

Verteilung von mehr als 1,5 Millionen Galaxien in unserer kosmischen Nachbarschaft, wie sie der Two Micron All Sky Survey (2MASS) aufgenommen hat. Die Farben der Galaxien geben deren Entfernung an. Ein wesentlicher Beitrag von James Peebles zur Kosmologie war die Quantifizierung der Strukturen in der Galaxienverteilung.

Unser Platz im Universum

Der diesjährige Physik-Nobelpreis würdigt theoretische Entwicklungen in der Kosmologie und die Entdeckung des ersten Exoplaneten um einen sonnenähnlichen Stern.

Joachim Wambsganz

Der Physik-Nobelpreis wird in diesem Jahr vergeben für Beiträge zum Verständnis der Evolution des Universums und des Platzes der Erde im Kosmos: Eine Hälfte des Preises geht an den kanadischen Kosmologen James Peebles für seine theoretischen Entdeckungen auf dem Gebiet der physikalischen Kosmologie. Die andere Hälfte teilen sich die beiden Schweizer Astronomen Michel Mayor und Didier Queloz für die Entdeckung des ersten extrasolaren Planeten, der einen sonnenähnlichen Stern umkreist.

Jim Peebles hat über viele Jahrzehnte wichtige Beiträge zur Kosmologie und zur großräumigen Struktur des Universums geliefert. Nach dem Grundstudium in seiner Heimat Manitoba in Kanada war er als Graduate Student nach Princeton gegangen. Zusammen mit seinem Doktorvater Robert Dicke sagte Peebles 1965 die Mikrowellenhintergrundstrahlung als „Echo des Urknalls“ vorher [1]. Dies geschah wohl unabhängig von den früheren Arbeiten von Gamow, Alpher und Herman und etwa zeitgleich mit der Entdeckung der 3K-Strahlung, die aus allen Richtungen des Himmels zu uns kommt, durch Arno Penzias und Robert Wilson – eine Leistung, die 1978 mit dem Physik-Nobelpreis gewürdigt wurde. Im Abstract schreibt Peebles: “There is good reason to expect the presence of black-body radiation in an evolutionary cosmology, and it may be pos-

sible to observe such radiation directly“. 1970 sagte Peebles zusammen mit Jer Yu – etwa zeitgleich, aber unabhängig von Sunyaev und Zel'dovich – die Temperaturschwankungen im kosmischen Mikrowellenhintergrund vorher [2]. Deren detaillierte Beobachtung und Berechnung haben entscheidend dazu beigetragen, die Eigenschaften unseres Universums zu verstehen. Damit hatte Peebles ein Fenster in das sehr frühe Universum eröffnet, das experimentell und theoretisch immer präziser untersucht, beschrieben und verstanden wurde. Die Satelliten COBE (Nobelpreis 2006 für John Mather und George Smoot), WMAP und Planck haben dazu großartige Daten geliefert (**Abb. 1**).

Der Theoretiker Peebles beschäftigte sich zudem mit dem Modell des heißen Urknalls, er dachte nach über die primordiale Nukleosynthese und berechnete, dass in dieser frühen Phase des Universums Helium entstehen und etwa 25 % des Massenbudgets ausmachen sollte. Er war einer der ersten, die sich quantitativ mit der hierarchischen Struktur des Kosmos beschäftigten, und Mitbegründer des kosmologischen Standardmodells, in dem kalte Dunkle Materie die wesentliche Materie-Komponente ausmacht und die Kosmologische Konstante (bzw. Dunkle Energie) die dominante Energieform darstellt [3]. Um die unerwartet kleine Amplitude der Temperaturschwankungen im Universum zu erklären, schlug Peebles 1982 vor, dass die kosmische Materie zum weitaus überwiegenden Teil aus nichtrelativistischen



Juan Diego Soler

Philip James Edwin Peebles wurde 1935 in Winnipeg, Kanada, geboren. Er studierte an der University of Manitoba und promovierte 1962 bei Robert Dicke an der Princeton University, wo er seine ganze Karriere über blieb und heute emeritierter Professor ist.

Teilchen bestehen könnte, die nicht mit Licht wechselwirken. Damit trat die kalte Dunkle Materie auf den Plan, ohne die das kosmologische Standardmodell erfolglos wäre. Der Titel seines ersten Buches „Physical Cosmology“ aus dem Jahr 1971 beschreibt den wesentlichen Beitrag von Peebles: Er machte aus der Kosmologie eine quantitative Wissenschaft. Zuvor war die Kosmologie oft etwas abwertend als die Wissenschaft der drei Zahlen bezeichnet worden: Hubble-Konstante H_0 , Brems- oder Beschleunigungsparameter q_0 und Dichteparameter ρ_0 . Dieses Lehrbuch – wie auch „The Large-Scale Structure of the Universe“ von 1980 und die „Principles of Physical Cosmology“ von 1993 – waren schon zu ihrer Zeit Standardwerke, und sie gehören auch heute noch zum Repertoire jedes Studierenden der Extragalaktik und Kosmologie. Damit hat Peebles das Denken von Generationen von Studierenden und Wissenschaftlern geprägt. Er ist ein Wegbereiter der modernen Kosmologie.

Bei der Bekanntgabe des Nobelpreises 2019 beschrieb Mats Larsson, Vorsitzender des Nobelpreis-Komitees, Peebles Beiträge mit den Worten: „Die kosmische Hintergrundstrahlung [...] wurde zu einer Goldmine für unser Verständnis darüber, wie sich unser Universum entwickelt hat, von seiner frühen Kindheit zum heutigen Tag. Ohne die theoretischen Entdeckungen von James Peebles hätten uns die wundervollen Präzisionsmessungen dieser Strahlung [Anmerkung: Mikrowellenhintergrundstrahlung] in den letzten 20 Jahren fast nichts gesagt.“ Ulf Danielsson aus dem Nobelkomitee verglich das Universum mit einer Kaffeetasse: Den Kaffee, den er in eine Tasse eingoss, bezeichnete er als Dunkle Energie (69 % des Energie-Inhalts des Universums), einen

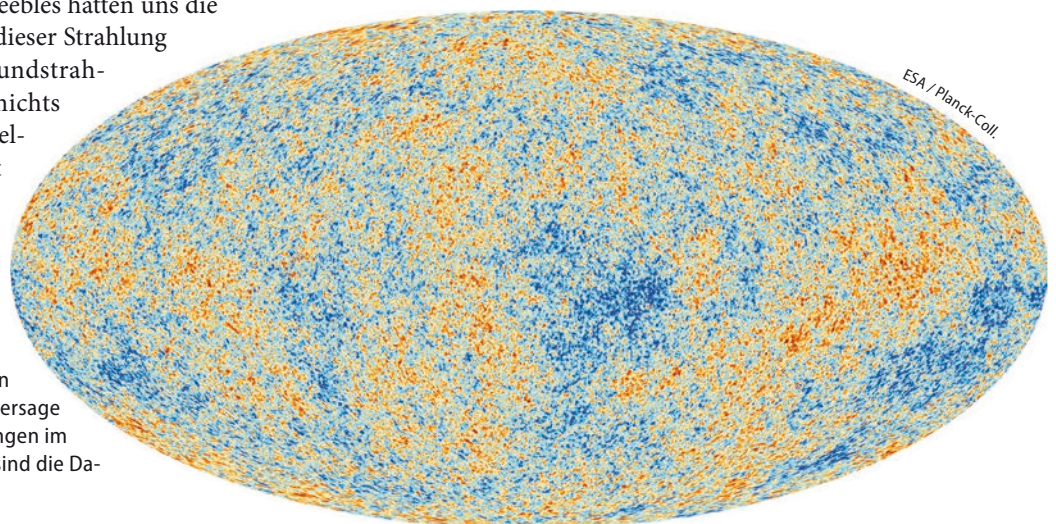
Abb. 1 Eine der großen wissenschaftlichen Leistungen von James Peebles war die Vorhersage und Berechnung der Temperaturschwankungen im kosmischen Mikrowellenhintergrund. Hier sind die Daten des Planck-Satelliten gezeigt.

Schuss zugefügter Milch erklärte er zur Dunklen Materie (26 %) und ein paar wenige eingestreute Zuckerkörnchen beschrieb er als normale Materie (5 %). Peebles habe theoretische Werkzeuge entwickelt und angewandt, um die dunklen Komponenten unseres Universums zu entdecken.

Während der Live-Übertragung der Nobelpreis-Presskonferenz wurde Jim Peebles per Telefon zugeschaltet und erklärte, wie faszinierend es sei, sehr klare Evidenz dafür zu haben, dass das Universum aus einem heißen und dichten Zustand expandierte. Die Theorie dazu sei zwar sehr genau getestet, wir müssten aber dennoch zugeben, dass die Dunkle Materie und die Dunkle Energie mysteriös seien. Das bedeute, dass es trotz der großen Fortschritte in unserem Verständnis der Ausdehnung des Universums noch viele offene Fragen gebe, insbesondere was diese Dunkle Materie und diese Dunkle Energie seien. Auf die Frage, was er als seine größte Entdeckung in der Kosmologie bezeichnen würde, erwähnte er die 55 Jahre, die er in diesem Feld gearbeitet habe, und dass es ihm sehr schwer fiel, da etwas herauszuheben: „It’s a life’s work!“ Peebles hatte auch einen Rat für junge Menschen, die in die Forschung streben: Man möge das aus Liebe zur Wissenschaft tun, nicht etwa mit dem Ziel, Preise und Auszeichnungen zu erhalten.

Planeten, die um Sterne kreisen

Michel Mayor untersuchte schon in seiner Doktorarbeit an der Universität Genf sonnennahe Sterne. Ende der 1970er-Jahre brachte ihn sein Interesse für die Dynamik von Doppelsternen dazu, den Spektrographen COREVAL zu entwickeln. Vor dieser Zeit wurden Spektren noch aufwändig auf photographischen Platten aufgenommen und analysiert. COREVAL wurde auf photoelektrischer Basis konstruiert und gebaut. Diese neue Technologie ermöglichte es, die sich periodisch ändernden Doppler-Geschwindigkeiten von Doppelsternen mit einer Präzision von 1 km/s zu vermessen. Um aber besser differenzieren zu können, ob die Begleiter massearme Sterne oder substellare Objekte waren – Braune Zwerge oder gar Planeten –, waren noch höhere Genauigkeiten notwendig. So entwickelte Mayor Anfang der 1990er-Jahre den Spektrographen ELODIE, bei dem Glasfasern das Licht vom Cassegrain-Fokus zum Spektrographen leiteten.





Michel Gustave Édouard Mayor wurde 1942 in Echallens, Schweiz, geboren. Er studierte Physik in Lausanne und wurde 1971 am Observatorium Genf promoviert. 1984 wurde er Professor an der Universität Genf. Seit seiner Emeritierung 2007 ist er dort Honorarprofessor.



Didier Patrick Queloz wurde 1966 in der Schweiz geboren. Er studierte Physik an der Universität Genf, wo er 1995 bei Michel Mayor promovierte. Dort wurde er im Jahre 2008 Professor, seit 2013 ist er auch Professor am Cavendish Lab der Universität Cambridge.

Dieser deckte den optischen Wellenlängenbereich von 391 bis 681 nm ab, Geschwindigkeitsmessungen waren mit einer Genauigkeit von 15 m/s oder besser möglich. Die wohl durchdachte Konstruktion von ELODIE ermöglichte eine sehr schnelle Datenreduktion, sodass sich die Radialgeschwindigkeiten quasi in Echtzeit auswerten ließen.

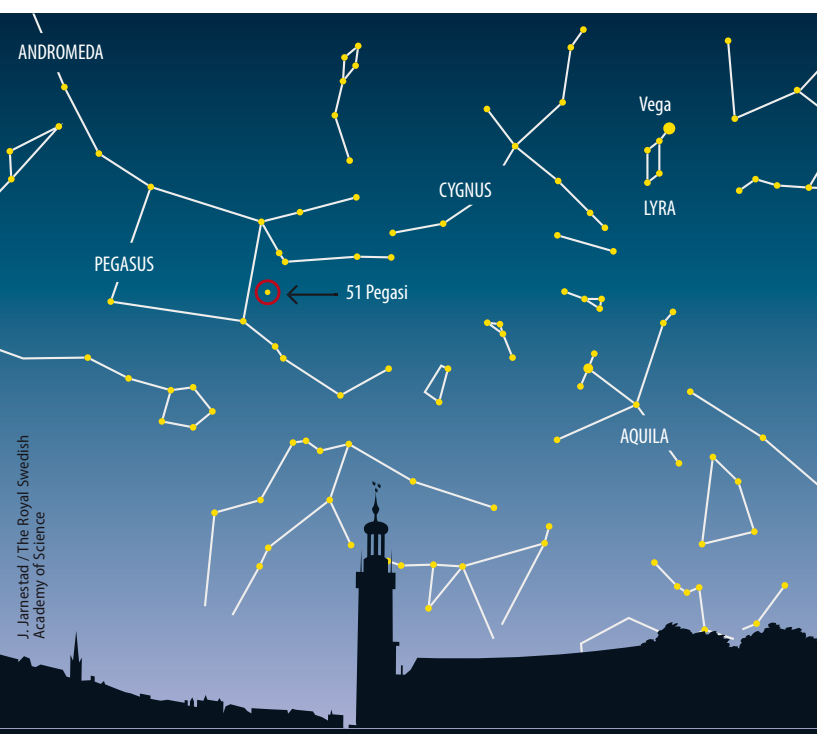
Inzwischen hatte Didier Queloz begonnen, als Doktorand mit Michel Mayor zu arbeiten. Nach der Installation des Echelle-Spektrographen ELODIE am 1,9 m-Spiegel des Observatoire de Haute-Provence in Frankreich Ende 1993 begannen die beiden Astronomen, die Radialgeschwindigkeiten einiger gezielt ausgewählter sonnennaher Sterne genau zu vermessen. Solche Projekte benötigen sehr lange Messreihen (Time Domain Astronomy) und daher auch ein gutes Teleskop an einem guten Standort sowie viele Beobachtungsnächte über Wochen, Monate oder gar Jahre, die Mayor und seinem Team an diesem Teleskop auch zur Verfügung standen.

Eine Liste von Sternen stand auf ihrem Beobachtungsprogramm, bei dem Stern 51 Pegasi (**Abb. 2**) – er ist etwa 50 Lichtjahre entfernt und gerade noch mit bloßem Auge sicht-

bar – konnten Mayor und Queloz eine Bewegung mit einer Periode von 4,2 Tagen und einer Amplitude von etwa 56 m/s nachweisen. Im Vergleich zum Sonnensystem – der Merkur als innerster Planet benötigt etwa 88 Tage für einen Umlauf – war dies höchst ungewöhnlich und unerwartet. Die Masse des Begleiters ist bei der Radialgeschwindigkeitsmethode nicht eindeutig zu bestimmen (**Abb. 3**); aufgrund der unbekanntenen Bahnneigung lässt sich nur eine untere Massengrenze angeben. Bei Sicht direkt von der Seite entspricht diese der tatsächlichen Masse. Für 51 Peg b beträgt die Massenuntergrenze etwa eine halbe Jupitermasse.

Nochmals ein Vergleich zum Sonnensystem: Die durch den Jupiter induzierte Bewegung der Sonne hat eine Amplitude von etwa 12 m/s (mit einer Periode von 12 Jahren), die Erdbewegung führt bei der Sonne zu einer Geschwindigkeit von 10 cm/s. Mit dem Spektrographen ESPRESSO am VLT-Teleskop der ESO werden Genauigkeiten von 10 cm/s oder besser angestrebt.

Die Bekanntgabe der Entdeckung des Planeten 51 Peg b im Oktober 1995 war eine Sensation [4]. Aber es gab auch Skepsis: Der Abstand zum Mutterstern von nur etwa 5,2 % des Erdbabstands zur Sonne sowie die hohe Masse des Begleiters waren komplett unerwartet. Keine Theorie hatte solch „heiße Jupiter“ in so engen Orbits vorhergesagt. Selbst die Interpretation der Messungen als Doppler-Bewegungen des Muttersterns wurde hinterfragt: Konnten es nicht einfach Pulsationen des Sterns sein, sodass die Photosphäre, also die äußere Schicht des Sterns, sich ausdehnt und zusammenzieht und sich damit periodisch auf uns zu bzw. von uns weg bewegt? Eine solche Pulsation würde jedoch unweigerlich mit einer Helligkeitsänderung des Sterns einhergehen und sich subtil auf die Form der Spektrallinien auswirken. Beide Einwände wurden in kurzer Zeit widerlegt: Es wurden keinerlei periodische Schwankungen der Sternhelligkeit korreliert mit der Radialgeschwindigkeitsamplitude gemes-



◀ **Abb. 2** Sternenhimmel über Stockholm: Der 1995 entdeckte erste Planeten-Begleiter eines sonnenähnlichen Sterns außerhalb unseres Sonnensystems befindet sich im Sternbild Pegasus und umkreist den Stern 51 Pegasi.

sen, und auch die sogenannte Bisektor-Analyse schloss eine Pulsationsbewegung des Sterns aus. Damit war die Entdeckung des ersten Planeten um einen sonnenähnlichen Stern bestätigt – und fand den Weg in die Lehrbücher.

Mayor und Queloz gaben sich damit nicht zufrieden. Sie entwickelten den Spektrographen HARPS mit einer noch höheren Genauigkeit von 1 m/s, der am 3,6 m Teleskop der ESO auf La Silla in Chile installiert ist. Um zu veranschaulichen, was eine solche Genauigkeit in der Praxis bedeutet, sei daran erinnert, dass die relative Wellenlängenänderung einer Spektrallinie dem Verhältnis der Geschwindigkeit des Sterns zur Lichtgeschwindigkeit entspricht:

$$\frac{\Delta v}{c} = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot (300\,000\,000 \frac{\text{m}}{\text{s}})^{-1} \approx 3 \cdot 10^{-9} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda}.$$

Eine Genauigkeit von $3 \cdot 10^{-9}$ bedeutet, die Ruhewellenlänge einer Spektrallinie bei etwa 600 nm ändert sich um 0,000 002 nm! Solch extrem präzise Spektrographen, die mit der Sorgfalt und Geduld eines schweizerischen Präzisions-Uhrmachers gebaut wurden, haben es Michel Mayor und Didier Queloz ermöglicht, eine Frage zu beantworten, die so alt ist wie die Menschheit: Ja, es gibt andere Planeten in der Milchstraße! Didier Queloz arbeitete am Genfer Observatorium weiter an der Suche und Charakterisierung von Exoplaneten. Inzwischen ist er auch Professor in Cambridge und war/ist beteiligt an den Transit-Suchprojekten CoRoT und WASP sowie dem Next Generation Transit Survey.

Heute sind mehr als 4000 individuelle Planeten um andere Sterne bekannt. Neben der von Mayor und Queloz angewandten Technik kommen für die Suche nach Exoplaneten weitere Methoden zum Einsatz [5]. Inzwischen wurde eine ganze Reihe von Systemen mit mehreren (bis zu sieben) Planeten entdeckt, darunter mit Trappist-1 eines, das dem Sonnensystem in einigen Eigenschaften ähnelt [6]. Heute wissen wir, dass Planeten der „Normalfall“ sind, nicht die Ausnahme: Eine statistische Analyse zeigt, dass im Mittel jeder Stern der Milchstraße mindestens einen Planeten mit der Masse des Neptun hat [7]. Die nächsten Ziele sind nun, die Massengrenzen weiter nach unten zu verschieben zu erd-, mars- und merkurähnlichen Planeten sowie die genauere Charakterisierung von Planeten in der habitablen Zone, also in einem Abstand vom Stern, in dem Wasser flüssig sein kann und in dem somit Leben, wie wir es kennen, vorstellbar ist. Manche Techniken erlauben es bereits, nach Monden um Planeten um Sterne zu suchen. Doch die ultimative Frage bleibt: Gibt es Leben anderswo?

Von der Milchstraße bis zum Rand des Universums

Die beiden in diesem Jahr ausgezeichneten Themengebiete – Kosmologie einerseits und extrasolare Planeten andererseits – sind bezogen auf ihre Massen- oder Längenskalen selbst für astronomische Verhältnisse extrem weit entfernt voneinander, sozusagen vom Rande des Universums bis zu unserer kosmischen Nachbarschaft in der Milchstraße. Die Preisträger sind sich jedoch in vielerlei Hinsicht ähnlich. Alle drei haben bereits in ihrer Doktorarbeit mehr oder weniger an den Themen geforscht, die zu der diesjährigen Auszeichnung führten. Alle drei haben ihr Arbeitsfeld um-

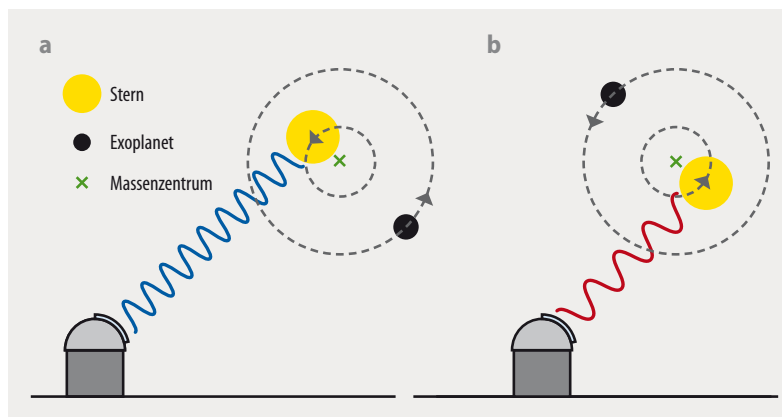


Abb. 3 Ein Stern bewegt sich aufgrund der Gravitationswirkung eines ihn umkreisenden Planeten um den gemeinsamen Schwerpunkt. Von der Erde aus betrachtet kann man die Radialgeschwindigkeits-Komponente dieser Bewegung mittels Doppler-Effekt messen: Bewegt sich der Stern auf uns zu, sind die Spektrallinien blauverschoben (a), bewegt er sich von der Erde weg, sind sie rotverschoben (b).

fassend weiterentwickelt und geprägt. Und alle drei sind als Menschen extrem angenehm und zuvorkommend geblieben. Sie sind stets bereit, Fragen von jungen Studierenden sowie der wissenschaftlichen Öffentlichkeit ernst zu nehmen und ausführlich wie auch freundlich zu beantworten.

Mit ihren Entdeckungen haben sie neue Forschungsrichtungen eröffnet: Ein signifikanter Anteil der Fachartikel in den Journalen „Astronomy & Astrophysics“ oder „Astrophysical Journal“ widmen sich der Kosmologie, die als physikalische Disziplin zweifelsohne von Jim Peebles mitbegründet wurde, der noch immer steigende Anteil von Artikeln aus der Exoplanetenforschung ist gewiss auf die Entdeckungen von Michel Mayor und Didier Queloz zurückzuführen.

Literatur

- [1] R. H. Dicke et al., *Astrophys. J.* **141**, 414 (1965) und P. J. E. Peebles, *Astrophys. J.* **142**, 1317 (1965)
- [2] P. J. E. Peebles und J. T. Yu, *Astrophys. J.* **162**, 815 (1970)
- [3] P. J. E. Peebles, *Astrophys. J. Lett.* **263**, L1 (1982)
- [4] M. Mayor und D. Queloz, *Nature* **378**, 355 (1995)
- [5] J. Wambsganß, *Physik Journal*, Mai 2009, S. 49 und L. Kaltenegger, *Physik Journal*, Februar 2012, S. 25
- [6] Y. Tsapras, M. Hundertmark und J. Wambsganß, *Physik Journal*, April 2018, S. 18
- [7] A. Cassan et al., *Nature* **481**, 167 (2012)

Der Autor



DPG/Grewer

Joachim Wambsganß (FV Extraterrestrische Physik) studierte Physik und Astronomie in Heidelberg, München und Princeton. Nach Diplom und Promotion an der LMU München und am Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching verbrachte er Postdoc-Jahre

in Princeton, Garching und Potsdam. 1999 wurde er Professor an der U Potsdam, 2004 erhielt er einen Ruf an die U Heidelberg, wo er seither Direktor des Astronomischen Rechen-Instituts (ARI) ist.

Prof. Dr. Joachim Wambsganß, Zentrum für Astronomie der Universität Heidelberg, ARI, Mönchhofstr. 12 – 14, 69120 Heidelberg und International Space Science Institute (ISSI), Hallerstr. 6, 3012 Bern