



Max-Planck-Institut  
für Sonnensystemforschung  
Report 2009/2010



MAX-PLANCK-GESellschaft



**Herausgeber**

***Publisher***

Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung

*Max Planck Institute for Solar System Research*

Max-Planck-Straße 2

37191 Katlenburg-Lindau, Germany

Tel. : (+49) 5556 979 0

Fax : (+49) 5556 979 240

E-mail: [presseinfo@mps.mpg.de](mailto:presseinfo@mps.mpg.de)

Internet: [www.mps.mpg.de](http://www.mps.mpg.de)

**Redaktion**

***Editors***

Patrick Daly

Grit Koch

Johannes Stecker

Johannes Wicht

**Katlenburg-Lindau, November 2011**

Titelbild: Start des von einem Ballon in die Stratosphäre getragenen Sonnenobservatoriums Sunrise am 8. Juni 2009

*Cover photo: Launch of the balloon-borne stratospheric solar observatory Sunrise on June 8th, 2009*



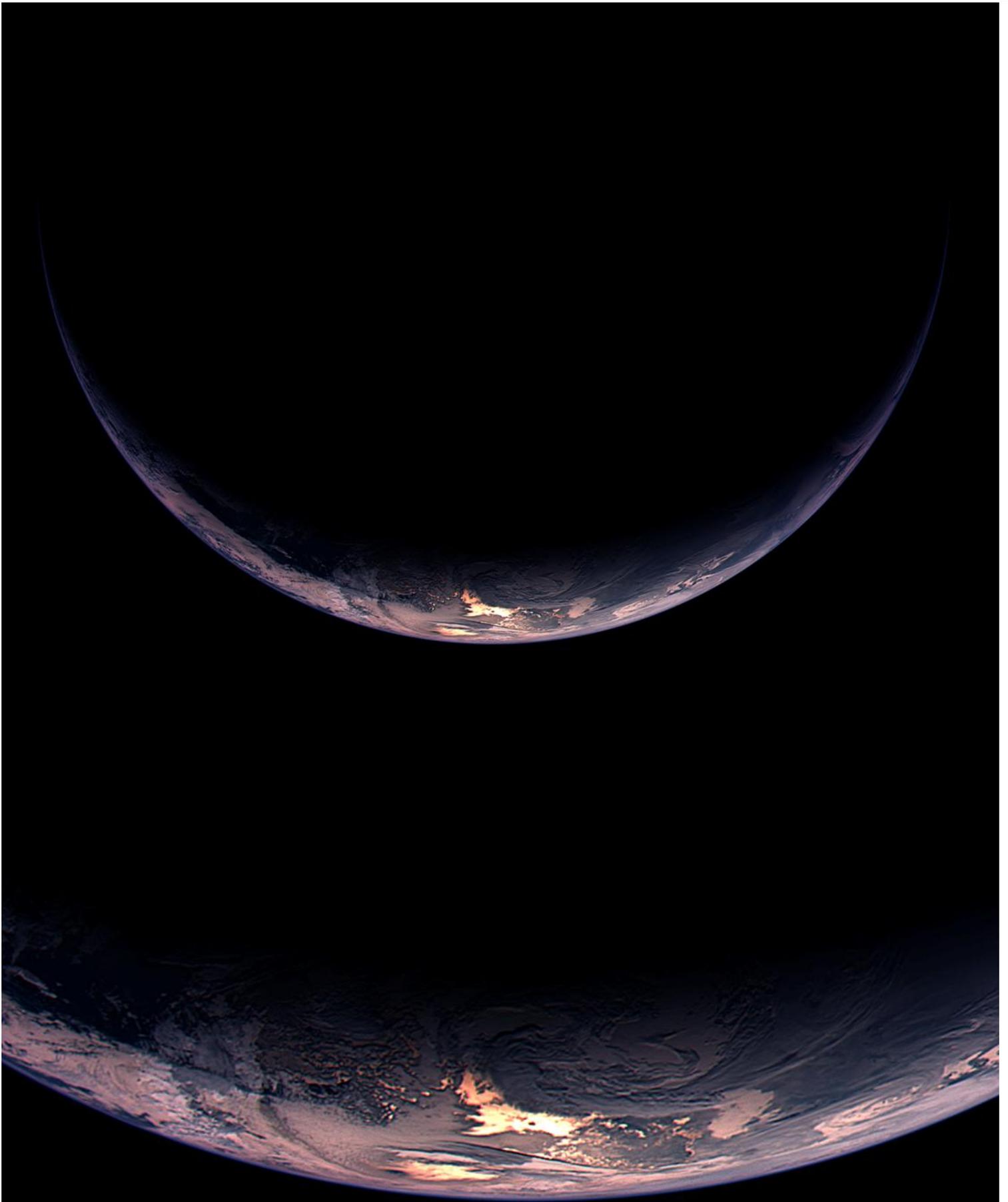
**Max-Planck-Institut  
für Sonnensystemforschung**

*Max Planck Institute  
for Solar System Research*

**Report 2009/2010**



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT



Auf ihrem Weg zu dem Kometen 67/P passiert die Raumsonde ROSETTA im Nov. 2009 erneut die Erde; die OSIRIS-Kamera beobachtet hier den Südpazifik aus einer Entfernung von 350 000 km.

*On its way to the comet 67/P the space probe ROSETTA passes the Earth once again; the OSIRIS camera observes here the South Pacific from a 350 000 km distance*

©ESA 2009 MPS for OSIRIS-Team MPS/UPD/LAM/IAA/RSSD/INTA/UPM/DASP/IDA

<b>0</b>	<b>Vorwort</b>	5
	<i>Preface</i>	
<b>1</b>	<b>Wissenschaft und Forschung</b>	7
	<i>Science and research</i>	
<b>1.1</b>	<b>Forschungsprofil des MPS</b>	7
	<i>Research profile of the MPS</i>	
<b>1.2</b>	<b>Planeten und Kometen</b>	11
	<i>Planets and Comets</i>	
1.2.1	Überblick	11
	<i>Overview</i>	
1.2.2	Erkundung des Sonnensystems mit Herschel	17
	<i>Exploration of the solar system with Herschel</i>	
1.2.3	Das Innere der Planeten	24
	<i>Planetary interiors</i>	
1.2.4	Planetenoberflächen	35
	<i>Planetary surfaces</i>	
1.2.5	Die Atmosphären der Planeten	43
	<i>Planetary atmospheres</i>	
1.2.6	Die Plasma-Umgebung der Planeten	53
	<i>Planetary plasma environment</i>	
1.2.7	Kleine Körper im Sonnensystem	62
	<i>Small bodies in the solar system</i>	
<b>1.3</b>	<b>Sonne und Heliosphäre</b>	71
	<i>Sun and Heliosphere</i>	
1.3.1	Überblick	71
	<i>Overview</i>	
1.3.2	SUNRISE: Ein Sonnenobservatorium am Ballon	80
	<i>SUNRISE: A balloon-borne stratospheric solar observatory</i>	
1.3.3	Wie funktioniert ein Sonnenfleck?	87
	<i>How does a sunspot work?</i>	
1.3.4	Erforschung der Sonnenkorona mit Stereoskopie und Magnetfeldmodellierung	93
	<i>Coronal magnetic field modelling and stereoscopy</i>	
1.3.5	Koronale Konvektion	100
	<i>Coronal convection</i>	
1.3.6	Erstbeobachtung des echten Lyman- $\alpha$ Linienprofils	108
	<i>First view of the genuine solar Lyman-<math>\alpha</math> line profile</i>	
1.3.7	Wechselwirkungen von Ionen mit Wellen und Turbulenz im Sonnenwind	113
	<i>Interactions of ions with waves and turbulence in the solar wind</i>	
<b>1.4</b>	<b>Helio- und Asteroseismologie</b>	121
	<i>Helio- and Asteroseismology</i>	
1.4.1	Überblick	121
	<i>Overview</i>	
1.4.2	Seismologie von Sonnenflecken	125
	<i>Sunspot seismology</i>	
1.4.3	Asteroseismologie eines sonnenähnlichen, planetentragenden Sterns	132
	<i>Asteroseismology of a Sun-like planet-host star</i>	

---

1.5	<b>Publikationen</b> <i>Publications</i>	138
1.6	<b>IMPRS</b> <i>IMPRS</i>	140
2	<b>Infrastruktur</b> <i>Infrastructure</i>	143
2.1	<b>Einführung eines neuen zentralen Datenspeichers am MPS</b> <i>Introducing a new central data storage at the MPS</i>	144
2.2	<b>Auf dem aktuellen Stand des technisch Machbaren mit dem neuen 5-Achs-Bearbeitungszentrum</b> <i>Approaching the technical limits with the new state of the art 5-axes machining center</i>	146
2.3	<b>Detektorentwicklung</b> <i>Detector development</i>	147
2.4	<b>Ausgezeichnete Ausbildung</b> <i>Award-winning apprenticeship</i>	149
3	<b>Öffentlichkeitsarbeit</b> <i>Public outreach</i>	151
4	<b>Institutsüberblick</b> <i>Institute at a glance</i>	155
4.1	<b>Wissenschaftliche Leitung und Gremien</b> <i>Scientific management and boards</i>	155
4.2	<b>Organigramm</b> <i>Organizational chart</i>	157
4.3	<b>Personalentwicklung</b> <i>Staff development</i>	158
4.4	<b>Institutshaushalt</b> <i>Budget</i>	159
4.5	<b>Auszeichnungen 2009/10</b> <i>Awards in 2009/10</i>	160
4.6	<b>Sir Ian Axford: Nachruf und Symposium</b> <i>Sir Ian Axford: Obituary and symposium</i>	161
4.7	<b>Neubau des MPS</b> <i>New MPS building</i>	163

## Vorwort



**Prof. Dr. Ulrich Christensen**  
Direktor

**Prof. Dr. Laurent Gizon**  
Direktor

**Prof. Dr. Sami K. Solanki**  
Direktor

## Preface

In den Jahren 2009 und 2010 hat die Zukunft des Max-Planck-Instituts für Sonnensystemforschung klare Konturen angenommen. Der Neubau des Instituts auf dem Nordcampus der Universität Göttingen in unmittelbarer Nachbarschaft zur Fakultät für Physik wurde endgültig genehmigt. In Form des Siegerentwurfs eines Architekten Wettbewerbs hat der Neubau eine sehr konkrete Gestalt angenommen, die in dem Beitrag am Ende dieses Berichtes begutachtet werden kann.

Weiterhin wurde im Jahr 2010 die Stelle des Direktors einer neuen dritten Abteilung ausgeschrieben. Diese Position ist verbunden mit einer Professur am Institut für Astrophysik und wird gemeinsam mit der Universität Göttingen besetzt. Mit der Physik des Inneren der Sonne und sonnenähnlicher Sterne, die im Fokus der Abteilung stehen wird, wird das MPS um das relativ junge, aber vielversprechende Forschungsgebiet der Helio- und Asteroseismologie erweitert, das sich auszeichnet mit den vorhandenen Forschungsrichtungen ergänzt. Inzwischen (im Jahr 2011) ist die Suche erfolgreich gewesen, und Laurent Gizon, der seit 2005 eine selbständige Forschungsgruppe am Institut leitete, ergänzt die Institutsleitung zu einem Triumvirat.

Aber das MPS hat sich in den beiden Jahren keineswegs nur mit seiner Zukunft beschäftigt. Dass vor allem intensiv und erfolgreich Sonnensystemforschung betrieben wurde, kann man den Beiträgen in diesem Bericht entnehmen. Höhepunkte waren der Flug des ballongetragenen Sonnenteleskops Sunrise und der Start des Weltraumobservatoriums Herschel, das unter anderem planetare Atmosphären im mm-Wellenlängenbereich untersucht.

*The future of the Max Planck Institute for Solar System Research took clear shape in the years 2009 and 2010. The new institute building on the northern campus of the University of Göttingen in immediate vicinity to the Faculty of Physics has been finally approved. And with the winning design of an architectural competition it got a concrete face, which can be inspected in the concluding contribution of this report.*

*Furthermore the position of the director of a new third department has been announced in 2010. This position comprises a professorship at the Institute for Astrophysics and the incumbent will be appointed together with the University of Göttingen. With the Physics of the Interior of the Sun and sun-like stars, the central research field of the new department, the MPS will be expanded by a relatively new, but rather promising branch of astrophysics, the Helio- and Asteroseismology, which perfectly complements the existing research directions. Meanwhile (in 2011) the search has been successful and Laurent Gizon, who has been the leader of an independent research group at the institute since 2005, extends the board of directors to a triumvirate.*

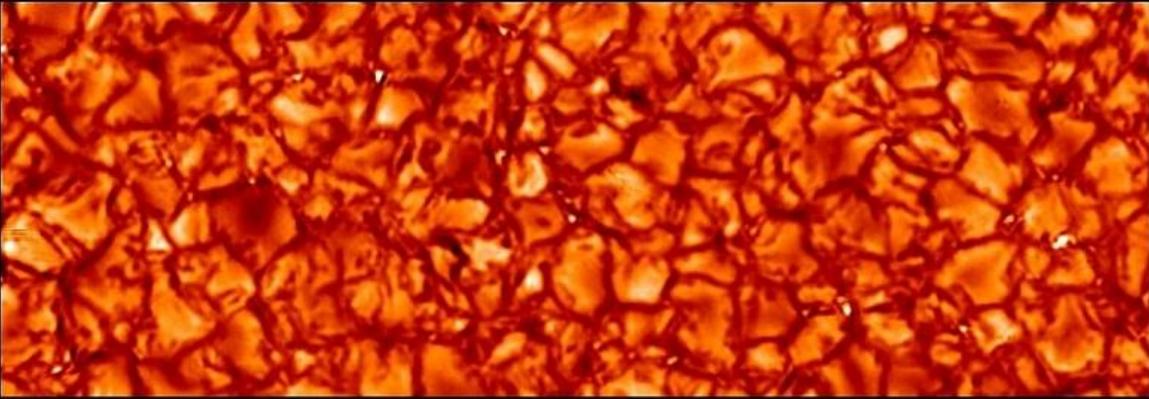
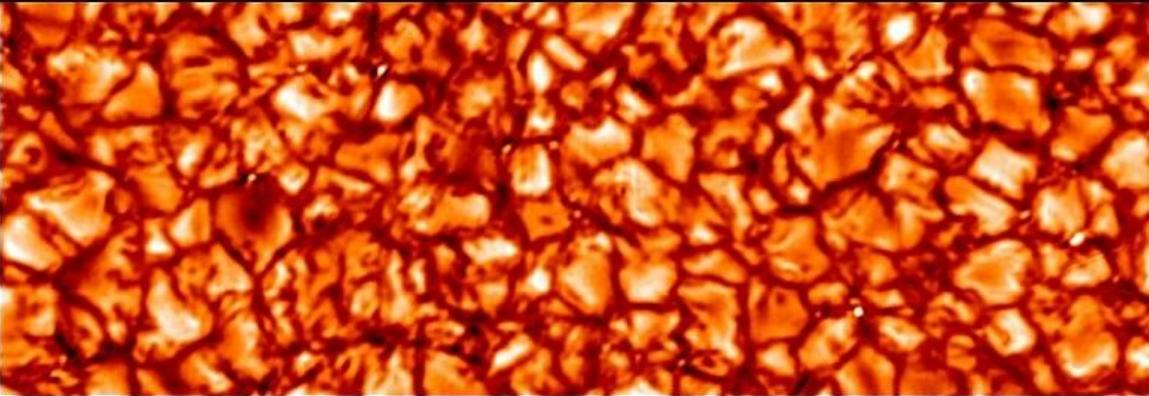
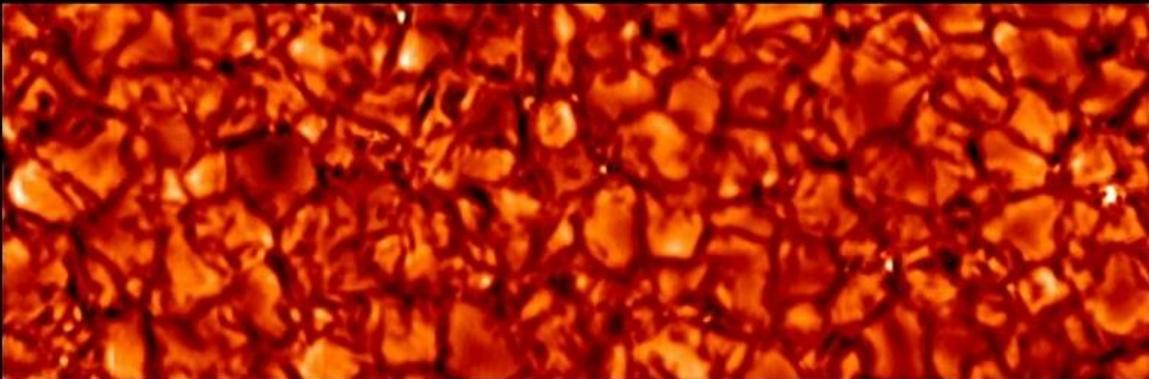
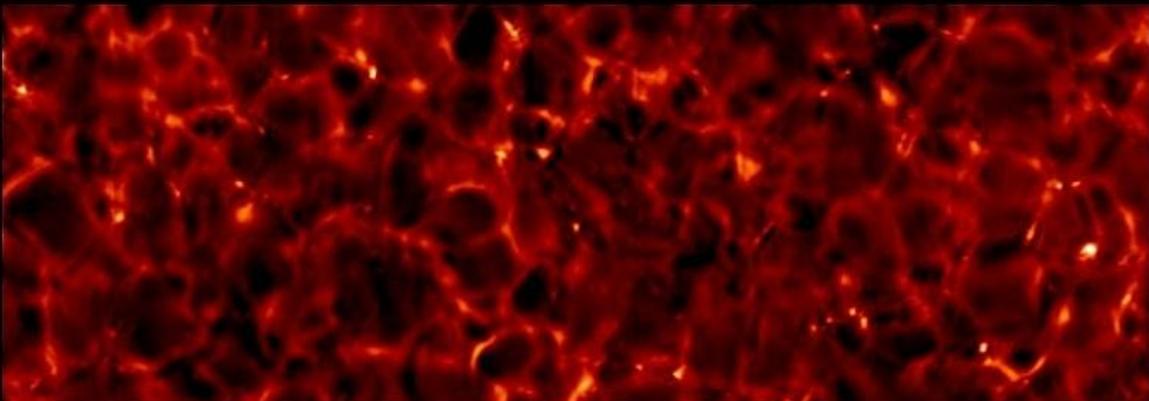
*But the MPS has not just been busy solely with its future in these both years. The individual articles in this report demonstrate, that in the first line solar system research has been pursued, intensively and successfully. The flight of the balloon-borne solar telescope Sunrise and the launch of the space observatory Herschel, that investigates, among other things, planetary atmospheres in the mm-wavelength range, have been two of the highlights.*

Ulrich Christensen

Laurent Gizon

Sami K. Solanki

14 arcsec

 $\lambda=300\text{nm}$  $\lambda=313\text{nm}$  $\lambda=388\text{nm}$  $\lambda=397\text{nm}$ 

Körnige Sonne: Die Aufnahmen zeigen die sogenannte Granulation in vier verschiedenen Farben im nahen ultravioletten Licht. Der Bildausschnitt entspricht etwa 10 000 km x 30 000 km.

*Granular Sun: The picture shows the solar granulation in four different colors in the near ultraviolet. The window corresponds to an area of about 10 000 km x 30 000 km*

## 1 Wissenschaft und Forschung

### 1.1 Forschungsprofil des MPS

Das Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung ist eines von sechs Instituten der Max-Planck-Gesellschaft, die auf dem Gebiet der Astronomie und Astrophysik forschen, und es ist das einzige, das sich mit dem Sonnensystem in allen seinen Erscheinungsformen beschäftigt.

Im Mittelpunkt der Forschungen stehen insbesondere das Innere und die Atmosphäre der Sonne mit ihrem Magnetfeld, ihrer Atmosphäre und ihrer Aktivität und Variabilität und dessen Auswirkung auf die Erde, das interplanetare Medium, das Innere und die Oberfläche, Atmosphäre, Ionosphäre und Magnetosphäre der Planeten, ihre Ringe und Monde, sowie Kometen und Asteroiden. Ergänzt werden diese Arbeiten in geringerem Umfang durch die Beschäftigung mit globalen Aspekten des Planeten Erde wie auch mit astronomischen Objekten jenseits unseres Sonnensystems.

Die Vielfalt der Themen gliedert sich in drei Hauptforschungsrichtungen, der im Berichtszeitraum 2009/10 je eine wissenschaftliche Abteilungen („Sonne und Heliosphäre“ und „Planeten und Kometen“) bzw. eine Max-Planck Forschungsgruppe („Helio- und Asteroseismologie“) zugeordnet waren (ab 1.4. 2011 ist die Forschungsgruppe aufgegangen in eine dritte Abteilung „Physik des Inneren der Sonne und sonnenähnlicher Sterne“).

Bei der stark experimentell ausgerichteten Arbeitsweise des Instituts spielen die Entwicklung und der Bau von Instrumenten sowie die Gewinnung und Auswertung von Messdaten eine zentrale Rolle. Teleskope am Boden, in der Stratosphäre (getragen von Ballonen oder Flugzeugen) und vor allem im Welt- raum liefern das Licht für abbildende und spektrometrische Verfahren, die in einem weiten Wellenlängenbereich, angefangen von Röntgenstrahlen bis hin zum Infraroten, zur Anwendung kommen. In-situ Messungen mit Hilfe von Instrumenten auf Satelliten und Raumsonden sind wesentlich für die Untersuchung der Oberflächen und Atmosphären der Körper des Sonnensystems, aber auch für die Erforschung des interplanetaren Plasmas. Das Innere der Sonne und der Planeten werden mit helioseismologischen und geophysikalischen Techniken erkundet. Die Auswertung und Interpretation der gewonnenen Messdaten wird intensiv von theoretischen Arbeiten begleitet. Physikalische Modelle werden erstellt und mit Hilfe numerischer Simulationsrechnungen überprüft und weiterentwickelt.

Da astrophysikalische Beobachtungsprogramme fast immer einen erheblichen Aufwand an personellen und finanziellen Ressourcen erfordern, sind vielfältige,

## 1 Science and research

### 1.1 Research profile of the MPS

*The Max Planck Institute for Solar System Research is one of six institutes of the Max Planck Society involved in the research field of astronomy and astrophysics, and it is the only one dealing with the solar system with all its manifestations.*

*Subjects of investigation in particular are the interior and the atmosphere of the Sun, its magnetism, activity and variability including its impact on the Earth, the interplanetary medium, the interiors, surfaces, atmospheres, ionospheres, and magnetospheres of the planets, their rings and moons, as well as comets and asteroids. These studies are complemented on a small scale by research into global aspects of planet Earth as well as into astronomical objects beyond the solar system.*

*The variety of topics is structured in three main research directions, each corresponding during the reporting period 2009/10 to a scientific department (“Sun and Heliosphere” and “Planets and Comets”) or a Max Planck Research Group (“Helio- and Asteroseismology”), respectively (starting 1.4.2011 the Research Group has been merged into a new, third department “Physics of the Interior of the Sun and solar-like Stars”).*

*The MPS is oriented predominantly toward experimental research, with emphasis on development and construction of instruments and the accumulation and analysis of observational data. Ground-based, stratospheric (balloon- or aircraft-borne) and especially space-borne telescopes provide the light for imaging and spectroscopic techniques, applied in a wide spectral range from X-rays up to infrared. In-situ measurements with instruments aboard satellites and space probes are essential for the analysis of the surfaces and atmospheres of the solar system bodies, as well as for the exploration of the interplanetary plasma. The interiors of the Sun and of planets are probed by helioseismology and by geophysical methods. The analysis and interpretation of the gathered observational data are accompanied by intensive theoretical work. Physical models are developed and verified and improved based on numerical simulations.*

*Astrophysical observational programs require in most cases a huge personnel and financial effort. Therefore various, typically international collaborations are es-*

meist internationale Kooperationen für die Arbeit des Instituts essentiell. Im Berichtszeitraum 2009/10 gab es am MPS ca. 50 einzelne Projekte mit ca. 140 verschiedenen externen Institutionen, die über eine informelle wissenschaftliche Zusammenarbeit hinausgingen. Die Bandbreite erstreckt sich dabei von der Beteiligung an großen Weltraummissionen von ESA und NASA mit einem Ressourcenaufwand am MPS von –zig Mitarbeitern und einem Budget von mehreren Millionen Euro pro Jahr bis hin zur rein wissenschaftlichen Zusammenarbeit zur Auswertung z.B. von Missionsergebnissen unter Einbeziehung weniger Wissenschaftler. Von diesen 50 Projekten beinhalten mehr als 80% internationale Kooperationen. Das Diagramm in Abb. 1 zeigt die geographische Verteilung der Kooperationspartner. Gut die Hälfte waren Institute in Europa (ohne Deutschland), ca. ¼ waren nationale Partner, annähernd 20% waren aus den USA und die übrigen 6% kamen aus anderen Ländern.

Beispielhaft seien hier nur einige wenige Institute genannt, mit denen es zahlreiche Kooperationen gibt: Applied Physics Laboratory der John Hopkins University (USA), DLR-Institut für Planetenforschung (Berlin), Instituto de Astrofísica de Canarias (Spanien), Jet Propulsion Laboratory (USA), Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik (Freiburg), Observatoire de Paris (Frankreich), Rutherford Appleton Laboratory (UK).

Gut sichtbar wird der Umfang der Zusammenarbeit auch in der Publikationsstatistik des MPS. Im Berichtszeitraum 2009/10 sind es 124 Institute in 26 verschiedenen Ländern (18 europäische und 8 außereuropäische), mit denen mindestens 5 Artikel gemeinsam veröffentlicht wurden (Basis sind referierte Publikationen gemäß dem „Web of Science“). Institute in den USA sind dabei 27 Mal vertreten, in Frankreich sind es 16, in Deutschland 14 und in Großbritannien 9. Die prozentuale Verteilung auf die verschiedenen Regionen zeigt Abb. 2.

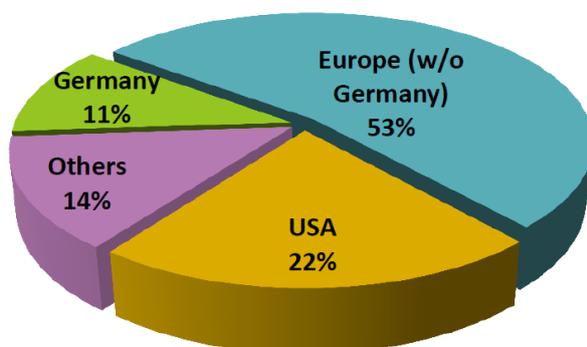


Abb. 2: Geographische Verteilung der Institute mit  $\geq 5$  gemeinsamen Publikationen in 2009/10

*Fig. 2: Geographical distribution of the Institutes with  $\geq 5$  joint publications in 2009/10*

Die große Ähnlichkeit mit der Verteilung der Projekt-

*sential for the activities of the institute. During the reporting period 2009/10 about 50 individual projects with about 140 different external institutions, going beyond an informal scientific cooperation, have been active at the MPS. The range extends from participation in large space missions of ESA and NASA with resources of tens of employees and several million euros per year on MPS side to purely scientific cooperation e.g. for the analysis of mission data comprising just a few scientists. More than 80% of these 50 projects include international collaborations. The diagram of Fig. 1 shows the geographical distribution of the cooperation partners. Slightly more than half are institutes in Europe (without Germany), about ¼ are national partners, almost 20% are from the USA and the remaining 6% are from other countries.*

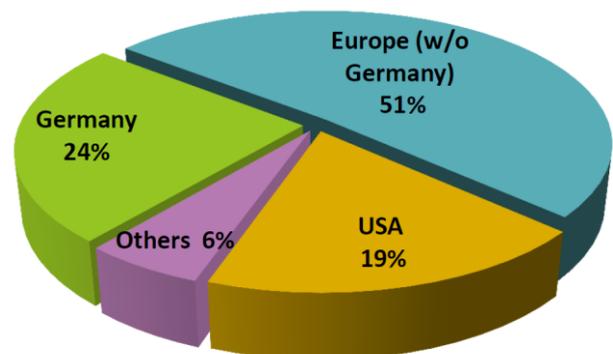


Abb.1: Geographische Verteilung der Kooperationspartner des MPS

*Fig. 1: Geographical distribution of the cooperation partners of the MPS*

*As an example, we list a few Institutes with multiple collaborations: Applied Physics Laboratory of the John Hopkins University (USA), DLR-Institut für Planetenforschung (Berlin), Instituto de Astrofísica de Canarias (Spain), Jet Propulsion Laboratory (USA), Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik (Freiburg), Observatoire de Paris (France), Rutherford Appleton Laboratory (UK).*

*The extent of the collaborations is also clearly visible in the publication statistics of the MPS. There are 124 institutes in 26 different countries (18 European and 8 outside Europe) with which at least 5 joint articles have been published during 2009/10 (based on refereed publications according to the Web of Science). 27 of these institutes are in the USA, 16 in France, 14 in Germany and 9 in the UK. The regional distribution by percentage is shown in Fig. 2.*

*The high similarity with the distribution of the project partners is obvious, but a closer look reveals also a few differences. For example, national partners are stronger represented among the project partners than they are in the publication statistics. For institutes outside*

partner ist naheliegend, allerdings zeigen sich im Detail auch einige Unterschiede. So sind nationale Partner bei der Projektkooperation stärker vertreten als sie es in der Publikationsstatistik sind, während es für Institute außerhalb Europas und der USA genau anders herum ist. Einer der Gründe dafür ist, dass es auf nationaler Ebene überproportional viele Kooperationen gibt, in deren Fokus die Instrumentenentwicklung steht, die weniger publikationsträchtig ist, während solche Kooperationen bei Instituten in den unter „Others“ erfassten Regionen eher unterrepräsentiert sind.

Abb. 3 zeigt die entsprechenden geographischen Verteilungen auch für höhere Anzahlen gemeinsamer Publikationen, also typisch einer intensiveren Zusammenarbeit. So sind es z.B. immer noch 31 Institute, mit denen mehr als 20 gemeinsame Artikel entstanden sind, wobei hier dann Institute in den USA fast gleich stark vertreten sind wie solche in Europa.

*Europe and the USA this is just the other way around. One of the reasons may be that on a national level there is a relatively large number of collaborations with clear focus on the development of instruments, which are less disposed for publications, while such collaborations are underrepresented for institutes in the regions listed under “Others”.*

*Fig. 3 shows the corresponding geographical distribution for higher numbers of joint publications, indicating typically a more intense cooperation. For example, the MPS has produced at least 20 joint articles with 31 institutes, of which there are almost as many US as European partners.*

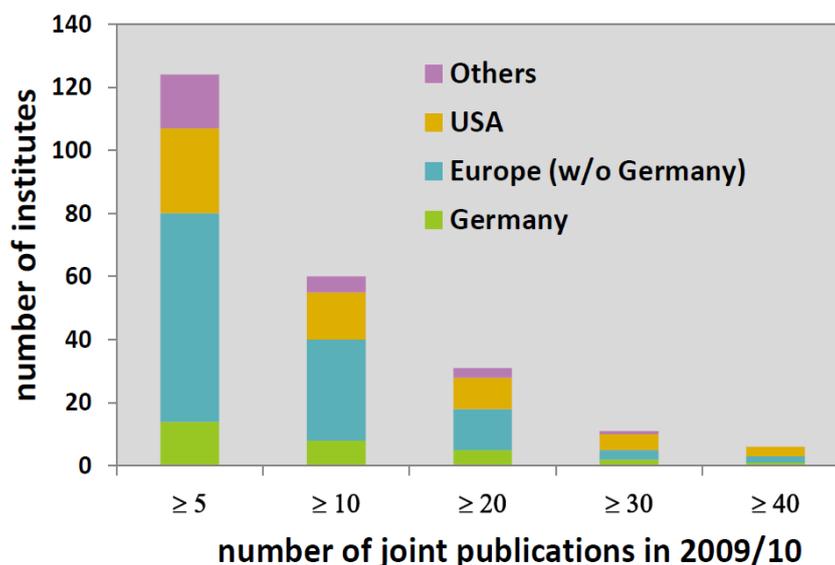


Abb. 3: Geographische Verteilung der Institute in Abhängigkeit von der Anzahl gemeinsamer Publikationen in 2009/10

*Fig. 3: Geographical distribution of the Institutes as a function of the number of joint publications in 2009/10*



Asteroid Lutetia im Blick der am MPS gebauten OSIRIS-Kamera auf der Raumsonde ROSETTA bei ihrem Vorbeiflug am 10.7.2010  
[Asteroid Lutetia as seen by the MPS built OSIRIS camera onboard the space probe ROSETTA during its flyby on July 10, 2010](#)

©ESA 2010 MPS for OSIRIS-Team MPS/UPD/LAM/IAA/RSSD/INTA/UPM/DASP/IDA

## 1.2 Planeten und Kometen

### 1.2.1 Überblick

#### Forschungsgebiet und Methoden

Die Arbeiten in Abteilung „Planeten und Kometen“ decken ein weites Spektrum an Themen aus dem Bereich der Planetenforschung ab. Wir untersuchen die Struktur und Zusammensetzung der Planeten in unserem Sonnensystem und studieren die dynamischen Prozesse, die sich in ihren verschiedenen Bereichen abspielen. Das umfasst die Gebiete tief im Inneren, die Oberflächenschichten, die Atmosphären und die Plasmaumgebung der Planeten (also das extrem dünne, elektrisch geladene Gas, das die Planeten umschließt). Im Blickpunkt stehen alle großen Planeten, aber ebenso kleine Körper wie Kometen oder Asteroiden. Wir versuchen dabei, die Gemeinsamkeiten und die Unterschiede der verschiedenen planetaren Körper herauszufinden (vergleichende Planetologie). Grundsätzlich wollen wir verstehen, wie das Sonnensystem entstanden ist und sich dann weiterentwickelt hat zu der Vielfalt verschiedenartiger Körper, die wir heute vorfinden, und die sich uns mit einer Fülle unterschiedlichster Naturscheinungen zeigt.

Unsere wichtigsten Forschungswerkzeuge sind wissenschaftliche Instrumente auf Weltraummissionen, deren Daten wir analysieren und interpretieren. Die meisten dieser Instrumente, oder zumindest wesentliche Teile von ihnen, werden hier im Institut entwickelt und gebaut. Sie beobachten die Objekte entweder aus der Entfernung, indem sie an Bord von Raumsonden um das Ziel kreisen, oder untersuchen die Objekte in-situ mit Hilfe von Sonden, die auf der Oberfläche landen. Kameras werden eingesetzt, um die Oberflächen und Atmosphären von Planeten und kleinen Körpern abzubilden. Spektrometer, die im nahen Infrarot oder im Mikrowellenbereich arbeiten, charakterisieren ihre Zusammensetzung. Andere Instrumente messen den Fluss energiereicher geladener oder neutraler Teilchen (Atome, Elektronen, Protonen) in der Umgebung von Planeten und Kometen. Bei anderen Missionen, die sich noch in der Flugphase oder in der Vorbereitung befinden, werden wir Massenspektrometer und Gaschromatographen einsetzen, um die Zusammensetzung von Staub und organischen Komponenten auf Kometen oder im Marsboden zu untersuchen. Wir bereiten uns darauf vor, auf künftigen Weltraummissionen das Innere von Mars und Mond mit Seismometern zu erkunden, die Oberflächentopographie und die Gezeitendeformationen des Merkur mit Hilfe eines Laseraltimeters zu kartieren und die Zusammensetzung der Oberfläche dieses Planeten mittels Röntgenfluoreszenz zu bestimmen. Die Daten von Instrumenten im Weltraum werden ergänzt durch Beobachtungen mit großen Teleskopen vom Erdboden.

## 1.2 Planets and Comets

### 1.2.1 Overview

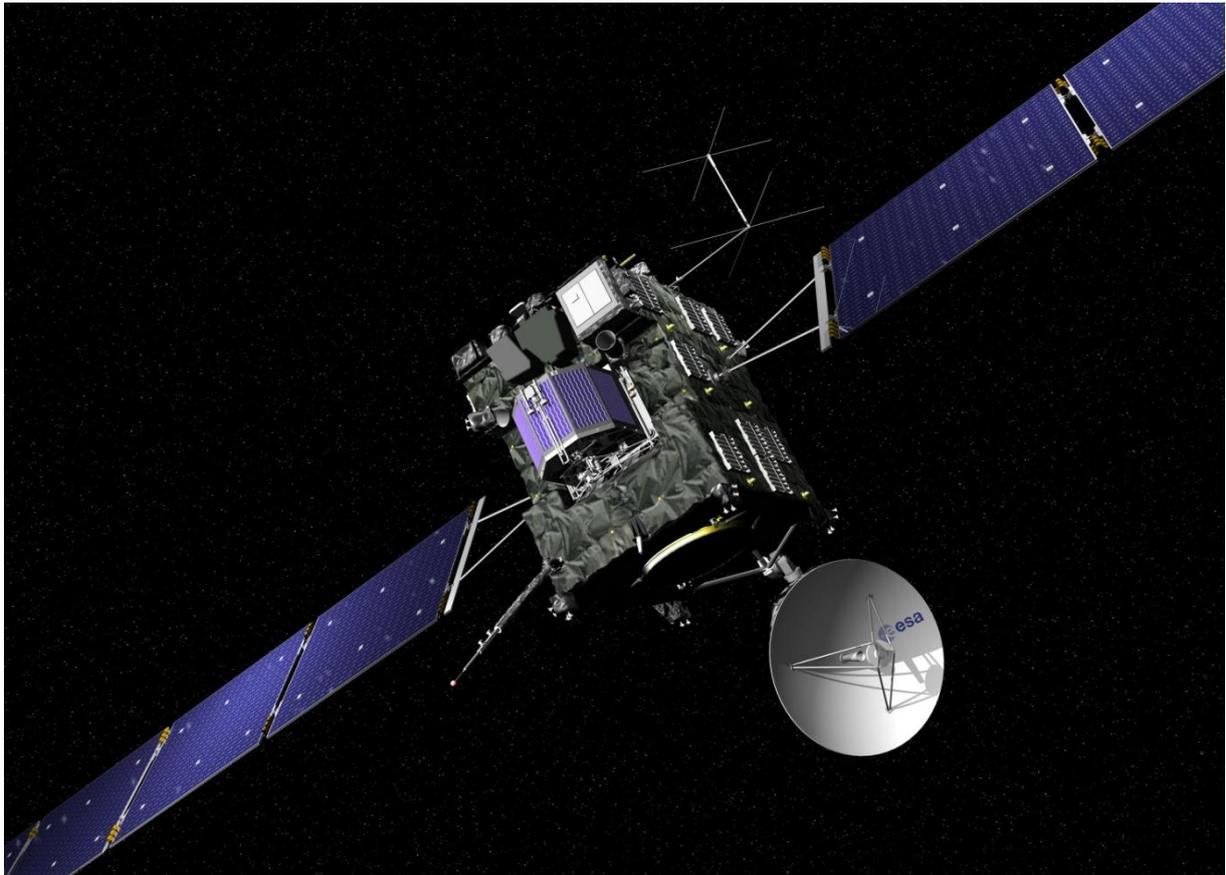
#### Field and methods of research

*Research in the department „Planets and Comets“ covers a broad spectrum of topics in planetary sciences. We study the structure and composition of planetary bodies in our solar system and the dynamical processes that operate in their various parts. This includes the deep interior, the surface layers, the atmospheres of planetary bodies and their plasma environment (i.e. the very rarified gas of electrically charged particles that surrounds the planets). Our targets are all major planets as well as minor bodies, such as comets and asteroids. We want to learn what is common and what is different between the various planetary objects (comparative planetology). The general aim is to understand how the solar system formed and later evolved into the rather diverse set of bodies that we find today and that show a wealth of different phenomena.*

*The main tools of our research are scientific instruments that fly on space missions and whose data we analyze and interpret. Most of these instruments or significant parts of them are designed and built at our institute. They use either remote sensing techniques on spacecraft that orbit a target object, or we study them in-situ on probes that land on their surfaces. We use cameras to image the surfaces and atmospheres of planets and minor bodies. Spectrometers in the near infrared or the microwave frequency range characterize their composition. Other instruments measure the flux of energetic charged and neutral particles (atoms, electrons, protons) in the vicinity of planets and comets. On missions that are flying or in preparation, we will use mass spectrometry and gas chromatography to analyze the composition of dusty and organic components of comets and of the soil on Mars. On upcoming space missions we are preparing to use seismometers that study the interior of Mars or the Moon, to map the surface topography and tidal deformation of Mercury by a laser altimeter and to use X-ray fluorescence to determine the surface composition of this planet. The data from space-born instruments are augmented by ground-based observations using large telescopes; these are mainly used to characterize comets and asteroids. Aside from interpreting observational data, we use theory and large-scale numerical simulations, for example for modeling the global circulation in the atmospheres of other planets, the dynamics of charged particles in space plasmas or the generation of magnetic fields in the electrically conducting*

den aus, vor allem zur Charakterisierung von Kometen und Asteroiden. Neben der Auswertung von Beobachtungsdaten sind theoretische Arbeiten und umfangreiche numerische Simulationen von erheblicher Bedeutung, z.B. um Modelle zu entwickeln für die globale Zirkulation in der Atmosphäre anderer Planeten, für die Dynamik geladener Teilchen von Plasmen im Weltraum oder für die Erzeugung magnetischer Felder in den elektrisch leitenden Kernen verschiedener Planeten.

*cores of different planets.*



Die Raumsonde Rosetta auf dem Weg zum Kometen "67P/Churyumov-Gerasimenko". Gut sichtbar ist die Landeeinheit Philae, die unter Leitung des MPS entwickelt wurde.

*Space probe Rosetta on its way to comet "67P/Churyumov-Gerasimenko". Clearly visible is the landing unit Philae, developed under MPS lead.*

©ESA

### Wichtige Weltraummissionen der Planetenforschung

In 2009/10 haben Instrumente mehrerer Weltraummissionen Daten geliefert, die am MPS analysiert wurden. Die Venus Monitoring Camera (VMC) der **Venus Express Mission** hat Bilder der Wolkenstrukturen aufgenommen, mit deren Hilfe die Zirkulation in der oberen Atmosphäre untersucht wird. Der Teilchendetektor ASPERA-4 auf der gleichen Mission sammelt Informationen über den Verlust von Bestandteilen der Atmosphäre an ihrer Oberseite. Das Gleiche macht ASPERA-3 bei der **Mars Express Mission**. Das MARSIS-Radar dieser Mission ermöglicht die

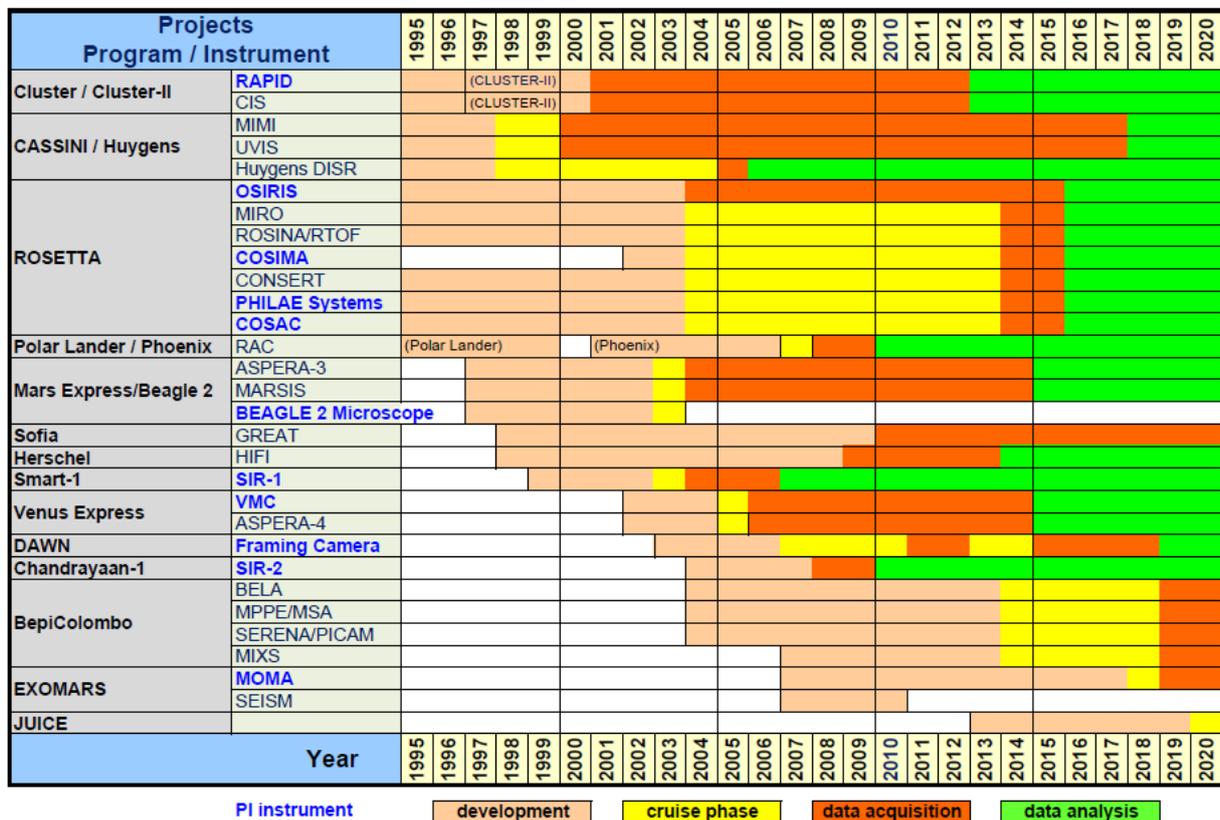
### Important space missions in planetary science

*In 2009/2010 instruments on several space missions recorded data that have been analyzed at MPS. On the **Venus Express Mission** the Venus Monitoring Camera VMC imaged cloud structures which are used to study the circulation in the upper atmosphere of Venus. The particle detector ASPERA-4 on the same mission provides information on losses from the top of the atmosphere, as is also done with its twin ASPERA-3 on the **Mars Express Mission**. The MARSIS radar on that mission allows to study the ionosphere of Mars and the structure of the upper few kilometers of the Martian*

Untersuchung der Mars-Ionosphäre und der Struktur der oberen ersten Kilometer des Marsbodens. Die Robotic Arm Camera (RAC) der 2008 in der Polarregion des Mars gelandeten **Phoenix**-Mission lieferte Nahbilder der Mineralkörner, aus denen der Marsboden besteht. Das SIR-2 Infrarot-Spektrometer auf dem indischen Mond-Orbiter **Chandrayaan-1** wurde eingesetzt, um eine Übersicht der unterschiedlichen Gesteinsarten auf der Mondoberfläche zu erstellen. Die Daten des Teilchendetektors MIMI/LEMMS auf der **Cassini**-Mission, die den Saturn seit 2004 umkreist, helfen dabei, den Einfluss der verschiedenen Saturnmonde auf das Plasma in der Magnetosphäre dieses Planeten zu verstehen. Prozesse in der Magnetosphäre der Erde werden mit Hilfe der Daten der Teilcheninstrumente RAPID und CIS, die sich an Bord der vier Satelliten der **Cluster**-Mission in Erdumlaufbahnen befinden, untersucht. Die Zusammensetzung und Struktur der Atmosphären mehrerer Planeten und Kometen stehen im Blickpunkt des im fernen Infrarot-Bereich (FIR) arbeitenden Spektrometers HIFI, das zu dem Weltraumobservatorium **Herschel** gehört, welches seit 2010 im Weltall stationiert ist. **Rosetta** befindet sich im Anflug auf einen Kometenkern, um ihn 2014/15 aus einer nahen Umlaufbahn zu beobachten und ein Landegerät auf ihm abzusetzen. Auf ihrem Weg hat die Mission die Asteroiden Steins und Lutetia passiert, wobei unser Kamerasystem OSIRIS detaillierte Abbildungen geliefert hat.

*soil. The Robotic Arm Camera RAC on the **Phoenix** mission which landed in 2008 in the polar region of Mars provided close-up images of the mineral grains that make up the Martian soil. The SIR-2 infrared spectrometer on the Indian Lunar Orbiter **Chandrayaan-1** has been used to map different rock types at the Moon's surface. Data from the particle detector MIMI/LEMMS on the **Cassini** mission, which orbits Saturn since 2004, are used to study how the plasma in Saturn's magnetosphere is affected by the different satellites of this planet. Processes in the Earth's magnetosphere are investigated with the data from the particle instruments RAPID and CIS on the four satellites of the **Cluster** mission in an Earth orbit. The far infrared (FIR) spectrometer HIFI on the space observatory **Herschel**, which is since 2010 in an orbit, is used to determine the composition and structure of the atmospheres of several planets and of comets. . The **Rosetta** mission is in its cruise phase towards a cometary nucleus in order to study it from a close orbit and to deploy a lander in 2014/15. On its way it passed the asteroids Steins and Lutetia, which have been imaged by our camera system OSIRIS. In 2009/2010 the **Dawn** mission, to which we provided two cameras, was on its way to the largest asteroids Vesta (reached in 2011) and Ceres (to be reached in 2014). For planetary missions that have been selected to fly in the future, we have been designing the MOMA instrument to study the composition of*

### Planets and Comets: Project Overview



Die Mission **Dawn**, zu der wir zwei Kameras beigesteuert haben, befand sich 2009/10 noch auf dem Weg zu dem größten Asteroiden Vesta (den sie 2011 erreicht hat) und zu Ceres (der 2014 erreicht werden soll). Für Planeten-Missionen, die für zukünftige Flüge ausgewählt wurden, haben wir für **Exomars** das MO-MIA-Instrument zur Untersuchung der Zusammensetzung des Marsbodens entwickelt und sind beteiligt an der Entwicklung des Laseraltimeters sowie zweier Teilcheninstrumente für die **BepiColombo**-Mission zum Merkur.

### Forschungsthemen der Planeten-Abteilung

- Das Innere der Planeten

Die Gruppe, die sich mit dem Planeteninneren befasst, verwendet umfängliche numerische Simulationen zur Modellierung der Konvektion und anderer dynamischer Prozesse im Innern erdähnlicher Planeten (ihren flüssigen Metallkernen) und in den Gasplaneten. Das Ziel ist insbesondere, besser zu verstehen, wie ein Planet mittels des Dynamoeffektes ein Magnetfeld erzeugt. Die entwickelten Dynamomodelle dienen dazu, die Unterschiede in Struktur und Stärke des Magnetfeldes der verschiedenen Planeten zu erklären, und, im Falle der Erde, die Details seiner räumlichen Struktur und seiner Veränderung auf kurzen und langen Zeitskalen zu verstehen. Wir bereiten uns außerdem darauf vor, die interne Struktur der Planeten Merkur und Mars zu erkunden, z.B. die Größe ihrer Eisenkerne und deren Zustand (flüssig, fest, oder teilweise flüssig) durch Messung der Gezeitenverformung mit einem Laseraltimeter (Merkur) oder durch die Aufzeichnung seismischer Wellen (Mars) zu bestimmen.

- Die Oberflächen der Planeten

Hochaufgelöste Abbildungen und Spektroskopie der Planetenoberflächen von einer Umlaufbahn aus und in-situ Erkundungen mittels Landegeräten liefern eine Fülle unterschiedlicher Daten, die uns helfen, die Zusammensetzung der Oberfläche und die Prozesse, die sie geformt haben, zu verstehen. Das erlaubt auch Rückschlüsse auf das Planeteninnere, welches durch vulkanische Materialien mit zu den Oberflächenschichten beigetragen hat, und das in Einschlagkratern in Form von Gestein aus der unteren Kruste oder aus dem Mantel freiliegt. Die Oberfläche ist aber auch durch externe Prozesse geprägt, im Fall des Mars zum Beispiel durch die Wechselwirkung mit der Atmosphäre und mit einem Wasserkreislauf, der sogar auf solch einem verhältnismäßig kalten und trockenen Planeten eine wichtige Rolle spielt.

- Die Atmosphären der Planeten

Alle großen Planeten des Sonnensystems besitzen Atmosphären, aber deren Zusammensetzung und Zirkulationsmuster unterscheiden sich deutlich.

*the Martian soil on **Exomars**, and contributed to the development of a laser altimeter and two particle instruments on the **Bepi Colombo** mission to the planet Mercury.*

### Research topics in the planetary department

- Planetary Interiors

*The planetary interior group uses large-scale numerical simulations of convection and other dynamical processes in the fluid interiors of Earth-like planets (their liquid metal cores) and of gas planets. A particular aim is to better understand how a planet generates a magnetic field by a dynamo process. Dynamo models are developed that aim at explaining the differences in structure and strength of the magnetic fields of the different planets and, in case of the Earth's magnetic field, the details of its spatial structure and its variation on short and long time scales. We also prepare to probe the internal structure of the planets Mercury and Mars, e.g. determine the size of their iron cores and their state (liquid, solid, partly liquid) by measuring tidal deformation with a laser altimeter (Mercury) and by recording seismic waves (Mars).*

- Planetary Surfaces

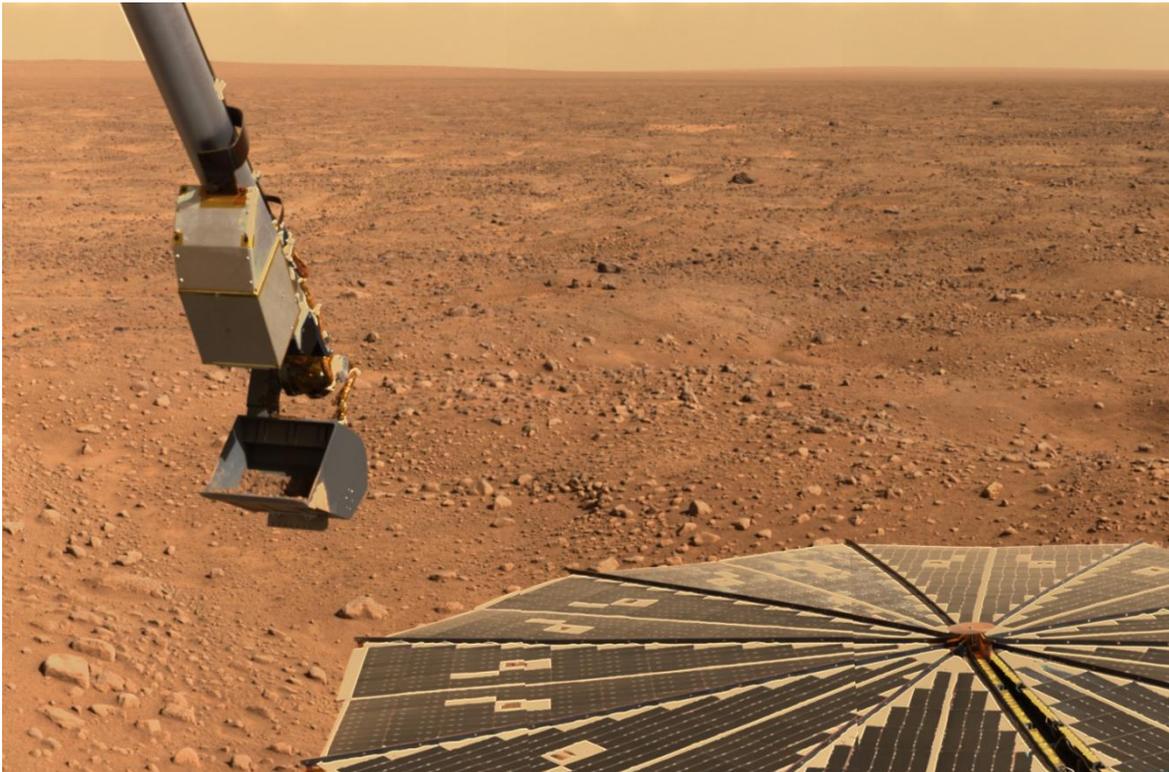
*High-resolution imaging and spectroscopy of the surfaces of planets from orbit and probing it in-situ with landers provides a wealth of different data that we use to understand what the surface layers of a planet are made of and what processes have shaped them. This has implications for the interior of a planet, which has contributed by volcanic products to the surface layers or which is exposed in the form of rocks from the lower crust or the mantle inside impact craters. The surface is also shaped by external processes, for example in the case of Mars by the interaction with the atmosphere and a water cycle, which plays an important role even on a cold and comparatively dry planet.*

- Planetary Atmospheres

*All large planets in the solar system have atmospheres, however, their composition and the atmospheric circulation pattern differ widely. Wind speeds and pattern*

Windgeschwindigkeiten und Windmuster werden gewonnen, indem man, zum Beispiel bei Venus, die Bewegung der Wolken verfolgt. Mikrowellen- und Infrarot-Spektroskopie sind äußerst empfindliche Methoden, um die Konzentration der unterschiedlichen Bestandteile der planetaren Atmosphären, einschließlich Spurengase, als Funktion der Höhe zu bestimmen. Aus diesen Daten lassen sich in Verbindung mit chemischen Reaktionsmodellen und Zirkulationsmodellen Erkenntnisse gewinnen über die Unterschiede in der Dynamik und Chemie der planetaren Atmosphären.

*are deduced from the tracking of clouds, for example in the atmosphere of Venus. Microwave and infrared spectroscopy are very sensitive tools to determine the concentration of various components of planetary atmospheres, including trace gases, as a function of altitude. In combination with chemical reaction models and circulation models, such data help to understand the differences in dynamics and chemistry of planetary atmospheres.*



Landeplatz der Phoenix-Mission auf dem Mars. Der Roboterarm trägt die am MPS entwickelte Robotic Arm Camera (RAC).

*Landung site of the Phoenix mission on Mars. The robotic arm is equipped with the Robotic Arm Camera (RAC) developed at the MPS.*

©ESA

#### • Kleine Körper

Kometen und Asteroiden sind Überbleibsel aus einer Zeit, als es die großen Planeten noch nicht gab, und ihre Erforschung liefert Hinweise, wie sich das Sonnensystem vor ca. 4,5 Milliarden Jahren gebildet hat. Wir beobachten diese Objekte mit Teleskopen von der Erde aus und mit Kameras und Spektroskopen vom Weltraum aus, um ihre physikalischen Eigenschaften und ihre chemische Zusammensetzung zu bestimmen. Ein Großteil unserer Aktivitäten auf diesem Gebiet in 2009-2010 diente der Vorbereitung auf detaillierte Untersuchungen von Vesta und Ceres durch die Dawn-Mission und des Kerns des Kometen Churyumov-Gerassimenko durch Rosetta.

#### • Minor bodies

*Comets and asteroids are left-overs from the times before the large planets existed and their study provides clues on how the solar system formed around 4.5 billion years ago. We observe these objects using ground-based telescopes and space-borne cameras and spectrometers to determine their physical properties and chemical composition. In 2009-2010 many of our activities in this field have been in preparation of the detailed studies of Vesta and Ceres by the Dawn Mission and of the nucleus of comet Churyumov-Gerassimenko by Rosetta.*

- Plasmaumgebung und Teilchen

Der Raum um die Planeten und kleinen Körper im Sonnensystem ist ausgefüllt mit energiereichen Teilchen, deren Fluss und Energieverteilung in-situ mit Teilchendetektoren auf verschiedenen Raumsonden gemessen wird. Diese Teilchen sind von unterschiedlicher Herkunft. Sie können zum Beispiel durch die Wechselwirkung einer planetaren Atmosphäre mit dem Sonnenwind, durch das Abspalten von der festen Oberfläche eines Körpers ohne Atmosphäre oder durch vulkanische Prozesse, die es auf einigen Monden gibt, entstehen. Geladene Teilchen werden von dem Magnetfeld des Planeten (so eines existiert) in einer Magnetosphäre gefangen. Mit den Teilchendaten, die bei verschiedenen Planeten, einschließlich der Erde, gewonnen wurden, untersuchen wir magnetosphärische Prozesse, die Erosion der Atmosphären von Mars und Venus durch den Sonnenwind und die Wechselwirkung des Plasmas in der Magnetosphäre des Saturn mit dessen Monden.

Die Forschungsergebnisse in 2009-2010 in jedem dieser Gebiete werden in den Kapiteln 1.2.3 - 1.2.7 an mehreren repräsentativen Beispielen vorgestellt. Das erste Kapitel 1.2.2 beschreibt als besonderen Schwerpunkt erste Ergebnisse der Herschel-Mission.

- Space plasma and particles

*The space around planets and minor bodies in the solar system is filled with energetic particles, whose flux and energy distribution is measured in-situ by particle detectors on various spacecraft. These particles have different origin. For example, they can result from the interaction of a planetary atmosphere with the solar wind, from sputtering from the solid surface of a body without atmosphere or from volcanic processes on some satellites. Charged particles are trapped by the magnetic field of a planet (when it exists) in a magnetosphere. We use particle data obtained at various planets, including Earth, to study magnetospheric processes, the erosion of the atmospheres of Mars and Venus by the solar wind, or the interaction of the plasma in Saturn's magnetosphere with satellites.*

*The research in each of these fields in 2009-2010 will be illustrated by several representative examples in the chapters 1.2.3-1.2.7. The first chapter 1.2.2 provides as a special focus topic the first results of the Herschel mission.*



Ein letzter Blick auf den Asteroiden Lutetia, nachdem ihn die Rosetta-Sonde passiert hat.  
[Last view on asteroid Lutetia after the Rosetta probe passed it.](#)

©ESA 2010 MPS for OSIRIS-Team MPS/UPD/LAM/IAA/RSSD/INTA/UPM/DASP/IDA

### 1.2.2 Erkundung des Sonnensystems mit Herschel

Nach vielen Jahren intensiver Vorbereitung war es am 14. Mai 2009 endlich soweit: Eine Ariane-V-Rakete hob vom Weltraumbahnhof Kourou in Französisch-Guyana ab, um die Weltraumsonde Herschel ins All zu befördern. Eine Woche später erreichte Herschel seinen Bestimmungsort, den L2-Punkt (Abb. 1). Dieser liegt auf der sonnenabgewandten Seite, 1,5 Millionen Kilometer von der Erde entfernt. Mit einem Durchmesser von 3,5 Metern ist Herschel das größte Weltraumteleskop und bildet die vierte „Cornerstone Mission“ der ESA. Die nach dem Entdecker der Infrarotstrahlung benannte Sonde trägt drei wissenschaftliche Experimente, die den fernen Infrarotbereich (FIR) von 57  $\mu\text{m}$  bis 672  $\mu\text{m}$  spektroskopisch und photometrisch vermessen: HIFI (Heterodyne Instrument for the Far Infrared), PACS (Photodetector Array Camera and Spectrometer) und SPIRE (Spectral and Photometric Imaging Receiver). Die Detektoren dieser Instrumente müssen auf Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt gehalten werden. Die zu diesem Zweck mitgeführten mehr als 2.000 Liter flüssiges Helium dürften bis Frühjahr 2013 reichen.

Herschels hohe Empfindlichkeit und sein Betrieb im Weltall ermöglichen eine Vielzahl neu- und einzigartiger Beobachtungen. Die hoch aufgelöste Vermessung der FIR-Hintergrundstrahlung erlaubt Rückschlüsse auf die Strukturbildung in der frühen Anfangszeit des Universums. Daten von fernen Infrarotgalaxien liefern Informationen über Sternentstehungsraten und Galaxienentwicklung auf kosmologischen Zeitskalen. Herschel-Messungen enthüllen die Physik und Chemie des interstellaren Mediums, der Kinderstube von Sternen, und enträtseln die Mechanismen der Entstehung und Entwicklung von Sternen und Planeten. Das Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung hat sich im Rahmen des HssO-Programms (Herschel Solar System Observations) insbesondere dem letzten Punkt gewidmet.

#### Das HssO-Beobachtungsprogramm

Das HssO-Programm wird im Rahmen eines Konsortiums von mehr als 50 Wissenschaftlern aus 11 Ländern unter Leitung des MPS durchgeführt. Insgesamt stehen knapp 300 Stunden zur Beobachtung des Sonnensystems zur Verfügung, von denen bis Ende 2010 zwei Drittel in Anspruch genommen wurden. Die enorme Menge der dabei gewonnenen Daten konnte bisher erst zu einem Bruchteil ausgewertet werden.

HssO konzentriert sich darauf, das Vorkommen von Wasser und seine Rolle im Sonnensystem zu untersuchen [Hartogh et al., 2009]. Aufgrund des Wassergehalts der Atmosphäre sind solche Untersuchungen von der Erdoberfläche aus nur eingeschränkt möglich.

### 1.2.2 Exploration of the solar system with Herschel

*Finally, after several years of preparation, the day had come: An Ariane V rocket was launched at May 14th, 2009 from the space center Kourou in French-Guyana to lift the Herschel space probe into its orbit. After one week Herschel arrived at its destination, the L2 point (Fig. 1). This point is located in a distance of 1.5 million km from Earth, opposite to the Sun. With a diameter of 3.5m Herschel is the largest space telescope ever and constitutes the fourth “cornerstone mission” of ESA. The probe, named after the discoverer of the infrared radiation, carries three science experiments, surveying the far infrared range (FIR) from 57  $\mu\text{m}$  to 672  $\mu\text{m}$  by spectroscopic and photometric methods: HIFI (Heterodyne Instrument for the Far Infrared), PACS (Photodetector Array Camera and Spectrometer) und SPIRE (Spectral and Photometric Imaging Receiver). The detectors of these instruments have to be cooled to a temperature close to absolute zero. The 2000 liters of helium carried along for this purpose will be sufficient until spring 2013.*

*Herschel's high sensitivity and the fact that it is operated from space offer a variety of new and unique observations. The high resolution measurement of the FIR background radiation allows conclusions about the structure of the early universe. Data from far infrared galaxies provide information about the formation rate of stars and the development of galaxies on cosmological time scales. Herschel's measurements reveal the physics and chemistry of the interstellar medium, the nursery of stars, and unravel the mechanisms of the formation and development of stars and planets. The Max Planck Institute for Solar System Research has focused particularly on the last topic, within the frame of the HssO programme (Herschel Solar System Observations).*

#### The HssO observation program

*The HssO program is carried out by a consortium comprising more than 50 scientists from 11 different countries, led by the MPS. In total nearly 300 hours are available for the observation of the solar system. Up to end 2010 2/3 of them have been used. Only a small fraction of the huge amount of data gathered could be analyzed so far.*

*The occurrence of water and its role in the solar system is the major focus of the HssO investigations [Hartogh et al., 2009]. Corresponding observations from ground face strong limitations due to the water content of the atmosphere. Water is ubiquitous in the so-*

Wasser ist im Sonnensystem allgegenwärtig, etwa als Gas in den Planeten- und Kometenatmosphären, gebunden im Gesteinsmantel oder als Eis auf den Oberflächen von Planeten, Monden, Kometen und kleineren Partikeln. In den Atmosphären spielt Wasser eine wichtige Rolle für die dort ablaufenden chemischen Prozesse.

*lar system, e.g. gaseous in the atmospheres of planets and comets, bounded in the rocky mantles or as ice on the surfaces of planets, moons, comets or smaller particles. In the atmospheres water plays a major role for the chemical processes going on there.*

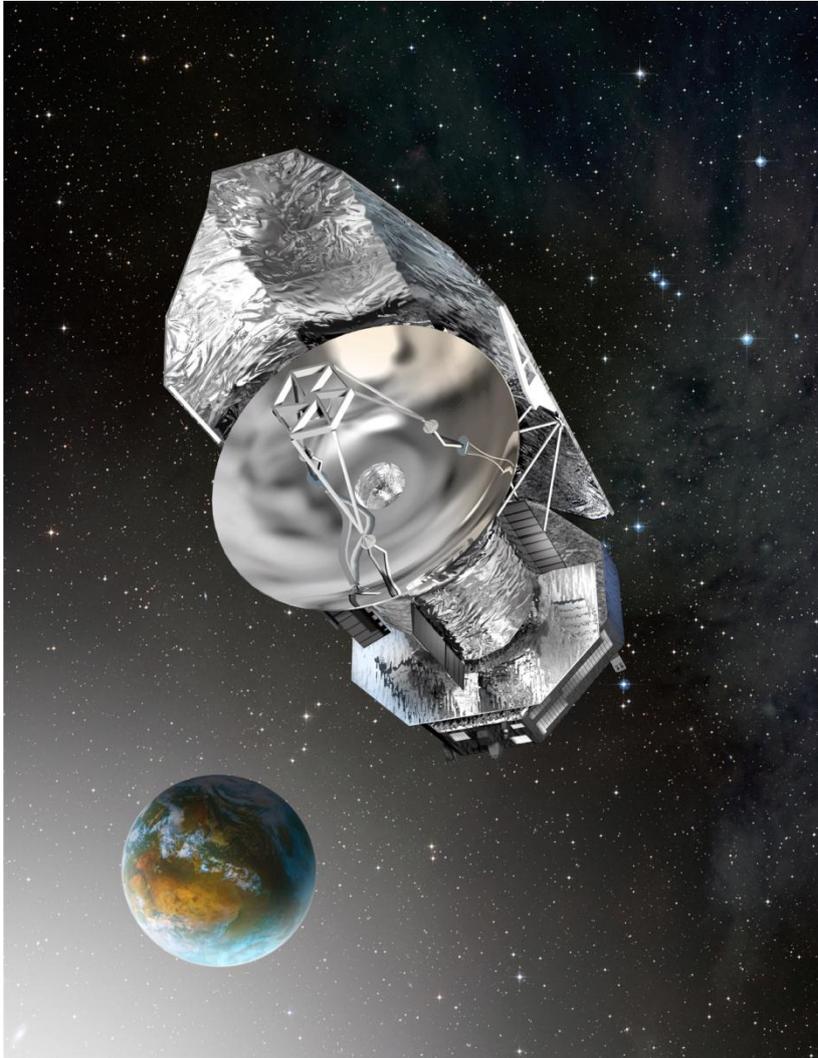


Abb. 1: Das Weltraumteleskop Herschel auf dem Weg zu seiner 1,5 Millionen Kilometer von der Erde entfernten Beobachungsposition.

*Fig. 1: The space telescope Herschel on the way to its observation position in a distance of 1.5 million km from Earth. ©ESA*

Das Verhältnis von Deuterium (D), einem Wasserstoffisotop mit zwei Neutronen, zu „normalem“ Wasserstoff (H) ist ein wichtiges Werkzeug, um die Herkunft von Wasser zu entschlüsseln (siehe Abb. 2). Im HssO-Programm wird das (D/H)-Verhältnis sowohl in den Planeten- als auch in den Kometenatmosphären mit bisher unerreichter Genauigkeit bestimmt. Im Zusammenspiel mit älteren Daten werden damit Rückschlüsse auf das (D/H)-Verhältnis in den protoplanetaren Scheiben und die spätere Umverteilung von Wasser möglich. Zum ersten Mal misst Herschel auch das (D/H)-Verhältnis eines Kometen der Jupiterfamilie, um zu klären, ob diese als Quelle für das Wasser auf der Erde in Frage kommen.

*The ratio of deuterium (D), an hydrogen isotope with two neutrons, and "normal" hydrogen(H) is an important tool to identify the origin of water (see. Fig. 2). As part of the HssO program the (D/H) ratio in planetary and cometary atmospheres will be determined with unprecedented accuracy. Combining this information with existing data allows conclusions about the (D/H) ratio in the protoplanetary disc and about later redistribution of water. For the first time Herschel will determine the (D/H) ratio of a comet out of the Jupiter family of comets in order to find out if this is a potential source for the water on Earth.*

HssO wird erstmalig Auskunft geben über die genaue räumliche Verteilung von Wasserdampf in den Strato-

*For the first time ever HssO will provide information about the precise spatial distribution of water vapor*

sphären von Uranus, Neptun, Jupiter, Saturn und des Saturnmondes Titan. Damit lassen sich die möglichen Quellen wie etwa Kometen oder interplanetarer Staub besser eingrenzen. Bei Saturn kommt auch der Mond Enceladus in Frage, der große Mengen Wasserdampf ausstößt. Beobachtungen der Marsatmosphäre runden das Programm ab. Hier sind die saisonalen Schwankungen des Wassergehalts der Atmosphäre und ihr Einfluss auf die dort ablaufenden chemischen Prozesse sowie die Bedeutung von „Escape-Prozessen“ für die Atmosphäre von besonderem Interesse.

*in the stratospheres of Uranus, Neptune, Jupiter, Saturn and Saturn's moon Titan. Based on this it is possible to constrain the potential sources, e.g. comets or inter-planetary dust. For Saturn, the moon Enceladus, ejecting large amounts of water vapor, is also a potential candidate. Observations of the atmosphere of Mars complement the program. In this case seasonal variations of the atmospheric water content and its influence on the chemical processes there as well as the relevance of escape processes for the atmosphere are of particular interest.*

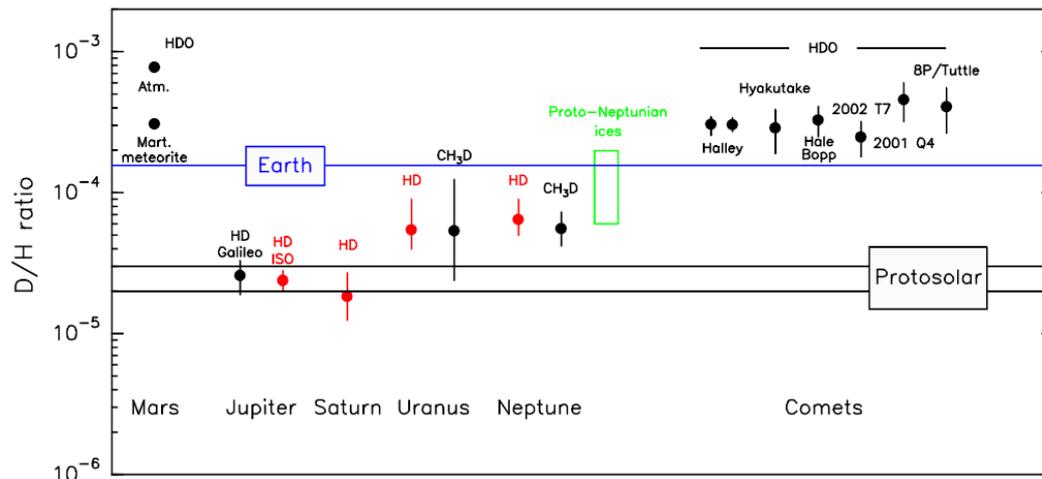


Abb. 2: Das Verhältnis D/H von schwerem (D) zu normalem Wasserstoff (H) für verschiedene Körper im Sonnensystem. Die Werte wurden an Wasser (HDO), molekularem Wasserstoff (HD) oder Methan (CH<sub>3</sub>D) bestimmt. Jupiter und Saturn weisen die Werte des protosolaren Nebels auf, alle anderen Planeten und die Kometen zeigen eine Anreicherung von D, die unterschiedliche Ursachen haben kann. Uranus und Neptun etwa haben einen hohen Eis-Anteil, der einen erhöhten D/H-Wert aufweist. Marsmeteorite zeigen einen doppelt so hohen Wert wie die Erde, die Mars-Atmosphäre ist durch Escape-Prozesse sogar um den Faktor 5 stärker angereichert.

*Fig. 1: The ratio D/H of heavy (D) to normal (H) hydrogen for different objects in the solar system. The values have been determined for water (HDO), molecular hydrogen (HD) or methane (CH<sub>3</sub>D). Jupiter and Saturn have the same values as the protosolar nebula, all other planets and the comets exhibit an accumulation of D. This may have different causes. For instance, Uranus and Neptune have a high share of ice, and this has a high (D/H) ratio. Mars meteorites show twice the value observed on Earth and the ratio for the Mars atmosphere is increased even by a factor of 5 due to escape processes.*

### Erste Ergebnisse I: Die Kometen Garradd, Wild2 und Christensen

Das erste Objekt im Sonnensystem, das Herschel beobachtete, war C/2008 Q3 (Garradd), ein Komet mit einer Umlaufzeit von 190.000 Jahren und einem Perihel (kürzester Abstand zur Sonne) von 270 Millionen km. Im Juli 2009 vermaß HIFI drei Wasser-Spektrallinien (bei 557 GHz, 1113 GHz und 1669 GHz) aus einer Entfernung von 285 Millionen km. Die beiden höheren Frequenzen wurden zum ersten Mal beobachtet.

Eine wichtige Kenngröße für die Gas- und Staubwolke (Koma), die einen Kometen umgibt, ist die Wasser-

### First results I: The comets Garradd, Wild2 and Christensen

*The C/2008 Q3 (Garradd), a comet with a period of 190 000 years and a perihelion (shortest distance to the Sun) of 270 million km, was the first object in the solar system observed by Herschel. In July 2009 HIFI measured three spectral lines of hydrogen (at 557 GHz, 1113 GHz and 1669 GHz) out of a distance of 285 million km. The both upper frequencies have been observed for the first time.*

*The water production rate is an important parameter for the cloud of gas and dust (coma) surrounding a*

Produktionsrate. Im Prinzip kann diese über die Linienstärke bestimmt werden. Dafür muss jedoch bekannt sein, welche Prozesse zur Anregung der Strahlung beitragen. Ein Großteil der Gaswolke ist aber so dünn, dass kaum noch Stöße zwischen den Wassermolekülen stattfinden und darum andere, komplexere Prozesse die Anregung dominieren. Die Verhältnisse der drei gemessenen Linienstärken erlauben es nun erstmals, die entwickelten Anregungsmodelle direkt zu testen. Insgesamt ergaben sich Abweichungen von weniger als 15 % zwischen Modell und den Beobachtungen. Die so ermittelten Wasser-Produktionsraten des Kometen nahmen während der achttägigen Beobachtung von  $2,8 \times 10^{28}$  Moleküle/s auf  $1,8 \times 10^{28}$  Moleküle/s ab [Hartogh et al., 2010b].

Die von HIFI im Februar 2010 aus einer Entfernung von 135 Millionen km beobachteten Wasserlinien von 81P/Wild, einem Kometen mit einer Periode von nur 6,4 Jahren und einem Perihel von 240 Millionen km, zeigen eine Produktionsrate von  $10^{28}$  Molekülen/s und bestätigen einmal mehr die Anregungsmodelle [de Val Borro et al., 2010]. Dies ist eine wesentliche Voraussetzung, um in einem nächsten Schritt das D/H-Verhältnis möglichst exakt zu bestimmen.

Der Komet C/2006 W3 (Christensen) wurde mit den Instrumenten PACS und SPIRE vermessen. C/2006 W3 ist ein langperiodischer Komet mit 140 000 Jahren Umlaufzeit, der sein Perihel von fast 470 Millionen km im Juli 2009 erreichte. Während bodengebundene Beobachtungen des Hydroxylradikals (OH) im Zeitraum Januar bis März 2009 eine Wasser-Produktionsrate von ca.  $5 \times 10^{28}$  Molekülen/s ermittelten, konnten die Herschel-Messungen im November 2009 trotz intensiver Suche kein Wasser detektieren. Damit dürfte die Wasser-Produktionsrate niedriger als die untere Messgrenze von  $6 \times 10^{27}$  Molekülen/s gewesen sein. Dies ist erstaunlich, da der Komet in beiden Fällen den gleichen Abstand zur Sonne hatte. Gleichzeitig durchgeführte bodengebundene Messungen zeigten dagegen eine weiterhin hohe Kohlenmonoxid-Produktion, sodass sich ein außergewöhnlich hohes Verhältnis CO/H<sub>2</sub>O von mehr als 4,5 ergab. Abb. 3 zeigt die Staubkoma des Kometen in den Wellenlängen 70  $\mu\text{m}$  und 160  $\mu\text{m}$ . Für Staubkörner aus Kohlenstoff bzw. Olivin wurde eine Produktionsrate von 850 kg/s und 920 kg/s bestimmt [Bockelée-Morvan et al., 2010].

### Erste Ergebnisse II: Die Planeten Mars und Neptun

Im April 2010 wurde Mars mit dem HIFI-Instrument in einem von der Erde aus nicht zugänglichen Wellenlängenbereich beobachtet, um nach bisher nicht gefundenen Spurenelementen zu suchen. Gleichzeitig wurden Kohlenmonoxidspektren gemessen, um so das vertikale Temperaturprofil zu bestimmen. Dieses ist für die weiteren Auswertungen von großer Bedeutung. Dabei stellte sich heraus, dass die mittlere Temperatur der Marsatmosphäre etwa 10 bis 15 Grad kälter war

*comet. Basically this parameter can be determined by the strengths of the spectral lines. However, for this the processes contributing to the radiation have to be known. But the bulk of the gas cloud is very tenuous. Hence there are almost no collisions between the water molecules and other, more complex excitation processes are dominant. The ratios of the strengths of the three measured lines allow now for the first time to test directly the excitation models developed. Overall the deviations turned out to be less than 15% between the model and the observations. The so determined water production rates of the comet decreased from  $2.8 \times 10^{28}$  molecules/s to  $1.8 \times 10^{28}$  molecules/s during the eight days of observation [Hartogh et al., 2010b].*

*The water lines of 81P/Wild, a comet with a period of just 6.4 years and a perihelion of 240 million km, observed by HIFI in February 2010 from a distance of 135 million km, show a production rate of  $10^{28}$  molecules/s and confirm the excitation models once again [de Val Borro et al., 2010]. This is an essential prerequisite to determine the D/H ratio in a next step as accurate as possible.*

*C/2006 W3 (Christensen), a comet with a long period of 140 000 years, who reached its perihelion of almost 470 million km in July 2009, was investigated with the instruments PACS and SPIRE. Ground based observations of the hydroxyl radical (OH) during the period January to March 2009 detected a water production rate of about  $5 \times 10^{28}$  molecules/s. Herschel measurements in November 2009 did not detect any water at all, despite intensive search. This indicates that the water production rate was below the detection limit of  $5 \times 10^{27}$  molecules/s. This is surprising, based on the fact the distance to the Sun was the same in both cases. On the other hand, ground based measurements done at the same time revealed a still high production of carbon monoxide. This results in an exceptional high CO/H<sub>2</sub>O ratio of 4.5. The dust coma of the comet observed at wavelengths of 70  $\mu\text{m}$  and 160  $\mu\text{m}$  is displayed in Fig. 3. Production rates of 850 kg/s and 920 kg/s have been determined for dust particles of carbon and olivine, respectively [Bockelée-Morvan et al., 2010].*

### First results II: Planets Mars and Neptune

*Mars was observed by the HIFI instrument in April 2010 in a wavelength range that is not accessible from ground, to search for trace elements not detected so far. At the same time spectra of carbon monoxide were measured to determine the vertical temperature profile. This is crucial for the further analysis. It was found that the average temperature of the Martian atmosphere is colder by about 10 to 15 degrees than predicted by current atmospheric models for the*

als heutige Atmosphärenmodelle dies für die entsprechende Mars-Jahreszeit (nördlicher Frühling) voraus-sagen [Hartogh et al., 2010c,a].

*corresponding season (northern spring) [Hartogh et al., 2010c,a].*

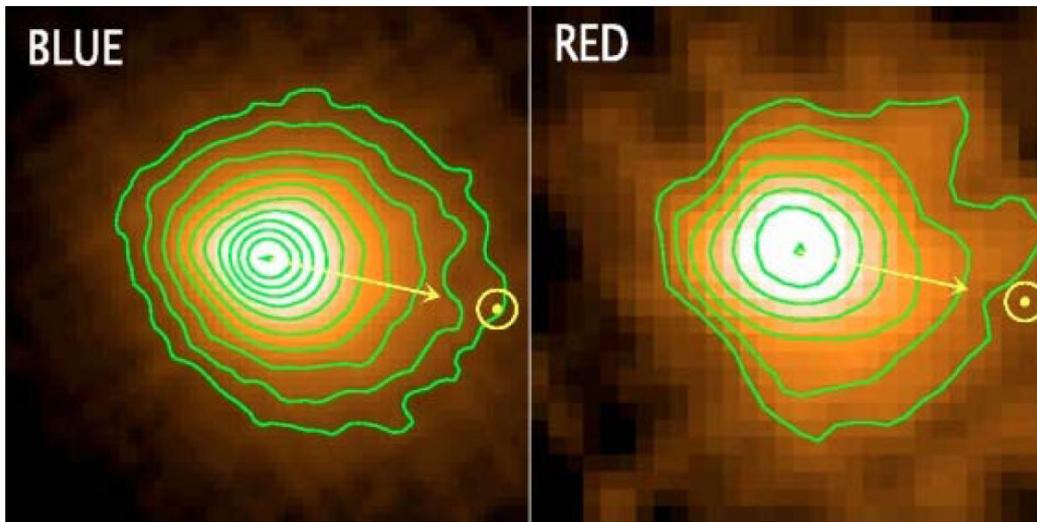


Abb. 3: PACS-Bilder der Staubkoma des Kometen Christensen, aufgenommen im Wellenlängenbereich von 70  $\mu\text{m}$  (links) und 160  $\mu\text{m}$  (rechts). Der gelbe Kreis und der zugehörige Pfeil zeigen die Richtung der Sonne an. Die grünen Konturlinien markieren den Intensitätsabfall in logarithmischen Stufen von 0,1. Die Abmessungen des Bildes betragen 160 000 km x 160 000 km.

*Fig. 3: PACS images of the dust coma of comet Christensen, observed at wavelengths of 70  $\mu\text{m}$  (left) and 160  $\mu\text{m}$  (right). The direction to the Sun is indicated by the yellow circle and the corresponding arrow. The green contour lines mark the intensity decrease in logarithmic steps of 0.1. The area shown in the image is 160 000 km x 160 000 km*

HIFI versuchte, zunächst Wasserstoffperoxid ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) bei einer Frequenz von 1847 GHz aufzuspüren. Wasserstoffperoxid spielt eine wichtige Rolle in der Chemie der Marsatmosphäre und steht zudem in dem Verdacht, durch seine sterilisierende Wirkung Spuren früheren Lebens vernichtet zu haben. Die Verbindung entsteht durch photochemische Reaktionen und elektrostatische Entladungsprozesse in der Atmosphäre. Chemiemodelle sagen eine Volumenkonzentration von 5 bis 15 ppb für den nördlichen Frühling voraus. Trotz einer Empfindlichkeit von nur 2 ppb konnte HIFI aber kein Wasserstoffperoxid messen.

*Initially HIFI searched for hydrogen peroxide ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) at a frequency of 1847 GHz. Hydrogen peroxide plays an important role for the chemistry of the Martian atmosphere and is suspected to have eliminated traces of earlier life due to its sterilizing effect. The molecule is generated by photochemical reactions and electrostatic discharge processes in the atmosphere. Chemistry models predict a volume concentration of 5 to 15 ppb for the northern spring. But HIFI was not able to detect hydrogen peroxide, despite a sensitivity of 2 ppb.*

In der Vergangenheit wurde bereits mehrfach vergeblich versucht, Chlorwasserstoff (HCl) in der Marsatmosphäre nachzuweisen, da es als Indikator für vulkanische Aktivität gilt. HIFI-Messungen bei 1876 GHz konnten die Empfindlichkeit der bisherigen Infrarotmessungen von 2 ppb um den Faktor 10 verbessern, doch das Ergebnis ist nach wie vor negativ.

*Several attempts have been made in the past to identify hydrogen chloride (HCl) in the atmosphere of Mars, but without success. This element is considered to be an indicator for volcanic activity. HIFI measurements at 1876 GHz did improve the sensitivity of 2 ppb of earlier infrared measurements by a factor of ten, but still without a positive result.*

Molekularer Sauerstoff ( $\text{O}_2$ ) hingegen konnte dank des guten Signal-zu-Rauschverhältnisses zum ersten Mal im Submillimeter-Wellenlängenbereich nachgewiesen werden [Hartogh et al., 2010c]. Von der Erde aus ist Sauerstoff bestenfalls bei einer günstigen Planetenkonstellation Erde/Mars messbar. Zuletzt ist dies 1972 gelungen. Damals wurde ein Volumenanteil von 1,3

*Due to the good signal-to-noise ratio molecular oxygen ( $\text{O}_2$ ) could be detected for the first time in the sub-mm wavelength range [Hartogh et al., 2010c]. From ground oxygen can be measured at a favorite constellation of Earth and Mars only. This was successful in 1972 for the last time. At that time a volume share of 0.13% had been determined. The HIFI*

Promille ermittelt, der durch die HIFI-Beobachtungen mit 1,4 Promille bestätigt wird. Aktuelle photochemische Modelle der Marsatmosphäre können, vor allem durch Photolyse von Kohlendioxid und von Wasserdampf, nur einen Bruchteil dieses Wertes erklären. Ein Großteil des Sauerstoffs muss daher schon sehr lange in der Marsatmosphäre vorhanden sein und stammt wahrscheinlich aus Zeiten, in denen es dort noch mehr Wasser gab. Nach so langer Zeit sollte sich der molekulare Sauerstoff nahezu gleichmäßig verteilt haben und seine Konzentration, wie auch in der Erdatmosphäre, nur wenig von der Höhe abhängen. Abbildung 4 vergleicht das gemessene Sauerstoffspektrum mit den Ergebnissen, die das Modell unter Annahme eines konstanten Höhenprofils liefert. Die sichtbaren Differenzen deuten jedoch darauf hin, dass der Sauerstoffgehalt seinen höchsten Wert in Bodennähe erreicht und nach oben hin stark abnimmt. Zurzeit wird diese Diskrepanz zwischen Theorie und Messung intensiv untersucht.

*result of 0.14% confirms this value. Current photochemical models of the Martian atmosphere are only able to explain a small fraction of this value, mainly by photolysis of carbon dioxide and water vapor. Therefore the major portion of the oxide has to exist in the atmosphere of Mars for a very long time and will probably originate from an earlier phase where more water was available on Mars. After such a long time the molecular oxygen is expected to be distributed uniformly and its concentration should, same as for Earth, not vary significantly with height. Fig. 4 compares the measured spectra of oxygen with the results of the model based on the assumption of constant height profile. But the apparent differences indicate that the oxygen content has a maximum close to the surface and strongly decreases with height. This deviation of theory and measurement is currently analyzed intensively.*

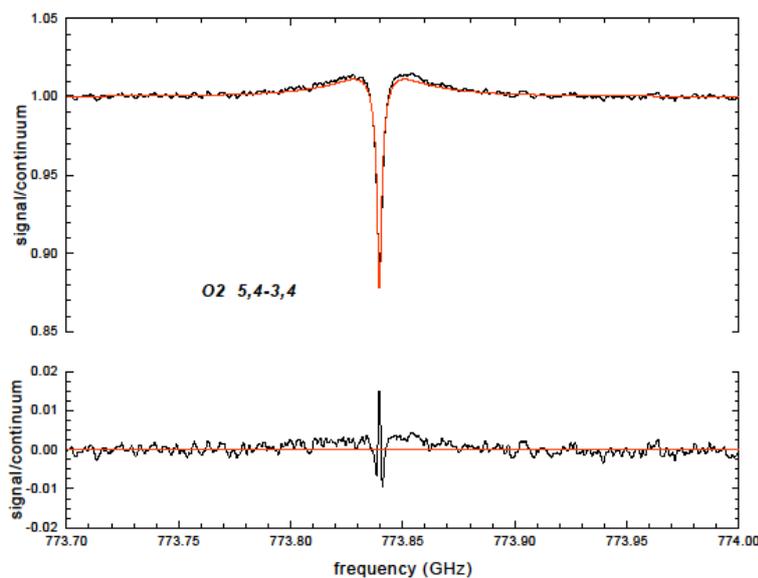


Abb. 4: Spektrum molekularen Sauerstoffs in der Marsatmosphäre. Die schwarzen Linien stellen die Messung und die roten Linien die Simulation für ein konstantes Höhenprofil von 1400 ppm dar. Der untere Teil zeigt die Differenz zwischen Messung und Modell.

*Fig. 4: Spectrum of molecular oxygen in the Martian atmosphere. The black curve represents the measurement data, and the red curve the simulation results for a constant height profile of 1400 ppm. The bottom part shows the deviation between measurement and model.*

Bei den PACS-Beobachtungen der Neptun-Atmosphäre im Oktober 2009 sind insbesondere der hohe Methan- und Kohlenmonoxidgehalt der Stratosphäre bemerkenswert. Das Methan kommt aus der tieferen Troposphäre und muss auf seinem Weg in die Stratosphäre die mit  $-217^{\circ}\text{C}$  extrem kalte Tropopause überwinden. Dabei kondensieren über 99 % des Methans und fallen als Methanschnee zurück in tiefere Regionen. Tatsächlich enthält die Stratosphäre jedoch mit 7,5 % ähnlich viel Methan wie die Troposphäre, und damit zehnmals mehr als erwartet. Man hat jedoch unlängst ungewöhnlich hohe Temperaturen in der Tropopause der Südpolarregion beobachtet. Diese könnte möglicherweise als Schlupfloch für das Methan dienen und die Diskrepanz erklären.

*Most remarkable result of the observation of the atmosphere of Neptune in October 2009 by PACS is the high share of methane and carbon monoxide in the stratosphere. The methane originates from the deeper troposphere and has to pass on its way to the stratosphere the tropopause with its extreme cold temperature of  $-217^{\circ}\text{C}$ . This causes more than 99% of the methane to condensate and to fall back as methane snow to the deeper regions. But it was actually found that the stratosphere has with 7.5% a methane share close to that of the troposphere. This is a factor of ten higher than expected. However, recent observations revealed exceptional high temperatures in the tropopause of the southern polar region. This might be a potential gateway for the methane and thus explain the discrepancy.*

Die Kondensationstemperatur von Kohlenmonoxid ist so niedrig, dass die Tropopause keine Barriere darstellt. Überraschend ist jedoch, dass der CO-Gehalt der Stratosphäre doppelt so hoch ist wie der der Troposphäre. Da eine photochemische Produktion von CO in der Stratosphäre aufgrund von Sauerstoffmangel ausgeschlossen werden kann, bleiben als Erklärung nur Quellen außerhalb des Planeten. Die Auswertung der vertikalen CO-Verteilung und Computersimulationen der Neptunstratosphäre zeigen, dass ein etwa 200 Jahre zurückliegender Kometeneinschlag die wahrscheinlichste Erklärung ist [Lellouch et al., 2010].

*For carbon monoxide with its very low condensation temperature the tropopause is no barrier. But it is surprising that the CO concentration in the stratosphere turned out to be twice as high as in the troposphere. Due to a lack of oxygen the photochemical generation of CO in the stratosphere can be excluded. Only explanations remaining are exterior sources. The analysis of the vertical CO distribution and simulations of the stratosphere of Neptune indicate the impact of a comet 200 years ago to be the most likely explanation [Lellouch et al., 2010].*

### Ausgewählte Veröffentlichungen

#### *Selected publications*

Hartogh, P., E. Lellouch, J. Crovisier, et al.: Water and related chemistry in the solar system. A guaranteed time key programme for Herschel. *Planetary and Space Science* 57, 1596-1606(2009), doi: 10.1016/j.pss.2009.07.009

Hartogh, P., J. Crovisier, M. de Val-Borro, et al.: HIFI observations of water in the atmosphere of comet C/2008 Q3 (Garradd). *Astronomy & Astrophysics* 518, L150 (2010b), doi: 10.1051/0004-6361/201014665

de Val-Borro, M., P. Hartogh, J. Crovisier, et al.: Water production in comet 81P/Wild 2 as determined by Herschel/HIFI. *Astronomy & Astrophysics* 521, L50 (2010), doi: 10.1051/0004-6361/201015161

Bockelée-Morvan, D., P. Hartogh, J. Crovisier, et al.: A study of the distant activity of comet C/2006 W3 (Christensen) with Herschel and ground-based radio telescopes. *Astronomy & Astrophysics* 518, L149 (2010), doi: 10.1051/0004-6361/201014655

Hartogh, P., M. I. Blecka, C. Jarchow, et al.: First results on Martian carbon monoxide from Herschel/HIFI observations. *Astronomy & Astrophysics* 521, L48 (2010a), doi: 10.1051/0004-6361/201015159

Hartogh, P., C. Jarchow, E. Lellouch, et al.: Herschel/HIFI observations of Mars: First detection of O<sub>2</sub> at submillimetre wavelengths and upper limits on HCl and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. *Astronomy & Astrophysics* 521, L49 (2010c), doi: 10.1051/0004-6361/201015160

Lellouch, E., P. Hartogh, H. Feuchtgruber, et al.: First results of Herschel-PACS observations of Neptune. *Astronomy & Astrophysics* 518, L152 (2010), doi: 10.1051/0004-6361/201014600

## 1.2.3 Das Innere der Planeten

## 1.2.3 Planetary interiors

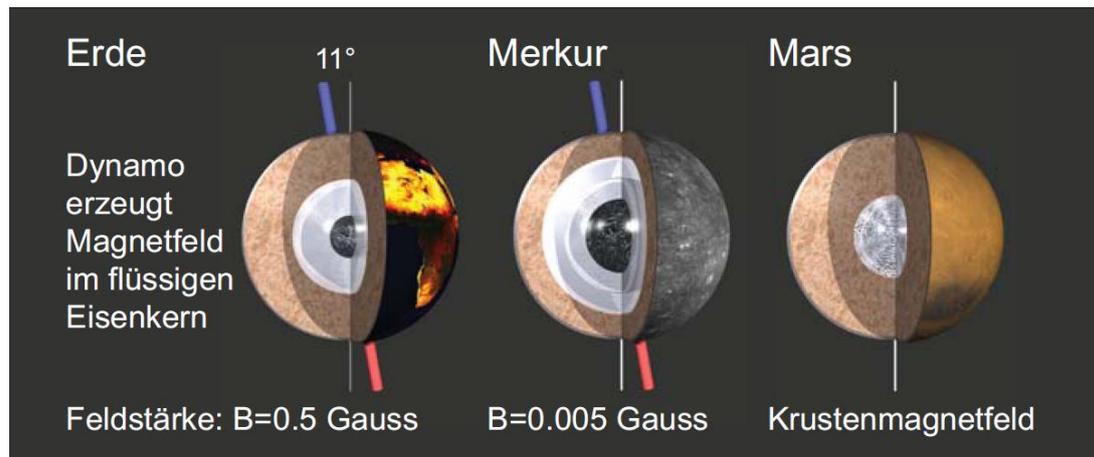


Abb. 1: Wahrscheinlicher innerer Aufbau von Erde, Merkur und Mars mit Kruste, Gesteinsmantel und flüssigem Eisenkern. Wie die Erde besitzt wohl auch Merkur im Zentrum zudem einen festen Eisenkern. Der Dynamo von Mars hat vor über 4 Milliarden Jahren aufgehört zu arbeiten, doch hinterließ eine starke Krustenmagnetisierung.

*Fig. 1: Likely inner structure of Earth, Mercury and Mars with crust, rocky mantle and liquid iron core. Like Earth, Mercury may have a solid iron core in its center. Mars' dynamo stopped operating more than 4 billion years ago but left a strong crustal magnetization.*

Die Erforschung des Inneren der Planeten ist ein wichtiges Anliegen des MPS (siehe Abb. 1). Dabei verwenden die Wissenschaftler recht unterschiedliche Werkzeuge: Theoretische Überlegungen und aufwendige Computersimulationen helfen, die Dynamik von Gesteinsmänteln und Eisenkernen zu verstehen. Ein besonderer Forschungsschwerpunkt liegt dabei auf dem Dynamoprozess, der die planetaren Magnetfelder erzeugt. Diese Magnetfelder liefern wertvolle Informationen über die inneren Vorgänge, die sonst vor uns verschlossen blieben. Computersimulationen des Dynamomechanismus liefern hier das notwendige Bindeglied, das die beobachteten Felder mit diesen Vorgängen verknüpft. Abschnitt 1 bietet einen Überblick der entsprechenden Arbeiten in den Jahren 2009 und 2010.

Seit einigen Jahren ist das MPS an der Entwicklung von Weltrauminstrumenten beteiligt, mit denen das Innere der Planeten erforscht werden kann. Der Einsatz von Seismometern auf anderen Planeten und auch Monden ist wissenschaftlich sehr vielversprechend und Abschnitt 2 fasst die MPS-Aktivitäten auf diesem Gebiet zusammen. Laseraltimeter vermessen die Topographie und zeigen, wie ein terrestrischer Planet auf Gezeitenkräfte reagiert, was wiederum Rückschlüsse auf die inneren Eigenschaften ermöglicht. Abschnitt 3 vermittelt einen Einblick in die entsprechenden MPS-Arbeiten im Rahmen der BepiColombo Mission zum Merkur.

*The study of the interior of planets is an important goal for MPS (see Fig. 1). Different methods are employed for this means: Theoretical considerations and large scale computer simulations help to understand the dynamics of rocky mantles, and iron cores. A particular research focus are the dynamo processes that generate the planetary magnetic fields. These fields provide valuable information about interior processes that are not accessible by other means. Computer simulations of the dynamo process provide the necessary link that ties the observed magnet field to these processes. Section 1 provides an overview of the related work in 2009 and 2010.*

*Since a few years, MPS participates in the developments of space instruments geared to explore planetary interiors. Putting seismometers on other planets and also moons is scientifically very promising and section 2 gives an overview of respective MPS activities in 2009 and 2010. Laser altimeters measure the topography and reveal how a terrestrial planet responds to gravity forces which in turn provides clues to the interior properties. Section 3 summarizes respective MPS activities for the BepiColombo mission to Mercury.*

## 1. Computersimulationen planetarer Dynamos

Die Planeten erzeugen ihre Magnetfelder in einem Dynamomechanismus genannten Prozess, der auf dem Prinzip der elektromagnetischen Induktion beruht: Wird ein elektrischer Leiter durch ein Magnetfeld bewegt, so werden elektrische Ströme angeordnet, die wiederum das Magnetfeld erzeugen können. Elektrische Leiter findet man etwa in den Eisenkernen der terrestrischen Planeten, die Bewegung wird durch zwei Arten von Konvektion gewährleistet. Thermische Konvektion geht auf Temperaturunterschiede zurück, chemische Konvektion auf Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung, die etwa entstehen, wenn bei der Auskristallisation eines festen Eisenkerns die dem Eisen beigemischten leichteren Bestandteile der Kernflüssigkeit frei werden (siehe Abb.1). In beiden Fällen sind Dichteunterschiede und die damit verbundenen Auftriebskräfte die eigentliche Ursache der Bewegung.

Seit etwa einem Jahrzehnt nutzen MPS-Wissenschaftler aufwendige Computersimulationen, um die Bewegungen und die Magnetfelderzeugung in den Dynamoregionen der Planeten zu modellieren. Diese Simulationen sind sehr erfolgreich und erklären viele der beobachteten Phänomene, und das, obwohl einige der verwendeten Parameter weit von der Realität entfernt sind. Ein Beispiel ist die Ekman-Zahl, ein Maß für die Bedeutung der Viskosität. Aufgrund der verschwindend kleinen Viskosität in den flüssigen Eisenkernen ist auch die Ekman-Zahl sehr klein. Im flüssigen Eisenkern der Erde beträgt sie z.B. nur  $E=10^{-15}$ . Eine Folge der niedrigen Viskosität ist, dass die Konvektionsbewegungen sehr kleinskalig werden können, zu kleinskalig, um sie in den Computersimulationen auf heutigen Rechnern noch darzustellen. Die Simulationen verwenden darum Ekman-Zahlen die  $E=10^{-6}$  nicht unterschreiten. Die große Diskrepanz zum wirklichen Wert wirft natürlich wichtige Fragen auf: Kann man den Ergebnissen trauen? Sind die Computermodelle nur oberflächlich betrachtet erfolgreich und die Ähnlichkeit mit den realen Magnetfeldern lediglich ein Zufall? Wie können die Ergebnisse zu den wahren Parameterwerten extrapoliert werden? Abschnitt 1.1. und Abschnitt 1.2 geben einige Antworten.

Die Computermodelle wurden ursprünglich für den Erddynamo entwickelt. In den letzten Jahren arbeiten MPS-Wissenschaftler daran, den Computercode auf die spezifische Situation anderer Planeten anzupassen. Besondere Schwerpunkte liegen hier auf Merkur (Abschnitt 1.3) und Mars (Abschnitt 1.4).

### 1.1 Skalierungsgesetze für Dynamos

Skalierungsgesetze adressieren fundamentale Fragen planetarer Dynamos: Dynamoregionen werden durch eine Vielzahl von Eigenschaften charakterisiert. Welche davon sind für den Dynamoprozess wirklich wichtig?

## 1. Computer simulations of planetary dynamos

*Planets produce their magnetic fields in a process called dynamo mechanism which relies on electromagnetic induction: When an electrical conductor moves through a magnetic field electrical currents are produced which in turn can create the magnetic field. Electrical conductors are for example found in the iron cores of terrestrial planets, two different kinds of convection provide the necessary motion: Thermal convection relies on temperature differences while chemical convection goes back to compositional differences produced when iron crystallizes to form a solid inner core and releases the lighter components mixed into the core fluid (see Fig. 1). In both cases, density differences and the associated buoyancy are the real drivers of the motion.*

*Since about a decade MPS scientists use large scale computer simulations for modeling the fluid flow and magnetic field generation in the atmospheres and dynamo regions of planets. These simulations are very successful in explaining many of the observed features despite the fact that some parameters are far from reality. One example is the Ekman number, a measure for the importance of viscous effects. Because of the tiny viscosity in liquid iron cores, the Ekman numbers are very small, for example as small as  $E=10^{-15}$  in Earth's liquid iron core. A consequence of the low viscosity is that the motion can become very small scale, too small to be properly represented even in today's largest computers. The models therefore run at much larger viscosities that correspond to Ekman numbers not smaller than  $E=10^{-6}$ . The discrepancy raises several important questions: Can the results still be trusted? Is the reported success merely only a superficial and perhaps accidental similarity with the observed planetary fields? How should the results be extrapolated to realistic values? Section 1.1 and section 1.2 provide some answers.*

*The computer models were originally developed with the geodynamo in mind. In recent years MPS scientist worked on adapting the computer code to better represent the specific situations of other planets with a particular focus on Mercury (section 1.3) and Mars (section 1.4) (see Fig. 1).*

### 1.1 Dynamo scaling laws

*Scaling laws address fundamental questions planetary dynamos: Given the multitude of properties that characterize planetary dynamo regions, which are really decisive for determining, for example, the*

tig und bestimmen z.B. die Geschwindigkeit der Konvektionsbewegung und die Stärke des Magnetfeldes? Wie genau hängen die Ergebnisse von den Parametern ab? Wie muss man sie auf die realistischen Werte eines Planeten extrapolieren oder umskalieren?

*speed of the convective flow or the amplitude of the internal magnetic field? How exactly do the results depend on the parameters? How can the results be extrapolated or rescaled to the realistic planetary parameters?*

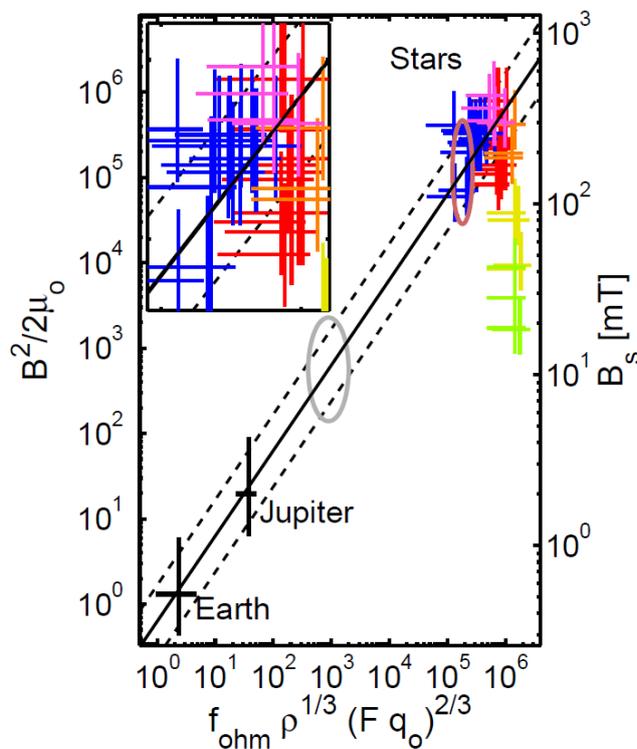


Abb. 2: Magnetische Energiedichte (linke Achse) und Magnetfeldstärke (rechte Achse) für Dynamos in Abhängigkeit von der Dichte  $\rho$  und dem Wärmefluss  $q_o$  aus der Dynamo-Region. T-Tauri-Sterne sind in blau und Alte-Zwerg in rot und rosa eingezeichnet. Die Balken vermitteln einen Eindruck der Unsicherheiten. Die braune und die graue Ellipse zeigen Vorhersagen für einen braunen Zwerg mit einer Oberflächentemperatur von 1500K und für einen Exoplaneten mit sieben Jupitermassen.

*Fig. 2: Magnetic energy density (left axis) and field intensity (right axis) as a function of density  $\rho$  and heat flux  $q_o$  from the dynamo region. T-Tauri stars are shown in blue, old dwarfs in red and pink. The bars give an idea of the uncertainty. The brown and grey ellipses show predictions for a brown dwarf with a surface temperature of 1, 500 K and for an exoplanet with seven Jupiter masses, respectively.*

Mehr als 100 Dynamosimulationen wurde analysiert, um die Gesetze abzuleiten. Es erwies sich, dass die entscheidende Größe der Energiefluss ist, der die Konvektionsbewegungen antreibt. Die Stärke des Magnetfeldes hängt von der dritten Wurzel des Energieflusses ab, die Stärke der Konvektionsbewegung von der fünften Wurzel. Die Viskosität spielt also keine große Rolle, was erklärt, warum die Simulationen trotz der viel zu großen Ekman-Zahl so erfolgreich sind [Christensen, 2010].

Der Energiefluss ist direkt mit dem Wärmefluss aus einem Himmelskörper verknüpft. Ist der Wärmefluss bekannt, so kann mittels der Skalierungsgesetze die Stärke des Magnetfeldes berechnet werden. Dies funktioniert nicht nur für einige Planeten in unserem Sonnensystem erstaunlich gut, sondern auch für Alte-Zwerg und T-Tauri-Sterne [Christensen et al., 2009] (siehe Abb. 2). Der Dynamomechanismus in diesen speziellen Sternen scheint darum ähnlich zu funktionieren wie in Planeten. In jungen braunen Zwergen hingegen spielen wohl auch andere Prozesse eine Rolle, denn hier wird ein zu starkes Magnetfeld vorhergesagt [Reiners et al., 2009].

*In order to establish these laws more than 100 dynamo simulations at different parameters were analyzed. The results show that the energy flux available to drive the convective flow is the crucial parameter that determines the magnetic field as well as the flow amplitude. The magnetic field amplitude depends on the cubic root of this energy flux, while the flow amplitude depends on the fifth root. The fact that viscosity plays no role may explain why the dynamo simulations are so successful despite the fact that the Ekman number is orders of magnitude too large [Christensen, 2010].*

*The energy flux is directly coupled to the heat flux coming out of a celestial body. The scaling law then allows to predict the magnetic field strength when the heat flux is known. This prediction not only works for several planets in our solar system but also for old dwarfs and T-Tauri stars [Christensen et al., 2009] (see Fig. 2). The dynamo mechanism operating in these special stars may thus be similar to the one in planets. For young brown dwarfs, however, other effects may play a role since the predicted field is too strong [Reiners et al., 2009].*

### 1.2 Wie realistisch sind Computermodelle des Erddynamos?

Das Magnetfeld der Erde wird bereits seit einigen Jahrhunderten erforscht. Das Wissen um seine Struktur und zeitliche Veränderung ist beeindruckend und wächst weiter an. Wie gut geben Computersimulationen des Erddynamos die unterschiedlichen Aspekte wieder? Wie sollten die Parameter in den Simulationen gewählt werden, wenn bestimmte Eigenschaften möglichst genau modelliert werden sollen? Um diese Fragen zu beantworten, wurde in zahlreichen Computermodellen wichtige charakteristische Eigenschaften wie Magnetfeldsymmetrien, die Dominanz des Dipols und die Zeitabhängigkeit einschließlich Feldumkehrungen untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass selbst recht einfache Modelle bei relativ großen Ekman-Zahlen all diese Eigenschaften recht erfolgreich wiedergeben. Es ist jedoch entscheidend, dass die Rayleigh-Zahl, ein Maß für die Stärke der Konvektionsbewegung antreibenden Energieflusses, an die Ekman-Zahl angepasst wird. Wird die Ekman-Zahl abgesenkt, so muss die Rayleigh-Zahl im gleichen Zuge angehoben werden, da sonst das Magnetfeld zu symmetrisch und zu undynamisch wird. [Christensen et al., 2010, Wicht et al., 2010]

Es scheint jedoch wenigstens zwei Aspekte des Erdmagnetfeldes zu geben, die nur bei kleinen Ekman-Zahlen auftreten. An der Grenze zwischen Kern und Mantel zeigt das Erdmagnetfeld ausgeprägte Flecken normaler Feldrichtung auf beiden Seiten des Äquators. In den Simulationen treten ähnliche Strukturen nur auf, wenn die Ekman-Zahl klein genug ist ( $E \leq 3 \times 10^{-5}$ ) und die Rayleigh-Zahl groß genug. Torsionale Oszillationen könnten eine wichtige Rolle für die kurzzeitigen Schwankungen des Erdmagnetfeldes spielen. Dies sind Störungen der Ost/West-Strömung im Erdkern, die sich wellenartig senkrecht zur Erdrotationsachse ausbreiten. Torsionale Oszillationen werden auch in Dynamo-simulationen gefunden (siehe Abb. 3), und zwar wiederum nur, wenn die Ekman-Zahl klein genug ist ( $E \leq 3 \times 10^{-5}$ ). Gleichzeitig darf jedoch die Rayleigh-Zahl nicht zu hoch sein und muss auf einem Niveau gehalten werden, auf dem das Magnetfeld noch keine Feldumkehrungen zeigt [Wicht and Christensen, 2010]. Dieser Konflikt kann wohl erst bei erheblich kleineren Ekman-Zahlen aufgelöst werden.

### 1.3 Warum ist Merkurs Magnetfeld so schwach?

Merkurs Magnetfeld ist etwas 100 Mal schwächer als das der Erde. Obwohl es wahrscheinlich in einem Dynamoprozess in Merkurs flüssigem Eisenkern erzeugt wird, liegt seine Stärke damit weit unter dem, was die Dynamotheorie und typische Computermodelle vorhersagen. Am MPS werden zwei alternative Modelle verfolgt, um diese Diskrepanz zu erklären.

### 1.2 How realistic are computer models of Earth's dynamo?

*Since the geomagnetic field has been explored for several centuries there is a wealth of information about its structure and temporal evolution. How well do dynamo simulations model the various geomagnetic features? How should a dynamo modeler choose the parameters in the computer simulation? To answer these questions several different properties like magnetic field symmetries, the dominance of the dipole contribution and its time dependence including field reversals have been compared with models of the historic field at Earth's core mantle boundary. The results show that even rather simple simulations at relatively large Ekman numbers successfully model these properties. However, it is important to adjust the other parameters for the chosen Ekman number. When the Ekman number is decreased towards more realistic values the Rayleigh number, which measures the strength of the convective driving, has to be increased in order to keep the magnetic field complex and dynamic enough [Christensen et al., 2010, Wicht et al., 2010].*

*There are at least two geomagnetic features, however, which seem to require low Ekman numbers. The geomagnetic core mantle boundary field shows pronounced patches of normal polarity close to the equator. Dynamo simulations only show similar features when the Ekman number is small enough ( $E \leq 3 \times 10^{-5}$ ) and the Rayleigh number large enough. Torsional oscillations are a hotly debated dynamical feature of the geomagnetic field. These are wave like disturbances in the east/west component of the core flow that propagate along magnetic field lines away or towards Earth's rotation axis. Dynamo simulations show similar features (see Fig. 3), but only when the Ekman number is small ( $E \leq 3 \times 10^{-5}$ ). At the same time, the Rayleigh number has to be kept at a level where the magnetic field is not yet reversing [Wicht and Christensen, 2010]. This conflict may only be solved at significantly lower Ekman numbers.*

### 1.3 Why is Mercury's magnetic field so weak?

*Mercury's magnetic field is about 100 times weaker than the geomagnetic field. Though being very likely generated by an internal dynamo operating in the planet's liquid iron core, its strength is below what dynamo theory and computer models predict. Mercury's dynamo thus seems to be special. Two alternative models were developed to explain the weak field.*

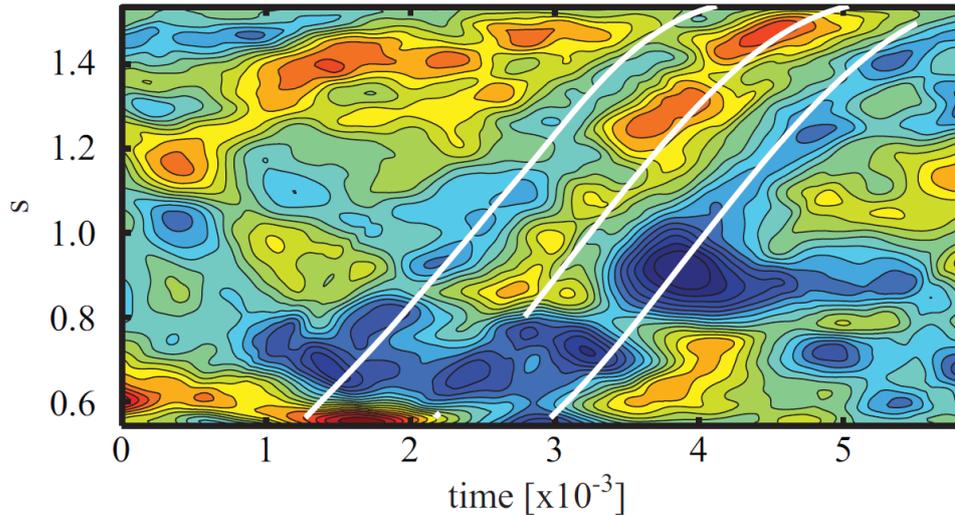


Abb. 3: Torsionale Oszillationen in einer Dynamosimulation bei  $E = 3 \times 10^{-6}$ . Die farbigen Konturen zeigen die Ost/West-Komponente der Geschwindigkeit, gemittelt über die Länge und in Richtung der Rotationsachse. Die Zeit (x-Achse) ist in Einheiten der magnetischen Diffusionszeit angegeben, die y-Achse zeigt den Abstand von der Rotationsachse. Weiße Linien markieren die vorhergesagte Ausbreitung von torsionalen Oszillationen.

*Fig. 18: Torsional oscillations in a dynamo simulation at  $E = 3 \times 10^{-6}$ . The colored contours show the east/west component of the flow averaged over longitude and along the rotation axis. The time on the x-axis is given in units of magnetic diffusion time, the y-axis is the distance from the rotation axis. The white lines show the predicted propagation of torsional oscillations.*

Thermische Evolutionsmodelle deuten darauf hin, dass der Wärmefluss durch Merkurs Kern-Mantel-Grenze zu gering ist, um thermische Konvektion anzutreiben. Der Kern ist jedoch so weit abgekühlt, dass ein fester innerer Eisenkern auskristallisiert (siehe Abb. 1). Frühere Computermodelle haben gezeigt, dass die Kristallisationswärme und die frei werdenden leichten Elemente einen Dynamoprozess im unteren Bereich des flüssigen Kerns antreiben. Der äußere Teil bleibt hingegen aufgrund des geringen Wärmeflusses durch die Kern-Mantel-Grenze stabil geschichtet und nimmt kaum an der Magnetfeldproduktion teil. Das im Inneren erzeugte Magnetfeld ist zwar stark, wird aber beim Diffundieren durch die äußere Schicht bis auf den beobachteten Wert abgeschwächt.

Neuere Computermodelle berücksichtigen nun, dass die leichten Stoffe wesentlich schlechter diffundieren als Wärme, ein Unterschied der bisher vernachlässigt wurde. Die Ergebnisse zeigen, dass die von der Grenze der inneren Kerns aufsteigenden chemische Konvektionsstrukturen wesentlich dünner bleiben als die thermischen (siehe Abb. 4). Sie können darum tiefer in die stabile Schicht eindringen, intensivieren dort den Dynamomechanismus und erzeugen ein Magnetfeld, dessen Stärke über den gemessenen Werten liegt. Um diesen Effekt klein genug zu halten, muss der Anteil leichter Elemente auf unter ein Gewichtsprozent reduziert werden [Manglik et al., 2010].

*Thermal evolution simulations suggest that the heat flux through Mercury's core-mantle boundary is too low to drive convection. However, the planet's core has cooled enough to start crystallizing a solid inner iron core (see Fig. 1). Earlier computer models have shown that crystallization heat and the release of light elements drive a dynamo mechanism in the deeper part of the liquid core. The outer part, however, remains stably stratified due to the low heat flux through the core-mantle boundary and does hardly take part in dynamo action. The magnetic field produced in the lower part is strong but is weakened to the observed field strength when diffusing through the outer layer.*

*Newer models now take into account that chemical elements diffusive much slower than heat, a fact that had previously been neglected for simplicity. The results show that chemical plumes rising from the inner core boundary stay thinner than the thermal plumes (see Fig. 4). They can more easily penetrate the outer layer, intensify dynamo action here and produce a magnetic field whose strength lies above the measured values. To make this effect small enough the concentration of light elements must be smaller than 1% in weight [Manglik et al., 2010].*

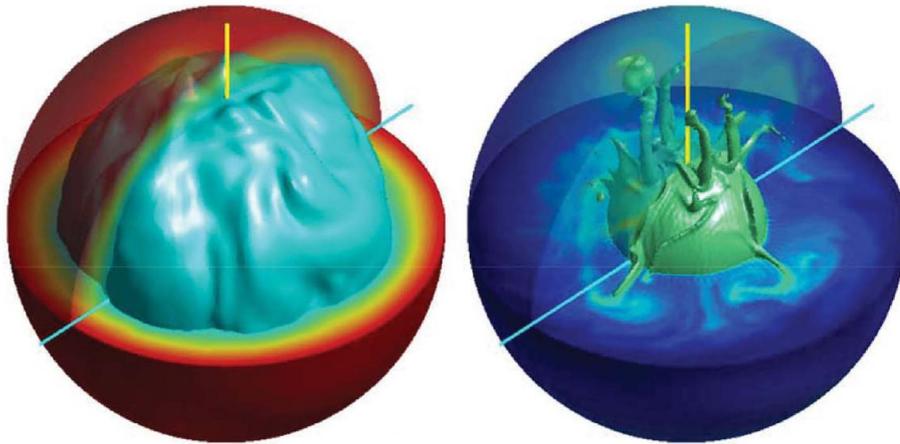


Abb. 4: Flächen konstanter Temperatur (links) und konstanter Konzentration leichter Elemente (rechts) in einer Dynamosimulation, in der Wärme zehn Mal leichter diffundiert als die leichten Elemente.

*Fig. 4: Iso-surfaces of temperature (left) and concentration of light elements (right) in a dynamo simulations where heat diffusion is ten times more efficient than chemical diffusion.*

Feedback-Dynamo bietet eine alternative Erklärung für das schwache Magnetfeld. Die Wechselwirkung mit dem internen Magnetfeld lenkt die geladenen Sonnenwindteilchen um den Planeten. So entsteht die Magnetosphäre, eine Magnetfeldblase um Merkur, die mit einem elektrischen Stromsystem und dem dazugehörigen externen Magnetfeld verknüpft ist. Auf den für den internen Dynamoprozess wichtigen Zeitskalen hat dieses externe Magnetfeld die Form eines Dipols, der in der Dynamoregion dem intern erzeugten Dipol entgegengerichtet ist. Der schwächere gesamte Dipol reduziert die Effektivität des Dynamoprozesses, wie Computersimulationen mit einem einfachen parametrisierten Dynamomodel zeigen. Wenn man mit einem kleinen internen Feld startet, dann kann dieser negative Feedback den Dynamo in seinem schwachen Zustand halten (siehe Abb. 5) solange der interne Dynamoprozess nicht zu sehr dominiert [Heyner et al., 2010].

#### 1.4 Neue Dynamomodelle für Mars

Vor mehr als 4 Millionen Jahren hörte der Marsdynamo auf zu arbeiten, doch er hinterließ eine starke Krustenmagnetisierung. Da Mars recht früh in seiner Geschichte eine feste thermisch isolierende obere Mantelschicht ausbildete, blieb der Kern recht heiß und ist bis heute komplett flüssig (siehe Abb. 1). Der frühe Marsdynamo wurde allein durch die langsame Abkühlung des Kerns angetrieben und stellte seinen Betrieb ein, als der Wärmefluss durch die Kern-Mantel-Grenze zu niedrig wurde.

*The feedback dynamo model offers an alternative explanation for Mercury's weak field. The interaction of the charged solar wind particles with the internal magnetic field diverts the solar wind around the planet. This interaction creates the magnetosphere, the magnetic bubble around Mercury, and its associated current system that gives rise to an external magnetic field. On the time scales of interest for the internal dynamo process the external field is roughly dipolar and opposes the direction of the internal dipole within the dynamo region. Computer simulations using a simple parameterized dynamo model show that the weakened effective dipole decreases the overall effectiveness of the dynamo process. When the simulation is started with a small internal field this negative feedback can retain the dynamo in a weak state (see fig. 5) provided the internal dynamo action is not too strong [Heyner et al., 2010].*

#### 1.4 New dynamo models for Mars

*The Martian dynamo ceased more than 4 billion years ago but has left its trace in the form of a strong crustal magnetization. Because Mars developed a thick and rigid crust early in its history, the core remained relatively hot and completely liquid (see Fig. 1). The ancient Martian dynamo was therefore exclusively driven by secular core cooling and stopped operating when the heat flux through the core-mantle boundary became too low.*

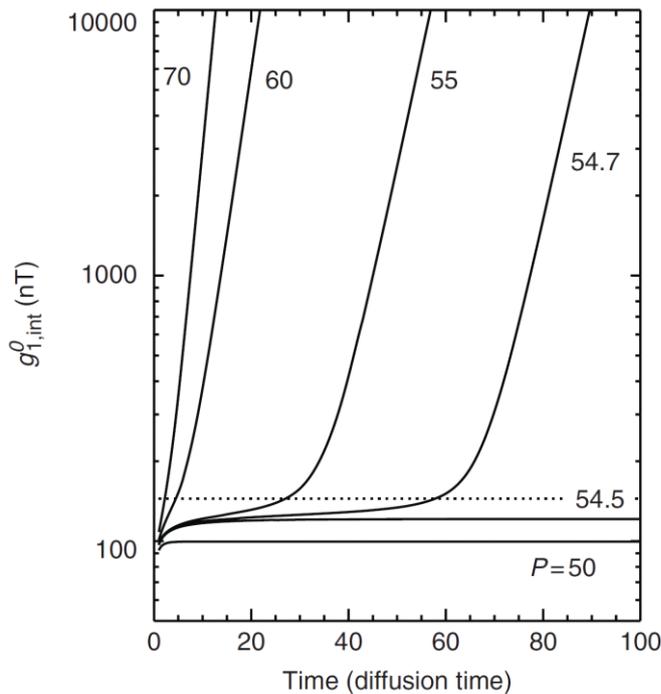


Abb. 5: Entwicklung des internen axialen Dipols in einem einfachen Feedback-Dynamomodell. Die Zahlen an den Kurven geben die Dynamozahl an, ein Maß für die Stärke des Dynamoeffekts.

*Fig. 5: Evolution of the internal axial dipole in a simple feedback dynamo model. Numbers adjacent to the curves give the dynamo number that measures the strength of dynamo action.*

Wie kann der Marsdynamo möglichst realistisch in den Computermodellen wiedergegeben werden? Aufgrund der verwendeten Methode in den Computermodellen kann der Radius des inneren Kerns nicht beliebig klein gewählt werden. Es zeigte sich jedoch, dass sein Einfluss ohnehin gering ist. Um die rein durch Abkühlung angetriebene Konvektion zu modellieren, wurde der vom inneren Kern ausgehende Fluss von Wärme und leichten Elementen auf null gesetzt und zwei Varianten von Randbedingungen an der Kern-Mantel-Grenze getestet: Es stellte sich heraus, dass bei einer konstanten Temperatur nicht-dipolare Felder erzeugt werden, während ein konstanter Wärmefluss dipol-dominierte Felder bevorzugt. Da letztere Randbedingung realistischer ist, war das Magnetfeld des frühen Mars wohl dem der heutigen Erde ähnlich. Dies gilt auch für das frühe geomagnetische Feld, denn der innere Erdkern ist wohl nicht älter als zwei Billionen Jahre [Hori et al., 2010].

Die Magnetisierung der Marskruste zeigt eine Zweiteilung, die in etwa mit einer Zweiteilung der Topographie zusammenfällt: Das ältere Bergland der Südhalbkugel ist viel stärker magnetisiert als die jüngeren Ebenen der Nordhalbkugel. Die spezielle Topographie wird zum Beispiel durch einen großen Meteoriteneinschlag in der Nordhalbkugel erklärt. Ein solcher Einschlag würde den nördlichen Gesteinsmantel aufheizen und bewirken, dass der Kern dort schlechter abkühlt. Um diesen Effekt in den Computermodellen zu berücksichtigen, wurde der Wärmefluss durch die nördliche Kern-Mantel-Grenze herabgesetzt.

*How can this dynamo be modeled most realistically in the computer simulations? The employed methods prevent us from reducing the inner core radius to zero but tests show that its influence is only minor anyway. To model the secular cooling, we set the heat and light element flux from the inner boundary to zero and explore two different thermal boundary conditions at the core-mantle boundary. When imposing a fixed heat flux the magnetic fields tend to be dipole dominated. However, the dipole loses its special role when a homogenous temperature is imposed. Since the former case is more realistic it seems likely that the ancient Martian field was dipole dominated. The same also applies for the early geodynamo since Earth started to nucleate its inner core not more than 2 billion years ago [Hori et al., 2010].*

*The magnetization of the Martian crust shows a dichotomy that roughly correlates with the prominent topographic dichotomy: the older southern high lands show a much stronger magnetization than the younger northern low lands. The topographic dichotomy may be the result of a giant impact on the northern hemisphere. This impact would have heated the northern mantle allowing less heat to escape through the northern than through the southern core-mantle boundary. We model this effect by decreasing the heat flux through the northern core-mantle boundary in the dynamo model.*

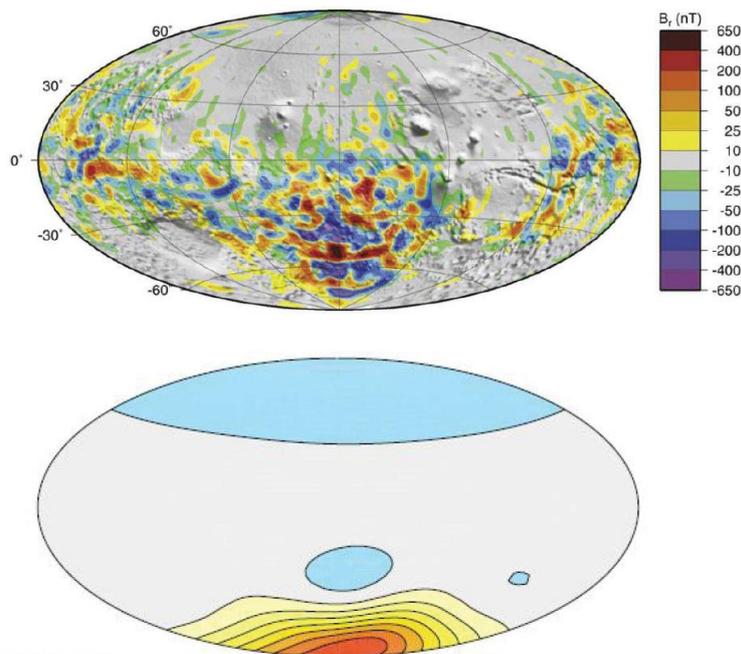


Abb. 6: Vergleich eines Modells der Krustenmagnetisierung auf Mars, in 200 km Höhe gemessen, mit dem Feld einer Computersimulation, in der der Wärmefluss aus der Südhalbkugel des Kerns größer ist als aus der Nordhalbkugel. Die kleinen Skalen in der Krustenmagnetisierung gehen wahrscheinlich auf geologische Prozesse zurück.

*Fig. 6: Comparison of a model of the Martian crustal magnetization as seen in 200km altitude with a dynamo model where the heat flux through the southern part of the core-mantle boundary is higher than through the northern. The small scales in the crustal magnetization are likely the result of geological processes.*

Die Simulationen zeigen, dass bereits eine Variation von 10% ausreicht, um die Lösung drastisch zu verändern. Der starke Temperaturkontrast, der sich zwischen Nord- und Südhalbkugel einstellt, treibt starke thermische Winde. Diese fließen westwärts in der heißeren Nordhemisphäre, jedoch ostwärts in der kühleren Südhemisphäre. Die Scherung zwischen den beiden Zellen erzeugt ein starkes ost/west-gerichtetes Magnetfeld. Die Produktion eines Magnetfelds mit einer radialen Komponente ist hauptsächlich auf die lokalen Aufströme in der Südhemisphäre beschränkt. Da nur dieses Feld von außen beobachtet werden kann, ergibt sich die in Abb. 6 gezeigte Zweiteilung. Die Zweiteilung der Topographie und der Krustenmagnetisierung ist also wohl nicht zufällig, sondern hat die gleiche Ursache.

## 2. Seismologie auf anderen Planeten und Monden

Der Großteil vom dem, was wir über den inneren Aufbau der Erde wissen, basiert auf seismischen Messungen. Druck- und Scherwellen, meist durch Erdbeben ausgelöst, laufen durch den Erdkörper und werden an einer Vielzahl seismischer Stationen registriert. Aus dem aufgezeichneten Signal kann der Pfad und die Geschwindigkeit der Welle rekonstruiert werden, was dann Rückschlüsse auf die innere Struktur und die Materialeigenschaften ermöglicht. Der flüssige und der zentrale feste Eisenkern der Erde wurden zum Beispiel dank seismischer Methoden entdeckt. Der Einsatz von Seismometern auf anderen Planeten und Monden ist darum ein vielversprechender Schritt.

Die Seismometer, die von den Apollo-Missionen, auf den Mond abgesetzt wurden, lieferten interessante Ergebnisse. Bis heute wurde jedoch nur ein Instrument auf einem anderen Planeten platziert: Die Viking-

*The computer simulations show that even a rather low relative variation amplitude of about 10% leads to a new convection pattern in the core. Strong lateral temperature differences between a hotter northern and a cooler southern hemisphere drive fierce thermal winds, blowing westward in the northern but eastward in the southern hemisphere. The differential rotation between these two cells produces strong east/west directed magnetic field. The production of magnetic field with a radial component is mainly restricted to the plume like upwellings in the southern hemisphere. That fact that only this field can be observed from the outside explains the magnetic field dichotomy shown in Fig 6.. The correlation of magnetization and topographic dichotomies is thus not a coincidence but has the same cause.*

## 2. Seismology on other planets and moons

*Most of what we know about Earth's interior is based on seismic measurements. Pressure and shear waves mostly triggered by Earth quakes travel through Earth and are recorded at a multitude of seismic stations. The recorded signals allow to deduce the path and speed of the waves which in turn provides information about the interior structure and properties. For example, the presence of Earth's liquid iron core and the central solid iron core was established by seismic means. It seems natural to also employ this method at other planets.*

*The seismometers deployed by the Apollo missions on moon yielded some interesting insights but so far only one attempt was made to place a seismometer on another planet: the Viking mission brought a seismo-*

Mission brachte ein Seismometer zum Mars, das aber aufgrund der ungünstigen Installation im Wesentlichen nur Windbewegungen aufzeichnete. Seit einigen Jahren wird am MPS im Rahmen des SEIS-Konsortiums ein modernes Aufstellsystem entwickelt, das einen optimalen Kontakt zum Untergrund garantiert und es erlaubt, das Seismometer präzise auszurichten.

Ursprünglich wurde das System für den Humboldt-Lander der ExoMars-Mission entwickelt, der jedoch Budgetkürzungen zum Opfer fiel. Jetzt sind Einsätze auf dem Mond mit der japanischen SELENE2-Mission und auf dem Mars mit der NASA Discovery-Mission GEMS geplant. Das SEIS-Konsortium wird vom Institut de Physique du Globe in Paris angeführt, das auch für den seismischen Sensor verantwortlich zeichnet.

*meter to Mars which unfortunately mostly recorded wind induced vibrations because of an unfortunate deployment. Since a few years MPS develops an advanced deployment system within the international SEIS consortium that will guarantee an optimized ground contact and allows to level the seismometer.*

*It was originally developed for the now canceled Humboldt payload on the mission ExoMars and is now planned to fly to the moon with the Japanese SELENE2 spacecraft and/or to Mars onboard the NASA Discovery Mission GEMS. The SEIS consortium is headed by the Institut de Physique du Globe in Paris which will also be responsible for the seismic sensor.*

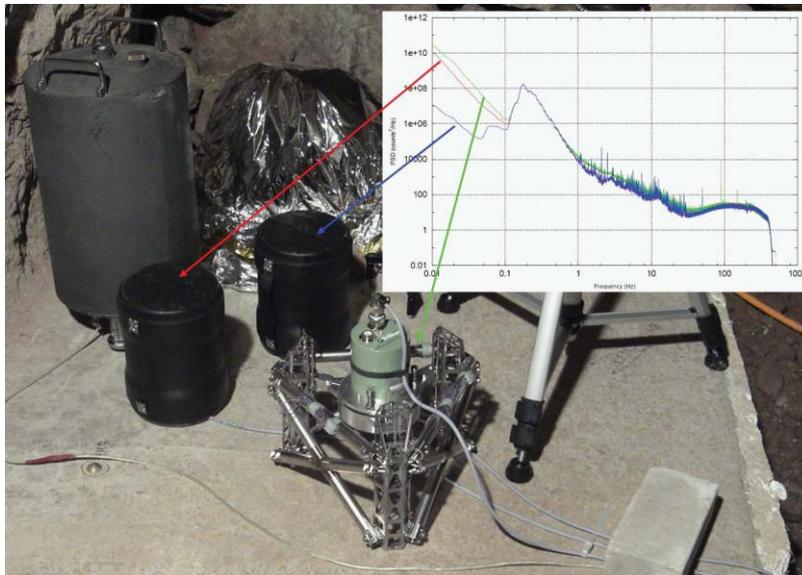


Abb. 7: Test der am MPS entwickelten Seismometer-Ausstellvorrichtung (vorn). Im Hintergrund zwei andere Seismometer, die zu Vergleichszwecken mitlaufen. Die Ausstellvorrichtung garantiert eine gute Übertragung des seismischen Signals über einen großen Frequenzbereich (kleines Bild).

*Fig. 7: Test of the seismometer deployment system developed at MPS. Two other seismometers were used for comparison and are shown in the background. The deployment system guarantees a good transmission over a wide spectral range (insert figure).*

Das System hat drei Beine, die eine justierbare Plattform tragen. Im Jahr 2010 wurde in einer seismischen Beobachtungen dienenden Schwarzwaldmine getestet, wie gut seismische Wellen zum Sensor übertragen werden. Abb. 7 zeigt den Testaufbau. Mit Hilfe von künstlichen und seismischen Wellen konnte eine ausgezeichnete Übertragungscharakteristik in einem breiten Frequenzbereich nachgewiesen werden. Später im Jahr wurde das System mit dem für den Weltraum Einsatz vorgesehenen Sensortyp ausgestattet und konnte einige weitere Test wie Nivellierung und Datenspeicherung erfolgreich absolvieren.

*The deployment system has three legs that carry the movable sensor platform which can be individually adjusted to level the instrument. In 2010 the transmission characteristics have been tested in a seismic observatory located in a Schwarzwald mine. Fig. 7 shows the deployment system, running with a commercial standard sensor, and two other seismometers in the background for comparison purposes. Using natural and artificial excitations allowed to determine the system response function at different frequencies and proved the good transmission. Later in 2010 the system has been equipped with the dedicated seismic sensors and successfully passed several tests including leveling and data logging.*

### 3. Laseraltimeter und das Studium des tiefen Inneren

Die zeitabhängige Gezeitendeformation eines Planeten wird von den Gravitationsfeldern der Sonne, eines Mondes oder anderer Planeten verursacht und liefert

### 3. Laser altimeters for studying the deep interior

*Observations of the gravity field, the rotational state, and the tidal deformation of terrestrial planets constrains the deep interior structure. The time depend-*

Informationen über seine innere Struktur. Die Deformation wird durch die Love-Zahlen  $k_2$  und  $h_2$  charakterisiert.  $k_2$  ist das Verhältnis der durch die Deformation hervorgerufenen Gravitationsfeldänderung und des deformierenden Gravitationsfeldes,  $h_2$  ist ein Maß für die relative Höhenänderung. Sind beide Love-Zahlen hinreichend genau bekannt, lässt sich die Existenz eines flüssigen Eisenkerns nachweisen und man kann seinen Radius abschätzen.

*ent tidal deformation caused by the gravitational field of the sun, an orbiting moon, or other planets depends on the material properties deep inside the planetary body. The deformation is characterized by the tidal Love numbers  $k_2$  and  $h_2$ .  $k_2$  measures the ratio of the gravity changes induced by the deformation and the deforming gravity field,  $h_2$  measures the relative vertical displacement. The knowledge of both Love numbers allows to determine whether Mercury's iron core is still partially liquid and to estimate its radius.*

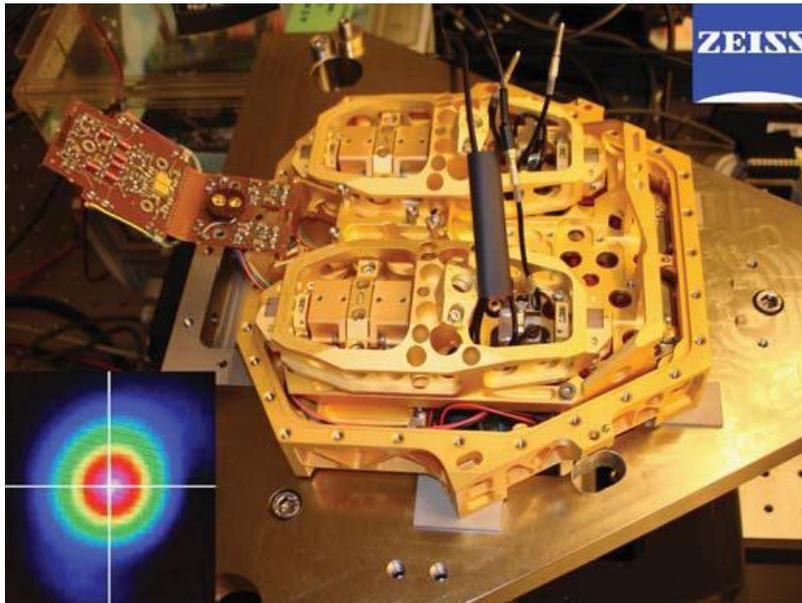


Abb. 8: Der gepumpte und gekapselte Nd:YAG-Laser für das Laseraltimeter BELA während Tests bei Zeiss Optronics in Oberkochen.

*Fig. 8: The pumped and encapsulated Nd:YAG laser for the altimeter BELA during testing at Zeiss Optronics in Oberkochen.*

Sowohl NASA's MESSENGER-Mission als auch ESA's BepiColombo-Mission zum Merkur haben Laseraltimeter an Bord, die primär die Topographie vermessen sollen. BepiColombo wird voraussichtlich 2014 starten und sein Ziel 2020 erreichen. Das MPS ist für das Lasersystem des Laseraltimeters mit dem Namen BELA zuständig. Für das Gesamtsystem zeichnet die Universität Bern und das DLR-Institut für Planetenforschung in Berlin verantwortlich. Der Laser wird zur Zeit bei Zeiss Optronics in Oberkochen konstruiert und basiert auf einem "side-pumped" redundanten Nd:YAG Diodenlaser, der bei 1064 nm arbeitet, mit einer Impulsenergie von 50 mJ und einer Wiederholungsrate von 10 Hz (siehe Abb. 8). Die Gezeitendeformation durch die Sonne erreicht auf Merkur eine Amplitude von nur einem Meter. Um dieses Signal von der um ein Vielfaches größeren statischen Topographie isolieren zu können, muss der Laser eine hohe Präzision und Zuverlässigkeit über mehr als 300 Millionen Schüsse innerhalb eines Jahres gewährleisten. Dies wird zur Zeit in den Zeiss-Laboratorien unter Anleitung des MPS und der ESA getestet.

*The MESSENGER and BepiColombo missions to Mercury both carry laser altimeters whose primary goal is to accurately map the topography. BepiColombo is planned to be launched in 2014 and will reach its target in 2020. MPS is responsible for the laser system used in the BepiColombo Laser Altimeter BELA which is built under the lead of the University of Bern and the DLR Institute for Planetary Research in Berlin. The BELA laser is currently manufactured by Zeiss Optronics in Oberkochen. It is based on a side-pumped redundant Nd:YAG diode laser operating at 1064 nm with 50 mJ pulse energy and a pulse repetition frequency of 10 Hz (see Fig. 8). Solar tidal forces generate elevation changes of Mercury's surface of the order of only 1 m. In order to be able to discriminate this small deformation from the much larger static topography, the laser has to achieve high precision, consistency and reliability for more than 300 million laser shots in about one year. These key requirements are presently tested in the Zeiss laboratories under the supervision of MPS and ESA.*

Das MPS hat mittels Computersimulationen untersucht, unter welchen Voraussetzungen die Love-Zahl

*MPS has performed computer simulations to investigate whether the Love number  $h_2$  can be retrieved*

$h_2$  genau genug bestimmt werden kann. Dazu wurde eine synthetische Messreihe verwendet, die BepiColombos nominelle Missionsdauer von vier Merkurjahren abdeckt [Koch et al., 210]. Die Ergebnisse zeigen, dass bei Verwendung des vollen Datensatzes die Ungenauigkeit nur 1% beträgt. Im realistischeren Fall, dass nur jene Daten brauchbar sind, bei deren Messung die Raumsonde nicht weiter als 1000 km vom Planeten entfernt ist, erhöht sich die Ungenauigkeit auf ein immer noch akzeptables Niveau von 14%. Damit ist es möglich, den Radius von Merkurs flüssigem Eisenkern bis auf 75 km genau zu bestimmen.

*accurately enough using a global synthetic altimetry record covering the nominal mission duration of approximately 4 Mercury years [Koch et al., 2010]. The results demonstrate that in an ideal case of uninterrupted data coverage  $h_2$  can be determined with an uncertainty of 1%. The uncertainty increases to a still acceptable level of 14% in the anticipated case that BELA measurements are limited to 1000 km spacecraft altitude. Provided Mercury still has a liquid core the data should allow to determine its radius to within 75 km.*

### Ausgewählte Veröffentlichungen

#### *Selected publications*

Christensen, U. R.: Dynamo Scaling Laws and Applications to the Planets, *Space Sci. Rev.* 152, 565-590 (2010), doi:10.1007/s11214-009-9553-2

Christensen, U. R., V. Holzwarth, and A. Reiners: Energy flux determines magnetic field strength of planets and stars, *Nature*, 457, pp. 167-169 (2009), doi:10.1038/nature07626

Reiners, A., G. Basri, and U. R. Christensen: Surprisingly Weak Magnetism on Young Accreting Brown Dwarfs, *Astrophys. J.*, 697(1), pp. 373-379 (2009), doi:10.1088/0004-637X/697/1/373

Christensen, U. R., J. Aubert, and G. Hulot: Conditions for Earth-like geodynamo models, *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 296, pp. 487-496 (2010), doi:10.1016/j.epsl.2010.06.009

Wicht, J., S. Stellmach, and H. Harder: Numerical dynamo simulations: From basic concepts to realistic models, in: *Handbook of Geomathematics* (edited by W. Freeden, M. Z. Nashed, and T. Sonar), pp. 459-502, Springer, Heidelberg (2010)

Wicht J. and U. R. Christensen: Torsional oscillations in dynamo simulations, *Geophys. J. Int.*, 181, pp. 1367-1380 (2010), doi:10.1111/j.1365-246X.2010.04581.x

Manglik, A., J. Wicht, and U. R. Christensen: A dynamo model with double diffusive convection for Mercury's core, *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 289, pp. 619-628 (2010), doi:10.1016/j.epsl.2009.12.007

Heyner, D., D. Schmitt, J. Wicht, et al.: The initial temporal evolution of a feedback dynamo for Mercury, *Geophys. Astrophys. Fluid Dynamics*, 104, pp. 419-429 (2010), doi:10.1080/03091921003776839

Hori, K., J. Wicht, and U. R. Christensen: The effect of thermal boundary conditions on dynamos driven by internal heating, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 182(1-2), pp. 85-97 (2010), doi:10.1016/j.pepi.2010.06.011

Koch, C., R. Kallenbach, and U. R. Christensen: Mercurys global topography and tidal signal from laser altimetry by using a rectangular grid, *Planet. Space Sci.*, 58, pp. 2022-2030 (2010), doi:10.1016/j.pss.2010.10.002

### 1.2.4 Planetenoberflächen

Seit Mitte der 90er Jahre ist das Max-Planck-Institut maßgeblich an der Erforschung der Planeten- und Mondoberflächen beteiligt gewesen und hat dadurch zu mehreren Mars-Orbiter- und Landemissionen sowie neuerdings zu zwei Mond-Orbiter-Missionen beigetragen. Die neueren Arbeiten am MPS hatten sich schwerpunktmäßig mit den Daten vom Instrument SIR-2 an Bord des Mond-Orbiters Chandrayaan-1 und vom Instrument auf der Mars-Landemission Phoenix beschäftigt. Die Abschnitte 1 und 2.1 liefern eine kurze Übersicht der jeweiligen Hauptergebnisse.

#### 1. SIR II - Der Mond im Infrarot beobachtet

Alle terrestrischen Planeten verfügen über chemisch unterschiedlich beschaffene Krusten. Umstritten ist allerdings, ob diese Krusten am Anfang der Planetengeschichte entstanden oder ob sie das kumulative Produkt der jeweiligen planetarischen Evolution sind. Die Auswertungen der Daten des Infrarot-Spektrometers 2 (SIR-2) der indischen Mondmission Chandrayaan-1 beschäftigen sich mit dieser Frage, indem versucht wird, in Einschlagkratern, die über Zentralberge verfügen, deren mineralogische Zusammensetzung zu untersuchen.

Krater dominieren die lunare Landschaft und sind über die gesamte Oberfläche zufällig verteilt. Krater mit einem Durchmesser von mehr als 35 km weisen in vielen Fällen Zentralberge auf, die aus Untergrundmaterial bestehen, das beim Einschlagsprozess an die Oberfläche befördert wurde.

Je größer der Krater, umso wahrscheinlicher ist es im Allgemeinen, dass das freiliegende Material aus noch tieferen Schichten stammt. Dadurch bieten diese Zentralberge ein einzigartiges Fenster in das Innere der Mineralogie des Mondes (siehe Abb. 1). Da Krater mit Zentralbergen über die gesamte Mondoberfläche verstreut sind und in verschiedenen Größen vorkommen, ermöglichen die Messungen von SIR-2 eine umfangreiche Fernanalyse von tieferem Mantelgestein.

Wie lässt sich die Mineralogie des Zentralberges dieses Kraters bestimmen? Das von der Mondoberfläche reflektierte Sonnenlicht wird durch ein Spektrometer gemessen, das sich auf einer Raumsonde befindet. Je nachdem, welches Mineral das Sonnenlicht trifft, wird mehr oder weniger Licht zum Spektrometer zurückreflektiert. Das Ergebnis einer Messung ist das sogenannte Reflexionsspektrum, bei dem die reflektierte Lichtintensität als Funktion der Wellenlänge gemessen wird.

### 1.2.4 Planetary surfaces

*MPS has been heavily involved in the exploration of planetary and Moon surfaces since the mid 1990's, contributing to a number of Mars orbiter and lander missions and more recently also to two Moon orbiters. Recent work has been dominated by data from the SIR-2 instrument on the Indian Chandrayaan-1 Moon orbiter and from the Phoenix Mars lander. Sections 1 and 2.1 provide brief overviews of the respective main results.*

#### *SIR II - The Moon in infrared*

*All the terrestrial planets are covered by chemically distinct crusts. Whether these crusts have formed early in the planetary history or are the cumulative product of the planetary evolution is still being discussed. The data from the Spectrometer Infrared 2 (SIR-2) on the Indian Moon mission Chandrayaan-1 address this question for the Moon by analyzing the minerals of the central peaks found in several impact craters.*

*Craters are the dominant landform and are approximately randomly distributed over the surface. Those with diameters larger than 35 km have central peaks composed of subsurface material that has been excavated by the impact process.*

*The larger the crater the more likely it is that the exposed material originates from even deeper layers. These central peaks therefore offer a unique window to the interior mineralogy of the Moon (see Fig. 1). Since craters with central peaks are scattered all over the lunar surface and come at very different sizes the SIR-2 measurements allow a fairly extensive remote analysis of deeper mantle material.*

*How does the identification of the mineralogy for a central crater peak work? The solar light reflected from the lunar surface is measured with a spectrometer from a spacecraft. Dependent on the type of mineral on which the solar light impinges, more or less light is reflected back to the spectrometer. The result of a measurement is the so called reflectance spectrum, where the reflected light intensity is measured as function of the wavelength.*

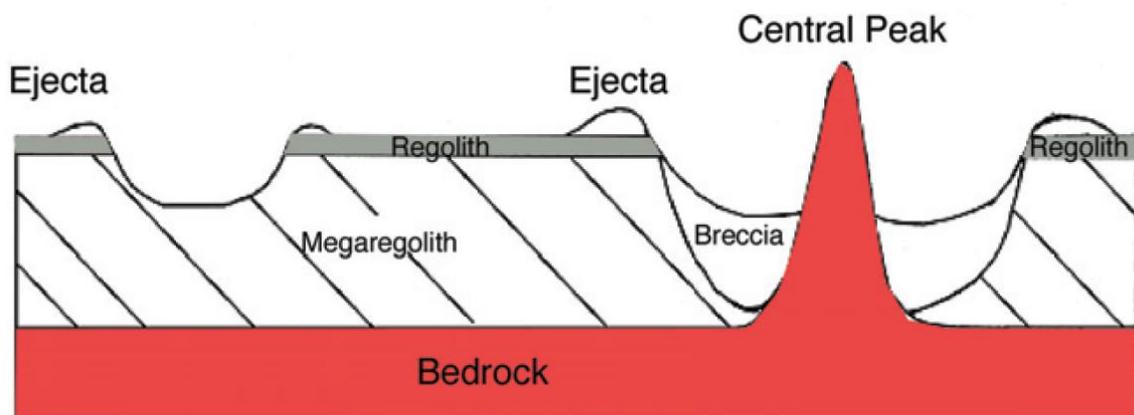


Abb. 1: Schematische Krustenstruktur des Mondes.

*Fig. 1: Schematic crustal structure of the Moon.*

Die Identifizierung der unterschiedlichen Minerale wird hauptsächlich durch die Auswertung der Lage und der Form der in den Infrarot-Reflexionsspektren sichtbaren Absorptionscharakteristika erreicht. Die Wellenlängen, bei denen diese sichtbaren Absorptionsminima liegen, geben Aufschluss über die Zusammensetzung der vom Sonnenlicht getroffenen Oberflächen, während die Größe der Absorption ein Maß für die Häufigkeit eines vorkommenden Minerals ist. Abb. 2 zeigt, wie mit einem Spektrum, das über zwei Absorptionslinien verfügt, die mögliche Zusammensetzung eines beobachteten Mondoberflächensegmentes bestimmt werden kann, indem die beobachteten Absorptionswellenlängen mit einer Vielzahl in Frage kommender Absorptionswellenlängen von Mineralen oder Mineralkombinationen verglichen werden. Das untere linke Tafelbild zeigt das Reflexionsspektrum eines Zentralberges mit zwei deutlichen Absorptionsminima. Das untere rechte Tafelbild zeigt, wo sich Minerale mit zwei Absorptionsminima auf einer Karte befinden, bei der die zwei Wellenlängenpositionen der Minima auf einer x- und einer y-Koordinate aufgetragen sind. Die Position der gemessenen Minima auf dieser Karte bestimmt das Mineral des Zentralberges. Die meisten gesteinsbildenden Minerale können dank ihrer unterschiedlichen Absorptionsmerkmale prinzipiell durch diesen Prozess bestimmt werden.

Anders als bei früheren Messungen, die Reflexionsdaten bei wenigen fest definierten Wellenlängen lieferten, deckt das SIR-2 Spektrum einen durchgehenden Wellenlängenbereich ab. Dies stellte sich als wichtig heraus, da klare Absorptionsstellen in Mondspektren oft fehlen.

*The different minerals can in principle be determined from the wavelength position and the depth of the absorption bands in the measured infrared spectrum. The wavelengths identify the different constituents and the depth is a measure for the abundance of a given mineral. Fig. 2 illustrates how two absorption lines help to characterize the composition by matching them with catalogs for conceivable minerals or mineral combinations. The lower left panel shows a reflectance spectrum from a central crater peak that has two clear absorption minima. The lower right panel shows where known minerals with two absorption minima are located on a map where the two wavelengths serve as x- and y-coordinate. The position of the measured minima on this map determines the mineral of the central peak. Most of the rock-forming minerals can be identified through this process thanks to their distinct absorption characteristics.*

*Differently from previous measurements which provided reflectance data at a few selected wavelengths, SIR-2 spectra cover a continuous wavelength range. This turned out to be important since clear absorption features are often missing in the lunar spectra.*

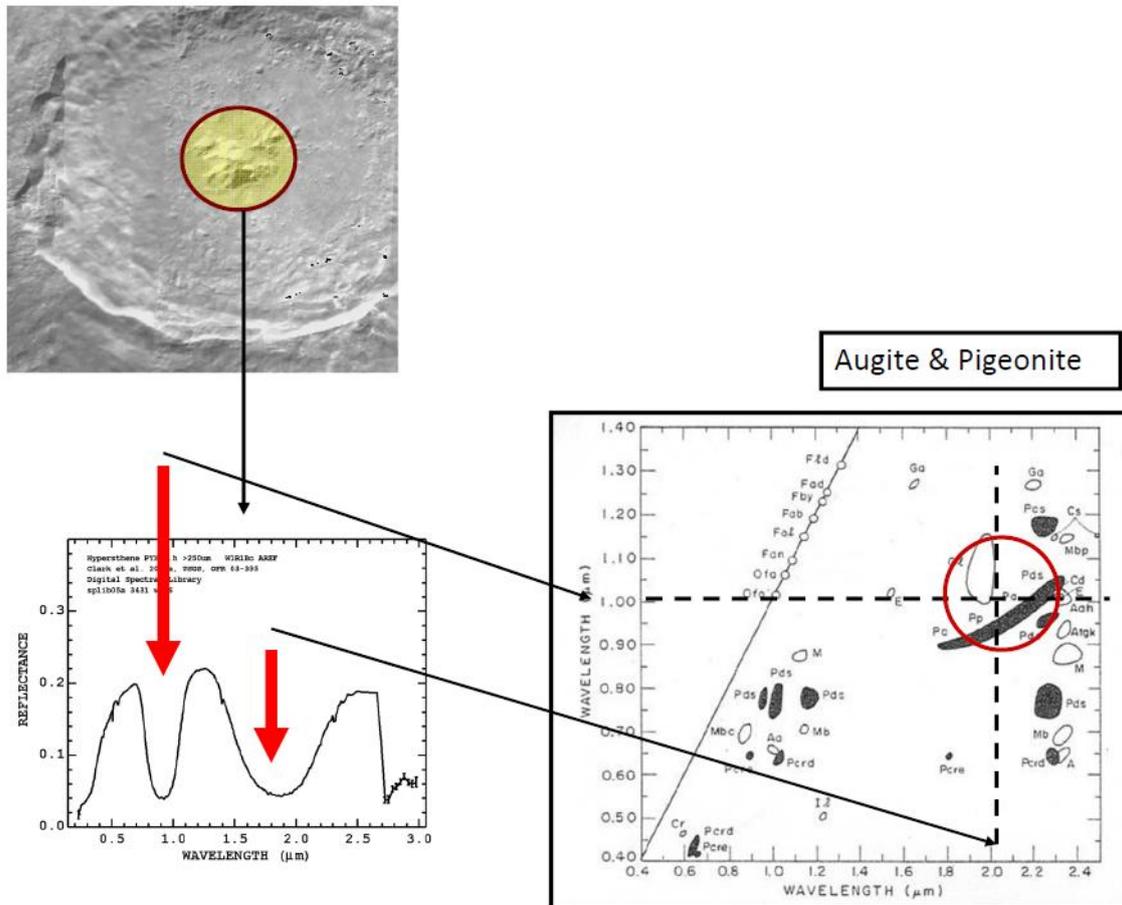


Abb. 2: Das Grundprinzip der Gesteinsbestimmung eines Zentralberges. Die zwei Absorptionslinien ermitteln das Mineral aus einem Katalog von J.B. Adams (rechts).

*Fig. 2: The basic principle of the central crater peak mineral identification. Two absorption lines identify the mineral in a catalog from J.B. Adams (right).*

Die allgemeine Form der Spektren kann dann wichtige und entscheidende Hinweise zu einer mineralogischen Identifikation liefern. Dieser Sachverhalt wird in Abb. 3 dargestellt, wo gezeigt wird, wie die Spektren von SIR-2 an eine mineralogische Modell-Zusammensetzung numerisch angepasst werden. Allerdings erlauben die verwendeten Inversionsalgorithmen oft keine eindeutige Bestimmung der mineralogischen Zusammensetzung. Das Beispiel zeigt, dass Olivine und Spinel beide aufgrund ihrer spektralen Eigenschaften in den betrachteten Spektren vorkommen können und dass eine eindeutige Bestimmung der Zusammensetzung nicht möglich ist.

In der Regel bestätigen die Daten von SIR-2 die Ergebnisse der Clementine-Mission von 1994. Allerdings erlauben sie zum ersten Mal die spektrale und räumliche Auflösung, die zur Aufklärung kleinräumiger Strukturen auf dem Mond notwendig sind. Die Zentralberge innerhalb der größeren Einschlagskrater enthalten oft mehr mafisches Material, d.h. mit Magnesium und Eisen angereichertes Material, als die, die auf der Hochlandkruste entstanden sind. Eine mögliche Erklärung

*The overall shape of the spectrum can then offer important decisive clues. Fig. 3 demonstrates that the high quality SIR-2 spectra can be fitted to a good precision by linearly adding the spectra of different minerals in a computer inversion algorithm. Very often, however, the spectra do not allow to uniquely determine the composition. For example, the spectral features of the minerals olivine or spinel are both candidates which could be present in the observed spectra.*

*SIR-2 data generally confirm the results from the Clementine mission launched in 1994, but offer for the first time the spectral and spatial resolution required to resolve small scale structures on the Moon. The central crater peaks within larger impact basins contain more mafic material, i.e. material enriched in magnesium and iron, than those that formed within highland crust. The interpretation is that the larger impacts that formed the basins had exposed the*

rung hierfür ist, dass die tiefere mafische Kruste durch die stärkeren Einschläge, die zur Beckenformation geführt haben, freigelegt wurde und später durch kleinere darauffolgende Ereignisse sedimentiert wurde. Die Daten zeigen also, dass die Mondkruste in ihrer Zusammensetzung unterschiedlich ist, und zwar sowohl global gesehen als auch auf einer Skala von nur 100 m.

*mafic lower crust which was then tapped later by smaller subsequent events. The data also show that the lunar crust is compositionally diverse, globally but also on a scale of only 100 m.*

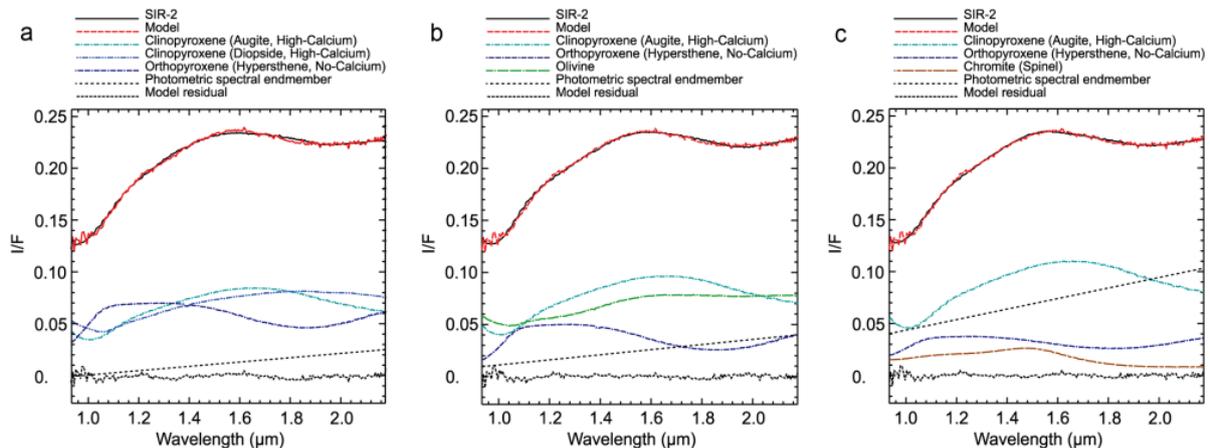


Abb. 3: Das SIR-2-Spektrum einer typischen mafischen Oberfläche kann mit drei verschiedenen Mineralzusammensetzungen gleichermaßen modelliert werden. a: Ca-pyroxenes (Clinopyroxen) und no-Ca-pyroxenes (Orthopyroxen). b: Gleiche Pyroxen wie in Bild a, aber mit Einbezug von Olivine. c: Gleiche Bestandteile wie in Bild b, allerdings mit Spinel anstatt Olivine.

*Fig. 3: The SIR-2 spectrum of a typical mafic-rich surface can equally well be modeled with three different mineral compositions. a: Ca-pyroxenes (clinopyroxenes) and no-Ca-pyroxenes (orthopyroxene) only. b: The same pyroxenes as in panel a, plus olivine. c: The same components as in panel b but with spinel instead of olivine.*

Die Feinheiten der lokal sichtbaren spektralen Variationen auf der Mondoberfläche werden erst durch den Vergleich der SIR-2-Spektren mit Bildern von hochauflösenden Kameras deutlich, wie sie z.B. die Mond-Mission LROC (NASA) liefert. Abb. 4 zeigt beispiellose Details der scharfen lithografischen Abgrenzung zwischen dem Hauptzentralberg im Copernicus-Krater und dem umgebenden Kraterboden.

*The subtleties of local spectral variations can only now being fully appreciated by the comparison and analysis of new high-resolution photographs of the lunar surface, for instance those available from the LROC (NASA) lunar mission. Fig. 4 shows unprecedented details of the sharp lithographical boundary between the main central peak in the Copernicus crater and the surrounding crater floor.*

Der dunkle, glatte und dicht mit Kratern versehene Kraterboden grenzt sich scharf von der Erhebung des Kraterzentralberges ab, der eine extrem hohe Albedo aufweist und selber nahezu keine Vertiefungen zeigt. Andere LROC Bilder, die hier nicht gezeigt werden, verraten die Präsenz von weit über den Kraterboden verteilten Felsen aus hellen Materialien, deren Oberfläche der der Berge ähnelt. Wir können erwarten, dass die spektralen Proben dieses extrem heterogenen Geländes, die mit SIR-2 aufgenommen wurden, eine große Variabilität der Spektraleigenschaften aufweisen. Mit der Analyse der SIR-2-Daten hat eine neue Ära der Kartographie und Erforschung des Mondes gerade erst begonnen.

*The dark, smooth and highly cratered floor sharply gives away to the elevated central edifices, which appear of extremely high albedo and nearly completely devoid of pitted features. Other LROC images not shown here reveal widely distributed outcrops of bright materials, superficially similar to the peaks, scattered across the crater floor. We can expect that the SIR-2 spectral samples of these highly heterogeneous terrains will also show a great variability in spectral features. A new dawn of lunar mineral mapping and investigation has just begun.*

## 2. Wasser und Eis auf den Polen des Mars

### 2.1 Phoenix

Am 25. März 2008 setzte die Phoenix-Mission am Pol des Planeten Mars auf (68.22°N, 234.25°O). Die Landeregion liegt etwa 1500 km nördlich des Tharsis-Plateaus und 1800 km nördlich des vulkanischen Gebiets Alba Patera. Der nächste Impaktkrater ist der 20 km entfernte Heimdahl-Krater mit einem Durchmesser von 11,5 km.

## 2. Water and ice in the polar region of Mars

### 2.1 Phoenix

*The Phoenix mission landed in the polar regions of Mars (68.22°N, 234.25°E) on May 25, 2008. The landing site is about 1500 km north of the northern border of the Tharsis plateau and about 1800 km north of Alba Patera volcanic complex. The closest major impact crater is the Heimdahl crater with a diameter of 11.5 km about 20 km away.*

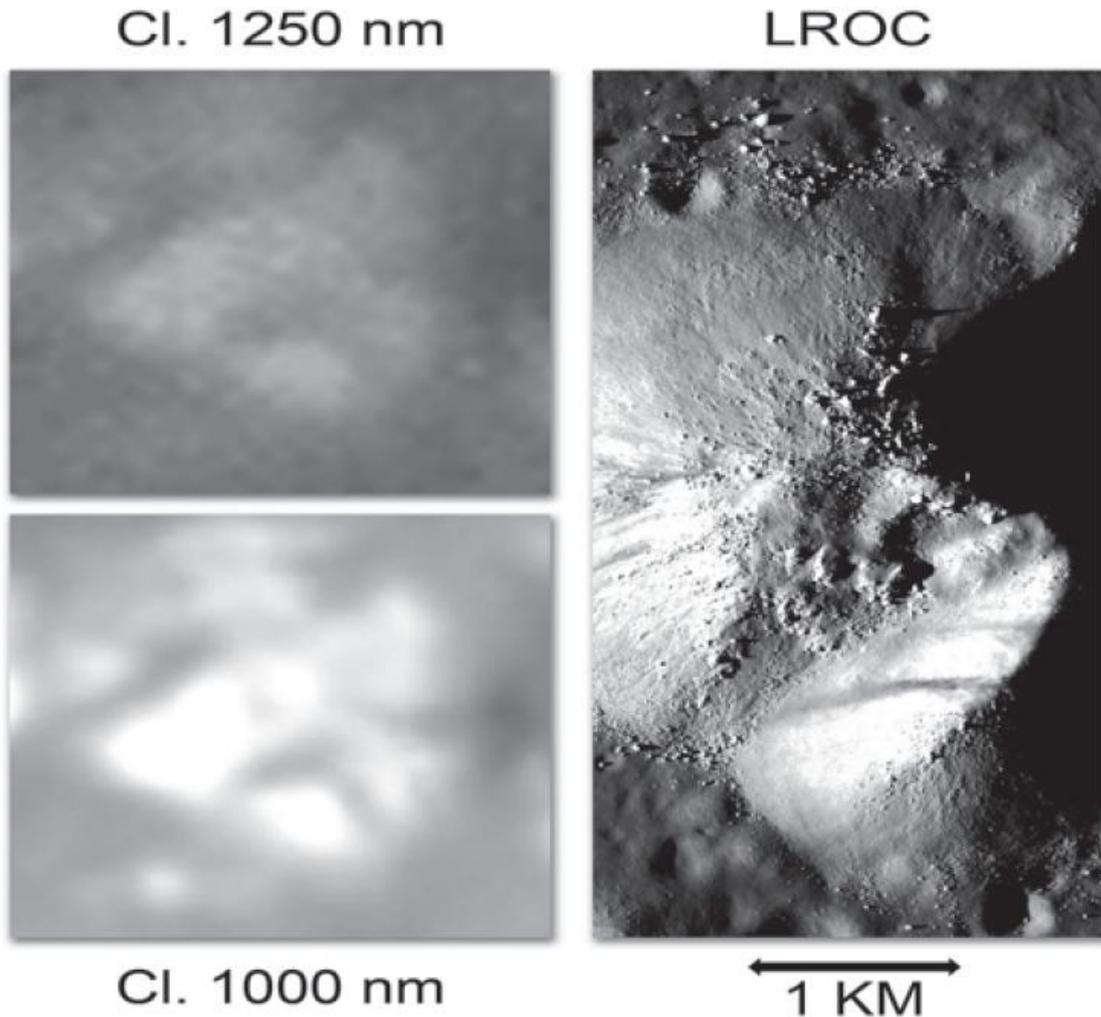


Abb. 4: Spektralfoto des Haupt-Zentralberges im Copernicus-Krater, aufgenommen von der Clementine-Mission in zwei diagnostischen Filterbandbereichen (1.00 und 1.25 $\mu$ m, ca. 200m räumliche Auflösung) und zum Vergleich ein von der Lunar Reconnaissance Orbiter-Kamera (Auflösung von 0.5 m) aufgenommenes Bild der gleichen Mondoberfläche.

*Fig. 4: Spectral images from the Clementine mission of the main central peak in the Copernicus crater at two diagnostic filter bands (1.00 and 1.25 $\mu$ m, ca. 200m resolution) compared to a photograph of the same area from the Lunar Reconnaissance Orbiter camera with 0.5m resolution.*

Das Hauptziel der Mission war es, das durch ein Gammastrahlen-Spektrometer an Bord des Mars-Odyssey-Orbiters entdeckte Wasservorkommen näher zu untersuchen. Vermutet wurde, dass das Wassersignal von einer Permafrostschicht stammt. MPS leitete

*The primary purpose of the mission was to investigate the hydrogen enrichment previously detected by the gamma-ray spectrometer on the Mars Odyssey orbiter. The enrichment in hydrogen was being interpreted as a water permafrost layer. MPS contributed*

das Instrumententeam für die an dem Roboterarm montierte Kamera (RAC) und beteiligte sich auch an dem optischen Mikroskop MECA. Phoenix landete in einer Region, in der der Untergrund durch Polygone geprägt ist (Abb. 5). Diese Strukturen treten auf, wenn eine mit Eis durchsetzte flache Sedimentschicht saisonalen Schwankungen ausgesetzt ist, und werden darum auch in den Tundraregionen der Erde gefunden. Wenn sich die Sedimentschicht bei kalten Temperaturen zusammenzieht, treten Risse auf. Diese füllen sich mit durch Wind eingeblasenes Sediment und können sich bei steigender Temperatur nicht mehr schließen. Das Innere des Polygons wölbt sich darum auf.

*with instrument lead on the Robotic Arm Camera (RAC) and participation in the MECA instrument (Optical microscope detector system). Phoenix landed in a region dominated by polygonal ground features (see Fig. 5). These polygonal features are typical for the presence of widespread, shallow, cohesive icy soil that experience seasonal temperature cycles and are also found in the tundra on Earth. The seasonal temperature cycles cause the contraction cracks to fill with wind born sediments. The cracks are then not able to close again during the expansion at warmer temperatures, causing the interior of the polygons to bulge.*

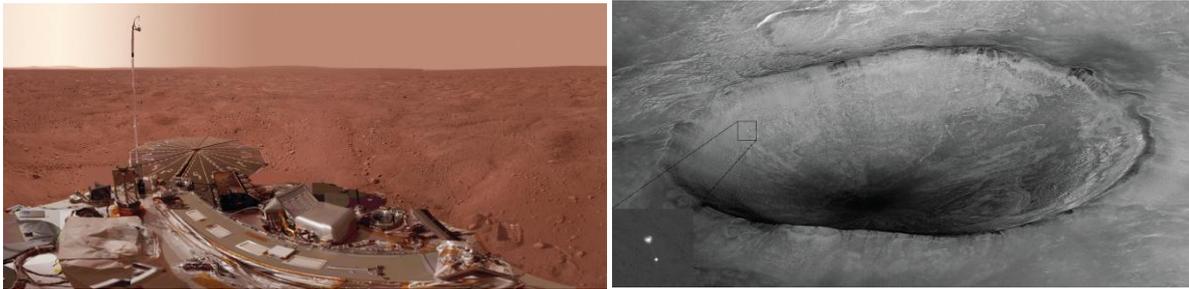


Abb. 5: (Links) Die Landeregion des Phoenix zeigt polygonale Strukturen. (Rechts) Der Phoenix-Lander während der Landung. Das Bild wurde von der HiRISE-Kamera an Bord des Mars-Reconnaisance Orbiter aufgenommen. Der geneigte Blickwinkel zeigt im Hintergrund den Heimdahl-Krater mit einem Durchmesser von 11,5 km.

*Fig. 5: (left) The Phoenix landing site showing polygonal features. (right) The Phoenix lander as imaged during the landing. The image was acquired by the HiRISE camera on the Mars Reconnaissance Orbiter. The image has been acquired at an oblique angle with the 11.5 km Heimdahl crater in the background.*

Da Phoenix am Rand so einer Struktur landete, konnte sowohl die Kante als auch das Innere des Polygons mit dem Roboterarm untersucht werden, der mit seiner Schaufel in das Sediment grub. Anzeichen für oberflächennahes H<sub>2</sub>O-Eis waren schnell gefunden (Abb. 6). Eine der ersten vom Roboterarm eingesammelten Sedimentproben zeigte bereits weißes Material. Aufnahmen von der Unterseite des Landers zeigten dort, wo die Bremsraketen die Oberfläche freigeblasen hatten, eine helle und glatte Oberfläche. Diese wurde "Holy Cow" genannt nach dem erstaunten Ausruf eines Wissenschaftlers, als er die erste Aufnahme der Struktur sah. Wiederholte Aufnahmen von verschiedenen Oberflächenstrukturen zeigen auch, dass das Eis schmilzt. In direktem Kontakt mit der Marsatmosphäre ist Wassereis instabil. Nur eine isolierende Schicht von Sediment kann das Schmelzen verhindern.

*Phoenix was fortunate enough to land close to the edge of a polygonal feature. This allowed access to both the edge and interior of the polygon with the robotic arm used to dig into the Martian surface. Indications that H<sub>2</sub>O water ice was present in the near surface were quickly seen (Fig. 6). An early soil sample collected by the robotic arm showed white material. Images taken of the underside of the lander showed that the retro rockets had cleaned off the top soil down to a flat hard layer with high albedo (called Holy Cow after the exclamation of the scientists when they first saw the image). Repeated imaging of various surface features also showed evidence of ice sublimating away. Water ice in direct contact with the Martian atmosphere is unstable and will sublimate away. Water ice is only stable because of the isolating effect of a layer of soil on top of the ice.*

Als der Roboterarm versuchte, Gräben zu schaufeln, stieß er auf eine harte Schicht. Deren Tiefe nimmt von etwa 5 cm im Inneren des Polygons auf etwa 20-25 cm am Rand zu. Diese Werte stimmen mit dem überein, was man für durch Wassereis hervorgerufene Polygone erwarten würde. Der endgültige Beweis, dass es sich wirklich um Wassereis handelt, wurde von dem

*When digging trenches, the Phoenix robotic arm encountered a hard layer. The depth of the hard layer varied from  $\approx$  5cm in the interior of a polygon down to 20-50cm in the troughs at the edge of the polygon. This is consistent with a periglacial thermal contraction polygon formed by water ice. The final proof of water ice in the Martian Polar Regions was provided*

Gasanalysegerät TEGA geliefert. TEGA konnte das von einer Probe verdampfende Wasser messen, die von der harten Schicht am Grunde des "Wicked Witch" Grabens gekratzt wurde.

*by the TEGA (Thermal Evolver Gas Analyzer). TEGA detected a low temperature release of H<sub>2</sub>O from a sample acquired from the Wicked Witch trench by scraping the hard layer at its bottom.*



Abb. 6: (Links) Wahrscheinlich Wassereis in der Schaufel des Roboterarms, aufgenommen von der RAC-Kamera. (Mitte) Ein Blick unter den Lander, wo die Bremsraketen hartes, helles Material (Wassereis) freigeblasen haben ("Holy-Cow"-Struktur). (Rechts) Zwei Abbildungen zu verschiedenen Zeiten (Sol 20 und 24), die zeigen, wie das Wassereis schmilzt.

*Fig. 6: (left) Possible water ice in the scoop of the robotic arm as imaged by the RAC camera. (middle) Areas under the lander where the retro rocks have cleaned away the top soil down to a hard bright (water ice) layer (Holy Cow feature). (right) Two SSI images (Sol 20 and Sol 24) showing soil clouds disappearing because of ice sublimation.*

## 2.2 Trockene Seen auf dem Mars

Zusätzlich zu den kleineren Polygonen mit Durchmessern zwischen 2m und 10m in der Nähe der Landeregion zeigen Bilder aus dem Orbit viel größere Polygone mit Durchmessern von 15 m bis 350 m. Diese wurden auf dem Boden eines Kraters in der Polarregion des Mars entdeckt (Abb. 7).

Ein analytisches Modell, das auf Bruchmechanik basiert, zeigt, dass unter den herrschenden klimatischen Bedingungen der thermische Stress durch Temperaturschwankungen Bruchabstände von maximal 75 m entstehen lassen würde. Realistischere Abschätzungen liefern Abstände von 18m bis 22 m, was im Bereich der auf Mars gefundenen kleinen Polygone liegt. Ursache für die großen Polygone in Kratern könnte das Austrocknen ehemals feuchten Sediments sein, wobei ein Beitrag durch thermischen Stress aber nicht ausgeschlossen werden kann. Das würde bedeuten, dass es einmal Seen oder wasserreiche Sedimente in der Kratern gegeben haben muss. Viele solcher Regionen haben keine offensichtliche äußere Quelle für Wasser. Das Auftauen von Wassereis kurz nach dem Impact ist jedoch eine mögliche Erklärung. Andere Strukturen, wie Sedimentablagerungen, Hügel, und Strandlinien weisen ebenfalls darauf hin, dass es einmal Seen auf dem Mars gegeben hat und Austrocknung dann die großen Polygone formte. Die Variation der Polygongröße lässt sich mit verschiedenen hydrologischen Umgebungen erklären.

## 2.2 Dry lake beds on Mars

*In addition to the polygonal features (size 2-10m) seen at the Phoenix landing site, orbital images also show polygons with a much larger scale (size 15-350m). These polygonal features are found in the floor of a large number of craters in the polar regions of Mars (Fig. 7).*

*An analytical model based on fracture mechanics reveals that under current climatic conditions, the maximum fracture spacing attainable by thermal stresses alone is 75m at the most. More reasonable values fall within 18m and 22m, which is the size range of thermal contraction polygons on Mars. As a result, desiccation of formerly wet sediments is considered to be the likely mechanism for the formation of crater floor polygons (without ruling out thermal contraction processes as a possible contributor in some cases). This implies that lakes or water-rich sediments existed in the craters in the past. Many such aqueous environments have no apparent external source of water, and thus, hydrothermal processes occurring shortly after the impact event may be a viable explanation for the observed evidence. Other features such as sedimentary deposits, mounds, and shorelines, corroborate past lake formation and possible desiccation to form crater floor polygons. Furthermore, the variation of crater floor polygons sizes with location can be indicative of different hydrologic environments.*

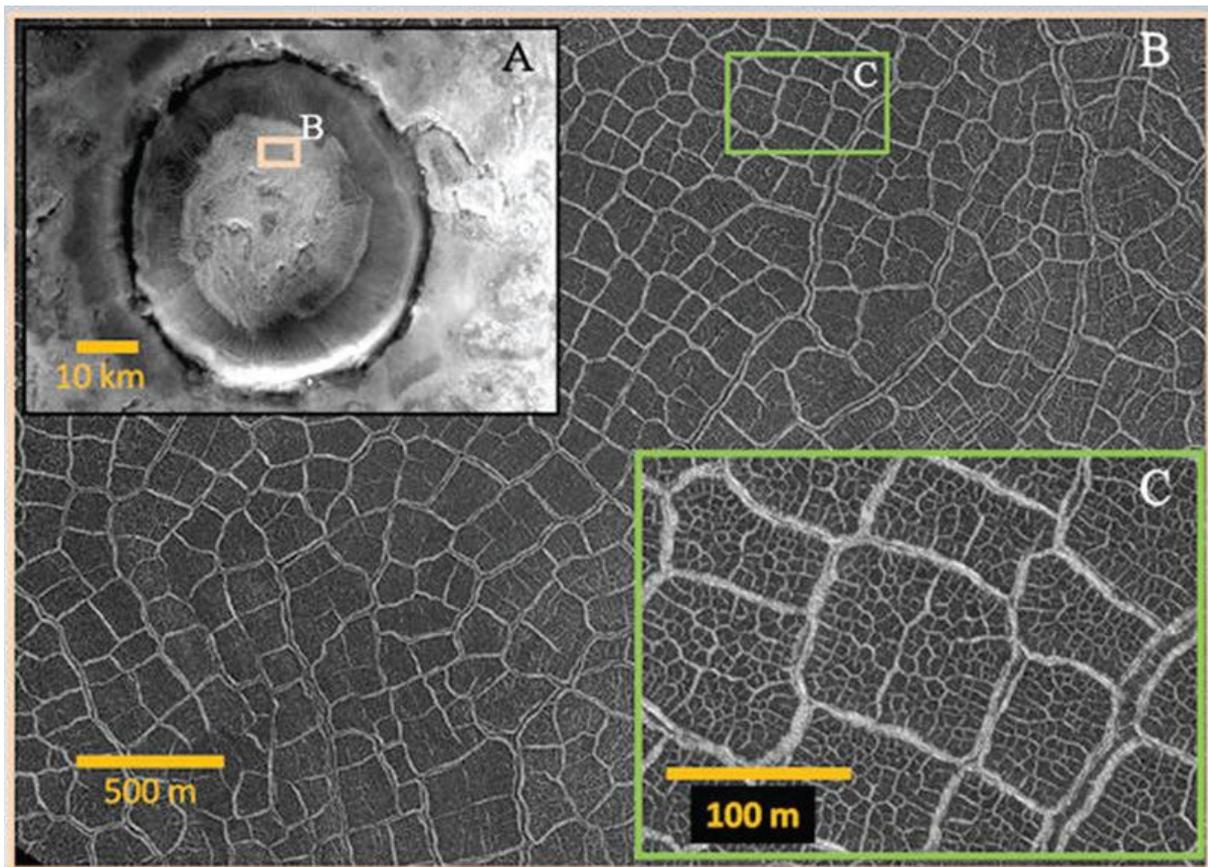


Abb. 7: Typische Polygone am Boden eines Kraters. A und B: Bilder von der MRO-CTX-Kamera (Auflösung 6 m pro Pixel) von einem Impaktkrater (67.2°N und 47.8°O) mit 14 km Durchmesser. Zwei unterschiedliche Klassen können identifiziert werden: Größere Polygone zwischen 70 und 350 m Durchmesser, mit einem mittleren Durchmesser von 120 m und fast orthogonalen Rändern, und kleinere Polygone zwischen 5 und 20 m. C: Ausschnitt einer Aufnahme der MRO-HiRise-Kamera (Auflösung 25 cm pro Pixel) vom selben Krater und einem Polygon mit 100 m Durchmesser und umgebenden 6 bis 8 m breiten, frostgefüllten Mulden. Sekundäre Mulden innerhalb der größeren Strukturen formen kleinere Polygone mit 10 m Durchmesser. Diese sind wahrscheinlich die periglazialen Polygone, wie sie in der Tundra auftreten.

*Fig. 7: Typical crater floor polygons. A and B: MRO-CTX camera image (resolution 6m per pixel) of a 14 km sized impact crater located at 67.2°N and 47.8°E. Two distinct size groups can be seen: A large 70 - 350m sized polygon with an average diameter of 120m and mainly orthogonal trough intersections, and a smaller group, not always present, ranging in size from 5 to 20 m. C: MRO-HiRise (resolution 25cm per pixel) sub-image for the same crater of a 100m wide polygon with a 6 - 8m wide, frost-filled troughs surrounding it. Secondary troughs within the larger features form polygons with an average diameter of 10m. These embedded features are probably periglacial thermal contraction polygons.*

#### Ausgewählte Veröffentlichungen

##### *Selected publications*

Bugiolacchi, R., U. Mall, M. Bhatt, et al.: An in-depth look at the lunar crater Copernicus: Exposed mineralogy by high-resolution near-infrared spectroscopy. *Icarus* 213, 43–63 (2011), doi:10.1016/j. icarus.2011.02.023.

El Maarry, M. R., W. J. Markiewicz, M. T. Mellon, et al.: Crater floor polygons: Desiccation patterns of ancient lakes on Mars? *J. Geophys. Res.* 115, E10006 (2010), doi:10.1029/2010JE003609.

Goetz, W., W. T. Pike, S. F. Hviid, et al.: Microscopy analysis of soils at the Phoenix landing site, Mars: Classification of soil particles and description of their optical and magnetic properties. *J. Geophys. Res.* 115, E00E22 (2010), doi:10.1029/2009JE003437.

Smith, P. H., L. K. Tamppari, R. E. Arvidson, et al.: H<sub>2</sub>O at the Phoenix Landing Site. *Science* 325, 58–61 (2009), doi:10.1126/science.1172339.

### 1.2.5 Die Atmosphären der Planeten

Die Atmosphären der Planeten im Sonnensystem sind recht unterschiedlich. Ihr heutiger Zustand hängt von einer ganzen Reihe von Parametern ab, z.B. davon, wie weit der Planet von der Sonne entfernt ist, wie groß seine Masse und damit die Anziehungskraft ist, woher das Material stammt aus dem die Atmosphäre zusammengesetzt ist und wie die Atmosphäre sich aufgrund dieser Gegebenheiten entwickelt hat. Zunächst bildeten sich die vier äußeren Planeten, auch Gasriesen genannt, durch Akkretion von Material im äußeren Sonnensystem. Die Hauptbestandteile ihrer Atmosphären sind Wasserstoff und Helium. Die vier inneren Planeten werden als erdähnlich oder terrestrisch bezeichnet, womit allerdings in erster Linie der Aufbau der festen Bestandteile gemeint ist. In ihrer Entstehungsphase war es auf den Oberflächen so heiß, dass nahezu alle flüchtigen Bestandteile und somit die Atmosphären ins All entwichen sind. Erst in einer späteren Phase, deren Zeitpunkt (ca. 50 bis 600 Millionen Jahre nach deren Entstehung) kontrovers diskutiert wird, kam es durch Einschläge von Kometen, Asteroiden oder gar Planetoiden, deren Ursprung in den kühleren Regionen des Sonnensystems lag, zur massiven Anlieferung der Elemente, aus denen sich die Atmosphären von Venus, Erde und Mars entwickelten. Deren ursprüngliche Hauptbestandteile waren Kohlendioxid, Wasserdampf und Stickstoff. Während es auf der Venus zu heiß und auf dem Mars zu kalt war, um über längere Zeiträume flüssiges Wasser zu bilden, löste sich in den Erdozeanen ein Großteil des Kohlendioxids auf und ist heute in Form von Carbonaten im Gestein gebunden, so dass Stickstoff zum häufigsten Bestandteil der Erdatmosphäre wurde. Die später einsetzende Photosynthese führte schließlich zur Bildung der heutigen Sauerstoffkonzentration. Kohlendioxid und Stickstoff stellen nach wie vor den Hauptbestandteil der Venus- und Marsatmosphäre dar, der Wasserdampf wurde durch Photodissoziation (Venus und Mars) bzw. Ausfrieren (Mars) zum Spurenstoff.

Die Struktur der Atmosphären wird u.a. durch deren chemische Zusammensetzung bestimmt. Die hohe Sauerstoffkonzentration in der Erdatmosphäre führte zur Ausbildung der Ozonschicht, die einen Teil der UV-Strahlung der Sonne absorbiert und eine Temperaturinversion in der mittleren Atmosphäre hervorruft. Die so entstandene Schicht heißt Stratosphäre. In den Gasriesen führt Absorption von Sonnenstrahlung durch Kohlenwasserstoffe und Aerosole zur Ausbildung von Stratosphären. Die Stratosphären werden nach unten durch die Troposphären und nach oben durch die Meso- bzw. Thermosphären begrenzt. Die Evolution, Physik und Chemie dieser Atmosphärenschichten sowie Wechselwirkungen mit den Planetenoberflächen und der Sonnenaktivität werden am

### 1.2.5 Planetary atmospheres

*The atmospheres of the planets in the solar system are quite different. Their present state depends on a number of parameters, for instance the heliocentric distance, its mass and gravity, where the atmospheric building material comes from and how the atmosphere evolved with time under these circumstances. Initially the four outer planets, called gas giants formed by accretion of material from the outer solar system. The main constituents of their atmospheres are hydrogen and helium. The four inner planets are called terrestrial planets mainly due the similar composition of their solid constituents. When the terrestrial planets formed, their very hot surface forced any volatile components including their atmosphere to escape to space. In a later phase, atmospheric forming volatiles from the outer cool region of the solar system were massively delivered by impacts of comets, asteroids or even planetoids (the largest with more than 1000 km diameter). When these impacts exactly happened (50-600 million years after the formation of the planets) is controversially debated. The initial composition of the terrestrial atmosphere of Venus, Earth and Mars was dominated by carbon dioxide, water vapor and nitrogen. While it was too hot on Venus and too cold on Mars to form liquid water over longer periods, in the Earth ocean carbon dioxide started to dissolve and was slowly transformed into carbonates in rocks. Nitrogen remained the most abundant gas in the Earth atmosphere. Later photosynthesis made molecular oxygen the second abundant gas. In the atmospheres of Mars and Venus, carbon dioxide and nitrogen are still the most abundant constituents. Since water vapor was either frozen out (Mars) or photolyzed (Venus and Mars) it became a trace gas in present days.*

*The structure planetary atmospheres form depends on their chemical composition. The high molecular oxygen concentration in the Earth atmosphere is the main condition required to build up the ozone layer, absorbing a large fraction of the ultra violet (UV) radiation of the sun. The absorption of UV light heats up the middle atmosphere and creates a temperature inversion called stratosphere. The gas giants have also stratospheres, but the heating of their middle atmosphere is caused by absorption of solar radiation by carbon hydrates and aerosols instead. The stratospheres are confined by the troposphere below and the mesosphere and thermosphere above. The evolution, physics and chemistry of these atmospheric layers, their interaction with the planetary surfaces and the solar*

MPS theoretisch und experimentell hauptsächlich im Rahmen von bodengebundenen Beobachtungen und Raumfahrtmissionen erforscht. Im Folgenden werden Forschungsergebnisse nach Planeten geordnet dargestellt.

### Venus

Die Venus Express Mission der ESA hat viel zum heutigen Verständnis der Venusatmosphäre beigetragen. Das MPS war an führender Stelle an der wissenschaftlichen Koordination und Planung der Mission, sowie instrumentell mit der Venus Monitoring Camera (VMC) beteiligt. Ferner gab es wissenschaftliche und operationelle Beteiligungen an dem bildgebenden Infrarotspektrometer VIRTIS (Visible and InfraRed Thermal Imaging Spectrometer) sowie dem Radio Science Instrument VeRa. Aus diesen Daten wurde ein konsistentes Bild der Meteorologie der Venusatmosphäre an der Wolkenobergrenze entwickelt.

Die Wolken in der Venusatmosphäre bestehen aus Schwefelsäure und Schwefeldioxid. Die Wolkenuntergrenze liegt in ca. 50 km Höhe. Die Obergrenze ist abhängig von der geographischen Breite und konnte mit Hilfe von VIRTIS durch Analyse der Absorptionstiefe des Kohlendioxid Bandes bei 1.6  $\mu\text{m}$  Wellenlänge erstmals exakt bestimmt werden. Dabei stellte sich heraus, dass die Wolkenobergrenze von ca. 74 km am Äquator und in niedrigen Breiten auf 63 bis 69 km in der Polarregion abfällt und dort in ihrer Ausdehnung mit dem im UV-Bereich von VMC aufgenommenen dunklen Polaroval übereinstimmt (Abb. 1e). Die Analyse von VIRTIS-Messungen im thermischen Infrarot sowie von Radiookkultationsmessungen hat ergeben, dass der Höhenabfall bei ca. 50 bis 60° südlicher Breite beginnt und mit einer Reduzierung der Temperatur einhergeht.

VMC hat im UV Bereich (Filter zentriert um 365 nm) eindrucksvolle Ergebnisse über die Verteilung des sogenannten unbekanntes Absorbers geliefert. Die Kontrastschwankungen in Abb. 1 werden durch die inhomogene Verteilung des Absorbers an der Wolkenobergrenze hervorgerufen. Durch die exzentrische Umlaufbahn von Venus Express wurden dabei sowohl globale als auch lokale Bilder mit hoher Auflösung aufgenommen und neue Merkmale in der Wolkenstruktur entdeckt, z.B. die „Lace“ Wolken, Wolkentürme in niedrigen Breiten, das schon erwähnte dunkle Polaroval und schmale kreis- oder spiralförmige „Rillenwolken“ in der Polarregion. Ferner wurden erstmals detaillierte Strukturen in den Regionen um den sub-solaren Punkt (d.h. da, wo die Sonne im Zenit steht) sowie der Wirbelzone in der Nachmittagshemisphäre sowie einer ganzen Reihe anderer Merkmale wie z.B. lokalen Aufhellungen gesichtet. Durch das langfristige, kontinuierliche Monitoring des Planeten

*radiation and activity are investigated by theoretical and experimental studies at MPS. The following paragraphs will illustrate the scientific results ordered by planets.*

### Venus

*The Venus Express mission of the European Space Agency (ESA) is now approved until the end of 2012 with plans for further extension for two more years. Both the spacecraft and the payload are in good shape, continuing systematic monitoring of the planet that now is already the longest and most complete Venus mission in many aspects. MPS was deeply involved in the mission science coordination, scientific support of planning and operations, and analysis of the observations by the Venus Monitoring Camera (VMC), the Visible and InfraRed Thermal Imaging Spectrometer (VIRTIS), and the radio science experiment (VeRa). A new consistent picture of meteorology at the Venus cloud tops is emerging from these data.*

*The clouds in the Venus atmosphere consist mainly of sulfuric acid and sulfur dioxide. The cloud bottom is at around 50 km altitude. The cloud top altitude has been derived from the depths of the CO<sub>2</sub> absorption band at 1.6  $\mu\text{m}$  wavelengths. It is located at about 74 km in the middle and low latitudes, decreasing poleward from ~ 50° by about two atmospheric scale heights and reaches 63-69 km in the polar regions. This global polar depression discovered by Venus Express coincides with the eye of the planetary vortex and the dark oval in Figure 1e. Surprisingly, CO<sub>2</sub> absorption bands are often weaker in the dark UV features, indicating that the dark markings are likely to be located a few hundred meters higher. Further analysis of VIRTIS- and radio occultation measurements confirmed that the depression starts at 50 to 60° poleward and is connected with a temperature reduction.*

*The VMC camera has delivered so far the longest record of observations of the Venus cloud tops in four narrowband filters from UV to near-IR. The most exciting results come from the UV filter centered at 365 nm – the absorption feature of the unknown absorber mixed into the sulfuric acid aerosol that constitute the bulk of the Venus clouds. The contrast pattern on the Venus disk continuously imaged in the filter are produced by inhomogeneous distribution of the unknown absorber at the cloud tops (Fig 1). The highly eccentric polar orbit allows for VMC to combine context images of the Venus Southern hemisphere, taken with spatial resolution better than ~ 50 km per pixel, with close-up snapshots and mosaics of the low latitudes and the Northern hemisphere with a resolution of up to a few hundred meters per pixel, thus putting small-scale features in a global context. The camera discovered new features like “lace clouds” and cloud columns at low latitudes, dark polar oval and narrow circular and*

mit hoher zeitlicher Auflösung konnten auch erstmals Änderungen in der Morphologie der Wolken nachverfolgt werden.

*spiral "grooves" in the polar regions, different types of waves at high latitudes. The VMC observations revealed detailed structure of the sub-solar region and the afternoon convective wake. VMC provided almost continuous monitoring of the planet with high temporal resolution that allows to follow changes in the cloud morphology at various scales.*

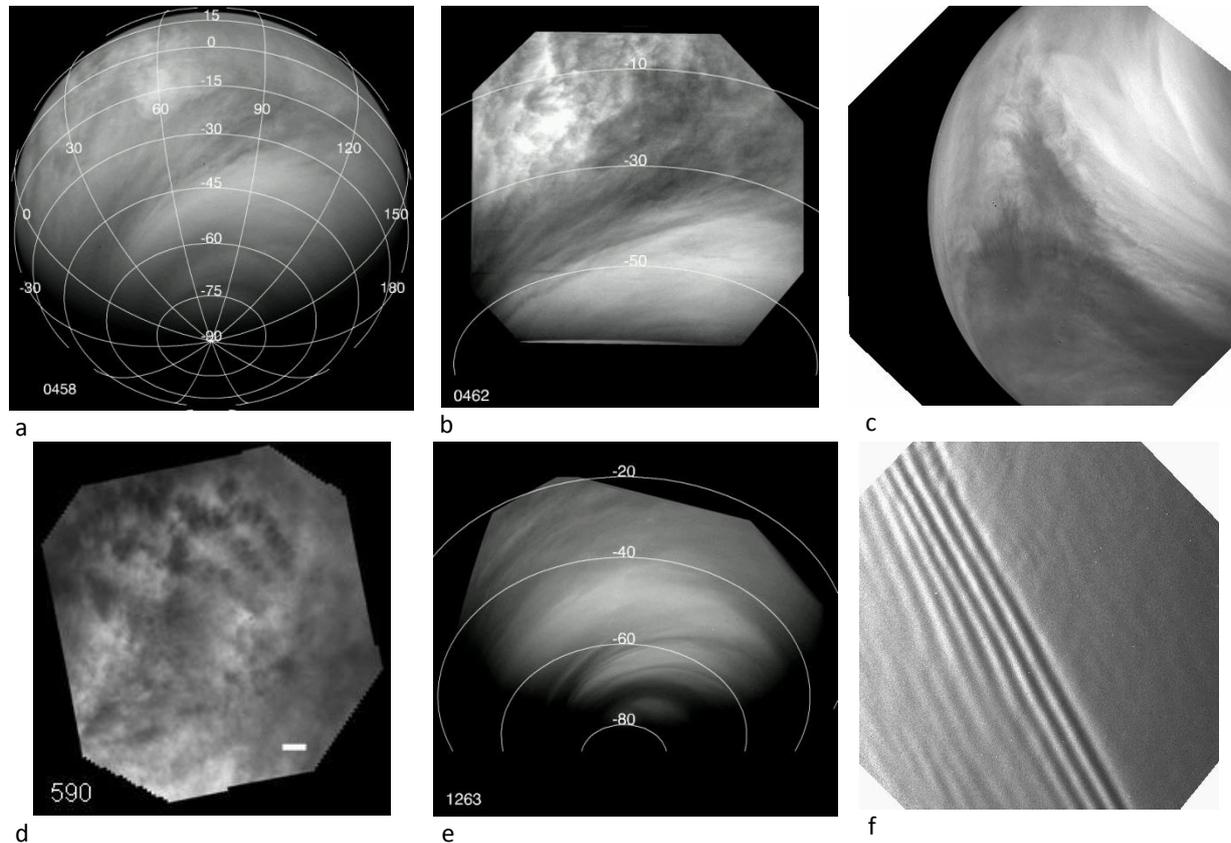


Abb. 1: VMC UV Bilder von Venus (a) globale Ansicht aus einer Entfernung von 30000 km mit Südpol unten; (b) Struktur der Übergangsregion in mittleren Breiten; (c) die subsolare Zone; (d) Wolkentürme und Wellen in der Nähe des Äquators (der weiße Balken in der unteren rechten Ecke entspricht 200 km); (e) "Polarkappe" mit dunklem Oval bei  $\sim 70^\circ\text{S}$  und dünne "Rillen"; (f) Beispiel für lange polare Wellen.

*Fig. 1: VMC UV images of Venus: (a) global view of Venus from a distance of  $\sim 30000$  km. The southern pole is in the bottom; (b). structure of the mid-latitude transition region; (c). sub-solar zone; (d) cloud columns and waves near equator (white bar in the lower right corresponds to 200 km); (e) "polar cap" with dark oval at  $\sim 70^\circ\text{S}$  circle and thin "grooves"; (f) example of long polar waves.*

Durch die Verfolgung der Wolkenbewegungen im ultravioletten Licht wurden auch Windgeschwindigkeiten bestimmt. Zonale (Ost-West) Winde erreichen ihr klimatologisches Maximum von 90 bis 100 m/s in niedrigen Breiten ( $< 40^\circ$ ) und flauen dann ab ca.  $50^\circ$  stark ab. Meridionale (Nord-Süd) Winde hingegen erreichen ihr Maximum von ca. 20 m/s in mittleren Breiten (ca.  $50^\circ$ ) und fallen gegen Äquator und Pol gegen Null ab. Diese Windmuster konnten weitgehend durch komplementäre, aus Temperaturmessungen mit VeRa gewonnene thermische Winde bestätigt werden.

*Tracking of UV cloud markings provides a powerful tool to study winds. The zonal wind at the cloud top has been determined to have a climatological maximum of 90 to 100 m/s in lower latitudes ( $< 40^\circ$ ) and quickly fade out towards the pole. The meridional winds show a maximum of about 20 m/s in mid-latitudes ( $\sim 50^\circ$ ) and slow down to zero towards equator and poles. This pattern has been confirmed by complementary observations of temperature from which similar thermal wind patterns have been derived.*

**Erde**

Das MPS erforscht die mittlere und obere Atmosphäre der Erde durch Beobachtungen im Millimeterwellenbereich, die Interpretation der gewonnenen Daten sowie durch Modellrechnungen. Theoretische Konzepte der Atmosphärenphysik und -chemie können einfacher durch Messungen verifiziert werden als das bei Planetenatmosphären der Fall ist. Diese Konzepte können dann ggf. auf andere Planetenatmosphären übertragen werden.

In den Jahren 2009 und 2010 wurden Wasserdampf und Ozondaten auf kurzen (Ozonlöcher in der Stratosphäre) und langen Zeitskalen (Sonnenszyklus) analysiert und Modellrechnungen zur Atmosphärenchemie und Dynamik durchgeführt, deren Ergebnisse an zwei Beispielen in kurzer Form präsentiert werden.

1) Suche nach solaren Signalen im mesosphärischen Wasserdampf

Weil sich die totale Bestrahlungsstärke der Erde im Verlauf eines Sonnenfleckenzyklus um weniger als 0.1 % ändert, ist ein direkter Einfluss auf Klimavariationen unwahrscheinlich. Kürzerwellige Sonnenstrahlung, z.B. im UV variiert allerdings wesentlich stärker. Neuere Satellitenmessungen zeigen, dass die Lyman- $\alpha$  Strahlung in der gleichen Periode um etwa den Faktor 2 schwankt. Da Wasserdampf von Lyman- $\alpha$  Strahlung photolysiert wird, sollte der Wasserdampfgehalt der oberen Mesosphäre gegenläufig zur solaren Aktivität schwanken. Um diesem „Sonnensignal“ auf die Spur zu kommen, wurde eine 11-jährige Periode (1995 – 2006) unseres Wasserdampfdatensatzes der polaren Mesosphäre analysiert – mit erstaunlichen Ergebnissen. Abb. 2 zeigt die relative Änderung der Wasserdampfkonzentration mit der Höhe, getrennt nach Winter und Sommermonaten für eine Änderung der Lyman- $\alpha$  Strahlung um  $10^{11}$  Photonen  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Oberhalb von 80 km sieht man sowohl im Sommer als auch im Winter die erwartete Antikorrelation. Unterhalb von 80 km im Sommer und unterhalb von 65 km im Winter steigt der Wasserdampfgehalt mit zunehmender Sonnenaktivität dagegen an. Die positive Korrelation in den Wintermonaten lässt sich mit den beobachteten, häufiger auftretenden stratosphärischen Erwärmungen während hoher Sonnenaktivität begründen (wobei der Mechanismus nicht genau bekannt ist). Stratosphärische Erwärmungen gehen in der Regel einher mit dem Transport wasserdampfreicherer Luft von unten und aus niedrigeren Breiten bis in die mittlere Mesosphäre. Der Grund für die positive Korrelation im Sommer liegt möglicherweise in autokatalytischen Reaktionen des Wasserdampfs sowie aufwärts wehenden Winden, die wasserdampfreiche Luft aus tieferen Schichten nach oben befördern und Verluste ausgleichen. Umgekehrt wird im Winter die wasserdampfarme Luft aus dem Mesopausenbereich,

**Earth**

*MPS investigates the middle and upper atmosphere of the Earth by observations in the millimeter wave range, by the interpretation of the collected data and by model calculations. Theoretical concepts of atmospheric physics and chemistry are easier to be verified by these measurements than it is the case for planetary atmospheres. These constrained concepts are then applied to planetary atmospheres.*

*In the years 2009 and 2010 water vapor and ozone data were analyzed on short (e.g. ozone holes in the stratosphere) and long (solar cycle) time scales and supplemented by model calculations of atmospheric physics and chemistry. We will present two examples below.*

*1) Search for solar signals in the mesospheric water vapor*

*The total solar irradiance varies by less than 0.1 % during a solar cycle. Therefore a direct influence of solar variability on the climate is rather unlikely. Solar radiation with shorter wavelengths however varies to a much larger extent. Latest satellite measurements show a variation of the solar Lyman- $\alpha$  radiation by nearly a factor of 2 over a solar cycle. Since water vapor is photolyzed by Lyman- $\alpha$  radiation, its concentration in the upper mesosphere is expected to vary in opposite phase. In order to find such variations, we analyzed an 11-years period (1995-2006) from our water vapor data set of the polar mesosphere – with amazing findings. Figure 2 shows the relative variation of the water vapor concentration with altitude, split for winter and summer months for a variation of the Lyman- $\alpha$  radiation by  $10^{11}$  photons  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Above 80 km altitude we find indeed the expected anti-correlation. However, below 80 km altitude in summer and 65 km in winter the water vapor concentration correlates with solar activity. The positive correlation in the winter months is likely to be related to the observed increased number of stratospheric warmings during high solar activity (the mechanism why more stratospheric warmings appear is not understood). During stratospheric warmings water vapor rich air is transported from mid-latitudes into polar latitudes and from lower altitudes into the middle mesosphere. The positive correlation in the summer months is possibly caused by autocatalytic water production and upward blowing winds, transporting the water vapor rich air from deeper layers, compensating the loss by photolysis. During winter the opposite happens: the very dry air from the mesopause – a region where the destruction of water vapor by Lyman- $\alpha$  radiation is most efficient - is transported downwards.*

in dem die Lyman- $\alpha$  Strahlung besonders effizient wirkt, nach unten befördert.

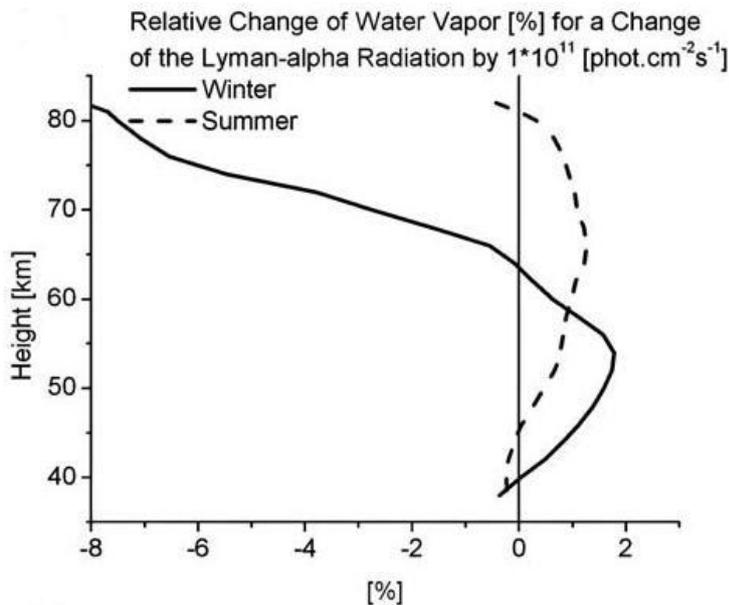


Abb. 2: Relative Änderung des Wasserdampf Mischungsverhältnisses (in Prozent) für ein Ansteigen der Lyman- $\alpha$  Strahlung von  $1 \times 10^{11}$  Photonen  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Sommer- und Wintermonate sind separat dargestellt

Figure 2: Relative change of water vapor mixing ratio (in percent) for an increase for the Lyman- $\alpha$  radiation by  $1 \times 10^{11}$  photons  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  with summer and winter months considered separately

## 2) Ozonlöcher in der Stratopause über Lindau

Ozonmessungen über Lindau zeigen im Stratopausenbereich sporadische Einbrüche auf teilweise weniger als 20 % des nominalen Wertes. Diese treten immer dann auf, wenn die Stratopausentemperatur und der Wasserdampf, z.B. hervorgerufen durch Stratosphärenwärmungen, einen bestimmten Wert überschreiten. In einer Art Hysterese bedarf es dann relativ starker Reduktionen dieser beiden Parameter, damit das Ozon wieder auf seinen ursprünglichen Wert springt. Wir haben herausgefunden, dass dieses bistabile Verhalten auf einen Rückkopplungsmechanismus zwischen der Ozon-Säulendichte und der Ozon-Dissoziationsfrequenz (dem Quotient aus Dissoziationsrate und Konzentration) zurückzuführen ist. Ozon ist das einzige chemisch variable Gas, dessen Dissoziationsrate von dessen Säulendichte abhängt, es schirmt sich sozusagen selbst gegen die einfallende Strahlung ab. Wird diese Abschirmwirkung z.B. durch einen ansteigenden Wasserdampfgehalt (Quellgas für Wasserstoffradikale, die Ozon abbauen) abgeschwächt, verringert sich die Konzentration und die Dissoziationsfrequenz steigt weiter an, was wiederum zur Verringerung der Ozonkonzentration und weiteren Erhöhung der Dissoziationsfrequenz führt. Dieser Prozess hört erst auf, wenn fast alles Ozon zerstört wurde. Unsere Modellrechnungen zeigen, dass auch der umgekehrte Prozess stattfindet ("Selbstheilung") und im Prinzip auch das Pendel in die entgegengesetzte Richtung ausschlagen kann mit einem Vielfachen des Nominalwertes. Allerdings treten diese hohen Werte nur unter Stratopausenbedingungen auf, wie sie bisher über Lindau noch nicht beobachtet wurden.

## 2) Ozone holes in the stratopause over Lindau

Ozone measurements over Lindau show sporadic decrease events in the stratopause region to less than 20 % of the nominal value. These events appear, when the stratopause temperature and water vapor mixing ratio exceed a certain threshold caused for instance by stratospheric warmings. Once the ozone concentration is low, it needs a rather large decrease of water vapor mixing ratio and temperature to make ozone reaching its original nominal value. We analyzed that this bistable behavior is based on a feed-back mechanism between the ozone column density and the ozone dissociation frequency (the ratio of dissociation rate and concentration). Ozone is the only chemically variable gas of which the dissociation frequency depends on its column density. It shields itself against the incoming UV-radiation. In case the self-shielding effect is weakened for instance by increased water vapor (water vapor is the source gas of hydrogen radicals depleting ozone), the ozone concentration decreases while the dissociation frequency increases, causing a further decrease of the ozone concentration, etc. This process may not stop before nearly all ozone is depleted. According to our model calculations also the opposite effect happens (self-healing), e.g. when the water vapor concentration decreases below a certain value. Theoretically even much larger ozone concentration than the nominal value may build up in case the stratopause shows favorable conditions for this event. However, since these conditions never appeared over Lindau the predicted high ozone concentrations were obviously not found in our data set.

**Mars**

## 1) Atmosphärische Wellen und die allgemeine Zirkulation und Photochemie auf Mars

Die Bedingungen für die Ausbreitung von Schwerkwellen in der Marsatmosphäre entsprechen ziemlich genau denen, wie wir sie in der Mesosphäre und Thermosphäre der Erde vorfinden. Mit einem neuentwickelten Modell ist es erstmals gelungen, den Einfluss von Schwerkwellen auf die obere Marsatmosphäre zu analysieren. Es hat sich herausgestellt, dass sie viel tiefer in die Thermosphäre eindringen als bisher geglaubt, und Beschleunigungen von mehreren hundert m/s/Tag ausüben. Gleichzeitig induzieren die Schwerkwellen sehr starke Temperaturschwankungen.

In etwas tieferen Schichten sind Wellen für ein Phänomen verantwortlich, das wir mit Modellrechnungen vorhergesagt haben und das in jüngster Zeit durch ein Instrument namens Mars Climate Sounder (MCS) auf einem Marssatelliten tatsächlich gefunden wurde: Die starke Erwärmung der polaren Winteratmosphäre in ca. 60 bis 70 km Höhe.

Jahreszeitliche Schwankungen der atmosphärischen Parameter (Winde, Temperatur, Luftdruck) sind hinlänglich von der Erde bekannt. So wird das Klima in der Antarktis beispielsweise stark von der Amplitude der halbjährlichen Oszillation (engl: Semi-annual oscillation, SAO) bestimmt. Man hat lange geglaubt, dass die Anregung der SAO durch äquatoriale Wellen, die durch Feuchtkonvektion angeregt werden, entstehen und diese deshalb nicht in der sehr trockenen Marsatmosphäre existieren kann. Unsere Modellrechnungen zeigen allerdings, dass auch andere Anregungsmechanismen möglich sind, und z.B. Gezeiten und planetare Wellen die SAO anregen können und dass die SAO ein Phänomen aller schnellrotierenden Planeten ist. Mittlerweile wurden unsere Ergebnisse durch Detektion der SAO in den Atmosphären von Mars, Jupiter und Saturn bestätigt.

Ferner wurde ein 3-d Chemie-Transport-Modell der Marsatmosphäre entwickelt. Das Modell wurde gegen Mars Express Daten erfolgreich getestet und konnte gemessene Vertikalprofile, soweit vorhanden, verifizieren. Spezielles Augenmerk wurde auf den Einfluss des photochemischen Dopplereffekts (auch Doppler-Sonnemann-Effekt) gelegt.

**Mars**

## 1) Atmospheric waves and the general circulation and photo chemistry on Mars.

*The conditions for the propagation of gravity waves in the Martian atmosphere are rather similar to those in the Earth mesosphere and thermosphere. With a newly developed model we analyzed for the first time the influence of gravity waves on the upper Martian atmosphere. It turned out that gravity waves penetrate much deeper into the thermosphere than believed so far. They may cause accelerations of several hundred m/s/day. At the same time, gravity waves create very strong temperature variations.*

*In lower altitudes gravity waves create a phenomenon, predicted by our model calculations and recently observed by an instrument called Mars Climate Sounder (MCS) on the Mars Reconnaissance Orbiter: the strong warming of the polar winter atmosphere in about 60 – 70 km altitude.*

*Annual variations of atmospheric parameters like wind, temperature and pressure are well known on Earth. By way of example the climate of Antarctica depends strongly on the amplitude of the semi-annual oscillation (SAO). For a long time the paradigm was valid that the SAO was caused by equatorial waves excited through moist convection. Therefore the existence of an SAO like behavior was not expected to be possible on Mars. Our model calculations however predicted other excitation mechanisms of the SAO. Basically a number of different atmospheric properties like for instance tides and planetary waves were identified as sources for exciting the SAO. In a generalized formulation we found out that the SAO is even a phenomenon of all fast rotating planets. This prediction was meanwhile confirmed by observations of the SAO in the atmospheres of Mars, Jupiter and Saturn.*

*We developed a 3-d chemistry transport model of the Martian atmosphere. The model was successfully tested against Mars Express data and was able to verify available vertical profiles of trace gases. Special emphasis was put on the influence of the photochemical Doppler effect (also known as Doppler-Sonnemann effect) on the chemistry.*

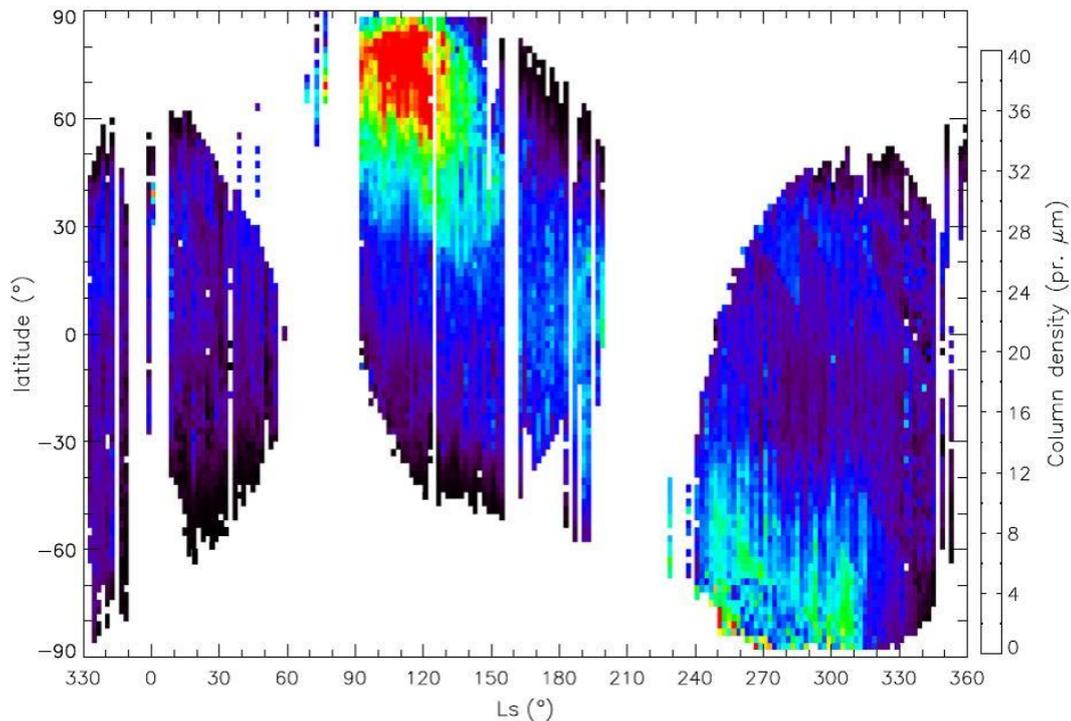


Abb. 3: Saisonale Variation des Wasserdampfes in der Marsatmosphäre beobachtet mit OMEGA

*Fig. 3: Seasonal behavior of water vapor in Martian atmosphere as observed by OMEGA*

## 2) Wasserzyklus auf Mars

Das bildgebende Spektrometer OMEGA auf dem Satelliten Mars Express hat die Variation des Wasserdampfes über einen Zyklus von über einem Marsjahr gemessen. Die Studie berührt verschiedene Charakteristika des Wasserzyklus: dessen zeitliche Entwicklung (von Tagesgängen bis zu saisonalen Schwankungen) sowie die horizontale und vertikale Verteilung des Wasserdampfes. Abb. 3 zeigt die saisonale Schwankung der Wasserdampf Säulendichte, die im Jahresmittel 10 pr.µm beträgt (d.h. entsprechend einer Niederschlagsmenge von 10 µm) mit leicht höheren Werten im Norden. Die höchsten Werte treten in der nördlichen Polarregion im Sommer auf (60 pr.µm). Durch meridionale Zirkulation wird Wasser von den Polen zum Äquator transportiert.

Wie ein Vergleich der OMEGA und MGS/TES Daten zeigen, wird nur ein geringer Teil des Wassers während eines Tagesganges durch die Oberfläche absorbiert, bzw. freigesetzt. Wasserdampf Maxima treten über der Tharsis-Region und Arabia Terra auf. Die Höhe, bei der Wasserdampf kondensiert, ist durch den Jahresgang des Sonneneinfallwinkels gegeben und schwankt zwischen 5 bis 15 km während Aphelium und 55 km im Perihelium.

Weitere Ergebnisse zur Marsatmosphäre sind in dem Kapitel 1.2.2 über Herschel beschrieben.

## 2) The water cycle on Mars

*The imaging spectrometer OMEGA studies all aspects of the water cycle on Mars: the temporal evolution on seasonal and diurnal scales as well as the lateral and vertical distribution. Fig. 3 shows the seasonal behavior of the atmospheric water column density. The mean abundance during the year was  $\sim 10$  pr.µm (i.e. corresponding to a precipitation of 10 µm), with slightly higher values in the northern hemisphere. The peak of activity, up to 60 pr.µm, occurs at the edge of the Northern polar cap during local summer. The Southern summer peak is less pronounced. The meridional circulation affects the water cycle by transporting water to the equator.*

*Comparison of the OMEGA and MGS/TES data sets showed that the water vapor exchange between the surface and the atmosphere is at most a few pr.µm. The spatial distribution of the atmospheric water vapor after correction for topography shows local maxima over Tharsis and Arabia Terra regions. The saturation height of water vapor is mainly governed by the varying insolation during the year. Water is confined to the lower 5 – 15 km near the surface at aphelion, while at perihelion is extends up to 55 km.*

*Further results about the Martian atmosphere are described in chapter 1.2.2. about Herschel findings.*

## Jupiter

Im Rahmen von Vorbereitungsarbeiten zur Herschel-Mission wurden ein photochemisches sowie ein Strahlungstransportmodell der Jupiterstratosphäre entwickelt.

Ziel des photochemischen Modells ist es, Vertikalprofile der wichtigsten Kohlenwasserstoffe sowie Sauerstoff-enhaltender Moleküle zu berechnen. Das Modell bildet die komplette Photochemie der Jupiterstratosphäre ab, beinhaltet Reaktionen zwischen Kohlenwasserstoffen und Sauerstoff-enhaltenden Gasen und berücksichtigt Transport- und Kondensationsprozesse sowie den Eintrag von extrajovialen Komponenten (Kometen, Meteoriten, Staub).

Das Strahlungstransportmodell berechnet basierend auf den Vertikalprofilen der Gase in der Jupiterstratosphäre die zu erwartenden spektralen Linienstärken. Ferner wird überprüft, wie viel Information aus den zu messenden Spektren bei gegebenem Signal-zu-Rausch-Verhältnis zu gewinnen ist.

## Saturn und Titan

Aus Submillimeterwellen Beobachtungen mit dem James Clark Maxwell Teleskop (JCMT) in Hawaii wurde die vertikale Verteilung von Kohlenmonoxid (CO) in der Saturnstratosphäre berechnet. Die Quelle des stratosphärischen COs ist nicht eindeutig bestimmt. Prinzipiell kann es sowohl aus der Troposphäre stammen als auch aus dem Weltall eingetragen werden, z.B. durch den permanenten Fluss interplanetarer Staubteilchen oder Kometeneinschläge. Die verschiedenen möglichen Quellen hinterlassen allerdings unterschiedliche "Fingerabdrücke", die man aus der Vertikalverteilung bestimmen kann. Mit Hilfe eines Chemie-Transport Modells konnten wir nachweisen, dass der Ursprung des COs wahrscheinlich auf einen Kometeneinschlag vor 190 bis 250 Jahren zurückgeht.

Titan, der größte Saturnmond ist durch die Cassini Mission intensiv erforscht werden. Dessen Stickstoffatmosphäre enthält auch eine Reihe komplexer organischer Moleküle. Wir haben diese Moleküle mit dem Atacama Pathfinder Experiment (APEX) und Herschel im Submillimeterwellenbereich vermessen und einige Vertikalprofile bestimmt (s. Abb. 4) Neben vielen bereits bekannten Molekülen fanden sich auch Spektrellinien, die noch nicht identifiziert werden konnten.

## Neptun

Herschel-Beobachtungen von Neptun sind im Kapitel 1.2.2 beschrieben.

## Jupiter

*In preparation of the Herschel mission both a photochemical as well as a radiative transfer model of the stratosphere of Jupiter was developed.*

*The main goal of the photochemical model is to calculate vertical profiles of the main hydrocarbons and of oxygen bearing molecules. The model describes the complete photochemistry of the Jovian stratosphere and includes reactions between carbon hydrates and oxygen bearing gases, taking into account transport condensation processes and the insertion of extrajovial components (comets, meteoroids and interplanetary dust).*

*The radiative transport model calculates the amplitude and shape of spectra derived from the vertical profiles. Furthermore it evaluates the information content of measured spectra as a function of the signal-to-noise ratio.*

## Saturn and Titan

*Vertical profiles of carbon monoxide (CO) in the stratosphere of Saturn were derived from sub-millimeter wave observations with the James Clark Maxwell Telescope (JCMT) in Hawaii. The source of the stratospheric CO is not well determined. It may originate in the troposphere or being delivered by extra-Jovian material from space, for instance by the permanent flux of interplanetary dust particles or by cometary impacts. The way to disentangle the different sources is to understand their fingerprints which can be derived by the vertical profile of CO. Using a chemistry transport model we demonstrated that the origin of Saturn's stratospheric CO is probably a cometary impact about 190 to 250 years ago.*

*Titan, the largest moon of Saturn, was extensively investigated by the Cassini mission. Its nitrogen atmosphere contains a number of complex organic molecules. We measured these molecules with the Atacama Pathfinder Experiment (APEX) and Herschel in the sub-millimeter wave regime and determined a number of vertical profiles. The molecular survey provided a large number of molecular spectra. Not all of them have been identified yet.*

## Neptune

*Herschel observations of Neptune are described in chapter 1.2.2.*

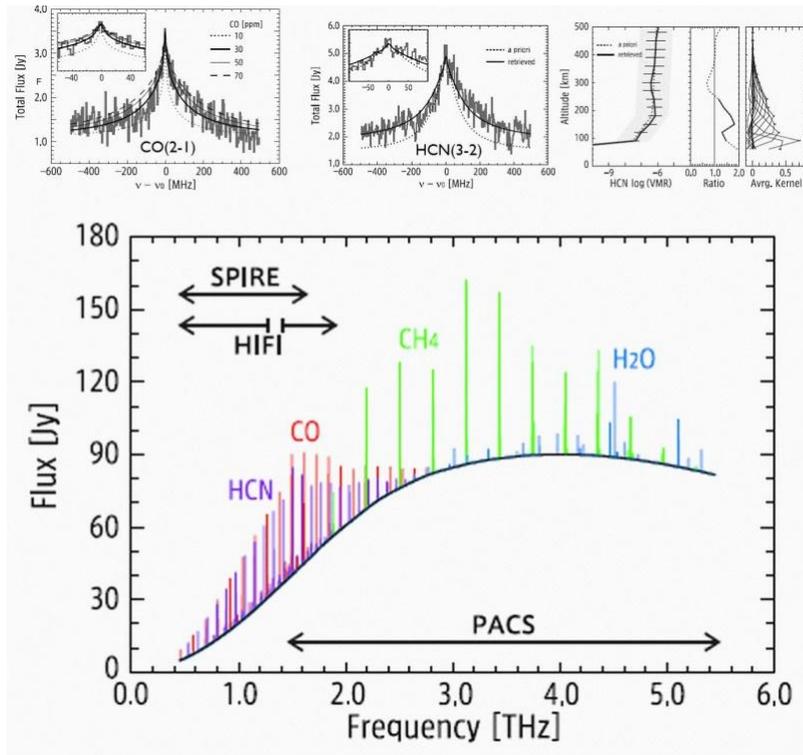


Abb. 4: Oben links: Synthetisches und beobachtetes Spektrum des CO (2-1) Rotationsübergangs, gemessen mit dem APEX SHFI Heterodynspektrometer bei 231 GHz. Das synthetische Spektrum wurde unter der Annahme von gleichverteilten Mischungsprofilen von 10, 30, 50 und 70 ppm modelliert. Oben rechts: Beobachtete und synthetische HCN(3-2) Linie ebenfalls mit SHFI bei 266 GHz gemessen, sowie das invertierte Vertikalprofil. Unten: synthetisches Spektrum, wie es die beiden Herschel Instrumente SPIRE und PACS sehen.

*Fig. 4: Upper-Left: Observed and synthetic CO(2-1) line obtained with SHFI at 231 GHz (gray and line spectra, respectively). The synthetic spectrum was calculated assuming vertically uniform CO mixing ratios of 10, 30, 50, and 70 ppm. Upper-Right: Observed and synthetic HCN(3-2) line obtained with SHFI at 265.89 GHz, and retrieved HCN vertical profile (with ratio of the retrieve profile with respect to the a priori, and averaging kernels). Lower: Synthetic spectra of Titan of Herschel observations (full range spectra of SPIRE and PACS).*

### Ausgewählte Veröffentlichungen

#### *Selected publications*

Ignatiev, N.I., D.V. Titov, G. Piccioni, et al.: Altimetry of the Venus cloud tops from the Venus Express observations. *J. Geophys. Res.* 114, 405-414 (2009), doi:10.1029/2008JE003320

Moissl, R., I. Khatuntsev, S.S.Limaye, et al.: Venus cloud top winds from tracking UV features in Venus monitoring Camera images, *J. Geophys. Res.* 114, E00B31 (2009), doi:10.1029/2008JE003117

Titov, D.V., W.J. Markiewicz, N. I. Ignatiev, et al.: Morphology of the cloud tops as observed by the Venus Express Monitoring Camera, *Icarus* (2011), doi:10.1016/j.icarus.2011.06.020

Sonnemann G. R. and P. Hartogh: Upper stratospheric ozone decrease events due to a positive feedback between ozone and the ozone dissociation rate, *Nonlin. Proc. Geophys.*, 16, 409-418 (2009), doi:10.5194/npg-16-409-2009

Hartogh, P., G. R. Sonnemann, M. Grygalashvily, et al.: Water vapor measurements at ALOMAR over a solar cycle compared with model calculations by LIMA, *J. Geophys. Res.*, 115, D00I17 (2010), doi:10.1029/2009JD012364

- Yiğit, E., A. S. Medvedev, A. D. Aylward, et al.: Modeling the effects of gravity wave momentum deposition on the general circulation above the turbopause, *J. Geophys. Res.*, 114, D07101 (2009), doi:10.1029/2008JD011132
- Maltagliati, L., D.V. Titov, Th. Encrenaz, et al.: Annual survey of water vapor behavior from the OMEGA mapping spectrometer onboard Mars Express. *Icarus* 213, p 480-495, 2011
- Kuroda, T., A. S. Medvedev, P. Hartogh, et al.: On Forcing the Winter Polar Warmings in the Martian Middle Atmosphere during Dust storms, *J. Meteorol. Soc. Japan*, 87, 913–921(2009), doi:10.2151/jmsj.87.913
- Sonnemann, G. R., P. Hartogh, M. Grygalashvyly, et al.: A New Coupled 3D-Model of the Dynamics and Chemistry of the Martian Atmosphere, in: *Advances in Geosciences*, vol. 19, pp. 177–194, World Scientific Publishing Co., 2010.
- Sagawa, H., P. Hartogh, M. Rengel, et al.: Preparation for the solar system observations with Herschel: Simulation of Jupiter observations with PACS, *Planet. Space Sci.*, 58, 1692–1698 (2010), doi:10.1016/j.pss.2010.05.011
- González, A., P. Hartogh, and L. M. Lara, Photochemistry in the Jovian atmosphere: preparation for water observations with Herschel, in: *Advances in Geosciences. Volume 25: Planetary Sciences*, pp. 209–218, World Scientific Publishing Co., 2010
- Cavalié, T., P. Hartogh, F. Billebaud, et al.: A cometary origin for CO in the stratosphere of Saturn?, *Astron. & Astrophys.*, 510, A88 (2010), doi:10.1051/0004-6361/200912909
- Rengel, M., H. Sagawa, and P. Hartogh, Retrieval Simulations of Atmospheric Gases from Herschel observations of Titan, in: *Advances in Geosciences*, vol. 19, pp. 335–348, World Scientific Publishing Co., 2010

### 1.2.6 Die Plasma-Umgebung der Planeten

Planeten und Monde stehen mit der Sonne in vielfacher Weise in Wechselwirkung. Während die Gravitationskräfte die planetaren Umlaufbahnen bestimmen, wird die Zusammensetzung der Oberflächen und Atmosphären nicht nur durch die Geologie bestimmt, sondern auch durch die Sonneneinstrahlung und den Sonnenwind. Diese Wechselwirkung steht im Mittelpunkt der Forschung der Planetare-Plasmen-Gruppe am MPS. Da die Gase der Exosphären - das sind die höchsten Regionen der planetaren und lunaren Atmosphären - ionisiert sind, fällt diese Forschung in den Bereich der Physik der ionisierten Gase oder Plasmaphysik.

### 1.2.6 Planetary plasma environment

*The planets and moons of the solar system interact with the Sun in many ways. While the gravitational forces determine the planetary orbits, the composition of surfaces and atmospheres of planets and moons is not only determined by geological effects but by solar radiation and solar wind. This interaction is the focus of the research of the Planetary Plasmas Group at MPS. Since the gases in the exospheres, the outermost part of the atmospheres of planets and moons, are largely ionized, the research falls into the domain of ionized gases or plasma physics.*

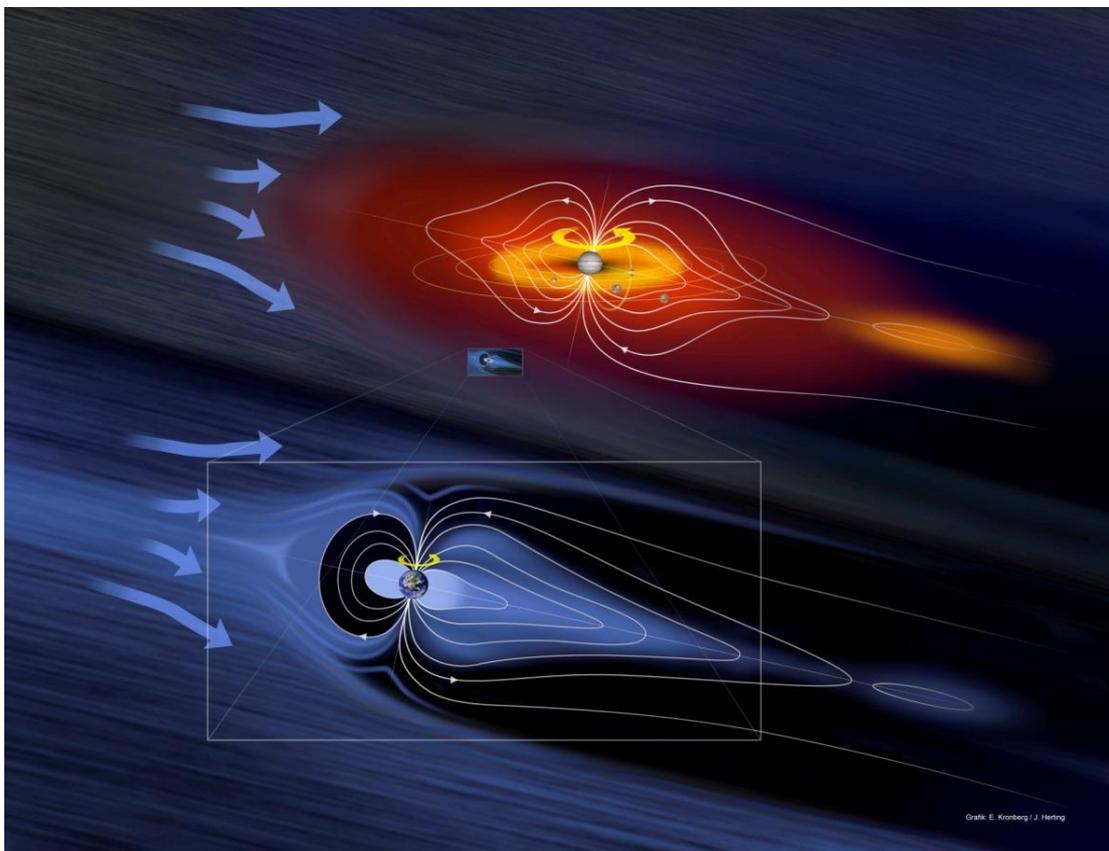


Abb. 1: Vergleich der Magnetosphären von Jupiter und Erde. Der Radius der Jupiter-Magnetosphäre ist mit 7 Millionen km siebzigmal größer als der der Erdmagnetosphäre. Im unteren Teil ist die magnetische Umgebung der Erde vergrößert dargestellt.

*Fig. 1: Comparison of the magnetospheres of Jupiter and Earth. The Jovian magnetosphere has a radius of about 7 million km, the Earth magnetosphere of about 100 000 km. The lower part shows an enlargement of the Earth's magnetic environment.*

Im Bereich der terrestrischen Planeten (Merkur, Venus, Erde und Mars) konzentriert sich die Forschung auf den Einfluss der Sonnenstrahlung und des Sonnenwindes auf die Planetenentwicklung. Bei den Gasriesen Jupiter und Saturn versuchen wir, das Wechselspiel zwischen planetaren Magnetfeldern, Exosphären

*For the terrestrial planets (Mercury, Venus, Earth and Mars) the current research focuses on the influence of the solar radiation and of the solar wind, a stream of charged particles, on planetary evolution. For the gas giants Jupiter and Saturn we explore the interplay between planetary magnetic field, exospheres and*

und Monden zu verstehen. Abb. 1 zeigt die Struktur und Größe der Magnetosphären von Jupiter und Erde im Vergleich. Auf der Tagseite (links) drückt der Sonnenwind die Magnetosphäre zusammen und pumpt Energie in die Magnetosphäre, die auf der Nachtseite (rechts) in Form von Plasmawolken (Plasmoiden) entweicht [Krupp et al., 2010]. Im Folgenden beschreiben wir einige Forschungsergebnisse der Jahre 2009 und 2010 - beginnend bei Merkur bewegen wir uns auswärts bis zu den Grenzen des Sonnensystems.

### 1. Merkur - Ionen-Zerstäubung der Oberfläche

Der Planet Merkur hat keine Atmosphäre im klassischen Sinne, sondern die starke Sonneneinstrahlung und der Einfall des Sonnenwindes schlagen Atome aus der Oberfläche und bilden eine dünne Exosphäre und einen Planetenschweif. Diese Atome können sowohl optisch von der Erde aus als auch durch Teilchenspektrometer vor Ort beobachtet werden. Die ersten Beobachtungen am Planeten durch die Mariner-10-Mission 1974 und 1975 führten zur Entdeckung einer relativ kleinen Magnetosphäre - verursacht durch ein schwaches inneres Feld. Diese Magnetosphäre schützt die Oberfläche nur teilweise und führt zu sehr komplexen Plasma-Prozessen in der Exosphäre. Zum ersten Mal ist im April 2011 mit der NASA-Sonde Messenger ein Satellit in eine Umlaufbahn um Merkur getreten, aber die Beobachtungsmöglichkeiten dieses Satelliten für Plasmaprozesse sind sehr beschränkt. Daher entwickelt das MPS neue Sensoren für die japanisch-europäische Mission BepiColombo, die im Jahr 2014 starten wird.

### 2. Venus - eine Ionosphäre im Sonnensturm

Der Planet Venus hat eine sehr dichte und heiße Atmosphäre, die nicht durch ein inneres Magnetfeld vor dem Sonnenwind geschützt ist. Da aber die obere Atmosphäre durch die solare UV-Strahlung ionisiert wird, bildet sich eine elektrisch leitende Region (Ionosphäre), die das Magnetfeld des Sonnenwindes und infolgedessen auch den Teilchenstrom um den Planeten lenkt. Die Instrumente an Bord des europäischen Venus-Express-Satelliten, der Venus seit 2006 umkreist, erlauben es, die verschiedenen Regionen dieser sogenannten induzierten Magnetosphäre zu charakterisieren [Angsmann et al., 2011]. Das MPS lieferte nicht nur eine Kamera, sondern auch Elektronik für die Ionen- und Neutralteilchen-Sensoren auf Venus Express.

Die verschiedenen Regionen werden durch Plasma-Grenzschichten getrennt. Abb. 2 zeigt drei dieser Schichten, deren Position durch die Variation von Sonnenwind und UV-Strahlung verändert wird. Dies verursacht die Streuung der Punkte in Abb. 2. Bei schneller Variation des Sonnenwindes können die nachseitigen Schichten wie eine Fahne im Wind flattern. Die äußerste Grenze ist die Bugstoßwelle (grüne

*moons. Fig. 1 shows the structure of the magnetospheres of Jupiter and Earth and their comparative sizes. On the day-side (left) solar wind compresses the magnetospheres and deposits energy which is released on the night-side in the form of plasma bubbles (plasmoids) [Krupp et al., 2010]. In the following we describe some research highlights from the years 2009 and 2010, starting at Mercury and working our way outside to the outer limits of the solar system.*

### 1. Mercury - ions sputtered into space

*The planet Mercury has no atmosphere in a classical sense but the strong solar radiation and the impact of solar wind sputters atoms from the planetary surface that form an exosphere and a planetary tail. These atoms can be observed remotely due to their ultraviolet emission and in-situ by spacecraft instruments. The first in-situ observations by the Mariner 10 spacecraft in 1974 and 1975 led to the discovery of a relatively small magnetosphere that indicated a weak internal magnetic field. The magnetosphere partly protects the surface from the solar wind and leads to more complex processes in the exosphere. With the orbit insertion of the NASA spacecraft Messenger in April 2011, for the first time a spacecraft orbits Mercury. Messenger's capability of observing ions in the planet's exosphere is very limited. The MPS therefore contributes to developing advanced ion sensors for the Japanese-European BepiColombo mission to Mercury to be launched in 2014.*

### 2. Venus - an ionosphere in a solar storm

*The planet Venus has a very dense and hot atmosphere which is not protected by any internal magnetic field from solar wind. However, induction processes in the electrically conducting ionized upper atmosphere nevertheless deflect the magnetic field carried by the solar wind around the planet. The instruments on the European spacecraft Venus Express, which orbits Venus since 2006, allow to characterize the different regions of this so-called induced magnetosphere [Angsmann et al., 2011]. The MPS contributed not only to the optical instrumentation but also to the ion and neutral atom analyzer ASPERA-4 onboard Venus Express.*

*The different regions are separated by boundary layers, three of which are shown in Fig. 2. The locations of the layers change according to the variations in the solar wind which at some time pushes them closer to the planet than at other times and which are the reason for the scatter in Fig. 2. Fast variations may even cause the boundaries to flap like a flag. The outermost boundary is the bow shock (green dots) where the*

Punkte), an der Teilchen des Sonnenwindes zum ersten Mal auf vom Planeten reflektierte Wellen treffen. Diese Wechselwirkung bremst und heizt den Sonnenwind, der dann durch die induzierten Felder um den Planeten gelenkt wird. Die zweite Grenze ist die Magnetopause (schwarze Punkte), an der der Teilchenfluss des Sonnenwindes aufhört. Darunter werden stärkere Magnetfelder beobachtet, die bis tief in die Ionosphäre reichen können, deren Obergrenze (Ionopause, rote Punkte) durch die Beobachtung planetarer Elektronen bestimmt ist. Die Magnetopause erstreckt sich weit in die Nachtseite, wo sich ein Schweif planetarer Teilchen bildet. Auf der Tagseite wird die Ionopause nur an den Polregionen von Venus Express durchquert. Die Position der Grenzschichten ist eine wesentliche Beobachtung, um Computersimulationen zu entwickeln, die es erlauben werden, die komplexe Wechselwirkung des Sonnenwindes mit der Atmosphäre der Venus zu verstehen.

*solar wind first encounters plasma waves reflected from the planet. The interaction brakes and heats the solar wind which then flows around Venus into the night-side. The second boundary is the magnetopause (black dots) which defines the upper limit of the magnetosphere and largely separates solar wind from planetary particles. The region directly below this layer is dominated by relatively large magnetic fields. The magnetopause extends far into the night-side, forming a long tail. The ionopause (red dots) is located slightly below the magnetopause and defines the upper boundary of the ionosphere where ionized particles prevail. The ionopause is especially prominent on the day-side but mostly lies too close to the planet for the Venus Express orbit. The location of the boundary layers is an important tool for verifying theoretical computer simulations that will ultimately allow to understand the complex interaction of the solar wind with Venus' atmosphere.*

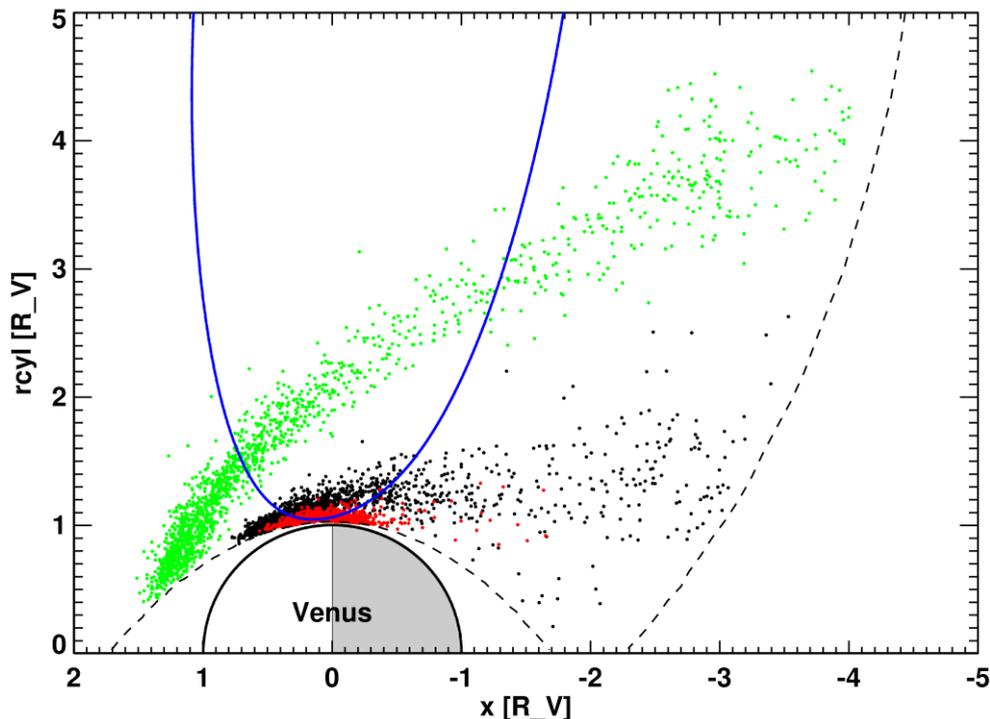


Abb. 2: Vermessung der Plasmagrenzen um Venus durch Venus Express. Die Sonne befindet sich links, die Nachtseite der Venus ist grau schattiert. Durchquerungen der Grenzen auf jedem der 24h-Orbits sind durch farbige Punkte markiert. Venus Express benötigt etwa zwei Stunden um die nähere Plasma-Umgebung zu durchqueren. Da jeder Orbit im Vergleich zum vorigen nur wenig verschoben liegt, dauert die Durchmusterung der Umgebung mehrere Jahre. Die Grenzschichten sind Bugstoßwelle (grüne Punkte), Magnetopause (schwarze Punkte) und Ionopause (rote Punkte)

*Fig. 2: Observation of plasma boundaries around Venus by Venus Express. The Sun is located on the left-hand side. Venus' night side is shaded grey. Boundary layer crossings are shown by colored dots, each representing one 24h-orbit. The regions below the black dashed lines are not covered by the orbits one of which is shown as a blue curve. Venus Express needs about two hours to cross the planets near environment. Each orbit is slightly shifted with respect to the previous one and it took a few years to compile all shown crossings. The boundary layers are the bow shock (green dots), the magnetopause (black dots) and the ionopause (red dots).*

### 3. Erde - entfernte Signale der Erdmagnetosphäre

Die Erforschung der Magnetosphäre und Ionosphäre der Erde stand für viele Jahrzehnte im Zentrum der Arbeit des MPS. Gegenwärtig wird sie beflügelt durch die Beobachtungen des RAPID-Spektrometers für energetische Ionen, das am MPS für die Cluster-Mission gebaut wurde. Das Hauptinteresse gilt dabei dem Abfluss von Teilchen durch den Schweif der Erde und der Beobachtung von irdischen Ionen weit außerhalb der Erdmagnetosphäre. Diese so genannten up-stream events wurden durch den SEPT-Sensor an Bord der Stereo-Satelliten beobachtet (Abb. 3). Im Jahr 2007 war die Sonnenaktivität sehr niedrig, sodass sich ein wiederkehrendes Muster von schnellen und langsamen Sonnenwindströmen bildete, deren Überlagerung korotierende Wechselwirkungs-Regionen (CIRs) erzeugt. Innerhalb dieses Musters beobachtet man Intensitätsspitzen des Protonenflusses mit einer Dauer von einigen Stunden immer dann, wenn der Beobachtungspunkt mit der Erdmagnetosphäre magnetisch verbunden war. Eine Kombination von Messungen auf Stereo-A und Stereo-B zwischen 70 und 1750 Erdradien Entfernung mit solchen auf Cluster und Geotail zwischen 10 und 30 Erdradien Entfernung zeigt eine hohe Korrelation der Ereignisse über große Distanzen. Upstream events haben daher ihren Ursprung in der Erdmagnetosphäre, können aber noch in 10 Millionen km Entfernung beobachtet werden, was bisher nicht vermutet wurde [Kronberg et al., 2011].

### 3. Earth - remote signals from the magnetosphere

*The research of Earth's magnetosphere and ionosphere has been a focus at MPS for many decades and is currently mainly driven by the observations of the RAPID sensor for energetic ions built by MPS for the Cluster mission. It concentrates on the escape of ions through the plasma tail of our planet and the observation of ions in the solar wind upstream of Earth, either coming from Earth's atmosphere or being reflected by the magnetosphere, the so-called upstream events. Fig. 3 shows observations of such ions by the SEPT sensor onboard the Stereo mission. In 2007 the solar magnetic activity was low and the solar wind formed a recurrent pattern of fast and slow solar wind streams that are emitted from different regions of the rotating Sun. When the faster wind catches up with slower previously emitted wind, so-called corotating interaction regions (CIRs) form. Imbedded within the recurring pattern, there are spikes of increased upstream proton flux which lasted for several hours and occurred when the point of observation was connected via magnetic field lines with Earth's magnetosphere. A joint analysis of Stereo-A and Stereo-B measurements at 70 to 1750 Earth radii and Cluster and Geotail measurements close to the bow shock at about 30 Earth radii revealed a high correlation of upstream events over these distances. The upstream events may thus have their origin in Earth's magnetosphere but extend to the previously unexpected distance of 10 million km [Kronberg et al., 2011].*

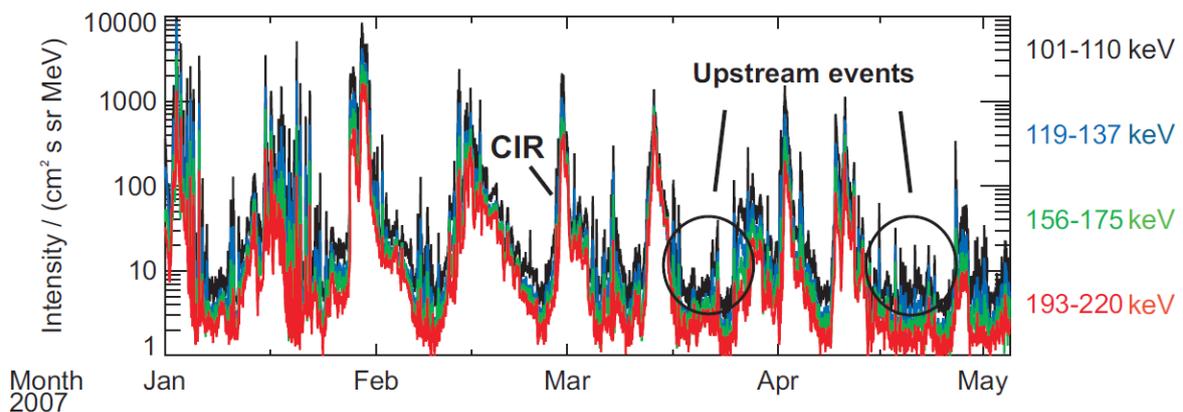


Abb. 3: Flussstärke energetischer Ionen, beobachtet von SEPT/Stereo-A stromaufwärts der Erde in den ersten Monaten des Jahres 2007. Verschiedene Farben zeigen Ionen verschiedener Energien (in keV). Das wiederkehrende Muster wird durch das periodische Auftreten von schnellen und langsamen Sonnenwindströmen verursacht, die besonders bei geringer solarer Aktivität so genannte korotierende Wechselwirkungs-Regionen (CIRs) bilden. Innerhalb dieses Musters erkennt man Ionenflüsse, die von der Erdmagnetosphäre stammen (upstream events).

*Fig. 3: Flux intensity of energetic ions observed by SEPT/Stereo-A upstream of Earth in the first months of 2007. Different colors represent different ion energies (in keV). The recurrent pattern is created by the periodic occurrence of fast and slow solar wind streams at low solar magnetic activity which produce so called corotating interaction regions (CIRs). Within this pattern ions reflected or originating from Earth are observed (upstream events, from).*

#### 4. Mars - alte Krustenfelder noch wirksam

Ebenso wie Venus hat Mars eine Atmosphäre, aber kein inneres Magnetfeld, so dass sich auch hier eine induzierte Magnetosphäre bildet. Allerdings entdeckte die Mars-Global-Surveyor-Mission im Jahr 1996, dass die Kruste des Planeten hauptsächlich in der Südhemisphäre starke Magnetisierungen aufweist. Man nimmt an, dass diese durch einen inneren Dynamo erzeugt wurden, der vor mehr als 4 Milliarden Jahren abgeklungen ist. Beobachtungen des ASPERA-3-Instruments der europäischen Mars-Express-Mission zeigen nun, dass der Sauerstoff-Abfluss aus der Ionosphäre des Planeten über Zonen stärkerer Magnetisierung erhöht ist (siehe Abb. 4). Dieser Effekt ist vergleichbar mit dem erhöhten Abfluss, der entlang des irdischen Polarlicht-Ovals beobachtet wird [Dubinin et al., 2009]. Ebenso können Druckschwankungen des Sonnenwindes - besonders in korotierenden Wechselwirkungs-Regionen - den Abfluss erhöhen. Eine Kombination von Beobachtungen des Radarinstruments MARSIS und des Ionensensors auf Mars Express erlauben es erstmals, den Abfluss entlang der Tag-Nacht-Linie des Planeten zu vermessen. Die beobachtete Abfluss-Rate stimmt mit Modellen des Druckgradienten zwischen Tag- und Nachtseite gut überein. Dies zeigt, dass der Sonnenwind eine große Rolle für den Wasserverlust der Mars-Atmosphäre spielt [Fränz et al., 2010].

#### 4. Mars - old crustal fields still matter

*Like Venus, planet Mars has an atmosphere but no internal magnetic field and thus only an induced magnetosphere. However, in 1996 the Mars Global Surveyor spacecraft discovered that the planet's crust is strongly magnetized, predominantly in the southern highlands. This remanent magnetization is believed to go back to an internal dynamo that ceased to operate more than 4 billion years ago. Observations of the ASPERA-3 sensor on the European Mars Express spacecraft show an increased oxygen ion outflow from the Martian ionosphere above regions of stronger crustal magnetization (see Fig. 4). This effect is likely similar to the increased ion outflow observed along the magnetic field lines in Earth's aurora [Dubinin et al., 2009]. Pressure pulses exerted by the corotating interaction regions enhance this oxygen outflow. A combination of observations from the radar instrument MARSIS and the ion sensors on Mars Express allowed for the first time to directly determine the ionospheric outflow along the line that separates day and night side. The observed flow rates agree well with models of the pressure gradient between dayside and nightside ionosphere and prove that the solar wind plays a major role for the loss of water from the Martian atmosphere [Fränz et al., 2010].*

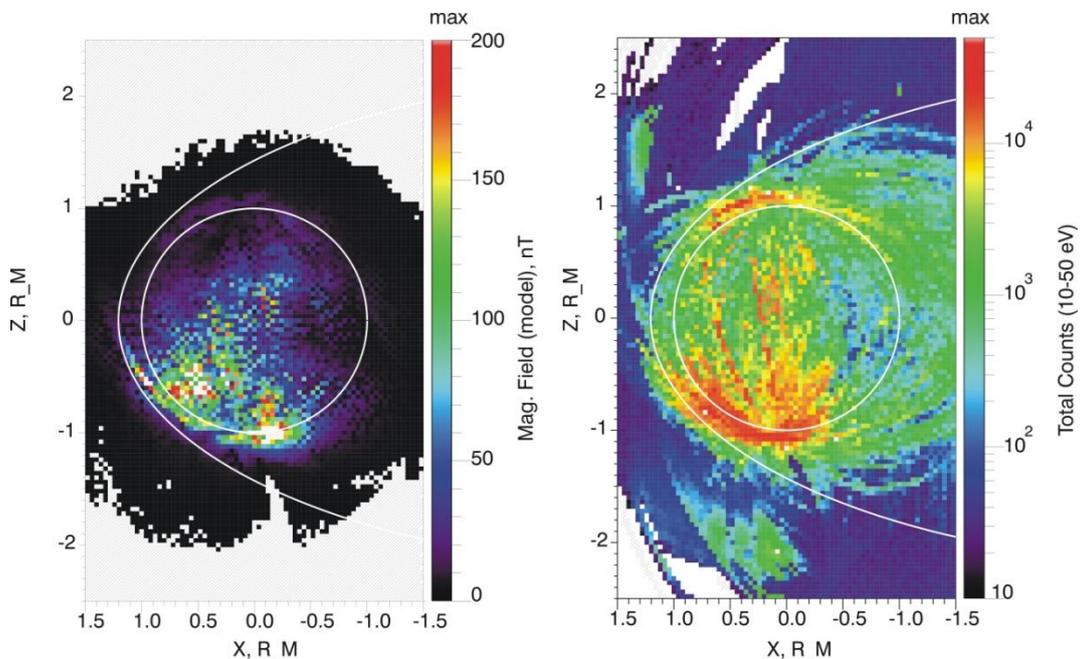


Abb. 4: Beitrag der Krustenfelder von Mars zur Gesamtfeldstärke am Ort der Beobachtungen durch Mars Express in den Jahren 2004–2009 (links). Gleichzeitige Beobachtungen des Sauerstoff-Abflusses aus der Ionosphäre durch das ASPERA-3-Instrument (rechts).

*Fig. 4: Contribution of the Martian crustal magnetic fields to the total magnetic field at the points of observation by the Mars Express spacecraft in 2004–2009 (left side). Simultaneous observations of oxygen outflow from the ionosphere by the ASPERA-3 sensor on the spacecraft (right side).*

### 5. Jupiter - neue Missionen zu den Monden

Die Magnetosphäre des Planeten Jupiter ist das größte Objekt im Sonnensystem mit einem Durchmesser von 20 Sonnenradien. Im Vergleich ist die Erdmagnetosphäre winzig (siehe Abb. 1). Obwohl es seit dem Ende der Galileo-Mission im Jahr 2003 keine neuen Beobachtungen am Planeten gibt (außer einem kurzen Vorbeiflug der New-Horizons-Raumsonde im Jahr 2007), ist das Forschungsinteresse am Jupiter-System sehr groß - für die Plasmaphysik besonders seit der Beobachtung von Polarlichtern auf Jupiter durch das Hubble-Weltraumteleskop [Radioti et al., 2009]. Zudem ist nach derzeitigem Wissen der Jupitermond Ganymed der einzige Mond des Sonnensystems, der ein inneres Magnetfeld besitzt - eingebettet in die Magnetosphäre Jupiters. Das MPS will daher die globale Konfiguration der Magnetosphäre, die vorherrschenden dynamischen Prozesse und die Wechselwirkung zwischen der Magnetosphäre und den Galileischen Monden erforschen. Zu diesem Zweck werden neue Teilcheninstrumente für zukünftige Missionen entwickelt - zum Beispiel für die ESA-Cosmic-Vision-Mission JUICE (Jupiter Icy Moon Explorer, vormals EISM-Laplace), deren Start im Jahr 2022 geplant ist.

### 6. Saturn - Monde im Strahlungsgürtel

Die Plasma-Umgebung des Saturn wird durch eine komplexe Wechselwirkung zwischen dem Magnetfeld Saturns, den Ringen und den Monden gebildet und wird zurzeit durch die Cassini-Mission untersucht. Die Forschung des MPS konzentriert sich auf die sogenannten Strahlungsgürtel - Regionen, in denen energiereiche Teilchen magnetisch eingeschlossen sind. Der Ionen-Strahlungsgürtel erstreckt sich zwischen den Hauptringen und der Umlaufbahn des Mondes Tethys. Ionen, die sich entlang der Feldlinien bewegen, die Saturn mit den Monden Mimas, Enceladus und Tethys verbinden, können von diesen inneren Monden absorbiert werden. Dies erklärt die reduzierten Ionenflüsse, die das vom MPS gebaute LEMMS-Instrument entlang bestimmter Feldlinien beobachtet (Abb. 5). Die Absorption führt zu einer Aufspaltung des Ionen-Strahlungsgürtels und zur Trennung vom Gürtel außerhalb von Tethys' Umlaufbahn. Die Ionen des inneren Gürtels sammeln sich durch die Bombardierung der Atmosphäre und Ringe des Saturn mit galaktisch-kosmischer Teilchenstrahlung (GCR), die genügend Energie hat, um in die innere Magnetosphäre vorzudringen. LEMMS-Beobachtungen über einen Zeitraum von 6 Jahren haben gezeigt, dass die Flussintensität des Strahlungsgürtels wie die der GCRs variiert - nämlich in Abhängigkeit vom Sonnenzyklus [Roussos et al., 2011].

### 5. Jupiter - new missions to its moons

*The magnetosphere of planet Jupiter is the largest object in the solar system spanning about 20 solar radii. Earth's magnetosphere is tiny in comparison (see Fig. 1). While there have been no new in-situ observations of the Jovian magnetosphere since the end of the Galileo mission in 2003 (apart from a short encounter with the New Horizons spacecraft in 2007) interest in the plasma physics of the Jovian system is still very strong and has been excited by more recent observations of the Jovian aurora by the Hubble Space Telescope [Radioti et al., 2009]. Also the Jovian moon Ganymede is the only satellite in the solar system known to possess its own magnetosphere embedded in the Jovian magnetosphere. We need to understand the global configuration of the Jovian magnetosphere, the highly dynamic plasma transport processes inside the magnetosphere as well as the interaction between the magnetosphere and its Galilean moons. Therefore MPS is interested in designing particle spectrometers to achieve these science goals to be flown on future missions, e.g. on the proposed ESA Cosmic Vision mission JUICE (Jupiter Icy Moon Explorer, formerly EISM-Laplace) planned to be launched in 2022.*

### 6. Saturn - moons in radiation belts

*Saturn's plasma environment is a complex product of the interaction between the planets magnetic field, rings, and moons. The system is currently investigated by the Cassini mission. A focus of MPS research are Saturn's radiation belts, regions of trapped high-energetic particles. The ion radiation belt extends between the main rings and the orbit of the moon Tethys. Its ions can travel along the magnetic field lines that connect Saturn with Mimas, Enceladus and Tethys and are subsequently absorbed by these larger inner moons. This explains the reduced ion intensities that the MPS-built LEMMS instrument measured along these specific field lines (Fig. 5). The absorption results in a sectionized ion radiation belt that is isolated from the belt beyond Tethys' orbit. Its population stems from impacts of very high-energy Galactic Cosmic Rays (GCRs) - only those are energetic enough to cross the moon's orbit - on the planet's atmosphere and rings. The analysis of a longer LEMMS data set covering 6 years established that solar cycle related GCR intensity variations are also detected in the ion belt population [Roussos et al., 2011].*

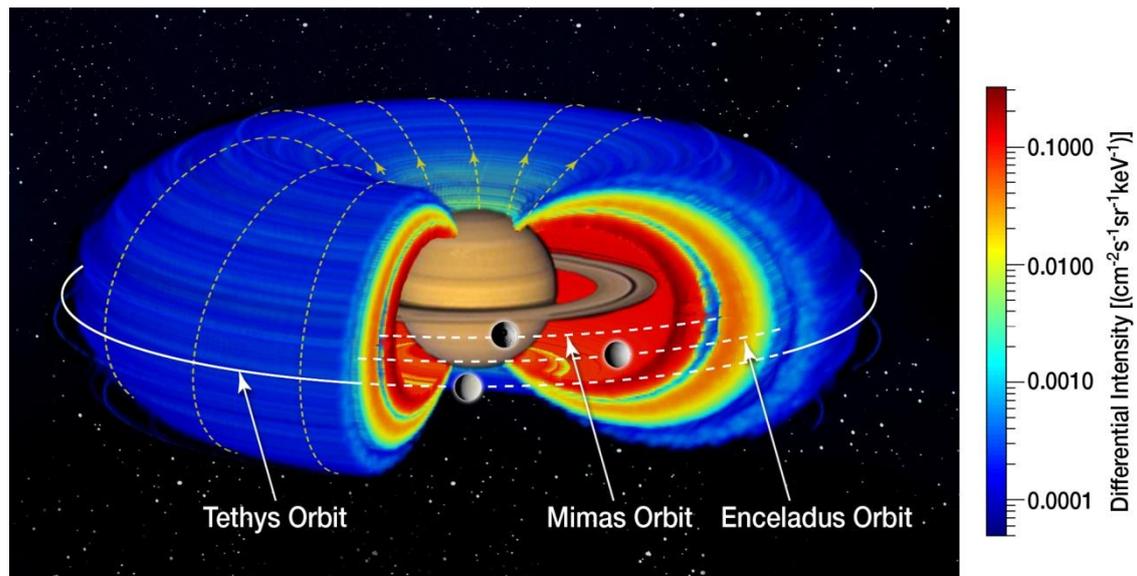


Abb. 5: Die reifenförmige Struktur der Ionen-Strahlungsgürtel des Saturn nach Messungen des MIMI/LEMMS-Detektors an Bord von Cassini. Die Strahlungsintensität ist durch Farben wiedergegeben, wobei bei rot hohe und blau niedrige Intensität bedeutet.

*Fig. 5: The toroidal structure of Saturn's ion radiation belts, constructed using real data from the Cassini's MIMI/LEMMS energetic charged particle detector. The intensity of the radiation belts is color coded, with red/blue corresponding to high/low intensities, respectively.*

## 7. Kosmischer Staub - die Korngröße zählt

Kosmischer Staub ist ebenso zentraler Bestandteil der Plasmaforschung des Sonnensystems. Mit ungefähr 1% Masse macht Staub nur einen kleinen Teil unserer Galaxie aus. Trotzdem ist er von fundamentaler Bedeutung, da sich aus Staub Planeten und Asteroiden gebildet haben. Wir benutzen Beobachtungen des Staubdetektors an Bord von Ulysses, um den interstellaren Staubfluss (ISD) durch das Sonnensystem und seine Wechselwirkungen mit den Magnetfeldern der Heliosphäre zu bestimmen. Durch die Relativgeschwindigkeit zwischen Sonnensystem und der lokalen interstellaren Umgebung begegnen uns Staub und Neutralteilchen mit etwa 26 km/s. Neutrale Teilchen bewegen sich dabei auf ballistischen Bahnen, während geladene Teilchen dem Magnetfeld folgen. Staubeilchen gehören je nach Größe zu einer der beiden Gruppen. Teilchen mit Durchmesser  $\geq 1\mu\text{m}$  sind so schwer, dass elektromagnetische Kräfte vernachlässigt werden können, während Teilchen  $\leq 1\mu\text{m}$  magnetisch stark abgelenkt werden und kaum das innere Sonnensystem erreichen. Der Staubdetektor auf Ulysses misst Teilchen im Größenbereich  $0.1\mu\text{m} \leq r \leq 1\mu\text{m}$ , wo die Abhängigkeit vom Magnetfeld bereits eine große Rolle spielt. Eine genaue Analyse der Daten hat nun gezeigt, dass diese Abhängigkeit besonders in den Jahren 2005 und 2006 beobachtet werden konnte [Krüger et al., 2010]. Wir haben nun herausgefunden, dass diese Ablenkung im Durchschnitt  $50^\circ \pm 15^\circ$  betrug. Eine Aufteilung des Datensatzes nach Korngröße zeigt, dass die Ablenkung von der

## 7. Cosmic dust - small and large grains differ

*Cosmic dust is also of high interest for research in solar system plasmas. At a fraction of only 1%, dust is a minor constituent of our galaxy. Nevertheless, it is of fundamental importance, as it represents the material that forms planets and asteroids. We have used the data set of the dust detector onboard the Ulysses spacecraft to analyze the flow of Interstellar Dust (ISD) through the solar system, and characterize its interactions with the heliospheric magnetic field. On its path through the local interstellar cloud, the solar system encounters interstellar gas and dust at a velocity of 26 km/s. Neutral particles can reach the inner solar system on ballistic trajectories. Charged particles flow along the magnetic field lines around the heliosphere. Dust particles fall into either of these categories, depending on their size. Particles of  $\geq 1\mu\text{m}$  are so heavy that electromagnetic forces can be neglected, whereas dust particles  $\leq 1\mu\text{m}$  are strongly influenced by the magnetic field and do not reach the inner solar system. The dust detector on the Ulysses spacecraft is most sensitive in the range of  $0.1\mu\text{m} \leq r \leq 1\mu\text{m}$ , where size-dependent interaction with heliospheric magnetic fields is expected. Detailed analysis of the Ulysses dust data has now shown these interactions to be particularly effective in a time period in 2005/2006. [Krüger et al., 2010] have already indicated a pronounced shift in the flow direction of the ISD particles at this time. We could determine this shift to be  $50^\circ \pm 15^\circ$ . In order to test for a size dependence of this effect, the data set was divided into two subsets of particles smaller and*

Größe unabhängig ist, die Flussstärke zeigte in diesem Zeitraum aber eine signifikante Größenabhängigkeit (Abb. 6, unten). Der Gesamtfluss erreichte ein Missions-Maximum, das aber für kleine Teilchen vier Monate früher lag als für große. Ebenso war der Fluss kleiner Teilchen im Jahr 2005 fünf Mal so hoch wie der großer Teilchen. Zur Erklärung dieses Verhaltens entwickeln wir nun numerische Modelle des Staubflusses durch die Heliosphäre.

*larger than  $0.2\mu\text{m}$ . Within the statistical errors, the shift was the same for both subsets. However, the dust flux in the 2005/2006 period showed an exceptional size-dependent behavior (Fig. 6, bottom). While the total flux reached an all-mission maximum, the flux of small particles reached its maximum 4 months ahead of the large particle flux. While a somewhat smaller or comparable flux is more typical, the flux of small particles exceeded that of larger particles by a factor of five in 2005. In an effort to explain these observations, we are working on a numerical model for the dust flow through the heliosphere.*

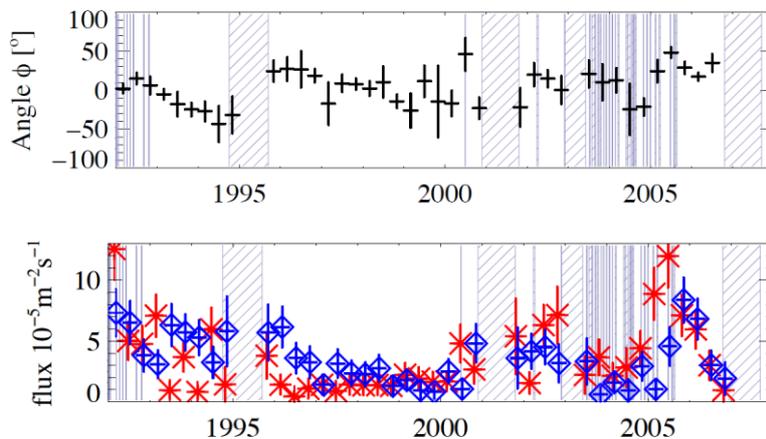


Abb. 6: Oben: Winkelabhängigkeit des Staubflusses beobachtet durch die Ulysses-Mission, relativ zum erwarteten Fluss von interstellarem Staub durch die Heliosphäre. Unten: Der Staubfluss getrennt nach Korngröße,  $< 0.2\mu\text{m}$  (rot),  $> 0.2\mu\text{m}$  (blau).

*Fig. 6: Top: Angular variation of the dust flow observed by Ulysses, relative to the expected flow of the interstellar dust through the heliosphere. Bottom: The flux is shown separately for small particles  $< 0.2\mu\text{m}$  (red) and large particles  $> 0.2\mu\text{m}$  (blue).*

## 8. Die Heliosphäre - Kollision mit dem interstellaren Gas

Schließlich untersuchen wir auch die Heliosphäre - die Plasmawolke, die durch den Sonnenwind im interstellaren Gas gebildet wird (Abb. 7). Ähnlich wie sich um die Planeten ein Plasmamantel (Magnetosheath) formt, bildet die Wechselwirkung zwischen Sonnenwind und interstellarem Gas eine Region aufgeheizten Plasmas, die man als Heliosheath bezeichnet. Die innere Grenze dieser Region wird als Termination Shock bezeichnet und wurde von den beiden Voyager-Sonden 2004 bzw. 2007 überquert. Da die äußere Grenze des Heliosheath, die Heliopause, noch nicht durchflogen wurde, war ihre Entfernung bisher nicht bekannt. Durch eine Kombination von Beobachtungen von 5 Satelliten (IBEX, SOHO/HSTOF, Cassini/INCA, Voyager 1 und 2) aus der Ferne und vor Ort können wir aber nun mit einem numerischen Modell des Termination Shock die Dicke des Heliosheath abschätzen: in Richtung gegen die Strömung des interstellaren Gases beträgt diese 25-30 Astronomische Einheiten (AE). Die Länge des Schweifes der Heliosphäre in der Gegenrichtung lässt sich hingegen bisher nicht durch Beobachtungen beschränken und wird auf 1000 – 100000 AE geschätzt [Hsieh et al., 2010].

## 8. The heliosphere - collision with interstellar gas

*Finally, we also investigate the heliosphere - the plasma bubble produced by the solar wind in the interstellar gas (Fig. 7). Similar to the formation of a magnetosheath around the planets the interaction of the solar wind and the interstellar gas forms a region of heated plasma called the heliosheath. The inner boundary of this region is called termination shock and was crossed by the two Voyager spacecraft in 2004 and 2007. Since the outer boundary - called heliopause - has not been crossed by any spacecraft yet the thickness of the heliosheath was unknown. A combination of remote and in-situ observations by 5 different spacecraft (IBEX, SOHO/HSTOF, Cassini/INCA, Voyager 1 and 2) was now interpreted together with numerical models of the termination shock to infer a thickness of about 25-30 AU of the heliosheath in the upstream direction with respect to the interstellar gas flow. In the opposite or so-called tail direction the estimates are not constrained by in-situ observations and present estimates are in the range of 1000 – 100000 AU [Hsieh et al., 2010].*

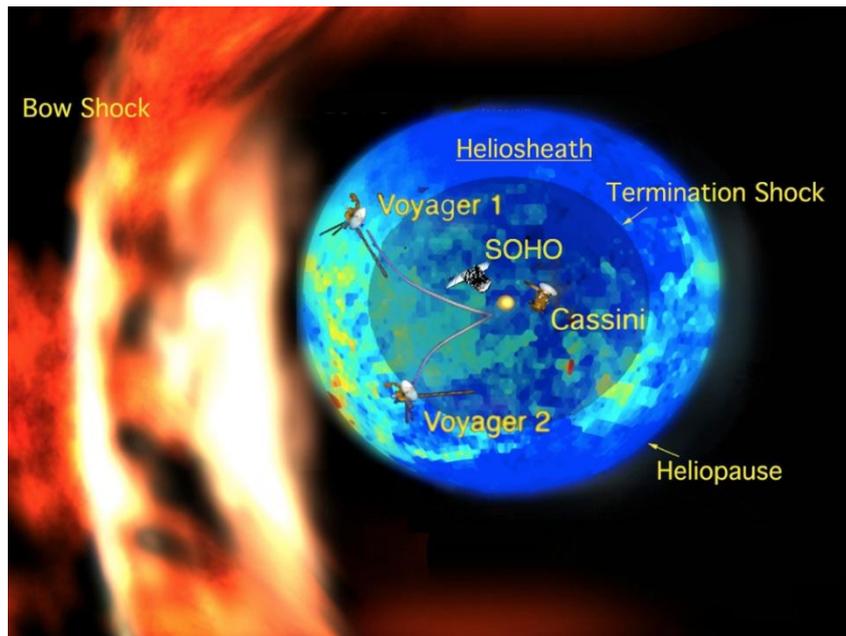


Abb. 7: Plasma-Grenzen der Heliosphäre: Die Heliopause ist bestimmt durch das Druckgleichgewicht zwischen Sonnenwind und interstellarem Gas. Wellen, die von dieser Grenze einwärts laufen, bilden den Termination Shock; solche, die auswärts laufen, die Bugstoßwelle (Bow Shock). Die blau-grüne Einfärbung zeigt die Emission von energiereichen Neutralteilchen aus dem Heliosheath

*Fig. 7: Plasma boundaries of the heliosphere of our solar system: At the heliopause the pressure of the solar wind and the interstellar gas are in balance. Waves reflected from this boundary inwards produce the termination shock, reflected outwards the bow shock. The blue and green colored sky map shows emission of energetic neutral atoms from the heliosheath.*

©NASA/JPL/JHUAPL

### Ausgewählte Veröffentlichungen

#### *Selected publications*

Angsmann, A., M. Fränz, E. Dubinin, et al.: Magnetic states of the ionosphere of Venus observed by Venus Express. *Planetary Space Sci.* 59, 327–337 (2011), doi:10.1016/j.pss.2010.12.004.

Dubinin, E., M. Fraenz, J. Woch, et al.: Long-lived auroral structures and atmospheric losses through auroral flux tubes on Mars. *Geophys. Res. Lett.* 36, L08108 (2009), doi:10.1029/2009GL038209.

Fränz, M., E. Dubinin, E. Nielsen, et al.: Transterminator ion flow in the Martian ionosphere. *Planetary Space Sci.* 58, 1442–1454 (2010), doi:10.1016/j.pss.2010.06.009.

Hsieh, K. C., J. Giacalone, A. Czechowski, et al.: Thickness of the heliosheath, return of the pick-up ions, and Voyager 1's crossing the heliopause. *Astrophys.J.* 718, L185–L188 (2010), doi:10.1088/2041-8205/718/2/L185

Kronberg, E. A., R. Bůcık, S. Haaland, et al.: On the origin of the energetic ion events measured upstream the Earth's bow shock by STEREO, Cluster and Geotail. *J. Geophys. Res.* 116, A02210 (2011), doi:10.1029/2010JA015561.

Krüger, H., V. Dikarev, B. Anweiler, et al.: Three years of Ulysses dust data: 2005 to 2007. *Planetary Space Sci.* 58, 951–964 (2010), doi:10.1016/j.pss.2009.11.002.

Krupp, N., K. K. Khurana, L. Less, et al.: Environments in the Outer Solar System. *Space Sci. Rev.* 153, 11–59 (2010), doi:10.1007/s11214-010-9653-z.

Radioti, A., A. T. Tomas, D. Grodent, et al.: Equatorward diffuse auroral emissions at Jupiter: Simultaneous HST and Galileo observations. *Geophys. Res. Lett.* 36, L07101 (2009), doi:10.1029/2009GL037857.

Roussos, E., N. Krupp, C. P. Paranicas, et al.: Long- and short-term variability of Saturn's ionic radiation belts. *J. Geophys. Res.* 116, A02217 (2011), doi:10.1029/2010JA015954.

### 1.2.7 Kleine Körper im Sonnensystem

Im Sonnensystem gibt es vier Reservoirs an kleinen Körpern: den Asteroidengürtel zwischen Mars und Jupiter, die Familie der Jupiter-Kometen, die vermutlich aus dem Kuipergürtel kommen, die langperiodischen Kometen aus der Oortschen Wolke und die Region der Transneptun-Objekte, hauptsächlich konzentriert im Kuipergürtel zwischen 40 und 50-fachen Erdabstand von der Sonne. Die kleinen Körper in diesen Reservoirs sind zu einem großen Teil Überbleibsel aus der Entstehungsphase des Planetensystems. Obgleich durchaus mit individueller Entwicklungsgeschichte während der vergangenen 4.6 Milliarden Jahre, so geben sie doch ein in vielen Teilen unverändertes Abbild der Bedingungen wieder, die zum Zeitpunkt der 'Geburt' dieser Planetesimale in den verschiedenen Regionen der protoplanetaren Scheibe herrschten. Deswegen erscheinen Asteroiden wohl den terrestrischen Planeten in der warmen Umgebung in Sonnennähe ähnlich, während Kometen und Transneptun-Objekte eher die kalten Körper repräsentieren, die zur Bildung der Gasriesen im Planetensystem beigetragen haben. Die Erforschung grundlegender physikalischer Eigenschaften wie Größe, Gestalt, Zusammensetzung, Temperatur, Oberflächen und innerer Aufbau, aber auch der Mikrostruktur der Oberfläche ermöglicht nicht nur den gegenwärtigen Zustand nach 4.6 Milliarden Jahre Entwicklungszeit im Sonnensystem zu erkunden, sondern gibt auch Aufschluss über die Entstehungsgeschichte des Planetensystem als Ganzes und woraus es entstanden ist. Neben den physikalischen Bedingungen während dieser Phase haben in den vergangenen 10 Jahren Fragestellungen zur chemischen und astrobiologischen Natur der kleinen Körper erheblich an Bedeutung gewonnen.

Raumfahrtmissionen ermöglichen die beste und direkteste Erforschung der kleinen Körper und in der Regel geben sie die umfassendsten Detailinformationen. Jedoch nur einige wenige Objekte können mit Weltraumfahrzeugen besucht werden. Deswegen basieren Untersuchungen zur Gesamtpopulation und ihrem gegenseitigen Zusammenhang auf Messungen von der Erde aus. Die Arbeitsgruppe zu kleinen Körpern am Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung spielt eine aktive Rolle in den weltweiten Bemühungen zur Erforschung der kleinen Körper im Sonnensystem. Sie verfolgt ihre Forschungsziele durch die Beistellung von wissenschaftlicher Instrumentierung zu Weltraummissionen wie ROSETTA und DAWN, aber auch durch astronomische Beobachtungen an modernen erdgebundenen Teleskopen, sowie durch Modellierung der Messungen.

### 1.2.7 Small bodies in the solar system

*Small bodies in the solar system are found in four reservoirs: the asteroids in the main belt between the orbits of Mars and Jupiter, the short period Jupiter family comets likely originating from the Kuiper Belt, the long period comets from the Oort cloud, and the Trans-Neptunian objects beyond Neptune's orbit, mostly concentrated in the Kuiper Belt between 40 and 50 times the Earth distance to the Sun. The bodies in these reservoirs are to a large extent the left-overs from the formation of our planetary system, and they represent - despite their individual evolution over the past 4.6 billion years - a rather unaltered memory of the conditions, prevailing at the time when these planetesimals were born in different regions of the solar formation disk. For instance, asteroids are more similar to terrestrial planets in the warm environment close to the Sun, while comets and Trans-Neptunian objects are more representative for the cold bodies that have contributed to the formation of the gas giants in the planetary system. The exploration of basic physical properties like size, shape, composition, temperature, surface, intrinsic structure and even microstructure of the surfaces allows to assess not only the present status of the bodies after 4.6 billion years of evolution in the neighborhood of the Sun, but it also provides clues on the formation history of the planetary system as a whole and what it was made of. Besides the physical conditions, chemical and astrobiological questions on the nature of the small bodies and their possible contribution to the formation of life on Earth have gained importance over the past decade.*

*Space missions give the best and most direct platform for investigations of the small bodies and, naturally, they provide the most detailed results. However, since only a few individual objects can be visited by man-made spacecraft, population and context information need to be collected by Earth-based observing techniques. The MPS research group of small bodies is an active element of the world-wide efforts on small bodies exploration and it follows both research paths with instrument contributions to space missions like ROSETTA and DAWN as well as astronomical and modeling studies using both modern ground- and space-based telescopes.*



Abb. 1: 21 Lutetia im Asteroidengürtel, aufgenommen mit dem OSIRIS Instrument während des Vorbeiflugs von ROSETTA am 10 Juli 2010.

*Fig. 1: Scene of main belt asteroid 21 Lutetia, imaged by the OSIRIS instrument during the fly-by of the ROSETTA spacecraft on 10 July 2010.*

## 1. ROSETTA

ESA's Cornerstone-Mission ROSETTA wurde im März 2004 gestartet und zielt auf die wissenschaftliche Erforschung des periodischen Kometen 67P/Churyumov-Gerasimenko ab, einem Mitglieder der Jupiter-Familie von Kometen, die vermutlich aus den äußeren Bereichen des Planetensystems, z.B. dem Kuipergürtel, stammen. MPS-Wissenschaftler, Ingenieure und Techniker sind an der Mission mit der weltweit umfangreichsten Beistellung an und zu wissenschaftlichen Instrumenten (9 von 20) beteiligt. Hauptverantwortung hat das Institut für die wissenschaftliche Kamera OSIRIS, den Analysator zur Staubzusammensetzung COSIMA, den Gas- und Organik-Analysator COSAC sowie die Kometenlandesonde PHILAE. Beteiligungen größtenteils mit Beistellung von Instrument-Hardware bestehen für den Radio-Sounder CONSERT, das sub-mm Gas- und Oberflächenmessgerät MIRO, das Gasspektrometer ROSINA, das Magnetometer und den Plasma-Analysator ROMAP, dem Staubimpakt-Analysator SESAME-DIM sowie dem Radio-Science-Experiment RSI. Neben dem wissenschaftlichen Highlight mit dem Vorbeiflug an 21 Lutetia, einem größeren Asteroiden im Hauptgürtel, haben ROSETTA-Orbiter und -Lander in 2009-2010 die letzten 4 einer Serie von 13 Instrument- und System-Check-Outs in der Cruise-Phase von der Erde zum äußeren Asteroi-

## 1. ROSETTA

*ESA's Cornerstone mission ROSETTA, launched in March 2004, aims at the scientific exploration of periodic comet 67P/Churyumov-Gerasimenko, a Jupiter family comet, most likely originating from the outskirts of the planetary system in the Kuiper Belt. MPS scientists, engineers and technicians participate with the worldwide largest complement (9 out of a total of 20) of scientific instruments onboard. Lead roles are taken for the mission camera system OSIRIS, the dust composition analyzer COSIMA, the gas and organics analyzer COSAC, the comet lander PHILAE; co-investigator tasks are accomplished for the nucleus interior tomographic radio sounder CONSERT, the sub-mm gas, water and surface analyzer MIRO, the coma gas composition spectrometer ROSINA, the magnetometer and plasma analyzer ROMAP, the dust impact analyzer SESAME-DIM, and the radio science experiment RSI. In 2009-2010 the orbiter and lander have successfully completed - aside the scientific highlight of the flyby at the main belt asteroid 21 Lutetia (for the main results see below) - the last 4 from a series of 13 regular instrument and system check-outs during the cruise phase between Earth and the outer asteroid belt. The spacecraft and instruments are ready for a 2½ years hibernation period in deep space. Meanwhile the 1.5 years long scientific exploration*

dengürtel absolviert. Raumfahrzeug und Instrumente sind nun bereit für eine 2½-jährige Ruhephase im Weltraum, in der kein Betrieb an Bord stattfinden wird. In dieser Periode wird die 1½ Jahre lange wissenschaftliche Erkundungsphase am Kometen (Beginn 2014) auf der Erde vorbereitet durch Detailplanung der wissenschaftlichen und operationellen Betriebssequenzen, unterstützt durch Laborexperimente und Kalibrationsmessungen am Boden. Dabei kommt am MPS flugtaugliche und bauidentische Instrumentierung zum Einsatz.

## 2. Der Vorbeiflug bei 21 Lutetia - Ergebnisse von OSIRIS, MIRO, COSIMA und COSAC

Am 10. Juli 2010 flog ROSETTA an 21 Lutetia vorbei, dem größten Asteroiden, der bisher von einem Raumfahrzeug besucht wurde. Die engste Annäherung betrug 3170 km. Während des Vorbeiflugs konnte die OSIRIS-Kamera Bilder von mehr als 50 Prozent der Oberfläche des Asteroiden, zumeist von der nördlichen Hemisphäre, aufnehmen und zur Erde funken. Dabei kamen 21 Filter in der Kamera zum Einsatz. Die beste Auflösung betrug ca. 60 m pro Kamera-Pixel. Die Bilder (Abb. 1) zeigen eine stark verkraterte, jedoch auch unterschiedliche Oberflächenmorphologie, eine Folge der langen und komplexen Entwicklungsgeschichte des Körpers. Einige Mehrfachkratersysteme zeigen Hinweise auf Bergrutsche von den Kraterwällen. Die Oberfläche ist von losem Regolith-Material bedeckt und zeigt Grabensysteme, die auf Spalten tief unter der Oberfläche hindeuten könnten. Die OSIRIS-Bilder ermöglichten die Rekonstruktion der irregulären Gestalt des ca. 130 km großen Asteroiden und ergaben, in Kombination mit einer Massenschätzung vom RSI-Instrument an Bord, einen erstaunlich hohen Wert für die mittlere Dichte des Körpers (mehr als  $3 \text{ g/cm}^3$ ). Um diese sowie die Ergebnisse zur Oberflächen-Mineralogie konsistent interpretieren zu können, muss man annehmen, dass 21 Lutetia einst während ihrer Frühphase sehr heiß war, möglicherweise sogar teilweise geschmolzen, so dass sich im Inneren ein eisenhaltiger Kern gebildet hat. Asteroiden dieser Größe repräsentieren möglicherweise die Planetesimale aus der Frühphase des Planetensystems besser als die kleineren 'Rubble-Pile'-Asteroiden, die andere Missionen bisher besucht haben.

Abschätzungen der Körperausdehnung durch MIRO wurden in unvorhersehbarer Weise durch einen Berg auf der Asteroidenoberfläche behindert. Die erhaltenen Messungen von der Asteroidenoberfläche sind am besten mit einer niedrigeren thermischen Trägheit als bei Asteroid 2867 Steins zu erklären. Die thermische Trägheit sagt aus, wie schnell die im Körper enthaltene Wärmeenergie durch Abkühlung bzw. Erhitzung abgegeben oder aufgenommen werden kann und beschreibt die Qualität der thermischen Isolierung des Materials an der Oberfläche.

*period of the comet, starting in spring 2014, will be prepared on Earth by scientific and operational planning as well as supporting lab and ground calibration experiments involving the flight spare equipment at MPS.*

## 2. The Lutetia flyby - results from OSIRIS, MIRO, COSIMA and COSAC

*The Rosetta spacecraft flew by asteroid 21 Lutetia, the largest asteroid visited by a spacecraft so far, on July 10, 2010, with a closest approach distance of 3170 km. The OSIRIS camera system imaged more than 50% of the asteroid surface, mostly of the Northern Hemisphere, in 21 filters and at a best spatial scale of  $\approx 60\text{m/pixel}$  (Fig. 1). The images reveal a heavily cratered and morphologically diverse surface, indicating a long and complex evolution history of the body. Several multiple crater systems contain landslides from the crater walls. The surface is covered by loose "regolith" material, and shows systems of grooves that suggest cracks deep below. The OSIRIS images allowed reconstruction of the irregular shape of this about 130 km size asteroid and they provide - in combination with the mass estimate from the RSI instrument onboard ROSETTA - a surprisingly large density of over  $3 \text{ g/cm}^3$ . To make this measurement consistent with the mineralogy revealed on the surface, it is likely that 21 Lutetia was very hot, possibly even partially molten, during its early history which allows to form a dense iron-containing core. This shows that asteroids of this size are much more like remnant planetesimals, the building blocks of planets, than the smaller "rubble pile" asteroids seen by previous missions.*

*The estimation of the asteroid's extension to be done with MIRO suffered from the unforeseeable, but disturbing presence of a surface mountain in the instrument beam towards the asteroid. However, the instrument measurement argues for a lower thermal inertia of the surface material than that found during the fly-by at the much smaller asteroid 2867 Steins. Thermal inertia measures how fast the internal thermal energy of a body reacts to surface cooling or heating and characterizes the thermal insulation properties of the surface material.*

Die Instrumente COSIMA und COSAC fanden weder Staubkörner noch Gas, das vom Asteroiden freigesetzt wurde. Daraus kann man zum einen schließen, dass die mittlere räumliche Staubdichte höchstens  $10^{-13}$  Teilchen pro  $\text{cm}^3$  für Körner größer als  $10\ \mu\text{m}$  betragen hat, mithin die sog. Hillsphäre mit weniger als  $10^{-10}$  Teilchen pro  $\text{cm}^3$  gefüllt war. Diese beiden Resultate sind im Bereich dessen, was für 21 Lutetia erwartet wurde. Die COSAC-Messungen ergeben eine Obergrenze von  $5 \times 10^{-9}$  mbar für den Gasdruck um den Asteroiden. Die Exosphäre, falls überhaupt existent, war also extrem dünn. Physikalische Prozesse, die Gas und Staub an der Oberfläche freisetzen können, sind offenbar nicht sehr effizient.

*The instruments COSIMA and COSAC did not detect any dust grains or gas originating from the asteroid. This sets an upper limit to the mean dust density of  $10^{-13}$  particles per  $\text{cm}^3$  for particles larger than  $10\ \mu\text{m}$  and an upper limit of  $10^{-10}$  particles per  $\text{cm}^3$  in the so-called Hill sphere. Both values are within the expected range for an asteroid of 21 Lutetia's size and density. The COSAC measurements put an upper limit of  $5 \times 10^{-9}$  mbar on the gaseous pressure around the asteroid. The exosphere, if present at all, is thus extremely thin and potential processes that may release dust and/or gas from the surface are rather inefficient.*

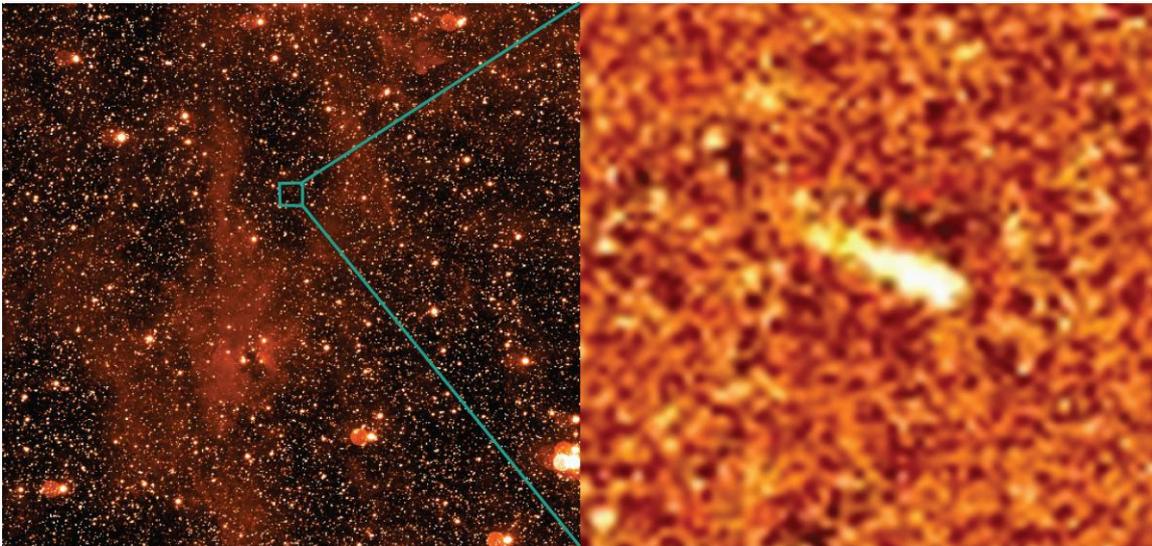


Abb. 2: Die Reste der Asteroidenkollision in P/2010 A2 LINEAR, aufgenommen mit der OSIRIS-Kamera an Bord von ROSETTA im März 2010. Der Zusammenstoß ereignete sich mehr als ein Jahr vor dem Aufnahme-datum. Das linke Bild zeigt das Kameragesichtsfeld am Himmel bei der Aufnahme von P/2010 A2 LINEAR; das rechte Bild gibt eine Vergrößerung der Kollisionsstelle am Himmel wieder, die aus einer Vielzahl von aufaddierten Einzelaufnahmen und nach Beseitigung der Hintergrundobjekte erhalten wurde.

*Fig. 2: The asteroid collision of P/2010 A2 LINEAR imaged with the OSIRIS camera onboard ROSETTA in March 2010, more than one year after the event. The left panel shows the camera field of view towards the asteroid collision, the right panel provides a close-up extract of a large co-added combination of such exposures, now with the background stars removed, enhancing the signal of the impact event in the asteroid belt.*

### 3. P/2010 A2 LINEAR - ein nur kurz zurückliegender Zusammenstoß im Asteroidengürtel

Das OSIRIS-Team nutzte die Gelegenheit, um wissenschaftliche Aufnahmen auf dem Weg zu 21 Lutetia zu sammeln. So ergab sich die Chance, einen erst kurz vorher entdeckten Asteroiden im Hauptgürtel zu untersuchen, der zunächst als Komet P/2010 A2 LINEAR katalogisiert wurde. Die Morphologie des Staubschweif des Objekts weicht deutlich von dem für Kometen typischen Erscheinungsbild ab (Abb. 2). Durch den Vergleich von Aufnahmen, gewonnen an erdgebundenen Teleskopen, mit denen von OSIRIS auf ROSETTA konnte ein Stereo-Bild des Schweifes erhalten werden. Die darauf aufbauende Modellierung der

### 3. P/2010 A2 LINEAR - a recent collision in the asteroid belt

*The camera OSIRIS performed a target-of-opportunity cruise phase observation while en route to 21 Lutetia. The MPS team took advantage of the position of ROSETTA to study the newly discovered main-belt comet P/2010 A2 LINEAR. The morphology of the dust tail of this object was unlike any previously observed comet (Fig. 2). By combining images from Earth-based telescopes and from ROSETTA using OSIRIS as a space telescope, a stereo view of the tail could be established. Modeling of the dust dynamics of this tail revealed that it could only be the result of a collision of asteroids, rather than of intrinsic comet-like activity.*

Schweifdynamik ergab, dass das beobachtete Phänomen das Resultat einer Asteroidenkollision ist und nicht von Aktivität wie bei einem Kometen getrieben war. Der sichtbare Schweif besteht aus mindestens mm großen Staubpartikeln, die bei einem Impakt-event um den 5. Februar 2009 erzeugt wurden, d.h. mehr als ein Jahr vor der Entdeckung des Objekts. P/2010 A2 LINEAR ist die erste jemals beobachtete Kollision von Asteroiden und war eine hervorragende Demonstration des Leistungsvermögens der OSIRIS-Kamera, die als kleines Teleskop mit nur 14 cm Öffnung an die Sensitivität von Großteleskopen auf der Erde und vom Hubble Space Telescope heranreicht.

#### 4. DAWN

Die DAWN-Mission aus dem NASA Discovery Programm wurde im September 2007 gestartet und plant Rendezvous-Besuche bei den beiden großen Hauptgürtel-Asteroiden 4 Vesta in 2011/12 und 1 Ceres in 2015/16. Ein Team von MPS-Wissenschaftlern und Ingenieuren ist hauptverantwortlich für ein wichtiges wissenschaftliches Instrument an Bord des Raumfahrzeugs: das Bildkamera-System FC, das für die Erkundung der beiden Körper mittels Bildern im sichtbaren Wellenlängenbereich zuständig ist. In 2009 und 2010 haben Raumfahrzeug und Kameras insgesamt 4 Testperioden im Flug erfolgreich durchlaufen. Als nächster Programmpunkt steht die Ankunft bei 4 Vesta für Sommer 2011 an. Inzwischen hat das MPS-Team die wissenschaftlichen und operationellen Planungen für die Annäherungs- und Orbitphase am Asteroiden abgeschlossen. In Vorbereitung mit der Begegnung mit 4 Vesta hat das DAWN-Team photometrische und spektroskopische Messungen des Asteroiden von der Erde aus durchgeführt. Das Team arbeitet auch auf Labormessungen von Reflexionsspektren von ausgewähltem Meteoriten-Material hin, die später als Referenz für die mineralogische Analyse der Kamerabilder genutzt werden können.

#### 5. Erdgebundene Beobachtungen

In 2009 und 2010 wurden weitere Resultate der noch laufenden Beobachtungskampagne zum Zielkometen, 67P/Churyumov-Gerasimenko, publiziert. Insbesondere zielten sie auf die Analyse der Kometenaktivität während des Bahnbogens im Aphel und in der Entfernung der ersten Annäherung von ROSETTA an den Kometen ab. Der Kometen war im Wesentlichen inaktiv; deswegen konnten die Eigenschaften der Lichtreflexion an der Kometenoberfläche näher untersucht und eine verbesserte Bestimmung der Rotationsperiode des Kometenkerns durchgeführt werden. Als Unterstützung der weltweiten Beobachtungen für den Vorbeiflug der STARDUST-NEXT-Mission am Kometen 103P/Hartley 2 im November 2010 wurde eine ein Jahr überdeckende Monitoring-Kampagne des Kometen durchgeführt mit dem Ziel, den Verlauf der Staub-

*The tail contains mm and larger size ejecta from the impact that happened around 5 Feb 2009, i.e. more than one year before the discovery of the object. P/2010 A2 LINEAR represents the first ever observed asteroid collision. This was also a great demonstration of the capabilities of the OSIRIS camera system pushing sensitivity limits of its 14 cm aperture to the range of the largest ground-based telescopes, and of the Hubble Space Telescope.*

#### 4 DAWN

*NASA's Discovery Program mission DAWN, launched in September 2007, plans to visit the two large main belt asteroids 4 Vesta in 2011/12 and 1 Ceres in 2015/16. An MPS science and engineering team has contributed and takes the lead for one of the scientific key instruments onboard: the framing camera FC that will aim at the imaging exploration of the two bodies in the wavelength range of reflected sunlight. In 2009-2010 spacecraft and camera passed successfully in total 4 in-flight check-outs and are now awaiting arrival at the first scientific target, 4 Vesta, in summer 2011. In the meanwhile, the MPS team has completed the scientific and operational planning of the approach and orbiting phase at the asteroid. In preparation of the encounter with 4 Vesta the DAWN team has also performed photometric and spectroscopic measurements of the asteroid from Earth and it collaborates in a laboratory analysis for new reflectance spectra of meteoritic material that can serve as reference for the mineralogic analysis of remote sensing data of small body surfaces from spacecraft.*

#### 5. Earth-based observations

*In 2009 and 2010 new results from the on-going campaign of observations on the ROSETTA target comet 67P/Churyumov-Gerasimenko were published, studying the activity of the comet during the aphelion arc of the orbit and in the distance range of the first encounter with the space probe. The comet was mostly inactive which allowed to study the light reflectance properties of the nucleus, and to refine estimates of its rotation period. As contribution of the world-wide campaign in support of the mission STARDUST-NEXT fly-by in November 2010, a year-long imaging campaign of monitoring comet 103P/Hartley 2 was also performed with the aim to characterize the dust production in this comet. These observations were complemented by high dispersion IR spectroscopy around the orbit part of the planned encounter in order to*

produktion durch den Kometenkern zu charakterisieren. Diese Aufnahmen wurden ergänzt durch hochauflösende Infrarot-Spektroskopie-Messungen der Gasproduktionsrate bestimmter sog. Muttermoleküle des Kometenkerns. Der gemessene niedrige Anteil von CO-Gas spricht für eine atypische Eiszusammensetzung im Kometen. Eigene Teleskopbeobachtungen haben zur Bestimmung der Rotationsperiode des Kometen 9P/Tempel 1 beigetragen, eine Arbeit, die für die erfolgreiche Planung und Durchführung des Vorbeiflugs der EPOXI-Mission am Kern des Kometen im Februar 2011 notwendig war. Durch die Verbindung von Photometrie des Kometen über mehr als 10 Jahre konnte eine Änderung der Rotationsperiode des Kerns nachgewiesen werden, die für die Ausrichtung des Zielanflugs der Mission zum Kometenkern große Bedeutung erlangt hat. Änderungen der Rotationsperiode von Kometenkernen könnten durch Rückstoßkräfte auf den Kern infolge von Kometenaktivität verursacht sein, wurden jedoch vorher niemals durch direkte Messungen nachgewiesen.

Populationsstudien von kleinen Körpern verwenden Ergebnisse von Beobachtungen mittels verschiedener Techniken wie Imaging, Spektroskopie und Polarimetrie und in verschiedenen Wellenlängenbereichen vom Visuellen bis sub-mm. Damit untersuchen MPS-Wissenschaftler physikalische Eigenschaften wie z.B. Größe und Albedo von Kometenkernen. Des Weiteren sind sie involviert in ein Such- und Monitoring-Programm der erst jüngst entdeckten kometenartigen Objekte im Asteroidengürtel, einschließlich P/2010 A2 LINEAR (siehe Teil 3). Die Eiszusammensetzung im Kern des langperiodischen Kometen C/2004 Q2 Machholz konnte durch Spektrallinien-Messungen einer Reihe von Muttermolekülen wie CH<sub>3</sub>OH, HCN, HNC, H<sup>13</sup>CN, H<sub>2</sub>CO, CO, und CS bestimmt werden mit der Schlussfolgerung, dass die thermische Prozessierungsgeschichte des Kometenkerns Ähnlichkeiten zu der von Kometen aus der Jupiterfamilie hat (Abb. 3). Beobachtungen der Kometen C/2006 W3 Christensen, C/2008 Q3 Garradd, 9P/Tempel 2, 81P/Wild 2, und 103P/Hartley 2 wurden mit ESA's Herschel Observatorium als Teil des HssO-Programms erzielt; erste Resultate sind in Kapitel 1.2.2 beschrieben.

Andere Teleskopbeobachtungen wandten sich der Bestimmung der Oberflächenmineralogie von Asteroiden zu, insbesondere den sog. Erdbahnkreuzern. Dabei wurden die ersten bekannten Stücke aus dem Mantelvolumen des Asteroiden 4 Vesta entdeckt. Ein noch andauerndes aufwändigeres Beobachtungsprogramm bei der europäischen Sternwarte in Chile versucht den Nachweis des sog. YORP-Effekts bei Asteroiden, der kleine Änderungen der Rotationsperiode infolge des Sonnenlichts erzeugt.

*assess the production rates of parent gas species in the nucleus. The low amount of CO found supports the scenario of a special ice composition in this comet. Other ground-based imaging contributed to the determination of the rotation period of comet 9P/Tempel 1 in preparation of the fly-by of the EPOXI mission at the nucleus in February 2011. By combining nucleus photometry from over 10 years a change in the rotation period was found that was important for the final targeting of the mission flyby. Such period changes may be caused by reaction forces on the nucleus due to its outgassing while being active and were predicted by modelers, but never confirmed by direct measurements.*

*The studies on the population context use telescope observations involving different techniques (imaging, spectroscopy, polarimetry) and wavelengths (visible to sub-mm). MPS researchers studied bulk physical properties like size and albedo of cometary nuclei and were involved in a search and monitoring program of the newly identified population of main-belt comets, including the mysterious object P/2010 A2 LINEAR (see section 3). The ice composition of the nucleus of the long-periodic comet C/2004 Q2 Machholz measured through a number of parent molecules like CH<sub>3</sub>OH, HCN, HNC, H<sup>13</sup>CN, H<sub>2</sub>CO, CO, and CS suggests a thermal processing history of the nucleus similar to those of Jupiter family comets (Fig. 3). Measurements of comets C/2006 W3 Christensen, C/2008 Q3 Garradd, 9P/Tempel 2, 81P/Wild 2, and 103P/Hartley 2 were collected with ESA's Herschel Observatory as part of the Guaranteed Time Program HssO and first results are described in chapter 1.2.2.*

*Other ground-based studies determined the surface mineralogy of asteroids, namely of so called Earth crossers, which led to the discovery of the first known piece of a mantle segment originating from asteroid 4 Vesta. An on-going large observing campaign at ESO Chile addresses the YORP effect - the tiny change in the spin rate of asteroids caused by sunlight.*

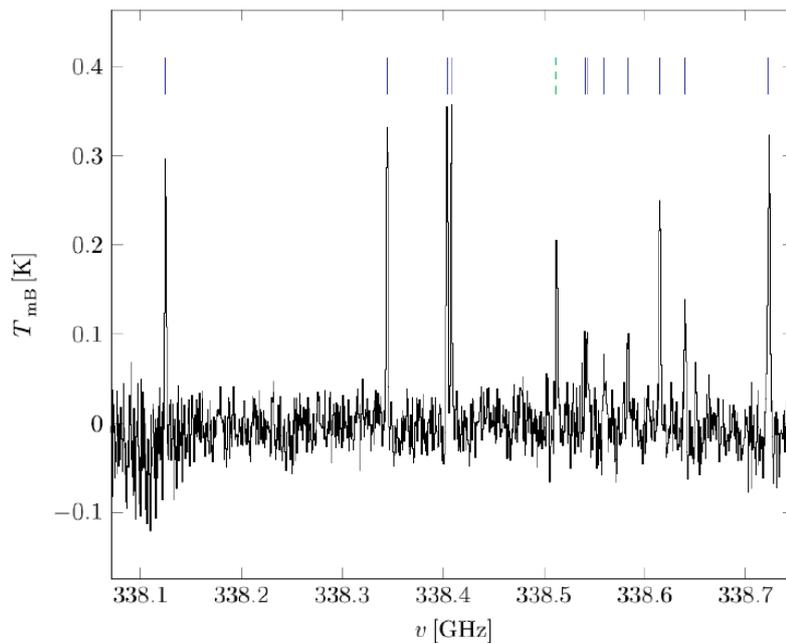


Abb. 3:  $\text{CH}_3\text{OH}$  Spektrum des Kometen C/2004 Q2 (Machholz), aufgenommen im Januar 2005. Die durchgezogenen vertikalen Linien markieren detektierte  $\text{CH}_3\text{OH}$  Spektrallinien. Die unterbrochene vertikale Linie zeigt einen Blend aus drei Emissionslinien bei 338.530 GHz.

Fig. 3:  $\text{CH}_3\text{OH}$  spectrum of comet C/2004 Q2 (Machholz) obtained in January 2005. Solid vertical lines indicate detected  $\text{CH}_3\text{OH}$  spectral lines. The dashed vertical line is a blend of three emission lines at 338.530 GHz.

Die Charakterisierung der Oberflächeneigenschaften von Transneptun-Objekten unter Benutzung von Photometrie- und Polarimetriemethoden ist ein aktives Arbeitsfeld von MPS-Wissenschaftlern. Dies schließt Untersuchungen des Zwergplaneten Pluto und des Neptunmondes Triton (vermutlich ein eingefangener Körper aus dem Kuipergürtel) ein. Die Pluto-Messungen zeigen, dass die Änderungen der Infrarot-Reflektivität der Oberfläche bei etwa  $3.1 \mu\text{m}$  sich nach 2005 stabilisiert haben. Diese Veränderungen werden entweder durch Ausfrieren von atmosphärischen Gasen auf der Oberfläche erzeugt oder durch windgetriebene Ablagerungen von Eis aus anderen Regionen. Im Rahmen eines Open-Time Key-Programms des Herschel-Observatoriums werden derzeit mehr als 130 Transneptun-Objekte beobachtet, um Größe, Albedo und thermischen Eigenschaften dieser kalten Körper am Rande des Planetensystems zu bestimmen. Erste Resultate bestätigen einerseits frühere Ergebnisse: die Körper haben nur gering reflektierende Oberflächen. Andererseits gab es erste Hinweise auf neue, unerwartete Eigenschaften, die jedoch erst mit dem gesamten Datenpaket aller Objekte richtig analysiert und interpretiert werden können. Zur Untersuchung des Lichtstreuerverhaltens von organischem Material im Weltraum mit seiner bisher noch unbekanntem Zusammensetzung werden spektropolarimetrische Messungen der dunklen und hellen Seite des Saturnmondes Iapetus durchgeführt. Sie belegen für beide Hemisphären sehr unterschiedliche Verhaltensweisen.

## 6. Modellierung der Kometenkoma

Am MPS werden physikalische Modelle der Gas- und der Staubkoma von Kometen entwickelt. Zur Beschreibung der Gaskoma wurde ein Strahlungstransportmodell entwickelt, das erlaubt, physikalische Pa-

*MPS researchers have used both photometry and spectroscopy to characterize the surfaces of Trans-Neptunian Objects, including detailed studies of the dwarf planet Pluto and Neptune's moon Triton, a likely escapee from the Kuiper Belt. The Pluto measurements show that the changes on the infrared surface reflectivity around  $3.1 \mu\text{m}$ , that were caused either by re-condensed atmospheric frost or by wind transported ices, have stabilized after 2005. In an Herschel Open Time Key Program more than 130 Trans-Neptunian Objects are measured in order to determine size, albedo and thermal properties of these cold bodies at the edge of the planetary system. The first results on one side confirm earlier findings on the darkness of the main population of the belt, but gave also puzzling indications for possible new findings to be expected from the much larger dataset in 2011 when population studies will become possible for the very first time. The microstructure of surfaces can be studied by polarimetric techniques. In order to explore the light scattering behavior of space organics of yet unknown nature a comparative analysis of spectropolarimetric measurements of the dark organic and the bright icy sides of the Saturn moon Iapetus is performed with clear indications of distinctly different behaviour for the two hemispheres.*

## 6. Modeling cometary comae

*The modeling efforts at MPS refer to the physical description of the gaseous and of the dusty comae of comets. For the gaseous coma a radiative transfer model is developed that allows to obtain physical pa-*

parameter wie Gasdichte, Geschwindigkeit und Temperatur aus Spektrallinien zu bestimmen, die mit dem MIRO-Instrument auf ROSETTA gemessen werden können. Zwei Lösungsansätze wurden implementiert, einer mit vereinfachenden Annahmen wie z.B. eines sphärisch symmetrischen Kometenkerns und lokalen thermodynamischen Gleichgewichts in der inneren Koma sowie ein komplexeres Modell, das Nicht-Gleichgewichtsbedingungen und weitere Effekte wie Wasser-Wasser- und Wasser-Elektronenstöße sowie Fluoreszenz im Infraroten als Anregungsmechanismus des Gases berücksichtigt. Die Modellierung der Staubkoma zielt auf die Bestimmung von aktiven Regionen auf dem Kometenkern ab, die eine erhöhte Staubproduktion zeigen in Form von kollimierten Jets, Spiral- oder bogenartigen Strukturen, wie man sie aus Welt- raum- und Teleskopbeobachtungen kennt. Das neue Staubkoma-Modell erlaubt die Simulation dieser Phänomene und berücksichtigt auch die komplexe Gestalt des Kometenkerns durch ein adaptiertes 3D-Modell. Komet 9P/Tempel 1 ermöglichte die erfolgreiche Validierung des Modells mittels eines Vergleichs der Resultate mit denen aus der Deep-Impact-Mission zu diesem Kometen.

*parameters like gas density, velocity and temperature from spectral lines observed by the ROSETTA MIRO instrument. Two model descriptions were implemented, one with simplifying conditions like spherical symmetry of the cometary nucleus under local thermal equilibrium for the inner coma and a more sophisticated one considering non-equilibrium conditions and taking additional physical effects into account like water-water and water-electron collisions as well as infrared fluorescence as excitation mechanisms in the gas. The dust coma modeling is intended to identify active regions on the cometary nucleus that produce enhanced dust emission resulting in collimated jets, spirals and arcs that can be observed from spacecraft or from the ground. The new model allows to simulate such features using a realistic 3-dimensional shape model of the nucleus. The case of 9P/Tempel 1 allowed successful validation of the modeling approach through comparison with results obtained for this comet by the DEEP-IMPACT mission.*

### Ausgewählte Veröffentlichungen

#### *Selected publications*

Bagnulo, S., G. P. Tozzi, H. Boehnhardt, et al.: Polarimetry and photometry of the peculiar main-belt object 7968 = 133P/Elst-Pizarro. *Astron. & Astrophys.* 514, A99 (2010), doi:10.1051/0004-6361/200913339.

Gulkis, S., S. Keihm, L. Kamp, et al.: Millimeter and submillimeter measurements of asteroid (2867) Steins during the Rosetta fly-by. *Planet. Space Sci.* 58, 1077–1087 (2010), doi:10.1016/j.pss.2010.02.008.

Keller, H. U., C. Barbieri, D. Koschny, et al.: E-type Asteroid (2867) Steins as Imaged by OSIRIS on Board Rosetta. *Science* 327, 190–193 (2010), doi:10.1126/science.1179559.

Müller, T., E. Lellouch, J. Stansberry, et al.: “TNOs are Cool”: A survey of the trans-Neptunian region. I. Results from the Herschel science demonstration phase (SDP). *Astron. & Astrophys.* 518, L146 (2010), doi:10.1051/0004-6361/201014683.

Nathues, A.: Spectral study of the Eunomia asteroid family Part II: The small bodies. *Icarus* 208, 252–275 (2010), doi:10.1016/j.icarus.2010.02.011.

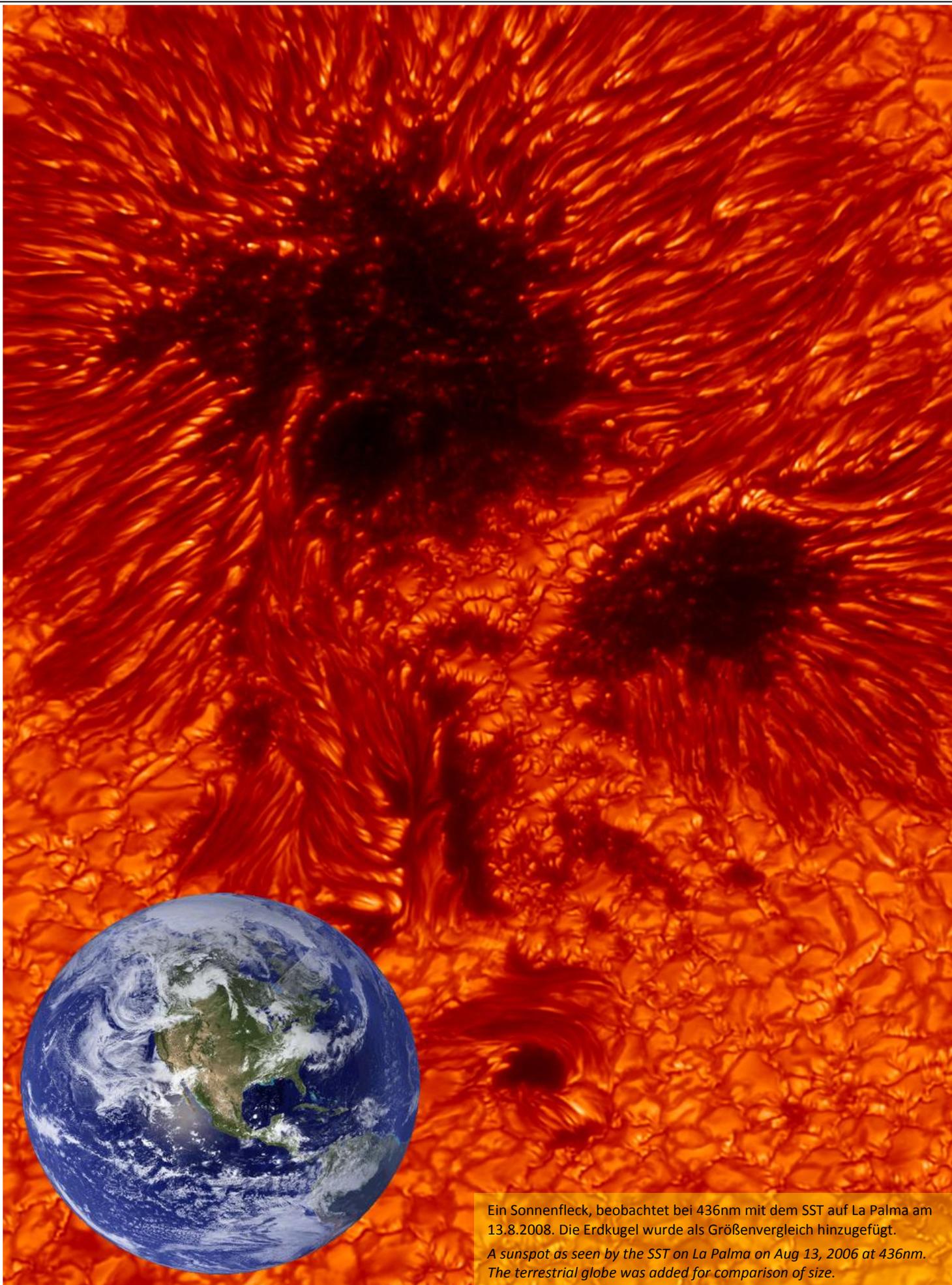
Protopapa, S., A. Alvarez-Candal, A. Barucci, et al.: ESO large program about transneptunian objects: surface variations on (47171) 1999 TC36. *Astron. & Astrophys.* 501, 375–380 (2009), doi:10.1051/0004-6361/200810572.

Schröder, S. E., H. U. Keller, P. Gutiérrez, et al.: Evidence for surface variegation in Rosetta OSIRIS images of asteroid 2867 Steins. *Planet. Space Sci.* 58, 1107–1115 (2010), doi:10.1016/j.pss.2010.04.020.

Snodgrass, C., C. Tubiana, J.-B. Vincent, et al.: A collision in 2009 as the origin of the debris trail of asteroid P/2010 A2. *Nature* 467, 814–816 (2010), doi:10.1038/nature09453.

de Val-Borro, M., P. Hartogh, J. Crovisier, et al.: Water production in comet 81P/Wild 2 as determined by Herschel/HIFI. *Astron. & Astrophys.* 521, L50 (2010), doi:10.1051/0004-6361/201015161.

Vincent, J.-B., H. Bönhardt, and L. M. Lara: A numerical model of cometary dust coma structures. Application to comet 9P/Tempel 1. *Astron. & Astrophys.* 512, A60 (2010), doi:10.1051/0004-6361/200913418.



Ein Sonnenfleck, beobachtet bei 436nm mit dem SST auf La Palma am 13.8.2008. Die Erdkugel wurde als Größenvergleich hinzugefügt.

*A sunspot as seen by the SST on La Palma on Aug 13, 2006 at 436nm. The terrestrial globe was added for comparison of size.*

## 1.3 Sonne und Heliosphäre

### 1.3.1 Überblick

#### Forschungsgebiet und Methoden

Das Forschungsgebiet der Abteilung „Sonne und Heliosphäre“ ist die Sonne in der gesamten Vielfalt ihrer beobachtbaren und messbaren Phänomene. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Atmosphäre der Sonne mit ihrer reichhaltigen Struktur und Dynamik, ergänzt durch die Beschäftigung mit dem Sonneninneren als Ort der Entstehung des solaren Magnetfeldes auf der einen Seite und mit der Heliosphäre, also dem vom Sonnenwind geprägten interplanetaren Raum, dessen Eigenschaften wiederum durch die Sonnenatmosphäre bestimmt werden, auf der anderen Seite. Mit der Untersuchung solar-terrestrischer Beziehungen, also insbesondere des Einflusses der schwankenden solaren Partikel- und Wellenstrahlung auf die Erde, erstreckt sich das Arbeitsgebiet sogar über die Sonne und ihre direkte Umgebung hinaus. Das gemeinsame Thema, das alle diese Bereiche verbindet und das der wesentliche Motor ist für die Vielzahl der dynamischen Phänomene der Sonne, ist dabei das solare Magnetfeld.

Die Entwicklung und der Bau von wissenschaftlichen Instrumenten und die Gewinnung und Auswertung von Messdaten spielen eine zentrale Rolle. Die äußere Atmosphäre der Sonne, die Korona, wird mit optischen Instrumenten im gesamten Spektralbereich vom Sichtbaren bis zum EUV (extremen UV-Licht) vom Weltraum aus beobachtet und ihre Plasmaeigenschaften werden mit spektroskopischen Methoden diagnostiziert. Die unteren Schichten der Atmosphäre, die Photosphäre und die Chromosphäre, werden anhand von spektropolarimetrischen Messungen und mit abbildenden Techniken vom Boden aus, vom Weltraum aus, und auch mit Hilfe von Stratosphärenballons untersucht. Der relevante Spektralbereich erstreckt sich dabei von Millimeterwellen bis hin zum FUV (fernen UV-Licht). Dabei geht es vor allem um die Bestimmung des solaren Magnetfeldes, welches eine grundlegende Rolle spielt für die Struktur und Dynamik der Atmosphäre. Im Sonnenwind dagegen werden vor allem Teilchen und Wellen von Instrumenten auf Raumsonden in-situ gemessen. Die Zusammensetzung des Partikelstromes und die Verteilung der Teilchen sowie das Studium von Transportvorgängen und Beschleunigungsprozessen stehen dabei im Vordergrund.

Begleitet werden die beobachtenden Aktivitäten von intensiven theoretischen Arbeiten. Der Fokus liegt hierbei auf der numerischen Simulation im Bereich solarer Dynamos und von MHD-Prozessen in der Konvektionszone und in der Atmosphäre der Sonne.

## 1.3 Sun and Heliosphere

### 1.3.1 Overview

#### Field and methods of research

*The research field of the department „Sun and Heliosphere“ comprises the Sun with its full variety of observable and measurable phenomena. The focus is on the atmosphere of the Sun with its rich structure and dynamics, complemented on the one hand by the investigation of the interior of the Sun as the location where the solar magnetic field is generated, and on the other hand by the exploration of the heliosphere, i.e. the inter-planetary space that is determined by the solar wind, and whose characteristics are again shaped by the solar atmosphere. The investigation of solar-terrestrial connections, especially of the impact of the variable radiation of solar particles and electromagnetic waves on the Earth, even extends the research area beyond the Sun and its close environment. The common topic, connecting all these strands and being the main driver for the multitude of dynamic solar features, is the solar magnetic field.*

*The development and construction of scientific instruments and the acquisition and analysis of measurement data are essential for the department. The outer atmosphere of the Sun, the corona, will be observed from space with optical instruments covering the full spectral range from visible to EUV (extreme UV), and its plasma characteristics are analyzed by spectroscopic means. The lower layers of the atmosphere, the photosphere and the chromosphere, are investigated by spectropolarimetric measurements and with imaging techniques from ground, from space and via stratospheric balloons. The relevant spectral range extends from millimeter waves to FUV (far UV). Main target of the measurements is to characterize the solar magnetic field that plays an essential role for the structure and dynamics of the atmosphere. Particles and waves in the solar wind are measured in-situ by space probes. The chemical composition and the distribution of the particles as well as the study of transport mechanisms and acceleration processes are of main interest.*

*The observational activities go along with intensive theoretical work. The focus is on numerical simulations of solar dynamo processes and of MHD processes in the convection zone and the atmosphere of the Sun.*



Die Sonnengruppe in 2009

Solar Group in 2009

### Wesentliche Datenquellen

Das bedeutendste Beobachtungsereignis war für die Sonnenabteilung im Zeitraum 2009/10 der erfolgreiche Flug des von einem Ballon getragenen Sonnenobservatoriums SUNRISE im Juni 2009 (siehe 1.3.2.). Das wesentliche wissenschaftliche Ziel von SUNRISE ist das Studium der Magneto-Konvektion, die einen beträchtlichen Teil aller solaren Phänomene verursacht. Die Instrumente an Bord von SUNRISE lieferten UV-Bilder und Messungen des magnetischen Feldvektors mit hoher Auflösung.

Messungen des solaren Magnetfeldes erfolgen auch mit dem German Vacuum Tower Telescope (VTT) auf Teneriffa und mit dem Swedish Solar Telescope (SST) auf La Palma. Das SST erlaubt Messungen mit der höchsten zur Zeit verfügbaren räumlichen Auflösung, während das VTT mit Hilfe des im infraroten Spektralbereich arbeitenden TIP II Spektropolarimeters, das vom MPS zusammen mit dem IAC bereitgestellt wurde, Magnetfeldmessungen mit der höchsten Empfindlichkeit liefert.

Intensiv genutzt werden auch die Daten des Solar Optical Telescope (SOT), das sich an Bord der Hinode-Raumsonde (einer von Japan angeführten Sonnenmission, die in 2006 gestartet wurde) befindet. Vor allem die Daten des zugehörigen Spektropolarimeters, aber auch die der Narrow- und Broadband Filter Imager sind dabei von Interesse.

Die im Jahre 1995 bzw. 2006 gestarteten Raumsonden SOHO und STEREO sind weiterhin wesentliche Datenquellen bei der Untersuchung des Einflusses, den das Magnetfeld auf die oberen Atmosphärenschichten der Sonne hat. Als Untersuchungsmethoden kommen dabei die EUV-Spektroskopie (SUMER auf SOHO), die Abbildung der gesamten Sonnenscheibe (SECCHI auf STEREO) und die Koronagraphie (LASCO auf SOHO und SECCHI) zur Anwendung. Die aus zwei Raumfahrzeugen bestehende STEREO-Mission hat durch die Stere-

### Main data sources

*The most important observational event in 2009/10 for the solar department was the successful science flight of the balloon borne SUNRISE observatory in June 2009 (see 1.3.2). The main scientific aim of SUNRISE was to study magneto-convection, which drives a significant fraction of all solar active phenomena. The instruments onboard SUNRISE provided high-resolution UV images and measurements of the magnetic field vector.*

*Measurements of solar magnetic fields are also carried out with the German Vacuum Tower Telescope (VTT) on Tenerife and with the Swedish Solar Telescope (SST) on La Palma. At present, the SST affords measurements at very high spatial resolution while the VTT provides the most sensitive magnetic field measurements currently available through the TIP II spectropolarimeter (provided by MPS jointly with the IAC), operating in the infrared spectral range.*

*Heavy use is also being made of the data of the Solar Optical Telescope (SOT) onboard Hinode (a solar mission led by Japan that was launched 2006), mainly from the spectro-polarimeter, but also from the Narrow- and Broadband Filter Imagers.*

*The SOHO spacecraft, launched 1995, and the STEREO mission, launched 2006, are major sources for data to investigate the influence of the magnetic field on the upper layers of the solar atmosphere by means of EUV spectroscopy (SUMER on SOHO), disk imaging (SECCHI on STEREO) and coronagraphy (LASCO on SOHO and SECCHI). The two-spacecraft STEREO mission opened the fascinating new possibility of determining the 3-D structure of the solar atmosphere via stereoscopy carried out with identical sets of the SECCHI instrument*

oskopie, realisiert durch zwei identische SECCHI-Instrumente auf den beiden Raumsonden, die neue und faszinierende Möglichkeit eröffnet, die 3D-Struktur der Sonnenatmosphäre zu ermitteln.

Die Beziehungen von Sonne und Erde werden auf der Basis von SOHO- und STEREO-Daten, vor allem aber mit Hilfe von Modellen, die die solare Strahlungsintensität auf Zeitskalen von Stunden bis hin zu Jahrtausenden beschreiben, untersucht.

### Arbeitsgruppen der Abteilung

#### ➤ CSI: Spektroskopie und Abbildung der Korona

Die Gruppe untersucht die physikalischen Prozesse in der Chromosphäre, der Übergangsregion und Korona, sowohl mit beobachtenden Methoden wie auch mit theoretischen Modellen. Am besten geeignet zur Beobachtung der oberen solaren Atmosphäre sind Wellenlängen im Bereich des fernen und extremen UV-Lichts und der weichen Röntgenstrahlung. Diese Strahlungen sind nur vom Weltraum aus beobachtbar. Ziel der Forschungstätigkeit der Gruppe ist es, die fundamentalen Plasmaprozesse in der in der oberen Atmosphäre auf allen Skalen zu beschreiben und zu verstehen. Insbesondere stehen dabei die ungelösten Fragen der Aufheizung der Korona und der Beschleunigung des Sonnenwindes im Blickpunkt. Darüber hinaus werden atomare Strahlungsprozesse, Anregung und Abregung von Ionen, Strahlungstransport und Welle-Teilchen-Wechselwirkungen untersucht.

#### ➤ Coronal Dynamics: Die Struktur und Dynamik der Korona

Kühle Sterne wie die Sonne sind von einer ca. eine Millionen Grad Kelvin heißen äußeren Atmosphäre, der Korona, umgeben. Es ist weiterhin rätselhaft, wie diese hohen Temperaturen, 100 bis 1000 Mal höher als die an der Oberfläche, aufrechterhalten werden. Man kann davon ausgehen, dass der Heizmechanismus, der auf jeden Fall im Zusammenhang steht mit dem Magnetfeld (bzw. seiner Änderung), die Struktur der Korona ändert, Plasmaströmungen verursacht und Wellenphänomene induziert. Auf der Sonne lässt sich diese dynamische Entwicklung der Korona, vor allem durch Spektroskopie und Abbildung im extremen UV und im Bereich der Röntgenstrahlung, im Detail beobachten.

#### ➤ SAMCO: Stereoskopie und Magnetfeldmodellierung der Sonnenkorona

Das Magnetfeld koppelt das Innere der Sonne mit der Photosphäre und der Korona, wo es Aufheizungsprozesse und eruptive Erscheinungen wie Flares und koronale Massenauswürfe verursacht. Die Gruppe hat ausgefeilte Computercodes entwickelt, um auf der Basis nicht-linearer und selbstkonsistenter Extrapolationstechniken mit Hilfe von Stereoskopie und Tomo-

*suite on both spacecraft.*

*The Sun-Earth connection is being investigated on the basis of SOHO and STEREO data and, in particular, through the modeling of solar irradiance from time scales of hours to millennia.*

### Research teams of the solar department

#### ➤ CSI: Coronal Spectroscopy and Imaging

*The group studies physical processes in the solar chromosphere, transition region and corona with the help of both, observational techniques and theoretical modeling. The upper solar atmosphere is best observed in the wavelength ranges of the far and extreme ultraviolet and soft X-rays, emissions that are only accessible from space. The group's research aims at describing and understanding the fundamental plasma processes at all scales in the upper solar atmosphere and addresses in particular the un-solved problems of coronal heating and solar wind acceleration. Atomic radiation processes, ionic excitation and de-excitation, radiation transport and wave-particle interactions are studied as well.*

#### ➤ Coronal Dynamics: The structure and dynamics of the corona

*Cool stars like our Sun are surrounded by a million Kelvin hot outer atmosphere, the corona. It is still puzzling how its high temperature, being 100 to 1000 times hotter than the solar or stellar surface, is sustained. Being related to (changes of) the magnetic field, we can expect the heating mechanism to change the structure of the corona, to drive plasma flows, and to induce wave phenomena. On the Sun we can observe this dynamic evolution of the corona in detail, especially through spectroscopy and imaging at extreme ultraviolet and X-ray wavelengths.*

#### ➤ SAMCO: Stereoscopic And Magnetic modeling of the solar Corona

*The magnetic field couples the solar interior with the photosphere and corona where it drives heating processes and eruptive phenomena such as flares and coronal mass ejections. The group has developed sophisticated computer-codes to model the coronal magnetic field and plasma by nonlinear and self-consistent extrapolation techniques, stereoscopy and*

graphie das Magnetfeld und das Plasma in der Korona zu modellieren.

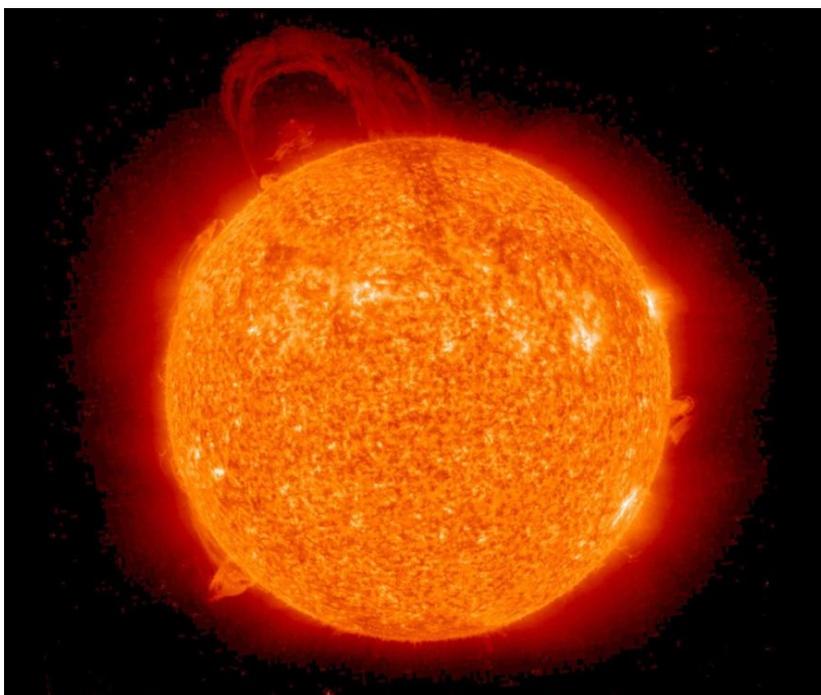
- SLAM: Untere Atmosphäre und Magnetfeld der Sonne

Im Fokus dieser Gruppe steht die Beobachtung der Sonne mittels abbildender und spektroskopischer Methoden in den Spektralbereichen des nahen UV, des sichtbaren Lichtes und des nahen Infrarot. Abbildungen der Sonne mit hoher Auflösung unter Verwendung von "phase diversity image reconstruction" und hochgenaue Spektropolarimetrie (Zeeman-Polarimetrie und Hanle-Diagnostik von gestreuter Strahlung) sind die wesentlichen Techniken.

*tomography.*

- *SLAM: Solar Lower Atmosphere and Magnetism*

*Main focus of this observational oriented group is the imaging and spectroscopy of the Sun in the near UV, visible and near IR. High-resolution solar imaging using phase diversity image reconstruction techniques and high-precision spectro-polarimetry (Zeeman polarimetry and Hanle diagnostics of scattering polarization) are employed.*



Diese spektakuläre eruptive Prominenz wurde von STEREO im extremen UV-Licht eingefangen, als sie von der Sonne hinausgeschleudert wurde (Apr. 12-13, 2010)

*STEREO caught this spectacular eruptive prominence in extreme UV light as it blasted away from the Sun (Apr. 12-13, 2010)*

- Solar-MHD: Solare und stellare Magnetohydrodynamik

Die Magnetohydrodynamik (MHD) beschreibt die dynamischen Wechselwirkungen zwischen Strömungen und Magnetfeldern in einem stoß-dominierten Plasma. Die Gruppe beschäftigt sich vor allem mit MHD-Prozessen im Inneren und in der Atmosphäre der Sonne und anderer Sterne. Umfangreiche numerische Simulationen und analytische Methoden kommen zur Anwendung. Das Ziel der Arbeiten ist ein Verständnis des Ursprungs von solarem und stellarem Magnetismus und seiner vielfältigen Manifestationen in Gestalt der magnetischen Aktivität.

- Solar-Plasma: Teilchen und Felder im Sonnenwind

Das Augenmerk der Gruppe liegt hauptsächlich auf Theorie und Modellierung der Sonnenkorona und des Sonnenwindes, mit Schwerpunkt auf Plasmakinetik

- *Solar-MHD: Solar and stellar magnetohydrodynamics*

*Magnetohydrodynamics (MHD) describes the dynamical interaction between flows and magnetic fields in a collisionally dominated plasma. The work of the MHD group is mainly concerned with MHD processes in the interior and atmosphere of the Sun and other stars. Using large-scale numerical simulations and analytical tools, this work aims at understanding the origin of solar and stellar magnetism as well as its rich variety of manifestations in the form of magnetic activity*

- *Solar-Plasma: Solar wind particles and fields*

*The group is mainly engaged in theory and modeling of the solar corona and solar wind, with emphasis on plasma kinetics and MHD turbulence. The solar re-*

und MHD-Turbulenz. Das Verständnis der grundlegenden Plasmaprozesse auf allen Skalen in der Korona, insbesondere in der Übergangsregion, ist das Ziel der Arbeiten, die sich direkt mit der Sonne befassen. Im Hintergrund steht dabei das fundamentale Problem der Aufheizung der Korona durch Plasmawellen und kleinskalige magnetische Aktivität. Bei der Erforschung des Sonnenwindes stehen MHD-Turbulenz und Welle-Teilchen-Wechselwirkungen im Mittelpunkt.

- Plasma-Simulations: Theorie und Simulation von Plasma im Sonnensystem

Die Freisetzung von Energie im Universum durch magnetische Rekonnektion und die daraus resultierende Turbulenz, Strukturbildung, Plasmaheizung und Teilchenbeschleunigung ist das Hauptthema der Forschungsarbeiten der Gruppe. Anwendungen sind magnetische Teilstürme in den Magnetosphären der Planeten, die Aufheizung der Sonnenkorona, solare Flares, koronale Massenauswürfe und Teilchenbeschleunigung. Als Forschungsmethoden kommen sowohl kinetische Simulationen (Vlasov- und PIC-Code) wie auch kombinierte kinetische-MHD Plasmasimulationen, die in der Gruppe entwickelt wurden, zur Anwendung.

- Sun-Climate: Veränderlichkeit der Sonne und Klima

Erst die Strahlung der Sonne macht die Erde zu einem bewohnbaren Planeten. Daher ist es wahrscheinlich, dass Veränderungen in der Strahlungsleistung der Sonne einen Einfluss auf das Erdklima haben. Aber es hat sich als äußerst kompliziert erwiesen, genau festzustellen, wie die Leistung der Sonne sich verändert, und wie solche Fluktuationen das Klima auf der Erde beeinflussen. Eine zunehmende Flut an Daten von der Sonne und über das Erdklima in den letzten Jahren erlaubt aber einen rapiden Fortschritt bei dem Verständnis der Veränderlichkeit der Sonne und dessen Einfluss auf das Klima der Erde, auf das die Arbeiten der Gruppe abzielen.

#### Die wichtigsten Projekte in 2009/10:

- Sunrise: Von einem Ballon getragenes Sonnenteleskop in der Stratosphäre

Das Ziel des Sunrise-Projektes sind hochaufgelöste spektropolarimetrische Beobachtungen der solaren Atmosphäre auf der intrinsischen räumlichen Skala ihrer magnetischen Strukturen. Das Sunrise-Teleskop mit einem Durchmesser von 1m und seine Instrumente liefern Spektren und Abbildungen, die in der Lage sind, die kritischen räumlichen Strukturen aufzulösen. Die wissenschaftliche Zielsetzung besteht vor allem darin, die Entstehung magnetischer Strukturen in der Sonnenatmosphäre zu verstehen und ihre Wechsel-

*search aims at understanding basic plasma processes at all scales in the solar corona, especially in the transition region, and addresses the fundamental problem of coronal heating by plasma waves and small-scale magnetic activity. The solar wind research focuses on MHD turbulence and wave-particle interactions.*

- *Plasma-Simulations: Theory and simulation of solar system plasmas*

*The main emphasis of the research in the group is on the energy release in the universe by magnetic reconnection and on the resulting turbulence, structure formation, plasma heating and particle acceleration. Applications are magnetic substorms in planetary magnetospheres, heating of the solar corona, solar flares, coronal mass ejections and particle acceleration. The research methods are kinetic (Vlasov- and PIC-code) simulations as well as combined kinetic-MHD plasma simulations, developed in the group.*

- *Sun-Climate: Solar variability and climate*

*Radiation from the Sun makes Earth a habitable planet. Fluctuations in the solar radiative output are therefore likely to affect the climate on Earth, but establishing both, how the output of the Sun varies and how such variations influence Earth's climate have proved tricky. Increased amounts of data from the Sun and about the climate on Earth over recent years means that rapid progress is being made. This work is aimed at understanding solar variability and the Sun's influence on the Earth's climate.*

#### Major projects in 2009/10:

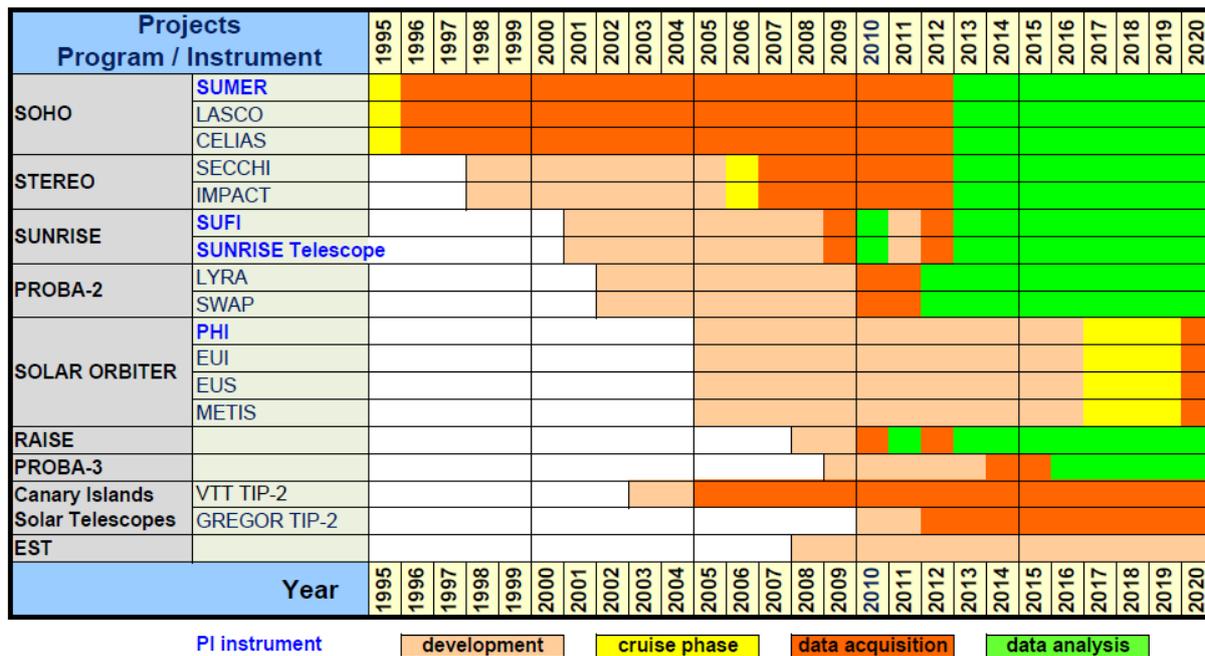
- *Sunrise: A balloon-borne stratospheric solar telescope*

*The Sunrise project aims at high-resolution spectropolarimetric observations of the solar atmosphere on the intrinsic spatial scale of its magnetic structure. The Sunrise telescope with 1 m aperture and its instruments provide spectra and images resolving the critical spatial scales on the Sun. The main scientific goal is to understand the formation of magnetic structures in the solar atmosphere and to study their interaction with the convective plasma flows. In June 2009 Sunrise performed successfully its first nearly 5-day science*

wirkung mit den konvektiven Plasmaströmungen zu untersuchen. Im Juni 2009 hat Sunrise einen ersten erfolgreichen Wissenschaftsflug absolviert, der das Observatorium in einem fast fünftägigen Flug von Esrange in Schweden nach Somerset Island in Kanada geführt hat. Teleskop und Instrumente haben dabei die Erwartungen erfüllt (siehe 1.3.2. für eine detaillierte Beschreibung). Ein erneuter Flug in 2012 ist in Vorbereitung.

*flight, starting from Esrange, Sweden and ending on Somerset Island, Canada. The telescope and science instruments worked as expected (see 1.3.2. for more details). A re-flight in 2012 is under preparation.*

## Sun and Heliosphere: Project Overview



- Solar Orbiter: Erkundung von Sonne und Heliosphäre mit hoher Auflösung

Die ESA-Mission Solar Orbiter wird die magnetische Koppelung von der Photosphäre bis hin zur Heliosphäre umfassend erkunden. Das MPS war erheblich beteiligt an der Definition der Mission und der wesentlichen wissenschaftlichen Instrumente und wurde ausgewählt, um zu vier vorgeschlagenen Instrumenten wesentliche Beiträge zu liefern: PHI (Polarimetric and Helioseismic Imager; MPS ist PI (Principal Investigator)-Institut), EUI (Extreme-Ultraviolet Imager, Co-PI-Beteiligung), EUS (Extreme Ultraviolet Imaging Spectrograph, Co-PI-Beteiligung), und METIS (Koronagraph, Co-PI-Beteiligung). Solar Orbiter ist heute eine von drei im Rennen verbliebenen medium-class Missionen, die sich um die zwei Startplätze (M1, M2) in dem Cosmic Vision Programm der ESA bewerben. Die endgültige Auswahl erfolgt im Oktober 2011. Der Start der M1-Mission ist für 2017 vorgesehen.

- *Solar-Orbiter: High-resolution mission to the Sun and inner heliosphere*

*ESA's Solar Orbiter will comprehensively cover the magnetic coupling from the photo-sphere out to the heliosphere. MPS has been extensively involved in the definition of the mission and the major scientific instruments. We have been selected to contribute extensively to four proposed instruments: PHI (Polarimetric and Helioseismic Imager, PI-ship), EUI (Extreme-Ultraviolet Imager, Co-PI level), EUS (Extreme Ultraviolet Imaging Spectrograph, Co-I level), and METIS (Coronagraph, Co-I level). Solar Orbiter is now one of three remaining medium-class missions in competition for two slots (M1, M2) in ESA's Cosmic Vision program. The final selection will be in October 2011. Launch of the M1 mission is scheduled for 2017.*



Start des Sunrise-Observatoriums im Juni 2009 von ESRANGE (Schweden)  
*Start of the Sunrise Observatory in June 2009 from ESRANGE (Sweden)*

- STEREO: Observatorium für solar-terrestrischen Beziehungen (Solar TERrestrial RElations Observatory)

Die NASA-Mission STEREO, die in 2006 gestartet ist, wurde dafür ausgelegt, die Sonne und innere Heliosphäre erstmalig in 3D zu beobachten, um so dazu beizutragen, Ursprung, Entwicklung und interplanetare Auswirkungen von koronalen Massenauswürfen aufzudecken. Das MPS hat zu den Instrumenten SECCHI und IMPACT Beiträge geleistet. Die Messphase der Mission wurde im Jahr 2010 bis Ende 2012 verlängert.

- SOHO: Das Sonnen- und Heliosphären-Observatorium

SOHO ist eine gemeinsame Mission von ESA und NASA, die Ende 1995 gestartet wurde mit dem Ziel, die innere Struktur der Sonne, ihre ausgedehnte äußere Atmosphäre und den Ursprung des Sonnenwindes zu erforschen. Das MPS war das PI-Institut für das SUMER-Instrument (ein UV-Spektrometer) und wesentlich beteiligt am LASCO-Koronagraphen (Co-PI-Beteiligung). SOHO arbeitet ununterbrochen seit mehr als 15 Jahren und ist vermutlich die wissenschaftlich erfolgreichste Sonnenmission aller Zeiten. Die Messphase wurde im Jahr 2009 bis Ende 2012 verlängert.

### Ausgewählte Ergebnisse der Sonnengruppe in 2009/10

In den folgenden Abschnitten (1.3.2 – 1.3.7) werden exemplarisch einige Arbeitsgebiete und Ergebnisse der Sonnengruppe aus dem Berichtszeitraum vorgestellt. Sie geben einen guten Überblick über die Bandbreite der Forschung in dieser Abteilung, liefern aber keinen auch nur annähernd vollständigen Überblick über die Arbeiten der Gruppe, sondern stellen nur einige ausgewählte Beispiele dar.

In 1.3.2 wird mit Sunrise die bedeutendste Beobachtungsmission der Sonnengruppe in diesen beiden Jahren vorgestellt. Der folgende Beitrag über Sonnenflecken stellt den Beobachtungsergebnissen der letzten Jahre die Resultate der numerischen Simulationen von Sonnenflecken am Institut gegenüber. Mit der Sonnenkorona, einem der Hauptarbeitsgebiete der Abteilung, befassen sich die Beiträge 1.3.4 und 1.3.5. In dem ersten Beitrag steht das Magnetfeld in der Korona im Fokus, der zweite Beitrag widmet sich der Konvektion von Plasma in dieser äußeren Schicht der Sonnenatmosphäre, zum einen auf der Basis von 3D-Beobachtungen, zum anderen auf der Basis von Modellrechnungen. Dass auch die SOHO-Mission nach annähernd 15 Jahren ununterbrochenen Betriebs noch für bedeutende neue wissenschaftliche Erkenntnisse gut ist, zeigt der Beitrag 1.3.6. über die Beobachtung und Deutung der Details der Lyman- $\alpha$  Spektrallinie, die von der Sonnenatmosphäre im UV-Bereich

- *STEREO: The Solar TERrestrial RElations Observatory*

*STEREO is a NASA mission launched in 2006 and designed to make the first 3D observations of the Sun and inner Heliosphere to help unveil the origin, evolution and inter-planetary consequences of coronal mass ejections. MPS has contributed to the SECCHI and IMPACT instruments. The data acquisition phase of the mission has been extended in 2010 up to end 2012.*

- *SOHO: The Solar and Heliospheric Observatory*

*SOHO, a joint ESA/NASA mission, was launched at the end of 1995 and is designed to study the internal structure of the Sun, its extensive outer atmosphere and the origin of the solar wind. MPS was PI (Principal Investigator) institute for the SUMER instrument (UV spectrometer) and has significantly contributed to the LASCO Coronagraph (Co-PI ship). Being in continuous operation for now more than 15 years SOHO is probably the most successful solar mission ever. The data acquisition phase of the mission has been extended in 2009 up to end 2012.*

### *Selected results of the solar group in 2009/10*

*Some of the research areas and the results of the solar group in the reporting period will be presented in the following chapters (1.3.2 – 1.3.7). They provide a good overview of the spectrum of research pursued in this department, but are far off to give a complete survey of the work done by the group. These are just a few selected examples.*

*The most important observational mission of the solar group in these both years, Sun-rise, will be introduced in 1.3.2. The following contribution about sunspots confronts the observational results of the last years with the outcome of numerical simulations of sunspots at the MPS. The articles in 1.3.4. and 1.3.5. are dealing with the solar corona, one of the main research areas of the group. The magnetic field in the corona is addressed by the first contribution, while the other one is dedicated to the convection of solar plasma in this outer layer of the atmosphere and presents the corresponding results of 3D observations and of modeling efforts. The contribution 1.3.6 about the observation and interpretation of the details of the Lyman- $\alpha$  spectral line, emitted by the solar atmosphere in the UV, demonstrates that the SOHO mission after 15 years of continuous operation still allows major new scientific insights. The final chapter 1.3.7. provides an overview of current findings about the interactions of ions with*

emittiert wird. Das abschließende Kapitel 1.3.7 gibt einen Überblick über aktuelle Erkenntnisse über die Wechselwirkung der Ionen im Sonnenwind mit dort auftretenden Wellen und Turbulenzen. *waves and turbulence in the solar wind.*



Solar Orbiter kommt der Sonne in 2018 näher als alle bisherigen Raumsonden

*Solar Orbiter will approach the Sun in 2018 as close as no other space probe so far*

©ESA

### 1.3.2 SUNRISE: Ein Sonnenobservatorium am Ballon

Am 8. Juni 2009 startete das Sonnenobservatorium Sunrise zu seiner ungewöhnlichen Reise an einem Heliumballon mit einem Durchmesser von 130m von Skandinavien nach Kanada. In einer Flughöhe von mehr als 37 km über dem Erdboden konnte das größte Sonnenteleskop, das sich je dem störenden Einfluss der Erdatmosphäre entzogen hat, die Sonne mit bisher unerreichter Detailgenauigkeit unter die Lupe nehmen. Fast sechs Tage lang hatte Sunrise unser Zentralgestirn im Visier, ununterbrochen, dank der Mitternachtssonne entlang der arktischen Flugroute. Die gewonnenen Daten erlauben phantastische Einblicke in die physikalischen Ursachen der Sonnenaktivität.

Die Aktivität der Sonne wird am auffälligsten in ihrer äußeren Atmosphäre sichtbar, der bei Sonnenfinsternissen mit dem bloßen Auge sichtbaren Korona. Hier wird Energie in gigantischen Eruptionen freigesetzt. Manchmal mehrmals am Tage werden dabei Plasmawolken in den interplanetaren Raum geschleudert, und Elementarteilchen auf hohe Energien beschleunigt. Diesem durch die Sonnenaktivität hervorgerufenen "Weltraumwetter" sind auch die Erde und der erdnahe Weltraum ausgesetzt. Satelliten und Astronauten werden durch die Strahlungstürme gefährdet, während die Wirkungen auf der Erde vom Erscheinen von Polarlichtern über Störungen des Funkverkehrs und von Navigationssystemen bis hin zu großflächigen Ausfällen der Stromversorgung reichen können. Auch ein Einfluss auf langfristige Klimaveränderungen ist nicht ausgeschlossen.

Die Ursache all dieser Aktivitätsphänomene, deren Intensität in einem etwa 11-jährigen Rhythmus schwankt, ist das Magnetfeld der Sonne. Das Feld wird in einem Dynamoprozess im Sonneninnern erzeugt und stößt in Sonnenflecken und einer Vielzahl von kleineren Konzentrationen durch die sichtbare Oberfläche der Sonne. Dort nimmt es Energie aus den brodelnden Strömungen des heißen Plasmas auf, transportiert sie in die Korona, wo sie schließlich explosiv und eruptiv freigesetzt werden kann.

Um diesen Energietransfer von der Quelle her zu verstehen, muss man die Struktur des Magnetfeldes an der Sonnenoberfläche und seine Wechselwirkung mit den dort herrschenden Plasmaströmungen untersuchen: Die sichtbare Sonnenoberfläche, die so genannte Photosphäre, ist strukturiert durch die ständige Umwandlung von kinetischer (turbulente Gasbewegungen), magnetischer, und Strahlungsenergie. Heißes Plasma steigt aus tieferen Schichten der Sonne auf, kühlt durch die Abstrahlung des Sonnenlichts ab und sinkt als kühleres Gas in die Sonne zurück. Das entstehende charakteristische "Muster" aus hellen

### 1.3.2 SUNRISE: A balloon-borne stratospheric solar observatory

*On the 8th of June 2009, Sunrise, the biggest solar telescope ever to leave the ground, began its maiden voyage from Sweden to Northern Canada – hanging from a 130 m diameter helium balloon. At a cruising altitude of 37 km it gazed at the Sun with an unprecedented viewing quality, uninterrupted thanks to the midsummer conditions along the arctic flight path. The glimpses of the solar surface convection are of unrivaled quality and unveil the fascinating roots of solar activity.*

*The activity of the Sun becomes visible in its most striking way in the outer layers of the solar atmosphere, the Corona, which is visible to the naked eye in a total solar eclipse only. Here energy is released in gigantic eruptions. Sometimes several times a day clouds of plasma are ejected into planetary space, and elementary particles are accelerated to high energies. Exposed to this solar activity driven "space weather" is also the earth and near earth space. satellites and astronauts are endangered, while the telluric consequences range from the appearance of northern lights to radio disturbances and breakdown of navigation systems or power networks. Not even an influence on long term climate change can be ruled out.*

*At the root of all these activity phenomena, which vary with an 11-year cycle, is the Sun's magnetic field. The field is generated by a dynamo process in the interior of the Sun, and penetrates the visible solar surface in giant sunspots and a variety of smaller-scale field concentrations. There it takes energy from the boiling plasma, transports it into the corona, where the energy can finally be released explosively into space.*

*In order to understand this energy transfer from its source, it is necessary to understand the structure of the magnetic field on the solar surface and its interaction with the plasma flows found here: The visible solar surface, the so-called photosphere, is structured by a constant interplay between kinetic (plasma flows), magnetic, and radiative energies. Hot plasma rises from deeper layers, cools down due to radiative energy loss, and sinks back into the Sun. The resulting characteristic pattern of bright patches of hot, rising gas, and dark lanes in between them, formed by cool gas, which sinks back into the Sun, is known under the name of*

Blasen aufsteigenden heißen Gases und dazwischen liegenden dunkleren Bereichen, in denen das kühle Gas in die Sonne zurücksinkt, ist als Granulation der Sonnenoberfläche bekannt.

*the "solar granulation".*

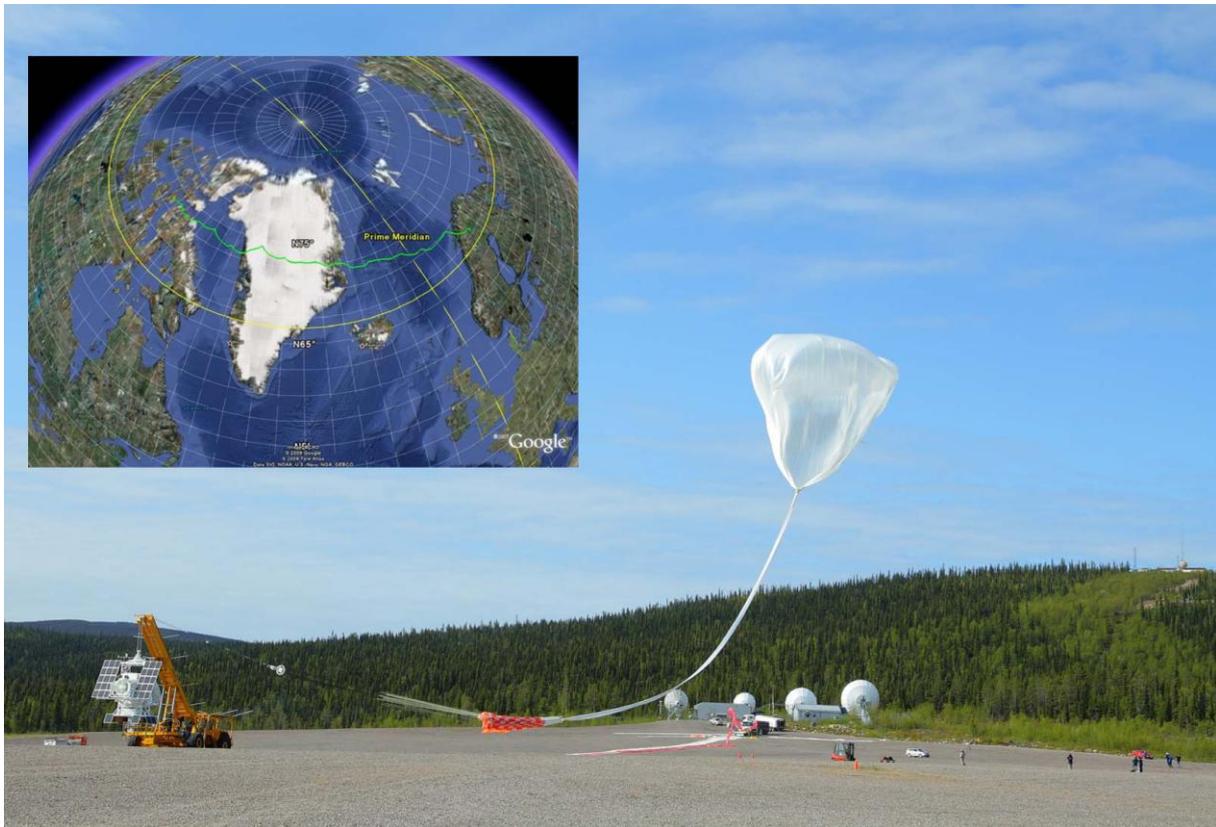


Abb. 1: Der Start des Sonnenobservatoriums Sunrise am 8. Juni 2009. Die Gondel mit dem Teleskop wird von einem Kranfahrzeug so lange gehalten, bis das etwa 300 Meter lange Gebilde aus Halteseilen, Fallschirm und Ballonhülle senkrecht steht. Dann wird die Gondel ausgeklinkt und der Ballon steigt mit Sunrise in eine Höhe von 37 km auf, wo er einen Durchmesser von 130 Metern erreicht. Das links eingesetzte Bild zeigt die Flugbahn von Sunrise als grüne Linie von Nordschweden über Grönland nach Somerset Island (Kanada). Die gelbe Linie zeigt den nördlichen Polarkreis.

*Fig. 1: Launch of Sunrise on June 8th, 2009. The gondola with the telescope is suspended by a special crane until the 300 m long assembly of balloon, parachute, and connection cables is close to vertical. After release, the balloon rises up to 37 km altitude, where it reaches a diameter of 130 m. The insert on the left side of the image depicts the flight path of Sunrise from Sweden to Canada as the green line, while the yellow line indicates the arctic circle.*

Dabei zeigt sich, dass sich diese Prozesse auf im Vergleich zur Größe der Sonne räumlich sehr kleinen Skalen von 100 km und darunter abspielen: Messungen und Computersimulationen lassen erwarten, dass der magnetische Fluss die Sonnenoberfläche überwiegend in der Form hochkonzentrierter "Flussröhren" durchdringt. Die Ergebnisse aufwendiger Computersimulationen deuten darüber hinaus darauf hin, dass es auch ein weit verbreitetes "turbulentes" Magnetfeld gibt, das in einem lokalen Dynamoprozess durch Plasmaströmungen nahe der Oberfläche ständig auf- und abgebaut wird.

*It is interesting to note that these processes occur on extremely small scales when compared to the size of the Sun. Spectroscopic investigations as well as numerical simulations indicate that the magnetic flux is concentrated mostly in so-called "flux tubes with diameters of 100 km or below. In addition, sophisticated computer models predict a turbulent field, which is constantly being created and destroyed by local dynamo action on the solar surface.*

Um diese Prozesse quantitativ mit der erforderlichen hohen räumlichen Auflösung zu untersuchen, muss ein zentrales Hindernis überwunden werden: die Luftunruhe in der Erdatmosphäre, durch welche die Bilder und Messungen auch der besten Teleskope ständig verwaschen und "verwackelt" werden. Gute Bilder erhält man so nur als seltene Momentaufnahmen, längere Bildserien zum Studium der Prozesse und Veränderungen bei höchster Auflösung können praktisch nie erlangt werden.

Der beste Weg, den störenden Einfluss der Erdatmosphäre zu vermeiden, ist, sie möglichst weit unter sich zu lassen, d.h. sein Teleskop in den Weltraum zu bringen. Mit kleineren Teleskopen (bis 50 cm Öffnung) hat man das bereits auch getan, für Strukturen auf der Sonne von 100 km und darunter wird aber ein Teleskop mit einer Öffnung von mindestens 1 Meter benötigt. Masse, Größe und Komplexität eines solchen Instruments würden die Kosten einer Weltraummission allerdings in wahrhaft "astronomische" Größenordnungen treiben. Als Alternative bietet sich deshalb an, ein großes Teleskop mit seinen wissenschaftlichen Instrumenten in der Gondel eines mit Helium gefüllten Ballons in die Stratosphäre zu bringen. In etwa 37 km Höhe lässt man über 99% der Atmosphärenmasse unter sich und wird praktisch nicht mehr durch Luftturbulenz gestört.

*In order to investigate these processes with the required high spatial resolution one has to overcome a central obstacle: the flurry of the Earth's atmosphere, which renders the images even of our best telescopes unsharp and fuzzy. Only in rare moments good images can be captured, but it is virtually impossible to obtain time series at high resolution - a prerequisite to study the solar evolution and the underlying physical processes.*

*The optimum way of avoiding atmospheric disturbance is to leave it behind, i.e. to operate the telescope in space. Smaller telescopes (up to 50 cm aperture) have indeed been placed on satellites, but in order to study the fundamental processes on the solar surface one needs a telescope with a diameter of at least 1 m. Bringing such a telescope into space would indeed require resources of astronomical dimensions. A valid alternative, however, is to fly the telescope onboard a stratospheric helium balloon. At a flight altitude of 37 km above ground, 99% of the Earth's atmosphere is left below the telescope, and residual scintillation can thus be neglected.*



Abb. 2: Das flugbereite Observatorium mit einem Teil des internationalen Sunrise-Teams. Neben dem MPS sind am Projekt beteiligt: das Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik in Freiburg, das High Altitude Observatory in Boulder (Colorado), das Instituto de Astrofísica de Canarias auf Teneriffa und weitere spanische Institute im IMAx-Konsortium, und das Lockheed-Martin Solar and Astrophysics Laboratory in Palo Alto (Kalifornien).

*Fig. 2: The Sunrise observatory ready to be launched with a part of the international Sunrise team. Under leadership of MPS, several other institutions are part of the mission: The Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik in Freiburg, the High Altitude Observatory in Boulder (Colorado), the Instituto de Astrofísica de Canarias on Tenerife and other spanish research institutes forming the IMAx consortium, as well as the Lockheed-Martin Solar and Astrophysics Laboratory in Palo Alto (California).*

Das fliegende Sonnenobservatorium Sunrise wurde als internationales Gemeinschaftsprojekt von Instituten aus Deutschland, Spanien und den USA unter der Füh-

*The stratospheric solar observatory Sunrise was developed and built in an international effort by institutions from Germany, Spain, and the USA, under lead-*

derung des MPI für Sonnensystemforschung entwickelt [Solanki et al., 2010]. Die notwendige Messgenauigkeit und Detailauflösung erfordert dabei das präzise Zusammenspiel einer Reihe von komplexen Instrumenten. Das Teleskop mit einem Spiegeldurchmesser von 1m erlaubt es, selbst kleinste Details auf der Sonne zu beobachten [Barthol et al., 2011]. Der "Sunrise Filter Imager" (SuFI), ein hochauflösendes optisches System mit einer CCD-Kamera, bildet auch Strukturen von unter 100 km Größe auf der Sonnenoberfläche in mehreren Wellenlängenbereichen des ultravioletten Lichtes ab, die vom Erdboden her nicht zugänglich sind [Gandorfer et al., 2011]. Um gleichzeitig quantitative Aussagen über die physikalischen Größen wie Plasmageschwindigkeiten und Magnetfeld zu erlangen, nimmt das "Imaging Magnetograph Experiment" (IMaX) die von SuFI beobachteten Strukturen zusätzlich mit spektroskopischen Mitteln unter die Lupe. An jedem Bildpunkt werden dazu mehrere unterschiedliche Wellenlängen und Polarisationszustände des Lichtes vermessen. Dabei müssen die einzelnen Messungen möglichst rasch und unter identischen Bedingungen aufeinander folgen, was vom Erdboden aus wegen der Bildschwankungen durch die Turbulenz der Atmosphäre kaum erreicht werden kann. Auch für Sunrise in seiner schaukelnden Ballongondel musste ein aufwendiger optischer Bildstabilisator und eine komplexe Lichtverteiloptik entwickelt werden, damit die Instrumente SuFI und IMaX gleichzeitig scharfe Bilder und genaue Magnetfeldkarten liefern können.

Nach über 6 Jahren Vorbereitung, Entwicklung und ausgiebigen Tests startete Sunrise im Juni 2009 von der europäischen Weltraumbasis ESRANGE nahe Kiruna in Nordschweden zu seinem ersten wissenschaftlichen Flug (Abb. 1 und 2). Die Ballon-Profis der Columbia Scientific Ballooning Facility der NASA brachten das 2,6 Tonnen schwere, sechs Meter breite und 7 Meter hohe Sonnenobservatorium sicher in die Luft. Von den zirkumpolaren stratosphärischen Winden wurde Sunrise in fast 6 Tagen nach Nordkanada getragen, wo es auf der unwirtlichen Somerset Insel sicher am Fallschirm landete. Teleskop und wissenschaftliche Instrumente überstanden die Landung in rauem Gelände ohne größere Beschädigungen. Insbesondere konnte der wertvollste "Schatz", die auf Festplatten gespeicherten 1,8 Terabyte an wissenschaftlichen Bildern und Daten unversehrt geborgen werden.

Sunrise lieferte Aufnahmen der Sonnenoberfläche mit bislang ungekannter Qualität (s. Abb. 3). Dank Sunrise konnte die Sonnenoberfläche zum ersten Mal mit hoher räumlicher Auflösung auch im nahen ultravioletten Licht zwischen 200nm und 350 nm Wellenlänge untersucht werden, das vom Erdboden aus wegen der Absorption in der Ozonschicht praktisch nicht gemessen werden kann. Bei diesen Wellenlängen werden auch kleine Temperaturschwankungen innerhalb der Konvektionsströmungen mit sehr hohem Intensitätskon-

*ership of the Max Planck Institute of Solar System Research [Solanki et al., 2010]. The required accuracy and resolution can only be achieved with a precise concert of different, dedicated complex instruments. A telescope with a diameter of 1m allows even minute details on the solar surface to be observed [Barthol et al., 2011]. The Sunrise Filter Imager SuFI [Gandorfer et al., 2011], a high resolution CCD based imaging system maps even structures with sizes below 100 km in different wavelength bands in the near ultraviolet, which are inaccessible from ground. The "Imaging Magnetograph eXperiment" IMaX takes a close look to all the features observed by SuFI by analyzing their spectrum, thus gaining quantitative insights into their physical characteristics like velocity and magnetic field. To this end, at each spatial position in the image several measurements need to be taken in different wavelengths and polarization states. These individual measurements must be obtained as simultaneously as possible within a time interval as short as possible, under exactly identical conditions; this is impossible to be achieved on ground, since the observing conditions through the Earth's atmosphere are constantly changing. Only in near-space conditions this can be done with the required precision, but even for the Sunrise telescope a state-of-the-art image stabilization system had to be developed to compensate for the swinging balloon gondola. In addition a state-of-the-art light distribution optics was built at MPS to allow all instruments to look at the same target simultaneously.*

*After more than 6 years of development and testing, Sunrise was launched to its first scientific flight in June 2009 from ESRANGE space base near Kiruna in northern Sweden (see Figures 1 and 2). The professionals from the Columbia Scientific Ballooning Facility brought the 2.6tons heavy observatory with dimensions of 7 m in height and 6 m in width within 2 hours into flight altitude of 37 km. There it followed circumpolar wind systems around the north pole, which carried the observatory in 6 days from Scandinavia to northern Canada, where it safely landed, suspended by a giant parachute on hostile Somerset Island. All equipment, telescope and delicate instruments could be recovered in reusable conditions, but of up-most importance was to secure the "treasure" of 1.8 TB of scientific data, which had been stored on board.*

*Sunrise delivered pictures of the Sun's surface with hitherto unknown quality (see Figure 3). Thanks to Sunrise the solar surface could for the first time be investigated with high spatial resolution also in the near Ultraviolet between 200 nm and 350 nm, a region inaccessible from ground due to the absorption of these wavelengths in the Ozone layer. At these wavelengths also tiny temperature fluctuations within the convective cells stand out with high intensity contrast [Hirzberger et al., 2010]. With these data our numeri-*

trast sichtbar [Hirzberger et al., 2010]. Damit lassen sich unsere theoretischen magnetohydrodynamischen Modelle der Photosphäre auf eine solide experimentelle Grundlage abstützen. Der bisher weitgehend unerforschte Bereich des nahen Ultraviolett ist aber vor allem wichtig in Hinblick auf die Wirkung der schwankenden Sonnenaktivität auf die Heizung der Stratosphäre - mit möglichen Auswirkungen auf die Klimaentwicklung.

*cal models of solar surface convection can be put on a firm observational basis. The hitherto almost unstudied near ultraviolet spectral region is, however, most interesting in view on the interaction of the varying solar activity and the heating of the stratosphere - with potential impact on the Earth's climate.*

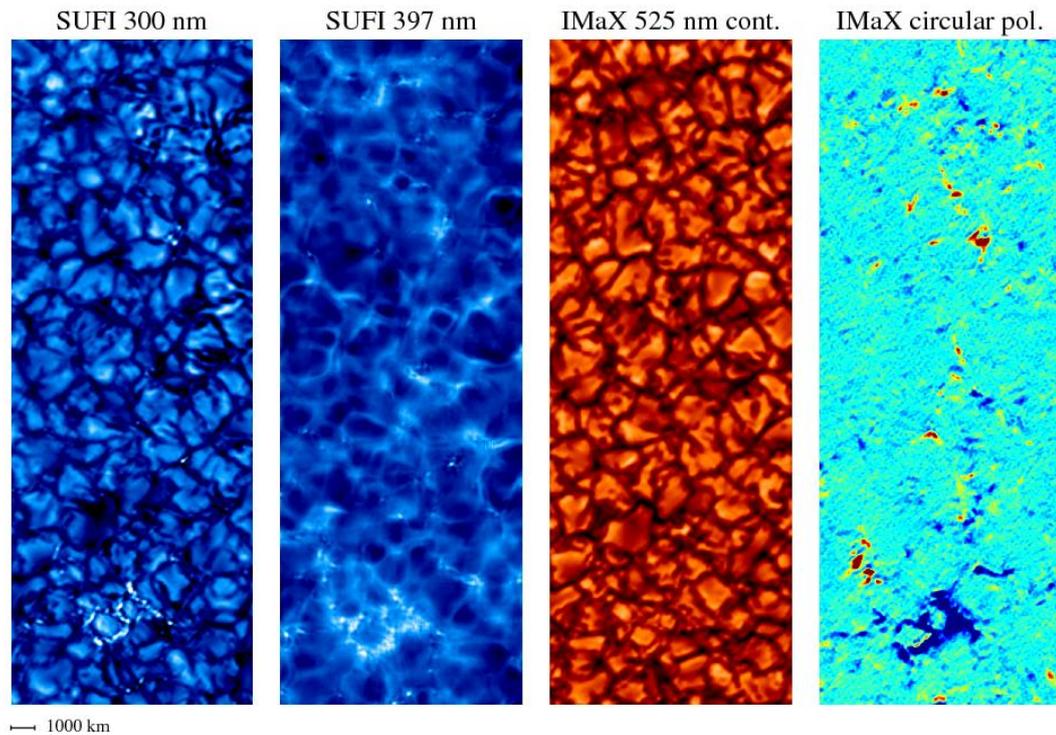


Abb. 3: Erste Bilder von den Sunrise-Instrumenten. Die Aufnahmen zeigen jeweils den gleichen kleinen Ausschnitt der Sonnenoberfläche (etwa 1/20000 der Gesamtfläche). Links außen: SuFI-Bild bei 300 nm Wellenlänge (UV-Licht); Mitte links: SuFI-Bild bei 397 nm Wellenlänge in einer Spektrallinie des ionisierten Kalziums; Mitte rechts: IMAx-Bild bei 525 nm Wellenlänge (sichtbares Licht); rechts außen: IMAx-Karte des vertikalen Magnetfelds. Die Farbskala reicht von Blau (nach innen gerichtetes starkes Magnetfeld) über Türkis (sehr schwaches Feld) bis Rot (nach außen gerichtetes starkes Feld). Die Grundstruktur der Intensitätsbilder zeigt das Muster der aufsteigenden hellen heißen Gasblasen und dunklen kühlen Abströmungen, welche die Energie aus dem Sonneninnern nach außen transportieren. Der Vergleich zwischen den Intensitätsbildern und der magnetischen Karte zeigt, dass den hellen Punkten mit Durchmesser von ca. 100 km, die besonders gut in den SuFI-Bildern zu erkennen sind, Gebiete mit starkem Magnetfeld entsprechen. Magnetfeld findet sich jedoch auch an vielen anderen Stellen der Oberfläche.

*Fig. 3: First images of the Sunrise instruments. All pictures show the same target area on the Sun (approximately 1/20000 of the total surface). From left to right: SuFI image at 300 nm wavelength (near ultraviolet); SuFI image at 397 nm, a spectral line of ionized Calcium; IMAx image taken in the green at 525 nm wavelength; IMAx map of the vertical magnetic fields. The color scale in this image ranges from blue (strong magnetic field pointing into the Sun) via turquoise (very weak field) to red (strong outward pointing magnetic field). The intensity images all show the pattern of the solar granulation of bright, hot, rising gas bubbles, which transport the energy up to the solar surface, and dark intergranular lanes, in which the cool material sinks back into the Sun. From a comparison of the intensity images with the magnetic field map it is evident that tiny bright points, which are best seen in the SuFI images, harbor strong magnetic field concentrations. Magnetic fields are, however, also found on many other locations on the solar surface.*

Eine der großen Überraschungen, die die Sunrise Daten bereithielten, ist die enorme Dynamik der Granulation selbst auf kleinsten Skalen: "Wirbelstürme" und

*One of the big surprises, which the Sunrise data presented, is the extremely dynamic behavior of the granulation on even smallest scales: Eddies and Tornadoes*

Strudel sind in den Daten deutlich zu sehen und treten in wesentlich höherer Rate auf als in früheren Studien beschrieben. Die turbulenten konvektiven Gasströmungen sind auch der Ursprung akustischer Wellen, deren Frequenzspektrum mehrere Größenordnungen überstreicht. Während langsame Wellen mit Perioden über 3 Minuten an der oberen Grenze der Photosphäre reflektiert werden und zu stehenden Wellenmustern führen (den berühmten p-Moden, durch deren Analyse Erkenntnisse über die innere Struktur der Sonne erhalten werden können; eine Technik, die in Analogie zur irdischen Seismologie Helioseismologie genannt wird), können kurzperiodische Wellen in die oberen Schichten der Sonnenatmosphäre, die sog. Chromosphäre eindringen, wo sie ihre Energie an das dortige Gas verlieren. Die Frage, warum die Chromosphäre heißer ist als die darunter liegende Photosphäre, ist bis heute nicht abschließend geklärt. Könnten diese Wellen hier eine entscheidende Rolle spielen?

Dank der enormen räumlichen Auflösung der Sunrise Daten konnte der akustische Energiefluss mit bisher unerreichter Genauigkeit gemessen werden: Es zeigt sich, dass mehr als die Hälfte der Energie, die die heiße Chromosphäre an Strahlungsverlusten erleidet, in Form von akustischen Wellen bereitgestellt wird. Dieses Ergebnis ist überraschend, obwohl dieser Mechanismus schon vor fast 40 Jahren theoretisch beschrieben wurde! Aber aufgrund der mangelnden Qualität früherer Beobachtungen unterschätzte man jedoch die Effizienz der akustischen Heizung der Chromosphäre lange Zeit.

In den als dunkle Bereiche innerhalb des Granulationsmusters sichtbaren "intergranular lanes" bilden sich durch Selbstverstärkungseffekte Magnetfeldschläuche mit Durchmessern von unter 100 km, aber sehr hohen Feldstärken: Das Magnetfeld dort ist über 5000-mal stärker als das Erdmagnetfeld an den magnetischen Polen. Diese Grundbausteine des solaren Magnetfeldes sind schon vor fast 40 Jahren vorhergesagt worden, konnten aber bisher nur sehr eingeschränkt und indirekt nachgewiesen werden. Sunrise konnte nun zum ersten Mal solche magnetischen Flussröhren direkt nachweisen, wobei auch der theoretisch zu erwartende Temperaturanstieg innerhalb dieser magnetischen Schläuche sichtbar wurde [Lagg et al., 2010]. Dieses wichtige Ergebnis wird dazu beitragen, den Zusammenhang zwischen magnetischer Aktivität der Sonne und ihrer Gesamtaustrahlungsleistung zu verstehen, die für den vermutlichen Einfluss der Sonne auf unser Klima verantwortlich zeichnet.

Da die typische Lebensdauer der konvektiven Zellen nur einige Minuten beträgt, ist das Magnetfeld extrem dynamisch und in ständiger Entstehung, Umwandlung und Vernichtung. Der pro Zeiteinheit an die Oberfläche tretende magnetische Fluss, der mithilfe des Instruments IMAx auf Sunrise vermessen werden

*are clearly visible in the data and appear at much higher rates than as described in previous studies. The turbulent convective gas flows are at the origin of acoustic waves, with a frequency spectrum spanning several orders of magnitude. While slow waves with periods of 3 min and above, are reflected at the upper boundary of the photosphere and lead to standing wave patterns (the famous p-modes, which form the analytic basis for the internal structure of the Sun by the technique of Helioseismology, so called in analogy to telluric seismology), shorter period waves can penetrate into high layers of the solar atmosphere, the so-called Chromosphere, where they lose their energy by wave dissipation. It is an unsolved problem why the Chromosphere is hotter than the underlying photosphere. Which role do these waves play here?*

*Thanks to the enormous spatial resolution of the Sunrise data, the acoustic energy flux could be determined with unprecedented accuracy: It becomes clear that more than half of the energy, which is lost by the chromosphere due to radiation, is supplied by acoustic waves. This result is very surprising, although this mechanism was theoretically described already 40 years ago! But due to the limited quality of former observations the efficiency of this acoustic heating of the chromosphere was underestimated for a long time.*

*In the "intergranular lanes", dark stripes of downflowing cold gas in between the granules, magnetic fields are amplified and concentrated in flux tubes with diameters of 100 km or below, but very high field strengths: The magnetic field there is up to 500 times stronger than at the poles of the Earth. These basic building blocks of solar magnetism were predicted some 40 years ago, but could be observed in an only limited, indirect way. Sunrise could now for the first time directly observe such flux tubes, also confirming the expected increase in temperature within these structures [Lagg et al., 2010]). This important result will contribute to our understanding of the connection between the Sun's magnetic activity and its total brightness, which is considered responsible for the solar influence on Earth's climate.*

*Since the typical life time of the convective cells is only several minutes, the magnetic field is extremely dynamic and found in continuous emergence, development, and annihilation. The total magnetic flux per time, as measured by Sunrise/IMAx, is higher by two orders of magnitude as previously known, confirming*

konnte, ist um zwei Größenordnungen höher als bisher bekannt, was bestätigt, dass die meisten magnetischen Bausteine auf sehr kleinen Skalen versteckt sind [Danilovic et al., 2010].

Obwohl die einzelnen magnetischen Bausteine sehr klein sind, haben sie in ihrer Gesamtheit einen entscheidenden Einfluss auf die Struktur der solaren Atmosphäre. Das zeigt sich auch in Aufnahmen der unteren Chromosphäre, die das Instrument SuFI im nahen ultravioletten Bereich des Sonnenspektrums aufnehmen konnte. Dort kann man dank der hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung der Daten im Detail zusehen, wie die Bewegungen der magnetischen Feldschläuche in der unteren Atmosphäre zu sehr kurzlebigen und lokalen Temperaturanstiegen in den oberen Schichten führen. Ein wichtiger Schritt auf unserem Weg zum Verständnis, wie genau die Magnetfeldschläuche auf der Sonne die einzelnen Stockwerke der Sonnenatmosphäre miteinander vernetzen.

Auch wenn die Aufnahmen, die Sunrise von der Sonnenoberfläche machte, nur einen winzigen Detailausschnitt aus der Sonne zu zeigen scheinen, so stellen sie doch lange gesuchte Puzzleteile dar, die schon jetzt entscheidend dazu beigetragen haben, unser Gesamtbild der Sonne immer weiter zu vervollständigen.

*that most of the magnetic elements are hidden on very small scales [Danilovic et al., 2010].*

*Although the individual magnetic elements are extremely small, in their totality they have a driving influence on the structuring of the solar atmosphere. This can also be seen in observations of the Sunrise/SuFI instrument, obtained in the near ultraviolet spectral domain. Thanks to the high spatial and temporal resolution of these data one can directly see in detail, how the movements of the flux tubes in the lower parts of the solar atmosphere cause short-lived and localized temperature enhancements in the overlying chromosphere. This is an important result, which demonstrates, how the different floors of the solar atmosphere are interconnected and coupled by the magnetic fields.*

*Although it might seem that the Sunrise data depict only a tiny detailed part of the Sun, they are long-sought for important pieces, which have already proven to be important contributions to the solution of the puzzle that the Sun still represents to us.*

### Ausgewählte Veröffentlichungen

#### *Selected publications*

Solanki, S. K., P. Barthol, S. Danilovic, et al.: SUNRISE: Instrument, Mission, Data, and First Results. *ApJL*, 723: L127-L133 (2010). doi: 10.1088/2041-8205/723/2/L127

Barthol, P., A. Gandorfer, S. K. Solanki, et al.: The Sunrise Mission. *Solar Phys.*, 268: 1-34 (2010). doi:10.1007/s11207-010-9662-9

Gandorfer, A., B. Grauf, P. Barthol, et al.: The Filter Imager SuFI and the Image Stabilisation and Light Distribution system ISLiD of the Sunrise balloon borne Observatory. *Solar Phys.*, 268: 35-55 (2011). doi:10.1007/s11207-010-9636-y

Danilovic, S., B. Beeck, A. Pietarila, et al.: Transverse Component of the Magnetic Field in the Solar Photosphere Observed by SUNRISE. *ApJL*, 723: L149-L153 (2010). doi: 10.1088/2041-8205/723/2/L149

Hirzberger, J., A. Feller, T. L. Riethmüller, et al.: Quiet-sun Intensity Contrasts in the Near-ultraviolet as Measured from SUNRISE. *ApJL*, 723: L154-L158 (2010). doi: 10.1088/2041-8205/723/2/L154

Lagg, A., S. K. Solanki, T. L. Riethmüller, et al.: Fully Resolved Quiet-Sun Magnetic Flux Tube Observed with the SUNRISE/IMAX Instrument. *ApJL*, 723: L164-L168 (2010). doi: 10.1088/2041-8205/723/2/L164

### 1.3.3 Wie funktioniert ein Sonnenfleck?

#### 1. Das Rätsel der Sonnenflecken

Seit der Erfindung des Teleskopes Anfang des 17. Jahrhunderts werden Sonnenflecken regelmäßig beobachtet. Die physikalische Ursache der dunklen Flecken auf der Sonne blieb lange Zeit ein Geheimnis, bis im Jahr 1908 George Ellery Hale bis zu 4000 Gauss starke Magnetfelder (etwa 10000 Mal stärker als das Erdmagnetfeld) in Sonnenflecken messen konnte. Erst durch diese Entdeckung konnte die Dunkelheit der Sonnenflecken erklärt werden: Das starke Magnetfeld unterdrückt lokal die Konvektionsströmungen, die das heiße Gas zur Sonnenoberfläche transportieren. Trotz dieser Entdeckung des solaren Magnetismus blieben grundsätzliche Fragen zur Struktur der Sonnenflecken noch über 100 Jahre lang ein Rätsel: Was ist die Ursache für die Unterteilung in eine dunkle Umbra und eine hellere Penumbra? Woher stammen die winzigen, hellen Punkte in der Umbra, die sogenannten umbral dots? Was verursacht die langen, hellen und dunklen Filamente in der Penumbra? Warum beobachtet man einen radial nach außen gerichteten Fluss von solarem Plasma?

In den letzten Jahrzehnten hat die Qualität der Sonnenfleckenbeobachtungen stetig zugenommen, was einen detaillierten Blick auf deren Struktur und Dynamik ermöglichte. Außerdem erlaubte die enorme Zunahme an Rechenleistung eine realistische numerische Modellierung kompletter Sonnenflecken. Erst in den letzten Jahren konnte durch Zusammenführen moderner Beobachtungsmethoden, ausgeklügelter Datenanalyse und numerischen Simulationen ein Durchbruch für das Verständnis von Struktur und Dynamik in Sonnenflecken erreicht werden. Die ungeklärten Phänomene der umbral dots, der Filamente in der Penumbra und des systematischen radialen Plasmaflusses konnten mit einem konsistenten physikalischen Modell erklärt werden, das den Energietransport durch Konvektion in der Gegenwart eines starken Magnetfeldes beschreibt. Wissenschaftler am MPS haben entscheidende Beiträge zur Lösung dieses Rätsels beigetragen.

#### 2. Simulationen eines Sonnenflecks

Umfangreiche numerische Simulationen haben sich zu einem wertvollen Werkzeug für das Verständnis der physikalischen Prozesse auf der Sonne entwickelt. Solche Simulationen basieren auf den grundlegenden physikalischen Gleichungen der Hydrodynamik und der Elektrodynamik für elektrisch leitfähige Gase unter realistischen solaren Bedingungen. Zusätzlich berücksichtigen sie den Transport von Energie durch Strahlung. Um die Simulationen tatsächlich durchführen zu können, müssen einige Näherungen eingeführt werden; die Simulation weist aber im Prinzip keinen

### 1.3.3 How does a sunspot work?

#### 1. The enigmatic sunspots

*Sunspots have been observed regularly since the invention of the telescope at the beginning of the 17th century. However, their physical nature remained a complete mystery until 1908, when George Ellery Hale first measured their strong magnetic field reaching up to 4000 Gauss (roughly 10000 times stronger than the Earth's magnetic field). This crucial discovery paved the way toward the explanation of sunspot darkness: the strong magnetic field locally suppresses the outward flow of energy transported by convective motions. Even after the crucial discovery of sunspot magnetism, the origin of the division of sunspots into a dark umbra and a less dark penumbra, of their intricate fine structure with tiny bright umbral dots, of the striation of the penumbra in the form of long bright and dark filaments, and of the vigorous radial outflow of plasma in the penumbra remained enigmatic for a century.*

*Over the last decades, the quality of sunspot observations using imaging and spectroscopy has continuously improved and permitted an ever more detailed view of the structure and dynamics of sunspots. Moreover, the spectacular increase of computing power made it possible to carry out realistic numerical simulations of complete sunspots. In the last few years, the combination of the complementary approaches of observation, sophisticated data analysis, and numerical simulations has led to a breakthrough of our understanding of the structure and dynamics of sunspots. Previously enigmatic phenomena such as umbral dots, penumbral filamentation, and systematic penumbral outflows found a physically consistent common explanation in terms of convective energy transport dominated by the presence of a strong magnetic field. Researchers from MPS have made important contributions to this breakthrough.*

#### 2. Sunspot simulations

*Comprehensive numerical simulations have become a crucial tool for understanding physical processes on the Sun. Such simulations are based upon the fundamental equations describing the fluid dynamics and electrostatics of electrically conducting gases together with the energy transport by radiative transfer under realistic solar conditions. Some approximations have to be used in order to make the simulation feasible at all, but in principle there are no free parameters in such a simulation that could be 'tuned' in order to obtain a desired outcome or to fit simulated quantities*

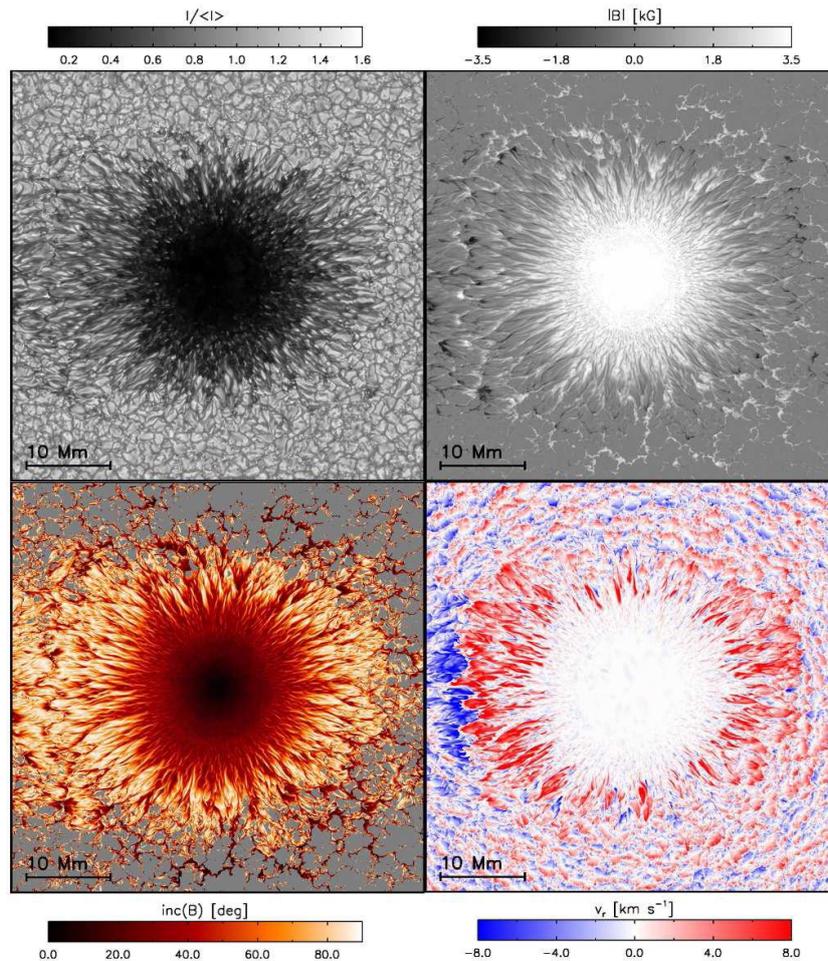


Abb. 1: Schnappschuss einer Sonnenfleckensimulation (Rempel et al., 2009). Oben links: Helligkeit, vergleichbar zu einem Bild aufgenommen im sichtbaren Spektralbereich des Lichtes. Die dunkle Umbra ist umgeben von einer von Filamenten geprägten Penumbra. Rings um den Sonnenfleck dominiert das Muster der Granulation: Heiße, aufsteigende Plasmasäulen bilden helle Granulen, die durch Abstrahlung von Energie abkühlen. Das kühle Plasma kippt über und fließt anschließend in einem Netzwerk von schmalen, dunklen Bahnen wieder nach unten. Oben rechts: Stärke der vertikalen Magnetfeldkomponente nahe der sichtbaren Sonnenoberfläche. Schwarz und weiß stellen die beiden unterschiedlichen magnetischen Polaritäten dar. In der Umbra ist das Feld vertikal und recht homogen, während sich in der Penumbra dessen Filamentierung widerspiegelt. Dort ist das vertikale Feld in den hellen Filamenten deutlich schwächer. Unten links: Neigung des Magnetfeldes in Bezug auf die Normale zur Sonnenoberfläche. Das Feld in den hellen Filamenten ist nahezu horizontal, während es in den dunkleren, dazwischenliegenden Regionen deutlich schwächer geneigt ist. Unten rechts: Radiale Strömungsgeschwindigkeit (bezüglich des geometrischen Zentrums des Sonnenflecks) nahe der sichtbaren Sonnenoberfläche. Starke, horizontale, radial nach außen gerichtete Strömungen dominieren die hellen Filamente in der Penumbra. Nahe dem linken Rand ist die entsprechende radiale Strömung eines zweiten Sonnenflecks (nicht gezeigt) zu erkennen.

*Fig. 1: Snapshot from a sunspot simulation (Rempel et al., 2009). Upper left panel: Brightness, comparable to an image taken in the visible wavelength range. The dark umbra is surrounded by a filamented penumbra. The sunspot is embedded in the granulation pattern resulting from convective energy transport: hot plumes of rising plasma form bright granules which are cooled by radiation, and turn over to downflows forming a network of dark lanes between the granules. Upper right panel: strength of the vertical magnetic field component near the visible surface. Black and white indicate the two magnetic polarities. The field is rather homogeneous and vertical in the umbra, but reflects the filamentation in the penumbra, the vertical field being significantly weaker in the bright filaments. Lower left panel: inclination of the magnetic field vector with respect to the vertical. The field is almost horizontal in the bright filaments and much less inclined in the darker regions between them. Lower right panel: radial flow velocity (with respect to the geometric center of the sunspot) near the visible surface. There are strong horizontal outflows along the bright penumbral filaments. Near the left-hand edge, the corresponding outflow from a second sunspot (not shown here) is also visible.*

freien Parameter auf, die es ermöglichen würden, das Resultat so zu trimmen, dass man ein gewünschtes Ergebnis bekommt oder dass die simulierten Größen zu den beobachteten passen.

Zu lösen bleibt ein System von Gleichungen in einem dreidimensionalen Gitter mit typischerweise 1-10 Milliarden Gitterpunkten, das ein Volumen in den oberflächennahen Schichten der Sonne und der darüber liegenden Sonnenatmosphäre repräsentiert. Die Entwicklung dieser Region kann über einen Zeitraum von Stunden bis Tagen verfolgt werden. Im Gegensatz zu den Beobachtungen, die nur eine sehr dünne Schicht nahe der optischen Sonnenoberfläche untersuchen können, erlauben die Simulationen einen Blick auf die physikalischen Prozesse, die sowohl in tieferen Schichten als auch in der Sonnenatmosphäre ablaufen. Durch Vergleich der Simulationsresultate mit den Beobachtungen lassen sich Rückschlüsse auf die Gültigkeit der verwendeten Näherungen und auf die Realitätsnähe der Simulationen ziehen. Wenn die Ergebnisse der Simulationen sich als konsistent mit den Beobachtungen erweisen, dann liefern sie uns detaillierte Informationen über die drei-dimensionalen Prozesse, die den beobachteten Phänomenen zugrunde liegen.

In internationaler Kooperation führt die *Solar Magnetohydrodynamic Group* des MPS die weltweit derzeit umfangreichsten Simulationen eines kompletten Sonnenfleckes durch. Abbildung 1 zeigt einen Schnappschuss einiger physikalischer Größen, die aus diesen Simulationen resultieren. Der hier gezeigte Sonnenfleck ist eigentlich eine Hälfte eines Sonnenfleckens mit entgegengesetzter magnetischer Polarität. Zwischen den beiden Polaritäten bildet sich eine ausgedehnte Penumbra (in der Abbildung links). Die Simulation reproduziert die typische Struktur eines Sonnenfleckes: Eine dunkle Umbra im Zentrum mit starken, vertikal zur Sonnenoberfläche gerichteten Magnetfeldern ist umgeben von einer Penumbra. Die Feinstruktur der Penumbra resultiert aus der dort herrschenden komplexen Magnetfeldstruktur. Die helleren Filamente werden dominiert von schwachen, nahezu horizontalen Magnetfeldern, während die dunkleren Filamente stärkeres und vertikales Magnetfeld aufweisen. Die Simulationen zeigen einen ständigen horizontalen, radial auswärts gerichteten Plasmafluss mit Geschwindigkeiten von bis zu 8 km/s entlang der hellen Filamente. Alle diese Eigenschaften stimmen mit den Resultaten der hochaufgelösten Sonnenbeobachtungen der letzten 20 Jahre überein.

Die Simulationen vermitteln eine dreidimensionale Ansicht der physikalischen Größen und erlauben daher die Identifizierung der Prozesse, die den Phänomenen zugrunde liegen. Die Filamentierung der Penumbra resultiert aus der Unterdrückung der Konvektionsströmung durch das dort vorherrschende starke, horizontale Magnetfeld: Das heiße, aufstei-

to observational results.

*The system of equations is solved on a three-dimensional grid consisting of typically 1–10 billion cells, which represents a piece of the solar near-surface layers and lower atmosphere. The evolution of the simulated solar scene is followed for periods of hours to days. In contrast to observations, which can only probe a thin layer near the optical surface of the Sun, simulations provide a full view onto the three-dimensional nature of the physical processes taking place above, at and below the surface layers. Of course, the realism of the simulations and the validity of the approximations used need to be tested by comparing the results with observations. If a reasonable consistency between observation and simulation is found, the latter provides detailed information about the three-dimensional physical processes underlying the observed phenomena.*

*At present, the most advanced comprehensive simulations of complete sunspots are carried out by the Solar Magnetohydrodynamics Group at MPS and their international collaborators. Figure 1 shows a snapshot of various physical quantities resulting from such a simulation. The sunspot shown is actually one of a pair of sunspots with opposite magnetic polarities; this leads to the more extended penumbra on the left-hand side of the spot. The simulation reproduces the typical structure of a sunspot: a dark central umbra with a strong vertical field surrounded by a filamentary penumbra with inclined field. The filamentation of the penumbra is reflected in a complex magnetic field structure: brighter filaments with almost horizontal and relatively weak field alternate with darker filaments with stronger, more vertical field. The simulations consistently show a strong horizontal outflow of plasma with velocities up to 8 km/s along the bright penumbral filaments with horizontal field. All these properties are in agreement with the body of information that has been obtained by high-resolution observations over the last two decades.*

*The simulations provide a three-dimensional view of the physical quantities and therefore allow us to identify the processes behind the phenomena. The penumbral filamentation results from the constraint put upon convective motions by the strong and inclined magnetic field in the penumbra: the hot, rising gas is channelized along the magnetic field lines and is*

gende Gas wird entlang dieser Magnetfeldlinien kanalisiert und durch die mit zunehmender Höhe expandierende, magnetische Struktur nach außen abgelenkt. Dieser Prozess ist die Quelle des nahezu radial nach außen gerichteten Plasmaflusses entlang des horizontalen Magnetfeldes, dem sogenannten Evershed Flow. Ein Teil dieses heißen Plasmastromes wälzt sich um, senkrecht zur Richtung der Filamente, und fließt an den Rändern der Filamente entlang dünner Bahnen in tiefere Regionen. Aktuellste Beobachtungen zeigen entsprechende Drehbewegungen, die direkt als laterale Umwälzströmungen interpretiert werden können (siehe Abschnitt 3).

Auf eine sehr ähnliche Art und Weise konnten die Simulationen den Weg zum Verständnis der umbral dots ebnet. Auch hier ist das Zusammenspiel von Konvektionsströmungen und Magnetfeld der entscheidende Faktor. An diesen Stellen ist das Magnetfeld stark und vertikal und kann daher sehr effektiv die laterale Ausdehnung von heißem, aufsteigendem Gas verhindern. Wenn dieses heiße Gas nun die Sonnenoberfläche erreicht, erscheint es als kleiner, heller Punkt in der Umbra (umbral dot). Das heiße Gas kühlt durch Abstrahlung von Energie sehr schnell ab und kippt am Rand des aufwärts gerichteten Stromes über, so dass die schmale heiße und aufsteigende Plasmasäule am Rand von kühlem, abströmendem Plasma umgeben ist. Das starke Magnetfeld erzwingt also eine Konvektion auf deutlich reduzierter lateraler Ausdehnung. Die Effizienz des Energietransportes sinkt dadurch auf etwa 20% des Wertes außerhalb des Sonnenflecks, was zur (relativen) Dunkelheit der Umbra führt. In der Penumbra kann sich das aufsteigende, heiße Plasma durch das horizontale Feld entlang einer Richtung ausdehnen (entlang des Magnetfeldes), so dass die Effizienz des Energietransportes (und damit die mittlere Helligkeit in der Penumbra) zwischen der der Umbra und der ungestörten Granulation in der ruhigen Sonne liegt.

### 3. Beobachtungen von Sonnenflecken

Die hier beschriebenen Simulationen erlauben das Studium der physikalischen Prozesse auf der Sonnenoberfläche mit einer räumlichen Auflösung, die das Leistungsvermögen moderner Sonnentelkope bei weitem übersteigt. Sie ermöglichen außerdem einen Blick auf Schichten der Sonnenatmosphäre, die für Beobachtungen nicht zugänglich sind. Um die Ergebnisse der Simulationen zu bestätigen oder auch zu widerlegen, müssen beobachtbare Größen aus den Simulationen extrahiert werden. Wissenschaftler am MPS verwenden weltraumgestützte, ballongetragene und auch bodengebundene Teleskope, um diese Observablen zu messen.

Basierend auf Daten des Solar Optical Telescope an Bord des japanischen Hinode Satelliten gelang es Forschern des MPS, die Drehbewegungen in den Filamen-

*therefore deflected horizontally outward by the expanding magnetic structure. This process provides the source for the observed almost radial outflows along filaments with horizontal field, the so called Evershed Flow. Part of the hot plasma turns over perpendicular to the radial filament axis and feeds narrow downflow lanes at the edges of the filaments. Recent observations of 'twisting motions' in penumbral filaments can be directly interpreted in terms of such laterally overturning flows (see Section 3).*

*In a similar way, simulations paved the way to understanding the umbral dots, bright points observed in sunspot umbrae, in terms of convective flows dominated by a strong magnetic field. In this case, the magnetic field is strong and vertical, thus strongly inhibiting the lateral expansion of the hot upflows. When reaching the surface layers, the upflows appear as small bright dots. The plasma cools by radiation and overturns in the immediate vicinity of the upflow, so that the underlying structure of umbral dots becomes a narrow rising plume of hot plasma surrounded by a narrow annulus of downflowing cool plasma. As a result, the strong magnetic field forces the convection to operate on much smaller lateral scales. The energy transport therefore becomes rather inefficient and the total energy output is reduced to about 20% of the value outside the sunspot, leading to the (relative) darkness of the umbra. In the penumbra, the inclined field allows the rising plasma to expand in one lateral direction (along the field), so that the efficiency of convective energy transport (and thus the mean penumbral brightness) is intermediate between umbra and undisturbed granulation.*

### 3. Sunspot observations

*The simulations described above allow studying the physical processes in the Sun with a spatial resolution exceeding the capabilities of the most powerful solar telescopes currently available. They also access layers which are not accessible for observations. Observable quantities must be extracted from the simulations in order to validate or falsify the approximations used in the simulations. Researchers at MPS use space- or balloon-borne observatories as well as ground-based solar telescopes to measure these observables.*

*Using data from the Solar Optical Telescope onboard the Japanese Hinode space observatory researchers at MPS successfully observed 'twisting motions' in pe-*

ten der Penumbra zu beobachten und damit die in den Simulationen gefundenen lateralen Umwälzströmungen zu bestätigen [Bharti et al., 2010]. Dies ist in Abb. 2 dargestellt: Ein schmaler Ausschnitt von ca.  $150 \times 5000 \text{ km}^2$ , senkrecht zur Richtung der Filamente in der Penumbra, wurde über einen Zeitraum von 150 Minuten beobachtet. Die einzelnen Beobachtungen wurden übereinandergestapelt, um die laterale Bewegung in den Filamenten zu verdeutlichen.

*numbral filaments even at the center of the solar disk, confirming the laterally overturning flows seen in the simulations [Bharti et al., 2010]. The space-time slice diagram in Figure 2 illustrates these motions: a slice of about  $150 \times 5000 \text{ km}^2$ , perpendicular to the direction of the penumbral filaments, was observed over a period of 150 minutes. The individual slices were stacked along the horizontal axis to emphasize lateral motions in the filaments.*

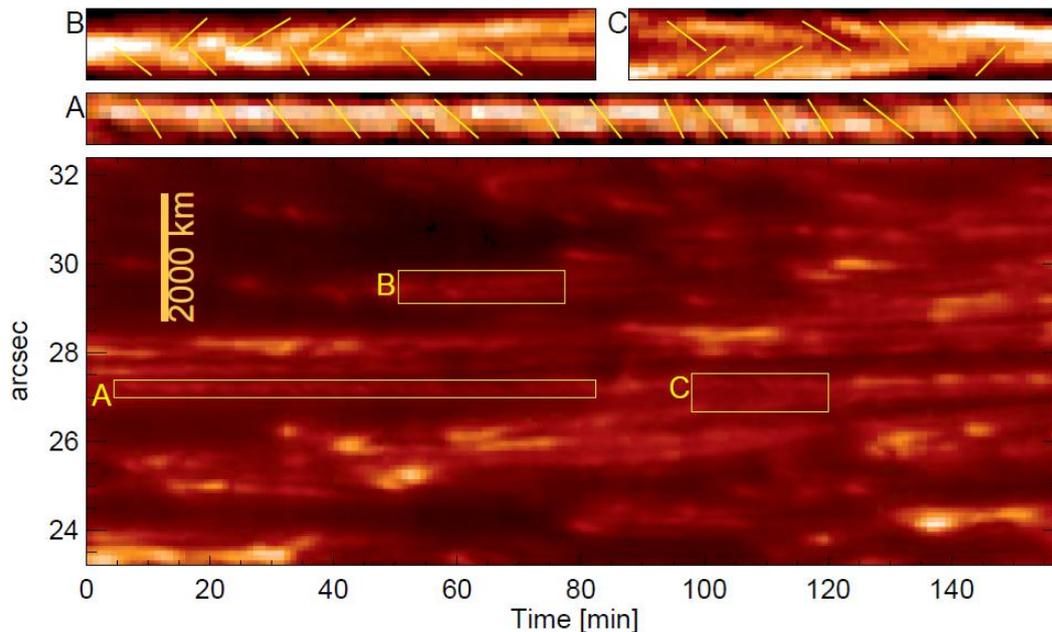


Abb. 2: Ort-Zeit Diagramm einiger Filamente in der Penumbra. Die Rotationsbewegung zeigt sich in diagonalen (Region A) oder fischgrätenähnlichen (Region B und C) dunklen Bahnen inmitten der hellen Filamente in der Penumbra. In den Vergrößerungen der Regionen A, B und C verdeutlichen Hilfslinien diese Rotationsbewegungen.

*Fig. 2: Space-time slices of a penumbral filament. The twisting motions manifest themselves in diagonal (see box A) or fish-bone like (boxes B and C, see enlargements with white guiding lines) dark lines within the bright penumbral filaments.*

Einige Filamente weisen diagonale oder fischgrätenähnliche dunkle Bahnen auf (siehe Bereich A, B und C), die auf eine Rotationsbewegung mit einer Geschwindigkeit zwischen 1.4 und 2.1 km/s hindeuten. Solche lateralen Strömungen sind in alle horizontalen Richtungen weg vom Zentrum des Sonnenflecks zu finden. Die beobachtete Korrelation zwischen Helligkeit und Geschwindigkeit bestätigt das Bild der lateralen Umwälzströmungen, die die Energie für die Helligkeit der Filamente bereitstellen.

*Diagonal or fish-bone-like black lanes, visible in some of the filaments (see boxes A, B and C), indicate twisting motions with velocities between 1.4 and 2.1 km/s. These lateral motions are found in all azimuthal directions from the center of the sunspot. The obtained correlation of brightness and velocity suggests that overturning convection causes the twisting motions in penumbral filaments providing the energy maintaining the brightness of the filaments.*

Um die Konvektionsströmungen in der Penumbra mit den Simulationen zu vergleichen, müssen die physikalischen Parameter in den tieferen Schichten der Sonnenatmosphäre gemessen werden, da die Simulationen dort die heftigsten Strömungen voraussagen. Nur einige, relativ schwache Fraunhofer Linien werden in diesen tiefen Schichten gebildet und beinhalten daher

*For the comparison of the penumbral convection with the simulations it is essential to probe the deep layers of the photosphere, the visible surface of the Sun, where the simulations predict the motions to be most vigorous. Only a few, weak Fraunhofer spectral lines are formed in these layers and hence carry the information about the velocity and temperature structure*

die Information über die dort herrschenden Geschwindigkeiten und Temperaturen. Eine dieser Spektrallinien ist die neutrale Kohlenstofflinie C I bei einer Wellenlänge von 5380 Å. Wissenschaftlern am MPS gelang es erstmals, das von den Simulationen vorhergesagte, abwärts gerichtete Strömungsmuster mit einer bisher nicht erreichten Auflösung von nur 100 km zu detektieren und damit die Theorie der lateralen Umwälzströmungen zu bestätigen [Joshi et al., 2011]. Die Intensitätskarten in Abb. 3 zeigen die Filamentstruktur der Penumbra im grünen Spektralbereich der Sonne (linkes Bild). Helle und damit heiße Bereiche werden von dunkleren (kühleren) Bereichen umgeben.

*in the deep photosphere. One of these is a line of neutral carbon (C I) at the wavelength 5380 Å. Reaching the unprecedented spatial resolution of 100 km, MPS researchers were able to detect the downflow pattern as expected from the presence of overturning convection in penumbral filaments [Joshi et al., 2011]. The intensity maps presented in Fig. 3 line show the filamentary structure of the penumbra observed in the green spectral region of the Sun (left panel). Bright areas, corresponding to hot material, are surrounded by darker (cooler) regions.*

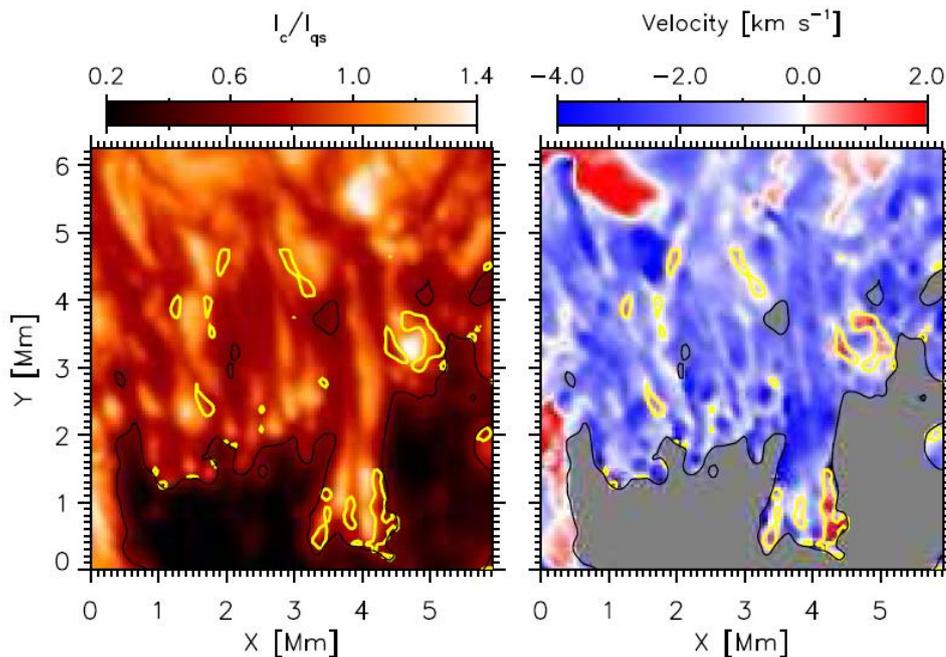


Abb. 3: Kontinuums-Intensität und Dopplergeschwindigkeitskarte einer Penumbra, gemessen in der C I 5380 Å Spektrallinie am 2. Juni 2009 mit dem 1m Swedish Solar Telescope auf La Palma (Kanarische Inseln, Spanien). Das linke Bild zeigt die Kontinuumsintensität, ein Maß für die Temperatur auf der Sonnenoberfläche. Der dunkle Bereich im unteren Drittel des Bildes, hervorgehoben durch die schwarze Konturlinie, markiert die Umbra des Sonnenflecks. Die Penumbra ist charakterisiert durch die länglichen, radial nach außen gerichteten Filamente. Blau eingefärbte Bereiche in der Dopplergeschwindigkeitskarte (rechts) deuten auf zum Beobachter gerichtete Gasströmungen (Aufwärtsströmungen) hin. Rot eingefärbt sind Bereiche mit Abwärtsströmungen. Dort fließt das Gas zurück in tiefere Schichten der Sonnenatmosphäre. Die gelben Konturlinien markieren die Abwärtsströmungen in den dunkleren Gebieten der Penumbra. Die Umbra wurde von der Analyse der Dopplergeschwindigkeiten ausgenommen und daher grau markiert.

*Fig. 3: Continuum intensity and Doppler velocity maps of the penumbra obtained in the C I 5380 Å line obtained on June 2nd 2009 with the 1m Swedish Solar Telescope on La Palma (Canary Islands, Spain). The left panel shows the continuum intensity, a measure for the temperature on the solar surface. The dark area in the lower part of the image, outlined by the black contour line, marks the umbra of the sunspot. The penumbra is characterized by elongated structures, oriented radially outwards from the umbra. The blue color in the Doppler velocity images (right panel) indicate that the material in the penumbra is moving towards the observer, corresponding to upflows with respect to the solar surface. The red colors indicate regions where gas is flowing down to deeper layers of the photosphere. The yellow contour lines outline penumbral downflows located in darker parts of the penumbra. The umbra is excluded from the velocity analysis (gray area in the velocity map).*

Die exakte Analyse der Wellenlängenposition der C I Linie erlaubt die Erstellung einer Dopplergeschwindigkeitskarte (rechtes Bild in Abb. 3). Hier

*The exact analysis of the wavelength position of the C I line allows a Doppler velocity map to be created (right panel), where the up- and downflows of the gas*

werden auf- und abwärts gerichtete Gasströmungen in der Sonnenatmosphäre sichtbar. Einige der hellen Filamente in der Penumbra zeigen Aufwärtsströmungen (blau eingefärbt), die von Abwärtsströmungen (rot) umgeben sind. Diese Bereiche, gekennzeichnet durch gelbe Konturlinien, sind ein starkes Indiz für das Vorhandensein der vorhergesagten Umwälzströmungen. Diesen Strömungen überlagert ist der sogenannte "Evershed-Flow", die radial nach außen gerichteten Strömung, die das Dopplersignal der Penumbra in weiten Bereichen dominiert.

*in the solar atmosphere become visible. For some of the penumbral filaments upflows (blue color) are surrounded by downflows (red color). These regions, indicated by yellow contour lines, strongly suggest the presence of overturning convection in penumbral filaments, modulated by the Evershed flow, the radial outflow, which dominates the signal in much of the penumbra.*

### Ausgewählte Veröffentlichungen

#### *Selected publications*

Bharti, L., S. K. Solanki, and J. Hirzberger: Evidence for convection in sunspot penumbrae. *Astrophys. J.* 722, L194–L198 (2010), doi:10.1088/2041-8205/722/2/L194.

Cameron, R. H., J. Jiang, D. Schmitt, and M. Schüssler: Surface flux transport modeling for solar cycles 15–21: effects of cycle-dependent tilt angles of sunspot groups. *Astrophys. J.* 719, 264–270 (2010), doi:10.1088/0004-637X/719/1/264.

Hirzberger, J., T. Riethmüller, A. Lagg, et al.: High-resolution spectro-polarimetry of a flaring sunspot penumbra. *Astron. & Astrophys.* 505, 771–790 (2009), doi:10.1051/0004-6361/200912063.

Joshi, J., A. Pietarila, J. Hirzberger, et al.: Convective Nature of Sunspot Penumbral Filaments: Discovery of Downflows in the Deep Photosphere. *Astrophys. J.* 734, L18 (2011), doi:10.1088/2041-8205/734/1/L18.

Rempel, M., M. Schüssler, R. H. Cameron, and M. Knölker: Penumbral structure and outflows in simulated sunspots. *Science* 325, 171–174 (2009), doi:10.1126/science.1173798.

### 1.3.4 Erforschung der Sonnenkorona mit Stereoskopie und Magnetfeldmodellierung

#### Einleitung

Wie die meiste Materie in unserem Universum besteht auch die Sonnenkorona, die äußerste Schicht der Sonnenatmosphäre, aus Plasma. Dieses stellt, neben den klassischen Aggregatzuständen fest, flüssig und gasförmig, einen vierten Zustand der Materie dar. Bei Temperaturen in der Korona von über einer Millionen Grad werden die neutralen Atome ionisiert, so dass ein Gas aus positive geladenen Ionen und negativen Elektronen entsteht. Obwohl die einzelnen Partikel also geladen sind, ist das Plasma aber auf großen Skalen quasi-neutral (die positiven und negativen Gesamtladungen sind gleich groß). Daher wird die Struktur des Plasmas durch das Magnetfeld der Sonne bestimmt.

Von der Erde aus kann die lichtschwache Sonnenkorona nur während einer totalen Sonnenfinsternis direkt beobachtet werden. Erst Beobachtungen vom Weltraum aus (z.B. mit den Raumsonden SOHO und STEREO, die von der ESA und NASA 1995 bzw. 2006

### 1.3.4 Coronal magnetic field modeling and stereoscopy

#### Introduction

*The outermost part of the solar atmosphere, the solar corona, is, like most of the matter in the universe, in a plasma state. This constitutes a fourth state of matter, besides the well-known states solid, fluid and gas. Temperatures in excess of one million Kelvin cause most neutral atoms to become ionized, forming a gas of positively charged ions and negative electrons. Though the individual particles are charged, the plasma is quasi-neutral (the total amount of positive and negative charges is the same on large scales). This causes the structure of the plasma being controlled by the solar magnetic field.*

*Only during solar eclipses, the faint coronal plasma can directly be observed from Earth. Therefore, observations from space (e.g. by the SOHO and STEREO spacecraft, launched by ESA and NASA in 1995 and 2006, respectively), are necessary to observe the corona with*

gestartet wurden), erlauben es, die Korona kontinuierlich zu beobachten. Eine wichtige Quelle ist hierbei elektromagnetische Strahlung im extrem ultravioleten (EUV) Wellenlängenbereich, wie sie vom heißen Plasma in der Korona abgestrahlt wird. Immer mal wieder registriert man dabei ein äußerst dynamisches Verhalten der Korona, so genannte Flares und koronale Massenauswürfe, die ursächlich auf Instabilitäten im Sonnenmagnetfeld zurückzuführen sind. Bei einem Flare (Sonnenfackel) kommt es innerhalb einiger Minuten zu einem starken, lokalisierten Helligkeitsanstieg und der Beschleunigung energiereicher Teilchen. Ein beträchtlicher Teil dieser Flares ist verbunden mit Massenauswürfen, bei denen Milliarden Tonnen Plasma mit Geschwindigkeiten von über 1000 km/s in den interplanetaren Raum geschleudert werden.

Wenn die Entladung in Richtung der Erde erfolgt, dann kann diese koronale Materie nach etwa zwei bis drei Tagen auf die Atmosphäre der Erde treffen. Dort führt sie zu Polarlichtern, kann aber auch Schäden verursachen. Das Mobilfunknetz und die satellitengestützte Navigation werden gestört, Satelliten können zerstört werden, und sogar Ausfälle im Stromnetz sind schon vorgekommen.

Die Forschungsgruppe 'SAMCO' (Stereoscopic And Magnetic modelling of the solar Corona, oder auf Deutsch: Stereoskopie und Magnetfeldmodellierung der Sonnenkorona) am MPS untersucht aber auch ruhige Gebiete auf der Sonnenoberfläche und Löcher in der Korona. In diesen Koronalöchern ist die EUV-Strahlung sehr stark reduziert und sehr dünne Plasmasäulen parallel zu den Magnetfeldlinien, so genannte Plumes, können beobachtet werden. In den Bereichen der so genannten ruhigen Sonne gibt es zwar keine großen Eruptionen, aber neue Beobachtungen zeigen, dass auch die ruhige Sonne auf kleinen räumlichen und schnellen zeitlichen Skalen sehr dynamisch ist.

### Messung des Sonnenmagnetfeldes

Das Sonnenmagnetfeld kontrolliert die Bewegung der geladenen Plasmateilchen in der Sonnenatmosphäre. Die Teilchen kreisen um die Magnetfeldlinien und sind dadurch in Flussröhren gefangen. Der durch das Magnetfeld erzeugte Druck übersteigt den Gasdruck des koronalen Plasmas um zwei bis vier Größenordnungen. Deshalb wird die Struktur des Plasmas durch das Magnetfeld bestimmt und das auf den Feldlinien gefangene, leuchtende Plasma macht die Struktur der Feldlinien sichtbar, wie etwa im linken Bild in Abbildung 1. Die Aufnahme stammt vom AIA-Instrument auf der 2010 gestarteten Raumsonde Solar Dynamics Observatory (SDO). Im Bild sind geschlossene Magnetfeldbögen zu erkennen, die an beiden Fußpunkten mit der Photosphäre (der sichtbaren Sonnenoberfläche) verbunden sind. In der Photosphäre kann man das Magnetfeld direkt messen, wie eine Aufnahme des

*sufficient continuity. The hot coronal plasma emits at extreme ultraviolet (EUV) wavelengths which provides a favorable source for observing the structure of the coronal plasma. The dominant magnetic force in the corona gives rise to eruptive phenomena, like flares and coronal mass ejections. During a flare the amount of emitted radiation increases rapidly within a few minutes and high energy particles become accelerated. A considerable fraction of all flares is associated with billions of tons of plasma being ejected. The material during such "coronal eruptions" is ejected with velocities of more than 1000km/s.*

*When directed towards Earth, the ejected coronal material can impinge on the Earth's atmosphere after about two to three days. It can cause Aurorae (northern and southern lights) but may have also harmful effects like destroying satellites, disturbance of communication and navigation by satellites and even power-cutoffs.*

*The SAMCO-group (Stereoscopic And Magnetic modelling of the solar Corona) at the MPS also investigates the structure of the quiet Sun and coronal holes. In the corona above the latter, the EUV emissivity of the coronal plasma is strongly reduced and faint density striations aligned along the magnetic field, so called plumes, can be observed. Quiet Sun regions do not show large scale eruptions. However, new observations show that the quiet Sun is very dynamic on small spatial and short temporal scales.*

### Measurements of the solar magnetic field

*The motion of the ions and electrons of the solar atmosphere is controlled by the solar magnetic field. The particles gyrate around the field lines and are therefore confined to magnetic flux tubes. In the solar corona, the pressure exerted by the magnetic field is about two to four orders of magnitude higher than the gas pressure of the plasma. Consequently, the magnetic field dominates and essentially shapes the plasma density in the solar corona. The magnetic field cannot be observed directly, but the plasma frozen to the magnetic field lines radiates and outlines the magnetic field. The left panel of Figure 1 shows an EUV-image taken by the AIA instrument on the 2010 launched Solar Dynamics Observatory (SDO). Magnetic loops are clearly outlined by the radiating plasma. Loops form closed magnetic arcades with both footpoints located in the photosphere, the visible surface of the Sun. In*

HMI-Instruments auf SDO im rechten Bild in Abb. 1 zeigt. Gebiete mit besonders großer Magnetfeldstärke (weiß und schwarz im Bild) führen zu hell leuchtenden Strukturen in Koronabildern. Wir bezeichnen sie als aktive Gebiete, da sie die Hauptquelle für große Eruptionen wie Flares und Massenauswürfe sind. Für die Untersuchung des Magnetfeldes in der Korona stehen damit zwei unterschiedliche Ansätze zur Verfügung, nämlich die Auswertung von EUV-Bildern und Modellrechnungen mit photosphärischen Magnetfeldmessungen als Ausgangspunkt. Ein einzelnes EUV-Bild zeigt nur eine 2D-Projektion des Magnetfeldes, aber wenn die Korona aus verschiedenen Blickwinkeln beobachtet wird (z.B. mit den beiden STEREO-Raumsonden und SDO), dann kann mit Stereoskopie die 3D-Struktur (aber nicht die Magnetfeldstärke) rekonstruiert werden. Alternativ wird das in der Photosphäre gemessene Magnetfeld in die Korona extrapoliert. Hierzu sind Modellannahmen notwendig und man erhält die Struktur, Stärke und Energiedichte des Magnetfeldes in der Korona. Eine Schlüsselfrage ist insbesondere: Verfügt ein aktives Gebiet über genug freie Energie, um Eruptionen verursachen zu können?

*the photosphere the magnetic field vector can be measured directly (see right panel in Fig. 1). Regions of high magnetic field strength (white and black spots in the image) are usually associated with bright structures in coronal images. These regions are called 'active regions', because they are the main source for eruptive activity like flares and coronal mass ejections. We therefore have two sources of information to derive the (magnetic) structure of the corona, observations in EUV and coronal magnetic field models based on photospheric measurements. A coronal EUV-image represents the 2D projections of the magnetic field, but with observations from different viewpoints like the two STEREO spacecraft and SDO, we can reconstruct the 3D structure with the help of stereoscopy. This provides the structure and topology of magnetic field lines, but not the field strength. Alternatively, we extrapolate photospheric magnetic field measurements into the solar corona. This approach requires model assumptions about the coronal plasma and provides the structure and strength of the magnetic field (and thus its energy content). A particular important question is: How much free energy is available to drive eruptions?*

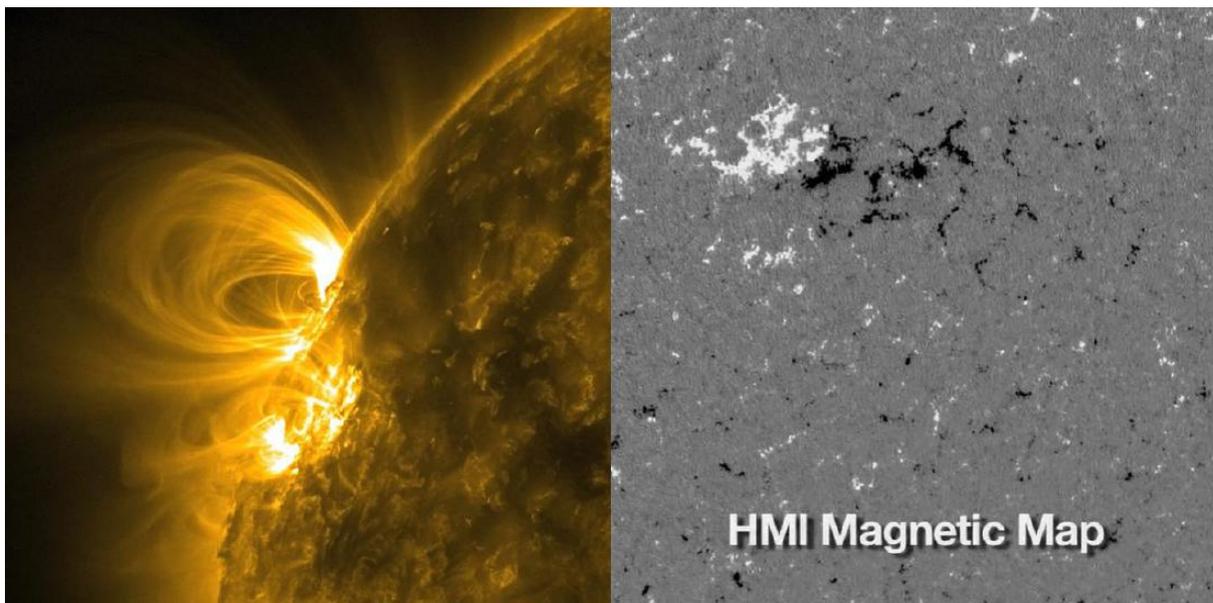


Abb. 1: Das linke Bild zeigt eine EUV-Aufnahme eines aktiven Gebietes mit SDO/AIA. Das leuchtende Plasma macht Magnetfeldbögen sichtbar. Das rechte Bild zeigt Magnetfeldmessungen auf der Sonnenoberfläche, aufgenommen von SDO/HMI. Weiße (schwarze) Gebiete markieren starke positive (negative) Magnetfelder. Wir kombinieren die Magnetfeldmessungen, EUV-Aufnahmen und Computersimulationen, um die Physik der Korona und den Zusammenhang Photosphäre-Korona zu verstehen.

*Fig. 1: The left hand picture shows an active region observed in EUV by the SDO/AIA instrument. Clearly visible are magnetic loops, which are visible by the radiating plasma. The right hand picture shows measurement of the solar magnetic field in the photosphere from the HMI instrument on SDO. White (black) regions contain a strong positive (negative) magnetic field. Combining photospheric magnetic field measurements, coronal EUV-images and computer simulations help to understand the physics of the solar corona and the photosphere-corona connection.*

### Kraftfreie Magnetfelder

Da der Magnetfelddruck in der Korona den Plasma-  
druck um einige Größenordnungen übersteigt, dürfen wir in erster Näherung alle nicht-magnetischen Kräfte (Schwerkraft, Druckgradient des Plasmas) ignorieren und mit einem „kraftfreien“ Modell arbeiten. Die SAMCO-Gruppe hat an einer internationalen Studie teilgenommen, in der die Vorteile und Schwierigkeiten dieser kraftfreien Koronamodellierung im Detail untersucht wurden [DeRosa et al., 2009]. Dabei haben wir gelernt, dass es wichtig ist, Magnetfelddaten von hinreichend großen Gebieten auf der Sonnenoberfläche als Ausgangspunkt für die Modellierung zu verwenden. Solche großräumigen Vektormagnetogramme (Messungen des Magnetfeldvektors in der Photosphäre mit einem Vektormagnetographen, der Stärke und Richtung des Feldes bestimmt) werden z.B. von SOLIS (Synoptic Optical Long-term Investigations of the Sun, einem bodengebundenen Magnetographen in den USA) zur Verfügung gestellt. Auch müssen nicht vermeidbare Fehler in der Messung des photosphärischen Feldes mit einkalkuliert werden. Frühere Computersimulationen, die auf einzelne und isolierte aktive Gebiete beschränkt waren, wurden in kartesischen Koordinaten durchgeführt. Die Erweiterung der Modellierung auf mehrere aktive Gebiete und auf die ruhige Sonne, z.B. auf der Basis von SOLIS-Magnetogrammen, erfordert dagegen die Verwendung von Kugelkoordinaten [Tadesse et al., 2011].

### Unter welchen Umständen kommt es zu Eruptionen?

Auf der Sonnenoberfläche ändert sich das Magnetfeld ständig, verursacht durch aus der Konvektionszone aufsteigenden magnetischen Fluss und die gegenseitige Auslöschung positiver und negativer Polaritäten. Zudem werden durch photosphärische Plasmaströmungen die Fußpunkte von Magnetfeldbögen verschoben. Diese Plasmaströmungen haben typischerweise eine Geschwindigkeit von weniger als 1km/s und die Verscherung der Fußpunkte induziert elektrische Ströme entlang der koronalen Magnetfeldbögen. Die Korona ist fast immer im Gleichgewicht mit der Photosphäre und es ist legitim, ihr Magnetfeld als eine Abfolge quasi-statischer, kraftfreier Gleichgewichtszustände zu modellieren. Dass die Korona in einem Kräftegleichgewicht ist, bedeutet aber keineswegs, dass die entstehenden Strukturen auch stabil bleiben. Unter gewissen Umständen endet die quasi-statische Entwicklungsphase und für kurze Zeit (einige Minuten) wird die Korona sehr dynamisch und zeigt Eruptionen in aktiven Regionen. Während der Eruptionen ist die Korona nicht im Gleichgewicht mit der Sonnenoberfläche und sie schleudert Plasmoide (in sich geschlossene Plasma und Magnetfeldstrukturen, die keine Verbindung zur Photosphäre mehr haben) mit Geschwindigkeiten von mehreren tausend km/s in den interplanetaren Raum. In einer kürzlich veröffentlichten Studie

### Force-free fields

*As the magnetic pressure dominates in the solar corona over the plasma pressure by several orders of magnitude, we can neglect to lowest order all non-magnetic forces like pressure gradient and gravity and model the field with a force-free model. We participated in an international study on detailed investigations of the advantages and problems of the force-free approach [DeRosa et al., 2009] and we learned that it is important to use vector magnetograms (measurements of the photospheric magnetic field vector with the help of a vectormagnetograph), which cover a sufficiently large area as provided for example by SOLIS (Synoptic Optical Long-term Investigations of the Sun, a ground-based vectormagnetograph located in the USA), as input for force-free models and to take into account unavoidable errors in the photospheric field measurements. While earlier investigations have been confined to single active regions, using a Cartesian geometry, large field of view magnetograms including several active regions and quiet Sun areas require computations in spherical geometry using e.g. full-disk SOLIS measurements as boundary conditions [Tadesse et al., 2011].*

### Under which conditions do active regions erupt?

*Changes in the photospheric magnetic field are due to flux emergence and/or cancellation and by photospheric plasma flows which transport foot points of magnetic loops. These foot point motions with typical flow speeds in the photosphere of less than about 1km/s shear the loops and induce electric currents. The coronal magnetic field is at most locations in equilibrium with the photospheric boundary and the corona can be modeled as a sequence of force-free equilibria. Equilibrium does, however, not necessarily imply a stable configuration. Under certain conditions the quasi-static equilibrium phase ends, and is followed by a very dynamic phase (when eruptions occur), followed again by a newly built equilibrium. During eruptive phases the corona is not in equilibrium with the photosphere and plasma and magnetic field are ejected with speeds of up to several thousand km/s. In a recent study [Thalmann, 2010], the temporal evolution of force-free fields prior and after eruptions was investigated in detail. The top panels of Figure 2 show the magnetic field configuration (force-free fields extrapolated from ground based measurements with the Solar-Flare-Telescope (SFT, a vector magnetograph located in Japan) before (upper left panel) and after (upper right panel) a flare. Before the flare, the field (black lines) is more curled and current-carrying. Such*

[Thalmann, 2010] wurde die zeitliche Entwicklung des koronalen Magnetfeldes vor und nach einer Eruption im Detail untersucht. Die oberen Bilder in Abbildung 2 zeigen die Magnetfeldkonfiguration vor (oben links) und nach (oben rechts) einem Flare. Als Randbedingungen für die gezeigten Computersimulationen wurden Messungen des Solar-Flare Vektormagnetographen in Japan benutzt. Vor dem Flare ist das Magnetfeld (schwarze Linien) verwirbelt, was zu starken elektrischen Strömen führt. Solche Konfigurationen enthalten freie magnetische Energie, die zu einem Teil während des Flares freigesetzt wird. Die unteren Bilder in Abbildung 2 zeigen Iso-Flächen der Magnetfeldstärke (die proportional zur Wurzel der Energiedichte ist). Man kann klar erkennen, dass die Magnetfeldamplitude nach dem Flare abgenommen hat (rechtes unteres Bild). Ein substantieller Teil der freien Energie (aber nicht die gesamte) wurde während der Eruption freigesetzt. Hierbei wurde innerhalb von 30 Minuten etwa 100 000 Mal mehr Energie freigesetzt als jedes Jahr auf der Erde verbraucht wird.

*configurations contain free magnetic energy, which partly becomes released during eruptions. The lower panels in Figure 2 show iso-surfaces of the coronal magnetic field magnitude (which is proportional to the square-root of the magnetic energy). It is clearly visible, that after the flare (right panel) the field strength has decreased. A significant part (but not all) of the free energy has been set free. The total amount of released energy during the 30 min duration of the eruption was about  $10^5$  times the total energy consumption on Earth in one year.*

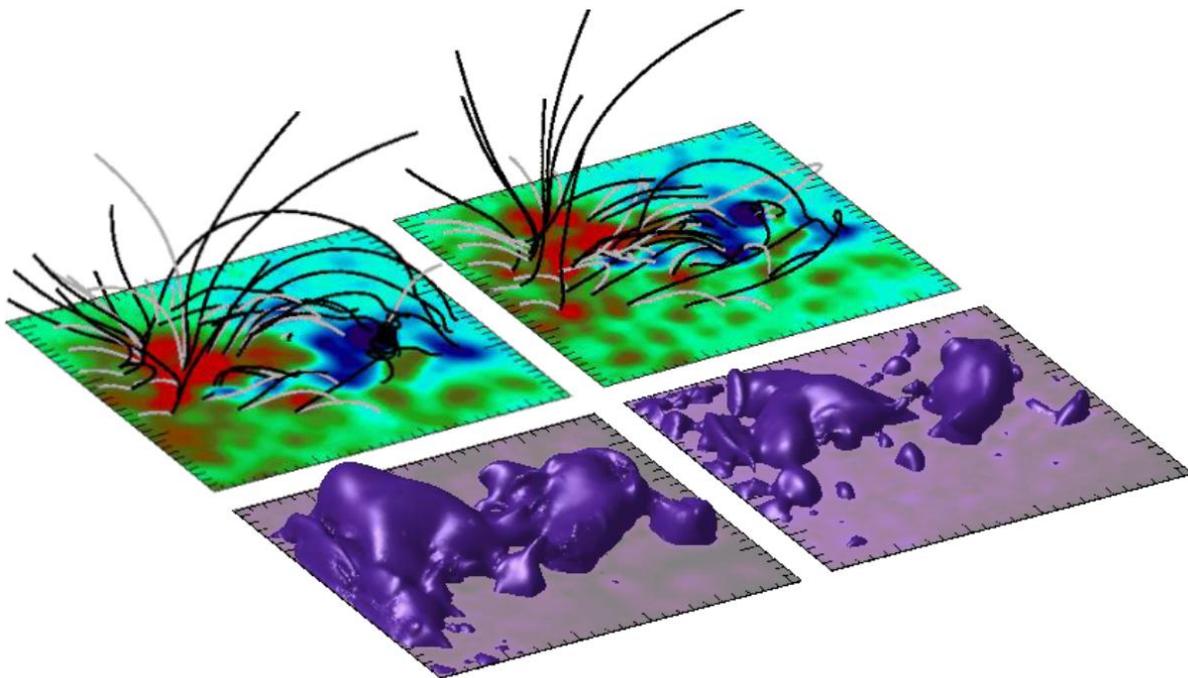


Abb. 2: Die oberen Bilder zeigen das Magnetfeld vor (links) und nach einem M6.1 Flare am 20. bzw. 21. Januar 2004. In den unteren Bildern werden 20 mT Iso-Flächen der Magnetfeldstärke dargestellt (links und rechts wieder vor bzw. nach dem Flare). Das Magnetfeld wurde aus photosphärischen Messungen extrapoliert. (Farbkodierung in der Photosphäre: rot (blau) zeigen positive (negative) Polarität des vertikalen Feldes.) Schwarze Linien zeigen Magnetfeldlinien aus einem nicht-linearen kraftfreien Modell und graue Linien das zugehörige Potentialfeld (hierbei werden keine elektrischen Ströme berücksichtigt und Potentialfelder entsprechen einem Minimum-Energiezustand). Die Iso-Flächen zeigen klare Anzeichen einer Implosion des Magnetfeldes. Das bedeutet, dass die Energiedichte des Feldes durch den Flare stark abgenommen hat.

*Fig. 2: Magnetic field configuration (upper panels) and iso-surfaces of magnetic field magnitude of 20 mT (lower panels) on Jan 20 and 21, 2004 (before and after a flare, left and right panels, respectively). The magnetic field was extrapolated from photospheric magnetic field measurements (red and blue colors show positive and negative magnetic fields in the photosphere). Black field lines outline the force-field (current and free energy carrying) and gray ones the corresponding potential field (no electric currents, minimum energy state). The iso-surface shows clear signatures of an implosion, i.e., the decrease of magnetic pressure due to the flaring activity*

### Koronalöcher und polare Plumes

Über einem Gebiet von ca. 30% der Sonnenoberfläche hat die Korona Löcher, die in EUV-Bildern dunkel erscheinen (siehe Abbildung 3). Auf der Sonnenoberfläche ist das Magnetfeld in Koronalöchern fast unipolar und in der Korona offen (d.h. nur an einer Polarität ist es mit der Photosphäre verbunden ist und die Feldlinien setzen sich in den interplanetaren Raum fort). Das Plasma strömt entlang dieser offenen Feldlinien weitgehend ungehindert aus der Korona hinaus (es bildet den so genannten schnellen Sonnenwind), während das in der Korona verbleibende Plasma extrem dünn ist und in EUV-Bildern entsprechend dunkel erscheint. Allerdings beobachtet man in Koronalöchern lang gestreckte, hellere Strukturen mit einer erhöhten Dichte und Emissivität, die als polare Plumes (Plasma Säulen oder -fontänen) bezeichnet werden.

Für die Analyse dieser Strukturen haben wir spezielle Computerprogramme entwickelt. Die 3D-Geometrie der Plumes wird mit stereoskopischen und tomographischen Methoden rekonstruiert. Für die Stereoskopie verwenden wir gleichzeitig EUV-Bilder aus drei verschiedenen Blickwinkeln (STEREO-A, STEREO-B und SOHO). Für Tomographie benötigt man eine Vielzahl an Bildern aus verschiedenen Blickwinkeln, die sukzessive unter Ausnutzung der Sonnenrotation gewonnen werden.

Mit Hilfe der 3D-Rekonstruktionen wurde herausgefunden, dass Plumes in den Polarkappen der Sonne homogen verteilt und stärker horizontal geneigt sind, als man a priori von einem Dipolfeld erwarten würde [Feng et al. 2009]. Im Gegensatz zu früheren Untersuchungen (aus der Zeit vor dem Start der Stereosonden im Jahr 2006) sind Plumes und so genannte bright points (helle Flecken) nicht notwendigerweise korreliert. Das Plasma in Plumes strömt mit einer Geschwindigkeit von weniger als 10km/s. Es ist daher unwahrscheinlich, dass Plumes einen wesentlichen Beitrag zum schnellen Sonnenwind liefern, der ca. 800km/s schnell ist.

### Feinstruktur der ruhigen Sonne

Mit dem IMAX Instrument auf dem ballongetragenen Sunrise-Observatorium wurde kürzlich das photosphärische Magnetfeld in der ruhigen Sonne mit noch nie da gewesener Auflösung gemessen und in die Chromosphäre, der Atmosphärenschicht zwischen Photosphäre und Korona, und die Korona extrapoliert. In der Photosphäre weist die ruhige Sonne eine magnetische Netzwerkstruktur auf, mit starken Feldern im Netzwerk (>300 G) und schwachen Inter-Netzwerk-Feldern. In Zusammenarbeit mit dem Sunrise-Team konnte herausgefunden werden, dass ca. 90% der magnetischen Energie in der mittleren Chromosphäre (ca. 1000 km über der Sonnenoberfläche) magnetisch mit den darunter liegenden starken Netzwerkfeldern ver-

### Coronal holes and polar plumes

*About 30% of the Solar surface is covered by coronal holes which appear dark in EUV-images (see Figure 3). Coronal hole regions have almost unipolar magnetic fields in the photosphere, which extend into the corona along open magnetic field lines. The coronal plasma flows along the open lines and leaves the corona with a strongly reduced plasma density and emissivity causing the darkness (this plasma flow is called solar wind). The corona above coronal holes is not entirely dark, however, but includes polar plumes, which are large elongated structures with enhanced density and emissivity.*

*We developed special mathematical methods to identify and associate plumes in EUV-images. The 3D geometry of plumes is reconstructed by stereoscopic and tomographic methods. While stereoscopy is performed with simultaneously observed EUV-images from three vantage points (the two STEREO spacecraft, A and B, and SOHO), tomography requires images from many viewpoints. This has been achieved by taking advantage of the rotation of the Sun.*

*Based on the reconstruction of the 3D-structure of plumes with stereoscopy, an investigation of the physical quantities of plumes and interplume regions revealed that plumes are distributed homogeneously in the polar caps and that they are more horizontally than initially estimated based on the assumption of a bipolar solar magnetic field [Feng et al. 2009]. In contrast to earlier works (prior to the launch of STEREO in 2006) the observed EUV plumes and bright points are not always related. The outflow velocity was found to be below 10km/s. It is therefore unlikely that plumes dominantly contribute to the fast solar wind. (The fast solar wind has a speed of about 800km/s.)*

### Fine structure of the quiet Sun

*Recent photospheric magnetic field measurements with the balloon borne SUNRISE/IMAX instrument with unprecedented spatial resolution have been used to model the 3D-structure of the chromosphere, the atmospheric layer in between the photosphere and corona, and corona in the quiet Sun. In the photosphere the quiet Sun consists of strong magnetic network elements (>300G) and weaker inter-network fields. In collaboration with the Sunrise team it was found that 90% of the magnetic energy in the mid chromosphere (at a height of 1Mm above the solar surface) has its origin (i.e. is magnetically connected to) in the underlying strong magnetic network elements [Wiegmann et al., 2010]. Quiet Sun magnetic*

bunden ist [Wiegmann et al., 2010]. Die Magnetfeldbögen der ruhigen Sonne sind wesentlich kürzer und niedriger als in aktiven Gebieten. Die meisten dieser magnetischen Bögen sind bezüglich der Feldstärke an ihren Fußpunkten sehr asymmetrisch. Auch wenn man historisch immer noch von ruhiger Sonne spricht (frühere Beobachtungen mit niedriger Auflösung ließen keine Aktivität erkennen), so haben uns die neuen Messungen gezeigt, dass diese Gebiete sich insbesondere in den Inter-Netzwerk-Bereichen schnell verändern. Entsprechend sind die magnetischen Bögen in den höheren Schichten kurzlebig und verschmelzen häufig auf kleinen zeitlichen und räumlichen Skalen.

*loops are much shorter and lower lying than active region loops. Most of the loops are far from symmetry, with the magnetic field strength at one photospheric foot point being much higher than at the other foot point. The term 'quiet Sun' was originally used because earlier investigations with instruments of lower spatial resolution led to the suggestion that these regions show only low activity. Recent observations, however, show fast varying structures, in particular in the inter-network. Correspondingly, magnetic loops in the quiet Sun's upper atmosphere are short lived structures which frequently reconnect on small spatial and short temporal scales.*

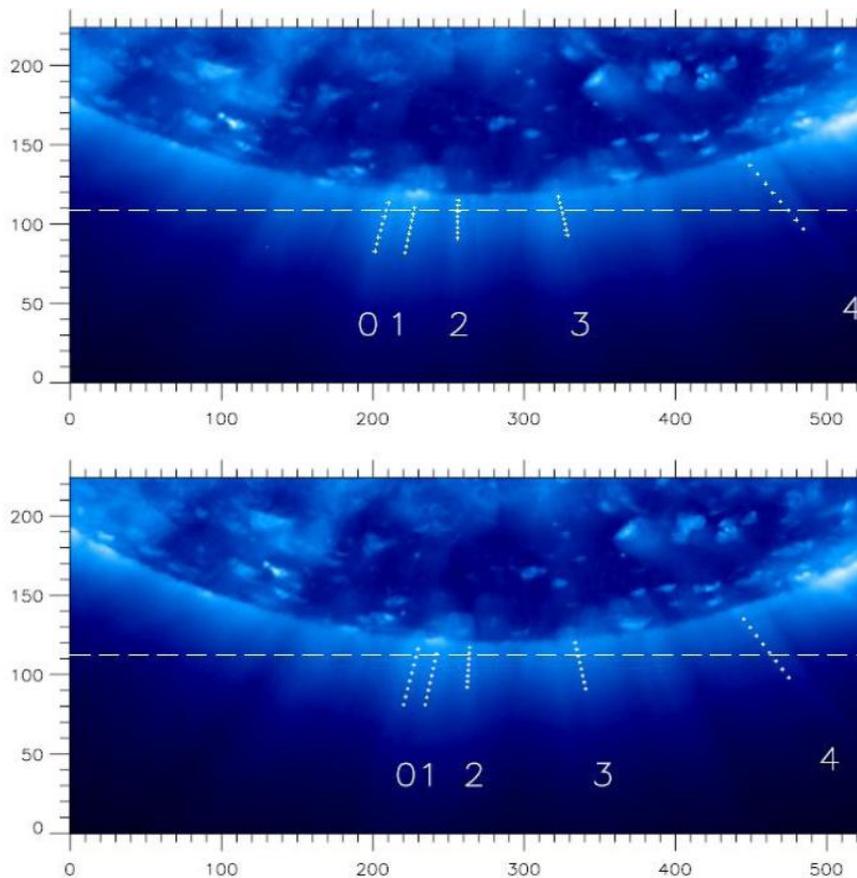


Abb. 3: EUV-Aufnahmen von polaren Plumes aus zwei Blickwinkeln mit den STEREO-Sonden (oben: STEREO-A, unten: STEREO-B). Polare Plumes kommen in polaren Koronalöchern vor. Die Aufnahmen wurden am 7. April 2007 im EUV (Wellenlänge 17.1 nm) gemacht.

*Fig. 3: Observations of polar plumes with the SECCHI instrument on the STEREO spacecraft A (top) and B (bottom). Polar plumes originate in polar coronal holes. The observations have been taken 2007 April 7 in EUV at wavelength 17.1 nm.*

### Ausgewählte Veröffentlichungen

#### *Selected publications*

DeRosa, M. L. , C. J. Schrijver, G. Barnes, et al.: A Critical Assessment of Nonlinear Force-Free Field Modeling of the Solar Corona for Active Region 10953. *Astrophys. J.* 696, 1780–1791 (2009), doi:10.1088/0004-637X/696/2/1780.

Feng, L., B. Inhester, S. K. Solanki, et al.: Stereoscopic polar plume reconstructions from STEREO/SECCHI images. *Astrophys. J.* 700, 292–301 (2009), doi:10.1088/0004-637X/700/1/292.

Tadesse, T. Wiegmann, B. Inhester, and A. Pevtsov. Nonlinear force-free field extrapolation in spherical geometry: improved boundary data treatment applied to a SOLIS/VSM vector magnetogram. *Astron. & Astrophys.* 527, 1–7 (2011), doi:10.1051/0004-6361/201015491.

Thalmann J. K.: Evolution of coronal magnetic fields. Doktorarbeit, Technische Universität Braunschweig, Berlin (2010).

Wiegmann, T., S. K. Solanki, J. M. Borrero, et al.: Magnetic Loops in the Quiet Sun. *Astrophys. J.* 723, L185–L189 (2010), doi:10.1088/2041-8205/723/2/L185.

### 1.3.5 Koronale Konvektion

#### Beobachtungen von Eruptionen und eingefangenen Plasma in der Korona

Die äußere Atmosphäre der Sonne, die Korona, besteht aus über eine Million K heißem ionisiertem Gas, einem Plasma. Dabei ist die Frage, warum die Korona über 100 Mal heißer ist als die Oberfläche, die Photosphäre, eines der großen Probleme der stellaren Astrophysik. In den unteren Bereichen der Korona, bis zu einigen Millionen km über der Oberfläche, findet ein kontinuierliches Recycling des Plasmas statt: von der Oberfläche wird Plasma eingeschossen, geheizt und steigt in die Korona auf. Der größte Teil kühlt und fällt zurück. Ein kleinerer Teil bleibt gefangen und formt Kondensationen von kühlerem Plasma, die Protuberanzen. Ein weiterer kleiner Teil wird nach außen als Sonnenwind beschleunigt. Das Verständnis dieses Recyclings ist ein Schlüssel, um zu verstehen, wie die die heiße Korona erzeugt und erhalten wird.

Die Struktur und Dynamik der Korona wird vom Magnetfeld kontrolliert, das in der Photosphäre verankert ist. Konvektive Bewegungen schwämmen Magnetfeld gemischter Polarität an die Oberfläche und konzentrieren es in einem netzwerkartigem Muster. Diese Supergranulation und die damit verbundenen Fußpunktbewegungen des Magnetfeldes führen zu Strömen und einer Erhöhung der Energie des Magnetfeldes in der Korona. Dissipation, d.h. Konversion von magnetischer Energie in thermische und kinetische Energie, führt zu Eruptionen auf allen beobachtbaren Skalen: komplexere Konfigurationen des Magnetfeldes sind dabei assoziiert mit größeren Eruptionen, bei denen eine große Menge koronaler Materials in den interplanetaren Raum geschleudert wird, den koronalen Massenauswürfen (coronal mass ejections, CMEs).

Kleine Eruptionen, Mini-CMEs, wurden erstmals in unserer Studie gefunden, in der wir die supergranularen Strömungen mit der Aktivität der unteren Korona verknüpften [Innes et al., 2009]. Hierbei kombinierten wir Beobachtungen im Extrem-Ultraviolett, die die

### 1.3.5 Coronal convection

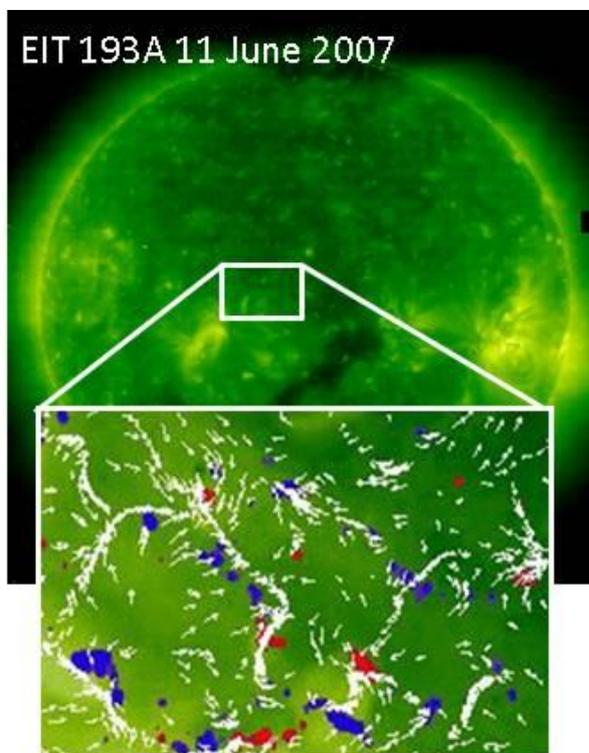
#### Observations of eruptions and trapping of plasma in the corona

*The solar corona, the outermost layer of the solar atmosphere, consists mainly of hot, million degree K, ionized gas (plasma). A long-standing problem in solar and stellar physics is to explain the existence of the corona above the much cooler photosphere, the visible surface of the Sun. In the lower corona which extends up to a few million km from the surface, plasma is being continuously recycled. It is injected from the surface, heated and rises up through the corona. The majority cools and falls back but some becomes trapped and forms condensations of cold plasma known as prominences. A small fraction continues outward as the solar wind. Understanding the structure of the lower corona is an important step to identifying the processes maintaining the hot solar corona.*

*The coronal dynamics and its structure is controlled by the magnetic field which is rooted in the photosphere. Convective motions below the surface sweep up small concentrations of mixed polarity field into a distinctive network pattern known as supergranulation. Magnetic bipoles emerge with the convective flow at the cell centers and then are swept separately to the boundaries and junctions of the cells. The flux emergence and footpoint motion builds up electric current and magnetic energy in the corona. Dissipation and the conversion of magnetic free energy into thermal and kinetic energy leads to eruptions on all scales: larger eruptions are associated with larger, more complicated configurations of the magnetic field.*

*Small eruptions, looking like small versions of CMEs (coronal mass ejections, i.e. massive outbursts of coronal plasma into space) were first reported in our study connecting supergranular convective flows with activity seen in images of the lower corona [Innes et*

koronale Dynamik zeigen, mit Messungen der Geschwindigkeit und des Magnetfeldes in der photosphärischen Supergranulation (siehe Abb. 1). Man sieht Gebiete starken Magnetfeldes, die an den Grenzen und Kreuzungen des supergranularen Netzwerkes zusammengetragen werden, wo die meisten Eruptionen zu finden sind. Die stärksten Ereignisse werden durch konvergente rotierende Strömungen in magnetisch bipolaren Gebieten ausgelöst. Einige Ereignisse zeigen Wellen, die sich mit etwa 100 km/s über etwa 80 Mm ausbreiten. Die Entstehungsrate beträgt etwa 1000 Ereignisse pro Tag auf der ganzen Sonne.



*al., 2009]. In this work we combined series of extreme ultraviolet images to capture the coronal dynamics at high spatial and temporal resolution with measurements of supergranular flows and the photospheric magnetic field. The region studied is shown in Fig. 1. Here one sees patches of magnetic field connected by supergranular flows that accumulate along the network cell boundaries and junctions. The study revealed that eruptions occur pre-dominantly at the junctions of supergranular cells. The strongest eruptions seemed to be activated by converging and rotating flows twisting small concentrations of opposite polarity magnetic field. The occurrence rate of the small eruptions is about 1000 per day over the whole Sun. Some are associated with waves that travel with speeds up to 100 km/s over a distance of up to 80 Mm.*

Abb. 1: Supergranulare Strömungen konzentrieren Magnetfeld in Kreuzungen des Netzwerkes. Das Bild im Hintergrund zeigt die diffuse koronale Emission. Strömungen sind durch weiße Pfeile gekennzeichnet. Wo viele Pfeile zu sehen sind, ist die Strömung konvergent. Magnetfeldkonzentrationen sind rot/blau gekennzeichnet für Feldstärken über +/- 40 G.

*Fig. 1: Supergranular flows sweep up magnetic concentrations to the network junctions. The background image shows the diffuse coronal emission. Flows are represented by white arrows. They accumulate where the arrow density is highest. Magnetic field concentrations are indicated by blue/red patches where the field is greater/less than +/-40 G.*

Die Restrukturierung der Korona beim Einsetzen der Eruption wurde durch Beobachtungen in Quadratur untersucht [Innes et al., 2010]: Die STEREO-Mission besteht aus zwei identischen Observatorien, die die Sonne umkreisen, eines etwas schneller, eines etwas langsamer als die Erde. Wir haben diese Beobachtungen durchgeführt, als die Raumfahrzeuge im rechten Winkel bezogen auf die Sonne standen. Ein Observatorium beobachtete die koronale Emission von einem Million K heißem Plasma in einem 171Å-Filter in der Mitte der Sonnenscheibe, das andere 30 Mal kühleres Plasma an gleicher Stelle am Sonnenrand in Protuberanzen und der Chromosphäre (der Schicht unter der Korona) in einem 304 Å -Filter. Dadurch konnten wir gleichzeitig die horizontale Ausbreitung (in Scheiben-

*The restructuring of the corona during the onset of eruptions was investigated using unique STEREO quadrature observations [Innes et al., 2010]. The STEREO mission consists of two spacecraft with identical instruments suites that are orbiting the Sun - one slightly faster and the other slightly slower than Earth. In our study one STEREO spacecraft was 45° ahead of the Earth taking images of the lower corona through the 171Å filter and the other spacecraft was 45° behind taking images of the about 30 times cooler and denser plasma in prominences and in the chromosphere (the atmospheric layer below the corona) through the 304 Å filter. Thus we were able to simultaneously observe the on-disk lateral extent registered as an intensity decrease at 171Å, and the off-*

mitte) als auch die vertikale Entwicklung (am Rand mit dem anderen Observatorium) des gleichen Ereignisses vermessen. Abbildung 2 zeigt eine solche Eruption, die mit einer Abdunkelung der Korona beginnt, der eine kleine aufgehellte Front vorangeht, die außerhalb des ausbrechenden chromosphärischen Materials liegt. Dies zeigt, dass das Öffnen des koronalen Magnetfeldes der erste Schritt für den Ausbruch ist. Wir haben auch ähnliche Effekte bei neu auftauchendem magnetischem Fluss gesehen [Genetelli & Innes, 2011].

Um den Verbleib des ausgeworfenen Materials zu untersuchen, benutzten wir ebenfalls STEREO-Beobachtungen in Quadratur. Während der Beobachtung der Eruptionen im 171Å-Filter in Scheibenmitte mit dem einen Observatorium wurden mit dem anderen am Rand die gleichen Eruptionen untersucht [Innes et al., 2010b].

*limb height of chromospheric eruptions in the 304Å images. The eruptions, as illustrated in Fig. 2, start with a coronal dimming preceded by a faint bright front that lies just outside the erupting chromospheric material. This shows that the opening of the coronal magnetic field is an important step in getting material from the chromosphere into the corona. We have recently seen a similar effect at the onset of flux emergence [Genetelli & Innes, 2011].*

*To answer the question of where the ejected plasma goes we again made use of STEREO quadrature observations. The eruptions were observed at disk center through the 171Å filter of one spacecraft while the other spacecraft observed the corresponding coronal variations off the limb [Innes et al., 2010b].*

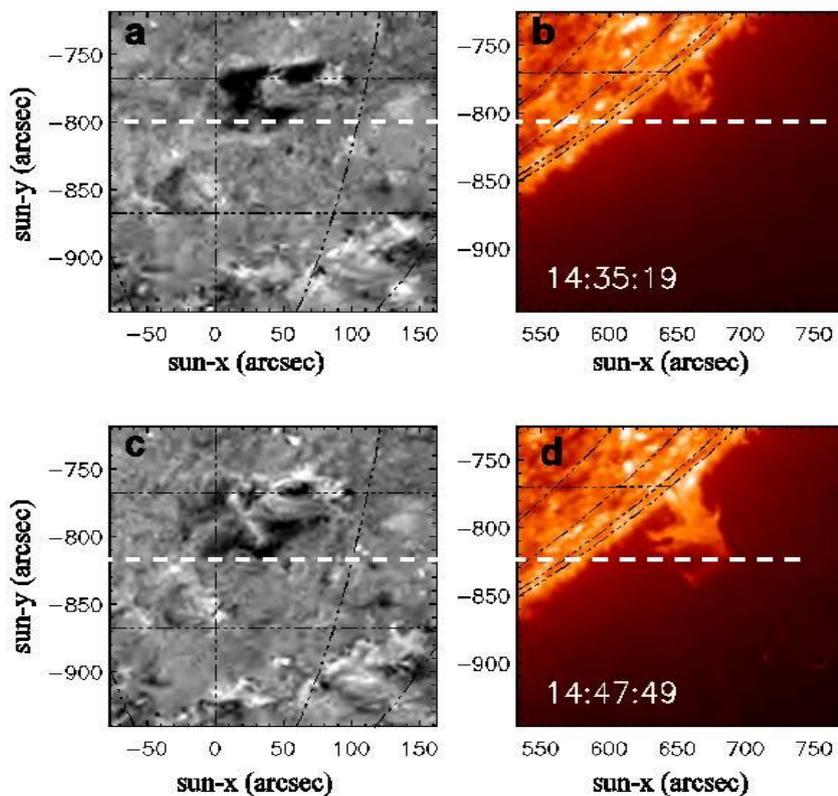


Abb. 2: Beobachtungen in Quadratur einer Eruption in Bereichen ruhiger Sonne. Beobachtung der gleichen Region zur gleichen Zeit mit den STEREO Observatorien, einmal in Scheibenmitte (171 Å, links), einmal am Rand (304 Å, rechts). Gleiche Strukturen befinden sich bei gleicher sun-y-Koordinate. Beim Start des Ausbruchs (obere Reihe) ist die Front der Abdunkelung in 171 Å wenige arcsec außerhalb des Ausbruchs am Rand in 304Å.

*Fig. 2: Quadrature observations of a quiet Sun eruption. STEREO-Ahead 171 Å (left) and simultaneous STEREO-Behind 304 Å (right) intensity images. The limb in the STEREO-B images is at disk center in the STEREO-A images. The images are aligned so that features in the limb and disk center images are at the same sun-y. At onset (top row) the bright edge of the 171 Å dimming is a few arcsec outside the eruption on the limb.*

Abb. 3 zeigt die klare Beziehung des heißen koronalen Plasmas (171Å, blau) zum kühlen chromosphärischen Plasma (304Å, rot). Die "Hörner" entstehen, wenn kühlendes Plasma entlang des Randes der Kavität

*Fig. 3 shows that off-limb the structure of the corona and the relationship between the hotter coronal plasma, emitting at 171Å (blue), and the cooler chromospheric plasma, emitting at 304Å (red), is very*

nach unten fällt. In Scheibenmitte, wo die gleiche Struktur von oben zu sehen ist, sind Kavität und darunter liegende Protuberanz als leichte Abdunkelung zu erkennen (mit "filament?" gekennzeichnet). Dies Bild ändert sich kaum, während die Struktur kühlt. Stattdessen stechen kleine Aufhellungen hervor ("bright points"), die am Rand als Wald von kleinen Eruptionen zu sehen sind, den Spikulen. Nur selten sieht man Eruptionen, die so groß sind, wie die in Abb. 2 gezeigten. Dies zeigt, wie wichtig gleichzeitige Beobachtungen am Rand und in der Mitte der Sonnenscheibe sind, um das Recycling des koronalen Plasmas zu verstehen.

*clear. The 'horns' lying along the edge of the cavity are created when cooling coronal plasma falls along the edge of the cavity. In the disk center image, the cavity and underlying cool prominence are seen as a subtle darkening, marked filament?, when viewed from above. The on-disk images barely change as the corona cools. Instead ones attention is caught by many small flickering bright points which in the off-limb images merge and create a forest of small eruptions along the limb, known as spicules. Only occasionally does one see eruptions the size of the one shown in Fig. 2. These observations show the importance of using simultaneous disk and limb views together with multiple filters to capture the recycling of plasma and the structure of the solar corona.*

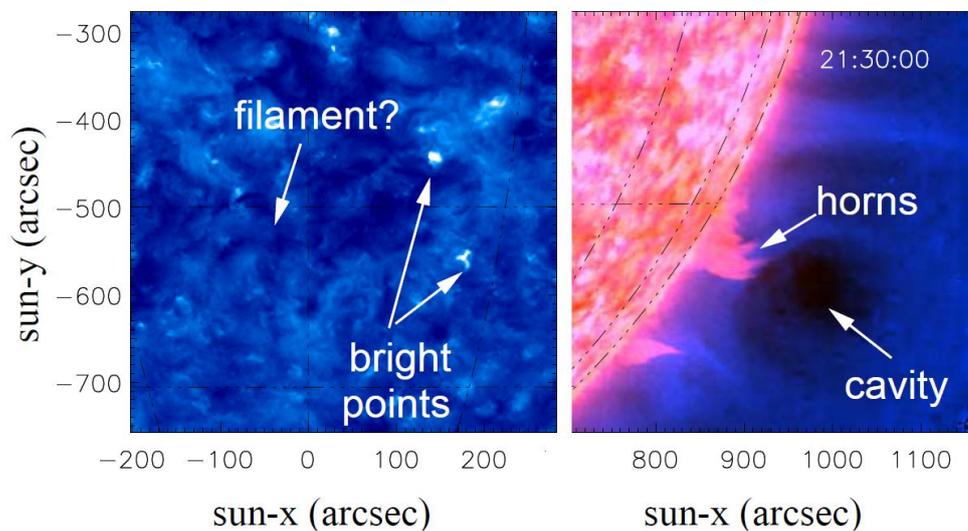


Abb. 3: Quadratur-Beobachtung von STEREO-A (171Å, links) und STEREO-B (171/304Å überlagert, rechts) einer kühlen Protuberanz in der Korona. Blau zeigt die koronale 171Å-Emission und rot die chromosphärische 304Å-Emission.

*Fig. 3: STEREO-Ahead 171Å (left) and STEREO-Behind 171-304Å composite (right) images of cool structures (prominences) in the corona. The blue color represents the lower coronal 171Å emission and the red the chromospheric 304Å emission.*

Die Beobachtungsbedingungen sind derzeit besonders günstig, da die beiden STEREO-Observatorien etwa  $\pm 90^\circ$  zur Erde-Sonne-Linie stehen, während das kürzlich gestartete Solar Dynamics Observatory (SDO) gleichzeitig einen umfassenden Überblick über die Korona, das photosphärische Magnetfeld und supergranuläre Strömungen vom Erdborbit aus liefert. Das lässt uns viele neue Erkenntnisse zum Recycling von koronalem Material erwarten.

### 3D-MHD-Modelle koronaler Konvektion und des Recyclings von koronalem Plasma

Parallel zu den Beobachtungen untersuchen wir das Recycling von koronalem Material durch geeignete Modelle. Hierzu führen wir numerische Experimente basierend auf Modellen zur 3D-MHD (Magnetohydrodynamik) durch, inklusive dem Massenaustausch von

*Now is the perfect time for quadrature observations because the STEREO spacecraft are at roughly  $\pm 90^\circ$  to the Earth-Sun line and the recently launched Solar Dynamics Observatory (SDO) is giving a comprehensive view of the corona, photospheric magnetic field and supergranular flows from low Earth orbit. We are looking forward to many new insights in the near future.*

### 3D MHD modeling of coronal convection and the recycling of coronal plasma

*Parallel to observational efforts to investigate the recycling of coronal material we model the relevant processes. To achieve this we run 3D magnetohydrodynamic (MHD) models of the solar corona which account for the exchange of mass between the chromo-*

Chromosphäre und Korona. Bisher sind diese Modelle auf kleine aktive Regionen beschränkt.

In diesen Modellen treiben horizontale Bewegungen der Konvektion in der Photosphäre das Magnetfeld. Hierdurch werden in der Korona Ströme induziert, die dissipiert werden und so das Plasma heizen. Um die koronale Emission aus den Modellen zu synthetisieren, muss man neben der Massen- und Impulserhaltung auch die Energieerhaltung lösen. Besondere Beachtung gilt den Strahlungsverlusten und der Wärmeleitung entlang des Magnetfeldes, da diese wichtig für den sich einstellenden Druck sind. Um die beschreibenden Gleichungen zu lösen, benutzen wir den Pencil-Code, einen Finite-Differenzen-Code höherer Ordnung, um 3D-MHD-Probleme zu lösen.

Die zufälligen Bewegungen in der Photosphäre und die Strukturierung des Magnetfeldes führen zu einer koronalen Heizung, die räumlich und zeitlich hoch variabel ist. Dies ist in Abb. 4 dargestellt, die die (normalisierte) Heizrate in einem vertikalen Schnitt durch das dreidimensionale koronale Volumen zeigt [Bingert & Peter, 2011]. Man sieht hier ausgedehnte Gebiete mit starker Heizung sowie kleine Streifen mit lokal erhöhter Heizrate. Diese filamentartigen Strukturen folgen dem Magnetfeld. Die Situation in Abb. 4 ist nur eine Momentaufnahme— die Stromschichten entwickeln sich sehr schnell im Laufe der Zeit.

*sphere and the corona. So far these models are applicable only to the processes related to small active regions.*

*In these models horizontal convective motions in the photosphere drive the magnetic field. This induces currents in the corona that are dissipated by Ohmic dissipation and consequently heat the corona. In order to properly synthesize the coronal emission from the numerical experiments, we have to solve not only the mass and momentum balance along with the induction equation. Special care has to be taken of the energy balance including heat conduction along the magnetic field and radiative losses, which together basically set the coronal pressure. To solve the governing equations we employ the Pencil Code, a modular high-order finite-differences code to solve 3D MHD problems.*

*The stochastic nature of the photospheric driver and the fine spatial structuring of the magnetic field lead to a coronal heat input that is highly intermittent in time and space. This is illustrated by Fig. 4 which shows the (normalized) heating rate in a narrow vertical slab of the 3D coronal volume [Bingert & Peter, 2011]. Here one can see large regions of strong heating as well as small stripes of (locally) enhanced heating. These filamentary structures follow the magnetic field lines. The heating rate shown in Fig. 4 is only a single snapshot — the filamentary current sheets are evolving rapidly.*

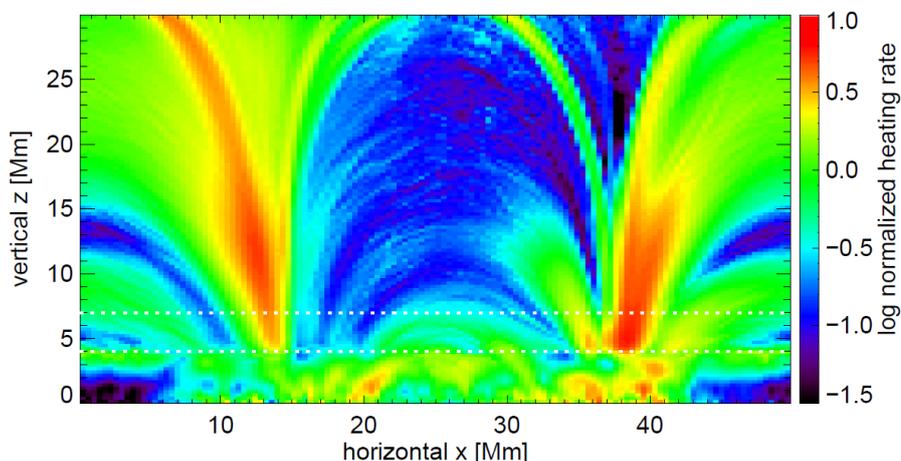


Abb. 4: Heizrate im 3D-MHD-Modell der Korona. Gezeigt ist ein vertikaler Schnitt über den beiden Hauptpolaritäten (bei 13Mm und 38Mm in x- Richtung). Der mittlere exponentielle Abfall mit der Höhe ist abgezogen, um Details in allen Höhen zu zeigen. Die Heizung ist konzentriert in blattartigen Strukturen, die am Magnetfeld ausgerichtet sind.

*Fig. 4: Heating rate in a 3D MHD coronal model. Shown is a vertical slab above the main polarities of an active region (near 13Mm and 38Mm in the x direction). The average vertical exponential drop was subtracted to show details at all heights. The heating rate is concentrated in sheet-like structures aligned with the magnetic field.*

Die räumliche und zeitliche Verteilung der Heizrate erzeugt eine von Bögen dominierte Korona, ähnlich wie man sie in Beobachtungen im Extrem-Ultraviolett

*The spatial and temporal distribution of the heating rate in our models produces a loop-dominated corona, similar to what is found in extreme UV observa-*

(EUV) sieht. Am unteren Rand unserer Box starten wir mit einer Verteilung des Magnetfeldes, die einer Beobachtung entnommen wurde. Aus der numerischen Simulation synthetisieren wir dann die zu erwartende koronale Emission. Diese zeigt eine Vielzahl von koronalen Bögen, die die Hauptpolaritäten verbinden, wie in Abb. 5 zu sehen [Peter et al., 2011].

*At the lower boundary we start with a distribution of the magnetic field as found in photospheric observations, e.g. of an active region, run the 3D MHD model and synthesize the resulting coronal emission. This shows a multitude of coronal loops connecting the main polarities, as shown in Fig. 5 [Peter et al., 2011].*

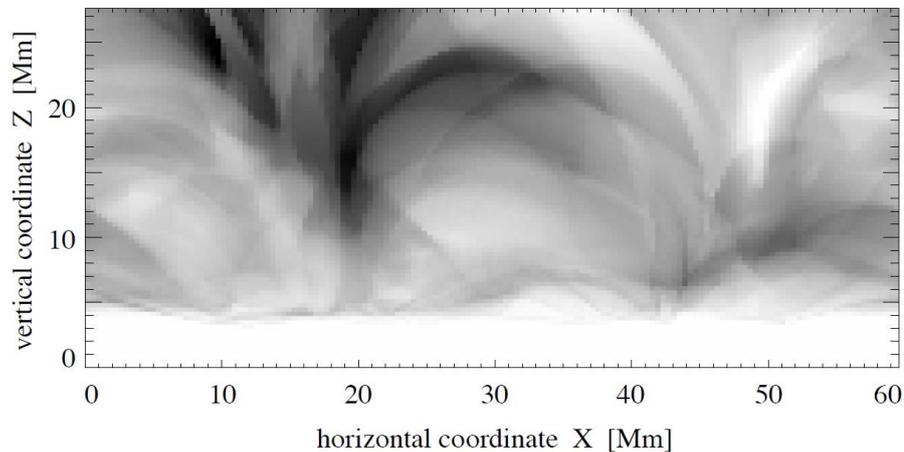


Abb. 5: Synthetisierte koronale Emission aus dem 3DMHD-Modell. Gezeigt ist die Emission integriert entlang der Y-Richtung durch die ganze Box (Seitenansicht, schwarz zeigt helle Strukturen). Dies entspricht dem, was man in Bildern bei  $171\text{\AA}$  am Sonnenrand sieht, z.B. mit AIA-Instrument auf SDO.

*Fig. 5: Synthesized coronal emission from a 3D MHD model. Shown is the emission integrated horizontally in the Y-direction, through the whole computational domain (side view, negative image) similar to what would be seen in images at  $171\text{\AA}$  at the limb as they are provided by the AIA instrument of SDO.*

Als besonderes Merkmal kann dieses Modell die beobachteten mittlere Doppler-Verschiebungen reproduzieren, d.h. das entlang der Sichtlinie integrierte Geschwindigkeitsfeld [Zacharias et al., 2011a]. Des Weiteren zeigen die räumlichen Strukturen in den aus dem MHD-Modell synthetisierten Doppler-Karten (Abb. 6) typische Merkmale, wie man sie auch in Beobachtungen von aktiven Regionen findet, z.B. Siphon-Strömungen, bei denen Material an einem Fußpunkt in den Bogen strömt und am anderen wieder hinaus, oder ein Entleeren des Bogens durch an beiden Fußpunkten nach unten fallendes Plasma [Peter, 2010]. Die Übereinstimmung von räumlicher Struktur der EUV-Emission und der Doppler-Verschiebungen zeigt, dass die 3D-MHD-Modelle im Wesentlichen die richtige räumliche und zeitliche Verteilung der Heizrate erzeugen. Dadurch ergibt sich die beobachtete Dynamik des koronalen Plasmas auf Längenskalen von einigen 100 km bis zur Größe einer aktiven Region.

Durch die fortwährende Evaporation und Entleerung der koronalen Bögen zeigen die Modelle ein kontinuierliches Recycling von koronalem Plasma auf den im Modell beschriebenen zeitlichen und räumlichen Skalen.

*More importantly, the model also successfully reproduces the Doppler shifts (i.e. integrate line-of-sight velocity field) as found in the corona and the transition region between the chromosphere and corona [Zacharias et al., 2011a]. Furthermore, the spatial structures found in the coronal Doppler maps synthesized from the MHD model (Fig. 6) show typical features as found in real active region observations such as siphon flows characterized by an upflow at one footpoint and downflow at the other and loop draining characterized by plasma falling down to both footpoints [Peter, 2010]. The match of the spatial structuring in EUV emission and in Doppler shift patterns shows that the 3D MHD models can to a large part properly describe the spatial and temporal distribution of the heat input and produce the correct dynamics of the coronal plasma, on length scales from several 100 km to the size of an active region.*

*With the constant evaporation (rising) of chromospheric plasma on some field lines and draining (falling) of cooling plasma on others, the models show a continuous recycling of coronal plasma, at least on the temporal and spatial scales resolved in the numerical experiments.*

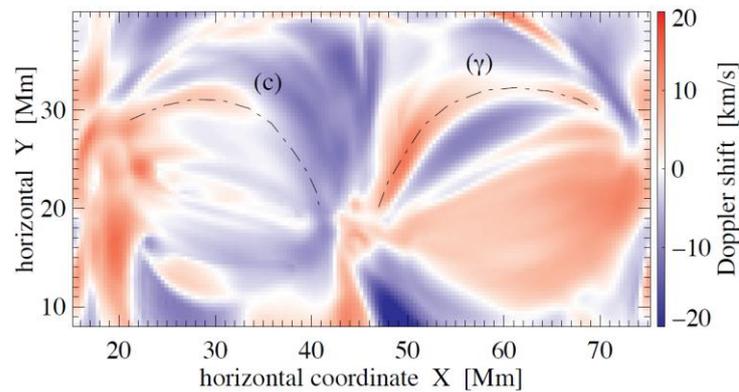


Abb. 6: Blick von oben auf eine aktive Region im 3DMHD- Modell. Gezeigt ist die Doppler-Karte berechnet aus der synthetisierten koronalen Spektrallinie von Mg X bei  $625 \text{ \AA}$ , die bei  $10^6 \text{ K}$  entsteht. Strömungen entlang von Bögen (c) und sich entleerende Bögen ( $\gamma$ ) sind deutlich sichtbar für zwei Fälle, bei denen die Hauptpolaritäten verbunden werden.

*Fig. 6: View of an active region from straight above synthesized from a 3D MHD model. This shows the Doppler shift in the coronal spectral line emitted by Mg X at  $625 \text{ \AA}$  formed just above  $10^6 \text{ K}$ . Loop flows (c) and draining plasma  $\gamma$ ) can be seen along two selected loops (dashed lines) connecting the main polarities.*

Trotz dieser guten Übereinstimmung von Modell und Beobachtung sind noch viele Fragen offen. So zeigen Beobachtungen, dass Protuberanzen und Kavitäten (Fig. 3) ein integraler Bestandteil der Korona sind. Diese sind aber genauso wie z.B. Spikulen (noch) nicht in den Modellen beschrieben. Teils ist dies durch die in den Modellen zur Vermeidung von numerischen Instabilitäten benötigte hohe Dämpfung verursacht — eine Beschränkung, die in Zukunft vielleicht umgangen werden kann.

*Despite the good match of model and active region observations, as of yet there are numerous unresolved issues. For example the observations show that prominences and coronal cavities (Fig. 3) are an integral part of the quiet Sun coronal structure. These, as well as spicules, are not (yet) in the 3D models. In part this is due to the high damping required in the numerical experiments to avoid extremes that cannot be handled by the numerical scheme — a restriction that hopefully will be overcome in the future.*

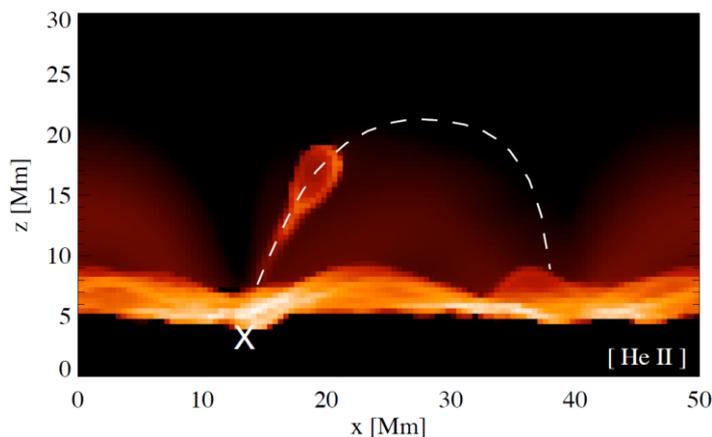


Abb. 7: Auswurf von kühlem Plasma in die Korona. In Folge einer kurzen starken Heizperiode bei x wird in einem explosionsartigen Prozess Plasma im Wesentlichen ballistisch nach oben geworfen. Die Blase mit kühlem Plasma folgt grob den Feldlinien und fällt auf der anderen Seite herunter. Ihre Trajektorie ist durch die gestrichelte Linie gezeigt. Dies synthetisierte Bild zeigt, was AIA/SDO am Sonnenrand in  $304 \text{ \AA}$  Filtergrammen sehen würde, die von He II Emission dominiert werden.

*Fig. 7: Ejection of cool plasma into the corona. Following a short pulse of strong heating (near x) in an explosion-like event plasma is ejected into the corona, basically in a ballistic fashion. The blob of cool gas roughly follows the magnetic field lines and then falls down on the other side. Its trajectory is indicated by the dashed line. The synthesized image shows what AIA/SDO would see at the limb in the  $304 \text{ \AA}$  channel dominated by He II.*

Einige numerische Experimente zeigen explosionsartige Auswürfe von Plasma in die Korona (Abb. 7), die

*Some numerical experiments show ballistic ejections of cool gas into the corona (Fig. 7) which is driven by*

von kurzen Pulsen sehr hoher Heizung verursacht werden [Zacharias et al., 2011b]. In zukünftigen numerischen Experimenten, die noch stärkere Störungen des Magnetfeldes erlauben, könnten sich diese Ereignisse zu den beobachteten Mini-CMEs entwickeln.

*an explosion-like short pulse of very strong heating [Zacharias et al., 2011b]. In future numerical experiments allowing for more violent disruptions of the magnetic field, these might develop into the mini-CMEs found in observations.*

### Ausgewählte Veröffentlichungen

#### *Selected publications*

Genetelli, A. and D. E. Innes: Evolution of coronal emission during flux emergence. In: 4th SOLAIRE Network Meeting EGU (2011), in press

Innes, D., S. McIntosh, and A. Pietarila: STEREO quadrature observations of mass flows in prominences. In: Proceedings of the 38th COSPAR Scientific Assembly, vol. 38, p. 2917 (2010).

Innes, D. E., A. Genetelli, R. Attie, and H. E. Potts: Quiet Sun mini-coronal mass ejections activated by supergranular flows. *Astron. & Astrophys.* 495, 319 (2009), doi:10.1051/0004-6361/200811011.

Innes, D. E., S. W. McIntosh, and A. Pietarila: STEREO quadrature observations of coronal dimming at the onset of mini-CMEs. *Astron. & Astrophys.* 517, L7 (2010b), doi:10.1051/0004-6361/201014366.

Bingert, S. and H. Peter: Intermittent heating in the solar corona employing a 3D MHD model. *Astron. & Astrophys.* 530, 112–124 (2011), doi:10.1051/0004-6361/201016019.

Peter, H.: Asymmetries of solar coronal extreme ultraviolet emission lines. *Astron. & Astrophys.* 521, A51 (2010), doi:10.1051/0004-6361/201014433.

Peter, H., S. Bingert, P. Zacharias, and B. Gudiksen: The nature of loops in the hot atmospheres of cool stars. *Astron. & Astrophys.* (2011), submitted for publication.

Zacharias, P., H. Peter, and S. Bingert: Investigation of mass flows in the transition region and corona in a three-dimensional numerical model approach. *Astron. & Astrophys.* 531, A97 (2011a), doi:10.1051/0004-6361/201016047.

Zacharias, P., H. Peter, and S. Bingert: Ejection of cool plasma into the hot corona. *Astron. & Astrophys.* 532, A112 (2011b), doi:10.1051/0004-6361/201116708.

### 1.3.6 Erstbeobachtung des echten Lyman- $\alpha$ Linienprofils

Die Lyman- $\alpha$  Linie des neutralen Wasserstoffs überstrahlt alle anderen Emissionslinien der Sonne. Die Linien der Lyman-Serie entstehen bei Resonanzübergängen aus angeregten Zuständen in den Grundzustand von Ein-Elektronen Systemen. Die Lyman- $\alpha$  Linie des Wasserstoffs ( $\lambda$  121.6nm) – der Übergang aus dem ersten angeregten Zustand in den Grundzustand – ist in der Sonnenatmosphäre der Hauptträger beim Energietransport durch Strahlung. Die Linie fällt in den Messbereich des SUMER Spektrographen auf der Raumsonde Solar and Heliospheric Observatory (SoHO). Das Instrument Solar Ultraviolet Measurements of Emitted Radiation (SUMER) entstand am MPS mit Beistellungen eines internationalen Konsortiums. Es misst im Wellenlängenbereich von ca. 66nm bis ca. 161nm. Die Lyman- $\alpha$  Linie ist jedoch viel zu hell für den empfindlichen SUMER Detektor und Überbelichtungen mussten unbedingt vermieden werden. Erst nach 13 Betriebsjahren fand das SUMER-Team in 2008 einen Trick, Lyman- $\alpha$  mit 'blinzeln den Augen' zu beobachten, indem die Eingangsapertur nur teilweise geöffnet wurde. Durch diese unkonventionelle Methode konnten erstmals hochaufgelöste Spektren der Linie aufgenommen werden – frei von Absorption durch Wasserstoff in der höheren Erdatmosphäre. Zuvor wurden solche Spektren von erdnahen Satelliten aufgenommen. SoHO ist die erste Raumsonde, die mit hochauflösenden Instrumenten zur Sonnenbeobachtung an Bord am Lagrange-Punkt L1 stationiert wurde. Am L1 heben sich die Anziehungskräfte von Erde und Sonne sowie die Fliehkraft des Orbits gegenseitig auf. Hier, im Abstand von 1,5 Millionen Kilometern von der Erde, sind die Effekte des geokoronalen Wasserstoffs vernachlässigbar. Diese einzigartigen Daten führten zu einer Vielzahl von neuen, faszinierenden Resultaten.

In einer Spektrallinie tragen alle Photonen die zum Atomübergang gehörige Energie. Die Unschärfe der Energie ist sehr klein, die Linienverbreiterung erfolgt im Wesentlichen durch die physikalischen Gegebenheiten am Entstehungsort und führt in der Regel zu einem symmetrischen, gaußförmigen Profil. Die Lyman-Linien des Wasserstoffs sind jedoch durch Selbstumkehr gekennzeichnet. Wegen der hohen Wasserstoffdichte werden die Photonen auf dem Weg vom Entstehungsort zum Beobachter vielfach absorbiert und re-emittiert. Dieser Absorptionsvorgang bewirkt, dass die Spektrallinie in der Mitte einbricht und zwei Spitzen hinterlässt. Alle Lyman-Linien zeigen Selbstumkehr, am stärksten die  $\alpha$ -Linie der Serie. Erstaunlicherweise tritt die Selbstumkehr aber nicht genau in der Linienmitte auf. Statistisch gesehen überragt die kurzwellige Spitze die langwellige signifikant. Bei allen anderen Lyman-Linien ist dieser Effekt entge-

### 1.3.6 First view of the genuine solar Lyman- $\alpha$ line profile

*The Lyman- $\alpha$  line from neutral hydrogen outshines all other emission lines of the Sun. Lines of the Lyman series emanate from resonance transitions between the ground and excited levels of single-electron atoms. The Lyman- $\alpha$  line of hydrogen ( $\lambda$  121.6 nm) – the transition from the first excited level into the ground level – is the prime vehicle for radiative energy transport in the solar atmosphere. It emits in the wavelength range of the SUMER spectrograph onboard the Solar and Heliospheric Observatory (SoHO). Solar Ultraviolet Measurements of Emitted Radiation (SUMER) was built at MPS with contributions from an international consortium. The instrument covers the wavelength range from approx. 66 nm to approx. 161 nm. The Lyman- $\alpha$  line is, however, far too strong for the sensitive SUMER detector and, blinded by its brightness, the SUMER instrument did not dare look at it. After 13 years of its operation, the SUMER team found a trick in 2008 to observe it with 'twinkling eyes' by partly closing the door of the instrument aperture. Such unconventional high-resolution observations – not hampered by absorption of hydrogen present in the extended Earth atmosphere – had never been accomplished before. In fact, earlier spectroscopic observations of this line were obtained from satellites in low Earth orbit. SoHO is the first space probe with high-resolution solar instrumentation that is stationed near the first Lagrangian point, L1, where the gravitational forces of Sun and Earth and the centrifugal force of the orbit compensate to zero. Here, at a distance of 1.5 million kilometers away from Earth, effects of geocoronal hydrogen are negligible. These observations have provided a rich source of data and fascinating new results.*

*The photons of a spectral line carry the energy released by the associated atomic transition. The uncertainty of the energy release is very small, but the physical conditions of the emitting gas broaden the initially sharp line profile and normally give it a symmetric Gaussian shape. Unlike most other solar UV emission lines, the hydrogen Lyman lines are self-reversed because of opacity effects. The solar light emitted by hydrogen cannot directly reach the observer. The density of hydrogen atoms is so high that any emitted photon will be absorbed and re-emitted many times before it can leave the Sun. This absorption effect causes a central depression instead of a peak in the line profile, e.g., all spectral lines of hydrogen are self-reversed. The strongest absorption is found in the alpha line of the Lyman series. As an unexpected result, we have found statistically that the strongly self-reversed spectral line profile of Lyman- $\alpha$*

gegengesetzt (siehe Abb. 2). Diese Beobachtungen dienen dazu, den Einfluss von Strömungen und magnetischen Strukturen auf das Linienprofil zu untersuchen.

*is asymmetric so that the peak on the blue side of the central reversal is stronger, oppositely to all the other self-reversed lines of the Lyman series (cf., Fig. 2). Using this, we have investigated the effects of down-flows and of the magnetic network on Lyman line profiles.*

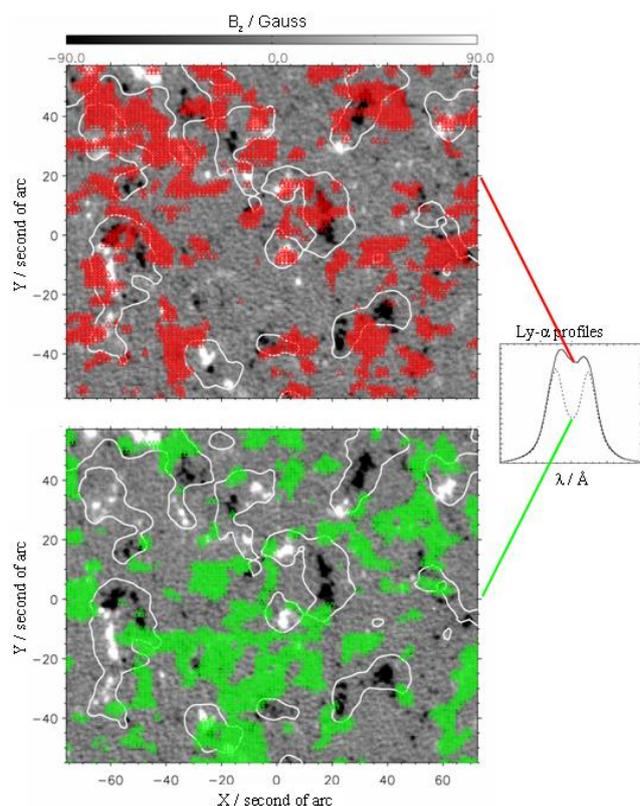


Abb. 1: Konturen großer Lyman- $\alpha$  Helligkeit (weiß) umfassen im Magnetogramm die hellen und dunklen Stellen mit starken Magnetfeldern, die das magnetische Netzwerk ausmachen. Die Lyman- $\alpha$  Profile der in diesem Gebiet aufgenommenen Spektren wurden nach der Tiefe der Selbstumkehr sortiert. 25% der extremen Fälle sind rot, bzw. grün markiert. Offensichtlich häufen sich flache Profile im Netzwerk und Profile mit starker Linienumkehr im inneren Bereich. Das deutet auf eine geringere Dichte über dem Netzwerk hin. Eine noch stärkere Linienumkehr weisen Spektren aus Koronalöchern auf.

*Fig. 1: Magnetograms in grey, overlaid with Lyman- $\alpha$  brightness contours (white) that nicely outline the magnetic network. Lyman- $\alpha$  spectra obtained all across the area shown in the figure are sorted by the depth of the self-reversal of their profile and 25% of the extreme cases are shown in red and green. Obviously self-reversed profiles cluster in the cell interior and flat profiles in the network. This suggests a lower density above the magnetic network as compared to the low-lying loops in the cell interior. The deepest self-reversals (or highest opacities) have been found in coronal hole spectra.*

### Das magnetische Netzwerk

In der Chromosphäre, der Schicht zwischen der sichtbaren Oberfläche und der heißeren äußeren Schicht, der Korona, ordnen sich Stellen mit erhöhtem Magnetfeld (schwarz oder weiß in Abb. 1) zu Strukturen an, die wie ein Netzwerk rundliche Zellen umfassen. Hier treten Magnetbögen aus dem Inneren der Sonne hervor, die sich trichterförmig aufweiten. Das Zellinnere ist mit kleinen, flach liegenden Bögen angefüllt und nicht so hell wie das Netzwerk.

Abb.1 ist zusammengesetzt aus einem Magnetogramm (eine Karte des Magnetfeldes) aufgenommen vom Michelson Doppler Imager (MDI) Instrument auf SoHO und Informationen aus SUMER Spektren, aufgenommen als Raster im Licht von Lyman- $\alpha$ . Die Konturen erhöhter Lyman- $\alpha$  Helligkeit zeichnen das magnetische Netzwerk nach. Alle Spektren wurden nach der Tiefe ihrer Selbstumkehr sortiert und die extremen Quartile – Fälle mit besonders flachem Profil oder besonders tiefer Selbstumkehr – rot, bzw. grün markiert (siehe Abb. 1). Offensichtlich häufen sich

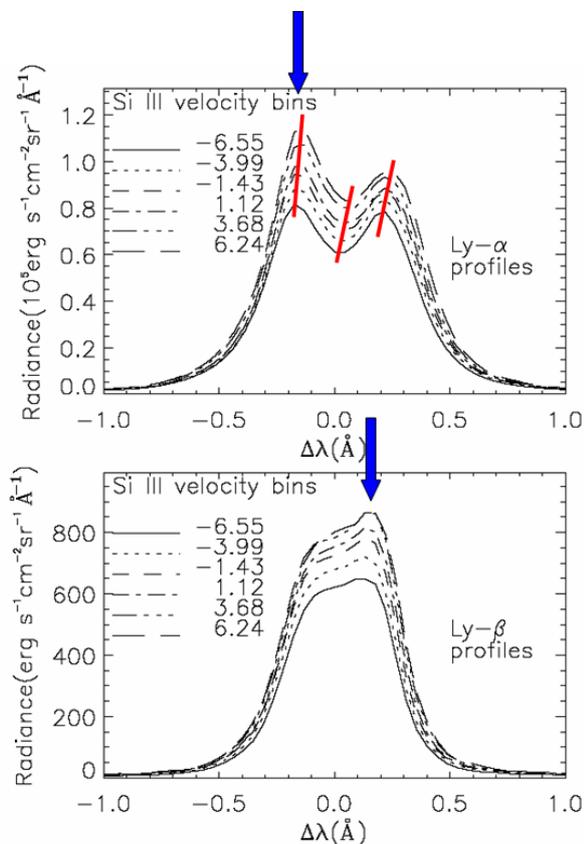
### The magnetic network

*In the chromosphere, the intermediate layer of the solar atmosphere between the visible surface, the photosphere, and the hot outer layer, the corona, patches of magnetic activity (shown in black and white in Fig. 1) constitute the magnetic network outlining roundish areas or cells. In the network, magnetic loops protrude from the solar interior and open into over-arching structures, while the cell interiors are filled with low lying loops. The network is brighter than the cell interior.*

*Fig. 1 is a composite of a magnetogram (a map of the magnetic field) from the Michelson Doppler Imager (MDI) instrument on SoHO and spectroscopic information from a SUMER raster scan in Lyman- $\alpha$  light. The overlaid contours of enhanced Lyman- $\alpha$  emission nicely outline the magnetic network. We have sorted the spectra at each location by the depth of the self-reversal in the profile. The extreme quartiles – cases of rather flat and of deeply reversed profiles – are indicated in red and green respectively (cf., Fig. 1). It is obvious that less self-reversed profiles cluster along*

flachere Profile entlang den Netzwerkgrenzen. Hier weiten sich Magnetbögen trichterförmig auf und die Dichte fällt ab.

An den Polen gibt es häufig ausgedehnte Gebiete, die im Vergleich zur Sonnenscheibe im Licht heißer, koronaler Emission dunkel erscheinen. Diese 'Koronalöcher' sind die Quellgebiete des schnellen Sonnenwindes. In Koronalöchern ist der Abstand der beiden Spitzen im Profil deutlich höher, ein klares Anzeichen für erhöhte Linienumkehr. Die Undurchsichtigkeit (Opazität) ist hier so stark, dass die Lyman- $\beta$  Linie (bei der im Gegensatz zu Lyman- $\alpha$  - wie in Abb. 2 gezeigt - normalerweise die rote Spitze dominiert) sich nun ähnlich wie Lyman- $\alpha$  verhält und eine leichte Dominanz der blauen Spitze zeigt.



*the network boundary. Here, the expanding magnetic field forms funnel-like structures with reduced opacity.*

*Polar regions often host extended areas which appear dark in contrast to the hot coronal emission of the disk. These 'coronal holes' are the source regions of the fast solar wind. In the coronal hole the separation of the peaks of the Lyman- $\alpha$  profile is significantly wider, which gives a clear indication of a higher opacity. In the coronal hole the opacity is so high that the Lyman- $\beta$  line (which in contrast to Lyman- $\alpha$  - as shown in Fig. 2 - normally has a red peak dominance) now has a slight blue peak dominance and starts to behave like Lyman- $\alpha$ .*

Abb. 2: Die Linienprofile von Lyman- $\alpha$  (oben) und Lyman- $\beta$  (unten) sind hier nach der Geschwindigkeit der Plasmaströmung sortiert und in 6 Gruppen eingeteilt. Negative Werte bis zu -6,55 km/s (untere Kurven) bedeuten aufsteigende, positive Werte bis zu 6,24 km/s (obere Kurven) fallende Bewegungen. Die Asymmetrien sind in den Linien offensichtlich entgegengesetzt, und es besteht ein Zusammenhang zwischen Asymmetrie und Fallbewegung, wie durch die roten Markierungen angedeutet: Je stärker die Fallbewegung, desto heller das Licht und desto ausgeprägter die Asymmetrie des Linienprofils.

*Fig. 2: Line profiles of Lyman- $\alpha$  (top) and Lyman- $\beta$  (bottom) have been sorted by their plasma flow into six velocity bins. Negative values up to -6.55 km/s (lower curves) correspond to upflows and positive values up to 6.24 km/s (upper curves) to downflows. It is obvious that the asymmetries of both lines are opposed, and there is a clear correspondence between asymmetry and downflows as indicated by the red tracing lines: the higher the downflow, the brighter the emission and the more asymmetric the profile.*

### Der Effekt von Auf- und Abbewegungen auf das Lyman- $\alpha$ Profil

Spektrometer können mit Hilfe des Doppler-Effekts die Bewegung eines Atoms feststellen, wenn es sich beim Aussenden des Photons entlang der Sichtlinie bewegt. In diesem Fall wurde die Dopplerbewegung mit Hilfe der Si III Emissionslinie bei 120.6 nm bestimmt. Bei dieser hellen Linie sind wegen ihres schmalen Gauß-profils Linienverschiebungen viel besser zu erkennen als bei Lyman- $\alpha$ . Sie wurde zusammen mit Lyman- $\alpha$  (121.6 nm) und Lyman- $\beta$  (102.5 nm) aufgezeichnet. Die Linienprofile von Lyman- $\alpha$  (oben) und Lyman- $\beta$

### Effect of flows on the Lyman- $\alpha$ profile

*Spectrometers can measure the motion of the light emitting atom along the line-of-sight by the Doppler effect. We have used this to determine at each location the Doppler shift in the emission line of Si III (120.6 nm) by the deviation from the average profile. This line, recorded simultaneously with Lyman- $\alpha$  (121.6 nm) and Lyman- $\beta$  (102.5 nm), is unblended and has a narrow Gaussian shape. It is, therefore, more suitable for Doppler measurements than Lyman- $\alpha$ . We have found Doppler flows from -6.5*

(unten) wurden nach der Geschwindigkeit der Plasmaströmung sortiert und in sechs Gruppen eingeteilt. Die gemittelten Profile für jede Gruppe sind in Abb. 2 dargestellt. Man sieht deutlich die entgegengesetzte Asymmetrie beider Linien und dass ein Zusammenhang zwischen Asymmetrie und Fallbewegung besteht, wie durch die roten Markierungen angedeutet ist. Je stärker die Fallbewegung, desto heller das Licht und desto ausgeprägter die Asymmetrie des Linienprofils. Das beweist, dass es eine allgegenwärtige Abströmung in magnetischen Strukturen gibt, die bei der Entstehung des Linienprofils eine entscheidende Rolle spielt.

Wir vermuten, dass beide Beobachtungen – die Rolle des Magnetfeldes und der Effekt der Dopplerbewegung bei der Entstehung des Lyman- $\alpha$  Linienprofils – mit demselben physikalischen Vorgang zusammenhängen. Heinzel, Anzer und Gunár (A&A 442, 331, 2005) haben mit Modellrechnungen gezeigt, dass bei einer Protuberanz (eine große, helle Erscheinung, die über den Sonnenrand hinausragt) deren magnetische Orientierung relativ zur Sichtlinie einen Einfluss auf das Lyman- $\alpha$  Profil hat, und zwar in der Weise, dass die Linienumkehr tiefer ist, wenn das Magnetfeld senkrecht zur Sichtlinie steht. Beobachtungen scheinen das zu bestätigen.

*km/s (upflows) to +6.5 km/s (downflows). The profiles have been sorted by the Doppler motion and grouped into six velocity bins. The average profiles for each bin are shown in Fig. 2. We clearly see that the asymmetries of both lines are opposed, and there is a clear correspondence between asymmetry and downflows as indicated by the red tracing lines. The higher the downflow, the brighter the emission and the more asymmetric the profile. This confirms the presence of a persistent downflow in the magnetically structured atmosphere that plays a dominating role in the line profile formation.*

*We suspect that both observations – the role of the magnetic field and the effect of the Doppler flow in the formation of the Lyman- $\alpha$  line profile – are related to the same physical process. Heinzel, Anzer, and Gunár (A&A 442, 331, 2005) have carried out model calculations and shown that the orientation of the axis of a prominence (a large, bright feature extending outward from the Sun's surface, often in a loop shape) relative to the line-of-sight should have an imprint on the self-reversal depth of Lyman- $\alpha$ , such that the reversal is deeper, when the magnetic field is oriented perpendicular to the line-of-sight. Prominence observations seem to support this model.*

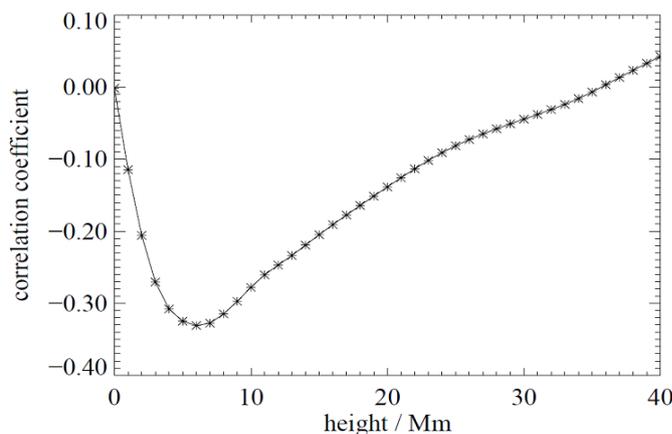


Abb. 3: Anti-Korrelation zwischen der Tiefe der Selbstumkehr der Lyman- $\alpha$  Linie und der Sichtlinienkomponente des Magnetfeldes bei verschiedenen Höhen über der Sonnenoberfläche. Eine besonders tiefe Linienumkehr tritt auf, wenn das Magnetfeld senkrecht zur Sichtlinie orientiert ist. Die Anti-Korrelation hat bei ca. 6 Mm einen Extremwert.

*Fig. 3: Anti-Correlation between the depths of the self-reversal of the Lyman- $\alpha$  line and the line-of-sight component of the magnetic field at various heights above the solar surface. Deep reversals prevail, if the magnetic field is oriented perpendicular to the line-of-sight. The anti-correlation peaks at approx.. 6 Mm.*

Zeitgleich zu unseren Beobachtungen wurde das photosphärische Magnetfeld von MDI gemessen. Mit Standardmethoden wurde das Magnetfeld bis in die Korona extrapoliert und dessen Sichtlinienkomponente mit der Tiefe der Linienumkehr bei Lyman- $\alpha$  verglichen. Es gibt eine kleine, aber deutliche Anti-Korrelation, die bei  $\approx 6$  Mm einen Extremwert erreicht (Abb. 3). Damit lässt sich wiederum das in Abb. 1 dargestellte Phänomen der flacheren Profile im chromosphärischen Netzwerk erklären, weil die Magnetbögen hier tendenziell in Richtung zum Beobachter

*We have used standard routines to extrapolate to coronal heights the photospheric magnetic field as observed by the MDI instrument on SoHO during our Lyman- $\alpha$  observations and compared its line-of-sight component to the reversal depth as shown in Fig. 3. There is a small, but clear anti-correlation, which has its minimum around 6 Mm. This is in agreement with the observations shown in Fig. 1 that demonstrate that flows along the line-of-sight lead to less-reversed line profiles. We suggest that the orientation of the magnetic field plays an important role in shaping the*

orientiert sind. Es zeigt sich, dass die Orientierung des Magnetfeldes nicht nur bei Protuberanzen, sondern in allen Strukturen auf der Sonne einen Effekt auf das Profil der Lyman- $\alpha$  Linie hat. Die Abnahme der Opazität ist offenbar ein Effekt der Abströmungen in vom Magnetfeld geformten Strukturen.

Unsere Ergebnisse weisen auf die Bedeutung des solaren Magnetfeldes bei den Prozessen hin, die das Profil der Lyman- $\alpha$  Linie bestimmen. Es gibt offenbar ein permanentes Abströmen an beiden Fußpunkten geschlossener Magnetbögen, und damit eine Manifestation für einen fundamentalen Transportvorgang, für den Foukal (ApJ 223, 1046, 1978) den Begriff 'coronal convection' eingeführt hat.

*profile not only in prominences but also in any structure on the solar disk. This can be explained as an effect of the downflows that – guided by the magnetic field – reduce the opacity along the magnetic structures.*

*Our results show that the magnetically structured atmosphere plays an important role in the line profile formation indicating the presence of a persistent downflow at the footpoints of closed loops. We suggest that this is the manifestation of a fundamental mass transport process, coined by Foukal (ApJ 223, 1046, 1978) as 'coronal convection'.*

### Ausgewählte Veröffentlichungen

#### *Selected publications*

Curdt, W., H. Tian, L. Teriaca, et al.: The Ly- $\alpha$  profile and center-to-limb variation of the quiet Sun. *Astron. & Astrophys.* 492, L9–L12 (2008), doi:10.1051/0004-6361:200810868.

Curdt, W., H. Tian, L. Teriaca, and U. Schühle: The SUMER Ly- $\alpha$  profile of quiescent prominences. *Astron. & Astrophys.* 511, L4 (2010), doi:10.1051/0004-6361/200913875.

Curdt, W., H. Tian, and E. Marsch: The coronal convection. *Cent. Eur. Astrophys. Bull.* 35, 187–194 (2011).

Marsch, E., H. Tian, J. Sun, W. Curdt, and T. Wiegmann: Plasma flows guided by strong magnetic fields in the solar corona. *Astrophys. J.* 685, 1262–1269 (2008).

Tian, H., W. Curdt, E. Marsch, and U. Schühle: Hydrogen Lyman- $\alpha$  and Lyman- $\beta$  spectral radiance profiles in the quiet Sun. *Astron. & Astrophys.* 504, 239–248 (2009a), doi:10.1051/0004-6361/200811445.

Tian, H., L. Teriaca, W. Curdt, and J.-C. Vial: Hydrogen Ly- $\alpha$  and Ly- $\beta$  Radiances and Profiles in Polar Coronal Holes. *Astrophys. J.* 703, L152–L156 (2009b), doi:10.1088/0004-637X/703/2/L152.

Tian, H., E. Marsch, W. Curdt, and J. He: Upflows in funnel-like legs of coronal magnetic loops. *Astrophys. J.* 704, 883–890 (2009c), doi:10.1088/0004-637X/704/1/883.

### 1.3.7 Wechselwirkungen von Ionen mit Wellen und Turbulenz im Sonnenwind

#### Einleitung

Da Teilchenstöße im hoch-verdünnten Sonnenwind selten und deshalb unbedeutend sind, übernehmen die Fluktuationen der elektrischen und magnetischen Felder auf allen Skalen die Rolle von Zweierstößen und bestimmen durch Streuung der Teilchen die Transporteigenschaften des Plasmas und die Thermodynamik des Sonnenwindes. So können Wellen und Turbulenzen, wie sie im Sonnenwindplasma von Natur aus vorkommen, zu allen Arten von Welle-Teilchen Wechselwirkungen führen, und auf diese Weise den Mikrozustand der Ionen und Elektronen, die vollständig durch ihre Geschwindigkeitsverteilungen bestimmt sind, beeinflussen und regulieren. Diese können, ebenso wie die Vektorkomponenten der Felder und die Spektren der Wellen, in Weltraumplasmen heutzutage routinemäßig mit Hilfe geeigneter Instrumente auf Raumfahrzeugen gemessen werden. Es sollte gleich zu Beginn bemerkt werden, dass der Sonnenwind in zwei grundlegenden Formen vorkommt, nämlich als schnelle (700-800 km/s) und langsame (300-400 km/s) Sonnenwindströme.

#### Korrelationen zwischen der Protonen-Temperatur-anisotropie und hochfrequenten Alfvénwellen

Schon vor einigen Jahrzehnten haben die Plasmainstrumente auf den beiden Raumsonden der Helios Mission detaillierte in-situ Messungen im Sonnenwind gemacht bei Abständen von der Sonne ungefähr zwischen den Bahnen von Merkur und Erde. Die damals erhaltenen Resultate zeigten, dass in schnellen Sonnenwindströmen das Protonen-Temperaturverhältnis,  $T_{\perp}/T_{\parallel}$ , wobei  $T_{\parallel}$  and  $T_{\perp}$  jeweils den kinetischen Energien parallel und senkrecht zum Magnetfeld entsprechen, insbesondere im Kernbereich der Geschwindigkeitsverteilungsfunktionen (GVFn) nicht 1 war, sondern vergleichsweise große Werte von bis zu 2 oder 3 annahm bei einer Distanz von 0.3 AE von der Sonne (AE = astronomische Einheit = mittlere Distanz von der Sonne zur Erde, ca. 150 Millionen km). Diese Beobachtung wurde damals interpretiert als ein Indiz für starke lokale senkrechte Aufheizung der Ionen im schnellen Sonnenwind. Man fand heraus, dass das Temperaturverhältnis mit wachsender heliozentrischer Distanz kleiner wurde und bei 1 AE Werte um 1 oder weniger annahm.

Jedoch erst in jüngster Zeit haben Bourouaine et al. [2010] Korrelationen untersucht zwischen dem Verhältnis von senkrechter und paralleler Temperatur der Protonen und der Leistungsdichte transversaler Alfvénwellen, die Frequenzen zwischen 0.01 und 1 normalisiert auf die lokale Protonen-Gyrationsfrequenz (dies ist die Frequenz der Kreisbewegung

### 1.3.7 Interactions of ions with waves and turbulence in the solar wind

#### Introduction

*As particle collisions are rare in the dilute solar wind and thus unimportant, the fluctuations on all scales of the electric and magnetic fields in the solar wind take over the role of binary collisions and determine by scattering of the particles the plasma transport properties and thermodynamics of the wind. Thus the waves and turbulence prevailing naturally in the solar wind plasma can lead to all kinds of wave-particle interactions, and in this way influence and regulate the microstate of the ions and electrons which are fully described by their velocity distributions. They can, like the field vector components and wave spectra, nowadays routinely be measured in space plasmas by appropriate instruments on any spacecraft. It should be noted at the outset that the solar wind comes in two basic forms, which are the fast (700-800 km/s) and slow (300-400 km/s) solar wind streams.*

#### Correlation between the proton temperature anisotropy and high-frequency Alfvén waves

*Several decades ago, the plasma instruments on the twin Helios missions made detailed in-situ measurements in the solar wind at solar distances roughly between Mercury's and Earth's orbits. The results then obtained showed that in fast solar wind streams the proton temperature ratio,  $T_{\perp}/T_{\parallel}$ , with  $T_{\parallel}$  and  $T_{\perp}$  corresponding to the kinetic energies parallel and perpendicular to the magnetic field, respectively, in particular in the core part of the velocity distribution functions (VDFs), was not unity but could reach comparatively high values of up to 2-3 at a distance of 0.3 au (au = astronomical unit = distance from Sun to Earth, which is about 150 million km) from the Sun. This observation was then interpreted as indicating strong local perpendicular heating of the ions in the fast solar wind. With increasing heliocentric distance, the temperature ratio was found to decrease, attaining values equal to unity or below at 1 au.*

*But only recently [Bourouaine et al., 2010] correlations have been made and analyzed between the power density of transverse Alfvén waves, having frequencies between 0.01 and 1 normalized to the local proton gyro-frequency (gyro- or cyclotron-frequency is the frequency of the circular motion of a proton in the plane perpendicular to the mean magnetic field) in the*

eines Protons in der Ebene senkrecht zum mittleren Magnetfeld) im Bezugssystem des Plasmas haben. Das Leistungsspektrum der Wellen wurde berechnet aus den Vektorkomponenten des Magnetfeldes, das zeitgleich mit den Teilchen gemessen wurde, und die Ionentemperaturen wurden erneut aus den originalen GVFn abgeleitet, wie sie in schnellen Sonnenwindströmen während der Helios 2 Mission bei radialen Abständen von der Sonne zwischen 0.3 und 0.9 AE gemessen wurden.

Aufgrund dieser modernen und umfassenden statistischen Analyse erhält man eine bemerkenswerte Korrelation zwischen den Zunahmen des Temperaturverhältnisses der Protonen und den offensichtlichen Erhöhungen des Wellenleistungsspektrums, ein Resultat, das in Abb. 1 illustriert wird. In Sonnennähe findet man oftmals, dass die Leistungsdichte in den transversalen Komponenten der Wellen um mehr als eine Größenordnung über der in ihren longitudinalen Komponenten liegt (oberes linkes Paneel). Die gemessene Ionen-Temperaturanisotropie scheint von dem theoretischen Schwellwert für die Ionen-Zyklotron-Instabilität (ein Zustand, in dem die Wellenamplitude exponentiell mit der Zeit ansteigt) begrenzt zu werden. Diese neuen Ergebnisse legen nahe, dass hochfrequente Alfvén-Zyklotron-Wellen die Temperaturanisotropie im Kern der Protonen-GVF regulieren. Eine höhere Anisotropie veranlasst die stärkere Anregung von Wellen, und dies führt zu einer Reduktion der Anisotropie und dem Anwachsen der Wellenenergie. Umgekehrt kann eine schon vorher existierende höhere Intensität der Wellen zu ihrer stärkeren Absorption durch Ionen führen, und damit zum Anwachsen von deren Temperaturanisotropie.

Es ist so offensichtlich geworden, dass die hohe senkrechte Temperatur der Protonen eng verknüpft ist mit einer erhöhten Leistung in den transversalen Komponenten von Wellen bei Frequenzen nahe bei, aber noch unterhalb der lokalen Protonen-Gyrationsfrequenz. Diese (wahrscheinlich Alfvén-Ionen-Zyklotron) Wellen haben also einen wesentlichen Einfluss auf die senkrechte Heizung der Protonen, die auch mit der großskaligen magnetohydrodynamischen Turbulenz verbunden ist. Allerdings ist die Idee, die hochfrequenten Wellen könnten direkt an der Sonne selbst entstanden sein, wohl nicht zutreffend. Es ist wahrscheinlicher, dass sie im expandierenden Sonnenwind andauernd erzeugt und wieder absorbiert werden, möglicherweise durch eine stetige Welle-Teilchen-Kaskade und eine von der Temperaturanisotropie angetriebene Plasma-Instabilität.

*plasma frame, and the ratio of the perpendicular and parallel temperature of the protons. The wave power spectrum was evaluated from the concurrently measured high-resolution 3-D magnetic field vector components, and the ion temperatures were derived anew from the original VDFs as measured in fast solar wind streams during the Helios 2 primary mission at radial distances from the Sun between 0.3 au and 0.9 au.*

*From this modern comprehensive statistical analysis, one obtains a striking correlation between the increases in the proton temperature ratio and the apparent enhancements in the wave power spectrum, a result that is illustrated in Fig. 1. Near the Sun the transverse part of the wave power is often found to be by more than an order of magnitude higher than its longitudinal counterpart (top left panel). The measured ion temperature anisotropy appears to be limited by the theoretical threshold value for the ion-cyclotron wave instability (situation in which the wave amplitude grows exponentially with time). These new findings suggest that high-frequency Alfvén-cyclotron waves regulate the proton core temperature anisotropy. A higher anisotropy will cause the waves to become unstable, and this will lead to a reduction of the anisotropy and increase of wave energy. Vice versa, higher pre-existing wave intensity may lead to stronger wave absorption and the increase of the temperature anisotropy.*

*It has become obvious that a high perpendicular proton temperature is correlated with an enhanced wave power level in the transversal components of the waves at frequencies near but below the local proton gyro-frequency. These (probably Alfvén-ion-cyclotron) waves appear to have an important impact on the perpendicular proton heating, which is also connected with large-scale magnetohydrodynamic turbulence. Yet, the idea that these high-frequency waves are directly launched at the Sun might not be valid. It seems more likely that they are continuously generated and reabsorbed in the expanding solar wind, perhaps through an ongoing wave-particle cascade and anisotropy-driven plasma instability.*

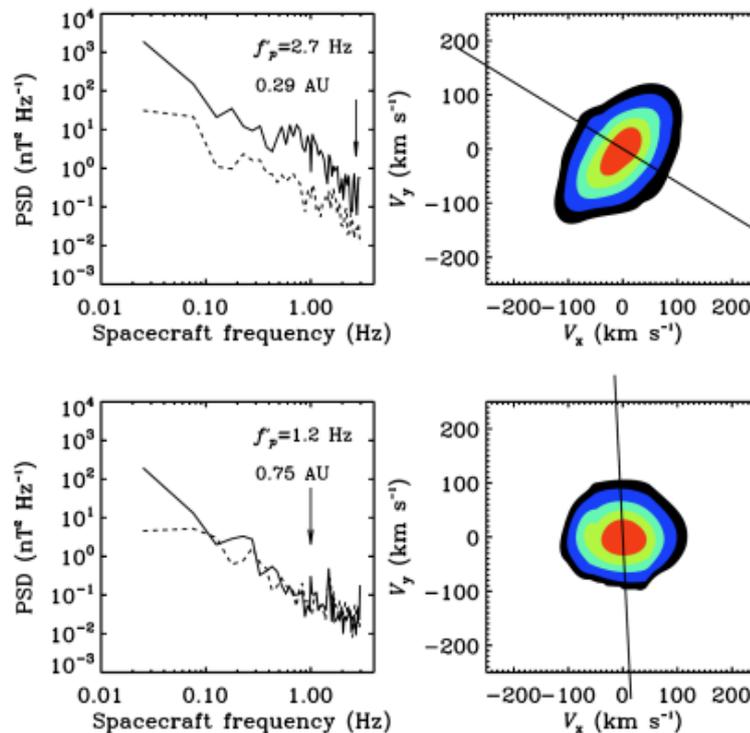


Abb. 1: Oben links: Transversales (durchgezogene Linie) und longitudinales (durchbrochene Linie) Leistungsspektrum der (sehr wahrscheinlich Alfvén-Ionen-Zyklotron) Wellen. Oben rechts: Die entsprechenden Isodichte-Farbkonturen (in Schritten von 20% von der Mitte bis zum Rand) des anisotropen Kernbereichs der Protonen-Geschwindigkeitsverteilungsfunktion (GVF), gemessen 1976, Tag 105, 00:22:07. Die Form der GVF zeigt deutlich an, dass sich die Verteilung zu höheren Geschwindigkeiten senkrecht zum Magnetfeld (angedeutet durch die gerade Linie) erstreckt. Unten links: Entgegengesetzte Resultate mit einem niedrigeren Leistungsspektrum während des Zeitintervalls von 21:36:50 bis 21:37:32; unten rechts: die dazugehörige isotrope Protonen-GVF (gemessen 1976, Tag 67, 21:37:12). Die Doppler-verschobene Protonen-Zyklotron Frequenz ist auf der linken Seite jeweils mit einem Pfeil markiert.

*Fig. 1: Top left: The transversal (solid line) and longitudinal (dashed line) power spectrum of the (most likely Alfvén-ion-cyclotron) waves. Top right: The corresponding isodensity colour-contours (in steps of 20% from the middle to the edge) of the anisotropic core of the proton velocity distribution function (VDF) measured on day 105 in 1976 at 00:22:07. The shape clearly indicates that the distribution extends to higher velocities perpendicular to the direction of the magnetic field (indicated by the straight line). Bottom left: Contrasting results with a lower wave-power spectrum during the time interval from 21:36:50 to 21:37:32, and (bottom right) the associated isotropic proton VDF measured on day 67 in 1976 at 21:37:12. The Doppler-shifted proton-cyclotron frequency is marked on the left plots by an arrow.*

### Heizung des Kernbereichs der Protonenverteilung und Ausbildung eines Beams durch parametrisch instabile Alfvén-Zyklotron-Wellen

Das Plasma in der Sonnenkorona, der äußersten Schicht der Sonnenatmosphäre, ist um etwa drei Größenordnungen heißer als die sichtbare Oberfläche der Sonne, die Photosphäre, die eine Temperatur von 6000 K hat. Die Energiequelle ist jedoch immer noch unbekannt. Vielversprechende Kandidaten für die Koronaheizung sind die Alfvén-Wellen, die fundamentale Normalmoden eines jeden magnetisierten Plasmas sind. Von einem mikroskopischen Standpunkt aus ist es ein damit eng zusammenhängendes, aber auch grundlegendes Problem, die physikalischen Mechanismen zu verstehen, welche die Gestalt der GVF der

### Proton core heating and beam formation via parametrically unstable Alfvén-cyclotron waves

*The plasma in the Sun's corona, the outermost layer of the solar atmosphere, is by about three orders of magnitude hotter than the visible surface of the Sun, the photosphere (having a temperature of 6000 K). Its energy source, however, is not yet known. Promising candidates for coronal heating are Alfvén waves, which are fundamental normal modes of any magnetized plasma. From a microscopic point of view, a closely related and also basic issue of space plasma physics is to understand the physical mechanisms that shape the VDFs of the ions supporting those waves in the Sun's outer corona and solar wind.*

Ionen, der Träger der Wellen in der äußeren Korona und im Sonnenwind, bestimmen.

Die von Plasmainstrumenten auf mehreren Raumsonden gemessenen Daten der Ionen haben gezeigt, dass die Protonen-GVFn im schnellen Sonnenwind ausgesprochen nicht-thermische Eigenschaften aufweisen, die oft assoziiert sind und gleichzeitig auftreten mit Alfvénischen Fluktuationen von großer Amplitude. Die Protonen-GVFn zeigen typischerweise einen dichten Kernbereich, der eine Temperaturanisotropie mit  $T_{\perp}/T_{\parallel} > 1$  (siehe den Paragraphen oben) aufweist, sowie eine Beam-artige zweite Komponente, die weg von der Sonne entlang des Hintergrundmagnetfeldes  $\mathbf{B}$  strömt. Die beobachtete Relativgeschwindigkeit ist von der Größenordnung der lokalen Alfvéngeschwindigkeit  $V_A$  (d.h. der Geschwindigkeit, mit der sich Verbiegungen der Magnetfeldlinien und Veränderungen der Magnetfeldstärke im Plasma ausbreiten). Diese Beam-Protonen beinhalten Information über den kinetischen Zustand des Sonnenwind-Plasmas und seiner koronalen Quellgebiete. Man glaubt deswegen, die kinetischen Eigenschaften seien auch ein Schlüssel zum Verständnis der Koronaheizung. Jedoch sind ihr Ursprung (entweder in der Korona oder dem interplanetaren Raum) und ihre räumliche und zeitliche Entwicklung noch nicht vollständig verstanden, sie können aber erläutert und nachvollzogen werden mit Hilfe von numerischen Simulationen.

Kinetische Plasma-Theorie und ein-dimensionale Hybrid-Simulationen (sie behandeln die Ionen als Teilchen und Elektronen als Flüssigkeit) wurden von Araneda et al. [2008] verwendet, um Effekte zu studieren, die kompressible Fluktuationen, angetrieben durch parametrische Instabilitäten von Alfvén-Zyklotron-Wellen, auf die Protonen-GVFn haben. Dabei können feldparallele Protonenbeams entstehen (siehe die sich entwickelnden oberen Ausbeulungen erhöhter Dichte in den Kontourplots der Abb. 2) während der Sättigungsphase der Welle-Teilchen-Wechselwirkungen. Diese Beams haben eine Driftgeschwindigkeit, die etwas größer ist als die Alfvéngeschwindigkeit, und sie bleiben bis zum Ende der Simulation bestehen. Der Kern der GVF wird durch Streuung an Wellen anisotrop, so wie es typischerweise in den GVFn im schnellen Sonnenwind gemessen wird. Mit Hilfe von Simulationen konnten die wesentlich beteiligten Instabilitäten identifiziert werden, und man fand dabei, dass selbst in Parameterbereichen, wo die Flüssigkeitstheorie angemessen erscheint, doch starke kinetische Effekte vorherrschen. Hieraus folgt, dass die Wechselwirkungen der Protonen mit Plasmawellen (inklusive akustischen Wellen), die aus einer Kaskade Alfvénischer Turbulenz entstehen können, für die charakteristische Gestalt der GVFn verantwortlich zu sein scheinen.

*Measured ion data from plasma instruments on several spacecraft have shown that the proton VDFs in fast solar wind exhibit distinctly non-thermal features which are often associated and concurrent with large-amplitude Alfvénic fluctuations. Proton VDFs typically show a denser proton core component having a temperature anisotropy with  $T_{\perp}/T_{\parallel} > 1$  (see above paragraph), and a beam-like secondary component streaming away from the Sun along the background magnetic field  $\mathbf{B}$ . The observed relative drift speed is of the order of the local Alfvén speed  $V_A$  (i.e. the speed at which distortions of the magnetic field lines and strength propagate in the plasma). These double-beam proton VDFs carry information about the kinetic state of the solar wind plasma and its coronal sources, and are therefore believed to provide important clues on the coronal heating mechanism. However, their origin (either in the corona and/or interplanetary space) and their spatial and temporal evolution have not yet been fully understood, but can be illuminated and mimicked by numerical simulations.*

*Kinetic plasma theory and one-dimensional hybrid simulations (treating ions as particles and electrons as a fluid) were used by Araneda et al. [2008] to study the effects that compressible fluctuations driven by parametric instabilities of Alfvén-cyclotron waves have on proton velocity distributions. Field-aligned proton beams can be generated (see the developing upper extension of increased density in the contour plots in Fig. 2) during the saturation phase of the wave-particle interaction. The beams have a drift speeds slightly greater than the Alfvén speed, and they are maintained until the end of the simulations. The main core part of the distribution becomes due to scattering by waves anisotropic, as is typically observed in the velocity distributions measured in the fast solar wind. Through simulation the key instabilities involved were identified, and it was also found that, even in the parameter regime where fluid theory appears to be appropriate, strong kinetic effects still prevail. Hence, proton interactions with plasma waves (including acoustic waves) originating from the cascading of Alfvénic turbulence appear to be responsible for the distinct shape of the velocity distribution.*

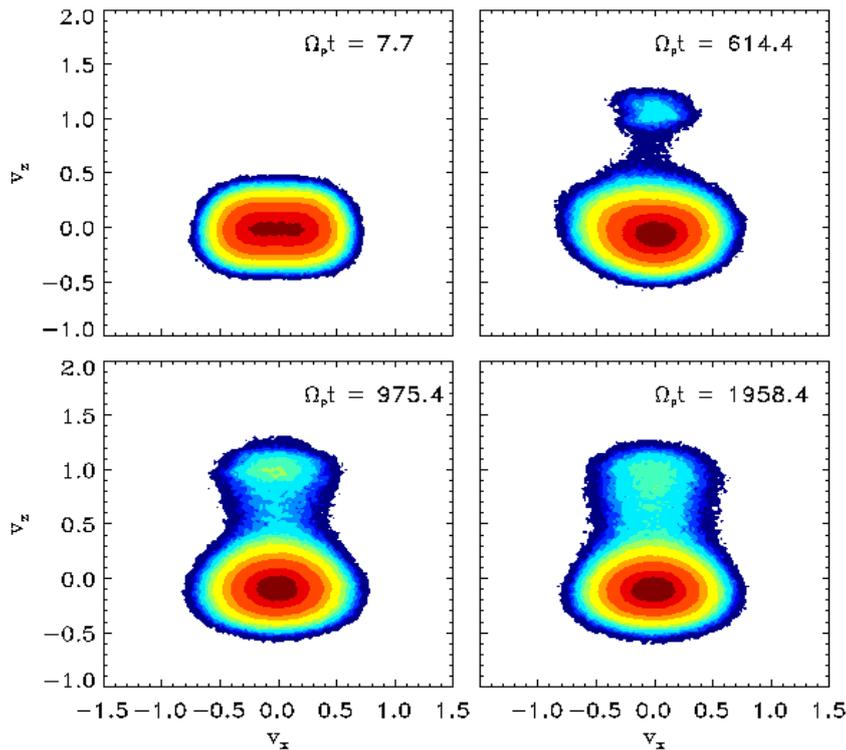


Abb. 2: Farbkontourdarstellungen der Protonen-GVFn in der  $(v_x, v_z)$  Ebene (mit Geschwindigkeiten in Einheiten von  $V_A$ , und mit dem mittleren Feld in der  $z$ -Richtung; die  $x$ -Achse ist senkrecht zum Feld in willkürlicher Orientierung, da die GVf gyrotrop ist, also zylindersymmetrisch im Hinblick auf die  $z$ -Achse.) für den Fall einer dispersiven Pumpwelle und zu vier Zeitpunkten (in Einheiten der Gyroperiode; die entsprechende Frequenz ist  $\Omega_p$ ). Die Farbkonturen entsprechen 75 (dunkelrot), 50 (rot), 10 (gelb) Prozent des Maximums der GVf, wobei die relative Teilchenzahldichte des Beams ungefähr 7% beträgt.

*Fig. 2: Contour plots of the proton VDF in the  $(v_x, v_z)$  plane (with velocity in units of  $V_A$ , and with mean field in the  $z$ -direction; the  $x$ -axis is perpendicular to the field in an arbitrary orientation, as the VDF is gyrotropic, i.e. cylindrically symmetric with respect to the  $z$ -axis.) for the dispersive-wave case at four instants of time (in units of the proton gyroperiod; the corresponding frequency is  $\Omega_p$ ). The color coding of the contours corresponds, respectively, to 75 (dark red), 50 (red), 10 (yellow) percent of the maximum of the VDF, with a relative particle number density of the beam of about 7%.*

### Über die Relativgeschwindigkeit und das Temperaturverhältnis von Alphateilchen und Protonen im Sonnenwind

Bourouaine et al. [2011] haben jüngst die relative Strömungsgeschwindigkeit und das Temperaturverhältnis von Alphateilchen und Protonen analysiert, sowie deren Verknüpfungen mit der Häufigkeit der Helium-Ionen, dem Stoßalter (d.h. der Anzahl von Stößen während der Ausbreitungszeit des Sonnenwindes bis zum Ort seiner Beobachtung) und dem Leistungsspektrum transversaler Fluktuationen im Inertialbereich der Turbulenz. Dabei fanden sie heraus, dass das Verhältnis  $T_\alpha/T_p$  der Alphateilchen-Temperatur  $T_\alpha$  zur Protonen-Temperatur  $T_p$  antikorreliert ist mit der Häufigkeit der Helium-Ionen. Trotz einer relativ hohen Stoßzahl und eines kleinen Leistungsspektrums der Wellen kann  $T_\alpha/T_p$  relativ hohe Werte (sogar mehr als zwei) erreichen, und zwar im-

### On the relative speed and temperature ratio of solar wind alpha particles and protons

*Bourouaine et al. [2011] have recently analyzed the relative flow speed and the temperature ratio of alpha particles and protons and their connections to the helium ion abundance, the collisional age (i.e., the number of collisions during the transit time of the solar wind to the point of measurement), and the power of transverse fluctuations within the inertial range of the turbulence. They found that the ratio,  $T_\alpha/T_p$ , of the alpha-particle temperature  $T_\alpha$  to the proton temperature  $T_p$  anti-correlates with the helium ion abundance. Despite a relatively high collision number and small wave power,  $T_\alpha/T_p$  can reach comparatively high values (even above two) whenever the helium ion abundance is low (below about 2%). In contrast, the differential speed of alpha particles with respect to protons*

mer dann, wenn die Helium-Häufigkeit niedrig ist (unter 2%). Im Gegensatz dazu ist die Differenzgeschwindigkeit zwischen Alphateilchen und Protonen deutlich positiv korreliert mit der Leistungsdichte der Wellen, jedoch anti-korreliert mit dem Stoßalter.

Letztendlich ist die individuelle Aufheizung jeder Ionensorte positiv korreliert mit der totalen Leistungsdichte der Wellen. Dieses Ergebnis legt die Schlussfolgerung nahe, dass eine hohe Stoßreibung die Differenzgeschwindigkeit zwischen Alphateilchen und Protonen zwar stark reduzieren kann, jedoch nicht ausreicht, um deren Temperaturen anzugleichen, d.h.  $T_\alpha \cong T_p$  zu machen. Das ist ein Hinweis darauf, dass der lokale Wellenheizungsprozess auf einer Zeitskala stattfindet, die viel kürzer ist als die Stoßzeit. Die Beobachtungsergebnisse sind in Abb. 3 illustriert. Sie zeigt, dass eine große Differenzgeschwindigkeit der Ionen mit der Leistungsdichte von hochfrequenten Wellen positiv korreliert ist. In dieser Abbildung sieht man auch, dass die absolute Temperatur der Protonen eng mit der Wellenleistungsdichte zusammenhängt. Relativ große Werte von  $T_\alpha/T_p$  bedeuten aber nicht notwendigerweise, dass die Heizung des Plasmas insgesamt hoch ist. Man muss daher schließen, dass Alphateilchen, vorausgesetzt, dass ihre Häufigkeit geringer als gewöhnlich ist, selbst dann, wenn der Energieeintrag relativ klein ist, viel stärker als die Protonen von Wellen aufgeheizt werden können.

Die selektive Heizung und Beschleunigung schwerer Ionen im Sonnenwind und der Korona stellen seit langem ein theoretisches Problem für die Weltraumphysik dar und werden als empirische Indikatoren gedeutet für die verschiedenen kinetischen Prozesse, wie sie in stoßfreien Plasmen stattfinden können. Numerische Simulationen [Araneda et al., 2009] zeigen, dass schnelle und langsame magnetoakustische Wellen und transversale Wellen die kohärente Flüssigkeitsbewegung der verschiedenen Ionensorten selektiv zerstören können, und auf diese Weise zu einer differentiellen Heizung und Beschleunigung führen. Durch Einfang von einigen der häufigeren Protonen im Potential der akustischen Wellen kann der beobachtete Beam der Protonen mit einer Drift von ungefähr der Alfvéngeschwindigkeit erzeugt werden. Wegen ihrer größeren Masse werden die Alphateilchen jedoch nicht eingefangen, sondern sie beginnen relativ zu den zurückweichenden Protonen zu driften.

*is clearly correlated with the wave power and anti-correlated with the collisional age.*

*Ultimately, the individual heating of each ion species is positively correlated with the total wave power. These findings suggest that high collisional friction could be efficient in reducing the differential speed between alpha particles and protons, but appears not to be sufficient to equalize the alpha and proton temperatures, i.e., to make  $T_\alpha \cong T_p$ . This is a hint that the local wave heating process is acting on a timescale much shorter than the collision time. The observational results are illustrated in Figure 3, which shows that large ion differential speeds are positively correlated with the wave power of the high-frequency waves. From this figure it also turns out that the absolute temperature of the protons correlates strongly with the wave power. However, relatively large  $T_\alpha/T_p$  values do not necessarily imply that the overall heating of the plasma is high. The conclusion is that, even when wave energy input is comparatively small, alpha particles can, given their abundance remains smaller than usual, still be heated more strongly than the protons.*

*Preferential heating and acceleration of heavy ions in the solar wind and corona represent a longstanding theoretical problem in space physics, and are seen as distinct empirical signatures of the various kinetic processes occurring in collisionless space plasmas. Numerical simulations [Araneda et al., 2009] show that fast and slow ion-acoustic waves (IAW) and transverse waves can selectively destroy the coherent fluid motion of different ion species and, in this way lead to their differential heating and acceleration. Trapping of the more abundant protons by the IAWs can generate the observed proton beam with a drift speed of about the Alfvén speed. Because of their larger mass, alpha particles do not become significantly trapped but start drifting relative to the receding bulk protons.*

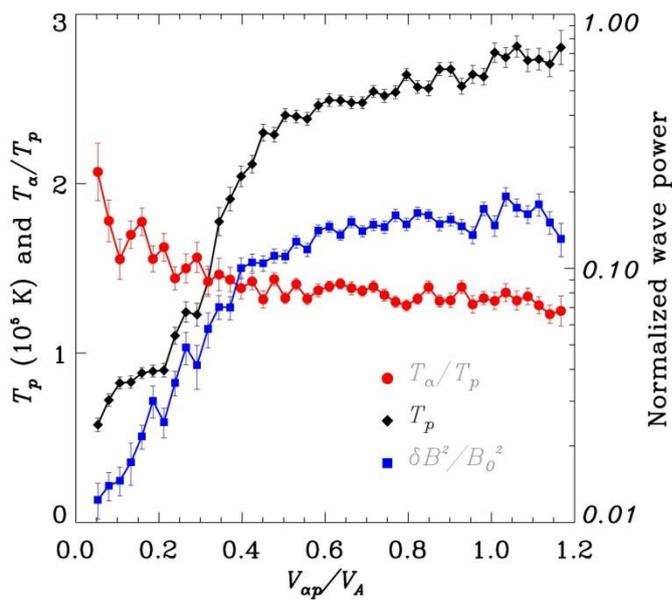


Abb. 3: Erwartungswerte (gewichtete Mittelwerte) der Protonen-Temperatur (schwarz), die normalisierte Leistungsdichte der Wellen (blau), und das Alpha-Teilchen-zu-Protonen Temperaturverhältnis (rot) aufgetragen gegen die relative Ionen-Differenzgeschwindigkeit in Einheiten der Alfvén-Geschwindigkeit  $V_A$ . Die kleinen vertikalen Balken geben die Unsicherheiten (eine Standardabweichung) in den Erwartungswerten für jedes einzelne Bin wieder. Die mittlere Wellenamplitude  $\delta B$  ist normalisiert auf den Wert des mittleren Hintergrundmagnetfeldes  $B_0$ .

**Fig. 3:** Expected (weighted averages) values of the proton temperature (black), the normalized wave power (blue), and the alpha-to-proton temperature ratio (red) versus the relative ion differential speed in units of the Alfvén speed  $V_A$ . The vertical bars are the uncertainties (one standard error) in the expected values of each bin. The average wave amplitude  $\delta B$  is normalized with respect to the background mean magnetic field  $B_0$ .

### Ausgewählte Veröffentlichungen

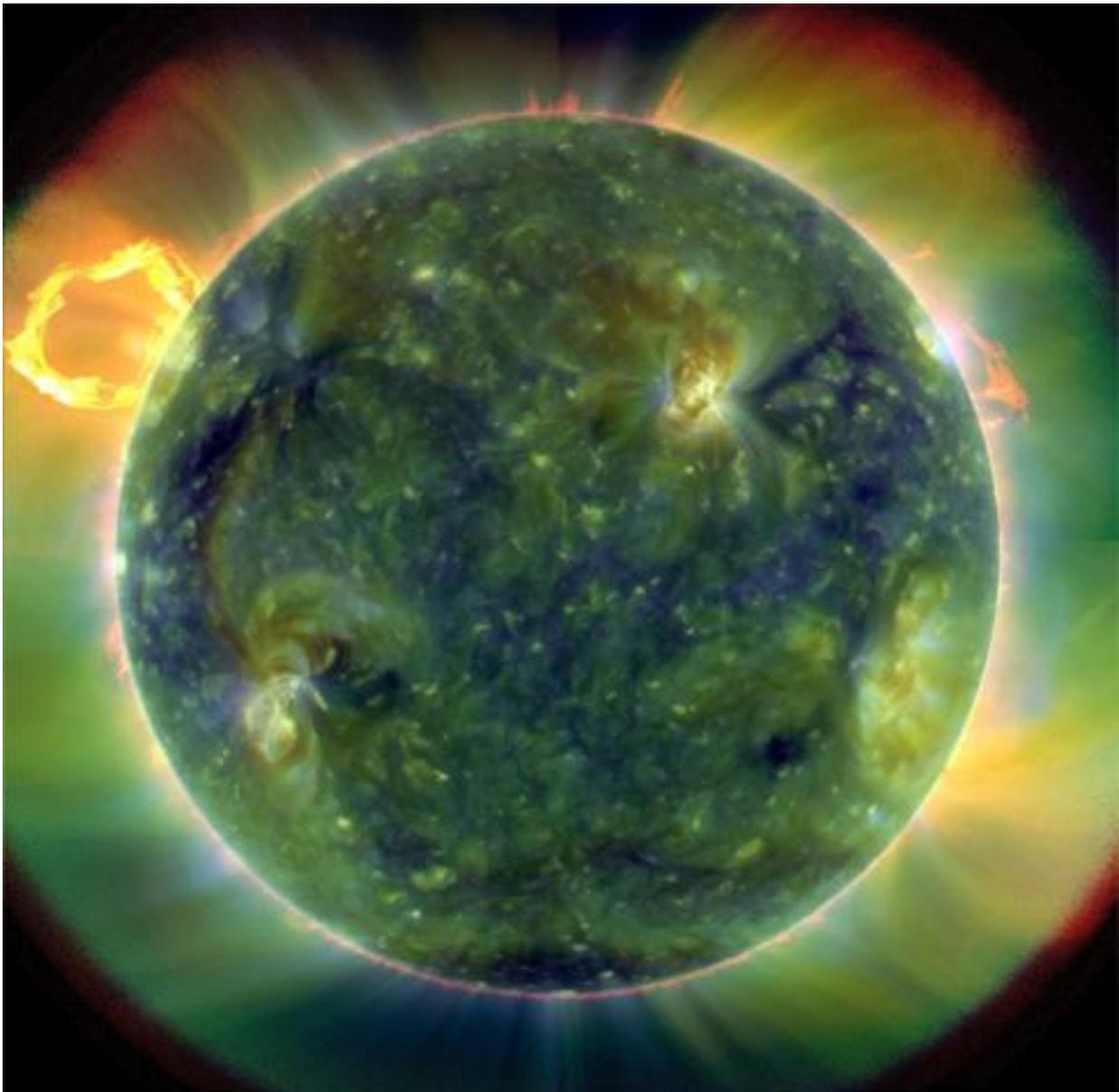
#### Selected publications

Araneda, J. A., E. Marsch, and A. F.-Viñas: Proton Core Heating and Beam Formation via Parametrically Unstable Alfvén-Cyclotron Waves. *Phys. Rev. Lett.* 100, 125003 (2008), doi:10.1103/PhysRevLett.100.125003.

Araneda, J. A., Y. Maneva, and E. Marsch: Preferential Heating and Acceleration of Alpha Particles by Alfvén-Cyclotron Waves. *Phys. Rev. Lett.* 102, 175001 (2009), doi:10.1103/PhysRevLett.102.175001.

Bourouaine, S., E. Marsch, and F. M. Neubauer: Correlations between the proton temperature anisotropy and transverse high-frequency waves in the solar wind. *Geophys. Res. Lett.* 37, L14104 (2010), doi:10.1029/2010GL043697.

Bourouaine, S., E. Marsch, and F. M. Neubauer: On the Relative Speed and Temperature Ratio of Solar Wind Alpha Particles and Protons: Collisions versus Wave Effects. *Astrophys. J.* 728, L3–L7 (2011), doi:10.1088/2041-8205/728/1/L3.



Das SDO-Weltraumteleskop liefert Beobachtungen seismologischer Wellen in der Sonne sowie koronaler Aktivität  
*SDO spacecraft providing observations of solar seismic waves and coronal activity*

## 1.4 Helio- und Asteroseismologie

### 1.4.1 Überblick

Ganz generell haben die Helioseismologie und die Asteroseismologie das Ziel, unser Verständnis der Physik des Inneren der Sonne und der Sterne zu verbessern. Sie vermögen, die Theorie des Sternaufbaus und der Sternentwicklung genau zu testen, beschreiben Phänomene abseits des Standardmodells des Sternaufbaus (Rotation, Konvektion, Mischungsprozesse) und liefern Randbedingungen für Theorien des Magnetismus der Sonne und der Sterne.

Eine unabhängige Max-Planck-Forschungsgruppe (MPRG) „Helio- und Asteroseismologie“ wurde 2005 am MPS eingerichtet. Eines der wesentlichen wissenschaftlichen Ziele ist es, die Konvektionszone der Sonne in drei Dimensionen abzubilden und physikalische Zusammenhänge zwischen inneren Strömungen und den verschiedenen Komponenten der magnetischen Aktivität, die in der Photosphäre beobachtet werden, herzustellen, um die Fragen bezüglich des Ursprungs des Magnetismus der Sonne zu behandeln.

Die MPRG ist in wichtige internationale Weltraummissionen eingebunden. Sie beteiligt sich an der Auswertung helioseismologischer Beobachtungen des Solar Dynamics Observatory der NASA, wirkt bei der wissenschaftlichen Definition der Mission Solar Orbiter der Europäischen Weltraumagentur (ESA) mit und übernimmt eine führende Rolle in dem europäischen Konsortium, das die ESA-Mission PLANetary Transits and Oscillations of stars (PLATO) vorgeschlagen hat, um extrasolare Planeten zu entdecken und ihre Zentralsterne zu untersuchen.

Ab April 2011 wird die MPRG in eine vollwertige Abteilung überführt, die sich mit der Untersuchung des Inneren der Sonne und der Sterne beschäftigen wird.

#### Helioseismologie

Millionen von Schwingungsmoden, die durch die Sonnenkonvektion angeregt werden, erlauben es Astrophysikern, ins Innere der Sonne zu blicken, ähnlich wie Geophysiker mit Hilfe von Erdbeben den inneren Aufbau der Erde untersuchen. In den letzten 25 Jahren hat die Helioseismologie eine beachtliche Anzahl an Entdeckungen im Bereich der Sonnenphysik, der stellaren Astrophysik und der fundamentalen Physik hervorgebracht. Die Helioseismologie hat den mit Abstand genauesten Test der Theorie des Sternaufbaus und der Sternentwicklung geliefert. Dieser erforderte insbesondere eine Korrektur des Standardmodells der Teilchenphysik, um das Problem der Sonnenneutrinos zu lösen. Heutzutage ist der spannendste Aspekt der Helioseismologie die Suche nach Antworten auf Fragen bezüglich des Ursprungs und der Variabilität des Sonnenmagnetfeldes, dem wohl wichtigsten ungelö-

## 1.4 Helio- and Asteroseismology

### 1.4.1 Overview

*Broadly speaking, the purpose of helioseismology and asteroseismology is to improve our understanding of the physics of the interior of the Sun and stars. They provide precise tests of the theory of stellar structure and evolution, describe phenomena beyond the standard stellar model (rotation, convection, mixing processes), and constrain theories of solar/stellar magnetism.*

*An independent Max Planck Research Group (MPRG) "Helio- and Asteroseismology" was established in 2005 at the MPS. One of the main scientific aims is to image the solar convection zone in three dimensions and reveal physical relationships between internal motions and the various components of magnetic activity observed in the photosphere, in order to address the question of the origin of solar magnetism.*

*The MPRG is involved in important international space missions. It participates in the analysis of the helioseismic observations from NASA's Solar Dynamics Observatory (SDO), contributes to the scientific definition of the Solar Orbiter mission of the European Space Agency (ESA), and plays a leading role in the European consortium that proposes PLANetary Transits and Oscillations of stars (PLATO) as an ESA mission to detect extrasolar planets and study their host stars.*

*From April 2011, the MPRG will develop into a full department dedicated to the study of solar and stellar interiors.*

#### Helioseismology

*Millions of modes of vibration, excited by solar convection, enable astrophysicists to see inside the Sun, just as geophysicists can probe the internal structure of the Earth thanks to earthquakes. Over the past twenty five years, helioseismology has produced a considerable number of discoveries in solar, stellar, and fundamental physics. Helioseismology has provided by far the most precise tests for the theory of stellar structure and evolution, implying, in particular, a revision of the standard model of particle physics to solve the solar neutrino problem. Today, the most exciting aspect of helioseismology is the search for clues regarding the origin and variability of the Sun's magnetic field, possibly the most important unsolved problem in solar physics. The general belief is that the dynamo process, whereby magnetic field lines are stretched and twisted by internal shearing motions, causes the solar magnet-*

ten Problem der Sonnenphysik. Die allgemeine Auffassung ist, dass ein Dynamoprozess den magnetischen Zyklus der Sonne verursacht, wobei magnetische Feldlinien durch Scherbewegungen im Sonneninneren gestreckt und verdreht werden. Die Helioseismologie ist unsere einzige Hoffnung, diese Modellvorstellung zu bestätigen, indem wir innere Massebewegungen sowie asphärische Strukturen und ihre zeitlichen Variationen abbilden. Dank 15 Jahren helioseismologischer Beobachtungen des SOHO-Weltraumteleskops (eine sehr erfolgreiche Zusammenarbeit zwischen ESA und NASA) und dem bodengebundenen Beobachtungsnetzwerkes GONG konnte die Helioseismologie bereits Bereiche rotationsbedingter Scherung im Sonneninneren, Variationen der Sonnenrotation in Abhängigkeit des Sonnenzyklus und rätselhaft, quasi-periodische Veränderungen am Boden der Konvektionszone nachweisen.

Die nächsten Fortschritte werden von der lokalen Helioseismologie erwartet, die dreidimensionale Abbildungen des Inneren der Sonne liefert. Die lokale Helioseismologie basiert auf der Interpretation von Korrelationen von Schwingungen, die an zwei Punkten der Oberfläche beobachtet werden. Obwohl dieser Forschungszweig noch in der Entwicklung steckt, hat er bereits einen Mechanismus für den Breitentransport von magnetischem Fluss aufzeigen können, der den 11-jährigen Sonnenzyklus bestimmen könnte. Detaillierte, dreidimensionale Karten von Strömungen unterhalb der Sonnenoberfläche werden ein Schlüssel zum Verständnis komplexer magnetohydrodynamischer Phänomene sein, die die Sonnenaktivität steuern. In einer weiteren Anwendung ermöglicht die lokale Helioseismologie die Entdeckung aktiver Regionen auf der erdabgewandten Seite der Sonne und erlaubt so die frühzeitige Warnung vor schädlichen Ereignissen des Weltraumwetters.

Der Start von SDO im Jahr 2010 war ein wichtiger technologischer Schritt für die Helioseismologie. Mit seiner hohen räumlichen Auflösung über die gesamte sichtbare Sonnenoberfläche erlaubt SDO, die Entwicklung aktiver Regionen auf der Sonne zu verfolgen, wenn sie sich als Folge der Rotation über die Sonnenscheibe bewegen. Noch vor Beendigung diesen Jahrzehnts wird uns zudem der Solar Orbiter der ESA zum ersten Mal Zugang zur inneren Dynamik der Polregionen der Sonne verschaffen.

Um mit dem riesigen SDO-Datenaufkommen von ca. 1 TB/Tag zurechtzukommen, wurden beträchtliche Rechen- und Speicherressourcen am MPS angeschafft, um das „German Data Center for SDO“ aufzubauen. Die Haupteinrichtung, die vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und dem Europäischen Forschungsrat (ERC) gefördert wurde, ist heute bereits in Betrieb. Entdeckungen bezüglich der tiefenabhängigen Struktur von Sonnenflecken und der Dynamik der oberen Konvektionszone wurden bereits gemacht.

*ic cycle. Helioseismology is our only hope to confirm this paradigm by mapping internal mass motions, structural asphericities, and their temporal variations. Thanks to fifteen years of helioseismic observations from the SOHO spacecraft (a very successful collaboration between ESA and NASA) and the ground-based network GONG, helioseismology has already provided some important results, revealing regions of rotational shear in the Sun's interior, solar-cycle variations in the rotation rate, and mysterious quasi-periodic changes at the base of the convection zone.*

*The next advances are expected to come from local helioseismology, which provides 3D views of the solar interior. Local helioseismology is based on the interpretation of the two-point correlations of the oscillations observed at the solar surface. Although still a developing science, it has already pinpointed a mechanism for the latitudinal transport of the magnetic flux that could determine the eleven-year period of the solar cycle. Detailed 3D maps of subsurface flows will be key to understanding the complex magnetohydrodynamical phenomena that control solar activity. In another application, local helioseismology can be used to detect active regions on the far side of the Sun, thus providing advance warning for harmful space weather events.*

*The launch in 2010 of SDO was an important technological step for helioseismology. With a high spatial resolution over the entire visible solar hemisphere, SDO enables us to follow the evolution of solar active regions as they rotate across the solar disk. Before the end of this decade, ESA's Solar Orbiter will, for the first time, give access to the subsurface dynamics of the Sun's polar regions.*

*In order to cope with the huge SDO data flow of the order of 1 TB/day, significant computing and storage resources were deployed at the MPS to set up a German Science Center for SDO. This major facility, supported by the German Aerospace Center (DLR) and the European Research Council (ERC), is operational today. Discoveries have been made concerning the subsurface structure of sunspots and the dynamics in the upper convection zone. Further advances will rely on new techniques of computational helioseismology, inspired*

Weitere Fortschritte werden sich, angeregt durch die Methoden der Seismologie der Erde, auf neue Techniken im Bereich der computerbasierten Helioseismologie stützen.

*from terrestrial seismology.*



Max-Planck-Forschungsgruppe im Jahr 2010

*Max Planck Research Group in 2010*

### Asteroseismologie

Die Asteroseismologie untersucht globale Schwingungen in entfernten Sternen und tritt momentan in eine sehr spannende Phase neuer Entdeckungen ein. Bei vielen Sternen mit einer breiten Spanne von Massen und Entwicklungsstadien ist bekannt, dass sie Schwingungen aufweisen. In den letzten Jahren wurden große Fortschritte mit dem Betrieb des CNES/ESA-Satelliten CoRoT und der NASA-Mission Kepler gemacht. Beide Teleskope liefern hervorragende asteroseismologische Daten für einige Dutzend sonnenähnliche Sterne.

Stellare Schwingungen haben ein beachtliches diagnostisches Potential und ermöglichen es, die Masse und das Alter von Sternen mit unvergleichlicher Genauigkeit zu messen. Diese Kenntnis für eine hinreichende Anzahl von Sternen wird unsere Vorstellung von der Sternentwicklung und die Untersuchung galaktischer Entwicklung revolutionieren. Die Asteroseismologie hat außerdem das Potential, die innere Rotation von Sternen und die Grenzen von Konvektions- und Ionisationszonen zu bestimmen. Solche Informationen würden helfen, dynamogetriebene Aktivitätszyklen von Sternen und den Zusammenhang zwischen der Sonne und anderen Sternen zu verstehen. Diese spannenden Möglichkeiten zur Untersuchung des Aufbaus, der Entwicklung und der Aktivität von Sternen wird vollständig durch hochpräzise Beobachtungen einer großen Anzahl von Sternen ermöglicht werden.

Die Asteroseismologie von Zentralsternen mit extrasolaren Planeten wird besonders für die Charakterisierung der Eigenschaften der entdeckten Planeten von Nutzen sein. Genaue seismologische Messungen der Massen und Radien der Zentralsterne ermöglichen die

### Asteroseismology

*Asteroseismology, the study of global oscillations on distant stars, is entering a very exciting period of discoveries. Many stars, covering a wide range of masses and evolutionary states, are known to exhibit oscillations. Much progress has been made in the last few years with the operation of the CoRoT satellite of CNES/ESA and the Kepler mission of NASA, which deliver excellent asteroseismic data for a few tens of Sun-like stars.*

*Stellar oscillations have considerable diagnostic potential and allow stellar mass and age to be determined with unprecedented precision. Such knowledge for a sufficient sample of stars will revolutionize stellar evolution and galactic evolution studies. Asteroseismology also has the potential to constrain internal stellar rotation and locate the borders of convection and ionization zones. Such information would help to understand dynamo-generated stellar activity cycles and the solar-stellar connection. These exciting possibilities for the study of stellar structure, evolution, and activity will be fully realized once high-precision observations become available for a large sample of stars.*

*The asteroseismology of planet-host stars will be particularly useful to characterize the properties of detected exoplanets. Precise seismic estimates of the masses and radii of host stars will make it possible to infer the masses and radii of the transiting planets.*

Bestimmung der Massen und Radien der Transitplaneten. Mit Hilfe der Asteroseismologie kann auch das Alter der Zentralsterne bestimmt werden: dies ist eine wesentliche Information für die Untersuchung der Entwicklung extrasolarer Planetensysteme.

Das Ziel von PLATO ist es, die Schwingungen von über 80000 sonnenähnlichen Sternen zu messen. Diese Sterne sind hell genug, um sie mit hochpräziser bodengebundener Spektroskopie zu weiter untersuchen. Bestätigte extrasolare Planetensysteme werden mit Hilfe der Asteroseismologie der Zentralsterne und den Folgebeobachtungen vollständig charakterisiert. Die Max-Planck-Forschungsgruppe ist ein wichtiger Partner des PLATO Missionskonsortiums. Es koordiniert die Bewertungs- und Definitionsphasen des PLATO Ground Segment.

#### **Ausgesuchte Ergebnisse der Gruppe Helio- und Asteroseismologie in den Jahren 2009/10**

An einer Reihe von Forschungsthemen und Projekten wurde im Berichtszeitraum gearbeitet:

- Herleitung von Laufzeit-Sensitivitätskernen zur Berechnung der seismischen Signatur lokaler Inhomogenitäten im Sonneninneren (Strömungen und thermodynamische Größen)
- Effiziente und genaue Inversion von Laufzeiten zur Herleitung dreidimensionaler Strömungen in den oberflächennahen Schichten der Sonne
- Numerische Vorwärts-Modellierung der Ausbreitung seismischer Wellen durch magnetisierte Strukturen
- Seismologie von Sonnenflecken auf Basis einer Modellierung der vollständigen Wellenform
- Aufbau eines Rechenzentrums für lokale Helioseismologie, gefördert durch einen *Starting Grant* des *European Research Council* (ERC)
- Anwendungen unter Verwendung von Beobachtungen des SOHO/MDI-Instruments
- Aufbau eines Datenzentrums für das *Solar Dynamics Observatory* (gefördert durch das DLR)
- Fourier-Analyse von sonnenähnlichen Schwingungen in entfernten Sternen
- Koordination der Studien zum PLATO-Bodensegment im Rahmen der Evaluierungs- und Definitionsphase; Asteroseismologie von Sternen mit Planeten.

Im Folgenden werden zwei Themen genauer vorgestellt: Zunächst eine Studie der inneren Struktur von Sonnenflecken, die Beobachtungen und numerische Modelle kombiniert. Anschließend die eindeutige Entdeckung der inneren Rotation im sonnenähnlichen Stern HD52265 mit asteroseismologischen Methoden auf der Basis von CoRoT-Beobachtungen.

*With asteroseismology, the ages of planet-host stars will be measured: crucial information for studies of the evolution of exoplanetary systems.*

*The goal of PLATO is to measure the oscillations of over 80,000 Sun-like stars, bright enough to be studied further with high-precision spectroscopy from the ground. Confirmed planetary systems will be fully characterized through the asteroseismology of their host stars and the follow-up observations. The Max Planck Research Group is an important partner in the PLATO mission consortium, as it coordinates the assessment and development phase studies of the PLATO Ground Segment.*

#### ***Selected results of the helio- and asteroseismology group in 2009/10***

*Various research topics and projects were covered during the reporting period:*

- *Derivation of traveltime sensitivity kernels to compute the seismic signature of localized heterogeneities in the solar interior (flows and thermodynamic quantities)*
- *Efficient and accurate inversions of traveltimes to infer three-dimensional flows in the near surface layers of the Sun*
- *Numerical forward modelling of seismic wave propagation through magnetized structure*
- *Sunspot seismology based on full waveform modelling*
- *Set-up of a computing centre for local helioseismology, supported by a Starting Grant from the European Research Council (ERC)*
- *Applications using space observations from the SOHO/MDI instrument*
- *Set-up of a data centre for the Solar Dynamics Observatory (supported by the German space agency, DLR)*
- *Fourier analysis of solar-like oscillations in distant stars*
- *Coordination of the Assessment Phase and Definition Phase studies of the PLATO ground segment; Asteroseismology of planet-host stars.*

*In the following pages two particular topics are presented in more detail. First, a study of sunspot internal structure that combines observations and numerical modeling. Second, the unambiguous detection of internal rotation by means of asteroseismology in the Sun-like star HD52265 observed by CoRoT.*

## 1.4.2 Seismologie von Sonnenflecken

### Einleitung

Sonnenflecken sind große Konzentrationen von starkem magnetischem Fluss, die durch die Sonnenoberfläche hindurchtreten. Somit stellen sie eine wichtige Verbindung zwischen dem inneren Magnetfeld der Sonne und ihrer näheren Umgebung dar, und sind eine der zentralen Herausforderungen bei der Erforschung der Sonne. Sie treten in Form von Bändern auf, die sich bis in Breiten von ca.  $30^\circ$  nördlich und südlich des Äquators erstrecken; ihre Verteilung ändert sich gemäß dem 11-jährigen Sonnenzyklus. Während sich Sonnenflecken leicht an der Oberfläche beobachten lassen, ist die Erforschung ihrer Struktur unterhalb der Sonnenoberfläche keinesfalls eine leichte Aufgabe. Eine Reihe wichtiger Fragen, die sich in dem Zusammenhang stellen, können allerdings mit Hilfe der Helioseismologie untersucht werden, wie zum Beispiel:

- i) Die Eigenschaften oberflächennaher Plasmaströmungen: Sind Sonnenflecken umgeben von inwärts oder auswärts gerichteten Strömungen? Wie tief reicht dieses Strömungssystem?
- ii) Die Struktur unterhalb der Oberfläche: Haben Sonnenflecken eine tiefreichende oder eine flache Struktur? Besitzen sie eine zweischichtige Struktur bezüglich ihrer Wellenausbreitungsgeschwindigkeit (also ein flacher Bereich verringerter Wellengeschwindigkeit bis in eine Tiefe von ca. 3 Mm unterhalb der Oberfläche, gefolgt von einer ausgedehnten Schicht erhöhter Wellengeschwindigkeit bis in eine Tiefe von ca. 20 Mm), oder besitzen sie nur eine Schicht (also lediglich eine flache Schicht erhöhter Wellengeschwindigkeit)?
- iii) Die Feldanordnung des Magnetfeldes unterhalb der Oberfläche: Besitzen Sonnenflecken einen monolithischen Feldstruktur (die als einzelne Flussröhre beschrieben werden kann) oder besitzen sie eine faserartige Struktur (die die Flussröhre unterhalb der Oberfläche in viele kleine Fasern aufspaltet)?

Die lokale Helioseismologie ist die einzige Methode, die es uns mit Hilfe der Auswertung von Schwingungen der Sonne erlaubt, die Eigenschaften der Sonne unterhalb der Photosphäre (d.h. unterhalb der sichtbaren Sonnenoberfläche), zu untersuchen. Es existieren verschiedene helioseismologische Methoden, um diese Schwingungen zu analysieren. Die Fourier-Hankel-Methode wurde beispielsweise in der Vergangenheit erfolgreich eingesetzt, um die Wechselwirkung von Schallwellen mit Sonnenflecken zu studieren. Diese Methode zerlegt das Signal der solaren Schwingungen, das in einem Kreisring um den Sonnenfleck beobachtet wird, in einen einlaufenden und einen auslaufenden Anteil. Eine andere Technik ist die Ringdiagramm-Analyse. Ringdiagramme sind lokale

## 1.4.2 Sunspot seismology

### Introduction

*Sunspots are very large and strong magnetic flux concentrations that have intersected with the solar surface. As such, they represent one of the major connections of the internal magnetic field of the Sun with its wider environs, and also an ongoing challenge in the study of the Sun. They tend to occur in bands centered on the equator that extends to latitudes of  $30^\circ$  and their distribution varies with the 11 year solar cycle. But while sunspots are easily observed at the surface, determining their subsurface structure is no trivial matter. As such, there are a number of outstanding issues that need to be addressed by helioseismologists, including:*

- i) The nature of near-surface plasma flows: are sunspots surrounded by inflows or outflows? How deep does the flow system extend?*
- ii) The subsurface structure: are sunspots deep or shallow structures? Do they comprise a "dual-layered" wave-speed structure (i.e., a shallow region of decreased wave-speed down to a depth of approx. 3 Mm below the surface, followed by an extended region of enhanced wave-speed down to a depth of approx. 20 Mm), or are they single-layered (i.e., comprising only a shallow wave-speed enhancement)?*
- iii) The subsurface field configuration: do sunspots possess a monolithic subsurface flux configuration (which can be represented as a single flux tube), or do they possess a fibril structure (which fragments the flux tube into many small strands below the surface)?*

*Local helioseismology is the only means by which we can investigate structures below the photosphere (i.e., the visible surface of the Sun) through the study of solar oscillations. Various local helioseismic techniques exist to analyse the oscillations. For example, Fourier-Hankel analysis has been used successfully in the past for studying the interaction of acoustic waves with sunspots. This process decomposes the solar oscillation signal, observed in an annulus around a sunspot, into inward and outward propagating wave modes. Another technique is the ring-diagram method. Ring-diagrams are local power spectra of the wave field. Cuts at constant frequency through the three-dimensional power-spectrum reveal nested ellipses or rings that change shape and shift center under the*

Leistungsdichtespektren des Wellenfeldes. Querschnitte durch die Leistungsdichtespektren bei konstanter Frequenz zeigen verschachtelte Ellipsen oder Ringe, die unter dem Einfluss von Änderungen des Sonnenmediums ihre Form ändern und/oder ihren Mittelpunkt verschieben. Die Laufzeit-Entfernungs-Analyse ist eine weitere Methode, bei der man die Laufzeit eines Wellenpakets zwischen zwei Punkten auf der Sonnenoberfläche berechnet. Schließlich gibt es noch die Methode der helioseismologischen Holographie (akustische Abbildung), eine Methode, bei der das Wellenfeld unterhalb der Sonnenoberfläche rekonstruiert wird, indem man die Ausbreitung von Wellen vorwärts oder rückwärts in der Zeit berechnet.

Im Laufe der Zeit hat die lokale Helioseismologie gezeigt, dass sich die Wellenausbreitung in einem Sonnenfleck von der Ausbreitung in der ruhigen Sonne unterscheidet [für einen aktuellen Überblick, siehe Gizon et al. [2010]. Die Laufzeitverschiebungen in der Umgebung von Sonnenflecken werden als Folge von Magnetfeldern, Strömungen und lokalen Änderungen der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schallwellen interpretiert. In diesem Artikel präsentieren wir einige neue Ergebnisse helioseismologischer Studien, die am MPS erzielt wurden. Dabei wurden die tiefenabhängigen Eigenschaften eines Sonnenflecks in der aktiven Region (AR) 9787, einem großen, isolierten und kreisförmigen Sonnenfleck, untersucht.

### Strömungen in Sonnenflecken

In der Photosphäre sind Sonnenflecken normalerweise umgeben von horizontalen, auswärts gerichteten Strömungen, dem sogenannten "moat flow". Mit Amplituden von einigen hundert Metern pro Sekunde kann diese Strömung als Eigenbewegung von Granulationzellen (den sichtbaren Strukturen in der Photosphäre, die durch Konvektionsströmungen erzeugt werden) sowie durch Messungen der Dopplerverschiebung von Spektrallinien beobachtet werden. Der "moat flow" wurde kürzlich auch mit Hilfe der lokalen Helioseismologie durch die Inversion von Wellenlaufzeiten nachgewiesen [Gizon et al., 2009]. Ausgangspunkt eines helioseismologischen Inversionsproblems sind eine Reihe von Messwerten (z.B. Laufzeiten). Das Ergebnis der Inversion erlaubt Rückschlüsse auf die physikalischen Prozesse, die zu diesen Messungen geführt haben. Unter der Voraussetzung, dass Inhomogenitäten unterhalb der Sonnenoberfläche klein sind, ist es möglich, einen linearen Zusammenhang zwischen den Laufzeitmessungen und den inneren Eigenschaften der Sonne herzustellen.

Durch Filterung der Beobachtungsdaten wurden die Laufzeiten der Oberflächenschwerewellen (f-Moden) und der Schallwellen (p-Moden) bestimmt. Diese Laufzeiten wurden anschließend für Inversionsrechnungen verwendet, um Strömungen um den Sonnenfleck der aktiven Region AR 9787 zu bestimmen. Diese

*influence of alterations to the solar medium. Time-distance analysis is another method which computes the travel time of a wave packet travelling between two points on the solar surface. Finally, there is the method of helioseismic holography (acoustic imaging), a diagnostic tool which reconstructs the subsurface wave fields by propagating waves either forward or backward in time.*

*Over the years, local helioseismology has shown that wave propagation is different in sunspots than in the quiet Sun (see Gizon et al. [2010] for a recent review), with the wave travel-time shifts in the vicinity of sunspots typically interpreted as arising predominantly from magnetic fields, flows, and local changes in sound speed. In this article, we present some recent results obtained at the MPS from helioseismic analysis of the subsurface properties of the sunspot in active region (AR) 9787 - a large, round, isolated sunspot which appeared on the solar disk from 20-28 January 2002.*

### Sunspot flows

*In the photosphere, sunspots are typically surrounded by diverging horizontal outflows, termed "moat flows". With amplitudes of several hundred meters per second, they can be seen by proper motions of granules (the visible structures in the photosphere caused by convective flows) as well as by Doppler-shift measurements. The moat flow has also been recently detected by local helioseismology, through linear inversions of travel times [Gizon et al., 2009]. In a helioseismic inverse problem, the starting point is a set of measurements (e.g., travel times) and the final product is the physical implication of the said measurements. Under the assumption that subsurface inhomogeneities are weak, it is possible to write a linear relationship between travel-time measurements and internal solar properties.*

*Time-distance travel times of AR 9787 were derived using filtering that isolated the surface gravity (f-mode) and acoustic (p-mode) waves. These travel times were then used to produce linear inversions for flows around the sunspot in active region AR 9787. These inversions showed an azimuthally averaged hor-*

Inversionen zeigen eine azimuthal gemittelte, horizontal auswärts gerichtete Strömung in den ersten 4 Mm unter der Sonnenoberfläche, die einen Maximalwert von 230 m/s in einer Tiefe von 2.6 Mm und in einem radialen Abstand von ca. 5 Mm vom Fleckenrand erreicht. Abb. 1 zeigt eine Aufnahme der Inversionsmessungen um den Sonnenfleck in einer Tiefe von 1 Mm.

Diese Messungen des "moat flows" wurden durch Ringdiagramm-Studien von Moradi et al. [2010] bestätigt. Die helioseismologischen Ergebnisse stimmen mit Beobachtungen des "moat flows" in AR 9787 von Gizon et al. [2009] überein. Stärke und Ausdehnung des "moat flow" wurden hier aus der beobachteten Bewegung magnetischer Elemente bestimmt, die mit Hilfe des lokalen "correlation tracking" gemessen wurde.

*horizontal outflow in the first 4 Mm beneath the surface, reaching an amplitude of 230 m/s at a depth of 2.6 Mm and radial distance of some 5 Mm outside the outer spot boundary. Fig. 1 shows a snapshot of the inversion results at a depth of 1 Mm around the sunspot.*

*Such measurements of the subsurface moat flow have been confirmed by ring-diagram analysis undertaken by Moradi et al. [2010]. The helioseismology results were in line with observations of the moat flow in AR 9787 presented by Gizon et al. [2009], the strength and extent of which was characterized by measuring the observed motion of the moving magnetic features using a local correlation-tracking method.*

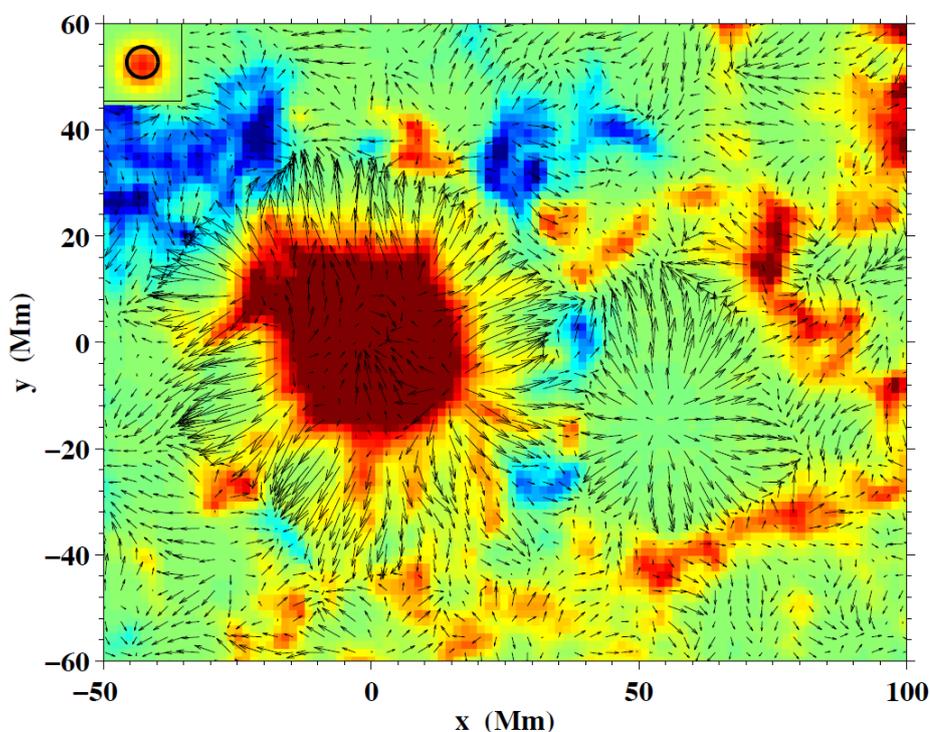


Abb. 1: Karte der horizontalen Strömung (Pfeile) um den Sonnenfleck in AR 9787 in einer Tiefe von 1 Mm. Die Strömungswerte basieren auf helioseismologischen Inversionen von Laufzeitmessungen und wurden mit Hilfe der Daten des MDI-Instruments an Bord des SoHO-Weltraumteleskops bestimmt (mit den Daten eines Tages, dem 24. Januar 2002, aufgenommen im "full disk"-Modus). Der längste Pfeil entspricht einer Strömungsgeschwindigkeit von 450 m/s. Die Farbkodierung zeigt die Stärke des Magnetfeldes an der Oberfläche in Richtung der Sichtlinie; rot und blau entsprechen unterschiedlichen Polaritäten des Magnetfeldes (Sättigung bei  $\pm 350$  G).

*Fig. 1: Map of horizontal flows (arrows) at a depth of 1 Mm around the sunspot in AR 9787 derived using one day (January 24, 2002) of full disk data from the MDI instrument onboard the SoHO spacecraft and time-distance helioseismology. The longest arrow corresponds to a flow of 450 m/s. The surface line-of-sight magnetic field is displayed in red and blue shades corresponding to the opposite polarities (saturated at  $\pm 350$  G).*

### Aufbau von Sonnenflecken

Zeit-Entfernungs-Helioseismologie, Holographie und Ringdiagramme wurden angewendet, um Änderungen der Wellengeschwindigkeit in Sonnenflecken zu bestimmen. Die Interpretationen der Ergebnisse, die mit

### Sunspot structure

*Time-distance helioseismology, holography, and ring diagrams have all been used to infer changes in the wave speed in sunspots. However, interpretations of data have been somewhat ambiguous and incon-*

den Anwendungen der Methoden der lokalen Helioseismologie auf aktive Regionen der Sonne erzielt wurden, waren jedoch nicht immer eindeutig und konsistent. Abb. 2 zeigt einen Vergleich einer Zeit-Entfernungs-Inversion und einer Ringdiagramm-Inversion [Gizon et al., 2009]. Das Ergebnis einer realistischen numerischen Simulation eines Sonnenflecks [Rempel et al., 2009] sowie die Perturbation unterhalb der Oberfläche, wie sie ein phänomenologisches Modell nahegelegt, das mit der Fourier-Hankel-Analyse des Sonnenflecks in der aktiven Region 5254 im Zeitraum vom 27.-30. November 1988 abgeleitet wurde (Fan, Braun and Chou, 1995, ApJ 451, 877), sind zum Vergleich mit abgebildet.

*sistent for applications of local helioseismic methods in solar active regions. Fig. 2 shows a comparison between time-distance and ring-analysis inversions [Gizon et al., 2009]. For comparative purposes, the results of the subsurface perturbation suggested by a phenomenological model based on the Fourier-Hankel analysis of the sunspot in Active Region 5254 during November 27-30, 1988 (Fan, Braun and Chou, 1995, ApJ 451, 877), and a realistic numerical simulation of a sunspot [Rempel et al., 2009], are also plotted.*

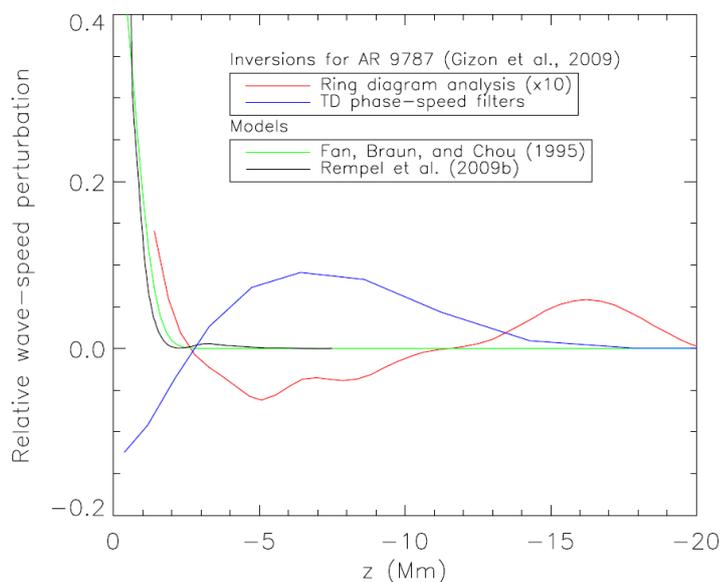


Abb. 2: Vergleich verschiedener helioseismologischer Methoden zur Bestimmung der Perturbation der Wellengeschwindigkeit unterhalb der aktiven Region AR 9787. Die rote und die blaue Kurve zeigen die Ergebnisse der Ringdiagramm-Analyse sowie der nach Phasengeschwindigkeit gefilterten Zeit-Entfernungs-Analyse. Die Zeit-Entfernungs-Analyse entspricht dem Ergebnis entlang der Achse des Sonnenflecks; das Ergebnis der Ringdiagramm-Analyse ist mit einem Faktor 10 skaliert. Die schwarze Kurve zeigt die Störung einer schnellen Schwingungsmode ("fast mode") in einer magnetohydrodynamischen (MHD) Simulation unter Einbeziehung von Strahlungstransport. Die grüne Kurve entspricht einer axialen Wellengeschwindigkeitsstörung, die von einem phänomenologischen Fourier-Hankel-Modell abgeleitet wurde.

*Figure 2: Comparison of different helioseismic methods used to infer wave speed perturbations below AR 9787. The red and blue curves show the ring-diagram and phase-speed filtered time-distance results, respectively. The time-distance result is shown along the axis of the sunspot; the ring-diagram result has been scaled by a factor of 10. The black curve indicates the fast mode speed perturbation from radiative magnetohydrodynamical (MHD) simulations. The green line represents the on-axis wave-speed perturbations deduced from a Fourier-Hankel phenomenological model.*

Es wird deutlich, dass die zwei Inversionsmethoden Profile der Wellengeschwindigkeit erzeugen, die unterschiedliche Vorzeichen und Amplituden aufweisen. Gizon et al. [2009] und Moradi et al. [2010] diskutieren eine Reihe von Faktoren, die zu solch einem Unterschied führen können. Dazu gehört z.B. die Beobachtung, dass die Ringdiagramm-Inversion oberflächennahe Effekte mit einbezieht, während sie in der Zeit-Entfernungsanalyse nicht berücksichtigt werden. Weiterhin beachtet keine der beiden Methoden sämtliche

*As is evident, the two inversions give subsurface wave-speed profiles with opposite signs and different amplitudes. Gizon et al. [2009] and Moradi et al. [2010] discussed a number of factors which could contribute to such a disagreement, including the observation that the ring-diagram inversions include a treatment of near-surface effects absent from the time-distance analyses. Furthermore, neither method fully accounts for the details of the measurement procedures, especially in the case of time-distance,*

Details des Messverfahrens. Dies trifft insbesondere auf die Zeit-Entfernungs-Analyse zu, bei der die Effekte der Datenfilterung nicht vollständig berücksichtigt werden. Der vermutlich kritischste Punkt ist aber, dass beide Inversionsmethoden Sensitivitäts-Funktionen verwenden, die die Effekte des Magnetfeldes nicht explizit einschließen, und dass beide Methoden die Störungen der Wellengeschwindigkeit (inkorrekt) als klein annehmen.

### Diskussion und Ausblick

Berücksichtigt man all diese Einschränkungen, dann ist es beachtenswert, dass drei von vier Kurven in Abb. 2 auf eine starke positive Störung der Wellengeschwindigkeit, die sich bis in eine Tiefe von 2.5 Mm unterhalb der Oberfläche erstreckt, hindeuten. Unterhalb dieser Tiefe zeigen die helioseismologischen Inversionen deutlich stärkere Störungen der Ausbreitungsgeschwindigkeit (wenn auch mit unterschiedlichen Vorzeichen) als die anderen beiden Methoden. Direkte numerische Simulationen der Wellenausbreitung durch magnetische Modelle von Sonnenflecken sind die einzige Möglichkeit, um die Gültigkeit dieser Modelle zu testen. Cameron et al. [2008, 2011] haben kürzlich den "Semispectral Linear MHD" (SLiM) Code verwendet, um die Wellenausbreitung von f- und p-Moden durch das Modell eines Sonnenflecks, der sich nicht tiefer als 2 Mm erstreckt, zu berechnen. In Abb. 3 zeigen wir die Berechnung der Ausbreitung eines Wellenpakets von f- und p-Moden (rechte Seite der Abbildung), bei dem derselbe Code und dasselbe Sonnenfleckmodell für AR 9787 verwendet wurde wie in Cameron et al. [2011]. Um die Gültigkeit des zu Grunde liegenden Modells zu überprüfen, wird das simulierte Wellenfeld mit der von SoHO-MDI beobachteten Kreuzkovarianzfunktion verglichen (linke Seite der Abbildung). Die Kreuzkovarianzfunktion ist im Wesentlichen ein phasenkohärenter Mittelwert von zufälligen Sonnenschwingungen. Sie erlaubt es, die Wellenlaufzeit zwischen zwei Punkten auf der Oberfläche zu messen. Die Position des Sonnenflecks ist in der Mitte, wobei die Kreise die Ränder der Umbra (dunkler, zentraler Bereich eines Sonnenflecks) und der Penumbra (filamentartige Struktur um den Sonnenfleck herum) kennzeichnen.

Der Vergleich mit den Beobachtungen ist vielversprechend: Die beobachtete Kreuzkovarianz zeigt, dass die Wellen beim Durchgang durch den Sonnenfleck in allen drei Fällen beschleunigt werden, während ihre Amplituden im Vergleich zur ruhigen Sonne abnehmen. Die Simulationen sind wohl das stärkste Argument für ein flaches Modell mit hohen Wellengeschwindigkeiten. Die Ergebnisse der Strömungsinversionen und der numerischen Simulationen wurden in der Illustration in Abb. 4 miteinander kombiniert und fassen die wesentlichen Ergebnisse der helioseismologischen Studie zur Tiefenstruktur von AR 9787 zusammen.

*where the effects of the data analysis filtering are not fully accounted for. Most critically perhaps, both inversion methods use sensitivity functions that do not explicitly include the direct effects of the magnetic field, and both (incorrectly) assume that wave-speed perturbations are small.*

### Discussion and perspective

*Keeping in mind all of the above caveats, it is worth noting that three out of four curves shown in Fig. 2 are consistent with a strong, positive wave-speed perturbation extending about 2.5 Mm below the surface. Below this depth, the helioseismic inversions show considerably stronger deep wave-speed perturbations (albeit, of opposite signs) than the other methods. Direct numerical simulations of wave propagation through magnetic sunspot models are the only way to test the validity of these models. Cameron et al. [2008, 2011] have recently used the Semispectral Linear MHD (SLiM) code to compute the propagation of f and p modes through a model sunspot extending no deeper than 2 Mm. In Fig. 3, we show the computation for the propagation of f and p wave packets (right panels), using the same simulation code and sunspot model of AR 9787 as Cameron et al. [2011]. In order to assess the validity of the underlying sunspot model, the simulated wave field, is compared to the observed SoHO-MDI cross-covariance functions (left panels). The cross-covariance is essentially a phase coherent average of the random solar oscillations. It provides a way to measure wave travel times between two surface locations. The sunspot AR 9787 is located at the origin, with the circles showing the boundaries of the umbra (dark central region of a sunspot) and penumbra (filamentary structure surrounding the umbra).*

*The comparison with the observations is promising: The observed cross-covariances show that, in all cases, solar waves speed up through the sunspot and that their amplitudes are reduced relative to the quiet Sun. These simulations are perhaps the strongest argument in favor of a shallow, fast wave-speed model. The results of the flow inversions and the numerical simulations have been combined in the illustration in Fig. 4, summarizing the key findings of the helioseismic analysis of the subsurface properties of AR 9787.*

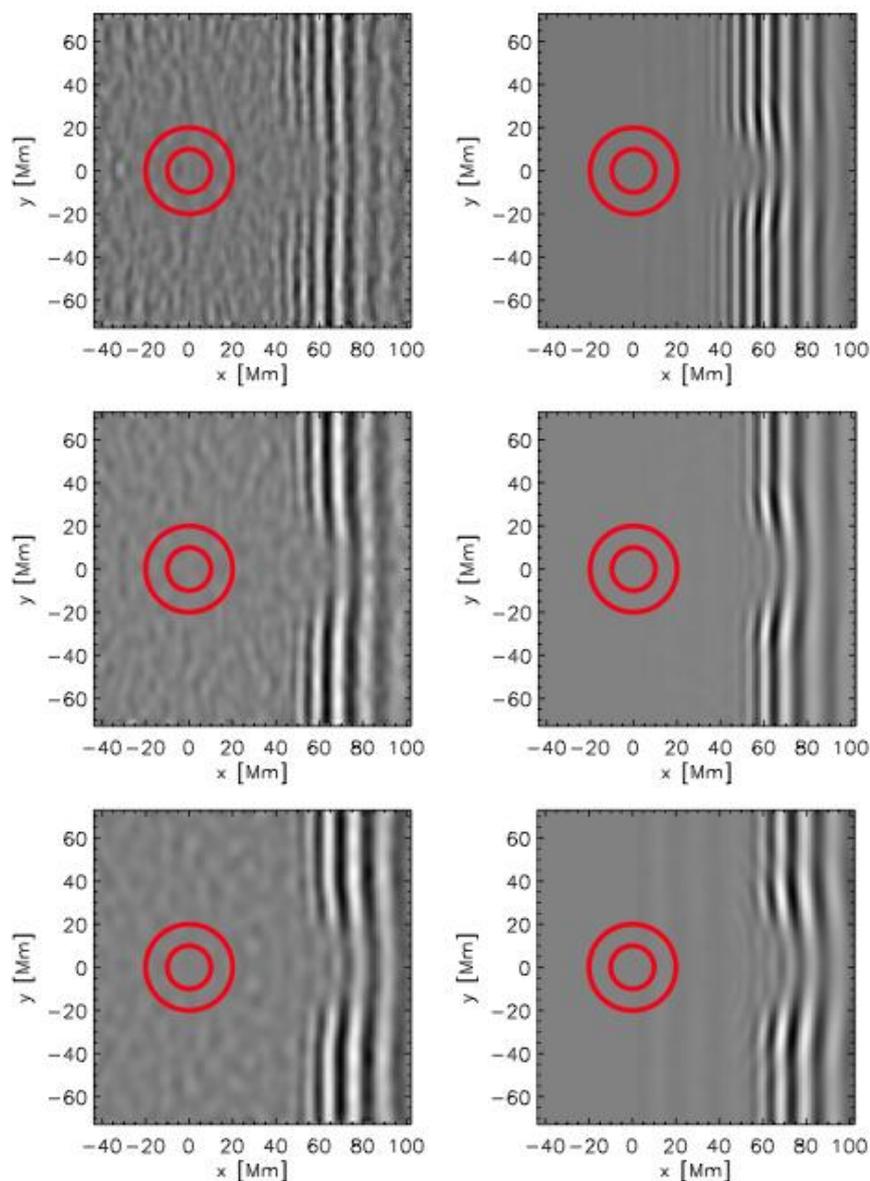


Abb. 3: Vergleich der beobachteten SoHO-MDI Kreuzkovarianzfunktion (linke Spalte) und der numerischen Simulation der Ausbreitung von Wellenpaketen (rechte Spalte) durch ein Modell eines Sonnenflecks. Die obere Reihe zeigt die Kreuzkovarianzfunktion (links) und die Simulation (rechts) einer f-Mode nach  $t = 185$  min, während in der mittleren und in der unteren Reihe das gleiche für verschiedene p-Moden nach  $t = 165$  min bzw.  $t = 145$  min dargestellt ist.

*Fig. 3: Comparison of observed SoHO-MDI cross-covariance functions (left panels), and numerical simulations of wave packets (right panels) through the model sunspot. The top panels show the cross-covariance (left panels) and simulations (right panels) for the f-mode at  $t = 185$  min, while the middle and bottom panels show the same but for various p-modes at  $t = 165$  min and  $t = 145$  min, respectively.*

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass die Seismologie von Sonnenflecken stark von den verbesserten Beobachtungen des Solar Dynamics Observatory (SDO, gestartet in 2010) profitieren wird. Der Helioseismic and Magnetic Imager (HMI), ein Instrument an Bord von SDO, wird nicht nur Doppler-Abbildungen der Sonnenoberfläche mit höherer Auflösung liefern, sondern zusätzlich vollständige Vektor-Magnetogramme zur Verfügung stellen. Verlässliche Messungen des Magnetfeldes in der Photosphäre werden ein Schlüssel

*Finally, we note that sunspot seismology will benefit greatly from improved observations by the Solar Dynamics Observatory (SDO), launched in 2010. The Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) instrument onboard SDO will not only provide higher-resolution Doppler images of the solar disk, but it will also provide full vector magnetograms. Reliable measurements of the photospheric magnetic field will be key to constraining the near-surface layers of sunspot models, as detailed models of the surface layers are a*

sein bei der Verbesserung unseres Verständnisses der oberflächennahen Schichten von Sonnenfleckmodellen. Diese detaillierten Modelle der Oberflächenschichten sind notwendig, um die tieferen Strukturen von Sonnenflecken zu untersuchen.

*necessity in order to probe the deeper structure of sunspots.*

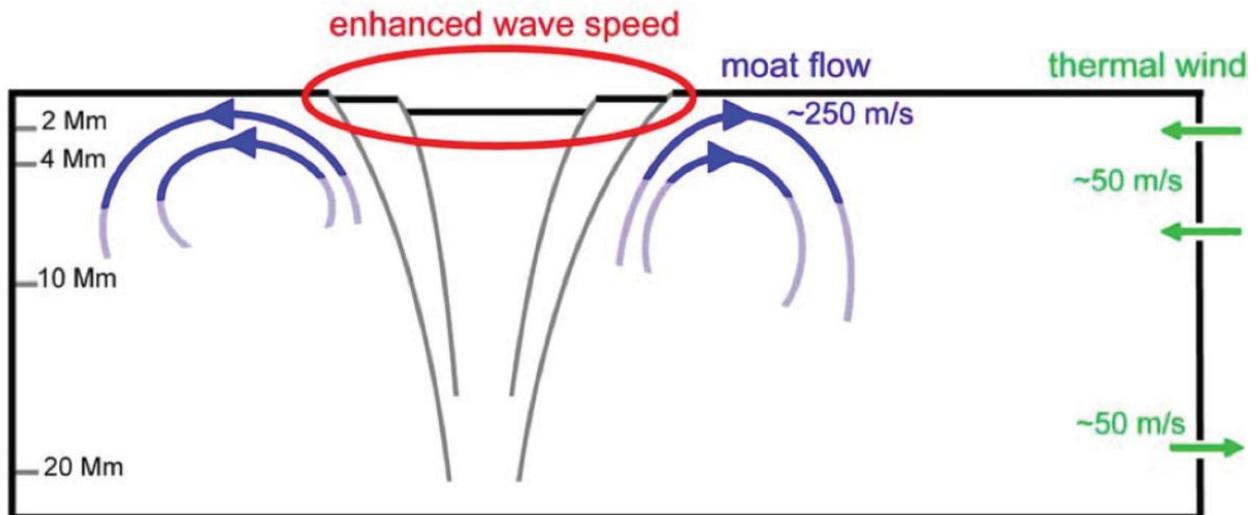


Abb. 4: Illustration der abgeleiteten Eigenschaften unterhalb der Oberfläche von AR 9787. Abweichend vom traditionellen Bild der Tiefenstruktur von Sonnenflecken, das bisher vorherrschte, spielen sich fast alle Änderungen in den oberflächennahen Schichten ab. Dieser Sonnenfleck zeigt, in Übereinstimmung mit direkten Beobachtungen an der Oberfläche, auswärts gerichtete Strömungen nahe der Oberfläche (anstatt einer Strömung zum Sonnenfleck hin), sowie lediglich einen Bereich erhöhter Wellenausbreitungsgeschwindigkeit (anstatt des traditionellen "Zweischicht"-Modells).

*Fig. 4: An illustration of the inferred subsurface properties of AR 9787. Unlike the traditional view of the subsurface structure of sunspots that has prevailed until recently, almost all changes are localized in the near-surface layers. This sunspot shows near-surface outflows (instead of inflows), which is consistent with direct surface observations, as well as only a region of enhanced wave-speed (instead of the traditional two-layer model).*

#### Ausgewählte Veröffentlichungen

##### *Selected publications*

Cameron, R., L. Gizon, and T. L. Duvall, Jr.: Helioseismology of sunspots: Confronting observations with three-dimensional MHD simulations of wave propagation. *Solar Phys.* 251, 291–308 (2008), doi: 10.1007/s11207-008-9148-1.

Cameron, R., L. Gizon, H. Schunker, and A. Pietarila: Constructing Semi-Empirical Sunspot Models for Helioseismology. *Solar Phys.* 268, 293–308 (2011), doi:10.1007/s11207-010-9631-3.

Gizon, L., A. C. Birch, and H. C. Spruit: Local Helioseismology: Three-Dimensional Imaging of the Solar Interior. *Annual Rev. Astron. Astrophys.* 48, 289–338 (2010), doi:10.1146/annurev-astro-082708-101722.

Gizon, L., H. Schunker, C. S. Baldner, et al.: Helioseismology of sunspots: a case study of NOAA region 9787. *Space Sci. Rev.* 144, 249–273 (2009), doi:10.1007/s11214-008-9466-5.

Moradi, H., C. Baldner, A. C. Birch, et al.: Modeling the subsurface structure of sunspots. *Solar Phys.* 267, 1–62 (2010), doi:10.1007/s11207-010-9630-4.

Rempel, M., M. Schüssler, R. H. Cameron, and M. Knölker: Penumbra structure and outflows in simulated sunspots. *Science* 325, 171–174 (2009), doi:10.1126/science.1173798.

### 1.4.3 Asteroseismologie eines sonnenähnlichen, planetentragenden Sterns

#### Einleitung

Die Asteroseismologie ist ein spezielles Werkzeug, um den inneren Aufbau, die Entwicklung und die dynamischen Prozesse entfernter Sterne zu untersuchen. Viele Sterne verschiedenen Typs und Entwicklungsstades zeigen globale Schwingungen, die an ihrer Oberfläche in Form von Helligkeitsvariationen oder Oberflächenbewegungen sichtbar sind. Sonnenähnliche Schwingungen sind Schallwellen (p-Moden), die durch turbulente Konvektion in den oberflächennahen Schichten des Sterns angeregt werden. Sie können in Sternen mit einer äußeren Konvektionszone beobachtet werden, z.B. in sonnenähnlichen Sternen und Roten Riesen. In der Sonne konnten rund zehn Millionen Schwingungen beobachtet werden, da man ihre Oberfläche räumlich auflösen kann. Der Nachweis von Schwingungen in entfernten Sternen ist eine weitaus größere Herausforderung, da Sternenlicht hier nur über die gesamte Oberfläche integriert gemessen werden kann. Daher sind asteroseismologische Studien auf einige Dutzend globale Schwingungsmoden, im Wesentlichen radiale ( $\ell = 0$ ), Dipol- ( $\ell = 1$ ) und Quadrupolmoden ( $\ell = 2$ ), beschränkt. Diese Schwingungen, insbesondere ihre Frequenzen, verraten viel über die innere Struktur und die dynamischen Eigenschaften von Sternen. Das Hauptresultat asteroseismologischer Studien sind genaue Messungen fundamentaler stellarer Parameter wie Radius, Masse, Alter und chemische Zusammensetzung. Außerdem erlaubt die Asteroseismologie grundsätzlich die Messung der inneren Rotation von Sternen. Asteroseismologische Präzisionsmessungen erfordern lange und ununterbrochene Beobachtungen. Dank eigens dafür konzipierter Weltraummissionen wie der CNES/ESA-Mission CoRoT und der NASA-Mission Kepler ist die Asteroseismologie sonnenähnlicher Sterne heute realisierbar.

CoRoT ist eine CNES/ESA Mission, die im Dezember 2006 gestartet wurde. Ihre präzisen photometrischen Messungen im Weltraum ermöglichen asteroseismologische Untersuchungen von Sternen und die Entdeckung extrasolarer Planeten, d.h. Planeten um Sterne außerhalb unseres Sonnensystems. Das MPS war bei der Auswahl des Beobachtungsobjektes HD 52265 involviert. HD 52265 ist der einzige sonnenähnliche Stern im Beobachtungsfeld von CoRoT, der gleichzeitig auch einen Exoplaneten beherbergt. Der Stern wurde 2008/09 für vier Monate ununterbrochen beobachtet. Die CoRoT-Beobachtung von HD 52265 bieten einen der besten derzeit vorliegenden Datensätze. Die Qualität der Daten ermöglichte uns zum ersten Mal, stellare Rotation in einem sonnenähnlichen Stern mit Hilfe der Asteroseismologie nachzuweisen [Stahn, 2010].

### 1.4.3 Asteroseismology of a Sun-like planet-host star

#### Introduction

*Asteroseismology is a unique tool to study the interior structure, the evolution, and the global dynamics of distant stars. Many stars of various types and evolutionary stages undergo global oscillations, which can be observed at the stellar surface in terms of brightness variations or surface motions. Solar-like oscillations are acoustic waves (p modes) which are excited by turbulent convection in the near surface layers of the star. They can be observed in stars with an outer convection zone, in particular solar-like stars and red giants. Thanks to the ability to make images of the solar surface, about ten million modes of oscillations have been measured in the Sun. The detection of oscillations in distant stars is much more challenging because stellar time series are observations of the disk-integrated light of a star. Therefore, asteroseismic studies are restricted to a few tens of global modes of oscillations, i.e. radial ( $\ell = 0$ ), dipole ( $\ell = 1$ ), and quadrupole ( $\ell = 2$ ) modes. These oscillations, in particular their frequencies, contain precious information on the structure and dynamics of stellar interiors. The main outcome of asteroseismic studies are precise estimates of the fundamental stellar parameters, e.g. stellar radii, masses, ages, and initial chemical composition. In addition asteroseismology allows in principle to infer stellar interior rotation. High precision asteroseismology requires long and uninterrupted observations. Thanks to dedicated space missions like the CNES/ESA mission CoRoT and the NASA mission Kepler, asteroseismology of Sun-like stars is now a reality.*

*CoRoT is a CNES/ESA mission that was launched in December 2006. It performs high-precision space photometry suitable for asteroseismology and the detection of exoplanets. The MPS was involved in the selection of the primary target HD 52265, the only known Sun-like planet host star in the CoRoT seismology field. HD 52265 was observed continuously for 4 months in 2008/09. The CoRoT observations of HD 52265 provide one of the best data sets available until now. The quality of the data enabled us to infer for the first time stellar rotation in a Sun-like star by means of asteroseismology [Stahn, 2010].*



Sonnenähnliche Schwingungen können am besten im Frequenzraum statt im Zeitraum analysiert werden. Abb. 1 zeigt das Leistungsdichtespektrum der 117-tägigen CoRoT-Beobachtung von HD 52265. Die typische, kammartige Struktur sonnenähnlicher Schwingungen ist offensichtlich. Es ist bemerkenswert, dass die radialen Moden und die Quadrupolmoden deutlich voneinander getrennt sind. Die Qualität der Daten ist mit oberflächenintegrierten Sonnenbeobachtungen aus den frühen 1980ern vergleichbar; lediglich das Photonenrauschen ist höher. Der nahezu regelmäßige Frequenzabstand zwischen den Moden wird durch die „Large separation“ ( $\Delta\nu$ ) zwischen Moden mit dem gleichen  $\ell$  und der „Small separation“ ( $\delta\nu$ ) zwischen benachbarten Quadrupol- und Dipolmoden charakterisiert. Die „Large separation“ entspricht der inversen Laufzeit von Schallwellen durch den gesamten Stern und ist zur Quadratwurzel der mittleren Dichte des Sterns proportional. Die „Small separation“ hängt vom Gradienten der Schallgeschwindigkeit im Zentrum und somit vom Alter des Sterns ab.

Wir verwendeten eine Maximum-Likelihood-Methode zur Bestimmung der Parameter der Schwingungsmoden, d.h. der Frequenzen, Linienbreiten und Amplituden. Diese Methode ist aus der Analyse von Schwingungen in der Sonne wohl bekannt. Wir haben einen globalen Fit des Schwingungsspektrums im Frequenzbereich zwischen 1.6–2.6 mHz durchgeführt, d.h. wir haben die Schwingungsparameter aller sichtbaren Schwingungen gleichzeitig bestimmt. Insgesamt umfasste unsere Datenauswertung 84 radiale, Dipol- und Quadrupolmoden. Außerdem umfasste unsere Analyse auch den Effekt von stellarer Rotation auf die Schwingungsmoden [Gizon and Solanki, 2003]: Rotation erzeugt eine Aufspaltung der  $(2\ell + 1)$  azimuthalen Komponenten der nicht-radialen Schwingungen ( $\ell \geq 1$ ). Für langsam rotierende Sterne ist diese Frequenzaufspaltung proportional zu einem geeigneten Mittelwert der stellaren Winkelgeschwindigkeit ( $\Omega$ ). Außerdem kann die Inklination ( $i$ ) zwischen der stellaren Rotationsachse und der Sichtlinie aus der Sichtbarkeit der einzelnen azimuthalen Komponenten abgeleitet werden.

Basierend auf den gemessenen Schwingungsfrequenzen bestimmten wir eine mittlere „Large separation“ von  $\Delta\nu = 98.56 \pm 0.13 \mu\text{Hz}$  sowie eine mittlere „Small separation“ von  $\delta\nu = 8.08 \pm 0.16 \mu\text{Hz}$ . Diese Werte gehören zu den genauesten Messungen der „Large-“ und „Small separation“ eines sonnenähnlichen Sterns. Ausgehend von der gemessenen „Large separation“ finden wir für HD 52265 eine mittlere Dichte, die ungefähr halb so groß ist wie die mittlere Dichte der Sonne. Darüber hinaus ist der seismologische Messwert der Dichte ca. 60 Mal präziser als die Dichte, die man aus den spektroskopischen Werten für Masse und Radius (siehe oben) ableiten kann. Eine Gruppe aus Kanada, die ebenfalls an diesem Projekt beteiligt

*Solar-like oscillations are best studied in frequency space rather than in the time domain. Fig. 1 shows the power spectrum of the 117 days CoRoT observation of HD 52265. The typical comb-like structure of the solar-like oscillations is evident. It is noteworthy that the radial and quadrupole modes are clearly separated. The quality of the data is comparable with disk-integrated observations of the Sun from the early 1980's except for a higher noise level. The nearly regular frequency spacing of the modes is characterized by the large separation,  $\Delta\nu$ , between modes with identical  $\ell$  and the small separation,  $\delta\nu$ , between adjacent quadrupole and radial modes. The large separation is the inverse travel time of the acoustic modes through the stellar diameter; it is proportional to the square root of the mean stellar density. The small separation is sensitive to the sound speed gradient in the stellar core and thus related to the age of the star.*

*We used a standard maximum likelihood estimation to determine the mode parameters of the oscillations, i.e. the frequencies, line widths, and amplitudes. This method is well known from the analysis of oscillations in the Sun. We performed a global fit of the oscillation power spectrum in the range 1.6-2.6 mHz, i.e. we measured the mode parameters of all visible modes simultaneously. In total, our fit included 84 radial, dipole, and quadrupole modes. In addition, our fit includes the effect of rotation on the oscillations [Gizon and Solanki, 2003]: stellar rotation leads to a splitting of the  $(2\ell + 1)$  azimuthal components of the non-radial oscillations ( $\ell \geq 1$ ). For a slowly rotating star the frequency splitting is proportional to a suitable average of the stellar angular velocity,  $\Omega$ . Furthermore, the inclination angle,  $i$ , of the stellar rotation axis with respect to the line of sight can be inferred from the visibility of the azimuthal components.*

*From the measured mode frequencies we determined a mean large separation  $\Delta\nu = 98.56 \pm 0.13 \mu\text{Hz}$  and a mean small separation of  $\delta\nu = 8.08 \pm 0.16 \mu\text{Hz}$ . These values rank among the most precise measurements of the large and small separation for a Sun-like star. Based on the measured large separation we find that the mean density of HD 52265 is about half as big as the density of the Sun. More importantly the seismic constraint on the density is about 60 times more precise than the density deduced from the spectroscopic mass and radius (see above). A collaborating group from Canada used the measurements of  $\Delta\nu$  and  $\delta\nu$  together with non-seismic constraints (e.g.  $T_{\text{eff}}$ , the surface gravity, and the metallicity) to obtain a best-fit*

war, verwendete die Messungen von  $\Delta v$  und  $\delta v$  zusammen mit nicht-seismologischen Messwerten (z.B.  $T_{\text{eff}}$ , Oberflächenschwerebeschleunigung und Metallizität), um ein bestmögliches Modell aus einem Modellraster, das mit dem Aarhus Stellar Evolution Code erzeugt wurde, zu bestimmen. Das beste Modell hat eine Masse von  $M = (1.27 \pm 0.03)M_{\odot}$ , einen Radius von  $R = (1.34 \pm 0.02)R_{\odot}$  und ein Alter von  $2.37 \pm 0.29$  Ga. Der statistische Fehler dieser fundamentalen stellaren Parameter beträgt lediglich 2% für Masse und Radius, und der Fehler für das Alter des Sterns entspricht 5% seiner Lebensdauer auf der Hauptreihe. Die seismologischen Messergebnisse sind 3-6 Mal präziser als die nicht-seismologischen Messungen (siehe oben)!

### Erster zweifelsfreier Nachweis stellarer Rotation mit Hilfe der Asteroseismologie

Neben der Bestimmung der fundamentalen stellaren Parameter waren wir außerdem in der Lage, die globale Rotation von HD 52265 anhand der rotationsbedingten Frequenzaufspaltung der Dipol- und Quadrupolmoden zu messen; wir bestimmten eine Rotationsperiode von  $11.8^{+5.0}_{-1.9}$  Tagen, d.h. doppelt so schnell wie die Rotation der Sonne, sowie eine Inklination der Rotationsachse von  $i = 36^{+14}_{-9}$ ° (siehe Abb. 2). Abgesehen von der Sonne ist dies die erste zweifelsfreie asteroseismologische Messung der Rotation in einem sonnenähnlichen Stern! Es ist besonders bemerkenswert, dass unsere seismologische Messung außerordentlich gut mit der spektroskopischen Messung der projizierten Rotationsgeschwindigkeit sowie mit der Signatur der Rotation von Sternflecken in der beobachteten Lichtkurve übereinstimmt (siehe Abbildung 2). In Zukunft wird es vielleicht sogar möglich sein – weniger verrauschte Beobachtungen vorausgesetzt – differentielle Rotation in Sternen, also die radius- und breitenabhängige Rotationsgeschwindigkeit, zu messen; dies ist bisher nur für die Sonne möglich. Differentielle Rotation ist ein wesentlicher Bestandteil stellarer Dynamotheorien. Die Messung der inneren Rotation von Sternen in Verbindung mit der Untersuchung stellarer Aktivitätszyklen könnte so helfen, unser Verständnis des Dynamos in der Sonne und in entfernten Sternen zu verbessern.

### Abschätzung der Masse des Exoplaneten mit Hilfe der Asteroseismologie

In unserem Sonnensystem sind die Planetenumlaufbahnen ungefähr an der Rotationsachse der Sonne ausgerichtet, genauer  $|i - i_p| < 7.3^\circ$ . Wenn wir annehmen, dass die Rotation von HD 52265 und die Umlaufbahn seines Begleiters ebenfalls aneinander ausgerichtet sind ( $i = i_p$ ), dann können wir die minimale Masse des Begleiters ( $M_p \sin i_p$ , siehe Abschnitt 2) in eine absolute Masse umrechnen. Wie in Abb. 2 dargestellt, würde die seismologische Messung der Inklination der stellaren Rotationsachse einer Masse des

*model from a large grid of stellar models computed with the Aarhus Stellar Evolution Code. The best-fit stellar model has a mass of  $M = (1.27 \pm 0.03)M_{\odot}$ , a radius of  $R = (1.34 \pm 0.02)R_{\odot}$  and an age of  $2.37 \pm 0.29$  Gyr. The formal errors on these fundamental parameters are only 2% for mass and radius, and the formal error of the stellar age corresponds to 5% of the main-sequence lifetime of the star. The seismic constraints are 3-6 times more precise than the non-seismic measurements given in Section 2!*

### First unambiguous detection of rotation by means of asteroseismology

*In addition to constraining the stellar fundamental parameters we were able to measure the bulk rotation of HD 52265 from the rotational splitting of the dipole and quadrupole modes; we obtained a rotation period of  $11.8^{+5.0}_{-1.9}$  days, i.e. twice as fast as the solar rotation, and an inclination of the stellar rotation axis of  $i = 36^{+14}_{-9}$ ° (see Figure 2). This is the first unambiguous asteroseismic measurement of rotation in a Sun-like star other than the Sun! It is particularly remarkable that our seismic constraint is in very good agreement to the spectroscopic measurement of the projected rotational velocity and the signature of the rotation of starspots in the observed light curve (see Figure 2). In the future, presuming observations that are even less noisy, it may become possible to measure differential rotation, i.e. the radial and latitudinal dependence of the stellar rotational velocity, as it was done already for the Sun. Differential rotation is an important ingredient of stellar dynamo theories. Thus, measuring the internal rotation of stars combined with the study of stellar activity cycles should improve our understanding of the solar and stellar dynamos.*

### Seismic constraints on the mass of the planetary companion

*In our solar system the planetary orbits are nearly aligned with the rotation axis of the Sun, i.e.  $|i - i_p| < 7.3^\circ$ . Under the assumption that the planetary orbit and the stellar rotation axis in the exoplanetary system HD 52265 are in line with each other, i.e.  $i = i_p$ , the minimum mass of the companion,  $M_p \sin i_p$  (see Section 2), can be converted into a constraint on the true mass of the planet. According to Fig. 2 the seismic constraint on the inclination of the stellar spin axis,  $i$ , would then correspond to a mass of the companion of*

Begleiters von  $M_p = 1.85^{+0.52}_{-0.36} M_{\text{Jupiter}}$  entsprechen. Diese Masse ist deutlich unterhalb der unteren Massengrenze von Braunen Zwergen ( $M_{\text{BD}} > 13 M_{\text{Jupiter}}$ ). Braune Zwerge sind sub-stellare Objekte im Übergangsbereich von Sternen zu Planeten. Ihre Massen sind zu niedrig, um Wasserstoffbrennprozesse in ihren Kernen aufrechterhalten zu können. Ihre Massen sind allerdings groß genug, um Energie durch die Fusion von Deuterium und Lithium zu erzeugen. Unsere seismologische Studie legt nahe, dass der Begleiter HD 52265b ein Planet und kein Brauner Zwerg ist.

$M_p = 1.85^{+0.52}_{-0.36} M_{\text{Jupiter}}$ . This mass is well below the lower mass limit of brown dwarfs ( $M_{\text{BD}} > 13 M_{\text{Jupiter}}$ ). Brown dwarfs are sub-stellar objects that mark the transition from stars to planets. Their masses are too low to sustain hydrogen burning but are still high enough to generate energy by fusion of deuterium and lithium. Our seismic analysis suggests that the companion HD 52265b is a planet rather than a brown dwarf.

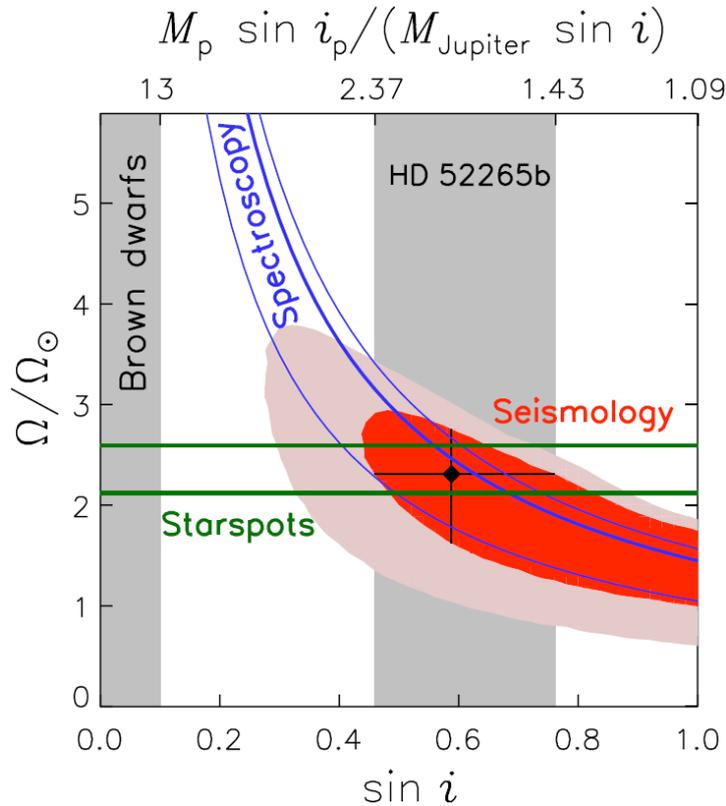


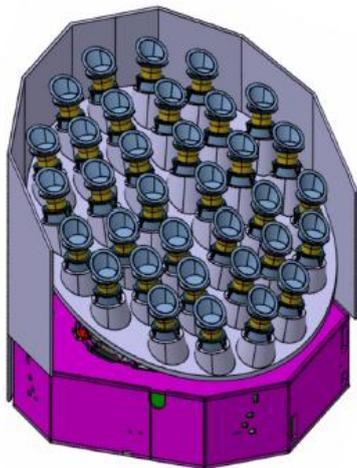
Abb. 2: Messung der stellaren Winkelgeschwindigkeit ( $\Omega$ , in Einheiten der solaren Winkelgeschwindigkeit  $\Omega_{\odot}$ ) und des Inklinationwinkels ( $i$ ) der Rotationsachse von HD 52265. Die dunkel- und hellroten Bereiche entsprechen der  $1\sigma$ - und  $2\sigma$ -Messunsicherheit unseres Fits in der  $\Omega/\Omega_{\odot}-\sin i$ -Ebene. Die schwarze Raute mit den Fehlerbalken stellt das Ergebnis unserer Arbeit dar, d.h.  $\Omega = 2.3^{+0.5}_{-0.7} \Omega_{\odot}$  und  $i = 36^{\circ+14}_{-9}$ . Die spektroskopische Messung der projizierten Rotationsgeschwindigkeit (blaue Linien) und die Abschätzung der Oberflächenrotation, die aus der Signatur der Lichtkurve durch Sternflecken abgeleitet wurde, sind in bemerkenswerter Übereinstimmung mit den seismologischen Ergebnissen. Unter der Annahme, dass die stellare Rotationsachse und die Normale der Planetenumlaufbahn parallel ausgerichtet sind ( $i = i_p$ ), kann die absolute Masse des Begleiters abgeschätzt werden (siehe obere x-Achse). Verwenden wir den seismologischen Messwert für  $i$ , so erhalten wir eine Masse des Begleiters von  $M_p = 1.85^{+0.52}_{-0.36} M_{\text{Jupiter}}$ ; dieser Wert ist deutlich unterhalb der unteren Massengrenze von Braunen Zwergen, wie durch die grau schraffierten Bereiche verdeutlicht wird.

Fig. 2: Constraints on the stellar angular velocity, ( $\Omega$ , in units of the solar angular velocity,  $\Omega_{\odot}$ ), and the inclination angle  $i$  of the rotation axis of HD 52265. The dark-red and light-red regions correspond to  $1\sigma$  and  $2\sigma$  uncertainties of our fit in the plane  $\Omega/\Omega_{\odot}-\sin i$ . The black diamond and the error bars represent the result of the global fit, i.e.  $\Omega = 2.3^{+0.5}_{-0.7} \Omega_{\odot}$  and  $i = 36^{\circ+14}_{-9}$ . The spectroscopic measurement of the projected rotational velocity (blue lines) and a stellar surface rotation estimate obtained from the signature of starspots in the CoRoT light curve (green lines) are remarkable consistent with the seismic analysis. Under the assumption that the stellar rotation axis and the normal of the planetary orbit are aligned,  $i = i_p$ , the true mass of the companion can be estimated (see upper x-axis). Using the seismic constraint on  $i$  we obtain a mass of the companion of  $M_p = 1.85^{+0.52}_{-0.36} M_{\text{Jupiter}}$ , i.e. well below the lower mass limit of brown dwarfs as indicated by the grey shaded regions.

### Die Zukunft: PLATO

Das zentrale wissenschaftliche Ziel der PLATO-Mission (PLANetary Transits and Oscillations of stars, Abb. 3) ist die Erfassung von Transits erdähnlicher Planeten und die Charakterisierung von extrasolaren Planetensystemen mit Hilfe der Asteroseismologie ihrer Zentralsterne. Zu diesem Zweck wird PLATO rund dreißigtausend kühle, sonnenähnliche Zwergsterne kontinuierlich für eine Dauer von bis zu drei Jahren beobachten. Die Genauigkeit der fundamentalen stellaren Parameter, die mit Hilfe der Asteroseismologie bestimmt werden können, ist Voraussetzung für präzise Messungen der Massen, Radien und Alter der nachgewiesenen Exoplaneten. PLATO wird statistische Untersuchungen großer Stichproben von Exoplaneten und die Bildung von Entwicklungssequenzen von extrasolaren Planetensystemen ermöglichen.

PLATO ist ein Kandidat für ESA's Cosmic Vision Programm. Derzeit befindet sich die Mission in der Definitionsphase und eine Entscheidung über die Auswahl der Mission wird im Oktober 2011 erwartet. Der Start ist für 2018 geplant. Das MPS ist stark in die Planungen des PLATO-Bodensegments eingebunden. Im Einzelnen koordiniert es die Aktivitäten des PLATO-Datenzentrums (PDC), das für die Erzeugung der wissenschaftlichen Datenprodukte verantwortlich ist (dazu gehören z.B. die Liste und Rangfolge von Planetenkandidaten und bestätigten Planeten, Parameter stellarer Schwingungen, fundamentale Parameter von Planeten und Sternen).



### Ausgewählte Veröffentlichungen

#### Selected publications

Ballot, J., L. Gizon, R. Samadi, et al.: Accurate p-mode measurements of the G0V metal-rich CoRoT target HD 52265. *Astron. & Astrophys.* 530, A97 (2011), doi:10.1051/0004-6361/201116547.

Gizon, L. and S. K. Solanki: Determining the inclination of the rotation axis of a Sun-like star. *Astrophys. J.* 589, 1009–1019 (2003), doi:10.1086/374715.

Stahn, T.: Analysis of time series of solar-like oscillations - Applications to the Sun and HD 52265. Doktorarbeit, Georg-August-Universität Göttingen, (2010).

### The future: PLATO

*The main science objective of the PLATO mission (PLANetary Transits and Oscillations of stars, Fig. 3) is to detect planetary transits of earth-like planets and characterize the exoplanetary systems through asteroseismology of the host stars. For this purpose, PLATO will observe about thirty thousand cool dwarfs similar to the Sun for extended periods of time of up to 3 years. The precision of stellar fundamental parameters obtained by asteroseismology is required to deduce precise masses, ages, and radii of exoplanets. PLATO will allow to conduct statistical analyses of a big sample of exoplanets and to generate evolutionary sequences of exoplanet systems.*

*PLATO is a candidate mission of ESA's Cosmic Vision Programme. Currently the mission is in a Definition Phase and a decision on the final selection is expected in October 2011. The launch is planned for 2018. The MPS is very much involved in the definition and planning of the PLATO ground segment. In particular it coordinates the activities of the PLATO Data Center (PDC) which is in charge of computing the PLATO scientific data products (e.g. the list and ranking of planetary candidates and confirmed planets, parameters of stellar oscillations, planet and stellar fundamental parameters).*

Abb. 3: Mögliches Konzept des PLATO-Satelliten, bestehend aus 34 kleinen Teleskopen (jeweils mit 12 cm Spiegeldurchmesser). Das gesamte Teleskop hat ein weites Sichtfeld von rund 50° Durchmesser. Am Ende der geplanten Missionsdauer von 6 Jahren hätte PLATO ca. 50% des gesamten Himmels beobachtet. [Abb. aus Catala et al. (2011), *JPhCS* 271(1)]

*Fig. 3: Possible concept of the PLATO satellite. The concept comprises 34 small telescopes (with 12 cm diameter for each telescope). The whole telescope has a wide field of view of about 50° diameter. At the end of the mission after 6 years, PLATO would have observed about 50% of the whole sky. [Fig. from Catala et al. (2011), *JPhCS* 271(1)]*

## 1.5 Publikationen

Neben der Durchführung wissenschaftlicher Projekte, die im Fall des MPS häufig die Entwicklung wissenschaftlicher (Weltraum-)Instrumente und die Gewinnung entsprechender Messdaten beinhalten, sind wissenschaftliche Publikationen ein wesentliches Ergebnis der Arbeiten am Institut. Deren Anzahl ist damit ein relevantes Maß für die Leistungsfähigkeit des Instituts. Das bezieht sich insbesondere auf die Anzahl der referierten Publikationen, also solcher, die in einem Journal mit einem „peer-review“ basierten Auswahlverfahren veröffentlicht werden.



Abb. 1 zeigt die Entwicklung der Anzahl der referierten wissenschaftlichen Publikationen des MPS (d.h. mindestens einer der Autoren gehört dem MPS an) pro Jahr in den letzten 10 Jahren, basierend auf den Angaben des „Web of Science“ (WOS). Seit 2005 zeigt sich eine stetige und deutliche Zunahme, die im Vergleich von 2010 zu 2005 über 50% beträgt. Der besonders deutliche Anstieg in 2010 ist zumindest zu einem erheblichen Anteil den Projekten Herschel und Sunrise zu verdanken, die in dem Jahr erstmals in größerem Umfang wissenschaftliche Ergebnisse der Missionen vorgestellt haben.

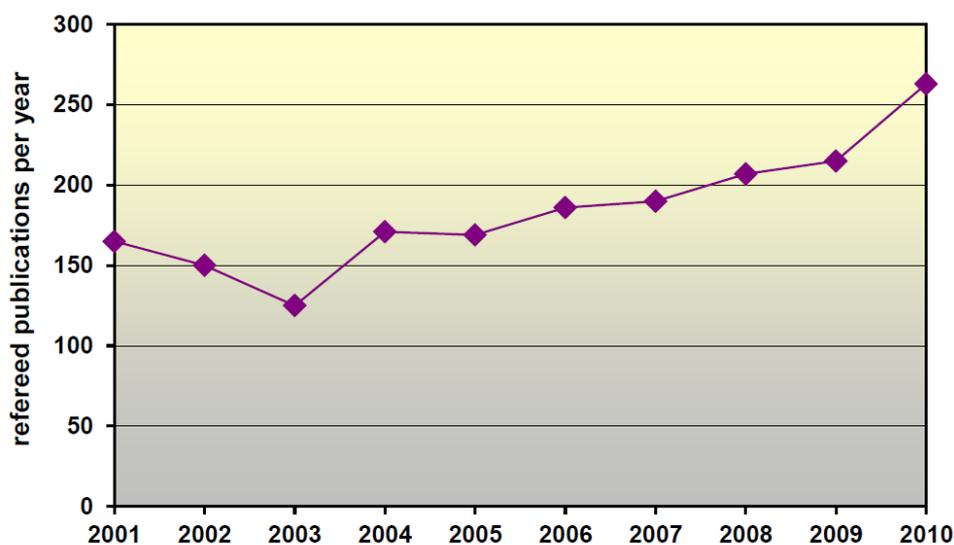


Abb. 1: Anzahl der referierten MPS-Publikationen pro Jahr (nach WOS)

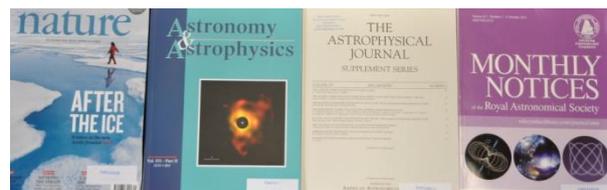
Fig. 1: Number of refereed MPS publication per year (acc. WOS)

Ein – zugegebenermaßen grobes – Maß für die wissenschaftliche Relevanz der einzelnen Artikel ist die Häufigkeit, mit der diese in anderen wissenschaftlichen Publikationen zitiert werden. Die zweite Abbildung zeigt die Häufigkeit, mit der referierte MPS-

## 1.5 Publications

Besides accomplishing scientific projects, which in case of the MPS typically include the development of scientific instruments (often for space missions) and the acquisition of corresponding data, scientific publications are a major result of the work done at the institute. Thus their number is a relevant performance indicator for the institute. This is especially the case for the number of refereed publications, i.e. such publications, which appear in a journal with a peer-review based selection process.

Figure 1 shows for the last 10 years the development of the number of refereed MPS publications (i.e. at least one of the authors is a member of the MPS) per year, based on the Web of Science (WOS). Since 2005 a steady and significant increase can be observed, accumulating to 50% for 2010 compared to 2005. The marked increase in 2010 is to a relevant part due to the projects Herschel and Sunrise. Both have presented in this year for the first time a large number of scientific results of their missions.



An - admittedly not very precise - indicator for the relevance of an individual paper is its citation count, i.e. how often it has been cited in other scientific publications. The second diagram shows the citation count of all refereed MPS publications within each year. For e.g.

Publikationen in dem jeweiligen Jahr zitiert wurden. In 2010 z. B. war das für alle Publikationen des Instituts zusammen ca. 7000 Mal der Fall. Da die Anzahl aller Publikationen jedes Jahr zunimmt, ist das natürlich ein Maß, das bereits intrinsisch zu einem Anwachsen tendiert. Geeigneter ist daher ein Maßstab, der sich auf eine feste Basis bezieht. Für die zweite Kurve in dem Diagramm wurden daher nur die Publikationen der jeweils vorangehenden 5 Jahre als Bezugsgröße gewählt. Auch dieser Performanceindikator zeigt für das MPS ein fast stetiges Wachstum seit 2004, und auch hier beträgt der Zuwachs von 2005 zu 2010 mehr als 50%. Der singuläre Peak im Jahr 2009 ist zu einem erheblichen Teil bedingt durch eine relativ hohe Zahl an Publikationen in den Journalen „Nature“ und „Science“ mit ihren typisch sehr hohe Zitationsraten, die für 2009 voll zum Tragen kommen.

2010 all refereed MPS papers together have been cited about 7000 times. Due to the fact that the number of papers is increasing each year this parameter tends intrinsically to grow over time. More appropriate is a parameter that is related to a fixed basis. For the other curve in this diagram only the publications of the preceding five years have been taken into account. This performance indicator shows for the MPS as well an almost steady increase since 2004, and the accumulated growth from 2005 to 2010 is also more than 50%. The singular peak in 2009 is for a major portion caused by a relatively high number of publications in the journals “Nature” and “Science” with their typically high citation counts, which become fully effective in 2009.

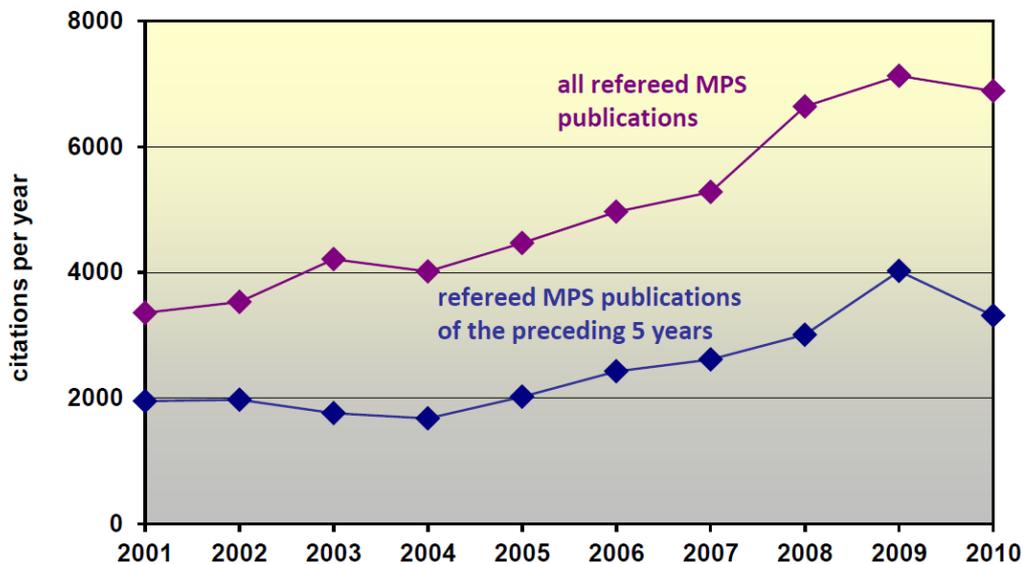


Abb. 2: Anzahl der Zitierungen pro Jahr, bezogen auf alle referierten MPS-Publikationen bzw. bezogen auf die Publikationen der jeweils letzten 5 Jahre (nach WOS).

Fig. 2: Number of citations per year, with respect to all refereed MPS publications and with respect to the publications of the preceding 5 years (acc. WOS).



Auswahl der in der IMPRS (siehe nächste Seite) entstandenen Doktorarbeiten  
 Selection of the PhD thesis completed in the IMPRS (see next page)

## 1.6 IMPRS

In der „International Max Planck Research School (IMPRS) on Physical Processes in the Solar System and Beyond“ (Solar System School) hat sich das Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung mit den physikalischen Fakultäten der Universität Göttingen (Institut für Astrophysik, Institut für Geophysik) und der TU Braunschweig (Institut für Geophysik und Extraterrestrische Physik, Institut für Theoretische Physik) zusammengeschlossen, um in- und ausländischen Doktoranden optimale Möglichkeiten zu bieten, auf dem Gebiet der Physik des Sonnensystems zu promovieren.

Die Solar System School bietet ein forschungsintensives, dreijähriges Promotionsstudium. Das Lehrprogramm beinhaltet den gesamten Bereich der Sonnensystemforschung, von der Geophysik über Planetenforschung bis hin zur Sonnenphysik, einschließlich der dafür wesentlichen physikalischen Grundlagen. Es ermöglicht eine breite, interdisziplinäre und fundierte wissenschaftliche Ausbildung, die durch Kurse in numerischer Physik, Weltraumtechnologie, Projektmanagement, wissenschaftlichem Schreiben und Präsentationstechniken ergänzt wird.

Die Forschungsprojekte der Doktoranden sind so vielfältig wie die Forschungsthemen des MPS und der beteiligten Institute und umfassen alle Aspekte des Sonnensystems. Die Forschungsmethoden reichen von Instrumentierung und Beobachtung über Datenanalyse und Interpretation bis hin zu numerischen Simulationen und theoretischer Modellierung.

## 1.6 IMPRS

*The “International Max Planck Research School (IMPRS) on Physical Processes in the Solar System and Beyond“ (Solar System School) is a joint venture of the Max Planck Institute for Solar System Research with the University of Göttingen (Institute for Astrophysics, Institute for Geophysics) and the Technical University Braunschweig (Institute for Geophysics and Extraterrestrial Physics, Institute for Theoretical Physics) to offer graduate students from many countries attractive conditions to gain a PhD in the field of solar system physics.*

*The Solar System School offers a research-oriented, 3-years graduate program covering the full range of physics inherent in the growing field of solar system science, from geophysics and planetary science to solar physics, as well as the underlying fundamental physics. It ensures a broad, interdisciplinary, and well-founded education for a career in science. The program is complemented by training in computational physics, space technology, project management, scientific writing and presentation skills.*

*The PhD projects are as diverse as the research topics of the MPS and the involved Institutes and comprise all areas of the solar system. Methods of research include instrumentation, observations, data analysis, numerical simulations and theoretical modeling.*



Die Doktoranden der IMPRS im November 2009

*IMPRS PhD students in November 2009*

In 2009 und 2010 haben jeweils ca. 65 Doktoranden an dem Programm der Solar System School teilgenommen. Neu angefangen haben 17 (2009) bzw. 13 (2010), und die Promotion erfolgreich abgeschlossen haben 14 (2009) bzw. 12 (2010). In Summe hat die IMPRS damit seit ihrer Gründung in 2002 bis Ende 2010 die Sonnensystemforschung um 94 frisch promovierte Physiker bereichert. Die Doktoranden kamen in 2009/10 aus 29 verschiedenen Ländern. Der Anteil ausländischer Doktoranden lag bei  $\frac{2}{3}$ , der weiblicher Studierender bei  $\frac{1}{3}$ .

*In 2009 as well as in 2010 about 65 students took part in the program of the Solar System School. 17 (2009) resp. 13 (2010) new students joined the School, and 14 (2009) resp. 12 (2010) finished their PhD successfully. Since it was established in 2002 up to end of 2010 the IMPRS has supported the solar system research in total with 94 freshly graduated PhDs. The PhD students in 2009/10 came from 29 different countries. The share of foreign student was  $\frac{2}{3}$ , the share of female students was  $\frac{1}{3}$ .*

#### **Abgeschlossene Dissertationen in 2009/ *Finished PhDs in 2009:***

Sofiane Bourouaine, *Kinetic modeling of coronal loops and wave-particle interactions*

Aline de Lucas, *Multi-spacecraft study of spatial shock front extent in the inner heliosphere*

Sanja Danilovic, *Magnetic fine structure in the solar photosphere: observations and MHD simulations*

Silvia Protopapa, *Surface characterization of Pluto, Charon and (47171) 1999 TC36*

Michal Drahus, *Microwave observations and modeling of the molecular coma in comets*

Peng Ruan, *Magnetic field extrapolation in the solar corona and observations of a flux rope in the solar wind*

Li Feng, *Stereoscopic reconstructions of coronal loops and polar plumes*

Sofie Spjuth, *Disk-resolved photometry of small bodies*

Gero Kleindienst, *Untersuchung von quasiperiodischer ULF-Wellenaktivität in der Saturnmagnetosphäre*

Esa Vilenius, *On the analysis of near-infrared point spectrometer data for the investigation of lunar surface mineralogy*

Philippe Kobel, *Center-to-limb investigations of solar photospheric magnetic features at high spatial resolution*

Manuela Wiese, *Lunar mineralogy with SIR-1 and Clementine UVVIS/NIR*

Christian Koch, *Extraction of Mercury's tidal signal and libration amplitude from synthetic laser altimeter data sets*

Shangbin Yang, *Magnetic helicity research of emerging active regions*

#### **Abgeschlossene Dissertationen in 2010/ *Finished PhDs in 2010:***

Setareh Javadi Dogahneh, *Numerical simulation of the heating of X-ray Bright Points in the solar corona*

Arianna Piccialli, *Cyclostrophic wind in the mesosphere of Venus from Venus Express observations*

Kristofer Hallgren, *Mesospheric water vapor - Variability at different time-scales observed by ground-based microwave spectroscopy*

Thorsten Stahn, *Analysis of time series of solar-like oscillations - Applications to the Sun and HD52265*

Erik Johansson, *Hybrid simulations of the stellar wind interaction with close-in extrasolar planets*

Julia Thalmann, *Evolution of coronal magnetic fields*

Xianyi Li, *Development of RAC devices fabricated using e-beam lithography for Chirp Transform Spectrometers*

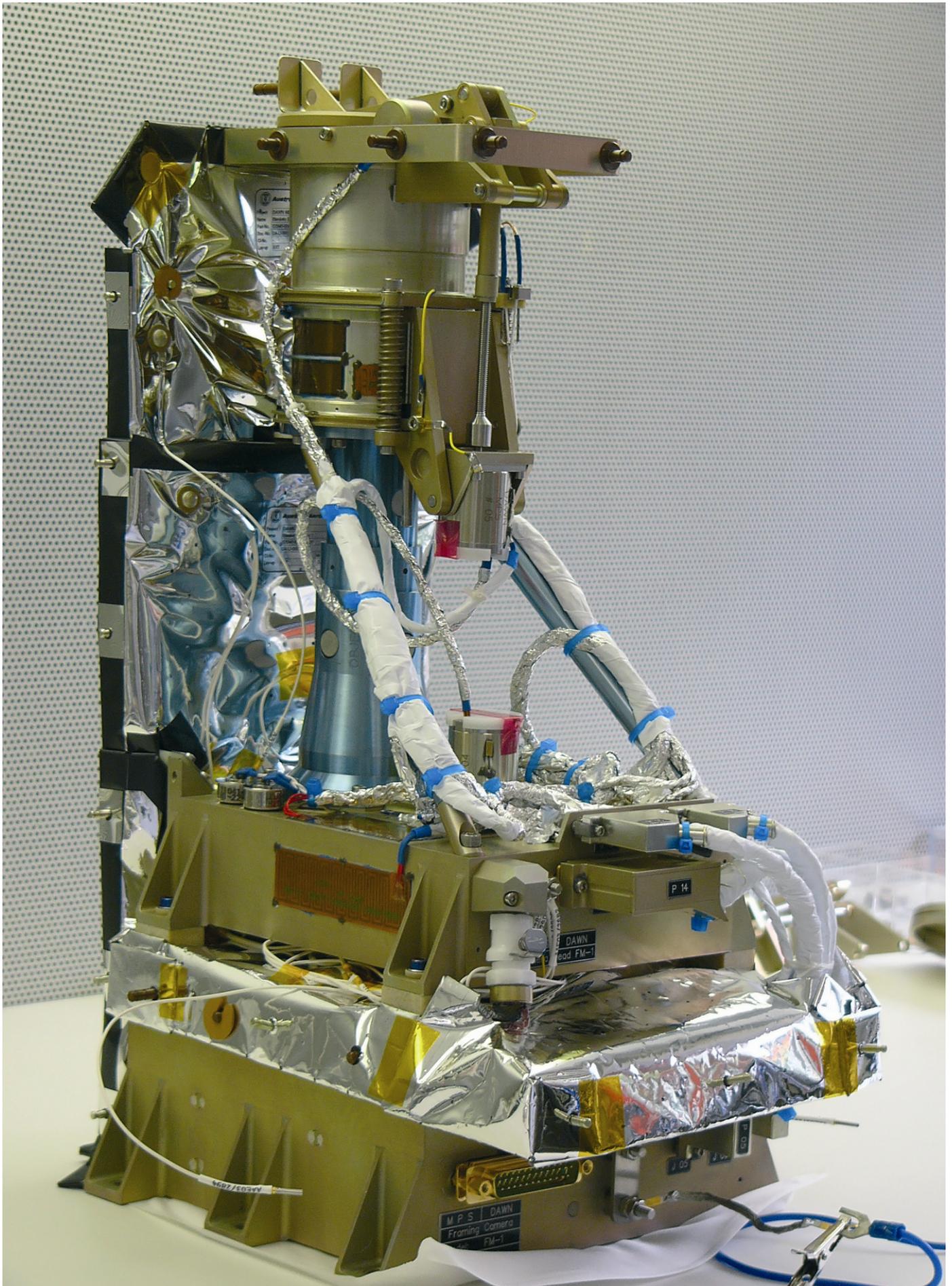
Hui Tian, *New views on the emission and structure of the solar transition region*

Manuela Lippi, *The composition of cometary ices as inferred from measured production rates of volatiles*

Danica Tothova, *Multi-wavelength observations of coronal waves and oscillations in association with solar eruptions*

Yana Maneva, *Generation and dissipation of Alfvén-cyclotron turbulence in the solar corona and solar wind and related ion differential heating and acceleration*

Jean-Baptiste Vincent, *From observations and measurements to realistic modeling of cometary nuclei*



Die am Institut entwickelte Kamera für die Dawn-Mission, die unterwegs ist zu den Asteroiden Vesta und Ceres  
*The camera developed at the MPS for the Dawn mission, currently on its way to the asteroids Vesta and Ceres*

## 2 Infrastruktur

Die zentralen Einrichtungen, die die Infrastruktur des Instituts bilden, gliedern sich in den technischen-administrativen Service (Verwaltung, Betriebstechnik, Bibliothek, etc.) und den Wissenschaftlich-Technischen Service (Konstruktion und mechanische Werkstätten, Elektronik-Labor mit Reinräumen, Thermal-Vakuum-Kammern und anderen Testeinrichtungen, Rechenzentrum, etc.).

Die Entwicklung und der Bau von leistungsfähigen und technologisch anspruchsvollen Instrumenten, vor allem für den Einsatz bei Weltraummissionen, begründen zu einem wesentlichen Teil den exzellenten Ruf des MPS. Das Institut war bisher als Mitglied in internationalen Konsortien an ca. 100 derartigen Experimenten auf internationalen Missionen beteiligt und hat die in der Mehrzahl im Institut entwickelten Instrumente (z.B. UV-, IR- und Massenspektrometer, Spezialkameras, Flugzeitdetektoren, Koronagraphen, Gaschromatographen) erfolgreich betrieben. Wesentliche Voraussetzung dafür ist eine wissenschaftlich-technische Infrastruktur, die in den jeweiligen Bereichen an der Grenze des technisch Machbaren arbeitet. Daneben ist ein leistungsfähiges Rechenzentrum erforderlich, um den Herausforderungen der rapide wachsenden Datenmengen, die von den Instrumenten geliefert werden, und der immer komplexeren Simulationen gewachsen zu sein.

Im Folgenden wird an einigen wenigen Beispielen aus den einzelnen Bereichen exemplarisch verdeutlicht, wie das MPS seine exzellente Position bei der Entwicklung leistungsfähiger und zuverlässiger Instrumente für die Sonnensystemforschung auch für die Zukunft sicherstellt. Dazu gehört dann auch die Verpflichtung des MPS, das Know-How an Berufsanfänger im Rahmen einer vielfach ausgezeichneten Ausbildung weiterzugeben, wie der abschließende Teil dokumentiert

In einer Vielzahl von Thermal-Vakuum-Anlagen werden die Experimente realistischen Tests unter Welt-raumbedingungen unterzogen (Temperaturen zwischen  $-180^{\circ}$  und  $+150^{\circ}\text{C}$  und niedrigste Drücke bis zu einem Zehnmillionstel Millibar).

*Thermal-vacuum chambers are used to test experiments under the realistic conditions of space (temperatures between  $-180^{\circ}$  und  $+150^{\circ}\text{C}$  and pressures as low as one ten millionth millibar.*

## 2. Infrastructure

The infrastructure of the institute is established by central units, which are divided in technical-administrative services (administration, building services, library, etc.) and scientific-technical services (mechanical construction and workshop, electronics lab including clean rooms, thermal-vacuum chambers and other test facilities, computing center, etc.).

The development and construction of technological advanced, high-performance scientific instruments, especially for space missions, constitute to a significant part the excellent standing of the MPS. So far the institute has been a member of international consortia for about 100 such experiments as part of international missions, and it has successfully operated these instruments (e.g. UV, IR and mass spectrometer, special purpose cameras, flight time detectors, coronagraphs, gas chromatographs), which typically have been developed in the institute. Essential requirement for this is a scientific-technical infrastructure that is capable to reach the limits of what is technically feasible. In addition, a powerful computing center is necessary to cope with the challenges of enormously growing volumes of experimental data provided by the instruments, and of ever more complex simulations.

In the following a few examples from separate areas may demonstrate that the MPS will secure its excellent position for developing reliable high-performance instruments for solar system research also for the future. Involved in this are also the efforts of the MPS to pass its know-how to young people in the frame of its award winning apprenticeship, as shown in the last chapter.



## 2.1 Einführung eines neuen zentralen Datenspeichers am MPS

Mit fortschreitender Technik liefern wissenschaftliche Instrumente wie Spektrometer oder Kameras, die bei Weltraummissionen zum Einsatz kommen, exponentiell wachsende Datenmengen, deren Speicherung und Verarbeitung eine immense Herausforderung für die IT-Infrastruktur des Instituts darstellen und die eine ständige Anpassung an die gestiegenen Anforderungen nötig machen. Im Jahr 2010 wurde daher eine massive Erweiterung und, aus den unten beschriebenen Erwägungen heraus, auch eine Zentralisierung des Datenspeichers in Angriff genommen.

Traditionell gewachsene Speicherlandschaften, wie sie auch am MPS vorherrschen, bestehen in der Regel aus einer Vielzahl autarker Systeme, die zudem meist von unterschiedlichen Herstellern stammen. Solche Umgebungen erschweren die Verwaltung erheblich und sind unflexibel, weil Speicherbereiche bei Kapazitätsmangel nicht mit einfachen Mitteln erweitert werden können, sondern die Daten mit hohem Aufwand auf neue Hardware transferiert werden müssen. Bei der Beschaffung des neuen zentralen Fileservers, der gleichermaßen Windows- und Unix-Klienten versorgen soll, spielten daher neben Datensicherheit, Leistung und Durchsatz auch Aspekte wie einfache Administrierbarkeit, Erweiterbarkeit und Flexibilität eine entscheidende Rolle.



Vorder- und Rückansicht des neuen zentralen Fileservers

## 2.1 Introducing a new central data storage at the MPS

*With the progress of technology scientific instruments like spectrometers or cameras, used on space missions, provide an exponentially growing amount of data. Storing and processing of these data is a huge challenge for the IT infrastructure of the institute and demands continuous adjustment to cope with the increasing requirements. Therefore a huge extension of the data storage was scheduled for 2010, combined with the migration to a central data storage (for reasons listed below).*

*Legacy storage environments like the one at MPS usually consist of a large number of autonomous systems from various vendors. Such environments are difficult to manage and hard to extend because in the case of capacity shortage it usually requires a fair amount of work to move the data to new storage units. Therefore, in addition to data security, performance and throughput, easy administration and extensibility as well as flexibility were major criteria for the procurement of a new central fileserver which should also be able to serve both Windows and Unix clients natively.*



Front and back view of the new central file server

Die Wahl fiel auf einen NAS-Filer (network attached storage) der Firma Isilon, der im November 2010 geliefert wurde. Das System besteht aus zwei separaten Clustern, von denen eines aus 4 und das zweite aus 3 sogenannten Speicherknoten besteht, von denen jeder mit 36 1-TB-Platten ausgerüstet ist. Insgesamt stehen damit 252 1-TB-Festplatten zur Verfügung.

Die einzelnen Knoten eines jeden Cluster sind jeweils über Hochgeschwindigkeits-Switches miteinander verbunden. Das primäre Cluster mit 4 Knoten und einem deutlich höheren maximal erreichbaren Datendurchsatz steht im zentralen Serverraum, während das zweite Cluster mit 3 Knoten als Backuptarget in einem anderen Brandabschnitt aufgestellt ist. Damit ist gewährleistet, dass selbst bei einem Komplettverlust des primären Clusters etwa durch Feuer der Datenbestand (wenn auch nur auf dem Stand zum Zeitpunkt der letzten Replikation, die üblicherweise jede Nacht stattfindet) innerhalb kurzer Zeit wieder online gebracht werden kann. Jedes Cluster ist so konfiguriert, dass der Verlust zweier Festplatten oder eines einzelnen Knotens ohne Datenverlust verkraftet werden kann; bei besonders kritischen Daten lässt sich auch eine noch höhere Redundanz erreichen.

Ihre wohl größte Stärke zeigt die Isilon-Lösung, wenn es um Erweiterbarkeit geht: Ein Isilon-Cluster stellt ein einziges großes Filesystem (OneFS) zur Verfügung, das über alle Knoten aufgespannt wird. Wächst der Bedarf an Kapazität, so kann diese durch einfaches Hinzufügen eines oder mehrerer Knoten erweitert werden, ohne dass es zusätzlicher Konfigurationsarbeiten oder des Umkopierens von Daten seitens des Administrators bedarf. Der Datenbestand wird von der OneFS-Software automatisch über alle Knoten verteilt und den Klienten zur Verfügung gestellt, so dass sich auch die verfügbare Bandbreite entsprechend erhöht. Ein Nachteil des Systems besteht darin, dass sich die Rechteverwaltung von Bereichen, auf die sowohl Windows-Klienten wie Unix-Klienten zugreifen, recht kompliziert gestaltet.

Inzwischen sind große Teile der Windows- und Unix-Home-Verzeichnisse sowie größere Datenbestände auf das Isilon-Cluster migriert worden. Bereits jetzt ist absehbar, dass die Cluster in Kürze um weitere Knoten erweitert werden müssen, was im Vergleich zu früher allerdings kaum administrativen Aufwand erfordern wird.

*We chose an Isilon NAS device (network attached storage) which was finally delivered in November 2010. The system consists of two separate clusters, comprising 3 and 4 nodes, respectively. Each of the nodes is equipped with 36 1TB drives. In total 252 1TB drives are available.*

*The single nodes of each cluster communicate internally via high speed switches. The primary four-node cluster, which has a significantly higher maximum data rate, is located in the main server room, while the second cluster with 3 nodes, which serves as a backup target, has been placed in another building in order to ensure that in case of a catastrophic failure of the primary cluster the data can be brought back online fast (at least based on the status of the last replication, which is usually done each night). Each cluster is configured in such a way that two disks or even a complete node may fail without data loss; for particularly critical data an even higher level of redundancy can be achieved.*

*The Isilon solution reveals its greatest strength when it comes to extensibility: It provides one single large file system (OneFS) which is spanned over all cluster nodes. If more capacity is needed, one simply adds one or more new nodes to the system; additional configuration steps or data migration are not required. The data are automatically redistributed and published to the clients over all available nodes by the OneFS software, the available bandwidth also increases according to the number of new nodes. One disadvantage of the Isilon cluster is the fairly complicated permissions management on directories which are accessed by both, Windows clients and Unix clients.*

*Meanwhile major parts of the Windows and Unix home directories as well as a large amount of other data have been migrated to the Isilon cluster. It is already foreseeable that its capacity needs to be increased in the short term by adding additional nodes which should require only very little administrative efforts.*

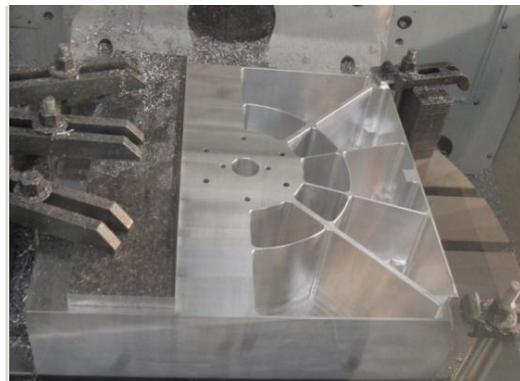
## 2.2 Auf dem aktuellen Stand des technisch Machbaren mit dem neuen 5-Achs-Bearbeitungszentrums

Im Bereich Mechanik, der sich unterteilt in die mechanische Konstruktion, die Feinmechanikwerkstatt inklusive der Schlosserei und die Lehrwerkstatt für die Ausbildungsberufe Industriemechaniker und Metallbauer, liegt der Schwerpunkt der Arbeiten auf der Entwicklung und dem Bau von wissenschaftlichen Instrumenten, zum großen Teil für Weltraummissionen. Um mit den in diesem Bereich sehr hohen und zunehmenden Anforderungen an Komplexität, Genauigkeit und Zuverlässigkeit Schritt halten zu können, wurde im Jahr 2009 vom MPS ein Antrag an die MPG zur Anschaffung eines 5-Achs-Bearbeitungszentrums gestellt. Dieses wurde im November 2009 geliefert und im Januar 2010 am MPS in Betrieb genommen. Ein solches Werkzeug stellt derzeit auf dem Gebiet der spanabhebenden Bearbeitung von festen Werkstoffen den Stand der Technik dar und bietet eine Vielzahl von Möglichkeiten, auch die komplexesten und kompliziertesten Konturen mit hoher Genauigkeit herzustellen. Und natürlich verfügt sie auch über weit reichende Optionen, vorhandene CAD-Daten zu ihrer Steuerung zu verwenden. Bisher gab es am MPS keine Maschine dieser Art.



## 2.2 Approaching the technical limits with the new state of the art 5-axes machining center

*The main focus of the mechanics service unit, comprising a mechanical construction office, a precision mechanics and metal workshop and an apprenticeship workshop for industrial mechanics and metal workers, is on the development and construction of scientific instruments, for a major part for space missions. To cope with the very high and continuously increasing requirements with respect to complexity, precision and reliability in this area the MPS made in 2009 a request to the Max Planck Society to acquire a 5-axes machining center. It has been delivered in December 2009 and was operational in January 2010. This tool represents the state of the art in the field of metal-cutting machining and offers a variety of options to generate the most complex structures with high precision. And of course it provides extensive possibilities to use existing CAD data for control. The MPS did not have such a machine previously.*



Oben: Erste Arbeiten an und mit der Maschine am MPS

*Top: First results of the new machining center*

Links: Das neue Bearbeitungszentrums U-620 der Firma Spinner

*Left: The new machining center U-620 from Spinner*

Durch die speziellen Anforderungen an Form und Gestalt von Strukturteilen für den Weltraumeinsatz ist eine mechanische Fertigung mit konventionellen Fräsmaschinen nicht oder nur sehr eingeschränkt und mit sehr großem Aufwand machbar. Die Möglichkeiten, die sich mit dem Einsatz einer 5-Achs-Simultanbearbeitung bieten, eröffnen dem Konstrukteur zusätzlichen Gestaltungsspielraum. Dem (idea-

*Due to the specific requirements with respect to the shape of structural parts for use in space missions a mechanical manufacturing with a conventional milling machine is not doable at all or only to a limited extent and with huge effort. The new capabilities provided by a 5-axes machining center will give the design engineer additional options for the construction. This is at least one major step towards the (ideal) goal of the*

len) Ziel des Mechanikbereichs, die vollständige Kette von der ersten Idee über Struktur- und Thermalanalysen bis hin zur Fertigung von Bauteilen innerhalb des Institutes durchzuführen, kommt man damit zumindest einen bedeutenden Schritt näher.

Der Vorteil des Bearbeitungszentrums wird allerdings nur dann wirklich voll ausgenutzt, wenn die Forderung nach 5-Achssimultanfähigkeit schon in die Konstruktion mit einfließt. In genau dieser Verknüpfung liegt die große Herausforderung für die Mechanik am MPS. Nur mit Kenntnis der Machbarkeit bei der Fertigung wird der Konstrukteur die optimale Entscheidung hinsichtlich der komplexen Gestaltung einzelner Bauteile z.B. zur Erreichung hoher Steifigkeiten bei geringer Gesamtmasse treffen.

Die Fertigung ist andererseits sehr von den Erfahrungen und Kenntnissen der Programmierer abhängig. Zudem wird gleichzeitig mit dem neuen Bearbeitungszentrum eine leistungsfähigere CAM-Software in der Werkstatt eingeführt, die eine gründliche Einarbeitung erfordert, um sukzessive das volle Potential der 5-Achsprogrammierung und –simultanbearbeitung ausschöpfen zu können.

Die verstärkte Verflechtung von CAD und CAM erfordert dabei von allen Mitarbeitern in dieser Kette umfangreiche Kenntnisse im Umgang mit verschiedenen Programmpaketen, aber auch Erfahrungen in der allgemeinen Werkstoffkunde oder bei Fragen der technologischen Abfolge von Fertigungsschritten.

Der Bau des PHI-Instruments für die geplante ESA-Mission Solar Orbiter, die ab 2018 die Sonne aus bisher unerreichter Nähe beobachten soll, wird voraussichtlich die erste willkommene Herausforderung darstellen, bei der die Mechanik zeigen kann, dass sie den zukünftigen Anforderungen an die Entwicklung der hochkomplexen Instrumente mit Zuversicht entgegensehen können.

## 2.3 Detektorentwicklung

Ein Schwerpunkt der Entwicklungsaktivitäten des MPS im Elektroniklabor ist die Herstellung und Qualifikation von abbildenden Kameras für planetare und solare Missionen. Das umfasst die Charakterisierung von kommerziell verfügbaren Multi-Pixel-Sensoren – Charge Coupled Devices (CCDs) und CMOS Active Pixel Sensoren (APS) – und die Beurteilung ihres Werts für die Verwendung in wissenschaftliche Missionen.

Ein kommerziell verfügbares bildgebendes Bauteil, das für Weltraumprojekte entwickelt wurde, ist der STAR-1000 Sensor, ein CMOS-APS Element mit einem 1 Mega-Pixel-Format, das insbesondere für schnelle

*mechanics unit, to realize the complete chain, starting from the first idea, over structural and thermal analyses up to the manufacturing of the parts, within the institute.*

*But the advantage of the machining center will be fully utilized only if the capability of 5-axes simultaneous processing is already taken into account during the design phase. Exactly here is the major challenge for the mechanics team of the MPS. Only with a clear knowledge of the manufacturing capabilities will the designer be able to make the right choices with respect to the complexity of the parts, e.g. in order to achieve high rigidity with low mass.*

*On the other hand the manufacturing depends a lot on the experience and know-how of the programmer. In addition, a more powerful CAM software will be implemented together with the new machining center, which requires a sound training in order to fully exploit the full potential of 5-axes programming and simultaneous processing step by step.*

*The stronger interdependence of CAD and CAM requires from everyone in this chain in-depth know-how about different software tools, but also general knowledge about material science or about the technological sequence of manufacturing steps.*

*The construction and manufacturing of the PHI instrument for the Solar Orbiter mission of ESA, planned to observe the Sun from an unprecedented proximity from 2018 onwards, will likely be the first opportunity for the mechanics unit to demonstrate, that the MPS will be able to look forward to the future requirements for the development of highly complex instruments with confidence.*

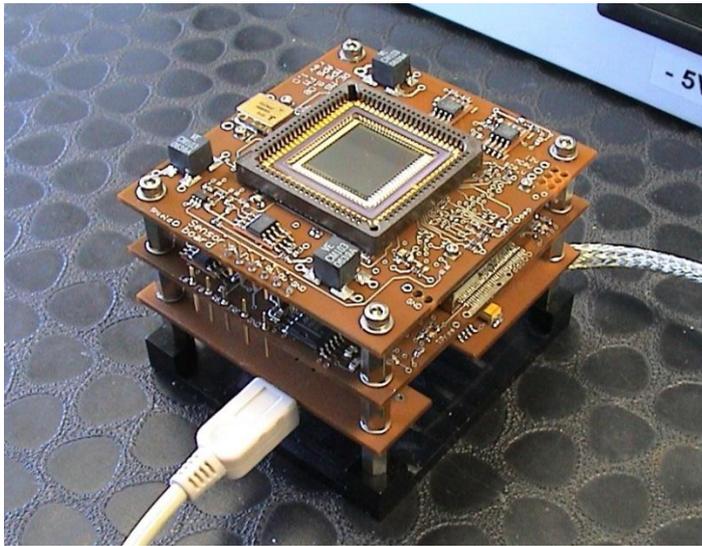
## 2.3 Detector development

*A great part of the MPS development activities in the electronics laboratory focuses on the production and qualification of imaging cameras for planetary and solar missions. This includes the characterization of multi-pixel sensors – Charge Coupled Devices (CCDs) and CMOS Active Pixel Sensors (APS) – that are commercially available, and evaluating their merits for use in scientific missions.*

*One commercially available imaging device that was developed for space projects is the STAR-1000 sensor. This is a CMOS-APS device of 1 megapixel format that is particularly useful for fast image sequences. In addi-*

Bildfolgen geeignet ist. Hinzu kommt, dass APS-Bauteile generell eine freie Wahl des Auslesefensters (Full-Frame- oder Sub-Frame-Bilder) erlauben durch eine geeignete Programmierung des Arbeitsprozessors, eines FPGA (free programmable gate array)-Bausteins.

Im Elektroniklabor des MPS wurden dann die gesamten Schaltungen für die Ausleseelektronik, bestehend aus einer Sensorplatine, einer FPGA-Platine und einer Computer-Interface-Platine, entwickelt. Das umfasste die Auswahl der elektronischen Komponenten, das Design, Layout und die Fertigung der Leiterplatten, die Entwicklung der Betriebssoftware, die FPGA-Programmierung, etc.



Die Kamera mit dem STAR-1000 Sensor und den Platinen der Ausleseelektronik, die am MPS entwickelt und gebaut wurden

*The camera with the STAR-1000 sensor and the electronic readout boards designed and fabricated at the MPS*

Das Testen und Charakterisieren der Kamera dient zunächst vor allem dazu, das Design so zu optimieren, dass es die Möglichkeiten des Sensors hinsichtlich dynamischem Umfang und Ausleserauschen voll ausnutzt. Die Bestückung der Elektronikboards mit weltraumtauglichen Bauteilen erfordert dann eine Überarbeitung des Designs, ohne dabei die Leistungsfähigkeit zu vermindern. Das Bild zeigt die Kamera mit flugähnlichen Bauteilen (also solchen, die hinsichtlich Funktionalität und Abmessungen den endgültigen sehr nahe kommen, aber nicht tatsächlich für den Einsatz im Weltraum qualifiziert sind). Sie wird noch weiter optimiert werden, um dann als UV-Detektor für den Koronagraphen METIS und als Kamerasystem für den "correlation tracker" des PHI-Instruments eingesetzt zu werden. Beide Instrumente sind geplant für die Solar Orbiter Mission, die 2017 starten soll.

Die Erfahrungen aus dieser Entwicklung werden genutzt für weitere Kameras, die mit anderen Bildsensoren gebaut werden. Für das Solar Orbiter Instrument PHI selbst wird ein neuer CMS-APS-Sensor im Auftrag des MPS von der belgischen Firma CMOSIS nv entwickelt. Eine solche großformatige Abbildungsmatrix (4 Mega-Pixel) wird dann erstmalig im Weltraum zum

*tion, the APS devices in general allow the free selection of readout windows (either full frame or sub-frame images) by a proper programming of the operating processor, a FPGA (free programmable gate array) device.*

*In the MPS electronics lab the entire electronic readout circuitry, consisting of a sensor board, FPGA board, and a computer interface board has been developed. This includes the component selection, the design, layout and fabrication of boards, development of operating software, FPGA programming, etc.*

*The testing and characterization of the camera first concentrates on optimizing the design to fully exploit the sensor capabilities in terms of dynamic range and readout noise. The equipment of the electronic boards with space qualified components necessitates a re-design of the layout of the boards without degrading the performance. The figure shows the camera system with flight representative components (i.e. components which are very close to the final ones with respect to functionality and form factor, but which are not actually space qualified). It will be further optimized for the UV detector of the coronagraph METIS and as a camera system for the correlation tracker system of the PHI instrument. Both instruments are planned to be part of the Solar Orbiter mission to be launched 2017.*

*The heritage of this development will be used for further cameras to be built with other image sensors. For the Solar Orbiter PHI instrument itself a new CMOS-APS sensor is developed under contract with CMOSIS nv in Belgium. This large-format imaging array (of 4 megapixel) will be used for the first time in space. The PHI instrument requires a new design of the readout*

Einsatz kommen. Das PHI-Instrument erfordert dann allerdings ein Neudesign der Ausleseelektronik und eine komplexere Programmierung für die Handhabung der Daten.

*electronic system and more complex programming for the data handling.*

## 2.4 Ausgezeichnete Ausbildung

Die Entwicklungsarbeiten am MPS erfordern hoch qualifiziertes Personal. Daher bietet das Institut Ausbildungsmöglichkeiten im Bereich der wissenschaftlich-technischen Serviceeinrichtungen, aber auch in der Haustechnik und in der Verwaltung an. Bei Leistungswettbewerben sind Auszubildende des MPS immer wieder ausgezeichnet worden, bereits sieben von ihnen gar als Bundessieger in ihrem jeweiligen Ausbildungsberuf. Im Jahr 2009 ist jetzt sogar die Ausbildung am MPS insgesamt von der Max-Planck-Gesellschaft mit ihrem mit 5000€ dotiertem Azubi-Preis für herausragende Leistungen in der Berufsausbildung ausgezeichnet worden.

Die angebotenen Ausbildungsberufe umfassen: Industriemechaniker (Feingerätebau), Metallbauer (Konstruktionstechnik), Elektroniker für Geräte und Systeme, Elektroniker für Energie- und Gebäudetechnik, Kaufleute für Bürokommunikation und Fachinformatiker (Systemintegration)

## 2.4 Award-winning Apprenticeship

*The instrument developments done at the MPS require a highly qualified workforce. For this reason the institute offers apprenticeships especially within the scientific-technical service units, but also in the area of building services and administration. Apprentices of the MPS have been successful in competitions many times, and so far seven of them have been awarded the prize as winner in the national competition in their specific field. In 2009 the apprenticeship at the MPS altogether has been awarded the "Azubi" prize of the Max Planck Society, endowed with € 5000, for their exceptional achievements.*

*The offered occupations for apprenticeship comprise: Precision mechanic, metal worker, electronic technician for instruments and systems, electronic technician for energy and building services, office communication assistants and IT specialists.*



Die Azubis im Jahr 2010

*The apprentices in 2010*

Im Mittel werden 25-30 Jugendliche gleichzeitig ausgebildet, von denen ca. 8 jedes Jahr die Ausbildung erfolgreich abschließen. In den Jahren 2009/10 waren das:

Industriemechaniker (Feingerätebau): Sascha Adamski, Christina Fahlbusch, Nils Henne, Sascha Kirchhoff,

*In average 25 – 30 young people are trained at the same time, and about eight of them finish the apprenticeship successfully each year. In 2009/10 this have been:*

*Precision mechanic: Sascha Adamski, Christina Fahlbusch, Nils Henne, Sascha Kirchhoff, David Otto, Mari-*

David Otto, Marius Rinkleff, Björn Wemheuer, Peer Strogies („Northeimer Modell“)

Metallbauer (Konstruktionstechnik): Andre Echtermeyer

Elektroniker Geräte und Systeme: Philip Brakel, Nicholas Unger, Dustin Vogel, Stefan Wagner

Elektroniker Energie- und Gebäudetechnik: Denis Wirt

Kauffrau Bürokommunikation: Christin Enge, Jennifer Raabe

Business Administration (Bachelor of Arts): Jennifer Bartels

us Rinkleff, Björn Wemheuer, Peer Strogies („Northeimer Modell“)

*Metal worker: Andre Echtermeyer*

*Electronic technician for instruments and systems: Philip Brakel, Nicholas Unger, Dustin Vogel, Stefan Wagner*

*Electronic technician for energy and building services: Denis Wirt*

*Office communication assistants: Christin Enge, Jennifer Raabe*

*Business Administration (Bachelor of Arts): Jennifer Bartels*

**12. September 2009**

**Tag der offenen Tür**  
Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung

Tag der offenen Tür  
am 12. September 2009  
von 10 - 18 Uhr

- Vorträge und Videofilme
- Führungen und Rundgänge
- Informationsstände
- Ausgestellte Weltrauminstrumente
- Ergebnisse aktueller Weltraummissionen
- Kinderprogramm
- Speisen und Getränke

**MPS**

Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung · Katlenburg-Lindau  
Max-Planck-Straße 2 · Telefon: 05556-979-0 [www.mps.mpg.de](http://www.mps.mpg.de)

Veranstaltungsplakat des MPS zum Tag der offenen Tür 2009

*Poster to invite the public to the MPS open day in 2009*

### 3 Öffentlichkeitsarbeit

Das Sonnensystem mit seiner Vielzahl an Himmelskörpern und mit seiner Fülle spektakulärer Erscheinungen und Prozesse fasziniert die meisten Menschen. Erforscht werden diese Phänomene mit zum Teil beeindruckenden Beobachtungsmethoden (Raumsonden, Observatorien, Stratosphärenballone). Gewonnen werden Erkenntnisse über den Ursprung und die weitere Entwicklung des Lebens und seiner Umgebung. Es kann also nicht verwundern, dass das Interesse der Öffentlichkeit und der regionalen sowie überregionalen Medien an den Forschungsthemen und -projekten des MPS ausgesprochen groß ist. Die Pressestelle des MPS begegnet diesem Interesse regelmäßig durch das Erstellen von Pressenotizen, das Beantworten von Journalisten- und Laienanfragen, öffentliche Vorträge für Erwachsene und Kinder und Führungen für Besucher. So wurden im Berichtszeitraum 2009/10 27 Pressemitteilungen herausgegeben, die öffentliche Erich-Regener-Vortragsreihe des MPS wurde mit insgesamt elf gut besuchten Vorträgen fortgesetzt, und über 800 Besuchern wurden in mehr als 30 Führungen die aktuellen Forschungen und Ergebnisse des MPS vorgestellt.

Neben diese kontinuierlichen Aktivitäten gibt es aber auch in jedem Jahr spezielle Projekte und besondere Höhepunkte. Dazu zählten in 2009/2010 die Teilnahme an der Eröffnungsveranstaltung zum Internationalen Jahr der Astronomie im Museum für Kommunikation in Berlin sowie eine öffentliche Vortragsreihe zusammen mit dem DLR Göttingen und dem Institut für Astrophysik der Universität Göttingen in der historischen Sternwarte in Göttingen. Besondere Höhepunkte aus Sicht der Presse- und Öffentlichkeitsarbeit im Jahre 2009/2010 waren allerdings der Tag der offenen Tür am 12. September 2009 und der Start des Sonnenobservatoriums Sunrise im Juni 2009, der durch umfangreiche Medien- und Öffentlichkeitsarbeit vorbereitet und begleitet wurde.

#### Tag der offenen Tür

Am 12. September 2009 fand am MPS (erstmal seit 2005) wieder ein Tag der offenen Tür statt. In der Zeit zwischen 10 und 18 Uhr gab es für die Besucher Informationsstände, Filmvorführungen, ein Vortragsprogramm jeweils für Erwachsene und für Kinder, ein Spiel- und Bastelprogramm für Kinder, zahlreiche Führungen und Verpflegung. Insgesamt besuchten etwa 5000 Gäste an diesem Tag das Institut.

Der Tag der offenen Tür war für das MPS ein riesiges Ereignis, an dem alle Mitarbeiter des Instituts mitwirkten. Zudem bot er der Öffentlichkeit die einmalige Gelegenheit, völlig unkompliziert mit Wissenschaftlern und Forschern ins Gespräch zu kommen, sich

### 3 Public Outreach

*Most people are fascinated by the solar system with its variety of celestial bodies and an abundance of spectacular phenomena. Scientists the world over study these phenomena with e.g. space probes, observatories and stratospheric balloons in order to gain insights into the origin and further development of life and its surroundings. Therefore, it is not surprising that the public as well as regional and national media continue to show a keen interest in the institute's scientific work and projects. The MPS press office satisfies this interest by publishing regular press reports, answering inquiries by journalists as well as the general public, organizing talks for children and adults, and guided tours of the institute. In 2009/2010 the press office published 27 press releases, the popular "Erich Regener" series of talks has been continued with eleven well-attended lectures and in the course of over 30 guided tours more than 800 visitors learned about current MPS projects and results.*

*In addition to these ongoing activities, every year has its special projects and highlights. Examples of those highlights in 2009/2010 are the opening ceremony of the International Year of Astronomy in 2009 at the Museum for Communication in Berlin, a series of public lectures together with the DLR Göttingen and the Institute for Astrophysics of the Göttingen University in the historical observatory in Göttingen. From the PR and media perspective, the most important events in 2009/2010 were the open day on September 12, 2009 and the launch of the solar observatory SUNRISE in June 2009 which was prepared and covered by extensive PR and press work.*

#### Open Day

*For the first time since 2005, the MPS opened its doors to the public on September 12, 2009. Between 10am and 6pm visitors had the opportunity to learn about the institute and its scientific work in a number of talks for children and adults, with films and on various stands presenting projects and important areas of work. The range of activities on offer was rounded off by guided tours, food and drink, and an arts and crafts program for children. All in all about 5,000 people visited the institute on that day.*

*All MPS employees contributed to this huge event. In addition, the public had the opportunity to chat with scientists and researchers, to get detailed information*

detailliert zu informieren und das Institut, seine Werkstätten und Labore aus der Nähe kennen zu lernen

*and to look behind the scenes at the institute's laboratories and workshops.*



Bereits die jüngsten Besucher lassen sich von der MPS-Forschung fesseln  
*MPS science captivates all ages*

## SUNRISE

Eines der öffentlichkeitswirksamsten wissenschaftlichen Projekte des Jahres 2009 war der Start des Sonnenobservatoriums SUNRISE. Die Pressestelle hat deshalb bereits Monate zuvor begonnen, Öffentlichkeit und Medien über dieses Projekt zu informieren.

Um die Öffentlichkeit zu informieren und bereits im Vorfeld für das Projekt „Sonnenobservatorium am Ballon“ zu begeistern, hat das MPS erstmals einen Science-Blog ins Leben gerufen. In der Zeit von Anfang April bis Mitte Juni bot dieser Blog Interessierten die Gelegenheit, Vorbereitungen, Tests und Start der Mission im nordschwedischen Kiruna sowie die Landung in Kanada im Internet zu verfolgen. Neben insgesamt sieben Hintergrundberichten zu Themen wie „Das Teleskop“ und „Die Magnetfelder der Sonne“, berichteten in so genannten O-Tönen Wissenschaftler vom Stand der Dinge vor Ort in Kiruna.

Das zweite Standbein der Öffentlichkeitsarbeit zum Thema „Sunrise“ war die Verleihung der Auszeichnung „Ort im Land der Ideen 2009“ am 8. August

## SUNRISE

*One of the high-profile scientific projects in 2009 was the launch of the solar observatory SUNRISE. The press office had begun informing the public and media about this project already months in advance.*

*In order to inform the public and raise enthusiasm for the project "Balloon-borne solar observatory", MPS created their first science blog. From the beginning of April to mid-June, this blog provided the opportunity to follow the SUNRISE preparations and tests as well as the launch from Kiruna in northern Sweden and the landing in Canada on the internet. In addition to background information, e.g. about the telescope and the sun's magnetic field, scientists report on the happenings in Kiruna from their personal point of view.*

**Sunrise Science-Blog**  
Internet-Tagebuch zur Sunrise-Mission

<http://www.mps.mpg.de/projects/sunrise/scienceblog/>

2009. Neben der offiziellen Preisverleihung für geladene Gäste bot das MPS an diesem Tag zwei öffentliche Vorträge. Der Vortrag „Dem Feuerwerk des Sonnenmagnetfeldes auf der Spur“ richtete sich an Erwachsene und gab einen Überblick über Sinn und Zweck der Mission Sunrise sowie über den wissenschaftlichen Hintergrund. Im anschließenden Kinder Vortrag „Von der Sonne und anderen Gasballons“ wurde in kindgerechter Weise erklärt, wie die Sonne funktioniert. Beide Vorträge wurden von mehr als 100 Gästen besucht.

Die Mission Sunrise wurde in 2009/10 mit fünf Pressemitteilungen von den Startvorbereitungen bis zu den hin zu den ersten wissenschaftlichen Ergebnissen begleitet. Besonders der Start des Sonnenobservatoriums fand ein überwältigendes Echo in den Medien mit Berichten unter anderem in Spiegel Online, FAZ, Focus Online, Bild Online, n-tv Online und zahlreichen regionalen Tageszeitungen in ganz Deutschland.

Zudem hat das MPS im Vorfeld des Starts gezielt ausgewählte Journalisten eingeladen, die spannende Phase der letzten Vorbereitungen und den Start selbst vor Ort in Kiruna mitzuerleben. Daraus entstanden der 30-minütiger Fernsehbeitrag „Gefährlicher Stern“, der in der 3Sat-Reihe Hitec ausgestrahlt wurde, und eine mehrseitige und umfangreich bebilderte Reportage in der Zeitschrift GEO. Beides hat maßgeblich zur Bekanntheit der Mission (und damit des MPS) beigetragen.

*The second pillar of the SUNRISE PR-work centered on SUNRISE being awarded the prize as one of 365 places of innovation in Germany (Ort im Land der Ideen). The award ceremony on August 8, 2009 was complemented by two public talks. "Uncovering the secrets of the Sun's magnetic field" targeted primarily adults and gave an overview of the how and why of the SUNRISE mission as well as its scientific background. The following talk for kids "About the Sun and other gas balloons" explained how the Sun works. Both lectures were attended by more than 100 listeners.*

*In 2009/2010 five press releases were published concerning the SUNRISE mission, from preparations for the launch to the first scientific results. The launch especially was met with overwhelming media interest with reports by Spiegel Online, FAZ, Focus Online, Bild Online, n-tv Online and a number of regional papers all over Germany.*

*Furthermore, the MPS personally invited selected journalists to experience for themselves the excitement during the last preparations and the launch itself live on site in Kiruna. This resulted in the 30-minute TV show "Dangerous star", aired on 3Sat as part of the Hitec series and a multi-page report in the journal GEO including many breathtaking photographs. Both have contributed considerably to the mission's (and thus the MPS') publicity.*



Das Institutsgebäude des MPS an seinem momentanen Standort im Harzvorland  
*The MPS building at its current location at the foothills of the Harz Mountains*

## 4 Institutsüberblick

## 4 Institute at a Glance

### 4.1 Wissenschaftliche Leitung und Gremien

### 4.1 Scientific Management and Boards

#### Direktoren

##### *Directors*

Prof. Dr. Ulrich R. Christensen

Prof. Dr. Sami K. Solanki

Geschäftsführender Direktor im Berichtszeitraum 2009/10/  
*Managing Director during the reporting period 2009/10*

Prof. Dr. Laurent Gizon

(seit 1.4.2011)  
*(since Apr. 1<sup>st</sup>, 2011)*

#### Max-Planck-Forschungsgruppenleiter

##### *Max Planck Research Group Leader*

Prof. Dr. Laurent Gizon (bis 31.3.2011)  
*(until Mar. 31<sup>st</sup>, 2011)*

#### Emeritierte Wissenschaftliche Mitglieder

##### *Emeritus scientific members*

Prof. Sir Ian Axford († 13.03.2010)

Dr. Helmut Rosenbauer

Prof. Dr. Vytenis M. Vasyliunas

#### Auswärtige Wissenschaftliche Mitglieder

##### *External scientific members*

Prof. Dr. Albert Galeev

Prof. Dr. Johannes Geiss

Prof. Dr. Karl-Heinz Glaßmeier

#### Kuratorium

##### *Board of Trustees*

Prof. Dr. Stefan Dreizler

Institut für Astrophysik, Georg-August-Universität  
Göttingen

Helge Engelhard

Ministerialdirigent, Bundesministerium für Bildung und  
Forschung

Dr. Thomas Galinski

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

Prof. Dr. Jürgen Hesselbach

Präsident der Technischen Universität Braunschweig

Dr. Hanna von Hoerner

von Hoerner & Sulger GmbH

Markus Hoppe

Vizepräsident der Georg-August-Universität Göttingen



Die Direktoren des MPS

##### *MPS Directors*

(U.Christensen, L. Gizon, S.K. Solanki)

Dr. Josef Lange

Staatssekretär, Niedersächsisches Ministerium  
für Wissenschaft und Kultur

Prof. Dr. Oskar von der Lühe

Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik

Erika Mann

ehem. Mitglied des Europäischen Parlaments

Dr. Fritz Merkle

OHB-System GmbH

Prof. Dr. Hermann Opgenoorth

Swedish Institute of Space Physics

Thomas Oppermann

Mitglied des Bundestags

**Fachbeirat****Scientific Advisory Board****Prof. Dr. Larry Esposito**

Laboratory for Atmospheric and Space Physics  
University of Colorado

**Prof. Dr. Richard Harrison**

Department Space Science and Technology  
Rutherford Appleton Laboratory

**Prof. Dr. Suzanne Hawley**

Department of Astronomy  
University of Washington

**Prof. Dr. Gerhard Hensler**

Institut für Astronomie  
Universität Wien

**Prof. Dr. John Leibacher**

National Solar Observatory

**Prof. Dr. Philippe Lognonné**

Dépt. de Géophysique Spatiale et Planétaire  
Institut de Physique du Globe

**Prof. Dr. Eric Priest**

Department of Mathematics  
St. Andrews University

**Prof. Dr. Robert Rosner**

Department of Astrophysics  
University of Chicago

**Prof. Dr. David Stevenson**

Geological & Planetary Sciences  
California Institute for Technology

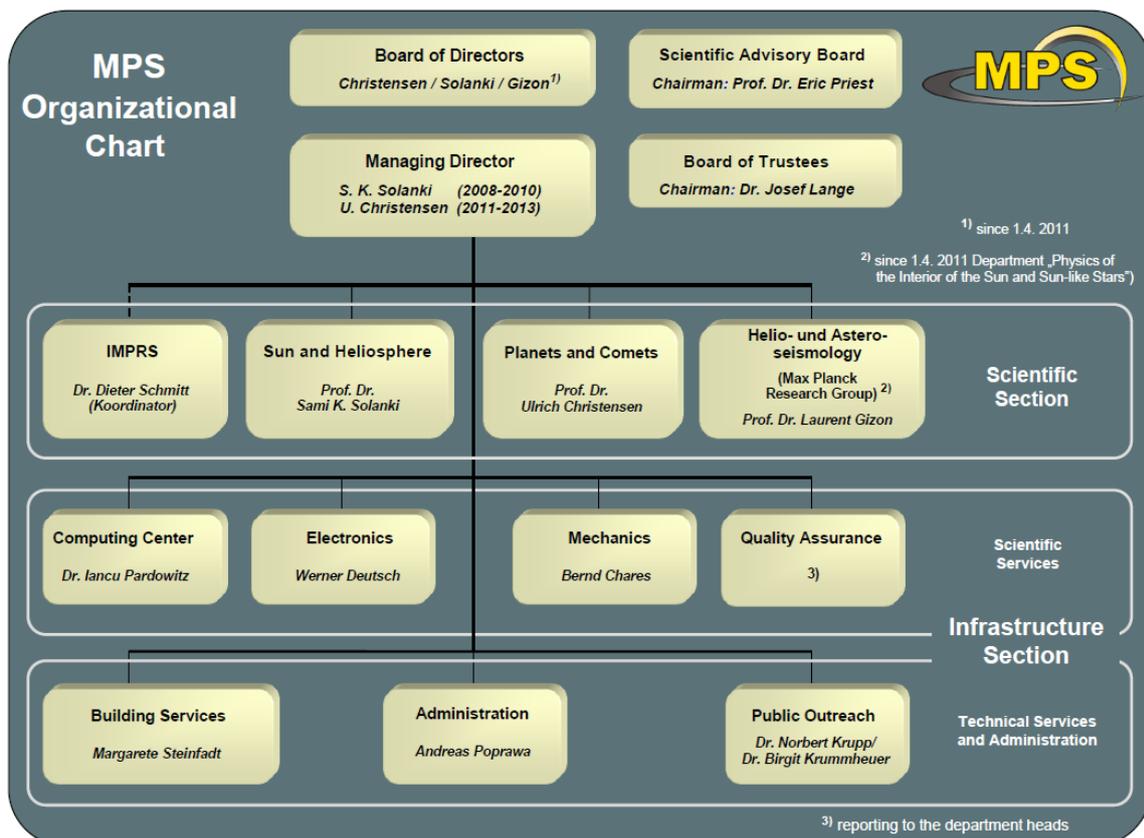
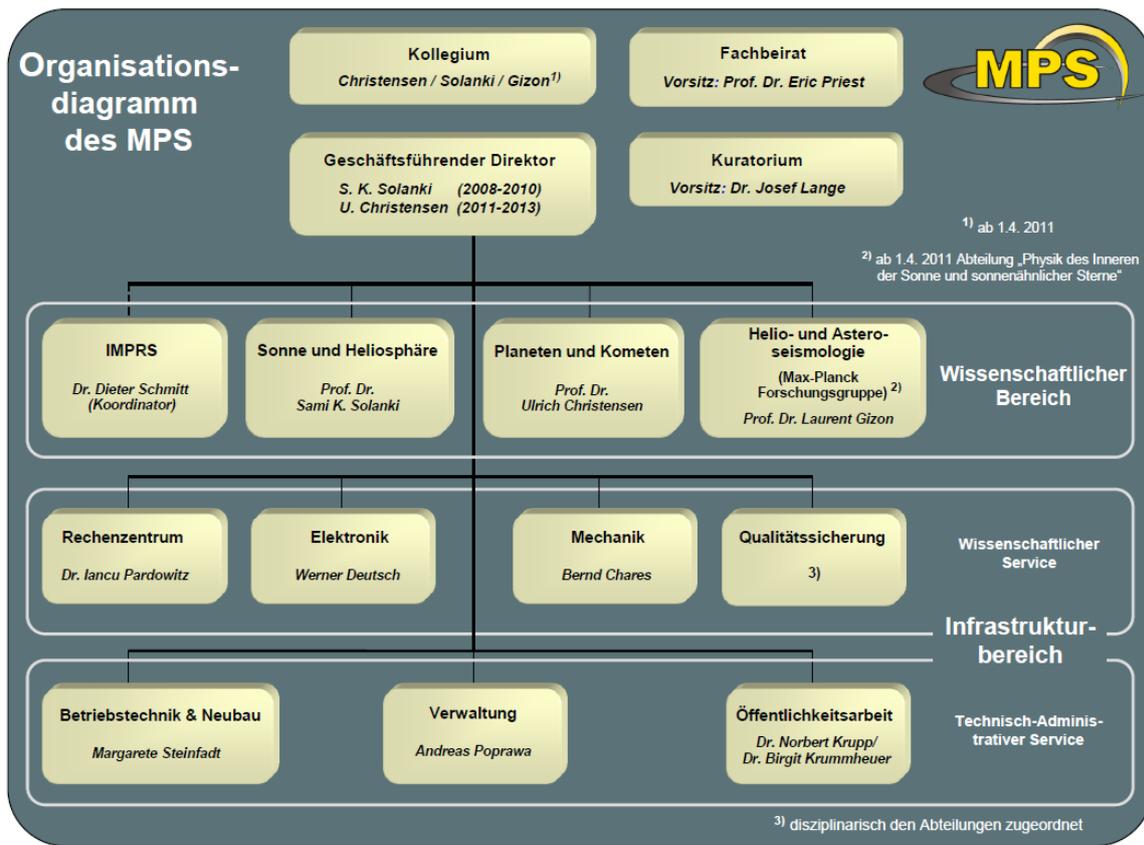


Der Fachbeirat im Jahr 2009 (mit dem MPG-Präsidenten, der Institutsbetreuung und den Direktoren)

*The Scientific Advisory Board in 2009 (together with the President of the Max Planck Society, the liaison officer for the institute and the Directors)*

## 4.2 Organigramm

## 4.2 Organizational Chart



### 4.3 Personalentwicklung

### 4.3 Staff development



MPS-Mitarbeiter im September 2009

MPS staff in September 2009

Die Anzahl Mitarbeiter hat sich im Berichtszeitraum um ca. 20 (8%) erhöht, im Wesentlichen durch eine höhere Anzahl an Postdocs und durch neu eingestellte Projektmitarbeiter, vor allem bei dem Projekt Solar Orbiter. Die Tabelle zeigt die Aufteilung hinsichtlich Finanzierung der Stellen (institutionell oder über Drittmittel) und die Anteile permanenter und zeitlich befristeter Stellen jeweils zu Beginn und zum Ende des Berichtszeitraumes.

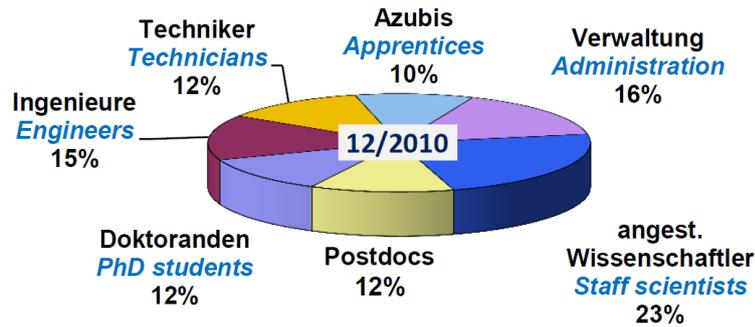
*The total number of employees has increased by about 20 (8%) during the reporting period, mainly due to a higher number of Postdocs and due to newly hired project engineers, especially for the Solar Orbiter project. The table shows the distribution with respect to funding of the positions (institutional or third party) and the shares of permanent and non-permanent positions, at the beginning and at the end of the reporting period, respectively*

	Ende 2008 <i>end 2008</i>	Ende 2010 <i>end 2010</i>
<b>Gesamt</b> <i>total</i> <sup>1</sup>	268	289
<b>Institutionell</b> <i>institutional</i>	195 (73%)	196 (68%)
<b>Drittmittel</b> <i>3rd party</i>	73 (27%)	93 (32%)
<b>Unbefristet</b> <i>permanent</i>	112 (42%)	108 (37%)
<b>Befristet</b> <i>non-permanent</i>	156 (58%)	181 (63%)

<sup>1</sup> ohne Gäste / without guests

Die Aufteilung der Mitarbeiter auf die verschiedenen Beschäftigungsgruppen zum Ende des Berichtszeitraums ist in der Grafik dargestellt. Sie hat sich in den zwei Jahren 2009/10 nur unwesentlich geändert. Etwa 50% der Institutsmitarbeiter sind Wissenschaftler, davon ca. die Hälfte Nachwuchswissenschaftler (Doktoranden und Postdocs). Aber auch der überwiegende Teil der Ingenieure und ein erheblicher Teil der Techniker direkt für wissenschaftliche Projekte tätig.

*The breakdown of the employees with respect to the different staff groups at the end of the reporting period (12/2010) is shown in the diagram. The distribution has changed only very slightly during the two years 2009/10. About 50% of the institute staff are scientists, with about half of them being junior scientists (PhD students and Postdocs). But the majority of the engineers and a significant portion of the technicians is also directly involved in scientific projects.*



Zusammensetzung der Mitarbeiter; Stand Ende 2010

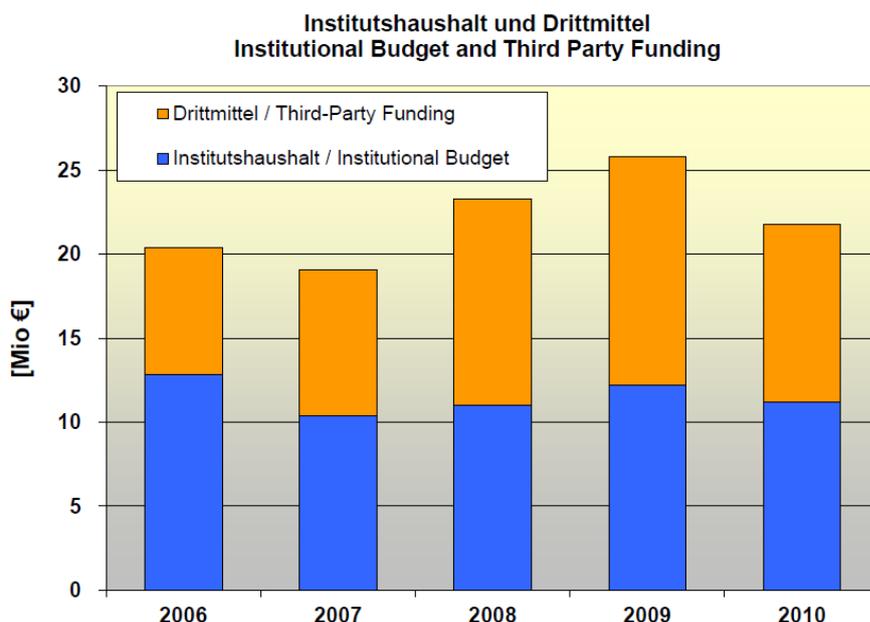
*Breakdown of the the staff; status end 2010*

### 4.4 Institutshaushalt

Über die letzten Jahre besteht der Haushalt des MPS im Mittel zu knapp 50% aus den institutionellen Mitteln der MPG und zu gut 50% aus Drittmitteln. Die Abnahme der institutionellen Mittel von 2006 zu 2007 spiegelt noch den letzten Schritt der Reduktion des Instituts in den Jahren seit 1997 wider. Seitdem ist dieser Teil des Haushalts relativ konstant, wird aber mit der Erweiterung des Instituts um eine dritte Abteilung im Jahr 2011 in den Folgejahren anwachsen. Die Drittmittel sind, abhängig von den Zeitplänen der zugehörigen Projekte, deutlicheren Schwankungen unterworfen. Bedeutendster Drittmittelgeber ist der DLR; daneben sind ESA, EU, DFG, und MPG wesentliche Quellen (projektspezifische Förderung der MPG außerhalb des regulären Budgets, basierend auf einer Evaluierung, werden hier zu den Drittmitteln gezählt).

### 4.4 Budget

*Over the last years the budget of the MPS has been based in average to just under 50% on the institutional funds of the Max Planck Society and to more than 50% on 3rd party funding. The reduction of institutional funding from 2006 to 2007 still reflects the last step in the down-sizing of the institute in the years since 1997. Since then this share of the budget is relatively stable, but it is expected to increase in the following years due to the expansion of the institute by a third department in 2011. The 3rd party funding shows a larger fluctuation, in line with the schedule of the corresponding projects. Most important source for 3rd party funds is the DLR; other major sources are ESA, EU, DFG and MPG (project specific funding by the MPG outside the regular budget, based on an evaluation procedure, is considered here as 3rd party funding).*



Entwicklung des MPS-Haushalts in den letzten 5 Jahren  
*Development of the MPS budget within the last 5 years*

## 4.5 Auszeichnungen 2009/10

**Dr. Robert Cameron** und **Prof. Dr. Manfred Schüssler** (zusammen mit M. Rempel und M. Knoelker)

"John W. Firor Publication Award 2009" (HAO) für die herausragende Veröffentlichung "Penumbral Structure and Outflows in Simulated Sunspots", Science, 2009

**Prof. Dr. Ulrich Christensen**

"Augustus-Love-Medaille 2009" (EGU) für "seine grundlegenden Beiträge zur Geodynamik ..."

**Prof. Dr. Albert Galeev** (auswärtiges wissenschaftliches Mitglied des MPS)

"Hannes-Alfvén-Medaille 2009" (EGU) für "seine herausragenden Beiträge zur Theorie des Plasmas im Weltraum ..."

**Prof. Dr. Laurent Gizon**

"Karen-Harvey-Preis 2009" (SPD/AAS) für "seine bedeutenden Beiträge und seine Führungsrolle in der Entwicklung der Techniken der lokalen Helioseismologie für das Studium des Sonneninneren"

**Prof. Dr. Eckart Marsch**

Ernennung zum Fellow der AGU in 2009

**Prof. Dr. Eckart Marsch** und **Prof. Dr. Vytenis Vasyliunas**

"2009 Editors' Citations for Excellence in Refereeing" (AGU)

**Dr. Elias Roussos**

"Otto-Hahn-Medaille" der Max-Planck-Gesellschaft, verliehen in 2009 für seine herausragende Doktorarbeit „Interactions of weakly or non-magnetized bodies with solar system plasmas: Mars and the moons of Saturn“

## 4.5 Awards in 2009/10

**Dr. Robert Cameron** and **Prof. Dr. Manfred Schüssler** (together with M. Rempel and M. Knoelker)

"John W. Firor Publication Award 2009" (HAO) for the outstanding publication "Penumbral Structure and Outflows in Simulated Sunspots", Science, 2009

**Prof. Dr. Ulrich Christensen**

"Augustus Love Medal 2009" (EGU) for "his fundamental contributions to geodynamics ..."

**Prof. Dr. Albert Galeev** (external scientific member of the MPS)

"Hannes Alfvén Medal 2009" (EGU) for "his outstanding contributions to space plasma theory ..."

**Prof. Dr. Laurent Gizon**

"Karen Harvey Prize 2009" (SPD/AAS) for "his significant contributions and leadership in the development of local helioseismology techniques for the study of the Sun's internal dynamics"

**Prof. Dr. Eckart Marsch**

Election as Fellow of the AGU in 2009

**Prof. Dr. Eckart Marsch** and **Prof. Dr. Vytenis Vasyliunas**

"2009 Editors' Citations for Excellence in Refereeing" (AGU)

**Dr. Elias Roussos**

"Otto Hahn Medal" of the Max Planck Society was awarded in 2009 for his outstanding PhD thesis „Interactions of weakly or non-magnetized bodies with solar system plasmas: Mars and the moons of Saturn“



Abb.: Laurent Gizon (links) erhält den Karen-Harvey-Preis 2009 von Todd Hoeksema (rechts), Vorsitzender der sonnenphysikalischen Abteilung der AAS, in Boulder (USA)

Fig.: Laurent Gizon (left) receives the Karen Harvey Prize 2009 from Todd Hoeksema (right), chairman of the Solar Physics Division of the AAS, in Boulder (USA)

## 4.6 Sir Ian Axford: Nachruf und Symposium

Professor Sir Ian Axford, Direktor und Wissenschaftliches Mitglied am Max-Planck-Institut für Aeronomie (dem Vorläufer des heutigen MPS) in Katlenburg-Lindau seit 1974, verstarb am 13. März 2010 im Alter von 77 Jahren.

Mit Ian Axford haben wir einen herausragenden Wissenschaftler verloren, der als Pionier in der Erforschung von Magnetosphäre und Heliosphäre anzusehen ist. Mit wesentlichen Beiträgen zu den grundlegenden Theorien der Struktur der Magnetosphäre, des Ursprungs des Sonnenwindes und der Beschleunigung der Teilchen der kosmischen Strahlung hat er die Wissenschaft in seinem Forschungsgebiet in hohem Maße geprägt.

William Ian Axford wurde 1933 in Neuseeland geboren. Er studierte in seinem Heimatland (Canterbury) und in England (Manchester und Cambridge) Ingenieurwissenschaften und Mathematik und promovierte 1960 mit einer Arbeit aus dem Gebiet der angewandten Mathematik. Danach war er zwei Jahre beim Defense Research Board of Canada, wo er einige seiner wichtigsten Arbeiten veröffentlichte. Von 1963 bis 1974 lehrte er zunächst an der Cornell University und dann an der University of California in San Diego Astronomie und Physik. Von 1974 bis 2001 war er Direktor am Max-Planck-Institut für Aeronomie (MPAe), dem heutigen MPS, unterbrochen nur durch die Tätigkeit als Vizekanzler der Victoria-University in Wellington/Neuseeland von 1982 bis 1985.

Zu der Vielzahl an renommierten Ehrungen und Auszeichnungen, die Sir Ian zuteil wurden, gehören die Ernennung zum Fellow der Royal Society in London (F.R.S.) 1986 sowie die Erhebung in den Ritterstand durch die englische Königin in 1996.

Im Alter von 41 Jahren wurde er 1974 von der MPG zum Wissenschaftlichen Mitglied und zum Direktor des MPAe berufen. Ian Axford gelang es, das internationale Ansehen des Instituts deutlich zu stärken und es zunehmend für Gastwissenschaftler zu öffnen. Das MPAe beteiligte sich unter seinem Einfluss vermehrt an wichtigen internationalen Missionen der Weltraumforschung. Die Beiträge zur Mission Giotto (einem Rendezvous mit dem Kometen Halley) und zu den Sonnensonden Ulysses und SOHO zählen mit zu den größten Erfolgen seines Wirkens am Institut.

Neben der Wahrnehmung zahlreicher einflussreicher

## 4.6 Sir Ian Axford: Obituary and Symposium

*Professor Sir Ian Axford, a scientific member and director of the Max Planck Institute for Aeronomy (the predecessor of today's MPS) in Katlenburg-Lindau since 1974, has passed away at the age of 77.*

*With the passing of Ian Axford we have lost an outstanding scientist, who was one of the pioneers in magnetospheric and heliospheric exploration. With his essential contributions to the fundamental theories of the structure of the magnetosphere, the origin of the solar wind and the acceleration of cosmic-ray particles, he significantly shaped the science within his research field.*



**Sir Ian Axford**  
(\*02.01.1933 †13.03.2010)

*William Ian Axford was born in New Zealand in 1933. He received degrees in engineering science and mathematics from the universities in Canterbury (New Zealand), Manchester and Cambridge and achieved his doctorate in 1960 in the field of applied mathematics. He then joined the Defense Research Board of Canada where he published some of his most influential papers. From 1963 to 1974 he taught Astronomy and Physics, first at Cornell University and then at the University of California in San Diego. From 1974 to 2001 he was a director at the Max Planck Institute for Aeronomy (MPAe), today's MPS, interrupted by a tenure as Vice-Chancellor of the Victoria University of Wellington/New Zealand from 1982 to 1985.*

*Just two of the numerous and prestigious awards and honours bestowed on Sir Ian were his naming as a Fellow of the Royal Society in London (F.R.S.) in 1986 and the knighthood bestowed by the Queen in 1996.*

*In 1974 at the age of 41 he was appointed scientific member and director of the MPAe by the Max Planck Society. Ian Axford significantly enhanced the international reputation of the Institute and attracted an increasing number of guest scientists. Under his guidance the MPAe participated increasingly in important international space missions. The contributions to the Giotto mission (a rendezvous with comet Halley) as well as to the solar probes Ulysses and SOHO are some of the greatest achievements during his directorship at the Institute.*

*Besides fulfilling many duties and holding major posi-*

Ämter und Aufgaben in den wichtigsten wissenschaftlichen Organisationen auf seinem Forschungsgebiet hat Ian Axford sich besonders für die Gründung der European Geophysical Society, deren Präsident er von 1990 bis 1992 war, sowie der Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) eingesetzt.

Nach seiner Emeritierung als Direktor des MP Ae in 2001 kehrte er in seine Heimat Neuseeland zurück, verbrachte jedoch weiterhin regelmäßig einige Monate am Max-Planck-Institut und war bis kurz vor seinem Tod weiter wissenschaftlich aktiv. Nach längerer Krankheit ist Sir Ian Axford am 13. März 2010 in Napier/Neuseeland verstorben.

Um seine Leistungen und Erfolge in Lindau, also an dem Ort, von dem aus er die Forschung in vielen Bereichen geprägt und zahlreiche Kollegen inspiriert hat, zu würdigen, lud das MPS Freunde und ehemalige Kollegen Axford's am 14. Juni 2010 zu einem Symposium zu Ehren von Sir Ian Axford an das MPS. Die Leistungen Ian Axford's in den verschiedenen Bereichen seiner Forschungstätigkeit, Heliosphäre und Sonnenwind (Egil Leer, University of Oslo), Schocks und kosmische Strahlung (Randy Jokipii, University of Arizona), Ionosphäre und Magnetosphäre (Karl-Heinz Glaßmeier, TU Braunschweig), Planeten und Kometen (Wing Ip, National Central University Taiwan) wurden in einzelnen Vorträgen in Erinnerung gerufen, und ein biographischer Beitrag (Arne K. Richter, MPS) legte den Fokus auf sein Wirken als Direktor am MP Ae.

*tions within the most important scientific organizations in his research field, Ian Axford was heavily engaged in the founding of the European Geophysical Society of which he served as president from 1990 to 1992, and of the Asia Oceania Geosciences Society (AOGS).*

*After his retirement as director of the MP Ae in 2001 he returned to New Zealand, although he still found time to spend a few months a year at the Max Planck Institute. He continued to be scientifically productive until close to his death. On March 13, 2010 Sir Ian Axford died in Napier/New Zealand after a long illness.*

*In order to commemorate his achievements in Lindau, a place where and from where he influenced research in many fields and inspired so many people, the MPS invited former friends and colleagues of Ian to a Symposium in Honor of Sir Ian Axford at the MPS on June 17, 2010. Ian's achievements in the various fields of his research activities, Heliosphere and Solar Wind (Egil Leer, University of Oslo), Shocks and Cosmic Rays (Randy Jokipii, University of Arizona), Ionosphere and Magnetosphere (Karl-Heinz Glaßmeier, TU Braunschweig) and Planets and Comets (Wing Ip, National Central University Taiwan) were recognized in separate talks and a biographical contribution (Arne K. Richter, MPS) focused on the period of his directorship at the MP Ae.*



Eröffnung des Symposiums durch Sami K. Solanki

*Opening of the Symposium by Sami K. Solanki*

## 4.7 Neubau des MPS

Das MP siedelt Anfang 2014 vom heutigen Standort in Katlenburg-Lindau in das 30 Kilometer entfernte Göttingen um. In den nächsten Jahren entsteht dort auf dem Nordcampus der Universität Göttingen in direkter Nachbarschaft des Instituts für Astrophysik ein Neubau für etwa 50 Millionen Euro. Auf etwa 10 000 Quadratmetern Nutzfläche bietet der Gebäudekomplex Büroräume, Labore, Werkstätten, hochmoderne Reinräume und eine neun Meter hohe Ballon- und Integrationshalle. Zur sozialen Infrastruktur gehören eine Kindertagesstätte, ein Bistro und Gästewohnungen.

## 4.7 New MPS Building

*The MPS will move early 2014 from today's location in Katlenburg-Lindau to Göttingen, a 30 km distance. On the northern campus of the University of Göttingen, in the immediate vicinity of the Institute for Astrophysics, a new building will be constructed for about 50 Million euros. With a floor space of about 10 000 square meter, the site will house offices, labs, workshops, state of the art clean rooms and a balloon and integration hall with a height of 9 m. Part of the social infrastructure are a children's day-care, a bistro and guest apartments. .*



Der Eingangsbereich des neuen Institutsgebäudes

*Front view of the new institute's building*

Da sich die Forschungsthemen des Instituts in den letzten Jahrzehnten grundlegend gewandelt haben (von der ursprünglichen Untersuchung der oberen Erdatmosphäre hin zur Erforschung des Sonnensystems) und daher zunehmend die Entwicklung von Instrumenten für Weltraummissionen im Mittelpunkt der Arbeiten steht, ist die technische Infrastruktur des über 40 Jahre alten Institutsgebäudes den neuen Anforderungen nicht mehr voll gewachsen. Der Neubau wird eine flexible Umgebung liefern, die auf die aktuellen und zukünftigen wissenschaftlichen Ziele des Instituts hin optimiert ist.

*The scientific orientation of the institute has changed radically during the last decades, away from the investigation of the upper atmosphere of the Earth, towards the exploration of the solar system. For this reason the development of instruments for space missions has become more and more important. But the technical infrastructure of the more than 40 years old building is no longer able to cope fully with these requirements. The new building will provide a flexible environment that is optimized for the current and future scientific objectives of the institute.*

Vom Umzug verspricht sich das MPS auch eine stärkere Zusammenarbeit mit der Universität in Göttingen, insbesondere den Instituten für Astrophysik und Geophysik. Zudem wird es so möglich, die wissenschaftliche und soziale Infrastruktur des renommierten Wissenschaftsstandorts zu nutzen.

Im September 2010 hat ein hochkarätig besetztes Preisgericht aus international bekannten Architekten und renommierten Persönlichkeiten aus der Wissenschaftswelt den Architekturwettbewerb rund um den MPS-Neubau entschieden. Sieger des Wettbewerbs ist der Entwurf des Aachener Architektenbüros Carpus + Partner AG. Diese Vision des Neubaus schafft Räume, die ein besonders angenehmes Arbeitsklima versprechen. Zudem passt sich das geplante Gebäude harmonisch in die bestehende Bebauung des Nordcampus ein. Der erste Spatenstich erfolgte im August 2011.

*The MPS expects the move also to intensify the collaboration with the University of Göttingen, especially with the institutes for Astrophysics and Geophysics. In addition, the move will allow to profit from the scientific and social infrastructure of this renowned science location.*

*In September 2010 a top-class jury of international renowned architects and representatives of the science arena selected the design of the "Carpus + Partner AG" from Aachen as the winner of the architectural competition for the new MPS building. Their vision of the new building is expected to provide especially a pleasant working atmosphere. In addition, the planned building fits very well to the existing ones of the northern campus. The ground breaking ceremony took place in August 2011.*



Überblick auf den gesamten Neubau des MPS

*Overview of the complete new MPS building*

Max-Planck-Institut für  
Sonnensystemforschung  
Max-Planck-Straße 2  
37191 Katlenburg-Lindau  
Tel: 05556-979-0  
Fax: 05556-979-240  
E-Mail: [presseinfo@mps.mpg.de](mailto:presseinfo@mps.mpg.de)