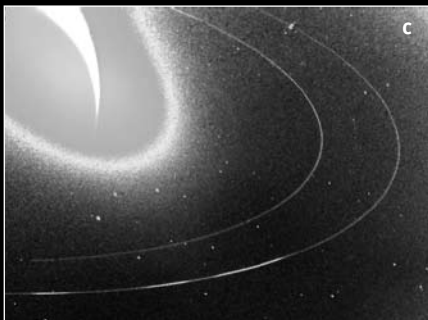




Planeten-Ringe

Dynamische Laboratorien im Sonnensystem

VON FRANK SPAHN

Filigrane Ringe aus Eis und Staub umgeben die Gasplaneten Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun. Sie sind die flachsten Strukturen im Universum und zeichnen sich durch eine komplexe Dynamik aus. Die Rillen, Wellen und »Propeller«, die moderne Raumsonden in den Ringsystemen enthüllen, liefern wichtige Hinweise auf die Bildung von Strukturen und sogar auf die Entstehung von Planeten.

Die Scheibenform ist neben der Kugel die im Kosmos am häufigsten anzutreffende Struktur. Sie ist grundsätzlich mit der Entstehung von Himmelskörpern verknüpft und eine natürliche Folge des Wechselspiels der Kräfte. Instabilitäten in einer Ansammlung von Materie – zum Beispiel der gravitative Kollaps einer Molekülwolke zu Protosternen – zusammen mit der Erhaltung des Drehimpulses erzwingen die Bildung von Materiescheiben um ein zentrales Objekt.

So mancher wird sich mit amüsierter Bewunderung eines Pizzabäckers erinnern, der mit gekonntem Schwung den Pizzateig in Rotation versetzt und ihm so die gewünschte flache Form verleiht. Bei der Bildung kosmischer Scheiben über-

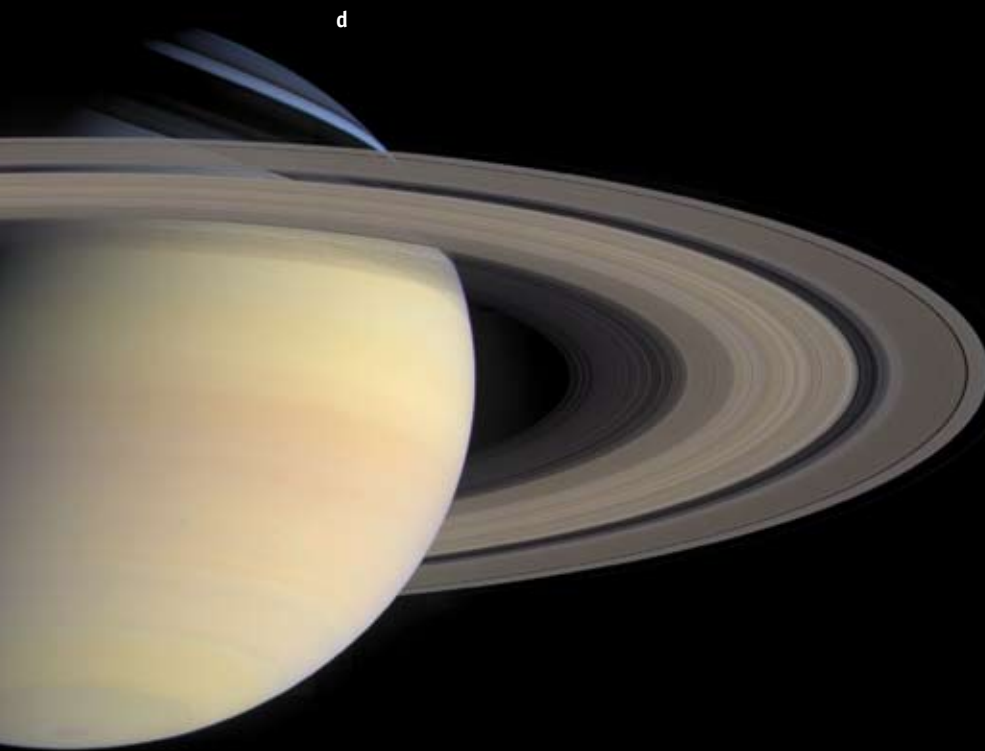
nimmt die frei werdende Gravitationsenergie beim Kollaps der Materie den Part des Pizzabäckers, jedoch unter der Knute der Drehimpulserhaltung.

Dieses Szenario läuft auf den verschiedensten Größenskalen ab: Die Physik der Entstehung von Spiralgalaxien mit Durchmessern von 100 000 Lichtjahren ist mit der Bildung von Gas-Staub-Scheiben, die sich nur über einige Hundert Astronomische Einheiten um einen entstehenden Stern erstrecken, und nicht zuletzt mit der Dynamik planetarer Ringe eng verwandt. Letztere sind die kleinsten kosmischen Scheiben und mit Durchmessern von einigen Hunderttausend Kilometern geradezu winzig im Vergleich mit ihren großen Verwandten. Trotz der Unterschiede laufen in all diesen Schei-

ben viele Prozesse in ähnlicher Weise ab. Beispielsweise haben die Spiralarme in Galaxien und die Dichtewellen in planetaren Ringen den gleichen physikalischen Ursprung.

Unser besonderes Interesse gilt den Gemeinsamkeiten zwischen präplanetaren Scheiben und den planetaren Ringen. Beide Typen kosmischer Scheiben werden von der Gravitation des Zentralkörpers (des Sterns oder Planeten), von der Eigengravitation des Scheibenmaterials und von Kollisionen zwischen den Konstituenten der Scheibe (Planetesimale von einigen bis Hunderten Kilometern Größe beziehungsweise zentimeter- bis metergroße Ringteilchen) entscheidend bestimmt. Diese Parallelen können bei der Erforschung planetarer Ringe weiter genutzt werden, um Licht in das Dunkel der Planetenentstehung zu bringen, wie wir später an Beispielen illustrieren wollen.

Zunächst möchten wir die planetaren Ringe näher vorstellen und zeigen, welchen Prozessen sie ihre faszinierende Gestalt verdanken. Dabei stellen wir die vier Ringsysteme unseres Sonnensystems (Abb. 1) kurz vor und heben Gemeinsamkeiten und Unterschiede hervor. Zu-



◀ **Abb. 1: Vier Ringsysteme sind in unserem Sonnensystem bekannt:**
 (a) Jupiters Staubring, hier aufgenommen von der Raumsonde GALILEO (der Planet steht links außerhalb des Bildausschnitts);
 (b) die schmalen Uranus-Ringe, hier im »Uranus-Abendrot« photographiert von VOYAGER 2 (an der Bildunterkante verläuft die obere Atmosphäre von Uranus, die horizontalen weißen Streifen markieren Ausschnitte der Uranusringe);
 (c) die Ringbögen von Neptun, hier gesehen von VOYAGER 2;
 (d) die prägnanten Ringe des Saturn, hier aufgenommen von CASSINI während des Anfluges auf den Riesenplaneten im Mai 2004 aus einer Entfernung von 28.2 Millionen Kilometern.

a, b, c: NASA/JPL; d: NASA/JPL/Space Science Institute

dem können wir feststellen, dass der Saturnring die Eigenschaften aller anderen Ringsysteme in sich birgt. Deshalb, und auch wegen der sensationellen Erfolge der laufenden CASSINI-Mission, bildet der Saturnring den Hauptgegenstand dieses Aufsatzes.

Die planetaren Ringe des Sonnensystems

Heute weiß man, dass Ringe zum Erscheinungsbild der Riesenplaneten von Jupiter bis Neptun gehören. Sie bestehen im Wesentlichen aus Eis- und Staubteilchen im Größenbereich von Mikrometern bis hin zu Brocken groß wie Mehrfamilienhäuser. Die Gravitation des Planeten zwingt alle Partikel, die größer als einige Millimeter sind, auf fast perfekte Kepler-Kreisbahnen und beeinflusst somit entscheidend das Erscheinungsbild eines planetaren Rings. Sowohl die extrem flache Scheibenstruktur als auch die nahezu perfekten Kreisbahnen, auf denen die Ringmaterie den Planeten umläuft, werden von Stößen bewirkt, die in den dicht gepackten Ringen des Saturn, Uranus und Neptun sehr häufig sind. Pro Umlaufperiode von nur wenigen Stunden stößt jedes Teilchen zehn- bis zwanzigmal mit seinen Nachbarn zusammen.

Planetare Ringe können nur nahe am Planeten auftreten, wo die Gezeitenkräfte so groß sind, dass sich Körper von mehr als etwa zehn Meter Größe nicht bilden können. Die Ursache der Gezeiten ist in der von der Gravitation des Planeten aus-

geübten Anziehungskraft zu suchen, die mit zunehmendem Abstand kleiner wird. Somit wirkt auf ein Ringteilchen an der dem Planeten zugewandten Seite eine größere Kraft als an der abgewandten. Wird die Kraftdifferenz zu groß, so wird der Körper zerrissen. Die Grenze, die den Stabilitätsabstand eines gravitationsgebundenen Ringkörpers vom Zentralplaneten markiert, wird als Roche-Grenze bezeichnet. Innerhalb dieser Grenze wird die Gezeitenkraft größer als der innere Zusammenhalt des Körpers, sodass er in diesem Abstand nicht mehr existieren kann und in kleinere Bestandteile zerfällt. Im Unterschied dazu sind trotz der erheblich größeren Masse des Zentralsterns die präplanetaren Scheiben vergleichsweise so riesig, dass die Gezeiten unwesentlich werden und sich aus dem Scheibenmaterial Planeten bilden können.

Die Ringsysteme unseres Sonnensystems zeigen sich in unterschiedlicher Gestalt: Die dichten Komponenten der Ringe

des Uranus und Neptun sind radial sehr schmal (so genannte »Ringlets«, übersetzt »Ringlein«, von höchstens hundert Kilometern radialer Breite, siehe Abb. 1) und in eine ausgedehnte Staubscheibe eingebettet. Der Jupiterringsystem besteht hauptsächlich aus Staub, sehr ähnlich den Staubscheiben, welche die dichten Uranus- und Neptunringe einschließen, oder auch Saturns E-Ring.

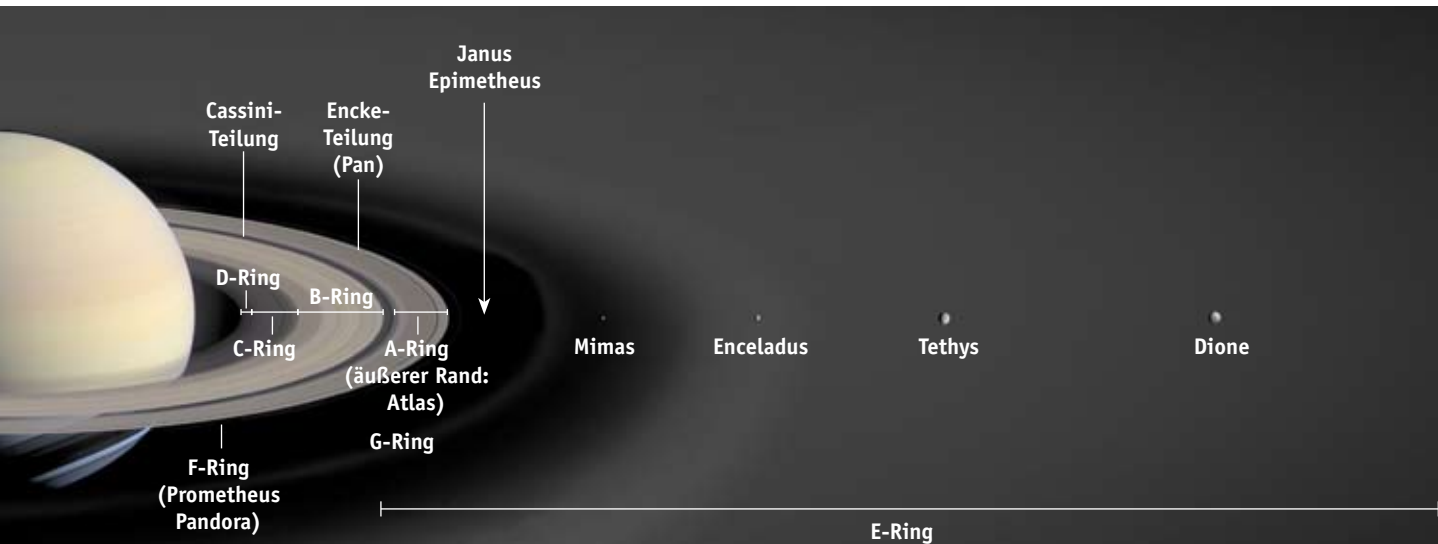
Anders als die Ringlets des Uranus und Neptun sind die dichten Saturnringe weit ausgedehnt und messen von Außenkante zu Außenkante rund 300 000 Kilometer (was etwa dem Abstand Erde-Mond entspricht). Es sind, mit wachsendem Abstand von Saturn, die Ringe D, C, B und A, wobei die beiden letzteren durch eine Lücke, die Cassini-Teilung, getrennt sind (Abb. 1 und 2). Sie bestehen aus dicht gepackten makroskopischen, Zentimeter bis mehrere Meter großen Eisteilchen und werden als Hauptringe Saturns bezeichnet. Weiter außen schließen sich die

»Sterne und Weltraum« im Physik-Unterricht

Die Bilder der Saturnringe faszinieren uns immer wieder aufs Neue. Wie schafft es die Natur, Eispartikel und Staub so prachtvoll zu arrangieren? Schon mit Mitteln der Schulphysik können wir diesem Geheimnis auf die Spur kommen. Dazu stehen im Internet unter www.wissenschaft-schulen.de ausführ-

liche didaktische Materialien kostenlos zur Verfügung.

Unser Projekt »Wissenschaft in die Schulen!« führen wir in Zusammenarbeit mit der Landesakademie für Lehrerfortbildung in Donaueschingen durch. Es wird von der Klaus Tschira Stiftung gGmbH großzügig gefördert.



Beide Bilder: NASA/JPL/Space Science Institute

Ringe F, G und E an, die sich durch einen hohen Staubanteil auszeichnen. Der von den Geysiren des Eismondes Enceladus gespeiste E-Ring reicht bis hinaus zur Bahn des Mondes Titan (600 000 Kilometer Distanz von Saturn; Abb. 2). Die äußeren Ringe sind optisch sehr dünn, bestehen also aus Staub relativ geringer räumlicher Dichte.

Die Dynamik der Staubringe unterscheidet sich grundlegend von jener der Eisbrocken, welche die dichten Ringe bilden. Neben der Gravitation des Planeten werden die Staubteilchen von einer Vielzahl verschiedener Kräfte beeinflusst, wie zum Beispiel von elektromagnetischen Feldern (Lorentz-Kraft), der Strahlung der Sonne (Strahlungsdruck), der Plasmareibung und vielen anderen Wechselwirkungen mehr. Direkte Stöße spielen in den Staubringen praktisch keine Rolle.

Hier geht es uns im Wesentlichen um Saturns Hauptringe. Ihre zentimeter- bis metergroßen makroskopischen Teilchen bevölkern dicht gedrängt die Umgebung der Äquatorebene des Planeten (Abb. 3). Gravitation und häufige Kollisionen geben den dichten Ringen ihre unverwechselbare Gestalt. Vor allem verursachen Stöße zwischen den Ringteilchen die extrem geringe vertikale Ausdehnung der Hauptringe von weit weniger als dreißig Metern, die einer horizontalen Ausdehnung von 300 000 Kilometern gegenübersteht. Überträgt man dieses Verhältnis auf ein Blatt Papier, so müsste es die Größe mehrerer Fußballfelder haben. Daher kann man die Ringe mit Recht als die flachsten uns bekannten Strukturen im Kosmos bezeichnen.

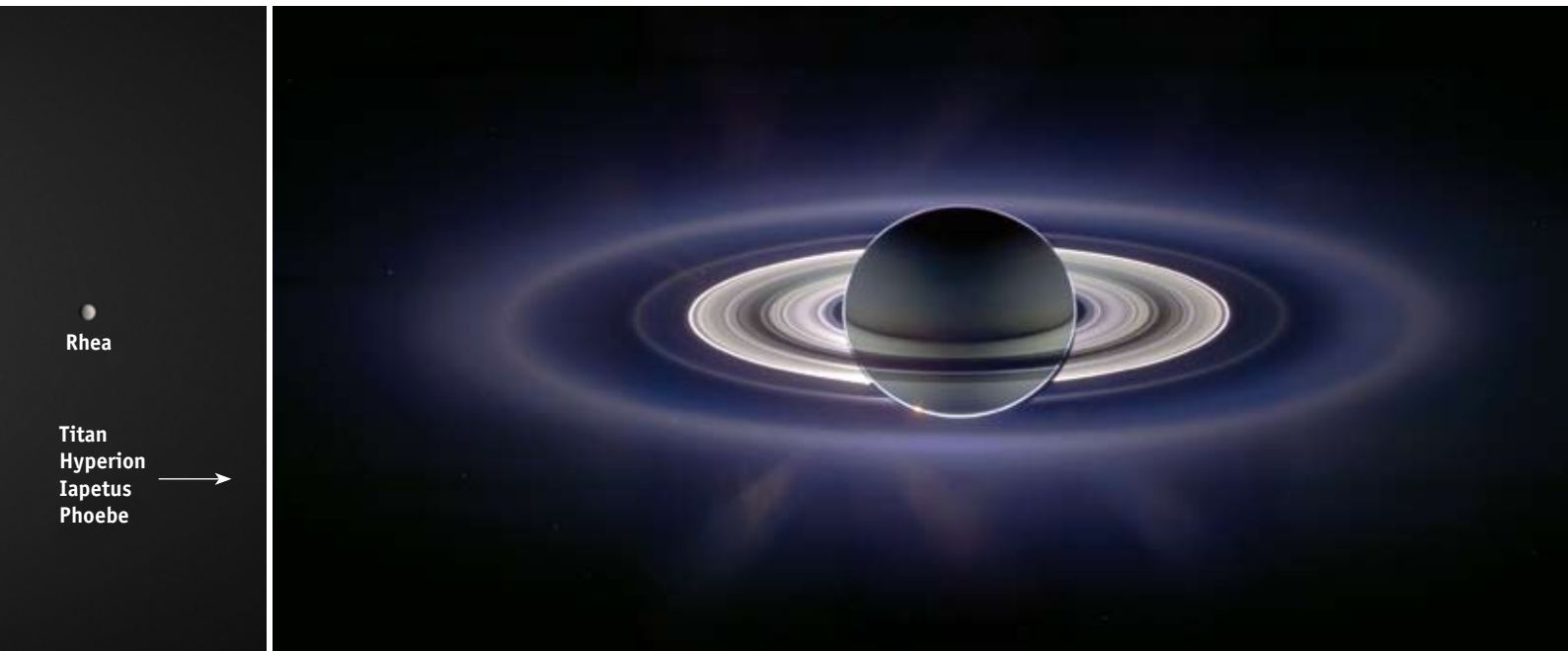
Die Abbildung 3 verdeutlicht dieses erstaunliche Strukturmerkmal: Die Ringe wurden von den CASSINI-Kameras direkt

von der Kante aus aufgenommen und sind erst bei genauem Hinsehen als haarfeine, dunkle horizontale Linie in der Bildmitte vor der Saturnsichel zu sehen. Jedoch werfen sie deutlich ihre Schatten auf die Wolkenoberkante Saturns, sodass sich laterale und vertikale Ausdehnung sehr schön vergleichen lassen. Mehr noch: Gestochen scharf kann man vom hauchzarten D-Ring hin zum Pol den C-Ring (der noch etwas Sonnenlicht durchlässt), danach den praktisch optisch dichten B-Ring (er lässt kein Licht durch), weiter nördlich die Cassini-Teilung und schließlich den A-Ring erkennen. Selbst die Encke-Teilung und der schmale F-Ring sind als dünner heller Streifen im Schatten des A-Rings beziehungsweise als haarfeiner, filigraner dunkler Faden jenseits der Außenkante der Hauptringe in nördlicher Richtung auszumachen. Der schwarze Punkt, der quasi auf der Ringebene liegt, ist der Eismond Enceladus, ein anderer »Star« der Saturnsystems, der mit seinen Geysiren den E-Ring füttert – den optisch dünnen, aber größten Ring des Sonnensystems.

Welchen Prozessen verdanken die dichten Ringe nun diese extrem flache Gestalt? Ursache sind dissipative Stöße zwischen den Ringteilchen. Die Stoßpartner werden deformiert, erwärmt und können zerbrechen – Bewegungsenergie wird dabei in Wärme verwandelt, sodass die Bewegungen gedämpft und die Teilchen auf eine Kreisbahn in der Äquatorebene gezwungen werden.

Die Energieverluste durch Kollisionen lassen sich besser verstehen, wenn man sich die Ringteilchen als frostige Schneebälle vorstellt. Angenommen, ein solches Teilchen würde aus der Ringebene ausgelenkt. Es muss nun zweimal pro

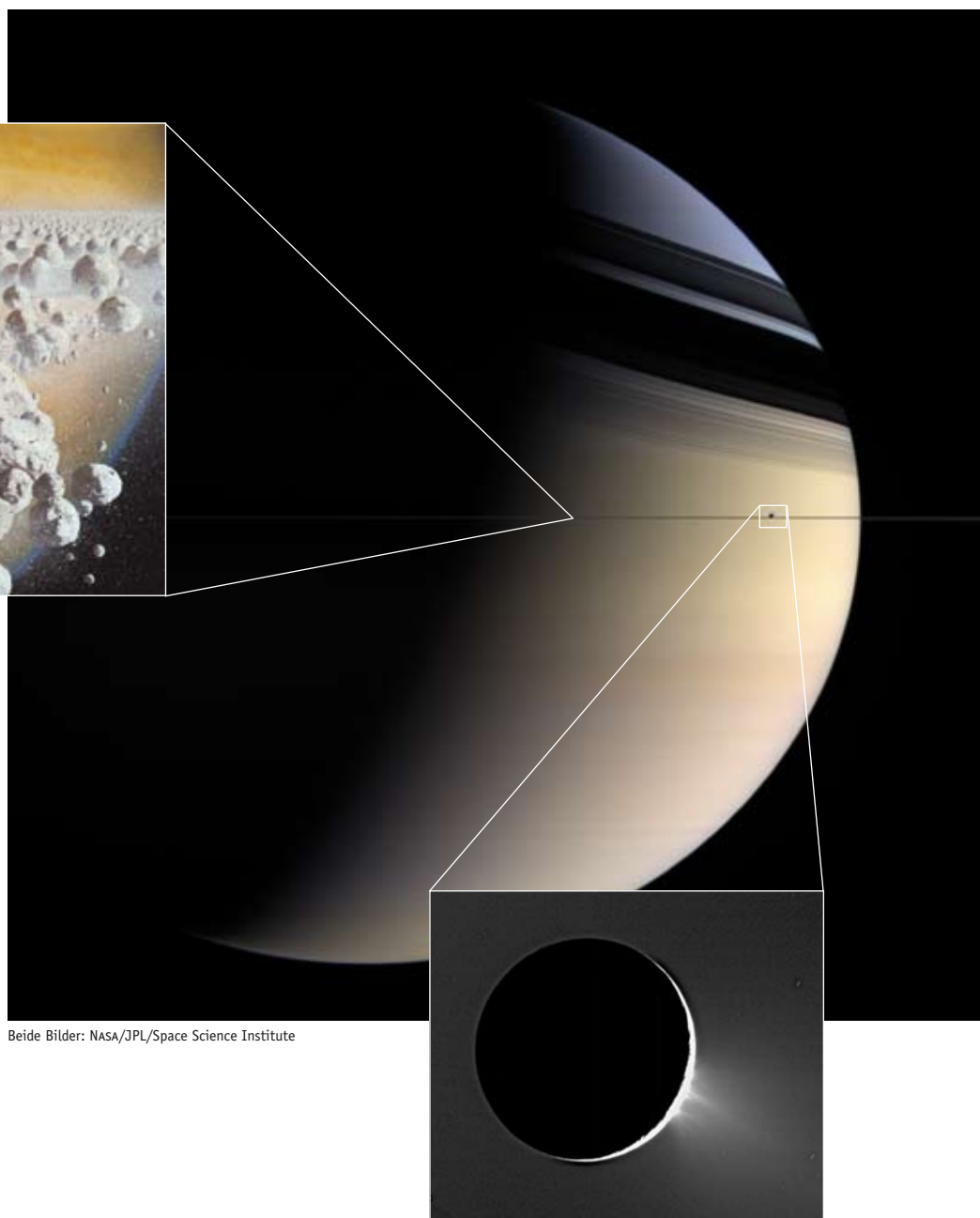
Abb. 2: Das Ringsystem Saturns ist hier im direkten Licht (links) und im Gegenlicht (rechts) zu sehen. Die dichten Hauptringe D, C, B und A bestehen aus zentimeter- bis metergroßen Eis- und Gesteinspartikeln. Eine markante »Lücke«, die Cassini-Teilung, ist nicht leer, sondern enthält Material, das dem C-Ring ähnelt. Eine schmale, nur 320 Kilometer breite Lücke, die Encke-Teilung, wird durch den Mond Pan verursacht. Außerhalb der Hauptringe schließen sich die Staubringe F, G und E an. Letzterer erstreckt sich bis zur Bahn Titans und beherbergt die großen Monde Mimas bis Rhea – unter anderem den geologisch aktiven Enceladus, der das Material für den riesigen E-Ring bereitstellt. In der Gegenlichtaufnahme rechts, die entstand, als die Sonde CASSINI den Kernschatten Saturns durchquerte, sind gleichzeitig sowohl die sonst unsichtbaren Staubringe (die äußeren diffusen graublauen Bereiche) als auch die grellen inneren Hauptringe sichtbar. An den äußersten und ausgedehntesten, diffusen E-Ring grenzt innen der ebenfalls diffuse, doch radial schmalere G-Ring. Die Staubringe sind aber keineswegs isoliert, sondern reichen zusammenhängend bis an die Hauptringe heran.



William K. Hartmann



▶ Abb. 3: Ringe, von der Kante gesehen, und ihre Schatten. Der feine dunkle horizontale Streifen markiert die Ringe. In Richtung Norden sind ihre Schatten deutlich sichtbar. A- und B-Ring lassen kaum Sonnenlicht durch, und ihre Schatten erscheinen schwarz. Die beiden hellen Streifen in der Dunkelheit sind die Cassini- und die Encke-Teilung. Die »Ausschnittsvergrößerung« oben zeigt ein Gemälde von Bill Hartmann, wie er sich die Ringe aus der Nähe vorstellt. Rechts unten ist der Mond Enceladus vergrößert dargestellt, der direkt vor den Ringen zu sehen ist. Deutlich ist sein »eisiger Atem« erkennbar, der den großen E-Ring mit Material versorgt.

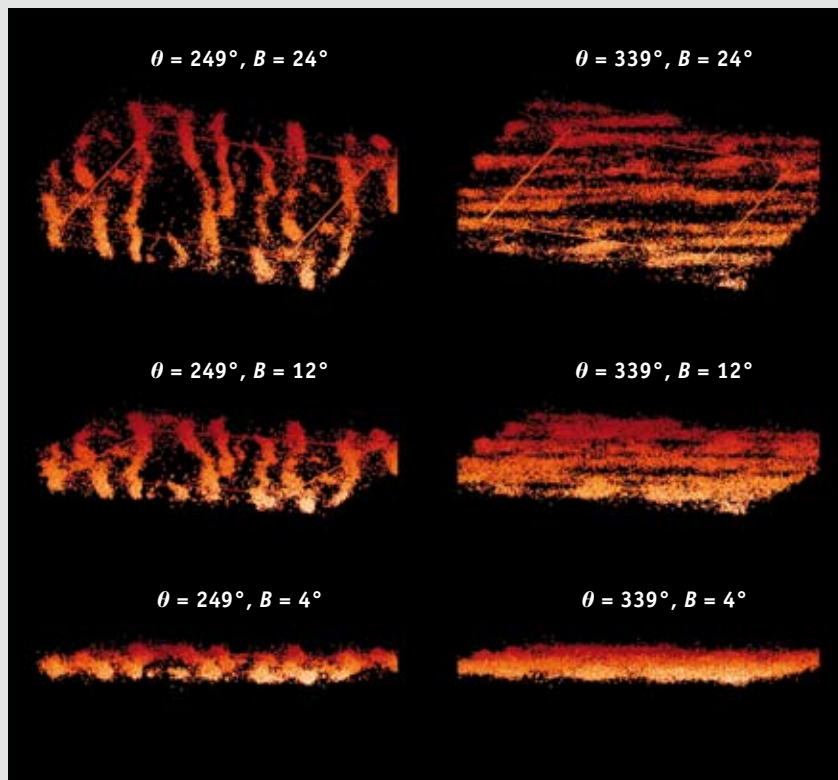


Beide Bilder: NASA/JPL/Space Science Institute

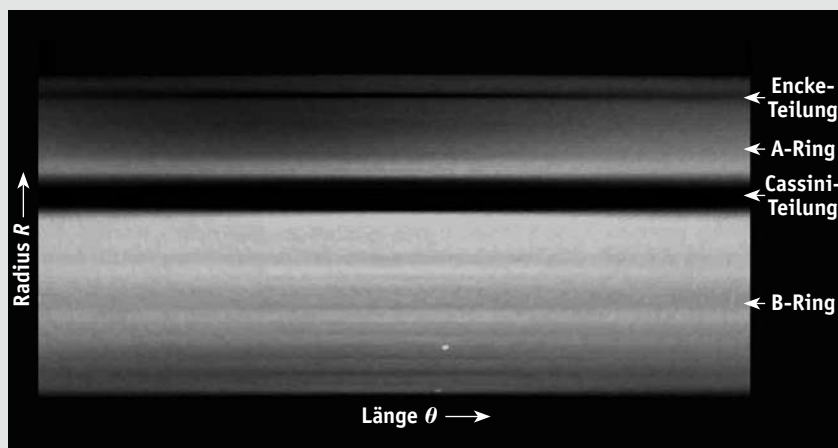
Selbstgravitationsbugwellen in den Ringen A und B

Die gravitativen Instabilitäten der Saturnringe hat Heikki Salo in numerischen Modellrechnungen untersucht. Rechts sind Ergebnisse seiner Rechnungen dargestellt: Eine quaderförmige, $500 \times 500 \times 50$ Meter große Box beherbergt 100 000 metergroße Teilchen und simuliert so die Situation in Saturns A-Ring. Deutlich zeichnen sich die Dichtebugwellen ab, die sich durch die Selbstgravitation entwickeln. Die verschiedenen Bildteile zeigen unterschiedliche Beobachtungsgeometrien – offenbar hängt die Helligkeit des reflektierten Lichtes stark von der Beobachtungsrichtung ab. Die Ausschnitte in den linken und rechten Spalten unterscheiden sich in der azimutalen Länge θ , die drei Reihen zeigen verschiedene Höhen B des Beobachters über der Ringebene. Verglichen mit der rechten Spalte scheinen die linken Bilder mehr Lücken zwischen den Strukturen zu offenbaren – damit können sie weniger Licht pro projizierter Fläche reflektieren. Über den gesamten Ringumfang zwischen 0° und 360° sollten sich deshalb auf Aufnahmen eines Ringes mit solchen Bugwellen helle und dunkle Regionen abwechseln.

Dieser Effekt ist in der Tat in der unten gezeigten Aufnahme des Weltraumteleskops HUBBLE zu erkennen. Hier nimmt der B-Ring den unteren Bildteil ein. In der Bildmitte schließt sich die dunkel erscheinende Cassini-Teilung an. Oben der A-Ring, an dessen oberen Rand die dunkle Encke-Teilung anschließt. Deutlich erkennt man, dass die linke obere Hälfte des A-Rings wesentlich dunkler ist als die rechte Seite. Dieser Effekt wird von den oben dargestellten Selbstgravitationsbugwellen hervorgerufen.



Heikki Salo



NASA/Hubble Heritage Team (STScI/AURA)

Umlauf die mit »Frostschneebällen« dicht gepackte Ringebene passieren. Stöße mit anderen Teilchen wären bei diesen Passagen zwangsläufig die Folge. Dabei wird nach jedem Stoß die vertikale Komponente der Geschwindigkeit geringer. Wie ein Ball, dessen Rückprallhöhe nach jedem Fußbodenkontakt abnimmt, bis er nach kurzer Zeit zur Ruhe kommt, wird das gestörte Ringteilchen schon nach wenigen Umläufen zurück in die Ringebene finden. Daher rührt die extrem geringe Dicke und hohe Dichte der Ringe.

Bei der physikalischen Beschreibung dieser Prozesse sind Analogien zur Thermodynamik molekularer Gase augenscheinlich und lehrreich. So kann man die Bewegung der Ringteilchen mit der von Molekülen eines Gases vergleichen. Den

Abweichungen der Bewegung der Ringteilchen von Kepler-Kreisbahnen in der Äquatorebene lässt sich eine »granuläre Temperatur« zuordnen – wie bei Gasen, bei denen die Temperatur der mittleren kinetischen Energie der erratischen Bewegung der Moleküle entspricht. In diesem Bild bestimmt die »granuläre Temperatur« des Ringes seine Dicke. Beide können nicht beliebig klein werden, denn je »kälter« der Ring ist, desto höher wird dessen Dichte und desto häufiger stoßen die Teilchen miteinander. Das führt wiederum zum Ansteigen der »granulären Temperatur« und somit der Ringdicke.

Demzufolge ergibt sich die Ringdicke, das augenscheinlichste Merkmal der dichten Ringe von Saturn, Uranus und Neptun, aus dem Gleichgewicht zwischen

»Kühlung« der Bewegungsenergie in dissipativen Stößen und »Heizung« durch viskose Kepler-Scherung.

Instabilitäten, Wellen und »Propeller« in dichten Ringen

Neben der beeindruckenden Flachheit der Saturnringe haben die Messungen der VOYAGER-Raumsonden, der aktuell laufenden CASSINI-Mission, aber auch des Weltraumteleskops HUBBLE (HST) eine ganze Welt neuer und unerwarteter Strukturen offenbart. Einige Feinstrukturen und ihre physikalische Beschreibung werden wir jetzt vorstellen: gravitative und viskose Instabilitäten, Wellen und Resonanzen sowie Lücken, Bugwellen und »Propeller«, die von kleinen Moonlets inmitten der Ringe erzeugt werden.

■ Gravitative Instabilitäten – die

»Gravitationsbugwellen«: Oben haben wir grob umrissen, wie die von Gezeitenkräften generierte Scherung die gravitative Zusammenballung (Akkretion) größerer Körper in den Ringen verhindert. Das heißt jedoch nicht, dass die Eigengravitation des Ringes sich nicht in Strukturbildungen äußert – vorausgesetzt, dass genügend Ringmaterial nahe der Ringebene versammelt ist und die Ringregion möglichst weit von Saturn entfernt ist.

Diese Bedingungen sind in der Mitte des A-Ringes bei etwa 130 000 Kilometer Abstand vom Saturn gegeben. Die Massendichte ist dort hoch genug, sodass die Ringteilchen beginnen »Cluster« zu bilden, die jedoch von den Gezeiten geschert, lang gezogen und schließlich in einige hundert Meter lange und um die zehn Meter breite Filamente fragmentiert werden, die man Selbstgravitationsbugwellen nennt. Diese länglichen Strukturen folgen der Bahnbewegung, sind aber infolge des Widerstreits von Scherung und Gravitation um ungefähr 20 bis 25 Grad zur mittleren Bewegungsrichtung innerhalb der Ringebene geneigt. Die (radialen) Abstände zwischen den einzelnen Selbstgravitationsbugwellen sind durch die so genannte Toomre-Wellenlänge gegeben, die für den A-Ring 50 bis 100 Meter beträgt. Selbstgravitationsbugwellen, wie sie Heikki Salo 1992 mit numerischen Experimenten vorhersagte, sind im Kasten auf Seite 30 dargestellt.

Die Existenz der Selbstgravitationsbugwellen konnte sowohl vom HST als auch von einigen CASSINI-Experimenten nachgewiesen werden: Die Neigung der Filamente zu der Richtung der Bahnbewegung beeinflusst entscheidend die photometrischen Beobachtungen, wie diese Modellrechnungen zeigen: Je nachdem, unter welchem Winkel wir den Ring beobachten, sehen wir mehr oder weniger schwarzen Himmelshintergrund. So wird das Licht der Sonne von verschiedenen Regionen des Saturnrings unterschiedlich reflektiert, womit der A-Ring auf unterschiedlichen azimuthalen Längen unterschiedlich hell erscheint. Die azimuthale Helligkeitsasymmetrie des A-Rings, wie sie in der im Kasten gezeigten HST-Aufnahme deutlich zu sehen ist, zeugt damit eindrucksvoll von der Existenz dieser theoretisch vorhergesagten Selbstgravitationsbugwellen.

Auch die von CASSINI durchgeführten Bedeckungsexperimente belegen die azimuthale Variation der optischen Tiefe, die sich nur mit der Existenz der »Gravitationsbugwellen« befriedigend erklären lässt. Bei diesen Bedeckungsexperimenten wird die Helligkeit eines Sterns durch die

»Gardine« der Saturnringe hindurch vermessen. Aus der Absorption des Lichts durch die Ringmaterie, die durch die optische Tiefe charakterisiert ist, kann auf die Flächendichte in den Ringen geschlossen werden. Die experimentelle Bestätigung der Theorie einer marginalen gravitativen Instabilität gestattet die Abschätzung der dynamisch wirksamen Masse im A-Ring, auch wenn die Kameras auf CASSINI die Selbstgravitationsbugwellen nicht direkt auflösen können.

■ **Viskose oszillatorische Instabilitäten:** Ein weiterer Effekt der sehr »beengten« Verhältnisse in den dichten Ringen A und B sind mit der Dichte wachsende Drehimpulstransporte, welche die Strukturierung eines homogenen Rings verursachen. Wie ist das zu verstehen?

Die keplersche Bahngeschwindigkeit des Ringmaterials nimmt mit wachsendem Abstand vom Planeten ab. So benötigen die Ringpartikel im inneren D-Ring (66 900 Kilometer vom Zentrum des Saturn entfernt) für dessen Umrundung nur 4,5 Stunden, die Teilchen im F-Ring in 140 000 Kilometer Abstand dagegen 14 Stunden. Die Umlaufzeiten der weiter außen liegenden Satelliten bemessen sich nach Tagen und Wochen. Diese Abhängigkeit der Bahngeschwindigkeit vom Gravitationszentrum bezeichnet man als differenzielle Rotation.

Wir haben schon erwähnt, dass jedes Ringteilchen pro Umlauf mehr als zehn Mal mit anderen Partikeln stößt, sodass die inneren, schnelleren Ringbrocken

die äußeren, langsameren anrempeln und somit stetig Impuls auf ihre äußeren Nachbarn übertragen. Auf diese Weise wird permanent (Dreh-) Impuls von inneren Ringregionen nach außen transportiert. Analog zu Gasen und Flüssigkeiten kann man von einer Zähigkeit oder Viskosität der Ringe sprechen, womit wieder Parallelen mit der Gaskinetik offenbar werden.

Aus einem Wechselspiel dieser viskosen, durch Teilchenstöße verursachten Impulstransporte mit Trägheitskräften, vornehmlich der Corioliskraft, resultieren Wellen, die den Ring radial durchlaufen. Die Transporte in planetaren Ringen sind ein komplexes Problem der statistischen Physik, jedoch kann man vereinfachend annehmen, dass dieser Impulsfluss mit der Dichte wächst. Analytische und numerische Untersuchungen dieses Effekts haben gezeigt, dass Ringe mit optischen Tiefen $\tau \approx 1$ (Flächendichte um die 1000 Kilogramm pro Quadratmeter) spontan solche radialen Oszillationen ausbilden. Diese Bedingungen sind in Saturns B-Ring gegeben, wo man viskose Oszillationen mit einer typischen Wellenlänge von 130 Metern erwartet.

Die Abbildung 4 zeigt Bildausschnitte von Simulationen, die aus einer Arbeit meines Kollegen Jürgen Schmidt und unseres Partners Heikki Salo von der Universität Oulu in Finnland stammen [1]. Hier treten sowohl die axialsymmetrischen viskosen Oszillationen als auch die Selbstgravitationsbugwellen in Erscheinung. Auch wenn sich die beiden von In-

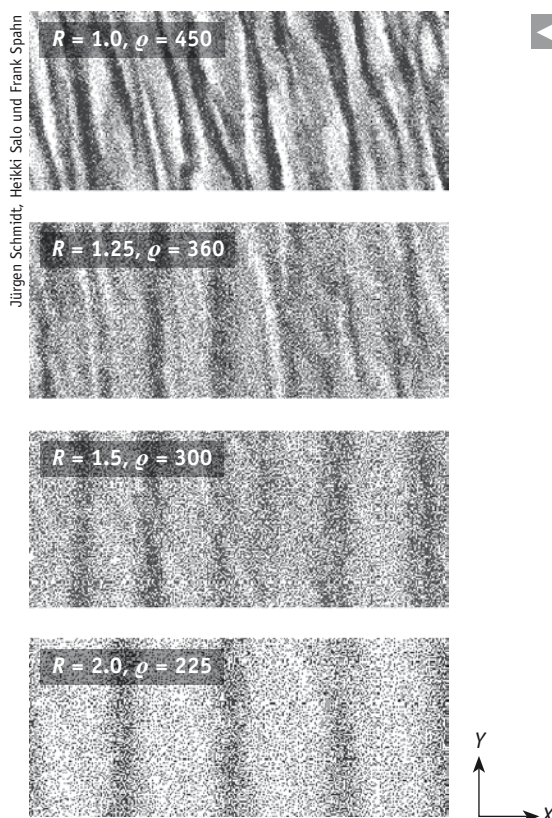


Abb. 4: Numerisch berechnete Teilchendichten nach Simulationen von Jürgen Schmidt, Heikki Salo und dem Autor zu den oszillatorischen Instabilitäten in dichten planetaren Ringen. Die Simulationsbox misst 583×233 Meter und beherbergt zwischen 16 000 und 60 000 Teilchen. Die vier verschiedenen Paneele gehören zu Simulationen mit unterschiedlichen Massendichten der Teilchen, sodass von oben nach unten der Einfluss der Selbstgravitation immer schwächer wird. Im oberen Ausschnitt kann man deutlich die um 23 Grad geneigten Bugwellen erkennen, unten markieren die vertikalen Streifen die viskosen Oszillationen. Der Planet liegt in Richtung minus X , die Bahnbewegung weist in Richtung Y .

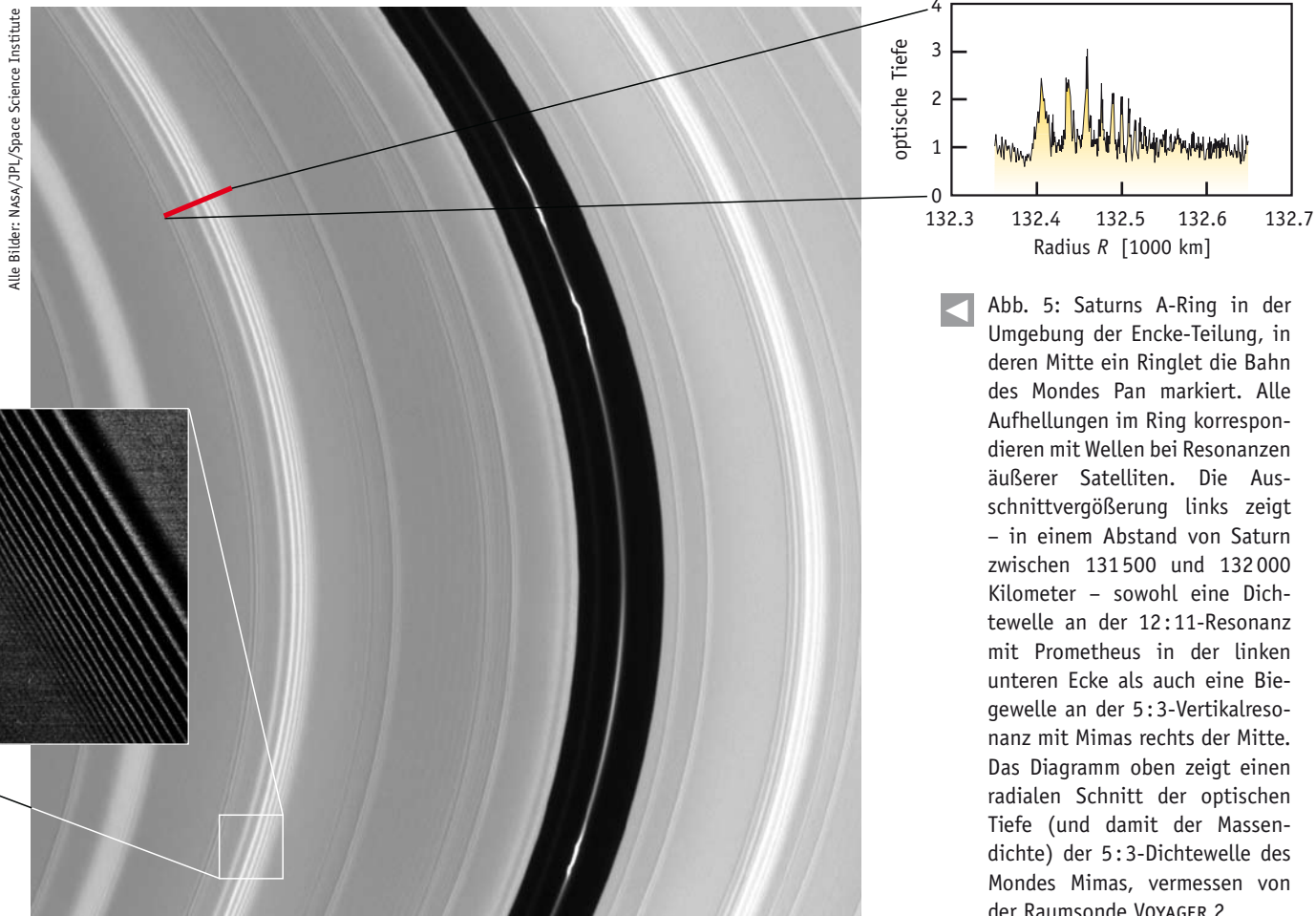


Abb. 5: Saturns A-Ring in der Umgebung der Encke-Teilung, in deren Mitte ein Ringlet die Bahn des Mondes Pan markiert. Alle Aufhellungen im Ring korrespondieren mit Wellen bei Resonanzen äußerer Satelliten. Die Ausschnittvergrößerung links zeigt – in einem Abstand von Saturn zwischen 131 500 und 132 000 Kilometer – sowohl eine Dichtewelle an der 12:11-Resonanz mit Prometheus in der linken unteren Ecke als auch eine Biegewelle an der 5:3-Vertikalresonanz mit Mimas rechts der Mitte. Das Diagramm oben zeigt einen radialen Schnitt der optischen Tiefe (und damit der Massendichte) der 5:3-Dichtewelle des Mondes Mimas, vermessen von der Raumsonde VOYAGER 2.

stabilitäten hervorgerufenen Strukturen überlagern, wurden die radialen viskosen Wellen in Saturns A- und B-Ring jüngst durch Messungen von Sternbedeckungen mit dem CASSINI-Experiment RSS (Radio Science System) nachgewiesen.

Aus der Analyse der viskosen Oszillationen in den CASSINI-Daten kann man nun den Ringen weitere Geheimnisse entlocken: So wie die Selbstgravitationsbugwellen auf die beteiligte Masse in einer Ringregion hinweist, ermöglichen die viskosen Wellen eine Abschätzung der mechanischen Eigenschaften der Teilchen beim Stoß sowie der »granularen Viskosität« des Ringflusses – genügend Herausforderungen für die verbleibende Zeit der CASSINI-Mission in Sachen Saturnringe.

■ **Wellen und Resonanzen:** Bislang war nur davon die Rede, welche Strukturen ein dichter Ring unter bestimmten Bedingungen spontan entwickelt. Nun ist aber bekannt, dass Saturn von wenigstens 60 Monden umkreist wird, von denen einige recht massereich sind. Auch wenn die meisten dieser Trabanten den Planeten fern der Ringe umrunden, tragen sie wegen ihrer relativ großen Massen entscheidend zur Ausbildung von Ringstrukturen bei. Warum diese von Monden generierten Dichtemerkmale sich jedoch nur

bei ganz bestimmten radialen Abständen vom Saturn in den Ringen entwickeln können, und nicht gleichermaßen überall, wollen wir jetzt erläutern.

Die Ursache ist wieder in der differenziellen Rotation zu suchen. In der Vielzahl der Umlaufzeiten m von Ringteilchen und n von Monden sind gerade jene für die Strukturbildung in den Ringen bedeutsam, die zueinander in einem ganzzahligen Verhältnis stehen ($m:n$, beides ganze Zahlen). Ein Beispiel soll das veranschaulichen: Die Ringteilchen, welche die Außenkante des B-Ringes und die Innenkante der Cassini-Teilung im Abstand von 117 500 Kilometern bevölkern, benötigen exakt halb soviel Zeit wie der Mond Mimas (Abstand zu Saturn: 185 520 Kilometer). Die Umlaufzeiten von Mond und Ringteilchen stehen dort genau im Verhältnis 2:1, weshalb diese Region als 2:1-Resonanz des Mondes Mimas bezeichnet wird.

Warum ist nun die Ganzzahligkeit dieses Verhältnisses so bedeutsam für die Ausbildung von Strukturen in den Ringen? Das wollen wir am Beispiel einer Kinderschaukel (periodisch getriebenes Pendel) veranschaulichen.

Vor meinem geistigen Auge sehe ich meinen Enkel, der von seinem geduldigen Großvater auf der Schaukel zu vergnüglichen Höhenflügen getrieben wird. Der

Spaß ist für den Enkel jedoch schnell vorbei, wenn die Schaukel nicht immer wieder bei der gleichen Phase der Bewegung den gewünschten Schubs bekommt. Mit anderen Worten, die Eigenschwingung des Systems Enkel plus Schaukel muss mit der großväterlichen Anschubfrequenz synchron sein. Dabei kommt es nicht darauf an, ob ich dem Bengel bei jeder Schwingung oder nach jeder zweiten, dritten oder auch nach unregelmäßigen, aber ganzzahligen Schwingungsvorgängen den gewünschten sanften Kick gebe. Wesentlich ist nur, dass es immer an der gleichen Phase des Schwingungsvorgangs geschieht. Das wird bei der Schaukel ebenso wie bei den gestörten Ringen von der Ganzzahligkeit der involvierten Perioden garantiert. Bei Schwingungsvorgängen allgemein, und speziell bei den Störungen in planetaren Ringen, spricht man in solchen Fällen von Resonanz.

An Resonanzstellen in planetaren Ringen können vielfältige Reaktionen der Teilchen auftreten, was wiederum vom Typ der Resonanz abhängt. Das ist ein komplexes, weites Feld, und wir können die Ursachen dieser Vielfalt hier nur andeuten. Schuld an der Diversität ist Saturn selbst, der keine perfekte Kugel ist, sondern ein abgeplattetes Rotationsellipsoid. Infolgedessen kommen für verschiedene Raumrichtungen leicht ver-

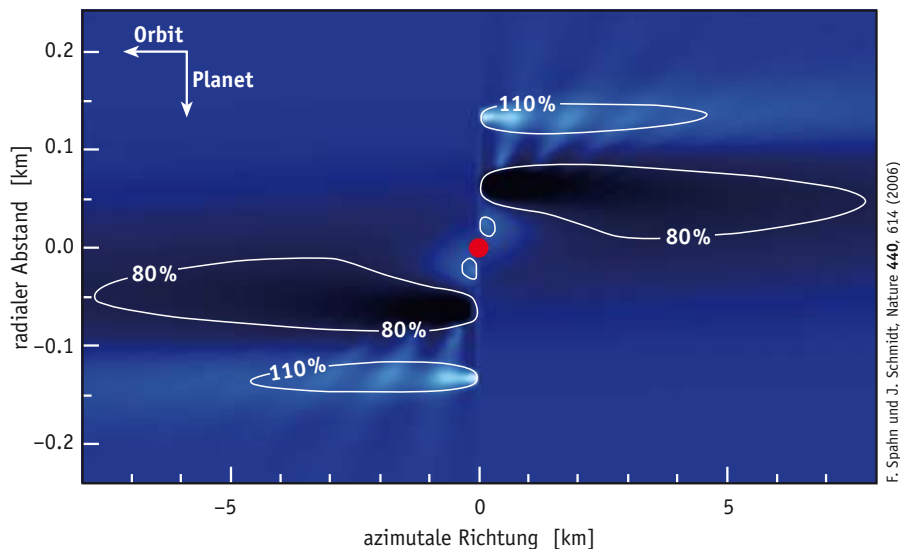


Abb. 6: Die Propellerstruktur, verursacht von einem einige Hundert Meter großen Moonlet (roter Punkt in der Bildmitte). Dieses Kennzeichen eines Moonlets ist das Resultat theoretischer Untersuchungen. Die Materiedichte ist farblich kodiert: Hellblau bis Weiß kennzeichnet hohe Dichte, Schwarz steht für materiefreie Regionen. Für kilometergroße Kleinmonde reichen die dunklen Dichteverarmungen um den ganzen Ring, und es entsteht eine Lücke, die in der Mitte von einem Ringlet durchbrochen wird (vgl. Abb. 5).

stimmte Bahnfrequenzen ins Spiel, die im Falle eines kugelförmigen Planeten alle gleich sind.

Der Zoo der Strukturen an den Resonanzen beherbergt viele Spezies: Lücken, eng begrenzte schmale Ringe, Ringbögen (F- und G-Ring Saturns, Neptun-Ringe, siehe Abb. 1) – und nicht zuletzt *Dichte- und Biegewellen*. Letztere sind das Ergebnis eines Wechselspiels der Selbstgravitation mit Trägheitskräften, vornehmlich der Corioliskraft.

Dichtewellen werden an den Resonanzen durch laterale, in der Ringebene liegende Gravitationsstörungen des Mondes generiert und stellen räumlich und zeitlich periodische Veränderungen der Dichte dar.

Biegewellen werden von der vertikalen Komponente der Gravitationskraft des störenden Mondes angeregt und sind Schwingungen der vertikalen Auslenkung des Rings aus der Äquatorialebene (Abb. 5). Man kann sich das vielleicht wie die Verbiegungen einer Hutkrempe vorstellen.

Beide Wellentypen formen eng gewundene Spiralen im Ring – ähnlich den Armen der Spiralgalaxien, deren physikalisches Fundament das gleiche ist. Die Ausbreitungsrichtungen der Dichte- und der Biegewellen sind gegenläufig: Erstere streben vom Saturn weg, letztere bewegen sich auf ihn zu. In beiden Fällen nimmt die Wellenlänge mit dem Abstand von der Resonanz ab (Abb. 5), wobei sie zudem noch von der Dichte abhängt. Deshalb bietet das Vermessen der Wellenlängen der Dichte- und Biegewellen eine weitere Möglichkeit, die Dichte und schließlich die Masse der Ringe zu bestimmen.

Die Abbildung 5 zeigt die beiden Wellenarten, wie sie von Prometheus an der 12:11-Resonanz beziehungsweise von Mimas an der vertikalen 5:3-Resonanz angeregt werden. Links unten in der Ausschnittsvergrößerung sehen wir die von

Prometheus verursachte Dichtewelle; die Bildmitte und die obere Hälfte werden von der Mimas-Biegewelle eingenommen. Der gesamte A-Ring ist durchzogen von Wellen (die helleren Regionen im großen Bild), da sich dort die Resonanzstellen der äußeren Monde häufen – sie sind das bestimmende Strukturmerkmal des A-Rings.

■ **Ringlets, Lücken, Bugwellen und »Propeller«:** Die große Zahl der Trabanten des Saturn und deren zahlenmäßige Häufung in Ringnähe lassen vermuten, dass auch inmitten der Ringe Kleinmonde (Moonlets – übersetzt »Möndlein«) versteckt sein sollten. Ihre geringe Größe (50 Meter bis wenige Kilometer) und die große Helligkeit der Ringe erschweren die direkte visuelle Entdeckung solcher Körper. Deshalb haben wir uns eines Tricks bedient und Strukturen berechnet, die

von eventuell vorhandenen Moonlets in die Ringe eingraviert werden könnten. Im Ergebnis dieser Studien wurde der in der Überschrift dieses Abschnitts angegebene Katalog von Merkmalen gefunden, welcher das Aufspüren von Moonlets erleichtert oder gar erst ermöglicht.

Die Physik der Störung des Rings durch eingebettete Moonlets ist im Wesentlichen vom Widerstreit zweier Prozesse bestimmt: (1) der *gravitativen Streuung* des Ringmaterials durch die Moonlets und (2) der *viskosen Diffusion* der Ringteilchen. Während ein Kleinmond bestrebt ist, Strukturen in den Ringen zu generieren (Prozess 1), versucht die durch Teilchenstöße hervorgerufene viskose Diffusion (Prozess 2) jede Dichtestörung auszugleichen.

Prozess 1, gravitative Streuung: Der Einfluss des Moonlets auf die Ringteilchen wird vom Dreikörperproblem beschrieben.

GALILEO

Ihr Spezialist für Astronomie

TeleVue 13/13 Celebration!

13 Wochen - 13% Rabatt
auf alle TeleVue Okulare und Barlowlinsen
(ausser Ethos)

z.B. Nagler Okulare:
31 mm nur 851 CHF (515 EUR)
20 mm nur 605 CHF (366 EUR)
2.5-11 mm je nur 389 CHF (235 EUR)

**Die Revolution auf dem
Okularmarkt: TeleVue Ethos
13 mm, 100° Gesichtsfeld**

Ein unvergessliches
Beobachtungserlebnis.
Genießen Sie den einmaligen
„Space-Walk-Effekt“.

949 CHF (574 EUR)

Qualität
Service
Preisgünstig

**Neue Kamera von SBIG:
ST-4000XCM**

SBIG stellt neue One-Color-Shot
Kamera vor: Der ideale
Einstieg in die CCD-Fotografie!
Folgende Features erwarten Sie:

- 4.2 Megapixel
- 2048 x 2048 pixels - 7.4 micron
- Selfguiding: Kein Leitrohr nötig!
- Farbchip
- Mech. Shutter für Darkframes
- Geregelte Kühlung
- USB-Anschluss
- Stabiler Transportkoffer
- Inkl. umfangreichem Softwarepaket
- Optional mit Adaptiver Optik erhältlich

**5349 CHF
(3240 EUR)**

www.galileo.cc • info@galileo.cc

Limmattalstr. 206 • 8049 Zürich • Tel.: + 41 (0)44 340 23 00 • Fax: + 41 (0)44 340 23 02
Rue de Genève 7 • 1003 Lausanne • Tel.: + 41 (0)21 803 30 75 • Fax: + 41 (0)21 803 30 77

Preis inkl. 7,7% MwSt. Angaben in EUR dienen nur zu Informationszwecken, Deckung erfolgt bei Zahlung. Preis- Angaben sind Abbildungen, ohne Gewähr. Ausdrucken ohne Voreinstellung vorbehalten.

ben, das zu den Dauerbrennern der mathematischen Physik gehört. Seit Henri Poincaré (1854–1912) wissen wir, dass dieses Problem ungeahnte dynamische Komplexität in sich birgt: Reguläre, periodische Bewegung in einigen Gebieten des Phasenraums (der Raum der Orte und Impulse der Teilchen) werden kontrastiert von chaotischen Regionen – zum Beispiel in der Nähe der Moonlets, wo sich Resonanzen radial dicht drängen. Für ein Moonlet gegebener Masse existiert ein radialer Abstand von seiner Bahn, innerhalb dessen sich Resonanzen überlappen und sich Teilchen chaotisch bewegen. Geringste Veränderungen der Anfangsbedingungen haben drastische Auswirkungen, sodass die Trajektorien anfänglich benachbarter Teilchen im Phasenraum exponentiell mit der Zeit auseinanderstreben. In dieser Region versucht das Moonlet eine Zone nahe seiner Bahn freizufegen. In größerem radialen Abstand vom Mond vollführen die Teilchen reguläre radiale Oszillationen, die sich in *Dichtebugwellen* (Abb. 6 und 7) äußern. In unmittelbarer Nähe der Bahn des Moonlets findet man ebenfalls reguläre periodische Bahnen – so genannte »Hufeisenbahnen«. Diese Ringteilchen teilen sich die Bahn mit dem Moonlet.

Ohne den Einfluss der Teilchenkollisionen würde ein Kleinmond also folgende Strukturen generieren: (a) ein schmales »Ringlet« direkt auf der Moonlet-Bahn, (b) *Lücken* beziehungsweise Gebiete verminderter Dichte, die das Ringlet umgeben, und (c) *Dichtebugwellen* an den Rändern der Lücke. Die räumliche Ausdehnung dieser Strukturen – Ringlet, Lücke und Bugwellen – hängt von der Masse des Moonlets ab [2]. Ob sich die Teilchenverarmungszonen (b) zu Lücken auswachsen, die den ganzen Ring durchziehen, wird außer von der Moonletmasse auch von der Viskosität in den Teilchenringen (Impulstransport durch Stöße) bestimmt:

Prozess 2, viskose Diffusion: Nun werden die vom Moonlet dem Ring aufgeprägten Strukturen (a) bis (c) von der oben beschriebenen differentiellen Rotation in azimuthaler Richtung weiter transportiert. Zugleich suchen Stöße zwischen den Teilchen und die daraus resultierende Ringviskosität jegliche Dichteinhomogenitäten zu egalisieren. Sie erzeugen eine zufällige Komponente der Teilchenbewegungen, die letztlich eine Diffusion in radialer Richtung bewirken. Über welche Distanz in azimuthaler Richtung die »Löcher« dem Diffusionsprozess standhalten, hängt ab vom Verhältnis der Moonletmasse zur Ringviskosität: Je massereicher das Moonlet oder je weniger viskos das Ringmaterial ist, desto

größer wird die Struktur, die das Moonlet im Ring erzeugt.

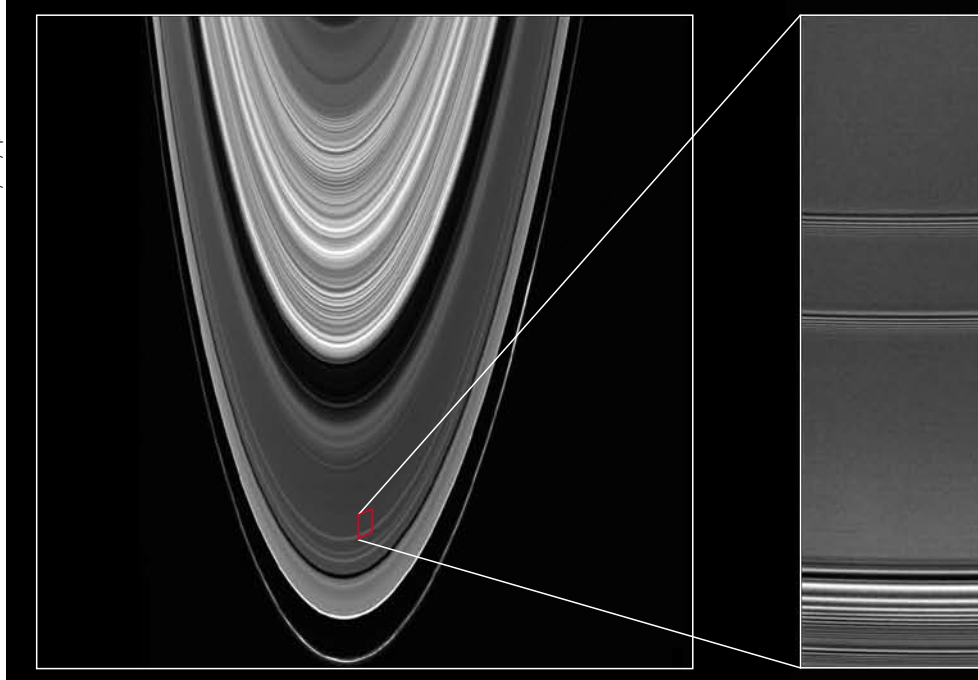
Ein Eismond von einem Kilometer Größe ist nach unseren Rechnungen in der Lage, eine bleibende Lücke in die Ringe zu reißen, an deren Rändern Bugwellen die Bewegung des Moonlets begleiten, und die zudem von einem Ringlet geteilt ist [3]. Ist das Moonlet kleiner (zwischen 50 und 800 Meter groß), so reicht die Lücke nicht um den gesamten Ring herum, und die Struktur ähnelt einem »Propeller« (Abb. 6 und 7). Daten der Raumsonden VOYAGER und CASSINI bestätigten die Existenz solcher Moonlets im A- und im F-Ring Saturns.

Zwei größere Teilungen zerschneiden Saturns A-Ring: die 320 Kilometer breite Encke-Teilung und die etwa 38 Kilometer breite Keeler-Lücke (Abb. 7). Beide Strukturen zeigen an ihren Rändern die vorhergesagten Bugwellen – deutlich sichtbare Hinweise auf eingebettete Monde. Für die Encke-Teilung ist der 25 Kilometer große Ringmond Pan verantwortlich, den Mark R. Showalter aufgrund der Bugwellen an den Rändern der Teilung vorhergesagt und danach in VOYAGER-Bildern gefunden hatte [4]. Auch ein »Ringlet« nahe der Bahn von Pan ist auf den Abbildungen 5 und 7 zu erkennen und untermauert dessen Existenz. Weitere Ringlets in der Encke-Teilung legen die Vermutung nahe, dass dort noch mehrere Moonlets existieren. Die kleinere, ungefähr 38 Kilometer breite Keeler-Teilung wird von dem sieben Kilometer großen Mond Daphnis gegraben, der im Mai 2005 anhand der CASSINI-Bilder aufgespürt wurde. Rechts in Abbildung 7 ist ein Schnappschuss der dynamischen Aktivitäten von Daph-

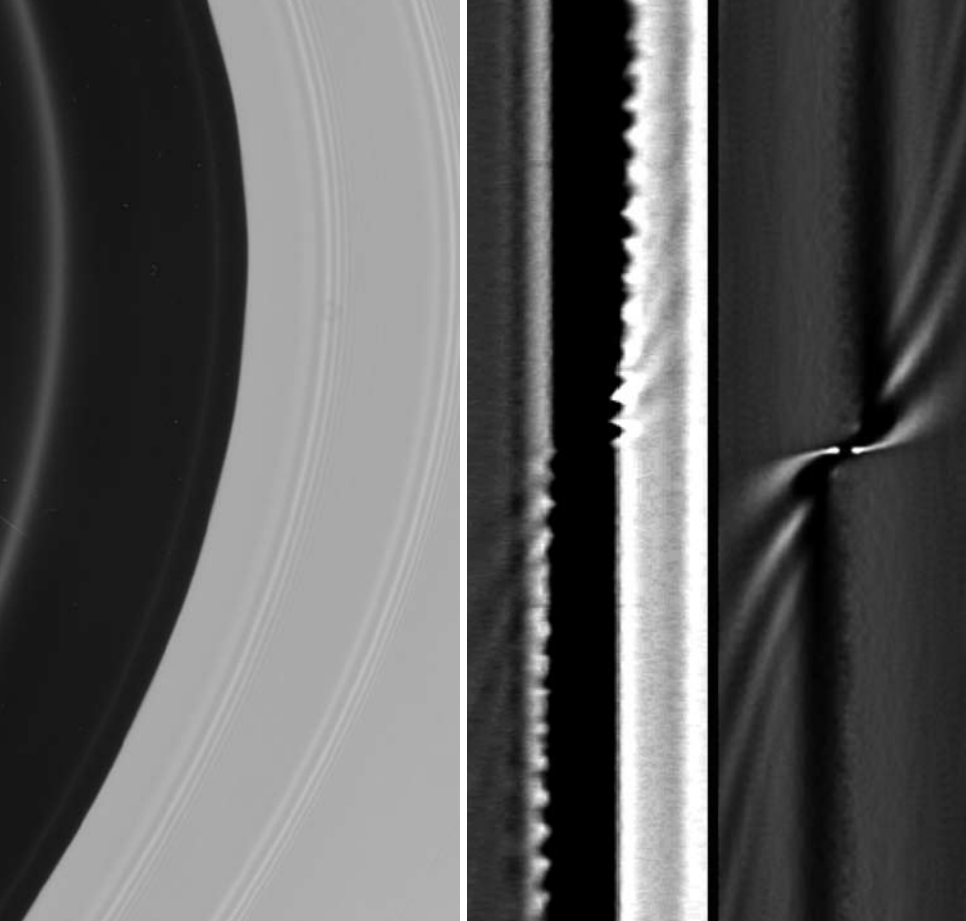
nis im Vergleich mit Resultaten theoretischer Simulationen zu sehen.

Das sind aber nicht die einzigen größeren Ringobjekte. Die Auflösung der Aufnahmen, die CASSINI bei ihrer Ankunft am Saturn im Juli 2004 von den Ringen gewann, reichte aus, um im A-Ring vier »Propeller«-Strukturen nachzuweisen [5]; siehe Abb. 8). Sie deuten auf Moonlets von etwa 50 Meter Größe (wenn man annimmt, dass sie aus Eis bestehen). Die Auswertung späterer CASSINI-Aufnahmen vergrößerte die Familie der Moonlets im Größenbereich von 60

Alle Bilder: NASA/JPL/Space Science Institute



Links und Mitte: NASA/JPL/Space Science Institute; rechts: M. Seiß



◀ Abb. 7: Ganz links ist ein Ausschnitt der 320 Kilometer breiten Encke-Teilung mit dem inneren Ringlet dargestellt, das die Bahn des Mondes Pan markiert. Neben vier Dichtewellen kann man auf dieser CASSINI-Aufnahme ausgedehnte Wellenstrukturen an der linken inneren Kante der Encke-Teilung erkennen. Diese vom 25 Kilometer großen Mond Pan angeregten Dichte-Bugwellen bedecken ein weit größeres Areal des A-Ringes, als es eine einzelne Dichtewelle vermag. Das mittlere Bild zeigt einen Teil der Keeler-Lücke, die ebenfalls Moonlet-verdächtige Wellenphänomene aufweist; in der Tat wurde dort im Mai 2005 auf CASSINI-Bildern der sieben Kilometer große Mond Daphnis entdeckt. Diesen Aufnahmen ist ganz rechts eine Computersimulation einer Propellerstruktur gegenübergestellt, die aus einer Arbeit unseres Kollegen M. Seiß stammt.

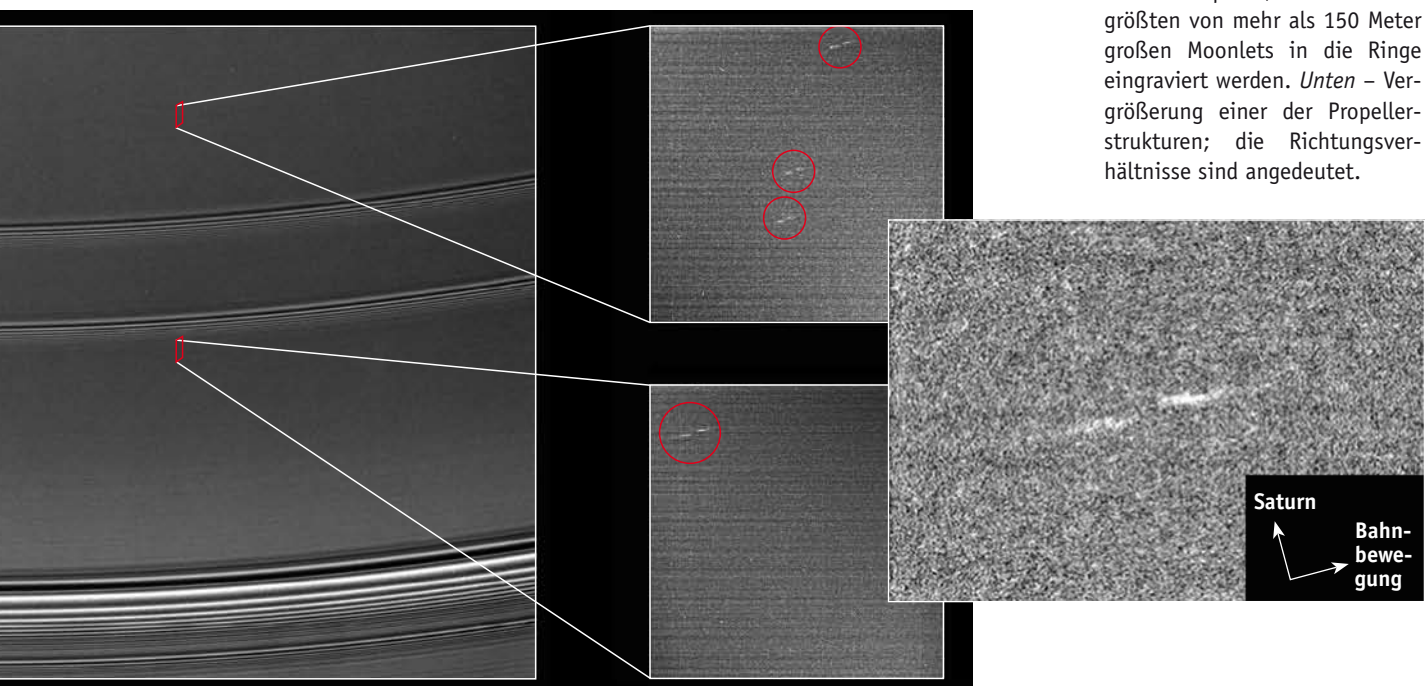
bis 150 Metern auf mehr als ein Dutzend [6]. Mehr noch: Allerneueste Untersuchungen erhöhten diese Zahl auf weit über hundert [7].

Ein erstaunlicher Beobachtungsbe- fund ist, dass alle diese wolkenkratzer- großen Moonlets in einem schmalen, nur etwa 3000 Kilometer breiten Abstands- bereich von Saturn gefunden wurden. Unsere Abschätzungen ergeben, dass ei- nige zehn Millionen solcher Brocken den A-Ring bevölkern, und dass deren Exis- tenz auf ein bestimmtes Szenario der Entstehung der Ringe hinweist.

Wann und wie entstanden die Ringe?

Man könnte annehmen, dass die vier be- kannten Ringsysteme zusammen mit den Planeten entstanden und somit Zeu- gen der Ära der Planetenentstehung sind. Allerdings deuten die Zeitskalen der ab- laufenden physikalischen Prozesse auf ein deutlich geringeres Alter. Da ist vor allem der stetige Strom von Meteoriten, kosmischer Strahlung und Plasma, der das Ringmaterial in einem Zeitraum von zehn bis 100 Millionen Jahren erodiert. Hinzu kommen die Teilchenstöße, bei

▼ Abb. 8: *Links* – Lage der vier zu- erst entdeckten »Propeller« im A-Ring. Im mittleren Vergröße- rungsausschnitt sind drei Dich- tewellen sehr schön zu erken- nen. In der nächsten Vergröße- rung am rechten Rand sind die vier Propeller deutlich sichtbar. Sie werden von 50 Meter gro- ßen Moonlets erzeugt. Inzwi- schen kennen wir mehr als ein Dutzend solcher Propeller, von denen die größten von mehr als 150 Meter großen Moonlets in die Ringe eingraviert werden. *Unten* – Ver- größerung einer der Propeller- strukturen; die Richtungsver- hältnisse sind angedeutet.



denen Deformation oder auch Fragmentation der Ringteilchen auf Kosten der mechanischen Energie des Ringstroms gehen. Dadurch verringert sich die Bahnenergie der Teilchen, wodurch ständig Ringmaterie auf den Planeten niedergeht. Seit der Entstehung der Planeten hätte allein dieser Dissipationsstrom den Saturnring arg dezimiert. Seine Lebensdauer verringert sich zusätzlich durch die kosmische Erosion. Fazit: Die Ringe müssen wesentlich jünger als die Planeten und das Sonnensystem sein.

Deshalb kommt eine »gewaltsame Geburt« in Betracht, bei der ein kosmisches Projektil – ein Komet oder Asteroid – einen Eismond der Größe von Mimas oder Enceladus trifft und diesen in seine Bestandteile zerlegt. Die jüngst entdeckten wolkenkratzergroßen Ringbrocken könnten Beleg für eine solche kosmische Katastrophe sein. Warum? Eingangs haben wir erklärt, dass durch Akkretion keine Körper größer als einige zehn Meter entstehen können – die Gezeitenkräfte verhindern deren Wachstum. Der Nachweis solcher und noch größerer Moonlets legt den katastrophalen Einschlag als Ringentstehung nahe. Dabei können sehr wohl größere Bruchstücke bis zur Größe des Projektils entstehen.

Besonders interessant erscheint die Tatsache, dass alle bisher gefundenen Propeller-Moonlets in einem schmalen radialen Abstandsbereich um 130 000 Kilometer im A-Ring gefunden wurden. Diese radiale Konzentration lässt sich nicht durch

eine einzige ursprüngliche Katastrophe erklären – eine solche würde eine nahezu homogene radiale Verteilung der großen Trümmer erzeugen; vielmehr weist sie auf eine bestimmte Erosionskaskade hin, die mehrere Stufen durchlaufen hat.

Die Tatsache, dass die »Wolkenkratzer« am stärksten durch Meteoriteneinschläge gefährdet sind, legt folgende zeitliche Entwicklung der Ringe nahe: Anfänglich wird ein 400 bis 500 Kilometer großer Mond durch den katastrophalen Einschlag eines Meteoriten in nur mäßig kleinere Bestandteile zerlegt. Diese großen Trümmer bilden den primordialen Ring; die heutigen fünf bis 50 Kilometer großen Ringmonde stellen die zweite Generation dar – sozusagen die Brüder von Pan, Daphnis und Atlas. Durch ihre geringere Größe sind sie gegen Meteoritenprojekte etwas weniger resistent als der Ursprungsmond und werden innerhalb von einigen zehn bis hundert Millionen Jahren weiter erodiert, wobei Wolkenkratzer-Moonlets als größte Reste übrig bleiben. Jene sind aber die Körper in den Ringen, die am gefährlichsten leben und deren Lebensdauer am geringsten ist.

Ein mehrere tausend Kilometer breiter Gürtel, der solche Moonlets beherbergt, ist Beleg für eine solche zeitliche Erosionskaskade. Denn die Zerstörung eines der größeren »Brüder Pans«, der zuvor eine mehrere tausend Kilometer breite Lücke frei fegte, wird diese mit Ringmaterial, darunter auch mit mehreren Wolkenkratzer-Moonlets auffüllen. Genau dies wurde jüngst von den Kameras auf CASSINI in Saturns A-Ring beobachtet [6]. Daher glaubt man heute, dass planetare Ringe Reste von vor nicht allzu langer Zeit zerstörten Monden sind und keine Überbleibsel der Planetenentstehung.

Trotz dieser von der Planetenentstehung entkoppelten Entstehungsgeschichte der Ringe gestattet deren Erforschung interessante Einblicke in die Akkretion von Planeten um junge Sterne. So zeigen die CASSINI-Beobachtungen des F-Rings zahlreiche helle Verklumpungen, die sich erratisch im Ring bewegen, sich aber nach geraumer Zeit infolge starker Gezeitenkräfte wieder auflösen. Zudem wird in diesem äußeren Ring eine größere Zahl Moonlets vermutet, die dort allerdings keine Propellerstrukturen generieren können, da zahlreiche Störungen – vor allem durch die Ringhirten Prometheus und Pandora – das Teilchenensemble in der Region gehörig durcheinander bringen. Die beiden Monde Prometheus und Pandora eskortieren den schmalen F-Ring – man bezeichnet sie deshalb auch als Hirten oder Hüter des F-Ringes.

Ansätze zur Bildung größerer Körper sind im F-Ring und auch im G-Ring klar

erkennbar, aber sie erreichen nicht die kritische Masse, bei der die Körper erhalten bleiben. Beide Ringe liegen an der Demarkationsgrenze zwischen Ringen und größeren Monden und werden deshalb beständig zwischen Akkretion und Fragmentation hin und her gerissen.

Ähnlichkeiten mit den präplanetaren Scheiben

Ähnliche Prozesse vermutet man in präplanetaren Scheiben, nur mit dem Unterschied, dass dort die vergleichsweise große Entfernung vom Zentralkörper die zerstörende Wirkung der Gezeiten mildert und sich deshalb planetare Objekte bilden können [8, 9]. Die Gaskomponente in präplanetaren Scheiben begünstigt zusätzlich durch ihren dissipativen Charakter die Akkretion gegenüber den Fragmentationsprozessen und somit die Bildung von Planeten.

Hat sich ein Planetenembryo gebildet, so ähnelt das System Stern plus Scheibe plus Protoplanet einem planetaren Ring, der ein Moonlet beherbergt. Man kann deshalb erwarten, dass ein heranwachsender Planetenembryo zunächst die »Propellerphase« durchmacht, bevor er groß genug ist, um eine die ganze Scheibe umfassende Lücke zu reißen. Der Übergang von der »Propellerphase« zur umfassenden Lücke markiert einen wichtigen Moment der Planetenakkretion, denn sobald sich die Lücke gebildet hat, ist der Planetenembryo vom Materialnachschub abgeschnitten. Er sollte deshalb schon in der ersten Phase seines Wachstums genügend Material gesammelt haben, um auch durch die Lücke hindurch weiter erfolgreich der Scheibe Materie zu entziehen. Wir haben abgeschätzt, dass im frühen Sonnensystem ein »Proto-Jupiter« mit einer Masse um die zehn Erdmassen »Propeller«-Strukturen erzeugt, und dass sich daraus bei weiterem Wachstum eine Lücke entwickelt.

In jedem Fall ist zu erwarten, dass Protoplaneten deutliche Strukturen in die Scheibe schreiben. Deshalb sollte es in Zukunft mit leistungsfähigeren Teleskopen gelingen, solche Lücken oder gar »Propeller« aufzulösen, sodass wir praktisch in der Lage wären, den jungen Planeten beim Wachsen zuzuschauen – eine verlockende Perspektive. □

Literaturhinweise

- [1] H. Salo et al., *Icarus* **153**, 295 [2001]
- [2] F. Spahn und H. Sponholz, *Nature* **339**, 607 [1989]
- [3] F. Spahn und M. Sremčević, *A&A* **358**, 368 [2000]
- [4] M.R. Showalter, *Nature* **351**, 709 [1991]
- [5] M.S. Tiscareno et al., *Nature* **440**, 648 [2006], F. Spahn und J. Schmidt, *Nature* **440**, 614 [2006]
- [6] M. Sremčević et al., *Nature*, im Druck
- [7] M.S. Tiscareno et al., *AJ*, eingereicht
- [8] Sebastian Wolf, Hubert Klahr: Planetenentstehung – am Himmel beobachtet, im Computer verstanden. *SuW* 2/2006, S. 22–30
- [9] Jakob Staudé: Planeten: Turbulente Geburt in der Scheibe. *SuW* 11/2007, S. 21



Frank Spahn lehrt und forscht an der Universität Potsdam. Er ist Mitglied der Arbeitsgruppe Nichtlineare Dynamik am Institut für Physik und des Cosmic Dust Analyzer Teams der CASSINI-Mission.

WISSEN SIE SCHON, WAS 2008 ZU BIETEN HAT?



DER HIMMEL 2008

Der Himmel 2008 entstand in Zusammenarbeit mit dem S. Fischer Verlag und zeigt alle astronomischen Highlights 2008 im Überblick. Nach Monaten geordnet, geeignet für Einsteiger ebenso wie für erfahrene Hobbyastronomen. Mit umfangreichem Kartenmaterial ausgestattet und durchgehend farbig, ist **Der Himmel 2008** hauptsächlich auf die praktischen Aspekte der Himmelsbeobachtung ausgerichtet. ISBN 978-3-596-17529-1; ca. 200 Seiten; DIN A5; € 12,95 (zzgl. Porto)

KALENDER »HIMMEL UND ERDE 2008«

Astronomen präsentieren im Bildkalender **Himmel und Erde 2008** ihre schönsten Aufnahmen und lassen Sie an den fantastischen Möglichkeiten der modernen Naturbeobachtung teilhaben. Zusätzlich bietet er wichtige Hinweise auf die herausragenden Himmelsereignisse 2008 und erläutert auf einer Extraseite alle auf den Monatsblättern des Kalenders abgebildeten Objekte knapp und anschaulich. 14 Seiten; 13 farbige Großfotos; Spiralbindung; Format: 55 x 45,5 cm; € 29,95 zzgl. Porto; als Standing Order € 27,- inkl. Inlandsversand; ISBN 978-3-411-12685-9



AHNERTS ASTRONOMISCHES JAHRBUCH 2008

Im Zeitschriftenformat enthält das Standardwerk für Hobbyastronomen alle wichtigen Informationen über die Himmelsereignisse 2008, versehen mit Tabellen, Diagrammen und einem reichhaltigen Hintergrundwissen. So können Sternfreunde Monat für Monat ihre eigenen Beobachtungen planen und auswerten. Zudem erhalten Sie noch Tipps zur Beobachtung von Deep-Sky-Objekten mit dem Fernrohr. Ca. 190 Seiten mit zahlreichen, überwiegend farbigen Fotografien und Grafiken; € 9,80 zzgl. Porto; als Standing Order € 8,50 inkl. Inlandsversand; ISBN 978-3-938639-64-1; Erscheinungstermin: 07.09.2007



Bestellen können Sie auf dem Beihefter oder unter

www.spektrum.com/lesershop

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Wissen aus erster Hand

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH | Slevogtstraße 3–5 | 69126 Heidelberg | Tel 06221 9126-743 | Fax 06221 9126-751
service@spektrum.com