

loidales Magnetfeld im Halo in Form eines Dipol- oder Quadrupolfelds (siehe Kasten S. 23). Dieses poloidale Halofeld ist aber um einen Faktor zehn schwächer als das zugehörige Scheibefeld und vermag die jetzt beobachteten Magnetfelder im Halo alleine nicht zu erklären. Allerdings könnten galaktische Winde zusätzlich Magnetfelder aus der Scheibe in den Halo transportieren. Für die Existenz galaktischer Winde sprechen gerade in letzter Zeit immer mehr Beobachtungshinweise.

Die neu durchgeführten Beobachtungen von NGC 4631 passen auch in ihrer Struktur nicht zu einer einfachen großräumigen Magnetfeldstruktur wie einem Dipol oder Quadrupol im Halo. Sie zeigen, zumindest im nördlichen Teil des Halos, gigantische magnetische Schleifen mit wechselnden Feldrichtungen. Die großräumige Magnetfeldstruktur im Halo scheint also komplizierter zu sein. Und da wir mit den Beobachtungen über die ganze Sichtlinie durch die Galaxie mitteln, ist die dreidimensionale Struktur des Magnetfelds im Halo bisher noch nicht eindeutig bekannt. Hier sind weitere theoretische Modelle und Simulationen gefragt, die diesen Entdeckungen hoffentlich folgen werden.

Zurzeit werden die anderen Spiralgalaxien des CHANG-ES-Projekts am Bonner Max-Planck-Institut für Radioastronomie in ähnlicher Weise analysiert. Es zeigt sich schon jetzt, dass auch sie großräumige Magnetfelder in ihren Halos besitzen. Damit dürften die großräumigen Magnetfelder im Halo auch als Bindeglied zu intergalaktischen Magnetfeldern angesehen werden und dazu beitragen, deren Ursprung zu verstehen.

MARITA KRAUSE ist Astrophysikerin am Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn und in der Projektleitung von CHANG-ES (Continuum HALos of Nearby Galaxies – an EVLA Survey). Ihr Hauptforschungsinteresse gilt Magnetfeldern in Spiralgalaxien.

Literaturhinweis

Krause, M. et al.: CHANG-ES XXII: Coherent Magnetic fields in the halos of spiral galaxies. *Astronomy & Astrophysics* (in press) 2020, arXiv:2004.14383

Mora-Partiarroyo, S. C. et al.: CHANG-ES XV: Large-scale Magnetic field reversals in the radio halo of NGC 4631. *Astronomy & Astrophysics* 632, 2019



Marilyn Chung

Am Vier-Meter-Ma-yall-Teleskop des Kitt Peak National Observatory bei Tucson, Arizona, wird gegenwärtig das Instrument DESI (Dark Energy Spectroscopic Instrument) installiert. Es soll in den nächsten fünf Jahren die Distanzen zu 30 bis 40 Millionen Galaxien messen.

Analyse Dunkler Energie mit kosmischen Wüsten

Die gigantischen Leerräume in der dreidimensionalen wabenförmigen Verteilung der Galaxien helfen bei der Messung von Dunkler Energie. Denn je größer die Dunkle Energie ist, umso schneller dehnt sich das Universum in seiner Spätphase aus, und umso weniger Galaxien sollten pro Volumen vorhanden sein.

Der bei Weitem größte Teil der Energie in unserem heutigen Universum liegt in der Form von Dunkler Energie vor, und bis heute ist diese Energieform nicht wirklich verstanden (siehe SuW 7/2020, S. 26). Um vorherzusagen, wie sich das Universum in der Zukunft verhalten wird, ob es sich für immer ausdehnen, in einem Big Rip zerrissen oder in einem Big Crunch kollabieren wird, müssen wir allerdings genau verstehen, was Dunkle Energie ist, und wie sie sich in der Zukunft verhalten wird.

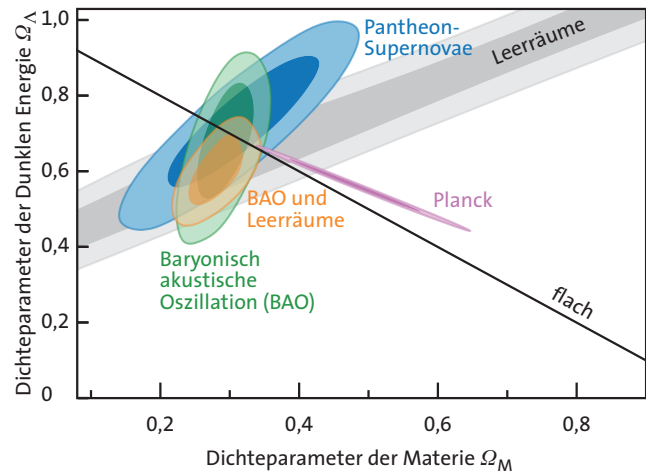
Im Jahr 1928 entdeckten Edwin Hubble und andere, dass sich Galaxien schneller von uns fortbewegen, wenn sie weiter entfernt sind. Auf dieser Entdeckung fußt die Urknalltheorie, nach der das ganze Universum seinen Ursprung in einem kleinen Punkt hatte (siehe SuW 2/2013, S. 32 und S. 50). Jedoch hatten Forscher vermutet, dass sich die kosmische Ausdehnung immer mehr verlangsamt, da die Gravitationskraft sämtlich vorhandener Materie der Ausdehnung entgegenwirkt. Aus diesem Grund war es eine große Überraschung, als Forscher im Jahr 1998 durch Messungen von Supernova-Explosionen entdeckten, dass sich der Kosmos immer schneller ausdehnt. Die treibende Ursache für diese Ausdehnung wurde im Anschluss Dunkle Energie genannt.

Nach wie vor deuten Messungen darauf hin, dass sich Dunkle Energie wie die Energie des Vakuums verhält. Das heißt, dass Dunkle Energie proportional zum Volumen des Universums ist. Da es sich immer weiter ausdehnt, steigt der Anteil Dunkler Energie und die Ausdehnung des Kosmos wird sich in der Folge immer weiter beschleunigen.

Die Tatsache, dass das Vakuum Energie besitzt, ist schon seit langem bekannt. So untermauert der Casimir-Effekt diese These. Dabei handelt es sich um einen quantenphysikalischen Effekt, durch den zwei parallele und leitfähige Platten im Vakuum eine Kraft erfahren, die den Abstand der Platten zu verringern sucht. Theoretische Berechnungen besagen allerdings, dass der Anteil der Vakuumenergie so groß sein sollte, dass sich das Universum enorm schnell ausdehnen müsste – derart schnell, dass kosmische Materie keine Zeit gehabt hätte, Sterne oder Galaxien zu bilden. Aus diesem Grund haben Kosmologen immer gedacht, dass ein bisher unbekannter Prozess den Effekt der Vakuumenergie auf das Universum verschwinden lässt, denn nur so kann sich ein Kosmos wie der Unsrige bilden. Die gegenwärtigen Messungen der Dunklen Energie deuten aber darauf hin,

Energiedichte und Materiedichte im Universum

Die gegenwärtig besten Messungen zur Verteilung der Energiedichte im Universum, also der Energie pro Volumen, sind hier aufgetragen: Die horizontale Achse zeigt den Anteil der Energiedichte in der Form von normaler und Dunkler Materie, während die vertikale Achse den Anteil der Dunklen Energie darstellt. Die voneinander unabhängigen Beobachtungsmethoden zeigen, dass 70 Prozent der Energiedichte im Kosmos in der Form von Dunkler Energie und 30 Prozent als Dunkle Materie vorliegen (siehe auch SuW 7/2020, S. 28). Das weltweit größte Archiv mit Daten von entfernten Supernovae vom Typ Ia heißt Pantheon. Die baryonischen akustischen Oszillationen (BAO) entsprechen Dichtewellen im Urplasma des jungen Universums, die sich aus dem kosmischen Mikrowellenhintergrund ableiten lassen.



Seshadri Nadathur et al.: Testing low-redshift cosmic acceleration with large-scale structure. Physical Review Letters 124, 221301 (2020), fig. 4; Bearbeitung: SuW-Grafik

dass ein sehr kleiner Teil dieser Vakuumenergie nicht verschwindet. Die genauen Hintergründe für ein solches Verhalten sind gegenwärtig nicht verstanden.

Anzahldichte der Galaxien als Messlatte

Die Analyse der räumlichen Verteilung von Galaxienhaufen und Galaxien ist eine der vielversprechendsten Methoden, um mehr über die Dunkle Energie zu erfahren. Ein größerer Anteil an Dunkler Energie bedeutet, dass sich das Universum schneller ausdehnt. Das wiederum führt zu einer mit der Zeit abnehmenden Dichte von Galaxien, da sich die Materie im expandierenden Universum immer mehr verdünnt. Mehr Dunkle Energie bedeutet eine kleinere Dichte von Galaxien, während eine höhere Galaxiendichte ein Zeichen für weniger Dunkle Energie ist.

Die Ermittlung der Verteilung von Galaxien ist recht aufwendig: Man muss für jede Galaxie die kosmologische Rotverschiebung messen, um ihre Entfernung zu bestimmen. Die Rotverschiebung einer Galaxie beschreibt die Verschiebung von Absorptions- und Emissionslinien im Spektrum einer Galaxie, die durch die Ausdehnung der Raumzeit verursacht wird: Je höher die Fluchtgeschwindigkeit der Galaxie, umso größer ist ihre Distanz. Für eine möglichst lückenlose dreidimensionale Karte der Galaxienverteilung sind so viele Galaxien mit bekannter Entfernung erforderlich wie nur eben möglich. Gegenwärtig gibt es Teleskope, die mehrere Tausend solcher Messungen auf einmal machen können, was die Sammlung von riesigen Datensätzen ermöglicht. Das größte Datenarchiv

von solchen Galaxien hat das Projekt BOSS (Baryon Oscillation Spectroscopic Survey) geliefert, mit dem Astronomen über fünf Jahre hinweg mehr als eine Million Galaxiendistanzen bestimmen konnten.

Für die Auswertung der immensen Datenmenge ist ein kosmologisches Modell erforderlich, das die Galaxiendichte mit dem Anteil Dunkler Energie in Verbindung bringt. Die physikalischen Prozesse, die dabei betrachtet werden müssen, geraten allerdings sehr kompliziert, wenn zum Beispiel die Kollision zweier Galaxien berücksichtigt werden soll. Dies überfordert selbst die immense Rechnerleistung heutiger Computersysteme. Aus diesem Grund können wir gegenwärtig nur bestimmte Teile unserer Datensätze für kosmologische Auswertungen verwenden. Die Frage ist deshalb: Wie sollen wir die Daten am effizientesten auswerten?

In unserer kürzlich erschienenen Arbeit in den »Physical Review Letters« haben wir einen neuen Ansatz getestet. Wir schauten uns spezielle Gebiete in der Verteilung von Galaxien an, die sich mit existierenden Modellen sehr gut beschreiben lassen. Wir haben dort nach Arealen gesucht, die keine oder nur sehr wenige Galaxien enthalten. Diese Raumbereiche weisen oft Durchmesser von 20 bis 30 Megaparsec auf, also bis zu 100 Millionen Lichtjahre, und enthalten fast keine Galaxien. In der Fachsprache werden sie als Voids (englisch: Leere) bezeichnet. Für solche kosmische »Wüsten« lässt sich sehr viel leichter ein Modell entwickeln, das derartige Gebiete und deren zeitliche Entwicklung beschreibt. Dieses Verfahren versetzt uns in die Lage, mehr über die Dunkle Energie zu lernen, und

wird dazu beitragen, gegenwärtige Messungen der zeitlichen Entwicklung von Dunkler Energie zu verbessern. Unsere Ergebnisse ergeben zusammen mit den anderen unabhängigen Methoden, dass 70 Prozent der Energie im Universum in der Form von Dunkler Energie und 30 Prozent als Dunkle Materie vorliegen (siehe Grafik oben). Sie bestätigen die bislang favorisierten Messwerte.

In den nächsten Jahren beginnen neue Experimente, die uns Datensätze von gar 30 bis 40 Millionen Galaxien bereitstellen. Diese Datenmenge wird also 30- bis 40-mal so umfangreich sein wie die eine Million Galaxien, die wir in unserer Analyse verwendeten. Dieser riesige Datenschatz enthält vermutlich fantastische Entdeckungen. Die Frage, wie man diese Datensätze am besten auswertet, beschäftigt eine zunehmend große Zahl von Wissenschaftlern. Unser Ansatz ist sicherlich nicht der einzige, allerdings hat sich tatsächlich gezeigt, dass die Untersuchung von Galaxienwüsten dazu beitragen kann, das Verständnis der Dunklen Energie voranzutreiben.

FLORIAN BEUTLER ist Assistenzprofessor und Royal Society Research Fellow an der University of Edinburgh, Mitglied beim Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) und der Euclid space-satellite Kollaboration.

Literaturhinweis

Nadathur, S. et al.: Testing low-redshift cosmic acceleration with large-scale structure. Physical Review Letters 124, 2020