

**DIE
SIGMUND
DÄR
STERNE**

DIE SIGNATUR DER STERNE

LICHT AUF KRUMMEN WEGEN

JOACHIM WAMBSGANSS

Neue technische Entwicklungen machen es möglich, die Helligkeit vieler Millionen Sterne nahezu lückenlos zu vermessen. Auf diese Weise können Astrophysiker äußerst seltene Signale der Planeten aufspüren. Die Dauer-messungen bestätigen nicht nur den bereits von Einstein vorausgesagten Gravitationslin-seneffekt. Sie führten auch zu einem spekta-kulären Ergebnis: Jeder Stern der Milchstraße wird von Planeten umkreist – Planeten sind die Regel, nicht die Ausnahme.

A

Am 29. Mai des Jahres 1919 schob sich der Neumond langsam vor die Scheibe der Sonne. Mitten am Tag wurde es dunkel, und für wenige Minuten waren die Sterne am dunklen Taghimmel zu sehen. Die Sonnenfinsternis kam den Wissenschaftlern der britischen Royal Society gerade recht, um die Sternpositionen nahe der Sonne zu vermessen. Das ist nur während einer totalen Sonnenfinsternis möglich: Normalerweise ist der blaue Himmel so hell, dass – bekannterweise – tagsüber keine Sterne zu sehen sind. Mit ihren Messungen wollten die britischen Astronomen die Allgemeine Relativitätstheorie bestätigen, die Albert Einstein im Jahr 1915 fertiggestellt hatte. Viele Experten waren von Einsteins Theorie seinerzeit sofort begeistert, sie war von großer mathematischer Schönheit und Eleganz – aber beschrieb sie unser Universum auch richtig?

Nach Einstein beeinflussen Planeten, Sterne, Galaxien – alle Objekte im Universum – den Raum: Aufgrund ihrer Masse „verbiegen“ sie ihn sozusagen. Im Gegenzug gibt der verbogene Raum den Planeten, Sternen und Galaxien vor, wie sie sich zu bewegen haben. Schon im Jahr 1905 hatte Einstein mit seiner berühmten Formel $E = mc^2$ gezeigt, dass Materie („m“) und Energie („E“) äquivalent zueinander sind. Daraus folgt, dass sich Licht ähnlich wie Materie verhält: Lichtstrahlen werden ebenfalls von der Schwerkraft angezogen und müssen der Krümmung des Raumes folgen. Das war ein radikaler Bruch mit der vorherigen Sichtweise, dem „Newtonschen Universum“. In ihm ziehen sich die Objekte aufgrund ihrer Schwerkraft in einem dreidimensionalen Euklidischen Raum gegenseitig an, und Lichtstrahlen breiten sich immer kerzengerade aus. Beschrieb Einstein das Universum besser als Euklid und Newton?

Das war die Frage, die von beiden großen Expeditionen der britischen Royal Society während der Sonnenfinsternis am 29. Mai 1919 beantwortet werden sollte. Nach Einsteins Theorie „verbiegt“ auch die Sonne aufgrund ihrer Masse den Raum um sich herum. Die Sterne, die von der Erde aus gesehen knapp neben der Sonne stehen, sollten demzufolge „nach außen“ verschoben erscheinen. Einstein selbst war es, der solche Messungen während einer Sonnenfinsternis vorgeschlagen hatte, um seine Vorhersage zu bestätigen.

Die Ergebnisse der beiden mittlerweile berühmten Sonnenfinsternis-Expeditionen wurden im Herbst des Jahres 1919 veröffentlicht und waren eine Sensation: Die Positionen der Sterne erwiesen sich als exakt so „nach außen“ verschoben, wie von Einstein vorhergesagt, jeweils weg vom Zentrum der Sonne, umgekehrt proportional zum Abstand vom Sonnenzentrum, bei doppeltem Abstand also um den halben Winkelwert. Die Verschiebungen der Sternpositionen nahe der Sonne entsprachen genau Einsteins Berechnungen, die Resultate der beiden großen Messkampagnen bestätigten somit die Allgemeine Relativitätstheorie durch Beobachtung: Dies war der Beginn von Einsteins Weltruhm.

Objekte, die den Raum verbiegen

Die Ablenkung von Lichtstrahlen durch die Schwerkraft hat noch eine weitere Wirkung: Die Allgemeine Relativitätstheorie sagt nämlich voraus, dass uns weit entfernte Sterne auf diese Weise heller erscheinen. Nehmen wir an, ein kugelrunder Stern strahlt in alle Richtungen gleich viel Licht ab, etwa so, wie eine altmodische Milchglas-Glühbirne, die in den von der Fassung abgewandten Raum strahlt. Wenn man sich den Stern aus einer festgelegten Entfernung anschaut, hat er eine bestimmte Helligkeit. Diese Helligkeit sollte bei konstanter Entfernung exakt die gleiche sein – unabhängig davon, aus welcher Richtung man den Stern betrachtet. Man könnte sich eine Kugelschale mit sehr großem Radius um diesen Stern herum vorstellen: Jeder Quadratzentimeter der Kugelschale würde von innen beleuchtet, und jeder Quadratzentimeter würde genau gleich viele Lichtstrahlen empfangen. Diese Vorstellung ist auch nach Einstein richtig – allerdings nur unter der Voraussetzung, dass der (Welt-)Raum zwischen dem Stern und der Kugelschale völlig leer ist.

Aber das Weltall ist nicht leer. Es ist bevölkert von Staub und Gas, von Planeten und Monden, von Sternen und Galaxien. Und alle diese Objekte verbiegen den Raum, wenn auch meist nur um einen winzig kleinen Betrag. Stellen wir uns nun in diesem Szenario einen einzigen Stern auf halber Strecke zwischen dem Zentralstern und der Kugelschale vor: Der einzelne Stern verbiegt den Raum. Die ursprünglich gleichmäßig ausgesandten Lichtstrahlen des Zentralsterns spüren die Anwesenheit dieses zweiten Sterns, sie werden von ihm angezogen und abgelenkt. Die Folge: Vom Zentralstern aus gesehen kommen direkt hinter dem als Fokussier-Linse wirkenden Stern mehr Lichtstrahlen pro Quadratzentimeter auf der Kugelschale an – und weit weg davon kommen weniger Lichtstrahlen an. Denn es werden ja keine neuen Lichtstrahlen erzeugt, sie verteilen sich nur anders auf der Kugelschale.

Physikalisch ausgedrückt heißt das: Verschiedene Beobachter messen in gleicher Entfernung unterschiedliche Helligkeiten des Zentralsterns. An manchen Positionen

kommen mehr Lichtstrahlen an: Der Zentralstern erscheint heller. An anderen Positionen kommen weniger Lichtstrahlen an: Entsprechend schwächer erscheint der Zentralstern. In der Summe müssen die helleren Messungen exakt durch die schwächeren Messungen kompensiert werden, das folgt allein schon aus dem Gesetz der Energieerhaltung. Das Interessante daran ist, dass Positionen mit helleren und schwächeren Messungen sehr unterschiedlich verteilt sind: Es gibt wenige Stellen, von denen aus der Zentralstern (teilweise sehr viel) heller erscheint; im Gegensatz dazu erscheint der Zentralstern von den allermeisten Positionen aus und verglichen mit einer „leeren“ Kugelschale nur minimal schwächer.

Was das für eine praktische Bedeutung für die Erforschung des Weltalls hat, illustriert ein astrophysikalisches Phänomen, das Einstein in den 1930er-Jahren vorhergesagt: Von der Erde aus betrachtet kann uns ein weit entfernter Stern heller oder sogar als Doppelstern erscheinen, wenn zwischen ihm und uns ein anderer Stern steht. Der Vordergrundstern wirkt dann als „Schwerkraft-Linse“: Er fokussiert das Licht des Hintergrundsterns wie eine konvexe Glaslinse auf uns zu. Nach diesem Effekt erhielt das Phänomen auch seinen heutigen Namen: „Mikrogravitationslinsen-Effekt“.

Stellen wir uns nun folgende Szene vor: Der Vordergrundstern ist am Himmel zunächst relativ weit vom Hintergrundstern entfernt, dann läuft er vor ihm vorbei und zieht auf der anderen Seite davon. Wenn das geschieht, verändert sich die Helligkeit des Hintergrundsterns in charakteristischer Weise. Zu Einsteins Zeiten war es noch nicht möglich, diese Veränderungen zu messen, zumal ein derart präzises Zusammentreffen von Hintergrund- und Vordergrundstern ein extrem seltenes Ereignis ist. Selbst Einstein war skeptisch und befürchtete, dass es keine wirkliche Chance gebe, den Mikrogravitationslinsen-Effekt jemals zu messen.

Damit behielt er ausnahmsweise einmal nicht Recht: Die technische Fortentwicklung der Teleskope, CCD-Kameras, Analyse-Software und Computerleistung haben Astronomen ab Mitte der 1990er-Jahre in die Lage versetzt, solche „Mikrolinsen“-Ereignisse routinemäßig anhand der charakteristischen Lichtkurven zu entdecken und zu vermessen: Die Helligkeit des Hintergrundsterns erhöht sich, erreicht ein Maximum und fällt auf symmetrische und mathematisch exakt vorbestimmbare Weise wieder ab. Das ist nicht nur ein interessantes optisches Kuriosum – es ist auch – ein sehr nützlicher und erkenntnisreicher astrophysikalischer Effekt.

Auf der Suche nach Exoplaneten

Ursprünglich war der Mikrogravitationslinsen-Effekt in den 1980er-Jahren von dem polnischen, an der Universität

„Für die
Sterne gilt:
Schein
ist Sein.“

„Von der Erde aus betrachtet kann uns ein weit entfernter Stern heller oder sogar als Doppelstern erscheinen, wenn zwischen ihm und uns ein anderer Stern steht. Der Vordergrundstern wirkt dann als ‚Schwerkraft-Linse‘.“



PROF. DR. JOACHIM WAMBSGANSS studierte Physik und Astronomie in Heidelberg, München und Princeton (USA) und wurde 1990 an der Ludwig-Maximilians-Universität München promoviert. Nach Stationen an der Princeton University in New Jersey (USA), am Max-Planck-Institut für Astrophysik Garching, am Leibniz-Institut für Astrophysik in Potsdam sowie an der Universität Potsdam folgte er 2004 einem Ruf an die Universität Heidelberg und wurde Direktor des Astronomischen Rechen-Instituts (ARI). Von 2005 bis 2015 war er zudem Direktor des Zentrums für Astronomie der Universität Heidelberg (ZAH). Seit Herbst 2017 ist er Präsident der Astronomischen Gesellschaft. Zu seinen Forschungsinteressen gehören neben dem Gravitationslinseneffekt unter anderem extrasolare Planeten, Dunkle Materie und Galaxienhaufen.

Kontakt: jkw@ari.uni-heidelberg.de

Princeton arbeitenden Astrophysiker Bohdan Paczyński als Methode vorgeschlagen worden, um nach der sogenannten Dunklen Materie zu suchen. Er ging dabei von folgenden Überlegungen aus: Ein Objekt der Dunklen Materie strahlt – wie es der Name schon sagt – selbst kein Licht aus. Würde ein solches „unsichtbares“ Objekt zwischen der Erde und einem weit entfernten Stern hindurchlaufen, dann sollte ein Beobachter den Hintergrundstern dennoch auf die beschriebene charakteristische Weise heller werden und alsdann wieder verblassen sehen. Auf diese indirekte Weise, vermutete Paczyński, könnte man die Dunkle Materie nachweisen, wenn sie in Form von kompakten Objekten vorliegt. Die Experimente waren jedoch nicht erfolgreich.

Inzwischen nutzen Astronomen den Mikrogravitationslinsen-Effekt auf andere Weise mit sehr viel Erfolg: Sie suchen damit nach Planeten bei anderen Sternen – und

entdecken mit dieser Methode auch solche „Exoplaneten“. Wenn der „vorüberziehende“ Stern nämlich von einem Planeten begleitet wird, wirkt der Planet als zusätzliche (aber deutlich schwächere) Gravitationslinse. Der typische Helligkeitsverlauf, die sogenannte Lichtkurve, kann ein weiteres charakteristisches Maximum oder sogar mehrere Maxima enthalten. Das sind die eindeutigen Signaturen von Exoplaneten.

Meine Arbeitsgruppe am Astronomischen Rechen-Institut (ARI) des Zentrums für Astronomie der Universität Heidelberg (ZAH) ist innerhalb eines großen internationalen Teams seit mehr als einer Dekade an einem Beobachtungsprogramm beteiligt, das die Helligkeit von vielen Millionen Sternen immer wieder misst. Unser Ziel ist es, sehr seltene Mikrogravitationslinsen-Ereignisse zu entdecken, die durch ein weit entferntes Planetensystem hervorgerufen werden. Dazu nutzen wir Teleskope in

„Um ein einziges Planetensignal zu entdecken, muss man immer wieder die Helligkeit von 100 Millionen Sternen vermessen.“

Chile, Südafrika und Australien. Wir beobachten deshalb von der Südhalbkugel aus, weil von dort der Zentralbereich der Milchstraße sichtbar ist, in dem eine sehr hohe Sterndichte besteht – so bekommt man stets sehr viele Sterne in das Messfeld der Kamera. Die Standorte der Teleskope sind darüber hinaus so gewählt, dass zu jedem Zeitpunkt an mindestens einem Beobachtungsort Nacht ist. So können wir die Helligkeiten der Sterne tatsächlich rund um die Uhr messen: Wir arbeiten gleichsam jeden Tag in einer 24-Stunden-Nachtschicht. Das ist erforderlich, um das Signal eines Planeten auf keinen Fall zu verpassen. Denn die Chance, auf diese Weise einen Exoplaneten zu entdecken, steht eins zu 100 Millionen. Mit anderen Worten: Um ein einziges Planetensignal zu entdecken, muss man immer wieder die Helligkeit von 100 Millionen Sternen vermessen.

Noch vor wenigen Jahren sind Doktoranden und Nachwuchswissenschaftler zu den Beobachtungsorten gereist, um dort für zumeist zwei Wochen Messungen durchzuführen. Seit drei Jahren können wir dafür die robotischen Teleskope des „Las Cumbres Observatory“ in Santa Barbara, Kalifornien, nutzen. Mit ihnen lassen sich Messreihen nahezu vollautomatisch erstellen. Seither haben wir eine ganze Reihe von Exoplaneten entdeckt. Arnaud Cassan,

Von Kalendergrundlagen zu Satellitenmissionen

Das Zentrum für Astronomie der Universität Heidelberg (ZAH) ist die größte universitäre Einrichtung für astronomische Forschung und Lehre in Deutschland. Es wurde im Jahr 2005 als Zusammenschluss der bisherigen Landesforschungseinrichtungen Astronomisches Rechen-Institut (ARI) und Landessternwarte Königstuhl (LSW) mit dem bereits existierenden universitären Institut für Theoretische Astrophysik (ITA) gegründet.

Die Forschung am ZAH umfasst einen breiten Themenbereich von Kosmologie und Gravitationslinsen über Galaxienentwicklung und Stelldynamik bis hin zu Sternentstehung, Astrometrie und Satellitenmissionen. Die Geschichte des Astronomischen Rechen-Instituts geht zurück bis zur Erteilung des Kalenderpatents im Jahr 1700. Auch heute noch gehören zu seinen Aufgaben astronomische Dienstleistungen wie Kalendergrundlagen und Jahrbücher. Das ARI ist in verschiedene lokale, europäische und weltweite Forschungsnetzwerke eingebunden. Es spielte eine führende Rolle bei der Vorbereitung der Satellitenmission „Gaia“ der Europäischen Raumfahrtorganisation ESA und betreibt einen Höchstleistungsrechner zur Berechnung gravitativer Wechselwirkungen.

www.zah.uni-heidelberg.de

THE SIGNATURE OF STARS

BENT OUT OF SHAPE

JOACHIM WAMBSGANSS

A solar eclipse almost 100 years ago proved: light rays do not always follow a straight path. With his General Theory of Relativity, Albert Einstein predicted that stars and galaxies deform space, and that light rays follow the resulting curvature. In May 1919, a British expedition measured the positions of stars near the eclipsed sun and showed that they appeared offset during the eclipse – the confirmation of Einstein’s prediction!

In the 1930s, Einstein showed that a background star can become brighter or even appear to be double when a foreground star passes in front of it as seen from Earth. Einstein knew that this would be an extremely rare coincidence, so he was sceptical that this phenomenon would ever be observed. Due to enormous technological advances in telescopes, CCD cameras and analysing software, this “gravitational lens effect” – whereby massive objects like planets, stars or galaxies focus light like an optical lens – has become a very versatile tool in today’s astronomy.

Here at Heidelberg University, we are part of an international team searching for planets around distant stars using this method, which is called “gravitational microlensing”. By monitoring the brightnesses of about 100 million background stars, we occasionally detect an extrasolar planet when we measure the very rare characteristic magnification of a background star that is caused by the planetary system in the foreground. Our statistical analysis has proved that, on average, every star in the Milky Way has at least one planet. In other words: planets around other stars are the rule rather than the exception! ●

**“Where stars are
concerned,
appearance is reality.”**

**PROF. DR JOACHIM
WAMBSGANSS** studied physics
and astronomy in Heidelberg,
Munich and Princeton, USA,
and earned his doctorate at
Ludwig-Maximilians-Universität
in Munich in 1990. His career
took him to Princeton University
in New Jersey, USA, the Max
Planck Institute for Astrophysics in
Garching, the Leibniz Institute for
Astrophysics in Potsdam and the
University of Potsdam; in 2004,
he accepted a chair at Heidelberg
University and became director of
the Astronomisches Rechen-In-
stitut (ARI). From 2005 to 2015,
he also served as director of the
Centre for Astronomy of Heidel-
berg University (ZAH). In autumn
of 2017, Prof. Wambsganß was
elected president of the German
Astronomical Society. Besides
the gravitational lens effect, his re-
search interests include extrasolar
planets, dark matter and galaxy
clusters.

Contact: jkw@ari.uni-heidelberg.de

damals Mitglied meiner Heidelberger Arbeitsgruppe, war in dem internationalen Team federführend bei der statistischen Analyse jenes Mikrolinsen-Beobachtungsprogramms, das mit einem spektakulären Ergebnis endete: Jeder Stern der Milchstraße hat im Schnitt mindestens einen Planeten. Aufgrund des Mikrogravitationslinsen-Effektes und seiner erfolgreichen Nutzung in der Forschung wissen wir heute, dass Planeten um andere Sterne nicht die Ausnahme sind – sie sind der Normalfall, die Regel!

Was ist die wahre Helligkeit?

Was ist die wahre Position?

Wenn ein Stern zu manchen Zeiten heller leuchtet als „im Durchschnitt“, dann muss er zu anderen Zeiten schwächer sein, als es der Mittelwert vorgibt. Die Verteilung von „heller“ und „schwächer“ ist, wie bereits beschrieben, sehr ungleich. Für relativ kurze Zeit kann der Stern sehr viel heller leuchten – wir haben Mikrolinsen-Ereignisse gefunden, die dreimal, 60 Mal oder sogar 1.000 Mal heller waren als normal. Für die allermeiste Zeit aber erscheint der Stern dann ein klein wenig schwächer als im Durchschnitt. Es stellen sich also die Fragen: Was ist die „wahre Helligkeit“ des Hintergrundsterns? Was ist die „wahre Position“ eines Sterns hinter der Sonne?

Man ist geneigt zu antworten: Die wahre Helligkeit und die wahre Position eines Hintergrundsterns sind die, wenn kein anderer Stern oder keine Sonne vor ihm steht und Licht ablenkt. Mathematisch ist das aber nicht korrekt: Es handelt sich – verglichen mit der mittleren Helligkeit eines weit entfernten Sterns – um eine leicht unterdurchschnittliche Helligkeit. Die Antwort auf die Frage nach dem Schein oder Sein der Sterne lautet: Es gibt keine „wahre“ oder „falsche“ Helligkeit, und es gibt auch keine „wahre“ oder „falsche“ Position. Wir messen zu jedem Zeitpunkt und aus jeder Richtung immer die Helligkeit und die Position der Sterne in der gerade gegebenen Raum-Zeit-Materie-Konfiguration des Universums – beschrieben durch die Allgemeine Relativitätstheorie von Albert Einstein. In diesem Sinne zeigt die Messung also immer die wahre Helligkeit und die wahre Position, sodass für die Sterne gilt: Schein ist Sein. ●

„Alle Objekte im Weltall – Staub und Gas, Planeten und Monde, Sterne und Galaxien – verbiegen den Raum, wenn auch meist nur um einen winzig kleinen Betrag.“