

Linsen im Kosmos

Die gravitative Lichtablenkung ist zu einem unverzichtbaren Werkzeug der Kosmologie geworden.

Peter Schneider

Lichtstrahlen folgen den Nullgeodäten der Metrik und werden daher im Schwerefeld abgelenkt. Dieser Effekt besitzt wichtige astrophysikalische Anwendungen: Wenn das Licht einer entfernten Quelle durch eine Massenkonzentration („Gravitationslinse“) zwischen uns und der Quelle abgelenkt wird, lässt sich daraus viel lernen – sowohl über die Massenverteilung der Linse als auch über die Eigenschaften der Quelle und die des Raums dazwischen. Der Gravitationslinseneffekt ist inzwischen als zentrales Werkzeug der Astrophysik und Kosmologie etabliert.

Die Messung der Lichtablenkung im Gravitationsfeld der Sonne während einer Sonnenfinsternis 1919 bestätigte eine der zentralen Vorhersagen der Allgemeinen Relativitätstheorie. Das verhalf ihr zur breiten Anerkennung in der Fachwelt und weit darüber hinaus. Schon bald darauf wurde über weitere spektakuläre Effekte der gravitativen Lichtablenkung spekuliert: Falls sich eine genügend massereiche und kompakte Massenverteilung zwischen einer entfernten Quelle und uns befindet, kann es mehrere Lichtstrahlen geben, die uns mit der Quelle verbinden – und damit wäre die Quelle an mehreren Positionen der Sphäre zu sehen (Abb. 1). Die ersten Mehrfachbilder eines Quasars wurden 1979 entdeckt; inzwischen ist die Zahl solcher starken Gravitationslinsensysteme auf mehrere hundert angewachsen, wobei als Quellen aktive und normale Galaxien auftreten und Galaxien oder Galaxienhaufen als Linse wirken [1].

Da Lichtbündel nicht nur als Ganzes, sondern auch differentiell abgelenkt werden, sind die beobachteten Bilder im Vergleich zum Bild der unabgelenkten Quelle verzerrt. Dies hat zwei Effekte zur Folge: Erstens ändert sich die Querschnittsfläche (bzw. der beobachtete Raumwinkel) der Lichtbündel. Da die Flächenhelligkeit aufgrund des Liouville-Theorems erhalten bleibt, ändert sich der beobachtete Fluss eines Bildes um diese Flächenverzerrung. Zweitens verändert sich die Form der Bilder. Beide Effekte können dramatische Konsequenzen haben, etwa leuchtende Bögen in Galaxienhaufen (Abb. 2). Der Fluss dieser Bögen kann den der „ungelinsten“ Quelle um einen Faktor 20 oder mehr übersteigen. Wie schon Fritz Zwicky 1937 vorhersagte, erlaubt uns der Linseneffekt daher einen besseren Blick auf leuchtschwache, sehr weit entfernte Quellen. In den meisten Fällen ist die Bildverzerrung wesentlich un-

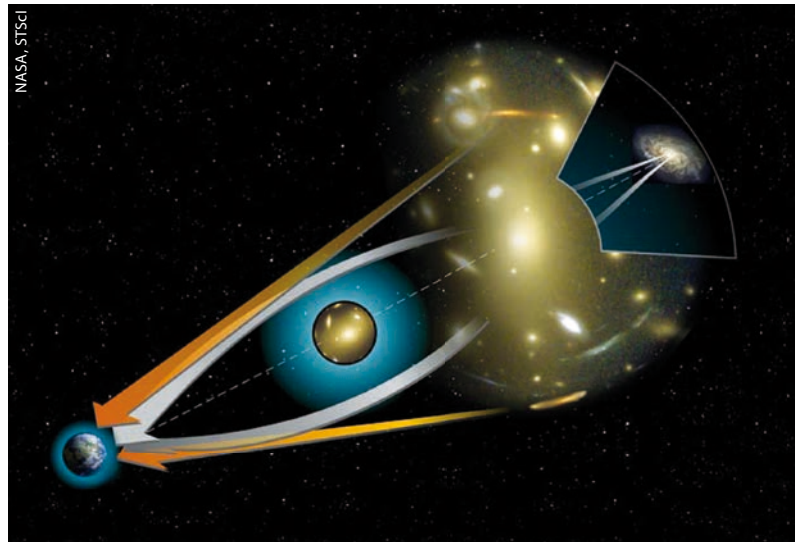


Abb. 1 Eine Massenverteilung zwischen uns und einer weit entfernten Quelle kann aufgrund der Raumkrümmung zu Mehrfachbildern der Quelle führen.

spektakulärer als bei den leuchtenden Bögen und lässt sich in individuellen Bildern nicht identifizieren; wir sprechen dann vom „schwachen Gravitationslinseneffekt“. Da jedoch in unserem Universum die Dichte von schwachen und weit entfernten Galaxien an der Sphäre sehr groß ist, ist es möglich, diese Verzerrungen statistisch nachzuweisen und quantitativ zu untersuchen.

Der Gravitationslinseneffekt [2 – 5] beschränkt sich auf die Lichtablenkung in schwachen Gravitationsfeldern, sodass das Superpositionsprinzip gilt: Der durch eine Massenverteilung hervorgerufene Ablenkungswinkel lässt sich berechnen als Faltung der

KOMPAKT

- Die Lichtablenkung im Schwerefeld lässt sich auf vielfältige Weise für astrophysikalische und kosmologische Beobachtungen nutzen.
- So lassen sich dank des Gravitationslinseneffekts leuchtschwache, entfernte Quellen beobachten.
- Zudem erlaubt die gravitative Lichtablenkung die genaueste Massenbestimmung von Objekten außerhalb der Milchstraße sowie den Nachweis großer Anteile Dunkler Materie.
- Die „kosmische Scherung“ gilt als vielversprechendste Methode, um die Eigenschaften der Dunklen Energie zu untersuchen und zu klären, ob diese kompatibel sind mit denen der kosmologischen Konstanten.

Prof. Dr. Peter Schneider, Argelander Institut für Astronomie, Auf dem Hügel 71, 53121 Bonn



Abb. 2 Der Galaxienhaufen A2218 zeigt eine Vielzahl leuchtender Bögen, stark verzerrte und vergrößerte Bilder von Hintergrundgalaxien. Die Modellierung dieses komplexen Gravitationslinsensystems erlaubt sehr genaue Aussagen über die Massenverteilung (z. B. radiales

Profil, Elongation, Bimodalität) im inneren Bereich des Haufens. Der Himmelsausschnitt in dieser Aufnahme beträgt rund $160'' \times 80''$, entsprechend einer Fläche von etwa $500 \times 250 \text{ kpc}^2$ bei der Rotverschiebung $z = 0,18$ des Haufens.

Dichteverteilung mit dem Einsteinschen Ablenkwinkel $4 GM/(c^2 \xi)$ eines Lichtstrahls im Abstand ξ von einer Punktmasse M . Die Beziehung zwischen der wahren (ungelinsten) Winkelposition der Quelle $\vec{\beta}$ und der beobachteten Bildposition $\vec{\theta}$ an der Sphäre (Abb. 3) ist gegeben durch die Linsengleichung

$$\vec{\beta} = \vec{\theta} - \vec{\alpha}(\vec{\theta}), \tag{1}$$

wobei

$$\vec{\alpha}(\vec{\theta}) = \frac{1}{\pi} \int d^2\theta' \kappa(\vec{\theta}') \frac{\vec{\theta} - \vec{\theta}'}{|\vec{\theta} - \vec{\theta}'|^2} \tag{2}$$

der skalierte Ablenkwinkel und $\kappa(\vec{\theta})$ die Konvergenz ist; letztere ist proportional zur entlang der Sichtlinie projizierten Flächenmassendichte Σ der Linse,

$$\kappa = \frac{4 \pi G D_d D_{ds}}{c^2 D_s} \Sigma \equiv \frac{\Sigma}{\Sigma_{cr}}, \tag{3}$$

mit den Entfernungen D zwischen Beobachter, Linse und Quelle (Abb. 3). Der Linseneffekt hängt daher von der Massenverteilung Σ und der Geometrie ab, denn die Entfernungen ergeben sich aus der messbaren Rotverschiebung von Linse und Quelle sowie der Geometrie der Raumzeit, also unserem kosmologischen Modell.

Mehrfachabbildungen einer Quelle entstehen, wenn die Linsengleichung (1) für eine Quellposition $\vec{\beta}$ mehrere Lösungen $\vec{\theta}_i$ besitzt; die Quelle ist dann an den Positionen $\vec{\theta}_i$ der Sphäre zu sehen. Solche starken Linseneffekte treten auf, wenn die Konvergenz $\kappa \geq 1$ im zentralen Bereich der Linse erreicht, d. h. die Flächenmassendichte den kritischen Wert Σ_{cr} (Gl. 3) übersteigt. Die einzelnen Bilder sind meist unterschiedlich hell, da der Gezeitenanteil der Lichtablenkung – die Ableitung des Ablenkwinkels $\vec{\alpha}$ – von der jeweiligen Bildposition abhängt. Daher sind die Verstärkungsfaktoren μ der Bilder verschieden.¹⁾

1) Für kleine Quellen ist die Verstärkung durch die Flächenverzerrung der Linsenabbildung (1) gegeben, d. h. durch die Inverse der Determinante der Jacobi-Matrix $A_{ij} = \partial \beta_i / \partial \theta_j$.

Massenbestimmung in starken Linsensystemen

Für eine axialsymmetrische Massenverteilung und eine Quelle genau hinter ihrem Zentrum kann aus Symmetriegründen das Bild der Quelle einen vollständigen Ring bilden – den Einstein-Ring. Aufgrund von (1) mit $\vec{\beta} = \vec{0}$ folgt als Bedingung für den Einstein-Radius des Rings $\theta_E = \alpha(\theta_E)$. Mit Hilfe von (2) und (3) lässt sich zeigen, dass die mittlere Flächenmassendichte innerhalb des Einstein-Radius gerade Σ_{cr} ist. Somit folgt für die Masse innerhalb des Einstein-Rings sofort

$$M(\leq \theta_E) = (D_d \theta_E)^2 \pi \Sigma_{cr},$$

wenn die Entfernungen zu Linse und Quelle aufgrund ihrer Rotverschiebungen bekannt sind. Störungen der Symmetrie führen dazu, dass der Ring in zwei oder vier Einzelbilder aufgespalten wird, wobei der charakteristische Bildabstand rund $2\theta_E$ beträgt. Dadurch ist es möglich, aus der Position der Mehrfachbilder unmittelbar und modellunabhängig auf die Masse innerhalb des Einstein-Radius zu schließen. Der Linseneffekt erlaubt die mit Abstand genaueste Massenbestimmung von Objekten außerhalb unserer Milchstraße! Allerdings handelt es sich um die Masse innerhalb eines durch die Bildpositionen vorgegebenen Radius um das Linsenzentrum.

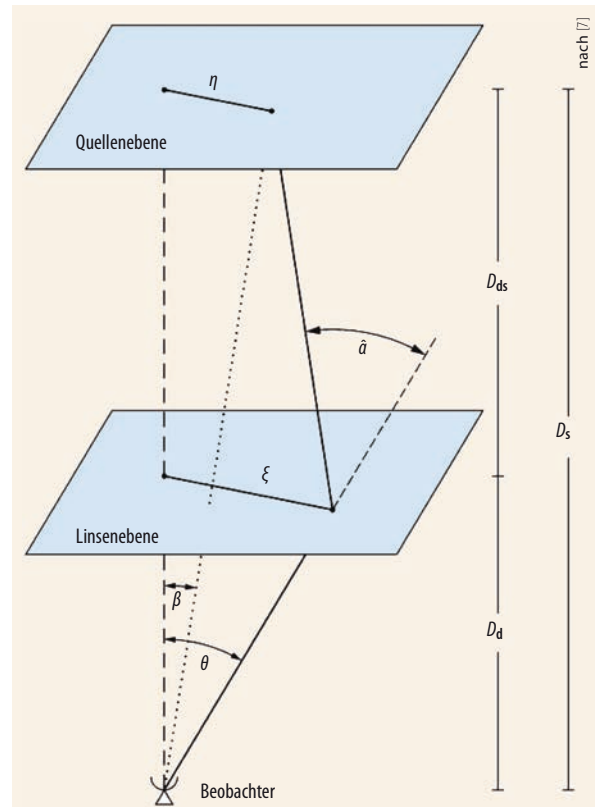


Abb. 3 Gravitationslinsengeometrie: Licht von der Quelle im Abstand D_s vom Beobachter wird von einer Massenkonzentration im Abstand D_d um einen Winkel $\hat{\alpha}$ abgelenkt. Die Beziehung (1) zwischen der wahren Position $\vec{\beta} = \vec{\eta}/D_s$ und der beobachteten Position $\vec{\theta} = \vec{\xi}/D_d$ folgt direkt aus dem Strahlensatz, wobei $\hat{\alpha} = (D_{ds}/D_s) \hat{\alpha}$ ist. Für kosmologische (Winkeldurchmesser-)Entfernungen gilt im Allgemeinen $D_{ds} \neq D_s - D_d$.

Typische Bildabstände liegen bei etwa einer Bogensekunde bzw. $15''$, wenn (elliptische) Galaxien bzw. Galaxienhaufen als Gravitationslinsen wirken. Das vielleicht wichtigste Resultat aus Untersuchungen dieser Systeme ist der Nachweis, dass ein beträchtlicher Anteil an Dunkler Materie vorhanden ist: Innerhalb des Einstein-Radius von Linsengalaxien liegt etwa die Hälfte der Masse in Form Dunkler Materie vor – die aus ihrer Leuchtkraft bestimmte Masse der Sterne in diesen Galaxien ist deutlich geringer als $M(\leq \theta_E)$ [6]. Daher bestätigt der Linseneffekt die Existenz Dunkler Materie auf Skalen von Galaxien und -haufen, und zwar im Gegensatz zu anderen Methoden sogar modellunabhängig.

Genauere Modellierungen solcher Linsensysteme erlauben Aussagen über die Form der Dichteverteilung. Die Richtung der großen Halbachse der projizierten Massenverteilung stimmt sehr gut mit der der Lichtverteilung überein. Dies weist auf einen engen Zusammenhang zwischen der Sternverteilung und der Dunklen Materie hin; allerdings kann das Achsenverhältnis dieser beiden Verteilungen recht unterschiedlich sein. In Verbindung mit stardynamischen Methoden lässt sich das radiale Profil der gesamten Dichteverteilung im Zentrum von Linsengalaxien bestimmen; dessen logarithmische Steigung beträgt etwa $\gamma = 2,0 \pm 0,2$ ($\rho \propto r^{-\gamma}$). Diese fast universelle Steigung unterscheidet sich von der der Sternverteilung und der erwarteten Verteilung Dunkler Materie und muss daher durch gemeinsame Entwicklungseffekte beider Komponenten zustande kommen.

Konsistenztest unseres Weltmodells

Die Lichtlaufzeiten entlang der Lichtstrahlen der Mehrfachbilder sind unterschiedlich und bei gegebener Form der Massenverteilung und der Rotverschiebungen von Linse und Quelle proportional zur Größenskala c/H_0 des Universums, wobei H_0 die Hubble-Konstante ist. Für variierende Quellen, wie Quasare und andere aktive Galaxien, kann man die Differenz der Lichtlaufzeit Δt messen und daraus die Hubble-Konstante bestimmen – eine Idee des norwegischen Astronomen Sjur Refsdal aus dem Jahr 1964. Inzwischen ist es gelungen, in 15 Linsensystemen diese Laufzeitdifferenzen zu vermessen. Diese betragen typischerweise einige Wochen. Bei zwei von ihnen ist es möglich, die Form der Massenverteilung relativ genau zu bestimmen. Die daraus resultierenden Werte von H_0 stimmen mit den Werten überein, die andere Methoden im lokalen Universum liefern, was einen beeindruckenden Konsistenztest unseres Weltmodells darstellt.

Mikrolinseneffekt

Galaxien besitzen aufgrund der Sterne eine feinkörnige Massenverteilung. Diese kleinskaligen Strukturen beeinflussen die Ablenkungswinkel nur sehr schwach, haben

aber merklichen Einfluss auf deren Gradienten (und somit auf die Jacobi-Matrix der Linsenabbildung). Als Konsequenz hängt der Verstärkungsfaktor μ einer Quelle sehr empfindlich von der genauen relativen Position der Quelle ab – vorausgesetzt, diese ist kleiner als der typische Einstein-Winkel von Sternen (etwa 10^{-6} Bogensekunden). Aufgrund relativer transversaler Bewegungen von Quelle, Linse und Beobachter ändert sich μ und damit der beobachtete Fluss von Einzelbildern. Im Gegensatz zur intrinsischen Variabilität, die in allen Mehrfachbildern mit einer Verzögerung Δt gleich erscheint, ist diese Mikrolinsen-Variabilität in den Bildern unkorreliert. Die entsprechenden Lichtkurven hängen von der Quellgröße und ihrem Profil ab. Mit Hilfe solcher Mikrolinsenereignisse hat man den innersten Bereich von Quasaren räumlich auflösen können. Damit ließ sich zeigen, dass das Standardmodell einer optisch dicken Akkretionsscheibe um ein supermassives Schwarzes Loch mit den Beobachtungen konsistent ist. So stammt die meiste optische oder Röntgenemission aus einem Bereich von etwa 100 bzw. 30 Schwarzschild-Radien um das Schwarze Loch.

Sterne und andere kompakte Objekte in unserer Milchstraße können ebenfalls zu Mikrolinseneffekten führen. Obwohl diese Effekte sehr selten auftreten, konnte man sie durch langjährige umfangreiche Experimente nachweisen. Dabei diente die universelle Form der Lichtkurve und ihre Achromatizität (gravitative Lichtablenkung ist unabhängig von der Wellenlänge des Lichtes) als Identifikation. Die Experimente konnten klar ausschließen, dass ein signifikanter Bruchteil

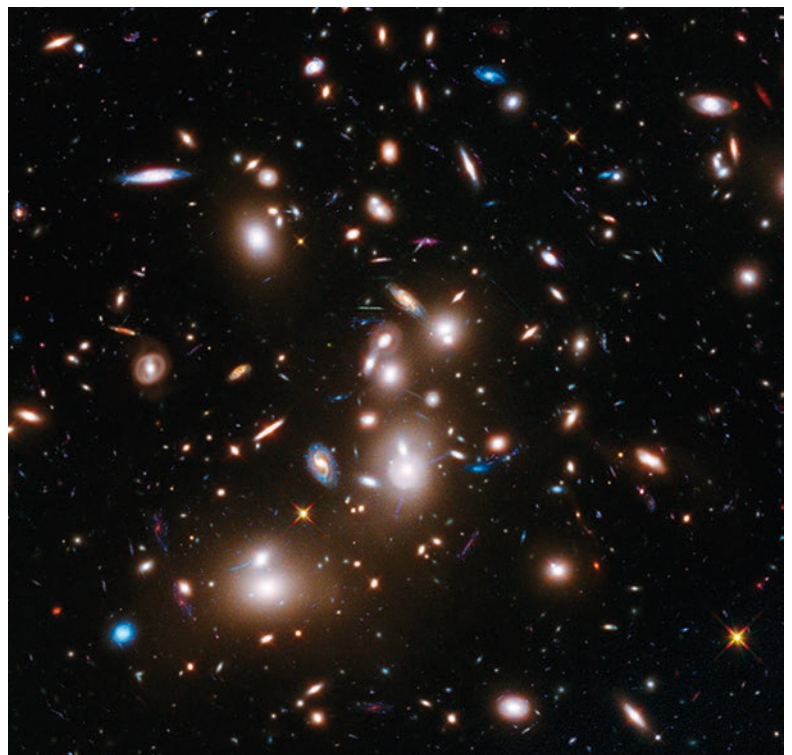


Abb. 4 Diese ultratiefe Aufnahme ($\sim 3' \times 3'$) des Galaxienhaufens Abell 2744 mit der Rotverschiebung $z = 0,31$ zeigt neben den Galaxien des Haufens eine große Vielzahl von Hintergrundgalaxien,

die wegen der differentiellen Lichtablenkung verzerrt sind und deren beobachteter Fluss dadurch deutlich erhöht wird, typischerweise um einen Faktor 15.

2) Genauer: Die Sche-
nung beschreibt den
spurfreien Anteil der
Jacobi-Matrix A .

der Dunklen Materie in unserer Milchstraße aus kompakten Objekten (etwa ausgebrannten Sternen) besteht. Mittels solcher Mikrolinsenereignisse ließen sich auch zahlreiche Planeten außerhalb unseres Sonnensystems entdecken. Hierbei fanden sich erstmals auch Planeten kleinerer Massen sowie Planeten, die nicht um ein Muttergestirn kreisen („free-floating planets“) und deren Entstehungsgeschichte praktisch unbekannt ist.

Natürliche Teleskope

Der Verstärkungseffekt sorgt dafür, dass Gravitationslinsen als „natürliche Teleskope“ wirken – eine Quelle etwa hinter dem zentralen Bereich eines Galaxienhaufens erscheint wesentlich heller als die ungelinste Quelle (Abb. 4). Dieser Effekt ermöglicht besonders tiefe Himmelsdurchmusterungen in Bereichen mit großem μ . Die leuchtschwächsten bzw. entferntesten Quellen (von denen wir auch solche beobachten können, deren Licht zu einem Zeitpunkt emittiert wurde, als das Universum jünger als ein Zehntel des heutigen Weltalters war) wurden mit solchen Untersuchungen gefunden. Als weitere Konsequenz des Verstärkungseffekts ließen sich viele der scheinbar leuchtkräftigsten Quellen als Gravitationslinsensysteme identifizieren. So sind praktisch alle Submillimeter-Quellen oberhalb eines bestimmten Grenzflusses entweder nahe Spiralgalaxien oder weit entfernte staubreiche Galaxien mit aktiver Sternentstehung, die durch den Linseneffekt wesentlich verstärkt werden.

Schwacher Linseneffekt

Mehrfachbilder und leuchtende Bögen treten in der Nähe des Einstein-Radius auf, weshalb man mit dem starken Linseneffekt nur die inneren Bereiche der Linsen untersuchen kann. Die Methoden des schwachen

Gravitationslinseneffekts erlauben es hingegen, die Massenverteilungen in den Außenbereichen zu bestimmen [7]. Das Prinzip des schwachen Linseneffekts beruht darauf, dass die beobachtete Elliptizität eines Bildes $\varepsilon = \varepsilon^s + \gamma$ einer weit entfernten Quelle die Summe aus deren intrinsischer Elliptizität ε^s und dem Gezeitenanteil der Lichtablenkung, der Scherung γ , ist.²⁾

Diese Größen haben jeweils zwei Komponenten – die Elliptizität wird durch das Achsenverhältnis und die Richtung der großen Halbachse beschrieben – und werden als komplexe Zahlen dargestellt. Da in unserem Universum keine Richtung ausgezeichnet ist, ist der Erwartungswert von ε^s gleich Null, gemäß der Mittelung über den die Richtung der Elliptizität definierenden Phasenfaktor $e^{2i\varphi}$. Daher ist der Erwartungswert der beobachteten Elliptizität einer Galaxie bei $\vec{\theta}$ gleich $\gamma(\vec{\theta})$. Scherung und Konvergenz hängen linear zusammen, sodass aus der Vermessung von γ mittels der Elliptizitäten von Bildern weit entfernter Galaxien direkt Aussagen über die Massenverteilung κ der Linsen möglich sind.

Die Massenverteilung von einzelnen Galaxienhaufen lässt sich mit dieser Methode parameterfrei rekonstruieren. Als vielleicht wichtigstes Ergebnis solcher Untersuchungen ist der unmittelbare Nachweis der Dominanz Dunkler Materie in Haufen zu betrachten: Im Bullet-Cluster (Abb. 5) findet sich eine bimodale Massenverteilung, die mit derjenigen der leuchtkräftigen Haufengalaxien zusammenfällt. Das heiße Gas ist völlig anders verteilt und weist eindeutig auf eine Kollision zweier Unterhaufen hin. Bei dieser Kollision verhalten sich Gas und Galaxien unterschiedlich: Letztere erfahren aufgrund des kleinen geometrischen Wirkungsquerschnitts praktisch keine Reibung. Die Koinzidenz der Materieverteilung mit der Galaxienverteilung zeigt nun, dass die dominante Komponente der Materie sich wechselwirkungsfrei verhält, d. h. sie unterliegt nicht wie das Gas einer Reibung. Da das Gas in Haufen typischerweise fünf Mal mehr Masse enthält als die Sterne in Galaxien, dominiert (stoßfreie) Dunkle Materie die Massenbilanz. Dieses Argument gilt weitgehend unabhängig von der Gültigkeit der Allgemeinen Relativitätstheorie und schließt modifizierte Gravitationstheorien als Alternative zur Dunklen Materie aus. Inzwischen wurden mehrere solcher Haufenkollisionen gefunden mit stets der gleichen Implikation.

Der schwache Linseneffekt erlaubt die Kalibration von Skalierungsrelationen zwischen der Masse von Galaxienhaufen und ihren beobachtbaren Eigenschaften, wie etwa die Röntgenleuchtkraft und -temperatur. Diese bilden wiederum die Basis aller kosmologischen Untersuchungen mittels Haufen, die unter anderem mit dem in 2016 startenden deutsch-russischen Satelliten eROSITA durchgeführt werden. Die Kombination des starken und schwachen Linseneffekts in den Innen- bzw. Außenbereichen von Haufen bestätigt die Vorhersage von kosmologischen Simulationen im Rahmen des Modells von Kalter Dunkler Materie. Demnach existiert ein spezifisches universelles Dichteprofil von



Abb. 5 Der Bullet-Cluster: Die optische Aufnahme ($7 \times 5'$) dieses Doppelhaufens ist mit der Röntgenemission (rot) des heißen Gases und mit der aus dem schwachen Gravitationslinseneffekt rekonstruierten Massenverteilung (blau) überlagert. Letztere ist ähnlich verteilt wie die Galaxien des Haufens, was unmittelbar die Dominanz Dunkler Materie zeigt.

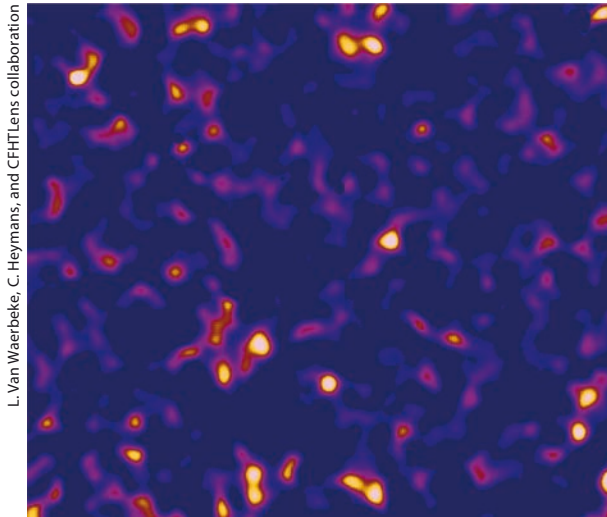


Abb. 6 Diese Karte eines $7^\circ \times 7^\circ$ großen Feldes des CFHTLenS Surveys zeigt die entlang der Sichtlinie projizierte Dichte von Dunkler und leuchtender Materie. Den höchsten Maxima der Dichteverteilung entsprechen Massenkonzentrationen, in denen sich Galaxienhaufen gebildet haben.

Massenkonzentrationen.

Das mittlere Massenprofil von Galaxien und Gruppen von Galaxien lässt sich durch die Korrelation der Scherung mit den Positionen dieser Objekte genau vermessen. Der Vergleich der so bestimmten Masse mit der aus der Lichtverteilung bestimmten Sternmasse zeigt, dass das Masse-zu-Leuchtkraft-Verhältnis von kosmischen Objekten und damit die Effizienz, mit der die baryonische Materie Sterne bildet, empfindlich von ihrer Masse abhängen. Diese Effizienz ist maximal für Objekte etwa der Masse unserer Milchstraße und nimmt für masseärmere und -reichere Objekte stark ab. Diese Reduktion der Sternbildungseffizienz ist hauptsächlich auf Rückkopplungseffekte durch Supernova-Explosionen und aktive Galaktische Kerne zurückzuführen [8] und erlaubt daher aussagekräftige Rückschlüsse auf die Entwicklung von Galaxien, Gruppen und Haufen.

Kosmische Scherung und Dunkle Energie

Die großräumige Materieverteilung im Universum lässt sich mit dem schwachen Linseneffekt kartieren (Abb. 6) und statistisch untersuchen [9]. Die Korrelationen der Scherung entlang von Lichtstrahlen gegebenen Abstands hängen von den Korrelationseigenschaften der kosmischen Materieverteilung und ihrer zeitlichen Entwicklung ab. Messungen dieser kosmischen Scherung haben beispielsweise gezeigt, dass die Expansion des Universums zurzeit beschleunigt abläuft und daher von der Dunklen Energie dominiert ist, unabhängig von anderen Methoden. Ebenso ist die

kosmische Scherung bereits heute eine kompetitive Methode, um die Amplitude der Dichtefluktuationen im Universum zu bestimmen. Die Untersuchungen des Mikrowellenhimmels mit dem Planck-Satelliten haben eine Rekonstruktion der kosmischen Materieverteilung ermöglicht, wobei die ungelinste Temperaturverteilung des kosmischen Mikrowellenhintergrunds als Quelle diente. Erst die Kombination dieser Materiekarte mit den statistischen Eigenschaften des Mikrowellenhintergrunds erlaubte es, allein aus den Planck-Daten die kosmologischen Parameter beeindruckend genau zu bestimmen, ohne auf andere kosmologische Beobachtungsergebnisse zurückzugreifen.

Die kosmische Scherung gilt als vielversprechendste Methode, um empirisch die Eigenschaften der Dunklen Energie zu untersuchen und um speziell die zentrale Frage zu beantworten, ob die Eigenschaften der Dunklen Energie kompatibel sind mit denen der kosmologischen Konstanten. Der europäische Satellit Euclid, dessen Start für 2020 geplant ist, widmet sich genau dieser Frage. Seine Vermessung der kosmischen Scherung, die gegenüber heutigen Ergebnissen um mehrere Größenordnungen genauer sein wird, wird uns zeigen, ob die Einführung der kosmologischen Konstante Einsteins „größte Eselei“ war oder aber eine seiner genialsten Ideen.

Literatur

- [1] P. Schneider, Einführung in die extragalaktische Astronomie und Kosmologie, Springer, Heidelberg (2005); aktualisierte Fassung: Extragalactic Astronomy and Cosmology, Springer, Heidelberg (2015)
- [2] P. Schneider, J. Ehlers und E. E. Falco, Gravitational Lenses, Springer, Heidelberg (1992)
- [3] M. Bartelmann, Classical and Quantum Gravity 27, 233001 (2010)
- [4] M. Bartelmann, Physik in unserer Zeit 45, 220 (2014)
- [5] P. Schneider, C. Kochanek und J. Wambsganss, Gravitational Lensing: Strong, Weak and Micro, Springer, Heidelberg (2006)
- [6] T. Treu, ARA&A, 48, 87 (2010)
- [7] M. Bartelmann und P. Schneider, Phys. Rep. 340, 291 (2001)
- [8] H. Mo, F. van den Bosch und S. White, Galaxy Formation and Evolution, Cambridge University Press, Cambridge (2010)
- [9] M. Bartelmann, Sterne und Weltraum 8/2007, S. 38 und 9/2007, S. 36 (2007)

DER AUTOR

Peter Schneider hat nach dem Physikstudium in Bonn am Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching promoviert, wo er nach einem Aufenthalt am JILA in Boulder auch viele Jahre arbeitete, bevor er 2000 an die Universität Bonn wechselte. Schon früh beschäftigte er sich mit der gravitativen Lichtablenkung. Die Monografie „Gravitational Lenses“ von Schneider, Ehlers und Falco von 1992 gilt als Referenzwerk. Darüber hinaus war er u. a. Herausgeber der Letters Section von Astronomy & Astrophysics, der wichtigsten europäischen astronomischen Fachzeitschrift.

