

## Die dunkle Seite des Universums

Beobachtungen von über 70 000 weit entfernten Galaxien erfordern keine Modifikationen von Einsteins Gravitationstheorie.

Dr. Martin Kilbinger und Prof. Dr. Jochen Weller, Exzellenzcluster Universe, Boltzmannstraße 2, 85748 Garching bei München, und Universitätssternwarte München, Ludwig-Maximilians-Universität, Scheinerstraße 1, 81679 München

Beobachtungen von Supernovae haben Mitte der 1990er-Jahre gezeigt, dass sich das Universum beschleunigt ausdehnt [1, 2]. Seither versuchen Kosmologen, der Ursache dieser Ausdehnung auf die Spur zu kommen. Die einfachste Erklärung besteht darin, dem Vakuum im Universum eine Energie zuzuschreiben, die sich in den Einsteinschen Feldgleichungen als kosmologische Konstante äußert. Eine Verallgemeinerung dieser Idee führt zur Dunklen Energie als ein alles durchdringendes „Gas“ (z. B. die Quintessenz [3, 4]), dessen Teilchen nur eine Masse im sub-eV-Bereich haben können.

Alternativ lässt sich die beobachtete beschleunigte Ausdehnung auch dadurch erklären, dass die Allgemeine Relativitätstheorie (ART) bei sehr großen Entfernungen nicht mehr gültig ist. Modifikationsversuche von Einsteins Beschreibung der Gravitation haben eine lange Geschichte und gehen auf Brans und Dicke (1961) zurück. Allerdings ist es sehr schwer, eine konsistente

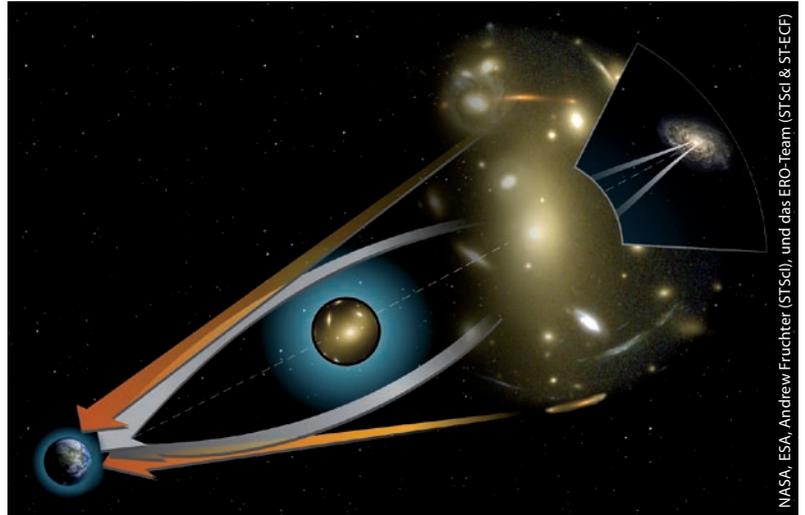


Abb. 1 Die Masse eines Galaxienhaufens (blau umrandet) lenkt das Licht einer entfernten Galaxie ab. Position und Aussehen der Quelle werden dadurch stark

verzerrt (orangefarben). Dient dagegen ein Klumpen oder ein Filament Dunkler Materie als Linse, ergibt sich nur ein sehr schwacher Gravitationslinseneffekt.

alternative Theorie zu entwickeln, die mit allen Beobachtungen auf kleineren Entfernungen, z. B. im Sonnensystem oder von Doppelpulsaren, verträglich sind. Dennoch existieren solche Modelle [5].

Die Eine-Million-Euro-Frage für Kosmologen lautet nun: Wie lässt sich anhand astronomischer Beobachtungen zwischen der Dunklen Energie und Modellen, welche die Einsteinsche Gravitationstheorie modifizieren, unterscheiden? Beide Ansätze liefern qua Konstruktion, dieselbe Expansionsgeschichte des Universums. Allerdings sagen sie eine unterschiedliche Entwicklung der großräumigen Strukturen im Universum vorher. Effektiv lässt sich dieses Verhalten zum Teil dadurch beschreiben, dass die Newtonsche Gravitationskonstante bei großen Entfernungen einen anderen Wert annimmt.

Mithilfe des schwachen Gravitationslinseneffekts lässt sich mit großer Empfindlichkeit nachweisen, wie sich die großräumigen Strukturen während ihrer Entstehung verändern. Dieses Phänomen, das bereits Einstein im Rahmen seiner ART vorhergesagt hat, beruht darauf, dass Materie Licht beeinflusst (Abb. 1). Lichtstrahlen entfernter Ga-

laxien, die durch das inhomogene Universum propagieren, werden entlang der Sichtlinie stetig abgelenkt. Daher sehen wir ein leicht verzerrtes Galaxienbild, wobei die Verzerrung direkt von den Massenspotentialen abhängt. Diese „kosmische Scherung“ ist sehr klein und an einzelnen Galaxien nicht zu beobachten, da man deren eigentliche Form nicht kennt. Beobachtet man aber hunderttausende von Hintergrundgalaxien, so gelingt es, den Effekt statistisch nachzuweisen.

Auch die Verteilung von Galaxien und deren Geschwindigkeiten erlauben es, die großräumige Struktur im Universum zu erforschen. Allerdings ist die Galaxienverteilung für gewöhnlich gegenüber der zugrundeliegenden Materieverteilung verschoben, denn die Galaxien „klumpen“ meist stärker als die Gesamtmaterie. Daher ist ein Rückschluss von der Galaxienverteilung auf die großräumige Struktur systematisch verfälscht und eine kosmologische Interpretation der Ergebnisse praktisch unmöglich.

Nun haben Forscher der Universitäten Princeton, Berkeley, Zürich und Seoul simultan das Gravitationslinsensignal sowie die Verteilung der Galaxien und ihrer

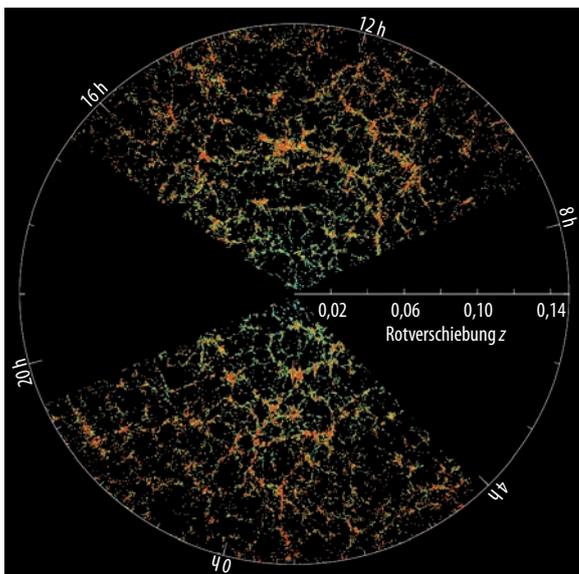


Abb. 2 Bei dieser zweidimensionalen Projektion der dreidimensionalen Galaxienkarte des Sloan Digital Sky Survey (SDSS) befindet sich die Erde im Zentrum. Der Radius entspricht der Entfernung von der Erde und wird hier mit der Rotverschiebung  $z$  angegeben. Jeder Punkt repräsentiert eine Galaxie aus typischerweise 100 Milliarden Sternen. Die roten Punkte entsprechen Galaxien mit älteren Sternen. Der äußere Kreis liegt bei einer Entfernung von zwei Milliarden Lichtjahren.

Mt. Blanton & SDSS

NASA, ESA, Andrew Fruchter (STScI), und das ERO-Team (STScI & ST-ECF)

Geschwindigkeiten gemessen, um die Materieverteilung im Universum unverfälscht zu bestimmen [6]. Für diesen empfindlichen Test auf Abweichungen von der Einsteinschen Gravitationstheorie wurde ein sehr homogenes Ensemble von über 70 000 leuchtkräftigen, altersgeröteten Galaxien im Rahmen des Sloan Digital Sky Survey (SDSS) beobachtet (Abb. 2). Diese Himmelsdurchmusterung wurde zwischen 2000 und 2005 mit dem 2,5-Meter-Teleskop des Apache Point Observatory in New Mexico (USA) durchgeführt. Sie deckt ein Achtel des Himmels ab und ist damit die bislang größte optische Beobachtungskampagne. Als die Galaxien dieses Licht vor 3,5 Milliarden Jahren ausgestrahlt haben, besaß das Universum 77 Prozent der jetzigen Größe und befand sich bereits in der Phase der beschleunigten Expansion. Reyes et al. kommen zu dem Ergebnis, dass die beobachtete Materieverteilung für eine Entfernung zwischen 45 und 220 Millionen Lichtjahren sehr gut mit der Vorhersage der ART übereinstimmt. Außerhalb dieses Bereiches verhindert die zunehmende Verschiebung ins Infrarot zuverlässige Messungen im Rahmen des SDSS.

Der Vergleich mit zwei alternativen Gravitationstheorien zeigt, dass eine der beiden wie die ART innerhalb der Messunsicherheit

von 17 Prozent mit den Messdaten verträglich ist, während die Daten die andere mit einer Wahrscheinlichkeit von über 98 Prozent ausschließen.

Diese sehr vielversprechenden Resultate lassen hoffen, dass zukünftige Beobachtungen sehr große Einschränkungen an alternative Theorien machen können, mit Messunsicherheiten von einem Prozent und weniger. So wird der Dark Energy Survey (DES) in ein paar Jahren einen ähnlich großen Bereich des Himmels wie der SDSS kartographieren, aber zu wesentlich größeren Entfernungen und mit stark verbesserter Bildqualität. Schließlich soll die geplante Europäische Satellitenmission Euclid den gesamten Himmel beobachten. Damit stehen die Chancen gut, dass wir hundert Jahre nach Aufstellen seiner ART herausfinden, ob Einsteins Beschreibung der Gravitation erweitert werden muss [7].

**Martin Kilbinger und Jochen Weller**

- [1] S. Perlmutter et al., *Astrophys. J.* **483**, 565 (1997)
- [2] A. G. Riess et al., *Astron. J.* **116**, 1009 (1998)
- [3] C. Wetterich, *Nucl. Phys. B* **302**, 668 (1988)
- [4] B. Ratra und J. Peebles, *Phys. Rev. D* **37**, 3406 (1988)
- [5] W. Hu und I. Sawicki, *Phys. Rev. D* **76**, 064004 (2007)
- [6] R. Reyes et al., *Nature* **464**, 256 (2010)
- [7] S. Thomas, F. Abdalla und J. Weller, *Mon. Not. R. Astron. Soc* **395**, 197 (2009)

## KURZGEFASST

### ■ **Transparenz im Alleingang**

Bei der „Elektromagnetisch Induzierten Transparenz (EIT)“ lassen sich die optischen Eigenschaften von atomaren Medien mithilfe von Licht drastisch verändern. Bislang wurde dieser Effekt nur an größeren Ensembles aus vielen hunderttausend Atomen nachgewiesen. Physikern um Gerhard Rempe vom Max-Planck-Institut für Quantenoptik konnten nun zeigen, dass sich auch die optische Transparenz einzelner, in einem Mikroresonator gefangener Atome mit Laserpulsen quasi per Knopfdruck kontrollieren lässt. Das einzelne Atom arbeitet also wie ein Transistor: es steuert, ob der Resonator Licht durchlässt oder nicht. M. Mücke et al., *Nature* DOI: 10.1038/nature09093 (2010)

### ■ **Gruppendynamik bei Atomen**

Die Lamb-Verschiebung führt zu einer kleinen Änderung der Energie-Niveaus von gebundenen Elektronen. Ursache ist die Emission und Absorption virtueller Photonen innerhalb des Atoms. Einem Forscherteam vom Helmholtzzentrum DESY ist es an der europäischen Synchrotronstrahlungsquelle ESRF in Frankreich erstmals gelungen, die kollektive Lamb-Verschiebung in einem Ensemble gleicher Atome (Fe-57) nachzuweisen. Dort kann das emittierte Licht eines Atoms nicht nur von diesem selbst, sondern auch von einem anderen Atom absorbiert und wieder abgestrahlt werden kann. Das Atom-Ensemble strahlt daher energieärmeres Licht als ein einzelnes Atom ab. R. Röhlberger et al., *Science Express*, DOI: 10.1126/science.1187770 (2010)