

# Verklumpter als gedacht

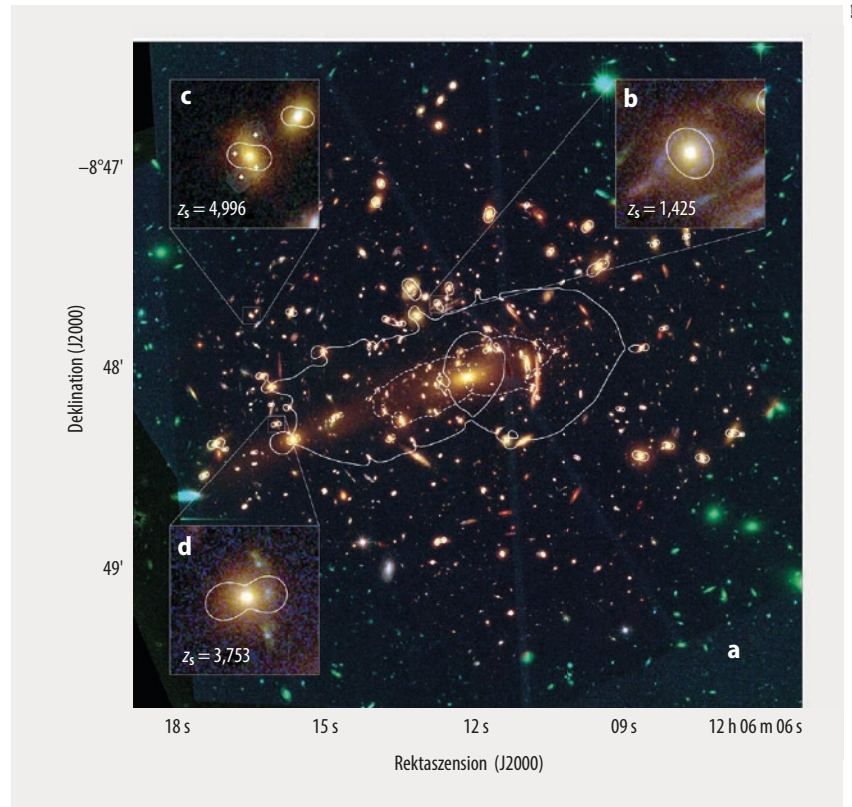
Die Verteilung der Dunklen Materie aus Beobachtungsdaten weist deutlich mehr Klumpen auf, als es aktuelle Simulationen von Galaxienhaufen vorhersagen.

Matthias Bartelmann

Ohne Dunkle Materie kommt das kosmologische Standardmodell nicht aus. Ohne die bislang unentdeckten Teilchen müsste beispielsweise die Amplitude der Temperaturschwankungen im kosmischen Mikrowellenhintergrund etwa hundertmal größer sein als beobachtet. Obwohl unklar ist, woraus Dunkle Materie besteht, lässt sich ihre Verteilung beobachten. Am besten eignet sich dafür der Gravitationslinseneffekt [1], also die Ablenkung von Licht aufgrund der Raumkrümmung, die von Massen- und Energieverteilungen herrührt.

Der Gravitationslinseneffekt ist stark astigmatisch und erzeugt daher verzerrte Bilder von Quellen, die im Hintergrund derjenigen Massenverteilungen stehen, die als Gravitationslinsen wirken. Kommen diese Quellen der optischen Achse nahe genug, die vom Beobachter durch das Zentrum der Gravitationslinse führt, und besitzt die Gravitationslinse in ihrem Zentrum eine ausreichend hohe Massendichte, kann der Gravitationslinseneffekt einzelne Quellen mehrfach abbilden. Die Anzahl der Bilder, die eine starke Gravitationslinse von Quellen bei fester Entfernung erzeugen kann, ändert sich an kritischen Kurven. Projiziert man diese mithilfe der Gravitationslinsenabbildung in die Quellenebene, entstehen sogenannte Kaustiken der Gravitationslinse. Weit entfernt davon hat jede Quelle nur ein Bild. Überquert die Quelle eine Kaustik nach innen, steigt die Anzahl der Bilder um zwei. Die Mehrfachbilder liegen beiderseits der kritischen Kurve.

Zu den spektakulärsten starken Gravitationslinsen gehören manche Galaxienhaufen. Zahlreiche Beobachtungen zeigen, dass die einigen hundert bis tausend Galaxien solcher Haufen nur einen kleinen Teil zu ihrer Masse beitragen, die von Dunkler Materie dominiert wird. In einigen Ga-



Das Farbkompositbild der zentralen Region des Galaxienhaufens MACSJ1206 kombiniert Beobachtungen des Hubble-Weltraumteleskops (HST) für verschiedene Frequenzen. Die kritischen Kurven des Haufens sind für Quellen-Rotverschiebungen von 1 bzw. 7 gezeigt (a, gestrichelt bzw. durchgezogen). Die drei Insets zoomen auf GGSL-Ereignisse, die Quellen bei verschiedenen Rotverschiebungen  $z_s$  einschließen und zeigen deren kritische Kurven. In (b) und (d) sind die durch den Linseneffekt abgebildeten Quellen im Hintergrund blauer als die als Linsen wirkenden Galaxien im Vordergrund. In (c) ist die abgebildete Quelle im HST-Bild nicht sichtbar, zeigt sich aber mit dem MUSE-Spektrographen am VLTI. Die weißen Kreuze geben die Positionen von vier Mehrfachbildern der Quelle an.

Galaxienhaufen fand das Hubble-Weltraumteleskop hunderte von Mehrfachbildern entfernter Quellen, von denen einige stark zu Arcs verzerrt werden. Die Arcs und Mehrfachbilder erlauben es, die Massenverteilung in Galaxienhaufen genau zu rekonstruieren [2 – 4].

In diesen Rekonstruktionen ist die Dunkle Materie in Galaxienhaufen nicht gleichmäßig verteilt, sondern klumpt. Besonders eindrucksvoll zeigt sich dies nahe der kritischen Kurven, wo der Gravitationslinseneffekt wie ein starkes Mikroskop wirkt. Befindet

sich in der Nähe der kritischen Kurve einer vorher glatten Massenverteilung ein weiterer kleiner Materieklumpen, verstärkt sich dessen Gravitationslinseneffekt erheblich. Er beult dann die vorher glatte kritische Kurve lokal nach außen aus [5, 6].

Massimo Meneghetti von der Universität Bologna hat nun zusammen mit einer italienisch-US-amerikanischen Arbeitsgruppe diesen Effekt verwendet und untersucht, wie stark die Dunkle Materie in elf Galaxienhaufen klumpt, die das Hubble-Weltraumteleskop sehr genau beobachtet

hat [7]. Diese Galaxienhaufen sind starke Gravitationslinsen, deren Massenverteilungen sich anhand zahlreicher Mehrfachbilder genau rekonstruieren lassen. Die kritischen Kurven der rekonstruierten Massenverteilungen weisen zahlreiche lokale Ausbuchtungen auf und belegen so, wie stark die Dunkle Materie klumpt. Das Team um Meneghetti quantifiziert die Stärke dieser Verklumpung anhand des Wertes, um den sich die von einer kritischen Kurve eingeschlossene Fläche durch die lokalen Ausbuchtungen vergrößert. Daraus leitet sich die Wahrscheinlichkeit ab, mit der die Klumpen in Galaxienhaufen selbst wieder als starke Gravitationslinsen wirken (Galaxy-Galaxy Strong Lensing, GGSL).

Zum Vergleich analysiert das Forschungsteam detailliert simulierte Galaxienhaufen auf dieselbe Weise. Dabei entstehen realistische synthetische Bilder, aus denen sich mit derselben Rekonstruktionsmethode für die simulierten Galaxienhaufen die GGSL-Wahrscheinlichkeit gewinnen lässt (Abb. 1). Der Vergleich verblüfft: Die GGSL-Wahrscheinlichkeit in den simulierten Galaxienhaufen fällt um mehr als eine Größenordnung hinter den Wert der beobachteten Galaxienhaufen zurück. In den realen Objekten ist die Dunkle Materie also erheblich stärker verklumpt als in den simulierten. Das überrascht in mindestens zweierlei Hinsicht.

Erstens erfolgten die Simulationen unter der Annahme kalter Dunkler Materie, die von allen hypothetischen Formen Dunkler Materie am stärksten verklumpen sollte. Zwar berücksichtigten die Simulationen, dass freigesetzte Energie in den Galaxienhaufen dazu führen kann, dass sich Klumpen ausdehnen und damit die Verklumpung verringert. Ohne diesen Prozess ändern sich die starken Gravitationslinseneffekte aber kaum.

Zweitens gibt es seit Langem Hinweise darauf, dass Dunkle Materie in Galaxien weit weniger verklumpt, als es Simulationen vorhersagen [8]. So enthalten simulierte Galaxien deutlich mehr Satellitengalaxien, als in beobachteten Galaxien auftreten. Das gilt auch für die Milchstraße mit den beiden Magellanschen Wolken

als bekanntesten Satelliten. Aufgrund der Simulationen sollte sie erheblich mehr haben. Zudem steigt die Materiedichte in beobachteten Galaxien langsamer zum Zentrum hin an als in simulierten Galaxien. Die Frage, warum beobachtete Galaxien weniger strukturiert und weniger kompakt sind als simulierte, ist Gegenstand lebhafter Diskussionen. Die genannte Energiefreisetzung scheint nicht auszureichen, sodass auch warme Dunkle Materie infrage kommen könnte. Dagegen zeigen die aktuellen Ergebnisse, dass Galaxienhaufen nicht nur erheblich stärker geklumpt sind, als selbst mit kalter Dunkler Materie zu erwarten wäre, sondern dass auch die Klumpen bei gleicher Masse kompakter sind als in den Simulationen.

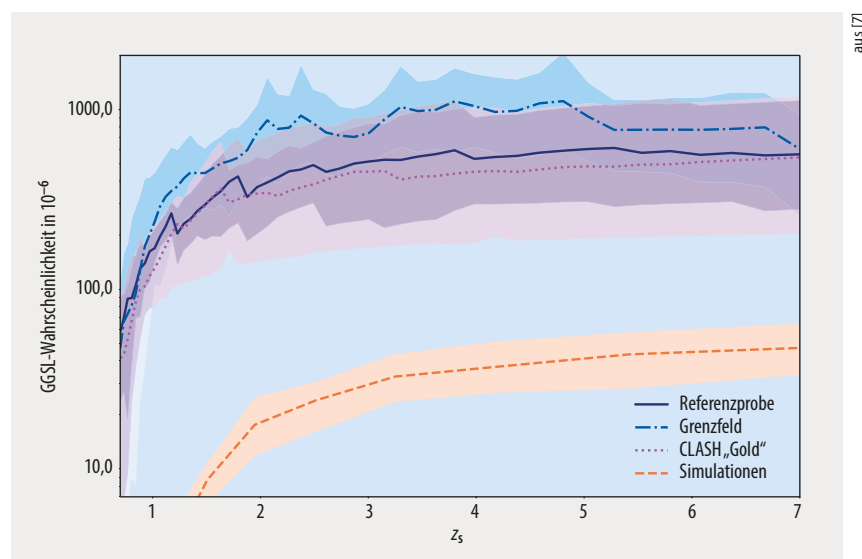
Diese neuen Befunde sind wichtig, weil Galaxienhaufen hinsichtlich ihrer inneren Verklumpung weit oberhalb der oberen Schranke liegen, die durch kalte Dunkle Materie gesetzt ist. Außerdem stellen sie das Gegenteil dessen fest, was seit Jahrzehnten in Galaxien beobachtbar ist. Drei mögliche Auswege scheint es zu geben: Verursachen numerische Artefakte das überraschende Ergebnis? In dem Fall sollten diese Artefakte in gleicher Weise auch Simulationen von Galaxien betreffen. Kann Dunkle Materie noch stärker klumpen, als es im Modell der kalten Dunklen Materie möglich ist? Daraus könnten äußerst

interessante Aussagen über mögliche Kandidaten Dunkler Materie folgen. Oder wechselwirkt gewöhnliche Materie, die durch Abstrahlung Energie verlieren und kondensieren kann, mit der Dunklen Materie anders und stärker als angenommen? Das Ergebnis von Massimo Meneghetti und seinem Team dürfte weitreichende Auswirkungen auf diese Diskussion haben.

- [1] P. Schneider, Linsen im Kosmos, Physik Journal, Juni 2015, S. 45
- [2] E. Jullo et al., NJP 9, 120447 (2007)
- [3] M. Meneghetti et al., MNRAS 472, 3177 (2017)
- [4] A. Acebrón et al., MNRAS 470, 1809 (2017)
- [5] D. Coe et al., ApJ 723, 1678 (2010)
- [6] C. Grillo et al., ApJ 800, 38 (2015)
- [7] M. Meneghetti et al., Science 369, 1347 (2020)
- [8] J. Bullock und M. Boylan-Kolchin, ARA&A 55, 343 (2017)

## Der Autor

**Prof. Dr. Matthias Bartelmann**, Institut für Theoretische Physik, Universität Heidelberg, Philosophenweg 16, 69120 Heidelberg



**Abb. 1** Die GGSL-Wahrscheinlichkeit ist als Funktion der Quellen-Rotverschiebung  $z_s$  für verschiedene Stichproben gezeigt. Die farbigen Bänder gehören als 99,9 %-Konfidenzintervalle zu jedem der vier Datensätze. Beobachtung und Simulation unterscheiden sich um etwa eine Größenordnung.