NZZ Online Forschung und Technik

Mittwoch, 6. Oktober 1999

Kosmologie im Umbruch

Entfernte Sternexplosionen verändern unser Bild des Universums

Von Bruno Leibundgut*

Die in den letzten beiden Jahren gemachte Entdeckung, dass das Universum sich immer schneller ausdehnt, zwingt Forscher zum Umdenken. Die gravitierende Masse im Universum ist für dessen weitere Entwicklung längst nicht so ausschlaggebend, wie man bisher dachte. Statt dessen scheint eine aus dem Vakuum resultierende Energie zu dominieren.

Alle Materie im Universum unterliegt der Gravitationskraft. In einem Universum, in dem es nichts als Materie gibt, sollte sich die vom Urknall herrührende Expansion deshalb verlangsamen. In den letzten zwei Jahren haben sich allerdings die Hinweise verdichtet, dass das Gegenteil der Fall ist: die Expansion des Universums scheint trotz der bremsenden Gravitationskraft immer mehr an Schwung zu gewinnen. Die einfachste Erklärung hierfür ist, dass es neben der Materie noch eine andere Form von Energie im Universum geben muss, die der Gravitation entgegenwirkt. Diese Entdeckung hat weitreichende Konsequenzen für unser Bild vom Universum.

Urknalltheorie und ihre Erweiterungen

Alle gängigen Weltmodelle beruhen auf der Idee des Urknalls. Kehrt man die Expansion des Universums um, so muss es zu einer früheren Zeit eine Phase gegeben haben, während deren alle Objekte viel näher zusammen waren als heute. Nicht nur die mittlere Dichte des Universums, auch seine Temperatur war damals viel höher. Die Urknalltheorie sagt voraus, dass ein Nachglühen dieser heissen Phase auch heute noch als universelle Hintergrundstrahlung beobachtbar sein sollte. Weil sich das Universum ausgedehnt hat, sollte diese Strahlung heute sehr kühl sein. Die im Jahr 1965 gemachte Entdeckung dieses Mikrowellenhintergrundes durch Arno Penzias und Robert Wilson hat der Urknalltheorie zum Durchbruch verholfen. Gestützt wird die Urknalltheorie auch durch die Häufigkeitsverteilung der leichten chemischen Elemente. Wasserstoff, Helium, Lithium und Bor müssen in den ersten Minuten des Urknalls entstanden sein, während alle anderen Elemente erst später – in Sternen und Sternexplosionen – hergestellt wurden. Die beobachteten Häufigkeiten der leichten Elemente stimmen exakt mit den Vorhersagen der Urknalltheorie überein.

Die Urknalltheorie hat über die Jahre verschiedene Erweiterungen erfahren. So sind sogenannte inflationäre Theorien eingeführt worden, die entscheidende Probleme des Urknalls lösen sollten. In der ursprünglichen Theorie ist nicht erklärbar, weshalb weit entfernte Regionen am Himmel eine solch homogene Erscheinung haben. Nach der ursprünglichen Theorie sollten diese Bereiche nämlich «kausal entkoppelt» sein. Damit ist gemeint, dass selbst Signale, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten, keine Chance haben, die Entwicklung in den weit auseinanderliegenden Bereichen zu synchronisieren und zu koordinieren. Um dieses Problem zu umgehen, wurde eine kurze Phase rapider Beschleunigung, die Inflation, im sehr frühen Universum eingeführt. Dies hat zur Folge, dass das heute beobachtbare Universum aus einem ursprünglich viel kleineren, kausal verknüpften Bereich entstanden ist. Eine entscheidende Vorhersage dieser Theorien ist, dass das Universum während der Inflation «flach gezogen» wurde, heute also eine euklidische Raum−Zeit−Geometrie besitzen sollte.

Die modernen Weltmodelle basieren auf den Feldgleichungen der allgemeinen Relativitätstheorie. Fundamentale Messgrössen dieser Theorie sind die momentane Expansionsrate, bekannt als Hubble−Konstante, und die mittlere Energiedichte des Universums. Die Bestimmung dieser Parameter ist eine der Hauptaufgaben der beobachtenden Kosmologie. Die Versuche zur exakten Bestimmung der Hubble−Konstante haben in den letzten Jahren eine gewisse Konvergenz gezeigt, und ein definitiver Wert dieser Konstante ist absehbar. Die mittlere Energiedichte des Universums war hingegen bis vor ein paar Jahren im wesentlichen unbestimmt. Die Zukunft des Universums hängt entscheidend von diesem Parameter ab, und es wurden verschiedene Versuche unternommen, ihn zuverlässig zu messen.

Durch die Beobachtung von weit entfernten Supernovae ist es in den letzten beiden Jahren möglich geworden, die globale Geometrie des Universums zu bestimmen. Da Energie und Raumgeometrie in einem einfachen Zusammenhang stehen, kann eine Messung der globalen Geometrie die mittlere Energiedichte des Universums bestimmen. Experimente dieser Art sind schon vor sechzig Jahren vorgeschlagen worden, scheiterten allerdings in der Ausführung, weil man kosmische Distanzen nicht genau genug messen konnte. Für solche Distanzmessungen werden sehr leuchtkräftige Objekte benötigt. Die einfachste Methode beruht auf sogenannten «Standardkerzen», d.h. Objekten, die unabhängig von ihrer Position im Universum und ihrem Alter immer die gleiche absolute Leuchtkraft haben. Vergleicht man die gemessene scheinbare Helligkeit einer solchen Standardkerze mit ihrer absoluten Leuchtkraft, kann ihre Distanz relativ einfach gemessen werden. Der Trick besteht darin, gute astronomische Standardkerzen zu finden.

Gewisse Sternexplosionen, Supernovae vom Typ Ia, die sich in alten, verbrannten Sternen ereignen können, sind als ideale Kandidaten für eine solche Anwendung erkannt worden. Entsprechend den gängigen Theorien explodieren diese Sterne auf Grund einer nuklearen Kettenreaktion, in der Kohlen− und Sauerstoff zu Nickel fusionieren. Dieses Nickel ist radioaktiv und zerfällt über Kobalt zu Eisen. In diesem Prozess wird eine exakt definierte Energiemenge freigesetzt, die teilweise in optisches Licht umgewandelt wird. Da man davon ausgeht, dass die Fusions− und Zerfallsprozesse in diesen Sternen immer und überall die gleichen sind, sollte auch ihre absolute Leuchtkraft nur wenig variieren.

In den letzten beiden Jahren haben zwei internationale Forschergruppen − das High−z Supernova Search Team und das Supernova Cosmology Project − unabhängig voneinander nach Supernovae gesucht, die möglichst weit von der Erde entfernt sind. Der Blick in die ferne Vergangenheit sollte zeigen, in welchem Masse die Expansion des Universums durch die in ihm enthaltene Materie gebremst wird. Da man den Beitrag der sichtbaren Materie zur Massendichte zu kennen glaubt, ergäbe sich daraus eine Abschätzung der dunklen Materie. Die dunkle Materie wurde schon vor beinahe 20 Jahren postuliert, um die Dynamik einzelner Galaxien und Galaxienhaufen zu erklären. Nach allem, was man heute weiss, liefert die dunkle Materie den dominanten Beitrag zur Masse des Universums.

Die Messungen der beiden Gruppen zeigten ein unerwartetes Ergebnis. Die Entfernungen, die mit den Supernovae bestimmt wurden, sind nicht nur grösser, als man es in einem durch Materie gebremsten Universum erwarten würde; selbst in dem hypothetischen Fall eines masselosen, also ungebremst expandierenden Universums ergäben sich nicht so grosse Distanzen zwischen den Supernovae. Es scheint, als habe sich die Expansion des Universums in den letzten 5 bis 10 Milliarden Jahren sogar noch beschleunigt. Das ist ein paradoxes Ergebnis, da dies nur möglich ist, wenn es im Universum neben der an Materie gebundenen Energie noch eine andere Energieform gibt. Diese Energieform wird auch als Kosmologische Konstante bezeichnet.

In einem solchen Universum ist der Zusammenhang zwischen der Raumgeometrie und der mittleren Energiedichte nicht mehr ganz so einfach wie in einem Universum, in dem es nichts als Materie gibt. Zum Glück kann man aber auf andere Ergebnisse zurückgreifen. Neuere Messungen der Schwankungen im Strahlungshintergrund zeigen, dass die Geometrie des Universums flach sein muss. Dies ist für viele Theoretiker eine willkommene Nachricht, da inflationäre Modelle damit bestätigt würden. In einem flachen Universum lassen sich die Supernovae−Distanzmessungen so interpretieren, dass heute etwa 70 Prozent aller Energie in Form der Kosmologischen Konstante vorliegt, während nur 30 Prozent an (sichtbare und dunkle) Materie gebunden ist.

Einsteins «Eselei»

Schon Albert Einstein hatte in seine Feldgleichungen der allgemeinen Relativitätstheorie eine abstossende Komponente, die Kosmologische Konstante, eingeführt. Diese Konstante sollte gewährleisten, dass das Universum statisch bleibt und nicht unter dem Einfluss der Schwerkraft in sich zusammenstürzt. Nach der Entdeckung der kosmischen Expansion und der dynamischen Natur des Universums durch Edwin Hubble hat er diese ad hoc eingeführte Konstante als seine «grösste Eselei» bezeichnet − wie es scheint zu Unrecht: Die mit den Supernovae gemessenen Entfernungen sind so gross, dass ein Beitrag der Kosmologischen Konstante unabdingbar ist.

Natürlich ist es auch möglich, dass unsere Standardkerzen sich über die kosmologischen Zeiten verändert haben und damals, als die Explosionen stattfanden, einfach nicht so hell waren wie Supernovae der jüngeren Zeit. Auf Grund der detaillierten Beobachtungen sind Helligkeitsveränderungen der entfernten Supernovae selbst auszuschliessen. Sie gleichen in praktisch allen beobachtbaren Parametern den nahen Supernovae. Eine andere Möglichkeit besteht darin, dass ein Teil des ausgesandten Lichts vom interstellaren Staub verschluckt wird. Da der Staub bevorzugt blaues Licht absorbiert, sollte sich im Spektrum der Supernovae ein Farbeffekt zeigen, was jedoch nicht der Fall ist. Es ist allerdings vorstellbar, dass der Staub vor langer Zeit andere optische Eigenschaften besessen hat.

Ein weiterer Effekt wird durch die Lichtablenkung an sehr dichten und massiven Objekten erzeugt. In diesem Fall werden entfernte Objekte in ihrer Helligkeit geschwächt, ohne dass eine Farbveränderung auftritt. Selbst die Supernovae mit der grössten Distanz zur Erde sind jedoch nicht weit genug entfernt, um durch diesen Effekt genügend beeinflusst zu werden. Alles in allem ist die einfachste Erklärung immer noch, dass die Entfernungen zu gross für ein frei expandierendes Universum sind.

Die Annahme, dass die Expansion des Universums durch eine abstossende Kraft vorangetrieben wird, lässt auch ein altes Paradoxon in neuem Licht erscheinen. Die Hubble−Konstante lässt sich direkt in ein Alter des Universums umrechnen. In einem von Materie dominierten Universum ergab sich damit ein Alter, das etwas kleiner war als das der ältesten bekannten Sterne. Dieser offensichtliche Widerspruch hat viele Astronomen angespornt, die Messungen der Hubble−Konstante zu verbessern. Mit den Werten, welche die Supernovae für die Materiedichte und die Kosmologische Konstante liefern, ergibt sich jetzt ein Alter des Universums zwischen 13 und 15 Milliarden Jahren. In einem solchen Universum haben auch die ältesten Kugelsternhaufen bequem Platz, die auf 11 bis 12 Milliarden Jahre geschätzt werden.

Die Zukunft des Universums

Allerdings erzeugen die neuen Messungen auch neue Fragen. Die Kosmologische Konstante kann in der Teilchenphysik mit der Quantenenergie des Vakuums identifiziert werden. Alle Vorhersagen der Teilchenphysik sind um viele Grössenordnungen grösser als die jetzt gemessene Kosmologische Konstante. Ein weiteres Problem stellt der Zeitpunkt der Messung dar. In der Anfangsphase wurde die Entwicklung des Universums zuerst durch die Strahlungsdichte und dann durch die Materiedichte bestimmt. Heute ist das Universum kalt, und auch die Materiedichte wird immer kleiner, je mehr sich das Universum ausdehnt. In Zukunft wird deshalb die Kosmologische Konstante, also die Vakuumenergie, zum dominierenden Faktor der Expansion. Wir scheinen in der einzigen Epoche zu leben, in der es möglich ist, beide Komponenten zu messen. Für manche Kosmologen ist diese Koinzidenz nicht akzeptierbar, weil sie dem Menschen eine Sonderstellung im Universum einräumt.

Mit der Existenz einer Kosmologischen Konstante ist auch die Zukunft des Universums besiegelt: es wird ewig expandieren. Das heisst, dass unser Universum zwar einen Anfang im Urknall hatte, aber nie ein Ende finden wird. Ein weiterer Aspekt der neuen Messungen ist, dass die dominierende Energie im Universum nicht aus anziehender Materie besteht, sondern in einer uns bisher völlig unbekannten Form vorliegt. Dies kann auch als erweitertes Kopernikanisches Prinzip angesehen werden. Die Materie, aus der die sichtbaren Galaxien, die Sterne und die Erde mit all ihren Bewohnern bestehen, ist nur ein kleiner Teil der gesamten Masse im Universum. Diese wiederum stellt nur einen kleinen Teil der gesamten Energie im Universum dar.

* Der Autor arbeitet an der Europäischen Südsternwarte. Er ist Mitglied des High−z Supernova Search Team.

Neue Zürcher Zeitung, 6. Oktober 1999