

Andromedagalaxie →

□ Krebsnebel



Sternbild Orion

Danny Farrow, Pan-STARRS1 Science Consortium und Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik

Neue Karte der Milchstraße

W I S wissenschaft in die schulen!

Mittlerweile haben Astronomen eine relativ genaue Vorstellung davon, wie unsere Heimatgalaxie aufgebaut ist – gleichwohl gibt es noch immer zahlreiche Ungewissheiten. Neues, mit der Himmelsdurchmusterung Pan-STARRS erstelltes, präziseres Kartenmaterial des Nachthimmels ermöglicht nun bislang nicht dagewesene Einblicke.

Bereits in der Antike mutmaßte der griechische Philosoph Demokrit, dass unsere Galaxie aus vielen einzelnen Sternen besteht. Doch erst knappe zweitausend Jahre später gelang es Galileo Galilei, diese Vermutung zu bestätigen. Als erster Mensch beobachtete er mit einem Fernrohr den Nachthimmel und berichtete darüber im Jahr 1610 in seinem Werk Sternbote: »Die Galaxis ist nämlich nichts anderes als eine Ansammlung zahlloser, haufenförmig angeordneter Sterne.«

Doch wie viele Sterne befinden sich tatsächlich in unserer Heimatgalaxie? Ende des 18. Jahrhunderts schätzte der Astronom Wilhelm Herschel zum ersten

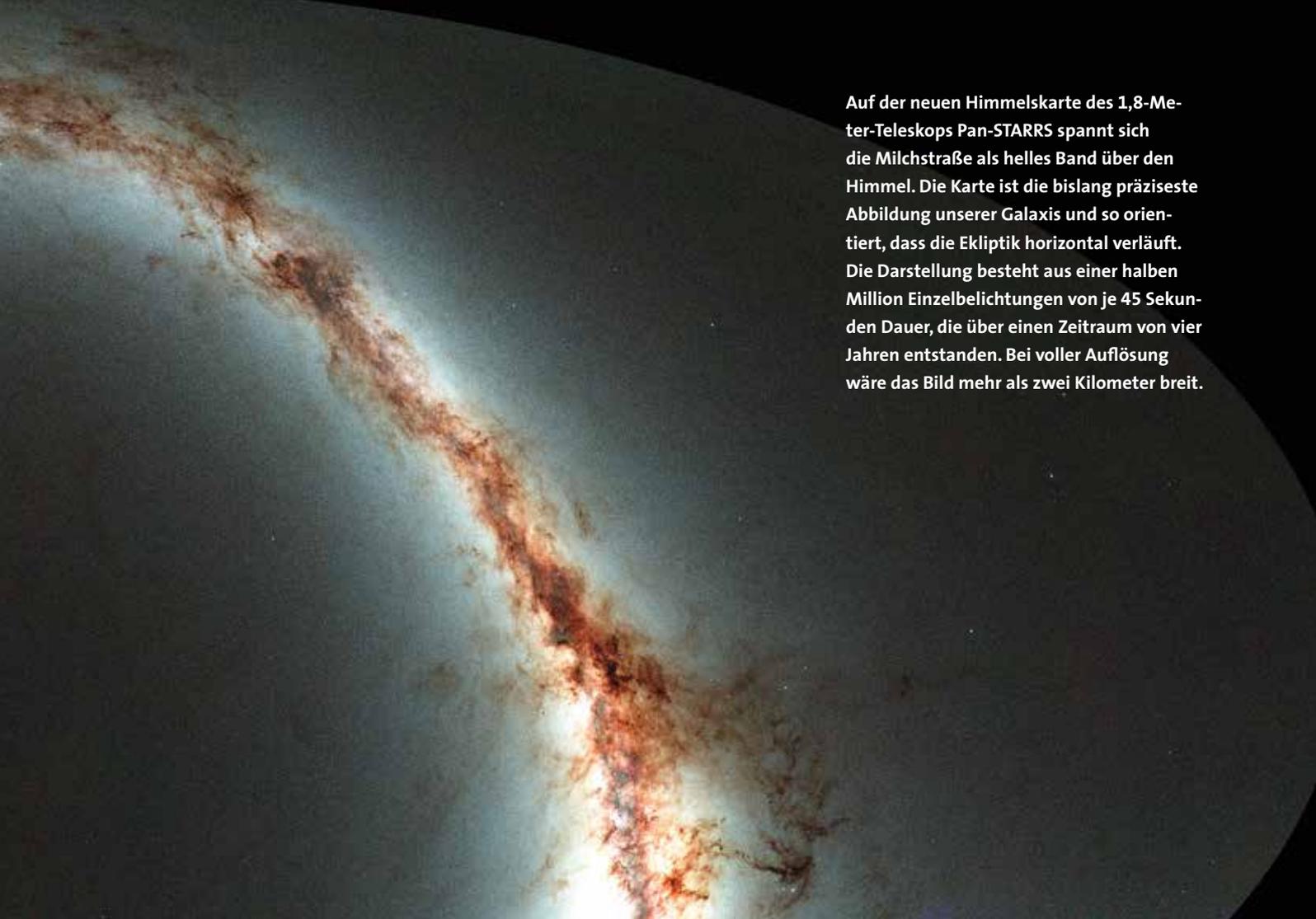
Mal Ausdehnung und Größe der Milchstraße anhand von Zählungen sichtbarer Sterne ab (siehe Bild S. 18). Mit seinen Werten lag er jedoch weit unter den heutigen Angaben. Das lag vor allem daran, dass Staubwolken zwischen den Sternen, so genannte interstellare Materie, den Blick auf dahinter liegende Sterne verdecken.

Erst zu Beginn des 20. Jahrhunderts gelang dem Astronomen Harlow Shapley eine realistischere Abschätzung. Er nutzte hierfür die Verteilung von Kugelsternhaufen und bestimmte damit näherungsweise die Größe des Milchstraßensystems. Heute weiß man jedoch, dass er

im Gegensatz zu Galilei die Ausdehnung der Galaxis überschätzte. Experten gehen gegenwärtig davon aus, dass sich etwa 100 bis 300 Milliarden Sterne im Milchstraßensystem befinden.

Der Himmel über Hawaii

Die bisher vollständigste Karte der Galaxis veröffentlichten nun Astronomen mit Hilfe der Daten des Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System, kurz Pan-STARRS. Dieses Teleskop hat einen Spiegeldurchmesser von 1,8 Metern und befindet sich auf dem Vulkan Haleakala auf der Hawaii-Insel Maui (siehe Bild S. 18). In den letzten vier Jahren verma-



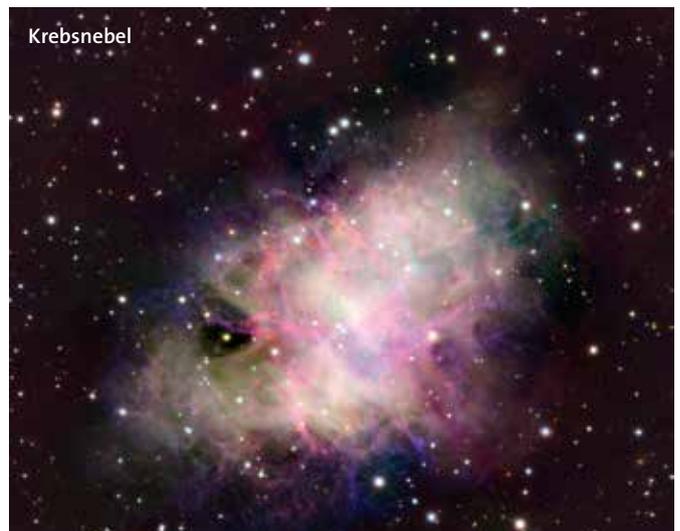
Auf der neuen Himmelskarte des 1,8-Meter-Teleskops Pan-STARRS spannt sich die Milchstraße als helles Band über den Himmel. Die Karte ist die bislang präziseste Abbildung unserer Galaxis und so orientiert, dass die Ekliptik horizontal verläuft. Die Darstellung besteht aus einer halben Million Einzelbelichtungen von je 45 Sekunden Dauer, die über einen Zeitraum von vier Jahren entstanden. Bei voller Auflösung wäre das Bild mehr als zwei Kilometer breit.

Danny Farrow, Pan-STARRS1 Science Consortium und Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik



Sternbild Orion

Das Sternbild Orion ist nur ein kleiner Ausschnitt (siehe Rahmen) der großen Himmelskarte von Pan-STARRS.

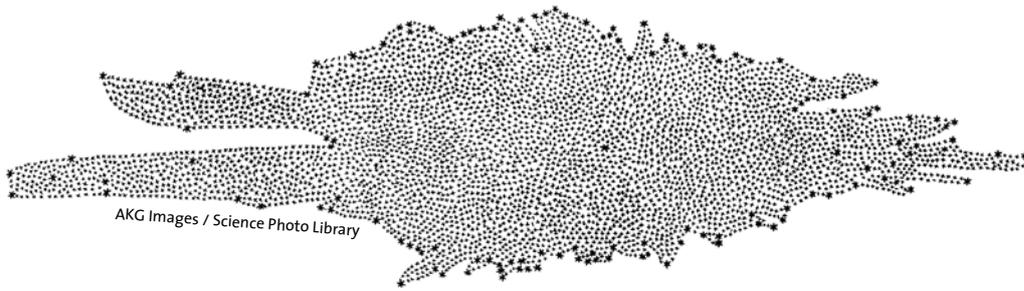


Krebsnebel

Die Qualität der Himmelskarte von Pan-STARRS lässt sich an einem bekannten Objekt erkennen, wie hier zum Beispiel am Krebsnebel Messier 1, Überrest einer Supernova-Explosion.

Pan-STARRS

Pan-STARRS



Die wohl erste Karte des Milchstraßensystems stammt von Caroline Herschel und ihrem Bruder William aus dem Jahr 1785. Mit einem Teleskop hatten sie zuvor die sichtbaren Sterne am Himmel gezählt. Auf Grund interstellarer Materie, welche die Sicht auf dahinterliegende Objekte versperrt, unterschätzten sie die Größe der Galaxis deutlich.

ßen die beteiligten Wissenschaftler damit die verschiedenen Himmelspositionen zwischen 10- und 20-mal. Sie verwendeten dazu fünf unterschiedliche Filter, die jeweils für andere Wellenlängenbereiche des Lichts durchlässig sind. Dementsprechend bestehen die Aufnahmen aus unterschiedlichen Farben – von Grün bis zum nahen Infrarot. Insgesamt umfasst die Karte drei Viertel unseres Nachthimmels – dem gesamten Teil, der sich von Hawaii aus beobachten lässt.

Das Endergebnis dieser langjährigen Beobachtungen ist beeindruckend: Millionen einzelner Aufnahmen setzten die Forscher zusammen und schufen damit die vollständigste und genaueste Karte unseres Himmels, die es jemals gab (siehe Bild S. 17). Insgesamt sind darauf mehr als drei Milliarden Objekte zu sehen. Die Daten benötigen etwa zwei Petabyte Speicherplatz, was dem Hundertfachen der Datenmenge von Wikipedia entspricht. Eine weitere Version dieses gigantischen Werks, das zusätzlich auch Informationen über die Bewegungen und die Entfernungen der Objekte beinhaltet, soll Ende des Jahres folgen.

Da die Aufnahmen über mehrere Jahre hinweg gemacht wurden, konnten die Astronomen in ihnen auch veränderliche Objekte entdecken – beispielsweise Supernovae und veränderliche Sterne. Ferner ließen sich extrasolare Planeten identifizieren, schwachleuchtende Satellitengala-

xien, die unsere Milchstraße umkreisen, sowie eine Vielzahl von Asteroiden. Informationen über solche erdnahen Asteroiden helfen der US-Weltraumbehörde NASA und der Europäischen Weltraumorganisation ESA, ein Asteroiden-Warnsystem zu entwickeln. Dieses soll möglichst früh auf potenziell gefährliche Exemplare aufmerksam machen, die der Erde zu nahe kommen könnten. Insgesamt sind bis heute mehr als 15 000 erdnahe Asteroiden registriert.

Die Architektur des Milchstraßensystems

Die Daten der Himmelsdurchmusterung präzisieren darüber hinaus das Bild vom Aufbau der Galaxis. Beispielsweise diskutieren Astronomen nach wie vor über die exakten Positionen der verschiedenen Spiralarme unserer Galaxie. Es lässt sich eben schlecht eine Karte der Nachbarschaft anfertigen, wenn man lediglich aus dem eigenen Fenster schauen kann und andere Objekte die Sicht versperren. Ähnlich verhält es sich bei dem Versuch, die Struktur des Milchstraßensystems von der Erde aus zu erkunden: Auch wenn die heutigen Beobachtungsmethoden um ein Vielfaches besser sind als zu Galileis Zeiten, liegen immer noch Staubwolken vor so manchem Gebiet und verstellen dadurch den gewünschten Durchblick. Doch kennt man die genaue Position, Verteilung, Größe und Form solcher Wol-

ken, lässt sich daraus die Struktur der Spiralgalaxie zumindest annähernd rekonstruieren – auf der neuen Karte sind die Staubwolken relativ gut als dunkle Flecken zu erkennen.

Wer die neue Himmelskarte sehr intensiv studiert, findet auch einige bekannte Sternbilder: Orion zum Beispiel und den sich darin befindenden Orionnebel (siehe Ausschnitt S. 17). Auch unsere Nachbargalaxie im Sternbild Andromeda ist zu erkennen (siehe Pfeil) ebenso wie der Krebsnebel (siehe Ausschnitt S. 17). Die Kartierung des Milchstraßensystems ist mit diesem neuen Material allerdings noch lange nicht abgeschlossen. Daten des Satelliten Gaia werden schon bald dazu beitragen, den Detailreichtum – insbesondere auch in der dritten Dimension – drastisch zu erhöhen. Experten erwarten, dass diese Raumsonde während ihrer Mission weitere galaktische und auch extragalaktische Objekte entdeckt. Daneben erhoffen sich Wissenschaftler aus ihren Aufzeichnungen sowohl neue Erkenntnisse über die Entstehung und Architektur unserer Galaxis als auch des gesamten Universums.

ANNA-CHRISTINA EILERS promoviert am Max-Planck Institut für Astronomie in Heidelberg. Sie forscht über die Eigenschaften des intergalaktischen Mediums und entwickelt Computermodelle zur Analyse von stellaren Spektren.



Das Pan-STARRS-Observatorium befindet sich auf dem Vulkan Haleakala auf Maui. Innerhalb der zurückliegenden vier Jahre kartierten Astronomen damit den Nachthimmel und fertigten die bis dato detailreichste Darstellung der Milchstraße an.

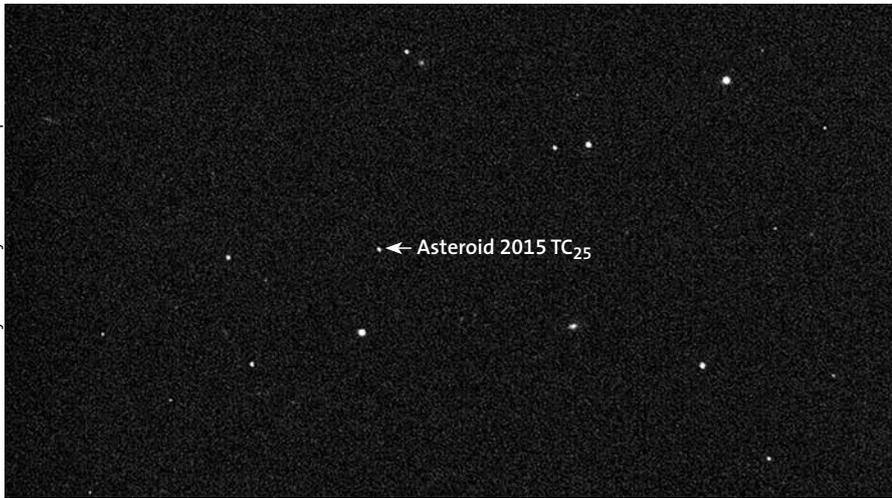
Literaturhinweise

Chambers, K. C. et al.: The Pan-STARRS1 Surveys. arXiv:1612.05560

Pan-STARRS-Pressemitteilung:

Pan-STARRS Releases Largest Digital Sky Survey to the World. www.ifa.hawaii.edu/info/press-releases/panstarrs_release/

W I S Didaktische Materialien: www.wissenschaft-schulen.de/artikel/1051367



Der nur zwei Meter große Asteroid 2015 TC₂₅ kam während seines Vorbeiflugs am 12. Oktober 2015 der Erde näher als unser Mond. Wegen seiner geringen Größe erreichte TC₂₅ aber dennoch nur eine scheinbare Helligkeit von 17,5 mag.

Ein Mini-Asteroid mit bewegter Vergangenheit

W I S wissenschaft
in die schulen!

Meist verpassen Astronomen kleine Asteroiden, wenn sie an der Erde vorbeifliegen. Doch dank schneller Kommunikation über soziale Medien gelang es nun, einen nur zwei Meter großen Brocken eingehend zu untersuchen.

Wäre der Asteroid 2015 TC₂₅ auf die Erde gestürzt, hätte es ganz sicher einen spektakulären Feuerball gegeben. Womöglich wäre er sogar nicht vollständig verglüht, so dass es in einem Meteoritenfall geendet hätte. Doch der zwei Meter große Brocken verfehlte die Oberfläche unseres Planeten am 12. Oktober 2015 um 111 045 Kilometer. Dafür ist der Miniaturasteroid nun einer der am besten charakterisierten erdnahen Kleinkörper, wurde er doch bei seiner Erdpassage mit mehreren Teleskopen intensiv untersucht. Wegen der geringen Größe handelt es sich eigentlich eher um einen Meteoroiden. In der Regel werden solche kleinen und schnellen Objekte zu spät entdeckt, als dass sich umfassende Beobachtungskampagnen planen und durchführen ließen.

Manchmal muss es schnell gehen

Der Faktor Zeit ist also ausschlaggebend für eine erfolgreiche Untersuchung: »Üblicherweise nutzen wir traditionelle Kommunikationsformen zur Koordination der Beobachtungen von erdnahen Asteroiden wie TC₂₅«, erzählt Vishnu Reddy vom Lunar and Planetary Laboratory der University of Arizona. »Aber viele Kollegen lesen ihre E-Mails nicht so häufig wie die sozialen Medien. Deshalb nutzte ich dieses Mal

Twitter und Facebook und konnte so eine Reihe von Beobachtungen in verschiedenen Wellenlängen initiieren.«

Neben optischen Teleskopen kam dabei auch das 300-Meter-Radioteleskop bei Arecibo auf Puerto Rico zum Einsatz. Die kombinierten fotometrischen, spektroskopischen und Radarbeobachtungen liefern ein umfassendes Bild des Kleinkörpers und erlauben Rückschlüsse auf seine Herkunft.

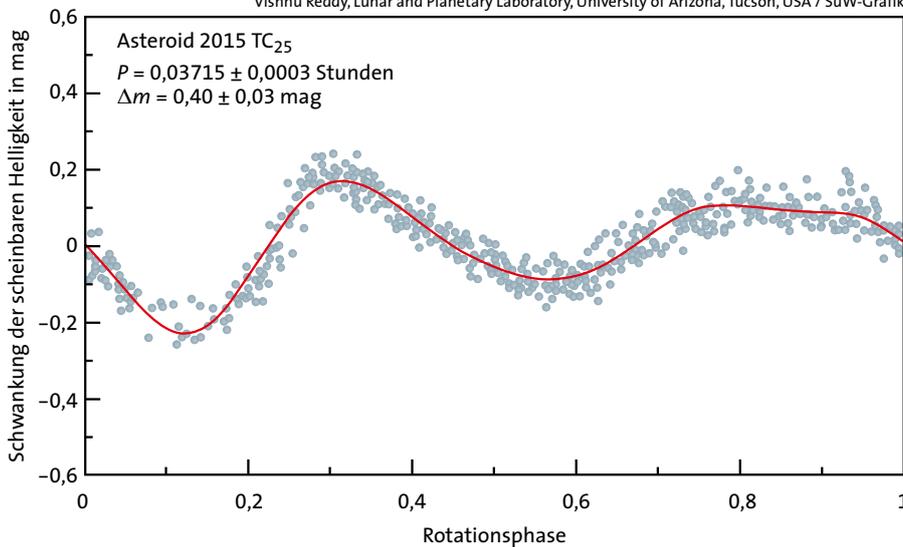
Bei der Verfolgung des Asteroiden kam den Astronomen sein hoher Albedowert entgegen. Der Wert ist ein Maß für das Rückstrahlvermögen von nicht selbst leuchtenden Oberflächen. 2015 TC₂₅ reflektiert einen Anteil von 60 Prozent des Sonnenlichts zurück in den Weltraum. Eine solch hohe Rate ist typisch für die seltenen E-Typ-Asteroiden. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass ihre Oberfläche das Silikatmineral Enstatit enthält.

Trotz des hohen Albedowerts erreichte das Objekt während seiner Annäherung an die Erde eine scheinbare Helligkeit von lediglich 17,5 mag (siehe Bild oben). Wie die während der Erdpassage aufgezeichnete fotometrische Lichtkurve zeigt, schwankte die auf den Abstand korrigierte scheinbare Helligkeit um bis zu 0,4 mag (siehe Grafik S. 20). Die Periodizität von 2,23 Minuten

kommt dabei durch die Eigenrotation des Brockens zu Stande.

Ähnlich schnell drehen sich auch die vier anderen bislang beobachteten Asteroiden, die eine vergleichbare absolute Helligkeit aufweisen: 2006 RH120 (2,75 Minuten), 2008 JL24 (3,23 Minuten), 2010 WA (0,51 Minuten) und 2012 XB112 (2,6 Minuten). Die Lichtkurve von 2015 TC₂₅ ist asymmetrisch, was auf eine irreguläre Form des Asteroiden hindeutet. Sehr wahrscheinlich gleicht er einem moderat deformierten Ellipsoid.

Um Informationen über die Oberflächenbeschaffenheit des Asteroiden zu erhalten, sandten Wissenschaftler mit dem Arecibo-Teleskop am 17. und 18. Oktober 2015 zirkular polarisierte Radarsignale in seine Richtung. Für die einfache Strecke, zu jener Zeit etwa die vierfache Entfernung Erde–Mond, benötigten die Signale rund vier Sekunden. Die an 2015 TC₂₅ reflektierten Radarwellen fing das Teleskop nach weiteren vier Sekunden wieder auf. Anders als an einer perfekt spiegelnden Ebene kehrt sich die Polarisationsrichtung an realistischen Oberflächen nicht vollständig um, sondern nur teilweise. Das Verhältnis der Polarisationsrichtungen – gleichgerichtet zu entgegengesetzt – liefert Aufschlüsse über die Streueigenschaften des



Die scheinbare Helligkeit des Asteroiden 2015 TC₂₅ schwankt mit einer Periode von 2,23 Minuten (0,03715 Stunden) und einer Helligkeitsvariation von maximal 0,4 mag. Die Asymmetrie der an die Helligkeitswerte angepassten Kurve (rot) lässt auf eine irreguläre Form des Felsbrockens schließen. Die Messungen (grau) wurden während der Erddpassage am 12. Oktober 2015 von mehreren Teleskopen durchgeführt.

ZUM NACHDENKEN

Erdbahnkreuzer 2015 TC₂₅



In der Liste der bekannten Erdbahnkreuzer des Center for Near Earth Object Studies (CNEOS) des JPL gibt es derzeit mehr als 2000 Einträge. 2015 TC₂₅ ist eines der erfassten Objekte. Der Miniasteroid passierte die Erde am 13. Oktober 2015 um 07:32 Uhr TDB (= UT - 65 s) im Abstand $d_{TC25} = 110\,840$ km zum Erdzentrum. Den nächsten nahen Vorbeiflug nach Erscheinen dieser SuW-Ausgabe berechnet CNEOS für den 8 bis 32 Meter großen Erdbahnkreuzer 2012 TC₄. Am Morgen des 12. Oktober 2017 wird er in einem Viertel der Mondstanz an der Erde vorüberfliegen.

Aufgabe 1: Durch Vergleich mit dem Mond (Durchmesser: $D_M = 3478$ km, mittlere Entfernung von der Erde: $d_M = 384\,400$ km, Albedo: $A_M = 0,12$) berechne man die absolute Helligkeit H_1 eines kugelförmigen Körpers der Größe $D_1 = 1$ km, dessen Albedo $A_1 = 1$ ist. Die Definition der absoluten Helligkeit für Objekte im Sonnensystem stellt diese in $d_1 = 1$ AE Entfernung von der Erde und in 1 AE Entfernung von der Sonne und idealisiert bei Phase Null, also von der Erde aus gesehen voll beleuchtet (solch eine Konstellation ist in Wirklichkeit nicht möglich). 1 AE = $149,6 \cdot 10^6$ km.
Hilfe: Dem Verhältnis zwischen zwei verschiedenen Intensitäten I_1 und I_0 entspricht der Helligkeitsunterschied:

$$\Delta m = m_0 - m_1 = 2,5 \text{ mag} \cdot \lg(I_1/I_0).$$

Die Intensität ist des Weiteren proportional zum Durchmesser im Quadrat, der Albedo und umgekehrt proportional zur Entfernung zum Quadrat, also $I \propto D^2 A d^2$. Insgesamt lässt sich demnach schreiben:

$$\Delta m = 2,5 \text{ mag} \cdot \lg \left[\left(\frac{D_1}{D_0} \right)^2 \frac{A_1}{A_0} \left(\frac{d_0}{d_1} \right)^2 \right] \quad (1)$$

Es gilt $\Delta m = m_M - H_1$, und die Vollmondhelligkeit ist $m_M = -12,7$ mag.

Zusatzaufgabe: Man leite aus Gleichung (1) mit Hilfe des 1-km-Objekts die Gleichung:

$$D = A^{-1/2} \cdot 10^{-H/5 \text{ mag}} \cdot 1329 \text{ km}$$

ab, mit welcher sich der Durchmesser D eines beliebigen Körpers mit der Albedo A und der absoluten Helligkeit H bestimmen lässt.

Aufgabe 2: a) Welche Größe D_{TC25} hat 2015 TC₂₅ mit $H_{TC25} = 29,5$ mag und **b)** welche maximale scheinbare Helligkeit m_{TC25} hatte er bei seinem Erdvorbeiflug? AXEL M. QUETZ

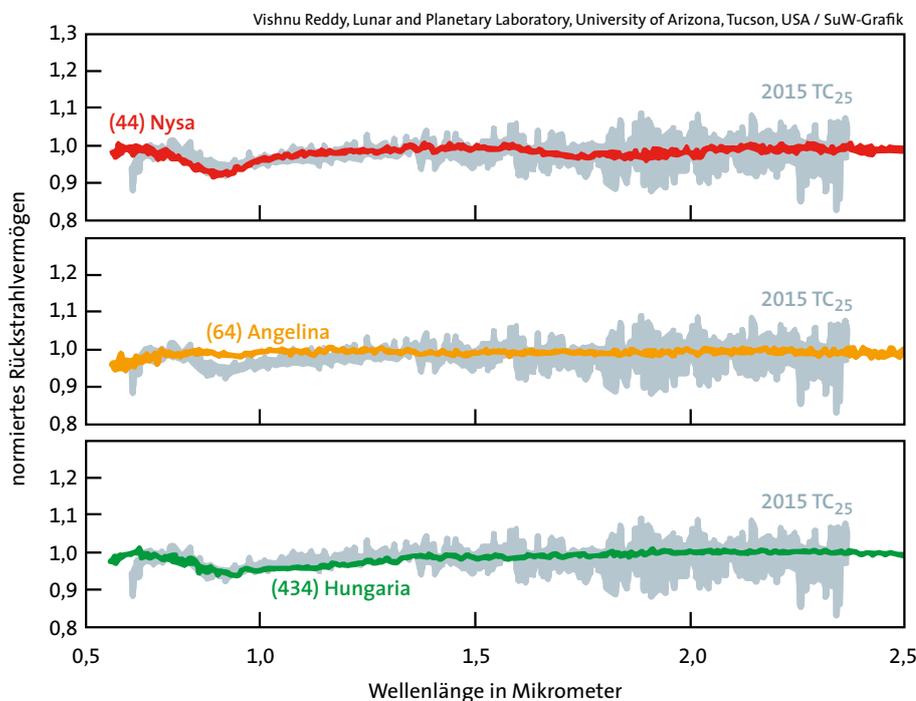
Ihre Lösungen senden Sie bitte bis zum **8. September 2017** an: Redaktion SuW – Zum Nachdenken, Haus der Astronomie, MPIA-Campus, Königstuhl 17, D-69117 Heidelberg. Fax: 06221 528377. PDF: zumnachdenken@sterne-und-weltraum.de. Einmal im Jahr werden unter den erfolgreichen Lösern Preise verlost: siehe S. 93

Oberflächenmaterials und erlaubte in diesem Fall einen Vergleich mit anderen Asteroidentypen. Bei 2015 TC₂₅ betrug das beschriebene Verhältnis rund 0,9, was ebenfalls im Einklang mit anderen bekannten E-Typ-Asteroiden steht.

Hinweise auf Herkunft

Zusätzlich analysierten Reddy und sein Team Nahinfrarotspektren, die vom Drei-Meter-Teleskop IRTF (Infrared Telescope Facility) der NASA auf dem Mauna Kea, Hawaii, stammten und verglichen diese mit Spektren größerer Asteroiden sowie von bekannten Meteoriten. Auch diese Untersuchungen legen nahe, dass es sich bei 2015 TC₂₅ um einen E-Typ-Asteroiden handelt. Solche Objekte kommen vorwiegend im inneren Bereich des Asteroidenhauptgürtels zwischen den Bahnen von Mars und Jupiter vor. Sie sind sehr wahrscheinlich Bruchstücke aus den oberflächennahen Schichten größerer, differenzierter Hauptgürtelasteroiden. Derartige Himmelskörper waren kurz nach ihrer Entstehung extrem heiß, so dass sich Eisen und Nickel in ihren Kernen ansammelte und sich darüber ein Mantel aus Silikatmineralen bildete.

Die bekannten E-Typ-Asteroiden sind mehrheitlich eher klein, nur drei sind größer als 50 Kilometer: (44) Nysa, (55) Pandora und (64) Angelina. Gewisse Unterschiede zwischen diesen Spektren und demjenigen von 2015 TC₂₅ führen die Forscher darauf zurück, dass TC₂₅ anders als die größeren Versionen sehr wahrscheinlich keine Regolithschicht besitzt: Seine Schwerkraft ist nicht in der Lage, loses Material aus kleineren Gesteinsbrocken und Staub auf seiner Oberfläche zu halten. Daher besteht die Oberfläche von 2015 TC₂₅ sehr wahrscheinlich aus glattem Fels.



Das korrigierte Spektrum von 2015 TC₂₅ (grau) ähnelt denen der E-Typ-Asteroiden (44) Nysa und (424) Hungaria. Bei (64) Angelina gibt es beim Absorptionsband um die Wellenlänge 0,9 Mikrometer Unterschiede. Der Typ E bezeichnet steinige Körper mit dem Mineral Enstatit, MgSiO₃, an der Oberfläche. Die Übereinstimmung mit (44) Nysa ist dabei sehr gut, so dass 2015 TC₂₅ womöglich ein Bruchstück desselben ist.

Auf Grund seiner Erdnähe benötigt 2015 TC₂₅ ähnlich lange wie die Erde, um die Sonne zu umrunden – nämlich 382 Tage. Er ist ein so genannter Erdbahnkreuzer des Apollo-Typs. Das bedeutet: Die große Halbachse seiner Bahn ist größer als die der Erde, sein Perihelabstand jedoch geringer als derjenige unseres Planeten. Das war aber wohl nicht immer so. Bahndynamische Überlegungen führen zu zwei möglichen Herkunftsorten im Asteroidenhauptgürtel: Einer davon ist die Hungaria-Familie. Diese Gruppe von E-Typ-Asteroiden umkreist die Sonne in Abständen zwischen 1,7 and 2,0 Astronomischen Einheiten. Ihr Name stammt vom größten Mitglied der Familie, dem Asteroiden (434) Hungaria (rund elf Kilometer Durchmesser). Alternativ könnte 2015 TC₂₅ auch ein Bruchstück vom rund 70 Kilometer großen Typ-E-Asteroiden (44) Nysa sein, das auf eine erdnahe Bahn geraten ist. Diese Vermutung basiert auf der Tatsache, dass sein Spektrum dem von (44) Nysa sehr ähnlich ist.

Erdnahe Kleinkörper wie 2015 TC₂₅ stellen keine Gefahr für die Erde dar. Dazu müssen die Objekte schon etwas größer sein – so wie der Bolide, der am 15. Februar 2013 über der Stadt Tscheljabinsk in Russland explodierte und Verletzte und

Sachschäden verursachte. Er hatte rund die zehnfache Größe von 2015 TC₂₅.

Gleichwohl helfen die Erkenntnisse über jegliche die Erde umschwirrende Felsbrocken dabei, die Bedrohung für unseren Planeten besser einzuschätzen. Detaillierte Informationen über Herkunft, Aufbau und Zusammensetzung erdbahnkreuzender Asteroiden sind enorm nützlich, wenn es zukünftig darum gehen sollte, einen größeren Brocken abzuwehren, der uns sonst zu nahe käme.

JAN HATTENBACH ist Physiker und Amateur-astronom. In seinem Blog »Himmelslichter«, zu finden unter www.himmelslichter.net, schreibt er über alles, was am Himmel passiert.

Literaturhinweis

Reddy, V. et al.: Physical Characterization of ~2-Meter Diameter Near-Earth Asteroid 2015 TC25: A Possible Boulder from E-type Asteroid (44) Nysa. In: The Astronomical Journal 152:162, 2016

W I S Didaktische Materialien:
www.wissenschaft-schulen.de/artikel/1051360

Alles für die Astronomie.



www.intercon-spacetec.de

INTERCON SPACETEC®

Takahashi FC-76 DCU



- Nachfolger des FC-76 DC € 1.574,-
- Fluorit Doublet Apochromat
- 76/570 mm, f/7,5
- teilbar – ideal für Transport & Reise

Takahashi FC-100 DL

limitierte
Sonderauflage

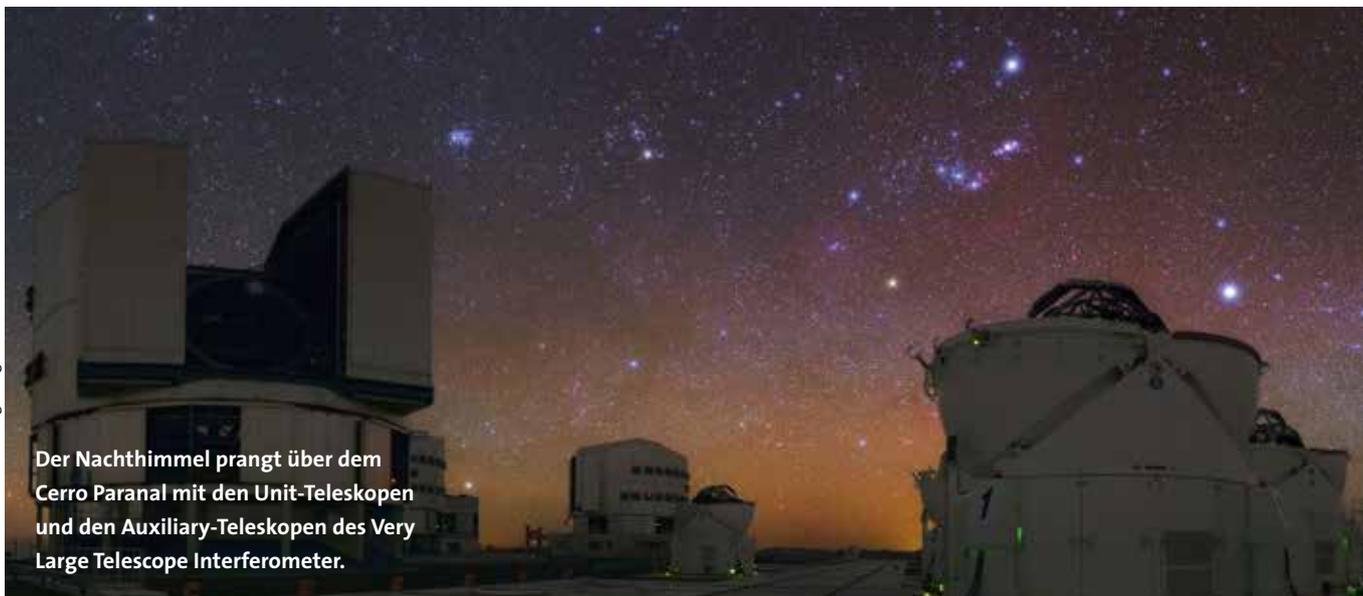


- Fluorit Doublet Apochromat € 3.123,-
- 100/900 mm, f/9
- Auslieferung ab November 2017
- Vorbestellung empfohlen

INTERCON SPACETEC®

Gablinger Weg 9 · 86154 Augsburg
Tel.: 0821 / 41 40 81

Mo - Fr 10-19 Uhr, Sa 11-16 Uhr
email: info@intercon-spacetec.de
Shop: www.intercon-spacetec.de



Der Nachthimmel prangt über dem Cerro Paranal mit den Unit-Teleskopen und den Auxiliary-Teleskopen des Very Large Telescope Interferometer.

Komplexe Oberflächenstrukturen auf dem Roten Riesen R Sculptoris

W I S wissenschaft in die schulen!

Neue Entwicklungen der optischen Interferometrie ermöglichen es, Bilder von Sternen in immer größerem Detailreichtum aufzunehmen. Damit gelang nun die Entdeckung einer strukturierten Sternoberfläche, die durch Konvektion und klumpige Staubbildung zu Stande kommt.

Wer schon einmal unsere Sonne mit bloßem Auge oder mit einem Teleskop durch einen Sonnenfilter betrachtet hat, weiß aus eigener Anschauung, dass die sichtbare Oberfläche der Sonne nicht als gleichmäßige Scheibe erscheint: Sie zeigt Sonnenflecken. Das sind Strukturen, die durch Magnetfelder entstehen und gegenüber ihrer 5500 Grad Celsius heißen Umgebung um rund 1000 Grad kühler sind und somit durch den Kontrast dunkel erscheinen (siehe SuW 7/2017, S. 32). Mit großen erd- und weltraumgebundenen Sonnenobservatorien studieren Sonnenphysiker diese Flecken, aber auch kleinskalige Erscheinungen, die so genannten Granulen. Sie entstehen durch Konvektion der heißen Sonnenmaterie.

Wegen ihrer großen Entfernungen erscheinen andere Sterne jedoch selbst mit großen Teleskopen meist nur punktförmig. Die besten derzeit verfügbaren Teleskope erreichen beispielsweise bei einer Wellenlänge von rund 1,6 Mikrometern im nahen Infrarot Winkelauflösungen von etwa 30 Millibogensekunden. Dies reicht lediglich aus, um die größten und

nächsten Sterne gerade so als Scheiben auflösen zu können.

Weitaus höhere Winkelauflösungen lassen sich durch die optische Interferometrie erreichen. Dabei wird das Licht von zwei oder mehr Teleskopen kohärent, also unter Berücksichtigung der Lauflängen, vereinigt. Die damit erzielbare Auflösung entspricht dem Abstand der beiden Teleskope. Diese Technik hat in den letzten Jahren hinsichtlich der Genauigkeit der Messungen und der Effizienz der Beobachtungen enorme Fortschritte gemacht. Damit lassen sich nun andere Sterne nicht nur auflösen, sondern auch Bilder ihrer Oberflächen aufnehmen. Besonders gut eignet sich hierfür das Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte auf dem Paranal in Chile (siehe Bild oben). Das Instrument PIONIER vereinigt das Licht der vier Teleskope bei Wellenlängen um 1,6 Mikrometer und erreicht eine Winkelauflösung von 2,5 Millibogensekunden. Damit ist es sehr wohl in der Lage, Sternoberflächen zu kartieren.

Mit dieser Technik erstellten wir nun Bilder des Roten Riesen R Sculptoris und

dessen ausgedehnter Atmosphäre (siehe Kasten rechts, untere Bildreihe). Mit seinem 355-fachen Sonnendurchmesser erscheint er in der Entfernung von rund 1200 Lichtjahren unter einem Winkel von rund neun Millibogensekunden. Die spektakulären Aufnahmen zeigen eine komplexe Struktur mit einer dominierenden heißen Stelle im westlichen Teil der Sternscheibe. Der Kontrast dieser Stelle zu seiner Umgebung ist ungewöhnlich hoch. Sie ist mehr als doppelt so hell wie die dunkleren Regionen der Sternscheibe.

Rätselhafte Strukturen

Wir haben zunächst gerätselt, wie sich diese Struktur erklären lässt. Aus mehreren Gründen ist es unwahrscheinlich, dass es sich um Flecken direkt auf der Photosphäre handelt. Diese können durch Konvektion entstehen, ähnlich wie die Granulen der Sonnenoberfläche, aber bei Roten Riesen auf sehr viel größeren Skalen. Allerdings ist der beobachtete Kontrast für diese Erklärung zu hoch. Zum anderen erwarten wir bei einem Roten Riesen, dass Details auf der Photosphäre durch sei-

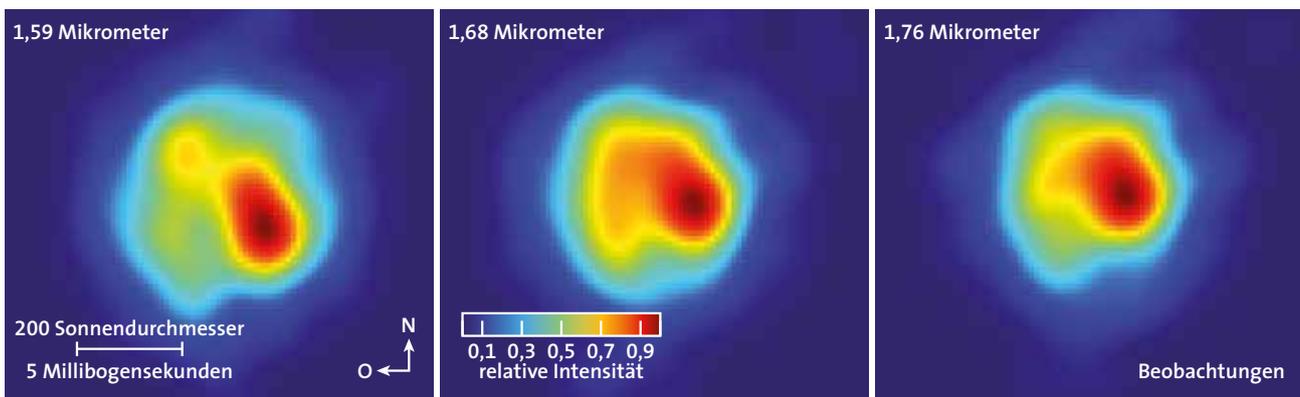
Oberflächendetails mit Interferometrie

Der Rote Riese R Sculptoris im Sternbild Bildhauer hat einen Durchmesser vom 355-Fachen der Sonne. Trotz seiner Entfernung von rund 1200 Lichtjahren lassen sich mit interferometrischer Beobachtung Oberflächendetails sichtbar machen. Die Bilder bei den infraroten Wellenlängen 1,59, 1,68 und 1,76 Mikrometer zeigen eine komplexe Oberflächenstruktur mit einer dominierenden heißen Stelle (siehe untere Reihe). Sie entsteht vermutlich durch Staubeentwicklung, die vor dem Stern im Abstand von zwei bis drei Sternradien stattfindet. Diese Staubeentwicklung erfolgt in Klumpen, da große Konvektionszellen in der Sternatmosphäre Dichteschwankungen bei diesen Sternabständen zur Folge haben.

Dreidimensionale Dichtesimulationen der konvektiven Hülle und Atmosphäre eines Roten Riesen erklären die beobachteten Oberflächenstrukturen von R Sculptoris (siehe Bild rechts).



Bernd Freytag et al., Universität Uppsala / SuW-Grafik



Markus Wittkowski et al., ESO / SuW-Grafik

ne ausgedehnte Atmosphäre und seinen Sternwind verdeckt werden.

Beobachtungen von R Sculptoris mit ALMA, dem Atacama Large Telescope Array, enthüllten zuvor eine Spiralstruktur des Windes, die auf einen bisher nicht bekannten Begleiter hindeutet (siehe SuW 3/2015, S. 22). Dieser ist jedoch zu weit entfernt, um Strukturen in der Atmosphäre von R Sculptoris bewirken zu können. Wir interpretieren unsere Bilder mit Konvektion in der Photosphäre. Sie führt dazu, dass Staubbildung in der ausgedehnten Atmosphäre in Klumpen erfolgt. Dies geschieht oberhalb der Photosphäre in etwa zwei bis drei Sternradien Abstand. Dieser Staub verdeckt die Photosphäre unterschiedlich stark. Dort, wo der helle Fleck zu erkennen ist, blicken wir zu tieferen und heißeren Schichten der Atmosphäre. An anderen Stellen ist die Abdunklung durch Staub stärker, so dass wir kühlere äußere Bereiche der Atmosphäre sehen.

Tatsächlich gelangen in den letzten Jahren nicht nur Fortschritte der interferometrischen Techniken, die diese Beobachtungen möglich gemacht haben. Eben-

so gibt es beeindruckende Entwicklungen im Bereich theoretischer Modelle der Atmosphären von Roten Riesen, um solch immer detailliertere Beobachtungen zu erklären. Simulationen von Bernd Freytag, Susanne Höfner und Sofie Liljegren von der Universität Uppsala, Schweden, bestätigten jüngst, dass sich komplexe Strukturen bilden können, die zur Entstehung klumpigen Staubs führen (siehe Bild ganz oben).

Durch vergleichende Beobachtungen mit den Simulationen sind wir uns nun sicherer, einige der Prozesse der Sternatmosphären und Sternwinde zu verstehen. Die Winde reichern das interstellare Medium mit Produkten der Kernfusion im Sterninneren an, die zur Bildung neuer Sterne und Planeten verwendet werden.

MARKUS WITTKOWSKI ist Astronom bei der Europäischen Südsternwarte (ESO) mit Sitz in Garching bei München. Er betreut Beobachtungen, die am Paranal Observatorium in der chilenischen Atacamawüste durchgeführt werden und erforscht dort Atmosphären und Winde entwickelter Sterne.

Literaturhinweise

- Freytag, B. et al.:** Global 3D Radiation-Hydrodynamics Models of AGB Stars. In: *Astronomy & Astrophysics* 600, A137, 2017
- Khouri, T. et al.:** Study of the Inner Dust Envelope and Stellar Photosphere of the AGB Star R Doradus using SPHERE/ZIMPOL. In: *Astronomy and Astrophysics* 591, A70, 2016
- Leinert, C., Graser, U.:** Interferometrie an Großteleskopen. In: *Sterne und Weltraum* 11/2004, S. 32–39
- Maercker, M.:** Rote Riesen und ALMA – das größte Radioteleskop der Welt. In: *Sterne und Weltraum* 3/2015, S. 22–24
- Wittkowski, M. et al.:** Aperture Synthesis Imaging of the Carbon AGB Star R Sculptoris: Detection of a Complex Structure and a Dominating Spot on the Stellar Disk. In: *Astronomy & Astrophysics* 601, A3, 2017

WIS Didaktische Materialien:
www.wissenschaft-schulen.de/artikel/1051492