

Zusammenfassung
Primordiale Nukleosynthese

Fabian Joswig

22. Februar 2015

1 Einleitung

Die Materie im heutigen Universum besteht zum größten Teil aus leichten Elementen, nämlich zu ca. 75 Prozent aus Wasserstoff und 23 Prozent aus Helium, während leichtere Elemente nur einen kleinen Anteil ausmachen (Siehe Abbildung 1).

Wie lässt sich diese Zusammensetzung aber erklären? Unter der Annahme, dass im frühen Universum ausschließlich Wasserstoff vorhanden war und sich aus diesem Sterne gebildet haben, gibt es zwei verschiedene Prozesse zur Elemententstehung. Zum einen die stellare Nukleosynthese, die Fusion in Sternen hoch bis zu Eisen, zum anderen die interstellare Nukleosynthese, insbesondere Spallation kosmischer Strahlung, mit der sich die Entstehung der schweren Elemente sowie einiger leichter Elemente wie Lithium erklären lässt.

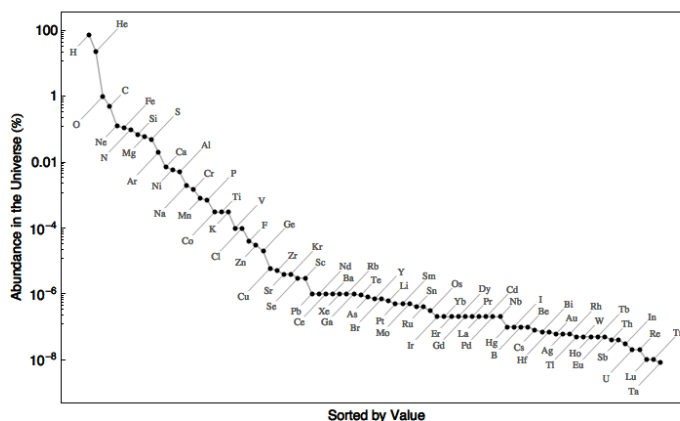


Abbildung 1: Häufigkeit der Elemente im Universum¹

Allerdings ergeben sich hieraus einige Ungereimtheiten. Beispielsweise finden sich im Universum vergleichsweise hohe Anteile an Deuterium, welches in Sterne bloß als Zwischenprodukt zur Heliumfusion dient und somit fast vollständig weiter fusioniert. Auch insbesondere der große Anteil an Helium lässt sich durch die beiden Prozesse nicht hinreichend erklären. Um das in der Milchstraße durch Fusion entstandene Helium grob abzuschätzen nehmen wir an, dass die aktuelle Strahlungsleistung der Milchstraße L_* über ihre gesamte Lebensdauer t konstant ist, nehmen sie mit dieser mal und teilen durch die Energie, die pro Kg durch Fusion entstandenem Helium frei wird:

$$M_{He} = \frac{L_* \times t}{E} = \frac{4 \cdot 10^{36} \text{ W} \times 3 \cdot 10^{17} \text{ s}}{6 \cdot 10^{14} \text{ J/Kg}} = 2 \cdot 10^{39} \text{ Kg} \quad (1)$$

Das somit als Obergrenze abgeschätzte Helium mit einer Masse von etwa $M_{He} = 2 \cdot 10^{39} \text{ Kg}$ hat an der Gesamtmasse der Milchstraße von etwa $3 \cdot 10^{41} \text{ Kg}$ allerdings bloß einen Anteil von weniger als einem Prozent. Die beiden beschriebenen Prozesse scheinen also nicht auszureichen um die Elementkonstellation des Universums zu erklären. Hierzu benötigt man zusätzlich die primordiale Nukleosynthese, die Elemententstehung direkt nach dem Urknall.

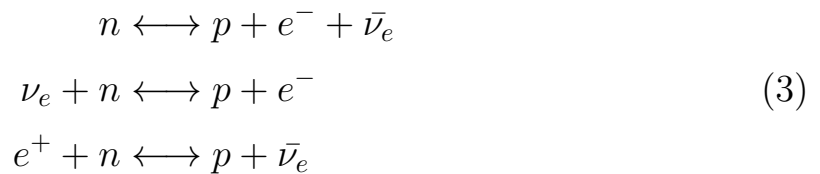
¹<http://periodictable.com/Properties/A/UniverseAbundance.ssp.log.gif>

2 Theoretische Überlegungen

Um die primordiale Nukleosynthese zu erklären betrachten wir zunächst das Universum ca. 10^{-2} Sekunden nach dem Urknall bei einer Temperatur von etwa 10 MeV. Zu diesem Zeitpunkt sind die Quarks bereits in Hadronen übergegangen und es liegen nichtrelativistische Protonen und Neutronen vor, die sich im thermischen Gleichgewicht befinden. Das Neutron-zu-Proton-Verhältnis ist somit temperaturabhängig und lässt sich mit Hilfe von statistischen Gleichungen und der Annahme, dass das chemische Potential der Neutrinos klein gegenüber der Temperatur ist, wie folgt darstellen:

$$\left(\frac{n}{p}\right)_{EQ} = \exp\left(\frac{-(m_n - m_p)}{T}\right) \quad (2)$$

Das Gleichgewicht wird somit neben der Temperatur durch die Massendifferenz von Neutron und Proton bestimmt und durch die folgenden Reaktionen der schwachen Wechselwirkung aufrechterhalten:



Entscheidend für die primordiale Nukleosynthese ist der Zeitpunkt, bei dem dieses Gleichgewicht ausfriert und das daraus resultierende Neutron-zu-Proton-Verhältnis. Dieser Zeitpunkt tritt ein, wenn die Wachstumsrate des Universums H größer als die Reaktionsrate der schwachen Wechselwirkung Γ wird. Vereinfacht lässt sich das Verhältnis der beiden wie folgt darstellen:

$$\frac{\Gamma}{H} \approx \left(\frac{T}{0,8 \text{ MeV}}\right)^3 \quad (4)$$

Das Gleichgewicht friert somit bei Temperaturen von etwa 0,8 MeV aus, was einem Neutron-zu-Proton-Verhältnis von $\frac{n}{p} \approx \frac{1}{6}$ entspricht.

3 Entstehung der leichten Elemente

Der Zeitpunkt an dem die primordiale Nukleosynthese beginnt wird durch einen weiteren Gleichgewichtsprozess bestimmt, nämlich das Ausfrieren des Deuteriums. Auch hier wird wieder die Wachstumsrate des Universums mit der Reaktionsrate der schwachen Wechselwirkung verglichen, vereinfacht:

$$\frac{\Gamma_D}{H} \sim \left(\frac{T}{0,1 \text{ MeV}} \right)^5 \quad (5)$$

Ab Temperaturen von ca. 0,1 MeV, was einer halben bis drei Minuten nach dem Urknall entspricht, kann also die Fusion zu Deuterium



beginnen. Von Deuterium aus sind eine ganze Reihe weiterer Reaktionen möglich, die in Abbildung 2 dargestellt sind. Die Pfeile beschreiben die Vorzugsrichtung.

Das nächsthöhere Reaktionsprodukt nach Beryllium wäre Kohlenstoff, welches durch einen 3- α -Prozess entsteht. Hierfür reicht die Energie im frühen Universum allerdings nicht aus, die Coulomb Abstoßung ist zu groß. Durch die primordiale Nukleosynthese entsteht vor allem Helium 4, welches energetisch am günstigsten ist, sowie kleinere Anteile an Deuterium, Helium 3, Lithium 7 und Beryllium 7. Eine zeitliche Entwicklung der primordialen Nukleosynthese ist in Abbildung 3 zu sehen.

Entscheidend für das Modell der primordialen Nukleosynthese sind drei Parameter. Zum einen die Halbwertszeit des Neutrons, welche Auswirkung auf die Reaktionsrate der schwachen Wechselwirkung und somit auf den Zeitpunkt des Ausfrierens und das Neutron-zu-Proton-Verhältnis hat. Denn je mehr Neutronen nach dem Ausfrieren

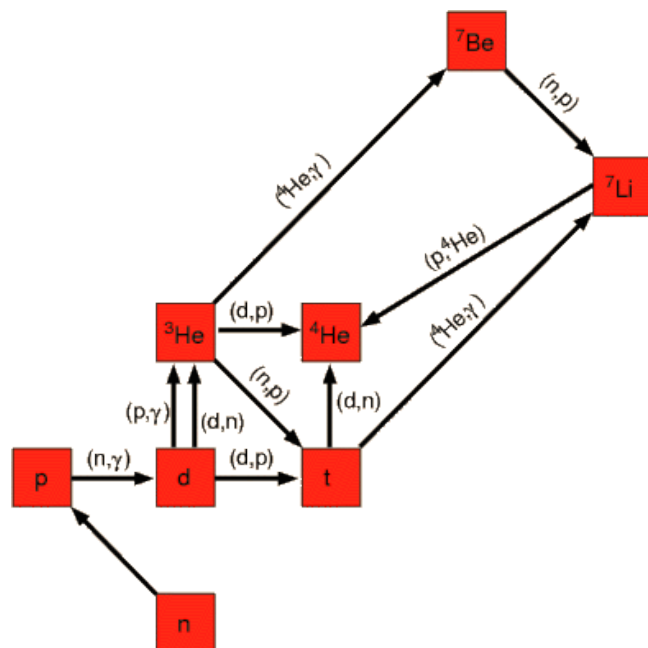


Abbildung 2: Mögliche Fusionsreaktionen während der primordialen Nukleosynthese²

²http://www.einstein-online.info/images/vertiefung/BBN_physI/reactions.gif

vorhanden sind, desto mehr schwerere Elemente können entstehen. Die Bestimmung der Halbwertszeit stellte in der Vergangenheit ein großes Problem dar, lässt sich inzwischen aber relativ genau auf $\tau_n = 10,2$ Minuten bestimmen.

Zweiter wichtiger Parameter ist die Anzahl der relativistischen Freiheitsgrade zum Zeitpunkt der primordialen Nukleosynthese, die einen Einfluss auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Universums und somit wieder auf das Neutron-zu-Proton-Verhältnis hat. Im Standardmodell beträgt diese $g_* = 10,75$ zusammengesetzt aus Photonen, Elektronen, Positronen und drei Neutrino Spezies. Als die primordiale Nukleosynthese vorgeschlagen wurde war die Anzahl der Neutrino Spezies noch weitgehend unbekannt, neuere Messungen bestätigen allerdings das Standardmodell.

Der dritte wichtige Parameter ist das Baryon-zu-Photon-Verhältnis η welches ein Maß für den Anteil baryonischer Materie am Universum ist. Die Fusionsraten der einzelnen Elemente sind proportional zu η . Somit führt ein größerer Wert zu größeren Anteilen schwererer Elemente.

4 Experimentelle Ergebnisse

Der Vergleich der primordialen Nukleosynthese mit experimentellen Daten gestaltet sich verhältnismäßig schwierig, da sich die Elementzusammensetzung bis heute durch andere Prozesse deutlich verändert hat wie in der Einleitung beschrieben. Genaue Messungen sind also nur an sehr speziellen Systemen möglich. Primordiales Deuterium lässt sich beispielsweise durch Spektralanalyse des interstellaren Mediums messen, in dem sich deuterierte Moleküle wie DHO , CH_3D und DCO befinden. Insbesondere bei Helium 4 ergibt sich das Problem stellares von primordialem Helium zu unterscheiden. Aus diesem Grund vermisst man metallarme Zwerggalaxien, in denen kaum Fusion passiert ist. In Abbildung 4 werden die Ergebnisse der primordialen Nukleosynthese in Abhängigkeit vom Baryon-zu-Photon-Verhältnis η mit experimentellen Werten, den horizontalen Balken, verglichen. Die Breite der Balken stellt den Fehler dar.

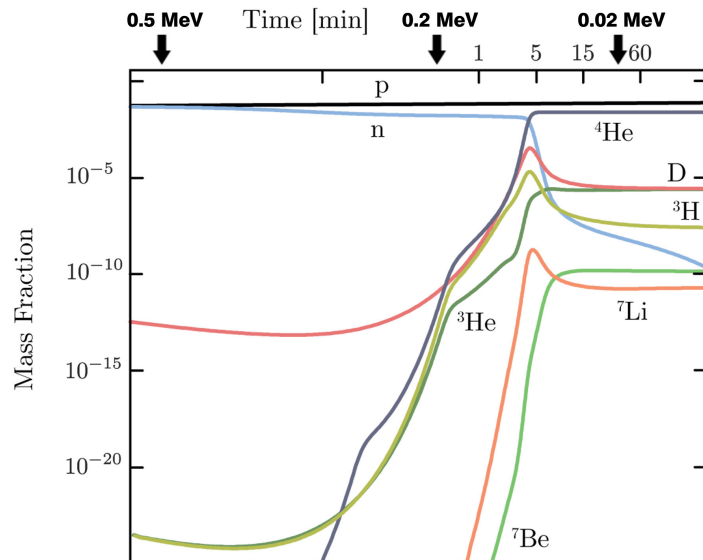


Abbildung 3: Zeitliche Entwicklung der primordialen Nukleosynthese³

³<http://www.damtp.cam.ac.uk/user/db275/Cosmology/Chapter3.pdf>

Als zusätzlicher Vergleichswert ist das durch das Wilkinson Microwave Anisotropy Probe Experiment aus der kosmischen Hintergrundstrahlung gemessene η als vertikaler Balken aufgetragen. Die experimentellen Ergebnisse liefern beeindruckende Übereinstimmung mit den durch die Theorie vorhergesagten Werten. Insbesondere mit Hilfe des recht genau bestimmten Wertes für Deuterium lässt sich η sehr scharf eingrenzen. Desweiteren stimmen die Ergebnisse auch mit den Messungen von WMAP überein.

Allerdings liegt der errechnete Wert für Lithium 7 ca. um den Faktor 4 über dem gemessenen Wert. Dieses Problem ist bis jetzt noch nicht gelöst, die wahrscheinlichste Erklärung ist ein Fehler im Experiment, das auf der Vermessung der Atmosphäre metallarmer Sterne beruht. Eventuell verbirgt sich hier aber auch neue Physik.

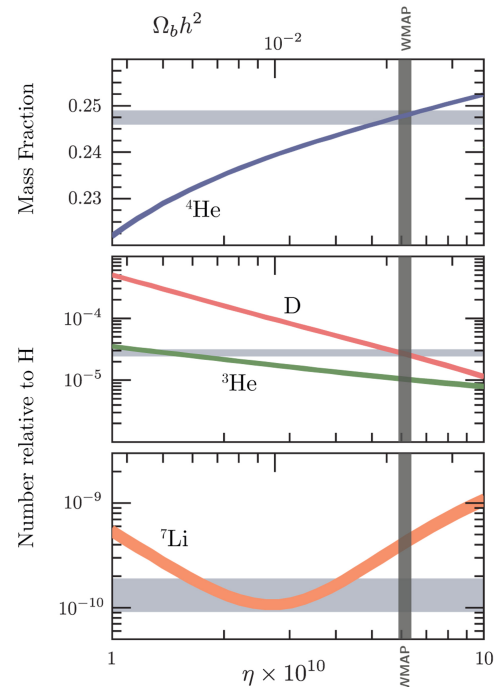


Abbildung 4: Ergebnisse der primordialen Nukleosynthese im Vergleich zu experimentellen Daten⁴

5 Zusammenfassung

Zusammenfassend kann man sagen, dass das Modell der primordialen Nukleosynthese sehr gut mit den experimentellen Ergebnissen übereinstimmt und somit die beste Bestätigung für das Urknallmodell ist. Die Standardkosmologie scheint das Universum somit zumindest ab Zeiten von ungefähr 10^{-2} Sekunden und Temperaturen von ca. 10 MeV korrekt zu beschreiben. Um Unstimmigkeiten wie das Lithiumproblem genauer bewerten zu können, müssen zukünftige Messungen abgewartet und das Modell eventuell angepasst werden.

Quellen

- KOLB, EDWARD, TURNER, MICHAEL (1994) The Early Universe, Westview Press
- ZUBER, KAI, KLAPDOR-KLEINGROTHAUS, HANS VOLKER (1997), Teilchenastrophysik, Teubner Verlag
- BERGSTRÖM, LARS, GOOBAR, ARIEL (2000) Cosmology and Particle Astrophysics, Springer
- BAUMANN, DANIEL D. (2014) Cosmology, <http://www.damtp.cam.ac.uk/user/db275/Cosmology/>

⁴<http://www.damtp.cam.ac.uk/user/db275/Cosmology/Chapter3-Script.pdf>