

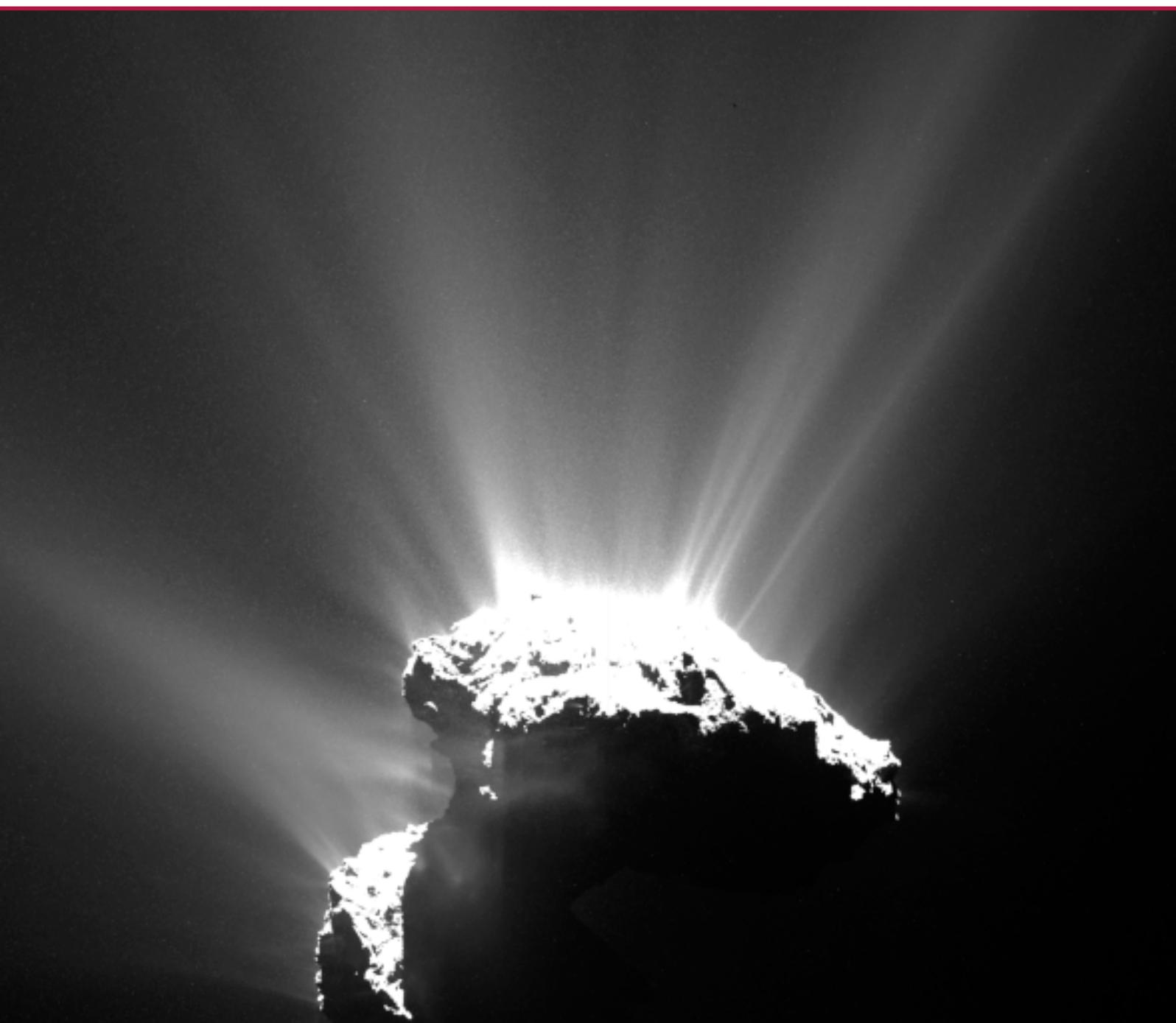


MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT



**Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung**

**REPORT 2013 | 2014**



Herausgeber

*Publisher*

Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung

*Max Planck Institute for Solar System Research*

Justus-von-Liebig-Weg 3

37077 Göttingen, Germany

Tel. : (+49) 551 384 979-0

Fax : (+49) 551 384 979-240

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

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

Redaktion

*Editors*

Johannes Stecker

Johannes Wicht

Design und Layout

*Design and Layout*

Katja Töpfer

Titelbild: Die Aktivität des Kometen 67P/Churyumov-Gerasimenko im Blick der Osiris-Kamera an Bord der Raumsonde Rosetta

*Cover photo: The activity of the comet 67P/Churyumov-Gerasimenko observed by the Osiris camera on board Rosetta*

ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team MPS/UPD/LAM/IAA/SSO/INTA/UPM/DASP/IDA

## INHALT

## CONTENT

<b>Vorwort</b>	<b>4</b>	<b><i>Preface</i></b>
<b>Wissenschaft und Forschung</b>	<b>6</b>	<b><i>Science and research</i></b>
Forschung am MPS	<b>7</b>	<i>Research at MPS</i>
Forschungshighlights 2013/2014	<b>13</b>	<i>Research highlights in 2013/2014</i>
Die Erforschung des Asteroiden (4) Vesta	14	<i>Exploration of the Asteroid (4) Vesta</i>
Flechten mit Magnetfeldern auf der Sonne	21	<i>Braiding of magnetic fields on the Sun</i>
Rosetta und Philae beim Kometen 67P/ Churyumov-Gerasimenko	29	<i>Rosetta and Philae at Comet 67P/ Churyumov-Gerasimenko</i>
Von kalt zu heiß: Am magnetischen Übergang in der Atmosphäre der Sonne	36	<i>From cold to hot: at the magnetic transition In the solar atmosphere</i>
<b>Planeten und Kometen</b>	<b>44</b>	<b><i>Planets and Comets</i></b>
Überblick	45	<i>Overview</i>
Das Innere der Planeten	50	<i>Planetary Interiors</i>
Planetare Oberflächen	56	<i>Planetary Surfaces</i>
Die Atmosphären der Planeten	62	<i>Planetary Atmospheres</i>
Die Plasma-Umgebung der Planeten	68	<i>Planetary Plasma Environment</i>
Kleine Körper im Sonnensystem	78	<i>Small Bodies in the Solar System</i>
<b>Sonne und Heliosphäre</b>	<b>85</b>	<b><i>Sun and Heliosphere</i></b>
Überblick	86	<i>Overview</i>
Koronale Dynamik	92	<i>Coronal Dynamics</i>
Koronale Spektroskopie und Abbildung	97	<i>Coronal Spectroscopy and Imaging</i>
Untere Sonnenatmosphäre und Magnetismus	103	<i>Solar Lower Atmosphere and Magnetism</i>
Solare Korona in 3D	108	<i>Solar Corona in 3D</i>
Solare Magnetohydrodynamik	113	<i>Solar Magnetohydrodynamics</i>
Theorie und Simulation des Sonnensystemplasmas	117	<i>Theory and Simulation of Solar System Plasma</i>
<b>Das Innere der Sonne und der Sterne</b>	<b>124</b>	<b><i>Solar and Stellar Interiors</i></b>
Übersicht der Abteilung	125	<i>Department Overview</i>
Das Innere der Sonne	128	<i>Solar Interiors</i>
Das Innere der Sterne	134	<i>Stellar Interiors</i>
<b>Solare Variabilität und Klima</b>	<b>140</b>	<b><i>Solar Variability and Climate</i></b>
<b>Kometenforschung</b>	<b>148</b>	<b><i>Research Linked to Comets</i></b>
<b>Publikationen</b>	<b>153</b>	<b><i>Publications</i></b>
<b>IMPRS</b>	<b>156</b>	<b><i>IMPRS</i></b>
<b>Öffentlichkeitsarbeit</b>	<b>160</b>	<b><i>Media and Public Relations</i></b>
<b>MPS im Überblick</b>	<b>166</b>	<b><i>MPS at a glance</i></b>



Ulrich Christensen



Laurent Gizon



Sami K. Solanki

## Vorwort

Die Jahre 2013 und 2014 standen für das Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung (MPS) im Zeichen der Veränderung und des Neuanfangs. Der Institutsneubau in der Nähe des Nordcampus der Universität Göttingen, der 2011 begonnen wurde, konnte im Laufe des Jahres 2013 vollendet werden. Erste Infrastruktur zog bereits im Sommer desselben Jahres vom alten Standort in Katlenburg-Lindau an den neuen Bestimmungsort um. Die Mitarbeiter folgten Anfang 2014. Zusammen mit etwa 350 nationalen und internationalen Gästen aus Wissenschaft, Politik und Wirtschaft weihten sie am 21. Mai 2014 die neue Heimat des Instituts in einer Feierstunde ein.

Auch aus wissenschaftlicher Sicht prägte die Vollendung lang vorbereiteter Projekte den Berichtszeitraum. Im Sommer 2013 hob das ballongetragene Sonnenobservatorium Sunrise von der Weltraumbasis Esrange im schwedischen Kiruna ab und startete auf seine fünftägige Reise um den Nordpol herum. Immer fest im Blick: die Sonne, die sich bei diesem zweiten Flug deutlich aktiver zeigte als noch beim Erstflug 2009. Zur wissenschaftlichen Ausbeute des Flugs zählen detailreiche Aufnahmen der Chromosphäre der Sonne, der Schicht zwischen der sichtbaren Sonnenoberfläche und ihrer äußeren Atmosphäre.

## Preface

*The years 2013 and 2014 have been marked by changes and new beginnings at the Max Planck Institute for Solar System Research. The new building close to the university's northern campus, whose construction started in 2011, was completed in the course of 2013. In summer, the first pieces of infrastructure were moved from the old institute in Katlenburg-Lindau to the new premises. In the beginning of 2014 the employees started working at their new location. The new institute was officially inaugurated on May 21, 2014. The ceremony was attended by MPS employees as well as 350 national and international scientists, politicians and business representatives.*

*From a scientific point of view, the years 2013 and 2014 were marked by the completion of projects which had been prepared for a long time: In summer 2013 the balloon-borne solar observatory Sunrise started its second science flight from the space center Esrange in Kiruna, Sweden. During its five-day journey at 70.5° latitude, in a period of much higher solar activity than observed during the first flight in 2009, Sunrise took very detailed pictures of the Sun's chromosphere, the zone between the visible surface and the outer solar atmosphere.*

Die ESA-Raumsonde Rosetta erreichte 2014 ihr Ziel – nach zehnjährigem Flug und einer davor liegenden, langjährigen Entwicklungsphase. Am 6. August 2014 schwenkte Rosetta in eine Umlaufbahn um den Kometen Churyumov-Gerasimenko ein. Mit an Bord trug sie zahlreiche Instrumente, die ganz oder zum Teil am MPS entwickelt und gebaut worden waren. Sie untersuchten die Gasemissionen des erwachenden Kometen, lieferten erste Hinweise auf die Zusammensetzung des Kometenwassers sowie atemberaubende Aufnahmen einer fremden, bizarren Welt. Der Höhepunkt der Mission erfolgte am 12. November: Die Landeeinheit Philae, zu der MPS-Forscher Subsysteme und wissenschaftliche Instrumente beigetragen hatten, setzte auf der Oberfläche des Kometen auf. 60 Stunden lang führte Philae Messungen durch und sendete einzigartige Messdaten zurück zur Erde.

Derweil stellten andere Aktivitäten am Institut wichtige Weichen für die Zukunft. In den neuen Laboren und Reinräumen des Neubaus setzten Mitarbeiter der Abteilung „Sonne und Heliosphäre“ ihre Vorbereitungen für die Mission Solar Orbiter fort. 2018 startet die Raumsonde ins All. Die Abteilung „Das Innere der Sonne und der Sterne“ freute sich über die Auswahl der ESA-Mission PLATO, an deren Entwurf MPS-Wissenschaftler maßgeblich mitgewirkt hatte. Die Sonde soll ab 2024 eine Million Sterne nach erdähnlichen Exoplaneten absuchen; das wissenschaftliche Datenzentrum der Mission wird in den nächsten Jahren am MPS entstehen.

Nicht ganz so weit entfernt liegen die Forschungsobjekte der Mission JUICE. 2013 wählte die ESA zwei Instrumente mit MPS-Beteiligung für die eisige Entdeckungstour ins Jupitersystem aus: das Submillimeter Wave Instrument SWI und das Teilcheninstrument PEP. 2022 sollen beide auf ihre lange Reise aufbrechen.

Die International Max Planck Research School on Solar System Science startete im Herbst 2013 in eine dritte Runde und wird nun in Zusammenarbeit mit der Universität Göttingen sechs weitere Jahre lang Doktorandinnen und Doktoranden ausbilden.

*ESA's space probe Rosetta finally reached its target – after a ten-year flight and many preceding years of planning and development. On August 6, 2014, Rosetta swung into orbit around comet Churyumov-Gerasimenko. The probe carries a multitude of instruments which have been partially or entirely developed and built at the institute. They examined the comet's arising gas emission, gave first insights into the composition of the comet's water and delivered breathtaking images of an alien, bizarre world. The mission's highlight took place on November 12 when the lander Philae alighted on the comet's surface. For 60 hours, the lander took measurements and sent unique data back to Earth. MPS contributed subsystems and scientific instruments to the lander.*

*A number of other activities at the institute set the course for the future: A team from the department „Sun and Heliosphere“ continued working on the mission Solar Orbiter in the institute's new cleanrooms and laboratories. The probe is scheduled to begin its journey into space in 2018. The department „Solar and Stellar Interiors“ was excited about the selection of ESA's PLATO mission. MPS scientists had significantly contributed to its design. Starting in 2024, PLATO will search for earth-like exoplanets around one million stars. The mission's scientific data center will be established at MPS during the next few years.*

*The objects of interest of the JUICE mission are a little closer to Earth. JUICE will commence its long journey to the icy Jupiter system in 2022. In 2013 ESA had selected two instruments with MPS involvement for the mission: the submillimeter wave instrument SWI and the particle instrument PEP.*

*The International Max Planck Research School on Solar System Science of MPS and the University of Göttingen started its third term in the fall of 2013. This means that the school can continue its training program for PhD students for another six years.*

WISSENSCHAFT UND FORSCHUNG

*SCIENCE AND RESEARCH*

MAX PLANCK · INSTITUT FÜR SONNENSYSTEMFORS

**FORSCHUNG AM MPS**

***RESEARCH AT MPS***



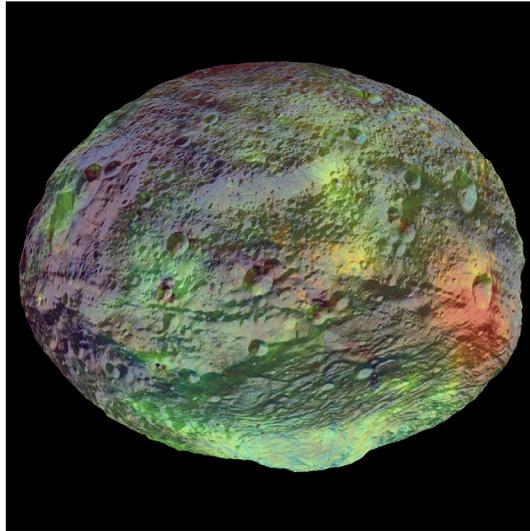
Im Mittelpunkt der wissenschaftlichen Arbeit am MPS steht das Sonnensystem in all seinen Manifestationen: Das Innere und die Atmosphäre der Sonne, ihr Magnetismus, ihre Aktivität und Variabilität einschließlich ihres Einflusses auf die Erde, das interplanetare Medium, das Innere, die Oberflächen, die Atmosphären, Ionosphären und Magnetosphären der Planeten, deren Ringe und Monde, und schließlich Kometen und Asteroiden. Ergänzt werden diese Studien durch Untersuchungen an astronomischen Objekten außerhalb des Sonnensystems, insbesondere sonnenähnliche Sterne und Exoplaneten, sowie in begrenztem Umfang über globale Aspekte des Planeten Erde.

Die genannten Forschungsthemen werden durch die drei Abteilungen und die zusätzlichen Forschungsgruppen des Instituts weitgehend abgedeckt.

*The subject of scientific investigation at the MPS is the solar system in all its manifestations: 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 on astronomical objects beyond the solar system, in particular Sun-like stars and exoplanets, as well as, on a small scale, on global aspects of planet Earth.*

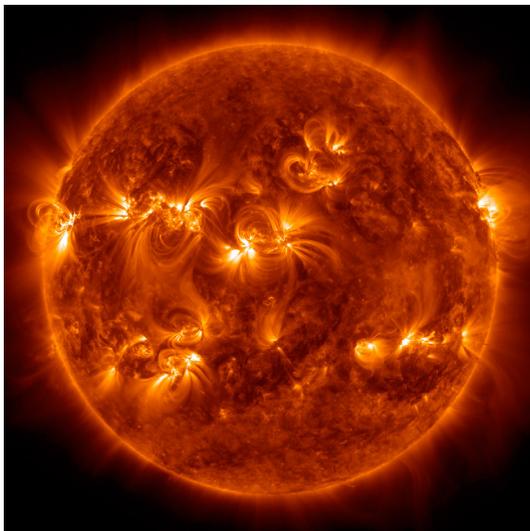
*The research topics listed above are covered to a large extent by the three scientific departments and the additional research groups.*

Zentrales Thema der Abteilung „Planeten und Kometen“ ist die Entwicklung und Geschichte unseres Sonnensystems. Wesentlicher Gegenstand ihrer Untersuchungen sind die terrestrischen Planeten und die Gasriesen einschließlich deren tiefen Inneren, deren Oberflächen, Atmosphären und Plasmaumgebungen, sowie die kleinen Körper im Sonnensystem einschließlich Kometen und Asteroiden.



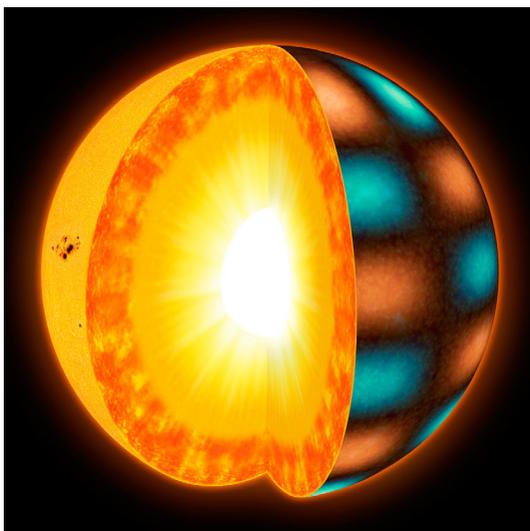
*Central theme of the department “Planets and Comets” is the evolution and history of our solar system. Main objects of its investigations are the terrestrial planets and the gas giants, including their deep interiors, surfaces, atmospheres and the plasma environments, and the small bodies in the solar system including comets and asteroids.*

Zentrales Thema der Abteilung „Sonne und Heliosphäre“ ist die Sonne mit ihrer ganzen Vielfalt an aktiven und dynamischen Phänomenen. Im Fokus ihrer Forschung stehen die Atmosphäre der Sonne mit ihrer reichhaltigen Struktur und Dynamik und das Magnetfeld der Sonne als Hauptursache für die Vielzahl dynamischer solarer Erscheinungen.



*Central theme of the department “Sun and Heliosphere” is the Sun with its full variety of active and dynamic features. The main focus of its research is on the atmosphere of the Sun with its rich structure and dynamics and on the solar magnetic field as the main driver for the multitude of dynamic solar features.*

Zentrales Thema der Abteilung „Das Innere der Sonne und der Sterne“ ist die interne Struktur, die Dynamik und die magnetische Aktivität der Sonne und der Sterne. Ihre Untersuchungen beruhen vor allem auf der Helioseismologie und der Asteroseismologie, d.h. der Verwendung solarer oder stellarer Schwingungen als Sonden für das Innere der Sonne und der Sterne.



*Central theme of the department “Solar and Stellar Interiors” is the internal structure, dynamics and magnetic activity of the Sun and stars. Its investigations are mainly based on helioseismology and asteroseismology, i.e. the use of solar or stellar oscillations as probes of the interior of the Sun or other stars.*

Die Frage, wo und wie Kometen entstanden sind, steht im Fokus der Max-Planck-Forschungsgruppe „RELIC“ (Research Linked to Comets). Sie studiert die Bildung erster Planetesimale im Sonnensystem, deren Überreste Kometen sind, sowie die physikalischen Eigenschaften der Objekte im Kuipergürtel und anderer Populationen, die Kometen beherbergen.



*The question, where and how comets did form, is in the focus of the Max Planck Research Group “RELIC” (Research Linked to Comets). It studies the formation of first solar system planetesimals of which comets are remnants and the physical properties of Kuiper Belt Objects and other populations where comets are stored.*

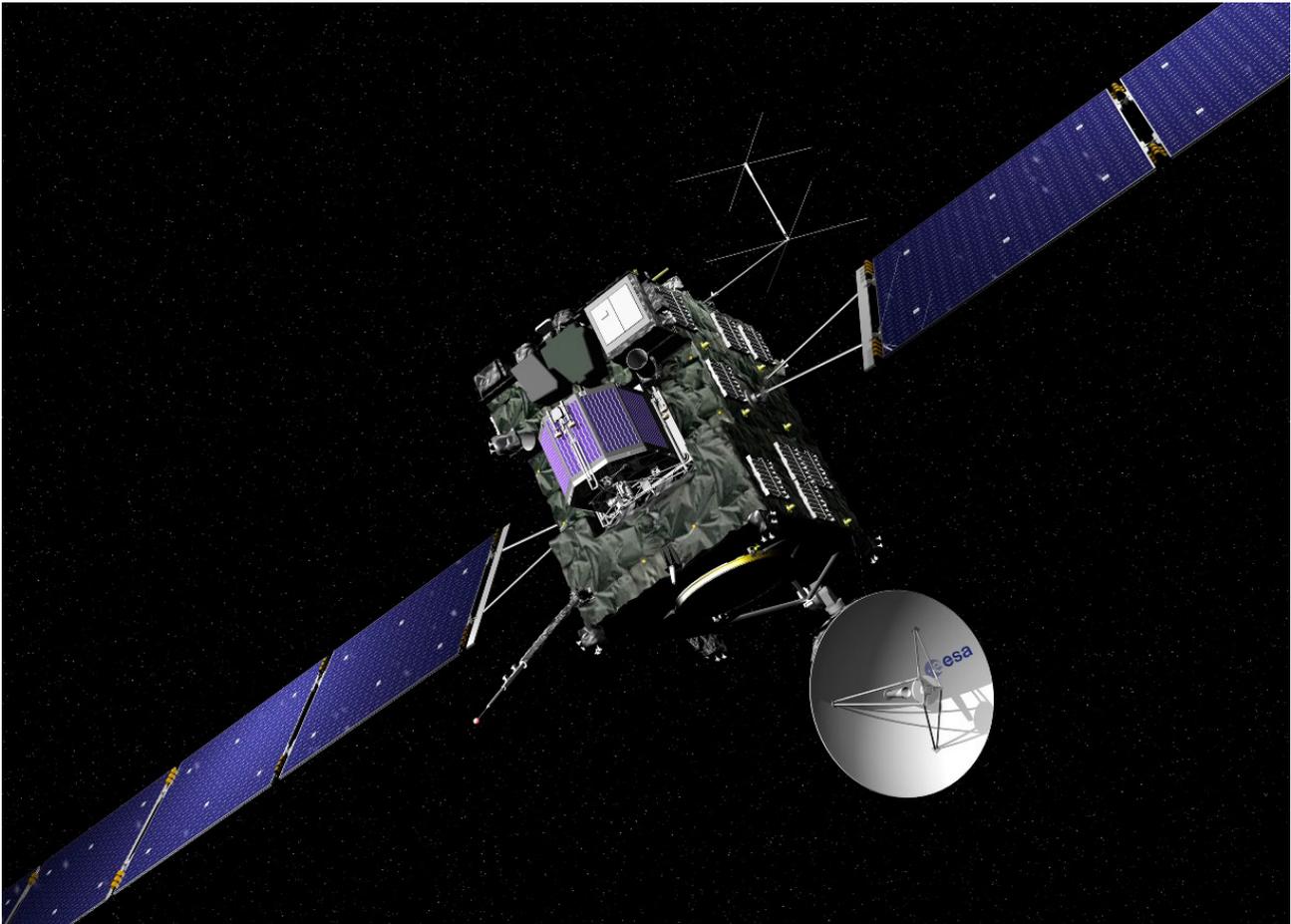
Die solare Variabilität auf Zeitskalen von Tagen bis hin zu Jahrtausenden ist das zentrale Thema der Minerva-Forschungsgruppe „Solare Variabilität und Klima“. Sie erforscht die Mechanismen der Schwankungen der solaren Strahlung und versucht, die gemessenen Variationen im Modell nachzubilden und den magnetischen Fluss an der Sonnenoberfläche und die solare Strahlung seit dem Maunder-Minimum und während des Holozäns zu rekonstruieren.



*The solar variability on timescales of days to millennia is the central topic of the Minerva Research Group “Solar Variability and Climate”. It investigates the mechanisms of solar irradiance variations and aims at modeling the measured variations and reconstructing the magnetic flux at the solar surface and the irradiance since the Maunder minimum and over the Holocene.*

Bei der auf wissenschaftliche Beobachtungen ausgerichteten Arbeitsweise des Instituts spielen die Entwicklung und der Bau von Instrumenten, insbesondere für Weltraummissionen, 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 spektroskopische Verfahren, die in einem weiten Wellenlängenbereich von Röntgenstrahlen bis hin zum Infraroten und mm-Wellen zur Anwendung kommen. In-situ Messungen mit Hilfe von Instrumenten auf Satelliten und Raumsonden sind wesentlich für die Untersuchung der

*The MPS is oriented predominantly toward observational research, with emphasis on the development and construction of instruments, in particular for space missions, and the analysis of observational data. Ground-based, sub-orbital (balloon- or aircraft-borne) and in particular space-borne telescopes provide the light for imaging and spectroscopic techniques, applied in a wide spectral range from X-rays up to infrared and mm wavelength range. In-situ measurements with instruments aboard satellites and space probes are essential for the analysis of the surfaces, atmospheres and magnetospheres of the solar system bodies, as*



Die Raumsonde Rosetta mit der Landeeinheit Philae, die vor allem am MPS entwickelt wurde.

*Space probe Rosetta with the lander Philae mainly developed at MPS*

Oberflächen, Atmosphären und Magnetosphären der Körper des Sonnensystems, aber auch für die Erforschung des interplanetaren Plasmas und des Sonnenwindes. Das Innere der Sonne, der Sterne und der Planeten wird mit helioseismologischen, asteroseismologischen und geophysikalischen Techniken erkundet. Die Gewinnung von Beobachtungsdaten wird durch eine intensive Analyse und Interpretation der Daten ergänzt und begleitet von gründlichem theoretischen Arbeiten und Modellrechnungen, basierend auf modernsten numerischen Simulationsrechnungen.

*well as for the exploration of the interplanetary plasma and the solar wind. The interiors of the Sun, stars and planets are probed by helioseismology, asteroseismology and by geophysical methods. The observational activities are enhanced by intensive analysis and interpretation of the gathered data and are accompanied by thorough theoretical work and modeling, based on state-of-the-art numerical simulations.*

Das Institut ist bei acht derzeit aktiven Weltraummissionen der ESA und NASA mit Instrumentenbeiträgen beteiligt (SoHO, Cassini, Cluster-II, Mars Express, Rosetta, STEREO, Dawn, Proba-2) und ist in die Entwicklung von Instrumenten oder Bodensegmenten bei sieben zukünftigen bedeutenden Weltraummissionen eingebunden (InSight, BepiColombo, Solar Orbiter, ExoMars, Proba-3, PLATO,

*The institute has provided instrument contributions to eight currently active space missions of ESA and NASA (SoHO, Cassini, Cluster-II, Mars Express, Rosetta, STEREO, Dawn, Proba-2) and is involved in the instrument or ground segment development for seven future major space missions (InSight, BepiColombo, Solar Orbiter, ExoMars, Proba-3, PLATO, JUICE). It*

JUICE). Es hat das ballongetragene Sonnenobservatorium Sunrise zu Beobachtungsflügen eingesetzt, ist in das von einem Flugzeug getragene Infrarot-Observatorium SOFIA involviert und an bodengebundenen Sonnenobservatorien auf Teneriffa beteiligt (VTT, Gregor), für die es Postfokus-Instrumente geliefert hat bzw. zurzeit entwickelt. Es ist eingebunden in die Datenbearbeitung für das Solar Dynamics Observatory (SDO) der NASA und betreibt das Deutsche Datenzentrum für SDO. Es ist vertreten in den Wissenschaftsteams mehrerer anderer Weltraummissionen und hat ausgezeichneten Zugang zu zahlreichen anderen wertvollen Datensätzen (z. B. Kepler, Hinode, IRIS).

Die wissenschaftliche Arbeit am MPS ist überwiegend im Rahmen einer Vielzahl (bis zu 200) bilateraler und multilateraler Kollaborationen mit nationalen oder internationalen Forschungseinrichtungen organisiert. Die zugehörigen Projekte umfassen dabei sowohl Instrumentenprojekte wie auch rein wissenschaftliche Projekte. Die Bandbreite reicht dabei von informellen Kollaborationen zu einem spezifischen wissenschaftlichen Thema im Rahmen einer kleinen Gruppe, über einen begrenzten Zeitraum und ohne gesonderte Finanzierung, deren Ergebnis typisch einige gemeinsame Publikationen sind, bis hin zu großen Projekten, basierend auf vertraglichen Vereinbarungen mit dedizierter Finanzierung und definierten Zeitplänen. Die umfangreichsten Kollaborationen dienen häufig der Entwicklung von Weltrauminstrumenten und der Gewinnung entsprechender Messdaten. Bei nahezu allen Instrumentenprojekten arbeitet das MPS mit einer Vielzahl von Forschungseinrichtungen in Deutschland, Europa und der übrigen Welt zusammen. Solche Kollaborationen bilden sich typisch bei Abgabe eines Instrumentenvorschlags an eine der Raumfahrtorganisationen und bestehen für Jahre oder Jahrzehnte, bis die wissenschaftliche Auswertung der gewonnenen Messdaten abgeschlossen ist.

*has flown the balloon-borne solar observatory Sunrise, is involved in the aircraft-borne infrared observatory SOFIA and has a share in the ground-based solar observatories on Tenerife (VTT, Gregor), for which it has provided and is currently developing post-focus instrumentation. It is involved in the data processing for the Solar Dynamics Observatory (SDO) and operates the German Data Center for SDO. It is member of the science teams of several other space missions and has excellent access to numerous valuable data sets (e.g. Kepler, Hinode, IRIS).*

*The research at MPS is characterized by a large number (up to 200) of bilateral and multilateral collaborations with national or international research institutions dedicated to specific projects, comprising both, instrument development projects as well as science-oriented projects, ranging from informal collaboration on a specific scientific topic within a small group over a limited time without extra funding, usually resulting in a few common papers, to large projects based on formal agreements with dedicated funding and defined schedules. The most extensive project collaborations typically aim to develop space instrumentation and to gain corresponding scientific data. In virtually all instrument projects the MPS collaborates with partners at research institutes in Germany, Europe and the world. These collaborations are usually formed when an instrument proposal is submitted to one of the space agencies and persist for years or decades until the analysis of scientific results has been concluded.*

**FORSCHUNGSHIGHLIGHTS 2013/2014**

***RESEARCH HIGHLIGHTS IN 2013/2014***

## Die Erforschung des Asteroiden (4) Vesta

### *Exploration of asteroid (4) Vesta*

Jenseits der Bahn des Planeten Mars und noch innerhalb der des Jupiters bewegen sich unzählige kleine Körper um die Sonne. Dieser Bereich wird „Asteroidengürtel“ oder auch „Hauptgürtel“ genannt. Mittels erdgebundener Teleskope haben Forscher bis heute mehr als 694.000 Asteroiden entdeckt und ihre Bahnen vermessen. Die Theorie der Planetenbildung besagt, dass sich zunächst sogenannte Protoplaneten bis zu einem Durchmesser von einigen hundert Kilometern ausgebildet haben. Die größeren Gesteinsplaneten wie die Erde oder der Mars waren einst auch Protoplaneten, welche im Laufe der Zeit durch einfallendes Material weiter wachsen konnten. Nach unserem heutigen Erkenntnisstand haben gravitative Störungen des Jupiters dazu geführt, dass sich im Bereich des Hauptgürtels kein größerer Planet entwickeln konnte. Hier wurden die Protoplaneten zu meist in viele Bruchstücke zerschlagen, die heute einen Großteil des Asteroidengürtels ausmachen. Bei den größten Asteroiden, wie Ceres und Vesta, handelt es sich jedoch um intakt gebliebene Protoplaneten. Die Erforschung der Entstehung und Entwicklung dieser beiden Körper erlaubt Rückschlüsse auf die Zustände im frühen Sonnensystem und damit auf die Entstehung der Erde.

Ceres ist mit einem Durchmesser von bemerkenswerten 940 km das größte Objekt im Asteroidengürtel. Neueste spektroskopische Daten zeigen, dass die Oberfläche im Wesentlichen aus sogenannten Phyllosilikaten besteht. Im Laufe

*Beyond the orbit of planet Mars but still inside the Jupiter orbit countless small bodies are moving around the Sun. This region is called 'asteroid belt' or 'main belt'. Using ground-based telescopes, researchers have discovered until today more than 694,000 asteroids and determined their orbits. The planet formation theory implies that at first so-called protoplanets have accreted, reaching diameters up to a few hundred kilometers. The larger rocky planets, such as Earth and Mars, were once also protoplanets, which grow over time by in-falling material. According to our current knowledge, gravitational perturbations of Jupiter have prevented planet formation in the asteroid belt. Here most of the original protoplanets have been destroyed into many fragments, which today make up a large part of the asteroid belt. However, the large asteroids Ceres and Vesta are still intact protoplanets. Investigating the origin and evolution of these two bodies allows conclusions about the conditions in the early solar system and the formation of Earth.*

*Ceres is the largest object in the asteroid belt with a remarkable diameter of 940 km. Recent spectroscopic data show that the surface primarily consists of so-called phyllosilicates. Over the course of billions of years, Ceres has*

der Jahrmilliarden hat sich Ceres vermutlich nur leicht mineralogisch verändert und somit sollte die Oberfläche noch Ähnlichkeiten zur Urmaterie aufweisen, aus der das Sonnensystem einst entstanden ist. Bei Vesta dagegen, deren Durchmesser 525 km beträgt, gab es bereits vor der Dawn-Mission deutliche Anhaltspunkte dafür, dass die Oberfläche von vulkanischen Gesteinen geprägt ist und demnach durch Schmelzprozesse verändert wurde.

Durch die Untersuchung zweier so unterschiedlicher Protoplaneten trägt die NASA Mission Dawn zur Aufklärung der Bedingungen im frühen Sonnensystem bei. Das MPS hat zwei baugleiche Kameras, die beiden sogenannten „Framing Cameras“ oder kurz FCs [2], beige gesteuert, die neben Aufnahmen im Weißlicht auch detaillierte spektrale Informationen durch sieben engbandige Farbfilter vom blauen bis in den nahen Infrarotbereich liefern. Im Zusammenspiel mit zwei weiteren Instrumenten auf Dawn, dem Visuellen- und Nahinfrarotspektrometer (VIR) und dem Gammastrahlen/Neutronen-Spektrometer (GRAND), kann so die mineralogisch-chemische Zusammensetzung der Asteroidenoberflächen kartiert werden.

Dawn erreichte im Juli 2011 nach einer Flugdauer von vier Jahren ihr erstes Ziel, die Vesta. Die Aufnahmen der Framing Cameras zeigen eine mehrere Milliarden Jahre alte, allerdings durch Einschläge stark verwitterte Oberfläche, die reich an dem Mineral Pyroxen ist [3]. 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 erheblich älter ist als die südliche. Die beiden Hemisphären unterscheiden sich allerdings nicht nur durch ihr Alter, sondern auch in der mineralogischen Zusammensetzung, die sich durch unterschiedliche spektrale Eigenschaften erschließt. Die südliche Hemisphäre ist stark durch Diogenit geprägt, einem als Meteorit gefundenen Gesteinstyp, der stark basaltischem Tiefengestein auf der Erde ähnelt. Die nördliche Hemisphäre ist eher eukritisch, entspricht also dem Basaltgestein, welches sich bei Vulkanausbrüchen an der Oberfläche bildet [3]. Basaltische Gesteine entstehen

*changed probably only slightly its surface composition and thus it should exhibit more similarities to the primordial material from which the solar system once formed. For Vesta, however, which has a diameter of 525 km, we had already before the Dawn mission evidence that the surface is composed of basaltic rocks and thus was subject of melting processes. By studying two different protoplanets, the NASA mission Dawn [1] contributes to understand the conditions which were present in the early solar system.*

*The MPS has contributed two identical cameras, the so-called 'Framing Cameras' or short FCs [2], which provide detailed spectral information by using seven narrow-band filters, ranging from the visible to the infrared light. In combination with two other instruments on Dawn, the Visual – and near Infrared Spectrometer (VIR) and the gamma ray/neutron spectrometer (GRAND), the mineralogical and chemical composition of the asteroid surfaces can be derived.*

*Dawn reached its first target Vesta in July 2011 after a flight time of four years. The images of the Framing Cameras show a several billion years old, though by impacts heavily eroded surface, which is rich in the mineral Pyroxene [3]. While the northern hemisphere of the minor planet exhibits a multitude of craters, significantly less impacts can be found on the southern hemisphere. This is an indication that the northern hemisphere is considerably older than the southern. The two hemispheres differ not only by age but also in mineralogical composition, which is revealed through their different spectral properties. The southern hemisphere is strongly influenced by diogenite, a rock type found as meteorite that resembles highly basaltic plutonic rock on Earth. The northern hemisphere is rather eucritic and thus corresponds to basalt rock, which forms when volcanic eruptions on the surface occur [3]. Basaltic rocks form by partial melting of the silicate mantle of a planet which is olivine-rich, and the following separa-*

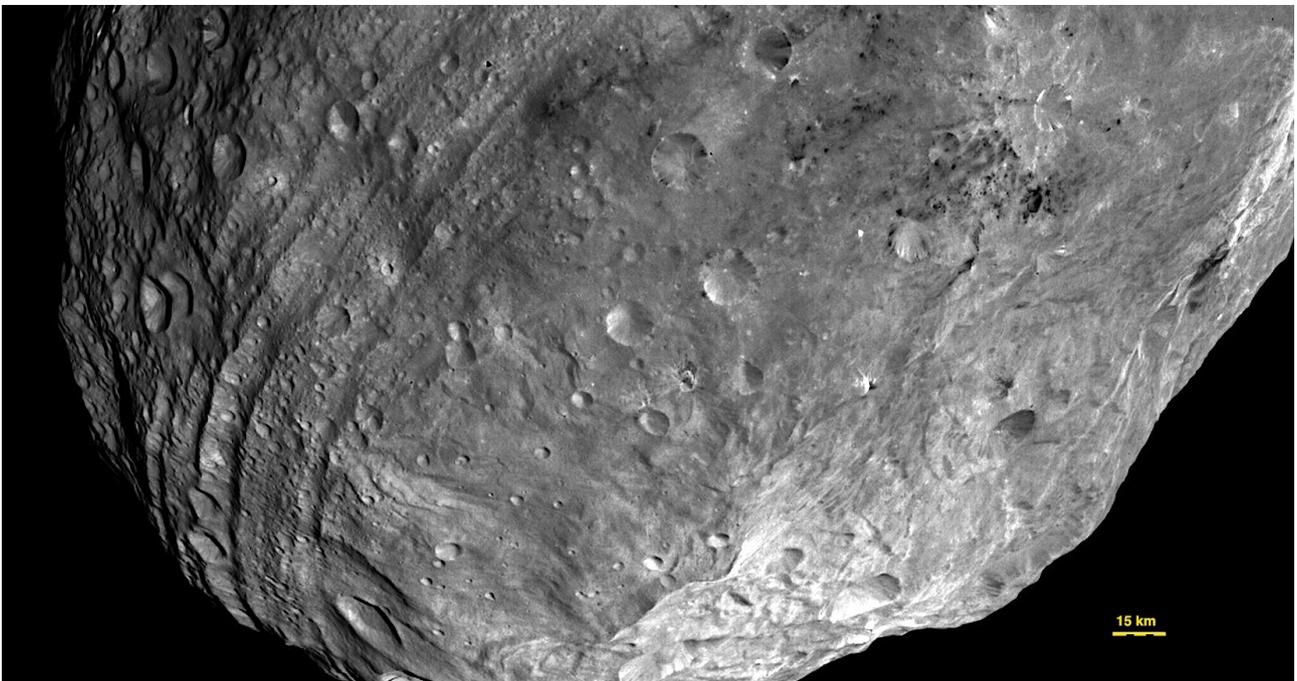
## Die Erforschung des Asteroiden (4) Vesta *Exploration of asteroid (4) Vesta*

durch das teilweise Aufschmelzen des am Mineral Olivin reichen Silikatmantels eines Planeten und der folgenden Abtrennung der Magma vom festen Residuum. Ihr Vorkommen auf Vesta belegt, dass sich der Kleinplanet im Laufe seiner Entwicklung stark aufgeheizt haben muss, wahrscheinlich kurz nach seiner Entstehung durch die Zerfallswärme relativ kurzlebiger radioaktiver Isotope, die heute verschwunden sind.

Der Kleinplanet weist in der äquatorialen Region sowie nördlich davon große Rillenstrukturen auf die nahezu den ganzen Körper umspannen. Diese Rillen und die Unterschiede in Alter und Zusammensetzung der Hemisphären sind die Folgen zweier großer Impakte, die Vesta auf der Südhemisphäre getroffen haben und den Kleinplaneten fast zerrissen hätten (siehe Abb. 1). Das jüngere der beiden großen Impactbecken nennt man Rheasilvia (Durchmesser 500 km), das ältere Veneneia (400 km). Wir gehen heute davon aus, dass das Veneneia-Ereignis zu den sehr dunklen Ablagerungen auf der Vesta-Oberfläche geführt hat (siehe

*tion of the magma from the solid residue. Their existence on Vesta indicates that the asteroid has been strongly heated, probably shortly after its accretion by the decay of relatively short-lived radioactive isotopes, which have decayed long time ago.*

*The asteroid shows large grooves structures [4], which almost span the entire body in the equatorial region and further north. These grooves and the differences in age and composition of the hemispheres are the result of two big impacts on Vesta's southern hemisphere, which had almost destroyed the asteroid (see Fig. 1). The younger of the two large impact basins is named Rheasilvia (diameter 500 km), the older Veneneia (400 km). We have evidence that the Veneneia event has deposited the dark material on the surface of Vesta (see Fig. 1 and 3), which is to date especially visible*



**Abb. 1:** 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 Impactbeckens Rheasilvia nahe des Südpols (unten rechts). Die Oberfläche zeigt starke Helligkeitskontraste, was für kleinere Asteroiden untypisch ist. Credit: NASA/JPL-Caltech/UCLA/MPS/DLR/IDA

**Fig. 1:** The asteroid Vesta imaged during 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 a large brightness range that is atypical for small asteroids. Credit: NASA/JPL-Caltech/UCLA/MPS/DLR/IDA

## Die Erforschung des Asteroiden (4) Vesta *Exploration of asteroid (4) Vesta*

Abb. 1 und 3), die heute vor allem noch in der Äquatorregion und nördlich davon sichtbar sind. Es gilt heute als gesichert, dass es sich hierbei um Reste eines Projektils handelt, und zwar von einem kohligem Chondrit. Chondrite zeichnen sich durch einen hohen Anteil an Kohlenstoff und organischen Komponenten aus [6].

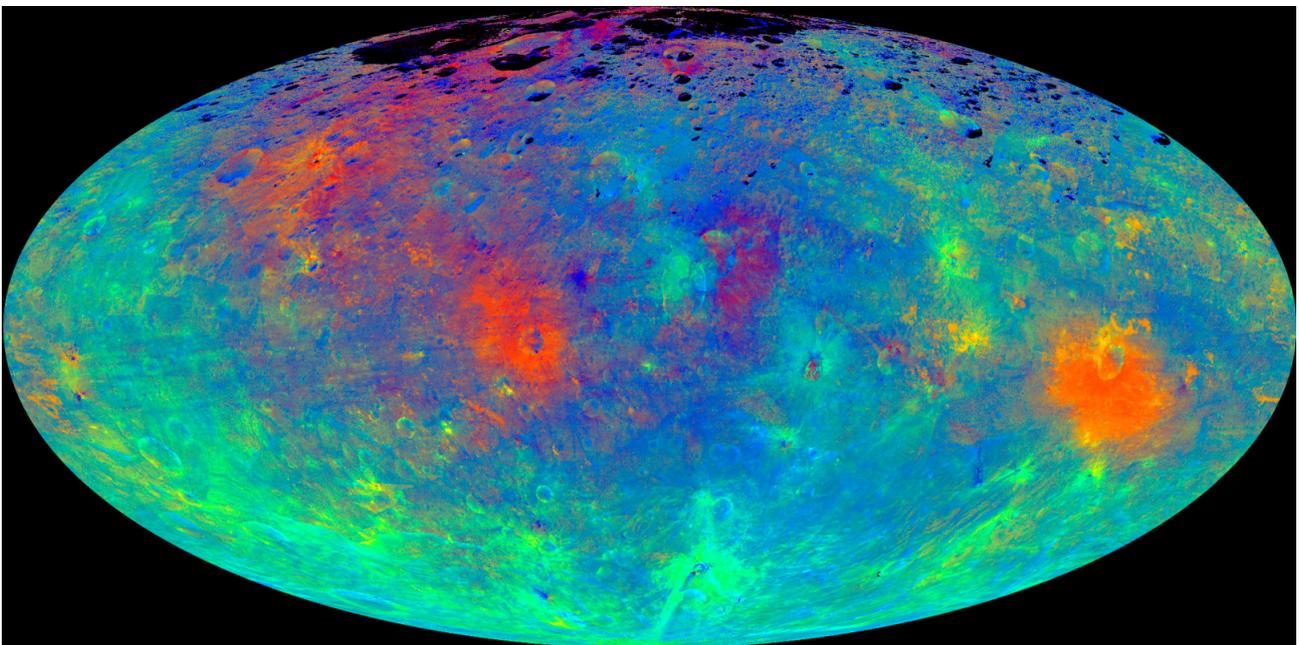
Während einige Oberflächenbereiche schwarz wie Kohle sind, leuchten andere hell wie Schnee. Die Zusammensetzung dieser hellen Bereiche entspricht dem der vulkanischen Vesta-Oberfläche, jedoch ist das Material feinkörniger und somit heller. Die Wälle des Rheasilvia-Impaktbeckens sind bis heute gut erkennbar und der gleichzeitig entstandene Zentralberg ist mit einer Gesamthöhe von etwa 22 km deutlich höher als jeder Berg auf der Erde.

Nicht zuletzt durch die Beobachtungen der Framing Cameras (FC) wissen wir, dass die auf der Erde aufgefundenen Meteorite der sogenannten

*in the equatorial region and further north [5]. The dark material is likely a remnant of a projectile of carbonaceous chondritic composition. Chondrites are characterized by a high percentage of carbon and organic components [6].*

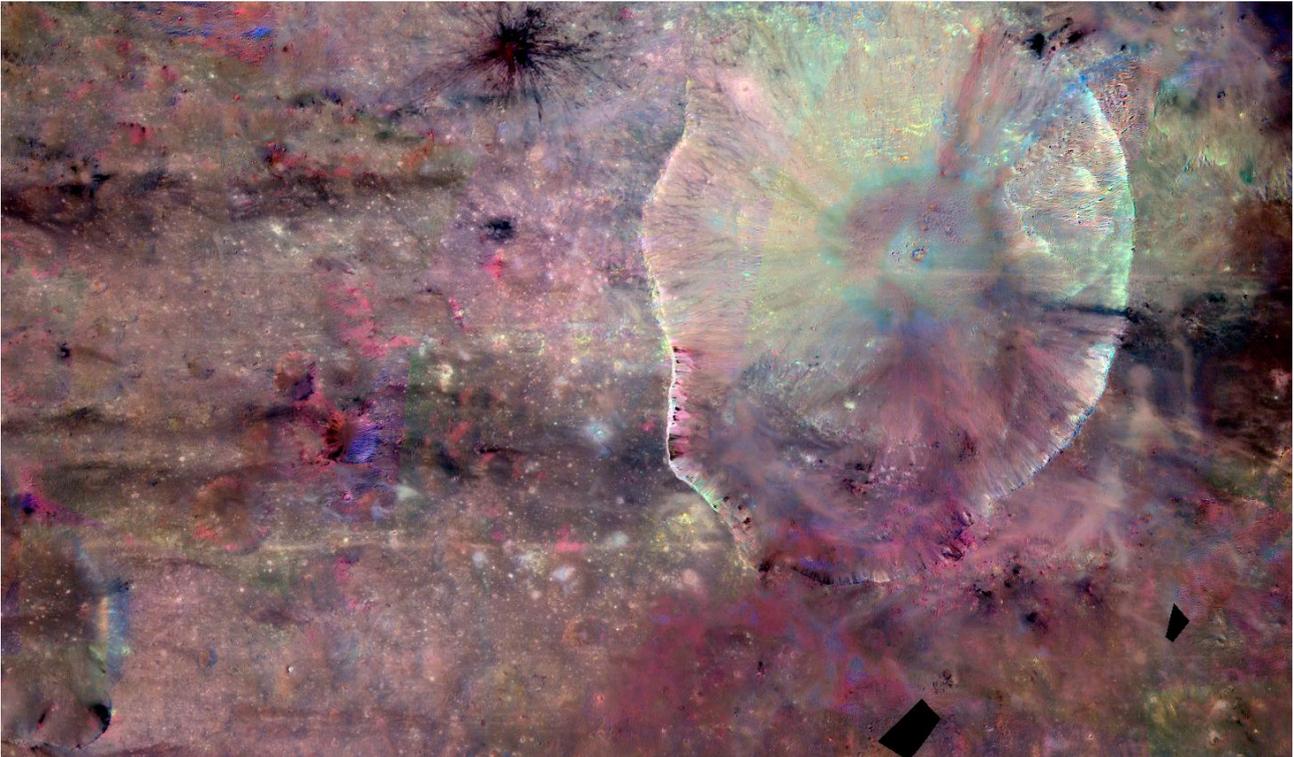
*While some areas of the surface are black as coal, others shine bright as snow. The composition of these bright areas corresponds to that of the darker volcanic Vesta surface; however, the bright material shows lower grain sizes and therefore brighter. The rim of the Rheasilvia impact basin is visible until today and its central peak, created nearly simultaneously with the rim, is significantly higher than any mountain on Earth with a total height of about 22 km.*

*Not least by the observations of the Framing Cameras, we know that the meteorites of the HED group (Howardites, Eucrites, Diogenites;*



**Abb. 2:** Farbkodierte Karte des Asteroiden Vesta. Die Nordhalbkugel reflektiert andere Wellenlängen des Sonnenlichts als die Südhalbkugel. In der Karte ist dies durch eine überwiegende Blaufärbung im Norden (Eukrit und Howardit), aber ausgedehnten gelblich-grünlichen Bereichen im Süden (Diogenit) dargestellt. Die Bereiche um zwei große Krater (etwas links von der Bildmitte und rechts) zeigen eine auffällige orange-rote Färbung. Hierbei handelt es sich wahrscheinlich um Auswurfmaterial, möglicherweise ist dieses Material sogar durch den Impakt aufgeschmolzen gewesen.

*Fig. 2: Color-coded map of the asteroid Vesta. The northern hemisphere reflects other wavelengths of sunlight than the southern hemisphere. In this map the majority of the northern hemisphere is bluish (eucrite and howardite) while the southern hemisphere is yellowish-greenish (diogenite). The areas around two large craters (slightly left of center and right) show a striking orange-red coloration. This is probably ejecta, possibly this material also has been melted by the impact.*



**Abb. 3:** Falschfarbenabbildung eines kleinen Teils der Oberfläche des Asteroiden Vesta. Das Bild, welches den 60 km großen Marcia-Krater zeigt, wurde aus einer Reihe von Einzelaufnahmen in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen zusammengesetzt. Das Bild besticht durch deutliche Farbkontraste, vor allem durch das dunkle „kohlige“ Material von einem eingeschlagenen Körper und das rote durch Einschläge ausgeworfene und aufgeschmolzene Material.

*Fig. 3: False color composite of a small part of the surface of the asteroid Vesta. The mosaic shows the 60 km diameter crater Marcia, composed of a series of individual images obtained in different wavelength ranges. The picture impresses with significant color contrasts, especially due to the dark carbonaceous material deposited by an impactor and the red possibly former molten material.*

HED-Gruppe (Howardite, Eukrite, Diogenite; basaltische Gesteine) zu einem erheblichen Anteil von Vesta stammen [7]. Die Meteoride und deren Mutterkörper, erdbahnkreuzenden Asteroiden, wurden einst durch den Rheasilvia-Impakt erzeugt, bei dem große und kleine Bruchstücke der Kruste von Vesta auf Fluchtgeschwindigkeit beschleunigt wurden. Einige von ihnen gelangten durch den Schwereinfluss des Planeten Jupiter auf Bahnen, die sie in Erdnähe brachten. Im Verlauf der Auswertungen der Vesta-Daten gelang es, mit Hilfe des VIR-Instruments und der Framing Cameras, mögliche Herkunftsregionen der verschiedenen Unterklassen von HED-Meteoriten zu identifizieren. Über detaillierte Laboranalysen der Meteoriten konnte so eine mineralogische Karte der Asteroidenoberfläche erstellt werden. Hierfür wurden Falschfarbenaufnahmen aus tausenden von FC Bildern kombiniert und analysiert (siehe Abb. 2 und 3).

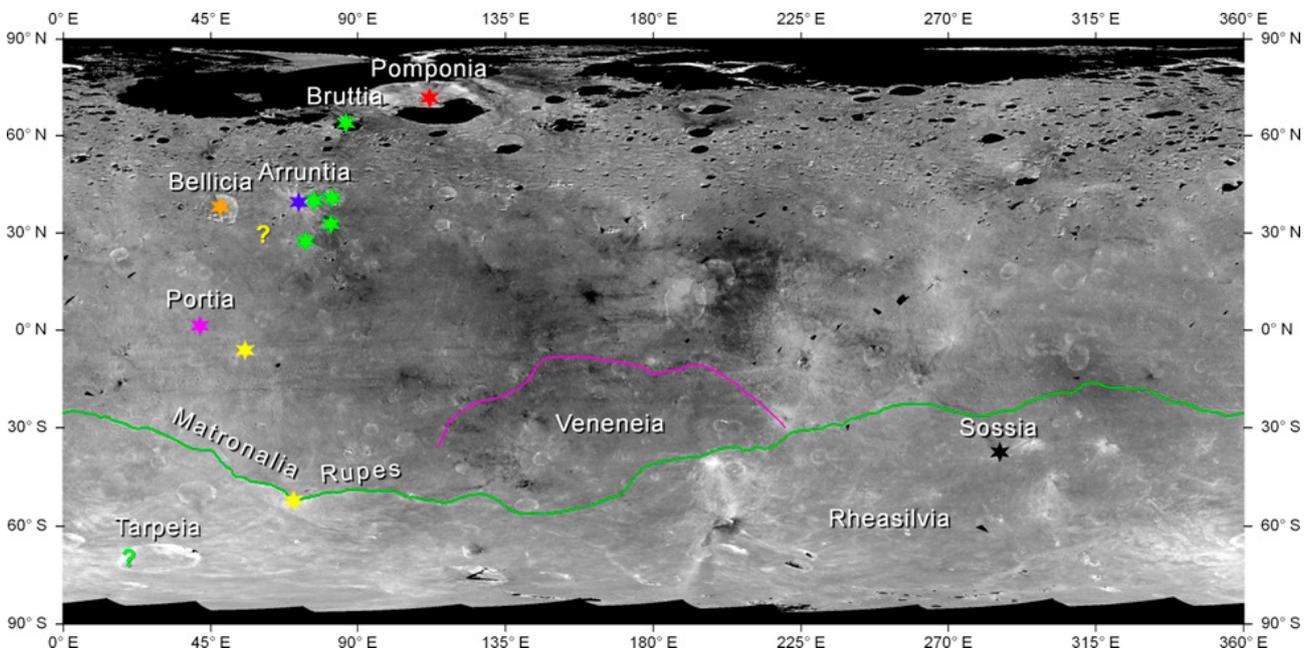
*basaltic rocks) are mainly of Vesta origin [7]. The meteoroids and their parent bodies, Earth's orbit-crossing asteroids, were once generated by the Rheasilvia impact. Large and small fragments of Vesta's crust were accelerated and reached escape velocity. Some of them were pushed due to the gravity of the planet Jupiter into near Earth orbits. During the evaluation of the Vesta data by combining VIR and Framing Camera results, we were able to identify possible regions of origin of the various subclasses of HED meteorites. By using detailed laboratory spectral information of meteorites we produced a mineralogical map of the surface of the asteroid. For this purpose false color composites have been computed which originate from thousands of FC images (see Fig. 2 and 3).*

Die Bilder der Framing Cameras belegen, dass die Vesta an den Polen deutlich abgeplattet ist. Die Bahn der Raumsonde um den Planeten lässt wiederum Rückschlüsse auf das Gravitationsfeld und somit auf die Massenverteilung zu. Ein Vergleich beider Datensätze zeigt, dass die Dichte deutlich zum Zentrum hin zunimmt, was einen Schalenbau nahelegt. Ähnlich wie die Erde besteht die Vesta wohl aus einem Eisenkern, einem Mantel, der vermutlich reich an Olivin ist, und einer basaltischen Kruste [8]. Der Radius des Eisenkerns beträgt etwa 42% des mittleren Asteroidenradius (bei der Erde sind es 55%). Die Vesta ist somit tatsächlich als Protoplanet einzustufen, der aus der Urzeit des Sonnensystems vor über vier Mrd. Jahren weitgehend intakt erhalten geblieben ist, wenn auch die Oberfläche durch ein Bombardement von Körpern unterschiedlicher Größe stark verwittert wurde.

Dem Dawn-Team am MPS gelang eine Zahl von interessanten Entdeckungen wie etwa der Nachweis von Olivin auf der Oberfläche des Asteroiden. Allerdings stammt dieser Olivin wohl nicht von Vesta selbst, sondern wie auch das dunkle kohlige

*The images of the Framing Cameras show that Vesta is significantly oblate at the poles. The orbit of the spacecraft around the asteroid allowed conclusions about the gravitational field and thus on the mass distribution. A comparison of both data sets shows that the density increases significantly towards the center, suggesting a shell structure. Like the Earth, Vesta has likely an iron core, a mantle, which is probably rich in olivine, and a basaltic crust [8]. The radius of the iron core is about 42% of the mean asteroid radius (Earth 55%). Vesta is thus indeed a protoplanet which has remained largely intact since its origin in the solar system over four billion years ago, even though the surface has been heavily weathered by a bombardment of bodies of various sizes.*

*A number of interesting discoveries have been reached by the Dawn team at MPS, such as the detection of olivine on the surface of the asteroid. However, this olivine originates probably not from Vesta itself, but as the dark carbona-*



**Abb. 4:** Olivinhaltige Oberflächenbereiche auf dem Asteroiden Vesta (Sterne). Die Grenzen zweier großer Einschlagsbecken sind durch farbige Linien markiert (Veneneia – violett, Rheasilvia – rot). Bemerkenswerterweise befinden sich fast alle Olivinaufschlüsse außerhalb des Rheasilvia-Beckens.

**Fig. 4:** Olivine-rich surfaces areas on the asteroid Vesta (stars). The borders of the two large impact basins are marked by colored lines (Veneneia – violet, Rheasilvia – red). Remarkably, almost all olivine-rich areas are outside the Rheasilvia basin.

Material von einem oder mehreren Einschlagskörpern. Das Fehlen von Vesta-eigenem Olivin auf der Oberfläche ist ein Hinweis darauf, dass die Vesta-Kruste erheblich mächtiger ist als ursprünglich angenommen [9].

Im Dezember 2014 hat die Dawn Sonde mit dem Anflug auf den Asteroiden, Ceres begonnen, um diesen im März 2015 zu erreichen. Ceres ist knapp doppelt so groß wie Vesta und spektroskopische Messungen von der Erde aus lassen vermuten, dass die Oberfläche recht ursprünglich ist und nicht durch vulkanische Aktivität verändert wurde. Die im Vergleich zu Vesta deutlich kleinere mittlere Dichte legt nahe, dass große Mengen Wassereis vorhanden sind, und Modellrechnungen zeigen, dass es unter einer Eisschicht sogar einen Wasserozean geben könnte. Während Vesta ein terrestrischer Protoplanet ist, ähnelt Ceres eher den Eismonden der großen Gasplaneten im äußeren Sonnensystem.

*aceous material rather from one or more impactors. The absence of surface olivine that originates from Vesta is an indication that the crust is significantly thicker than originally thought [9].*

*In December 2014 the Dawn spacecraft started its approach phase to asteroid Ceres [1] and reached the target in March 2015. Ceres is nearly twice as large as Vesta and ground-based spectroscopic measurements suggest that the surface is quite original and has not been altered by igneous volcanic activity. Compared to Vesta Cere's mean density is significantly lower, which suggests that large amounts of water ice are present, and model calculations show that there could be a water ocean under the ice. While Vesta is a terrestrial protoplanet, Ceres is more like the icy moons of the large gas planets in the outer solar system.*

Referenzen / *References* .....

- [1] Russel, C.; Raymond, C. (Eds.); *The Dawn Mission to Minor Planets 4 Vesta and 1 Ceres*; Springer-Verlag New York (2012).
- [2] Sierks, H., Keller, H. U., Jaumann, R., et al.; *The Dawn Framing Camera*; Space Science Review 163, 263-327 (2011).
- [3] Reddy, V., Sanchez, J. A., Nathues, A., et al.; *Color and Albedo Heterogeneity of Vesta from Dawn*; Science 336, 700-704 (2012).
- [4] Jaumann, R., Williams, D. A., Buczkowski, D. L., et al.; *Vesta's Shape and Morphology*; Science 336, 687 (2012)
- [5] Reddy, V., Le Corre, L., O'Brien, D. P., et al.; *Delivery of Dark Material to Vesta via Carbonaceous Chondritic Impacts*; Icarus 221, 544-559 (2012).
- [6] Nathues, A., Hoffmann, M., Cloutis, E., et al.; *Detection of serpentine in exogenic carbonaceous chondrite material on Vesta from Dawn FC data*; Icarus 239, 222-237 (2014).
- [7] McSween, H. Y., Binzel, R. P., de Sanctis, M. C., et al.; *Dawn; the Vesta-HED connection; and the geologic context for eucrites, diogenites, and howardites*; Meteoritics & Planetary Science (2013)
- [8] Asmar, S. W., Konopliv, A. S., Park, R. S., et al.; *The Gravity Field of Vesta and Implications for Interior Structure*; Lunar and Planetary Science Conference 43, 2600 (2012)
- [9] Nathues, A., Hoffmann, M., Schäfer, M., et al.; *Exogenic olivine on Vesta from Dawn Framing Camera color data*; Icarus 258, 467-482 (2015)

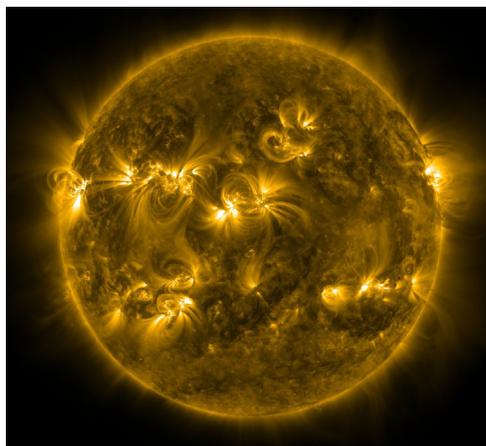
# Flechten mit Magnetfeldern auf der Sonne

## *Braiding of magnetic fields on the Sun*

Kühle Sterne wie unsere Sonne sind von einer heißen äußeren Atmosphäre umgeben, der Korona. In dieser werden Temperaturen von weit über einer Million K erreicht, womit es dort etwa 100 mal heißer ist als auf der Oberfläche. Da Wärme immer nur vom heißen zum kühlen Körper geleitet werden kann, stellt sich die Frage, wie die mit knapp 5800 K verhältnismäßig kühle Oberfläche die Korona heizen kann. Die zentrale Rolle bei der Lösung des Problems der Heizung der Korona spielt das Magnetfeld, das sowohl den Energiefluss in die Korona kanalisiert als auch durch die Konversion von magnetischer Energie in thermische Energie direkt zur Heizung beiträgt. Die Frage nach der Heizung der Korona ist dabei auch von breiterem Interesse in der Astrophysik, da sich bei einer großen Zahl von Phänomenen, die im Röntgenlicht beobachtbar sind, die gleiche Frage der Aufheizung des Plasmas auf hohe Temperaturen stellt.

**Abb. 1:** Bild der Korona der Sonne im extremen Ultraviolett. Diese Aufnahme zeigt Plasma in der äußeren Atmosphäre bei einer Temperatur von knapp unter einer Million K. Deutlich ist zu erkennen, dass das heiße Plasma vorwiegend in Bögen konzentriert ist. Diese zeigen die Magnetfeldlinien in der Korona an. Aufnahme vom 15. Mai 2013 mit dem AIA-Instrument auf dem Solar Dynamics Observatory (SDO) der NASA bei einer Wellenlänge von 171 nm.

Bild: Courtesy of NASA/SDO and the AIA science team.



*The Sun has a hot outer atmosphere, the corona. There the temperature rises to more than a million K, which is more than 100 times hotter than at the surface. Because heat is always transported from a hot to a cool body the question is how the relatively cool Sun can heat the hot corona. The central role to solve this riddle is played by the magnetic field. This channels not only the energy flux in the upper atmosphere, it also supplies heat to the corona through the conversion of magnetic energy into thermal energy. This question of the heating process is of wide interest also in astrophysics, because quite a number of astrophysical phenomena visible in X-rays share this question of plasma heating.*

*Fig. 1: Image of the corona in the extreme ultraviolet (EUV). This shows plasma in the outer atmosphere at a temperature of just below one million K. The hot plasma is concentrated in loops that outline the magnetic field lines. The image was acquired on 15. May 2013 with the AIA instrument on-board the space-based Solar Dynamics Observatory (SDO) of NASA at a wavelength of 171 nm.*

*Courtesy of NASA/SDO and the AIA science team.*

## Atomphysik, Spektroskopie, Plasma und Magnetfelder

Dabei wurde erst in den 1940er Jahren in einem engen Wechselspiel von Atomphysik, Spektroskopie im Labor und Astrophysik klar, dass die Korona aus heißem Plasma besteht [1]. Erkannt wurde dies durch die Identifikation beobachteter solarer Spektrallinien mit sogenannten verbotenen Übergängen zwischen Anregungszuständen von hochionisierten Atomen. Genauer gesagt sind diese Übergänge quantenmechanisch nur so unwahrscheinlich, dass sich die entsprechenden Spektrallinien im Labor nicht beobachten lassen, in astrophysikalischen Objekten aufgrund der Integration entlang der eben astronomisch langen Sichtlinie aber schon. Walter Grotian war der erste, der 1939 diesen Zusammenhang für die sogenannte „rote Koronalinie“ bei 637.5 nm von neunfach ionisiertem Eisen zeigte.

Durch die hohen Temperaturen ist das koronale Plasma hoch ionisiert. Zudem ist die Energiedichte des Magnetfeldes deutlich höher als die innere Energie des Plasmas. Damit werden Strömungen vom Magnetfeld geleitet; das Plasma bewegt sich nur entlang des Magnetfeldes, nicht aber quer dazu. Wann und wo immer Material in die Korona eingebracht wird, wird es sich daher entlang der Magnetfeldlinien verteilen. So entstehen die koronalen Bögen aus heißem Plasma, die man besonders gut im extremen Ultraviolett (EUV) und im Röntgenlicht beobachten kann (Abb. 1). Wie Eisenfeilspäne im Schülerversuch zeigen die koronalen Bögen den Verlauf der Magnetfeldlinien an.

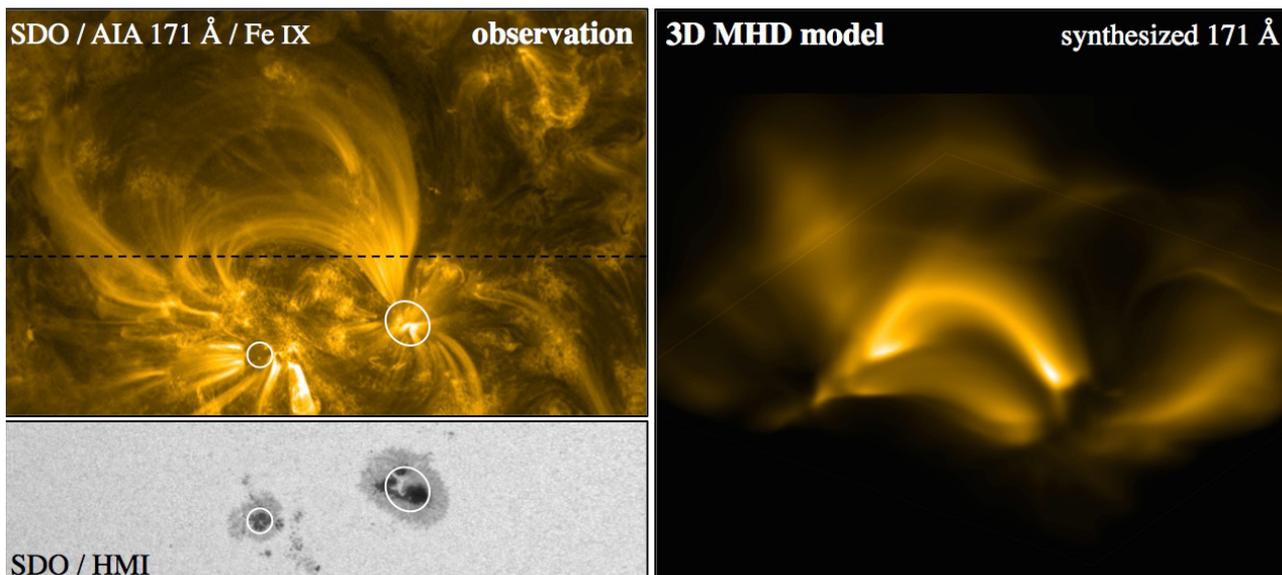
Die Wurzel der koronalen Bögen an der Sonnenoberfläche sind Konzentrationen von Magnetfeld. In den aktiven Regionen der Sonne befinden sich meist zwei (oder mehr) Sonnenflecken entgegengesetzter magnetischer Polarität. Bei typischen Durchmessern von mehreren Zehntausend km und Magnetfeldstärken von bis zu 0.3 T wird hier die oberflächennahe Konvektion unterdrückt. Durch den so reduzierten Energietransport erscheinen die Flecken dunkler. In der Regel verbinden die koronalen Bögen entweder die Peripherie von zwei Sonnenflecken, oder einen Sonnenflecken

## *Atomic physics, spectroscopy, plasma and magnetic fields*

*It was not before the early 1940s that the hot temperature of the corona has been recognized. This became possible through an intensive interaction between spectroscopic studies in the laboratory and in astrophysics [1]. In particular, the emission lines seen during solar eclipses were identified with so-called forbidden transitions of highly ionized atoms. For example, Walter Grotian identified the “red line” at 637.5 nm to be from nine-times ionized iron. Following quantum mechanics the probabilities for such transitions are not strictly forbidden, but only very low. Therefore they cannot be directly observed in the laboratory, but they can be seen in astrophysical objects because of the long line-of-sight integration.*

*Due to the high temperature in the corona the plasma is highly ionized. Furthermore the energy density of the magnetic field is much higher than the thermal energy of the plasma. Thus the magnetic field channels flows; the plasma is moving only along the magnetic field lines, but not across. Wherever plasma will be injected into the corona, it will be distributed along field lines. Consequently coronal loops hosting hot plasma form. These can be seen at best in the extreme ultraviolet (EUV) and in X-rays (Fig. 1).*

*The root of coronal loops at the solar surface are concentrations of magnetic field. In active regions of the Sun there are typically two (or more) sunspots of opposite magnetic polarity. With typical diameters of several ten thousand km and high magnetic field strengths of some 0.3 T here the near-surface convection is suppressed. Because of the reduced energy transport these spots then appear dark in visible light. In general, the coronal loops hosting hot plasma then connect the periphery of two sunspots of opposite polarity, or one sunspot with*



**Abb. 2:** Links oben ist eine Beobachtung einer aktiven Region auf der Sonne zu sehen, aufgenommen mit dem 171 nm-Kanal des AIA-Instruments auf dem Solar Dynamics Observatory (SDO) der NASA. Diese zeigt Plasma bei einer Temperatur von knapp unter einer Million K im Licht von Fe IX. Die Breite des Ausschnitts entspricht etwa 150.000 km auf der Sonne. 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 171 nm-Kanal, die aus einem 3D-MHD-Modell synthetisiert wurde. In diesem Modell ist ein koronaler Bogen zwischen zwei Sonnenflecken zu sehen.

Beobachtung: Courtesy of NASA/SDO and the AIA and HMI science teams. Modell: S. Bingert, H. Peter, MPS.

*Fig. 2: Observation and model of the solar corona. The top left panel shows the corona above an active region recorded in the 171 nm channel of AIA on-board the Solar Dynamics Observatory (SDO) of NASA showing plasma just below one million K. The width of the part of the corona shown here corresponds to 150.000 km on the Sun. The coronal loops are rooted in the periphery of sunspots. The latter are seen in the lower left panel showing the solar surface in visible light recorded by SDO/HMI (this displays the same region as the lower third of the corona in the top panel). The right panel shows a 3D MHD model as it would appear when observed in the same wavelength channel. Here one dominant coronal loop is connecting two sunspots.*

*Courtesy of NASA/SDO and the AIA and HMI science teams (left panel); MPS (right panel)*

mit kleineren magnetischen Konzentrationen im Außenbereich der aktiven Region (Abb. 2, links).

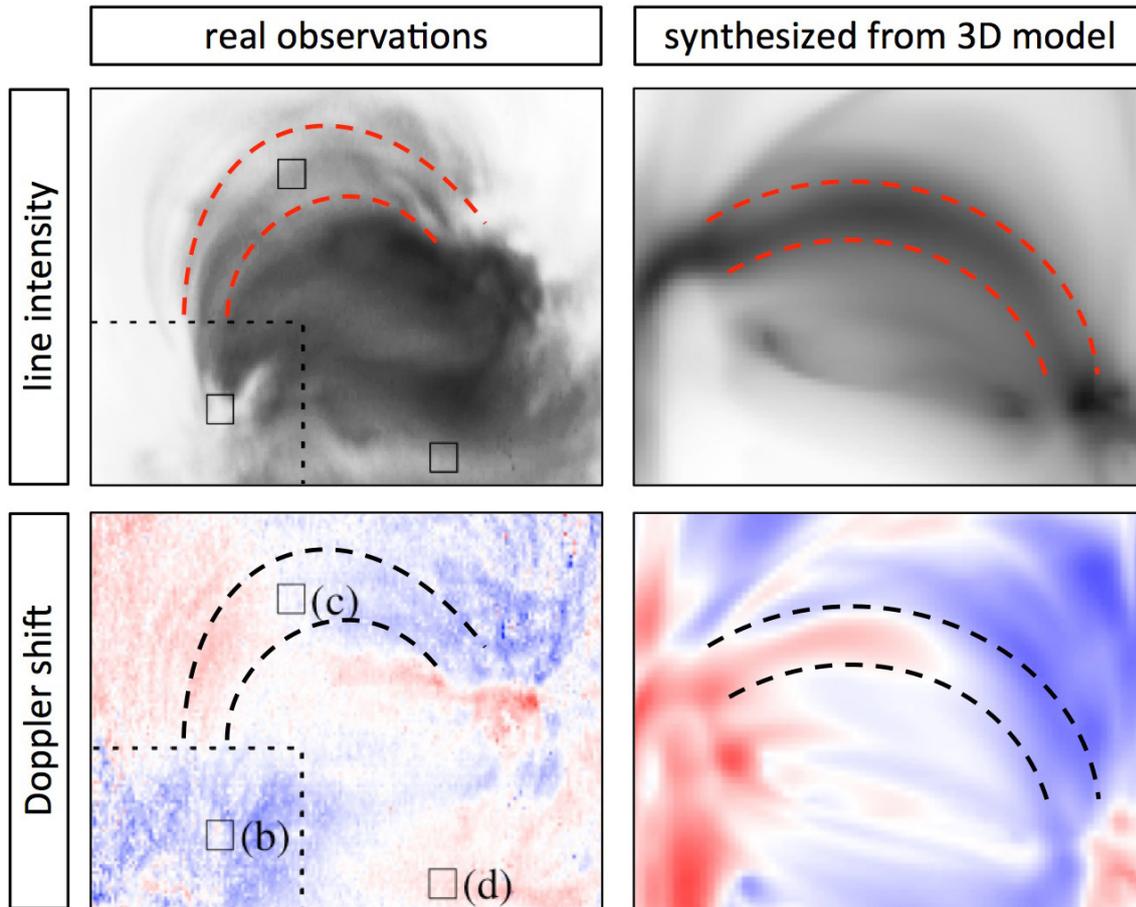
## Was heizt die Korona?

Seit erkannt wurde, dass die Korona aus heißem Plasma bestehen muss, wurden viele Prozesse vorgeschlagen, um die hohen Temperaturen der äußeren Atmosphäre zu verstehen. Der enge Zusammenhang von koronalen Strukturen und Magnetfeld deutete früh auf die wichtige Rolle von letzterem. In den 1970er Jahren wurde daher von Eugene Parker vorgeschlagen, dass, anschaulich gesprochen, die konvektiven Bewegungen an der Sonnenoberfläche die Magnetfeldlinien verflechten [2]. Stark vereinfacht kann man sich die Magnetfeldlinien als Saiten vorstellen, die in Korken veran-

*surrounding smaller magnetic concentrations (Fig. 2, left image).*

## What is heating the corona?

*Since it was realized that the corona has to consist of hot plasma, many processes have been suggested to sustain the high temperature. The tight connection between coronal structures and the magnetic field points to the key role of the magnetic field. In the early 1970s Eugene Parker suggested that the convective motions at the surface would, figuratively speaking, braid the magnetic field lines [2]. In a simplified picture one could imagine the magnetic field lines as strings rooted in corks swimming on boiling water. The near-surface convection on*



**Abb. 3:** Großräumige Struktur und Dynamik in einer aktiven Region in der Beobachtung und einem 3D-MHD-Modell. Die linke Spalte zeigt eine Beobachtung einer aktiven Region mit EIS/Hinode in der koronalen Linie von Fe xv bei 28.4 nm (ca. 115 Mm zu 90 Mm). Das Bild links oben zeigt die Intensität der Linie (auf einer inversen Farbtafel). Ein koronaler Bogen ist durch die gestrichelten Linien hervorgehoben. Das Bild unten links zeigt die entsprechende Dopplerkarte, d. h. die Geschwindigkeiten entlang der Sichtlinie in der Region wo Fe xv entsteht. Die entgegengesetzten Rot- und Blauverschiebungen auf den beiden Seiten des Bogens zeigen die Siphon-Strömung von der rechten zur linken Seite des Bogens. Die rechte Spalte zeigt eine entsprechende Struktur, wie man sie in einem 3D-MHD-Modell findet. Die Farbtafeln der Beobachtung und des Modells sind identisch (von 20 km/s blau- bis 20 km/s rotverschoben).  
 Abbildung mit Daten von Peter (2010; A&A 521, A51)

**Fig. 3:** Large-scale structure and dynamic in an active region in observations and a 3D MHD model. The left column shows an observations of an active region with EIS/Hinode in the coronal line of Fe xv at 28.4 nm displaying a section of 115 Mm by 90 Mm. The top left panel shows the line intensity (on an inverse scale) with a loop highlighted by the dashed lines. The bottom left panel shows the corresponding observed Doppler map, i. e. the line-of-sight velocity of the plasma seen in the Fe xv line. The opposing red- and blueshifts in the two legs of the loop indicate the siphon flow from the right to the left leg of the loop. The right column shows a corresponding structure seen in the coronal emission synthesized from a 3D MHD model. The color tables of the Doppler maps in the observations and the model are identical (ranging from 20 km/s blueshift to 20 km/s redshift).  
 Figure extracted from data based on Peter (2010; A&A 521, A51)

kert sind, die in brodelndem Wasser schwimmen. Die Konvektion führt dabei zu einem irreversiblen Verwickeln der Feldlinien. Dies erzeugt 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. Somit wird magnetische Energie in thermische umgewandelt.

*the Sun causes an irreversible braiding of the field lines which induces currents in the upper atmosphere that are subsequently dissipated. This way magnetic energy is converted to heat.*

Ohne Frage wird dieser Prozess in der Korona arbeiten. Offen ist nur, ob dies effektiv genug ist, und ob die räumliche und zeitliche Variation der Energiezufuhr koronale Strukturen hervorbringt, die mit den Beobachtungen übereinstimmen. Um diese Frage zu beantworten, kann man numerische Experimente durchführen, in denen die relevanten Prozesse so gut wie möglich beschrieben werden. Geeigneter Weise löst man hierzu die Gleichungen der Magnetohydrodynamik (MHD) abhängig von Zeit und Raum in drei Dimensionen [3]. Die MHD ist die Kombination aus Hydrodynamik und den Maxwell'schen Gleichungen, um der Wechselwirkung von Plasma und Magnetfeld Rechnung zu tragen. Als Anfangsbedingung wird ein Magnetfeld basierend auf Beobachtungen gewählt, das sich dann durch die konvektiven Bewegungen an der Oberfläche verändert. Basierend auf Temperatur, Dichte und Geschwindigkeit aus dem Modell wird dann die koronale Emission synthetisiert. Solche synthetischen Beobachtungen (jeweils rechts in Abb. 2 bis 4) erlauben dann einen direkten Vergleich mit Beobachtungen. Erst die großen Fortschritte der Rechenkapazität von Supercomputern genauso wie neue, besser auflösende Instrumente zur Beobachtung der Korona im Lauf der letzten Dekaden haben die im Folgenden beschriebenen Ergebnisse möglich gemacht.

## **Moderne 3D Modelle der Korona**

Um die entstehende EUV-Emission der Korona realistisch zu beschreiben, müssen Dichte und Temperatur in der Korona selbstkonsistent beschrieben werden. Insbesondere muss man hierzu die Energiebilanz lösen. Unter anderem wird berücksichtigt, wie Energie durch Dissipation der Ströme hinzugeführt, durch Wärmeleitung parallel zum Magnetfeld umverteilt und schließlich durch Emission von EUV- und Röntgen-Strahlung wieder abgegeben wird. Ein Teil der durch Wärmeleitung zur Sonne zurück geleiteten Energie heizt an der Basis der Korona das dort kühle Material, welches dann in die heiße Korona aufsteigt.

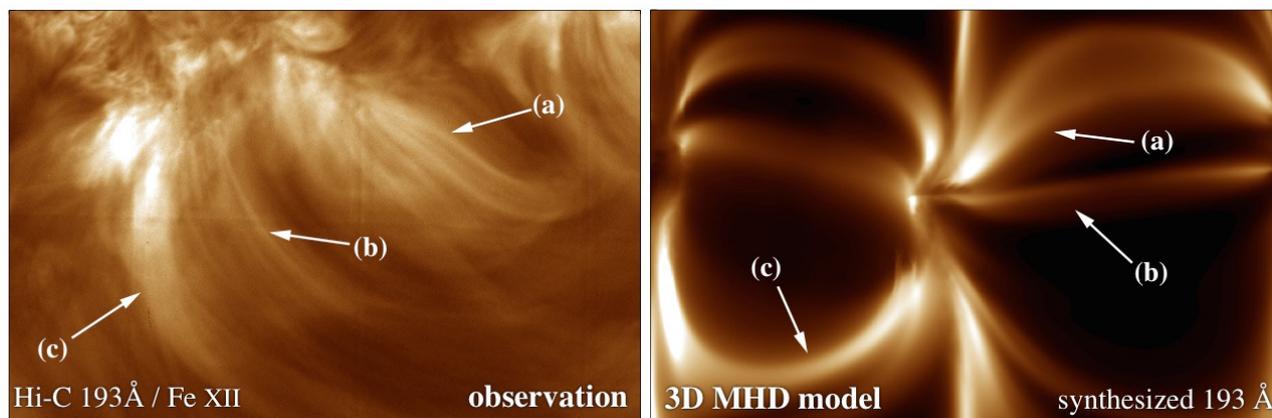
*There is no question that this process will operate in the solar corona. The open questions are (1) if this process is efficient enough, and (2) if the spatial and temporal distribution of the energy input produces structures that are consistent with observations. To address this problem one can run numerical experiments in which the relevant processes are simulated in a computer as good as possible. The best tool for this is to solve the space- and time-dependent equations of magneto-hydrodynamics (MHD) in all three dimensions [3]. MHD is the combination of hydrodynamics and Maxwell's equations to account for the interaction of plasma and magnetic field. As an initial condition we choose a magnetic and velocity field distribution on the surface based on observations. The model then provides data cubes in a three-dimensional box for temperature, density, and velocity of the plasma and for the magnetic field. These quantities can be used to synthesize the coronal emission. Such synthetic observations (right panel of Fig. 2) allow then a detailed comparison to observations. The enormous progress in computational power and improvements in instrumentation to observe the corona over the last decade(s) gave rise to the results described in the following.*

## **Modern 3D models of the corona**

*To synthesize the emerging coronal emission in the EUV in a realistic way the temperature and the density have to be solved for self-consistently. This requires a realistic energy balance. To achieve this we describe how heat is added through the dissipation of currents, how it is then redistributed through heat conduction, and finally is radiated in the EUV and X-rays wavelength range. Here it is essential that part of the energy conducted back to the Sun is heating cool plasma at the base of the corona that is then evaporated into the corona.*

In der numerischen Simulation kann man eine sich selbstkonsistent aufrechterhaltende heiße äußere Atmosphäre erzeugen, die durch das Magnetfeld geordnet wird und koronale Bögen erzeugt, ähnlich wie auf der echten Sonne [4]. Rechts in Abb. 2 ist ein Beispiel eines einzelnen heißen Bogens gezeigt, der sich in einem 3D-MHD-Modell gebildet hat. Der koronale Bogen im Bild erscheint weniger scharf als in der Beobachtung (links in Abb. 2), was der limitierten räumlichen Auflösung im Modell geschuldet ist. Nichtsdestotrotz hat der modellierte Bogen ähnliche Eigenschaften 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 konnte das alte Problem gelöst werden, warum die EUV-Bögen eine konstanten Querschnitt zeigen, obgleich sich das Magnetfeld mit der Höhe aufweitet.

*In the numerical experiments one then finds a self-consistently sustained hot outer atmosphere that is structured by the magnetic field forming coronal loops, similar as found on the real Sun [4]. The right panel of Fig. 2 shows as an example a hot coronal loop that appeared in an MHD simulation. This loop appears less sharp than in a real observation (left panel of Fig. 2) which is because of the limited spatial resolution of the simulation. Still, this loop shares many of the properties of observed loops. In particular, this loop has a cross section that is constant from the footpoints to the apex of the loop, just as found in observations. The analysis of the model shows that is because of the way how the coronal emission is a convolution of temperature and density in the atmosphere. This suggests a solution to the long-standing problem of why the loops have a constant cross section while the magnetic field is expanding into the atmosphere.*



**Abb. 4:** Das linke Bild zeigt eine Beobachtung mit Hi-C während eines NASA-Raketenfluges. Diese Daten haben die höchste bisher erreichte räumliche Auflösung im EUV von etwa 150 km auf der Sonne. Sie zeigen Emission von Fe XII in einem Kanal bei 19.3 nm, und damit Plasma bei etwa 1.5 Millionen K. Die Breite des Bildausschnitts entspricht etwa 100.000 km. 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 ein einer expandierenden Einhüllenden, (b) Bögen mit konstantem Querschnitt und (c) dicke Bögen. Basierend auf Fig. 8 aus [6].

**Fig. 4:** Structures in the solar corona and in a 3D model. The left image shows a observation acquired during the flight of a sub-orbital rocket (Hi-C) by NASA. These data show the corona of the Sun at an unprecedented spatial resolution of 150 km on the Sun. They show emission of Fe XII around 19.3 nm originating at about 1.5 million K. The width of the image corresponds to about 100.000 km. The right panel shows a 3D MHD model as seen in synthesized light in the same wavelength channel. Observation and model show the same typical structures: (a) loops in expanding envelopes, (b) loops with a constant cross section, and (c) thick loops. Based on Fig. 8 from [6].

## Vergleich von Modell und Beobachtung

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, wo es wieder abkühlt und zurück fällt, was dann die Rotverschiebungen erzeugt [5]. Ein typisches Muster der Dynamik in aktiven Region sind Siphon-Strömungen von einer Seite des koronalen Bogens zur anderen. In Doppler-Karten, die mit einem EUV-Spektrographen aufgenommen werden, zeigen sich diese Strömungen durch einen glatten Übergang von Rot- zu Blauverschiebungen entlang des Bogens. Solche Muster finden sich auch in der synthetisierten Emission von 3D-MHD-Modellen der Korona (Abb. 3). In unserem Modell, wie vermutlich auch auf der Sonne, werden diese Siphon-Strömungen selbstkonsistent hervorgerufen durch ein asymmetrisches Heizen des Bogens, welches eine Druckdifferenz an den beiden Fußpunkten der koronalen Bögen erzeugt.

Eine detailliertere Untersuchung der Morphologie der koronalen Strukturen, die sich in den dreidimensionalen Modellen ergeben, zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Beobachtungen. Dies wird in Abb. 4 illustriert durch einen Vergleich eines Modells mit hoher räumlicher Auflösung (rechts) mit einer Beobachtung im EUV, mit der bisher höchsten in dem Spektralbereich erzielten räumlichen Auflösung [6]. Die gezeigte Beobachtung stammt von einem Raketenflug (Hi-C) der NASA im Jahr 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 sogar die beobachtete koronale Struktur und Dynamik reproduziert werden, basierend allein auf den Beobachtungen an der Sonnenoberfläche [7].

## Comparison between model and observation

*From the output of the MHD model we can synthesize individual emission lines that form in the corona, spanning a wide range of line formation temperatures. These show a good match in terms of (average) Doppler shifts that are caused by the plasma motions in the transition region from the cool chromosphere into the hot corona. In response to heating the cool plasma is expands into the corona. It then cools and falls back to the Sun causing the transition region lines to be redshifted [5]. A typical feature of active region dynamics are siphon flows from one end of a coronal loop to the other. In Doppler maps acquired by an EUV spectrograph these show up as a smooth transition from blueshift to redshift along the loop, and such patterns are also found in the synthesized emission from 3D MHD models (Fig. 3). In our model, and presumably also on the Sun, these siphon flows are self-consistently driven by an asymmetric heating of the loop creating a difference in coronal pressure at the two loop legs.*

*A detailed investigation of the morphology of coronal structures found in 3D models provides a good overall match with observations. This is illustrated in Fig. 4 that shows a comparison of a model with high spatial resolution (right) to an observation (left) in the EUV with unprecedented spatial resolution in this wavelength range [6]. The observation shown here was acquired during a suborbital rocket flight (Hi-C) of NASA in 2012. The arrows in the figure point at typical structures that are found in the observation as well as in the simulation, showing that the typical structures found in observations are also found in the model. In another high-resolution simulation that was driven by the observed magnetic and velocity field in the photosphere we could even directly reproduce the observed coronal structures, showing that the numerical model provides a good description for the real corona. [7].*

## Ausblick

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

Trotz aller Erfolge bleiben viele Fragen ungelöst, insbesondere zu Mikroprozessen auf kleinen Skalen, zu Stabilität und Eruptionen in der Korona, und zum Vergleich mit aktiven Sternen. Eine zentrale Rolle für die weitere Entwicklung unseres Verständnisses von Sonne und Heliosphäre, und damit auch der Korona, wird die Solar Orbiter-Mission von ESA und NASA einnehmen [8]. Nach ihrem Start in 2017 wird die Raumsonde der Sonne auf weniger als ein Drittel Erdabstand nahekomen und hohe heliographische Breiten erreichen. Hier werden, mit starker deutscher Beteiligung insbesondere durch die MPG, Beobachtungen der Sonne und Messungen im interplanetaren Raum mit bisher unerreichter Genauigkeit angestrebt, um so einen entscheidenden Beitrag zur Lösung der noch offenen Fragen zu leisten.

## Outlook

*The good match between the coronal emission synthesized from the models and solar observations shows that the (numerical) models capture the relevant processes in the corona, at least on observable scales. This also applies for the heating, structure, and dynamics of the corona. Based on this the numerical experiments confirm the mechanism of coronal heating due to field-line braiding as suggested by Parker more than forty years ago.*

*Despite all the success, there are many unsolved questions, in particular concerning micro-processes on small scales, stability and eruptions in the corona, and the relation to other more active stars. For the further understanding of the Sun and the heliosphere, and thus also of the corona, the upcoming Solar Orbiter mission of ESA and NASA [8] will play a key role. Following its launch in 2018 the spacecraft will get close to the Sun with a distance of only one third of the Earth's distance to the Sun, and it will reach high heliographic latitudes. Remote-sensing observations of the Sun and in-situ measurements in interplanetary space with unprecedented accuracy will provide essential contributions to address the unsolved questions.*

## Referenzen /References

- [1] Grotian, W.; *Zur Frage der Deutung der Linien im Spektrum der Sonnenkorona*; Naturwissenschaften 27, 214 (1939)
- [2] Parker, E. N.; *Topological dissipation and the small-scale fields in turbulent gases*; Astrophysical Journal 174, 499 (1972)
- [3] Bingert, S.; Peter, H.; *Intermittent heating in the solar corona employing a 3D MHD model*; Astronomy & Astrophysics 530, A112 (2011)
- [4] Peter, H.; Bingert, S.; *Constant cross section of loops in the solar corona*; Astronomy & Astrophysics 548, A1 (2012)
- [5] Zacharias P.; Peter H.; Bingert S.; *Investigation of mass flows in the transition region and corona in a three-dimensional numerical model approach*; Astronomy & Astrophysics 531, A97 (2011)
- [6] Peter H., Bingert S., Klimchuk J. A.; de Forest, C.; Cirtain, J. W.; Golub, L.; Winebarger, A.R.; Kobayashi, K.; Korreck, K. E.; *Structure of solar coronal loops: from miniature to large-scale*; Astronomy & Astrophysics 556, A104 (2013)
- [7] Bourdin P.-A.; Bingert S.; Peter H.; *Observationally driven 3D MHD model of the solar corona above an active region*; Astronomy & Astrophysics 555, A123 (2013)
- [8] Müller, D.; Marsden, R. G.; St. Cyr, O. C.; Gilbert, H. C.; Solar Orbiter Team; *Solar Orbiter: Exploring the Sun–Heliosphere Connection*; Solar Physics 285, 25 (2013)

# Rosetta und Philae beim Kometen 67P/ Churyumov-Gerasimenko

## *Rosetta and Philae at comet 67P/Churyumov-Gerasimenko*

### **Kometen, das Planetensystem und die Erde**

Kometen gelten als Boten aus der Entstehungsphase des Sonnensystems. Entstanden im Bereich der großen Gasplaneten, wurden sie während der dynamisch sehr heftigen Clean-up-Phase der Entstehungsscheibe der Planeten zum Teil in zwei Reservoirs im Sonnensystem gespeichert, in der sog. Oort-Wolke zwischen etwa 10000- und 100000-fachen Erdabstand zur Sonne (=1 AE) und im sog. Kuiper-Gürtel außerhalb der Neptunbahn zwischen 35-50 AE. Durch die große Sonnenferne der Reservoirs sind die Kometen tief gefroren (Temperaturen unter 100 K) und gelten deswegen als weitgehend unveränderte Relikte aus den ersten 10 bis wenigen 100 Millionen Jahren des Planetensystems. Sie sollten in ihrer Zusammensetzung, inneren Struktur und in weiteren physikalischen Eigenschaften quasi die Bedingungen widerspiegeln, die zum Zeitpunkt und am Ort ihrer Entstehung geherrscht haben. Ein erheblicher Anteil an Wasser- und anderen Eisen sowie auch organisches Material wird in Kometenkernen erwartet. Dabei besteht die Möglichkeit, dass Kometenwasser zum heute vorhandenem Ozean- und Erdkrustenwasser durch Impakte beigetragen hat. Die Organik in Kometen wurde zwangsläufig auch auf die Erde geliefert.

### ***Comets, the Planetary System and the Earth***

*Comets are believed to be messengers from the formation period of the solar system. Originating in the distance range of the giant planets, comets were stored during the violent clean-up phase of the planetary formation disk in two reservoirs, i. e. in the Oort Cloud at about 10000 to 100000 astronomical units (AU = mean distance Sun – Earth) and in the Kuiper Belt region beyond Neptune’s orbit at about 35 to 50 AU. Due to large distances from the Sun in the reservoirs, comets are deeply frozen (temperatures below 100 K). Therefore, they are considered as widely unchanged relics from the first 10 to a few 100 million years of the planetary system. They should reflect in their composition, inner structure and other physical properties the environmental conditions that prevailed at the time and location of their formation. Comets nuclei are expected to contain a considerable amount of water and other icy compounds as well as organic material. Hence, comets may have contributed via impacts to the existing water on Earth (ocean water and water in the terrestrial crust). Evidently, also the cometary organics would have been delivered to Earth.*

## Die Rosetta-Mission zu 67P/ Churyumov-Gerasimenko

Nach dem Erfolg der Giotto-Sonde zum Kometen 1P/Halley beschloss die europäische Raumfahrt-Agentur ESA in 1993, Rosetta, eine wissenschaftliche Mission zu einem Jupiter-Familie-Kometen (JFK), innerhalb des Horizon-2000-Programms durchzuführen. Aufgabe der Mission ist, wesentliche wissenschaftliche Fragestellungen zu Kometen per Experimentmessungen zu adressieren, d. h.: Wie funktioniert ein Komet? Wie ist der Kometenkern aufgebaut? Welche Materialstoffe enthält ein Komet? Welche Rolle spielten Kometen bei der Entstehung des Planetensystems? Welche Bedeutung haben Kometen für das Wasser und das Leben auf der Erde? Im Unterschied zu allen Kometensonden vor Rosetta, die ausschließlich nur Fly-by-Missionen mit typischen Vorort-Messzeiten von wenigen Stunden waren, sollte der Komet nun mittels Experimenten auf einem Orbiter über einen guten Teil seines Umlaufs um die Sonne erkundet werden. Auf Vorschlag von Helmut Rosenbauer vom Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung und Kollegen sollte Rosetta auch einen Lander auf der Kometenoberfläche absetzen. Damit wird erstmals die In-Situ-Erforschung der Oberflächenschichten und des Kometeninneren möglich.

Je neun Instrument-Proposals wurden für Orbiter und Lander ausgewählt, ergänzt um ein Experiment, das für die Messungen Instrument-Hardware sowohl auf dem Orbiter als auch auf dem Lander benutzt. Das Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung nimmt die Hauptverantwortung für zwei Orbiter-Instrumente (das Kamera-System Osiris und den Staub-Analysator Cosima), für ein Lander-Instrument (das Komag- und Bodenprobenanalyse-Experiment Cosac) und für die wissenschaftliche Gesamtmission des Philae-Landers wahr und hat zu insgesamt 3 weiteren Orbiter- (Consert, Miro, Rosina) und zu 2 weiteren Lander-Instrumenten (Romap, Sesame) wesentlich beigetragen. Außerdem hat das Institut wesentliche Teilsysteme des Landers beigestellt.

## *The Rosetta Mission to 67P/ Churyumov-Gerasimenko*

*In 1993 and after the success of the Giotto mission to comet 1P/Halley the European Space Agency ESA decided to perform – within the Horizon-2000 programme – the Rosetta project, a scientific mission to a Jupiter family comet (JFC). Mission goals and objectives are to challenge important scientific questions on comets by experiment measurements; for instance: How does a comet work? What is the internal structure of a nucleus? Which material does the comet contain? What was the role of comets during the formation of the planetary system? How relevant are comets for the water and life on Earth? Compared to all comet mission done before – all fly-by missions with relatively short (a few hours) measurement times on target – Rosetta is meant to explore a comet through measurements from orbit and over a significant part of the cometary orbit around the Sun. Upon proposition of Helmut Rosenbauer from the Max-Planck Institute of Solar System Research and colleagues a lander was attached to the Rosetta spacecraft. The lander should perform a soft landing on the cometary surface and study by in-situ experiments the surface layers and the cometary interior.*

*Nine instrument proposals were selected each for the orbiter and for the lander, plus one experiment that requires for the performance of measurements hardware on both the orbiter and the lander. The Max-Planck Institute for Solar System Research has leadership responsibilities for two orbiter instruments (the camera system Osiris and the dust composition analyser Cosima), for one lander instrument (the coma gas and surface sample analyser Cosac) and for the overall scientific mission of the Philae lander. Moreover, important contributions were provided for three more orbiter (Consert, Miro, Rosina) and two lander instruments (Romap, Sesame) as well as for lander subsystems.*

Nach einer Startverzögerung von einem Jahr, die auch einen Wechsel des Zielkometen bedeutete, ging Rosetta mit Philae am 2. März 2004 an Bord einer Ariane-5-Rakete auf die rund 7 Milliarden km lange und rund 10<sup>1</sup>/<sub>4</sub> Jahre dauernde Reise zum Kometen 67P/Churyumov-Gerasimenko (abgekürzt 67P), einem als typisch eingeschätzten JFK. Da die Anpassung an die Kometenbahn nicht mit Raketenantrieben alleine erreicht werden konnte, wurden sogenannte Gravity-Assist-Flybys bei der Erde (3x) und Mars (1x) durchgeführt; während der Passage des Asteroidengürtels im Sonnensystem konnten zusätzlich noch zwei Asteroiden, (2867) Steins am 9. September 2008 und (21) Lutetia am 10. Juli 2010, per Fly-bys untersucht werden. Anfang August 2014 erreichte Rosetta den Kometen 67P mit einem Abstand von etwa 100km und führt seitdem das wissenschaftliche Messprogramm der Orbiter-Mission in Kometennähe zwischen ca. 10 und einigen 100km Abstand zur Kernoberfläche aus.

## Die Landung auf dem Kometenkern

Am 12 November 2014 erfolgte die Landung von Philae auf der Kometenoberfläche. Der rein passive Lander stieß sich um 08:35 UTC in einer Höhe von 22.5km über der Oberfläche mit 19cm/s vom Rosetta-Orbiter ab und machte sich auf den 7h währenden Abstieg zur Kometenoberfläche: Ziel war das vorher ausgesuchte Landeareal Agilkia auf der kleineren Komponente des Kometenkerns. Trotz großer vorhergesagter Landeellipse hatte Philae in nur 150m Abstand zum nominalen Zielpunkt um 15:34 UTC die erste Bodenberührung. Da die Harpunen zur festen Verankerung des Landers an der Kometenoberfläche nicht ausgelöst wurden, startete Philae zu einer mehr als 1km weiten, taumelnden Hüpf-Exkursion über die Oberfläche und kam erst nach knapp 2h und zwei weiteren, kurzen Bodenkontakten im Randbereich des Landeareals B (später Abydos benannt) zur Ruhe. Die wissenschaftlichen Messungen des Landers mussten dann wegen der begrenzten Batterieleistung innerhalb von etwa 2 Tagen ohne genaue Kenntnis des Landplatzes und der Lage des Landers

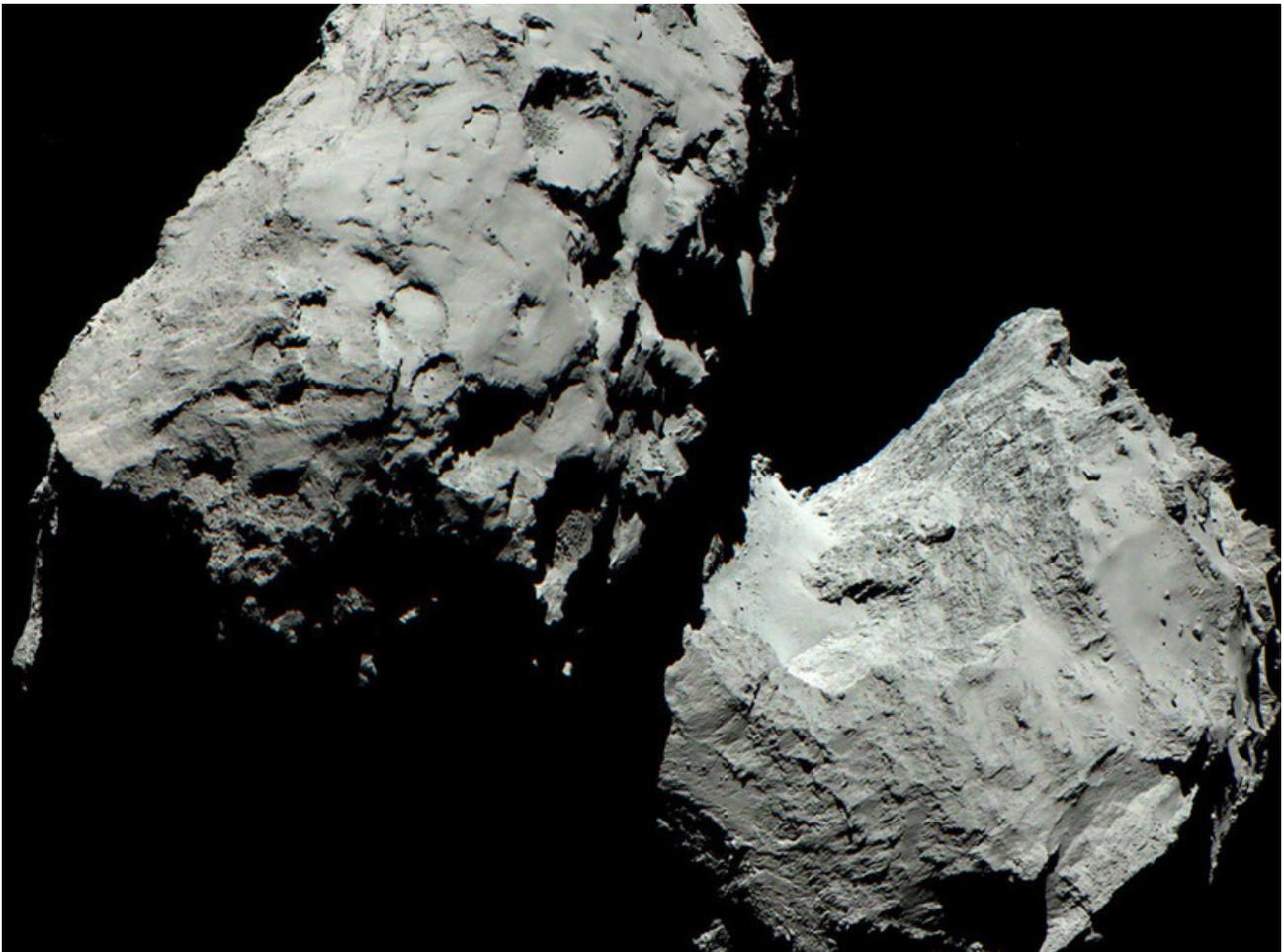
*After a one year delay and due to that a change of the target comet, Rosetta with Philae attached started its about 7 billion km long journey on 2 March 2004 on board of an Ariane 5 launcher. The 10<sup>1</sup>/<sub>4</sub> years long travel led the spacecraft to comet 67P/Churyumov-Gerasimenko, a typical JFC. Since the adaptation of the spacecraft trajectory to the orbit of the comet was not within reach for man-made rocket propulsion systems, so called gravity assists flybys at planets were performed (3x at Earth, 1x at Mars). While passing through the asteroid belt in the solar system two asteroids were visited and explored through fly-bys, i. e. (2867) Steins on 9 September 2008 and (21) Lutetia on 10 July 2010. In the beginning of August 2014 Rosetta reached comet 67P at a distance of about 100km. Since then the orbiter performs its scientific measurement programme in the neighbourhood of the nucleus at distances between 10 and some 100km.*

## *Landing on the Nucleus*

*On 12 November 2014 Philae landed at the cometary surface. At 08:35 UTC the passive lander separated from the Rosetta orbiter at a distance of 22.5km above the surface and with a speed of 19 cm/s. The descent to the surface took about 7h and the lander was targeting the selected landing site Agilkia, located on the smaller component of the nucleus. Despite a much larger predicted landing ellipse Philae touched ground just 150m from the target point exactly on time on 15:34 UTC. Since the harpoon anchors of the lander did not shoot, Philae started for a more than 1 km wide tumbling and hopping tour across the surface. After two further short surface contacts the final landing occurred about 2 hours after first touch-down at the border region of former landing site B (later named Abydos). Since information on the site location and on the lander orientation on the surface was not available, the scientific measurements of the lander had to be implemented partly in the blind during the*

implementiert und durchgeführt werden. Dem Lander-Team gelang es trotz dieser unerwarteten Umstände, jedes Instrument wenigstens einmal, manche auch mehrmals, für wissenschaftliche Aufgaben zu betreiben. Am 15. November 2014 kurz nach Mitternacht schaltete der Bordcomputer den Lander wegen nachlassender elektrischer Stromversorgung auf den sog. Hibernation-Modus, bei dem zunächst kein Betrieb und auch kein Kontakt zum Orbiter, und damit zur Erde, besteht.

*subsequent 2 days, the operations timeframe as limited by battery power. The science and operations team managed – despite these unexpected and unfavourable circumstances for the lander – to operate each of the 10 on-board instruments at least once for scientific measurements, a few even several times. On 15 November 2014 shortly passed midnight due to ceasing electric power, the on-board computer switched the lander to hibernation mode, which implies – at least for a while – being no on-board operations and contact with the orbiter and thus with Earth.*



**Abb. 1:** Ein Farbbild des Rosetta-Kometen 67P/Churyumov-Gerasimenko zeigt die beiden Komponenten des Kometenkerns mit grauen Oberflächen. Das Bild wurde zusammengestellt aus drei Aufnahmen, die am 6. August 2014 vom Kamerasystem OSIRIS mit Hilfe des roten, grünen und blauen Filters aus einer Entfernung von 120 Kilometern gemacht wurden. © ESA/Rosetta/MPS für das OSIRIS Team MPS/UPD/LAM/IAA/SSO/INTA/UPM/DASP/IDA

*Fig. 1: The colour image of the Rosetta comet 67P/Churyumov-Gerasimenko shows the two components of the cometary nucleus covered with grey surfaces. The images is a composite of 3 exposures taken on 6 August 2014 from a distance of 120 km by the Osiris camera system through red, green, and blue filters. © ESA/Rosetta/MPS für das OSIRIS Team MPS/UPD/LAM/IAA/SSO/INTA/UPM/DASP/IDA*

## Highlights von Rosetta und Philae

Osiris-Kamera-Bilder zeigen einen Kometenkern, der aus zwei verschiedenen großen Teilkomponenten besteht, die über eine schmale Halsregion miteinander verbunden sind (Abb. 1). Die Teilkomponenten werden als sog. Planetesimale angesehen, die durch Zusammenstoß, wahrscheinlich bei der Entstehung des Kometenkerns, aneinandergesetzt wurden [3]. Die Halsregion wird durch die fortdauernde Aktivität des Kometen entweder verbreitert oder aufgelöst, eine Frage, der die Rosetta-Mission durch weitere Beobachtungen nachgehen wird. Oberflächensignaturen in Osiris-Bildern sowie der von Miro bestimmte Wertebereich für die thermische Trägheit der Oberfläche deuten auf Schichtungen von losem Regolith hin, das sich in Form von Fallback-Material aus der Kometenaktivität abgelagert hat [2, 3, 4]. Der Lander ist jedoch bei seinem endgültigen Landeplatz auf sehr feste, plattenartige Oberflächenstrukturen gestoßen, die sich durch Sinterprozesse infolge der Sonnenerwärmung und Kometenaktivität des Oberflächenmaterials erklären lassen. Für den Kometenkern ergibt sich insgesamt eine mittlere Dichte von  $0.47 \text{ g/cm}^3$ , was auf eine geringe Kompaktierung und einem hohen mikro- und/oder makroskopischen Leerraumanteil im Kometenkern hinweist [3]. Consert Sounding der kleineren Kernkomponente ergibt eine Porosität von 75 – 85 Prozent und deutet auf Homogenität des Kerninneren auf Skalen von 10m hin [5]. Aus Magnetfeld-Messungen von Romap während des Abstiegs des Landers zur Kometenoberfläche [6] folgt, dass Magnetfelder bei der Bildung des Kometenkerns während der Frühphase des Sonnensystems keine große Rolle gespielt haben können.

In der Kometenkoma konnte das ROSINA-Instrument schon mehr als 20 leicht flüchtige Gasverbindungen nachweisen, die aus dem Eis im Kometenkern durch Sonnenerwärmung verdampfen. Dabei ist Wasser die Hauptkomponente gefolgt von Kohlendioxid, das auf der Nachtseite des Kometen sogar überwiegen kann. Das Isotopenverhältnis D/H von Deuterium zu Wasserstoff im Wassergas

## Highlights on the comet, measured by Rosetta and Philae

*Images of the Osiris camera show a double nucleus with components of different size and connected through a neck region (Fig. 1). The two nucleus components are considered to be so called planetesimals which got glued together via a collision, probably during the formation age of the cometary nucleus [3]. The neck region displays enhanced activity which may either produce increased layerings in the region or erode the neck-connection of the two components, a question the Rosetta mission is able to address properly with further observations. Surface signatures in Osiris images as well as the range for the thermal inertia as determined by Miro indicate surface layerings of loose regolith which may have formed as fall-back material from the cometary activity [2, 3, 4]. The lander, however, found rather hard plate-like surface structures at its final landing site Abydos which may have formed by sintering of surface material due to solar heating and cometary activity. The cometary nucleus as a whole has a mean bulk density of  $0.47 \text{ g/cm}^3$ , which suggest a low degree of compaction and a high percentage of micro porosity and/or empty space in the nucleus [3]. Consert sounding of the small nucleus component determined a porosity of 75 – 85 percent and supports a high degree of homogeneity of the nucleus interior on distance scale of the order of 10m [5]. Romap magnetic field measurements during the lander descent to the cometary surface indicate that magnetic forces did not play an important role during the formation of this cometary nucleus in the early ages of the solar system [6].*

*The Rosina experiment detected already more than 20 volatile gas species in the cometary coma that evaporate due to solar heating from the ice in the cometary nucleus. Water is most abundant followed by carbon monoxide, which may even be dominating on the night side of the comet. The isotope ratio D/H of deuterium*

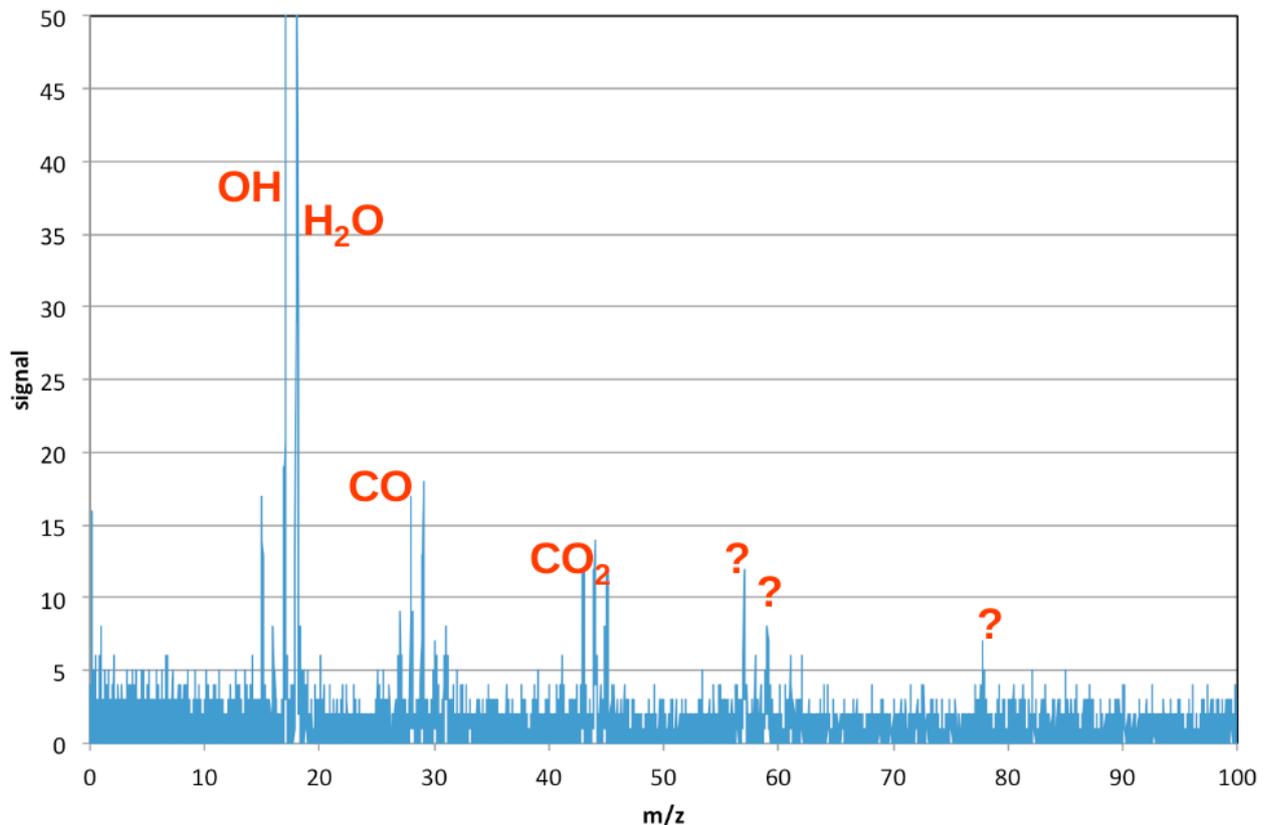
von 67P weist den dreifachen Wert im Vergleich zu Ozeanwasser auf der Erde auf [1]. Dies deutet darauf hin, dass Kometen wie 67P nicht die einzige Quelle für das Wasser auf der Erde gewesen sein können und belegt zusammen mit früheren D/H-Messungen in anderen Kometen, dass diese Körper in einem weiteren Abstandsbereich im äußeren Sonnensystem entstanden sein müssen und danach in das Reservoir des Kuiper-Gürtels vermischt wurden.

Die nicht- bzw. schwerflüchtige Komponente des Kometenmaterials, das z. B. durch die Kernaktivität in Form von Staub freigesetzt wird, besteht aus silikatischen und organischen Verbindungen. Der Staub besteht aus Kornaggregaten, die zum Teil nur sehr lose zusammengehalten werden [7].

*to hydrogen in the water vapour of 67P is three times higher than the D/H of terrestrial ocean water [1]. Hence, comets like 67P should not be the only source for the water on Earth. Moreover, combined with earlier D/H results measured in other comets, it suggests a wider distance range for the formation of cometary nuclei in the outer solar system and thereafter a mixing in the reservoir of the Kuiper Belt.*

*The non-volatile component in the cometary material released by cometary activity as dust consists of silicate and organic compounds. The dust are aggregate grains partially only very loosely bound [7]. The Cosac experiment collected cometary dust most likely during the*

## COSAC im „Schnüffelmodus“



**Abb. 2:** Cosac-Massenspektrum, aufgenommen während der Hopping-Phase des Landers am 12. November 2014. Schnüffelmodus bezeichnet eine Messung, die den Nachweis von Gas aus der Kometenkoma ermöglicht. Identifizierte Komagase sind bezeichnet; die Fragezeichensymbole markieren Peaks von organischen Substanzen aus Alkohol-, Amin-, Amid- und/oder Aldehydverbindungen.  
© ESA/Rosetta/Philae/COSAC/MPS

*Fig. 2: Cosac mass spectrum, collected on 12 November 2014 during the Hopping phase of the lander. 'schnüffelmodus' denotes a measurement modus that allows the detection of gas from the cometary coma. Identified coma gases are indicated in the plot. Question mark symbols mark mass peaks from organic species attributed to alcohol, amine, amide and or aldehyde compounds. © ESA/Rosetta/Philae/COSAC/MPS*

Rosetta und Philae beim Kometen 67P/ Churyumov-Gerasimenko  
*Rosetta and Philae at comet 67P/Churyumov-Gerasimenko*

Cosac hat vermutlich beim ersten Lander-Touch-Down aufgewirbelten Kometenstaub aufgesammelt, anschließend im Taumelflug des Landers über die Oberfläche analysiert und dabei einen erheblichen kohlen- und stickstoffhaltigen Organikanteil gefunden (siehe Abb. 2, [8]), der sich am besten Alkohol-, Amin-, Amid- und/oder Aldehydverbindungen zuordnen lässt.

*first touch-down of the lander and analysed it during the subsequent tumbling hopping of the lander across the surface. The results indicate a significant content of carbon and nitrogen-rich material which are attributed to alcohol, amine, amide and/or aldehyde compounds [8].*

Referenzen / *References* .....

- [1] Altwegg, K., H. Balsiger H., Bar-Nun, A., et al.; 67P/Churyumov-Gerasimenko; *a Jupiter family comet with a high D/H ratio*; Science 347, 6220 (2015)
- [2] Gulkis, S., Allen, M., von Allmen, P., et al.; *Subsurface properties and early activity of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko*; Science 347, 6220 (2015)
- [3] Sierks, H., Barbieri, C., Lamy, P. L., et al.; *On the nucleus structure and activity of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko*; Science 347, 6220 (2015)
- [4] Thomas, N., Sierks, H., Barbieri, C., et al.; *The morphological diversity of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko*; Science 347, 6220 (2015)
- [5] Kofman, W., Herique, A., Barbin, Y., et al.; *Properties of the 67P/Churyumov-Gerasimenko interior revealed by CONSERT radar*; Science 349, 6247 (2015)
- [6] Auster, H.-U., Apathy, I., Berghofer, G., et al.; *The nonmagnetic nucleus of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko*; Science 349, 6247 (2015)
- [7] Schulz, R., Hilchenbach, M., Langevin, Y., et al.; *Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko sheds dust coat accumulated over the past four years*; Nature 518, 7538 (2015)
- [8] Goesmann, F., Rosenbauer, H., Bredehöft, J. H., et al.; *Organic compounds on comet 67P/Churyumov-Gerasimenko revealed by COSAC mass spectrometry*; Science 349, 6247 (2015)

# Von kalt zu heiß: Am magnetischen Übergang in der Atmosphäre der Sonne

## *From cold to hot: at the magnetic transition in the solar atmosphere*

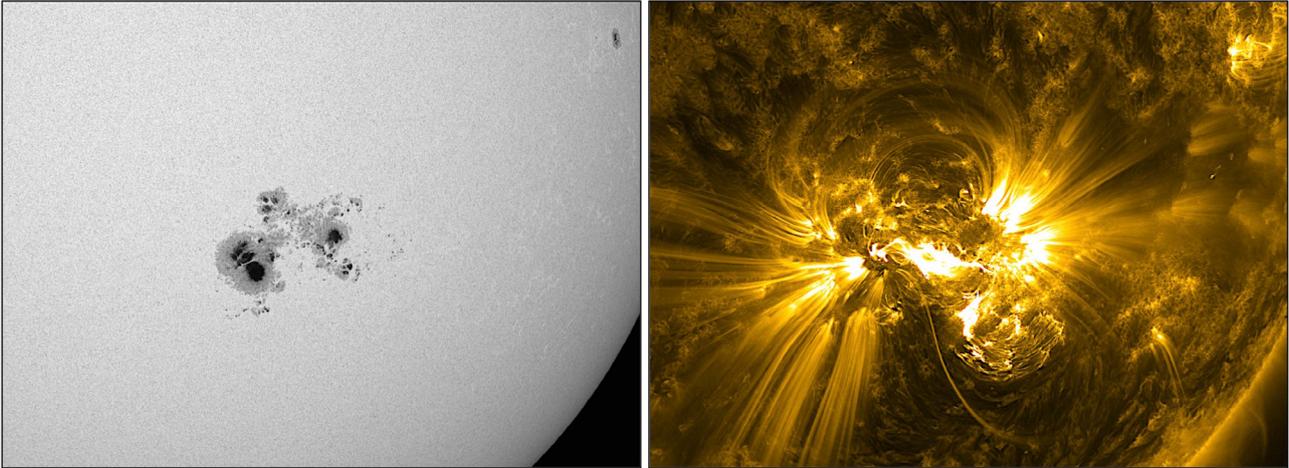
Die Sonne ist von einer Atmosphäre umgeben, in der die Temperaturen im Mittel von etwa 5800 K an der Oberfläche nach außen hin auf mehrere Millionen K ansteigen. Dabei unterscheidet sich die Atmosphäre nahe der Oberfläche der Sonne, die Photosphäre, fundamental von der äußeren Atmosphäre, der Korona. Dieser Unterschied manifestiert sich in der grundlegend verschiedenen Rolle, die jeweils das Magnetfeld spielt. In der Photosphäre ist das Magnetfeld in Strukturen unterschiedlicher Größe konzentriert. Am oberen Ende der Skala finden sich die Sonnenflecken, die Größen vergleichbar dem Durchmesser der Erde erreichen können – und doch nur Millionstel der sichtbaren Hemisphäre der Sonne abdecken. Das untere Ende der Skala ist allein durch das Auflösungsvermögen der leistungsfähigsten Sonnenteleskope begrenzt. Trotz des zahlreichen Vorkommens dieser kleinen Magnetfeldkonzentrationen ist im Mittel in der Photosphäre die Energiedichte des Magnetfeldes signifikant geringer als die thermische Energiedichte des Plasmas, also des größtenteils ionisierten Gases der Sonnenatmosphäre.

In der Korona der Sonne hingegen sind diese Verhältnisse umgekehrt – energetisch dominiert hier das Magnetfeld gegenüber dem Plasma. Dabei füllt das Magnetfeld praktisch den gesamten Raum und das Plasma kann sich nur entlang der Magnetfeldlinien frei bewegen. Quer dazu können die geladenen Teilchen des Plasmas nicht wandern, und bleiben so auf den Feldlinien gefangen.

*Our Sun is surrounded by an atmosphere, where on average the temperature is rising from about 5800 K at the surface to several million K further out. Most importantly, the atmosphere close to the surface, the photosphere, is fundamentally different from the outer atmosphere, the corona. This difference manifests itself through the role the magnetic field plays in these regimes. In the photosphere the magnetic field is concentrated in structures covering a wide range of scales. The largest structures are sunspots, with diameters comparable to the Earth, but still only covering few parts in a million of the visible hemisphere of the Sun. The lower end of the spatial scales is limited only by the resolving power of the best solar telescopes available. While small-scale magnetic concentrations are all over the place, on average, in the photosphere the energy density of the magnetic field is significantly lower than the thermal energy density of the plasma, i. e. the mostly ionized gas in the atmosphere.*

*In contrast, in the corona the magnetic field dominates over the plasma in term of energy. Here the magnetic field is basically space-filling and the plasma can move only along magnetic field lines. An ionized particle of the plasma cannot cross field lines and is thus trapped on a fieldline. Consequently structures outline magnetic field lines similarly to experiments with iron filings in school (Fig. 1).*

## Von kalt zu heiß: Am magnetischen Übergang in der Atmosphäre der Sonne *From cold to hot: at the magnetic transition in the solar atmosphere*



**Abb. 1:** Vergleich von Photosphäre und Korona. An der Sonnenoberfläche (links) in der Photosphäre zeigen sich große Konzentrationen von Magnetfeld als dunkle Sonnenflecken. Das Bild rechts zeigt Plasma bei 1 Million K in der Korona, aufgenommen zur gleichen Zeit. Die Plasmabögen in der Korona zeichnen die Magnetfeldstruktur in der äußeren Atmosphäre nach. Diese Aufnahme vom 24.10.2014 zeigt etwa ein Viertel der Sonnenscheibe. Die hier abgebildete aktive Region war die größte der letzten 20 Jahre.

Bild: NASA/SDO, Helioviewer ([www.helioviewer.org](http://www.helioviewer.org))

**Fig. 1:** Comparison of chromosphere and corona. At the surface (left) in the photosphere large concentrations of magnetic field show up as dark sunspots. The right image shows plasma at one million K in the corona, recorded at the same time as the left image. The plasma loops in the corona outline the magnetic field in the outer atmosphere. These images show about one quarter of the solar disc, recorded on 24.10.2014. The active region shown here was the biggest one in the last 20 years.

Source: NASA/SDO, Helioviewer ([www.helioviewer.org](http://www.helioviewer.org))

Daher ergeben sich Strukturen, die ähnlich wie Eisenfeilspäne im Schülerversuch den Verlauf der Magnetfeldlinien anzeigen (Abb. 1).

Da in der Photosphäre das Plasma, in der Korona das Magnetfeld dominiert, muss es dazwischen eine Region geben, in der sich die Verhältnisse umkehren. Und genau an solchen Phasenübergängen sind physikalische Prozesse besonders interessant, da sich Vorgänge unterschiedlicher Natur mischen. In diesem *Interface* zwischen Photosphäre und Korona liegen die Chromosphäre und die Übergangsregion. Die Chromosphäre schließt sich nach oben an die Photosphäre an. Während in der Photosphäre die Temperatur nach außen hin wie erwartet abfällt, steigt sie in der Chromosphäre wieder leicht an, bedingt vor allem durch Umwandlung von magnetischer Energie in Wärme, z. B. indem durch Bewegungen des Magnetfeldes induzierte Ströme dissipiert werden. Diese Region ist als farbiges, rot leuchtendes Band bei einer Sonnenfinsternis zu sehen, worauf ihr Name zurückgeht. Hier in der Chromosphäre findet der Übergang von plasma- zu magnetfelddominiert statt. Am oberen Ende der Chromosphäre steigt die Temperatur steil in die Korona hinein an. Dieses Gebiet, die Übergangsregion, ist durch steile

*If the plasma dominates in the photosphere and the magnetic field does so in the corona, there has to be a region, where the conditions change. It is just at such phase transitions that the physics become particularly interesting because processes of different nature are mixed. At this interface between the photosphere and the corona the chromosphere and the transition region are located. While in the photosphere the temperature is dropping outwards, as expected, in the chromosphere the temperature starts rising. This is because of the conversion of magnetic energy into heat, e.g. through the dissipation of currents that are induced by motions of the magnetic field. During solar eclipses the chromosphere is seen as a colorful red band, suggesting its name. Here in the chromosphere the transition from plasma to magnetic-field dominated takes place. At the top end of the chromosphere the temperature then rises steeply into the corona. The transition region in-between is dominated by strong gradients.*

## Von kalt zu heiß: Am magnetischen Übergang in der Atmosphäre der Sonne *From cold to hot: at the magnetic transition in the solar atmosphere*

Gradienten gekennzeichnet, durch die sich das Verhalten des Plasmas schlagartig ändert.

In dieser *Interface*-Region aus Chromosphäre und Übergangsregion kehrt sich einerseits die Dominanz der Rollen von Plasma und Magnetfeld um, und andererseits ändert sich das thermische Verhalten des Plasmas sehr stark. Dieser Region der Sonne ist der *Interface Region Imaging Spectrograph* (IRIS) gewidmet [1]. IRIS ist ein welt- raumgestütztes Sonnenobservatorium der NASA mit internationaler Beteiligung. Gestartet im Juni 2013, liefert es seit Herbst 2013 Daten bisher unerreichter Qualität. Um diese *Interface*-Region zu beobachten, sind Observationen im extremen Ultraviolett (UV) notwendig, da in diesem Wellen- längenbereich die heiße äußere Atmosphäre der Sonne vor der im Sichtbaren alles überstrahlenden Oberfläche der Sonne beobachtbar ist.

IRIS liefert eine bisher im UV unerreichte hohe räumliche Auflösung von etwa 250 km auf der Sonne, eine Verbesserung um einen Faktor fünf. Bei dieser Auflösung könnte man aus Flensburg einen Menschen auf der Zugspitze erkennen. Dazu kommt eine spektrale Auflösung, also die Feinheit, mit der das Licht spektral in Farben zer- legt wird, die gegenüber Vorgängerinstrumenten um einen Faktor drei gesteigert werden konnte. Dies erlaubt einen wesentlich detaillierteren Blick in die Geschwindigkeitsverteilung und die Dyna- mik der *Interface*-Region.

## Struktur der Sonnenatmosphäre

Unser Bild der Struktur der Sonnenatmosphäre hat sich im Laufe der Zeit stark gewandelt. Ging man zunächst von einer einfachen eindimensionalen Schichtung aus, so erzwangen besser werdende Beobachtungen ein Umdenken, und spätestens mit bildgebenden Beobachtungen im extremen UV in den 1990er Jahren wurde klar, dass die Struktur der Korona äußerst komplex ist. Kühle und heiße- re Strukturen sind nicht geordnet, sondern inein- ander verwoben und zeitlich variabel. Im Fall der Chromosphäre setzte sich im gleichen Zeitraum

*In the interface region composed by the chro- mosphere and the transition region not only the roles between plasma and magnetic field change, but also the thermal characteristics of the plasma change abruptly. To characterize this regime the Interface Region Imaging Spec- trograph (IRIS) has been launched [1]. IRIS is a space-based solar observatory of NASA with international contributions. Launched in June 2013 it provides scientific data since fall 2013 of unprecedented quality. To investigate the in- terface region requires observations in the ul- traviolet (UV) because in this short-wavelength range the outer atmosphere can be observed in front of the solar disk.*

*IRIS provides UV data with an unprecedented spatial resolution of 250 km on the Sun which is about five times better than what previous instruments delivered. At this resolution one could recognize a person at the Zugspitze, Ger- many's tallest mountain at its southern border, from Flensburg, Germany's northernmost city. In addition, also the spectral resolution of IRIS is a factor of three better than previous instru- ments, so our ability to spectrally resolve the different colors of the Sun can be done at in- creased precision. Together, this allows a much more detailed view of the structure and dynam- ics of the interface region.*

## Structure of the solar atmosphere

*Our view of the solar atmosphere changed in time. Initially a simple one-dimensional stratifi- cation was considered, but improving observa- tions challenged this. Since at least the 1990ies it became clear from extreme UV observations that the structure of the corona is very complex. Cool and hot structures are not well ordered but intermixed and change in time. During the same timeframe also the picture of the chro- mosphere changed from a well ordered layer to a dynamic inhomogeneous region. How-*

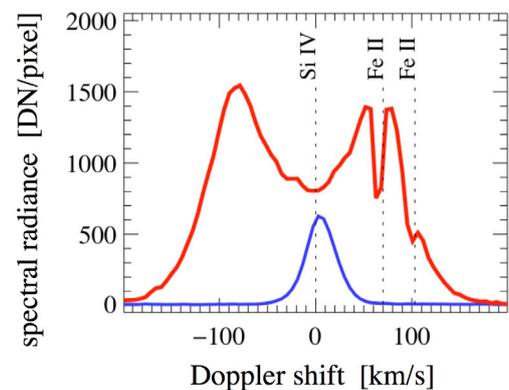
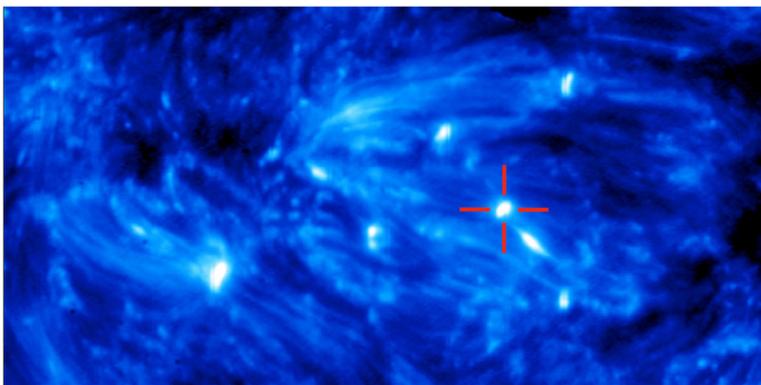
## Von kalt zu heiß: Am magnetischen Übergang in der Atmosphäre der Sonne *From cold to hot: at the magnetic transition in the solar atmosphere*

das Bild einer dynamischen Chromosphäre durch, die sich ständig durch Stoßwellen thermisch und dynamisch verändert. Allerdings blieb das Paradigma, dass die heißen Gebiete (über 100 000 K), der Übergangsregion und der Korona oberhalb der kühleren Chromosphäre zu liegen kommen.

Beobachtungen mit IRIS zeigen nun, dass auch diese Temperaturordnung auf den Kopf gestellt werden kann [2]. Die spektroskopischen Beobachtungen demonstrieren, wie kühles Material der Chromosphäre räumlich über heißem Plasma liegt, das normalerweise der Übergangsregion zugeordnet wird (Abb. 2). Hierbei ist vor allem die hohe spektrale Auflösung von IRIS wichtig, denn die Beweisführung beruht auf sehr schmalen Absorptionslinien im Spektrum, die mit früheren Instrumenten nicht sichtbar gewesen wären. So unerwartet diese Umkehrung der normalen atmosphärischen Schichtung ist, so schwierig ist ihre noch offene Erklärung. Da die beobachteten heißen Taschen in kühlem Material eingebettet sind, müssen effektive Heizungsprozesse zuvor das kühle Material in der Tasche in sehr kurzer Zeit

*ever, the paradigm remained that hot regions (above 100 000K) of the transition region and the corona are to be found above the cool chromosphere.*

*Observations with IRIS now show that even this temperature structure can be turned upside-down [2]. The spectroscopic observations show that cool material from the chromosphere is lying above hotter plasma that usually is associated with the transition region (Fig. 2). To obtain this result the improved spectral resolution of IRIS was of pivotal importance, because the interpretation relies on narrow absorption lines in the extreme UV that have not been visible with previous instrumentation. This inversion of the temperature stratification was unexpected, and its explanation is challenging. Because pockets of hot gas are embedded in cool dense material, efficient heating processes must operate to heat up the material in the pockets in a very short time. Most likely the explanation is based on magnetic reconnection, a sudden change of the structure and connec-*



**Abb. 2:** Heiße Explosionen in der kühlen Sonnenatmosphäre. Das linke Bild zeigt einen kleinen Ausschnitt der Sonne (50 000 km zu 25 000 km) im Licht von dreifach ionisiertem Silizium, astronomisch Si IV genannt, welches Plasma bei knapp unter 100 000 K repräsentiert. Es stechen etwa 1000 km kleine, heiße Taschen hervor, die für ca. 2 Minuten hell aufleuchten. Rechts ist in rot ein Spektrum der Si IV-Linie gezeigt, das am Punkt des roten Kreuzes im linken Bild aufgenommen wurde (Wellenlängenchse in Einheiten der Dopplerverschiebung). Erst der Vergleich mit einem normalen mittleren Spektrum (blau) zeigt, wie außergewöhnlich das Linienprofil an dieser Stelle der Atmosphäre ist. Die Analyse u.a. dieses Spektrums zeigt, dass hier die Temperaturschichtung verdreht ist, denn nur so können die Absorptionslinien von Fe II (einfach ionisiertem Eisen) im Profil von Si IV verstanden werden.

Bild: IRIS/NASA/Peter, basierend auf Daten aus [2].

**Fig. 2:** Hot explosions in the cool solar atmosphere. The left image shows a small part of the Sun (50 000 km by 25 000 km) in the light of three times ionized Silicon, Si IV. This shows plasma at just below 100 000 K. Prominent are about 1000 km small hot pockets that brighten up for about two minutes. The right panel shows in red the line profile of Si IV at the location indicated by the red cross in the left panel (the wavelength axis is given in units of Doppler shift). The comparison to a normal average spectrum (in blue) shows how extraordinary the spectrum in the hot pocket really is. The analysis of this and other spectra shows the temperature inversion, because only then the narrow absorption lines through Fe II (singly ionized iron) in the profile of Si IV can be understood.

Image: IRIS/NASA/Peter, based on data of [2].

## Von kalt zu heiß: Am magnetischen Übergang in der Atmosphäre der Sonne *From cold to hot: at the magnetic transition in the solar atmosphere*

stark aufgeheizt haben. Verantwortlich für diese Explosionen ist vermutlich magnetische Rekonnektion, eine abrupte Veränderung der Struktur des Magnetfeldes. Allerdings zeigen bisherige Modelle für verwandte Ereignisse eine wesentlich geringere Temperaturerhöhung. Neue Modelle und Beobachtungen werden Wege zeigen müssen, wie dieses Phänomen verstanden werden kann.

Solche Temperaturinversionen konnten auch in weniger dynamischen Gebieten gefunden werden [3]. Dabei wurden schmale Absorptionslinien identifiziert, die Molekülübergängen zugeordnet sind ( $H_2$  und CO). Moleküle können nur in kühler Umgebung existieren, und zeigen so, dass eine dunkle Wolke, die sich über ein Gebiet starker Emission aus der Übergangsregion schiebt, höchstens 4000 K bis 5000 K kühl ist. Dieser weitere Fall einer Inversion in der Chromosphäre legt nahe, dass ein Umdenken in unserem Bild der Struktur der Sonnenatmosphäre nötig ist.

### **Struktur des Magnetfeldes**

In Verbindung mit Beobachtungen der Magnetfeldstärke in der Photosphäre liefern die Daten von IRIS wichtige Informationen zur magnetischen Struktur in der *Interface*-Region. Die Beobachtung von Sonnenflecken zeichnete dabei die magnetische Verbindung von der Korona durch die *Interface*-Region in die Photosphäre auf [4]. Von besonderem Interesse sind dabei sehr kleine Aufhellungen der *Interface*-Region, die vermutlich direkt die magnetische Wechselwirkung des in die Korona reichenden Magnetfeldes mit dem horizontalen Magnetfeld in den Außenbereichen der Sonnenflecken zeigt.

Da das Plasma entlang der Magnetfeldlinien gefangen ist, geben die Beobachtungen der Richtung von Plasma-Geschwindigkeiten Hinweise auf die dreidimensionale Struktur des Magnetfeldes. Insbesondere konnte mithilfe von IRIS gezeigt werden, dass die magnetische Helizität infolge von magnetischer Rekonnektion zwischen verschiedenen Zuständen wechseln kann. Helizität ist eine

*tivity of the magnetic field. However, existing models of related events show only a minor temperature enhancement. New models and observations will have to show a path how to understand this phenomenon.*

*Similar temperature inversions have been found with IRIS also in less dynamic regions [3]. Here narrow absorption profiles have been identified as energy transitions in molecules ( $H_2$  and CO). Molecules can exist only in a cool environment. Therefore the molecular absorption in the extreme UV shows that above a hot region of transition region plasma a cloud of cool material is floating, which has temperatures of 4000 K to 5000 K at most. This additional case of a temperature inversion suggests that we have to revise our picture of the thermal structure of the solar atmosphere.*

### **Structure of the magnetic field**

*When combined with observations of the magnetic field in the photosphere, the data from IRIS provide key information on the magnetic structure of the interface region. Observing sunspots, IRIS in combination with other instruments could show the magnetic connection from the corona through the interface region all the way down to the photosphere [4]. Of particular interest in this context are very small brightenings of interface region plasma. These can be interpreted as a consequence of the interaction of the magnetic field reaching up into the corona with the horizontal magnetic field in the outer part of the sunspot.*

*Because the plasma is trapped on magnetic field lines, observations of plasma motions provide information on the three-dimensional structure of the magnetic field. In particular, IRIS data show that the magnetic helicity can change between different states through reconnection. Helicity is a mathematical property of*

## Von kalt zu heiß: Am magnetischen Übergang in der Atmosphäre der Sonne *From cold to hot: at the magnetic transition in the solar atmosphere*

mathematische Eigenschaft des Magnetfeldes, die allgemeinverständlich als Verdrillung bezeichnet werden kann, und die eine Erhaltungsgröße darstellt. Der Zustandswechsel der Helizität wurde in der Theorie vorhergesagt und IRIS zeigt nun erste Hinweise hierfür in der Sonnenatmosphäre [5].

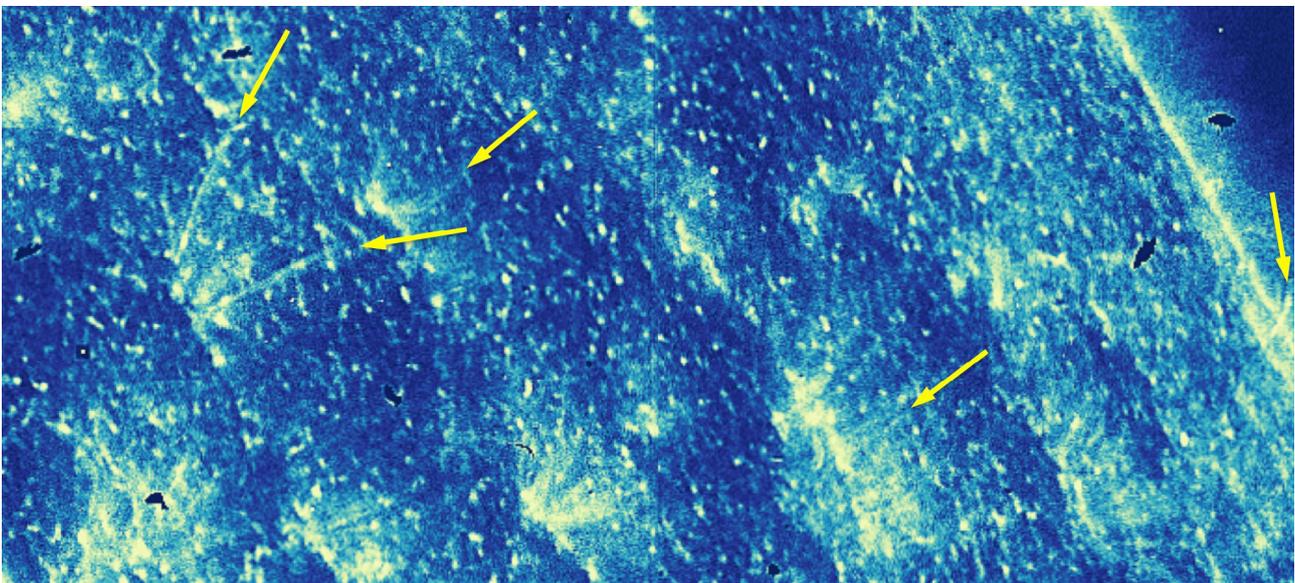
### Massenaustausch zwischen Chromosphäre und Korona

Die *Interface*-Region zeichnet sich durch ihre hohe Dynamik und die intensive Wechselwirkung zwischen Plasma und Magnetfeld aus, da sich die Energiedichten von Plasma und Magnetfeld hier die Waage halten. Hieraus resultiert ein stetiger Massenaustausch zwischen Korona und Chromosphäre der mit der Heizung und Kühlung des Materials einhergeht, und in dessen Folge Stoßwellen eine wichtige Rolle spielen, um die Eigenschaften von Spektrallinien in der Übergangsregion zu ver-

*the magnetic field. It is a conserved quantity and (sloppily) might be considered as the twist of the magnetic field lines in a given structure. The change between different states of helicity has been predicted by theory and IRIS now showed first proof for this in the solar atmosphere [5].*

### Mass exchange between chromosphere and corona

*The interface region is characterized by a very dynamic evolution and an intense interaction between the plasma and the magnetic field, because in places the energy density of the plasma and the magnetic field roughly match. This results in a continuous mass exchange between the corona and the chromosphere, driven by the heating and cooling of the plasma. The shocks that result from this process are a key to understand the properties of spec-*



**Abb. 3:** Jets in der Atmosphäre der Sonne. Dieses Bild zeigt die Sonne bei Temperaturen von ca. 40 000 K im Licht von C II (einfach ionisiertem Kohlenstoff). Der Ausschnitt ist etwa 83 000 km x 37 000 km groß; rechts ist der Sonnenrand zu sehen. Wie Haarbüschel zeigen sich die Jets, von denen einige mit Pfeilen markiert sind. In diesen Jets strömt Material mit mehreren 100 km/s nach oben in die Atmosphäre und füttert so die Korona und den Sonnenwind mit Material.

Bild: IRIS/NASA/Tian, basierend auf Daten aus [7].

**Fig. 3:** Jets in the solar atmosphere. This image shows the Sun at temperatures of about 40 000 K in the light of C II (singly ionized carbon) and covers about 83 000 km by 37 000 km. The solar limb is seen in the top right corner. The jets appear like a tuft of hair, some of them being marked with arrows. In these Jets plasma is entering the upper atmosphere with speeds of more than 100 km/s. This feeds the corona and the solar wind with material. Image: IRIS/NASA/Tian, based on data from [7].

## Von kalt zu heiß: Am magnetischen Übergang in der Atmosphäre der Sonne *From cold to hot: at the magnetic transition in the solar atmosphere*

stehen [6]. Insbesondere in Gebieten mit erhöhtem Magnetfeld außerhalb von Sonnenflecken finden sich zahlreiche kleine Auswürfe von Plasma in die Korona hinein, sogenannte Jets, in denen das Material auf Geschwindigkeiten von mehreren 100 km/s beschleunigt wird [7]. Diese neu gefundenen dynamischen Jets (Abb. 3) spielen eine wesentliche Rolle beim Aufbau von Strukturen in der Übergangsregion und beim Transport von Masse in die Korona, und möglicherweise auch beim Füttern des Sonnenwindes, einem kontinuierlichen Strom geladener Teilchen, der die Heliosphäre, den durch den Sonnenwind geprägten interplanetaren Bereich um die Sonne, mit Plasma füllt und mit der Magnetosphäre der Erde, der durch das Erdmagnetfeld dominierten Umgebung der Erde, in Wechselwirkung tritt.

### **Ausblick**

Nach gut einem Jahr intensiver Forschung und der Untersuchung einer großen Vielfalt von Phänomenen haben Beobachtungen mit IRIS alte Fragen teils beantwortet, teils präzisiert, und vor allem neue Fragen aufgeworfen. Die hier vorgestellten Ergebnisse zu Taschen heißen Materials in kühler Umgebung, zur Inversion der thermischen Struktur der Atmosphäre, oder zur magnetischen Verbindung und dem Massenaustausch zwischen Chromosphäre und Korona kamen überraschend und harren einer Erklärung durch Modelle. Detaillierte dreidimensionale Simulationen der Sonnenatmosphäre, so komplex sie auch sind, konnten viele der von IRIS gefundenen Ereignisse nicht vorher-sagen. Dies zeigt einmal mehr die Wichtigkeit neuer, verbesserter Beobachtungen in der astronomischen Forschung und lässt uns voller Erwartung auf die weiteren mithilfe von IRIS zu gewinnenden Ergebnisse blicken.

*tral lines forming in the transition region [6]. In particular in regions with enhanced magnetic field strength outside sunspots numerous small ejections are found where plasma is accelerated into the corona with speeds of more than 100 km/s [7]. These newly found jets (Fig. 3) should play an important role in building up the structures we see in the transition region, in transporting mass into the corona, and possibly also in feeding the solar wind. The latter is of interest, because the continuous stream of charged particles from the solar wind fills the interplanetary space with plasma and interacts with the magnetosphere of the Earth.*

### **Outlook**

*After the initial phase of IRIS studies of a wide range of phenomena, these novel observations answered or reformulated old questions and posed new ones. The results presented here on the pockets of hot gas in cool surroundings, the temperature inversion in the atmosphere, or the magnetic connection and mass exchange between chromosphere and corona came as a surprise and await proper explanations though new models. Detailed three-dimensional models of the solar atmosphere, with all their complexity, could not predict many of the phenomena discovered by IRIS. This emphasizes the importance of new improved observations in astronomical research. The observations still to be acquired with IRIS will provide us with further answers and questions, keeping the dynamic solar atmosphere a hot topic during the coming years.*

Von kalt zu heiß: Am magnetischen Übergang in der Atmosphäre der Sonne  
*From cold to hot: at the magnetic transition in the solar atmosphere*

Referenzen / *References* .....

- [1] De Pontieu, B.; Title, A.M.; Lemen, J.R.; et al.; *The Interface Region Imaging Spectrograph (IRIS)*; Solar Physics 289, 2733 (2014).; <http://iris.lmsal.com>
- [2] Peter, H.; Tian, H.; Curdt, W.; Schmit, D.; Innes, D.; et al.; *Hot explosions in the cool atmosphere of the Sun*; Science 346, id. 1255726 (2014).
- [3] Schmit, D. J.; Innes, D.; Ayres, T.; Peter, H.; Curdt, W.; Jaeggli, S.; *Molecular absorption in transition region spectral lines*; Astronomy & Astrophysics 569, L7 (2014).
- [4] Tian, H.; Kleint, L.; Peter, H.; et al.; *Observations of Subarcsecond Bright Dots in the Transition Region above Sunspots with the Interface Region Imaging Spectrograph*; Astrophysical Journal 790, L29 (2014).
- [5] Li, L.P.; Peter, H.; Chen, F.; Zhang, J.; *Conversion from mutual helicity to self-helicity observed with IRIS*; Astronomy & Astrophysics 570, A93 (2014).
- [6] De Pontieu, B.; McIntosh, S.; Martinez-Sykora, J.; Peter, H.; Pereira, T. M. D.; *Why is Non-Thermal Line Broadening of Spectral Lines in the Lower Transition Region of the Sun Independent of Spatial Resolution?*; Astrophysical Journal 799, L12 (2015).
- [7] Tian, H.; DeLuca, E. E.; Cranmer, S. R.; De Pontieu, B.; Peter, H.; et al.; *Prevalence of small-scale jets from the networks of the solar transition region and chromosphere*; Science 346, id.1255711 (2014).

PLANETEN UND KOMETEN

*PLANETS AND COMETS*

# Überblick

## Overview

### 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

### *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*

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.

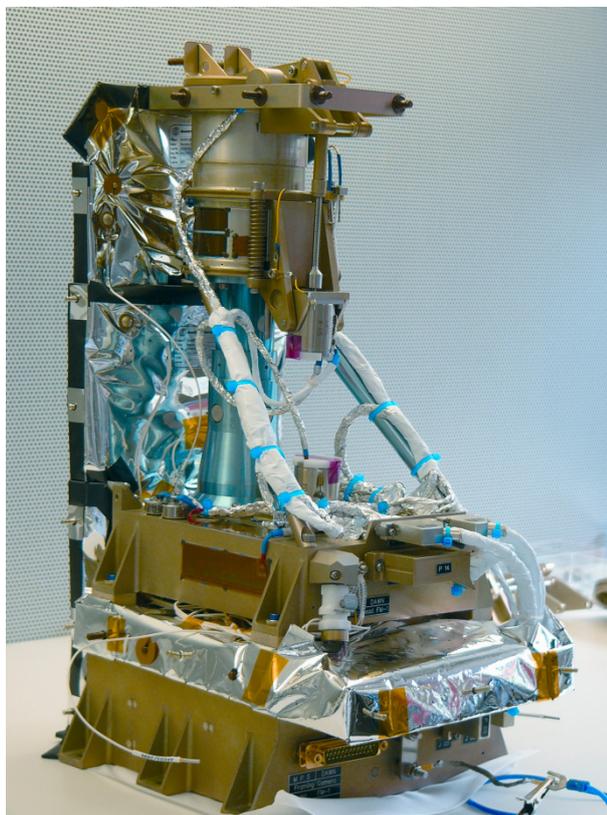
Wir setzen Massenspektrometer und Gaschromatographen ein, um die Zusammensetzung von Staub und organischen Komponenten auf Kometen und in der Zukunft im Marsboden zu untersuchen. Mit Weltraummissionen, die in den nächsten Jahren starten, werden wir das Innere des Mars mit Seismometern erkunden, die Oberflächentopographie 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 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.

Die am Institut entwickelte Kamera für die Dawn-Mission der NASA, die den Asteroiden Vesta erforscht hat und momentan auf dem Weg zu dem Zwergplaneten Ceres ist.

*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.*

*Mass spectrometers and gas chromatographs are used to analyze the composition of dusty and organic components of comets and in the future also of the Martian soil. On upcoming space missions we are preparing to use seismometers that study the interior of Mars, 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 spaceborne instruments are augmented by ground-based observations using large telescopes; these are mainly used to characterize comets and asteroids. Aside from interpreting observational data, we use theory and large-scale numerical simulations, for example for modeling the global circulation in the atmospheres*

*of other planets, the dynamics of charged particles in space plasmas or the generation of magnetic fields in the electrically conducting cores of different planets.*



*The camera for the Dawn mission, developed at the MPS. Dawn has explored the asteroid Vesta and is currently on its way to the dwarf planet Ceres.*

## Wichtige Weltraummissionen der Planetenforschung

In 2013/14 haben Instrumente mehrerer Weltraummissionen Daten geliefert, die am MPS analysiert wurden. Die Venus Monitoring Camera (VMC) der *Venus Express Mission* nahm bis Anfang 2015 Bilder der Wolkenstrukturen auf, mit deren Hilfe die Zirkulation und die Zusammensetzung der oberen Atmosphäre untersucht wird und der Teilchendetektor ASPERA-4 sammelte Informationen über den Verlust von Bestandteilen der Atmosphäre an ihrer Oberseite. Das Gleiche macht ASPERA-3 bei der *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 den Infrarotspektrometern auf dem Herschel-Weltraumobservatorium, die bis 2013 Daten geliefert haben, konnten wir die Konzentrationen und Verteilung verschiedener Spurengase in den Atmosphären von Jupiter, Uranus und des Saturnmondes Titan bestimmen.

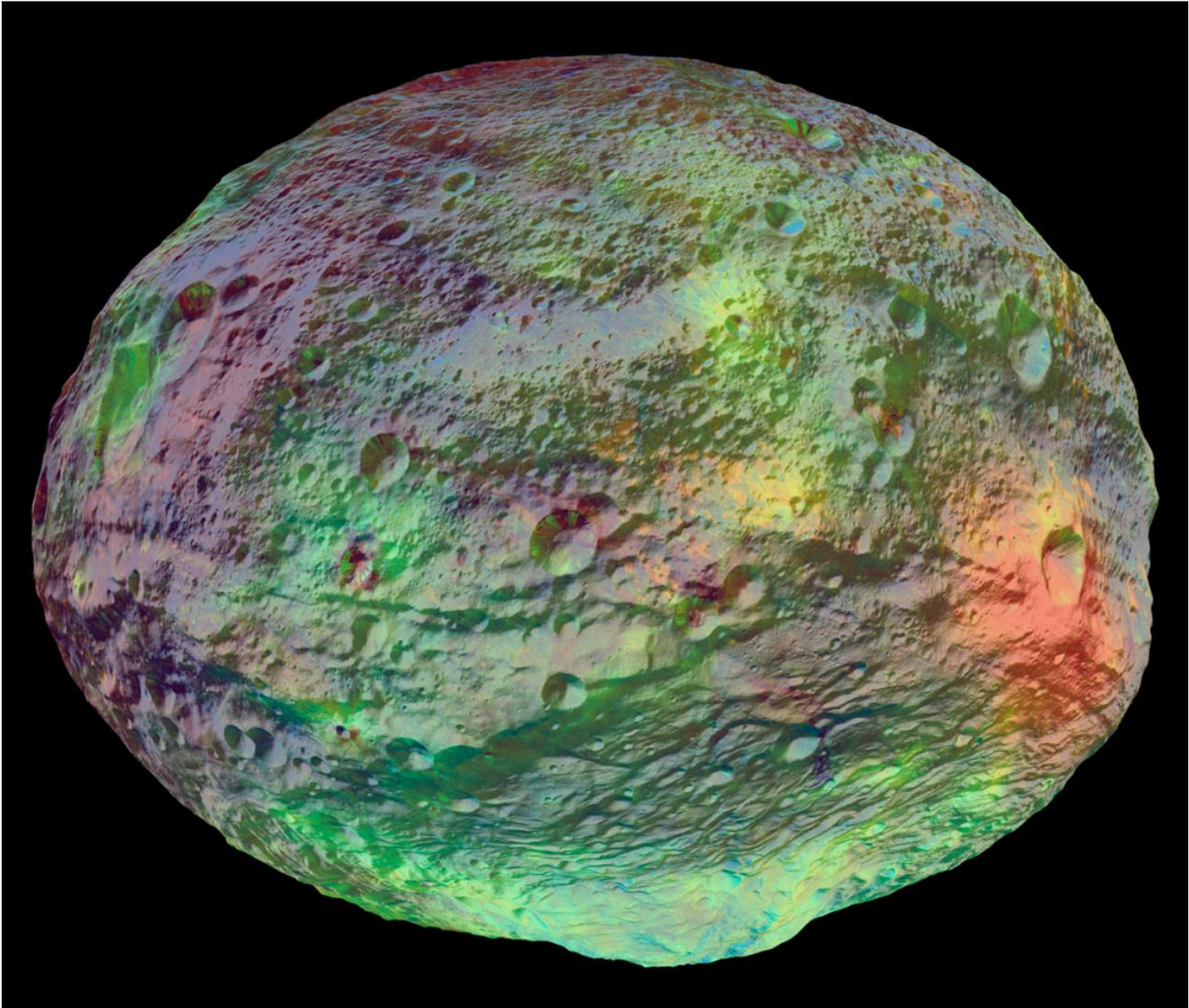
Die Farbaufnahmen, die unsere beiden Kameras auf der Dawn-Mission 2011/2012 vom Kleinplaneten Vesta gewonnen haben, haben wir benutzt, um die mineralogische Zusammensetzung der sehr vielgestaltigen Oberfläche zu charakterisieren. Entgegen der Annahme, dass der riesige Impakt, welcher das Rheasilvia-Becken am Südpol von Vesta geschaffen hat, große Mengen an olivinreichem Mantelgestein ausgeworfen haben sollte, können wir nur wenige kleine Olivinvorkommen an Hand ihrer Spektralsignatur identifizieren. Der geologische Kontext, in dem sie vorkommen, legt zudem nahe, dass sie von außen auf Vesta gebracht worden sind. Gegen Ende des Jahres 2014 befand sich Dawn im Anflug auf sein zweites Ziel, den Zwergplaneten Ceres.

## Important Space Missions in Planetary Science

*In 2013/2014 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 until early 2015 which are used to study the circulation in the upper atmosphere. The particle detector ASPERA-4 on the same mission provided information on losses from the top of the atmosphere, as is also done with its twin ASPERA-3 on the Mars Express Mission.*

*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 concentration and distribution of various trace gases in the atmospheres of Jupiter, Uranus, and Saturn's moon Titan.*

*Color images of the protoplanet Vesta, taken in 2011/2012 by our two cameras onboard the Dawn mission, helped to characterize the mineralogical composition. It had been suggested that the large impact that formed the Rheasilvia basin on Vesta's south pole would have excavated huge amounts of Olivin bearing mantle rocks. However, the images reveal that Olivin's spectral signature can only be found in a few places where the geological context suggests that it was brought in by impacts. At the end of 2014 Dawn was approaching its second target, the protoplanet Ceres.*



Dreidimensionale Farbkarte des Asteroiden Vesta  
©NASA/JPL-Caltech/UCLA/MPS/DLR/IDA/PSI

*Three dimensional color map of asteroid Vesta*

Der Höhepunkt des Jahres 2014 war die Ankunft der Rosetta-Mission bei ihrem Zielkometen Churyumov-Gerassimenko und das Absetzen der Landesonde Philae. Wir haben die Federführung bei drei Instrumenten auf dem Orbiter und Lander, Beteiligungen an mehreren weiteren Instrumenten und wesentliche Beiträge zur Landesonde selbst geleistet. Die OSIRIS-Kameras haben die zweiteilige Form des Kometenkerns mit bizarren Oberflächenstrukturen gezeigt. Das COSIMA-Instrument auf dem Orbiter fängt vom Kometen ausgestoßene Staubpartikel ein, bildet sie mit einer mikroskopischen Kamera ab und analysiert ihre Zusammensetzung. Die erste Landung auf einem Kometenkern am 12.11.2014 verlief nicht ohne

*The scientific highlight of 2014 was the arrival of the Rosetta mission at the comet Churyumov-Gerassimenko and the successful landing of the Philae probe. We have the lead for three instruments onboard the orbiter and the lander, significantly contributed to several other instruments, and are also responsible for important parts of the landing gear. The OSIRIS cameras revealed that the cometary nucleus consists of two parts covered with bizarre surface structures. The COSIMA instrument on the orbiter captures cometary dust particles, images them with a microscopic camera, and also analysis their composition. The first landing ever on a comet on November 12, 2014 was not with-*

Komplikationen, hat aber dennoch eine reiche Ausbeute wissenschaftlicher Resultate eingebracht. Unter anderem hat das Massenspektrometer unseres COSAC-Instrumentes einen Cocktail organischer Moleküle in der Kometenmaterie gefunden. Die Instrumente des Orbiters liefern weiter wissenschaftliche Daten bis voraussichtlich September 2016.

*out complications but achieved a rich scientific yield. For example, the mass spectrometer of our COSAC instrument identified a cocktail of organic molecules in the cometary material. The instruments on the orbiter keep on delivering scientific data, presumably until September 2016.*



Details der Oberflächenstruktur des Kometen Churyumov-Gerasimenko, aufgenommen von der OSIRIS-Kamera an Bord von Rosetta.

*Details of the surface structure of the comet Churyumov-Gerasimenko, observed by the OSIRIS camera onboard Rosetta.*

Bild: © ESA/Rosetta/MPS für das OSIRIS Team MPS/UPD/LAM/IAA/SSO/INTA/UPM/DASP/IDA

*Image: © ESA/Rosetta/MPS für das OSIRIS Team MPS/UPD/LAM/IAA/SSO/INTA/UPM/DASP/IDA*

# Das Innere der Planeten

## *Planetary Interiors*

### **Forschungsgebiet**

Die Erforschung des Inneren der Planeten macht einen wichtigen Teil der Arbeit am MPS aus. Verschiedene Methoden werden dabei angewandt. Das MPS beteiligt sich etwa an dem Bau des Laser-Altimeters, das auf der ESA Raumsonde BepiColombo 2017 zum Merkur fliegen wird. Das Instrument ist seit einiger Zeit fertig und wartet auf den Start der Mission. Für ein Seismometer, das auf dem Mars eingesetzt werden soll, hat das MPS ein Nivelliersystem gebaut. Der ursprünglich für das Frühjahr 2016 vorgesehene Start von NASA's InSight-Mission, die das Instrument transportieren soll, wurde leider verschoben.

Aufwendige Computersimulationen bilden ein weiteres Standbein der Erforschung von Planeteninneren am MPS. Der Fokus liegt dabei auf dem Verstehen der inneren Dynamik, insbesondere des Dynamomechanismus, der das großskalige Magnetfeld der Planeten erzeugt. Dieser Mechanismus basiert auf dem physikalischen Prozess der Induktion und benötigt ein elektrisch leitfähiges und bewegtes Medium, wie zum Beispiel das flüssige Eisen im Erdkern, das durch Temperaturunterschiede zu Konvektionsbewegungen angetrieben wird. Die Magnetfelder spielen eine wichtige Rolle für die Bewohnbarkeit eines Planeten und liefern zudem oft die einzigen Hinweise auf die dynamischen Prozesse im tiefen Inneren. Während des Berichtszeitraumes hat sich die Ar-

### **Research area**

*Exploring the interior of planets is an important part of the work at MPS. Different tools are employed to reach this goal. MPS contributes to the laser altimeter scheduled to fly to Mercury on ESA's BepiColombo Mission in 2017. The instrument is ready and awaits the launch. MPS also built the leveling system for a seismometer planned to land on the Martian surface. The launch date of NASA's InSight mission that will carry this instrument was originally foreseen for early 2016 but has been suspended.*

*Large scale numerical computer simulations form another backbone for MPS research of planetary interiors. The focus here is on understanding the inner dynamics and in particular the dynamo mechanism that creates the large scale planetary magnetic fields. The dynamo mechanism is based on a physical process called induction and requires an electrically conducting and moving medium. This is for example the liquid iron in Earth's core, set into convective motion by temperature induced density differences. Magnetic fields play an important role for the habitability of a planet and often offer the only clue on the deep interior dynamics. During the report period the planetary dynamics group has been working on all planetary dynamos in our solar system. Larger numerical parameter studies on the convective*

beitsgruppe „Planetary Dynamics“ mit allen planetaren Dynamos im Sonnensystem beschäftigt. Groß angelegte numerische Parameterstudien des Wärmetransports in Kugelschalen und der fundamentalen Instabilitäten in dem sogenannten Spherical-Couette-System (Wicht 2014) waren weitere Forschungsgebiete.

## Wichtige Ergebnisse

Der NASA Satellit Juno wird Jupiter im Sommer 2016 erreichen und das Magnetfeld des Planeten mit bisher unerreichter Genauigkeit vermessen. Die Mission wird zudem wichtige weitere Hinweise auf die innere Dynamik liefern. Computermodelle von Jupiters Atmosphärendynamik und dem Dynamoprozess bildeten darum einen Forschungsschwerpunkt, dessen Ergebnisse im Folgenden etwas näher erläutert werden.

Jupiters Gashülle besteht hauptsächlich auf Wasserstoff und Helium und umgibt wohl einen kleinen Gesteinskern unbekannter Größe. Wasserstoff durchläuft bei etwa 87 % des Planetenradius einen Phasenübergang zu einem metallischen Zustand. Man unterscheidet darum eine metallische innere und eine molekulare äußere Gashülle. Da eine hohe elektrische Leitfähigkeit für den Dynamoprozess essentiell ist, werden die Magnetfelder wohl hauptsächlich in der metallischen Schicht erzeugt. Die schnellen westwärts und ostwärts gerichteten Winde, die die Wolken des Planeten antreiben, bleiben hingegen wahrscheinlich auf die molekulare Schicht beschränkt. Höhere Dichten und die Lorentzkraft bremsen die Dynamik in größeren Tiefen.

Quantenmechanische Ab-initio-Rechnungen zeigen nun, dass es keine klare Trennung zwischen den beiden Schichten gibt. Alle physikalischen Eigenschaften ändern sich vielmehr kontinuierlich, was zu interessanten Wechselwirkungen führen kann. Um dieses Szenario zu erforschen, hat die Planetary Dynamics Group ein integriertes Computermodell entwickelt, das 99 % des Planetenradius mit einem realistischen Dichteprofil abbildet und ein elektrisches Leitfähigkeitsprofil verwendet, das die schwach leitfähige molekulare Region berück-

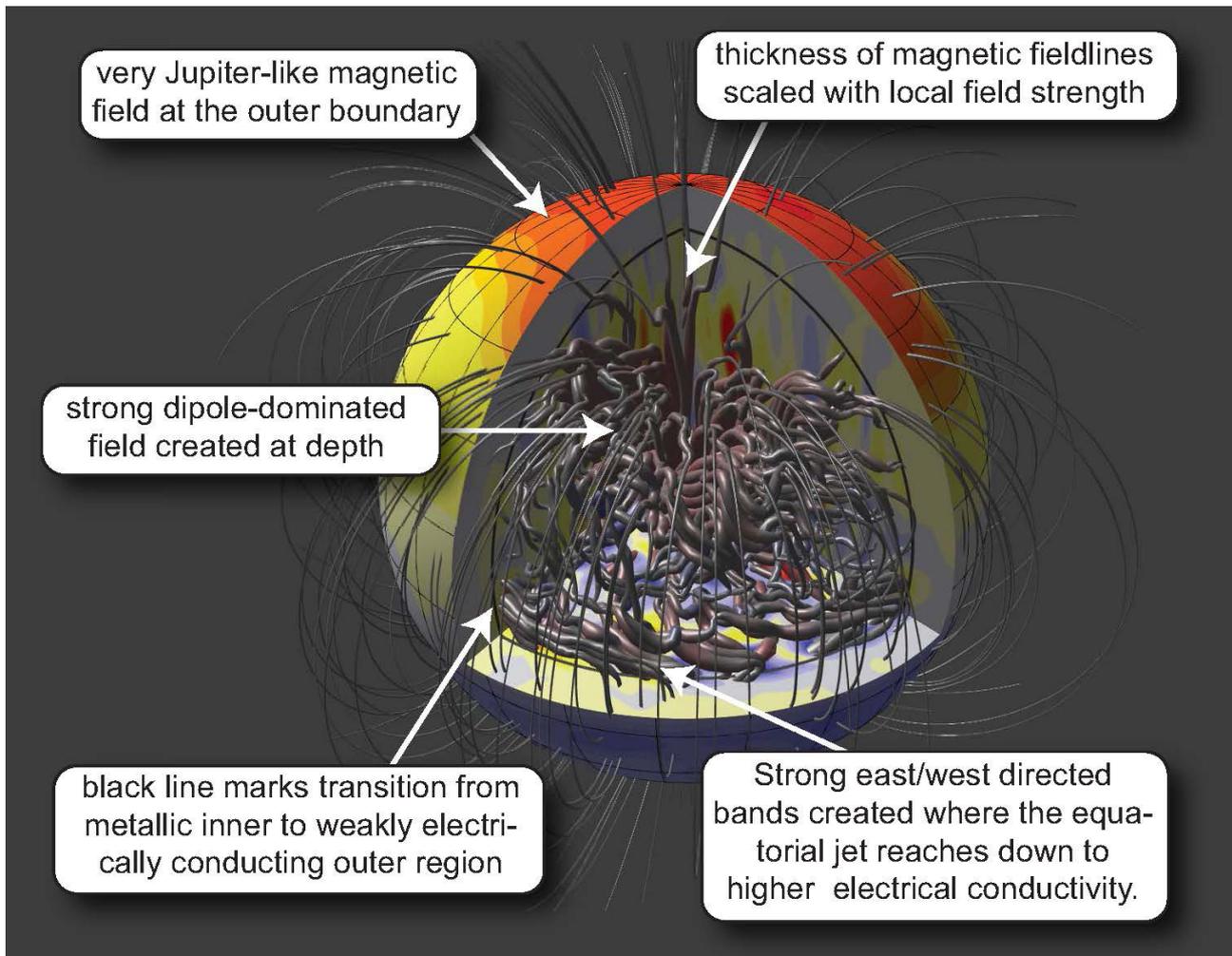
*heat transport in spherical shells and the fundamental instabilities in the spherical Couette problem were additional research areas (Wicht 2014).*

## Major results

*NASA's Juno spacecraft will reach Jupiter in summer 2016. It will measure the planets magnetic field with unprecedented precisions and is also expected to reveal important additional constraints on the planets interior dynamics. Simulations of Jupiter's atmospheric dynamics and dynamo process therefore formed a main research focus that we report on in the following.*

*Jupiter's gas envelope mainly consists of Hydrogen and Helium and surrounds a small rocky inner core of unknown size. Hydrogen undergoes a phase transition to a metallic state at about 87 % of the planet's radius, separating the gaseous envelope into a molecular outer and a metallic inner region. Since higher electrical conductivity is essential for a dynamo mechanism, the magnetic field production is generally thought to happen in the metallic region. The fierce east- and westward directed winds observed in the planet's cloud layer, on the other hand, are likely constrained to the outer envelope because higher densities and Lorentz forces slow down the dynamics at greater depth.*

*Quantum-mechanical ab-initio simulations show that there is no clear cut separation between both layers but rather a continuous transition in all physical properties which may lead to interesting and important interactions. To explore this scenario, the planetary dynamics group at MPS developed an integrated numerical model that simulates 99 % of Jupiter's radius with a realistic density profile and a continuous electrical conductivity profile that includes the weakly conducting molecular region. The*



**Abb. 1:** Illustration des Magnetfeldes in dem am MPS entwickelten neuen Computermodell für Jupiters interne Dynamik. Die Dicke der Feldlinien gibt die lokale Feldstärke wieder. Die farbigen Kontouren auf der äußeren Oberfläche zeigen das einwärts gerichtete radiale Feld in blau und das auswärts gerichtete Feld in gelb und rot. Kontouren auf den Schnittflächen zeigen das ostwärts gerichtete Feld in gelb und rot und das westwärts gerichtete Feld in blau.

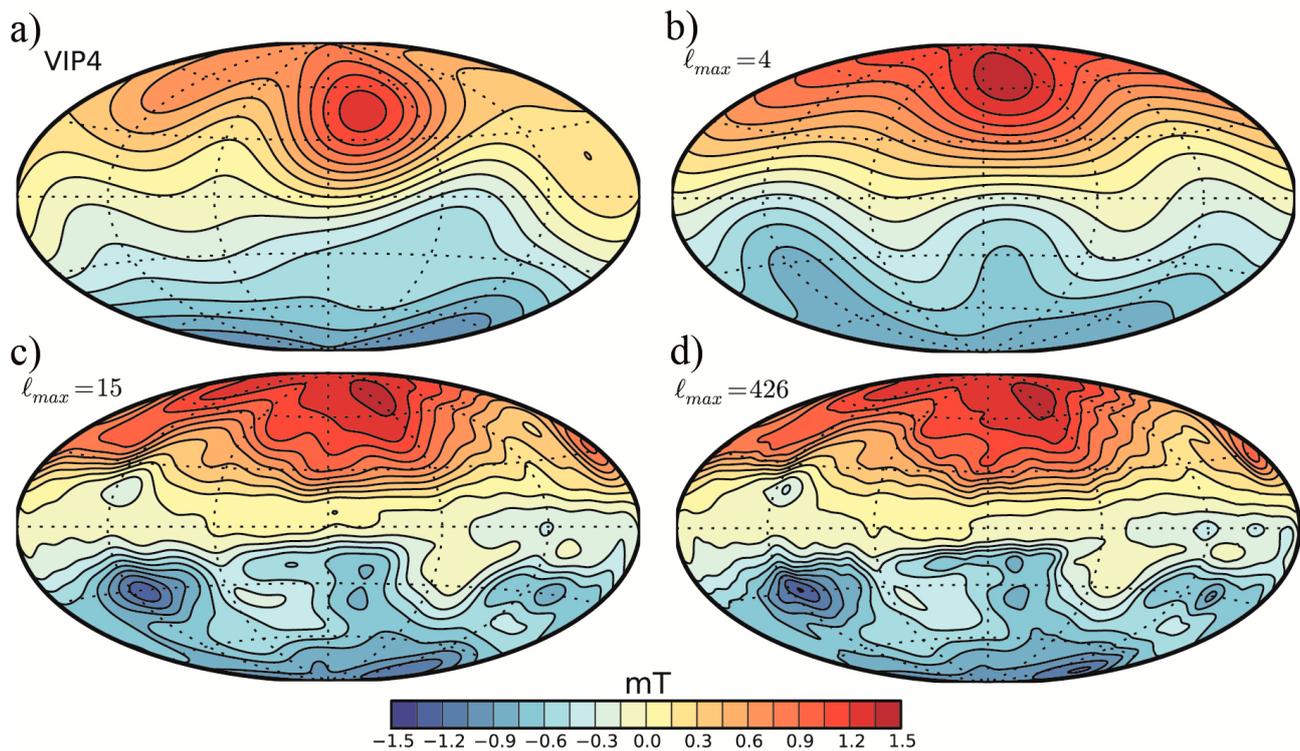
*Fig. 1: Illustration of the magnetic field in the new integrated Jupiter dynamo model developed at MPS. The thickness of the field lines is scaled with the local field strength. Contours on the outer boundary show radial inward (blue) and outward (red and yellow) field while the cut sections show eastward (red and yellow) and westward (blue) directed field.*

sichtig. Die realistischste Simulation verbrauchte 2 Millionen CPU-Stunden auf dem Max-Planck-Supercomputer Hydra. Der verwendete numerische Code MagIC5 ist jetzt öffentlich auf GitHub verfügbar (<https://github.com/magic-sph/magic>).

*most realistic simulation ran on the Max-Planck super computer Hydra, consuming about 2 million CPU hours. The employed code MagIC5 is now publicly available on github (<https://github.com/magic-sph/magic>).*

Die in Abb. 1 illustrierten Ergebnisse zeigen, dass ein starkes primäres Dipol-dominantes Feld im tieferen Inneren des Planeten erzeugt wird, wo die Dichte und die elektrische Leitfähigkeit sich nur noch wenig ändern. Abb. 2 belegt, dass dieses Feld gut mit dem großskaligen Feld übereinstimmt, das mit den Missionen Pioneer, Voyager und Galileo beobachtet wurde. In der Äquatorregion des

*The results, illustrated in Fig. 1, reveal that a strong dipole dominated primary magnetic field is produced in the deeper interior of the planet where density and conductivity profiles are only mild. This field agrees well with the known large scale field revealed by Pioneer, Voyager, and Galileo space mission observations, as is demonstrated in Fig. 2. A fast prograde equa-*



**Abb. 2:** Vergleich von Jack Connerneys VIP4 Modell für Jupiters Magnetfeld, das auf Beobachtungsdaten beruht, mit der neuen Computersimulation. Gezeigt wird das radiale Magnetfeld an der Planetenoberfläche. Auswärts (einwärts) gerichtetes Feld wird durch gelbe und rote (blaue) Farben dargestellt. VIP4 hat eine räumliche Auflösung, die einem sphärisch harmonischen Grad  $l_{max}=4$  entspricht. Abbildung b) zeigt einen Schnappschuss des Computermodells bei gleicher Auflösung. Abbildung c) zeigt den gleich Schnappschuss mit der Auflösung  $l_{max}=15$ , die für die Juno-Mission erwartet wird, während Abbildung d) die volle Auflösung des Computermodells wiedergibt.

*Fig. 2: Comparison of the VIP4 Jupiter magnetic field model (panel a) by Jack Connerney, which is based on observations, with the magnetic field in the simulations. Shown is the radial field at planetary surface, yellow and red (blue) colors indicate outgoing (ingoing) field. VIP4 has a spatial resolution equivalent to a spherical harmonic degree  $l_{max}=4$ . Panel b) therefore shows a snap shot in the numerical simulation that has been filtered to the same resolution. Panel c) shows the same snap shot with the resolution  $l_{max}=15$  expected for the Juno mission while panel d) shows the full numerical model.*

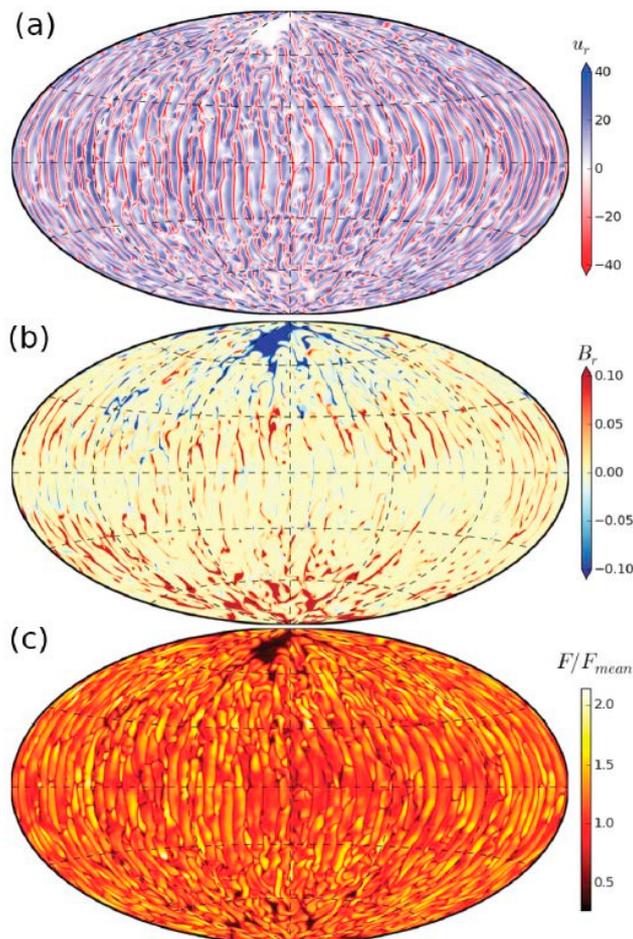
äußeren Bereichs entwickelt sich ein schneller, ostwärts gerichteter Windjet. Dort wo der Jet in Regionen mit höherer Leitfähigkeit herunterreicht, gibt er Anlass zu einem sekundären Dynamoeffekt. Die Juno-Mission sollte in der Lage sein, die Signatur dieses zweiten Dynamos zu erkennen, und zwar in Form von langgestreckten magnetischen Bändern bei niedrigen Breiten wie in Abb. 2 illustriert. Das Computermodell sagt auch vorher, dass die Juno Mission während der einjährigen Missionszeit Änderungen im Magnetfeld messen kann, die Hinweise auf die Zeitskalen der internen Prozesse liefern.

Was das Computermodell nicht reproduziert, sind die ostwärts und westwärts gerichteten Jets in mittleren und hohen Breiten. Ältere Simulationen

*torial eastward directed wind jet develops in the weakly conducting outer region and leads to a secondary dynamo effect where it reaches down to regions with larger electrical conductivity. The Juno Mission should reveal the signature of this secondary process in the form of longitudinally elongated equatorial magnetic bands shown in Fig. 2. The numerical model also predicts that Juno has the chance to observe magnetic field variations during its one year nominal mission time which will allow deducing the time scales of the deeper dynamics.*

*The numerical models fails to reproduce Jupiter's mid to high latitude eastward and westward directed winds. Previous simulations*

**Abb. 3:** Simulation eines konvektionsgetriebenen Dynamos mit einem Sternfleck in der Nähe des Nordpols. Abbildung (a): radiales Geschwindigkeitsfeld knapp unter der Oberfläche. Auswärts (einwärts) gerichtete Bewegungen sind rot (blau) dargestellt. Abbildung (b): radiales Magnetfeld an der Oberfläche mit auswärts (einwärts) gerichtetem Feld in rot (blau). Abbildung (c): Wärmefluss (Helligkeit) an der Oberfläche.



**Fig. 3:** Convective dynamo exhibiting a dark starspot near the north pole. (a) Radial velocity with outgoing (ingoing) flows shown in red (blue), (b) radial magnetic field with outgoing (ingoing) field shown in red (blue), (c) heat flux (luminosity) near the stellar surface.

legen nahe, dass diese Jets zu einem unrealistischen nicht-dipolaren Feld führen, wenn sie bis zu den besser leitfähigen Regionen herunterreichen. Anders als der äquatoriale Jet könnten sie darum nur ein flaches Wetterphänomen sein, angetrieben von Prozessen, die der Computercode bis jetzt noch nicht korrekt wiedergibt. Die Juno-Mission sollte dazu beitragen, dieses Rätsel zu lösen.

Die Dynamik in Sternen, die anders als die Sonne relativ schnell rotieren und deren Inneres voll konvektiert, könnte sehr ähnlich sein wie im Jupiter oder anderen Gasgiganten. Die Planetary Dynamics Group hat darum begonnen, den Computercode MagIC auch für die Modellierung von Sternen einzusetzen – ein Schritt, der die Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Abteilungen des MPS fördert. Im Rahmen einer systematischen Parameterstudie von konvektionsgetriebenen Dynamos mit starker Dichteschichtung wurden einzig-

*suggest that these winds would promote an unrealistic non-dipolar field when reaching down into the higher conducting regions. Unlike the equatorial jet, they may just be a shallower weather phenomenon, driven by some processes that are not yet correctly modelled in the simulation code. The Juno mission should also help to solve this puzzle.*

*The dynamics in stars which, unlike the Sun, have a fully convective interior and rotate relatively fast may actually be quite similar to that in gas giants like Jupiter. This motivated the planetary dynamics group to also consider stellar applications, a step that simulates collaborations between the different departments at MPS. During a systematic study of convection-driven dynamos with strong density stratifications distinct structures developed that seem to resemble so-called starspots. These are dark*

artige Strukturen gefunden, die den sogenannten Sternflecken ähneln. Dies sind dunkle Gebiete, die oft in polaren Regionen von schnell rotierenden kalten Sternen gefunden werden. In den Simulationen ist eine Kombination von schneller Rotation und des stärksten Dichtegradienten, den die Computerleistung noch zulässt, wichtig. Dies ermöglicht, dass sich langlebige Magnetfeldkonzentrationen bei hohen Breiten ausbilden, die den radialen Fluss nahe der Oberfläche behindern. Damit wird der konvektive Wärmetransport lokal behindert und die Region erscheint kälter und damit dunkler, wie in Abb. 3 gezeigt. Dies ist die erste konsistente Simulation eines Sternflecks in einer globalen Dynamosimulation.

*areas often found in the polar regions of rapidly rotating cool stars. In the simulations a combination of rapid rotation and the highest accessible density contrast seems essential. This promotes a long-lived large magnetic flux concentration at high latitudes which quench the radial flow in the near-surface layers and thereby locally impedes convective heat transfer. The effect is a relatively cool and thus darker spot on the surface (Fig. 3). The simulation offers the first self-consistent starspot formation in a global dynamo model.*

**Team in 2013/2014:** .....

Ulrich Christensen,  
Johannes Wicht,  
Thomas Gastine,  
Rakesh Yadav,  
Domenico Meduri,  
Ankit Barik,  
Andrea Bossmann



**Ausgewählte Publikationen /Selected publications** .....

Wicht J. (2014): Fluid Mech., 738, 184-221:  
*Flow instabilities in the wide-gap spherical Couette system*

Gastine T, Wicht J., Duarte L. D. V. et al. (2014): Geophys. Res. Lett., 41, 5410-5419:  
*Explaining Jupiter's magnetic field and equatorial jet dynamics*

Duarte L. D. V., Gastine T., Wicht J. (2013): Phys. Earth Planet. Inter., 222, 22-34:  
*Anelastic dynamo models with variable electrical conductivity: An application to gas giants*

Yadav R. K., Gastine T., Christensen U. R., Reiners A. (2015): A&A, 573, A68 (14 pp):  
*Formation of starspots in self-consistent global dynamo models: Polar spots on cool stars*

# Planetare Oberflächen

## *Planetary Surfaces*

### **Forschungsgebiet**

Seit den 90er Jahren beteiligt sich das MPS intensiv an der Erforschung von planetaren Oberflächen mit wesentlichen Beiträgen zu verschiedenen Orbiter- und Landemissionen zur Venus, zum Mars, und zum Mond. In jüngster Zeit lag ein Schwerpunkt auf der Auswertung von Daten der am MPS entwickelten „Venus Monitoring Camera“ an Bord des ESA Satellit „Venus Express“. Ferner wurden die Daten des Mars-Rovers Curiosity analysiert, und der folgende Bericht konzentriert sich darauf, die wissenschaftliche Dimension dieses außergewöhnlichen Vehikels und analytischen Labors herausgearbeitet werden. Was sind die fundamentalen Fragen, die Curiosity klären soll? Wie wird die Mission genutzt, um die wesentlichen Aspekte zu ergründen und die Antworten einzugrenzen?

Der NASA Curiosity-Rover landete am 5. Aug. 2012 im Gale-Krater. Dieser Krater hat einen Durchmesser von etwa 150 km und liegt exakt auf der Linie, welche die relative jungen Tiefebene der Nordhalbkugel von den älteren, kraterreichen und höher gelegenen südlichen Regionen trennt. Die meisten Strom- oder Flusstäler finden sich in den südlich Gebirgsregionen und wurden mit großer Wahrscheinlichkeit vor etwa 3-4 Milliarden Jahren durch flüssiges Wasser erodiert. Auf den nördlichen Tiefebene mag es hingegen einen riesigen Ozean gegeben haben. Der Gale Krater ist einzigartig, da er einen ungewöhnlich hohen (mehr als

### ***Research Area***

*MPS has been heavily involved in the exploration of planetary and Moon surfaces since the mid 1990's, contributing to a number of Venus and Mars orbiter and lander missions and more recently also to two Moon orbiters. Recent work has been dominated by data from the Venus monitoring camera on board of Venus express and by data from the Mars rover Curiosity. We highlight the latter work in the following and concentrate on explaining the science dimension of this extraordinary "vehicle & laboratory", i.e. present some key questions on Mars and explain how this mission is used in order to address these questions and to achieve its ambitious goals.*

*The NASA rover Curiosity landed in Gale crater on Aug. 5, 2012. The crater with a diameter of about 150 km is located right on the line that separates the fairly young northern lowlands from the older crater-rich southern highlands. Most fluvial channels and channel networks that were (most likely) formed by flowing water are located on the southern highlands, while the Northern plains may have hosted a huge ocean. Gale crater is exceptional as it contains an unusually high central mound more than 5 km in altitude, higher than parts of the crater walls. This central mound is partly magmatic*

5 km) Zentralberg hat, der sogar Teile der Kraterwand überragt. Der südlichere und höchste Teil des Zentralbergs ist magmatischer Natur. Hier wurde Gestein durch die Energie des Einschlagsereignisses vor etwa 3.8 Milliarden Jahren aufgeschmolzen. Der nördlichere und volumenmäßig größere Teil besteht jedoch aus Sedimenten. Es obliegt der Curiosity-Mission, die jüngere Entwicklung dieser Sedimente (etwa im Zeitraum vor 3.8 bis 2 Milliarden Jahren) näher zu charakterisieren. Sie dokumentieren die frühe Geschichte des Planeten, als Mars (zumindest lokal und episodisch) noch „warm und feucht“ war wie die Erde; zu einer Zeit also, als sich frühes Leben auf der Erde bildete. Der Übergang von präbiotischer Chemie zum Stoffwechsel primitiver Organismen bleibt der bemerkenswerteste und am wenigsten verstandene Entwicklungsschritt von „Materie“. Dank seiner außergewöhnlichen geologischen Gegebenheiten hat der Gale Krater das Potential, unser Verständnis des Mars aber auch der frühen Erde wesentlich voranzubringen.

Ziel der Mission ist die Durchquerung der unteren Regionen des sedimentären Zentralbergs und die Charakterisierung der Sedimente sowie der physikochemischen Bedingungen, unter denen diese Sedimente abgelagert wurden. In den Jahren 2013 und 2014 fuhr Curiosity 5 km in südwestliche Richtung entlang meter-hoher, dunkler, für den Rover nicht-überquerbarer Wanderdünen, die sich mit einer Geschwindigkeit von 20-40 cm pro Jahr in südliche Richtung fortbewegen. Satellitenbeobachtungen wiesen den Weg zu einer Lücke in dieser Dünen-Halskette, die sich um den Zentralberg legt.

Hier sind einige der wissenschaftlichen Schlüsselfragen:

(1) Wurden diese Sedimente durch Wasser oder Wind abgelagert? Handelte es sich um Flussablagerungen oder um Ablagerungen in einem See? Wie als sind sie?

(2) Fragen, die mit flüssigem Wasser zu tun haben, dem Medium, das untrennbar mit der Entwicklung des Lebens in Zusammenhang steht: Enthalten diese Sedimente Mineralphasen, die auf wässrige Alteration oder Verwitterung hindeuten?

*(southern part of the mound, generated during the impact that formed the crater ~3.8 Ga ago) and partly of sedimentary nature (cross-shaped northern part of the mound, generated during significant time after the impact). While the origin of the sedimentary mound is not fully understood, the various layers reflect the early history of Mars (say from 3.8 Ga and up to 2 Ga). Hence the crater documents the early history of Mars, – at a time when Mars was “warm & wet” like Earth (at least locally and episodically) and at a time when life originated on Earth, – the most remarkable and least understood development of matter. Due to its exceptional geologic setting, Gale crater has the potential to improve our understanding of early and modern Mars as well as early Earth.*

*The final goal is to ascend the lower part of the central mound and to characterize the Martian environment at a time, when these sediments were deposited. In the years 2013-2014, Curiosity drove more than 5 km to the southwest along meters-high dark not-traversable dunes that are moving southward at a velocity of some 20-40 cm/year. Orbital observations lead the way to a gap of this “necklet” of dunes that surround the central mound.*

*Some of the key science questions the mission addresses are:*

*(1) What was the depositional environment of these sediments? Were they deposited by wind or water? Are they fluvial or lake deposits? How old are they?*

*(2) Questions pertaining to liquid water as this medium is strongly related to life: Do these sediments contain alteration or water-bearing phases that attest to aqueous weathering? If yes, what was the pH of these aqueous solutions? Were they near-neutral and*

Falls ja, welchen pH-Wert hatten diese wässrigen Lösungen? Waren sie neutral (pH ~ 7) und damit zuträglich für die Mehrheit der uns bekannten Lebensformen? Wurden diese Verwitterungsphasen durch Wasser zum Ort der Ablagerung transportiert? Von woher? Etwa von der nördlichen Gale Kraterwand? Welche Prozesse haben zur Verfestigung des Gesteins beigetragen und wie lange hat dies gedauert?

(3) Wichtige zusätzliche Fragen: Welche Unterschiede und Gemeinsamkeiten gibt es zwischen den von Curiosity untersuchten Gesteinen im Gale Krater und den sogenannten SNC-Meteoriten, die wohl unstreitig vom Mars stammen? Welche Konzentrationen und isotopischen Signaturen haben die Volatile in der Atmosphäre ( $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ) und jene, die beim Erhitzen der Gesteine entweichen (z. B.  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $SO_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2$ ,  $HCl$ ,  $H_2S$ ,  $CH_4$ ,  $NH_3$ )?

## Wichtige Ergebnisse

Die Charakterisierung der Ablagerungsbedingungen auf dem frühen Mars und seiner „Bewohnbarkeit“ ist ein riesiges Puzzle. Die Fragen sind zu komplex, als dass sie allein durch Curiosity beantwortet werden könnten, zumal der Rover ein relativ kleines geologisches Gebiet (< 20 km) erkundet. Dennoch hat die Mission bereits partielle Antworten geliefert.

Die folgenden Bilder veranschaulichen die Gegebenheiten und wissenschaftlichen Aktivitäten. Abb. 1 entstand an Sol 527, d. h. 527 Marstage (à 24,6 irdische Stunden) nach der Landung. Es zeigt eines der recht häufig angetroffenen rätselhaften, kreisförmigen Objekte. Im Vordergrund sieht man eine meter-hohen Sanddüne, im Mittelgrund einen kleinen Rücken und ein seichtes Tal. Die südwestliche Gale-Kraterwand ragt im Hintergrund auf. Abb. 2 zeigt Sedimentgesteine im Vordergrund, weiter weg die oben erwähnten dunklen Dünen und im Hintergrund die unteren Bereiche des Zentralberges. Abb. 3 präsentiert ein „Selfie“, das durch die am Ende des Roboterarms montierte Kamera aufgenommen wurde, und zeigt auch eines der Bohrlöcher im Sedimentgestein. Die Bohrlöcher sind zylindrisch, etwa 1,7 cm im

*thus benign to life (as known on Earth) or acidic? Were the alteration phases formed in place or brought in from elsewhere by fluvial transport? Into which direction did the water flow that carried the sedimentary load? Or the other way round: where did this sedimentary load come from? Which processes turned the loose sediments into a sedimentary rock and when did this happen?*

*(3) Important additional questions: How do the rocks encountered along the rover traverse compare to the so-called SNC meteorites that arguably have originated on Mars? What are the abundance and isotopic signature of volatiles in the atmosphere ( $H_2O$ ,  $CO_2$ , methane [ $CH_4$ ]) or volatiles that are thermally released from rocks (e.g.  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $SO_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2$ ,  $HCl$ ,  $H_2S$ ,  $CH_4$ ,  $NH_3$ )?*

## Major results

*Characterizing the depositional environment on early Mars and addressing its habitability is a huge puzzle. The above questions are too complex to be answered by a single mission, in particular since this mission is limited to a fairly small geologic area. Curiosity has nevertheless already started to provide first insights.*

*The following images have been selected to illustrate the above statements and the science activities of this extraordinary mission: the picture in Fig. 1 was taken on sol 527, i. e. 527 Martian days post landing (1 Martian day = 24.6 Earth hours). It shows an example of frequently encountered, enigmatic circular features and a meter-high sand dune in the foreground, a small ridge and shallow valley in the medium ground and the southwestern wall of Gale crater in the far background. Fig. 2 shows sedimentary rocks in the foreground, aforementioned dark dunes further away, and the lower slopes of the central mound in the background. Finally, Fig. 3 shows a “selfie” acquired by the camera that is mounted to the end of the rover’s robotic arm. This photo also illustrates the drilling of sedimentary rocks. The drill holes are*

**Abb. 1:** Die Düne "Dingo Gap" (Sol 527, 29. Jan. 2014, NASA/JPL). Man beachte das kreisförmige Objekt vor der Düne und die Aufwölbung hinter der Düne. Die „Bergkette“ im Hintergrund ist der südwestliche Teil der Gale-Kraterwände.



**Fig. 1:** Dingo Gap dune (Sol 527, 29-Jan-2014, NASA/JPL). Note the circular feature in front of the dune and the ridge behind the dune. The "mountain chain" in the distance is a SW portion of the Gale crater wall.

Durchmesser und etwa 6 cm tief. Die Analyse der chemischen und mineralogischen Zusammensetzung des Bohrmehls, ermittelt durch Röntgenbeugung, Röntgenfluoreszenz sowie Analyse thermisch freigesetzter Gase, leistet einen wichtigen Beitrag zum Verständnis der Natur und Geschichte der Sedimente.

In den Jahren 2013 & 14 war das MPS zum Beispiel an der Untersuchung von Konglomeraten und einer großen Windrippel beteiligt. Konglomerate sind fluviatile Sedimente aus gerundeten Gesteinsbruchstücken sehr unterschiedlicher Größe. Eine Reihe von Konglomeraten wurde erstmals auf dem Mars nahe dem Landeplatz angetroffen. Sie zeugen von anhaltendem Überlandtransport von Sand und Geröll durch flüssiges Wasser. Diese Konglomerate haben wesentlichen Einfluss auf die Interpretation der Ablagerungsbedingungen und Sedimentbildung im Gale Krater während der ersten paar 100 Millionen Jahre nach dem Einschlag.

Etwa 100 m östlich des Landeplatzes wurde eine Rocknest genannte große Windrippel ausgiebig mit der gesamten wissenschaftlichen Nutzlast des Rovers analysiert. Dabei wurde die Funktionsweise aller wissenschaftlichen Instrumente getestet und

*cylindrical, about 1.7 cm in diameter and about 6 cm deep. The chemical and mineralogical composition of the drill fines (as determined by x ray diffraction, x-ray fluorescence, analysis of thermally evolved gases) are key to interpret the nature and history of the sedimentary rocks.*

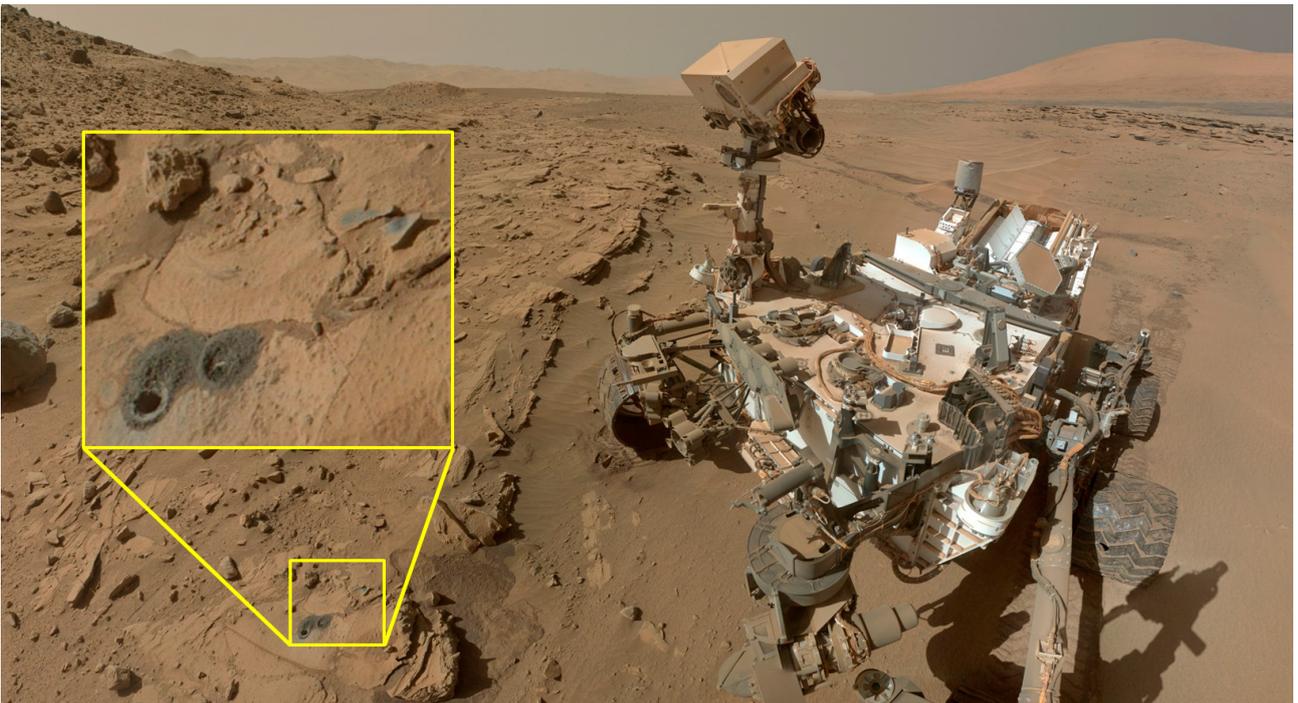
*In the years 2013 and 14 the MPS contributed for example to the exploration of conglomerates and of a large Aeolian ripple. Conglomerates are fluvial deposits of rounded clasts with a broad size distribution. A series of conglomerates were discovered (for the first time on Mars!) right at Curiosity's landing site and attest to sustained over-land flow of liquid water. These conglomerates play a major role in the interpretation of the early depositional environment of Gale crater, during the first hundreds of million years after its formation.*

*About 100 m East of touch down a large ripple of windblown soil (called Rocknest sand shadow) was examined by the entire science payload onboard the rover. This campaign was important to test all instruments and established an important link to data sets from previous missions. New discoveries were made thanks*



**Abb. 2:** Sandsteine in der Kimberley-Region im Vordergrund und der von dunklen Dünen umgebene Zentralberg im Hintergrund (Sol 580, 21. März 2014, NASA/JPL, PIA19839).

*Fig. 2: Kimberley sandstones in the foreground, central mound enlaced by dark dunes in the background (Sol 580, 21-Mar-2014, NASA/JPL, PIA19839).*



**Abb. 3:** „Rover-Selfie“, das im Zeitraum Sol 613-621 (Apr./May-2014) aufgenommen wurde (NASA/JPL, PIA18390). Das Mosaik besteht aus mehr als 30 Bildern. Das Areal, das die Bohrlöcher enthält, ist vergrößert (im gelb gerahmtem Fenster) dargestellt. Man beachte auch das dunkle Gestein in der oberen rechten Ecke dieses Fensters (Beobachtungsobjekt „Stephen“), einer Gesteinsoberfläche, die durch die Staubentfernungsbürste an Bord des Rovers gereinigt und chemisch charakterisiert wurde.

*Fig. 3: „Selfie“ of the rover acquired in the Sol range 613-621 (Apr./May-2014, NASA/JPL, PIA18390). This mosaic is composed of more than 30 images. The drill area is magnified in the yellow framed inset. Note also dark rocks in the upper right of the inset (rock target “Stephen”, cleaned by the Dust Removing Tool (DRT) onboard the rover and studied extensively by remote sensing and contact science instruments).*

die Messungen mit Datensätzen früherer Missionen abgeglichen. Neue Entdeckungen wurden dank experimenteller Techniken möglich, die bisher noch nie in-situ an der Oberfläche des Mars zum Einsatz gekommen sind, z.B. Röntgenbeugung, Laser Induced Breakdown Spectroscopy [LIBS]. Beispielsweise wurden die dominierenden Minerale (weitgehend basaltisch) über die chemische Zusammensetzung und die Gitterparameter identifiziert. Des Weiteren wurde die chemische Verfestigung der obersten Schichten charakterisiert, die diese Rippel in Position hält, während Dünen und Rippel näher am Zentralberg des Kraters wandern.

Curiosity ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt weiterhin voll funktionstauglich. Der „Fluss“ der wissenschaftlichen Entdeckungen reißt nicht ab und ist im Laufe der Mission stetig angeschwollen dank der zunehmenden Erfahrung bei der Steuerung des Rovers, dank verbesserter autonomer Steuerungs-Software und dank außergewöhnlicher Führungsqualitäten und Logistik.

*to experimental techniques that so far had never been applied in-situ on the Martian surface (e.g. x-ray diffraction, Laser Induced Breakdown Spectroscopy [LIBS]). As an example the major minerals in the ripple material were identified (fairly basaltic mineralogy) and characterized in terms of chemical composition and lattice parameters of the minerals. Furthermore the chemical induration in the top most parts of the ripple was characterized that makes the ripple immobile (as opposed to moving dark dunes closer to the central mound).*

*Curiosity remains healthy as of now. Science return continues and has been continuously accelerating over the course of the mission thanks to increasing experience in commanding the rover, improving autonomous software, and superior leadership and logistics.*

**Team in 2013/2014:** .....

Walter Goetz, Urs Mall, Wojciech Markiewicz, Eugene Shalygin, Alexander Basilevsky

**Ausgewählte Publikationen /Selected publications** .....

Blake D. F., Morris R. V., [...] Goetz W. et al. (2013): Science 341, 6153, id 1239505:  
*Curiosity at Gale Crater, Mars: Characterization and Analysis of the Rocknest Sand Shadow*

Goetz W., Madsen M. B., Edgett K. S. et al. (2013): Geophys. Res. Abstracts, Vol. 15, EGU2013-2179, EGU General Assembly: *Compositional Variations of Rocknest Sand, Gale Crater, Mars*

Hamilton V. E., Vasavada A. R., [...], Goetz W. et al. (2014): J. Geophys. Res. – Planets, 119, 4, 745 (25 pp):  
*Observations and preliminary science results from the first 100 sols of MSL REMS ground temperature sensor measurements at Gale Crater*

Meslin P.-Y., Gasnault O., [...] Goetz W. et al. (2013): Science 341, 6153, id. 1238670:  
*Soil Diversity and Hydration as Observed by ChemCam at Gale Crater, Mars*

Yingst R. A., Kah L. C., [...] Goetz W. et al. (2013): J. Geophys. Res. – Planets, 118, 11, 2361 (19 pp):  
*Characteristics of pebble- and cobble-sized clasts along the Curiosity rover traverse from Bradbury Landing to Rocknest*

Williams R. M. E., Grotzinger J. P., [...] Goetz W. et al. (2013): Science, 340, 1068 (4 pp):  
*Martian Fluvial Conglomerates at Gale Crater*

# Die Atmosphäre der Planeten

## *Planetary Atmospheres*

### Forschungsgebiet

Die Atmosphären der Planeten im Sonnensystem sind recht unterschiedlich. Zunächst bildeten sich die vier äußeren Planeten, auch Gasriesen genannt, durch Akkretion von Material im äußeren Sonnensystem. Die Hauptbestandteile ihrer Atmosphären sind Wasserstoff und Helium. Die vier inneren Planeten werden als erdähnlich oder terrestrisch bezeichnet, womit allerdings in erster Linie der Aufbau der festen Bestandteile gemeint ist. In ihrer Entstehungsphase war es auf den Oberflächen so heiß, dass nahezu alle flüchtigen Bestandteile und somit die Atmosphären ins All entwichen sind. Erst in einer späteren Phase lieferten Einschläge von Körper aus dem äußeren Sonnensystem die Elemente aus denen sich die heutigen Atmosphären bildeten. Deren ursprüngliche Hauptbestandteile waren Kohlendioxid, Wasserdampf und Stickstoff. Während es auf der Venus zu heiß und auf dem Mars zu kalt war, um über längere Zeiträume flüssiges Wasser zu bilden, löste sich in den Erdozeanen ein Großteil des Kohlendioxids auf und ist heute in Form von Karbonaten im Gestein gebunden. Stickstoff wurde darum zum häufigsten Bestandteil der Erdatmosphäre. Die später einsetzende Photosynthese führte schließlich zur Bildung der heutigen Sauerstoffkonzentration. Kohlendioxid und Stickstoff stellen nach wie vor den Hauptbestandteil der Venus- und Marsatmosphäre dar, der Wasserdampf wurde durch Photodissoziation (Venus und Mars) bzw. Ausfrieren (Mars) zum Spurenstoff.

### *Research area*

*The atmospheres of the planets in the solar system are quite different. The four outer planets, called gas giants, initially formed by accretion of material from the outer solar system. The main constituents of their atmospheres are hydrogen and helium. The four inner planets are called terrestrial planets mainly due the similar composition of their solid constituents. When the terrestrial planets formed, their very hot upper layer forced any volatile components including their atmospheres to escape to space. In a later phase, atmospheric forming volatiles from the outer cool region of the solar system were massively delivered by impacts. The initial composition of the terrestrial atmosphere of Venus, Earth and Mars was dominated by carbon dioxide, water vapor and nitrogen. While it was too hot on Venus and too cold on Mars to form liquid water over longer periods, in the Earth ocean carbon dioxide started to dissolve and was slowly transformed into carbonates in rocks. Nitrogen remained the most abundant gas in the Earth atmosphere. Later photosynthesis made molecular oxygen the second abundant gas. In the atmospheres of Mars and Venus, carbon dioxide and nitrogen are still the most abundant constituents. Since water vapor was either frozen out (Mars) or photolyzed (Venus and Mars) it became a trace gas in present days.*

## Mars

Uns gelang der erste Nachweis von atomarem Sauerstoff in der Marsatmosphäre überhaupt. Die Beobachtungen wurden im Frühjahr 2014 mit dem GREAT Instrument auf SOFIA auf einer Frequenz von 4745 GHz durchgeführt und zeigten eine Säulendichte von  $9.0 \pm 1.6 \times 10^{-16} \text{cm}^{-2}$ . Dieser Wert ist ca. 2–3 mal kleiner als durch photochemische Modelle vorhergesagt. OI spielt in der Sauerstoffchemie der Marsatmosphäre mit bisher nicht verstandenen Quellen und Senken eine wichtige Rolle.

Das vom MPS entwickelte globale Zirkulationsmodell der Marsatmosphäre wurde um die atmosphärische Schicht der Thermosphäre erweitert, so dass jetzt der Höhenbereich von Boden bis ca. 150 km Höhe simuliert werden kann. Medvedev et al. (2013) kamen zu dem erstaunlichen Ergebnis, dass sich vertikal ausbreitende Schwerewellen stark zur Kühlung der oberen Atmosphäre beitragen. Durch diese Erkenntnis können wir jetzt „Aerobraking“, d.h. das Abbremsen von Satelliten durch Eintauchen in die obere Marsatmosphäre genauer vorausberechnen. Darüber hinaus konnten wir mit Modellrechnungen (Kuroda et al. 2013) zeigen, dass die Bildung von CO<sub>2</sub> Eiswolken über den Polkappen durch den sich schlängelnden Polarnachtjet und Kelvinwellen moduliert wird, die regelmäßig im Herbst und Winter auftreten. Mit diesem Modell können wir Schneefälle auf Mars vorhersagen.

## Jupiter und Exo-Jupiter

Mit den Herschel Instrumenten HIFI und PACS haben wir die vertikale und horizontale Verteilung von Wasser in der Jupiterstratosphäre bestimmt. Gleichzeitig wurde zur Bestimmung der Temperaturverteilung vom Boden aus mit der Infrared Telescope Facility (IRTF) der NASA das v4 Emissionsband von Methan gemessen. Die Messungen zeigen, dass Wasser nur bei Atmosphärendrücken kleiner 2 mbar vorkommt und dessen horizontale Verteilung um den Faktor 2–3 von Süden nach Norden abfällt (Abb. 1). Die maximale Emission bei ca. 15° Süd stimmt mit dem Ort des von IRTF detektieren warmen stratosphärischen Gürtel überein. Die breitenabhängige Temperaturverteilung

## Mars

*The first ever detection of atomic oxygen (OI) in the Martian atmosphere in spring 2014 was achieved with the GREAT Instrument on SOFIA at a frequency of 4745 GHz. A column density of  $9.0 \pm 1.6 \times 10^{-16} \text{cm}^{-2}$  was determined, a factor of 2–3 lower than predicted by state-of-the-art photochemical models. OI is an important measure for the oxygen chemistry in the Martian atmosphere and its unexplained sources and sinks.*

*The MPS Mars-global circulation model has been extended to the thermosphere and covers now altitudes from ground to about 150 km altitude. Medvedev et al. (2013) found the amazing result that vertically propagating gravity waves produce cooling and density changes in the lower thermosphere comparable to the effect of IR cooling by CO<sub>2</sub>. This new insight allows for the first time accurate predictions of the effect of aerobraking maneuvers of satellites orbiting Mars. Furthermore, Kuroda et al. (2013) modeled that the formation of CO<sub>2</sub> ice clouds over the polar caps is modulated by the meandering polar night jet and by Kelvin waves regularly occurring from autumn to winter. Based on this finding, we developed the first weather forecast model for Mars that allows precise predictions of CO<sub>2</sub> snowfalls.*

## Jupiter and Exo-Jupiters (warm gas giants)

*We observed the spatial distribution of the water emission in Jupiter's stratosphere with the Heterodyne Instrument for the Far Infrared (HIFI) and the Photodetector Array Camera and Spectrometer (PACS) onboard Herschel to constrain its origin. In parallel, we monitored Jupiter's stratospheric temperature with the NASA Infrared Telescope Facility (IRTF) to separate temperature from water variability. We found that water is restricted to pressures lower than 2 mbar. Its column density decreases by a factor of 2–3 between southern and northern latitudes, consistently between the HIFI and the PACS maps (Fig. 1). We infer that an emis-*

Abb. 1: Säulendichte von Wasserdampf (in  $\text{cm}^{-2}$ ), bestimmt aus 4518 GHz Spektren. Jupiter und seine Rotationsachse werden durch die schwarzen Linien dargestellt. Der graue Kreis repräsentiert den Strahl.

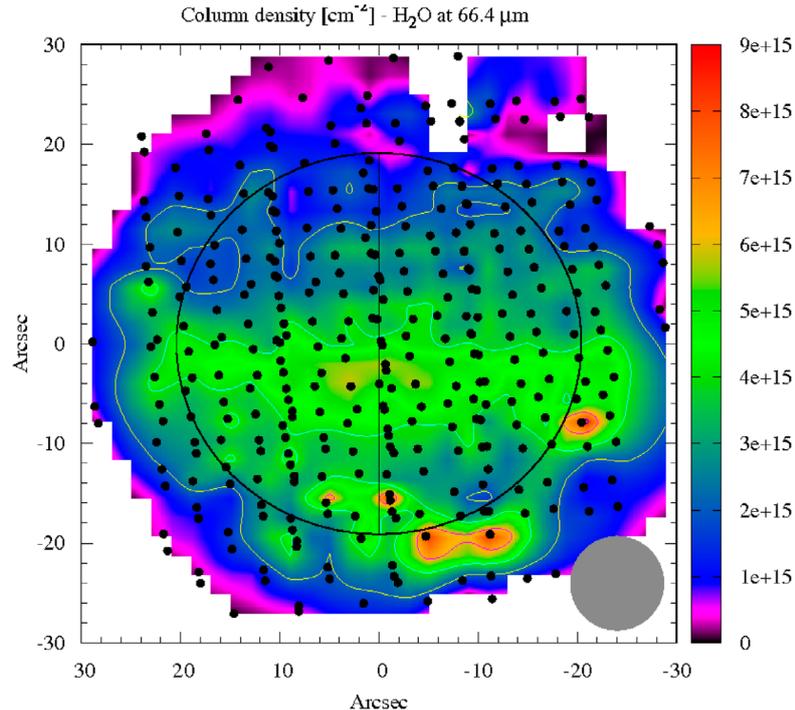


Fig. 1: Column density of water (in  $\text{cm}^{-2}$ ), as derived from the 4518 GHz map. Jupiter is represented by the black ellipse and its rotation axis is also displayed. The beam is represented by the grey filled circle..

kann diese Nord-Süd Asymmetrie im Wasserdampf nicht erklären. Aufgrund der gemessenen horizontalen und vertikalen Verteilung kann man interplanetaren Staub als Quelle des stratosphärischen Wassers ausschließen. Unsere Modellrechnungen zeigen, dass mehr als 95% des heute bestimmen Wassers aus dem SL9 Einschlag stammen.

Begleitend zum Engagement des MPS in der JUICE mission mit dem PI Submillimetre Wave Instrument (SWI) und der Beteiligung an dem Exoplanet Characterization Observatory (EChO), wurde ein neues Modell für Jupiters Atmosphärendynamik über dem 2 bar Niveau entwickelt (Medvedev et al, 2013, Kuroda et al. 2014). Dieses weltweit erste 3d Modell seiner Art kann Daten vom Cassini Satelliten, die während Jupiter-Vorbeiflügen gemessen wurden, präzise reproduzieren. Wir sind damit in der Lage, die Zirkulation in Jupiters Stratosphäre besser zu verstehen. Das Modell wurde auch erfolgreich zur Simulation der Atmosphären von Exoplaneten eingesetzt.

*tion maximum seen around 15° S is caused by a warm stratospheric belt detected in the IRTF data. Latitudinal temperature variability cannot explain the global north-south asymmetry in the water maps. From the latitudinal and vertical distributions of water in Jupiter's stratosphere, we rule out interplanetary dust particles as its main source. Furthermore, we demonstrate that Jupiter's stratospheric water was delivered by the SL9 comet and that more than 95% of the observed water comes from the comet according to our models.*

*Along with the selection of the JUICE mission, the Submillimetre Wave Instrument (SWI) and our involvement in the Exoplanet Characterization Observatory (EChO), we developed a new general circulation model of Jupiter's atmosphere above the 2 bar level (Medvedev et al, 2013, Kuroda et al. 2014). This worldwide first full 3d model precisely reproduces observations of the Cassini Spacecraft during the Jupiter flyby and enabled us to understand the physical processes forcing Jupiter's stratospheric circulation. The model was also used to simulate the atmospheres of extrasolar gas giants.*

Abb. 2: PACs Spektrum von Titan, dargestellt als Verhältnis Linie/Kontinuum. Die farbigen Striche oben deuten ausgewählte Spektrallinien an. Unten: Best-fit Spektren mit angedeuteten Signaturen von  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{HCN}$  and  $\text{H}_2\text{O}$ .

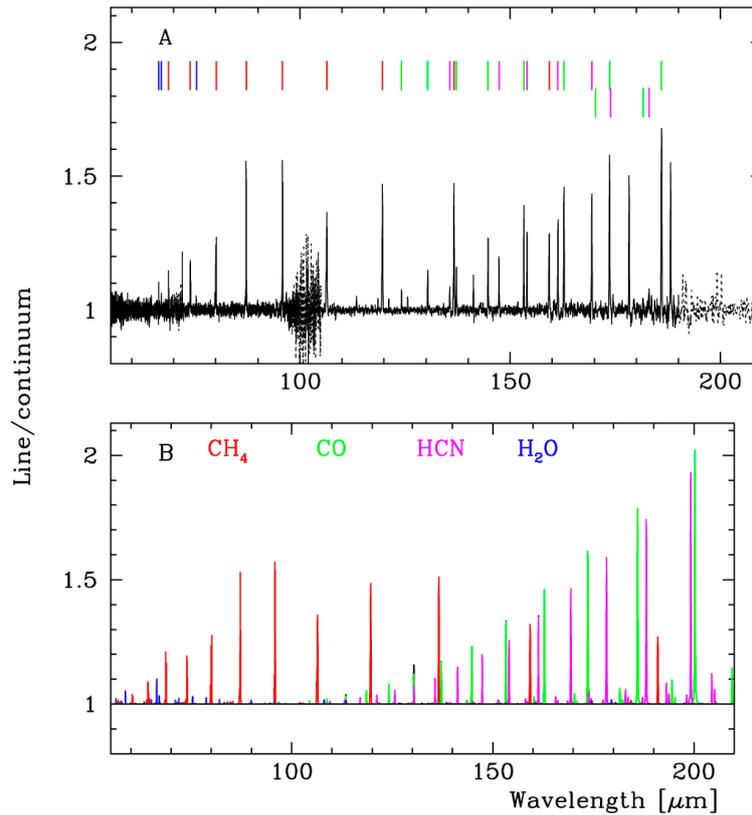


Fig. 2: PACS spectrum of Titan, expressed in line-to-continuum ratios. The colored marks at the top show the selected lines and transitions. Bottom: Best-fit spectra indicating the signatures of  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{HCN}$  and  $\text{H}_2\text{O}$ .

## Titan

Herschel Beobachtungen haben erstmals spektrale Daten der Titanatmosphäre im Bereich von 50 bis 210  $\mu\text{m}$  Wellenlänge geliefert (Abb. 2), aus denen die Konzentrationen von  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{HCN}$  und  $\text{H}_2\text{O}$  abgeleitet sowie die Isotopenverhältnisse von  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  zu  $124 \pm 58$  ( $\text{CO}$ ) und  $66 \pm 35$  bestimmt werden konnten (Rengel et al. 2014).

Die Erweiterung unseres non-LTE Strahlungstransport Modells auf die Titanatmosphäre zeigte, dass die allgemeine Annahme des thermosphärischen Energiegleichgewichts, nämlich die LTE Verteilung der Rotationslinien von  $\text{HCN}$  in über 1000 km Höhe, entsprechend einem Druck von  $\sim 0.025$  nbar nicht mehr zutrifft. (Rezac et al., 2013).

## Titan

*Herschel PACS observations provided the first highly resolved spectrum of Titan in the Far Infrared between about 50 to 210  $\mu\text{m}$  wavelengths (Fig. 2). The observation allowed to determine molecules like  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{HCN}$  and  $\text{H}_2\text{O}$  with much higher precision than before. Furthermore, the isotopic ratios of  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  in  $\text{CO}$  and  $\text{HCN}$  were determined to be  $124 \pm 58$  and  $66 \pm 35$  respectively (Rengel et al. 2014).*

*The extension of our non-LTE radiative transfer model for planetary atmospheres to Titan showed that the common model assumption for the thermospheric energy balance, namely the LTE distribution of rotational lines of  $\text{HCN}$ , is generally not valid above about 1100 km, or  $\sim 0.025$  nbar, which will affect the derived thermospheric cooling rates. (Rezac et al., 2013).*

## Uranus

Die 922 GHz CO-Linie konnte erstmals in der Uranusatmosphäre durch Messungen mit Herschel-HIFI nachgewiesen werden. Die Analyse dieser Daten mit empirischen, bzw. Diffusionsmodellen legen nahe, dass das CO einen extraplanetaren Ursprung hat. Eine Strahlungstransferrechnung mit einem konstanten CO Profil oberhalb eines Druckbereichs von 100 mbar und dem Volumenmischungsverhältnis (VMR) von  $7.1-9.0 \times 10^{-9}$  reproduziert die gemessene stratosphärische Linie für ein gegebenes Temperaturprofil. Zur Bestimmung des Sauerstoff- zu Wasserstoff Verhältnisses (O/H) haben wir ferner ein thermochemisches Modell der Uranustroposphäre benutzt, das an seiner oberen Grenze ein CO VMR von  $2.1 \times 10^{-9}$  durch Transport aus der unteren Atmosphäre angibt. Daraus schließen wir, dass O/H in Uranus weniger als 500-mal dem solaren Wert entspricht. Da das durchschnittliche VMR von der Stratosphäre zur Troposphäre hin stark abfällt, liegt die Schlussfolgerung einer externen Quelle nahe (Cavalié et al. 2014).

## Neptun

Durch bodengebundene Beobachtungen der Neptunatmosphäre wollten wir etwaige Schwankungen des HCN Vertikalprofils während der letzten 14 Jahre bestimmen. Aus den gemessenen Spektren haben wir durch Inversionsrechnungen einen ausgeprägten Abfall dieses Moleküls unterhalb von 0.6 mbar bestimmt. Diese Beobachtung ist konsistent mit Messungen, die bereits 1998 durchgeführt wurden (Rezac et al, 2014).

## Uranus

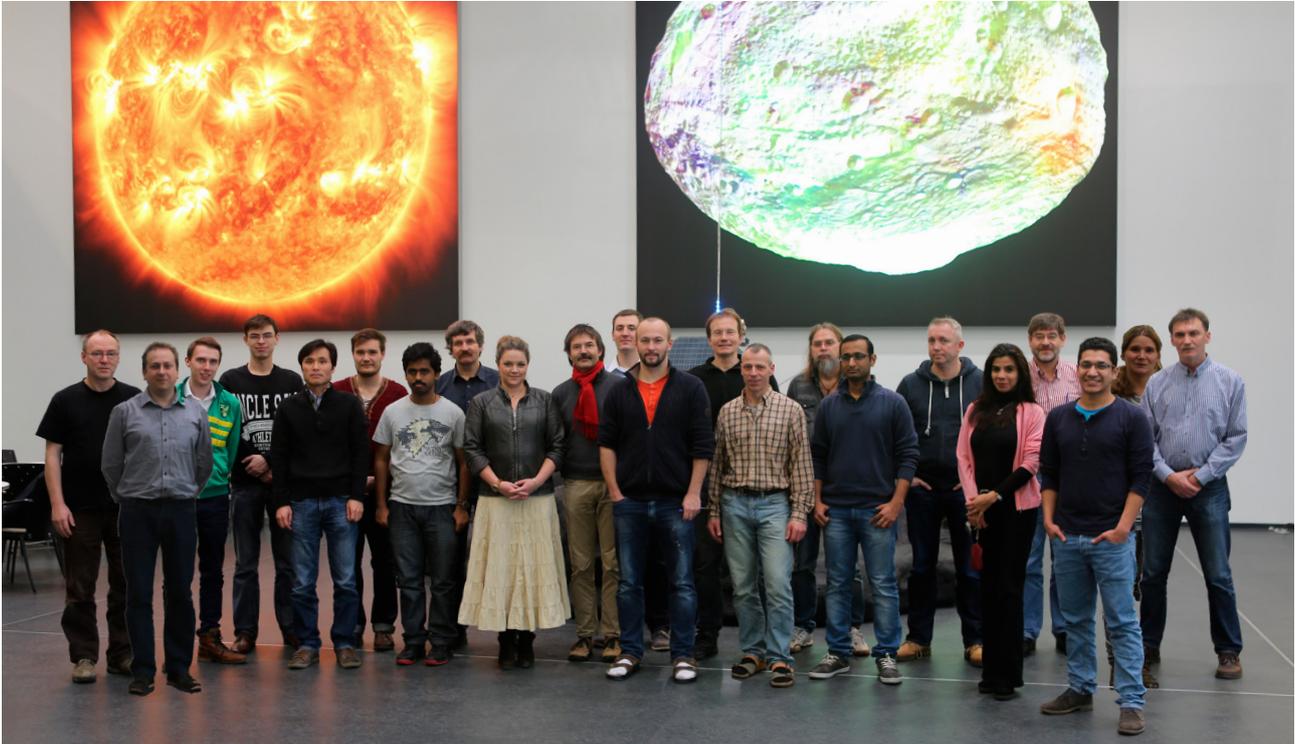
*We have detected the 922 GHz rotational line in Uranus for the first time using Herschel-HIFI. With both, empirical and diffusion models we found that CO has an external origin. We also used a thermochemical model of its troposphere to derive an upper limit on the oxygen-to-hydrogen (O/H) ratio in the deep atmosphere of Uranus. An empirical profile in which CO is constant above the 100 mbar level with a mole fraction of  $7.1-9.0 \times 10^{-9}$ , depending on the adopted stratospheric thermal structure, reproduces the data. Taking an internal source model upper limit of a mole fraction of  $2.1 \times 10^{-9}$  we find, based on our thermochemical computations, that the deep O/H ratio of Uranus is less than 500 times solar. The average mole fraction of CO decreases from the stratosphere to the troposphere and thus strongly advocates for an external source of CO in Uranus (Cavalié et al. 2014).*

## Neptune

*Ground-based submillimeter wave observations using the Heinrich-Hertz telescope were performed in order to determine changes in the vertical distribution of the HCN molecule in Neptune's atmosphere during the last 14 years. We determined a pronounced HCN decrease below the 0.6 mbar level, consistent with former observations. No detectable change in the HCN profile could be derived since 1998 (Rezac et al, 2014).*

Team in 2013/2014: .....

Paul Hartogh, Thibault Cavalié, Bo Gao, Christopher Jarchow, Alexander Medvedev, Miriam Rengel, Ladislav Recaz, Oliver Stenzel, Wojciech Markiewicz, Eugene Shalygin, Jiseh Sethunad



Ausgewählte Publikationen / *Selected publications* .....

- Cavalié T., Feuchtgruber H., Lellouch E., de Val-Borro M. et al. (2013): *A&A.*, 553, A21 (16 pp):  
Spatial distribution of water in the stratosphere of Jupiter from Herschel HIFI and PACS observations
- Cavalié T., Moreno R., Lellouch E., Hartogh P. et al. (2014): *A&A* 562, A33 (6 pp):  
The first submillimeter observation of CO in the stratosphere of Uranus
- Kuroda T., Medvedev A. S., Kasaba Y., Hartogh P. (2013): *Geophys. Res. Lett.*, 40, 1484 (5 pp):  
Carbon dioxide ice clouds, snowfalls, and baroclinic waves in the northern winter polar atmosphere of Mars
- Kuroda T., Medvedev A. S., Hartogh P. (2014): *Icarus*, 242, 149 (9 pp):  
Parameterization of radiative heating and cooling rates in the stratosphere of Jupiter
- Medvedev A. S., Sethunadh J., Hartogh P. (2013a): *Icarus*, 225, 228 (8 pp):  
From cold to warm gas giants: A three-dimensional atmospheric general circulation modeling
- Medvedev A. S., Yigit E., Kuroda T., Hartogh P. (2013b): *J. Geophys. Res.*, 118, 2234 (13 pp):  
General circulation modeling of the Martian upper atmosphere during global dust storms
- Rengel M., Sagawa H., Hartogh P., Lellouch E. et al. (2014): *A&A*, 561, A4 (6 pp)  
Herschel/PACS spectroscopy of trace gases of the stratosphere of Titan
- Rezac L., Kutepov A. A., Faure A., Hartogh P., Feofilov A. G. (2013) *A&A*, 555, A122 (4 pp):  
Rotational non-LTE in HCN in the thermosphere of Titan: Implications for the radiative cooling,
- Rezac L., de Val-Borro M., Hartogh P., Cavalié T., et al. (2014): *A&A* 563, A4 (5 pp):  
New determination of the HCN profile in the stratosphere of Neptune from millimeter-wave spectroscopy

# Die Plasma-Umgebung der Planeten

## *Planetary Plasma Environment*

### **Forschungsgebiet**

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

Im Bereich der terrestrischen Planeten (Merkur, Venus, Erde und Mars) konzentriert sich die Forschung auf den Einfluss der Sonnenstrahlung und des Sonnenwindes auf die Planetenentwicklung. Bei den Gasriesen Jupiter und Saturn versuchen wir, das Wechselspiel zwischen planetaren Magnetfeldern, Exosphären und Monden zu verstehen. Im Folgenden beschreiben wir einige Forschungsergebnisse der Jahre 2013 und 2014 – beginnend bei Merkur bewegen wir uns auswärts bis zu den Grenzen des Sonnensystems.

### ***Research area***

*The planets and moons of the solar system interact with the Sun in many ways. While the gravitational forces determine the planetary orbits, the composition of surfaces and atmospheres of planets and moons is modified by solar radiation and solar wind. This interaction is the focus of the research of the Planetary Plasmas Group at MPS. Since the gases in the exospheres, the outermost part of the atmospheres of planets and moons, are largely ionized, the research falls into the domain of ionized gases or plasma physics.*

*For the terrestrial planets (Mercury, Venus, Earth and Mars) the current research focuses on the influence of the solar radiation and of the solar wind, a stream of charged particles, on planetary evolution. For the gas giants Jupiter and Saturn we explore the interplay between planetary magnetic field, exospheres and moons. In the following we describe some research highlights from the years 2013 and 2014, starting at Mercury and working our way outside to the outer limits of the solar system.*

## Wichtige Ergebnisse

### Venus – eine Ionosphäre unter Druck

Der Planet Venus hat eine sehr dichte und heiße Atmosphäre, die nicht durch ein inneres Magnetfeld vor dem Sonnenwind geschützt ist. Da aber die obere Atmosphäre durch die solare UV-Strahlung ionisiert wird, bildet sich eine elektrisch leitende Region (Ionosphäre), die das Magnetfeld des Sonnenwindes und infolgedessen auch den Teilchenstrom um den Planeten lenkt. Die Instrumente an Bord des europäischen Venus-Express-Satelliten, der Venus von 2006 bis 2014 umkreiste, erlaubten es, die verschiedenen Regionen dieser sogenannten induzierten Magnetosphäre zu charakterisieren. Das MPS lieferte nicht nur eine Kamera, sondern auch Elektronik für die Ionen- und Neutralteilchen-Sensoren auf Venus Express.

In einer Reihe von Studien haben wir die komplexe Struktur der induzierten Felder und Ströme in der Ionosphäre und im Magnetschweif des Planeten untersucht. Abb. 1 illustriert die Kräfte, die elektrische Ströme in der Wechselwirkungsregion zwischen Sonnenwind und Ionosphäre verursachen.

## Major results

### Venus – an ionosphere under pressure

The planet Venus has a very dense and hot atmosphere which is not protected by any internal magnetic field from solar wind. However, induction processes in the electrically conducting ionized upper atmosphere nevertheless deflect the magnetic field carried by the solar wind around the planet. The instruments on the European spacecraft Venus Express, which orbited Venus from 2006 to 2014, allowed to characterize the different regions of this so-called induced magnetosphere. The MPS contributed not only to the optical instrumentation but also to the ion and neutral atom analyzer ASPERA-4 onboard Venus Express.

In a series of papers we analyzed the complex structure of the induced fields and currents in the ionosphere and magnetotail of the planet. Fig. 1 illustrates the forces leading to different currents in the interaction region between solar wind and ionosphere. The pressure exerted by the solar wind onto the ionosphere leads to a

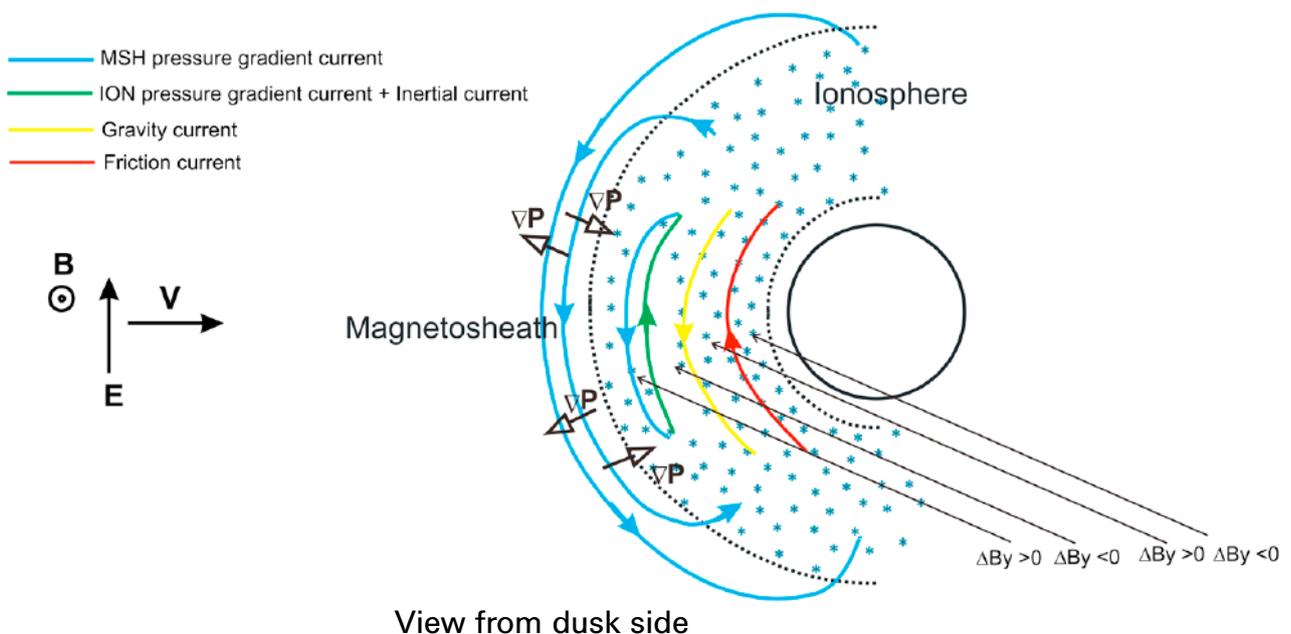


Abb. 1: Skizze der in der Ionosphäre der Venus erzeugten Ströme. Der Anströmdruck des Sonnenwindes verursacht einen Druckgradienten und einen entsprechenden Strom zwischen Magnetosheath und Ionosphäre. Weitere Ströme entstehen durch planetare Ionen, Gravitations- und Reibungskräfte.

Fig. 1: Sketch of electric currents in the magnetized Venus ionosphere driven by different forces. Interplay of these forces and their variations with variations in solar wind and the interplanetary magnetic field determine the plasma flow and field configuration within the ionosphere (from [Dubinin et al., 2014a]).

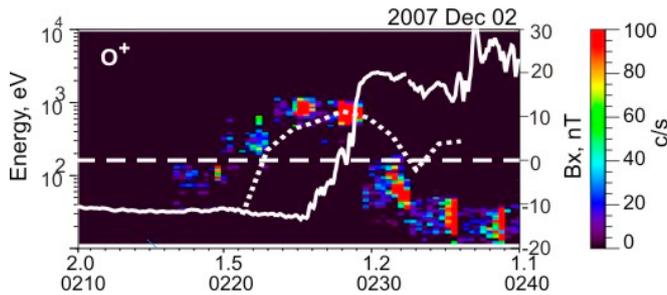


Abb. 2: Umkehrung der Bx-Komponente des Magnetfeld und Energiespektren der Sauerstoffionen bei der Passage der Plasmaschicht im Magnetschweif der Venus. Gepunktete Kurven zeigen den Energiezuwachs der Ionen im Model von Dubinin et al., 2013

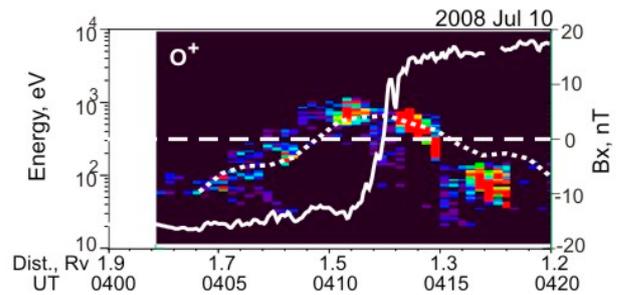


Fig. 2: Variations in the Bx component of the magnetic field and energy spectra of oxygen ions at crossings of the plasma sheet of the Venusian tail. Dotted curves show the energy gained by oxygen ions in the model by [Dubinin et al., 2013].

Der Anströmdruck des Sonnenwindes erzeugt einen Strom durch den Druckgradienten zwischen Magnetosheath und Ionosphäre. Der Gegendruck der planetaren Ionen erzeugt einen entgegengesetzten Strom. Zusätzlich treten Gravitations- und Reibungsströme in der Ionosphäre auf.

Obwohl Venus kein inneres Magnetfeld besitzt formt sich um den Planeten ein langer Magnetschweif durch die Faltung des interplanetaren Feldes. Die dadurch entstehenden magnetischen Spannungen können Ionen wie in einer Düse beschleunigen. Da diese Kräfte in der Schweifmitte am stärksten sind, beobachten wir bei der Passage des Schweifs eine Glockenform der Energie-Zeit Spektrogramme (Abb. 2). Ein einfaches Model [Dubinin et al., 2013] kann diesen Effekt erklären. Wir haben auch beobachtet, dass die Plasmaschicht asymmetrisch ist (Fig. 3) und dass diese Asymmetrie durch das konvektive elektrische Feld ( $-v \times B$ ) des Sonnenwindes bestimmt wird. Dies bedeutet, dass die Faltung des Magnetfeldes um den Planeten asymmetrisch erfolgt [Dubinin et al., 2014a].

## Erde – Quellen und Verlust von Plasma

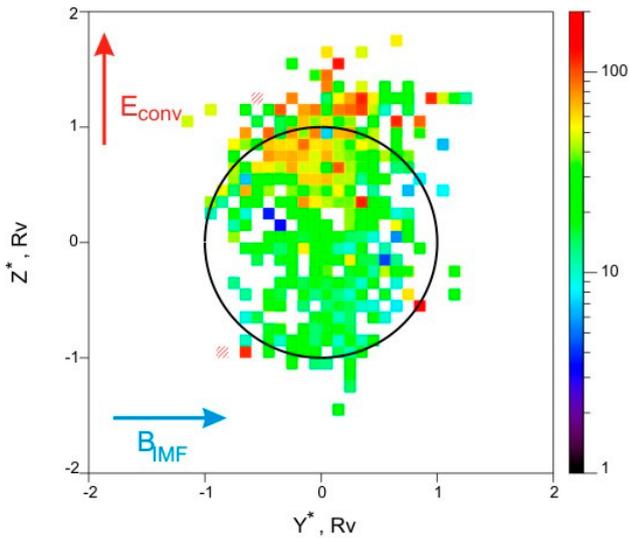
Die Plasma-Umgebung der Erde wird von zwei Hauptprozessen bestimmt: dem Transport des Sonnenwind-Plasmas durch die Magnetopause und dem Ausfluss von Ionen aus der Ionosphäre. Die relativen Beiträge dieser Quellen hängen stark von der geomagnetischen Aktivität ab. Der

*magnetosheath pressure gradient current. The counter pressure by the planetary heavy ions leads to an ion pressure gradient current. In addition gravity and friction currents are important in the lower ionosphere.*

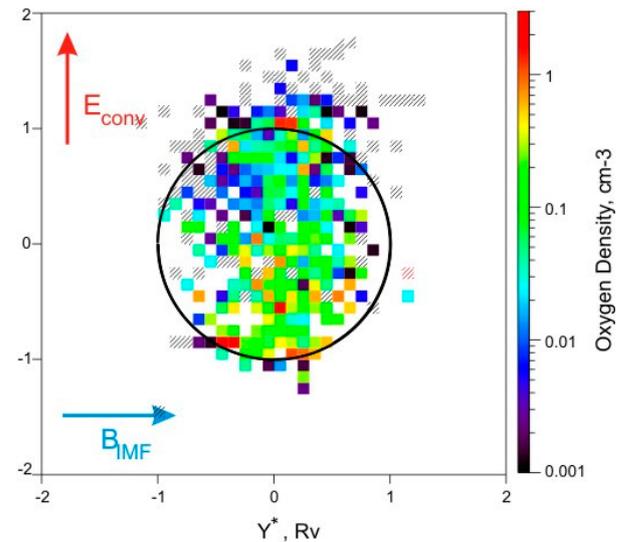
*Although Venus has no global intrinsic magnetic field it possesses a long magnetotail formed by draping of the interplanetary magnetic field lines around the planet. The resulting strong magnetic field tensions function like a jet-engine accelerating the ionospheric plasma. Since this force is the strongest in the center of the tail the energy-time spectrograms of the ions display a bell-shape signature while the spacecraft crosses the plasma sheet (Fig. 2). A simple model describing such a process of ion acceleration [Dubinin et al., 2013] well describes the observed features. We also found that the structure of the plasma sheet occurs very asymmetrical (Fig. 3) and such an asymmetry is controlled by the direction of the motional electric field ( $-v \times B$ ) in the solar wind implying a difference in the magnetic field draping between the hemisphere pointing in the direction of the motional electric field and the opposite hemisphere [Dubinin et al., 2014a].*

## Earth – sources and escape of plasma

*The Earth's plasma environment is maintained by two main processes; transport of solar wind plasma across the magnetopause on one hand, and outflow of ionized material from the ionosphere on the other hand. The relative contributions of these two sources vary significantly*



**Abb. 3:** Kartierung der Geschwindigkeit und Dichte von Sauerstoffionen im Magnetschweif der Venus. Die  $Z^*$ -Achse ist in Richtung des elektrischen Konvektionsfeldes, die  $Y^*$ -Achse senkrecht dazu in Magnetfeldrichtung. Eine starke Asymmetrie in Abhängigkeit vom elektrischen Feld wird sichtbar. Plasma in der E+ Hemisphäre ist weniger dicht aber schneller als in der E- Hemisphäre [Dubinin et al., 2013].



**Fig. 3:** Maps of the velocity and density of oxygen ions plotted as projections onto the plane perpendicular to the tail.  $Y^*$  axis is along the cross-flow component of the IMF and  $Z^*$  axis is along the motional electric field. A strong asymmetry in the plasma sheet characteristics in the E+ and E- hemispheres is observed. Plasma which fills the tail in the E+ hemisphere is less dense as compared to that in the E- hemisphere and flows with a higher speed [Dubinin et al., 2013].

Transport durch die Magnetopause ist am effizientesten, wenn das interplanetare Magnetfeld dem Erdfeld entgegen gerichtet ist. Der ionosphärische Quellfluss verändert sich mit der Sonneneinstrahlung und dem Niederschlag energiereicher Ionen.

Studien dieser Prozesse am MPS orientieren sich momentan an den Beobachtungen der Cluster-Mission, an der wir mit Instrumenten und Datenanalyse beteiligt sind. Abbildung 3 zeigt, wie verschiedene Ionensorten in der Magnetosphäre zirkulieren.

Die Kenntnis der chemischen Zusammensetzung der Ionen in der Erdmagnetosphäre und in der Plasmaschicht des Magnetschweifs ist wesentlich, um Transport-Prozesse und Instabilitäten zu verstehen. Die Aufladung der Magnetosphäre mit Schwerionen aus der Ionosphäre (besonders Sauerstoff) beeinflusst Struktur und Volumen der Plasma- und Stromschichten im Magnetschweif. Das hat große Auswirkungen auf die globale Dynamik der Magnetosphäre insbesondere bei Magnetstürmen und Substorms. Die Bildung und Auflösung

with geomagnetic activity. Transport across the magnetopause is most efficient when the geomagnetic field and the interplanetary magnetic field carried by the solar wind have opposite directions. The ionospheric source is primarily modulated by solar illumination and to some extent by the precipitation of energetic particles.

Studies of these processes are currently focused around observations from the Cluster mission, where MPS has been actively involved in both instrumentation and data analysis. Fig. 3 illustrates how different ion species of terrestrial origin are circulated in the magnetosphere.

Knowledge of the ion composition in the near-Earth's magnetosphere and plasma sheet is essential for the understanding of magnetospheric transport processes and instabilities. The presence of heavy ions of ionospheric origin in the magnetosphere, in particular oxygen, influences the plasma sheet bulk properties, current sheet thickness and its structure. This has profound consequences for the global magnetospheric dynamics, including geomagnetic storms and substorm-like events. The

des Ringstroms und der Strahlungsgürtel hängt ebenfalls von der Schwerionendichte ab. In Kronberg et al., 2014 berichten wir über neue Beobachtungen der Cluster-Mission und Modelle der Zirkulation von Schwerionen in der Magnetosphäre. Andererseits bestimmen Ionen niedriger Energie ( $E < 70\text{eV}$ ) die Plasmadichte in der Magnetosphäre und spielen damit auch eine große Rolle in der Dynamik. Unsere Beobachtungen zeigen, dass diese Ionen an den Polkappen, in den Lobes und auf der Tagseite der Magnetosphäre zusammen mit heißem Plasma vorkommen. Die Ionsphäre ist auch hier die Quelle dieser Ionen. In Li et al., 2013 haben wir den Transport von der Quellregion bis in die Lobes und weiter bis zur Plasmaschicht untersucht. Sowohl Transportzeit als auch Regionen des Transports hängen stark von der geomagnetischen Aktivität ab.

Das Magnetfeld der Erde schützt aber dabei im Prinzip die Atmosphäre vor Erosion durch den Sonnenwind. Dieser Schutz könnte aber während der Perioden der Feldumkehrung weniger effektiv sein. In Wei et al., 2014 haben wir untersucht, ob der verstärkte Sauerstoff-Ausfluss während längerer Zeiträume mit wiederholten Feldumkehrungen so stark gewesen sein kann, dass er ein Massensterben in der Tier- und Pflanzenwelt verursacht haben könnte. Neuere geologische Daten zeigen, dass im Phanerozoikum tatsächlich eine Korrelation zwischen der Häufigkeit der Feldumkehr, dem Sauerstoffgehalt der Atmosphäre und dem Massensterben mariner Lebewesen zu beobachten ist.

### **Mars – Erosion der Atmosphäre durch den Sonnenwind**

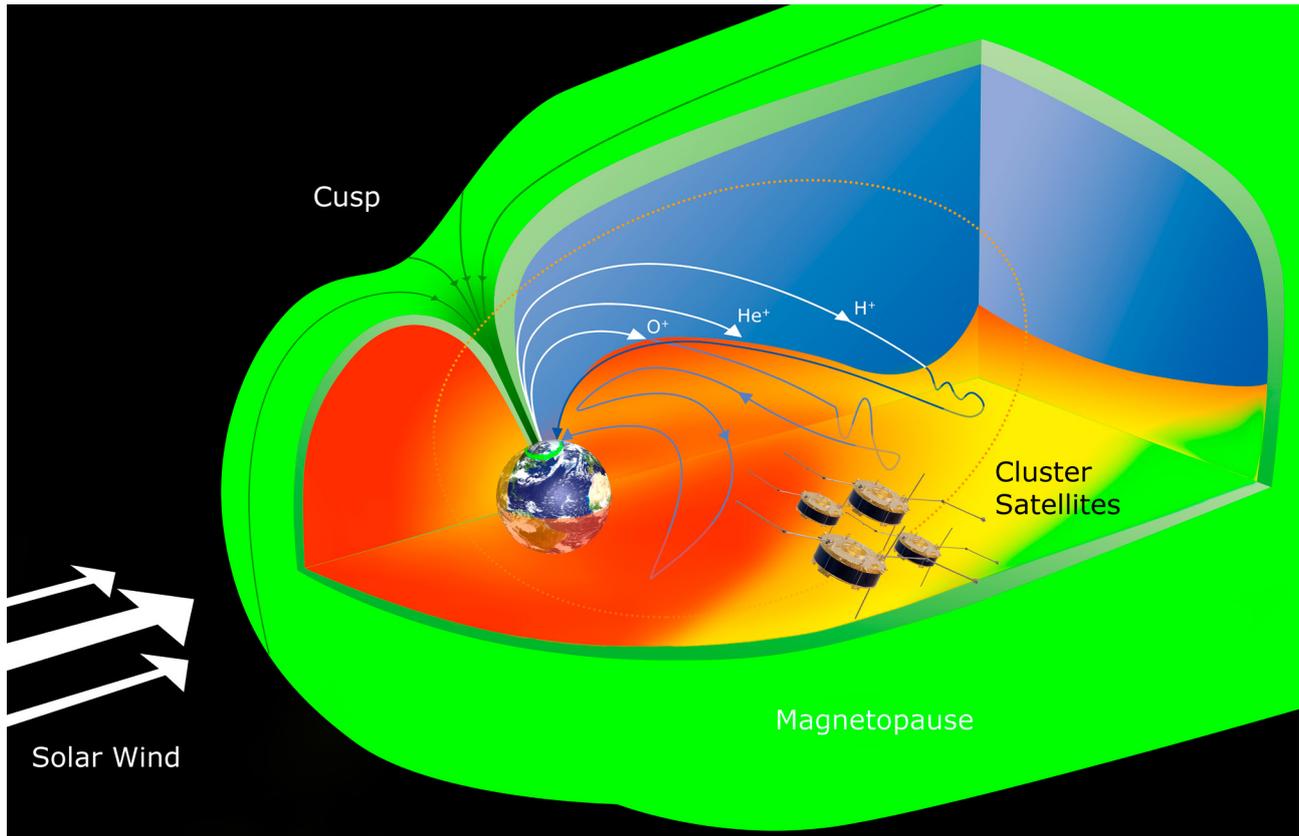
Die zentrale Frage hinsichtlich der Evolution der Mars-Atmosphäre ist die des Wasserverlustes besonders in der Frühzeit des Sonnensystems als der Sonnenwind noch stärker war als heute. Der Einschlag dichter Plasmawolken während koronaler Massenauswürfe (CMEs) gewährt uns Einblick in die Prozesse, die sich damals kontinuierlich abgespielt haben müssen. Ein sehr starker CME schlug im Juni 2011 in die Mars-Ionosphäre

*formation and demise of the ring current and the radiation belts are also dependent on the presence of heavy ions. [Kronberg et al., 2014] cover recent advances in Cluster observations and models of the circulation of heavy ions in the magnetosphere. On the other hand the low energy ( $E < 70\text{eV}$ ) ions dominate the population of plasma in the magnetosphere, and also play a significant role in dynamics of the magnetosphere. Observations have revealed the presence of low energy ions in Earth's polar caps, lobes, dayside magnetosphere and plasma sheet along with hotter plasma. The ionosphere is the main source region of these low energy ions. In [Li et al., 2013] we investigated the transport route of low energy ions from their source region to the magnetotail lobes and further to the plasma sheet. Both transport time and location highly depend on geomagnetic activity.*

*The magnetic field at Earth protects the planet and its ionosphere from the solar wind. However during the periods of reversals of the magnetic field such a screening might be not very efficient. We proposed [Wei et al., 2014] that accumulated oxygen escape forced by the solar wind during an interval of increased reversal rate of the geomagnetic field could have led to the catastrophic drop of the oxygen level which is known to be related to mass extinction. The newest data sets available for the Phanerozoic era showed that the reversal rate increased and the atmospheric oxygen level decreased when the marine diversity showed a gradual mass extinction lasting millions of years.*

### **Mars – atmospheric erosion by solar wind**

*The essential question concerning the evolution of the Martian atmosphere is how loss of atmospheric material, especially the constituents of water occurred in the earlier evolution of Mars when solar wind was much stronger than presently. Impact of dense solar plasma bubbles during Coronal Mass Ejections (CME) of the Sun can shed light on the processes of the solar wind interaction with Mars in past epochs. A very powerful CME impacted the Mar-*



**Abb. 4:** Zirkulation der schweren Ionen in der Magnetosphäre der Erde. Weiße und blaue Linien zeigen die Bahnen der Ionen, die aus der Polarregion (in Pfeilrichtung) strömen. Ein großer Teil dieser Ionen erreichen die zentrale Plasmaschicht des Magnetschweifs. Dort werden sie beschleunigt und füllen schließlich den Ringstrom und den Strahlungsgürtel der Erde.

*Fig. 4: Circulation of heavy ions in the Earth magnetosphere. White and blue lines represent the ion trajectories outflowing from the polar region. Arrows indicate direction of ion transport. A large fraction of the ions enter the tailside plasma sheet where they get accelerated and eventually contribute to the ring current and radiation belt population. (From [Kronberg et al., 2014])*

ein und verursachte starke Plasmawirbel, die von Mars Express beobachtet wurden [Morgan et al., 2014]. Die Ionosphäre war stark komprimiert und der subsolare Punkt höchster Plasmadichte verschob sich von 130km auf 100km Höhe. Bei einem Zenithwinkel von 70 Grad stieg das komprimierte Magnetfeld auf 200nT und die Ionosphäre oberhalb von 270km (Periapsis von Mars Express) wurde vollständig abgetragen. Die Ionosphäre in niedrigeren Höhen dehnte sich weit in den Magnetschweif aus. Das Dichtemaximum wurde noch bei 115 Grad Zenithwinkel beobachtet, während es sonst auf der Nachtseite vollständig verschwindet.

*tian ionosphere in June 2011 produced strong perturbations in the Martian space – observed by the Mars Express spacecraft [Morgan et al., 2014]. The ionosphere was strongly compressed and the subsolar peak altitude of the main layer which is nominally very stable at ~130 km, did move to ~100 km of altitude. The value of the draped magnetic field measured at solar zenith angle of ~70o did increase up to ~200 nT. The ionosphere at altitudes above ~270-300 km (periapsis of Mars Express) was probably eroded. The ionosphere at lower altitudes was also strongly expanding to the night side (main peak was detectable at solar zenith angles SZA ~115o while it disappears usually at SZA ~90o).*

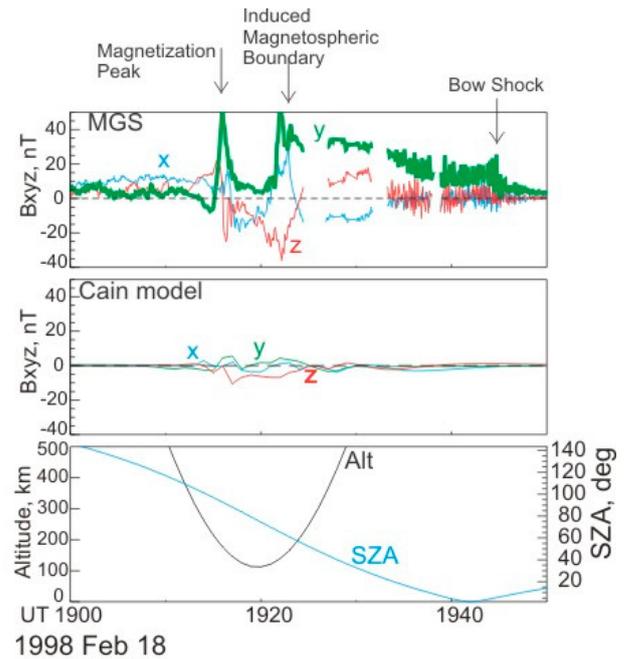
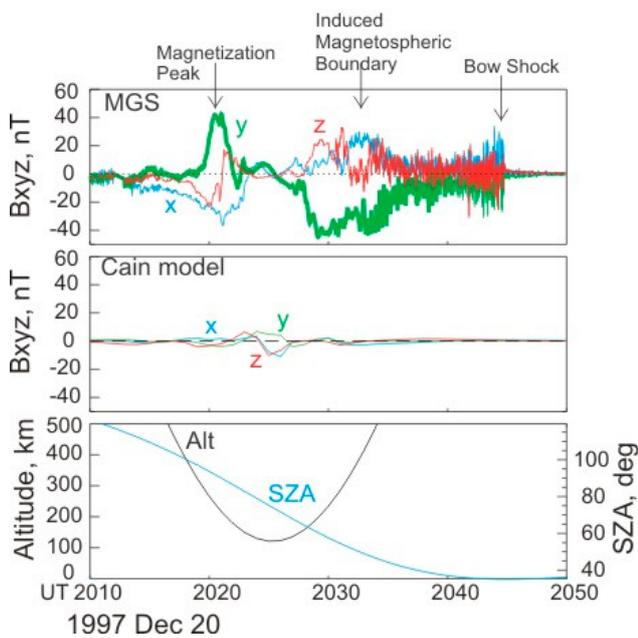


Abb. 5: Magnetfeldänderungen während zweier Passagen der Mars-Umgebung durch den MGS Satelliten (oben). Tief in der Ionosphäre entdeckte MGS starke Magnetfelder (Magnetization Peak). Die Feldrichtung an diesem Punkt ist unabhängig von der  $B_y$ -Komponente des Feldes im Sonnenwind (grüne Linie). Bei jeder Orientierung des Feldes im Sonnenwind rotiert das Feld am Magnetization Peak so, dass es von der Morgen zur Abendseite gerichtet ist. Dieser Peak kann nicht durch die hier schwachen Krustenfelder (mittlerer Panel) erklärt werden. Der Peak wird bei niedrigen Höhen ( $< 200$  km) und hohen Zenithwinkeln (untere Panel) beobachtet. Der gleiche Effekt wird bei Venus beobachtet, wo es keine Krustenfelder gibt [Dubinin et al., 2014a,b].

Fig. 5: Magnetic field variations during two crossings of the Martian space by the MGS spacecraft (top). Deep inside the ionosphere MGS detects a strong magnetic field (Magnetization Peak). The direction of the magnetic field at the peak is insensitive to the sign of the  $B_y$  component (green line) in the solar wind. For any  $B_y$  component in the solar wind the magnetic field in the magnetization peak rotates such that it is directed from dawn to dusk ( $B_y > 0$ ). This peak is difficult to explain by the crustal magnetic field (middle) which is much weaker in these regions. The peak is observed at low altitudes ( $< 200$  km) and high solar zenith angles (bottom). The same effect is observed at Venus which does not possess an intrinsic magnetic field [Dubinin et al., 2014a,b].

Weitere Beobachtungen durch den Mars Global Surveyor Satelliten haben einen Anstieg der Magnetfeldstärke in der nördlichen Ionosphäre bei einer Höhe von etwa 200km gezeigt und zwar in Regionen mit sehr schwachen Krustenfeldern [Dubinin et al., 2014b]. Ein besonderes Merkmal dieser Beobachtungen ist, dass das Magnetfeld am Punkt größter Feldstärke in Richtung der Abendseite rotiert – unabhängig von der Orientierung des interplanetaren Feldes (IMF) (Abb. 6). Da eine ähnliches Verhalten der Ionosphäre bei einem Polaritätswechsel des IMF auch bei Venus beobachtet wurde [Dubinin et al., 2014a], erwarten wir dies auch für andere Ionosphären im Sonnensystem – zum Beispiel bei Titan.

A significant increase of the magnetic field strength was observed by the Mars Global Surveyor spacecraft in the northern ionosphere at altitudes of  $\sim 200$  km in the regions where the crustal magnetic field is expected to be low [Dubinin et al., 2014b]. An important feature of this observation was that the magnetic field at the peak rotated in a way to have a dominant dawn-dusk component independently of the field orientation in the solar wind (Fig. 6). Since a similar response of the ionosphere on a polarity reversal of the interplanetary magnetic field (IMF) is also typical for the Venus ionosphere [Dubinin et al., 2014a] we expect similar magnetization features for other solar system bodies having dense ionospheres, for example at Titan.

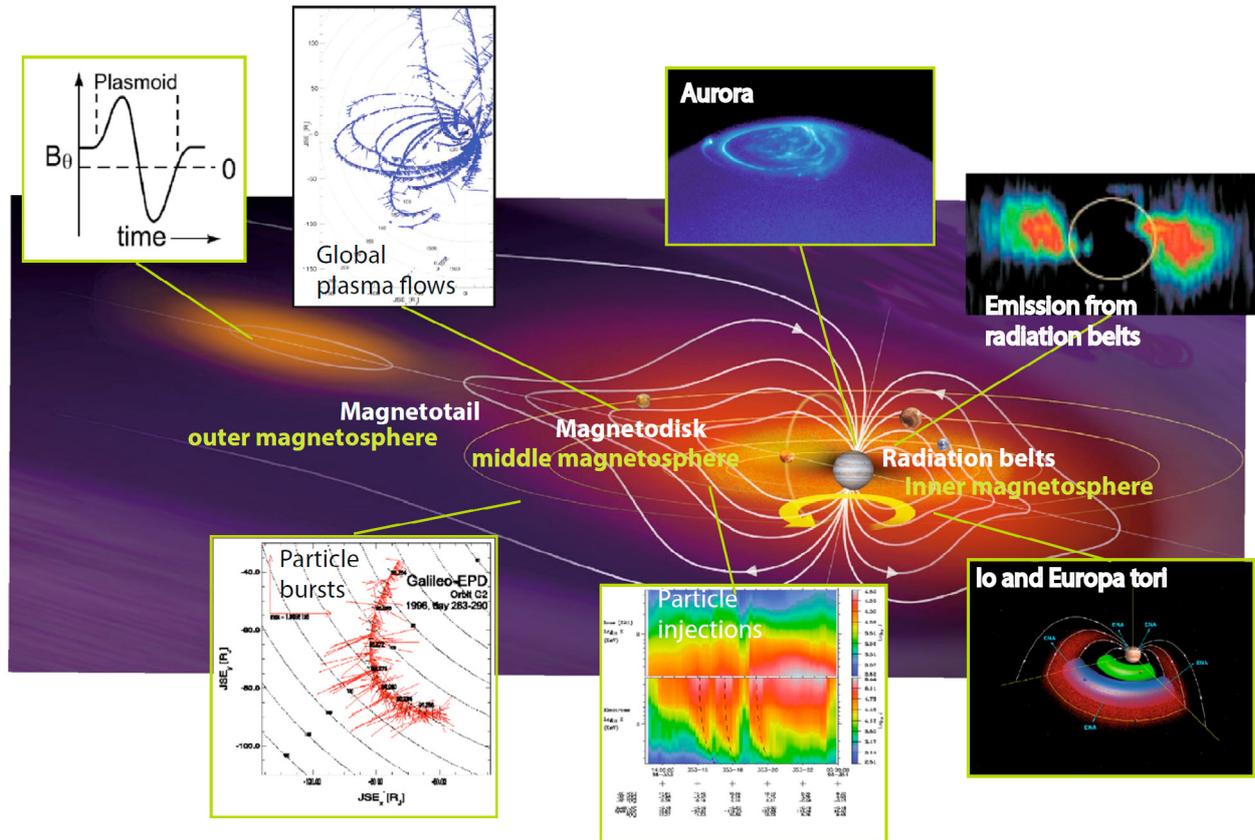


Abb. 6: Die wichtigsten Regionen der Jupitermagnetosphäre im Überblick. (Strahlungsgürtel in der inneren Magnetosphäre, Magnetodisk in der mittleren Magnetosphäre und der Magnetschweif in der äußeren Magnetosphäre). Die kleinen Bilder zeigen typische Prozesse für die entsprechenden Regionen (aus Krupp, 2014)

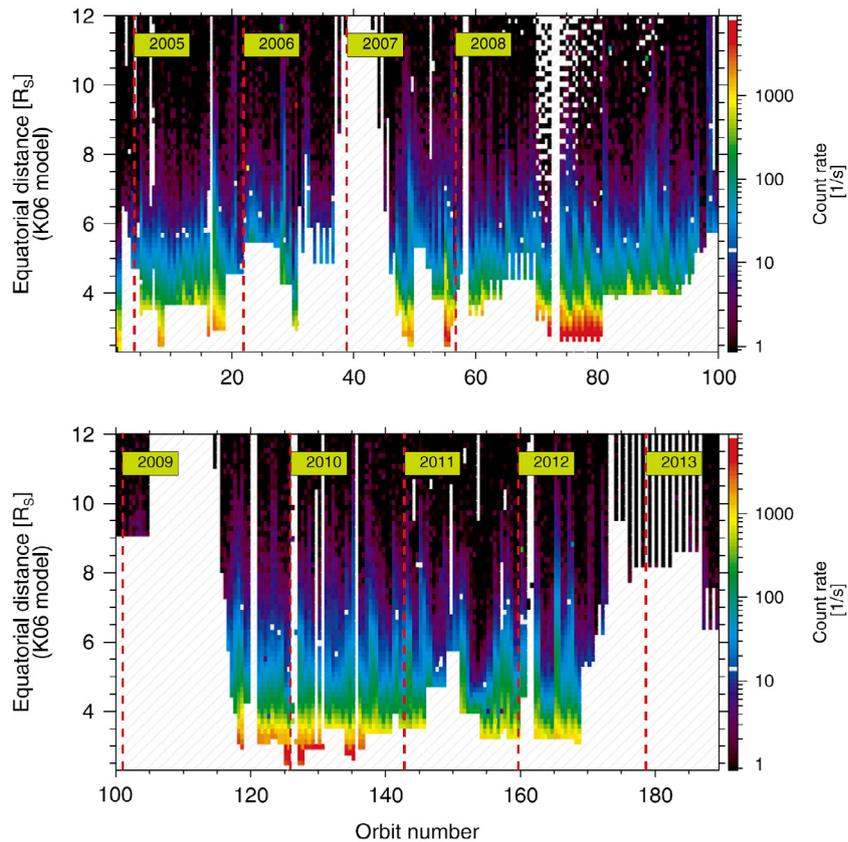
Fig. 6: Key magnetospheric regions of the Jovian magnetosphere (radiation belts in the inner magnetosphere, magnetodisk in the middle magnetosphere, and the magnetotail in the outer magnetosphere). The inserts show typical measurements for those regions (from Krupp, 2014)

### Jupiter – Planet der Superlativen und Referenzobjekt für Exoplaneten

Die Magnetosphäre des Planeten Jupiter ist das größte Objekt im Sonnensystem, beherbergt die stärksten Strahlungsgürtel, hat das stärkste Magnetfeld aller Planeten in unserem Sonnensystem. Der Magnetosphärenschweif ist mehr als 5 AE lang und reicht bis zur Bahn von Saturn. Das MPS hat ein sehr großes Forschungsinteresse an den plasma-physikalischen Prozessen im Jupiter-System – besonders im Hinblick auf die Auswertung von Daten der Galileo-Mission und zur Vorbereitung zukünftiger Missionen – zum Beispiel für die ESA-Cosmic-Vision-Mission JUICE (Jupiter Icy Moon Explorer, vormals EJSM-Laplace), deren Start im Jahr 2022 geplant ist. Der Beitrag der Plasmagruppe des MPS an Juice besteht in einem Elektronen- und Ionenspektrometer für das PEP-Instrument an Bord der Raumsonde. Das Ver-

### Jupiter – planet of superlatives and reference object for exoplanets

The magnetosphere of planet Jupiter is the largest object in the solar system with the strongest radiation belts of all planets as well as the strongest magnetic field. The Jovian magnetotail extends more than 5 AU up to Saturn's orbit. MPS is strongly interested in the understanding of plasma processes in the Jupiter system, especially to analyze the data of the Galileo spacecraft in more detail and to predict the measurements to be taken by future missions to Jupiter, e.g. the ESA Cosmic Vision mission JUICE (Jupiter Icy Moon Explorer, formerly EJSM-Laplace) planned to be launched in 2022. MPS provides an electron- and ion spectrometer for the PEP-Instrument aboard that mission. The understanding of magnetospheric key regions in the Jovian system (see



**Abb 7.:** Variabilität von Elektronenintensitäten in den Strahlungsgürteln von Saturn. Die Abbildung zeigen die Anzahl der MeV-Elektronen in Farbe als Funktion des Abstands von Saturn für 190 Orbits um Saturn in den Jahren 2005–2013 (aus Roussos et al., 2014).

*Fig. 7: Variability of color-coded electron intensities in Saturn's radiation belts as a function of distance from the planet for 190 orbits around Saturn in the years 2005 to 2013 (from Roussos et al., 2014)*

ständnis der wichtigsten Regionen der Jupitermagnetosphäre (siehe Abb. 6) und die lokalen Plasmaparameter liegen dabei im Fokus (Krupp, 2014).

*Fig. 6) as well as the local plasma parameters are in the focus*

### **Saturns unbekanntes elektrisches Feld und seine variablen Strahlungsgürtel**

### **Saturn – unknown electric field and the variable radiation belts**

Die Raumsonde Cassini, seit 2004 im Umlauf um Saturn, ermöglicht es erstmalig, die zweitgrößte Magnetosphäre in unserem Sonnensystem im Detail und über einen längeren Zeitraum zu studieren. An Bord der Raumsonde befindet sich auch das Teilchenspektrometer LEMMS aus den Laboren des MPS. Mit dessen Hilfe lassen sich zeitlich und räumlich variable, durch energiereiche geladene Teilchen erzeugte plasmaphysikalische Phänomene studieren. So konnte durch das Studium der Absorptionssignaturen in den Verteilungen geladener Teilchen und dem Vergleich der räumlichen Lage dieser Signaturen zur erwarteten Position in verschiedenen Regionen der Magnetosphäre auf ein elektrisches Feld zwischen Tag-

*The space probe Cassini, in orbit around Saturn since 2004, enables us to study the second largest magnetosphere in great detail and over an extended time period. One of the scientific instruments aboard the spacecraft is the particle spectrometer LEMMS, out of the laboratories of MPS. With the help of LEMMS spatially and temporally variable energetic charged particle phenomena in the plasma parameters are measurable. From comparing measured absorption signatures in particle distributions and their expected location in different regions of the magnetosphere it was possible to conclude a day-night electric field in the system (Andriopoulou et al., 2014).*

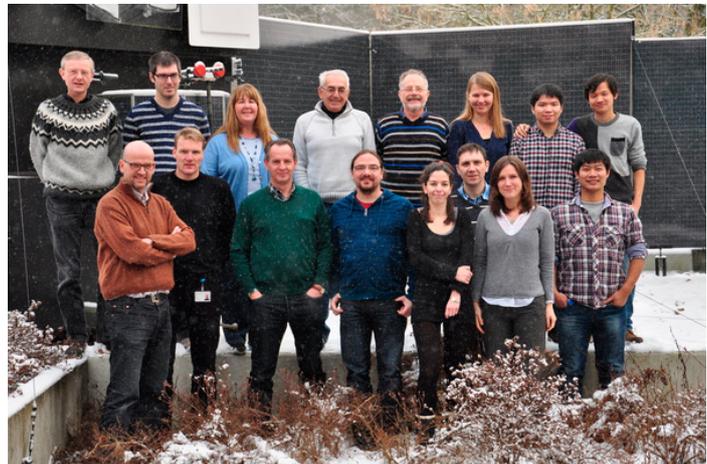
und Nachtseite der Magnetosphäre geschlossen werden (Andriopoulou et al., 2014).

Die Erforschung der Strahlungsgürtel des Saturns war ein weiterer Schwerpunkt der Datenanalyse am MPS. LEMMS-Beobachtungen haben gezeigt, dass die aus Elektronen gebildeten Strahlungsgürtel sowohl in ihrer Intensität wie in ihrer räumlichen Ausdehnung in die Magnetosphäre stark variieren (Roussos et al., 2014). Die Variationen sind in Abb. 7 sowohl in der in der farbcodierten Intensität wie auch in der Ausdehnung in die Magnetosphäre für eine vorgegebene Zählrate deutlich zu erkennen. So variiert die Zählrate von 100 c/s count level zwischen 5 und 10 Saturnradien.

*Another topic of interest was the study of Saturn's radiation belts over time. LEMMS measurements show that Saturn's electron radiation belts vary in their intensity and in their extension into the magnetosphere (Roussos et al., 2014). Fig. 7 clearly shows the variability of the electron belts in the color-coded intensity as well as in the extension inside the magnetosphere of a given count level, e.g. 100 c/s is found between distances of 5 to 10 Saturn radii.*

Team in 2013/2014: .....

Leonardo Regoli, Kun Li, Patrick Daly, Anna Kotova, Benjamin Palmaerts, Elias Roussos, Markus Fränz, Norbert Krupp, Eduard Dubinin, Elena Kronberg, Esa Villenius, Harald Krüger, Stein Haaland, Mikhail Rashev



Ausgewählte Publikationen / *Selected publications*

- Dubinin E., Fraenz M., Zhang T. L., Woch et al. (2013): J. Geophys. Res., 118, 7624–7634:  
Plasma in the Near Venus Tail: Venus Express Observations
- Dubinin E., Fraenz M., Zhang T. L., Woch J., Wei Y. (2014a): J. Geophys. Res., 119, 7587–7600:  
Magnetic fields in the Venus ionosphere: Dependence on the IMF direction- Venus Express observations
- Dubinin E., Fraenz M., Zhang, T. L., Woch J., Wei Y. (2014b): Geophys. Res. Lett., 41, 6329–6334:  
Magnetic fields in the Mars ionosphere of noncrustal origin: Magnetization features
- Kronberg E. A., Ashour-Abdalla M., Dandouras I. et al. (2014): Space Sci. Rev., Vol.184, 173-235:  
Circulation of Heavy Ions and Their Dynamical Effects in the Magnetosphere: Recent Observations and Models
- Li K., Haaland S., Eriksson A., et al. (2013): J. Geophys. Res., 118, 5467–5477:  
Transport of cold ions from the polar ionosphere to the plasma sheet
- Krupp N. (2014): Astron. Astrophys. Rev., 22:75 (18 pp):  
Giant magnetospheres in our Solar system: Jupiter and Saturn
- Morgan D., [...] Dubinin E., Fraenz M. et al. (2014): J. Geophys. Res., 119, 5891–5908:  
Effects of a strong ICME on the Martian ionosphere as detected by Mars Express and Mars Odyssey
- Roussos, E., Krupp N., Paranicas C., Carbary F., Kollmann P. (2014), Planet. Space Sci., 104, 3-17  
The Variable extension of Saturn's electron radiation belts
- Wei Y., [...] Fraenz M., Dubinin E. et al. (2014):, Earth and Planet. Sci. L., 394, 94–98:  
Oxygen escape from the Earth during geomagnetic reversals: Implications to mass extinction

# Kleine Körper im Sonnensystem

## *Small Bodies in the Solar System*

### **Forschungsgebiet**

Kleine Körper im Planetensystem findet man in vier Reservoirs: im Asteroidengürtel, in der Region der Jupiter-Kometenfamilie und in der Oortschen Kometen-Wolke sowie in der Region jenseits von Neptun, vornehmlich im Kuiper-Gürtel. Diese Körper sind hauptsächlich Überbleibsel aus der Entstehung des Planetensystems, die die Bedingungen zum Zeitpunkt und am Ort ihrer Entstehung in der protoplanetaren Scheibe weitgehend konserviert haben. So geben die Asteroiden eher über die wärmere Umgebung der Sonne Auskunft, in der auch die terrestrischen Planeten entstanden, während Kometen und Transneptun-Objekte als Repräsentanten für kalte Körper gelten, die zur Entstehung der Gasriesen im Planetensystem beigetragen haben. Die Erkundung wesentlicher physikalischer Eigenschaften ermöglicht nicht nur die Erfassung des gegenwärtigen Zustands nach einer 4.6 Milliarden Jahre währenden Entwicklung, sondern erlaubt auch Rückschlüsse auf die Entstehungsgeschichte des Planetensystems als Ganzes sowie auf die ursprünglichen Ingredienzien. Während der zurückliegenden Dekade haben auch Fragen zur chemischen und astrobiologischen Relevanz kleiner Körper und ihrer möglichen Beiträge für die Entstehung des Lebens auf der Erde zunehmend an Bedeutung gewonnen.

Weltraummissionen stellen die beste Möglichkeit zur Erkundung der kleinen Körper im Planetensys-

### **Research area**

*Small bodies in the planetary system are found in four reservoirs: in the asteroid belt, in the regions of the Jupiter family and the Oort Cloud comets, and in the Trans-Neptunian region, mostly in the Kuiper Belt. These bodies are to a large extent the left-overs from the formation of our planetary system and represent a largely unaltered memory of the conditions, prevailing at the time when these planetesimals were born in different regions of the solar formation disk. For instance, asteroids are closest to the terrestrial planets in the warm environment close to the Sun, while comets and Trans-Neptunian Objects are more representative for the cold bodies that have contributed to the formation of the gas giants. The exploration of basic physical properties like size, shape, composition, temperature, surface, intrinsic structure and even microstructure of the surfaces allows us to assess not only the present status of the bodies after 4.6 billion years of, but it also provides clues on the formation history of the planetary system as a whole. Chemical and astrobiological questions and the possible contribution of small bodies to the formation of life on Earth have gained importance over the past decade.*

*Space missions provide most direct platform for investigating these bodies and deliver the most detailed results. However, since only a*

tem dar und liefern die detailreichsten Resultate. Allerdings können nur wenige Objekte von Raumfahrzeugen besucht werden. Deswegen ist es notwendig, mittels erdgestützter Beobachtungstechniken Informationen zur Häufigkeit und zum Kontext der Objekte im Planetensystem zu gewinnen. Die MPS Arbeitsgruppe kleine Körper ist ein aktives Element in den weltweiten Bemühungen zur Erforschung kleiner Körper. Sie verfolgt beide Erkundungsoptionen, z. B. mit Instrumentenbeiträgen zu Missionen wie ROSETTA und DAWN, aber auch mit astronomischen Beobachtungen und Modell-Entwicklung unter Nutzung moderner Boden- und Weltraumgestützter Teleskope.

## Wichtige Ergebnisse

### **ROSETTA beim Kometen 67P/Churyumov-Gerasimenko und beim Asteroiden Lutetia**

Nach dem Ende der rund 30 Monate dauernden Hibernation-Phase am 20. Januar 2014, wurden die Instrumente unter MPS-Leitung oder mit MPS-Beistellungen auf dem ROSETTA-Orbiter (CONSERT, COSIMA, OSIRIS, ROSINA-RTOF) und dem PHILAE-Landers (CONSERT, COSAC, ROMAP-SPM, SESAME-DIM) für die wissenschaftlichen Aufgaben am Hauptziel der Mission, dem Kometen 67P/Churyumov-Gerasimenko, präpariert und kalibriert. Bereits vor der Ankunft am Kometen am 6. August 2014 wurden grundlegende physikalische Eigenschaften des Kometenkerns bestimmt. Die folgenden Monate bis Oktober 2014 galten der Charakterisierung des Kerns und der Auswahl möglicher Landegebiete für PHILAE. Die Region J, später Agilkia genannt, wurde für die PHILAE-Landung am 12. November 2014 ausgewählt und vorab einer detaillierten Untersuchung durch die Orbiter-Instrumente unterzogen. Nach einer Hüpfphase über die Kernoberfläche kam der Lander am Landplatz Abydos endgültig zum Stehen und arbeitete dort ein wissenschaftliches Messprogramm ab, das so gut wie möglich an die damals weitgehend unbekannte Ortsumgebung angepasst wurde. Erste wissenschaftliche Ergebnisse zu ROSETTA und PHILAE werden in einem separaten Beitrag dargestellt (REFERENZ MIT

*few individual objects can be visited by spacecraft, population and context information need to be collected by Earth-based observing techniques. The MPS research group of small bodies is an active element of the world-wide efforts on small bodies' exploration and follows both research paths with instrument contributions to space missions like ROSETTA and DAWN as well as astronomical and modelling studies using both modern ground- and space-based telescopes.*

## Major results

### **ROSETTA at comet 67P/Churyumov-Gerasimenko and asteroid Lutetia**

*After wake-up on 20 January 2014 from a 30 months hibernation, the ROSETTA instruments with MPS lead or with MPS contributions (CONSERT, COSIMA, OSIRIS, ROSINA-RTOF) and the lander PHILAE (CONSERT, COSAC, ROMAP-SPM, SESAME-DIM) were prepared and calibrated for the scientific exploration of the primary mission target, comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. Already before arrival at the comet on 6 August 2014, basic physical parameters of the nucleus were measured. The subsequent months until October 2014 were devoted to the characterization of the nucleus and of preselected landing sites for PHILAE. Landing site J (named Agilkia) was chosen and inspected in greater detail by the orbiter instruments for the lander delivery on 12 November 2014. After an unexpected surface hopping, the lander came to rest at site Abydos and performed a modified science program for 2<sup>1</sup>/<sub>2</sub> days, adapted as much as possible to the by then widely unknown location and environment. Some first scientific results of the ROSETTA and PHILAE missions are summarized in a separate section (REFERENCE TO PAGE??). Other early results refer to the rotation and the active regions on the nucleus during approach*

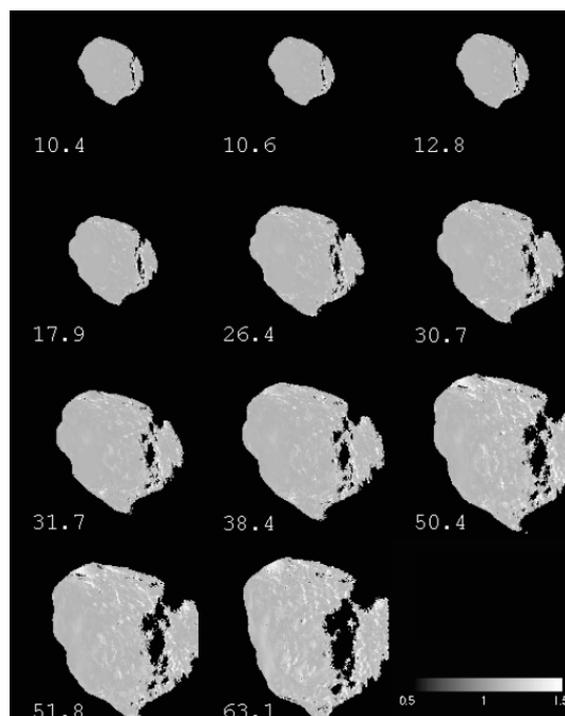
SEITENZAHL). Weitere frühe MPS-Beiträge beziehen sich auf die Rotationsbewegung und die aktiven Regionen auf dem Kern während der Annäherungsphase zum Kometen, auf die Freisetzung von Staubkörnern, die elektrostatische Aufladung und die Dichte von Kometenstaub sowie auf die Detektion eines Staubkorneinschlags durch SESAME-DIM während des Abstiegs von PHILAE zur Oberfläche. Engineering-Aspekte zur PHILAE-Landung wurden analysiert, und die Festigkeit der Kometenoberfläche am ersten Punkt der Bodenberührung des Landers wurde bestimmt.

Basierend auf OSIRIS-Aufnahmen während des Vorbeiflugs beim Asteroiden (21) Lutetia am 10. Juli 2010 wurden Hapke-Parameter zur Lichtstreuung der Oberfläche abgeleitet. Mit wenigen kleinflächigen Ausnahmen erscheint das Lichtstreuverhalten der sichtbaren und sonnenbeschienenen Oberfläche gleichförmig über den visuellen Wellenlängenbereich, im Einklang mit einer Oberfläche, die bedeckt ist mit gut durchmischem Regolith aus zahlreichen Einschlägen auf den Körper (Abb. 1). Junge und ältere Einschlagsregionen unterscheiden sich diesbezüglich nicht.

*of the spacecraft to the comet, to the shedding, charging and bulk density of dust grains released by the comet and to the detection of a dust impact by the SESAME-DIM instrument during the PHILAE descent. Engineering aspects of the PHILAE landing are analyzed and the surface strength at the first touch-down point of PHILAE was estimated.*

*From an analysis of OSIRIS images taken during the fly-by at asteroid (21) Lutetia on 10 July 2010 Hapke light scattering parameters of the surface were obtained; with the exception of a few small regions the visible and illuminated surface of the asteroid displays a rather uniform light reflection behavior over the visible wavelength range, compatible with a surface mostly covered by well-mixed regolith from the numerous impacts on this body (Fig. 1). Young and older cratering regions are undistinguishable to this respect.*

**Abb. 1:** Albedo-Karten der Oberfläche von (21) Lutetia, basierend auf OSIRIS-Aufnahmen durch Filter mit Zentralwellenlänge  $\lambda = 649$  nm. Die Einzelaufnahmen sind durch den Phasenwinkel markiert.



**Fig. 1:** Albedo ratio maps of (21) Lutetia, obtained from OSIRIS images through filters with central wavelength around  $\lambda = 649$  nm. The subimages are identified by their phase angle.

## **DAWN bei Vesta und auf dem Weg zu Ceres**

Nach Ende der wissenschaftlichen Messungen im Orbit um den Asteroiden (4) Vesta setzte die DAWN-Mission ihre Reise fort zum Zwergplaneten (1) Ceres. Die Annäherung an den Asteroiden erfolgte gegen Ende 2014 mit Einschwenken in den Orbit im März 2015. Im Berichtszeitraum wurden Check-outs der Framing Camera (FC) durchgeführt und das wissenschaftliche Programm der Kamera bei Ceres vorbereitet. Die Missionsphase bei Vesta ergab einige Neuentdeckungen, so z.B. der Nachweis eines Eisenkerns im Asteroiden, dunkles Material, das weit verteilt ist über der ansonsten hellen Oberfläche sowie eine Reihe von typischen Oberflächenstrukturen, die auf eine turbulente Vergangenheit des Asteroiden hinweisen. Die FC-Gruppe am MPS konzentriert sich auf die Analyse der Zusammensetzung des dunklen Oberflächenmaterials und der Verteilung von Olivin auf Vestas Oberfläche. Der Nachweis von exogenem Olivin auf der Nordhemisphäre und die gleichzeitige, fast vollständige Absenz von Olivin im südlichen Impakt-Basin verändert das Asteroidenmodell mit einer dünnen (~20 km) Kruste über einem Mantel hin zu einer dickeren Kruste (etwa 80 km). Die Altersbestimmung von Oberflächenarealen auf (4) Vesta wurde aus FC-Bildern mittels Kraterstatistik-Auswertung durchgeführt. Erstmals wurden FC-Aufnahmen mit verschiedenen Filtern benutzt, um die Oberflächenzusammensetzung durch Vergleich mit Laborspektren von sog. HED-Meteoriten zu bestimmen. Mehr Einzelheiten zur Dawnmission werden in einem gesonderten Beitrag erläutert (siehe Seite 15).

## **Erd- und weltraumgestützte Beobachtungen**

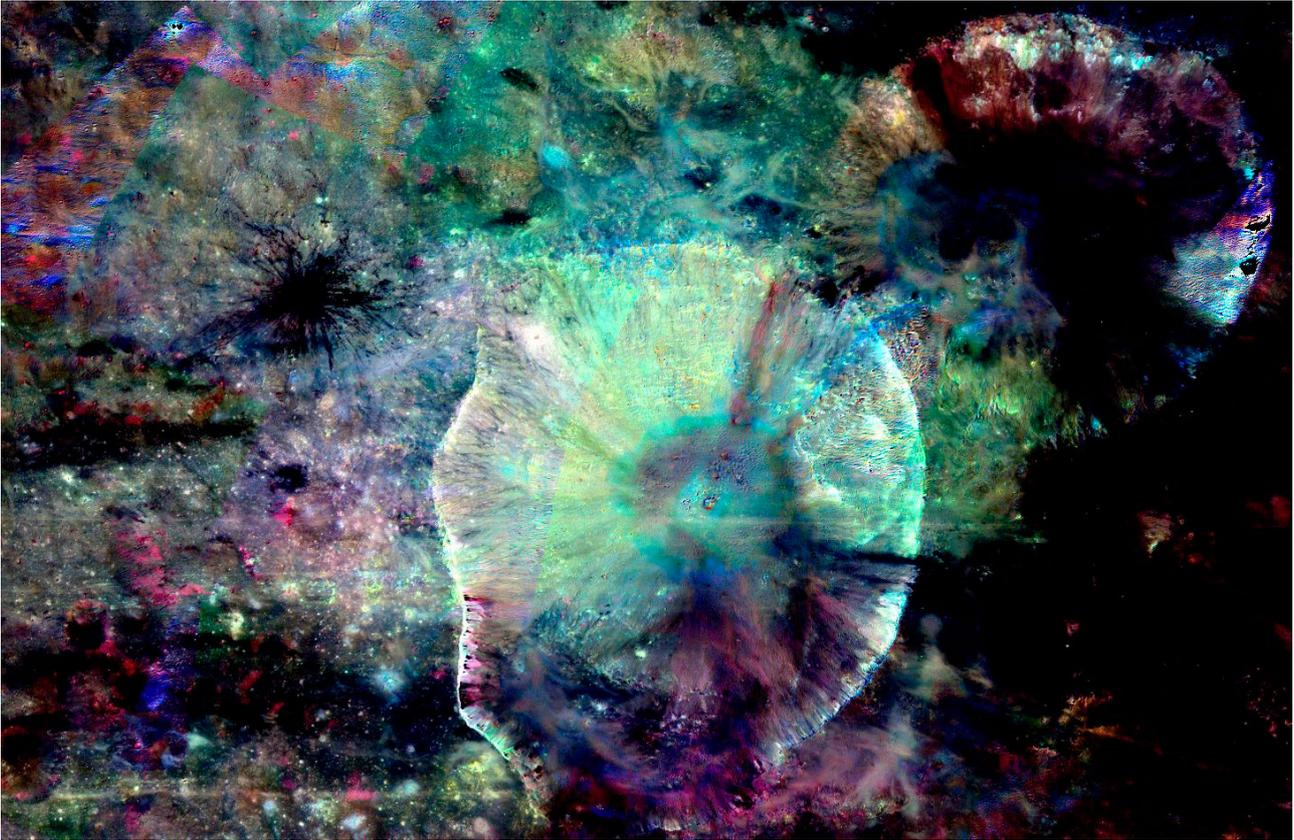
In 2013–2014 wurde eine Zusammenfassung zurückliegender und neuer Beobachtungen des ROSETTA Zielkometen 67P/Churyumov-Gerasimenko publiziert, die, basierend auf Messungen aus mehreren Sonnenumläufen, das Aktivitätspro-

## ***DAWN at Vesta and on its way to Ceres***

*After the orbiting mission at asteroid (4) Vesta in 2011 and 2012 the DAWN spacecraft continued its journey to the dwarf planet (1) Ceres which it was approaching by the end of 2014 for orbit inserting in March 2015. In the reporting period instrument check-outs of the Framing Cameras (FC) and preparation of the science program for imaging at Ceres were performed. The mission phase at Vesta led to a series of discoveries as, for example, the proof of an iron core, the widespread occurrence of dark material on the otherwise bright surface, as well as a variety of distinctive surface structures that point to a turbulent past of Vesta. The DAWN group at MPS focused on the compositional analysis of the dark material and the distribution of olivine on Vesta's surface. The detection of exogenic olivine in the northern hemisphere and the almost absence of olivine in the southern impact basin were two highlights, changing the picture of a thin crust (~20 km) and a shallow mantle to a thicker crust (~80 km). In addition, ages of surface regions on (4) Vesta were determined by cratering statistics from FC images. The analyses of multi-filter FC cubes of Vesta were used, for the first time, to constrain the composition of Vesta's surface by comparing laboratory spectra of HED meteorites with FC data. The DAWN results are discussed in more detail in the article starting at page (see page 15).*

## ***Earth- and space-based observations***

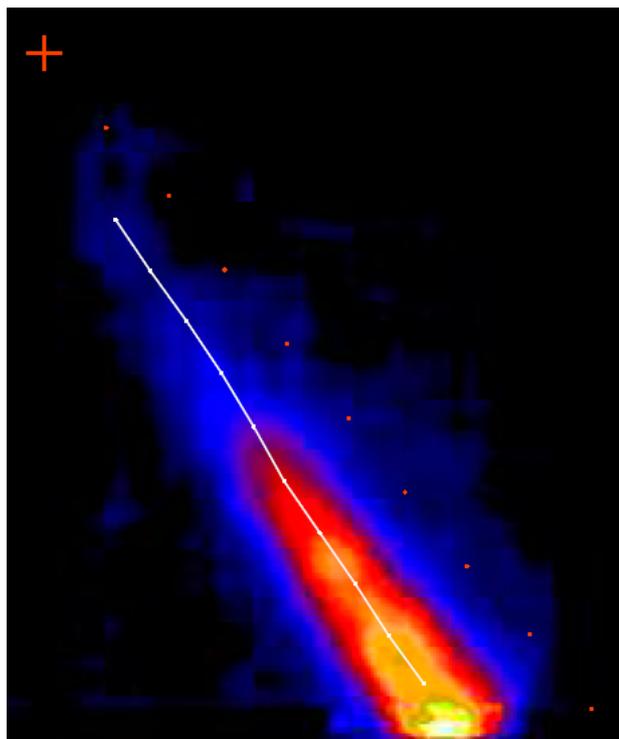
*In 2013-2014 a summary and new observations of the ROSETTA target comet 67P/Churyumov-Gerasimenko was published, studying the activity profile of the comet during the mission rendezvous arc of the orbit and over a num-*



**Abb. 2:** Falschfarben-Komposite-Bild des Kraters Marcia (Durchmesser 58 km) auf (4) Vesta. Der Krater und seine Umgebung besitzen unterschiedliche, lithologische Einheiten (dargestellt in Farbcodierung). Beispiel: Dunkle Materialströme kommen vom inneren Kraterwand und bewegen sich hangabwärts.

*Fig. 2: False color composite of Vesta's crater Marcia (diameter 58 km). The crater and its environment show different lithologic units (color units). For example, dark material flows are originating at the inner walls and move downslope.*

**Abb. 3:** Die Staubwolke des sich auflösenden Kometen C/2012 S1 ISON, verursacht durch das Auseinanderbrechen des Kometenkerns während der Perihelppassage bei 1.8fachen Sonnenradius. Die Daten wurden im Lyman- $\alpha$ -Licht mit dem SUMER-Instrument an Bord des SOHO-Observatoriums gewonnen. Das rote Kreuz gibt die erwartete Position des Kometenkerns zum Zeitpunkt der Aufnahme an, die roten Punkt markieren die Trajektorie des Kometen durch das Gesichtsfeld. Die weiße Linie zeigt die Richtung zunehmender Helligkeit in der Koma an. Die Form der spitzen Koma sowie ihr Öffnungswinkel erlauben die Bestimmung des Zeitpunkts für das Auseinanderbrechens des Kometen sowie der Geschwindigkeit, mit der Staub bei dem Auflösungsprozess des Kerns freigesetzt wurde.



*Fig. 3: The dust cloud of the dissolving comet C/2012 S1 ISON, produced by the nucleus break-up during perihelion passage at 1.8 solar radii and imaged in Lyman- $\alpha$  light by SUMER onboard of the SOHO spacecraft. The red cross marks the position of the nucleus predicted for the exposure midtime, the red dots show its trajectory through the field of view. The wide line indicates the line of increasing brightness in the coma. Coma shape and opening angle constrain the break-up time and the dust release velocity during the dissolution event.*

file des Kometen während des Bahn Bogens der Rendezvous-Mission beschreibt. The Aktivität des Sun-grazing Kometen C/2012 S1 ISON bei größerem Sonnenabstand wurde verfolgt und der Staubanteil in Schweif und Koma des Kometen wurde bestimmt. Zwei kleiner ‚Break-up‘ Ereignisse des Kometen wurden in Aufnahmesequenzen des Wendelstein-Observatoriums der Universität München nachgewiesen. Der Komet wurde nahe der Sonne mit Aufnahmen SOHO und STEREO Missionen weiterverfolgt. Lyman- $\alpha$  Bilder, aufgenommen mit SUMER auf SOHO (Fig. 3), ermöglichen die Bestimmung des Zeitpunkts und der Bedingungen für die Auflösung des Kometenkerns in Perihelnähe. Nun der Staubschweif wurde als Überbleibsel nach dem Periheltransit beobachtet. Ein Splitting-Ereignis wurde auch bei dem Kometen P/2013 R3 mittels Hubble Space Telescope beobachtet, und Parameter des Massenausstoßes wurden aus den Bildern abgeleitet. Bei Objekten im Asteroidengürtel (P/2010 A2, 133P/Elst-Pizarro, 311P/PANSTARRS), die Aktivität zeigten, wurde die Staubemissionsrate bestimmt und mögliche Ursachen für den Massenverlust diskutiert. P/2013 P5 PANSTARRS scheint ein weiteres, viel untersuchtes Beispiel für einen Asteroiden zu sein, der infolge von Rotationskräften zerbrochen ist und infolge einer ganzen Zerfallsserie eine Mehrzahl von Staubschweiften erzeugt hat. (3200) Phaeton, ein etwas rätselhaftes Objekt, produzierte während seines zurückliegenden Periheltransits einen Schweif, bestehend aus Mikrometer großen Teilchen und möglicherweise verursacht durch thermische Spannung.

Mit dem HERSCHEL-Weltraum-Observatorium und bodengebundene Infrarot und Sub-Millimeter Messungen wurde die Gasaktivität und Zusammensetzung bei verschiedenen Kometen bestimmt. MPS-Wissenschaftler haben zudem Photometrie- und Spektroskopiebeobachtungen durchgeführt, um Oberflächeneigenschaften von Transneptun-Objekten zu charakterisieren. Ein Open-Time-Key-Programm bei HERSCHEL ermöglichte die Vermessung von mehr als 130 Transneptun-Objekten und die Bestimmung von Größe, Albedo und thermischen Eigenschaften dieser kalten Körper am Rande des Planetensystems.

*ber of previous revolutions. The distant activity of the sun-grazing comet C/2012 S1 ISON was monitored and the dust content in the tail and coma were estimated. Two smaller break-up events of the comet were detected in campaign images of the Mt. Wendelstein observatory of the University of Munich. The comet was followed close to the Sun using SOHO and STEREO images. Lyman- $\alpha$  imaging with SUMER onboard of SOHO (Fig. 3) allowed the determination of the final break-up as well as the dissolution time and conditions of the nucleus close to perihelion, of which only a remnant dust tail was observed post-perihelion. Another splitting event, i. e. that of P/2013 R3, was observed using HST and mass ejection parameters were determined. Objects displaying signs of activity (P/2010 A2, 133P/Elst-Pizarro, 311P/PANSTARRS) in the main asteroid belt were analyzed for their dust emission and possible release processes. P/2013 P5 PANSTARRS appears to be another well studied example of an asteroid that may have been broken due to rotational forces releasing a variety of dust tail material during a series of events. An enigmatic object, (3200) Phaeton, displayed a tail of micron-sized dust released during past activity, most likely due to thermal fracture around perihelion passage.*

*Observations with the Herschel space observatory and ground-based infrared/sub-millimeter facilities allowed characterizing the gas activity and composition of several comets. MPS researchers have used both photometry and spectroscopy to characterize the surfaces of Trans-Neptunian Objects. In a Herschel open time key program more than 130 Trans-Neptunian Objects were measured in order to determine size, albedo and thermal properties of these cold bodies at the edge of the planetary system.*

Team in 2013/2014: .....

Hermann Boehnhardt, Ulrich Christensen, Fred Goesmann, Paul Hartogh, Martin Hilchenbach, Martin Hoffmann, Christopher Jarchow, Harald Krüger, Urs Mall, Wojciech Markiewicz, Andreas Nathues, Miriam Rengel, Ladislav Rezac, Reinhard Roll, Michael Schäfer, Holger Sierks, Harald Steining, Jessica Agarwal, Nilda Oklay, Juan Andres Sanchez, Colin Snodgrass, Peter Strub, Cecilia Tubiana, Jean-Baptiste Vincent, Chaitanya Giri, Jakob Deller, Marc Hofmann, Sebastian Höfner, Nasifeh Masoumzadeh, Guneshwar Singh Thangjam

Ausgewählte Publikationen / *Selected publications* .....

Curdt W., Boehnhardt H., Vincent J.-B., Solanki S. K., Schühle U., Teriaca L. (2014): A&A 567, 2014, L1 (4 pp):  
Scattered Lyman- $\alpha$  radiation of comet 2012/S1 (ISON) observed by SUMER/SOHO

Jewitt D., Ishiguro M., Weaver H., Agarwal J. et al. (2014): Astron. Journal, 147, 5, 117 (12 pp):  
Hubble Space Telescope Investigation of Main-belt Comet 133P/Elst-Pizarro, AJ 147, 117

Lacerda P., Fornasier S., Lellouch E., Kiss C. et al. (2014): Astroph. Journal Letters, 793, 1, L2 (6 pp):  
The Albedo-Color Diversity of Transneptunian Objects, ApJ 793, 2014, L2

**SONNE UND HELIOSPHÄRE**

***SUN AND HELIOSPHERE***

# Überblick

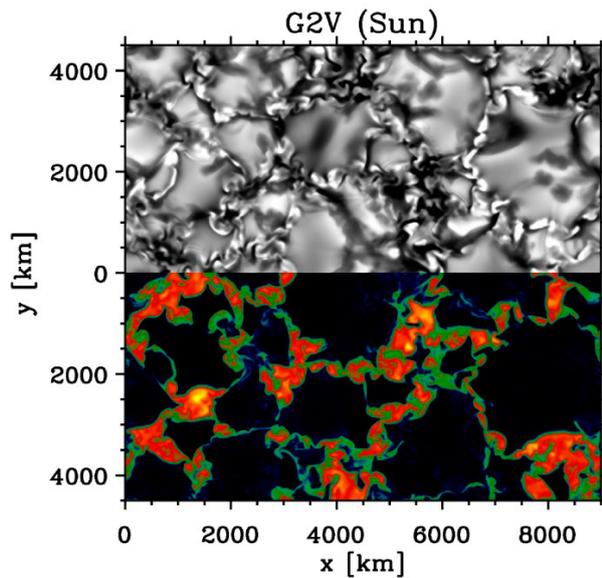
Das Forschungsgebiet der Abteilung „Sonne und Heliosphäre“ umfasst die Sonne in der gesamten Vielfalt ihrer beobachtbaren und messbaren Phänomene. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Atmosphäre der Sonne mit ihrer reichhaltigen Struktur und Dynamik, einschließlich der solar-terrestrischen Beziehungen, d.h. dem Einfluss der schwankenden solaren Partikel- und Wellenstrahlung auf die Erde. Das zentrale Thema ist dabei das solare Magnetfeld, der wesentliche Motor für die Vielzahl der dynamischen Prozesse auf der Sonne.

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 Spektralbereich vom Sichtbaren bis zum extremen UV vom Weltraum aus beobachtet und ihre Plasmaeigenschaften werden mit spektroskopischen Methoden diagnostiziert. Die tieferen Schichten der Atmosphäre, die Photosphäre und die Chromosphäre, werden anhand von spektropolarimetrischen Messungen und mit abbildenden Techniken vom Weltraum aus, vom Boden und mit Hilfe von Stratosphärenballons im Bereich von Millimeterwellen bis hin zum fernen UV untersucht. Dabei geht es vor allem um die Charakterisierung des solaren Magnetfeldes. Im Sonnenwind werden vor allem Teilchen und Wellen von Raumsonden in-situ gemessen.

## Overview

*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, including solar-terrestrial connections, i.e. the impact of the variable radiation of solar particles and electromagnetic waves on the Earth. The central topic is the solar magnetic field, the main driver for the multitude of dynamic processes on the Sun.*

*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 spectral range from visible to 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 in a spectral range extending from millimeter waves to far UV. Main target of the measurements is the characterization of the solar magnetic field. Particles and waves in the solar wind are measured in-situ by space probes.*

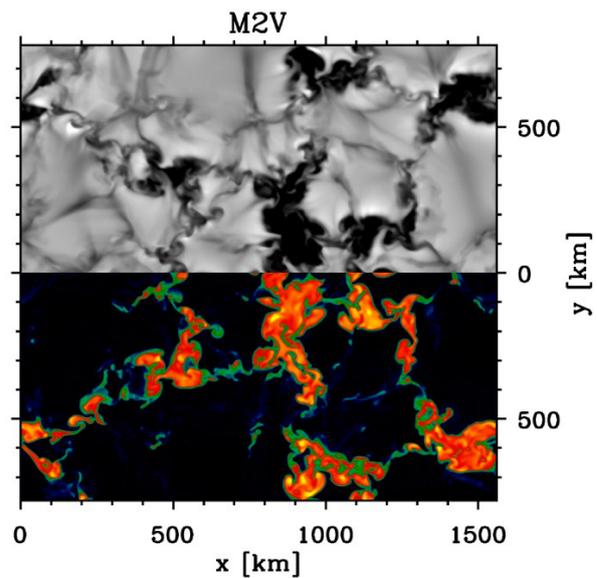


Simulation der austretenden Intensität (oben) und des Magnetfeldes (unten) in der solaren Photosphäre.

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

Die Datenquellen für die wissenschaftlichen Arbeiten im Berichtszeitraum umfassen Instrumente auf Weltraumsonden sowie ballongetragene und bodengebundenen Sonnenteleskope.

Das Ziel von *Sunrise*, einem unter Leitung des MPS entwickelten Sonnenobservatorium, das von einem Ballon in die Stratosphäre getragen wird, sind hochaufgelöste Beobachtungen der solaren Atmosphäre. Das Sunrise-Teleskop mit einem Durchmesser von 1 m und seine Instrumente liefern Spektren und Abbildungen, die in der Lage sind, die kritischen räumlichen Strukturen insbesondere des solaren Magnetfeldes aufzulösen, um so die Entstehung magnetischer Strukturen in der Sonnenatmosphäre verstehen zu können. Juni 2013 hat Sunrise (nach dem Erstflug in 2009) einen zweiten erfolgreichen Wissenschaftsflug absolviert, der das Observatorium in einer fast fünf-tägigen Reise von Esrange in Schweden in den Norden Kanadas geführt hat. Die dabei gewonnen Messdaten sind eine wesentliche Datenquelle für die Arbeiten der Abteilung.



Simulation of the emergent intensity (top) and the magnetic field (bottom) in the solar photosphere.

*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.*

*Data sources for the scientific work during the reporting period comprise instruments on-board space probes as well as balloon borne and ground based solar telescopes.*

*Sunrise, a solar observatory developed under leadership of the MPS, that is carried by a balloon in the stratosphere, aims at high-resolution spectropolarimetric observations of the solar atmosphere. The Sunrise telescope with 1 m aperture and its instruments provide spectra and images resolving the critical spatial scales in particular of the solar magnetic field, in order to understand the formation of magnetic structures in the solar atmosphere. In June 2013 Sunrise performed (after a first flight in 2009) successfully its second science flight, starting from Esrange in Sweden and ending after an almost 5-days journey in northern Canada. The gained measurement data are a major data source for the research of the department.*

Start des Sonnenobservatoriums  
Sunrise in 2013



Launch of the Sunrise solar ob-  
servatory in 2013

Messungen des Sonnenmagnetfeldes erfolgen auch mit *Gregor*, einem 1,5 m-Sonnenteleskop, das zusammen mit dem federführenden Kiepenheuer-Institut für Sonnenforschung in Freiburg und dem Astrophysikalischen Institut Potsdam in den letzten Jahren auf Teneriffa errichtet wurde und Beobachtungen der solaren Atmosphäre mit sehr hoher Auflösung erlaubt. Das vom Institut mitentwickelte Infrarotpolarimeter TIP-2, bisher am Vakuum Turm Teleskop (VTT) auf Teneriffa eingesetzt, wurde zu *Gregor* verlagert und dort im GRIS (Gregor Infrared Spectrograph) eingebaut. Zudem erfolgen weiterhin auch Beobachtungen mit dem *Swedish Solar Telescope* (SST) auf La Palma.

Das *Solar Dynamics Observatory* (SDO) der NASA liefert seit 2010 kontinuierlich Daten mit hoher räumlicher Auflösung über die gesamte sichtbare Sonnenoberfläche. Von besonderer Bedeutung für die Arbeit der Sonnengruppe sind die Messungen

*Measurements of solar magnetic fields are also carried out with Gregor, a 1.5m solar telescope constructed in the last years on Tenerife in collaboration with the Kiepenheuer-Institut für Sonnenforschung (Freiburg), that is leading the project, and the Astrophysikalisches Institut Potsdam. It will allow observations of the solar atmosphere with high resolution. The infrared-polarimeter TIP-2, co-developed by the institute and so far located at the German Vacuum Tower Telescope (VTT) on Tenerife, was transferred to Gregor and added there to the GRIS (Gregor Infrared Spectrograph). In addition, observations are still performed with the Swedish Solar Telescope (SST) on La Palma.*

*The Solar Dynamics Observatory (SDO) of NASA provides since 2010 continuously data with high spatial resolution over the entire visible solar hemisphere. Of particular relevance*

des solaren Magnetfelds durch den Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) und die Bilder vor allem im UV-Bereich, die das Atmospheric Imaging Assembly (AIA) liefert.

Der *Interface Region Imaging Spectrograph* (IRIS), eine NASA-Mission, die im Jahr 2013 gestartet wurde, um die Chromosphäre und die Übergangsregion auf der Sonne zu beobachten, liefert UV-Spektren und Bilder mit hoher Auflösung aus dieser komplexen und dynamischen Zwischenschicht zwischen Photosphäre und Korona, und hat sich als wertvolle neue Datenquelle erwiesen, insbesondere für die koronalen Gruppen der Abteilung.

Intensiv genutzt werden weiterhin auch die Daten des Solar Optical Telescope (SOT) an Bord der *Hinode*-Raumsonde, einer von Japan angeführten und in 2006 gestarteten Sonnenmission, sowie die Messungen der Raumsonden *SOHO* (Start 1995) und *STEREO* (Start 2006). Die aus zwei Raumfahrzeugen bestehende *STEREO*-Mission hat durch die Stereoskopie, realisiert durch zwei identische Instrumente auf den beiden Raumsonden, die Möglichkeit eröffnet, die 3D-Struktur der Sonnenatmosphäre zu ermitteln.

Die bedeutendste Mission, für die die Sonnengruppe aktuell neue Instrumente entwickelt, ist die ESA-Mission *Solar Orbiter*. Sie wird die magnetische Koppelung von der Photosphäre bis hin zur Heliosphäre umfassend erkunden. Das MPS war erheblich beteiligt an der Definition der Mission und wird zu vier Instrumenten wesentliche Beiträge zu liefern: PHI (Polarimetric and Helioseismic Imager; MPS ist Principal Investigator), EUI (Extreme-Ultraviolet Imager), EUS (Extreme Ultraviolet Imaging Spectrograph) und METIS (Koronagraph). Der Start dieser ersten medium-class (M1) Mission im Rahmen des Cosmic Vision Programms der ESA ist für 2017 vorgesehen.

Unter Führung der japanischen Weltraumagentur JAXA wird mit *SOLAR-C* die nächste große Sonnenmission (nach *Solar Orbiter*) vorbereitet. Der Start ist im Zeitraum nach 2020 vorgesehen. Das MPS strebt an, eine führende Rolle bei der Entwicklung eines hochauflösenden VUV-Spektro-

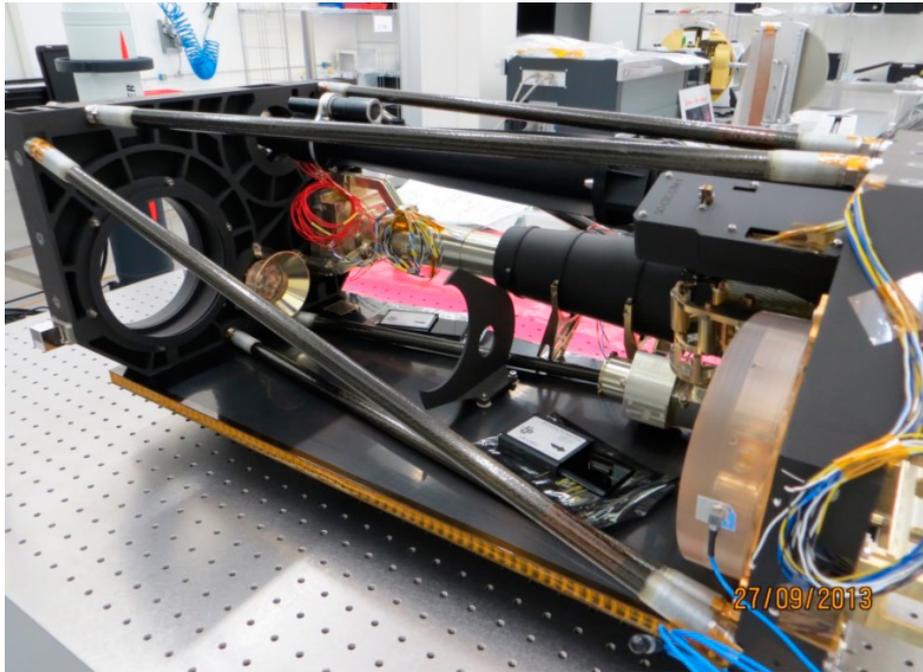
*for the research of the solar group are the measurements of the solar magnetic field by the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) and the images especially in the EUV range provided by the Atmospheric Imaging Assembly (AIA).*

*The Interface Region Imaging Spectrograph (IRIS), a NASA Mission launched in 2013 to observe the chromosphere and transition region on the Sun, provides UV spectra and images with high resolution from this complex and dynamic interface region between the photosphere and corona, and turned out to be a valuable new data source, in particular for the coronal groups in the department.*

*Heavy use is also still being made of the data of the Solar Optical Telescope (SOT) onboard Hinode, a solar mission led by Japan and launched 2006, as well as measurements by the SOHO (launch 1995) and STEREO spacecraft (launch 2006). The two-spacecraft STEREO mission opened the possibility of determining the 3-D structure of the solar atmosphere via stereoscopy carried out with identical sets of instruments on both spacecraft.*

*The most important space mission for which the solar group is currently developing new instruments is ESA's Solar Orbiter. It 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 will contribute significantly to four instruments: PHI (Polarimetric and Helioseismic Imager, MPS is Principal Investigator), EUI (Extreme-Ultraviolet Imager), EUS (Extreme Ultraviolet Imaging Spectrograph), and METIS (Coronagraph). Launch of this first medium-class (M1) mission within ESA's Cosmic Vision program is scheduled for 2017.*

*The next major solar mission (after Solar Orbiter), Solar-C, led by the Japanese space agency JAXA, is currently being defined. Launch is foreseen in a timeframe after 2020. MPS seeks for a leading role at the development of a high-resolution VUV spectrometer (LE-*



Mechanisch-thermisches Modell der Optik-Einheit von PH1

*Structural thermal model of the PH1 optics unit*

ometers (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.

Das Institut entwickelt mit dem *Fast Solar Polarimeter* (FSP) ein neuartiges Polarimeter, dessen Detektor vom Halbleiterlabor der MPG stammt, sowie mit dem *Microlens Spectrograph* ein abbildendes Spektrometer, welches gleichzeitig die beiden räumlichen Koordinaten wie auch das Spektrum aufnimmt. Beide Instrumente sollen am Gregor wie auch an anderen zukünftigen Teleskopen (z. B. dem Advanced Technology Solar Telescope in den USA) eingesetzt werden.

Die Forschung der Abteilung Sonne und Heliosphäre ist thematisch in Form unterschiedlicher Arbeitsgruppen strukturiert, wobei es keine strikte personelle Zuordnung gibt, Wissenschaftler also zum Teil in verschiedenen Gruppen mitwirken. Die einzelnen Arbeitsgruppen sind:

- Coronal Dynamics (CD): Die Struktur und Dynamik der Korona
- Coronal Spectroscopy and Imaging (CSI): Spektroskopie und Abbildung der Korona

*MUR), based on a proposal of the institute, and intends to contribute to another central instrument, the Solar UV-Visible-IR Telescope (SUVIT).*

*A Fast Solar Polarimeter (FSP), a novel polarimeter with a detector provided by the semiconductor lab of the Max Planck Society, and a Microlens Spectrograph that records simultaneously the two spatial coordinates as well as the spectrum, are currently under development at the MPS. Both instruments are supposed to be used at Gregor as well as at other future telescopes (e.g. the Advanced Technology Solar Telescope in the USA).*

*The research in the department "Sun and Heliosphere" is structured by different themes and corresponding research groups, without a strict assignment of scientists to a certain group, i.e. individual researchers may be involved in different groups. The individual research groups are:*

- *Coronal Dynamics (CD): The structure and dynamics of the corona*
- *Coronal Spectroscopy and Imaging (CSI)*

- Solar Lower Atmosphere and Magnetism (SLAM): Untere Atmosphäre und Magnetfeld der Sonne
  - Solar Corona in 3D (SoCo3D): Stereoskopie und Magnetfeldmodellierung der Sonnenkorona
  - Solar-MHD: Solare und stellare Magnetohydrodynamik
  - Sun-Climate: Veränderlichkeit der Sonne und Klima (seit Ende 2013 eigenständige Minerva-Forschungsgruppe „Solare Variabilität und Klima“)
  - Theorie und Simulation der Sonnensystem-Plasmen (TSSP)
- *Solar Lower Atmosphere and Magnetism (SLAM)*
  - *Solar Corona in 3D (SoCo3D): Stereoscopic and magnetic modeling of the solar Corona*
  - *Solar-MHD: Solar and stellar magnetohydrodynamics*
  - *Sun-Climate: Solar variability and climate (since end of 2013 a separate Minerva Research Group "Solar Variability and Climate")*.
  - *Theory and Simulation of Solar System Plasma (TSSP)*

In den folgenden Abschnitten werden exemplarisch Ergebnisse der einzelnen Arbeitsgruppen in dem Berichtszeitraum vorgestellt. Sie geben einen Eindruck von der Bandbreite der Forschung in der Abteilung, ohne einen auch nur annähernd vollständigen Überblick über die Arbeiten der Gruppe zu liefern.

*In the following sections some of the results of the individual research groups within the reporting period are presented. They provide an impression of the spectrum of research pursued in this department, but are far off to give a complete survey of the work done by the group.*

Sonnenabteilung in 2013/2014: .....



# Koronale Dynamik

## Coronal Dynamics

### Forschungsgebiet

Kühle Sterne wie unsere Sonne sind von einer eine Million Kelvin heißen äußeren Atmosphäre umgeben, der Korona. In den 1940er Jahren zeigten Ergebnisse der Spektroskopie, dass die Korona heiß ist, doch noch heute ist das Problem des Heizungsprozesses eine der interessantesten Fragen in der stellaren Astrophysik. Beobachtungen im extremen Ultraviolett und im Röntgenbereich zeigen, dass die Korona aus Bögen aufgebaut ist, in denen emittierendes Plasma im Magnetfeld gefangen ist. Aufgrund des hohen Ionisationsgrades sind die Strömungen wie auch der Energietransport nur parallel zum Magnetfeld. Daher wurde die Korona traditionell in eindimensionalen Modellen beschrieben, in denen alle Größen nur von der Länge entlang des Bogens abhängen. Dem gegenüber zeigen moderne Beobachtungen, dass in der Korona der Heizungsprozess eng mit der (sich ändernden) Struktur und Dynamik der äußeren Atmosphäre verwoben ist.

Entsprechend werden dreidimensionale Modelle benötigt, um die Prozesse in der Korona abzubilden. Hierzu benutzen wir numerische Simulationen, die die Gleichungen der Magnetohydrodynamik (MHD) lösen, und so die Wechselwirkung von Plasma und Magnetfeld einschließen. Besonderes Augenmerk liegt auf der Energiebilanz, die nicht nur die Temperatur in der Atmosphäre bestimmt, sondern auch den Druck. Dies ist we-

### Research area

*Cool stars like our Sun are surrounded by a million Kelvin hot outer atmosphere, the corona. In the 1940ies spectroscopy revealed the high temperature of the corona, but still today the heating of the plasma remains one of the most interesting questions in stellar astrophysics. Observations in the extreme UV and in X-rays show the corona to be build up by loops, where the emitting plasma is confined by the magnetic field. Being ionized, plasma flows and the energy transport through heat conduction will be parallel to magnetic field lines. Therefore, traditionally coronal structures have been described by one-dimensional models with all properties depending only on the arc-length of a fieldline. However, modern observations show that in the solar corona the process of the heating is closely related to the (changing) structure and dynamics in the outer atmosphere.*

*Consequently, three-dimensional models are required to properly model for the processes we see in the corona. Therefore we employ numerical simulations solving the magneto-hydrodynamic (MHD) equations that account for the interaction of plasma and magnetic field. Special attention has to be paid to the energy balance which not only sets the temperature, but also determines the pressure in the corona.*

sentlich, um die koronale Emission zu synthetisieren, die man entsprechend dem Modell erwarten kann. Durch einen direkten Vergleich von synthetisierter Emission und tatsächlicher Beobachtung können wir so untersuchen, welche Prozesse für die Struktur und Dynamik in der äußeren Atmosphäre verantwortlich sind. Neben diesen Modellen für die Korona der Sonne wenden wir unsere Modelle nun auch im stellaren Kontext an, um die Beziehung der Sonne zu anderen Sternen und deren äußeren Atmosphären zu untersuchen.

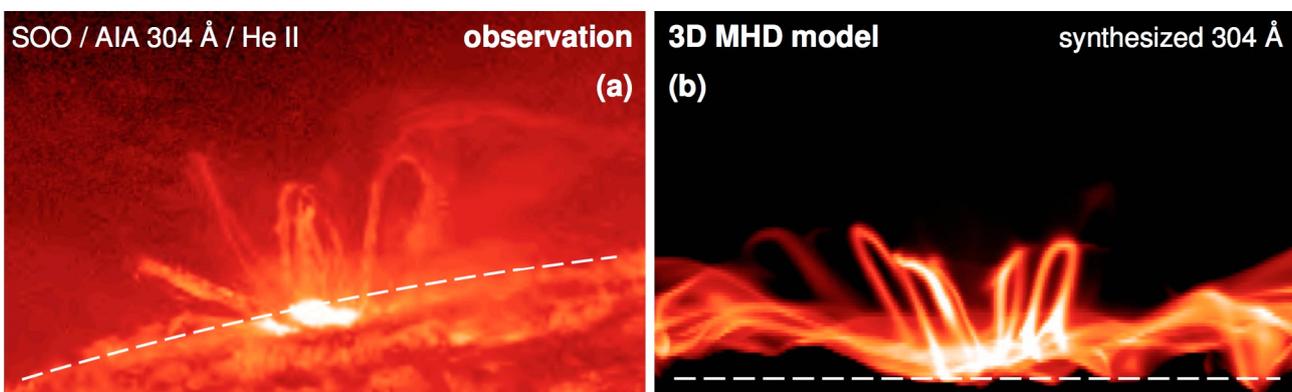
## Wichtige Ergebnisse

Im Allgemeinen zeigt die koronale Emission, die aus den 3D MHD-Modellen abgeleitet ist, eine gute Übereinstimmung mit Beobachtungen von aktiven Gebieten auf der Sonne (Abb. 1). Die aus dem Modell synthetisierte Emission zeigt koronale Bögen, die sich im auf Zeitskalen von etwa einer Stunde entwickeln. Dabei entsprechen die Eigenschaften der modellierten Bögen den Beobachtungen, z. B. bezüglich ihres Querschnitts, der Verteilung der Emission entlang des Bogens oder der (mittleren) Dopplerverschiebung. Dies bedeutet, dass die zeitliche und räumliche Verteilung der Heizrate in unseren Modellen eine gute Repräsentation der Heizrate auf der wirklichen Sonne darstellt. Die Analyse der Energiebilanz im Modell zeigt, dass das Energiespektrum der ein-

*This is essential to synthesize the coronal emission expected from our numerical experiments. Through a direct comparison between the synthesized emission and real solar observations we can then investigate which processes might be responsible for the actual structure and dynamics in the solar upper atmosphere. Besides these solar models we now start to employ our models in the stellar context to better understand the relation of the Sun to other stars with respect to their hot atmospheres.*

## Major results

*In general, the coronal emission derived from our 3D MHD numerical experiments of the corona in solar active regions shows a good match to observations in terms of spatial structure and evolution (Fig. 1). The emission synthesized from the model shows coronal loops that evolve over about one hour that share major properties with observed loops, e.g. in terms of their cross-section, distribution of intensity along the loop, or (average) Doppler shifts. This implies that the spatio-temporal distribution of the energy input in our model is a good representation of the actual heating process on the Sun. The analysis of the energy balance shows that in the model the distribution of individual energy deposition events is close to the pro-*



**Abb. 1:** Plasma-Bögen beobachtet auf der Sonne (a) und in einer 3D-MHD-Simulation (b). Beobachtung und Simulation zeigen einen Wellenlängenbereich um 30.4 nm der dominiert ist von Emission von einfach ionisiertem He, die bei etwa 100 000 K entsteht (aus Chen et al. 2015; Nature Phys. 11, 492).

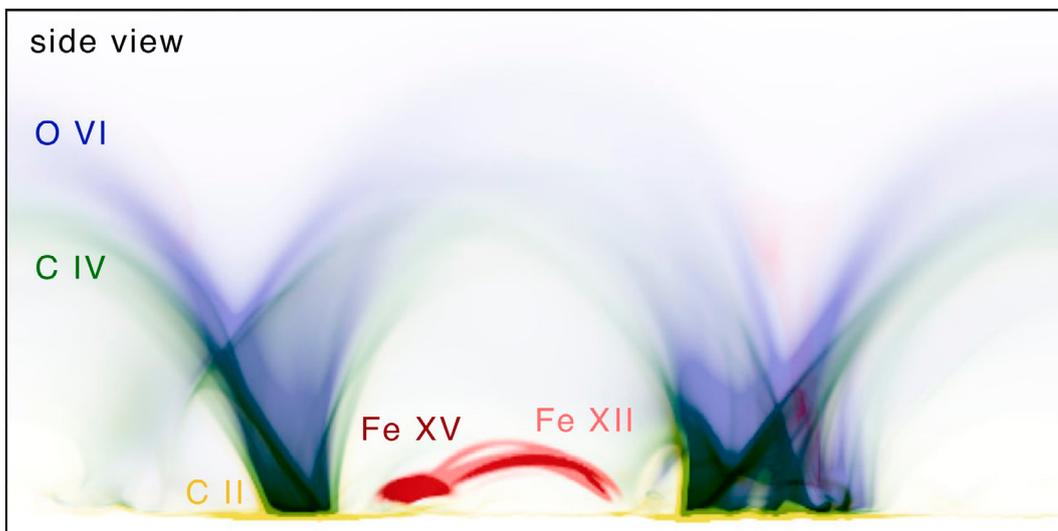
**Fig. 1:** Plasma loop as observed on the Sun (a) and in a 3D MHD simulation (b). Both observation and simulation show emission in a band around 30.4 nm dominated by emission from singly ionized He forming at around 100.000 K (from Chen et al. 2015; Nature Phys. 11, 492).

zernen Heizereignisse konsistent mit den schon länger vorgeschlagenen Nanoflares ist (Bingert & Peter 2013). Im Modell werden die Magnetfelder an der Sonnenoberfläche durch (horizontale) Konvektionsbewegungen verflochten, so dass in der oberen Atmosphäre elektrische Ströme induziert werden, die dann durch Ohmsche Dissipation das Plasma aufheizen. Dies ist ähnlich einem Draht, der durch einen zu hohen Strom aufgeheizt wird.

In manchen Situationen können die 3D-Modelle beobachtete Strukturen direkt reproduzieren. Allein angetrieben durch beobachtete Veränderungen des Magnetfeldes an der Oberfläche bestimmten wir die Entwicklung der Korona in einer aktiven Region und synthetisierten die zu erwartende koronale Emission. Dabei finden wir im Modell koronale Bögen, die an der gleichen Stelle zu finden sind wie die entsprechende Bögen in der Beobachtung (Bourdin et al. 2013). Mithilfe von Daten der beiden weltraumgestützten Observatorien STEREO konnten wir durch eine stereoskopische Inversion zeigen, dass sich auch die dreidimensionale Struktur der Bogen in Beobachtung und Modell gleichen (Abb. 2). Dies unterstreicht, dass die 3D-Modelle eine realistische Repräsentation der beobachteten Strukturen liefern können.

*posed nanoflares (Bingert & Peter 2013). Here the motions at the solar surface shift around the magnetic field so that the changes of the magnetic field induce currents in the upper atmosphere that then heat the plasma through Ohmic dissipation. This is similar to a wire getting hot when carrying a too strong current.*

*In certain situations the 3D models can even fully reproduce observed structures. Driven by the observed (changes of the) surface magnetic field in an active region we ran the numerical model and synthesized the coronal emission. We then found a set of loops in the model that appeared at the same location as a set of loops in observations (Bourdin et al. 2013). Using data from the two STEREO spacecraft providing a stereoscopic observation of that same region we could show that even the three-dimensional structure of the loops was the same in the model and the observation (Fig. 2). This emphasizes that the 3D models can produce realistic coronal structures.*

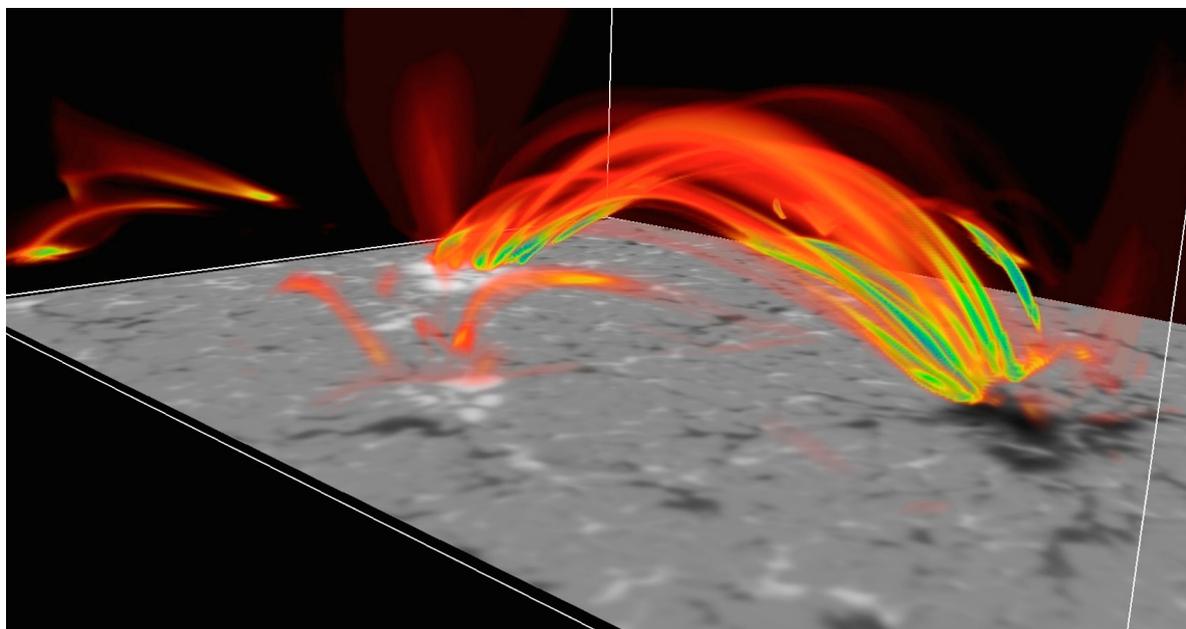


**Abb. 2:** Koronale Bögen in einer Simulation, in der ein beobachtetes veränderliches Magnetfeld an der Sonnenoberfläche die Entwicklung antreibt. Gezeigt ist ein Blick auf die 3D Box der Simulation von der Seite mit einem Gesichtsfeld von 240 Mm zu 120 Mm. Die verschiedenen Farben geben die Emission verschiedener Ionen wieder. Die in rot gezeigten Bereiche entsprechen in ihrer Lage im Raum den stereoskopisch beobachteten Bögen (aus Bourdin et al. 2014; Publ. Astron. Soc. Japan 66, S7).

*Fig. 2: Coronal loops from a numerical simulation driven by actual observations. This shows a view at the 3D computational box from the side displaying 240 Mm by 120 Mm. The different colors show the emission from different ions in the upper atmosphere. Those in red match the corresponding stereoscopic observations of the loops in the observations (from Bourdin et al. 2014; Publ. Astron. Soc. Japan 66, S7).*

In einem Modell einer neu entstehenden aktiven Region konnten wir im Detail untersuchen, wie koronale Bögen als Folge des Energieeintrags in die Korona entstehen. Wir finden einen engen Zusammenhang zwischen dem nach außen gerichteten Poynting-Fluss magnetischer Energie und der Entstehung von koronalen Bögen bei hoher Temperatur. Dabei ist die räumliche Verteilung sowohl der Temperatur als auch der Dichte verhältnismäßig glatt. Hingegen ist die koronale Emission, die sich durch eine nicht-lineare Verknüpfung dieser beiden Größen ergibt, feiner strukturiert. (Abb. 3). Der Grund hierfür ist in der nicht exakten Übereinstimmung von Temperatur und Dichte in Raum und Zeit zu finden (Chen et al. 2014). In unserem Modell ist der Eintrag an Energie in die Korona dadurch bestimmt, dass ein Gebiet mit erhöhtem Magnetfeld in den sich bildenden Sonnenflecken gedrückt wird, letztlich angetrieben von den konvektiven Strömungen an der Oberfläche. Unsere Simulation gibt ein kohärentes Bild vom Auftauchen von magnetischen Fluss an der Oberfläche bis zur Entstehung von koronalen Bögen, einschließlich ihrer äußerst dynamischen Entwicklung.

*In a model of an emerging active region we could study in detail how the coronal loops form in response to the energy input. Here we found a close match between enhanced upward directed flux of magnetic energy at the base of the corona and the loop formation at coronal temperatures. Most importantly, while both the density and the temperature structure in the atmosphere are relatively smooth, the resulting coronal emission which is a convolution of these two quantities, will show a much finer structure (Fig. 3). This is mainly because the structures in density and temperature do not exactly match in time and space (Chen et al. 2014). The energy input into the upper atmosphere is driven by the magnetic field close to a sunspot is pushed around by the surface flows. This provides a coherent picture from the emergence of new magnetic flux at the surface to the final formation of coronal loop, including their dynamic evolution.*



**Abb. 3:** Visualisierung der koronalen Emission aus einem 3D-MHD-Modell einer aktiven Region. Durch das sich verändernde Magnetfeld an der Sonnenoberfläche (Grauskala) werden in der Korona Ströme induziert, die das Plasma aufheizen. Die resultierende Emission (grün und rot) die bei etwa 2 MK entsteht ordnet sich in dynamischen Bögen, ähnlich wie in Beobachtungen (aus Peter 2015; Phil. Trans. R. Soc. A, 373, id.20150055).

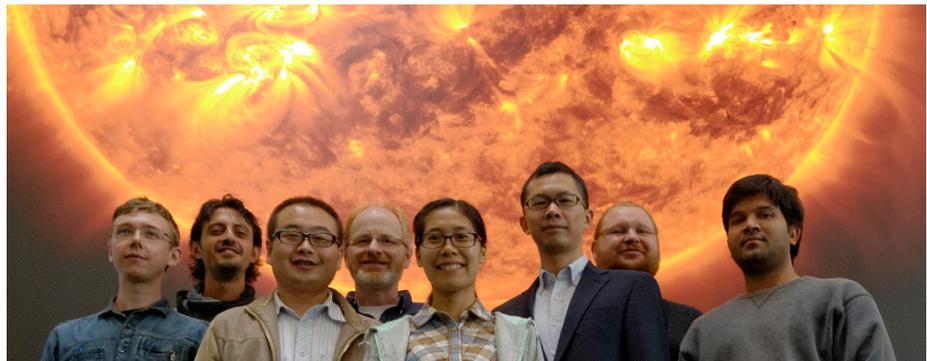
*Fig. 3: Visualization of coronal emission from a 3D MHD model of an active region. Through changes in the magnetic field at the solar surface (gray scale) currents are induced in the corona that heat the plasma resulting in coronal emission, here showing plasma at about 2 MK (green and red color). The corona is clearly structured into evolving loops, similar to real observations (from Peter 2015; Phil. Trans. R. Soc. A, 373, id.20150055).*

Um die koronale Aktivität der Sonne und anderer Sterne in einem vereinheitlichenden Modell zu verstehen, muss man einen weiten Bereich stellarer Parameter untersuchen. Als ersten Schritt in diese Richtung haben wir globale Modelle eines Sterns angefertigt, die seine Konvektionszone und äußere Atmosphäre einschließen. Ein Beispiel ist dabei die Untersuchung der Migration des Aktivitätsgürtels eines Sterns in Richtung Äquator während des Aktivitätszyklus. Dabei zeigt sich, dass die Migration mit einer alpha-Omega Dynamowelle entsprechend der Parker-Yoshimura-Regel in Einklang steht (Warnecke et al. 2014). Dies unterstreicht die Wichtigkeit der Scherschicht nahe der stellaren Oberfläche für die (koronale) Aktivität eines Sterns.

*To better understand coronal activity, one has to investigate a broader range of stellar parameters, ultimately trying to better understand also stellar coronae using 3D MHD models. As a first step in this direction we performed global models of the convection zone of stars including their corona. One example is an investigation of the equatorward migration of the activity belt over the cycle. Here we could show that the migration direction can be explained by an alpha-Omega dynamo wave following the Parker-Yoshimura rule (Warnecke et al. 2014). This emphasizes the importance of the near-surface shear layer for the equatorward migration and thus for (coronal) activity in general.*

Team in 2013/2014: .....

Krzysztof Barczynski,  
Sven Bingert,  
Philippe Bourdin,  
Feng Chen,  
Lakshmi Pradeep Chitta,  
Hardi Peter,  
Jörn Warnecke,  
Tijmen van Wettum



Referenzen / *References* .....

Bingert S., Peter H. (2013): A&A 550, A30 (8 pp.): *Nanoflare statistics in an active region 3D MHD coronal model*  
Bourdin Ph.-A., Bingert S., Peter H. (2013): A&A 555, A123 (6 pp.): *Observationally driven 3D magnetohydrodynamics model of the solar corona above an active region*  
Chen F., Peter H., Bingert S., Cheung M.C.M. (2014): A&A 564, A12 (13 pp.): *A model for the formation of the active region corona driven by magnetic flux emergence*  
Warnecke, J., Käpylä, P. J., Käpylä, M. J., Brandenburg, A. (2014) ApJL 796, L12 (6 pp.): *On the cause of solar-like equatorward migration in global convective dynamo simulations*

# Koronale Spektroskopie und Abbildung

## *Coronal Spectrography and Imaging*

### **Forschungsgebiet**

Unsere Gruppe beschäftigt sich mit bildgebenden und spektroskopischen Techniken – meist im UV-Bereich – und verwendet dabei vielfältige Methoden für die unterschiedlichsten wissenschaftlichen Fragestellungen. Dahinter steht jeweils der Grundgedanke, aus Beobachtungsdaten Rückschlüsse auf die physikalischen Prozesse in der Chromosphäre, der Korona und dem Übergangsgebiet abzuleiten und damit Modelle zur Beschreibung der Vorgänge zu validieren, und zwar auf allen Skalen, angefangen von Mikro-Vorgängen, die den Sonnenwind antreiben bis hin zu großräumigen Phänomenen wie Flares oder koronalen Masseauswürfen (CMEs). Dadurch ergibt sich eine natürliche Überschneidung mit den mehr theoretisch orientierten Arbeitsgruppen ‚Koronale Dynamik‘ und ‚Plasma Simulation‘.

Mitglieder der CSI-Gruppe sind ebenfalls in den Betrieb des derzeitigen Instrumentariums und dessen Weiterentwicklung für zukünftige Missionen stark eingebunden.

Mit SUMER, dem UV-Spektrometer auf der von ESA und NASA betriebenen SoHO Sonde (Solar and Heliospheric Observatory), wurden mehrere, mit der NASA-Sonde IRIS koordinierte Kampagnen durchgeführt. IRIS (Interface Region Imaging Spectrometer) ist seit Juni 2013 im Orbit. Die sich gegenseitig ergänzenden Daten führten zu neuen

### ***Research area***

*Our research focusses on ultraviolet imaging and spectroscopy techniques, targeting solar features with a variety of scientific topics and methods. The basic concept is to employ observational data to study the underlying physical processes in the solar chromosphere, transition region and corona and to constrain models that describe coronal dynamics on all scales, from the small-scale processes that drive the solar wind to large-scale flare and coronal mass ejections (CMEs). The group's research complements the more theoretically orientated Coronal Dynamics and Plasma Simulation group.*

*Members of the CSI group are also heavily involved with running and developing instruments on current and future space missions.*

*SUMER, the ultraviolet spectrometer on the joint European and NASA spacecraft SoHO (Solar and Heliospheric Observatory), has made several campaigns in coordination with the NASA spacecraft IRIS (Interface Region Imaging Spectrometer) launched in June 2013. The complementary observations have provided new insight into flares and other small-scale eruptions. Another significant achievement by the group has been to re-calibrate all SUMER*

Erkenntnissen über Flares und Mikro-Flares. Ein weiteres bedeutendes Resultat aus der Gruppe ist die Rekalibration und Archivierung aller SUMER Spektren, auf die nun über das SoHO Archiv zugegriffen werden kann.

Die europäische *Solar Orbiter* Mission zur Erforschung des inneren Sonnensystems geht in die entscheidende Phase. Der geplante Start im Oktober 2018 bedeutet, dass die Hardware-Phase der CSI Beiträge – EUI, SPICE, und METIS – in vollem Gange ist. Dazu kommt als Vorbereitung zum Betrieb der Instrumente die Ausarbeitung von Beobachtungsplänen, geeignet, um etwa die Herkunft solarer, energiereicher Teilchen zu erforschen.

## Wichtige Ergebnisse

### **„Sonnen Tornado“ angestoßen von Flares**

Solare Tornados sind massereiche, schnell rotierende Gasgebilde, die urplötzlich bis zu 200 Mm aus der Sonnenoberfläche emporschnellen. Man beobachtet sie meist am Sonnenrand, wo sie als rotierende Gaswolken oft länger als ein Tag in die Korona hineinragen (Abb. 1). Mittels einer einzigartigen Serie von stereoskopischen Aufnahmen der Sonden SDO (Solar Dynamics Observatory) und STEREO (Solar Terrestrial Relations Observatory) konnte das Entstehen des Tornados aus einem Filament (einem dünnen Strang aus sehr dichtem und sehr kühlem Gas) dokumentiert werden. Es bestand eine Verbindung zwischen diesem Ausbruch und gewaltigen X-Flares, die sich einige hundert Megameter entfernt abspielten. Dies erlaubt Rückschlüsse auf die grundlegenden physikalischen Prozesse bei dem beobachteten Tornado, denn mit einem Flare geht ein plötzlicher Druckabfall an dieser Stelle einher und benachbartes Material strömt als Druckausgleich ein. Manchmal geraten großräumige Filamente in diesen Sog (Panesar et al. 2013). Das Plasma in solchen Filament-Strängen ist angefüllt mit verdrehten Magnetfeldlinien. Der solare Tornado war also ursprünglich ein Filament-Strang, der sich plötzlich in der Korona wiederfand und die Drehbewegung rührt von ionisiertem Gas, das den verdrehten Magnetfeldern folgt.

*spectra from the entire mission. They are now available in the SOHO archive.*

*Solar Orbiter, is a European mission to explore the inner solar system with a planned launch date in October 2018. The hardware phase of our group's contributions to Solar Orbiter – EUI, SPICE, and METIS – is in full swing. In parallel group members are designing instrument observing sequences to study, for example, the source of solar energetic particles.*

## Major results

### **‘Solar tornado’ triggered by flares**

*Solar tornados are massive, rapidly rotating plumes of gas that suddenly tower up to heights of over 200 Mm above the solar surface, and last for over a day. They are usually seen as swirling clouds silhouetted against the corona (Fig. 1). Using a unique series of stereo observations from two spacecraft, the Solar Dynamics Observatory and STEREO (Solar Terrestrial Relations Observatory), we obtained observations of a solar tornado developing out of a long, thin filament of very dense, cool gas. The onset was linked to violent X-ray flares several hundred Mm away. This gave us the clues needed to explain the basic physics behind tornados because when flares occur there is a sudden drop in pressure at the flare site. Then to equalize the pressure, material rushes in from the surrounding corona and, in the case of tornados, drags upward large-scale filaments in its wake (Panesar et al. 2013). Filament plasma is threaded with twisted magnetic fields. Thus the solar tornado was a filament that had suddenly risen into the corona and the swirling was the effect of ionized gas falling along twisted magnetic fields in the filament.*

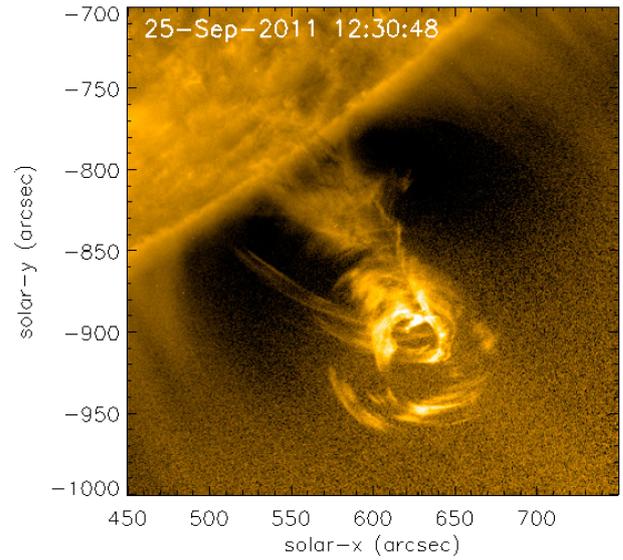
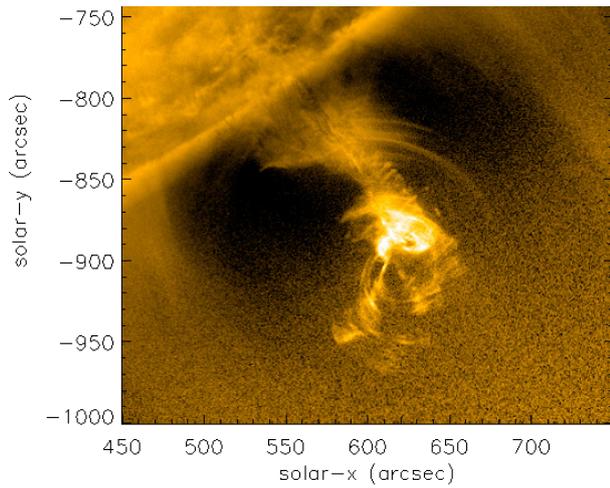


Abb. 1: Bild eines Sonnen-Tornados, Aufnahme der SDO Sonde im EUV-Licht bei 17,1 nm.

Fig. 1: Image of a solar tornado taken by the Solar Dynamics Observatory in the extreme ultraviolet channel at 17.1 nm.

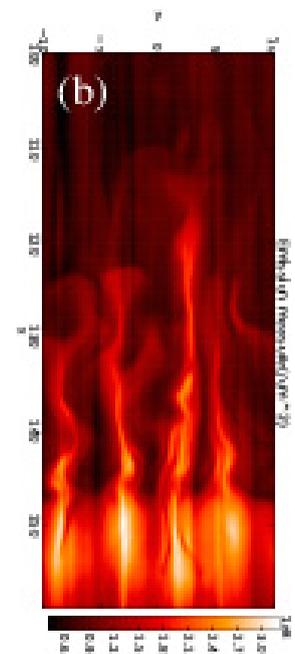
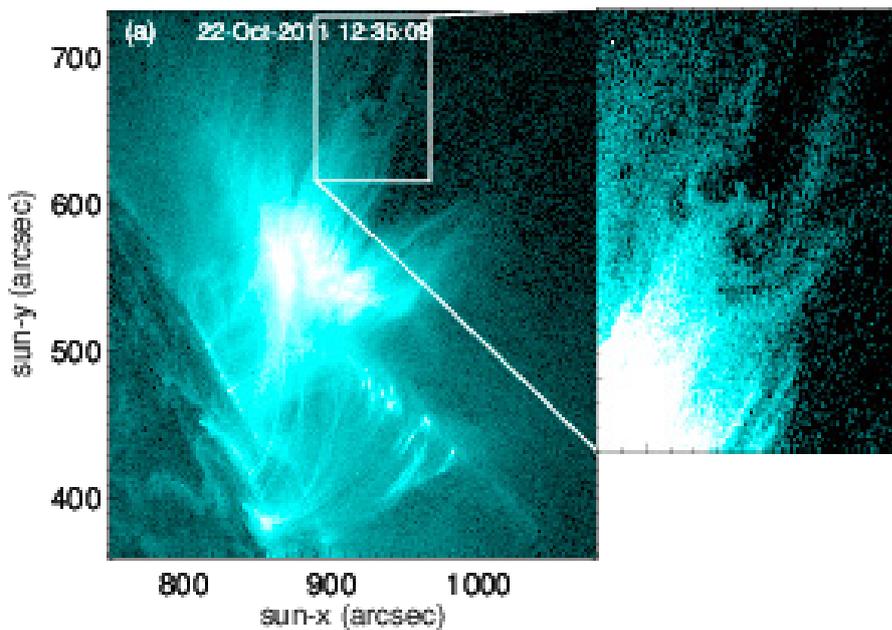
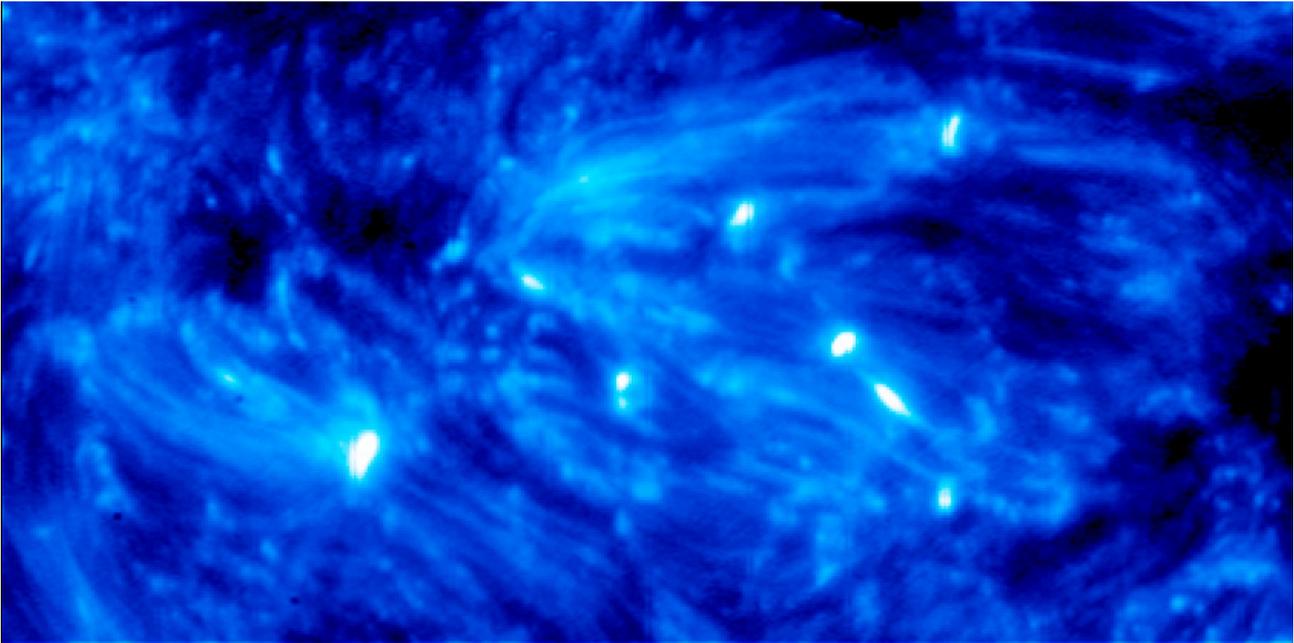


Abb. 2: (a) Dunkle Schlieren, die wellenartig auf das Flare-gebiet herunterströmen wurden mit SDO (Solar Dynamics Observatory) beobachtet. In der Vergrößerung sind sie deutlich sichtbar. (b) Eine 3D MHD Simulation zeigt fingerartige Strukturen als Folge der Instabilität an der Spitze eines Rekonnexions-Jets.

Fig. 2: (a) Dark, wavy downflowing fingers above a flare, observed by the Solar Dynamics Observatory. A close-up of the downflow is shown in the inset. (b) 3D MHD simulation of the finger-like structures forming due to instabilities at the head of a reconnection jet.



**Abb. 3:** Diese von IRIS aufgenommene Bild zeigt Plasma mit einer Temperatur von knapp 100000 K. Die kleinen kreisförmigen Aufhellungen zeugen von Explosionen. Sie bleiben für einige Minuten sichtbar. Das Gesichtsfeld beträgt etwa 50 Mm x 25 Mm.

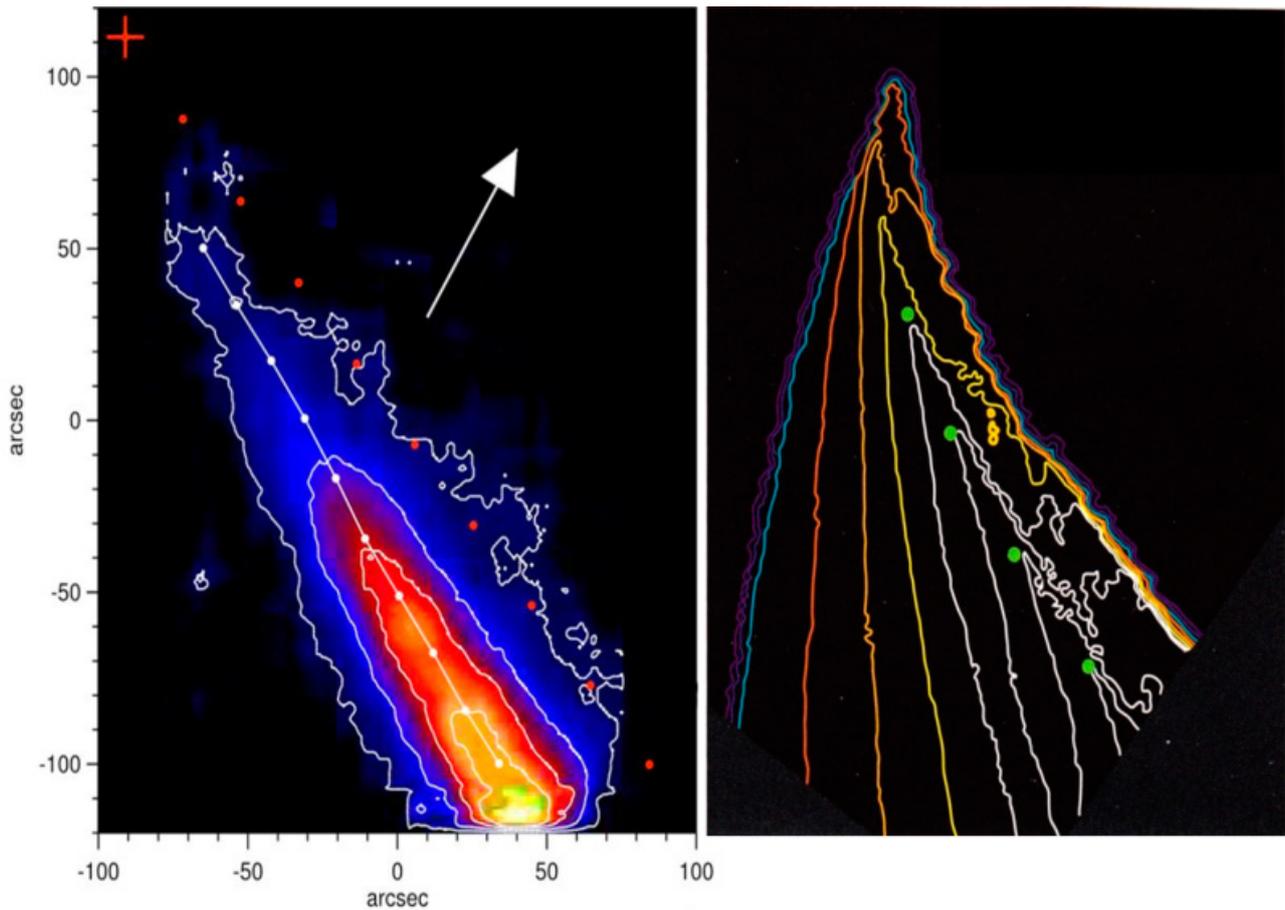
*Fig. 3: This image, recorded by IRIS, shows plasma at temperatures just below 100,000 K. The small circular bright structures are the explosions with a typical lifetime of a few minutes. The field of view is about 50 Mm by 25 Mm.*

### **Rekonnexion, Jets und ihre Spuren**

Als magnetische Rekonnexion bezeichnet man einen Vorgang, bei dem magnetische Feldlinien aufbrechen und sich neu verbinden. In der äußeren Sonnenatmosphäre entstehen daraus eindrucksvolle, gewaltige Phänomene: Flares und koronale Massenauswürfe. Dabei erfolgt die Rekonnexion selbst auf kleinstem Raum und bleibt unsichtbar. Sie kann jedoch mit modernen Supercomputern nachgebildet werden. Die Simulationen sagen bei Flare-Ereignissen über aktiven Gebieten schnelle Jets ohne große Masse voraus. Wegen der geringen Dichte sind sie nicht direkt beobachtbar. Dennoch verrät die Spur eines Jets seine Existenz. Wenn der Jet auf weiter unten liegendes, dichteres Material trifft, entsteht an der Übergangsregion eine Rayleigh-Taylor Instabilität. Dieser Vorgang ist nicht ungewöhnlich, er erfolgt immer, wenn eine Flüssigkeit mit hoher Dichte über eine mit geringer Dichte gebracht wird, etwa, wenn Milch in Kaffee gegossen wird. Man erkennt die Instabilität an den langen, fingerartigen Ausbuchtungen an der Grenzschicht. Genau so sehen die dunklen, wel-

### ***The exhaust regions of magnetic reconnection jets***

*Magnetic reconnection is the process whereby magnetic field lines break and rejoin. In the outer atmosphere of the Sun it is one of the most powerful processes, giving rise to flares and coronal mass ejections. The reconnection process itself occurs at unresolvably small sites; however it can be simulated with modern-day supercomputers. Simulations of flares predict fast, low-density jets from reconnection sites high in the corona above the flaring active region. Because of their low density, these jets have not been observed. Nevertheless we have shown their existence by observing the jet exhaust. Where the jet exhaust meets with underlying high-density gas, the interface is Rayleigh-Taylor unstable. This is a common instability that happens on Earth when a dense fluid is placed above a less dense one, for example when milk is poured into coffee. The instability is recognizable by its distinctive pattern of long, thin intertwining fingers along the boundary of the two fluids. This is exact-*



**Abb. 4:** (a) Staubschweif des Kometen ISON im Licht von Ly- $\alpha$ . Weiße Punkte zeigen die Mittellinie an, rote – leicht versetzt – die vorhergesagten Positionen des Kernes im Minutentakt, das Kreuz entspricht der Position der Bildaufnahme.  
 (b) Simulation, die Konturen zeigen Synchronen (zur selben Zeit entstandener Staub), deren Mittelgrat durch grüne Punkte markiert ist. Der Modellschweif ähnelt der Aufnahme, wenn man einen heftigen Staubausbuch 8,5 h vor dem Periheldurchgang annimmt und die Staubproduktion dann rasch erlischt.

**Fig. 4:** (a) Dust tail of ISON around perihelion observed in Ly- $\alpha$ . The bi-sector of the tail is indicated by a white line. Red dots ending with a cross predict the position of the nucleus along the trajectory. The arrow points toward Sun center. The tail is offset from the trajectory.  
 (b) A model dust tail can reproduce the observation. The line of green dots marking the tip points of the higher-level contours resembles the tail axis, if we assume a violent dust outburst  $\approx 8.5$  h prior to perihelion passage followed by a sharp decrease of the dust production.

lenartigen Strukturen aus, die man oft über Flares sieht. (Abb. 2). Vergeblich suchte man nach einer geeigneten Interpretation, seit das Phänomen vor 15 Jahren erstmals beobachtet wurde. Unsere 3D MHD Simulationen von Rekonnexions-Ereignissen in der Sonnenkorona haben gezeigt, dass sie die natürliche Folge einer Rayleigh-Taylor Instabilität an der Spitze eines Jets mit geringer Dichte sind, der nach unten gerichtet auf Material hoher Dichte trifft (Guo et al. 2014).

ly what the dark wavy structures seen above flares look like (Fig. 2). Since their discovery 15 years ago, these dark downflows have defied a consistent interpretation. Our 3-D MHD simulations of reconnection in the solar corona have shown that they are a natural consequence of the Rayleigh-Taylor instability at the head of a low-density jet ramming into the underlying dense active region (Guo et al. 2014).

## Heiße Gasballen, Zeugen von Explosionen im Temperaturminimum der Sonnatmosphäre

Die sichtbare Oberfläche der Sonne, die Photosphäre, ist mit einer Temperatur von 5000 K das kälteste Gebiet auf der Sonne. Ein sehr überraschendes Detail zeigten Bilder der kürzlich gestarteten NASA Sonde IRIS, auf denen man kleine Ballen von heißem (100 000 K) und sehr dynamischem Gas in der Photosphäre erkennt. Diese Entdeckung beweist, dass magnetische Rekonnektion nicht nur in der Korona vorkommt und dort zu heftigen Flares führt, sondern auch in den kühlen Gebieten mit hoher Dichte. Dieses unerwartete Ergebnis ihrer Analyse präsentierten Peter et al. (2014) in einer Veröffentlichung der ersten IRIS Resultate.

## Komet ISON

Eine einzigartige Gelegenheit bot sich im November 2013 für das SUMER Spektrometer, als erstmals ein Komet wenige Minuten vor dem Periheldurchgang in das Gesichtsfeld des Sonneninstrumentes eintrat. Die Aufnahme im Licht der Lyman- $\alpha$  Linie des Wasserstoffs zeigt einen leicht gekrümmten Schweif aus Staub (Abb. 4). Die Analyse zeigte, dass es sich um Licht der Sonne handelt, gestreut an 11500 Tonnen feinen Staubes (Curdt et al. 2014). Der Komet war zu dem Zeitpunkt bereits inaktiv.

## *Hot explosions in the coolest layers of the solar atmosphere*

*The Sun's surface, known as the photosphere, with a temperature 5000 K is the coolest region of the Sun. One of the most surprising revelations of the recently launched NASA spacecraft, IRIS, was small pockets of hot (100,000 K), very dynamic gas inside the solar photosphere. Their discovery implies that magnetic reconnection is a powerful process not only in the corona above flares but also in the cool, dense regions of the atmosphere. It had not been suspected until revealed by the analysis presented in Peter et al. (2014).*

## *Comet ISON*

*A unique opportunity for SUMER opened in November 2013, when comet ISON appeared in its field-of-view, only minutes before perihelion passage. Our first observation of a cometary target revealed in Lyman- $\alpha$  emission a slightly curved dust tail, which we interpret as light from the disk scattered by 11,500 tons of dust in the tail (cf., Fig. 4). The comet was already inactive at that time (Curdt et al. 2014).*

## Team in 2013/2014:

Jörg Büchner, Werner Curdt, Davina Innes, Bernd Inhester, Hardi Peter, Udo Schühle, Sami K. Solanki, Luca Teriaca, Thomas Wiegmann, Eckart Marsch, Krzysztof Barczynski, Radoslav Bucik, Naihua Chen, Lijia Guo, Don Schmit, Neda Dadashi, Girjesh Gupta, Farhad Shakeri, Navdeep Panesar.

## Referenzen /References

- Curdt W., Böhnhardt H., Vincent J.-B., Solanki S. K., Schühle U., Teriaca L. (2014): A&A 567, L1 (4pp): *Scattered Lyman-alpha radiation of comet 2012/S1 (ISON) observed by SUMER/SOHO*
- Guo L.-J., Huang Y.-M., Bhattacharjee A., Innes D. (2014): ApJL, 796, L29 (6pp): *Rayleigh-Taylor Type Instabilities in the Reconnection Exhaust Jet as a Mechanism for Supra-arcade Downflows in the Sun*
- Panesar N. K., Innes D., Tiwari S. K., Low B. C. (2013): A&A, 549, A105 (5pp): *A solar tornado triggered by flares*
- Peter H., Tian H., Curdt W., Schmit D., Innes D. et al. (2014): Science 346, 6207, id 1255726: *Hot explosions in the cool atmosphere of the Sun*

# Untere Sonnenatmosphäre und Magnetismus

## *Solar Lower Atmosphere and Magnetism*

### **Forschungsbereich**

Der Forschungsbereich der SLAM Gruppe umfasst alle Bereiche, die zur Erforschung der Photosphäre und der Chromosphäre der Sonne notwendig sind, von der Instrumentierung über Datenanalyse bis hin zur theoretischen Modellierung. Als wichtigstes Werkzeug dafür dient die Spektropolarimetrie, die Messung und Interpretation des polarisierten Sonnenspektrums, das von der Sonnenoberfläche abgestrahlt wird und auf dem Weg durch die Sonnenatmosphäre so modifiziert wird, dass die dort herrschenden physikalischen Prozesse und Bedingungen aus dem Spektrum rekonstruiert werden können.

Auf instrumenteller Seite konzentriert sich die Arbeit der SLAM Gruppe auf die Entwicklung von hochempfindlichen Spektropolarimetern, die die hohe räumliche Auflösung moderner Sonnentelkope ausnutzen. Prototypen dieser Instrumente werden gebaut und an den Teleskopen getestet. Von besonderem Interesse sind dabei auch Entwicklungen für zukünftige Sonnentelkope mit großer Apertur (4m Spiegeldurchmesser), wie das *Daniel K. Inouye Solar Telescope* (DKIST) oder das *European Solar Telescope* (EST).

Der Schwerpunkt bei der Datenanalyse liegt auf der korrekten Interpretation der spektro-polarimetrischen Daten, die mit bodengebundenen, ballongetragenen oder weltraumbasierten Teleskopen

### ***Research area***

*The research area of the SLAM group covers all aspects related to the photosphere and the chromosphere of the Sun, from instrumentation, over data analysis to theoretical modeling. The main tool behind all these activities is spectro-polarimetry, the measurement and interpretation of the polarized solar spectrum, emitted from the solar surface and altered by the physical conditions and processes in the solar atmosphere.*

*On the instrumental side, the focus is on the development of spectro-polarimeters allowing for extremely sensitive measurements at the spatial resolution limit of current solar telescopes. Prototypes of these instruments are being built and tested at solar telescopes. Of special interest are developments for future, large aperture (4 meter diameter) solar telescopes, like the Daniel K. Inouye Solar Telescope (DKIST) or the European Solar Telescope (EST).*

*On the data analysis side, emphasis is put on the retrieval and correct interpretation of spectro-polarimetric data obtained with ground-based, balloon-borne or space-based observatories. Of special importance for the group are the usage and improvement of so-called inversion codes, which decipher the information contained in the radiation emitted from the Sun*

gewonnen werden. Besonders hervorzuheben ist dabei die Benutzung und Weiterentwicklung sogenannter Inversionscodes – Computerprogramme, die die Information aus den solaren Spektren entschlüsseln um ein Bild der physikalischen Bedingungen in der Sonnenatmosphäre, wie Temperatur- oder Magnetfeldverlauf, zu erstellen. Die angewandten Techniken zur Datenanalyse interagieren sehr stark mit der Instrumentenentwicklung, da nur die sorgfältige Berücksichtigung aller instrumentellen Effekte eine eindeutige Interpretation der spektropolarimetrischen Daten erlaubt.

Die theoretische Modellierung konzentriert sich sowohl auf die Physik, die in den Inversionsprogrammen enthalten ist, als auch auf magneto-hydrodynamische Simulationen, deren Resultate vor allem für den Vergleich mit den beobachteten Bedingungen in der Sonnenatmosphäre von großer Bedeutung sind.

## Wichtige Ergebnisse

### Die Analyse von Sonnenflecken mit Hinode Daten

Wissenschaftler des MPS entwickelten eine neuartige Inversionsmethode (van Noort, 2012), die eine neue Möglichkeit eröffnet, spektropolarimetrische Daten auszuwerten. Diese neue Technik, angewandt auf Daten des japanischen Hinode Satelliten, resultierte bereits in fünf Erstautor-Publikationen in referierten Fachzeitschriften mit großer Wirkung auf die Fachwelt. Sie regte nicht nur die Entwicklung ähnlicher Methoden in anderen Instituten an, sondern führte auch zur Verbesserung von Instrumentierung für bodengebundene Sonnenbeobachtungen.

Die Umbren von Sonnenflecken sind von einem Ring radial nach außen gerichteter Filamente umgeben, der Penumbra. Die magnetischen und thermischen Eigenschaften dieser Filamente konnten mit bisher unerreichter Genauigkeit studiert werden (Tiwari et al., 2013). Die Startpunkte der bemerkenswert uniformen Filamente zeigen heißes, nach oben strömendes Material in einem nahezu

*to obtain a picture of the physical conditions in the solar atmosphere, like temperature and magnetic field stratification. The data analysis techniques interact closely with the instrument developments, since only the careful consideration of instrumental effects allows for a unique interpretation of the spectropolarimetric data.*

*The theoretical modelling concentrates on the physics behind these inversion codes and the exploitation of magneto-hydrodynamic models for comparison with the observed conditions in the solar atmosphere.*

## Major results

### Analysis of sunspots using Hinode data

*MPS scientists developed a novel inversion technique (van Noort, 2012) opening a new window for the analysis of spectropolarimetric data. The new method, applied to data from the Japanese Hinode satellite, resulted in five first author papers in peer-reviewed journals of high impact to the solar community. It triggered not only the development of similar inversion techniques in other institutes, but also of new instrumentation for ground-based observations.*

*The umbrae of sunspots are surrounded by a ring of radially outward directed filaments, the penumbra. The magnetic and thermal properties of these filaments could be studied with unprecedented accuracy (Tiwari et al., 2013). The head of the remarkably similar filaments shows hot, upflowing material along with an upward-pointing field. Nearly horizontal fields*

Abb. 1: Atmosphärische Parameter (von oben nach unten: Temperatur, Geschwindigkeit entlang des Sehstrahls, Magnetfeldstärke, -inklination und -azimuth, mikro-turbulente Geschwindigkeit) eines "Standard"-Filaments der Penumbra in verschiedenen Höhen („a“ =  $\log_{\tau}=-2,5$ , „b“ =  $\log_{\tau}=-0,9$  und „c“ =  $\log_{\tau}=0,0$ ). Diese Parameter identifizieren die Filamente der Penumbra als längliche, magnetisierte Konvektionszelle.

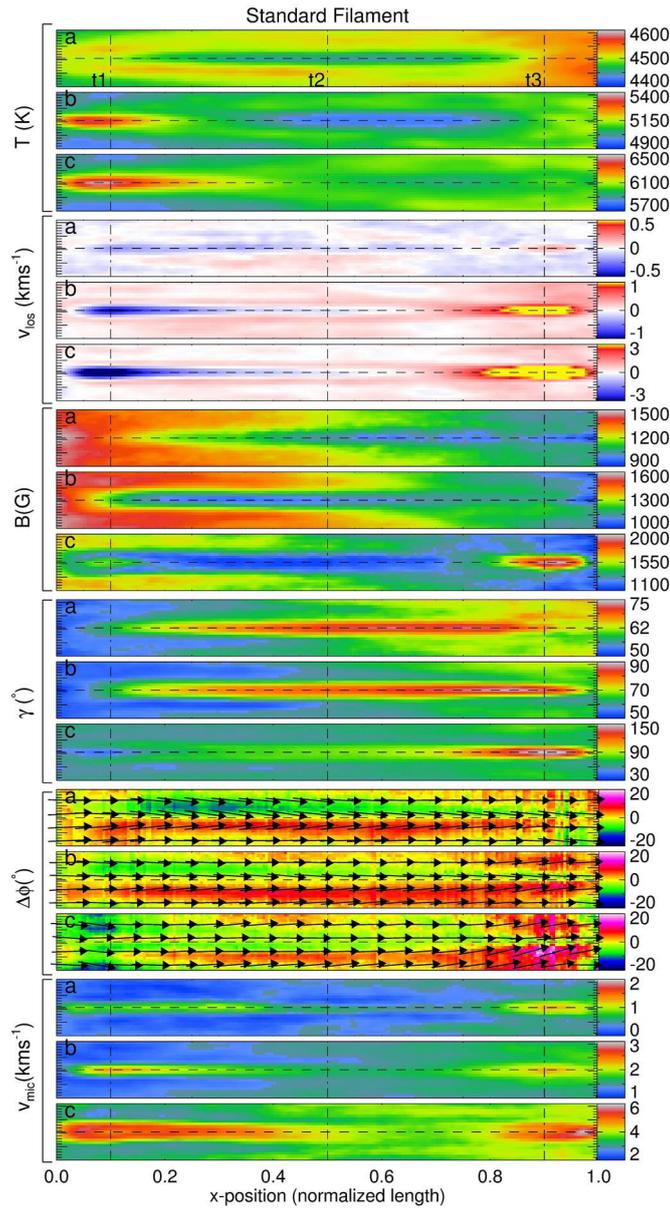


Fig. 1: Atmospheric parameters (from top to bottom: temperature, line-of-sight velocity, magnetic field strength, inclination, and azimuth, micro-turbulent velocity) of the "standard" penumbral filament at three different height nodes ("a" =  $\log_{\tau}=-2.5$ , "b" =  $\log_{\tau}=-0.9$ , and "c" =  $\log_{\tau}=0.0$ ). The parameters identify the penumbral filament to be an elongated, magneto-convective cell.

vertikalen Magnetfeld. Die Startpunkte sind mit horizontalen Feldern mit einer Stärke von etwa 1 kG mit den Fußpunkten verbunden. In den Fußpunkten finden sich abwärtsgerichtete Strömungen mit Geschwindigkeiten von mehr als 20 km/s in Regionen mit hoher magnetischer Feldstärke mit einer der Umbra entgegengesetzten Polarität (van Noort et al., 2013).

Die Sonnenoberfläche außerhalb von Sonnenflecken setzt sich aus so genannten Granulen zusammen. Diese zellenartigen Strukturen mit einer typischen Größe von 1000-2000 km und einer Lebensdauer von 5-10 Minuten entstehen aufgrund

of around 1 kG connect the head to the tail. The tails harbor downflows at record-high velocities of more than 20 km/s in high-field strength, opposite polarity patches (van Noort et al., 2013).

The solar surface outside of sunspots consists of granules. These cell-like structures with a typical size of 1000-2000 km and lifetimes in the range of 5-10 minutes are a product of the convective motions of the plasma close to the

der Konvektionsbewegung des Plasmas nahe an der Sonnenoberfläche. Manchmal sind diese Granulen auch in Sonnenflecken zu finden, und zwar als Lichtbrücke in der Umbra, wo sie als einige hundert Kilometer hoher Gebirgskamm die Umbra durchtrennt. Die außergewöhnliche Position dieser Granulen, deren Flanken der kühleren Umgebung der Umbra ausgesetzt sind, erlaubte einen tiefen Blick ins innere dieser Konvektionszellen. Lagg et al. (2014) konnte feststellen, dass diese Zellen im Inneren nahezu frei von magnetischen Feldern sind.

## **Sunrise II**

Das ballongetragene Teleskop Sunrise startete im Juni 2013 zu seinem zweiten Flug in die Stratosphäre. Eines der primären Ziele der Mission war es, hoch aufgelöste Bilder der Chromosphäre aufzunehmen, einer Region der Sonnenatmosphäre in einer Höhe von bis zu etwa 2000 km über der Sonnenoberfläche.

Der Sunrise Filter Imager (SuFI) zeichnete hochaufgelöste Bilder in den Spektralbereichen der Mg II k und Ca II H Linie auf. Danilovic et al. (2014) entdeckte bemerkenswerte qualitative und quantitative Übereinstimmungen zwischen den Bildern dieser beiden Spektralbereiche in der ruhigen Sonne in der Nähe eines Sonnenflecks und während eines kleinen Flares. Dabei zeigten die Filtergramme in Mg II k einen um einen Faktor 1,4 bis 1,7 höheren Kontrast, und erschienen etwas verschmierter und glatter in der ruhigen Sonne. Die Unterschiede zwischen den beiden Spektralbereichen begründen sich zum einen in den unterschiedlichen Höhenbereichen, in denen die Mg II k und die Ca II H Linien entstehen, und dem damit verbundenen Temperaturunterschied, zum anderen auch in der Tatsache, dass das breitbandige Mg-Filter einen größeren Höhenbereich abdeckt als das Ca-Filter.

*solar surface. Sometimes these granules can form a lightbridge across the umbra of a sunspot, standing out like a few hundred kilometer high mountain ridge across sunspot umbrae. The prominent position of these granules, with two sides exposed to the cold, umbral environment, allowed us to see deeply into the interior of these convective cells. Lagg et al. (2014) found these cells to be close to field-free in its deep interior.*

## **Sunrise II**

*The balloon-borne observatory Sunrise was launched in June 2013 for its second flight into the stratosphere. One of the prime targets of the mission was to achieve high-resolution images of the chromosphere, a layer in the solar atmosphere approximately 2000 km above the visible surface of the Sun.*

*The Sunrise Filter Imager (SuFI) took high-resolution images in the spectral bands of Mg II k and Ca II H. Danilovic et al. (2014) detected remarkable qualitative and quantitative similarities between these two filters in the quiet Sun, in a region close to a sunspot and during a small flare. However, the Mg filtergrams display 1.4-1.7 times higher intensity contrast and appear more smeared and smoothed in the quiet Sun. These differences at least partially arise because of differences in the height where the Mg and Ca lines are formed, a temperature difference, and also the fact that the broad Mg filter sampled a larger height range than the Ca filter.*

Abb. 2: SuFI und Solar Dynamics Observatory (SDO) Daten aufgenommen am 15. Juni 2013 um 19:40 UT. Zwei interessante Strukturen sind erkennbar: eine filament-ähnliche Struktur bei [7",10"] und ein kleiner *surge*, einem Auswurf von Plasma in die Korona, bei [12",20"]. Während die Ca-Bilder die höchste Intensität immer am Fußpunkt der Struktur zeigen, bewegt sich die hellste Region in den Mg-Bildern etwas nach oben, was sehr gut den SDO-Bildern entspricht, die heißere Gase der Korona zeigen.

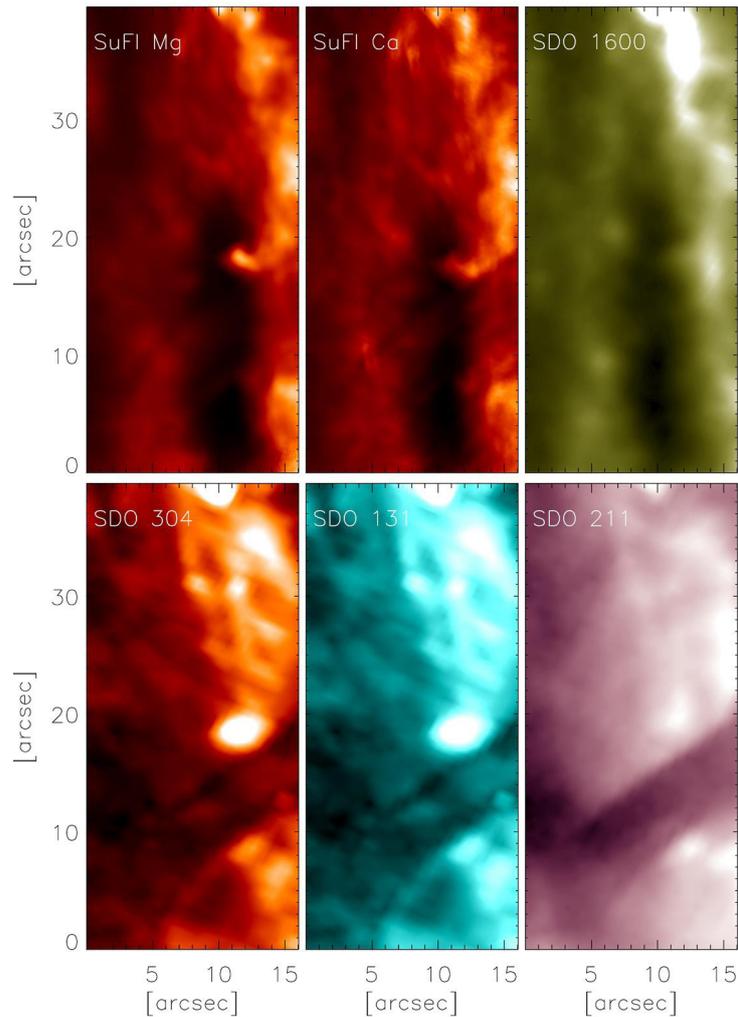


Fig. 2: SuFI and Solar Dynamics Observatory (SDO) data acquired on June 15, 2013 at 19:40 UT. Two interesting features are visible: a filamentary feature at [7",10"] and a small surge at [12",20"]. While Ca images show the highest intensity always at the bases of the feature, the feature's brightest region seems to move slightly upwards in Mg images and correspond well to the hotter SDO channels.

Team in 2013/2014:

Achim Gandorfer, Andreas Lagg, Sami K. Solanki, Joachim Woch, Alex Feller, Johann Hirzberger, Michiel van Noort, Anusha Bhasari, Pradeep Chitta, Sanja Danilovic, Hans-Peter Doerr, Anjali John Kaithakkal, Ivan Milic, Smitha Narayanamurthy, Tino Riethmüller, Nagaraju Krishnappa, Meetu Verma, Shahin Jafarzadeh, Sanjiv Tiwari, Francisco Andrés Iglesias, David Bühler, Ricardo Gafeira, Fatima Kahil, Azaymi Siu

Ausgewählte Publikationen

- Tiwari S. K., van Noort M., Lagg A., Solanki S. K. (2013): A&A 557, A25 (17pp):  
Structure of sunspot penumbral filaments: a remarkable uniformity of properties
- van Noort M., Lagg A., Tiwari S. K., Solanki S. K. (2013): A&A 557, A24 (14 pp):  
Peripheral downflows in sunspot penumbrae
- Lagg A., Solanki S. K., van Noort M., Danilovic S. (2014): A&A 568, A60 (9pp):  
Vigorous convection in a sunspot granular light bridge
- Danilovic S., Hirzberger J., Riethmüller T., Solanki S. K. et al. (2014): ApJ 784, 1, 20 (9pp):  
Comparison between Mg II k and Ca II H Images Recorded by SUNRISE/SuFI

# Solare Korona in 3D

## *Solar Corona in 3D*

### Forschungsgebiete

#### **Magnetfeldmodelle der Sonnenkorona**

Die Sonnenkorona wird durch Magnetfelder dominiert und strukturiert. In niedrigster Ordnung können wir nicht magnetische Kräfte vernachlässigen und kraftfreie Modelle benutzen. Kraftfrei bedeutet hierbei, dass die Lorentzkraft verschwindet. Gleichbedeutend ist, dass die elektrische Stromdichte und das Magnetfeld parallel zueinander sind. Im Allgemeinen ist der Zusammenhang zwischen Stromdichte und Magnetfeld nichtlinear und daher sind komplexe Computerprogramme notwendig um nichtlineare, kraftfreie Koronamodelle zu berechnen. Als Randbedingungen für die Modelle werden Messungen der photosphärischen Magnetfeldvektoren (etwa von SDO/HMI, Hinode/SOT, SUNRISE/IMAX) benutzt.

#### **Stereoskopie koronaler Strukturen**

Ziel dieser Arbeiten ist die 3D Rekonstruktion koronaler Loops, Plumes, Massenausbrüchen (CMEs) und Eruptionen. Stereoskopische EUV-Beobachtungen sind seit 2006 mit den beiden STEREO-Raumsonden möglich, welche mit einer Geschwindigkeit von ca. 20 Grad pro Jahr von der Erde in unterschiedliche Richtungen wegdriften. Neuerdings berücksichtigen unsere Modelle zusätzlich auch Daten anderer Raumsonden (SoHO oder SDO, zukünftig auch Solar Orbiter) und koron-

### *Research Areas*

#### *Coronal magnetic field models*

*The solar corona is dominated and structured by the magnetic field. In lowest order we can neglect all nonmagnetic forces and model the solar corona with a force-free model. Force-free means that the Lorentz force vanishes. This is equivalent to the assumption that the electric current density and magnetic field vector are parallel. In the generic case the relation between current density and magnetic field is not linear and sophisticated numerical codes are required to compute the nonlinear force-free coronal magnetic field model. As input the model requires measurements of the photospheric magnetic field vector (e.g. from SDO/HMI, Hinode/SOT, SUNRISE/IMAX).*

#### *Stereoscopy of coronal structures*

*The aim of these endeavours is the reconstruction of the 3D shapes of coronal loops, polar plumes, coronal mass ejections (CMEs) and eruptive prominences. The possibility of stereoscopic EUV observations of the solar corona opened 2006 with the launch of the twin STEREO spacecraft, which are continuously drifting away from Earth in different directions by about 20 degrees/year. Meanwhile, we also integrate observations from a third viewpoint (SoHO or*

ale Magnetfeldmodelle. Um relevante Informationen aus den EUV-Bildern zu extrahieren, benutzen wir Imageprocessing Algorithmen um kleinskalige und kontrastreiche Strukturen zu extrahieren. Um diffuse Strukturen wie CMEs zu rekonstruieren, wird der Dichtekontrast zu dem umgebenden dünnen koronalem Plasma detektiert.

## Wichtige Ergebnisse

### Geometrische Form koronaler Massenauswürfe

Wir vergleichen verschiedene Methoden, um die dreidimensionale (3D) Struktur koronaler Massenauswürfe (CMEs) zu rekonstruieren. Die neuentwickelten Methoden umfassen die geometrische Lokalisierung, Maskenanpassung, Vorwärtsmodellierung, Polarisationsanalyse und lokales Korrelationstracking sowie stereoskopische Triangulation. Diese fünf Methoden wurden auf den gleichen, am 7. August 2010 beobachteten CME, angewendet. Abb. 1 zeigt den Vergleich zweier Rekonstruktionsmethoden (Maskenanpassung und Vorwärtsmodellierung). Rekonstruktionen mit Bildern von drei (statt nur zwei) Raumsonden sind präziser. Während man für die Vorwärtsmodellierung ein a-priori Modell der CME-geometrie benötigt, ist die Maskenanpassung flexibler (Feng et al. 2013).

### Modelle der globalen Korona

Wir modellieren das koronale Magnetfeld über einem Gebiet mit mehreren aktiven Regionen mit Hilfe eines globalen nichtlinear kraftfreien (NLFFF) Computercode, der Magnetfeldmessungen des Helioseismic and Magnetic Imager (SDO/HMI) der gesamten Sonnenscheibe als Randbedingung benutzt (Abb. 2). Aktive Regionen in den beiden Hemisphären sind magnetisch miteinander verbunden. Die entsprechenden trans-äquatorialen Loops sind dabei fast Stromfrei. Das bedeutet, dass unterschiedliche aktive Regionen zwar Magnetfelder, aber kaum Ströme miteinander teilen (Tadesse et al. 2014)

*SDO, in future Solar Orbiter) or other information like coronal magnetic field models. In order to extract the relevant information from EUV images we use image-processing schemes which detect small-scale, high-contrast features. More diffuse objects like CME clouds are reconstructed by detecting the density contrast to the surrounding low density corona.*

## Major results

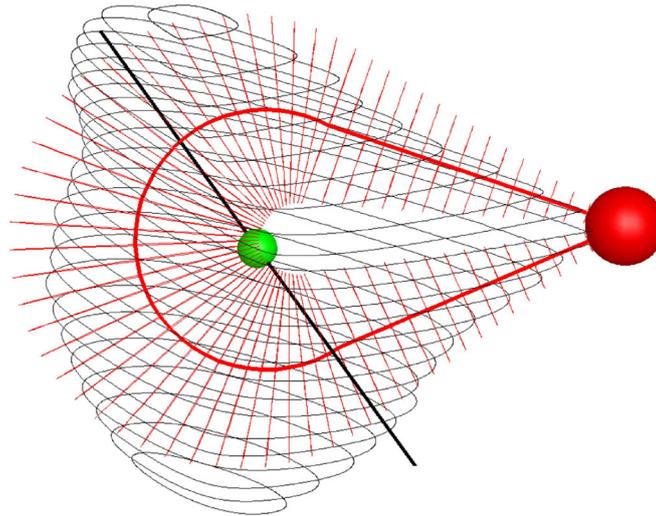
### Comparisons of CME Morphology

*We compare different methods to reconstruct three dimensional (3D) coronal mass ejection (CME) morphology. The explored methods include geometric localization, mask fitting, forward modelling, polarization ratio, and local correlation tracking plus triangulation. These five methods are applied to the same CME event that occurred on 7 August 2010. Figure 1 shows a comparison of the mask fitting and a forward fitting model. Reconstructions including three-view observations are more precise than reconstructions done with only two views. Compared to the forward modelling method, in which an a priori shape of the CME geometry is assumed, the mask fitting has more flexibility (Feng et al. 2013).*

### Global coronal modelling

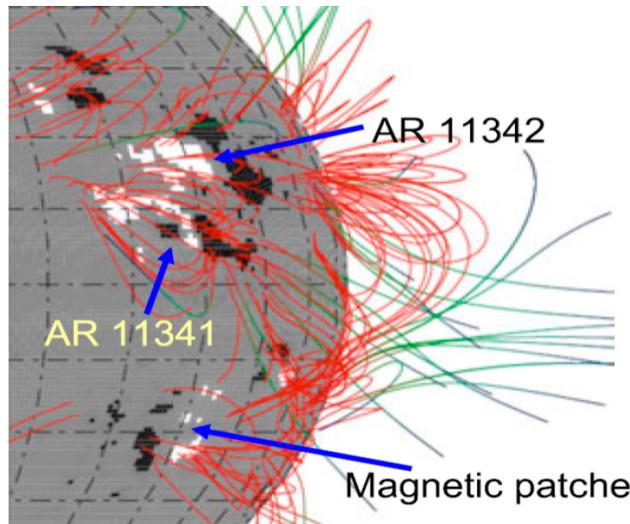
*We model the coronal magnetic field above multiple active regions with the help of a non-linear force free field (NLFFF) extrapolation code over the full solar disk using the Helioseismic and Magnetic Imager (SDO/HMI) data as boundary conditions (Fig. 2). It was found that active regions in the two solar hemispheres are magnetically connected. The corresponding trans-equatorial loops are almost currentfree. This means that the different active regions share a fair amount of magnetic flux, but hardly any electric currents (Tadesse et al. 2014).*

**Abb. 1:** Vergleich von zwei Methoden um eine 3D Flussröhre mit Maskenanpassung (schwarz) und Vorwärtsmodellierung (rot) zu rekonstruieren. Die rote Kugel zeigt die Sonne und die grüne den Massenschwerpunkt des CMEs (aus Feng et al. 2013 SolPhys 282, 221)



*Fig. 1: Comparison of a 3D flux rope reconstruction with a mask fitting technique (black) and the forward fitting GCS model (in red, GCS means Graduated Cylindrical Shell). The red ball shows the Sun and the green ball the center of mass of the CME (from Feng et al. 2013, SolPhys, 282, 221).*

**Abb. 2:** Ein nichtlinear kraft-freies Modell der globalen Sonnenkorona. Die weißen und schwarzen Gebiete auf der Sonnenoberfläche zeigen positive und negative Magnetfelder. Die roten Linien sind geschlossenen Loops, welche die positiven und negativen Gebiete auf der Sonnenoberfläche miteinander verbinden. Grüne Linien sind offene Feldlinien. Diese sind nur durch einem Fußpunkt mit der Sonnenoberfläche verbunden (aus Wiegelmann et al. 2014 SolPhys, 289, 831).



*Fig. 2: A nonlinear force-free model of the global solar corona. The white and black areas on the solar surface are positive and negative magnetic fields. Red lines are closed magnetic loops, which connect positive and negative areas on the Sun. The green lines are open field lines. They are connected only with one footpoint with the solar surface (from Tadesse et al. 2014, SolPhys, 289, 831).*

### Feinstruktur der ruhigen Sonne

Wir haben eine Zeitreihe hochaufgelöster Magnetfeldmessungen von Sunrise/IMaX in die Chromosphäre und Korona extrapoliert. Die meisten Magnetfeldloops sind unsymmetrisch in dem Sinne, dass die Magnetfelder an ihren Fußpunkten unterschiedlich stark sind. Die Magnetfeldtopologie ändert sich rapide, mit einer typischen Recyclingzeit von  $3 \pm 1$  Minuten in der oberen Atmosphäre und  $12 \pm 4$  Minuten in der Photosphäre. Die hierbei durch magnetische Rekonnexion freigesetzte Energie ist wahrscheinlich nicht ausreichend, um durch diesen Prozess alleine die Korona und Chromosphäre zu heizen (Wiegelmann et al. 2013).

### Fine Structure of Quiet Sun

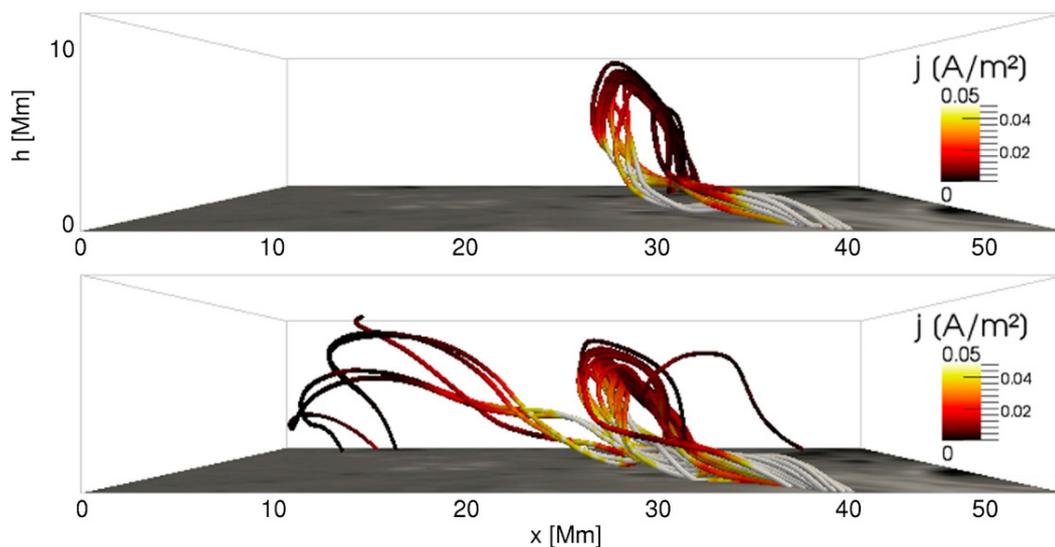
*We extrapolate a time series of high resolution quiet Sun magnetograms measured with Sunrise/IMaX into the chromosphere and corona. The majority of the modeled magnetic loops are asymmetric in the sense that the photospheric field strength at the loop foot points is very different. We find that the magnetic connectivity of the loops changes rapidly with a typical connection recycling time of about  $3 \pm 1$  minutes in the upper solar atmosphere and  $12 \pm 4$  minutes in the photosphere. The energy released by the associated magnetic-reconnection processes is not likely to be the sole source chromospheric and coronal heating in the quiet Sun (Wiegelmann et al. 2013).*

### Verdrillte und verflochtene Magnetfelder

Die aktive Sonnenkorona besteht im Wesentlichen aus geschlossenen Magnetfeldbögen. Fußpunkt-bewegungen auf der Sonnenoberfläche verdrillen und verflechten die zugehörigen Loops, was zur Speicherung von magnetischer Energie führt. Basierend auf 3D Koronamodellen konnten wir zeigen, dass die stärkste Emission an den am stärksten verdrillten Strukturen auftritt, siehe Abb. 3. Die gespeicherte Energie ist hierbei höher als frühere Studien vermuten lassen. Verbunden mit der gespeicherten Energie sind starke elektrische Ströme, die eine wichtige Rolle bei der Heizung des koronalen Plasmas spielen (Thalmann et al. 2014).

### Magnetic twist and braiding

*The active region corona is organized primarily in the form of closed magnetic loops. Motions on the Sun's surface move the footpoints of the loops, causing them to become braided and/or twisted and magnetic energy to be stored. Based on 3D coronal magnetic field modeling, we demonstrate that most intense coronal emission is associated with highly twisted structures (Fig. 3). We found that the magnetic energy stored in braided fields is higher than what was suspected from earlier investigations. Associated with the stored magnetic energy are strong electric currents, which are important to heat the coronal plasma (Thalmann et al. 2014).*



**Abb. 3:** Einige stark verdrillte und verflochtene Magnetfeldlinien aus einem nichtlinear kraftfreien Model. Die Farben der Feldlinien zeigen die elektrische Stromdichte an. Bild b zeigt die Konfiguration ca. 12 Minuten später als Bild a. Es wird angenommen, dass starke elektrische Ströme eine wichtige Rolle bei der Heizung des koronalen Plasmas spielen (aus Thalmann et al. 2014, ApJ, 780, 102).

*Fig. 3:* Selected, strongly twisted magnetic field lines based on a nonlinear force free model. The field lines are color coded with the electric current density. Panel b has been taken 12 min after panel a. Strong electric currents are a source for heating the coronal plasma (from Thalmann et al. 2014, ApJ, 780, 102).

Team in 2013/2014: .....

Thomas Wiegelmann,  
Bernd Inhester,  
Borut Podlipnik,  
Iulia Chifu,  
Stephan Barra,  
Ioanna Patsou,  
Lei Lu,  
Xinhua Zhao,  
Li Feng



Ausgewählte Publikationen / *Selected publications* .....

- Feng L., Inhester B., Mierla M. (2013): SolPhys 282, 221 (17 pp):  
Comparisons of CME Morphological Characteristics Derived from Five 3D Reconstruction Methods
- Tadesse T., Wiegelmann T., MacNeice P. J. et al. (2014): SolPhys, 289, 831 (14pp):  
A Comparison Between Nonlinear Force-Free Field and Potential Field Models Using Full-Disk SDO/HMI Magnetogram
- Thalmann J., Tiwari, S. K., Wiegelmann T. (2014): ApJ, 780, 102 (8 pp)  
Force-free Field Modeling of Twist and Braiding-induced Magnetic Energy in an Active-region Corona
- Wiegelmann T., Solanki S. K., Borrero J. M., Peter H. et al. (2013): SolPhys, 283, 253 (19pp)  
Evolution of the Fine Structure of Magnetic Fields in the Quiet Sun: Observations from Sunrise/IMaX and Extrapolations

# Solare Magnetohydrodynamik

## *Solar Magnetohydrodynamics*

Die Aktivität der Sonne und ähnlicher Sterne wird durch ihre Magnetfelder bestimmt. Wie auch in anderen Abschnitten dieses Berichts beschrieben, ist der überwiegende Teil der Forschung in der Sonnenabteilung des MPS auf das Magnetfeld bezogen.

Woher kommen diese Magnetfelder? Warum variiert die Menge von magnetischem Fluss an der Sonnenoberfläche zeitlich? Wie erscheinen Magnetfelder und wie entwickeln sie sich an der Oberfläche der Sonne und anderer Sterne? Unsere Arbeitsgruppe geht diese Fragen auf der Grundlage der Magnetohydrodynamik (MHD) an. Diese Theorie beschreibt die Wechselwirkung von Magnetfeldern mit dem ionisierten Gas (dem Plasma) im Inneren der Sonne und anderer Sterne. Wir arbeiten in engem Kontakt zwischen unserem theoretischen Ansatz (der aufwendige Computer-Simulationen einschließt) und Beobachtungsergebnissen von anderen Arbeitsgruppen in der Sonnenabteilung des MPS und anderswo.

In den Jahren 2013 und 2014 haben wir uns auf zwei Themengebiete konzentriert. Das erste betrifft Magnetfelder an der Oberfläche von Sternen. Im Einzelnen haben wir dabei untersucht, wie Magnetfelder das von den Sternen emittierte Licht, welches beobachtet wird, beeinflussen. Das Magnetfeld prägt in charakteristischer Weise das vom Stern in verschiedenen Wellenlängen (verschiedenen Farben des Spektrums) kommende

*The activity of the Sun and other cool stars is dominated by its magnetic field. Most of the research undertaken in the solar department at MPS, as also described in other sections of this report, is directly related to the magnetic field.*

*Where does this magnetic field come from? Why does the amount of magnetic field at the solar surface vary in time? How do magnetic fields appear and evolve on the surface of the Sun and other stars? Our group addresses these questions on the basis of magnetohydrodynamics (MHD). This theory describes how magnetic fields interact with the ionized gas (the plasma) inside the Sun and stars. We work in close contact between our theoretical approach (including computationally intensive simulations) and observational results from other groups in the solar department at the MPS and elsewhere.*

*In the years 2013 and 2014 we have concentrated on two topics. The first concerns magnetic fields on the surface of stars. In particular, we considered how the magnetic field affects the emitted light from the star which can be observed. The magnetic field imprints its signature on the amount of light coming from the star at different wavelengths (different colors of the spectrum) and, in particular, on the shape*

Licht, insbesondere die Form der Spektrallinien. Es ist wesentlich, diese Prägung zu verstehen, um zuverlässig das Magnetfeld eines Sterns aus den Beobachtungen zu erschließen – wenn wir nicht wissen, wie die magnetische Struktur auf anderen Sterne aussieht, dann ist es für Beobachter unmöglich, ihre Messungen richtig zu interpretieren.

Um dieses Ziel zu erreichen, führen wir zunächst Computer-Simulationen durch, um die Struktur des Magnetfeldes auf einem kleinen Gebiet an der Oberfläche eines Sterns zu bestimmen. Dies geschieht mit einem modernen hochauflösenden 3D-Programmcode, der die wesentlichen physikalischen Prozesse in den oberflächennahen Schichten eines Sterns beschreibt. Zu diesen Prozessen gehören der Energietransport durch elektromagnetische Strahlung und konvektive Strömungen, die Wirkung von Veränderungen des Ionisierungsgrades der chemischen Bestandteile des stellaren Plasmas und die dynamischen Wirkungen der Magnetfelder. Diese komplexen Prozesse können nur durch aufwändige Computersimulationen behandelt werden. Die Abbildung 1 zeigt Ergebnisse solcher Simulationen.

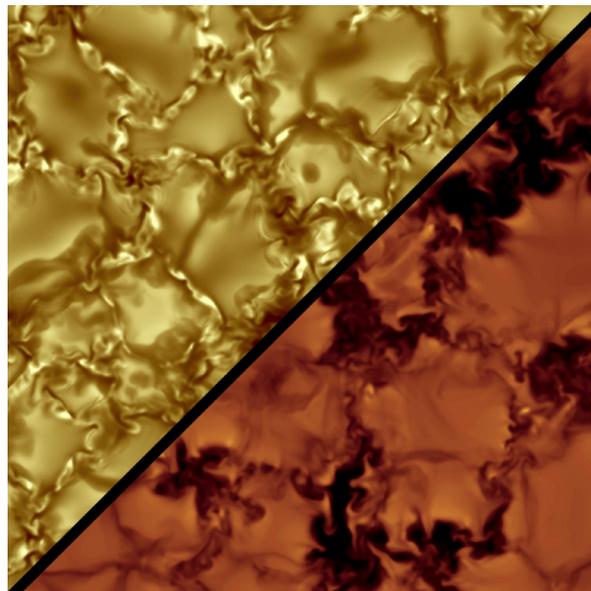
Wenn ein kleiner Teil der Sternoberfläche simuliert ist, kann das vom Stern kommende integrierte Licht betrachtet werden, indem man die kleinen Ausschnitte auf einer Kugeloberfläche zusammensetzt, wie es in Abbildung 2 gezeigt ist.

*of the spectral lines. Understanding the signature is essential in order to confidently infer the magnetic fields on stars from observations – if we don't know what the magnetic structure looks like on other stars than it is impossible for observers to properly interpret what they measure.*

*To accomplish this goal, we first carry out computer simulations in order to determine the structure of the magnetic field on a small patch of the stellar surface. We do this using a state-of-the-art, high-resolution, 3D numerical simulation code describing the physical processes relevant for the near-surface layers of a star. These processes include the transfer of energy by electromagnetic radiation as well as by convective motions, the effects of changes in the ionization state of the chemical constituents of the stellar plasma, and the dynamical effects of magnetic fields. These complex processes are only tractable using large computer simulations. Figure 2 shows results of such simulations.*

*Once a small part of a stellar surface has been simulated, the integrated light from the star can be considered by pasting the small patches onto a spherical surface as shown in Figure 2.*

**Abb. 1:** Wirkung des Magnetfeldes auf die Oberflächenhelligkeit eines Sterns ähnlich der Sonne (links oben) und eines kühleren und masseärmeren M2-Sterns (rechts unten). Beim sonnenähnlichen Stern zeigt sich das Magnetfeld in den hellen Streifen zwischen den homogener erscheinenden Gebieten (konvektive Aufströmungen, Granulen genannt). Im Fall des viel kühleren M2-Sterns führt das Magnetfeld zu dunklen Strukturen zwischen den Granulen.



*Fig. 1: Effect of the magnetic field on the surface brightness of a Sun-like star (upper left), and a cooler, less massive M2 star (lower right). In the Sun-like case, the magnetic field corresponds to the bright lanes between the smooth regions (convective outflows, called granules). In the case of the much cooler M2 star the magnetic field leads to the dark structures between the granules.*

Abb. 2: Geometrie für das Zusammensetzen von lokalen Simulationsbereichen auf eine Kugeloberfläche, um das gesamte von einem Stern ausgesandte Licht zu berechnen. Die wesentlichen Größen sind der Sichtwinkel ( $\mu$ ) und die lokale Geschwindigkeit ( $v$ ) in Richtung des Beobachters durch die Rotation des Sterns.

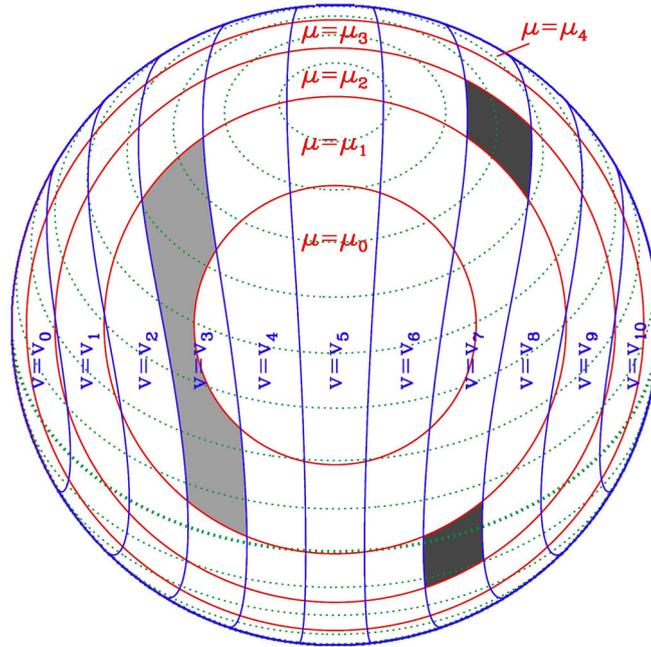


Fig. 2: Geometry for pasting local simulation boxes onto a sphere in order to obtain the total light from the star. The important quantities are the viewing angle ( $\mu$ ) and the local velocity ( $v$ ) in the direction of the observer due to the rotation of the star.

Das zweite Thema, auf das wir uns in 2013 und 2014 konzentrierten, ist die Ursache der Veränderungen der magnetischen Aktivität von einem Aktivitätszyklus der Sonne zum nächsten. Wie man in Abb. 3 sieht, variiert die Häufigkeit, mit der Sonnenflecken an der Sonnenoberfläche auftauchen (ein gutes Maß für die allgemeine magnetische Aktivität), zeitlich stark. Die etwa 11 Jahre dauernden Zyklen, die deutlich in ihrer Amplitude variieren, sind dabei von besonderer Bedeutung. Wir fanden heraus, dass das Auftauchen von großen Sonnenfleckengruppen, die sich über den solaren Äquator erstrecken, eine der hauptsächlichen Ursachen für diese Variabilität ist.

*The second topic which we focused on in 2013 and 2014 was the cause of the variations in magnetic activity from one solar activity cycle to the next. As shown in Figure 3, the rate at which sunspots emerge on the solar surface (a good proxy for magnetic activity in general), varies strongly in time. Particularly noteworthy are the cycles, which last about 11 years and vary significantly in their strength. We have identified the emergence of large sunspot groups across the equator as one of the main drivers for this variability.*

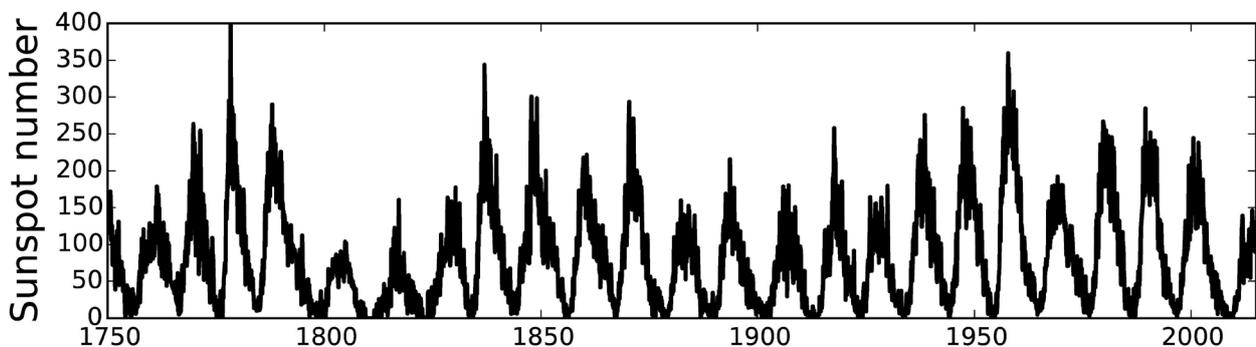


Abb. 3: Zahl der Sonnenflecken an der Sonnenoberfläche als Funktion der Zeit. Die Stärke der Sonnenaktivität steigt und fällt in Zyklen von etwa 11 Jahren, deren Amplitude deutlich variiert. Ein Forschungsziel der Arbeitsgruppe ist es, die Ursache dieser Variabilität zu verstehen.

*Fig. 3: The number of sunspots on the solar surface as a function of time. The amount of solar activity waxes and wanes in cycles of 11 years, whose amplitude varies significantly. One aim of the research in the group is to understand the origin of this variability.*

Team in 2013/2014: .....

David Martin Belda,  
Benjamin Beeck,  
Robert Cameron,  
Dieter Schmitt,  
Manfred Schüssler.

Am 4. Dezember 2013 verstarb unser Freund und langjähriges Gruppenmitglied Dieter Schmitt.

Wir vermissen ihn schmerzlich

*On December 4, 2013, our friend and group member for many years, Dieter Schmitt, passed away. We miss him sadly.*



Referenzen /References .....

- Beeck, B., Cameron, R. H., Reiners, A., Schüssler, M.; *Three-dimensional simulations of near-surface convection in main-sequence stars. I. Overall structure*; A&A 558, A48 (2013)
- Beeck, B., Cameron, R. H., Reiners, A., Schüssler, M.; *Three-dimensional simulations of near-surface convection in main-sequence stars. II. Properties of granulation and spectral lines*; A&A 558, A49 (2013)
- Cameron, R. H., Dasi-Espuig, M., Jiang, J., Isik, E., Schmitt, D., Schüssler, M.; *Limits to solar cycle predictability: Cross-equatorial flux plumes*; 2013, A&A 557 A141 (2013)
- Jiang, J., Cameron, R. H., Schüssler, M.; *Effects of the scatter in sunspot group tilt angles on the large-scale magnetic field at the solar surface*; ApJ 791, 5 (2014)

# Theorie und Simulation des Sonnensystemplasmas

## *Theory and Simulation of the Solar System Plasmas*

### **Forschungsgebiet**

Das Sonnensystem ist angefüllt mit Plasma, also geladenen Teilchen: Elektronen und Protonen (Ionen des Wasserstoffs) sowie aus Ionen anderer Elemente und Moleküle. Im Mittel gleichen sich die elektrischen Ladungen jedoch aus, d.h. das Sonnensystemplasma ist insgesamt elektrisch neutral. Wegen der Ladungen fließen jedoch elektrische Ströme die in den Magnetfeldern der Sonne und Planeten starke Kräfte entfalten. Dadurch bildet das Plasma Strukturen, in denen Energie akkumuliert und Magnetfelder verstärkt werden (Dynamo-Effekt). Von Zeit zu Zeit setzen diese Strukturen die in ihnen gespeicherten Energien durch einen „magnetische Rekonnexion“ genannten Prozess schlagartig frei. Bekannte Beispiele sind Sonneneruptionen, solare Massenauswürfe und planetare Magnetstürme.

Damit bestimmen die Sonnensystemplasmen das Weltraumwetter, dem Satelliten und Raumfahrer aber auch der ionisierte Teil der Erdatmosphäre oder zum Beispiel Hochspannungsnetze und Hochleistungstransformatoren direkt ausgesetzt sind. Obwohl in den meisten Fällen unsichtbar für unsere Augen sind Weltraumplasmen also von großer Bedeutung für das menschliche Leben. Daher werden sie auch daher permanent mit Hilfe von Teleskopen auf der Erde und Satelliten im Weltraum überwacht. Ein besseres Verständnis des häufig rätselhaften Verhaltens der Sonnensys-

### **Research area**

*The solar system is filled with magnetized plasmas which consist of electrically charged particles like electrons and hydrogen ions – protons as well as ions of other elements and molecules. Their total electrical charges are balanced. Thus, the solar system plasma is, overall, electrically neutral. Electrical plasma currents can cause, however, strong magnetic forces in the magnetic fields of the Sun and planets. As a result, the solar system plasmas form structures which accumulate energy and enhance magnetic fields (dynamo effect). From time to time, these structures explode releasing temporarily accumulated magnetic energy by a process called “magnetic reconnection”. These explosions manifest themselves, e.g., in solar flares and consequent coronal mass ejections (CMEs) as well as in planetary magnetic storms.*

*This way the overall plasma dynamics determine the “space weather” in the Solar system which affects not only satellites and astronauts but also the ionized part of Earth’s atmosphere, high voltage power grids and high performance transformers which, in turn, affects human civilization despite most of solar system plasma is invisible! We aim to understand these dynamics with the help of, sophisticated spacecraft experiments and remote astrophysical*

templasmen wird uns auch helfen, die Plasmen des Universums, also in anderen Sternensystemen und Galaxien zu verstehen. Wir sind allerdings noch davon entfernt, etwa die Plasmaexplosionen auf der Sonne soweit zu verstehen, dass ihre Voraussage möglich würde. Um einer Lösung dieser Frage näherzukommen, ist es notwendig Unmengen gegenwärtig von Satelliten und Teleskopen gesammelter Daten auszuwerten. Voraussetzung dafür ist es, gut begründete Hypothesen und Theorien zu entwickeln.

Die TSSSP-Gruppe trägt hierzu mit Arbeiten zu fundamentalen offenen Fragen zur Plasmadynamik im Weltall bei. Insbesondere suchen wir nach den Ursachen von Plasmaexplosionen und der Freisetzung kosmischer Energien in den heißen und stark verdünnten, über elektromagnetische Wellen und Turbulenzen wechselwirkende Weltraumplasmen. Im Mittelpunkt unserer Forschungen steht die schnelle, häufig explosive magnetische Rekonnexion. Wir untersuchen ihre Ursachen und ihre Folgen für Plasmaheizung, die Beschleunigung von Plasmen sowie einzelner geladener Teilchen auf sehr hohe Energien. Da die turbulenten Sonnensystemplasmen hochkomplexe Gebilde sind, untersuchen wir sie nicht nur mit Hilfe von analytisch-theoretischen Methoden, sondern auch durch numerische Simulationen auf modernen Höchstleistungs-Supercomputern. Durch geeignete numerische Experimente können wir nämlich unsere theoretischen Ableitungen am besten überprüfen und ihre Schlussfolgerungen dann direkt mit den zumeist sehr lückenhaften Beobachtungsergebnissen im Sonnensystem vergleichen. Computersimulationen erlauben uns auch einen direkten Vergleich unserer theoretischen Modelle mit Laborexperimenten zur magnetischen Rekonnexion in Greifswald (Experiment VINETA-2), Princeton (Experimente MRX und FLARE) und Tokyo (Experiment MAST).

*observations the solar system. A better understanding of solar system plasma will help us to understand better also the plasmas of the Universe, i. e. in other stellar systems and galaxies. Its theoretical understanding is, however, still in its infancy. We are far away from a solution of problems like the plasma explosions at the Sun to a degree that we could predict them. To solve these problems one has to analyze the huge amount of data collected by spacecraft and telescopes. Such analyses require in the first place the development of appropriate hypotheses and theories.*

*The TSSSP group contributes to the solution of several fundamental open questions concerning plasma dynamics in space. Most of all, we investigate the reasons for plasma explosions and energy releases in space plasmas. Special emphasis is put on the mechanism of the fast and often explosive magnetic reconnection. We investigate its causes and its effects on plasma heating and the acceleration of plasmas as well as individual particles to high energies. Since collisionless plasmas form very complex systems with a high degree of freedom, we investigate them not only by analytical-theoretical methods but also by numerical simulations on modern supercomputers. The results of appropriate numerical experiments allow us to test our hypotheses and to compare their results with observations. Sophisticated numerical simulations also help us validate our theories by applying them to laboratory plasma experiments, carried out, e.g., at Princeton (MRX and FLARE), Greifswald (VINETA-2) and Tokyo (MAST).*

## Wichtige Ergebnisse

### Helle Sonnenflecken durch Kompression solaren Plasmas

Es ist bis heute nicht geklärt, auf welche Weise sich die Sonnenkorona auf Temperaturen von mehreren Millionen Grad aufheizt während die Oberfläche der Sonne gerade einmal 6000 K heiß ist. Mit Hilfe von Computersimulationen des koronalen Plasma konnten wir zeigen, dass außerordentlich heiße, d. h. helle Flecken in der Sonnenatmosphäre genau dort beobachtet werden, wo aus dem Sonneninneren aufsteigende Energien die Magnetfelder „verbiegen“, wodurch das Plasma der Sonnenkorona komprimiert wird und sich daher aufheizt (Adamson et al., 2013).

## Major results

### Bright spots at the Sun caused by compression of solar plasmas

*It is still unclear why the solar corona is millions of degree K hot while the surface temperature of the Sun is only about 6000 K. By means of direct numerical simulations of the coronal plasma we could show that extraordinary bright, i.e. hot, spots in the solar atmosphere can be observed in the same places where the plasma is compressed due to the transfer of energy from the sub-photospheric convection zone to the corona by bending magnetic fluxes (Adamson et al., 2013).*

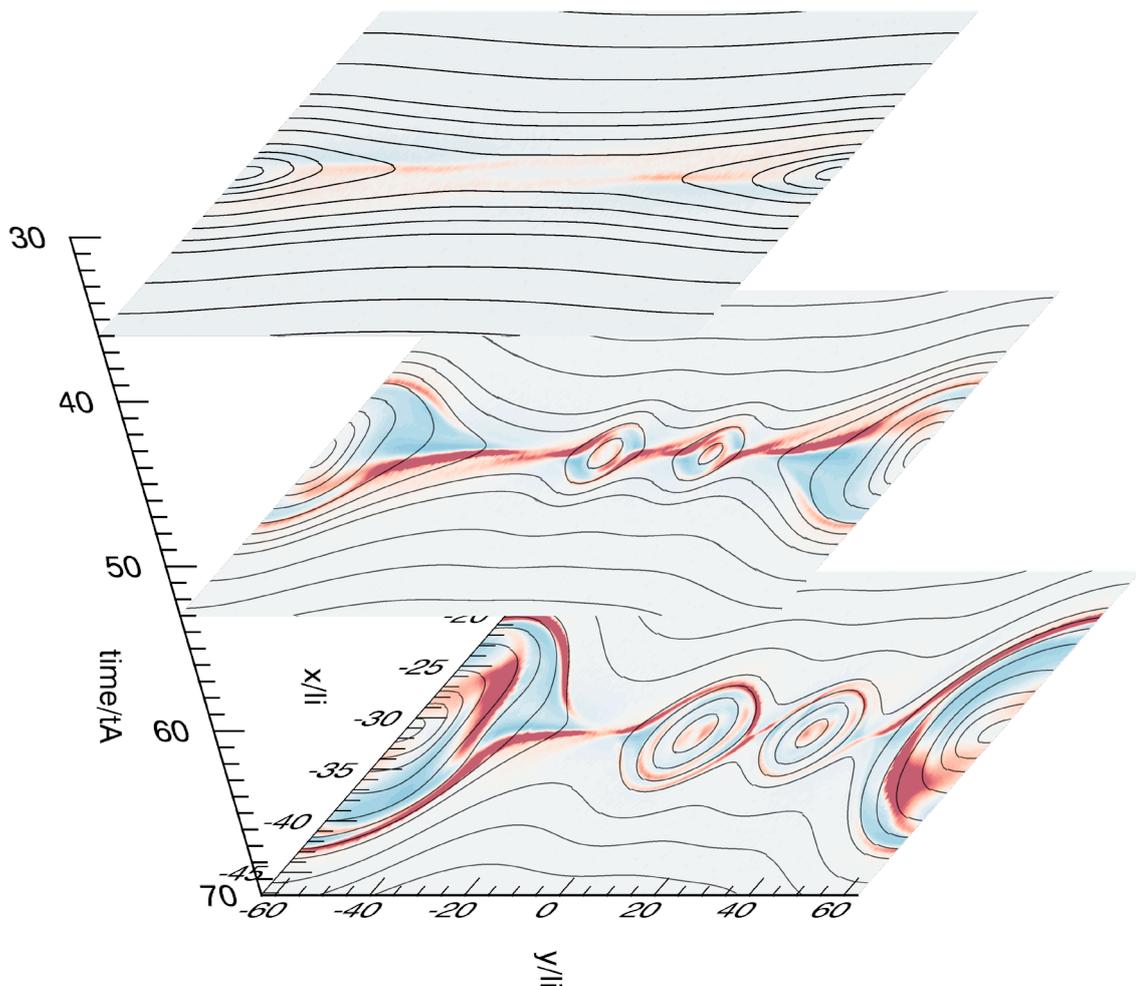


Abb. 1: Plasmakinetische Simulation schneller Rekonnexion (Schwarz: Magnetische Feldlinien) durch magnetische Turbulenz (Blau und rotgefärbte Gebiete).

Fig. 1: Kinetic plasma simulation of fast magnetic reconnection (black: evolving magnetic field lines) supported by turbulence (blue and red regions).

### **Vestärkung magnetischer Rekonnexion durch kleinskalige Turbulenz**

Mit Hilfe plasmakinetischer numerischer Simulationen untersuchten wir die Auswirkungen kleinskaliger Turbulenz auf die Effizienz der magnetischen Rekonnexion. Wir konnten zeigen, dass Mikroturbulenz in stoßfreien Sonnensystemplasmen die Verwandlung magnetischer Energie in Bewegungsenergie des Plasmas und seine Heizung durch Rekonnexion beschleunigt (Büchner & Schmidt 2013, Muñoz et al. 2014, Abb. 1).

### **Ist magnetische Helizität (Verdrillung) ein guter Hinweis auf bevorstehende Sonneneruption?**

Wir entwickelten eine neue Methode zur Berechnung der magnetischen Helizität, d. h. der Verdrillung von Magnetfelder, in der Sonnenkorona die auf Sonnenbeobachtungen beruht. Wir verglichen die ermittelte Helizität mit den Ergebnissen von Computersimulationen „Aktiver Regionen“ auf der Sonne, oberhalb von Sonnenflecken. Wir konnten zeigen, dass die magnetische Helizität vor dem Ausbruch von Sonneneruptionen ein kritisches Niveau erreicht während sie anschließend an der Sonne stark abfällt da sie in den interplanetaren Raum transportiert wird (Yang et al. 2013).

### **Ausbreitung von Stromabrissen nach stoßfreier magnetischer Rekonnexion im Laborexperiment**

Das Laborplasma-Experiment MRX der Universität von Princeton, New Jersey (USA) ergab, dass sich Stromabrisse durch magnetische Rekonnexion nach einer Eruption in einem stoßfreien Plasma mit hoher Geschwindigkeit ausbreiten. Mit Hilfe einer Elektronen-MHD (EMHD)-Beschreibung des Plasmas konnten wir zeigen, dass die Ausbreitung der Abrisse derjenigen einer Elektronen-Plasmawelle entspricht, die durch die Eruption selbst ausgelöst wird (Jain et al. 2013). Wir lösten das Problem mit Hilfe einer Auswertung der linearen Dispersion von Stromschichten auf der Elektronenskala (Jain & Büchner, 2014-a). Mit Hilfe numerischer (EMHD)-Simulationen fanden wir heraus, dass sich danach in Elektronen-Stromschichten dreidi-

### **Enhanced magnetic reconnection by small-scale turbulence**

*We simulated the consequences of small scale turbulence for the evolution of magnetic reconnection by means of kinetic numerical simulations. We could show that the micro-turbulence of collisionless solar system plasmas crucially affects the conversion of magnetic energy to plasma kinetic energy and heat by magnetic reconnection (Büchner & Schmidt 2013, Muñoz et al. 2014, see Fig. 1).*

### **Is magnetic helicity a good predictor of solar eruptions?**

*We developed a new method to calculate the relative magnetic helicity evolution in the solar corona based on observations. We compared the calculated helicity to simulated active regions above sunspots. We could show that the helicity prior to an eruption first increases to a critical level and suddenly drops afterwards because it is transported into interplanetary space (Yang et al. 2013).*

### **Spreading of current disruption after collisionless magnetic reconnection in laboratory experiments**

*The University of Princeton laboratory experiment MRX revealed that after initial eruption collisionless magnetic reconnection is spreading at high speed. By means of an electron-MHD (EMHD) approach we could show that this spreading is due to the propagation of electron plasma waves self-generated by the eruption (Jain et al. 2013). We solved this problem using our findings about the linear dispersion of electron-scale current sheets (Jain & Büchner, 2014-a). By means of numerical EMHD simulations we found that in the course of the consequent evolution of thin and thick electron scale current sheets three-dimensional plasmoids are formed while the current sheet filaments*

Abb. 2: Nichtlineare Evolution instabiler Stromschichten auf der Elektronenskala dargestellt durch EMHD Simulationen: Bildung dreidimensionaler Strukturen, sogenannter Plasmoide (blaue Linien: Magnetfeld) und Filamentierung der Stromschicht (siehe die rot und gelb gefärbten Oberflächen konstanter Stromdichte).

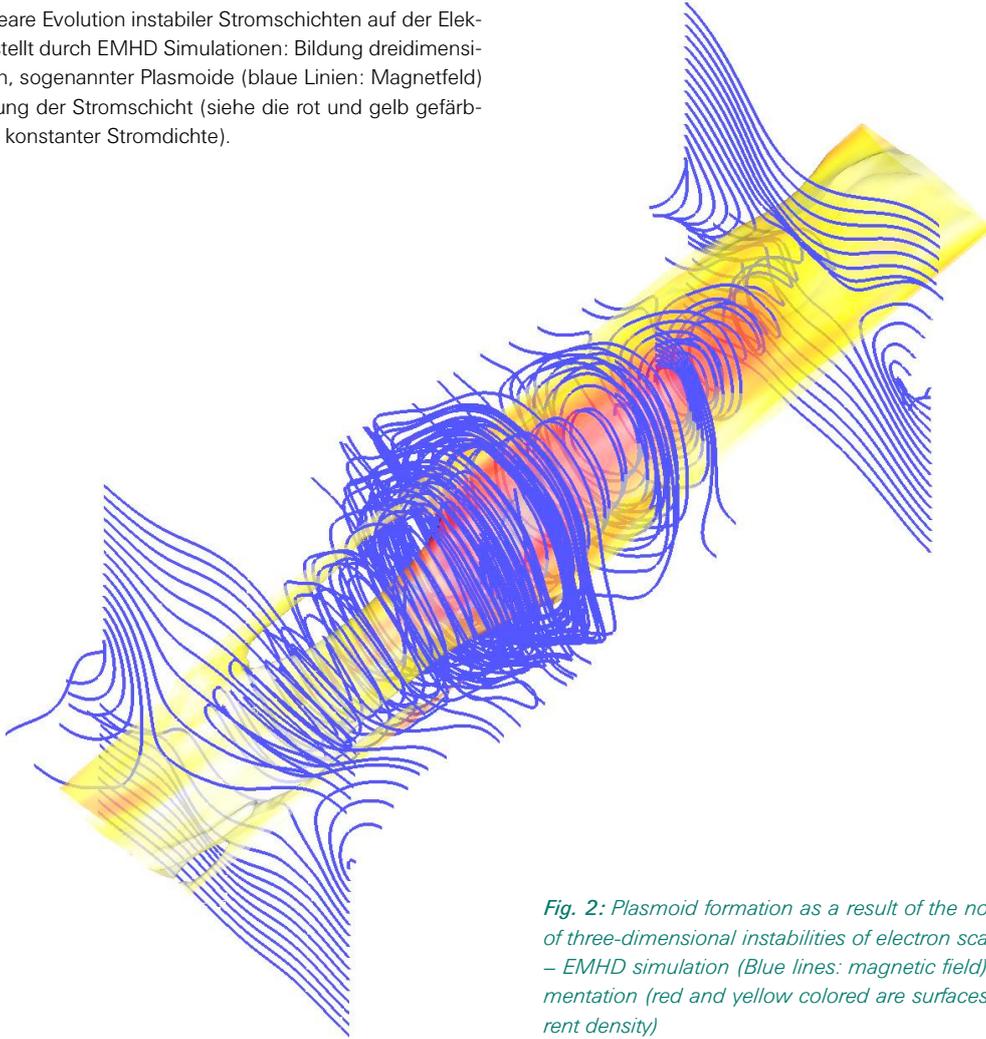


Fig. 2: Plasmoid formation as a result of the nonlinear evolution of three-dimensional instabilities of electron scale current sheets – EMHD simulation (Blue lines: magnetic field) and current filamentation (red and yellow colored are surfaces of constant current density)

mensionale Strukturen (“Plasmoide”) bilden während die Stromschicht in Folge der magnetischen Rekonnexion filamentiert wird (Jain & Büchner, 2014-b, Abb. 2).

### Der Einfluss anisotroper Heizung auf die Stabilität stoßfreier Plasmastromschichten

Mit Hilfe des Teilchen (PIC-) Computercodes „ACRONYM“ simulierten wir die nichtlineare Evolution stoßfreier Stromschichten in antiparallelen Magnetfeldern (Harris-Schichten). Neben anderen Ergebnissen fanden wir heraus, dass das Plasma in Magnetfeldrichtung und senkrecht dazu unter Umständen verschieden stark geheizt werden kann. Eine anisotrope Heizung führt dann aber zu einer Bifurkation der Stromschichten, wodurch die magnetische Rekonnexion verlangsamt wird (Muñoz et al. 2014-a).

due to magnetic reconnection (Jain & Büchner, 2014-b, see Fig. 2).

### The influence of anisotropic heating on the stability of collisionless plasma current sheets

Utilizing the PIC-code “ACRONYM” we simulated the evolution of Harris-type collisionless current sheets. Among other findings we discovered which crucial role anisotropic heating plays for current sheet bifurcation and slowing down magnetic reconnection (Muñoz et al. 2014-a).

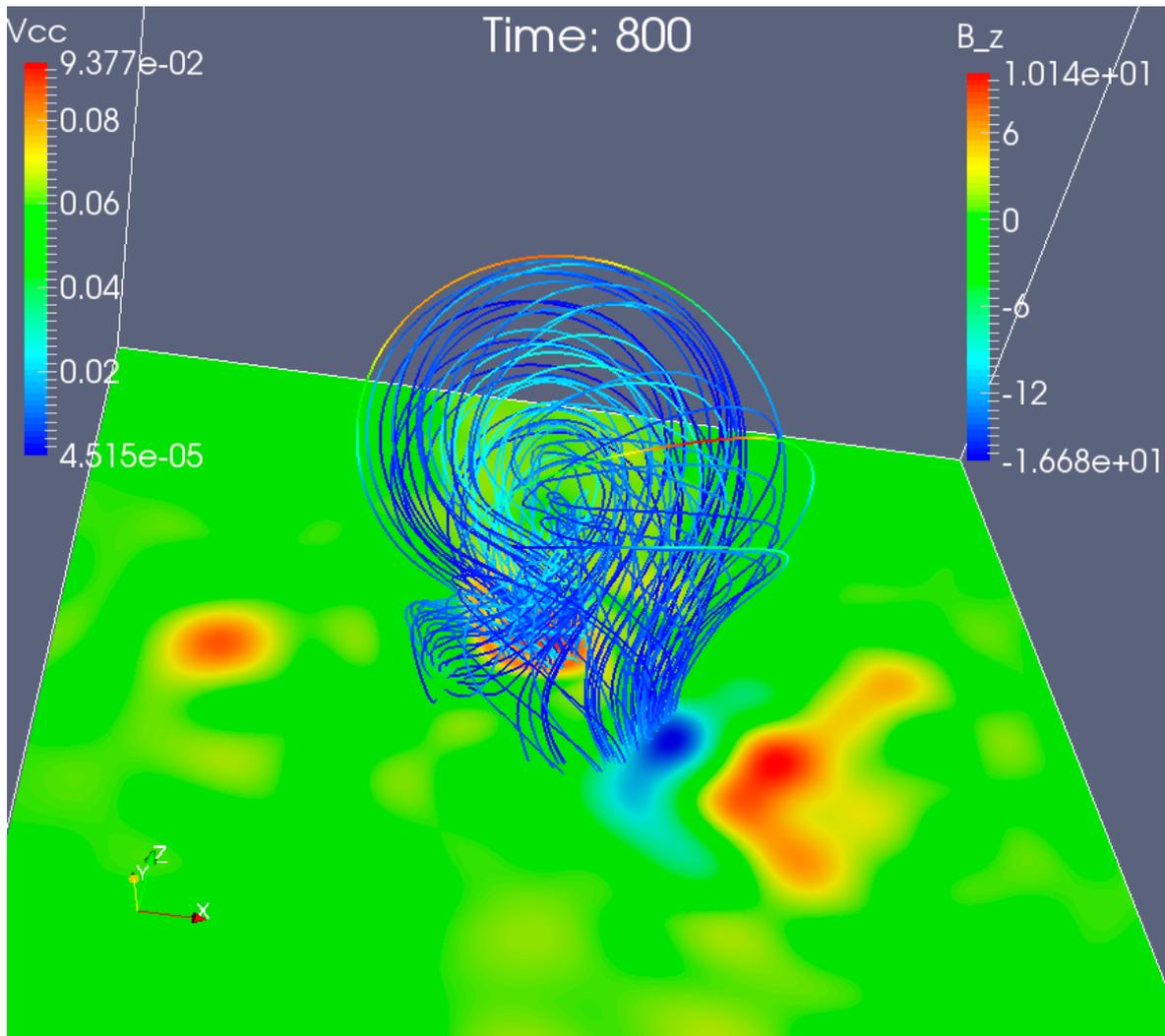


Abb. 3: Datenbasierte Simulation des koronalen Massenauswurfs aus der aktiven Region AR11226 am 7. Juni 2011. Diese Simulation wurde mithilfe des neu entwickelten Programms GOEMHD erstellt.

Fig. 3: Data driven simulation of the CME eruption from the active region AR 11226 at the Sun on June 7, 2011. The simulation was carried out by using the newly developed GOEMHD3 code.

### Vergleich von PIC-Code und gyrokinetischer Dynamik magnetischer Rekonnexion bei starkem Führungsfeld

Mit Hilfe des Teilchen (PIC-) Computercodes „ACRONYM“ untersuchten wir auch die Stabilität für die Sonnenkorona typischer kraftfreier Stromschichten, in denen das starke Magnetfeld der Sonne dominiert und verglichen diese Ergebnisse verglichen wir mit Computersimulationen des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik in Garching, die auf vereinfachten, sogenannten gyrokinetischen Annahmen beruhen. Wir fanden heraus, für welche Sonnenparameter die vereinfachte gyrokinetische Beschreibung nicht mehr anwendbar ist (Muñoz et al., 2014-2).

### Comparison of gyrokinetic and PIC-code simula strong guide-field magnetic reconnection

Utilizing the PIC-code “ACRONYM” we further analyzed the stability of force-free current sheets with strong guide fields typical for the solar corona and compared them with the results of simulations of the Max Planck Institute for Plasma Physics in Garching which are based on gyrokinetic assumptions. We discovered for which parameters this simplified approach is no longer applicable (Muñoz et al. 2014-b).

### **Simulation von Sonnenruptionen mit unserem neuen MHD-Computerprogramm „GOEMHD3“**

Magneto-Hydrodynamische (MHD-) Computerprogramme sind in der Regel zu dissipativ, numerisch verlustbehaftet, um die Ursache von Sonnenruptionen nach längeren Phasen ungehinderter Akkumulation magnetischer Energie adäquat beschreiben zu können. Daher entwickelten wir gemeinsam mit dem Rechenzentrum Garching der MPG das neue Programmsystem „GOEMHD3“, das auf einem verlustarmen Algorithmus basiert und auf paralleles Rechnen auf modernsten Supercomputern optimiert ist. Nachdem das Programm durch Lösung von Testproblemen validiert wurde können damit Sonnenruptionen auf der Grundlage von Sonnenbeobachtungen simuliert werden (Skala et al., 2014; Filme können über die Webseite angeschaut werden).

### ***Simulation of Solar eruptions using our new MHD code GOEMHD3***

*Existing magnetohydrodynamic (MHD) simulation codes are usually too dissipative and prone to too high numerical losses to adequately describe the cause of solar eruptions after longer periods of unhindered accumulation. This is why we developed the new high-Reynolds-number MHD code GOEMHD3 together with the MPG's computing center in Garching. This code is based on a low-loss algorithm and it is massively parallelized for the use of forefront supercomputers. After validating the code by solving a number of physical test problems we succeeded to simulate eruptions in the solar corona driven by solar observations (Skala et al. 2014; movies are available on the web page).*

#### **Team in 2013/2014:** .....

Jörg Büchner, Eric Adamson, Neeraj Jain, Patrick Kilian, Lihui Cai, Patricio Muñoz, Suzana da Souza, Jan Skala, Fabien Widmer, Shangbin Yang, Sijie Yu, Xiaowei Zhou



#### **Referenzen /References** .....

- Adamson E., Büchner, J. Otto A. (2013): A&A, 557, A118 (14 pp): On the role of current dissipation in the energization of coronal bright points
- Büchner J., Schmidt W. (2013): International Innovation, Research Media, 124, 53 (3 pp): The behaviour of plasmas
- Jain N., Büchner J., Dorfman S., Ji H., Sharma A. S. (2013): Phys. Plasmas, 20, 112101: Current disruption and its spreading in collisionless magnetic reconnection
- Jain N., Büchner J (2014-a): Phys. Plasmas, 21, 062116: Three-dimensional instabilities of an electron scale current sheet in collisionless magnetic reconnection
- Jain N., Büchner J. (2014-b): Phys. Plasmas, 21, 072306: Nonlinear evolution of three-dimensional instabilities of thin and thick electron scale current sheets: Plasmoid formation and current filamentation
- Muñoz P.A., Kilian P., Büchner J. (2014): Phys. Plasmas, 21(11), 112106: Instabilities of collisionless current sheets revisited: The role of anisotropic heating
- Skala J, Baruffa F., Büchner J., Rampp M. (2014): arxiv: <http://arxiv.org/abs/1411.1289>  
The 3D MHD code GOEMHD3 for astrophysical plasmas with large Reynolds numbers
- Yang S., Büchner J., Santos J. C., Zhang, H. (2013): Solar Physics, 283:369-382 (13 pp) Evolution of Relative Magnetic Helicity: Method of Computation and Its Application to a Simulated Solar Corona above an Active Region

**DAS INNERE DER SONNE UND DER STERNE**

***SOLAR AND STELLAR INTERIORS***

# Übersicht der Abteilung

Die Ursache für den elfjährigen magnetischen Zyklus der Sonne ist eine der wichtigsten ungelösten Fragen in der Sonnenphysik. Im Allgemeinen betrifft diese Frage alle kühlen Sterne, deren äußere Schichten Konvektion aufweisen. Diese Aktivitäts-Zyklen werden als die Wechselwirkung zwischen Materieströmen (z. B. Rotation, meridionaler Fluss, Konvektion) und Magnetfeldern interpretiert und mit Dynamo-Modellen beschrieben. Es ist allerdings unklar, wo genau in der Sonne und wie im einzelnen diese Dynamoprozesse ablaufen. Auch was die Periode der Aktivitätszyklen festlegt, ist nicht bekannt. Um diese Fragen zu beantworten, werden mehr empirische Informationen über die Dynamik im Inneren der Sonne und anderen Sternen benötigt.

Die Helioseismologie bedient sich der sichtbaren Schwingungen der Sonne, um das Innere unseres Heimatsterns zu erforschen. Mit ähnlichen Methoden macht die Asteroseismologie die Schwingungen von anderen Sternen nutzbar. Dank dieser Werkzeuge können nicht nur die Theorien zu Sternaufbau und -Entwicklung getestet und verfeinert werden, sondern auch thermische Strukturen und Strömungen im Inneren der Sonne und anderer Sterne studiert werden. Dies trägt dazu bei, das Magnetfeld dieser Sterne besser zu verstehen. Asteroseismologie erlaubt es außerdem, die Sonne mit anderen Sternen zu vergleichen und Rückschlüsse auf die Vergangenheit und Zukunft der Sonne zu ziehen.

## *Department 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 with convective envelopes are not understood. These cycles are expected to be the result of the interplay between flows (e.g., rotation, meridional circulation, convection) and magnetic fields and are described by dynamo models. It is not clear, however, how and where the 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 subsurface dynamics in solar and stellar interiors.*

*Helioseismology is the use of solar oscillations as probes of the interior of the Sun. Asteroseismology is a generalization of helioseismology to the study of oscillations of other stars. These tools allow us to test and refine the theory of stellar structure and evolution and to study thermal structures and flows in the interior of the Sun and stars, thereby bringing us closer to understanding solar and stellar magnetism. Further, asteroseismology allows us to place the Sun in the context of other similar stars and to study the possible futures and pasts of the Sun.*

Im April 2011 wurde die Abteilung „Das Innere der Sonne und der Sterne“ am MPS eingerichtet. Die Abteilung ist eine gemeinsame Initiative der Max-Planck-Gesellschaft, der Universität Göttingen und dem Bundesland Niedersachsen. Dank der gleichzeitigen Berufung von Laurent Gizon als Direktor am MPS und Professor an der Universität Göttingen wurde auch eine Forschungsgruppe am Institut für Astrophysik geschaffen, die sich mit der Physik von Sonne und Sternen auseinandersetzt.

Die Arbeit der Abteilung basiert auf weltraumbasierten Beobachtungen des Solar Dynamics Observatory (SDO) und der Kepler-Mission. Die Beobachtungen werden mit Hilfe von numerischen Simulationen interpretiert. Dies umfasst unter anderem Modelle der Struktur der Sonne und anderer Sterne, Berechnungen zur Ausbreitung von Wellen, magneto-hydrodynamische Simulationen der Sonnenkonvektion sowie Flusstransport-Dynamomodelle.

Die Abteilung leistet einen wichtigen Beitrag zur kürzlich ausgewählten PLATO-Mission (ESA M3, Start in 2024, Abb. 1 zeigt eine Illustration des Konzepts). PLATO ist die nächste Mission, welche Transits von Exoplaneten beobachten wird. Ihre wichtigste Aufgabe ist es, Exoplaneten und ihre Muttersterne in der Nachbarschaft der Sonne zu charakterisieren. Dabei wird auf den mit CoRoT und Kepler gewonnenen Erfahrungen aufgebaut. PLATO hat jedoch den Vorteil, dass der Fokus auf hellen Sternen liegt. Die von PLATO entdeckten Planeten können somit problemlos weiterführenden Analysen unterzogen werden. Dies umfasst zum Beispiel die Untersuchung der Atmosphären der Planeten und die Suche nach Biomarkern. PLATO wird eine große Anzahl von Lichtkurven aufnehmen, und damit die Erforschung von Zehntausenden von kühlen Zwergsternen mit Hilfe der Asteroseismologie ermöglichen.

Die Abteilung beteiligt sich im Rahmen der IMPRS-Graduiertenschule außerdem an der Ausbildung der nächsten Generation von Wissenschaftlern. In den Jahren 2013/2014 gab es sieben Doktoranden in der Abteilung (Ferret, Langfellner, Løptien, Nielsen, Papini, Themessl, Yang). Zusätz-

*In April 2011, the MPS department “Solar and Stellar Interiors” was created. The department is a joint initiative of the Max Planck Society, the University of Göttingen, and the state of Niedersachsen. Thanks to the joint appointment of Laurent Gizon as MPS Director and Professor at the University of Göttingen, there is also a research group at the Institute for Astrophysics, Göttingen, which covers topics in solar and stellar physics.*

*The research of the department is driven by space-based observations from the Solar Dynamics Observatory (SDO) and Kepler missions. The observations are interpreted using numerical modeling tools, including solar and stellar structure models, wave propagation computations, MHD simulations of solar convection, and flux transport dynamo models.*

*The department plays an important role in the recently-selected PLATO mission (ESA M3, 2024 launch; see Fig. 1 for a concept illustration). The PLATO mission is the next generation planetary transit experiment; its main objective is to characterize exoplanets and their host stars in the solar neighborhood. While it builds on the heritage from CoRoT and Kepler, the major breakthrough to be achieved by PLATO will come from its strong focus on bright targets. It is intended to provide targets for future programs aiming at performing detailed analysis of planet atmosphere and searches for biomarkers. PLATO will provide an extensive set of light curves that will enable asteroseismology for many tens of thousands of cool dwarf stars.*

*The department participates in training the next generation of scientists through the IMPRS graduate program. In the time period 2013/2014 there were seven PhD students in the department (Ferret, Langfellner, Løptien, Nielsen, Papini, Themessl, Yang). In addition*

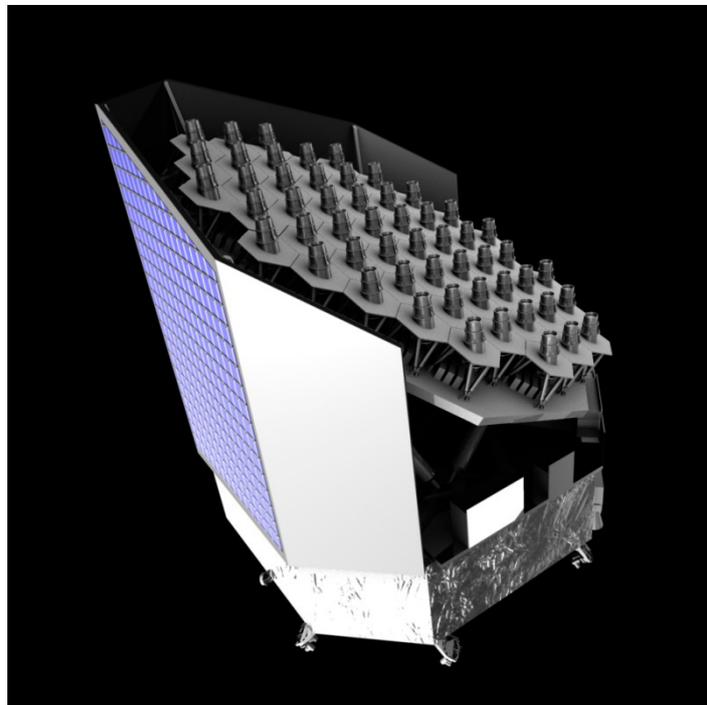
lich waren in den beiden Jahren drei Austauschstudenten zu Gast.

Auch wissenschaftliche Besucher sind wichtig für die Abteilung: In den Jahren 2013/2014 hatten wir 16 Besucher zu Gast, um die enge Zusammenarbeit zu fördern und anregende Diskussionen zu ermöglichen. Ferner hat die Abteilung im September 2014 die HELAS VI/SOHO 28/SPACEINN-Konferenz „Helioseismology and Applications“ organisiert. Das Treffen brachte einen Großteil der weltweit tätigen Helioseismologen für eine Woche nach Göttingen.

*to Ph.D. students, the department also hosted three summer students in 2013/2014.*

*Scientific visitors are important to the department. In the time period 2013/2014 we have had about 16 visitors come for collaboration and discussion. The department organized the HELAS VI/SOHO 28/SPACEINN conference “Helioseismology and Applications” in September 2014. This meeting gathered a large fraction of the international helioseismology community (80 participants).*

Abb. 1: Illustration des PLATO-Konzepts



*Fig. 1: PLATO concept illustration*

# Das Innere der Sonne

## *Solar Interiors*

### **Forschungsgebiet**

Ein Schwerpunkt der Abteilung ist die Suche nach den Ursachen der magnetischen Aktivität der Sonne. Dafür werden Strömungen im Sonneninneren (dies beinhaltet sowohl globale als auch konvektive Strömungen) dreidimensional erfasst, das Magnetfeld der Sonne vermessen und thermodynamische Größen im Sonneninneren bestimmt. Wir entwickeln außerdem neue Methoden, um die qualitativ hochwertigen Daten von SDO und – in Zukunft – von Solar Orbiter auszuwerten.

Helioseismologie ist die Erforschung des Sonneninneren mittels Schwingungen, die an der Sonnenoberfläche sichtbar sind. Dieses Forschungsgebiet beinhaltet eine Vielzahl verschiedener Methoden. Globale Helioseismologie basiert auf der Messung und Interpretation der Resonanzfrequenzen der globalen akustischen Oszillationen der Sonne. Dies ermöglicht das Studium von Größen, die eine Achsensymmetrie um die Rotationsachse und eine Nord-Süd-Symmetrie aufweisen. Lokale Helioseismologie verwendet dagegen Messungen von Korrelationen des Wellenfeldes auf der Sonnenoberfläche, um das Sonneninnere dreidimensional zu erfassen. In der Abteilung verwenden wir tagtäglich sowohl globale als auch lokale Helioseismologie.

Ein Schwerpunkt der globalen Helioseismologie war eine großangelegte neue Auswertung der

### ***Research area***

*A focus of the department is to search for the root causes of solar magnetic activity. This objective involves probing the three-dimensional flows (including both global-scale flows and convective flows), magnetic field, and thermodynamic properties in the solar interior. We are developing new methods of data analysis in order to take full advantage of the existing high-quality observations from SDO and the expected observations from Solar Orbiter.*

*Helioseismology, the use of solar oscillations to measure physical conditions in the solar interior, includes a wide range of methods. Global helioseismology is based on measuring and interpreting the resonant frequencies of the global acoustic oscillations of the Sun and allows us to study axisymmetric and North-South symmetric properties of the Sun. Local helioseismology involves measuring the correlations in the surface wave field and allows three-dimensional probing of the solar interior. In the department, we routinely use both global and local helioseismology.*

*A focus of the global helioseismology effort has been on a major reanalysis of the existing 15*

bereits existierenden 15 Jahre an MDI-Beobachtungsdaten. Dies beinhaltet vor allem eine bessere Behandlung von verschiedenen systematischen Effekten (Larson & Schou, 2015). Dank dieser aufwändigen neuen Auswertung der MDI-Daten konnte der radiale Gradient der Sonnenrotation in der oberflächennahen Scherungsschicht neu vermessen werden. Die neuen Ergebnisse stimmen gut mit einer kürzlich erfolgten Analyse von HMI-Daten überein (Hauptresultat 1 unten).

Lokale Helioseismologie umfasst einen großen Bereich an Werkzeugen, mit denen die physikalischen Bedingungen im Sonneninneren dreidimensional vermessen werden können. Insbesondere wenden wir Zeit-Entfernungs-Helioseismologie (Duvall et al. 1993) auf SDO-Daten an. Letztere liegen am Deutschen Datenzentrum für SDO vor, welches am MPS angesiedelt ist. Wellen, die zwischen zwei Punkten auf der Sonnenoberfläche durch das Sonneninnere laufen, führen zu Korrelationen in dem beobachteten Wellenfeld an der Oberfläche. In der Zeit-Entfernungs-Helioseismologie wird die Laufzeit der Wellen aus diesen zeitlichen Korrelationen bestimmt und interpretiert. Zwei Schwerpunkte waren hier der Einfluss der Rotation auf die Konvektion nahe der Sonnenoberfläche (Hauptresultat 2 unten) und das Aufsteigen von aktiven Regionen (Hauptresultat 2 unten).

## Hauptresultate 2013/2014

### Radialer Gradient der Sonnenrotation

Laut Theorien zur oberflächennahen Konvektion der Sonne muss die Rotationsrate der Sonne nahe der Sonnenoberfläche mit zunehmender Tiefe zunehmen. Corbard & Thompson (2002) stellten mit Hilfe von vier Jahren an SOHO/MDI-Daten fest, dass dies zwar am Äquator der Fall ist, der radiale Gradient aber bei mittleren Breitengraden das Vorzeichen wechselt (die Rotation der Sonne nimmt also mit zunehmender Tiefe ab). Dieser Vorzeichenwechsel bei mittleren Breitengraden war schwer zu erklären. Daher haben Berekat et al. (2014) diesen Gradienten mit Hilfe von fünf Jahren an HMI-Daten zusammen mit 15 Jahren

*years of MDI observations to improve the treatment of numerous systematic effects (Larson & Schou, 2015). This extensive reanalysis of the MDI observations enabled new inferences of the radial gradient of the solar rotation rate in the near-surface shear layer that agree well with a recent analysis of HMI observations (Major Result 1 below).*

*Local helioseismology encompasses a broad set of tools for measuring physical conditions in the solar interior in three dimensions. In particular, we apply time-distance helioseismology (Duvall et al. 1993) to SDO observations, readily available in the German Data Center for SDO at the MPS. Waves traveling between points on the solar surface cause correlations in the observed wavefield of solar oscillations. Time-distance helioseismology consists of extracting and interpreting wave travel times from these temporal correlations. Two main topics have been the influence of rotation on near-surface convection (Major Result 2 below) and the emergence of active regions (Major Result 3 below).*

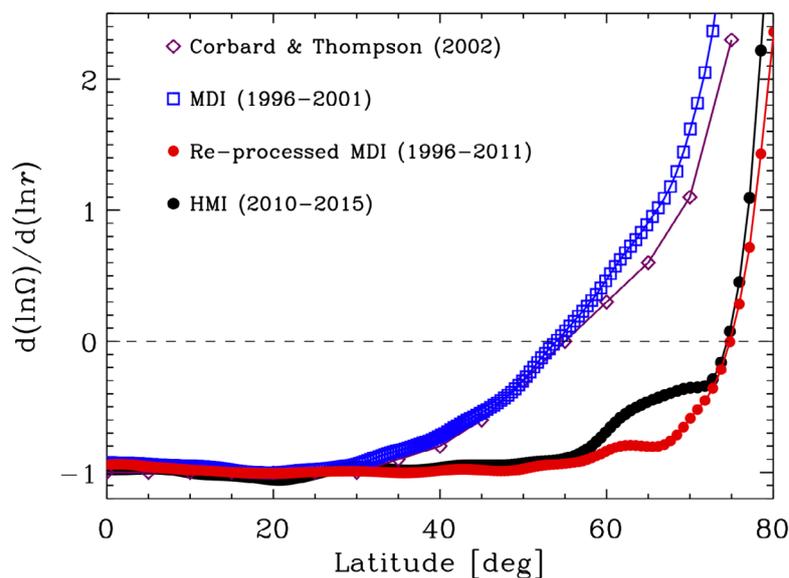
## Major Results 2013/2014

### Radial gradient of the solar rotation rate

*Theories of near-surface convection predict that near the solar surface the solar rotation rate should decrease with distance from the center of the Sun. Corbard & Thompson (2002) used about four years of SOHO/MDI data and found that this is the case near the equator, but that the radial gradient changes sign at mid-latitudes (i. e. rotation rate increases with distance from the center of the Sun). This change in sign with latitude has been difficult to understand theoretically. Berekat et al. (2014) used five years of HMI observations, together with fifteen years of MDI observations (after improved treatment of*

an MDI-Daten (nach verbesserter Behandlung der Physik und instrumenteller Effekte, siehe Larson & Schou 2014) erneut vermessen. Berekat et al. (2015) fanden heraus, dass der Gradient über einen großen Breitengradbereich nahezu konstant ist und bis zu weitaus größeren Breitengraden sein Vorzeichen beibehält als von Corbard & Thompson (Fig. 2) bestimmt. Die wichtigsten Ursachen für die Unterschiede zwischen den Ergebnissen von Berekat et al. (2015) und der vorherigen Arbeit sind Vereinfachungen bei der anfänglichen Bearbeitung der MDI-Daten, um die Parameter der Moden zu extrahieren.

*the physics and instrumental effects, see Larson & Schou 2014) to revisit the question of the radial gradient in the solar rotation rate. Berekat et al. (2014) found that the gradient is almost constant with latitude and negative up to a substantially higher latitude than found by Corbard & Thompson (Fig. 2). The main sources of discrepancies between the Berekat et al. (2014) and the previous results were simplifications in the initial processing of the MDI data to extract mode parameters.*



**Abb. 2:** Logarithmus des radialen Gradienten der Sonnenrotation als Funktion des Breitengrades. Negative Werte bedeuteten, dass die Rotationsrate mit zunehmender Tiefe zunimmt. Die violetten Diamanten zeigen die Ergebnisse von Corbard & Thompson (2002), die mit Hilfe von (alten) SOHO/MDI-Beobachtungen erstellt wurden. Wir konnten diese Resultate mit unserer eigenen Analyse reproduzieren (blaue Quadrate). Die gefüllten roten und schwarzen Kreise zeigen die neu ausgewerteten SOHO/MDI-Daten (15 Jahre) und neuen SDO/HMI-Daten (5 Jahre). In allen Fällen ist der Messfehler kleiner als die Größe der Symbole. Anders als Corbard & Thompson (2002) können wir keinen Vorzeichenwechsel des radialen Gradienten bei mittleren Breitengraden feststellen. Adaptiert von Berekat et al. (2014).

*Fig. 2: Logarithmic radial gradient of solar rotation as a function of latitude. The purple diamonds show the measurements by Corbard & Thompson (2002) using (old) SOHO/MDI observations, which we have reproduced using our own analysis (blue squares). Filled red and black circles show the results obtained from fifteen years of re-processed SOHO/MDI data and five years of SDO/HMI data. In all cases the random errors are smaller than the sizes of the symbols. Unlike Corbard & Thompson (2002), we do not find a change in the sign of the radial gradient at mid latitudes. Adapted from Berekat et al. (2014).*

### **Einfluss der Rotation der Sonne auf die Konvektion**

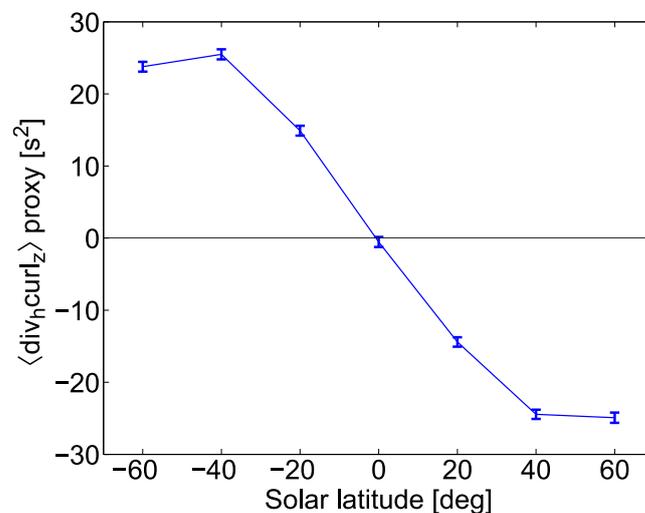
Langfellner et al. (2014, A&A) haben mit Hilfe von Helioseismologie die Vortizität der oberflächennahen Konvektion vermessen. Diese Messungen

### **Influence of solar rotation on convection**

*Langfellner et al. (2014, A&A) measured fluid vorticity in solar surface convection using helioseismology. These measurements inform us about the influence of the Coriolis force on tur-*

beschreiben den Einfluss der Corioliskraft auf Turbulenz, was wichtig für die globale Dynamik der Sonne ist. Diese Ergebnisse wurden mit Hilfe einer neuen Messmethode erzielt, die auf der Messung der Laufzeit von seismischen Wellen entlang eines ringförmigen Weges auf der Sonnenoberfläche beruht. Diese Laufzeiten können direkt mit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit entlang dieses Weges in Verbindung gebracht werden. Mit Hilfe von HMI-Daten konnte eine klare Korrelation zwischen der vertikalen Vortizität und der horizontalen Divergenz nachgewiesen werden (Abb. 3): Eine horizontale Ausströmung ist in der nördlichen Hemisphäre mit einer negativen vertikalen Vortizität (und in der südlichen Hemisphäre mit einer positiven Vortizität) verknüpft. Diese Beobachtungen ermöglichen es, Rückschlüsse auf Modelle turbulenter Konvektion zu ziehen. Die gleichen Modelle beschreiben auch die konvektiven Spannungen, die die differentielle Rotation und den meridionalen Fluss aufrecht erhalten. Somit sind sie essentiell, um die Ursache dieser Strömungen zu verstehen.

*bulence, which affects the global dynamics of the Sun. These results were obtained using a new measurement technique which consists of measuring the travel time of seismic waves along a circular path on the solar surface in order to approximate the average flow along this path. Using HMI data, a clear correlation was detected between vertical vorticity and horizontal divergence (Fig. 3): horizontal outflows are associated with negative vertical vorticity in the northern hemisphere (positive vorticity in the southern hemisphere). These observations provide constraints on models rotating turbulent convection. These same models predict the convective stresses that maintain the large-scale differential rotation and the meridional circulation and thus are crucial for understanding the physical origin of these flows.*



**Abb. 3:** Eine Beschreibung der Korrelation zwischen der horizontalen Divergenz und der vertikalen Vortizität von supergranularen Strömungen, die mittels Zeit-Entfernungs-Helioseismologie gemessen wurden. Hierfür wurden für jeden Breitengrad Karten der Laufzeit erstellt; sowohl welche, aus denen sich die Divergenz ermitteln lässt, als auch welche, aus denen sich die Vortizität ergibt. Dann wurde punktweise das Produkt aus diesen Karten bestimmt und sowohl räumlich als auch zeitlich über vier Monate an Daten gemittelt. Die beobachtete Korrelation wird durch die Corioliskraft verursacht. Dieses Resultat ermöglicht es, Rückschlüsse auf Modelle rotierender turbulenter Konvektion zu ziehen. Solche Modelle sind wichtig für das Verständnis der großräumigen differentiellen Rotation und des meridionalen Flusses.

*Fig. 3: A proxy for the correlation between the horizontal divergence and vertical vorticity of supergranular flows, computed with time-distance helioseismology. At each latitude, the quantity was obtained by computing both divergence- and vorticity-sensitive travel time maps and spatially averaging the pointwise product of these travel times over hundreds of maps, spanning four months of observations. The observed correlation is caused by the Coriolis force. This result puts constraints on models of rotating turbulent convection, which are crucial for explaining the maintenance of the large-scale differential rotation and the meridional circulation.*

## Untersuchungen von aufsteigenden aktiven Regionen mit Helioseismologie

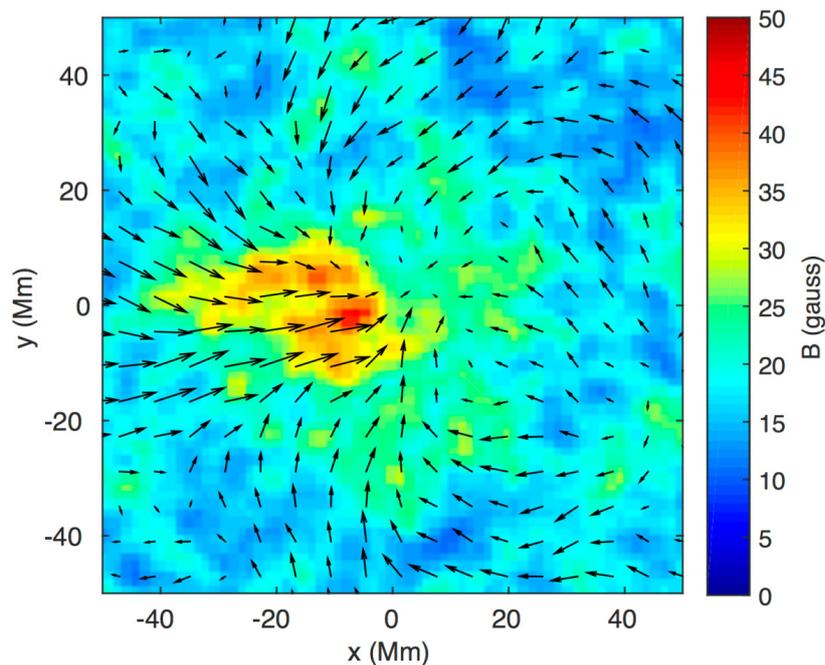
Es wird allgemein angenommen, dass aktive Regionen auf der Sonne aus konzentrierten Magnetfeldern entstehen, die vom unteren Rand der Konvektionszone aufsteigen. Aktive Regionen entstehen in diesem Modell, wenn diese Konzentrationen an magnetischem Fluss die Photosphäre durchqueren. Die Beobachtung der Bildung von aktiven Regionen sollte daher Rückschlüsse auf das Verhalten dieser Magnetfeld-Konzentrationen unterhalb der Sonnenoberfläche zulassen.

Birch et al. (2013) haben das Verhalten von mehr als 100 aufsteigenden aktiven Regionen mit Daten vom GONG-Netzwerk studiert. Abb. 4 zeigt das gemittelte Geschwindigkeitsfeld nahe der Sonnenoberfläche und das mittlere Magnetfeld dieser Regionen zwischen 27 und 11 Stunden, bevor die

## *Helioseismology of emerging active regions*

*The origin of solar active regions is generally thought to be magnetic flux concentrations rising from the base of the convection zone. Active regions are then the result of these flux concentrations crossing the photosphere. Observations of the formation of active regions should therefore contain clues about the sub-surface behavior of magnetic flux concentrations.*

*Birch et al. (2013, ApJ) carried out a survey of more than one hundred emerging active regions as observed by the GONG network. Figure 4 shows the average near-surface flow field and magnetic field associated these emerging active regions between 27 and 11 hours before*



**Abb. 4:** Gemittelte Strömungen (Pfeile) und vertikales Magnetfeld (ohne Vorzeichen, Farben). Die Strömungen wurden mit Helioseismologie aus GONG-Daten ermittelt und entsprechen einem Zeitrahmen zwischen 27 und 11 Stunden vor der Entstehung der aktiven Regionen. Es wurde über 105 Regionen gemittelt. Die Strömungen haben eine typische Geschwindigkeit von 15 m/s und sind wesentlich schwächer als die konvektiven Strömungen nahe der Sonnenoberfläche. Dieses Ergebnis zeigt, dass der Aufstieg von Magnetfeld-Konzentrationen im Vergleich zu Konvektion langsam vonstatten geht. Adaptiert von Birch et al. (2013).

*Fig. 4: Average flows (arrows) and unsigned vertical magnetic field (colors) inferred from helioseismology applied to GONG observations in the 27 to 11 hours before the emergence of solar active regions. The average is taken over 105 pre-emergence regions. The flows have a typical amplitude of 15 m/s and are much weaker than the near-surface convective flows. This result shows that flux emergence is a gentle process compared to convection. Adapted from Birch et al. (2013).*

aktive Region die Sonnenoberfläche erreicht. Die Strömungen sind sehr schwach im Vergleich zu konvektiven Strömungen, was bedeutet, dass die oberflächennahe Konvektion auf der Größenskala von Supergranulation eine wichtige Rolle beim Aufstieg von Magnetfeld-Konzentrationen spielt. Dieses Ergebnis ist wichtig, weil es zeigt, dass die Modelle für die Bildung aktiver Regionen auch Konvektion in Betracht ziehen müssen.

*emergence. The flows are very weak compared to convective flows; these measurements show that near-surface supergranulation-scale convection plays an important role in the flux emergence process. This result is important as it shows the models of the formation of active regions must account for convection.*

Team in 2013/2014: .....

Atefeh Barekat, Aaron Birch, Raymond Burston, Thomas Duvall, Zélia Ferret, Christopher Hanson, Jan Langfellner, Michael Leguèbe, Björn Löptien, Kaori Nagashima, Emmanuele Papini, Jesper Schou, Hannah Schunker, Dan Yang und Ming-Hsu Yang

Referenzen / *References* .....

Barekat A., Schou J., Gizon L. (2014): A & A, 570, L12 (4 pp):  
The radial gradient of the near-surface shear layer of the Sun

Langfellner J., Gizon L., Birch A.C. (2014): A & A, 570, A90 (7 pp):  
Time-distance helioseismology: A new averaging scheme for measuring flow vorticity

Birch A.C., Braun D.C., Leka K.D. et al. (2013): Astrophys. J., 762, 131 (12 pp):  
Helioseismology of Pre-emerging Active Regions. II. Average Emergence Properties

Schunker H., Gizon L., Cameron R. H., Birch, A. C. (2013): A & A, 558, A130 (5 pp):  
Helioseismology of sunspots: how sensitive are travel times to the Wilson depression and to the subsurface magnetic field?

# Das Innere der Sterne

## *Stellar Interiors*

### **Forschungsgebiet**

Die Asteroseismologie ist ein lebendiges und schnell wachsendes Forschungsgebiet -- dank Weltraummissionen, die kontinuierliche Beobachtungen einer großen Zahl von Sternen über lange Zeit hinweg ermöglichen. Eine der ersten Missionen dieser Art war die CoRoT-Mission (2009 gestartet) von CNES und ESA. Die andere große Weltraummission für Asteroseismologie ist das Kepler-Weltraumteleskop der NASA. Obwohl bei Beiden der Schwerpunkt auf dem Aufspüren von Planeten liegt, haben CoRoT und Kepler auch revolutionäre Beobachtungsdaten für die Asteroseismologie geliefert.

Seit 2013 liegen die wichtigsten Aufgaben im Bereich der stellaren Physik darin, die Rotation von Sternen zu bestimmen, die Frequenzen der Moden einzelner Sterne mit Sternmodellen zu beschreiben, Methoden zu entwickeln um die Unsicherheiten in den oberflächennahen Schichten von Sternmodellen zu verringern und die PLATO-Mission vorzubereiten.

Das Messen der Rotation von Sternen ist wichtig, weil die Rotationsrate einer der wichtigsten Bestandteile von stellaren Dynamo-Theorien ist. Genaue Kenntnisse, wie die Rotationsrate im Hertzsprung-Russell-Diagramm variiert, werden helfen zu verstehen, was für Mechanismen die Dynamos von verschiedenen Klassen von Sternen antreiben.

### ***Research area***

*Asteroseismology is a vibrant and rapidly growing field, owing to space-borne missions dedicated to long-term continuous monitoring of large numbers of stars. One pioneering mission of this kind was the CNES-ESA CoRoT mission (launched 2006). The other major space-based 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.*

*The main activities in stellar physics since 2013 have been to measure the rotation of stars, to fit models of stars to individual mode frequencies, to develop methods for mitigating the effects of the uncertainties in the surface layers of stellar models, and prepare for the PLATO mission.*

*Stellar rotation rates are important as rotation is one of the key ingredients in theories of stellar dynamos. An understanding of how rotation rates vary across the HR diagram will help to understand the possible dynamo mechanisms that operate in various classes of stars. Measurements of stellar differential rotation are also*

Messungen von differentieller Rotation in Sternen sind außerdem wichtig, um Rückschlüsse auf Modelle des Drehimpuls-Transports zu ziehen. Dieses Thema wird im Hauptresultat 1 behandelt.

Unsicherheiten in der oberflächennahen Struktur von Sternen führen zu Diskrepanzen zwischen den modellierten und den gemessenen Resonanzfrequenzen (der sogenannte „Oberflächeneffekt“). Diese Diskrepanzen können zu Fehlern bei der Ermittlung der fundamentalen Sternparameter führen. Normalerweise werden empirische Formeln benutzt, die auf Fits beruhen, um diese Diskrepanz zwischen den modellierten und den gemessenen Frequenzen zu beheben. Im Abschnitt über das Hauptresultat 2 beschreiben wir eine neue Methode, wie der Oberflächeneffekt in Sternen mit Hilfe von Modellen parametrisiert werden kann. Im Abschnitt über das Hauptresultat 3 zeigen wir ein Beispiel, wie mittels Asteroseismologie die Geometrie eines Sternsystems bestimmt werden kann.

## Wichtige Ergebnisse

### Messung der Rotation von Sternen mit Sternflecken

Nielsen et al. (2013) haben die Rotationsperioden von etwa 12.000 Sternen aus den Kepler-Daten gemessen. Bei diesen Sternen handelt es sich zum Großteil um aktive Sterne auf der Hauptreihe, die stabile, wiederkehrende Sternflecken zeigen. Wir haben das Maximum der spektralen Leistungsdichte der Lichtkurven bei niedrigen Frequenzen bestimmt. Dann haben wir diejenigen Sterne ausgewählt, bei denen die Rotationsperioden über mehrere Abschnitte der Kepler-Daten hinweg stabil sind. Abbildung 5 vergleicht die hier gewonnenen Ergebnisse mit anderen Daten. Für F-, G- und K-Sterne haben wir eine gute Übereinstimmung mit anderen Ergebnissen gefunden. Die Rotation von Sternen kann auch mittels Asteroseismologie gemessen werden. Ein Vergleich der Rotationsraten, die durch Asteroseismologie und durch Sternflecken gemessen wurden, wird zeigen, wie die Rotation im Inneren des Sterns variiert. Mit Daten der kommenden TESS- und PLATO-Missionen

*important as they will help constrain models for angular momentum transport. This topic is discussed in Major Result 1 below.*

*Uncertainties in the physics of stellar structure in the near-surface layers of stars lead to mismatches between modeled and observed resonant frequencies (the so-called “surface effect”). This mismatch can cause biases in inferences of stellar fundamental stellar parameters. Typically, empirical fitting formulae are used to fit and remove the mismatch between observations and modeled mode frequencies. In Major Result 2 below we describe new work on models for parametrizing stellar surface effects. In Major Result 3 we show an example of using asteroseismology to constrain the geometry of a stellar system.*

## Major Results 2013/2014

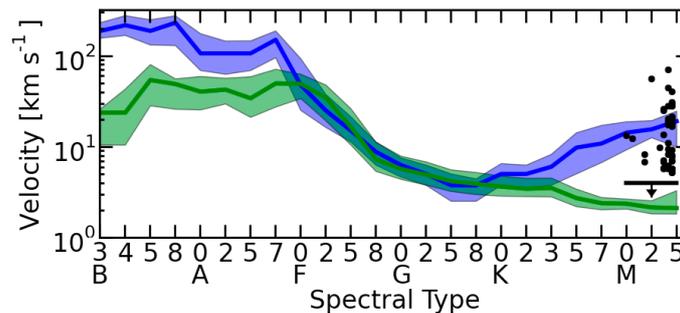
### Stellar rotation from starspots

*Nielsen et al. (2013) measured the rotation periods of approximately 12000 stars in the Kepler field. These are mainly active main-sequence stars that show stable, recurring starspot patterns. We identified the peak of maximum power in the (low-frequency part of the) power spectra of the light curves and then selected the stars for which rotation periods are stable over several Kepler quarters. Figure 5 shows the results and some comparisons to other data sets. We found good agreement for F, G and K stars with other data sets. Asteroseismology is another method for measuring stellar rotation rates; comparison with between asteroseismic and starspot rotation rates will constrain how rotation varies with depth inside stars. With the upcoming TESS and PLATO missions we will be able to measure stellar rotation periods of stars with a wider range of basic parameters like effective temperature, surface gravity and*

werden wir die Rotationsperioden von Sternen bestimmen können, die einen größeren Bereich an fundamentalen Parametern abdecken, wie etwa die Effektivtemperatur, die Oberflächengravitation und das Alter. Ferner werden wir die Rotation auch im Hinblick auf die Position der Sterne innerhalb der Milchstraße untersuchen können.

age, but also with respect to their location in Milky Way galaxy.

**Abb. 5:** Mittlere Rotationsgeschwindigkeit am Äquator als Funktion des Spektraltyps. Die gemittelte aus Sternflecken abgeleitete Rotationsrate von Nielsen et al. (2013) ist in grün gezeigt. Die blauen Symbole stellen die von Glébocki & Gnaciński (2005) mit Spektroskopie gemessene Rotationsrate dar. Die schwarzen Punkte zeigen spektroskopisch bestimmte Werte von Reiners et al. (2012), dabei befinden sich 201 Sterne unterhalb von 4 km/s (durchgezogene Linie). Die schattierten Flächen und die Fehlerbalken zeigen das untere und obere 34%-Konfidenzintervall. Für F-, G- und K-Sterne stimmen die mit Hilfe von Sternflecken und mit Spektroskopie ermittelten Rotationsraten sehr gut miteinander überein. Von Nielsen et al. (2013).



**Fig. 5:** Median equatorial velocity as a function of stellar spectral type. The median starspot rotation velocities from Nielsen et al. (2013) are shown in green for each spectral type. The median equatorial velocity (spectroscopy) from Glébocki & Gnaciński (2005) is shown in blue.

The black points show spectroscopy values from Reiners et al. (2012); 201 stars in this sample are below 4 km/s (solid bar). The shaded areas and error bars span the upper and lower 34th percentile values from the median. The agreement between starspot rotation and  $v \sin i$  measurements is excellent for F, G and K stars. From Nielsen et al. (2013).

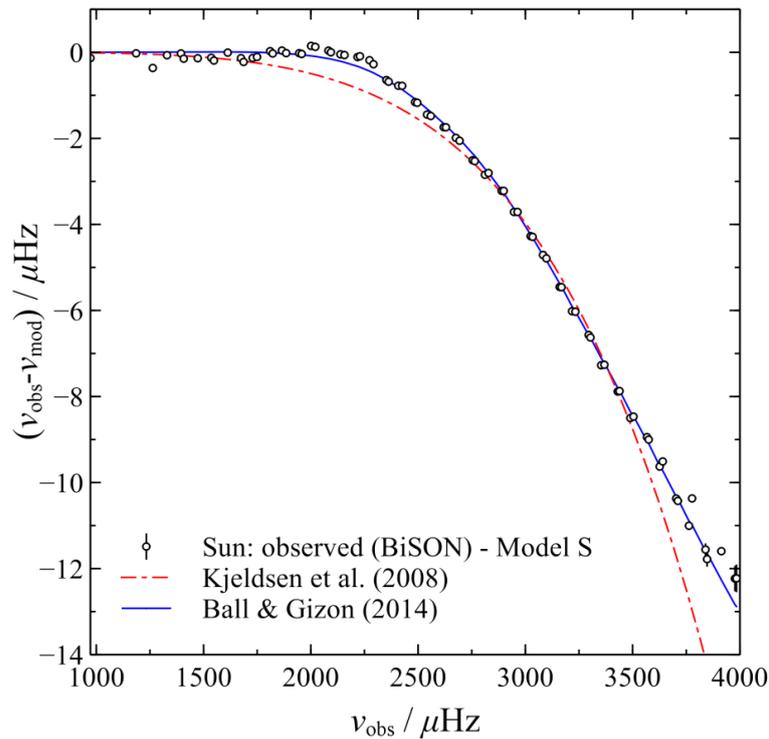
### Fitten des Oberflächeneffekts

Weltraumbasierte Beobachtungen von solaren Schwingungen bieten die Möglichkeit, mit Hilfe der Frequenzen einzelner Moden Rückschlüsse auf Sternmodelle zu ziehen. Die Frequenzen von Moden, die aus Sternmodellen errechnet wurden, werden allerdings durch das schlechte Verständnis der oberflächennahen Schichten verfälscht. Dieser „Oberflächeneffekt“ muss also berücksichtigt werden, damit Sternparameter, die auf dem am besten passenden Sternmodell basieren (z.B. Alter oder Radius), korrekt bestimmt werden. Ball & Gizon (2014) haben zwei neue Methoden vorgeschlagen, mit denen dieser Effekt korrigiert werden kann. Sie haben gezeigt, dass sie mit diesen Methoden den bekannten Oberflächeneffekt der Sonne besser reproduzieren können als andere Methoden (siehe Abb. 6). Darüberhinaus haben sie die neue Korrektur bei dem sonnenähnlichen Stern HD52265 (Gizon et al. PNAS 2013) angewandt, welcher von Planeten umkreist wird. Mit dem neuen Verfahren stimmen die Sternmodelle

### Fitting surface effects

Space-based observations of solar-like oscillations present an opportunity to constrain stellar models using individual mode frequencies but stellar model frequencies are biased by poor modelling of the near-surface layers. If this “surface effect” is incorrectly treated (or not considered at all), any inference based on the best-fit stellar model (e.g. a stars age or radius) might be biased. Ball & Gizon (2014) proposed two new surface-effect corrections and demonstrated that they fit the known surface effect in the Sun better than existing formulae (see Fig. 6). They further applied the new corrections to the Sun-like planet host HD52265 (Gizon et al. PNAS 2013) and found that the new corrections produce better-fitting stellar models. This work is generally important for asteroseismology, since surface effects must be corrected whenever models are fit to individual frequencies. In addition, the correction may help to constrain the physics that causes the discrepancy.

**Abb. 6:** Differenz der Frequenzen von Moden niedrigen Grades zwischen der Sonne (BiSON) und einem Standardmodell der Sonne (Modell S), der sogenannte „Oberflächeneffekt“. Die rote gepunktet-gestrichelte Linie zeigt einen Fit mit einem Potenzgesetz, wie von Kjeldsen et al. (2008) vorgeschlagen und danach von vielen Gruppen angewandt, die sich mit Sternmodellen beschäftigen. Die blaue Linie zeigt einen besseren Fit des Oberflächeneffekts, wie von Ball & Gizon (2014) vorgeschlagen.



**Fig. 6:** Low-degree modes frequency differences between the Sun (BiSON) and a standard solar model (Model S), i.e. the so-called “surface effect”. The red dot-dashed line shows a best-fit power law correction, as suggested by Kjeldsen et al. (2008) and subsequently used by many modelling groups. The blue line is a better fit of the surface effect proposed by Ball & Gizon (2014).

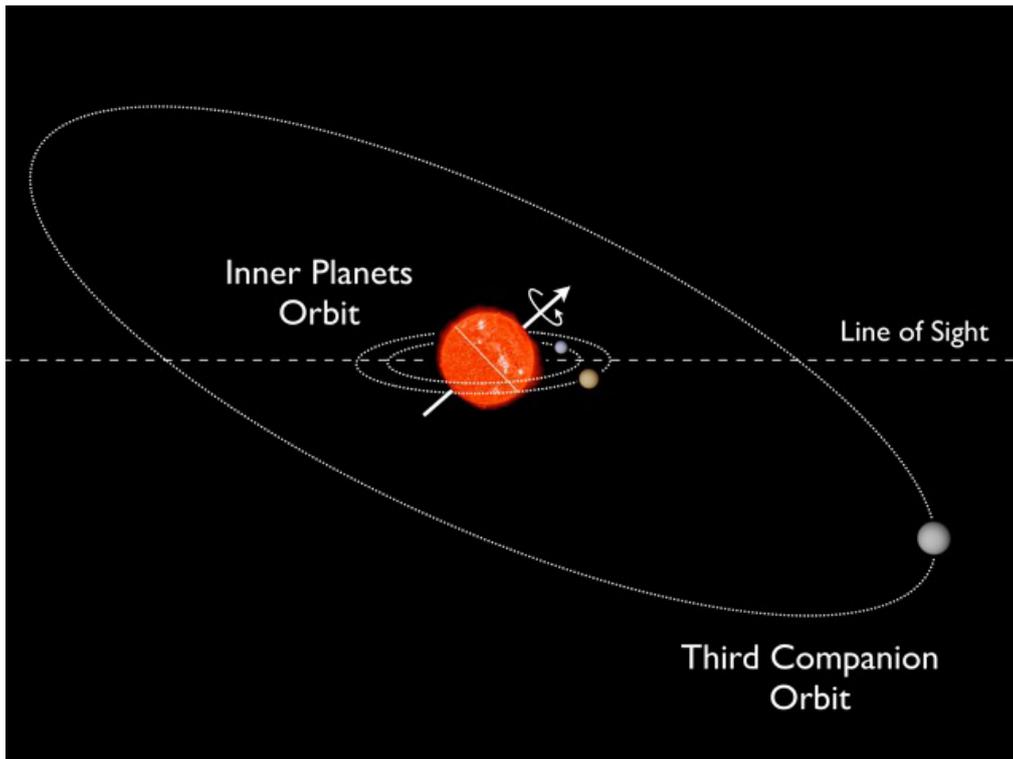
besser mit den Beobachtungsdaten überein. Diese Arbeit ist wichtig für die Asteroseismologie im Allgemeinen, da Oberflächeneffekte immer korrigiert werden müssen, wenn einzelne Frequenzen gefittet werden sollen. Zusätzlich kann die Korrektur dabei helfen, Rückschlüsse auf die Physik zu ziehen, die die Diskrepanz verursacht.

### Unterschiedliche Ausrichtung von Rotations- und Bahndrehimpuls eines Sterns mit mehreren Planeten

Kepler-56 ist ein roter Riese, der in einer Schale um einen inaktiven Heliumkern Wasserstoff fusioniert. Außerdem weist er Schwingungen auf, deren Frequenzen aufgrund der Rotation des Sterns aufgespalten sind. Aus der Frequenzaufspaltung lässt sich eine Rotationsperiode von etwa 75 Tagen ableiten, wobei der Kern schneller rotiert als die Oberfläche des Sterns. Außerdem kann man hieraus einen Neigungswinkel der Rotationsachse zur Sichtlinie von 45 Grad ableiten. Der Stern wird von zwei Planeten umkreist, deren Orbit senkrecht zur Sichtlinie liegt (dies muss der Fall sein, da die Planeten gelegentlich den Stern bedecken) und die eine Umlaufzeit von 10,50 bzw. 21,41 Tagen aufweisen. Diese Beobachtungen zeigen, dass un-

### Stellar Spin-Orbit Misalignment in a Multi-planet System

Kepler-56 is an oscillating red-giant star that fuses Hydrogen in a shell around an inert Helium core. The stellar oscillations are split due to the stellar rotation, which reveals a rotation period of about 75 days with the core rotating faster than the surface as well as an inclination angle with respect to the line-of-sight of about 45 degrees. Additionally, this star hosts two transiting co-planar planets (as they are transiting, their orbital axis must be perpendicular to the line of sight) with periods of 10.50 and 21.41 days. These observations show that spin-orbit misalignments are not confined to hot-Jupiter systems as has so far been observed. Several theories have been proposed to explain stellar



**Abb. 7:** Schematische Illustration des Kepler-56-Systems. Dieses einzigartige System besteht aus einem roten Riesen, der von zwei Planeten umkreist wird. Der Orbit der beiden Planeten ist senkrecht zur Sichtlinie ausgerichtet. Die Rotationsachse des Sterns ist nicht senkrecht zur Bahnebene der Planeten ausgerichtet. Es konnte ein drittes Begleitobjekt in einem weiten Orbit nachgewiesen werden. Dieses ist wahrscheinlich für die unterschiedlichen Ausrichtungen der Drehimpulse verantwortlich. Die gestrichelte Linie zeigt die Sichtlinie (horizontal), die gepunkteten Linien geben die Orbits der Planeten an und der dicke Pfeil zeigt die Rotationsachse des Sterns. Die Abbildung wurde von Daniel Huber zur Verfügung gestellt.

*Fig. 7: Schematic illustration of the Kepler-56 system. This unique system consists of a red-giant star hosting two co-planar transiting planets, while the spin axis of the star is misaligned with respect to the orbital axis of these two planets. A third companion has been detected in a wide orbit, which is likely to be responsible for this misalignment. The dashed line indicates the line of sight (horizontal), the planetary orbits are indicated with dotted lines and the spin-axis is indicated with the thick arrow. Figure courtesy Daniel Huber.*

terschiedliche Ausrichtungen von Rotations- und Bahndrehimpuls nicht nur bei Systemen mit einem heißem Jupiter auftreten, wo sie bislang als Einziges beobachtet werden konnten. Es wurden verschiedene Theorien vorgeschlagen, mit denen sich diese unterschiedlichen Ausrichtungen erklären lassen. Darunter fallen beispielsweise dynamische Störungen wie Kozai-Zyklen, Planet-Planet-Streuung oder Drehmomente, die von weit entfernten Begleitobjekten herrühren. Durch Messungen der Radialgeschwindigkeit konnte in der Tat ein drittes Begleitobjekt in einem weiten Orbit um Kepler-56 nachgewiesen werden. Weiterführende Messungen der Radialgeschwindigkeit werden zeigen, ob es sich hierbei um einen Planeten oder einen Stern

*spin-orbit misalignments. Favored scenarios include dynamical perturbations such as Kozai cycles and planet-planet scattering or torques from wide-orbiting companions. Indeed radial-velocity measurements revealed a third companion in a wide orbit in the Kepler-56 system. Continued radial velocity measurements will reveal whether the third companion in the Kepler-56 system is a planet (implying that the initial misalignment occurred after the planets formed) or a star (implying a primordial misalignment of the protoplanetary disk).*

handelt. Im Falle eines Planeten müsste die unterschiedliche Ausrichtung der Drehimpulse erfolgt sein, nachdem sich die Planeten gebildet haben. Im Falle eines Sterns wäre bereits die protoplanetare Scheibe anders ausgerichtet gewesen.

**Team in 2013/2014:** .....

George Angelou, Matthias Ammler-von Eiff, Warrick Ball (Uni-Gruppe), Raymond Burston, Elisabeth Guggenberger, Saskia Hekker, Martin B. Nielsen, Emmanuele Papini, Timo Reinhold (Uni-Gruppe), Jesper Schou, Hannah Schunker, Nathalie Themessl, Timothy White (Uni-Gruppe)

**Referenzen /References** .....

Nielsen M. B., Gizon L., Schunker H., Karoff C. (2013): *A & A*, 557, L10 (4pp):  
Rotation periods of 12 000 main-sequence Kepler stars: Dependence on stellar spectral type and comparison with  $v \sin i$  observations

Ball W., Gizon L. (2014): *A & A*, 568, A123 (10 pp)  
A new correction of stellar oscillation frequencies for near-surface effects

Rauer and 159 co-authors, including Gizon L., Ammler-von Eiff M., Birch A. C. (2014): *Experimental Astron.* 38, 249 (81 pp):  
The PLATO 2.0 mission

Huber D., Carter J., Barbieri M., [...], Hekker S. et al. (2013) ; *Science* 342, 331 (4 pp):  
Stellar Spin-Orbit Misalignment in a Multiplanet System

**SOLARE VARIABILITÄT UND KLIMA**

***SOLAR VARIABILITY AND CLIMATE***

## **Forschungsgebiet**

Die Sonne ist die wichtigste Energiequelle für das Klimasystem der Erde. Sowohl der gesamte Energiefluss der Sonne, der in unser Klimasystem eindringt, wie auch der Energiefluss innerhalb bestimmter Spektralbereiche, beschrieben durch die totale (total solar irradiance, TSI) und die spektrale (spectral solar irradiance, SSI) Bestrahlungsstärke, sind zeitlichen Schwankungen unterworfen und sind Schlüsselparameter zur Bewertung des solaren Einflusses auf den Klimawandel. Messungen dieser Parameter werden erst seit weniger als 40 Jahren vom Weltraum aus durchgeführt und haben bereits unschätzbare Informationen über die Amplituden, Profile und Zeitskalen der Schwankungen geliefert. Um jedoch den solaren Einfluss auf das Erdklima richtig einschätzen zu können, müssen solare und klimatische Aufzeichnungen über deutlich längere Zeiträume miteinander verglichen werden. Dies erfordert Modelle der Bestrahlungsstärke und Rekonstruktionen in die Vergangenheit. Diese Minerva-Forschungsgruppe untersucht die solare Variabilität auf Zeitskalen von Tagen bis zu Jahrtausenden. Das umfasst ein gründliches Verständnis der Mechanismen der TSI- und SSI-Schwankungen, das Modellieren der gemessenen Variationen und eine Rekonstruktion der solaren Variabilität über die letzten Jahrzehnte und Jahrtausende.

## **Research area**

*The Sun is the main energy source to Earth's climate system. The total solar energy flux entering the climate system and the energy flux within specific spectral intervals, described in terms of the total (TSI) and spectral (SSI) solar irradiance, respectively, vary with time and are key quantities for the assessment of solar influence on climate changes. Measurements of these quantities have been done from space for less than 40 years and provided invaluable information on the amplitudes, profiles and time scales of the variation. However, to assess solar influence on Earth's climate, solar and climate records need to be compared over significantly longer periods of time. This calls for irradiance models and reconstructions back in time. This research group studies solar variability on time scales of days to millennia, which includes gaining an in-depth understanding of the mechanisms of the TSI and SSI variation, modelling the measured variations and reconstructing solar variability over last centuries and millennia.*

## Wesentliche Ergebnisse

### Rekonstruktionen der totalen und spektralen solaren Bestrahlungsstärke

Rekonstruktionen der Sonnenvariabilität und der solaren Bestrahlungsstärke in der Vergangenheit erfordern ein klares Verständnis der Mechanismen solcher Schwankungen, und ein erfolgreiches Modell muss zum Test die direkt gemessenen Schwankungen reproduzieren. Am erfolgreichsten haben sich die Modelle erwiesen, die auf der Annahme beruhen, dass Schwankungen der Bestrahlungsstärke durch die Entwicklung des Magnetfeldes an der Sonnenoberfläche hervorgerufen werden. Dieses Magnetfeld zeigt sich auf der sichtbaren Sonnenoberfläche in Form dunkler Sonnenflecken und heller Sonnenfackeln auf. Je nach dem relativen Anteil dieser hellen und dunklen Strukturen zu einem bestimmten Zeitpunkt erscheint die Sonne etwas dunkler oder heller. Eines der erfolgreichsten Modelle der Variationen der solaren Bestrahlungsstärke ist SATIRE (Spectral And Total Irradiance REconstructions), das von der Gruppe "Solare Variabilität und Klima" im Laufe des letzten Jahrzehntes entwickelt wurde. Es existieren verschiedene Versionen des Modells, die die Strahlung auf unterschiedlichen Zeitskalen rekonstruieren und dafür unterschiedliche Beobachtungen der Sonnenaktivität als Grundlage benutzen.

#### SATIRE-S

SATIRE-S (wobei „S“ für die Satellitenepoche steht) benutzt hochaufgelöste Magnetogramme der vollen Sonne (d. h. Messungen des Magnetfeldes auf der Sonnenoberfläche), um die zeitlichen Veränderungen der Oberflächenbedeckung durch verschiedene Strukturen zu beschreiben. Basierend auf Beobachtungen der vollen Sonne durch vier unterschiedliche Instrumente – NSO KP/512, NSO KP/SPM, SoHO/MDI, und SDO/HMI – haben wir die Tageswerte der solaren Bestrahlungsstärke seit 1974 rekonstruiert. Das Modell repliziert 92% der Variabilität in den TSI-Messungen über den Zeitraum 1978–2014 und stimmt mit den Beobachtungen der spektralen Bestrahlungsstärke, soweit sie zuverlässig sind (Abb. 1), sowie mit einer unabhängigen, empirischen Rekonstruktion

## Major results

### Reconstructions of total and spectral solar irradiance

*Reconstructions of past solar variability and irradiance require a clear understanding of the mechanisms of such changes and, as a test, a successful model must reproduce the directly measured variations. Most successful have been models that are based on the assumption that irradiance changes are caused by the evolution of the solar surface magnetic field. The latter emerges at the visible solar surface in form of dark sunspots and bright faculae, and depending on the relative contribution of these bright and dark features at a given time, the Sun appears slightly darker or brighter. One of the most successful models of solar irradiance variation is the SATIRE (Spectral And Total Irradiance REconstructions) developed by the "Solar variability and climate" group over the last decade. Different versions of the model exist aiming at reconstructing the irradiance at different time scales and relying on different input observations of solar activity.*

#### SATIRE-S

*(where "S" stands for the Satellite era) uses solar high-resolution full-disc magnetograms (i. e. measurements of the surface magnetic field) to describe changes in the surface coverage by various features in time. We have reconstructed daily solar irradiance since 1974 based on full-disc observations by four different instruments, NSO KP/512, NSO KP/SPM, SoHO/MDI, and SDO/HMI. The model replicates 92% of the variability in the TSI measurements over the period 1978-2014, is consistent with spectral solar irradiance observations where they are reliable (Fig. 1) and with an independent, empirical reconstruction of UV irradiance (Mea11 in Fig. 1). The weaker solar cycle variability at 300-400 nm produced by the alternative NRLSSI model,*

Abb. 1: Die integrierte SSI innerhalb der angegebenen Wellenlängenintervalle in UARS/SUSIM-Messungen (schwarz) und als Ergebnis von Modellen (siehe Legende in der Abbildung oben) als Funktion der Zeit. Die Zeitfolgen wurden mittels eines beweglichen 81-Tage-Mittelwertes geglättet. Die verschiedenen Zeitfolgen sind normalisiert relativ zu der SATIRE-S-Rekonstruktion beim Minimum des Sonnenzyklus (rot) (aus: Yeo et al., 2015, JGR, 120, 6055).

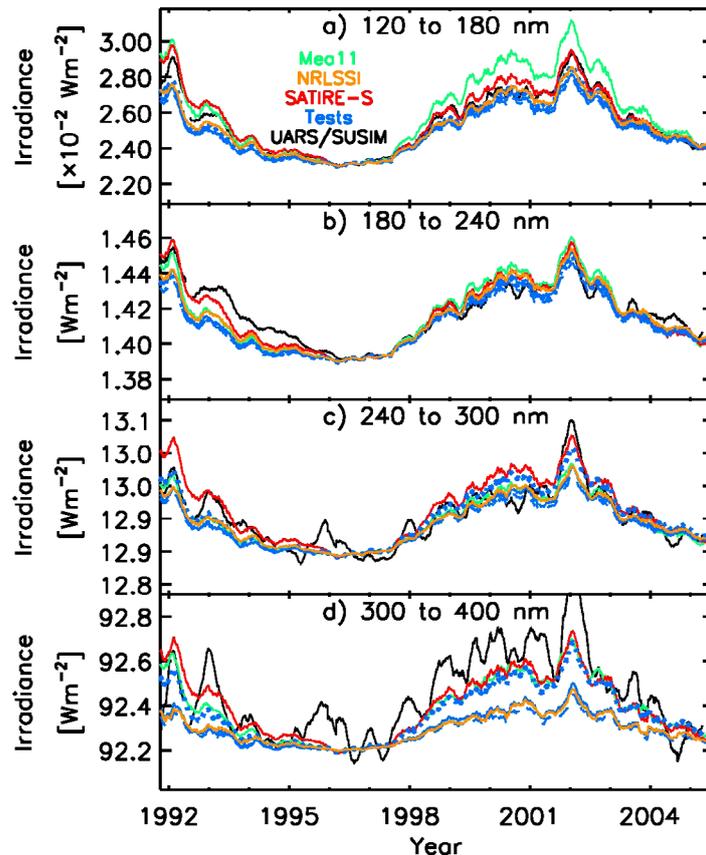


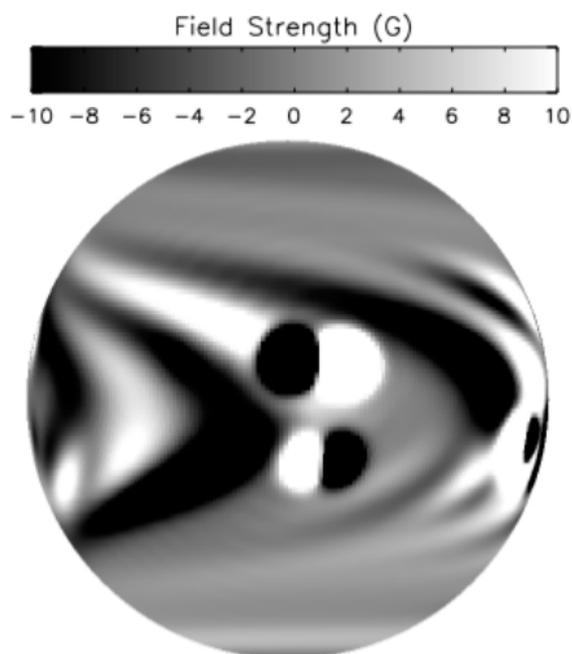
Fig. 1: The integrated SSI within the annotated wavelength intervals in UARS/SUSIM measurements (black) and produced by models (see legend in top panel) against time. The time series were smoothed by taking the 81-day moving average. The various time series are normalized to the SATIRE-S reconstruction (red) at solar cycle minimum (from Yeo et al. 2015, JGR, 120, 6055).

der Bestrahlungsstärke (Mea11 in Abb. 1) überein. Die schwächere Variation mit dem Sonnenzyklus bei 300–400 nm, die von dem alternativen und weithin für Klimasimulationen verwendeten NRLSSI Modell erzeugt wird, ist aus keiner verfügbaren Aufzeichnung ersichtlich. Auch wenn die zur Konstruktion von NRLSSI verwendete Methode prinzipiell korrekt ist, so konnten wir doch zeigen, dass die rekonstruierte Variation mit dem Sonnenzyklus durch die Ungenauigkeiten in den SSI-Beobachtungen, auf die sie sich in der Ableitung stützt, negativ beeinflusst wird. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die täglichen SSI-Zeitreihen von SATIRE mit Beobachtungen verschiedenster Quellen übereinstimmen und so ihre Gültigkeit und Verwendbarkeit für Klimamodelle beweisen. Dadurch wird auch einen weiteren Beweis dafür geliefert, dass der solare Oberflächenmagnetismus die Hauptursache von Schwankungen in der solaren Bestrahlungsstärke auf Zeitskalen größer als ein Tag ist (Yeo et al. 2014).

*widely used for climate simulations, is not evident in any available record. We showed that although the method employed to construct NRLSSI was principally sound, reconstructed solar cycle variability is detrimentally affected by the uncertainty in the SSI observations it draws upon in the derivation. In summary, the SATIRE daily SSI time series is consistent with observations from multiple sources, demonstrating its validity and utility for climate models. It also provides further evidence that solar surface magnetism is the prime driver of variation in solar irradiance on time scales greater than a day (Yeo et al. 2014).*

## SATIRE-T

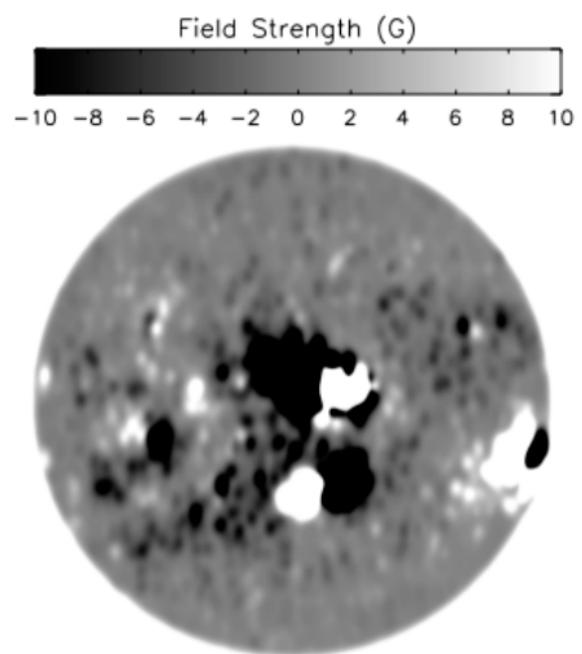
SATIRE-T (wobei „T“, für die Epoche der Teleskopbeobachtungen steht) erlaubt Rekonstruktionen der solaren Bestrahlungsstärke zurück bis ins 17. Jahrhundert. Messungen des solaren Oberflächenmagnetfeldes (Magnetogramme) sind erst seit ca. vier Jahrzehnten verfügbar. Rekonstruktionen von Bestrahlungsstärken zu früherer Zeit müssen sich auf Beobachtungen von Sonnenflecken verlassen. Wir haben ein neues Modell entwickelt, welches die gemessenen Sonnenfleckengebiete und ihre Positionen als Input nutzt, um synthetische Magnetogramme zu simulieren. Das Auftreten neuer aktiver Regionen (Sonnenflecken und Fackeln) auf der Sonnenoberfläche wird durch diese Beobachtungen und ihre Weiterentwicklung durch das Oberflächenflusstransportmodell (surface flux transport Model, SFTM) beschrieben. Um die Bestrahlungsstärke zu berechnen, werden die Flächenbedeckung und Verteilung verschiedener magnetischer Strukturen als Funktion der Zeit aus den simulierten Magnetogrammen extrahiert.



**Abb. 2:** Simuliertes (links) und von MDI/SoHO (rechts) aufgezeichnetes Magnetogramm am 24. Juli 2004. Das aufgezeichnete Magnetogramm zeigt Werte oberhalb  $3\sigma$  des Rauschpegels, korrigiert für die Komponente in Blickrichtung, um die radiale Magnetfeldstärke zu erhalten. Das aufgezeichnete Magnetogramm wurde geglättet, um es mit dem simulierten besser vergleichen zu können. Die Farbbalken mit Grauskalen, die für beide Abbildungen gleich sind, zeigen die Feldstärke an (aus: Dasi et al., 2014, A&A 570, A23).

## SATIRE-T

(with “T” for the Telescope era) allows reconstructions of the irradiance back to the 17th century. Measurements of the solar surface magnetic field (magnetograms) are only available for the last four decades. Reconstructions of the irradiance at earlier times have to rely on sunspot observations. We have developed a new model that uses the observed sunspot areas and positions as input to simulate synthetic magnetograms. The emergence of new active regions (sunspots and faculae) on the solar surface is described by these observations, and their subsequent evolution by the surface flux transport model (SFTM). To compute the irradiance, the area coverage and the distribution of different magnetic features as a function of time are extracted from the simulated magnetograms (Fig. 2). The new model, SATIRE-T2, goes back to 1878 and reproduces the measured TSI changes at daily and rotational time-



**Fig. 2:** Simulated (left) and observed by MDI/SoHO (right) magnetogram on the 24th of July 2004. The observed magnetogram shows values above  $3\sigma$  of the noise level, corrected for the line-of-sight component to give the radial magnetic field strength and is smoothed the observed magnetogram to resemble the simulated one more closely. The greyscale colour bars, which are the same for both images, indicate the field strength (from Dasi et al. 2014).

(Abb. 2). Das neue Modell, SATIRE-T2, geht bis ins Jahr 1878 zurück und reproduziert auf Zeitskalen von Tagen und Rotationsperioden die gemessenen TSI-Schwankungen genauer als die frühere Version des SATIRE-T Modells (Dasi et al. 2014).

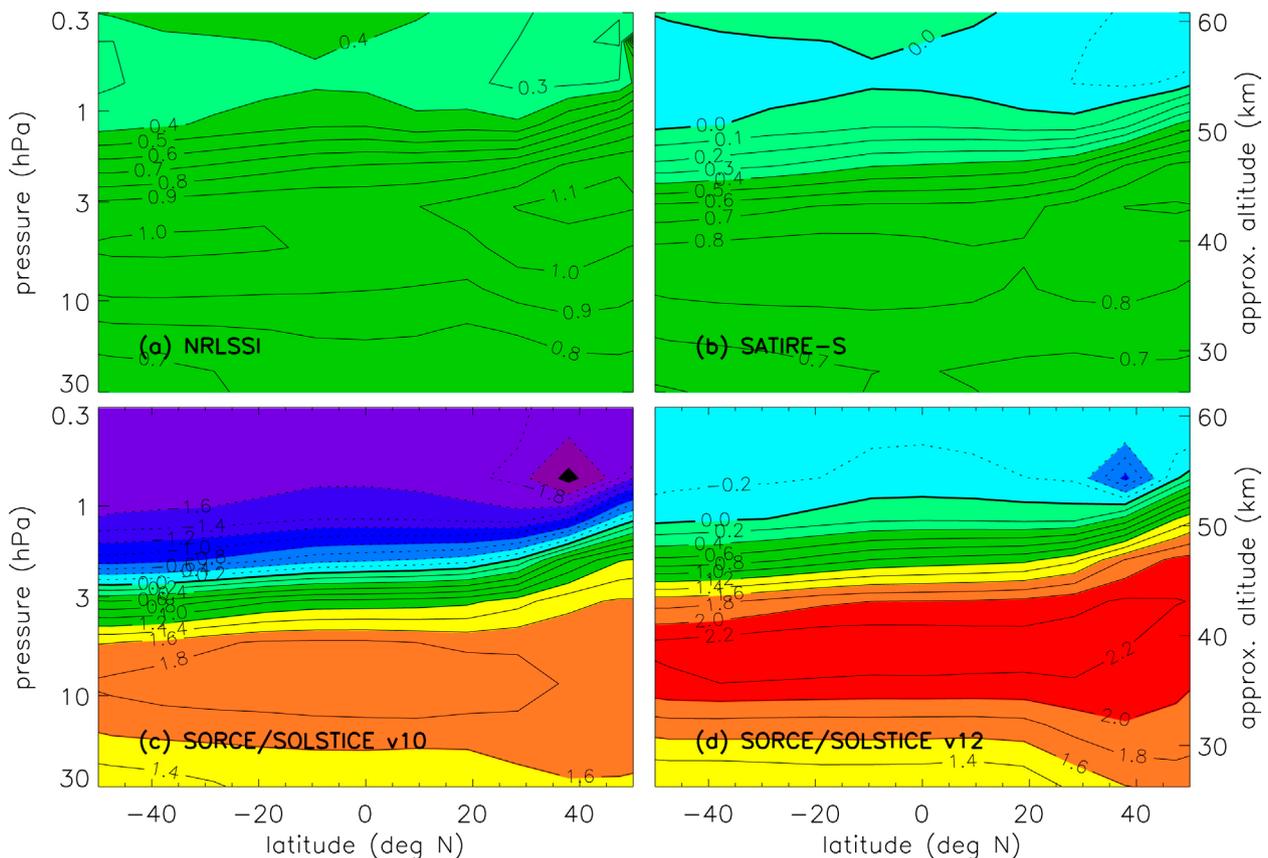
### Auswirkungen auf Atmosphärenmodelle der Erde

Neuste Messungen der SSI durch das „Solar Radiation and Climate Experiment“ (SORCE) haben unterschiedliche Schwankungen im UV-Bereich im Vergleich zu anderen Messungen und Modellen der Bestrahlungsstärke (wie z.B. NRLSSI und SATIRE-S in Abb. 1) gezeigt. Es wurde auch gezeigt, dass Schwankungen in den SSI-Datensätzen er-

*scales more accurately than the previous version of the SATIRE-T model (Dasi et al. 2014).*

### Implications for Earth's atmospheric models

*Recent measurements of SSI by the SOLar Radiation and Climate Experiment (SORCE) showed different variability in the UV compared to other irradiance measurements and models (such as e.g. NRLSSI and SATIRE-S in Fig. 1). It has also been shown that uncertainties in the SSI datasets might have significant con-*



**Abb. 3:** Konturdiagramme der Schwankungen des stratosphärischen Ozons zwischen 2003 und 2008 unter Verwendung von SSI-Datensätzen (a) des NRLSSI-Modells, (b) des SATIRE-S-Modells, und der SORCE/SOLSTICE Version 10 (c) und Version 12 (d). Alle Ergebnisse sind für den 25. Dez. Das Konturintervall ist 0.1% in (a), (b) und 0.2% in (c), (d); negative Änderungen (d. h. Zunahme mit abnehmender Solaraktivität) sind mit gestrichelten Linien dargestellt. Blau und lila geben negative Änderungen an, während grün, gelb und rot positive Änderungen anzeigen (aus: Ball et al, 2014, J. Atm. Sci.).

*Fig. 3: Contour plots of the change in stratospheric ozone between 2003 and 2008 using SSI input from (a) the NRLSSI model, (b) the SATIRE-S model, and SORCE/SOLSTICE (c) version 10 and (d) version 12. All results are for 25 Dec. Contour interval is 0.1% in (a),(b) and 0.2% in (c),(d) with negative changes (i.e., increases with decreasing solar activity) shown with dotted contours. Blue and purple reflect negative changes, while green, yellow, and red show positive changes (from Ball et al. 2014)*

hebliche Auswirkungen auf Modelle der Erdatmosphäre haben können. In Zusammenarbeit mit Forschungsgruppen aus dem UK haben wir alle drei Datensätze dazu verwendet, um  $O_3$ -Schwankungen in der mittleren Atmosphäre während des Sonnenzyklus 23 (1996–2008) mit einem atmosphärischen 2D-Modell des Imperial College und einem chemischen 3D-Transportmodell (chemical transport model, CTM) abzubilden. Die resultierende Reaktion des atmosphärischen  $O_3$  ist sehr sensitiv hinsichtlich der Wahl des Datensatzes der Bestrahlungsstärke. Die Verwendung von NRLSSI führt zu einer Abnahme an mesosphärischem  $O_3$ , während SATIRE-S und SORCE/SOLSTICE eine Zunahme hervorrufen (Abb. 3). Wir konnten nachweisen, dass das aktuelle Wissen über Schwankungen in der SSI nicht ausreicht, um stabile Schlussfolgerungen hinsichtlich der Auswirkung der solaren Schwankungen auf die Atmosphäre zu ermöglichen. Wir konnten ebenso nachweisen, dass aufgrund der großen Ungenauigkeiten und des kurzen Zeitraumes der  $O_3$ -Messungen dessen Änderungen in der unteren Mesosphäre nicht dazu verwendet werden können, um zwischen SSI-Datensätzen zu unterscheiden. Die modellierten solaren Aufheizraten in der mittleren Erdatmosphäre (15–80 km) hängen ebenso stark von der Wahl des SSI-Eingangsdatensatzes ab (Ball et al. 2014).

### **Helligkeitsschwankungen der Sonne und sonnenähnlicher Sterne**

Die Sonne und andere Sterne mit vergleichsweise schwacher magnetischer Aktivität werden mit zunehmender Aktivität im Durchschnitt heller. In anderen Worten, ihre gesamten Helligkeitsschwankungen folgen dem 11-jährigen Sonnenfleckenzyklus. Magnetisch aktivere Sterne zeigen ein gegenläufiges Verhalten und werden mit zunehmender Aktivität (d. h. mit zunehmender Sonnenfleckenanzahl) dunkler. Wir haben das SATIRE-Modell so extrapoliert, dass andere Sterne als hypothetische Sonnen behandelt werden, die, abhängig von ihrem mittleren Aktivitätslevel, von magnetischen Strukturen (Flecken und Fackeln) bedeckt sind und aus verschiedenen Blickwinkeln relativ zu ihrer Rotationsaxe betrachtet werden (ein Beobachter auf der Erde sieht die Sonne immer ungefähr von ihrem Äquator aus). Wir haben festge-

*sequences for models of the terrestrial atmosphere. In collaboration with research groups from UK, we used all three datasets to model changes in middle atmospheric  $O_3$  during solar cycle 23 (1996–2008) with a 2D Imperial College atmospheric model and a 3D chemical transport model (CTM). The resulting response of the atmospheric  $O_3$  is very sensitive to the choice of the irradiance dataset. Using NRLSSI leads to a decline in mesospheric  $O_3$  while SATIRE-S and SORCE/SOLSTICE result in an increase (Fig. 3). We showed that current knowledge of variations in SSI is not sufficient to warrant robust conclusions concerning the impact of solar variability on the atmosphere. We also showed that due to large uncertainties and the short time span of the  $O_3$  observations,  $O_3$  changes in the lower mesosphere cannot be used to discriminate between SSI datasets. The modelled solar heating rates in the Earth's middle atmosphere (15–80 km) also strongly depend on the choice of the input SSI data set (Ball et al. 2014).*

### **Brightness variations of the Sun and Sun-like stars**

*The Sun and other stars with comparatively low magnetic activity levels become on average brighter when their activity increases. In other words, their overall brightness changes follow the 11-year sunspot cycle. Magnetically more active stars display the opposite behaviour and become fainter with increasing activity (i.e. with increasing sunspot number). We have extrapolated the SATIRE model to treat stars as hypothetical suns with coverage by magnetic features (spots and faculae) depending on their mean activity level and viewed under different angles to their rotation axes (an Earth-based observer always sees the Sun roughly from its equator). We found that the contribution by starspots to the variability increases faster with stellar activity than the facular contribution. This*

stellt, dass der Beitrag der Sternenflecken an den Schwankungen mit stellarer Aktivität schneller zunimmt als der Beitrag der Fackeln. Das verursacht einen Wechsel von Fackel-dominiertes Variabilität und direkter Aktivitäts-Helligkeits-Beziehung zu Flecken-dominiertes Variabilität und inverser Aktivitäts-Helligkeits-Beziehung mit zunehmendem stellarem Aktivitätslevel. Das Variabilitätsregime hängt ebenso vom Betrachtungswinkel ab (Shapiro et al. 2014).

*causes the transition from faculae-dominated variability and direct activity-brightness correlation to spot-dominated variability and inverse activity-brightness correlation with increasing stellar activity level. The regime of the variability also depends on the viewing angle (Shapiro et al. 2014).*

**Team in 2013/2014:** .....

Theodosios Chatzistergos,  
Maria Dasi Espuig,  
Natalie Krivova,  
Sami K. Solanki,  
Alexander Shapiro,  
Kok Leng Yeo

Die Gruppe im September 2014  
(T. Chatzistergos, N. Krivova, A. Shapiro, K. L. Yeo). Foto: D. Ausserhofer

*Group in September 2014 (T. Chatzistergos, N. Krivova, A. Shapiro, K.L. Yeo). Photo: D. Ausserhofer*



**Referenzen /References** .....

- Ball W. T., Krivova N. A., Unruh Y. C., Haigh J. D., Solanki S. K. (2014): J. Atm. Sci., 71/11, 4086-4101 (16 pp):  
A new SATIRE-S spectral solar irradiance reconstruction for solar cycles 21-23 and its implications for stratospheric ozone
- Dasi-Espuig M., Jiang J., Krivova N. A., Solanki S. K. (2014): A&A 570, A23 (11 pp):  
Modelling total solar irradiance since 1878 from simulated magnetograms
- Shapiro A. I., Solanki S. K., Krivova N. A., et al. (2014): A&A 569, A38 (18 pp):  
Variability of Sun-like stars: reproducing observed photometric trends
- Solanki S. K., Krivova N. A., Haigh J. D. (2013): Ann. Rev. Astron. Astrophys. 51, 311-351 (41 pp):  
Solar Irradiance Variability and Climate
- Yeo K. L., Krivova N. A., Solanki S. K., Glassmeier K.-H. (2014): A&A 570, A85 (18 pp):  
Reconstruction of total and spectral solar irradiance from 1974 to 2013 based on KPVT, SoHO/MDI, and SDO/HMI observations

**KOMETENFORSCHUNG**

***RESEARCH LINKED TO COMETS***

## Forschungsgebiet

Die wissenschaftliche Interesse der Max-Planck Forschungsgruppe RELIC (Research Linked to Comets) ist vielfältig. Zum einen versuchen wir zu verstehen, wie vor etwa 4,5 Milliarden Jahren die ersten Objekte im Sonnensystem, Planetesimale genannt, entstanden sind. Kometen sind die am besten erhaltenen Überbleibsel dieser Planetesimale, daher stehen sie im Zentrum unseres Interesses. Zudem untersuchen wir, die diese Objekte, die sich vor so langer Zeit gebildet haben, erhalten geblieben sind. Die meisten noch erhaltenen Planetesimale aus der Entstehungszeit befinden sich in einer Region jenseits des Neptun, im Kuipergürtel. Die Eigenschaften der Objekte im Kuipergürtel zu verstehen ist daher eines der Ziele der Gruppe. Hin und wieder wird eines der Objekte im Kuipergürtel in das innere Sonnensystem abgelenkt, erwärmt sich dort, beginnt zu sublimieren und wird zu einem Kometen. Wir wollen daher schließlich verstehen, was mit den Objekten des Kuipergürtels passiert, während sie sich zu Kometen entwickeln.

Da die beschriebenen Phänomene nicht nur in unserem Sonnensystem auftreten, sondern auch in der Umgebung vieler Sterne, möchten wir sie sehr allgemein verstehen, um so zur Erforschung von extrasolaren Planetensystemen beizutragen.

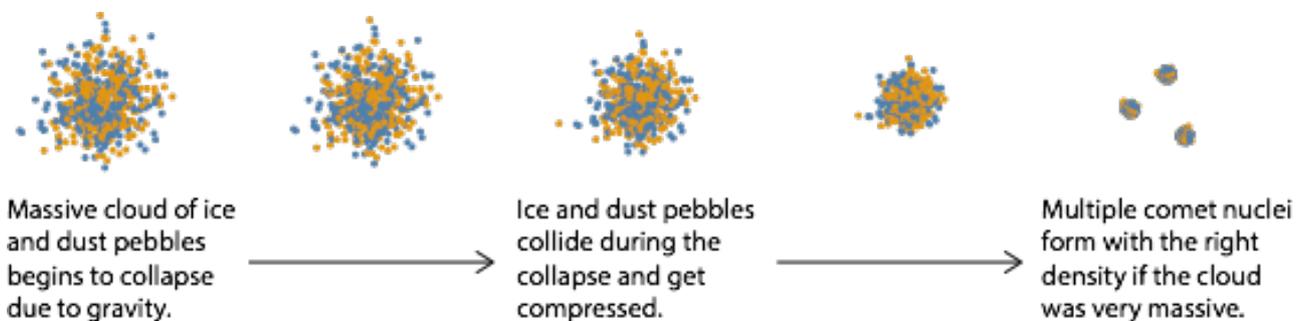
## Research area

*The scientific interests of the Max Planck Research Group RELIC (Research linked to Comets) are broad. First, we would like to understand how the first objects, called planetesimals, were born in the solar system about 4.5 billion years ago. Comets are the best preserved remnants of planetesimals, so we focus on them. Second, we need to investigate how those objects formed so long ago have been preserved. Most leftover planetesimals from the formation epoch are stored beyond Neptune in a region called the Kuiper Belt, and we are very interested in learning the properties of those objects. Once in a while one of those Kuiper Belt objects is perturbed into the inner solar system, where it heats, begins to sublimate, and becomes a comet. So, lastly, we need to know what happens to the Kuiper Belt objects as they evolve to become comets.*

*The phenomena described above are not exclusive to our solar system; they occur around many stars. We are interested in understanding the phenomena in a very general way so that we can contribute to the study of extrasolar planetary systems.*

## Wesentliche Ergebnisse

Die RELIC-Gruppe beschäftigt sich zurzeit mit Aspekten auf beiden Enden der Kometenentwicklung. Wir entwickeln state-of-the-art Simulationen der Entstehung von Kometen. Ausgangspunkt der Simulationen sind riesige Teilchenwolken aus Eis und Staub, die aufgrund der Schwerkraft kollabieren und in ihrem Mittelpunkt ein Objekt ausbilden (Abb. 1). Dieses ist eine sehr neue und interessante Theorie der Entstehung von Planetesimalen. Manche dieser Planetesimale treffen aufeinander und wachsen weiter, bis sie letztendlich zu Planeten werden. Andere bleiben klein und werden Kometen. Die Simulationen zeigen, dass die Eigenschaften von Kometen sehr stark von der anfänglichen Masse der Wolke, aus der sie hervorgegangen sind, abhängen. Wir konnten zeigen, dass die Wolke, aus der der aktuell von Rosetta untersuchte Komet 67P entstand, sehr massereich war, wesentlich massiver als der Komet. Das bedeutet, dass jede kollabierende Wolke mehrere Objekte ausbilden muss und nicht nur ein einzelnes Planetesimal.



**Abb.1:** Kometen entstehen wahrscheinlich in riesigen Teilchenwolken, die aufgrund der Schwerkraft kollabieren. Die Teilchen bestehen aus Eis und Staub und werden komprimiert, wenn die Wolke kollabiert. Wir haben herausgefunden, dass nur sehr massereiche Wolken (eintausend bis eine Million Mal massereicher als der Komet) die Teilchen stark genug komprimieren können, um einen Kometen wie 67P hervorzubringen. Das bedeutet, dass aus jeder Wolke mehrere Kometen entstehen.

Wir untersuchen zudem die Rotation von Objekten aus dem Kuipergürtel und von Kometen, um zu verstehen, wie die Aktivität der Kometen die Rotation und die Form der Kometenkern beeinflusst (Abb. 2). Über die Rotation und Form der Objekte

## Major Results

*The RELIC group is currently investigating aspects at both ends of comet evolution. We are developing state-of-the-art simulations of the formation of comets. The simulations start with large clouds of particles made of ice and dust, which then collapse due to gravity to form an object at the centre (Fig. 1). This is a very recent and exciting theory for forming planetesimals. Some of these planetesimals come together and keep growing to form the planets, and some remain small and become the comets. The simulations show that the properties of comets depend strongly on the initial mass of the collapsing cloud in which the comet formed. We found that the cloud that formed comet 67P, which is currently being studied by Rosetta, was very massive, much more massive than the comet. The implication is that each collapsing cloud must form several objects and not just a single planetesimal.*

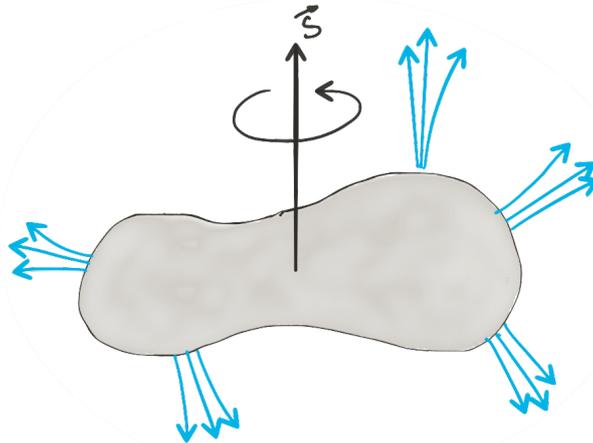
*Fig. 1: Comets are probably born in massive pebble clouds that collapse due to gravity. The pebbles are made of ice and dust and they get compressed as the cloud collapses. We found that only very massive pebble clouds, one thousand to one million times more massive than the comet, can compress the pebbles enough to produce a comet like 67P. The implication is that each cloud must form many comets.*

*We are also investigating the rotations of Kuiper Belt objects and comets in order to understand how cometary activity changes the rotation and the shape of comet nuclei (Figure 2). Kuiper Belt objects are the parent population of*

des Kuipergürtels, die die Ausgangspopulation der Kometen darstellen, ist wenig bekannt. Sie sind aber wichtig, da sie die Entstehungsmechanismen und die weitere Entwicklung dieser Objekte durch Kollisionen widerspiegeln.

*comets. Their rotations and shapes are not well known but are important because they reflect the formation mechanism and collisional evolution of these objects.*

**Abb. 2:** Kometen stammen aus einer Region jenseits des Neptun, dem Kuiper-Gürtel. Die Rotation eines Objekts aus dem Kuiper-Gürtel wird bei der Entstehung festgelegt und ändert sich, wenn die Objekte kollidieren. Wenn die Objekte zu Kometen werden, entstehen Jets (hier in blau), die die Rotation der Kometenkern beschleunigen oder abbremsen. Mithilfe von Rosetta werden wir diesen Prozess genau untersuchen und die Ergebnisse auf andere Kometen übertragen.



*Fig. 2: Comets originate beyond Neptune, in the Kuiper Belt. The spins of Kuiper Belt objects were set at formation and modified by collisions. When Kuiper Belt objects become comets, their jets (blue arrows) cause the comet nucleus to spin faster or slower. With Rosetta we will study this process in great detail and then apply the theory to other comets.*

Wenn sie den Kuipergürtel verlassen und sich der Sonne nähern, werden diese Objekte zu Kometen. Ihre Rotation ändert sich aufgrund der für die Kometenaktivität typischen Jets. Wir messen die Rotation von Objekten aus dem Kuipergürtel und von Kometen, um sie zu vergleichen. Mithilfe der Daten von Rosetta wollen wir verstehen, wie die Jets die Rotation und Form von 67P verändern, um dieses Wissen dann auf andere Kometen anzuwenden.

*Upon leaving the Kuiper Belt and approaching the Sun, these objects become comets and their rotations are modified by the jets typical of cometary activity. We will measure rotations of both Kuiper Belt objects and comets and compare them. We will also use information from Rosetta to learn how the jets change the rotation and shape of 67P, and then apply what we have learned to other comets.*

Wir haben ein detailliertes Modell des Kometenstaubs entwickelt, um einige der überraschenden Beobachtungen von Rosetta zu erklären. So hat Rosetta z. B. gemessen, dass 67P große, lockere Staubpartikel ausstößt, die sich langsamer bewegen als erwartet. Das Modell ist in der Lage, diese Beobachtungen zu erklären.

*We have developed a detailed model of cometary dust that tried to explain some of the surprising observations reported by Rosetta. Specifically, Rosetta found that 67P ejects large and fluffy dust particles that move slower than expected. The model can explain these observations.*

Zu den weiteren Ergebnissen der Arbeiten in der RELIC-Gruppe zählen die Entdeckung und erste Untersuchung eines „contact binary“ (eines Doppelkörpers, deren beiden Teile sich gravitativ genähert haben, bis sie sich berühren) im Kuipergürtel (Lacerda et al. 2014a), die Identifizierung von zwei Oberflächentypen unter den Objekten im Kuipergürtel (Lacerda et al. 2014b) und die erste Studie über das Wachstum von Planetesimalen durch Anlagerung von Chondrulen (Johansen et al. 2015).

*Other work by the RELIC group has included the discovery and preliminary investigation of a contact binary (two bodies that have gravitated toward each other until they touch) in the Kuiper Belt (Lacerda et al. 2014a), the identification of two surface types among Kuiper Belt objects (Lacerda et al. 2014b) and the first study of planetesimal growth by accretion of chondrules (Johansen et al. 2015).*

## Ausblick

In den kommenden Jahren, während denen Rosetta seine Erkundung des Kometen 67P abschließt, werden wir die Untersuchung der Entstehung von Planetesimalen und ihrer Entwicklung als Kometen weiter fortführen. Diese sind fundamentale Fragen, die im Zusammenhang stehen mit dem Ursprung des Sonnensystems, und damit letztlich mit unserem eigenen Ursprung.

## Outlook

*In the coming years, as Rosetta completes its exploration of comet 67P, we plan to continue our investigation of the formation of planetesimals and their evolution as comets. These are fundamental problems that link us to the origins of the solar system, and ultimately to our own origins.*

### Team in 2013/2014:

Pedro Lacerda, Sebastian Lorek, Rosita Kokotanekova, Yuri Skorov

### Ausgewählte Publikationen / *Selected publications*

Lacerda P., McNeill A., Peixinho N. , The unusual Kuiper belt object 2003 SQ317, MNRAS, 437, 3824-3831 (2014)

Lacerda P., Fornasier S., Lellouch E. et al., The Albedo-Color Diversity of Transneptunian Object, ApJL, 793, L2 (2014)

Johansen A., Mac Low M.-M., Lacerda P., Bizzarro M., Growth of asteroids, planetary embryos, and Kuiper belt objects by chondrule accretion, Sci. Adv., 1, 3, e1500109 (2015)



Neben der Entwicklung wissenschaftlicher Instrumenten, häufig für Weltraummissionen, und der Gewinnung entsprechender Messdaten manifestieren sich die Ergebnisse der wissenschaftlichen Arbeit am MPS vor allem in Form wissenschaftlicher Publikationen. Deren Anzahl kann daher als relevanter Leistungsindikator 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.

Die rote Kurve in der Abbildung zeigt die Entwicklung der Anzahl der referierten 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). Bis 2012 zeigt sich eine stetige Zunahme von im Mittel ca. 5% pro Jahr, abgesehen von einem deutlichen Peak in 2010, der vor allem den Projekten Herschel und Sunrise zu verdanken, die in dem Jahr erstmals in größerem Umfang Ergebnisse publiziert haben.

Die Jahre 2013 und 2014 weisen dagegen eine leicht zurückgehende bis stagnierende Entwicklung auf. Die Gründe dafür sind vor allem der Institutsumzug Anfang 2014 einschließlich Vorbereitung und Nacharbeiten, die Vorbereitung auf und die Begleitung der Rosetta-Mission in der kritischen Phase sowie der hohe Entwicklungsaufwand für das Projekt Solar Orbiter. Alle diese

*Besides development of scientific instruments, often for space missions, and the acquisition of corresponding observational data the results of the scientific work at the MPS are mainly manifested by scientific publications. Thus their number may be considered as a relevant performance indicator for the institute. This is especially the case for the number of refereed publications, i.e. such publications, which appear in a journal with a peer-review based selection process.*

*The red curve in the figure shows for the last 10 years the development of the number of refereed MPS publications (i.e. at least one of the authors is member of the MPS) per year, based on the Web of Science (WOS). Until 2012 a steady increase of about 5% per year on average can be observed, with exception of a peak in 2010, caused mainly by the projects Herschel and Sunrise, which published in that year for the first time a large number of scientific results.*

*The years 2013 and 2014 exhibit a slightly decreasing to stagnant trend. Reasons are in the first line the move of the institute early 2014 including its preparation and subsequent setup work, the critical science phase of the Rosetta mission, requiring major efforts for preparation and support, and the high development efforts for the Solar Orbiter project All these activities*

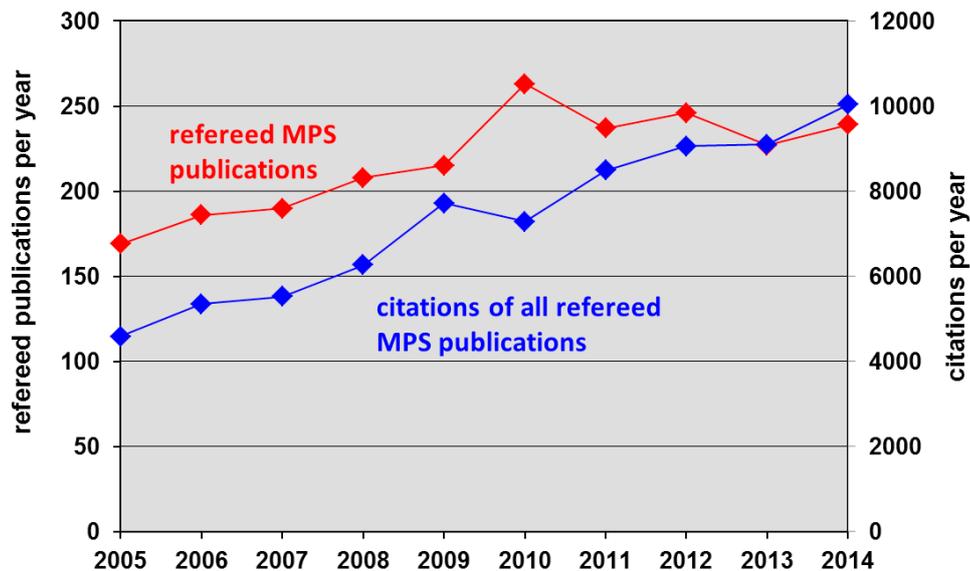


Abb. 1: Anzahl der referierten MPS-Publikationen pro Jahr für die letzten 10 Jahre (nach WOS)

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

Aktivitäten werden mittel- und langfristig wissenschaftliche Früchte tragen, kurzfristig aber binden sie in hohem Maße Ressourcen, ohne zu Publikationen zu führen.

*are expected to yield scientific profit on the mid- or long-term, but in the short-term they require a lot of resources without leading to publications..*

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 blaue Kurve in der Abbildung zeigt die Häufigkeit, mit der referierte MPS-Publikationen in dem jeweiligen Jahr zitiert wurden. Im Jahr 2014 z.B. war das für alle Publikationen des Instituts zusammen ca. 10.000 Mal der Fall. Auch dieser Performanceindikator zeigt für das MPS ein fast stetiges Wachstum mit einer durchschnittlichen Wachstumsrate von ca. 8% pro Jahr, also signifikant höher als die Zunahme der Zahl der 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 blue curve in the diagram shows the citation count of all refereed MPS publications within each year. For e.g. 2014 all refereed MPS papers together have been cited about 10.000 times. Also his performance indicator shows for the MPS an almost steady increase of about 8% per year on average, i.e. a significantly higher growth rate than for the the number of publications.*



Abb. 2: Titelblatt einer Sonderausgabe von Science zur Rosetta-Mission.

Fig. 2: Cover of a special issue of Science about the Rosetta mission in January 2015.

**INTERNATIONAL MAX PLANCK RESEARCH  
SCHOOL (IMPRS)**

In der „International Max Planck Research School for Solar System Science at the University of Göttingen“ (Solar System School) haben sich das Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung und die Institute für Astrophysik und Geophysik der Georg-August-Universität Göttingen zusammengeschlossen, um in- und ausländischen DoktorandInnen optimale Möglichkeiten zu bieten, auf dem Gebiet der Sonnensystemforschung 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 Sonnen- und Astrophysik, einschließlich der dafür wesentlichen physikalischen Grundlagen. Es ermöglicht eine breite, interdisziplinäre und fundierte wissenschaftliche Ausbildung, die durch Kurse in numerischer Physik, Weltraumtechnologie, wissenschaftlichem Schreiben und Präsentationstechniken, guter wissenschaftlicher Praxis und Karriereworkshops ergänzt wird.

Mit dem Umzug des MPS auf den Campus der Universität Göttingen im Februar 2014 hat die Schule ihre wissenschaftliche Bandbreite nochmals erweitert. Die Sonnensystemforschung als Schlüsselthema ist eingebettet in den weiteren geo- und astrophysikalischen Kontext, und die Forschungsprojekte der Promovierenden sind ebenso

*In the “International Max Planck Research School for Solar System Science at the University of Göttingen” (Solar System School), the Max Planck Institute for Solar System Research and the Institutes for Astrophysics and for Geophysics of the University of Göttingen collaborate to provide excellent PhD training in Solar system science to both international and local students.*

*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 and stellar 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, scientific writing and presentation skills, good scientific practice, and career development.*

*Along with the move of the MPS to the Göttingen Campus in 2014, the School has further extended its scientific scope. Solar system science as its key research area is now even more strongly embedded in the wider geo- and astrophysical context. The PhD topics are just as diverse as the research topics of the partici-*

Abb. 1: Eine Gruppe IMPRS-Studenten berät über eine gemeinsame Präsentation während des Retreats 2014.



*Fig. 1: During the IMPRS retreat in 2014, a working group of students discusses a joint presentation.*

Abb. 2: Nach der erfolgreichen Verteidigung seiner Doktorarbeit wird ein Absolvent von seinen Kommilitonen mit einem dekorierten Doktorhut empfangen.



*Fig. 2: Upon exiting his successful defense, fellow students celebrate the graduate with a decorated doctoral hat.*

vielfältig wie die Forschungsthemen der Partnerinstitute. Sie umfassen mit der Sonne, ihren Planeten und kleinen Körpern vor allem die Objekte unseres Sonnensystems, aber auch die Sterne und Planeten anderer Sonnensysteme. Die Methoden reichen von Instrumentierung und Beobachtung über Datenanalyse und Interpretation bis hin zu numerischen Simulationen und theoretischer Modellierung.

In der Lehre bietet die unmittelbare Nachbarschaft des Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung und der Fakultät für Physik der Universität Göttingen mit ihren Instituten für Astrophysik und Geophysik den Studierenden der IMPRS an allen Partnerinstituten die Möglichkeit für ein äußerst breites Angebot an Vorlesungen, Seminaren, Kolloquien, wissenschaftlichem Austausch und interdisziplinärer Betreuung.

Im Mittel nehmen zwischen 40 und 50 DoktorandInnen gleichzeitig am Programm der Solar System School teil. Neu angefangen haben 2013

*patting partner institutions. These PhD projects predominantly comprise all areas of our own Solar system – the Sun, its planets and small bodies-, but also (to a lesser extent) other stars and their planetary systems. Methods of research include instrumentation, observations, data analysis, numerical simulations and theoretical modeling.*

*In education and training, the new location of the Max Planck Institute for Solar System Research in the direct vicinity of the Faculty of Physics of the University of Göttingen, with its Institutes for Astrophysics and Geophysics, leads to a unique broad variety of courses on offer to IMPRS students at all partner institutions: lectures, seminars, colloquia, scientific exchange and interdisciplinary supervision.*

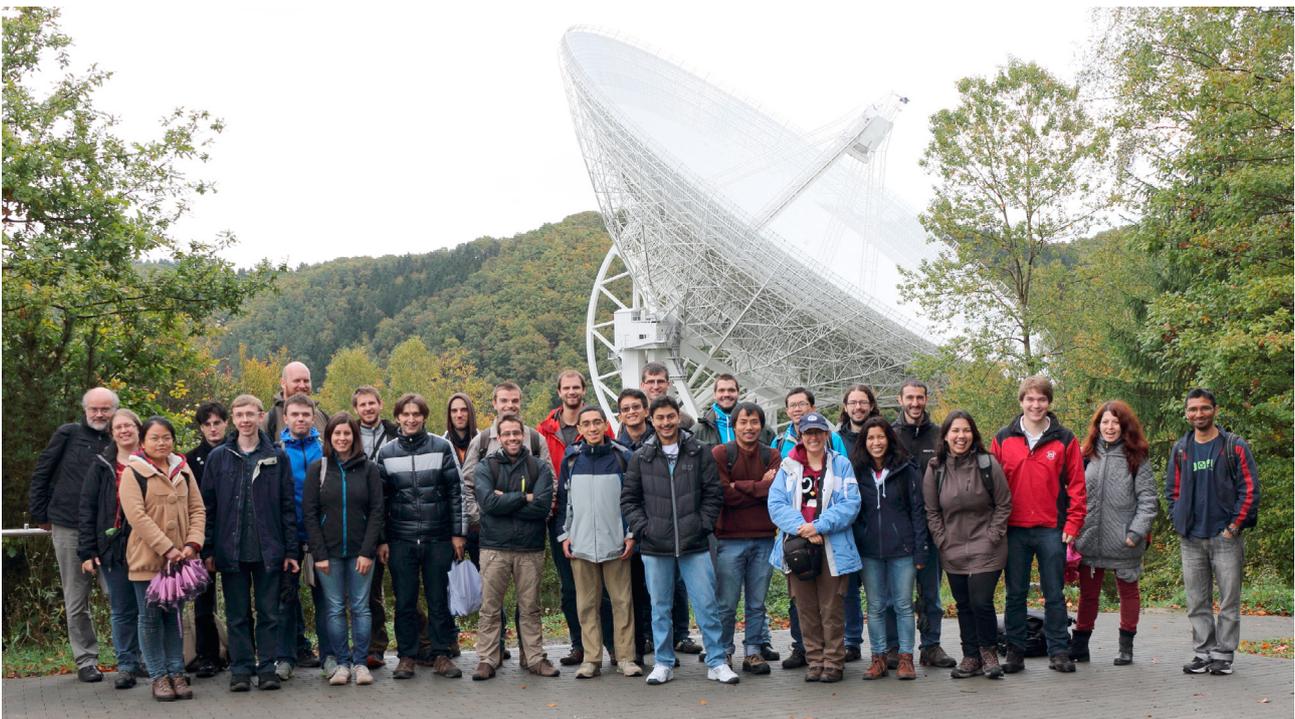
*On average, 40 to 50 students participate in the Solar System School's program at any given time. In 2013, 13 new students joined the*

vierzehn, und 2014 zwölf Studierende. Vierzehn Nachwuchswissenschaftler haben 2013 ihre Promotion erfolgreich abgeschlossen, dreizehn im darauffolgenden Jahr 2014. In Summe hat die IMPRS damit seit ihrer Gründung 2002 bis Ende 2014 die Sonnensystemforschung um 140 frisch promovierte PhysikerInnen bereichert. Die DoktorandInnen kamen dabei aus insgesamt 45 verschiedenen Ländern. Der Anteil ausländischer DoktorandInnen lag in den neuen Jahrgängen 2013/2014 bei etwa 3/4, der Anteil weiblicher Studierender bei etwa 2/5.

Ein Antrag auf Einrichtung oder Fortführung einer IMPRS kann jeweils für einen Zeitraum von sechs Jahre gestellt werden. Der Anspruch, in einer IMPRS eine exzellente Promotionsausbildung anzubieten, wird regelmäßig von einem externen Gutachtergremium überprüft. Bei positiver Evaluierung durch das Gremium kann ein Fortsetzungsantrag auf Verlängerung um weitere sechs Jahre bewilligt werden. Seit der Gründung der Schule 2002 wurde die wissenschaftliche Qualität und die Qualität der Promotionsausbildung in zwei Evaluationen im November 2005 und im Juni 2012 als sehr erfolgreich bewertet. Darauf basierend wurde die IMPRS zuletzt ein weiteres Mal für den Zeitraum Oktober 2013 bis September 2019 verlängert.

*School, and 14 in 2014. 14 junior scientists successfully graduated with a PhD in 2013, and 13 in the following year 2014. In total, from its establishment in 2002 to the end of 2014, the IMPRS has thus created a talent pool of 140 new graduates in solar system science, contributing significantly to the research community. Overall, these PhD students came from 45 different countries of origin. The share of international students in the cohorts 2013/14 was about 3/4, the share of female students was about 2/5.*

*Any IMPRS is funded in six-year intervals. The scope to provide excellence in science and in PhD training, formulated in a proposal for the establishment or extension of an IMPRS, is regularly evaluated by an external committee. In case of a positive evaluation, a proposal for an extension for the next six years may be approved. Since its establishment in 2002, the scientific quality and the quality of PhD training in the Solar System School has been very positively evaluated in evaluations both in November 2005 and in June 2012. Based on this excellent performance, the IMPRS has recently been extended for yet another six years for the time period from October 2013 to September 2019.*



IMPRS-Studenten und Betreuer am Radioteleskop Effelsberg

*The IMPRS group at the Effelsberg radio telescope*

ÖFFENTLICHKEITSARBEIT

*MEDIA AND PUBLIC RELATIONS*

Ob Sonne, Planeten oder Kometen – das Interesse der Öffentlichkeit und der Medien an den Forschungsthemen und -methoden des MPS ist ausgesprochen groß. Interessierte Laien wenden sich an das Institut mit fachlichen Fragen und der Bitte um Einschätzungen; Medien suchen Interviewpartner und Drehmöglichkeiten; Besucher – vom Kindergartenkind bis zum Physikstudierenden – nehmen an Institutsführungen und öffentlichen Veranstaltungen teil. Diesen sehr verschiedenen Zielgruppen begegnet das MPS mit unterschiedlichsten Methoden der Presse- und Öffentlichkeitsarbeit, die im Folgenden beschrieben werden.

### **Pressemitteilungen**

Regelmäßig informiert das MPS Medien und Öffentlichkeit in Pressemitteilungen und auf der Institutshomepage über neue Forschungsergebnisse und Meilensteine von Weltraummissionen, an denen das Institut beteiligt ist. 2013 und 2014 wurden insgesamt 74 Pressemitteilungen herausgegeben. Neben Neuigkeiten zu den Missionen Sunrise und Rosetta stießen besonders die Auswahl der PLATO-Mission durch die ESA, Ergebnisse der NASA-Mission IRIS und Beobachtungen des Kometen ISON auf Interesse.

*The interest of the general public and the media in the research topics and methods of the MPS is huge. Interested laypersons contact the institute with scientific inquiries and ask for assessments of scientific developments; the media searches for interview partners and filming opportunities; visitors – from preschool children to physics students at the University – take part in guided tours and public events. The MPS approaches these very different target groups with various methods of media and public relations which shall be elaborated in the following.*

### **Press releases**

*Regularly, the MPS informs the media and the general public in press releases and on the institute's homepage about new research results and milestones of space missions to which the institute contributes. In 2013 and 2014, all in all 74 press releases were issued. Apart from news from the missions Sunrise and Rosetta, especially the selection of the PLATO mission by ESA, results of NASA's IRIS mission and observations of comet ISON were well received.*

20 ENTDECKEN

STUTTGARTER ZEITUNG  
Nr. 3481 / Freitag, 17. Oktober 2014

STUTTGARTER  
KinderZEITUNG

Was die Sonne wirklich aufheizt



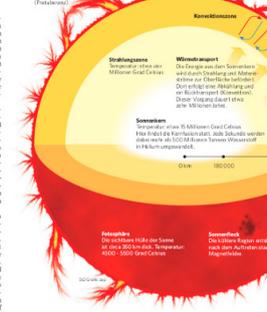
Physik Das Weltraumteleskop IRIS inspiziert die brodelnde Hülle der Sonne und hilft, Eruptionen zu verstehen. Von Roland Kraiser

Spitzes Kraut

Das Weltraumteleskop IRIS inspiziert die brodelnde Hülle der Sonne und hilft, Eruptionen zu verstehen. Von Roland Kraiser

Die Energieproduzentin Sonne

AUF DER OBERFLÄCHE DER SONNE IST ES SOGAR VERGLEICHWEISE KÜHL. Die Energieproduzentin Sonne



Kerna (Hans-Günter Rommelspacher) Sie erhebt sich mehrere 10.000 Kilometer in die Höhe und ist die heißeste Schicht der Sonne. Temperatur: bis zu mehreren Millionen Grad Celsius

Look! Comet ISON has sprouted a pair of wings [Photo]

Comments 0 | Email | Share 94 | Tweet 84



This image taken Nov. 16 shows ISON's atmosphere with two wing-like features resembling the letter U. For orientation, the comet's nucleus position is shown as a bright spot in the center. (Wendelin Observatory of the L1871/MPS / November 19, 2013)

By Deborah Netburn  
November 19, 2013 | 4:33 p.m.  
Comet ISON appears to have sprouted wings. Two wing-shaped features in the thin atmosphere around the head of Comet ISON were detected earlier this week by scientists from the Max Planck Institute for Solar System Research (MPS) in Germany. You can see them in the image above -- it looks almost like a cartoon angel gliding through the night sky.

rast sehr nah

nden Siding Spring könnte den Rosten sind gefährlich. Von Roland Kraiser

Die Weltraumteleskop IRIS inspiziert die brodelnde Hülle der Sonne und hilft, Eruptionen zu verstehen. Von Roland Kraiser

WISSENSCHAFT

MITTWOCH, 19. JUNI 2013

Sunrise landet in Kanada

Ende der Mission mit fliegendem Sonnenobservatorium / Bergungsteam unterwegs



Sunrise vor Sonne ausgerichtet: Aufnahme des Sonnenobservatoriums von einer der Bordkameras. Im Foto ist oben der Ballon zu sehen.

Katzenburg-Lindau: Flug Tag hat der Flug des Ballongestirgen. Sunrise vor Sonne ausgerichtet: Aufnahme des Sonnenobservatoriums von einer der Bordkameras. Im Foto ist oben der Ballon zu sehen.

Abb. 1: Das MPS in der Presse. Links: Artikel in der Los Angeles Times vom 19. November 2013 über MPS-Beobachtungen des Kometen ISON, Mitte: Umfassender Artikel in den Stuttgarter Nachrichten vom 17. Oktober 2014 über IRIS-Ergebnisse von MPS-Forschern, Rechts: Beitrag über die erfolgreiche Landung des Sonnenobservatoriums Sunrise im Göttinger Tageblatt vom 19. Juni 2013.

Fig. 1: The MPS in the media: Left: An article in the Los Angeles Times from November 19th, 2013 describing MPS-observations of comet ISON, Center: comprehensive article in the Stuttgarter Nachrichten from October 17, 2014 dealing with IRIS results by MPS scientists, Right: text about the successful landing of the solar observatory Sunrise in the Göttinger Tageblatt from June 19, 2013.

Führungen

Zahlreiche lokale, nationale und internationale Besuchergruppen besuchen das MPS jährlich, um die Arbeit des Instituts in Führungen kennenzulernen. Die Führungen richten sich an alle Alters- und Bildungsklassen: vom Kindergartenkind bis zu Physikstudenten. Wegen des Umzugs nach Göttingen wurde der Führungsbetrieb am neuen Standort zunächst eingestellt, Mitte 2014 jedoch wieder aufgenommen. Das Interesse an Institutsführungen ist mit dem neuen Standort und der

Guided Tours

Every year, several local, national, and even international groups of visitors tour the MPS in order more about the institute's work. The guided tours are aimed at visitors of all ages and different levels of background knowledge: from kindergarten children to physics students. Due to the relocation to Göttingen, the guided tours were at first discontinued at the new site, but soon resumed in mid-2014. The public interest in guided tours has increased signifi-

derzeitigen hohen Sichtbarkeit des MPS in den Medien deutlich gestiegen. 2014 wurden mit etwa 40 Führungen für etwa 600 Gäste etwa doppelt so viele Führungen angeboten wie in einem typischen Jahr in Katlenburg-Lindau.

### **Zukunftstag**

Das MPS nimmt regelmäßig am deutschlandweiten Zukunftstag teil. An diesem Tag erhalten Schülerinnen und Schüler aus der Region, die Möglichkeit, verschiedene Tätigkeitsfelder und Arbeitsplätze am MPS kennenzulernen: von der Werkstatt bis zur Wissenschaft.

2013 nahmen 33 Jugendliche teil. Gleich zu Beginn erwartete die Jugendlichen mit einem Vortrag über 3D-Bilder aus dem Weltall ein spannender Einblick in eine fremde Welt, bei dem die Schüler trotz der frühen Uhrzeit eifrig miträtselten. In den nächsten Stunden wurde es „irdischer“: Die Schüler lernten die Feinmechanikwerkstatt, das Elektroniklabor und das Rechenzentrum kennen, durften ein eigenes Mühlespiel fräsen, ihren Namen aus Widerständen löten und in die „Innereien“ eines Rechners schauen. Ein weiterer Höhepunkt: Experimente mit Vakuum-Pumpe und flüssigem Stickstoff, bei denen gefrorene Rosen wie Glas zersprangen und Schaumküsse explodierten.

2014 nahm das Institut wegen des Umzugs ausnahmsweise nicht am Zukunftstag teil.

### **Sunrise**

Im Sommer 2013 startete das ballongetragene Sonnenobservatorium SUNRISE zu seinem zweiten Flug. Am 12. Juni hob es von der Weltraumbasis ESARANGE im nordschwedischen Kiruna ab. Insgesamt fünf Pressemitteilungen begleiteten Vorbereitungen, Start, Flug und Bergung. Zudem wurde eine vierseitige Broschüre erstellt, die über die Mission, ihre Besonderheiten und Ziele informiert.

*cantly since then, probably due to the new, attractive location and the current high visibility of the MPS in the media. In 2014 the institute offered 40 guided tours for approximately 600 visitors – about twice as much as in a typical year in Katlenburg-Lindau.*

### **Career Day**

*Almost every year, the MPS takes part in the national „Zukunftstag“, a day dedicated to showing pupils career options in a hands-on manner. On this day, pupils from the surrounding area receive the opportunity to explore different occupations and work places at the MPS – from the workshops to the sciences.*

*In 2013, 33 young people participated. In the morning, the students were offered a lecture on three-dimensional images from space. The next hours were less „out of this world“: the children got to know the mechanics workshop, the electronics laboratory, and the computing center. Another highlight: Experiments with a vacuum pump and with liquid nitrogen, in which frozen roses shattered like glass and candy exploded.*

*In 2014, the institute did not partake in the Zukunftstag due to the recent relocation.*

### **Sunrise**

*In the summer of 2013, the ballone-borne solar observatory Sunrise embarked on its second scientific journey. On June 12th it lifted off at ESARANGE space station in Kiruna in the north of Sweden. All in all, five press releases accompanied the preparations, launch, flight, and retrieval. In addition, a four-page brochure was compiled informing about the mission, its specifics and goals.*



Abb. 2: Etwa 500 Besucher verfolgten die Landung von Philae auf dem Kometen 67P/Churyumov-Gerasimenko am 12. November 2014 am MPS. Foto: MPS

*Fig. 2: Approximately 500 visitors watched the landing of Philae on comet 67P/Churyumov-Gerasimenko on November 12, 2014 at the MPS. credits: MPS*

## **Rosetta**

Das beherrschende Thema für die Presse- und Öffentlichkeitsarbeit im Jahr 2014 war die ESA-Mission Rosetta zum Kometen 67P/Churyumov-Gerasimenko. Das MPS ist mit zahlreichen Instrumenten (sowohl auf dem Orbiter, als auch auf dem Lander) an der Mission beteiligt. Zudem hat das Institut etwa 50 Prozent der Landeeinheit Philae entwickelt.

Insgesamt 28 Pressemitteilungen informierten 2014 über entscheidende Stationen der Mission: vom „Aufwachen“ der Sonde aus ihrem 30-monatigen Tiefschlaf im Januar 2014, über die Ankunft am Kometen im August und bis zur Landung auf dem Kometenkern im November. Dazu wurden erste wissenschaftliche Ergebnisse präsentiert.

Als Hintergrundinformationen für interessierte Laien und Medien erstellte die Pressestelle fünf Broschüren: zu den Instrumenten OSIRIS, COSIMA, COSAC und DIM sowie zur Landeeinheit Philae.

## **Rosetta**

*The dominant topic for media relations and public outreach in 2014 was ESA's Rosetta mission to comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. The MPS contributed to several of the mission's scientific instruments (on the orbiter as well as on the lander). Also, the institute developed and built approximately 50 percent of the lander hardware.*

*All together 28 press releases informed about Rosetta's mission milestones in 2014: from the awakening of the space probe from its more than 30 months of hibernation in January, its arrival at the comet in August, and the touchdown on the comet's nucleus in November. In addition, first scientific results were presented.*

*Providing background information for interested enthusiasts and the media alike, the press office compiled five brochures: dealing with the instruments OSIRIS, COSIMA, COSAC, and DIM as well as with the lander Philae.*



Abb. 3: Aus großen Styropor-Blöcken entstand in zahlreichen Arbeitsschritten ein Modell des Rosetta-Kometen im Maßstab 1:1500.  
Fotos: MPS

*Fig. 3: A model of Rosetta's comet on a scale of 1:1500 was created from large blocks of styrofoam in several production steps.  
credits: MPS*

Zwei öffentliche Veranstaltungen boten die Möglichkeit, wichtige Meilensteine der Mission am Institut mitzuerleben. Für den Vorabend der Ankunft am Kometen am 8. August 2014 lud das MPS zu einem öffentlichen Vortrag. Zudem wurden im Foyer Flugersatzeinheiten zahlreicher Rosetta-Instrumente ausgestellt. Am 12. November, dem Tag der Landung, bot das MPS ab 14 Uhr ein umfangreiches Programm: Aktivitäten wie „Rate die Landestelle“ oder Kometenbacken, Live-Schaltungen zu dem MPS-Kollegen in den Kontrollzentren in Köln und Darmstadt und Public Viewing des Livestreams der ESA. Etwa 500 Besucher verfolgten die Landung am MPS.

*Two public events offered the opportunity, to witness important mission milestones at the institute. On the evening before the arrival at the comet on August 8th, the MPS invited the public to a lecture. In addition, flight spares of several Rosetta instruments were displayed in the foyer. On November 12th, the day of the landing, the MPS offered an extensive program starting at 2pm: activities such as „guessing the landing site“, or „baking a comet“, live interviews with MPS colleagues stationed in the control centers in Cologne and Darmstadt, and public watching of ESA's livestream. Approximately 500 visitors came to MPS on this day.*

Um den fernen Rosetta-Kometen greifbarer zu machen, fertigten die MPS-Mitarbeiter Helge Aue und Martin Heinrich ein riesiges Modell des Kometenkerns im Maßstab 1:1500 an. Dies hat sich als hilfreiches Werkzeug erwiesen, um Besuchern Farbe, Form und den Landungsverlauf zu erklären.

*In order to make Rosetta's comet more tangible, the MPS employees Helge Aue and Martin Heinrich constructed a huge model of the comet on a scale of 1:1500. It has proven to be a helpful tool in explaining color, shape and the course of the landing to visitors.*

**MPS IM ÜBERBLICK**

***MPS AT A GLANCE***

## Wissenschaftliche Leitung und Gremien *Scientific Management and Boards*

### Direktoren / *Directors*

Prof. Dr. Ulrich R. Christensen  
Geschäftsführender Direktor 2011–2013  
*Managing Director 2011–2013*

Prof. Dr. Laurent Gizon

Prof. Dr. Sami K. Solanki  
Geschäftsführender Direktor 2014–2016  
*Managing Director 2014–2016*

### 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



Die Direktoren des MPS *The MPS Directors:*  
Laurent Gizon, Sami K. Solanki, Ulrich R. Christensen

**Kuratorium**  
***Board of Trustees***

Prof. Dr. Ulrike Beisiegel  
Präsidentin, Georg-August-Universität Göttingen

Prof. Dr. Stefan Dreizler  
Institut für Astrophysik  
Georg-August-Universität Göttingen

Rüdiger Eichel  
Abteilungsleiter, Niedersächsisches Ministerium  
für Wissenschaft und Kultur

Dr. Gerd Gruppe  
Vorstand Raumfahrtmanagement  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Frauke Heiligenstadt, MdL  
Niedersächsische Kultusministerin

Dr. Josef Lange (Vorsitzender / chair)  
Staatssekretär a. D.

Prof. Dr. Oskar von der Lühe  
Direktor, Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik

Prof. Dr. Mark McCaughrean  
Head, Research & Scientific Support Department  
European Space Agency

Dr. Michael Menking  
Senior Vice President  
Director „Earth Observation, Navigation & Science“  
Airbus Defence & Space

Dr. Fritz Merkle  
Mitglied des Vorstands  
Orbitale Hochtechnologie Bremen-System AG

Dr. Karl-Friedrich Nagel  
Ministerialrat  
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

Thomas Oppermann, MdB  
Vorsitzender der SPD-Bundestagsfraktion

Dr. Ulf von Rauchhaupt  
Senior Science Editor  
Frankfurter Allgemeine Sonntagszeitung

**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 (Vorsitzender / chair)  
Department of Mathematics  
St. Andrews University

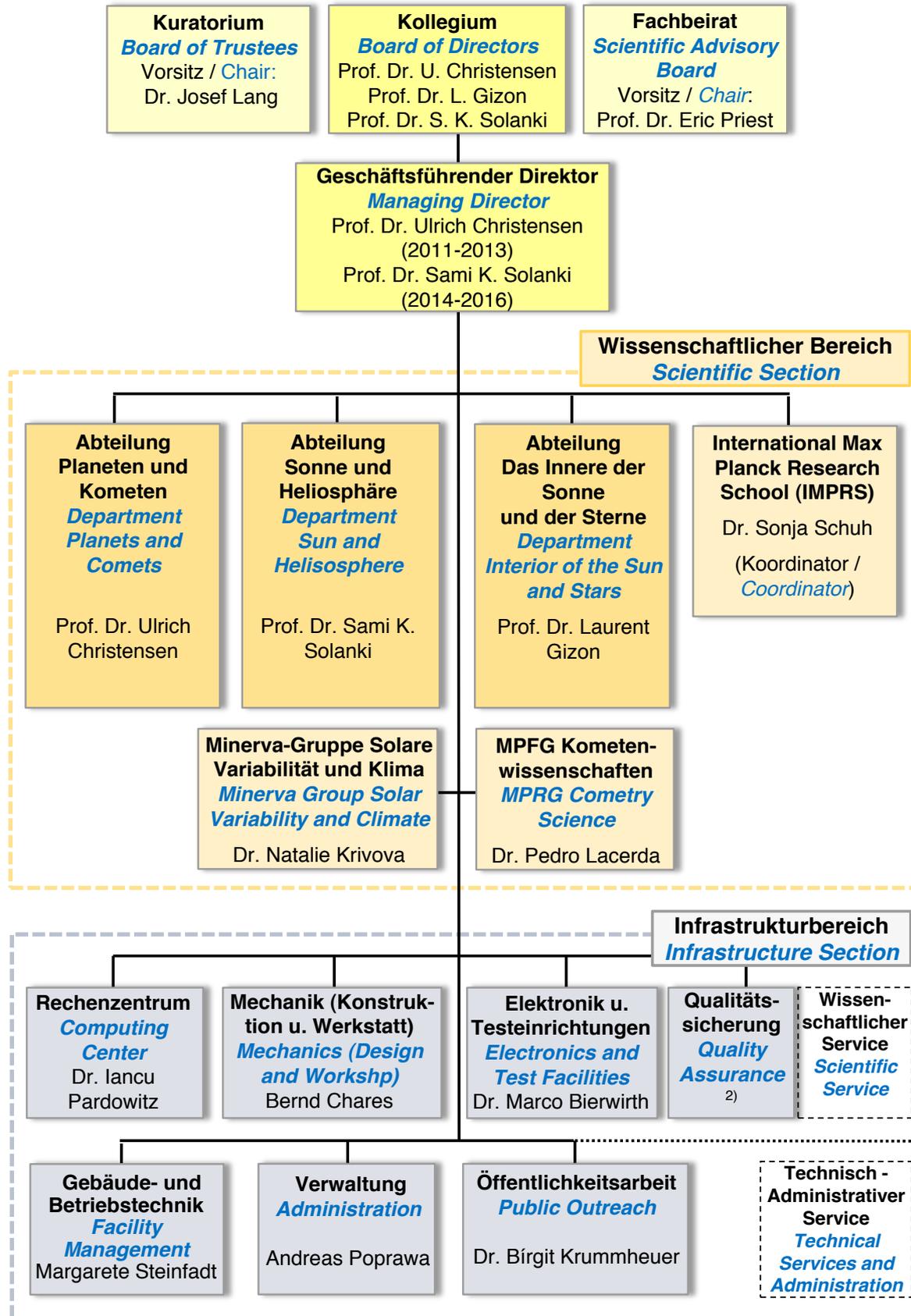
Prof. Dr. David Stevenson  
Geological & Planetary Sciences  
California Institute for Technology



Der Fachbeirat im Jahr 2013 (von links nach rechts):  
*The Scientific Advisory Board in 2013 (from left to right):*  
Claude Catala, John Leibacher, Gerhard Hensler, Richard Harrison,  
Eric Priest, David Stevenson, Larry Esposito

# Organigramm

# Organizational Chart



<sup>2)</sup> disziplinarisch den Abteilungen zugeordnet  
*reporting to the scientific departments*

## Personalentwicklung

Die Entwicklung der Anzahl der Mitarbeiter in den letzten fünf Jahren, insgesamt und für die einzelnen Mitarbeitergruppen, ist in dem Diagramm dargestellt. Die Gesamtzahl der Mitarbeiter hat sich im Berichtszeitraum (2013/14) deutlich (um 10%) erhöht, mit dem markantesten Wachstum bei den Ingenieuren und Technikern. Dieser sprunghafte Anstieg bei den technischen Angestellten ist bedingt durch den Bedarf der großen Weltraummissionen, vor allem Solar Orbiter und JUICE. Aber auch die wissenschaftlichen Mitarbeiter (zumindest Postdocs und Wissenschaftler) zeigen einen gewissen Anstieg. Gründe dafür sind der noch andauernde Aufbau der dritten Abteilung, die in 2011 eingerichtet wurde, der Aufbau einer neuen Max-Planck-Forschungsgruppe und einer Minerva-Gruppe, der ressourcenbedarf einiger gro-

## Staff Development

The evolution of the staff numbers during the last five years, in total and for the individual staff groups, is shown in the diagram. The total number of employees increased clearly (by 10%) during the reporting period (2013/14), with the most prominent growth for the staff groups of engineers and technicians. This jump in the technical staff is due to the needs of the large space missions, predominantly Solar Orbiter and JUICE. But also the scientific staff (at least postdocs and scientists) shows some increase. Reasons are the third department, established in 2011, that still continues to grow, the establishment of a new Max Planck Research Group and a Minerva Group, the resource requirements of some of the large space missions (in particular Rosetta) and the involvement in a

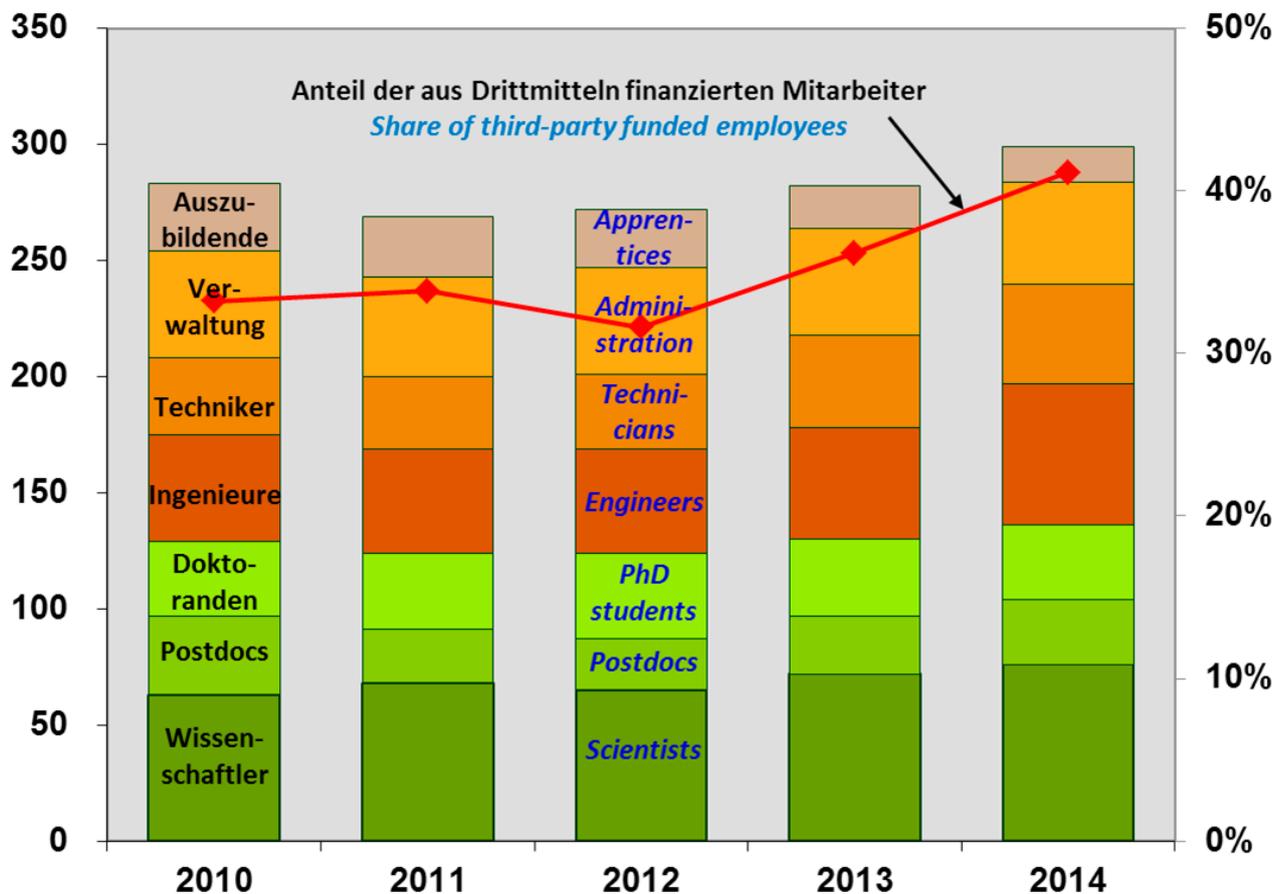


Abb. 1: Entwicklung der Gesamtzahl der Mitarbeiter, der einzelnen Mitarbeitergruppen und des Anteils drittmittelfinanzierter Positionen in den letzten fünf Jahren.

Fig. 1: Evolution of the total staff number, the individual staff groups and the share of third party funded positions during the last five years.

ßer Weltraummissionen (insbesondere Rosetta) und die Beteiligung an einer Reihe anderer großer Projekte (z. B. der Sonderforschungsbereich "Astrophysical Flow Instabilities and Turbulence" und das Max-Planck-Princeton-Center in Plasmaphysik).

Neben den von der MPG finanzierten institutionellen Positionen gibt es einen großen Anteil an Stellen (die Mehrheit der wissenschaftlichen Positionen), die über Drittmittel gefördert sind. Diese Stellen sind meist projektbezogen und die entsprechenden Mittel stammen vom DLR, der EU, der ESA, dem DFG und anderen. Der Anteil drittmittelfinanzierter Stellen, der ebenfalls in dem Diagramm dargestellt ist, ist im Berichtszeitraum von 33% auf 41% angestiegen.

## Institutshaushalt

Die wesentlichen Finanzierungsquellen des MPS sind das von der MPG bereitgestellte reguläre Institutsbudget und projektbezogene Drittmittel von DLR, EU, DFG, ESA und anderen. Diese werden ergänzt durch Sondermittel der MPG für spezielle Projekte (einschl. der IMPRS) oder für hohe Investitionen in wissenschaftliches Equipment, die typischerweise auf Basis einer Evaluation bewilligt werden.

Über die letzten Jahre bestand der Haushalt des MPS im Mittel zu annähernd gleichen Anteilen aus Mitteln der MPG und aus Drittmitteln. Das von der MPG bereitgestellte institutionelle Budget (blau dargestellt im Diagramm) ist vergleichsweise stabil und weist einen konstanten moderaten Anstieg auf, der für die Jahre 2013 und 2014 durch Kosten im Zusammenhang mit dem Umzug des Instituts in den Neubau etwas stärker ausfällt. Die Drittmittel (orange dargestellt) sind dagegen deutlicheren Schwankungen unterworfen, abhängig von den jeweils anstehenden Projektaktivitäten. MPG-Sondermittel (in grün) sind in 2014 besonders ausgeprägt, u. a. aufgrund von Investitionen in Equipment im Rahmen des Umzugs in das neue Institutsgebäude.

*number of other large projects (e.g. Collaborative Research Center "Astrophysical Flow Instabilities and Turbulence" and the Max Planck Princeton Center in Plasma Physics).*

*Besides the institutional positions funded by the MPG, a large share of personnel (the majority of scientific staff) are employed based on third party funding. These positions are mostly project-related and funded by DLR, EU, ESA, DFG and others. The share of third party funded employees, also shown in the diagram, rose during the reporting period from 33% to 41%.*

## Institute's Budget

*The prime funding sources of the MPS are the institutional budget provided by the Max Planck Society (MPG) and project-related third-party funding through DLR, EU, DFG, ESA and others. This is augmented by extra funds, outside the regular budget, provided by the MPG for certain projects (incl. the IMPRS) or major investment in science-related equipment, usually based on an evaluation process.*

*Over the last years the MPS budget has on average been based to approximately same shares on funds of the Max Planck Society and on third party funding. The institutional budget (shown in blue in the diagram) is relatively stable, with a steady moderate increase. 2013 and 2014 show a somewhat higher raise due to costs related to the move of the institute in its new building. Third party funding (presented in orange) shows a larger fluctuation, according to the scheduled activities of the corresponding projects. Special funding by the MPS (in green) is particularly pronounced in 2014, amongst others due to investment for equipment in the context of the move in the new institute's building.*

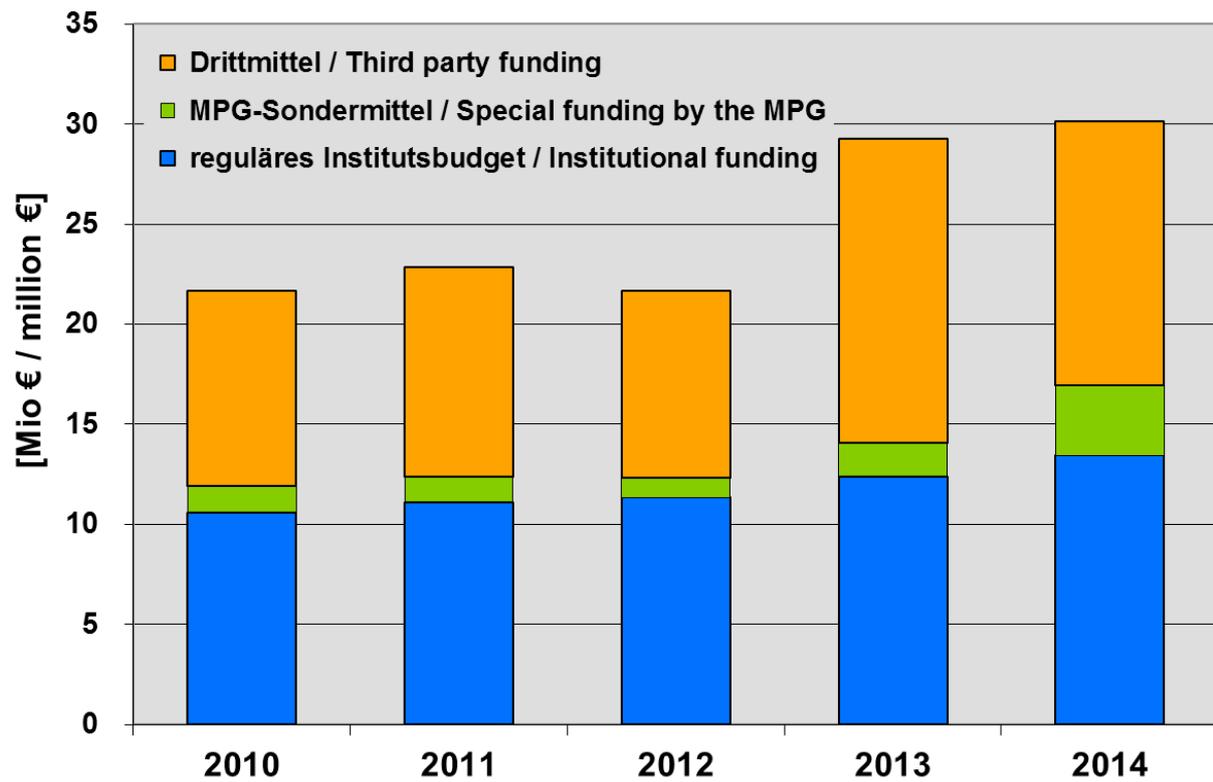


Abb. 2: Entwicklung des MPS-Haushalts in den letzten fünf Jahren, getrennt nach regulärem Institutshaushalt, Drittmitteln und MPG-Sondermitteln.

*Fig. 2: Trend of the MPS funding during the last five years, separated for institutional funding, third party funding and extra MPG funding.*



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

## Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung

Justus-von-Liebig-Weg 3  
37077 Göttingen

Tel. : (+49) 551 384979-0  
Fax : (+49) 551 384979-240

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

