

# Licht ins Dunkel bringen: Gravitationslinsen im Kosmos

*Matthias Bartelmann*

## Ein modernes physikalisches Weltbild

Etwa seit der letzten Jahrhundertwende durchläuft die Kosmologie eine stürmische Entwicklung, die vor allem durch eine Fülle neuer Daten angetrieben wird. Diese Entwicklung mündete in ein Weltmodell, das physikalisch so einfach wie nur möglich erscheint. Aufbauend auf der allgemeinen Relativitätstheorie Albert Einsteins und auf zwei Symmetrieanahmen ist die moderne Kosmologie in der Lage, so gut wie allen solchen Beobachtungen einen überzeugenden Rahmen zu bieten, die überhaupt Aussagen über das Universum als Ganzes erlauben.

Symmetrieanahmen sind ein wesentliches Element der modernen Physik überhaupt. Sie besagen, dass ein physikalisches Modell oder eine Theorie unverändert bleiben, wenn sie bestimmten Transformationen unterworfen werden. Sie sind zugleich die fundamentalsten Annahmen, die dem Aufbau physikalischer Theorien vorausgehen: Alle grundlegenden Theorien der modernen Physik können durch die Symmetrien charakterisiert werden, die ihnen zugrunde gelegt werden.

In der Kosmologie fordert die eine dieser Symmetrieanahmen, dass die mittleren beobachtbaren Eigenschaften des Universums unabhängig davon seien, in welcher Richtung am Himmel sie beobachtet würden. Die zweite Annahme verlangt, dass die erste auch für jeden anderen Beobachter im Universum gelte. Die erste Annahme hat zur Folge, dass das Weltmodell der Kosmologie *isotrop* um uns ist, und die zweite, dass es isotrop um jeden seiner Beobachter und damit *homogen* ist.

Aufbauend auf diesen beiden Annahmen ergibt sich aus der allgemeinen Relativitätstheorie eine ganze Klasse von Weltmodellen, die nach dem russischen Mathematiker Alexander Friedman, der

sie als Erster aus Einsteins Feldgleichungen ableitete, Friedman-Modelle genannt werden. Diese Modelle sind durch wenige Parameter zu spezifizieren. Zu ihnen gehören die Dichte der Materie und der Strahlung im Universum ebenso wie die heutige Ausdehnungsrate des Universums. Diese Parameter sind heute dank einer Vielzahl verschiedener Messungen mit relativen Genauigkeiten bekannt, die größtenteils besser als ein Prozent sind. Es ist ein bemerkenswerter Triumph der Kosmologie wie auch der Physik überhaupt, dass es möglich war, dank präziser Daten ein Weltmodell zu entwickeln, das mit den einfachsten möglichen Annahmen maximal erfolgreich ist. Es wird kosmologisches Standardmodell genannt.

## Dunkle Materie

Dieses so erfolgreiche und einfache kosmologische Standardmodell fordert den hohen Preis, dass ihm zufolge etwa 85 % der Materie im Universum von einer Form sein müssen, die wir nicht kennen. Entscheidend ist, dass diese Materie nicht mit elektromagnetischer Strahlung wechselwirken darf. Deswegen wird sie dunkle Materie genannt. Wir wissen nicht, woraus diese dunkle Materie bestehen könnte. Allen noch so raffinierten Laborexperimenten auf der Erde hat sie sich bisher entzogen. Es ist eine der wesentlichen Aufgaben der modernen Kosmologie, die Natur der dunklen Materie aufzuklären. Wie kann sie aber diese Aufgabe erfüllen, wenn sich die dunkle Materie jeder direkten Beobachtung entzieht, indem sie nicht mit Licht wechselwirkt? Dieser Vortrag handelt davon, wie es durch das Wechselspiel zwischen Licht und Schwerkraft gelingt, zumindest die Verteilung der dunklen Materie zu kartieren.

Beginnen wir im Sonnensystem. Die Planeten umlaufen die Sonne mit Geschwindigkeiten, die vom Merkur im Inneren bis zum Neptun ganz außen immer weiter abnehmen. Das dritte Kepler'sche Gesetz besagt, dass die Geschwindigkeiten der Planeten mit der Wurzel aus deren Entfernung von der Sonne abfallen müssen. Aus den Umlaufgeschwindigkeiten lässt sich die Masse der Sonne genau bestimmen. Die recht steile Abnahme der Geschwindigkeiten nach außen zeigt an, dass die Masse des Sonnensystems so gut wie vollständig im Zentrum konzentriert ist, also in der Sonne selbst.

Beobachtungen dieser Art lassen sich auch an ganzen Galaxien durchführen, z. B. an Spiralgalaxien. Solche Galaxien sind Sternsyste-

teme wie unsere Milchstraße, in der ein Großteil der etwa 100 Milliarden Sterne, aus denen sie besteht, in einer flachen Scheibe um eine zentrale Verdickung angeordnet sind. Mithilfe von Spektrografen lassen sich die Geschwindigkeiten messen, mit denen die Sterne in den Scheiben solcher Galaxien um das Zentrum laufen. Das Ergebnis ist seit den 1970er Jahren gut bekannt und doch immer wieder überraschend: Ausgehend vom Zentrum der Spiralgalaxien steigt die Umlaufgeschwindigkeit schnell auf Werte um 150 bis ca. 200 km/s an – und bleibt beinahe konstant auf diesem Wert, so weit sich die Beobachtung auch vom Zentrum entfernt. Die Umlaufgeschwindigkeit der Sterne in Spiralgalaxien nimmt nach außen hin nicht ab, wie es die Umlaufgeschwindigkeit der Planeten im Sonnensystem tut: Das zeigt, dass die Masse dieser Galaxien nicht in ihrem Zentrum konzentriert ist.

Natürlich kann man die Umlaufgeschwindigkeit der Sterne nur bis zu solchen Abständen vom Galaxienzentrum messen, wo überhaupt noch Sterne zu beobachten sind. Weiter außen bis zu sehr viel größeren Abständen vom Zentrum der Spiralgalaxien hin gibt es jedoch Wolken aus neutralem Wasserstoffgas, das im Radiobereich leuchtet. Mit Radioteleskopen können auch die Umlaufgeschwindigkeiten dieser Wolken gemessen werden. Sie bestätigen den Befund, auf den schon die Sterne schließen lassen: Die Umlaufgeschwindigkeiten auch der Wasserstoffwolken in Spiralgalaxien bleiben bis zu den größten beobachtbaren Abständen vom Zentrum annähernd konstant.

Daraus lässt sich auf einfache Weise berechnen, wie die Masse verteilt sein muss, die von den Sternen und den Wasserstoffwolken umlaufen wird. Solche etwa konstanten Umlaufgeschwindigkeiten sind nur dann möglich, wenn die Gesamtmasse der Galaxien direkt proportional mit dem Abstand vom Zentrum der Galaxien zunimmt.

Das Licht in den Spiralgalaxien ist jedoch ganz anders verteilt; insbesondere ist es viel stärker als die Masse zum Zentrum hin konzentriert. Je weiter man in den Spiralgalaxien nach außen geht, umso dunkler wird die dort anhand der Umlaufgeschwindigkeiten von Sternen oder Wasserstoffwolken nachgewiesene Materie.

Geht man in der Hierarchie der kosmischen Strukturen um eine Stufe nach oben, gelangt man zu den Galaxienhaufen. Dort bewegen sich einige hundert bis etwa tausend Galaxien in einem vergleichsweise beschränkten Volumen. Aus der messbaren Geschwindigkeitsverteilung dieser Galaxien kann man ähnlich wie bei den Spiralgalaxien bestimmen, wieviel Masse notwendig ist, um die Galaxien durch die Schwer-

kraft in den Galaxienhaufen festzuhalten. Vergleicht man diese Masse mit derjenigen, die anhand des Lichts der Galaxien direkt beobachtbar ist, ergibt sich wiederum ein ähnlicher Befund wie bei den Spiralgalaxien: Auch die Galaxienhaufen enthalten erheblich mehr als die leuchtende, sichtbare Materie. Auch sie sind durch dunkle Materie dominiert.

Ein vielleicht noch überzeugenderes Argument dafür, dass die dunkle Materie die kosmischen Strukturen dominiert, lässt sich aus dem frühesten beobachtbaren Zustand des Universums ableiten. Mit geeigneten Teleskopen, die für Mikrowellen empfindlich sind, können wir in eine Zeit zurückschauen, in der das Universum gerade knapp 400 000 Jahre alt war. Von dort erreicht uns die Wärmestrahlung, die im heißen, frühen Anfangszustand des Universums entstanden ist. Diese elektromagnetische Strahlung, aufgrund ihrer dominanten Wellenlänge als kosmischer Mikrowellenhintergrund bezeichnet, erfüllt unseren gesamten Himmel mit einer fast vollkommen gleichförmigen Intensität, die der Wärmestrahlung eines schwarzen Körpers mit einer Temperatur von knapp drei Grad über dem absoluten Temperaturnullpunkt entspricht. Ausgehend vom sehr heißen Anfangszustand des Universums hat sich die Wärmestrahlung durch die kosmische Ausdehnung bis heute so weit abgekühlt, dass es vermessend erscheint, überhaupt von „Wärme“ zu sprechen.

Beobachtet man den kosmischen Mikrowellenhintergrund mit so hoher Empfindlichkeit, dass Temperaturschwankungen im Bereich von einige Millionstel Grad um die mittlere Temperatur von knapp drei Grad sichtbar werden, sieht man jedoch den gesamten Himmel von einer Fülle von Strukturen überzogen. Darin erkennen wir die Vorläufer derjenigen Strukturen, die uns heute in weit ausgeprägterer Form umgeben, also der Galaxien, Galaxienhaufen und noch größerer Gebilde. Diese Temperaturschwankungen im kosmischen Mikrowellenhintergrund sind der zwingendste Beleg dafür, dass das Universum vor allem aus einer Form dunkler Materie bestehen muss, die nicht mit Licht wechselwirken kann: Wenn die kosmische Materie vorwiegend von gewöhnlicher Zusammensetzung wäre, müssten die kosmischen Strukturen einen viel stärkeren Abdruck im kosmischen Mikrowellenhintergrund hinterlassen haben. Die beobachtbaren Temperaturschwankungen lägen dann im Bereich von Tausendstel statt Millionstel Grad, wären also um etwa das Tausendfache stärker.

Wir befinden uns in der modernen Kosmologie daher in der eigenartigen Situation, dass uns ein schon allein aufgrund seiner

bestechenden Einfachheit sehr überzeugendes, mit zahlreichen Beobachtungen bestens übereinstimmendes Weltmodell zu Schlussfolgerungen zwingt, die unsere alltägliche Erfahrung auf rätselhafte Weise übersteigen. Bei weitem die meiste Materie im Universum liegt in einer Form vor, die wir bisher nicht kennen und nicht verstehen. Diese Materie kann offenbar nicht direkt mit Licht wechselwirken und scheint sich daher unserer Beobachtung zu entziehen. Wir finden uns gewissermaßen in einem dunklen Raum wieder, der voller dunkler Möbel steht, deren Lage und Ausdehnung wir feststellen sollen. Dennoch ist es für die Kosmologie ebenso wie für die Astrophysik entscheidend wichtig, dass wir ein Bild von der Menge und der Verteilung dieser eigenartigen dunklen Materie gewinnen können.

### Gravitationslinsen

Dabei hilft uns ein Effekt, den die allgemeine Relativitätstheorie zweifelsfrei vorhersagt. Diese Theorie erklärt die Schwerkraft dadurch, dass die Anwesenheit von Materie und Energie die Raumzeit so krümmt, als würde sie eine Senke in der Raumzeit erzeugen. Licht, von dem wir gewohnt sind, dass es sich entlang gerader Strahlen ausbreitet, wird durch solche Senken abgelenkt. Es folgt dann Linien, die nun im herkömmlichen Sinn nicht mehr wie Geraden aussehen, dennoch aber die geradesten Linien darstellen, die in einer in sich gekrümmten Raumzeit überhaupt möglich sind. Solche möglichst geraden Linien heißen geodätische Linien.

Die geodätischen Linien solcher Lichtstrahlen, die nahe an einer Masse vorbeigehen, werden durch diese Masse so angezogen, als würden sie wie durch eine gewöhnliche Sammellinse zur optischen Achse hin gebrochen. Man spricht deshalb vom Gravitationslinseneffekt. Wie in der vertrauten geometrischen Optik werden die Lichtstrahlen dadurch zum Beobachter hin fokussiert. Auch wenn man Gravitationslinsen üblicherweise keine Brennweite zuordnen kann, haben sie viele Eigenschaften, die an gewöhnliche Sammellinsen aus Glas oder Kunststoff erinnern.

Schon Isaac Newton hatte vermutet, dass Licht durch die Schwerkraft abgelenkt werden könne. In seinem Buch „Opticks: or, a treatise of the reflections, refractions, inflections and colours of light“ schrieb er in einem Anhang als erste einer ganzen Liste von Fragen: „Do not

Bodies act upon Light at a distance, and by their action bend its Rays; and is not this action (*caeteris paribus*) strongest at the least distance?“

In der Newton'schen Physik ist diese Frage aber gar nicht sicher beantwortbar. Licht kann als ein Strom von Teilchen, den Photonen, aufgefasst werden, die aber keine Ruhemasse haben. In der Betrachtungsweise der speziellen Relativitätstheorie gewinnen sie zwar aufgrund ihrer Bewegung eine Trägheit, die zu ihrer Masse beiträgt, aber wenn sie in Ruhe sein könnten, wäre gar keine Masse mehr übrig. Auf etwas, das keine Masse hat, sollte die Schwerkraft aber doch nicht wirken können?

Andererseits hängt auch in der Newton'schen Physik die Bahn eines kleinen Testkörpers um eine schwere Masse gar nicht von der Masse des Testkörpers ab. Wie Galilei schon feststellte, fallen alle Körper gleich schnell, sofern über die Schwerkraft hinaus keine Kräfte auf sie wirken. Stellt man sich ein Lichtteilchen vor, das eine sehr geringe Masse hätte, wäre seine Bewegung z. B. um die Sonne problemlos berechenbar. Würde man diese Masse halbieren, bliebe seine Bahn dieselbe. Und wenn seine Masse immer weiter verringert würde, bis sie schließlich ganz verschwände?

Der Astronom Johann Georg Soldner war sich dieser Schwierigkeit vollkommen bewusst, als er für das Astronomische Jahrbuch für das Jahr 1804 seine Arbeit „Ueber die Ablenkung eines Lichtstrahls von seiner geradlinigen Bewegung, durch die Attraktion eines Weltkörpers, an welchem er nahe vorbei geht“ schrieb. Unter der Annahme, dass auch den Lichtteilchen eine Masse zuzuordnen wäre, berechnete er, um wieviel solche Lichtstrahlen abgelenkt würden, die von der Erde aus gesehen gerade am Sonnenrand vorbeigingen. Fast entschuldigend schrieb er:

Hoffentlich wird es niemand bedenklich finden, daß ich einen Lichtstral (*sic*) geradezu als schweren Körper behandle. Denn daß die Lichtstrahlen alle absoluten Eigenschaften der Materie besitzen, sieht man an dem Phänomen der Aberration, welches nur dadurch möglich ist, daß die Lichtstrahlen wirklich materiel (*sic*) sind. – Und überdies, man kann sich kein Ding denken, das existiren (*sic*) und auf unsere Sinne wirken soll, ohne die Eigenschaften der Materie zu haben.

In Einsteins Auffassung vom Wesen der Schwerkraft stellt sich dieses Problem aber gar nicht. Wie oben schon beschrieben, interpretiert

Einsteins allgemeine Relativitätstheorie die Schwerkraft nicht mehr als Kraft im Newton'schen Sinne, sondern erklärt die Auswirkungen der Schwerkraft auf die Bewegung von Körpern durch eine Krümmung der Raumzeit, die durch die Anwesenheit von Materie oder Energie hervorgerufen wird.

Zum ersten Mal berechnete Einstein die Ablenkung eines Lichtstrahls am Sonnenrand aufgrund einer noch nicht abgeschlossenen Version der allgemeinen Relativitätstheorie im Juni 1911. Er fand: „Ein an der Sonne vorbeigehender Lichtstrahl erlitte demnach eine Ablenkung vom Betrage  $4 \cdot 10^{-6} = 0,83$  Bogensekunden.“ Genau denselben Wert hatte Johann Georg Soldner 1804 durch seine Rechnung aufgrund der Newton'schen Physik erhalten. Beim zweiten Mal kam Einstein 1916 zu dem Schluss: „Ein an der Sonne vorbeigehender Lichtstrahl erfährt demnach eine Biegung von 1,7" (...).“ Sein Wert hatte sich glatt verdoppelt, und das aus gutem Grund: Erst aufgrund der abgeschlossenen allgemeinen Relativitätstheorie stellte Einstein fest, dass er sowohl die zeitliche als auch die räumliche Krümmung der Raumzeit aufgrund der Schwerkraft berücksichtigen musste, und dadurch trat gerade der doppelte Betrag der Lichtablenkung auf.

Dieser Wert von 1,7 Bogensekunden, zweimal so groß wie er nach der Newton'schen Rechnung zu erwarten gewesen wäre, wurde kurz danach durch Beobachtungen bestätigt. Während einer totalen Sonnenfinsternis am 29. Mai 1919 gelang es zwei britischen Expeditionen nachzumessen, um welchen Winkel Sterne von der Sonne weg verschoben erschienen, die zum Zeitpunkt der Finsternis nahe bei der Sonne standen und aufgrund der Verdunkelung der Sonne kurzzeitig sichtbar wurden. Im November 1919 berichteten die Autoren Dyson, Eddington und Davidson:

Thus the results of the expeditions to Sobral and Principe can leave little doubt that a deflection of light takes place in the neighbourhood of the sun and that it is of the amount demanded by Einstein's general theory of relativity, as attributable to the sun's gravitational field.

Bereits am 9. Oktober 1919 hatte Einstein selbst in einer kurzen Notiz berichtet:

Nach einem von Prof. Lorentz an den Unterzeichneten gerichteten Telegramm hat die zur Beobachtung der Sonnenfins-

ternis vom 29. Mai ausgesandte englische Expedition unter Eddington die von der allgemeinen Relativitätstheorie geforderte Ablenkung des Lichtes am Rande der Sonnenscheibe beobachtet. Der bisher provisorisch ermittelte Wert liegt zwischen 0,9 und 1,8 Bogensekunden. Die Theorie fordert 1,7.

Für Einstein selbst bedeutete die Lichtablenkung am Sonnenrand zwar eine Bestätigung seiner allgemeinen Relativitätstheorie, aber zugleich war er sich sicher, dass dieser Effekt darüber hinaus kaum jemals eine astrophysikalische Bedeutung erlangen würde, von einer noch praktischeren ganz abgesehen. Als ihn der tschechische Ingenieur Rudi W. Mandl 1936 in Princeton aufsuchte und bat, den Gravitationslinseneffekt eines Sterns an einem weiter entfernten Stern zu berechnen, willigte Einstein schließlich ein, eine Notiz in der Zeitschrift *Science* (*Science* 84 [1936] 506) über dieses Phänomen zu veröffentlichen, das er für unbeobachtbar hielt. Indirekt ebenfalls durch Mandl angeregt, äußerte der schweizerisch-amerikanische Astronom Fritz Zwicky jedoch schon 1937 die Idee, dass ganze Galaxienhaufen als Gravitationslinsen wirken könnten (*Physical Review* 51 [1937] 290). Nur vier Jahre vorher hatte Zwicky durch Beobachtungen des Coma-Galaxienhaufens den ersten Hinweis auf dunkle Materie gefunden (*Helvetica Physica Acta* 6 [1933] 110). Es dauerte allerdings noch bis 1979, bis die erste Gravitationslinse gefunden wurde (*Nature* 279 [1979] 381). Bei ihr handelt es sich um eine Galaxie, die ein helles, annähernd punktförmiges, sehr weit entferntes Objekt, einen so genannten Quasar, zweifach abbildet.

## Gravitationslinsen als optische Linsen

Wie erwähnt, verhalten sich Gravitationslinsen in vieler Hinsicht ganz ähnlich wie optische Linsen aus Glas oder Kunststoff. Sie können durch einen Brechungsindex beschrieben werden, der direkt durch das Newton'sche Gravitationspotential gegeben ist. Eine Gravitationslinse verhält sich wie ein Medium, das optisch dichter als das Vakuum ist. Wie in der gewöhnlichen geometrischen Optik gilt für Gravitationslinsen das Fermat'sche Prinzip, demzufolge ein Lichtstrahl zwischen festen Anfangs- und Endpunkten einen solchen Weg nimmt, längs dessen er eine extremale (meistens minimale) Zeit benötigt.

Zugleich gibt es wichtige Unterschiede zwischen Gravitationslinsen und optischen Linsen. Nur in unrealistischen Ausnahmefällen kann einer Gravitationslinse eine Brennweite zugeordnet werden, und üblicherweise sind Gravitationslinsen stark astigmatisch, d. h. sie erzeugen verzerrte Bilder derjenigen Objekte, die durch sie betrachtet werden. Sowohl in Galaxien als auch in Galaxienhaufen wurden zahlreiche Beispiele solcher teils extremer Verzerrungen beobachtet.

So störend ein solcher Astigmatismus für ein optisches System wäre, das in unserem Alltag verwendet werden soll, so wichtig ist er für die Astrophysik. Gerade durch die Verzerrungen, die sie verursachen, verraten die Gravitationslinsen ihre Anwesenheit selbst dann, wenn sie fast vollständig aus dunkler Materie bestehen. Ebenso wie geriffelte Glasscheiben selbst dann anhand der Verzerrungen dessen erkennbar werden, was jenseits der Scheiben liegt. Wenn sie vollkommen durchsichtig sind, werden Gravitationslinsen aufgrund der charakteristischen Verzerrungen sichtbar, die sie den Lichtquellen im fernerem Universum aufprägen. Und nicht nur das: Aus dem Ausmaß der Verzerrungen lässt sich im irdischen wie im kosmischen Fall auf recht einfache Weise ermitteln, wie im einen Fall die Glasscheibe geriffelt und wie im anderen Fall die als Gravitationslinse wirkende Masse verteilt sein muss.

Da man im einen wie im anderen Fall die Lichtquelle nicht mehr unverzerrt sieht, kann man die Verzerrung nur dann rekonstruieren, wenn man entweder weiß oder plausibel annehmen kann, wie die Lichtquelle unverzerrt aussähe. In der Regel sind es die Bilder sehr weit entfernter Galaxien, anhand derer der Gravitationslinseneffekt nachgewiesen wird. Wenn diese fernen Galaxien alle kreisrund wären, könnte die Verzerrung leicht bestimmt werden. Sie würde Kreise zu Ellipsen verformen, an denen die Verzerrung durch den Unterschied zwischen ihren großen und ihren kleinen Halbachsen gemessen werden könnte. Einzeln für sich genommen, sind auch ferne Galaxien keineswegs rund, sondern in sich selbst bereits annähernd elliptisch. Die wesentliche Annahme, die in die Interpretation beobachteter Gravitationslinseneffekte eingeht, ist daher die, dass ausreichend viele Galaxien, wenn man sie überlagerte, ein annähernd rundes, mittleres Bild ergäben. Daher mittelt man den Grad der elliptischen Verformung über genügend viele ferne Galaxien und nimmt die Verzerrung, die nach der Mittelung noch übrig bleibt, als ein Maß für den Astigmatismus des Gravitationslinseneffekts.

Dabei hilft es, dass mit großen Teleskopen bei entsprechend langen Belichtungszeiten entfernte Galaxien in einer schier unglaublichen Zahl sichtbar werden. Auf der Fläche, die der Vollmond am Himmel überdeckt, stehen etwa 20 000 solcher Galaxien, deren Form noch genügend genau ausgemessen werden kann. Deshalb ist es möglich, Gravitationslinseneffekte räumlich aufgelöst zu messen, obwohl für diese Messung in der Regel über mindestens zehn Galaxienbilder gemittelt werden muss.

## Galaxien, Galaxienhaufen und noch größere Linsen

Die Fortschritte, die dabei während der letzten 15 Jahre erzielt wurden, sind ganz erstaunlich. Die starken Gravitationslinseneffekte in Galaxienhaufen sind dramatisch, aber selten und auf den innersten Kernbereich der Galaxienhaufen begrenzt. Wesentlich häufiger sind schwache Verzerrungen durch den Gravitationslinseneffekt, die weiter entfernt von den Zentren der Galaxienhaufen auftreten. Sie führen aber in der Regel nur zu Verzerrungen im Prozentbereich bis hin zu einigen zehn Prozent. Hypothetische kreisrunde Quellen würden dadurch zu Ellipsen verzerrt, deren kleine Halbachsen um einige Prozent bis etwa zehn Prozent kleiner als ihre großen Halbachsen wären. Es bedarf großer Anstrengungen und höchst empfindlicher Verfahren, um derart kleine Verzerrungen zuverlässig zu messen. Der Fortschritt auf dem Gebiet der Gravitationslinsenforschung wurde dadurch ermöglicht, dass immer größere astronomische Kameras mit immer fehlerfreieren Abbildungseigenschaften Bilder erzeugen, die mit kontinuierlich verfeinerten digitalen Bildanalyseverfahren bearbeitet werden. Diese Entwicklung setzt sich nach wie vor fort.

Als Beispiel für ein Projekt zur genauen Untersuchung von Galaxienhaufen sei das Clash-Programm genannt. Das Akronym Clash steht für „Cluster Lensing And Supernovae with Hubble“, also für Beobachtungen des Gravitationslinseneffekts in Galaxienhaufen und an Supernovae mit dem Hubble-Weltraumteleskop. Im Zuge dieses Projekts wurden 25 solche Galaxienhaufen mit äußerster Genauigkeit beobachtet, die bereits als starke Gravitationslinsen bekannt waren. Auf das Projekt wurden 524 Erdumläufe des Hubble-Weltraumteleskops verwendet, was mehr als einem Monat Beobachtungszeit mit demjenigen Teleskop entspricht, das von außerhalb der Erdatmosphäre die schärfsten derzeit möglichen optischen Bilder liefern

kann. Für den schwachen Gravitationslinseneffekt ist die Bildschärfe entscheidend, weil sie die Messung der Verzerrung schwacher Galaxienbilder erheblich erleichtert.

Ein wichtiges Ziel des Clash-Programms war es, anhand des schwachen und des starken Gravitationslinseneffekts die Verteilung dunkler Materie in den beobachteten Galaxienhaufen mit größtmöglicher Genauigkeit zu rekonstruieren. Dabei kamen auch Methoden zum Einsatz, die in Heidelberg entwickelt worden waren. Damit wurde es möglich, den radialen Verlauf der Dichte dunkler Materie mit vorher nie erreichter Präzision zu bestimmen. Die Verteilung dunkler Materie kann in diesen Galaxienhaufen regelrecht kartiert werden. Was auf einer topographischen Karte die Höhenlinien wären, sind in den Karten der Materieverteilung die Linien gleicher Materiedichte. Stellt man sich die Ansammlung dunkler Materie in einem Galaxienhaufen als Berg vor, erlaubt es der Gravitationslinseneffekt, die Ausdehnung und die Höhe solcher Gebirge aus dunkler Materie zu vermessen.

Das ist möglich, ohne zu wissen, worum es sich bei der dunklen Materie eigentlich handelt, denn der Gravitationslinseneffekt wird allein durch die Anwesenheit von Materie bestimmt, aber nicht dadurch, woraus diese Materie bestehen könnte. So finden wir uns in der Situation wieder, dass die Ausbreitung des Lichts durch die gekrümmte Raumzeit der allgemeinen Relativitätstheorie es uns ermöglicht, die Menge und die Verteilung einer Materieform zu bestimmen, die uns ansonsten gerade deswegen jede Auskunft verweigert, weil sie auf keinerlei direkte Weise mit Licht wechselwirkt.

Hinweise darauf, woraus die dunkle Materie bestehen könnte, ergeben sich aus dem Gravitationslinseneffekt nur indirekt und in einzelnen Fällen, aber dennoch auf spektakuläre Weise. In den wenigen derartigen Beispielen, die bisher beobachtet wurden, handelt es sich um Situationen nach kosmischen Kollisionen, bei denen zwei oder mehr Galaxienhaufen aufeinandertreffen.

Galaxienhaufen bestehen nicht nur aus dunkler Materie und einigen hundert Galaxien, die sich darin bewegen, sondern sie enthalten auch ein Gas, genauer ein Plasma, das so heiß ist, dass es energiearmes oder „weiches“ Röntgenlicht abstrahlt. Galaxienhaufen sind deswegen die hellsten Röntgenquellen am Himmel. Ihre Röntgenstrahlung durchdringt die Erdatmosphäre nicht und muss deswegen von Satelliten aus beobachtet werden. Solche Beobachtungen zeigen, dass sich dieses heiße Röntgen gas in Galaxienhaufen dort ansammelt, wo

sich auch die meiste dunkle Materie befindet. In ungestörten Galaxienhaufen gleichen sich die Verteilungen der dunklen Materie und des Röntgengases weitgehend.

Bei Galaxienhaufen, die miteinander kollidiert sind, beobachtet man stattdessen, dass das heiße Röntgen gas von der dunklen Materie getrennt wurde. Die Bilder zeigen, dass das Gas zwischen den Galaxienhaufen liegenbleibt, während sich die dunkle Materie davon entfernt. Die dunkle Materie verhält sich so, als könnten sich Ansammlungen aus dunkler Materie einfach gegenseitig durchdringen, ohne dass die Teilchen der dunklen Materie voneinander Notiz nähmen.

Das Gas dagegen verhält sich anders. Es besteht aus gewöhnlichen Atomen bzw. Atomkernen und Elektronen, die wegen der hohen Temperatur des Gases voneinander getrennt sind. Die Gasteilchen wechselwirken also miteinander. Ihre Ladungen üben aufeinander elektromagnetische Kräfte aus, die im Vergleich zur Gravitationskraft geradezu ungeheuer stark sind. Während einer Kollision zweier Galaxienhaufen wirken die beiden Wolken heißen Gases wie zähe Medien aufeinander, die sich nicht ohne Weiteres durchdringen können. Sie bremsen sich gegenseitig wie durch Reibung ab und bleiben daher etwa dort liegen, wo die Galaxienhaufen aufeinander trafen. Die beiden Wolken aus dunkler Materie dagegen durchdringen sich allem Anschein nach so, als gäbe es überhaupt keine direkte Wechselwirkung zwischen den hypothetischen Teilchen der dunklen Materie. Aus dem messbaren Unterschied zwischen dem Verhalten des Röntgengases und demjenigen der dunklen Materie kann abgeschätzt werden, wie stark die Teilchen der dunklen Materie höchstens miteinander wechselwirken können. Die Beobachtungen erlauben den Schluss, dass schon ein einziger Stoß zwischen zwei dunklen Materieteilchen während einer Milliarde Jahren zu viel wäre, um die beiden Wolken aus dunkler Materie sich so ungehindert durchdringen zu lassen, wie sie es offenbar tun. Solche kosmologischen Informationen, aus dem Vergleich der Röntgenemission mit dem Gravitationslinseneffekt gewonnen, sind für die Teilchenphysik höchst wertvoll.

Selbst zur Analyse noch größerer kosmischer Objekte als der Galaxienhaufen lässt sich der Gravitationslinseneffekt einsetzen. Das gesamte Universum ist von Strukturen durchsetzt, die kurz nach seiner Entstehung angelegt und seitdem immer ausgeprägter wurden. Lichtstrahlen, die wir aus dem fernen Universum empfangen, können daher letztlich nicht gerade sein: Sie werden ständig in verschiedene Richtungen abgelenkt, während sie auf dem Weg zu uns

die wachsenden kosmischen Strukturen passieren. Dieser Effekt ist schwach, denn er verzerrt die Bilder ferner Galaxien um wenige Prozent. Dennoch ist er messbar. Das hat für uns zweierlei Auswirkungen: Zum einen sehen wir das ferne Universum nicht so, wie es ist, sondern wie es uns aufgrund des Gravitationslinseneffekts erscheint. Zum zweiten lässt es sich wie schon bei den Galaxienhaufen anhand der messbaren Verzerrungen ermitteln, wie die dunkle Materie im Universum verteilt ist. Auch hier ist es möglich, die Landschaft der dunklen Materie zu kartieren.

Die fernste Lichtquelle im Universum ist der kosmische Mikrowellenhintergrund. Wie eingangs erwähnt, handelt es sich dabei um die weit abgekühlte Wärmestrahlung aus der Frühzeit des Universums, als es noch keine 400.000 Jahre alt war. Das Licht, das uns von dort erreicht, hat beinahe das gesamte sichtbare Universum durchquert, bevor es bei uns eintraf. Dabei kam es gewissermaßen an der Gesamtheit der Strukturen vorbei, die unser Universum füllen und wurde durch deren Gravitationslinseneffekt abgelenkt. Auch den kosmischen Mikrowellenhintergrund sehen wir also nicht so, wie er eigentlich ist, sondern wie er uns durch den Gravitationslinseneffekt des Universums abgebildet wird. Die Verzerrungen, die dadurch ausgelöst werden, sind sehr klein. Es gehört zu den faszinierendsten kosmologischen Ergebnissen der letzten Jahre, dass es möglich wurde, den Gravitationslinseneffekt des gesamten überschaubaren Universums auf den kosmischen Mikrowellenhintergrund zu messen und daraus gewissermaßen den optischen Brechungsindex des Universums zu bestimmen.

## Schluss

Fast alle Informationen, die wir aus dem Universum erhalten, erreichen uns in Form von Licht. Manche für uns sichtbare Lichtquellen sind ungeheuer weit entfernt. Auf dem Weg zu uns durchleuchtet ihr Licht die Strukturen, die sich vorwiegend aus dunkler Materie früh im Universum gebildet haben und die seitdem unter ihrer eigenen Schwerkraft wachsen. Dabei wird das Licht abgelenkt, als würde es unregelmäßig strukturierte Glasplatten durchlaufen, und diese Ablenkung führt dazu, dass Gravitationslinsen als abbildende optische Systeme unbrauchbar sind: Ihr Astigmatismus lässt uns weit entfernte Quellen verzerrt erscheinen. Gerade dieser Astigmatismus

ist es aber, der den Gravitationslinseneffekt für die Astrophysik so wertvoll werden lässt, denn durch ihn verrät die dunkle Materie ihre Anwesenheit. Durch technische, rechnerische und wissenschaftliche Fortschritte wurde es vor etwa 15 Jahren möglich, nicht nur die Materieverteilung in Galaxienhaufen zu kartieren, sondern auch in erheblich größeren Strukturen. Die Natur der dunklen Materie konnte dadurch noch nicht aufgeklärt werden, wohl aber ihre Menge und ihre Verteilung. Nur in Einzelfällen war es möglich, die Wechselwirkung der hypothetischen Teilchen der dunklen Materie miteinander einzuschränken. So liefert uns der Einfluss der Raumzeit-Krümmung auf die Ausbreitung von Lichtstrahlen Informationen über die dunkle Materie, obwohl sie gar nicht direkt mit Licht wechselwirken kann.