

# Einsteins Aufstieg zum Superstar

## 100 Jahre Lichtablenkung

*Am 29. Mai 1919 beobachteten britische Astronomen eine Sonnenfinsternis. Ihre Mission: Beschreibt die neue revolutionäre Gravitationstheorie eines deutsch-jüdischen Physikers die Natur genauer als diejenige eines englischen Universalgenies? Zum Jubiläum blicken wir zurück auf ein Phänomen, das Albert Einstein zum Jahrhundertgenie machte, und das sich heute zu einem wertvollen Werkzeug der Astronomie gemausert hat.*

Von Tim Tugendhat und Andreas Müller

### IN KÜRZE

- Die Sonnenfinsternis vom 29. Mai 1919 wurde von zwei britischen Teams in Südamerika und Afrika verfolgt.
- Die Masse der Sonne verbiegt Lichtstrahlen von Sternen, die hinter unserem Heimatgestirn stehen. Damit bestätigten die Beobachtungen fulminant die allgemeine Relativitätstheorie.
- Quasi über Nacht wurde der Erfinder der neuen Gravitation weltberühmt: Albert Einstein.

**N**iemand hätte um das Jahr 1900 erwartet, welch epochale Umbrüche sich zu Beginn des 20. Jahrhunderts ereignen und insbesondere auf den Ersten Weltkrieg von 1914 bis 1918 folgen würden. In Europa brachen Königshäuser, Machtstrukturen und überhaupt die »alte Ordnung« zusammen. Die Völker experimentierten mit Demokratie und Freistaaten, mit Revolution und Kommunismus.

Auf einer ganz anderen Ebene kam zur gleichen Zeit die »alte Physik« ins Wanken. Naturwissenschaftler experimentierten mit Licht und Materie, zerlegten die nur scheinbar unteilbaren Atome in ihre Bestandteile und begannen die Natur des Lichts zu verstehen. Das Zeitalter der »modernen Physik« war angebrochen, das sich auf zwei große Säulen stützt: die Quantenphysik und die Relativitätstheorie, die beide ab 1900 ihre Blütezeit erlebten.

Die heute schillerndste Persönlichkeit der Wissenschaft war an der Entwicklung dieser zwei großen Theorien maßgeblich

beteiligt: Albert Einstein (1879–1955). Während viele namhafte Physiker an der Quantentheorie mitgewirkt haben, ist die Relativitätstheorie eindeutig Einsteins alleiniges Jahrhundertwerk. Sie gehört bis heute zu den besten physikalischen Theorien, die sich bei der Beschreibung der Natur bewährt haben. Einstein formulierte 1905 die spezielle Relativitätstheorie, welche die Physik bei Geschwindigkeiten nahe der Lichtgeschwindigkeit beschreibt und unsere Vorstellungen von Raum, Zeit, Energie und Masse revolutionierte. Im Jahr 1915 veröffentlichte er die allgemeine Relativitätstheorie, die uns ganz neue Einsichten in das Wesen der Gravitation bietet (siehe SuW 11/2015, S.40). Einsteins Theoriegebäude war damit schon 1915 abgeschlossen und musste nun nur noch durch Experimente untermauert werden.

Schon wenige Jahre später, im Jahr 1919, ereignete sich ein Himmelsphänomen, dessen präzise Auswertung über Aufstieg und Fall eines Genies entscheiden soll-



Die Beobachtung der Sonnenfinsternis am 29. Mai 1919 durch britische Astronomen unter der Leitung von Sir Arthur Eddington (Cambridge) erfolgte an zwei Orten: Auf der Insel Príncipe im Golf von Guinea vor Afrika und in Sobral, Brasilien. Auf dieser Fotografie, die in Sobral aufgenommen wurde, sind zwei Sterne markiert, die während der Verfinsterung der Sonne sichtbar wurden. Die Auswertungen der Fotoplatten ergab, dass das Sternenlicht durch die Gravitation der Sonne abgelenkt wurde, wie es Albert Einstein vorausgesagt hatte. Diese digitalisierte Aufnahme stammt aus dem Archiv der Landessternwarte Heidelberg, deren Direktor Max Wolf (1863–1932) mit Eddington einen regen Kontakt pflegte und von ihm eine Glaskopie der Platte erhielt.

te: Die Sonnenfinsternis am 29. Mai 1919 bot die Gelegenheit zu überprüfen, ob die Lichtstrahlen von Hintergrundsternen in dem Maße um die Sonne gebogen werden, wie es Einsteins neue Gravitationstheorie vorhersagte (siehe Bild S. 27). Tatsächlich konnten britische Astronomen diesen Nachweis führen. Der darauf folgende weltumspannende Medienhype machte Einstein quasi über Nacht zum Superstar und ebnete seinen Weg zum Jahrhundertgenie der Physik.

## Eine fast perfekte Gravitation

Bis zur Wende vom 19. zum 20. Jahrhundert war zur Beschreibung der Schwerkraft die Gravitationstheorie von Sir Isaac Newton das Maß aller Dinge. Newtons große Leistung im 17. Jahrhundert war es zu erkennen, dass die fernen, kosmischen Körper wie Kometen und Planeten denselben Gesetzmäßigkeiten folgen wie irdische Körper, zum Beispiel ein herabfallender Apfel oder die Bahn einer Kanonenkugel. Der geniale Naturforscher fand heraus, dass sich zwei Objekte umso mehr anziehen, je größer ihre Massen sind und je kleiner ihr Abstand ist.

Genauer gesagt nimmt die newtonsche Gravitationskraft mit dem Abstand zum Quadrat ab. Das heißt, stünde die Erde in doppelter Entfernung zur Sonne, so würde die Schwerkraft zwischen den beiden nur noch ein Viertel so groß sein. Die Proportionalitätskonstante bei diesem Kraftgesetz ist die newtonsche Gravitationskonstante. Ihr Zahlenwert folgt nicht aus der Theorie, sondern muss experimentell ermittelt werden. Der verhältnis-

mäßig kleine Wert verrät uns, dass die Gravitation eine schwache Kraft ist.

Eines der wichtigsten und rätselhaftesten Prinzipien von Newtons Physik ist die Äquivalenz von schwerer und träger Masse: Die Eigenschaft eines Objekts, andere Körper anzuziehen, heißt schwere Masse. Je größer sie ist, desto stärker ist die Anziehung. Als träge Masse bezeichnen Physiker wiederum diejenige Eigenschaft, die gegenüber einer Bewegungsänderung einen Widerstand entgegensetzt. Je größer diese Trägheit ist, desto stärker muss eine Kraft sein, um eine Beschleunigung auf den Körper auszuüben. Newton fasste dies als Trägheitsgesetz zusammen, mit dem heutzutage jeder Schüler konfrontiert wird. Es ist jedoch in der klassischen Physik überhaupt nicht ersichtlich, warum träge und schwere Masse identisch sein sollten.

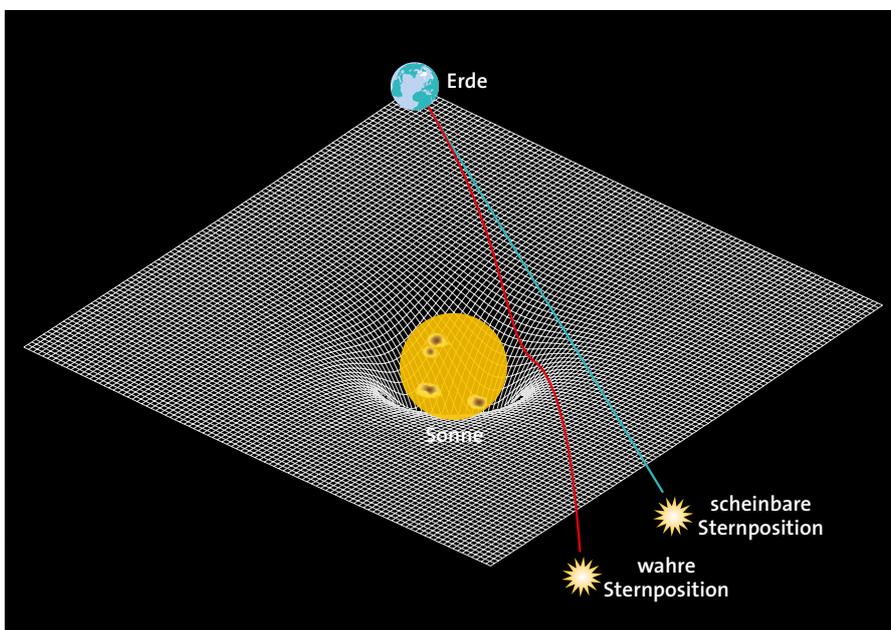
Newtons Konzept von der Schwerkraft konnte bis zu Beginn des 20. Jahrhunderts fast alle beobachteten Phänomene der Gravitation ausreichend gut beschreiben. Eine Ausnahme stellt die bereits im 19. Jahrhundert bekannte merkwürdige Bahnbewegung von Merkur dar. Merkurs ellipsenförmige Bahn ist nicht geschlossen, sondern bildet eine rosettenartige Kurve im Raum. Denn mit jedem Umlauf des Planeten um die Sonne dreht sich die Bahnellipse ein bisschen weiter. Entsprechend bewegt sich Merkurs sonnennächster Punkt, das Perihel, auch um die Sonne.

Diesen Effekt der Periheldrehung gibt es auch in der newtonschen Gravitation und wird verursacht durch das Zusammenwirken der Gravitationskräfte von

der Sonne und den Planeten, vor allem von Jupiter. Diese Himmelskörper ziehen Merkur ein wenig aus seiner Bahn. Eine Berechnung mit Newtons Gleichungen ergibt, dass sich Merkurs Ellipse dadurch um 5,3 Bogensekunden pro Jahr oder 0,15 Grad pro Jahrhundert dreht. Seltsam ist nur, dass für Merkur eine Drehung von 5,7 Bogensekunden pro Jahr beobachtet wurde – immerhin ein Unterschied von sieben Prozent. Ein kleiner Messfehler, könnte man meinen. Jedoch waren astronomische Messungen schon im 19. Jahrhundert genau genug, dass Astronomen nach einem Grund für diese Gravitationsanomalie von Merkur suchten.

Könnte ein bis dato unbekannter Planet in Sonnennähe Merkurs Bahn beeinflussen? Tatsächlich wurde die Hypothese vom Planeten Vulkan aufgestellt. Er wurde niemals entdeckt. Man braucht ihn auch gar nicht, denn beschreibt man die Merkurbewegung mit Einsteins neuer Theorie, ergibt sich tatsächlich der Beobachtungswert von 5,7 Bogensekunden pro Jahr. Die unerklärliche Abweichung verschwindet und damit auch die Notwendigkeit von Vulkan. Der innerste Planet Merkur ist so nah an der Sonne, dass neue relativistische Effekte wichtig werden, die in Newtons Gravitation fehlen.

Einstein hatte sein Heureka-Erlebnis, als er den exakten Beobachtungswert der Periheldrehung von Merkur mit seiner Theorie berechnen konnte. Später berichtete er, dass er vor Glück nicht schlafen konnte. Heute gilt diese Bestätigung als der erste erfolgreiche Test der allgemeinen Relativitätstheorie.



Die Sonnenmasse krümmt die netzartige Raumzeit und zwingt Lichtstrahlen auf gekrümmte Wege. Gemäß Einsteins neuer Gravitationstheorie breitet sich Licht im Allgemeinen nicht geradlinig aus. Somit werden die Positionen von Sternen, die hinter der Sonne und nah an deren Rand stehen, geringfügig durch die lichtablenkende Wirkung der Sonnenmasse verschoben.



Auf einer flachen Landkarte erscheinen Flugstrecken gekrümmt (oben). Warum fliegen Piloten solche Umwege, wenn doch Geraden die kürzesten Verbindungen sind? Die Auflösung zeigt die Flugroute auf einem Globus (rechts). Die Erdoberfläche ist tatsächlich gekrümmt wie auf einer Kugel. Die krumme Flugstrecke ist dabei die kürzeste Verbindung zwischen Start- und Landepunkt und folgt im Idealfall einem Teilstück eines Großkreises. Die kürzeste Verbindung zwischen zwei Punkten auf einer Kugeloberfläche heißt Orthodrome. Aufpassen muss man bei den Breitenkreisen (violett), denn sie sind mit Ausnahme des Äquators keine Großkreise.



### Einsteins gekrümmte Raumzeit

Schon die Grundannahme der Relativitätstheorie scheint unserer Erfahrung zu widersprechen: Raum und Zeit sind keine getrennt zu betrachtenden Eigenschaften der Natur. Vielmehr bilden die drei Raumdimensionen und die Zeit als vierte Dimension ein vierdimensionales, verformbares »Gitternetz«: die Raumzeit. Neu ist im Vergleich zu den alten Vorstellungen von Galileo Galilei und Isaac Newton, dass die Raumzeit als Bühne des Naturgeschehens nicht unabhängig ist von den Objekten, die in Raum und Zeit existieren. Die Raumzeit reagiert dynamisch auf alles, was in ihr existiert.

Nach Einsteins Weltbild ist die Gravitation keine Kraftwirkung zwischen Massen, sondern vielmehr eine Verformung des Raum-Zeit-Gefüges durch die Massen selbst. Einstein geht dabei über Newton hinaus: In Newtons Physik folgen alle Körper einer geradlinigen Bahn, es sei denn, eine Kraft wirkt auf sie. Bei Einstein beschreiben alle kräftefreien Körper eine Bahn, die so gerade ist, wie es geht: die Geodäte. Weil Massen und andere Energieformen jedoch die Raumzeit krümmen,

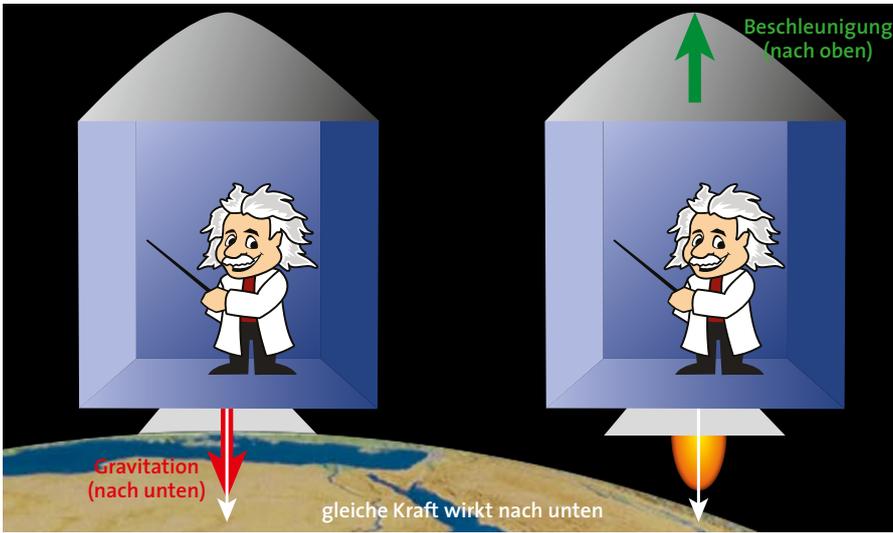
sind Geodäten im Allgemeinen krumme Kurven (siehe Grafik S. 28). Was die allgemeine Relativitätstheorie mathematisch so schwierig macht, ist der Teufelskreis der Nichtlinearität, denn die von Masse gekrümmte Raumzeit beeinflusst wiederum die Bewegung der Masse selbst und anderer Massen.

Die Tatsache, dass krumme Linien die kürzeste Verbindung darstellen können, lässt sich an der Bahn eines Langstreckenflugs veranschaulichen (siehe Grafik oben).

Einsteins Ausgangspunkt für seine neue Gravitation war die spezielle Relativitätstheorie, die er 1905 veröffentlichte. Wie schon der Titel seiner Publikation »Von der Elektrodynamik bewegter Körper« verrät, wurde Einstein von der Elektrodynamik geleitet, jener Theorie von James Clerk Maxwell aus dem 19. Jahrhundert, welche die elektrischen und magnetischen Erscheinungen physikalisch beschreibt. Einstein bemerkte, dass die Gleichungen der Elektrodynamik ihre Form verändern, wenn man die alten Konzepte von Galilei und Newton einer absoluten Zeit zugrundelegt. Einsteins radikale

Forderung einer absoluten, das heißt in allen Bezugssystemen konstanten Lichtgeschwindigkeit ging einher mit einer relativen, also von der Relativgeschwindigkeit abhängigen Zeit. Noch schlimmer: Auch die Länge eines Objekts ist eine relative Größe und hängt von der Geschwindigkeit des Beobachters relativ zum Objekt ab. Schon in der speziellen Relativitätstheorie werden Raum und Zeit zur vierdimensionalen Raumzeit vereinigt. In Abwesenheit von Massen ist diese Raumzeit noch flach. In der zehn Jahre später veröffentlichten allgemeinen Relativitätstheorie wird die Raumzeit durch Massen und andere Energieformen verbogen.

Einstein bezeichnete es später als seinen glücklichsten Einfall, der ihn zur allgemeinen Relativitätstheorie geführt hatte: Im freien Fall spürt man das eigene Gewicht nicht. Ein frei fallender Körper ist kräftefrei. Daraus folgte das einsteinische Äquivalenzprinzip, das besagt, dass man in einer geschlossenen Kapsel überhaupt nicht unterscheiden kann, ob man im Schwerfeld mit dieser Kapsel ruht oder in einer Rakete nach oben beschleunigt wird (siehe Grafik S. 30). Die Auswir-



**Nach dem einsteinschen Äquivalenzprinzip kann ein Beobachter in einer geschlossenen Kabine nicht feststellen, ob er sich ruhend in einem Schwerfeld befindet (links) oder ob er nach oben beschleunigt wird (rechts).**

kungen auf Testkörper im Innern der Kapsel sind dieselben. In anderen Worten: Es gibt keinen Unterschied zwischen Körpern, die auf die Erde fallen und mit 9,81 Metern pro Sekunde zum Quadrat zum Erdmittelpunkt beschleunigt werden, und Körpern, die in einer Rakete in der Schwerelosigkeit mit 9,81 Metern pro Sekunde zum Quadrat nach oben beschleunigt werden. Diese Nicht-Unterscheidbarkeit heißt Äquivalenzprinzip und ist genau gleichbedeutend mit der Aussage, dass schwere und träge Masse gleichwertig sind.

### Der Krieg kam dazwischen

Einstein veröffentlichte schon 1911 eine Arbeit mit dem Titel »Über den Einfluss der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichts«, in der er spekulierte, dass die gekrümmte Raumzeit nicht nur die Bahn eines Körpers, sondern auch die von Lichtstrahlen ändern würde. Qualitativ folgt diese Einsicht direkt aus dem Äquivalenzprinzip.

Somit war nach der Periheldrehung von Merkur ein weiterer, zweiter Test von Einsteins neuer Gravitationstheorie offenkundig: Mit der bekannten Masse der Sonne konnte er ausrechnen, dass Sterne, deren Lichtstrahlen genau am Rand der Sonnenscheibe vorbei zu uns gelangen, um etwa 0,85 Bogensekunden verschoben werden. Der Effekt wird kleiner, je weiter der Strahl vom Sonnenrand entfernt vorbei läuft. Heute nennen wir dieses Phänomen den Gravitationslinseneffekt, weil

die Masse der Sonne wie eine Linse wirkt und Lichtstrahlen ablenkt.

Nun ist die Messung von Sternpositionen nahe der Sonne alles andere als trivial. Schon 1913 fragte Einstein beim Leiter des Mount-Wilson Observatory in Kalifornien, George Hale, an, bis zu welchem Abstand Astronomen am lichten Tag Sterne in Sonnennähe beobachten können. Hale reichte die Frage an William Campbell, dem Chef des Lick Observatory weiter, der Einstein keine Hoffnung machen konnte, dass dieses Unterfangen gelingt. Denn die Sonne überstrahlt natürlich alle Hintergrundsterne – außer bei einer Sonnenfinsternis. Eine tollkühne Idee war geboren: In den wenigen Minuten, in denen sich die Sonne komplett verdunkelt, müsste ein Astronom möglichst viele Sternpositionen in der Nähe der Sonnenscheibe messen. Den gleichen Himmelsausschnitt misst er dann bei Nacht zu einem anderen Zeitpunkt, wenn die Sonne nicht zwischen Erde und den gleichen Sternen steht, und vergleicht dann die Positionen der Sterne.

Ein junger Astronom aus Berlin, Erwin Freundlich, war von dem Vorhaben gepackt. Er versuchte den Effekt auf alten Fotoplatten mit Aufnahmen von Sonnenfinsternissen zu finden, jedoch ohne Erfolg. Im August 1914 sah er endlich seine Chance: Er startete eine Expedition, um Einsteins Effekt bei einer totalen Sonnenfinsternis auf der Halbinsel Krim im Russischen Reich zu messen. Am 1. August, nur drei Wochen vor der Sonnenfinsternis, erklärte der deutsche Kaiser Russland den

Krieg. Das deutsche Expeditionsteam wurde in Russland festgesetzt und konnte die Messung nie durchführen.

In den Kriegsjahren erkannte Einstein einen Fehler in seinen Berechnungen. Er musste sein ursprüngliches Ergebnis auf rund 1,7 Bogensekunden verdoppeln. Wäre Freundlich's Expedition in Russland erfolgreich gewesen, so hätte er Einstein unter Annahme des ursprünglichen Resultats widerlegt, und die Zweifler an Einsteins revolutionärer Theorie hätten Recht bekommen. So hatte Einstein großes Glück, dass die Sonnenfinsternis-Messungen erst in einem neuen Anlauf fünf Jahre später gemacht werden konnten.

### Noch mehr Sonnenfinsternisjäger

In der Zwischenzeit hatten britische Astronomen schon zu Kriegszeiten durch den Physiker Willem de Sitter aus den neutralen Niederlanden Wind von Einsteins bahnbrechender Theorie bekommen.

Eine der Schlüsselfiguren war Frank Dyson (1868–1939), zu jener Zeit Astronom Royal, quasi der königliche Chefastronom des Vereinigten Königreichs. Der zweite Protagonist war der Astrophysiker Sir Arthur Eddington (1882–1944). Er hatte sich bereits einen Namen als mathematisch-physikalisches Multitalent gemacht und bekleidete ab 1913, also schon mit 31 Jahren, den wichtigsten Lehrstuhl für Astronomie an der University of Cambridge.

Eddington war bekannt, dass es schon in der newtonschen Schwerkraft einen Lichtablenkungseffekt gibt, der aber noch nie gemessen wurde. Unter der Annahme, dass Licht aus massebehafteten Teilchen (Korpuskeln) besteht, lässt sich mit Hilfe des newtonschen Gravitationsgesetzes eine Abweichung berechnen, die genau halb so groß ist wie der einsteinsche Wert. Der bayerische Physiker und Landvermesser Johann Georg von Soldner (1776–1833) hatte dies 1801 für Sterne nah am Sonnenrand zu 0,84 Bogensekunden berechnet und 1804 veröffentlicht. Um 1784 war das Henry Cavendish (1731–1810) auch gelungen, nur veröffentlichte er das nicht.

Die Voraussetzungen waren also gut, um in einem Experiment nachzuprüfen, wer Recht hat. Hätte Einstein seinen Fehler von 1911 jedoch nicht korrigiert, wäre es unmöglich gewesen, die beiden Gravitationstheorien gegeneinander auszuspielen.

Dyson und Eddington schmiedeten den Plan, es Freundlich gleich zu tun, und wollten die Sonnenfinsternis vom

29. Mai 1919 verfolgen, um Einsteins neue Gravitation zu überprüfen. Bei diesem Ereignis würde die Sonne vor dem offenen Sternhaufen der Hyaden stehen; sehr günstig, um zu testen, ob die Position dieser Sterne verzerrt werden. So entsandten die Briten zwei Expeditionen: Während Eddington mit seinem Team die Verfinsterung auf der Insel Principe im westafrikanischen Golf von Guinea verfolgte, beobachtete der Brite Andrew Crommelin mit dem zweiten Team in Sobral, im Nordosten von Brasilien. Die Ausbeute fiel sehr unterschiedlich aus: Crommelin kehrte mit acht brauchbaren Fotoplatten zurück, während Eddington wetterbedingt nur zwei Platten mitbrachte.

### Die Briten krönen Einstein

Eddington gab vorab im September 1919 in einem Vortrag auf einer Tagung in Bournemouth bekannt, dass die gemessenen Verschiebungen der Sternorte in Sonnennähe mit Einsteins neuer Theorie

übereinstimmten. Am 6. November 1919 folgte dann die denkwürdige gemeinsame Sitzung der Royal Society und der Royal Astronomical Society. Sitzungsleiter Crommelin präsentierte die endgültigen Resultate der Sonnenfinsternisexpeditionen. Im Prinzip wurden die Fotoplatten mit Finsternis verglichen mit Platten des gleichen Sternfelds ohne Sonne im Vordergrund. Der Vergleich enthüllte direkt, dass die Positionen einiger Sterne in Sonnennähe um ein paar hundertstel Millimeter verschoben wurden. Anders ausgedrückt betrug die Lichtablenkung am Sonnenrand  $1,98 \pm 0,12$  Bogensekunden im südamerikanischen Sobral beziehungsweise  $1,61 \pm 0,30$  Bogensekunden in Afrika. Beide Messwerte sind nah an Einsteins Vorhersage von 1,7 Bogensekunden. Die Daten bestätigten die neue Gravitationstheorie auf spektakuläre Weise. Ein Schaubild aus ihrer Veröffentlichung von 1920 zeigt die Vorhersage der beiden konkurrierenden Theorien nach Newton und Einstein als

zwei Linien (siehe Kasten unten links). Die Messpunkte liegen allesamt so, dass nur die allgemeine Relativitätstheorie sie zu erklären vermag und Newtons Gravitation quasi ausgeschlossen ist.

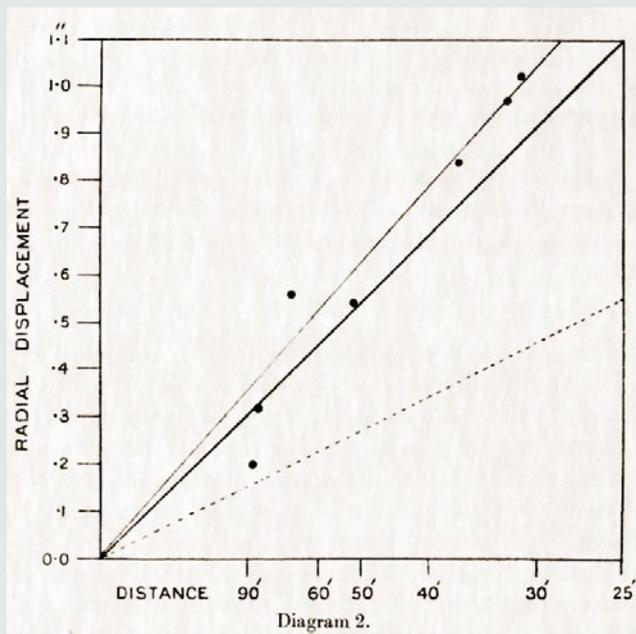
Diese Entdeckung blieb auch von einer breiteren Öffentlichkeit nicht unbemerkt: Die »verrückte« Theorie, die auf einer konstanten Lichtgeschwindigkeit, Gedankenexperimenten und einem sich krümmenden Raum basiert, schaffte es sogar in die »New York Times« im November 1919 (siehe Kasten unten rechts). Vergleichbar wäre das heute vielleicht mit der Meldung über die Entdeckung des Higgs-Teilchens 2012 oder der Bekanntgabe von dem direkten Nachweis der Gravitationswellen im Jahr 2016, die auch auf den Titelseiten von Zeitungen sowie in den Abendnachrichten zu sehen waren. Der Unterschied hierbei liegt jedoch in der untypisch kurzen Zeitspanne zwischen Vorhersage und Entdeckung: Im Falle des Higgs-Bosons zogen etwa 50 Jahre ins Land, bei den Gravitationswellen ein

## Einstein hatte Recht!

In der 1920 publizierten Veröffentlichung präsentierten Dyson, Eddington und Davidson die Auswertung der Sonnenfinsternis von 1919 auch im unten gezeigten Diagramm. Auf der Senkrechten ist die durch die Lichtablenkung bewirkte Verschiebung der Sternorte in radialer Richtung (in Bogensekunden) gegenüber ihrem Abstand zur Mitte der Sonnenscheibe (in Bogenminuten) in der Waagerechten aufgetragen. Weil die vorhergesag-

te Lichtablenkung in Einsteins Theorie doppelt so groß ist wie in der newtonschen Theorie, steigt die Gerade der allgemeinen Relativitätstheorie (durchgezogene Linie) doppelt so stark an wie der »klassische« Fall (gestrichelt). Mit bloßem Auge ist zu erkennen: Die Beobachtungsdaten (schwarze Punkte) bestätigen fulminant Einsteins allgemeine Relativitätstheorie. Sodann startete ein Medienhype um Einstein, der ihm Weltruhm brachte.

Dyson, F.W et al.: A Determination of the Deflection of Light by the Sun's Gravitational Field, from Observations Made at the Total Eclipse of May 29, 1919. In: Philosophical Transactions of the Royal Society, Series A, 220, 291–333, 1920, S. 332



Je näher der scheinbare Ort des Gestirns am Sonnenrand steht, umso größer ist die Verschiebung durch die Lichtablenkung.

### Lichter im Himmel alle schief

Wissenschaftler sind mehr oder weniger ratlos angesichts der Ergebnisse der Sonnenfinsternis-Beobachtungen.

### Einsteins Theorie triumphiert

Sterne waren nicht dort, wo sie sein sollten oder wo man sie berechnet hatte, aber kein Grund zur Sorge.

Ein Buch für 12 gelehrte Männer

Niemand sonst auf der Welt könnte es verstehen, sagte Einstein, als seine mutigen Verleger es veröffentlichten.

Einsteins Theorie schaffte es in der Weltpresse ganz nach oben, wie hier in die »New York Times« vom 10. November 1919.

## LIGHTS ALL ASKEW IN THE HEAVENS

Men of Science More or Less Agog Over Results of Eclipse Observations.

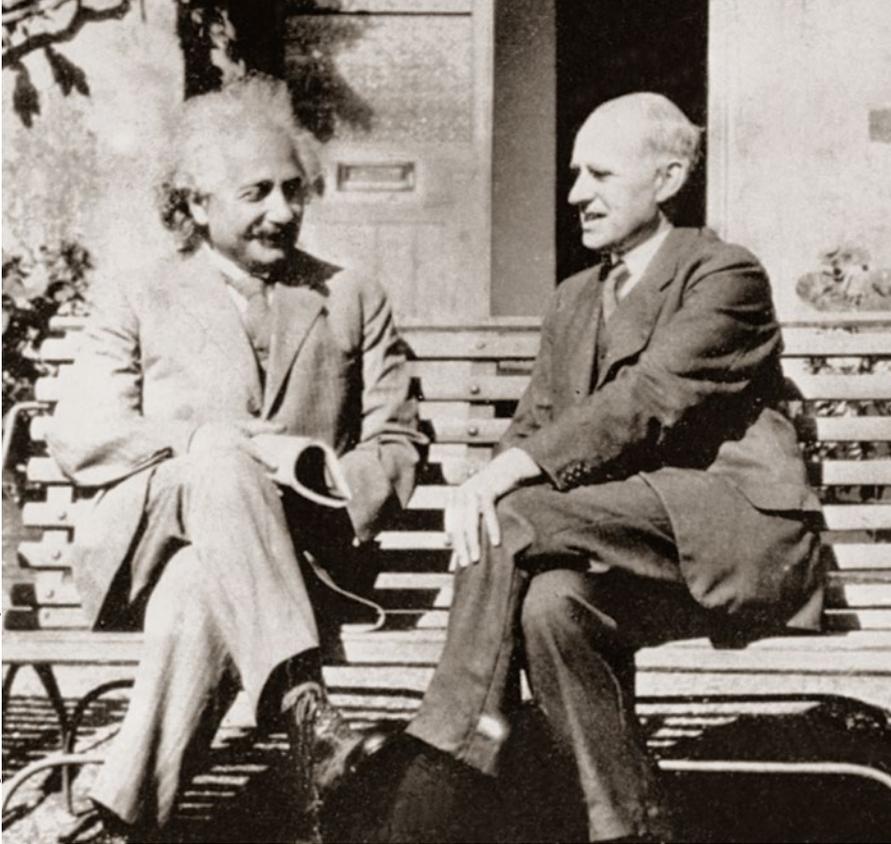
### EINSTEIN THEORY TRIUMPHS

Stars Not Where They Seemed or Were Calculated to be, but Nobody Need Worry.

### A BOOK FOR 12 WISE MEN

No More in All the World Could Comprehend It, Said Einstein When His Daring Publishers Accepted It.

New York Times, 10. November 1919, S. 17



Dieses Foto zeigt Albert Einstein (links) und Sir Arthur Eddington (rechts) auf einer Bank in Eddingtons Garten und wurde im Jahr 1930 aufgenommen.

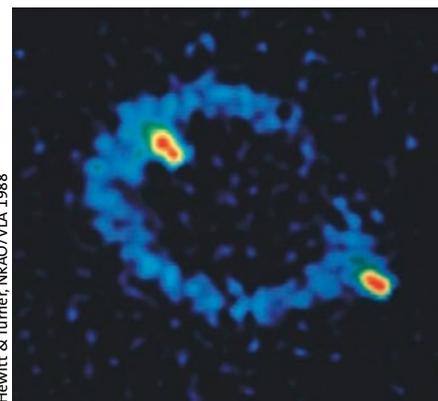
ganzes Jahrhundert. Dyson und Eddington konnten hingegen eine nur vier Jahre alte Theorie bestätigen. Damals entwickelte sich die Physik sehr rasant – ähnlich lief es bei den Erfolgen mit der Quantentheorie.

### Zu revolutionär für seine Zeit

Im Jahr 1921 wurde Einstein (siehe Bild oben) mit dem Physik-Nobelpreis ausgezeichnet. Für eine neue Theorie von Raum und Zeit und für die korrekte Vorhersage der Planetenbahn von Merkur sowie der quantitativ richtigen Beschreibung der Lichtablenkung am Sonnenrand – könnte man vermuten. Weit gefehlt, denn das Auswahlkomitee der Nobelstiftung traute sich nicht. Zu vielen waren die einsteinischen Konzepte von Raum, Zeit, Energie, Materie und Gravitation zu revolutionär. Immerhin widersprach Einsteins Werk nicht nur Newtons Jahrhunderte alten, bewährten Physik, sondern auch fast allen namhaften Philosophen der Zeit. Deshalb verlieh man Einstein den Nobelpreis »für seine Verdienste um die theoretische Physik, besonders für seine Entdeckung des Gesetzes des photoelektrischen Effekts«, also ausdrücklich für einen Effekt der Quantenphysik, den er beschreiben und erklären konnte.

Albert Einstein war seiner Zeit weit voraus. In der Folgezeit und selbst noch nach

Einsteins Tod im Jahr 1955 gab es viele weitere Tests der allgemeinen Relativitätstheorie, die seine Theorie immer wieder glänzend bestätigten: die Fluchtbewegung von Galaxien in einem expandierenden, relativistischen Universum; die Gravitationsrotverschiebung im Schwerefeld von Massen, deren Kehrseite nichts anderes ist als die gravitative Zeitdehnung (»Uhren im Tal ticken langsamer als auf dem Berg.«); die Laufzeitverzögerung von elektromagnetischen Wellen (Shapiro-Effekt); der Mitnahmeeffekt einer rotierenden Raumzeit (Lense-Thirring-Effekt) und zuletzt der direkte Nachweis von Gravitationswellen. Diese qualitativ und quantitativ präzisen Bestätigungen machen unmissverständlich klar, dass Einsteins größter Wurf bis heute die beste Gravitationstheorie ist.



Hewitt & Turner, NRAO/VLA 1988

### Lichtablenkung reloaded

Der relative Messfehler bei den Plattenresultaten von 1919 betrug zehn bis zwanzig Prozent. Das ist groß genug, dass diese Messungen allein Zweifel wach werden ließen. Daher wurde in weiteren Sonnenfinsternissen versucht, die Genauigkeit zu erhöhen – mit mäßigem Erfolg. Am renommierten Royal Greenwich Observatory nahe London wurden im Jahr 1979 die alten Platten von 1919 mit neuen Präzisionsverfahren neu ausgemessen. Das Ergebnis wurde so auf  $1,98 \pm 0,18$  Bogensekunden beziehungsweise  $1,90 \pm 0,11$  Bogensekunden verbessert. Die relative Ungenauigkeit von knapp sechs Prozent für den letztgenannten Wert ist noch ausbaufähig.

In der Tat wurde die Lichtablenkung an der Sonne mit neuen Objekten wiederholt: 3C 273 und 3C 279 sind zwei Quasare, die glücklicherweise in der Nähe der Sonnenbahn lokalisiert sind. Quasare sind leuchtkräftige Zentren von Galaxien, die durch den Materieeinfall auf ein extrem massereiches Schwarzes Loch – übrigens ebenfalls eine Vorhersage von Einsteins Theorie – gespeist werden. Jedes Jahr am 8. Oktober wird 3C 279 sogar von der Sonne bedeckt. Der andere Quasar 3C 273 ist von seinem Kompagnon etwa vier Grad oder acht scheinbare Sonnendurchmesser entfernt. Dieser Abstand muss sich auf Grund der Lichtablenkung am Sonnenrand – genauer gesagt: der Ablenkung der Radiowellen der Quasare durch die Sonnenmasse – verändern, und genau das haben Radioastronomen präzise gemessen. Es kommt ihnen ein Verfahren der Apertursynthese namens Very Long Baseline Interferometry (VLBI) zugute. Hierbei werden Radioantennen zu einem Verbund zusammengeschlossen, um die Auflösung zu erhöhen. Mit VLBI lassen sich die Himmelsorte der Quasare extrem genau bestimmen und die für das genannte

Einem Team um die Beobachterin Jaqueline Hewitt (MIT) gelang diese Radioaufnahme mit dem Very Large Array in New Mexico, USA. Die Radioquelle MG1131 + 0456 (rot) erscheint als Doppelbild und zeigt zusätzlich eine ovale Struktur, die als Einsteinring interpretiert wurde. Eine unsichtbare Linse verbiegt die Radiowellen der Quelle und erzeugt von ihr zwei Phantombilder (siehe Kasten S. 34).

Quasarpaar der relative Fehler auf 0,1 Prozent herabsetzen.

Im Jahr 2004 konnten Radioastronomen die einsteinsche Ablenkung mit Hilfe von mehreren hundert Radioquellen auf einen relativen Messfehler von nur 0,002 Prozent genau bestätigen.

Der ESA-Astrometriesatellit Gaia soll am Missionsende 2020 die Lichtablenkung durch die Sonnenmasse auf 0,0001 Prozent messen können. Gaia führt diese Messungen jedoch nicht nahe am Sonnenrand, sondern bei Winkelabständen von 45 bis 135 Grad durch.

## Gravitationslinsen in den Tiefen des Alls

Die Lichtablenkung an Massen ist der Spezialfall des Gravitationslinseneffekts. Die Bezeichnung rührt daher, weil eine Masse, zum Beispiel die Sonne, wie eine Linse auf Lichtstrahlen wirkt und diese bündelt. Das »normale« auf der Erde beobachtbare Abbild eines fernen Hintergrundobjekts kann durch die Wirkung einer Massenlinse zwischen Objekt und Erde stark verzerrt werden. Im Idealfall, in dem Hintergrundobjekt und Linse entlang der Sichtlinie achsensymmetrisch sind, ergibt sich für einen Beobachter auf der Erde der

berühmte Einsteinring: Das Licht der fernen Punktquelle wird kreisförmig um die Linse gebogen. Dabei wird die Helligkeit des gelinsten Objekts auch verstärkt, weil mehr Licht auf Umwegen zur Erde gelangt.

Zum ersten Mal beobachteten Radioastronomen im Jahr 1987 ein derart merkwürdig verzerrtes Bild, und zwar bei der Radioquelle MG1131+0456 (4C05.51). Das Foto wurde bei einer Wellenlänge von zwei Zentimetern mit dem Very Large Array in

## *Einstein nahm die Gravitationslinsen vorweg, die vielfach in der Astronomie als Werkzeug eingesetzt werden.*

New Mexico, USA, aufgenommen (siehe Bild S. 32 unten).

Letztlich ist der Einsteinring ein Sonderfall mit unendlich vielen Mehrfachbildern des gelinsten Objekts, die sich kreisförmig anordnen. Sind die Verhältnisse nicht mehr achsensymmetrisch, sondern asymmetrisch, was im Allgemeinen der Fall ist, dann ergeben sich verzerrte einfache Bilder der Quelle oder Mehrfachbilder (vergleiche Seite 83 in diesem Heft). Ein besonderer Fall ist hierbei das Einsteinkreuz mit vier Bildern der ursprünglichen Quelle, die sich kreuzförmig anordnen. Diese seltsame Erscheinung wurde beim Quasar

Q2237+030 entdeckt. Einstein hatte derartige »kosmische Fata Morganen« bereits Jahrzehnte früher vorweggenommen und das bizarre Phänomen inklusive seiner Erklärung im Jahr 1936 im Fachjournal Science publiziert.

In der Folgezeit wurden immer mehr Gravitationslinsen entdeckt, vor allem bei Galaxien und bei Galaxienhaufen (siehe Kasten S. 34, 35). Aber auch kleinere Objekte können als Gravitationslinse

wirken. Die Astronomen nennen solche Miniformen des Gravitationslinseneffekts Mikrolinsenereignisse. Schon vor Jahren konnten Beobachter mit Hilfe des Gravitationslinseneffekts im galaktischen Halo der Milchstraße Objekte aufspüren: die MACHOs. Das sind sternartige Gebilde, die wie Linsen wirken. Das Akronym steht für Massive Compact Halo Objects. Sie wandern mehr oder weniger unsichtbar durch die Milchstraße und verraten sich nur, wenn sie zufällig das Licht eines Hintergrundsterns Richtung Erde bündeln und auf sehr gleichförmige Weise verstärken. Der charakteristische und symmetrische

**Spektrum LIVE**  
Reisetermine des Verlags  
Spektrum der Wissenschaft

EVENTS

## Reiseangebote für Spektrum-Leser

Als wissenschaftlich orientierter Verlag wollen wir unseren Leserinnen und Lesern Reisen anbieten, die sowohl neue Erlebnisse als auch Erkenntnisse ermöglichen. Dazu haben wir für Sie unterschiedliche spannende und informative Reisen ausgewählt, die in Kooperation mit verschiedenen Veranstaltern durchgeführt werden.

Entdecken Sie die Welt der Gefiederten (birdingtours) | Auf den Spuren von Albert Einstein (WittmannTravel) | Islands faszinierende Geologie (Moi Reisen) | Wildes Namibia: Vom Atlantik bis zu den Victoriafällen – Namibia mit Stippvisite nach Botswana und Simbabwe (travel-to-nature) | Peru Pur – die perfekte Gruppenreise für Einsteiger (travel-to-nature) | Fotoreise Costa Rica – mit der Kamera auf Motivjagd (travel-to-nature)

Infos und Anmeldung:

**Spektrum.de/live**



Der Galaxienhaufen Abell 370 im Vordergrund (weiße Quellen) besteht aus normaler und Dunkler Materie. Sie verzerrt das Licht von fernen Hintergrundgalaxien zu krummen Bögen, die sich auf konzentrischen Kreisen anordnen.

NASA, ESA, and J. Lotz and the HFF Team (STScI)

## Gravitationslinsen im Einsatz

**G**ravitationslinsen haben sich mittlerweile als Werkzeuge in Astronomie und Kosmologie vielfach bewährt. Der Linseneffekt verstärkt die Helligkeit der gelinsten Quelle. So wurden viele Entfernungsrekorde von Galaxien nur deshalb gebrochen, weil die Strahlung der lichtschwachen, fernen Quelle erhöht und so die Galaxie überhaupt erst sichtbar wurde.

Eine andere Anwendung von Gravitationslinsen ist das Auffinden von unsichtbarer Materie vermöge ihrer Gravitation (siehe SuW 2/2013, S. 32). Kosmologen kartieren so großräumig in 3-D die Verteilung der mysteriösen Dunklen Materie. Eine große Ansammlung von Dunkler Materie – zum Beispiel im oben mit dem

Weltraumteleskop Hubble aufgenommenen Galaxienhaufen – wirkt wie eine Linse und erzeugt viele verzerrte Bilder von fernen Galaxien, die sich weit hinter dem Galaxienhaufen befinden. Astrophysiker vergleichen die so gewonnene Verteilung Dunkler Materie am Himmel mit Simulationen auf Supercomputern.

Mit dem Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) der ESO in Chile ist den Astronomen 2014 ein besonders spektakulärer Einsteinring geglückt (siehe Bild S. 35 unten). Zufällig stehen von der Erde aus gesehen zwei Galaxien direkt hintereinander. Im Vordergrund steht eine elliptische Galaxie, die in einer Distanz von vier Milliarden Lichtjahren als Linse wirkt

Verlauf der Lichtkurve, einer Darstellung der Helligkeit über der Zeit, ist eigentümlich für Gravitationslinsenereignisse. Durch eine sorgfältige Analyse der Lichtkurve ist es möglich, sie von »normaler« Variabilität eines veränderlichen Sterns zu unterscheiden.

Die meisten MACHOs konnten als kaum direkt sichtbare, lichtschwache Braune Zwerge – Zwitterobjekte zwischen Stern und Planet – identifiziert werden. Manchmal waren es jedoch auch rote Zwergsterne der Spektralklasse M, die ebenfalls leuchtschwach, aber sehr zahlreich sind. Sie hatten sich entlang der Sichtlinie zwischen Erde und fernem Hin-

tergrundstern gemogelt und kurzzeitig den charakteristischen »Linsenblitz« erzeugt. Beide Objektklassen – Braune Zwerge und M-Sterne – bestehen natürlich aus normaler (baryonischer) Materie.

Die Linsenmethode funktioniert in gleicher Weise bei Objekten, die noch kleiner sind. So war es im Jahr 2003 zum ersten Mal gelungen, einen Exoplaneten nachzuweisen, der als Mikrolinse wirkte: Ein Vordergrundstern zog vor einem Hintergrundstern vorbei und verstärkte dessen Licht auf einer Zeitskala von etwa sechs Wochen. Dabei stieg die Helligkeit des Hintergrundsterns innerhalb eines Tages nochmalig merklich an und fiel

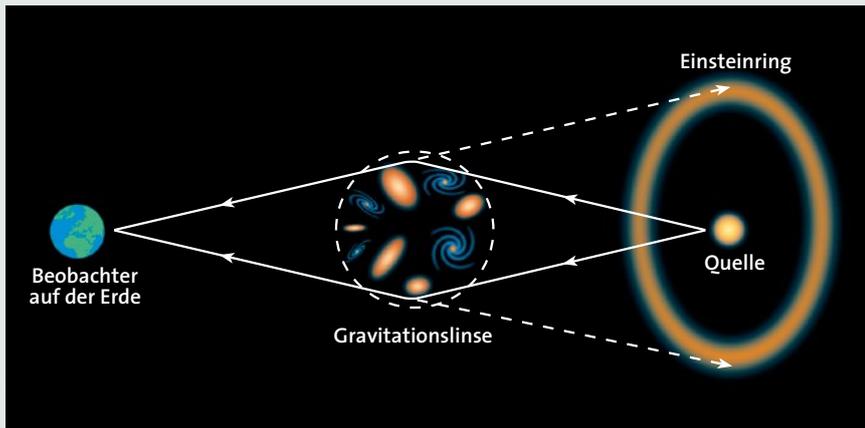
ebenso schnell wieder ab. Das wurde so interpretiert, dass ein um den Vordergrundstern kreisender Exoplanet das Licht des Hintergrundobjekts zusätzlich zu seinem Wirtsstern verstärkt hatte.

### Und die nächste Revolution?

Im Mai 2019 feiern wir zu Recht das einhundertjährige Jubiläum einer von vielen einsteinschen Vorhersagen: die Lichtablenkung durch Massen, die zum ersten Mal 1919 bei einer Sonnenfinsternis bestätigt werden konnte. Danach wurden Lichtablenkung und Gravitationslinseneffekt genutzt, um unzählige weitere astronomische Entdeckungen zu machen. Die

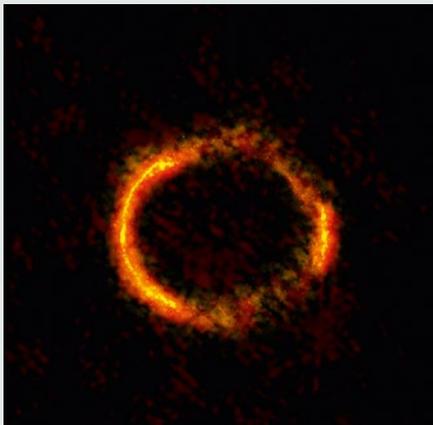
(im Foto nicht abgebildet). Weit dahinter steht in einer Entfernung von rund zwölf Milliarden Lichtjahren die aktive Galaxie SDP.81, in der recht viele Sterne entstehen. Das Material, aus dem sich die Sterne bilden, besteht unter anderem aus den Molekülen Kohlenmonoxid und Wasser. ALMA detektierte deren Emission bei charakteristischen Frequenzen von einigen hundert Gigahertz. Dabei wurden die Antennen des Verbunds auf der chilenischen Hochebene in der Atacamawüste auf ihre Maximaldistanz von 15 Kilometern voneinander platziert. Nur so waren scharfe Fotos mit bis zu 23 Millibogensekunden Auflösung möglich.

Der nur 1,5 Bogensekunden im Durchmesser messende Einsteinring ist nicht ganz perfekt, sondern setzt sich genauer betrachtet aus zwei Bögen zusammen, von denen einer etwas kürzer ist als der andere.



suW-Grafik

ALMA (NRAO/ESO/NAOJ); B. Saxton NRAO/AUI/NSF (https://public.nrao.edu/news/alma-ring-lens/) / CC BY 3.0 (creativecommons.org/licenses/by/3.0/legalcode)



Eine große Massenansammlung, die zwischen einer fernen Quelle und dem irdischen Beobachter liegt, lenkt das Licht dieser Quelle ab und wirkt so als »Gravitationslinse«. Bei perfekter Achsensymmetrie sieht der Beobachter ein ringförmiges Bild, den Einsteinring.

Dieser »Feuerreifen« ist nichts anderes als ein Einsteinring, ein verzerrtes Bild der Galaxie SDP.81, das vom Teleskopverbund ALMA fotografiert wurde.

Naturwissenschaften, und insbesondere die Astronomie, haben sich in den letzten hundert Jahren enorm weiterentwickelt – auch dank Einstein. Dennoch bleiben viele Rätsel, die es zu lösen gilt, wie die Singularitäten in Schwarzen Löchern, die Natur der Dunklen Materie, die Ursache für ein beschleunigt expandierendes Universum und der Urknall selbst.

Manchmal wünscht man sich als Wissenschaftler so eine Zeit wie damals, eine Zeit der Umwälzungen und der wissenschaftlichen Unruhe, in der eine neue Theorie innerhalb von wenigen Jahren bestätigt werden konnte. Doch eine neue Theorie der Gravitation, die über Einstein

hinausgeht, scheint ferner denn je. Zwar gibt es seit einigen Jahrzehnten Anwärter für solche Theorien, wie die Stringtheorie oder die Schleifenquantengravitation, aber sie bleiben uns den Beweis bis zum heutigen Tag schuldig, dass sie die Natur besser beschreiben als Einsteins Jahrhundertwerk.

Die Wissenschaftsgeschichte lehrt uns jedoch vor allem eins: Die Natur und die Naturwissenschaften sind immer für eine Überraschung gut. In Zeiten des scheinbaren Stillstands kommt ein neues Phänomen oder eine Forscherpersönlichkeit um die Ecke, mit der keiner gerechnet hat. Hoffentlich ist es bald wieder so weit. ©



**TIM TUGENDHAT** studierte 2007 bis 2013 Physik an der Universität Heidelberg und hat 2018 über den Gravitationslinseneffekt promoviert. 2018 war er Praktikant bei »Sterne und Weltraum«.



**ANDREAS MÜLLER** promovierte 2004 an der Universität Heidelberg über Schwarze Löcher. Der Astrophysiker ist seit April Chefredakteur von »Sterne und Weltraum«.

## Literaturhinweise

**Bührke, T.:** Einsteins Jahrhundertwerk. dtv premium, München 2015

**Coles, P.:** Einstein, Eddington and the 1919 Eclipse. In: astro-ph/0102462

**Dyson, F. W.; Eddington, A. S.; Davidson, C.:** A Determination of the Deflection of Light by the Sun's Gravitational Field, from Observations Made at the Total Eclipse of May 29, 1919. In: Philosophical Transactions of the Royal Society. Series A, 220, S. 291–333, 1920

**Einstein, A.:** Über den Einfluß der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes. In: Annalen der Physik, 340, S. 898–908, 1911

**Einstein, A.:** Lens-Like Action of a Star by the Deviation of Light in the Gravitational Field. In: Science 84, S. 506–507, 1936

**Pössel, M.:** 100 Jahre und quicklebendig. In: Sterne und Weltraum 11/2015, S. 40–47

**Sellentin, E., Bartelmann, M.:** Kosmologische Kuriositäten. In: Sterne und Weltraum 2/2013, S. 32–43

**Will, C.:** The 1919 measurement of the deflection of light. In: arXiv:1409.7812

Dieser Artikel und Weblinks unter:

[www.sterne-und-weltraum.de/artikel/1633580](http://www.sterne-und-weltraum.de/artikel/1633580)

**W I S** Didaktische Materialien: [www.wissenschaft-schulen.de/artikel/1421024](http://www.wissenschaft-schulen.de/artikel/1421024)