

Besuch beim Herrn der Ringe

Wenn Cassini am 1. Juli in eine Umlaufbahn um den Saturn einschwenkt, endet eine fast achtjährige Reise. Ein kosmisches Billardspiel in den Gravitationsfeldern der Venus, der Erde und des Jupiter katapultierte die Sonde an ihr Ziel. Mindestens vier Jahre lang soll das Vehikel den Riesenplaneten umkreisen und die Welt seiner Ringe und Monde erkunden. Im Januar 2005 wird die Landeinheit Huygens auf der Oberfläche des Titan aufsetzen. Die Max-Planck-Gesellschaft ist an dieser Mission mit vier Instrumenten beteiligt. Bereits im Anflug lieferten die Geräte wertvolle Messdaten. Darüber und über die Instrumente berichtet **NORBERT KRUPP** vom **MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR AERONOMIE** in Katlenburg-Lindau.

Die Raumsonde *Cassini* startete im Oktober 1997 von Cape Canaveral aus ins All. Damit begann eine der aufregendsten Reisen zu einem anderen Planeten unseres Sonnensystems. An der NASA-Mission beteiligt sind außerdem die europäische Weltraumorganisation ESA und die italienische ASI. *Cassini* beherbergt 12 wissenschaftliche Instrumente, weitere 6 befinden sich auf der Landesonde *Huygens*.

Das Max-Planck-Institut für Aeronomie in Katlenburg-Lindau steuert wesentliche Komponenten für das Teilchenspektrometer MIMI/LEMMS und das Ultraviolett-Spektrometer UVIS/HDAC auf *Cassini* sowie für das Kamerasystem DISR auf *Huygens* bei. Das Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg zeichnet für den Staubdetektor CDA auf *Cassini* verantwortlich. Namenspatrone der Mission sind der französische Astronom Giovanni Domenico Cassini (1625 bis 1712) und sein holländischer Kollege Christiaan Huygens (1629 bis 1695).



Rendezvous mit dem Ringplaneten: So könnte es aussehen, wenn Cassini im Juli in eine Umlaufbahn um Saturn einschwenkt.

Der Vorbeiflug an Jupiter im Dezember 2000 und Januar 2001 war der bisherige Höhepunkt der Mission. Die Ergebnisse ließen bereits erkennen, wie exzellent Wissenschaftler, Ingenieure und Techniker auf allen Ebenen gearbeitet haben – denn die Qualität der Daten ist einzigartig. Gewonnen wurden sie unter anderem mit dem „Magnetospheric Imaging Instrument“ MIMI. Es besteht aus den drei Sensoren MIMI/INCA („Ion Neutral Camera“), MIMI/

CHEMS („Charge Energy Mass Spectrometer“) sowie MIMI/LEMMS („Low Energy Magnetospheric Measurement System“) und misst die Ladungszustände, Energien und Flugrichtungen von Atomen und geladenen Teilchen. Messungen dieser Teilchen machen die sonst unsichtbare Magnetosphäre – eine Art magnetischer Schutzschild um den Planeten – sichtbar.

In einem solchen natürlichen „Labor“ laufen faszinierende Prozesse

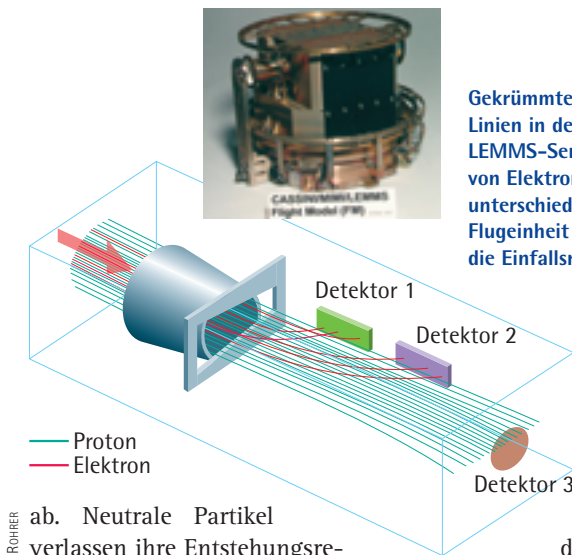


ILLUSTRATION: ROHNER

ab. Neutrale Partikel verlassen ihre Entstehungsregion ungehindert, geladene Teilchen sind an elektrische und magnetische Felder gebunden und gestatten Rückschlüsse über Richtung und Stärke dieser Felder. Es wird möglich, die Bewegungen der Partikel zu bestimmen und die globale Magnetfeldkonfiguration und die Teilchendynamik zu analysieren.

Auch andere Planeten als die Erde – darunter Jupiter und Saturn – besitzen ein internes Magnetfeld und damit eine Magnetosphäre, die den Planeten und seine nähere Umgebung gegenüber dem einfallenden Sonnenwind abgrenzt und teilweise schützt. Ohne die Wirkung der Magnetosphäre gäbe es auf der Erde kein Leben. Magnetosphären sind die größten Objekte in unserem Sonnensystem. Wäre die Saturnmagnetosphäre von der Erde aus sichtbar, hätte sie fast den doppelten Durchmesser der Sonnenscheibe; die Jupitermagnetosphäre wäre sogar zehnmal so groß. Mit MIMI wollen wir besser verstehen, wie dieser Schutzschild funktioniert und welche physikalischen Prozesse in planetaren Magnetosphären – speziell in der Saturnmagnetosphäre – ablaufen.

Die Abbildung oben zeigt das Messprinzip des am Max-Planck-Institut für Aeronomie entwickelten und vom

Gekrümmte Pfade: Die eingezeichneten Linien in der Schemazeichnung des MIMI/LEMMS-Sensors entsprechen den Bahnen von Elektronen (rot) und Ionen (grün) unterschiedlicher Energien. Oben die Flugrichtung des Geräts. Der Pfeil markiert die Einfallsrichtung der Teilchen.

Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) finanziell geförderten Instruments. Die roten und grünen Linien stellen einfallende Elektronen und Ionen dar, die durch eine trichterähnliche Öffnung (Pfeil) in das Instrument gelangen. Eine wabenähnliche Struktur definiert die Einfallsrichtung sehr genau. Durch die Wirkung der Lorentz-Kraft werden Ionen und Elektronen wegen unterschiedlicher Masse und Ladung mit Halbleiterdetektoren an verschiedenen Positionen im Instrument registriert. Ein Magnet biegt die Bahn der Elektronen um und schickt sie auf die Detektoren 1 und 2; positive Ionen werden wegen ihrer höheren Massen sehr viel schwächer und wegen ihrer positiven Ladung in die entgegengesetzte Richtung abgelenkt und landen auf Detektor 3. Dies ermöglicht den Nachweis von Ionen und Elektronen unterschiedlicher Energien. Das Instrument ruht auf einer Drehplattform, sodass sich außerdem die Einfallsrichtung der Teilchen bestimmen lässt.

Ergebnisse von MIMI/LEMMS während des Jupiter-Vorbeiflugs von *Cassini* zeigten, dass die Magnetfeldlinien im Jupitersystem noch bei Abständen von 200 Planetenradien – 14 Millionen Kilometer – geschlossen sein müssen und mit dem Planeten verbunden sind (Abb. unten). Wir

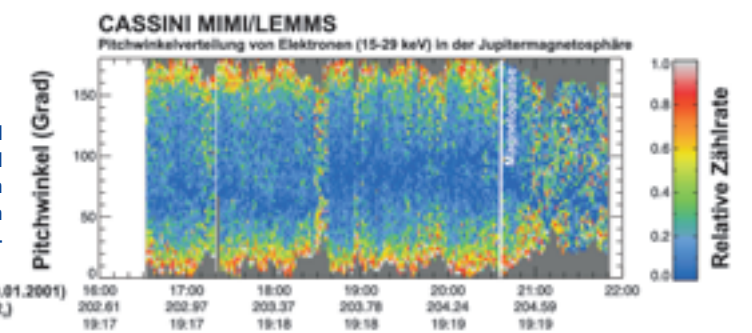
ALLE ABBILDUNGEN: MPI FÜR AERONOMIE

Fingerabdrücke des Magnetfelds: Aufgetragen ist die relative Anzahl der Elektronen in Farbe als Funktion des Winkels zum Magnetfeld (y-Achse) und als Funktion des Abstands von Jupiter (x-Achse) nach Messungen des MIMI/LEMMS-Sensors. Die meisten Elektronen bewegten sich bei 0 und 180 Grad zum Magnetfeld (also entlang der Magnetfeldlinien), solange sich die Raumsonde in der Jupitermagnetosphäre aufhielt. Als *Cassini* die Magnetopause durchquerte, verloren die Feldlinien ihre Verbindung mit Jupiter.

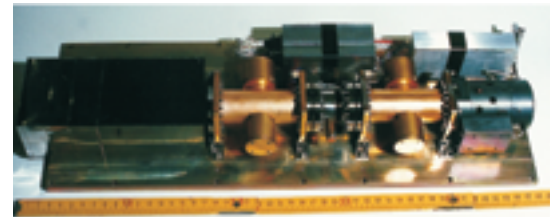
folgern das aus der aufgezeichneten „Pitchwinkelverteilung“, bei der die Einfallsrichtung der Teilchen relativ zur Magnetfeldrichtung untersucht wird. Elektronen innerhalb der Jupitermagnetosphäre bewegen sich im Wesentlichen entlang der Magnetfeldlinien (0 und 180 Grad in der Pitchwinkelverteilung) zwischen Nord- und Südpol des Planeten hin und her. Diese frühen Ergebnisse des MIMI-Instruments schrauben die Erwartungen für Saturn sehr hoch. Hier hoffen wir uns erste direkt gemessene energiereiche Neutralteilchen (ENAs) von dem Planeten und seinem Mond Titan. Weiterhin werden wir sehr detailliert und global die Bewegungsrichtungen von Elektronen und Ionen in der Saturnmagnetosphäre messen können – und erstmals auch die Ladungszustände der Ionen.

BLICK IN DIE GESCHICHTE DES SONNENSYSTEMS

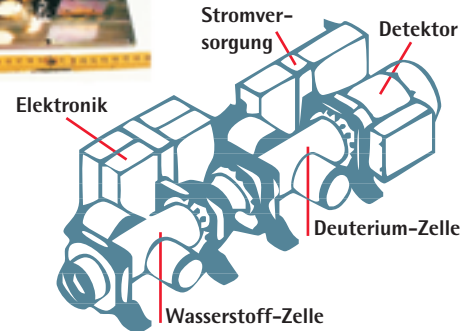
Ein weiteres Instrument auf *Cassini* ist das Ultraviolett-Spektrometer UVIS (Abb. auf Seite 48). Es besteht aus mehreren Detektoren für unterschiedliche Wellenlängenbereiche. Die am Max-Planck-Institut für Aeronomie entwickelte und gebaute Wasserstoff-Deuterium-Absorptionszelle (UVIS/HDAC) soll zum ersten Mal das Verhältnis von Deuterium (D), dem schweren Wasserstoffisotop, zu Wasserstoff (H) in der Atmosphäre des Saturnmonds Titan direkt bestimmen. Zwar gibt es schon heute Werte für das D/H-Verhältnis in der Titanhülle; sie beruhen aber auf Infrarotmessungen vom Erdboden und Erdorbit aus. Dazu wurden Linien Wasserstoff enthaltender Moleküle in der Titanatmosphäre beobachtet, zum



Wertvolles Stück: der Cosmic-Dust-Analyzer (CDA) eingepackt in Thermalisierungsfolie. Das runde Detektorgehäuse hat einen Durchmesser von 40 Zentimetern. Im Inneren sieht man die Eintrittsgitter und die Streben des Multipliergehäuses. Zur Ausrichtung in die Staubrichtung besitzt das Experiment einen Drehtisch.



Hightech an Bord: Flugeinheit und Schemazeichnung der Wasserstoff-Deuterium-Absorptionszelle UVIS/HDAC zur Messung des Verhältnisses von Deuterium zu Wasserstoff in der Atmosphäre des Saturnmonds Titan.



tope nur geringfügig voneinander unterscheiden (Wasserstoff: 1215,67 Ångström, Deuterium: 1215,34 Ångström), wäre ein herkömmliches Spektrometer mit dem zum Trennen dieser Linien erforderlichen Auflösungsvermögen für eine Raumsonde zu schwer. Deshalb wird bei *Cassini* mit HDAC eine Wasserstoff-Deuterium-Absorptionszelle eingesetzt: Entlang der optischen Achse des Instruments sind hintereinander je eine Zelle mit molekularem Wasserstoff (H_2) und Deuterium (D_2) angeordnet. Das einfallende Licht durchquert bei-

de Zellen und wird von einem Photodetektor registriert. Das Erhitzen eines in jeder Zelle angebrachten Wolframfadens zerlegt viele H- und D-Moleküle in einzelne Atome. Diese Atome absorbieren dann einen Teil der einfallenden Lyman- α -Strahlung – was sich in einer verringerten Zählrate des Detektors spiegelt.

Über die Heizleistung der Wolframfäden lässt sich die Konzentration der H- oder D-Atome in den Zellen, und damit deren Absorptionsfähigkeit einstellen. So kann zum Beispiel ein großer Teil der vom atomaren Wasserstoff in der Titanatmosphäre gestreuten Lyman- α -Strahlung absorbiert und erst dadurch das wesentlich schwächere Signal des Deuteriums gemessen werden. Durch geeignete Kombination der Absorption in beiden Zellen ist es dann möglich, das D/H-Verhältnis zu bestimmen. Die für dieses Instrument wichtigste Messung planen wir während eines Titan-Vorbeiflugs am 26. Dezember 2005. Während dieser Passage wird sich die Radialgeschwindigkeit *Cassinis* im Vergleich zu Titan stark verändern. Die daraus resultierende

Doppler-Verschiebung der Spektrallinien sollte es gestatten, die Form der Wasserstofflinie präzise auszumessen. Diese Information dient dazu, die Genauigkeit der Messung des D/H-Verhältnisses weiter zu erhöhen.

Das Max-Planck-Institut für Kernphysik leitet die Untersuchungen des deutschen Experiments *Cosmic-Dust-Analyzer* CDA. Mit großer Empfindlichkeit und hoher Zuverlässigkeit kann dieser Sensor zwei Arten von Staub nachweisen: interplanetaren, der von Kometen oder Asteroiden stammt, und interstellaren, der unser Sonnensystem „durchweht“, dessen Ursprung aber außerhalb liegt. CDA dedektiert Partikel mit einer Geschwindigkeit von 5 Kilometern pro Sekunde und einer Masse von 10^{-16} Kilogramm (entsprechend einer Größe von einem zehntausendstel Millimeter). Neben der Teilchengeschwindigkeit und der Teilchengröße bestimmt das Instrument auch die elektrische Ladung der Staubteilchen und ihre elementare Zusammensetzung. Das CDA-Experiment arbeitet seit 1999 erfolgreich im interplanetaren Raum und liefert ständig wertvolle Daten zur Erde, die den „Staubwissenschaftlern“ bereits viele neue Entdeckungen und Ergebnisse beschert haben.

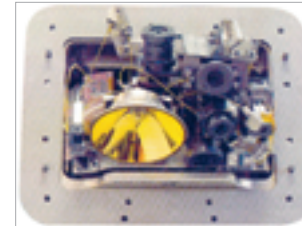
STAUBFÄNGER IM INTERPLANETAREN RAUM

Das integrierte Flugzeitmassenspektrometer bestimmt die elementare Zusammensetzung der mikrometergroßen Staubteilchen. Während des Vorbeiflugs am Jupiter war die Registrierung der Staubraten auf eine Dauer von 12 Stunden beschränkt, es zeigten sich aber hohe Einschlagsraten. Zusammen mit gleichzeitigen Messungen des Staubdetektors auf der Raumsonde *Galileo* ließ sich durch eine Korrelationsanalyse die Phasenverschiebung der beiden Ratenmessungen ermitteln. Danach „weht“ der Staub mit einer Geschwindigkeit von 400 Kilometern pro Sekunde, und die Partikel haben Radien von nur 8 Nanometern.

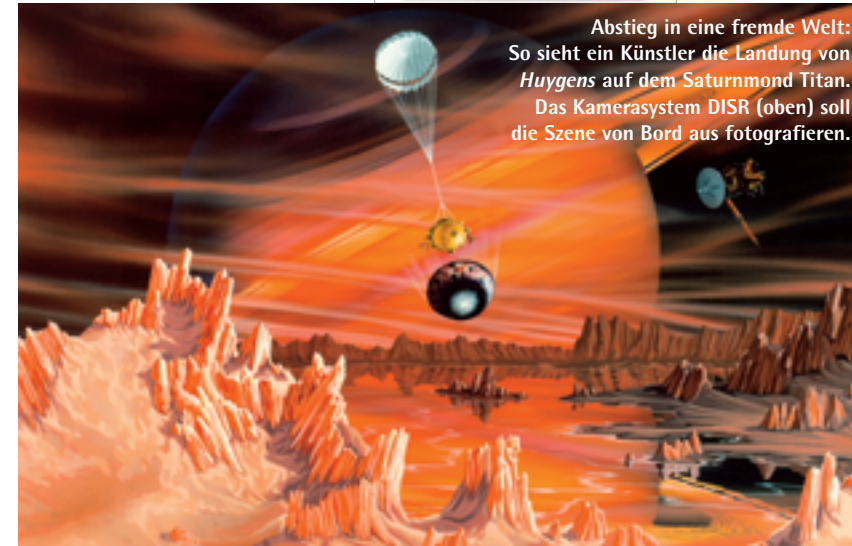
Die Resultate lassen einiges erwarten. Der Saturn ist für sein Ringsystem aus Staub und Gesteinsbrocken

bekannt. Die Dimensionen der Staubteilchen reichen von einem tausendstel Millimeter (E-Ring) bis zur Größe eines Mehrfamilienhauses (innere Ringe). Neben den optisch dichten inneren Ringen, die mit den Buchstaben A bis D gekennzeichnet werden, hat man noch weiter außen liegende Ringe entdeckt. Interessant ist hier vor allem der E-Ring mit seiner Ausdehnung von 3 bis 8 Saturnradien. Da *Cassini* diesen Ring oft durchfliegen wird, lassen sich seine Mikrometer großen Staubteilchen direkt nachweisen. *Cassinis* Staubdetektor wird sicher nicht alle Fragen lösen, aber seine Ergebnisse werden den Antworten ein großes Stück näher kommen.

Ein Highlight der Mission ist zweifellos das Absetzen der Atmosphären- und Landeeinheit *Huygens* auf Titan. Auf dem Him-



sehr viel geringer ist als auf unserem Planeten, ähneln die chemischen Prozesse doch denen in der frühen Erdatmosphäre, die schließlich zur Entstehung von Leben geführt haben. Die organischen Verbindungen verklumpen zu Aerosolen und formen eine orangefarbene Dunstschicht, die Titan verschleiert. So blieb die Oberfläche der im optischen Wellenlängenbereich arbeitenden Kamera der Sonde *Voyager 1* während ihres Vorbeiflugs 1980 verborgen. Im infraroten Teil des Spektrums ist Titans Atmosphäre durchsichtiger: Mit dem Weltraumteleskop *Hubble* und erdgebundenen Teleskopen haben die Forscher Oberflächenstrukturen entdeckt – darunter ein hell erscheinendes Gebiet von der Größe Australiens. Die Ursache für die beobachteten Helligkeitsunterschiede ist bislang ungeklärt.



Abstieg in eine fremde Welt: So sieht ein Künstler die Landung von *Huygens* auf dem Saturnmond Titan. Das Kamerasystem DISR (oben) soll die Szene von Bord aus fotografieren.

melskörper herrscht ein Oberflächendruck von eineinhalb (Erd-)Atmosphären, seine Hülle besteht hauptsächlich aus Stickstoff, enthält aber keinen Sauerstoff, sondern Methan und möglicherweise das Edelgas Argon. Die ultraviolette Sonneneinstrahlung spaltet die Stickstoff- und Methanmoleküle in Titans Stratosphäre und bildet damit komplexe organische Verbindungen.

Wenn auch die Oberflächentemperatur mit minus 180 Grad Celsius

Die europäische Sonde *Huygens* soll am 15. Januar 2005 auf Titan landen. Das Max-Planck-Institut für Aeronomie ist an einem der wissenschaftlichen Instrumente an Bord der Sonde beteiligt, dem „Descent Imager/Spectral Radiometer“. Das DISR besteht aus einer komplexen Kombination mehrerer Kameras und Spektrometer, die während des zweieinhalbstündigen Fallschirmabstiegs fotografieren und die Strahlung in verschiedenen Richtungen und Wellen-

längenbereichen messen sollen. Dabei wird das Licht von insgesamt 10 Aufnahmeoptiken durch Glasfaserkabel auf gemeinsam genutzte Sensoren geleitet – auf verschiedene Fotodioden für ultraviolettes und infrarotes Licht und auf eine elektronische Kamera (CCD) für den optischen Bereich. Die Daten werden während des Abstiegs zum *Cassini*-Mutter-schiff übertragen, dort gespeichert und schließlich zur Erde gesendet.

Die nach oben gerichteten Strahlungsmessungen des DISR dienen dem Studium der Atmosphäre. Die Form der Sonnenaureole und das Spektrum sowie die Polarisation der Strahlung geben Aufschluss über die genaue Zusammensetzung der Atmosphäre und die Natur der Aerosole in der Dunstschicht. Die nach unten gerichteten Spektrometer ermöglichen die Untersuchung des Materials auf der Oberfläche, die vermutlich zu einem großen Teil aus Wassereis besteht und die organischer Schlamm bedeckt, der „vom Himmel“ herabgerieselt ist. Die Kameras des DISR haben verschiedene Blickwinkel.

Der Schwerpunkt der *Huygens*-Mission liegt auf Messungen während des Abstiegs. Aber wenn die Sonde den vom Fallschirm gebremsten Aufschlag heil übersteht, soll sie auf der Oberfläche weiter Daten sammeln. Und falls die Sonde tatsächlich in einem Methansee landet, macht das nichts: Sie ist schwimmfähig...

Der Beitrag entstand in Zusammenarbeit mit Ralf Srama (Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg), Björn Grieger und Stefan Werner (Max-Planck-Institut für Aeronomie).



DR. NORBERT KRUPP (Jahrgang 1963) studierte Physik an der Universität Kaiserslautern und promovierte am Institut für Geophysik und Meteorologie der Technischen Universität Braunschweig in Zusammenarbeit mit dem Max-Planck-Institut für Aeronomie in Katlenburg-Lindau. Nach einem Postdoc-Aufenthalt am Applied Physics Laboratory/The Johns Hopkins University in Laurel, Maryland (USA), kam er als wissenschaftlicher Mitarbeiter zurück ans Lindauer Institut. Sein Schwerpunkt ist die Analyse wissenschaftlicher Daten von Raumsonden. Norbert Krupp ist „Principal Investigator“ des Teilcheninstruments EPAC auf der Raumsonde *Ulysses*, „Co-Investigator“ der Instrumente MIMI und UVIS auf *Cassini* sowie des Instruments ASPERA auf *Mars Express*.