

■ Dunkle Energie im frühen Universum?

Beobachtungen weit entfernter Supernovae liefern neue Erkenntnisse zur beschleunigten Expansion des Universums und den Eigenschaften der Dunklen Energie.

Die Expansion des Universums wird von seinem Inhalt bestimmt. Der direkteste Weg, die verschiedenen Komponenten des Universums zu erkunden, besteht darin, sowohl die momentane Expansionsrate, als Hubble-Konstante bezeichnet, als auch deren Entwicklung mit der Zeit zu vermessen. Da wir das lokale Universum am besten beobachten können, kennen wir die Hubble-Konstante relativ genau. Eine bisher unbeantwortet gebliebene Frage ist, wie sich die Expansion in der Vergangenheit entwickelt hat und wie die Zukunft des Universums aussehen wird. Adam Riess vom Space Telescope Science Institute und der Johns Hopkins Universität in Baltimore hat nun gemeinsam mit Kollegen Beobachtungen von entfernten Typ-Ia-Supernovae vorgelegt, die die Veränderung der Expansion modell-unabhängig belegen und weitere Eigenschaften der Dunklen Energie beschreiben [1].

Nimmt man die Allgemeine Relativitätstheorie als grundlegende Theorie der Gravitation, so ergibt sich zwangsläufig, dass die Entwicklung des Universums von den verschiedenen Energiekomponenten bestimmt wird. Alexander Friedmann zeigte, dass die Einsteinsche Theorie ein expandierendes Universum zwingend vorhersagt. Edwin Hubble entdeckte dann Ende der Zwanzigerjahre des letzten Jahrhunderts, dass die Fluchtgeschwindigkeit der Galaxien mit deren Entfernung zunimmt und hat damit die Expansion des Universums als eine beobachtbare Größe eingeführt. Ende der Neunzigerjahre wurde schließlich die Beschleunigung der Expansion durch Beobachtungen der Typ-Ia-Supernovae entdeckt, mit deren Hilfe sich genaue kosmologische Entfernungen messen lassen. Seit dieser Entdeckung haben Theoretiker sich den Kopf zerbrochen, welche Masse-Energie-Komponente für die Beschleunigung verantwortlich sein könnte [2].



Diese drei Supernovae (oben vor, unten nach der Explosion) gehören zu den weitest entfernten Sternener Explosionen, die mit dem Hubble-Weltraumteleskop beobachtet werden konnten.

In den letzten paar Jahren hat sich ein „Konkordanzmodell“ der Kosmologie herauskristallisiert: ein flaches Universum mit Photonen, Baryonen, Dunkler Materie und Dunkler Energie als Hauptkomponenten. Der Begriff Konkordanz wird benützt, um darauf hinzuweisen, dass unabhängige Beobachtungen ein Set bestimmter Parameter bevorzugen, die zugrundeliegende Physik aber nicht verstanden ist. In diesem Sinn sind leider sowohl Dunkle Materie als auch Dunkle Energie Platzhalter für noch unverstandene Physik.

Dunkle Ursachen der Expansion

Dunkle Materie wirkt gravitativ wie normale, baryonische Materie, wechselwirkt ansonsten aber nicht mit der zugänglichen Welt oder sich selbst. Die Dunkle Materie ist mitverantwortlich für die Entwicklung der großräumigen Struktur der Verteilung der Galaxien im Universum.

Im Gegensatz dazu hat die Dunkle Energie die Eigenschaft, dass sie auch auf sehr großen Skalenlängen nicht „klumpt“. Dazu wird sie von einer Zustandsgleichung beschrieben, in der eine höhere Dichte nicht einem größeren Druck entspricht, sondern im Gegenteil eine größere Abstoßung erzeugt. Obwohl viele

theoretische Ansatzpunkte vorgeschlagen wurden, gibt es noch keine überzeugende Erklärung für die Natur der Dunklen Energie. Am „einfachsten“ wird immer noch die kosmologische Konstante angesehen. Die wechselvolle Geschichte dieses Parameters seit seiner Einführung durch Einstein ist schon oft beschrieben worden. Als Beschreibung der Energie des quantenmechanischen Vakuums lässt sich die kosmologische Konstante von der heutigen Teilchenphysik nicht erklären. Alternative Erklärungen für die Dunkle Energie sind ein Teilchenfeld, dass ähnlich wie die Inflation Energie ins Universum pumpt, mögliche Effekte höherer Dimensionen oder gar Anzeichen von „neuer Physik“.

Mit der nun vorgelegten ersten modell-unabhängigen Bestimmung der universellen Expansion mittels entfernter Typ-Ia-Supernovae haben Adam Riess und Kollegen die Eigenschaften der Dunklen Energie weiter eingeschränkt und festgestellt, dass die Dunkle-Energie-Komponente schon seit einiger Zeit die Expansion beeinflusst. Dazu haben Riess und Kollegen mit dem Hubble Space Telescope – das Teleskop hatte als seine Hauptaufgabe, die Hubble-Konstante genau zu bestimmen, daher der Name – 21

neue, weit entfernte Supernovae gefunden und ausgemessen. Die Entfernungen sind so groß, dass die Mehrheit der beobachteten Supernovae explodierten, bevor unsere Sonne und die Erde entstanden (vor 5 bzw. 4,5 Milliarden Jahren). Bei den entferntesten Supernovae blickt man neun Milliarden Jahre zurück. Die Leuchtkräfte der Typ-Ia-Supernovae lassen sich nun so normieren, dass man die genauen Entfernungen zu ihnen ermitteln kann. Mit diesen Maßstäben gelang es Riess et al., die Expansionsrate als Funktion der Rotverschiebung zu bestimmen. Es zeigt sich, dass das Universum in der Vergangenheit schneller expandierte. Allerdings ist in den letzten circa sechs Milliarden Jahren die Abbremsung von einer Beschleunigung überlagert worden. Die Expansion verlangsamt sich zwar immer noch, nur nicht so schnell, wie in den einfachsten kosmologischen Modellen erwartet. Die Analyse in der

neuen Publikation beschreibt die Beschleunigung in einer modellunabhängigen und überzeugenden Weise.

Es ist extrem wichtig, die Eigenschaften der Dunklen Energie so vielfältig wie möglich zu untersuchen. Die neuen Daten weisen darauf hin, dass die kosmologische Konstante die Messergebnisse immer noch ausgezeichnet beschreibt. Modelle einer zeitabhängigen Dunklen Energie werden mit den neuen Daten einigermäßen eingeschränkt, allerdings müssen dazu auch andere, unabhängige Messungen miteinbezogen werden. Die Bestimmung der mittleren Massedichte, z. B. mittels der baryonischen akustischen Oszillationen in Verbindung mit den Inhomogenitäten des Mikrowellenhintergrundes, wie sie mit der Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) gemessen wurden, hilft da sehr.

Die entfernten Supernovae erlauben Riess und Kollegen auch

eine Untersuchung über die „Stärke“ der Dunklen Energie bei hoher Rotverschiebung. Sie haben dabei festgestellt, dass die Effekte der Dunklen Energie auch schon bei hohen Rotverschiebungen vorhanden sind. Dies ist im Rahmen von Modellen, in denen die Dunkle Energie erst kürzlich bestimmend wurde, schwer zu erklären.

Die Eigenschaften der Dunklen Energie müssen besser vermessen werden, bevor die Modelle weiter eingeschränkt werden können. Die entfernten Supernovae, die von Riess und seinen Kollegen beobachtet wurden, sind ein wichtiger Schritt in dieser Richtung.

Bruno Leibundgut

Dr. Bruno Leibundgut, European Southern Observatory, Karl-Schwarzschild-Straße 2, 85748 Garching

- [1] A. Riess et al., *The Astrophysical Journal* **656**, 10. Februar 2007, astro-ph/0611572
 [2] vgl. D. Giulini und N. Straumann, *Physikal. Blätter*, November 2000, S. 41; C. Wetterich, *Physik Journal*, Dezember 2004, S. 43

■ Der Dreh mit dem Magnetismus

Magnetische Wirbel lassen sich mit überraschend schwachen und kurzen magnetischen Pulsen schalten und eröffnen Aussichten auf leistungsfähige Datenspeicher

Obgleich bereits mehrfach totgesagt, sind magnetische Medien seit Ende der 1950er-Jahre als permanente Datenspeicher im Einsatz, wobei sowohl bezüglich der Datendichte als auch bei der Lese- und Schreibgeschwindigkeit faszinierende Fortschritte gemacht wurden. Zwar bestehen diese Medien – wie bereits die magnetischen Bänder in der Frühzeit der magnetischen Datenspeichertechnik – noch immer aus granularen Filmen, dennoch erreichen z. B. moderne Festplatten eine Speicherdichte von 100 Gbit/Inch² bei einer Schreibgeschwindigkeit von ca. 100 MHz.

Solch granulare Medien bestehen aus winzigen Körnern, die sich recht gut als eindomänig, d. h. homogen magnetisiert, verstehen lassen. Daraus ergeben sich jedoch einige grundlegende Probleme, die einer weiteren Verbesserung der Performance im Wege stehen:

Einerseits besitzt jedes Korn dort, wo der Vektor der Magnetisierung senkrecht zu seiner Korngrenze steht, ein magnetisches Streufeld, über welches benachbarte Partikel wechselwirken. Dies führt zu unerwünschten Kopplungseffekten. Des Weiteren sinkt mit dem Kornvolumen auch die magnetische Anisotropieenergie, die ihre Ursache in der Spin-Bahn-Kopplung hat, zu einer Vorzugsrichtung der Magnetisierung führt und diese z. B. gegen thermische Fluktuationen stabilisiert. Unterhalb einer kritischen Größe, dem „superparamagnetischen Limit“, ändert die Magnetisierung allein durch thermische Anregungen ihre Richtung, was unweigerlich zum Datenverlust führt. Schließlich ist die Geschwindigkeit, mit der eindomänige Partikel ummagnetisiert werden können, durch die Präzessionsfrequenz limitiert, sodass sich selbst unter Ausnutzung

ausgefeilt getakteter Feldverläufe eine „Schallmauer“ von ca. 150 ps nicht unterschreiten lässt [1].

Deshalb wurde seit langem darüber nachgedacht, die besonderen Eigenschaften sehr flacher Nanopartikel zu nutzen. Hier führt die Minimierung der im Wesentlichen aus Austausch- und Streufeldenergie bestehenden Gesamtenergie zu einer Wirbelbildung [2]. Dabei lassen sich Diskontinuitäten nur durch einen senkrecht magnetisierten Bereich im Zentrum vermeiden (**Abb. a**). Der Durchmesser dieses sog. Wirbelkerns, der schon lange vorhergesagt [3], aber erst kürzlich direkt gemessen werden konnte [4], beträgt nur etwa 10 nm.

Diese außergewöhnliche magnetische Konfiguration bietet gleich mehrere Vorzüge: Drehsinn des Wirbels und Ausrichtung des Wirbelkerns lassen sich unabhängig voneinander einstellen, wodurch