

Von „neuen Sternen“ zum Doppelquasar

Die Idee der Gravitationslinsen hat einen frühen Ursprung und eine wechselhafte Geschichte.

Tilman Sauer

Die Idee einer Gravitationslinse ergibt sich sehr natürlich aus den Prinzipien der geometrischen Optik, sobald man ein Gesetz der Ablenkung von Lichtstrahlen im Gravitationsfeld hat. Einstein fasste sich damit bereits vor dem Ersten Weltkrieg in unveröffentlichten Notizen. In den folgenden Jahrzehnten kam die Idee mehrmals wieder auf, fiel aber auch immer wieder in Vergessenheit.

Im September 1911 veröffentlichte Einstein eine Arbeit, in der er eine Ablenkung der Lichtstrahlen beim Durchgang durch das Gravitationsfeld der Sonne herleitete [1] (Abb. 1). Diese Ableitung beruhte auf seiner bereits 1907 formulierten Hypothese der vollständigen Äquivalenz von gradlinig gleichförmig beschleunigten Bezugssystemen und konstanten, homogenen Gravitationsfeldern. Aus dieser Äquivalenzhypothese hatte Einstein geschlossen, dass die Lichtgeschwindigkeit vom Gravitationspotential abhängen sollte. Unter Verwendung des Huygens-Prinzips sagte Einstein in dieser Arbeit für Lichtstrahlen von Sternen, die sich hinter der Sonne befinden und gerade am Sonnenrand vorbei auf die Erde treffen, eine Winkelablenkung von 0,83“ vorher.

Einstein leitete für Lichtstrahlen, die im Abstand ρ vom Zentrum an der Sonne vorbeigehen, eine Ablenkung von

$$\delta = \frac{2kM}{c^2} \cdot \frac{1}{\rho} \quad (1)$$

her, mit der Gravitationskonstanten k , Sonnenmasse M und Lichtgeschwindigkeit c . Der numerische Faktor ist in dieser Formel noch um einen Faktor 2 zu klein im Vergleich zur späteren Allgemeinen Relativitätstheorie. Aber entscheidend war die Abhängigkeit des Ab-

lenkungswinkels vom Kehrwert des sonnennächsten Abstands ρ .

Eine Ablenkung des Lichtes im Gravitationsfeld ergibt sich im Prinzip auch im Rahmen der Newtonschen Gravitationstheorie, vor allem wenn man wie Newton eine Korpuskulartheorie des Lichts vertritt. Entsprechende Überlegungen finden sich in der Wissenschaftsgeschichte seit Newton gelegentlich [2]. Aber Einsteins Ablenkungsgesetz (1) ist hier zum ersten Mal im Rahmen einer relativistischen Gravitationstheorie hergeleitet. Einstein begann zeitgleich, mit Astronomen wie George Ellery Hale von Pasadena über die Frage zu korrespondieren, ob man eine solche kleine Ablenkung der Lichtstrahlen vielleicht während einer Sonnenfinsternis würde beobachten können [3].

In der Woche vom 15. bis 22. April 1912 besuchte Einstein Berlin. Zu dieser Zeit war er noch Professor in Prag, aber schon auf dem Sprung zu seiner neuen Stelle an der ETH Zürich. Während seines Besuchs diskutierte er mit Erwin Freundlich, mit dem er kurz vorher erst Kontakt aufgenommen hatte, auch über die empirische Überprüfung seiner neuen Gravitationstheorie. Freundlich war ein ehrgeiziger junger Astronom, der sich mehr für grundlegende Fragen als für astronomische Routineaufgaben interessierte (Abb. 2). Er begeisterte sich für die Frage nach der empirischen Bestätigung der Einsteinschen Theorie und machte sie zu seiner Lebensaufgabe [4].

Eine Bestätigung der vorhergesagten Lichtablenkung schien Freundlich möglich zu sein, wenn man die scheinbaren Orte von Sternen nah am Sonnenrand während einer Sonnenfinsternis mit den entsprechenden Orten ohne Ablenkung durch das Gravitations-

4. Über den Einfluß der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes; von A. Einstein.

Die Frage, ob die Ausbreitung des Lichtes durch die Schwere beeinflusst wird, habe ich schon an einer vor 3 Jahren erschienenen Abhandlung zu beantworten gesucht.¹⁾ Ich komme auf dies Thema wieder zurück, weil mich meine damalige Darstellung des Gegenstandes nicht befriedigt, noch mehr aber, weil ich nun nachträglich einsehe, daß eine der wichtigsten Konsequenzen jener Betrachtung der experimentellen Prüfung zugänglich ist. Es ergibt sich nämlich, daß Lichtstrahlen, die in der Nähe der Sonne vorbeigehen, durch das Gravitationsfeld derselben nach der vorzubringenden Theorie eine Ablenkung erfahren, so daß eine scheinbare Vergrößerung des Winkelabstandes eines nahe an der Sonne erscheinenden Fixsternes von dieser im Betrage von fast einer Bogensekunde eintritt.

Es haben sich bei der Durchführung der Überlegungen an demselben Gegenstande folgende Punkte ergeben:

Lichtstrahl erfährt demnach eine Ablenkung vom Betrage $4 \cdot 10^{-6} = 0,83$ Bogensekunden. Um diesen Betrag erscheint die Winkeldistanz des Sternes vom Sonnenmittelpunkt durch die Krümmung des Strahles vergrößert. Da die Fixsterne der der Sonne zugewandten Himmelspartien bei totalen Sonnenfinsternissen sichtbar werden, ist diese Konsequenz der Theorie mit der Erfahrung vergleichbar. Beim Planeten Jupiter erreicht die zu erwartende Verschiebung etwa $\frac{1}{100}$ des angegebenen Betrages. Es wäre dringend zu wünschen, daß sich Astronomen der hier aufgerollten Frage annähmen, auch wenn die im vorigen gegebenen Überlegungen ungenügend fundiert oder gar abenteuerlich erscheinen sollten. Denn abgesehen von jeder Theorie muß man sich fragen, ob mit den heutigen Mitteln ein Einfluß der Gravitationsfelder auf die Ausbreitung des Lichtes sich konstatieren läßt.

Prag, Juni 1911.

(Eingegangen 21. Juni 1911.)

Abb. 1 In dieser Arbeit in den „Annalen der Physik“ aus dem Jahr 1911 leitete Einstein das Ablenkungsgesetz für Lichtstrahlen im Gravitationsfeld eines Sterns her, aus dem sich die Gravitationslinsenidee in natürlicher Weise ergibt [1].

feld der Sonne vermessen konnte. Freundlich ließ sich von vielen Kollegen Aufnahmen von früheren Sonnenfinsternissen senden, fand aber die alten Aufnahmen zu unscharf oder ungeeignet für den Nachweis des Ablenkungseffekts.

Wir wissen aus Aufzeichnungen Einsteins in einem Notizbuch von 1912, dass Freundlich und er sehr wahrscheinlich bei ihrer Begegnung in Berlin nicht nur die Möglichkeit einer Bestätigung der Lichtablenkung während einer Sonnenfinsternis besprochen haben. Es

Prof. Dr. Tilman Sauer, Institut für Mathematik, Johannes-Gutenberg-Universität Mainz, 55099 Mainz

finden sich in diesem Notizbuch nämlich Rechnungen zu einem weiteren Effekt, der sich auch aus der Lichtablenkung (1) ergibt (Abb. 3) [5, 6]. Hat man nämlich ein Gesetz der Ablenkung von Lichtstrahlen als Funktion des Abstands von einem Punkt, liegt die Frage nahe, ob die Gravitationswirkung einer kompakten, sphärisch symmetrischen Massenverteilung ähnliche optische Abbildungseigenschaften hat wie eine gewöhnliche Glaslinse. Man kann sich also fragen, ob ein Stern wie die Sonne durch die Wirkung seines Gravitationsfeldes eine Linsenwirkung ausübt. Genau diese Rechnung findet sich in Einsteins Notizbuch.

Der Anlass für diese Überlegung war vermutlich der Ausbruch einer hellen Nova [8]: Am 12. März 1912 wurde nämlich im Sternbild Zwilling ein „Neuer Stern“ entdeckt. Rasch breitete sich die Nachricht in Astronomenkreisen aus, und viele Observatorien richteten ihre Instrumente auf dieses seltene Ereignis [9]. Auch das Observatorium in Potsdam nahm in der Zeit zwischen dem 15. März und dem 12. April eine Reihe von Fotografien des entsprechenden Himmelsausschnitts auf. Erwin Freundlich wurde mit



Abb. 2 Der Astronom Erwin Finlay Freundlich (1885 – 1964) plante eine Expedition zur Krim, um dort Aufnahmen während einer Sonnenfinsternis am 21. August 1914 zu machen und so Einsteins Vorhersagen zu bestätigen. Doch der Kriegsausbruch verhinderte das, denn Freundlich geriet in russische Internierung.

der photometrischen Auswertung dieser Aufnahmen beauftragt. Einstein und Freundlich dürften sich daher gefragt haben, ob diese Erscheinung vielleicht durch einen Linseneffekt zu erklären sei. Einstein ging in seinen Rechnungen davon aus, dass sich bei S ein Stern befinde, bei L ein weiteres astrophysikalisches Objekt mit einem

starken Gravitationsfeld, das als Linse wirkt, und bei B ein Beobachter (Abb. 4). Der Abstand zwischen B und L heiße R, der Abstand zwischen L und der Projektion von S auf die Linie BL heiße R', und wir setzen $\alpha = 2kM/c^2$. Dann ergibt sich aus elementaren geometrischen Überlegungen die Linsengleichung

$$r = \rho \frac{R+R'}{R} - \frac{R'\alpha}{\rho}, \quad (2)$$

wobei r den orthogonalen Abstand des Sterns von der Verbindungslinie Beobachter-Linse bezeichnet. Zur Ableitung dieser Gleichung berücksichtigt man, dass der erste Term den Abstand des scheinbaren Bildes S' bzw. S'' des Sterns von der optischen Achse bezeichnet (Abb. 4a) und sich aus dem Strahlensatz ergibt, während der zweite Term die Ablenkung vom gradlinig projizierten Strahl gemäß Gl. (1) bestimmt. Mit der Einführung der dimensionslosen Variablen

$$\begin{aligned} r_0 &= r \sqrt{\frac{R}{R'(R+R')\alpha}} \\ \rho_0 &= \rho \sqrt{\frac{R+R'}{RR'\alpha}} \end{aligned} \quad (3)$$

ergibt sich die Linsengleichung in der einfachen Form

$$r_0 = \rho_0 - \frac{1}{\rho_0}. \quad (4)$$

Dies ist eine quadratische Gleichung für ρ_0 , und die beiden Lösungen entsprechen zwei möglichen Lichtwegen, die vom Stern S den Beobachter B erreichen können. Da wir es hier nur mit drei Punkten zu tun haben, handelt es sich um ein ebenes Problem. Aus der Linsengleichung folgt demnach, dass man ein doppeltes Bild des Sterns sieht. Es folgt aber noch mehr: Für $r_0 = 0$, d. h. für den Fall der vollständigen Ausrichtung der drei Objekte auf einer Achse, erhalten wir Rotationssymmetrie, und die beiden Linsenbilder degenerieren zu einem Ring vom Abstand

$$\rho^{\text{Ring}} = \sqrt{\frac{\alpha RR'}{R+R'}}. \quad (5)$$

Schließlich kann man sich überlegen, ob die Linsenwirkung eine Verstärkung des Lichts am Punkt des Beobachters bewirkt. Dazu

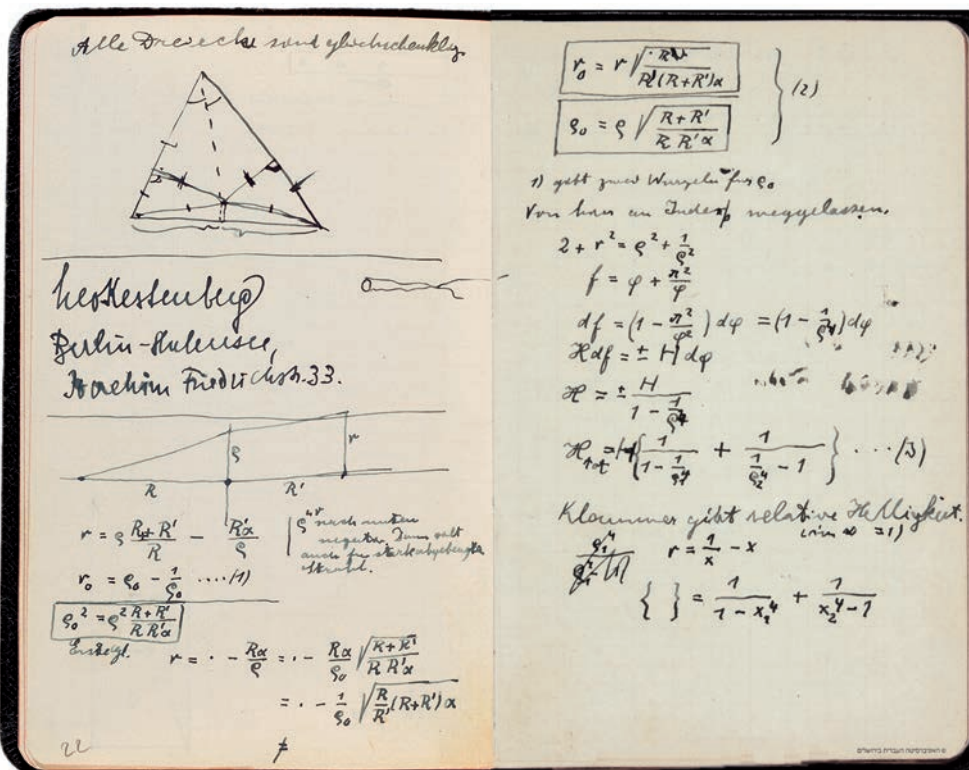


Abb. 3 Einsteins Rechnungen zur Gravitationslinse in seinem Prager Notizbuch [7]

muss man korrespondierende Flächenelemente in der Linsenebene und in der Beobachterebene miteinander in Beziehung setzen und mit den entsprechenden Verhältnissen ohne Linse vergleichen (Abb. 4b). Genau dies tut Einstein in seinen Notizen aus dem Jahr 1912. Für die Helligkeit erhält er den Ausdruck

$$H_{\text{tot}} = H \left\{ \frac{1}{1-1/\rho_1^4} + \frac{1}{1/\rho_2^4-1} \right\}, \quad (6)$$

wobei H die Helligkeit ohne Linsenwirkung bezeichnet. Für die relative Verstärkung ergibt sich [8]

$$H_r = \frac{H_{\text{tot}}}{H} = \sqrt{1 + \frac{1}{r^2(1+1/4r^2)}}, \quad (7)$$

wobei $r \equiv r_0$. Die Gleichung (7) divergiert für $r \rightarrow 0$.

Kann es sein, dass diese Verstärkung den Effekt der „neuen Sterne“ als vorübergehende optische Vergrößerung eines entfernten Sterns durch einen vorüberziehenden Linsenstern erklären kann? Wir wissen aus einem Brief Einsteins, dass er diese Möglichkeit damals in der Tat in Betracht gezogen, aber dann doch aufgegeben hat: „Es ist mir nun leider klar geworden, dass die ‚neuen Sterne‘ nichts mit der ‚Linsenwirkung‘ zu thun haben, dass ferner letztere mit Rücksicht auf die am Himmel vorhandenen Sterndichten ein so ungeheuer seltenes Phänomen sein muss, dass man wohl vergeblich ein solches erwarten würde,“ schrieb Einstein am 15. Oktober 1915 an seinen

Freund Heinrich Zangger [10]. Neben der Seltenheit des Phänomens bei Sternen sprachen zwei weitere Argumente gegen diese Erklärung [8; 11, S. 6]. Zum einen sollte die Lichtkurve eines linsenartig verstärkten Sterns zeitsymmetrisch verlaufen, was bei einer Nova im Allgemeinen nicht der Fall ist. Zweitens sollte sich das Spektrum einer Nova durch die Linsenwirkung zeitlich nicht verändern. Heute wissen wir, dass die meisten Novae Doppelsternsysteme sind und durch Zündung einer thermonuklearen Reaktion an der Oberfläche des kleineren Partners, meist eines weißen Zwerges, ihre Helligkeit erhalten. Aber um 1912 waren die astrophysikalischen Mechanismen von Novae oder Supernovae noch unbekannt. Die Erklärung einer Nova aus der Gravitationslinsenwirkung eines vorüberziehenden Sterns war ein cleverer Einfall, der in den Papierkorb wanderte, wo er sich mit anderen ergebnislosen Ideen in guter Gesellschaft befand, wie Einstein scherzhaft zu sagen pflegte. Von all dem wüssten wir nichts ohne Albert Einsteins Notizen und Briefe.

Comeback(s) einer Idee

Das Gesetz der Lichtablenkung überlebte in seiner funktionalen Form den Übergang von Einsteins Gravitationstheorie von 1912 zur

Allgemeinen Relativitätstheorie im Herbst 1915. In der neuen Theorie kam nur ein Faktor 2 hinzu. Daher verwundert es auch nicht, dass die Idee einer Gravitationslinsenwirkung über die Zeit immer wieder einmal erörtert wurde. In einer kurzen Notiz in „Nature“ aus dem Jahr 1919 [12] erwähnte der englische Physiker Oliver Lodge die Analogie zwischen dem Gravitationsfeld einer Masse und einem optischen Medium. Aber er bemerkte nur, dass man hier nicht von einer Linse sprechen könne, da eine solche Linse keine definierte Brennweite habe. Das Licht sammelte sich nicht in einem einzelnen Brennpunkt, sondern entlang einer Brennlinie. Ein Jahr später diskutierte Arthur Stanley Eddington die Möglichkeit eines optischen Doppelbildes, kam aber zu der Einschätzung, dass dieses Phänomen wohl kaum beobachtbar sein würde ([13], S. 134).

Wie es scheint, stammt die erste publizierte positive Erörterung von Gravitationslinsen von dem russischen Physiker Orest Chwolson. Dieser hatte in einer kurzen Notiz „über eine mögliche Form fiktiver Doppelsterne“ in den „Astronomischen Nachrichten“ von 1924 spekuliert [14], dass man zwei spektral gleiche Bilder eines einzelnen Sterns durch die Gravitationswirkung eines dazwischenliegenden Objekts sehen müsste (Abb. 5). Chwolson bemerkte auch, dass sich im Falle vollständiger Ausrichtung

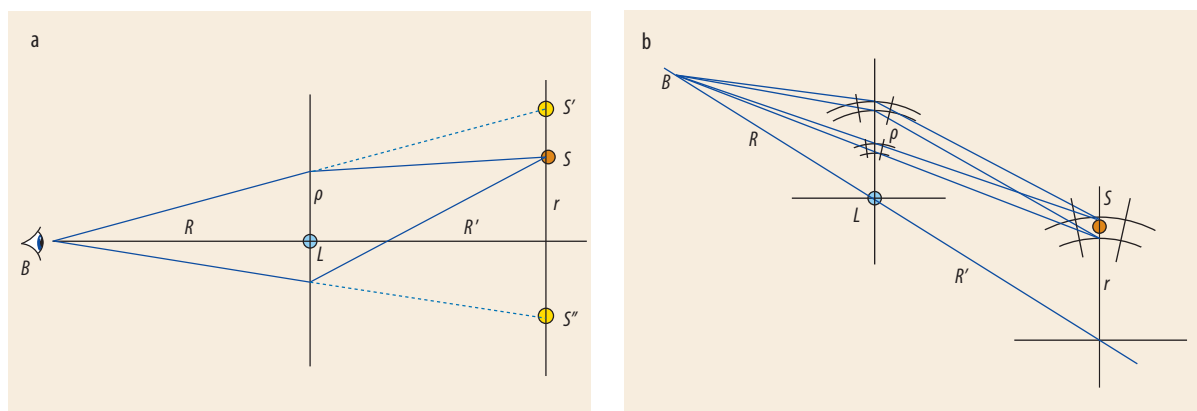


Abb. 4 Die Geometrie für Einsteins Rechnungen in Abb. 3 (a): Ein als Linse wirkender Stern bei L bricht die von einem Stern S herrührenden Lichtstrahlen gemäß Gl. (1), sodass ein Beobachter ein doppeltes Bild des Sterns bei S' und S''

sieht. Um die Helligkeitsverstärkung eines Sterns durch eine Gravitationslinse zu berechnen (b), vergleicht man ein Flächenelement $dr d\phi$ in der Objektebene des Sterns S mit den entsprechenden Flächenelementen $d\rho d\phi$ in der Linsen-

ebene L , und zwar einmal für den abgelenkten Strahl und einmal für den direkten Strahl, wenn keine Linse vorhanden wäre. Der aus der Linsengleichung folgende, stark abgelenkte Strahl auf der anderen Seite von L ist hier unterdrückt.

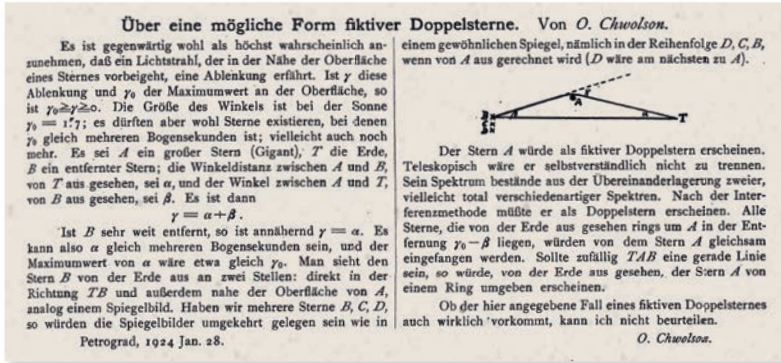
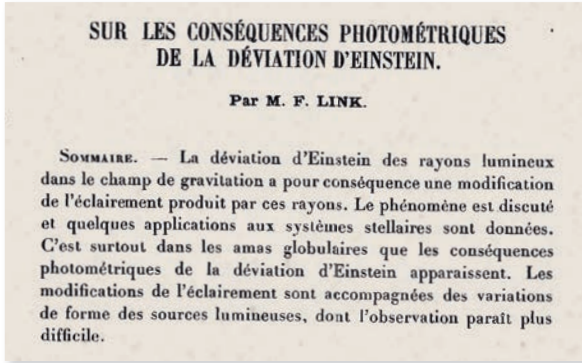


Abb. 5 Die kurze Notiz des Russen Orest Chwolson von 1924 [14] und die Arbeit des Tschechen František Link aus dem Jahr 1937 [17] befassten sich mit der Möglichkeit von Gravitationslinsen.



in einer Linie das Bild eines Rings ergeben müsste. Seine Notiz findet sich übrigens auf derselben Seite abgedruckt wie eine kurze Anmerkung Einsteins zu dem Problem der Erklärung der Rotverschiebung durch ein Elektronengas. Offenbar hat diese Koinzidenz aber nicht dazu geführt, dass Einstein Chwolson's Idee wahrgenommen oder sich später daran erinnert hätte. In den frühen 1920er-Jahren initiierte der Direktor des Yerkes Observatory, Edwin B. Frost, eine erste systematische Suche nach Gravitationslinsen, die allerdings erfolglos war [15].

Die weitere Geschichte der Gravitationslinsen zeigt nun das merkwürdige Phänomen, dass es nach längerem Dornröschenschlaf zweimal zu einem Erwachen und einer auffälligen Häufung von entsprechenden Publikationen gekommen ist, einmal um 1936/37, und ein zweites Mal in den frühen 1960er-Jahren, während sie in der Zwischenzeit vollständig in Vergessenheit zu geraten schien. 1936 wurde die Möglichkeit von Gravitationslinsen gleich zwei- oder vielleicht sogar dreimal unabhängig wieder entdeckt. Zunächst publizierte der tschechische Astronom František

Link im März 1936 eine kurze Arbeit in den „Comptes rendus de l'Academie des Sciences“ [16] und etwas später eine längere im „Bulletin Astronomique“ [17], in der er vor allem die Lichtverstärkung bei der Linsenwirkung detailliert ausrechnete (Abb. 5) [18].

Am 17. April 1936, nur wenige Wochen nach Links erster Arbeit, erhielt Einstein in Princeton Besuch von einem tschechischen Emigranten und Hobbyastronomen, Rudy W. Mandl, der Einstein von der Idee der Gravi-

tationslinsenwirkung überzeugen wollte und darüber hinaus weitere kühne Vorstellungen entwickelte, etwa, dass diese Lichtverstärkung Ursache für eine größere Häufigkeit von Mutationen sei und daher auch die Ursache für die Evolution des Lebens auf der Erde sein könnte [5, 6]. Es gibt keinen Hinweis darauf, dass Mandl und Link in irgendeiner Beziehung gestanden hätten oder dass Mandl von Links Publikation Kenntnis gehabt hätte. Jedenfalls gelang es dem hartnäckigen Mandl, Einstein zu einer kurzen Notiz in der Zeitschrift „Science“ [19] zu überreden, in welcher Einstein das Phänomen des doppelten Bildes und auch der Lichtverstärkung diskutierte und dabei – mit anderer Notation – Gleichungen angab, die völlig äquivalent zu denen waren, die er bereits 1912 in seinem Notizbuch ausgerechnet hatte [5].

Anders als die Arbeit von Link wurde die Einsteinsche Notiz von der Gemeinschaft der Astronomen zur Kenntnis genommen und löste unter anderem einen Artikel von Henry Norris Russell im „Scientific American“ aus, in dem dieser die fiktive Wahrnehmung des Sterns Sirius A abgebildet durch das Gravitationsfeld des weißen Zwergs Sirius B diskutierte. Dafür versetzte sich Russell in die Lage eines Beobachters, der sich auf einem geeignet platzierten hypothetischen Planeten befindet [20]. Ebenfalls aufgegriffen wurde Einsteins Arbeit wenige Wochen später in zwei Notizen Fritz Zwicky's in „Physical Review“. Dort diskutierte er den Gravitationslinseneffekt für den Fall von Galaxien und kam zu einer viel optimistischeren Einschätzung bezüglich der Beobachtbarkeit als Einstein [15, 21]. Als Reaktion auf die Publikationen von Link, Einstein und Zwicky publizierte schließlich der russische Physiker Gavril Adriano-vich Tikhov eine eigene Diskussion des Lichtverstärkungseffekts, welche er ohne weitere Belege mit der Bemerkung einleitete, dass er diese Überlegungen bereits im Jahr 1935 angestellt hätte [22].

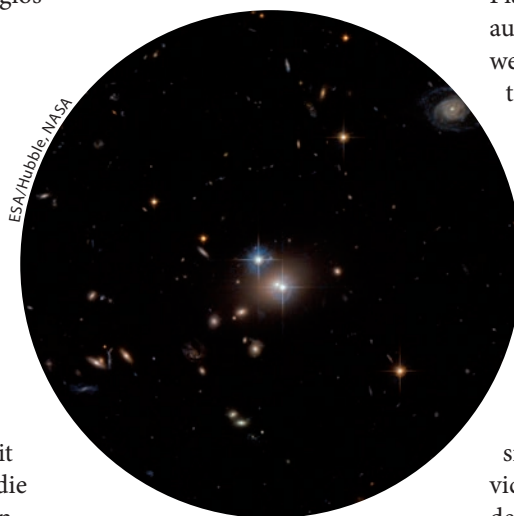


Abb. 6 Der Doppelquasar 0957+561 A, B (Mitte) im Sternbild Großer Wagen entpuppte sich 1979 als ein einziger Quasar, dessen Bild durch den Gravitationslinseneffekt verdoppelt wurde.

Doppelbild in Gravitationslinse

Nach diesen Publikationen aus den Dreißigerjahren scheint die Gravitationslinsenidee wieder in Vergessenheit geraten zu sein, bis sie in den späten Fünfziger- und frühen Sechzigerjahren wieder aufgenommen wurde. Auch diesmal haben sie verschiedene Autoren an verschiedenen Orten anscheinend unabhängig voneinander entdeckt. Mit den Arbeiten aus dem Jahr 1964 durch Sidney Liebes, Jr. [23] und Sjur Refsdahl [24] gerieten die Gravitationslinsen endgültig in das Bewusstsein der Astronomen. Dennoch dauerte es weitere fünfzehn Jahre, bis 1979 mit dem Doppelquasar 0957+561 A,B erstmals ein eindeutig durch den Gravitationslinseneffekt erzeugtes Doppelbild desselben Quasars identifiziert wurde (Abb. 6) [25].

Seitdem ist die Erforschung des Gravitationslinseneffekts zu einem sich rasant entwickelnden Forschungsgebiet geworden [26]. Auch Einsteins ursprüngliche Idee der vorübergehenden Lichtverstärkung bei Stern-Stern-Linsensystemen ließ sich inzwischen beobachten. Mehr noch: Wenn der als Linse wirkende Stern einen Planeten mit sich trägt, kann man inzwischen aus der Struktur der Lichtkurve die Existenz des Planeten erschließen. Der einst unzugängliche Effekt stellt somit heute eine wichtige Methode dar, um Exoplaneten zu entdecken und zu erforschen.

Danksagung

Die Arbeit an diesem Aufsatz wurde gefördert durch einen Gastaufenthalt am MPI für Wissenschaftsgeschichte.

Literatur

- [1] A. Einstein, *Annalen der Physik* **35**, 898, (1911) [CPAE 3, Doc. 23]
- [2] V. Trimble, in: T. G. Brainerd und C. S. Kochanek (Hrsg.), *Gravitational Lensing*, ASP Conf. Series **237** (2001), S. 1
- [3] J. Crellin, *Einstein's Jury*, Princeton University Press, Princeton (2006)
- [4] K. Hentschel, *Archive for History of Exact Sciences* **47**, 143 (1994)
- [5] J. Renn, T. Sauer und J. Stachel, *Science* **275**, 184 (1997)
- [6] J. Renn und T. Sauer, in: A. Ashtekhar et al. (Hrsg.), *Revisiting the Foundations of*

Relativistic Physics, Kluwer, Dordrecht (2003), S. 69

- [7] M. J. Klein, A. J. Cox, J. Renn und R. Schulmann (Hrsg.), *The Collected Papers of Albert Einstein [CPAE]*, Bd. 3: *The Swiss Years: Writings, 1909 – 1911*, Princeton University Press, Princeton (1993)
- [8] T. Sauer, *Archive for History of Exact Sciences* **62**, 1 (2008)
- [9] J. Fischer-Petersen, *Astronomische Nachrichten* **192**, 429 (1912)
- [10] R. Schulmann, A. J. Cox, M. Janssen und J. Illy (Hrsg.), *CPAE*, Bd. 8: *The Berlin Years: Correspondence, 1914 – 1918*, Princeton Univ. Press, Princeton (1998)
- [11] D. Kormos Buchwald et al. (Hrsg.), *CPAE*, Bd. 12: *The Berlin Years: Correspondence, January–December 1921*, Princeton Univ. Press, Princeton (2009)
- [12] O. J. Lodge, *Nature* **104**, 354 (1919)
- [13] A. S. Eddington, *Space, Time and Gravitation*, Cambridge University Press, Cambridge (1920)
- [14] O. Chwolson, *Astronomische Nachrichten* **221**, 329 (1924)
- [15] F. Zwicky, *Physical Review* **51**, 679 (1937)
- [16] F. Link, *Comptes Rendus des Séances de l'Académie des Sciences* **202**, 917 (1936)
- [17] F. Link, *Bulletin Astronomique* **10**, 73 (1937)
- [18] D. Valls-Gabaud, in: *Albert Einstein Century International Conference*, AIP Conf. Proc. **861**, 1163 (2006), arXiv:1206.1165
- [19] A. Einstein, *Science* **84**, 506 (1936)
- [20] H. N. Russell, *Scientific American* **156**, 76 (1937)
- [21] F. Zwicky, *Physical Review* **51**, 290 (1937)
- [22] G. A. Tikhov, *Izvestiia Glavnoi Astronomicheskoi Observatorii v Pulkove* **16**, 199 (1937)
- [23] S. Liebes, *Physical Review* **133**, B835 (1964)
- [24] S. Refsdahl, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **128**, 295 (1964)
- [25] D. Walsh, R. F. Carswell und R. J. Weymann, *Nature* **279**, 381 (1979)
- [26] J. Wambsganss, *Living Reviews in Relativity*, lrr-1998-12 (1998, überarbeitet 2001)

DER AUTOR

Tilman Sauer lehrt Geschichte der Mathematik und der Naturwissenschaften an der Universität Mainz. Nach seinem Studium an der FU Berlin, wo er 1994 in theoretischer Physik promovierte, war er wissenschaftlicher Mitarbeiter am MPI für Wissenschaftsgeschichte (1994 – 1996) und bei der Hilbert-Edition an der Universität Göttingen (1997 – 1999) sowie Assistent am Lehrstuhl für Wissenschaftstheorie und Wissenschaftsgeschichte an der Universität Bern (1999 – 2001), wo er 2008 habilitierte. Von 2001 bis 2013 arbeitete er am Caltech als Mitherausgeber der *Collected Papers of Albert Einstein*.

