



Erkundung des Sonnensystems mit Herschel

Herschel, das bisher größte Weltraumteleskop, wurde am 14. Mai 2009 mit einer Ariane-V- Rakete ins All befördert und beobachtet seitdem das Universum im fernen Infrarotbereich. Ein wichtiger Forschungsschwerpunkt beschäftigt sich mit der Rolle von Wasser und dessen Chemie im Sonnensystem. Dabei werden verschiedene Klassen von Kometen charakterisiert, der Zyklus von Wasser und seine vertikale Verteilung auf dem Mars analysiert und die Herkunft des Wassers in den Stratosphären der Gasriesen und des Saturn-Mondes Titan erforscht.

Nach vielen Jahren intensiver Vorbereitung was es am 14. Mai 2009 endlich soweit: Eine Ariane-V-Rakete hob vom Weltraumbahnhof Kourou in Französisch-Guyana ab, um die Weltraumsonde Herschel ins All zu befördern. Eine Woche später erreichte Herschel seinen Bestimmungsort, den L2-Punkt (**Abb. 1**). Dieser liegt auf der sonnenabgewandten Seite 1,5 Millionen Kilometer von der Erde entfernt. Mit einem Durchmesser von 3,5 Metern ist Herschel das größte Weltraumteleskop und bildet die vierte „Cornerstone Mission“ der ESA. Die nach dem Entdecker der Infrarotstrahlung benannte Sonde trägt drei wissenschaftliche Experimente, die den fernen Infrarotbereich (FIR) von 57 μm bis 672 μm spektroskopisch und photometrisch vermessen: HIFI (Heterodyne Instrument for the Far Infrared), PACS (Photodetector Array Camera and Spectrometer) und SPIRE (Spectral and Photometric Imaging Receiver). Die Detektoren dieser Instrumente müssen auf Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt gehalten werden. Die zu diesem Zweck mitgeführten mehr als 2.000 Liter flüssiges Helium dürften bis Ende 2012 reichen.



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

© ESA

Herschels hohe Empfindlichkeit und sein Betrieb im Weltall ermöglichen eine Vielzahl neu- und einzigartiger Beobachtungen. Die hoch aufgelöste Vermessung der FIR-Hintergrundstrahlung erlaubt Rückschlüsse auf die Strukturformation in der frühen Anfangszeit des Universums. Daten von fernen Infrarotgalaxien liefern Informationen über Sternentstehungsraten und

Galaxienentwicklung auf kosmologischen Zeitskalen. Herschel-Messungen enthüllen die Physik und Chemie des interstellaren Mediums, der Kinderstube von Sternen, und enträtseln die Mechanismen der Entstehung und Entwicklung von Sternen und Planeten. Das Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung (MPS) hat sich im Rahmen des HssO-Programms (Herschel Solar System Observations) insbesondere dem letzten Punkt gewidmet.

Das HssO-Beobachtungsprogramm

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

HssO konzentriert sich darauf, das Vorkommen von Wasser und seine Rolle im Sonnensystem zu untersuchen [1]. Aufgrund des Wassergehalts der Atmosphäre sind solche Untersuchungen von der Erdoberfläche aus nur eingeschränkt möglich. Wasser ist im Sonnensystem allgegenwärtig, etwa als Gas in den Planeten- und Kometenatmosphären, gebunden im Gesteinsmantel oder als Eis auf den Oberflächen von Planeten, Monden, Kometen und kleineren Partikeln. In den Atmosphären spielt Wasser eine wichtige Rolle für die dort ablaufenden chemischen Prozesse.

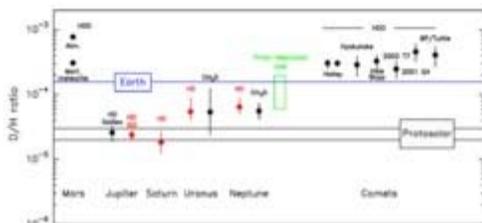


Abb. 2: Das Verhältnis D/H von schwerem (D) zu normalem Wasserstoff (H) für verschiedene Körper im Sonnensystem. Die Werte wurden an Wasser (HDO), molekularem Wasserstoff (HD) oder Methan (CH₃D) bestimmt. Jupiter und Saturn weisen die Werte des protosolaren Nebels auf, alle anderen Planeten und die Kometen zeigen eine Anreicherung von D, die unterschiedliche Ursachen haben kann. Uranus und Neptun etwa haben einen hohen Eis-Anteil, das einen erhöhten D/H-Wert aufweist. Marsmeteorite zeigen einen doppelt so hohen Wert wie die Erde, die Mars-Atmosphäre ist durch Escape-Prozesse sogar um den Faktor 5 stärker angereichert.

© aus [1]

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

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

Erste Ergebnisse I: Die Kometen Garradd, Wild2 und Christensen

Das erste Objekt im Sonnensystem, das Herschel beobachtete, war C/2008 Q3 (Garradd), ein Komet mit einer Umlaufzeit von 190.000 Jahren und einem Perihel (kürzester Abstand zur Sonne) von 270 Millionen km. Im Juli 2009 vermaß HIFI drei Wasser-Spektrallinien (bei 557 GHz, 1113 GHz und 1669 GHz) aus einer Entfernung von 285 Millionen km. Die beiden höheren Frequenzen wurden zum ersten Mal beobachtet. Eine wichtige Kenngröße für die Gas- und Staubwolke (Koma), die einen Kometen umgibt, ist die Wasser-Produktionsrate. Im Prinzip kann diese über die Linienstärke bestimmt werden. Dafür

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

Die von HIFI im Februar 2010 aus einer Entfernung von 135 Millionen km beobachteten Wasserlinien von 81P(Wild), einem Kometen mit einer Periode von nur 6,4 Jahren und einem Perihel von 240 Millionen km, zeigen eine Produktionsrate von 10^{28} Molekülen/s [3] und bestätigen einmal mehr die Anregungsmodelle. Dies ist eine wesentliche Voraussetzung, um in einem nächsten Schritt das D/H-Verhältnis möglichst exakt zu bestimmen.

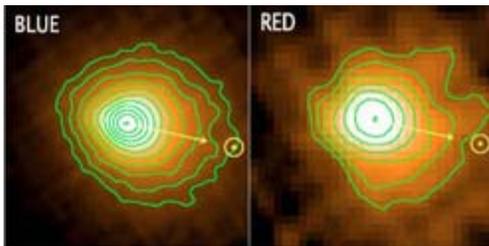


Abb. 3: PACS-Bilder der Staubkoma des Kometen Christensen, aufgenommen im Wellenlängen-bereich von 70 μm (links) und 160 μm (rechts). Der gelbe Kreis und der zugehörige Pfeil zeigen die Richtung der Sonne an. Die grünen Konturlinien markieren den Intensitätsabfall in logarithmischen Stufen von 0,1. Die Abmessungen des Bildes betragen 160000 km x 160000 km.

© aus [4]

Der Komet C/2006 W3 (Christensen) wurde mit den Instrumenten PACS und SPIRE vermessen. C/2006 W3 ist ein langperiodischer Komet mit 140.000 Jahren Umlaufzeit, der sein Perihel von fast 470 Millionen km im Juli 2009 erreichte. Während bodengebundene Beobachtungen des Hydroxylradikals (OH) im Zeitraum Januar bis März 2009 eine Wasser-Produktionsrate von ca. 5×10^{28} Molekülen/s ermittelten, konnten die Herschel-Messungen im November 2009 trotz intensiver Suche kein Wasser detektieren. Damit dürfte die Wasser-Produktionsrate niedriger als die untere Messgrenze von 6×10^{27} Molekülen/s gewesen sein. Dies ist erstaunlich, da der Komet in beiden Fällen den gleichen Abstand zur Sonne hatte. Gleichzeitig durchgeführte bodengebundene Messungen zeigten dagegen eine weiterhin hohe Kohlenmonoxid-Produktion, sodass sich ein außergewöhnlich hohes Verhältnis CO/H₂O von mehr als 4,5 ergab. **Abbildung 3** zeigt die Staubkoma des Kometen in den Wellenlängen 70 μm und 160 μm . Für Staubkörner aus Kohlenstoff bzw. Olivin wurde eine Produktionsrate von 850 kg/s und 920 kg/s bestimmt [4].

Erste Ergebnisse II: Die Planeten Mars und Neptun

Im April 2010 wurde Mars mit dem HIFI-Instrument in einem von der Erde aus nicht zugänglichen Wellenlängenbereich beobachtet, um nach bisher nicht gefundenen Spurenelementen zu suchen. Gleichzeitig wurden Kohlenmonoxidspektren gemessen, um so das vertikale Temperaturprofil zu bestimmen. Dieses ist für die weiteren Auswertungen von großer Bedeutung. Dabei stellte sich heraus, dass die mittlere Temperatur der Marsatmosphäre etwa 10 bis 15 Grad kälter war als heutige Atmosphärenmodelle dies für die entsprechende Mars-Jahreszeit (nördlicher Frühling) voraussagen [5, 6].

HIFI versuchte, zunächst Wasserstoffperoxid (H₂O₂) bei einer Frequenz von 1847 GHz aufzuspüren. Wasserstoffperoxid spielt eine wichtige Rolle in der Chemie der Marsatmosphäre und steht zudem in dem Verdacht, durch seine sterilisierende Wirkung Spuren früheren Lebens vernichtet zu haben. Die Verbindung entsteht durch photochemische Reaktionen und elektrostatische Entladungsprozesse in der Atmosphäre. Chemiemodelle sagen eine Volumenkonzentration von 5 bis 15 ppb für den nördlichen Frühling voraus. Trotz einer Empfindlichkeit von nur 2 ppb konnte HIFI aber kein Wasserstoffperoxid messen.

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

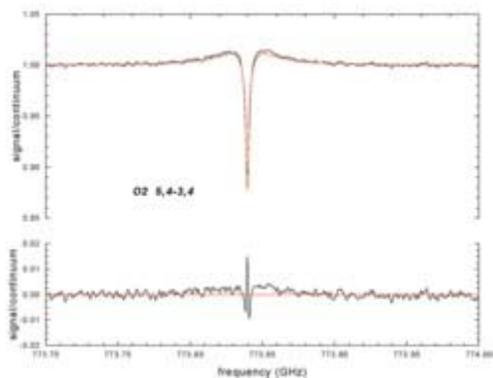


Abb. 4: Spektrum molekularen Sauerstoffs in der Marsatmosphäre. Die schwarzen Linien stellen die Messung und die roten Linien die Simulation für ein konstantes Höhenprofil von 1400 ppm dar. Der untere Teil zeigt die Differenz zwischen Messung und Modell.

© aus [6]

Molekularer Sauerstoff (O_2) hingegen konnte Dank des guten Signal-zu-Rauschverhältnisses zum ersten Mal im Submillimeter-Wellenlängenbereich nachgewiesen werden [6]. Von der Erde aus ist Sauerstoff bestenfalls bei einer günstigen Planetenkonstellation Erde/Mars messbar. Zuletzt ist dies 1972 gelungen. Damals wurde ein Volumenanteil von 1,3 Promille ermittelt, der durch die HIFI-Beobachtungen mit 1,4 Promille bestätigt wird. Aktuelle photochemische Modelle der Marsatmosphäre können, vor allem durch Photolyse von Kohlendioxid und von Wasserdampf, nur einen Bruchteil dieses Wertes erklären. Ein Großteil des Sauerstoffs muss daher schon sehr lange in der Marsatmosphäre vorhanden sein und stammt wahrscheinlich aus Zeiten, in denen es dort noch mehr Wasser gab. Nach so langer Zeit sollte sich der molekulare Sauerstoff nahezu gleichmäßig verteilt haben und seine Konzentration, wie auch in der Erdatmosphäre, nur wenig von der Höhe abhängen. **Abbildung 4** vergleicht das gemessene Sauerstoffspektrum mit den Ergebnissen, die das Modell unter Annahme eines konstanten Höhenprofils liefert. Die sichtbaren Differenzen deuten jedoch darauf hin, dass der Sauerstoffgehalt seinen höchsten Wert in Bodennähe erreicht und nach oben hin stark abnimmt. Zurzeit wird diese Diskrepanz zwischen Theorie und Messung intensiv untersucht.

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

Die Kondensationstemperatur von Kohlenmonoxid ist so niedrig, dass die Tropopause keine Barriere darstellt. Überraschend ist jedoch, dass der CO-Gehalt der Stratosphäre doppelt so hoch ist wie der der Troposphäre. Da eine photochemische Produktion von CO in der Stratosphäre aufgrund von Sauerstoffmangel ausgeschlossen werden kann, bleiben als Erklärung nur Quellen außerhalb des Planeten. Die Auswertung der vertikalen CO-Verteilung und Computersimulationen der Neptunstratosphäre zeigen, dass ein etwa 200 Jahre zurückliegender Kometeneinschlag die wahrscheinlichste Erklärung ist [7].

P. Hartogh, E. Lellouch, J. Crovisier, et al.:

Water and related chemistry in the solar system. A guaranteed time key programme for Herschel.

Planetary and Space Science 57, 1596-1606, doi: 10.1016/j.pss.2009.07.009 (2009).

P. Hartogh, J. Crovisier, M. de Val-Borro, et al.:

HIFI observations of water in the atmosphere of comet C/2008 Q3 (Garradd).

Astronomy & Astrophysics 518, L150, doi: 10.1051/0004-6361/201014665 (2010).

M. de Val-Borro, P. Hartogh, J. Crovisier, et al.:

Water production in comet 81P/Wild 2 as determined by Herschel/HIFI.

Astronomy & Astrophysics 521, L50, doi: 10.1051/0004-6361/201015161 (2010).

D. Bockelée-Morvan, P. Hartogh, J. Crovisier, et al.:

A study of the distant activity of comet C/2006 W3 (Christensen) with Herschel and ground-based radio telescopes.

Astronomy & Astrophysics 518, L149, doi: 10.1051/0004-6361/201014655 (2010).

P. Hartogh, M. I. Błecka, C. Jarchow, et al.:

First results on Martian carbon monoxide from Herschel/HIFI observations.

Astronomy & Astrophysics 521, L48, doi: 10.1051/0004-6361/201015159 (2010).

P. Hartogh, C. Jarchow, E. Lellouch, et al.:

Herschel/HIFI observations of Mars: First detection of O₂ at submillimetre wavelengths and upper limits on HCl and H₂O₂.

Astronomy & Astrophysics 521, L49, doi: 10.1051/0004-6361/201015160 (2010).

E. Lellouch, P. Hartogh, H. Feuchtgruber, et al.:

First results of Herschel-PACS observations of Neptune.

Astronomy & Astrophysics 518, L152, doi: 10.1051/0004-6361/201014600 (2010).

Adresse: http://www.mpg.de/1182156/Sonnensystem_Herschel

© Max-Planck-Gesellschaft, München, © 2003-2011
Alle Rechte vorbehalten
Vervielfältigung nur mit Genehmigung