

# Ursprung und Evolution des Universums

**Die astronomische Forschung zeigt, wie wir Menschen mit der Sternenwelt vernetzt sind. Aus den Wurzeln im Urknall hat das Universum seinen Reichtum an Strukturen entfaltet wie ein Baum mit unzähligen Verzweigungen.**

VON JAN OLOF STENFLO

Wegen seiner endlichen Geschwindigkeit bringt uns das Licht der Sternenwelt Botschaften aus der Vergangenheit. Raum und Zeit, Entfernung und Vergangenheit sind aneinander gekoppelt. Wir sehen die kosmischen Objekte nicht, wie sie jetzt sind, sondern wie sie waren, als das beobachtete Licht das Objekt verliess. Deshalb sind unsere Augen und Teleskope (unsere «verstärkten Augen») eine Art Zeitmaschinen.

An nahe liegenden Objekten ist diese Zeitdifferenz kaum wahrzunehmen. Den Mond sehen wir, wie er vor 1,5 Sekunden war, im Fall der Sonne blicken wir 8 Minuten zurück, in dem des nächstliegenden Sterns, Alpha Centauri, 4 Jahre. Die Betrachtung des Zentrums unserer Galaxie, der Milchstrasse mit ihren 100 Milliarden Sonnen, führt uns etwa 30 000 Jahre zurück in die Vergangenheit. Dies ist astronomisch gesehen verschwindend wenig im Vergleich zum Alter von 4,6 Milliarden Jahren von Sonne und Erde.

Anders wird es, wenn wir mit den mächtigen Teleskopen tief in die Galaxienwelt hineinblicken. Mit dem Hubble-Weltraumteleskop können wir beispielsweise über 10 Milliarden Jahre zurück-

blicken und Galaxien aus jener Zeit sehen, in der das Alter des Universums erst zehn Prozent seines jetzigen erreicht hat, vor der Geburt von Sonne und Erde. Zu diesem Zeitpunkt sahen die Galaxien tatsächlich anders aus als die heutigen. Im Radio-Mikrowellenbereich «sehen» wir sogar die «Oberfläche» des Urknalls, eine Art Wand in alle Richtungen, an der das Alter des Universums etwa hunderttausendmal geringer war als das heutige.

## Urknallstrahlung

Die Astronomie ist eine grundsätzlich empirische und physikalische Wissenschaft und wurde in den letzten hundert Jahren praktisch synonym zum Begriff «Astrophysik». Die Kosmologie, die Lehre über das Universum als Ganzes, war in der Vergangenheit vorwiegend theoretisch orientiert, aber mit der Entwicklung neuer instrumenteller Möglichkeiten ist auch sie zu einem empirisch geführten Wissenschaftszweig der Astronomie geworden. Eine der wichtigsten Vorhersagen der Kosmologie ist die Existenz einer Hintergrundstrahlung von allen Teilen des Himmels, eine thermische Strahlung im Mikrowellengebiet mit einer hochgradigen Isotropie. Es handelt sich um den stark verdünnten Rest des intensiven Strahlungsfeldes aus der Nähe des Anfangszustands im Urknall. Diese Urknallstrahlung wurde unabsichtlich im Jahre 1964 von Arno Penzias und Robert Wilson am Bell Telephone Laboratory in New Jersey entdeckt und mit dem Nobelpreis belohnt.

Gemäss der Urknalltheorie war in der Nähe der Frühphase das ganze Universum strahlungsdominiert, von intensivem Licht gefüllt, in thermodynamischem Gleichgewicht mit der Materie.

Mit der explosionsartigen Ausdehnung des Universums hat sich dieses Strahlungsfeld abgekühlt von 10 Milliarden Grad eine Sekunde nach dem Anfang bis zu den heute gemessenen 2,7 Grad (über dem absoluten Nullpunkt). Während der ersten hunderttausend Jahre war das Universum völlig undurchsichtig, da bei den hohen Temperaturen die Materie ionisiert war, und es deshalb eine enge Wechselwirkung zwischen Strahlung und Materie (via Lichtstreuung an freien Elektronen) gab.

Als aber nach etwa 300 000 Jahren die Temperatur unter 3000 Grad sank, konnten sich die freien Protonen mit den freien Elektronen kombinieren und neutralen Wasserstoff bilden. Da das Licht nicht mehr mit genügend freien Elektronen wechselwirken konnte, wurde das Universum durchsichtig. Das Licht der heute beobachteten Hintergrundstrahlung stammt aus dieser Zeit. Mit anderen Worten: Die Sicht in die Vergangenheit ist frei bis zu diesem Zeitpunkt, aber weiter können wir nicht blicken, da das Universum zu jener Zeit nicht durchsichtig war. Es ist tatsächlich wie eine Oberfläche, eine Wand, hinter der sich der Urknall versteckt. Wir können nicht den ganzen Weg bis zum Anfang zurückblicken, aber 99,998 Prozent des Weges. Der Rest bleibt uns «zensuriert».

Während der undurchsichtigen Frühphase gab es keine Sterne oder Galaxien. Wegen der engen Kopplung zwischen Strahlung und Materie hat das Licht alle Materiefluktuationen geglättet und die Möglichkeit zur Sternbildung blockiert. Erst nach der Entkopplung, in der durchsichtigen Phase, konnten sich Galaxien und Sterne bilden. Diese ersten Generationen von Galaxien können

Jan Olof Stenflo ist Professor für Astronomie an der ETH Zürich.

wir mit dem Hubble-Weltraumteleskop beobachten und finden, dass sie andere Eigenschaften als die heutigen Galaxien haben.

#### **Das Innere des Urknalls**

Da wir das Innere des Urknalls nicht direkt sehen können, müssen wir aus den genauen, beobachteten Eigenschaften der Oberfläche des Urknalls indirekt die Verhältnisse im Inneren bestimmen. Auf der Sonne verwendet man eine analoge Methode, die Helioseismologie. Man beobachtet, dass die ganze Sonne schwingt, mit einer Vielzahl (Tausenden) von diskreten Schwingungsfrequenzen, die von Resonanzen aus stehenden Schallwellen in der Sonne herrühren. Analoge Resonanzen von Schallwellen haben wir in Musikinstrumenten, beispielsweise in einer Geige. Es handelt sich also um «Töne», um die «Musik der Sonne».

Aus den beobachteten Frequenzen lässt sich die Variation der Schallgeschwindigkeit mit der Tiefe in der Sonne bestimmen. Da sich die Schallgeschwindigkeit proportional zur Wurzel der Temperatur verhält, kommt man zu einer empirischen Bestimmung der Temperaturverhältnisse im Inneren der Sonne. Früher basierten unsere Kenntnisse über den inneren Zustand der Sonne und der Sterne auf theoretischen Modellrechnungen von grossen Gaskugeln mit thermonuklearer Energieproduktion, aber durch die Helioseismologie lassen sich solche Modellrechnungen überprüfen. Die Theorien haben diesen neuen Test ausserordentlich gut bestanden. Dieser Erfolg gibt uns grösseres Vertrauen in die Richtigkeit der Sternevolutionsrechnungen, die zum Beispiel das zukünftige Schicksal unserer Sonne voraussagen und die Erklärung dafür liefern, wie die chemischen Elemente, aus denen die Planeten und das biologische Leben bestehen, entstanden sind.

Die beobachtete Oberfläche des Urknalls ist ausserordentlich glatt. Die grösste Abweichung von perfekter Glattheit in allen Richtungen ist eine Dipolanisotropie in der Grössenordnung von 0,01 Prozent die von der Erdbewegung bezüglich der Urknallstrahlung verursacht ist. In Richtung der Erdbewegung ist wegen des Dopplereffekts die Temperatur der kosmischen Hintergrundstrahlung ein kleines bisschen höher als in der Gegenrichtung. Wenn man diese Dipolanisotropie wegschubtrahiert, bleibt ein Fluktuationmuster mit einer typischen Amplitude von 0,001 Prozent. Das Muster hat Beiträge auf allen Winkelskalen. Das beobachtete Fluktuationmuster widerspiegelt Verhältnisse im Inneren des Urknalls, ähnlich wie das beobachtete Schwingungsmuster auf der Sonnenoberfläche die Verhältnisse im Inneren der Sonne widerspiegelt.

Auch im Urknall spielen Resonanzen und akustische Schwingungen eine wichtige Rolle, obwohl die Verhältnisse und die zugrunde liegende Theorie ganz anders sind als im Fall der Sonne. Insbesondere kann man aus dem beobachteten Fluktuationsspektrum schliessen, dass die grossskalige Raumkrümmung praktisch null ist (flache Raumzeit). Auch beinhaltet das Spektrum Informationen zur Antwort der Frage, zu welchen Teilen die so genannte dunkle Materie baryonisch (gewöhnliche Materie) oder nicht-baryonisch (bestehend aus exotischen, nur schwach wechselwirkenden Teilchen) zusammengesetzt sei, obwohl die Messgenauigkeit noch keine klare Antwort erlaubt. Eine Reihe zukünftiger Experimente sind geplant, um die Messgenauigkeit sehr wesentlich zu erhöhen. Je genauer und detaillierter wir das Fluktuationmuster auf der Urknalloberfläche kennen, desto besser und ergiebiger können wir die kosmologischen Fragen beantworten.

Für die Interpretation des Fluktuationmusters werden die bekannten physikalischen Gesetze und Theorien verwendet. Die Richtigkeit der Theorien können wir durch Laborexperimente prüfen. Die extremen Verhältnisse in der Frühphase des Universums können wir nur mit Teilchenbeschleunigern wie am CERN in Genf nachahmen, da die vorherrschenden Energien in der ersten Sekunde des Urknalls sehr hoch waren. Deshalb interessieren sich heutzutage die Teilchenphysiker sehr für Kosmologie, sie betreiben mit ihren Beschleunigern Urknallphysik. Es gibt also eine Art Konvergenz zwischen der Physik des Mikrokosmos (Teilchenphysik) und der Physik des Makrokosmos (Kosmologie).

Wenn wir uns in der ersten Urknallsekunde dem Punkt Null nähern, nehmen die Energien der Teilchen und die Temperaturen des Strahlungsfeldes steil zu. Bei einer Zeit früher als  $10^{-10}$  Sekunden nach der Anfangssingularität hat man mit Teilchenenergien zu tun, die noch nicht mit Beschleunigern auf der Erde erreicht werden können (sie werden aber in der beobachteten kosmischen Strahlung von Neutronensternen und aktiven Galaxienkernen erreicht). Deshalb können zurzeit die verwendeten Theorien und Naturgesetze nur bis zu diesem Zeitpunkt im Urknall durch Laborexperimente überprüft werden. Diese Grenze verschiebt sich natürlich mit dem Bau grösserer Beschleuniger.

#### **Fusionsprozesse**

Mit den bekannten, experimentell überprüften physikalischen Theorien kann man zeigen, dass im Urknall ausser den leichtesten Elementen Wasserstoff, Helium, Lithium und Beryllium keine schwereren Elemente entstehen konnten. Sie sind später durch thermonukleare Fusionsprozesse in den Zentren von Sternen entstanden.

Mit unseren Teleskopen sehen wir Sterne in allen Entwicklungsstadien, wie sie geboren werden, wie sie sterben. Mittels Spektroskopie bestimmen wir ihre chemische Zusammensetzung. Je grösser die Masse eines Sterns ist, desto schneller verschleudert sie ihren Energievorrat von thermodynamischem Brennstoff. Ein Stern mit 10-mal grösserer Masse als die Sonne lebt beispielsweise ein Hundertstel so lang. Sterne mit mehr als 8 Sonnenmassen explodieren als Supernovae. Deshalb gab es zwischen dem Urknall und der Geburt der Sonne viele Generationen von massiven Sternen. In sonnenähnlichen Sternen können (in der Rote-Riesen-Phase) keine Elemente, die schwerer als Sauerstoff sind, aufgebaut werden, und sie entwickeln sich zu langsam, um zur chemischen Entwicklung der Galaxie wesentlich beizutragen.

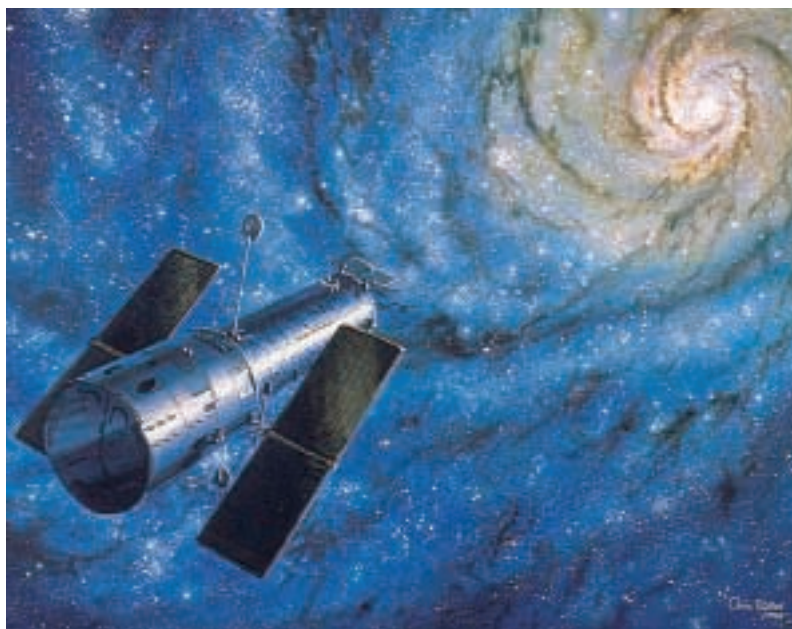
Nur in den massiveren Sternen können die schwereren Elemente entstehen. Diese Sterne haben ein gewaltsames Leben und schleudern am Ende ihres Lebens viel von ihrer verbrannten Materie in den interstellaren Raum zurück. Insbesondere die Supernovae, explodierende Sterne, spielen eine führende Rolle bei dieser Bereicherung des interstellaren Mediums und liefern das Eisen und die noch schwereren Elemente. Spätere Sternengenerationen, die in den Gas- und Staubnebeln zwischen den Sternen geboren werden, beginnen deshalb ihr Leben mit mehr schwereren Elementen als die vorherigen Generationen. Ohne diese schwereren Elemente kann es keine Planeten und kein biologisches Leben geben.

#### «Kinder der Sterne»

Durch Spektralanalyse der Sonnenatmosphäre und Untersuchung der Meteoriten kennen wir die chemische Zusammensetzung der Sonne zum Zeitpunkt ihrer Geburt: 75 Prozent Wasserstoff, 23 Prozent Helium, 2 Prozent

Elemente schwerer als Helium. Diese «kosmische Verunreinigung» von 2 Prozent wurde in früheren Sternengenerationen produziert und hat die Voraussetzungen für Planetenbildung und biologische Evolution geschaffen.

Anders wären, würde unser Universum anders aussehen. Ein Universum, in dem Menschen existieren können, ist nur dann möglich, wenn die Naturgesetze sehr genau ihre beobachteten Eigenschaften haben.



Mit dem Hubble-Weltraumteleskop können Astronomen über 10 Milliarden Jahre zurückblicken und Galaxien aus jener Zeit sehen, in der das Universum erst zehn Prozent seines jetzigen Alters erreicht hatte.

Wir wissen also, dass wir aus Sternmaterie bestehen, dass wir buchstäblich «Kinder der Sterne» sind. Der Kohlenstoff in unseren Zellen wurde in den Zentren von roten Riesensternen gebacken, das Eisen in unserem Blut hat Supernovaexplosionen erlebt. Jedes Atom in unseren Körpern hat eine grandiose kosmische Geschichte. Ohne die Existenz der Sterne wäre unsere eigene Existenz völlig undenkbar.

Die Geschichte der «kosmischen Alchemie» zeigt, wie wir Menschen mit der Sternenwelt vernetzt sind. Aus den Wurzeln im Urknall hat das Universum seinen Reichtum an Strukturen entfaltet wie ein Baum mit unzähligen Verzweigungen. Unsere tiefe Vernetzung mit der Natur können wir in vielen verschiedenen Formen verfolgen. Wenn beispielsweise die Fluktuationen auf der Urknalloberfläche, in der kosmischen Hintergrundstrahlung, etwas an-

Diese tiefgreifende Vernetzung zeigt, dass wir ein integrierter Bestandteil einer kosmischen Ganzheit sind, Teil eines kosmischen Gewebes unglaublicher Schönheit. Alle Erscheinungen auf unserer Erde, die Berge, die Ozeane, die Luft, die Pflanzen und die Tiere, sind wie wir auch «Kinder der Sterne». Wir erkennen, dass wir zusammen auf einem kleinen, verwundbaren Planeten leben, einer zerbrechlichen Perle im kosmischen Ozean. Auf diese Erkenntnis sollte auch eine Verantwortung folgen, eine gemeinsame Stewardship für unseren Planeten. Ob es uns gelingen wird, diese Verantwortung wahrzunehmen, ist eine Schicksalsfrage der Menschheit.

