

GRAVITATIONSLINSEN

Seminararbeit,
im Rahmen der Lehrveranstaltung EX 814231
Exkursion zu Großforschungsanlagen der Physik

Kittel Matthias 9502020
kittel@astro.univie.ac.at

Wien,

3. Jänner 2003

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| Prolog | 5 |
| 1 Geschichtlicher Überblick | 7 |
| 2 Physik von Gravitationslinsen | 10 |
| 2.1 Einleitung | 10 |
| 2.2 Mathematische Beschreibung | 12 |
| 2.3 Galaxienhaufen als Linsen | 16 |
| 2.4 Auswertungsverfahren | 16 |
| 2.5 Kosmologische Bedeutung | 17 |
| Literaturverzeichnis | 20 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|-----|---|----|
| 1.1 | Lichtablenkung am Rand der Sonne. Da der Lichtstrahl zur Sonne hin abgelenkt wird, erscheint die Position scheinbar weiter von der Sonne entfernt (entnommen aus [10]). | 7 |
| 1.2 | Bilder des Doppelquasars QSO 0957+561 A,B mit einer Rotverschiebung von $z=1.405$ gelinst durch eine elliptische Vordergrundgalaxie mit $z=0.39$, die beiden Bilder sind 5.7 Bogensekunden voneinander entfernt. credits: G. Rhee | 9 |
| 2.1 | Bilder des Vierfachquasars QSO 2237+030 mit einer Rotverschiebung von $z=1.695$. Die Linsen-Galaxie ist eine nahe Balken-Spiralgalaxie mit $z=0.039$. Die Konstellation wird Einstein-Kreuz genannt, weil die vier Bilder annähernd ein Kreuz bilden, dieses Phänomen kommt bei bestimmten Parametern der Quelle und Linse zustande und ist dementsprechend selten. credits: J.Rhoads (STScI) et al., WIYN, AURA, NOAO, NSF | 11 |
| 2.2 | Illustration eines Gravitationslinsensystems. Das Licht breitet sich von der Quelle (Source S), die sich im Abstand η von der optischen Achse befindet, zur Linse (im Abstand ξ von der optischen Achse) aus. Dort wird der Lichtstrahl um den Winkel $\hat{\alpha}$ abgelenkt, und erreicht den Beobachter im Punkt O (Observer). Berechnung siehe Text (entnommen aus [10]). | 12 |
| 2.3 | Bei B1938+666 ist die Ausrichtung zur linsenden Vordergrundgalaxie so gut, dass ein fast perfekter Einsteinring gebildet wird. credits: King L.J., NICMOS, HST, NASA | 15 |
| 2.4 | Der Galaxiencluster Abell 2218 ist derart massiv und kompakt, dass er das Licht dahinterliegender Galaxien linst. Es sind auch leuchtende Arcs (Erklärung siehe Text) zu sehen. | 17 |
| 2.5 | Der Galaxienhaufen CL0024+1654 bildet die dahinterliegende Galaxie gleich sieben Mal ab (blaue Bilder). Diese länglichen Abbildungen werden Arcs genannt. credits: Colley W.N. and Turner E., Tyson J.A., HST, NASA . . . | 18 |

Prolog

Heute eine freudige Nachricht. H.A. Lorentz hat mir telegraphiert, dass die englischen Expeditionen die Lichtablenkung an der Sonne wirklich bewiesen haben.

27 09 1919, Brief Einsteins an seine Mutter

Als Student der Astronomie war es für mich klar, diesen Exkursionsbericht über das Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching zu schreiben. Der Vortrag von H.U.Schmidt über das Thema Gravitationslinsen berührte einen Bereich der Astrophysik, dessen theoretische Vorhersagen bis an den Anfang des 19.Jahrhunderts zurückgehen, diese aber erst vor rund 25 Jahren experimentell bestätigt werden konnte. Aus diesem Grund ist dieses Thema für mich von besonderem Reiz.

Licht zeigt uns immer wieder seine Dualität, bei der Theorie der Gravitationslinsen stehen die Teilcheneigenschaften als Auslöser des Effektes im Vordergrund, die Welleneigenschaften werden dann vor allem in der mathematischen Herleitung verwendet, um dieses Phänomen zu beschreiben.

Da für die experimentelle Bestätigung des Gravitationslinseneffektes ein *tiefer* Blick in die Weiten des Universums notwendig ist, wurde erst in letzter Zeit, vor allem mittels des Hubble Space Telesopes (HST) eine größere Anzahl von Linsen gesichtet. Es zeigt sich in diesem Fall einerseits die Perfektion der Allgemeinen Relativitätstheorie Einsteins, die als mathematische Beschreibungsform des Gravitationslinseneffektes gilt, andererseits das ausgezeichnete Zusammenspiel von Theoretischer Astrophysik auf der einen Seite, und der Beobachtenden Astronomie auf der anderen Seite, welche die Vorhersagen theoretischer Natur bestätigt hat.

Welch große Last muss Einstein wohl vom Herzen gefallen sein, als er oben zitierten Brief an seine Mutter geschrieben hat ...

Kapitel 1

Geschichtlicher Überblick

Bereits im Jahre 1801 sprach Johann Georg von Soldner (1776-1833) von der Ablenkung eines Lichtstrahles durch einen gravitierenden Körper: *Wenn also ein Lichtstrahl an einem Weltkörper vorbeigeht, so wird er durch die Attraktion desselben genöthiget, anstatt in der geraden Richtung fortzugehen, eine Hyperbel zu beschreiben, deren konkave Seite gegen den anziehenden Körper gerichtet ist* (siehe Abbildung 1.1). Soldner berechnete den Ablenkungswinkel von Lichtstrahlen durch die Sonne unter der Annahme, dass die Lichtteilchen Massepartikel sind, die sich laut Newton'schen Gravitationsgesetzen bewegen, zu 0.84 Bogensekunden.

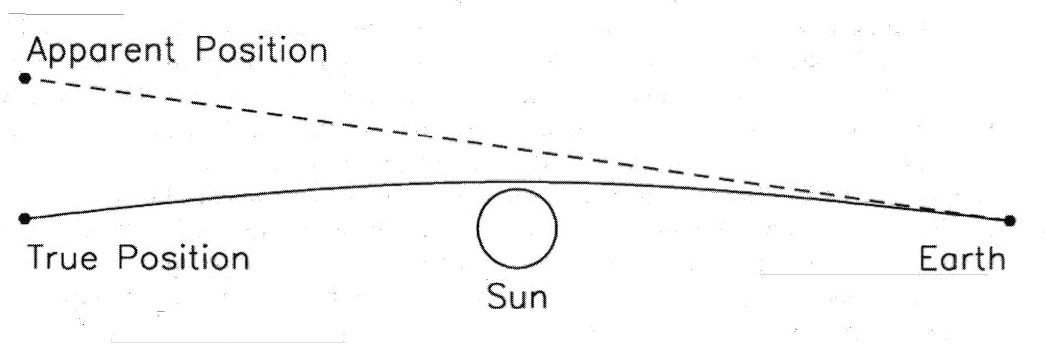


Abbildung 1.1: Lichtablenkung am Rand der Sonne. Da der Lichtstrahl zur Sonne hin abgelenkt wird, erscheint die Position scheinbar weiter von der Sonne entfernt (entnommen aus [10]).

1911 verwendete Albert Einstein (1879-1955) das Äquivalenzprinzip zur Ablenkung von Soldners Formel und gelangte zum selben Ablenkungswinkel wie dieser. Einstein schrieb in seinem Artikel *Über den Einfluß der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes* folgendes: *Da die Fixsterne der der Sonne zugewandten Himmelspartien bei totalen Sonnenfinsternissen sichtbar werden,*

ist diese Konsequenz der Theorie mit der Erfahrung vergleichbar.

Erst 1915 wandte Einstein den vollen Satz der Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie auf das Problem der Lichtablenkung im Schwerefeld an und bemerkte, dass der Ablenkungswinkel das Zweifache des vier Jahre zuvor kalkulierten Wertes beträgt. Aus seinen Gleichungen ermittelte Einstein den Wert für die tangentielle Lichtablenkung an der Oberfläche unserer Sonne zu 1.7 Bogensekunden. Dieser Wert wurde weitere vier Jahre (29.05.1919) später durch Beobachtungen bei einer totalen Sonnenfinsternis auf der Vulkaninsel Principe im Golf von Guinea in Westafrika durch Sir Arthur Stanley Eddington (1882-1944) bestätigt.

Es war auch Eddington der als erster daran dachte, dass es unter bestimmten Konditionen möglich ist, dass multiple Lichtwege Beobachter und Quelle verbinden können. 1924 dachte Orest Chwolson die Möglichkeit von fiktiven Doppelsternen an, die aufgrund von Lichtablenkung zustande kommen könnten, er gab aber nicht an, ob diese Doppelsterne beobachtbar wären.

In den 20er und 30er Jahren des vergangenen Jahrhunderts trieben Einstein und Fritz Zwicky (1898-1974) die Entwicklung der Theorie der Gravitationslinsen voran, doch dauerte es bis 1979 als Dennis Walsh, Robert Carswell und Ray Weymann die erste Gravitationslinse fanden (für genauere Informationen siehe [12]). Der Quasar QSO 0957+561 wurde durch eine Vordergrundgalaxie gelinst und es entstanden zwei Bilder desselben (siehe Abbildung 1.2).

Durch die Verbesserung der Beobachtungstechniken und vor allem durch die Inbetriebnahme des HST konnte die Anzahl der entdeckten Gravitationslinsen stark erhöht werden. Viele weitere Phänomene, wie Einsteinkreuze (siehe Abbildung 2.1) und -ringe (siehe Abbildung 2.3), sowie sogenannte Arcs (siehe Abbildung 2.4) konnten bereits beobachtet werden.

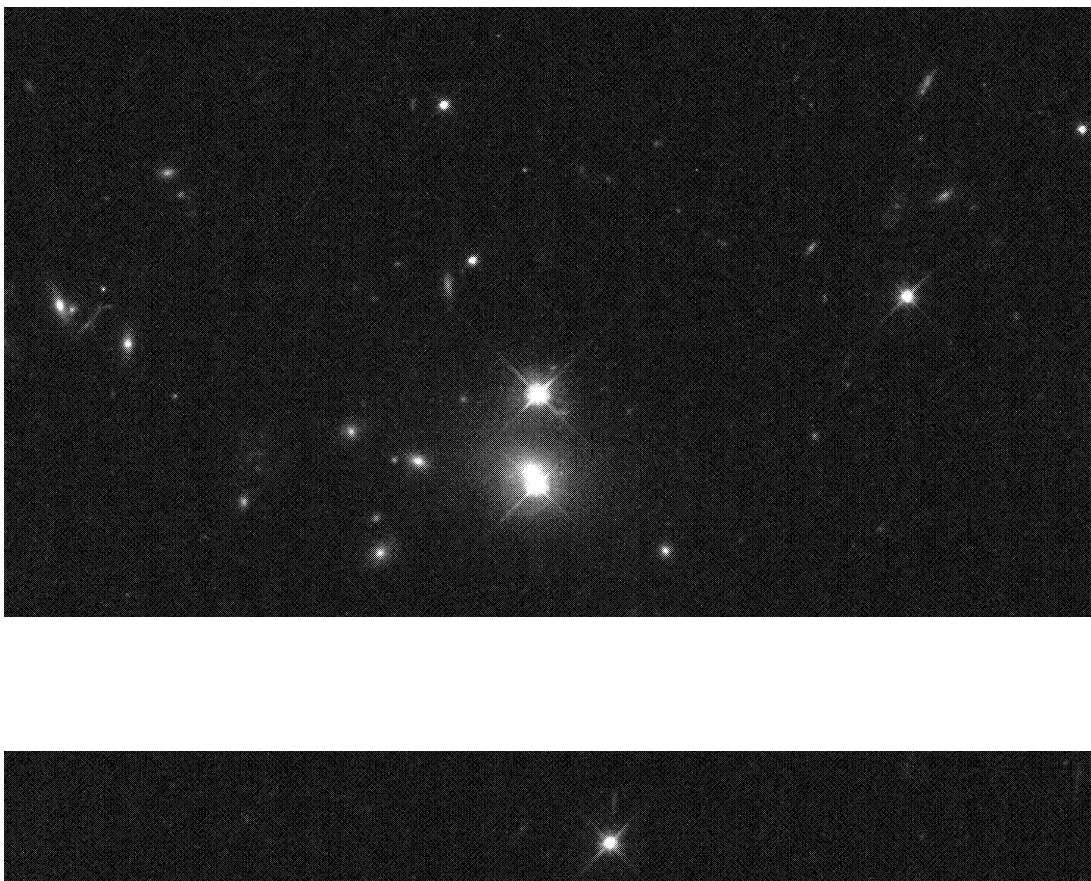


Abbildung 1.2: Bilder des Doppelquasars QSO 0957+561 A,B mit einer Rotverschiebung von $z=1.405$ gelinst durch eine elliptische Vordergrundgalaxie mit $z=0.39$, die beiden Bilder sind 5.7 Bogensekunden voneinander entfernt. credits: G. Rhee

Kapitel 2

Physik von Gravitationslinsen

2.1 Einleitung

Um Doppelbilder als Gravitationslinseneffekt bestimmen zu können, müssen bestimmte Eigenschaften dieser Bilder gegeben sein:

- die Rotverschiebungen der zwei (oder Mehrfach-)Bilder sind (nahezu) ident
- die Spektren sind sehr ähnlich oder ident
- die als Linse wirkende Galaxie, mit deutlich niedriger Rotverschiebung als die des dahinterliegenden Objektes, ist zwischen den Quasar-Bildern sichtbar
- die Bilder zeigen ein übereinstimmendes Variabilitätsverhalten, wenn man die unterschiedlichen Lichtlaufzeiten berücksichtigt
- kein Auftreten chromatischer Abberation

Treffen mehrere oder alle diese Punkte bei Beobachtungen überein, dann sind die Objekte heiße Kandidaten für Bilder einer Gravitationslinse. Bei der von Walsh et al. entdeckten Gravitationslinse treffen die oben genannten Punkte zu, der Lichtlaufzeitunterschied (der Zeitunterschied, zwischen dem Auftreten von Effekten bei den unterschiedlichen Bildern einer Gravitationalinse, da fast alle Konstellationen vom Ideal abweichen und das Licht der einzelnen Bilder unterschiedlich lange braucht, die Linse zu durchqueren) von 417 Tagen.

Ein weiteres Beispiel ist der Quasar QSO 2237+0305 (siehe Abbildung 2.1) bei dem sein Licht zu vier Bildern gelinst wird. Diese Mehrfachbilder entstehen bei komplexen Masseverteilungen innerhalb der Gravitationslinse.

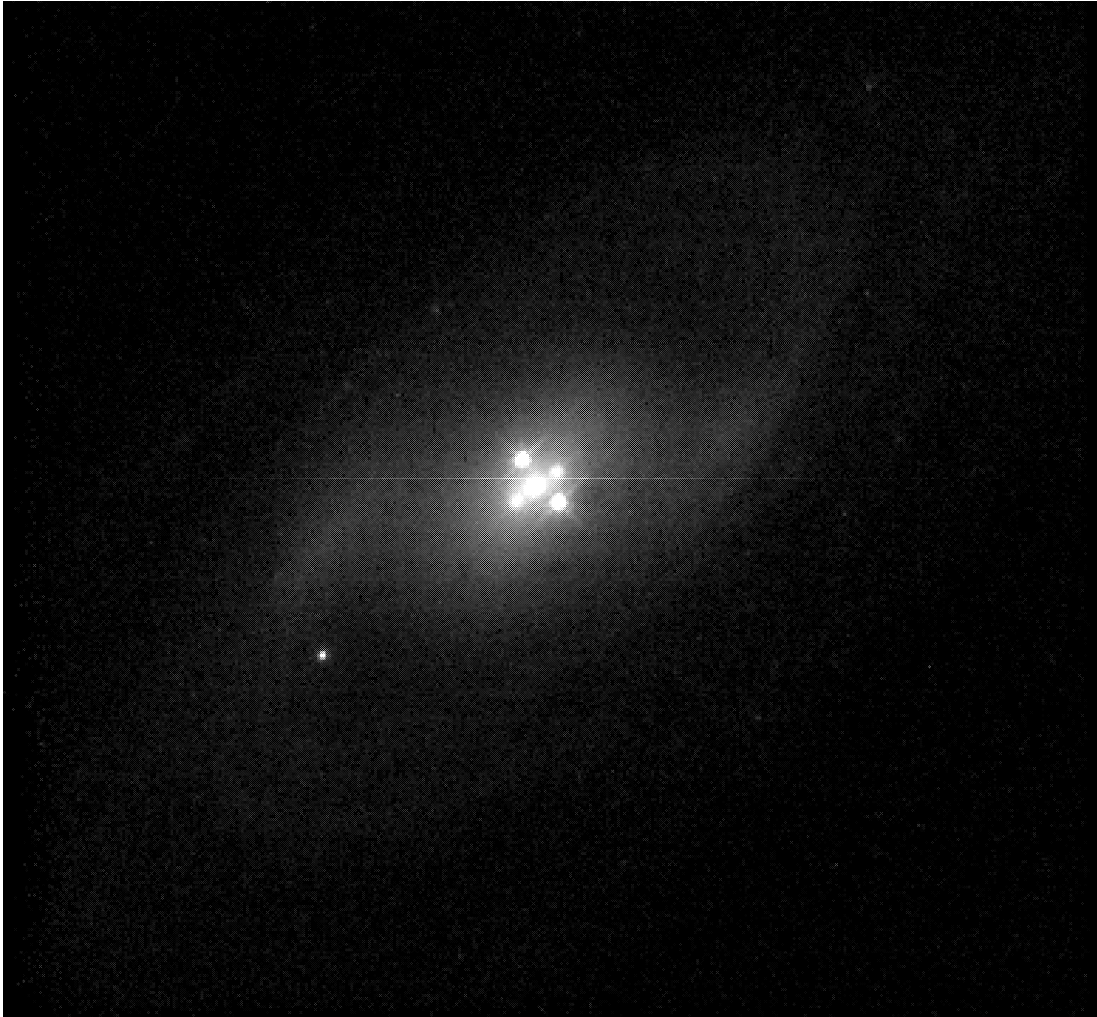


Abbildung 2.1: Bilder des Vierfachquasars QSO 2237+030 mit einer Rotverschiebung von $z=1.695$. Die Linsen-Galaxie ist eine nahe Balken-Spiralgalaxie mit $z=0.039$. Die Konstellation wird Einstein-Kreuz genannt, weil die vier Bilder annähernd ein Kreuz bilden, dieses Phänomen kommt bei bestimmten Parametern der Quelle und Linse zustande und ist dementsprechend selten. credits: J.Rhoads (STScI) et al., WIYN, AURA, NOAO, NSF

2.2 Mathematische Beschreibung

Die typische Geometrie (Achtung Zylindereometrie, also axialsymmetrisch) eines Gravitationslinsensystems (Linse entspricht einer Punktmasse) ist in Abbildung 2.2 gegeben. Der Lichtstrahl einer Quelle S ist um einen Winkel $\hat{\alpha}(\xi)$ abgelenkt und trifft auf einen Beobachter O . Der Winkel zwischen der optischen Achse und der wahren Position der Quelle ist gegeben durch β , der Winkel zwischen optischer Achse und dem Bild I ist θ . Die Entfernungen zwischen Beobachter und Linse, Linse und Quelle sowie Beobachter und Quelle sind gegeben durch D_d , D_{ds} , D_s .

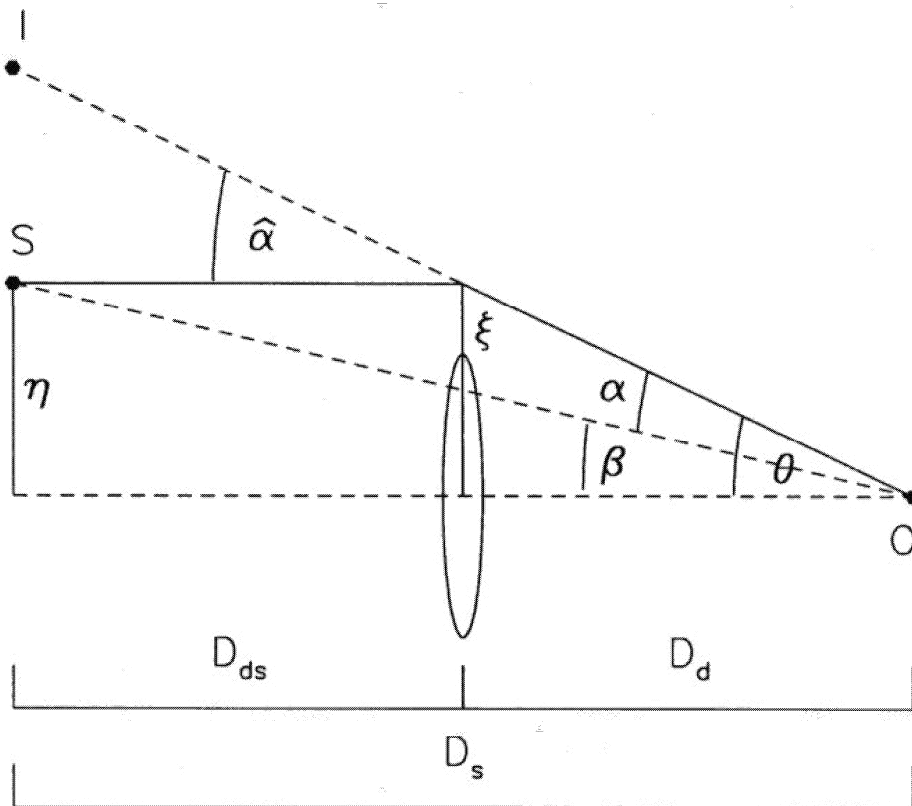


Abbildung 2.2: Illustration eines Gravitationslinsensystems. Das Licht breitet sich von der Quelle (Source S), die sich im Abstand η von der optischen Achse befindet, zur Linse (im Abstand ξ von der optischen Achse) aus. Dort wird der Lichtstrahl um den Winkel $\hat{\alpha}$ abgelenkt, und erreicht den Beobachter im Punkt O (Observer). Berechnung siehe Text (entnommen aus [10]).

Aus der Abbildung 2.2 lassen sich folgende Zusammenhänge ablesen:

$$\tan \theta = \frac{\overline{IoptischeAchse}}{D_s}$$

$$\tan \beta = \frac{\overline{SoptischeAchse}}{D_s}$$

$$\tan \hat{\alpha} = \frac{\overline{IS}}{D_{ds}}$$

Mit der Kleinwinkelnäherung ($\tan \alpha \sim \alpha$) und Multiplikation mit dem Zähler des Bruches gelangt man zu:

$$D_s \theta = \overline{IoptischeAchse}$$

$$D_s \beta = \overline{SoptischeAchse}$$

$$D_{ds} \hat{\alpha} = \overline{IS}$$

Über die Beziehung

$$\overline{IoptischeAchse} = \overline{SoptischeAchse} + \overline{IS}$$

gelangt man zu

$$D_s \theta = D_s \beta + D_{ds} \hat{\alpha}.$$

Mit den Zusammenhängen $\tan \alpha = \frac{\overline{SoptischeAchse}}{D_d}$ und $\hat{\alpha} = \frac{D_s}{D_{ds}} \alpha$, sowie der Kleinwinkelnäherung erhält man schlussendlich die Linsengleichung

$$\beta = \theta - \alpha(\theta).$$

Für den einfachsten Fall einer punktförmigen Linse ist der Ablenkwinkel $\hat{\alpha}$ gegeben durch:

$$\hat{\alpha} = \frac{4GM}{c^2} \frac{1}{\xi},$$

wobei M die Masse der Linse, ξ den Stoßparameter, G die Gravitationskonstante und c die Lichtgeschwindigkeit bezeichnet.

Nach Einsetzen des obig berechneten Ablenkwinkels und Ersetzen von ξ durch $D_d\theta$ gelangt man zur Linsengleichung für eine Punktmasse:

$$\beta(\theta) = \theta - \frac{\theta_E^2}{\theta},$$

wobei θ_E^2 den *Einsteinradius* mit

$$\theta_E^2 = \sqrt{\frac{4Gm}{c^2} \frac{D_{ds}}{D_d D_s}}$$

bezeichnet.

Die Linsengleichung ist eine quadratische Gleichung für die Bildpositionen $\theta_{1,2}$, diese sind gegeben durch

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

Eines der Bilder liegt immer innerhalb des Einsteinradius' und ist schwächer als jenes, welches außerhalb liegt.

Liegt die Quelle und die Linse genau auf der optischen Achse des beobachteten Teleskopes kommt es zum Phänomen des Einstein-Ringes. In diesem Fall ist $\beta = 0$ und die Linsengleichung reduziert sich auf

$$\theta_{1,2} = \theta_E,$$

was in Zylindergeometrie einem Kreis entspricht (siehe Abbildung 2.3).

Zusätzlich ist eine Verstärkung der Bilder gegeben, und zwar durch das Verhältnis der Raumwinkel zwischen Bild und Quelle, da der Gravitationslinseneffekt die Flächenhelligkeit nicht beeinflusst. Die Verstärkung der Quelle durch eine Linse kann in Näherung berechnet werden als:

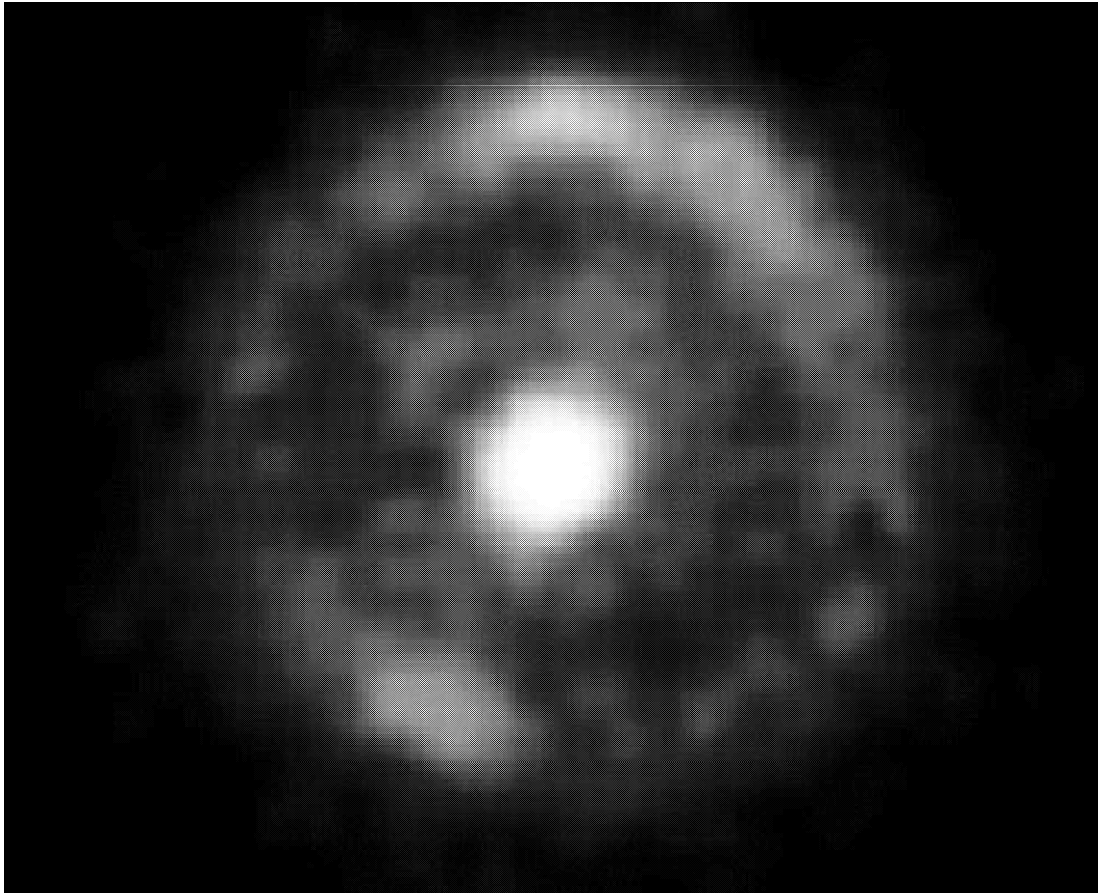


Abbildung 2.3: Bei B1938+666 ist die Ausrichtung zur linsenden Vordergrundgalaxie so gut, dass ein fast perfekter Einsteinring gebildet wird. credits: King L.J., NICMOS, HST, NASA

$$\mu = \frac{\theta}{\beta} \frac{d\theta}{d\beta}.$$

Durch Einsetzen in die obig berechneten Positionslösungen gelangt man zu den beiden Lösungen für die Verstärkung der einzelnen Bilder.

$$\mu_{1,2} = \left(1 - \left[\frac{\theta_E}{\theta_{1,2}}\right]^4\right)^{-1} = \frac{u^2 + 2}{2u\sqrt{u^2 + 4}} \pm \frac{1}{2}$$

Hier ist u der Winkel-Abstand zwischen Linse und Quelle in Einheiten des Einsteinradius' $u = \frac{\beta}{\theta_E}$. Die Verstärkung für das Bild innerhalb des Einsteinradius' ist demnach negativ, was bedeutet, dass die Orientierung spiegelverkehrt ist. Die Gesamtverstärkung beider Bilder ist gegeben durch:

$$\mu = |\mu_1| + |\mu_2| = \frac{u^2 + 2}{u\sqrt{u^2 + 4}}.$$

2.3 Galaxienhaufen als Linsen

Die im vorhergehenden Abschnitt abgeleiteten Formeln sind Annäherungen und basieren auf den Annahmen einer punktförmigen Quelle, sowie einer punktförmigen Linse. Wirken nun ganze Galaxienhaufen als Linse verkomplizieren sich die Berechnungen und führen zu komplexeren Bildern (siehe Abbildung 2.4).

Wenn ganze Galaxienhaufen als Gravitationslinsen wirken, kommt es zur Erzeugung von leuchtenden Bögen (Arcs) aufgrund der komplexen Zusammensetzung der Linse. Als gutes Beispiel dient hier der Haufen CL0024+1654, der in Abbildung 2.5 dargestellt ist. credits: siehe Abbildung unten

2.4 Auswertungsverfahren

Zur Auswertung und Bestimmung von Gravitationslinsen wurde das sogenannte Mona-Lisa-Programm entwickelt. Es werden die Parameter für Quelle und Linse eingegeben und iterativ die Bilder erzeugt. Man rechnet nun die *besten* Bilder zurück, mittelt diese und erhält so Informationen über die Quelle.

Aus einem Gravitationslinsensystem erhält man folgende zwei Informationen:

- Informationen über die Quelle, die so weit entfernt ist, dass ohne Gravitationslinsenverstärkung kein einziges signifikantes Photon je ein Teleskop erreicht hätte



Abbildung 2.4: Der Galaxiencluster Abell 2218 ist derart massiv und kompakt, dass er das Licht dahinterliegender Galaxien linst. Es sind auch leuchtende Arcs (Erklärung siehe Text) zu sehen.

- und viel wichtiger - Informationen über die Gravitationslinse selbst, über deren Masse und Massenverteilung. Daraus lässt sich nun weiters auf die Galaxienverteilung im Universum schließen und die Dunkle Materie bestimmen, da die herkömmliche Masse-Leuchtkraftbeziehung falsche Werte liefert

2.5 Kosmologische Bedeutung

Gravitationslinsen können auch dazu herangezogen werden, um den Wert der Hubble-Konstante zu bestimmen. Da bei nicht exakt axialer Ausrichtung die Lichtwege, die die einzelnen Bilder erzeugen, nicht gleich lang sind, kommt es zu unterschiedlichen Lichtlaufzeiten, da ja die Lichtgeschwindigkeit konstant ist. Sollte nun ein Effekt in der Quelle deren Helligkeit ändern, lässt sich diese Helligkeitsschwankung auch in den Bildern messen. Dies aber nur mit einer gewissen Zeitverzögerung zwischen dem Auftreten in den gelinsten Bildern, die zum Beispiel beim Quasar QSO 0957+561 (siehe Abbildung 1.2) 417 ± 3 Tage beträgt, und über die sich nun die Hubble-Konstante berechnen lässt.

Die *Fluchtgeschwindigkeit* mit der sich Galaxien voneinander weg bewegen wurde von Edwin Hubble (1889-1953) zu



Abbildung 2.5: Der Galaxienhaufen CL0024+1654 bildet die dahinterliegende Galaxie gleich sieben Mal ab (blaue Bilder). Diese länglichen Abbildungen werden Arcs genannt. credits: Colley W.N. and Turner E., Tyson J.A., HST, NASA

$$v = H_0 \times r$$

definiert, wobei v die Geschwindigkeit, r der Abstand der Galaxien und H_0 die zu bestimmende Konstante bezeichnen. Fast alle verwendeten Methoden sind sogenannte *indirekte* Methoden, die verschiedene periodisch veränderliche Sterne verwenden um Abstände im Universum zu eichen. Im Gegensatz dazu ist die Methode mittels Gravitationslinsen eine *direkte* Methode. Zusätzlich zu der geometrischen Zeitverzögerung aufgrund des unterschiedlich langen Lichtweges kommt noch die gravitative Zeitverzögerung aufgrund des Gravitationpotentials der Linse (Berechnung über Allgemeine Relativitätstheorie) hinzu. Diese beiden Zeitverzögerungen sind interessanterweise von derselben Größenordnung.

In einer vorgegebenen Beobachtungssituation sind nur dimensionslose Größen messbar, und zwar die Winkelabstände und Helligkeitsverhältnisse zwischen den Bildern, sowie die relative Helligkeitsverteilung der Linsengalaxie. Dadurch ist es möglich ein Modell für die Massenverteilung innerhalb der Linse zu konstruieren. Durch die Reproduktion der Beobachtungen durch das numerische Modell lassen sich die Parameter des Gravitationslinsensystems bestimmen. Diese Parameter

sind aber leider nicht eindeutig bestimmbar, zwei unterschiedliche Systeme können dasselbe Bild reproduzieren. Doch über den Lichtlaufzeitunterschied lässt sich nun doch das System eindeutig bestimmen, weil diese bei allen Systemen unterschiedlich ist.

Sind nun die Zeitverzögerung, deren erste Messung erst 20 Jahre nach der Entdeckung der ersten Gravitationslinse technisch möglich war, und die Rotverschiebungen von Linse und Quelle bekannt, kann die Hubble-Konstante berechnet werden. Für oben genannten Quasar beträgt $H_0 = 64 \pm 13$ km/s/Mpc. Die Hubble-Konstante wurde von Christopher Kochanek 2002 (siehe [8]) durch Messungen an fünf gut untersuchten Gravitationslinsen berechnet und gemittelt, der erhaltene Wert beträgt für $H_0 = 62 \pm 7$ km/s/Mpc. Dieser Mittelwert ist aber ähnlich aussagekräftig wie der Wert aus den Berechnungen der indirekten Methoden, hängt er doch stark von den Modellen ab, mit denen das Gravitationslinsensystem erstellt wird (Werte zwischen 48 und 71 km/s/Mpc).

Literaturverzeichnis

- [1] Active Galaxies and Quasars,
<http://www.astr.ua.edu/keel/agn/qso2237.html>
- [2] Dorfi, E.A., 2002, **Vorlesung Einführung in die Astronomie II** an der Universität Wien, Institut für Astronomie
- [3] Einsteins Entdeckung des Gravitationslinseneffekts,
<http://philoscience.unibe.ch/~tilman/lensing/lensing.html>
- [4] Gravitational Lens Data Base, <http://cfa-www.harvard.edu/castles/>
- [5] Gravitational Lenses,
<http://casswww.ucsd.edu/public/tutorial/GLens.html>
- [6] Gravitational Lensing Bibliography, Candidates, Didactical Experiments, Liège, <http://vela.astro.ulg.ac.be/themes/extragal/gravlens/bibdat/engl/>
- [7] Gravitationslinsen, <http://www.usm.uni-muenchen.de/people/saglia/dm/galaxien/alldt/node58.html>
- [8] Kochanek C., American Astronomical Society Meeting **200**, #51.15
- [9] Lens an Astrophysicist,
<http://theory2.phys.cwru.edu/~pete/GravitationalLens/>
- [10] Narayan R., Bartelmann M., **Lectures on Gravitational Lensing**, <http://www.mpa-garching.mpg.de/Lenses/JeruLect.html>
- [11] Schmidt, H.U., 2002, **Vortrag zur Exkursion**, Institut für Astrophysik, Garching
- [12] Walsh D., Carswell R.F., Weymann R.J., 1979, Nature **279**, 381-384
- [13] Wambsganß J., **Gravitationslinsen - Universielle Werkzeuge der Astrophysik**, <http://www.aip.de/~jkw/phiuz/phiuz.ps>
- [14] Wambsganß J., Wisotzki L., 2002, **Vorlesung Galaktische und extragalaktische Astrophysik** an der Universität Potsdam, Institut für Astrophysik