Nach: Hans-Ulrich Keller: Kosmos Himmelsjahr 2018
Franckh-Kosmos Verlags-GmbH & Co. KG, Stuttgart 2017

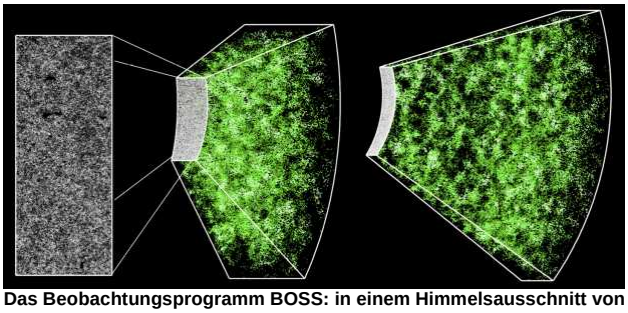
Monatsthema Dezember 2018

Der Dunklen Energie auf der Spur

In den Jahren 1924 bis 1928 entdeckten Edwin P. Hubble und sein Kollege Milton Humason mit dem damals weltweit größten Teleskop, dem 2,5-Meter-Reflektor des Mt. Wilson-Observatoriums in Kalifornien, die Expansion des Universums: Die Galaxienhaufen und —superhaufen fliehen voreinander. Je größer die Distanz der Galaxien, desto schneller entfernen sie sich. Galaxien gelten als Bausteine des Universums.
Später fand man heraus, dass die Galaxienhaufen und –superhaufen in einer honigwabenartigen Struktur im Universum angeordnet sind. Riesige Wände oder Mauern (engl.: walls) aus Galaxienhaufen umspannen ausgedehnte Leerräume (engl.: voids).
Heute blicken die Astronomen mit ihren Riesenteleskopen bis weit über zehn Milliarden Lichtjahre Entfernung ins Weltall. Doch weiter als vierzehn Milliarden Jahre geht der Blick nicht. Denn ein Blick in die Tiefen des Universums ist auch gleichzeitig ein Blick in die Vergangenheit. Da das Universum knapp 14 Milliarden Jahre alt ist, kann nur Licht höchstens aus dieser Zeit bis zur Erde gelangt sein. Denn die ersten Sterne und Galaxien entstanden 200 bis 400 Millionen Jahre nach dem Big Bang, dem heißen Beginn unseres Universums.
Lange war man der Auffassung, dass die Gravitationswirkung der im Weltall vorhandenen Massen die Expansion des Universums mehr oder minder stark bremst.
Groß war daher die Überraschung, als man vor zwanzig Jahren auf Grund von Supernovae-Helligkeitsmessungen im Vergleich mit der kosmologischen Rotverschiebung in den Galaxienspektren entdeckte, dass das Universum beschleunigt expandiert - die Ausdehnungsgeschwindigkeit nimmt immer mehr zu.

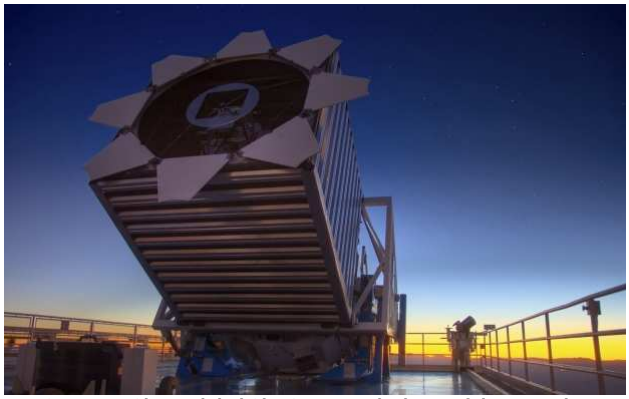
Die Expansion des Universums

Doch wer oder was treibt die Expansion an und sorgt für ihre Beschleunigung? Um die beschleunigende Wirkung zu erklären, hat man 1998 den Begriff „Dunkle Energie" (engl.: Dark Energy) eingeführt, ohne zunächst eine Ahnung davon zu haben, welcher Natur sie eigentlich ist. Von der Dunklen Energie ist lediglich bekannt, dass sie als Energiefeld auftritt, welches für die gegenwärtige Beschleunigung der Expansion des Universums sorgt. Das Weltall dehnt sich immer schneller aus.
Wie stark wirkt die Dunkle Energie? Wird sie dafür sorgen, dass eines fernen Tages das „Große Zerreißen" einsetzt? Es mag sein, dass die Dunkle Energie so übermächtig wird, dass die Galaxienhaufen auseinander getrieben werden, die Galaxien sich auflösen, dass Planeten ihren Muttersternen entrissen werden, dass selbst Sterne und Planeten zerplatzen, ja die Materie selbst - Moleküle, Atome, Elementarteilchen Opfer dieses mächtigen Energiefeldes werden.
Um die Stärke der Dunklen Energie zu ergründen, hat man unter anderem das Beobachtungsprogramm BOSS gestartet. BOSS steht für Baryon Oscillation Spectroscopic Survey. Das Programm sieht vor, eine dreidimensionale Karte der Verteilung von Galaxienhaufen und -superhaufen zu erstellen, die sich in einem Raumbereich von 650 Quadrilliarden Kubiklichtjahren befinden. Dieser riesige Bereich enthält etwa 1,2 Millionen Galaxien.



Das Beobachtungsprogramm BOSS: in einem Himmelsausschnitt von 1000 Quadratgrad wurden ca. 120.000 Galaxien untersucht und so auf ihre räumliche Verteilung geschlossen. (SDSS/Jeremy Tinker)

Zur Erfassung dieser Galaxien dient das 2,5-m-Sloan-Digital-Sky-Survey-Teleskop auf dem Apache Point in New Mexico (USA). Es wird damit die größte Karte von 95 Prozent des unsichtbaren Anteils des Universums, der Dunklen Energie und der Dunklen Materie entstehen. Die bisherigen Beobachtungsergebnisse zeigen, dass die Dunkle Materie dafür sorgt, dass die Galaxien sich zu Haufen und diese wiederum zu Superhaufen zusammenballen, während in größeren Raumbereichen die Dunkle Energie ihre Wirkung entfaltet.

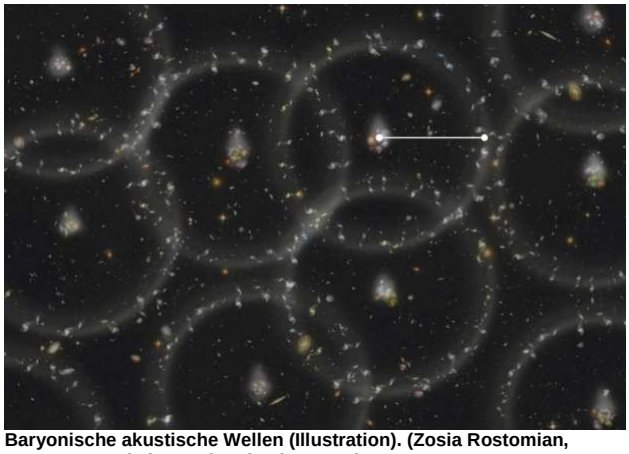


Das 2,5-Meter Sloan Digital Sky Survey Teleskop auf dem Apache Point Observatory in New Mexico. (SDSS/David Kirkby)

Die Beobachtungen erfassen Galaxien in bis zu sieben Milliarden Lichtjahren Entfernung. Man blickt somit in eine Vergangenheit von sieben Milliarden Jahren. Dabei kann man die mittleren Distanzen der Galaxiensuperhaufen voneinander in Abhängigkeit von der kosmischen Entwicklungsgeschichte erfassen.
Man misst dabei eine Größe, die als „kosmischer Schallhorizont" bezeichnet wird. Was hat es damit auf sich?

Relikte des Urknalls

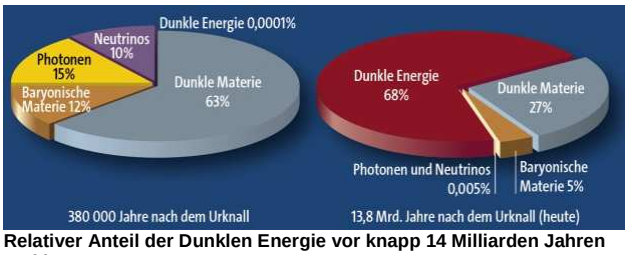
In einer sehr frühen Phase des Universums, in den ersten 380.000 Jahren nach dem Urknall, war das Weltall erfüllt von einem heißen Plasma, vornehmlich Elektronen, Protonen, Deuteriumkernen, α-Teilchen (Helium-Kerne), die sogenannte baryonische Materie, sowie Photonen und Neutrinos. Dieses primordiale, heiße und undurchsichtige Plasma durcheilten Druckwellen mit hohen Geschwindigkeiten von rund 60% der Lichtgeschwindigkeit. Man spricht von baryonischen akustischen Wellen oder schlicht von Schallwellen.



Baryonische akustische Wellen (Illustration). (Zosia Rostomian, Lawrence Berkeley National Laboratory)

Infolge der Expansion des Universums nahmen Dichte und Temperatur des Plasmas rapide ab. Als die Temperatur unter 3.000 Kelvin (rund 2700°C) sank, fingen die Protonen (Wasserstoffkerne) und die Heliumatomkerne (α-Teilchen) die Elektronen ein, ein Vorgang, der oft etwas missverständlich als „Rekombination" bezeichnet wird. Kurz, die Materie neutralisierte sich, wodurch das Universum durchsichtig wurde, denn es gab kaum mehr freie Elektronen, an denen die Photonen gestreut wurden.
Blickt man zurück auf die Feuerwand vom Urknall, analysiert man somit die kosmische Hintergrundstrahlung, was den Raumsonden

COBE, WMAP und Planck mit zunehmender Auflösung gelang, so findet man Abweichungen von einer aus allen Richtungen einfallenden Strahlung im Mikrokelvin-Bereich. Diese winzigen Temperaturvariationen im kosmischen Mikrowellenhintergrund sind ein Indiz für die ursprünglichen Dichteschwankungen.
Diese Dichteschwankungen sind die Spuren der primordialen Quantenfluktuationen, die in dem extrem jungen Universum bei der inflationären Phase von 10^{-35} bis 10^{-32} Sekunden auf kosmische Skalengröße ausgedehnt wurden. Dabei wurden auch die kosmischen Schallwellen gewissermaßen eingefroren und damit die Dichteschwankungen der Materie im Kosmos. An den Stellen höherer Dichte begann die Materie auf Grund der eigenen Schwerkraft zu klumpen, es entstanden Sterne, Galaxien, Galaxienhaufen und deren Superhaufen. Maßgeblich beteiligt war daran die Dunkle Materie, die keinen thermischen Druck spürt bzw. verursacht. Sie koppelt ausschließlich über die Gravitation mit der uns vertrauten baryonischen Materie.
Die Galaxienhaufen und Superhaufen bilden riesige Mauern, die große, fast völlig leere Räume umspannen, sogenannte Voids. Die großräumige Verteilung der Materie zeigt eine honigwabenartige Struktur.
Aus der Vermessung der Dichteschwankungen in der kosmischen Hintergrundstrahlung, also der Winkelmaße der Temperaturschwankungen im Mikrowellenhintergrund, kann man die Größe der Voids und die relativen Distanzen der Superhaufen voneinander zu einem bestimmten Weltalter hochrechnen. Die Skalengröße liegt dabei heute bei 490 Millionen Lichtjahren. Aus der Abweichung von diesem Maßstab lässt sich auf die Wirkung der Dunklen Energie schließen.



Relativer Anteil der Dunklen Energie vor knapp 14 Milliarden Jahren und heute.

Der Energieinhalt des Universums setzt sich heute zu 68% aus Dunkler Energie und zu 32% aus Materie zusammen, wobei 27% auf die Dunkle Materie und nur 5% auf die baryonische, uns vertraute Materie entfallen. Somit wird gegenwärtig die Expansion des Kosmos von der Dunklen Energie dominiert. Bis vor sieben Milliarden Jahren war es noch die Materie, die die Ausdehnung des Weltalls abbremste. Vor fünf bis sechs Milliarden Jahren begann das Zeitalter der sich beschleunigenden Expansion. In einigen weiteren Milliarden Jahren wird die Expansion ausschließlich von der Dunklen Energie beherrscht werden. Die Ursache für diese Ereignisfolge liegt in dem Umstand, dass die Materiedichte mit der Ausdehnung des Weltalls entsprechend abnimmt, die Dunkle Energie hingegen als Eigenschaft des Vakuums ändert ihren Energieinhalt pro Volumenelement nicht. So bleibt die Vakuumenergiedichte offensichtlich für alle Zeiten konstant. In etwa einer Billion (10^{12}) Jahren wird die Dunkle Energie auch die letzten Galaxien über den kosmischen Horizont katapultieren und somit unseren Blicken entziehen. Aber Menschen wird es in jenen fernen Zeiten ebenso wenig geben wie unsere Erde. Unsere Sonne wird längst zu einem kalten, winzigen Schwarzen Zwerg entartet sein.
Es kann aber alles auch viel schneller gehen. Schon nach einigen Dutzend Milliarden Jahren könnte das Universum samt seinem Inhalt im „Großen Zerreißen" (Big Rip) enden. Dies hängt von der Stärke der Dunklen Energie ab, die es zu ermitteln gilt. Bleibt die Dunkle Energie zeitlich konstant (kosmologische Konstante, Zustandsgleichung $w = -1$) oder variiert sie mit der Zeit? Dann spricht man von Quintessenz. Ab einer bestimmten Stärke ($w < -1$) wird sie zur Fantomenergie, die unausweichlich zum Big Rip führt.

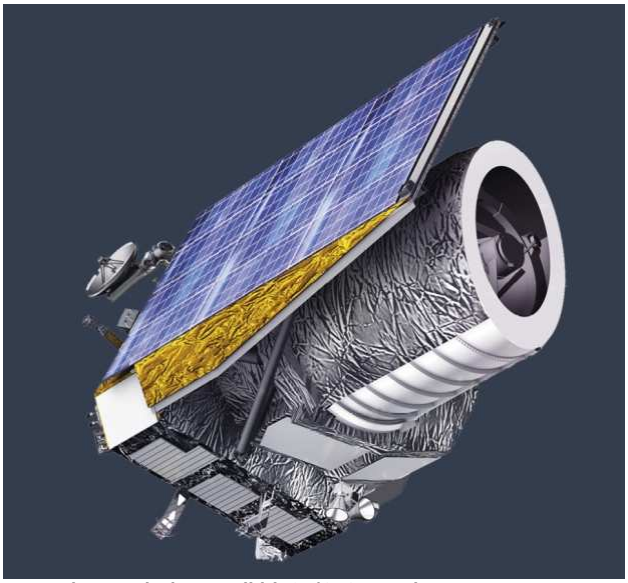
Die Suche nach der Dunklen Energie

Um der Dunklen Energie auf die Spur zu kommen, sind außer dem schon erwähnten BOSS-Programm noch weitere Beobachtungskampagnen gestartet worden oder in Vorbereitung beziehungsweise in Planung. Bereits im August 2013 begann man mit dem Dark Energy Survey (DES). Mit dem 4-m-Victor-M.-Blanco-Teleskop des Inter American Observatory auf dem Cerro Tololo in Chile, ausgerüstet mit einer 570 Megapixel-Kamera, wurden rund 300 Millionen Galaxien erfasst und dabei mehr Supernovae registriert als je zuvor. Dabei gelang es auch, die absoluten Helligkeiten und deren Streuungen von Supernovae des Typs Ia mit Hilfe klassischer Cepheïden genauer als bisher zu bestimmen. Die ersten Auswertungen der Beobachtungsdaten lassen eindeutig die seit rund sechs Milliarden Jahren beschleunigte Expansion des Kosmos erkennen.
Die Japaner sind mit ihrem 8-m-Subaru-Teleskop auf dem Mauna Kea (Big Island, Hawaii) und einer 870-Megapixel-CCD-Kamera der Dunklen Energie auf der Spur. Sie erreichen damit wesentlich lichtschwächere und damit fernere Galaxien als das DES-Projekt, das nur über ein Teleskop der 4-Meter-Klasse verfügt.
Auch mit dem Röntgenteleskop Chandra versucht man, aus der Verteilung des Millionen Grad heißen, allerdings sehr dünnen intergalaktischen Gases die wachsende Größe der Galaxiensuperhaufen zu ermitteln. Aus den ersten Beobachtungsergebnissen folgt, dass die Dunkle Energie seit acht Millionen Jahren nicht an Stärke zugenommen hat. Dies spricht dafür, dass es sich bei der Dunklen Energie um die klassische Vakuumenergie (auch als Einsteins kosmologische Konstante bezeichnet) handelt, deren Energiedichte konstant bleibt (Zustandsparameter $w = -1$; $dw/dt = 0$).
Ein weiteres Beobachtungsprogramm zur Erforschung der Dunklen Energie startet 2018 unter der Bezeichnung Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI). Mit dem 4-m-Mayall-Teleskop auf dem Kitt Peak National Observatory (Arizona) sollen Rotverschiebungen von 30 Millionen Galaxien bis zu zehn Milliarden Lichtjahren Distanz hochpräzise gemessen und mit Supernova-Helligkeitsmessungen verglichen werden.

Künstlerische Darstellung einer Supernova-Detonation. (ESO)

Auch mit dem im Bau befindlichen Large Synoptic Survey Telescope (LSST) mit 8,4 m Spiegeldurchmesser soll ab 2019 mit einer 3,2-Gigapixel-Kamera nach der Dunklen Energie gefahndet werden.
Die Radioastronomen lässt die Dunkle Energie ebenfalls nicht kalt. Mit dem Square Kilometre Array (SKA), das ab 2020 betriebsbereit sein soll, sollen die vermuteten intergalaktischen Wolken aus kaltem, neutralem Wasserstoff in den Galaxiensuperhaufen durch Beobachtung der 21-cm-Linie vermessen und ihre zunehmende Ausdehnung im Laufe der Geschichte des Kosmos registriert werden.
Speziell zur Untersuchung der Dunklen Energie soll das von der europäischen Weltraumagentur ESA geplante Weltraumteleskop Euclid dienen, an dem sich auch die amerikanische NASA beteiligt. Genau genommen ist Euclid kein Einzelfernrohr, sondern ein Doppelinstrument aus zwei 1,2-m-Korsch-Teleskopen, eines für den sichtbaren Spektralbereich und eines für das nahe Infrarot. Die Brennweite beträgt jeweils 24,5 Meter. Euclid soll im Jahre 2020 vom europäischen Weltraumbahnhof Kourou in Französisch-Guayana gestartet werden und im Lagrange-Punkt L2 in etwa 1,5 Millionen Kilometer Entfernung von der Erde platziert werden.
Täglich soll Euclid rund 850 Gigabyte an Daten zur Erde funken. In der Betriebszeit von sechs Jahren will man etwa ein Drittel der Fläche der Himmelskugel (etwa 14.000 Quadratgrad) bis in eine Raumtiefe von zehn Milliarden Lichtjahren erfassen. Neben der Messung von Rotverschiebungen von mehr als zwei Milliarden Galaxien sollen auch großräumig Gravitationslinsen erfasst werden, um die Massen von Galaxienhaufen zu bestimmen.
Spätestens 2030 wird man wissen, welches Schicksal die Dunkle Energie dem Universum bescheren wird: Das Große Zerreißen oder den unendlich langen Weg zum zeitlosen Zustand der Ewigkeit, in dem nichts mehr passiert.
Vielfach wird die Dunkle Energie als „mysteriös" bezeichnet. Im Grunde ist die Dunkle Energie nicht mysteriöser als die Gravitation. Beide werden durch Energiefelder repräsentiert, die auf Materie Kraft ausüben - einmal abstoßend, dann wieder anzie-

hend. Nur ist die Gravitation seit Isaac Newton, also seit mehr als dreihundert Jahren bekannt, die Dunkle Energie beziehungsweise ihre Wirkung auf die Expansion des Alls aber erst seit zwanzig Jahren. Beides sind Feldtheorien, deren quantenmechanische Ausarbeitung noch fehlt. Im Unterschied zur Gravitation wird die Dunkle Energie mit einem quellenfreien Skalarfeld beschrieben. Sie kann schlicht als Antigravitation aufgefasst werden, was den Symmetrieprinzipien der Physik entspricht.



Das Weltraumteleskop Euclid (ESA/C. Carreau)