

## Kartierung der dunklen Seite des Kosmos

Ein internationales Forscherteam hat die bisher größte dreidimensionale Karte der kosmischen Verteilung Dunkler Materie erstellt. Da Dunkle Materie bisher direkter Beobachtung nicht zugänglich ist, nutzen sie dazu den sogenannten schwachen Gravitationslinseneffekt.

Von Georg Wolschin

Dreidimensionale Karten unsichtbarer Objekte zu zeichnen ist ein schwieriges Unternehmen, dem sich Astronomen seit einigen Jahren mit wachsender Energie widmen. Ziel ist die Kartierung der Dunklen Materie, die nach heutigem Kenntnisstand mehr als 80 Prozent der Masse des Universums ausmacht. Möglicherweise besteht sie aus *Wimps* – schwach wechselwirkenden massereichen Teilchen (weakly interacting massive particles), beispielsweise Neutralinos. Da sie kein Licht oder elektromagnetische Strahlung anderer Wellenlängen aussendet, ist sie direkter astronomischer Beobachtung nicht zugänglich, kann aber sowohl mit gewöhnlicher “baryonischer” Materie als auch mit Licht durch Gravitation wechselwirken. Der Name “Baryonen” bezieht sich auf Protonen und Neutronen, die Konstituenten normaler Materie.

Man nutzt dazu den schwachen Gravitationslinseneffekt: Das von weit entfernten Galaxien ausgesandte Licht wird auf dem Weg zur Erde durch das Gravitationspotenzial der Dunklen und der baryonischen Materie abgelenkt, so dass die Gestalt der Hintergrundgalaxien verzerrt wird. Dieser Effekt ist in der Regel sehr schwach – die Exzentrizität einer Galaxie wird typischerweise nur um ein Prozent geändert – lässt sich aber dennoch messen. Man muss dabei sehr viele Galaxien messen, um über die intrinsische Elliptizität mitteln zu können. Aus den Ergebnissen schliesst man auf die ablenkende Masse, und bei bekannter Verteilung der sichtbaren Materie lässt sich die Dunkle Materie kartografieren.

Die jetzt von einem internationalen Wissenschaftlerteam aus 20 Mitgliedern von 11 Instituten – darunter dem Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching – erstellte Karte Dunkler und baryonischer Materie umfasst 500 000 Galaxien und ist die bisher größte, die Astrophysiker mit dieser Methode erstellt haben (Richard Massey et al., Nature Band 445, 18. Januar 2007).

Sie verwenden dabei unter anderem Daten, die von einer Himmelsdurchmusterung mit dem Weltraumteleskop Hubble stammen. Im Rahmen des Cosmic Evolution Survey COSMOS wurde dort bei 575 leicht überlappenden Einstellungen der ACS-Kamera (“Advanced Camera for Surveys”) ein Himmelsausschnitt mit einer Kantenlänge von 1,64 Grad untersucht. Die Fläche ist etwa achtmal so groß wie der Vollmond, sie stellt

den größten bisher auf diese Weise vermessenen Ausschnitt des Alls dar. Die Gestalt der Galaxien wurde mit sehr hoher Genauigkeit gemessen, und aus der beobachteten Verzerrung wird auf die Massenverteilung längs der Sichtlinie zur Erde geschlossen.

Dabei mussten die Wissenschaftler einige zunächst unvorhergesehene Probleme lösen. So kühlt sich das Hubble-Teleskop ab, wenn es in den Erdschatten eintritt, und heizt sich wieder auf, wenn es ihn verlässt, es "atmet" gewissermaßen während es die Erde umkreist. Dadurch ändert sich die Ausdehnung des etwa 13 Meter langen Instruments zwar nur um einige Mikrometer, aber dennoch werden durch diesen Effekt die Abbildungen ferner Galaxien um einen Betrag geändert, der etwa dem Einfluss der Dunklen Materie gleichkommt. Es gelang jedoch, eine entsprechende Korrektur zu berücksichtigen, indem man an Hand von Sternen in der Milchstraße, deren genaue Gestalt bekannt ist, die Änderung der Bilder ferner Galaxien beim Umlauf des Teleskops eichen konnte.

Von entscheidender Bedeutung für die Auswertung der Hubble-Aufnahmen nach Berücksichtigung aller Korrekturen ist die dreidimensionale Verteilung der Materie in die Tiefe des Raumes hinein, wenn man Schlüsse über die Dunkle Materie-Verteilung in verschiedenen Entwicklungsstadien des Universums ziehen will. Entsprechend ihrer Entfernung werden die Hintergrund-Galaxien deshalb in unterschiedliche Rotverschiebungsbereiche zwischen 0 und 1 eingeteilt – man macht auf diese Weise "tomografische" Schnitte durch verschiedene Entwicklungsstadien des Universums, Bilder 1 und 2. Das Alter der jeweiligen Schicht bestimmt man aus der Rotverschiebung der beobachteten Galaxien. Der gesamte untersuchte Bereich entspricht etwa 7 Milliarden Jahren, im Vergleich zu einem Weltalter von 13,7 Milliarden Jahren.

Mit einer solchen dreidimensionalen Analyse lassen sich die Massen und Positionen der beugenden Galaxien und Cluster unabhängig davon bestimmen, wie groß ihr Anteil an baryonischer Materie ist. Die Gravitationslinsen-Methode ist dabei ungewöhnlich empfindlich auf die Entfernung zur beugenden Massenansammlung.

Wie eine optische Glaslinse ist eine Gravitationslinse am wirksamsten, wenn sie auf halbem Weg zwischen Quelle und Beobachter sitzt. Im Gegensatz dazu fällt die Leuchtkraft optisch sichtbarer Quellen umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstandes. Um die Verteilung baryonischer Materie mit der Dunkler Materie zu vergleichen, berücksichtigt man diesen Effekt, indem die Vordergrundgalaxien als Funktion ihrer Rotverschiebung (kosmologischen Entfernung) entsprechend gewichtet werden. Die Anzahldichte dieser Galaxien und ihre Masse bilden zwei aufeinander abgestimmte Signaturen für die Baryonen. Die baryonische Masse der sichtbaren Galaxien lässt sich dabei aus deren Farbe und Entfernung bestimmen.

Ausserdem wurden Daten verwendet, die der ESA-Röntgensatellit XMM-Newton bei einer Durchmusterung des COSMOS-Feldes durch Wissenschaftler vom Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik um Günther Hasinger - insbesondere Alexis Finoguenov - aufgenommen hatten. Mit diesem Röntgenteleskop misst man die Strahlung, die von heissem Gas ausgeht – und damit baryonische Materie, die sich

besonders an den Orten konzentriert, wo auch sehr viel Dunkle Materie vorhanden ist. Die Messungen bestätigten unabhängig die Verteilung der baryonischen Materie, wie sie aus den Gravitationslinsen-Daten extrahiert wurde, und ermöglichten es so, die Methode zu eichen. Ausserdem wurden Daten vom japanischen Subaru-Teleskop, den Teleskopen der Europäischen Südsternwarte ESO in Chile, des Kitt Peak-Observatoriums in Amerika und noch einigen anderen Teleskopen verwendet, um die Verteilung der baryonischen Materie im COSMOS-Feld möglichst genau zu ermitteln. Die dabei photometrisch bestimmten Rotverschiebungen der Galaxien wurden anhand eines Vergleiches mit spektroskopisch ermittelten Rotverschiebungen aus der zCOSMOS-Durchmusterung der ESO validiert.

Die auf diese Weise erhaltene Karte der Dunklen Materie in diesem Ausschnitt des Universums ist trotz des großen Aufwandes noch ziemlich rudimentär. Das gilt insbesondere für die erwarteten Anzeichen großskaliger "Filamente", wie man sie in den Simulationsrechnungen zum Aufbau großer Strukturen im Universum findet. Man sieht allerdings an manchen Stellen dichte Zusammenballungen Dunkler Materie, und an diesen Stellen finden sich auch Galaxien und Gas aus normaler Materie – was darauf hin deutet, dass die baryonische Materie der Gravitationsanziehung der Dunklen Materie folgt und dort Sterne und sichtbare Galaxien bildet.

Diese Beobachtung stützt die Theorie, dass Filamente Dunkler Materie das Skelett des Universums darstellen, um das sich baryonische Materie ansammelt. Die Baryonen wurden anfangs durch elektromagnetische Abstoßung und durch Wechselwirkung mit Strahlung von der Klumpenbildung abgehalten, sie blieben zunächst in einer heissen, gasförmigen Phase. Mit der Expansion und Abkühlung des Universums entstanden dann Sterne und Galaxien einige hundert Millionen Jahre nach dem Urknall bevorzugt in den sogenannten Halos aus Dunkler Materie, die sich gleich nach dem Urknall gebildet hatten.

Detaillierte Simulationsrechnungen dieser Prozesse hat beispielsweise eine Theoretikergruppe um Simon White am Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching durchgeführt. Sie zeigen deutlich, dass bei der Galaxienbildung aus kleineren Strukturen größere entstehen.

Insgesamt bestätigen die jetzt vorliegenden Messungen eine Entwicklung von einer vergleichsweise homogenen Verteilung Dunkler Materie im früheren Universum (große Rotverschiebungen) hin zu einer klumpigeren Verteilung im jetzigen Universum. Das entspricht der theoretischen Vorstellung, dass sich die anfangs gleichmäßig verteilte Dunkle Materie im Laufe der Entwicklung des Universums stellenweise verdichtet hat. Man hofft, dass zukünftige Studien mit höherer Auflösung in größeren Himmelsausschnitten es ermöglichen, diese noch recht grobe Feststellung deutlich zu verfeinern. Möglicherweise wird man auch mit sehr großen Radioteleskopen, wie sie derzeit im Bau sind (beispielsweise dem Low Frequency Array LOFAR in den Niederlanden) hochaufgelöste Abbildungen der kosmischen Verteilung Dunkler Materie erstellen können.

Die jetzige Karte birgt auch einige noch unerklärte Rätsel. So gibt es eine Reihe von Gebieten mit Klumpen Dunkler Materie, in denen sich keine baryonische Materie findet – und umgekehrt. Massey sagt dazu: "Auf großen Skalen ergibt sich das erwartete Bild, aber man findet auf kleineren Skalen einige Diskrepanzen." Noch scheint es möglich, dass es sich dabei um Messfehler handelt, aber wenn das nicht der Fall sein sollte, wäre die Vorstellung nicht richtig, dass sich Strukturen aus baryonischer Materie nur um das "Gerüst" aus Dunkler Materie bilden.

Bisher waren mit der Gravitationslinsen-Methode erstellte Karten Dunkler Materie auf einzelne Galaxien oder Galaxiencluster beschränkt. Ein wichtiges Beispiel ist die – ebenfalls dreidimensionale – Karte aus der Combo-17 Durchmusterung im Jahr 2003, bei der eine englisch-deutsche Astronomengruppe um Klaus Meisenheimer und A. N. Taylor den Supercluster A901/2 bei einer Rotverschiebung von  $z=0.16$  untersuchte und erstmals das dreidimensionale Gravitationspotential in einem Ausschnitt des Weltalls mit Hilfe des Gravitationslinseneffektes (Bild 3) - kombiniert mit photometrischen Rotverschiebungsmessungen - bestimmen konnte. Allerdings war der Raumausschnitt hier wesentlich kleiner.

Die Verteilung von Dunkler und baryonischer Materie in einem Galaxiencluster – oder genauer, in zwei miteinander verschmelzenden Clustern – wurde 2006 anhand des sogenannten "Bullet Clusters" bei einer Rotverschiebung von  $z=0.296$  untersucht. Als Folge der Kollision zweier Galaxiencluster sind hier die stellare Komponente, und die Plasmakomponente, die Röntgenstrahlung aussendet, voneinander getrennt (Bild 4).

Mit terrestrischen Aufnahmen und Bildern vom Hubble-Weltraumteleskop untersuchte eine Gruppe um Douglas Clowe vom Steward Observatorium der Universität von Arizona in Tucson (Astrophysical Journal Band 648, L109 (2006)) das Gravitationspotential der verschmelzenden Cluster auf der Basis des schwachen Gravitationslinseneffektes. Die Verzerrung der Bilder von zahlreichen Hintergrundgalaxien durch das Gravitationspotential des Clusters wird auch hier benutzt, um das Potential zu bestimmen.

Die Positionen der heißen Gaswolken wurden mit dem Chandra-Röntgenteleskop der Nasa bestimmt. Die Karte zeigt sehr deutlich, dass das Gravitationspotential nicht hauptsächlich im Bereich der Plasmaverteilung verläuft, wo der wesentliche Teil der baryonischen Masse zu finden ist. Die Maxima von Gesamt-Massenverteilung – die durch Dunkle Materie dominiert wird – und leuchtender Masse sind mit hoher statistischer Signifikanz ( $8\sigma$ ) gegeneinander versetzt. Offenbar sind die Plasmawolken beim gegenseitigen Durchdringen der beiden Galaxien durch elektromagnetische Wechselwirkung abgebremst worden, während es bei der Dunklen Materie keine solche Abbremsung durch Wechselwirkung gab. Wie die Bugstoßwelle im rechten Teil von Bild 4 zeigt, hat der kleinere Cluster offenbar von links nach rechts den größeren durchdrungen; er bewegt sich derzeit mit etwa 4700 Kilometern pro Sekunde vom Hauptcluster weg. Die Zentren der Cluster haben sich vor etwa 100 000 Jahren durchdrungen.

Obwohl dieses Ergebnis noch keinen direkten Nachweis von Dunkler Materie darstellt, ist es doch ein sehr starker Hinweis auf ihre Existenz. Das gilt vor allem deshalb, weil die räumliche Versetzung von leuchtender Masse und Gravitationspotential hier so groß ist, dass sie sich nicht mehr durch eine alternative "Mond" (Modified Newtonian Dynamics)-Theorie erklären lässt, in der die Newtonsche Gravitationskraft geringfügig von der üblichen  $1/r^2$  – Abhängigkeit abweicht (siehe früheren Artikel von M. Milgrom ...in Spektrum der Wissenschaft). Seit der Schweizer Astronom Fritz Zwicky 1933 zeigen konnte, dass die Gravitationspotentiale von Galaxienclustern zu tief sind, um durch leuchtende Materie und das Newtonsche  $1/r^2$ -Verhalten der Kraft erklärbar zu sein, waren diese beiden Möglichkeiten in unterschiedlichen astrophysikalischen Zusammenhängen immer wieder diskutiert worden.

Von besonderem Interesse ist – über den bloßen Nachweis Dunkler Materie hinaus - das Zusammenwirken der Dunklen Materie mit der sogenannten Dunklen Energie, die für die beschleunigte Expansion des Universums verantwortlich ist (siehe "die unsichtbare Hand im Universum" von Christopher Conselice, Spektrum der Wissenschaft April 2007). Die Dunkle Energie beeinflusst offenbar auch die Wechselwirkung zwischen Galaxien. An zahlreichen Forschungsinstituten auf der ganzen Welt untersucht man derzeit diese Zusammenhänge, in Deutschland insbesondere im Rahmen des 2006 gegründeten transregionalen Sonderforschungsbereich "Das Dunkle Universum" an den Universitäten Bonn, LMU München und Heidelberg.

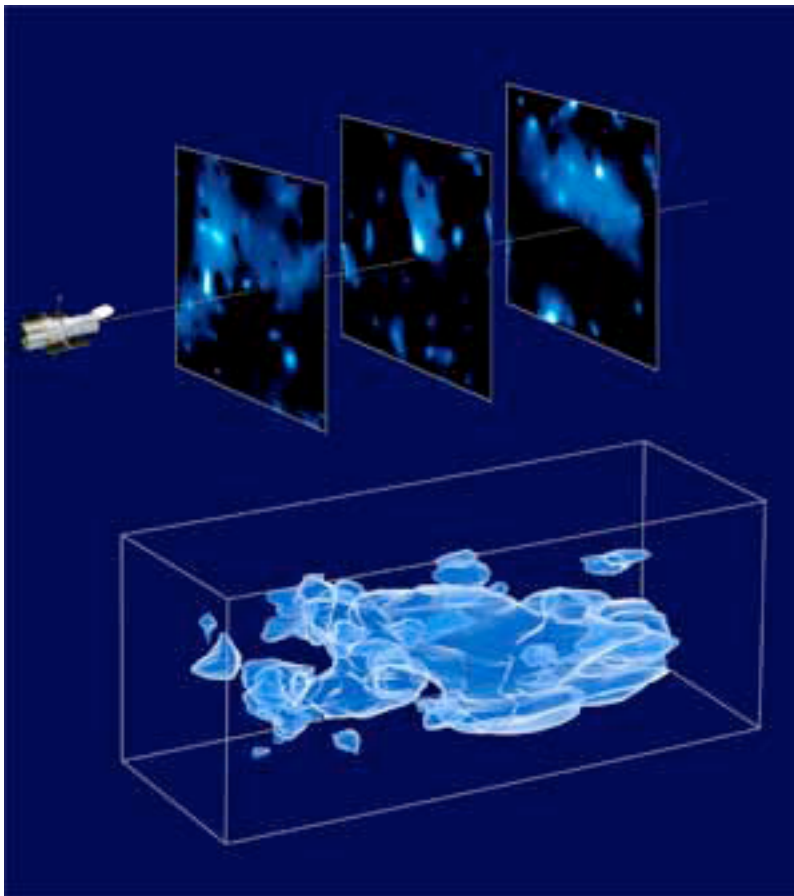


Bild 1: Verteilung der Dunklen Materie in einem Ausschnitt des Universums mit 1,6 Grad Kantenlänge vom Hubble-Teleskop aus gesehen. Die Schnitte entsprechen Rotverschiebungen von 0,3, 0,5 und 0,7. In Richtung zu den entfernteren Strukturen – früheren Entwicklungsstadien des Universums – wird die Klumpenbildung der Dunklen Materie immer ausgeprägter. ((Quelle: Nature 445 18.Jan. 2007/NASA,ESA; und MPG-Pressinformation SP1/2007(1) vom 8.1.2007)).

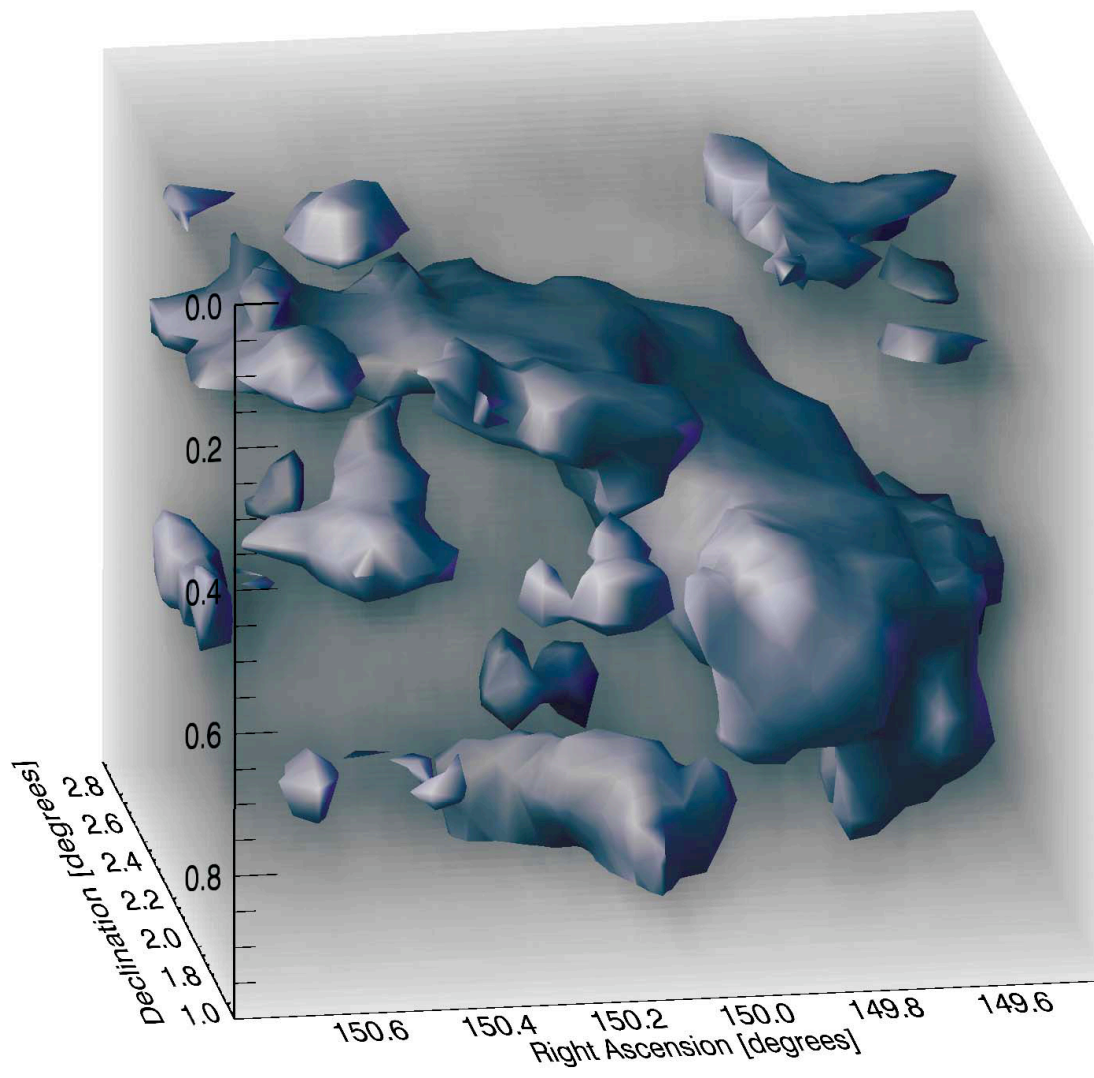


Bild 2: Dreidimensionale Rekonstruktion der Verteilung Dunkler Materie in einem Ausschnitt des Universums bis zu einer Rotverschiebung von  $z=1$ . Die Entfernung von der Erde wächst von oben nach unten. ((Quelle: Nature 445 18.Jan. 2007/NASA,ESA))

## SUPPLEMENTARY INFORMATION

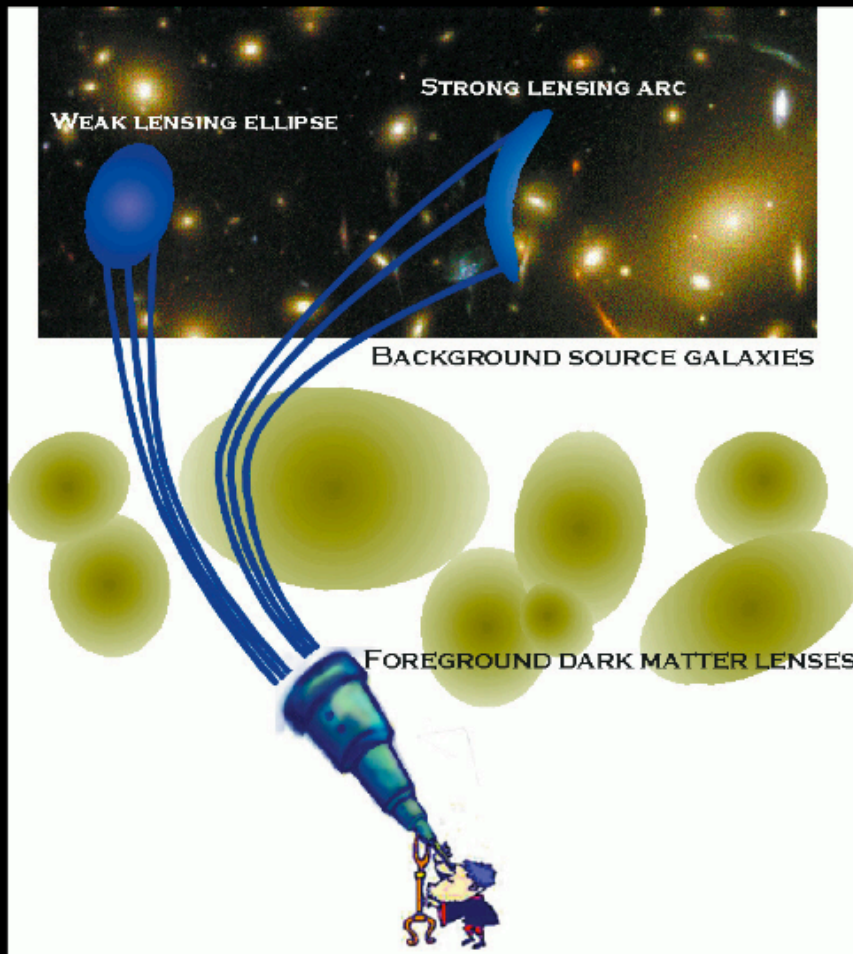


Figure 51 | Cartoon illustrating the process of gravitational lensing. Gravitational lensing by foreground mass distorts the shapes of distant galaxies, regardless of the nature of that mass. It is thus sensitive to the dominant contribution of dark matter. Measuring these distortions is like the intervening distribution of dark matter is like studying text lines in text through a magnifying glass to study the properties of the glass lens. Along lines of sight including the most dense mass concentrations, strong gravitational lensing distorts individual background galaxy shapes into multiply imaged giant arcs. Along a more typical line of sight, the smallest weak gravitational

lensing induces a  $\sim 1\%$  change in ellipticity. In this regime, the lensing distortion is smaller than the typical variation between galaxy morphologies, and it cannot be measured from a single galaxy because its intrinsic shape is not observable. However, the signal can still be detected statistically. The intrinsic shapes of adjacent galaxies are uncorrelated in the absence of lensing; they should have no preferred orientation. On the other hand, when adjacent galaxies have been lensed by approximately the same intervening mass, the weak lensing signal can be recovered from the degree of correlation between their shapes.

Bild 3: Schematische Darstellung der Wirkung einer Gravitationslinse auf die Gestalt einer Galaxie. ((Quelle: Nature 445 18.Jan. 2007)).



Bild 4: Abbildung des “Bullet-Clusters” mit einer Rotverschiebung von  $z=0,296$ . Violett dargestellt (in Falschfarben) ist das in Röntgenaufnahmen erkennbare heiße Gas, das den größten Anteil der baryonischen Materie in den zwei verschmelzenden Clustern enthält. Die gesamte Masse, wie sie aus Gravitationslinsen-Messungen bestimmt wird, ist in den blauen Bereichen konzentriert. Da sie deutlich von den Gebieten baryonischer Materie verschieden sind, müssen sie im Wesentlichen aus Dunkler Materie bestehen. ((Quelle: Chandra Röntgenteleskop/NASA/ESO/ D. Clowe et al.))