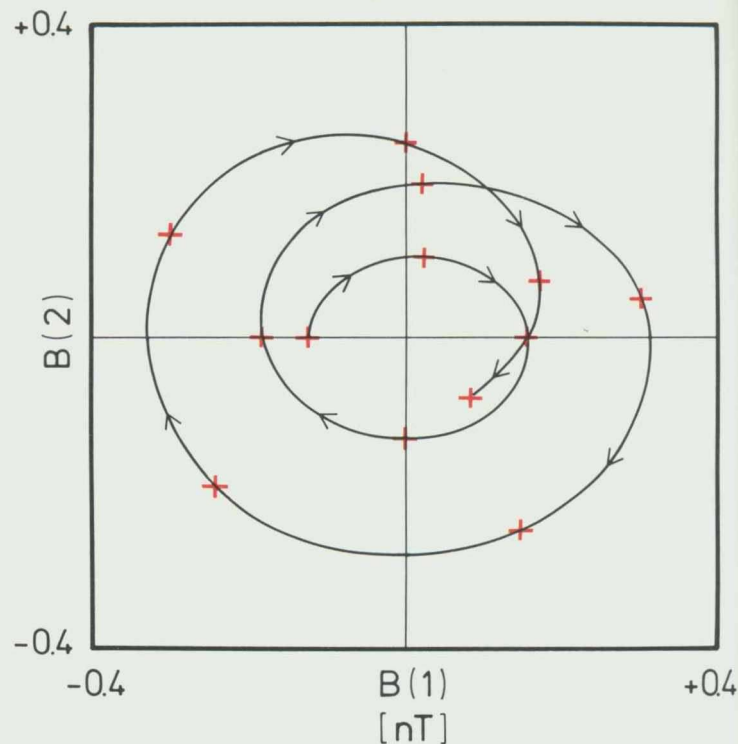


Abbildung a zeigt das Magnetfeld als Funktion der Zeit für eine sehr dünne Grenzschicht zwischen zwei Plasmen verschiedener Eigenschaften.  $F$  ist der Magnetfeldbetrag gemessen in Nanotesla, wobei ein Nanotesla etwa dem 50 000. ten Teil der Erdmagnetfeldstärke entspricht. Die Winkel PHI und THETA geben die Richtung des Magnetfeldes an. Die dünne Übergangsschicht bewegt sich aufgrund der Sonnenwindgeschwindigkeit am Beobachter vorbei, wobei eine Sekunde etwa 100 km entspricht. Eine genauere Auswertung ergibt, daß in der Schicht ein starker Strom fast senkrecht zum Magnetfeld fließt. Der starke Strom regt die Entstehung hochfrequenter elektromagnetischer Wellen an. Abbildung b zeigt diese in der sogenannten

„shock-mode“ des Raumfahrzeugs gemessenen Wellen dargestellt in einer Ebene senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Die in Abb. b dargestellte Zeit ist nur ein Bruchteil von 0,4 Sekunden der Gesamtlänge des „rechtszirkular“ polarisierten Wellenzuges, dessen Gesamtlänge von 2 Sekunden in Abbildung a als blauer Streifen dargestellt ist. Die roten Kreuze in Abb. b geben die einzelnen Meßpunkte an.

Der Sprung im Magnetfeld  $F$  in Abb. a wurde durch einen Ereigniserkennungrechner im Experiment E2 identifiziert.

Teil nur sehr schwer untersucht werden. Das Experiment E4 wurde benutzt, um elektromagnetische Wellen in solchen Strukturen mit höchstmöglicher Genauigkeit zu untersuchen. Dabei entsteht in kurzer Zeit eine sehr große Menge von Meßdaten, die zur Erde übertragen werden müssen. Das übersteigt die Übertragungskapazität der HELIOS-Sonden. Die Daten müssen deshalb an Bord zwischengespeichert werden, um sie später langsam genug zur Erde senden zu können. Dies erfordert aber die genaue Kenntnis des kurzen Zeitintervalls, in dem solche Ereignisse auftreten. Das Problem wurde mit Hilfe eines automatischen Ereignisdetektors gelöst. Er prüft ständig die Meßdaten, die mit hoher Rate durch den Speicher geschoben werden und sortiert besonders vielversprechende Intervalle zur unmittelbaren Übertragung heraus. Treten in den Daten Sprünge auf, zum Beispiel wegen des schnellen Anstiegs der magnetischen Feldstärke bei Ankunft einer Stoßwelle, so hält der Detektor ein Datenintervall vor und nach dem Sprung im Speicher zur späteren, hinreichend langsamen

Übertragung zur Erde fest. Ein großer Teil der wenigen Stoßwellen in den Aktivitätsphasen des automatischen Ereignisdetektors wurde so tatsächlich gefunden.

In Abb. Seite 88 soll aber ein anderes hochinteressantes Ereignis als Beispiel dargestellt werden. Abb. a zeigt die Registrierkurve einer sehr dünnen Magnetfeldstruktur, die durch einen abrupten Anstieg in der Magnetfeldstärke innerhalb weniger Sekunden gekennzeichnet ist. In der Struktur fließt ein starker elektrischer Strom senkrecht zum Magnetfeld. Dieser hat offensichtlich in einem engen Frequenzbereich einen Wellenzug angefacht. Er ist in Abb. b dargestellt, wie er von E4 beobachtet wurde. Die hochaufgelösten Messungen erlauben eine genaue Analyse. Die Welle war rechtszirkular polarisiert. Sie breitete sich unter einem Winkel von  $33^\circ$  zum Magnetfeld aus. Die gemessene Frequenz von 19 Hz entsprach wegen der durch die Relativgeschwindigkeit von HELIOS gegenüber dem Plasma auftretenden Frequenzverschiebung (Dopplereffekt) einer Frequenz von 7 Hz im Plasma. Damit liegt ein Teil der detaillierten Informationen zur Interpretation der Erscheinung vor.

### Schlußbemerkungen

Nach der Darstellung einiger wissenschaftlicher Ergebnisse der Experimente E2 und E4 an Bord der HELIOS-Sonden muß noch die Rolle dieser Mission der Weltraumforschung für die Lehre an einem Universitätsinstitut erwähnt werden. Das Projekt HELIOS gab einer großen Zahl von Studenten der Physik und Geophysik die Möglichkeit, Fertigkeiten für eine spätere Laufbahn in der Industrie zu erwerben. Dies waren zum einen Fertigkeiten in der Meßtechnik, der technischen und organisatorischen Durchführung eines großen Projektes und schließlich die zur Auswertung einer großen Menge Meßdaten notwendigen Fähigkeiten. Bei den Experimenten E2 und E4 mußten immerhin 3200 Magnetbänder verarbeitet werden.

*One of the most spectacular events on the sun are the solar eruptions (flares). In energy transformations of huge dimensions they use magnetic field energy to heat up and to accelerate the plasma. Many such eruptions are responsible for the appearance of interplanetary shock waves drastically disturbing the solar wind plasma and e.g. exciting magnetic storms in the earth's ionosphere. Their evidence has been proved by spacecraft even far out in the region of the outermost planets. The velocity of shock waves near the earth is in average 100 km/sec higher than the velocity of the solar wind. Near the sun the average velocity difference is even higher. In November 1977, thanks to a particularly preferable location of several spacecraft ( HELIOS 1 and 2, VOYAGER 1 and 2 and the earth satellites IMP-7 and -8) for the first time the overall structure of shock waves could be investigated. Two shock waves of different velocity overtook one another and merged to a single, very big one. Fig. page 87 is a diagram of this event. HELIOS 2 observed two still separated shock waves. Close to the earth and by the two VOYAGER spacecraft only one could be found. The theoretically developed assumptions about shock waves were confirmed. Especially E4 contributed with respect to resolving the fine structure of such events. In order to gain particularly high time resolution, by far exceeding the capabilities of direct data transmission, a special work mode using an intermediate data memory was installed on board. The data of short, most interesting events could be registered at highest possible accuracy, to be transmitted slowly to earth later. Fig. a page 88 gives a plot of a very thin magnetic field structure, characterized by sudden increase of the magnetic field strength. Within the structure a strong electric current is flowing perpendicular to the field. This has excited a whirl-like oscillation (Fig. b page 88).*

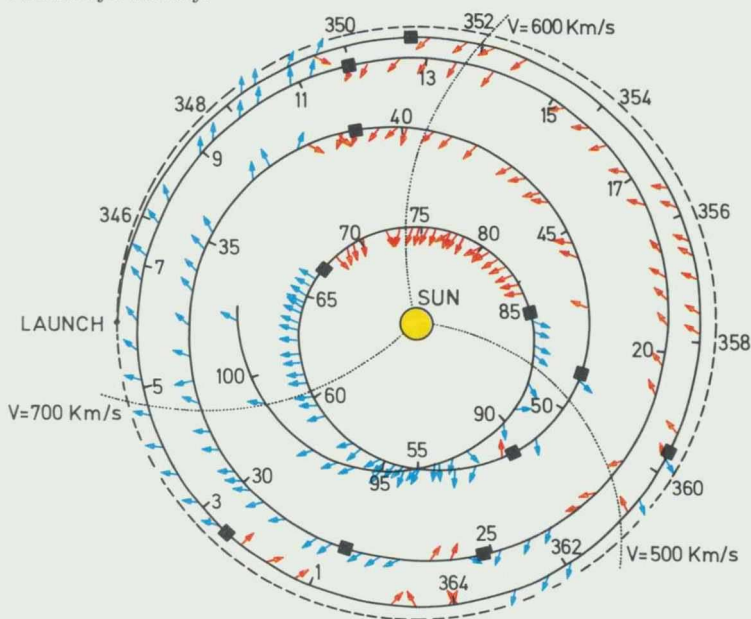
*The results of the experiments E2 and E4 did not only serve science directly but even more indirectly. They have offered a great number of students the opportunity to gain capabilities for their graduation and for their future work.*



Mariani

Feldorientierung von einem Bezugssystem aus gesehen, dessen Mitte die Sonne darstellt und das mit der Geschwindigkeit der Sonne rotiert (siehe auch S. 84 links). Die Tage sind durch Querstriche markiert (1. Januar entspricht Tag 1 des Jahres). In einigen Fällen, die mit Datenlücken zusammenfallen, wurden Mittelwerte über weniger als 12 Stunden (aber mehr als 6) verwendet. Kurven, gekennzeichnet durch die Sonnenwindgeschwindigkeiten  $V = 700, 600$  und  $500$  km/sek stellen idealisierte Feldlinien für die Konfi-

guration gemäß der Theorie von Parker dar. Diese Linien entsprechen nicht den Sektorgrenzen. Die Lage aller deutlich erkennbarer Sektorgrenziennübergänge wird durch dicke Querstriche angezeigt.



# Rome/GSFC Magnetic Field Experiment: A Summary of Results

F. Mariani<sup>1</sup>, N. Ness<sup>2</sup>, B. Bavassano<sup>3</sup>, L. Burlaga<sup>2</sup>, S. Cantarano<sup>4</sup>, C. Scearce<sup>2</sup>, R. Terenzi<sup>3</sup>,  
and U. Villante<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Fisica, Università di Roma, Italia

<sup>2</sup> NASA-Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland

<sup>3</sup> Istituto di Fisica, Spazio Interplanetario CNR, Frascati, Italia

<sup>4</sup> Istituto di Fisica, Università dell'Aquila, Italia

## 1. Description of the Instrument

The magnetic experiment E3 onboard HELIOS 1 and 2 was conceived as a cooperative effort between an American and an Italian scientific group and it resulted in a very successful enterprise. The aim of our experiment was the accurate measurement of the vector magnetic field by a triaxial fluxgate magnetometer. The instrument's sensor was mounted at the end of a 2.5 meter long boom to reduce to an absolute minimum the interference by the S/C or other onboard instruments. An additional feature of the experiment was a device (flipper) to rotate the instrument periodically (once every 36 hours) by  $90^\circ$  about one of the sensors, in order

to allow an inflight evaluation of any residual field at the sensor location. The severe environmental operational conditions, in particular the very intense solar radiation at perihelion, required a very careful thermal protection of the sensor. In order to have an accurate determination of the field despite the large expected variations due to the great heliocentric distance excursions, four different ranges of measurement were adopted, with increasing full range scales at increasing field strengths. Shifting from one range to the upper or lower one was automatically actuated by the internal electroacoustic control circuit, when the field exceeded or decreased beyond some predetermined fixed values. The field measurement was accurate to 1 part over 256 of the actual full scale.

Field orientation as seen in a reference system centered on the sun and containing the HELIOS orbit (see also page 84 left). Transverse bars on the orbit indicate the beginning of the corresponding UT day (January 1 equals day 1). In a few cases, coincident with data gaps, averages over less than 12 hours (but more than 6) have been used. Curves labeled  $V = 700, 600$ , and  $500$  km/s are the field lines for the ideal Parker's configuration corresponding to those solar wind speeds. It should be noticed that the lines are not sector boundaries. The positions of all clear sector boundary crossings are indicated by thick bars transverse to the orbit.

to allow an inflight evaluation of any residual field at the sensor location. The severe environmental operational conditions, in particular the very intense solar radiation at perihelion, required a very careful thermal protection of the sensor. In order to have an accurate determination of the field despite the large expected variations due to the great heliocentric distance excursions, four different ranges of measurement were adopted, with increasing full range scales at increasing field strengths. Shifting from one range to the upper or lower one was automatically actuated by the internal electroacoustic control circuit, when the field exceeded or decreased beyond some predetermined fixed values. The field measurement was accurate to 1 part over 256 of the actual full scale.

The studies made by our magnetic experiment are related to the following fundamental areas.

1. Spatial variation of the magnetic field compared to theories of the dynamics of shock waves, streams, and ambient wind.
2. Quasi-stationary sector structure, its relation to the solar photospheric field, and its relation to the origin of streams and shocks.
3. Origin of filaments and discontinuities, and their physical properties; their evolution with distance from the sun, and/or heliographic latitude.
4. Cosmic ray propagation and interaction with the magnetic field.
5. Frequency spectra (actually measuring wave-number spectra due to convection of the medium

*F. Mariani, N. Ness und Mitarbeiter berichten über Ergebnisse von HELIOS, Experiment 3, einem Magnetometer, das die langsamen Veränderungen des interplanetaren Magnetfeldes beobachtet. Es ist dem Magnetometer von E2 ähnlich. Es wurde von Wissenschaftlern von NASA-GSFC und von der Universität Rom gemeinsam entwickelt, betrieben und ausgewertet.*

*Die Studien des Experiments beziehen sich auf die folgenden Forschungsgebiete:*

*1. Räumliche Veränderung des Magnetfeldes im Vergleich mit Theorien der Dynamik von Stoßwellen und anderen Ereignissen im Sonnenwind.*

*2. Quasi-stationäre Sektorstruktur, ihre Beziehung zur Photosphäre und ihre Beziehung zu Plasmaströmen und Stoßwellen.*

*3. Ursprung von Filamenten und Diskontinuitäten und ihre physikalischen Eigenschaften, ihre Fortentwicklung mit dem Abstand zur Sonne und/oder von der heliographischen Breite.*

*4. Ausbreitung der kosmischen Strahlung und Wechselwirkung mit dem Magnetfeld.*

*5. Frequenz-Spektren, Wellen-Profile, Natur von Übergangsstrukturen und ihre Ursprünge, Wechselwirkungen, Bewegungen und Veränderungen mit dem Abstand.*

*Die HELIOS-Ergebnisse bestätigen eine Theorie, die Parker bereits 1958 aufgestellt hat und von der in anderen Kapiteln bereits gesprochen wurde: die Grundstruktur des interplanetaren Magnetfeldes um den Äquator herum ist eine Archimedische Spirale (vgl. Abb. Seite 90). Im Erdabstand von der Sonne liegt der Winkel zwischen Sonnenrichtung und Magnetfeldrichtung im Mittel bei  $45^\circ$  innerhalb der Ekliptik. Im Perihel von HELIOS geht der Winkel zurück bis ungefähr  $20^\circ$ . Die Polarität des Feldes erwies sich in der Anfangsperiode der Mission als verhältnismäßig stabil. Sie änderte sich über mehrere Sonnenrotationen hinweg nur sehr wenig. Die Übergänge von einer zur anderen Polarität waren vielfach abrupt. Sie benötigten meist nicht einmal eine Stunde. Manchmal gin-*

past the satellite); wave profiles; nature of the fluctuations and their origin, interactions, motions, and variations with distance.

## 2. Large-scale Variations and Sector Structure

Long-term averages (over 1 hour or more) are particularly suitable for studies of the gross structure of the field, such as radial, latitudinal and longitudinal variations in the large region explored by the two HELIOS spacecraft. On some occasions the relative position of the two spacecraft was very appropriate for studying the evolution of some solar wind properties in special configurations, such as alignments along the same radial line or along the same magnetic field line or very close to each other, to study the "coherence" of data collected at the two locations.

A simple theoretical description of the radial variation of the magnetic vector around the Sun, given by Parker as early as 1958, has received confirmation by HELIOS observations. For example, the theory predicts that the large-scale magnetic field in a uniform solar wind with constant speed  $V$  would have, on the equatorial plane of the sun, the form of an Archimedean spiral.

Generally, of course, the wind speed varies appreciably with time, and near the sun ( $\leq 0.1$  AU) it probably varies appreciably with distance, so one should not expect to describe the data in detail. Nevertheless, in some sense the "average" field will be given by Parker's theory with the velocity equal to an "average" solar wind speed.

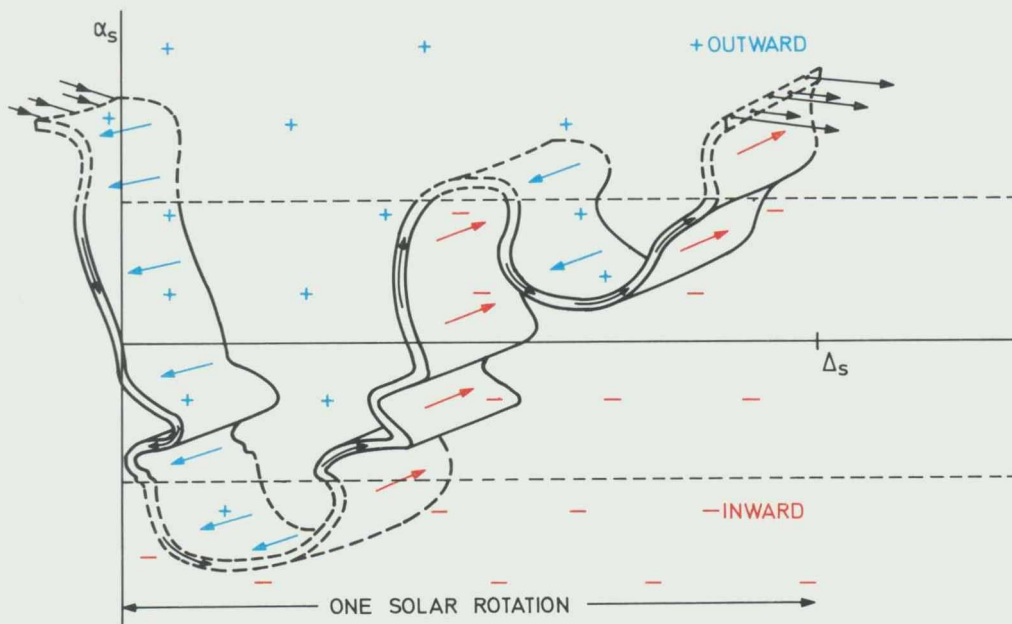
The interesting characteristic of the radial field is the dependence essentially only on the distance  $r$  while the transverse component depends upon  $r$  and the solar wind velocity  $V$ . Thus the local spiral angle of the field at a given distance from the sun is mainly defined by the velocity  $V$ .

As a whole this result from HELIOS is in good agreement with those from Mariner 10 up to distances of 0.46 AU from the sun and extend

their validity to the distance range 0.46–0.3 AU, which Mariner 10 did not explore.

The field direction, which on average is in the plane of the ecliptic and  $45^\circ$  to the radial direction close to earth, decreases to about  $20^\circ$  at the closest approach of the sun. The field polarity, toward the sun or outward, appears to be clearly recurrent for several consecutive rotations (fig. page 90). In many cases, the change from one polarity to the other was abrupt, occurring in less than an hour, while in other cases it was more gradual. Actually, the existence of the opposite polarity field tubes (magnetic sectors), was discovered close to earth in the early observations by IMP-1. The HELIOS data show this is a well-established feature at any distance from the Sun. A systematic study of these polarity transitions by HELIOS led to important results on the three dimensional field topology. There was a debate before the HELIOS data were available as to whether or not the field might be considered as the expansion toward the interplanetary medium of a sort of dipole field of the Sun, with some indication that there was a predominance of a given polarity when the S/C was sampling the field in the northern (or southern) hemisphere of the Sun.

Simultaneous observations made by HELIOS 1 and 2 over four consecutive solar rotations in early 1976 have given clear evidence that the latitudinal and longitudinal locations of the boundary of the opposite polarity sectors are consistent with a warped surface extending out of the Sun at an inclination  $\alpha$  of about  $10^\circ$  with respect to the heliographic equator (Figure page 92, see also figures page 72 and page 82). The frequent existence of 4 (or 6 in some cases) boundary crossings during a complete solar rotation, rather than only two, implies a distortion from planarity. The value of  $\alpha$  may be different at different times; data from the same HELIOS experiments for the full period 1974–78 suggest  $\alpha \approx 19^\circ$  which although different from  $\alpha \approx 10^\circ$  is still within the limits inferred by PIONEER 10 and 11 datas at distances much greater than 1 AU. On the other hand a solar cycle variation is also likely.



gen sie jedoch auch sehr langsam vorstatten. Diese Beobachtungen erbrachten wertvolle Hinweise für die dreidimensionale Topologie des Magnetfelds. Sie stehen im Einklang mit einer verwundenen Grenzfläche zwischen den Polaritäten (Abb. Seite 92, vgl. auch Abb. Seite 72 und 82) wie auch das wiederholte Auftreten von vier Sektorgrenzdurchgängen von HELIOS (manchmal sogar sechs) während einer Sonnenrotation zeigt. Änderungen mit dem Sonnenfleckenzyklus treten erwartungsgemäß auf.

Die Grenzfläche zwischen Regionen gegensätzlicher magnetischer Polarität ist physikalisch als eine Stromschicht zu erklären. Ihre verworfene Gestalt zeigt, daß das Magnetfeld der Sonne gelegentlich stark von einer einfachen Dipolstruktur abweicht. Der prozentuale Anteil des nicht-dipolartigen Felds lag im Jahr um das Sonnenfleckenminimum (Mai 76 bis Mai 77) bei 17%.

Ein unerwartetes Phänomen, das von HELIOS 1 während der Primärmission beobachtet wurde, war Sonnenwind mit ungewöhnlich starkem Magnetfeld und niedriger Temperatur. In einigen solchen Fällen wich das Feld stark von der erwarteten Spiralrichtung ab und es erschien

The surface separating the two regions of opposite magnetic polarities is physically interpretable as a current sheet. The observed shape of this sheet down to 0.3 AU has been projected to the lower corona, close to the Sun, then looking for its correlation with observed solar corona features and independent model computations of the magnetic field lines distribution close to the sun based on the observations of the photospheric magnetic field. A good match has been shown to exist between extrapolated HELIOS observations and computed shapes of the current sheet close to the sun; the shape of the sheet is far from the planar one which would be appropriate for the case of a solar dipolar field. The latitude of the sheet, i.e. the latitude of the sector boundary, with respect to the heliographic equator extended between  $\approx 15^\circ$  in the northern hemisphere and  $\approx 30^\circ$  in the southern hemisphere, with little change in the distance range 0.01 to 1 AU. The implication of these results is that the deviations from a simple dipole field are very significant (quadrupole field): A percent contribution of 17% of the quadrupole terms to the total field was computed for the period May 1976 to May 1977.

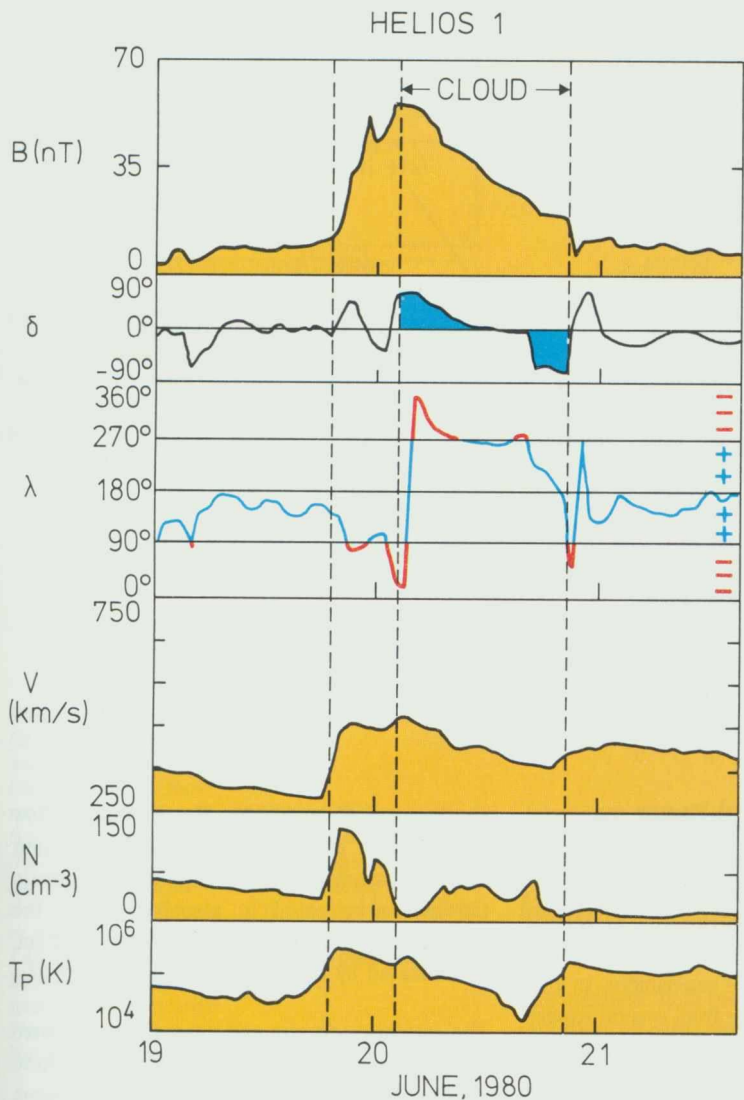
*Gestalt der Stromschicht, abgeleitet aus der Lage der Sektorgrenzübergänge; die Richtung der örtlichen Normalen auf die Stromschicht und die longitudinale Ausdehnung der Gebiete gleicher örtlicher Normalen auf die interplanetarer Magnetfeldpolarität. Durchgezogene Linien entsprechen denjenigen Gebieten, die von HELIOS direkt beobachtet wurden.  $\alpha_s$  = heliographische Breite;  $\Delta_s$  = heliographische Länge.*

The shape of the current sheet as extrapolated from the location of the boundary crossings; the orientation of the local normals of the current sheet and the longitudinal extension of the unipolar regions of the interplanetary magnetic field. Solid lines correspond to the region of direct knowledge of the current sheet by HELIOS observations.  $\alpha_s$  is heliographic latitude,  $\Delta_s$  is longitude.

### 3. Magnetic Clouds

An unexpected phenomenon observed by HELIOS 1 during the prime mission phase was a flow with unusually strong magnetic fields and low temperatures. In some of these flows the magnetic field direction was far from the expected "spiral field", and it appeared to rotate from north to south (or vice-versa) as the configuration moved past the spacecraft (see Figure page 93 left). Similar configurations were subsequently observed at 1 AU by IMP-8 and beyond 1 AU by VOYAGER 1 and 2. They were called "magnetic clouds" in accordance with the suggestion of Morrison that magnetized clouds of plasma may be ejected from the sun. However, the smooth variations of the magnetic field observed in magnetic clouds is more like a large-scale "loop" than the turbulent, chaotic magnetic fields lines imagined by Morrison. A theoretical configuration for the magnetic field in a magnetic cloud was computed by Goldstein.

The magnetic cloud shown in Figure page 93 left was moving supersonically relative to the material ahead of it, and it was therefore preceded by a shock. Not all clouds move fast enough to drive a shock, however. The magnetic pressure inside a magnetic cloud is higher than the gas pressure, and the combined magnetic field and gas pressure is higher inside a cloud than outside. Thus, magnetic clouds might expand, causing a reduction in density and momentum flux, which could lead to a deceleration of the cloud. In this



HELIOS 1

Eine magnetische Wolke, wie sie von E3 (die drei oberen Kurven) und E1 (die drei unteren Kurven) gemessen wurde.  $B$  = magnetische Feldstärke,  $\delta$  = Breitenwinkel,  $\lambda$  = Längewinkel,  $V$  = Sonnenwindgeschwindigkeit,  $N$  = Plasmadichte,  $T_p$  = Protonentemperatur.

Man beachte besonders die Änderung der Winkel zwischen den Linien, die mit „Cloud“ bezeichnet sind.  $\delta = 90^\circ$  ist die Südrichtung,  $\lambda = 0^\circ$  zeigt zur Sonne hin,  $\lambda = 180^\circ$  von der Sonne weg.

A magnetic cloud as measured by E3 (three upper curves) and E1 (three lower curves).  $B$  is magnetic field strength,  $\delta$  angle measured in latitudinal direction,  $\lambda$  angle measured in longitudinal direction,  $V$  solar wind velocity,  $N$  solar wind density,  $T_p$  proton temperature. Note especially the variation of the angles between the lines indicated as "Cloud".  $\delta = 90^\circ$  means orientation to the north,  $-90^\circ$  to the south.  $\lambda = 0^\circ$  means looking toward the sun,  $180^\circ$  away from the sun.

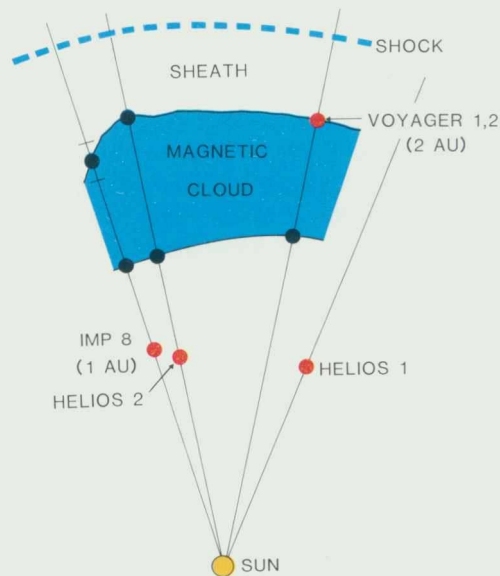
nord-süd (oder umgekehrt) rotierend im Verlauf der Wanderung des Phänomens über HELIOS hinweg (Abb. Seite 93 links).

Solche Ereignisse nennt man „magnetische Wolken“. Die in Abb. Seite 93 links gezeigte hatte Überschallgeschwindigkeit relativ zum vorauslaufenden Plasma. Deshalb bildete sich eine Bugstoßwelle aus. Nicht alle Wolken bewegen sich so schnell. Der magnetische Druck im Inneren einer magnetischen Wolke ist größer als der Gasdruck, beide zusammen sind größer als der Außendruck. Deshalb können sich magnetische

way a shock driven by a magnetic cloud near the sun might become "detached" from the cloud farther from the sun.

The shape and size of a magnetic cloud cannot be determined with one spacecraft. Simultaneous observations by HELIOS 1 and 2, IMP-8 and VOYAGER 1 and 2 made it possible to set some limits on the configuration of one magnetic cloud, as shown in Figure page 93 right. The cloud extended  $>30^\circ$  in azimuth and  $\sim 0.5$  AU in the radial direction at the time and position indicated in the figure.

The source of at least one magnetic cloud has been identified as a coronal mass ejection. This identification was possible because of the unique orbit of HELIOS 1, which brought apogee over the western limb of the sun in 1980 (see fig. page 74). Coronal mass ejections can be seen moving over the limbs by means of coronagraphs in orbit around the earth. In particular, a coronal mass ejection moving away from the sun and toward HELIOS 1 was observed by the NRL coronagraph on the spacecraft P78-1. A magnetic cloud preceded by a shock wave (figure page 93 left) was observed by HELIOS with a time delay relative to the observation of the coronal mass ejection which is consistent with the observed flow speed. Thus in some cases at least, interplanetary magnetic clouds and coronal mass ejections may be identified with one another.



JAN 6, HR 22, 1978  
EQUATORIAL PLANE

Die Skizze zeigt die Größe und Gestalt einer magnetischen Wolke in der Ekliptik, ermittelt aus Messungen von fünf Raumsonden.

Sketch showing the size and shape of a magnetic cloud in the ecliptic as determined by measurements from 5 spacecraft.

Wolken ausdehnen und sich dabei verlangsamen. Auf diese Weise kann sich eine Stoßwelle vor der Wolke selbständig machen und der Wolke davonlaufen.

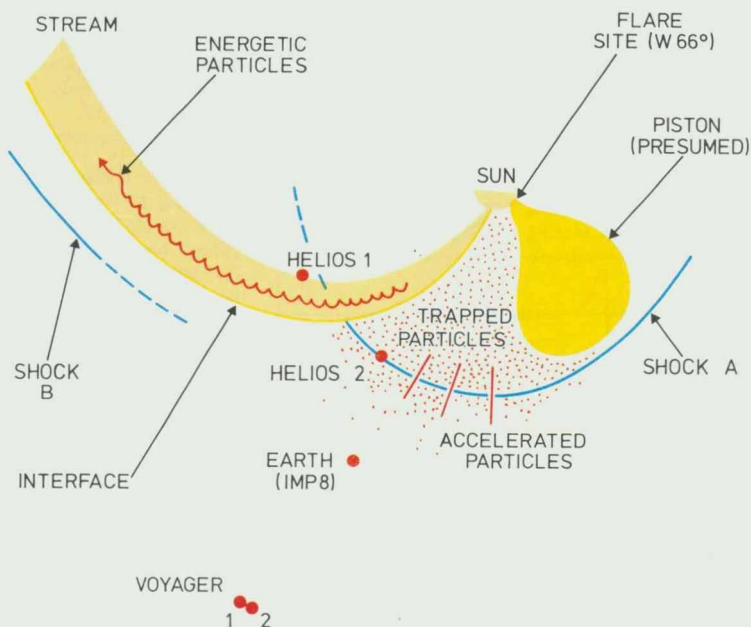
Form und Größe einer Wolke kann man nur mit Hilfe gleichzeitiger Beobachtungen an verschiedenen Orten bestimmen. Das war bei der besonderen Konstellation zwischen HELIOS 1 und 2, IMP-8 und VOYAGER 1 und 2 möglich, die bereits früher erwähnt wurden. So konnte die Wolke einigermaßen eingegrenzt werden (Abb. Seite 93 rechts). Sie dehnte sich  $30^\circ$  in azimuthaler Richtung und etwa 0.5 AE in radialer Richtung aus. Sie hatte also eine Dimension von über 70 Mio km erreicht, als sie über die Erde weglitt!

Wenigstens bei der in Abb. Seite 93 links diskutierten Wolke vom 19/20. Juni 1980 konnte dank der einzigartigen HELIOS 1-Bahn auch die Quelle des koronalen Massenauswurfs identifiziert werden, und zwar mit Hilfe von Koronagraphenbildern, wie sie auch schon früher erwähnt wurden. Die gesamte besondere Konstellation mehrerer Raumsonden wurde auch zum großräumigen Studium anderer Phänomene genutzt. Eines, nämlich die Untersuchung korotierender Ströme ist in Abb. Seite 94 schematisch angedeutet. Die hochauflösende Magnetfeldmessung und die Plasmadaten von HELIOS 2 lassen eine korotierende Stoßwelle (shock B) erkennen (sie geht der umlaufenden Kontur des Sonnenwindstroms voran), die bei 0.6 AE von der Sonne wegläuft. Die Stoßwelle war nicht stationär, d. h. irgend etwas hatte sich verändert, als sie zur Zeit ihres erwarteten Eintreffens bei HELIOS 1 nicht beobachtet werden konnte. Nicht stationäre korotierende Flüsse können sich aus koronalen Löchern entwickeln, die mit der Sonne rotieren, aber ihre Größe und Gestalt dabei verändern.

Das Magnetfeld spielt eine große Rolle bei der Entwicklung korotierender Ströme und bei der Bildung korotierender Stoßwellen. Abb. Seite 95 ist das theoretische Modell eines korotierenden Flusses. Es zeigt, wie sich eine Struktur im Sonnenwind zwischen 0.3 AE und 1.0 AE verändert.

NOV 21, 1977

0600 UT



Eine Stoßwelle, vorangetrieben von Materie, die von einem Flare ausgeworfen wurde, in Wechselwirkung mit einem korotierenden Strom-Stoßwelle-System. Für Einzelheiten siehe den Text.

A shock driven by ejecta from a flare interacting with a corotating stream and shock. For details see the text.

#### 4. Flow Systems and Related Phenomena

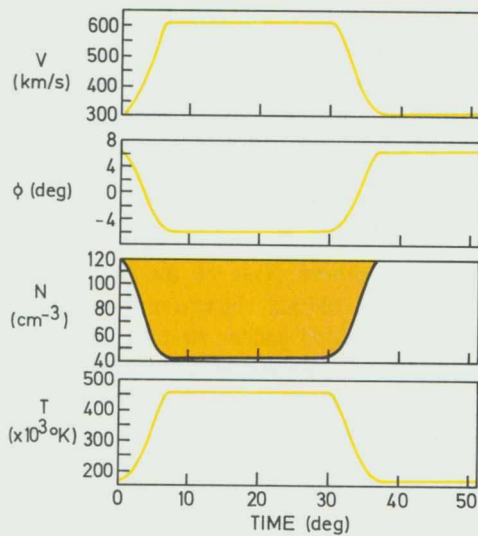
From the preceding discussion of a magnetic cloud it is clear that understanding an interplanetary magnetic field configuration associated with a flow on a scale of 1 AU requires more than measurements from a single experiment. In general, one needs observations from several experiments from more than one spacecraft, as well as solar observations in order to reconstruct an inhomogeneous, time dependent magnetic field configuration. This is particularly true when one attempts to understand the evolution of two or more flows and their associated magnetic field configurations.

Figure page 94 shows a flow configuration inferred from magnetic field and plasma data from 5 spacecraft. The data were supplied and interpreted by several investigators at a special workshop. Two types of patterns are evident in Figure page 93 right: a corotating stream and interaction region related to the boundary marked "interface", and a transient flow associated with a

shock wave ("shock A"). The corotating flow originated in a coronal hole and the transient flow was associated with a large flare. Energetic particles accelerated in association with the flare moved through the interplanetary medium, as indicated by the stippling in figure page 94.

The corotating stream and stream interface were unambiguously identified from the phase changes between the magnetic field and plasma profiles at HELIOS 1, HELIOS 2, IMP-8 and VOYAGER 1 and 2, i.e., the time delay of features moving from one spacecraft to another was simply the time required for a spiral to rotate at the solar rotation speed. High resolution magnetic field and plasma data from HELIOS 2 revealed a corotating shock (shock B) propagating away from the sun at 0.6 AU. This is the first observation of a corotating shock inside of 1 AU, but others have been subsequently identified in HELIOS data. If the flow were stationary, this shock should have been observed by HELIOS 1 approximately 41 hours later. A shock was not





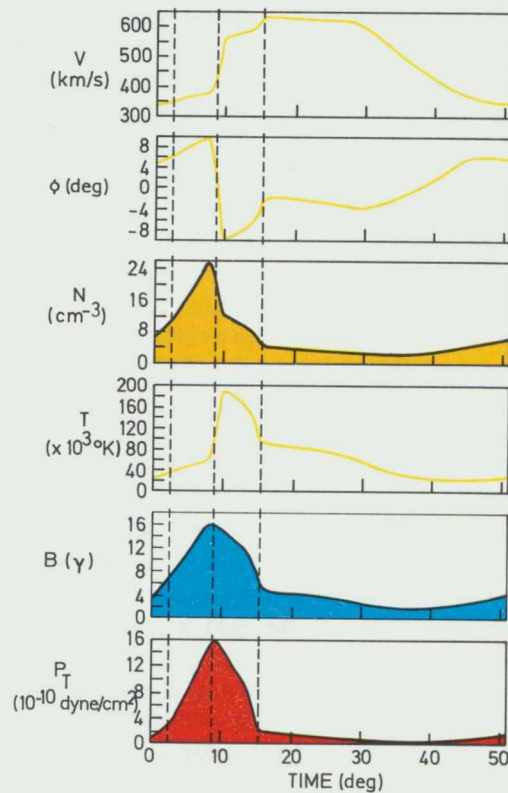
$$B = 45 \gamma$$

$$P_T = 133.6 \times 10^{-10} \text{ dynes/cm}^2$$

Magnetohydrodynamisch (MHD)-theoretisches Modell eines korotierenden Plasmastroms. Die Kurven links stellen ein Anfangsprofil, abgeleitet aus HELIOS-Daten bei 0,3 AE dar. Die Kurven rechts sind die nach der Theorie zu erwartenden Profile bei 1 AE. In der dargestellten Weise verändert sich entsprechend der Theorie der Plasmastrom auf seinem Weg von 0,3 AE bis 1 AE.

Theoretical Magnetohydrodynamic model of a corotating stream. Panels on the left are input profiles derived from HELIOS data, and panels on the right are predicted profiles at 1 AU.

Abb. Seite 94 zeigt auch eine andere Art von Stoßwellen (shock A), die von einem starken Flare in 60° westlicher Länge auf der Sonne ausgegangen war. Diese Stoßwelle wurde von allen Raumfahrzeugen beobachtet. Trägt man jedoch die Ankunftszeit der Stoßwelle gegenüber dem Abstand von der Sonne in ein Diagramm ein, so erhält man keine glatte Kurve (Abb. Seite 96). Das bedeutet, daß sich die Stoßwelle nicht nach allen Richtungen hin gleichmäßig ausbreitet hat. Diese und andere Beobachtungen von HELIOS beweisen, daß auch Stoßwellen stark veränderten Einflüssen ausgesetzt sind,



detected at HELIOS 1, however, indicating that a corotating flow need not be stationary. Non-stationary flows observed by HELIOS can develop from coronal holes which rotate with the sun but change their size and shape as they rotate.

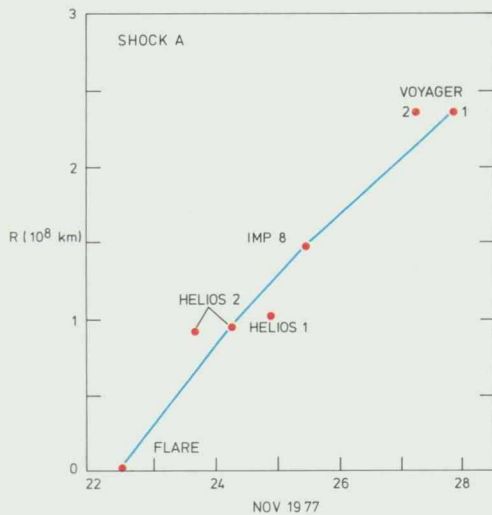
The magnetic field plays an important role in the evolution of corotating streams and the formation of corotating shocks. In order to accurately describe such flows, one must use a magnetohydrodynamic (MHD) model rather than a gas dynamic model. An example of the results of a MHD model for corotating flows is shown in figure page 95. Boundary conditions for the calculation were given by observations of the magnetic field and plasma made by HELIOS near 0.3 AU. Smoothed profiles derived from the data are shown on the left of the figure. The profiles predicted for 1 AU are shown on the right. Note the high-pressure “interaction region” in which the magnetic field strength is high owing to compression produced by the advancing stream. The interface may be seen, where the magnetic

field strength reaches its maximum value. It can also be identified by the decrease in density  $N$  and the increase in temperature  $T$ , which are determined by the initial condition (see the  $N$  and  $T$  profiles on the left of figure page 95) and by the east-west deflection of the flow. The development of two shocks is indicated by the lines on both sides of the interface. Shock B in figure page 94 corresponds to the dashed line ahead of the interface in figure page 95. The HELIOS observations in figure page 94 show that this “forward shock” can form earlier than the “reverse shock” which follows the interface. The forward shock in Figure page 94 was observed by IMP-8 at 1 AU and by VOYAGER 1 and 2 at 1.6 AU as well as at HELIOS 1 at 0.6 AU.

Figure page 94 also shows a different kind of shock wave (shock A) which was produced in association with a large flare at a longitude of 66° West. This was observed by all of the spacecraft. The spacecraft distance is plotted versus shock arrival time in figure page 96 for each spacecraft. The points do not lie along a smooth curve, indicating that contrary to the prevailing view, the shock was not a spherical or quasi-spherical surface with a speed that changes slowly and monotonically with distance. This and other evidence from HELIOS suggest that a shock surface might be corrugated and that its speed might fluctuate with distance from the sun, perhaps due to its passage through local inhomogeneities in the magnetic field and plasma.

HELIOS 2 actually observed 2 shocks in the event labeled shock A in figure page 94, but IMP-8 (which was nearly radially aligned with HELIOS 2 and the sun, and which was 0.4 AU beyond HELIOS 2) observed only 1 shock. This is the first clear evidence for the coalescence of two shock waves in the solar wind. It is significant that shock coalescence can occur within 1 AU, for such shock interactions produce qualitative changes in the interplanetary magnetic field and plasma (see also page 87).

At approximately the time that X-and Gamma-rays were observed from the flare that produced shock A, a Type III solar radio wave burst was



Zeitpunkte des Eintreffens einer Stoßfront an verschiedenen Orten des Raums. Das zugehörige Flare trat am 22. Nov. auf. Die Zuordnung bei HELIOS 2 ist nicht eindeutig.

Position of a shock versus time.

während sich ihre Geschwindigkeit beim Lauf nach außen langsam verringert.

Das Flare, das die Stoßwelle (shock A) hervorbrachte, hatte auch starke Röntgen- und Gammastrahlung zur Folge. Außerdem trat ein Radio-Ausbruch vom Typ III auf, der auf hochenergetische Flare-Elektronen zurückzuführen war. Schließlich wurden auch hochenergetische Protonen ( $\sim 80 - 200$  keV) ausgestoßen. Sie kamen nahezu gleichzeitig bei beiden HELIOS an, obwohl sie  $35^\circ$  voneinander entfernt standen (Abb. Seite 97). Die Teilchen fanden demnach im Raum Ausbreitungsbedingungen vor, die ihren Lauf nicht behinderten. Der absteigende Ast der Teilchenintensität zeigt jedoch große Unterschiede: Innerhalb des korotierenden Stroms (bei HELIOS 1) fällt die Teilchen-Intensität monoton ab mit der Zeit. Nicht so außerhalb des Stroms (HELIOS 2). Vom Flare erzeugte Teilchen erfüllen den Raum hinter der Stoßfront, können aber nicht in den korotierenden Strom eindringen. Hoher Teilchenfluß bei HELIOS 2 hielt so lange an, bis der korotierende Strom

observed by HELIOS 1 and 2. A beam of high energy (20–65 keV) electrons was detected by HELIOS 2 in association with the radio burst, and this beam was presumably the exciter at the burst. Electrostatic noise at the plasma frequency was observed at the time of arrival of the beam. The observed plasma waves were generated locally by the electron beam, but the higher frequency electromagnetic emission was probably generated  $\sim 0.2$  AU farther from the sun than HELIOS 1 and 2, with a centroid of emission between HELIOS 1 and 2.

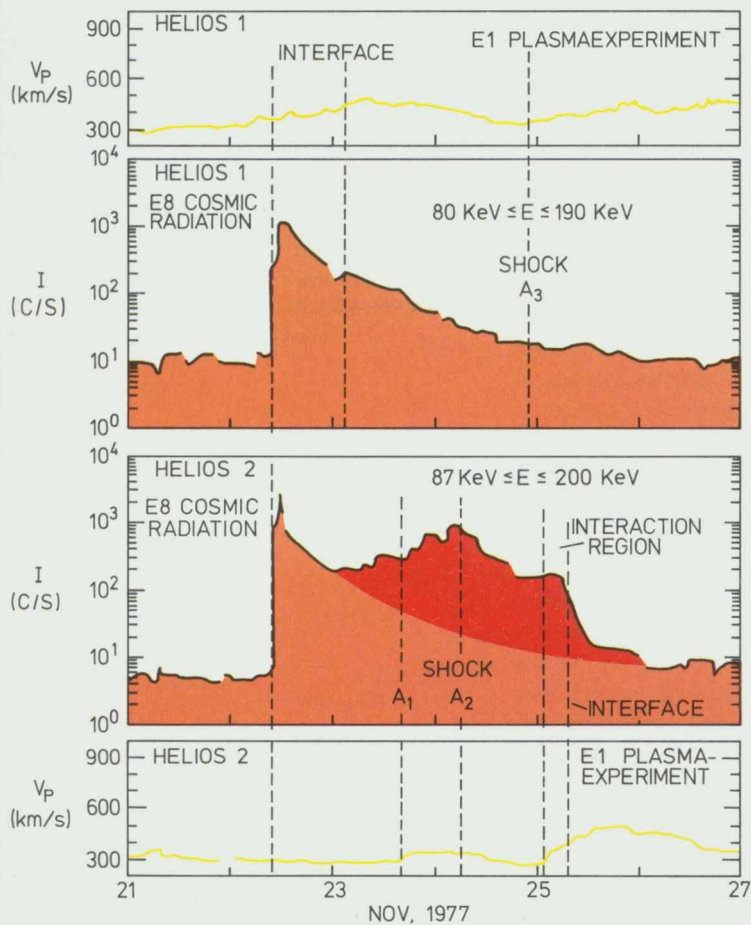
The flare that produced shock A also produced energetic protons (about 80–200 keV). Particles arrived nearly simultaneously at HELIOS 1 and 2, which were separated by  $\sim 35^\circ$  (figure page 97). Thus the propagation during the “rise” of the event was nearly independent of longitude and the flow configuration. However, the “decay” was strongly related to the field and flow configurations. Inside the corotating stream (at HELIOS 1), the intensity of solar energetic particles dropped monotonically with time. This is consistent with the idea that magnetic field lines in such a stream are spirals which extend very far from the sun and offer little resistance to the propagation of particles. HELIOS 2 observed a very different pattern (figure page 97). Initially, the decay developed just as it did at HELIOS 1. But as the shocks A1 and A2 approached the spacecraft, the intensity was observed to increase, reaching a maximum at shock A2. This suggests that some of the particles were accelerated in the solar wind by the shocks themselves. Acceleration by individual shocks had previously been observed. Here one shock was converging on another, a condition which is favorable for an acceleration mechanism proposed by Fermi. The particle flux remained high behind shocks A1 and A2 until the interface of the corotating stream moved past HELIOS 2. Then the energetic particle flux dropped abruptly, showing again that the particles that were initially in the corotating stream had moved away. The large and abrupt decrease of particle flux across the interface indicates that the interface was relatively impermeable to energetic particles. Thus large inhomogeneities in the density of solar

energetic particles can develop in the solar wind in response to the particular flow configurations. Conversely, energetic particle observations may be used as a tool to infer the global configurations of interplanetary flows and magnetic fields.

## 5. Discontinuities

Studies have been made on the field discontinuities, i.e., “abrupt” changes of the magnetic field, its direction and/or strength. There are several types of such events, including shock and tangential discontinuities (TD). The latter travel with the solar wind which convects them outward. Thus, information concerning what happens closer to the sun or even in the solar wind source region can be obtained. Data from HELIOS have shown that down to 0.3 AU the surface of TD’s tends to maintain an orientation parallel to the local average magnetic field. This strongly supports the view that they (or most of them) come from the source region. The temporal separation between consecutive discontinuities (on the average of the order of one hour) and simple geometrical considerations indicate that the discontinuities are boundaries of magnetic flux tubes having their roots in the solar corona with an average separation of the order of a few thousand km. Interestingly, independent computations of the configuration of open field lines rooted on the sun lead to estimated sizes of the magnetic field flux tubes of comparable size.

Another type of discontinuity has also been studied, the so-called rotational discontinuities (RD). These are propagating features which have been found to extend into the interplanetary medium along the spiral magnetic field lines. Fig. page 98 top shows the statistical distribution of the azimuth of the normal to the discontinuity plane for TD’s and RD’s based on more than 5000 events observed by the two HELIOS in early 1976.



*Intensität energiereicher Teilchen und Geschwindigkeitsprofile bei HELIOS 1 und 2. Innerhalb des korotierenden Stroms (HELIOS 1) nimmt die Teilchenintensität monoton ab. Zwischen der durchlaufenden Stoßwelle und dem korotierenden Strom war der Teilchenfluß hoch.*

Energetic particle intensity and speed profiles at HELIOS 1 and 2. Inside the corotating stream at HELIOS 1 the energetic particle intensity decreases monotonically. Between the transient shock and the corotating stream the particle flux was high.

The polarization state of the magnetic fluctuations was studied with HELIOS 2 data taken in the trailing edge of a recurrent high velocity stream observed at three distances from the sun during three consecutive rotations, e.g., in the typical conditions when almost pure (incompressible) Alfvénic fluctuations are expected to be predominant. The observed turbulence has been shown to be a mixture of purely Alfvénic modes and modes which are the incompressible limit of the so called "slow magnetoacoustic waves" (see page 101). The importance of these results is that the medium was described in terms of turbulence rather than of a single Alfvén wave.

Data from the same stream have been used to study the statistical properties of the fluctuations as a function of heliocentric distance and as a function of frequency range. The anisotropy of the fluctuations was shown to decrease when approaching the sun in any frequency range. For a given fixed distance, the highest frequency components were more anisotropic than the lowest frequency components. The total power of the fluctuations increased upon going towards the sun and as lower frequencies were included in the sample.

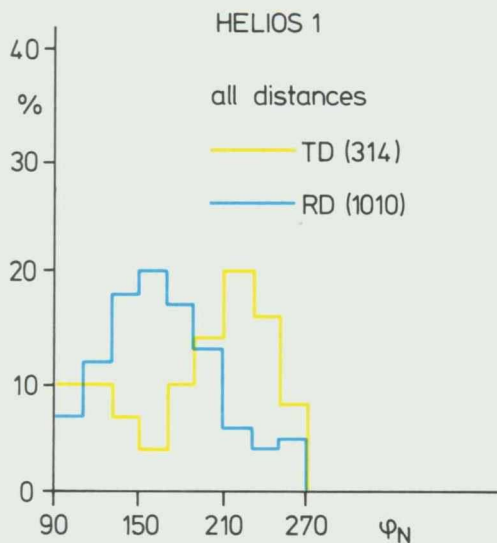
A related subject extensively studied with HELIOS data was the radial variation of the power spectra of the magnetic turbulence at very low frequencies (in the so called magnetohydrodynamic regime). The approach was to look at different frequency ranges, rather than the full frequency band. For all three field components there was a definite radial gradient of the spectral index with a less steep falloff for frequencies  $<0.01$  Hz and no variation at higher frequencies. The evolution of the power density with distance depends on frequency, increasing with increasing frequency. For frequencies  $>0.01$  Hz it remained approximately the same at all distances. This result, which is in conflict with ideas on propagation of Alfvénic turbulence (which predict a smaller gradient) has been explained by introducing a "dissipation length", a distance which is typical for the damping down of the

*HELIOS 2 passiert hatte. Dann fiel der Fluß steil ab. Offensichtlich können Grenzflächen Barrieren für die Ausbreitung hochenergetischer Teilchen darstellen.*

*Felddiskontinuitäten nennt man Stellen oder Flächen im Raum an denen sich Richtung und/oder Stärke des Feldes abrupt ändern. Wir kennen verschiedene Typen solcher Diskontinuitäten. Über Stoßwellen – sie gehören zu den stärksten bekannten Diskontinuitäten – wurde bereits berichtet. Zu einer wichtigen anderen Art von Diskontinuitäten gehören die Tangentialdiskontinuitäten (TD). Man stellt sie sich als Grenzfläche von Magnetflußröhren vor, die ihre Wurzeln in der Sonnenkorona, einige tausend km voneinander getrennt, haben. Sie wandern mit dem Sonnenwind, der sie nach außen zieht.*

## 6. Turbulence and waves

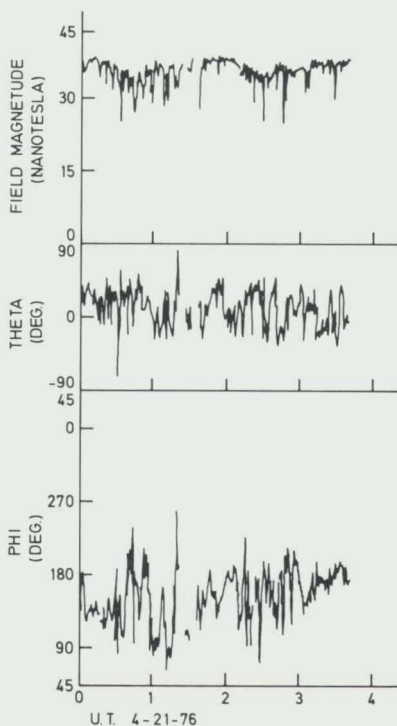
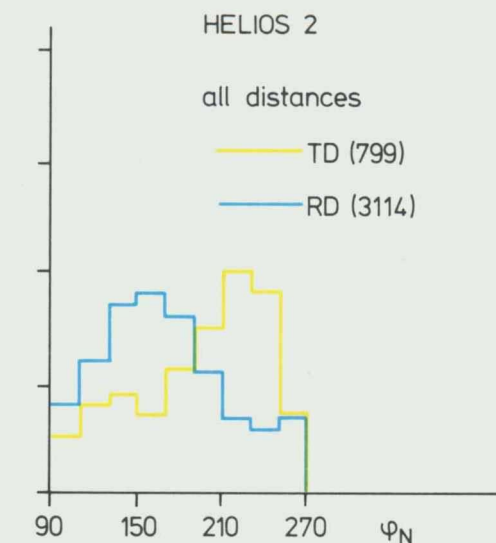
One simple type of wave whose existence was demonstrated by other S/C, the so called "Alfvén waves" (see also page 85), has been extensively studied in a number of different situations, over a wide frequency range and as a function of heliocentric distance, using the unique possibilities offered by the simultaneous HELIOS 1 and 2 observations. The radial evolution of the amplitude of the Alfvénic fluctuations associated with high velocity streams as seen at distances much less than 1 AU has also been investigated by HELIOS. The relative content of wave energy in general, not only of the Alfvénic type was estimated to be more than 10%, so that waves are important from the energetic point of view.



Ein weiterer Typ von Diskontinuitäten, Rotationsdiskontinuität (RD) genannt, wurde ebenfalls untersucht. Sie sind Strukturen, die sich entlang den spiralförmigen Magnetfeldlinien erstrecken und nach außen laufen. Abb. Seite 98 oben zeigt die statistische Verteilung des Azimutwinkels der Senkrechten auf die Diskontinuitätsflächen von TDs und RDs, wie sie die beiden HELIOS-Sonden 1976 beobachtet haben.

Turbulenzen und Wellen sind vielfältig im Plasma des interplanetaren Raums. Besonders Alfvénwellen (siehe auch Seite 85) wurden in verschiedenen Situationen ausgiebig untersucht. Die Möglichkeiten, die HELIOS 1 und 2 zusammen boten, erbrachten dafür besonders günstige Bedingungen. Fluktuationen vom Typus der Alfvénwellen, die Perioden von mehreren Stunden haben, wurden bei ihrer Bewegung nach außen entdeckt. Die größten Wellenlängen ( $\sim 0.4$  AE), die in Sonnennähe bei  $0.29$  AE zu finden waren, fehlten nahe der Erdbahn. Dort lagen die längsten Wellen in der Nähe von  $0.1$  AE.

Zusammenfassend entsteht bezüglich der Alfvénwellen das folgende Bild: Während ihrer Ausbreitung treten Alfvén-Fluktuationen in Wechselwirkung mit dem umgebenden Sonnenwind, und zwar unterschiedlich je nach ihrer Frequenz. Die höchsten Frequenzen werden

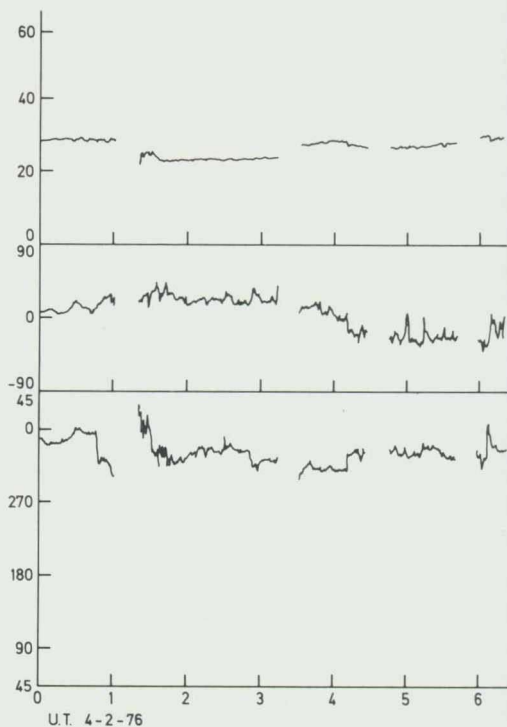


Beispiele von Magnetfeldmessungen hoher Auflösung unter „gestörten“ (linkes Feld) und „ruhigen“ (rechtes Feld) Bedingungen. Aufgetragen ist die Feldstärke (oben) im magnetischen Maß Nanotesla und die beiden Kom-

ponenten der Feldrichtung (in Grad). Theta ist der Winkel, der aus der Fläche der Ekliptik weist (+Nord, -Süd), Phi ist der Winkel innerhalb der Ekliptik mit  $0 =$  Sonnenrichtung.

Statistische Verteilung des Azimuts  $\Phi_n$  der Senkrechten auf die Diskontinuitätsfläche ( $\Phi_n = 0$  Richtung zur Sonne). In Klammern: Zahl der Ereignisse für HELIOS 1 (linkes Bild) und HELIOS 2 (rechtes Bild) TD = Tangentialdiskontinuität, parallel zu den Magnetfeldlinien, RD = Rotationsdiskontinuität

Statistical distribution of the azimuth  $\Phi_n$  of the normal to the discontinuity plane ( $\Phi_n = 0$  toward the sun). In parenthesis, the number of events for HELIOS 1 (left panel) and HELIOS 2 (right panel). TD = tangential discontinuity, i.e. parallel to the magnetic field lines. RD = rotational discontinuity.



Examples of high resolution magnetic field measurements, under "perturbed" (left panel) and "quiet" conditions (right panel). Plotted is the field strength (top) in the magnetic measure "nanotesla", and the two

components of the field direction (degrees). THETA is the angle measured out of the ecliptic plane (+ north, - south), PHI is the angle within the ecliptic plane with 0 degrees pointing toward the sun.

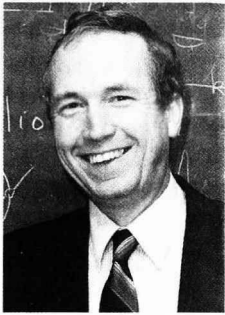
*stark gedämpft. Unterhalb von 0,01 Hz nimmt die Dämpfung ab, um bei etwa 0,0001 Hz (entspricht einer Schwingungsdauer von fast 3 Stunden) praktisch zu verschwinden. Fluktuationen mit noch niedrigeren Frequenzen (noch größere Schwingungsdauer), wie sie in Sonnennähe beobachtbar sind, beeinflussen großräumige Strukturen bzw. werden von ihnen beeinflusst, so daß sie in größerem Sonnenabstand nicht mehr als Wellen vom Alfvén-Typus angesehen werden können.*

power. This length (approximately 1 AU) remains unchanged at frequencies  $>0.01$  Hz, and it increases rapidly at frequencies  $<0.01$  Hz.

Recently the Alfvénic character of the solar wind fluctuations at extremely low frequencies ( $<10^{-4}$  Hz) was investigated using 1 hr averages of magnetic field data referring to the same streams as already discussed. Alfvénic fluctuations with periods up to several hours (15–18 hrs. in the spacecraft frame) were found, propagating outward. It was also found that the longest wavelengths ( $\approx 0.4$  AU) observed near the sun at 0.29 AU in the Alfvénic regime were not present near the earth's orbit at 0.87 AU, where the longest wavelengths were of the order of 0.1 AU. Gathering all previous results, the following picture of the radial evolution of the Alfvén waves emerges. During their propagation Alfvénic fluctuations interact with the ambient solar wind in different ways depending on their frequency. The highest frequency fluctuations experience a damping process whose efficiency decreases below 0.01 Hz and in practice disappears around  $10^{-4}$  Hz. The very low frequency fluctuations ( $\approx 2 \cdot 10^{-5}$  Hz) observed near the Sun interact with large-scale structures in the solar wind and then are removed from the Alfvénic regime at increasing heliocentric distances.

## 7. Conclusions

The HELIOS missions have resulted in a number of new findings, which have significantly improved our knowledge of the physics of the interplanetary medium and the solar wind emission. But not all potential content of our data has been exploited, as yet. Other contributions are expected to come in the second decade after the launching of the first HELIOS. This allows us to say that the HELIOS missions have been one of the most exciting adventures in space, from either view point, scientific and technological.



Gurnett



Anderson

# Plasma Waves in the Solar Wind: 10 Years of HELIOS Observations

D. A. Gurnett and R. R. Anderson  
Department of Physics and Astronomy  
The University of Iowa  
Iowa City, IA 52242

*Elektronen und Ionen sind im Plasma des interplanetaren Raums frei beweglich. Sie können in vielfältiger Weise Schwingungen ausführen und dabei Wellen anregen. Solche Schwingungen und Wellen übernehmen in dem sehr dünnen Plasma, in dem gegenseitige Stöße zwischen den Teilchen höchst selten sind, die Rolle von Energieüberträgern und sorgen für Temperaturengleich. Um solche Schwingungen und Wellen beobachten zu können, ist HELIOS mit einer 32m langen Meßantenne ausgestattet. Sie ist der Wellensensor für drei Empfänger, die den Frequenzbereich von ungefähr 10 Hz bis 3 MHz abdecken (Experimente 5a, 5b und 5c). Die Antenne spricht auf elektrische Feldschwingungen an. Magnetische Feldschwingungen werden vom Induktionsspulen-Magnetometer (E4) registriert.*

*Drei prinzipielle Typen von Plasmawellen wurden von der Meßantenne empfangen: (1) elektromagnetische Wellen, die sich durch den freien Raum hindurch ausbreiten, (2) Elektronen-Plasma-Schwingungen, (3) ionenakustische Schwingungen und Wellen.*

*Elektromagnetische Wellen (1) sind als Licht oder als Radiowellen – je nach ihrer Frequenz und Wellenlänge – allgemein bekannt. Im Plasma können sie sich nur dann fortpflanzen, wenn ihre Frequenz höher ist als eine Grenzfrequenz  $f_{pe}$ , die man Plasmafrequenz nennt. Sie breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus. Nur wenn ihre Frequenz knapp über der Plasmafrequenz liegt, wird die Wellengeschwindigkeit (Phasengeschwindigkeit) höher als die Lichtge-*

## I. Introduction

Previously in this book the reader has been introduced to the idea of a plasma, and to a solar plasma called the solar wind.

Because both the electrons and ions are free to move in a plasma, a wide variety of waves can exist in the solar wind. These waves are called plasma waves. Since the early days of the discovery of the solar wind it has been thought plasma waves play an important role in controlling dynamical processes in the solar wind. Because collisions are extremely rare in the tenuous solar wind, plasma waves play a role similar to collisions in an ordinary gas by scattering particles and providing the dissipation necessary to achieve thermal equilibrium. To detect plasma waves the HELIOS spacecraft included a 32 meter tip-to-tip dipole antenna for the electric field of plasma waves, and a search coil magnetometer for detecting magnetic fields. The signals from the electric antenna were analyzed by three instruments which covered the frequency range from about 10 Hz to 3 MHz. Another instrument analyzed the signals from the search coil magnetometer. In this paper we review results obtained from the HELIOS electric field measurements.

Before discussing the results, it is useful to review the types of waves that can exist in a plasma. Three principal types of plasma waves were detected by the electric field instruments on HELIOS: (1) the free space electromagnetic mode, (2) the electron plasma oscillation mode, and (3) the ion acoustic mode.

The free space electromagnetic mode is the usual electromagnetic mode in free space, of which light and radio waves are common examples.

The electron plasma oscillation is an almost purely oscillatory mode in which the electrons vibrate around their equilibrium position while the ions remain at rest. The resulting charge oscillation produces an electric field but no magnetic field. For this reason these waves are sometimes called electrostatic waves.

The ion acoustic mode is very similar to a sound wave in an ordinary gas, except that the electric field transfers the wave momentum instead of collisions. In contrast to electron plasma oscillations, both the electrons and ions participate in the wave motion. Because of the large inertia of the ions, the propagation speed of the ion acoustic mode is quite slow, normally much less than the solar wind speed, which is typically about 400 km/sec. As in the case of electron plasma oscillations the ion-acoustic mode is electrostatic, with no magnetic field.

Because the electron density decreases with increasing heliocentric radial distance, the laws of physics require that both the electron and ion plasma frequencies decrease with increasing radial distance from the sun. The resulting radial variation is shown in figure page 101. As can be seen the electron plasma frequency, which is the characteristic frequency of electron plasma oscillations and the low frequency limit of the free space electromagnetic mode, increases from

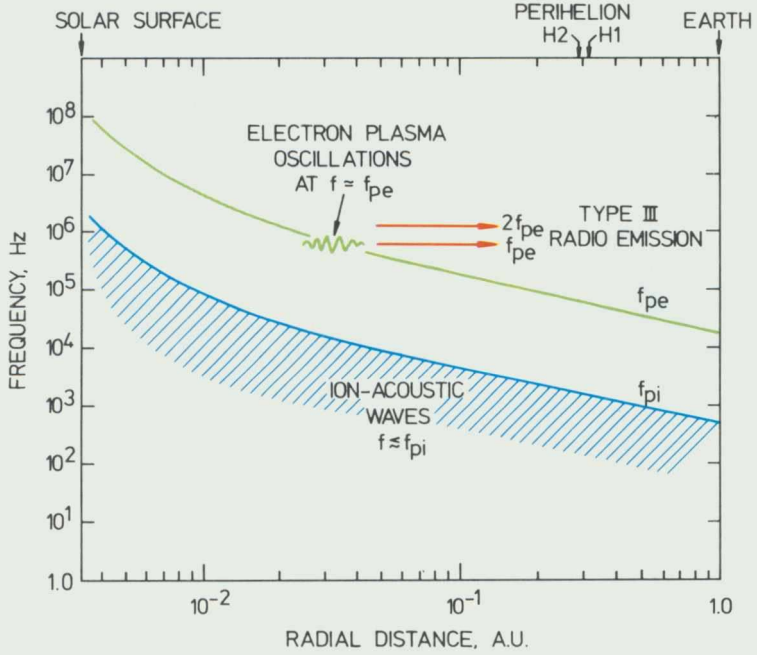
geschwindigkeit. Die Plasmafrequenz hängt von der Zahlendichte der Elektronen im Plasma ab. In Erdbahnnähe liegt die Plasmafrequenz bei ungefähr 20kHz, also im Bereich der längsten Radiowellen.

Bei den Elektronen-Plasma-Schwingungen führen die Elektronen Oszillationen um die als ruhend angenommenen, viel schwereren Ionen des Plasmas aus. Die resultierenden Schwingungen der elektrischen Ladung erzeugen elektrische, aber keine magnetischen Felder (elektrostatische Wellen).

Ionenakustische Wellen haben ähnliche Eigenschaften wie Schallwellen in einem Gas, abgesehen davon, daß das elektrische Feld für den Wellenimpuls verantwortlich ist und nicht die gegenseitigen Teilchenstöße. Im Gegensatz zu den Elektronen-Plasma-Schwingungen nehmen an den ionenakustischen Wellen Elektronen und Ionen teil. Die Geschwindigkeit ist niedrig, normalerweise viel kleiner als die Sonnenwindgeschwindigkeit. Ionenakustische Wellen können sich ausbreiten, solange ihre Frequenz kleiner ist als die Ionen-Plasmafrequenz  $f_{pi}$  die ihrerseits im allgemeinen nur  $1/3$  der Elektronen-Plasmafrequenz  $f_{pe}$  ausmacht.

Mit wachsendem Abstand von der Sonne nimmt die Plasmadichte ab. Dadurch werden sowohl die Elektronen-Plasmafrequenz  $f_{pe}$  als auch die Ionen-Plasmafrequenz  $f_{pi}$  beeinflusst. Die ungefähre Änderung mit dem Abstand gibt Abb. Seite 101. Gegen die Sonne hin wächst die Elektronen-Plasmafrequenz von etwa 20 kHz bis zu mehreren hundert MHz in der Nähe der Sonnenoberfläche an, entsprechend 500 Hz bis einige MHz für die Ionen-Plasmafrequenz.

Durch starke Elektronen-Plasmaschwingungen, die besonders dann entstehen, wenn ein größerer Schwarm schneller Elektronen von der Sonne aus durch den Raum und damit durch das Plasma fliegt, werden elektromagnetische Wellen angeregt (Wellenausbrüche vom Typ III; von Kellogg genauer beschrieben im nächsten Kapitel). Abb. Seite 102 oben zeigt Elektronen-Plasmaschwingungen, die im Zusammenhang mit einem Typ-III-Ausbruch beobachtet wurden. Wie



Darstellung der Änderung der Elektronen-Plasmafrequenz  $f_{pe}$  und der Ionen-Plasmafrequenz  $f_{pi}$  mit dem Abstand von der Sonne für typische Sonnenwindverhältnisse zwischen Sonnenoberfläche und Erdbahn.

A plot of the radial variation of the electron plasma frequency,  $f_{pe}$ , and the ion plasma frequency,  $f_{pi}$ , for a representative solar wind model from the surface of the sun to the orbit of the earth.

about 20 kHz at the earth's orbit to several hundred MHz at the solar surface. The ion plasma frequency, which is the upper frequency limit of the ion acoustic mode, varies from about 500 Hz at the earth's orbit to a few MHz at the solar surface.

II. Electron Plasma Oscillations and Type III Radio Bursts

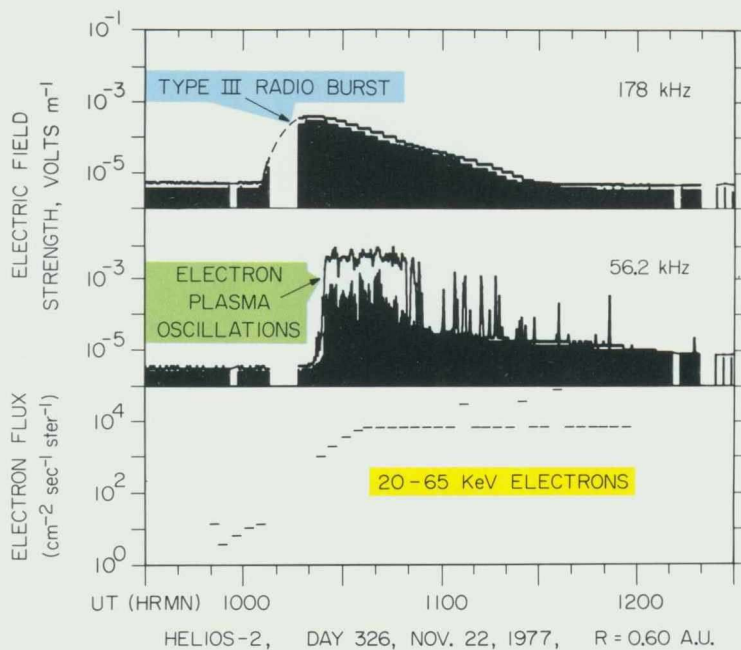
Type III solar radio bursts are produced by solar flares at the sun and are characterized by an emission frequency that decreases with increasing time according to a long standing theory, first proposed by Ginzburg and Zheleznyakov (1958), the generation of type III bursts is a two-step process in which (1) electron plasma oscillations are first produced by energetic electrons ejected from a solar flare, and (2) the energy in the plasma oscillation is converted to electromagnetic radiation via a nonlinear coupling process. One of the first notable accomplishments of the HELIOS plasma wave experiment was the confirmation of this basic mechanism.

An example from HELIOS 2 illustrating the simultaneous occurrence of a type III radio

burst, electron plasma oscillations, and energetic (20 – 65 keV) electrons from a solar flare is shown in figure on page 102 top. This event occurred on November 22, 1977, following a solar flare that started at 09:46 UT.

According to current ideas the electron plasma oscillations are excited by a beam-plasma instability as the high speed solar wind electrons stream outward from the sun. These plasma oscillations then produce radio waves at a fundamental frequency and the second harmonic via nonlinear coupling to the free space electromagnetic mode. This process is indicated schematically in figure page 101. For a further discussion of the generation of type III bursts, see the accompanying paper by Kellogg.

During the first 10 years of HELIOS observations a total of 238 electron plasma oscillation events were observed in association with type III radio bursts. Most of these events occurred around the time of maximum solar activity, from about 1977 to 1982. The frequency of the plasma oscillation shows a clear tendency to increase with decreasing radial distance from the sun, as would be expected from figure page 101. This trend is



Beispiel für das gleichzeitige Auftreten eines solaren Radio-Ausbruchs vom Typ III, von Elektronen-Plasmaschwingungen und höherenergetischen Elektronen einer Sonneneruption. Man nimmt an, daß die Elektronen-Plasmaschwingungen durch Wechselwirkungen zwischen dem von der Sonne ausgestoßenen Elektronenstrahl und dem Sonnenwindplasma hervorgerufen werden. Die Radiowellen des Ausbruchs sind eine Folge der Plasmaschwingungen, verursacht durch komplizierte Wechselwirkungsprozesse.

An example illustrating the simultaneous detection of a type III solar radio burst, electron plasma oscillations, and energetic electrons arriving from a solar flare. The electron plasma oscillations are believed to be produced via a beam-plasma instability caused by the energetic electrons streaming out from the sun, and the type III radio emission is produced from the electron plasma oscillations via a nonlinear coupling process.

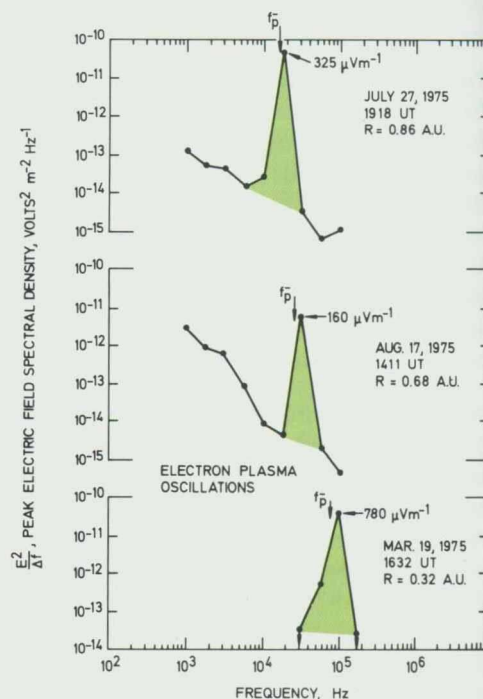
sehr die Frequenz der Elektronen-Plasmaschwingungen bei Annäherung an die Sonne zunimmt, zeigt Abb. Seite 102 unten. Auch die Intensität der Elektronen-Plasmaschwingungen scheint bei Annäherung an die Sonne anzusteigen. Solche Plasmaschwingungen treten nicht notwendigerweise nur dann auf, wenn ein Typ-III-Strahlungsausbruch beobachtet wird. Weit häufiger sind eng lokalisierte Schwingungsgebiete; sie treten gelegentlich mehrmals am Tag auf und stehen nicht in Verbindung mit der Aussendung von elektromagnetischen Wellen.

illustrated in figure page 102 bottom which shows the spectrum of electron plasma oscillation events detected at 0.86, 0.68, and 0.32 AU. The decrease in the electron plasma frequency with increasing radial distance accounts for the decreasing emission frequency of the type III burst as the solar flare electrons move outward from the sun. The intensity of the electron plasma oscillation also tends to increase with decreasing radial distance from the sun. The increase in the field strength with decreasing radial distance probably explains why type III radio bursts tend to be more intense at higher frequencies, which are generated closer to the sun.

Electron plasma oscillations are also observed that are not associated with any detectable type III radio emission. These types of plasma oscillations occur quite frequently, sometimes several times per day. The absence of a detectable radio emission from these events indicates that the plasma oscillations are probably quite localized, and not occurring simultaneously over a large volume of the solar wind, as in the case of the type III related events.

Spektrale Messungen des elektrischen Felds zeigen die Änderung der Elektronen-Plasmafrequenz mit dem radialen Abstand von der Sonne.

Electric field spectrum measurements showing the variation of the electron plasma frequency with radial distance from the sun.

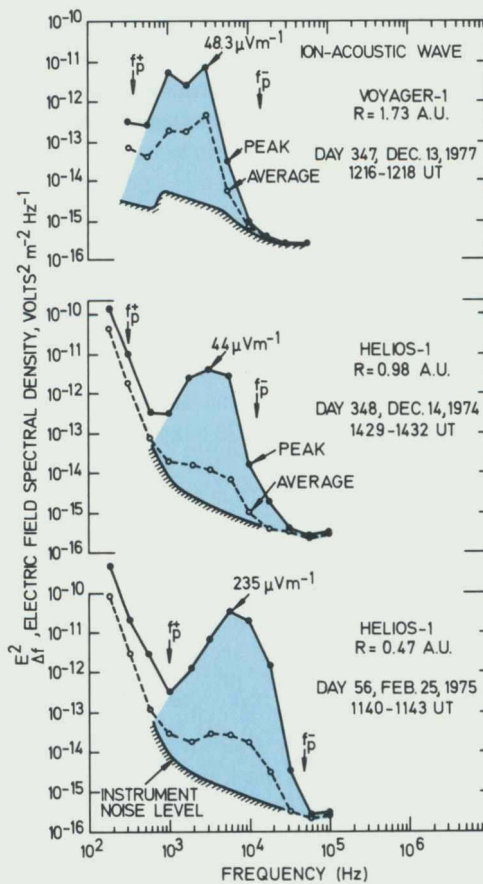




Über die zehn Jahre seit der Entdeckung dieser Art Rauschen konnte überzeugend nachgewiesen werden, daß es sich dabei um ionenakustische Wellen handelt. Diese müßten immer im Frequenzbereich unter der Ionen-Plasmafrequenz liegen, während sie von HELIOS bei Frequenzen registriert wurden, bei denen sie sich eigentlich nicht ausbreiten können. Die Lösung des Problems bietet der Doppler-Effekt. Er ist dafür verantwortlich, daß die Relativbewegung zwischen Sender und Empfänger zu Frequenzverschiebungen führt. Im vorliegenden Fall ist der Sender das Plasma, das die fraglichen Wellen erzeugt. Berücksichtigt man die Sonnenwindgeschwindigkeit und die Bahngeschwindigkeit von HELIOS und rechnet die zu erwartende Frequenzverschiebung aus, so ergeben sich tatsächlich Frequenzen, die geringer sind als die Ionen-Plasmafrequenz. Trotz des langen, ausgedehnten Studiums dieses Phänomens sind noch nicht alle Einzelheiten des Entstehens ionenakustischer Wellen klar. Zwei Faktoren scheinen besonders wichtig zu sein, das Verhältnis der Temperatur der Elektronen zu der der Ionen  $T_e/T_i$  (die beiden können stark verschieden sein, weil so gut wie keine Stöße zwischen einzelnen Teilchen auftreten), und der Wärmefluß der Elektronen  $Q_e$ . Falls sich herausstellen sollte, daß tatsächlich der Wärmefluß der entscheidende Anregungsfaktor dieser Wellen ist, so muß folgen, daß ionenakustische Wellen eine wichtige Rolle spielen für den Wärmetransport des Sonnenwinds.

Abb. Seite 104 zeigt eine interplanetare Stoßwelle, wie sie von einem der Radiowellenempfänger registriert wurde. Wie bereits auf den Seiten 74 bis 78 und 86 geschildert, stellen Stoßwellen drastische Störungen der sonst einigermaßen geordneten Verhältnisse im interplanetaren Raum dar. In den ersten Monaten der Mission traten sehr wenige solcher Ereignisse auf. Später jedoch, besonders im Maximum des Sonnenfleckenzyklus, waren sie recht häufig.

Die Stoßwelle von Abb. Seite 104 wurde am 30. März 1976, 17:44:00.5 Uhr registriert. In den meisten Frequenzkanälen setzte plötzlich starke



### III. Ion Acoustic Waves in the Solar Wind

In the first few months of operation of HELIOS 1, enhanced electric field intensities were discovered in the solar wind at frequencies between the ion and electron plasma frequencies. Typically, two or three periods of enhanced electric field intensities occur during each solar rotation, separated by periods of relatively low intensity. The periods of enhanced activity usually last from a few hours to several days. Subsequent investigations showed that the frequency spectrum of the electric field fluctuation depended on the radial distance from the sun, generally increasing in frequency, intensity and occurrence with decreasing distance from the sun. A representative set of electric field spectrums taken at 1.73, 0.98, and 0.47 AU, is shown in figure page 103. The spectrum at 1.73 AU is from VOYAGER 1. The

Typische Spektren der Feldstärke ionenakustischer Wellen in verschiedenen Abständen von der Sonne. Man beachte die Anstiegstendenz der Frequenz und der Intensität bei der Annäherung an die Sonne.

Typical spectra of the electric field strength of ion acoustic waves at various distances from the sun. Note the tendency for the frequency and intensity to increase closer to the sun.

trend toward increasing intensity and frequency with decreasing heliocentric radial distance is clearly evident.

Over 10 years since the discovery of this noise, a fairly convincing case has been made that these waves are ion acoustic waves. At first glance it does not appear that the spectrum is consistent with an ion acoustic wave interpretation, since the peak in the spectrum occurs well above the ion plasma frequency, whereas the ion acoustic mode can only propagate at frequencies below the ion plasma frequency. This difficulty was resolved by Gurnett and Anderson. Because the solar wind velocity is much greater than the ion acoustic speed, they concluded that the frequency should be almost entirely determined by the Doppler shift caused by the motion of the solar wind. The Doppler shift depends on wavelength and is given by  $f = V/\lambda$ , where  $\lambda$  is the wavelength of the waves.

The minimum wavelength varies from about 60 meters at the orbit of the earth to 20 meters at the HELIOS perihelion. The corresponding maximum frequencies, assuming a nominal solar wind velocity of 400 km/sec, are 6.6 and 20 kHz. These maximum frequencies are seen to be in excellent agreement with the upper cutoff frequency of the observed electric field spectrum.

Even after ten years of study the origin of the solar wind ion acoustic waves is not yet clearly established. Two factors, the electron to ion temperature ratio,  $T_e/T_i$ , and the electron heat flux,  $Q_e$ , seem to control the intensity of the ion acoustic waves.

These dependences support a theory, first by Forslund (1970), in which the ion acoustic waves are excited by the electron heat flux in the solar

Wellenintensität ein. Bemerkenswert ist jedoch, daß bei Frequenzen um 30kHz bereits vor dem Eintreffen der eigentlichen Stoßwelle erhöhte Feldstärken registriert wurden. Diese erhöhte Aktivität wird als Elektronen-Plasmaschwingung gedeutet ähnlich der, die auch bei Typ-III-Ausbrüchen beobachtet wird. Anscheinend strömen einige Elektronen noch schneller als die Stoßwelle in das umgebende Plasma des Sonnenwinds hinein. Die Schwingungen, die danach breitbandig in den meisten Frequenzkanälen einsetzen, sind ihrer Natur nach ionenakustische Wellen. Ihre Intensität ist jedoch wesentlich höher als die der vorher besprochenen Wellen dieses Typs. Gelegentlich treten auch solche Wellen bereits vor der eigentlichen Stoßwelle auf. Ihr Auftreten hängt von der Richtung des Magnetfeldes ab: steht es ungefähr senkrecht zur Stoßwellenfront, so können auch Ionen in den Bereich vor der Front eindringen und dort Schwingungen anregen. Steht das Magnetfeld ungefähr parallel, so ist dieser Fluß von Teilchen unterbunden; es treten keine ionenakustischen Wellen vor der Stoßfront auf. Der genaue Mechanismus der Anregung ionenakustischer Wellen vor der Stoßfront ist allerdings noch nicht in allen Einzelheiten bekannt. Man kann jedoch von HELIOS 1 weitere Meßdaten erhoffen, die dazu beitragen werden, einige der vielen offenen Fragen der Dynamik des interplanetaren Raums zu lösen.

Beispiel von Plasmawellen, hervorgerufen durch eine interplanetare Stoßwelle. Man nimmt an, daß Elektronen-Plasmaschwingungen von Elektronen stammen, die in den Bereich vor der Stoßfront strömen. Der plötzliche Anstieg, der in den meisten Frequenzkanälen im Augenblick des Eintreffens der Stoßfront registriert wird, ist auf ionenakustische Wellen zurückzuführen. Diese Wellen werden für die stoßwellenbedingte Aufheizung des Plasmas verantwortlich gemacht.

An example of plasma waves produced by an interplanetary shock. The electron plasma oscillations are believed to be produced by electrons streaming into the region ahead of the shock. The intense burst of noise at the shock crossing are believed to be ion acoustic waves. These waves are thought to heat the plasma at the shock.

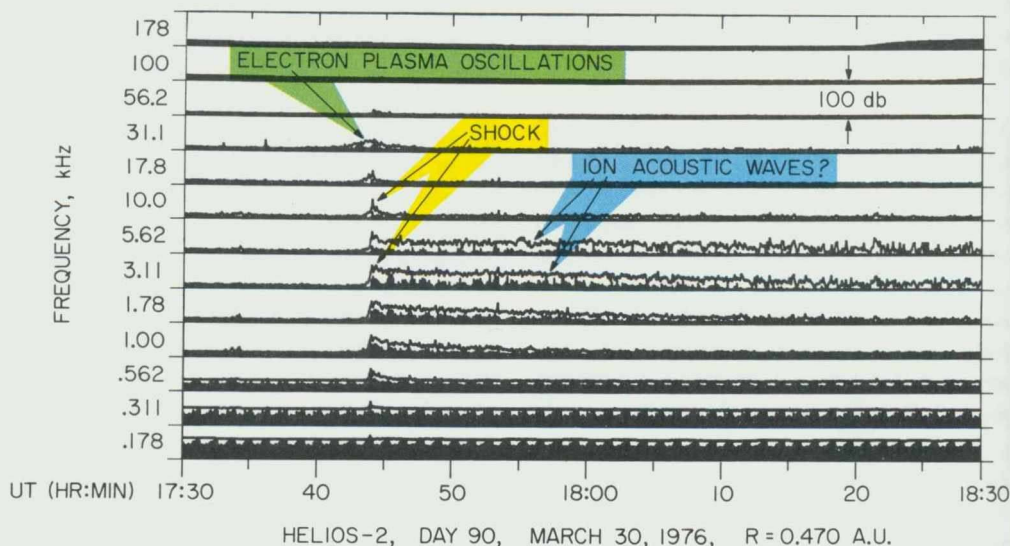
wind. If the electron heat flux is the origin of enhanced acoustic wave intensities, it is possible that these waves may play an important role in regulating the thermal conduction of heat away from the sun by the solar wind!

#### IV. Waves Associated with Interplanetary Shocks

Solar flares often produce shock waves that propagate through the solar wind out to the orbit of the earth. These shock waves are called interplanetary shocks and are almost always accompanied by enhanced plasma emissions. During the early part of the HELIOS mission interplanetary shocks were quite rare. However, later, around solar maximum, from about 1977 to 1982, many shocks were observed. The plasma wave signatures associated with these shocks are highly variable and depend on the detailed structure of the shock. A representative example is shown in figure page 104. This shock was detected by HELIOS 2 on March 30, 1976. The plasma wave signature in this case is quite straightforward and consists of a burst of electron plasma oscillations upstream of the shock and an abrupt broadband burst of electric field noise at the shock crossing, which was at 17:44:00.5 UT  $\pm$  0.5 sec. The broadband burst of noise gradually decays downstream of the shock over a period of half an hour or more.

Electron plasma oscillations are frequently observed upstream of the earth's bow shock and are known to be caused by a beam of electrons streaming into the solar wind from the shock. The mechanism of exciting the plasma oscillations is essentially the same as the oscillations associated with type III radio bursts, except that the electrons originate from the shock instead of the solar flare. In the region close to the sun, electron plasma oscillations of this type are believed to cause type II and type IV solar radio bursts via a nonlinear coupling process very similar to the generation of type III radio bursts. Interestingly enough, shock-associated electron plasma oscillations are quite rare in the HELIOS data. The March 30, 1976 event is one of the few shocks with upstream electron plasma oscillations. The reasons for the relatively low occurrence of upstream electron plasma oscillations ahead of interplanetary shocks is not completely understood, but is probably related to the lower Mach number of interplanetary shocks.

The intense broadband burst of electric field noise at the shock is observed on essentially every interplanetary shock detected by HELIOS. The shape of the spectrum of this noise is very similar to the spectrum of the ion acoustic noise described previously, but is usually more intense, sometimes reaching peak broadband field



strengths of several mV/m. Because of the similarity to the ion acoustic wave spectrum, it is generally believed that this noise is caused by ion acoustic waves generated in the shock. Studies of similar turbulence in the earth's bow shock indicate that this noise probably plays an important role in heating the plasma at the shock. Because particle collisions in the tenuous solar wind are extremely rare, some type of turbulent process must be present to provide dissipation and to heat the plasma at the shock.

#### V. Conclusions

This summary of results from the HELIOS plasma wave experiment demonstrates that this investigation has produced many important new results over the 10 year period since HELIOS 1 was launched. This investigation confirmed a basic theory for the generation of type III radio bursts that was first proposed over 20 years ago, and it revealed the existence of enhanced levels of ion acoustic wave turbulence in the solar wind. The long duration of the observations and the extended radial distance coverage provided a vast quantity of data on the temporal and radial variation of these and other plasma wave phenomena over almost an entire solar cycle. The results obtained show that the plasma processes occurring in the solar wind are very complicated and many important questions still remain to be answered. Hopefully, with the continued operation of HELIOS 1 and further study of the existing data some of these questions can be answered.



Kellogg

# Evidence Concerning the Generation Mechanism of Solar Type III Radio Bursts

Paul J. Kellogg  
School of Physics and Astronomy  
University of Minnesota  
Minneapolis, Minnesota 55455

*1930–1933 entdeckte Karl Jansky Radiowellen, die aus der Tiefe des Weltraums kommend die Erde erreichen. Inzwischen kennen wir nahezu unzählig viele Sterne, Milchstraßensysteme und sternähnliche Gebilde, die Radiowellen aussenden. Ihre Erforschung führte zur Entdeckung von Sternen, deren Eigenschaften vorher völlig unbekannt waren, z. B. die Pulsare. Wir haben auch entdeckt, daß so gut wie alle astronomischen Objekte Radiowellen aussenden. Mehr noch, wir wissen, daß alle heißen, glühenden Körper nicht nur im sichtbaren Licht leuchten, sondern auch im „Licht“ der Radiowellen. Die Intensität ist jedoch meist so gering, daß dieses Leuchten auch mit sehr empfindlichen Methoden nicht nachweisbar ist.*

*Bei den astronomischen Objekten sind entweder sehr starke magnetische Felder oder Strahlen hochenergetischer Teilchen für die Aussendung von Radiowellen verantwortlich. Den Mechanismus selbst verstehen wir bisher nur unvollständig.*

*Unsere Sonne wurde sehr bald als Radiowellenstrahler erkannt. Die ständig zu beobachtende Radiostrahlung ist nicht sehr intensiv. Ihr überlagert treten jedoch ausbruchartig Radiowellenstörungen auf, die sich in vier Typen gliedern lassen. Wir wissen, daß Ausbrüche des Typs I von Regionen auf der Oberfläche der Sonne ausgesendet werden. Die Typen II und III entstehen in Gegenden des interplanetaren Raums zwischen Sonne und Erde. Ausbrüche des Typs IV kommen aus Gegenden in der Nähe der Sonne, der heißen Atmosphäre, die Korona genannt wird.*

## Introduction

When Karl Jansky first discovered, in the years 1930–33, that radio signals were coming from space, some people thought that this was evidence of other advanced civilizations. It was natural to think this since our own civilization had only recently learned how to generate and detect radio signals over long distances. However, we now know that many astronomical objects generate radio signals as naturally as they generate light. Indeed a weak radio signal ought always to accompany the generation of light, but the emission of radio signals strong enough to be observed at large distances, we now know, generally requires either comparatively strong magnetic fields or beams of energetic particles.

Although we can make these general statements about the generation of radio noise, our science does not understand in detail the exact mechanism, in many cases, for the generation of the radio signals. It is important to understand the generation mechanisms because these radio signals can tell us a great deal about the nature of the object which is emitting them and will tell us more and more as we understand more perfectly exactly how the signals are generated. Much of our knowledge that has been obtained from radio astronomy has been obtained without a complete theory of the generation mechanism. Thus, for example, the pulsars were discovered and shown to be neutron stars by the very rapid and regular bursts which they emit even though we have only the vaguest ideas about what it is in the pulsar that causes it to emit strong radio signals. Nevertheless the regularity of the signals allows

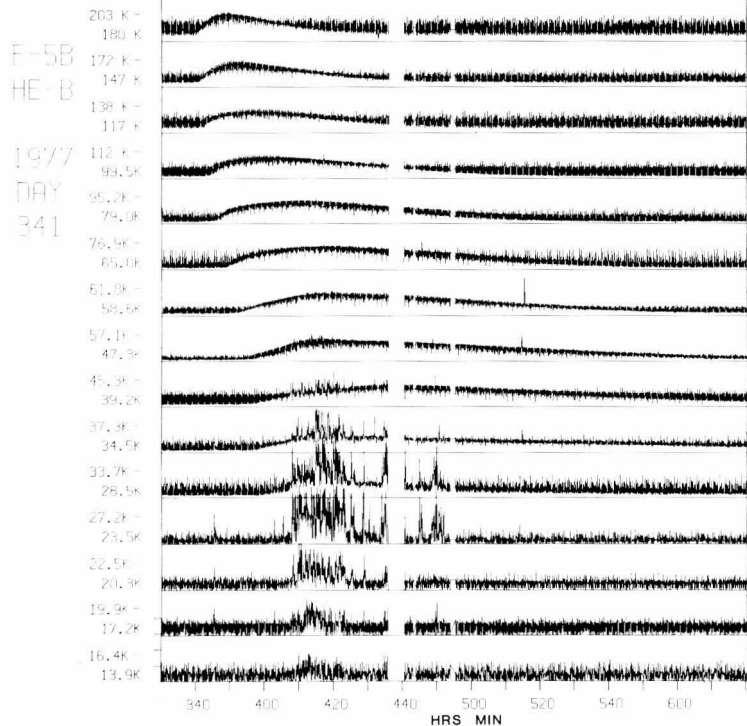
us to deduce something of the nature of the source.

Our own sun was early discovered to emit radio noise of several different kinds and these were early classified, when we had even less knowledge than we have at present, as Types I through IV. The Type I bursts are now known to be emitted by regions on the surface of the sun. Types II and III are generated in the interplanetary medium between the sun and the earth. Type IV bursts are generated near the sun but well above its surface.

All of these types were first discovered and studied using observations from the surface of the earth. However Types II and III have important parts of their spectra at frequencies which cannot reach the ground because the earth's ionosphere reflects away all frequencies below about 2 MHz. These types are then best studied from satellites, and a part of the HELIOS experiment complement was designed for their study (Experiment 5).

In fig. page 107 we show a Type III burst observed from HELIOS 2, on day 341 (8 Dec.) of 1977. To explain what is shown, we first describe the experiment and what it measured.

The University of Minnesota part of experiment 5 on the HELIOS satellites consisted of a radio receiver which was rapidly stepped through 168 different frequencies, the highest frequency being 203 kHz and the lowest one 12 Hz. This receiver was connected to the long antenna. In the figure page 107 we show the signals received in some of these 168 frequency channels, plotted as a function of time. In each strip of the figure we have plotted several of the frequency channels together. The Y axis indicates the strength of the signal and the X axis the time at which it was received. The first indications of the Type III burst are received in the 203 kHz channel at about 0339 where we see that the signal strength begins to rise smoothly above the background of weak interference from spacecraft systems. This indicates that a beam of electrons is leaving the surface of the sun and has reached a level (of about 20 solar radii) where the interplanetary



*Radiowellen und elektro-  
statische Signale, die wäh-  
rend eines Typ-III-Aus-  
bruchs empfangen  
wurden.*

Radio and electrostatic  
signals received during a  
Type III burst.

*Alle diese Radiowellenausbrüche wurden vom Erdboden aus entdeckt und klassifiziert. Die Ausbrüche des Typs II und III können von der Erde aus nur teilweise beobachtet werden, weil die Ionosphäre der Erde alle Frequenzen kleiner als ungefähr 2 MHz wegreflektiert. Deshalb werden diese Typen besser von Satelliten aus studiert. Experiment 5 auf HELIOS widmet sich dieser Aufgabe. Abb. Seite 107 zeigt einen Radiowellenausbruch vom Typ III, wie er von HELIOS 2, 1977, Tag 341 (8. Dezember) beobachtet wurde. Um zu erklären was gezeigt ist, wird erst das Experiment beschrieben und das, was damit gemessen wurde.*

*Der Teil von Experiment 5 auf den HELIOS-Sonden, der von der University of Minnesota beigesteuert wurde, stellt einen Radioempfänger dar, der schnell 168 verschiedene Frequenzen zwischen 203 kHz und 12Hz durchläuft. Dieser Empfänger ist verbunden mit der langen Meßantenne der HELIOS-Sonde. In Abb. Seite 107 sind die Signale von einigen dieser 168 Fre-*

electron density is right for the emission of waves at 203 kHz. As the electron beam rushes outward it generates radio noise successively at lower and lower frequencies because the electron density of the interplanetary medium becomes lower and lower and the emitted frequency is proportional to the square root of the electron density.

We know that this interplanetary medium is filled with plasma; that is to say, it represents a very tenuous part of the solar atmosphere, which is so hot and tenuous that the hydrogen and helium are completely ionized and the heavier elements are at least partially ionized. This plasma is continually moving outward past the earth, and so is called the solar wind. A major and very successful part of the HELIOS experiment complement was devoted to measurement of the solar wind.

Occasionally, in connection with a solar flare or similar disturbance on the surface of the sun, beams of energetic electrons having energies of

some tens of kiloelectronvolts (keV) are emitted and travel outward into this interplanetary medium. The interaction of these beams with the plasma, the solar wind, causes the beam to be bunched and to have strong electric fields. These fields oscillate at a frequency close to the plasma frequency and characteristic frequency of the plasma which is proportional to the square root of the density of electrons.

The mechanism for this instability is as follows. The electron beam is never perfect and has small regions where the total electron density may exceed the plasma ion density or vice versa, small regions of charge which cause small electric fields. The electrons and ions of the plasma then try to rush to move inward to neutralize these charges. However, the situation is somewhat like a hunter shooting at a bird. He must lead, must shoot in front of the bird in order that the shot reach the position of the bird at the time that it takes to travel to the bird's position. The in-rushing electrons and ions do not know to lead the fields in the beam and so they fall behind the position where they were supposed to neutralize the background charge densities. They then cause not a neutralization but an enhancement of the charge density at this following point. This point then becomes a new source of electric field, of opposite sign to the first which causes even more charges to rush in and fall behind and cause even larger electric fields.

These charge fluctuations are not waves. They are called electrostatic waves and they remain essentially fixed in the moving plasma. They do not propagate rapidly to large distances like radio signals would. However, through some mechanism which is not known for sure, these waves cause currents in the plasma which then generate the electromagnetic waves which propagate away at nearly the velocity of light and are measured as radio signals on the earth or by, for example, the radio receivers on the HELIOS satellite.

It can easily be seen that the motion of one group of electrons, the beam, through another group of particles, the solar wind, is essential for this

quenzkanäle über der Zeit, in der sie empfangen wurden, aufgetragen. Die Y-Achse jedes Frequenzkanals gibt die Intensität der Radiowellen wieder, die X-Achse die dazugehörige Zeit. Das Typ III-Ereignis setzt im Kanal höchster Frequenz (203 kHz) um 03.39 ein. Man sieht, daß die Signalstärke langsam über das Untergrundrauschen anzusteigen beginnt. Etwas später nimmt auch das Signal bei 172 kHz zu, bei 138 kHz noch später, und so fort. Das läßt vermuten, daß ein Strahl schneller Elektronen die Oberfläche der Sonne verlassen und einen Abstand erreicht hat, in dem die Elektronendichte des umgebenden Plasmas gerade die Emission von 203 kHz zuläßt (etwa 20 Sonnenradien). Beim Auswärtswandern erreicht der Elektronenstrahl Gegenden mit immer kleiner werdender Elektronendichte. Dementsprechend sinkt auch die Frequenz der abgestrahlten Radiowellen. Die Theorie sagt uns, daß die emittierte Frequenz proportional ist zur Quadratwurzel aus der Elektronendichte. Immer wieder einmal, insbesondere im Zusammenhang mit einem Fackelausbruch auf der Sonne (Flare), werden solche Elektronenstrahlen ausgestoßen. Ihre Geschwindigkeit liegt meist höher als 100 000 km/s. Das heißt, ihre Energie entspricht einer Spannung von mehreren 10 000 Volt. Im Vergleich dazu bewegt sich der Sonnenwind mit einigen 100 km/s nur sehr langsam nach außen. Es entsteht ein starkes elektrisches Feld. Es hindert den Strahl daran, sich aufzufächern. Er bleibt gebündelt. Oszillationen dieses Feldes werden besonders stark in der Resonanzfrequenz angeregt, die der dort vorherrschenden Elektronendichte entspricht. Wegen vieler zusätzlicher Störungen entstehen auch harmonische Frequenzen, insbesondere die doppelte Frequenz.

Die Feldoszillationen ziehen Schwingungen des Plasmas als Ganzem nach sich, weil die Elektronen versuchen, den elektrischen Feldschwankungen zu folgen. Das heißt, das Plasma selbst beginnt intern zu schwingen. Man kann diese Schwingungen nur dann beobachten, wenn sich das Meßgerät in dem Bereich befindet, den der Elektronenstrahl durchheilt. Mit HELIOS 2 kann

process since the growth of the fluctuations is caused by the "miss" due the motion. Of course both groups of electrons are moving outward, but the beam electrons are so fast (100,000 km/sec.) compared to the solar wind (500 km/sec.) that the solar wind motion is not important for this process.

By making a more mathematical theory of the process which has just been described in words, it can be shown that the charge fluctuations tend to oscillate at a frequency called the plasma frequency, which is proportional to the square root of the solar wind electron density.

The generation mechanism is then pretty well understood up the point where the electrostatic waves generate the radio waves. It is this last step about which there is some uncertainty. There are two basic theories for the generation of the radio signal by currents which are themselves caused by the electrostatic waves. In one of these theories the radio signals are generated at the second harmonic of the plasma frequency, the frequency of the electrostatic waves, and in the other theory the radio waves are generated slightly above the plasma frequency itself. For the vast majority of Type III bursts we see the frequency of the bursts falling as the electron beam rushes out from the sun and we have a fair idea of the density of the interplanetary medium, but we do not know whether the radio noise is emitted at the fundamental when the electron beam is closer to the sun or at the second harmonic when the electron beam is farther out.

Usually the electron beams which cause Type III bursts go off in some unknown direction. However, in the event of fig. page 107 and three others like it the electron beam was aimed at the HELIOS satellite. We know this because at 0405 we see the beginning of some much stronger and very irregular signals. These are identified as the electrostatic waves discussed above, the primary instability which gives rise to the radio signal. Since these electrostatic waves remain fixed in the plasma, they must have been generated in the region immediately around the HELIOS satellite. This allows us to tell much more about the

whole Type III burst than would otherwise be possible. From the fact that the beam passed over the HELIOS satellite, we know the direction in which it was emitted (the electrons do not travel in straight lines but are guided by the magnetic field and while this is somewhat uncertain we know the average field of the sun from other HELIOS observations and this is thought to be sufficiently accurate for our purposes). We know its radial position when it reached the HELIOS satellite and we will show evidence below that it travelled at a nearly uniform speed so that we can calculate the position of the electron beam at each instant of the event. This sort of data provides us with clear evidence concerning the generation mechanism and whether the radio signals are generated at the fundamental or second harmonic of the plasma frequency.

In order to show more clearly the effect in which we are interested it is convenient to plot the reciprocal of the frequency on the Y axis and the time of onset on the X axis. We have done this in figure page 109 for the four particular fortuitous Type III bursts which have been observed on HELIOS 2. In each graph a series of points with the straight line through them represents the onset time of the radio signal and the square box is drawn to show the electrostatic noise corresponding to the very irregular signals which begin at 0405 in figure page 107. (The fact that the line is straight is evidence that the electrons move out at constant speed.) In this way if the radio signal is generated at the plasma frequency, then the line for the radio signal onset times must pass through the box of electrostatic noise since the radio signal is then emitted at the same frequency as the electrostatic noise at the time that the electron beam reaches HELIOS. On the other hand, if the radio signal is generated at the second harmonic then its period will be half as great as the plasma period and the line will pass below the box at which the electrostatic noise starts. We see that neither of these ideal situations quite occurs in practice but that clearly there is a difference between the different events. For some of them the line passes slightly

ten nur viermal solche Ereignisse registriert werden. Eines davon ist das gezeigte Beispiel von Tag 341. Der Elektronenstrahl hatte gegen 4.05 Uhr HELIOS 2 erreicht. Von da an beginnt das Experiment wesentlich stärkere und sehr irreguläre Signale zu registrieren: die elektrostatischen Schwingungen des Plasmas.

Über die Bewegungsrichtung des Elektronenstrahls liefert das Experiment im allgemeinen nur unzureichende Informationen. Man weiß nur, daß die Elektronen bei ihrer Bewegung an das interplanetare Magnetfeld gebunden sind. Nur in solchen seltenen Fällen wie dem von Tag 341 kennt man einen Punkt im Raum, den der Elektronenstrahl erreicht hat, und aus den Magnetfeld-Informationen, die an Bord von ande-

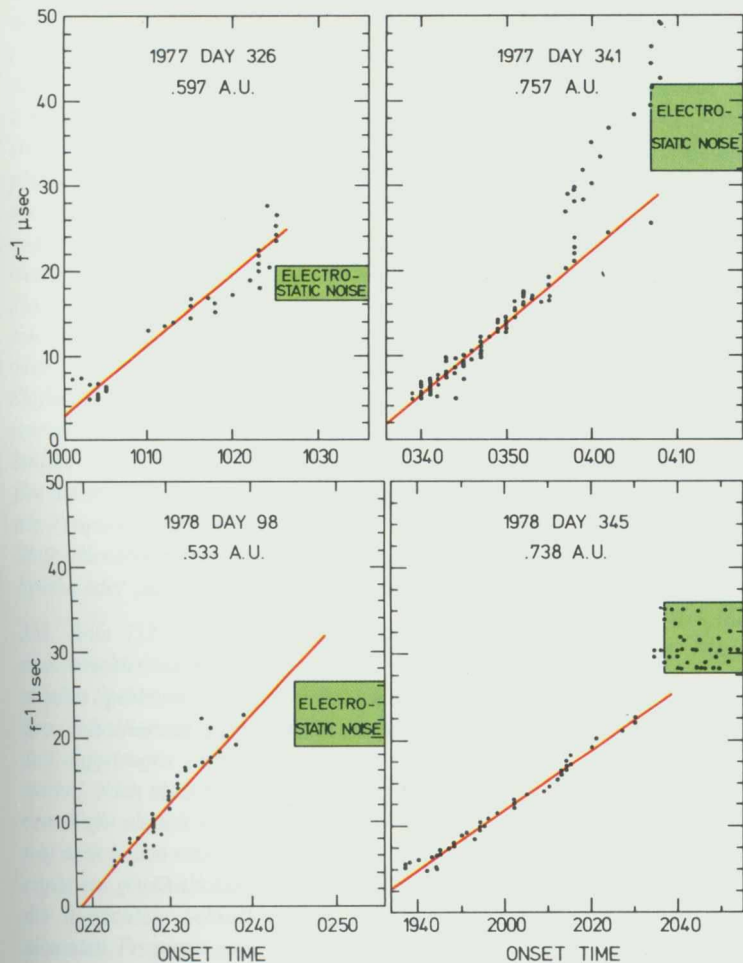
ren Experimenten gewonnen werden, kennt man auch die Richtung, aus der die Teilchen ankommen. Von der Sonne weg wandern die Elektronen mit nahezu konstanter Geschwindigkeit nach außen. Das läßt sich aus der stetigen Frequenzabnahme des Typ-III-Ausbruchs erschließen.

Nun bleibt jedoch die Frage offen, ob die vor dem Einsetzen der Plasma-Wellen empfangene Radiostrahlung der Resonanzschwingung entspricht oder einer höheren harmonischen Schwingung. In Abb. Seite 109 werden die vier Typ-III-Ereignisse betrachtet, bei denen die Plasma-Schwingungen direkt beobachtet werden konnten. Über der Zeit aufgetragen sind jedoch nicht die empfangenen Frequenzen, son-

above the square box and for others it passes considerably below. It is believed that this effect is due to deviations of the electron density from the smoothed average values which have been considered up to now. The radio signal can travel for large distances while the electrostatic noise remains fixed in the plasma so that radio signals coming from nearby regions can arrive slightly earlier than they are supposed to on the ideal model, because they come from nearby regions of different electron density. With this idea then we see that the events on 1977 Day 326 and 1978 Day 98 correspond to emission at the fundamental of the plasma frequency. The event on 1978 Day 345 apparently corresponds to emission at the second harmonic since at the time that the electron beam reaches the satellite and the electrostatic noise starts the radio signal has almost twice the frequency of the electrostatic noise. The event on 1977 Day 341 is clearly a combination of the two. Initially the radio noise is being emitted at the second harmonic since the line through the early points is aiming well below the box, but then at about time 0400 and a frequency of 50 kHz the onset times leave this straight line and move over toward a straight line which would correspond to emission at the fundamental.

Other researchers have found similar effects, which although the evidence was not quite so clear, nevertheless indicated that the frequency of mission could change from fundamental to harmonic (Haddock and Alvarez, 1973). Generally speaking, though, they were observing a transition in the opposite direction and it is not clear whether it is exactly the same effect as that shown for 1977 Day 341.

The HELIOS data then provide a clear answer of whether the radio emission is at the fundamental or at the second harmonic. The answer unfortunately is both. Unfortunately because this means that the frequency of Type III bursts cannot be used as a clear indication of the density of the interplanetary medium without some, other evidence as to whether in a given case the emission is at the fundamental or the second harmonic of the plasma frequency. It may seem that whether



Registrierkurve der Reziproken der Frequenz aufgetragen über dem Zeitpunkt des Einsetzens dieser Frequenz für vier Typ-III-Ausbrüche, die über HELIOS 2 hinweggelaufen sind.

Plots of reciprocal of frequency vs. onset time at that frequency for four Type III bursts which passed over the HELIOS 2 satellite.

dern die Schwingungsdauer, d. h. die Reziproken der Frequenzen. Das Kästchen am rechten Rand jeder der vier Darstellungen entspricht dem Bereich der empfangenen Plasma-Schwingungen. (Der geradlinige Anstieg der Schwingungsdauer der Radiowellen ist ein Beweis dafür, daß sich die Elektronen mit konstanter Geschwindigkeit nach außen bewegen.) Läuft die Gerade durch das Kästchen, so heißt das, daß dort die Frequenz der Radiowellen und die der Plasmaschwingungen im wesentlichen gleich ist. Ist die Frequenz der Radiowellen eine Harmonische der Plasmaschwingungen, so muß die Gerade unterhalb verlaufen. Das ist im Fall von Tag 345 recht gut erfüllt und auch der Fall von Tag 341 entspricht bis etwa 4.00 Uhr diesen Voraussetzungen. In den anderen Fällen liegen die Voraussetzungen jedoch offensichtlich komplizierter. Eine Entscheidung zwischen den beiden Möglichkeiten, die der Theorie entsprechen würden, ist nicht möglich.

Man mag einwenden, das seien unwesentliche Details. Tatsächlich werden jedoch solche Effekte hergenommen, um die Plasmadichten in astrophysikalischen Objekten zu analysieren, die niemals an Ort und Stelle beobachtet werden können. Radiorauschen ist eine wichtige Informationsquelle, um solche Objekte kennenzulernen. Die Astrophysik ist darauf angewiesen, wenn wir die Natur ferner Sterne und Sternensysteme verstehen lernen wollen.

the emission is at the fundamental or at the second harmonic of the plasma frequency is an unimportant detail. However, the behavior of the emission frequency of Type III bursts as a function of time has been used by many scientists to measure the density of the solar corona at times when and in places where there is no spacecraft. Further, it is important to understand all that we can about the ways in which radio noise is generated in all possible situations because it is only in this way that we may understand what is happening in very distant astronomical objects for which in situ measurements will never be possible.

#### References

Haddock, F. T. and H. Alvarez, Solar Phys. 29, 183 (1973).



# The HELIOS Radio Astronomy Experiment

Susan Kayser and Robert Stone  
NASA Goddard Space Flight Center,  
Greenbelt, MD 20771

*Das Radio-Astronomie-Experiment auf HELIOS 1 und 2 war dazu bestimmt, Radioausbrüche zu verfolgen, die sich zwischen Sonne und Erde ausbreiten. Solche Ausbrüche werden durch Materie ausgelöst, die von der Sonne ausgestoßen wurde, zum Beispiel Teilchenströme oder Wolken suprathemischer Elektronen (10-100 keV). Sie treten in Wechselwirkung mit dem Sonnenwind. Wenn eine Elektronenwolke, z. B. von einem Flare, nach außen wandert, regt sie elektromagnetische Wellen der Elektronenplasmafrequenz  $f_p$  und der Harmonischen dieser Frequenz  $2f_p$  an. Bei der Wanderung nach außen treffen die Elektronen auf immer dünner werdendes Plasma. Dementsprechend wird die Plasmafrequenz immer niedriger. Man nennt solche Radiowellenausbrüche Typ-III-Ausbrüche oder „schnelle Frequenzdrift“-Ereignisse. Auch Stoßwellen regen in ähnlicher Weise Radiowellenemissionen an. Sie wandern mit 500 bis 800 km/sec jedoch wesentlich langsamer nach außen als schnelle Elektronen. Deshalb ändert sich die Frequenz ihrer Wellen auch nur langsam. Stoßwellenemissionen nennt man Typ-II-Ausbrüche oder „langsame Drift“-Ereignisse.*

*Abb. Seite 112 zeigt ein Typ-III-Ereignis auf zwei verschiedene Weisen. Oben wird ein „dynamisches Spektrum“ gezeigt. Die Intensität ist als Grau-Schattierung gegen die Frequenz und die Zeit aufgetragen (Schwarz = höchste Signalstärke). Nach oben hin nimmt die Frequenz in dem Maße ab, wie die Teilchen von der Sonne weg nach außen wandern. Jeder Vertikalschnitt ergibt ein gewöhnliches Frequenzspektrum. Jeder horizontale Schnitt gehört zu einer bestimmten Frequenz und ergibt ein Zeitprofil.*

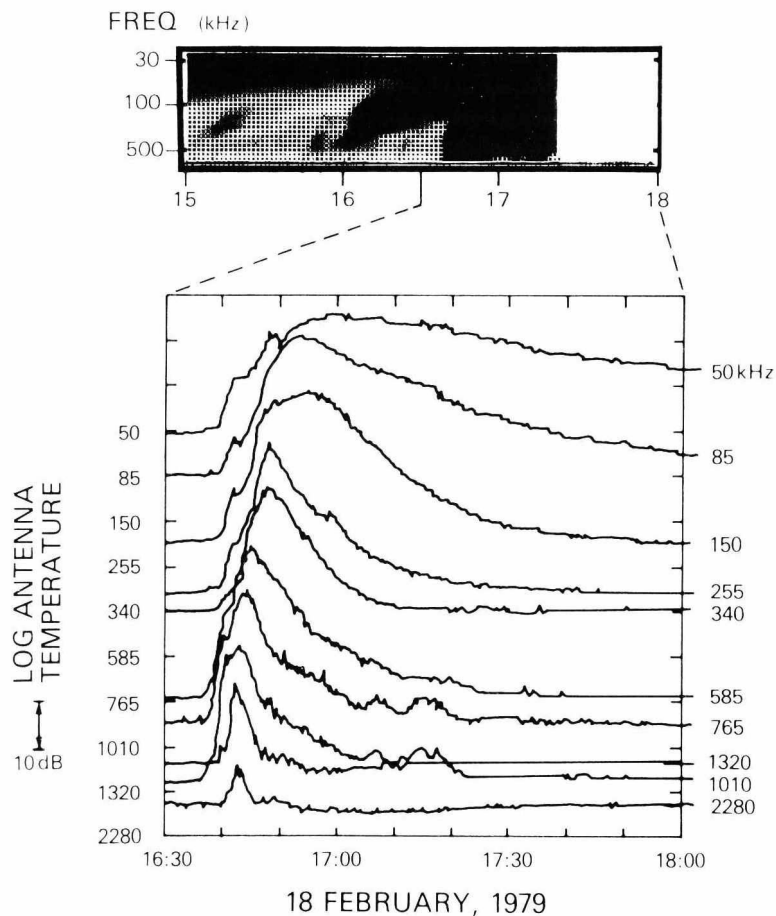
The radio astronomy experiments on HELIOS 1 and HELIOS 2 were designed to track travelling radio bursts between the sun and the earth. Radio bursts can result from the interaction of solar ejecta, such as streams or packets of suprathermal electrons (10–100 keV) with the interplanetary solar wind plasma. Suprathermal electrons, perhaps emitted during a solar flare, are guided outward along magnetic field lines which spiral out from the sun. The exciton electrons interact with the ambient plasma to generate electrostatic waves. The frequency,  $f_p$ , of these plasma waves depends on the electron density in the ambient plasma,  $n_e$ , and is given by  $f_p$  (kHz) =  $9 n_e^{1/2}$  ( $\text{cm}^{-3}$ ). Part of the plasma wave energy is converted into electromagnetic waves at frequency  $f_p$  and at the second harmonic,  $2f_p$ . As an electron packet travels outward from a solar flare, it passes through the decreasing electron density of the interplanetary medium (IPM), and so radio waves will be produced at lower frequencies. These travelling radio bursts are traditionally referred to as type III bursts, or “fast frequency drift” events. Shock waves propagating outward from the sun during a solar flare will also stimulate radio emission in a similar fashion. Since shock waves travel at about 500–800 km/s, much slower than suprathermal electrons, which move at  $1/3$ – $1/2$  of the speed of light, the rate of frequency drift toward lower frequency is much slower for these events. Shock wave emission is known as type II, or “slow drift” radiation.

An example of a type III event is shown in two ways in figure page 112. The upper panel presents a “dynamic spectrum” in which intensity

(as a shade of gray) is plotted against frequency and time. The blackest areas of the spectrum are those where the signal strength is greatest. Frequency decreases upwards, as we go out from the sun. A vertical slice gives an ordinary spectrum, i.e., intensity as a function of frequency. A horizontal slice gives a time profile, showing the change in intensity for one frequency as a function of time. In the lower panel, time profiles are shown for ten frequencies for an event. For clarity, each frequency is plotted 10 dB higher than the previous one. As time goes on, the peak intensity drifts to lower and lower frequencies. This is because the lower frequencies originate farther out from the sun, and it takes longer for the electron packet to arrive there.

Type III bursts in the interplanetary medium (IPM) are particularly interesting because they allow us to explore the large-scale interplanetary magnetic field by remote sensing. Since the electron exciton streams travel along the magnetic field lines, we can trace these field lines in three dimensions by mapping the location of the radio emission at many frequencies. The range of interplanetary densities between  $10 R_0$  (solar radii) and earth's orbit (1 Astronomical Unit or AU, which is  $215 R_0$ ) corresponds to a frequency range of 3000–20 kHz. In Table I, the HELIOS frequencies are listed, along with the typical solar distance at which each frequency would be emitted, assuming, as the evidence suggests, that the emission is at  $2f_p$ . At the present time, there is no other technique for obtaining such “snapshots” of the large-scale magnetic field configuration from  $10 R_0$  to 1 AU. Additionally, knowing the radial distance of the emission from the sun for each observing frequency makes it possible to determine the average solar wind density gradient from  $10 R_0$  to 1 AU, using the relation between frequency and density given above. Other important data can be gathered about the properties of the exciton stream itself as well as about the radio emission mechanism.

In order to track the position of the travelling source, a radio antenna must be able to resolve small angles. For a radio antenna to have a resolution of even  $1^\circ$  at 500 kHz, it must be about



18 FEBRUARY, 1979

*Solche Zeitprofile sind unten für zehn Frequenzen aufgetragen.*

*Die Elektronen bewegen sich längs der magnetischen Feldlinien. Deshalb stellen Typ-III-Ereignisse eine willkommene Hilfe zur Bestimmung der globalen Struktur des interplanetaren Magnetfelds dar. In Tabelle I sind die von HELIOS empfangenen Frequenzen ( $2f_p$ ) dem typischen Abstand von der Sonne gegenübergestellt, in dem sie von den Elektronen angeregt werden. Bisher gibt es keine andere Methode, die solche „Schnappschüsse“ der großräumigen Magnetfeldstruktur zwischen etwa  $10 R_\odot$  und  $1 \text{ AE}$  ermöglichen würde. Auch die Plasmadichte kann dabei mitgemessen werden. Informationen über den Ort des Ereignisses bekommt man mit Hilfe der Richtungsbestimmung von zwei Punkten im Raum aus (Abb. Seite 113 oben).*

*Das Typ-III-Ereignis vom 18. Febr. 1979 um 16:45. a) Das dynamische Spektrum. Die Intensität wird graphisch dargestellt als schattiertes Grau gegen Frequenz (nach oben abnehmend) und Zeit. Der freie Raum nach 17:25 ist eine Datenlücke. b) HELIOS-Zeitquerschnitte für zehn Frequenzen. Die Basislinie für angrenzende Frequenzkurven ist jeweils nach oben, wie links bemerkt, um 10 db versetzt. Querschnitte sind rechts durch ihre Frequenz gekennzeichnet.*

The type III event of 18 February 1979 at 16:45. a) The dynamic spectrum. Intensity is plotted as a shade of gray against frequency (decreasing upwards) and time. The blank space after 17:25 is a data gap. b) HELIOS time profiles for ten frequencies. The baseline for adjacent frequency curves is separated, as marked on the left, by 10 db. Profiles are labelled by frequency on the right.

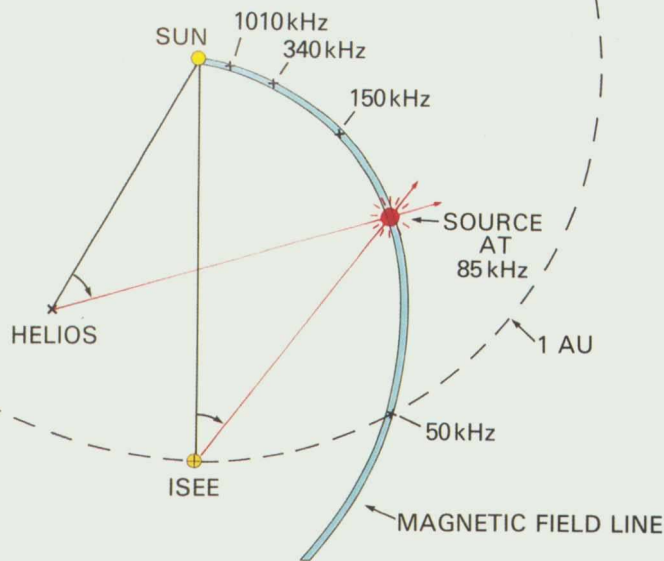
40 km across, and even bigger at lower frequencies. Furthermore, the frequencies characteristic of interplanetary densities, 3000–20 kHz, fall below the earth's ionospheric cutoff, and consequently can be observed only by spacecraft above the earth's plasmasphere. With present technological as well as financial limitations, putting such a large antenna into space is beyond consideration. Instead, we take advantage of the beam pattern of a relatively short dipole antenna. An electrically short dipole, such as that flown on the HELIOS payload, has a well-defined toroidal reception pattern. When such an antenna is broadside to a source, the signal received is much stronger than when it is end-on. By spinning the antenna, and finding the direction which the signal is strongest, we determine the direction of the source as projected on the spin

plane. With two such spacecraft, well-separated, we can determine the source direction as seen from each and triangulate between the two to locate the source, as shown in the sketch in figure page 113 top. This is what the HELIOS radio astronomy experiments were intended to accomplish.

The HELIOS radiometer consists of a dipole antenna, 32 meters tip-to-tip, which is shared with the electrostatic field experiment; the electronics which select a frequency channel, filter, and amplify it; and two alternating storage buffers. The output is an analog voltage which corresponds to the logarithm of the signal. The antenna is spinning in the ecliptic at about 60.3 revolution per minute, and two frequencies are measured in each revolution. Because of the  $180^\circ$  ambiguity of the power pattern of a dipole antenna, we need measurements during one half-spin only. Sixteen measurements are made in each half-spin, to provide the directional information. Not every revolution provides data, since it takes time for the storage buffers to transmit their one-spin's-worth of data. At the top rate, we receive measurements from one frequency pair every  $1\frac{1}{2}$  seconds. There are eight pairs of frequencies, listed in Table I, so by cycling through them, we obtain a set of 16 measurements for any particular frequency every 9 seconds at the top data rate, and less often at the lower data rates which are used when HELIOS is farther from earth.

Each set of 16 measurements is then analyzed to determine the strength of the signal, the direction of the source in the ecliptic, and the degree of modulation of the signal during the  $180^\circ$  rotation. For an extended source, the signal modulation during a half-spin is less than for a point source, so the modulation also gives an estimate of source size.

Unfortunately, one of the two 15-meter booms which constitute the antenna on HELIOS 1 could not be fully deployed after launch. This severely reduced the sensitivity of the radiometer, so that very few type III's were observed. The HELIOS 2 experiment worked well until the transmitter died in March, 1980, but because of the poor sensitivity of HELIOS 1, few triangulation could



Ein Typ-III-Ausbruch folgt einer Magnetfeldlinie (blau), die spiralförmig von der Sonne ausgeht. Bei jedem Punkt der Spur haben die abgestrahlten Radiowellen eine charakteristische Frequenz. Wenn man die Richtung der Quelle bei dieser Frequenz mißt (rote Linien), zum Beispiel von 2 genügend weit voneinander getrennten Raumsonden aus, kann man den Ort der Quelle durch Triangulation festlegen.

A type III burst follows a magnetic field line (blue) as it spirals out from the sun. At any point on the track, the radio emission has a characteristic frequency. Measuring the direction of the source at this frequency (red lines), as seen from two well-separated spacecraft, locates the source by triangulation.

Das HELIOS-Radiometer besteht aus einer Dipolantenne, 32 m lang, die von den drei Radio- und Plasmawellenexperimenten E5 a, b und c gemeinsam benutzt wird, aus der Elektronik eines Radioempfängers einschließlich der Frequenzfilter, die schmale Frequenzbänder im Bereich 20 kHz bis 3000 kHz auszufiltern gestatten. Die Dipolantenne liefert dann das maximale Signal, wenn die Welle genau senkrecht auf die Antenne auftrifft. Auf diese Weise ist die Messung der Richtung möglich. Die 16 Frequenzkanäle in Tabelle I können bei höchster Datenrate in neun Sekunden durchgemessen werden.

Leider hat sich einer der beiden 15-m-Antennenäste auf HELIOS 1 nicht voll entfaltet. Dadurch ist die Empfindlichkeit weit niedriger als vorgesehen. Nur wenige sehr starke Typ-III-Ereignisse konnten deshalb von HELIOS 1 empfangen werden. Das Experiment auf HELIOS 2 arbeitete bis zum Verlust der Sonde im März 1980 einwandfrei. Auch die gemeinsame Winkelmessung von HELIOS 1 und 2 zur Strahlungsquelle hin beschränkte sich auf einige wenige Fälle.

Seit im August 1978 die erdnahe interplanetare Sonde ISEE 3 gestartet wurde, konnten Triangulationen (Winkelmessungen) zwischen HELIOS 2 und ISEE 3 ausgeführt werden.

Als Beispiel ist der Typ-III-Ausbruch vom 6. März 1979, 17.25 Uhr, ausgewählt worden (Abb. Seite 113 unten). Die kleinen Kreise repräsentieren den Ort des Zentrums der Quelle bei jeder

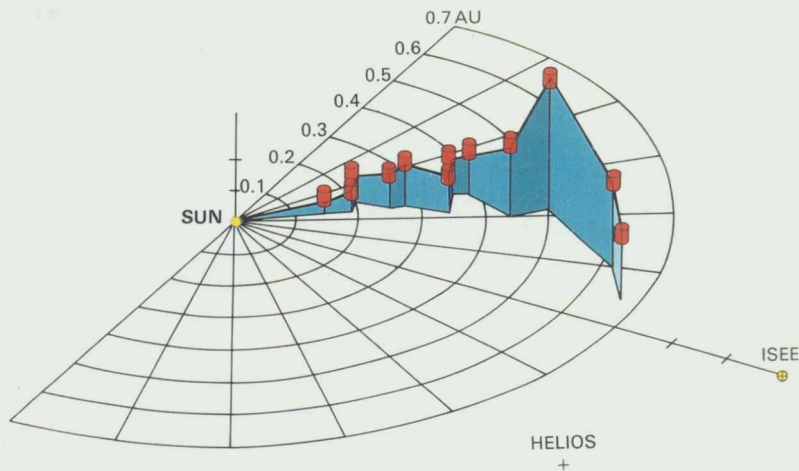
Die Bahn (dicke blaue Linie) des Typ-III-Ausbruchs vom 6. März 1979 um 17:25, trianguliert zwischen HELIOS 2 und ISEE 3. Die roten Kreise zeigen die Lage der Quelle für HELIOS-Frequenzen zwischen 1010 und 50 kHz.

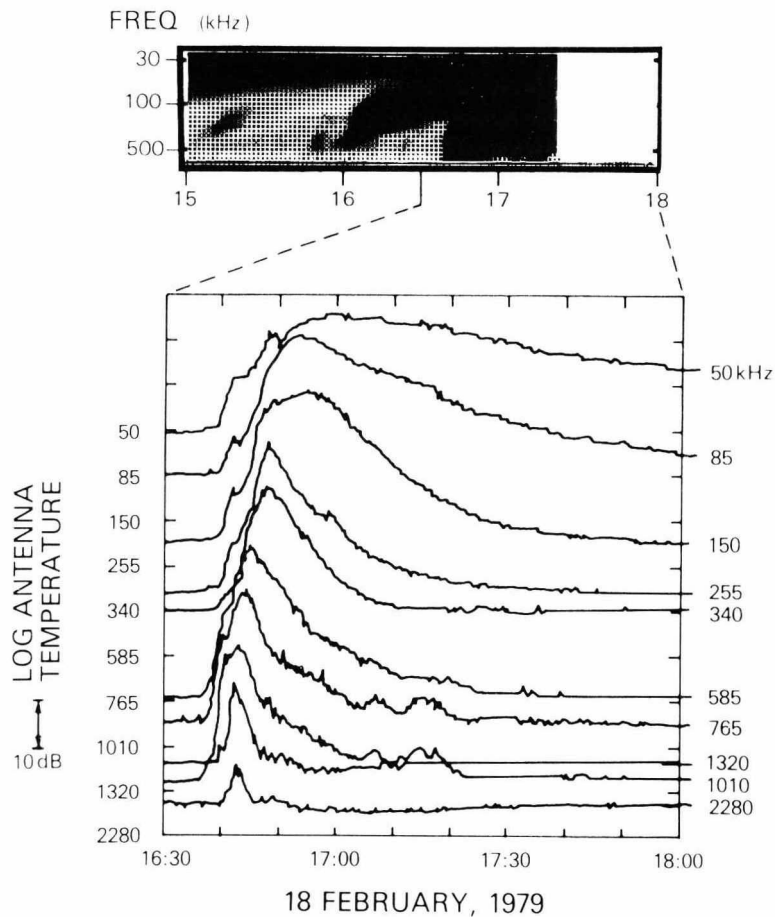
The trajectory (heavy blue line) of the type III burst of 6 March 1979 at 17:25, triangulated between HELIOS 2 and ISEE-3. The red balls show the location of the source for HELIOS frequencies between 1010–50 kHz.

be performed. Also, the number of usable frequencies at times is reduced, because to some extent the frequency channels disturb one another. However, since the launch of ISEE-3 in August, 1978, with another radio experiment triangulation could be performed between HELIOS 2 and ISEE-3 for a year or so of data overlap.

ISEE-3 was placed in orbit around the inner Lagrangian point – the gravitational balance point between the earth and the sun, about 0.011 AU upstream of the earth. The radio astronomy experiment on board samples 24 frequencies between 2000–30 kHz using a 91 meter (tip-to-tip) dipole antenna spinning in the elliptic plus a 14 meter dipole along the spin axis. This configuration enables determination not only of the azimuthal angle in the spin plane, but also the elevation from the spin plane. Triangulating these directions with the HELIOS direction locates the source in all three dimensions for that frequency.

As an example, the trajectory of the type III event of 6 March, 1979 at 17:25, which was triangulated between HELIOS 2 and ISEE-3, is shown in figure page 113 bottom. The little balls represent the positions of the center of the source at each HELIOS frequency. The actual source sizes are thought to be much larger than the boxes, judging from the degree of modulation seen in the signal during a half-spin. In this example, the large-scale spiral nature of the magnetic field is seen clearly, with smaller rip-





18 FEBRUARY, 1979

*Solche Zeitprofile sind unten für zehn Frequenzen aufgetragen.*

*Die Elektronen bewegen sich längs der magnetischen Feldlinien. Deshalb stellen Typ-III-Ereignisse eine willkommene Hilfe zur Bestimmung der globalen Struktur des interplanetaren Magnetfelds dar. In Tabelle I sind die von HELIOS empfangenen Frequenzen ( $2 f_p$ ) dem typischen Abstand von der Sonne gegenübergestellt, in dem sie von den Elektronen angeregt werden. Bisher gibt es keine andere Methode, die solche „Schnappschüsse“ der großräumigen Magnetfeldstruktur zwischen etwa  $10 R_\odot$  und  $1 \text{ AE}$  ermöglichen würde. Auch die Plasmadichte kann dabei mitgemessen werden. Informationen über den Ort des Ereignisses bekommt man mit Hilfe der Richtungsbestimmung von zwei Punkten im Raum aus (Abb. Seite 113 oben).*

*Das Typ-III-Ereignis vom 18. Febr. 1979 um 16:45. a) Das dynamische Spektrum. Die Intensität wird graphisch dargestellt als schattiertes Grau gegen Frequenz (nach oben abnehmend) und Zeit. Der freie Raum nach 17:25 ist eine Datenlücke. b) HELIOS-Zeitquerschnitte für zehn Frequenzen. Die Basislinie für angrenzende Frequenzkurven ist jeweils nach oben, wie links bemerkt, um 10 db versetzt. Querschnitte sind rechts durch ihre Frequenz gekennzeichnet.*

The type III event of 18 February 1979 at 16:45. a) The dynamic spectrum. Intensity is plotted as a shade of gray against frequency (decreasing upwards) and time. The blank space after 17:25 is a data gap. b) HELIOS time profiles for ten frequencies. The baseline for adjacent frequency curves is separated, as marked on the left, by 10 db. Profiles are labelled by frequency on the right.

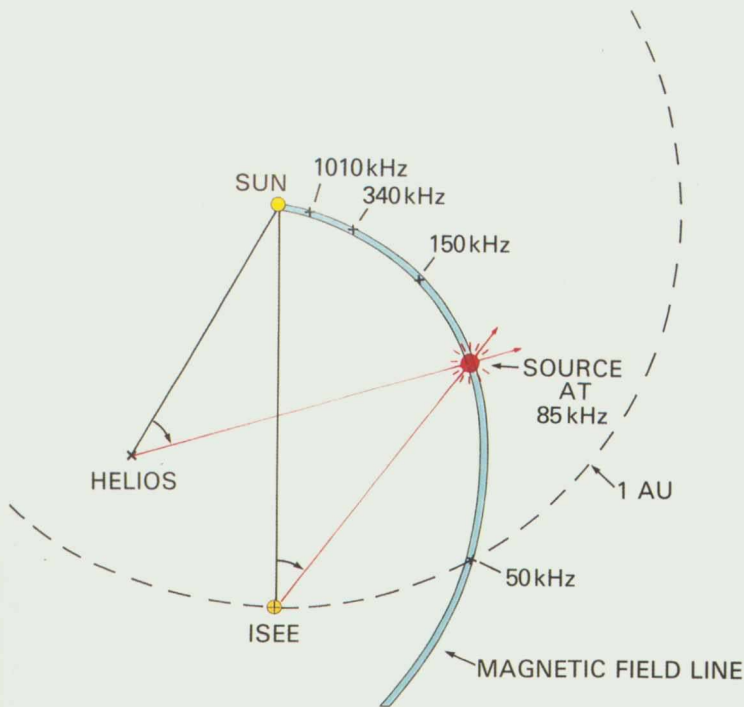
40 km across, and even bigger at lower frequencies. Furthermore, the frequencies characteristic of interplanetary densities, 3000–20 kHz, fall below the earth's ionospheric cutoff, and consequently can be observed only by spacecraft above the earth's plasmasphere. With present technological as well as financial limitations, putting such a large antenna into space is beyond consideration. Instead, we take advantage of the beam pattern of a relatively short dipole antenna. An electrically short dipole, such as that flown on the HELIOS payload, has a well-defined toroidal reception pattern. When such an antenna is broadside to a source, the signal received is much stronger than when it is end-on. By spinning the antenna, and finding the direction which the signal is strongest, we determine the direction of the source as projected on the spin

plane. With two such spacecraft, well-separated, we can determine the source direction as seen from each and triangulate between the two to locate the source, as shown in the sketch in figure page 113 top. This is what the HELIOS radio astronomy experiments were intended to accomplish.

The HELIOS radiometer consists of a dipole antenna, 32 meters tip-to-tip, which is shared with the electrostatic field experiment; the electronics which select a frequency channel, filter, and amplify it; and two alternating storage buffers. The output is an analog voltage which corresponds to the logarithm of the signal. The antenna is spinning in the ecliptic at about 60.3 revolution per minute, and two frequencies are measured in each revolution. Because of the  $180^\circ$  ambiguity of the power pattern of a dipole antenna, we need measurements during one half-spin only. Sixteen measurements are made in each half-spin, to provide the directional information. Not every revolution provides data, since it takes time for the storage buffers to transmit their one-spin's-worth of data. At the top rate, we receive measurements from one frequency pair every  $1\frac{1}{2}$  seconds. There are eight pairs of frequencies, listed in Table I, so by cycling through them, we obtain a set of 16 measurements for any particular frequency every 9 seconds at the top data rate, and less often at the lower data rates which are used when HELIOS is farther from earth.

Each set of 16 measurements is then analyzed to determine the strength of the signal, the direction of the source in the ecliptic, and the degree of modulation of the signal during the  $180^\circ$  rotation. For an extended source, the signal modulation during a half-spin is less than for a point source, so the modulation also gives an estimate of source size.

Unfortunately, one of the two 15-meter booms which constitute the antenna on HELIOS 1 could not be fully deployed after launch. This severely reduced the sensitivity of the radiometer, so that very few type III's were observed. The HELIOS 2 experiment worked well until the transmitter died in March, 1980, but because of the poor sensitivity of HELIOS 1, few triangulation could



Ein Typ-III-Ausbruch folgt einer Magnetfeldlinie (blau), die spiralförmig von der Sonne ausgeht. Bei jedem Punkt der Spur haben die abgestrahlten Radiowellen eine charakteristische Frequenz. Wenn man die Richtung der Quelle bei dieser Frequenz mißt (rote Linien), zum Beispiel von 2 genügend weit voneinander getrennten Raumsonden aus, kann man den Ort der Quelle durch Triangulation festlegen.

A type III burst follows a magnetic field line (blue) as it spirals out from the sun. At any point on the track, the radio emission has a characteristic frequency. Measuring the direction of the source at this frequency (red lines), as seen from two well-separated spacecraft, locates the source by triangulation.

be performed. Also, the number of usable frequencies at times is reduced, because to some extent the frequency channels disturb one another. However, since the launch of ISEE-3 in August, 1978, with another radio experiment triangulation could be performed between HELIOS 2 and ISEE-3 for a year or so of data overlap.

ISEE-3 was placed in orbit around the inner Lagrangian point – the gravitational balance point between the earth and the sun, about 0.011 AU upstream of the earth. The radio astronomy experiment on board samples 24 frequencies between 2000–30 kHz using a 91 meter (tip-to-tip) dipole antenna spinning in the elliptic plus a 14 meter dipole along the spin axis. This configuration enables determination not only of the azimuthal angle in the spin plane, but also the elevation from the spin plane. Triangulating these directions with the HELIOS direction locates the source in all three dimensions for that frequency.

As an example, the trajectory of the type III event of 6 March, 1979 at 17:25, which was triangulated between HELIOS 2 and ISEE-3, is shown in figure page 113 bottom. The little balls represent the positions of the center of the source at each HELIOS frequency. The actual source sizes are thought to be much larger than the boxes, judging from the degree of modulation seen in the signal during a half-spin. In this example, the large-scale spiral nature of the magnetic field is seen clearly, with smaller rip-

Das HELIOS-Radiometer besteht aus einer Dipolantenne, 32 m lang, die von den drei Radio- und Plasmawellenexperimenten E5 a, b und c gemeinsam benutzt wird, aus der Elektronik eines Radioempfängers einschließlich der Frequenzfilter, die schmale Frequenzbänder im Bereich 20 kHz bis 3000 kHz auszufiltern gestatten. Die Dipolantenne liefert dann das maximale Signal, wenn die Welle genau senkrecht auf die Antenne auftrifft. Auf diese Weise ist die Messung der Richtung möglich. Die 16 Frequenzkanäle in Tabelle I können bei höchster Datenrate in neun Sekunden durchgemessen werden.

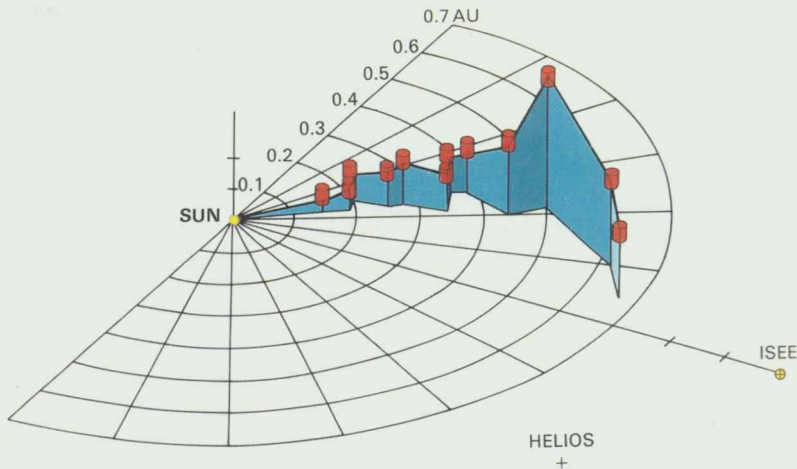
Leider hat sich einer der beiden 15-m-Antennenäste auf HELIOS 1 nicht voll entfaltet. Dadurch ist die Empfindlichkeit weit niedriger als vorgesehen. Nur wenige sehr starke Typ-III-Ereignisse konnten deshalb von HELIOS 1 empfangen werden. Das Experiment auf HELIOS 2 arbeitete bis zum Verlust der Sonde im März 1980 einwandfrei. Auch die gemeinsame Winkelmessung von HELIOS 1 und 2 zur Strahlungsquelle hin beschränkte sich auf einige wenige Fälle.

Seit im August 1978 die erdnahe interplanetare Sonde ISEE 3 gestartet wurde, konnten Triangulationen (Winkelmessungen) zwischen HELIOS 2 und ISEE 3 ausgeführt werden.

Als Beispiel ist der Typ-III-Ausbruch vom 6. März 1979, 17.25 Uhr, ausgewählt worden (Abb. Seite 113 unten). Die kleinen Kreise repräsentieren den Ort des Zentrums der Quelle bei jeder

Die Bahn (dicke blaue Linie) des Typ-III-Ausbruchs vom 6. März 1979 um 17:25, trianguliert zwischen HELIOS 2 und ISEE 3. Die roten Kreise zeigen die Lage der Quelle für HELIOS-Frequenzen zwischen 1010 und 50 kHz.

The trajectory (heavy blue line) of the type III burst of 6 March 1979 at 17:25, triangulated between HELIOS 2 and ISEE-3. The red balls show the location of the source for HELIOS frequencies between 1010–50 kHz.



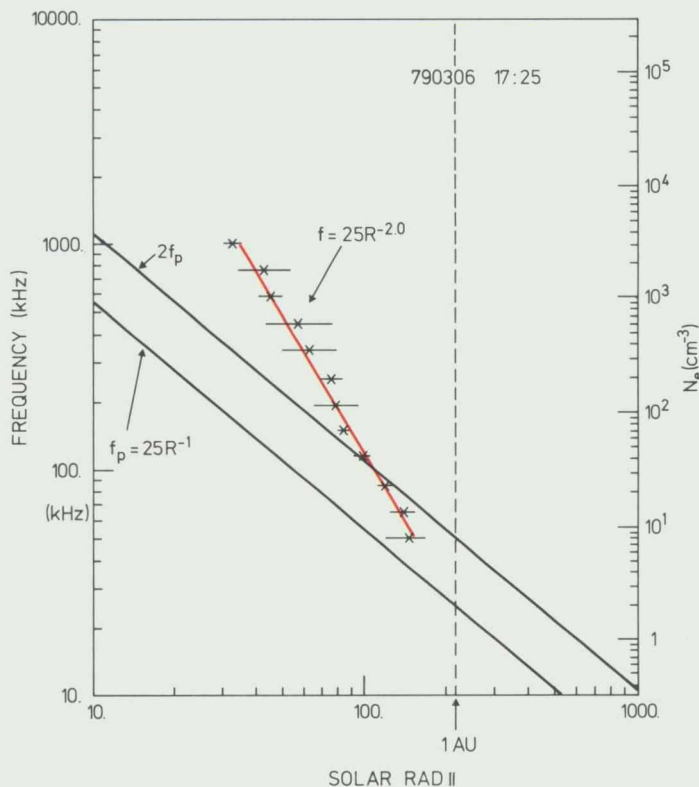
HELIOS-Frequenz. Die tatsächlichen Größen der Quellen muß man sich viel ausgedehnter vorstellen. Die großräumige Spiral-Natur des Magnetfeldes ist klar erkennbar, ebenso kleinere überlagerte Abweichungen. Das Flare, das diesen Ausbruch ausgelöst hatte, wurde auf der Sonne bei  $19^\circ$  Süd und  $63^\circ$  West identifiziert. Man sieht, daß die anregenden Elektronen in der südlichen Hemisphäre starteten, bald nach Norden überwechselten und dann bei etwa 0.5 AE wieder etwas in Richtung Süd zurückbogen, ohne jedoch den Bereich nördlich der Ekliptik zu verlassen.

In Abb. Seite 114 ist die Frequenz als Maß der Plasmadichte gegenüber dem Abstand aufgetragen, unter der Annahme, daß  $2f_p = 18\sqrt{n_e}$  ist ( $n_e$  = Zahl der Elektronen pro  $m^3$ ). Die gewonnenen Punkte liegen recht gut auf einer Geraden, aus der man schließen kann, daß  $n_e = 1,9/R^{3,98}$  ( $R$  = Abstand von der Sonne in AE). Das ist ein sehr steiler Dichteabfall von innen nach außen. Falls der Sonnenwind sich einfach radial von der Sonne weg ausbreitet, sollte die Dichte nur wie  $1/R^2$  abnehmen. Die beiden Geraden in Abb. Seite 114 zeigen diesen erwarteten Dichteabfall unter Berücksichtigung von  $f_p$  (untere Gerade) und  $2f_p$  (obere Gerade).

Das HELIOS-Radioastronomie-Experiment erlaubte erstmals die dreidimensionale Richtungssuche im Weltraum. Das Ergebnis ist eine Erweiterung unserer Kenntnisse über großräumige Bedingungen im interplanetaren Medium durch Fernmessungen.

ples superimposed. This event had an associated solar flare at S19°, W63°. We see that excitor electrons started in the southern hemisphere, rapidly crossed to the north, and then turned back down at about 0.5 AU, but stayed north of the ecliptic.

We can also use these trajectories to explore the large-scale density structure in the IPM. For each frequency, the distance of the source from the sun is determined by the triangulation. Since the frequency is  $2f_p$ , or  $18 n_e^{1/2}$ , we could equally



Frequenz und Elektronendichte graphisch dargestellt gegen die Entfernung für den Typ-III-Ausbruch am 6. März 1979.

Frequency and electron density plotted against distance for the type III burst of 6 March 1979.

well plot local electron density against distance, as is done in figure page 114. Fitting these points by a least-squares straight line, we obtain  $n_e = 1.9 R^{-3.98}$  ( $R$  in AU), an extremely steep fall-off with density. If the solar wind simply expanded radially away from the sun, the density should decrease as  $R^{-2}$ . The two straight lines in the figure show the expected  $f$ - $R$  relation in such a case, for radiation at  $f$  (the lower line) and at  $2f_p$  (the upper line). A decrease in density faster than  $R^{-2}$  is usually observed, in agreement with results obtained by other methods. Study of the deviations from a strict power-law can give information on the scale of inhomogeneity in the IPM.

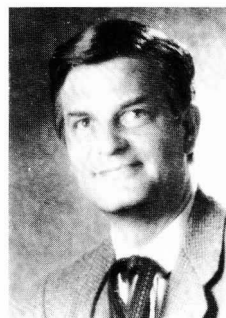
The HELIOS radio astronomy experiments were the first to provide three-dimensional direction-finding in space. Not only did they extend the radio frequency window beyond what is observable on earth, but they offered a long triangulation baseline. The result is an extension of our knowledge of large-scale conditions in the IPM through remote sensing.

Table I

HELIOS frequencies and the corresponding average radial distance.

f (kHz)	AU	Solar Radii
3000	0.028	6.0
2280	0.036	7.7
1320	0.058	12.5
1010	0.073	15.7
765	0.093	20.0
585	0.118	25.4
445	0.149	32.0
340	0.189	40.6
255	0.243	52.2
195	0.306	65.8
150	0.385	82.8
115	0.485	104.3
85	0.630	135.5
65	0.796	171.1
50	1.000	215.0
26.5	1.737	373.5

# Plasma- Fernerkundung mit Laufzeitmessungen (Korona-Sondierung)



Edenhofer

Peter Edenhofer, Ruhr-Universität Bochum

Bei seinem Umlauf um die Sonne „verschwindet“ HELIOS während einer Okkultationsstellung – von der Erde aus gesehen – hinter der Sonne (Abb. Seite 115 links). Die elektromagnetischen Wellen, die sich im Vakuum des Weltalls mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten, erleiden allerdings immer dann eine Laufzeitverzögerung, wenn sie das dichte Plasma der Sonnenatmosphäre mit seinen in sehr großer Zahl vorhandenen Elektronen durchdringen. Aus Meßreihen dieser Laufzeitverzögerung kann indirekt auf die koronale Elektronendichte- bzw. Plasmaverteilung geschlossen werden.

Solche Fernerkundungsverfahren gewinnen in Physik und Technik zunehmend an Bedeutung, wenn das Meßobjekt, so wie im vorliegenden Fall, einer direkten Messung nicht zugänglich ist oder sonst nicht berührungslos bzw. zerstörungsfrei vermessen werden kann (wie z. B. bei elektromedizinischen Anwendungen).

Die Fernerkundung der Sonnenatmosphäre ergänzt die Plasma-Messungen an Bord von HELIOS in die bisher unzugänglichen Bereiche hinein, wo der Sonnenwind seinen Ursprung hat. Hier laufen dynamische Prozesse ab (Protuberanzen, Flares usw.), die dem abströmenden Sonnenwind seine charakteristischen Eigenschaften aufprägen. Wegen des störenden Streulichts der Erdatmosphäre sind optische Beobachtungen der Sonnenumgebung nur innerhalb von etwa 2 bis 3 Sonnenradien ( $R_{\odot}$ ) möglich (Abb. Seite 115 rechts). Von Satelliten aus (z. B. Skylab 1973/1974) kommt man etwa bis 10  $R_{\odot}$ . Die direkten Messungen an Bord von HELIOS erreichten von außen her etwa 63  $R_{\odot}$ . Unser Laufzeitexperiment konnte ungefähr diese Meßlücke zwischen 3 und 60 bis 70  $R_{\odot}$  schließen.

Weiter außen werden mit abnehmender Plasmadichte die Meßeffekte zu klein, weiter innen sind dagegen die Plasmastörungen zu groß.

Bahn von HELIOS 2 während der Zeit, in der Laufzeitmessungen durchgeführt wurden (zwischen 1. März und 15. Juni 1976). Für den 30. April sind die Winkel Sonne-Erde-HELIOS ( $\Theta_1$ ) und Sonne-HELIOS-Erde ( $\Theta_2$ ) eingezeichnet. P bezeichnet den Strahlabstand von der Sonne, der im Text in Sonnenradien  $R_{\odot}$  angegeben ist. Einige Tage um den 16. Mai herum waren Datenübertragung und damit auch Laufzeitmessungen nicht möglich, weil HELIOS hinter der Sonne verschwunden war.

*Orbit of HELIOS 2 during the period of time delay measurements (between March 1 and June 15, 1976). For April 30 the angles sun-earth-HELIOS ( $\Theta_1$ ) and sun-HELIOS-earth ( $\Theta_2$ ) are drawn in. P marks the minimum link from the sun ( $\sim 26 R_{\odot}$ ). A few days about May 16 neither data transmission nor time delay measurements were possible because HELIOS 2 had disappeared behind the sun.*



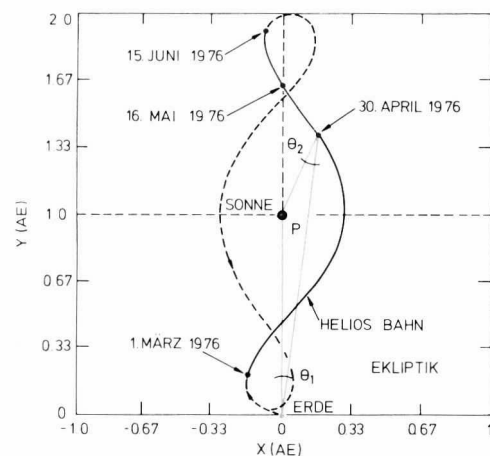
Aufnahme der Sonnenkorona mit dem Koronagraphen des Sonnenobservatoriums auf Mauna Loa (Hawaii). Die viel hellere Sonne wird von einer schwarzen Scheibe abgedeckt.

*The solar corona as seen from the coronagraph on top of the Mauna Loa (Hawaii). The much brighter sun is masked by a black disk.*

*Peter Edenhofer reports on his successful sounding of sun's corona in those constellations where HELIOS was standing almost behind the sun as seen from the earth (fig. page 115 left).*

*Electromagnetic waves propagating through the empty space travel at the speed of light. When penetrating a dense plasma like that of sun's corona they suffer a deceleration i.e. the signal arriving on earth is delayed in time. From series of measurements one can conclude on the electron density and the plasma distribution in the corona. Thus plasma measurements become possible in regions which have been inaccessible for HELIOS and which might remain inaccessible forever.*

*Optical ground-observations by means of coronagraphs are only possible in the immediate vicinity of the sun out to about 2–3 solar radii ( $R_{\odot}$ ) (fig. page 115 right). Satellite-borne coronagraphs (e.g. Skylab 1973/74) extend this region out to about 10  $R_{\odot}$ . The direct in situ measurements on board of HELIOS came as close as 63  $R_{\odot}$  to the sun. This experiment was able to approximately close the measuring gap between about 3 and 60–70  $R_{\odot}$ .*





Die 64-m-Antenne des DSN in Goldstone, Kalifornien.

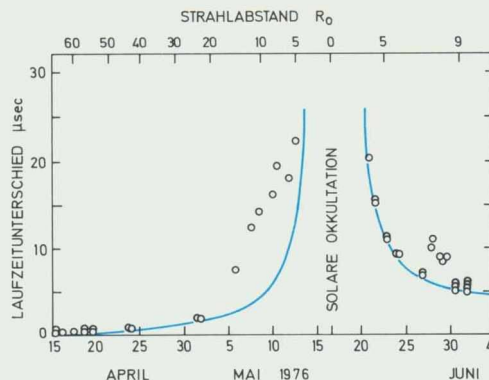
*The 64-m antenna of NASA's DSN at Goldstone, California.*

Leider sind die mit HELIOS 1 ausgeführten Messungen sehr lückenhaft. Auswertbare Ergebnisse lieferte vor allem HELIOS 2 mit Hilfe der großen Bodenstationen des DSN (Abb. Seite 116 oben) in hervorragender Qualität (Signalstärke) und ausreichender Menge. Wegen eines Fehlers an Bord (Verlust des Transponders; vgl. S. 186) waren die aktiven Meßperioden auf das jeweils erste Missionsjahr beschränkt.

Abb. Seite 116 unten zeigt die gemessenen Laufzeitverzögerungen  $\Delta t$ , das sind die Differenzen aus den errechneten Signallaufzeiten im Vakuum und aus den gemessenen Laufzeiten durch die Sonnenkorona. Kurz vor der Okkultation (Strahl-  
abstand zur Sonne  $3,1 R_{\odot}$ ) machte die Strahl-  
verzögerung 25 millionstel Sekunden aus, wobei die  
gesamte Signallaufzeit zwischen Erde und

Unten:  
Der zeitliche Verlauf der von den Elektronen in der Sonnenkorona verursachten Laufzeitverzögerung der HELIOS 2-Signale während der Okkultationsperiode im Mai 1976. Die untere Skala gibt das Datum an, die obere den jeweiligen Strahlabstand in Sonnenradien  $R_{\odot}$ . An der linken Skala ist die Signalverzögerung in millionstel Sekunden ( $\mu\text{s}$ ) ablesbar.

Bottom:  
*Time profile of HELIOS 2 signal time delays caused by coronal electrons during the occultation period of May 1976. The lower scale gives the date, the upper scale denotes the link distance in solar radii  $R_{\odot}$ . At the left scale the signal delay is given in microseconds ( $\mu\text{sec}$ ).*



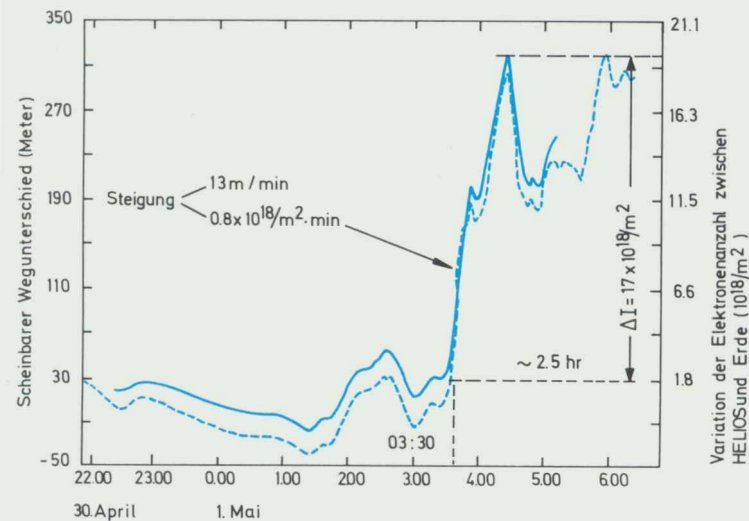
HELIOS sowie zurück 27,3 Minuten betrug. Die durchgezogene Kurve stellt die zeitlichen Mittelwerte der Verzögerung durch die ruhige Korona dar. Die als Kreise dargestellten, zum Teil weit abweichenden Meßpunkte sind auf koronale Störungen (Dichteschwankungen) zurückzuführen. Sie waren vor der Okkultation über dem Westrand der Sonne mehr als eine Woche lang und nach der Okkultation über dem Ostrand zwei bis drei Tage lang zu beobachten.

Abb. Seite 117 oben zeigt – erstmals bei einem solaren Okkultationsexperiment – Laufzeitmessungen mit HELIOS 2 bei einem Flare am 30. April 1976. Die beiden Meßkurven wurden mit Hilfe zweier unabhängiger Messungen gewonnen. Am 1. Mai gegen 3.30 Uhr setzt plötzlich ein sehr steiler Anstieg der Laufzeitverzögerung ein, hervorgerufen durch eine riesige Plasmawolke, die vom Flare in den Raum hinausgeschleudert wurde. Diese Wolke kreuzte den Sehstrahl Erde-HELIOS im Abstand von  $31,3 R_{\odot}$ . Ihre Geschwindigkeit wurde zu etwa 900 km/sek ermittelt.

In Abb. Seite 117 unten ist die Elektronendichteverteilung (in Milliarden Elektronen pro  $\text{m}^3$ ) entsprechend einer Meßreihe vom 8. Mai 1976 dargestellt (alle 2 Minuten ein Meßpunkt). Diese Verteilung wurde über ein kompliziertes Rechenverfahren (Inversion) aus der Meßreihe ermittelt. Man sieht, daß an dem genannten Tag in der Korona eine stark strukturierte Elektronendichteverteilung, verbunden mit dynamischen Prozessen, vorherrschte. Damit ist es erstmals gelungen, mit Hilfe von Okkultationsbeobachtungen und solchen Rechnungen in die Struktur der äußeren Korona einzudringen, wo normalerweise weder optische Beobachtungen noch direkte Messungen möglich sind.

Abb. Seite 117 mitte veranschaulicht beispielhaft Beobachtungen von HELIOS 2, die Anlaß zu Untersuchungen von Wellenphänomenen gaben. Die Dreiecke stellen Messungen von Laufzeitverzögerungen dar. Der zeitliche Verlauf zeigt Wellenstrukturen. Es handelt sich um Wellentypen ähnlich denen, die schon an anderen Stellen dieses Buches erörtert wurden (vgl. S. 85). In der Korona wurden sie erstmals von den beiden Okkultationsexperimenten entdeckt.





Plots of time delay variations from two independent measuring methods. From 3.30 h on the signal delay increases steeply. The reason is a huge plasma cloud ejected by a flare into space. The electron content  $\Delta I$  corresponds to the variation of the number of electrons between earth and HELIOS (cross section in  $m^2$ ).

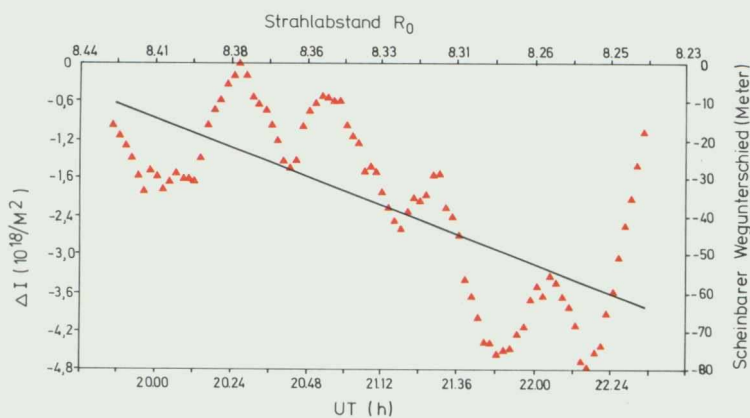
Unfortunately the HELIOS 1 measurements are full of data gaps. But well evaluatable data was delivered by HELIOS 2 in combination with the big groundstations of NASA's DSN (fig. page 116 top). Data quality (signal strength) was excellent and data amount was adequate. Unfortunately the activity phase was restricted to the period until the transponder on board failed (see page 186).

Fig. page 116 bottom is the measured signal time delay  $\Delta t$ . The solid line gives averages of the deceleration due to the steady state corona. Circles indicate density fluctuations. They could be observed for more than a week over the west limb of the sun and after the occultation for two to three days over the east limb.

Fig. page 117 top is a plot of time delay measurements of HELIOS 2 on April 30, 1976, when a

Beobachtung wellenartiger Strukturen in der Korona bei Strahlabständen von ungefähr  $8 R_0$  (Zeitmarken alle 2 Minuten).  $\Delta I$  gibt die Schwankung des Elektroneninhalts an, die rechte Skala den zugehörigen scheinbaren Wegunterschied gegenüber Wellenausbreitung im Vakuum.

Observation of wavelike structures in the corona at link distances of about  $8 R_0$  (tick marks every 2 minutes).  $\Delta I$  gives the fluctuation of the electron content. The scale on the right denotes the related virtual distance difference compared with the wave propagation through the vacuum.

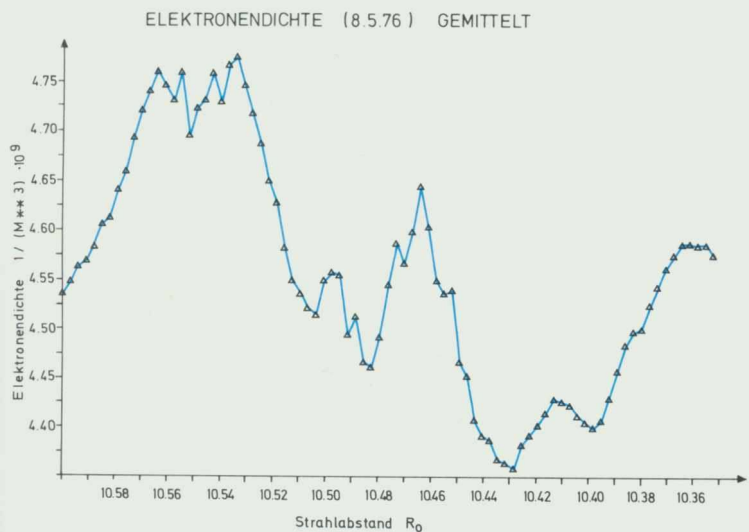


large flare was seen on sun's western hemisphere. The two curves have been gained by two different independent measurement methods. A huge plasma cloud, ejected by the flare caused a sudden very steep increase of the signal time delay on May 1, at 3.30 h. This cloud crossed the telemetry link between spacecraft and earth in a distance of  $31.3 R_0$ . Its velocity was determined to about 900 km/sec.

In fig. page 117 bottom the coronal electron density distribution (in billion electrons per  $m^3$ ) is plotted as calculated from a measurement series of May 8, 1976. This measurement originated from a region where neither optical nor direct measurements are possible.

The types of waves deduced from such measurements are the same as those which have already been discussed in other chapters of this book (see page 85). In the corona they were detected first by the two occultation experiments.

Oben: Registrierkurven von Laufzeitänderungen nach zwei unabhängig voneinander arbeitenden Meßverfahren. Ab 3.30 Uhr steigt die Signalverzögerung beinahe sprunghaft an. Ursache ist eine große Plasmawolke, die ein Flare in den Raum hinausschleudert. Der Elektroneninhalt  $\Delta I$  gibt die Variation der Zahl der Elektronen längs des Sehstrahls Erde-HELIOS an (pro Strahlquerschnitt in  $m^2$ ).



Aus Laufzeitmessungen bestimmte räumliche Verteilung der Elektronen (Milliarden Elektronen pro  $m^3$ ) in der Sonnenatmosphäre für Strahlabstände zwischen  $10,60$  und  $10,36 R_0$ .

Special distribution of electrons (billion electrons/ $m^3$ ) in sun's atmosphere for link distances between  $10.60$  and  $10.36 R_0$  as determined from time delay measurements.

# Das Faraday-Rotations-Experiment

H. Volland\*, G. S. Levy\*\*, M. K. Bird\*, C. T. Stelzried\*\* und B. L. Seidel\*\*

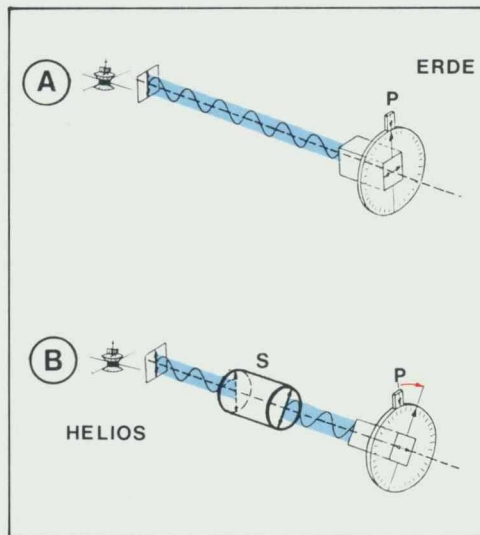
\* Radioastronomisches Institut, Universität Bonn, 5300 Bonn

\*\* Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA 91109

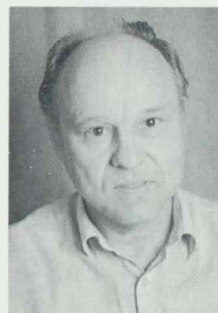
Es gibt ein besonders einfaches Verfahren, Information über Elektronendichte und Magnetfeld im außerirdischen Raum zu gewinnen, wenn man das Radiosignal eines Sterns oder einer Raumsonde am Erdboden auf seinen Polarisationszustand hin untersucht. Die zugrunde liegende physikalische Methode ist seit langem als Faraday-Rotation bekannt. Eine linear polarisierte elektromagnetische Welle (es mag sichtbares Licht oder eine Radiowelle sein) ist eine Welle, deren elektrisches Feld in nur einer Ebene senkrecht zur Ausbreitungsrichtung schwingt. Diese Ebene heißt Polarisationsebene. Läuft nun eine solche Welle durch ein ionisiertes Gas (ein Plasma) hindurch, und legt man ein Magnetfeld parallel zur Ausbreitungsrichtung der Welle, dann dreht sich die Polarisationsebene. Die Größe der Drehung hängt vom Produkt aus Magnetfeldstärke und dem Elektroneninhalt entlang der von der Welle durchlaufenen Strecke ab. Der Drehsinn wird von der Richtung des Magnetfeldes bestimmt.

Die Bahn der HELIOS-Sonde ist nun so beschaffen, daß die Sonde, von der Erde aus gesehen, jedes Jahr ein oder mehrere Male für kurze Zeit hinter der Sonne verschwindet (siehe Abbildungen der HELIOS-Bahnen auf Seiten 40/41). Das Verschwinden der Raumsonde hinter der Sonne nennt man eine Sonnenokkultation.

Kurz vor oder kurz nach einer Sonnenokkultation durchläuft das Telemetriesignal von HELIOS die Sonnenkorona. Die Sonnenkorona ist jene nähere Umgebung der Sonne, die aus hochionisiertem Plasma besteht, das von einem ziemlich regulären Magnetfeld durchzogen ist. Das Magnetfeld hat seinen Ursprung auf der Sonnenoberfläche,



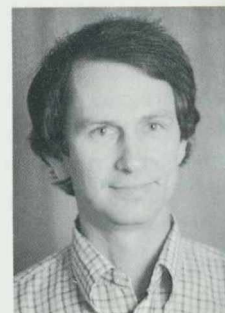
Prinzip des Faraday-Rotations-Experiments. Das linear polarisierte Signal der HELIOS-Sonde breitet sich durch den interplanetaren Raum zur Erde aus. An der Bodenstation wird die Polarisationsebene des Signals mit einem Polariometer (P) gemessen. Das übliche Ergebnis dieser Messung, keine Drehung gegenüber dem ursprünglichen Zustand, ist oben (Fall A) dargestellt. Während einer Sonnenokkultation läuft jedoch das Signal durch die Sonnenkorona (S). Die dadurch erfolgte Drehung der Polarisationsebene wird durch Nachsteuern des Polariometers bestimmt (Fall B).



Volland



Levy



Bird



Stelzried

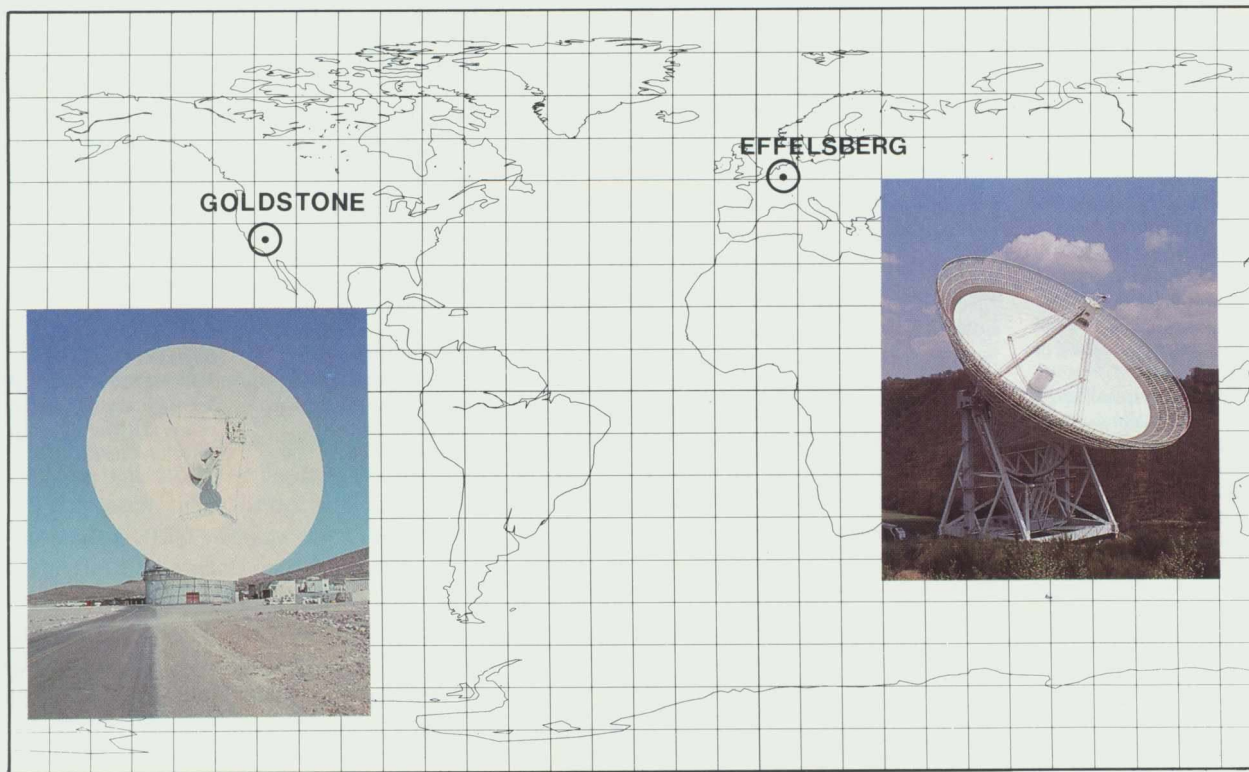


Seidel

*Principle of the Faraday rotation experiment. The linear polarized signal of the HELIOS probe propagates through interplanetary space to the earth. At the ground station the polarization plane of the signal is determined by a polarimeter (P). The normal result of this measurement – no rotation with respect to the original state – is given in the upper part (case A). During a solar occultation, however, the signal penetrates through sun's corona (S). The resulting rotation of the polarization plane is measured by adequate tuning of the polarimeter (case B).*

*The Faraday rotation is an easy method to remotely sound magnetized plasmas. A linear polarized electromagnetic wave penetrating a plasma parallel to a magnetic field suffers a rotation of its plane of polarization (fig. page 118). Polarization of a wave means that it is oscillating in only one direction perpendicular to its direction of propagation. The magnitude of the rotation depends on the product of magnetic field strength and electron density of the penetrated plasma. The direction of rotation, clockwise or counterclockwise, is determined by the direction of the magnetic field.*

*The orbit of HELIOS, as given in the figures pages 40/41 shows one or several solar occultations every year, i.e. the spacecraft disappears behind the sun for a certain time span depending on the constellation in space. Shortly prior to this occultation and shortly afterwards, the radio signals of HELIOS penetrate through the highly ionized plasma of sun's corona. The solar magnetic field together with the electrons of the plasma cause a measurable Faraday rotation effect, since the radio waves of HELIOS*



Geographische Lage der beiden Bodenstationen in Effelsberg (Eifel) und Goldstone (Kalifornien) mit Ansichten der beiden Antennensysteme. Das Effelsberger 100-m-Teleskop wird vom Max-Planck-Institut für Radioastronomie betrieben. Die Anlage in Goldstone (Spiegeldurchmesser: 64 m) gehört dem Deep Space Network der NASA.

*Map showing the positions of the two ground stations in Effelsberg (Eifel mountains, Germany) and Goldstone (California) with photographs of both antenna systems. The 100 m-telescope at Effelsberg is operated by the Max-Planck-Institute for Radio Astronomy. The establishment in Goldstone (diameter of the reflector: 64 m) belongs to the Deep Space Network of NASA.*

und seine Feldlinien reichen spiralförmig weit in den interplanetaren Raum hinaus. (Vgl. S. 80 ff.)

Das Telemetriesignal der HELIOS-Sonde ist linear polarisiert, so daß uns die Messung seiner Polarisations Ebene am Erdboden Auskunft über das Produkt aus Elektroneninhalt und Magnetfeld entlang des Sehstrahls gibt. Abb. Seite 118 ist eine schematische Darstellung der Messung der Faraday-Rotation des HELIOS-Signals. Läuft das Signal nicht durch die Sonnenkorona, dann wird es auf der Erde ohne Drehung der Polarisations Ebene empfangen (Fall A). Die eigentliche Messung der Faraday-Rotation erfolgt mit Hilfe eines Polarimeters (P), das dem Empfänger des Radioteleskops vorgeschaltet ist. Sobald das Signal die Sonnenkorona (S) durchläuft, dreht sich die Polarisations Ebene der Welle. Diese Drehung, die koronale Faraday-Rotation, kann man durch Nachsteuern des Polarimeters bestimmen (Fall B).

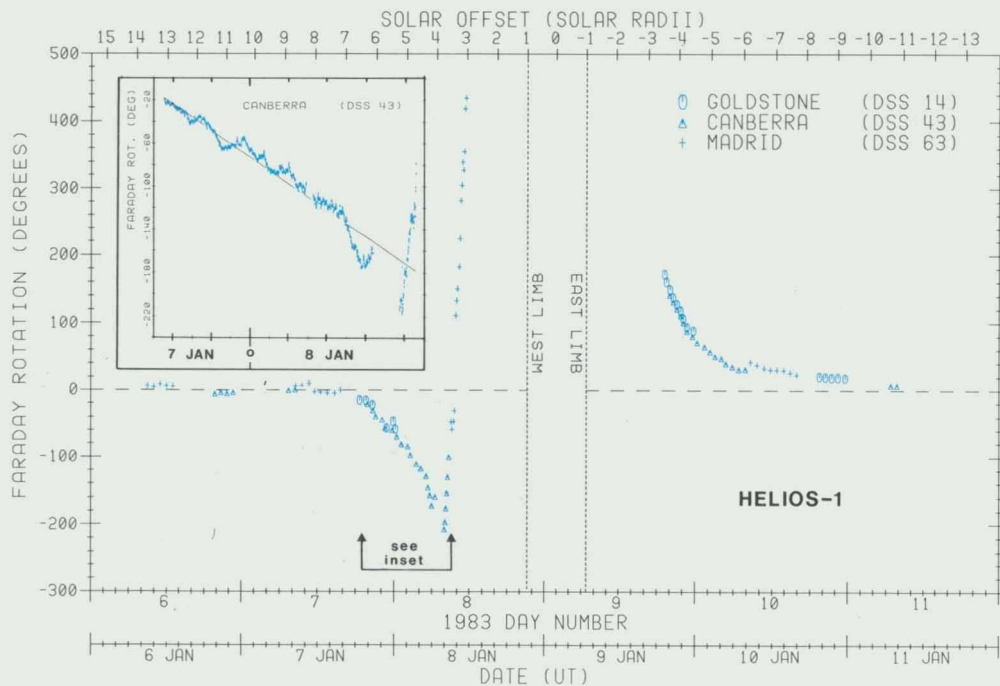
Die Elektronendichteverteilung in der Korona und das solare Magnetfeld ändern sich im allgemeinen nur langsam mit der Zeit. Die Sonne rotiert mit einer synodischen Periode (von der Erde aus gesehen) von etwa 27 Tagen. Das solare Magnetfeld dreht sich im wesentlichen starr mit der Sonne. Diese Umstände erlauben es, aus der zeitlich fortschreitenden Messung der Faraday-Rotation des HELIOS-Signals auf die räumliche Verteilung von Elektronendichte und Magnetfeld zu schließen, insbesondere auf die Sektorstruktur des koronalen Magnetfeldes (siehe auch den Artikel von Neubauer et al in dieser Festschrift).

Beobachten kann man von einer Bodenstation aus natürlich nur tagsüber, wenn Sonne und HELIOS gleichzeitig sichtbar sind. Im Laufe der Nacht kann es aber vorkommen, daß die Polarisations Ebene mehr als eine halbe Drehung (mehr als  $180^\circ$ ) vollendet. Bei der Anschlußmessung am nächsten Tag entsteht dadurch eine Vieldeutigkeit der Meßaussage. Diese Vieldeutigkeit läßt sich verhindern, wenn mehrere weit

are linear polarized. The measurement is done at the ground station.

*Normally the distribution of the electron density and the solar magnetic field in the corona is only slowly fluctuating. The solar magnetic field rotates essentially rigidly with the sun (27 days for one rotation as seen from the earth). Thus from consecutive measurements of the Faraday rotation, the spatial distribution of electron density and magnetic field can be determined, especially the sector structure of the coronal magnetic field (for comparison see page 84).*

*As the measurements can be done during daylight hours only, for consecutive observations more than one ground station is necessary. During the initial period of the mission the two receiving stations in Effelsberg (Germany) and Goldstone (California) were used (fig. on page 119). Later on the measurements were taken at the three big DSN stations in Goldstone, Madrid (Spain) and Canberra (Australia). If data gaps*



auseinanderliegende Bodenstationen eingesetzt werden. Zu Beginn der Mission wurden dazu die beiden Empfangsstationen Effelsberg (Eifel) und Goldstone (Kalifornien) benutzt. Abb. Seite 119 zeigt diese beiden Stationen und ihre geographischen Standorte. Später standen die drei 64-m-Stationen des NASA-Deep-Space-Network (DSN) in Goldstone (Kalifornien), Madrid (Spanien) und Canberra (Australien) zur Verfügung.

Abb. Seite 120 zeigt als Beispiel die Messung der Drehung der Polarisationssebene des Radiosignals von HELIOS 1 an den eben erwähnten drei Stationen während der Sonnenokkultation im Januar 1983. Die horizontale Skala gibt oben den sonnennächsten Abstand des HELIOS-Signals (solar offset) in Einheiten des Sonnenradius. Die vertikale Skala ist der Drehwinkel der Polarisationssebene (die „Faraday-Rotation“) in Grad. Ein Bildausschnitt links oben zeigt eine Vergrößerung der Meßpassage der Bodenstation Canberra (DSS 43) am 7./8. Januar 1983, auf der wir Feinstrukturen erkennen. Diese Feinstrukturen haben ein wellenförmiges Aussehen mit Perioden von der Größenordnung einer Stunde. Es handelt sich um magneto-hydrodynamische Wel-

len (Alfvén-Wellen) (vgl. dazu auch S. 85), die von der Sonnenoberfläche aus durch die Korona in den interplanetaren Raum hinauslaufen. Diese Wellen sind wohl zum erstenmal mit Hilfe unseres Experiments innerhalb der Korona direkt beobachtet worden.

In der Abb. wird sichtbar, wie der Drehwinkel der Polarisationssebene bei Annäherung an den Sonnenrand auf Grund des Anstieges der Elektronendichte und der Magnetfeldstärke in diesem Gebiet wächst. Bei einem Sonnenabstand von weniger als etwa 2 Sonnenradien ist eine Messung nicht mehr möglich, da die Bodenantenne die Radiostrahlung der Sonne und das HELIOS-Signal nicht mehr voneinander trennen kann. Deutlich erkennbar in Abb. Seite 120 sind auch Überlappungen von gleichzeitigen Messungen an zwei Stationen (z. B. in Goldstone und Canberra am 9. Januar), die uns einen Vertrauensbeweis für die Glaubwürdigkeit der Meßergebnisse geben.

Faraday-Rotations-Messungen zeichnen sich dadurch aus, daß sie Informationen aus Gebieten liefern, die durch direkte Sondierung schwer

Drehwinkel der Polarisationssebene des Radiosignals von HELIOS 1 während der Sonnenokkultation im Januar 1983. Die untere Skala gibt die Universalzeit (GMT) an. Die obere Skala zeigt den geringsten Sonnenabstand (solar offset) des HELIOS-Signals in Einheiten des Sonnenradius. Die Messungen wurden an den drei DSN-Stationen Goldstone (Kalifornien), Madrid (Spanien) und Canberra (Australien) aufgenommen. Im vergrößerten Bildausschnitt oben links sind Wellenstrukturen zu erkennen.

Rotation angle of the polarization plane of the HELIOS 1 radio signals during the solar occultation of January 1983. The lower scale is showing the Universal Time (GMT). The upper scale indicates the minimum solar distance (solar offset) of the HELIOS signals in units of sun's radius. The measurements were taken at the three DSN stations Goldstone (California), Madrid (Spain) and Canberra (Australia). In the enlarged upper left sector wave structures can be seen.

of several hours occur, it is sometimes impossible to avoid ambiguities, since the rotation of the polarization plane may well exceed 180 degrees.

Fig. page 120 is an example of a Faraday measurement with HELIOS during the occultation of January 1983 by means of the three DSN stations. The plot in higher resolution in the upper left of the figure (January 7/8, 1983) is showing wavelike structures with periods of the order of an hour. These are magneto-hydrodynamic waves (Alfvén waves; see also page 85) travelling from sun's surface through the corona into the interplanetary space. Our experiment may have been the first to observe these waves directly within the corona. The steep increase of the rotation angle of the polarization plane is due to the increase of the electron density and of the magnetic field strength close to the sun. The registration ends at about 2 to 3 solar radii where the measurement is getting impossible because the receiving antenna can no longer separate the solar radiation from the HELIOS signals. Regard also the overlappings of simultaneous measurements made at two stations (Goldstone and Canberra). They show that one can have confidence in the accuracy of the results.

oder gar nicht erreichbar sind. Sie ergänzen und erweitern deshalb Messungen anderer Art. Erst durch die Kombination von Messungen unterschiedlicher Parameter des gleichen physikalischen Phänomens ist es möglich, eine einigermaßen gesicherte und vollständige Aussage über den tatsächlichen Vorgang zu gewinnen.

Abb. Seite 121 zeigt als Beispiel das Ergebnis zweier simultaner Beobachtungen eines koronalen Massenauswurfes. Die zwei optischen Aufnahmen links wurden uns von Mitarbeitern am Naval Research Laboratory, Washington, DC, USA, zur Verfügung gestellt. Wir erkennen am Westrand der Sonne eine blasenförmige Aufhellung, die mit einer Geschwindigkeit von etwa 120 km/s nach außen dringt und gegen 06.30 Universalzeit (GMT) bereits einen Abstand von 5 Sonnenradien erreicht hat. Zur gleichen Zeit drang der Sehstrahl von HELIOS 2 durch diese Gegend (der weiße eingekreiste Punkt in beiden Bildern). Die Faraday-Rotations-Messungen rechts weisen starke Fluktuationen zu dieser Zeit auf, die wieder auf wellenförmige Störungen im Bereich des koronalen Auswurfes hindeuten (vgl. auch die Beobachtungen von E1, S. 74 bis 76).

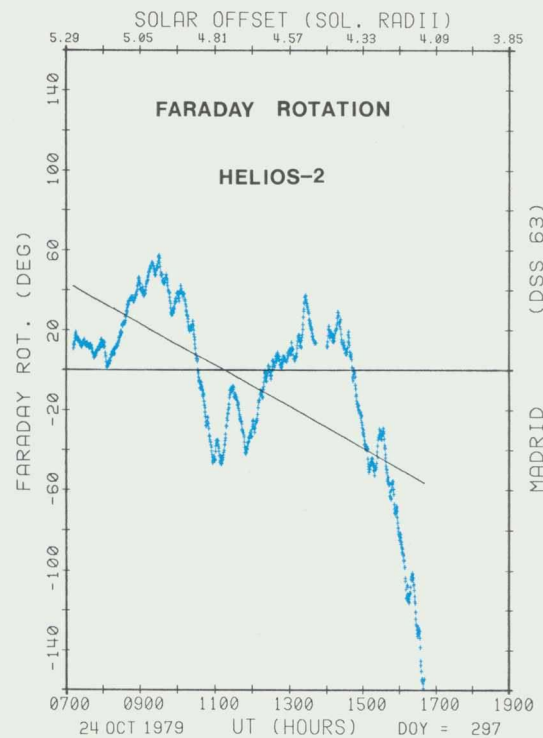
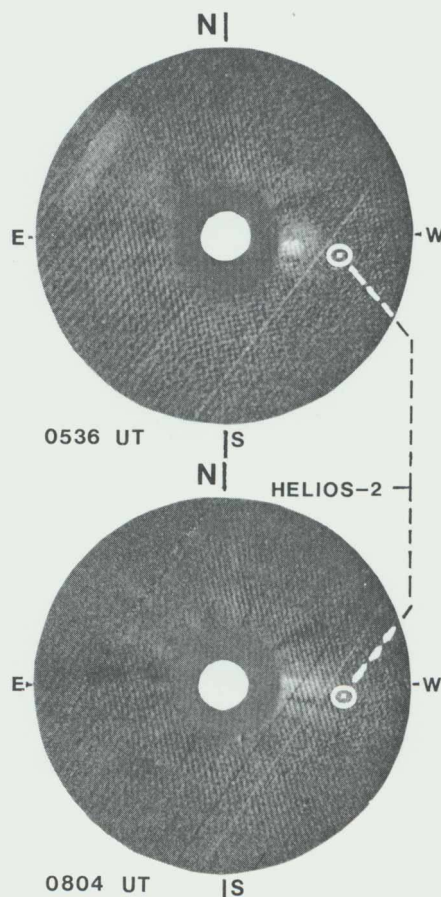
Faraday-Rotations-Messungen sind ein schönes Beispiel dafür, daß bereits vorhandene technische Systeme – in diesem Falle die Radioverbindung zwischen Raumsonde und Bodenstation – mit geringem Aufwand angezapft werden können, um zusätzliche physikalische Daten zu beschaffen, die sonst nur mit viel größerer Mühe oder überhaupt nicht zu erlangen sind. Diese Messung wird ein passives Experiment genannt, da keine zusätzlichen Instrumente an Bord der Raumsonde notwendig sind.

*Fig. page 121 shows two simultaneous observations of a coronal mass ejection (the two figures on the left are by courtesy of the Naval Research Laboratory, Washington, D.C.) The brightening above the west limb of the sun is travelling outward with a velocity of about 120 km/s. At about 6.30 h it has arrived at a distance of 5 solar radii. Simultaneously, the signals of HELIOS 2 penetrated through this region (the encircled dot in the two figures). Again the Faraday rotation is showing wavelike structures in the region of the coronal ejection.*

*This type of measurement is called a passive experiment because it uses the telemetry link as it is not depending on any other active device on board. It offers valuable scientific data at very low cost and effort from regions inaccessible to directly measuring spacecraft.*

Links: Zwei Aufnahmen des „Solwind“-Koronagraphen während eines koronalen Massenauswurfes am Westrand der Sonne. Der Koronagraph mißt die Helligkeitsverteilung der Korona im sichtbaren Licht, wobei die viel hellere Sonne (weiße Scheibe in der Mitte der beiden Aufnahmen) abgedeckt wird. Die Position der Raumsonde HELIOS 2 ist in beiden Bildern gekennzeichnet. (Aufnahmen vom Naval Research Laboratory, Washington, DC/USA.) Rechts: Faraday-Rotation des HELIOS-Signals zur Zeit des koronalen Massenauswurfes. Man beachte die wellenartigen Strukturen in dieser Registrierkurve.

*Left side: Two observations of the "Solwind"-coronagraph during a coronal mass ejection over the west limb of the sun. The coronagraph is measuring the brightness distribution of the corona in visible light, while the much brighter sun (white circle in the middle of both photographs) is artificially occulted. The position of HELIOS 2 is indicated by encircled dots (Courtesy Naval Research Laboratory, Washington, D.C.). Right side: Faraday rotation of the HELIOS signals at the time of the coronal ejection. Note the wavelike structures in the plot.*



Experiment 6

Teleskope für kosmische Strahlung  
*Cosmic Ray Telescopes*

Experiment 7:

Teleskope für kosmische Strahlung; Röntgen-Monitor  
*Cosmic Ray Telescopes, X-ray Monitor*

Experiment 8:

Detektoren für die niederenergetische kosmische Strahlung  
*Detectors for low energy cosmic rays*

# Kosmische Strahlung

Woher kommt die kosmische Strahlung?  
Auf welchen Bahnen laufen die Teilchen?  
Wo werden Teilchen beschleunigt?  
Wie ist die Zahl der Teilchen  
im Sonnensystem verteilt?

# *Cosmic Radiation*

*Where does the cosmic radiation come from?  
What orbits do the particles run through?  
Where are particles accelerated?  
How is the number of particles  
distributed in the solar system?*



Her  
84

# Die schnellen Individualisten im Sonnensystem

## Die Kosmische Strahlung

Horst Kunow und Gerd Wibberenz  
Institut für reine und angewandte Kernphysik  
Christian-Albrecht-Universität, Kiel



Kunow



Wibberenz

Kosmische Strahlung – dieser Begriff hat für viele Laien einen geheimnisvollen Klang. Wie viele Phänomene unseres modernen Lebens, entzieht sich auch die kosmische Strahlung dem direkten Nachweis durch die menschlichen Sinne. Während uns aber z. B. die Existenz der Radiowellen durch den täglichen Umgang mit Radio und Fernsehen bewußt ist, hört man über kosmische Strahlung nur recht selten etwas. Die bekannteste Nachweismethode, der Geigerzähler mit seinem in unregelmäßiger Folge wahrnehmbaren Ticken, dient auch dem Nachweis radioaktiver Gefährdung. Wenn einem dann zusätzlich gesagt wird, daß der Körper eines jeden Menschen am Erdboden in jeder Sekunde etwa zwanzigmal von Teilchen der kosmischen Strahlung getroffen wird, so sind versteckte Ängste als Nährboden für zum Teil abenteuerliche Geschichten über den Einfluß der kosmischen Strahlung auf den Menschen durchaus verständlich.

Glücklicherweise wissen die Wissenschaftler, die sich mit der kosmischen Strahlung beschäftigen, bereits seit Jahrzehnten wesentlich mehr über ihren Ursprung und über ihre Wirkung. So ist es erwiesen, daß die kosmische Strahlung, die seit Jahrtausenden mit praktisch gleicher Intensität auf die Erde niedergeht, keine Gefährdung für den Menschen am Erdboden darstellt. Die Atmosphäre der Erde und ihr Magnetfeld haben eine genügend stark abschirmende und damit schützende Wirkung.

### Was ist Kosmische Strahlung?

Die Kosmische Strahlung besteht aus Elektronen, Protonen, Alphateilchen (den Kernen von Heliumatomen) sowie in wesentlich geringerer Maße aus Atomkernen fast aller anderen chemischen Elemente, die mit für irdische Verhältnisse unvorstellbar hohen Geschwindigkeiten durch den Weltraum fliegen. Bei der großen Geschwindigkeit, die für Protonen z. B. oberhalb von mindestens 1300 km/s liegt, haben die Atome ihre Elektronenhülle vollständig abgestreift. Die hohen Energien der geladenen Teilchen der Kosmischen Strahlung deuten darauf hin, daß sie durch elektrische Felder im Weltraum sehr effektiv beschleunigt worden sind. Wir wissen inzwischen aus vielen Bereichen innerhalb des Sonnensystems (vgl. Abb. Seite 145), daß das Auftreten von Beschleunigungsprozessen typisch für ein extrem verdünntes Plasma ist. In einem Plasma der Temperatur von einer Million Grad hat ein Teilchen eine Energie von 86 eV, das entspricht der Energie, die ein Teilchen mit der Elementarladung eines Elektrons oder Protons nach Durchlaufen einer Spannung von 86 Volt gewinnt. Von „energiereichen“ Teilchen sprechen wir dann, wenn ihre Energie deutlich oberhalb der thermischen Energie des Plasmas liegt. Hat zum Beispiel ein Elektron beim Durchlaufen von elektrischen Feldern insgesamt einen Spannungsunterschied von einer Million Volt erfahren, so hat es eine Energie von 1 MeV (Mega-Elektron-Volt) angenommen und eine Geschwindigkeit von 282 000 km/s erreicht, also fast Lichtgeschwindigkeit. Nach gleicher Beschleunigung erreicht das etwa 2000 mal schwerere Proton

*Cosmic rays – this term has a mysterious sound. As many other phenomena of modern life the cosmic rays cannot be detected directly by the human senses. The best known detection method is the Geiger counter which is also used for detection of radioactive hazards. If one hears that the body of each human being on earth is hit in each second about 20 times by particles of the cosmic radiation it is understandable that people have adventurous ideas about the influence of cosmic radiation on man.*

*Fortunately enough scientists know more about cosmic rays. They know that cosmic rays are no hazard for man on earth because the atmosphere and the magnetic field provide enough screening and protection.*

*Cosmic rays consist of electrons, protons, helium nuclei, and some very small contribution of nuclei of all other chemical elements, which fly through space with enormously high velocities. The high velocities imply that the charged particles have been accelerated in space by electric fields very efficiently. We know meanwhile from many areas within the solar system that acceleration processes are typical for an extreme tenuous plasma. A particle in a plasma of one million degrees has an energy of 86 eV which is equivalent to the energy gained by an electron or proton after passage through an electric field of 86 Volts. "Energetic" particles are those which have energies well above the thermal energy of the plasma.*

*The sources of the cosmic radiation are even today, more than 70 years after their discovery*





Der Krebsnebel, wie er heute beobachtet wird, ist der Überrest einer Supernova-Explosion aus dem Jahre 1054. Etwa 1% der Sterne werden nach Verbrauch ihres gesamten Kernbrennstoffs nicht einfach verlöschen, sondern in einer gewaltigen und für den Stern katastrophalen Explosion große Teile ihrer Materie in den Weltraum abgeben. Gleichzeitig fällt der innere Kern des Sterns in sich zusammen und wird dabei soweit verdichtet, daß daraus ein Neutronenstern mit einem Radius von nur noch 10 km entsteht. Solche Explosionen werden als eine mögliche

Quelle der kosmischen Strahlung diskutiert. Vor allem sind sie auch für die Erzeugung der schweren Elemente verantwortlich. Die Schale des Kerns fliegt mit Geschwindigkeiten von einigen 1000 km/s Jahrtausende lang in den interstellaren Raum hinaus. Dabei wird die Expansion getrieben von dem heißen Plasma im Inneren der Kugel. Es bildet sich eine Überschallstoßwelle, die weitere Materie aus dem interstellaren Raum vor sich hertreibt. In der Umgebung dieser Stoßwelle wird über Jahrtausende hinweg ebenfalls kosmische Strahlung beschleunigt.

jedoch „nur“ eine Geschwindigkeit von 13 800 km/s bei einer Energie von ebenfalls 1 MeV.

Quellen und Ursprung der Kosmischen Strahlung sind auch heute, mehr als 70 Jahre nach ihrer Entdeckung durch den österreichischen Physiker Viktor Hess, nicht vollständig geklärt. Im Laufe der Zeit wurden viele Typen ungewöhnlicher astrophysikalischer Objekte (weiße Zwerge, Supernovae, Pulsare, schwarze Löcher, Flaresterne) für ihre Entstehung verantwortlich gemacht.

*The crab nebula as observable today is the remnant of a supernova explosion observed in 1054. After they have burnt all their nuclear fuel about 1% of all stars will throw large parts of their matter into free space during a huge explosion called supernova. Simultaneously the inner nucleus of the star will be generating a neutron star with a radius of only 10 km. These explosions are discussed as possible sources of cosmic radiation. Above all they are responsible for the generation of heavy elements. The shell of the nucleus flies through the*

Daß wir überhaupt Materieproben aus dem Kosmos in Form der Kosmischen Strahlung zu sehen bekommen, verdanken wir gerade der Tatsache ihrer Beschleunigung, denn nur aufgrund ihrer hohen Energie können beschleunigte Teilchen ihre Umgebung verlassen und große Entfernungen im Weltraum zurücklegen. Abbildung Seite 125 zeigt den Krebsnebel, einen Supernova-Überrest, der noch heute in der Lage ist, kosmische Strahlung zu beschleunigen.

*interplanetary space with velocities of some 1,000 km/s for thousands of years. The expansion is driven by hot plasma inside the sphere. The result is a shock wave which chases additional matter from the interplanetary space in front of it. Cosmic rays are accelerated in the vicinity of this shock wave for thousands of years.*

*by the Austrian physicist Viktor Hess, not fully explained. Many kinds of unusual astrophysical objects like white dwarfs, supernovae, pulsars, black holes, and flare stars have been made responsible for the cosmic ray generation. Only the fact that cosmic rays are accelerated in space allows them to leave their local environment and enables us to detect them in the vicinity of the earth. Figure page 125 shows the crab nebula, a supernova remnant, which is even today able to accelerate cosmic rays.*

*In contrast to the particles of the solar wind with intensities of ten particles per cubic centimeter and collective motion through interplanetary space the cosmic ray particles are individualists and dependent only on themselves in space. Their diameter is  $\frac{1}{1,000,000}$  of  $\frac{1}{1,000,000}$  mm and in average only one particle will be found in a cube of 30 m length. They orient themselves by following the magnetic field lines on screw shaped trajectories.*

*It is known since 40 years that the sun is able to accelerate particles, although the maximum energy of these solar cosmic rays is much smaller than the average energy of galactic cosmic rays. Solar events are relatively short intensity increases following explosive chromospheric eruptions (flares).*

*The close approximation of HELIOS to the sun is ideal to study solar cosmic rays. Of special interest is the acceleration process during flares. In addition accelerated particles can be used as "probes" which allow conclusions on magnetic structures in the solar corona and in the interplanetary space.*

*The sun is a typical star in its middle age and belongs to the most common type of stars. Some characteristic data are:*

*Age: 5 billion years*

*life expectancy: 4.5 billion years*

*mass: 332,000 earth masses*

*surface temperature: 5,800 degrees*

*energy production:  $3.7 \cdot 10^{20}$  megawatt*

*earth distance: 149,600,000 km (= 1 AU = astronomical unit)*

*next neighbour star (Proxima Centauri): 272,000 AU*

Im Gegensatz zu den Teilchen des Sonnenwindes, von denen sich immerhin noch etwa zehn in einem Kubikzentimeter befinden und die sich als Kollektiv durch den interplanetaren Raum bewegen, sind die Teilchen der Kosmischen Strahlung Individualisten und in der Weite des Weltraums praktisch auf sich allein gestellt. Sie sind etwa hundertmilliardenmal seltener als die Teilchen des Sonnenwindes. Ihr Durchmesser beträgt etwa ein Billionstel Millimeter, und man findet im Mittel ein Teilchen in einem Würfel von 30 m Kantenlänge. (Auf der Erde enthält 1 Kubikzentimeter Luft  $5 \cdot 10^{19}$  Atome.) Da die Teilchen elektrisch geladen sind, können sie sich in der Weite des Weltraums an den Magnetfeldlinien, an denen entlang sie sich auf schraubenförmigen Bahnen fortbewegen, orientieren. Im Gegensatz zum Licht breiten sie sich also nicht geradlinig aus. Als Quellen von Lichtstrahlen am Nachthimmel können wir daher isolierte, wohldefinierte Objekte ausmachen, während die Einfallsrichtung eines Teilchens der Kosmischen Strahlung uns nicht sofort etwas über seinen Herkunftsort aussagt.

Daß auch die Sonne in der Lage ist, Teilchen auf hohe Energien zu beschleunigen, ist seit den vierziger Jahren bekannt. Die Maximalenergie dieser „solaren kosmischen Strahlung“ erreicht allerdings bei weitem nicht das, was wir von der galaktischen kosmischen Strahlung gewöhnt sind. Außerdem handelt es sich um einzelne kurzzeitige Intensitätsanstiege, sogenannte solare Ereignisse, die in der Folge von explosionsartig verlaufenden Sonnenausbrüchen (chromosphärische Eruptionen = Flares) auftreten.

Die dichte Annäherung von HELIOS an die Sonne bietet ideale Voraussetzungen zum Studium der solaren kosmischen Strahlung. Dabei geht es einmal um die Aufklärung der Beschleunigungsprozesse bei Flares, für die es viele konkurrierende Modellvorstellungen, aber noch keine allgemein akzeptierte Theorie gibt. Zum anderen werden die beschleunigten Teilchen als „Sonden“ verwendet, denn das Studium der Ausbreitung geladener Teilchen im Raum erlaubt Schlüsse auf die magnetischen Strukturen in der Sonnenkorona und im interplanetaren Raum, in denen

die Teilchen sich bewegen. Der interplanetare Raum hat noch zwei weitere wichtige Eigenschaften im Zusammenhang mit der Erforschung der Kosmischen Strahlung: Er beeinflusst durch seine von der Sonne gesteuerte Variabilität die Intensität der von außen aus dem interstellaren Raum auf das Sonnensystem einfallenden galaktischen kosmischen Strahlung; Stoßwellen im interplanetaren Raum bilden darüber hinaus eine lokale Quelle für die Erzeugung energiereicher Teilchen.

### Im Machtbereich der Sonne

Die Sonne ist das Musterbeispiel eines normalen Sterns mittleren Alters, sie gehört zu dem am häufigsten vorkommenden Typus von Fixsternen. Einige charakteristische Lebensdaten sind:

Alter: 5 Milliarden Jahre

Lebenserwartung: 4,5 Milliarden Jahre

Masse: 332 000 Erdmassen

Oberflächentemperatur: 5 800 Grad

Energieproduktion:  $3,7 \cdot 10^{26}$  Megawatt

Erdentfernung: 149 600.000 km (= 1 AE = Astronomische Einheit)

Nächster Nachbarstern (Proxima Centauri): 272 000 AE

Trotz der Erforschung der Tiefen des Weltalls mit immer stärkeren Teleskopen, Weltraumobservatorien und Antennenfeldern zur Radiobeobachtung bleibt die Sonne eines der wichtigsten Objekte der Astrophysik. Durch die große Nähe kann der Aufbau der Atmosphärenschichten studiert werden mit einer Fülle von Strukturen der Oberfläche und mit zeitlichen Veränderungen der verschiedensten Formen und Typen, die mit teils nüchternen, teils phantasievollen Namen belegt sind (Bursts, Eruptionen, Fackeln, Flares, Flecken, Filamente, Loops, Plages, Protuberanzen, Rauschstürme, Sprays, Spritzer, usw.). Kurz, die Sonne ist sehr aktiv!

An der Beziehung zwischen Sonne und Erde ist ferner einzigartig, daß wir uns im Bereich der Erdbahn noch innerhalb der expandierenden Sonnenatmosphäre befinden. Der Sonnenwind und die von ihm mitgeführten Magnetfelder üben

*Despite the investigation of space with more powerful telescopes, antennas or observatories the sun remains one of the most important objects of astrophysics. Only because of the short distance to the sun frequently varying phenomena can be studied which show that the sun is very active.*

*The location of the earth is still within the expanding solar atmosphere. The solar wind and the frozen-in magnetic fields manifest the influence of the sun on the interplanetary medium in the whole heliosphere. Let us describe those phenomena which are related to the measurements of energetic particles on board of HELIOS.*

#### 1) Solar activity and solar cycle

*The activity of the sun with its 11- or 22-year cycle can be observed in many ways: Developments of sunspots, change of magnetic field polarity at the poles, open magnetic structures at the solar surface (coronal holes), or areas enclosed by magnetic loops as well as interplanetary magnetic fields. The influence on galactic and solar cosmic rays is demonstrated in figure page 129.*

#### 2) The solar wind and the structure of the interplanetary medium.

*The solar wind is a continuous stream of hot plasma originated in the solar corona and reaching out far into the heliosphere. It has been described in detail in earlier chapters. Important aspects for the cosmic rays are shown in figures page 131 top and 132. The expansion of the solar wind determines the structure of the interplanetary medium which is important for propagation processes of energetic particles. This will be explained in figures page 131 bottom through 134.*

#### 3) Solar eruptions (flares)

*Chromospheric eruptions or flares are explosive energy releases of the sun which can be observed in the light of certain spectral lines, especially of the  $H_{\alpha}$ -line. The energy release of only one*

starke Einflüsse auf die Magnetosphäre der Erde aus und manifestieren in der gesamten Heliosphäre den Einfluß der Sonne auf die Eigenschaften des Mediums. Aus der Fülle von Phänomenen, die mit der Sonne und ihrem Einflußbereich, der Heliosphäre, zusammenhängen, wollen wir kurz nur diejenigen herausgreifen, die für den Zusammenhang mit den Messungen energiereicher Teilchen an Bord von HELIOS wichtig sind.

### 1) Sonnenaktivität und Solarzyklus

Die Aktivität der Sonne, mit ihrem 11- bzw. 22-Jahreszyklus, läßt sich auf vielfältige Weise beobachten: Entstehung, Entwicklung und Verschwinden von Sonnenflecken auf der Sonnenscheibe, Umkehr der Magnetfeldpolarität an den Polen, magnetisch offene Strukturen auf der Sonnenoberfläche (koronale Löcher) oder nach außen hin durch magnetische Linien abgeschlossene Gebiete sowie interplanetare Magnetfelder. Die Beeinflussung der galaktischen und der solaren Kosmischen Strahlung durch den Solarzyklus wird anhand von Abb. Seite 129 demonstriert.

### 2) Der Sonnenwind und die Struktur des interplanetaren Mediums

Der Sonnenwind ist ein kontinuierlicher Strom von heißem Plasma, der in der Sonnenkorona seinen Ursprung hat und weit in die Heliosphäre hinausreicht. In jeder Sekunde wird durch den Sonnenwind eine Million Tonnen Materie aus der Korona fortgetragen. Das Thema ist in früheren Kapiteln ausführlich behandelt. Die für die Kosmische Strahlung wichtigen Aspekte werden in den Abbildungen Seite 131 oben und 132 vorgestellt. Die Expansion des Sonnenwindes bestimmt die Struktur des interplanetaren Mediums auf vielen räumlichen Skalen und liefert damit die Grundlage für das Verständnis der Ausbreitungsvorgänge energiereicher geladener Teilchen. Dies wird anhand der Abbildungen Seite 131 unten bis 134 erläutert.

### 3) Sonnenausbrüche (Flares)

Als chromosphärische Eruption oder Flares bezeichnet man explosionsartig verlaufende gewal-

tige Energieumsetzungen auf der Sonne, die ursprünglich vorwiegend im Licht bestimmter Spektrallinien insbesondere der H $\alpha$ -Linie, beobachtbar waren. Inzwischen können die Flares vom langwelligen Radiobereich bis in den Bereich der harten Gammastrahlung untersucht werden. Die bei einem großen Flare freiwerdende Energie von  $10^{18}$  bis  $10^{20}$  kWh entspricht dem Energieverbrauch der Bundesrepublik über einen Zeitraum von 10 Millionen Jahren. Die für uns wichtigen Folgeerscheinungen sind die Teilchenbeschleunigung und das Auftreten von Stoßwellen. Eine Veranschaulichung erfolgt in den Abbildungen Seite 135 bis 140.

### 4) Teilchenbeschleunigung an Stoßwellen im interplanetaren Raum

Stoßwellen im Plasma des Sonnenwindes sind auf zwei Ursachen zurückzuführen. Sie treten als Folge solarer Flares auf und beim Zusammentreffen schneller und langsamer Ströme im Sonnenwind. Sie wurden in früheren Kapiteln ausführlich dargestellt. Ihre Wirksamkeit bei der Beschleunigung energiereicher Teilchen wird anhand der Abbildungen Seite 142 bis 145 vorgestellt.

Das Szenario für die Erforschung der Kosmischen Strahlung bzw. der energiereichen Teilchen im Sonnensystem ist damit skizziert. Die mit den Teilbereichen 1 bis 4 zusammenhängenden Phänomene der Langzeitvariation der Kosmischen Strahlung, der Teilchenausbreitung, der Eigenschaften solarer Ereignisse und der Teilchenbeschleunigung werden in besonderen Abschnitten dieses Kapitels eingehender anhand von Bildern und Meßergebnissen der Instrumente an Bord von HELIOS 1 und 2 beschrieben. Im Schlußteil soll sodann der Blick auf die weiter entfernten Himmelsobjekte gerichtet werden, über die unser Wissen bei weitem nicht so detailliert ist wie über die Sonne und die Heliosphäre. Vielleicht kann die Erforschung der Kosmischen Strahlung dazu beitragen, unsere Vorstellungen über die Vorgänge im Kosmos zu verbessern. Zuvor soll jedoch noch kurz das Instrument beschrieben werden, mit dem die hier vorgestellten Ergebnisse gewonnen wurden.

*large flare of  $10^{18}$  or  $10^{20}$  kWh corresponds to the energy consumption of the Federal Republic of Germany for 10 million years. They accelerate cosmic rays and generate shocks. A description is given in figures page 135 to 140.*

### 4) Particle acceleration at shock waves in interplanetary space

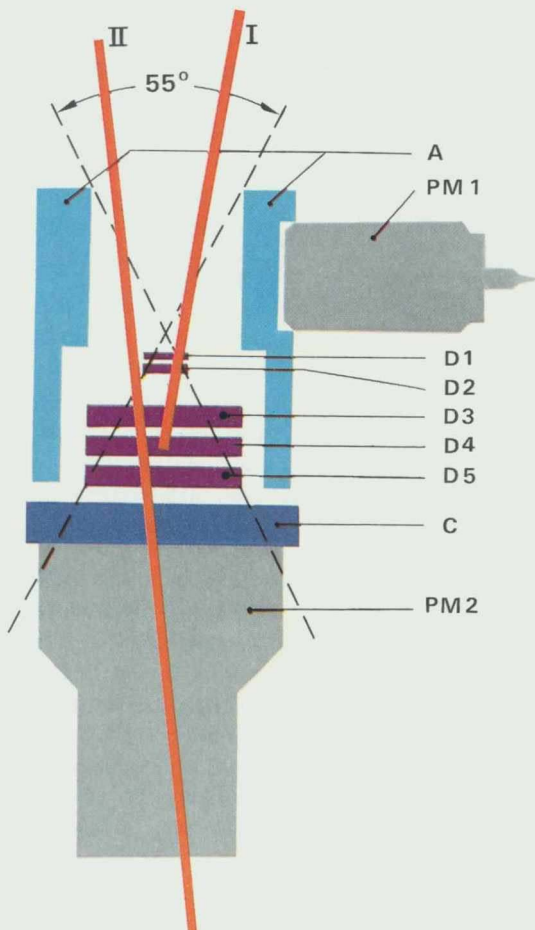
*Shock waves in solar wind are the consequence of solar flares or develop at the collision of a fast solar wind stream with slower plasma. They have been explained in detail in earlier chapters. The acceleration of particles by shock waves is demonstrated in figures page 142 through 145.*

*This is the scenario for the investigation of cosmic rays in the solar system. Long term variation of cosmic rays, particle propagation and the features of acceleration are described in special sections of this chapter using figures and results of HELIOS 1 and HELIOS 2. In the closing section we will turn our view to far astrophysical objects of which our knowledge is considerably smaller. Perhaps the investigation of the cosmic rays can contribute to our knowledge of the universe. But let us turn now to the instrument description in the next section.*

## Eine Falle für die Kosmische Strahlung

### Wie wird die Kosmische Strahlung an Bord von HELIOS gemessen?

Das Kieler Experiment mißt Teilchen der Kosmischen Strahlung mit Geschwindigkeiten von etwa 17 000 km/s für Protonen und 230 000 km/s für Elektronen bis hinauf zu Teilchen, die sich praktisch mit der Lichtgeschwindigkeit von 300 000 km/s bewegen. Die langsamsten dieser Teilchen würden die Erdkugel in weniger als 3 Sekunden umrunden und sind damit immer noch 220 mal schneller als das Raumfahrzeug im schnellsten (sonnennächsten) Punkt seiner Umlaufbahn. Wie man sie trotz der hohen Geschwindigkeiten genau vermessen kann, wird anhand der Abbildung Seite 128 erläutert.



Aufgrund der beschränkten Übertragungskapazität kann nur für eine stichprobenartige Auswahl von Teilchen die vollständige Information zur Erde gesendet werden. Zusätzlich werden jedoch alle Teilchen in elektronischen Zählern registriert, die es gestatten, die Anzahl der Teilchen pro Meßintervall getrennt nach Teilchenart, Geschwindigkeitsbereich und Einfallssektor zu zählen. Die Bereitstellung dieser Information in geeigneter Weise zur Übertragung erfolgt in der bordseitigen Elektronik.

Die für das Kieler Instrument erforderliche Übertragungsrate entspricht etwa der eines konventionellen Fernschreibers. Mit dieser Datenübertragungsrate konnte das Instrument jedoch nur erfolgreich betrieben werden, weil zuvor durch Ausscheidung aller nicht unbedingt erforderli-

Das Herz des Instruments zur Messung der energiereichen kosmischen Strahlung ist ein Detektorteleskop, das mehrere der seit Jahrzehnten in der Kernphysik bekannten Nachweismethoden in sich vereint:

Fünf scheibenförmige Halbleiter-Detektoren (D1 – D5), das sind große Silizium-Dioden, nutzen die ionisierende Wirkung der schnellen geladenen Teilchen zum Nachweis aus. Beim Durchsetzen des Halbleitermaterials erzeugt das Teilchen in einem feinen Schlauch im Silizium Elektronen und positive Ionen, die aufgrund der angelegten Spannungen von einigen hundert Volt innerhalb von Bruchteilen einer Millionstel Sekunde zu den entgegengesetzt geladenen Elektroden des Detektors wandern. Dort werden sie mit Hilfe höchst empfindlicher Verstärker nachgewiesen.

In dem ebenfalls scheibenförmigen Cerenkov-Detektor C aus synthetischem Saphir und im Szintillator A in Form eines Hohlzylind-

ders entsteht beim Durchgang eines geladenen Teilchens Licht, das die Photomultiplier (Lichtverstärker) PM 1 und PM 2 in elektrische Impulse umwandeln.

Die Spuren I und II deuten die Bahnen von Teilchen an, die in den Halbleiter-Detektoren steckenbleiben (I) oder das gesamte Detektorsystem durchdringen (II). Jedes Teilchen, das einen Teil des Detektors A durchdringt, wird ausgesondert, so daß nur solche Teilchen ausgemessen werden, die von oben oder unten das Detektorteleskop durchsetzen. Die Impulse, die dabei am Ausgang der Halbleiter-Detektoren und der Photomultiplier entstehen, erlauben es, Ladung, Masse und Geschwindigkeit der Teilchen zu bestimmen. Damit ist es möglich, die Elementzugehörigkeit (für leichte Elemente auch die Isotopenzugehörigkeit), die Energie sowie durch Ausnutzung der Drehung der Raumsonde auch die Einfallrichtung eines Teilchens zu bestimmen.

*The Kiel-Experiment measures particles of the cosmic radiation with velocities above 17,000 km/s for protons and 230,000 km/s for electrons up to particles which move with nearly light velocity of 300,000 km/s. The slowest particles would circle the earth in less than three seconds. They are about 220 times faster than the spaceprobe in its fastest position of its orbit. Figure page 128 explains how these particles can be measured in detail despite the high velocity.*

*Due to the limited transmitting capacity it is only possible to transmit the information of samples of particles to earth. In addition all particles are registered in counters. This allows determination of the number of particles per interval separated with respect to the species,*

*The detector system for the high energy cosmic ray instrument uses detection techniques which have been known for decades. 5 semiconductor detectors (D1 – D5), large silicon diodes, utilize the ionization of fast charged particles in the silicon. The particle generates electrons and positive ions which propagate to the electrodes of the detector within fractions of a millisecond due to the bias of several hundred volts. Highly sensitive amplifiers perform further analog processing. In the disc-like Cerenkov-detector C consisting of sapphire and in the hollow cylindrical scintillator A light is generated in response to the penetration of a charged particle, which is transformed into electrical pulses by the photomultipliers PM 1 and PM 2.*

*The tracks I and II symbolize the traces of particles which either stop in one of the semiconductor detectors (I) or penetrate the whole detector system*

*(II). Each particle penetrating detector A is excluded. Only particles entering from above or below are used for further analysis. The pulses appearing at the output of the semiconductor detectors or the phototubes enable us to decide on charge, mass and velocity of the particles. This determines the element (or isotope of light elements) and its energy. The trajectory of the particle is determined using the spin of the space probe.*

Die Meßdaten der Raumsonden HELIOS 1 und HELIOS 2 für den Zeitraum zwischen 1974 und 1984 füllen ca. 5000 Magnetbänder. Sie mußten für diese Darstellung durch Fortlassen und Zusammenfassung auf 1/50.000.000 der vom Experiment gemessenen und vom Raumfahrzeug übertragenen Datenmenge reduziert werden. Die Meßdauer von HELIOS überdeckt einen vollständigen Sonnenfleckenzyklus mit einem Sonnenfleckenminimum im Juni 1976 und einem Sonnenfleckenmaximum im Dezember 1979. Betrachtet man nun im mittleren Teil des Bildes die schnellen Protonen, so erkennt man, daß sie in der Form der gelben Kurve, also bis auf einige stark überhöhte Monatsmittelwerte im Zeitraum nach September 1977, etwa der Tendenz der Sonnenfleckenzykluskurve folgen. Dieser Anteil wird als galaktische Komponente bezeichnet. Dabei ist das Minimum der galaktischen Strahlung gegenüber dem Maximum der Sonnenfleckenzyklus verzögert. Diese Änderung der galaktischen kosmischen Strahlung mit dem Sonnenfleckenzyklus wird als Modulation oder 11-Jahresvariation bezeichnet. Zwar ist die Variation nicht so drastisch wie bei der Sonnenfleckenzyklus, doch sinkt die Intensität der energiereichen Protonen, bezogen auf das Sonnenfleckenminimum auf nur 36% zum Zeitpunkt des Sonnenfleckenmaximums.

Der galaktischen Komponente (mittlere gelbe Kurve) überlagert sind die energiereichen Ausläufer der solaren Teilchenstrahlung, die bei Sonneneruptionen (Flares) in der Sonnenatmosphäre beschleunigt werden. Es fällt auf, daß die solare Strahlung schlagartig mit dem Zeitpunkt des ersten deutlichen Anstiegs der Sonnenfleckenzyklus im September 1977 einsetzt und am stärksten ist zu den Zeiten der stärksten Änderung der Sonnenaktivität. Besonders deutlich zeigt sich die solare und interplanetare Komponente bei den langsamen Protonen (obere Kurve). Ihre Intensität steigt ebenfalls sehr abrupt im September 1977 um einen Faktor 1000 an und bleibt für einen Zeitraum von ca. 6 Jahren auf einem sehr hohen Wert. Hierbei ist allerdings über viele solare Ereignisse gemittelt worden. Ein Teil der hohen Intensitäten ist auf die Nachbeschleunigung der solaren Komponente durch interplanetare Stoßwellen zurückzuführen (siehe Abb. Seite 142).

For the period between 1974 and 1984 the data from HELIOS 1 and HELIOS 2 is stored on about 5000 magnetic tapes. The data had to be reduced for this figure by omission and compression to 1/50,000,000 of this amount. The measurements of HELIOS cover a full solar cycle with one solar minimum in June 1976 and one solar maximum in December 1979. The center panel shows the fast protons. One realizes that the fast protons, as their dependence is highlighted by the yellow curve (excluding some strongly enhanced monthly means in the period after Sep-

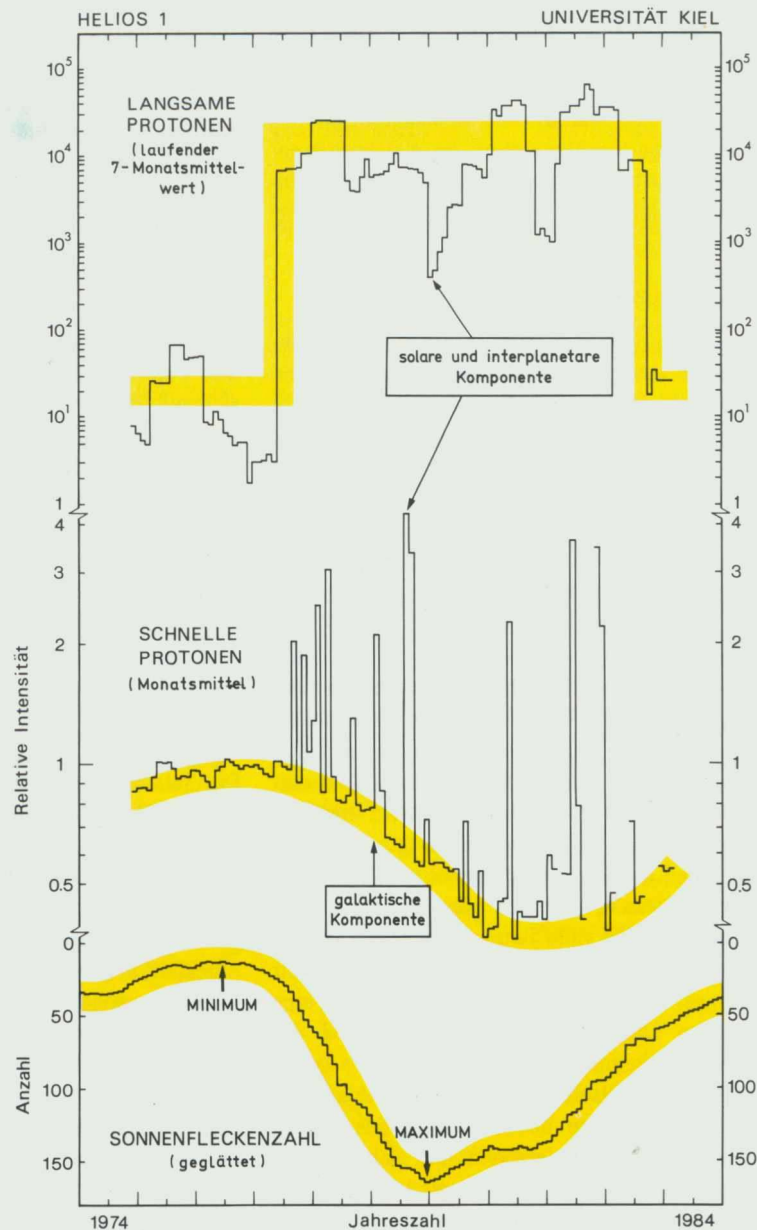
tember 1977), follows the tendency of the sunspot curve. This part is called galactic component. The minimum of the galactic radiation is delayed with respect to the maximum of the sunspot number. Superimposed on the galactic component (center yellow curve) are the high energy extensions of the solar cosmic rays, which are accelerated in the solar atmosphere during flares. It is a striking feature that the solar radiation starts abruptly with the time of the first apparent increase of the sunspot number in September 1977 and is highest at the times of the strongest changes of the solar activity. The solar and interplanetary component (upper panel) shows up with special distinctness in the slow protons. Their intensity increases as well very abruptly in September 1977 by a factor of 1000 and stays at this level for about six years. These are, however, averages over many solar events. Part of the high intensities is caused by post-acceleration of the solar component by interplanetary shock waves (see fig. page 142).

chen Informationen und durch sehr effektive Verschachtelung der Zahleninformationen, ähnlich einem Puzzle, alle nicht genutzten Übertragungsplätze aufgefüllt wurden.

Die beiden nahezu identischen Instrumente an Bord der Raumsonden HELIOS 1 und HELIOS 2 haben auf HELIOS 2 bis zum Ausfall der Sende- röhren und auf HELIOS 1 bis zum heutigen Tage

velocity range, and impact sector. The on-board electronic provides this information for transmission.

The identical instruments on board HELIOS 1 and 2 have both performed excellently. Quality and scientific content of the data exceed our expectations. The completeness is unique due to the consequent use of the on board core memory.



einwandfrei funktioniert und Daten geliefert, die unsere Erwartungen weit übertroffen haben. Die heute verfügbaren Daten überdecken nahezu lückenlos einen kompletten Sonnenfleckenzyklus. Fast beispiellos ist die Vollständigkeit der Daten über den Tagesverlauf, die durch konsequente Ausnutzung eines Kernspeichers an Bord der Raumsonden zur Überbrückung von Datenübertragungslücken erreicht wurde. Die Auswahl sich gegenseitig ergänzender Experimente an Bord der Raumsonden steigert den wissenschaftlichen Wert der Gesamtmission darüber hinaus erheblich. So wären viele Beobachtungen der Kosmischen Strahlung ohne die gleichzeitig gemessenen Daten über den Sonnenwind, das Magnetfeld oder über Plasmawellen nicht zu erklären.

### Die Handschrift der Sonne

Die Messungen der kosmischen Teilchenstrahlung im interplanetaren Raum zwischen Sonne und Erde geben in vielfältiger Weise Aufschluß über den dominierenden Einfluß der Sonne auf das Geschehen im gesamten Sonnensystem. Langfristige Beeinflussungen durch die Sonne lassen sich mit dem Sonnenfleckenzyklus in Beziehung setzen. Sonnenflecken sind kleine dunklere Flecken auf der Sonnenscheibe (Photosphäre), die meist in Gruppen auftreten (Abb. S. 21). Die Gebiete der Sonnenflecken erscheinen dunkler, weil die Oberflächentemperatur dieser photosphärischen Bereiche um bis zu  $1000^\circ$  niedriger ist als die der benachbarten Photosphäre. Sonnenflecken wurden bereits von Galilei entdeckt und seit 1749 ununterbrochen bis zum heutigen Tage beobachtet. Es zeigte sich sehr bald, daß die Sonnenfleckenanzahl von Tag zu Tag stark schwankt, daß sich aber der monatliche Mittelwert über viele Jahre systematisch ändert. Der Sonnenfleckenzyklus, der im Mittel mit sehr geringer Sonnenfleckenanzahl beginnt, hat eine mittlere Länge von 11 Jahren. Während des Sonnenfleckenmaximums in der Mitte des Zyklus liegen die gemittelten Sonnenfleckenanzahlen etwa bei 150. Genauere Beobachtungen des solaren Magnetfeldes haben ergeben, daß sich etwa zur Zeit des Sonnenfleckenmaximums auch das großräumige Magnetfeld der Sonne umpolt, so daß

die vollständige Periode eines Sonnenfleckenzyklus eigentlich ca. 22 Jahre dauert.

Zur Darstellung des Langzeitverhaltens der kosmischen Teilchenstrahlung in Abb. Seite 129 wurden Monatsmittelwerte für die energiereichen Protonen und sogenannte „laufende“ 7-Monatsmittelwerte für die langsameren Protonen verwendet. Diese Darstellungsarten wurden gewählt, um mit Sicherheit alle Einflüsse kurzzeitiger Veränderungen auszuschließen. Wir haben gesehen, daß die Sonne mit ihrem 11- bzw. 22-Jahresgang auf die galaktische Komponente einen mit zunehmender Sonnenfleckenanzahl hemmenden, auf die solare und interplanetare Komponente jedoch einen im Gegensatz dazu stark verstärkenden Einfluß ausübt.

Betrachtet man die kosmische Strahlung auf der Zeitskala von Monaten, z. B. wie in Abb. Seite 131 links in Form von 6-Stundenmittelwerten, sieht man Variationen der kosmischen Strahlung, die sich mit der Periodizität der Eigenumdrehung der Sonne von 27 Tagen in ähnlicher Weise bemerkbar machen. Wenn später die solaren Ereignisse diskutiert werden, geschieht dies auf der Basis von wenigen Tagen und mit Mittelungsperioden von z. B. 15 Minuten. Je nach gewählter Zeitskala und zeitlicher Auflösung lassen sich unterschiedliche Aspekte der Kosmischen Strahlung besonders gut untersuchen.

### Die langen Wege der Kosmischen Strahlung

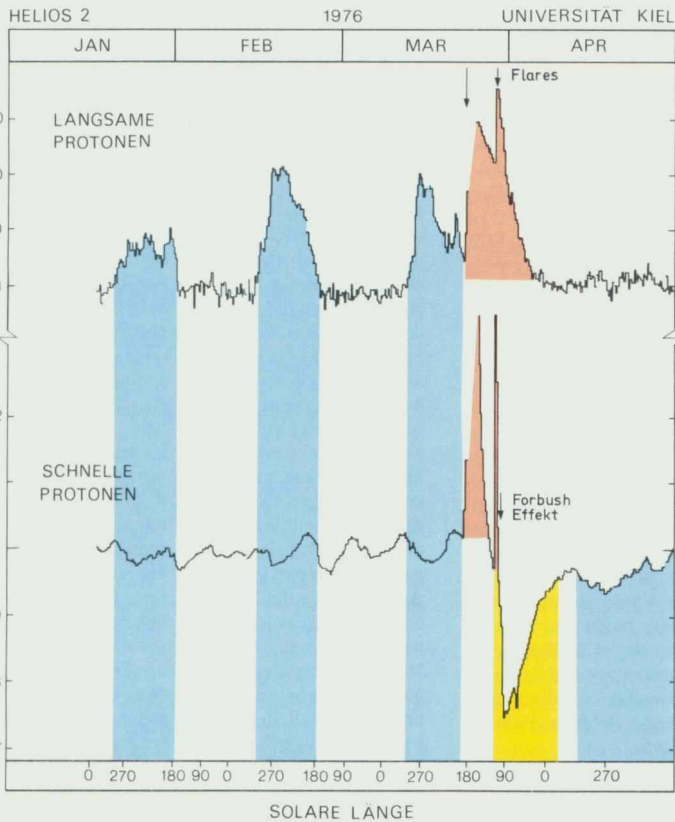
Die Teilchen der Kosmischen Strahlung haben vom Ort ihrer Entstehung bis zu ihrer Beobachtung im allgemeinen unvorstellbar lange Wege im Weltraum zurückgelegt. Dabei sind die Wege der Teilchen aus dem Sonnensystem vergleichsweise noch extrem kurz. Hier mißt man die Abstände in „Astronomischen Einheiten“, abgekürzt AE, wobei  $1 \text{ AE} \approx 150\,000\,000 \text{ km}$  dem mittleren Abstand zwischen Sonne und Erde entspricht. Für Entfernungen dieser Größenordnung benötigen die Teilchen Minuten bis Stunden. Kommen die Teilchen jedoch aus der Galaxis, so waren sie wesentlich länger unterwegs und mußten viel größere Strecken zurücklegen. Hier werden die Entfernungen in Lichtjahren

*The experiments on board complement each other and improve the scientific value of the whole mission considerably.*

*The measurements of the cosmic rays in interplanetary space between sun and earth show in many ways the dominating influence of the sun on the whole solar system. Long term influences by the sun are related to the sunspot cycle. Sunspots are small dark dots on the solar disk which appear often in groups. They were discovered by Galilei in 1749 and have been observed continuously until today. The sunspot numbers vary significantly from day to day, however, monthly means show systematic changes over about 11 years. The maximum mean sunspot number of a sunspot cycle is about 150. At the time of the maximum the gross magnetic field of the sun changes its sign.*

*To demonstrate the long term variation of the cosmic rays in figure page 129, monthly means have been used for the energetic protons and so-called "running" seven months means for the slower protons. This representation has been chosen to exclude all short time variations. The sun inhibits the galactic component partially with increasing sunspot number whereas the solar and interplanetary component is strongly increased at the same time. On a time scale of months as seen in figure page 131 left one observes variations of the cosmic rays represented by 6 hour averages which are related to the rotation of the sun. If solar events are discussed they are presented by 15 minute averages over a few days. Different aspects show up on different time scales and resolutions.*

*Particles of the cosmic radiation travel fantastically long distances in space. Travel distances of the particles within the solar system are comparatively extremely short. They are measured in "astronomic units" ( $1 \text{ AU} = 150,000,000 \text{ km}$ ), which is the mean distance between sun and earth, and they need minutes or hours. Particles arriving from the galaxy have been travelling much longer and have had to cover much larger distances, which are measured in light years ( $1 \text{ light year corresponds to } 9.5 \cdot 10^{12} \text{ km}$ ). The distance of the crab nebula*



In nahezu gleichem zeitlichem Abstand (genauer gesagt zu Zeiten, in denen das Raumfahrzeug mit gleichen Bereichen der rotierenden Sonne verbunden ist), werden Erhöhungen der Intensität der langsamen Protonen um Faktoren zwischen 10 und 100 beobachtet. Es handelt sich dabei um sog. korotierende Ereignisse, die durch blaue Unterlegung der Intensitätskurven hervorgehoben sind. Gleichzeitig damit beobachtet man in der Intensität der schnellen Protonen Verminderungen in der Größenordnung von 5%. Beide Effekte sind zurückzuführen auf mit der Sonne rotierende schnelle Sonnenwindströme, die in ihrer Umgebung langsame Protonen beschleunigen, schnelle galaktische Protonen jedoch geringfügig (zusätzlich) abschirmen. Wesentlich dramatischer sind die Intensitätsanstiege in der Folge der solaren Flares vom 20. und 28. März 1976 (rot). Dieselben Ereignisse werden auch in der Intensität der schnellen Protonen beobachtet, jedoch mit wesentlich schnellerer Abklingzeit. Mit einer Verzögerung von ca. 1 bis 2 Tagen folgt auf den Flareeffekt ein Abfall der schnellen Protonen um ca. 25% (gelb), der nach dem Entdecker dieses Phänomens als Forbush-Effekt bezeichnet wird. Hierbei wird die von außerhalb des Sonnensystems kommende galaktische kosmische Strahlung abgeschirmt durch eine expandierende Plasmawolke im Gefolge der Flare-Stoßwelle.

At times when the space probe is connected to certain areas on the rotating sun by interplanetary field lines, one observes increases in the intensity of the slow protons by factors between 10 and 100. These increases are called corotating events which

are highlighted in blue. Simultaneously one observes reductions by about 5% in the intensity of the fast protons. Both effects are related to fast solar wind streams corotating with the sun, which are able to accelerate slow protons in their vicinity, but have an additional screening effect on the fast galactic protons. More dramatic are the intensity increases following the solar flares of March 20 and 28, 1976, which are marked red. The same events are seen as well in the intensity of the fast protons, however, with much faster decay time. The flare effect is followed by a decrease of the fast protons by about 25% (yellow), with a delay of 1 or 2 days, which is called Forbush-effect. In this case the galactic cosmic rays from outside the solar system are screened by an expanding plasma-cloud following a flare shock wave.

At times when the space probe is connected to certain areas on the rotating sun by interplanetary field lines, one observes increases in the intensity of the slow protons by factors between 10 and 100. These increases are called corotating events which

gemessen (1 Lichtjahr entspricht 9,5 Billionen km). So ist die Entfernung des Krebsnebels (vgl. Abb. Seite 125) zu uns ca. 2 200 Lichtjahre ( $2 \cdot 10^{16}$  km), die schnellsten dort beschleunigten Teilchen der Kosmischen Strahlung sind also mindestens 2 200 Jahre unterwegs, bis sie durch Meßapparaturen, die von Menschen entwickelt wurden, nachgewiesen werden können.

Gewinde einer Holzschraube wäre die Bahn eines Protons im vorliegenden Magnetfeld einer Schraube mit Linksgewinde vergleichbar, die Bahn eines Elektrons entspräche einer wesentlich dünneren Schraube mit Rechtsgewinde.

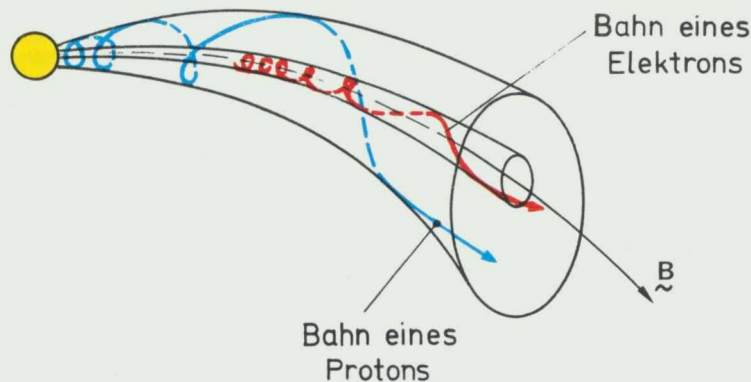
A magnetic field tube originating from the sun has ideally the shape of a cattle horn, with the tip anchored in the solar surface, expanding with solar distance and curved within the equatorial plane of the sun. The trajectory of a charged particle in a

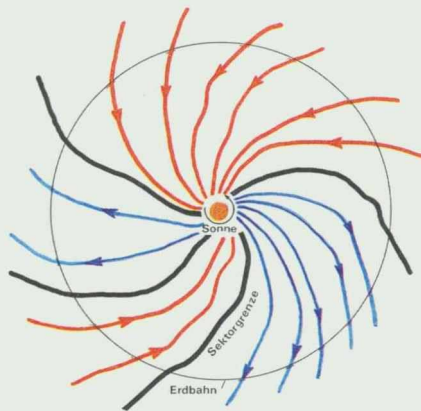
magnetic field is a superposition of a circle around the magnetic field line and a propagation in the direction of the magnetic field. In a diverging field as shown here protons propagate at the surface of the outer, more open horn. The trajectory has the

shape of a gradually opening and steepening spiral, which goes nearly parallel to the magnetic field line in the outer parts of the trajectory. If one compares the trajectory with the thread of a screw, the trajectory of a proton can be compared with the thread of a left-hand-screw, whereas the trajectory of an electron can be compared with a much thinner screw with right-hand-thread.

Eine von der Sonne ausgehende Magnetfeldröhre hat im Idealfall etwa die Form eines Rinderhorns, dessen Spitze in der Sonnenatmosphäre verankert ist und das sich nach außen erweitert, wobei die Krümmung innerhalb der Äquatorebene der Sonne liegt. Die Bahn eines geladenen Teilchens in einem Magnetfeld ergibt sich aus der Überlagerung einer Kreisbahn um die Magnetfeldlinie und einer Bewe-

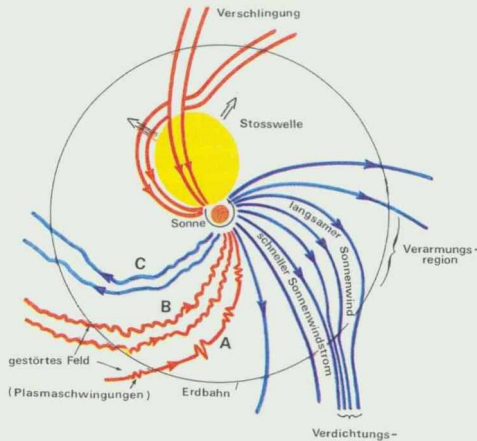
gung in Richtung des Magnetfeldes. Im Falle eines „sich öffnenden“ (divergenten) Magnetfeldes der vorliegenden Form laufen Protonen auf der Oberfläche des äußeren, also weiter geöffneten Hornes um, wobei sich die Umlaufbahn in der Form einer allmählich weiter und steiler werdenden Spirale darstellt, so daß die äußeren Teile der Bahn fast parallel zur Magnetfeldlinie verlaufen. Beim Vergleich mit dem





Der linke Teil der Darstellung zeigt die großräumige Struktur des interplanetaren Magnetfeldes zwischen Sonne und Erdbahn. Die Magnetfelder werden vom Sonnenwind aus der Korona in den interplanetaren Raum bis weit über die Erdbahn hinausgetragen. Da die Fußpunkte der Magnetfeldlinien jedoch weiterhin mit der Sonnenoberfläche verhaftet sind, bewirkt die Rotation der Sonne, daß die Magnetfeldlinien im interplanetaren Raum hinausgezogen werden und die interplanetare Magnetfeldstruktur darstellen, hat die Sonnenkorona selbst eine sehr komplexe Struktur. Einige Bereiche der Sonnenkorona, insbesondere die polaren Regionen, sind zum interplanetaren Raum hin offen und gestatten ein ungehindertes Abfließen von koronalem Plasma. Andere Bereiche der Sonnenkorona, insbesondere in der Nähe des Äquators, sind durch Magnetfeldbögen nahezu vollständig vom interplanetaren Raum abgeschirmt. Aus diesen Bereichen kann kein koronales Plasma ungehindert in den interplanetaren Raum abströmen. Die magnetisch offenen Bereiche werden als

grund der ausrichtenden (fokussierenden) Wirkung des sich aufweitenden Magnetfeldes praktisch parallel zu den Magnetfeldlinien fliegen. Nur sind die Verhältnisse im allgemeinen nicht so ideal, wie sie im linken Bild erscheinen. Im rechten Bild sind deshalb einige Modifikationen der Magnetfeldstruktur dargestellt. Da die solaren Magnetfelder weit in die Korona hinaufreichen, ja sogar in den interplanetaren Raum hinausgezogen werden und die interplanetare Magnetfeldstruktur darstellen, hat die Sonnenkorona selbst eine sehr komplexe Struktur. Einige Bereiche der Sonnenkorona, insbesondere die polaren Regionen, sind zum interplanetaren Raum hin offen und gestatten ein ungehindertes Abfließen von koronalem Plasma. Andere Bereiche der Sonnenkorona, insbesondere in der Nähe des Äquators, sind durch Magnetfeldbögen nahezu vollständig vom interplanetaren Raum abgeschirmt. Aus diesen Bereichen kann kein koronales Plasma ungehindert in den interplanetaren Raum abströmen. Die magnetisch offenen Bereiche werden als



koronale Löcher bezeichnet, da sie auf Bildern von der Sonnenkorona wegen ihrer geringen Plasmadichte nicht leuchten. Koronale Löcher sind Ausgangsgebiete schneller Sonnenwindströme, aus denen das Plasma mit Geschwindigkeiten zwischen 500 und 800 km/s abströmt. Über Bereichen mit geschlossenen Magnetfeldstrukturen ist die Plasmageschwindigkeit ca. 300–400 km/s, also wesentlich langsamer als über koronale Löcher. Auch hier führt die Sonnenrotation zu einer spiralförmigen Krümmung der mit dem Plasma mitgeführten Magnetfelder, die für die Gebiete des langsamen Sonnenwindes eine stärkere Krümmung aufweisen, für den schnellen Sonnenwindstrom jedoch wesentlich weniger gekrümmt sind. Aufgrund der großen Geschwindigkeitsdifferenzen hat das Plasma des schnellen Sonnenwindstromes Plasmapakete mit geringerer Geschwindigkeit bald eingeholt und schiebt sie vor sich her, wodurch Verdichtungsregionen entstehen. Hinter dem langsamen Plasma und vor einem neuen schnellen Sonnenwind tritt dagegen eine

Verarmungsregion auf, in der die Dichte des Plasmas stark zurückgeht. Diese durch den schnellen Sonnenwindstrom hervorgerufenen Strukturen haben einen großen Einfluß auf die Ausbreitung und Beschleunigung von geladenen Teilchen im interplanetaren Raum. Noch verworreneren Strukturen wie Verschlingungen, Knicks in den Magnetfeldlinien oder ähnliches, können als Folge von flareerzeugten interplanetaren Stoßwellen entstehen. Eine Stoßwelle entsteht nach einem Flare, wenn das Plasma mit Geschwindigkeiten von mehr als 1000 km/s, die oberhalb der Schallgeschwindigkeit in dem Plasma liegen, immer mehr langsames Plasma vor sich her schiebt und auf diese Weise, ähnlich einer sich aufsteilenden Wasserwelle in der Brandung, abrupte Sprünge in der Plasmadichte erzeugt. Da die Magnetfelder an das Plasma gekoppelt sind, werden auch sie vor der Stoßwelle hergeschoben und zum Teil stark verbogen und komprimiert. Wesentlich gravierender für die Ausbreitung geladener Teilchen sind Störungen auf den einzelnen Ma-

gnetfeldlinien, die im rechten Bild mit den Buchstaben A, B, C bezeichnet sind. Eine etwa gleichmäßig über die gesamte Länge der Magnetfeldlinie verteilte Störung ist im Fall B dargestellt. Es handelt sich vermutlich dabei um Störungen, die bereits an der Sonne der Magnetfeldlinie aufgeprägt wurden. Da das Magnetfeld aus der Sicht der sich an ihnen orientierenden Teilchen in jedem Augenblick eine etwas andere Richtung zeigt, verlieren die Teilchen schnell die Orientierung und sind nicht in der Lage, der Magnetfeldlinie streng zu folgen. Man spricht in einem solchen Fall von einer Steigungswinkelstreuung, die dazu führt, daß die Teilchen wieder in enger gewendelten Spiralen um die Magnetfeldlinien herumlaufen und nicht, wie im ungestörten Fall, in Erdbahnnähe praktisch parallel zu den Feldlinien fliegen. Der Weg der Teilchen von der Sonne zur Erde wird dadurch wesentlich länger, die Flugzeit größer. Im Gegensatz zu dem gleichmäßig gestörten Feld des Falles B ist im Fall A eine Feldlinie dargestellt, die nur örtlich begrenzte Störungen zeigt, während in den Zwischenbereichen ungestörte Bedingungen vorliegen. Lokale Anregungen von Plasmaschwingungen und Plasmawellen im interplanetaren Raum könnten zu diesen Magnetfeldstrukturen führen. Solche Störungen führen bei der Teilchenausbreitung zu örtlichen Steigungswinkelstreuungen und damit zu einer Entfokussierung (Isotropisierung). Sind die dazwischenliegenden ungestörten Strecken der Magnetfeldlinie hinreichend lang und die Divergenz des Magnetfeldes genügend groß,

so reicht die damit verbundene neue fokussierende Wirkung aus, um in größerer Entfernung keinen Einfluß der Störung auf die Winkelverteilung der Teilchen mehr nachweisen zu können. Im Fall C ist ein relativ wenig gestörtes Magnetfeld dargestellt. Hier haben die Teilchen kaum Schwierigkeiten, dem Magnetfeld zu folgen, die Umwege sind gering, Seitensprünge auf andere Magnetfeldlinien kaum möglich. Messungen im interplanetaren Raum gestatten im Fall C ziemlich genaue Rückschlüsse auf die Vorgänge auf der Sonne, da die Teilchen im interplanetaren Raum nicht wesentlich gestreut werden. Die starken Streuungen in den Fällen A und B führen dazu, daß Teilchen mit gleichen Geschwindigkeiten aufgrund stark unterschiedlicher Wegstrecken über ein großes Zeitintervall verteilt eintreffen. Das ergibt eine zeitliche „Verschmierung“. Auch eine sog. Querdiffusion, also der Sprung eines Teilchens auf eine benachbarte Feldlinie, wird in diesen Fällen häufiger auftreten, wengleich dieser Effekt im interplanetaren Raum eine relativ geringe Rolle spielt.

*The left-hand side of this figure shows the large scale structure of the interplanetary magnetic field between sun and earth. The magnetic fields are carried by the solar wind from the corona into the interplanetary space far beyond the orbit of earth. Since the roots of the magnetic field lines are further fixed to the solar surface, the rotation of the sun results in the spi-*



ral shape of the interplanetary magnetic field lines. In the plane of the solar equator the magnetic field shows a marked sector structure, which is extended into the plane of the ecliptic as well. Regions with magnetic fields predominantly pointing towards the sun (red) alter with regions of opposite direction (blue).

Along these structures the particles of the cosmic radiation propagate on spiral-shaped trajectories as shown in fig. page 131. As long as the magnetic field lines are smooth, as shown in the left figure, particles will propagate from the sun practically parallel to the field lines due to the focussing effect of the diverging magnetic field.

The right figure shows some modifications to the ideal magnetic field structure, which was presented on the left side. The interplanetary structure depends strongly on the coronal magnetic fields. Parts of the solar corona, especially the polar regions, are open to interplanetary space and enable an unrestrained outflow of coronal plasma. Other areas, especially close to the solar equator, are nearly completely screened from the interplanetary space by magnetic field loops.

From these regions coronal plasma has difficulties to get into interplanetary space. Open areas are called coronal holes, they are the regions of origin of fast solar wind streams, which have plasma velocities between 500 and 800 km/s.

Outside of regions with closed magnetic field structures the plasma velocity is about 300–400 km/s, much slower

than above coronal holes. Again the solar rotation results in spiral-shaped magnetic field lines, more curved, however, than for fast solar wind streams. Due to the large velocity difference, the plasma from the fast solar wind streams soon catches up with the plasma from the slow solar wind regions driving the particles in front of it, and thus generating compression regions. At the opposite side of a fast solar wind stream a rarefaction region builds up, in which the plasma density is strongly reduced. These structures are generated by the fast solar wind streams and have strong influence on the propagation and acceleration of charged particles in the interplanetary space. More complex structures as knots or kinks in the magnetic field lines can result from flare-originated interplanetary shocks. A shock develops after a flare, when the plasma propagates with more than 1,000 km/s and pushes more and more slow solar wind plasma in front of it. The density gradient steepens and finally changes abruptly. Similarly the magnetic fields are compressed and strongly bent. Much more important for the propagation of charged particles are disturbances on the individual magnetic field lines, as shown in the right figure with letters A, B and C. Case B shows a disturbance which is equally distributed along the total length of the magnetic field line. These disturbances are imprinted on the field line at the surface of the sun. Since the magnetic field as viewed from the particles shows slightly differ-

ent directions from one moment to the next, the charged particles lose their orientation and are not able to follow the magnetic field line completely. The result is a pitch angle scattering, which has the effect that the particle trajectories start again with narrow spirals around the magnetic field lines instead of parallel movement along the magnetic field. The total path length of the particles from the sun to earth will be much longer, the flight time larger.

In contrast to the equally disturbed field of case B, case A shows a field line which is only locally disturbed. Between local disturbances the field line is smooth. Local stimulation of plasma waves in the interplanetary space results in such magnetic field structures. The disturbances produce again pitch angle scattering and defocussing. If the intermittent undisturbed distance is long enough and the divergence of the magnetic field large, the focussing effect is high enough to demask the effect of the disturbance.

Case C shows the relatively undisturbed magnetic field. Particles have no difficulty in following the magnetic field, deviations are small and crossjumps to other magnetic field lines nearly impossible. Measurements in the interplanetary space enable relatively accurate observation of effects on the sun, because the particles are not noticeably scattered in interplanetary space. The strong scattering in the cases A and B results in a smoothing out of particles with equal velocities over a larger time interval. Perpendicular diffusion as a result of the

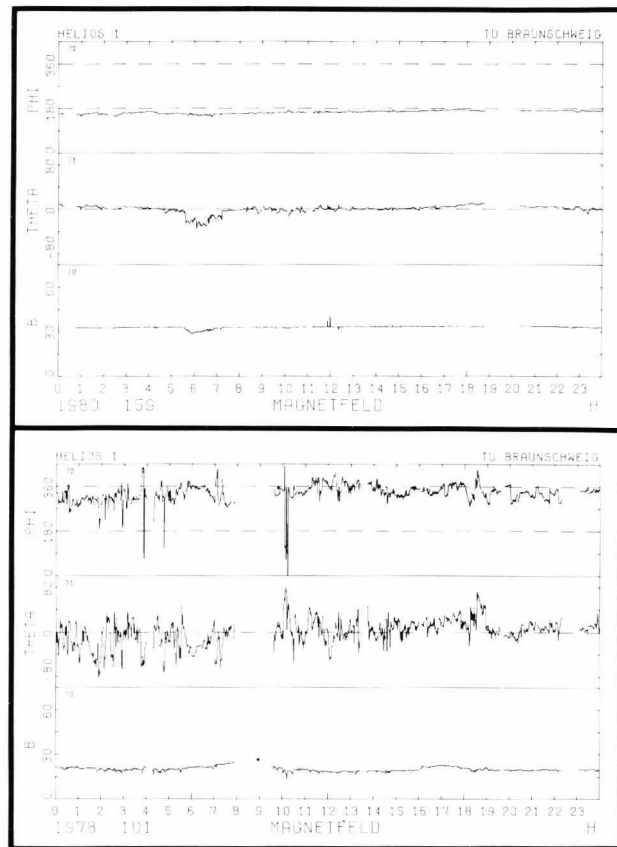
jump of one particle to a neighbouring field line may be more often observed in these cases, although this effect is generally not very dominant in interplanetary space.

Zur Veranschaulichung gestörter und ungestörter Verhältnisse im interplanetaren Raum wird das von HELIOS mit dem Instrument der Technischen Universität Braunschweig gemessene Magnetfeld dargestellt. Die drei zusammengehörenden Kurven geben den Betrag des Magnetfeldes (B) sowie zwei Winkel für die Ma-

gnetfeldrichtung senkrecht zur Ebene der Ekliptik ( $\Theta$ ) und in der Ebene der Ekliptik ( $\Phi$ ) an. Das obere Bild zeigt die Verhältnisse am 7. Juni 1980, einem Tag mit sehr wenig gestörtem Magnetfeld, wie es etwa dem Fall C in der vorigen Abbildung entspricht. Im unteren Teil ist das Magnetfeld für den 11. April 1978 dargestellt, an dem die Richtung ganz erheblichen Schwankungen ausgesetzt ist. Hier haben wir es mit einem stark gestörtem Magnetfeld zu tun, etwa vergleichbar mit dem in Fall B dargestellten Verhalten.

The magnetic field as measured by the instrument of the Technical University of Braunschweig

demonstrates disturbed and undisturbed conditions in the interplanetary space. The three related curves show the magnitude of the magnetic field (B) and two angles for the direction of the magnetic field perpendicular to the plane of the ecliptic ( $\Theta$ ) and within the plane of the ecliptic ( $\Phi$ ). The upper panel shows the conditions on June 7, 1980, which was a day with very little disturbance as shown in case C in the previous figure. The lower panel shows the magnetic field for April 11, 1978, a day when the direction shows tremendous variations. This is illustrated in case B where the magnetic field is strongly disturbed.



Die Darstellung des interplanetaren Magnetfeldes läßt bereits vermuten, daß die Teilchen der Kosmischen Strahlung im interplanetaren Raum je nach Störungszustand des Führungsfeldes recht unterschiedliche Ausbreitungsbedingungen vorfinden. Da das Instrument die Einfallrichtung jedes einzelnen Teilchens auf  $45^\circ$  genau bestimmt, lassen sich Winkelverteilungen ermitteln, die den Zustand des interplanetaren Raumes geben können. Man kann also die Teilchen der Kosmischen Strahlung als Sonden für den interplanetaren Raum benutzen und auf diese Weise Aufschluß über Bereiche des Raumes gewinnen, ohne direkt dorthin fliegen zu müssen. Anhand des solaren Flare-Ereignisses vom 28. März 1976 ist eine solche Auswertung

von uns vorgenommen worden, die zu dem hier dargestellten Ergebnis führt: Die lokalen Ausbreitungsbedingungen im interplanetaren Raum werden dargestellt durch die sog. „freie Weglänge“ eines Teilchens. Diese Bezeichnung ist aus der Physik der Gase bekannt und gibt an, wie weit sich ein Teilchen bewegen kann, ehe es durch einen Stoß aus seiner ursprünglichen Bahn geworfen wird. In einer dem täglichen Leben entnommenen Veranschaulichung wird von „drunkards walk“, d. h. dem Gang eines Betrunkenen gesprochen. Wesentliches Merkmal hierbei ist, daß nach wenigen Schritten die Orientierung über die ursprüngliche Richtung verloren gegangen ist und der Weg in eine willkürliche Richtung fortgesetzt wird. Die freie Weglänge ist ein Maß für die

zwischen zwei Änderungen der Hauptbewegungsrichtung zurückgelegte Strecken. Je größer die freie Weglänge ist, desto geringer ist die Streuung und um so schneller kann die Ausbreitung erfolgen. Eine ähnliche Maßeinheit ist auch hier eingeführt worden. Die freie Weglänge für die Ausbreitung parallel zu den Magnetfeldlinien schwankt zwischen 0,3 AE und 5 AE. Im oberen Teil des Bildes sind die freien Weglängen als Funktion des Abstandes von der Sonne (radial bzw. entlang der Magnetfeldspirale) dargestellt. Elektronen und Protonen haben relativ große freie Weglängen in der Nähe der Sonne bis zum Meßort von HELIOS bei 0,5 AE. Hinter HELIOS beginnt jedoch sofort ein Gebiet starker Streuung, wodurch die freie Weglänge um fast eine Größenord-

nung sinkt. Bei einem Abstand von 1,4 AE ist die freie Weglänge fast wieder so groß wie in der Nähe der Sonne, um dann mehr oder weniger stark anzusteigen. Wir haben es hier sicher mit einer Struktur im interplanetaren Raum zu tun, die nicht allgemeine Gültigkeit hat. Zur Zeit der Messung am 28. März 1976 jedoch wurde eine Struktur des interplanetaren Raumes beobachtet, die im unteren Teil des Bildes graphisch veranschaulicht werden soll.

Der Schwärzungsgrad ist ein Maß für die Dichte der Streuzentren. Dunklere Schattierung bedeutet eine höhere Dichte von Streuzentren, für die Teilchen also geringere freie Weglängen. Im inneren Bereich ist die Dichte der Streuzentren gering, die freie Weglänge also groß. Auf der der Sonne abgewandten Seite von HELIOS beginnt bald ein Bereich wesentlich stärkerer Streuung, der zu stark verringerten mittleren freien Weglängen führt. Die Dichte der Streuzentren nimmt nach außen hin allmählich wieder ab.

Bei der Darstellung wurde vereinfachend angenommen, daß der interplanetare Raum um die Sonne herum kugelsymmetrisch aufgebaut ist. Tatsächlich gibt es viele Hinweise dafür, daß dies nicht immer der Fall ist. Die Auswertung der Teilchendaten gibt auch nur Aufschluß über den interplanetaren Raum entlang der Magnetfeldlinie, die durch die Raumsonde geht.

*The sketch of the interplanetary magnetic field suggests that particles of the cosmic radiation envisage different propagation conditions in interplanetary space depending on the degree of disturbance of the guiding field. The instrument measures with an accuracy of  $45^\circ$  the angular distribution of the particles, which contains information on the conditions of the interplanetary space. The cosmic ray particles are used as probes for the interplanetary space under these circumstances.*

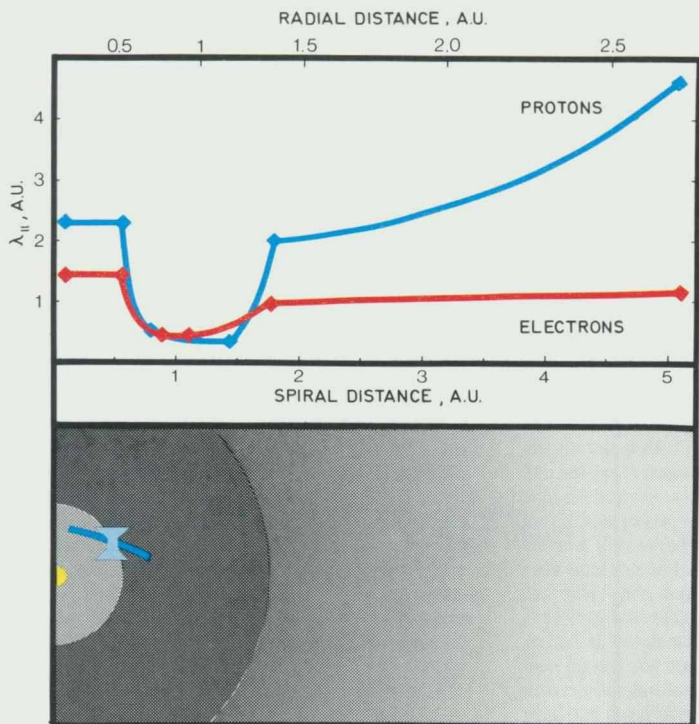
*The solar flare event of March 28, 1976, has been analysed to determine the conditions in the interplanetary space: The local propagation conditions are described by the so-called mean free path of a particle. This parameter is known from the physics of gases and describes, how far a particle can move before its trajectory is deviated by a collision. The total trajectory can be compared to the "drunkards walk". It is important to know that after a few collisions the remembrance of the original direction is lost so that the way is continued in an arbitrary direction. The free path length measures the distance between two changes of the main direction. Larger mean free path length corresponds to smaller scattering and faster propagation.*

*A similar parameter is used here. The free path length for the propagation parallel to the magnetic field lines changes between 0.3 AU and 5 AU. The upper panel shows the free path length as function of solar distance. Electrons and protons have relatively large free*

*path lengths in the vicinity of the sun. As soon as they have passed HELIOS at 0.5 AU a region of strong scattering starts which decreases the free path length by nearly one order of magnitude. At 1.4 AU the free path length is nearly as high as in the vicinity of the sun and starts to increase beyond. This structure in the interplanetary space is probably not of general validity. At the time of these measurements, however, the structure in interplanetary space has been observed, which is illustrated graphically in the lower panel. The degree of blackening describes the concentration of scattering centers.*

*Darker shadowing is equivalent to higher concentration of scattering centers which results in lower free path length for the particles. In the inner part the concentration of scattering centers is small, the free path length large. Scattering is high beyond HELIOS, which results in a strongly decreased mean free path length. The density of scattering centers decreases again with increasing solar distance.*

*This illustration assumes for simplicity that the interplanetary space around the sun is spherically symmetric. A large number of measurements show that this is not always the case. The evaluation of the particle data can only give information on the condition of the interplanetary space along the magnetic field line which passes the space-probe.*



Während über die Ausbreitung der Kosmischen Strahlung im interstellaren Raum nur sehr indirekte Informationen verfügbar sind, läßt sich die Ausbreitung im interplanetaren Raum wesentlich genauer studieren. Es wird sich zeigen, daß die Ausbreitungsbedingungen die Eigenschaften der Kosmischen Strahlung stark beeinflussen, so daß dieser Einfluß immer zuerst abgeschätzt werden muß, ehe Aussagen über die Quellen der Kosmischen Strahlung gemacht werden können.

## Geburtsstätten Kosmischer Strahlung

### Solare Flares – Energiestrotzende Kurzatmigkeit

In der Heliosphäre sind an den verschiedensten Orten Beschleunigungsprozesse für die kosmische Strahlung zu beobachten. Besonders spektakulär und von vielerlei Nebenwirkungen begleitet ist die Beschleunigung im Zusammenhang mit solaren Flares. Gewaltige Explosionen in der

Die Sonnenaktivität und damit die solare kosmische Strahlung ist bedingt durch das Auftreten von Sonnenflecken in elfjährigem Zyklus. Die Ansichten über den Ablauf der physikalischen Prozesse bei einer chromosphärischen Eruption (Flare) sind höchst kontrovers. Im einzelnen geht es um die Erzeugung, Speicherung und Freisetzung von Energie, wobei sich die Frage nach den Ursachen sowie dem Ort in der Sonnenatmosphäre stellt, wo diese Prozesse ablaufen. Voraussetzung sind in jedem Fall komplexe magnetische Strukturen an der Sonnenoberfläche. Das Bild zeigt eine der Modellvorstellungen (schematisch) im Zusammenhang mit einer Gruppe von Sonnenflecken (N, S) verschiedener Polarität. Durch Bewegungen im Sonneninnern werden die beiden Sonnenflecken N und S des inneren Fleckenpaares aufeinander zu-

getrieben. Dabei nähern sich die entgegengesetzt gerichteten Feldlinien in dem rot gezeichneten Bereich einander an. Mit dieser magnetischen Kompression ist eine Speicherung von Energie verbunden. Dies geht solange, bis es zu einer blitzartigen Entladung kommt (1). Dabei wird das Medium aufgeheizt, es treten ferner elektrische Felder auf, die zu einer Beschleunigung geladener Teilchen führen. Diese Teilchen, Elektronen und Nukleonen, verlassen das Kompressionsgebiet in beiden Richtungen. Die auf die dichten Schichten der Sonnenatmosphäre zulaufenden Teilchen (2) geben ihre Energie durch Aufheizung und Ionisation der Materie ab, erzeugen aber auch Röntgenstrahlung (X) im Falle der Elektronen und Gammastrahlung (Y) im Falle der Protonen und schwereren chemischen Elemente. Die entweichenden Teilchen (3), soweit sie auf offene

(see fig. page 125 ) is about 2,200 light years ( $2 \cdot 10^{16}$  km), the fastest cosmic ray particles need 2,200 years.

Only in interplanetary space can the propagation be studied in detail. Propagating conditions influence strongly the properties of the cosmic radiation. It is necessary to calculate this influence before drawing conclusions on the source of the cosmic radiation.

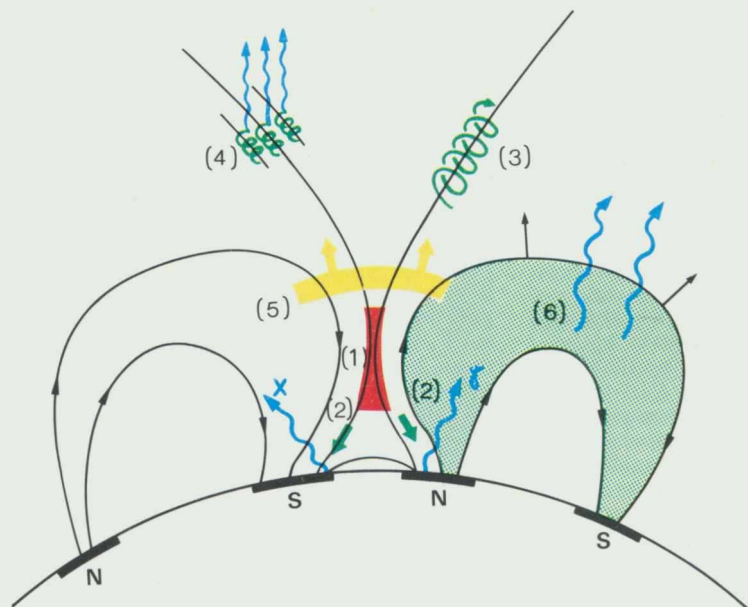
At many different locations in the heliosphere we can observe acceleration processes of cosmic

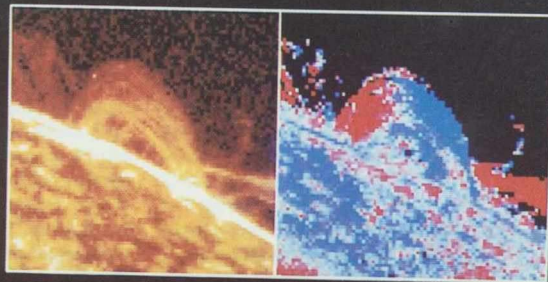
Feldlinien gelangen, sehen wir weiter außen als solare Kosmische Strahlung. Durch schnelle Elektronen werden dabei Radiobursts (Typ III) erzeugt (4). Als Folge der abrupten Aufheizung bildet sich eine Stoßwelle (5) aus, die, abhängig von ihrer Geschwindigkeit und vom Ort des Beobachters, nach ein bis vier Tagen im interplanetaren Raum beobachtet wird. Ein Teil der beschleunigten Teilchen wird in Bereichen geschlossener Magnetfeldbögen (grün gepunktet) gespeichert und bildet ein Reservoir für energiereiche Teilchen, die noch viele Stunden nach dem Sonnenausbruch die Korona verlassen können. Falls es sich dabei um Elektronen handelt, kann wiederum Radiostrahlung (Typ IV) erzeugt werden (6). Mit dieser Szenerie ist einer der Untersuchungsgegenstände von HELIOS angedeutet: Prozesse der Beschleunigung, Speicherung und Ausbreitung energiereicher geladener Teilchen solaren Ursprungs. Wichtig ist dabei u. a. die Korrelation mit Beobachtungen der Sonne im Bereich der elektromagnetischen Strahlung. Die folgenden Bilder sind Beispiele dafür.

The solar activity and the solar cosmic rays are related to the appearance of sunspots in the 11-year cycle. Controversial views exist on the sequence of physical processes during a chromospheric eruption (flare). Processes involved are in particular generation, storage, and release of energy and the question is, where in the solar atmosphere are these processes located. Complex magnetic field structures at the solar surface are essential. The figure shows

a simplified model which works in connection with a group of sunspots (N, S) of different polarity. Due to movements in the inner part of the sun the two sunspots N and S of the inner spotpair are moved towards each other. The field lines of opposite direction approach each other in the red region. Energy is stored as a consequence of the magnetic compression, as long as a flash-like discharge happens (1). The medium is heated, electric fields appear which result in an acceleration of charged particles. These particles, electrons, and nuclei leave the compression region in both directions. Particles moving towards the denser regions of the solar atmosphere (2) lose their energy by heating and ionization of atmospheric matter and generate X-rays (X) in the case of electrons and gamma-rays ( $\gamma$ ) in the case of protons and heavier nuclei. Other particles escape (3) if they reach open field

lines. These are observed as cosmic rays in interplanetary space. During their escape fast electrons will generate type III radiobursts (4). In consequence of the abrupt heating a shock wave is generated, which can be observed in interplanetary space a few days later. One part of the accelerated particles will be stored in closed magnetic field loops (green dotted). This is a reservoir for energetic particles which can still leave the solar corona after several hours. Electrons within this magnetic bubble will generate type IV radiation (6). This scenario sketches one of the research topics of HELIOS: Processes of acceleration, storage, and propagation of energetic charged particles of solar origin. It is important to correlate these with observations of the sun in the range of electromagnetic radiation. The following figures are examples.





Intensity

"Velocity"

Expt. 771 March 27, 1980 10:42 UT

C IV 1548.19 Angstroms

UVSP - SMM

Die Solar-Maximum-Mission hat sich zur Aufgabe gemacht, mit Hilfe von hochauflösenden Instrumenten im Bereich der UV-, Röntgen- und Gammastrahlung solare Flares und ihre Folgeerscheinungen genauer zu untersuchen. Abbildung a wurde mit einem UV-Spektrometer und Polarimeter-Instrument aufgenommen und zeigt im Licht des dreifach ionisierten Kohlenstoffs einen plasma-geladenen Magnetfeldbogen in der Abklingphase eines solaren Flares. Während der Blitzphase des Flares führte die erste starke Energieabgabe dazu, daß 10.000.000 K heiße Materie sich ausdehnte, aufstieg und die Magnetfeldbögen füllte. Die Abb. b ist ein sog. Dopplergamm, das entsteht, wenn man die Aufnahmen im Licht der einen Seite einer Spektrallinie von einer anderen Aufnahme im Licht der anderen Seite der Spektrallinie subtrahiert. Gasbewegungen auf den Beob-

achter zu verschieben die Intensität zu kürzeren Wellenlängen während Bewegungen von dem Beobachter fort die Maximalintensität zu längeren Wellenlängen verschieben. Das Ergebnis der Subtraktion ist so dargestellt, daß blaue Gebiete eine Bewegung auf den Beobachter zu symbolisieren und rote Gebiete eine entgegengesetzte Bewegung andeuten. Zum Verständnis muß noch gesagt werden, daß der rechte Fußpunkt der Magnetfeldlinien dem Beobachter näher liegt als der linke Punkt. Die blaue Farbe in der rechten Hälfte des Bogens und die rote Farbe in der linken Hälfte zeigen also, daß die Materie vom Gipfel des Magnetfeldbogens fort nach beiden Richtungen auf die Fußpunkte zuströmt. In diesen Bildern ist also die Bewegung von Plasma direkt sichtbar gemacht worden auf Bahnen, die Minuten vorher von energiereichen Teilchen, die bei dem Flare beschleunigt wur-

den, ebenfalls eingeschlagen wurden. Ein anderer Teil der energiereichen Teilchen jedoch ist vermutlich während der eruptiven Phase des Flares auch in Richtung auf den interplanetaren Raum beschleunigt worden und hat mittlerweile die Sonnenatmosphäre verlassen. Der Teil jedoch, der sich auf die Photosphäre zubewegt, hätte zu einem Bild führen können, wie es Abb. c für einen anderen Flare zeigt: Die Spektrometerkamera für harte Röntgenstrahlen der Solar-Maximum-Mission zeigt ein Bild der Fußpunkte der Magnetfeldbögen im Lichte der Röntgenstrahlung. Die Punkte auf der Sonnenoberfläche, von denen die Magnetfeldbögen ausgehen, sind im Lichte der Röntgenstrahlung am hellsten (weiß), während das heiße Plasma in den Magnetfeldbögen im Lichte energieärmerer Röntgenstrahlung glüht, was durch die Farben blau, rot, gelb und grün dargestellt ist.

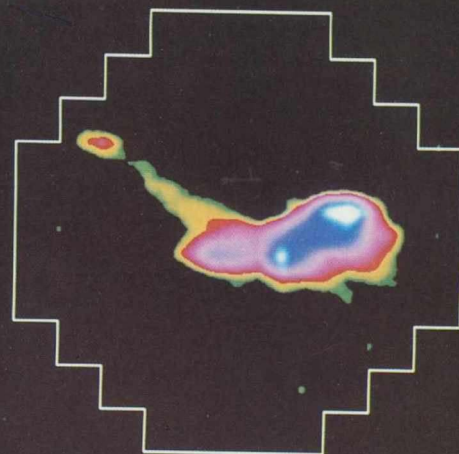


IMAGE 156 TO 156  
TIME: 310:22:33: 6 ACCUM: 4.500 FROM: 16.00 TO 30.00KEY

The task of the solar maximum mission is to investigate solar flares and related phenomena using high resolution instruments in the range of UV-, X-ray-, and gamma-radiation. Figure a has been taken with a UV-spectrometer and polarimeter instrument and shows a magnetic field loop in the light of the triple ionized carbon during the decay phase of a solar flare which is filled with plasma. The high energy release during the flash phase of the flare causes the 10,000,000 K material to expand and rise, filling the loops. Figure b is called a dopplergamm. It was formed by subtracting the image taken in one half of the spectrum line from that taken in the other half. Motions of gas towards an observer shifts the intensity to shorter wave lengths and away from the observer to longer wave lengths. The result is shown with blue areas

moving towards us and red areas away. Since the right hand footpoint is nearer to us the image shows that material is draining down the loop on both sides. These images show directly the movement of plasma on tracks which have been used by energetic particles, accelerated by the flare, only a few minutes before. Presumably another part of the energetic particles has been accelerated during the eruptive phase of the flare towards the interplanetary space and has meanwhile left the solar atmosphere. However, the part which streams into the photosphere could have caused an image as shown in figure c for another flare: The hard-X-ray imaging spectrometer of the Solar Maximum Mission shows an image of the flare-loop footpoints in the light of the X-rays. The points at which the magnetic loops emerge from the solar surface are the brightest in the high

energy X-rays (white) while the hot plasma in the magnetic loops glows in low energy X-rays (blue, red, yellow, and green).

Sonnenatmosphäre setzen unvorstellbare Energien innerhalb von wenigen Minuten frei. Große Mengen von Teilchen werden bis zu Geschwindigkeiten beschleunigt, die der Lichtgeschwindigkeit recht nahe kommen. Flares sind die wirksamsten Beschleunigungsprozesse im Sonnensystem, sie erreichen die höchsten Energien und größten Intensitäten. Sehr große Flareereignisse sind jedoch relativ selten. Besonders zu Zeiten des solaren Minimums gibt es oft Perioden, in denen über lange Zeit keine flareerzeugten Teilchen beobachtbar sind.

*rays. The acceleration in connection with solar flares is especially spectacular and accompanied by many secondary effects. Within a few minutes huge explosions in the solar atmosphere can release phantastic energies. Large quantities of particles are accelerated to velocities close to the velocity of light. Flares are the most effective acceleration processes in the solar system, they reach the highest energies and largest intensities. However, very large*

Am 11. April 1978 wurde um 14.10 Uhr auf der westlichen Hemisphäre der Sonne ein Flare beobachtet. Die Raumsonden HELIOS 1 und HELIOS 2 befanden sich in nahezu gleichem Abstand von der Sonne bei 0,5 AE, jedoch war der Winkelabstand zum Flareort von HELIOS 1 mit 90° wesentlich größer als von HELIOS 2 (die geometrischen Verhältnisse sind in der Skizze in der oberen rechten Bildecke angedeutet). Beide Raumsonden haben Elektronen und Protonen beobachtet, die bei diesem Flare beschleunigt wurden. Der Intensitätsverlauf über der Zeit weist jedoch deutliche Unterschiede auf, so daß hieran beispielhaft das Studium solarer Ereignisse mit HELIOS 1 und HELIOS 2 dargestellt werden kann. Dargestellt ist die Meßgröße Intensität als Maß für die Anzahlen von Teilchen über einen Zeitraum von

vier Tagen. Den vier Intensitätsprofilen gemeinsam ist das langsame Abklingen der Intensität nach dem Maximum, das auf eine Speicherung von Teilchen im interplanetaren Raum zurückzuführen ist. Dieses Abklingverhalten ist für die beiden untersuchten Teilchensorten und für beide Raumfahrzeuge nicht sehr verschieden. Bereits in Abb. Seite 134 wurde ein Beispiel dafür gegeben, daß im interplanetaren Raum bestimmte Bereiche die Teilchen kräftig streuen können. Die freie Weglänge wird dabei so stark herabgesetzt, daß sich die Teilchen im Mittel nur sehr langsam fortbewegen, viele Teilchen sogar auch wieder zurückgestreut werden. Befindet sich ein Raumfahrzeug innerhalb eines Gebietes starker Streuung, erscheinen die Teilchen über längere Zeit in diesem Gebiet gespeichert bei nur geringer Leckrate.

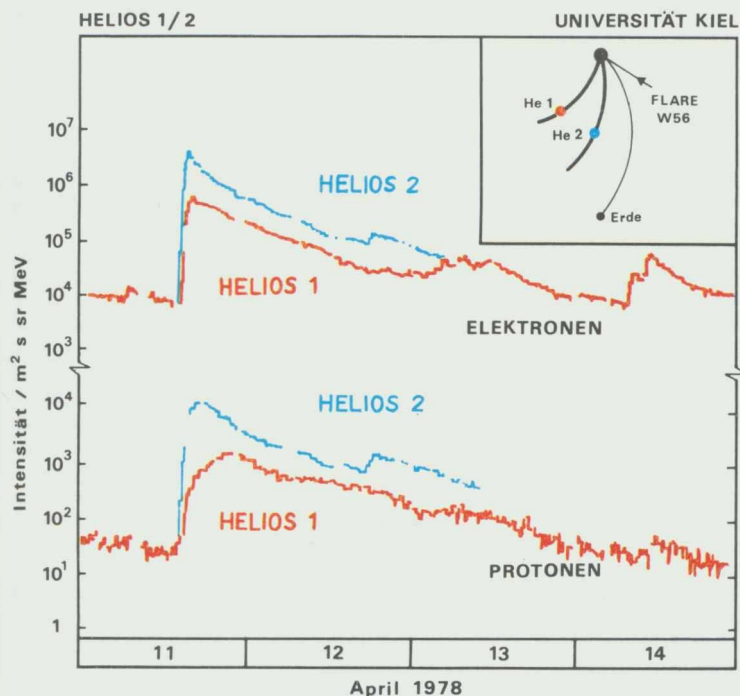
Für beide Teilchenarten beobachtet HELIOS 1 wesentlich geringere absolute Intensitäten, d. h. es werden weit weniger Teilchen gemessen. Darüber hinaus verläuft der Verlauf der Protonenintensität, daß die Anstiegszeit wesentlich größer ist, so daß das Maximum erheblich später auftritt. Diese Effekte sind auf die Ausbreitung in der Korona der Sonne zurückzuführen. Ausgehend vom Flareort breiten sich die beschleunigten Teilchen über größere Bereiche der Sonnenoberfläche aus, so daß die am Fußpunkt der Feldlinie eintreffende Teilchenzahl mit zunehmendem Flareabstand geringer wird. Zumindest für die Protonen gilt, daß sie länger brauchen, um in der Sonnenkorona den Weg vom Flareort zum Fuß-

punkt der Feldlinie von HELIOS 1 zurückzulegen, als bis zu HELIOS 2. Eines der ungeklärten Phänomene ist die schnelle Ausbreitung der Elektronen im Vergleich zu den Protonen. Ganz allgemein wird ein Intensitätsverlauf über der Zeit für solare Ereignisse beeinflusst durch Effekte der interplanetaren und der koronalen Ausbreitung. Um diese Effekte voneinander zu trennen und Rückschlüsse auf die Ausbreitung in der Korona und im interplanetaren Raum ziehen zu können, ist ein gutes Verständnis der Teilchenbewegung in komplexen Magnetfeldern erforderlich.

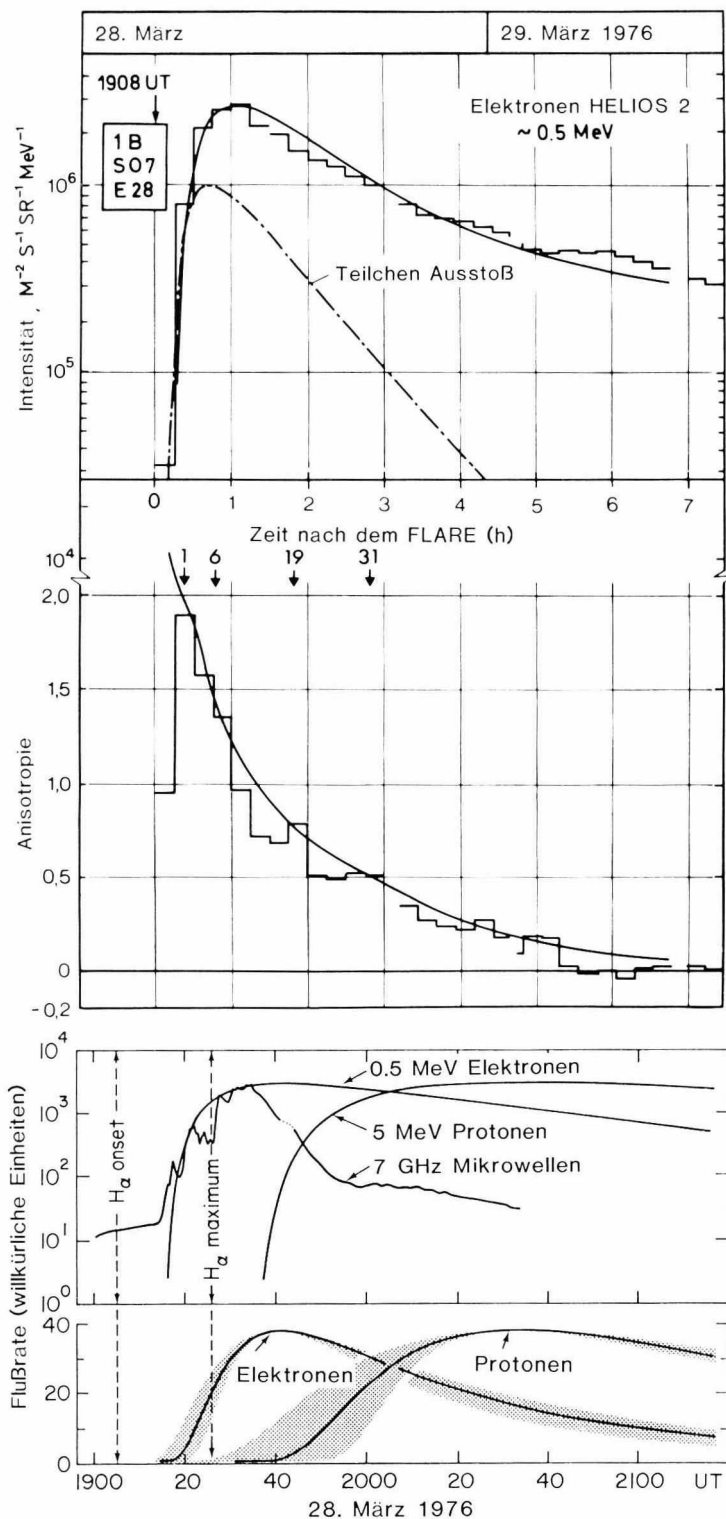
*solar events with HELIOS 1 and 2 using this example.*

*Shown is the intensity versus time for four days. All four intensity time profiles show a common slow decay of the intensity following the maximum. This is a result of a storage of particles in interplanetary space. The decay phase is not much different for both particle species and for both spacecraft. Already figure page 134 showed an example for strong interplanetary scattering. The mean free path is strongly reduced allowing only a slow net propagation of the particles, many of them are even scattered backward. If a spacecraft is situated within a region of strong scattering, particles seem to be stored over longer times with low leakage.*

*Both particle species show much lower absolute intensities at the location of HELIOS 1. Furthermore, the proton profile shows that the rise time is much larger resulting in a much later maximum. These effects result from the propagation within the solar corona. Particles propagate over larger areas of the solar surface. This results in lower particle numbers and delayed arrival at the footpoint of the field line of HELIOS 1 with respect to HELIOS 2. Still unexplained is the phenomenon of the fast propagation of electrons as compared to protons. In general the intensity profile for solar events is affected by both interplanetary and coronal propagation. To separate these two effects it is necessary to have good knowledge of the particle propagation in complex magnetic fields.*



*On April 11, 1978, at 14:10 UT a flare was observed at the western hemisphere of the sun. The spaceprobes HELIOS 1 and 2 were situated about 0.5 AU from the sun. However, the angular distance to the flare location for HELIOS 1 was 90°, which was much larger than for HELIOS 2. (The constellation is described in the insert of the figure.) Both spaceprobes observed electrons and protons accelerated by this flare. The time intensity dependence, however, shows remarkable differences which enable us to explain the investigations of*



Die Entwicklung von Modellvorstellungen zur Teilchenausbreitung dient der detaillierten Analyse solarer Ereignisse und ist seit vielen Jahren eine Spezialität der Kieler Arbeitsgruppe. Die ausgezogenen Kurven zeigen eine theoretische Beschreibung der Meßgrößen (Treppenkurven) Intensität (ein Maß für die Anzahlen von Teilchen) und Anisotropie (ein Maß für die bevorzugte Strömungsrichtung) nach einem um 19.08 Uhr auf der Sonne am 28. März 1976 aufgetretenen Flare. Es ist gelungen, die Effekte der Teilchenstreuung im interplanetaren Raum abzutrennen von der Injektion der Teilchen in Sonnennähe, die durch die strichpunktierte Kurve dargestellt wird. Daß man auf die Injektionsvorgänge in Sonnennähe in dieser Weise Schlüsse ziehen kann, ist ein entscheidender Vorteil der HELIOS-Mission. Wenn HELIOS die sonnennahen Bereiche seiner Bahn durchläuft, sind die Einflüsse der interplanetaren Streuung auf die Messungen erheblich geringer als bei Messungen von der Erde aus. Ferner scheint, wie am Beispiel von Abb. Seite 134 zu sehen, innerhalb von etwa 0,5 AE ein Bereich zu existieren, in dem das interplanetare Magnetfeld bis zur Sonne hin gelegentlich ungewöhnlich glatt sein kann.

*The development of models for the propagation of particles, which is necessary for a detailed analysis of solar events, is a speciality of the Kiel group since many years. The solid curves are the result of a theoretical description of the measured parameters (stepped curves) intensity and*

*anisotropy as measured after a flare at 19:08 UT on March 28, 1976. We succeeded in separating the effects of particle scattering in interplanetary space from the injection of particles near the sun which is described by the dash-dotted curve. It is one of the main benefits of the HELIOS-mission that it is possible to draw conclusions on the injection at the sun. If HELIOS is in the near sun regions of its trajectory, the influences of interplanetary scattering on the measurements are much lower than for measurements in the vicinity of the earth. In addition the interplanetary magnetic field seems to be occasionally unusually smooth within 0.5 AU as shown in figure page 134.*

Ein Vergleich der Injektionen von Elektronen und Protonen, die bei dem Ereignis von Abb. Seite 138 oben in der Umgebung der Sonne ins interplanetare Medium injiziert wurden, zeigt zwei überraschende Ergebnisse. Zum einen verlassen die ersten Elektronen unmittelbar nach ihrer Beschleunigung die Sonne (ein Maß für den zeitlichen Verlauf der Beschleunigung ist das Auftreten der mit „7 GHz Mikrowellen“ bezeichneten Radiostrahlung im oberen Teil des Bildes). Das ist bemerkenswert, weil HELIOS zum Zeitpunkt der Messung über magnetische Feldlinien mit einem Bereich auf der Sonne ver-

bunden ist, der etwa 60° in solarer Länge vom Flareort entfernt ist. Es ist bisher völlig ungeklärt, wie die beschleunigten Elektronen es schaffen, so schnell diese große Entfernung quer zu den mittleren Feldlinien zurückzulegen. Die Protonen dagegen lassen sich mehr Zeit, sie verlassen die Sonnenumgebung erst 20 Minuten später und werden offenbar auch für längere Zeit in der Sonnenumgebung gespeichert. Qualitativ wurde auf diesen Unterschied im Verhalten von Elektronen und Protonen schon bei Abb. Seite 137 hingewiesen.

*The comparison of the injection of electrons and protons as released from the sun into interplanetary space at the event discussed in figure page 138 shows two surprising results: The fast electrons leave the sun immediately after their acceleration. (The time dependence of the acceleration can be deduced from the radio radiation described by "7 GHz microwaves" in the upper panel). This is remarkable since HELIOS is connected via magnetic field lines with regions on the sun which are about 60° apart from the flare location. It is up to now unexplained how the accelerated electrons manage to pass these distances perpendicular to the mean magnetic field lines. The protons, however, need more time. They leave the sun only 20 minutes later and are stored in the vicinity of the sun for a longer time. This different dependence of electrons and protons was already shown qualitatively in figure page 137.*

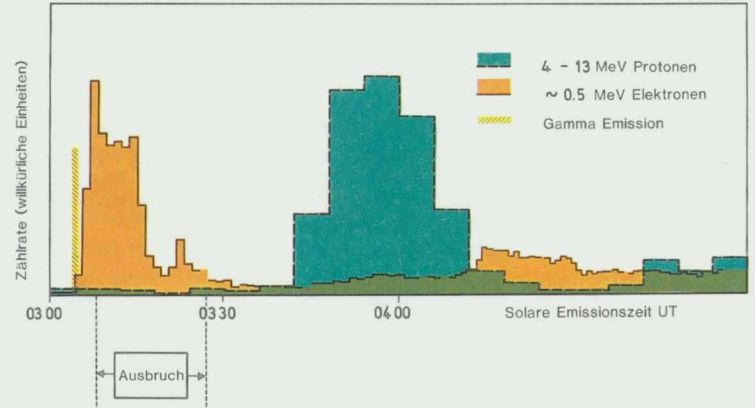
Das unterschiedliche Verhalten von Elektronen und Protonen und ihre Beziehung zum Beschleunigungsprozeß auf der Sonne konnte besonders gut bei dem Ereignis vom 7. Juni 1980 untersucht werden, bei dem sich HELIOS 1 innerhalb der ungewöhnlich ruhigen Magnetfeldstruktur befand, die in Abb. Seite 133 im oberen Teil dargestellt war. Das Magnetfeld war so glatt, daß die Teilchenbahnen das ideale Verhalten von Abb. Seite 131 unten zeigten und entlang des Magnetfeldes aus Richtung von der Sonne direkt auf den Beobachter zuliefen, und zwar in der zeitlichen Folge, wie sie an der Sonne injiziert wurden, verzögert um die Laufzeit entlang des Feldes. Auf der Sonne wurde – unter Berücksichtigung der Laufzeit des Lichts – um 03.04 Uhr ein kurzer Blitz von Röntgen- und Gammastrahlung registriert, ein Zeichen dafür, daß unmittelbar vorher die Beschleunigung von Elektronen und Protonen stattgefunden haben muß (vgl. Abb. Seite 135). Elektronen (orange) verlassen die Sonne praktisch gleichzeitig mit dem Auftreten der hochenergetischen Lichtquanten, werden allerdings auch noch lange danach in das interplanetare Medium injiziert. Die Protonen (grün) verlassen die Sonne jedoch erst etwa 40 Minuten später. Das ist überraschend, weil die Protonen dieser Energie auf der Sonne bereits zum Zeitpunkt der Erzeugung von Gammaquanten vorhanden gewesen sein müssen. Die Ursache der verzögerten Emission der Protonen ist noch völlig unklar, besonders wenn man bedenkt, daß die beschleunigten Elektronen die Sonne sofort verlassen können.

*The different behaviour of electrons and protons and their relation to the acceleration process on the sun could be studied in great detail during the event of June 7, 1980. HELIOS 1 was located in a magnetic field structure as shown in the upper panel of figure page 133 which was unusually quiet. The magnetic field was so quiet that the particle trajectories showed the ideal pattern as described in figure page 131 bottom. They flew from the solar direction along the magnetic field directly to the observer in the time sequence as they were injected from the sun, delayed only by the travel time along the field. A short flash of X- and gamma-radiation was observed on the sun at 03:04 UT indicating that directly before electrons and protons had been accelerated (see figure page 135). Electrons (orange) leave the sun simultaneously with the generation of high energy quanta, however, the injection continues sometime longer. The protons (green) leave the sun only 40 minutes later. This is surprising because protons of this energy have been present on the sun at the time of the gamma-ray-generation. The reason for the delayed emission of protons is still completely unclear, especially because electrons leave the sun immediately after acceleration.*

Mit noch besserer zeitlicher Auflösung wird das Ereignis vom 7. Juni 1980 hier gezeigt. Nur 8 Minuten sind auf diesem Bild

dargestellt und es ist erstaunlich, daß die Emissionen von Röntgen- und Gammastrahlung nur knapp eine Minute dauern. In dieser Zeit ist noch eine deutliche Feinstruktur zu beobachten, die auf eine Anregung der Röntgenstrahlung durch Gruppen von Elektronen, und der Gammastrahlung durch Gruppen von Nucleonen hinweist, die in Abständen von ca. 10 Sekunden auf die Photosphäre der Sonne zugelaufen sind. Die Beobachtung der Elektronen mit dem HELIOS-Experiment, ebenfalls bezogen auf die Startzeit auf der Sonne, ist im rechten Teil des Bildes dargestellt. Leider war wegen des großen Abstandes vom Raumfahrzeug zur Erde nur eine zeitliche Auflösung von wenig mehr als einer Minute möglich. Innerhalb dieser Zeitspanne laufen jedoch die von HELIOS beobachteten Elektronen gleichzeitig mit den für die Röntgenstrahlung verantwortlichen Elektronen vom Flaareort los. Wie aus Abb. Seite 139 oben hervorging, hält ihr Entweichen von der Sonne jedoch noch für etwa 10 weitere Minuten an. Die geschilderten Prozesse, die mit dem Speichern, Ausbreiten und Entweichen der bei Flares beschleunigten Elektronen und Protonen zusammenhängen, liefern wichtige Aufschlüsse über Prozesse in der Korona der Sonne, die mit optischen Beobachtungen von der Erde aus schwer oder gar nicht beobachtbar sind. Dies gilt insbesondere für den Prozeß des Aufbrechens und der Neuverbindung magnetischer Feldlinien (Reconnection), die für die Speicherung und das Entweichen von geladenen Teilchen verantwortlich sein können.

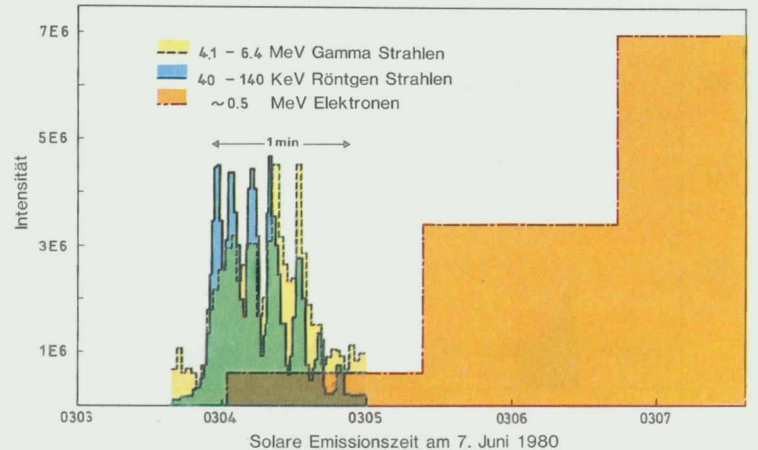
Ausstoß von Protonen und Elektronen



*The event of June 7, 1980, is shown with better time resolution in this figure and it is surprising that the emission of X-ray and gamma-ray radiation last only one minute. During this time a dominant fine structure can be observed which is related to an excitation of X-rays by groups of electrons and of gamma-rays, by groups of nuclei which approach the photosphere of the sun with ten seconds delay between each other. The observation of electrons with the HELIOS-experiment, related to solar release time,*

*is shown on the right side of the figure. Because of the unfavorable telemetry conditions due to the large distance between space-probe and earth the time resolution of the electron data is less than one minute. Within this time difference, however, the electrons observed by HELIOS, leave the sun simultaneously with the X-rays. As we saw in figure page 139 top the release of electrons from the sun continues for about ten more minutes. The described processes which are related to storage, propagation, and release of electrons and protons which*

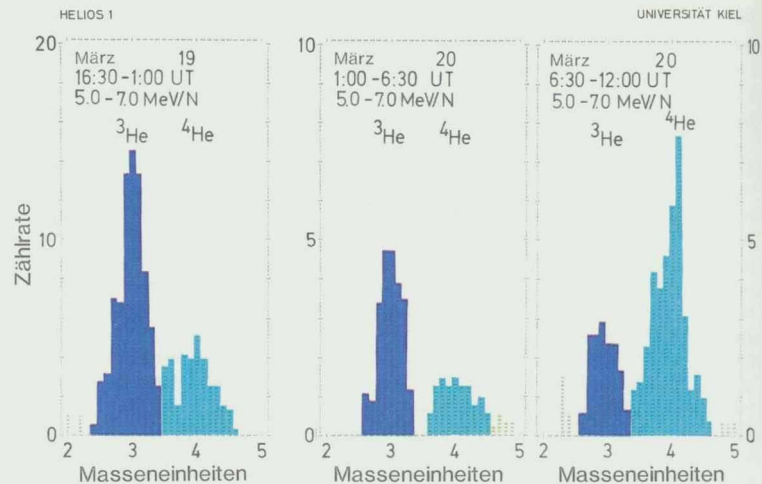
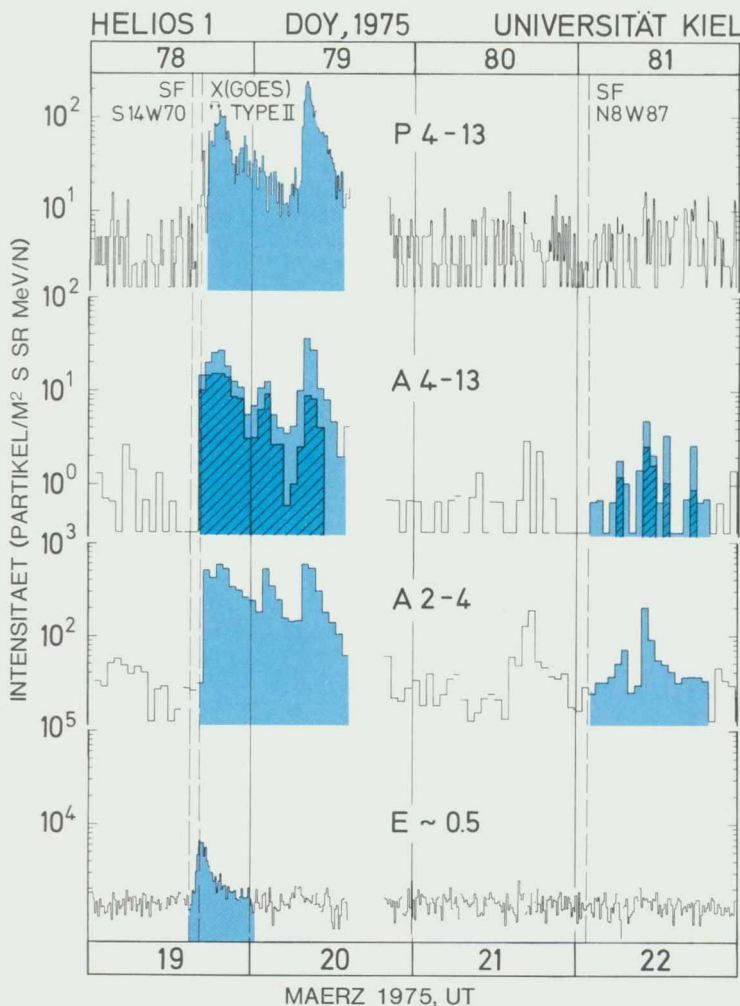
*were accelerated at flares reveal important information on processes in the corona of the sun which would be very difficult or even impossible to observe from the earth. This is true especially for the process of opening and reconnection of magnetic field lines which could be responsible for the release of charged particles.*



Das Ereignis vom 19. März 1975, gemessen auf HELIOS 1, war aus ganz anderen Gründen besonders interessant. Zunächst fiel ein relativ großer Anteil von Kernen auf, die schwerer sind als Wasserstoff. Bei der Analyse dieser in den A-Kanälen gezählten Teilchen zeigte sich, daß in der Heliumkomponente sehr viele Kerne des sonst sehr seltenen Isotops Helium-3 vorhanden waren. Unter normalen Bedingungen besteht Helium zu mehr als 99,9% aus dem Isotop He-

lium-4. Das hier beobachtete Helium-3-reiche Ereignis folgte nach einer länger dauernden Phase erhöhter Röntgen-Aktivität dem Auftreten von zwei sehr kleinen Flare-Ereignissen, in deren Folge wiederum Röntgenstrahlung und Typ-II-Radiostahlung beobachtet wurden. Das auf HELIOS gemessene Ereignis zeigt jedoch eine deutliche Dreifachstruktur, die sich insbesondere im Kanal A2-4 und A4-13 bemerkbar macht. Elektronen treten dagegen nur im Zusammenhang mit

dem ersten der drei Peaks der A-Kanäle auf. Im Kanal 4-13 ist der Teil des Isotops Helium-3 in dunkelblauer Farbe gegenüber dem Helium-4-Anteil (hellblau) markiert. In diesem sehr ungewöhnlichen Fall wurde sogar mehr Helium-3 als Helium-4 beobachtet.



*The event of March 19, 1975, measured by HELIOS 1, was especially interesting for a different reason. A relatively large abundance of nuclei heavier than hydrogen was noticed first. Analysis of these particles which are counted in the A-channels revealed that the helium component contained many nuclei of the normally very rare isotope helium-3. Under normal conditions helium consists of more than 99.9% helium-4. This helium-3-rich event followed after a phase of enhanced X-ray activity to very small solar flare events, which released as well X-rays and type-II-radio-bursts. The event measured on board HELIOS, however, shows a distinct structure of three peaks, observed clearly in the counting channels A2-4 and A4-13. In contrast to that electrons are observed only in connection with the first of the three peaks. In channel 4-13 the helium-3-content is marked by dark blue color, the helium-4-part is marked light blue. In this very unusual case more helium-3 than helium-4 was observed.*

Für jeden der drei Peaks des solaren Ereignisses vom 19. und 20. März 1975 wurde getrennt der Anteil von Helium-3 und Helium-4 bestimmt. Während der Helium-3-Anteil in den ersten beiden Peaks recht groß war (2,4 und 2,8), ist er im dritten Peak nur noch 0,55 bezogen auf Helium-4. Für diese Erscheinung hat sich mittlerweile die folgende Deutung herauskristallisiert: Durch lokale Aufheizung bestimmter Gebiete der Chromosphäre, eines Teils der Sonnenatmosphäre unterhalb der Korona, durch ionen-akustische Wellen, werden aufgrund von Resonanzen aus der dort vorhandenen Materie Helium-3 und einige andere schwerere Elemente besonders stark aufgeheizt. Dieser Vorgang könnte sich möglicherweise über mehrere Tage vor dem eigentlichen Flare erstrecken, wie Beobachtungen von erhöhter Röntgenaktivität belegen. Findet nun ein Flare in diesem Bereich der Chromosphäre statt, sind die Bedingungen für die Beschleunigung von Helium-3-Atomkernen wegen ihrer bereits relativ hohen Anfangsgeschwindigkeit besonders günstig.

Auf diese Weise kann aus einem relativ geringen Prozentsatz von Helium-3 in der Sonnenatmosphäre (unter 1‰) ein Helium-3-Anteil in bestimmten Sonnenergebnissen entstehen, der den Anteil des Helium-4 noch übertrifft. Bei verschiedenen anderen Ereignissen wurde ebenso wie beim vorliegenden beobachtet, daß nach mehreren Beschleunigungen im selben aktiven Gebiet der Helium-3-Anteil zurückgeht, was auf eine Helium-3-Verarmung in der aufgeheizten Materie des Flaregebietes hindeutet. Bei der Suche nach Helium-3-reichen Ereignissen waren wir mit HELIOS in einer recht günstigen Position, da uns die große Sonnennähe zum Teil Zählraten von Helium-3 bescherte, die bis zu einer Größenordnung über den Zählraten von Instrumenten in der Nähe der Erdbahn lag.



*For each of the three peaks of the solar events of March 19 and 20, 1975, the helium-3 and helium-4 content was determined separately. The helium-3 contribution is very high for the first two peaks (2.4 and 2.8), and is reduced to 0.55 related to helium-4 for the third peak. For this phenomenon the following interpretation has emerged: In certain areas of the chromosphere, which is a layer of the solar atmosphere below the corona, the chromospheric matter is locally heated by ion-acoustic waves, which heat to particularly high temperatures helium-3 and a few other heavier elements due to resonance conditions. This heating could last possibly for several days prior to the flare. If a flare happens in this part of the chromosphere, the conditions for accelerating helium-3-nuclei are very favorable because of their already high initial velocity. By this process a high helium-3-content as observed in special solar events, could be generated out of a very low percentage of helium-3 in the solar atmosphere (below 1%). Observations of several other solar events confirm the tendency of this event: After several accelerations within the same active region the helium-3-content decreases, indicating a helium-3-rarefaction in the heated matter of the flare region. In searching for helium-3-rich events HELIOS was very favorable, because the proximity to the sun resulted in count rates of helium-3, which are up to an order of magnitude higher than count rates observed near the orbit of earth.*

#### Quellen im Nichts – Beschleunigung im interplanetaren Raum

Bisher wurden Beobachtungen an Teilchen beschrieben, die in der Atmosphäre der Sonne beschleunigt wurden. Die Beschleunigungsregion befindet sich in einem Gebiet relativ hoher Teilchendichte, die Magnetfeldstrukturen sind klein – jedenfalls im Vergleich zu interplanetaren Strukturen – und der Energieeinsatz ist groß, so daß die Beschleunigungsprozesse sehr schnell (beobachtet wurden Beschleunigungsphasen von Bruchteilen von Sekunden) ablaufen.

Für Beschleunigungen im interplanetaren Raum gelten ganz andere Voraussetzungen. Die Plasmadichten sind um Größenordnungen niedriger als auf der Sonne. Interplanetare Magnetfeldstrukturen haben Ausdehnungen, die in Astronomischen Einheiten gemessen werden können, und die Energiedichten am Ort der Beschleunigung sind gering. Der große Vorteil im interplanetaren Raum ist jedoch, daß die Strukturen, die ein Beschleunigungspotential besitzen, über viele Stunden, oft sogar Tage, Wochen oder Monate erhalten bleiben. Zeit genug, damit die beschleunigten Teilchen viele Male in das Gebiet zurückkehren können, in dem der Beschleunigungsprozeß wirksam ist.

#### Schwächlinge mit Ausdauer – Korotierende Stoßwellen

Eine zweite Art interplanetarer Stoßwellen wurde bereits im Zusammenhang mit Abb. Seite 131 oben angesprochen. Sie entsteht, wenn ein schneller Sonnenwindstrom aus einem koronalen Loch auf den langsamen Sonnenwind trifft. Aus einer Verdichtungsregion (vgl. Abb. Seite 132) entwickeln sich im allgemeinen außerhalb der Erdbahn zwei Shocks, die vom Wechselwirkungsgebiet (interaction surface) ausgehend in Richtung des langsamen Sonnenwindes (vorwärts gerichteter Shock) und in Richtung des schnellen Sonnenwindes (rückwärts gerichteter Shock) laufen und mit der Sonne korotieren. Diese Strukturen sind äußerst langlebig und werden oft über viele Monate beobachtet.

*flare events are rare. Especially at times of the solar minimum there are often long periods during which no flare-generated particles can be observed.*

*In the previous section particles accelerated in the solar atmosphere have been described. In the acceleration region the plasma densities are high, the dimensions of magnetic field structures are small and the energy involved is high. This results in an acceleration process which is very fast.*

*The conditions are quite different in the interplanetary space. Plasma densities are much smaller, interplanetary magnetic field structures have dimensions measured in astronomical units, and the energy densities at the location of the acceleration is low. However, the structures with acceleration potential last over many hours, days, weeks or even months, time enough to allow particles to return many times into the accelerating region.*

*A second type of interplanetary shocks, which has been mentioned already in connection with figure page 131 left, evolves on the impact of a fast solar wind stream from a coronal hole onto slower plasma. Out of a compression region (see fig. page 132) two shocks are formed outside the orbit of earth, which leave the interaction surface in the direction of the slow solar wind (forward shock) and in the direction of the fast solar wind (reverse shock) superimposed on the corotation with the sun. These structures live very long and are often observed over many months.*

In der Folge von solaren Flares laufen häufig Wolken oder Blasen von stark aufgeheiztem Plasma mit Geschwindigkeiten von ca. 1000 km/s bis weit in den interplanetaren Raum hinaus. Sie treiben das langsamere Plasma des Sonnenwinds und die darin ein-

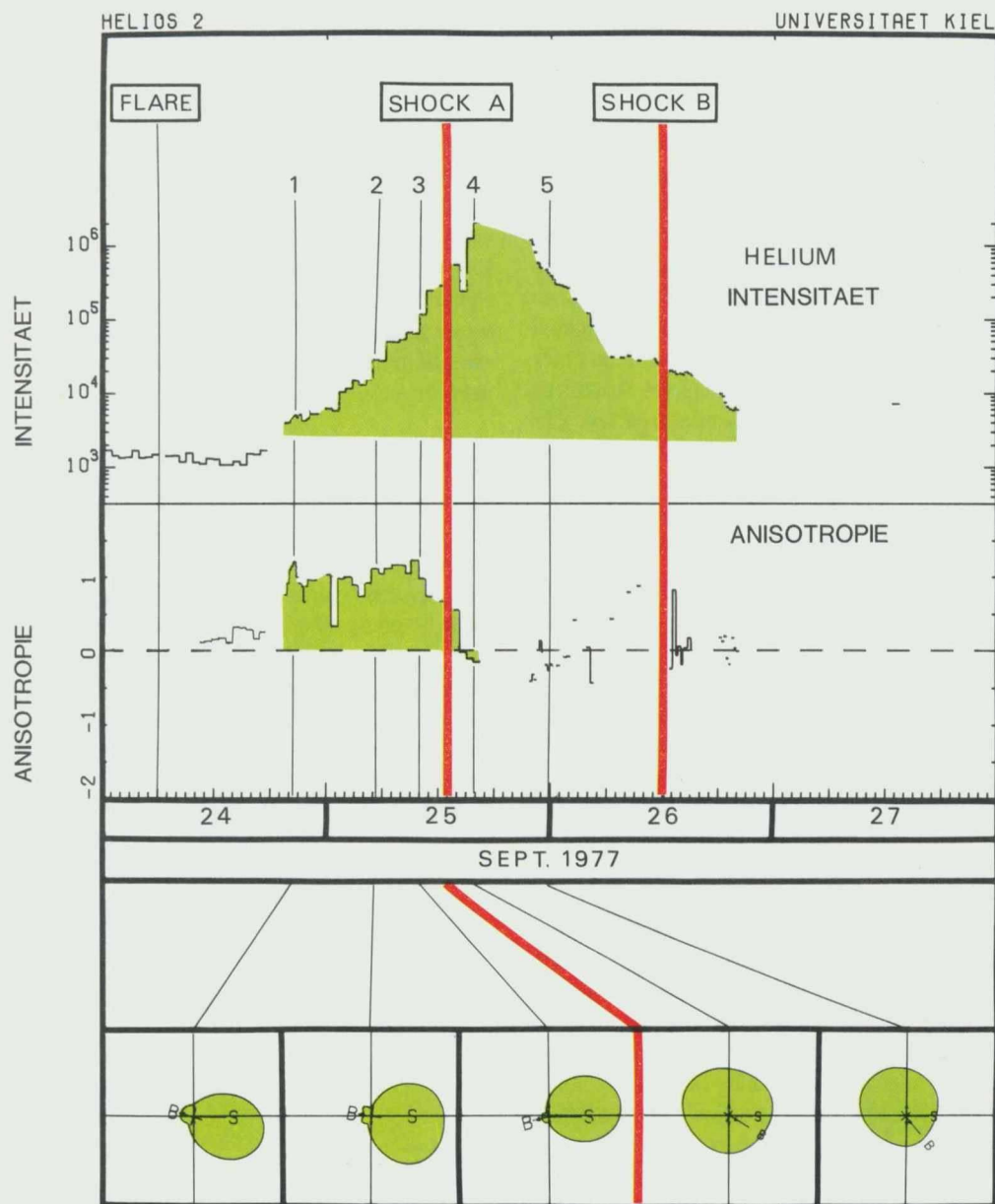
gefrorenen Magnetfelder vor sich her und entwickeln sich in einem Abstand von der Sonne zu interplanetaren Stoßwellen. In der Folge eines Flares am 24. September 1977 wurde auf HELIOS 2 als direkte Folge des Flares zunächst nur ein relativ ge-

ringfügiger Anstieg der Intensität beobachtet. Am 25. und 26. September passieren zwei interplanetare Stoßwellen (Shocks) die Raumsonde. Als Folge des Durchgangs der Stoßwelle am 25. September erhöht sich die Intensität der langsamen Helium-Atom-

kerne um mehr als zwei Größenordnungen. Besonders interessant ist, daß der Intensitätsanstieg bereits ca. 16 Stunden vor der Stoßwellenpassage beginnt und auch über viele Stunden danach noch deutlich sichtbar ist. Der gesamte Bereich der stoß-

wellenerzeugten Intensitätserhöhung ist im oberen Teil des Bildes grün ausgefüllt. Den Beweis für die Herkunft der Teilchen aus der Umgebung des Shocks gibt die Darstellung der Anisotropie im mittleren Teil des Bildes sowie der für ausgewählte Zeiten dargestellten Winkelverteilungen im unteren Teil des Bildes. Die Anisotropie ist positiv, wenn die Teilchen aus Richtung der Sonne beobachtet werden, negativ, wenn sie aus der entgegengesetzten Richtung eintreffen. Die Teilchen des solaren Flares zeigen keine ausgeprägte Anisotropie, jedoch springt die Anisotropie auf einen sehr hohen Wert in dem Augenblick, in dem die ersten stoßwellen-erzeugten Teilchen eintreffen. Auf diesem Wert bleibt sie praktisch bis kurz nach dem Durchgang der Stoßwelle stehen, um dann auf einen geringen negativen Wert zurückzufallen. Dies wird bestätigt durch die Winkelverteilungen, die für die Zeitpunkte 1 - 3 vor dem rot eingezeichneten Durchgang der ersten Stoßwelle eine starke Anisotropie mit einem Maximum der Winkelverteilung entlang der zur Sonne gerichteten Magnetfeldlinie zeigen. Dies ist gerade die Richtung, aus der die Stoßwelle auf HELIOS zuläuft. Für die Zeitpunkte 4 und 5 wird eine wesentlich stärker isotrope Winkelverteilung beobachtet, die jedoch ebenfalls ein schwach ausgeprägtes Maximum, diesmal aber aus der Richtung des von der Sonne abgewandten Teils der Magnetfeldlinie zeigt. Auch in diesem Fall strömen die Teilchen also vom Shock auf HELIOS zu, nunmehr in Richtung zur Sonne zurück. Dies ist ein recht augenscheinlicher

Beweis dafür, daß in der Umgebung der interplanetaren Stoßwelle Teilchen beschleunigt werden. Es ist interessant, daß in diesem Energiebereich die größten Anzahlen beschleunigter Teilchen an interplanetaren Stoßwellen und nicht bei Flares auf der Sonne erzeugt werden.



Following solar flares, clouds of heated plasma are often travelling with velocities of about 1,000 km/s far into the interplanetary space. They drive the slower plasma of the solar wind and the frozen-in magnetic fields in front of them and develop to interplanetary shocks within some distance from the sun. Following a flare on September 24, 1977, HELIOS 2 observed only a relative small increase of the intensity as an immediate consequence of the flare. On September 25 and 26, two interplanetary shocks passed the space probe. Related to the passage of the shock on September 25 the intensity of the slow helium-nuclei increased by more than two orders of magnitude. It should be pointed out that the intensity increase started already about 16 hours prior to the passage of the shock and lasted for many hours after the shock. The total area of the shock-generated intensity increase is highlighted green in the upper panel. The anisotropy is shown

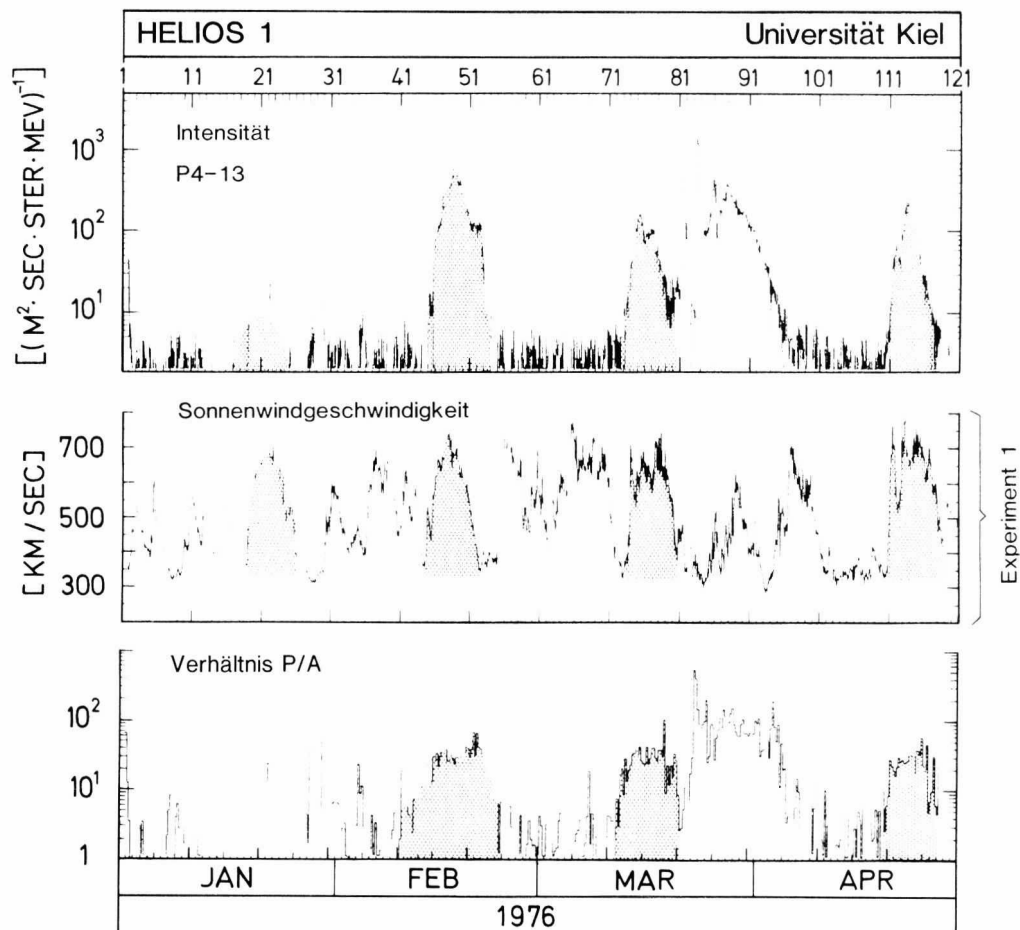
in the center panel whereas the angular distribution for selected periods is shown in the lower panel. Both give evidence that the particles originate from the vicinity of the shock. The anisotropy is positive when the particles arrive from the direction of the sun, negative, when they appear from the opposite direction. The particles of the solar flare show no pronounced anisotropy, however, the anisotropy changes to a very high value at the time when the first shock-generated particles appear. It remains on this value until shortly after the shock-passage and switches to a small negative value afterwards. This is confirmed by the angular distribution which shows a strong anisotropy with a maximum of the angular distribution along the magnetic field line pointing towards the sun for the periods 1–3 prior to the red-marked passage of the first shock. This is just the direction from which the shock approaches HELIOS. During the periods 4 and 5 much more isotropic angular distribution is observed with a weak maximum from the magnetic field direction pointing away from the sun. Also behind the shock the particles stream from the shock towards HELIOS, this time in the direction to the sun. This should be evidence enough that the particles are accelerated in the vicinity of the interplanetary shock. It should be pointed out that in this energy range the largest number of accelerated particles come from the interplanetary shock and not from the sun.

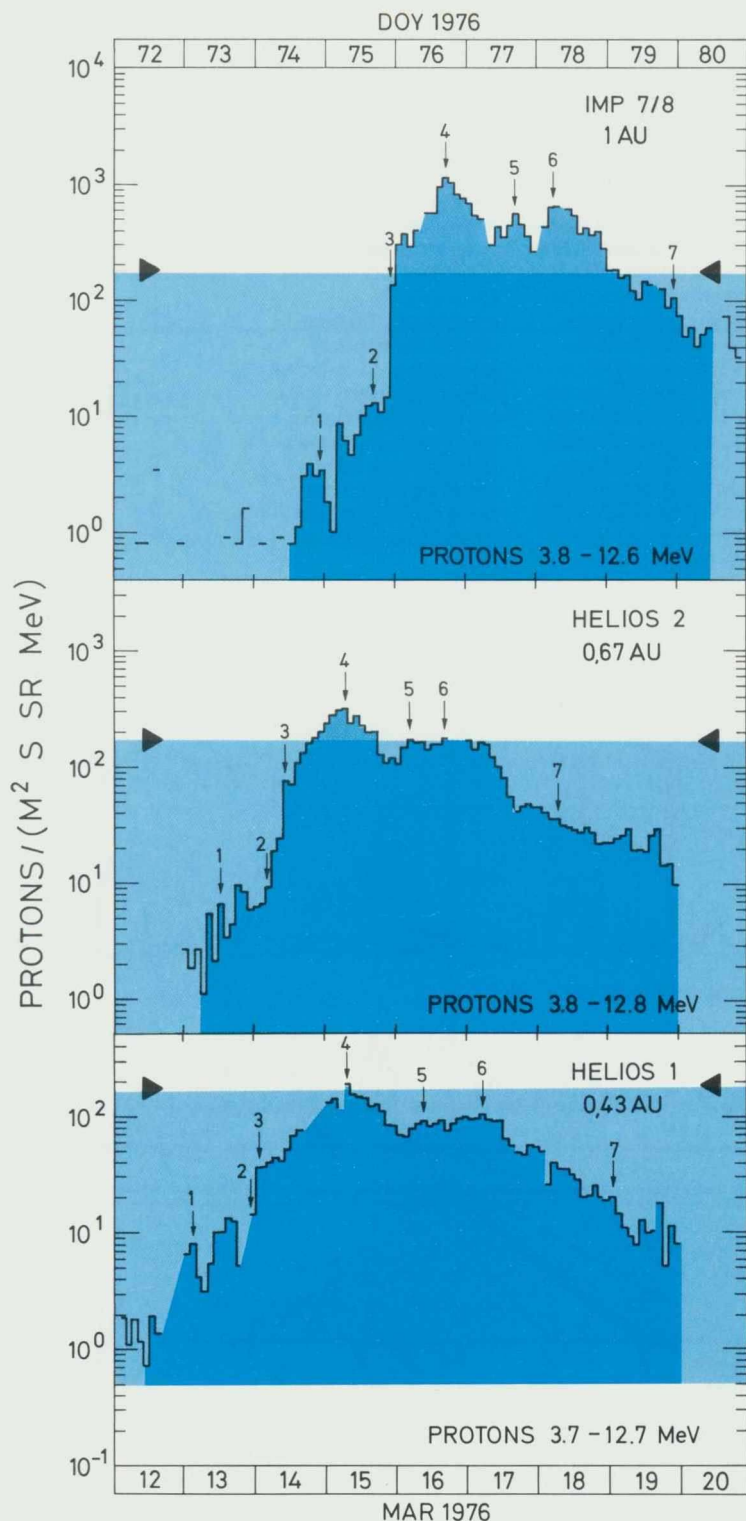
Der obere Teil des Bildes zeigt die Intensität der langsamen Protonen, wie sie auf HELIOS 1 in den ersten vier Monaten 1976 gemessen wurde. Er entspricht damit dem oberen Teil von Abb. Seite 131 links. Vier korotierende Ereignisse sind durch Rasterung hervorgehoben. Darunter ist für den gleichen Zeitraum die Sonnenwindgeschwindigkeit aufgetragen, wie sie vom HELIOS-Experiment 1 gemessen wurde. Deutlich zu erkennen ist, daß die korotierenden Ereignisse immer zugleich mit schnellen Sonnenwindströmen auftreten, bei denen die Sonnen-

windgeschwindigkeit deutlich oberhalb 500 km/sek liegt. Ebenso deutlich ist jedoch zu erkennen, daß es zusätzlich in den Lücken zwischen korotierenden Ereignissen schnelle Sonnenwindströme gibt, die nicht zu Intensitätsanstiegen der langsamen Protonen und damit zu korotierenden Ereignissen führen. Im unteren Teil des Bildes ist das Verhältnis von Protonen zu Heliumkernen dargestellt. Zu Zeiten der korotierenden Ereignisse ist dieses Verhältnis bemerkenswert konstant und verschieden von dem Verhältnis während ruhiger Zeiten sowie während solarer Ereignisse.

The upper panel shows the intensity of slow protons as observed by HELIOS 1 in the first four months of 1976. It corresponds to the upper part of figure page 131 left. Four corotating events are enhanced by screen dots. The center panel shows the solar wind velocity as observed by the HELIOS-experiment 1. There is a distinct correlation of corotating events with fast solar wind streams which have velocities above 500 km per second. However, in the intervals between corotating events one observes similar fast solar wind streams which do

not result in the appearance of corotating events. The lower panel shows the ratio of protons versus helium nuclei. At the times of the corotating events this ratio is remarkably constant and different from the ratio during quiet times or during solar events.





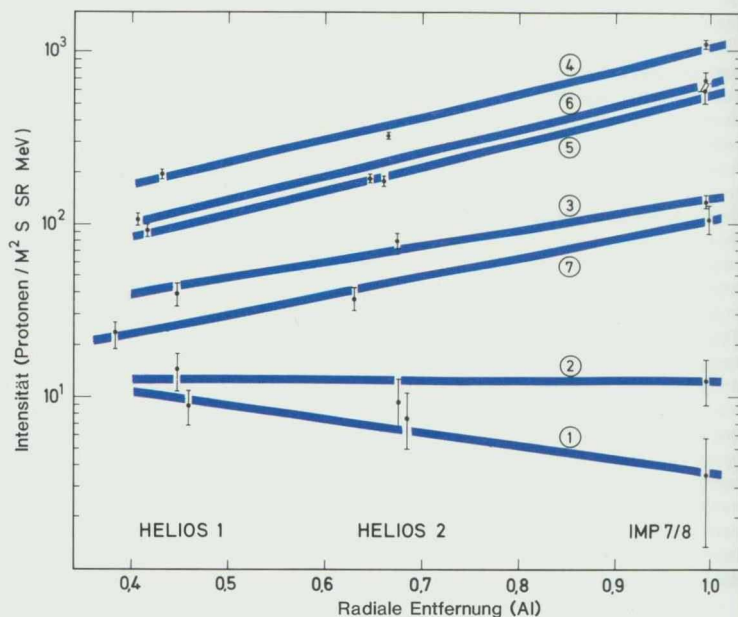
Während der HELIOS-Mission bestand erstmals die Möglichkeit, dasselbe korotierende Ereignis mit drei verschiedenen Raumfahrzeugen, die praktisch gleichzeitig auf derselben Magnetfeldlinie saßen, zu beobachten. Mitte März 1976 beobachtete HELIOS 1 ein korotierendes Ereignis bei 0,43 AE, HELIOS 2 bei 0,67 AE und IMP-7 bzw. IMP-8 bei 1 AE. Der Intensitätsverlauf der korotierenden Ereignisse ist blau unterlegt. Die Markierungen 1-7 bezeichnen Messungen, die auf denselben interplanetaren Magnetfeldlinien vorgenommen wurden. Die Abbildung zeigt deutlich, daß die Ereignisse auf allen Raumfahrzeugen eine Doppelpakstruktur (Markierung 4 und 6) zeigen, die der vorwärts bzw. rückwärts laufenden Stoßwelle zuzuordnen sind, und daß die Intensität mit zunehmendem Abstand von der Sonne ansteigt. Dies wird im Bild durch eine blaue Rasterunterlegung verdeutlicht, deren Obergren-

ze mit der Maximalintensität bei HELIOS 1 übereinstimmt, so daß man die Maxima bei HELIOS 2 und IMP-7/IMP-8 deutlich aus diesem Untergrund herauswachsen sieht.

*During the HELIOS-mission we had for the first time the possibility to observe the same corotating event simultaneously by means of three different spaceprobes which are located on the same magnetic field line. During the middle of March 1976 HELIOS 1 observed corotating events at 0.43 AU, HELIOS 2 at 0.67 AU and IMP-7 respectively IMP-8 at 1 AU. The intensity profile of the corotating events is highlighted blue. The arrows 1-7 mark measurements which were taken on the same interplanetary magnetic field line. The figure shows clearly that all space probes observe double-peak structures*

*(marks 4 and 6) which are related to the forward resp. backward moving shock. The intensity increases with increasing distance from the sun which is made more evident by a blue screen dot overlay which marks the maximum intensity observed by HELIOS 1. Out of this overlay the maxima at HELIOS 2 and furthermore at IMP-7/8 grow clearly.*

Die auf gleichen Magnetfeldlinien (vgl. Markierungen 1-7 in Abb. Seite 144 links) mit den Raumfahrzeugen HELIOS 1, HELIOS 2 und IMP-7/8 gemessenen Intensitäten werden über dem radialen Abstand von der Sonne aufgetragen. Die Markierungen zum „Fuß“ des korotierenden Ereignisses, kurz vor einem abrupten Anstieg der Intensität, der am deutlichsten bei IMP-7 und IMP-8 zwischen Markierung 2 und 3 sichtbar ist. Die mit dem Abstand von



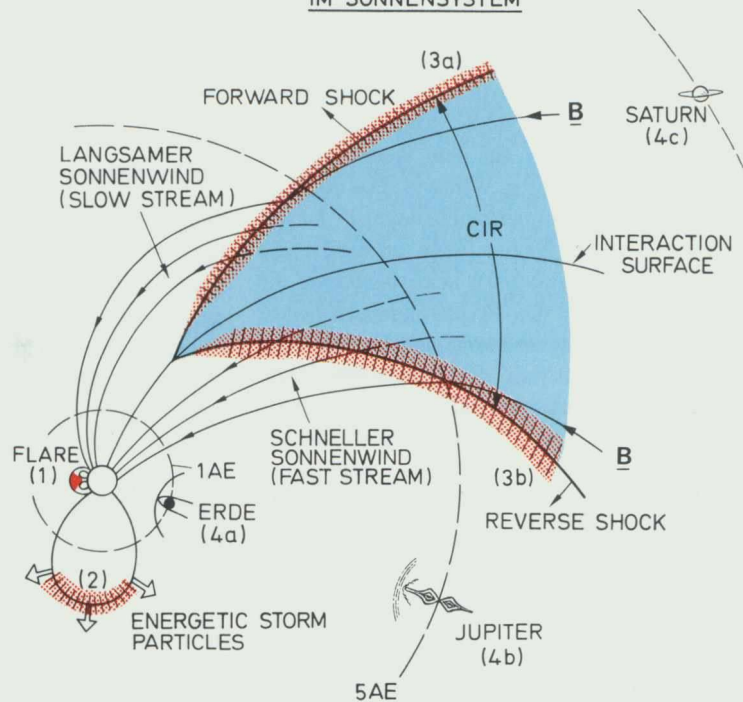
der Sonne abnehmende Intensität wäre typisch für ein solares Ereignis. Dies wäre ein Hinweis auf einen solaren Ursprung der Teilchen im „Fuß“ des Ereignisses. Die Intensität steigt jedoch für die Markierungen 2 bis 7 mit zunehmendem Sonnenabstand beträchtlich an. Der radiale Gradient würde bei 330% pro AE liegen. Dieser Intensitätsanstieg mit zunehmendem Abstand im inneren Sonnensystem ist ein deutlicher Hinweis darauf, daß die Teilchen von außen, aus der Richtung der korotierenden Stoßwellen, in das innere Sonnensystem eindringen (vgl. Abb. Seite 145).

*The intensities measured on identical magnetic field lines by HELIOS 1, HELIOS 2, and IMP-7/-8 (see marks 1-7 in figure page 144 left) are presented versus radial distance from the sun. Marks 1 and 2 belong to a "foot" of the corotating event shortly prior to an abrupt increase of the intensity which is most pronounced at IMP-7/-8 between marks 2 and 3. The decrease of the intensity with increasing distance from the sun would be typical for a solar event. This would be a hint to the solar origin of the particles in the "foot" of the event. However, the intensity increases with increasing solar distance remarkably between marks 2 and 7. The radial gradient would be 330%/AU. The intensity increase with increasing distance in the inner solar system is a clear evidence that the particles approach the inner solar system from outside, which is the direction where the corotating shock waves are observed (see figure page 145).*

Beschleunigungsprozesse für geladene Teilchen wurden in einer Reihe von Bildern vorgestellt. Hier ist ihr Auftreten im Sonnensystem nochmals schematisch zusammengefaßt, ergänzt durch die Beschleunigung in den Magnetosphären von Planeten. Die Vielfalt der dabei auftretenden Prozesse läßt den Schluß zu, daß die Natur keinen Trick unversucht läßt, elektrische Felder zu erzeugen und dabei geladene Teilchen zu beschleunigen: elektrostatische Felder durch Ladungstrennung bei Polarlichtern, Betatroneneffekt durch magnetische Stürme beim Strahlungsgürtel der Erde (4), Vernichtung magnetischer Feldlinien bei Flares (1), Fermi-Beschleunigung an den interplanetaren Stoßwellen (2, 3) und an den Bugstoßwellen (4), ergänzt durch elektrische Felder an den Grenzflächen der Stoßwellen (2, 3). Für alle Prozesse ist letztlich die Sonne der Energielieferant, entweder durch die explosionsartig verlaufenden Energieumsetzungen bei Flares (1) und den daraus resultierenden Stoßwellen (2) oder durch die Wechselwirkungen innerhalb des Sonnenwindes, wie sie beim Auftreffen eines schnellen Stromes auf einen langsamen geschehen (3) oder beim Auftreffen des Sonnenwindes auf einen Planeten mit Magnetfeld (4).

*Acceleration processes for charged particles have been presented by a number of figures. Their appearance in the solar system is once more schematically summarized, supplemented by the acceleration in the magnetospheres of planets. The variety of the observed processes allows the conclusion that nature does not omit any trick to generate electric fields and accelerate with them charged particles: Electrostatic fields by charge separation in polar lights, betatron effect by magnetic storms in the radiation belt of earth (4), annihilation of magnetic field lines in flares (1), Fermi-acceleration at interplanetary shocks (2, 3) and at the bow shock (4), supplemented by electric fields at the interaction surface of shocks (2, 3). The sun supplies the energy for all processes either by explosive energy releases during flares (1) and the shocks resulting from them (2) or by interactions within the solar wind as they happen at collisions of fast solar wind streams with this slower solar wind (3) or at the collision of the solar wind with a planet having a magnetic field (4).*

## BESCHLEUNIGUNG ENERGETISCHER TEILCHEN IM SONNENSYSTEM



- |     |  |
|-----|--|
| (1) | FLARES IN SONNENATMOSPHERE   |
| (2) | FLARE-ERZUGTE STOSSWELLEN IM INTERPLANETAREN RAUM (ESP-EREIGNISSE)                   |
| (3) | STOSSWELLEN VON KOROTIERENDEN WECHSELWIRKUNGSGBIETEN (CIR) (KOROTIERENDE EREIGNISSE) |
| (4) | MAGNETOSPHEREN VON PLANETEN (a) ERDE, (b) JUPITER, (c) SATURN, (d) MERKUR ?          |

### Wissenschaftliche Teamarbeit

Auf den vorangehenden Seiten wurde versucht, die Vielzahl der Beobachtungen kosmischer Strahlung im inneren Sonnensystem anhand sehr weniger Beispiele darzustellen. Dabei war es immer wieder notwendig, auf Beobachtungen anderer Experimente der HELIOS-Mission zu verweisen, ohne die eine genaue Interpretation der beobachteten Phänomene in vielen Fällen unmöglich gewesen wäre. Dies ist eine Besonderheit bei Untersuchungen der kosmischen Strah-

*We have tried to present the variety of cosmic ray observations in the inner solar system by only a few examples. It was often necessary to refer to observations of other experiments of the HELIOS-mission to interpret certain phenomena. This is unique for investigations of the cosmic rays are dependent on the environmental conditions, e.g. the state of the plasma, the plasma waves, and magnetic fields both at*

lung, auf die man immer wieder stoßen wird. Entstehung und Ausbreitung der kosmischen Strahlung ist in starkem Maße abhängig von den Umgebungsbedingungen, z. B. von dem Zustand des Plasmas und den darin vorhandenen Wellen sowie von den Magnetfeldern, sowohl am Ort der Entstehung als auch auf dem Wege zwischen Quelle und Beobachter. Während also die Plasmaphysiker ihre Sonnenwindmessungen im wesentlichen deuten können, ohne auf ergänzende Messungen angewiesen zu sein, benötigen die Experimentatoren des Magnetfeldexperimentes bereits die Ergebnisse der Plasma-Untersuchungen. Zur Untersuchung der kosmischen Strahlung endlich ist man weitgehend angewiesen auf die Ergebnisse von Plasma-, Magnetfeld- und Wellenuntersuchungen. Doch damit nicht genug. Zur Untersuchung der Ausbreitung der kosmischen Strahlung benötigt man weitere Teilchenmessungen an anderen Orten im Raum, etwa von Raumsonden oder Messungen in Erdnähe. Zur Untersuchung von Beschleunigungsphänomenen, insbesondere auf der Sonne, werden optische Beobachtungen in allen Frequenzbereichen, radioastronomische, Röntgen- oder Gammastrahlungsdaten herangezogen. Die Liste der zur Interpretation der kosmischen Strahlung notwendigen ergänzenden Daten ließe sich noch beträchtlich erweitern. Während der Lebensdauer von HELIOS sind eine Anzahl zusätzlicher Instrumente sowohl auf der Erde als auch im Weltraum verfügbar geworden, die die Messungen der kosmischen Strahlung gut ergänzen können. Als Beispiel möchte ich nur die Instrumente der Solar-Maximum-Mission nennen, die mit bisher einzigartiger Auflösung Informationen über den Ablauf solarer Flares gewinnen konnte.

Vielfältige wissenschaftliche Zusammenarbeiten mit Forschungsgruppen im In- und Ausland sind die Folge der Herausforderung, die der Forschungsgegenstand Kosmische Strahlung an die Wissenschaftler der Universität Kiel stellt. Darüber hinaus bietet ein technisch und wissenschaftlich so interessantes Projekt wie HELIOS mit einer Fülle von Meßdaten hervorragender Qualität eine ausgezeichnete Chance zur Ausbildung von Studenten und jungen Wissenschaft-

lern. Die große Zahl physikalischer Teilgebiete, die zu berücksichtigen sind und die komplexen technischen Anforderungen bei der Entwicklung eines solchen Instruments garantieren eine umfassende physikalische Ausbildung.

### Blick über die Grenzen

Lassen Sie uns zum Schluß auf die Frage eingehen, die immer wieder gestellt wird: Weshalb wird die kosmische Strahlung im Sonnensystem untersucht, was ist der Nutzen dieser recht aufwendigen Forschung? Falls sich jemand der Fragesteller große Hoffnungen auf technische Nutzung der gewonnenen Erkenntnisse machen sollte, hier zunächst eine negative Antwort: Wir sehen keine Chance, die bei solaren Flares freigesetzten riesigen Energien für technische Zwecke auf der Erde nutzen zu können. Mit der auf der Sonne innerhalb von Minuten freigesetzten Energie, die den Energiebedarf der Bundesrepublik für 10 Millionen Jahre decken könnte, wird man weder Kaffee kochen noch Auto fahren können. Dagegen ist nicht auszuschließen, daß einige der beobachteten Prozesse im solaren oder interplanetaren Plasma auch auf Plasmalaboratorien übertragen werden können. Allerdings ist das nicht unproblematisch, da die im Labor erzeugbaren Plasmen selbst bei Verwendung der leistungsfähigsten Vakuumpumpen immer noch um viele Größenordnungen dichter sind als der Sonnenwind. Die Ergebnisse der Untersuchungen im Labor und im Weltraum ergänzen sich jedoch im starken Maße und die Teildisziplinen wirken durchaus anregend aufeinander. Theoretische Plasmaphysiker (für die die Begrenzungen eines Labors keine Bedeutung haben), sind (im wesentlich stärkeren Maße) auf die Erforschung der Eigenschaften des Weltraumplasmas angewiesen. Sie sind es auch, die sich mit den Wechselwirkungen von Wellen und Teilchen im Plasma beschäftigen, also den Aspekten, die die kosmische Strahlung besonders beeinflussen. Alle im Sonnensystem beobachtbaren Beschleunigungs- und Ausbreitungsprozesse sind in diesem Sinne Experimente im Plasmalabor Heliosphäre. Zwar lassen sich die experimentellen Bedingungen vom Menschen

*the source and along the way to the observer. The investigation of the cosmic rays needs also the results of plasma, magnetic field and wave observations. In addition particle measurements at other locations in space are used, e.g. from spaceprobes or near earth, to determine propagation characteristics. The investigation of acceleration processes on the sun depends on optical observations in all frequency ranges, on data of radio waves, X- or  $\gamma$ -rays. Various additional instruments have become operational both on earth and in space during the life time of HELIOS, complementing the measurements of cosmic rays. One example is the Solar Maximum Mission which gives information on the solar flare process at uniquely high resolution.*

*Scientific collaborations with many domestic and foreign institutes are the consequence of the scientific item cosmic rays. Above that a technically and scientifically very interesting project such as HELIOS with large amounts of high quality data provides a unique opportunity to train students and young scientists.*

*Why study cosmic rays in the solar system, what is the yield of this expensive research? This question is often asked. A preliminary negative answer is most obvious: We do not see any chance to make technical use of the huge energies released during solar flares. With the energy released at the sun during a few minutes, energy enough to solve the demand of the Federal Republic of Germany for some ten million years, nobody will be able to prepare coffee or drive a car. It might be possible, however, to utilize some processes observed in solar or interplanetary plasma in plasma laboratories. The problem is that the plasma obtainable in laboratories is by many orders of magnitude denser than the solar wind. However, both disciplines complement each other. Theoretical plasma physicists are strongly dependent on the investigation of the space plasma. They consider as well the interaction between waves and particles in a plasma which influence strongly the cosmic rays. In this sense all acceleration and propagation processes observed in the solar*

nicht bestimmen, doch besteht die Aufgabe darin, die Zustände vor Beginn des zu studierenden Phänomens zunächst genau zu beschreiben und anschließend seinen Ablauf und Ausgang möglichst umfassend zu messen, damit sie zur Prüfung plasmaphysikalischer Theorien verwendet werden können.

Spätestens an dieser Stelle wird sich das Plasmalabor Heliosphäre ebenso wie das erdgebundene Labor als zu eng erweisen. Im interstellaren Raum, den Weiten unserer Galaxis mit ihren einigen 100 Milliarden Sonnen sowie in den Millionen anderen Galaxien gibt es Materie in allen erdenklichen Zuständen, insbesondere auch Plasmazuständen, auf die allgemeingültige Plasmatheorien angewendet werden.

Auf dem Umweg über die theoretische Plasma-physik wurden wir in die Weite des Kosmos verwiesen. Tatsächlich gibt es dort viele Phänomene, die denen in der Heliosphäre ähnlich sind.

1. Die Aktivität der Sonne hat ihr Analogon in magnetisch variablen Sternen, die bei Untersuchungen des Zeeman-Effekts an Spektrallinien dieser Sterne entdeckt wurden. Zwar sind mit dieser Methode nur Magnetfeldstärken nachzuweisen, die um Größenordnungen über denen der Sonne liegen, doch ist der Schluß sicher erlaubt, daß magnetische Variabilität und die damit verbundene Aktivität von Sternen ein weit verbreitetes Phänomen im Kosmos ist.

2. Ein Analogon zum Sonnenwind sind stellare Winde gigantischer Proportionen, die bei einigen roten Überriesensternen gefunden wurden, bei denen kontinuierlich Materie in den Weltraum hinausgeblasen wird, wobei die Masse dieser Sterne merklich verringert wird. Auch in diesen Systemen ist es wahrscheinlich, daß ähnliche Phänomene wie im interplanetaren Raum eine Rolle spielen können.

3. Auch das Auftreten von Flares ist wahrscheinlich nicht auf die Sonne beschränkt. Die Emissionslinien in Spektren einiger entfernter Sterne sowie Satellitenbeobachtungen im ultravioletten Bereich lassen auf die Existenz einer Chromosphäre in vielen Sternen schließen, in der, ähnlich wie auf der Sonne, Flares auftreten können.

Möglicherweise hat auch das kurzzeitige Aufleuchten von Flaresternen einen ähnlichen Ursprung.

4. Das Vorhandensein von stellaren Winden und Flares läßt natürlich auch auf die Existenz von Stoßwellen in anderen Systemen und im interstellaren Raum schließen. Eine besonders bekannte Stoßwelle tritt in Verbindung mit dem bereits in Abb. Seite 125 dargestellten Krebsnebel, einem Supernova-Überrest, auf. Im interplanetaren Raum wurde festgestellt, daß praktisch jede Stoßwelle unter geeigneten Bedingungen in der Lage ist, Teilchen zu beschleunigen. Es ist interessant, daß die Fähigkeit von Stoßwellen zur Teilchenbeschleunigung theoretisch schon lange vorhergesagt worden war, bevor der experimentelle Befund eindeutig feststand. In den heute favorisierten Modellen für die Beschleunigung der galaktischen kosmischen Strahlung in unserem Milchstraßensystem spielen Stoßwelleneffekte eine bevorzugte Rolle. Einer der wesentlichen Unterschiede gegenüber dem Sonnensystem besteht darin, daß die Teilchen in den interstellaren Magnetfeldern typisch etwa 10 Millionen Jahre gespeichert werden können. Es wird vermutet, daß in dieser Zeit viele Stoßwellen, z. B. im Gefolge von Supernovae, das gleiche Gebiet überstreichen können.

Die Übertragung bekannter physikalischer Prozesse auf andere räumliche und zeitliche Skalen ist von besonderem Reiz. Es liegt also nahe, die in der Heliosphäre beobachteten Erscheinungen zu verallgemeinern und auf die Umgebungsbedingungen in anderen Systemen im Kosmos anzuwenden. Dabei haben die folgenden allgemeinen Prozesse aus der Physik des Plasmas bzw. der energiereichen Teilchen besondere Bedeutung:

– die Neuverbindung und Verschmelzung magnetischer Feldlinien, die in der Fachsprache reconnection genannt wird –

– Wellen-Teilchen-Wechselwirkungen als wesentliche Ursache für Turbulenzen und Instabilitäten im Plasma –

*system are experiments in the "plasma laboratory heliosphere". The results of these experiments are important to test plasma physical theories.*

*At this point the plasma laboratory heliosphere will become too small as the laboratories on earth did before. In the interstellar space, the width of our galaxy with its about  $10^{11}$  suns as well as in the million other galaxies, matter consists in all possible states to which the general plasma theories can be applied.*

*After considering theoretical plasma physics we have been referred to the universe. Actually many phenomena show similarities to observations in the heliosphere.*

*1. The activity of the sun is comparable to magnetic variable stars. Although only those magnetic fields can be detected which are by orders of magnitude above the magnetic field of the sun, one can conclude that magnetic variability and the connected activity of stars is a common phenomenon in the universe.*

*2. Comparable to the solar wind are the stellar winds observed in connection with some red giants. It is anticipated that similar phenomena as in interplanetary space are present in these systems as well.*

*3. Flares are probably not restricted to the sun. Emission lines in spectra of some distant stars allow us to conclude that chromospheres exist in many stars, in which phenomena similar to the sun flares can happen.*

*4. The existence of stellar winds and flares demands shocks in other systems and in interstellar space. A well-known shock is anticipated in the crab nebula, a supernova remnant, shown in figure page 125. It has been observed in interplanetary space that on certain conditions each shock is capable of accelerating particles. This has been predicted theoretically since long ago, before it could be confirmed experimentally. Shocks are important in today's models of galactic cosmic ray acceleration in the galaxy. The major difference compared to the solar system is the storage of particles in*

- großräumige Plasmaströmungen -
- Eigenschaften stoßfreier Stoßwellen (Shocks)
- Teilchenbeschleunigung -
- Speicherung und Transport geladener Teilchen in Magnetfeldern -

Basierend auf den Erkenntnissen aus der Heliosphäre und ausgerüstet mit dem Werkzeug der theoretischen Plasmaphysik werden Modelle für entfernte astrophysikalische Objekte entwickelt, die zu von der Erde aus überprüfbareren Aussagen über Folgeerscheinungen führen. Radiostrahlung, Röntgen- oder Gammastrahlung, Gamma-ray-bursts und hochenergetische kosmische Strahlung sind nur einige der beobachtbaren Effekte, deren quantitative Deutung durch Modelle dem Gebäude der Erkenntnisse über den Kosmos und die Entstehung der Welt weitere Bausteine hinzufügen würde.

Möchte man die Frage nach dem Nutzen der Erforschung der kosmischen Strahlung kurz beantworten, so ist dies sicher nur in folgender Weise möglich: Die experimentelle Untersuchung der kosmischen Strahlung im inneren Sonnensystem ist reine Grundlagenforschung. Auf Grund der schwierigen experimentellen Technik im unwirtlichen Weltraum sind technisch anderweitig verwertbare Lösungen für experimentelle Probleme relativ wahrscheinlich. Wichtig sind die Untersuchungen darüber hinaus auch zur Vorhersagbarkeit von Störungen z. B. der Ionosphäre, als Folge von Sonnenausbrüchen, zur Bestimmung der Aufheizung der Hochatmosphäre, die zu einer Abbremsung von Satelliten führen kann. Der wesentliche Effekt dieser Art Forschung besteht jedoch darin, weitere Bausteine für ein möglichst umfassendes Verständnis des Universums zusammenzutragen.

*interstellar magnetic field for up to ten million years. It is anticipated that during this time many shocks cross the same regions e.g. following supernovae.*

*The transfer of well-known physical processes to other dimensions and other scales has its own attraction. The phenomena observed in the heliosphere are generalized and applied to the environments in other systems in the universe. The following plasma processes or energetic particle phenomena are important:*

- *annihilation and reconnection of magnetic field lines,*
- *wave particle interactions which are the main reason for turbulences and instabilities in the plasma,*
- *large scale plasma streams,*
- *the properties of collisionless shocks,*
- *particle acceleration,*
- *storage and transport of charged particles in magnetic fields.*

*Based on heliospheric results theoretical plasma physicists develop models for distant astrophysical objects which include results on secondary processes observable from earth. Radioastronomy, X- and gamma-ray astronomy, gamma-ray bursts and high energy cosmic rays show observable effects which may yield some new bricks in the building of our knowledge about the universe.*

*A short answer on the yield of the cosmic ray research would be the following: The experimental research of cosmic rays in the inner solar system is pure basic research. Some technical solutions of experimental problems due to the difficult experimental technique in the space environment can probably be used elsewhere. An important result would certainly be the prediction of disturbances e.g. of the ionosphere as a consequence of solar flares, and the heating of the high atmosphere which can decelerate satellites. The main yield of this research, however, are new clues for a general understanding of the universe.*





Trainor



van Hollebeke

# Results from the HELIOS Galactic and Solar Cosmic Ray Experiment (E7)

James H. Trainor, Michelle A. I. Van Hollebeke<sup>1)</sup>, Nand Lal and Frank B. McDonald<sup>2)</sup>  
 NASA/Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland

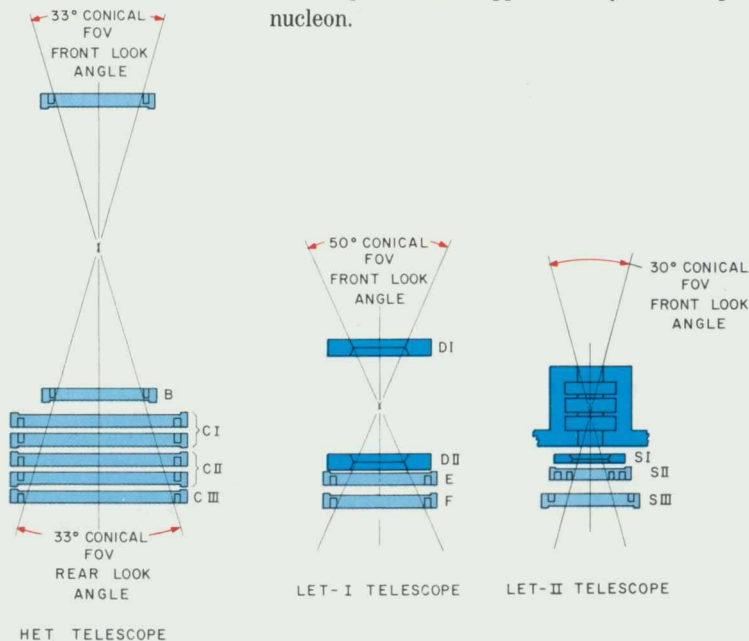
<sup>1)</sup> Present Address: Musee National des Sciences, Technique et Industrie, PARC de la Villette, Paris, France

<sup>2)</sup> Present Address: Chief Scientist, NASA Headquarters, Washington, D.C.

Die im folgenden beschriebenen Ergebnisse von E7 auf HELIOS über Energiespektren, die Ladungsverteilung und Ausbreitungsbedingungen solarer und galaktischer kosmischer Strahlung wurden von drei Atomkern-Teilchenteleskopen gewonnen (Abb. Seite 149). Sie waren zur Beobachtung von Elektronen (Energiebereich 50 keV bis etwa 800 MeV), Alphateilchen (bis 600 MeV pro Kernteilchen [Nukleon]) und Kernen schwererer Elemente (bis zum Neon und 200 MeV pro Nukleon) vorgesehen. Die Sensoren waren identisch oder sehr ähnlich unseren Instrumenten auf den Erdsatelliten IMP und ISEE, den Raum-

Skizzenhafter Schnitt durch die drei Typen von Atomkern-Teilchenteleskopen, die von E7 auf HELIOS benutzt wurden. Die kreisförmigen Siliziumdetektoren haben unterschiedliche Dicken zwischen 0,05 mm und 2,5 mm. Ihre Oberflächengrößen liegen zwischen 50 mm<sup>2</sup> und 8,5 cm<sup>2</sup>.

Cross-section drawings of the 3 types of nuclear particle telescopes used by the HELIOS E7 experiment. The circular silicon detectors are of varying thicknesses from 50 microns to 2.5 mm and have areas ranging from 50 mm<sup>2</sup> to 8.5 cm<sup>2</sup>.



PIONEER F & G DETECTOR COMPLEMENT  
 COSMIC RAY ENERGY SPECTRA

## Introduction

The purpose of this experimental investigation was to study the energy spectra, charge composition and flow patterns of both solar and galactic cosmic rays. To accomplish this study, the instrument incorporated three types of nuclear particle telescopes shown schematically in figure page 149. These sensors allow the following particle species and energy ranges to be measured: electrons, 50 keV to approximately 8 MeV; protons, 100 keV to approximately 800 MeV; alpha particles, to 600 MeV per nucleon; heavier elements up to Neon to approximately 200 MeV per nucleon.

These sensors were identical to or very similar to sensors on earth-orbiting IMP and ISEE spacecraft, the PIONEER 10 and 11 spacecraft to Jupiter and the outer solar system, and the later VOYAGER spacecraft to the outer planets. That fact often allows the direct intercomparison of the data over the large expanses of our solar system and that, together with the long lifetime of the experiments and spacecraft cited, simplifies and enhances the analysis of a broad range of solar and galactic phenomena to be described here.

In addition, the HELIOS experiment includes a proportional counter to monitor solar X-rays in the range 2 to 8 keV. This counter incorporates a fine collimator and an electronics system which allows data to be recorded in vertical bands across the sun and on either side, providing data to all the HELIOS investigations on energetic solar activity often not observable from earth. Figure page 150 is a photograph of the E-7 instrument showing several of the sensor assemblies or their apertures protruding through a heat shield, and the electronic box in the background.

## Solar Flare Associated Particle Events

An important aspect of solar flares is the production of energetic particles, since energetic particles seem to be both intimately related to the flare mechanism itself, and a number of flare phenomena appear to be produced by the interaction of energetic particles with material of the solar atmosphere. Additionally, radio emis-

sonden PIONEER 10 und 11 zum Planeten Jupiter und in das äußere Sonnensystem und später auf den VOYAGER-Sonden, die zu den äußeren Planeten unterwegs sind. Dadurch werden Messungen über die gesamte, sehr weite Spanne des ganzen Sonnensystems möglich, soweit es bisher überhaupt von Raumfahrzeugen erreicht werden kann. HELIOS dringt besonders nahe zur Sonne vor. Seine Messungen sind eine Art Grundlage für alles das, was weiter außen geschieht. Von unschätzbarem Vorteil ist dabei die unmittelbare Vergleichbarkeit der Meßdaten dank identischer Experimente und der weite Winkelbereich, den HELIOS in kurzen Zeiten durchfliegt.

Das Experiment enthält auch einen Monitor zur Beobachtung der Sonne im Röntgenlicht. Abb. Seite 150 zeigt das Experiment.

Flares auf der Sonne stoßen nicht nur Sonnenwindteilchen aus, die verhältnismäßig langsam sind, sondern auch sehr schnelle, hochenergetische Teilchen, die man wegen ihrer hohen Energie zur kosmischen Strahlung zählen muß. Die Vielfalt solcher Teilchen ist sehr groß. Man kann sie aus der Wellenstrahlung erschließen, die durch die Wechselwirkung der Teilchen mit dem umgebenden Plasma entsteht, oder direkt im Raum beobachten. Der Vergleich beider Methoden ist besonders nutzbringend. Am häufigsten sind die Elektronen zwischen etwa 10 und 100 keV und Ionen, besonders Protonen (= Wasserstoffionen, deren Anzahl weit höher ist als die Ionen aller anderen Elemente zusammengekommen), deren Energien zwischen einigen keV und mehreren GeV liegen. Wir wissen, daß die Energie des Flares und damit die der hochenergetischen Teilchen dem Energievorrat schnell ansteigender Magnetfelder entnommen wird. Der Mechanismus im einzelnen ist aber noch unklar. Die Analyse der Beobachtungen wird dadurch erschwert, daß sich die Eigenschaften der Teilchenströme aus dem Flare heraus mit den Einflüssen der Korona und des interplanetaren Mediums vermischen. Um diese verschiedenen Einflüsse trennen zu können, bot die Kombination von HELIOS 1 und 2 oft auch zusammen mit den Erdsatelliten IMP-7 und -8

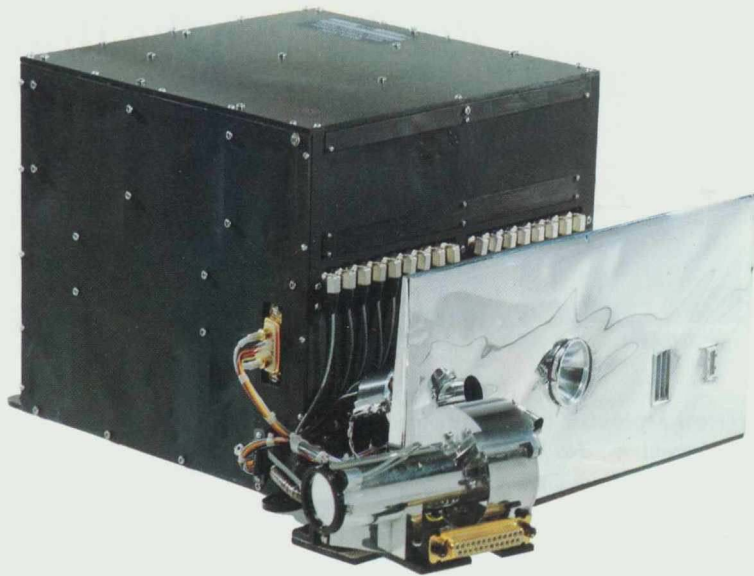


Bild von E7 auf HELIOS.

Photograph of the HELIOS-E7 experiment

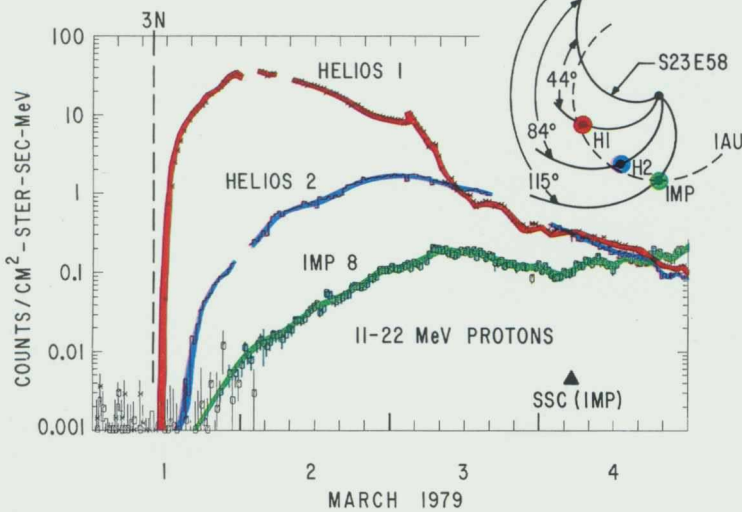
sion is produced by fast electrons interacting with the solar plasma and magnetic field, and X-ray emission is the result of the bremsstrahlung of energetic electrons. The gamma ray line emission is due to nuclear interaction of energetic ions, while continuum gamma ray emission is the result from the bremsstrahlung of relativistic electrons.

During a flare, a large and varied population of accelerated particles is produced. The nature and the characteristics of this population can either be derived from the observation of electromagnetic radiation or observed directly in the interplanetary medium. However, a comparative study between those two methods has proven to be a more valuable tool, as it helps to untangle and to cross check both the models used and the observations. The most dominant population consists of electrons in the range from about 10 to 100 KeV, and ions, especially protons (the hydrogen nuclei which are the most abundant ion species), which are detected from the keV energy range up to a few GeV in large flares. Energetic helium nuclei, carbon, nitrogen, oxygen, magnesium and iron nuclei are also observed. We know that the energy released in flares is derived from the rapidly growing magnetic field in active regions. However, a number of questions such as

the exact source of the material being accelerated, the acceleration process and the way particles are escaping from the corona into the interplanetary medium are still being debated, while more recent particle events and related flare observations bearing on the acceleration problems are being examined.

Among the particle observations giving clues to those problems are the examination of the time history of those events (that is to say: the variation with time of the number of atomic particles of a given species and energy passing through the detector at the spacecraft position since the start of the flare), the measured energy spectrum and the relative abundance of the different accelerated particle species. The relative abundance of electrons to protons is also an important measurement. However, before being detected in space, those particles have to experience transport from the flare accelerated site to the observing instrument aboard the spacecraft. Thus the effects of both interplanetary and longitudinal propagation need to be well understood in order to unfold the phenomena, or one has to find an observational trick to eliminate these effects.

HELIOS 1 and 2, often coupled with earth orbiting satellites such as the IMP-7 and IMP-8 or



Zeitprofil der Teilchenintensität, wie es von mehreren Raumsonden in verschiedenen heliographischen Längen bei dem Ereignis vom 1. März 1979 registriert wurde. Die Zeituordnung gestattet es, koronale Ausbreitungseffekte aufzuklären. Man beachte die unterschiedlichen Ankunftszeiten der ersten Teilchen an den verschiedenen Orten.

Time History of particle intensity recorded by several spacecraft at different heliolongitudes for the March 1, 1979 event. This timing allows one to unfold the coronal propagation effects. Note the different arrival times of the first particles recorded at the different locations.

oder ISEE besonders günstige Bedingungen immer dann, wenn

a) zwei Sonden sich gleich weit von der Sonne entfernt, aber in anderen Längenbereichen der Sonne aufhielten

b) zwei oder mehrere Sonden in verschiedenem Abstand von der Sonne, aber in ein und demselben, magnetisch mit der Flare-Region verbundenen Gebiet standen.

Während seiner zehn Betriebsjahre überdeckte HELIOS-1 fast einen ganzen Sonnenfleckenzyklus. Eine große Vielfalt von Ereignissen, angefangen von Mikroereignissen bis zu Rieseneruptionen, konnte beobachtet werden. Auch sehr atypische seltsame Ereignisse traten auf, verbunden mit der Emission von Neutronen, harten Röntgen- und Gammastrahlen.

Während des Sonnenfleckenmaximums überwiegen sehr energiereiche Teilchen im Bereich bis etwa 100 MeV, die von Flares stammen. Während des solaren Minimums sind Teilchen mit wesentlich niedrigeren Energien im Bereich um ungefähr 1 MeV am häufigsten. Solche Teilchenströme korotieren mit dem interplanetaren Medium; sie dauern typisch 4 bis 10 Tage lang und stehen in Verbindung mit interplane-

ISS, have provided excellent opportunities to both accommodate the observations and unfold the effects of interplanetary and coronal propagation. A collection of events could be observed simultaneously by more than one spacecraft. Those observations fall into two different categories.

a) Two spacecraft were at the same radial distance but separated in longitude with respect to the flare, with one spacecraft being magnetically well-connected to the flare region. These positions offer the possibility to study both the flare-associated particle phenomena and the determination of the coronal effects.

b) Two spacecraft or more are inside the region magnetically well-connected to the flare but at different radial distances, with one being as close as possible to the sun. This configuration allows solving the interplanetary dependence effects and the determination of the flare associated particle phenomena. Besides confirming earlier single spacecraft observations of coronal and interplanetary transport of solar particles, those observations gave new direct information on the spatial distribution of flare particles and help to put one more constraint in the parameters used to derive models of coronal and interplanetary propagation.

During its 10 years of operation, HELIOS 1 covered almost one solar cycle and was able to observe a large variety of events, ranging from micro events to large flares. For typical events when the spacecraft was well connected to the flare region, the measurements of particle properties such as timing, source particle spectra and relative abundance in conjunction with electromagnetic radiation observations related to the flare, have helped in better defining the characteristics of the particle distributions associated with flares. Such characteristics are presently being analysed more thoroughly in the context of particle acceleration models and models for injection into interplanetary space.

A very few atypical solar particle events were observed by HELIOS when its position was well aligned in relation to the flare region. Those events were associated with flares producing gamma rays detected by the Solar Maximum Mission spacecraft. In addition, neutrons directly involved in the gamma ray process were also observed in the interplanetary medium. The analysis of those events – particularly the timing, the anisotropy and the relative abundance of the elements – together with the hard X-rays, gamma rays, neutron observations, and the apparent association of a particle increase just a few hours before the main flare, had suggested the importance of storage for those events and has greatly helped in investigating a model where the impulsive flare and the resulting shock both further accelerate and precipitate the existing reservoir of stored energetic particles.

#### Corotating Energetic Particle Streams in the Inner and Outer Solar System

While at the maximum of solar activity, very energetic particles associated with solar flares are the dominant population and are detected in a range of energy extending to approximately 100 MeV, during the minimum solar activity period the dominant populations are the low energy particle streams in the approximately 1 MeV range. Those energetic particle streams are corotating with the interplanetary medium; they last typically for 4 to 10 days and are



turen Stoßwellen. PIONEER 10 und 11 hatten herausgefunden, daß die Intensität der Ströme zwischen 1 AE (Erdbstand) und 4 AE anwächst. Diese Teilchen müssen also im interplanetaren Raum zu ihren hohen Energien beschleunigt werden. Die Quelle für solche Energien liegt in starken, teilchenreichen Stoßwellen. Diese Annahme wurde durch Messungen im Bereich zwischen 0,3 AE und 10 AE bestätigt. Hochgeschwindigkeitsströme des Sonnenwindes, die aus koronalen Löchern stammen, entwickeln sich außerhalb etwa 2 AE zu korotierenden Stoßwellensystemen, die Protonen, Heliumkerne (Alphateilchen) und schwerere Ionen zu beschleunigen in der Lage sind. Die resultierenden hochenergetischen Teilchenströme erreichen ihr Maximum zwischen 3 und 5 AE Entfernung von der Sonne.

Ähnliche Mechanismen können natürlich auch in der Umgebung anderer Sterne und Sternsysteme wirksam sein. Möglicherweise sind sie die Ursache für die langsameren Teilchen der kosmischen Strahlung, die aus der Tiefe des Milchstraßensystems zu uns kommen (galaktische kosmische Strahlung).

Alle Arten der kosmischen Partikelstrahlung, auch die galaktische Strahlung, wird durch die Wechselwirkung mit dem Sonnenwind stark beeinflusst. Während des Sonnenfleckenzyklus beobachtet man hohe kosmische Strahlungsintensität im Aktivitätsminimum, niedrige Intensität im Aktivitätsmaximum. Eine der Aufgaben von HELIOS 1 und 2 war es, den Gradienten der galaktischen kosmischen Strahlung zu messen, d. h. anzugeben, wie stark die mittlere Strahlungsintensität sich ändert, während man sich der Sonne nähert. Dieser Gradient erwies sich als überraschend klein. Er stimmte überein mit ähnlichen Beobachtungen von PIONEER 10 und 11 auf dem Weg nach außen.

Die Intensität der kosmischen Strahlung konnte fast einen vollen solaren Zyklus lang beobachtet werden. Das Ergebnis zeigt Abb. Seite 154, in

associated with strong interplanetary shocks. The discovery of a positive radial gradient by PIONEER 10 and 11 between 1 and 4 Astronomical Units (AU) led McDonald et al (1976) to propose interplanetary acceleration as the most plausible explanation for the formation of those streams and to suggest the suprathermal distribution of the solar wind as a possible source of those particles. Detailed studies using a large network of cosmic ray experiments on-board space probes located between .3 AU and 10 AU, in which HELIOS measurements had contributed for a major part, confirmed those earlier explanations.

Measurements of the radial dependence between .3 AU and 10 AU of the energy spectra of both Hydrogen and Helium nuclei and the variations of those measurements with both time and distances relative to the sun and relative to the interaction boundary between the high speed and low speed solar wind streams, have led to major results which have been used extensively to resolve the problems of the origin and the interplanetary acceleration of those corotating particle streams. It is now believed that high speed solar wind streams which originate in large scale coronal holes evolve beyond 2 AU into corotating shock systems which accelerate protons, Helium nuclei and heavier ions. The resulting energetic particle streams have a maximum between 3 and 5 AU from the sun.

Such an acceleration which seems to take place very efficiently in the interplanetary medium could also exist in other star systems where the star wind may interact even more strongly to form shocks which could accelerate the suprathermal star wind to even higher energies than those observed near our sun. Such a mechanism may possibly form some of the low energy particle components of the galactic cosmic radiation, but at the present this is speculation and both observations and models need to be made.

#### Solar Modulation of Galactic Cosmic Rays

The intensities of galactic cosmic rays at the orbit of earth (1 AU) are significantly modulated

by their interaction with the interplanetary medium. Over an 11 year solar cycle, the magnitude of this modulation is inversely correlated with the level of solar activity, but remains substantial even during solar minimum periods. The physical processes involved are complex, but the understanding of solar modulation is vital in establishing the properties of galactic cosmic rays in the interstellar medium and the more general problems of charged particle transport in turbulent magnetic fields.

HELIOS 1 and 2 were launched at the time of solar minimum, and while one expected to measure a radial gradient of cosmic ray intensities inward to 0.3 AU, the HELIOS measurements showed that the gradient was very small indeed. Effectively, the HELIOS cosmic ray measurement then became a very clean measurement of the cosmic ray intensities of our inner solar system and were especially valuable for direct comparison with almost identical sensors on the PIONEER 10 spacecraft at large distances from the sun.

In the then current solar cycle, the onset of the long-term modulation began in late 1977. Figure page 154 shows HELIOS and PIONEER 10 data for the intensity of cosmic ray protons over the 4 year period from 1977 through the end of 1980. During this period PIONEER 10 travelled to distances from the sun of 12 AU to beyond 23 AU. The dashed and dotted curves represent simple transformations of the HELIOS data to the PIONEER 10 location and are seen to fit the data remarkably well. The models assume a gradient of 3.5 percent per AU and a propagation velocity from HELIOS to PIONEER 10 similar to solar wind velocities.

The simple transformation between HELIOS and PIONEER 10 directly gave the important new result that the relative magnitude of the intensity decrease of high energy galactic cosmic ray protons in the outer heliosphere is the same as that observed at 1 AU. Furthermore, there is a finite delay between the time these changes are observed at the orbit of earth and that of PIONEER 10, corresponding to approximately

Intensität von 115-220 MeV Protonen (26 Tage-Mittelwerte) für PIONEER 10 und HELIOS 1 und 2 zwischen 1977 und Frühjahr 1981. Die zwei Kurven durch die PIONEER 10-Daten stellen die HELIOS-Daten dar, übertragen zum PIONEER 10 unter der Annahme eines konstanten radialen Gradienten von 3,5% pro AE und (i) einem

Zeitunterschied, der durch eine Sonnenwindgeschwindigkeit von 550 km/sec definiert ist (gestrichelte Linie) oder (ii) der von gleichzeitigen Änderungen an den zwei im Raum sehr weit auseinanderliegenden Orten ausgeht ( $V_{sw} = \infty$ ; punktierte Linie).

Intensity of 115–220 MeV protons (26 day averages) for PIONEER 10 and HELIOS 1 and 2 from 1977 to early 1981. The two lines through the PIONEER 10 data represent the HELIOS data transferred to PIONEER 10 assuming a constant radial gradient of 3.5% per AU and (i) a propagation delay defined by a solar wind velocity of 550 km per sec. (dashed line) or (ii) assuming that

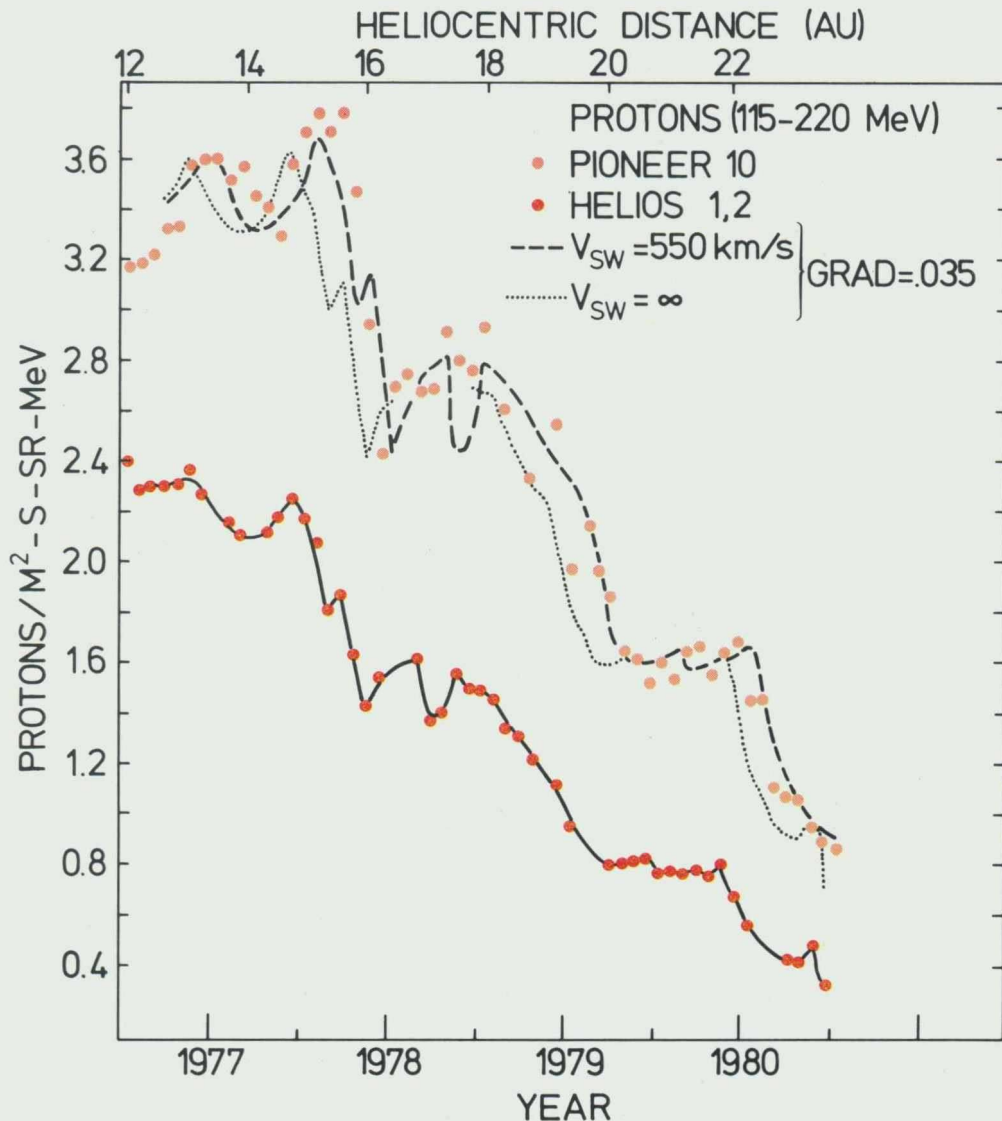
the changes occur simultaneously at the two locations ( $V_{sw} = \infty$ ; dotted line).

dem HELIOS-Daten mit denen von PIONEER 10 und 11 verglichen werden. PIONEER 10 ist inzwischen mehr als 23 mal so weit von der Sonne entfernt wie die Erde. Dennoch sind die Messungen der galaktischen kosmischen Strahlung auf HELIOS 1 und auf PIONEER 10 fast identisch, wenn man einen kleinen Gradienten von 3,5%/AE berücksichtigt (er trägt den vielen Einflüssen Rechnung, denen die Teilchen auf ihrem langen Weg ausgesetzt sind). Die Laufzeit zwischen PIONEER 10 und HELIOS beträgt für die Teilchen inzwischen mehr als 70 Tage! Vermutlich spielen Stoßwellen, die von der Sonne aus weit nach außen bis an die Grenze des Sonnensystems laufen, eine entscheidende Rolle für die Modulation der kosmischen Strahlung im Verlauf des Sonnenfleckenzyklus (vgl. S. 77). Das sind völlig neue Ideen über unser Sonnensystem und über Sternsysteme im allgemeinen, die den Astrophysikern Anregungen bieten, Modelle über die Welt insgesamt neu zu durchdenken.

Gegen Ende 1972 fanden sich in den Daten einiger Erdsatelliten ausbruchartige Ereignisse. Die Analyse ließ hochenergetische Gammastrahlen von galaktischen Quellen vermuten. Wegen ihrer extrem hohen Energie ist die Richtungsbestimmung von Gammastrahlen nur mit Hilfe von Triangulation möglich mit einer Basislänge, die Zeitdifferenzen des mit Lichtgeschwindigkeit durchlaufenen Wegs in der Größenordnung einiger Sekunden bis Minuten zuläßt. Da HELIOS 1 inzwischen gestartet war, bot sich HELIOS 2 als ideal geeignetes Raumfahrzeug an.

Die Projektleitung von HELIOS stimmte zu, E7 durch eine Elektronikbox zu ergänzen, die in Verbindung der Detektoren von E6 und E7 die Aufzeichnung von Ausbruchs-Datenprofilen und die Zeitbestimmung auf  $\frac{1}{1000}$  Sekunde genau ermöglichte.

Das Gerät erbrachte einen vollen Erfolg. Zusammen mit mehreren anderen Satelliten entdeckte HELIOS 2 zahlreiche Gammastrahlen-Ereignisse und ermöglichte die erste exakte Ortsbestimmung galaktischer Quellen von Gammastrahlen-Ausbrüchen.



70 days when PIONEER 10 is at 23 AU. These results require that near solar maximum most of the modulation must occur beyond 23 AU. The results suggest that moderately long-lived, radially propagating shock waves in the outer heliosphere may play a key role in the long term modulation (see also page 77). These were fresh new ideas which already have stimulated astrophysicists throughout the world to rethink the models and the processes effective in the energization and transport of high energy particles in our solar system and in stellar systems in general.

### Gamma Ray Bursts

It was in late 1972 that some nuclear radiation sensors on earth orbiting satellites detected burst-like events in their data. The analysis resulted in the suspicion that these bursts of radiation did not originate in our solar system, but that they were generated somewhere in the galaxy. From the signature of the bursts it was concluded that they were more of a wave-like nature rather than cosmic ray particles. Moreover, their nature was identified as gamma rays, i.e. electromagnetic radiation of extreme high energy. Due to the high energy of the photons in the burst, it is difficult to design a single sensor which can determine the direction and location of the source or sources. The only way to gain this information would be triangulation by measuring the difference of the burst arrival at two or more very distant points in space. The time difference measured on the various spacecraft resulting from the travel time of the gamma rays through space should be on the order of some seconds to minutes, since the gamma rays travel at the velocity of light. An ideally suited spacecraft for such a task was HELIOS 2, since HELIOS 1 had already been launched.

The HELIOS project agreed to a supplementary device as a last-minute electronics addition to be carried on top of the E7 electronics box. The electronic processing unit was connected to detectors in experiments E6 and E7, and could record burst profiles and absolute timing to 1 millisecond.

This experiment approach was a great success. HELIOS 2 detected numerous gamma ray burst events together with several other spacecraft and the experimenters and the project are proud that HELIOS 2 allowed the first precise location of these sources in the sky, proving the suspected galactic origin.

Projektmanagement:

DFVLR – Bereich für Projektträgerschaften, Köln

*DFVLR – Project Executive Department, Cologne*

Hauptauftragnehmer:

MBB – Unternehmensbereich Raumfahrt, Ottobrunn

*MBB – Space Division, Ottobrunn*



# HELIOS und die Beiträge der Industrie

Wer hat verantwortlich zur Entwicklung der beiden Sonden beigetragen?

Was war neu am HELIOS-Management?

Welche technischen Probleme mußten gelöst werden?

Was hat die Industrie aus HELIOS gelernt?

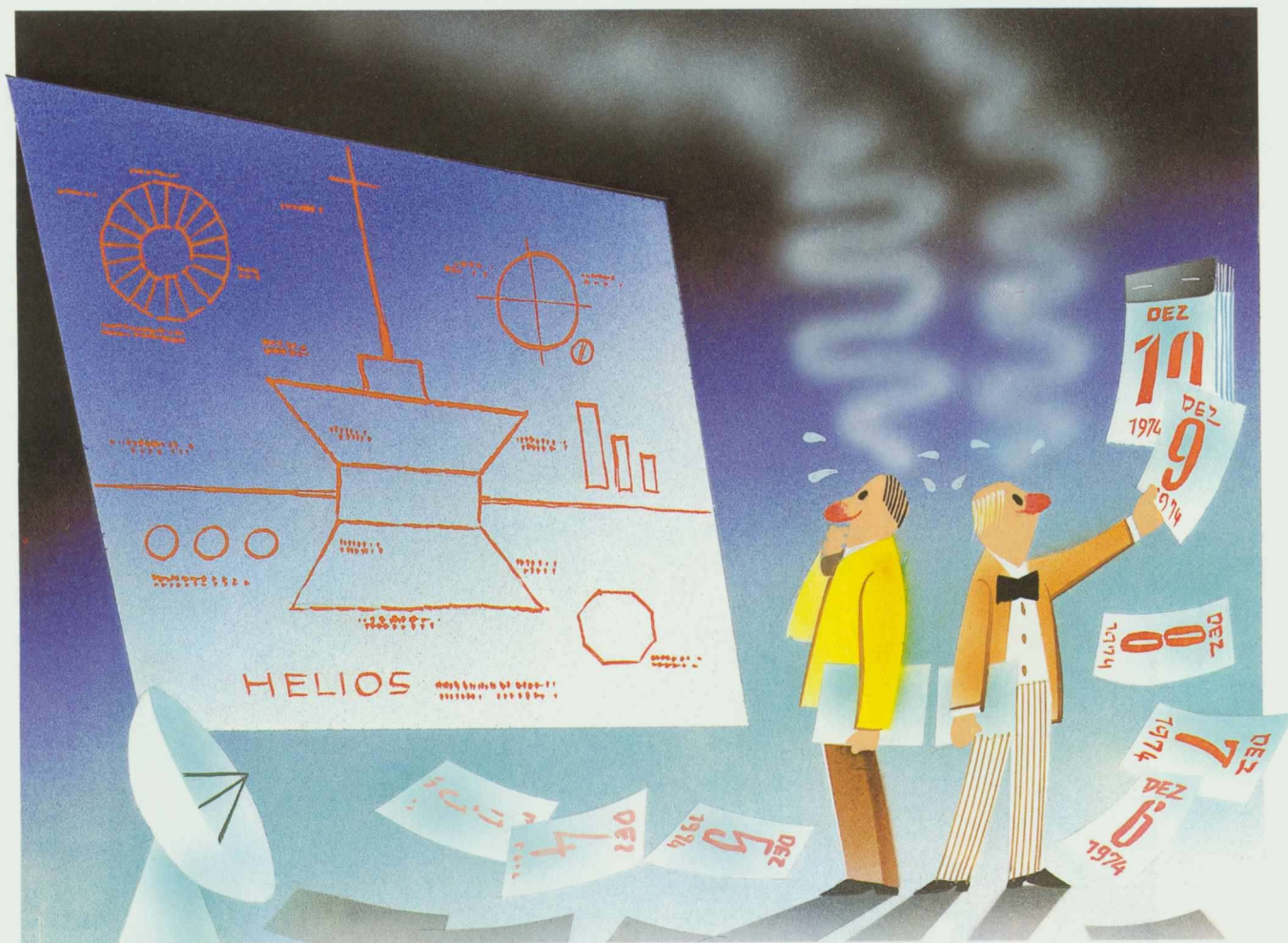
# *HELIOS and the Industrial Contributions*

*Who has responsibly contributed to the development of the two probes?*

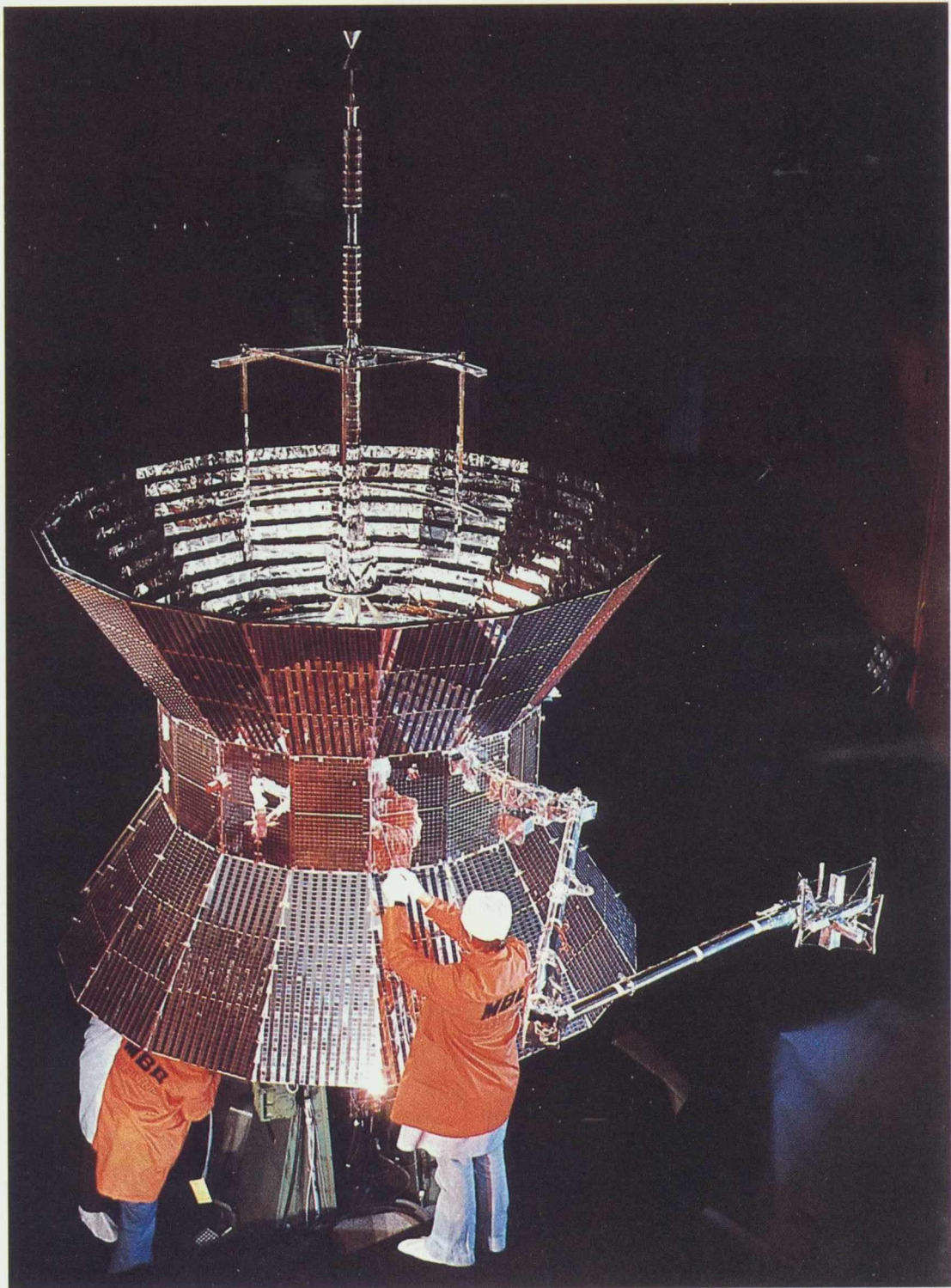
*What was new with the HELIOS Management?*

*Which technical problems had to be solved?*

*What has industry learned from HELIOS?*

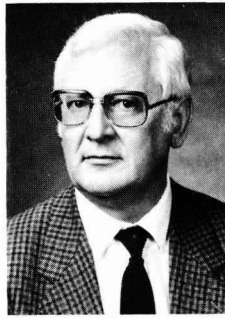


hek  
84



# Die Bedeutung von HELIOS für Europa

Ants Kutzer\*), Deutscher Projektleiter HELIOS, jetzt Leiter Orbitalsysteme, MBB-ERNO, Bremen



Kutzer

Die Herausforderung an das Management von HELIOS war vielleicht die größte Projekt-Herausforderung überhaupt. Die Vielzahl der Teilnehmer an HELIOS umfaßte Regierungsvertreter, Auftragnehmer und Wissenschaftler beider Länder, der Bundesrepublik Deutschland und der Vereinigten Staaten. Industrielle Beiträge kamen weit gestreut von Firmen aus den Vereinigten Staaten, Deutschland, Frankreich, Belgien und Großbritannien. Das Projekt übte strenge Managementkontrolle über alle Beteiligten, während es gleichzeitig einen hohen Grad von Offenheit und Gesprächsbereitschaft zwischen allen Gruppen förderte.

HELIOS bot die Chance der Ausbildung und Weiterbildung von hochqualifizierten Fachkräften aus der Industrie und der DFVLR. Fachleuten mit Erfahrung bot sich eine erste große Herausforderung für ihre berufliche Karriere in einem wachsenden und sich ausweitenden Bereich zukünftiger internationaler Vorhaben.

Einige Besonderheiten der Mission HELIOS waren bedeutsam für die deutschen Bodenkontroll-Aktivitäten: HELIOS war und ist

– die erste interplanetare Mission mit deutscher Netzwerkunterstützung

– das erste Raumfahrzeug, das ein S-Band Send-/Empfangssystem und Kanal-Kodierung benutzte

– das erste Raumfahrzeug, das die Ausrichtung einer Hochleistungsantenne an Bord vom Boden aus erforderte,

– die erste Mission mit einem kombinierten Betrieb über zwei Netzwerke (Deutsches Bodenbetriebssystem und DSN).

Die Lösung der dabei auftretenden Probleme war nicht weniger anspruchsvoll als die Entwicklung von HELIOS selbst, einer Raumsonde der dritten Generation. Diese Übersicht kann auf folgende Ergebnisse hinweisen:

Technik:

Ein großes Raumfahrzeug wurde entworfen, gebaut und in seine Umlaufbahn gebracht. HELIOS trieb den technischen Entwicklungsstand auf mehreren Gebieten voran, insbesondere im Thermalentwurf.

Die Konkurrenzfähigkeit der deutschen Raumfahrtindustrie wurde gesteigert, indem die Basis für bessere Ausrüstung, neue Techniken und Experimente für zukünftige Projekte geschaffen wurde.

Der Entwurf der elektrischen Bodenanlagen und der Geräte für die Telekommunikation über einen weiten Umgebungsbereich wurde erfolgreich verwirklicht. Er brachte verbesserte Qualität, Qualitäts-Kontrolltechniken und Verfahren mit sich. Solche Fortschritte finden direkte Anwendung in der deutschen Industrie insgesamt.

Die Arbeit, die im Bereich der Elektronik, integrierter Schaltkreise und Komponenten hoher Zuverlässigkeit geleistet wurde, hat die Stellung der deutschen und europäischen Industrie auf internationalem Feld rasant expandierender Elektronik ebenso verbessert wie die unterstützende Forschung im Bereich der Telekommunikation.

*The management challenge of HELIOS was perhaps the greatest challenge of all. The multiple participants of HELIOS included governmental agencies, contractors, and scientists from both the Federal Republic of Germany and the United States. The industrial effort is spread over a large number of contractors in the United States, Germany, France, Belgium, and the United Kingdom. The project exercised firm management control over the participating parties, while simultaneously assuring a degree of openness and communication among all participating groups.*

*HELIOS offered the opportunity to train and develop highly skilled professional personnel from Industry and the DFVLR and to retain the existing pool of skilled space personnel by providing them with the first big challenge of their professional careers in a growing and widening range of future international cooperative endeavours.*

*The highlights of the HELIOS mission features which were significant for German Ground Operations were*

*–first interplanetary mission supported by German net work,*

*–first spacecraft supported using S-band technique and channel coding,*

*–first spacecraft requiring high gain antenna pointing from ground,*

*–first mission with combined internetwork operations (German net/DSN).*

*Implementing these features has been as challenging a job as the development of this third generation spacecraft.*

*Today's survey of the impact identifies the following achievements.*

*\*) HELIOS Project Manager for Germany, now Orbital Systems Manager MBB-ERNO, Bremen*

Produktionsstätten und Bodenbetriebsanlagen wurden in Deutschland entwickelt, um die allgemeinen Aktivitäten und die Tests zu unterstützen. Sie stehen jetzt für zukünftige Raumfahrtprogramme zur Verfügung.

#### Management:

Die Netzplantechnik wurde erfolgreich erprobt. Die dazu notwendigen Methoden, Verfahrensweisen und Techniken der Systemanalyse und -synthese wurden entwickelt.

Ausgeklügelte Managementsysteme und -praktiken auf allen Gebieten der Projektplanung, im Berichtswesen und bei der Projektüberwachung wurden angewendet. Ein bestorganisiertes Managementteam etablierte und bewährte sich.

Das Projektmanagement-Konzept eines einzigen Hauptauftragnehmers erwies sich als sehr gut geeignet. Der Hauptauftragnehmer faßte die Tätigkeiten einer größeren Zahl von Unterauftragnehmern aus verschiedenen Ländern zusammen zu einer einzigen, gemeinsamen Projektleistung. Ein Stamm von hochqualifizierten Ingenieuren wuchs heran, der fähig war, die technischen Aufgaben eines großen und schwierigen Raumfahrtprojekts in beispielgebender Teamarbeit zu lösen.

Netzplantechnik und zugehörige Planungs- und Management-Methoden bewährten sich hervorragend. Über einen Zeitraum von fünf Jahren verschob sich der Starttermin von HELIOS 1 nur um ungefähr fünf Monate: wahrhaftig eine ausgezeichnete Leistung! Kostenschätzungs- und -kontrolltechniken wurden entwickelt und angewendet. Sie erwiesen sich als besonders wirksam. Die beteiligte Industrie hat mehr als zwanzig Projekte aufgezählt, die daraus unmittelbaren Nutzen gezogen haben. Werkstoffe und Techniken und technische Neuentwicklungen und/oder ihre Nebenprodukte wurden in Europa erstmals bei HELIOS eingesetzt.

Die Liste der aufgezählten Projekte umfaßt sowohl wissenschaftliche Satelliten wie GEOS als auch Anwendungssatelliten wie TV-Sat, ECS, MARECS und bemannte Missionen wie SPACELAB. Zukünftige Projekte wie DFS und EURECA sind gleichfalls immer noch Nutznießer der Entwick-

#### Technical:

*A major space vehicle was designed, qualified and launched into orbit. The HELIOS spacecraft advanced the state of the art in many areas with especially noteworthy advances in the thermal area.*

*The technological expertise of German space industry was enhanced thus providing the base for better equipment, techniques and experiments for future space projects.*

*Power and telecommunication reliability requirements over a wide range of environments were successfully met and brought about improved product integrity and quality control techniques and procedures. Such advances had a direct application to German industry as a whole.*

*Work accomplished in electronics, integrated circuits, and high reliability components as well as supporting research in telecommunications has enhanced German and European industry's position in the rapidly expanding international electronics field.*

*Facilities and ground operational equipment were developed in Germany to support HELIOS activities and tests and are now available for future space programs.*

#### Managerial:

*Application of the systems approach was accomplished and associated methods, procedures and techniques of systems analysis and synthesis developed.*

*Sophisticated management systems and practices in all areas of project planning, reporting and controlling were developed and applied and a skilled body of trained management personnel established.*

*The prime contractor concept of project management was successfully and effectively applied. The prime contractor integrated the activities of a large number of subcontractors from different countries into a single project effort.*

*A cadre of skilled technical personnel qualified to manage the technical efforts in a space project of large size and complexity was established.*

*Scheduling techniques and associated planning and management efforts were proven to be outstanding. Over a five year time span the launch date of the HELIOS mission slipped by about five months – a truly excellent performance.*

*Cost estimating and control techniques were developed and applied which proved extremely effective.*

*The participating industry in the HELIOS project have identified more than twenty (20) projects benefiting from the transfer of processes, materials and techniques and technological advancements and/or spin-offs as well as managerial procedures and methodologies first used in Europe on HELIOS.*

*The list of projects comprises scientific satellites such as GEOS and application Satellites as TV-Sat, ECS, as well as MARECS. Manned space activities as SPACELAB, future projects to be implemented such as DFS and EURECA are still potential recipients of HELIOS technology.*

*It was not surprising to find HELIOS technology applied in solar probes and Halley comet probe GIOTTO because more than ten years ago the HELIOS team envisaged the feasibility and capability of a modified HELIOS to intercept a comet in space by flying HELIOS through the coma of the ENCKE comet on December 6, 1980 and continuing on to perform its investigations of the sun at solar maximum (also 1980). The later part has come true anyway. Most of the HELIOS team on both sides of the Atlantic ocean remember the discussions in Ames Research Center of a project IKARUS and an invention called second surface mirrors to reject the heat from the sun. This NASA concept became a key feature of the HELIOS thermal design and final success. One small example of many sharings of knowledge and know-how: the Symbols of friendship and prosperity.*

lung von HELIOS. Es war nicht überraschend, daß die Techniken von HELIOS eingesetzt wurden bei fortgeschrittenen Studien über Sonnensonden und bei der Halley-Mission GIOTTO. Schon vor mehr als zehn Jahren hatte das HELIOS-Team den Einsatz einer modifizierten HELIOS-Sonde für eine Mission vorgesehen, deren Aufgabe es gewesen wäre, am 6. Dezember 1980 durch die Coma des Kometen Encke zu fliegen. Dabei sollten gleichzeitig die solar-interplanetaren Studien von HELIOS 1 und 2 während der Phase des Sonnenfleckenmaximums, also 1980, vertieft fortgesetzt werden. Glücklicherweise ermöglichte letzteres die lange Lebensdauer von HELIOS 1 ohnehin. Viele Mitarbeiter des HELIOS-Teams auf beiden Seiten des Atlantik erinnern sich an Diskussionen im Ames Research Center der NASA, als es um die Hinterglas-Spiegeltechnik ging, die damals bereits für ein Projekt IKARUS (Vorläufer einer Sonnensonde) vorgesehen war. Diese Technik des Hitzeschutzes interplanetarer Sonden wurde zur Schlüsseltechnik für den Thermalentwurf von HELIOS und damit schließlich für den Erfolg der Mission. Das sei ein kleines Beispiel für viele, bei denen Wissen und Können ausgetauscht wurden: Symbole für Freundschaft und Wohlwollen.

Die Aufgaben und Ziele des Projekts HELIOS, die zu Beginn des Programms 1969 formuliert worden waren, konnten voll erfüllt und erreicht werden. Die Ergebnisse können jetzt als vollendete Tatsachen präsentiert werden. Das internationale kooperative Raumsonden-Projekt HELIOS war auf allen Ebenen ein voller Erfolg.

*The goals and objectives of Project HELIOS as set forth at the inception of the program in 1969 were fully met. The achievements can now be presented as accomplished facts.*

*The International Cooperative Satellite Project HELIOS has been a great success throughout all its aspects.*

# Gewinn an Managementfähigkeiten durch HELIOS für die europäische Industrie

Ants Kutzer<sup>1)</sup>, deutscher Projektleiter HELIOS, jetzt Leiter Orbitalsysteme, MBB-ERNO Bremen

Bernd-J. Madauss<sup>2)</sup>, Leiter für Planung und Projektkontrolle bei HELIOS, jetzt Leiter Projekt-Operation, MBB, Unternehmensbereich Raumfahrt, Ottobrunn



Kutzer



Madauss

## Kenntnisse, die bei der Zusammenarbeit in Arbeitsgruppen und bei Projekt-Revisionen gewonnen wurden

Wie AZUR und AEROS, so war auch HELIOS ein kooperatives Projekt zwischen Deutschland (BMFT) und USA (NASA). Die Verantwortung für die Durchführung des Projekts und die Tag-für-Tag-Koordination war den beiden Projektleitern übertragen. Eine gemeinsame Arbeitsgruppe aus beiden Ländern mit angemessener Teilnehmer-schaft wurde als ständige Einrichtung von den Projektleitern ins Leben gerufen. Diese Institution erwies sich als ausgezeichnete Management-Hilfe.

Die regelmäßigen, etwa halbjährlichen mehrtägigen Konferenzen der gemeinsamen Arbeitsgruppe – abwechselnd in Deutschland und den USA – dienten der Lösung von Problemen, dem Austausch von Informationen und der vertieften Arbeit in Richtung auf den Erfolg. Die Arbeit war sehr effektiv und wurde zum Impulsgeber innerhalb des Projekts.

Die Aufgaben der gemeinsamen Arbeitsgruppe im einzelnen waren:

- Austausch der notwendigen Informationen
- Identifikation spezieller Probleme
- Zuordnung der Verantwortlichen für die Untersuchung der Probleme und die Analyse der vorgeschlagenen Lösungen
- Identifikation von Themen, die besondere Beachtung durch das Management erforderten
- Empfehlungen an die Projektleiter, um bei

komplexen deutsch-amerikanischen Schnittstellenfragen zu guten Lösungen zu kommen.

Vieles von der Erfahrung, die gewonnen wurde, ist der ausgezeichneten Unterstützung zu verdanken, die die NASA in Form von Dokumentation, Information und professioneller Erfahrung von Ingenieuren und Wissenschaftlern in diese Arbeitsgruppenkonferenzen einbrachte. Auch Erfahrungen aus dem interplanetaren PIONEER-Programm der NASA wurden ausgiebig genutzt.

Bereits davor bzw. parallel dazu lief ein Arbeits-Trainingsprogramm, das auf insgesamt etwa dreißig Mannjahre anwuchs – eine sehr wirkungsvolle Investition. Dieses Trainingsprogramm förderte sowohl Ingenieure als auch Wissenschaftler und administratives Personal. Die Mitarbeiter kamen aus dem Managementbereich, aus dem technischen Projektteam, vom Bodenkontrollsystem und aus technisch orientierten Forschungsinstituten, die dem Projekt funktionelle Unterstützung boten.

Ein anderes wirkungsvolles Instrument der Übertragung von Wissen und Erfahrung war das Projekt-Revisionsprogramm. Entwurfsrevisionen sind umfassende Prüfungspunkte im Lebenskreis eines Systems. Sie schließen das SONDENSYSTEM, Subsysteme und Komponenten ein. Die Hauptaufgaben dieser Revisionen betrafen:

- dem Projekt technische Assistenz bieten
- Schnittstellen festlegen und den Entwurf zusammenfassend begutachten
- die Dokumentation vervollständigen

## Know-how gained by cooperation in working groups and reviews

*HELIOS like AZUR and AEROS was a cooperative project between Germany (BMFT) and the United States (NASA). The responsibility for the implementation of the cooperative projects and for the day-to-day coordination rested with the single project managers nominated from both sides.*

*In particular in the HELIOS project the Joint Working Group established by the project managers with appropriate membership from both sides became an excellent management tool.*

*The Joint Working Group Meetings took place approximately every 6 months and alternated between Germany and the United States. These meetings became a very effective means for solution of problems, exchange of information and for concentrating efforts in the direction of success. They were a momentum within the project.*

*The meetings provide for:*

- exchange of required information
- identification of specific problems
- definition of responsibilities for the investigation of problems and analysis of proposed solutions

1) HELIOS Project Manager for Germany; now Manager Orbital Systems MBB/ERNO, Bremen  
2) HELIOS Project Operations Planning and Performance Control Manager

– periodische Bewertung des Entwurfs im Hinblick auf die Aufgabenstellung

– Probleme und riskante Bereiche für das Management aufzeigen.

Indem Experten die Entwurfskriterien mit dem tatsächlichen Entwurf vergleichen, gewinnt die Projektleitung Sicherheit darüber, wo Dinge geändert werden müssen bzw. wo die Chance besteht, das Entwicklungsziel zu erreichen. Die Revisionen dienen nicht dem Zweck destruktiver Kreuzverhöre oder dem Aussondern verschrobener Meinungen. Das vordringliche Ziel des HELIOS-Revisionsprogramms bestand vielmehr darin, die Erfolgswahrscheinlichkeit so hoch wie möglich werden zu lassen. Dieses Ziel wurde offensichtlich erreicht.

Während die Entwurfsrevisionen technisch orientiert waren, wurde auch Wert darauf gelegt, Operationsbeschränkungen einzugrenzen, besonders solche, die die Aufgabenstellung der Primärmission und die Projektkosten und die Zeitpläne betrafen.

Das Revisionsprogramm für HELIOS umfaßte:

– Konzeptentwurfsrevision

– Erste Hauptentwurfsrevision

– Zweite (kritische) Hauptentwurfsrevision

– Erste Produktinspektion

– Flugfähigkeits-Revision (nach der Testphase des Prototypen)

– Fertig-zum-Start-Revision (nach den Abschlußtests des Flugmodells)

– „Flugkontrolle startbereit“-Revision (nach der Herausgabe des Flugoperationsplans)

Die Methoden und Prozeduren waren sehr nützliche Managementhilfen. Sie sind jedoch kein Ersatz für die Erfahrung. Deshalb kam der wirksamste Erfahrungsbeitrag von Mitarbeitern, die bereits an Vorgängerprojekten gearbeitet hatten. So wurden die ehemaligen Projektgruppen von AZUR und DIAL geschlossen in die Projekte AEROS und HELIOS übernommen.

– *identification of items requiring management attention*

– *recommendations to the project managers concerning the solution of complex German/US interfaces.*

*Much of the experience gained results from excellent support provided by NASA by making available documentation, information, and the professional experience of NASA engineers and scientists in these working group meetings. Within the HELIOS Joint Working Group methods were developed to make the experience from the NASA interplanetary PIONEER program available to the HELIOS project.*

*Within the project about thirty (30) man years of (on-the-job) training with defined training purpose and plan have been an excellent investment. The training program covered engineers as well as project administrative staff within the project teams, the Ground and Operations System, and technological Institutes providing functional support to the cooperative projects.*

*Another most effective means of transfer of know-how and experience was the design review program.*

*In general, design reviews are check points in the life cycle of a system. They encompass a detailed systematic review of the spacecraft system, subsystems, and components. The overall objectives of such reviews are to:*

– *provide technical assistance to the project*

– *define interfaces and integrate the design*

– *improve documentation*

– *periodically evaluate design adequacy*

– *recognize problems and areas of risk to management.*

*By concentrating on design solutions and potential or actual problems, the various reviews provide the management either with a chance to change things or the assurance that the project will achieve objectives. These various reviews*

*are conducted on a constructive basis and are intended to provide assistance to the line engineers. They are not for the purpose of a destructive cross-examination of the design efforts, or the sorting out of opinions. For the HELIOS project a design review program was developed with the craft missions. This objective was obviously achieved. While the design review was technically oriented, proper consideration was also given to constraints operating on the projects; particularly those involving primary mission objectives and program costs and schedules.*

*The HELIOS review program included:*

– *Conceptual Design Review*

– *Preliminary Design Review*

– *Critical Design Review*

– *First Article Configuration Inspection*

– *Flight Qualification Review (after Prototype Qualification Testing)*

– *Flight Readiness Review (after Flight Unit Acceptance Testing)*

– *Flight Operational Readiness Review (after issue of Flight Operations Plan)*

*The methods and procedures described have been very useful management tools. However, there is no replacement for experience. Therefore the most valuable transfer of experience was accomplished by people working on previous projects. The AZUR and DIAL project teams were completely absorbed in the AEROS and HELIOS projects.*

*Not the last nor the least effect of know-how transfer was accomplished at the beginning of the HELIOS project by industrial US consultants from General Electric with emphasis on the management concept, plans and procedures and TRW with emphasis on the technical concept, trade-offs and system engineering. A noteworthy aspect was that where ever applicable the consultants were integrated in the customer/prime contractor organizational system.*

<b>1970</b>	<b>1971</b>	<b>1972</b>	<b>1973</b>	<b>1974</b>	<b>1975</b>
-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

- ▽ KONZEPTENTWURFSREVISION
  - ERFOLGREICHER ABSCHLUSS DER STUDIENPHASE
- ▽ ERSTE HAUPTENTWURFSREVISION
  - BESTÄTIGUNG DES ENTWURFSABSCHLUSSES
  - BEGINN DER INTEGRATION DES INGENIEURMODELLS
- ▽ ZWEITE (KRITISCHE) HAUPTENTWURFSREVISION
  - BESTÄTIGUNG DES ERFOLGREICHEN ABSCHLUSSES DER ENTWICKLUNGSTESTS
  - FORMALE GENEHMIGUNG DER PROTOTYP-INTEGRATION
- ERSTE PRODUKTINSPEKTION
  - SIE BESTÄTIGT, DASS ALLE EINZELTEILE GEMÄSS DER ANERKANNTEN DOKUMENTATION HERGESTELLT UND GETESTET WURDEN
- ▽ FERTIGSTELLUNGS-REVISION
  - SIE STELLT DEN ZUFRIEDENSTELLENDEN ABSCHLUSS DES QUALIFIKATIONS-TESTPROGRAMMS FEST
- FLUGFÄHIGKEITS-REVISION
  - ▽ F1
  - ▽ F2
  - FORMALE GENEHMIGUNG ZUM BEGINN DER STARTVORBEREITUNGEN

Nicht die letzte und gewiß nicht die geringste Übertragung von Wissen kennzeichnete den Beginn des HELIOS-Projekts. Amerikanische Industrieberater der Firmen General Electric (für das Managementkonzept, für Pläne und Methoden) und TRW (für das technische Konzept, für Konzeptalternativen und für Systemtechnik) wurden zu Hilfe gerufen. Wann immer möglich, wurden die Berater in das Organisationssystem von Auftraggeber/Auftragnehmer voll integriert.

Insgesamt zeigt die Erfahrung von HELIOS, daß in den Bereichen Management und Technik die Industrie und andere Organisationen „lernen“ wie ein einzelner Mensch und daß der schließlich erworbene Grad an Kenntnis in etwa proportional zu sein scheint zur Größe der Herausforderung und zur Komplexität der Aufgabe, die es zu bewältigen gilt.

Der geforderte Grad an Offenheit und Transparenz von Kosten-, Zeitplänen und technischer Information für ein Projekt der Größe von HELIOS mit klaren Grenzen zwischen den Verantwortlichkeiten von Auftraggeber und Industrie (unter der Führung eines industriellen Hauptauftragnehmers) bekräftigten neue Managementkonzepte. In etlichen Firmen wurde eine

Matrix-Struktur für Projektgruppen und das Konzept eines einzigen Projektleiters zum ersten Mal eingesetzt.

#### HELIOS-Projekt Durchführung und Methoden, die Standard des Managements in Europa wurden

Das Management von Großprojekten wie HELIOS erfordert beides, einen Stab von hochqualifizierten Ingenieuren und Verwaltungsfachleuten und einen Satz von hervorragenden und bewährten Arbeitsweisen und Methoden, die sich wie ein roter Faden durch die gesamte Projektlaufzeit ziehen. HELIOS war ein internationales Vorhaben. Deshalb mußten die Arbeitsweisen und Methoden einem internationalen Umfeld angepaßt sein, nicht nur einem rein nationalen. Obwohl das einerseits zusätzliche Belastungen für die Vorbereitung und den Einsatz der erforderlichen Dokumentation mit sich brachte, ergab sich andererseits ein gut durchdachtes Projekt-Managementsystem für HELIOS, das sich als wirkungsvolles Hilfsmittel in allen Bereichen des gesamten Projekts erwies. Aber nicht nur das; die Methoden und Arbeitsweisen, die vor der Entwicklungsphase von HELIOS eingeführt und dann eingesetzt wurden, sind zu einer wichtigen

Die wichtigsten HELIOS-Revisionen und ihre Definition

*The major HELIOS reviews and what they accomplished*

*In summary the HELIOS experience shows that in the areas of Technology and Management industry and organisations "learn" like a single person and the degree of gained final know-how is somewhat proportional to the magnitude of challenge and complexity of the task to be accomplished.*

*The required degree of openness and visibility of cost, schedule and technical information for a project of the HELIOS size with clear boundaries of customer/industry responsibilities under the leadership of an industrial prime contractor enforced new concepts and in quite a few companies the matrix concept of project teams and a single project manager concept was used for the first time.*

#### HELIOS project procedures and methodologies, now standard management tools in Europe

*The management of large scale projects such as HELIOS requires both a team of highly qualified engineers and administrators and a set of excellent and well-proven procedures and methodologies which serve as a guideline throughout the whole project life. Since HELIOS was an international undertaking, it must be emphasized that the procedures and methodologies had to be prepared for an international rather than an entirely national environment. Although this might, on the one hand, lead to some extra burden for preparation and implementation of the required HELIOS documentation, on the other hand, the benefit derived from it was a well-planned project management system for HELIOS, which proved to be a very successful tool for all levels of the entire project. But not only that, the methodologies and procedures established prior to and implemented during the HELIOS development phase, have become a major source for many European space projects which have been initiated subsequent to the completion of*

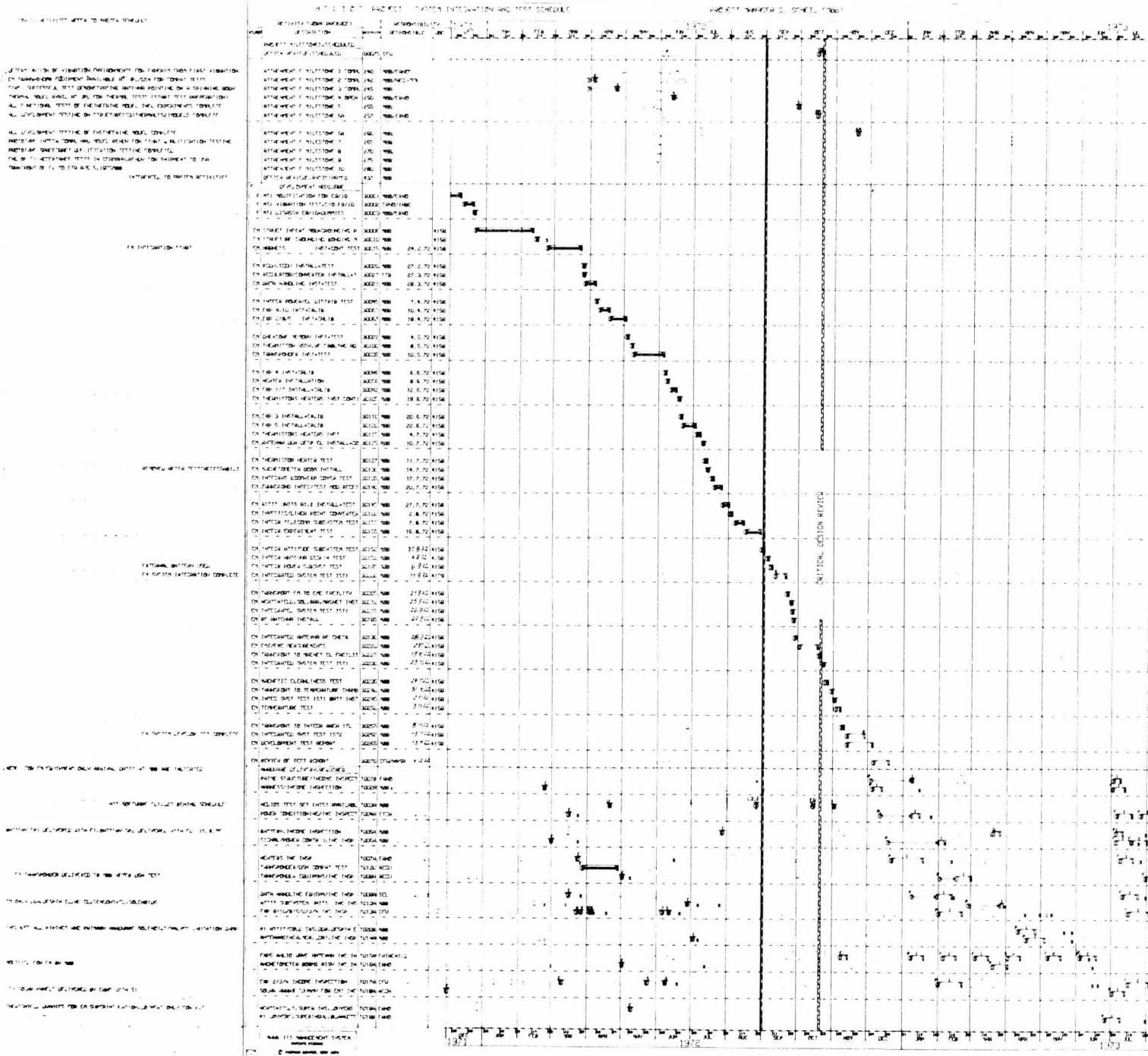


Beispiel für einen MARK III-Strukturplan. Solche Pläne, die hier nicht mehr

recht lesbar erscheinen, wurden im Projekt verwendet.

Sample MARK III printout. Such plans, here some-

what faded, were used during the project.



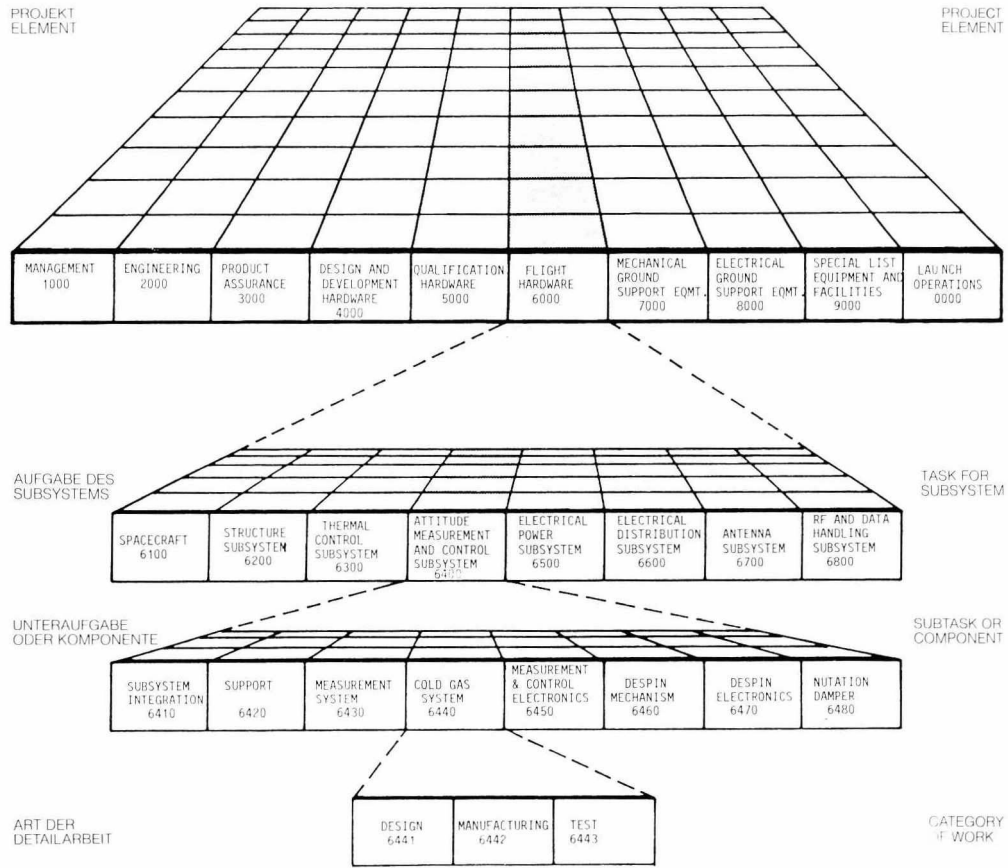
Quelle für viele europäische Raumfahrtprojekte im Anschluß an die Fertigstellung von HELIOS geworden. Mit anderen Worten, die Management-erfahrung von HELIOS, die in verschiedenen Plänen, Verfahren, Spezifikationen, Berichten usw. sauber dokumentiert vorliegt, kann als die Saat eines neuartigen Projektmanagements aufgefaßt werden, die inzwischen in den unterschiedlichsten Raumfahrtprojekten und in etlichen nicht raumfahrtorientierten Unternehmungen aufkeimt.

Viele Berichte und Artikel wurden herausgegeben, in denen etliche dieser Management-Erfahrungen im Detail beschrieben worden sind. In dieser Hinsicht muß auf den Abschlußbericht von HELIOS verwiesen werden, in dem die gewonnenen Erkenntnisse dargestellt sind.

Im folgenden sollen die Methoden und Arbeitsweisen, wie sie bei HELIOS angewendet wurden, etwas näher erläutert werden. Erstens, welche waren von besonderem Interesse für andere Projekte, und zweitens, wie haben sie europäische Raumfahrtprojekte beeinflusst, so daß sie zu Standard-Managementmethoden in Europa geworden sind? Die wichtigsten Ergebnisse einer Umfrage, die kürzlich durchgeführt wurde, um den erreichten Transfer von Managementverfahren von HELIOS zu anderen europäischen Raumfahrtprojekten zu bestätigen, werden kurz zusammengefaßt.

#### - Projektorganisation

Während der sechsjährigen Herstellungsphase der beiden Sonnensonden HELIOS waren im Projektbüro des Auftraggebers, bei den Haupt- und Unterauftragnehmern ständig einige hundert Mitarbeiter (Ingenieure, Manager usw.) beschäftigt, dazu etliche tausend von Universitäten, der staatlichen Verwaltung, funktionellen Abteilungen der Auftragnehmer, Lieferanten usw. Die Zusammenarbeit so vieler verschiedener Aktivitäten dauernd und vorübergehend Beteiligten erforderte ein ausgeklügeltes organisatorisches Konzept. Die eingesetzte Organisationsstruktur für das HELIOS-Projekt wies Transparenz in allen Projektebenen auf (Auftraggeber, Haupt- und Unterauftragnehmer) und umfaßte eine klare



Projektstrukturplan

Work Breakdown Structure

*HELIOS. In other words, the HELIOS management experience which had been well documented in various plans, procedures, specifications, reports etc. can be considered the new project management seed which is now growing in many different European space projects, as well as some non-space undertakings.*

*Many reports and articles have been written in which some of these management experiences have been described in detail. In this respect the HELIOS Final Report which addresses the lessons learned from the HELIOS project, needs to be especially mentioned.*

*But let us now look at the HELIOS methodologies and procedures a little closer. First, which were the ones of interest to other projects and, secondly, how have they influ-*

*enced European space projects so that they became standard management tools in Europe? The main results from a survey which was recently carried out in order to confirm the accomplished transfer of managerial procedures and methodologies from HELIOS to other European space projects are briefly summarized below.*

#### Project Organization

*During the course of the six year development and production program of the two HELIOS solar probes, a few hundred permanent team members at the project offices of the customer, prime and subcontractors (i.e. engineers, managers, etc.) were engaged in the HELIOS project and several thousand people from universities, governments, functional departments of the*

und unzweideutige Zuordnung des leitenden Personals, ihrer Aufgabengebiete, Verantwortlichkeiten und Vollmachten. HELIOS verdankt seinen Erfolg auch dem klaren, wohlausgeglichene organisatorischen Konzept des Projekts.

Die Grundsätze des Organisationskonzepts von HELIOS hatten einen starken Einfluß auf andere europäische Raumfahrtprojekte, Projektmanagement-Veröffentlichungen und Universitätskurse für organisatorische Verhaltensweisen. Das organisatorische Konzept von HELIOS stellt eine Art Orientierungsmaßstab für die moderne Praxis der Projektorganisation dar. Auch die Prinzipien der Matrix-Organisation wurden von den mit HELIOS befaßten Firmen weitgehend übernommen.

#### – Das Spezifikationssystem

Die Qualität des Projektmanagements ist stark abhängig vom eingesetzten Spezifikationssystem, denn die technischen Spezifikationen eines Projekts bilden die Basis für jede Art von erfolgreicher Planung und Kontrolle. Besonders das Management der Produktgestaltung hängt direkt vom System der Spezifikationen ab.

Eine wichtige Erfahrung, die das Projekt HELIOS vermittelte, war die, daß es äußerst wichtig ist, frühzeitig mit genauen und anerkannten Systemspezifikationen arbeiten zu können, damit die Systemspezifikationen von Anfang an zum formellen Vertragsdokument werden können. Dieses darf dann selbst nur durch eine Vertragsänderung oder einen Vertragszusatz geändert werden. Ebenso wichtig ist der frühzeitige Einsatz eines Spezifikationenbaums, der auf der jeweiligen Ebene die zugehörigen Subsysteme, Ausstattung und Schnittstellenspezifikationen aufzeigt. Das Prinzip der Verwendung eines geordneten und wirkungsvollen Spezifikationensystems ist von anderen europäischen Raumfahrtprojekten weitgehend übernommen worden. Es war nicht nur das sauber dokumentierte Spezifikationensystem von HELIOS, das als Leitprinzip diente. Die Übertragung von Kenntnissen war auch die Folge der Abwanderung von HELIOS-Personal zu anderen europäischen Raumfahrtprojekten.

#### – Projekt-Strukturplan

Forschungs- und Entwicklungsprojekte, insbesondere Raumfahrtprojekte, gründen stark auf Innovationen. Eine Grundvoraussetzung für Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Weltraum ist deshalb ausreichende Flexibilität. Anders ausgedrückt, am Beginn eines Projekts finden die Beteiligten nur sehr wenige festliegende Forderungen vor, zum Beispiel die Hauptaufgabenstellung. In einem etwas späteren Stadium werden die Systemspezifikationen festgelegt, aber einige Parameter bleiben offen, bis die Projektdefinition weit genug gediehen ist. Schließlich müssen natürlich alle noch fließenden Parameter festgelegt werden, oder „locked-in“, wie manche Manager sagen. Warum? – Weil nach einer Periode des Abwägens bei der Suche nach einer besten Lösung schließlich die Hardware-Phase beginnen muß, soll das Projektziel erreicht werden. Der Hersteller aber braucht feste Maße in seinen Zeichnungen; das darf man nicht aus den Augen verlieren!

Was hat das alles mit der Arbeitseinteilung zu tun? Der Projekt-Strukturplan ist ein universelles Managementwerkzeug, das in einem Projekt mehreren Zwecken dient und das die Aktivitäten ordnet. Aber die Aufstellung eines solchen Plans ist keine leichte Aufgabe, ganz im Gegenteil. Der Strukturplan gibt den systematischen Abriß des Projekts oder der Systemkonfiguration wirklichkeitsnah wieder, so daß die Ingenieure die übergeordnete Projektlogik besser verstehen. Die Verwaltung und die Kosten- und Terminplanverantwortlichen bevorzugen meist etwas anderes, und zwar einen Abriß, der Arbeitsteilung, Funktionen, Modelle, Kostenstellen usw. aufzeigt.

Zu Beginn der europäischen Raumfahrtaktivitäten haben solche widersprüchlichen Argumente oft zu fruchtlosen Management-Erlassen geführt. Für das Projekt HELIOS wurde das Problem gründlich studiert, bis für den Projekt-Strukturplan eine Lösung entwickelt war, die für alle Projektbereiche hilfreich war (siehe Abb. S. 166). Man muß ergänzen, daß die Aufstellung eines solchen Strukturplans einen Entwicklungs-

*prime and their subcontractors, suppliers etc. were involved. Cooperation of the many different activities which were performed by the above mentioned permanent and non-dedicated personnel, required a sophisticated organizational concept. The implemented organizational structure for the HELIOS project showed transparency at all project levels (i.e. customer, prime and subcontractors) and included a clear and unambiguous assignment of key personnel, including their scope of tasks, responsibilities and authorities. The HELIOS success was strongly related to the clear and well balanced organizational concept of the project.*

*The principles of the organizational concept of HELIOS had a strong reflection on other European space projects, project management publications and university courses on organizational behaviour. The HELIOS organizational concept can be considered a landmark in modern project organizational practice. In this respect it is worthwhile to be mentioned that also the principles of a matrix organization has been widely accepted by the companies involved in the HELIOS project.*

#### The Specification System

*The quality of project management is largely dependent on the specification system implemented, since the technical specifications of a project provide the baseline for any successful planning and control. Especially the configuration management is directly related to the specification system.*

*The important lesson learned during the course of the HELIOS project was, that it is absolutely essential to have a hard set of specifications early in the game, so that the system specification becomes a formal contractual document that can only be changed through a contract change or amendment. Equally important is the early establishment and implementation of a specification tree, showing at the appropriate levels the supporting subsystem, equipment, and interface specifications.*

prozeß darstellt, und daß seine Fortführung genau synchron mit den einzelnen Projektphasen voranschreiten muß.

Die Methodik eines Projekt-Strukturplans, wie er für das Projekt HELIOS eingerichtet worden ist, hat die europäischen Raumfahrtaktivitäten weitgehend beeinflußt. Er diente nicht nur als Richtlinie für andere Projekte. Die grundlegenden Gedanken, die im Zusammenhang mit HELIOS ausgearbeitet wurden, finden sich wieder in einschlägigen vorläufigen ESA-Richtlinien, wie sie 1979 erlassen wurden. Einige frühere HELIOS-Ingenieure haben aktiv an diesen ESA-Studien mitgewirkt.

#### - Terminplanung des Projekts

Wirkungsvolle Projektkontrolle erfordert gründliche und in Einzelheiten gehende zeitliche Planung bereits zu Beginn des Projekts und das ständige Fortschreiben aller Planungsziele. Großunternehmen wie HELIOS machen zusätzliche Zeitplanungs- und -kontrollmethoden notwendig, um alle Planungsschnittstellen in angemessener Weise zu berücksichtigen. Das Management von HELIOS wendete das rechnergestützte Zeitplan-Kontrollsystem Mark III von General Electric an. Es half bei HELIOS der Planungs- und Leistungskontrollgruppe, alle Bereiche des Zeitplans regelmäßig wirkungsvoll zu überwachen und zu kontrollieren. Mit anderen Worten, durch die Automation des zeitlichen Planungs- und Kontrollprozesses wurde auf allen Ebenen der Haupt- und Unterauftragnehmer-Organisation gleichmäßige Transparenz des Zeitplans und die Möglichkeit der sofortigen Reaktion auf unvorhergesehene Terminprobleme (Verzögerungen und Änderungen) sichergestellt.

Mit Mark III wurde strenge Zeitplanung und -kontrolle realisiert. Das Programm war netzwerkorientiert, aber die Ergebnisse wurden in Form von Balkendiagrammen dargestellt, die alle Terminalschnittstellen, Meilensteine und geplanten und erreichten Daten klarlegten. Ein Beispiel eines Mark-III-Ausdruckes zeigt Abb. Seite 165.

*The principles of implementing an orderly and effective specification system have been widely adopted by other European space project teams. Not only did the well documented HELIOS specification system serve as a guiding sample, but know-how transfer resulted also from migrating of HELIOS personnel to other European space projects.*

#### Work Breakdown Structure

*Research and Development (R and D) projects and especially space projects, are strongly based on innovation. A fundamental prerequisite for R and D activities in space therefore is flexibility. In other words, projects will find at the beginning of a project that only very little has been frozen, for example the primary objectives. At a little later stage the system specification becomes firm but some parameters are still left flexible until sufficient definition has been obtained. No doubt, as time goes by also these free floating parameters have to be frozen or "locked in", as some managers say. Why? Because, after a period of trade-offs, to find the best project solution, the hardware acquisition phase must finally begin in order to meet the project goal. The manufacturer, however, requires firm dimensions in his drawings, one must not forget this!*

*Now, what has all this to do with the Work Breakdown Structure? The Work Breakdown Structure, commonly referred to as the WBS, is a universal management tool, serving many purposes in the project and bringing law and order into operation. But the establishment of the one WBS is not an easy task. On the contrary, it is a difficult one! Why? The WBS on the one hand truly reflects the systematic breakdown of the project or system configuration, so that the engineers better understand the overall project logic. On the other hand, the administrators and cost and schedule people often see this in a slightly different way. They prefer to see a breakdown by work share, function, modules, cost categories etc.*

*In the early days of space activities in Europe these conflicting arguments often resulted in unfruitful management edicts. For the HELIOS project the problem was carefully studied until a WBS solution was derived, which was helpful to all project areas; see Figure page 166. In this respect it needs to be mentioned that the setting up of a WBS is an evolutionary process and that the development of WBS must be fully synchronized with the individual project phases.*

*The WBS methodology as established for the HELIOS project has widely influenced European space activities. Not only has the HELIOS WBS served as a guideline for other projects, but the general WBS philosophy developed in conjunction with HELIOS has been studied and reflected in ESA's preliminary WBS guideline issued in 1979. In this respect it should be mentioned that some former HELIOS engineers were actively involved in these WBS studies for ESA.*

#### Project Scheduling

*Effective project control requires thorough and detailed scheduling at the start of the project and a constant updating of all schedules implemented. Large scale undertakings, such as HELIOS, demand in addition effective schedule planning and control methods in order to handle all planning interfaces in the appropriate manner. The HELIOS management adopted the computerized schedule control system Mark III from General Electric, which helped the HELIOS planning and performance control team effectively monitor and control all areas of the HELIOS schedule on a regular basis. In other words, through automation of the schedule planning and control process constant transparency of the HELIOS schedules and immediate reaction to unforeseen schedule problems (delays and changes) was assured at all project levels of the prime contractor and subcontractor organizations. Through implementation of Mark III, a strong schedule planning and control discipline was implemented. The program was network oriented but the outputs were*

Inzwischen werden Zeitplandiagramme in Form von netzwerkorientierten Balkenkarten allgemein benutzt. Sie zeigen die Zeitplan-Schnittstellen-Meilensteine und geben auch Informationen über den Arbeitsfortgang (vgl. Abb. Seite 166). Solche Diagramme vereinigen die Vorteile eines einfachen Balkenplans mit den Schnittstellen, wie sie in die Netzwerkpläne eingetragen werden. Die Planungsmethodik, die im Projekt HELIOS angewendet wurde, wird jetzt in der europäischen Raumfahrtindustrie weitgehend eingesetzt. Einige ihrer Wurzeln können klar erkennbar bis HELIOS zurückverfolgt werden.

#### – Detailaufgabenkontrolle

Die Projekterfahrung hat gezeigt, daß parallel zur Projekt-Statuskontrolle die Forderung nach der Kontrolle von Detailaufgaben erwächst, die sich aus alltäglichen Problemen ergeben. Gründliche Disziplin bei der Kontrolle der Detailaufgaben ist der Schlüssel zur wirksamen Lösung solcher Probleme. Für HELIOS wurde ein Detailaufgaben-Kontrollplan eingerichtet, der jede definierte Detailaufgabe in einer Detailaufgabenliste mit einer laufenden Nummer enthält und der ihren Arbeitsfortgang aufzeigt. Die Detailaufgabenkontrolle lag in der Verantwortung des Managers für die Projektplanung und Leistungskontrolle. Der Status der Detailaufgaben wurde bei wöchentlichen Statussitzungen ermittelt.

Die Kontrolle der Detailaufgaben wurde ein wichtiges und wirksames Management-Hilfsmittel des Projekts HELIOS. Viele europäische Raumfahrtprojekte haben dieses System übernommen.

#### – Projektrevisionen

Projektrevisionen wie die erste Entwurfsrevision, die zweite (kritische) Entwurfsrevision und die Flugfähigkeitsrevision hatten gleichfalls große Bedeutung für das Projekt HELIOS. Nach ihrem Abschluß hatten die Projektleiter jeweils die völlige Sicherheit, daß ein wichtiger Abschnitt des Projekts erfolgreich beendet war, bevor eine neue Phase des Projekts beginnen konnte. Vor jeder Revision gab das industrielle Team von HELIOS unter dem Vorsitz des Hauptkontraktors

einen genauen Revisionsplan aus, der alle Tätigkeiten nannte, die vor der Revision abgeschlossen sein mußten, dazu die einzelnen Verantwortungsbereiche und alle Fertigstellungsdaten. Obwohl die Revisionen auf System- und Subsystemebene in kleineren Sitzungen erfolgten, wurden die Ergebnisse (Hinweise, Empfehlungen usw.) in einem gemeinsamen Revisions-Endbericht zusammengefaßt.

Die Methode der Revisionen, wie sie während des Projekts HELIOS durchgeführt wurden, sind zum Standardverfahren bei den meisten europäischen Raumfahrtprojekten geworden. HELIOS hat diese Entwicklung maßgeblich beeinflusst. Erst kürzlich zeigte eine Studie von ESA/ESTEC, die eine deutsche Firma als Auftragnehmer ausarbeitete, daß die Projektrevisionskonzepte von HELIOS jetzt zum Kern von ESAs Projektrevisionsphilosophie geworden sind. Die wichtigsten HELIOS-Revisionen und ihre Definition zeigt Abb. Seite 164.

#### Persönliche Karrieren von HELIOS-Mitarbeitern

Im Verlauf des Projekts HELIOS waren herausfordernde Entwicklungen auf vielen Gebieten die Basis für mannigfaltige Karrieremöglichkeiten. Arbeitsgebiete waren z. B.: Informationstheorie, Hochfrequenztechnik, Datenverarbeitung, Sondenintegration und -test, Zuverlässigkeit, Systemtechnik, administratives Management usw.

Während der Projekt-Durchführungsphase von 1969 bis 1. September 1975 zählte das Projektbüro 336 Veröffentlichungen und/oder Vorträge auf Fachtagungen, die unterschiedliche technische und wissenschaftliche Themen betrafen bzgl. der Entwicklung des Systems, der Subsysteme von HELIOS und der Experimente. Bis 1. April 1976 hatte sich diese Zahl bereits auf 425 Publikationen und wissenschaftlich-technische Fachvorträge erhöht. 100 von diesen Veröffentlichungen wurden im Rahmen von Fachstudien und zur beruflichen Ausbildung ausgearbeitet: 43 Universitätsstudienarbeiten, 41 Diplomarbeiten, 14 Dissertationen und 2 Habilitationen. Das war der Stand zu Beginn der erweiterten Mission, die noch viele Jahre der Sammlung wissenschaftlicher Daten und ihre Auswertung ermöglichte.

*presented in the form of a bar chart diagram clearly showing all schedule interfaces, milestones and planned and actual dates. An example of a Mark III output is presented in Figure page 165.*

*Today, schedule diagrams in the form of network oriented bar charts which show the schedule interface milestones and also give progress information (see Figure page 166) are commonly used. Such diagrams provide the advantages of both a simple bar chart and the interfaces as used in network plans. The scheduling methodology as applied for the HELIOS project is now widely used within the European space industry and some of the roots can be clearly identified from HELIOS.*

#### Action Item Control

*Project experience has shown that parallel to the control of schedule status, a strong demand exists to also thoroughly control all action items which may result from day-to-day problems. Establishing a sophisticated action item control discipline is the key to solving day-to-day problems in an effective manner. For the HELIOS project an action item control procedure was established, by which each defined action was traced through an action item status list showing the action, its running number, the assigned actionee and the scheduled and actual completion date. Action item control was the responsibility of the project planning and performance control manager and the action status was monitored at the weekly status meetings.*

*The control of action items has become an important and efficient management tool of the HELIOS project. Many European space projects have adopted the HELIOS action item control system.*

#### Project Review

*Project reviews such as the Preliminary Design Review (PDR), Critical Design Review (CDR) and Flight Readiness Review (FRR) were of great value to the HELIOS project. After completion of project reviews the project manager had*

Abb. Seite 171 illustriert die Ergebnisse für Berufskarrieren und demzufolge implizite den Gewinn an Kenntnissen, der von den Mitarbeitern am Projekt HELIOS auftraggeberseitig und in der Industrie erarbeitet wurde.

Die Abbildung spricht für sich. Viele Projektmanagerkarrieren, vom Abteilungsleiter bis hinauf zu den Spitzen von Firmenleitungen, konnten ermittelt werden. Besonders bemerkenswert ist die Zahl der Mitarbeiter, die zum bemannten Raumfahrtprogramm überwechselten. Acht Mitarbeiter von MBB-ERNO (industriell) und fünf von der DFVLR (Auftraggeber) wurden Mitglieder der Stabmannschaft beim Hauptauftragneh-

*full assurance that a major step of the project had been successfully completed before commencement of a new phase of the project. Prior to each review, the industrial team of HELIOS, under the leadership of the prime contractor, issued a detailed review plan showing all actions to be completed prior to the review, the individual responsibilities and all completion dates. Although conduction of reviews took place at system and subsystem level splinter meetings, the results (findings, recommendations etc.) were merged into one final review report.*

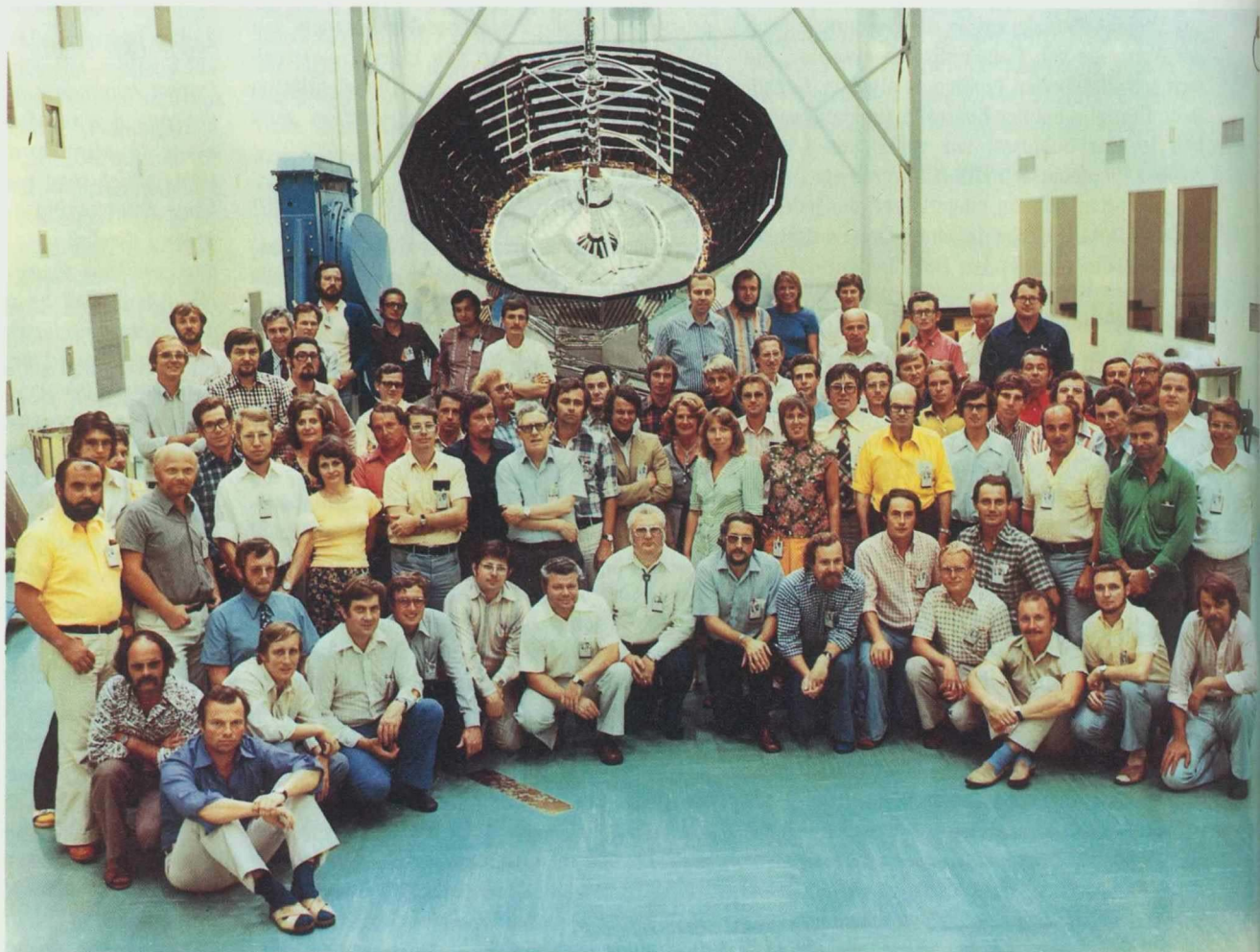
*The review methodology as implemented throughout the HELIOS project has become standard to most European space projects and the HELIOS approach considerably influenced this development. Only recently an ESA/ESTEC study, which was performed by a German consulting company, showed that the project review concepts of HELIOS are now the core of ESA's project review philosophy. The major HELIOS reviews and their definition are shown in Figure page 164.*

#### Career Achievements of HELIOS Personnel

*In the course of the HELIOS project, challenging development know-how in the areas of informa-*

HELIOS-Startmannschaft  
kurz vor dem Start in Cape  
Canaveral

HELIOS-Launch Team  
shortly before launch at  
Cape Canaveral



mer des SPACELAB, darunter der Projektleiter und direkt dem Projektleiter zugeordnete leitende Persönlichkeiten. Einer erreichte die Position des ESA-Projektleiters für die SPACELAB-Folgeproduktion, und drei hatten Schlüsselpositionen in der ESA-SPICE-Gruppe inne, die verantwortlich war für die Entwicklung und die erfolgreiche Mission der ersten SPACELAB-Nutzlast. Insgesamt hat das Projekt bemerkenswerte Karriere-erfolge ermöglicht. Das alles ging aus von der Erfahrung, die mit einem einzigen anspruchsvollen Projekt gewonnen wurde: HELIOS.

*tion theory, high frequency technology, data processing, integration and test, reliability, systems engineering and administrative management was the basis for manifold carrier opportunities.*

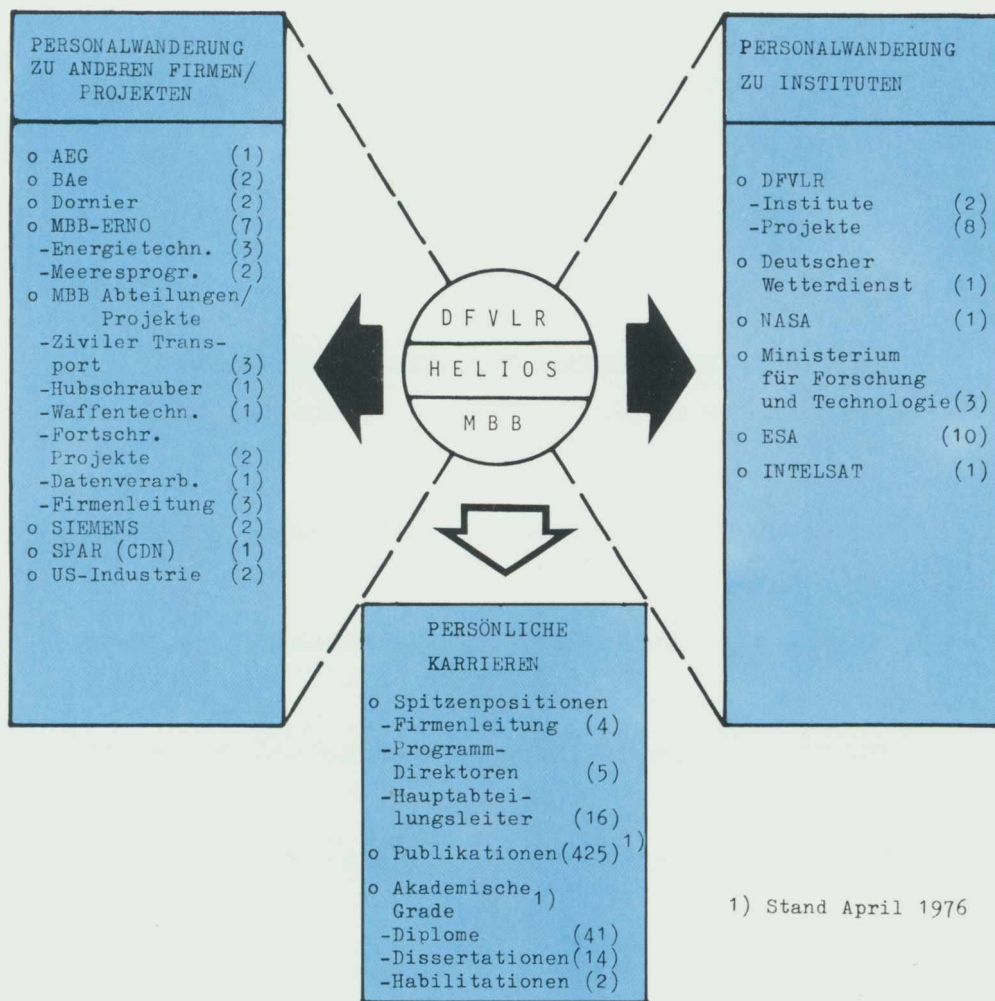
*During the project implementation phase 1969 to 1st September 1975 the DFVLR project office counted 336 publications and/or papers presented covering various technical/scientific topics related to the development of the HELIOS system, subsystems and experiments and as of April 1, 1976 this number had increased to 425 publications and presentations to the scientific - technological community.*

*One hundred of these papers presented were prepared in the course of education or advancing professional careers (43 are university studies, 41 theses submitted for an academic degree, 14 doctoral theses and 2 theses submitted for qualification as university lecturer). This was the status at the beginning of the extended mission with years of scientific data collection and evaluation to come.*

*Figure page 171 illustrates career achievements and, of course, implicit transfer of know-how from the customers and industrial HELIOS project team members in Europe.*

*The figure speaks for itself. Many project manager careers, department manager up to the top of corporate management can be identified. Outstanding is the number of personnel transfer to the manned Space program. Eight MBB/ERNO (industrial) and five DFVLR (customer) personnel from HELIOS Team became members of the SPACELAB Prime Contractor's core team including the project manager and key personnel reporting to the project manager. One holds the position of ESA project manager for SPACELAB follow on Production and three have been key members of the ESA SPICE team responsible for the first Spacelab Payload development and successful mission.*

*In summary there have been remarkable career achievements influencing a wide variety of activities ranging from business manager at Siemens in Australia to managers in the scientific establishments. It all started from the experience gained in one challenging project: HELIOS.*



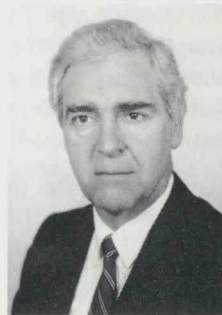
1) Stand April 1976

Personalwanderung und persönliche Karrieren

Personnel Transfer and Achievements

# Der technische Nutzen von HELIOS für die europäische Industrie

Victor Billig, Manager für die Unteraufträge bei HELIOS  
 MBB-Unternehmensbereich Raumfahrt, Ottobrunn  
 Ehemals Berater der Firma General Electric Company



Billig

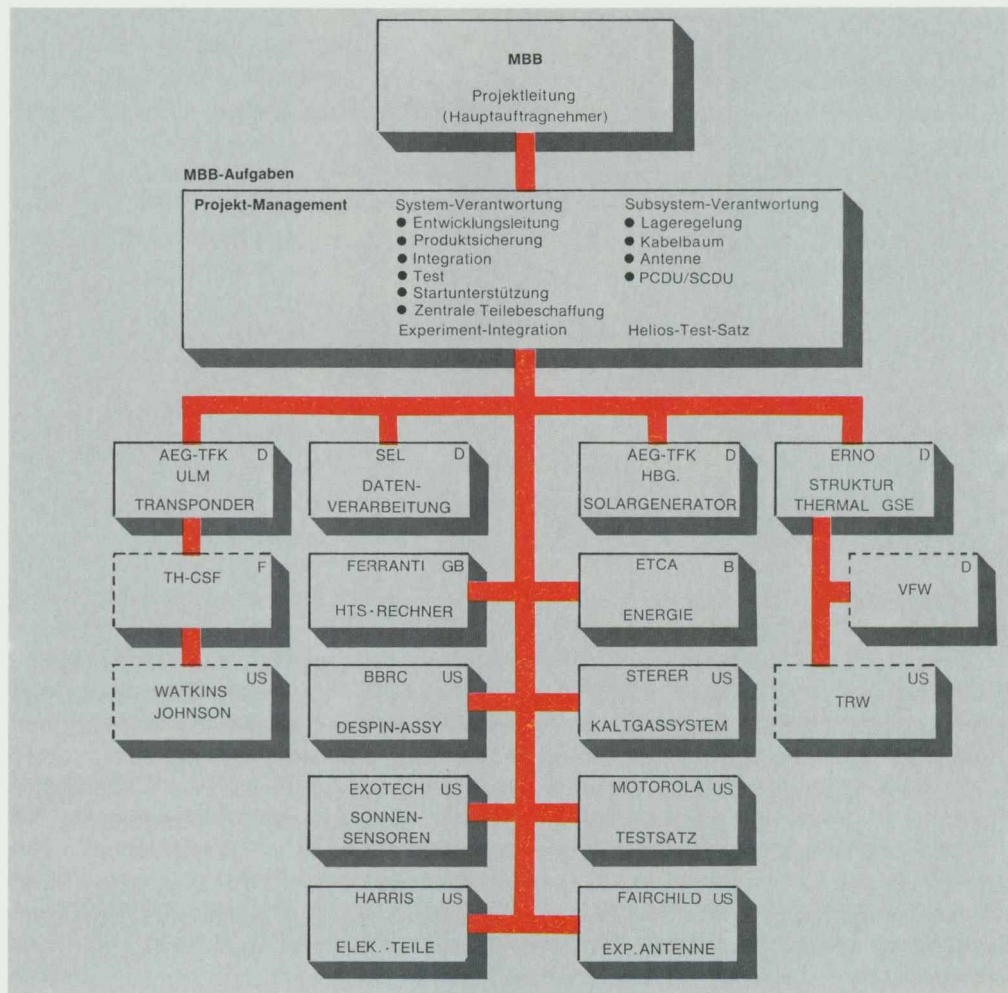
## Welches waren die industriellen Herausforderungen dieser riskanten Mission?

Während der Ausarbeitung des Projektangebots für HELIOS im Jahr 1969 mühte sich eine kleine, aber sorgfältig ausgewählte Gruppe aus talentierten jungen Ingenieuren, Physikern und Kaufleuten, all ihr Wissen und ihre Erfahrung in einen neuen Entwurf und ein Entwicklungsprogramm einzubringen, das zu einer erfolgreichen Mission bei möglichst niedrigen Kosten und geringem Zeitaufwand für den Auftraggeber führen würde. Die wissenschaftlichen Forderungen waren schwindelerregend (nie zuvor hatten Menschen ein Raumfahrzeug so nahe an die Sonne heranfliegen lassen), und doch konnte nur erprobte Technik verwendet werden. Jeder Fehler bei einem solchen internationalen Vorhaben würde ein nicht zu verantwortendes Risiko mit sich bringen. Wahrhaftig, HELIOS war ihre große Chance, nun alles das anzuwenden, was sie bei früheren Raumfahrtprojekten wie HEOS und AZUR bei MBB gelernt hatten. Das war wahrhaftig eine Herausforderung, die ihr ganzes Können beanspruchte!

Als die Nachricht durchsickerte, daß sie die Ausschreibung gewonnen hätten und sie von der deutschen Regierung als Hauptauftragnehmer ausgewählt worden seien, der das industrielle Projekt HELIOS anführen sollte, brach lauter Jubel aus. Der damalige Leiter des Unternehmensbereichs Raumfahrt von MBB, Julius Henrici, und der Projektleiter, Günter Scheil, waren glücklich, daß sich die langen Monate harter Arbeit bezahlt gemacht hatten. Sie erkannten jedoch auch sofort die ernüchternde Wirklich-

keit: um HELIOS zum Erfolg zu führen, waren Teamarbeit, technischer Beistand von anderen Organisationen (in Deutschland, den USA, Belgien, Frankreich und England) und außerordent-

liche Führungsqualitäten zur Integration so vieler Beiträge verschiedener Partner notwendig. Die Abbildung auf Seite 172 zeigt die wichtigsten beteiligten Unternehmen.





During the preparation of the HELIOS competitive proposal in 1969, a small but select group of bright young engineers, physicists, and commercial experts struggled to convert their knowledge and previous experience to the synthesis of a new design and development program that would end up in a successful mission with least possible cost and schedule demands on the customer. The scientific requirements were staggering (never before had man flown a spacecraft so close to the sun) yet only proven technology could be used. A failure on such an important international venture would be prohibitively risky. Indeed, HELIOS was their big chance to use all they had learned on earlier space projects at MBB such as HEOS and AZUR. This was truly a challenge that would show what they were made of.

When word came down that they had won the competition, that they had been selected by the German government as prime contractor to lead the HELIOS industrial project, jubilation broke out. MBB's Space Division Head Julius Henrici and project manager Günter Scheil were happy that the long months of hard work had paid off. However, they immediately recognized the sobering reality that to make HELIOS succeed would take teamwork, technological assistance from other organizations (in Germany, USA, Belgium, France and England) and extraordinary management leadership to integrate the diverse efforts of the various contributors. Fig. page 172 shows the major contributors involved.

They had no illusions about the difficulties which lay ahead of them. Technical support was needed in areas of telecommunication, attitude control, antenna design, thermal control and in both component as well as system level testing, integration and operations.

Support from the USA came via NASA for launch/tracking/data acquisition, technical consultation and training, centrifuge testing, flight load simulation, JPL Solar Simulation and Deep Space Network compatibility testing. Ludwig Bölkow, the Chairman of MBB Board of Directors, called upon the General Electric Co. Space Division as consultants to provide a broad range of space project expertise. There was much to be done in the areas of thermal modelling, surface property technology, lubricants, adhesives, conductive coating, attitude stability with flexible booms receiver phase-lock loop circuitry, high gain antenna design, data handling, telemetry coding, magnetic and particulate cleanliness, electro-magnetic compatibility, Hi-rel parts procurement... the list went on and on. Of course, many subjects were not new to German industry, but only had not yet reached the depth of maturity it was destined to have at completion of the HELIOS Program.

Although the scientific exploration of our solar system may be an exciting and spectacular result of this ambitious program, it is perhaps no more rewarding than the technological benefits accrued in designing, building, testing and launching the HELIOS satellites. Through such experience, we from industry have gained capabilities and resources which not only assure a continuing role in future space projects but also enrich our potential range of by-products for tomorrow's markets.

#### Lessons learned

The activities from project go-ahead until the second satellite was safely in orbit provided a wealth of exchange and technological benefits to industry; too much to be exhaustively treated in the small space allowed here. The samples below are intended to give the reader a glimpse of the lessons learned – a cross-section of the valuable know-how attributable to HELIOS experience and heritage. On subsystem level:

- Telemetry transmitter developed by Thomson-CSF. This was the first S-band transmitter developed in Europe for space applications

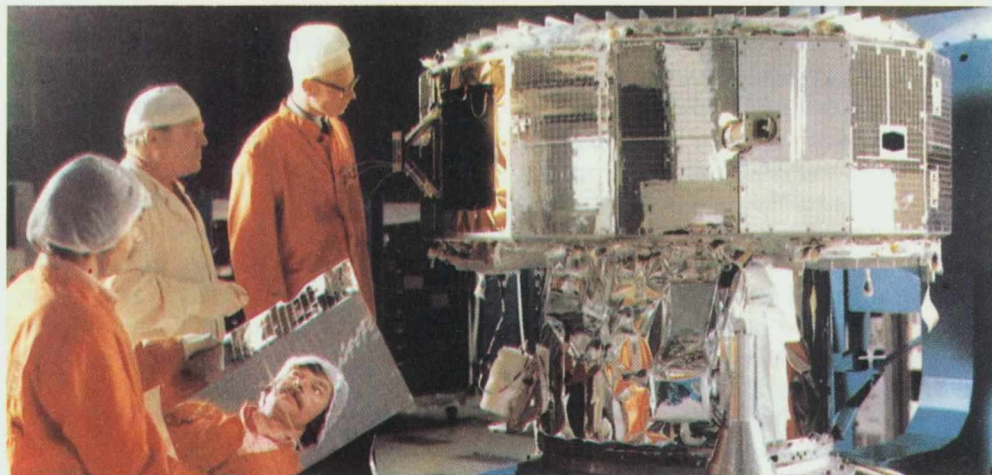
using both solid state and TWT power amplifiers with very stringent group delay requirements.

- Data handling converter design and wave soldering techniques introduced by Standard Electric Lorenz.
- At AEG-Telefunken, Solar cell assembly design for complete coverage to protect against particle irradiation; multilayer and module substrates to achieve highest degree of magnetic cleanliness; solar cell interconnect welding, conductive coating technology and 1 ohm cm solar cell attributed to HELIOS.
- Telecom noise-free oscillators, isolation FET amplifiers, automatic measurement systems for development and fabrication, calculation of RF power budgets, and PLL techniques were inherent benefits of HELIOS at AEG-Telefunken. S-Band receiver could be used elsewhere in its original form.
- At ERNO: Application of flight load analysis, methods for development of orthotropic cylindrical shells, high spin rate boom deployment by viscous damper control. Improvement of analytical methods in specular radiation exchange, infrared simulation of interaction between spacecraft and appendages. Solar array fin system, louvers, heaters, superinsulation and coatings have all reacted as expected, protecting HELIOS against the intense solar environment of 11.9 SC, the highest exposure ever to be withstood by a man-made operational satellite.
- At MBB: Use of dry lubricants in bearings, plastic seals in cold gas thrusters, solar pressure effects and control electronics for despun antenna were subjects of AMCS technology. Improvements in electrical distribution and grounding, harness connector terminations and shielding, antenna design and test including multipactor effect, transponder design and test, EMC of data handling equipment. Hi-rel parts and materials, bonding, thermal coating and conductive coating, as well as plastics and foils were important areas of technology.

Sie machten sich keine Illusionen über die Schwierigkeiten, die vor ihnen lagen. Technische Unterstützung war notwendig auf den Gebieten Telekommunikation, Lageregelung, Antennenentwurf, Thermalhaushalt und für die Tests, auf Komponenten- und Systemebene, für die Sondenintegration und für den Missionsbetrieb.

Unterstützung aus den USA bot die NASA für Start, Bahnbestimmung, Datenempfang, technische Beratung und Ausbildung, Zentrifugentest, Simulation der Lastannahmen für den Flug, Sonnensimulation im JPL und Verträglichkeitstests mit dem DSN. Ludwig Bölkow, Vorstandsvorsitzender von MBB, bat die Raumfahrtabteilung von General Electric Co um beratende Unterstützung. So konnte ein weiterer Bereich an Raumfahrt-Sachverstand eingebracht werden. Besonders tiefgehende Arbeit war nötig auf den Gebieten Thermalmodellierung, Technik der Oberflächeneigenschaften, Schmiermittel, Klebeverbindungen, leitfähige Beschichtung, Lagestabilität bei flexiblen Auslegern, Empfänger-„phase-lock-loop“-Schaltkreise, Hochgewinnantennenentwurf, Datenverarbeitung, Telemetrikodierung, magnetische Reinheit, allgemeine Schmutzverhütung, elektromagnetische Verträglichkeit, Bauteileschaffung für höchste Zuverlässigkeit... die Liste wurde länger und länger. Natürlich, viele Aufgaben waren für die deutsche Industrie nicht neu; sie hatten nur noch nicht einen derart hohen Reifegrad erreicht, wie er für die Fertigstellung des HELIOS-Programms notwendig war.

Die wissenschaftliche Erkundung unseres Sonnensystems stellt sicher ein erregendes und spektakuläres Ergebnis dieses ehrgeizigen Programms dar; sie ist vielleicht dennoch nicht anerkennenswerter als der technische Gewinn, der aus dem Entwurf, dem Bauen, Testen und Starten der HELIOS-Sonden erwuchs. Durch diese Erfahrung haben wir in der Industrie uns Fähigkeiten und Hilfsmittel erarbeitet, die nicht nur eine ständige Rolle bei zukünftigen Raumfahrtprojekten sichern, sondern die auch unser Potential für Nebenprodukte auf den Märkten von morgen bereichern.



### Erfahrungsgewinn der Industrie

Die Aktivitäten, vom Projektstart an bis die zweite Sonde sicher in ihre Bahn gebracht worden war, führten zu reichem Austausch von Kenntnissen und technischem Gewinn für die Industrie, allzu vielfältig, um in ein paar Zeilen erschöpfend besprochen werden zu können. Die folgenden Beispiele sollen dem Leser einen Einblick darüber geben, welche Neuerungen erarbeitet wurden – ein Querschnitt der wertvollen Kenntnisse, die der Erfahrung und dem Erbe von HELIOS zuzuschreiben sind.

Auf der Ebene der Subsysteme:

- Telemetrie-Senderentwicklung durch die französische Firma Thomson-CSF. Es war der erste S-Band-Sender, der in Europa für Raumfahrtanwendungen entwickelt wurde und der sowohl Transistorisierung als auch Wanderfeldröhren-Leistungsverstärkung mit sehr strengen Forderungen an die Signallaufzeit verwendete.
- Entwurf eines Datenverarbeitungskonverters und Wellenlöttechnik, die von Standard Electric Lorenz eingeführt wurden.
- Bei AEG-Telefunken, Solargeneratorentwurf mit völliger Bedeckung als Schutz gegen Teilchenbestrahlung, Vielfachschichten und Modulunterlagen, um ein Höchstmaß an magnetischer Reinheit zu erzielen; Schweißen von Verbindungen zwischen den Solarzellen; Technik der leitfähigen

Integration HELIOS 2  
Integrationshalle (Clean Room)  
MBB, Ottobrunn

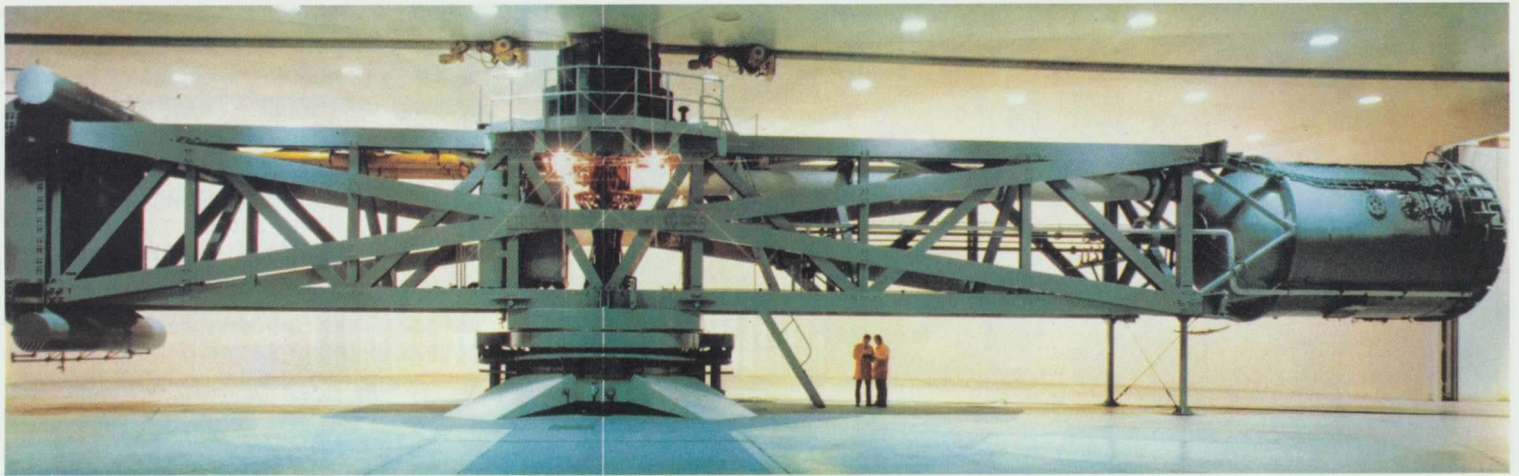
*Integration HELIOS 2  
Integration Hall (Clean Room)  
MBB, Ottobrunn*

*On systems level MBB performed spacecraft integration and tests entailing the development of a HELIOS Test Set and associated software. Handling and application of system requirements were given special attention because of the severe environmental and budgeted conditions placed upon certain engineering parameters. Weight, power, EM radiation, outgassing,*

Elektromagnetischer Verträglichkeitstest  
Testanlage MBB, Ottobrunn

*Electromagnetic Compatibility Test  
Test Facility MBB Ottobrunn*





higen Beschichtung und 1 Ohm · cm Solarzellen als HELIOS-Besonderheit.

– Rauscharme Oszillatoren für die Telekommunikation, Isolation, Feld-Effekt-Transistorverstärker, automatische Meßsysteme für Entwicklung und Fabrikation, Berechnung von Radiofrequenz-Leistungsbilanzen und „Phase-lock-loop“-Techniken waren typische Gewinne von HELIOS bei AEG-Telefunken. S-Band-Empfänger konnten auch anderweitig in ihrer ursprünglichen Form verwendet werden.

– Bei ERNO: Anwendung der Fluglastanalyse, Methode für die Entwicklung orthotroper zylindrischer Schalen, Auslegerentfaltung bei hoher Drallrate durch Viskositätsdämpferkontrolle. Verbesserung von analytischen Methoden beim Strahlungsaustausch über Spiegel, infrarote Simulation der Wechselwirkungen zwischen dem Raumfahrzeug und seinen Auslegern. Solargenerator-Blendensystem, Strahlungsklappen, Heizer, Superisolation und Beschichtungen haben sich alle so verhalten wie erwartet, indem sie HELIOS gegen die intensive Sonnenumgebung von 11,9 Solarkonstanten abschirmten. Das war die höchste Bestrahlungsstärke, die jemals ein operationelles Raumfahrzeug dauerhaft auszuhalten hatte.

– Bei MBB: Verwendung von Trockenschmiermitteln in Lagern, Kunststoffdichtungen in Kaltgasdüsen, Solardruckeffekte und Kontrollelektronik

für die entdrallte Antenne waren Probleme der Lageregelungstechnik. Verbesserungen im elektrischen Verteilungssystem und im Erdungskonzept, Kabelbaum-Endverbindungselemente und Abschirmung, Antennenentwurf und Test einschließlich Multipaktoreffekt, Transponderentwurf und Test, elektromagnetische Reinheit der Datenverarbeitungsgeräte an Bord. Bauteile und Materialien höchster Zuverlässigkeit, Technik der verschiedensten Verbindungen, Thermalbeschichtung und Leitfähigkeitsschichten wie auch die allgemeine Verwendung von Kunststoffen und Folien waren Bereiche wichtiger technischer Entwicklungen.

Auf Systemebene baute MBB das Raumfahrzeug zusammen und testete es aus. Auch die Testapparaturen und die zugehörigen Programme mußten entwickelt werden. Dem Umgang mit und der Anwendung von Systemforderungen wurde besondere Aufmerksamkeit geschenkt, denn die harten Umgebungsbedingungen und die Budgetbeschränkungen waren ausschlaggebend für so manchen technischen Parameter. Das Gewicht, der elektrische Leistungsbedarf, elektromagnetische Abstrahlung, Ausgasungsverhalten z. B. wurden rigoros kontrolliert. Gelegentlich traten kritische Probleme auf und die Konsequenzen waren manchmal wirklich nicht angenehm. Kurz vor dem Versand des ersten Flugmodells nach Cap Canaveral zum Beispiel zeigte sich bei einer gründlichen visuellen Inspektion, daß weiße

#### Zentrifugentest

Testanlage GSFC/USA

Aufgabe:

Simulation der Sondenbelastung durch die Rakete. Die max. lineare Beschleunigung beträgt fast das 30fache der Erdbeschleunigung.

#### Acceleration (Centrifuge) Test

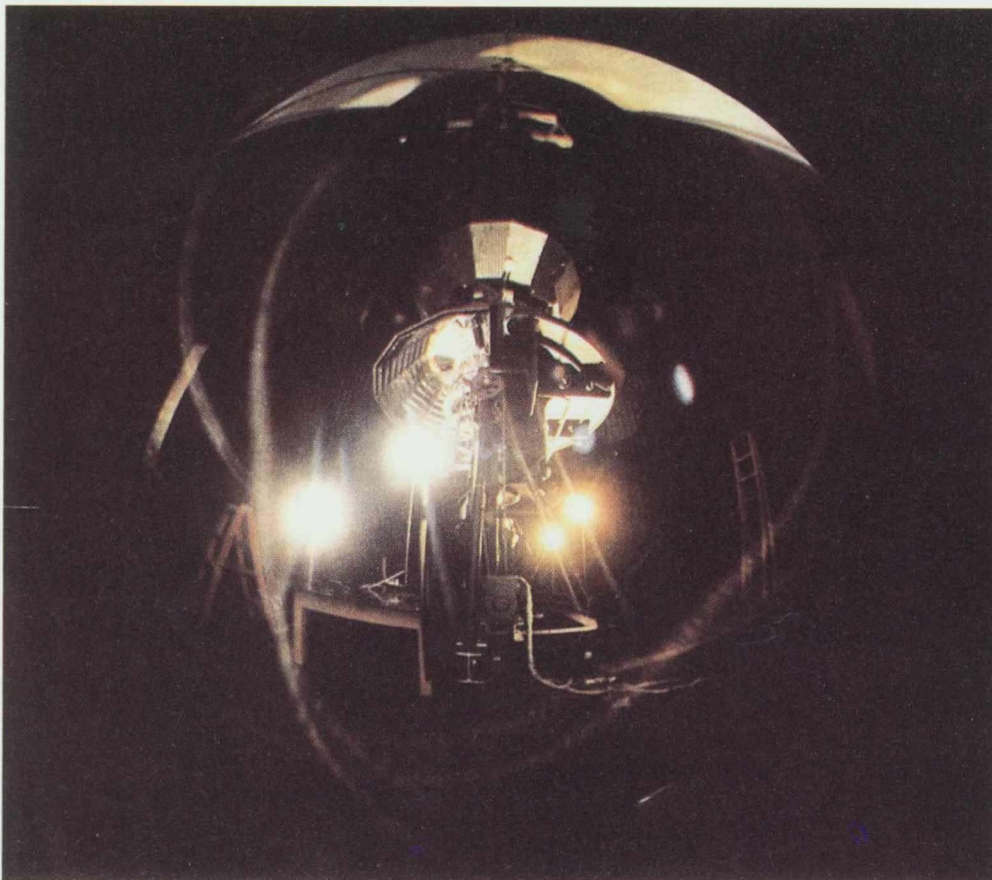
Test Facility GSFC, USA

Objective:

Simulation of the spacecraft loads by the launcher. The max. linear acceleration is approximately 30 times the earth's gravity.

for example, were rigorously controlled. The experiences were occasionally related to critical problems, and the lessons learned from them were sometimes not very pleasant. For example, shortly before shipment of the first flight model to Cape Canaveral, a thorough visual inspection was performed which revealed flaking of the white thermal paint, widely used on structural surfaces of the solar probe's antenna mast. Quickly, an emergency investigation was made by the Project Office and actions were taken in time to overcome a potential disaster. Minute separation of the paint from the surface had evidently been caused by brittle ageing and inadequate adhesion of the primer. However, it was more than just good luck that sharp-eyed inspectors recognized the trouble early enough to prevent serious impact.

Extensive know-how was gained also on stringent alignment techniques, mounting, insulation, automatic check out of experiment payloads and S/C housekeeping, gold plating and other EMC provisions, circuit safety, magnetic



Thermalfarbe ein wenig abzublättern begann. Sie war weitgehend benutzt worden für die Oberflächenstruktur des Sonnensonden-Antennenmasts. Schnell wurde von der Projektleitung eine Krisenuntersuchung veranlaßt, und Maßnahmen wurden eingeleitet, um eine mögliche Katastrophe zu verhindern. Langsame Ablösung der Farbschicht von der Oberfläche war offensichtlich die Folge von Rißalterung und ungenügender Haftung des Lösungsmittels. Mehr als nur viel Glück war es allerdings, daß scharfäugige Inspektoren die Gefahr früh genug erkannten und ernste Folgen verhinderten.

Gründliche Erkenntnisse wurden auch beim hochgenauen Justieren, beim Einbau, bei der Isolierung und dem automatischen Austesten der experimentellen Nutzlast gewonnen, ebenso aus dem gesamten Leistungshaushalt an Bord, der Goldbeschichtung und anderen Maßnahmen der

Sonnensimulationstest  
Testanlage JPL, USA  
Aufgabe:

Simulation der extremen Temperaturbelastung der Sonde bei größter Sonnenannäherung, Überprüfung der errechneten Temperaturvorhersagen.

*Solar Simulation Test  
Test facility JPL, USA  
Objective:*

*Simulation of the extreme temperature loading of the spacecraft at the nearest approach to the sun, checking of the predicted temperatures.*

elektromagnetischen Reinheit und abgestrahlter elektrischer Felder. Der Zusammenbau und die Testaktivitäten verbesserten die Expertise von MBB auf dem Gebiet der Groß-Integration in einem staubfreien Raum, der Massenbestimmung, der elektromagnetischen Reinheit, der magnetischen Störfreiheit, bei Erschütterungen, in Thermal-, Vakuum- und bei Drall-Tests. Abbildungen Seite 174 bis 177 zeigen HELIOS während einiger von diesen Arbeiten.

cleanliness and radiated electric fields. Assembly and test operations expanded MBB's experience in large-scale cleanroom integration, mass property determination, EMC, MC, vibration, thermal vacuum and spin testing. Figures pages 174 through 177 show the HELIOS satellite during some of these operations.

### The Heritage of Today's Space Programs from HELIOS

The technologies introduced or transferred in the development of the HELIOS Solar Probe had far reaching effects on many later space programs. Not only does this satellite stand alone, even today – 10 years after launch, for its high performance under the extreme thermal stresses of its solar orbit, but also serves as an example of superb engineering in the traditional spirit of German industry. The prototype model spacecraft which proudly stands in the Deutsches Museum of Munich is an inspiration for thousands of visitors who come to see the space science displays. This model, in true size, design, mechanical and electrical configuration, was actually used to test and to qualify the HELIOS Flight Models before launch. Indeed, it has an interesting story to tell. The experience, however, is not locked up as secrets inside the honeycomb sandwich outer structure and the superinsulation which cloak the spacecraft. They are alive and active at MBB and at many other companies who have benefited by the influx of knowledge and know-how brought with HELIOS.

Figure page 178/179 presents a summary of the follow-on project applications of HELIOS. It depicts the units, components, materials, industrial processes and techniques which have been conveyed or advanced into other satellites. In some case the transfers were in original form; in other cases a cross-fertilization, adaptation or modified design occurred. The spin-off products at all levels of the equipment tree would be too numerous to mention. They have dramatically influenced reliability, accuracy, weight, size, manufacturing ease and many other properties, which are the performance features of today's most advanced systems.

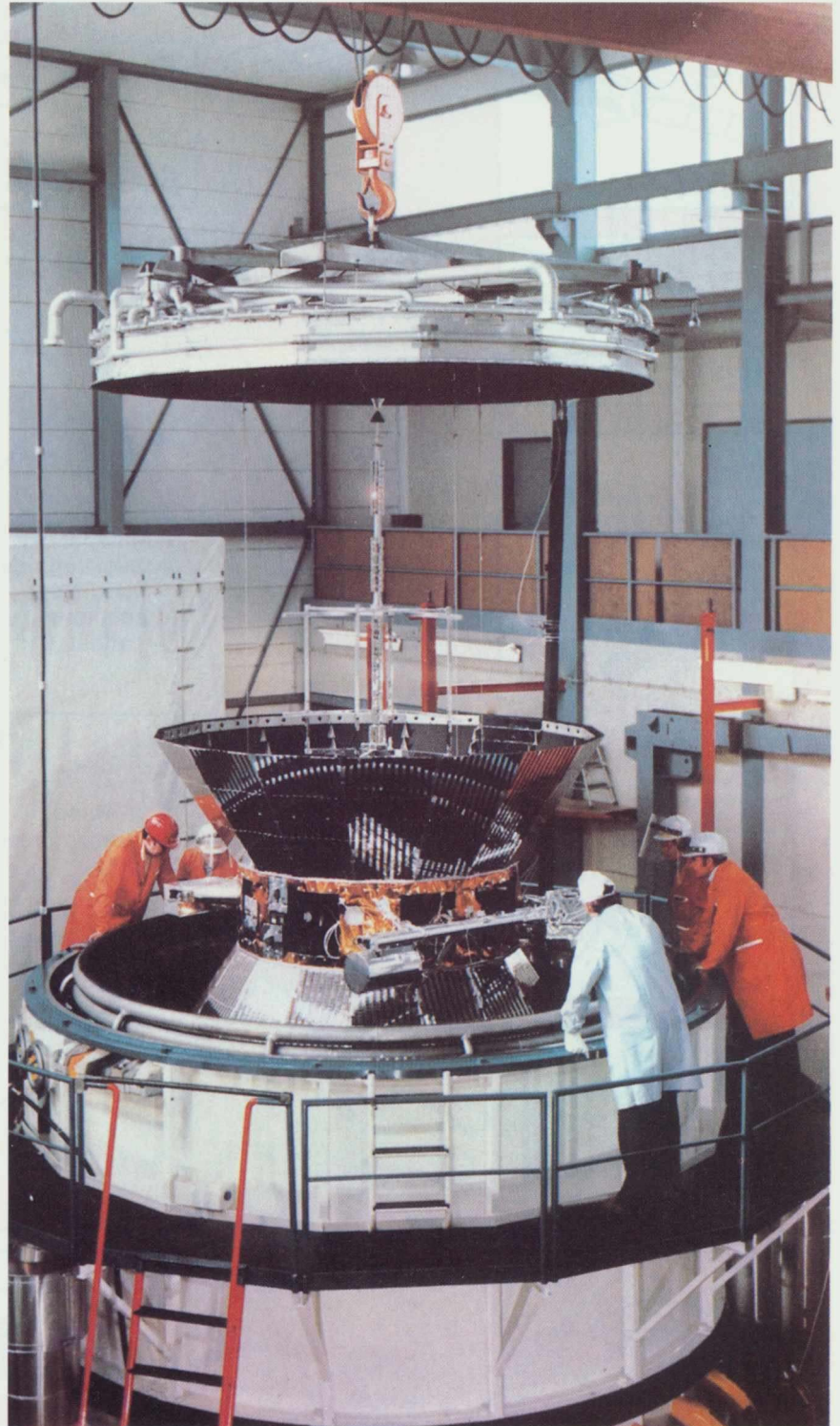
## Das HELIOS-Erbe für die heutigen Raumfahrt-Programme

Die eingeführten oder übertragenen Techniken bei der Entwicklung der Sonnensonde HELIOS hatten weitreichende Auswirkungen auf viele spätere Raumfahrtprogramme. Dieses Raumfahrzeug steht nicht nur heute, zehn Jahre nach dem Start, wegen seiner hohen Zuverlässigkeit unter extremen thermischen Bedingungen auf seiner Sonnenbahn einzigartig da, sondern es dient auch als Beispiel für eine vorbildliche Ingenieursleistung im traditionellen Geist der deutschen Industrie. Der Prototyp von HELIOS, der stolz im Deutschen Museum, München, ausgestellt ist, hinterläßt bei Tausenden von Besuchern, die kommen, um die Ausstellungsstücke in der Raumfahrthalle zu betrachten, bleibende Eindrücke. Dieses Modell, in wahrer Größe, Originalentwurf, mechanischer und elektrischer Konfiguration, wurde wirklich benutzt, um die HELIOS-Flugmodelle vor dem Start zu testen und zu qualifizieren. Und tatsächlich, es hat eine interessante Geschichte zu erzählen! Seine Erfahrung bleibt jedoch nicht unter seiner äußeren Honigwaben-Sandwich-Struktur und der Superisolierung, die das Raumfahrzeug ummantelt, als Geheimnis verborgen. Sie ist lebendig und aktiv bei MBB und bei vielen anderen Firmen, die bereichert wurden durch den Einfluß an Können und Wissen, die HELIOS mit sich brachte.

Abb. Seite 178/179 stellt eine Zusammenfassung der Folgeprojektanwendungen von HELIOS dar. Es bezeichnet die Einheiten, Komponenten, Materialien, industriellen Prozesse und Techniken, die in andere Satelliten übertragen oder vorangetrieben wurden, gelegentlich sogar in der ursprünglichen Weise. In anderen Fällen fand wechselseitige Befruchtung, Anpassung oder modifizierter Entwurf statt. Die Nebenprodukte auf allen Ebenen des Ausstattungs-Baums sind zu zahlreich, um aufgeführt zu werden. Sie haben in dramatischer Weise die Zuverlässigkeit, die Genauigkeit, Gewicht, Größe, Herstellungsvereinfachung und viele andere Eigenschaften beeinflusst. Sie sind Leistungscharakteristiken heutiger, meist fortgeschrittener Systeme.

Thermal  
Vakuumtest  
Testanlage  
IABG, Otto-  
brunn  
Aufgabe  
Prüfung der  
Leistungsfä-  
higkeit der  
Sonde unter  
simulierter  
Weltraum-Um-  
gebung

*Thermal  
Vacuum Test  
Test Facility  
IABG, Otto-  
brunn  
Objective:  
Testing of the  
functional  
performance  
of the space-  
craft under  
simulated  
space envi-  
ronment*



11,12

MARECS

11

DFS

10

VIKING

10

SPOT

9,10

TV-SAT  
TDF-1

10

ULYSSES

3,4,6,7,8

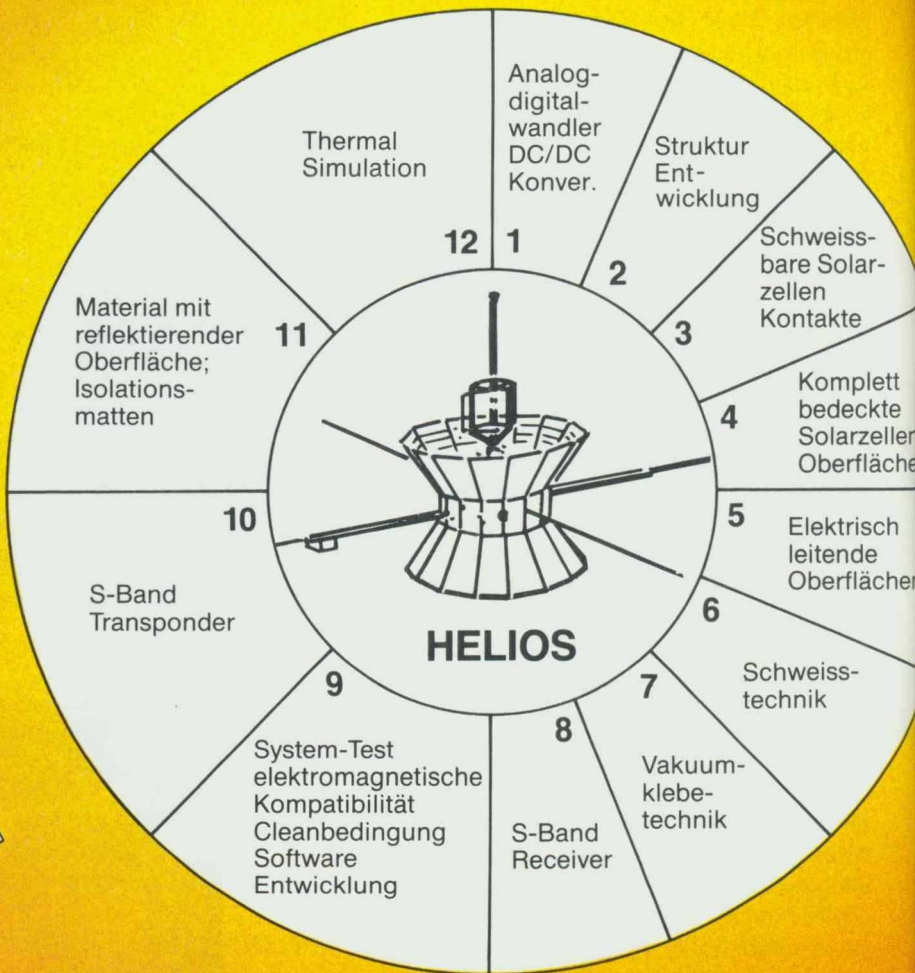
ISEE-B

12

ECS

2

EURECA



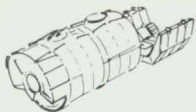
9

EXOSAT

10

TELECOM 1

1,2,6



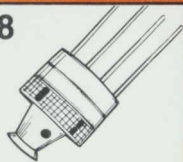
**SPACELAB**

3,4,6,7



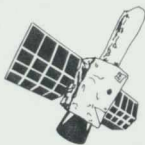
**CTS**

3,4,5,6,8



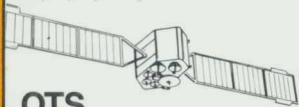
**GEOS**

3,4,6,7



**IUE**

3,4,6,11,12



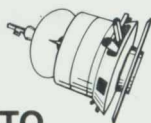
**OTS**

3,4,6



**MAROTS**

8



**GIOTTO**

Beispiele HELIOS-einge-  
führter Technologien und  
ihre Anwendung bei Folge-  
projekten

*Samples of technologies  
introduced on HELIOS  
and applied to follow-on  
projects*

Deutsches Bodenbetriebssystem GSOC in der  
DFVLR Oberpfaffenhofen.  
*German Ground Operations Center GSOC of the  
DFVLR Oberpfaffenhofen.*

JPL Pasadena, Kalifornien, USA  
*JPL Pasadena California, USA*

DFVLR, Bereich für Projektträgerschaften, Köln  
*DFVLR, Project Executive Department, Cologne*



# Bodenbetriebssystem

Welche Aufgaben hat die Bodenkontrolle?

Wer steuert HELIOS?

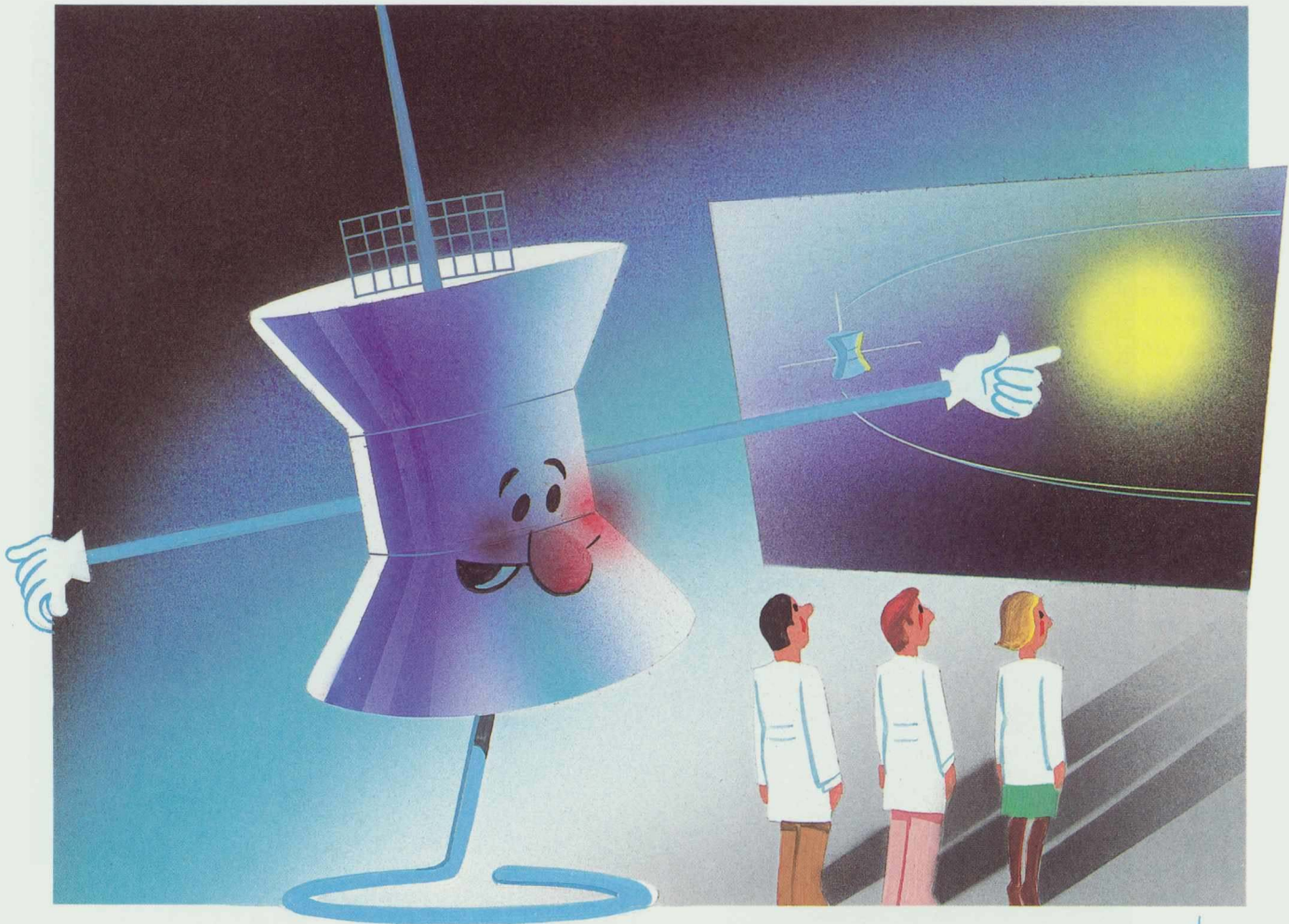
Welche Bodenstationen stehen mit HELIOS in Verbindung?

# Ground Operations System

Which are the tasks of the ground control?

Who operates HELIOS?

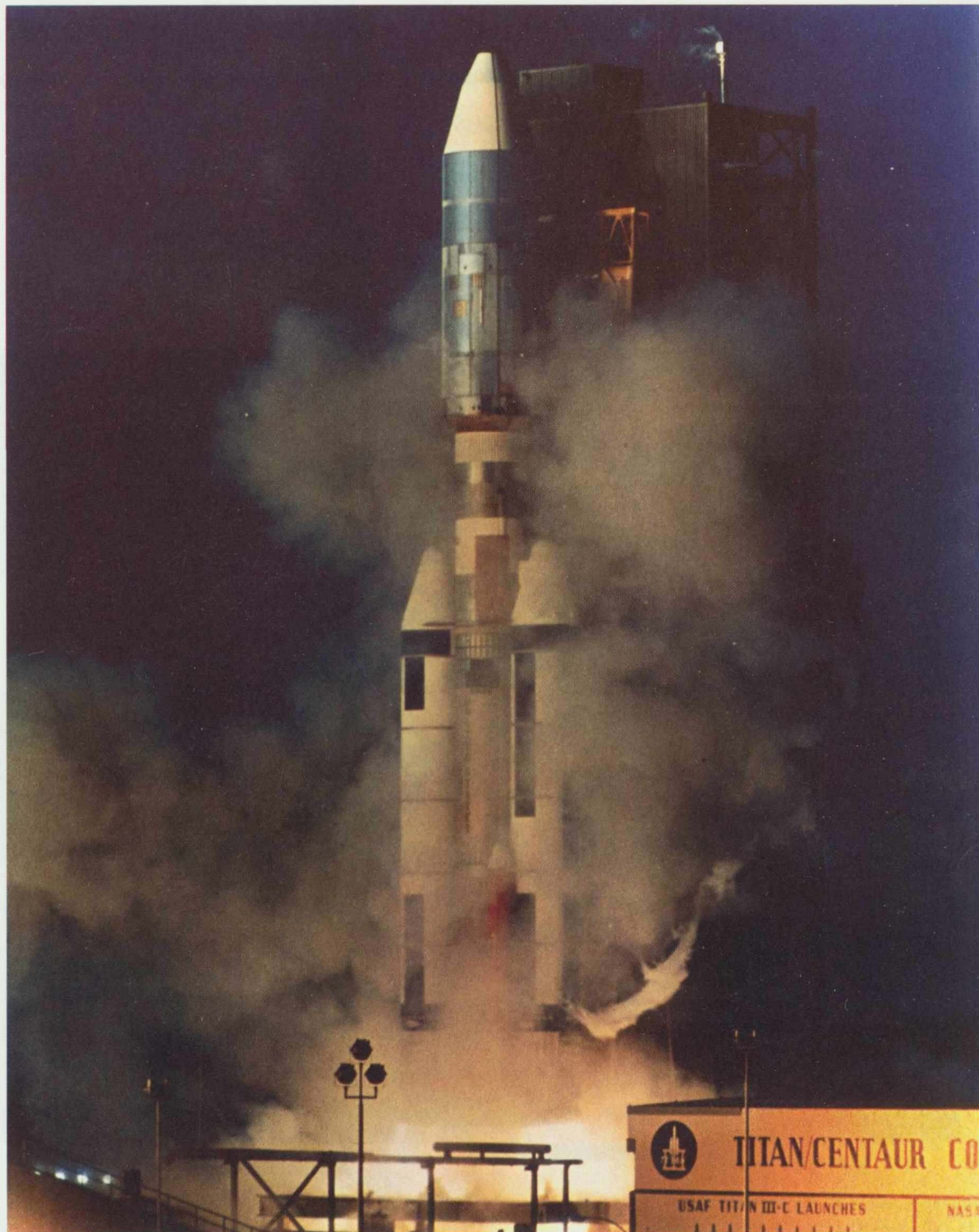
Which ground stations are in contact with HELIOS?



Hok  
84

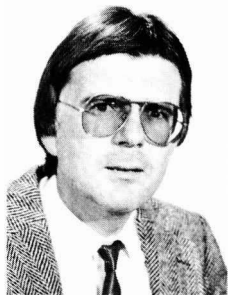
Die Startrakete Titan III  
E-Centaur-TE 364/4  
im Augenblick der Zündung

*The launcher Titan III  
E-Centaur - TE 364/4  
at ignition*



# HELIOS – Bodenbetrieb

Joachim Kehr und Georg Hiendlmeier  
DFVLR Oberpfaffenhofen



Kehr



Hiendlmeier

## Das Missions-Kontrollzentrum

Die Verantwortung der Bodenkontrolle für das Raumfahrzeug setzten bei HELIOS mit dem Abtrennen der Sonde von der obersten Raketstufe ein. In jahrelanger Vorarbeit war die Reihenfolge der Kommandos festgelegt worden. Sie versetzte das Fahrzeug in den Zustand, der ihm die Erfüllung seiner Aufgabe ermöglichte.

Zuerst wurde mit dieser Kommandofolge die Sonde so gedreht, daß die Telemetrieantenne senkrecht zur Bahnebene steht. Durch ein weiteres Kommando wurden die während des Starts am Satellitenkörper anliegenden Ausleger entfaltet. In ähnlicher Weise wurde die Meßantenne ausgefahren, die Telemetrieantenne auf die Erde ausgerichtet, die Umdrehungsrate in den Sollbereich gebracht, die Experimente eingeschaltet usw. Erst nach dieser etwa vier Tage dauernden Prozedur konnte die Mission im eigentlichen Sinne beginnen. Das ganze sehr komplexe Verfahren lief bei HELIOS 1 fast und bei HELIOS 2 völlig fehlerlos ab. Die gesamte Mission und Doppelmission lag in der Zuständigkeit des Deutschen Satelliten-Kontrollzentrums der DFVLR in Oberpfaffenhofen. Nur während der ersten beiden Wochen von HELIOS 1 war das Kontrollzentrum im Jet Propulsion Laboratory in Pasadena, Kalifornien, untergebracht.

Abb. Seite 184 ist ein Bild des Kontrollzentrums der DFVLR in Oberpfaffenhofen. Man sieht etliche Bildschirme vor einer großen Anzeigetafel. Auf die Bildschirme „schreibt“ der Stationsrechner laufend die Meßwerte über den Zustand der Sonde auf, die für den Betrieb notwendig sind. Der Stationsrechner wiederum bezieht seine

Ausgangsdaten von der Bodenstation, die gerade die Signale der Sonde empfängt. Aus einer Bitfolge, das ist eine Folge von Nullen und Einsen, der Sprache der Computer, die jedem Uneingeweihten sinnlos erscheinen muß, macht er in Sekundenschnelle lesbare Informationen, die den Betriebsingenieuren sagen, in welchem Zustand sich das Raumfahrzeug gerade befindet. Man nennt diesen Betrieb „Echtzeitbetrieb“, denn auf den Bildschirmen erscheinen tatsächlich die Meßinformationen, die dem Momentanzustand der Sonde entsprechen, verzögert nur um die Signallaufzeit zwischen Raumfahrzeug und Bodenstation, zwischen Bodenstation und Kontrollzentrum und um die Rechenzeit des Computers. Wenn überhaupt, ist dabei meist nur die Signallaufzeit durch den Raum von Bedeutung. HELIOS kann maximal 300 Mio km von der Erde entfernt stehen. Das entspricht einer Signallaufzeit von 1000 Sekunden = 16½ Minuten.

Die Echtzeitinformationen auf den Bildschirmen und die Erfordernisse der wissenschaftlichen Aufgabenstellung bilden die Grundlage für die Auswahl der Kommandos, die notwendig sind, um die optimale Funktion der Sonde zu gewährleisten. Im Laufe der zehn Missionsjahre wurden insgesamt etwa 350 000 Kommandos allein an die Sonde HELIOS 1 gesandt.

Bei einem so komplexen Gerät, wie es jede der beiden HELIOS-Sonden darstellt, kann man nicht erwarten, daß alles fehlerlos abläuft. Ein guter technischer Entwurf der Sonde zusammen mit funktionsgerechter Bodenkontrolle zeichnet sich nicht so sehr durch völliges Ausbleiben von Fehlern und Mängeln aus, als vielmehr dadurch, daß dann und wann notwendigerweise auftreten-

*The responsibility for the ground control of HELIOS started with the separation of the spacecraft from the last stage of the launching rocket. During the preparatory work of several years the sequence of commands had been defined, which were to bring HELIOS into its work-configuration. It took then almost three days until this configuration phase was completed, all initial commands being sent in order to start the nominal routine spacecraft operation. For the first two weeks of the mission of HELIOS 1 the control center of the DFVLR was accommodated at the Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, before the whole crew moved to its final working place at Oberpfaffenhofen, Oberbayern. HELIOS 2 was operated from Oberpfaffenhofen right from its very beginning.*

*Fig. page 184 is a view of the control room of the DFVLR Oberpfaffenhofen. Continuously the station computer "writes" the measuring values of the spacecraft's state, which are necessary to operate the spacecraft, on luminescent screens. They tell the operating engineers all technical data of the spacecraft. This type of operation is called "real time operation", because, indeed, on the screen appear the momentary status data of the spacecraft, delayed only by the signal travel time. At maximum, HELIOS may be as far from the earth as 300 million km. This relates to a signal travel time of 1000 seconds = 16½ minutes.*

*This real time information together with the requirements of the experiments are the basis for the selection of commands. During the first ten years of the mission all together about 350,000 commands have been sent to HELIOS 1 and an equivalent amount until January 1981 to HELIOS 2.*

*Any complicated instrument like each of the two HELIOS spaceprobes is not expected to operate completely flawlessly over a long time span. A good technical design together with the appropriate ground control may not be characterized primarily by complete absence of malfunctions and shortcomings, but much more by no serious*



HELIOS-Kontrollraum in der DFVLR Oberpfaffenhofen

HELIOS control room in the DFVLR Oberpfaffenhofen

de Fehler keine oder nur geringfügige Auswirkungen auf die Mission haben. HELIOS 1 kommt einem so definierten realistischen Optimum recht nahe.

Bereits nach etwa einem halben Missionsjahr trat ein Fehler auf, dessen Ursache nicht völlig geklärt werden konnte. HELIOS 1 stand gerade in Erdferne, also in fast 300 Mio km Entfernung von der Erde, als plötzlich die Funkverbindung abriß und keine Daten mehr empfangen werden konnten. So schnell wie möglich wurden Maßnahmen erörtert und beschlossen, wie man versuchen könnte, das erst einmal verloren geglaubte Raumfahrzeug wieder zu aktivieren. Kommandos wurden ausgesandt, die alle Experimente an Bord abschalteten. Ein weiteres Kommando schaltete den Bordsender auf „Notbetrieb“, über die Mittelgewinnantenne, während die Daten sonst über die Richtantenne ausgesendet werden.

Mehr als eine halbe Stunde dauerte es, bis die Betriebsmannschaft aufatmen konnte: Von der Bodenstation kam die Meldung, HELIOS 1 ist wieder da, wenn auch nur schwach (wegen der weniger leistungsfähigen Mittelgewinnantenne an Bord), aber sicher. Auch die Datenübertragungsrate war auf sparsamsten Betrieb (8 Bit pro Sekunde) geschaltet worden, deshalb dauerte es

länger als sonst, bis alle für die weiteren Maßnahmen notwendigen Daten auf den Bildschirmen vorzufinden waren. Es war auch einiges passiert an Bord: die Richtantenne war nicht mehr auf die Erde ausgerichtet, der Spannungsregler hatte sich abgeschaltet, so daß automatisch der Ersatzregler eingesprungen war und auch die beiden Kommandoempfänger hatten umgeschaltet. Nach dieser Analyse war alles weitere fast nur Routine. Schnell war eine Kommandofolge ausgewählt und abgesandt und ein paar Stunden später verlief die Mission wieder so, als sei nie etwas gewesen.

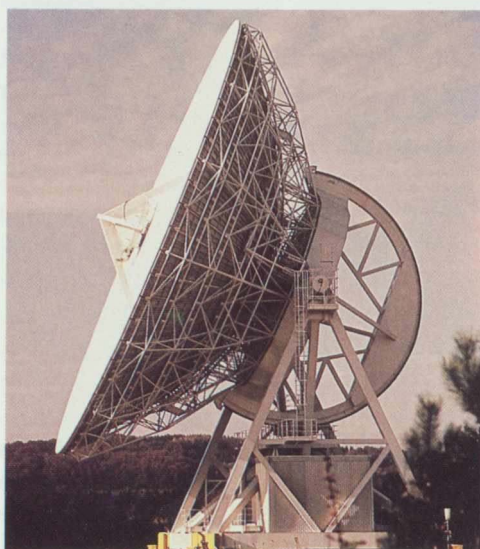
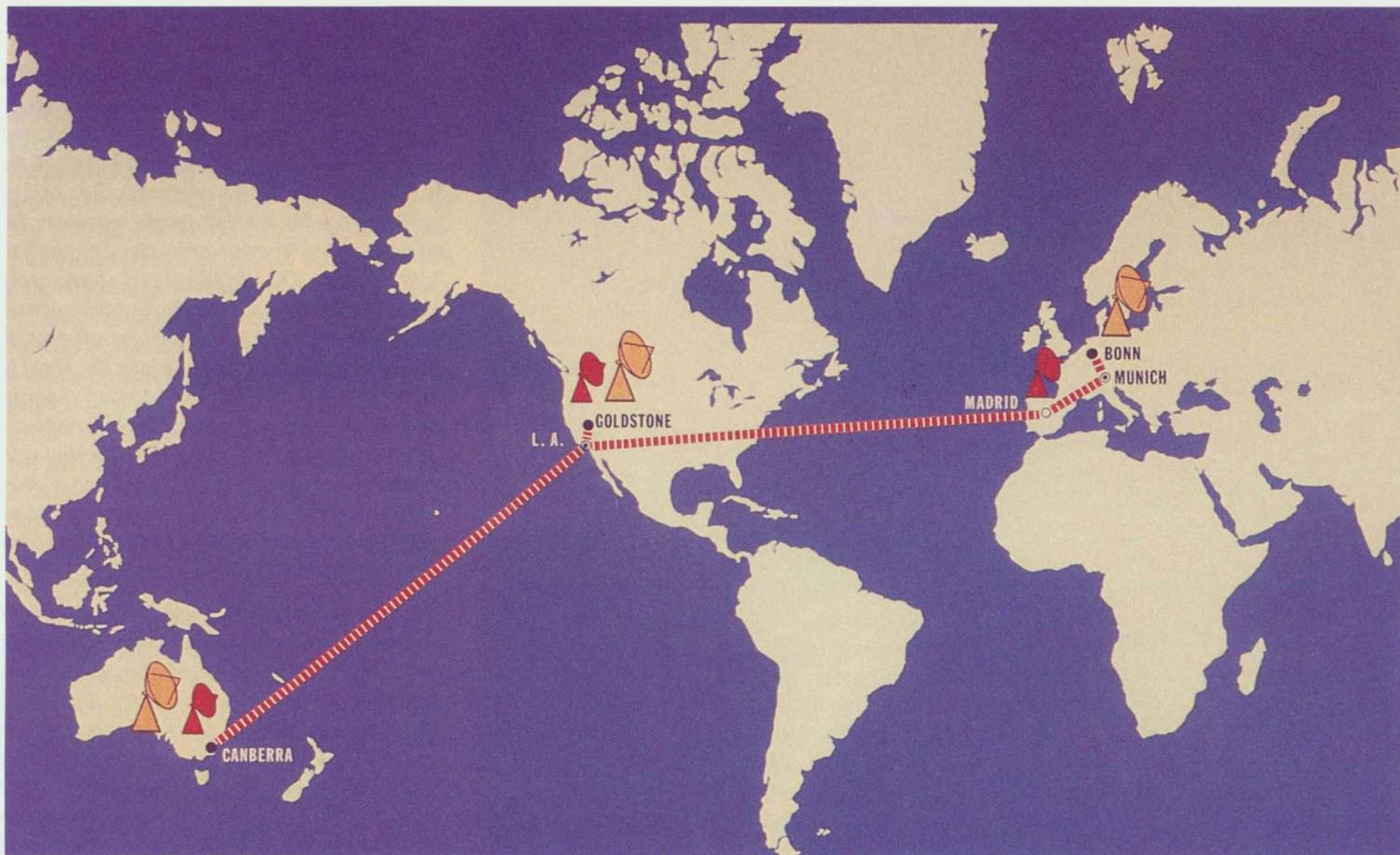
Jener erste Fehler lief also recht glimpflich ab, wie auch alle anderen derartigen „Regulatorumschaltungen“ die bei HELIOS 1 auftraten. Es gab jedoch auch andere Fehler, die nicht ohne zum Teil schmerzliche Missionseinbußen zu beheben waren. Am schlimmsten war davon HELIOS 2 am 3. März 1980 betroffen, als es nicht mehr gelang, die Sonde nach einem Defekt, der ganz ähnlich aussah wie die eben geschilderte Regulatorschaltung, wieder zum Leben zu erwecken. Der nochmalige Reaktivierungsversuch im Januar 1981, als HELIOS 2 in (relative) Erdnähe kam, erbrachte keinen dauerhaften Erfolg. Eine der großen NASA-Stationen konnte zwar noch ein sehr schwaches Signal der Sonde empfangen; auch

effects on the mission if malfunctions happen. HELIOS 1 comes pretty close to such a realistic optimum.

A serious malfunction, a breakdown of the whole onboard system, happened as early as about half a year after launch, when HELIOS 1 was in a far-earth position almost 300 million km away from earth. The control center succeeded in bringing the spacecraft up again and the nominal mission could continue. This failure has never been clarified completely. Up to now, only one of them, however, had really serious consequences. This one happened on March 3, 1980 on HELIOS 2. After this breakdown the spacecraft did not recover. Later recovery attempts, when the spacecraft came close to earth in early January 1981, failed also. The end of the mission HELIOS 2 had to be officially declared.

On HELIOS 1 the long mission of 10 years has caused deep traces of ageing. The performance of the solar cells has decreased more than expected. They do no longer generate enough power to operate the spacecraft over the complete orbit. Apparently, the environmental conditions close to the sun were more adverse than assumed. Therefore it is even more remarkable that the spacecraft is still operating successfully, although the active phases are now restricted to the orbital segments around the perihelion. One of the two transmitters still works and the despinn antenna has remained active too. All except two experiments (E3 and E4) are working properly and allow to transmit valuable measuring data.

Early in the mission, i.e. almost one year after launch, the capability to perform precise orbit measurements was lost. The transponder on board failed. This is a device allowing to measure the transmitting time between earth, spacecraft and back with utmost accuracy. Fortunately the initial orbit determination was so exact that even now, ten years after launch, no



Die Karte zeigt die geographische Lage der Bodenstationen des DSN und der Bundesrepublik. Die beiden Bilder unten zeigen links das 100-m Teleskop des Max-Planck-Instituts für Radioastronomie in Effelsberg und rechts die 30-m-Station in Weilheim

*The map shows the geographical position of the ground station of the DSN and of the Federal Republic. The two figures below show (left) the 100 m telescope of the Max-Planck-Institut für Radioastronomie at Effelsberg and (right) the 30-m station at Weilheim*

einige wenige Meßdaten konnten noch gewonnen werden. Es gelang jedoch nicht mehr, die Sendeanlage an Bord mit mittlerer oder voller Leistung zu betreiben. Das wäre notwendig gewesen, um einen kontinuierlichen Datenstrom zu gewährleisten. Die Sonde mußte aufgeben und die Mission HELIOS 2 beendet werden.

Bei HELIOS 1 hat die lange Missionszeit von 10 Jahren deutliche Alterungsspuren hinterlassen: Die Leistungsfähigkeit der Solarzellen ist stärker zurückgegangen, als man erwartet hatte. Die Umgebungsbedingungen in Sonnennähe waren offensichtlich ungünstiger als vorher angenommen. Um so erstaunlicher ist es, daß die Sonde noch immer sehr erfolgreich arbeitet, auch wenn die Aktivitätsphasen auf die Bahnbereiche um das Perihel herum eingeschränkt werden mußten. Einer der beiden Sender arbeitet noch, und auch die Richtantenne ist funktionsfähig geblieben. Sie erlauben es, alle in den Aktivitätsperioden der Sonde an Bord gewonnenen Meßdaten zur Erde zu übertragen. Von den zehn Experimenten an Bord sind nur zwei, nämlich die Magnetometer E3 und E4 ausgefallen. Das hat zwar zu einer Verminderung der noch zu erwartenden wissenschaftlichen Gesamtausbeute geführt, nicht aber zu einer Abwertung der übrigen Experimente und damit der Mission insgesamt.

Ziemlich früh in beiden Missionen, nämlich knapp ein Jahr nach dem Start ging auch die Möglichkeit verloren, Präzisionsmessungen der Bahnen auszuführen.

Man benutzt hierfür zwei unterschiedliche Meßmethoden: die exakte Messung des Abstands zwischen Sonde und Bodenstation zu genau festgelegten Zeiten und die Bestimmung der Relativgeschwindigkeit zwischen Sonde und Erde mit Hilfe des Doppler-Effekts. Weil die Lichtgeschwindigkeit sehr genau bekannt ist, genügt für die Abstandsmessung die Kenntnis der Signallaufzeit zwischen Sonde und Erde bzw. hin und zurück. Ein Spezialgerät an Bord, der sogenannte Transponder – er wurde unbrauchbar – nimmt das für die Laufzeitmessung von der Bodenstation ausgesandte Signal auf, kehrt es um und läßt es vom Sender der Sonde zurück zur Erde strahlen. Die Zeit zwischen der Aussendung des Signals am Boden und seiner Wieder-Ankunft kann bis auf einige milliardstel Sekunden genau ermittelt werden, entsprechend einer Abstandsgenauigkeit von ein paar Metern.

Auch die Relativgeschwindigkeit ist mit Hilfe des Doppler-Effekts recht genau meßbar, obwohl diese Messungen etwa hundertmal ungenauer sind als die Abstandsmessungen. Man mißt die ankommende Frequenz der HELIOS-Signale. Die Abweichung dieser Frequenz von der bekannten Sendefrequenz an Bord ist ein direktes Maß für die Relativgeschwindigkeit. Nur diese zweite Methode der Bahnvermessung ist bei dem genannten Verlust erhalten geblieben.

Zum Glück war die anfängliche Bestimmung der Bahn mit Hilfe der Laufzeitmessung so genau, daß auch jetzt, 10 Jahre nach dem Start keine neuerliche Bahnbestimmung mehr notwendig geworden ist.

Altersbedingt steigt die Temperatur an Bord von einem zum anderen Umlauf stetig an. Unter dem Einfluß der Umweltbedingungen wird die Oberfläche der Sonde allmählich dunkler und rauher. Sie verliert dabei langsam die Fähigkeit, das aufheizende Sonnenlicht wegzureflektieren, ehe es den Sondenkörper aufheizen kann. Diese ansteigende Hitze an Bord zieht eine Reihe von Problemen nach sich. So mußte das Gas abgelassen werden, das zur Nachregelung der räumlichen Lage des Raumfahrzeugs und seiner Rotationsgeschwindigkeit dienen sollte. Die Düsen waren nämlich so heiß geworden, daß ihr Leckwerden und damit unkontrolliertes Ausströmen des Gases drohte. Man hätte ein Taumeln der Sonde und dadurch den Verlust der Nachrichtenverbindung befürchten müssen. Bei HELIOS 2 brachte dieses Gas-Ablassen auch einen schönen, wissenschaftlich verwertbaren Vorteil mit sich, nämlich die Möglichkeit, die Symmetrie der interplanetaren Staubwolke quantitativ zu bestimmen (vgl. S. 55/56). Ansonsten hatte diese Maßnahme keine nachteiligen Folgen für die Mission. Die Stellung der Symmetrieachse und die Drallrate sind so stabil, daß eine Nachregelung vermutlich auch nach einigen weiteren Missionsjahren nicht notwendig werden dürfte.

Auch die Temperatur der Solarzellenanlage ist inzwischen stark angestiegen. Mehr als 183 °C wurden während des 19. Periheldurchgangs im Juli 1984 gemessen. Das ist über 50 °C mehr als zu Beginn der Mission. Allein dadurch kann ein Teil der eben bereits erwähnten Leistungseinbuße der Solarzellen erklärt werden. Andere Effek-

*further orbit determinations have become necessary.*

*The temperature on board increases steadily from one to the next orbit. The surface of the spacecraft is suspected to have got dark and rough. It slowly loses its ability to reflect the heating sunlight off the spacecraft. This caused problems e.g. for the gas supply necessary for attitude and spin rate corrections. The gas had to be released. On HELIOS 2 this shortcoming was used for a scientifically favourite action. The gas was used to turn the spacecraft axis for a short time in a direction, where the plane of symmetry of the Zodiacal light cloud could be determined. The gas release had no adverse consequences for the mission. Attitude and spin rate have turned out to be very stable. Most probably even through some more mission years no corrective action is expected to become necessary.*

*The temperature of the solar power generator has meanwhile strongly increased. More than 183 °C have been measured during the 19th perihelion passage. This is more than 50 °C above the temperature at the beginning of the mission. This alone explains a part of the power reduction as mentioned before. Other effects acting on the surface add to it. It is therefore no surprise that the generated electrical energy is sufficient only for the operation of the probe in the orbit sections about perihelion.*

*During the primary mission phases, in the Federal Republic the large (100 m diameter) antenna of the Max-Planck-Institut für Radioastronomie could be used for data reception and the 30 m-station of the DFVLR in Weilheim for command transmission. These two stations could be used for about one third of each day. For the remaining app. 16 h per day stations of NASA's DSN were available. All these stations were connected with the control center in Oberpfaffenhofen via data and voice lines. A several months lasting almost continuous data stream at highest time resolution (highest possible data rate) could be delivered to the scientists.*

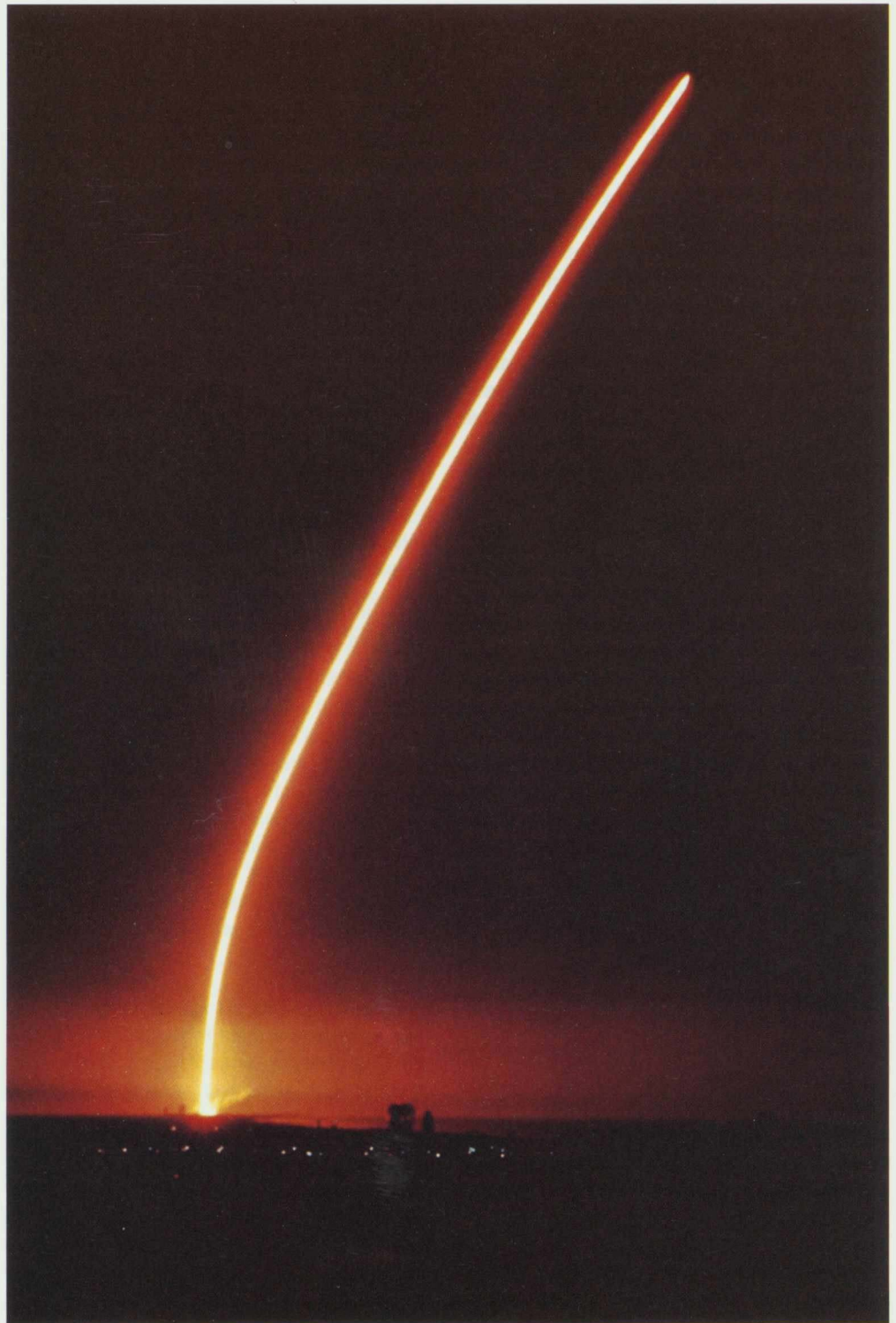
*After this initial phase adverse conditions forced the project to change the ground station*

te, die allgemein auf die Oberfläche wirken, kommen dazu. So verwundert es nicht, daß die erzeugte elektrische Energie nur mehr in den sonnennahen Bereichen der HELIOS 1-Bahn für den Betrieb der Sonde ausreicht. Bei jedem Bahnlauf steht die Betriebsmannschaft des Kontrollzentrums deshalb neu vor der Aufgabe, die wissenschaftliche Ausbeute der Mission zu optimieren, und nur die Geräte und Experimente an Bord einzuschalten, für die einerseits die verfügbare Leistung ausreicht und andererseits der höchste wissenschaftliche Wert zu erwarten ist. Daß dieses Verfahren bisher Erfolg hatte, beweisen zum Beispiel die wissenschaftlichen Beiträge in dieser Festschrift.

#### Die Bodenstationen

Die überaus erfreulich lange Lebensdauer der Mission konnte nur dadurch ständig in einer für die Wissenschaft vorteilhaften Weise ausgeschöpft werden, daß der Einsatz der Bodenstationen für den Meßdatenempfang und für die Kommandogabe in kaum jemals sonst erreichter Flexibilität alle Möglichkeiten in USA und in der Bundesrepublik Deutschland nutzte.

Zu Beginn der Mission standen in der Bundesrepublik die große (100 m Durchmesser) Antenne des Max-Planck-Instituts für Radioastronomie in Effelsberg (Eifel) für den Datenempfang und die 30-m-Station der DFVLR in Weilheim (Oberbayern) für die Kommandogabe zur Verfügung. Die Stationen konnten natürlich nur dann sinnvoll betrieben werden, wenn wenigstens eine der beiden HELIOS-Sonden über dem Horizont stand. In der Praxis ist das etwa ein Drittel eines vollen Tages. Die restlichen ungefähr 16 Stunden des Tages mußten von US-Stationen der NASA-Deep Space Network (DSN) abgedeckt werden. Hierfür standen vom Kontrollzentrum der DFVLR (GSOC) in Oberpfaffenhofen (Oberbayern) ständig mehrere Leitungen für die Datenübertragung am Boden und für den Fernspreverkehr bereit. In großzügiger Weise wurde der Mission von der NASA Bodenstationsunterstützung gewährt. Den



Wissenschaftlern konnte ein etliche Monate dauernder, fast kontinuierlicher Meßdatenstrom hoher und höchster Zeitauflösung geliefert werden, d. h. sehr hohe Datenübertragungsrate mit zeitlich sehr dichtliegender Folge von Einzelmessungen.

Nach dieser Anfangsphase zwangen jedoch diverse Umstände zu mehrmaligen Änderungen des Bodenstationseinsatzes. Die Station Effelsberg konnte nicht länger ihrem Hauptaufgabengebiet, der Radioastronomie, entzogen werden. Deshalb wurden im Sommer 1976 die mit der 100-m-Antenne zusammenarbeitenden Empfängeranlagen in Effelsberg abmontiert und nach Weilheim überführt. Nach kurzer Umbauphase übernahm diese (etwa 11mal weniger leistungsfähige) Anlage zusätzlich zur Kommandogabe auch den Dateneingang.

Bald entstanden auch bei der NASA Schwierigkeiten, die Mission in gleichem Umfang weiter zu unterstützen. Mehrere neue Raumfahrtprojekte forderten ebenfalls großzügige Stationsunterstützung. Die Datenlücken mehrten sich. Kritische Einbußen konnten dennoch weitgehend vermieden werden. In vermehrtem Umfang wurde der Datenspeicher an Bord eingesetzt. Bei der Sammlung von Meßdaten über Stunden läßt er zwar nur sehr niedrige Bitraten und damit nur sehr bescheidene Zeitauflösung zu. Aber er ermöglicht es, größere Intervalle ohne Datenübertragung zu überbrücken.

Während der verbliebenen Aktivitätsphase um das 19. Perihel war die Stationsunterstützung den Umständen gemäß recht bescheiden. Weilheim stand nicht mehr zur Verfügung, weil die Station in Vorbereitung auf andere Raumfahrtmissionen umgebaut werden mußte. Die NASA-Bodenstationen sind durch die Notwendigkeit der Unterstützung zahlreicher Missionen stark überlastet. Deshalb muß sich HELIOS mit ungefähr 20 Stunden Stationsunterstützung pro Woche begnügen.

#### „Rekordverdächtige“ Betriebsdaten von HELIOS

Nicht nur die Wissenschaftler können auf spektakuläre Einzelerfolge im Rahmen des Gesamter-

gebnisses von HELIOS verweisen. Auch der Betrieb der beiden Sonden weist Erfolge auf, die sich sehen lassen können:

– Am 10. Dezember 1984 hat HELIOS 1 eine Flugdauer von 10 Jahren oder 87 672 Stunden erreicht.

– Daten wurden während etwa 55 000 Stunden empfangen. Dabei betrug die übertragene Datenmenge ungefähr 100 Mrd. bit, die Bitrate lag also im Durchschnitt bei mehr als 500 bit pro Sekunde.

– Die höchste Temperatur wurde mit  $+250^{\circ}\text{C}$  am Antennenmast gemessen. Geschätzt wird diese Temperatur jedoch zu  $+360^{\circ}\text{C}$ . Der Meßfühler hat dort schon lange den Höchstpunkt seines Anzeigebereichs erreicht.

– Höchste und niedrigste Temperatur der Solarzellen:  $+183.4^{\circ}\text{C}$  im 19. Perihel,  $-57^{\circ}\text{C}$  kurz nach dem Start.

– Die niedrigste Temperatur wurde kurz nach dem Start an einem Ausleger gemessen:  $-65^{\circ}\text{C}$ .

*concept several times. Effelsberg could no longer be used for HELIOS. Therefore the receivers were transferred to Weilheim. After a short configuration phase this antenna (about 11 times less powerful than Effelsberg) took over the data reception in addition to the command transmission, as is obviously common for all DSN stations. Then NASA also got into trouble. They could no longer support the mission to the same extent as in the beginning phase. Several new deep space missions required ground station coverage in similar completeness. For HELIOS the number and extent of data gaps increased. This was partially overcome by means of the big onboard memory allowing to collect data of low bitrate over several hours to be transmitted later whenever adequate.*

*During the 19th perihelion ground station support was comparatively poor, considering the prevailing circumstances. Weilheim was no longer available since the station had to be reconfigured in preparation of new missions. The DSN is overloaded by so many missions. Therefore HELIOS was forced to be satisfied with about 20 hours per week station support.*

*There are numerous operational data of HELIOS which may be suspected to be records or which are otherwise remarkable:*

– *On December 10, 1984 HELIOS 1 has achieved a total flight time of 10 years or 87,672 hours*

– *Data were received during about 55,000 hrs. The transmitted amount of data meanwhile adds up to about 100 billion bit; thus the average bitrate was higher than 500 bits per second.*

– *The highest temperature measured was  $+250^{\circ}\text{C}$  at the antenna mast. However, this temperature is estimated to be  $+360^{\circ}\text{C}$ . The temperature sensor has long since reached at its highest range point.*

– *The highest and lowest temperatures of the solar cells:  $+183.4^{\circ}\text{C}$  during the 19th perihelion;  $-57^{\circ}\text{C}$  shortly after launch.*

– *The lowest temperature on board was measured shortly after launch at a boom:  $-65^{\circ}\text{C}$ .*





Heftman

# HELIOS Project Support

Kurt Heftman, HELIOS Project Support Manager, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, Cal. 91103, until November 1983. Presently Director, European Space Operations Center, D-6100 Darmstadt, Federal Republic of Germany, and Director of Operations, European Space Agency, 75738 Paris Cedex 15, France

*Kurt Heftman beschreibt die Beiträge, die das Jet Propulsion Laboratory (JPL), Pasadena, Kalifornien zum Projekt HELIOS und zur Mission leistete.*

*Es begann 1970, als etliche deutsche Ingenieure und Wissenschaftler, meist für die Dauer von einem Jahr, zu verschiedenen NASA-Zentren abgeordnet wurden, damit sie Aufgaben im Zusammenhang mit Weltraum-Forschungsvorhaben kennenlernen und sich mit Zielen im Hinblick auf HELIOS vertraut machen könnten. Am JPL betraf diese Ausbildungsphase in erster Linie die Telekommunikation – das JPL betreibt das weltweite Antennen-Netzwerk DSN – und die Kontrolle von Raumfahrzeugen im Kontrollzentrum (SFOF). Auch Probleme der Bahnbestimmung und Flugbahnanalyse waren wichtige Themen.*

*In einer Reihe von gemeinsamen Projekt-Management-Sitzungen wurden 1973 dem JPL für das Projekt drei Hauptaufgaben zugeteilt:*

- 1. Vorbereitung der im JPL stehenden großen Sonnensimulations-Testkammer, um darin im Frühjahr 1974 den Prototypen von HELIOS intensiven, wochenlangen harten Prüfungen zu unterziehen. Besonders wichtig war dabei die Bestrahlung mit künstlichen Sonnen, die 12 echten Sonnen in Erdabstand entsprechen. Aber auch andere Tests, vor allem mechanische, waren durchzuführen.*
- 2. Assistenz beim Bau der Sonde und bei der Vorbereitung der Mission, z. B. Mitarbeit am Entwurf und Test der Telemetrieantenne und der Sendeanlage an Bord, Berechnungen der Leistungsfähigkeit der Datenübertragung,*

## I. JPL Support

In the late 1970's many German engineers and scientists were in residence at various NASA U.S. locations, for periods of approximately one year, for study and familiarization purposes with respect to HELIOS. At the Jet Propulsion Laboratory (JPL) of the California Institute of Technology, in Pasadena, a broad familiarization program in, primarily, telecommunications and spacecraft operations was established to transfer knowledge about the Deep Space Network (DSN) and the Space Flight Operations Facility (SFOF). Residences were used by personnel from DFVLR Oberpfaffenhofen in Operations Centre development and support, mission operations, network documentation and control, orbit determination and trajectory analysis, among others. By 1972 these personnel had returned to DFVLR after obtaining training in the ground systems and operations techniques used on such U.S. interplanetary missions as Mariner '69 and Mariner '71, the Mars orbiter.

In 1973 a series of Joint Working Group meetings and splinter teams provided the main management device for continuous planning and development of systems and procedures for three types of JPL support activities:

a) The JPL Large Solar Simulation Facility was configured and tested for housing the HELIOS prototype spacecraft and testing it under intensities matching the 12 solar constants expected during flight. The DFVLR and MBB support team performed the actual tests in the spring of 1974, after the prototype spacecraft and support trail-

ers had been flown from Munich, in the facility being configured and maintained by JPL. The balancing, acoustic, and vibration testing was also performed. JPL constructed a fixture to measure the moments of inertia and this fixture was also subsequently used at the Kennedy Space Center on the flight spacecraft prior to launch.

b) Consulting continued in various technical disciplines. The Telecommunications, Systems, and Engineering Mechanics Divisions of JPL were asked to provide assistance in many areas such as antenna design and testing, travelling-wave-tube performance, link calculations for the spacecraft-earth communications paths, multiplexing, computer programs and documentation, ephemeris maintenance, solar panels performance, etc.

c) The HELIOS Operations Team was an integrated activity under the U.S. and German Project Managers, who co-chaired the Joint Working Group (fig. page 190). The principal U.S. contribution was from JPL. The Goddard Space Flight Center (GSFC) provided a mini-computer at the JPL/SFOF for science rapid real-time read-out, assistance with attitude determination, magnetic tape processing at GSFC, and limited support from the Madrid and Goldstone STDN (Space Tracking and Data Network) tracking stations, as well as consulting.

## II. Preparation for Operations

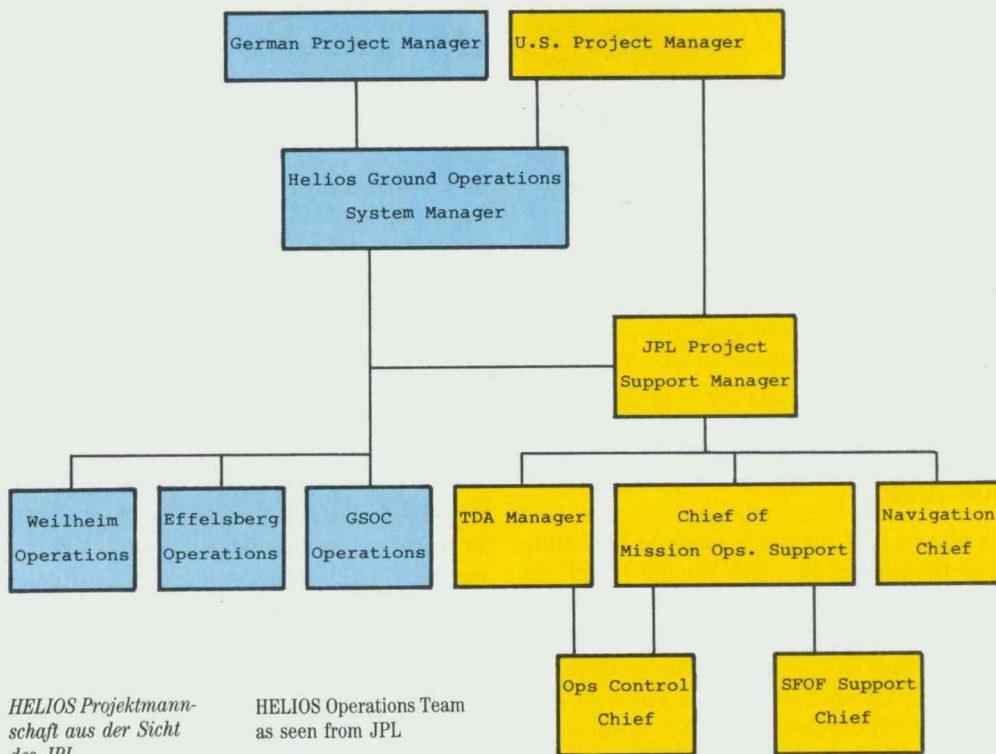
An early management decision provided for maximum utilization of existing ground data handling facilities at the DSN stations at Goldstone, Can-

Rechnerprogramme, Dokumentation, Flugbahn-Rechnungen, usw.

3. Mitarbeit beim Betrieb der Sonde. Den komplizierten Organisationsplan zeigt Abb. Seite 190. Den Hauptanteil an dieser Mitarbeit leistete das JPL, ein etwas geringerer Anteil betraf das Goddard Raumfahrtzentrum der NASA.

Die Vorbereitung des HELIOS-Betriebs machte frühzeitige Management-Entscheidungen notwendig, um die Bodenstationen der NASA (DSN) in Goldstone (Kalifornien), Canberra (Australien) und Madrid (Spanien) möglichst wirkungsvoll für die Mission verfügbar zu machen. Auch das weltweite Kommunikations-Netzwerk der NASA (NASCOM) und das SFOF in Pasadena mußten einbezogen werden: insgesamt war der Neuaufbau eines deutschen Kommunikations- und Bodenbetriebsnetzes zu planen, so daß dieses Netz selbständig und autark arbeitsfähig war. Gleichzeitig mußte dieses neue Netz so in das bestehende, wesentlich umfangreichere NASA-Netz integriert werden, daß gegenseitig keine Störungen auftraten. Großcomputer mußten auf beiden Seiten des Atlantik aufgestellt, programmiert und im direkten Betrieb getestet werden, die wechselseitigen Verantwortlichkeiten waren genau zu definieren und aufeinander abzustimmen. Ferner war festzulegen, wer wem was während der Mission auf dem Postweg zu übersenden hatte. Es entstand ein schrecklich komplexes, anspruchsvolles Organisationssystem – aber es funktionierte (Abb. Seite 191)!

1974 war das Jahr der Tests und der Problemlösungen. Alle Kommunikationsmöglichkeiten wurden ausgeschöpft: öffentliches Telefon, NASCOM-Verbindungsleitungen, Fernschreiber, Briefpost und persönliche Treffen. Kurt Heftman fuhr zwischen Januar und Oktober 1974 elfmal zwischen Kalifornien und Deutschland hin und her! Ein mathematisches Modell der Sonde mußte für den Computer ausgearbeitet werden, um das reale Raumfahrzeug bei Tests des Bodenbetriebssystems zu ersetzen. Das alles mußte am JPL in Arbeitsteilung mit anderen Projekten, z. B. Viking, bewältigt werden.



berra, and Madrid; of the world-wide NASA communications network (NASCOM); and of the SFOF in Pasadena:

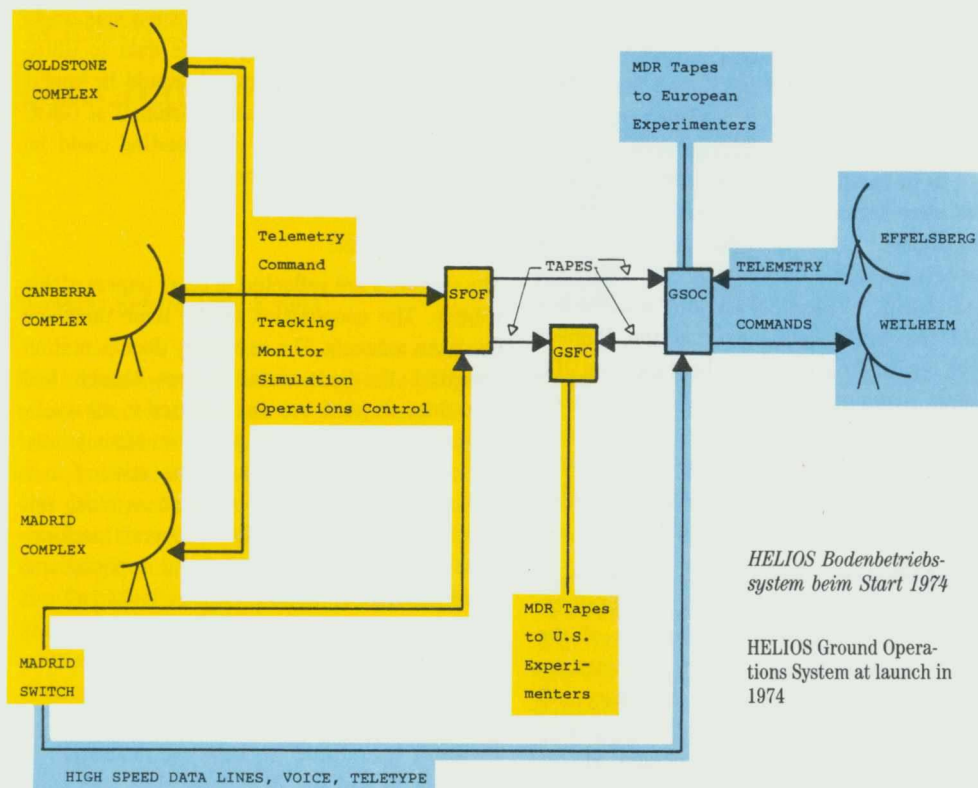
The control center would be primarily at the SFOF for HELIOS 1, but would be moved to the German Space Operations Center (GSOC) at DFVLR Oberpfaffenhofen at the decision of the Project Managers. In Germany, a new command station would be built in Weilheim, and the Effelsberg 100-meter antenna would be used for 90 horizon-to-horizon passes for telemetry reception at the maximum bit rate. The DSN 26, 34 und 64-meter diameter antennas could command at all times but the larger antennas would be requested at perihelion passages to permit the reception of the higher telemetry bit rates. At the SFOF, the IBM 360-75 computers would be on-line and process data from HELIOS as well as the various Pioneer spacecraft, the Mariner-Venus-Mercury spacecraft, and the Viking mission to Mars. In an off-line mode, HELIOS would share the Univac 1108 computers for orbit determination and trajectory work. The SFOF could monitor telemetered spacecraft parameters in real-time and send commands via the DSN stations; GSOC could also monitor these spacecraft parameters and send commands via the DSN stations in a bent-pipe mode on the downlink and a store-and-forward mode on the uplink, and, in addition, could monitor realtime telemetry from Effelsberg and send commands via Weilheim. All orbit determination would be performed at JPL, from radiometric data from

the DSN stations, and state vectors would be sent to GSOC for trajectory calculations and Weilheim and Effelsberg antenna predictions. GSOC would provide a high speed data line between Oberpfaffenhofen and the NASCOM Madrid switch, in addition to inter-Germany lines, to complete the communications link to JPL. In addition to the data and command link, voice and teletype connection to NASCOM would also be accomplished via the Madrid switch.

Telemetry and command tapes would be prepared in duplicate at JPL, one set sent to GSOC and the other to GSFC. GSOC would send a set of its Weilheim and Effelsberg tapes to GSFC, and GSFC would merge the DSN and German network tapes and provide Master Data Records to the U.S. experimenters. GSOC would, in turn, provide Master Data Records to the European experimenters.

The overall system was quite complicated and ambitious, but it worked (fig. page 191)!

Testing and problem resolution took place in 1974. Communications between the Operations Team members utilized commercial phone, NASCOM voice lines, teletype, mail, and personal meetings. I made 11 trips to Germany from California between January and October 1974. We built a fairly elaborate spacecraft simulation



Darüber hinaus war vom Spätsommer 1974 an die deutsche Bodenbetriebsmannschaft für die Startphase und für die ersten Missionswochen am JPL unterzubringen, bis wir schließlich im Dezember 1974 bei der letzten Projektsitzung vor dem Start im Kennedy-Raumfahrtzentrum zusichern konnten: „Fertig zum Start“.

Rückblickend, noch 10 Jahre danach, erscheint es bewundernswert, mit welcher Hingabe und mit welchem hohem technischen Können auf beiden Seiten des Atlantik das ausgeklügelte Bodenbetriebs- und Datensystem aufgebaut wurde. Die Gültigkeit dieser Feststellung wird bestätigt mit jeder neuen Periode, in der HELIOS aktiv betrieben wird. Das System hat sich auch nach zahlreichen Änderungen in den Geräten und im Personal voll bewährt.

Für das Bodenbetriebsystem begann die Mission mit dem Abtrennen der Sonde von der letzten Raketenstufe. Das wird im Beitrag von Kehr ausführlicher beschrieben. Die Bodenstationen und große Teile des Bodenbetriebs-

systems mußten der Mission und anderen Missionen so zugeteilt werden, daß für alle möglichst gute Bedingungen gewährleistet waren. Wiederholt waren Konzeptänderungen notwendig, weil neue Projekte, z. B. Viking oder Pioneer-Venus, neue Bedingungen in das System einbrachten.

Bei HELIOS 2 ging die Missionskontrolle nach dem Start unmittelbar auf das deutsche Kontrollzentrum in Oberpfaffenhofen über. Die Aufgabe, beide HELIOS-Sonden möglichst gleichmäßig und kontinuierlich zu bedienen, führte zu einer Überlastung des Systems besonders dann, wenn die räumliche Konstellation der Sonden am Sicht-Himmel ungünstig war. Teilweise Abhilfe, die leider nicht mängelfrei erreichbar war, konnte durch den Einsatz von Antennen, die nicht zum DSN gehören, geschaffen werden. Alle Möglichkeiten wurden ausgeschöpft, um die Wünsche der Wissenschaftler möglichst gut zu erfüllen.

Seit 1982 kann die Station Weilheim nicht mehr für den HELIOS-Betrieb eingesetzt werden. Sie

model in the IBM 360-75 computer as access to the real spacecraft was limited, and restricted to the final end-to-end test just prior to launch. Time-sharing in this on-line computer was tested with the already operating spacecraft programs and with the Viking mission preparation programs. Allocation of DSN stations would be scheduled through the DSN Scheduling System and conflict resolution based on various and changing priorities and negotiations between user projects.

In late summer 1974 the German operations crew took up residence at JPL and that required office and parking space, telephone lines, and general logistics support and heavy involvement of the JPL Shipping and Receiving Department. Testing continued into December 1974, and J. Panitz from GSOC and I reported the ground system "ready" at the Readiness Review at the Kennedy Space Center just before launch.

### III. Flight Operations

In retrospect, after 10 years, one must admire the dedication and technical expertise of personnel on both sides of the Atlantic in designing, testing, and operating such an elaborate ground data system. The validity of this statement is confirmed at every new HELIOS tracking and data acquisition period as the basic system has held together after numerous configuration and personnel changes.

The launch phase started after lift-off and separation from the Titan launch vehicle and continued until the spacecraft instruments settled down, the spin rate was stabilized, antennas were extended, and we entered a routine cruise period. That gave way to the perihelion passage period when maximum data reception was required and then again went into cruise towards the first aphelion on the far-side of the Sun. Tracking coverage was nearly continuous on this first approach to, and passage through, perihelion. The operating Pioneer spacecraft were mostly in routine data gathering modes, and Mariner-Venus-Mercury was over a year old already and used its own computer string for telemetry processing.

*wird gemäß den Forderungen neuer Raumfahrtprojekte umgebaut. Seither ist Datenempfang und Kommandogabe nur noch über DSN-Stationen möglich. Um das JPL dafür in anderer Weise zu entlasten, werden seither auch diejenigen Experimentdaten, die an US-Experimentatoren geschickt werden, im GSOC ausgearbeitet.*

*Nach 10 Jahren Betrieb muß man die Zusammenarbeit der Mitarbeiter im Team als bewundernswert bezeichnen. Die Dokumentation, die vor dem Start vorbereitet worden war, hat ihren Zweck voll erfüllt, ohne daß sie mißbraucht worden wäre, um an starren Positionen oder veralteten Annahmen festzuhalten. Wir alle haben unser Bestes versucht, um die Mission in vernünftiger Weise durchzuführen und haben so viele Meßdaten wie möglich eingebracht. Die Leistung der beiden Sonden insgesamt übertraf unsere Erwartungen weit und HELIOS 1 wurde für uns so etwas wie ein alter Freund, den wir so gut wie möglich umsorgen. HELIOS 1 hat weit mehr erbracht als erwartet. Ich hoffe, die Sonde wird auch weiterhin ihren Dienst tun, wenigstens bis ein voller Sonnenzyklus vollendet ist.*

Survival of the SFOF data processing capability, during the very active and demanding Viking mission to Mars, for HELIOS 1 and 2 required much attention, but the telemetry monitoring and command generation requirements continued to be satisfied until the IBM 360-75 computers were taken off-line after the end of the Viking project in 1981. The advent of the Pioneer-Venus-Mission-with-Entry-Probes in 1978 required sharing of the DSN tracking stations but not of the SFOF computers, as the Pioneer project received its telemetry bent-pipe via JPL and only required the IBM 360-75 for data records in non-real-time. The Voyager project also did not require the 360-75 for on-line telemetry processing but required much facility capability for test, training, and flight operations.

Since immediately after HELIOS 2 launch, in 1976, operations control for both spacecraft remained at GSOC, and reconfiguration of the Weilheim antenna to also receive telemetry enabled a sharing sequence where one spacecraft could be tracked by Weilheim and the other by the DSN. Occasional oversubscription at the Goldstone or Madrid longitudes caused us to request support from the co-located GSFC STDN stations. This proved difficult as there was no command capability from GSOC via these stations, and the telemetry was recorded and played into our DSN system via the one common station, at the Kennedy Space Center. Another experiment in ground systems adaptation was the use of the remote-controlled Venus (DSS-13) site at the Goldstone tracking complex. Unfortunately, gaps in telemetry reception could not be readily explained as no operators were involved, and no command capability existed for HELIOS.

In 1982 Weilheim was taken down for modification and HELIOS 1 continued to be tracked by the DSN, as permitted by the condition of the solar cells and the sharing of the stations between current users and the DSN modifications project. With no IBM 360-75 as the real-time

processor, real-time telemetry display was possible only after bent-piping of the data to GSOC and experimenter data records would be generated at GSOC. The command terminal at GSOC was prime, but back-up commanding could be performed via the JPL operator.

#### IV. After 10 years

The statistics are reflected in other papers of this volume. The cooperation of the team members has been amazing. The necessary documentation prepared in great detail before launch had served its purpose, but was not used to substantiate insistence on certain points or assumptions. We all tried our best to fly the mission in a rational manner and accumulated as much science data as possible. The spacecraft performance on the whole exceeded our expectations, and it became an old friend to be looked after if at all possible. Exploitation of a spacecraft is only possible after the initial requirements have been met, and HELIOS has continued to provide much more than the expected. I hope it will continue to perform, and that we have the dedication to continue to support it at least until the solar cycle is completed.

# Wissenschaftliche Datenauswertung

Wolfgang Kempe, DFVLR Köln



Kempe

Das Management der wissenschaftlichen Experimente gliedert sich – aus der Sicht der Projektleitung – üblicherweise in die beiden Teilbereiche „Entwicklung, Bau, Integration“ einerseits und „wissenschaftliche Datenauswertung“ andererseits. Der erste Teilbereich ist mit dem Start des Satelliten abgeschlossen, der zweite – über den hier kurz berichtet werden soll – begann im Falle von HELIOS etwa 3 Jahre vor dem Start und ist erfreulicherweise heute noch nicht beendet.

Erste Überlegungen zur Datenauswertung von HELIOS stammen etwa aus dem Jahre 1971. Damals lagen umfangreiche Erfahrungen aus dem Projekt AZUR vor (Start 1969), aber das Projekt AEROS (Start 1972) hatte auch schon gewisse Randbedingungen für ein Auswertungskonzept geschaffen. Für HELIOS stand damals zur Diskussion:

– zentrale Auswertung (mit eigenem Mikrofilmplotter) oder

– dezentrale Auswertung in den Instituten der Experimentatoren.

Fragen nach den Kosten, der Effektivität, den Zugriffsmöglichkeiten, aber auch nach so schwierig quantifizierbaren Größen wie „Ausbildungseffekt“ mußten beantwortet werden. Die Entscheidung fiel zugunsten der dezentralen Auswertung in den einzelnen Instituten der HELIOS-Experimentatoren – und die Auswirkungen davon haben sich in den vielen Jahren danach als sehr vorteilhaft erwiesen: gemäß der übergeordneten Zielsetzung des gesamten Projekts, allen Beteiligten möglichst viel Erfahrung zu vermitteln, sind in den Instituten Expertengruppen herange-

wachsen, die sich mit hervorragenden Leistungen auch an anderen Weltraumprojekten beteiligen konnten (als Beispiele seien erwähnt: GALILEO – die Sonde zum Jupiter; ULYSSES – die Mission außerhalb der Ekliptik; GIOTTO – die Sonde zum Kometen Halley).

Die Vorbereitungsphase der wissenschaftlichen Datenauswertung – das sind die Jahre bis zum Start 1974 – ist gekennzeichnet durch die Schaffung der personellen, apparativen und organisatorischen Voraussetzungen zur Durchführung der Datenauswertung. Die dafür notwendigen Mittel wurden vom Bundesminister für Forschung und Technologie zur Verfügung gestellt und von der Projektleitung an die Experimentatoren weitergeleitet. Arbeitsschwerpunkt während der Vorbereitungsphase war eindeutig die Entwicklung der Software. Auch im Projekt HELIOS wurde die Zeitspanne zur Erstellung einer einwandfrei funktionierenden Software von den Experimentatoren zunächst unterschätzt.

Der Aufbau bzw. Ausbau der Hardware verlief im wesentlichen problemlos. Es wurden beträchtliche Mittel in leistungsstarke Computer investiert, um die vielen wissenschaftlichen Daten auswerten zu können (die insgesamt für die wissenschaftliche Datenauswertung bewilligten Projektmittel belaufen sich auf rund 21 Mio DM; für die Experimente wurden 64, für die Sonde 288 Mio DM bewilligt).

Nach der Vorbereitungsphase der wissenschaftlichen Datenauswertung begann wenige Wochen nach dem Start Anfang 1975 die Betriebsphase, als die ersten wissenschaftlichen Daten – vom Satelliten-Kontrollzentrum der DFVLR in Ober-

*Management of scientific experiments usually is broken down into the sections “development, manufacture, integration” and “scientific data evaluation”. The first section is completed with the launch of the satellite, the second – subject of this brief contribution – started for HELIOS about three years prior to launch and luckily enough is still going on today.*

*First considerations about the HELIOS data evaluation originated approximately in 1971. At that time, extensive experience was available from the AZUR project (launch 1969), but under the AEROS project, too (launch 1972) certain boundary conditions had already been identified for an evaluation concept.*

*Preparatory phase of the scientific data evaluation – which covers the years until launch in 1974 – is characterized by creation of the basis, in terms of personnel, equipment, and organization, for the implementation of the data evaluation. The funds required were provided by the Federal Minister for Research and Technology and passed on by the DFVLR Project Management to the individual experimenters. Considerable amounts were invested in large-capacity computers capable of handling the multitude of scientific data (total project funds appropriated for the scientific data evaluation amount to app. DM 21 million, appropriations for the experiments were DM 64 million and for the probe DM 288 million).*

*The preparatory phase of the scientific data evaluation was followed by the operational phase starting in early 1975 a few weeks after the launch, when the first scientific data –*

pfaffenhofen auf Magnetbändern gespeichert – bei den Experimentatoren eintrafen. Jetzt mußte sich zeigen, ob die selbst entwickelte Software flexibel genug war, sich allen Eventualitäten „echter“ Flug-Daten anzupassen. Es waren zwar im Einzelfall noch umfangreiche Programmierarbeiten zu erledigen, doch im allgemeinen war man gut vorbereitet. Die Betriebsphase ist inzwischen längst zur Routine geworden – und die HELIOS-Daten werden mit zunehmendem Alter der Sonde immer preiswerter, ohne dabei an Wert zu verlieren: dividiert man die Gesamtkosten durch die Menge der empfangenen Daten, so ist dieses Preis-Leistungs-Verhältnis für eine Satelliten-Mission schon jetzt extrem günstig – und es wird von Jahr zu Jahr besser!

*prepared by the German Space Operations Center (DFVLR-GSOC) in Oberpfaffenhofen on magnetic tapes – were received by the experimenters. Now it had to be established whether the software, developed by the experimenters themselves, was flexible enough to cope with all contingencies of “real” flight data. Although extensive programming work had still to be performed in the individual case, preparation in general had been excellent. Meanwhile, the operational phase has long turned into routine work – and the HELIOS data are becoming cheaper as the probe gets older, without going down in value: if the overall costs are divided by the quantity of the data received, this cost/benefit ratio is already now extremely favorable for a satellite mission – and it is getting better every year!*

# Einige Fachausdrücke

## AE

Astronomische Einheit, mittlerer Abstand Sonne–Erde, 149,6 Millionen km

## Akustische Wellen

hörbare Wellen, hervorgerufen durch periodische Dichteschwankungen in Körpern. Die Schwingungsrichtung liegt in Ausbreitungsrichtung.

## Alfvén-Wellen

nach dem schwedischen Nobelpreisträger Hannes Alfvén benannte, transversalwellenförmige magnetohydrodynamische Plasma-Fluktuationen

## Alphateilchen

Atomkern des normalen Helium (2 Protonen + 2 Neutronen)

## Amplitude

halbe Höhe zwischen Berg und Tal einer Schwingung oder Welle

## Anisotropie

Gegenteil von Isotropie, Bevorzugung einer oder weniger Richtungen

## Antikorrelation

umgekehrte Wechselbeziehung zweier Größen, Vorgänge usw. aufeinander. Beispiel: in den mittleren und höheren Breiten der Erde ist die Länge der Nacht antikorreliert mit der Höhe des Sonnenstandes am Mittag.

## Antipodenpunkt

der Punkt im Raum, dessen gerade Verbindungslinie mit der Erde von der Sonne halbiert wird, heißt Antipodenpunkt der Erde

## Aphel

größter Abstand zwischen einem umlaufenden Körper und der Sonne

## Archimedische Spirale

von einem zentralen Punkt ausgehende krumme Linie. Der Winkelweg von einem Punkt der Spirale zu einem anderen ist verhältnismäßig zur Differenz der Entfernungen der beiden Punkte vom Zentrum. (Formel:  $r = a \cdot \varphi$ ;  $r$  = Abstand vom Zentrum,  $\varphi$  = Winkel,  $a$  = für die jeweilige archim. Spirale typische Konstante).

## Asteroid

kleiner Planet; der größte Asteroid, 1 Ceres hat einen Durchmesser von ungefähr 1000 km, alle anderen – die Bahnen von mehr als 2000 von ihnen sind inzwischen bekannt – sind wesentlich kleiner

## Astronomische Einheit

siehe AE

## Atomkern-Teilchenteleskop

Teleskop zur Beobachtung im „Licht“ der aus Atomkernen bestehenden Strahlung

## Azimutale Richtung

Azimuthwinkel: Richtung bzw. Winkel in der Bezugsebene, (z. B. Ekliptik)

## Betatron-Effekt

Elektronen, die beim Umlauf auf Kreisbahnen Energie gewinnen

## Bit

Grundgröße (Elementarquant) jeder Information

## BMFT

Bundesminister für Forschung und Technologie

## Chromosphäre

Einige 10 000 km dicke untere Atmosphäre der Sonne. Bei einer mittleren Temperatur von 20 000 Grad strahlen die Atome und Ionen in der für jede Teilchenart typischen Farbe des Lichts.

## Degradation

Abnahme der Leistungsfähigkeit

## DFVLR

Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt e. V.

## Dispersion

heißt die Eigenschaft durchsichtiger Körper, Licht unterschiedlicher Wellenlänge verschieden schnell durchzulassen bzw. verschieden stark zu brechen. Auch das Plasma zeigt für verschiedene frequente Wellen und für Teilchen unterschiedlicher Energien ähnliche Eigenschaften, die man gleichfalls Dispersion nennt.

## Divergenz

Auseinanderlaufen von Strahlen, Wellen oder Teilchen

## Doppler-Effekt

Erhöhung der Tonhöhe (Frequenz) bei Annäherung von Sender und Empfänger aufeinander, Erniedrigung der Tonhöhe (Frequenz) bei Entfernung von Sender und Empfänger voneinander

## Drallrate (spin)

Zahl der Umdrehungen pro Minute

## DSN

Deep Space Network, Bodenstationssystem der NASA

## Ekliptik(-ebene)

Bahnebene der Erde bei ihrem Lauf um die Sonne

## Elektron

leichtes Elementarteilchen (Lepton); Träger einer negativen elektrischen Elementarladung

## Elektronenplasmafrequenz

Frequenz der Eigenschwingungen der Elektronen um ihre Ruhelage im Plasma

## Elektrostatisch

als elektrostatische Vorgänge bezeichnet man elektrische, magnetfeldfreie Vorgänge

## eV (Elektronenvolt)

Energiemaß der Atom- und Kernphysik. Wenn ein Elektron oder ein anderes einfach geladenes Teilchen die Spannung von 1 Volt durchläuft, nimmt es die Energie von 1 eV auf.

## Faraday-Effekt

Drehung der Polarisationsebene einer elektromagnetischen Welle beim Durchdringen eines magnetisierten Körpers (z. B. Sonnenkorona)

## Filamente

Faserartig langgezogene Strukturen auf der Sonne

## Flare

Explosionsartige Eruption auf der Sonne

## Flarestern

Stern, bei dem starke Eruptionen auftreten

## Flugzeit-Massenspektrum

Die Atome verschiedener Atomarten unterscheiden sich durch ihre Masse. Bei gleicher Bewegungsenergie haben die schweren Teilchen geringere Geschwindigkeit

als die leichten. Läßt man alle Teilchen eine festgelegte Strecke durchlaufen, so kommen die leichten zuerst, die schwersten zuletzt an. Es entsteht das genannte Massenspektrum.

## Förstersonden-Magnetometer

empfindliches Meßgerät zur Beobachtung magnetischer Felder

## Fokussierung

Ausrichtung von verschiedenen Strahlen in eine Richtung oder auf einen Punkt hin.

## Frequenz

Anzahl der Schwingungen pro Sekunde; Maßeinheit Hertz (Hz)

## Galaxis

Milchstraßensystem

## Gammaquanten<sup>1)</sup>, -strahlen<sup>2)</sup>

Lichtstrahlen kürzester Wellenlänge<sup>3)</sup>, die wie Teilchen<sup>4)</sup> wirken

## Gammastrahlen-Ausbruch

plötzlich auftretender Gammastrahlen-Einfall, meist kurzer Dauer

## Geosphäre

Einflußbereich der Erde

## Giga (G)

Vorsilbe der Bedeutung Milliarde

## Gradient (radialer)

Änderung einer Größe längs einer Richtung (längs des Radius)

## Gravitation

gegenseitige Anziehung von Massen

## GSOC

German Space Operations Center  
Deutsches Satelliten Kontrollzentrum

## Harmonische Schwingungen

Schwingungen mit doppelter, dreifacher usw. Frequenz einer Grundschwingung. Die „Zweite Harmonische“ hat demnach die doppelte Frequenz der Grundschwingung. (Manche Autoren nennen diese Harmonische jedoch Erste Harmonische im Gegensatz zur Grundschwingung).

## Heliosphäre

Einflußbereich der Sonne

## Hertz (Hz)

Maß für die Frequenz einer Schwingung oder Welle (Zahl der Schwingungen pro Sekunde)  
1 Hz = 1 Schwingung pro Sekunde,  
1 kHz = 1000 Schwingungen pro Sekunde,  
1 MHz = 1 Million Schwingungen pro Sekunde

## Homogen

gleichverteilt

## Inhomogen

ungleich verteilt

## Ionen

elektrisch geladene „Atome“, d. h. Atome denen ein oder mehrere Elektronen zur Neutralität fehlen (positive Ionen) oder Atome, die ein oder mehrere überschüssige Elektronen haben (negative Ionen). Im interplanetaren Plasma kommen fast ausschließlich nur positive Ionen vor.

## Ionisation

Erzeugung von Ionen, auch Zahl der Elementarladungen pro Teilchen, auch Verhältnis der Gesamtzahl freier Ladungen zur Anzahl der Teilchen

## Ionosphäre

Bereich der hohen und höchsten Erdatmosphäre, in denen freie elektrische Ladungen überwiegen

## Isotope

Atome gleicher chemischer Eigenschaften, aber verschiedener Atomkernmasse, anders ausgedrückt, Atome gleicher Anzahl von Protonen aber verschiedener Anzahl von Neutronen im Kern.

## Isotrop

gleichmäßig nach allen Richtungen verteilt, keine Richtung bevorzugt

## JPL

Jet Propulsion Laboratory

## K

Abkürzung für Kelvin, Maßeinheit für die Temperatur. Der Nullpunkt der Kelvin-Temperaturskala ist der absolute Nullpunkt der Temperatur, d. h. 0 °C = 273 K und 1 °C Temperaturdifferenz = 1 K.

## Kilo (k)

Vorsilbe der Bedeutung Tausend

## Komet

auf einer stark elliptischen oder gar parabolischen Bahn um die Sonne laufender Körper, der in Sonnennähe teilweise verdampft und einen Schweif bildet, der bei großen Kometen bis 100 Mio. km lang werden kann

## Konjunktion

Konstellation, bei der mehrere Himmelskörper auf einer geraden Linie stehen

## Korona

Im Mittel 1,5 Mio. Grad heiße äußere Atmosphäre der Sonne. Die Fortsetzung der Korona nach außen bildet das interplanetare Medium.

## Koronagraph

Gerät zur künstlichen Erzeugung einer Sonnenfinsternis, um die Korona der Sonne sichtbar machen zu können

## Koronaloeh

Bereich in der Korona mit sehr geringer Dichte

## Korotieren

rotieren in gleicher Richtung und Winkelgeschwindigkeit

## Korrelation

direkte Wechselbeziehung zweier Größen, Vorgänge usw. aufeinander. Beispiel: in den mittleren und höheren Breiten der Erde ist die Tageslänge direkt korreliert mit der Höhe des Sonnenstands am Mittag.

## Kosmische Strahlung

Strahlung, die aus Teilchen hoher Energie besteht. Sie kommt aus dem Weltall und vermag auch feste Materie zu durchdringen.

## Lichtgeschwindigkeit (c)

300 000 km/sek

## Lichtjahr

Entfernung, die das Licht in einem Jahr zurücklegt:  
1 Lichtjahr =  $9,47 \cdot 10^{12}$  km = 63 280 AE

## Linear nichtlinear

man bezeichnet die gegenseitige Abhängigkeit zweier Größen linear, wenn eine schrittweise Zu- oder Abnahme der einen Größe eine im Verhältnis stets gleichbleibende Zu- oder Abnahme der anderen Größe nach sich zieht. Beispiele: gleichförmige Bewegung; in gleichen Zeitabschnitten werden gleiche Weglängen zurückgelegt.

Zerfall einer Substanz: nach doppelter Zeit auf die Hälfte, nach dreifacher Zeit auf ein Drittel usw.  
Steigt oder sinkt die abhängige Größe im Verhältnis nicht gleichbleibend, so heißt die Abhängigkeit nichtlinear.

#### Magnetohydrodynamik

Beschreibung der Gesetzmäßigkeiten, die in einem Plasma unter dem Einfluß sowohl der allgemeinen Gasgesetze als auch elektrischer und magnetischer Wirkungen vorherrschen.

#### Magnetosphäre

Die äußeren, sehr dünnen Bereiche der Erdatmosphäre, deren Eigenschaften überwiegend vom Magnetfeld der Erde bestimmt werden.

#### Maxwellverteilung

nach dem englischen Physiker James Clark Maxwell (1831 – 1879) benannte Verteilung aller vorkommenden Teilchengeschwindigkeiten in einem Gas einer bestimmten Temperatur.

#### MBB

Messerschmitt-Bölkow-Blohm G.m.b.H.

#### Mega (M)

Vorsilbe der Bedeutung Million

#### Meteorit

Körper im interplanetaren Raum kleiner als etwa 1 mm

#### Modifikation

Erscheinungsform

#### Modulation

Hochfrequenten Wellen aufgeprägte niederfrequente Schwingungen

#### MPG

Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V.

#### MPI

Max-Planck-Institut

#### Multiplikator-Effekt

Erzeugung von Elektronen bei hoher elektrischer Feldstärke hochfrequenter Wechselfelder

#### NASA

National Aeronautics and Space Administration

#### Neutron

ungeladenes schweres Elementarteilchen. Gemeinsam mit den Protonen bilden die Neutronen die Kerne der Atome

#### Neutronenstern

Stern, der nicht aus „normal“ aufgebauter Materie besteht, sondern der wegen seiner hohen Dichte so stark zusammengepreßt ist, daß die gesamte, den Stern bildende Materie zu Neutronen entartet ist.

#### nT

nano Tesla  
magnetische Maßfeinheit  
1 nT  $\approx$   $\frac{1}{50.000}$  der Erdmagnetfeldstärke

#### Nukleon

Atomkernteilchen, also Proton oder Neutron

#### Oszillation

Schwingung

#### Perihel(ium)

kürzester Abstand zwischen einem umlaufenden Körper und der Sonne

#### Phase

Abstand zwischen den Wellenbergen bzw. -tälern zweier Wellen gleicher Frequenz. Ist

die Phase 0, so liegen die zu den Wellen gehörigen Schwingungen gleichsinnig übereinander. Ist die Phase eine halbe Wellenlänge, so hat die eine Welle gerade dort einen Wellenberg, wo die andere ein Tal hat und umgekehrt. Die Schwingungen laufen genau gegensinnig. Alle anderen Phasen liegen zwischen diesen beiden Extremen.

#### Photosphäre

hell weiß leuchtende „Oberfläche“ der Sonne.

#### Plasma

gasähnlicher Zustand der Materie, bei dem freie negative und positive elektrische Ladungen neben den allgemeinen Gasgesetzen für die Eigenschaften verantwortlich sind.

#### Plasmafrequenz

Zahl der Schwingungen pro Sekunde, die den Elektronen (= Elektronenplasmafrequenz) bzw. den Ionen (= Ionenplasmafrequenz) bei einer bestimmten Plasmadichte eigentümlich ist. In Plasmen, in denen mehrere Ionenarten enthalten sind, können auch mehrere Ionenplasmafrequenzen auftreten.

#### Plasma-Instabilität

turbulente oder wellenartige Störung des Ruhezustands des Plasmas

#### Polarisation von Wellen (des Lichts)

Räumliche Wellen, die quer zu ihrer Fortpflanzung schwingen, besitzen im allgemeinen Fall keine Vorzugsrichtung der Schwingung. Treten solche Vorzugsrichtungen auf, so nennt man die Welle polarisiert: elliptisch polarisiert, wenn die Schwingungen in zwei zueinander senkrechten Vorzugsrichtungen voneinander verschieden sind, zirkular, wenn diese beiden Schwingungen zwar gleich, aber immer um  $\frac{1}{4}$  Wellenlänge versetzt auftreten. Der Grenzfall der elliptischen Polarisation ist die lineare Polarisation, wenn eine der beiden aufeinander senkrechten Schwingungen verschwindet.

#### Polarlicht

In den Polgegenden der Erde können interplanetare Teilchen bis in Atmosphärenhöhen mittlerer Dichte vordringen. Beim Zusammenstoß mit Atmosphärenatomen oder -molekülen werden diese zum Leuchten angeregt.

#### Proton

schweres Elementarteilchen; Träger einer positiven elektrischen Elementarladung. Gemeinsam mit Neutronen bilden die Protonen die Kerne der Atome

#### Protuberanz

Von der Oberfläche der Sonne aufsteigende leuchtende Gas-(Plasma-) Wolke, die durch magnetische Kräfte gelenkt, größtenteils wieder auf die Oberfläche zurückfällt.

#### Pulsar

Stern, der in regelmäßigen Abständen Radiopulse aussendet

#### Rauschen

Schwingungen und Wellen mit regellosen, statistisch verteilten Frequenzen und Amplituden

#### Reziproke der Frequenz

Das (die) Reziproke von A heißt  $\frac{1}{A}$ .

#### Roter Riese

Riesensterne mit einem Volumen, das bis zu mehreren Millionen mal größer ist als das der

Sonne, jedoch mit bis zu mehreren Tausend Grad niedrigerer Temperatur

#### Schwarzes Loch

großer Stern am Ende seines Lebens. Seine Dichte und als Folge davon seine Anziehungskraft ist dann so groß, daß nicht einmal Licht den Stern verlassen kann. Er strahlt nicht, zieht aber alle Materie und Strahlung in seiner Nähe in sich hinein.

#### Sektorgrenze

Übergangsbereich zwischen Bereichen gegensätzlicher Magnetfeldpolarität

#### Siderisch

auf den ruhend gedachten Fixsternhimmel bezogen

#### Solare Dynamik

Schwankungsbereich der Temperatur, der Teilchengeschwindigkeiten, des Magnetfelds usw. auf der Sonne

#### Solarkonstante

die Bestrahlungsstärke, mit der die Erde von der Sonne im Jahresmittel bestrahlt wird.

#### Sonnenfleckenzyklus

Ungefähr 11 Jahre dauernde Periode abwechselnd hoher und niedriger Sonnenfleckenzahl, in der der solare magnetische Dipol einmal umklappt: von Nord nach Süd oder umgekehrt

#### Sonnenokkultation

Verschwinden eines Körpers hinter der Sonne

#### Stoßwelle

wellenartige Störung des ruhigen Sonnenwinds, in vielen Fällen hervorgerufen durch eine starke Sonneneruption. Charakteristika: plötzlicher starker Dichteanstieg des Plasmas, Geschwindigkeit etliche 10 bis mehrere 100 km/sek. höher als die Geschwindigkeit des Sonnenwinds. Im neutralen Gas entspricht eine Stoßwelle der Knallwelle einer Explosion oder der Bugwelle eines Überschallflugzeugs.

#### Strahlungsdruck

Kraft pro Oberfläche, die von der Strahlung auf einen Körper wirkt

#### Supernova

explodierender Stern

#### Symmetrieachse

Achse, um die herum ein Körper völlig symmetrisch verteilt ist.

#### Symmetrieebene

Ebene, die einen Körper in zwei spiegelbildlich gleiche Teile teilt

#### Synodisch

auf die umlaufende Erde bezogen

#### Szygie

Position eines Himmelskörpers zwischen Sonne und Erde

#### Szintillator

in unregelmäßigen Abständen schwache Lichtblitze aussendender Kristall. Die Lichtblitze werden durch Teilchen der kosmischen Strahlung beim Durchdringen des Kristalls angeregt.

#### Transponder

Gerät zur zeitlich höchstpräzisen Umsetzung einer ankommenden Frequenz in eine abgegebene Frequenz

#### TWT

Wanderfeldröhre

u  
Maßeinheit für atomare Massen.  
ein Wasserstoffatom hat die Masse 1 u

#### Wanderfeldröhre

Verstärkerröhre für sehr hohe Frequenzen

#### Weißer Zwerg

kleiner, sehr heißer Stern sehr hoher Dichte (eines der letzten Stadien im Lebenslauf eines Sterns)

#### Welle-Teilchen-Wechselwirkung

Beeinflussung von geladenen Teilchen durch eine der vielen wellenartigen Instabilitäten, die in einem Plasma vorkommen können und umgekehrt Beeinflussung der Wellen durch den Teilchenfluß

#### Zeeman-Effekt

Aufspaltung von Spektrallinien in starken magnetischen Feldern

#### Zodiakallicht

interplanetares Streulicht; Sonnenlicht, das an kleinen und kleinsten Teilchen im Raum gestreut wird

#### Zyklotron-Resonanzen

Bewegte Ladungen, die nicht parallel zu einem Magnetfeld laufen, werden senkrecht zur magnetischen Feldrichtung abgelenkt. Laufen diese Ladungen genau senkrecht zur Feldrichtung, so werden sie in einen Kreis gezwungen. Ein Gerät, in dem die Teilchen auf solchen Bahnen laufen, heißt ein Zyklotron. Man kann die Kreisbewegung als Wirbelschwingung um das Feld auffassen. Resonanzen, die bei solchen Schwingungen auftreten, heißen Zyklotron-Resonanzen.

## *Some Technical Terms*

#### Acoustic waves

*audible waves, caused by periodical variations of density in the matter. The oscillatory direction is in direction of the wave propagation*

#### Alfvén waves

*transversal wave-like magneto-hydrodynamic plasma fluctuations named after Hannes Alfvén (Swedish Nobel laureat)*

#### Alpha particles

*atomic nucleus of the normal Helium (2 protons + 2 neutrons)*

#### Amplitude

*half distance between maximum and minimum of a vibration or wave.*

#### Anisotropy

*preference of one or few directions*

#### Anticorrelation

*opposite correlation of two quantities, processes etc. Example: in the medium and higher latitudes of the earth the length of the night is anticorrelated with the height of the position of the sun at noon.*

#### Antipodal point

*That point in space, whose straight connecting line with the earth is divided in two equal parts by the sun is called antipodal point of the earth*

#### Aphelion

*largest distance between an orbiting body and the sun.*



### Archimedean spiral

a curved line departing from a central point. The angular path from one point of the spiral to another is proportional to the distance difference of the two points from the centre.  
(formula:  $r = a \cdot \varphi$ ;  $r$  = distance to the centre,  $\varphi$  = angle,  $a$  = typical constant for the respective Archimedean spiral.)

### Asteroid

small planet; the largest asteroid, 1 Ceres has a diameter of about 1000 kms. All others are really smaller. The orbits of more than 2000 of them are meanwhile known.

### Astronomical unit

see AU

### AU

Astronomical unit = average distance sun - earth = 149,6 million kms

### Azimuthal direction

azimuth angle: direction respectively angle measured in the reference plane e.g. the ecliptic plane

### Betatron-effect

electrons, which gain energy while rotating in a circular orbit

### Bit

basic quantity (elementary quantum) of every information

### Black hole

large star at the end of its life. Its density and, as a consequence, its attractive force gets so huge that not even light can leave the star. It does not glow but attracts all matter and radiation to fall onto it like into a big empty hole.

### BMFT

Federal Minister of Research and Technology

### Chromosphere

some 10,000 kms thick lower atmospheric layer of the sun. At an average temperature of 20,000 degrees C the atoms and ions radiate at a light color typical for each particle species.

### Comet

celestial body running around the sun on a long elliptical or even parabolic orbit. Near the sun it evaporates partly forming a tail, which from great comets can get up to 100 Million kms long

### Conjunction

constellation with several celestial bodies on a straight line.

### Corona

outer atmosphere of the sun, in average 1.5 Mio degrees hot.

The interplanetary medium forms the expansion of the corona.

### Coronagraph

device to artificially generate a solar eclipse in order to be able to observe sun's corona

### Coronal hole

region in the corona with very low density

### Corotating

rotating at the same direction and angular velocity

### Correlation

direct relation of a value, process etc. to an other. Example: in medium and higher latitudes of the earth the length of the day is

directly correlated with the height of sun's elevation at noon.

### Cosmic radiation

radiation, which consists of particles of high energy. It originates from anywhere in the depth of space and may penetrate even solid matter.

### Cyclotron resonances

moving charged particles, not running parallel to a magnetic field are deflected perpendicular to the magnetic field direction. In case the particles run exactly perpendicular to the field direction they are forced into a circular orbit around the field. An apparatus in which the particles run on such orbits, is called a cyclotron. One may consider the circular motion a rotational oscillation. Resonances occurring with such oscillations are called cyclotron resonances.

### Degradation

decrease of performance

### DFVLR

German Aerospace Research Establishment

### Dispersion

the property of transparent bodies to let light of different wave lengths flow through differently quickly, respectively to diffract rays differently. The plasma, too, shows similar qualities for waves of different frequencies and for particles of different energies. This is also called dispersion.

### Divergence

running away from one another of rays, waves or particles

### Doppler-effect

frequency increase when transmitter and receiver approach one another, frequency decrease while the distance of transmitter and receiver is growing

### DSN

Deep Space Network, ground antenna system of NASA

### Ecliptic (plane)

orbit plane of the earth during its rotation around the sun

### Electron

light elementary particle (lepton); carrier of a negative electric elementary charge

### Electron plasma frequency

frequency of the eigenoscillations of the electrons about their steady state position in the plasma

### Electrostatic

electric processes without magnetic effects

### eV

energy measure of atomic and nuclear physics. A singly charged particle running through an electric field of 1 Volt takes up an energy of 1 eV.

### Faraday effect

rotation of the polarisation plane of an electromagnetic wave when penetrating magnetized material (e.g. sun's corona)

### Filaments

fibrous elongated structures on the sun.

### Flare

some type of heavy solar outburst

### Flare star

star, showing strong eruptions

### Flux Gate Magnetometer

sensitive measuring apparatus for the observation of magnetic fields

### Focussing

orientation of different rays in one direction or on a single point.

### Frequency

number of vibrations per second; unit of measurement: Hertz (Hz)

### Galaxy

Milky way system

### Gamma quant<sup>2</sup>), gamma ray<sup>2</sup>) ( $\gamma$ )

light rays of shortest wave lengths<sup>2</sup>), and very high energies, which act like particles<sup>2</sup>)

### Gamma ray burst

sudden Gamma ray event, mostly of short duration

### Geosphere

influential region of the earth

### Giga (G)

prefix of the meaning billion

### Gradient radial

variation of a measure along a direction (along the radius).

### Gravitation

mutual attraction of masses

### GSOC

German Space Operations Center

### Harmonic vibrations

vibrations with double, triple, etc. frequency of a basic vibration. The "second harmonic" has therefore the double frequency of the basic vibration. (Some authors, however, call this harmonic the first harmonic in contrast to the basic vibration.)

### Heliosphere

influence region of the sun.

### Hertz (Hz)

unit of the frequency of a vibration or a wave (number of vibrations per second)

1 Hz = 1 vibration per second.

1 kHz = 1000 vibrations per second.

1 MHz = 1 Million vibrations per second

### Homogeneous

equally distributed

### Inhomogeneous

not equally distributed

### Ion

electrical charged "atom", respectively atom, which lacks one or several electrons to neutrality (positive ion), or atom that has one or several excessive electrons (negative ion). In interplanetary plasma there are nearly exclusively only positive ions.

### Ionisation

generation of ions, also number of elementary charges per particle. Also proportion of the total number of free charges to the number of particles.

### Ionosphere

region of the high and highest atmosphere of the earth, where free electric charges predominate

### Isotopes

atoms of equal chemical characteristics, but different nuclear mass, in other words, atoms of equal number of protons but different number of neutrons in the nucleus.

### Isotropic

equally distributed into all directions, no direction favored.

### JPL

Jet Propulsion Laboratory

### K

abbreviation for Kelvin, the physical measuring unit of the temperature. The zero point of the Kelvin temperature scale is the absolute zero point of the temperature, i.e.  $0^\circ \text{C} = 273^\circ \text{K}$  and  $1^\circ \text{C}$  temperature difference = 1 K

### Kilo (k)

prefix of the meaning one thousand

### Light year

distance, which the light traverses in one year: 1 light year =  $9.47 \cdot 10^{12}$  kms = 63,280 AU

### Linear, nonlinear

the mutual dependence of two values is called linear, if an increase or decrease results in a related increase or decrease. Example: constant velocity: equal time differences cause equal travel distances. In case the relation is not proportional it is called nonlinear.

### Magnetohydrodynamic

Description of the natural laws governing a plasma under the influences of the general rules of natural gases as well as electrical and magnetical forces.

### Magnetosphere

The outer, very tenuous regions of the earth's atmosphere, the characteristics of which are determined predominantly by the magnetic field of the earth.

### Maxwell distribution

The distribution of all occurring particle speeds in a gas of a certain temperature, called after the English physicist James Clark Maxwell (1831-1879).

### MBB

Meserschmitt-Bölkow-Blöhm GmbH

### Mega (M)

prefix of the meaning one million

### Meteorite

solid body in the interplanetary space of smaller size than about 1 mm

### Modification

alternative appearance

### Modulation

vibrations of low frequency imprinted on waves of high frequency

### MPG

Max-Planck-Society for the Promotion of Sciences

### MPI

Max Planck Institute

### Multipactor effect

generation of electrons by high frequency alternating fields at high electric field strengths.

### NASA

National Aeronautics and Space Administration

### Neutron

uncharged, neutral heavy elementary particle. Together with the protons the neutrons form the nuclei of the atoms.

### Neutron star

star, which does not consist of "normally" built-up matter, but which is compressed to such a high density that the whole matter forming the star is degenerated to neutrons.

### Noise

vibrations and waves, with irregular, statistically distributed frequencies and amplitudes

### nT = nano Tesla

magnetical measuring unit;  
 $1 \text{ nT} \approx 1/50.000$  of the magnetical field strength of the earth

### Nucleon

particle of the atomic nucleus, i.e. proton or neutron

### Oscillation

vibration

### Particle-telescope

telescope for the observation in the "light" of the radiation of particles

### Perihelion

shortest distance between an orbiting body and the sun

### Phase

distance between the wave crests or wave troughs of two waves of the same frequency. If the phase is 0, the vibrations belonging to the waves are correlatively superposed. If the phase is half a wave length, the wave has exactly wave crests at the positions of wave troughs of the other wave and vice versa. The vibrations run exactly opposite. All the other phases lie between these two extremes.

### Photosphere

white lighting "surface" of the sun

### Plasma

gas-like state of the matter, at which free negative and positive electric charges and not only the neutral gas particles define the characteristics.

### Plasma frequency

number of oscillations per second typical for electrons (electron plasma frequency) or ions (ion plasma frequency) at a specific density. In plasmas containing several ion species also several ion plasma frequencies may occur.

### Plasma instability

turbulent or wave-like disturbance of the steady state of a plasma

### Polarization of waves (of light)

Spatial waves oscillating perpendicular to their direction of propagation do in general not have a preferred direction of oscillation. If such preferred directions occur, the wave is called polarized: elliptically polarized, if the oscillations in two perpendicular main directions are different, circularly polarized, if these oscillations are equal, but always shifted by a quarter wavelength. The extreme of elliptical polarization is called linear polarization, if one of the two perpendicular main oscillations vanishes.

### Polar light

In the polar regions of the earth interplanetary particles can penetrate to atmospheric heights where medium density prevails. At collisions with atmospheric atoms or molecules these are excited to glow.

### Proton

heavy elementary particle; carrier of a positive electric elementary charge. Together with neutrons the protons form the nuclei of the atoms.

### Protuberance

glowing gas- (plasma-) cloud ascending from the surface of the sun, triggered and guided by magnetic forces. Most of the material falls back onto the surface.

### Pulsar

star, which transmits radio impulses in regular intervals

### Radiation pressure

force per surface acting on a body by radiation

### Reciprocal of frequency

the reciprocal of  $A$  is  $\frac{1}{A}$ .

### Red giant

giant star with a volume, which may be several million times larger than that of the sun, however, with up to several thousand degrees lower temperature.

### Scintillator

crystal which is emitting weak light flashes in irregular time distances. The light flashes are excited by particles of the cosmic radiation penetrating the crystal.

### Sector boundary

transition layer between regions of different magnetic field polarities

### Shock wave

wave-like disturbance of the steady-state solar wind, in many cases generated by a strong solar eruption. Characteristics: sudden strong density increase of the plasma, velocity several 10 to up to several 100 km/sec higher than the solar wind speed. In a neutral gas a shock wave corresponds to the burst wave of an explosion or to the nose wave of a supersonic aircraft.

### Sideric

referred to the star sky, assuming it is fixed.

### Solar constant

The average solar radiation intensity which is irradiating the earth

### Solar dynamic

variation range of temperature, particle velocity, magnetic field etc. on the sun.

### Solar occultation

position of a body behind the sun as seen from the earth.

### Spin

number of rotations per minute

### Sunspot cycle

About 11 years lasting period of alternatingly high and low sunspot number with one turn-around of the solar magnetic dipole: north to south or vice versa

### Supernova

exploding star

### Synodic

related to the orbiting earth

### symmetry, axis of

axis around which a body is equally distributed

### Symmetry, plane of

plane, dividing a body into two mirror-inverted equal parts

### Syzygy

position of a celestial body between sun and earth

### Time-of-Flight Mass Spectrometer

the atoms of different types of atoms differ in their masses. At equal kinetic energy the heavier particles have a lower speed than the light ones. If all particles run a fixed distance the light-weight ones come first, the heaviest last. The result is the termed mass spectrometer

### Transponder

device to transfer in a timely most precise fashion an incoming frequency into a frequency to be transmitted.

### Travelling wave tube (TWT)

amplifier tube for very high frequencies

### u

measuring unit for atomic masses.  
A Hydrogen atom has the mass 1 u.

### Velocity of light (c)

300.000 kms/sec

### Wave-particle interaction

Influence of any type of waves or wave-like instabilities on charged particles in a plasma or vice versa

### White dwarf

small, very hot star of very high density (one of the last development states during the life span of a star).

### Zeeman effect

Splitting of spectral lines in strong magnetic fields.

### Zodiacal light

interplanetary straylight; sunlight diffracted by small and smallest particles in space.

## Register

Unterstrichungen bedeuten Hinweise auf größere Textabschnitte  
**Fettdruck** weist auf Abbildungen hin

### **A**

ÄEG 171, 174  
AEROS 162, 163, 193  
Alfvén, Hannes 73, 82  
Alfvénwellen 70, 81, 82 85, 86, 98, 99 120  
Alphateilchen 66, 69, 70, 124, 149  
Anderson, R. R. 100  
Angelus Silesius 15  
Anisotropie 71, 138, 142  
Antenne 174, 184, 186, 189  
Antennenmast 176, 183, 188  
Antipodenstellung 75  
Aphel 36, 40, 44  
Asteroiden 52  
Astronomische Einheit (AE) 24, 130  
Atmosphäre 66  
Ausleger 183, 188  
AZUR 162, 163, 193

### **B**

Bahnbestimmung 174, 186  
Ballernamodell 72, 81, 82, 85  
Bartels, Julius 66  
Bavassano, B. 90  
Beggs, James M. 7

### Berichtswesen 160

Beteigeuze 52  
Billig, Victor 172  
Bird, M. K. 118  
Bitrate 42  
Blackout 40, 41, 42  
BMFT 39, 171  
Bodenkontrolle 68, 159, 162, 181, 191  
Bodenstation 36, 68  
Bölkow, Ludwig 174  
Burlaga, L. 90  
Canberra (Australien) 120, 190  
Cantarano, S. 90  
Cassini 50, 51, 55  
Cerenkov-Detektor 128  
Channeltrons 27  
Chromosphäre 67, 30, 34, 69, 70, 81, 126, 140  
Countdown 41, 43

### **D**

Datenauswertung 89, 193  
Datenempfang 174  
Datenübertragung 39, 42, 44, 128, 184, 188  
Datenverarbeitungskonverter 174  
Dehmel, G. 80  
Delta-Klasse 39  
Detailaufgabenkontrolle 169  
Detektorteleskop 128, 149  
Deutscher Wetterdienst 171  
DFVLR 39, 170, 171  
DIAL 163  
Differenzgeschwindigkeit 72  
Dipolantenne 113  
Dipolstruktur 92  
Disconnection 76  
Diskontinuität 91, 97, 98  
Dispersion 70  
Dopplereffekt 37, 89, 103, 186  
Dopplergamm 136  
Dornier 171  
Drallachse 43  
Drehimpuls 77  
DSN 42, 116, 119, 159, 174, 185, 187, 189, 191  
Dynamisches Spektrum 111, 112

### **E**

Echtzeitbetrieb 183  
Edenhofer, Peter 115  
Effelsberg 42, 119, 185, 187, 188  
Einstein, Albert 37  
Einschlagsrate 60  
Ekliptik 42, 50, 51, 52, 54, 73, 98, 114, 133  
Elektronen 24, 34, 35, 42, 67, 100, 108, 124, 128, 131, 135, 137, 139, 149  
Elektronik 159  
Elektronendichte 108, 114, 115, 116, 117, 118, 119  
Elektronenplasmafrequenz 100, 101, 102, 104, 108, 111  
Elektronen, suprathermische 111  
Elektrostatische Schwingungen 109  
Ellipsenbahn 24, 34  
Energie 24, 27, 40, 69, 76, 86, 124, 187  
Energiehaushalt 46  
Energiespektrum 67  
Entwurfsrevision 162, 163  
EOS 19  
Erde 24, 28, 36, 145  
Ereignisdetektor 89  
Eruption 22, 27, 29, 69, 74, 75, 86, 87, 121, 126, 127, 129, 135, 136, 151  
ESA 168, 169, 171  
Exzentrizität 40, 41

Fackelausbruch 26, 108  
Faraday-Effekt 37, 118, 119  
Faraday-Rotation 118, 119, 121  
Fechting, Hugo 58  
Feldlinien, magnetische 24  
Feldstärke, elektrische 108  
Fichte 20  
Firmen 172  
Flare 26, 69, 75, 77, 86, 94, 96,  
108, 111, 114, 115, 116, 126,  
127, 129, 131, 132, 135, 136,  
137, 138, 139, 140, 142, 145,  
147, 150, 151  
Flarestern 125, 147  
Flugzeit-Massenspektrometer  
59  
Fluktuationen 98, 121  
Forbush-Decrease 20, 131

**G**  
GALIA 17  
Galaxis 20, 80, 130, 147, 153  
Galilei, Galileo 20  
GALILEO 193  
Gammastrahlung 96, 135, 136,  
139, 148, 151  
Gammastrahlensausbrüche 43,  
148, 155  
Gasdüse 186  
General Electric Co 164, 168,  
174  
GEOS 160  
Geschwindigkeitsverteilungs-  
funktion, 67, 68, 70, 71  
GIOTTO 79, 161, 193  
Goldstone 119, 190  
Gradient 144, 153, 154  
Gravitation 37, 54  
Grayout 42  
Greenschicht 88, 97  
Grün, Eberhard 58  
GSFC 175, 190  
GSOC 43, 183, 187, 192  
Gurnett, D. A. 100

**H**  
Halbleiterdetektoren 128  
Harmonische Frequenzen 108,  
109, 110, 111, 114  
H $\alpha$ -Strahlung 14  
Heftman, Kurt 189  
Heis, H. 55, 57  
HELIOS 36, 38, 39, 40, 41, 43, 53,  
74, 115, 177, 188  
HELIOS (Gott) 17, 18, 19  
Heliosphäre 72, 75, 126, 147,  
148, 150, 174  
Helium 66, 69, 70, 72, 124, 140  
Henrici, Julius 172  
Hess, Viktor 125  
Hiendlmeier, Georg 183  
Hinterglasspiegel (SSM) 39,  
161  
Hochgewinnantenne (HGA)  
42, 43, 159  
Hochtemperaturzellen 39  
Hollebeke, Michelle A. I. van  
149  
Hyperbolische Bahnen 61

**I**  
IABG 177  
IKARUS 161  
IMP 68, 69, 79, 87, 94, 144, 149  
Induktionsspulen-  
magnetometer 36, 100  
Instabilitäten 70, 147  
Integration 174  
INTELSAT 171

Interplanetarer Raum 134  
Interstät 138  
Inversion 116  
Ionen 24, 35, 67, 100  
Ionenabschirmung 43  
Ionenakustische Wellen 70,  
100, 101, 103, 104, 140  
Ionenplasmafrequenz 101, 103  
Ionenspektren 69  
Ionosphäre 22, 66, 107, 148  
ISEE 1/2/3 68, 79, 149  
Isotrop 68, 70, 71, 132

**J**  
Jahresringe 20  
Jansky, Karl 106  
Jet Propulsion Laboratory  
(JPL) 174, 176, 183, 189  
Jupiter 24, 52, 77, 145, 150

**K**  
Kanal-Kodierung 159  
Karrieren 169, 171  
Kayser, Susan 111  
Kehr, Joachim 183  
Kellogg, Paul J. 101, 106  
Kempe, Wolfgang 193  
Kissel, Jochen 58  
Komet 34, 35, 53, 54, 55, 58, 79,  
161, 193  
Konglomerat 62  
Konjunktion 42  
Kontrollzentrum 183, 184  
Korona 27, 32, 33, 34, 37, 66, 68,  
69, 74, 75, 81, 106, 115, 118,  
119, 120, 126, 135, 137, 139,  
140, 150  
Koronagraph 34, 68, 74, 75, 94,  
121  
Koronalöcher 31, 66, 72, 73, 81,  
94, 127, 152  
Koronasondierung 115  
Kosmische Strahlung 20, 41,  
66, 76, 77, 91, 97, 106, 123,  
125, 149  
Krebsnebel 125, 131  
Kreuzkopplungseffekt 43  
Kunow, Horst 124  
Kurzschluß 41  
Kutzer, Ants 12, 39, 159, 162

**L**  
Lagerregelung 174  
Lal, Nand 149  
Laufzeitmessung 115, 186  
Leinert, Christoph 50  
Levy, G. S. 118  
Lichtgeschwindigkeit 100, 124,  
128  
Lichtjahr 131  
Link, Hartmut 50  
Loch im Sonnenwind 70  
Lüst, Reimar 8

**M**  
Madauss, Bernd-J. 162  
Madrid 120, 190  
Magnetfeld 24, 34, 41, 54, 71,  
80, 82, 84, 85, 90, 98, 104, 106,  
109, 112, 114, 118, 126, 130,  
132, 133, 134, 136, 137, 139,  
141, 142, 150  
Magnetfeldexperimente  
E2 36, 43, 80, 82, 83, 146  
E3 83, 90, 186  
E4 80, 82, 83, 88, 100, 186  
Magnetfeldlinien 34, 35, 72, 80,  
81, 126  
Magnetfeldpolarität 72, 80  
Magnetfeldspirale 35

Magneto hydrodynamik 95, 120  
Magnetometer 36, 43, 80, 82,  
83, 88, 90, 100, 146, 186  
Magnetosphäre 66, 68, 126, 145  
Management 46, 157, 162, 166,  
193  
Mariani, F. 90  
MARINER-2 66  
Mark III Strukturplan 165, 168  
Mars 24, 52  
Massenspektrum 61, 63  
Matrix-Organisation 167  
Maxwellverteilung 70  
MBB 39, 170, 171, 175  
McDonald, Frank B. 149  
Merkur 24, 36, 86, 145  
Meßantenne 41, 100, 107  
Meteor 52, 58  
Meteorit 52, 58, 60  
Microchannel plates 67  
Mikrometeoritenexperiment  
58, 59  
Mikrometeoriten  
Zusammensetzung 61  
Mißweisung 78  
Mittelgewinnantenne 184  
Modulation 77  
Mögel-Dellinger-Effekt 22  
Mond 24, 32, 33, 50  
Multipaktor-Effekt 42, 43  
Muschmann, G. 80

**N**  
NASA 79, 161, 171, 190  
Neptun 24  
Ness, N. 90  
Netzplantechnik 160  
Neubauer, F. M. 80, 119  
Neutronen 151  
Neutronenmonitor 76  
Neutronenstern 125  
Nukleon 135, 149

**O**  
Okkultation 40, 41, 44, 115,  
116, 118, 120  
Opp, Albert G. 9  
Organisationssystem 167  
OSO 66  
Oszillation 108  
Ousley, Gilbert W. 10, 12

**P**  
Parametrischer Verstärker 39  
Perihel 40, 41, 43, 44, 46, 186  
Perseiden 53  
Personalwanderung 171  
Phasengeschwindigkeit 100  
Phasenraumdichte 68  
Photomultiplier 128  
Photosphäre 24, 27, 34, 80, 81,  
91  
PIONEER 10/11 68, 73, 150,  
153, 154, 162, 191  
Pitz, Eckhart 50  
Planet A 79  
Planetsystem 26, 53  
Plasma 24, 26, 42, 56, 80, 118,  
124  
– dichte 26, 101, 112, 114, 115  
– experiment 36, 67, 86, 146  
– frequenz 67, 100, 108, 110,  
111, 114  
– labor 87  
– wellen 41, 70, 100, 109, 110,  
120, 132  
– wellenexperiment 113  
– wolke 116, 117, 142  
Pluto 24

Polarimeter 118, 119  
Polarisation 57, 118  
Polarisationsebene 37  
Polarlicht 22, 66  
Porsche, Herbert, 10, 12  
Präzession 43  
Procyon 56  
Projektmanagement 160  
Projektorganisation 166  
Projekt-Revision 162, 164, 169  
Projektstrukturplan 166, 167  
Proton 66, 70, 71, 72, 96, 124,  
129, 131, 137, 139  
Protuberanz 23, 69, 70, 75, 115  
Proxima Centauri 126  
Pulsar 106, 125  
Punkt, kritischer 77

**Q**  
Quadranten 53, 55

**R**  
Radioastronomie 68, 106, 111  
Radiometer 103, 107, 113  
Radiowellen 22, 36, 41, 42, 106,  
109, 113, 118, 138, 148  
– ausbrüche 96, 101, 102, 104,  
106, 107, 108, 109, 111, 112,  
113, 135, 140  
– experiment 113  
Rauschen 103, 108, 110  
Reconnection 73, 76, 139, 147  
Regulatorumschaltung 184  
Resonanz 109  
Riemann, Bernhard 87  
Riesenhuber, Heinz 6  
Rissalterung 176  
Röntgenmonitor 36, 150  
Röntgenstrahlen 22, 31, 34, 96,  
135, 136, 139, 140, 148, 151,  
152  
Rosenbauer, Helmut 66  
Rotationsperiode 80

**S**  
Saturn 24, 145  
S-Band-Frequenz 43, 159, 174  
Searce, C. 90  
Scheffler, Viktor 15  
Scheil, Günter 172  
Schwarzes Loch 125  
Schwenn, Rainer 66  
Scout-Klasse 39  
Seidel, B. L. 118  
Sektorgrenze 73, 84, 90, 92  
Sektorstruktur 80, 91, 132  
Sekundäremissionen 43  
SIEMENS 171  
Signallaufzeit 116, 117  
Silikate 61  
Siliziumdetektor 149  
Simulation 174, 189  
Skylab 66, 79, 115  
Solarkonstante 45  
Solargenerator 44, 174, 186  
Solarzellen 175, 186, 188  
Sonne (n) 14, 24, 26, 126  
– äquator 24, 25, 54, 72, 81, 85  
– atmosphäre 26  
– eruption 27, 29, 86, 87  
– Finsternis 32, 33, 34  
– Flecken 20, 21, 24, 28, 72,  
130, 135  
– maximum 32, 74, 129, 151,  
161  
– minimum 33,  
27, 92, 129, 151  
– relativzahl 74  
– zyklus 46, 57, 68, 76, 77, 92, 103

– oberfläche 21, 24, 126  
– system 24, 36, 52, 58  
– wind 41, 54, 65, 66, 80, 86,  
97, 102, 108, 126, 127, 132,  
153  
– experiment 66  
– geschwindigkeit 71, 101  
– ströme 73  
SPACELAB 160, 171  
SPAR 171  
Spezifikationssystem 167  
Spiegelfolien (SSM) 39, 161  
Spinachse 43  
Spiralen, archimedische 82,  
84, 85, 91, 92, 98, 113, 114,  
132, 134  
Standard Electric Lorenz  
174  
Start 187  
Startrakte 182  
Staubbeschleuniger 59  
Staubdetektor 36  
Staub, interplanetarer 34,  
41, 49, 51  
Stelzried, C. T. 118  
Stone, Robert 111  
Stoßwelle 20, 68, 69, 70, 74,  
75, 77, 86, 87, 91, 94, 95, 96,  
97, 103, 104, 125, 126, 129,  
132, 135, 142, 145, 147, 148,  
153, 155  
Stoßwelle, korotierende 141,  
143, 144, 145  
„Strahl“ 68, 108  
Strahlungsdruck 53, 58, 62, 86  
Streuung 68, 134, 138  
Strom, korotierender 90, 95,  
96, 97, 143, 144, 145  
Stromlinien 66  
Stromschicht 81, 92  
Sturm, magnetisch-  
ionosphärisch 87  
Subalfvenisch 70  
Supernova 125, 147  
Symmetrieebene des  
– Staubes 54, 55, 56, 186  
Szygie 42, 44  
Sztintillator 128

**T**  
Teilchen -bahnen 60, 61  
– chondritische 61, 62  
– eisenreiche 61, 62  
– detektor 36  
– flockige 62  
– flußdichte 76  
Teilchen-Teleskop 36, 128,  
149, 150  
Telekommunikation 159, 174  
Telemetrie 68, 174  
Terenzi, R. 90  
Terminplanung 168  
Test 174, 175, 176, 177  
Thermalfarbe 176  
Thermalhaushalt 43, 159,  
174  
Thermalkontrolle 45  
Thomson-CSF 174  
Titan-Centaur-Rakete 41  
Titanen 17  
Trägerrakete 41  
Trainingsprogramm 162  
Trainor, James H. 12, 149  
Transistorverstärker 39, 174  
Transponder 37, 116, 186  
Triangulation 112, 113, 155

TRW 164  
Turbulenz 98, 147

**U**  
Ultraviolettstrahlung 66  
ULYSSES 77, 79, 193  
Uranus 24  
UV-Spektrometer 136  
**V**  
Vega 79  
Venus 24, 36, 50  
Verschmelzung 87  
VIKING 190  
Villante, U. 90  
Volland, H. 118  
VOYAGER 68, 86, 87, 94, 102,  
150

**W**  
Wärmefluß 103  
Wärmehaushalt 46  
Wanderfeldröhre 44, 174  
Weilheim 185, 187, 188  
Weißer Zwerg 125  
Welle, elektromagnetische  
100, 111  
Wellentechnik 174  
Welle-Teilchen-  
Wechselbeziehung 70, 72,  
91  
Welle, zirkularpolarisierte 88  
Winkelberg, Gerd 124  
Winkelmessung 113  
Wolken, magnetische 76, 93

**Z**  
Zeeman-Effekt 81, 147  
Zeitauflösung 68  
Zeitprofil 111, 112  
Zodiaklicht 50, 54, 57  
– photometer 36  
– experiment 52, 53, 54  
Zyklotronresonanzen 70

## Register

*Underlined are remarks  
concerning to major texts  
Bold printed are figures*

**Action item control** 169  
AEG 171, 173  
AEROS 162, 163, 193  
Alfvén, Hannes 70, 85, 86  
Alfvén waves 81, 86, 97, 99, 120  
Alpha particles 66, 153  
Alvarez 109  
Anderson, R. R. 100, 103  
Angelus Silesius 15  
Angle, measurement of 113  
Angular momentum 78, 79  
Anisotropy 71, 138, 142, 151  
Annual rings 20  
Antenna 41, 184  
Antenna mast 173, 188  
Aphelion 37, 41  
Asteröide 52  
Astronomical Unit (AU) 39,  
111, 125, 130  
Attitude control 173, 186, 189  
AZUR 162, 163, 173, 193

**B**  
B<sub>Ae</sub> 171  
Ballarina model 71, 72, 82, 85  
Bavassano, B., 90  
Beggs, James M. 7  
Billig, Victor 172

- Bird, M. K. 15, 118  
 Bit rate 42, 188  
 Black hole 125  
 Blackout 42  
 BMFT 162, 171, 193  
 Bolkow, Ludwig 173  
 Boundary layer 73, 88, 95  
 Burlaga, L. 90
- C**  
 Canbera 119, 120, 189  
 Cantarano, S. 90  
 Career 159, 170, 171  
 Cassini 50, 51, 56  
 Cerenkov detector 128  
 Chromosphere 27, 30, 34, 69,  
 125, 126, 140, 147  
 Cloud, magnetical 78, 92, 93  
 Comet 35, 52, 54, 55, 61, 160  
 Conjunction 42  
 Control center 184, 186  
 Corona 27, 33, 34, 37, 66, 67,  
 69, 71, 75, 79, 92, 96, 110, 115,  
 118, 119, 120, 125, 126, 141,  
 150, 151  
 Coronagraph 34, 74, 75, 77, 93,  
 115, 121  
 Coronal hole 31, 66, 70, 71, 73,  
 83, 85, 95, 126, 153  
 Corona sounding 115  
 Cosmic radiation 20, 37, 41,  
 78, 90, 123, 128, 135, 149, 153  
 Count-down 41, 43  
 Crab nebula 125, 130, 147  
 Cross coupling effect 43  
 Current sheet 85, 86, 92
- D**  
 Data evaluation 193  
 Data transmission 42, 89  
 Dehmel, G. 80  
 Delta class 39  
 Design review 163, 169  
 Detector telescope 128  
 DFVLR 171, 183, 189, 194  
 DLAL 163  
 Diffraction 54  
 Dipol antenna 100  
 Dipol structure 91  
 Discontinuity 90, 96, 98  
 Dopplergram 136  
 Doppler effect 37, 103  
 Dornier 171  
 DSN 116, 117, 119, 173, 185, 186,  
 188, 189, 191, 192, 193  
 Dust, interplanetary 34, 49,  
 50, 51
- E**  
 Earth 25, 36, 145  
 Ecliptic plane 42, 50, 51, 55,  
 79, 86, 91, 12, 133  
 Edenhöfer, Peter 115  
 Effelsberg 42, 119, 185, 188, 190  
 Einstein, Albert 37  
 Electron 25, 34, 35, 42, 67, 80,  
 100, 106, 124, 128, 135, 138,  
 139, 149, 150  
 Electron density 107, 108, 109,  
 111, 114, 115, 117, 119, 120  
 Electronics 85, 155, 160  
 Electron plasma frequency 96,  
 100, 101, 102, 103, 104  
 Electron, suprathermal 111,  
 153  
 Electrostatic oscillation 96,  
 100, 102, 107, 108, 111  
 Elliptic orbit 35, 61, 63,  
 Energy 25, 27, 66, 77, 78, 86,  
 89, 137, 146, 150  
 EOS 19  
 Eruption 20, 22, 27, 29, 69, 74,  
 75, 77, 87, 89, 93, 121, 125, 126  
 ESA 168, 170, 171
- F**  
 Faraday effect 37, 118  
 Faraday rotation 118, 121  
 Fechtig, Hugo 58  
 Fermi 196  
 Field lines, magnetical 25  
 Field strength, electrical 41,  
 102  
 Fir 20  
 Firms 172  
 Flaking 175  
 Flare 26, 69, 77, 87, 89, 94, 96,  
 101, 102, 104, 107, 111, 117,  
 125, 126, 127, 133, 137, 139,  
 141, 142, 145, 147, 149, 150,  
 151  
 Flare star 125  
 Fluctuations 99, 107, 117, 119  
 Forbush decrease 20, 131  
 Forslund 103
- G**  
 GAIA 17  
 Galaxy 20, 78, 147, 155  
 Galilei, Galileo 20, 130  
 Gamma radiation 95, 135, 136,  
 139, 146, 148, 150, 151  
 Gamma ray burst 37, 43, 148,  
 155  
 General Electric Co. 163, 168,  
 173  
 GEOS 160  
 German Weather  
 Broadcasting System 171  
 Ginzburg, 101  
 GIOTTO 160  
 Goldstein 92  
 Goldstone 116, 119, 120, 189,  
 192  
 Gradient 97, 153, 154  
 Gravitation 37, 55, 113  
 Graydot 42  
 Ground Control Room 184, 186  
 Ground Operations System  
 181, 183, 190  
 Ground station 37, 118, 186,  
 188, 191  
 Grün, Eberhard 58  
 GSFC 90, 175, 189, 192  
 GSOC 43, 189, 190, 191, 192,  
 194  
 Gurnett, D.A. 100, 103
- H**  
 H $\alpha$ -radiation 14, 126  
 Haddock 109  
 Harmonic frequency 101, 108,  
 109, 111, 114  
 Heftman, Kurt 189  
 Heis, H. 57  
 HELIOS 36, 38, 39, 40, 41, 43, 44,  
 46, 53, 74, 158, 182  
 HELIOS (God) 17, 18, 19  
 Heliosphere 24, 36, 70, 77, 78,  
 126, 135, 147, 153  
 Helium 66, 67, 69, 70, 79, 107,  
 124, 140, 142, 153  
 Henrici, Julius 173  
 Hess, Viktor 125  
 Hiendmeier, Georg 183  
 High gain antenna 42, 43, 159  
 High temperature cells 39  
 Hole in the solar wind 69
- Hollebeke, Michelle A.I. van  
 149  
 Hydrogen 107  
 Hyperbolic orbit 61, 63
- I**  
 IABG 177  
 ICARUS 160  
 Ignition 182  
 IMP 71, 87, 89, 91, 92, 93, 94,  
 95, 144, 149, 150  
 Impact rate 58, 60  
 Instability 101, 148  
 Integration 174, 176, 193  
 INTELSAT 171  
 Intensity 138  
 Interplanetary space 134  
 Ion 25, 35, 80, 100, 150  
 Ion acoustic wave 100, 101,  
 103, 104, 141  
 Ionosphere 22, 89, 106, 112,  
 148  
 Ion plasma frequency 101, 103  
 Ion guard 43  
 ISEE 113, 149, 151  
 Isotope 67, 71, 133
- J**  
 Jansky, Karl 106  
 Joint Working group 162, 163,  
 189  
 JPL 173, 176, 183, 189, 191,  
 192  
 Jupiter 25, 145, 149
- K**  
 Kayser, Susan 111  
 Kehr, Joachim 183  
 Kellogg, Paul 101, 106  
 Kempe, Wolfgang 193  
 Kissel, Jochen 58  
 Knowor, Horst 124  
 Kutzer, Anst 13, 39, 159, 162
- L**  
 Lal, Nand 149  
 Launch 173, 184, 187, 193, 194  
 Launch vehicle 41, 182, 191  
 Leinert, Christoph 50  
 Levy, G. S. 118  
 Light year 130, 135  
 Link, Hartmut 50  
 Lüst, Reimar 8
- M**  
 Mach number 104  
 Madauss, Bernd-J. 162  
 Madrid 119, 120, 189, 190, 192  
 Magnetic field 25, 41, 66, 67,  
 70, 80, 84, 86, 89, 90, 94, 95,  
 96, 98, 111, 118, 131, 132, 133,  
 134, 139, 141, 150  
 Magnetic field experiment  
 E2 37, 43, 80, 83  
 E3 37, 80, 90  
 E4 37, 80  
 Magnetic field line 25, 34, 35,  
 81, 96, 125  
 Magnetic field polarity 70, 71  
 Magnetometer 37, 43, 80, 83, 90  
 Magnetohydrodynamic 95, 97,  
 120  
 Magnetosphere 145  
 Management 47, 159, 162, 163,  
 168, 171, 193  
 Mariani, F. 78, 90  
 Mariner I, 189, 190, 192  
 MARK III structure 165, 168, 169  
 Mars 25, 190, 192  
 Matrix organization 164, 167  
 MBB 171, 173, 176, 189
- McDonald, Frank B. 149  
 Measuring antenna 41, 100,  
 106, 111, 113, 191  
 Mercury 25, 36, 145  
 Meteor 54  
 Meteorite 61  
 Micrometeorite 52, 58  
 -experiment 58, 59  
 Microwaves 138  
 Modulation 112, 113, 155  
 Moon 24, 50  
 Morrison 92  
 Multiplier effect 42, 43, 173,  
 189  
 Musmann, G. 80
- N**  
 NASA 80, 162, 163, 171, 188  
 Neptune 25  
 Ness, N. 90  
 Neubauer, F. M. 80  
 Neutron 151  
 Neutron star 106, 125  
 Noise 42, 96, 103, 104, 106, 107,  
 108, 109  
 Nucleon 135
- O**  
 Occultation 41, 115, 116, 117,  
 118, 120  
 Opp, Albert G. 9  
 Oscillation 89  
 Osley, Gilbert W. 11, 13
- P**  
 Panitz, J. 191  
 Parametric amplifier 40  
 Particle, chondritic 62, 63  
 -, density 63  
 -, fluffy 63  
 -, iron rich 62, 63  
 -, telescope 37, 149  
 Perihelion 36, 41, 43, 44, 45, 46,  
 70, 86, 90, 103, 186, 188, 191  
 Personnel transfer 171  
 Phase space density 68  
 Photo multiplier 128  
 Photosphere 25, 27, 34, 90, 92  
 PIONEER 91, 149, 153, 154,  
 155, 163, 190, 191, 192  
 Pitz Eckhart 50  
 Planetary system 26  
 Plasma 25, 42, 89, 95, 107, 109,  
 118, 124  
 -cloud 56, 78, 117, 142  
 -density 26, 69  
 -experiment 37, 66, 79  
 -frequency 96, 100, 101, 102,  
 103, 104, 107, 108, 109, 111,  
 114, 133  
 -lab 147  
 -wave experiment 100  
 -waves 42, 96, 100  
 Pluto 25  
 Point, critical 79  
 Polarization 88, 97, 118, 120  
 -plane 37  
 Polar light 22  
 Porsche, Herbert 13  
 Precession 43  
 Procyon 57  
 Project management 166, 167,  
 193  
 -organization 160, 166  
 -review 162, 166, 169, 170  
 Propagation time  
 measurement 115  
 Proton 66, 70, 71, 78, 96, 124,  
 128, 138, 139, 149, 150, 153
- Protuberance 69, 77  
 Proxima Centauri 125  
 Pulsar 106, 125
- Q**  
 Quadrantides 54, 55  
 Quadrupol field 92
- R**  
 Radiation, cosmic 20, 41, 78,  
 90  
 Radiation pressure 54  
 Radio astronomy 111, 148  
 Radiometer 112  
 Radio waves 22, 42, 100, 106,  
 108, 109  
 Radio wave burst 95, 96, 101,  
 102, 104, 105, 106, 107, 108,  
 109, 111, 112, 113, 135, 140  
 Radio wave experiment 37,  
 42, 100, 106  
 Real time operation 183  
 Reconnection 74, 139, 148  
 Riessenhuber, Heinz 6  
 Rosenbauer, Helmut 66
- S**  
 Saturn 25, 145  
 S-band frequency 43, 159, 173  
 Scattering 134, 137, 138  
 Searce, L. 90  
 Schedule planning 160, 168  
 Scheffler, Viktor 15  
 Scheil, Günter 173  
 Schwenn, Rainer 66  
 Scintillator 128  
 Scout class 39  
 Search coil magnetometer 37,  
 80, 86, 100  
 Secondary emission 43  
 Second surface mirror 39, 160  
 Sector boundary 71, 74, 84, 90,  
 91, 92, 95, 153  
 Sector structure 83, 90, 91,  
 119, 133  
 Seidel, B. L. 118  
 Semiconductor detector 128  
 Shock, corotating 94, 95, 141,  
 144, 145, 153  
 Shock wave 70, 75, 77, 78, 87,  
 89, 90, 92, 94, 95, 96, 97, 104,  
 125, 127, 133, 135, 141, 142,  
 145, 147, 148, 155  
 Short circuit 42, 74  
 SIEMENS 171  
 Signal travel time 116, 117  
 Silicon detector 149  
 Simulation 189, 190  
 Skylab 83, 115  
 Solar cell 184, 188  
 Solar constant 45, 189  
 Solar eclipse 34  
 Solar eruption 20, 22, 27, 29  
 Solar generator 45, 186, 189  
 Solar surface 25  
 Solar system 37, 61  
 Solar wind 41, 65, 76, 78, 79,  
 80, 89, 103, 107, 126  
 -experiment 66  
 -velocity 71  
 SPACELAB 160, 171  
 SPAR 171  
 Specification system 167  
 Spin axis 42, 43, 45, 186  
 Spiral, archimedean 35, 70,  
 80, 84, 85, 86, 91, 92, 96, 113,  
 132, 134  
 Standard Electric Lorenz 173  
 Stelzried, C. T. 118
- Stone, Robert 111  
 "Strahl" 67, 68  
 Stream, corotating 94, 95, 96,  
 97, 143, 144, 151, 153  
 Sudden ionospheric  
 disturbance 22  
 Sun 14, 21, 31, 125, 152  
 sun's atmosphere 26, 83, 107,  
 117, 149  
 sun's equator 25, 55, 71, 91, 92,  
 131  
 Sun spot 20, 21, 25, 28, 70, 126,  
 130, 135  
 -cycle 47, 56, 57, 74, 76, 91,  
 105, 126, 129, 151, 153  
 -maximum 32, 74, 101, 104,  
 130, 155, 160  
 -minimum 33, 153  
 Supernova 125, 147, 148  
 Symmetry, plane of 55, 56  
 Systems analysis 160  
 Syzygy 42
- T**  
 Telecommunication 40, 45,  
 160, 173, 189  
 Terenzi, R. 90  
 Test 173, 174, 175, 176, 177, 189  
 Thermal control 45, 173  
 Thermal design 43, 47  
 Thomson-CSF 173  
 Time-of-flight mass  
 spectrometer 59  
 Titans 17  
 Trainor, James H. 13, 149  
 Transistor amplifier 40  
 Transponder 37, 117, 173, 184  
 Travelling wave tube 45, 173, 189  
 Triangulation 112, 113, 114, 155  
 TRW 163  
 Turbulence 97, 105, 148, 153
- U**  
 ULYSSES 79  
 Uranus 25
- V**  
 Velocity distribution  
 function 66, 68, 70, 71  
 Velocity of light 107, 115, 128,  
 155  
 Venus 25, 36, 50  
 VIKING 190, 191, 192  
 Villante, U. 90  
 Volland, H. 118  
 VOYAGER 87, 89, 92, 94, 95,  
 103, 149, 192
- W**  
 Wave, electromagnetic 100,  
 111  
 Wave, ion acoustic 100, 101,  
 104, 141  
 Wave, magetoacoustic 97  
 Weilheim 185, 188, 190, 192  
 White dwarf 125  
 Wibberenz, Gerd 124  
 Work breakdown structure  
 166, 168
- X**  
 X-ray 22, 31, 34, 83, 95, 135,  
 136, 139, 141, 146, 148, 149,  
 150, 151, 152  
 X-ray monitor 37, 149
- Z**  
 Zheleznyakov 101  
 Zodiacal Light 50, 51, 54, 57,  
 186  
 -experiment 50, 52, 53, 55  
 -photometer 37



