

Gravitationslinsen – Eine Sternstunde Einsteins

In Bezug zum SuW-Beitrag „Gaia spürt Einstein-Kreuze auf“ aus der Rubrik: „Blick in die Forschung: Nachrichten“ in der Zeitschrift »Sterne und Weltraum« 4/2022

WIS-ID: 1571150, Zielgruppe: Oberstufe

Andreas Jørgensen

Die Schwerkraft spielt eine wichtige Rolle in der Astronomie und im Alltag. Das Newtonsche Gravitationsgesetz und die Keplerschen Gesetze, die den Einfluss der Schwerkraft auf Massen beschreiben, gehören somit zum Kernstoff des Physikunterrichts. Aber wie verhält sich eigentlich *Licht* in einem Gravitationsfeld? Die Antwort auf diese Frage ist facettenreich und bietet viele erstaunliche Einblicke ins Universum. In diesem WIS-Beitrag betrachten wir eine Facette: die Gravitationslinsen. Durch den Gravitationslinseneffekt können mehrere verzerrte Bilder desselben Objekts am Himmel zu sehen sein. Am Firmament ist nicht alles wie auf den ersten Blick scheint!

Übersicht der Bezüge im WIS-Beitrag		
Astronomie	Galaxien, Kosmos	Gravitationslinsen , Eddington-Experiment , Dunkle Materie , Milchstraße, Galaxienhaufen, Einstein-Ring, Einstein-Kreuz, Mikrolinseneffekt
Physik	Relativitätstheorie	Gravitation, allgemeine Relativitätstheorie, Licht im Gravitationsfeld, Größen und Einheiten
Fächer- verknüpfung	Astronomie – Mathematik	Winkel- und Bogenmaß, Rechenaufgaben
Lehre allgemein	Kompetenzen (Erkenntnisgewinnung, Kommunikation), Lehr-/ Sozialformen Unterrichtsmittel	Ergebnisse beurteilen , Diagramme erstellen und verstehen , Recherchen durchführen , Projektarbeit , Einzelarbeit , Partner- und Gruppenarbeit , Plenum , Diskussionsaufgaben , Übungsaufgaben zum Thema ‚Gravitationslinsen‘

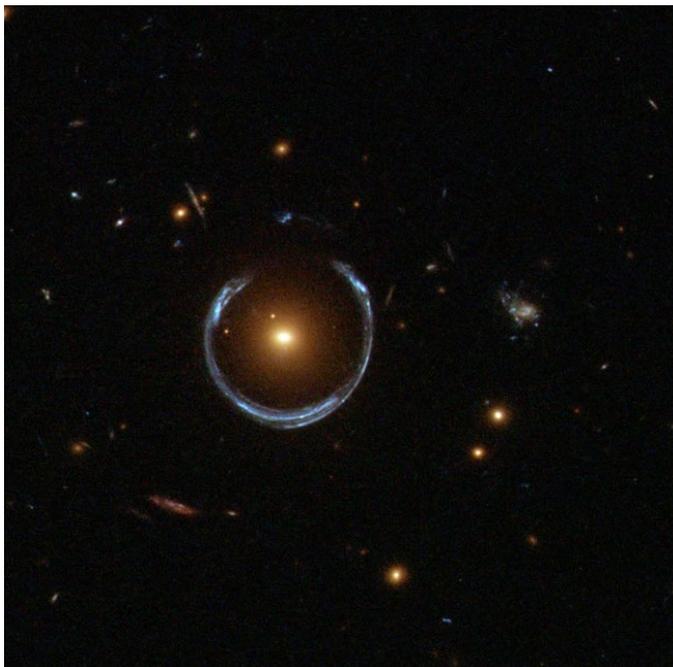


Abbildung 1: Die [Abbildung links](#) zeigt einen Einsteinring: Das blaue Licht einer fernen Galaxie wird durch eine Galaxie (LRG 3-757) im Vordergrund abgelenkt und bildet einen Ring. Die [Abbildung rechts](#) zeigt ein Einsteinkreuz: Eine Galaxie (UZC J224030.2+032131) verzerrt das Licht eines dahinter liegenden [Quasars](#) (aktiver Galaxienkern), wodurch vier Bilder des Quasars entstehen, die zusammen mit UZC J224030.2+032131 ein Kreuz am Himmel bilden. Obwohl auf der Abbildung rechts fünf helle Punkte zu sehen sind, zeigt die Abbildung somit nur zwei Himmelskörper.

©: ESA/Hubble und NASA [CC BY 4.0](#).

Die Ablenkung des Lichts

[Zurück zum Anfang](#)

Gravitationsfelder beeinflussen den Weg, den das Licht durch die Raumzeit zurücklegt. Ein Lichtstrahl, der an einer Masse M in einer Entfernung ξ vorbeizieht, wird deshalb um einen Winkel $\hat{\alpha}$ abgelenkt. Vorausgesetzt, dass das Licht sich in einem schwachen Gravitationsfeld bewegt, sodass $\hat{\alpha}$ klein bleibt, sagt Albert Einsteins allgemeine Relativitätstheorie voraus, dass dieser Winkel wie folgt berechnet werden kann:

$$\hat{\alpha} = \frac{4GM}{c^2\xi}$$

Hier bezeichnen G und c die Gravitationskonstante und die Lichtgeschwindigkeit. Setzt man Zahlen in diese Formel ein, erhält man das Ergebnis im Bogenmaß ([Radian](#)). 360° entsprechen 2π Radian (rad). 1° entspricht 60 [Bogenminuten](#) (') bzw. 3600 [Bogensekunden](#) (").

Sir Arthur Eddington brach 1919 nach Principe an der Westküste Afrikas auf, um die von Einstein vorausgesagte Ablenkung des Lichts während einer totalen Sonnenfinsternis zu überprüfen. Hierzu beobachtete er einen Stern, der sich nahe am Rand der Sonnenscheibe befand: Wenn Einstein recht hatte, würde sich die Position des Sterns durch die Ablenkung des Lichts scheinbar ändern. Das Prinzip ist in [Abbildung 2](#) veranschaulicht.

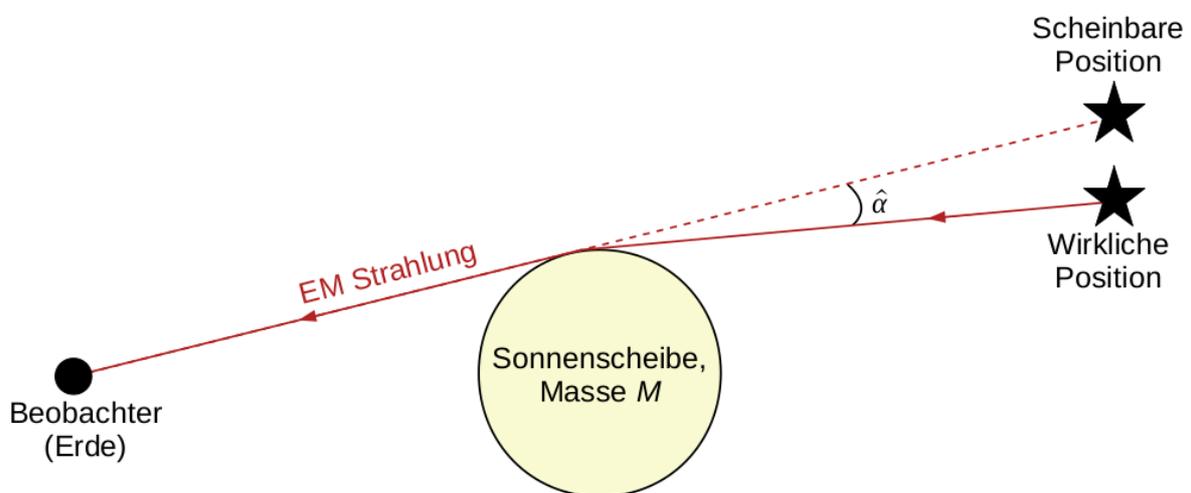


Abbildung 2: Prinzipdarstellung des Eddington-Experiments. Das Licht eines Sterns wird vom Gravitationsfeld der Sonne abgelenkt, wodurch das Licht für den Beobachter auf der Erde aus einer anderen Richtung (gestrichelte Linie) zu kommen scheint. Der Beobachter sieht somit ein verlagertes Bild des Sterns. ©: Andreas Jørgensen, CC0.

Eddingtons Messungen bestätigten Einsteins Voraussage und lieferten damit den ersten experimentellen Nachweis für die allgemeine Relativitätstheorie. Dieser Erfolg verhalf Einstein über Nacht zum Weltruhm. Seitdem wurde die allgemeine Relativitätstheorie in zahlreichen Experimenten immer wieder aufs Neue bestätigt. In der Tat spielt die allgemeine Relativitätstheorie eine entscheidende Rolle für Schlüsseltechnologien wie das [GPS](#).

Wie groß war nun die von Einstein berechnete Ablenkung des Lichts? Das müsst ihr in der **Übungsaufgabe 2** (im Anhang) selbst herausfinden.

Viele Bilder vom selben Himmelskörper

[Zurück zum Anfang](#)

Jedes Gravitationsfeld (und daher jedes Objekt mit einer Masse) beeinflusst die Richtung elektromagnetischer Strahlung. Abhängig vom Gravitationsfeld sowie von der Lage dieser Masse, der Wellenquelle und des Beobachters zueinander kann dieser Umstand zu verblüffenden Phänomenen führen. Analog zu einer Sammellinse/Konvexlinse/Lupe, kann eine Masse beispielsweise das Licht eines Hintergrundobjekts bündeln. Für einen Beobachter, der sich im Brennpunkt des gebündelten Lichts befindet, können dadurch vielfache, verzerrte und räumlich verlagerte Bilder des Hintergrundobjekts entstehen. Wegen der angedeuteten Parallelen zu optischen Linsen bezeichnet man die Masse, die das Licht ablenkt, als **Gravitationslinse** und die daraus entstandene Ablenkung des Lichts als [Gravitationslinseneffekt](#). Das zugrundeliegende Prinzip dieses Phänomens ist in Abbildung 3 dargestellt.

Im Falle der Sonne ist die Entfernung zur Erde zu gering, als dass das Licht eines Hintergrundobjekts von einem Objekt mit der Masse der Sonne gebündelt werden könnte. Deshalb beobachtete Eddington 1919 lediglich eine Ablenkung des Lichts. Wenn ein massenreiches Objekt, wie eine Galaxie oder ein [Galaxienhaufen](#), in einer Entfernung von Milliarden von Lichtjahren dahingegen als Gravitationslinse agiert, können Bilder entstehen wie die, die auf Abbildung 1 auf der Titelseite zu sehen sind.

Nehmen wir der Einfachheit halber an, dass die Gravitationslinse eine Punktmasse ist. Falls die Wellenquelle, sprich das Hintergrundobjekt, genau hinter der Gravitationslinse steht, erzeugt der Gravitationslinseneffekt ein verzerrtes ringförmiges Bild der Wellenquelle. Dieser sogenannte Einsteinring (siehe Abbildung 1) hat einen Radius (θ_E), der im Bogenmaß durch die folgende Formel bestimmt werden kann:

$$\theta_E = \sqrt{\frac{4GM}{c^2} \frac{D_{LQ}}{D_Q D_L}}$$

Hier bezeichnen D_L , D_Q und D_{LQ} die Entfernungen zwischen dem Beobachter und der Gravitationslinse, dem Beobachter und der Wellenquelle bzw. der Gravitationslinse und der Wellenquelle (siehe Abb. 3).

Der Winkel θ_E wird als **Einsteinradius** bezeichnet. Zu beachten ist, dass dieser Winkel vom Beobachter aus gemessen wird, während es sich bei $\hat{\alpha}$ in Abb. 2 um einen Winkel in der Ebene der Gravitationslinse handelt.

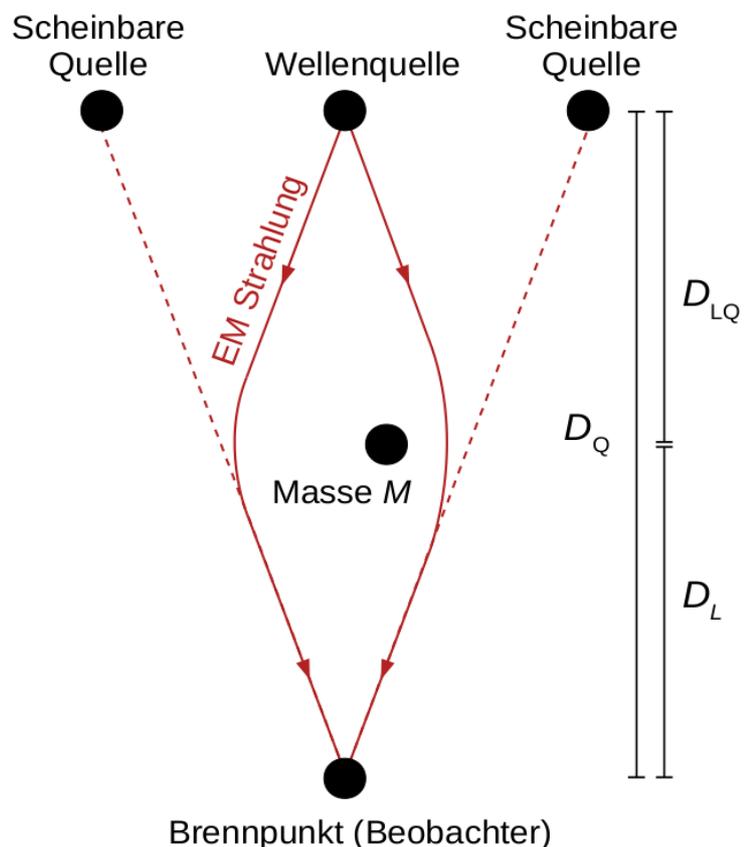


Abbildung 3: Stilisierte Darstellung des Gravitationslinseneffekts. Elektromagnetische (EM) Wellen werden auf ihrem Weg zwischen der Wellenquelle (dem Hintergrundobjekt) und dem Beobachter vom Gravitationsfeld eines massenreichen Objekts (der Gravitationslinse, M) abgelenkt, wodurch mehrere Bilder der Wellenquelle entstehen. ©: Andreas Jørgensen, CC0.

Liegt die Wellenquelle nicht genau hinter der Gravitationslinse, entstehen statt des Einsteinrings zwei getrennte Bilder, deren Winkelabstand größer als oder ungefähr gleich $2\theta_E$ ist. Die beiden Bilder liegen vom Beobachter aus gesehen, d. h. auf den Himmel projiziert, auf einer Linie mit der Gravitationslinse und der Wellenquelle (vgl. Abb. 4).

Die Gravitationslinse verlagert nicht nur scheinbar das Hintergrundobjekt, sie vergrößert es auch. Da die Gravitationslinse das Licht des Hintergrundobjekts bündelt, ist die Gesamthelligkeit der Bilder höher, als die Helligkeit des Hintergrundobjekts ohne den Einfluss der Gravitationslinse wäre. Diese Helligkeitszunahme hat faszinierende Anwendungsmöglichkeiten, auf die die **Übungsaufgaben 5 und 7** (im Anhang) näher eingehen.

Im oben angeführten Beispiel, in dem zwei Bilder entstehen, ist eines der beiden Bilder heller als das andere. Nehmen wir beispielshalber an, dass die Wellenquelle wie in Abb. 4 vom Beobachter aus gesehen etwas links von der Gravitationslinse steht. In diesem Fall würde links und rechts von der Gravitationslinse ein Bild entstehen, aber das Bild links wäre heller als das Bild rechts. Je größer der Winkelabstand zwischen der Gravitationslinse und der Wellenquelle wäre, desto größer wäre dieser relative Helligkeitsunterschied. Außerdem nimmt die Helligkeit beider Bilder mit wachsendem Winkelabstand zwischen der Gravitationslinse und der Wellenquelle ab: Falls der Winkelabstand sehr viel größer wird als der Einsteinradius (θ_E), entspricht die Helligkeit des einen Bildes ungefähr der eigentlichen Helligkeit der Wellenquelle, während das andere Bild verblasst. Das ergibt Sinn: Falls die Gravitationslinse sich nicht zwischen der Wellenquelle und dem Beobachter befindet, wird das Licht der Wellenquelle nicht vom Gravitationsfeld der Linse beeinflusst. In der **Übungsaufgabe 6** könnt ihr diese Aussagen noch einmal im Detail durchgehen.

Bezeichnen wir mit dem Vergrößerungsfaktor μ das Verhältnis zwischen dem [Lichtstrom](#) eines Bildes und dem Lichtstrom, der von der Quelle käme, wenn die Gravitationslinse nicht vorhanden wäre. Dann ist $\mu = 1$ für ein Bild, dessen Helligkeit der eigentlichen Helligkeit des Hintergrundobjekts entspricht. Für ein verblasstes Bild ist $\mu < 1$, und für ein vergrößertes Bild ist $\mu > 1$. Im oben genannten Beispiel entstehen zwei Bilder. Unter der Annahme, dass die Wellenquelle eine Punktquelle ist, sind die Vergrößerungsfaktoren (μ_+ und μ_-) dieser beiden Bilder wie folgt gegeben:

$$\mu_{\pm} = \frac{1}{4} \left(\frac{\beta/\theta_E}{\sqrt{(\beta/\theta_E)^2 + 4}} + \frac{\sqrt{(\beta/\theta_E)^2 + 4}}{\beta/\theta_E} \pm 2 \right).$$

Hier bezeichnet β den absoluten Winkelabstand zwischen der Gravitationslinse und der Wellenquelle: Wenn die Wellenquelle genau hinter der Gravitationslinse steht, ist β somit 0. Setzt man $\beta = 0$ in die oben angeführte Formel für μ_+ und μ_- ein, erhält man übrigens eine unendliche Vergrößerung des Hintergrundobjekts. Da geht scheinbar etwas nicht mit rechten Dingen zu. Es gibt keine unendlich hellen Objekte am Nachthimmel! Das liegt teilweise daran, dass real existierende Wellenquellen nicht punktförmig sind.

Jetzt, wo wir gerade dabei sind, die Annahmen hinter den Formeln kritisch hervorzuheben, sollte angemerkt werden, dass wir eine weitere entscheidende Vereinfachung vorgenommen haben...

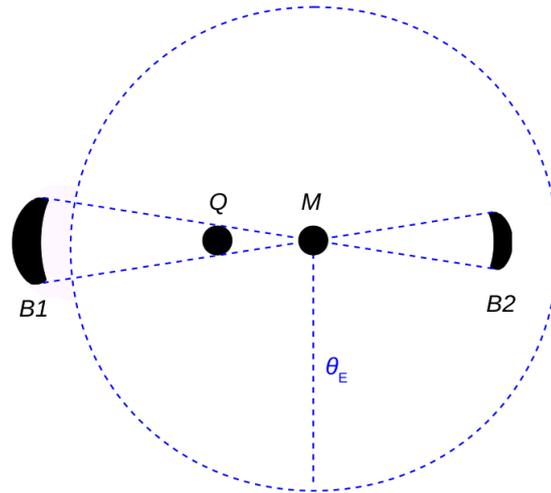


Abbildung 4: Skizze eines Gravitationslinsensystems am Himmel aus der Perspektive des Beobachters. Die Gravitationslinse ist in diesem Beispiel eine Punktmasse (M). Die Wellenquelle (Q) liegt hier nicht genau hinter der Gravitationslinse. Statt eines Einsteinrings entstehen zwei verzerrte Bilder ($B1$ und $B2$). Das Bild ($B1$), das sich auf derselben Seite der Gravitationslinse wie Q befindet, ist heller als das andere ($B2$). ©: Andreas Jørgensen, CC0.

Auf die Massenverteilung kommt es an

[Zurück zum Anfang](#)

Die Annahme, dass Gravitationslinsen Punktmassen sind, stellt oft eine Vereinfachung dar, mit der die beobachteten Bilder nicht erklärt werden können. Die räumliche Massenverteilung der Gravitationslinse muss mit in Betracht gezogen werden. Somit sind drei Faktoren für die Bildentstehung entscheidend: erstens, die Lage der Wellenquelle, der Gravitationslinse und des Beobachters zueinander. Zweitens die räumliche Ausdehnung der Wellenquelle. Drittens, die räumliche Massenverteilung der Gravitationslinse. Abweichungen von den vereinfachenden Annahmen im vorigen Abschnitt können interessante Konsequenzen haben. Wie im Falle des Einsteinkreuzes in Abb. 1 auf der Titelseite können so mehr als zwei Bilder entstehen. Abb. 5 zeigt ein weiteres Beispiel für eine komplexere Bildentstehung.

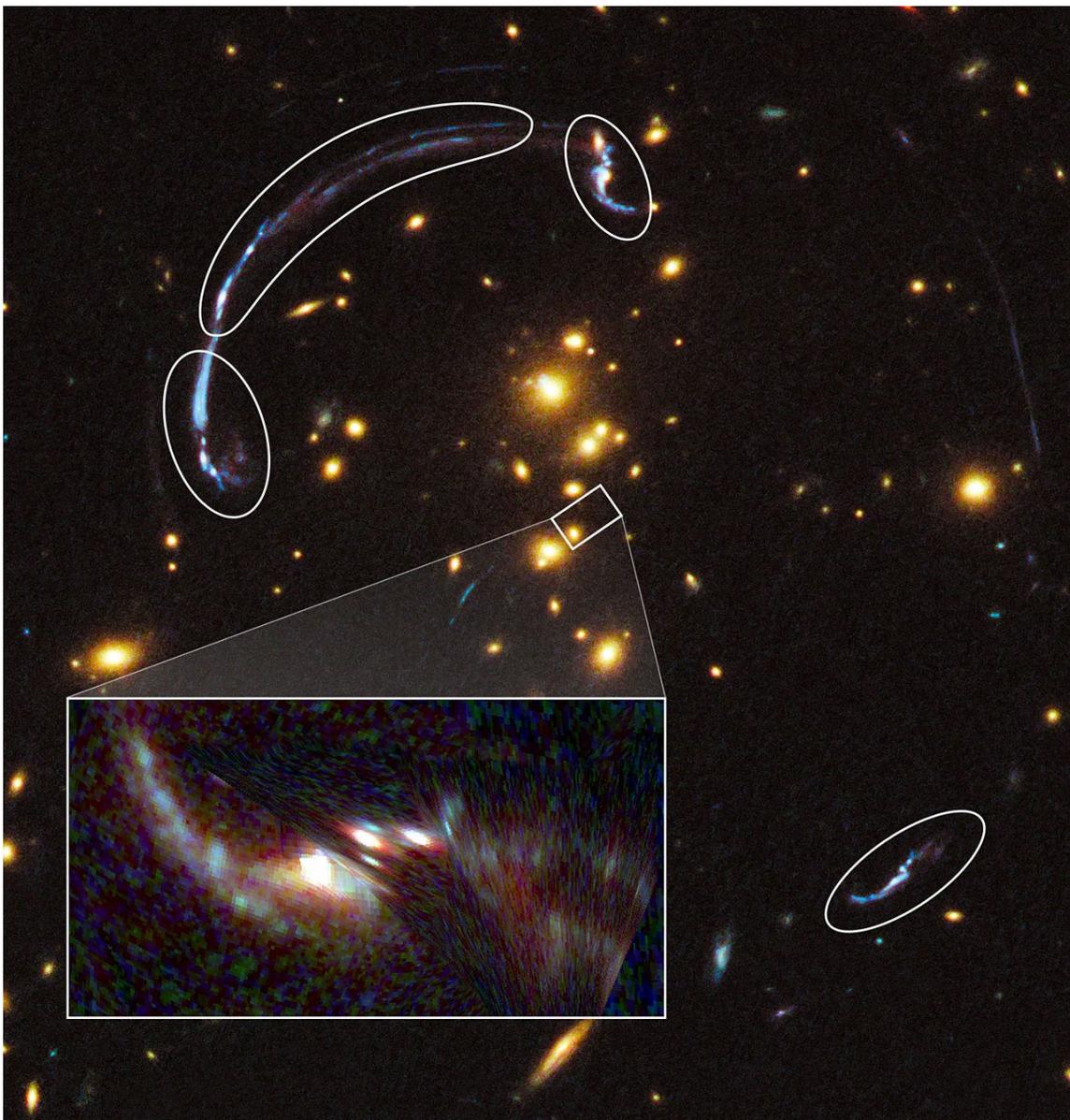


Abbildung 5: Das Gravitationsfeld eines Galaxienhaufens erzeugt verzerrte Bilder einer Hintergrundgalaxie (RCSGA 032727-132609). Vier Bilder sind mit weißen Ringen markiert. Die eigentliche Position der Wellenquelle ist in der Mitte der Aufnahme mit einem weißen Rechteck markiert. Das Rechteck unten links zeigt eine Rekonstruktion der Wellenquelle.

©: [NASA](#), [ESA](#), [J. Rigby \(NASA Goddard Space Flight Center\)](#), [K. Sharon \(Kavli Institute for Cosmological Physics, University of Chicago\)](#), und [M. Gladders und E. Wuyts \(University of Chicago\)](#) [CC BY 4.0](#).

Alle im Text gezeigten Aufnahmen (Abbildungen 1 und 5) sind Beispiele für den sogenannten *starken* Gravitationslinseneffekt: Starke Gravitationsfelder führen zu extremen Verzerrungen der Hintergrundobjekte. Oft führt die Lage der Wellenquelle, der Gravitationslinse und des Beobachters zueinander jedoch nur zu einer schwachen Verzerrung der Hintergrundgalaxie, was einer einzelnen Galaxie nicht anzusehen ist. Schließlich können Galaxien an sich viele verschiedene Formen annehmen, und die Form jeder einzelnen Galaxie ist nicht von vornherein bekannt. Dieser sogenannte *schwache Gravitationslinseneffekt* klingt zwar auf Anhieb etwas unspektakulär, aber dem ist nicht so, wenn die Gravitationslinse das Licht *vieler* Hintergrundobjekte verzerrt: Hintergrundobjekte, die nahe bei aneinander stehen, werden auf ähnliche Weise verzerrt, wodurch Muster in der Orientierung der Hintergrundgalaxien entstehen.

Aus diesen Informationen lässt sich viel herauslesen: Wie oben angeführt hängt der Gravitationslinseneffekt von der Massenverteilung der Gravitationslinse ab, woraus folgt, dass man aus detaillierten Beobachtungen der entstandenen Bilder Rückschlüsse auf die Massenverteilung der Gravitationslinse ziehen kann. Viele Wissenschaftler*innen arbeiten deshalb mit der Erhebung und Auswertungen von Daten sowie theoretischen Überlegungen, die uns anhand des schwachen Gravitationslinseneffekts Einblicke ins Universum verschaffen (vgl. **Übungsaufgabe 9**). Dazu gehören die Wissenschaftler*innen, die am [Vera C. Rubin Observatory](#) und am Weltraumteleskop [Euclid](#) beteiligt sind.

Gravitationslinsen helfen Wissenschaftler*innen den Kosmos besser zu verstehen. Manche Anwendungsmöglichkeiten werden in den Übungsaufgaben angedeutet. Einige Aspekte wurden bereits oben behandelt. Hier sei aber noch ein interessantes Beispiel erwähnt: Schaut man sich die Bilder eines Hintergrundobjekts (z. B. die vier Bilder des Quasars im Einsteinkreuz in Abb. 1) genauer an, stellt man fest, dass sie auffallend viele Gemeinsamkeiten aufweisen, was den Verdacht nahe legt, dass es sich wirklich um dasselbe Objekt handeln muss. Es gibt aber auch viele Unterschiede zwischen den Bildern. So könnte ein Unterschied sein, dass das Licht eines Bildes einen längeren Weg zur Erde zurückgelegt hat als das Licht eines anderen Bildes. Immerhin bewegt sich das Licht der Bilder nicht entlang gerader Linien. Die Lichtstrahlen, die einen längeren Weg zurücklegen mussten, waren folglich länger unterwegs, was heißt, dass die Bilder zeitlich versetzte Aufnahmen des Hintergrundobjekts sind. Während dieser längeren Reisezeit hat sich das [Universum etwas mehr ausgedehnt](#). Wenn man den Zeitunterschied zwischen den Bildern misst, kann man deshalb Rückschlüsse auf die Expansion des Universums ziehen: Der Gravitationslinseneffekt bietet damit ein alternatives Verfahren, um die [Hubble-Konstante](#) zu messen.

Literatur und Quellen

[Zurück zum Anfang](#)

- [1] Peter Schneider, *Extragalactic Astronomy and Cosmology*, 2006, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN-13 978-3-540-33174-2
- [2] Sean M. Carroll, *Spacetime and Geometry*, 2004, Pearson Education, ISBN 0-8053-8732-3
- [3] Seager, S., *Exoplanets*, 2010, The University of Arizona Press, ISBN: 978-0-8165-2945-2
- [4] https://en.wikipedia.org/wiki/Einstein_Cross#cite_note-5
- [5] https://en.wikipedia.org/wiki/Eddington_experiment
- [6] <https://de.wikipedia.org/wiki/Gravitationslinseneffekt>

Aufnahmen von Einsteinringen, Einsteinkreuzen und anderen Gravitationslinseneffekten sind auf <https://hubblesite.org/resource-gallery/>, <https://esahubble.org/images/> sowie auf <https://apod.nasa.gov/apod/> zu finden.

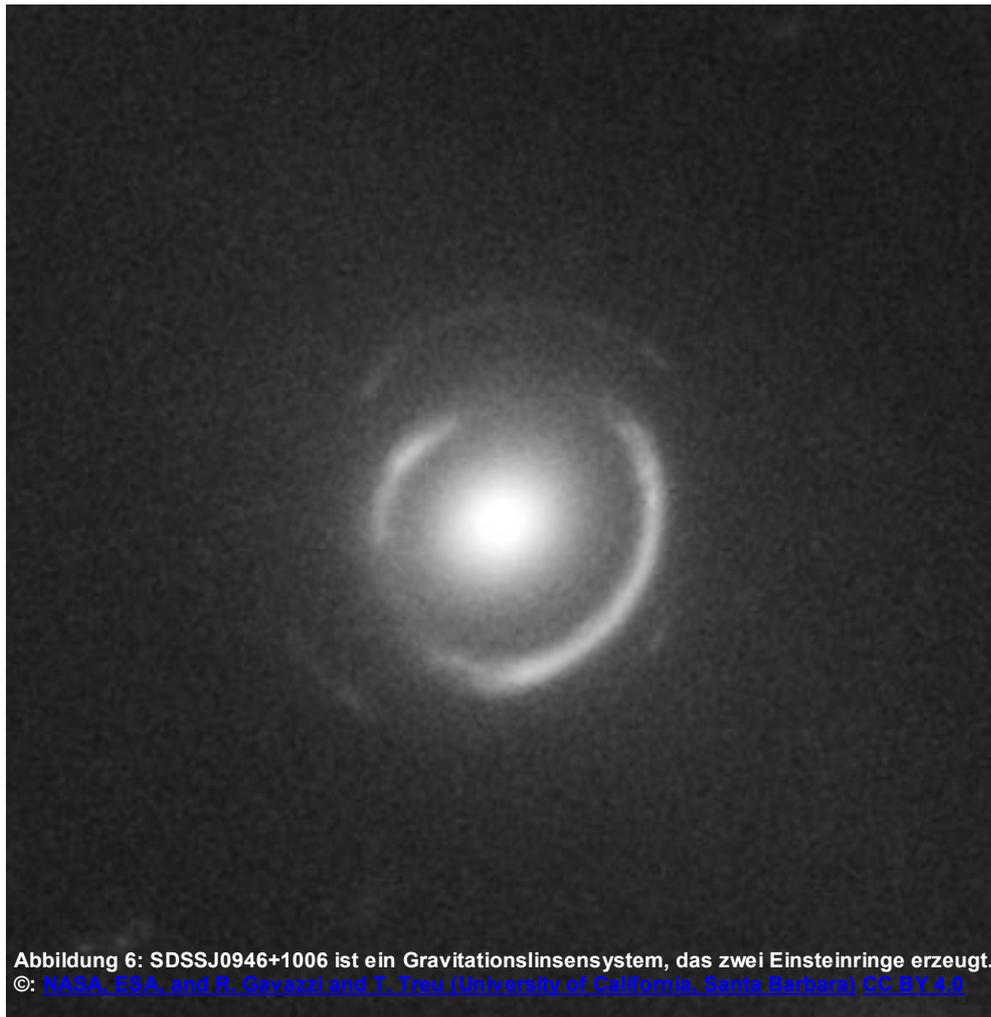
Hilfreiche Animationen von der NASA sind beispielsweise hier auf [Youtube](#) sowie auf einigen ihrer eigenen [Websites](#) zu finden.

Übungsaufgaben

[Zurück zum Anfang](#)

1. Gebt die Erklärung zu den Abbildungen 2 und 3 mit eigenen Worten wieder.
2. Wie oben bereits erwähnt, beobachtete Sir Arthur Eddington während einer Sonnenfinsternis einen Stern, dessen Licht aufgrund des Gravitationsfeldes der Sonne abgelenkt wurde. Da sich der Stern nahe der Sonnenscheibe befand, entsprach die Entfernung (ζ) zwischen dem Lichtstrahl und der Gravitationslinse dem Radius der Sonne (696.340 km). Die Masse der Sonne (M) beträgt $1,989 \cdot 10^{30}$ kg, die Lichtgeschwindigkeit beträgt 299.792.458 m/s und die Gravitationskonstante beträgt $6,67408 \cdot 10^{-11}$ m³/kg/s².
Berechnet anhand dieser Angaben die Ablenkung des Lichts ($\hat{\alpha}$). Gebt die Antwort in Bogensekunden an. (Tipp: Wenn ihr die Zahlen in die Gleichung einsetzt, bekommt ihr eine Antwort im Bogenmaß. Geht in dieser Aufgabe sorgfältig mit den Einheiten um).
3. Warum musste Eddington nach Principe reisen, um der Sonnenfinsternis beizuwohnen. Hätte er nicht seine Messungen im englischen Cambridge durchführen können?
4. Abbildung 1 auf der Titelseite zeigt einen Einsteinring. Bei solchen Bildern ist die Gravitationslinse eine Galaxie oder ein Galaxienhaufen, und wir können annehmen, dass alle relevanten Entfernungen (D_L , D_Q , D_{LQ}) in der Größenordnung von Gigaparsec (Gpc) liegen (1 pc entspricht $3,086 \cdot 10^{16}$ m). Schätzt die Größenordnung des Einsteinradius basierend auf der Annahme, dass es sich bei der Gravitationslinse um eine Punktmasse handelt, dessen Masse in der Größenordnung von hundert Milliarden Sonnenmassen liegt. Recherchiert, um herauszufinden, ob eure Schätzung mit der Wirklichkeit übereinstimmt.
5. In den 1990er Jahren suchte man nach dunklen Himmelskörpern (z. B. Braune Zwerge oder Schwarze Löcher), die die Milchstraße umkreisten. Deshalb richtete man Teleskope auf die [Große Magellansche Wolke](#) (GMW), die sich 49,97 kpc von der Erde befindet. Würde ein dunkles Objekt zwischen dem Beobachter und der GMW vorbeiziehen, würde dieses Objekt als Gravitationslinse agieren.
 - a) Berechnet den Einsteinradius (θ_E) für ein solches Objekt unter der Annahme, dass es 10 kpc von der Erde entfernt ist, und dass seine Masse einer Sonnenmasse entspricht (Tipp: Ein solches Objekt geht als Punktmasse durch).
Selbst moderne Teleskope können so kleine Winkel nicht messen. Deshalb machte man sich den Umstand zunutze, dass eine solche Gravitationslinse beim Vorbeiziehen das Licht des Hintergrundobjekts bündeln würde, was zu einer Helligkeitszunahme führen würde. Zwar fand man die gesuchten Objekte, aber ihre Anzahl reichte nicht aus, um ein brisantes Rätsel zu lösen: Die Masse der Milchstraße übersteigt bei weitem die Masse der sichtbaren Objekte darin.
 - b) Setzt euch mit der Arbeit von Vera Rubin auseinander. Welche Entdeckung hat diese Wissenschaftlerin über die Rotationskurven von Galaxien gemacht?
 - c) Was ist Dunkle Materie?
6. Abbildung 4 skizziert ein Gravitationslinsensystem aus der Perspektive des Beobachters. Da angenommen wird, dass die Gravitationslinse eine Punktmasse ist, entstehen zwei Bilder. Berechnet für eine punktförmige Wellenquelle die Vergrößerungsfaktoren (μ_+ und μ_-) der beiden Bilder für β/θ_E gleich 0,01, 0,03, 0,10, 0,25, 0,50, 0,75, 1,00, 1,25, 1,50, 1,75 und 2,00. Erstellt aus den berechneten Punkten ein Diagramm, das μ_+ und μ_- als Funktion von β/θ_E zeigt. Fügt μ_+/μ_- dem Diagramm hinzu. Diskutiert eure Ergebnisse und vergleicht sie mit den Aussagen im Text.

7. Wenn ein Stern an einem Hintergrundobjekt vorbeizieht, agiert der Stern als Gravitationslinse, was eine Helligkeitszunahme des Hintergrundobjekts zur Folge hat. Sollte ein Planet seine Bahnen um den Stern ziehen, könnte dieser Umstand den Helligkeitsverlauf beim Durchlauf durch die Gravitationslinse messbar beeinflussen: Es kommt zu zusätzlichen kurzen Helligkeitsspitzen. Dies ist der sogenannte **Mikrolinseneffekt**. Animationen dieses Phänomens sind beispielsweise auf der [Website](#) der NASA zu finden. Mithilfe des Mikrolinseneffekts wurden schon mehr als hundert fremde Welten entdeckt. Informiert euch über andere Methoden zum Nachweis von Exoplaneten. Taucht hierzu mit WIS tiefer ins Thema ein:
<http://www.wissenschaft-schulen.de/alias/material/auf-der-suche-nach-fernen-welten/1421052> .
8. Abbildung 6 zeigt ein Gravitationslinsensystem, das dadurch besonders wird, dass es gleich zwei Einsteinringe erzeugt. Erklärt qualitativ, wie es dazu kommen kann.



9. Im Text wird der schwache Gravitationslinseneffekt erwähnt.
- Das geplante Vera C. Rubin Observatory wird diesen Effekt nutzen, um Rückschlüsse auf die Massenverteilung im Universum zu ziehen. Anhand dieser Daten wird es den Wissenschaftler*innen möglich sein weitere Aussagen über die Dunkle Materie (vgl. Übungsaufgabe 5) und die Dunkle Energie zu machen. Was ist Dunkle Energie? **Recherchiert** das Standardmodell der Kosmologie (Λ CDM). Könnt ihr euren Mitschülern einige Hauptaussagen dieses Modells mit einfachen Worten wiedergeben?
 - Im Text heißt es, dass Galaxien viele verschiedene Formen annehmen können. Findet heraus welche verschiedene Galaxientypen es gibt.

Lösungen zu den Übungsaufgaben

[Zurück zum Anfang](#)

Zu 1. Diese Aufgabe lädt zu Diskussionen in kleinen Gruppen ein.

Zu 2. $\hat{\alpha} = 8,48 \cdot 10^{-6} \text{ rad} = 0,000486^\circ = 1,75''$. NB: Aufgrund der Radial-Symmetrie der Sonne dürfen wir die Berechnung unter der vereinfachenden Annahme ausführen, dass sich die gesamte Masse der Sonne in ihrem Massenmittelpunkt befindet. Daher entspricht ζ dem Sonnenradius.

Zu 3. Die Sonnenfinsternis war nur in [gewissen Regionen](#) zu sehen und nur an manchen Orten total. Um den Stern beobachten zu können war eine Sonnenfinsternis notwendig, da die Sonne den Stern sonst überstrahlt hätte.

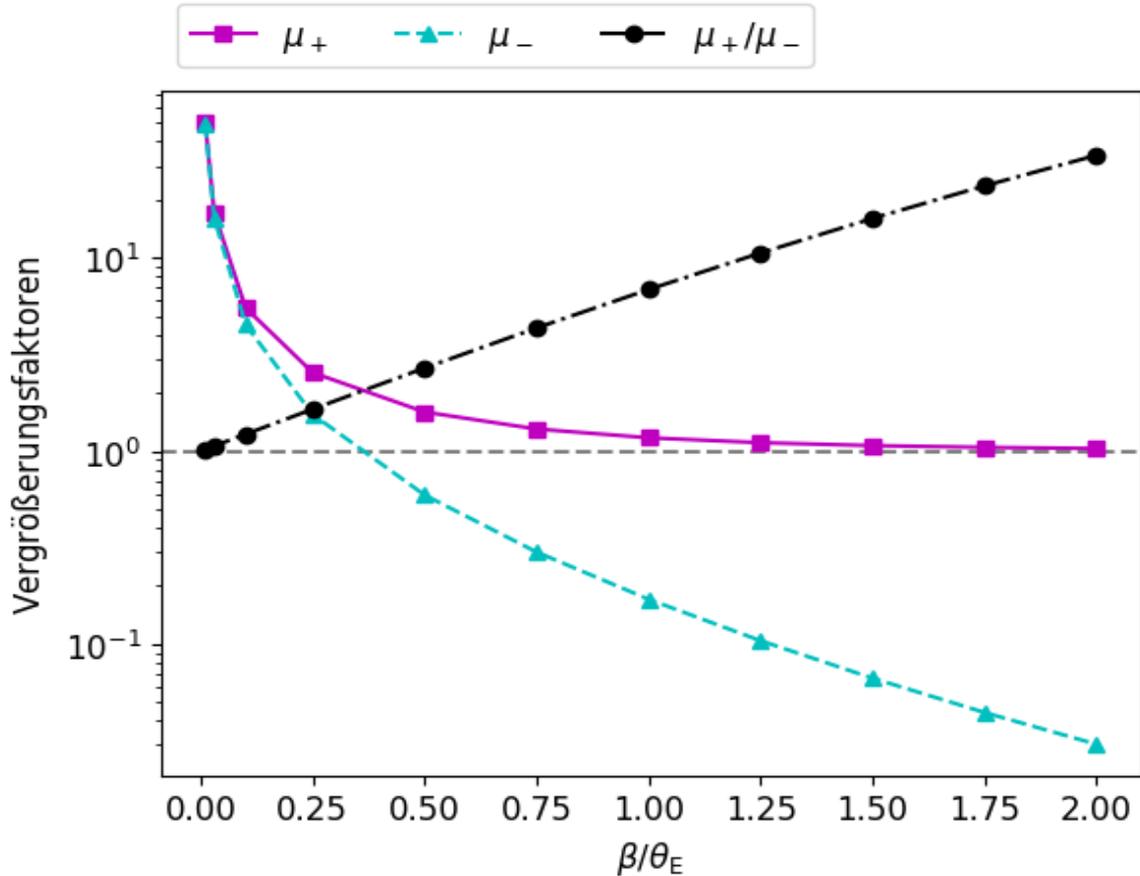
Zu 4. Setzt man Zahlen/Größenordnungen in die Gleichung ein, bekommt man eine Antwort in der Größenordnung von einer Bogensekunde. Das stimmt qualitativ mit [Beobachtungen](#) überein.

Zu 5. a) $\theta_E = 0,0009''$. NB: So lange alle relevanten Entfernungen sehr viel kleiner als c/H_0 sind, ist $D_{LQ} = D_Q - D_L$. Dies gilt also innerhalb unserer Galaxie und der Lokalen Gruppe, obwohl [Entfernungen](#) in der Kosmologie (und somit beispielsweise in Übungsaufgabe 4) nicht zwangsläufig additiv sind.

b) Diese Aufgabe kann als Ausgangspunkt für selbständige Projekte dienen. Vera Rubin beobachtete, dass die Umlaufgeschwindigkeit der Sterne in den äußeren Bereichen von Spiralgalaxien konstant bleibt, obwohl die sichtbare Materie auf das Zentrum der Galaxien konzentriert ist. Diese Beobachtung ist nur dann mit den Keplerschen Gesetzen vereinbar, wenn ein Großteil der Masse der Dunklen Materie zugeschrieben wird. Nach Vera Rubin wurde das [Vera C. Rubin Observatory](#) benannt.

c) Auch diese Aufgabe lädt zu selbständigen Projekten ein.

Zu 6. Eine Erläuterung der unten gezeigten Abbildung findet sich im Abschnitt „Viele Bilder vom selben Himmelskörper“



Zu 7. Auch diese Aufgabe lädt zu Diskussionen in kleinen Gruppen ein.

Zu 8. In diesem Fall liegen gleich drei Galaxien auf einer Linie hinter einander. Die Galaxie, die der Erde am nächsten liegt, agiert als Gravitationslinse für die beiden dahinter liegenden Galaxien und erzeugt einen Einsteinring für jeden der beiden.

Zu 9. Auch diese Aufgabe ist als Anreiz für Projekte gedacht.

- Diese Aufgabe ermöglicht eine Diskussion der beschleunigten Expansion des Universums und der Forschung, die zum [Nobelpreis der Physik 2011](#) führte.
- Hier kann man z. B. die [Hubble-Sequenz](#) diskutieren.