

Schutzschilde im Sonnensystem

Schnee aus Eisen und metallischer Wasserstoff – beides kann Magnetfelder antreiben. Deren Vermessung eröffnet Einblicke in die Prozesse, die das Innenleben der Planeten verändern. Die Vielfalt dieser Magnetfelder untersucht **Ulrich Christensen**, Direktor am **Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung** in Göttingen.

TEXT **THORSTEN DAMBECK**

In den 1950er-Jahren steckte die Radioastronomie noch in den Kinderschuhen. Doch die Observatorien waren keineswegs klein, im Gegenteil: Auf riesigen Freiflächen lauschten die Astronomen nach himmlischen Radioquellen. Mit einer solchen Anlage bei Seneca im US-Bundesstaat Maryland, auf der mehr als acht Kilometer Antennendraht gespannt waren, gelang US-Forschern 1955 ein Zufallsfund: Bei der Beobachtung des 6300 Lichtjahre entfernten Krebsnebels spürte das Antennenungetüm einen sehr viel näheren Sender auf, der immer wieder mal mit Kurzwellen dazwischenfunkte: Jupiter.

Der Planet stand auf seinem Weg durch den Tierkreis für die Störaktion gerade an der passenden Stelle. Bald schon fingen die Astronomen weitere Radiostrahlung von ihm auf, diesmal bei höheren Frequenzen und zeitlich weitgehend konstant. Ein stimmiges Bild ergab sich: Um all das zu bewerkstelligen, musste Jupiter in ein Magnetfeld gehüllt sein – denn die hochfrequenten Wellen stammen von Elektronen, die magne-

tisch gefangen um den Riesenplaneten sausen. Das erste planetare Magnetfeld jenseits der Erde war gefunden.

Heute treiben Messungen vor Ort die Erforschung von Jupiters magnetischem Feld voran. Seit 1973 trugen acht Raumsonden dazu bei, weitere Missionen sind unterwegs oder in Planung. Bei anderen Planeten wurden die robotischen Entdecker ebenfalls fündig: Denn auch Saturn, Uranus und Neptun haben globale Magnetfelder; hinzu kommt der kleinste Planet, Merkur. Doch sind die Eigenschaften der Felder recht unterschiedlich.

EINE SCHNELLE ROTATION HILFT DEM DYNAMOEFFEKT

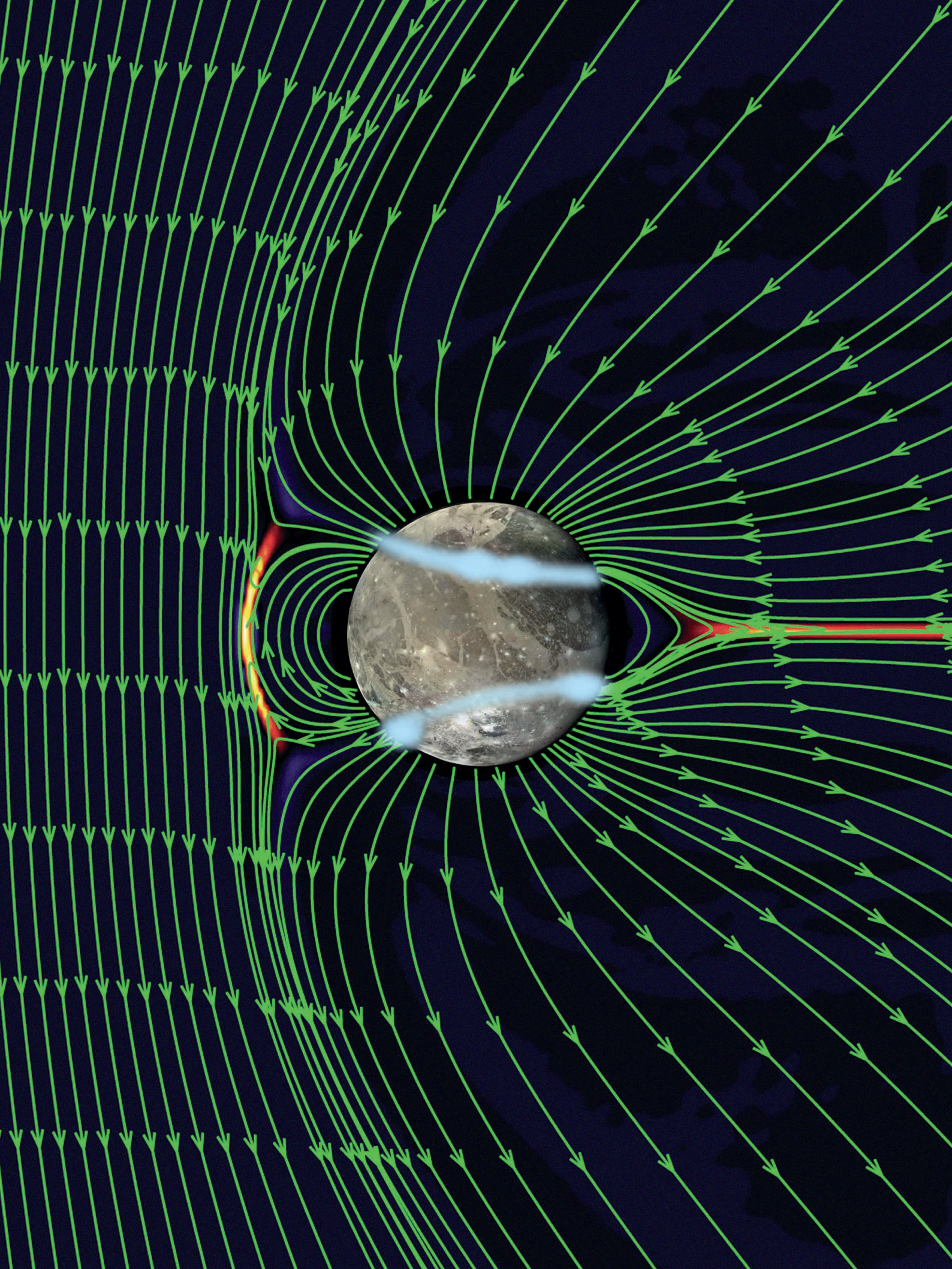
„Es gibt eine unübersichtliche Vielfalt“, sagt Ulrich Christensen. Am Fenster seines Büros im Göttinger Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung reihen sich die Globen von Himmelskörpern: Erdmond und Mars, beide sind den Raumsonden zufolge heute ohne globales Magnetfeld. Auch die Venus hat einen Fensterplatz. Lange wurde sie

„Schwester der Erde“ titulierte – doch anders als unsere Heimatwelt hat auch sie kein eigenes Magnetfeld.

Was macht den Unterschied zu den magnetischen Planeten aus? „Himmelskörpern ohne Magnetfeld fehlt ein aktiver planetarer Dynamo“, sagt Christensen, Experte für die numerische Simulation solcher Dynamos. Alle globalen Magnetfelder entstünden tief unter den Oberflächen der Planeten. „Dort müssen elektrisch leitende Flüssigkeiten durch Strömungen in Bewegung kommen. Sehr hilfreich für einen Dynamoprozess ist auch eine genügend schnelle Eigenrotation.“ Daran hapert es etwa bei der Venus, die nicht weniger als 243 Erdentage für eine Umdrehung um ihre eigene Achse benötigt.

Jupiter vollführt eine Rotation in weniger als zehn Stunden, sein Magnetfeld ähnelt in mancher Hinsicht dem der Erde. Zwar ist es mehr als zehnmal stärker. Doch ebenso wie bei uns messen die Forscher im Wesentlichen ein einfaches Dipolfeld, vergleichbar also einem gigantischen Stabmagneten. Auch ist das Feld rund zehn Grad gegen

Sonderstatus: Als einziger Trabant verfügt Ganymed über eine eigene kleine Magnetosphäre. Sie liegt inmitten der Feldlinien des Jupiters, die sich nahe dem Mond deformieren und teilweise mit jenen des Ganymed vermischen. Dort, wo sich die Feldlinien öffnen, dringen Teilchen aus Jupiters Magnetosphäre in die dünne Atmosphäre und erzeugen Polarlichter, auch Aurorae genannt.



die planetare Rotationsachse geneigt. Das bedeutet aber nicht, dass im Innern Jupiters dieselben Prozesse ablaufen wie im Erdinnern, denn als Gasriese ist er völlig anders aufgebaut.

Die Rolle des flüssigen Eisens, dessen Strömungen im Erdkern unser Magnetfeld bewirken, spielt im Jupiter der Wasserstoff – also die Substanz, aus welcher der Planet überwiegend besteht. Doch ist es ein anderer Wasserstoff als der, den wir kennen. Denn durch den hohen Druck, dem das Element im Innern des Planeten ausgesetzt ist, ändert es radikal seine Eigenschaften.

Nicht nur, dass die Atome so eng zusammengequetscht werden, dass sie eine Flüssigkeit bilden. Vor allem sind ihre Elektronen nicht mehr auf ihre vormaligen Heimatatome beschränkt,

sondern können nahezu frei umherwandern: Aus dem Isolator wird also ein Metall. Darauf deuten neben theoretischen Rechnungen auch Laborexperimente hin – etwa am Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz. Dort setzen die Forscher Wasserstoff mächtig unter Druck, bis auf Werte, wie sie ähnlich im Innern von Gasplaneten auftreten. Bei mehreren Millionen Bar registrierten sie dabei im Jahr 2011 eine Zunahme in der elektrischen Leitfähigkeit.

DER JUPITERMOND GANYMED IST GRÖßER ALS MERKUR

Dem größten Planeten widmet sich auch Johannes Wicht. Dabei ist der Mitarbeiter des Max-Planck-Instituts für Sonnensystemforschung auf eine

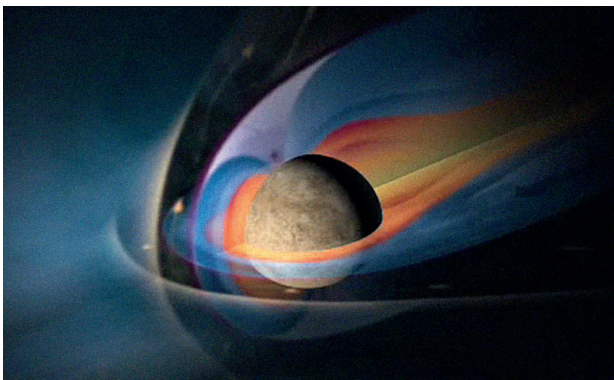
doppelte Struktur gestoßen, die er vor Kurzem mit seinem Kollegen Thomas Gastine in den *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS* geschildert hat: „Unsere Simulationen zeigen, dass die erdähnliche Komponente des Magnetfelds in den Tiefen der Atmosphäre erzeugt wird“, erläutert Wicht.

Hinzu kommt ein zweiter Dynamoprozess, der am Übergang zum metallischen Wasserstoff stattfindet. Das Magnetfeld des Gasriesen mag zwar erdähnlich erscheinen, sein Ursprung geht jedoch auf exotische Prozesse zurück.

67 bekannte Satelliten umkreisen Jupiter – eine Art Sonnensystem en miniature. Mit Ganymed beherbergt es den größten aller Monde; sein Durchmesser beträgt 5268 Kilometer, damit übertrifft er den des Planeten Merkur. Zwischen

DER MAGNETISCHE SONNENNACHBAR

Äußerlich ähnelt er dem Mond, doch unter seiner Oberfläche unterscheidet sich der sonnennächste Planet Merkur von allen anderen Körpern im inneren Sonnensystem. Eigentümlich ist vor allem sein riesiger Metallkern, der 83 Prozent des Planetenradius einnimmt (Vergleichswert Erde: 54 Prozent). Auch sein Magnetfeld ist sonderbar. Schon länger war bekannt, dass es nur ein Prozent der Stärke des Erdfelds besitzt.

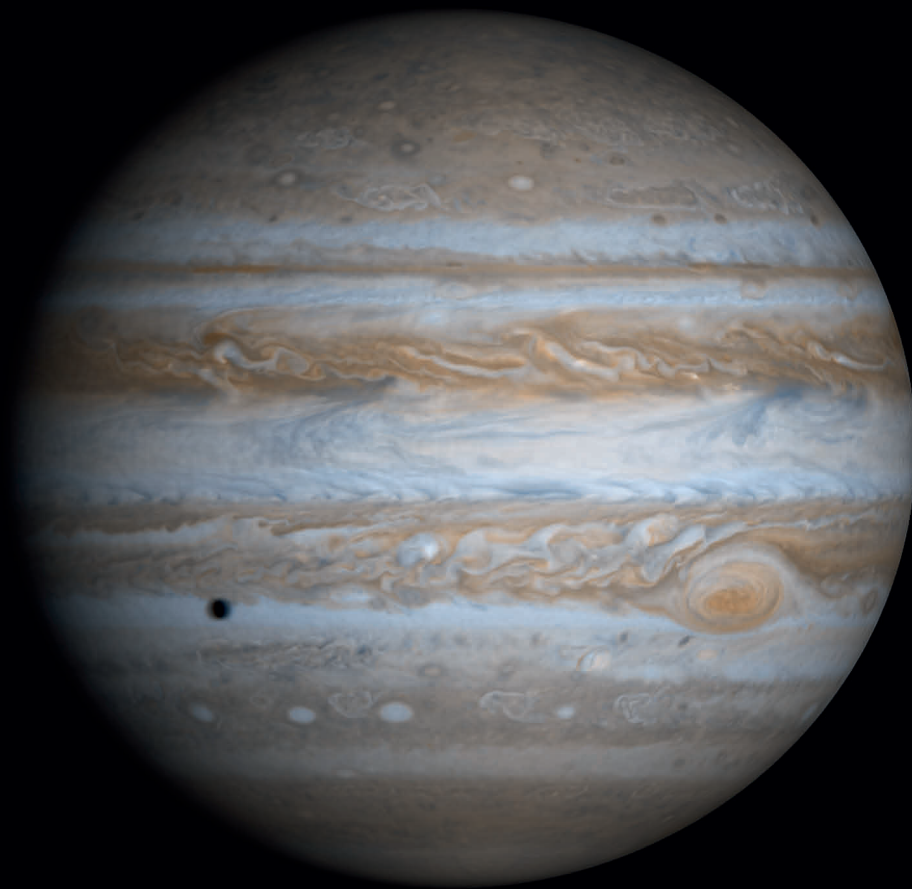


Merkurs Magnetfeld im Modell: Die Darstellung beruht auf Daten des ersten Vorbeiflugs der Raumsonde *Messenger*. Registriert und abgebildet ist der Bereich geladener Teilchen, der durch Wechselwirkungen mit dem Sonnenwind entsteht.

„Kürzlich hat die NASA-Sonde *Messenger* eine signifikante Nordverschiebung des magnetischen Äquators im Vergleich zum geografischen Äquator gemessen – es geht dabei um immerhin 20 Prozent des Planetenradius“, erläutert Johannes Wicht aus der Abteilung für Planeten und Kometen am Göttinger Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung. „Diese Nord-Süd-Asymmetrie ist ebenso erstaunlich wie einzigartig, denn das Magnetfeld des Merkurs ist ansonsten sehr einfach strukturiert und beinahe rotationssymmetrisch.“ Es wirke, als hätte man einen Stabmagneten einfach in Richtung Norden verschoben.

In einer aktuellen Studie haben Wicht und sein Team mehrere Dynamomodelle analysiert, um den magnetischen Besonderheiten des Merkurs auf die Schliche zu kommen. „Ganz ähnlich wie im Ganymed könnte auch im Merkur Eisenschnee eine wichtige Rolle für den Dynamo spielen“, erklärt der Wissenschaftler.

Der Schnee treibt den Dynamo so stark an, dass das erzeugte Magnetfeld kleinskalig ist und die Nord-Süd-Symmetrie hinreichend gebrochen wird. Gleichzeitig hinterlässt der Eisenschnee unter dem Gesteinsmantel eine dicke Schicht aus schwefelreichem Material, die nicht am Dynamoprozess teilnimmt. Sie wirkt wie ein Filter, der ausschließlich die einfacheren Bestandteile des Magnetfelds bis an die Oberfläche durchdringen lässt.

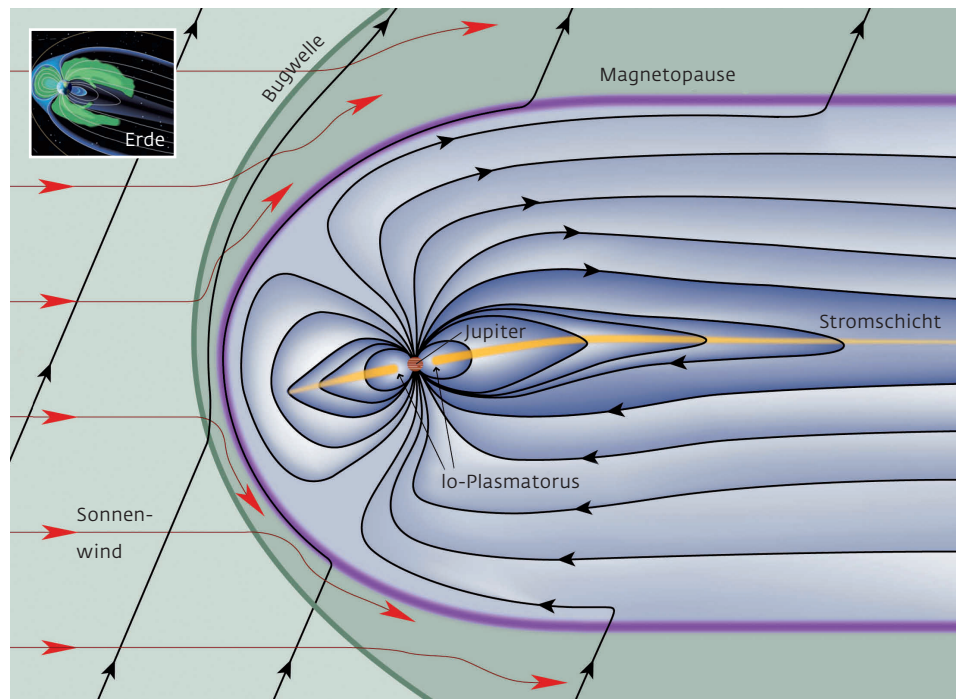


1995 und 2003 erforschte die amerikanische Raumsonde *Galileo* das Jupitersystem, mehrmals stand auch der Riesenmond auf dem Besuchsprogramm.

Dabei entdeckte *Galileos* Magnetometer ein Unikum, das den Mond bis heute auszeichnet: Ganymed ist der einzige Trabant, der ein globales Magnetfeld besitzt, es ist immerhin dreimal stärker als das des Merkurs („Der magnetische Sonnennachbar“, linke Seite). Eine jüngst von Ulrich Christensen im Fachjournal *ICARUS* publizierte Studie gewährt Einblicke in Ganymeds Innenleben. „Wie auf der Erde ist ein flüssiger Eisenkern die Quelle des Magnetfelds“, sagt der Max-Planck-Direktor. Gleichzeitig weist er ältere Ideen zurück, das salzige Tiefenmeer, das Ganymed wahrscheinlich ebenso wie sein Nachbarmond Europa besitzt, könnte der Ort des Dynamogeschehens sein.

„Wahrscheinlich ist in Ganymeds Kern auch einiges an Schwefel vorhanden“, sagt Christensen. Dies ist nicht ungewöhnlich, auch im Erdkern werden zusätzlich zur metallischen Komponente bis zu zehn Prozent leichtere Substanzen angenommen, vermutlich ein Gemisch aus Schwefel, Sauerstoff und Silicium. Gleichwohl muten die

Gestreifter Gasriese: Mit einem Äquatordurchmesser von 142984 Kilometern ist Jupiter der größte Planet im Sonnensystem. Das Bild oben zeigt ihn in natürlichen Farben mit dem Schatten seines Mondes Europa (links). Die Abbildung unten verdeutlicht Formen und Größen der Magnetfelder von Erde (links oben) und Jupiter. Die Gestalt des irdischen Magnetfelds wird im Wesentlichen bestimmt durch den Sonnenwind, jene des Jupiters durch die vulkanische Aktivität des Mondes Io. Dessen Teilchen speisen stetig die Magnetosphäre und formen die Magnetfeldlinien zu einer sogenannten Stromschicht.





Befasst sich mit Magnetfeldern im Planetensystem: Ulrich Christensen, Direktor am Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung in Göttingen.

Prozesse im Ganymedkern, die Christensen simuliert hat, bizarr an: Es geht um eine Art Schnee, dessen „Flocken“ allerdings nicht aus Eis, sondern aus Eisen bestehen.

Vor dem gedanklichen Ausflug in diese exotische Welt ruft der Forscher das Zentrum unseres Planeten in Erinnerung: Dort existiert bekanntlich ein fester Eisen-Nickel-Kern. Dieser wuchs im Laufe der Erdgeschichte durch langsames Abkühlen heran – und zwar wegen des hohen Drucks zuerst im Zentrum; im Jargon spricht man von „Ausfrieren“. Darüber befindet sich eine geschmolzene Zone, die den festen Innenkern komplett umhüllt. Das ist das flüssige Stockwerk des irdischen Metallkerns, der Ort der Konvektionsströmungen.

„Konvektionsströmungen können nicht nur durch Temperaturdifferenzen in Gang kommen, sondern auch durch unterschiedliche chemische Konzentrationen“, sagt Ulrich Christensen. Bei Ganymed gehe es zwar auch um das Ausfrieren des Eisens, doch den Simulationsrechnungen zufolge ist sein Eisenkern anders aufgebaut: „Der Druck dort ist viel kleiner als im Erdkern. Es ist deshalb wahrscheinlich, dass der Kern dieses Mondes zuerst außen gefriert und die dichteren Eisenflocken wie Schnee

abwärtsrieseln, nämlich in Richtung Zentrum. Dort steigen die Temperaturen jedoch an, und der Eisenschnee schmilzt wieder.“

MODELLRECHNUNGEN KOMMEN DER REALITÄT RECHT NAHE

In der metallischen Legierung findet also ein abwärtsgerichteter Nettotransport von Eisen statt. Im Gegenzug bildet sich oben eine stabile flüssige Schicht, die weniger Eisen, dafür aber mehr Schwefel enthält. Als Konsequenz dieser Konzentrationsunterschiede springt die Konvektionsströmung an, die wiederum den Ganymeddynamo antreibt. Diese chemische Konvektion ist laut Christensen in kleineren planetaren Körpern wichtiger als die thermische Konvektion. „Im Ganymedkern dürfte sie zumindest dominieren, womöglich ist sie sogar die einzige Form.“

Die Modellrechnungen des Forschers reproduzieren das von *Galileo* gemessene globale Magnetfeld recht gut – insbesondere den nur kleinen Beitrag, den höhere Feldanteile zum Gesamtfeld leisten. Allerdings konnte die Sonde während ihrer kurzen Vorbeiflüge lediglich wenige Messungen beisteuern, räumt Christensen ein, der

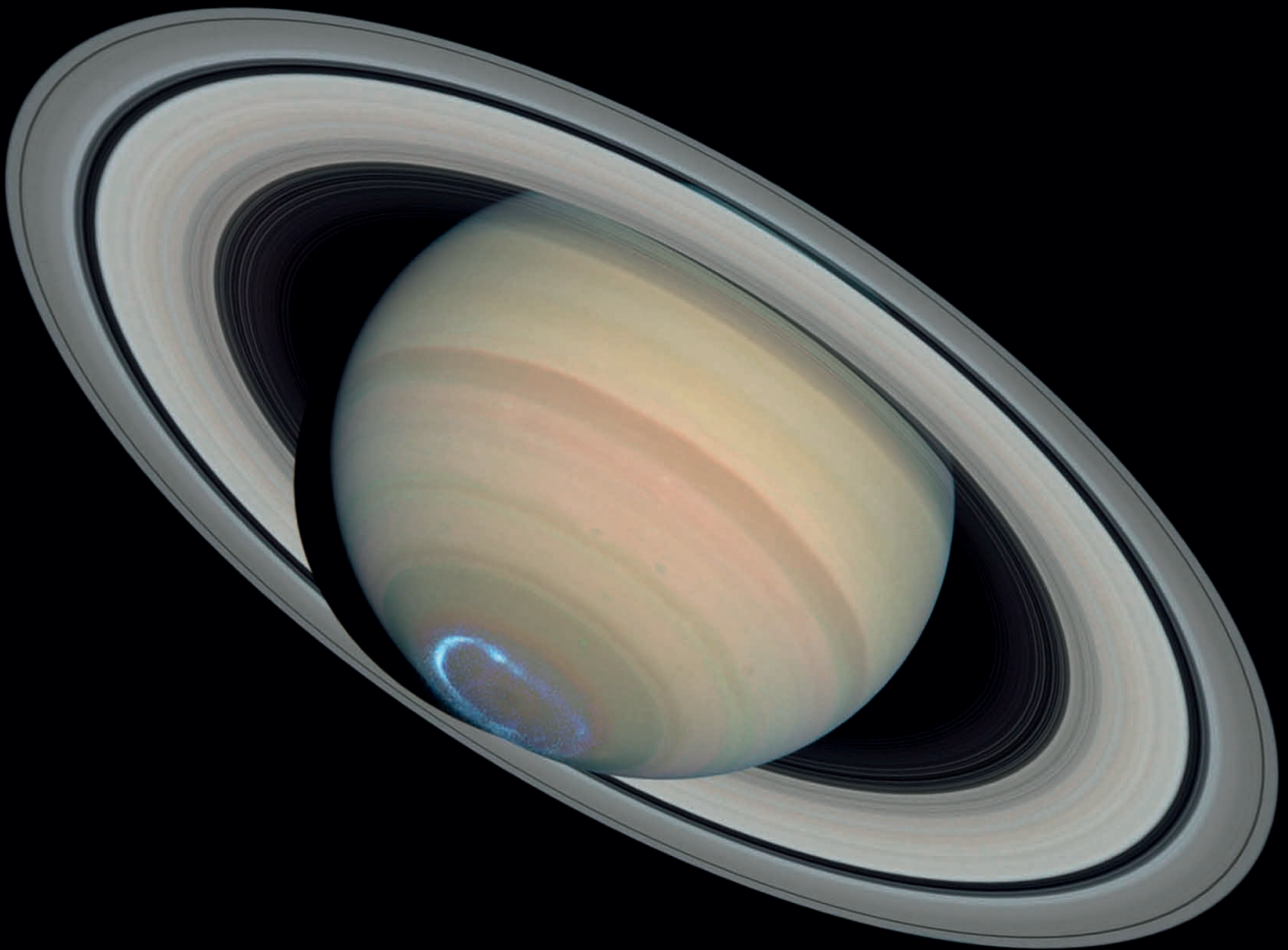
sich auf neue Daten freut, wie sie der *Jupiter Icy Moon Explorer (Juice)* liefern soll. Diese schwergewichtige Mission will die Europäische Weltraumagentur 2022 auf die Reise schicken, die Ankunft ist für 2030 geplant.

Die ESA-Sonde soll schließlich in eine Umlaufbahn um Ganymed einschwenken und unter anderem dessen Magnetfeld gründlich vermessen. Ein weiteres Novum: Die Planetenforscher werden die Wechselwirkung der ungleichen magnetischen Dynamos von Ganymed und Jupiter in den Fokus nehmen.

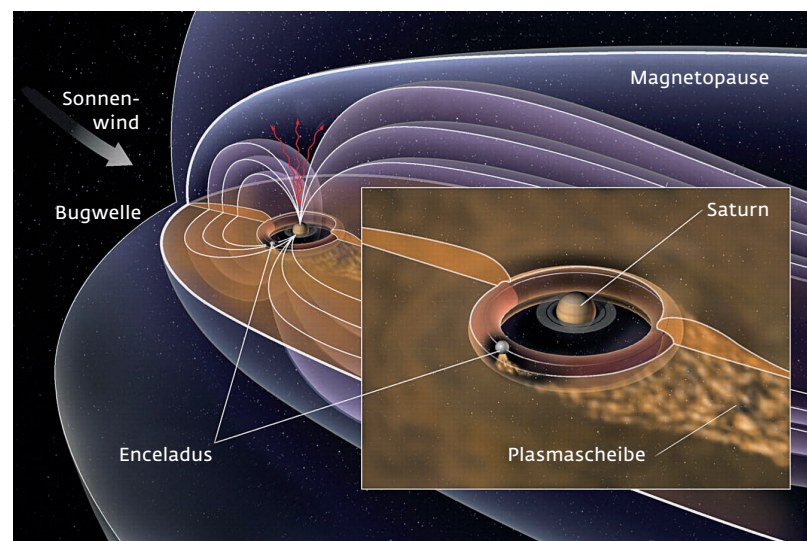
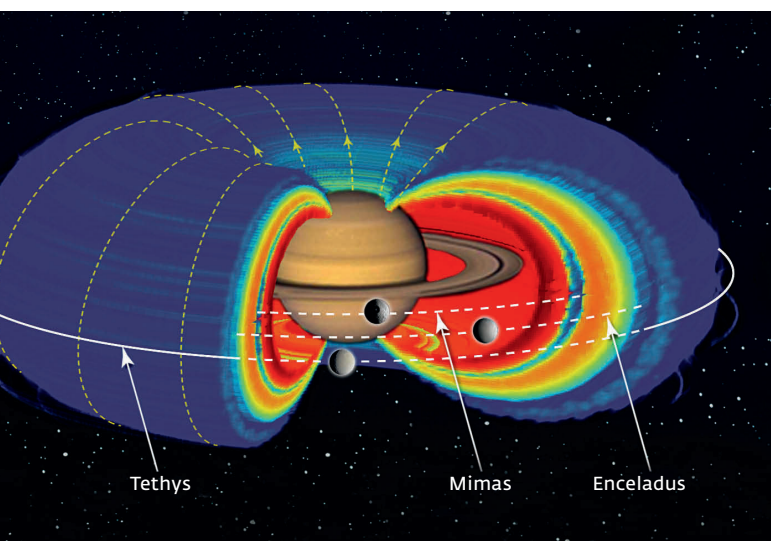
Jupiters Magnetfeld dominiert eine enorme Region rings um den Gasriesen: seine Magnetosphäre. Neben jener der Sonne ist sie die größte Struktur im Planetensystem. „Sogar am Saturn ist sie noch spürbar“, sagt Norbert Krupp, der die magnetosphärischen Prozesse beider Gasplaneten studiert hat. Als Teammitglied der *Cassini*-Mission spielt der Göttinger Max-Planck-Wissenschaftler seit einem Jahrzehnt bei der Erforschung des Saturnsystems in der ersten Reihe mit.

„Saturns Magnetosphäre ähnelt einem riesigen Stromlinienkörper, in dessen Kopf der Ringplanet sitzt“, sagt Krupp. An der Stirnseite treffen die geladenen Teilchen des Sonnenwindes auf diesen magnetischen Schutzschild. Abrupt werden sie dort abgebremst und in einem weiten Bogen um den Planeten gelenkt. Je nach Stärke der Sonnenaktivität passiert dies 20 bis 35 Saturnradien vom Planeten entfernt.

Auf der entgegengesetzten Seite formt die Magnetosphäre einen langen „Schweif“ aus, den „Magnetotail“. Vermutlich reicht er Hunderte Saturnradien ins Weltall. Die Gestalt von Saturns Magnetfeld ähnelt somit jener der Magnetfelder von Erde und Jupiter, ihre Größe rangiert dazwischen. >



Beringte Kugel: Schon im kleinen Teleskop besticht der Planet Saturn durch sein ausgedehntes Ringsystem. Das Weltraumteleskop *Hubble* enthüllt feine Details, etwa eine hellblaue Struktur um einen der Pole (Bild oben). Dabei handelt es sich um eine Aurora, die im UV-Licht leuchtet und mit dem Magnetfeld des Planeten in Verbindung steht. Dieses Magnetfeld (Grafik unten rechts) ähnelt – wie das von Erde und Jupiter – einem riesigen Stromlinienkörper, in dessen Kopf der Ringplanet sitzt. Der Raumbereich des Felds wird mit Partikeln geimpft, die der Mond Enceladus ständig freisetzt. Der Trabant kreist zusammen mit anderen wie Tethys und Mimas in einem Plasmatorus aus positiv geladenen Partikeln um Saturn (Grafik unten links).





Besprechung in kleiner Runde: Thomas Gastine, Johannes Wicht und Markus Fränz (von links).

Der offenkundigste Beleg für das magnetische Geschehen auf dem Ringplaneten sind Leuchterscheinungen in dessen Nord- und Südpolgebieten: die Aurorae. Wie auf der Erde entstehen sie, wenn Partikel des Sonnenwinds, die im Saturnmagnetfeld eingefangen wurden, entlang der magnetischen Feldlinien hinab zu den Magnetpolen spiralisieren und dabei gegen die Moleküle der Atmosphäre stoßen. Anders als unsere Polarlichter erstrahlt die Saturnaurora allerdings nicht im sichtbaren Licht, sondern bei ultravioletten Wellenlängen. Und während auf der Erde starke Polarlichtaktivitäten typischerweise nach einigen Stunden vorbei sind, lassen sie sich auf dem Saturn mitunter tagelang beobachten.

MEHRERE RUNDEN IM MAGNETFELD BRINGEN ENERGIE

Die Magnetosphäre Saturns ist Schauplatz energiereicher Prozesse, denn sie ist angefüllt mit rasanten Partikeln. Diese stammen hauptsächlich von Enceladus: Pro Sekunde stößt der geologisch aktive Minimonid 100 bis 300 Kilogramm Wasserdampf und Eispartikel aus, ein Teil davon kann sein schwaches Schwerfeld verlassen. „Die H_2O -Moleküle werden

durch die solare UV-Strahlung ionisiert und im Magnetfeld beschleunigt, man kann ihnen außerhalb der Enceladusbahn in der gesamten Magnetosphäre begegnen“, sagt Norbert Krupp.

In mehreren Strahlungsgürteln konzentrieren sich hauptsächlich Protonen und Elektronen, die Energien bis zu 100 Megaelektronenvolt (MeV) erreichen können. „Wie sie das genau schaffen, das ist noch Gegenstand intensiver Forschung. Womöglich haben sie bereits mehrere Runden im Magnetfeld hinter sich, wenn sie derart energiegeladen auf die Detektoren treffen“, erklärt Krupp. Durch die absorbierende Wirkung der Ringe und der inneren Monde sind diese Gürtel jedoch weniger intensiv ausgeprägt als ihr irdisches Pendant, der Van-Allen-Gürtel.

Die Saturnmonde sind den prasselnden Partikeln ausgesetzt. Zusammen mit seinem Kollegen Elias Roussos erforscht Norbert Krupp deshalb auch den Einfluss, den der Dauerbeschuss energiereicher Teilchen – insbesondere Elektronen – auf die Oberflächen der Monde ausübt. Experten sprechen von „Space Weathering“, wenn sie die chemische Verwitterung der Oberfläche eines Himmelskörpers durch die Einflüsse des freien Weltalls beschreiben.

Aktuelle Analysen, die jüngst in der Zeitschrift *ICARUS* erschienen, deuten darauf hin, dass die dem Saturn zugewandten Seiten der Eismonde Mimas, Tethys und Dione durch Beschuss mit Elektronen chemisch verändert werden. Diese sind so energiereich (einige MeV), dass sie senkrecht zum Magnetfeld, aber in entgegengesetzter Richtung zur Bahnbewegung der Monde driften. Gleichzeitig laufen sie zwischen Nord- und Südpol entlang des Magnetfelds hin und her. Mit diesem Bewegungsmuster können Experten die Auftreffzonen auf dem jeweiligen Mond berechnen. Es zeigte sich, dass einige der von *Cassinis* Bordkameras beobachteten Oberflächenmerkmale in den Äquatorregionen zum berechneten Verteilungsmuster der Partikel passen.

Zurück ins innere Sonnensystem: Was mit einem terrestrischen Planeten passiert, wenn sein magnetischer Schutzschild erlischt, lässt sich am Roten Planeten studieren. Denn einst dürfte auch der Mars einen aktiven Dynamo gehabt haben: Ein Flickenteppich von magnetisiertem Gestein auf seiner Oberfläche verweist noch heute auf diese magnetische Ära. Markus Fränz, ebenfalls vom Göttinger Max-Planck-Institut, hat die Plasmamessungen der Son-

Gezeichnet vom Weltraumwetter:
Die Oberfläche des Saturnmondes Tethys trägt deutliche Spuren chemischer Verwitterung. So etwa rührt der bläuliche Streifen in der rechten Bildhälfte von energiereichen Elektronen her, die unter dem Einfluss des planetaren Magnetfelds den Boden bombardieren.

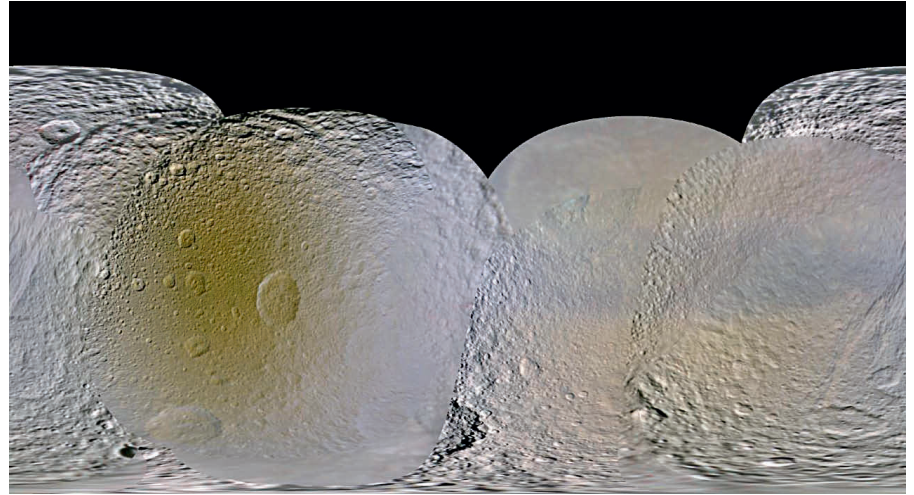
de *Mars Express* ausgewertet, die seit 2003 im Marsorbit kreist.

Kann man heute noch messen, wie das Wasser des ungeschützten Planeten der solaren UV-Strahlung und dem Sonnenwind zum Opfer fällt? „Wir messen sozusagen die Spaltprodukte des H_2O -Moleküls, nämlich die Sauerstoffionen. Neuerdings beziehen wir auch die Messungen des Radarinstruments in unsere Analysen ein“, sagt Fränz. Damit bekommen die Forscher ein vollständigeres Bild, denn sie sehen auch das energieärmere, kalte Plasma, das dem eigentlichen Plasmainstrument verborgen bleibt.

Mit dem so erhobenen Ionenabfluss kann man die anfängliche Wassermenge zurückrechnen, und es ergibt sich eine dramatische Austrocknung: Die Wassermenge eines globalen Marsozeans mit mehreren Hundert Metern Mächtigkeit ist demnach im Laufe der Jahrmilliarden ins All entwichen. „Der tatsächliche Wert dürfte sogar höher liegen, da die Sonne in ihrer Jugend wahrscheinlich erheblich aktivere Phasen als heute durchmachte und die Wasservorräte damals besonders drastisch dezimierte“, vermutet Markus Fränz.

Was vor sechs Jahrzehnten mit den Radiowellen des Jupiters begann, hat mittlerweile viele Erkenntnisse über die Planeten gebracht. Und ein weiteres Rendezvous mit dem Gasriesen ist schon fest eingeplant: An Bord der oben erwähnten *Juice*-Sonde wird auch ein Magnetometer (JMag) ins Jupitersystem reisen, auf dessen Daten sich besonders Christensen, Krupp und Roussos freuen.

Auch ein Teilcheninstrument namens *Particle Environment Package (PEP)* wird mit an Bord sein, wichtige Beiträ-



ge dazu werden aus Deutschland kommen. Fränz und seine Kollegen wollen damit die dünnen Gashüllen der Jupitermonde sowie die Neutralteilchen

und Ionen vermessen, die sich in den dortigen Magnetfeldern tummeln. Markus Fränz ist sicher: „Die Entdeckungen gehen weiter.“

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Obwohl Magnetfelder im Kosmos weit verbreitet sind, besitzen nicht alle Planeten unseres Sonnensystems eines. Bei Venus und Mars fehlen sie.
- Auch wenn sie in großer Vielfalt auftreten und sehr unterschiedlich strukturiert sind: Alle globalen Magnetfelder entstehen tief unter den Oberflächen der Planeten und bedürfen eines aktiven Dynamos.
- Der Jupitermond Ganymed gilt als der einzige Trabant, der ein globales Magnetfeld besitzt; es ist dreimal stärker als jenes des Planeten Merkur.
- Besonders ausgedehnt sind die Magnetfelder der Gasplaneten Jupiter und Saturn. Jupiters Magnetosphäre ist neben jener der Sonne die größte Struktur im Planetensystem.

GLOSSAR

Aurora: Dieses auch Polarlicht genannte Phänomen ist eine Leuchterscheinung in den Polbereichen eines Planeten. Ursache sind Teilchen des Sonnenwinds – vor allem Elektronen und Protonen –, die auf schwere Ionen in den oberen Schichten einer Gasatmosphäre treffen und dort letztlich Fluoreszenz hervorrufen.

Space Weathering: Fachbegriff für die chemische Verwitterung der Oberfläche eines atmosphärenlosen Himmelskörpers. Ursachen für eine solche Erosion sind Einflüsse aus dem freien Weltall wie der Einschlag von Mikrometeoriten, kosmische Strahlung oder solare UV-Strahlen.

Van-Allen-Gürtel: Ein nach dem US-amerikanischen Astrophysiker James Van Allen (1914 bis 2006) benannter Ring (Torus) aus energiereichen, geladenen Teilchen, die durch das Magnetfeld der Erde eingefangen werden. Der Gürtel besteht im Wesentlichen aus zwei Strahlungszonen. Auch andere Planeten besitzen ähnliche Strukturen.