

Prof. Dr. Markus Schumacher und Dr. Christian Weiser, Physikalisches Institut, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Hermann-Herder-Straße 3, 79104 Freiburg

Kopplungen modellunabhängig und mit einer bis zu einer Größenordnung genaueren Präzision zu extrahieren.

Bisher sind alle am LHC beobachteten Eigenschaften mit denen des Higgs-Bosons des Standardmodells verträglich. Es wird noch einige Zeit dauern und deutlich mehr Daten benötigen, bis die Natur des neu entdeckten Bosons vollständig enträtselt sein wird. Die Entdeckung eines Higgs-artigen Teilchens nach jahrzehntelangen

Anstrengungen ist ein Meilenstein der Physik, unabhängig davon, ob es sich letztendlich als das Higgs-Boson des Standardmodells, das einer erweiterten Theorie oder etwas völlig Unerwartetes erweist.

Markus Schumacher und Christian Weiser

[1] F. Englert und R. Brout, Phys. Rev. Lett. 13, 321 (1964); P. W. Higgs, Phys. Lett. 12, 132 (1964) und Phys. Rev. Lett. 13, 508 (1964); G. S. Guralnik, C. R. Hagen und T. W. B. Kibble, Phys. Rev. Lett. 13, 585 (1964)

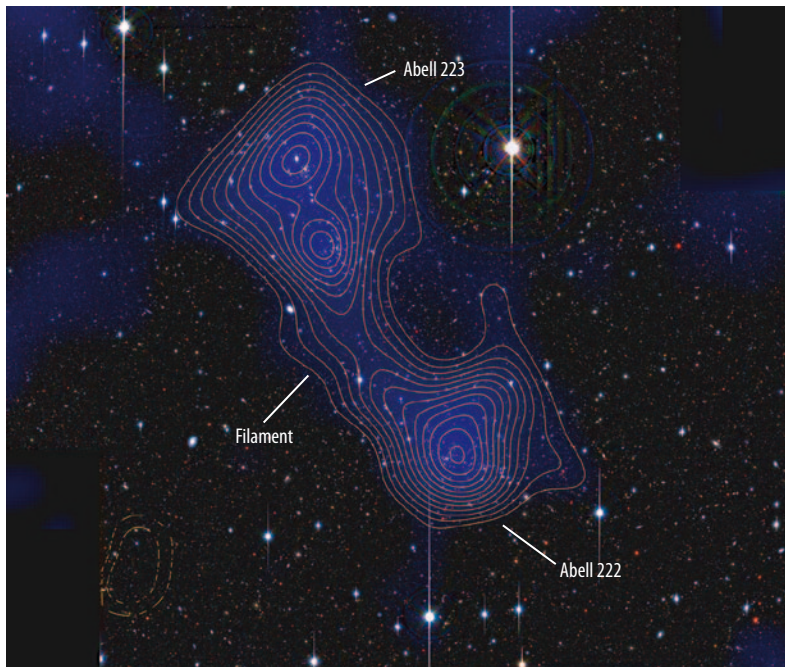
[2] LEP Working Group for Higgs Boson Searches and ALEPH and DELPHI and L3 and OPAL Collaborations, Phys. Lett. B565, 61 (2003); CDF and D0 Collaborations, Phys. Rev. Lett. 104, 061802 (2010)
 [3] <http://lepewwg.web.cern.ch/LEPEWWG>, März 2012
 [4] ATLAS Collaboration, akzeptiert bei Phys. Lett. B, arXiv 1207.7214
 [5] CMS Collaboration, akzeptiert bei Phys. Lett. B, arXiv 1207.7235
 [6] CDF and D0 Collaborations, akzeptiert bei Phys. Rev. Lett., arXiv 1207.6436

■ Die im Dunklen sieht man doch

Mit dem Gravitationslinseneffekt konnten Astronomen eine Struktur aus Dunkler Materie nachweisen.

Nach unserer gegenwärtigen Kenntnis bestehen kosmische Strukturen zu 83 Prozent aus der rätselhaften Dunklen Materie, die sich nur durch ihre Gravitationswirkung bemerkbar macht. Sie wechselwirkt aber nicht elektromagnetisch, denn sonst hätte sie sich durch Temperaturschwankungen im kosmischen Mikrowellenhintergrund (CMB) verraten, die um zwei Größenordnungen stärker ausfallen müssten als beobachtet. Strukturen aus Dunkler Materie mussten längst angelegt gewesen sein, als die leuchtende Materie nach Entkopplung des CMB endlich Strukturen bilden konnte. Dabei entstanden großräumige Filamentstrukturen, die zunächst vorwiegend aus Dunkler Materie bestehen sollten und erst nachträglich von Galaxien bevölkert wurden. Nun hat ein internationales Team um den deutschen Astronomen Jörg Dietrich Beobachtungen veröffentlicht, die mit großer Sicherheit die Existenz eines Filaments aus Dunkler Materie zwischen zwei Galaxienhaufen belegen [1].

Nach solchen Filamenten wurde bereits seit Langem gesucht: Schon 1970 hatte der russische Theoretiker Andrei G. Doroshkevich gezeigt, dass der Gravitationskollaps zufälliger, gaußscher Dichteschwankungen im Universum anisotrop verlaufen muss [2]: Zuerst bilden sich demnach durch den Kollaps



Die beiden Galaxienhaufen Abell 222 und 223 sind durch ein Filament aus Dunkler Materie verbunden. Dies ließ sich anhand des Gravitationslinseneffekts von über 40 000 Hintergrund-

galaxien nachweisen. Die daraus abgeleitete Massenverteilung ist hier als Linienmuster dem Foto der beiden Galaxienhaufen überlagert.

entlang einer Hauptachse der lokalen Dichteverteilung flache Materieschichten. Deren weiterer Kollaps erzeugt zuerst Filamente und erst danach durch weitere Fragmentation an den Schnittpunkten der Filamente annähernd kugelsymmetrische Gebilde, die späteren Galaxienhaufen.

Die Annahme eines ursprünglich gaußschen Zufallsfeldes wiederum liegt fest im Szenario der kosmischen Inflation begründet.

Ihm zufolge entstanden kosmische Strukturen aus den Vakuumfluktuationen des skalaren Feldes, das die Inflation antrieb. Aus dem zentralen Grenzwertsatz folgt dann, dass die Überlagerung vieler Fluktuationsmoden eine Gesamtdichte ergeben muss, die gaußverteilt ist. Somit führt ein direkter Weg vom inflationären Szenario zu der Erwartung, dass es filamentartige Strukturen aus Dunkler Materie geben müsse.

J. Dietrich, Universitäts-Sternwarte München

Großräumige und tiefe Himmelsdurchmusterungen, wie der „Sloan Digital Sky Survey“ und der „2-degree Field Galaxy Redshift Survey“, haben die Filamente in der räumlichen Verteilung der Galaxien nachgewiesen.^{+) Auch die Emission und Absorption von Röntgenstrahlung durch das warme, dünne Gas, das in den Filamenten aus dunkler Materie eingebettet sein soll, ließ sich beobachten. Der direkte Nachweis der Dunklen Materie in Filamenten stand bisher jedoch noch aus.}

Dietrich und Kollegen bedienen sich nun des Gravitationslinseneffekts, um nach Anzeichen eines Filaments aus Dunkler Materie zwischen den beiden Galaxienhaufen Abell 222 und 223 zu suchen, von denen Abell 223 wiederum aus zwei Komponenten besteht. Diese beiden Galaxienhaufen waren deshalb ins Visier geraten, weil sie nicht nur optisch nahe beieinander erscheinen, sondern auch räumlich benachbart sein sollten. Die beiden Galaxienhaufen zeigen eine Rotverschiebung von $z=0,21$ und erscheinen um etwa 14 Bogenminuten voneinander entfernt. Im kosmologischen Standardmodell bedeutet dies, dass die Galaxienhaufen bei einer Entfernung von rund 710 Megaparsec (2,5 Milliarden Lichtjahre) von der Erde einen projizierten Abstand von knapp 3 Megaparsec zueinander haben. Wenn ihr Rotverschiebungsunterschied von $\Delta z=0,005$ als Entfernungsunterschied zu deuten ist, sind sie längs der Sichtlinie etwa 16 Mpc oder rund 50 Millionen Lichtjahre voneinander entfernt, was etwa dem Drei- bis Vierfachen ihrer eigenen Größe entspricht. Das ist im Einklang mit einer früheren Untersuchung, die Schluss gekommen war, dass die beiden Galaxienhaufen miteinander wechselwirken [3].

Der Gravitationslinseneffekt bewirkt, dass Objekte im Hintergrund einer Gravitationslinse verzerrt erscheinen. Dieser „Astigmatismus“, meistens anhand der durch sie erzeugten Elliptizität von Hintergrundgalaxien quantifiziert, ist die Messgröße, aus

der sich die Massenverteilung in Gravitationslinsen rekonstruieren lässt. Dietrich et al. modellieren den Gravitationslinseneffekt des Ensembles auf zweierlei Weise. Bei der ersten Methode passen sie ein parametrisiertes Massenmodell den gemessenen Bildverzerrungen an. Dabei zeigte sich, dass ein Modell aus insgesamt drei elliptisch deformierten Massenkonzentrationen an den Positionen von Abell 222 und den beiden Komponenten von Abell 223 die Messungen weniger gut reproduziert als eines, das zusätzlich noch ein Filament zwischen den Galaxienhaufen enthält. Diese Konfiguration erlaubt noch keine zwingenden Schlussfolgerungen, weil auch ein Filament mit einer verschwindenden Amplitude gerade noch mit den Daten verträglich erscheint.

Die zweite Methode liefert jedoch überzeugendere Ergebnisse. Sie rekonstruiert die längs der Sichtlinie integrierte Massendichte des Galaxienhaufenensembles auf parameterfreie Weise aus den Bildverzerrungen. Hier zeigt sich eine Materiebrücke zwischen beiden Galaxienhaufen, deren Dichte auch an ihrem niedrigsten Sattel etwa in der Mitte zwischen den beiden Galaxienhaufen eine Signifikanz von knapp über 4σ besitzt. Da zudem zwischen den Galaxienhaufen an der Stelle des Filaments auch Röntgenemission normaler Materie mit einer Temperatur um 1 keV beobachtet wurde, scheint seine Existenz gesichert zu sein.

Die im Vergleich zu Simulationen [4] etwa vier- bis fünfmal höhere Dichte des Filaments könnte an seiner Neigung zur Sichtlinie liegen, wegen der es durch Projektion dichter erscheint. Die Autoren schätzen die Gesamtmasse des Filaments auf etwa $6,5 \times 10^{13}$ Sonnenmassen ab, wovon sechs bis neun Prozent auf das röntgenemittierende Gas entfallen.

Im Gegensatz zu diesen Ergebnissen hatte kürzlich eine Arbeit Zweifel an der Existenz Dunkler Materie aufkommen lassen [5]. Christian Moni-Bidin und Kollegen hatten aus kinematischen Untersuchungen von Sternen in

der Milchstraße geschlossen, dass die lokale Dichte der Dunklen Materie in der Sonnenumgebung um eine Größenordnung geringer sein müsse als bisher angenommen. Die Ergebnisse waren sogar damit verträglich, dass es überhaupt keine Dunkle Materie in der Sonnenumgebung gäbe. Dem widersprachen kurz darauf Jo Bovy und Scott Tremaine [6]. Sie halten die Annahme von Moni-Bidin et al., dass die mittlere azimuthale Geschwindigkeit der Sterne in der Sonnenumgebung radial konstant sei, für unhaltbar. Stattdessen gehen Bovy und Tremaine davon aus, dass stattdessen die Zirkulargeschwindigkeit radial konstant ist, und leiten daraus eine Dichte von $0,3 \pm 0,1 \text{ GeV/cm}^3$ für die Dunkle Materie ab, die sehr gut mit bisherigen Messungen übereinstimmt.

Zusammengefasst ist es also sehr wahrscheinlich gelungen, ein lang erwartetes Element kosmischer Strukturen erstmals direkt nachzuweisen. Weitere Analysen nahe benachbarter Galaxienhaufen müssen nun allerdings zeigen, ob die Dichte und Verteilung der Dunklen Materie in den Filamenten mit der theoretisch erwarteten übereinstimmt.

Matthias Bartelmann

- [1] J. P. Dietrich et al., *Nature* **487**, 202 (2012)
- [2] A. G. Doroshkevich, *Astrofizika* **6**, 581 (1970)
- [3] D. Proust et al., *Astronomy & Astrophysics* **355**, 443 (2000)
- [4] J. M. G. Mead, L. J. King und I. G. McCarthy, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **401**, 2257 (2010)
- [5] C. Moni-Bidin, G. Carraro, R. A. Méndez und R. Smith, *Astrophys. J.* **751**, 30 (2012)
- [6] J. Bovy und S. Tremaine, arXiv 1205.4033 (2012, *Astrophys. J.*, im Druck)

+) Sloan Digital Sky Survey (SDSS, www.sdss.org); 2-degree Field Galaxy Redshift Survey (2dFGRS, <http://magnum.anu.edu.au/~TDFgg/>)

Prof. Dr. Matthias Bartelmann, Institut für Theoretische Astrophysik, Universität Heidelberg, Albert-Überle-Straße 2 69120 Heidelberg