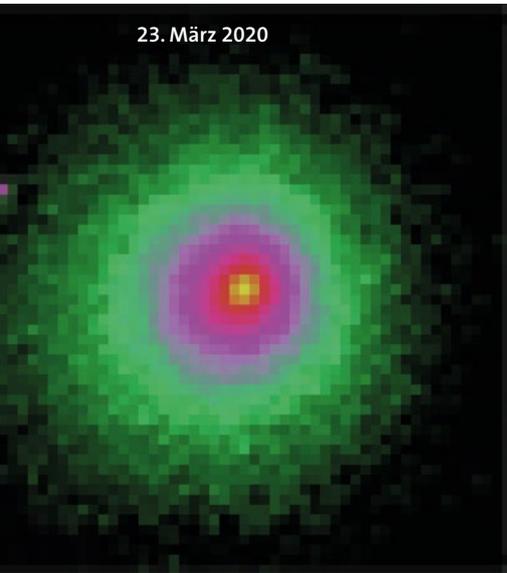
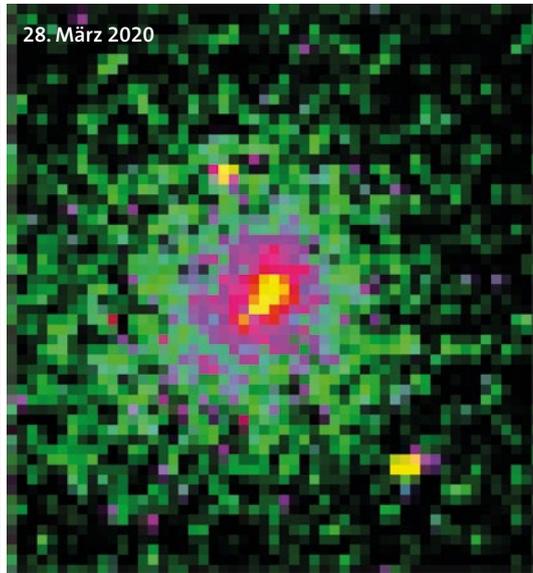


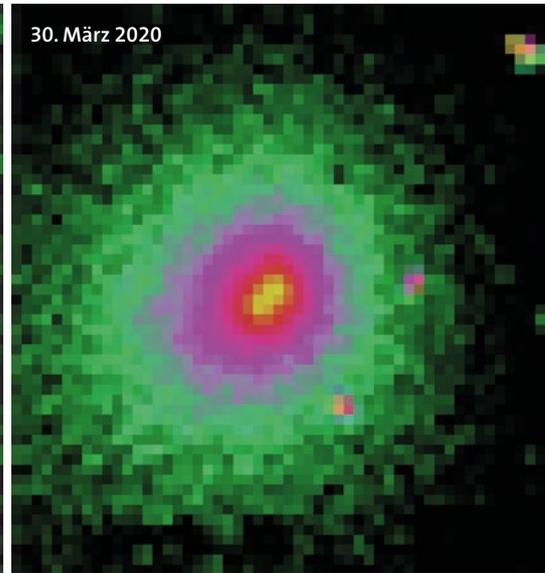
23. März 2020



28. März 2020



30. März 2020



Mit frdl. Gen. von David Jewitt (UCLA)

Der interstellare Besucher 2I/Borisov ist zerbrochen

Nach mehreren Helligkeitsausbrüchen zeigen Aufnahmen des Weltraumteleskops Hubble, dass der Kern des interstellaren Kometen Ende März 2020 in zwei Teile zerfallen ist. Schon eine Woche später hatte sich das kleinere Bruchstück in Form einer Staubwolke aufgelöst.

Beobachtungen mit dem Weltraumteleskop Hubble deuten darauf hin, dass der interstellare Besucher 2I/Borisov Ende März 2020 auseinandergebrochen ist. Während die Aufnahmen vom 23. März 2020 noch einen einzelnen hellen Kern im Zentrum der Kometenhülle, der Koma, zeigten, erschien das Objekt in Aufnahmen vom 30. März deutlich länglich (siehe Bilder oben). Die beiden Bruchstücke befanden sich zu diesem Zeitpunkt etwa 180 Kilometer voneinander entfernt, wie eine Gruppe von Forschern um David Jewitt von der University of California im »Astronomer's Telegram« berichtet. Eine andere Arbeitsgruppe schätzte den Durchmesser des abgetrennten Fragments auf weniger als 100 Meter. Dies ist eigentlich kein erheblicher Verlust, denn der Kern von 2I/Borisov dürfte zuvor etwa 400 Meter Gesamtdurchmesser gehabt haben. Unter der Annahme einer Kugelform kamen ihm so lediglich knapp zwei Prozent des Volumens abhanden.

Die aktuelle Beobachtung kommt nicht völlig überraschend: Frühere Analysen hatten ergeben, dass sich 2I/Borisov trotz seiner interstellaren Herkunft wie ein ty-

pischer Komet verhält. Er ähnelt darin den langperiodischen Kometen aus der Oort-schen Wolke, wo Milliarden von Objekten unsere Sonne in Abständen von bis zu einem Lichtjahr umrunden. Wird eines von ihnen beispielsweise durch gravitative Störungen von Nachbarsternen aus seiner Bahn gelenkt, so kann es tief ins Innere unseres Sonnensystems vorstoßen.

Heftige Gasausbrüche

Da der Himmelskörper große Mengen an flüchtigen Stoffen wie gefrorenen Gasen enthält, verdampfen diese bei der Annäherung an unser Zentralgestirn und entweichen ins All, wobei sie auch große Mengen an Staub mit sich reißen. Durch den Sonnenwind werden die Gase zu einem langen Schweif auseinandergezogen, und ein Komet entsteht. Da der Komet einem Stern offenbar noch nie so nahe kam, ereignen sich oft heftige Gasausbrüche, die den Kern auch zerreißen können (siehe Kasten S. 19 und SuW 6/2020, S. 13). Bereits Mitte März 2020 berichtete ein polnisches Astronomenteam von ausgeprägten Helligkeitsausbrüchen des Kometenkerns, bei denen größere Mengen an Gas und Staub

freigesetzt wurden: Das Verhalten deutet stark darauf hin, dass der Kern dabei sei, zu zerbrechen. Die beiden Bruchstücke bewegten sich relativ zueinander mit einer Geschwindigkeit von weniger als einem halben Meter pro Sekunde, was typisch für auseinanderbrechende Kometenkerne ist und schon häufig beobachtet wurde.

Am 3. April 2020 untersuchte eine weitere Forschergruppe am California Institute of Technology mit dem Weltraumteleskop Hubble den Kometen Borisov erneut. Dabei zeigte sich, dass das kleinere Fragment verschwunden war und sich an seinem Ort nur noch eine diffuse Wolke aus Gas und Staub befand. Vielleicht wurden nun auch Stoffe aus dem Inneren von 2I/Borisov freigesetzt, die man bislang noch nicht beobachtet hat.

Tatsächlich stießen Forscher um Martin Cordiner vom Goddard Space Flight Center der NASA in Greenbelt, Maryland, mit dem Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) der Europäischen Südsternwarte ESO in Chile im Bereich der Radiowellen auf hohe Gehalte von Kohlenmonoxid (CO), die um einen Faktor 9 bis 26 höher liegen, als bei allen anderen Kome-

Diese Aufnahmen mit der Weitfeldkamera 3 des Weltraumteleskops Hubble zeigen den Kernbereich des interstellaren Kometen 2I/Borisov. Während der Komet am 23. März 2020 noch unauffällig war, erschien der Kernbereich am 28. März bereits länglich und zwei Tage später deuten sich im Bild zwei Kerne an. Die Aufnahme wurde nach Helligkeitsgradienten künstlich eingefärbt, um die Unterschiede zu verdeutlichen.

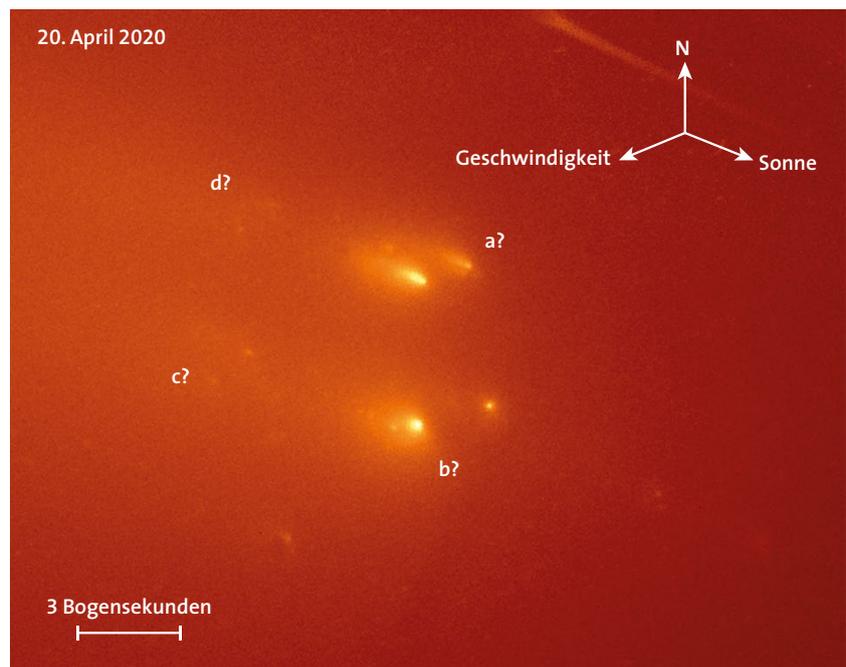
ten innerhalb eines Abstands von zwei Astronomischen Einheiten zur Sonne (rund 300 Millionen Kilometer = Durchmesser der Erdbahn) beobachtet wurden. Dabei war der Gehalt an Kohlenmonoxid in der Koma zeitweise deutlich höher als derjenige von Wasserdampf. Daneben stießen die Wissenschaftler auch auf Blausäure (HCN), die schon in vielen anderen Kometen nachgewiesen worden war. Offenbar bildete sich 2I/Borisov in einem sehr großen Abstand zu seinem Mutterstern, wo die Temperaturen äußerst gering waren. So konnte der Himmelskörper große Mengen des leicht flüchtigen Kohlenmonoxids anlagern. Daher mag der Komet auch aus dem Umfeld eines schwach leuchtenden Roten Zwergs stammen, wie die Forscher um Cordiner vermuten.

Fast zwei Millionen Tonnen Verlust

Mit dem Ultravioletteleskop UVOT des NASA-Satelliten Swift bestimmten Forscher um Zexi Xing von der University of Hongkong die Wasserfreisetzungsrate von Borisov im Zeitraum von September 2019 bis Februar 2020. Sie stellten fest, dass der Komet zum Zeitpunkt seiner höchsten Aktivität rund 30 Kilogramm Wasser pro Sekunde in Form von Dampf verlor. Damit dürfte der Himmelskörper bei seiner Sonnenpassage insgesamt etwa 230 000 Tonnen Wasserdampf freigesetzt haben. Mit anderen flüchtigen Stoffen zusammen waren es 320 000 Tonnen. Bei einem Masseverhältnis von Staub zu Gas von 4 : 1 hat der Komet bei seinem Durchflug des inneren Sonnensystems dann wohl insgesamt 1,6 Millionen Tonnen Materie eingeblüht. Je nach tatsächlichem Kerndurchmesser

Komet C/2019 Y4 ATLAS zerfällt weiter

Die bereits in SuW 6/2020, S. 13, beschriebene Auflösung des Kometen ATLAS hat sich fortgesetzt. Aufnahmen mit dem Weltraumteleskop Hubble vom April 2020 belegen, dass sich immer mehr Fragmente von dessen Kern abspalten, die sich danach rasch in Staubwolken auflösten. Auf den Bildern fanden sich zwischen 25 und 30 Fragmente. Zudem fiel die Helligkeit des Kometen insgesamt deutlich ab. Offenbar ist das Kernmaterial von ATLAS sehr fragil und bricht durch den Verlust des verbindenden Eises infolge der Sublimation leicht auseinander. Schon geringfügige Kräfte durch das Abströmen der Gase aus den frisch freigelegten Bruchflächen sorgen dafür, dass die Bruchstücke vom Kern abtreiben und zunächst eigene kleine Kometen bilden. Da die Bruchstücke aber nur geringe Ausdehnungen von wohl nur wenigen Metern besitzen, lösen sich diese Subkometen dann nach wenigen Tagen in Staubwolken auf.



NASA / ESA / Ye Qianzhi (University of Maryland)

Mit dem Weltraumteleskop Hubble entstand am 20. April 2020 diese Aufnahme der Kernzone des Kometen C/2019 Y4 (ATLAS). Neben vier größeren Bruchstücken lassen sich auch zahlreiche weitere kleine Fragmente erkennen, die sich nach wenigen Tagen bereits aufgelöst hatten.

schrumpfte seine äußere Schicht dabei um 1 bis 6,4 Meter.

Derzeit sind die Bedingungen für weitere Beobachtungen schwierig, da wegen der Covid-19-Krise die erdgebundenen Observatorien mit ihren lichtstarken Riesenteleskopen weitgehend außer Betrieb sind. Es bleibt zu hoffen, dass zumindest das Weltraumteleskop Hubble den interstellaren Besucher weiterhin im Auge behalten kann.

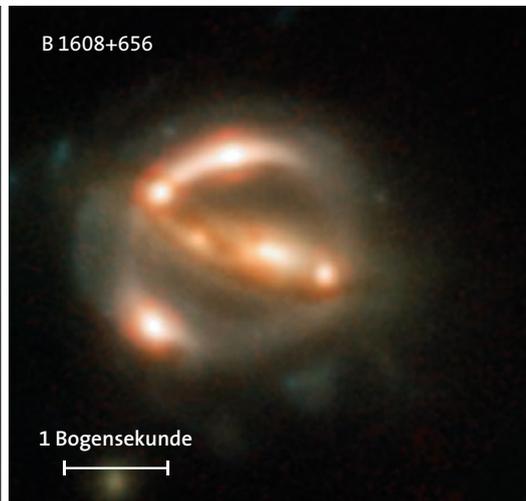
TILMANN ALTHAUS ist seit 2002 Redakteur bei »Sterne und Weltraum« und betreut vor allem Themen zur Planetenforschung und Raumfahrt.

Literaturhinweise

Astronomer's Telegram: Nummer 13549 (12. März 2020), 13611 (2. April 2020), 13613 (3. April 2020) und 13618 (6. April 2020)

Bodewits, D. et al.: The carbon monoxide-rich interstellar comet 2I/Borisov. *Nature Astronomy*, 2020

Xing, Z. et al.: Water production rates and activity of interstellar comet 2I/Borisov. *The Astrophysical Journal* 893, 2020



ESA/Hubble, NASA, Suyu et al. (<https://www.spacetelescope.org/images/heic1702b/>) / CC BY 4.0 (creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode)

Gravitationslinsen verschärfen Hubble-Krise

Seit wenigen Jahren liefern Messungen des Mikrowellenhintergrunds und der Typ-Ia-Supernovae miteinander unvereinbare Werte der Hubble-Konstante. Eine dritte, unabhängige Methode mit Hilfe von Gravitationslinsen vertieft den Graben nun weiter.

Die Hubble-Konstante H_0 ist eine der wichtigsten Naturkonstanten. Sie beschreibt die gegenwärtige Ausdehnungsrate des Universums. Bis in die späten 1990er Jahre wusste man nur, dass ihr Wert zwischen 50 und 100 Kilometer pro Sekunde und Megaparsec beträgt. Inzwischen liegen wesentlich genauere Werte vor; der bislang präziseste stammt aus den mit dem europäischen Satelliten Planck durchgeführten Messungen des kosmischen Mikrowellenhintergrunds und wurde im Jahr 2018 veröffentlicht. Er beträgt $67,4 \pm 0,5$ Kilometer pro Sekunde und Megaparsec. Pro Megaparsec, also mit jeder Million Parsec Entfernung (3,26 Millionen Lichtjahre), nimmt die Fluchtgeschwindigkeit der Galaxien im Mittel um 67,4 Kilometer pro Sekunde zu.

Das kosmologische Standardmodell

Dieser Wert folgt nicht direkt aus den Messungen zur Mikrowellenhintergrundstrahlung, sondern kann nur bei Annahme eines bestimmten kosmologischen Modells abgeleitet werden. Gegenwärtig wird das Lambda-CDM-Modell favorisiert, das darauf beruht, dass rund 70 Prozent der gesamten Energiedichte im lokalen Universum auf das Konto einer abstoßend wirkenden Dunklen Energie geht (symbolisiert durch die kosmologi-

sche Konstante Lambda Λ). Die gravitativ anziehende Materie macht die restlichen 30 Prozent aus, wobei mehr als 25 Prozent auf die kalte (also nicht-relativistische) Dunkle Materie (englisch: cold dark matter, CDM) entfallen.

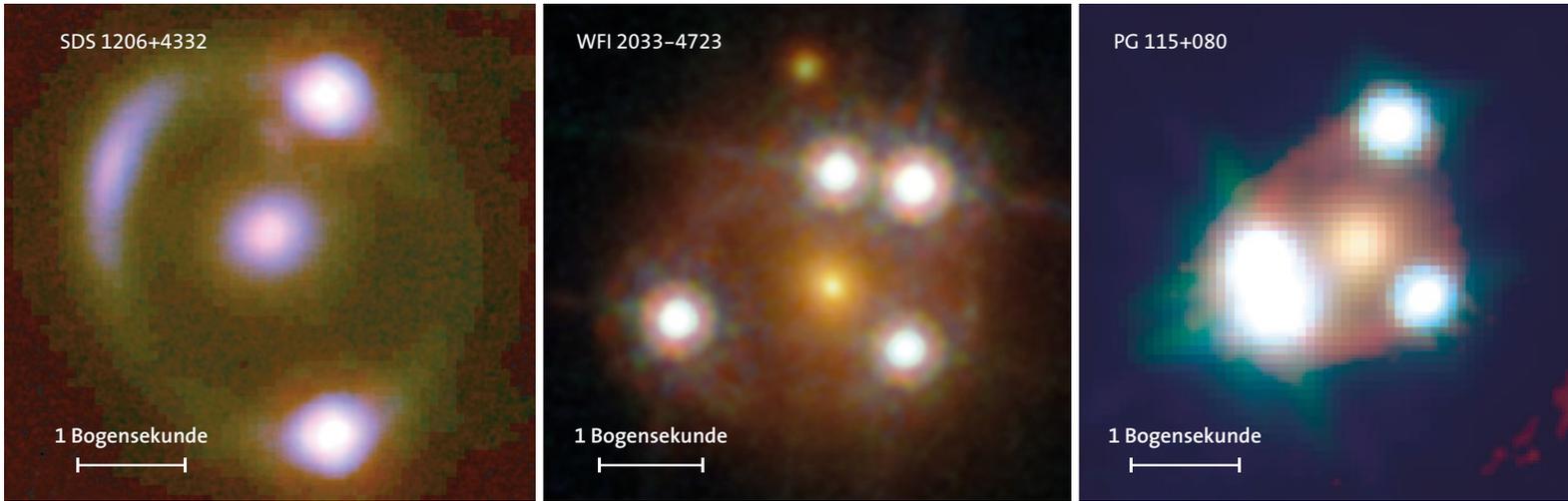
Direkte astronomische Messungen der kosmischen Expansion mit Hilfe weit entfernter Supernovae des Typs Ia waren lange Zeit erheblich ungenauer. Erst vor wenigen Jahren gelang es durch die verbesserte Eichung der Supernova-Distanzen anhand von Cepheiden-Sternen, die Präzision auf wenige Prozent zu steigern. Den bislang genauesten Wert veröffentlichte die SH0ES-Kollaboration um Adam Riess von der Johns Hopkins University in Baltimore im Jahr 2019: Er beträgt $74,03 \pm 1,42$ Kilometer pro Sekunde und Megaparsec, und liegt damit um rund zehn Prozent oder 4,4 Standardabweichungen oberhalb des Planck-Resultats (siehe SuW 10/2019, S. 22). SH0ES steht für »Supernova H_0 for the Equation of State«, was so viel heißt wie: Supernovae und H_0 für die [kosmologische] Zustandsgleichung.

Diese Diskrepanz ist eines der größten Rätsel der gegenwärtigen Kosmologie. Alle Versuche, sie ganz oder teilweise durch systematische Fehler bei der Analyse zu erklären, waren bislang erfolglos. Bleibt es dabei, könnte sie in letzter Konsequenz

zum Scheitern des Lambda-CDM-Modells führen. Ein alternatives kosmologisches Modell, das alle übrigen Beobachtungsdaten ebenso gut beschreibt wie die Standardkosmologie, ist jedoch nicht in Sicht.

Eine dritte, unabhängige Methode zur Messung der Hubble-Konstante verschärft das Problem nun weiter: Ein internationales Team um Kenneth Wong von der Universität Tokio veröffentlichte nun einen sehr genauen Wert von H_0 auf der Basis von Messungen mit Hilfe des Gravitationslinseneffekts (siehe SuW 10/2017, S. 20). Das Ergebnis lautet 73,3 Kilometer pro Sekunde und Megaparsec und hat einen relativen Fehler von nur 2,4 Prozent, ist also fast so genau wie die beiden anderen Methoden. Es bestätigt die Supernova-Messungen – und steht damit in klarem Konflikt mit dem Planck-Wert.

Wong und seine Kollegen verwendeten Präzisionsmessungen von sechs entfernten Quasaren, also den aktiven Kernen weit entfernter Galaxien. Der Motor eines Quasars ist ein massereiches Schwarzes Loch, in das Materie aus seiner Umgebung stürzt. Sie heizt sich dabei stark auf und setzt intensive Strahlung aller Wellenlängen frei. Quasare zeichnen sich deshalb durch hohe Leuchtkraft und starke Variabilität in Zeiträumen von Sekunden bis Wochen aus – das macht sie ideal für die Bestimmung der Hubble-Konstante.



Wird das Licht eines Quasars von einer auf der Sichtlinie zur Erde liegenden Gravitationslinse – einer Galaxie oder eines ganzen Galaxienhaufens – verzerrt, dann können mehrere Abbilder des leuchtkräftigen Galaxienkerns entstehen. Das Licht eines jeden Abbilds stammt von derselben Quelle (des fernen Quasars). Es hat jedoch auf der Reise zur Erde unterschiedliche Wege genommen und dafür unterschiedlich lange gebraucht.

Diese Laufzeitunterschiede äußern sich darin, dass die Helligkeitsschwankungen des Quasars von Abbild zu Abbild zu verschiedenen Zeiten auf der Erde ankommen. Die Zeitdifferenzen hängen davon ab, wie die Masse der Gravitationslinse auf der Sichtlinie zum Beobachter verteilt ist, aber auch von kosmologischen Parametern – allen voran dem Wert der Hubble-Konstanten H_0 . Die Methode schlug der norwegische Astrophysiker Sjur Refsdal schon im Jahr 1964 für gelinste Supernovae vor. Sie funktioniert aber ebenso mit Quasaren – und sogar bes-

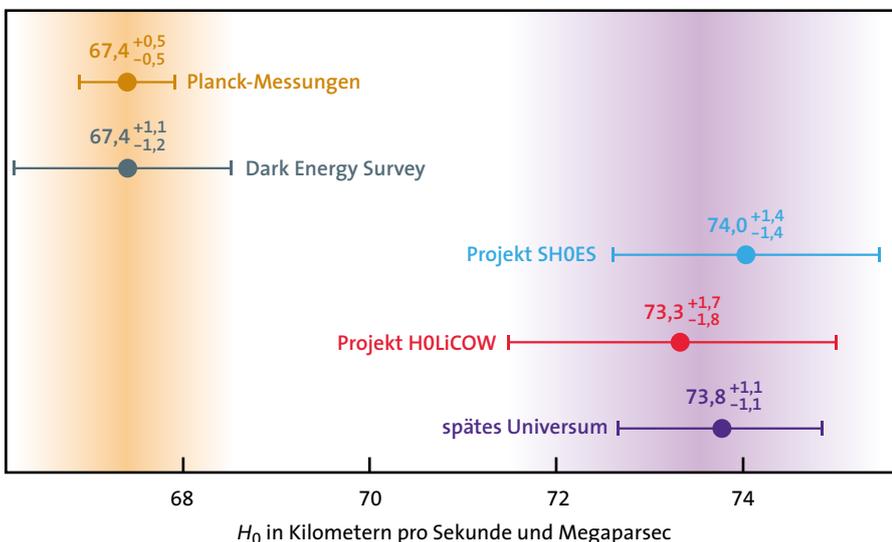
ser, da gelinste Quasare weit häufiger vorkommen als gelinste Supernovae (siehe SuW 5/2015, S. 17).

H_0 aus Gravitationslinsen

Die sechs von Wong und Kollegen untersuchten Systeme wurden im Rahmen des COSMOGRAIL-Projekts (Cosmological Monitoring of Gravitational Lenses) entdeckt; die nun veröffentlichten Resultate firmieren unter dem Etikett »H0LiCOW«, was mit einer Null geschrieben wird und » H_0 Lenses in COSMOGRAIL's Wellspring« (H_0 -Linsen in der COSMOGRAIL-Quelle) bedeutet. (Astronomen verbringen offenbar einen gewissen Teil ihrer Arbeitszeit mit dem Ersinnen von Akronymen.) Weil ihr Verfahren methodisch unabhängig von der H_0 -Bestimmung mit Supernovae ist, lassen sich beide Resultate zu einem gemeinsamen Wert von $73,8 \pm 1,1$ Kilometern pro Sekunde und Megaparsec kombinieren. Der Unterschied zwischen diesem kombinierten Wert und dem Planck-Resultat ist sehr groß und mit stol-

Für die Bestimmung der Hubble-Konstanten H_0 analysierten die Forscher sechs Quasare, deren Licht durch eine in Sichtlinie liegenden Gravitationslinse in mehrere Abbilder aufgespalten wurde. Die Aufnahmen entstanden durch eine Kombination von optischen und Nahinfrarotdaten des Weltraumteleskops Hubble sowie bodengestützten Observatorien unter Verwendung der adaptiven Optik. Die jeweils als Gravitationslinse wirkende Galaxie ist im Zentrum der einzelnen Bilder zu erkennen. Die Hintergrundgalaxie erscheint als verzerrter Bogen, während ihr aktiver Galaxienkern, der Quasar, in mehrere helle Bilder auf diesem Ring aufgespalten ist. Im Fall von HE 0435–1223 (siehe Bild oben links auf S. 20) formen diese Abbilder ein fast perfektes Einsteinkreuz.

Wong, K.C. et al.: H0LiCOW XIII. A 2.4% measurement of H_0 from lensed quasars: 5.3 σ tension between early and late-universe probes. arXiv:1907.04869, fig. 12; SuW-Gratik



Die gemessenen Werte der Hubble-Konstanten H_0 mit den jeweiligen Messunsicherheiten für das frühe (orange hinterlegt) und späte (violett hinterlegt) Universum widersprechen sich: Auf der einen Seite liefern die Messungen des Mikrowellenhintergrunds durch Planck und der kombinierten Analyse des Dark Energy Survey einen Wert um 67 Kilometer pro Sekunde und Megaparsec. Demgegenüber ist der Wert aus der Untersuchung von Supernovae vom Typ Ia (Projekt SH0ES) und der Gravitationslinsen (Projekt H0LiCOW) rund zehn Prozent höher. Das Ergebnis ihrer kombinierten Analyse (spätes Universum, lila) liegt 5,3 Standardabweichungen über dem Planck-Resultat.

zen 5,3 Standardabweichungen statistisch signifikant. Wo steckt der Fehler?

Die Gravitationslinsenmethode funktioniert auch bei größeren Distanzen als die Supernova-Methode. Dies macht sie robust gegen die Hypothese einer Hubble-Blase, also die Annahme, dass sich die Milchstraße durch Zufall in einer lokalen Anomalie mit unterdurchschnittlicher Massendichte im Vergleich zum Rest des Universums befindet. Auch wenn die Existenz einer solchen Blase bislang nicht bestätigt werden konnte, wird sie doch immer wieder zur Erklärung der Hubble-Diskrepanz zwischen dem frühen (Planck) und späten Kosmos (Supernovae) und sogar als Erklärung für ein Modell ohne Dunkle Energie herangezogen.

Eine Lösung des Problems der unterschiedlichen Hubble-Konstanten haben auch Wong und sein Team nicht anzubieten. Ihr nächstes Ziel ist es, die Präzision ihres H_0 -Werts von den derzeitigen 2,4 auf etwa 1 Prozent zu verbessern. Dazu werden etwa 40 gravitationsgelinste Quasarsysteme notwendig sein – eine Zahl, welche die Autoren in naher Zukunft erreichen wollen.

JAN HATTENBACH ist Physiker und Amateurastronom. Auf seiner Blogseite www.himmelslichter.net schreibt er über alles, was am Himmel passiert.



Milliarden frei fliegender Planeten

Seit Jahren fahnden Forscher nach vagabundierenden Planeten, die zu keinem Sternsystem gehören. Sind sie nur eine Illusion? Oder gar der kosmische Normalfall?

Bekanntlich gibt es Planeten in allen möglichen Varianten. In unserem Sonnensystem ist die Vielfalt beachtlich: große und kleine, rote und blaue, solche mit und solche ohne Atmosphäre. Manche von ihnen bieten festen Boden unter den Füßen, andere bestehen hauptsächlich aus Gas. Auf mindestens einem gibt es sogar Leben.

Weiter draußen im Kosmos geht es noch viel wilder zu. Da gibt es Planeten, zumeist Exoplaneten genannt, auf denen regnet es Eisen, oder sie bestehen aus Diamant und Graphit. Auf manchen ist es auf der einen Seite immer Nacht und auf der anderen Seite immer Tag, weil sie ihrem Zentralgestirn stets dieselbe Sei-

te zuwenden – diese gebundene Rotation kennen wir vom Mond.

Aber eines haben all diese vollkommen unterschiedlichen Typen gemeinsam: Sie umkreisen (mindestens) einen Stern, mal mehr, mal weniger weit entfernt von ihm. Mit einer Umlaufbahn, die mal mehr, mal weniger ellipsenförmig ist. Planeten sind also immer an ihr Zentralgestirn gebunden. Ein Exemplar ohne Stern, das ergibt keinen Sinn, oder?

Abtrünnige Himmelskörper

Seit einigen Jahren häufen sich Hinweise, dass es auch Planeten gibt, die ganz alleine durchs All fliegen. Keine Umlaufbahn, kein Stern, stattdessen eine endlo-

Literaturhinweise

Hilbert, S.: Ein neues Modell für den Kosmos? *Sterne und Weltraum* 10/2017, S. 20–22

Planck-Kollaboration: Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. arXiv: 1807.06209

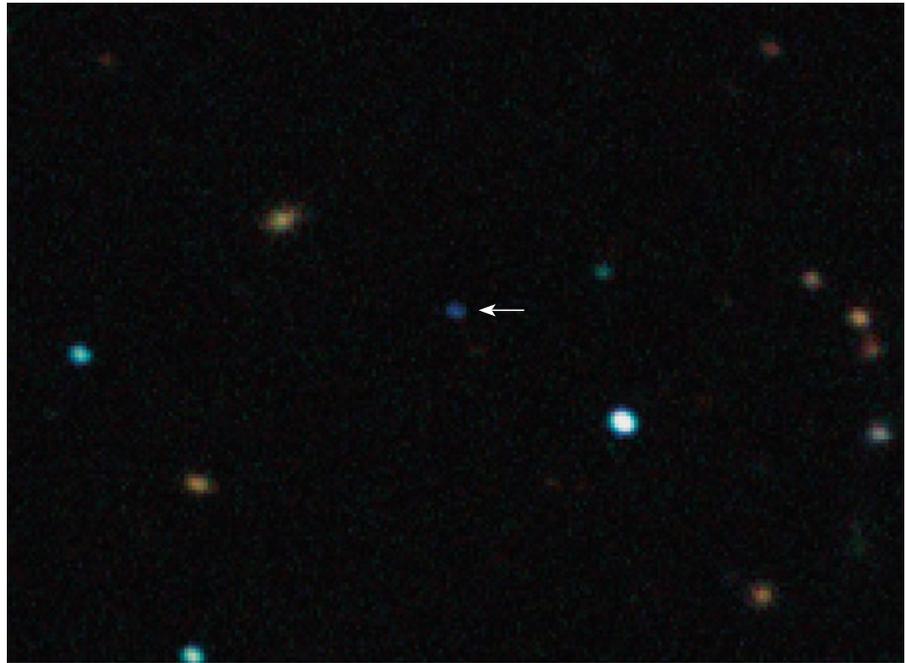
Quetz, A. M.: Zum Nachdenken – Shapiro-Verzögerung: Supernova unter der Gravitationslupe. *Sterne und Weltraum* 5/2015, S. 17

Ries, A. G. et al.: Large Magellanic Cloud Cepheid standards provide a 1% foundation for the determination of the Hubble constant and stronger evidence for physics beyond Λ CDM. *Astrophysical Journal* 876, 2019

Wong, K. C. et al.: H0LiCOW XIII. A 2.4% measurement of H_0 from lensed quasars: 5.3 σ tension between early and late-universe probes. arXiv: 1907.04869

W I S Didaktische Materialien:
www.wissenschaft-schulen.de/artikel/1051493

Diese künstlerische Darstellung zeigt den frei fliegenden Planeten CFBDSIR J214947.2–040308.9 – das unserem Sonnensystem nächste derartige Objekt. Den Hintergrund bildet eine echte Aufnahme des Zentralbereichs der Milchstraße, die das Infrarotteleskop VISTA in Chile geliefert hat.



ESO/P. Delorme (https://www.eso.org/public/germany/images/eso1245br) / CC BY 4.0 (creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode)

Dieses echte Foto des frei beweglichen Planeten CFBDSIR J214947.2–040308.9 wurde mit dem Instrument SOFI am New Technology Telescope der Europäischen Südsternwarte ESO am La-Silla-Observatorium im Infraroten aufgenommen. Der Himmelskörper erscheint als blaues Pünktchen (Pfeil). Er ist nur rund 130 Lichtjahre von der Erde entfernt. Der Freiflieger befindet sich nicht in einer Umlaufbahn um einen Stern und reflektiert daher auch kein Sternlicht. Sein schwaches Leuchten lässt sich nur als Wärmestrahlung im Infraroten nachweisen.

se Reise durch das Milchstraßensystem. Streng genommen kann es sich dabei gar nicht um Planeten handeln. »Die Nomenklatur ist Teil des Problems«, sagt Joachim Wambsganß von der Universität Heidelberg. Die Definition eines Planeten sieht nämlich vor, dass er sich in einer Umlaufbahn um einen Stern befindet. Wie soll also das sternlose Dingsda heißen? Nomade? Abtrünniges Etwas? Explanet?

»Da steckt dann ja schon eine Theorie zur Entstehung drinnen, nämlich, dass sich ein solches Objekt ehemals in einer Umlaufbahn um einen Stern befand«, so Wambsganß. »Man könnte es ein ungebundenes Objekt planetarer Masse nennen«, schlägt der Heidelberger Astronom vor, auch wenn er selbst zugibt: »Das ist pragmatisch, aber unromantisch.«

Vielleicht sollte man noch etwas pragmatischer sein und einfach »frei fliegender Planet« sagen. Selbst wenn dies einig Astronomen, die den Planetenbegriff sehr eng fassen, sauer aufstoßen dürfte, scheint weitgehend klar, was damit gemeint ist: ein Objekt, so massereich wie ein Planet. Vielleicht schaut es auch so

aus wie ein Planet, dem aber ein Stern und eine Umlaufbahn fehlen und der somit frei durch unsere Galaxie fliegt.

Linsende Vagabunden

Im Jahr 2011 haben Takahiro Sumi von der japanischen Universität Osaka und Kollegen erstmals Hinweise darauf gefunden, dass es frei fliegende Planeten geben könnte. Beobachtet haben die Astrophysiker zunächst 50 Millionen Sterne. Sie interessierten sich dabei aber nicht für die Sterne selbst, sondern hielten nach Mikrogravitationslinseneignissen Ausschau.

Der Gravitationslinseneffekt ist ein Phänomen, das sich mit Albert Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie beschreiben lässt. Demzufolge lenken Objekte auf Grund ihrer Masse das Licht dahinterliegender Quellen ab wie eine optische Linse. Bei Mikrogravitationslinsen ist, wie der Name schon andeutet, der Linseneffekt eher gering ausgeprägt. Allerdings beobachten Astronomen auch hier etwas: Die Lichtquelle im Hintergrund scheint vorübergehend heller zu werden.

Sumi und sein Team fanden ein paar solcher Fälle unter den 50 Millionen Hin-

tergrundsternen. Ein Planet, der von uns aus gesehen vor einem solchen Stern vorüberzieht, mag zwar selbst unsichtbar sein, führt jedoch bei dem Hintergrundstern zu einem charakteristischen symmetrischen Anstieg und Rückgang der Helligkeit.

Tatsächlich lassen sich mit dem Mikrogravitationslinseneffekt auch ganz normale Planeten nachweisen, also solche, die an ihren Stern gebunden sind. Allerdings wurden mit dieser Technik, gemessen an der Zahl aller bislang gefundenen, nur relativ wenige Exoplaneten entdeckt. Die Methode hat aber den Vorteil, dass sie sich zum Auffinden von relativ massearmen Objekten eignet, die selbst kaum leuchten – Planeten vom Format der Erde zum Beispiel.

Was aber führte nun Sumi und seine Kollegen dazu, in ihrem Artikel davon auszugehen, zehn vielleicht völlig ungebundene, also frei fliegende Planeten entdeckt zu haben? Nun – der dazugehörige Stern fehlte. Denn auch solch ein Stern sollte bei der Hintergrundquelle ein charakteristisches Schwanken in der Helligkeitskurve hervorrufen.



Frei fliegende Planeten

Die ersten sich frei im Milchstraßen-system bewegenden Planeten ohne Muttergestirn wurden schon vor 20 Jahren im offenen Sternhaufen Sigma Orionis entdeckt: anderthalb Dutzend Objekte, deren Massen vermutlich zwischen 8 und 18 Jupitermassen liegen. Diese massereichen Planeten ließen sich durch ihre Wärmestrahlung nachweisen. In Ermangelung einer äußeren Energiequelle bleibt ihnen nur allmähliches Schrumpfen unter Freisetzung eigener potenziellen Gravitationsenergie. Der Vorgang wird auch Kelvin-Helmholtz-Kontraktion genannt.

Aufgabe 1: Man berechne, um welchen Betrag ΔR ein frei fliegender Gasriese mit einer Anfangsgröße ($R_{\text{ffp}} = 1,2 R_{\text{J}}$) – etwas mehr als diejenige von Jupiter – mit achtfacher Jupitermasse ($M_{\text{ffp}} = 8 M_{\text{J}}$) schrumpfen muss, um wenigstens eine Million Jahre lang ($t_{\text{ffp}} = 10^6 \text{ a}$) – das Mindestalter des Sigma-Orionis-Sternhaufens – seine Leuchtkraft von **a)** $L_{\text{ffp,a}} = 10^{-4} L_{\odot}$ beziehungsweise von **b)** $L_{\text{ffp,b}} = 10^{-3} L_{\odot}$ aufrecht zu erhalten. Jupiterradius und -masse sind $R_{\text{J}} = 7,149 \cdot 10^7 \text{ m}$ und $M_{\text{J}} = 1,899 \cdot 10^{27} \text{ kg}$, die Leuchtkraft der Sonne ist $L_{\odot} = 3,846 \cdot 10^{26} \text{ W}$. Für Sterne und Gasplaneten mit nach innen wachsender Dichte

lässt sich das Gravitationspotenzial ansetzen mit $E_{\text{pot}} = -(2/7) G M^2/R$. Die Gravitationskonstante ist $G = 6,6743 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$. **Hilfe:** Die während der betrachteten Zeit abgestrahlte Energie ist $E(t_{\text{ffp}}) = L_{\text{ffp}} t_{\text{ffp}}$. Dann gilt: $\Delta E_{\text{pot}} = E(t_{\text{ffp}})$, wobei $\Delta E_{\text{pot}} = E_{\text{pot}}(R) - E_{\text{pot}}(R - \Delta R)$.

Aufgabe 2: Mit den derzeit zur Verfügung stehenden Teleskopen lassen sich erdgroße Freiflieger nicht über deren Wärmestrahlung aufspüren. Es geht allerdings auf einem anderen Weg. Wenn solch ein Objekt aus unserer Sicht zufällig vor einem entfernten Stern vorbeizieht, dann wirkt es als Mikrogravitationslinse und sorgt für eine vorübergehende Aufhellung. Damit dies geschieht, muss die entfernte Lichtquelle in den Einstein-Radius θ_E der Linse geraten. In angepasster Form lässt er sich folgendermaßen schreiben:

$$\theta_E = 5 \mu'' \sqrt{\frac{M_L}{10 M_{\oplus}}} \sqrt{\frac{\pi_{\text{rel}}}{0,1 \text{ m}''}}$$

M_L ist die Masse der Linse, also die des freifliegenden Planeten, $\pi_{\text{rel}} = \pi_L - \pi_S$ die relative Parallaxe ($\text{m}'' = \text{Millibogensekunden}$, $\mu'' = \text{Mikrobogensekunden}$). Für einen Freiflieger mit Erdmasse ($M = M_{\oplus}$) der Parallaxe $\pi_L = 2 \text{ m}''$ und einen Hintergrundstern mit $\pi_S = 1 \text{ m}''$ berechne man **a)** den Einstein-Radius und **b)** die Zeitskala des Ereignisses $t_E = \theta_E/\mu_{\text{rel}}$ mit einer typischen Eigenbewegung zwischen Quelle und Linse von $\mu_{\text{rel}} = 5 \text{ m}''/\text{a}$.

Aufgabe 3: Beim Mikrolinsenereignis OGLE-2012-BLG-1323 fanden sich die Werte $\theta_{E,1323} = 2,37 \mu''$ und $\mu_{\text{rel},1323} = 5,6 \text{ m}''/\text{a}$. Welche Zeitskala $t_{E,1323}$ hatte das Ereignis? AMQ

Ihre Lösungen senden Sie bitte an: Redaktion SuW – Zum Nachdenken, Haus der Astronomie, MPIA-Campus, Königstuhl 17, D-69117 Heidelberg. Fax: 06221 528377. E-Mail: zum-nachdenken@sterne-und-weltraum.de. Einsendeschluss ist der 3. Juli 2020.

Alle Leser, die bis einschließlich des Mai-Heftes 2021 mindestens neun richtige Lösungen senden, werden bei der jährlichen Verlosung berücksichtigt. Bitte beachten Sie unsere Teilnahmebedingungen auf Seite 16! Sie können Ihre Datenschutzrechte nach Art. 15 ff. DSGVO ausüben, indem Sie uns unter service@spektrum.de kontaktieren.

Allerdings ist noch ein anderes Szenario vorstellbar: Bei den zehn Kandidaten könnte es sich um solche Planeten handeln, die einfach in einer sehr großen Umlaufbahn um ihren Stern kreisen. Dann würde es nämlich einige Jahre dauern, bis der Stern ebenfalls die Hintergrundquelle passiert, oder auf Grund einer geometrisch ungünstigen Lage gar nicht daran vorbeizieht.

Frei oder nur fern?

Przemek Mróz vom California Institute of Technology erklärt die Problematik mit Hilfe von astronomisch gesinnten Außerirdischen: »Wenn Jupiter oder Saturn eine Mikrolinse wären, dann ließe sich auch die Sonne in der Lichtkurve der Mikrolinse erkennen. Aber Mikrolinsenereignisse durch Uranus und Neptun würden aussehen, als ob es sich dabei um frei fliegende Planeten handelt, weil sie so weit von der Sonne entfernt sind.«

Deshalb sprachen auch Sumi und Kollegen von der Möglichkeit, dass es sich bei ihren Entdeckungen entweder um frei fliegende Planeten handelt oder aber um an einen Stern gebundene Planeten in einer weiten Umlaufbahn. Ein versprengter Uranus oder aber ein einsamer Wanderer, ganz allein im All – keine Frage, welches Szenario ansprechender klingt. »Die meisten Menschen haben nur den Teil mit den frei fliegenden Planeten wahrgenommen«, kritisiert Joachim Wambsgans mit einem Seufzer.

Kein Wunder – denn die Geschichte klingt auch zu interessant. Laut diesen Beobachtungen wäre unsere Galaxie nämlich auf einmal mit extrem vielen Soloplaneten bevölkert. Sumi und sein Team rechneten hoch, dass es auf der Basis ihrer Messungen pro Stern im Milchstraßensystem fast zwei jupiterähnliche, frei fliegende Planeten geben könnte. Wenn wir von 100 Milliarden Sternen ausgehen, kämen wir so auf rund 200 Milliarden nomadenhafte Jupiter.

Mróz und seine Kollegen korrigierten im Jahr 2017 diese schwindelerregende Zahl mit weiteren Beobachtungen und einer verbesserten Statistik ein gutes Stück nach unten. Ihnen zufolge kommt lediglich auf jeden vierten Stern solch ein frei fliegender Gigant. Dafür nutzte die Forschergruppe Daten aus dem Beobachtungsprogramm OGLE (Optical Gravitational Lensing Experiment), um massereichere, frei fliegende Planeten von

ZUM NACHDENKEN: Unser Sonnensystem



368 Seiten. Preis: 25 €. Bestell-Link:

<https://amzn.to/2sYh6L>

Erdgröße aufzuspüren: Bislang konnte Mróz zehn solcher Kandidaten ausmachen.

Wie Planeten zu Wanderern werden

Das ist auf den ersten Blick eine eher übersichtliche Anzahl an Kandidaten, aber Mróz und seine Kollegen gehen davon aus, dass derartige Nomaden – oder die Pendants in großer Entfernung von ihrem Zentralgestirn – etwa so zahlreich wie die Sterne in der Milchstraße sind. »Wenn solche Kandidaten viel seltener als Sterne wären, hätten wir deutlich weniger Mikrolinsenereignisse beobachtet«, sagt der Forscher.

Also doch hundert Milliarden? Während man sich langsam an den Gedanken gewöhnt, dass da ganz schön viele planetare Körper alleine durch unsere Galaxis zu driften scheinen, stellt sich die Frage: Woher kommen die alle überhaupt her? Das können Forscher bislang nicht erklären. Sie wissen ja noch nicht einmal, ob diese Planeten tatsächlich frei fliegend sind. Aber prinzipiell sind drei Szenarien denkbar.

■ **Möglichkeit Nummer 1:** Jupitergroße, frei fliegende Planeten könnten sich beim Kollaps einer Gas- und Staubwolke bilden – ähnlich, wie ein Stern entsteht, nur in sehr viel kleinerem Maßstab. Derartige Objekte wären also tatsächlich nie in einer Umlaufbahn gewesen. Ob dieses Szenario in der Natur realisiert ist, bleibt unklar. Vor allem, da nun Mróz und seine Kollegen gezeigt haben, dass sie, wenn es sie denn gibt, doch nicht ganz so häufig sind.

■ **Möglichkeit Nummer 2:** Masseärmere, frei fliegende Planeten könnten ihre Karriere als ganz normaler Planet begonnen haben, indem sie in einer protoplanetaren Scheibe um einen jungen Stern entstanden. In den kommenden Millionen oder Milliarden von Jahren wären sie durch eine Verkettung ungünstiger Umstände aus dem Sternsystem befördert worden – zum Beispiel auf Grund von anderen Planeten, durch Wechselwirkungen in Doppelsternsystemen oder wegen eines vorbeifliegenden Sterns.

Die dynamischen Wechselwirkungen in jungen Sternhaufen haben beispielsweise Simon Portegies Zwart von der niederländischen Universität Leiden und Kollegen untersucht und im Jahr 2019 eine Studie dazu veröffentlicht. Sie simulierten die Vorgänge im Trapez-Sternhaufen des Orionnebels, einer Sternentstehungsregion in unserer

galaktischen Nachbarschaft. Sie kamen zu dem Schluss, dass auch dort der ein oder andere Planet aus seiner Bahn geworfen werden könnte – und es in der Galaxis insgesamt wohl 50 Milliarden solcher frei fliegender Planeten geben könnte.

■ **Möglichkeit Nummer 3:** Selbst bei einem schon weiter entwickelten Sternsystem kann sich ein Planet nicht in Sicherheit wiegen. Denn auch unsere Sonne wird sich in ein paar Milliarden Jahren zu einem Roten Riesen wandeln. In diesem Stadium verliert sie bis zur Hälfte ihrer Masse durch heftige Sternwinde. Das wiederum könnte die Umlaufbahnen der äußeren Planeten destabilisieren, und sie könnten wegdriften. »Eines Tages mag das auch Uranus und Neptun passieren«, glaubt Mróz.

Was da draußen wirklich ist

Um die Erde muss man sich vor diesem Hintergrund übrigens keine Sorgen machen: Unser Planet ist zu diesem Zeitpunkt vermutlich schon von der zu einem Roten Riesen aufgeblähten Sonne verschluckt worden. Damit besteht nicht die Gefahr, dass er aus dem Sonnensystem hinausbefördert wird und als Vagabund endet.

Auch für die Eisriesen am Rand des Sonnensystems gibt es noch Hoffnung, denn all die Szenarien für die Entstehung frei fliegender Planeten sind derzeit völlig hypothetisch. Das liegt unter anderem daran, dass bisher niemand sagen kann, ob es diese kosmischen Einzelgänger wirklich gibt. »Deshalb mag ich frei fliegende Planeten. Ich denke, sie erzählen eine Geschichte, die kompliziert und einzigartig ist«, sagt Portegies Zwart. Dennoch, auch diese Frage bleibt: Ist es wirklich eine Geschichte – oder doch eher ein Märchen?

Denn die bislang gefundenen frei fliegenden Planeten sind lediglich Kandidaten. Das Einzige, was man halbwegs bestimmen kann, ist ihre Masse. Nichts ist sonst über sie bekannt, nicht ihre Größe, ihre Herkunft, ihre Bahn. Noch einmal genauer hinschauen geht nicht, denn Mikrolinsenereignisse sind nur ein einziges Mal sichtbar, nämlich dann, wenn die Kandidaten gerade zufällig einen dahinterliegenden Stern passieren. Danach verschwinden sie auf Nimmerwiedersehen in den Weiten des Weltalls.

Trotzdem könnte die Zukunft ein wenig mehr Klarheit bringen. Einerseits wird das James Webb Space Telescope, der Nachfolger des Weltraumteleskops Hubble, im in-

fraroten Bereich des elektromagnetischen Spektrums direkt Ausschau nach den Wärmesignaturen von frei fliegenden jupitergroßen Objekten halten können. Mit seiner Hilfe ließe sich dann klären, ob es sie wirklich gibt. Der für März 2021 geplante Starttermin wird sich wegen der Corona-Pandemie weiter verzögern. Andererseits werden die geplanten Infrarotteleskope WFIRST und Euclid (siehe S. 26) zusammenarbeiten können, um über den Parallaxeneffekt die Masse sowie die Entfernung von Nomadenkandidaten genauer zu bestimmen.

Und schließlich wird die nächste Generation der Großteleskope mit ihren Spiegeldurchmessern von 30 Metern und mehr – wie das Extremely Large Telescope (ELT) der Europäischen Südsternwarte ESO und das US-kanadische Thirty Meter Telescope (TMT) – nicht nur die Mikrolinsenereignisse sehen; die neuen Riesenteleskope werden auch ausmachen können, ob zu einem frei fliegenden Kandidaten nicht doch ein Stern in weiter Entfernung dazugehört. Haben wir also ein paar Jahre Geduld, und wir werden herausfinden, ob die Planeten in unserer Galaxis alle in wohlgeordneten Bahnen laufen oder ob wir nicht doch von Milliarden einsamen Wanderern umgeben sind.

FRANZISKA KONITZER studierte Physik und Astrophysik an der University of York in Großbritannien und ist in München als Journalistin tätig.

Literaturhinweise

Cai, M. X. et al.: On the survivability of planets in young massive clusters and its implication of planet orbital architectures in globular clusters. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 489, 2019

Delorme, P. et al.: CFBDSIR2149–0403: a 4–7 Jupiter-mass free-floating planet in the young moving group AB Doradus? *Astronomy & Astrophysics* 548, 2012

Mróz, P. et al.: No large population of unbound or wide-orbit Jupiter-mass planets. *Nature* 548, 2017

Mróz, P. et al.: Two new free-floating or wide-orbit planets from microlensing. *Astronomy & Astrophysics* 622, 2019

 Didaktische Materialien:
www.wissenschaft-schulen.de/artikel/1051518