

Staub im Weltall

Neueste Daten fördern ein radikales Umdenken

Staubringe sind trotz ihrer Kurzlebigkeit heute ein allgemeines Phänomen im Weltraum. Wir sehen sie – in einem „alten“ Weltraum – um ganze Galaxien, um (Proto-) Sterne, um (vorwiegend) Gasplaneten – und neuerdings um Asteroiden und Zwergplaneten. Verlustprozesse von Stäuben durch „Herabspiralen“ von Staubkörnern auf Mutterkörper sind naheliegend, während die Frage nach einer effektiven Staubzufuhr offen ist oder zumindest sehr kontrovers diskutiert wird – trotz weitgehend verbesserter Datenlage. Schwerpunkte neuer Erkenntnisse sind überraschende Daten zum Saturn-Staubring durch die *Cassini-Huygens*-Mission und die Entdeckung eines ersten Ringsystems um den Zwergplaneten Haumea.

Norbert Pailer

Oben Thors Helm. Es handelt sich um einen Wolf-Rayet-Ringnebel. Wolf-Rayet-Sterne sind sehr heiße, massereiche und leuchtkräftige Sterne, die zum Ende ihres Lebens große Mengen ihrer Gas- und Staubhüllen durch gewaltige Sternwinde wegblasen und damit die interstellare Materie anreichern. Gleichzeitig ionisiert ihre Strahlung das weggeblasene Gas und lässt es leuchten. Meist ist es Wasserstoff und Sauerstoff, der dann so schöne Gebilde schafft wie den filigranen blauen Bogen im Bild. Der Urheber dieses Spektakels ist der helle, etwas pink wirkende Stern in der Bildmitte (Viererkette). (Martin Rusterholz in CXIELO, CC BY-SA 3.0)

Hinführung

Das Thema „Staub“ klingt zunächst ziemlich profan, erinnert es doch an lästige Hausarbeit. Wir treffen Staub – zum Ärger von Hausfrauen und -männern – regelmäßig auf unseren Regalen an. Aber auch dort ist er nicht nur irdischen Ursprungs, denn je nach Schätzung treffen 100 bis 10 000 Tonnen Staubmaterie in Form von typischerweise mikrometergroßen Teilchen pro Tag in Form von Mikrometeoriten unseren Planeten (vgl. HANSLMEIER 2002, 171 ff.). Falls die Partikel groß genug sind, machen sie sich als Sternschnuppen bemerkbar. Deren Reste sinken langsam Richtung Erde (und Regale). Ähnlich wie auf unseren Regalen verdeckt er auch im Weltraum einiges, was die Astronomen brennend interessiert.

Staub ist nämlich elementar wichtig, z.B. für die effektive Abführung von Energie bei der Sternentstehung, während er in Ringen um Planeten zu seiner schönsten Form aufläuft. Die „Langspiellplatte“ des Planeten Saturn (Abb. 5) mag hier das bekannteste Beispiel sein.

Gäbe es eine Hitliste für astronomische Objekte, dann dürfte der Staub im Weltall darauf nicht fehlen.

Zudem war der Staub im Weltall schon lange als Träger organischer Moleküle im Verdacht (Panspermie-Hypothese) – so wurde beispielsweise im Jahr 2002 die Aminosäure Glycin in interstellaren Wolken entdeckt (KUAN et al. 2003).

Staub wird neuerdings auch als Wasserträger verdächtigt (BRADLEY et al. 2014).

Nun wurde Saturn mit seinem komplexen Ringsystem von der Raumsonde *Cassini-Huygens* rund 12 Jahre lang untersucht, um das Geheimnis seiner Ringe zu lüften. Zurück blieben viele Rätsel und gewagte Hypothesen. Nachfolgend werden die verschiedenen Staubphänomene mit ihren Implikationen für den aktuellen Stand unseres Wissens diskutiert mit den beiden Schwerpunkten Saturn-Staubring und dem ersten entdeckten Staubring um den Zwergplaneten Haumea.

Staubzonen und -ringe im interstellaren Raum

Markantes Staubband einer Galaxie

Ein relativ bekanntes Beispiel für ein Staubband um eine Galaxie ist die Sombrero-Galaxie; sie wird in Abb. 1 von ihrer Kante gezeigt.

Physikalischer Kontext. Das sehr dunkle und stark ausgeprägte Staubband, das die Galaxie umgibt, verleiht ihr das typische Aussehen, das an einen mexikanischen Sombrero erinnert. Es handelt sich um eine Spiralgalaxie im Sternbild Jungfrau.

Auffällig sind die ungewöhnlich große, ausgedehnte Wölbung des „Sombreros“ aus Sternen sowie die dunklen, markanten Staubbahnen in der Ebene der Scheibe. Solche Staubwolken bestehen hauptsächlich aus den Elementen, die in Sternen durch Kernfusion erzeugt werden und die im Weltraum nicht gasförmig auftreten wie Wasserstoff und Helium, also Silizium, Sauerstoff und Kohlenstoff bzw. Verbindungen davon. Nach herrschender Vorstellung entstehen die Staubwolken, wenn Sterne große Teile ihrer prozessierten Materie abblasen oder in Supernovae explodieren. Das diffuse Leuchten in der ausgedehnten Zentralwölbung stammt von Milliarden alter Sterne. Die spektakulären Staubringe enthalten viele jüngere, hellere Sterne und weisen komplexe Details auf, die nur teilweise verstanden sind.

Aktuelle Fragestellungen. 1. Bisherige Modelle weisen auf eine Diskrepanz in der Gesamtenergiebilanz hin: Der Staub gibt im Infraroten mehr Energie in Form von Wärmestrahlung ab, als er von den Sternen seiner Umgebung erhält. Als mögliche Erklärung dafür wird angegeben, dass eine vom Staub verdeckte, diesen aber aufheizende Gruppe von jungen Sternen die fehlende Energie liefert (DE LOOZE et al. 2012).

2. Interstellares Gas und die Bestandteile des Staubes sind der Stoff, aus dem sich Sterne bilden, weshalb es nicht verwundert, gerade im spekta-



Abb. 1 Die rund 30 Millionen Lichtjahre entfernte Sombrero-Galaxie NGC 4594 mit ihrem ausgeprägten Staubband. (Bild: gemeinfrei)

kulären Staubring junge Sterne zu finden. Staub dient der effektiven Ableitung von Energie, was den Bildungsprozess eines Sterns entscheidend stützt. Da aber das sogenannte Urknallereignis nur leichte Elemente bis hin zu Spuren von Lithium erzeugt haben soll, stellt sich die Frage nach dem Energieabtransport erster Sternengenerationen. Zusätzlich ist molekularer Wasserstoff für die Bildung von Sternen unverzichtbar, dessen Entstehungsort die Oberfläche wiederum von Staubeilchen ist.

Es gibt zwar heute in diesem sehr aktiven Forschungsgebiet Modelle, die die Bildung großer Sterne mit 100 bis 1000 Sonnenmassen nahelegen, für kleinere und damit langlebige

Kompakt

Untersuchungen von interplanetarem und interstellarem Staub ist ein relativ junges Forschungsgebiet. Das Thermalverhalten, die Chemie und das allgegenwärtige Auftreten von Staub im Kosmos bringen dieses Phänomen auf die Hitliste moderner Forschung. Beispiele aktueller Fragestellungen sind:

- Thermalverhalten: Wärmeabfuhr bei Sternentstehung geschieht effektiv über Staub; erste Sternengenerationen mussten in einem Urknallszenario jedoch auf ihn verzichten.
- Chemie: Insbesondere bei Staubeilchen, freigesetzt von Kometen, wurden organische Moleküle nachgewiesen, was die Panspermie-Hypothese beflügelte. Sie behauptet, dass der Erde erste Lebenskeime von außen zugetragen wurden (ohne zu beantworten, wie sie dort als (zuverlässige) Lebensspender entstanden sein sollen).
- Allgegenwärtiges Auftreten: Je genauer hingeschaut werden konnte, desto häufiger wurden Staubbereitungen oder Staubbereitungen um verschiedenste Objekte entdeckt, wohl wissend, dass sie grundsätzlich Kurzzeitphänomene sind. Ihr vermehrtes Auftreten überrascht.

Weshalb hat der Stern Fomalhaut noch einen Staubring bestehend aus wenige Mikrometer großen Staubeilchen, die doch schon lange aufgrund des Strahlungsdrucks weggeblasen sein müssten? Nun wird die Mikrostruktur der Teilchen für deren besonderes Verhalten verantwortlich gemacht.

Rätselhaft ist die außergewöhnlich große Helligkeit des um Fomalhaut umlaufenden Exoplaneten Dagon, was hypothetisch mit einem gewaltigen Ringsystem um denselben zusammengebracht wird.

Dagon selbst wirft durch seine außergewöhnliche Bahn Fragen auf: Ist sie das Ergebnis eines Zusammenstoßes mit einem weiteren Exoplaneten?

Da ferne Staubbereitungen für in-situ-Messungen nicht erreichbar sind, hat man große Hoffnungen auf Beobachtungen des Saturnsystems gesetzt. Immerhin untersuchte die *Cassini-Huygens*-Mission dieses Objekt zusammen mit seinen Ringen zwölf Jahre lang. Trotz aller Erfolge dieser phantastisch zu nennenden Planetenmission ließ sie manche Fragen offen und es tauchten neue Fragen auf. Z. B. war Saturn – für uns – schon immer der Ringplanet. Neue Messungen widersprechen dem. Danach gab es vor einigen Hundert Millionen Jahren für ihn keinen Ring.

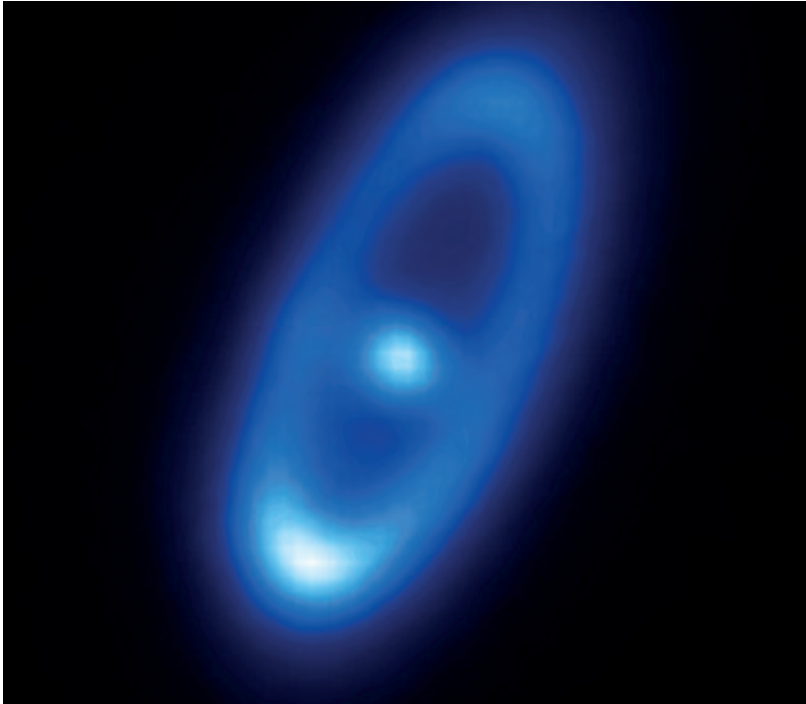


Abb. 2 Der Stern Fomalhaut ist 25 Lichtjahre von unserer Sonne entfernt und wird von einem 40 Milliarden Kilometer Durchmesser großen Staubring umgeben, an dessen innerem Rand im Jahr 2008 der Exoplanet Dagon entdeckt wurde. Das Bild wurde vom Weltraumteleskop *Herschel* aufgenommen. (Bild: ESA)

Sterne, die heute die überwiegende Mehrheit bilden, ist die Anwesenheit von Staub jedoch unabdingbar.

Staubringe um Sterne

Im Allgemeinen werden Staubringe um Sterne als „Rest“ aus Gas und Staub aus dem Sternbildungsprozess verstanden. Typischerweise entstehen nach allgemeinem Verständnis aus einem solchen „Steinbruch“ Planeten: In unserem Sonnensystem sehen wir folgerichtig kleine silikatische Körper nahe der Sonne (innere Planeten), gefolgt von den Gasgiganten der äußeren Planeten, an die sich die Eiskörper im Kuipergürtel und der postulierten Oort'schen Wolke anschließen.

Als Beispiel sei der Stern Fomalhaut genannt. Er ist 25 Lichtjahre von uns entfernt und beherbergt einen bemerkenswerten Staubring (Abb. 2).



Abb. 3 „Planet in der Mache“: In der Lücke der protoplanetaren Scheibe des Sterns PDS 70 ist erstmals ein Exoplanet im Prozess seines Entstehens zu beobachten; jedenfalls legen dies die Beobachtungen nahe. (ESO)

Physikalischer Kontext. Die Rede ist von einem relativ nahen Stern, dessen Masse etwa doppelt so groß ist wie die unserer Sonne. Er ist in der großen Entfernung von 133 astronomischen Einheiten, also mehr als viermal so weit, wie Neptun von der Sonne entfernt ist, von einem Staubring umgeben, der am ehesten mit dem Kuipergürtel unseres eigenen Sonnensystems vergleichbar ist.

Der scharfe Rand an der Innenseite des Staubrings legte die Vermutung nahe, dass sich dort ein größeres Objekt befinden müsse, das den Ring gravitativ beeinflusst (KALAS et al. 2005). Ein weiterer Hinweis darauf ergab die Beobachtung, dass sich der Staubring nicht exakt kreisförmig um Fomalhaut anordnet, sondern leicht elliptisch ist. Aufnahmen des Weltraumteleskops *Hubble* in den Jahren 2004 und 2006 ergaben einen Lichtpunkt, der sich offenbar auf einer Kepler'schen Bahn um Fomalhaut bewegte. Im November 2008 wurde dann mit Dagon der erste direkt nachgewiesene Exoplanet bekanntgegeben (KALAS et al. 2008).

Früher sah man Staub im Weltall eher als eine lästige Komponente an, während sich tatsächlich fast alle Typen von Objekten in irgendeiner Form mit ihm zieren.

Aktuelle Fragestellungen. 1. Für die Untersuchung bildete das Weltraumteleskop *Herschel* den Fomalhaut umgebenden Staubring in fünf Spektralbereichen des fernen Infrarotlichtes bei Wellenlängen zwischen 70 und 500 Mikrometern ab. Anhand des sich so ergebenden Infrarotspektrums gelangten die an der Auswertung der Daten beteiligten Wissenschaftler um Bram ACKE vom Astronomischen Institut der Universität Leuven/Belgien zu dem Ergebnis, dass die Staubkörner lediglich wenige Mikrometer groß sein können (ACKE et al. 2012). Daraus ergibt sich ein Problem: Der von Fomalhaut ausgehende Strahlungsdruck müsste derart kleine und entsprechend massearme Staubpartikel relativ schnell aus der Umgebung des Sterns „wegblasen“ und so den Staubring auflösen. Zur Auflösung des Widerspruchs wird als Erklärung angeboten, dass die Staubpartikel aus einer Vielzahl von jeweils nur mikrometergroßen Teilchen zusammengesetzt sind, wobei das Strahlungsverhalten von diesen kleinen Einzelkörnern dominiert sein soll.

2. Der Exoplanet Dagon erscheint eine Milliarde Mal lichtschwächer als der Stern Fomalhaut. Das ist immer noch viel heller, als die Oberfläche des Planeten allein erwarten lassen würde. Eine mögliche Erklärung ist, dass Dagon

von einem gewaltigen Ringsystem aus Eis und Staub umgeben ist, das den Dimensionen der Bahnen der Galilei'schen Monde um Jupiter entsprechen dürfte.

3. Aufgrund von Computersimulationen konnten die Astronomen darauf schließen, dass die Staubpartikel durch die Schwerkraft zweier Planeten in der Scheibe gehalten werden, wobei einer der Planeten den Stern Fomalhaut innerhalb und der andere außerhalb der Staubscheibe umläuft. Beide Exoplaneten sollten dabei als „Schäferplaneten“ fungieren, welche den Staubring durch ihre Schwerkraft zusammenhalten. Gesichtet wurde der zweite Schäferplanet bisher aber noch nicht. Nach BEUST et al. (2014) ist dieser hypothetische zweite Planet maßgeblich für die Erhaltung des Rings.

4. Die Mindestdistanz zwischen Exoplanet und Stern liegt Berechnungen zufolge bei rund sieben Milliarden Kilometern, während die größte Auslenkung seiner Bahn bei über 40 Milliarden Kilometern liegt. Die Bahn von Dagon ähnelt damit also viel mehr der Wanderung eines Kometen als der typischen Kreisbahn eines Planeten. Wurde das durch einen Zusammenstoß verursacht? Hat eine Kollision von Dagon mit einem weiteren Exoplaneten diesen auf die ungewöhnlich exzentrische Bahn gezwungen?

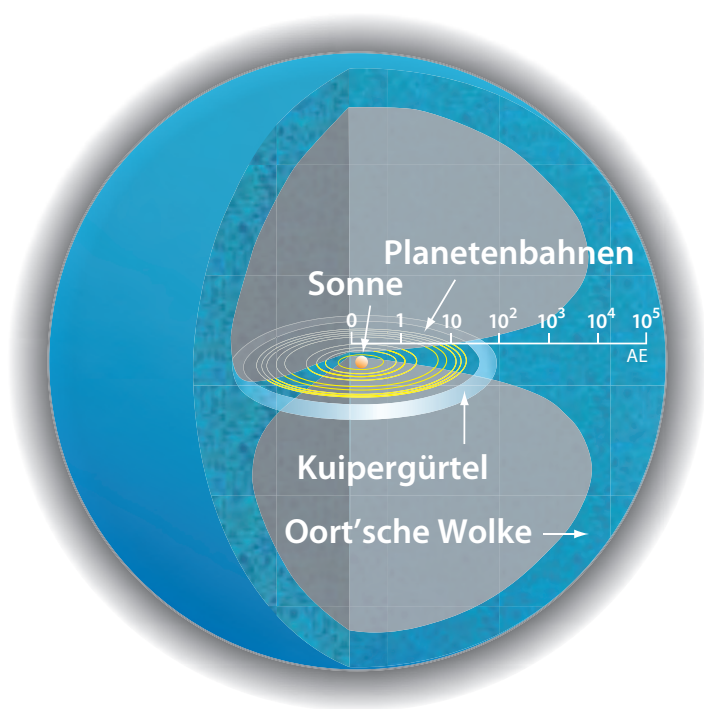
Die Suche nach Exoplaneten förderte laut Max-Planck-Institut für Astronomie MPIA in Heidelberg bislang etwa 3.800 Objekte mit unterschiedlichen Größen, Massen sowie Abständen von ihrem Mutterstern zutage. Zu deren Entstehung wurden zwar Theorien und Modelle möglicher Entstehungsszenarien entwickelt, die jedoch bisher mangels Beobachtungsmöglichkeiten nicht überprüfbar waren. Das hat sich nun geändert:

Das Konsortium des „Sphere“-Instruments am Very Large Telescope VLT der Europäischen Südsternwarte ESO in Chile entdeckte jüngst den Planeten PDS 70b, der sich in einer Entfernung von 22 Sonne-Erde-Abständen von seinem Zentralgestirn PDS 70 befindet.

Der Stern PDS 70 ist ein junger Stern und mit einer protoplanetaren Scheibe umgeben. Diese weist eine große Lücke auf. Im Fall des rund 370 Lichtjahre entfernten Sterns konnte nun in dieser Lücke ein sich bildender Planet entdeckt werden (KEPLER et al. 2018, MÜLLER 2018). Er beinhaltet wohl eine mehrfache Masse des Jupiter und soll noch im Wachsen begriffen sein. Abb. 3 zeigt die Szene.

Damit sollte man in der Lage sein, Planeten direkt bei ihrer Entstehung zu beobachten und erstmals die theoretischen Modelle zu prüfen.

Fazit. Es gibt offensichtlich kaum einen Objekttyp im Kosmos, der sich nicht mit Staubringen schmückt. Staubzonen oder Staubringe



sind aber auch gleichzeitig wie geheimnisvolle Schleier, die das bedecken und verdecken, was Astronomen gerne ungeschützt eingesehen hätten: zum Beispiel die Bildung von Planeten und Monden. So bleibt – bei allen bemerkenswerten neuen Einsichten – vieles im Ungefähren, das dann auch Freiheiten beim Einbau ins klassische, naturalistische Verständnis bietet. Der Aktualität der Messungen ist es geschuldet, dass gültige Schlüsse heute noch nicht gezogen werden können. Bisher gibt es eine Reihe von Modellen und nun geht es um deren Auswahl bzw. Korrektur anhand neuer Daten.

Staubringe um Planeten

Staubkugeln, Staubbürtel und Staubringe

Wenn man sich vom interstellaren Raum ausgehend unserer Sonne nähert, sollte man zunächst auf eine christbaumkugelähnliche Anordnung von Eiskörpern oder inaktiven Kometenkernen (typischerweise kilometergroße Eiskörper) stoßen. Aufgrund verschiedener Indizien wie Bahnparameter von Kometen schloss Jan OORT 1950 auf eine Population von Eiskörpern, die unser Sonnensystem am äußersten Rand umgeben soll. Wie angedeutet ist diese Population bisher nicht direkt nachgewiesen, sondern aufgrund gewisser Indizien postuliert worden. Weiter innen soll die Oort'sche Wolke in den sogenannten Kuipergürtel übergehen, dessen Ebene sich in der Bahnebene der Ekliptik (Bahnebene der Erde um die Sonne) befindet (Abb. 4). Der bekannteste Vertreter dieser Eiskörperpopulation ist der ehemalige Planet Pluto, der aufgrund ähnlicher

Abb. 4 Schematische Darstellung unseres Sonnensystems; die Dimensionen sind in einer Skala grob angedeutet, wobei AE Astronomische Einheit bedeutet und den Abstand zwischen Sonne und Erde meint (von außen kommend):

- Christbaumkugelförmige Anordnung der postulierten Oort'schen Wolke in einer Entfernung von bis zu 100.000 AE von der Sonne
- Übergang in den ringförmigen Kuipergürtel, der die sog. Zwergplaneten beherbergt
- Äußere Gasplaneten (Neptun, Uranus, Saturn, Jupiter)
- Zwischen Jupiter und Mars: Asteroidengürtel
- Innere Planeten (Mars, Erde, Venus, Merkur)

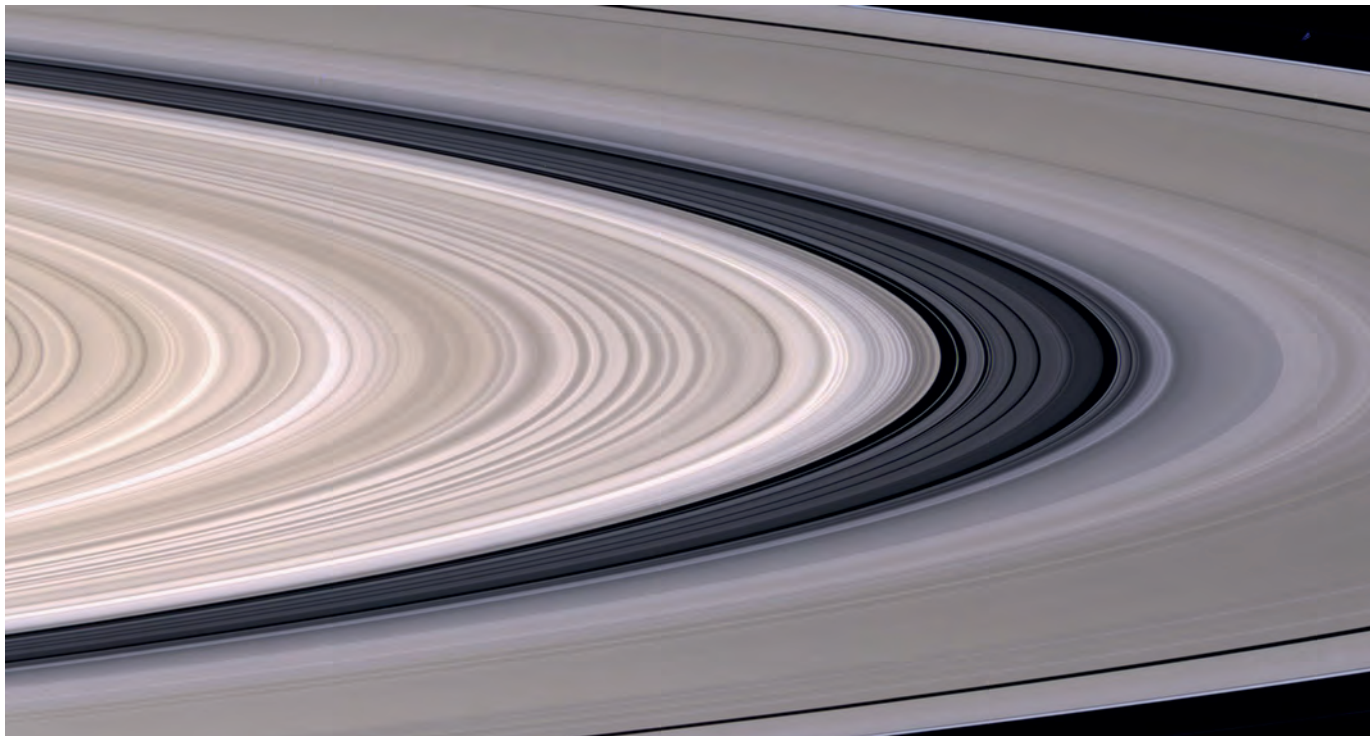


Abb. 5 Saturns „Langspielplatte“ in Form seines ausgeprägten, fein strukturierten Staubrings, der insbesondere durch die *Cassini-Huygens*-Mission 12 Jahre intensiv untersucht wurde. (NASA)

Objekte in seiner näheren Umgebung im Jahre 2006 zum Zwergplaneten „degradiert“ wurde. Und ausgerechnet aus diesem Eiskörpergürtel ist nun ein weiterer Zwergplanet entdeckt worden, bei dem erstmals ein Staubring nachgewiesen wurde (s.u.).

Staubringe bestehen aus einer Ansammlung mineralischer und eishaltiger Komponenten von typischerweise Sandkorn- bis Berggröße, die ein astronomisches Objekt in stabilen Bahnen umkreisen und zahlreich genug sind, um in ihrer Gesamtheit als ringscheibenförmiges Gebilde beschreibbar zu sein. Ihre Entdeckung verdanken sie Bedeckungen durch vorbeiziehende Sterne. Oft enthalten sie interne Strukturen, wie sie z.B. bei Neptun als „Ringwürste“ und bei Saturn eher als „Langspielplatte“ bekannt geworden sind. Ausmaße, Zusammensetzungen, Flächen- und Gesamthelligkeiten können dabei sehr unterschiedlich ausgeprägt sein.

Die Entstehungsgeschichte von Ringsystemen um Planeten ist nach wie vor Gegenstand vieler Spekulationen.

Während mittlerweile eine Menge über Eigenschaften dieser Ringsysteme erforscht werden konnte, ist deren Entstehungsgeschichte nach wie vor Gegenstand vieler Spekulationen:

1. Ein kleiner Mond könnte einem Planeten zu nahe gekommen und dort innerhalb der Roche-Grenze (s. Kasten S. 73) auseinandergerissen worden sein. Seine Bruchstücke mögen sich im Wechselspiel mit der Gravitation des Planeten zu einem Ring geformt haben.

2. Ringsysteme mögen auch Ergebnis der „Resteverwertung“ aus einem Planetenbildungsprozess sein, wobei innerhalb der Roche-Grenze sich kein einzelnes Objekt (Mond) bilden konnte.

3. Ein Planet mag von einem weiteren astronomischen Objekt getroffen worden sein und die dadurch freigesetzten Teilchen mögen sich um einen Planeten als Staubring formiert haben.

Staubringe um unsere Planeten haben eine lange Entdeckungsgeschichte. Zunächst wurden sie bei Saturn entdeckt: Galileo GALILEI sah sie erstmals im Juli 1610 mit einem der ersten Teleskope. Er erkannte die Ringe jedoch nicht als isolierte Objekte, sondern deutete sie als Henkel (*ansae*). Christiaan HUYGENS beschrieb die Ringe 45 Jahre später korrekt: „Der Saturn ist von einem dünnen, flachen Ring umgeben, der ihn nirgends berührt und der zur Ekliptik geneigt ist.“ Inzwischen wurden bei allen Gasplaneten Staubringsysteme entdeckt, wenn auch in recht unterschiedlichen Ausprägungen. Aus aktuellem Anlass soll das Ringsystem des Saturn auf der Basis neuester von *Cassini-Huygens* gewonnener Daten diskutiert werden.

Der Saturn-Staubring

Der Planet Saturn, sein Staubringsystem (Abb. 5) und seine Monde sind ausführlich in dem Buch „Der vermessene Kosmos – Ursprungsfragen kritisch betrachtet“ (PAILER & KRABBE 2016) diskutiert. In der gigantischen Eis- und Staubscheibe seiner Ringe waren ansatzweise die gleichen Prozesse der Strukturbildung durch Aufdickung von Material im Äquatorbereich zu erkennen, die

auch bei der Bildung unseres Sonnensystems eine Rolle gespielt haben sollen. Damit verbinden die Wissenschaftler die Hoffnung, auch Prozesse entdecken zu können, die bei fernen Planeten ablaufen: Es geht um den Aufbau von Planetenkörpern durch Akkumulation von Staubteilchen.

Das Ringsystem erschien bisher als der charakteristische Bestandteil eines Planeten namens Saturn in unserem Sonnensystem und hat die Phantasie von Dichtern und Denkern seit seiner Entdeckung gleichermaßen befeuert. Nun zeigen neueste Daten offensichtlich, dass dieses Ringsystem ausnahmsweise einmal nicht in das Bild einer Resteverwertung eines Planetenbildungsprozesses passt. Nach neuesten Daten von der *Cassini-Huygens*-Mission ist das Ringsystem dafür viel zu jung.

Die neu gewonnenen Daten stammen vom letzten riskanten Manöver, das der in die Jahre gekommenen Saturn-Mission *Cassini-Huygens* zugemutet wurde: ein erstmaliger Flug durch die Lücke des Planetenstaubtrings von Nord nach Süd am 26. April 2017, bis die Sonde am 15. September 2017 in den dichten Wolken des Saturn durch Reibungshitze in der Saturnatmosphäre verglühte. Auf die neuen Ergebnisse werden wir weiter unten zu sprechen kommen.

Bereits erste in-situ-Messungen durch die *Voyager*-Sonde 1980 hatten einerseits zahlreiche Details zu Tage gebracht, andererseits viele Rätsel hinterlassen. Hier brachte nun *Cassini-Huygens* mehr Klarheit. Die offenen Fragen betreffen die Intensität des Staubeinfalls auf das Saturnsystem, die Gesamtmasse des Ringsystems und die Helligkeit des Ringsystems.

Aktuelle Fragestellungen

1. Intensität des Staubeinfalls auf das Saturnsystem. Ein konstanter Regen interplanetarer Mikrometeorite vom äußeren Rand unseres Planetensystems sollte seit Milliarden von Jahren auf das Saturn-Ringsystem fallen. Erwartungsgemäß sollten diese dunklen Teilchen die ursprünglichen hellen und gut reflektierenden Wassereisteilchen des Ringsystems im Laufe ihres Bombardements dunkel färben.

Wie schnell sich dieser Prozess auswirkt, hängt natürlich von der Einfallsrate des Staubes ab, die bisher nicht viel mehr war als „best guess“.

Nach etwa zwölf Jahren intensiven Messens und Analysierens hat nun der *Cosmic Dust Analyzer CDA* – eines der zwölf Instrumente an Bord von *Cassini-Huygens* – für diese Abschätzung eine solide Basis gebracht – und das Ergebnis ist „inconsistent with an old ring“, wie es Sascha KEMPF von der University of Colorado in Boulder kommentierte. Der Staubfluss von außen auf den Ring ist etwa zehn Mal höher als zuvor gedacht und legt aufgrund erster und soweit bester Abschätzungen ein Ringalter von

Roche-Grenze

Zur Entstehung der Saturnringe gibt es trotz vieler Erklärungsversuche noch keine ausgewiesene Theorie. Nach der von Édouard Albert ROCHE bereits im 19. Jahrhundert vorgeschlagenen Theorie entstanden die Ringe durch einen Mond, der sich dem Saturn so weit genähert hatte, dass er durch Gezeitenkräfte auseinander gebrochen ist. Der kritische Abstand wird als Roche-Grenze bezeichnet.

Der Unterschied der Anziehungskräfte durch den Saturn auf beiden Seiten des Mondes überstieg in diesem Fall die mondinternen Gravitationskräfte, sodass der Mond nur noch durch seine innere Festigkeit zusammengehalten worden wäre, welche aber zu schwach war. Unter diesen Bedingungen wird ein Objekt zerlegt.

150 Millionen bis maximal 300 Millionen Jahren nahe. „Our measurements is the most direct way you can measure it“, fügt KEMPF hinzu. „There is not much you can do about it. It has to be young“ (KEMPF et al. 2017).

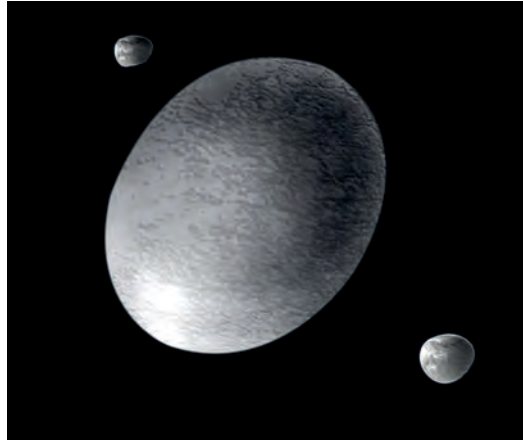
Demnach existierte vor einigen Hundert Millionen Jahren kein Ring. Saturn hat dieses Juwel (wie es genannt wird) erst sehr spät in seinem „Leben“ bekommen. Sollten Astronomen – nach den üblichen Altersvorstellungen – zur Zeit der Dinosaurier den Himmel geblickt haben, so hätten sie nur einen „nackten“, eher langweiligen Saturn ohne seinen „Heiligenschein“ gesehen.

So sollte vor noch nicht langer Zeit eine („schöne“) Katastrophe Saturn erreicht haben: Ein streunender Komet oder Asteroid mag einen Eismond gerammt haben, um besagte Brösel der Katastrophe in je einer Umlaufbahn unter Einhaltung gravitativer Gegebenheiten gleichmäßig zu verteilen. Oder hat ein anderer, bisher unbekannter Vorgang die Umlaufbahn eines Saturnmonds so sehr gestört, dass momentan wirkende Kräfte stärker waren als dessen innere Festigkeit? Jedenfalls müsste etwas Katastrophales passiert sein, was eine Entstehung des Saturnrings zugleich mit der Bildung des Planeten ausschließt.

2. Gesamtmasse des Ringsystems

In der Frühzeit des Planetensystems war die Anzahl der Objekte deutlich höher. Damit stieg auch die Zahl der Kollisionen untereinander. Diesem Verständnis folgend sollte ein Mond größer als der Saturnmond Mimas von einem Planetesimal (mutmaßlicher Vorläufer eines Planeten) getroffen und so der Ursprung des Ringsystems gewesen sein. Seit vielen Jahren war dies die Erklärung des Ursprungs des Saturn-Ringsystems. Als Hinweis galt die Dichte des B-Ringes (Teil des Ringsystems an der inneren Kante der von Giovanni Domenico CASSINI entdeckten und nach ihm benannten Lücke). Bereits die Raumsonde *Voyager* deutete durch die unerwartet detaillierte Struktur des Ringsystems an, dass dieses nicht sehr alt sein kann, da durch Kollisionsprozesse im Laufe der Zeit Störungen der Ordnung zu erwarten seien. Allerdings

Abb. 6 Künstlerische Darstellung des Zwergplaneten Haumea mit seinen Monden. Haumea ist der erste Zwergplanet, bei dem überraschenderweise ein Staubring entdeckt wurde. (A. FEILD, Space Telescope Science Institute)



wurde auch festgestellt, dass Schäfermonde gewisse „Ordnungshüter“ sind. Nun sollte *Cassini-Huygens* mehr Klärung in die Verwirrung um die Altersfrage bringen.

Während fünf von 22 *Cassini-Huygens*-Passagen durch die Ringebene rückte die Masse des B-Rings in den Fokus der Untersuchungen. Ein Radio-Experiment bestimmte aufgrund der minimalen Dopplerverschiebung die Gravitationskraft und damit die Masse des Rings, die nur das 0,4-Fache der Masse von Mimas zeigte. Dies ist um einiges weniger, als man vor dieser Messung vermutet hatte. Die Ringe sind sehr hell und bestehen zu über 90 % aus Wassereis. Mit dem *Cosmic Dust Analyser*, einem anderen *Cassini*-Messgerät, bestimmte man die Einfallsrate von dunklem Meteoritenstaub auf die Ringe. Diese Rate ist so hoch, dass die Ringmasse zu einem großen Anteil aus diesem Staub bestehen müsste und die Ringe sehr dunkel wären, wenn sie so alt wie der Saturn sein sollten (RACIOPPA et al. 2017).

3. Helligkeit des Ringsystems

Der zuvor genannte Schluss wird durch eine weitere Evidenz gestützt: Ein konstanter Regen dunkler Mikrometeorite fällt auf Saturn, der erwartungsgemäß die pristinen (= ursprünglichen) Wassereisteilchen im Ringsystem nachdunkelt. Die Schnelligkeit des Prozesses hängt von der Rate des Bombardements von außen ab, die bisher nur sehr unsicher bestimmt war.

Nach zwölf Jahren akribischer Suche hat das CDA-Experiment diese Unsicherheit durch sorgfältige Messungen aufgelöst. Und die Analyse ist inkonsistent mit einem alten Ring. Denn der gemessene einfallende Staubfluss ist satte zehn Mal höher als der zuvor abgeschätzte.

Wissenschaftler haben nun erst begonnen, Ring-formende Kollisionen neu zu denken. „It’s time for new ideas. The solar system could be full of surprises like this“, kommentierte Jeff CUZZI, ein Staubringexperte vom NASA Ames Research Center in Mountain View, Kalifornien, die neu entstandene Situation.

Erster Staubring um einen Zwergplaneten

Bis vor wenigen Jahren waren lediglich Ringe um die großen Gasplaneten Saturn, Uranus, Jupiter und Neptun bekannt. Dann entdeckten Astronomen gleich zwei Ringe um den Asteroiden Chariklo und später auch ein mögliches Ringsystem um den Asteroiden Chiron. Beide kreisen zwischen Saturn und Uranus um die Sonne. Mit der weiteren Entdeckung eines Rings um den Zwergplaneten Haumea (Abb. 6) haben die Astronomen nun einen Ring um einen nochmals gänzlich anderen Himmelskörper gefunden, der außerdem noch viel weiter von der Sonne entfernt ist.

Eigentlich war es ein eher hoffnungsloses Unterfangen, als in der Nacht vom 21. Januar 2017 der ferne Zwergplanet Haumea (aus der irdischen Perspektive) an einem Stern vorbeizog: Was sollte hier schon zu entdecken sein? Aber wenn sich schon einmal eine solche Konstellation ergibt, so sollte man zumindest genau hinschauen. Deshalb wurden zwölf Teleskope von zehn unterschiedlichen Observatorien zusammengeschlossen, um Daten zu sammeln. Vor allem ging es um Haumeas genauere Form, die Frage nach einer möglichen Atmosphäre – und um etwas, das nicht zu erwarten war (ORTIZ et al. 2017).

Physikalischer Kontext. Haumea ist einer von nur vier bisher bekannten Zwergplaneten, also von Objekten jenseits der Neptunbahn als Mitglieder des Kuipergürtels, einer von tausenden, die noch zu entdecken sind. So viel ist von ihm bekannt:

- Er hat eine lange Umlaufzeit um die Sonne von 285 Jahren.
- Er ist 50 Mal weiter von der Sonne entfernt als unsere Erde.
- Er hat eine außergewöhnliche Form, die einem langgezogenen Ei ähnelt, und ist nur halb so breit wie lang (Abb. 6).
- Seine Rotation benötigt weniger als vier Stunden; damit dreht sich Haumea schneller als jeder andere Himmelskörper im Sonnensystem.
- Seine Oberfläche ist – im Gegensatz zu anderen transneptunischen Objekten – von einer Schicht kristallinen Wassereises bedeckt.

Und nun zeigten die Beobachtungen der Sternbedeckung das Unerwartete: Haumea ist von einem Staubring umgeben.

Aktuelle Fragestellungen. Für die Entstehung des Staubrings haben die Forscher unterschiedliche Erklärungsversuche, so könnte er bei einer Kollision entstanden sein, die allerdings bei der großen Leere im äußeren Raum unseres Planetensystems große Zielgenauigkeit verlangen würde und damit eher unwahrscheinlich ist.

Vielleicht könnte aufgrund der außergewöhnlich hohen Rotationsgeschwindigkeit loses

Die Überraschung, dass der Saturn-Planetenkörper erst in jüngerer Zeit seine „Hutkrempe“ erhalten haben soll, ist für uns alle gewöhnungsbedürftig.

Material von der Oberfläche in die Umlaufbahn geschleudert worden sein, was aber bereits eine exotische Annahme wäre.

Schluss

„Mit der Entdeckung eines beringten Objekts im äußeren Sonnensystem und in einer völlig anderen Umgebung als die Gasplaneten wird die fundamentale Frage, wie sich solche Ringe bilden und entwickeln, noch spannender“, sagt Amanda SICKAFOOSE vom Südafrikanischen Astronomischen Observatorium in einem begleitenden Kommentar.

Bei aller Vielzahl verbliebener Rätsel hat sich bestätigt, dass Ringe junge Gebilde sind. Ähnlich wie bei Schwarzen Löchern, die zunächst eine Erfindung der Science-Fiction-Literatur waren und heute offensichtlich allgemeines „Zubehör“ jeder Galaxie sind, so sind offensichtlich Staubringe allgemeines Accessoire kosmischer Objekte, da sie bei zunehmend verschiedenen Objekten gefunden werden. Bei allen vorliegenden Erklärungsversuchen ist für sie bislang keine befriedigende Lösung gefunden; sie sind nach wie vor für Überraschungen gut.

„Durch die Entdeckungen der *Voyager*-Sonden haben sich Planetenringe als üblicher Bestandteil der Gasplaneten herausgestellt. Obwohl sie ziemlich unterschiedlicher Natur sind und unterschiedliche Ursachen haben mögen; eines ist ihnen gemeinsam: Es sind allesamt Kurzzeitphänomene, was durch ihren filigranen Charakter evident ist und durch ihre Entstehungsgeschichte plausibel gemacht wird. Umso erstaunlicher ist es, dass sie alle gleichzeitig auftreten“ – wenn wir technisch in der Lage sind, sie zu untersuchen. Dies ist ein Zitat aus einer alten Veröffentlichung („Neues aus der Planetenforschung – unerwartete Ergebnisse durch Raumsonden“) des Autors aus dem Jahre 1993. Diese Einschätzung gilt nach wie vor.

Versuchen wir, die eher jungen Alter – z. B. von Staubringen – mit den eher hohen Altern von Objekten in einem beschleunigt expandierenden Kosmos zu vergleichen, so stoßen wir auf eine Vielzahl von uns alt bzw. jung erscheinenden Phänomenen, was typisch ist für Schöpfung und in einer kontinuierlich verlaufenden Natur grundsätzlich nur schwer einzuordnen ist. Allerdings müssen wir nun lernen, dass ein zum (alten) Saturn gehöriger Ring wohl jüngeren Datums ist, was so keiner erwartet hat.

Dank

Ich möchte mich sehr herzlich bei Reinhard JUNKER für die gezeigte Akribie bei der Durchsicht des Manuskripts bedanken. Alfred KRABBE hat mit seinem profunden Wissen sorgfältig Inhalt und Aussage geprüft, während Albrecht EHREMANN mir entscheidend bei der Zusammenstellung der Originalquellen behilflich war. Allen danke ich für den beigesteuerten Mehrwert zu diesem Artikel!

Literatur

- ACKE B, MIN M et al. (2012) Herschel images of Fomalhaut – An extrasolar Kuiper belt at the height of its dynamical activity. *Astronomy & Astrophysics* 540, A125.
- BEUST H, AUGEREAU JC et al. (2014) An independent determination of Fomalhaut b's orbit and the dynamical effects on the outer dust belt. *Astronomy & Astrophysics* 561, id. A43, 16 pp.
- BRADLEY JP, ISHII HA et al. (2014) Detection of solar wind-produced water in irradiated rims on silicate minerals. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 111, 1732–1735.
- DE LOOZE I, BAES M, JACOPO F & VERSTAPPEN J (2012) Panchromatic radiative transfer modelling of stars and dust in the Sombbrero galaxy. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 419, 895–903.
- HANSLMEIER A (2002) Einführung in Astronomie und Astrophysik. Spektrum Akad. Verlag, Berlin.
- KALAS P, GRAHAM JR & CLAMPIN M (2005) A planetary system as the origin of structure in Fomalhaut's dust belt. *Nature* 435, 1067–1070.
- KALAS P, GRAHAM JR et al. (2008) Optical images of an exosolar planet 25 light-years from earth. *Science* 322, 1345–1348.
- KEPLER M, BENISTY M, MÜLLER A, HENNING T et al. (2018) Discovery of a planetary-mass companion within the gap of the transition disk around PDS 70. arxiv:1806.11568 [astro-ph.EP], accepted by *Astronomy & Astrophysics*.
- KEMP F, ALTABELLI N, SRAMA R, CUZZI JN & ESTRADA PR (2017) The Age of Saturn's Rings Constrained by the Meteoroid Flux Into the System. P. R., American Geophysical Union, Fall Meeting 2017, abstract #P34A-05, 12/2017.
- KUAN YJ, CHARNLEY SB, HUANG HC, TSENG WL & KISIEL Z (2003) Interstellar Glycine. *Astrophys. J.* 593, 848.
- MÜLLER A, KEPLER M et al. (2018) Orbital and atmospheric characterization of the planet within the gap of the PDS 70 transition disk, arXiv:1806.11567 [astro-ph.EP], submitted to *Astronomy & Astrophysics*
- ORTIZ JL, SANTOS-SANZ P et al. (2017) The size, shape, density and ring of the dwarf planet Haumea from a stellar occultation. *Nature* 550, 219–223.
- RACIOPPA P, DURANTE D & IESS L (2017) The mass of Saturn's B-ring from Cassini's Grand Finale orbits. 19th EGU General Assembly, EGU2017, Proceedings from the conference held 23–28 April, 2017 in Vienna, Austria., p.17150; 04/2017
- VOOSEN P (2017) Saturn's rings are a recent addition to the solar system, Cassini observations show. <http://www.sciencemag.org/news/2017/12/saturn-s-rings-are-recent-addition-solar-system-cassini-observations-show>

Anschrift des Verfassers:

Dr. Norbert Pailer, Landstr. 24, 88719 Meersburg-Stetten; E-Mail: norbert.pailer@amazingspace.com