

Max-Planck-Institut
für Sonnensystemforschung
Report 2011/2012



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
Internet: www.mps.mpg.de

Neue Adresse ab April 2014
New address as of April 2014
Justus-von-Liebig-Weg 3
37077 Göttingen
+49 551 384979-0
+49 551 384979-240

Redaktion

Editors

Grit Koch
Johannes Stecker
Johannes Wicht

Titelbild: Falschfarbenaufnahme des Asteroiden Vesta

Cover photo: False color image of asteroid Vesta

©NASA/JPL-Caltech/UCLA/MPS/DLR/IDA/PSI



**Max-Planck-Institut
für Sonnensystemforschung**

*Max Planck Institute
for Solar System Research*

Report 2011/2012



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

Vorwort	5
<i>Preface</i>	
1 Wissenschaft und Forschung	
<i>Science and research</i>	
1.1 Forschungsprofil des MPS	7
<i>Research profile of the MPS</i>	
1.2 Planeten und Kometen	
<i>Planets and Comets</i>	
1.2.1 Überblick	8
<i>Overview</i>	
1.2.2 Rosetta besucht Lutetia	14
<i>Rosetta visits Lutetia</i>	
1.2.3 Erste Ergebnisse der Dawn-Mission	17
<i>First Results of the Dawn Mission</i>	
1.2.4 Wasserquellen im äußeren Sonnensystem	20
<i>Water Sources in the Outer Solar System</i>	
1.2.5 Ionenverlust der terrestrischen Planeten	27
<i>Ion Escape from Terrestrial Planets</i>	
1.2.6 Wechselwirkungen der inneren Saturnmonde mit dem Plasma der Saturnmagnetosphäre	30
<i>Interaction between the Inner Moons and the Plasma in the Saturnian Magnetosphere</i>	
1.2.7 Die innere Dynamik von Jupiter und Saturn	34
<i>The Inner Dynamics of Jupiter and Saturn</i>	
1.3 Sonne und Heliosphäre	
<i>Sun and Heliosphere</i>	
1.3.1 Überblick	38
<i>Overview</i>	
1.3.2 Plasmaschauer auf der Sonne	46
<i>Splashdown on the Sun</i>	
1.3.3 Ist der magnetische Fluss der ruhigen Sonne an den Sonnenzyklus gebunden?	49
<i>Does the quiet Sun Magnetic Flux change with the Solar Cycle?</i>	
1.3.4 Magnetfeld und Energie der Sonnenkorona	52
<i>Magnetic Field and Energy of the Solar Corona</i>	
1.3.5 Vorwärtsmodelle der Sonnenkorona	56
<i>Forward Models of the Solar Corona</i>	
1.3.6 Simulationen von Magnetfeldern und Strömungen in oberflächennahen Schichten von Sternen	60
<i>Simulations of Magnetic Fields and Convective Flows in the Near-Surface Layer of Stars</i>	
1.3.7 Räumlich gekoppelte Inversionen spektropolarimetrischer Bilddaten: Grundlagen und erste Resultate	64
<i>Spatially Coupled Inversion of Spectro-Polarimetric Imaging Data and Results obtained therewith</i>	
1.4 Helio- und Asteroseismologie	
<i>Helio- and Asteroseismology</i>	
1.4.1 Überblick	68
<i>Overview</i>	
1.4.2 Ist die Konvektion im Sonneninneren langsamer als gedacht?	72
<i>Is Convection in the Solar Interior Slower than Expected?</i>	
1.4.3 Helioseismologie von aktiven Regionen vor deren Erscheinen	77
<i>Helioseismology of Active Regions before their Emergence</i>	
1.5 Publikationen	81
<i>Publications</i>	
1.6 IMPRS	83
<i>IMPRS</i>	

2	Infrastruktur <i>Infrastructure</i>	
2.1	Detektorlabor <i>Detector Laboratory</i>	86
2.2	Rechenzentrum <i>Computing Center</i>	87
2.3	Ausbildung <i>Apprenticeship</i>	88
3	Öffentlichkeitsarbeit <i>Public Outreach</i>	90
4	Institutsüberblick <i>The Institute at a glance</i>	
4.1	Wissenschaftliche Leitung und Gremien <i>Scientific Management and Boards</i>	94
4.2	Organigramm <i>Organizational chart</i>	96
4.3	Personalentwicklung <i>Staff development</i>	97
4.4	Institutshaushalt <i>Budget</i>	98
4.5	Neubau des MPS <i>New MPS building</i>	99

Vorwort

Preface



Prof. Dr. Ulrich Christensen
Direktor

Prof. Dr. Laurent Gizon
Direktor

Prof. Dr. Sami K. Solanki
Direktor

Das Neubauprojekt in Göttingen hat die Jahre 2011 und 2012 am MPS geprägt. Am Nordcampus der Georg-August-Universität in Göttingen in Nachbarschaft zur Fakultät für Physik soll das Institut 2014 eine neue Heimat finden. War der Neubau Anfang 2011 kaum mehr als eine Idee, die in Plänen und auf Zeichnungen existierte, findet sich Ende 2012 am neuen Standort ein fertiger Rohbau, der bereits viel von seiner künftigen Bestimmung und Wirkung erkennen lässt. Ein ausführlicher Text zum Bauprojekt findet sich am Ende dieses Berichts.

Die stärkere Orientierung des Instituts nach Göttingen und zum Göttingen Research Campus zeigt sich nicht zuletzt in der dritten Abteilung, die 2010 gegründet wurde. Ihr Leiter, Prof. Dr. Laurent Gizon, ist gleichzeitig ordentlicher Professor am Institut für Astrophysik der Universität. Seit 2012 sind die Forscher zudem durch den Sonderforschungsbereich „Astrophysikalische Strömungsinstabilität und Turbulenz“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft mit den Kollegen in Göttingen vernetzt. Auch die International Max Planck Research School (IMPRS), die das MPS seit 2002 zusammen mit den Universitäten in Braunschweig und Göttingen betreibt, wird sich künftig stärker nach Göttingen orientieren: Die MPG hat eine Verlängerung der IMPRS für den Zeitraum von Oktober 2013 bis September 2019 bewilligt, allerdings mit veränderter Ausrichtung, unter neuem Namen und mit der Universität Göttingen als alleinigem Partner.

Auch weitere Weichen für die wissenschaftliche Zukunft des MPS wurden 2011 und 2012 gestellt. So genehmigte etwa die Europäische Weltraumagentur (ESA) die Mission Solar Orbiter. Die gleichnamige Raumsonde soll 2017 ins All starten und sich näher an die Sonne heranwagen als jede andere Sonde zuvor. Das MPS ist an sechs der zehn Instrumente an Bord beteiligt. Bau und Entwicklung dieser Beiträge werden in den nächsten Jahren ein Schwerpunkt der Arbeit der Sonnenabteilung sein.

The project „New building and Relocation“ dominated the years 2011 and 2012 at the MPS. The institute will find a new home on the northern campus of the Georg-August-Universität in Göttingen, next to the Faculty of Physics. From an idea recorded as drawings and plans the new institute building had grown into a structurally complete shell by the end of 2012. A detailed article on the construction project can be found at the end of this report.

The institute strengthens its ties to Göttingen and the Göttingen research campus – a fact that is also reflected in the third department which was founded in 2010. Its leader, Prof. Dr. Laurent Gizon is at the same time full professor at the university's Institute for Astrophysics. In addition, the scientists have been connected to their colleagues in Göttingen via the collaborative research center “Astrophysical Flow Instabilities and Turbulence” of the “Deutsche Forschungsgesellschaft (German Research Foundation)” since 2012. The Max Planck Research School (IMPRS) which has been run by the MPS together with the universities of Braunschweig and Göttingen since 2002 will be oriented more towards Göttingen: The Max Planck Society has approved an extension of the IMPRS from October 2013 to September 2019. However, there will be a change of focus, a new name and the university of Göttingen as the sole partner.

The scientific future of the MPS was decided in other areas as well. For example, the European Space Agency ESA approved the Solar Orbiter mission. The space probe is scheduled to launch in 2017 and get a closer look of the Sun than any other probe before. The MPS contributes to four of the ten instruments on board. In the next couple of years, the development and construction of these contributions will be a major part of the Solar Department's work.

Zudem wurde im Sommer 2012 im spanischen Observatorio del Teide auf Teneriffa Europas größtes Sonnenteleskop GREGOR eingeweiht. Das MPS ist Mitglied des deutschen Konsortiums, welches das Teleskop finanziert und betreibt.

Auch aus Sicht der Planetenforschung brachte der Berichtszeitraum Zukunftswisendes. Seit 2012 steht fest: Das MPS ist Partner der Marsmission InSight der amerikanischen Weltraumagentur (NASA) und wird Teile des Seismometers entwickeln. 2016 soll die Landeeinheit von InSight auf dem roten Planeten aufsetzen und seinen inneren Aufbau erkunden.

Über die Ergebnisse laufender wissenschaftlicher Missionen und Forschungsprojekte aus den Jahren 2011 und 2012 gibt der Hauptteil dieses Berichts Aufschluss. Einige der spannendsten Erkenntnisse kamen aus dem Asteroidengürtel. Dort erreichte die NASA-Raumsonde Dawn im Sommer 2011 den Asteroiden Vesta und begleitete ihn mehr als ein Jahr lang. Forscher des MPS konnten entscheidend dazu beitragen, zu beweisen, dass Vesta ein Überbleibsel aus einer frühen Phase der Planetenentstehung ist. Das MPS ist mit einem Kamerasystem an der Mission beteiligt.

Beobachtungen des Kometen Hartley 2 mit Hilfe des ESA-Weltraumobservatoriums Herschel und helioseismologische Auswertungen von Daten der NASA-Sonde Solar Dynamics Observatory waren die Grundlage weiterer wissenschaftlicher Highlights. So konnten MPS-Forscher erstmals einen Kometen aufspüren, dessen Wasser dem der Erde gleicht, und beweisen, dass das Plasma im Inneren der Sonne langsamer fließt als bisher angenommen.

Furthermore, Europe's biggest solar telescope GREGOR, part of the Spanish observatory Observatorio del Teide on Tenerife, was inaugurated in 2012. The MPS is a member of the German consortium managing and financing the telescope.

The year 2012 brought good news for the planetary department: It has become certain that the MPS will be a partner of NASA's Mars mission InSight and will develop parts of the seismometer. InSight's lander unit is scheduled to alight on the red planet in 2016 and examine its inner structure.

The main part of this report describes the results of ongoing scientific missions and research projects in the years 2011 and 2012. Some of the most exciting results came from the asteroid belt where NASA's space probe Dawn reached the asteroid Vesta in 2011 and was able to follow it for over a year. MPS scientists took an active part in proving that Vesta is a relic from an early phase in planet formation. The MPS contributes a camera system to the mission.


Other scientific highlights were the observations of the comet Hartley 2 using ESA's space observatory Herschel and helioseismological analyses of data obtained by NASA's Solar Dynamics Observatory. For the first time, MPS scientists were able to find a comets whose water resembles terrestrial water and prove that the plasma in the solar interior flows slower than expected until now.



Ulrich Christensen



Laurent Gizon



Sami K. Solanki

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 das Innere und die Atmosphäre der Sonne mit ihrem Magnetfeld, 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 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 je eine wissenschaftliche Abteilung zugeordnet ist: „Sonne und Heliosphäre“, „Planeten und Kometen“ sowie „Das Innere der Sonne und der Sterne“.

Bei der 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 Weltraum liefern das Licht für abbildende und spektrometrische Verfahren, die in einem Wellenlängenbereich 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 wird 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.

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 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 to a scientific department (“Sun and Heliosphere”, “Planets and Comets” and “Solar and Stellar Interiors”).

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.

1.2 Planeten und Kometen

1.2.1 Überblick

Forschungsgebiet und Methoden

Die Arbeiten in der 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 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 zu der Vielfalt verschiedenartiger Körper weiterentwickelt hat, die wir heute vorfinden, und die sich uns mit einer Fülle unterschiedlicher Naturerscheinungen 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 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. Mit Weltraummissionen, die in den nächsten Jahren starten, werden wir das Innere von Mars und Mond mit Seismometern erkunden, die Oberflächen-topographie und die Gezeitendeformationen des Merkur mit Hilfe eines Laseraltimeters kartieren und die Zusammensetzung seiner Oberfläche mittels Röntgenfluoreszenz bestimmen. Die Daten von Instrumenten im Weltraum werden ergänzt durch Beobachtungen mit großen Teleskopen vom Erdboden aus, vor allem

1.2 Planets and Comets

1.2.1 Overview

Field and Methods of Research

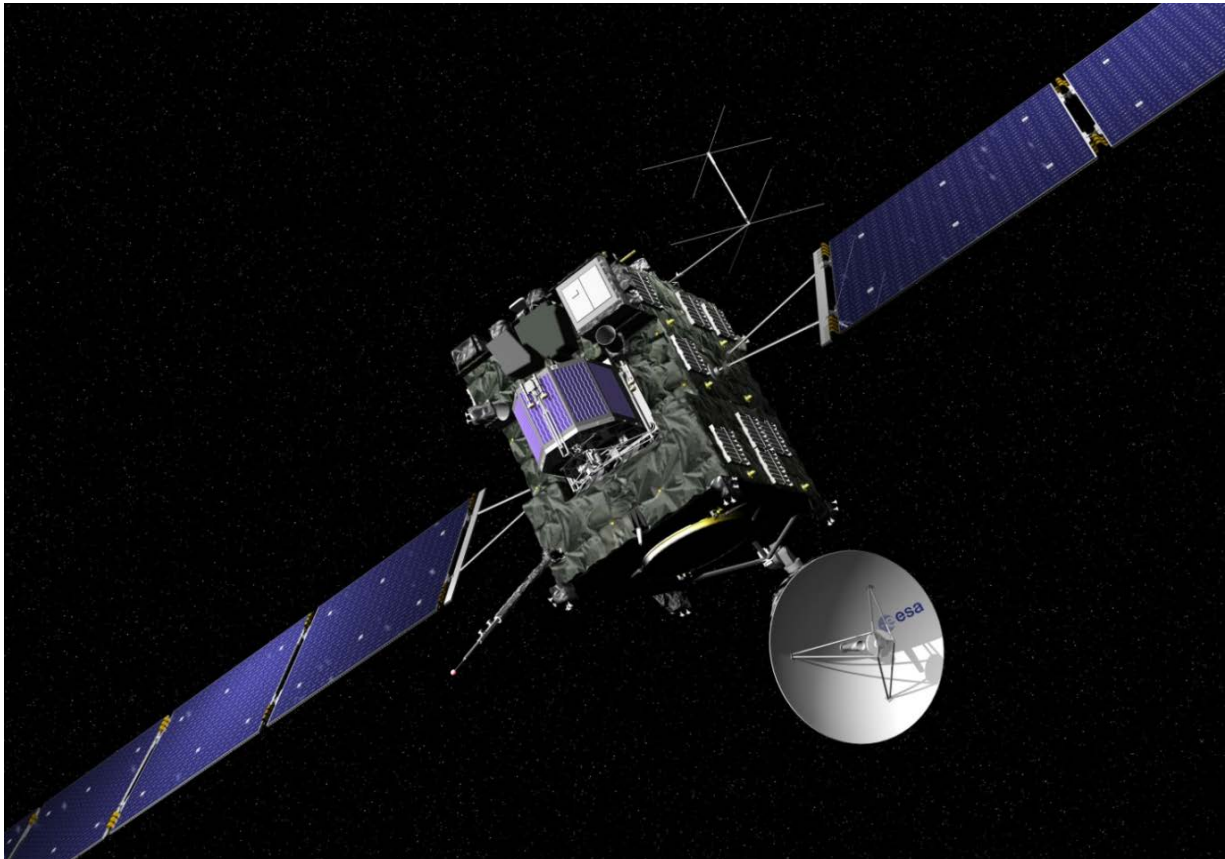
Research in the department „Planets and Comets“ covers a broad spectrum of topics in planetary sciences. We study the structure and composition of planetary bodies in our solar system and the dynamical processes that operate in their various parts. This includes the deep interior, the surface layers, 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 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 high-energy 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-borne 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

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.

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 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 2011/12 haben Instrumente mehrerer Weltraummissionen Daten geliefert, die am MPS analysiert wurden. Die Venus Monitoring Camera (VMC) der **Venus Express Mission** nimmt Bilder der Wolkenstrukturen auf, mit deren Hilfe die Zirkulation und die Zusammensetzung 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**.

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**.*

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.

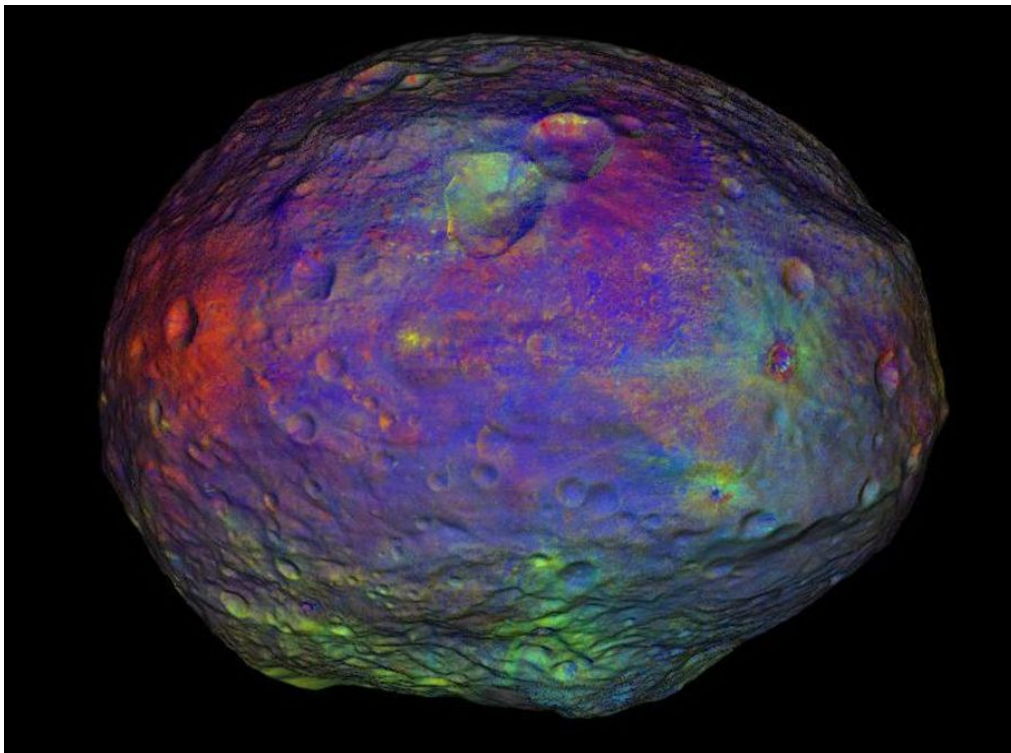
Mit dem HIFI-Instrument, einem Spektrometer für das ferne Infrarot, auf dem **Herschel**-Weltraumobservatorium, das von 2010 – 2013 Daten geliefert hat, haben wir die Struktur und Zusammensetzung der Atmosphären von Planeten und Kometen erforscht. Erstmals wurde dabei ein Komet gefunden, bei dem das Verhältnis der Konzentration von leichtem und schweren Wasserstoff mit der in den irdischen Ozeanen übereinstimmt. Damit hat die Hypothese an Gewicht gewonnen, wonach Kometen einen großen Teil des Wassers zur Erde gebracht haben.

Unsere beiden Kameras auf der **Dawn**-Mission haben 2011/2012 den Kleinplaneten Vesta in verschiedenen Farbkanälen abgebildet. Die Daten haben den Nachweis erbracht, dass Vesta in Kruste, Mantel und Eisenkern differenziert ist und zeugen von einer sehr bewegten Vergangenheit, die die Oberfläche des Planeten geprägt hat. Dawn befindet sich im Weiterflug zu Ceres, die 2015 erreicht werden wird.

*Data from the particle detector MIMI/LEMMS on the **Cassini** mission, which has orbited Saturn since 2004, are used to study how the plasma in Saturn's magnetosphere is affected by the planet's different satellites. 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 instrument HIFI on board the **Herschel** space observatory, a spectrometer for the far infrared, delivered data from 2010 to 2013. We used these data to analyze the structure and composition of planets and comets. For the first time, a comet was found whose ratio of the hydrogen isotope deuterium (D) to „normal“ hydrogen (H) matched that found in water on Earth. This supports the hypothesis that a major of the water on Earth originates from comets.*

*In 2011/2012 our cameras onboard the **Dawn** mission photographed the protoplanet Vesta with different color filters. These data not only provided proof that Vesta is divided into crust, mantle and iron core but also bear witness to a very turbulent past which shaped the planet's surface. Dawn is expected to reach its next target, Ceres, in 2015.*



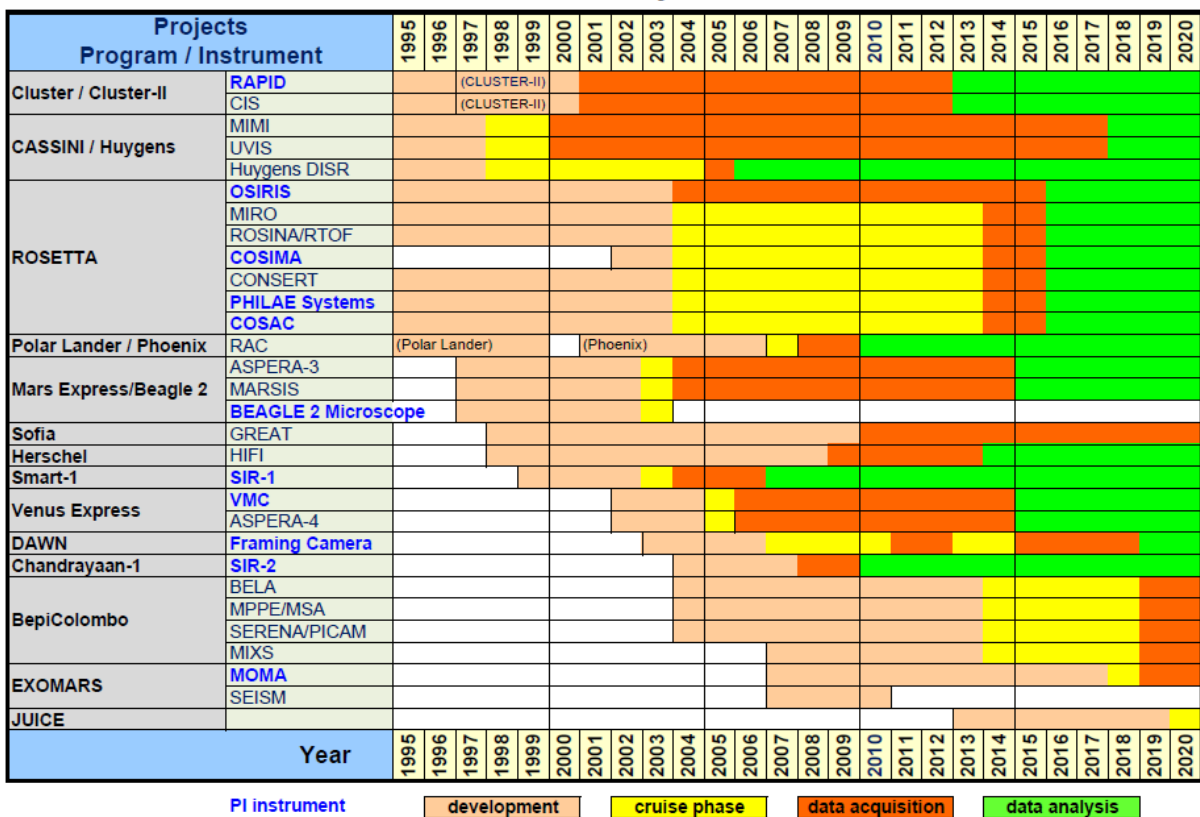
Dreidimensionale Farbkarte des Asteroiden Vesta
Three dimensional color map of asteroid Vesta

2012 sind in zunehmendem Maße die Vorbereitungen auf die wissenschaftliche Datenphase der **Rosetta**-Mission bei ihrem Zielkometen in den Vordergrund gerückt. Wir sind an zahlreichen Instrumenten auf dem Orbiter und der Landesonde Philae beteiligt, die 2014 – 2015 erstmals einen Kometenkern über lange Zeit aus unmittelbarer Nähe und auf seiner Oberfläche untersuchen wird. Für Planeten-Missionen, die für zukünftige Flüge ausgewählt wurden, haben wir für **Exomars** das MOMA-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.

*Preparations for the scientific data phase of the **Rosetta** mission were another focus in 2012. We contribute to several instruments onboard the orbiter and the landing probe Philae. Philae will, for the first time, examine a comet for a long period of time from close proximity and on its surface.*

*For planetary missions that have been selected to fly in the future, we have designed the MOMA instrument to study the composition of 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.*

Planets and Comets: Project Overview



Die wesentlichen Instrumentenprojekte der Planetengruppe in 2011/12
Major instrument-related project of the planetary department in 2011/12

Forschungsthemen der Planeten-Abteilung

• Das Innere der Planeten

Die Gruppe, die sich mit dem Planeteninneren befasst, verwendet umfangreiche numerische Simulationen zur Modellierung der Konvektion und anderer dynamischer Prozesse im Innern erdähnlicher Planeten (ihren flüssigen Metallkernen) und in Gasplaneten. Das Ziel ist insbesondere, besser zu verstehen, wie ein Planet mittels des Dynamoeffektes ein Magnetfeld erzeugt. Die entwickelten Dynamomodelle dienen dazu,

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

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. Windgeschwindigkeiten und Windmuster werden gewonnen, indem man, zum Beispiel bei Venus, die Bewegung der Wolken verfolgt oder aus der Rückstreuung des Sonnenlichtes auf die Zusammensetzung der Wolkenpartikel schließt. 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 über die Unterschiede in der Dynamik und der Chemie der planetaren Atmosphären gewinnen.

• Kleine Körper

Kometen und Asteroiden sind Überbleibsel aus einer Zeit, als es die großen Planeten noch nicht gab. 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.

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

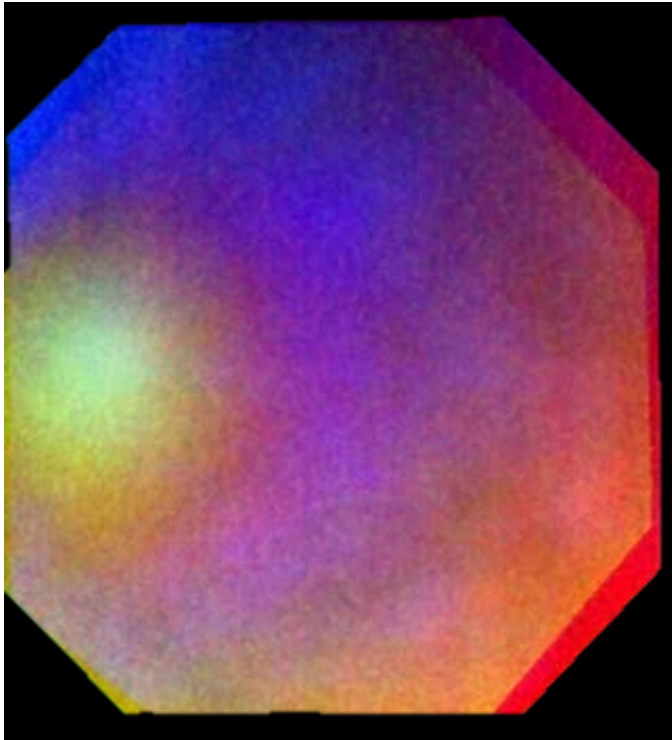
High-resolution imaging and spectroscopy of the surfaces of planets from orbit and probing it in-situ with landers provides a wealth of different data that we use to understand what the surface layers of a planet are made of and what processes have shaped them. This has implications for the interior 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 such 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 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.

• 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.



Glorie der Venus in Falschfarben. Das Zentrum der konzentrischen, farbigen Kreise ist der blassgelbe Fleck in der linken Bildhälfte. Die Glorie erstreckt sich über mindestens 1200 Kilometer. Die Daten wurden am 24. Juli 2011 aufgenommen.

The glory on Venus cloud tops in false colors. The center of the concentric colored circles is the pale yellow patch in the left half of the image. The glory extends over at least 1200 km. The data were recorded on July 24, 2011.

©ESA/MPS/DLR/IDA

• 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 den Jahren 2011 und 2012 auf jedem dieser Gebiete werden in den nächsten Kapiteln an mehreren repräsentativen Beispielen vorgestellt.

• 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 origins. 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 2011 and 2012 will be illustrated by several representative examples in the following chapters.

1.2.2 Rosetta besucht Lutetia

Im Juli 2012 flog die Raumsonde Rosetta in einer Entfernung von 3170 km am Hauptgürtel-Asteroiden 21 Lutetia vorbei. Lutetia wurde durch die OSIRIS Tele-Kamera (NAC) und die Weitwinkel-Kamera (WAC) mit einer Auflösung von bis zu 60 Metern pro Pixel untersucht (Abb. 1). Die Beobachtungen erlauben eine Rekonstruktion der 3-dimensionalen Gestalt des Asteroiden und damit die Bestimmung des Volumens des Körpers. Das Radio Science Instrument an Bord von Rosetta hat die genaue Masse des Asteroiden bestimmt. Aus dem Volumen und der Masse ergibt sich die Dichte von Lutetia zu $3.44 \pm 0.3 \text{ g/cm}^3$. Dies ist eine der höchsten je von einer Raumsonde gemessenen Dichte eines Körpers im Asteroidengürtel.

Die Aufnahmen von OSIRIS zeigen, dass 21 Lutetia eine komplexe Geologie hat. Die Nordpolregion ist von einer dicken Lage Regolith bedeckt, das sich in einigen Regionen in Lawinen hangabwärts bewegt hat. Mit den Hanglawinen verbunden sind Albedo-Änderungen, also Anzeichen einer weniger gealterten Oberfläche in der Reflektion des exponierten Materials, da das freigelegte, weniger gealterte Material andere Reflektionseigenschaften hat. Ein dichtes Netz aus Linien-Strukturen, sog. Lineamenten, die Kratermorphologie sowie die Krater SFD (size frequency distribution) weisen darauf hin, dass Lutetias Inneres eine hohe Festigkeit und eine relativ geringe Porosität hat.

Die geologisch komplexe Oberfläche des Asteroiden, das Oberflächenalter und die hohe Dichte deuten darauf hin, dass 21 Lutetia ein Planetesimal ist, das die Zeitalter des Sonnensystems als Ganzes überstanden hat, d.h. Lutetia wurde nicht durch Einschläge zerstört. Dies steht im Einklang mit Modellrechnungen, die zeigen, dass die mittlere Lebensdauer, die zur katastrophalen Zerstörung von Körpern mit Lutetias Größe (Durchmesser $\geq 100 \text{ km}$) führt, das Alter des Sonnensystems überschreitet. In dieser Beziehung unterscheidet sich Lutetia von den bisher von Raumsonden besuchten kleineren Asteroiden, die eher Fragmente großer Körper oder angesammelte Konglomerate geringer Dichte sind (Sierks et al., 2011).

Die Folgestudien nach dem Vorbeiflug verraten mehr über Lutetias Geschichte durch die Analyse der von den OSIRIS Kameras aufgenommen Bildern. Die hohe Auflösung erlaubt eine Untersuchung der Geomorphologie und macht eine Vielzahl spezieller Strukturen sichtbar: parallele, sich überschneidende Lineamente (auch Rinnen und Gräben), die ein großes Gebiet auf der Oberfläche bedecken (Thomas et al., 2012). Es wird vermutet, dass diese bei den größeren Einschlägen geformt wurden, die Lutetia das Aussehen gaben und die großen Krater schufen. Die Geologie der Oberfläche zeigt auch Strukturen, die auf

1.2.2 Rosetta visits Lutetia

In July 2012 the Rosetta spacecraft flew by the main-belt asteroid 21 Lutetia at a distance of 3170 km. Lutetia was imaged through the OSIRIS narrow-angle (NAC) and wide-angle (WAC) cameras, reaching a resolution of 60 m per pixel around closest approach (Fig. 1). These observations, complemented by Earth-bound observations to constrain the unobserved southern hemisphere, allowed the reconstruction of the shape of the asteroid, resulting in the determination of its volume. Using the mass of the asteroid measured by the Radio Science Instrument, the bulk density of Lutetia yields $3.44 \pm 0.3 \text{ g/cm}^3$, which is one of the highest measured by space missions in the asteroid belt.

The images by OSIRIS revealed that 21 Lutetia has a complex geology. The North Pole region is covered by a thick layer of regolith, which is seen to flow in major landslides associated with distinct albedo variation. The network of curvilinear features, the crater morphology and the crater SFD (size frequency distribution) indicate that Lutetia's interior has more strength and a lower porosity than expected in typical primordial aggregates of fine dust.

The geologically complex surface of the asteroid, the surface age and the high density suggest that 21 Lutetia is a primordial planetesimal which has survived over the age of the Solar System basically intact, i.e. has not been disrupted by impacts. The interpretation is consistent with the current view that the collisional lifetime for a catastrophic destruction of bodies with diameters $\geq 100 \text{ km}$ exceeds the age of the Solar System. In this respect, Lutetia differs from smaller asteroids visited by previous spacecraft, which are more shattered bodies, fragments of larger parents, or re-accumulated rubble piles (Sierks et al., 2011).

Follow-up studies over the years after the fly-by revealed more of Lutetia's history by looking at details in the images returned by OSIRIS. The high resolution images allowed to study the geomorphology of the asteroid, and revealed a wide range of features, including parallel and intersecting linear features (thought to be troughs or ditches) covering a large area on the surface (Thomas et al., 2012). These are thought to have been formed in the major impact events that shaped Lutetia and also created the large craters. The geology of the surface shows clearly distinguishable areas, pointing to differences in the

Unterschiede des unterliegenden Materials (Massironi et al., 2012) und Verschüttungen älterer Gebiete durch den Kraterauswurf hinweisen (Vincent et al., 2012).

Das Alter der Flächen wurde untersucht, indem die Anzahl der Krater gezählt wurden (älteren Flächen mit vielen Kratern und jüngeren mit nur wenigen kleinen Einschlägen). Das verrät, dass die ältesten Gebiete Relikte aus der frühen Zeit unseres Sonnensystems sind und mit 3.6 Milliarden Jahre etwa so alt sind wie die ältesten Regionen unseres Mondes (Late Heavy Bombardment, Marchi et al., 2012). Im Gegensatz dazu sind die Oberflächen der jüngsten Areale auf Lutetia vor weniger als 300 Millionen Jahren entstanden, als der Krater-Cluster am Nordpol gebildet wurde. Die Felsbrocken (boulders), die in und um diesen Krater-Cluster zu finden sind, bestätigen das junge Alter dieses Areals (Küppers et al., 2012). Diese von OSIRIS beobachteten Felsen haben Ausmaße von 60 bis 300 Metern im Durchmesser.

underlying structure (Massironi et al., 2012) and also burying of older terrains by material thrown out of the craters (Vincent et al., 2012).

The age of the surfaces was found by counting the number of craters (with older surfaces covered by many small craters and younger ones recently resurfaced by nearby major impacts). This revealed the oldest areas to be relics from the early days of our solar system, 3.6 billion years old, from the time (sometimes called the Late Heavy Bombardment) when the oldest and most cratered areas of our Moon were last resurfaced (Marchi et al., 2012). By contrast, the youngest areas were dramatically resurfaced less than 300 million years ago, when the North pole crater cluster was formed. The boulders found in and around this crater cluster confirm the young age of this area (Kueppers et al., 2012). The boulders seen by the OSIRIS cameras were between 60 and 300m in diameter.

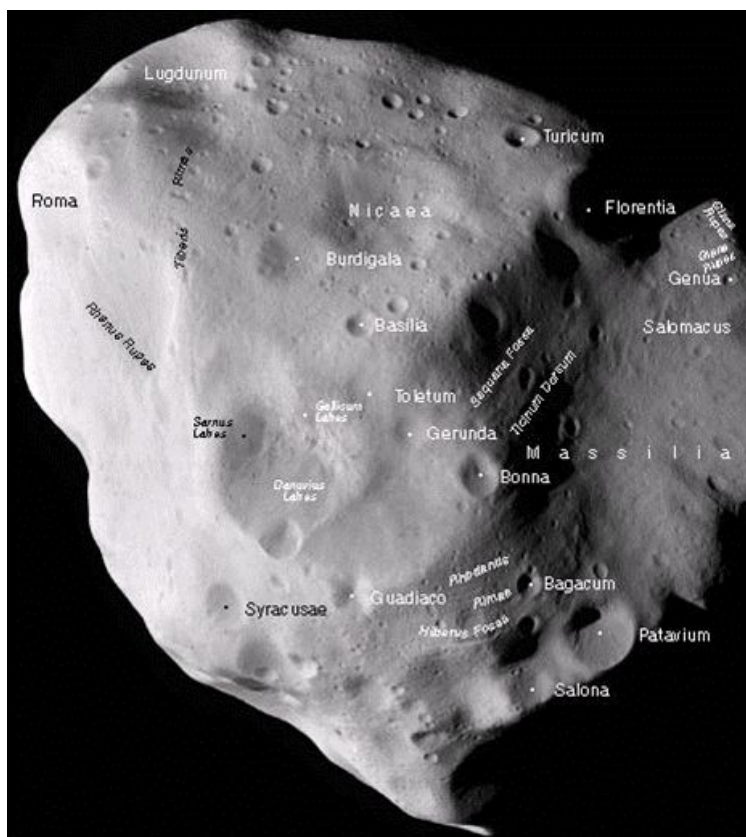


Abb. 1 Die Regionen und Krater auf Lutetia sind nach den europäischen Provinzen und Städten benannt zur der Zeit, als die Stadt Paris Lutetia hieß (53 v.Chr. bis 360 n.Chr.).

Fig. 1 Regions and craters on Lutetia are named after European provinces and cities at the time when Paris was named Lutetia (53 B.C. to 360).

© ESA © 2011 MPS for OSIRIS Team
MPS/UPD/LAM/IAA/RSSD/INTA/UPM
/DASP/IDA

Die Aufnahmen von OSIRIS wurden auch genutzt, um nach Satelliten um Lutetia zu suchen. Bis zur Auflösungsgrenze von 30 m am Nukleus und etwa 160 m innerhalb des Gravitationsbereichs von Lutetia wurden keine Satelliten entdeckt. Alle großen Auswürfe, die durch die gewaltigen Einschläge in Lutetias Vergangenheit entstanden, verließen komplett den Einflussbereich von Lutetia und blieben nicht als potentieller Mond an Lutetia gebunden (Bertini et al., 2012).

The images were also used to search for satellites around Lutetia, but none were found, down to the size of the boulders seen on the surface (with a limit of less than 30m near to the nucleus, and 160m within its entire sphere of influence). Any large boulders which escaped the surface in the giant impacts in Lutetia's past escaped entirely from the system, and did not stay bound to it as small moons (Bertini et al., 2012).

Die spektralen Informationen, die OSIRIS zurückbrachte, wurden dazu genutzt, die Mineralogie und den Variationsreichtum der Oberfläche zu untersuchen. Obwohl das junge Kratersystem recht variationsreich ist, zeigt sich die Oberfläche in großem Maßstab erstaunlich variationsarm (Magrin et al., 2012). Um weitere Einblicke zu erhalten, wurden die OSIRIS-Daten mit Ergebnissen des Nahinfrarot-Spektrometers VIRTIS kombiniert. Das Oberflächenspektrum zeigt sich ebenfalls relativ strukturlos aber im Einklang mit einem Aufbau aus bekannten Mineralien (kohlenstoffhaltige sowie Enstatit-haltige Chondrite).

Eines der interessantesten Ergebnisse von Rosettas Vorbeiflug an Lutetia basiert auf der Kombination der Oberflächenmineralogie mit der Messung der Dichte. Die Dichte von Lutetia ist höher als die Dichte der Mineralien an Lutetias Oberfläche, was das genaue Gegenteil von dem ist, was bisher an den meisten Asteroiden beobachtet wurde. Für kleine Asteroiden ist dies leicht erklärt, da diese Asteroiden über Äonen zertrümmert und wieder zusammengefügt wurden und so nur lose gepackte Konglomerate („rubble piles“) mit vielen Lücken entstanden, die die Dichte verringern. Lutetias Inneres muss eine höhere Dichte haben, als die Oberfläche vermuten lässt, was bedeutet, dass Lutetia eher wie ein kleiner Planet mit einem dichten Kern erscheint. Modellrechnung zeigen, dass die frühe Lutetia genug Energie hatte, um das Innere zumindest teilweise aufzuschmelzen (Weiss et al., 2012), während die Oberfläche nicht schmolz und eine geringere Dichte bewahrte (und von vielen kleinen Einschlägen zerstört wurde). Sogar der größte durch Einschläge geformte Krater, Massilia, hat Lutetias Inneres größtenteils intakt gelassen, auch wenn seine Oberfläche eine tiefe Schicht aus losem Regolith aufzeigt.

The color information OSIRIS returned was used to look at the mineralogy of the surface, and its variability. While there were larger variations in the young crater system, the large scale colours of Lutetia were remarkably uniform (Magrin et al., 2012). To look further into this puzzle, the OSIRIS data were combined with results from the near-infrared spectrograph VIRTIS. Together these show that the surface spectrum is relatively featureless and consistent with only a few types of mineral (carbonaceous or enstatite chondrites).

One of the most exciting suggestions to come from Rosetta's fly-by of Lutetia is based on combining this knowledge of the surface mineralogy with the measurement of the bulk density. This reveals that the density of Lutetia is higher than the density of the type of rock it appears to be made of, which is the opposite of what is seen on most small asteroids. For small asteroids this is easily explained, as the asteroids have been smashed and rearranged over aeons and are only loosely packed collections of rock ("rubble piles"), with many voids that lower the overall density. For Lutetia the interior must have a higher density than the surface suggests, which means that it is more like a small planet, with a denser core. Calculations reveal that the early Lutetia had enough energy to at least partially melt (sinter) the interior (Weiss et al., 2012), while the surface has not been melted and retains a lower density (and has been smashed by many small impacts). Even the biggest crater forming impacts have left Lutetia's interior largely intact, although its surface has a deep powdered layer of regolith, like smaller asteroids.

Ausgewählte Publikationen

Selected Publications

H. Sierks, P. Lamy, C. Barbieri et al., Images of asteroid 21 Lutetia: a remnant planetesimal from the early solar system, *Science*, Vol. 334, no. 6055, pp. 487-490, 2011, doi: 10.1126/science.1207325

I. Bertini, W. Sabolo, P. Gutierrez et al., Search for satellites near (21) Lutetia using OSIRIS/Rosetta images, *Planetary and Space Science*, vol. 66, issue 1, pp. 64-70, 2012, doi: 10.1016/j.pss.2011.12.022

M. Küppers, R. Moissl, J.-B. Vincent et al., Boulders on Lutetia, *Planetary and Space Science*, vol. 66, issue 1, pp. 71-87, 2012, doi: 10.1016/j.pss.2011.11.004

S. Magrin, F. La Forgia, M. Pajola et al., (21) Lutetia spectrophotometry from Rosetta-OSIRIS images and comparison to ground-based observations, *Planetary and Space Science*, vol. 66, issue 1, pp. 43-53, 2012, doi: 10.1016/j.pss.2011.10.001

S. Marchi, M. Massironi, J.-B. Vincent et al., The cratering history of asteroid (21) Lutetia, *Planetary and Space Science*, vol. 66, issue 1, pp. 87-95, 2012, doi: 10.1016/j.pss.2011.10.010

M. Massironi, S. Marchi, M. Pajola et al., Geological map and stratigraphy of asteroid 21 Lutetia, *Planetary and Space Science*, vol. 66, issue 1, pp.125-136, 2012, doi: 10.1016/j.pss.2011.12.024

N. Thomas, C. Barbieri, H. U. Keller et al., The geomorphology of (21) Lutetia: Results from the OSIRIS imaging system onboard ESA's Rosetta spacecraft, *Planetary and Space Science*, vol. 66, issue 1, pp. 96-124, 2012, doi: 10.1016/j.pss.2011.10.003

J.-B. Vincent, S. Besse, S. Marchi et al., Physical properties of craters on asteroid (21) Lutetia, *Planetary and Space Science*, vol. 66, issue 1, pp. 79-86, 2012, doi: 10.1016/j.pss.2011.12.025

B. P. Weiss, L. T. Elkins-Tanton, M. A. Barucci et al., Possible evidence for partial differentiation of asteroid Lutetia from Rosetta, *Planetary and Space Science*, vol. 66, issue 1, pp. 137-146, 2012, doi: 10.1016/j.pss.2011.09.012

1.2.3 Erste Ergebnisse der Dawn-Mission

Die Mission Dawn der NASA, an der sich das MPS mit zwei baugleichen Kameras („Framing Cameras“, FC) beteiligt, erreichte im Juli 2011 nach einer Flugdauer von vier Jahren ihr erstes Ziel, den großen Hauptgürtelasteroiden 4 Vesta. Dieses Objekt, obgleich als Asteroid klassifiziert, ähnelt nach unseren heutigen Erkenntnissen eher einem kleinen Planeten. So zeigen die Aufnahmen der Vesta eine sehr alte allerdings durch Einschläge verwitterte Oberfläche, die reich an dem Mineral Pyroxen ist. Während die nördliche Hemisphäre des Kleinplaneten mit vielen Kratern übersät ist, finden sich auf der südlichen Hemisphäre deutlich weniger Einschläge. Dies ist ein Hinweis darauf, dass die nördliche Hemisphäre deutlich älter ist als die südliche. Die beiden Hemisphären unterscheiden sich allerdings nicht nur durch ihr Alter sondern auch in der Zusammensetzung des Oberflächenmaterials. Während die südliche Hemisphäre stärker durch das Gestein Diogenit geprägt wird, ist die nördliche Hemisphäre eher eukritisch, d. h. die südliche Hemisphäre wird durch ein basaltisches Tiefengestein dominiert während nördlich davon eher Umformungen eines basaltischen Ergussgesteines vorherrschen.

Der Kleinplanet weist in der nördlichen Hemisphäre große Rillenstrukturen auf, welche nahezu den ganzen Körper umspannen. Die Unterschiede in Alter und Zusammensetzung in Nord- und Süd-Hemisphäre sind die Folgen zweier großer Impakte, die Vesta auf der Südhemisphäre getroffen haben und den Kleinplaneten fast zerrissen hätten (Abb. 2). Das jüngere der beiden großen Impaktbecken nennt man Rheasilvia (Durchmesser 500 km), das ältere Veneneia (400 km). Wir gehen heute davon aus, dass das Veneneia Ereignis zu dunklen Ablagerungen auf der Vestaoberfläche geführt hat, die heute noch in der Äquatorregion und nördlich davon sichtbar sind. Wahrscheinlich handelt es sich hierbei um Ablagerungen des Projektils, welches vor allem aus Kohlenstoff (Kohliger Chondrit) aufgebaut war.

Während einige Oberflächenbereiche schwarz wie Kohle sind, sind andere hell wie Schnee. Diese hellen Bereiche sind von unbekannter Zusammensetzung.

1.2.3 First Results of the Dawn Mission

NASA's Dawn mission, in which MPS participates with two identical cameras ("Framing Cameras," FC), reached its first target, the large main belt asteroid 4 Vesta, in July 2011 after a four-year flight. Although classified as an asteroid, Vesta is, according to our current knowledge, rather a small planet. Images of Vesta show a very old surface, weathered by impacts, which is rich in the mineral pyroxene. While the northern hemisphere of the asteroid is covered with many craters the southern one shows significantly fewer impact craters. This is an indication that the northern hemisphere is much older than the southern. Both hemispheres differ not only by age but also in composition of the surface material. While the southern hemisphere is more diogenitic, the northern hemisphere is rather eucritic, i.e. the southern hemisphere is dominated by a basaltic plutonic rock whereas further north extrusive igneous rocks are dominating.

Vesta shows large groove structures on its northern hemisphere which span almost the entire body. The observations of grooves, the different ages and compositions of the hemispheres are the result of two large impacts on the southern hemisphere that almost disrupted the minor planet (Fig. 2). The younger of the two major impact basins is called Rheasilvia (diameter 500 km), the older Veneneia (400 km). Our understanding is that the Veneneia event has led to dark deposits on the surface of Vesta which are still visible in the equatorial region and further north. Probably the deposits are remnants of the projectile that was composed mainly of carbon (carbonaceous chondrite).

While some surface areas are black as coal, others are bright as snow. These bright areas are of unknown composition. The rim of the Rheasilvia impact basin is

Die Wälle des Rheasilvia Impaktbeckens sind bis heute gut erkennbar, der gleichzeitig entstandene Zentralberg ist mit einer Gesamthöhe von etwa 22 km deutlich höher als jeder Berg auf der Erde.

still clearly visible. The central peak which was formed simultaneously is 22 km high and thus significantly higher than any mountain on Earth.

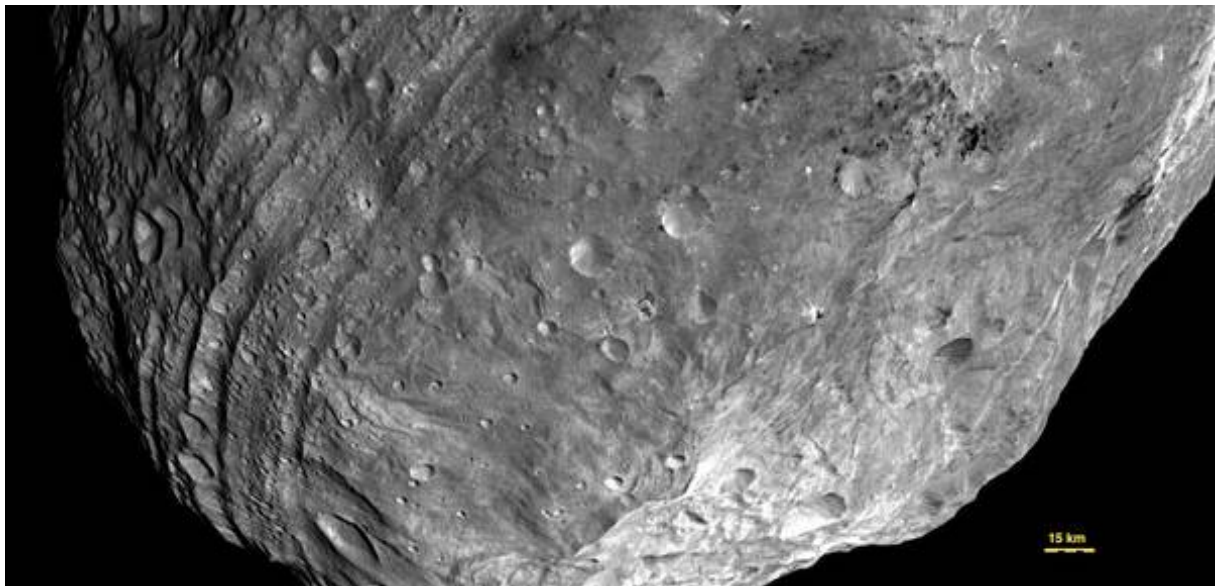


Abb. 2 Der Kleinplanet Vesta in der späten Anflugphase fotografiert. Gut zu erkennen sind die Rillen am Äquator sowie nördlich davon (linke Bildhälfte) sowie der Zentralberg des Impaktbeckens Rheasilvia (unten rechts). Die Oberfläche zeigt einige dunkle sowie helle Stellen.

Fig. 2 The asteroid Vesta, imaged in the late approach phase. Easily visible are the grooves at the equator and further north (left half of the image) and the central peak of the Rheasilvia impact basin (bottom right). The surface shows some dark and bright areas.

©NASA/JPL-Caltech/UCLA/MPS/DLR/IDA/PSI

Nicht zuletzt durch die Beobachtungen der FCs wissen wir, dass die auf der Erde aufgefundenen Meteorite der sogenannten HED-Gruppe (basaltische Gesteine) zu einem erheblichen Anteil von Vesta stammen. Die Meteorite und deren Mutterkörner, die sogenannten erdbahnkreuzenden Asteroiden, wurden einst durch den Rheasilvia Impact erzeugt, in dem große und kleine Bruchstücke der Kruste von Vesta auf Fluchtgeschwindigkeit beschleunigt wurden und durch Störungen des Planeten Jupiter in Erdnähe gelangten. Im Verlauf der ersten Monate des Aufenthaltes bei Vesta gelang eine Zuordnung zwischen den unterschiedlichen Oberflächenteilen und den verschiedenen Unterklassen der HED-Meteorite, so dass wir jetzt den chemischen Aufbau der Vestakruste genau kennen. Die Zuordnung der HED-Meteorite erfolgte mittels spektroskopischer Messungen des VIR Instrumentes und der FC. Hierfür wurden Falschfarbenaufnahmen aus hunderten von FC Bildern erstellt und analysiert (Abb. 3).

Not least by the observations of the FCs we know that most meteorites of the HED group (basaltic rocks) found on Earth are originating from Vesta. The meteoroids and their parent bodies, the so-called Earth-crossing asteroids were once produced by the Rheasilvia impact. Large and small fragments of Vesta's crust were accelerated to escape velocity and later on transferred to near Earth orbits by disturbances of the planet Jupiter. During the first months at Vesta a mapping between the different surface parts and the various subclasses of the HED meteorites was achieved, so that we now have detailed knowledge of the chemical composition of Vesta's crust. The assignment of the HED meteorites was performed using spectroscopic measurements of the VIR instrument and FC. For this from hundreds of FC frames false-color images were computed and analyzed (Fig. 3).

Die kombinierte Analyse der Vesta-Gestalt aus FC Bildern und dem Gravitationsmodell, gewonnen aus Bahnverfolgungsdaten der Raumsonde, lässt den Schluss zu, dass Vesta mineralogisch differenziert ist, d. h. der Körper ist aus Schalen aufgebaut bestehend

The combined analysis of Vesta's shape obtained from FC images and the gravity model, derived from tracking data of the spacecraft, suggests that Vesta is differentiated in the mineralogical sense, i.e. the body has a shell structure consisting of an iron core, a

aus einem Eisenkern, einem Mantel, der vermutlich reich an Olivin ist, und einer basaltischen Kruste. Der Eisenkern besitzt einen Radius von etwa 110 km, was im Verhältnis zum Gesamtradius von 260 km groß ist. Insgesamt ist Vesta somit als Protoplanet einzustufen, welcher aus der Urzeit des Sonnensystems vor 4,2 Mrd. Jahren erhalten geblieben ist, wenn auch seine Oberfläche durch ein Bombardement von Körpern unterschiedlicher Größe stark verwittert ist.

mantle, which is probably rich in olivine and a basaltic crust. The iron core has a radius of about 110 km, which is large relative to the total radius of 260 km. Therefore Vesta is classified as a proto-planet, which has been preserved from the early time of the solar system 4.2 billion years ago, although its surface is now heavily weathered by a bombardment of objects of different sizes.

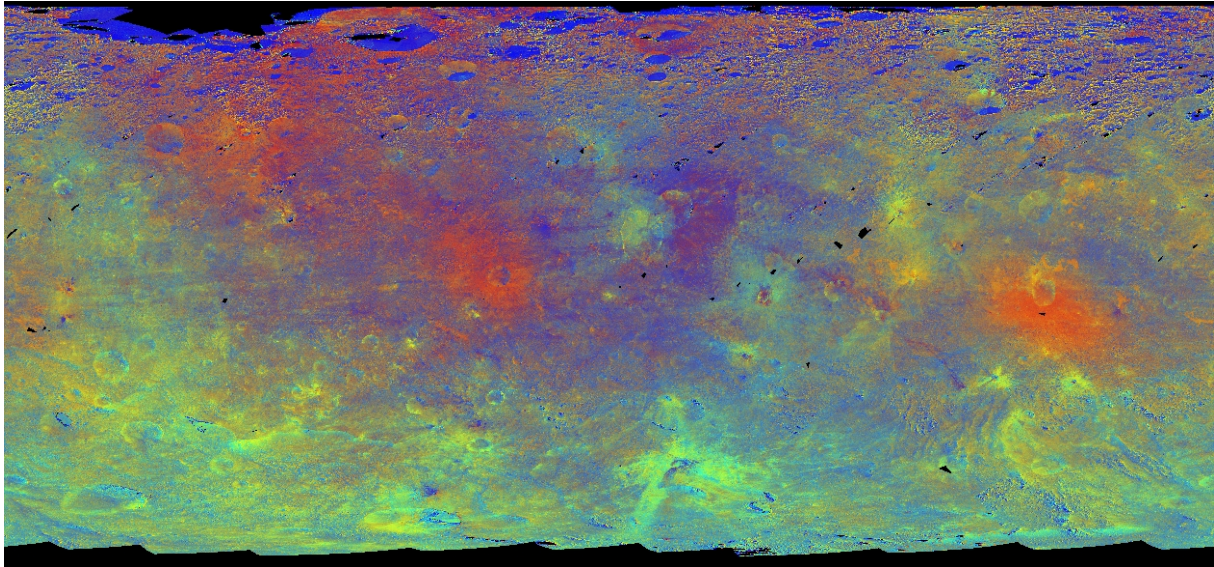


Abb. 3 Falschfarbenkarte des Asteroiden Vesta. Die Nordhalbkugel reflektiert Licht in einer anderen Stärke als die Südhalbkugel. In der Karte offenbart sich dies durch eine überwiegende Blaufärbung im Norden (Eukrit und Howardit) im Gegensatz zu ausgedehnten gelblich-grünlichen Bereichen im Süden (Diogenit). Zwei große Krater (links von der Bildmitte und rechts) zeigen eine auffällige orange-rote Färbung in ihrer Umgebung. Hierbei handelt es sich wahrscheinlich um Auswurfmaterial, möglicherweise ist dieses Material sogar durch den Impakt aufgeschmolzen gewesen.

Fig. 3 False color map of the asteroid Vesta. The northern hemisphere reflects light differently than the southern hemisphere. This is visible through a predominant blueness in the north (eucrite and howardite) as opposed to large yellowish-green areas in the south (diogenite). Two large craters (left of image center and right) show a striking orange-red coloration in their environment. This is probably ejecta material that possibly was once molten due to the impact.

©NASA/JPL-Caltech/UCLA/MPS/DLR/IDA/PSI

Das kommende Ziel der Dawn Sonde heißt 1 Ceres. Mit einem Durchmesser von fast 1000 km ist Ceres noch wesentlich größer als Vesta. Dennoch zeigen spektroskopische Messungen von der Erde aus, dass Ceres völlig anders aufgebaut sein muss als Vesta. Die Oberflächenszusammensetzung ist eher chondritisch (primitiv) und nicht basaltisch wie bei Vesta. Möglicherweise ist sogar Wassereis vorhanden und es gibt Modellrechnungen, die einen Wasserozean unter der Oberfläche zulassen. Die Raumsonde Dawn wird Ceres im Frühjahr 2015 erreichen und mindestens ein halbes Jahr im Orbit Messungen durchführen.

The upcoming target of the Dawn spacecraft is 1 Ceres. With a diameter of nearly 1000 km Ceres is much larger than Vesta. However, ground-based spectroscopic measurements show that Ceres must be differently composed than Vesta. The surface composition is rather chondritic (primitive) and not basaltic as for Vesta. Water ice might be present and there are model calculations, which allow for a water ocean beneath its surface. The Dawn spacecraft will reach Ceres in spring 2015 and perform at least six months measurements in orbit.

Ausgewählte Publikationen

Selected Publications

L. Le Corre, V. Reddy, N. Schmedemann et al., Olivine or impact melt: Nature of the "orange" material on Vesta from Dawn, 2013, *Icarus*, Volume 226, Issue 2, p. 1568-1594, doi: 10.1016/j.icarus.2013.08.013

E. A. Cloutis, P. Mann, M. R. M. Izawa, A. Nathues, et al., The 2.5-5.1 μm reflectance spectra of HED meteorites and their constituent minerals: Implications for Dawn, 2013, *Icarus*, Volume 225, Issue 1, p. 581-601, doi: 10.1016/j.icarus.2013.04.022

G. Thangjam, V. Reddy, L. Le Corre, A. Nathues, et al., Lithologic mapping of HED terrains on Vesta using Dawn Framing Camera color data, 2013, *Meteoritics & Planetary Science*, Volume 48, Issue 11, pp. 2199-2210, doi: 10.1111/maps.12132

V. Reddy, L. Le Corre, D. P. O'Brien, A. Nathues, et al., Delivery of dark material to Vesta via carbonaceous chondritic impacts, 2012, *Icarus*, Volume 221, Issue 2, p. 544-559, doi: 10.1016/j.icarus.2012.08.011

V. Reddy, A. Nathues, L. Le Corre, et al., Color and Albedo Heterogeneity of Vesta from Dawn, 2012, *Science*, Volume 336, No. 6082, pp700 – 704, doi: 10.1126/science.1219088

V. Reddy, J. A. Sanchez, A., et al., Photometric, spectral phase and temperature effects on 4 Vesta and HED meteorites: Implications for the Dawn mission, 2012, *Icarus*, Volume 217, p. 153-168, doi: 10.1016/j.icarus.2011.10.010

H. Sierks, H. U. Keller, R. Jaumann, The Dawn Framing Camera, 2011, *Space Science Reviews*, Volume 163, Issue 1-4, pp. 263-327, doi: 10.1007/s11214-011-9745-4

1.2.4 Wasserquellen im äußeren Sonnensystem

Wasser ist ein im Weltall reichlich vorhandenes Molekül, das aufgrund seiner spezifischen Eigenschaften (z. B. relativ hohe photochemische Stabilität, isotopische Zusammensetzung) als *Tracer* verwendet werden kann. Materialtransporte im Sonnensystem zwischen und auf den Planeten können mithilfe des Wassers zurückverfolgt werden. Diese Eigenschaften wurden ausgenutzt, um den Ursprung des Wassers auf der Erde und in den Atmosphären von Saturn und Titan besser zu verstehen.

Ist das irdische Wasser kosmischen Ursprungs?

Das Sonnensystem entwickelte sich vor ca. 4,57 Millionen Jahren aus dem protosolaren Nebel, einem Gebilde aus Gas und Staub. Durch Zusammenballung des Staubes entstanden Körper von einigen Kilometer bis zu mehreren Tausend Kilometer Durchmesser, die Planetesimale. Durch Kollisionen dieser Körper bildeten sich im Verlauf von mehreren 10 Millionen Jahren die terrestrischen Planeten, darunter die Erde. Die Einschläge besonders der großen Planetesimale führten durch die dabei umgesetzten Energien wiederholt zum Aufschmelzen der Erdkruste und sogar des Erdmantels. Dabei traten Temperaturen von über 1.000 K auf, die schließlich zum Verlust der leicht flüchtigen Elemente ins Weltall führten. Gegen Ende der Akkretionsphase waren deshalb alle Elemente, die flüchtiger

1.2.4 Water Sources in the Outer Solar System

Water is a plentiful molecule in space that can be used as a tracer because of specific characteristics, such as its comparatively high photochemical stability and different isotopical compositions. Transport of materials in the solar system among and on the planets can be traced with the help of water. These characteristics have been used to better understand the origin of water on Earth and in the atmospheres of Saturn and Titan.

Does our terrestrial water have a cometary origin?

The solar system developed about 4.57 million years ago from the protosolar nebula – a structure consisting of gas and dust. Conformation of the dust resulted in planetesimals with diameters of some few kilometers up to several thousand kilometers. Collisions of these bodies formed the terrestrial planets over time spans of some tens of million years, among them the Earth. Particularly large planetesimals caused repeated melting of the Earth's crust and even its mantle through the energy set free by their impacts. This produced temperatures of more than 1000 K, which finally led to a loss of the volatile components into space. Toward the end of the accretion phase all elements lighter than sodium and potassium were therefore strongly reduced compared

als Natrium und Kalium waren, gegenüber schwereren Elementen stark reduziert. Dies gilt auch für das Wasser und die Atmosphäre. Man diskutiert deshalb seit längerer Zeit, dass sich die Hydrosphäre und die Atmosphäre erst nach der Abkühlphase der Erde gebildet haben können.

to the heavier elements. This is also true for water and the atmosphere. For this reason it has been discussed for some time now that the hydrosphere and atmosphere may have evolved only after the cooling phase of Earth.

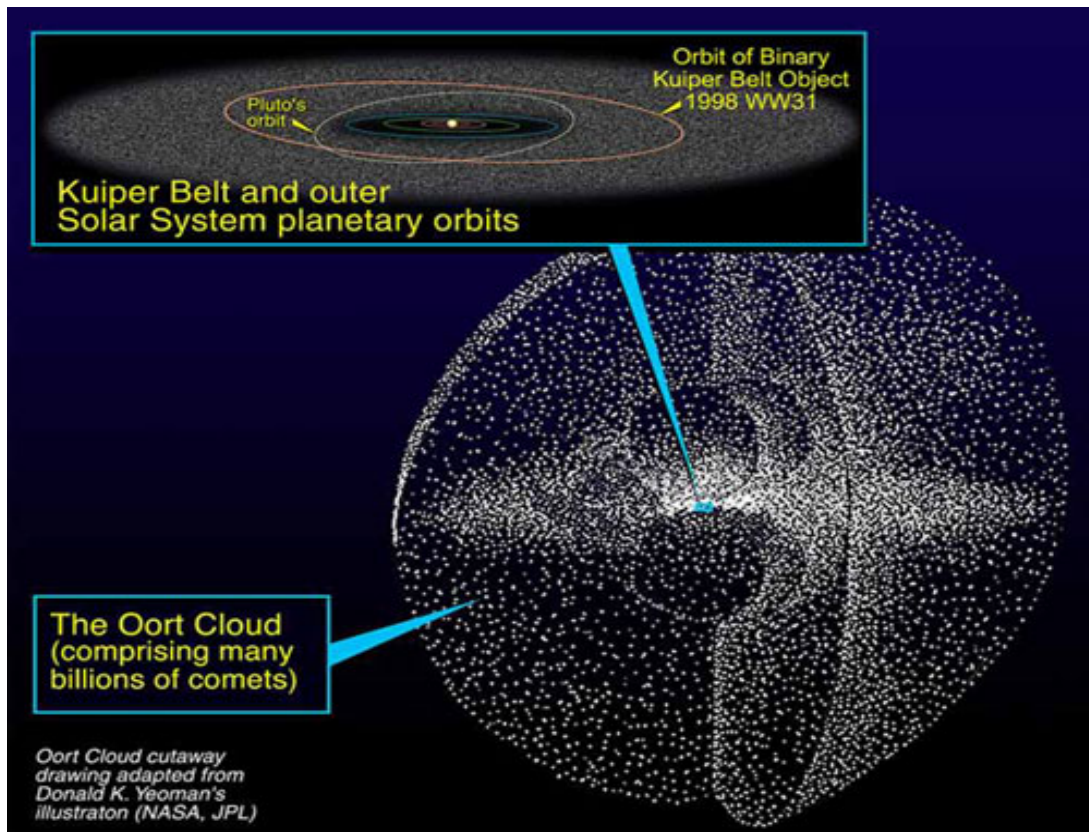


Abb. 4 Oort'sche Wolke und Kuiper Gürtel. Erstere umgibt das Sonnensystem kugelförmig und dehnt sich bis ca. 10.000 AE aus. Der Kuiper Gürtel ist ein flaches Gebilde, das ähnlich wie die Bahnebenen der Planeten orientiert ist. Seine Ausdehnung beginnt jenseits der Neptunbahn und beträgt ca. 30 – 50 AE.

Fig. 4 Oort cloud and Kuiper belt. The cloud spherically surrounds the solar system and extends to about 10,000 au. The Kuiper belt is a flat structure oriented in a way similar to the planetary orbits. It extends from the orbit of Neptune to about 30-50 au. © NASA/JPL

Das „Wie“ ist dabei sehr umstritten. Möglicherweise wurden in der Spätphase der Akkretion die großen Einschläge durch viele kleinere abgelöst, so dass sich die Erdoberfläche abkühlen konnte und die flüchtigen Substanzen auf der Erde blieben. Es gibt allerdings Hinweise, dass schon das Ursprungsmaterial sehr „trocken“ war. Darauf deutet die Ähnlichkeit der elementaren Erdzusammensetzung mit der der sogenannten Enstatit-Chondriten – einer primitiven Meteoritenklasse, die aus Bruchstücken von Planetesimalen bestehen – hin. Das Material, aus dem sie bestehen, entstammt dem inneren Sonnensystem und war offensichtlich bereits vor der Zusammenballung zu Planetesimalen höheren Temperaturen ausgesetzt. Es liegt deshalb nahe, dass die flüchtigen Substanzen auf

The most debated point in this discussion is the manner of this evolution. One possible explanation is that there were fewer large impacts in the late accretion phase and that they were eventually replaced by more frequent smaller impacts, which would mean that Earth's surface would have had time to cool and the more volatile components would have remained on Earth. But there are indications that the original material was very dry. This has been deduced from the similarity of the composition of Earth with the so-called enstatite-chondrites, a primitive class of meteorites that are the remains of shattered planetesimals. The materials they consist of originate in the inner solar system and have obviously been subject to higher temperatures long before the planetesimals

der Erde aus kälteren Regionen im äußeren Sonnensystem stammen müssen.

Bereits in den frühen 1960er-Jahren wurde deshalb gefolgert, dass Kometen geeignete Kandidaten für die Lieferung von Wasser und anderen leichtflüchtigen Substanzen auf der Erde sind, da sie zum größten Teil aus Eis bestehen.

Es gibt zwei Klassen von Kometen, die der Oort'schen Wolke (Oort Cloud Comets, OCC) und die der Jupiterfamilie (JFC). Die Oort'sche Wolke umgibt das Sonnensystem kugelförmig und dehnt sich bis zu einer Entfernung von 100.000 Astronomischen Einheiten (AE, Entfernung Erde-Sonne) aus. Nach der klassischen Theorie entstanden die OCCs im Bereich der Gasriesen Jupiter und Saturn (in ca. 5 – 10 AE Entfernung von der Sonne) und wurden durch gravitative Wechselwirkung mit Jupiter aus dem Sonnensystem in die Oort'sche Wolke geschleudert. Auf Grund der großen Entfernungen sind OCCs langperiodisch; die Umlaufzeiten um die Sonne können mehrere 100.000 Jahre betragen. JFCs sind hingegen kurzperiodisch mit typischen Umlaufzeiten zwischen 5 und 20 Jahren. Sie entstammen dem Kuipergürtel, der sich jenseits der Neptunbahn nahe der Ekliptik von ca. 30 bis 50 AE erstreckt. (Abb. 4).

were formed. Therefore it is reasonable to assume that the volatile components on Earth originate in cooler regions of the outer solar system.

In the early 1960s this led to the conclusion that comets are suitable candidates for delivering water and other light elements to Earth since they consist mostly of ice.

There are two classes of comets, the Oort cloud comets (OCCs) and those of the Jupiter family (JFC). The Oort cloud is a spherical cloud that surrounds the solar system and extends to about 100,000 astronomical units (au; the distance between Earth and Sun). According to classical theory, the OCCs formed in the vicinity of the gas giants Jupiter and Saturn (about 5 to 10 au distance from the Sun) and were ejected from the solar system through gravitational interaction with Jupiter into the Oort cloud. Because of the large distance, OCCs have long periods of up to several 100,000 years in their orbits around the Sun. Jupiter-family comets, on the other hand, have short periods with typical orbits of between 5 to 20 years. They originate in the Kuiper belt, which is located beyond Neptune's orbit near the ecliptic and extends from about 30 to 50 au (Fig. 4).

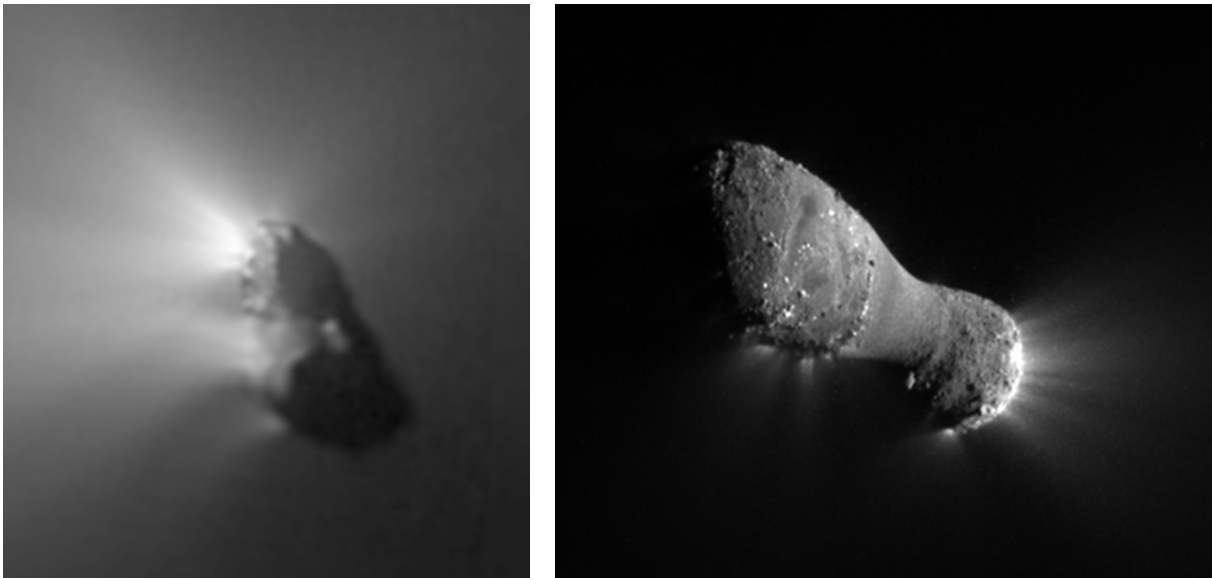


Abb. 5 Vertreter der OCCs (Komet Halley, links) und der JFCs (Komet Hartley 2, rechts). Die Aufnahmen wurden beim Vorbeiflug der Raumsonden Giotto (1986) und Epoxi (2011) gemacht.

Fig. 5 Example of an OCC (Halley's comet, left) and of an JFC (comet Hartley 2, right). Pictures taken during the fly-bys of the probes Giotto (1986) and Epoxi (2011).

©MPS/HMC und NASA

Ihren Namen haben sie dem Umstand zu verdanken, dass ihr weitester Abstand von der Sonne in der Nähe der Jupiterbahn liegt. Nichtsdestotrotz bestehen sie aus Material, dessen Ursprung viel weiter weg von der Sonne liegt als der des Materials, aus dem sich die OCCs zusammensetzen.

Das Bild der Kometen als Wasserlieferanten kam 1995 ins Wanken, nachdem die Analyse der isotopischen Zusammensetzung des Halley'schen Kometen (einem OCC), den die Giotto-Sonde 9 Jahre zuvor besucht hatte, publiziert wurde (Balsiger et al. 1995). Das Verhältnis von Deuterium (D), einem Wasserstoff-Isotop mit zwei Neutronen, zu „normalem“ Wasserstoff (H) war doppelt so hoch wie im Wasser auf der Erde. In der Folgezeit kamen viele wissenschaftliche Arbeiten zu dem Ergebnis, dass maximal 10 % des Wassers auf der Erde aus Kometen stammen könne. Gleichzeitig zeigten Untersuchungen, dass das D/H-Verhältnis einer primitiven Meteoritenklasse, der kohligen Chondrite, viel besser zur Erde passt. Ferner bestätigte eine Reihe von Fernerkundungsmessungen weiterer OCCs das doppelt so hohe D/H Verhältnis. Auch die andere Kometengattung, die JFCs, wurden als wenig wahrscheinliche Quelle angesehen. Simulationen zufolge soll das D/H-Verhältnis mit zunehmendem Abstand von der Sonne ansteigen, die isotopische Wasserzusammensetzung in JFCs also noch inkompatibler zum Wasser auf der Erde sein als bei OCCs.

Da kurzperiodische Kometen bereits vielfach der Sonne nah gekommen sind, haben sie einen Großteil ihres Materials eingebüßt und sind deshalb nicht so leuchtstark wie langperiodische OCCs. Somit ist die Bestimmung von D/H für JFCs mit Fernerkundungsmethoden schwierig und praktisch nur vom Weltall aus möglich. Die Bestimmung des D/H-Verhältnisses von Hartley 2 (Abb. 5), einem Kometen der Jupiterfamilie, war deshalb ein wichtiges Anliegen in dem vom MPS geleiteten Beobachtungsprogramm „Herschel solar system Observations (HSSO)“ im Rahmen der Herschel-Mission. Herschel ist das bisher größte Weltraumteleskop und arbeitete im fernen Infrarotbereich. Entgegen den Erwartungen ergab die Auswertung der im Jahr 2011 durchgeführten Beobachtungen, dass das D/H-Verhältnis im Rahmen der Fehlergrenzen dem des Erdwassers entspricht (Abb. 6).

Durch diese Erkenntnis wurden Kometen wieder zu potentiellen Wasserlieferanten. Zudem hat sie zu einem Paradigmenwechsel beigetragen. So wird z. B. vorgeschlagen, dass ein Großteil der Kometen der Oort'schen Wolke gar nicht aus dem Sonnensystem stammt und somit ihr Ursprung nicht in der Jupiter-Saturn-Region liegt. Und es werden die Modelle in Frage gestellt, die von einem D/H-Anstieg mit heliozentrischer Distanz ausgehen. Neue Ergebnisse zeigen einen wesentlich komplexeren Zusammenhang auf, bei dem das D/H-Verhältnis in Wasser nicht nur von der Sonnendistanz, sondern u. a. auch von dessen

The JFCs were given this name because the farthest distance of their orbits to the Sun is close to Jupiter's orbit. But they consist of material that comes from even farther away from the Sun than the material of the OCCs.

The idea of comets as suppliers of water was challenged in 1995 with the published analysis of the isotopical composition of Halley's comet (Balsiger et al. 1995). This OCC had been visited by the Giotto probe nine years previously. The ratio of the two-neutron hydrogen isotope deuterium (D) to „normal“ hydrogen (H) was twice as high as in water on Earth. Subsequently, many scientific articles reached the conclusion that at most 10 % of the water on Earth could have originated from comets. At the same time, investigations showed that the ratio of D to H in a more primitive class of meteorites, the carbonaceous chondrites, agreed much better with the ratio found on Earth. In addition, a number of remote investigations of other OCCs confirmed that the D/H ratio is twice as high. The other type of comets, the JFCs, were also considered to be unlikely sources. According to simulations, the ratio of D to H increases with increasing distance from the Sun, which makes the isotopical composition of JFCs even less compatible with water on Earth than that of OCCs.

Short-period comets have frequently come close to the Sun and thus lost most of their material, which is the reason why they are not as luminous as the long-period OCCs. This hinders determining the D/H ratio of JFCs with ground-based detection methods; it is almost only possible from space. Accordingly, determining the D/H ratio of the JFC Hartley 2 (Fig. 5) was an important goal of the observation program Herschel solar system observations (HSSO), a part of the Herschel mission that was led by the MPI for Solar System Research. Herschel is the largest space telescope to date and observed in the far-infrared. The observations made in 2011 revealed that contrary to expectations, the D/H ratio is the same as that of water on Earth within the error margin (Fig. 6).

Based on this discovery, comets once more became a potential source for water. It also triggered a change in paradigms. For example, it is now suggested that the majority of OCCs does not originate in the solar system at all and therefore not in the Jupiter-Saturn region. Models which assume an increase in D/H with increasing distance from the Sun's center now seem questionable. New findings show a much more complex correlation. They suggest that the D/H ratio in water not only depends on the distance to the Sun but also, among others, on its time of formation during the development of the solar system. Fostered

Entstehungszeitpunkt in der Entwicklung des Sonnensystems abhängt. Auch wird die postulierte isotopische Verschiedenheit (z. B. in D/H) der OCCs und JFCs in Frage gestellt und auf die großen Fehlerbalken bei früheren Messungen verwiesen (Abb. 6). Es werden sogar alte Datensätze von OCCs neu analysiert, resultierend in teils deutlich niedrigeren D/H-Verhältnissen (z. B. Brown et al. 2012, Komet Halley). Mit einer weiteren Herschel-Messung konnte schließlich das D/H-Verhältnis eines zweiten OCCs bestimmt werden, und auch das lag nur ca. 30 % über dem irdischen Wert (Bockelée-Morvan et al. 2012).

by the huge error bars of earlier measurements, the postulated isotopic differences (e.g. in D/H) between OCCs and JFCs is being questioned (Fig. 6). On top of that, old sets of OCC data are re-analyzed and partly yield a significantly lower D/H ratio (e.g. Brown et al. 2012, comet Halley). An additional Herschel measurement allowed to determine the D/H ratio of a second OCC. This, too, was only about 30 % higher than the terrestrial ratio (Bockelée-Morvan et al. 2012).

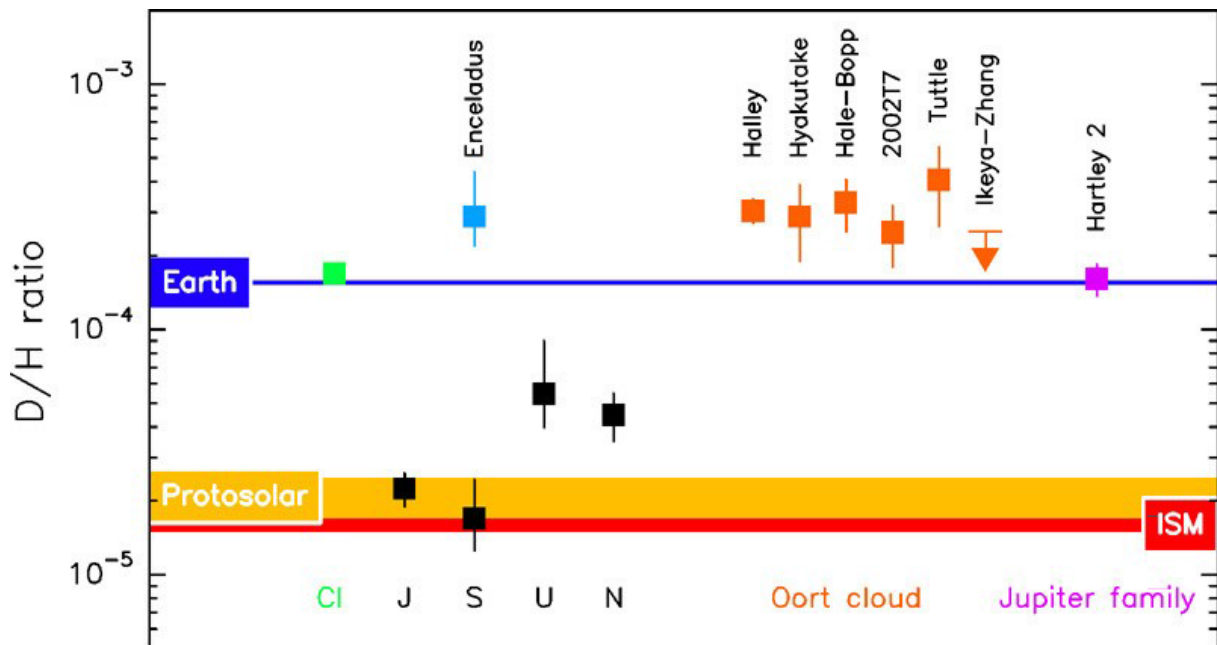


Abb. 6 Das Verhältnis D/H von schwerem (D) zu normalem Wasserstoff (H) für verschiedene Körper im Sonnensystem. Die Werte wurden an Wasser (HDO), molekularem Wasserstoff (HD) oder Methan (CH₃D) bestimmt. Jupiter und Saturn weisen die Werte des protosolaren Nebels auf, alle anderen Planeten, Enceladus und die OCCs 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. Der Komet Hartley 2 und ein CI-Chondrit ähneln dem als VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water) bezeichneten irdischen Wert.

Fig. 6 Ratio D/H of heavy (D) to normal hydrogen (H) for various bodies in the solar system. The values were determined on water (HDO), molecular hydrogen (HD), or methane (CH₃D). Jupiter and Saturn show the same values as the protosolar nebula; all other planets, Enceladus, and the OCCs show an enrichment in D that can have various reasons. Uranus and Neptune, for instance, have a high proportion of ice that shows a higher D/H ratio. Comet Hartley 2 and one CI-chondrite have a value similar to the terrestrial value, which is also called Vienna Standard Mean Ocean Water (VSMOW).

Kryovulkanismus versorgt Enceladus und Titan mit Wasser

Nach heutigem Verständnis haben die äußeren Planeten aufgrund ihrer Position im Sonnensystem während ihrer Akkretion große Mengen von Wasser (zumeist als Eis) gesammelt, das in Tiefen, in denen der

Cryovolcanoes on Enceladus supply water for Saturn and Titan

According to current understanding, the outer planets have collected large amounts of water (mostly as ice) because of their position in the solar system during their accretion phase. This is expected to be fluid or in

Atmosphärendruck mehr als 10 bar beträgt, flüssig bzw. gasförmig in Erscheinung treten sollte. Bisher schlugen allerdings alle Versuche fehl, dieses Wasser zu detektieren. Umso erstaunlicher war die Entdeckung von Wasser in den oberen Atmosphären der Planeten durch das *Infrared Space Observatory (ISO)* Mitte der 1990er Jahre. Da der Transport aus tieferen Atmosphärenschichten allein aufgrund der viel zu niedrigen Temperaturen oberhalb eines Druckbereiches von ca. 1 bar ausgeschlossen werden konnte, blieb nur ein extraplanetarer Ursprung übrig. Als potentielle Quellen wurden Kometeneinschläge, interplanetarer Staub, der im äußeren Sonnensystem relativ viel Eis enthält, sowie Wechselwirkungen mit den Monden identifiziert.

Modellrechnungen im HSSO-Team zeigten, dass diese drei Quellen unterschiedliche „Fingerabdrücke“ hinterlassen, die man anhand hochaufgelöster horizontaler und vertikaler Messwerte identifizieren kann. Erste spektroskopische Herschel-Messungen der Saturnstratosphäre führten dann allerdings zu völlig unerwarteten Ergebnissen. Die gemessenen Spektren entsprachen in keiner Weise den Erwartungen und ließen sich nur mit einer relativ dichten Wasserdampf Wolke erklären, die sich zwischen Herschel und Saturn befinden musste und die die Strahlung der Wassermoleküle aus der Saturnstratosphäre abschirmte.

gas-form in depths with an atmospheric pressure of more than 10 bar. So far, all attempts made to detect this water have failed, however. The detection of water in the upper atmospheres of the planets reported by the Infrared Space Observatory (ISO) in the mid-1990s was all the more remarkable. As transport from lower atmospheric layers could be excluded because of the much too low temperatures above pressure regions of about 1 bar, the only explanation was an extraplanetary origin. Potential sources discussed were cometary impacts, interplanetary dust, which carries comparatively large amounts of ice into the outer solar system; and interaction with the moons.

Model calculations made by the HSSO team showed that these three potential sources leave different fingerprints that can be identified with high-resolution horizontal and vertical measurements. First spectroscopical Herschel measurements in the stratosphere of Saturn yielded completely unexpected results, however. The measured spectra disagreed entirely with expectations and could only be explained by invoking a relatively dense water-vapor cloud located between Herschel and Saturn, which must reflect the radiation of the water molecules in the atmosphere of Saturn.

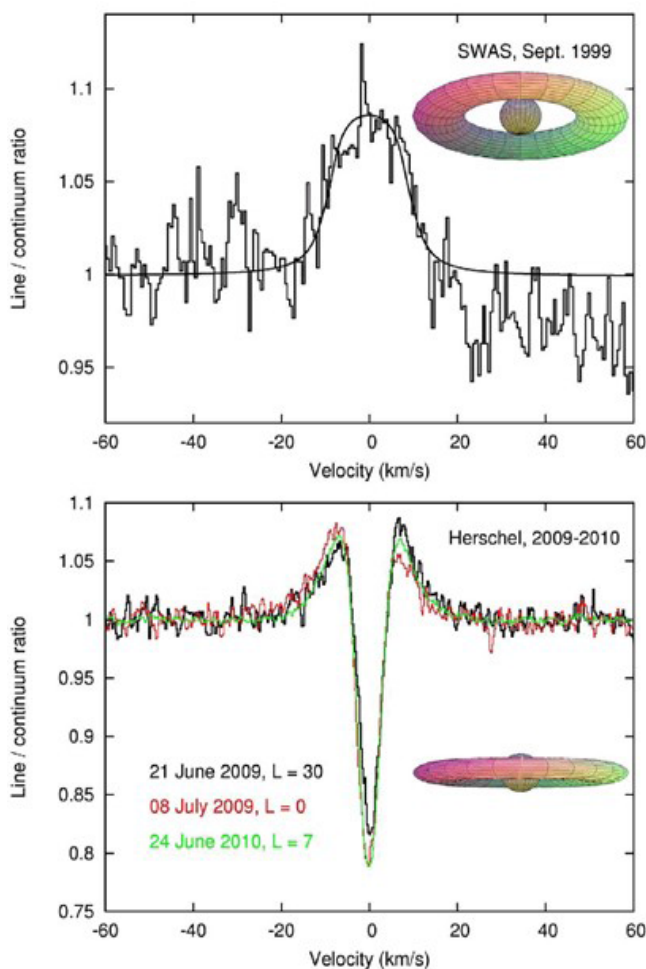


Abb. 7 Spektrum der Saturnatmosphäre beobachtet mit dem Submillimeter Wave Astronomy Satellite (SWAS) und mit Herschel. SWAS konnte die ISO-Beobachtungen einer Emissionslinie von Wasserdampf bestätigen, während Herschel eine Absorptionslinie beobachtete. Es stellte sich heraus, dass der Unterschied durch die verschiedene Inklination der Rotationsachse des Planeten in 1999 und 2009-10 zustande kam und der vom HSSO-Team entdeckte Enceladus-Wassertorus zum Zeitpunkt der Herschel-Beobachtungen Saturn weitgehend abdeckte. Die verschiedenen L-Werte markieren die orbitale Position von Enceladus.

Fig. 7 Spectrum of the atmosphere of Saturn observed with the Submillimeter Wave Astronomy Satellite (SWAS) and Herschel. The ISO observations were confirmed by SWAS with an emission line of water vapor, while Herschel observed an absorption line. The difference between them was found to be caused by the different inclinations of the planet's rotational axis in 1999 and 2009-2010. The Enceladus water torus discovered by the HSSO team covered most of Saturn at the time of observations with Herschel. The different L-values mark the orbital positions of Enceladus.

Darauf folgende Beobachtungen zur Charakterisierung dieser Wolke führten schließlich zu dem Ergebnis, dass sie einen Torus bildet, der fast den gesamten Saturn abdeckt und seine maximale Dichte in einer Entfernung von ca. 4 Saturnradien hat. Da sich der Mond Enceladus in derselben Entfernung befindet, war die Quelle des Torus schnell ausgemacht. Kryovulkanismus auf Enceladus, vor einigen Jahren von der Raumsonde Cassini entdeckt, emittiert ca. 250 kg Wasserdampf pro Sekunde in den Torus, der sich aufgrund von Stößen der Wassermoleküle auf die beobachtete Größe aufspannt und dabei die obere Saturnatmosphäre berührt. Dabei ist ein Bruchteil von ca. 5 % der von Enceladus ausgestoßenen Wassermenge ausreichend, um die von ISO und dem Submm Wave Astronomy Satellite (SWAS) bestimmte Säulendichte zu erklären (Hartogh et al. A&A, 2011). Der Torus wurde aufgrund seiner Neigung gegenüber der Ekliptik bei der vorangegangenen SWAS-Beobachtung nicht entdeckt (Abb. 7).

In der Atmosphäre des Saturnmondes Titan wurde ebenfalls bereits von ISO Wasser entdeckt. Allerdings lieferten die Beobachtungen nur geringe Anhaltspunkte für die Säulendichte und keine Information für dessen vertikale Verteilung, so dass sie anhand von photochemischen Modellen abgeschätzt wurde. Diese Abschätzungen lieferten so hohe Werte, dass sie mit keiner der potentiellen Quellen in Einklang zu bringen waren. Neue Herschel-Beobachtungen brachten schließlich Licht in das Dunkel. Das Vertikalprofil des Wassers konnte erstmals abgeschätzt werden mit dem Ergebnis, dass die Gesamtsäule ca. 10-mal kleiner ist als bisher angenommen. Da die Variabilität der kryovulkanischen Aktivität des Mondes Enceladus bekannt ist, kann der Transport von Wasser über den Enceladus-Wassertorus und dessen mit der Variabilität einhergehende Dichteschwankung als wahrscheinlichste Wasserquelle für Titan angesehen werden (Moreno et al., 2012).

Subsequent observations made with the aim of characterizing this cloud finally led to the result that this cloud is a torus that shields almost all of Saturn and has its highest density at a distance of about four Saturn radii. The moon Enceladus is located at about this distance and was soon confirmed as the source of the torus. Cryovolcanoes on Enceladus that were detected some years ago by the Cassini probe emit about 250 kg of water vapor per second into the torus, which expands to the observed size through collisions of the water molecules and touches the atmosphere of Saturn. About 5 % of the amount of water emitted by Enceladus are sufficient to explain the column density determined by ISO and the Submm Wave Astronomy Satellite (SWAS) (Hartogh et al. A&A, 2011). The torus had not been detected by previous SWAS observations because of its inclination with respect to the ecliptic (Fig. 7).

The ISO also detected water in the atmosphere of Titan, another moon of Saturn. But the observations yielded only few indications on the column density and no information on its vertical distribution, so that they needed to be estimated with photochemical modeling. These estimates were so high that they could not be reconciled with any of the potential sources. New Herschel observations finally brought some light into the darkness. The vertical profile of the water could be estimated for the first time, with the result that the entire column is about ten times smaller than assumed before. The known variability of the cryovolcanic activity on Enceladus fluctuations in the Enceladus water torus, and hence the transport of water via the Enceladus water torus is the probable source of water on Titan (Moreno et al. 2012).

Ausgewählte Publikationen

Selected Publications

H. Balsiger, K. Altwegg, J. Geiss, D/H and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratio in the hydronium ion and in neutral water from in-situ ion measurements in comet Halley, *Journal of Geophysical Research*, vol. 100, pp. 5827–5834, 1995, doi: 10.1029/94JA02936

P. Hartogh, 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*, vol. 57, issue 13, pp. 1596–1606, 2009, doi: 10.1016/j.pss.2009.07.009

P. Hartogh, D. C. Lis, D. Bockelée-Morvan, et al., Ocean-like water in the Jupiter-family comet 103P/Hartley 2, *Nature*, vol. 478, issue 7368, pp. 218–220, 2011, doi: 10.1038/nature10519

R. H. Brown, D. S. Lauretta, B. Schmidt et al., Experimental and theoretical simulations of ice sublimation with implications for the chemical, isotopic, and physical evolution of icy objects; *Planetary and Space Science*, vol. 60, issue 1, pp. 166–180, 2012, doi: 10.1016/j.pss.2011.07.023

D. Bockelée-Morvan, N. Biver, B. Swinyard, et al., Herschel measurements of the D/H and $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ ratios in water in the Oort-cloud comet C/2009 P1 (Garradd), *Astronomy & Astrophysics*, vol. 544, L15, 2012. doi: 10.1051/0004-6361/201219744

P. Hartogh, E. Lellouch, R. Moreno et al., Direct detection of the Enceladus water torus with Herschel, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 532, L2, 2011, doi: 10.1051/0004-6361/201117377

R. Moreno, E. Lellouch, L. M. Lara et al., The abundance, vertical distribution and origin of H_2O in Titan's atmosphere: Herschel observations and photochemical modelling, *Icarus*, vol. 221, issue 2, pp. 753-767, 2012, doi: 10.1016/j.icarus.2012.09.006

1.2.5 Ionenverlust der terrestrischen Planeten

Ein Thema, das in den letzten Jahren immer intensiver untersucht wird, ist der Verlust von kalten Ionen (mit Energien von weniger als 10 eV) aus den Ionosphären von Erde, Mars und Venus. 2008 zeigte eine Studie zu Beobachtungen des Elektron-Drift-Instruments an Bord von Cluster, dass der kalte Ionenfluss im Randschweif der Erdmagnetosphäre wesentlich höher ist als erwartet. Die Ursache, dass dieser Ionenfluss zuvor nicht beobachtet worden war, liegt darin, dass Ionen mit Temperaturen unter 1 eV sehr schwer zu messen sind. Dieser hohe Fluss von kalten Ionen bedeutet, dass der Verlust von Gasen aus der Erdatmosphäre in den Weltraum eine Größenordnung höher sein könnte als bisher angenommen. Dies würde eine Revision der Evolutionsmodelle der Erdatmosphäre nötig machen. Wir haben numerische Modelle entwickelt, um zu verstehen, wie kalte Ionen die Randbereiche des Magnetschweifs erreichen können und welche Ionenflüsse hierzu in der oberen Ionosphäre nötig sind (Abb. 8) (Li et al. 2012). Ob diese Ionen letztendlich in den Weltraum entweichen oder zur Atmosphäre zurückkehren, hängt vom Weltraumwetter ab (Abb. 9) (Haaland et al., 2012). Ionen, die entweichen können, werden im fernen Magnetschweif zu höheren Energien beschleunigt (Kronberg et al., 2012).

Der Verlust kalter Ionen aus der Mars-Ionosphäre konnte durch eine Kombination von Beobachtungen des Plasma-Spektrometers und des Radar-Instruments an Bord von Mars Express bestimmt werden (Fränz et al. 2010). Diese Beobachtungen zeigen, dass die Verlustrate von Gasen aus der Mars-Atmosphäre ebenfalls eine Größenordnung höher ist als bisher gemessen. Ob wir deshalb das Paradigma revidieren müssen, dass die Erdatmosphäre und das irdische Wasser durch die Erdmagnetosphäre vor Verlust geschützt werden, wurde in einer anderen Studie untersucht (Wei et al. 2012): Hier haben wir den Ionenabfluss von Erde und Mars bestimmt, wenn beide Planeten vom gleichen Druckimpuls des Sonnenwindes getroffen werden – dies war der Fall bei einer Konjunktion im Januar 2008.

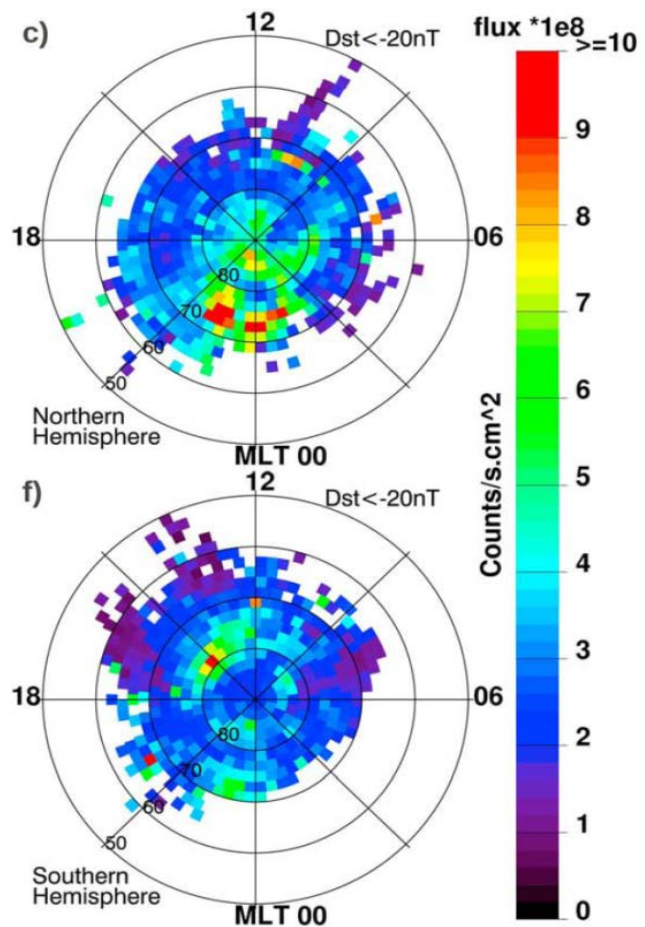
1.2.5 Ion Escape from Terrestrial Planets

One of the topics studied intensely in the last years is the escape of cold (low energy < 10 eV) ions from the ionospheres of Earth, Mars and Venus. In 2008 it was reported that observations by the electron drift instrument on board the Cluster spacecraft indicated a cold ion flux in the distant lobes of the Earth's magnetosphere of much higher intensity than anticipated. The reason that this flux was not observed by previous missions is that ions with temperatures below 1 eV are difficult to detect. This high flux of cold ions means that the loss of volatiles from the Earth atmosphere may be one order of magnitude higher than thought before, which has strong implications for atmospheric evolution. Models developed to understand how cold ions can get into the far distant lobes of the magnetosphere allow to calculate the flux intensity and spatial distribution of these ions close to their source region in the upper ionosphere (Fig. 8) (Li et al. 2012). Whether or not these ions are subsequently lost into space or return to Earth depends on the magnetospheric conditions (Fig. 9) (Haaland et al.(2012). Ions which can escape are accelerated to higher energies further down the tail (Kronberg E., et al., 2012).

The cold ion escape from the Martian ionosphere can be constrained by combining observations of the plasma spectrometer and radar instrument on board Mars Express (Fränz et al. 2010). These observations indicate that the escape rate of volatiles from Mars is also about one order higher than previously reported. Whether we have to revise the paradigm that the Earth atmosphere and water was protected from escape by the Earth magnetic field as compared to the unprotected atmospheres of Mars and Venus was elucidated in another study (Wei et al. 2012): We compared the outflow of ions from the Earth magnetosphere and from Mars induced magnetosphere when the same solar wind pressure pulse hit both planets when they were in conjunction - as seen from the Sun - in January 2008.

Abb. 8 Fluss-Intensität von aufwärts strömenden Ionen in einer Höhe von 1000 km über den Nord- und Südpolregionen der Erde bei einem Magnetsturm. Die Intensitäten wurden mit einem Ionen-Transport-Modell aus Beobachtungen der Cluster-Satelliten in großer Entfernung berechnet (aus Li et al, 2012).

Fig. 8 Flux intensity of upward moving ions at an altitude of 1000km over the Northern and Southern polar regions of Earth for disturbed magnetic conditions. The flux intensities were calculated by an ion transport model from the observations made by the Cluster spacecraft at large distance from Earth (from Li et al, 2012).



Die Daten zeigen, dass der Druckimpuls den Abfluss bei beiden Planeten verstärkt, der Effekt bei Mars aber wesentlich stärker ist. Dies bedeutet, dass die Erdatmosphäre tatsächlich vom Magnetfeld der Erde vor Verlust geschützt wird.

Bei Mars und Venus erlaubt die direkte Wechselwirkung des Sonnenwindes mit der oberen Ionosphäre andere Verlust-Mechanismen als bei der Erde. Der Fluss der Ionen von der Tag- zur Nachseite in niedrigen Höhen spielt hierbei eine entscheidende Rolle (Dubinin et al 2011). Wenn der Sonnenwind-druck sehr niedrig ist, öffnet sich der Flusskanal entlang der Schattengrenze, sodass sich eine ausgedehnte nachseitige Ionosphäre bilden kann – wie beobachtet von Venus Express im August 2010 (Wei et al., 2012b). Die nachfolgende Abschnürung dieser Nacht-Ionosphäre hängt wiederum von den Fluktuationen des Sonnenwindes ab – ähnlich wie im Magnetschweif der Erde (Dubinin et al., 2012).

The data show that the pressure pulse enhances the outflow at both planets but the relative enhancement is stronger at Mars. This implies that the Earth volatiles are indeed protected by the magnetic field.

At Mars and Venus the direct interaction of the solar wind with the upper ionosphere allows other escape mechanisms than at Earth. The flow of ions from the dayside ionosphere to the nightside at low altitudes plays a crucial role for the escape processes at these planets (Dubinin et al 2011). When the solar wind pressure is very weak, this trans terminator flow channel widens such that a huge nightside ionosphere can form as observed by Venus Express in 2010 (Wei et al., 2012b). The later tailward separation of this ionosphere depends on the solar wind fluctuations similar as observed for the Earth magnetospheric tail (Dubinin et al., 2012).

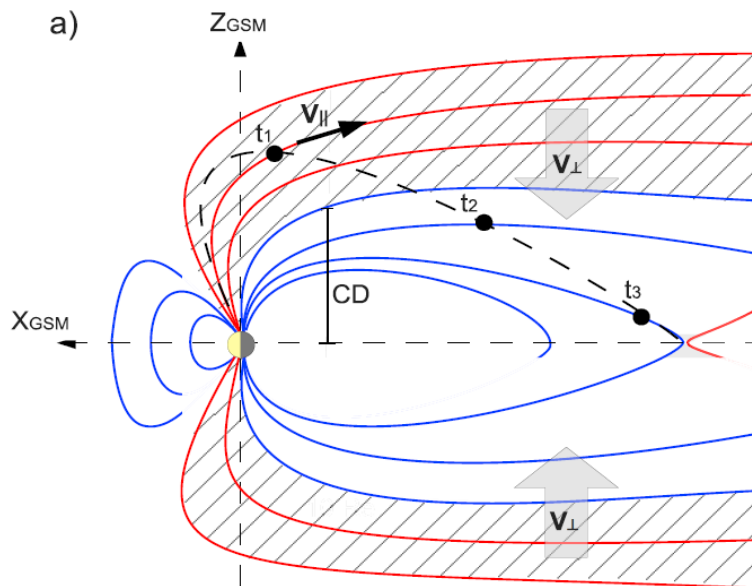


Abb. 9 Schnitt durch die Erdmagnetosphäre in der geozentrischen solar-magnetischen X-Y-Ebene. Ionen, die aus der Ionosphäre stammen, steigen aufwärts entlang offener Feldlinien (rot) zum Beobachtungspunkt (t_1). Danach werden sie in eine Region geschlossener Feldlinien konvektiert (blau) und anschließend in die Plasmaschicht des Schweifs (t_3) von wo der Verlust von hier hängt dann vom Weltraumwetter ab (aus Haaland et al, 2012).

Fig. 9 Cut through the Earth magnetosphere in the geocentric solar magnetic XZ plane. Ions

originating from the ionosphere travel upward on open field lines (red) to the observation point (t_1). Later they are convected into a region of closed field lines (blue) and into the tailside plasma sheet (t_3) from where escape depends on magnetospheric storm conditions (from Haaland et al, 2012).

Ausgewählte Veröffentlichungen

Selected Publications:

- E. Dubinin, M. Fränz, A. Fedorov et al., Ion Energization and Escape on Mars and Venus, *Space Science Review*, vol. 162, issue 1 – 4, pp. 173-211, 2011, doi: 10.1007/s11214-011-9831-7
- E. Dubinin, M. Fränz, J. Woch et al., Bursty escape fluxes in plasma sheets of Mars and Venus, *Geophysical Research Letters*, vol. 39, issue 1, 2012, doi: 10.1029/2011GL049883
- M. Fränz, E. Dubinin, E. Nielsen, J. Woch et al., Transterminator ion flow in the martian atmosphere, *Planetary and Space Science*, vol. 58, issue 11, pp. 1442-1454, 2010, doi: 10.1016/j.pss.2010.06.009
- S. Haaland, A. Eriksson, E. Engwall et al., Estimating the capture and loss of cold plasma from ionospheric outflow, *Journal of Geophysical Research*, vol. 117, issue A7, 2012, doi: 10.1029/2012JA017679
- E. Kronberg, S. Haaland, P. Daily et al., Oxygen and hydrogen ion abundance in the near-Earth magnetosphere: Statistical results on the response to the geomagnetic and solar wind activity conditions, *Journal of Geophysical Research*, vol. 117, issue A12, 2012, doi: 10.1029/2012JA018071
- K. Li, S. Haaland, A. Eriksson, et al., On the ionospheric source of cold ion outflow, *Geophysical Research Letters*, vol. 39, issue 18, 2012, doi: 10.1029/2012GL053297
- Y. Wei, M. Fränz, E. Dubinin, J. Woch et al., Enhanced atmospheric oxygen outflow on Earth and Mars driven by a corotating interaction region, *Journal of Geophysical Research*, vol. 117, issue A3, 2012, doi: 10.1029/2011JA017340
- Y. Wei, M. Fränz, E. Dubinin, et al., A teardrop-shaped ionosphere at Venus in tenuous solar wind, *Planetary and Space Science*, vol. 73, issue 1, pp. 254-261, 2012, doi: 10.1016/j.pss.2012.08.024

1.2.6 Wechselwirkungen der inneren Saturnmonde mit der Saturnmagnetosphäre

Die Raumsonde Cassini kreist seit 2004 um Saturn, den zweitgrößten Planeten unseres Sonnensystems. Mit an Bord ist auch ein Instrument namens LEMMS (Low Energy Magnetospheric Measurement System) aus den Laboren des MPS. Es dient der Messung energiereicher Elektronen und Ionen in der Umgebung des Ringplaneten. Diese geladenen Teilchen bewegen sich entlang und senkrecht zur Richtung des Magnetfeldes von Saturn. Neben der Gyration, einer spiralförmigen Bewegung entlang der magnetischen Feldlinien, springen die Teilchen in der so genannten „Bouncebewegung“ entlang des Magnetfeldes zwischen Nord- und Südpol hin und her. Zudem driften sie senkrecht zur Richtung des Magnetfeldes um den Planeten herum.

Die Messung der Energie und Bewegungsrichtung dieser geladenen Teilchen ist ein sehr gutes Werkzeug, um die Plasmaprozesse innerhalb der schnell rotierenden Saturnmagnetosphäre zu charakterisieren. Speziell zählt LEMMS die Teilchen in verschiedenen Energiebereichen und stellt so Verteilungsfunktionen auf.

Auf ihrer Bahn um den Planeten fliegt Cassini auch nahe an einigen der 60 Monde vorbei. Geladene Teilchen, die entlang des Magnetfeldes laufen, treffen auch auf die Mondoberfläche und gehen dabei verloren. Dies zeigt sich als so genannte Absorptionssignaturen in den Verteilungsfunktionen. Dabei unterscheidet man zwischen zeitlich über alle Längengrade gemittelte Signaturen (Makrosignaturen) und lokal in der Nähe des Mondes gemessenen (Mikrosignaturen) mit stark verminderten Zählraten

Abb. 10 vermittelt einen Eindruck der Variabilität von Elektronen-Mikrosignaturen. Teilweise sind es sehr lokale Minima (blau) in der Verteilungsfunktion (Category 1), die sich klar einem Mond zuordnen lassen, teilweise beobachtet man jedoch auch mehrere nah beieinander liegende Signaturen, die von unterschiedlichen Monden stammen könnten (Category 2 -5). Die Zuordnung wird dadurch verkompliziert, dass die Absorptionssignaturen eines Mondes nicht immer an der erwarteten Position auftauchen, sondern oft entweder näher am Saturn (radial einwärts) oder weiter vom Saturn entfernt (radial auswärts).

1.2.6 Interaction between the Inner Moons and the Saturnian Magnetosphere

The Cassini spacecraft is in orbit around Saturn, the second largest planet in our solar system, since 2004. One of the scientific instruments aboard the spacecraft is the “Low Energy Magnetospheric Measurement System” (LEMMS) designed and built at the Max Planck Institute for Solar System Research. LEMMS measures charged particles (electrons and ions) in the vicinity of the ring planet along and perpendicular to the magnetic field of Saturn. The motion of those charged particles can be described by a gyration around the magnetic field direction, a bounce motion along the magnetic field direction between the North- and the South Pole and a drift motion azimuthally around the planet perpendicular to the magnetic field.

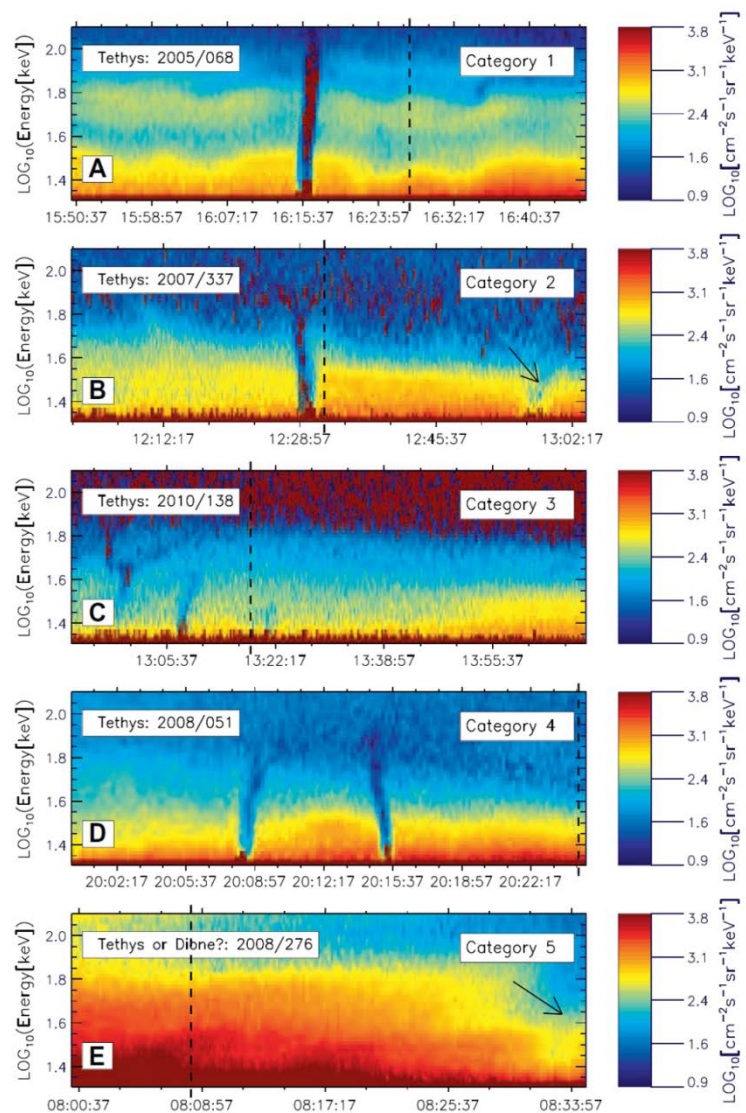
Measuring the energy and direction of motion of charged particles is a very useful tool to better characterize the plasma processes inside the rapidly rotating magnetosphere of Saturn. LEMMS counts particles in different energy channels and therefore provides distribution functions of electrons and ions.

The trajectory of Cassini includes close flybys at some of the 60 moons of Saturn. Along their bounce – and drift motion particles hit the moon’s surface and are lost which is visible as absorption signatures in the distribution functions. One can distinguish between so called “macrosignatures” (continuously present at all longitudes along the moon’s orbit) and “microsignatures” (locally reduced particle fluxes in the vicinity of the moon).

Fig. 10 shows the variability of electron microsignatures classified in different categories: Category 1 with locally very sharp absorptions clearly associated to a moon while categories 2 to 5 multiple and partially shallow absorptions are observed which could be associated to several moons. The identification of what moon causes which signatures is even more complicated because the expected location differs from the measured location.

Abb. 10 Beispiele von Elektronen-Mikrosignaturen in der Saturnmagnetosphäre, detektiert mit Hilfe des LEMMS-Detektors an Bord der Raumsonde Cassini klassifiziert in fünf Kategorien. (A) Kategorie 1 mit einer wohldefinierten einzelnen Absorption verursacht durch den Mond Tethys; (B) zeigt eine Mikrosignatur nach Kategorie 1 und eine nach Kategorie 2 ebenfalls verursacht durch Tethys; (C) Komplexe Mikrosignatur (Kategorie 3) von Tethys; (D) zwei Absorptionssignaturen mit der gleichen Struktur (Kategorie 4) ebenfalls von Tethys; (E) Absorption die nicht eindeutig einem Mond zugeordnet werden kann (Kategorie 5).

Fig. 10 Typical examples of electron time-energy spectrograms of microsignature events in the Saturnian magnetosphere detected by the LEMMS detector onboard Cassini classified into five different categories: Panel (A) depicts a microsignature with an organized structure (category one) that is caused by the moon Tethys. In panel (b) we can see two microsignature events, one of category one and one of category two, both of them caused by Tethys. Panel (c) shows a microsignature with a complex structure (category three) caused again by the moon Tethys. In panel (d) we can see two microsignature events of the same depth (category four) that were caused by Tethys. Panel (e) depicts a depletion-like event that is uncertain if it was caused by Tethys or by Dione (from Andriopoulou et al., 2012).



Andriopoulou et al. (2012) konnten zeigen, dass der radiale Versatz eine Funktion der Lokalzeit im Saturnsystem ist: radial auswärts beobachtet man den Versatz eher auf der Tagseite der Magnetosphäre und radial einwärts eher auf der Nachtseite (Abb. 10). Asymmetrien im lokalen Magnetfeld konnten als Ursache ausgeschlossen werden. Wahrscheinlicher ist ein bislang unbekanntes elektrisches Feld in der Saturnmagnetosphäre, das von der Tagseite zur Nachtseite zeigt und Werte zwischen 0.11 und 0.18 mV/m annehmen kann. Der Ursprung dieses elektrischen Feldes bleibt ungewiss.

Andriopoulou et al. (2012) could show that this radial offset systematically is a function of local time in the Saturnian system. As shown in Fig. 10 the offset is radially outwards in the noon sector while radially outward offsets primarily are found in the midnight sector. The could show that this asymmetry cannot be associated to the local magnetic field but rather due to an existing noon to midnight electric field of unknown origin with values between 0.11 and 0.18 mV/m.

Abb. 11 Offset in Abstand L zwischen erwarteter und gemessener Mikrosignatur verursacht durch den Mond Tethys als Funktion der Lokalzeit im Saturnsystem. $L=0$ bedeutet, dass die Mikrosignatur genau bei dem zu erwartenden Abstand L des Mondes gemessen wurde, bei positiven bzw. negativen Werten hat man einen radialen Offset gemessen. Unterschiedliche Symbole und Farben sind den in Abb. 10 beschriebenen Kategorien zugeordnet. Ringstromkorrekturen der L -Werte wurden berücksichtigt.
(aus Andriopoulou et al., 2012).

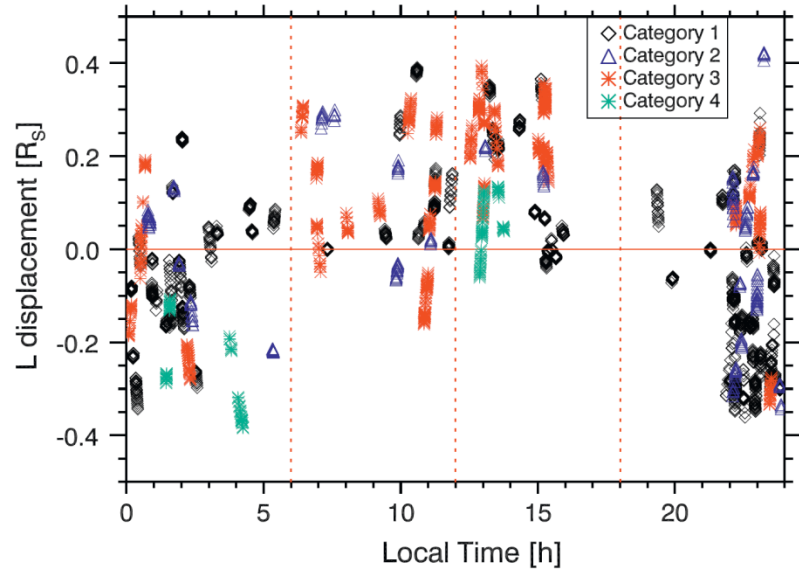


Fig. 11 Microsignature L -shell displacements, i.e. the difference of the L -shell of microsignatures to the L -shell of the moon-absorber, as a function of local time for the events caused by the moon Tethys. The zero L -shell displacement corresponds to the L -shell of the moon that caused the microsignature. The different colors correspond to the different categories as mentioned in Fig. 10. The L -shell data have been corrected for the ring current perturbation (from Andriopoulou et al. (2012)).

Daten von Raumsonden liefern natürlich nur eine Momentaufnahme der Plasmaumgebung eines Mondes während eines Vorbeifluges. Computersimulationen erlauben es, die globale Wechselwirkung des magnetosphärischen Plasmas mit den Monden im Saturnsystem grundlegender zu studieren. Der an der Technischen Universität Braunschweig entwickelte Hybridcode A.I.K.E.F wurde sehr erfolgreich auf das Saturnsystem angewendet. Abb. 12 illustriert einige der Ergebnisse von Simulationen die Roussos et al (2012) für die Umgebung des Mondes Rhea durchgeführt haben.

Abb. 12a (oben links) zeigt farbkodiert die Magnetfeldstärke in der Umgebung des Mondes. In den drei folgenden Abbildungen werden von links Elektronen mit unterschiedlicher Energie in die Box injiziert (in Richtung des rotierenden Plasmas in der Saturnmagnetosphäre). Die weißen Linien sind die Bahnen auf denen die Elektronen auf die Mondoberfläche treffen oder um diese herumgeführt werden. Mit zunehmender Energie werden die Bahnen immer komplexer, speziell im „Wake“, also dem „Plasmaschatten“ hinter dem Mond. Fliegt man mit einer Raumsonde durch den Wake hindurch wird man asymmetrische Verteilungsfunktionen und Absorptionen aber auch kurzfristige Erhöhungen in den Zählraten messen. Ein Vergleich mit Daten des LEMMS-Instruments an Bord der Raumsonde Cassini zeigt genau solche Signaturen.

Measurements aboard spacecraft taken during a flyby can only provide a snapshot of the plasma environment at a given time. However, computer simulations allow us to globally describe the interaction of the moons embedded in the magnetospheric plasma of the planet. The hybrid code A.I.K.E.F developed at the Technical University Braunschweig was successfully used to characterize the interaction in the Saturnian system. Fig. 12 illustrates some of the results of the simulations performed by Roussos et al. (2012) in the vicinity of Rhea.

Fig. 12a (top left) shows the calculated magnetic field strength color-coded in the vicinity of Rhea projected into the equatorial plane. The other three panels show the trajectories (white lines) of injected electrons with different energies (1 keV, 5 keV, and 30 keV) entering the simulation box from the left. The electrons are diverted around the moon. The higher the energy the more complex the trajectories are in the wake. Some of them even return back and hit the moon. By comparing the absorption signatures measured along a spacecraft trajectory through the wake with the simulation results the physical processes can be better understood.

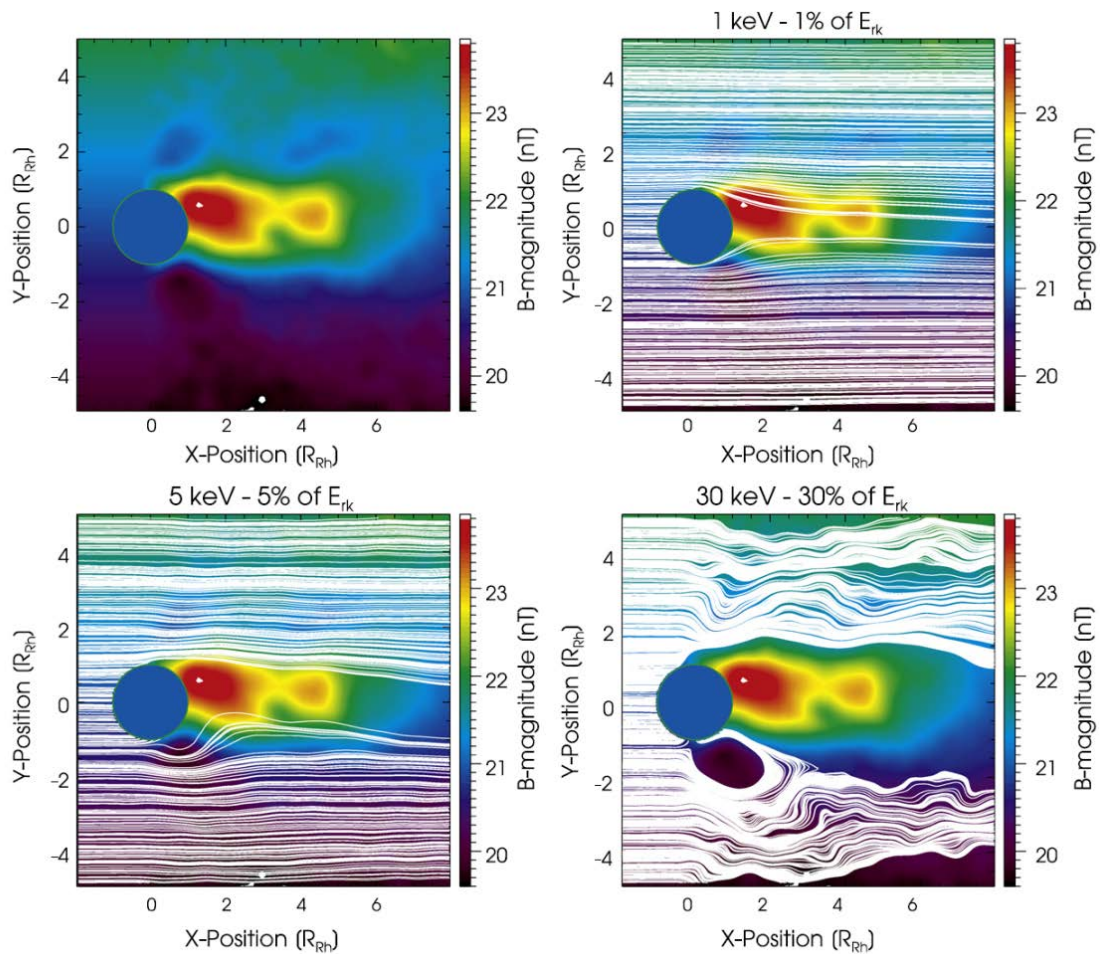


Abb. 12 Ergebnisse einer Hybridsimulation in der Umgebung des Mondes Rhea (positiv x zeigt in die Richtung der Korotation des magnetosphärischen Plasmas; positiv y zeigt Richtung Saturn). Oben links: Farbkodierte Magnetfeldstärke; oben rechts und unten: Bahnen von Elektronen mit unterschiedlicher Energie in der Umgebung von Rhea als zusätzliche weiße Linien eingezeichnet (aus Roussos et al., 2012).

Fig. 12 Energetic electron guiding center traces on the output of a hybrid code simulation of Rhea's magnetospheric interaction. The top left panel shows the reference $|B|$ -map, the remaining panels show traces at different electron energies. Traces are superimposed on the map of the top left panel (from Roussos et al., 2012).

Ausgewählte Publikationen

Selected publications

M. Andriopoulou, E. Roussos, N. Krupp, C. Paranicas, M. Thomsen, S. Krimigis, M. K. Dougherty, and K. H. Glassmeier, A noon-to-midnight electric field and nightside dynamics in Saturn's inner magnetosphere, using microsignature observations, *Icarus*, 220, 503–513, 2012, doi:10.1016/j.icarus.2012.05.010

E. Roussos, P. Kollmann, N. Krupp, C. Paranicas, S. M. Krimigis, D. G. Mitchell, A. M. Persoon, D. A. Gurnett, W. S. Kurth, H. Kriegel, S. Simon, K. K. Khurana, G. H. Jones, J.-E. Wahlund, and M. K. G. Holmberg, Energetic electron observations of Rhea's magnetospheric interaction, *Icarus*, 221, 116–134, 2012, doi:10.1016/j.icarus.2012.07.006

N. Krupp, E. Roussos, P. Kollmann, C. Paranicas, D. G. Mitchell, S. M. Krimigis, A. Rymer, G. H. Jones, C. S. Arridge, T. P. Armstrong, and K. K. Khurana, The Cassini Enceladus encounters 2005–2010 in the view of energetic electron measurements, *Icarus*, 218, 433–447, 2012, doi:10.1016/j.icarus.2011.12.018

1.2.7 Die innere Dynamik von Jupiter und Saturn

Die Erforschung des Inneren der Planeten ist ein wichtiges Anliegen des MPS. Dabei kommen recht unterschiedliche Werkzeuge zum Einsatz: Theoretische Überlegungen und aufwendige Computermodelle helfen, die Dynamik von Atmosphären, Gesteinsmänteln und Eisenkernen zu verstehen. Messinstrumente auf Satelliten oder Landeplattformen liefern wichtige Daten über die inneren Eigenschaften und Prozesse. Ein besonderer Forschungsschwerpunkt liegt auf der Modellierung des Dynamoprozesses, der die planetaren Magnetfelder erzeugt. Diese Magnetfelder spielen eine wichtige Rolle für die Bewohnbarkeit eines Planeten und erlauben wertvolle Rückschlüsse auf innere Vorgänge. Computersimulationen des Dynamomechanismus liefern hier das notwendige Bindeglied, das die beobachteten Magnetfelder mit diesen Vorgängen verknüpft.

In den Jahren 2011 und 2012 war die Modellierung der inneren Dynamik von Jupiter und Saturn ein besonderer Schwerpunkt. Beide Gasriesen haben einen ähnlichen inneren Aufbau und ein System von ostwärts und westwärts gerichteten zonalen Winden dominiert die Oberflächendynamik beider Planeten.

1.2.7 The Inner Dynamics of Jupiter and Saturn

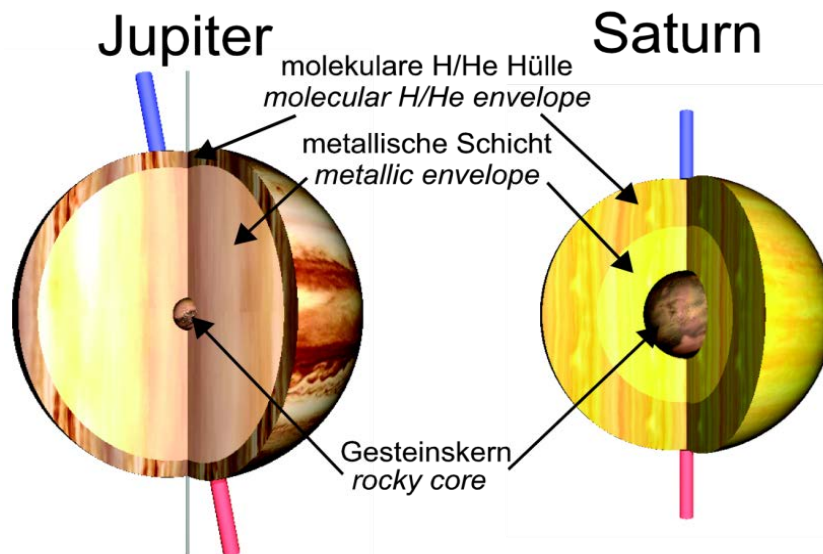
The interior of planets is an important research topic at MPS and different tools are employed to this end. Theoretical considerations and large-scale computer simulations help to understand the dynamics of atmospheres, rocky mantles, and iron cores. Instruments on orbiting satellites and landers deliver essential data about the interior processes. Modelling the dynamo process that generates the planetary magnetic fields is a main focus of research. These magnetic fields play an important role for the habitability of a planet and also bear important information about interior processes. Computer simulations of the dynamo mechanism provide the link between magnetic field observation and the inner dynamics.

In 2011 and 2012 modelling the inner dynamics of Jupiter and Saturn was a major research topic. Both gas giants have a similar interior structure (Fig. 13) and a system of east- and westward winds dominates the surface dynamics of both planets.

Abb. 13 Innerer Aufbau von Jupiter und Saturn. Die Atmosphären beider Planeten bestehen aus einem Helium-Wasserstoff-Gemisch. Wasserstoff nimmt bei hohem Druck metallische Eigenschaften an. Dieser Übergang findet bei etwa 90 % des Jupiter- und 65 % des Saturn-radius statt. Die Größe des inneren Kerns ist bei beiden Planeten noch unsicher.

Fig. 13 Inner structure of Jupiter and Saturn. The

atmosphere of both planets is mainly a hydrogen-helium mixture. Hydrogen assumes metallic properties at higher pressures. This transition is reached at about 80% of Jupiter's and 65% of Saturn's radius. The size of the inner rocky cores remains uncertain.



Die Atmosphären bestehen im Wesentlichen aus einem Gemisch aus Wasserstoff und Helium. Wasserstoff nimmt bei hohem Druck metallische Eigenschaften an. Dieser Übergang findet bei etwa 80 % von Jupiters Radius und bei 65 % des Radius im kleineren Saturn statt. Traditionell wird angenommen, dass das Magnetfeld in einem

The atmospheres mainly consist of a hydrogen and helium mixture. Hydrogen assumed metallic properties beyond a certain pressure. This important transition happens at 80 % of Jupiter's radius and 65 % of Saturn's radius, Saturn being the smaller of the gas giants. Traditionally, a

Dynamomechanismus in der inneren metallischen Schicht erzeugt wird, während die Oberflächenwinde in der äußeren molekularen Schicht entstehen. Die Magnetfelder beider Planeten sind erstaunlich unterschiedlich. Jupiters Magnetfeld ähnelt dem der Erde mit einem klar dominierenden Dipolanteil, der etwa 10 Grad gegen die Rotationsachse gekippt ist. Saturns Magnetfeld hingegen scheint perfekt achsensymmetrisch zu sein und ist stärker auf höhere Breiten konzentriert.

dynamo mechanism is thought to generate the magnetic fields in the metallic layer while the surface winds are hosted by the outer molecular envelope. The magnetic fields of Jupiter and Saturn are surprisingly different. Jupiter's field is very similar to the geomagnetic field with a clearly dominating dipole contribution that is tilted by 10 degree with respect to the planetary rotation axis. Saturn's magnetic field, on the other hand, seems nearly perfectly axisymmetric and is concentrated at higher latitudes.

In einem ersten Schritt wurde ein ursprünglich für die Erde entwickeltes Computermodell so angepasst, dass die in den Gasplaneten wichtige Zunahme der Dichte mit der Tiefe berücksichtigt werden konnte (anelastische Näherung). Simulationen der Dynamik in der äußeren molekularen Schicht zeigten, dass die Dichteschichtung die kleinskaligen Bewegungen stark beeinflusst. Die typische Längenskala der turbulenten Bewegungen nimmt klar nach außen hin ab, während deren Amplitude zunimmt. Die zonalen Winde werden jedoch von der Dichteschichtung weit weniger modifiziert. Die Bandstruktur bleibt erhalten, allerdings nimmt die Maximalgeschwindigkeit der Winde vom Pol hin zu dem Äquator stärker zu.

In a first step, MPS scientists adapted a numerical computer code originally developed to model Earth by incorporating the severe density stratification found in gas planets. Simulations of the dynamics in the outer molecular layer showed that the stratification primarily affects the small scale convective motions. The typical scale of these turbulent motions markedly decreases with radius while the amplitude increases. The east- and westward zonal winds, however, are only somewhat modified by the stratification. The band structure is conserved but the maximal speed within a band increases away from the poles when approaching the equator.

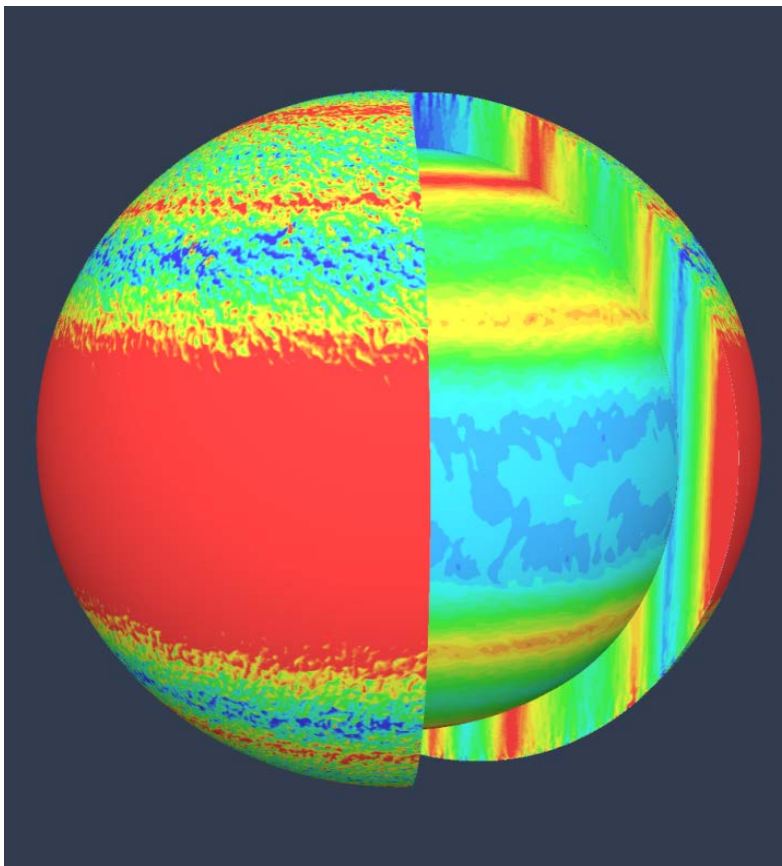


Abb. 14 Zonale Winde in einer Simulation ohne Magnetfeld, rot bedeutet ostwärts und blau westwärts.

Fig. 14 Zonal winds in a simulation without magnetic field, red represents eastward winds and blue westward.

Abb. 14 zeigt, dass die Winde sich entlang der Rotationsachse nur wenig ändern, sie reichen somit von Nord bis Süd durch den ganzen Planeten. Die ist eine Konsequenz der schnellen Rotation der Planeten und der darum dominierenden Corioliskraft.

Fig. 14 shows that these winds change only a little in the direction of the planetary rotation axis and thus span the whole planet from north to south. This is a consequence of the fast planetary rotation and the therefore dominating Coriolis force.

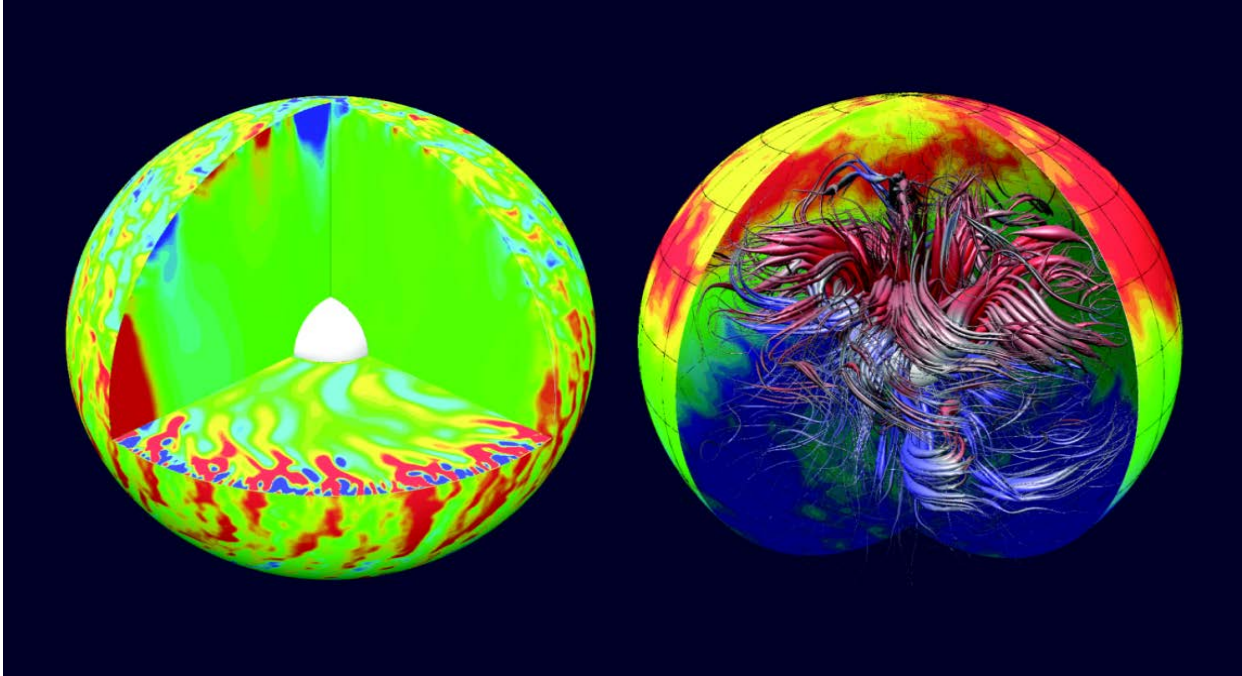


Abb. 15 Illustration einer Lösung mit dipolarem Magnetfeld und starken zonalen Winden in einer äußeren Schicht mit stark reduzierter elektrischer Leitfähigkeit. Die linke Abbildung zeigt die zonalen Winde an der Oberfläche und im rechten Schnitt. Im linken Schnitt werden die achsensymmetrischen zonalen Winde gezeigt. Rot bedeutet ostwärts und blau westwärts. Der Äquatorialschnitt illustriert die kleinskaligen turbulenten Bewegungen mittels Konturen der Z-Wirbelstärke (rot=positiv, blau=negativ). Die rechte Abbildung zeigt das radiale Magnetfeld an der Oberfläche (rot=auswärts, blau=einwärts) und das innere Magnetfeld in Form von Feldlinien, deren Dicke proportional zur lokalen Magnetfeldstärke ist.

Fig. 15 A solution with dipole-dominated magnetic field and strong zonal winds in the outer layer where the electrical conductivity strongly decreases. The left panel shows the zonal winds on the outer surface and the right cut. The left cut depicts the axisymmetric zonal winds. Red means eastward, blue westward. The equatorial cut illustrates the small scale turbulent convection using contours of the vorticity component parallel to the rotation axis (rot=positive, blue=negative). The right panel shows the radial magnetic field on the surface (red=outward, blue=inward) and illustrates the interior magnetic field with fieldlines. The thickness of the fieldlines is proportional to the local magnetic field strength.

Eine größere Rolle spielt das Dichteprofil für den Dynamomechanismus, der in einem zweiten Schritt untersucht wurde. Nimmt die Dichte um mehr als einen Faktor sieben innerhalb der modellierten Kugelschale zu, dann werden nur multipolare Magnetfelder, ohne einen dominierenden Dipolanteil gefunden. Für kleinere Dichteschichtungen existieren bei gleichen Parametern zwei Lösungen: eine multipolare Lösung mit komplexen Magnetfeldern und eine dipol-dominierte und damit realistischere Lösung. In der dipol-dominierten Lösung sind die zonalen Winde nur schwach, das Magnetfeld jedoch stark. In der multipolaren Lösung ist es umgekehrt. Die mit dem starken

The density profile more significantly influences the dynamo mechanism that was explored in a second step. When the density increases by more than a factor of seven within the modelled spherical shell the magnetic fields are always multipolar without a dominating dipole contribution. For smaller stratifications two different solutions exist at identical parameters: a multipolar solution with complex magnetic fields and a dipole-dominated and thus more realistic solution. In the dipolar solution the zonal winds remain only weak while the magnetic field is strong. In the multipolar solution it is the other way round: The strong Lorentz forces caused by the

Dipolfeld verknüpften Lorentzkräfte bremsen die zonalen Winde effektiv ab. Andererseits produzieren starke zonale Winde bevorzugt nicht-dipolare Magnetfelder.

Um sowohl starke zonalen Winde als auch dipol-dominierte Felder in einer Simulation zu vereinen, muss die Änderung der elektrischen Leitfähigkeit mit der Tiefe berücksichtigt werden. Neue quantum-mechanische Simulationen an der Universität Rostock zeigen, dass die Leitfähigkeit bereits in der äußeren molekularen Schicht graduell mit der Tiefe zunimmt. Aufgrund der steigenden Temperatur geht der Wasserstoff zunehmend in den Plasmazustand über. An der Grenze zur metallischen Schicht hat die Leitfähigkeit bereits den Wert der metallischen Phase angenommen, es existiert kein Phasensprung. Dieses Verhalten wurde mit einem vereinfachten Leitfähigkeitsprofil in den Computermodellen berücksichtigt. Kombiniert man diese Profil mit einer starken Dichteschichtung, dann ergeben sich realistischere Lösungen, wie in Abb. 15 gezeigt. Wie auf Jupiter und Saturn dominiert ein starker ostwärts gerichteter Wind in der Äquatorregion die Dynamik. Dieser Wind bleibt auf die äußere Region beschränkt, in der die elektrische Leitfähigkeit nur schwach ist, und spielt darum für die Magnetfelderzeugung keine Rolle. Bei höheren Breiten sind die zonalen Winde aufgrund der Dichteschichtung schwach genug, um die Erzeugung eines dipol-dominierten Magnetfeldes zu ermöglichen. Diese sekundären Winde sind auf den Gasriesen jedoch deutlich stärker und müssten darum auch auf die schlecht leitfähige Schicht beschränkt bleiben. Welche Mechanismen dafür verantwortlich sein könnten, bleibt jedoch unklar, denn in unseren Simulationen reichen die Winde immer durch den ganzen Planeten.

stronger dipolar fields effectively break the zonal winds. On the other hand, zonal winds typically produce non-dipolar magnetic fields.

In order to combine strong zonal winds and dipole dominated magnetic field in one numerical simulation the radial variation of the electrical conductivity has to be included into the model. New quantum mechanical ab initio calculations from the University Rostock show that the conductivity already increases with depth in the molecular envelope. Because of the rising temperature hydrogen becomes more and more ionized and assumes plasma properties. At the transition to the metallic phase the electrical conductivity already reaches metallic values and there is no clear transition. Such a behavior has been included in the simulation, using a simplified electrical conductivity profile. When this is combined with a strong density stratification the solutions become quite realistic as is demonstrated by Fig. 15. Like on Jupiter and Saturn, a fierce eastward directed wind dominates the equatorial region. This wind is confined to the outer region where the electrical conductivity remains low and therefore plays no role for the magnetic field generation. Because of the density stratification the winds at higher latitude are weak enough to allow for a dipole dominated magnetic field. These secondary winds are markedly stronger on the gas giants than in the simulations and will also have to remain confined to the outer layer where the electrical conductivity is weak. Which mechanism is responsible for this confinement remains unclear and is a topic of future research.

Ausgewählte Publikationen

Selected publications

T. Gastine and J. Wicht, Effects of compressibility on driving zonal flow in gas giants, *Icarus*, vol. 219, pp. 428–442, 2012, doi: 10.1016/j.icarus.2012.03.018

T. Gastine, L. Duarte, and J. Wicht, Dipolar versus multipolar dynamos: the influence of the background density stratification, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 546, A19, 2012, doi: 10.1051/0004-6361/201219799

T. Gastine, J. Wicht, and J. M. Aurnou, Zonal flow regimes in rotating anelastic spherical shells: An application to giant planets, *Icarus*, vol. 225, issue 1, pp. 156–172, 2013, doi: 10.1016/j.icarus.2013.02.031

L. D. V. Duarte, T. Gastine, and J. Wicht, Anelastic dynamo models with variable electrical conductivity: An application to gas giants, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, vol. 222, pp. 22–34, 2013, doi: 10.1016/j.pepi.2013.06.010

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 im Jahr 2012

Solar group in 2012

Wesentliche Datenquellen

Die Messungen des von einem Ballon getragenen Sonnenobservatoriums SUNRISE im Jahr 2009 waren im Berichtszeitraum 2011/2012 weiter eine wesentliche Datenquelle für die Arbeiten der Abteilung. Das wesentliche wissenschaftliche Ziel von SUNRISE ist das Studium der Magnetokonvektion, 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.

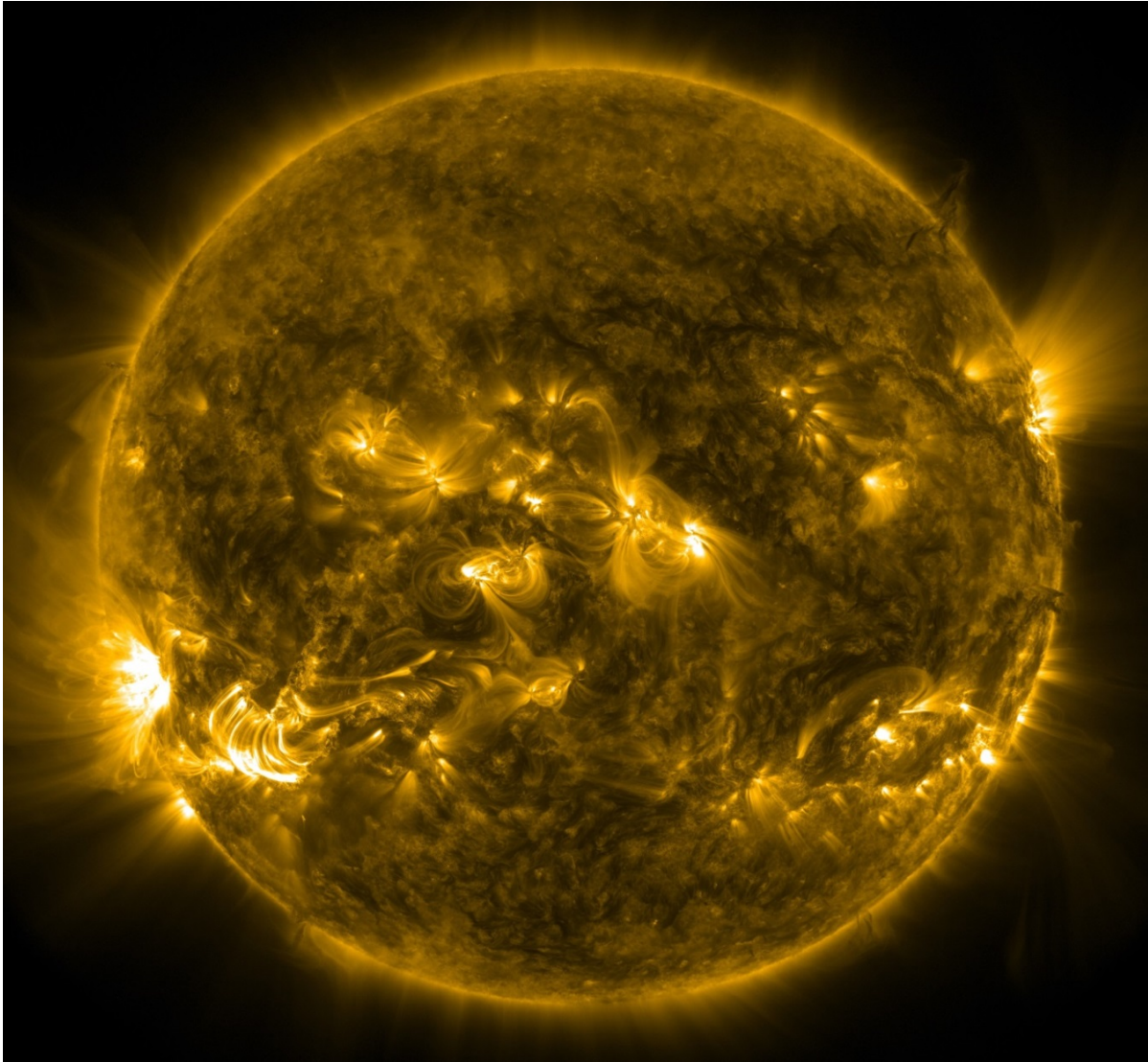
Das Solar Dynamics Observatory (SDO), eine Sonnenmission der NASA mit Start im Jahr 2010, liefert kontinuierlich Daten mit hoher räumlicher Auflösung über die gesamte sichtbare Sonnenoberfläche. Von besonderer Bedeutung für die Arbeit der Sonnengruppe sind die Messungen des solaren Magnetfelds durch den Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) und die Bilder vor allem im EUV-Bereich, die das Atmospheric Imaging Assembly (AIA) liefert.

Main data sources

The measurements provided by the balloon borne SUNRISE observatory in June 2009 remained for the reporting period 2011/12 a major data source for the research of the department. 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.

SDO (Solar Dynamics Observatory), a solar mission of NASA launched in 2010, provides continuously data with high spatial resolution over the entire visible solar hemisphere. Of particular relevance for the research of the solar group are the measurements of the solar magnetic field by the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) and the images especially in the EUV range provided by the Atmospheric Imaging Assembly (AIA).



Korona und Übergangszone der Sonne in der Beobachtung bei 171 Å durch SDO/AIA (31. Aug. 2012)

The solar corona and transition region observed at 171 Å by SDO/AIA (Aug. 31, 2012)

©NASA

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

Die im Jahre 1995 und 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 Stereoskopie, realisiert durch zwei identische SECCHI-Instrumente auf den Raumsonden, die Möglichkeit eröffnet, die 3D-Struktur der Sonnenatmosphäre zu ermitteln.

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 suite on both spacecraft.

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.

The Sun-Earth connection is 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.

Arbeitsgruppen der Abteilung

- 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.

Research teams of the solar department

- Coronal Dynamics: The structure and dynamics of the corona

Cool stars like our Sun are surrounded by a one 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.

- 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.

- CSI: Coronal Spectroscopy and Imaging

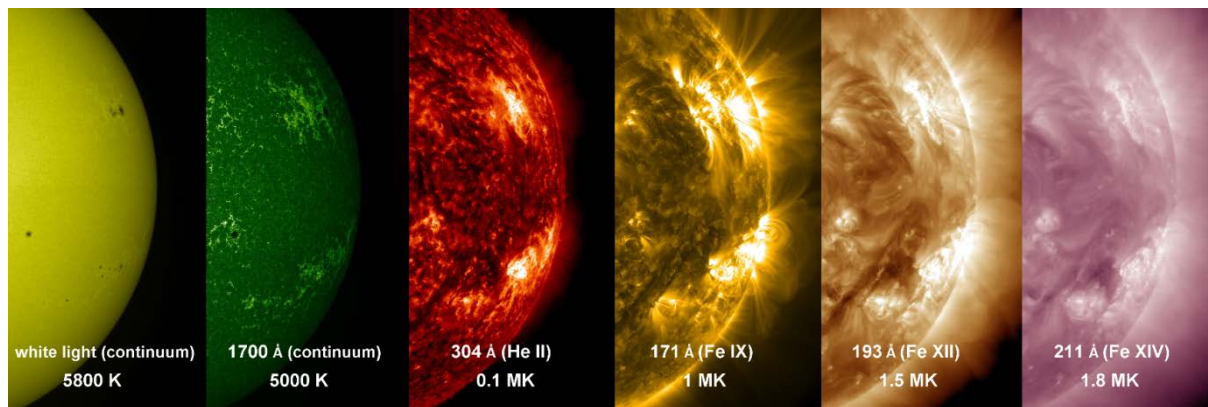
The group studies physical processes in the solar chromosphere, transition region and corona with the help of both, observational techniques and theoretical modeling. The upper solar atmosphere is best observed in the wavelength ranges of the far and extreme ultraviolet and soft X-rays, emissions that 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 unsolved 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.

- 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.

- 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.



Die solare Hemisphäre, beobachtet von SDO/AIA in unterschiedlichen spektralen Bereichen, und die Temperaturen, bei denen diese Linien typisch entstehen.

The solar hemisphere observed by SDO/AIA in different spectral ranges, and the temperatures at which these lines are typically formed.

- SoCo3D: 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 koronale Massenauswürfe verursacht. Die Gruppe hat ausgefeilte Computercodes entwickelt, um auf der Basis nicht-linearer und selbstkonsistenter Extrapolationstechniken mit Hilfe von Stereoskopie und Tomographie das Magnetfeld und das Plasma in der Korona zu modellieren.

- Solar-MHD: Solare und stellare Magnetohydrodynamik

Die Magnetohydrodynamik (MHD) beschreibt die dynamischen Wechselwirkungen zwischen Strömungen und Magnetfeldern in einem stoßdominierten 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 auf Theorie und Modellierung der Sonnenkorona und des Sonnenwindes, mit Schwerpunkt auf Plasmakinetik 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 die Frage der Aufheizung der Korona durch Plasmawellen und kleinskalige magnetische Aktivität. Bei der Erforschung des Sonnenwindes stehen MHD-Turbulenz und Welle-Teilchen-Wechselwirkungen im Mittelpunkt.

- *SoCo3D: 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 tomography.

- *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 research 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.

➤ 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.

➤ TSSSP: Theorie und Simulation der Sonnensystem-Plasmen

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.

Die wichtigsten Instrumenten-Projekte in 2011/12:

Das Ziel von **Sunrise**, einem Sonnenobservatorium, das von einem Ballon in die Stratosphäre getragen wird, 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 Wechselwirkung mit den konvektiven Plasmaströmungen zu untersuchen. 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. Ein erneuter Flug ist in Vorbereitung für das Jahr 2013.

➤ Sun-Climate: Solar variability and climate

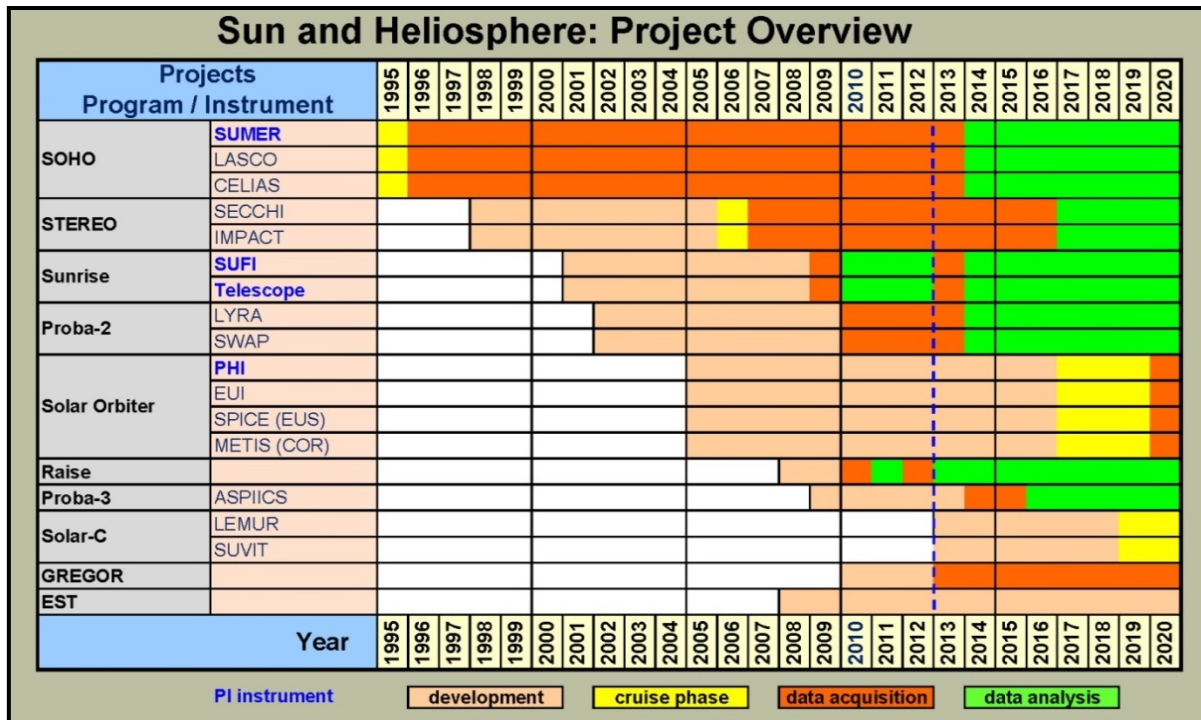
Radiation from the Sun makes Earth a habitable planet. Fluctuations in the solar radiative output are therefore likely to affect the climate on Earth, but establishing both, how the output of the Sun varies and how such variations influence Earth's climate have proved tricky. Increased amounts of data 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.

➤ TSSSP: Theory and Simulation of Solar System Plasma

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.

Major instrument related projects in 2009/10:

Sunrise, a solar observatory carried by a balloon in the stratosphere, 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. June 2009 Sunrise performed successfully its first nearly 5-day science flight, starting from Esrange, Sweden and ending on Somerset Island, Canada. A re-flight is under preparation for 2013.



Die wesentlichen Instrumentenprojekte der Sonnengruppe in 2011/12

The major instrument related project of the solar group in 2011/12

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 wissenschaftlichen Instrumente und wurde ausgewählt, um zu vier Instrumenten wesentliche Beiträge zu liefern: PHI (Polarimetric and Helioseismic Imager; MPS ist Principal Investigator), EUI (Extreme-Ultraviolet Imager, Co-PI-Beteiligung), EUS (Extreme Ultraviolet Imaging Spectrograph, Co-PI-Beteiligung), und METIS (Koronagraph, Co-PI-Beteiligung). Der Start dieser ersten medium-class (M1) Mission im Rahmen des Cosmic Vision Programms der ESA ist für 2017 vorgesehen.

Die NASA-Mission **STEREO** (Solar TERrestrial RELations Observatory), 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 inzwischen bis Ende 2016 verlängert.

SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) 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).

*ESA's **Solar Orbiter** will comprehensively cover the magnetic coupling from the photosphere 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). Launch of this first medium-class (M1) mission within ESA's Cosmic Vision program is scheduled for 2017.*

***STEREO** (Solar TERrestrial RELations Observatory) 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. Meanwhile the data acquisition phase of the mission has been extended up to end 2016.*

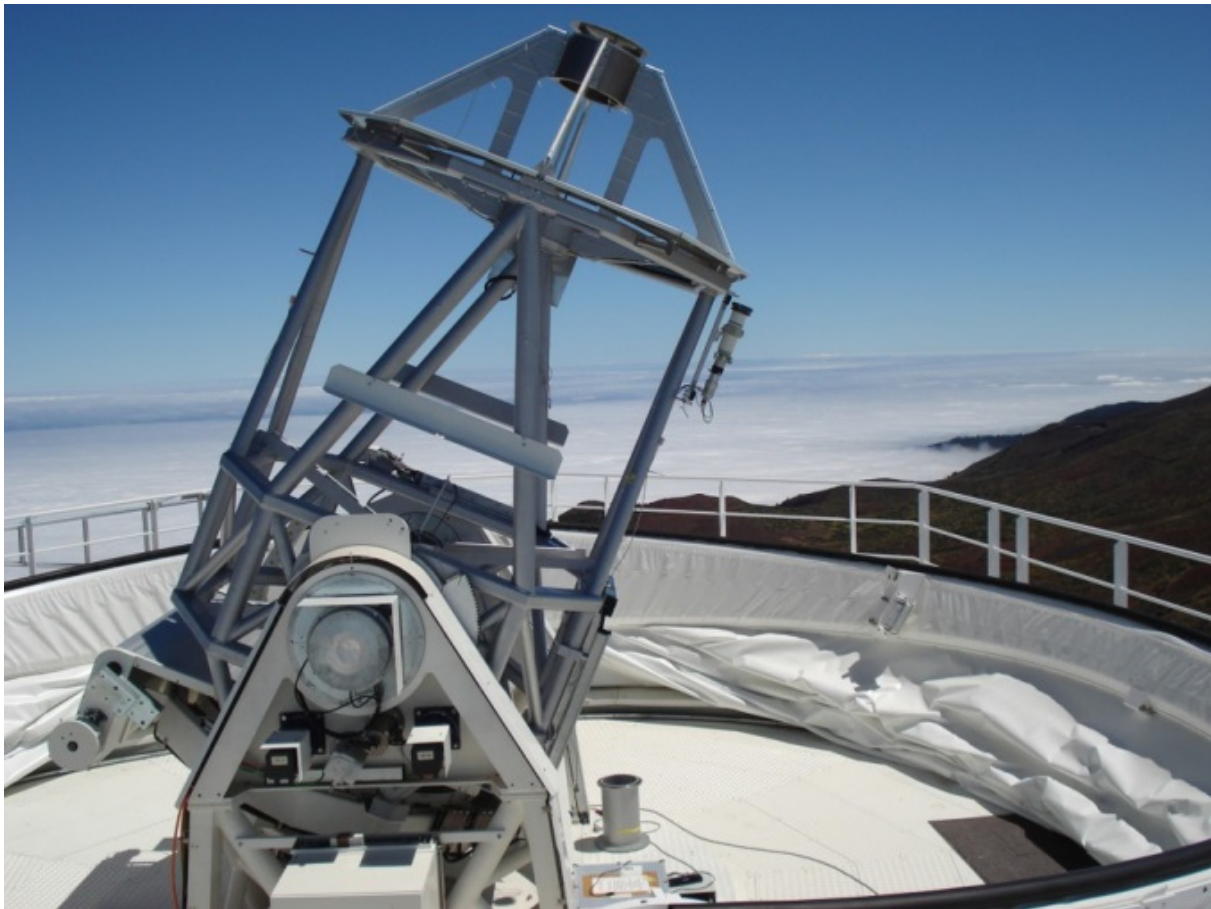
***SOHO** (Solar and Heliospheric Observatory), a joint ESA/NASA mission, was launched at the end of 1995 and is designed to study the internal structure of the Sun, its extensive outer atmosphere and the origin of the solar wind. MPS was PI (Principal Investigator) institute for the SUMER instrument (UV spectrometer) and has significantly contributed to the LASCO Coronagraph (Co-PI ship). Being in continuous*

SOHO arbeitet ununterbrochen seit mehr als 15 Jahren und ist vermutlich die wissenschaftlich erfolgreichste Sonnenmission aller Zeiten. Die Messphase wurde inzwischen bis Ende 2013 verlängert.

Unter Führung der japanischen Weltraumagentur JAXA wird mit **SOLAR-C** die nächste große Sonnenmission (nach Solar Orbiter) vorbereitet. Der Start ist im Zeitraum 2019/20 vorgesehen. Das MPS strebt an, eine führende Rolle bei der Entwicklung eines hochauflösenden VUV-Spektrometers (LEMUR), das auf einem Vorschlag des Instituts basiert, zu übernehmen, und sich an einem weiteren zentralen Instrument, dem Solar UV-Visible-IR Telescope (SUVIT), zu beteiligen.

operation for now more than 15 years SOHO is probably the most successful solar mission ever. Meanwhile the data acquisition phase of the mission has been extended up to end 2013.

*The next major solar mission (after Solar Orbiter), **Solar-C**, led by the Japanese space agency JAXA, is currently being defined. Launch is foreseen for 2019/20 time range. MPS seeks for a leading role at the development of a high-resolution VUV spectrometer (LEMUR), based on a proposal of the institute, and intends to contribute to another central instrument, the Solar UV-Visible-IR Telescope (SUVIT).*



GREGOR, ein 1,5-m-Sonnenteleskop auf Teneriffa, wurde im Mai 2012 eingeweiht.

GREGOR, a 1.5 m solar telescope on Tenerife, was inaugurated in May 2012.

GREGOR ist ein 1,5 m-Sonnenteleskop, das zusammen mit dem Kiepenheuer-Institut für Sonnenforschung in Freiburg, das die Führung bei dem Projekt hat, und dem Astrophysikalischen Institut Potsdam in den letzten Jahren auf Teneriffa errichtet wurde und Beobachtungen der solaren Atmosphäre mit sehr hoher Auflösung erlauben wird. Im Mai 2012 wurde Gregor offiziell eingeweiht.

***GREGOR**, a 1.5m solar telescope, constructed in the last years on Tenerife in collaboration with Kiepenheuer-Institut für Sonnenforschung (Freiburg), which is leading the project, and Astrophysikalisches Institut Potsdam, will allow ground based observations of the solar atmosphere with high resolution. The official inauguration was in May 2012.*

Ausgewählte Ergebnisse der Sonnengruppe in 2011/2012

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 Eindruck von der Bandbreite der Forschung in der Abteilung, liefern aber sicher keinen auch nur annähernd vollständigen Überblick über die Arbeiten der Gruppe.

1.3.2 Plasmaschauer auf der Sonne

Am 7. Juni 2011 schleuderte eine außergewöhnliche Eruption, verbunden mit einem mittelgroßen Flare, eine dichte Plasmawolke in die Korona, die äußere, heiße Atmosphäre der Sonne. Die starken Gravitationskräfte der Sonne zogen den größten Teil der Plasmawolke wieder auf die Sonnenoberfläche zurück. An der Frontseite der herabstürzenden Plasmamassen entwickelten sich quasi-reguläre Finger- und Bogenstrukturen wie sie sich ähnlich auch beim Aufschlag eines Tropfens auf der Wasseroberfläche ausbilden. Eine nähere Untersuchung (Innes et al, AA 2012) zeigte, dass auch die Physik in beiden Prozessen sich nicht unähnlich ist. Beiden liegt der gleiche fluid-dynamische Prozess, die Rayleigh-Taylor Instabilität, zugrunde. Diese Instabilität kann sich an der Grenzschicht zwischen zwei Flüssigkeiten unterschiedlicher Massendichte entwickeln, wenn das System einer Beschleunigung senkrecht zur Grenzfläche ausgesetzt ist. Die dichtere Flüssigkeit dringt dann in Form von fingerähnlichen Gebilden in die dünnere ein. Während Form und Abstand der Finger beim Tropfenaufschlag durch die Oberflächenspannung der Flüssigkeit beeinflusst werden, werden sie im magnetisierten Plasma von der Stärke und Ausrichtung des Magnetfeldes mitbestimmt.

Die Beobachtungen dieser Eruption wurden mit dem Atmospheric Imaging Instrument (AIA) auf dem Satelliten Solar Dynamics Observatory (SDO) gemacht, der 2010 gestartet wurde. Dieses Teleskop erzeugt Bilder der Sonne durch verschiedene Wellenlängenfilter mit einer Auflösung von etwa 100 km auf der Sonnenoberfläche und in Zeitabständen von 10 s. Die Filter sind auf EUV Wellenlängen abgestimmt, die elektronischen Übergängen in verschiedenen Ionen entsprechen, welche im thermodynamischen Gleichgewicht bei bestimmten Temperaturen besonders stark angeregt werden. Aus dem Vergleich der Bilder verschiedener Filter ist so eine Temperaturschätzung der Emissionsquelle möglich. Bilder der Eruption in den Filtern der Wellenlängen 211 Å und 304 Å sind in Abb. 1 wiedergegeben.

Selected results of the solar group in 2011/2012

Some of the research areas and the results of the solar group in the reporting period will be presented in the following chapters. They provide an impression of the spectrum of research pursued in this department but are far off from giving a complete survey of the group's work.

1.3.2 Splashdown on the Sun

A spectacular eruption on 7 June 2011 combined with a flare threw clouds of plasma (charged ions and electrons and neutral atoms) into the solar corona, the hot outer solar atmosphere. In this particular eruption the gravitational force of the Sun drew large quantities of plasma back to the surface. As the plasma fell, its leading edge developed a semi-regular finger and arc structure that looked like the rim of a splash. Our analysis (Innes et al, 2012) shows that the underlying physics behind both the falling solar plasma and liquid splashes is the same. Both result from a common fluid-dynamics phenomenon known as the Rayleigh-Taylor instability. This instability occurs at the interface between two fluids (liquids, gases or plasmas) of different densities when one fluid is accelerated into the other and produces long fingers of dense fluid separated by arcs of lighter fluid. In plasmas, the separation between the fingers is controlled by the magnetic field, whereas in liquid splashes, surface tension is the critical parameter.

The observations of the eruption were made with the Atmospheric Imaging Instrument (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO) which was launched in February 2010. SDO obtains images of the Sun through several filters with a spatial and temporal resolution of about 1000 km and 10 s, respectively. Each filter is designed to detect light emitted from different ions which form at a specific temperature. Thus by analyzing images from multiple filters, we are able to deduce the temperature structure in the solar plasma. Images of the eruption taken through the filters at wavelengths of 211 Å and 304 Å are shown in Fig. 1.

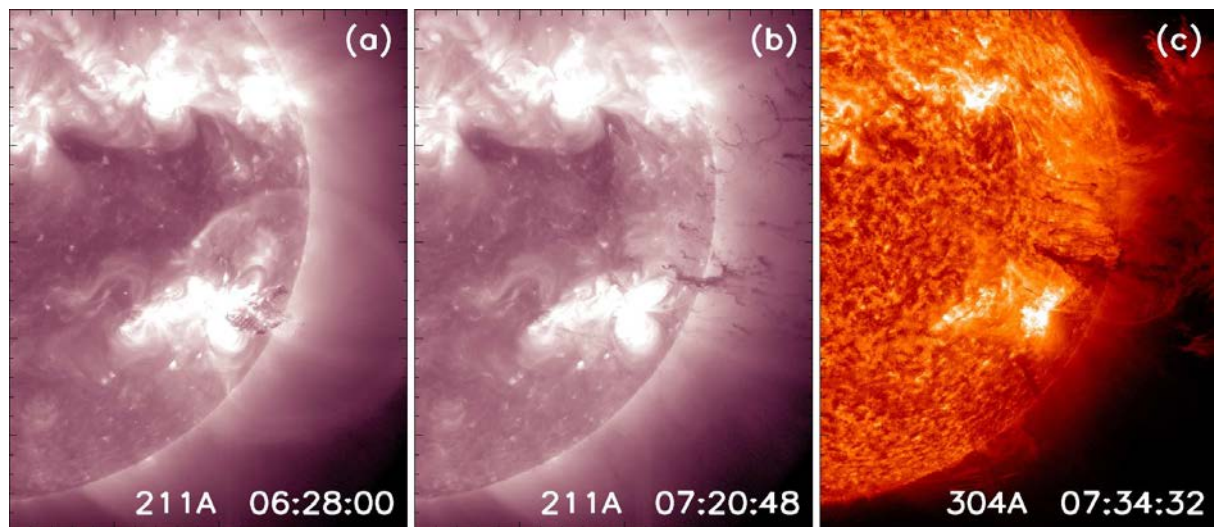


Abb. 1 Bilder der Eruption vom 7. Juni 2011, aufgenommen von der Raumsonde SDO im EUV-Licht der Wellenlängen 211 Å und 304 Å. Der 211-Å-Filter ist für die Emission von etwa 2×10^6 K heißem Plasma empfindlich. Die dunklen Strukturen in der Korona in Abb. b entstehen durch die Absorption der Hintergrundstrahlung durch neutralen Wasserstoff und Helium in der kalten, dichten Plasmawolke. Der 304-Å-Filter detektiert dagegen die Emission von kühlerem Plasma von etwa 5×10^4 K.

Fig. 1 Images of a solar eruption on 2011 June 7 taken by SDO through 211 Å and 304 Å filters. The 211 Å filter singles out emission from the hot, 2×10^6 K, flare heated plasma. The dark structures in the corona in Panel b are caused by the absorption of background coronal emission by neutral hydrogen and helium atoms in the cold, dense falling plasma. The 304 Å filter detects emission from the cooler 5×10^4 K plasma.

Die 211-Å-Bilder (Abb. 1a und b) zeigen die heißen Strukturen in der Sonnenkorona im Licht einer von 13-fach ionisierten Eisenionen (FeXIV) emittierten Spektrallinie. Der 304-Å-Filter ist dagegen empfindlich für die Emission von kühleren, einfach ionisierten Heliumionen, He II. Da die EUV Strahlung von neutralen Atomen absorbiert wird, erscheinen kühle Strukturen im Vordergrund dunkel gegen das helle Licht der EUV Korona.

Die Eruption am 7. Juni 2011 begann mit der Aussendung eines Flares und einer sich schnell ausbreitenden Schockwelle von dem gleichen Ort mit einer heißen, halbkugelförmigen Wellenfront (Abb. 1a). Danach folgte der Auswurf einer gewaltigen kalten und dichten Plasmawolke. Ein großer Teil der Wolke wurde bis in den interplanetaren Raum hinausgeschleudert, wo sich er als koronaler Massenauswurf weiter ausbreitete. Jedoch fiel auch ein ungewöhnlich großer Massenanteil der Wolke wieder auf die Sonnenoberfläche zurück. Im Licht des 211-Å-Filter (Abb. 1 b) können nur die dichtesten Anteile des herabstürzenden Plasmas als eine dunkle Linie gesehen werden, die die vordere Kante der fingerförmig deformierten Grenzfläche markiert. Die Strukturen diese Grenzfläche sind sehr viel eindrucksvoller durch den 304 Å Filter zu sehen (Abb. 1 c).

The 211 Å images (Fig. 1 a, b) reveal the structure of the hot coronal plasma, as seen in the light of a spectral line of highly ionized iron, Fe XIV. The 304 Å filter (Fig. 1 c) is tuned to detect emission from cooler, singly-ionized helium ions, He II. Because extreme ultraviolet (EUV) radiation is absorbed by neutral atoms, cold foreground structures show up dark against the bright EUV corona.

The solar eruption on 7 June 2011 started with the formation of a hot, dome-shaped wave propagating from the flare site (Fig. 1 a). This was followed by the ejection of a large cloud of cold, dense plasma. The bulk of the plasma continued into interplanetary space as a coronal mass ejection but an unusually large amount of plasma fell back to the Sun. In the 211 Å image (Fig. 1 b) only the very densest parts of the falling plasma can be seen as a dark line tracing out the rim of the splash. The splash is much more impressive in the 304 Å image (Fig. 1 c).

Wir haben den Abstand zwischen den Fingern gemessen und die Daten genutzt, um die charakteristische Wellengeschwindigkeit des Mediums (Alfvén-Geschwindigkeit) zu bestimmen. Diese Geschwindigkeit beträgt nur 50 km/s und stimmt mit der Magnetfeldstärke und der Plasmadichte überein, die man in der eruptierten Plasmawolke erwarten kann. Dieses Ergebnis bestätigt die Vermutung, dass die fingerförmigen Strukturen durch die Rayleigh-Taylor-Instabilität entstanden sind.

We have used the spacing between the dark fingers to estimate the characteristic wave speed (Alfvén speed) in the dense plasma, based on the growth rate of the Rayleigh-Taylor instability. The derived speed is about 50 km/s which is consistent with the magnetic field strength and densities expected in the erupting plasma. This is important confirmation that the observed splash-like structure is a result of the Rayleigh-Taylor instability.

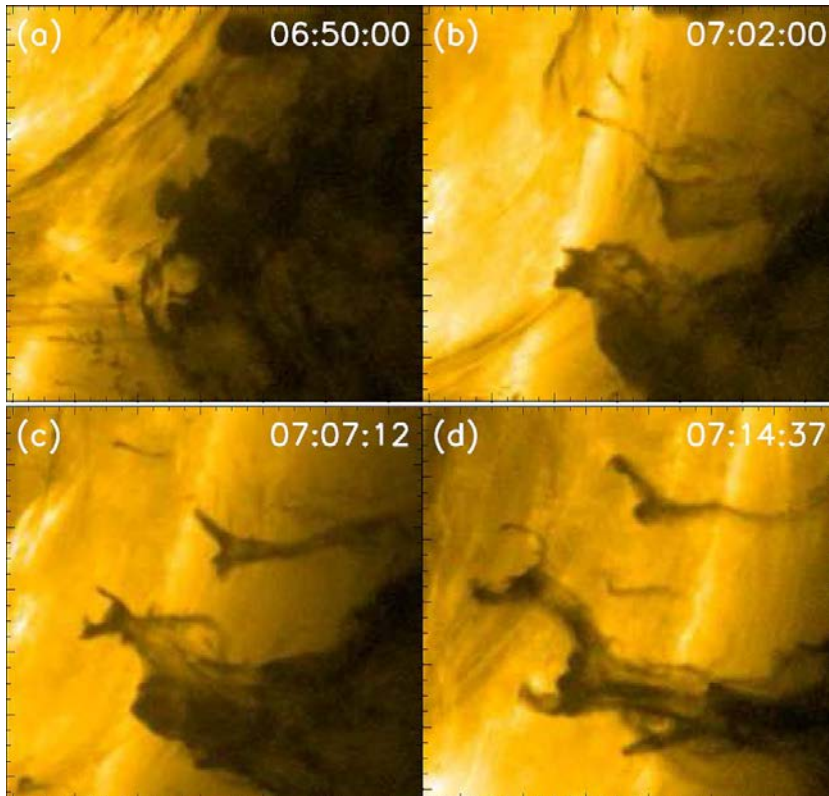


Abb. 2 Entwicklung der Rayleigh-Taylor Finger an der Vorderfront der herabfallenden Plasmawolke. Das Anwachsen der kalten, dichten Finger F1 und F2 kann in den 171-Å-Bildern des SDO Teleskops verfolgt werden. Die Emission bei 171 Å wird von hoch ionisierten Eisenionen Fe IX emittiert.

Fig. 2 Development of Rayleigh-Taylor fingers in falling plasma. The growth of the cold, dense fingers, F1 and F2, can be tracked in these images taken by SDO through the 171 Å filter which is tuned to detect emission from a highly ionized iron ion, Fe IX.

Ein einzigartiger Aspekt dieser Beobachtungen ist die Möglichkeit, Wachstum und Entwicklung der Rayleigh-Taylor Instabilität im Weltraum studieren zu können. Abb. 2 zeigt mehrere typische Beispiele. Während das dichte Plasma auf die Sonne zurück fällt, bilden sich an der Frontseite zunächst kleinräumige Irregularitäten, die dann zu dichten Tropfen, eingebettet in Taschen aus dünnem koronalem Plasma, heranwachsen. Diese Taschen wachsen fünfmal schneller als unter vergleichbaren Bedingungen im Labor.

A unique aspect of our study is the growth and evolution of the Rayleigh-Taylor fingers and arcs in a space environment. Fig. 2 shows several typical examples. As the dense plasma falls towards the Sun, small-scale irregularities in the plasma grow into sunward-moving, dense clumps separated by expanding arcs. The arcs were found to expand five times faster than has been measured in similarly-scaled laboratory experiments.

Diese überraschende Tatsache könnte mit dem starken Dichtegradient und einer starken Kopplung der Instabilität mit dem Sonnenwind (ein Plasmastrom von der Sonne in den interplanetaren Raum) zusammenhängen. Diese Deformation der Plasmotropfen in lang gezogene Finger konnte so noch nirgendwo beobachtet werden. Die Frontseite der Tropfen bildet gabelförmige Auswüchse, die sich weiter zu dünnen Plasmafäden ausdehnen und schließlich in vielen Fällen von der Plasmafront abreißen.

This is surprising but may be explained by the large density gradients and/or strong coupling between the solar wind (a stream of charged particles flowing outward from the Sun) and falling plasma. The evolution of the plasma clumps into long fingers had also not been seen previously. Instead of staying compact like a droplet, the leading edges of the clumps develop prong-like structures at their heads. The prongs continue to expand and in many cases were seen to reconnect and break-off forming thin filaments.

Diese Beobachtungen lassen durch ihre Formenvielfalt an der Plasmafront die komplexe Dynamik der Rayleigh-Taylor Instabilität erahnen. Die gleiche Instabilität liegt vielen anderen komplex geformten Fronten zugrunde, die auf verschiedensten Skalen beobachtet werden, von kleinräumigen Jets im Labor bis zu Nebelfronten in den Überresten von Supernovae und an der Oberfläche von Blasen in Galaxienclustern. Bei diesen galaktischen und extra-galaktischen Beispielen ist die Anwachszeit der Instabilität viel zu lang, um ihre Entwicklung beobachten zu können. In dem von uns beobachteten Beispiel in der Sonnenkorona konnten wir dagegen die Entwicklung auf der Zeitskala von einigen Stunden gut untersuchen. Wir glauben, dass unsere Ergebnisse auch Schlussfolgerungen auf galaktische Skalen zulassen und relevant sind für die Strukturierung galaktischer Nebelhüllen von Supernovae wie sie im Crab und Vela-Nebel beobachtet werden.

Observations of this splash have shown that the Rayleigh-Taylor instability in plasma leads to a rich variety of complex dynamics. This same instability lies behind many of the intricate structures seen in the universe, ranging in scale from small laboratory jets to supernova remnants and galactic clusters. In galactic and extra-galactic phenomena, however, the evolution time is too long to observe structural changes caused by the instability. This solar splash allows us to investigate the effects of the Rayleigh-Taylor instability on the evolution of plasma in space and thus gives new insights into the creation of some of the best known galactic nebula, like the Crab and Vela supernova remnants, as well as the large voids seen in galactic clusters.

Ausgewählte Veröffentlichungen

Selected publications

J. A. Araneda, E. Marsch, and A. F.-Viñas, Proton core heating and beam formation via parametrically unstable Alfvén-cyclotron waves, *Physical Review Letters*, vol. 100, issue 12 125003, 2008, doi: 10.1103/PhysRevLett.100.125003.

J. A. Araneda, Y. Maneva, and E. Marsch, Preferential heating and acceleration of alpha particles by Alfvén-cyclotron waves, *Physical Review Letters*, 102, 175001, 2009, doi: 10.1103/PhysRevLett.102.175001.

S. Bourouaine, E. Marsch, and F. M. Neubauer, Correlations between the proton temperature anisotropy and transverse high-frequency waves in the solar wind, *Geophysical Research Letters*, vol. 37, L14104, 2010, doi: 10.1029/2010GL043697.

S. Bourouaine, E. Marsch, and F. M. Neubauer, On the Relative Speed and Temperature Ratio of Solar Wind Alpha Particles and Protons: Collisions versus Wave Effects. *Astrophysical Journal Letters*, vol. 728, L3–L7, 2011, doi: 10.1088/2041-8205/728/1/L3.

1.3.3 Ist der magnetische Fluss der ruhigen Sonne an den Sonnenzyklus gebunden?

Die Sonnenoberfläche beherbergt Strukturen die man Sonnenflecken nennt. Die Anzahl der Sonnenflecken auf der Oberfläche variiert in einem 11-jährigen Zyklus. Über diesen Zeitraum variiert die Sonnenoberfläche von einem Zustand, der fast frei von Sonnenflecken ist, auch solares Minimum genannt, zu einem mit einer hohen Anzahl von Flecken, auch solares Maximum genannt, bevor wieder ein neues solares Minimum erreicht wird.

Mit Hilfe des Zeeman Effekts, (der die Aufspaltung von Spektrallinien in Subkomponenten unter dem Einfluss eines externen Magnetfelds beschreibt), können wir Sonnenflecken als eine Konzentration von starken magnetischen Feldern mit einer Größenordnung von rund 3000 G verstehen. Dies,

1.3.3 Does the Quiet Sun Magnetic Flux Change with the Solar Cycle?

The solar surface harbors structures known as sunspots. The number of sunspots on the solar surface is not constant, but varies on a time scale of 11 years. During this 11-year solar cycle the sun starts from a state of having almost no sunspots, called a solar minimum, to one with lots of sunspots, called a solar maximum, before returning to another solar minimum.

With the help of the Zeeman effect (i. e. the splitting of a spectral line into sub components under the influence of an external magnetic field) we can associate sunspots with intense magnetic fields on the order of 3000 G. Together with the varying number of sunspots on the solar surface we can surmise that the

zusammen mit der immer variierenden Anzahl der Sonnenflecken auf der Sonnenoberfläche, lässt auf einen Dynamoprozess innerhalb der Sonne schließen, der als Quelle der gemessenen magnetischen Felder dient.

Sun must harbor a dynamo mechanism, which generates the observed magnetic fields.

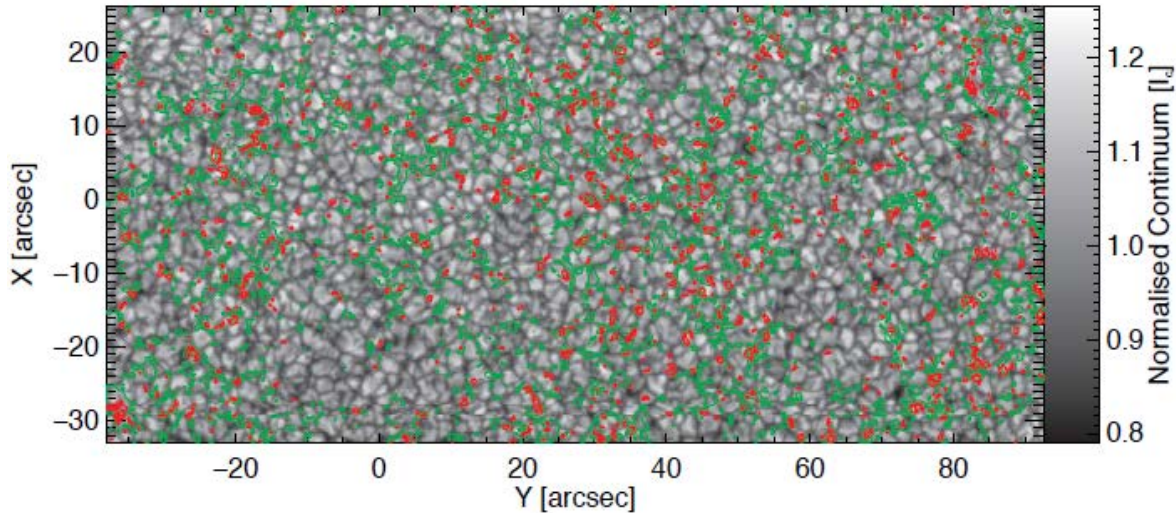


Abb. 3 Ruhige Sonne Bild aufgenommen vom Spektrographen des Hinode-Satelliten. Die grünen Konturlinien umfassen Bereiche mit stark zirkular polarisiertem Licht, die roten Konturlinien zeigen linear polarisierte Bereiche.

Fig. 3 Quiet Sun continuum image observed by the Hinode spectrograph. The green contours show areas of strongly circular polarized light and red contours indicate places of significant linear polarization.

Der Spektrograph an Bord des Hinode Satelliten erreicht eine räumliche Auflösung von 0,3 Bogensekunden. Mit dieser räumlichen Auflösung und den stabilen Beobachtungsbedingungen ist es nicht nur möglich, die Feinstruktur von Sonnenflecken zu studieren, sondern auch die kleinsten magnetischen Strukturen zu untersuchen. Diese kleinen magnetischen Strukturen verursachen keine Verdunkelung der Sonnenoberfläche, wie es für Sonnenflecken charakteristisch ist. Aus diesem Grund können solch kleine Strukturen nur mit Hilfe eines Polarimeters, der die zirkulare und lineare Polarisation des Lichtes der Struktur misst, studiert werden. Der Spektrograph des Hinode-Satelliten ist fähig, alle Polarisationszustände des Sonnenlichts zu messen.

The spectrograph aboard the Hinode satellite is capable of resolving features down to 0.3 arcseconds. With this angular resolution and the stable seeing conditions, it is not only possible to study sunspots in detail, but also examine some of the smallest magnetic features on the solar surface. These small magnetic features do not produce a characteristic darkening of the solar surface as sunspots do. For this reason the magnetic field of these features can only be analyzed with help of a polarimeter that measures the linear and circular polarized light emitted from such a feature. The spectrograph aboard Hinode can measure all states of polarized light received from the Sun.

Abb. 3 zeigt ein typisches Bild der ruhigen Sonne gemessen mit dem Hinode Spektrographen. Einfach zu sehen ist das Muster der hellen Granulen, (Gegenden mit heißem aufsteigendem Plasma), und der kalten und dunklen intergranularen Linien, welches charakteristisch ist für Gebiete der Sonne mit schwachen magnetischen Feldern. Die grünen Konturlinien in Abb. 3 umfassen Gebiete mit starker Zirkularpolarisation, die wiederum ein Indiz für vertikal zur Oberfläche orientierte Magnetfelder ist. Abb. 3 zeigt, dass

A typical image of the quiet Sun obtained by the Hinode spectrograph can be seen in Fig. 3. The pattern of bright granules (i. e. areas of hot rising plasma) and cool, dark intergranular lanes can be easily identified and is common for regions on the Sun associated with weak magnetic fields. The green contours in Fig. 3 encompass areas with strong circular polarization signals, which indicate magnetic fields vertical to the solar surface. Fig. 3 shows that these magnetic fields are found predominantly in intergranular lanes. The

diese Felder hauptsächlich in intergranularen Linien zu finden sind. Dagegen stellen die roten Konturlinien Stellen mit Magnetfeldern dar, die linear polarisiertes Licht abstrahlen. An diesen Stellen ist das Magnetfeld parallel zur Oberfläche orientiert und befindet sich bevorzugt am Rande von Granulen.

Abb. 3 belegt, dass selbst in der ruhigen Sonne eine Vielzahl magnetischen Feldern vorhanden sind, wenn auch sehr viel schwächere im Vergleich zu Sonnenflecken. Dies wiederum wirft die Frage nach der Quelle dieser Felder auf. Sind sie Teil des globalen Dynamos, der auch die Sonnenflecken verursacht, oder sind sie das Resultat eines turbulenten Dynamo Prozesses, der vor Ort auftritt und vom globalen Dynamo unabhängig ist? Eine Kombination dieser beiden Mechanismen ist natürlich auch denkbar. Frühere Studien, die sowohl Resultate von Simulationen als auch Beobachtungen verwendeten, haben gezeigt, dass ein turbulenter Dynamoprozess kurz unter der Sonnenoberfläche prinzipiell möglich ist. Aber selbst wenn es einen solchen Dynamo auf der Sonne gäbe, könnte der vom ihm produzierte magnetische Fluss immer noch um vieles geringer sein, als der des globalen Dynamos, selbst in der ruhigen Sonne.

Von November 2006 bis Mai 2012 haben wir 72 Bilder der ruhigen Sonne des Hinodespektrographen untersucht, um herauszufinden, ob der magnetische Fluss in der ruhigen Sonne vom Sonnenfleckenzyklus abhängt. Diese Zeitspanne beinhaltet sowohl das Ende des 23. als auch den Anfang des 24. Zyklus. Wie bei jeder Langzeitstudie ist die Überwachung der Prozesse innerhalb des Messinstrumentes genauso wichtig wie die eigentliche Analyse der Daten. Während der sechsjährigen Zeitspanne dieser Studie unterlag der Hinode-Satellit Temperaturschwankungen, die die Leistung des Spektrographen beeinträchtigten. Die Temperaturschwankungen verursachten eine kleine Defokussierung in den aufgenommenen Bildern, die wiederum großen Einfluss auf die gemessenen Polarisations-signale hatte. Diese Veränderung in den Polarisations-signalen wurde durch eine nachträgliche künstliche Defokussierung der Bilder kompensiert.

Nachdem alle instrumentellen Effekte in den Polarisations-signalen entfernt wurden, zeigten sowohl die Zirkular- als auch Linearpolarisation keine zeitliche Abhängigkeit mehr. Dieses Resultat suggeriert, dass der magnetische Fluss in der ruhigen Sonne unabhängig vom Sonnenfleckenzyklus ist, was wiederum die Theorie eines lokalen turbulenten Dynamoprozesses kurz unter der Sonnenoberfläche unterstützt.

Zukünftige Studien werden darauf zielen, die Zeitspanne der Studie zu erweitern. Da diese Studie einen Zeitrahmen von nicht einmal einem Sonnenfleckenzyklus untersucht, ist es dennoch möglich, dass sich der magnetische Fluss der ruhigen Sonne über längere Zeiträume verändert. Es ist jedoch anzumerken, dass

red contour lines on the other hand display the position of magnetic fields containing magnetic fields with linear polarized light. These are the locations of magnetic fields orientated parallel to the solar surface and are found preferentially near the edges of granules.

Fig. 3 demonstrates that even the quiet Sun contains copious amounts of magnetic fields, albeit far weaker than sunspots. This has put forth the question of the origin of these weak fields. Are they produced by the global solar dynamo responsible for generating the sunspots or are they the result of a turbulent dynamo mechanism that operates locally and is independent of the global dynamo? A combination of the two effects is of course also conceivable. Previous studies, using both simulations and observations, have shown that a turbulent dynamo mechanism can exist near the solar surface. However, even given the potential existence of such a dynamo, the magnetic flux generated by it could be outweighed by flux produced by the global dynamo even in the quiet Sun.

We analyzed 72 scans of the quiet Sun taken by the Hinode spectrograph starting in November 2006 until May 2012 to answer the question if the quiet Sun magnetic flux has a solar cycle dependence. This period stretches across the end of cycle 23 to the beginning of cycle 24. As with any long-term study, monitoring the changes in the instrument is as important as analyzing the data itself and this study was no different. Over the six years covered by this study the Hinode satellite suffered temperature fluctuations, which in turn adversely affected the performance of the spectrograph. These variations in temperature caused a slight defocus in the recorded scans, which had a significant effect on the strengths of the measured polarization signals. This artificial change in the measured polarization signal was compensated for by degrading each scan with an appropriate artificial defocus.

After removing all instrument-related degradations affecting the measured polarization signals, both the linear and circular polarization showed no temporal variation. This result indicates that the quiet Sun magnetic flux is independent of the solar cycle, which in turn supports the scenario where an independent local dynamo operates close to the solar surface.

Future investigations will aim at extending the time period covered by this study. Considering that this study did not even cover a full solar cycle, it is conceivable that a variation of the quiet Sun magnetic flux across solar cycles is nonetheless possible. However, it is important to note that an independent

ein lokaler Dynamo selbst dann arbeiten kann, wenn der globale Dynamo inaktiv oder schwächer ist, so wie es während des Maunder Minimums (eine 70-jährige Periode im 17. Jahrhundert, in der keine Sonnenflecken beobachtet wurden.) der Fall war. Das bedeutet, dass selbst in Zeiten verminderter solarer Aktivität die Sonnenoberfläche nicht frei von magnetischen Feldern wäre

local solar dynamo can operate even when the global dynamo is inactive or weakened, as was the case during the Maunder minimum (a 70-year period in the 17th century when no sunspots were observed). This suggests that even during times of low solar activity the solar surface would not be devoid of magnetic fields.

Ausgewählte Veröffentlichungen

Selected Publications

D. Bühler, A. Lagg, S. K. Solanki, Quiet Sun magnetic fields observed by Hinode: Support for a local dynamo, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 555, id A33, 2013, doi: 10.1051/0004-6361/201321152

M. Schüssler, A. Vögler, Strong horizontal photospheric magnetic field in a surface dynamo simulation, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 481, no. 1, L5-L8, 2008, doi: 10.1051/0004-6361:20078998

S. Danilovic, M. Schüssler, S. K. Solanki, Probing quiet Sun magnetism using MURaM simulations and Hinode/SP results: support for a local dynamo, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 513, id A1, 2010, doi: 10.1051/0004-6361/200913379

R. Ishikawa, S. Tsuneta, Comparison of transient horizontal magnetic fields in a plage region and in the quiet Sun, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 495, Issue 2, 2009, pp. 607 - 612, 2009, doi: 10.1051/0004-6361:200810636

H. Ito, S. Tsuneta et al., Is the Polar Region Different from the Quiet Region of the Sun?, Volume 719, Issue 1, pp. 131 – 142, 2010, doi: 10.1088/0004-637X/719/1/131

1.3.4 Magnetfeld und Energie der Sonnenkorona

Das Magnetfeld der Sonne wird in ihrem Inneren durch einen Dynamomechanismus erzeugt. Dieser Mechanismus erhält ein Magnetfeld durch elektrische Ströme aufrecht, welche ihrerseits durch Bewegungen des Plasmas induziert werden. Magnetischer Auftrieb bewirkt, dass Bündel starken Magnetfeldes zur sichtbaren Sonnenoberfläche (die Photosphäre) aufsteigen. Sie treten dann in Form von großen Bögen durch die Photosphäre durch und dehnen sich in die äußere Atmosphäre der Sonne (die Korona) aus.

Die Dynamik der Korona wird vornehmlich durch das Magnetfeld bestimmt in dem das koronale Plasma eingebettet ist. Warum dies so ist, wird klar, wenn man den Druck, den das Plasma und das Magnetfeld ausüben, gegenüberstellt. Der Plasmadruck skaliert mit der Anzahl der Teilchen und der Temperatur. Der Magnetfelddruck dagegen ist proportional zur Stärke des Magnetfeldes. Zwar ist die Temperatur des koronalen Plasmas sehr hoch (etwa 1 Million Kelvin), dessen Dichte jedoch sehr gering (nur etwa 10^9 Teilchen pro m^3 , d. h. etwa 10^{-11} kg/m^3). Die mittlere Stärke des Magnetfeldes beträgt dort etwa 0.001 Tesla. Diese Werte besagen, dass der Druck des Magnetfeldes rund 100 Mal größer ist als der des Plasmas. Dies hat

1.3.4 Magnetic Field and Energy of the Solar Corona

The solar magnetic field is generated by the action of a hydromagnetic dynamo in the solar interior. This mechanism sustains a magnetic field by electric currents which are induced by plasma motions. Magnetic buoyancy causes bundles of strong magnetic field to rise towards the visible solar surface (the photosphere). These bundles then emerge through the photosphere and expand into the outer atmosphere of the Sun (the corona) in form of arcades.

The coronal dynamics are mainly determined by the magnetic field in which the coronal plasma is embedded. This is evident if one compares the pressure which is exerted by the plasma and the magnetic field. The plasma pressure scales with the plasma density and temperature. The magnetic pressure is proportional to the square of the magnetic field strength. The temperature of the coronal plasma is very high (on the order of 1 million Kelvin) but its density is very low (only about 10^9 particles per m^3 , i.e., about 10^{-11} kg/m^3). The average field strength in the corona is approximately 0.001 Tesla. Using these values one finds that the magnetic pressure is about 100 times stronger than the plasma pressure.

zur Folge, dass das Plasma durch das stärkere Magnetfeldes beeinflusst wird. Das koronale Plasma, das Strahlung unterschiedlicher Wellenlängen abgibt, erlaubt es daher, diese Bögen indirekt zu beobachten (siehe Hintergrund in Abb. 4).

Consequently, in the solar corona the plasma is caught by the influence of the dominating magnetic field. Since the coronal plasma emits radiation at various wavelengths this radiation outlines the magnetic field lines and we can indirectly observe the magnetic arcades (see background in Fig. 4).

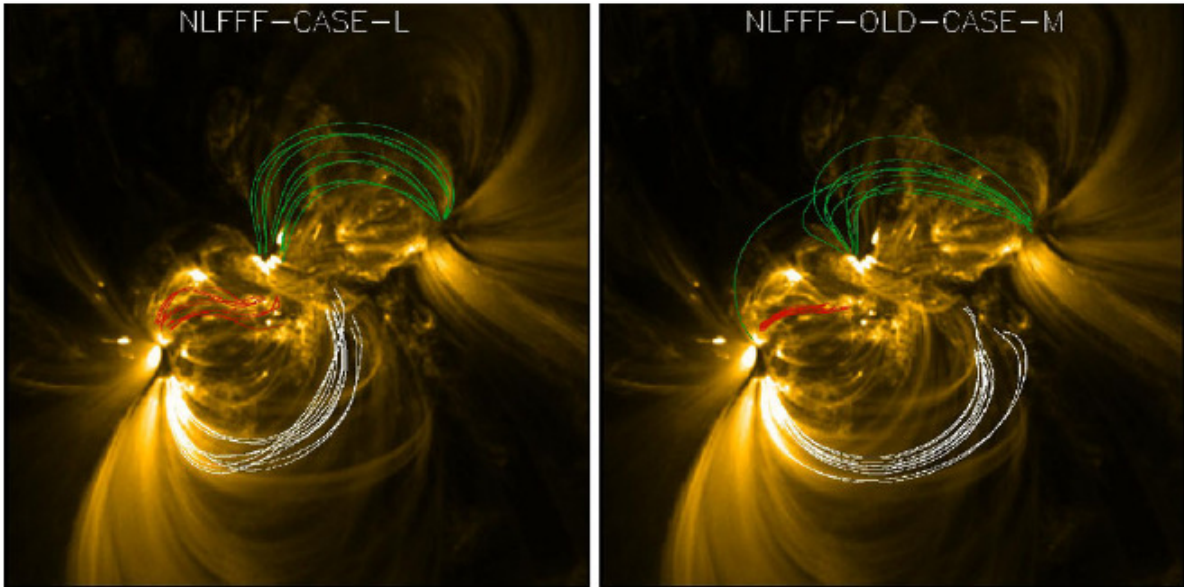


Abb. 4 Magnetfeldlinien, errechnet mit einem optimierten (links) und einem nicht-optimierten (rechts) nichtlinear kraftfreien Computerprogramm. Rote, weiße und grüne Linien zeichnen flache, verdrehte S-förmige und weniger verdrehte höher reichende Bündel von Magnetfeldlinien nach. Das Hintergrundbild zeigt zum Vergleich die Sonnenkorona, beobachtet bei einer Wellenlänge von 171 Å.

Fig. 4 Sample magnetic field lines calculated from a model result of the optimized nonlinear force-free code (left) and non-optimized code (right). Red, white and green lines outline low-lying twisted S-shaped and less twisted higher reaching bundles of field lines. The background image shows for comparison the solar corona observed at a wavelength of 171 Å.

In der Photosphäre dagegen in der die koronale Magnetfeldstruktur verankert ist, ist die Situation anders. Dort ist die Dichte des Plasmas sehr viel höher (etwa 10^{16} Teilchen pro m^3 , also rund 10^{-4} $kg\ m^{-3}$) und die Temperatur ist geringer (etwa 5000 Kelvin). Trotz der höheren Magnetfeldstärke (etwa 0.1 Tesla) ist der Plasmadruck größer als der des Magnetfeldes, sodass die Plasmabewegungen das Magnetfeld mit sich ziehen. Hier ist also das Magnetfeld den Plasmabewegungen ausgeliefert. Jede Bewegung des photosphärischen Plasmas hat eine Mitbewegung des eingebetteten Magnetfeldes zur Folge, worauf wiederum das umliegende Magnetfeld Kraft ausübt. Dies stellt eine geleistete Arbeit dar, was nichts weiter ist als mechanisch übertragene magnetische Energie. Diese magnetische Energie wird im koronalen Magnetfeld gespeichert.

Es stellt sich die wichtige Frage, wie man das Magnetfeld der Sonnenkorona und die darin gespeicherte magnetische Energie bestmöglich abschätzen kann. Es gibt unterschiedliche Ansätze und eine der fortschritt-

In the photosphere, where the coronal magnetic structures are anchored, the situation is different. There, the plasma density is much higher (about 10^{16} particles per m^3 , i.e., about 10^{-4} kg/m^3) and the temperature lower (roughly 5000 Kelvin). Even though the magnetic field strength is on average higher (0.1 Tesla), the plasma pressure is higher than the magnetic pressure so that the motion of the plasma drags the magnetic field along. In other words, the photospheric magnetic field is controlled by the plasma motion. Any motion of the plasma causes a movement of the embedded magnetic field against the surrounding field which consequently exerts a force. This is equivalent to a work performed which is nothing but mechanically imparted magnetic energy. And this magnetic energy is stored in the coronal magnetic field.

The question is how we can, at its best, approximate the magnetic field of the solar corona and the magnetic energy stored. Different approaches exist and one of the most sophisticated are so-called

lichsten Methoden sind nichtlinear kraftfreie Modelle (Wiegelmann & Sakurai 2012). Diese spezielle Klasse der stationären Gleichgewichtsmodelle basiert auf der Annahme, dass der elektrische Strom in der Sonnenkorona parallel zu dem Magnetfeld fließt. Dies ist gerechtfertigt da, wie oben erwähnt, in der Korona das Plasma dem Magnetfeld folgen muss. Als einzige Information brauchen solche Modelle Messungen des photosphärischen Magnetfeldes. Solche Daten werden routinemäßig von erdgebundenen sowie sich auf Satelliten im Weltraum befindenden Instrumenten geliefert.

Ein wichtiger Schritt in Richtung der effizientesten Nutzung der zur Verfügung stehenden Daten (zum Beispiel vom Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) an Bord des Satelliten *Solar Dynamics Observatory*) war es einen vorhandenen nichtlinear kraftfreien Computercode weiter zu entwickeln und dessen freie Parameter auf die Daten abzustimmen (Wiegelmann et al. 2012). Die dadurch erzielten Ergebnisse zeigen eine höhere Übereinstimmung des modellierten Magnetfeldes mit den in Bildern der Sonnenkorona beobachteten Strukturen (Abb. 4).

Sowohl hochgradig verdrehte Bündel von koronalen Magnetfeldbögen (rote Linien) als auch höherreichende weniger verdrehte Bündel (grüne und weiße Linien) können nun mit höherer Genauigkeit rekonstruiert werden.

Ein weiterer wichtiger Schritt war es, die Verlässlichkeit nichtlinearer, kraftfreier Modelle im Hinblick auf den der Modellierung zu Grunde gelegten photosphärischen Magnetfelddaten zu untersuchen. In Thalmann et al. 2012 und Thalmann et al. 2013 wurden Modelle basierend auf HMI Daten und basierend auf Daten vom Solar Optical Telescope Spectro-Polarimeter (SOT/SP) an Bord des *Hinode* Satelliten verglichen. Dadurch ist es gelungen die Verlässlichkeit und Genauigkeit solcher Modelle zu bestimmen. Unter anderem konnte gezeigt werden, dass die berechneten Absolutwerte des magnetischen Energiehaushaltes größenordnungsmäßig sehr verlässlich sind. Des weiteren wurde gezeigt, dass man bei der Interpretation der Magnetfeldstruktur berücksichtigen muss, dass die Ausdehnung und Form des modellierten Feldes von den der Modellierung zu Grunde liegenden Daten abhängt (Abb. 5).

nonlinear force-free models (Wiegelmann & Sakurai 2012). This special class of stationary equilibrium models is based on the assumption that the electric currents flow parallel to the magnetic field lines in the solar corona. This is justified since, the plasma is dominated by the magnetic field in the corona, as explained above. The only input required for such models is the measurement of the photospheric magnetic field. Such data are routinely provided by ground-based and space-borne instruments.

An important step towards the most efficient use of the available data (for instance, from the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) on board the Solar Dynamics Observatory) was the further improvement of an existing nonlinear force-free computer code and the proper adjustment of its free parameters (Wiegelmann et al. 2012). By this, the modeled magnetic fields match even better the loops seen in coronal images (see Fig. 4).

Not only highly twisted coronal field lines (red) but also higher-reaching and less twisted field lines (green and white) are reconstructed with higher accuracy than by earlier models.

Another important task is testing the reliability of nonlinear, force-free models depending on the photospheric input data. Thalmann et al. (2012) and Thalmann et al. (2013) compared models based on HMI data and based on data from the Solar Optical Telescope (SOT) Spectro-Polarimeter (SP) on board the Hinode satellite. This allowed to determine the accuracy of such models. It was shown that the calculated absolute energy estimates reproduce very reliably the correct order of magnitude. Moreover it was demonstrated that the interpretation of the modeled magnetic field structure, i.e., the expansion and form of the modeled field lines, depends on the used input data (see Fig. 5)

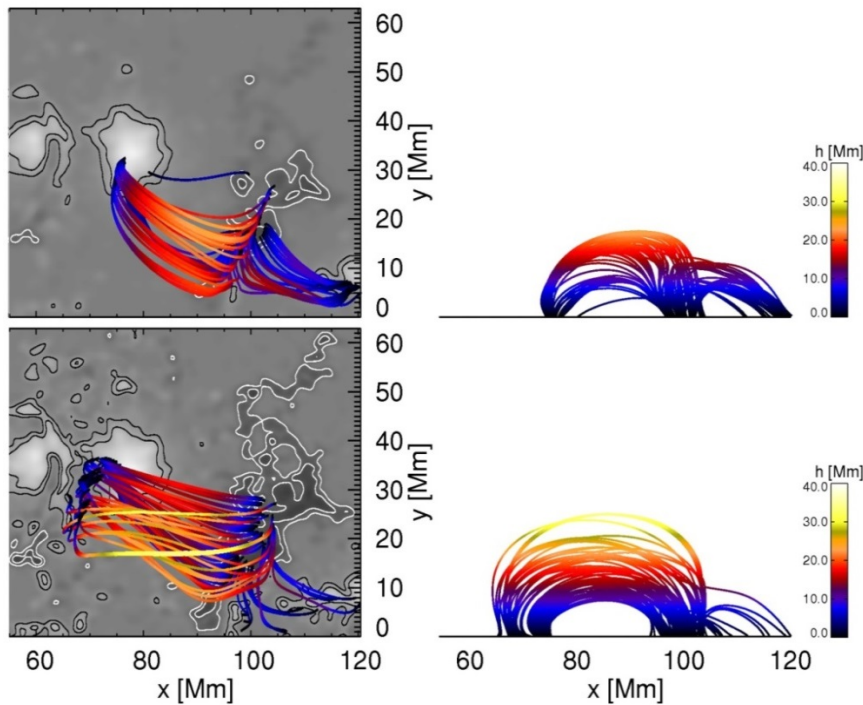


Abb. 5 Vergleich der modellierten Magnetfeldstruktur, berechnet mit nicht-linearen, kraftfreien Modellrechnungen, basierend auf HMI- (oben) und SOT/SP- (unten) Daten. Das graue Hintergrundfeld zeigt die Komponente des photosphärischen Magnetfeldes, normal zur Sonnenoberfläche. Schwarze und weiße Konturen zeigen die ± 0.05 Tesla und ± 0.1 Tesla Niveaus. Die linke Seite zeigt die Konfiguration mit Blick senkrecht auf die Sonnenoberfläche und die rechte Seite den Blick entlang der Oberfläche. Die Farbskalierung (und die Legende rechts) zeigen die

absolute Höhe der Strukturen in der Sonnenatmosphäre.

Fig. 5 Comparison of the magnetic field structure, calculated from the model result of the optimized nonlinear force-free code when based on HMI data (top panels) and SOT/SP data (bottom panels). The gray-scale background reflects the photospheric magnetic field component normal to the solar surface. Black and white contours are drawn at ± 0.05 Tesla and ± 0.1 Tesla. The left and right panels show the configuration when looking down onto and along the solar surface, respectively. The color code (and the color bar on the right) indicate the absolute height in the solar atmosphere.

Ausgewählte Publikationen

Selected Publications

J. K. Thalmann, A. Pietarila, X. Sun, T. Wiegmann, Nonlinear Force-free Field Modeling of a Solar Active Region Using SDO/HMI and SOLIS/VSM Data, *The Astronomical Journal*, vol. 144, issue 2, pp. 33-42, 2012, doi: 10.1088/0004-6256/144/2/33

J. K. Thalmann, S. K. Tiwari, T. Wiegmann, Comparison of Force-free Coronal Magnetic Field Modeling Using Vector Fields from Hinode and Solar Dynamics Observatory, *The Astrophysical Journal*, vol. 769, issue 1, id 59, 2013, doi: 10.1088/0004-637X/769/1/59

T. Wiegmann, T. Sakurai, *Living Reviews in Solar Physics*, Solar force-free magnetic fields, vol 9, no. 5, 2012, doi: 10.12942/lrsp-2012-5

T. Wiegmann, J. K. Thalmann, B. Inhester et al., How Should One Optimize Nonlinear Force-Free Coronal Magnetic Field Extrapolations from SDO/HMI Vector Magnetograms?, *Solar Physics*, vol. 281, issue 1, pp. 37-51, 2012, doi: 10.1007/s11207-012-9966-z

1.3.5 Vorwärtsmodelle der Sonnenkorona

Kühle Sterne wie unsere Sonne sind von einer heißen äußeren Atmosphäre umgeben, der Korona. Hier werden Temperaturen von weit über einer Million Grad erreicht, womit es 100-mal heißer ist als auf der Oberfläche der Sonne. Das heiße Plasma der Korona muss sich entlang magnetischen Feldlinien bewegen. Somit werden die Feldlinien durch das heiße Plasma nachgezeichnet, das im Röntgenlicht und im extremen Ultraviolett (EUV) sichtbar ist. Dies ist wie bei Eisenfeilspänen, die die Feldlinien eines Magneten zeigen. Die linke Spalte von Abb. 6 zeigt eine Beobachtung von koronalen Bögen, die aus der Peripherie von zwei Sonnenflecken an der Oberfläche der Sonne entspringen.

1.3.5 Forward Models of the Solar Corona

Cool stars like our Sun are surrounded by a hot outer atmosphere, the corona. There the temperature exceeds a million K, which is 100 times hotter than at the surface of the Sun. At these high temperatures the gas is fully ionized. This plasma can move freely only along the magnetic lines of force. The field lines are thus outlined by the hot plasma that is emitting light in X-rays and in the extreme ultraviolet (EUV). This is not unlike iron filings outlining the field lines of a permanent magnet. The left column of Fig. 6 shows an example of coronal loops emerging from the periphery of two sunspots on the solar surface.

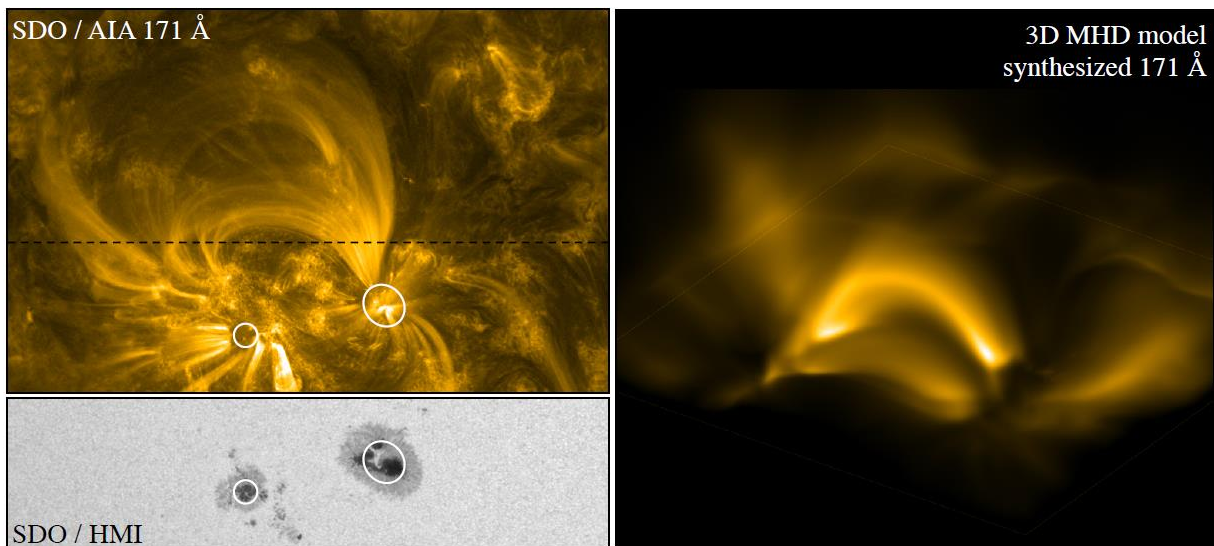


Abb. 6 Links oben ist eine Beobachtung einer aktiven Region auf der Sonne zu sehen, aufgenommen mit dem im 17.1 nm-Kanal des AIA-Instruments auf dem Solar Dynamics Observatory (SDO) der NASA. Dies zeigt Plasma bei einer Temperatur von knapp unter einer Million Grad. Die koronalen Bögen sind in der Peripherie von Sonnenflecken verwurzelt. Letztere sind in dem Bild der Sonnenoberfläche links unten zu sehen, das von SDO/HMI aufgenommen wurde (und den gleichen Bereich darstellt wie das untere Drittel des oberen Bildes). Das rechte Bild zeigt die koronale Emission im gleichen 17.1nm-Kanal die aus einem 3D-MHD-Modell synthetisiert wurde. In diesem Modell ist ein koronaler Bogen zwischen zwei Sonnenflecken zu sehen.

Fig. 6 The left top panel displays an observation of an active region on the sun in the 17.1 nm channel of the AIA instrument onboard the NASA Solar Dynamics Observatory (SDO) showing coronal plasma at just below a million K. The coronal loops originate from the vicinity of two sunspots. The bottom left panel shows the corresponding image of the solar surface from the SDO/HMI instrument (co-spatial with the lower third of the top panel as indicated by the dashed line). The right panel displays the coronal emission in the same 17.1 nm band synthesized from a 3D MHD model. This model shows one dominant coronal loop rising from two sunspots.

Seit in den 1940er Jahren erkannt wurde, dass die Korona aus heißem Plasma bestehen muss, wurden viele Prozesse vorgeschlagen um die hohen Temperaturen der äußeren Atmosphäre zu verstehen. Die Ähnlichkeit der Bilder im Röntgen- und EUV-Bereich mit den Magnetfeldstrukturen legte einen Mechanismus nahe,

Since the discovery in the 1940s that the corona consists of hot plasma, many processes have been proposed to explain how the high temperature in the outer atmosphere can be maintained. The close association of the hot plasma emitting in X-rays and EUV with strong magnetic field suggests that the

der auf magnetischen Prozessen basiert. In den 1970er Jahren wurde daher von E. Parker vorgeschlagen, dass, anschaulich gesprochen, die konvektiven Bewegungen an der Sonnenoberfläche die Magnetfeldlinien verflechten. Verankert in der Photosphäre (die die Oberfläche definiert) wie Saiten in Korken, die auf Wasser schwimmen, werden die Feldlinien irreversibel verwickelt. Dies führt zu Gradienten im Magnetfeld, die Ströme im elektrisch leitfähigen Plasma induzieren. Diese Ströme werden nun dissipiert und heizen das Plasma, ähnlich wie ein starker Strom einen Draht aufheizt.

Ohne Frage läuft dieser Prozess der Verflechtung in der Korona ab. Die Frage ist nur, ob die räumliche und zeitliche Variation der Energie, die dieser Prozess zuführt, koronale Strukturen hervorbringt, die mit den Beobachtungen übereinstimmen. Um diese Frage zu beantworten, haben wir sogenannte Vorwärts-Modelle durchgeführt. In einem numerischen Modell lösen wir dabei die Gleichungen der Magnetohydrodynamik (MHD) abhängig von Zeit und Raum in drei Dimensionen (Bingert & Peter 2011). Das bezieht alle Wechselwirkungen zwischen Magnetfeld und dem Plasma in der Atmosphäre mit ein. Als Anfangsbedingung wählen wir ein Magnetfeld basierend auf Beobachtungen, das sich dann durch die konvektiven Bewegungen an der Oberfläche verändert. Basierend auf Temperatur, Dichte und Geschwindigkeit aus dem Modell synthetisieren wir dann die koronale Emission. Dies erlaubt einen direkten Vergleich mit Beobachtungen.

Um die entstehende EUV-Emission der Korona realistisch zu beschreiben, muss der Druck in der Korona selbstkonsistent beschrieben werden. Hierzu lösen wir die Energiebilanz, in der unter anderem Energie durch Dissipation der Ströme hinzugeführt, durch die Wärmeleitung parallel zum Magnetfeld umverteilt und schließlich durch Emission von EUV- und Röntgenstrahlung wieder abgegeben wird. Ein Teil der Energie wird durch Wärmeleitung zur Sonnenoberfläche zurück geleitet, wo sie kühles Plasma aufheizt. Das Plasma verdampft und steigt dann in die heiße Korona auf.

Unser numerisches Modell erzeugt eine selbstkonsistent aufrechterhaltene heiße äußere Atmosphäre, die durch das Magnetfeld geordnet wird und koronale Bögen erzeugt, ähnlich wie auf der echten Sonne (Peter & Bingert 2012). Das rechte Bild in Abb. 6 zeigt eine Momentaufnahme im Licht des 17.1 nm-Kanals im EUV. Diese Emission kommt im wesentlichen von achtfach ionisiertem Eisen (Fe IX) und zeigt Plasma bei etwas unter einer Million K. Zur Zeit, die hier gezeigt ist, dominiert ein einzelner Bogen das Bild. Dieser erscheint weniger scharf als in der Beobachtung, was der limitierten räumlichen Auflösung im Modell geschuldet ist. Nichtsdestotrotz hat er ähnliche Eigen-

heating mechanism is closely related to the magnetic field. It was suggested in the 1970s by E. Parker that the convective motions on the solar surface would braid magnetic field lines. Anchored in the photosphere (the layer that defines the visible surface of the Sun) like strings in corks on top of boiling water they would be tangled in an irreversible fashion. This process leads to gradients (or more precisely a curl) of the magnetic field that induce currents in the electrically conductive plasma. Subsequently these currents will be dissipated and heat the plasma which hosts them, just like a too high current heats a wire.

Clearly, this braiding process will be at work in the solar corona. The main question is if the spatial and temporal distribution of the energy input due to this process will result in coronal structures and dynamics that are in line with actual observations. To answer this question we perform forward models of the solar corona. We start with an ab-initio time-dependent three-dimensional magneto-hydrodynamics model of the solar atmosphere including the relevant physical process (Bingert & Peter 2011). This fully accounts for the interaction of the magnetic field with the plasma in the atmosphere. We start our model with an initial configuration of the magnetic field based on observations, which is then driven by the convective motions at the surface. Using the temperature, density and velocity from the model we synthesize the coronal emission to be expected. This allows a direct comparison to actual observations.

To get a realistic estimate of the emission radiated from the model corona one has to determine the pressure in the corona in a self-consistent way. For this the equations we solve include an energy balance in which, among other processes, energy is added through Ohmic dissipation of the induced currents, is redistributed by heat conduction parallel to the magnetic field, and is lost through radiation primarily in the EUV and X-rays. Part of the energy is transported back towards the surface by heat conduction, cool plasma is heated and evaporated, and rises into the corona sustaining the hot upper atmosphere.

Our model is producing a self-consistently sustained hot atmosphere that is ordered by the magnetic field forming coronal loops, in a fashion similar to the real Sun (Peter & Bingert 2012). The right panel of Fig. 6 shows a snapshot of the model as it would be seen at wavelengths near 17.1 nm in the EUV. The emission is mainly originating from eight times ionized iron (Fe IX) as part of the coronal plasma at temperatures just below one million K. At the time shown here one loop is dominating. While the synthesized loop appears less crisp than in actual observations because of the limited spatial resolution in the model, it shares fundamental properties with actually observed loops.

schaften wie die beobachteten Bögen. Insbesondere ist, wie in der Beobachtung, der Querschnitt des Bogens im Modell konstant, wenn man von einem Fußpunkt zum anderen geht. Dies ist bedingt durch die Art und Weise, wie die Emission der Spektrallinien von der Verteilung von Dichte und Temperatur abhängt. Hiermit konnten wir das alte Problem lösen, warum die EUV-Bögen einen konstanten Querschnitt zeigen, obgleich sich das Magnetfeld mit der Höhe aufweitet.

Aus den Modellen können Emissionslinien synthetisiert werden, die einen weiten Bereich von Temperaturen überdecken. Diese reproduzieren die beobachteten mittleren Rotverschiebungen durch Plasmabewegungen in der Übergangszone vom kühlen unteren Teil der Atmosphäre in die heiße Korona. Das kühlere Plasma wird dabei aufgeheizt und nach oben getrieben, von wo es wieder kühlt und zurück fällt, was dann die Rotverschiebungen erzeugt (Zacharias et al. 2011). Dabei reproduzieren die numerischen Modelle auch die zeitliche Variabilität in der Übergangsregion und der Korona.

Most importantly its cross-section is approximately constant going from one leg to the other. This is due to the specific way in which the formation of the spectral emission line depends on temperature and density. Thus we solve a long-standing question on how EUV loops maintain a constant cross-section despite the magnetic field expanding with height.

We can also synthesize other emission lines covering a wide range of temperatures. This reproduces the observed average net redshifts caused by plasma motions in the transition region from the cool lower part of the atmosphere into the hot corona. We find that cool plasma is driven into the higher atmosphere where it is heated and then drains back to the surface causing the redshifts (Zacharias et al 2011). The numerical models of the corona also reproduce the observed average temporal variability in the transition region and corona.

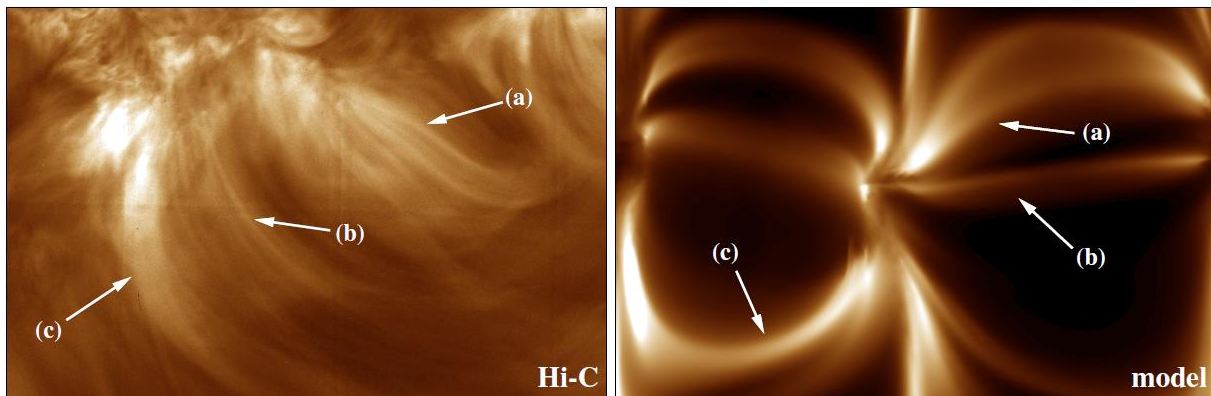


Abb. 7 Das linke Bild zeigt eine Beobachtung mit Hi-C während eines Raketenfluges. Diese Daten haben die höchste bisher erreichte Auflösung im EUV. Sie zeigen Emission in einem Kanal bei 19.3nm, die in Plasma bei etwa 1.5 Millionen K entsteht. Das rechte Bild zeigt die Emission im gleichen Wellenlängenband synthetisiert aus einem 3D-MHD-Modell. Beobachtung und Modell zeigen die gleichen typischen Strukturen: (a) Bögen in einer expandierenden Einhüllenden, (b) Bögen mit konstantem Querschnitt und (c) dicke Bögen.

Fig. 7 The left panel displays an observation with the Hi-C instrument obtained during a rocket flight. These are the highest spatial resolution data in the EUV obtained so far. This shows emission in a channel near 19.3 nm formed at about 1.5 million K. The right panel shows emission synthesized for the same band from a 3D MHD model. Both observation and model host the same typical structures highlighted by arrows: (a) loops in an expanding envelope, (b) thin loops with constant cross section, and (c) thick loops.

Die allgemeine Morphologie der koronalen Strukturen, die sich in den drei-dimensionalen Modellen ergeben, entspricht gut den Beobachtungen. Dies wird in Abb. 7 illustriert durch einen Vergleich eines Modells mit hoher räumlicher Auflösung (rechtes Bild) mit einer Beobachtung im EUV, bei der die bisher höchste räumliche Auflösung erreicht wurde (Peter et al. 2013). Die gezeigte Beobachtung stammt von einem

The general morphology of the coronal structures forming in the three-dimensional models compares well to observations. This is illustrated in Fig. 7 by comparing a high-resolution model (right panel) to an observation in the EUV with the highest spatial resolution obtained so far (Peter et al. 2013). These data were acquired during a NASA rocket flight of the Hi-C instrument in 2012. The arrows in the figure point

Raketenflug der NASA in 2012. Die Pfeile in den Bildern deuten auf typische Strukturen, die sich im Modell genauso wie auch in Beobachtungen finden. In einem hochauflösenden Modell konnten wir sogar die beobachtete koronale Struktur und Dynamik reproduzieren, basierend allein auf den Beobachtungen an der Sonnenoberfläche (Bourdin et al. 2013). Gegenwärtig arbeiten wir an neuen Modellen, die die Korona in neu entstehenden aktiven Regionen reproduzieren sollen, und die die Skalierungen von der Korona der Sonne hin zu aktiveren Sternen erklären können.

Die gute Übereinstimmung zwischen synthetisierter Emission aus den Modellen und echten Beobachtungen zeigt, dass die Modelle die wesentlichen Prozesse in der Korona richtig abbilden, zumindest auf den beobachtbaren Skalen. Gleiches gilt insbesondere auch für die Heizung, Struktur und Dynamik der Korona. Damit bestätigen unsere numerischen Modelle den Mechanismus der Feldlinienverflechtung zur Heizung der Korona, den Parker vor über vierzig Jahren vorgeschlagen hat.

to typical structures found both in observations and the model, showing that one finds the same type of structures in both. In a recent model we could even reproduce the actually observed structure and dynamics of the corona above an active region based solely on the observations at the solar surface (Bourdin et al. 2013). Current and future work includes to study the corona above emerging active regions and scaling the corona models to other stars more active than our sun.

The good match we find between the synthesized emission from our models and actual solar coronal observations shows that the model captures the essential processes leading to the heating, structure, and dynamics of the corona, at least on the scales currently observable. Thus our models confirm the field-line-braiding mechanism to heat the corona suggested by Parker forty years ago.

Ausgewählte Veröffentlichungen

Selected Publications

S. Bingert, H. Peter. Intermittent heating in the solar corona employing a 3D MHD model, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 530, id. A112, 2011, doi: 10.1051/0004-6361/201016019

P.-A. Bourdin, S. Bingert, H. Peter, Observationally driven 3D MHD model of the solar corona above an active region, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 555, id A123, 2013, doi: 10.1051/0004-6361/201321185

H. Peter, S. Bingert, Constant cross section of loops in the solar corona, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 548, id. A1, 2012, doi: 10.1051/0004-6361/201219473

H. Peter, S. Bingert, J. A. Klimchuk et al., Structure of solar coronal loops: from miniature to large-scale, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 556, id A104, 2013, doi: 10.1051/0004-6361/201321826

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

1.3.6 Simulationen von Magnetfeldern und Strömungen in oberflächennahen Schichten von Sternen

Obwohl die meisten Sterne (auch durch ein großes Teleskop betrachtet) lediglich als punktförmige Objekte erscheinen, wissen wir inzwischen viel über ihren inneren Aufbau und die Struktur ihrer oberflächennahen Schichten. Während die Physik des Sterninneren sich meist sehr gut durch analytische Gleichungen oder vereinfachte numerische Rechnungen beschreiben lässt, sind die Abläufe in den Oberflächenschichten, den Sternatmosphären, äußerst komplex. Vom Beispiel der Sonne wissen wir, dass die Atmosphärenstruktur von Konvektion (=Strömungen) und Magnetfeldern bestimmt wird, die auf komplexe Weise miteinander wechselwirken und Einfluss auf das von der Sonne abgestrahlte Licht haben. Wenn man das Licht anderer Sterne in seine Spektralfarben aufspaltet, lassen sich anhand der Form und Position (=Wellenlänge) der Spektrallinien Hinweise darauf finden, dass Konvektion und Magnetfelder auch in den Atmosphären anderer Sterne zu finden sind und deren Struktur bestimmen.

Ein genaues Verständnis der Oberflächenschichten von Sternen ist Voraussetzung, um detaillierte Aussagen über stellare Parameter (wie etwa Masse, Temperatur und chemische Zusammensetzung) mithilfe von Spektroskopie treffen zu können. Darüber hinaus beeinflussen die Prozesse in den äußeren Schichten eines Sternes, insbesondere die durch Magnetfelder hervorgerufene sogenannte stellare Aktivität (z.B. in Form von dunklen Sternflecken, von Massenauswürfen, Strahlungseruptionen und dem Ausstoß hochenergetischer Teilchen), sowohl die Beobachtbarkeit als auch die potenzielle Lebensfreundlichkeit von Planeten, die diesen Stern umkreisen. Ein wichtiger Schritt für das Verständnis der stellaren Magneto-Konvektion und stellarer Aktivität sind dabei numerische Simulationen, welche diese Prozesse in drei Raumdimensionen und in ihrer zeitlichen Entwicklung beschreiben.

Die *Solar Magnetohydrodynamics (MHD) Group* am MPS simuliert die oberflächennahen Schichten der Sonne und hat viele nicht-magnetische und magnetische Effekte und Strukturen untersucht, die auf der Sonne zu beobachten sind und sich im Computer simulieren ließen (darunter zum Beispiel Sonnenflecken und kleinskalige „magnetic bright points“) (Rempel et al. 2009 und Moll et al. 2012). Seit kurzem beschäftigt sich die Gruppe auch mit anderen Sternen. Die Sterne mit einem der Sonne ähnlichen Aufbau sind die kühleren Vertreter der sogenannten Hauptreihensterne, die sich von der Sonne im Wesentlichen nur durch eine etwas größere oder kleinere Masse und (damit zusammenhängend) einer etwas höheren oder niedrigeren Oberflächentemperatur unterscheiden. Da sie der

1.3.6 Simulations of Magnetic Fields and Convective Flows in the Near-Surface Layers of Stars

Most stars appear as point-like objects, even if viewed through a large telescope. Nonetheless, much about their interior properties and the structure of their near-surface layers is known today. While the physics of the stellar interiors can often be described by analytic equations or simplified numerical calculations, the processes in the near-surface layers, the stellar atmospheres, are of a very complex nature. It is known that the atmospheric structure of the Sun is determined by convective flows and magnetic fields, which interact in a complex manner and influence the light radiated from the solar surface. If the stellar light is separated into its spectral colors, information about convection and magnetic fields in stars other than the Sun can be obtained by determining the position (wavelength) and shape of spectral lines.

A detailed knowledge of the surface layers of stars is essential in order to determine precise values of stellar parameters (such as mass, surface temperature, and chemical composition) from spectroscopic observations. Moreover, the stellar atmosphere, and especially the so-called magnetic activity (which comprises phenomena such as dark starspots, mass ejections, flares, and emission of high-energy particles), influences the detectability and habitability of planets orbiting the star. An important step on the way to understand the processes of stellar magnetoconvection and magnetic activity are numerical simulations which describe these processes and their temporal evolution in three spatial dimensions.

The Solar Magnetohydrodynamics (MHD) Group at the MPS runs simulations of the near-surface layers of the Sun and has analyzed various non-magnetic and magnetic structures and phenomena (e.g., sunspots and small-scale magnetic bright points) which can be observed on the Sun and could be numerically simulated (Rempel et al. 2009 und Moll et al. 2012). Recently, the group has begun to extend their work to other stars. The stars which are most similar to the Sun are the cooler objects of the so-called main-sequence stars, which differ somewhat from the Sun in mass and consequently have a somewhat different surface temperature. As they are rather similar to the Sun, cool main-sequence stars are a good starting point for the investigation of convection and magnetic

Sonne relativ ähnlich sind, bieten die kühlen Hauptreihensterne einen einfachen Startpunkt für die Untersuchung von Konvektion und Magnetfeldern in den oberflächennahen Schichten. Sie sind vor allem aber auch deshalb wichtige Forschungsobjekte, weil sie sehr zahlreich sind und deshalb auch in der näheren Umgebung des Sonnensystems (wenige Lichtjahre bis einige hundert Lichtjahre) den größten Anteil der beobachtbaren Sternenpopulation ausmachen und weil sie die aussichtsreichsten Kandidaten für Planetensysteme mit guten Bedingungen für die Entwicklung von Leben sind.

Um die Oberflächenschichten der Sonne oder anderer Sterne im Computer zu simulieren, müssen Gleichungen zu den in diesen Schichten wesentlichen physikalischen Gesetzen gelöst werden. Besonders wichtig sind hierbei neben den Grundgleichungen der Hydrodynamik, die bei hohen Temperaturen wichtige Ionisation des Plasmas, sowie die Erzeugung und Absorption von elektromagnetischer Strahlung. Bei Simulationen mit Magnetfeld kommt noch die Wechselwirkung zwischen Magnetfeld und Strömungen (Induktion und magnetische Kräfte) hinzu. Das dadurch entstehende System von Gleichungen wird mithilfe eines Computerprogramms Zeitschritt für Zeitschritt auf einem räumlichen Gitter gelöst. Auf diese Weise erhält man eine realistische Repräsentation der zeitlichen Entwicklung eines Ausschnittes der Oberflächenschichten des simulierten Sternes (Vögler et al. 2005). Die Illustration einiger simulierten Größen in einer solchen „Simulationsbox“ zeigt Abb. 8.

fields in stellar near-surface layers. Moreover, they are important research targets, because they are quite common in the solar neighborhood (most of the stars within a few hundred light years are cool main-sequence stars) and because they are the most likely candidates for planetary systems with good conditions for the evolution of life.

For the purpose of comprehensively simulating the surface layers of stars with a computer, the equations describing the relevant physical processes have to be solved. Most important are the basic equations of hydrodynamics, equations describing the ionization of the plasma at high temperature, as well as the emission and absorption of electromagnetic radiation. For simulations with a magnetic field, the interaction between magnetic field and convective flows (induction and magnetic forces) have to be included as well. This system of equations is solved by a computer time step for time step on a spatial grid. Thus one obtains a realistic representation of the temporal evolution of a small part of the near-surface layers of the simulated star (Vögler et al. 2005). Fig. 8 shows the illustration of some of the simulated quantities in such a “simulation box” for a single time step.

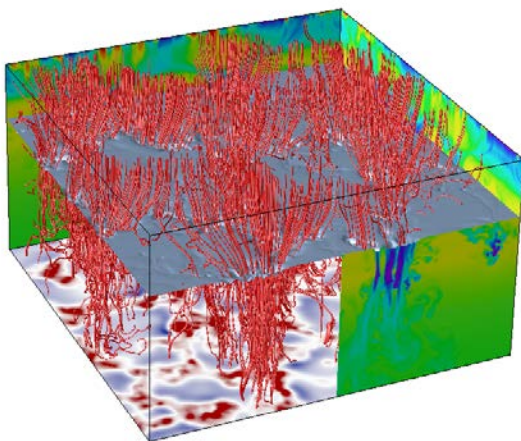


Abb. 8 Illustration der Simulationsbox eines M2V-Sternes mit einer Masse von etwa 0,4 Sonnenmassen. Die silberne erscheinende Fläche ist die sichtbare Oberfläche des Sternes. Rote Kurven zeigen Magnetfeldlinien. Die Farbkarten auf den Seitenflächen der Box deuten horizontale Temperaturfluktuationen an (rot=heißer, blau=kälter als das horizontale Mittel), die Bodenfläche zeigt die Strömungen durch den Boden der Box (rot=abwärts, blau=aufwärts). Das simulierte Gebiet hat eine Ausdehnung von 1560 km × 1560 km × 800 km und das mittlere vertikale Magnetfeld beträgt 500 G (0,05 Tesla). Durch die konvektiven Strömungen wird das Magnetfeld in lokale Flussbündel konzentriert, die in den Gebieten kühler Abwärtsströmungen liegen.

Fig. 8 Illustration of the simulation box of an M2V star of 0.4 solar masses. The silvery surface is the visible surface of the star. Magnetic field lines are indicated in red. The colored side faces show the horizontal temperature fluctuations (red = hotter, blue = cooler than the horizontal mean temperature). The color map on the bottom shows flows through the bottom boundary of the box (red = downflow, blue = upflow). The simulated region is 1560 km × 1560 km wide and 800 km high and the mean vertical magnetic field strength is 500 G (0.05 Tesla). Transported by the convective flows, the magnetic field is concentrated in flux tubes, which are located in cool downflow regions.

Ausgehend von der Sonne mit einer Effektivtemperatur von 5770 K wurden die Oberflächenschichten eines heißeren Sternes mit einer Effektivtemperatur von 6750 K und etwa der 1,5-fachen Sonnenmasse und vier kühlerer Sterne mit Effektivtemperaturen bis hinab zu 3600 K und Massen bis hinab zu 0,4 Sonnenmassen simuliert. Es wurden sowohl Rechnungen ohne Magnetfeld als auch welche mit verschiedenen starkem mittleren Magnetfeld bis zu einer mittleren Magnetfeldstärke von 500 G (0,05 Tesla) durchgeführt und analysiert.

Die Rechnungen ohne Magnetfeld bestätigten und präzisierten die Trends, die aus ähnlichen Rechnungen, (spektroskopischen) Beobachtungen und theoretischen Erwägungen vermutet wurden: So sind die an der Oberfläche als sogenannte Granulen sichtbaren Konvektionszellen auf kühleren Hauptreihensternen deutlich kleiner und etwas kurzlebiger als solche auf heißeren Hauptreihensternen. Die auftretenden Geschwindigkeiten sind geringer und die Temperaturunterschiede zwischen abwärts- und aufwärtsströmendem Material weniger ausgeprägt (Beeck et al. 2013).

Starting with the Sun (“effective temperature” of 5780 K), the surface layers of one hotter star with an effective temperature of 6750 K and about 1.5 times the solar mass and of four cooler stars with effective temperatures down to 3600 K and masses down to 0.4 solar masses have been simulated. Simulations were run without magnetic field as well as with various values for the average vertical field strength of up to of 500 G (0.05 Tesla).

The simulations without magnetic field confirmed trends which were surmised from similar simulations, (spectroscopic) observations, and theoretical considerations and rendered them more precise. For instance, the convection cells, which are visible on the surface as so-called “granules”, are much smaller and somewhat shorter-lived on the cooler stars of the sequence than on the hotter; the convective velocities are smaller and the temperature contrasts between up- and downflows are less distinct (Beeck et al. 2013).

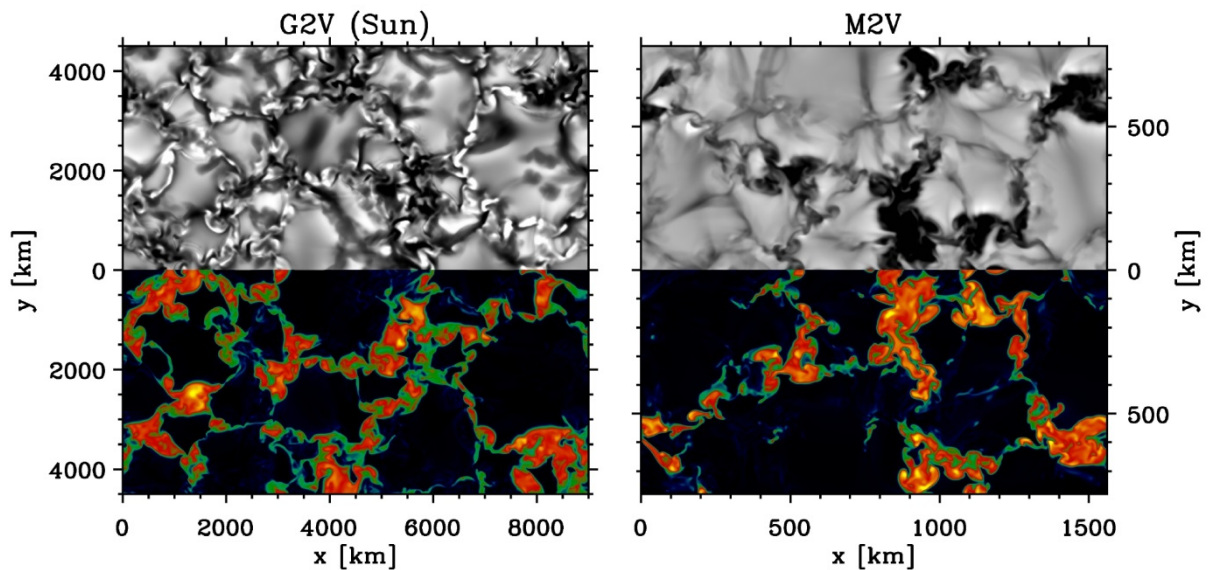


Abb. 9 Vergleich zwischen den Simulationen der Sonne (G2V, links) und eines M2V-Sternes (rechts). In der oberen Hälfte der Abbildung ist die Intensität des die Sternatmosphäre senkrecht verlassenden Lichtes gezeigt, während in der unteren Hälfte die Magnetfeldstärke illustriert ist (rot/gelb = starkes Magnetfeld), welches in abwärts strömenden Bereichen konzentriert wurde. Zum besseren Vergleich ist nur die eine Hälfte der Simulationsbox gezeigt und bei $y=0$ gespiegelt dargestellt. Während die magnetischen Strukturen bei der Sonne sowohl hell als auch dunkel sein können, sind sie beim M2V-Stern fast ausschließlich dunkler als die weitgehend magnetfeldfreie Umgebung.

Fig. 9 Comparison between the simulations of the Sun (G2V; left) and a M2V star (right). The upper half of the panels shows the intensity of the light emerging from the atmosphere, while the lower half illustrates the magnetic field strength (red/yellow = strong magnetic field), which is concentrated in the downflows. To facilitate the comparison only one half of the simulation boxes is shown and the boxes are shown mirrored at $y=0$. The magnetic structures on the Sun can appear bright or dark (depending on their size), whereas the magnetic structures of the M2V star are almost exclusively darker than the mostly field-free environment.

Bei den Rechnungen mit Magnetfeld wird ein zunächst homogenes, vertikales Magnetfeld in die Simulationsbox eingebracht. Bei allen untersuchten Sternparametern wird das Magnetfeld durch die konvektiven Strömungen mitgeführt und in den abwärts strömenden Bereichen konzentriert. Allerdings wurde ein wesentlicher Unterschied in der Struktur dieser Magnetfeldkonzentrationen zwischen der Sonne und sehr kühlen Hauptreihensternen (M-Zwergen) gefunden: Während auf der Sonne solche magnetischen Strukturen je nach räumlicher Ausdehnung sowohl hell als auch dunkel sein können, zeigen die Simulationen von M-Zwergen praktisch keine hellen Magnetfeldkonzentrationen (siehe Abb. 9).

Die Ergebnisse der durchgeführten Simulationen wurden als Grundlage verwendet, Teile des Lichtspektrums zu berechnen, welches von einem Stern mit einem der Simulation entsprechenden äußeren Aufbau von der Erde aus sichtbar wäre (Beeck et al. 2013). Bei der Analyse der Spektrallinien, die aus den magnetischen Simulationen erzeugt wurden, wurde eine Entdeckung gemacht, die für quantitative Magnetfeldmessungen bei Sternen von großer Bedeutung ist: Der zur Messung von Magnetfeldern herangezogene Zeeman-Effekt führt zwar erwartungsgemäß zu einer Verbreiterung oder Auspaltung einiger Spektrallinien. Tatsächlich haben aber bei bestimmten Magnetfeldstärken die vom Magnetfeld hervorgerufenen Veränderungen der Atmosphärenstruktur einen viel größeren Einfluss auf die Spektrallinien als der Zeeman-Effekt. Dies hat Folgen für die Messung von stellaren Magnetfeldern, aber auch für die spektroskopische Messung von Sternparametern und die Detektion von Exoplaneten um magnetisch aktive Sterne.

For the simulations with magnetic field, an initially homogeneous and vertical magnetic field was introduced into the simulation box. For all stellar models investigated, the magnetic field is advected by the flows and concentrated in downflow regions. However, a crucial difference in the structure of these magnetic flux concentrations between the Sun and the very cool main-sequence stars (so-called M dwarfs), was found: while magnetic structures on the Sun can appear bright or dark depending on their size, the simulations of M dwarfs show virtually no bright magnetic flux concentrations (see Fig. 9).

The simulation results have been used as a basis for the calculation of parts of the electromagnetic spectrum, which would be observable for a star with an atmospheric structure corresponding to the simulation results (Beeck et al. 2013). The analysis of the spectral lines obtained from the magnetic simulation runs yielded a result with important implications for the measurement of stellar magnetic fields. The Zeeman effect, which is used for the determination of the magnetic field, broadens or splits the line as expected. However, for some spectral types, the local modifications of the thermodynamical structure have a much larger impact on the spectral lines than the Zeeman effect. This phenomenon does not only impair measurements of stellar magnetic fields but also has consequences for the spectroscopic determination of stellar parameters and for the detection of exoplanets around magnetically active stars.

Ausgewählte Publikationen

Selected Publications

M. Rempel, M. Schüssler, R. H. Cameron, M. Knölker, Penumbra Structure and Outflows in Simulated Sunspots, *Science*, vol. 325, issue 5937, pp. 171-174, 2009, doi: 10.1126/science.1173798

R. Moll, R. H. Cameron, M. Schüssler, 2012, Vortices, shocks, and heating in the solar photosphere: effect of a magnetic field, *Astronomy & Astrophysics* vol. 541, id. A68, 2012, doi: 10.1051/0004-6361/201218866

A. Vögler, S. Shelyag, M. Schüssler et al., Simulations of magneto-convection in the solar photosphere. Equations, methods, and results of the MURaM code, *Astronomy & Astrophysics* vol. 429, pp. 335-351, 2005, doi: 10.1051/0004-6361:20041507

B. Beeck, R. H. Cameron, A. Reiners, M. Schüssler, Three-dimensional simulations of near-surface convection in main-sequence stars – I. Overall structure, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 558, id. A48, 2013, doi: 10.1051/0004-6361/201321343

1.3.7 Räumlich gekoppelte Inversionen spektropolarimetrischer Bilddaten: Grundlagen und erste Resultate

Das Beugungslimit von Teleskopen setzt der räumlichen Auflösung von Sonnenbeobachtungen physikalische Grenzen. Es führt zu einer Bildunschärfe, die kleinskalige, räumliche Details im Bild verschmiert. Jedes Pixel in diesem Bild beinhaltet allerdings die Information des Sonnenlichtes über einen großen Wellenlängenbereich (verschiedene Farben), und die Variation der Intensität über diesen Bereich, das Spektrum, beschreibt die physikalischen Bedingungen der Sonnenatmosphäre an diesem Bildpunkt. Diese Information kann teilweise rekonstruiert werden (invertiert), indem man für jeden Bildpunkt eine Sonnenatmosphäre als Anfangswert annimmt, und die Parameter dieser Atmosphären so lange variiert, bis das daraus berechnete, synthetische Spektrum mit dem beobachteten Spektrum übereinstimmt. Dieser Prozess wird üblicherweise von sogenannten Inversions-Codes bewerkstelligt, Computerprogrammen, die diesen Unterschied zwischen Synthese und Beobachtung automatisch minimieren. Da allerdings das beobachtete Sonnenbild in verschiedenen Wellenlängen sehr unterschiedlich aussehen kann, verändert die Bildunschärfe das Spektrum für jedes Pixel signifikant, was zu einer falschen Interpretation der physikalischen Bedingungen in der Sonnenatmosphäre führen kann.

1.3.7 Spatially Coupled Inversion of Spectro-Polarimetric Imaging Data and Results Obtained therewith

Observing the Sun near the diffraction limit of any telescope inevitably leads to degradation of the data in the spatial domain due to telescope diffraction. This degradation results in a blurred image, thus reducing the spatial details in the image. However, each image pixel on the Sun emits light over a wide range of wavelengths (colors), and the variation of the intensity over the wavelength range, the spectrum, contains information over the physical conditions in the atmosphere in that location. This information can be partially recovered (inverted), by iteratively adjusting a "best guess" solar atmosphere for each image pixel until the calculated spectrum of that atmosphere matches the observed one. This is typically accomplished using an inversion code, a computer program that automatically tries to minimize the difference between the observed and calculated spectrum. However, since the observed image can look very different at different wavelengths, the blurring significantly alters the spectrum of each image pixel, which may lead to a wrong interpretation of the physical conditions in the atmosphere.

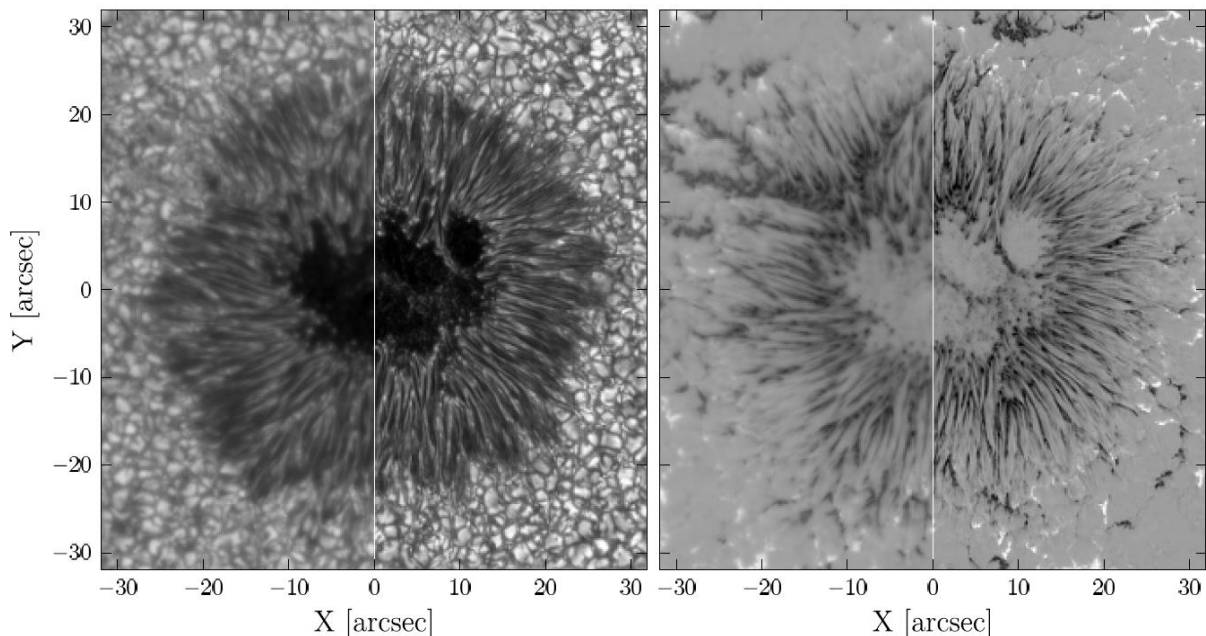


Abb. 10 Originales (linke Hälfte) und invertiertes Bild (rechte Hälfte) eines Sonnenfleckes nahe dem Sonnenzentrum in Stokes I (links) und Stokes V (rechts) bei einer Wellenlänge von 6302.557 Å

Fig. 10 Original (left half) and inverted (right half) images of a sunspot near disk center, in Stokes I (left) and V (right) at a wavelength of 6302.557 Å.

Dieses Problem wurde bereits vor einigen Jahren erkannt. Bisherige Lösungsansätze basieren auf der Annahme, dass das beobachtete Spektrum in einem Pixel eine Kombination aus dem tatsächlich von diesem Pixel stammendem Spektrum und einer zweiten Komponente, dem "Falschlicht", resultierend aus der Unschärfe des Bildes, ist. Weil das Falschlicht aber nicht vom "echten" Licht unterscheidbar ist, waren diese Ansätze nur wenig erfolgreich und ihre Anwendung auf einzelne, kleinskalige Strukturen begrenzt.

Wir haben eine Methode entwickelt, die die Beugung durch das Teleskop direkt im Inversionsprozess berücksichtigt. Diese Methode berechnet das Spektrum nicht für jedes einzelne Pixel, sondern für alle Bildpunkte gleichzeitig. Auf die so bestimmten synthetischen Spektren wird die Teleskop-Beugung (Unschärfe) angewandt, und erst dann werden diese Spektren mit den Beobachtungen verglichen. Diese iterative Optimierung der Sonnenatmosphäre für jedes individuelle Pixel berücksichtigt dabei die Bedingungen in der Sonnenatmosphäre für alle umgebenden Pixel gleichzeitig. Diese "Entflechtung" spektraler Information erlaubt es, kleinskaligere Strukturen als bisher möglich zu rekonstruieren.

Abb. 10 demonstriert die Stärke dieser Methode: Die invertierten Atmosphären wurden herangezogen, um ein Intensitätsbild (Stokes I) und ein Bild der Zirkularpolarisation (Stokes V) zu erzeugen, das signifikant mehr Details beinhaltet als das ursprüngliche Intensitätsbild. Dies erlaubt das Studium solarer Feinstrukturen, z.B. auf der Basis spektraler Scans des Spektropolarimeters (SP) des Hinode-Weltraumteleskopes, mit bisher unerreichter Genauigkeit.

Jede Datenanalyse, die auf der Bestimmung der Parameter der Sonnenatmosphäre mit Hilfe von Inversionstechniken beruht, kann von der neuartigen Inversionstechnik deutlich profitieren. Eine Publikation, die diese Methode beschreibt, ist 2012 in *Astronomy & Astrophysics* erschienen.

Die neue Inversionstechnik wurde bereits in einigen Projekten zur Analyse von Hinode-SP Daten erfolgreich eingesetzt:

1. Sonnenflecken sind dunkle Gebiete auf der Sonnenoberfläche, deren Häufigkeit mit dem Aktivitätszyklus der Sonne schwankt. Der Großteil der Sonnenflecken, die das Hinode-SP Instrument beobachtet hat, wurden invertiert und für systematische Analysen in einer Datenbank gespeichert. Diese Datenbank erlaubt es, die Langzeit-Variationen der Struktur von Sonnenflecken zu studieren und die kleinskaligen Phänomene sowohl im Detail als auch statistisch zu untersuchen. Die Datenbank beinhaltet derzeit etwa 40 invertierte Sonnenflecken und soll öffentlich verfügbar gemacht werden.

This problem was recognized several years ago and was addressed by assuming that observed spectrum of each image pixel is a combination of the spectrum produced by the real atmosphere of the Sun, and a second "component", representing the "false light" that was added by the blurring. Because the false light cannot be distinguished from the "real" light, this method has had only limited success and was only practical for application to individual, small-scale structures.

We have developed a new inversion method that takes the telescope diffraction directly into account in the inversion process. The method does not compute the spectrum for each image pixel individually, but instead calculated the spectra for all image pixels, and then applies the telescope blurring before comparing the result to the observations. The iterative optimization of the atmosphere of each pixel on the solar surface takes into account how a change in the atmosphere in each pixel affects the observed spectrum in all of the pixels surrounding it. This "disentangling" of the spectral information allows for the recovery of smaller scale spatial structure than was previously possible.

Fig. 10 shows an example of this, where the inverted atmospheres have been used to generate images in intensity (Stokes I) and circularly polarized light (Stokes V), containing significantly more spatial detail than is visible in the original data. This allows for a much more detailed study of solar fine-structure than was previously possible using e.g. inverted spectral scans made with the Spectropolarimeter (SP) onboard the Hinode spacecraft.

*Every analysis of data relying on the retrieval of atmospheric parameters using inversions techniques can greatly benefit from this new method. A paper describing the method and exploring its properties was published in an article in 2012, *Astronomy & Astrophysics*.*

The new inversion method was used to analyze spectro-polarimetric data from the Hinode spacecraft in a number of projects:

1. *Sunspots are dark spots on the solar surface that come and go with the activity cycle of the Sun. The majority of all sunspots ever observed with the Hinode SP in high-resolution mode were inverted and stored in a database of sunspots, suitable for a systematic analysis. The database enables the study of long term variations in sunspot structure, and the identification and study of small scale structures, both in detail and statistically. The database currently contains over 40 inverted sunspots and will be made publicly available.*

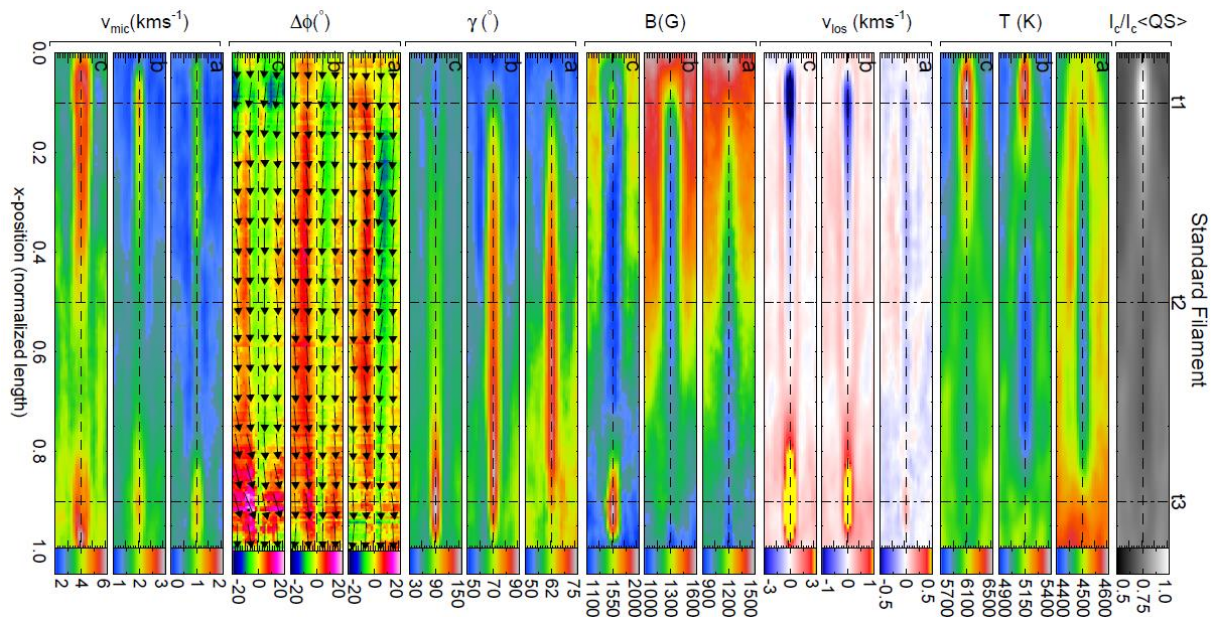


Abb. 11 Mittelwerte einiger durch Inversion bestimmter atmosphärischer Parameter für verschiedene Ebenen gleicher optischer Dicke ($\log\tau_c = -2,5$ (a), $-0,9$ (b) und 0 (c)). Gezeigt sind von rechts nach links: Intensität (I), Temperatur (T), Doppler-Geschwindigkeit (v_{los}), magnetische Feldstärke (B), Inklination (γ) und Azimuth (ϕ) des Magnetfeldes, und die mikro-turbulente Geschwindigkeit (v_{mic}).

Fig. 11 Average of several inverted quantities at optical depth levels ($\log\tau_c = -2.5$ (a), -0.9 (b) and 0 (c)). Shown are from right to left: intensity (I), temperature (T), Doppler velocity (V_{los}), magnetic field strength (B), magnetic field inclination angle (γ), magnetic field azimuth angle (ϕ) and microturbulent velocity (v_{mic})

2. Sonnenflecken können unterteilt werden in einen dunklen Teil (Umbra), der umgeben ist von einem Ring aus Filamenten (Penumbra), der dunkler ist als die umgebende Sonnenoberfläche, aber heller als die Umbra. Eine große Anzahl von Filamenten einer Penumbra, beobachtet sehr nahe am Sonnenzentrum, wurde markiert, entzerrt, auf einheitliche Länge normiert und anschließend gemittelt. Das daraus resultierende, gemittelte Filament, dargestellt in Abb. 11, zeigt erstaunlich geringe Variationen und wenig Abhängigkeit von der radialen Position des Filaments in Bezug auf die Umbra.

Diese einheitliche, magnetische Struktur hat einen heißen, hellen Kopf ("filament head"), wo solares Gas nach oben strömt. Auf dem Weg zum Endpunkt des Filaments ("filament tail") kühlt dieses Material allmählich ab, bevor es dann in starken Abwärtsströmungen zurück ins Sonneninnere strömt. Zusätzliche, schwache Abwärtsströmungen sind auf beiden Seiten des Filaments zu erkennen, was auf einen konvektiven Prozess hindeutet, der auch von numerischen Simulationen vorhergesagt wurde. Eine Publikation zu diesem Thema wurde bei Astronomy & Astrophysics eingereicht.

3. "Umbral Dots" (UDs) sind Areale in der Umbra, die eine erhöhte Temperatur, ein schwächeres Magnetfeld und starke Aufwärtsströmungen in ihrem

2. Sunspots can be divided in a dark part (umbra) which is surrounded by a filamentary ring (the penumbra) which is darker than the surrounding solar surface, but brighter than the umbra. A large number of filaments of a sunspot penumbra, observed very close to the center of the solar disc, were tracked, straightened, length-normalized and finally averaged. The resulting average penumbral filament, shown in Fig. 11 was found to be remarkably uniform and has a structure that does not appear to depend much on the radial distance of the filament to the sunspot umbra.

The uniformly magnetized average structure has a hot, bright head, where material flows up, it then gradually cools while flowing towards the tail where it submerges in a strong downflow. Additional weak downflow lanes are visible on both sides of the filament, that are indicative of convection and appear to be largely consistent with the structure of penumbral filaments in numerical simulations. A paper has been submitted to Astronomy & Astrophysics.

3. Umbral dots (UDs) are regions in the umbra of sunspots that are characterized by temperature enhancement, magnetic field weakening and strong

Zentrum aufweisen. Wir konnten diese Aufwärtsströmungen nicht nur für periphere UD, sondern auch für zentrale UD feststellen, deren charakteristische Signatur im Allgemeinen deutlich weniger ausgeprägt ist. In einem Abstand zwischen 200 und 500 km vom Zentrum des UD finden wir systematische Abwärtsströmungen für beide Arten von UD, die eine Lösung liefern für das seit langem bestehende Problem der Massenbilanz in UD. In der oberen Photosphäre finden wir kaum einen Unterschied zwischen den UD und deren diffusem, umbralem Hintergrund. Eine Publikation dazu wurde in *Astronomy & Astrophysics* veröffentlicht.

upflow in deep atmospheric layers in the UD core. We find strong upflows not only for peripheral UD, but also for for central UD, whose characteristic signatures are generally less marked. Between 200 km and 500 km distance from the UD center, we find systematic downflows around both UD types, apparently solving the long-standing problem of the UD mass flux balance. In the upper photosphere, little or no difference between the UD and their diffuse umbral background is found. A paper has been published in Astronomy & Astrophysics.

Ausgewählte Publikationen

Selected Publications

T. Riethmüller, S. K. Solanki, M. van Noort, S. K. Tiwari, Vertical flows and mass flux balance of sunspot umbral dots, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 554, id. A53, 2013, doi: 10.1051/0004-6361/201321075

S. K. Tiwari, M. van Noort, A. Lagg, S. K. Solanki, Structure of sunspot penumbral filaments: a remarkable uniformity of properties, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 557, id. A25, 2013, doi: 10.1051/0004-6361/201321391

M. van Noort, Spatially coupled inversion of spectro-polarimetric image data. I. Method and first results, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 548, id. A5, 2012, doi: 10.1051/0004-6361/201220220

1.4 Helio- und Asteroseismologie

1.4.1 Überblick

Eines der wichtigsten bislang ungelösten Probleme der Sonnenphysik ist der Ursprung des 11-jährigen magnetischen Aktivitätszyklus der Sonne. Im Allgemeinen sind Aktivitätszyklen in kühlen Sternen mit konvektiver Hülle bislang kaum verstanden. Man glaubt, dass diese Zyklen aus dem Zusammenspiel von Strömungen (beispielsweise Konvektion und Rotation) und Magnetfeldern entstehen und sich durch Dynamodelle beschreiben lassen. Es ist jedoch völlig unklar, wo und wie genau diese Dynamos arbeiten und was die Periode des Aktivitätszyklus bestimmt. Der Grund für das fehlende Verständnis dieser Zyklen ist, dass es kaum verlässliche Informationen über Rotation und Konvektion im Innern von Sternen gibt.

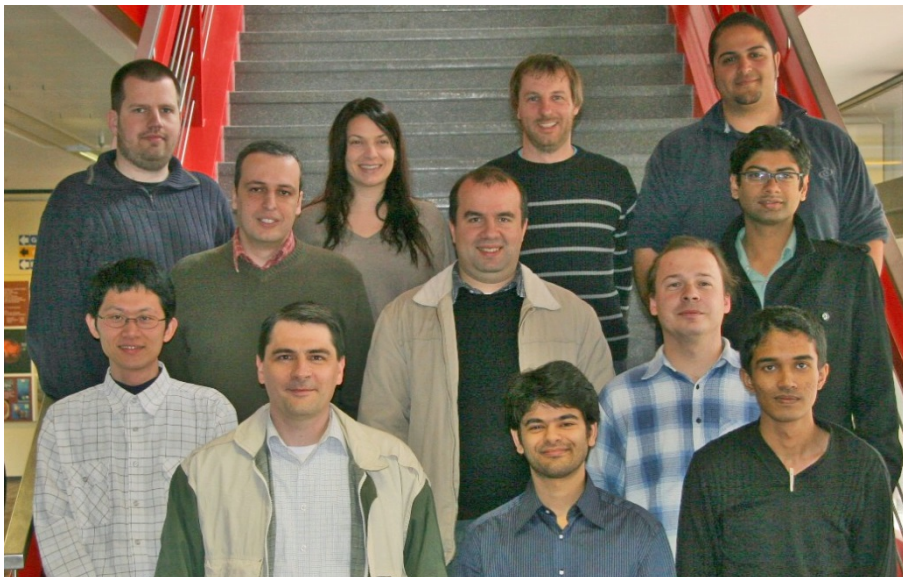
Die Helioseismologie nutzt stochastisch angeregte solare Oszillationsmoden, um in das Innere der Sonne zu blicken. Die Asteroseismologie ist eine Verallgemeinerung der Helioseismologie auf Oszillationen anderer Sterne. Diese Methoden erlauben es uns, Temperaturschichtungen und Strömungen in der Sonne und anderen sonnenähnlichen Sternen zu studieren und helfen uns dabei, solare und stellare Dynamos besser zu verstehen. Des Weiteren lässt sich aus der Kombination beider Methoden die Sonne im Kontext anderer Sterne verstehen. Dies eröffnet uns den Blick auf die mögliche Vergangenheit und Zukunft unseres Zentralgestirns.

1.4 Helio- and Asteroseismology

1.4.1 Overview

One of the most important unsolved problems in solar physics today is the origin of the Sun's eleven-year magnetic cycle. More generally, activity cycles in cool stars like the Sun are not understood. These cycles are expected to be the result of the interplay between flows (e.g., rotation and convection) and magnetic fields and are described by dynamo models. It is not clear, however, how and where these dynamos operate, and what sets the periods of activity cycles. The reason for this lack of understanding is the absence of sufficient empirical information about rotation and convection in stellar interiors.

Helioseismology is the use of stochastically excited solar oscillations as probes of the interior of the Sun. Asteroseismology is the generalization of helioseismology to the study of the oscillations of other stars. These tools allow us to study thermal structures and flows in the interior of the Sun and also the interiors of Sun-like stars, thereby bringing us closer to understanding solar and stellar dynamos. In addition, the combination of helioseismology and asteroseismology of Sun-like stars allows us to place the Sun in the context of other similar stars, and to study the possible futures and pasts of the Sun.



Die Abteilung "Das Innere der Sonne und der Sterne" im Jahr 2012

The department „Solar and Stellar Interiors“ in 2012

Im Jahre 2005 wurde am MPS die unabhängige Max-Planck-Forschungsgruppe (MPFG) "Helio- und Asteroseismologie" ins Leben gerufen. Eines der wichtigsten Ziele der Wissenschaftler war es, ein dreidimensionales Bild der solaren Konvektionszone zu gewinnen, um

An independent Max Planck Research Group (MPRG) "Helio- and Asteroseismology" was established in 2005 at the MPS. One of the main scientific aims was to image the solar convection zone in three dimensions and reveal physical relationships between internal

daraus auf physikalische Gesetzmäßigkeiten zwischen Materiebewegungen im Innern einerseits und den verschiedensten Erscheinungen magnetischer Aktivität in der Photosphäre andererseits zu schließen.

Diese Erkenntnisse sollten Aufschluss über den Ursprung des solaren Magnetfeldes geben. Im April 2011 wurde am MPS die neue Abteilung "Das Innere der Sonne und der Sterne" gegründet. Die neue Abteilung ist eine gemeinsame Initiative der Max-Planck-Gesellschaft, der Universität Göttingen und des Landes Niedersachsen. Sie baut direkt auf dem Erbe der Max-Planck-Forschungsgruppe "Helio- und Asteroseismologie" auf, wobei der wissenschaftliche Schwerpunkt auf dem Innern der Sonne und sonnenähnlicher Sterne verbleibt. Durch die gemeinsame Berufung von Laurent Gizon als MPS-Direktor und Professor an der Universität Göttingen wurde eine Arbeitsgruppe auch am Institut für Astrophysik Göttingen etabliert, welche sich mit den Themen der stellaren Modellierung, Asteroseismologie und Helioseismologie beschäftigt.

Helioseismologie

Durch Konvektion werden im Inneren der Sonne Millionen von Schwingungen angeregt, die es Astrophysikern erlauben ins Innere der Sonne zu blicken - ähnlich zu Geophysikern, die mit Hilfe von Erdbeben den inneren Aufbau der Erde untersuchen. In den letzten 25 Jahren hat die Helioseismologie eine beachtliche Anzahl von Entdeckungen im Bereich der Sonnenphysik und stellarer Astrophysik hervorgebracht, sowie wichtige Beiträge zur Grundlagenphysik geliefert. Beispielsweise hat die Helioseismologie die mit Abstand genauesten Tests zur Theorie von Sternenaufbau und -entwicklung geliefert. Dies erforderte insbesondere eine Korrektur des Standardmodells der Teilchenphysik, um das Problem der fehlenden Sonnenneutrinos zu lösen. Heute liegt der aufregendste Aspekt der Helioseismologie in der Suche nach dem Ursprung und der Variabilität des solaren Magnetfeldes. Nach allgemeiner Auffassung verursachen so genannte Dynamoprozesse den solaren Aktivitätszyklus. Dabei werden die Magnetfeldlinien durch Scherbewegungen im Sonneninnern gestreckt und verdreht. Die Helioseismologie ist unsere einzige Hoffnung diese Modellvorstellung zu bestätigen, durch die Kartierung von Massebewegungen im Innern, asphärischen Strukturen und deren zeitlicher Veränderung. Die Helioseismologie hat bereits wichtige Erkenntnisse in Bezug auf den Sonnendynamo geliefert. Dabei wurden u.a. die Scherung der Rotation im Sonneninnern, Variationen der Sonnenrotation in Abhängigkeit des Sonnenzyklus sowie rätselhafte, quasi-periodische Veränderungen am unteren Ende der Konvektionszone nachgewiesen.

Weitere Fortschritte in der Messung von Bewegungen im Sonneninnern, die wichtig für die Entstehung des Sonnendynamos sind, erwartet man sich von der so

motions and the various components of magnetic activity observed in the photosphere, in order to address the question of the origin of solar magnetism.

In April 2011, the new MPS department "Solar and Stellar Interiors" was created. The new department is a joint initiative of the Max Planck Society, the University of Göttingen, and the state of Niedersachsen. It builds directly on the legacy of the Max Planck Research Group "Helio- and Asteroseismology", with a scientific focus that remains on the interior of the Sun and Sun-like stars. Thanks to the joint appointment of Gizon as MPS Director and Professor at the University of Göttingen, a research group was also started at the Institute for Astrophysics, Göttingen, which covers topics in stellar modeling, asteroseismology, and helioseismology.

Helioseismology

Millions of modes of vibration of the Sun, excited by solar convection, can be used to probe the Solar interior, just as earthquakes can be used to probe the internal structure of the Earth. 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. The general belief is that the dynamo process, whereby magnetic field lines are stretched and twisted by internal shearing motions, causes the solar magnetic cycle. Helioseismology is our only hope to test this paradigm by mapping internal mass motions, structural asphericities, and their temporal variations. Helioseismology has already provided some important results related to the solar dynamo: the detection of regions of rotational shear in the Sun's interior, solar-cycle variations in the rotation rate, and quasi-periodic changes at the base of the convection zone.

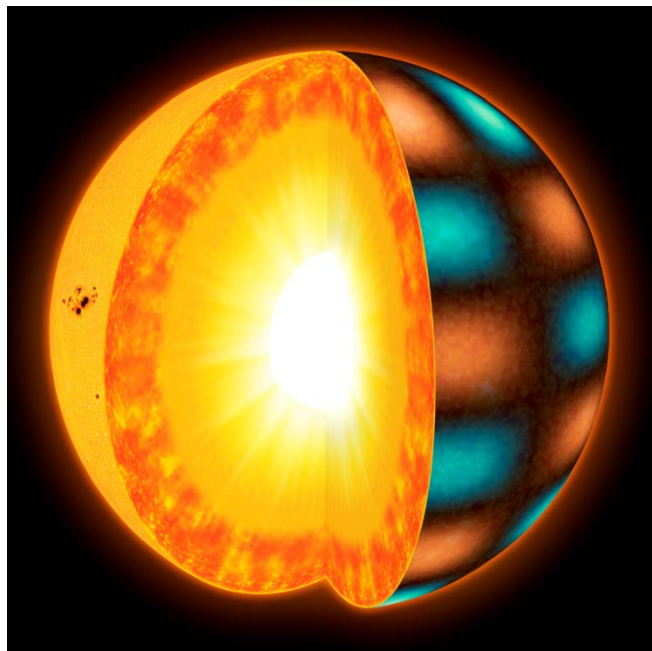
The next advances in measuring internal motions that are important for the solar dynamo are expected to come from local helioseismology, which provides 3D

genannten lokalen Helioseismologie, die dreidimensionale Bilder des Sonneninneren 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 Breitengrad-abhängigen Transport von magnetischem Fluss aufzeigen können, der den 11-jährigen Sonnenzyklus bestimmen könnte. Detaillierte, dreidimensionale Karten von Strömungen unterhalb der Sonnenoberfläche werden den Schlüssel bilden zum Verständnis komplexer magneto-hydrodynamischer Phänomene, die die Sonnenaktivität steuern.

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 nonlinear modulation of the eleven-year period of the solar cycle. Detailed 3D maps of subsurface flows will be key to understanding the complex magneto-hydrodynamical phenomena that control solar activity.

Das Bild zeigt die horizontalen Variationen (rechts, blau und orange) der Sonne im normalen Oszillationsmodus. Im Schnitt ist die Konvektionszone erkennbar ($r > 0,7 R_{\text{Sun}}$, orange und gelb) und darunter die Strahlungszone im Inneren (gelb). Links auf der Oberfläche ist ein Beispiel für eine aktive Region, dargestellt als Intensitätskontrast.

The figure shows the horizontal variations (blue and orange, on the right) of an example normal mode of oscillation of the Sun. The cut into the Sun shows the convection zone ($r > 0.7 R_{\text{Sun}}$, orange and yellow) and below the radiative interior (yellow). On the surface on the left is an example intensity image showing an active region.



Die NASA-Mission "Solar Dynamics Observatory" (SDO) hat in den letzten Jahren hochaufgelöste Daten der gesamten Sonnenscheibe geliefert. Beobachtungen des "Helioseismic and Magnetic Imager" (HMI) an Bord von SDO werden von der Universität Stanford automatisch ans MPS weitergeleitet. Die Analyse dieser Daten spielte dabei eine wichtige Rolle für unsere Abteilung. Siehe hierzu z.B. die Artikel "Ist die Konvektion im Sonneninneren langsamer als gedacht?" sowie "Helioseismologie aktiver Regionen vor deren Erscheinen" weiter unten.

In the past few years, high-resolution full-disk data for helioseismology have been obtained by the NASA Solar Dynamics Observatory (SDO) mission. Observations from the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) onboard SDO automatically stream to MPS from Stanford University and have played a central role in the activities of the department. For examples, see the articles "Is convection in the solar interior slower than expected?" and "Helioseismology of active regions before their emergence" below.

Das äußerst hohe Datenaufkommen von SDO (1 TB/Tag) erfordert erhebliche Rechen- und Speicherkapazitäten, die extra hierfür am MPS installiert wurden, um so das deutsche Wissenschaftszentrum für SDO zu bilden. Diese bedeutende Einrichtung wurde unterstützt durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) sowie durch ein vom Europäischen Forschungsrat ("European Research Council", ERC) gefördertes Programm (2007, "Seismische Darstellung des Sonneninneren") und ist betriebsbereit. Zusätzlich zu den Aufnahmen von SDO

The SDO data rate is of the order of 1 TB/day and thus 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 a European Research Council ERC Starting Grant (2007, "Seismic Imaging of the Solar Interior") is currently operational. In addition to the new observations from SDO, other important helioseismology data sets are the observations from the Solar and Heliospheric Observatory (SOHO) spacecraft (a very successful

gibt es weitere wichtige Datenquellen für die Helioseismologie: u.a. das Weltraumteleskop "Solar and Heliospheric Observatory" (SOHO - eine äußerst erfolgreiche Kooperation zwischen ESA und NASA) sowie das bodengebundene Beobachtungsnetzwerk "Global Oscillation Network Group" (GONG).

Noch vor Ende dieses Jahrzehnts wird die ESA-Mission "Solar Orbiter" von einem Orbit außerhalb der Ekliptikebene einen neuen Blick auf die Sonne liefern. Dieser neue Blickwinkel eröffnet die direkte Sicht auf höhere Breitengrade einschließlich der Sonnenpole und ermöglicht damit der lokalen Helioseismologie die Kartierung von Konvektion und Strömungen auf großen Skalen. Diese Messungen werden dazu beitragen, die Modelle des Transports von magnetischem Fluss in die Polregionen zu verbessern. Die Abteilung ist momentan damit beschäftigt, die helioseismologischen Aspekte der "Solar Orbiter"-Mission zu planen.

Asteroseismologie

Asteroseismologie, die Suche nach globalen Oszillationen von weit entfernten Sternen, ist ein dynamisches, schnell wachsende Feld. Es profitiert vor allem von Weltraummissionen, die eine große Anzahl von Sternen über einen langen Zeitraum hinweg beobachten. Ein Pionier auf diesem Gebiet war die CNES-ESA-Weltraummission CoRoT, die 2006 startete. Die andere für die Asteroseismologie entscheidende Mission stellt das NASA-Weltraumteleskop Kepler dar, das im Jahre 2009 ins All geschossen wurde. Obwohl beide Missionen ursprünglich für die Suche nach extrasolaren Planeten ausgelegt waren, haben ihre Beobachtungen die Asteroseismologie revolutioniert.

Stellare Oszillationen schränken Modelle des Sternaufbaus erheblich ein: Zum einen lassen sich für ein gegebenes Sternmodell aus den Oszillationen wichtige Eigenschaften des Sterns, wie z. B. Radius, Masse und Alter bestimmen. Das hilft sowohl dabei, die Entstehungsgeschichte der Sterne in unterschiedlichen Teilen unserer Galaxie nachzuvollziehen, als auch bei der Bestimmung von Masse, Radius, und Alter von Planeten. Zum anderen tragen die Oszillationen zu einem besseren Verständnis von Prozessen bei (z. B. Konvektion), die durch Modelle nur unzureichend beschrieben werden. Schließlich lassen sich mit Hilfe der Asteroseismologie abrupte Übergänge wie die scharfen Grenzen von Konvektions- und Ionisationszonen bestimmen. Das kann dazu beitragen, dynamogetriebene stellare Aktivitätszyklen zu verstehen und die Erkenntnisse über die Sonne in einen stellaren Kontext zu setzen.

Asteroseismologie kann auf viele Arten von Sternen angewendet werden. Das ist von großer Bedeutung, um so die Konsistenz der Modelle unter einer Vielzahl physikalischer Bedingungen zu testen. Ein besonders interessantes Forschungsgebiet unserer Abteilung ist die Erforschung alter Sterne, (Unterriesen und rote

collaboration between ESA and NASA) and the ground-based Global Oscillation Network Group (GONG).

Before the end of this decade, Solar Orbiter, an ESA medium-class mission, will provide a view of the Sun from an orbit inclined out of the ecliptic plane. This vantage point will allow a direct view of the polar regions of the Sun and thus allow local helioseismology of both convection and large-scale flows at high solar latitudes. These measurements will help constrain models for the transport of magnetic flux in the polar regions. The department is currently involved in planning for the helioseismology aspects of the Solar Orbiter mission.

Asteroseismology

Asteroseismology, the study of global oscillations on distant stars, is a vibrant and rapidly growing field, owing to space missions dedicated to long-term, simultaneous monitoring of large numbers of stars. One pioneering mission of this kind was the CNES-ESA CoRoT mission (launched 2006). The other major space mission for asteroseismology is NASA's Kepler space telescope (launched 2009). Though largely planet-finding missions, CoRoT and Kepler have produced revolutionary observations for asteroseismology.

Stellar oscillations tightly constrain models in a number of ways. First, for a given set of models, the oscillations can be used to precisely determine basic stellar parameters like mass, radius and age. These fundamental constraints are useful determining how stars have evolved in different parts of the galaxy and determining the mass, radii and ages of planets. Second, the oscillations also help constrain poorly-understood processes that are approximated in the models, like convection. Finally, asteroseismology can identify abrupt features like the boundaries of convection and ionization zones, which can help to understand dynamo-driven activity cycles and improve the solar-stellar connection.

Asteroseismology can be applied to many types of stars; this is important for testing that models are consistent across a variety of physical conditions. A particularly exciting area in which the department is involved is the study of older stars (subgiants and red giants) in which the rotation rates of the core and

Riesen). In diesen Sternen kann man die Rotationsperioden des Kerns und der konvektiven Hülle getrennt bestimmen. Das geschieht durch die Beobachtung von gemischten Oszillationsmoden, d.h. Moden mit einer Mischung aus Schall- und internen Schwerewellencharakter.

Unsere Abteilung spielt eine wichtige Rolle bei den bodengestützten Aufgaben der möglichen ESA M3-Mission "PLANetary Transits and Oscillations of stars" (PLATO). Das Konzept von PLATO ist es, Exoplaneten durch die Transitmethode aufzuspüren und die Muttersterne asteroseismologisch zu klassifizieren (Radius, Masse, Alter). Obwohl PLATO 2011 nicht ausgewählt wurde, konkurriert es derzeit mit anderen Missionen um den Platz der M3-Mission. Sollte PLATO im Februar 2014 ausgewählt werden, wird es hochpräzise asteroseismologische Daten von mehr als 85.000 kühlen Zwergsternen liefern.

Auf den folgenden Seiten werden zwei ausgewählte Themen näher vorgestellt: „Ist die Konvektion im Sonneninneren langsamer als gedacht?“ und „Helioseismologie aktiver Regionen vor deren Erscheinen“.

1.4.2 Ist die Konvektion im Sonneninneren langsamer als gedacht?

Konvektion – der Wärmetransport durch Strömungen – spielt in Modellen des Sonneninneren eine zentrale Rolle: Sie ist verantwortlich für den Energietransport nach außen in den äußeren 30 % des Sonnenradius entspricht (der sogenannten Konvektionszone) und sorgt für die Aufrechterhaltung der Strömungen auf globaler Ebene. Das heutige Verständnis der solaren Konvektion basiert auf theoretischen Modellen und numerischen Simulationen (Miesch et al. 2008). Beide Methoden liefern ähnliche Schätzungen für die Stärke von konvektiven Strömungen im Inneren der Sonne.

Helioseismologie – die Verwendung solarer Oszillationen (akustische Wellen im Innern der Sonne, die in zufälliger Weise durch starke oberflächennahe Konvektion angeregt werden) als „Testballons“ für das Sonneninnere – hat eine lange Tradition darin, die Theoretiker zu überraschen. Ein bemerkenswertes Beispiel war die Entdeckung, dass das Material in der solaren Konvektionszone eine Rotationsgeschwindigkeit besitzt, die auf Linien in radialer Richtung ungefähr konstant ist und nicht etwa auf Zylindern parallel zur Rotationsachse, wie es von frühen Modellen vorhergesagt wurde (siehe z. B. Thompson et al. 2003 für einen Übersichtsartikel zur inneren Rotation der Sonne).

Ein weiteres Beispiel ist die Entdeckung einer sehr dünnen Schicht am unteren Ende der Konvektionszone, der sogenannten *Tachocline*-Region, wo die breitengradabhängige Rotationsgeschwindigkeit der

envelope can be separated through the observation of mixed oscillation modes, i. e. modes of mixed acoustic and internal gravity-wave character.

The Department plays a leading role in the ground segment activities of the ESA M3 mission candidate, PLANetary Transits and Oscillations of stars (PLATO). The concept of PLATO is to characterize transiting exoplanets through the asteroseismology of host stars (radii, masses, ages). Although PLATO was not selected in 2011, the project has joined the competition for the M3 launch slot. If selected in February 2014, the PLATO mission will provide precision asteroseismic data for over 85,000 cool dwarf stars.

In the following pages two particular topics are presented in more detail: “Is convection in the solar interior slower than expected?” and “Helioseismology of active regions before their emergence”.

1.4.2 Is Convection in the Solar Interior Slower than Expected?

Convection, the transport of heat by flows, plays a central role in models of the solar interior: it is responsible for the outwards transport of energy through the outermost 30 % of the distance from the center to the surface of the Sun (the convection zone) and is also responsible for maintaining the global-scale flows on the Sun. Current understanding of solar convection is based on theoretical models and numerical simulations (e.g., Miesch et al. 2008). Both methods provide similar estimates of the strength of convective flows in the solar interior.

Helioseismology, the use of solar oscillations (acoustic waves in the interior of the Sun that are randomly excited by vigorous near-surface convection) as probes of the solar interior, has a long history of providing surprises to theorists. One notable example was the discovery that the bulk of the solar convection zone has a rotation rate that is approximately constant on radial lines rather than constant on cylinders aligned with the rotation axis as predicted by early models (see e.g., Thompson et al. 2003 for a review of solar internal rotation).

Another example is the discovery of a very thin layer at the base of the convection zone, the tachocline region, where the latitudinally varying angular velocity of the convection zone transforms into the rigid body

Konvektionszone in die gleichförmige Rotation eines starren Körpers in der Strahlungszone übergeht. Die Strahlungszone bezeichnet die Region gleich unterhalb der Konvektionszone, in der Strahlung den dominanten Mechanismus für den Energietransport nach außen darstellt.

rotation of the radiation zone. In the radiation zone, the mechanism for the energy transport is radiation.

Abb. 1 Beispiel für eine Karte der Plasmageschwindigkeit in Richtung des Beobachters auf der Sonnenoberfläche (ein so genanntes Dopplergramm, hier als Graustufenbild im Hintergrund), aufgenommen vom Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) an Bord des NASA-Satelliten Solar Dynamics Observatory (SDO). Zeitreihen dieser Bilder können als Anordnung von Seismometern auf der Sonnenoberfläche verstanden werden. Sie werden verwendet, um die Laufzeit von akustischen Wellen auf verschiedenen Wegen durch das Sonneninnere zu messen. Die spezielle Mess-Geometrie, die hier gezeigt ist (farbige Kreisbögen), zeigt Beispiele für die Regionen, die genutzt werden, um Wellenlaufzeiten in Ost-West- (blaue Linien) und Nord-Süd-Richtung (rote Linien) zu messen.

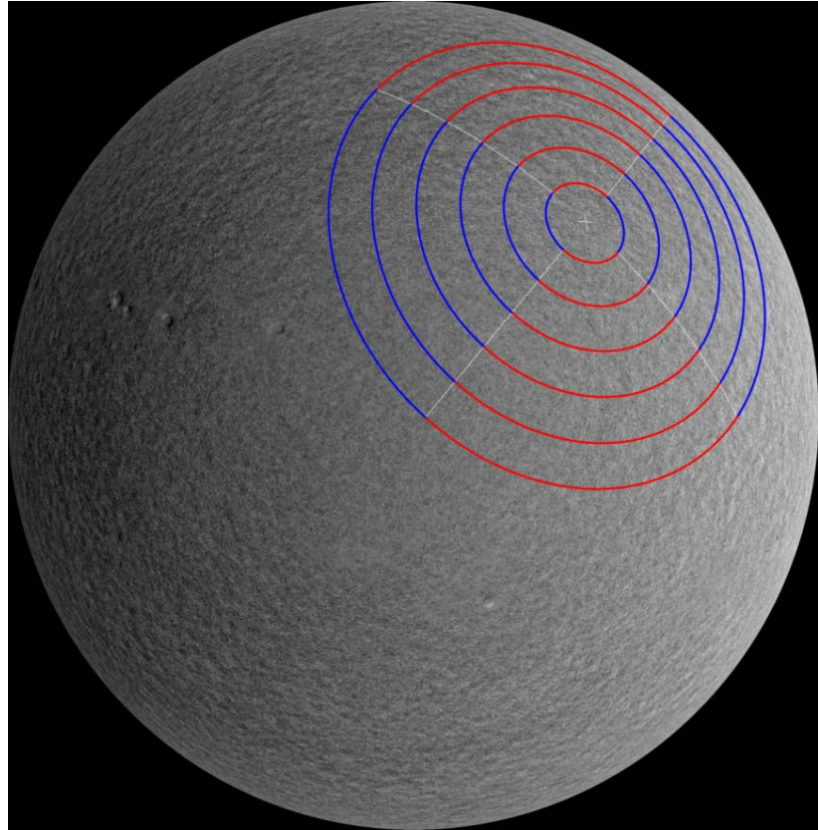


Fig. 1 An example map of the line-of-sight velocity on the surface of the Sun (called a “Dopplergram”, here shown as the background gray scale image) from the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) on board the Solar Dynamics Observatory (SDO). Time series of these images can be thought of as providing an array of seismometers on the surface of the Sun and are used to measure to the time required for acoustic waves to travel along various paths through the solar interior. The particular measurement geometry shown here (colored lines) outline examples of the regions that are used for measuring east-to-west (blue lines) and north-to-south (red lines) wave travel times. Figure from Hanasoge et al. (2012)

Kürzlich wendeten Hanasoge et al. (2012) Methoden der Helioseismologie auf Beobachtungsdaten des Instruments *Helioseismic and Magnetic Imager* (HMI) an Bord des NASA-Satelliten *Solar Dynamics Observatory* (SDO, Scherrer et al 2012) an, um eine obere Grenze für die Stärke von konvektiven Strömungen im Sonneninneren zu erhalten (Abb. 1). Der Ansatz basierte auf *Time-Distance-Helioseismologie* (Duvall et al. 1993), bei der die Laufzeit von akustischen Wellen durch die Sonne zwischen zwei Orten auf der Sonnenoberfläche gemessen wird. Die Wege dieser Wellen durch das Sonneninnere werden vor allem von der radialen Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit bestimmt. Diese steigt wegen der höheren Temperatur mit zunehmender Tiefe an, sodass von der Oberfläche kommende Wellen sukzessive nach oben gebrochen

Recently, Hanasoge et al. (2012) applied helioseismology to the observations from the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) on board the Solar Dynamics Observatory (SDO; Scherrer et al. 2012) to obtain an upper limit on the strength of convective flows in the solar interior (Fig. 1). The approach was based on time-distance helioseismology (Duvall et al. 1993), which involves measuring the time required for acoustic waves in the Sun to propagate between different locations on the solar surface. These waves follow paths (analogous to optical ray paths) through the solar interior that are determined mostly by the radial dependence of the sound speed (the sound speed increases rapidly with depth below the surface due to the increasing temperature; thus waves originating at the surface are refracted

werden und zur Oberfläche zurückkehren. Die beobachteten Differenzen der Laufzeiten von Wellen, die denselben Weg in entgegengesetzten Richtungen durchlaufen, reagieren empfindlich auf die Strömungen im Sonneninneren. Daher können Messungen der Wellenlaufzeiten mittels einer Kalibrationsprozedur in Abschätzungen der Strömungen im Sonneninneren umgerechnet werden.

Abb. 2 zeigt die beobachtete obere Grenze für die Stärke der konvektiven Strömungen, die von Hanasoge et al. (2012) ermittelt wurde. Sie ist hier wiedergegeben durch das sogenannte Spektrum der kinetischen Energie, bei dem das Quadrat der Strömungsamplitude in Abhängigkeit von der horizontalen Längenskala aufgetragen ist. Die horizontale Längenskala wird hier durch die so genannte Nebenquantenzahl ausgedrückt, die dem Umfang der Sonne, geteilt durch die horizontale Längenskala, entspricht. Also gilt: Je größer die Nebenquantenzahl, desto kleiner die zugehörige Längenskala. zeigt außerdem Vorhersagen zweier Simulationen solarer Konvektion. Die aus der Beobachtung gewonnene obere Grenze ist um einige Größenordnungen kleiner als die Vorhersagen des *Anelastic Spherical Harmonic*-Codes (ASH-Code; Miesch et al. 2008), der einen Standard-Code für die Simulation von solarer Konvektion in sphärischer Geometrie darstellt.

Wie von Gizon & Birch (2012) diskutiert, wird diese Diskrepanz noch augenfälliger, wenn man weitere Vergleiche anstellt (siehe ebenfalls). Ein Standard-Code für oberflächennahe Konvektion in kartesischer Geometrie, der Strahlungseffekte berücksichtigt, ist *Stagger* (Stein & Nordlund 2006). Die Vorhersagen des *Stagger*-Codes stimmen auf den Längenskalen, wo die Simulationen miteinander verglichen werden können, ungefähr mit den Resultaten des ASH-Codes überein. ASH vernachlässigt jedoch Strahlungseffekte, d. h. der Code berücksichtigt die oberen Schichten der Konvektionszone nicht. *Stagger* behandelt die oberflächennahen Schichten dagegen umfassend. Die grobe Übereinstimmung beider Simulationen legt nahe, dass das Spektrum der oberflächenfernen Konvektion in den Simulationen nicht stark von der oberflächennahen Konvektion beeinflusst wird.

Andere Beobachtungsmethoden können ebenfalls herangezogen werden, um weitere Aussagen über die Amplitude der konvektiven Strömungen an der Sonnenoberfläche zu erhalten. zeigt zusätzlich Messergebnisse für Oberflächenströmungen von Roudier et al. (2012). Die Messung wurde durchgeführt, indem Granulen (kleinskalige Manifestationen der Konvektion) in Zeitreihen von Bildern von SDO/HMI verfolgt wurden. Zur erneuten Überraschung sind diese Oberflächenströmungen schwächer als die tiefen Strömungen, die vom ASH-Code vorhergesagt wurden; die Standardtheorie der Konvektion sagt hingegen voraus, dass die Amplitude der konvektiven

upwards as they propagate). The observed differences in travel times for waves propagating along the same path but in opposite directions are sensitive to flows in the solar interior. Thus, measurements of wave travel times can, through a calibration procedure, be converted into estimates of flows in the solar interior.

Fig. 2 shows the observational upper limit obtained by Hanasoge et al. (2012), expressed in terms of a kinetic energy spectrum which gives the square of the amplitude of the flow as a function of horizontal length scale. Here the horizontal length scale is expressed in terms of angular degree; the horizontal length scale is the solar circumference divided by the angular degree. also shows predictions from two simulations of solar convection. The observational upper limits are several orders of magnitude below the predictions of the Anelastic Spherical Harmonic code (ASH code; Miesch et al. 2008), which is a standard code for simulating large-scale solar convection in spherical geometry.

As discussed by Gizon & Birch (2012), this disagreement is made even more striking through several additional comparisons (also shown in). The predictions of the stagger code are in approximate agreement with the ASH results in the range of horizontal scales where the two simulations can be compared. ASH does not treat radiation and thus does not include the upper layers of the convection zone; stagger contains a comprehensive treatment of the near-surface layers. The rough agreement between the two suggests that the spectrum of the deep subsurface convection in the simulations is not strongly sensitive to the treatment of near-surface convection.

Other observational methods can be brought to bear on the question of the amplitude of convective flows at the solar surface. also shows a measurement of surface flows by Roudier et al. (2012) by following small features in time series of images from SDO/HMI. It came as another surprise that these surface flows are weaker than the deep flows predicted by the ASH code. Standard convection theory predicts that the amplitude of convective flows should decrease with depth below the photosphere. The observations of surface flows thus lead to the independent suggestion that a new look at convection models is required.

Strömungen mit zunehmender Tiefe unter der Photosphäre abnehmen sollte. Die Beobachtungen der Oberflächenströmungen legen also nahe, dass ein neuer Blick auf die Modelle der Konvektion erforderlich ist, und das unabhängig von den Ergebnissen der Helioseismologie.

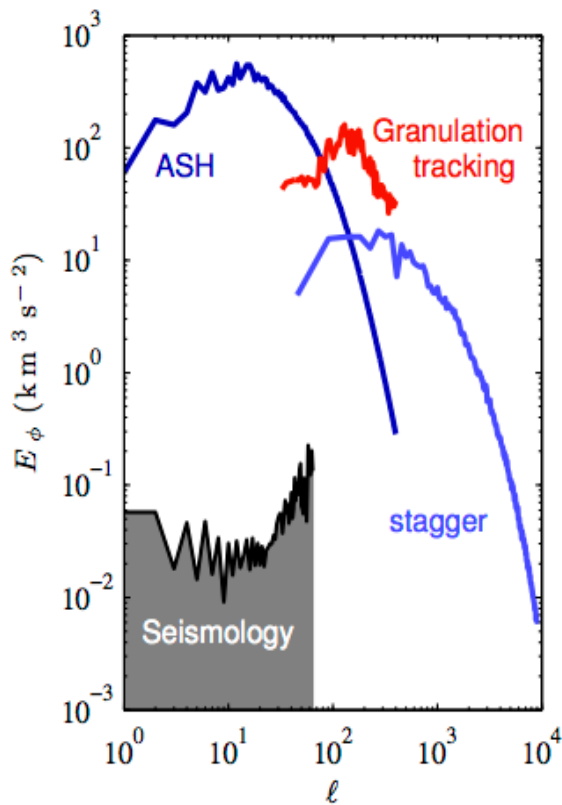


Abb. 2 Die quadratische Amplitude der horizontalen Strömungsgeschwindigkeiten (ausgedrückt als Spektrum der kinetischen Energie E) in Abhängigkeit von der Nebenquantenzahl l (die Nebenquantenzahl beschreibt die horizontale Längenskala der Strömung und ist gleich dem Sonnenumfang geteilt durch die Längenskala). Die graue Zone zeigt den Bereich, der nach den Einschränkungen durch Hanasoge et al. (2012) für eine Tiefe von $r=0,96R_{\odot}$ (R_{\odot} =Sonnenumfang) erlaubt ist. Die quadratische Amplitude der Oberflächengeschwindigkeiten, die durch die Verfolgung von Granulen bestimmt wurde, ist durch die rote Kurve dargestellt (Roudier et al. 2012). Diese Kurve weist einen Peak bei einer Nebenquantenzahl von 120 auf, der durch Supergranulation verursacht wird. Die dunkelblaue Kurve mit einem Peak um eine Nebenquantenzahl von 10 stammt von den sphärischen ASH-Simulationen (Miesch et al. 2008) für eine Tiefe von $r=0,98R_{\odot}$. Die hellblaue Kurve stammt von den kartesischen Konvektionssimulationen des *Stagger*-Codes, ebenfalls bei $r=0,98R_{\odot}$. Dort, wo die Längenskalen von beiden Simulationen überlappen, stimmen die Ergebnisse grob überein. Diese Abbildung zeigt, dass die beobachteten oberen Grenzen von Hanasoge et al. (2012) im Widerspruch zu aktuellen Simulationen der Konvektion im Sonneninneren stehen.

Fig. 2 Squared amplitude of horizontal velocities as functions of angular degree (the angular degree describes the horizontal length scale of the flow and is the number of wavelengths around the solar circumference). The gray region shows the region allowed by the observational helioseismology constraints of Hanasoge et al. (2012) for the depth of $r=0.96R_{\text{sun}}$. The squared amplitude of surface velocities measured by following small-scale features (Roudier et al., 2012) is shown in the heavy red curve. This curve has a peak at an angular degree of about 120 and is due to the supergranulation pattern (an intermediate scale of convection). The dark blue curve with a peak around angular degree about ten is from the spherical ASH simulations (Miesch et al. 2008) for the depth of $r=0.98R_{\text{sun}}$. Convective velocities are expected to decrease with depth below the surface, so this is in conflict with both the helioseismology and surface tracking constraints. The light blue curve is from the Cartesian radiative convection simulations with the *stagger* code, also at $r=0.98R_{\text{sun}}$. In the region of overlap, the *stagger* and ASH results are in rough agreement. This figure shows that the observational upper limits of Hanasoge et al. (2012) are in conflict with current simulations of convection in the interior of the Sun. Figure from Gizon & Birch (2012).

Die gemessenen Oberflächenströmungen (Abb. 2) zeigen einen Peak im Energiespektrum bei einer Nebenquantenzahl von ungefähr 120; dies entspricht einer Längenskala von ca. 35 Mm (1 Mm sind 1.000 km). Zum Vergleich: Der Radius der Sonne beträgt 696 Mm. Verantwortlich dafür ist Supergranulation, ein Konvektionsmuster auf einer mittleren Längenskala. Der Peak liegt genau in dem Bereich, wo die sphärischen ASH-Simulationen und die kartesischen *Stagger*-Simulationen überlappen. Über den physikalischen Ursprung der

The measured surface flows (Fig. 2) show a peak in the kinetic energy spectrum at an angular degree of about 120 (which corresponds to a horizontal scale of about 35 Mm, for reference the solar radius is 696 Mm). This peak is due to the supergranulation, an intermediate scale of convection, and occurs just at the region of overlap between the spherical ASH simulations and the Cartesian domain *stagger* simulations. The physical origin of these features is not well known. As the *stagger* simulations are

Supergranulen ist bisher wenig bekannt. Wenn einmal die *Stagger*-Simulationen auf größere Skalen und die ASH-Simulationen auf kleinere Skalen ausgeweitet werden können, wird der beobachtete Peak einen wichtigen Test für die Vereinbarkeit der Simulationen mit den Beobachtungen darstellen.

Die durch Helioseismologie gewonnenen Ergebnisse von Hanasoge et al. (2012) stellen eine ernsthafte Herausforderung für die Modelle der solaren Konvektionszone dar. Eine mögliche Auflösung der Probleme besteht in der Revision der helioseismischen Methoden der Datenanalyse. Insbesondere bei der Umrechnung von Wellenlaufzeiten in Geschwindigkeiten von konvektiven Strömungen wurden bislang verschiedene Annahmen benutzt. So wurden Tiefenkorrelationen in den Geschwindigkeiten ignoriert und die Konvektion als in der Zeit „eingefroren“ angenommen, d. h. für die Zeit, die die Wellen benötigen, um sich durch das Innere der Sonne zu bewegen, wurde die Konvektion als gleich bleibend betrachtet. Zukünftige Arbeiten im Rahmen des DFG-Sonderforschungsbereichs 963 „Astrophysikalische Strömungsinstabilität und Turbulenz“ werden diese Möglichkeiten erforschen.

extended to larger domains and larger spatial scales and the ASH simulations are extended to capture smaller spatial scales, the observed supergranulation peak will provide an important observational test.

The helioseismic inferences of Hanasoge et al. (2012) have brought a serious challenge to models of the solar convection zone. One possible resolution is a revision in the helioseismic data analysis methods. In particular, the calibration from wave travel times to convective velocities employed several assumptions: depth correlations in the convective velocities were ignored and the convection was assumed to not change in the time needed for the waves to propagate through the solar interior. Future work will explore these possibilities as a part of the special research area “Astrophysical Flow Instabilities and Turbulence”.

Ausgewählte Publikationen

Selected Publications

- M. S. Miesch, A. S. Brun, M. L. De Rosa, J. Toomre, J., Structure and evolution of giant cells in global models of solar convection, *Astrophysical Journal*, vol. 673, issue 1, pp. 557–575, 2008, doi: 10.1086/523838
- M. J. Thompson, J. Christensen-Dalsgaard, M. S. Miesch, et al., The internal rotation of the sun, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 41, pp. 599–643, 2003, doi: 10.1146/annurev.astro.41.011802.094848
- S. M. Hanasoge, T. L. Duvall Jr., K. R. Sreenivasan, Anomalously weak solar convection, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 109, issue 30, pp. 11928–11932, 2012, doi: 10.1073/pnas.1206570109
- P. H. Scherrer, J. Schou, R. I. Bush, A. G. Kosovichev, The helioseismic and magnetic imager (HMI) investigation for the solar dynamics observatory (SDO), *Solar Physics*, vol. 275, pp. 207–227, 2012, doi: 10.1007/s11207-011-9834-2
- T. L. Duvall Jr., S. M. Jefferies, J. W. Harvey, M. A. Pomerantz, Time-distance helioseismology, *Nature*, vol. 362, no. 6419, pp. 430–432, 1983, doi: 10.1038/362430a0
- L. Gizon, A. C. Birch, H. C. Spruit, Local helioseismology: three-dimensional imaging of the solar interior *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 48, pp. 289–338, 2010, doi: 10.1146/annurev-astro-082708-101722
- L. Gizon, A. C. Birch, Helioseismology challenges models of solar convection, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109, pp. 11896–11897, 2012, doi: 10.1073/pnas.1208875109
- R. F. Stein, Å. Nordlund, Solar small-scale magnetoconvection, *Astrophysical Journal* vol. 642, issue 2, pp. 1246–1255, 2006, doi: 10.1086/501445
- Th. Roudier, M. Rieutord, J. M. Malherbe, Quasi full-disk maps of solar horizontal velocities using SDO/HMI data, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 540, id A88, 2012, doi: 10.1051/0004-6361/201118678

1.4.3 Helioseismologie aktiver Regionen vor deren Erscheinen

Sonnenflecken sind kreisförmige dunkle Regionen auf der Sonnenoberfläche, die sich durch starke Magnetfelder auszeichnen. Mit Radien von bis zu 15.000 km erlangen sie nur einen Bruchteil des Sonnenradius (ca. 700.000 km). Die Anzahl der Sonnenflecken verändert sich mit der Zeit. Während eines Aktivitätsminimums kommen Sonnenflecken selten oder gar nicht vor, wohingegen sie während eines Aktivitätsmaximums häufig zu finden sind. Die Aktivitätsminima und -maxima wechseln sich mit der Zeit ab; man spricht vom 11-jährigen Aktivitätszyklus.

Es existiert eine Vielzahl von Modellen, die versuchen den Sonnenzyklus zu erklären. In einigen dieser Modelle wird die großräumige Ost-West-Komponente des magnetischen Feldes der Sonne am unteren Ende der Konvektionszone generiert. In der Konvektionszone wird Energie durch Konvektion zur Sonnenoberfläche transportiert. Diese Zone erstreckt sich von der Sonnenoberfläche bis in eine Tiefe von 200.000 km ins Sonneninnere. Man nimmt an, dass großräumige Magnetfelder am unteren Ende der Konvektionszone Instabilitäten hervorrufen, die zu lokalen Magnetfeldkonzentrationen führen können. Diese Gebiete haben eine geringere Plasmadichte als die Umgebung und steigen durch die Auftriebskraft zur Sonnenoberfläche auf. Wenn diese Regionen die Sonnenoberfläche erreichen, treten sie als magnetisch aktive Regionen und Sonnenflecken in Erscheinung (s. Abb. 3).

Als Folge ihres Auftriebs bewegen sich diese Regionen weg von der Rotationsachse der Sonne, welche in Nord-Süd-Richtung liegt. Die Rotation der Sonne selbst erfolgt in Richtung Westen. Aus der Drehimpulserhaltung folgt, dass diese Regionen lokaler Magnetfeldkonzentrationen starke Materieströme (in der Größenordnung von einigen 100 m/s) hervorrufen müssen, welche sich entgegengesetzt zur Rotationsrichtung der Sonne bewegen. zeigt ein Modell für die durch Auftriebskraft hervorgerufene Ost-West-Strömung. Das Aufspüren dieser Flüsse unterhalb der Oberfläche würde es uns erlauben, magnetische Flusskonzentrationen zeitlich zu verfolgen, und so stärkere Randbedingungen für den solaren Fleckenzyklus zu formulieren.

Das Sonneninnere ist undurchsichtig, also der direkten Beobachtung nicht zugänglich. Wie können wir also Materieströme im Sonneninneren untersuchen? Die Antwort auf diese Frage heißt Helioseismologie! Sie nutzt die Beobachtung von Wellen auf der Sonnenoberfläche aus, um ins Innere der Sonne zu blicken (einen Übersichtsartikel hierzu findet man z.B. in Gizon, Birch & Spruit, 2010). Durch lokale Druckunterschiede finden in der Sonne Oszillationen statt. Es breiten sich Druckwellen aus, die aus Regionen höhe-

1.4.3 Helioseismology of Active Regions before their Emergence

Sunspots are regions of strong magnetic field and appear as roughly 15,000 km diameter circular dark regions on the surface of the Sun, which has a radius of about 700,000 km. The number of sunspots on the Sun changes with time. During periods of solar minimum sunspots are absent and during periods of solar maximum sunspots are common. As time passes the Sun alternates between solar minimum and solar maximum. This sunspot cycle takes about eleven years.

A variety of models to explain the sunspot cycle exist. In some of these models, the large-scale East-West component of the Sun's magnetic field is generated near the bottom of the convection zone. The convection zone (where energy is transported towards the solar surface by convection) extends from the solar surface down to about 200,000 km below the solar surface. Large-scale magnetic fields at the base of the convection zone are expected to develop instabilities that lead to local concentrations of magnetic field. These local concentrations have a plasma density that is smaller than that of the ambient plasma and thus rise to the solar surface. When these magnetic concentrations reach the solar surface they appear as magnetic active regions and sunspots (Fig. 3).

As a result of their buoyant rise, magnetic flux concentrations move away from the axis of rotation of the Sun (which is aligned in the North-South direction, and rotates westwards). Due to the conservation of angular momentum these flux concentrations are thus expected to develop strong flows (of order 100 m/s) in the direction opposite to the direction of rotation. Fig. 4 shows one model for the flow system associated with a buoyantly rising flux concentration. Detection of these flows below the surface would enable us to track these magnetic flux concentrations below the solar surface and thus enable us to place strong constraints on models of the sunspot cycle.

The interior of the Sun is opaque so how can we study flows in the solar interior? The answer is helioseismology: the use of observations of waves at the surface Sun to study the solar interior (for a review of the topic, see Gizon, Birch, & Spruit, 2010). The Sun is filled with pressure waves. These pressure waves consist of propagating regions of compressed (high pressure) and expanded (low pressure) regions of the plasma and are analogous to sound waves in air. These waves are generated by the strong turbulent

ren und niedrigeren Gasdrucks bestehen, ähnlich zu Schallwellen in der Luft, und im Sonneninneren gefangen sind. Diese Wellen werden generiert durch stark turbulente Strömungen nahe der Sonnenoberfläche und breiten sich durch das gesamte Sonneninnere aus. Die Geschwindigkeit, mit der sich die Wellen ausbreiten, kann sich durch großräumige Plasmabewegungen im Sonneninneren verändern: Wellen innerhalb der Sonne werden durch Strömungen genauso mitgeführt, wie z.B. Schallwellen durch Wind auf der Erde.

flows near the solar surface and propagate throughout the solar interior. The speed at which the waves propagate can be altered by large-scale plasma flows in the solar interior: waves are carried along with flows in the same way that sound waves in the earth's atmosphere are carried by winds.

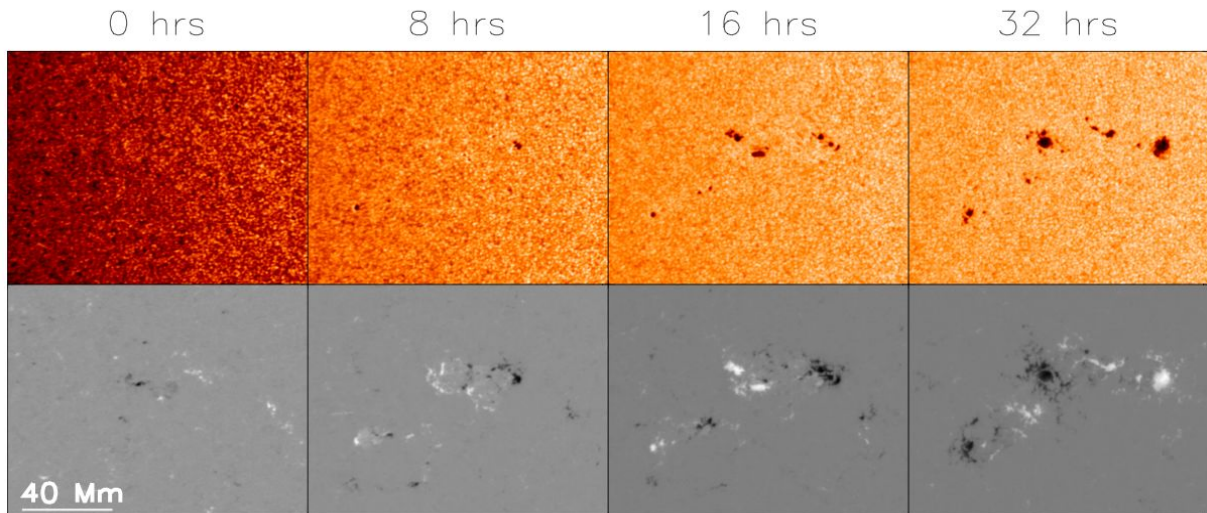


Abb. 3 Oben: Zeitliche Abfolge von SDO/HMI Intensitätsaufnahmen. Regionen starker Magnetfelder sind als dunkle Flecken sichtbar. Unten: Magnetfeldaufnahmen entlang unserer Sichtlinie. Die dunklen und hellen Gebiete zeigen Magnetfeldkomponenten entgegengesetzter Polarität. In beiden Aufnahmen nimmt die Zeit von links nach rechts zu. Diese Bildfolge zeigt die Entstehung der magnetischen Struktur, die in eine aktive Region übergehen wird (NOAA AR11158).

Fig. 3 Time sequence of SDO/HMI intensity images (top row; regions of strong magnetic field are seen as dark spots in the intensity images) and line-of-sight magnetic field maps (bottom row; the black and white regions show areas of strong line-of-sight magnetic fields of the two polarities). Time increases from left to right. This sequence of images shows the emergence of the magnetic structure that will go on to form an active region (NOAA AR11158).

Abb. 4 zeigt die Wege, die die Wellen durch das Sonneninnere nehmen würden. Wir haben Methoden entwickelt, um aus Messungen der Wellenausbreitung auf der Sonnenoberfläche dreidimensionale Bilder des Sonneninneren zu erzeugen (Svanda et al. 2011, Jackiewicz et al. 2012). Diese Methoden erlauben es, Abbildungen von Strömungen im Sonneninneren zu erzeugen, basierend auf Messungen der Wellenausbreitung auf der Sonnenoberfläche.

Fig. 4 shows the paths the waves would take through the solar interior. We have been developing and validating methods for converting measurements of wave propagation on the Sun to 3D images of the flows in the solar interior (Svanda et al. 2011, Jackiewicz et al. 2012). These methods allow us to make maps of flows in the solar interior based on measurements of wave propagation.

Erst kürzlich konnten wir die Helioseismologie nutzen, um nach Strömungen zu suchen, die durch aufsteigende magnetische Flussröhren verursacht werden, die mit Modellen des Aktivitätszyklus vorhergesagt werden (Leka et al. 2013; Birch et al. 2013). In dieser umfassenden Studie von mehr als 100 aufsteigenden magnetischen Regionen haben wir Beobachtungen

Recently we have used helioseismology to search for the flows associated with the rising magnetic flux tubes required by standard models of the sunspot cycle (Leka et al., 2013; Birch et al. 2013). In this extensive survey of more than one hundred emerging magnetic regions, we used observations from the Global Oscillation Network Group (GONG) and the

der Global Oscillation Network Group (GONG) und des Michelson Doppler Imager Instruments an Bord des Solar and Heliospheric Observatory (MDI/SOHO) genutzt, um diese Regionen einen Tag vor deren Erscheinen zu untersuchen. Dabei haben wir herausgefunden, dass sogar bis zu einem Tag vor Erscheinen einer aktiven Region schwache Magnetfelder in der Region existieren. Diese Magnetfelder sind in Einzelbeobachtungen nicht sichtbar; hierzu bedarf es einer statistischen Analyse.

Michelson Doppler Imager instrument on The Solar and Heliospheric Observatory spacecraft (MDI/SOHO) to study the region from the solar surface down to 20,000 km for the day before emergence. We found that, even one day before the emergence of an active region, weak magnetic field exists at the emergence location. These magnetic fields cannot be seen clearly in individual case studies; the statistical approach that we employed was essential.

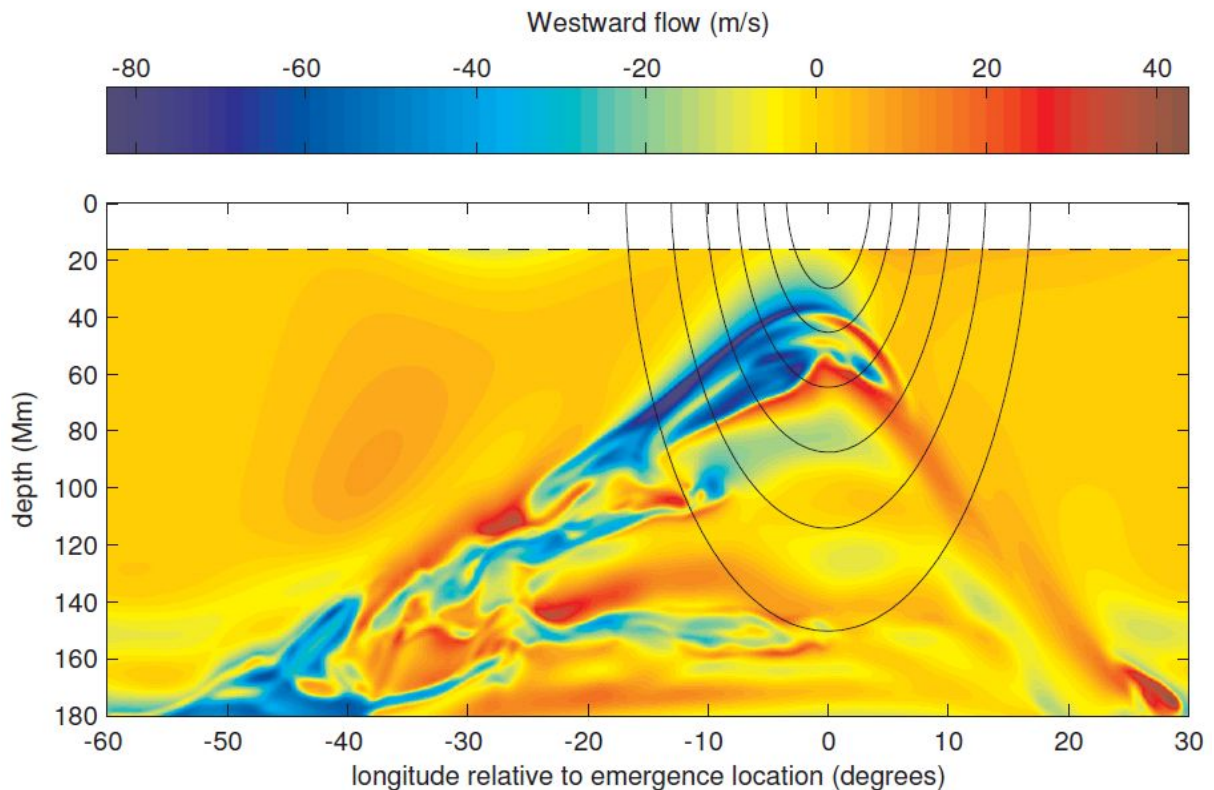


Abb. 4 Numerisches Modell der Ost-West-Strömung einer aufsteigenden magnetischen Flusskonzentration, drei Tage vor deren Erscheinen an der Oberfläche. Die ungefähren Wege akustischer Wellen sind als schwarze Linien dargestellt. Diese Wellen werden an der Oberfläche erzeugt, treten ins Sonneninnere ein und werden zur Oberfläche zurückgeworfen, da die Schallgeschwindigkeit mit zunehmender Eindringtiefe in der Sonne zunimmt. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen hängt von den vorherrschenden Strömungen im Sonneninnern ab. Aus diesem Grund lassen sich aus der Laufzeit der Wellen Rückschlüsse auf Strömungen in der Sonne ziehen.

Fig. 4 East-West flows (colors) from a numerical model of a rising magnetic flux concentration at three days before emergence. The approximate paths of acoustic waves are shown in the black curves. The acoustic waves are generated at the solar surface, and are refracted upwards as the sound speed increases with depth into the Sun. The speed at which the waves propagate depends on the flows in the solar interior and as a result wave travel times can be used to measure flows in the interior of the Sun. We are using helioseismology to search for flows associated with rising magnetic flux concentrations. Figure adapted from Birch et al. (2010).

Eine mögliche Erklärung für diese schwachen Oberflächenfelder ist, dass sie vorauseilende Fragmente der gesamten aufsteigenden Flusskonzentration darstellen, die durch Konvektion an die Oberfläche befördert werden. Zusätzlich haben wir schwache Strömungen

One possible explanation for these weak surface fields is that they are small fragments of the rising flux concentrations that have been brought to the surface by convective flows ahead of the bulk of the magnetic flux concentration. In addition, we found weak

(10 m/s) gefunden, die zu diesen schwachen Oberflächenfeldern hin konvergieren. Wir konnten jedoch in keiner Tiefe bis 20.000 km Anzeichen für starke Strömungen (100 m/s) finden, die der Sonnenrotation entgegengesetzt sind. Die Abwesenheit dieser Strömungen ist eine große Herausforderung für die theoretischen Modelle.

Momentan weiten wir die Arbeit von Birch et al. (2013) auf die qualitativ hochwertigen Daten des Heliospheric and Magnetic Imager (HMI) an Bord des NASA Solar Dynamics Observatory (SDO) aus. HMI/SDO liefert seit 2010 eine zeitlich kontinuierliche Abfolge von Aufnahmen mit hoher räumlicher Auflösung der gesamten sichtbaren Sonnenoberfläche. Daher lassen sich mit diesem Instrument hervorragend entstehende aktive Regionen beobachten.

(10 m/s) flows converging towards these weak surface magnetic fields. We did not, however, find any sign of strong (100 m/s) flows at any depth down to 20,000 km, in the direction opposite to rotation. The absence of this flow is a significant challenge for theory.

We are currently extending the work of Birch et al. (2013) to take advantage of the high-quality observations from the Heliospheric and Magnetic Imager (HMI) onboard the NASA Solar Dynamics Observatory (SDO). HMI/SDO has been providing continuous temporal coverage at high resolution for the full visible disk of the Sun since 2010, and is thus ideal for studying emerging active regions before they are seen at the solar surface.

Ausgewählte Publikationen

Selected Publications

L. Gizon, A. C. Birch, H. C. Spruit, Local Helioseismology: Three-dimensional Imaging of the Solar Interior, Annual Reviews in Astronomy and Astrophysics, vol. 48, pp. 289-338, 2010, doi: 10.1146/annurev-astro-082708-101722

M. Svanda, L. Gizon, S. M. Hanasoge, S. D. Ustyugov, Validated helioseismic inversions for 3D vector flows, Astronomy & Astrophysics, vol. 530, id.A148, 2011, doi: 10.1051/0004-6361/201016426

J. Jackiewicz, A. C. Birch, L. Gizon, S. M. Hanasoge et al., Multichannel Three-Dimensional SOLA Inversion for Local Helioseismology, Solar Physics, vol. 276, issue 1-2, pp. 19-33, 2013, doi: 10.1007/s11207-011-9873-8

A. C. Birch, D. C. Braun, K. D. Leka et al., Helioseismology of Pre-emerging Active Regions. II. Average Emergence Properties, Astrophysical Journal, vol. 762, issue 2, id.131, 2013, doi: 10.1088/0004-637X/762/2/131

K. D. Leka, G. Barnes, A. C. Birch, I. Gonzalez-Hernandez et al., Helioseismology of Pre-emerging Active Regions. I. Overview, Data, and Target Selection Criteria, Astrophysical Journal, vol. 762, issue 2, id.130, 2013, doi: 10.1088/0004-637X/762/2/130

4.3 Publikationen

Neben der Durchführung wissenschaftlicher Projekte, im Fall des MPS häufig die Entwicklung von (Weltraum-) Instrumenten und die Gewinnung entsprechender Messdaten, sind wissenschaftliche Publikationen ein wesentliches Ergebnis der Arbeiten am Institut. Deren Anzahl kann daher auch als ein (grober) Indikator für die Leistungsfähigkeit des Instituts betrachtet werden. 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. mindesten 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 von ca. 5 - 6% pro Jahr im Mittel. Der auffällige Peak in 2010 ist 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.

4.3 Publications

Besides accomplishing scientific projects - in case of the MPS often the development of scientific instruments (typically 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 may be considered as a (rough) 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.

Fig. 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 of about 5-6% per year on average can be observed. The marked peak 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.

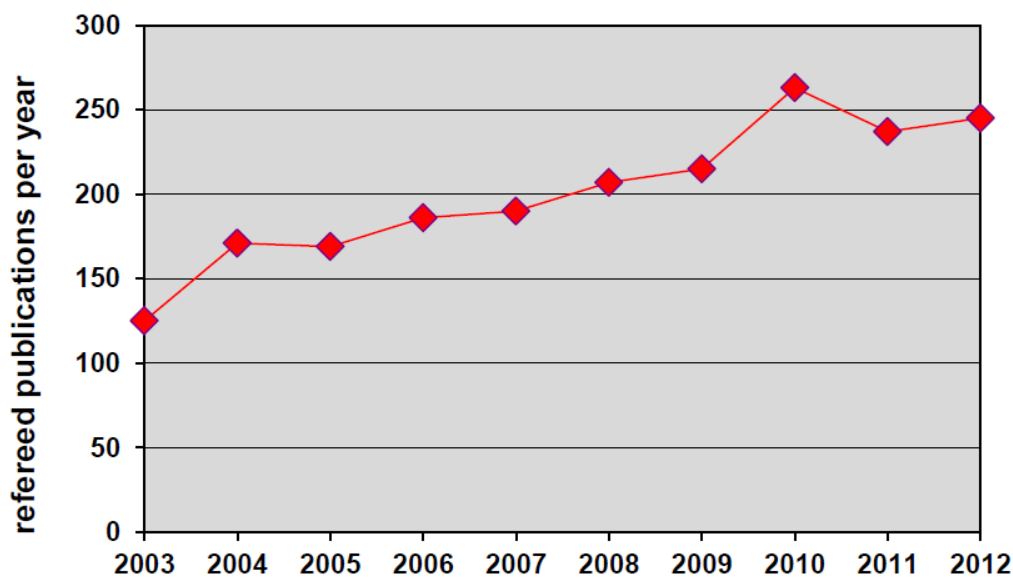


Abb. 1: Anzahl der referierten MPS-Publikationen pro Jahr für die letzten 10 Jahre (nach WOS)

Fig. 1: Number of refereed MPS publication per year for the last 10 years (acc. WOS)

Als ein – zugegebenermaßen sehr grober – Indikator für die wissenschaftliche Relevanz der einzelnen Artikel mag die Häufigkeit, mit der diese in anderen wissenschaftlichen Publikationen zitiert werden, herangezogen werden. Die zweite Abbildung zeigt die Häufigkeit, mit der referierte MPS-Publikationen

An - admittedly not very reliable - 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. 2011 all refereed MPS papers together

in dem jeweiligen Jahr zitiert wurden. Im Jahr 2011 z. B. war das für alle Publikationen des Instituts zusammen fast 8.400 Mal der Fall. Da die Anzahl aller Publikationen mit jedem 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 fünf Jahre als Bezugsgröße gewählt. Auch dieser Performanceindikator zeigt für das MPS ein fast stetiges Wachstum seit 2004 von 10-11 % pro Jahr im Mittel. 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 hohen Zitationsraten, die für 2009 voll zum Tragen kamen.

have been cited almost 8,400 times. Due to the fact that the number of papers is increasing with 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 of about 10-11 % per year on average. 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 became fully effective in 2009.

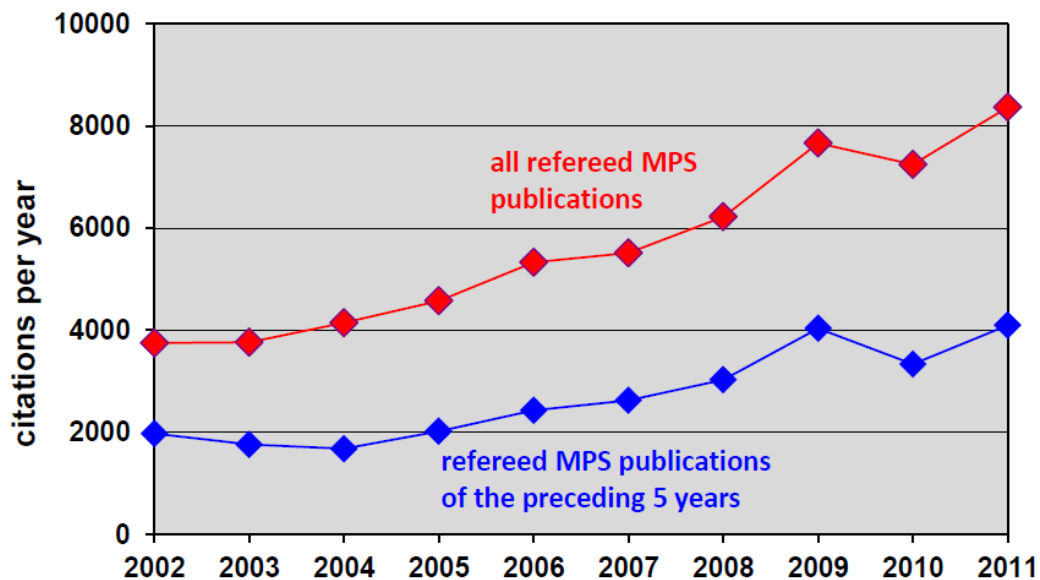


Abb. 2: Anzahl der Zitierungen pro Jahr, bezogen auf alle referierten MPS-Publikationen bzw. bezogen auf die Publikationen der jeweils letzten 5 Jahre (nach WOS).

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).

1.6 International Max Planck Research School

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 und der TU Braunschweig 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 International Max Planck Research School

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 and the Technical University Braunschweig 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, three-year 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 Juni 2011

IMPRS PhD students in June 2011

In den Jahren 2011 und 2012 haben im Mittel ca. 53 Doktoranden an dem Programm der Solar System School teilgenommen. Neu angefangen haben 10 (2011) bzw. 13 (2012), und die Promotion erfolgreich abgeschlossen haben 15 (2011) bzw. 5 (2012). In Summe hat die IMPRS damit seit ihrer Gründung in 2002 bis Ende 2012 die Sonnensystemforschung um 113 frisch promovierte Physiker bereichert. Die Doktoranden kamen in 2011/12 aus ca. 20 verschiedenen Ländern. Der Anteil ausländischer Doktoranden lag bei etwa 1/3, der weiblicher Studierender bei etwa 1/4.

Die Ergebnisse der Solar System School wurden erstmals im November 2005, ca. vier Jahre nach ihrem Start, evaluiert. Auf Basis dieser Evaluation wurde die IMPRS, die ursprünglich, wie alle IMPRS, für sechs Jahre bewilligt worden war, für weitere sechs Jahre bis September 2013 verlängert. Im Mai 2012 hat das MPS einen Antrag auf eine weitere Verlängerung über 2013 hinaus gestellt. Mit dem Umzug auf den Campus der Universität Göttingen im Jahr 2014 wird die Schule ihre wissenschaftliche Bandbreite erweitern, wobei die Sonnensystemforschung weiter im Zentrum steht, und sie wird stärker eingebettet sein in den weiteren geo- und astrophysikalischen Kontext. Der neue Standort des MPS in unmittelbarer Nähe der Fakultät für Physik eröffnet zudem die Möglichkeit für ein breiteres Angebot an Kursen für die Studenten in enger Zusammenarbeit mit den Instituten für Astrophysik und Geophysik der Universität Göttingen. Die Änderungen spiegeln sich auch wider in dem neuen Namen „IMPRS for Solar System Science“ und der geänderten Partnerstruktur (die Technische Universität Braunschweig wird nicht mehr teilnehmen). Nach einer sehr positiven Evaluation im Juni 2012 wurde der Antrag im Dezember bewilligt und die IMPRS bis September 2019 verlängert.

In 2011 and 2012 about 53 students on average took part in the program of the Solar System School. 10 (2011) resp. 13 (2012) 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 2011/12 came from ca. 20 different countries. The share of foreign student was about 2/3, the share of female students was about 1/4.

The performance of the School was evaluated for the first time in November 2005, about four years after its start. Based on this evaluation the school, originally approved for six years, as all IMPRS are, was extended by another six years until September 2013. In May 2012 the MPS applied for a further extension of the IMPRS beyond 2013. With the move of the MPS to the campus in Göttingen in 2014, the School, while still concentrating on solar system science, will have a broader scientific scope and will become more strongly embedded in the wider geo- and astrophysical context. The new location of the MPS in direct vicinity of the Faculty of Physics further opens the possibility of offering a broader range of courses to the students in close collaboration with the Institutes for Astrophysics and Geophysics of the University of Göttingen. The changes are reflected in the new name “IMPRS for Solar System Science” and a change in the partner structure (the Technical University Braunschweig will no longer participate). After a very positive evaluation of the School in June 2012 the application was approved in December 2012 and the IMPRS extended until September 2019.

Abgeschlossene Dissertationen in 2011

Dissertations finished in 2011:

Anne Angsmann, Magnetic states of the ionosphere of Venus observed by Venus Express

Judith de Patoul, Stereoscopy and tomography of coronal structures

Mohamed R. El Maarry, Searching for Hydrothermal Systems on Mars using Remote Sensing

Maria Dasi Espuig, Solar variability: A new proxy and models of solar irradiance variations

Lars Guicking, Niederfrequente Magnetfeldfluktuationen in der Plasmaumgebung der Venus

Jingnan Guo, Particle acceleration in the solar corona: simulation and observation

Joachim Müller, A.I.K.E.F.: An Adaptive Hybrid Model with Application to Fossil Fields at Titan and Mercury's Double Magnetopause

Nilda Oklay, Spectropolarimetric investigations of the deep photospheric layers of solar magnetic structures

Ferdinand Plaschke, Stehende Kruskal-Schwarzschild-Moden an der Magnetopause

Tilaye Tadesse Asfaw, Nonlinear force-free reconstruction of the coronal magnetic field with advanced numerical methods

Vedat Tanriverdi, Numerical simulations of the gravitational geodynamo and its time spectrum

Ronny Lutz, The search for substellar companions in subdwarf B stars in connection with evolutionary aspects

Anna Müller, Energetic particle injection events in the Kronian magnetosphere: applications and properties

Mingyuan Wang, Investigation of Martian Ionosphere based on Radio Science

Shuo Yao, Observational Studies on Multi-scale Structures and Waves in the Solar Wind

Abgeschlossene Dissertationen in 2012

Dissertations finished in 2012

Wieland Dietrich, The hemispherical magnetic field of ancient Mars - numerical simulations and geophysical constraints

Peter Kollmann, Sources, sinks, and transport of energetic particles within Saturn's magnetosphere

Yeon Joo Lee, Venus cloud structure and radiative energy balance of the mesosphere

Megha Uprendra Bhatt, Mineralogical analysis and iron abundance estimation of the Moon using the SIR-2 and other VIS-NIR spectrometers on-board the lunar orbiter Chandrayaan-1

Daniel Verscharen, On convected wave structures and spectral transfer in space plasmas – applications to solar corona and solar wind

2 Infrastruktur

Die zentralen Einrichtungen, die die Infrastruktur des Instituts bilden, gliedern sich in den technisch-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 Beispielen für technologische Weiterentwicklungen und Verbesserungen der technischen Infrastruktur gezeigt, welche Anstrengungen das MPS unternimmt, um auch in Zukunft leistungsfähige und zuverlässige Instrumente für die Sonnensystemforschung entwickeln zu können.

2.1 Detektorlabor

Ein Schwerpunkt der Entwicklungsaktivitäten des Detektorlabors am MPS ist die Weiterentwicklung, Herstellung und Qualifikation von wissenschaftlichen Kameras für Weltraummissionen. Aufbauend auf der Vorentwicklung eines 1 Megapixel Kamerasystems wurde im Auftrag des MPS mit der Firma CMOSIS in Belgien ein neuer 4 Megapixel CMOS-APS Sensor entwickelt. Hierfür wurde die komplette Kameraelektronik sowie die benötigte Hard- und Software-Testumgebung entworfen und gebaut. Das Labor hat im Zuge der Entwicklung weiterhin umfangreiche Qualifikationstests (Strahlung, thermal, Vakuum und Beleuchtung) des Sensors und der Elektronik durchgeführt. Beide Kamerasysteme werden auf der ESA-Satellitenmission Solar Orbiter eingesetzt.

2 Infrastructure

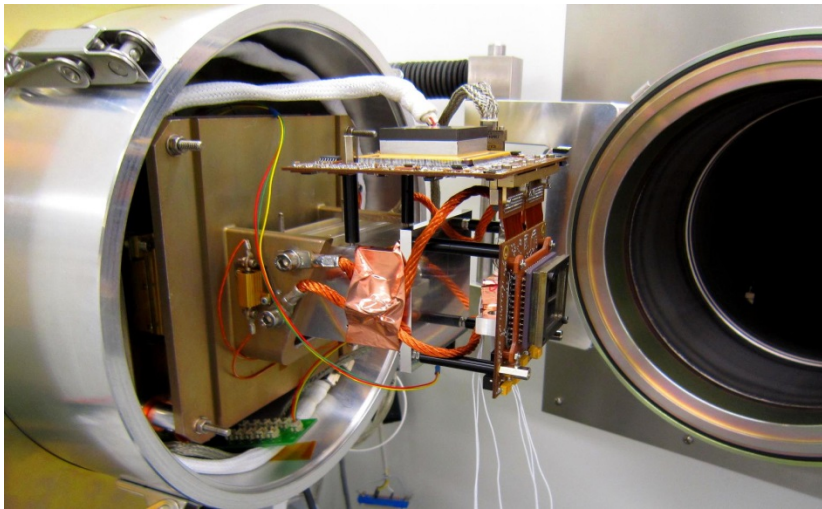
The infrastructure of the institute is established by central units, which are divided in technical-administrative services (administration, building services, library, etc.) and scientific-technical services (mechanical construction and workshop, electronics lab including clean rooms, thermal-vacuum 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 of technological progress and improvements of the technical infrastructure may demonstrate the efforts of the MPS to ensure the capability to develop reliable high-performance instruments for solar system research also in the future.

2.1 Detector Lab

Development activities of the MPS detector lab focus on the advancement, production and qualification of scientific cameras for space missions. Following the development of a one-megapixel camera system, MPS commissioned the development of a new four-megapixel CMOS-APS sensor with the Belgian company CMOSIS. The entire electrical system for the camera as well as the necessary test environments for hard- and software were designed and built. During the development phase, the detector lab conducted extensive tests (radiation, thermal, vacuum and lighting) of the sensor and the electronics. Both camera systems will be used on board ESA's satellite mission Solar Orbiter.



Testmodell der 4-Megapixel-Kamera in der Vakuumkammer des MPS Detektorlabors

Test model of the four-megapixel camera built up inside the vacuum chamber

Die Abbildung zeigt das „Breadboard“ Testmodell der 4-Megapixel-Kamera (Bildmitte) eingebaut in die Vakuum-Vermessungskammer im Detektorlabor am MPS.

Das Kamerasystem besteht aus zwei Einheiten.

- a) Sensorelektronik mit Bildsensor und schnellen Analog-Digital-Wandlern
- b) Ausleseelektronik mit einem schnellen digitalen Interface

Kupferleitungen dienen zur thermischen Anbindung im Vakuum, um definierte Temperaturen am Bildsensor einstellen zu können. Der Bildsensor wird während der Tests von vorn in unterschiedlichen Spektralbereichen beleuchtet. Die gewonnenen Bilddaten werden über eine Vakuumdurchführung nach außen zu einer Testelektronik geführt und dort ausgewertet.

2.2 Rechenzentrum

Um dem Bedarf an Parallelrechnerkapazität im Institut nachzukommen, wurde Anfang 2012 ein HPC-System in Betrieb genommen. Beschafft wurde ein Cluster der Firma Dell bestehend aus 16 Bladeservern. Jeder Knoten dieses Clusters enthält vier CPUs mit jeweils 12 Cores und 256GB RAM. Untereinander sind die Knoten über QDR Infiniband (40 Gbit/s) vernetzt. Als Betriebssystem kommt Suse Linux Enterprise Server 11 (SLES 11) zum Einsatz.

Dem Cluster vorgelagert sind zwei Computeserver mit gleicher Hardwareausstattung und demselben Betriebssystem. Die Nutzer können sich direkt auf diesen Servern einloggen und arbeiten, Batchjobs absenden und deren Zustand überwachen.

The picture shows the breadboard test model of the four-megapixel camera (center) built into the vacuum measurement chamber at the MPS detector lab.

The camera system consists of two units:

- a) sensor electronics with sensor and fast analogue-digital modifier*
- b) read-out electronics with a fast digital interface*

The copper pipes ensure the thermic connection inside the vacuum in order to expose the image sensor to specified temperatures. During the test the sensor is lit from the front with different spectral ranges. The acquired data are transmitted through a vacuum duct to the outside of the chamber where they are evaluated and interpreted.

2.2 Computing Center

In order to meet the demand for parallel computing capacities, we installed a HPC system in the beginning of 2012. We acquired a Dell cluster consisting of 16 blade servers. Each node of this cluster contains four CPUs with twelve cores each and 256 GB RAM. The nodes are connected via QDR Infiniband (at 40 Gbit/s). The operating system is Suse Linux Enterprise Server 11 (SLES 11).

The clusters are managed by two compute servers equipped with the same hardware and running the same operating system. The users can log on directly to these servers, work on them, send batch jobs and check their status.

Das HPC-Cluster ist, wie die meisten Computerverserver im Institut, an die zentrale Datenspeicherung angebunden. Das ermöglicht den Nutzern den Zugriff auf ihre Daten direkt auf den Servern, auf denen die Weiterverarbeitung geschehen soll.

Während der bisherigen Laufzeit hat sich die Hardware als zuverlässig, robust und als die passende Wahl erwiesen.

Dieser Erfolg beruht zum einen auf der beschafften Hardware. Zwei weitere Aspekte sind jedoch ebenso entscheidend beteiligt: Dies ist zum einen der kurze Weg zu den Nutzern, der eine persönliche Betreuung und Unterstützung ermöglicht. Zum anderen ist dies der Batchbetrieb. Er gewährleistet die automatische Ressourcenverwaltung und macht komplizierte Absprachen unter den Nutzern zur Vermeidung von Überladung der Rechner unnötig.

Gleichzeitig vereinfacht er auch den Betrieb des Systems, da die einzelnen Server des Clusters unabhängig von einander für den Nutzerbetrieb gesperrt und gewartet werden können.



Das neue HPC-Cluster

The new HPC cluster

Like most compute servers at the MPS, the HPC cluster is connected to the central data storage. This enables the users to access their data directly on the same servers where the data will be processed.

During its run-time so far the hardware proved to be reliable, robust and well-suited to the users' needs.

This success is partly based on the hardware itself but also on two other important aspects: the short communication ways between users and IT staff which allows for personal support. On the other hand it is the batch mode which ensures the automated administration of resources and eliminates the need for complicated arrangements between users to avoid overburdening the machines.

At the same time it facilitates running the system because the individual servers in a cluster can be blocked from user access for maintenance purposes.

2.3 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.

Die angebotenen Ausbildungsberufe umfassen: Industriemechaniker (Feingerätebau), Metallbauer (Konstruktionstechnik), Elektroniker für Geräte und Systeme, Elektroniker für Energie- und Gebäudetechnik, Kaufleute für Bürokommunikation und Fachinformatiker (Systemintegration)

2.3 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 won national competitions in their specific field.

We offer the following apprenticeships: precision mechanic, metal worker, electronic technician for instruments and systems, electronic technician for energy and building services, office communication assistants and IT specialist (system integration).



Die Azubis im Jahr 2012

The apprentices in 2012

Im Mittel werden 25 Jugendliche gleichzeitig ausgebildet, von denen ca. 8 jedes Jahr die Ausbildung erfolgreich abschließen. In den Jahren 2011/12 waren das:

Industriemechaniker (Feingerätebau): Kevin Brandt, Dennis Drescher, Hauke Fremer, Jakob Herbold, Sven Hiliz, Patrick Schenke, Martin Sieber, Sebastian Westphal

Elektroniker Geräte und Systeme: Nikolai Graf, Julian Ifland, Tobias Napp, Thomas Wolf

Fachinformatiker: Lukas Stark

Kauffrau Bürokommunikation: Isabell Senger

On average 25 young people are trained at the same time, and about eight of them finish the apprenticeship successfully each year. In 2011/12 they were:

Precision mechanic: Kevin Brandt, Dennis Drescher, Hauke Fremer, Jakob Herbold, Sven Hiliz, Patrick Schenke, Martin Sieber, Sebastian Westphal

Electronic technician for instruments and systems: Nikolai Graf, Julian Ifland, Tobias Napp, Thomas Wolf

IT specialist: Lukas Stark

Office communication assistant: Isabell Senger

3 Öffentlichkeitsarbeit

Wie ist das Sonnensystem entstanden? Gibt es auch auf anderen Planeten Leben? Und wie beeinflusst die Sonne unsere Erde? Fragen wie diese bewegen viele Menschen - und sind eng mit den Forschungsthemen des MPS verknüpft. Dementsprechend ist auch das Interesse der Öffentlichkeit und der Medien an den Forschungsthemen, -ergebnissen und -methoden des MPS ausgesprochen groß. Dieses Interesse spiegelt sich auf unterschiedlichste Weise wider: in den Anfragen interessierter Laien, in häufigen Interviewwünschen der Medien und nicht zuletzt im regen Zulauf, den öffentliche Veranstaltungen des MPS genießen. Das MPS begegnet diesem vielfältigen Interesse durch eine ganze Reihe von Maßnahmen der Presse- und Öffentlichkeitsarbeit.

Mit Hilfe von Pressemitteilungen werden die Medien regelmäßig über aktuelle Entwicklungen und neue wissenschaftliche Ergebnisse informiert. Im Berichtszeitraum 2011/12 hat die Pressestelle des MPS dazu 35 Pressemitteilungen herausgegeben. Einige davon, wie etwa die Texte zur Einweihung des Sonnenteleskops GREGOR (Mai 2012) und zur Beteiligung des MPS an der NASA-Marsmission Mars Science Laboratory (August 2012), waren außerordentlich erfolgreich und wurden in etwa 50 Printmedien aufgegriffen.

Sowohl für die Medien als auch für eine breitere Öffentlichkeit entwickelt das MPS Broschüren, Infoblätter und spezialisierte Internetseiten, die tiefgehende Informationen zu speziellen Themen liefern. Interessierten Laien bietet zudem die Erich-Regener-Vortragsreihe spannende Einblicke in die Forschungsthemen des MPS. Einen Blick hinter die Kulissen des Instituts erhalten Besucher im Rahmen von Führungen. Im Berichtszeitraum fanden mehr als 40 Führungen mit mehr als 750 Besuchern – vom Kindergartenkind bis zum Physikstudenten - statt.

Im Folgenden werden drei Schwerpunkte der Presse- und Öffentlichkeitsarbeit aus den Jahren 2011 und 2012 näher beschrieben.

Pressearbeit zur NASA-Mission Dawn

Eines der öffentlichkeitswirksamsten wissenschaftlichen Projekte der Jahre 2011 und 2012 war die Mission Dawn der amerikanischen Weltraumagentur NASA. Im Sommer 2011 erreicht die Raumsonde den Asteroiden Vesta und begleitete ihn mehr als ein Jahr lang. Das MPS hatte das wissenschaftliche Kamerasystem an Bord entwickelt und gebaut – und ermöglichte auf diese Weise während der Mission einen einzigartigen Blick auf eine fremde Welt.

Das MPS begleitete die Mission von der Anflugphase im Frühjahr 2011 bis zum Verlassen des Asteroiden im

3 Public Outreach

What are the origins of the solar system? Is there life on other planets? And how does the Sun influence Earth? Many people are interested in answers to questions like these. Since they are closely related to research at the MPS, the public as well as the media are keen on learning about our research fields, methods and results. This interest takes on different forms: inquiries by the curious public, frequent interview requests and of course the popularity of public MPS events. The MPS answers this varied interest with a multitude of activities in the area of press and public relations.

We regularly publish press releases to inform the media about current developments and scientific results. The MPS press office issued 35 press releases during the reporting period 2011/2012. Some, like the reports on the inauguration of the solar telescope GREGOR in May 2012 and on MPS involvement in the NASA mission Mars Science Laboratory in August 2012 were extraordinarily successful. They were used in about 50 print media.

The MPS press office develops brochures, flyers and specialized web pages offering detailed information on select topics for the media as well as for the general public. Those who are interested can gain exciting insight into MPS research topics with the lecture series "Erich Regener". Visitors have the possibility to arrange guided tours and take a look behind the scenes of the MPS. In 2011/2012 the MPS welcomed over 750 visitors –from preschoolers to physics students - in more than 40 guided tours.

The following paragraphs offer a more detailed description of three priorities in the years 2011 and 2012.

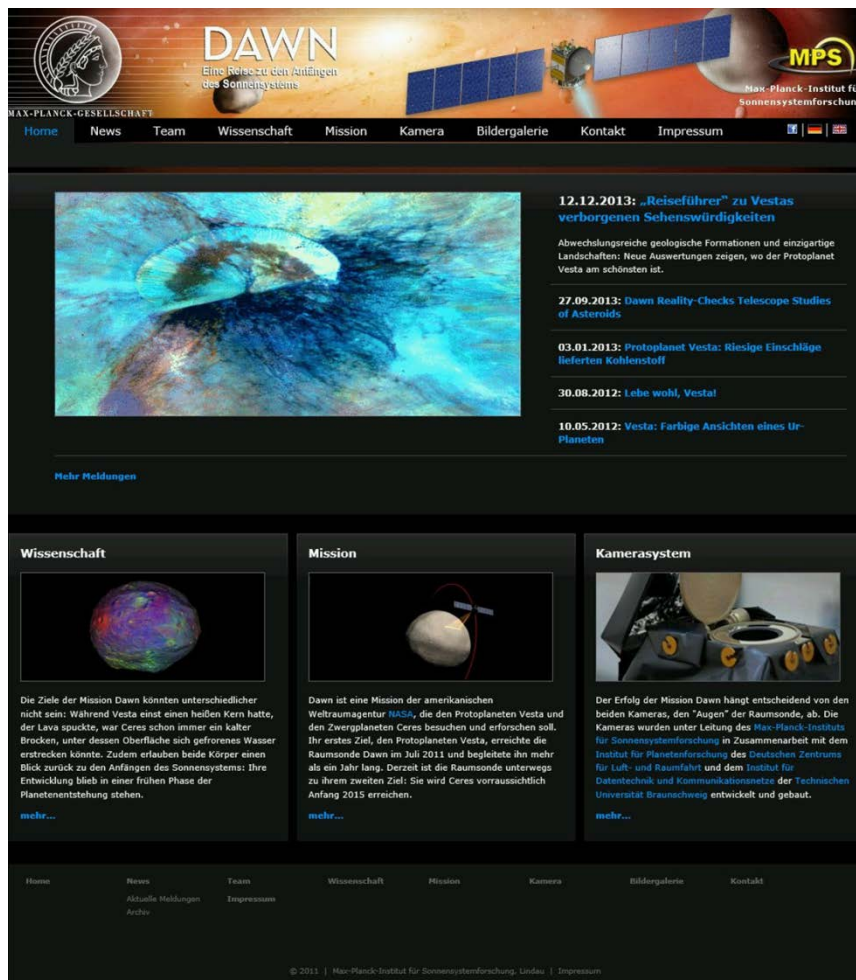
Press Work concerning NASA's Dawn Mission

The years 2011 and 2012 saw new events in NASA's high-profile mission Dawn. In the summer of 2011 Dawn reached the asteroid Vesta and accompanied it for more than a year. The MPS had developed and constructed the scientific camera system on board the space probe and thus afforded a unique view of an extraordinary world during the mission.

The MPS press office accompanied the mission during the approach phase from spring 2011 until the probe

Herbst 2012 mit umfangreicher Presse- und Öffentlichkeitsarbeit begleitet. So wurde etwa zu ersten Mal eine eigene Missionshomepage entworfen, gestaltet und betrieben (www.dawn.mps.mpg.de). Diese bot nicht nur aktuelle Nachrichten und Pressemitteilungen, sondern bereitete auch Informationen über die Mission, wissenschaftliche Hintergründe und das Kamerasystem des MPS ansprechend und leicht verständlich auf.

left the asteroid in fall 2012 with a variety of press of public relation work. The most important example is the website - designed, published and run by the MPS - solely dedicated to Dawn (www.dawn.mps.mpg.de). The website does not only offer up-to-date news and current press releases but also presents information about the mission, the scientific background and the MPS-built camera system in a way that is both intriguing and easy to understand.



Screenshot der MPS-Webseite zur NASA-Mission Dawn

Screenshot of the MPS-run website dedicated to NASA's Dawn mission

In der Hochphase der Mission bot die Internetseite ein Bild des Tages, das den Asteroiden immer wieder in einem neuen Licht zeigte. Parallel dazu wurde eine eigene Facebook-Seite betrieben, die bis zu 500 Nutzer aus aller Welt verfolgten. Wie die Interaktion mit diesen Nutzern zeigte, bietet ein solches Engagement im Bereich der Sozialen Medien die Möglichkeit, eine spezielle, dafür aber hochinteressierte und gut informierte Zielgruppe anzusprechen.

During the mission's busiest phase, the website presented a picture of the day showing new images of the asteroid every day. At the same time the MPS ran a Facebook page which had up to 500 followers from all over the world. This interaction with the users showed that a commitment in social media offers the chance to reach a small but highly interested target group.

Die Medien wurden 2011 und 2012 in insgesamt 13 Pressemitteilungen über Neuigkeiten zur Dawn-Mission informiert. Die Bandbreite der Themen reichte von wissenschaftlichen Ergebnissen über beeindruckende Bilder bis hin zu wichtigen Meilensteinen der Mission. Zudem trug das MPS zu insgesamt fünf zum Teil internationalen Pressekonferenzen bei.

Durch diese Bemühungen ist es gelungen, ein generelles Interesse an den wissenschaftlichen Fragestellungen der Mission zu wecken und die Medien über die Rolle des MPS zu informieren. Zahlreiche Meldungen von Presseagenturen, Zeitungsartikel und Radiobeiträge griffen Informationen des MPS auf.

Thirteen press releases concerning the Dawn mission were issued in 2011 and 2012. The topics ranged from scientific results to impressive pictures and important milestones of the mission. Furthermore, the MPS contributed to five partly international press conferences.

These measures succeeded in sparking the public's interest in the mission's scientific background and in informing the media about MPS involvement. Information by and about the MPS was included in a variety of reports by press agencies, newspaper articles and radio programs.



Klein, aber schon kugelig: Ceres (links) und Vesta (Mitte) im Größenvergleich zu unserem Mond. Das Bild von Vesta wurde von Dawn am 9. Juli aufgenommen.

Schon wieder so eine Weltumkartung! Wenn die NASA kommende Woche neue Bilder vom Asteroiden Vesta veröffentlicht, mag manchen das Gefühl beschleichen, dergleichen schon gesehen zu haben: einen unruhigen, kratzröhrenförmigen Eisen vor schwarzem Hintergrund. Schon richtig, Vesta ist nicht der erste Asteroid, der Besuch von der Erde bekommt. Die europäische Sonda Rosetta ist bereits an zweien vorbeigeflogen und die Japaner sind sogar kurz auf einem gelandet. Und dann wären da noch Deimos und Phobos. Die beiden Marsmonde wurden bereits auf mehreren Missionen zum Roten Planeten abgesehen, in dessen Umlaufbahn sie aber möglicherweise erst nachträglich gerieten. Dann gehörten auch sie einst zu jenem Schwarm abertausender Gesteinsbrocken, die zwischen den Bahnen von Mars und Jupiter kreisen, im sogenannten Asteroidengürtel.

Vesta allerdings ist nicht irgendein Asteroid. Zum einen stellt sie mit über 500 Kilometern Durchmesser das zweitgrößte Trümmern im Asteroidengürtel. Zusammen mit der doppelt so dicken Ceres ist Vesta sogar einen Einfluss auf die Erdbahn aus, wie Jacques Laszkar vom Observatoire de Paris und seine Kollegen in einer solchen in *Astronomy & Astrophysics* veröffentlichten Studie herausgefunden haben. Obwohl die Umlaufbahnen von Vesta und Ceres um die Sonne 2,3-bis beziehungsweise 2,7-mal weiter sind als die der Erde, lässt sich ihrer chaotischen Einwirkung wegen die Form der Erdbahn – und damit der Anteil, die diese an Klimaveränderungen hatte – nicht weiter als 60 Millionen Jahre in die Vergangenheit zurückverfolgen.

Neben seiner Größe fällt Vesta im Asteroidengürtel noch aus einem anderen Grund auf: Sie ist gar kein richtiger Asteroid. Vesta hat Merkmale eines Planeten, sagt Andreas Nathaus vom Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung (MPS). Sein Team hat die Kamera entwickelt, mit der an Bord die amerikanische Raumsonde Dawn („Morgendämmerung“) nach vier Jahren Flug gestern in den Orbit um Vesta eingeschwenkt ist. Auf den Bildern, die

Himmelskörpers floss. Das es sich dabei um Vesta handelt, schließt man daraus, dass Elektrizität in ähnlicher Weise reflektieren wie jener Himmelskörper. Vermutlich stammen alle HED-Meteoriten von Vesta, von wo sie einmal durch Einschlag abgesprengt wurden. Vesta wäre danach kein ganz uranfängliches Objekt aus in der Morgendämmerung des Sonnensystems kalt verbackenem Staub, sondern eines, dessen Material einst aufgeschmolzen war und dabei von der Schwer-

pern zermahlen. Nur Vesta und Ceres – vielleicht auch noch Pallas, das drittgrößte Asteroidengürtelobjekt – entgingen diesem Schicksal offenbar. Quasi als planetare Fossilien etablierten sie damit Einblicke in die Entstehung des Sonnensystems vor gut 4,65 Millionen Jahren. Soweit die Theorie. Eine Aufgabe von Dawn ist zu überprüfen, ob Vesta wirklich ein differenziertes Objekt ist, sagt MPS-Direktor Ulrich Christensen. Wenn dem so ist, stellt sich die Frage nach Vestas Innenleben. Auf Aufnahmen des Hubble-Teleskops ist zu erkennen, dass Vesta durch einen Treffer in der Südpolregion so beschädigt worden ist, dass Dawn's Instrumente dort den entblößten Mantel studieren können müssten. Neben der Kamera sind das ein Gammastrahlen- und Neutronendetektor zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung von Vestas Oberfläche sowie ein Spektrometer zur Kartierung von Mineralien.

Diese Gerüchte werden ein volles Erdendjahr lang auf Vesta gerichtet sein, zuweilen aus nur 300 Kilometern Entfernung zur Oberfläche. Im Juli 2012 soll Dawn dann etwas tun, was noch mit keiner anderen Raumsonde versucht wurde: den Orbit eines besuchten Körpers verlassen und in den eines zweiten einschwenken. Möglich ist das, weil Dawn mit einem Ionentriebwerk ausgestattet ist, das Rückstoß durch Ausstoß elektrisch beschleunigter Xenonreserven erzeugt. Die dafür notwendigen Xenonreserven wiegen viel weniger als der Treibstoff eines konventionellen Raketentrieb-

werks. Eine ionengetriebene Sonde hat daher bei gleicher Nutzlast eine größere Reichweite. Dawn's zweites Ziel ist Ceres, die Königin des Asteroidengürtels. Sie ist ein definitives kein Asteroid, sondern ein sogenannter Zwergplanet, worunter Astronomen alles im Sonnensystem verstehen, was zwar ein zu kleines Schwerefeld hat, um als richtiger Planet zu gelten, aber trotzdem kugelförmig ist. Größe und Form ist allerdings so ziemlich das Einzige, was von Ceres sicher bekannt ist. Das Spektrum lässt Wasseris oder wasserhaltige Minerale vermuten – Genauer wird sich erst durch Dawn's Besuch im Jahr 2015 zeigen. „Bei Ceres werden wir mehr Überraschungen erleben als bei Vesta“, vermutet Andreas Nathaus. Einige Forscher spekulieren sogar, unter Ceres' Eiskruste könnte sich eine Schicht flüssigen Schwefelwasserstoffs verborgen wie etwa beim Jupitermond Europa. „Das erscheint mir eher gewagt“, sagt Planetologe Christensen. Leider hat die knappe 350 Millionen Dollar teure Sonde, die ein Jahr vor ihrem Start beinahe gestrichen worden wäre, aus Kostengründen kein Magnetometer an Bord, mit dem man die Existenz eines solchen unterirdischen Ozeans hätte recht klar nachweisen können. Trotzdem nimmt die NASA diese Möglichkeit natürlich ernst: Mach Missionende wird Dawn wieder von Ceres weg manövriert – auf dass sie ja nicht auf die Oberfläche der eisigen Felskugel stürzt und dort eine etwaige erdseitige Ursubstanz-Fauna mitirdischen Keimen verweht.



Seit 2007 auf Tour: die ionengetriebene Sonde Dawn



Ein Stück Vesta: Fragment des Millbillillie-Meteoriten

Ein Artikel zur bevorstehenden Ankunft der Raumsonde Dawn am Protoplaneten Vesta aus der Frankfurter Allgemeinen Sonntagszeitung vom 17. Juli 2011.

An article in the Frankfurter Allgemeine Sonntagszeitung covering Dawn's imminent arrival at the protoplanet Vesta, published July 17, 2011.

Max-Planck-Wissenswelten

Im Frühjahr 2011 rief das MPS (zusammen mit dem Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation) eine Vortragsreihe für Kinder ins Leben. Die Reihe, die aus insgesamt sechs Vorträgen bestand, richtete sich an Schulkinder im Alter bis elf Jahren. Die Vorträge fanden in einem zweiwöchigen Rhythmus Freitagnachmittags im Hörsaal des MPS statt und waren jedes Mal außerordentlich gut besucht. Das Themenangebot umfasste unter anderem: „Das bunte Universum oder: Warum ist die Sonne gelb?“, „Funktioniert mein Kompass auch auf dem Mars?“ und „Vulkane, Stürme und Landschaften aus Eis: Eine Reise zu den Planeten“. Die jungen Zuhörer erhielten zudem eine Art Studienausweis, in den sie ihre Teilnahme am jeweiligen Vortrag eintragen lassen konnten. Für die begleitenden Eltern gab es parallel zu den Vorträgen Führungen durch das Institut.

Max Planck Science World

In the spring of 2011 the MPS launched a lecture series for children in cooperation with the Max Planck Institute for Dynamics and Self-Organization. The series consisted of six lectures and was aimed at school kids up to eleven years of age. The lectures were given once every two weeks and were exceptionally well attended. The topics included: "The colours of the universe – or: Why is the Sun yellow?", "Does my compass work on Mars?" and "Volcanoes, storms and landscapes of ice: a journey to the planets". The young attendees were issued a study pass in which they could enter their participation in the lectures. The accompanying parents were invited to guided tours of the institutes for the duration of the lectures.



Mit Experimenten und einem außergewöhnlichen Vortrag begeisterte Dr. Achim Gandorfer die Besucher des Kindervortrages „Warum ist die Sonne gelb?“, der im Rahmen der Vortragsreihe Max-Planck Wissenswelten stattfand.

Dr. Achim Gandorfer enthralled his young audience with experiments and his exceptional talk on the topic "Why is the Sun yellow?", one of six lectures in the Max Planck Science World.

Teilnahme an der ersten Göttinger Nacht des Wissens

Am 24. November 2011 fand in Göttingen die erste Nacht des Wissens statt. Mehr als 15.000 Besucher nutzten die Gelegenheit, sich an verschiedenen Standorten in der Stadt über wissenschaftliche Themen zu informieren. Ein besonderer Anziehungspunkt für viele Gäste war der Nordcampus der Universität, wo der naturwissenschaftliche Schwerpunkt der Nacht lag. Dort präsentierte sich auch das MPS mit zwei Informationsständen (Themen: Ballonmission Sunrise, Eismonde des Saturn) sowie mit zwei Vorträgen über die NASA-Mission Dawn und Helioseismologie.

Participation in the first Göttingen Night of Science

The first Night of Science took place in Göttingen on November 24, 2011. Over 15,000 visitors took the opportunity to learn about scientific topics at various locations throughout the city. A point of particularly high interest was the university's northern campus. This was also where the MPS presented two stands, one on the balloon-borne telescope Sunrise, the other informing about Saturn's icy moons. We also gave a lecture on NASA's Dawn mission and another on helioseismology.

4 Institutsüberblick

4.1 Wissenschaftliche Leitung und Gremien

Direktoren

Directors

Prof. Dr. Ulrich R. Christensen

Geschäftsführender Direktor im Berichtszeitraum 2011/12

Managing Director during the reporting period 2011/12

Prof. Dr. Sami K. Solanki

Prof. Dr. Laurent Gizon

Emeritierte Wissenschaftliche Mitglieder

Emeritus scientific members

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.

4 Institute at a Glance

4.1 Scientific Management and Boards



Die Direktoren des MPS: Prof. Dr. L. Gizon, Prof. Dr. S. K. Solanki, Prof. Dr. U. R. Christensen

The MPS Directors: Prof. Dr. L. Gizon, Prof. Dr. S. K. Solanki, Prof. Dr. U. R. Christensen

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

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

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. Claude Catala
Observatoire de Paris

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. Eric Priest
Department of Mathematics
St. Andrews University

Prof. Dr. David Stevenson
Geological & Planetary Sciences
California Institute for Technology

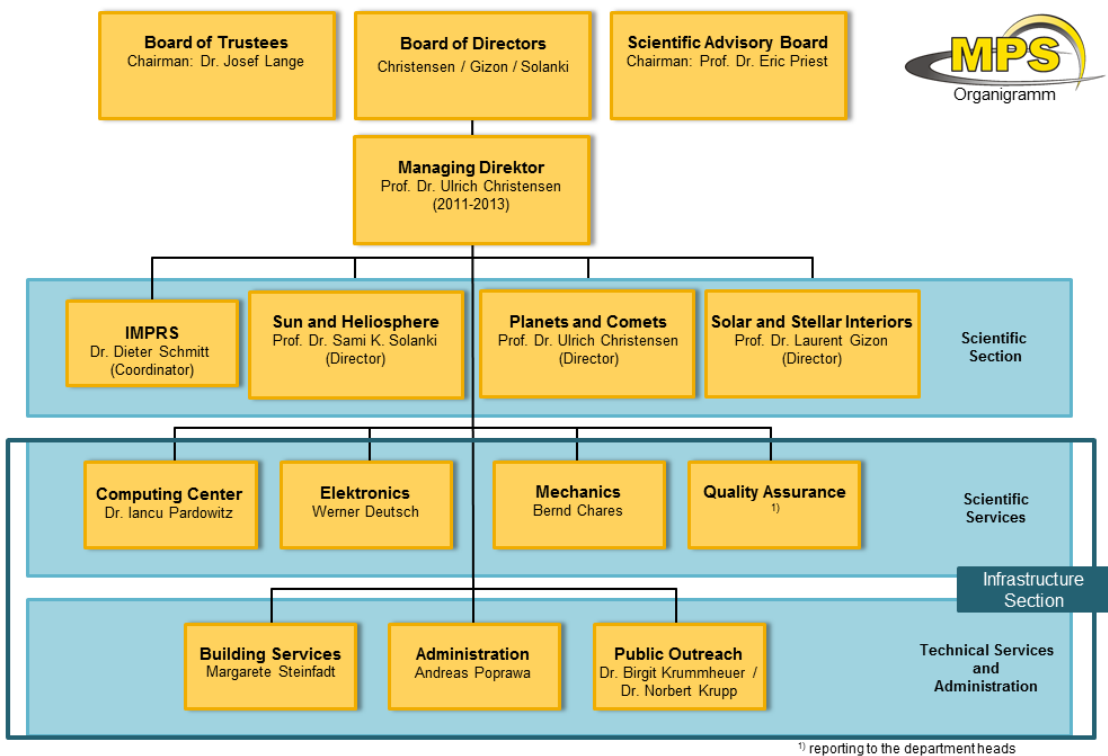
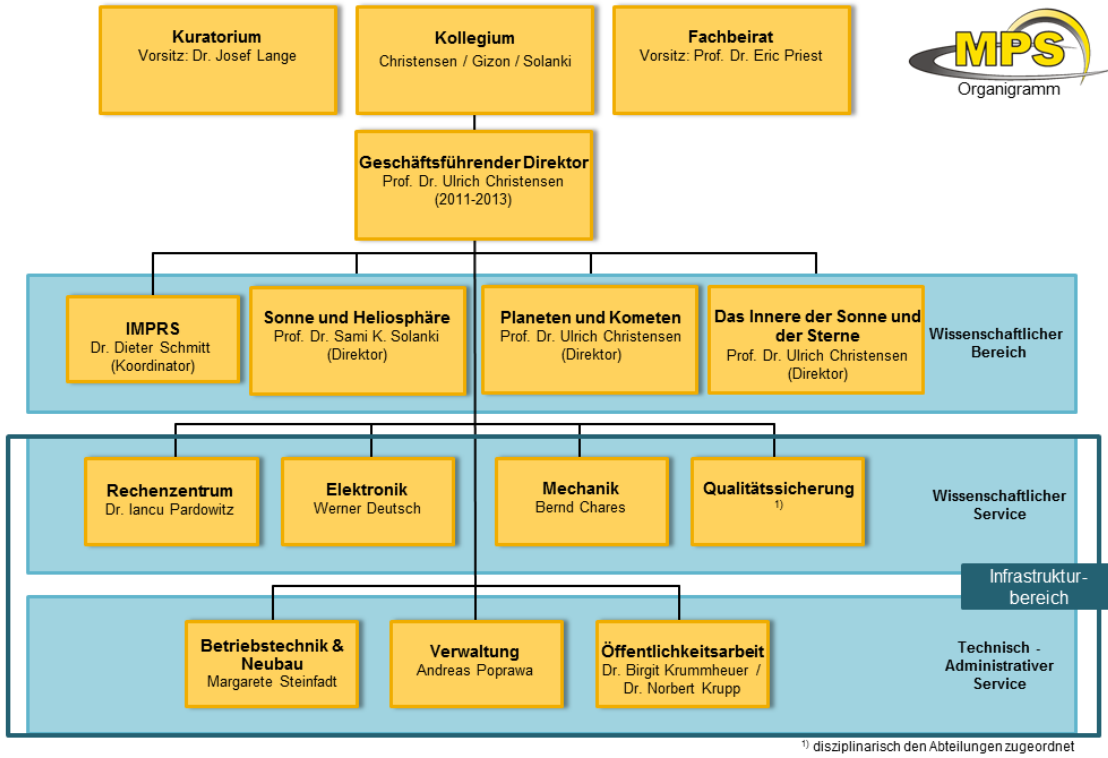


Der Fachbeirat im Jahr 2009 (mit dem MPG-Präsidenten, der Institutsbetreuung und den Direktoren)

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

Die Anzahl Mitarbeiter hat sich im Berichtszeitraum geringfügig (4 %) reduziert, in erster Linie durch eine geringere Anzahl an Postdocs. Dies stellt aber nur eine zufällige temporäre Fluktuation dar. 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.

4.3 Staff Development

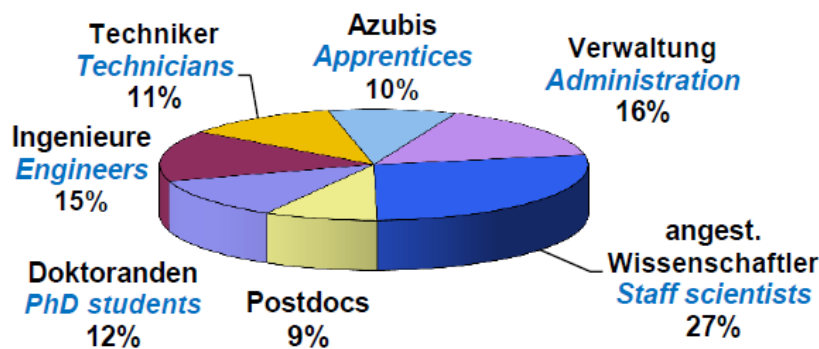
The total number of employees decreased slightly (4 %) during the reporting period, mainly due to a reduced number of Postdocs. This is an incidental temporary fluctuation. The table shows the distribution with respect to funding of the positions (institutional or third party) and the shares of permanent and non-permanent positions, at the beginning and at the end of the reporting period.

	Ende 2010 <i>end 2010</i>	Ende 2012 <i>end 2012</i>
Gesamt <i>total</i> ¹	283	273
Institutionell <i>institutional</i>	189 (67 %)	183 (67 %)
Drittmittel <i>3rd party</i>	94 (33 %)	90 (33 %)
Unbefristet <i>permanent</i>	105 (37 %)	103 (38 %)
Befristet <i>non-permanent</i>	178 (63 %)	170 (62 %)

¹ 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 2011/12 nur unwesentlich geändert. Etwa 50 % der Institutsmitarbeiter sind Wissenschaftler, davon fast die Hälfte Nachwuchswissenschaftler (Doktoranden und Postdocs). Aber auch der überwiegende Teil der Ingenieure und ein erheblicher Teil der Techniker sind direkt für wissenschaftliche Projekte tätig.

The breakdown of the employees with respect to the staff groups at the end of the reporting period 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 almost 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 (Ende 2012)

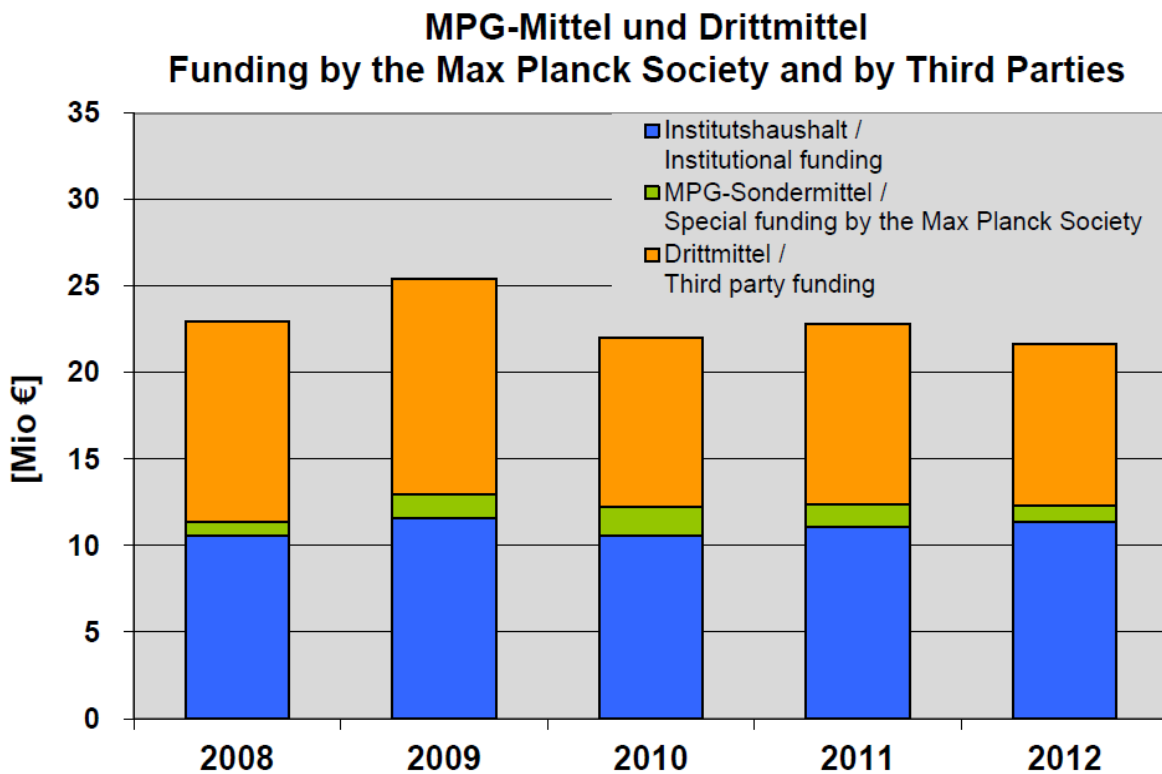
Staff structure (end of 2012)

4.4 Institutshaushalt

Über die letzten Jahre besteht der Haushalt des MPS im Mittel etwa je zur Hälfte aus Mitteln der MPG und aus Drittmitteln. Die institutionellen Mittel sind relativ konstant, mit einem leichten Anstieg ab 2011 durch die Erweiterung des Instituts um eine dritte Abteilung. Die Drittmittel sind, abhängig von den Zeitplänen der zugehörigen Projekte, deutlicheren Schwankungen unterworfen. Bedeutendster Drittmittelgeber ist der DLR; daneben sind ESA, EU und DFG wesentliche Quellen. Zusätzlich dargestellt sind MPG-Sondermittel. Hierbei handelt es sich um projektspezifische Förderung oder Unterstützung bei der Anschaffung von großem Equipment außerhalb des regulären Budgets, typisch basierend auf einer externen Evaluierung.

4.4 Budget

Over the last years the budget of the MPS has been based on average to about 50% on funds of the Max Planck Society and to about 50% on 3rd party funding. The institutional funding is relatively stable, with a slight increase since 2011 due to the expansion of the institute by a third department. 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, and DFG. Shown in addition is special funding by the Max Planck Society. This is project specific funding or support for the procurement of large equipment outside the regular budget, typically based on an external evaluation.



Entwicklung des MPS-Haushalts in den letzten 5 Jahren

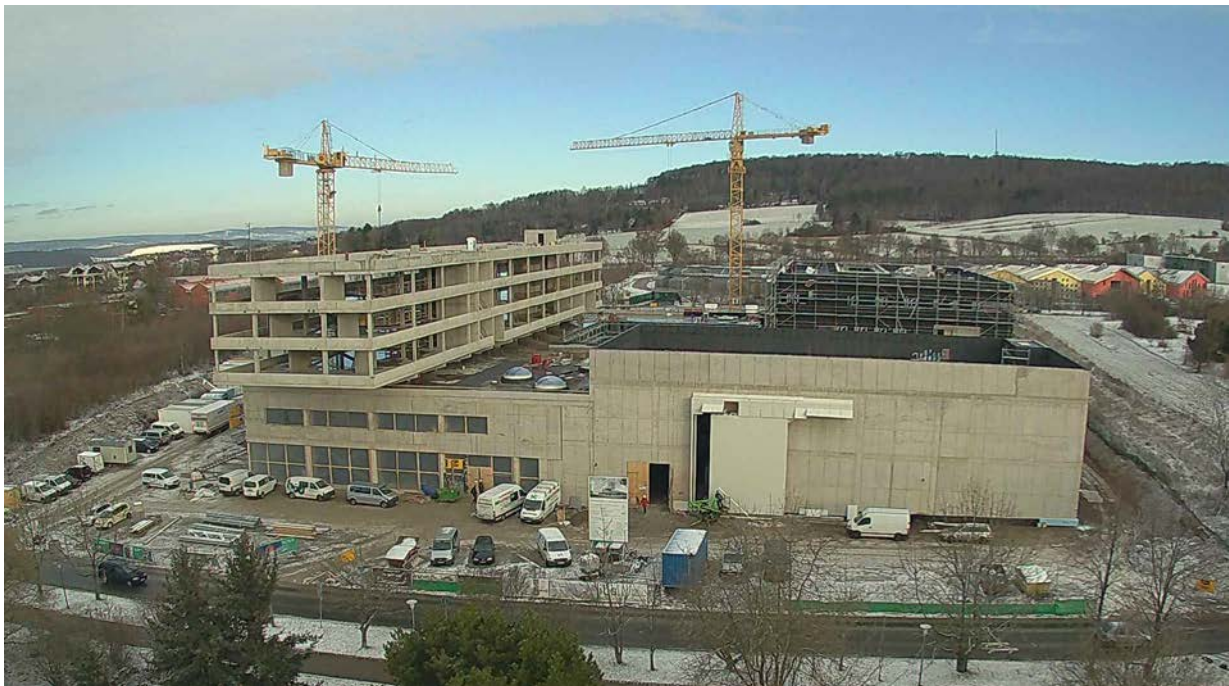
Development of the MPS budget during the last 5 years

4.5 Neubau des MPS

Das MPS zieht Anfang 2014 vom heutigen Standort in Katlenburg-Lindau in das 30 Kilometer entfernte Göttingen um. Aktuell 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.

4.5 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 is 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 meters. Part of the social infrastructure are a day-care center, a bistro and guest apartments.



Die Baustelle für das neue Instiut Ende 2012

Construction site for the new building at the end of 2012

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 ausreichend 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 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.

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.

Der erste Spatenstich erfolgte im August 2011 und das Richtfest im Dezember 2012. Der Umzug ist für Anfang 2014 geplant. Ab April 2014 wird dann der Betrieb im neuen Gebäude in vollem Umfang aufgenommen sein.

The ground breaking ceremony took place in August 2011 and the roofing ceremony in December 2012. The move is planned for early 2014. In April 2014 full operation will have resumed in the new building.



Richtfest für den Neubau im Dezember 2012

Roofing ceremony in December 2012

Max-Planck-Institut für
Sonnensystemforschung
Max-Planck-Straße 2
37191 Katlenburg-Lindau
Tel: 05556-979-0
E-Mail: presseinfo@mps.mpg.de
www.mps.mpg.de

Neue Adresse ab April 2014
New address as of April 2014

Justus-von-Liebig-Weg 3
37077 Göttingen

Tel.: 0551 384979-0