

Sonderlinge im Sonnensystem

Kleine Körper auf Umlaufbahnen um die Sonne sind entweder Kometen oder Asteroiden – so stand es lange in den Lehrbüchern. Am **Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung** in Göttingen erforscht **Jessica Agarwal** „aktive Asteroiden“, das sind Kleinkörper, die so recht in keine klassische Schublade passen.

TEXT **THORSTEN DAMBECK**

Wer in der Adventszeit zwischen dem 4. und dem 14. Dezember den Blick zum Nachthimmel richtet, kann auf ein Geschenk besonderer Art hoffen: Sternschnuppen. Verlängert man die Lichtspuren der Meteore zurück, so scheinen sie aus den Zwillingen zu strömen, sie heißen deshalb nach dem lateinischen Namen des Sternbilds Geminiden. Es handelt sich dabei um winzige kosmische Staubkörnerchen, und immer im Advent ist die Erde genau an der richtigen Stelle, sodass der Staub in der irdischen Lufthülle verglühen kann. Dabei sorgt er für die huschenden Lichter, die einen geheimen Wunsch erfüllen sollen, so der Volksglaube.

Astronomen sehen das nüchterner. Sie haben die Quelle des Staubs bereits länger ausgemacht. Es ist Phaethon, ein seit 1983 bekannter Asteroid, der die Sonne auf einer lang gestreckten Ellipse umläuft. Sein Abstand schwankt dabei sehr stark, alle 1,4 Jahre nähert er sich

ihr auf 0,14 Astronomische Einheiten (AE), entsprechend einer Distanz von rund 20 Millionen Kilometern. Dann wird es auf dem nur fünf Kilometer großen Körper mehr als 700 Grad Celsius heiß. Und der Strahlungsdruck des intensiven Sonnenlichts kann die winzigen Staubpartikel auf der Oberfläche ins All katapultieren.

DIE MEISTEN ASTEROIDEN KREISEN IM HAUPTGÜRTEL

„Es ist sehr ungewöhnlich, dass ein Asteroid die Quelle für einen Meteorstrom ist“, sagt Jessica Agarwal vom Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung. „Normalerweise stammen Meteorströme von Kometen.“ Diese sind seit der Antike bekannt, sie können in Sonnennähe teils imposante Schweife aus Gas und Staub ausprägen. Dann sind die spektakulären Ereignisse am Nachthimmel auch Tagesgespräch in der Öffentlichkeit. Der Staub, den Kometen ins All entlassen, wird durch su-

blimierendes Eis mitgerissen und ist die Ursache der periodischen Meteorströme. So jedenfalls steht es seit Langem in den Lehrbüchern.

Phaethon ist anders: Er gibt zwar auch Staub ab, bewerkstelligt dies jedoch eisfrei. Asteroiden kennt man erst seit rund 200 Jahren, das erste Exemplar war Ceres. Sie war lange Zeit ihr größter Vertreter, heute gilt sie als Zwergplanet (Kasten auf Seite 51). Mittlerweile sind diese Objekte zu Hunderttausenden katalogisiert, die meisten umrunden die Sonne im sogenannten Hauptgürtel, von den Astronomen *main belt* genannt. Dieser liegt zwischen den beiden großen Planeten Mars und Jupiter.

Asteroiden und Kometen – Jessica Agarwal kennt sich in beiden Welten

Optische Täuschung! Diese Reihe von Aufnahmen des Weltraumteleskops *Hubble* zeigt, dass der Asteroid 288P aus zwei Teilen besteht, die umeinander kreisen. Außerdem weist der Himmelskörper die wichtigsten Charakteristika eines Kometen auf – eine Koma, welche die beiden Kerne einhüllt, sowie einen Staubschweif.

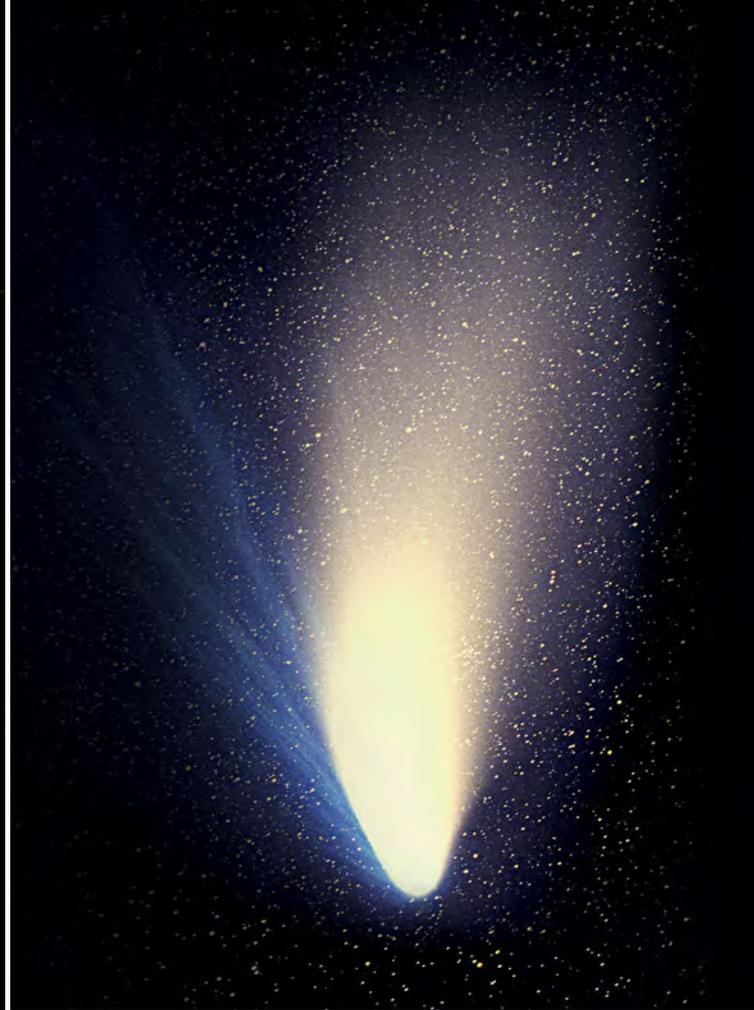
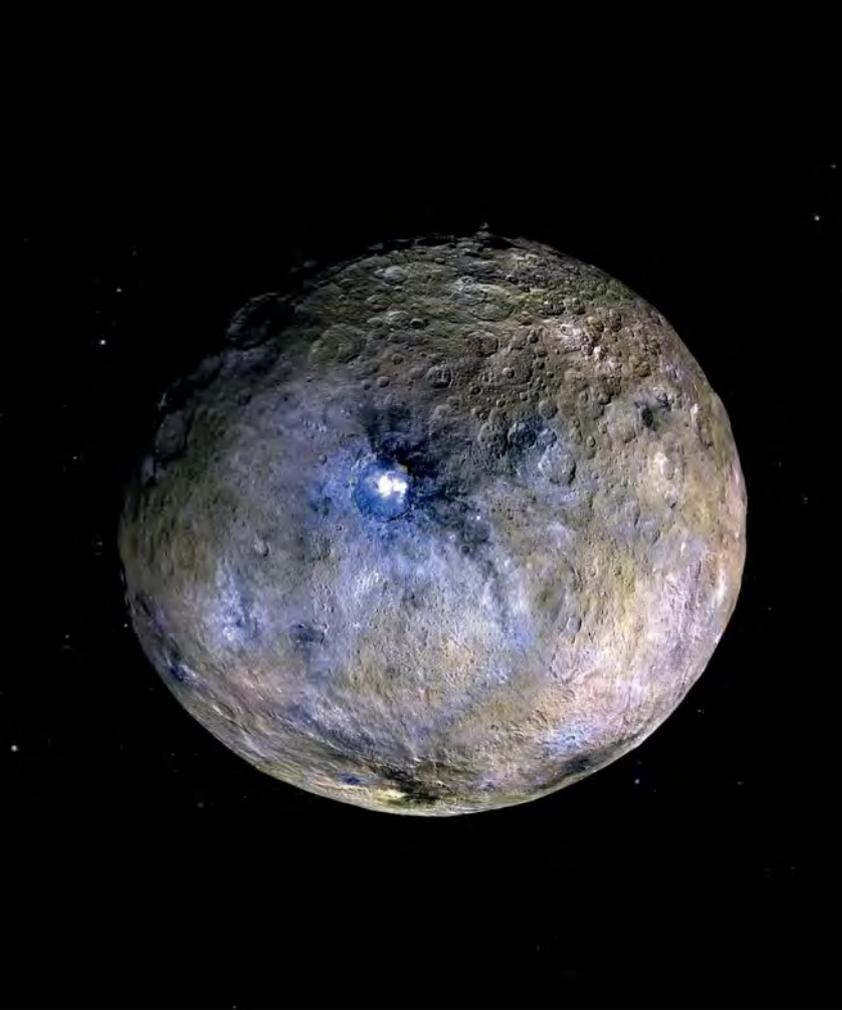
22. August 2016

1. September 2016

9. September 2016

20. September 2016

29. September 2016



Kosmisches Kleinzeug: Der Zwergplanet Ceres (links) gehört zu den Asteroiden, Hale-Bopp zur Familie der Kometen. Bis vor einigen Jahren haben die Astronomen die beiden Klassen wegen ihrer unterschiedlichen Merkmale klar voneinander getrennt, doch die Grenzen verschwimmen zunehmend.

aus. Und im Grenzgebiet dazwischen: „Wir forschen an der Nahtstelle zwischen Astronomie und Geophysik“, so die Göttinger Astronomin, denn es geht um physikalische Prozesse, welche die kleinen Himmelskörper stark beeinflussen können. Ein Schwerpunkt der Wissenschaftlerin ist eine noch überschaubare Teilgruppe der Kleinplaneten, die sogenannten aktiven Asteroiden. Phaethon gehört zu dieser Gruppe aus Sonderlingen. Gemeinsam ist ihnen, dass sie Staub abgeben können. Eine Fachpublikation aus dem Jahr 2015 umfasst bereits 18 Exemplare. Die allermeisten messen nur wenige Kilometer, als Ausnahmen stechen Scheila und Ceres hervor, deren Durchmesser mit 113 und 975 Kilometern beziffert werden.

Asteroiden werden durch Kollisionen mit anderen kleinen Körpern auch immer kleiner, Agarwal vergleicht dies mit einem Mahlprozess. Ein Beispiel ist der Zusammenprall, der das Objekt P/2010 A2 heimsuchte und den die Forscher auf das Jahr 2009 rückdatierten. Fünf Monate lang beobachteten sie im

Folgejahr mit dem *Hubble*-Weltraumteleskop die Entwicklung des Schweifs von P/2010 A2. Dieser stellte sich anders dar als ein normaler Kometenschweif. Denn da Kometen in der Nähe der Sonne quasi kontinuierlich Gas und Staub ausstoßen, hat ihr Schweif üblicherweise eine aufgefächerte Form.

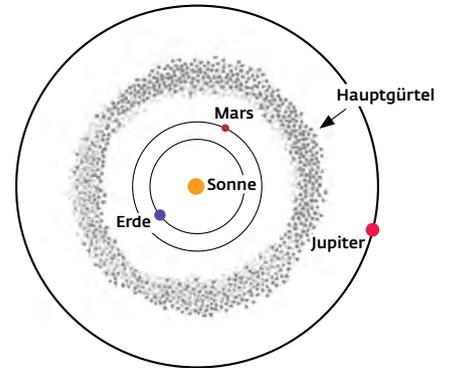
X-FÖRMIGE STRUKTUR IM STAUSCHWEIF ALS UNIKUM

Der geradlinige Schweif von P/2010 A2 deutete hingegen auf die Entstehung durch ein einzelnes, kurzzeitiges Ereignis hin. Bereits auf den ersten detailreichen *Hubble*-Fotos entdeckten die Forscher ein Lichtpünktchen, das zugehörige Objekt schätzten sie auf rund 120 Meter im Durchmesser. „Der Kern erschien fast abgetrennt von der Staubwolke“, so Agarwal, die damals noch am Forschungszentrum der ESA im niederländischen Noordwijk die Bilder auswertete. Den Lichtpunkt interpretierten die Experten als größtes Fragment einer Asteroidenkollision. Eine x-förmige

Struktur im Staubschweif, unmittelbar hinter dem Fragment, macht diesen Asteroiden zu einem Unikum.

Manche der aktiven Asteroiden werden auch als *main-belt comets* tituiert. Bei ihnen vermuten die Astronomen, dass ihre Staubabgabe ähnlich wie bei Kometen durch Wassereis oder andere flüchtige Substanzen angetrieben wird, das beim Sublimieren oberflächennahe Staubkörnchen mitreißt. Ein Vertreter dieser Gruppe ist 288P; er bewegt sich im äußeren Hauptgürtel auf einer elliptischen Bahn und benötigt für einen kompletten Sonnenlauf 5,3 Jahre.

Diesen Kleinplaneten kennt man erst seit dem Jahr 2006, damals war er als schwaches Lichtpünktchen von den auf kleine Körper spezialisierten Spacewatch-Teleskopen am Kitt Peak National Observatory im US-Bundesstaat Arizona entdeckt worden. Bereits fünf Jahre später fiel er auf, als er mehrere Monate lang in Sonnennähe aktiv war. Auf den Fotos waren nämlich ein kurzer, von der Sonne weg gerichteter Staubschweif und eine rund sechsmal längere Spur entlang



Reiche Quelle: Die meisten Asteroiden laufen auf Bahnen zwischen den Planeten Mars und Jupiter um die Sonne, im sogenannten Hauptgürtel.

seiner Bewegungsrichtung klar auszumachen. Die lange Dauer der Aktivität deutete bereits damals auf die Sublimation von Eis als Motor hin.

Im September 2016 waren die Beobachtungsbedingungen für 288P dann besonders günstig. Er näherte sich der Erde sogar bis auf 1,45 AE – eine gute Gelegenheit für Jessica Agarwal und Kollegen, ihrem Studienobjekt weitere Geheimnisse zu entreißen. Auf den hochauflösenden Fotos des *Hubble*-Teleskops zeigte sich nun klar, was vorher nur schemenhaft zu erahnen war: 288P ist doppelt! Er besteht also aus zwei einzelnen, etwa gleich großen Komponenten, die ihren gegenseitigen Schwerpunkt umkreisen; beide messen rund 1,8 Kilometer. Auffällig ist ihr verhältnismäßig großer Abstand, der etwa 100 Kilometer beträgt.

Der aktive Doppelasteroid ist ein gutes Beispiel dafür, dass diese Körper faszinierende Objekte sein können. An ihnen lassen sich die Veränderungsprozesse, denen sie unterworfen sind, gleichsam live studieren. Am Anfang von 288P stand wohl eine Kollision, die einst einen rund zehn Kilometer großen Vorgängerkörper zertrümmerte. Damals, vor etwa 7,5 Millionen Jahren, schlug nicht nur die Geburtsstunde von 288P, sondern diejenige einer ganzen Asteroidenfamilie. Mindestens elf Mitglieder dieser Gruppe sind bereits bekannt, ihre ähnlichen Umlaufbahnen um die Sonne verraten ihren gemeinsamen Ursprung. Astronomisch gesehen handelt es sich um eine sehr junge Familie. Eine zweite, spätere Kollision könnte 288P dann in zwei Trümmer gesprengt haben. Oder er ging bereits

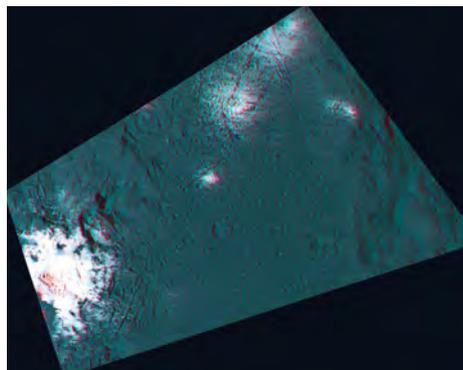
als Doppelkörper aus der gewaltsamen Geburt hervor. „Beides ist nicht auszuschließen, genau wissen wir es nicht“, sagt Jessica Agarwal.

Es gibt jedoch ein plausibleres Szenario. Kleine Himmelskörper können auch durch Fliehkräfte zerrissen werden – und zwar, wenn sie zu schnell um ihre eigene Achse rotieren. Diese Ereignis-

EINE AKTIVE GIGANTIN

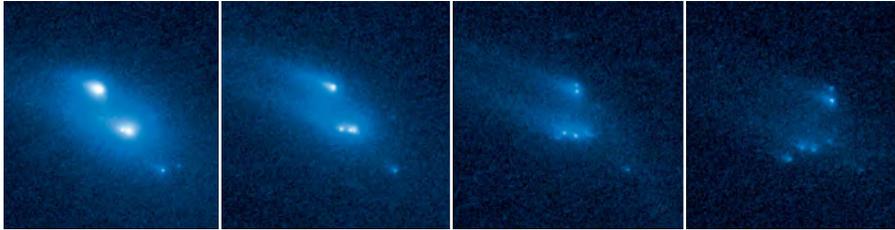
Auf der Bühne des gesamten Sonnensystems ist Ceres mit im Mittel 975 Kilometern Durchmesser lediglich ein Zwerg – mit nur 0,28 Prozent der Masse des leichtesten Planeten Merkur. Unter den aktiven Asteroiden, die meisten sind nur wenige Kilometer groß, ist sie jedoch eine Gigantin. Seit Juni 2018 kreist die Raumsonde *Dawn* auf einer neuen, stark elliptischen Umlaufbahn um Ceres. Manchmal trennen die NASA-Sonde nur etwa 35 Kilometer von der Oberfläche, so nah kam *Dawn* ihrem Studienobjekt seit ihrer Ankunft im März 2015 noch nie. Aus der geringen Distanz sind nun Detailfotos des 90 Kilometer großen Occator-Kraters entstanden (Bild), die teils zehnfach bessere Auflösung zeigen und den bisher besten Blick auf die ominösen hellen Flecken bieten, die *Dawn* dort bereits früher entdeckt hatte.

Im Zentrum dieses Einschlagskraters findet sich eine zentrale Vertiefung,



in deren Mitte eine auffallend helle, asymmetrische Kuppe emporragt – der Schauplatz früherer kryovulkanischer Aktivität. Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Sonnensystemforschung haben herausgefunden, dass dort bis in jüngste geologische Zeit salzige Lösungen austraten. Das Wasser verflüchtigte sich und ließ helle Ablagerungen zurück. Spektroskopische Messungen haben diese Substanz als Natriumcarbonat identifiziert.

Weitere helle Sprengel im östlichen Teil des Kraters sind wahrscheinlich ebenfalls Stellen, wo ein Wasser-Salz-Gemisch zutage trat. Mehrere aktuelle Studien legen nahe, dass die Cereskruste reich an Wassereis ist. Wahrscheinlich legen kleinere Meteoriteneinschläge und Erdbeben immer wieder Eis frei, das dann verdampft. So entsteht eine extrem dünne Gashölle aus Wasserdampf, eine sogenannte Exosphäre.



Totale Auflösung: Der Asteroid P/2013 R3 zerbröselte praktisch vor den Augen der Astronomen. Vermutlich war das Objekt einst eine lose Ansammlung größerer Felsbrocken gewesen. Es verschwand schließlich ganz von der Bildfläche und ward seitdem nicht mehr gesehen.

nisse, die lange schon von Kometen bekannt sind, suchen auch Asteroiden heim. Ein solches Drama kann durch verschiedene Ursachen ausgelöst werden. „Sollte etwa stellenweise oberflächennahes Eis existieren, so könnten die Sublimation des Gases und der damit verbundene Rückstoß eine Art Düseneffekt bewirken, der die Rotation relativ schnell erhöht – bis sie ein kritisches Maß überschreitet, das der Körper dann nicht mehr aushalten kann“, sagt Agarwal.

Demnach wäre schon nach einigen Tausend Jahren eine Zersplitterung des Asteroiden möglich. Jüngste Analysen legen es nahe, dass der „Düsentrieb“ den Körper von 288P mittels einer solchen eskalierenden Eigenrotation auseinanderriß. Auch bei der Entwicklung der gegenseitigen Umlaufbahn dürfte dieser Effekt eine gewichtige Rolle gespielt haben, sodass sich beide Komponenten immer weiter voneinander entfernten – bis sie schließlich die große heutige Distanz erreichten,

die es *Hubble* überhaupt erst ermöglichte, die Doppelnatur von 288P zu enthüllen.

Experten kennen einen weiteren Prozess, der die Eigenrotation verändern kann: den sogenannten YORP-Effekt. Dabei kann im Laufe längerer Zeiträume allein durch die Beleuchtung mit Sonnenlicht und durch die Wiederabstrahlung der Wärme die Drehung eines unregelmäßig geformten, kleinen Himmelskörpers so lange beschleunigt werden, bis die Zentrifugalkräfte ihn zerreißen (Kasten unten). Eine Variante, der Binary-YORP-Effekt, kann darüber hinaus in einem Doppelsystem die Komponenten wieder zusammenführen – oder sie immer weiter voneinander entfernen.

Ein besonders drastischer Fall war die Zersplitterung des Asteroiden P/2013 R3, den David Jewitt von der University of California in Los Angeles zusammen mit Jessica Agarwal und weiteren Kollegen im Jahr 2014 beobachtete. Die Forscher waren quasi live dabei, als der Asteroid seiner schnellen Rotation zum Opfer fiel – wahrscheinlich bewirkt durch den YORP-Effekt: Mindestens zehn Bruchstücke, das größte mit etwa 200 Meter Durchmesser, ließen sich identifizieren. Hinzu kam eine Trümmer- und Staubwolke, deren Masse die Forscher auf etwa 100 000 Tonnen taxierten.

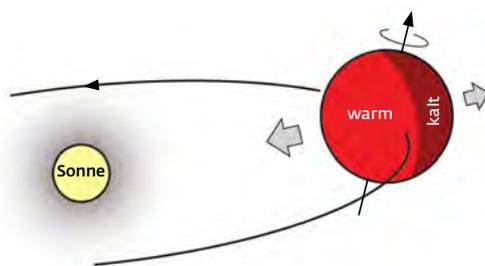
Eine Rückrechnung der Bahnen der einzelnen Bruchstücke auf den Fotos von *Hubble* und vom Keck-Teleskop auf Hawaii weisen darauf hin, dass der Asteroid zwischen Februar und September 2013 begann, in mehreren Stufen zu zerbrechen – nur wenige Monate vor seiner Entdeckung. Wahrscheinlich war P/2013 R3 lediglich eine lose Ansammlung größerer Felsbrocken und Staub, die nur schwach von der geringen Schwerkraft des Körpers zusammengehalten wurde, ein sogenannter Rubble-Pile-Asteroid.

Weil dabei große Mengen von Staub freigesetzt wurden, der einen deutlichen Schweif erzeugte, klassifizierten die Forscher den Himmelskörper zunächst irrtümlich als Kometen. Könnte der Aste-

GESCHREDDERTE ASTEROIDEN

Der YORP-Effekt ist eine allmähliche Veränderung des Rotationszustands kleiner Himmelskörper, etwa Asteroiden, unter dem Einfluss der Sonnenstrahlung. Er entsteht, wenn thermische Strahlung richtungsabhängig von dem Körper abgegeben wird, wodurch ein stetes Drehmoment erzeugt wird. Dadurch kann sich die räumliche Lage der Rotationsachse des Körpers verändern, die sich dann parallel, senkrecht oder antiparallel zu seiner Umlaufebene einstellt. Außerdem kann die Eigenrotation des Asteroiden gebremst oder beschleunigt werden (Bild).

Im Jahr 2007 wurde der Effekt erstmals an den Asteroiden YORP und Apollo nachgewiesen. Die Rotation des aktiven Asteroiden P/2013 R3 wurde offenbar



durch den YORP-Effekt so stark beschleunigt, dass er durch die Fliehkräfte in mindestens zehn Fragmente zerbrach. Der Name des Effekts ist ein englisches Akronym und setzt sich aus den Anfangsbuchstaben der Nachnamen der Forscher Yarkovsky, O'Keefe, Radzievskii und Paddack zusammen.

roid auch durch einen Impakt zerstört worden sein? Agarwal hält das für unwahrscheinlich. Die geringe Geschwindigkeit der Bruchstücke, die im Fall einer Kollision viel größer sein müsste, spreche dagegen. Auch „Düseneffekte“ durch Sublimation von gefrorenen Substanzen – allen voran Wassereis – kommen kaum infrage, da sich keinerlei Hinweis auf länger anhaltende, durch Sublimation angetriebene Staubaktivität finden ließ.

VERSCHWUNDEN AUF NIMMERWIEDERSEHEN

Man muss sich immer wieder auf Überraschungen gefasst machen, wenn man aktive Asteroiden erforscht. „P/2013 R3 ist zerfallen, verschwunden und seitdem nie wieder aufgetaucht. Das Objekt P/2016 G1 bestand offenbar nur aus einer Staubwolke, zumindest war der Kern zu klein, um sichtbar zu sein. P/2013 P5 wiederum zeigte neun, sehr individuelle Staubschweife“, sagt Jessica Agarwal. Die boomende Forschung hat auch die Raumfahrtagenturen aufmerken lassen. So hat die ESA im Januar 2018 über eine Mission zu mehreren aktiven Kleinkörpern nachgedacht, zunächst allerdings nur als theoretische Studie. Die japanische Agentur JAXA ist bereits weiter, sie plant mit der Raumsonde *Destiny+* einen Vorstoß zur Quelle des Geminidenstroms, also zu Phaethon; der Start soll 2022 erfolgen.

Läuft alles nach Plan, so könnte ein Staubdetektor an Bord der Sonde vier Jahre später denjenigen Rohstoff inspizieren, der jedes Jahr im Dezember am irdischen Firmament die Schnuppen fallen lässt; das Instrument wird an der Universität Stuttgart entwickelt. Allerdings ist Phaethon ein unsteter Zeitgenosse, denn auf aktive Phasen folgen auch lange Perioden relativer Ruhe. Wenn Jessica Agarwal sich ein Zielobjekt für eine Raumsonde wünschen dürfte, wäre ihre Wahl aber eine andere: „288P! Er zeigt die kometenartige Aktivität, und der große Abstand seiner Komponenten ist einzigartig. Er wäre mein Favorit.“ ◀



Das Ungewöhnliche im Blick: Jessica Agarwal vom Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung in Göttingen befasst sich mit aktiven Asteroiden. Das sind Himmelskörper, die besondere Merkmale besitzen, etwa aus mehreren Kernen bestehen oder in ihrem Äußeren einem Kometen gleichen.

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- In den vergangenen Jahren haben die Wissenschaftler herausgefunden, dass es keine klare Trennlinie zwischen schweifbildenden Kometen und Asteroiden gibt.
- Die Grenzgänger im Planetensystem werden aktive Asteroiden genannt, weil sie Staub abgeben und Schweife ausbilden können.
- Zusätzlich wurden auch Asteroiden entdeckt, die aus einem Doppelkörper bestehen.
- Manche Asteroiden scheinen nur aus einer Staubwolke zu bestehen, andere zerfallen vor den Augen der Forscher.

GLOSSAR

Astronomische Einheit: Eine Astronomische Einheit (AE) ist der mittlere Abstand zwischen Erde und Sonne und entspricht 149,57 Millionen Kilometern.

Kryovulkanismus: Eine Form von Vulkanismus, bei der keine heiße Lava ausgespuckt wird wie bei Vulkanen auf der Erde, sondern Methan, Kohlenstoffdioxid, Wasser oder Ammoniak. Diese Stoffe liegen im Innern eines Planeten oder Mondes in gefrorenem Zustand vor.

Sublimation: Auf der Erde geht etwa Wasser bei Erwärmung vom festen in den flüssigen und dann in den gasförmigen Zustand über. Wird eine dieser Phasen übersprungen und geht ein Stoff vom festen direkt in den gasförmigen Aggregatzustand über, spricht man von Sublimation.