

VOM URKNALL ZUM KOHLENSTOFF

Ein Entstehungsprozess mit Feinabstimmungen

Friedemar Kuchar
Institut für Physik
Montanuniversität Leoben

Kohlenstoff ist nicht nur der Namensgeber der ASMET Symposiums „Carbon Based Coatings“. Er tritt in verschiedensten Modifikationen auf, die von grundsätzlich wissenschaftlichem und von technischem Interesse sind, z.B. als Diamant, Graphit, Fulleren, Nanoröhrchen, Graphen und Graphin. Eine ganz besondere Rolle kommt ihm bei der Entstehung des Lebens, wie wir es kennen, zu. Ohne Kohlenstoff in ausreichender Menge gäbe es keine lebenden Organismen und keine Menschen (und kein CBC Symposium).

In diesem Vortrag wird die Entstehung des Elements Kohlenstoff beschrieben. Dazu ist es notwendig die Entwicklung des Universums bereits in den ersten Minuten nach dem Urknall zu betrachten. Das Alter des Universums – 13,7 Mrd. Jahre - kann aus Beobachtungen wie seiner Expansion und der kosmischen Hintergrundstrahlung sehr gut abgeschätzt werden. Es ergibt sich aus der Rückverfolgung der Expansion zu einem Zustand, in dem das gesamte Universum in einem Punkt – einer Singularität – konzentriert war. Einerseits ergibt sich diese Singularität aus den Gleichungen der Einsteinschen Relativitätstheorie, andererseits sind diese für so einen Zustand nicht anwendbar. Letztlich fehlt hier die Vereinigung von Relativitätstheorie und Quantenmechanik. Trotzdem gibt es theoretische Ansätze, die sogar die Zeit vor dem Urknall betrachten bzw. als Lösungen unendlich viele Parallel-Universen ergeben. Beides wird voraussichtlich einer experimentellen Beobachtung nie zugänglich sein. Die experimentelle Beobachtung ist aber in der Naturwissenschaft ein unabdingbares Werkzeug, um Theorien zu falsifizieren. Neben astronomischen Beobachtungen dienen dazu Experimente mit Teilchenbeschleunigern wie dem LHC am CERN. Dabei wird versucht Teilchenenergien zu erzeugen, die den Energien in einem frühen Stadium des Universums entsprechen (Abb.1). Mit dem LHC werden bei Kollisionen von Protonen und Antiprotonen Teilchenenergien von einigen TeV erreicht. Auf der Zeitskala des Universums entspricht dies etwa 10^{-12} s nach dem Urknall. Experimentell überprüfte Theorien gibt es daher nur für längere Zeiten, auch wenn sich Ereignisse davor – wie eine inflationäre Phase der Expansion - auf die spätere Entwicklung auswirken. Das Standardmodell der Kosmologie kann die Entwicklung des Universums ab dem oben angegebenen Zeitpunkt sehr gut beschreiben, obwohl uns in den experimentellen Beobachtungen direkt nur die sichtbare Materie, d.h. ca. 5% des gesamten Materie- und Energieinhalts des Universums zugänglich ist.

Für die Entwicklung des Universums und die Entstehung sowie Häufigkeit der Elemente waren mehrere besondere Bedingungen – so genannte Feinabstimmungen – von entscheidender Bedeutung. Eine weitgehend akzeptierte Vorstellung ist, dass unmittelbar nach dem Urknall Materie und Antimaterie entstand. Durch eine noch nicht verstandene Symmetriebrechung blieb ein Überschuss von 10^{-9} an Materie übrig (1. Feinabstimmung), der die sichtbare und uns im täglichen Leben begegnende Materie bestehend aus Protonen und Neutronen ausmacht. In den ersten drei Minuten nach dem Urknall entstanden daraus durch Fusionsprozesse die Atomkerne von Wasserstoff und Helium und geringste Mengen von Lithium. Dabei gab es weitere Feinabstimmung bezüglich der Stabilität von Deuterium und die „Rettung der Neutronen“. Die Prozesse zur Erzeugung schwererer Elemente konnten nur über ein Beryllium-Isotop laufen, das eine extrem kurze Lebensdauer hat, sodass es sich

sofort wieder in leichtere Kerne umwandelte. Der Weg zum Kohlenstoff war versperrt! Erst ab etwa 100 Millionen Jahren formten sich die ersten Sterne, in denen die Dichten groß genug waren, sodass drei Helium-Kerne zu Kohlenstoff verschmelzen konnten. Hier spielt in einer weiteren Feinabstimmung ein resonantes Energieniveau des Kohlenstoffkerns eine entscheidende Rolle. Ein ähnlicher Prozess mit einem Kohlenstoffkern und einem Heliumkern zur Erzeugung von Sauerstoff ist wegen des Fehlens eines resonanten Sauerstoffniveaus viel weniger effizient, sodass Kohlenstoff mit relativ großer Häufigkeit im Universum auftritt. Eine wichtige Rolle für die Entstehung der schwereren Elemente aus Kohlenstoff spielten Fusionsprozesse in den Sternen und Supernova-Explosionen am Ende des Lebens der Sterne. Dies und die Häufigkeitsverteilung der Elemente im Universum wird im Vortrag auch diskutiert werden. Über die Supernova-Explosionen kamen die Elemente in den interstellaren Raum formten neue Sterne und Galaxien, darunter auch unsere Milchstrasse, das Sonnensystem, die Erde und das menschliche Leben.

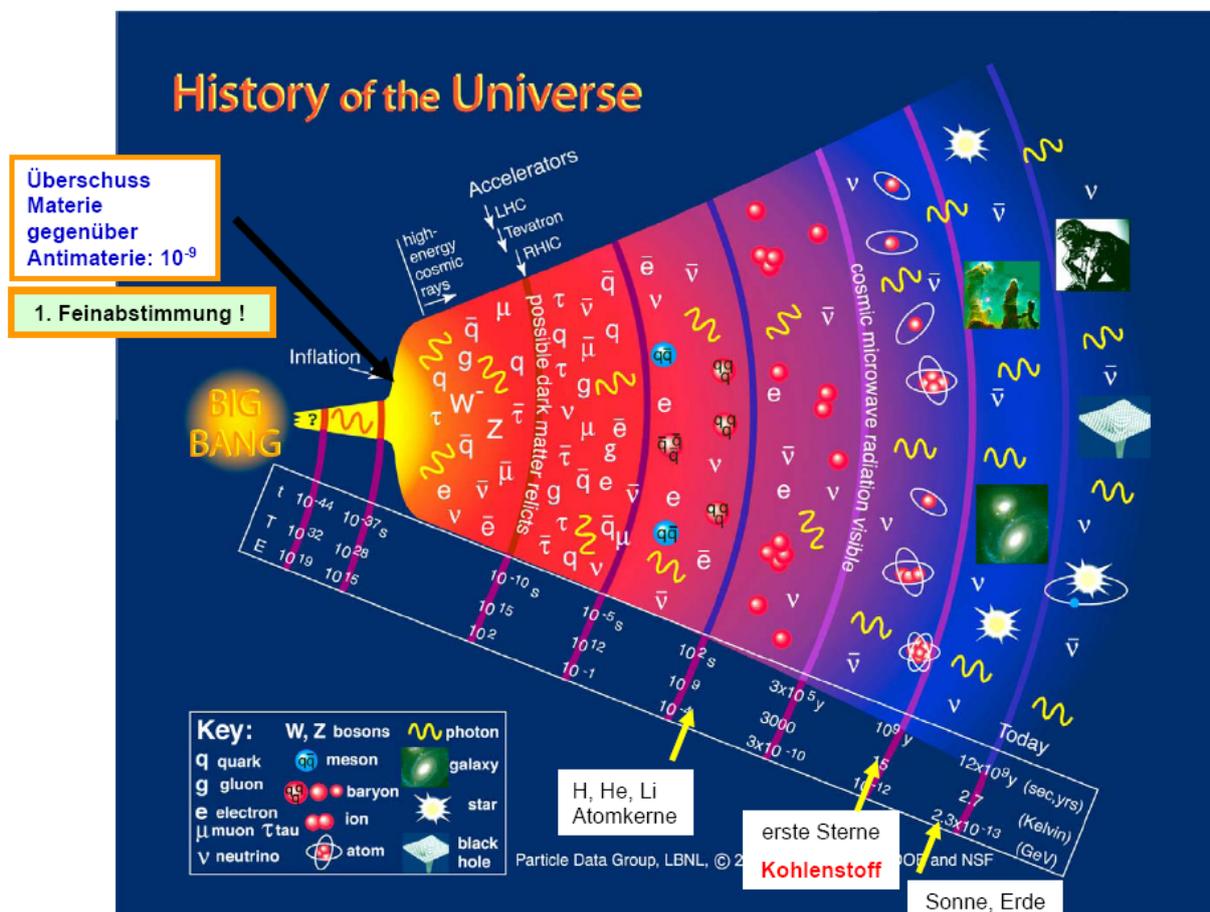


Abb.1 Entwicklung des Universums vom Urknall bis heute. Vertikal ist die Ausdehnung des Universums skizziert. Die Skalen für Zeit t, Temperatur T und Energie E sind stark nichtlinear.