

Primordiale Nukleosynthese

Heliumentstehung im Urknall

Beinahe alle chemischen Elemente, aus denen wir und unsere Umgebung bestehen, sind in Sternen entstanden. Dies gilt jedoch nicht für die beiden im Universum am häufigsten vorkommenden Elemente, Wasserstoff und Helium, die bereits kurz nach dem Urknall gebildet wurden.

Nach dem heutigen Stand der Kosmologie hat das Universum seinen Ursprung vor etwa 10–15 Milliarden Jahren in einem unendlich dichten und heißen Feuerball, dem Urknall. Es gibt allerdings bisher keine physikalische Theorie, die in dieser frühesten Entwicklungsphase des Kosmos gültig ist. Mit unserem heutigen Wissen können wir die Entwicklung des Universums erst ab etwa 10^{-43} Sekunden (ausgeschrieben wäre das eine 1 an der 43. Stelle nach dem Komma!) nach dem Urknall beschreiben, wobei allerdings noch viele Fragen offen sind.

Zu diesem frühen Zeitpunkt besteht das Universum aus einer Ursuppe von Elementarteilchen. Die Temperatur dieser Ursuppe beträgt 10^{32} Kelvin (Eine 1 mit 32 Nullen). Zum Vergleich: Die Sonnenoberfläche hat etwa 6000 Kelvin, im Zentrum der Sonne herrschen Temperaturen von 10 Millionen Kelvin. (Die Kelvin-Temperaturskala ist um 273 gegenüber der Celsius-Temperaturskala verschoben: 0 Kelvin entsprechen -273° Celsius)

Im Laufe seiner Entwicklung expandierte das Universum bis zu seiner heutigen Größe, dabei bildeten sich die Galaxien, Sterne und Planeten, die wir heute beobachten.

Während dieses Expansionsprozesses kühlte sich das Universum immer weiter ab. Die kosmische Hintergrundstrahlung, die ihren Ursprung im Urknall hat und an der gesamten thermischen Entwicklung des Universums teilgenommen hat, hat heute eine Temperatur von etwa 3 Kelvin (-270° Celsius)

In der ersten Minuten der Existenz des Universums, während der frühesten Abkühlungsphase, fanden Kernreaktionen statt, in denen das Helium gebildet wurde. Dies wird von der Theorie der *Primordialen Nukleosynthese* beschrieben.

Die ersten drei Minuten in der Geschichte des Kosmos

Urknall

- Beginn der Zeit und des Raumes
- Unendlich hohe Temperatur und Dichte

Es gibt bisher keine physikalische Theorie, die diesen Anfangszustand beschreibt.

Mit unserem heutigen Wissen ist die Entwicklung des Universums ab 10^{-43} Sekunden nach dem Urknall beschreibbar.

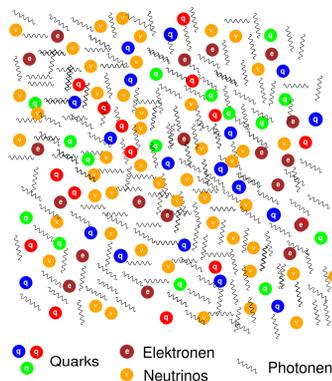


Elementarteilchen-Ursuppe

- Zeit: 10^{-43} bis 0.00001 Sekunden
- Temperatur: 10^{32} bis 10 Billionen Kelvin

Das frühe Universum besteht in dieser Entwicklungsphase aus einer Ursuppe von Elementarteilchen.

Diese Elementarteilchen, Photonen, Quarks, Elektronen und Neutrinos, stehen miteinander im Gleichgewicht (die Teilchenzahlen stehen in einem festen Verhältnis zueinander) und wandeln sich ständig ineinander um.



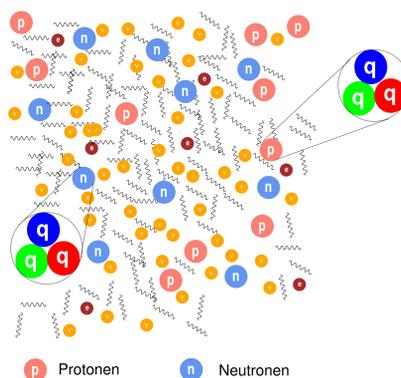
Protonen und Neutronen entstehen

- Zeit: 0.00001 Sekunden
- Temperatur: 10 Billionen Kelvin

Aus je drei Quarks bilden sich Protonen und Neutronen, die Grundbausteine der Materie. Aus diesen sind alle Atomkerne aufgebaut.

Solange die Temperatur größer ist als etwa 10 Milliarden Kelvin können sich Protonen und Neutronen ständig ineinander umwandeln, sie stehen miteinander im Gleichgewicht. Die relativen Häufigkeiten werden vom Verhältnis der kosmischen Temperatur zur Massendifferenz zwischen Neutron und Proton bestimmt. Während der Abkühlung von 10 Billionen auf 10 Milliarden Kelvin sinkt die relative Häufigkeit der Neutronen zu den Protonen von 1:1 auf etwa 1:6.

Wegen der hohen Temperatur können noch keine Kernreaktionen ablaufen und somit noch keine Atomkerne aufgebaut werden.



Heliumentstehung

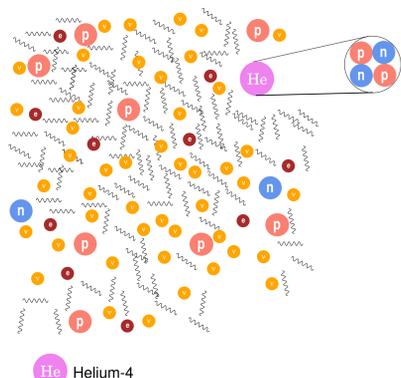
- Zeit: ≈ 3 Minuten
- Temperatur: ≈ 1 Milliarde Kelvin

Die Temperatur ist nun niedrig genug, um Kernreaktionen zu erlauben.

In verschiedenen Reaktionsketten bilden sich aus je zwei Neutronen und zwei Protonen schrittweise Heliumkerne.

Ein Beispiel für eine solche Reaktionskette ist links abgebildet. Aus einem Neutron und einem Proton bildet sich zunächst ein Deuteriumkern, durch Anlagerung eines weiteren Neutrons ein Tritiumkern (Deuterium und Tritium sind Wasserstoff-Isotope). Erst in einem weiteren Schritt bildet sich aus dem Tritium schließlich ein Heliumkern.

Da praktisch alle Neutronen in Heliumkernen gebunden werden, hängt die Ausbeute an Heliumkernen sehr stark von der Anzahl der zur Verfügung stehenden Neutronen ab, die mit sinkender Temperatur immer weiter abnimmt.



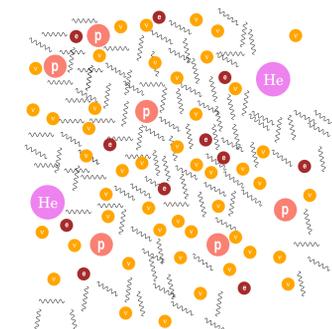
Ende der Nukleosynthese

- Zeit: später als 3 Minuten
- Temperatur: unter 10^9 Kelvin

Kernreaktionen können nicht mehr stattfinden, da Temperatur und Dichte zu niedrig sind.

Alle vorhanden Neutronen (ca. 14% der Materie) sind in Heliumkernen gebunden worden, die nun etwa 6 % der Materieteilchen ausmachen.

Die restlichen 94% der Materieteilchen sind Protonen, also Wasserstoffkerne.



Nach dem Ende der Nukleosynthese beträgt der Anteil von Helium-4 an der Gesamtmasse der Materie im Kosmos etwa 25%, 75% sind Wasserstoff (ein Helium-4 Kern wiegt etwa so viel wie vier Wasserstoffkerne).

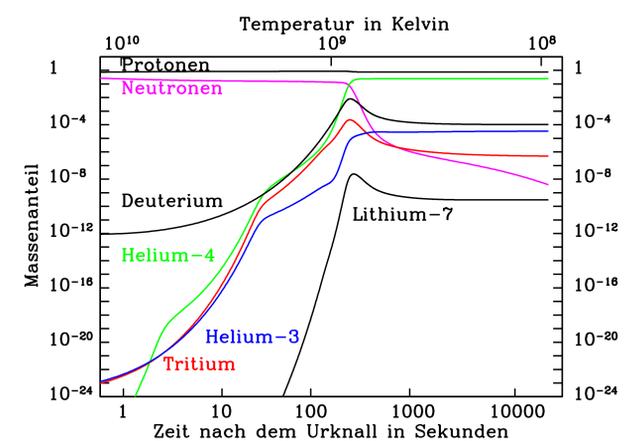
In winzigen Spuren (etwa 10-millionenfach geringere Konzentrationen) sind gleichzeitig mit Helium-4 auch andere, schwerere Elemente wie Lithium und Beryllium gebildet worden. In etwas höheren Konzentrationen (etwa hunderttausendmal geringer als Helium-4) findet man auch die Zwischenprodukte der Helium-Reaktionskette, Deuterium und Helium-3 (leichteres Helium-Isotop).

Die wenigen nicht zu Atomkernen verschmolzenen Neutronen zerfallen mit einer Lebensdauer von etwa 10 Minuten. Tritium ist ebenfalls instabil und zerfällt mit einer Halbwertszeit von etwa 12 Jahren.

Durch Simulationen am Computer können die Häufigkeiten von Helium und der anderen Kerne relativ zum Wasserstoff vorhergesagt werden. Dafür muß man nur die Temperaturentwicklung und die Reaktionsraten sowie die Materiedichte des Kosmos kennen.

Das Ergebnis einer solchen Rechnung ist in der Abbildung dargestellt. Auf der unteren Achse ist die kosmische Zeit seit dem Urknall aufgetragen, auf der vertikalen der prozentuale Anteil der einzelnen Elemente an der Gesamtmasse der Materie im Universum.

Man sieht, wie die Häufigkeiten von Helium-3 und -4 sowie von Lithium und Beryllium ansteigen, während die der Neutronen und Protonen, aus denen die Kerne aufgebaut werden, abfallen. Nach etwa 500 Sekunden bleiben die Häufigkeiten konstant, Temperatur und Dichte sind nicht mehr hoch genug, um Kernreaktionen zu ermöglichen. Ausnahme sind die restlichen Neutronen, deren Zerfall temperaturunabhängig ist.



Die Häufigkeiten der Elemente können in verschiedenen astrophysikalischen Objekten im Universum durch Beobachtungen bestimmt werden. Diese Beobachtungen spiegeln allerdings immer die Häufigkeiten zum Zeitpunkt der Beobachtung wider. Da sich die relativen Häufigkeiten der Elemente im Laufe der Entwicklung des Universums durch Kernreaktionen in den Sternen verändert haben, macht man diese Beobachtungen in den ältesten, am wenigsten entwickelten Objekten im Universum. Auf diese Weise erhält man Elementhäufigkeiten, die den ursprünglich im Urknall erzeugten sehr nahe kommen.

Die theoretisch vorhergesagten Häufigkeiten hängen sehr stark von der Dichte der Neutronen und Protonen, also der Materie, relativ zu den Photonen ab. Vergleicht man die vorhergesagten mit den aus den Beobachtungen abgeleiteten Häufigkeiten, so stimmen diese bei einem bestimmten Wert für die Dichte gut überein. Auf diese Weise läßt sich der Anteil „normaler“, sogenannter *baryonischer* Materie im Kosmos bestimmen.

Wie man aus anderen Messungen weiß, liegt die gesamte Materiedichte im Kosmos jedoch wesentlich höher. Die fehlende, sogenannte *Dunkle Materie* kann also nicht aus baryonischer Materie bestehen. Kandidaten für die Dunkle Materie sind beispielsweise Neutrinos, sollte sich herausstellen, daß diese eine Masse besitzen.

Der Erfolg der Theorie der Primordialen Nukleosynthese besteht einerseits darin, die Entstehung des im Universum vorhandenen Heliums, das in dieser Menge nicht in Sternen gebildet worden sein kann, zu erklären. Weiterhin werden die ursprünglichen Häufigkeiten der leichten Elemente Deuterium (schwerer Wasserstoff), Helium und Lithium für dieselbe Materiedichte im richtigen Verhältnis zum Wasserstoff vorhergesagt.

Die Primordiale Nukleosynthese ist damit eine der wichtigsten Bestätigungen für die Urknalltheorie, also dafür, daß das Universum in einem dichten und heißen Feuerball entstanden ist.