

15. Die erste Viertelstunde unseres Universums

15.1 "Tief ist der Brunnen der Vergangenheit."

So beginnt Thomas Mann seinen Roman "Joseph und seine Brüder" und fährt dann fort: "Sollte man ihn nicht unergründlich nennen?". Wenn es um den Brunnen der Vergangenheit geht, kann auch die Physik – ähnlich wie die Archäologie - sehr tief bohren, d.h. Zeugnisse aus der ganz frühen Zeit des Universums ans Tageslicht bringen. Während die Archäologie z. B. in Ägypten einige Tausend Jahre der Vergangenheit untersucht, kann die Kosmologie einige Milliarden Jahre zurückschauen. Hierbei muss sich aber auch die Physik mit dem begnügen, was die Natur für uns an Zeugnissen aus der Vergangenheit aufbewahrt hat. Die kosmische Hintergrundstrahlung war ein solcher Glücksfall: 300.000 Jahre nach dem Urknall hat sich die Strahlung von der Materie gelöst. Seither hat sie sich – bis auf die Abkühlung - nicht mehr verändert und somit ein sehr differenziertes Bild des Universums aus dieser Zeit bewahrt.

Heute besprechen wir ein noch früheres Zeugnis der Vergangenheit, die sog. primordiale (von lat. prima ordo – erste Ordnung, uranfänglich) Elementverteilung, die in der ersten Viertelstunde (zwischen 1 s und 1000s) nach dem Urknall entstanden ist.

15.2 Die primordiale Elementverteilung

Es gibt in der Welt 81 stabile Elemente, das leichteste ist der Wasserstoff, und Wismut ist das schwerste. Alle Elemente oberhalb des Wismut, d.h. mit Kernladungszahlen $Z > 83$ sind radioaktiv, so auch Uran ($Z = 92$). Dass Uran dennoch als Kernbrennstoff in Reaktoren verwendet werden kann, liegt an der riesig großen Halbwertszeit für den Zerfall. Auch von den Elementen mit $Z < 83$ sind zwei nicht stabil: Technetium und Promethium.

Sind nun alle Elemente auf unserer Erde gleich häufig? Antwort: Nein. Wasserstoff ist das von allen Elementen häufigste, gefolgt von Helium. Wismut ist um einen Faktor von mehr als einer Milliarde seltener.

Ist die Elementverteilung auf verschiedenen Himmelskörpern gleich? Nein! Zum Beispiel besteht die Sonnenoberfläche fast nur aus Wasserstoff und Helium, während Stickstoff, Sauerstoff und Wasserdampf die Atmosphäre der Erde dominieren. Das Gas im intergalaktischen Raum, d.h. zwischen den Galaxien, besteht zur Hauptsache aus Wasserstoff und Helium im Massenverhältnis 3:1, ganz ähnlich wie auf der Oberfläche der Sonne. Von der Materie, die man in Sternen und im interstellaren bzw. intergalaktischen Gas findet, machen Wasserstoff und Helium den Hautteil der Masse aus.

Die leichten Elemente, Wasserstoff einschließlich des Deuteriums (des schweren Wasserstoffs) und Helium einschließlich des ^3He , nennt man primordial, weil sie, wie man bald erkannt hatte, sehr früh, d.h. am Anfang des Universums entstanden sind. Darüber werden wir in dieser Vorlesung sprechen. Erst später, nachdem sich Sterne gebildet hatten, wurden die schwereren Elemente aus den primordialen im Innern der Sterne zusammengefügt. Die Energieproduktion in der Sonne, wo primordialer Wasserstoff in Helium umgewandelt wird, wurde in einer früheren Vorlesung behandelt.

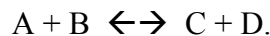
Die dabei erforderliche hohe Temperatur von etwa $15 \cdot 10^6$ K lässt vermuten, dass die Temperaturen, unter denen das primordiale Helium aus Protonen (den Kernen des leichten Wasserstoffs ^1H) und Neutronen gebildet worden ist, in dieser Größenordnung gelegen haben müssen. Das heißt, dass diese Reaktion schon zu einem sehr frühen Zeitpunkt in der Entwicklung des Universums abgelaufen sein muss.

15.3 Aus Protonen und Neutronen werden die ersten Kerne

Atomkerne bestehen aus Protonen und Neutronen. Wir springen deshalb in den Zustand des Universums, wo es Protonen, Neutronen, Photonen und Leptonen (Elektronen, Positronen und Neutrinos) gab. Die Temperatur war zu hoch, als dass sich Atomkerne oder Atome bilden konnten, sie war aber andererseits zu niedrig dafür, dass die Nukleonen in Quarks aufgelöst wurden. Es herrschte eine Temperatur von etwa 1 Billion Grad (10^{12} K), und eine Zeit von etwa 1 Millisekunde (1 ms) war seit dem Urknall vergangen. Woher wir das so genau wissen? Gerade aus dem genauen Verständnis der Bildung der primordialen Elemente und der dabei beobachteten Elementhäufigkeit kann man diese Aussagen mit Hilfe bekannter physikalischer Gesetze ableiten.

Zum Zeitpunkt 1 ms nach dem Urknall gab es etwa gleich viele Protonen und Neutronen. Das Universum dehnte sich weiter aus, kühlte ab, und die Neutronen wandelten sich teilweise in Protonen um, denn sie sind schwerer als die Protonen. Dann, etwa 10 Sekunden nach dem Urknall, bei einer Temperatur von 10 Milliarden Grad (10^{10} K) und einem Verhältnis von Protonen zu Neutronen von 7:1 fingen die ersten Kernreaktionen an.

Kernreaktionen, die in thermischen Gleichgewicht mit ihrer Umgebung ablaufen, ähneln chemischen Reaktionen, wie z.B.



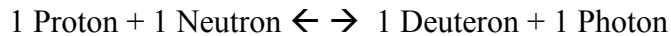
Aus zwei Substanzen, A und B, entstehen zwei andere Substanzen, C und D, und umgekehrt, aus C und D entstehen A und B. Hin- und Rückreaktionen sind immer möglich; welche der beiden Richtungen dominiert, hängt von vielen Faktoren ab, z.B. von der Temperatur, aber auch davon, in welchen Konzentrationen die einzelnen Substanzen vorhanden sind. Nach einer gewissen Zeit wird sich ein Gleichgewicht zwischen den Substanzen einstellen. Wenn sich die Temperatur ändert, wird es sich verschieben.

Versuch: Jod-Blinklicht

Dieser Versuch zeigt, dass sich chemische Gleichgewichte auf Grund von Konzentrations- und Temperaturänderungen im Laufe der Zeit verschieben können. Pauschal handelt es sich um Oxidations- und Reduktionsreaktionen beim Jod, die im einzelnen jedoch zu kompliziert sind, um sie näher zu beschreiben.

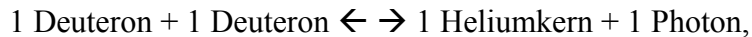
Nachdem drei Lösungen in ein Becherglas, das auf einem Magnetrührer stand und von unten beleuchtet werden konnte, gegeben worden waren, änderte sich die Farbe in Abständen von 5 bis 10 s von Tiefblau nach Hellgelb und umgekehrt.

Wir betrachten nun die Reaktionen zwischen Nukleonen. Die einfachste Reaktion ist die Produktion von Deuteriumkernen oder Deuteronen (einem gebundenen Zustand von Proton und Neutron).



10 s nach dem Urknall sind die äußeren Bedingungen so, dass die Reaktion von links nach rechts verläuft und sich Deuteronen bilden. Nach drei Minuten sind die Neutronen im wesentlichen aufgebraucht, und die Reaktion kommt zum Stillstand.

Inzwischen ist aber eine andere Reaktion angelaufen:



wobei die ^4He -Kerne aus zwei Protonen und zwei Neutronen bestehen. Da bei dieser Reaktion neben dem Helium viel Energie frei wird und von dem Photon weggetragen wird, läuft die Reaktion bevorzugt von links nach rechts ab, hört aber

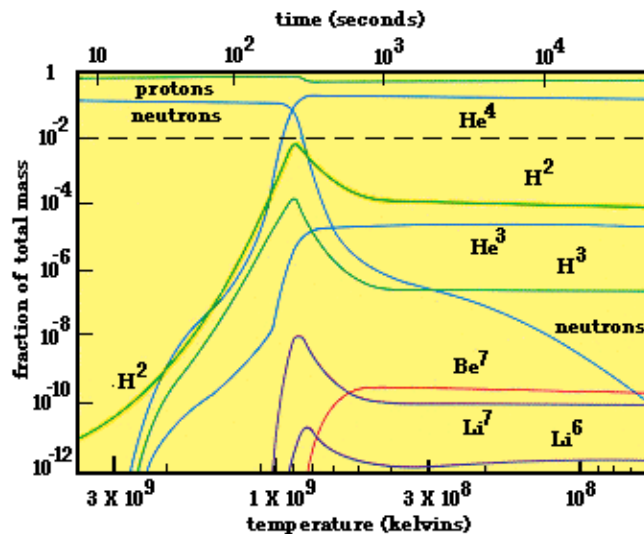


Abb.15.1: Die Entwicklung der Elementhäufigkeiten als Funktion der Temperatur (untere Skala) und der Zeit in Sekunden nach dem Urknall (obere Skala)

auf, wenn kein Deuterium mehr nachgeliefert wird (nach etwa 1000 s).

Da die Bildung schwererer Kerne, z.B. Kohlenstoff oder Sauerstoff, nur bei höheren Temperaturen, als zu dieser Zeit vorhanden sind, ablaufen können, werden fast keine schwereren Elemente gebildet. In der Tat:

Es gibt keine primordialen Elemente, die schwerer als Lithium sind.

Eine detaillierte Analyse dieser Reaktionen und der Vergleich mit den gemessenen Verhältnissen der primordialen Elemente legt die Bedingungen, die im Universum in den ersten drei Minuten geherrscht haben müssen, fest. Deshalb können wir mit so großer Sicherheit über Zeitpunkte und Temperaturen sprechen.

15.4 Was geschah danach und davor?

In der heutigen Vorlesung sind wir in den Zustand der Entwicklung unseres Universums gesprungen, an dem es nur Protonen, Neutronen, Photonen und Leptonen gab. Das war

etwa 1 Tausendstel einer Sekunde nach dem Urknall. Wir haben dann das Universum der ersten Viertelstunde verfolgt, während derer sich die primordialen Elemente bildeten.

Die weitere Entwicklung ist zunächst relativ langweilig. Das Universum dehnt sich weiter aus und kühlt ab. Es dauert 300 000 Jahre bis zur nächsten entscheidenden Phase: aus Elektronen und Atomkernen bilden sich die Atome. Von diesem Zeitpunkt erzählt uns die kosmische Hintergrundstrahlung.

Was geschah vor der Bildung der primordialen Elemente? Nun könnte man glauben, dass man zur Zeit $t = 1/1000$ s nach dem Big Bang dem Beginn des Universums schon ganz nahe ist. Aber auch wenn diese Zeitspanne sehr kurz ist, ist in ihr schon sehr viel passiert, wie die folgende Tabelle zeigt:

Zeit	Horizont	Temperatur	Name	Konstituenten	Relikte
0	0		Urknall		
10^{-33} s			Inflation	Energie	
10^{-6} s	300 m	10^{+13} K	Ende Quark-Leptonen Ära	Quarks, Antiquarks Leptonen, Antileptonen	
1 s	$3 \cdot 10^5$ km	10^{+10} K	Hadronen-Leptonen Ära	Protonen, Neutronen, Leptonen, Photonen, Neutrinos	
1-10 min	10^8 km	10^{+9} K	Synthese primordialer Elemente	p^+ , He^{2+} , Elektronen, Neutrinos, Photonen	Verhältnis von Helium, Deuterium und Wasserstoff
300.000 Jahre	300.000 Lj	3000 K	Trennung von Licht und Materie	H- und He-Atome Photonen, Neutrinos	3 K Hintergrundstrahlung
½ Mrd. Jahre		100 K	Erste Sternsysteme	Auch schwerere Elemente	Hubblesches Gesetz
14 Mrd. Jahre	14 Mrd. Lj	3 K	Heute	Sterne, Photonen und Neutrinos	

Tabelle 15.1: Einige entscheidende Perioden und Ereignisse aus der Geschichte unseres Universums. Die Zeit ist ab dem Urknall gerechnet. Da die Größe des Universums nicht bekannt ist, wird nur der Horizont, bis zu dem man zum entsprechenden Zeitpunkt sehen kann, angegeben.

Wenn wir in diesem Vorlesungszyklus auf die so ungeheuer vielfältigen, atemberaubenden Prozesse vor der ersten Tausendstel Sekunde nicht eingegangen sind, liegt das daran,

- dass wir keine "archäologischen Funde" aus dieser Frühzeit haben,

- dass in dieser Frühzeit physikalische Bedingungen geherrscht haben müssen, für die unsere physikalischen Gesetze nicht getestet sind, und
- deshalb hier die Spekulationen dominieren.

15.5 Die Grenzen unseres Wissens im Kleinsten und im Größten

Im ersten Teil unserer Vorlesung sind wir von der Umgebung unseres täglichen Lebens ausgegangen und sind in immer kleinere Dimensionen vorgedrungen. Bei den Quarks und Elektronen und anderen elementaren Bausteinen unserer Welt haben wir aufgehört - nicht weil wir glauben, dass wir hier wirklich an den Urgrund der Welt gekommen seien, sondern weil die gegenwärtigen experimentellen Möglichkeiten uns diese Grenze gesetzt haben. Denn wo es keine Experimente gibt, hört die gesicherte Physik auf, aber nicht das spekulative Denken. An diesem Punkt wird aus dem Nachdenken über gemachte Experimente ein Vordenken über zu machende Experimente.

Ähnlich sieht es mit der Grenze aus, an die wir gestoßen sind, als wir das Geschehen im Universum immer weiter in die Vergangenheit zurück verfolgt haben. Auch hier kamen wir an die Grenze, wo experimentelle Information fehlt und aus dem Nachdenken ein Vordenken wird.

15.6 Biographie: George Anthony Gamow (1904 – 1968)

Der in Odessa in der Ukraine geborene Gamow beschloss schon früh, Naturwissenschaftler zu werden. Nachdem er an seinem 13. Geburtstag von seinem Vater ein Teleskop geschenkt bekommen hatte, beobachtete er leidenschaftlich gern den Himmel. Sein Studium begann er 1922 in seiner Heimatstadt, wechselte aber bald nach Leningrad, wo er sich für die Fächer Optik und Kosmologie immatrikulierte. Gegen Ende seines Studiums, das er 1928 mit der Promotion abschloss, besuchte er eine Sommerschule in Göttingen, dem damaligen Zentrum der Quantenphysik. Er wandte diese neue Theorie auf den radioaktiven Zerfall an und erklärte u.a. den Alphazerfall mit Hilfe des Tunneleffekts. Bei einem Besuch in Kopenhagen wurde 1929 Niels Bohr auf den jungen Wissenschaftler aufmerksam. Gamows Arbeiten beeindruckten Bohr so sehr, dass er ihm ein einjähriges Stipendium der Königlich-Dänischen Akademie besorgte. So arbeitete Gamow ein Jahr am Institut für Theoretische Physik in Kopenhagen und ging anschließend als Rockefeller Fellow nach Cambridge, wo er mit Rutherford, dem damaligen "Titan" der experimentellen Kernphysik zusammentraf. Obwohl Rutherford gewisse Vorbehalte gegenüber Theoretikern hatte, machte Gamow durch seine Art, die Probleme intuitiv und ohne übermäßigen mathematischen Formalismus anzugehen, auf ihn einen tiefen Eindruck. So entstand während des einjährigen Aufenthalts eine fruchtbare Zusammenarbeit zwischen Gamow und den Mitarbeitern des Cavendish Laboratory. Nachdem Gamow 1931 als Master of Research an die Akademie der



Wissenschaften in Leningrad berufen worden war, merkte er bald, dass die Bedingungen in der kommunistischen Sowjetunion für ihn auf die Dauer nicht tragbar sein würden. Nach mehreren misslungenen Fluchtversuchen erhielt er 1933 die Erlaubnis, den Solvay Kongress in Brüssel zu besuchen. Dabei machten die Sowjets den "Fehler", auch seine junge Frau als seine Sekretärin mit ausreisen zu lassen. Diese Chance ließen die beiden sich nicht entgehen und blieben im Westen. Zunächst arbeitete Gamow in Paris und als Visiting Professor in London. Als er 1934 von der University of Michigan zu Gastvorlesungen eingeladen wurde, reiste er in die Vereinigten Staaten, wo er noch im gleichen Jahr einen Lehrstuhl für Physik an der George Washington University in Washington DC erhielt. Bei seiner Berufung erhielt er von der Universität zwei Wünsche erfüllt: Erstens wurde Edward Teller als weiterer Wissenschaftler an die Fakultät berufen, und zweitens durfte er einmal pro Jahr Wissenschaftler zu einer Tagung nach Washington einladen. Aus der Zusammenarbeit mit Teller erwuchsen zunächst wichtige Beiträge zur Theorie des Betazerfalls. Während des zweiten Weltkriegs waren beide an der Entwicklung der Atombombe beteiligt und ihre Arbeiten in Los Alamos führten schließlich zur Herstellung der Wasserstoffbombe.

Da Gamow es nicht liebte, auf einem durch viele Wissenschaftler überlaufenen Gebiet zu arbeiten, hatte er sich schon bald in Amerika der Astrophysik zugewandt, wo er seine kernphysikalischen Kenntnisse auf die Energieproduktion von Sternen und deren Evolution anwandte. Sehr bekannt sind seine Arbeiten zur Nukleosynthese und zum Modell des Urknalls, als dessen Relikt er die kosmische Hintergrundstrahlung 1948 voraussagte.

Nachdem 1953 die Doppelhelix-Struktur der DNA von Watson und Crick entdeckt worden war, wechselte Gamow sein Interesse abermals und machte wesentliche Beiträge zur genetischen Codierung. Auch wenn seine Ideen nicht vollständig richtig waren, wiesen sie jedoch den Biowissenschaftlern den Weg, der letztlich zum Ziel führte.

1956 verließ Gamow Washington und arbeitete die letzten Jahre seines Lebens an der University of Colorado in Boulder.

An vielen Stellen wird Gamow als ein sehr humorvoller Mann beschrieben, der es verstand, auch schwierige Dinge einfach darzustellen. So sagte einmal ein Reporter, er sei "the only scientist in America with a real sense of humour". Für seine populärwissenschaftlichen Darstellungen, die von dem schüchternen, aber sehr wissbegierigen Bankangestellten Mr. Tomkins ("Mr. Tomkins in Wonderland") handeln, erhielt er 1956 den Kalinga Preis der Vereinten Nationen.

Quellen:

1. <http://medlem.spray.se/gamow/georgegamow.html>
2. <http://www2.gwu.edu/~physics/gwimageh.htm>
3. http://scienzapertutti.lnf.infn.it/biografie/SxT_gamow-bio.html
4. <http://scienceworld.wolfram.com/biography/Gamow.html>