

Astroteilchenphysik – Physik und Chemie fachübergreifend

R. Müller

1 | Einleitung

● Obwohl die Kernphysik eines der klassischen Themengebiete des Physikunterrichts ist, gibt es nur wenige Vorschläge für die interessantere Gestaltung des Unterrichts. Zu weit weg erscheinen β -Zerfall, Dosisleistung und Zerfallsgesetz von allem, was Schülerinnen und Schüler in ihrer Umwelt begegnet oder ihr Interesse weckt. Eine Ausnahme ist der medizinische Kontext in der Anwendung radioaktiver Strahlung zu Diagnostik und Therapie. Einen Unterrichtsvorschlag zum Thema Strahlentherapie, der mit sehr gutem Erfolg erprobt wurde, findet man in [1].

Einer der interessantesten Bereiche aus der Kernphysik, wenn nicht aus der Physik überhaupt, ist für die Schule noch weitgehend unerschlossen: die Astroteilchenphysik. Damit bezeichnet man die Physik der Kern- und Teilchenreaktionen, die sich im frühen Universum ereignet haben, wenige Sekunden bis Minuten nach dem Urknall, als das Universum extrem dicht und heiß war. Zu diesem frühen Zeitpunkt entstanden die Kerne der leichten Elemente bis ${}^7\text{Li}$. Ihre Häufigkeiten haben sich teilweise bis heute nicht geändert und sind der Beobachtung zugänglich. Die Übereinstimmung der theoretisch vorhergesagten Häufigkeiten mit der Beobachtung ist eine der wichtigsten Bestätigungen des Urknall-Modells. Qualitativ lassen sich die Kernreaktionen, die zur Bildung der leichten Elemente führen, in der Oberstufe oder in einem guten Mittelstufenkurs verstehen.

Fruchtbar ist dabei ein Fachübergreif zur Chemie. Dort sind der Begriff des Reaktionsgleichgewichts und seine dynamische Interpretation durch das Gleichgewicht von Hin- und Rückreaktion wichtige Unterrichtsinhalte. In der Astroteilchenphysik wird nun nicht das Gleichgewicht chemischer Reaktionen, sondern das Gleichgewicht von Kernreaktionen betrachtet. Die entsprechenden Gesetzmäßigkeiten und die in der Chemiedidaktik entwickelten Analogien und Lernhilfen können fast unverändert übernommen werden. Durch das

Aufgreifen von Inhalten aus dem Chemieunterricht und die dadurch erreichte Vernetzung wird das im Chemieunterricht erworbene Wissen gefestigt und vertieft.

Für Schülerinnen und Schüler ist „der Anfang der Welt“ ein motivierendes Thema, bei dem sie ihre Kenntnisse aus Physik und Chemie auf ein hochaktuelles Gebiet aus der Forschung anwenden können. Sie machen die Erfahrung, dass man eine der wichtigsten, experimentell prüfbar Aussagen des Urknall-Modells nicht nur stauend zur Kenntnis nehmen muss, sondern dass sich das in der Schule erarbeitete Wissen anwenden lässt, um interessante Ergebnisse aus der Forschung zu verstehen.

2 | Das chemische Gleichgewicht

● In einem früheren Heft dieser Zeitschrift gab Höner [2] einen prägnanten Überblick über die Probleme bei der Behandlung des chemischen Gleichgewichts im Unterricht. Eine chemische Reaktion kann man als einen Übergang von einem (vom Experimentator hergestellten) Nichtgleichgewichtszustand in einen Gleichgewichtszustand zwischen Edukten und Produkten ansehen. Dieser Gleichgewichtszustand ist in unserem Zusammenhang relevant. Das chemische Gleichgewicht ist nicht etwa dadurch gekennzeichnet, dass keine Reaktionen mehr stattfinden. Im Gegenteil: Es ist höchst dynamisch. Hin- und Rückreaktion laufen ständig gleichzeitig ab. Man drückt dies durch einen Doppelpfeil aus:



Bei einer chemischen Reaktion werden zunächst die Edukte in einem Reaktionsgefäß zusammengegeben. Die Geschwindigkeit der Hinreaktion ist größer als die der Rückreaktion (das ist zwangsläufig so, denn es sind ja zu Beginn noch gar keine Produkte vorhanden, die reagieren könnten). Mit der Zeit wird allerdings die Geschwindigkeit der Hinreaktion geringer, weil die Konzentration der Edukte abnimmt. Gleichzeitig nimmt die Geschwindigkeit der Rückreak-

tion zu.

Das chemische Gleichgewicht ist erreicht, wenn die Geschwindigkeiten von Hin- und Rückreaktionen gleich groß sind, so dass sich die Konzentrationen von Produkten und Edukten nicht mehr ändern. Trotz der auf mikroskopischer Ebene ständig stattfindenden Hin- und Rückreaktionen scheint auf makroskopischer Ebene „nichts mehr zu passieren“. Das Massenwirkungsgesetz beschreibt die Konzentrationen der Reaktionspartner, die sich im Gleichgewicht einstellen. Strukturell hat es die Gestalt:

$$c_{\text{Produkte}} / c_{\text{Edukte}} = K. \quad (1)$$

Bei den meisten chemischen Reaktionen, die im Schulunterricht betrachtet werden, liegt das Gleichgewicht stark auf der Seite der Produkte. Das muss aber nicht immer der Fall sein. Es gibt „unvollständig“ verlaufende Reaktionen, bei denen nicht alle Edukte zu Produkten reagieren. Ein Beispiel ist die Bildung von Essigsäureethylester [2]. Hier liegt das Reaktionsgleichgewicht weder ganz auf der Seite der Produkte noch der Edukte, sondern in einem Zwischenbereich.

Besonders wichtig im hier betrachteten Zusammenhang ist, dass die Lage des chemischen Gleichgewichts von der Temperatur abhängt. Durch Änderung der Temperatur kann die Gleichgewichtskonzentration von Edukten und Produkten beeinflusst werden. Quantitativ wird dies durch das Arrhenius-Gesetz beschrieben, das die Temperaturabhängigkeit der Gleichgewichts„konstanten“ aus dem Massenwirkungsgesetz wiedergibt:

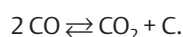
$$K = A \exp(-E_A/RT). \quad (2)$$

Hier ist E_A die sogenannte Aktivierungsenergie¹ der betreffenden Reaktion und R die allgemeine Gaskonstante. Für Physiker wesentlich „lesbarer“ wird der Zusammenhang, wenn man die Gleichungen (1) und (2) kombiniert:

¹ allgemeiner: eine Differenz von freien Enthalpien

$$\frac{c_{\text{Produkte}}}{c_{\text{Edukte}}} = A e^{-\frac{E_A}{RT}} \quad (3)$$

Das Verhältnis der Konzentrationen von Produkten und Edukten wird durch einen Boltzmann-Faktor bestimmt, eine aus der Physik sehr vertraute Gesetzmäßigkeit. Durch Variation der Temperatur kann man die Lage des Gleichgewichts verschieben. Ein Beispiel dafür ist die Reaktion zwischen Kohlenstoff, Kohlenstoffmonoxid und Kohlenstoffdioxid (Boudouard-Gleichgewicht) [3]:



Bei Temperaturen unter 600 °C liegt das Reaktionsgleichgewicht ganz auf der rechten Seite, während es bei Temperaturen über 900 °C ganz auf der linken Seite liegt. Im Zwischenbereich gibt es einen kontinuierlichen Übergang; das chemische Gleichgewicht liegt hier weder vollständig bei den Produkten noch bei den Edukten (Abb. 1). In der Praxis ist das Boudouard-Gleichgewicht in der Stahlherstellung und bei den Verbrennungsvorgängen in Motoren wichtig.

3 | Analogien zur Vermittlung des chemischen Gleichgewichts

● Für Schülerinnen und Schüler ist der Begriff des dynamischen Gleichgewichts schwierig zu verstehen, weil das „nicht-mehr-Verändern“ der Konzentrationen damit unvereinbar erscheint, dass Hin- und Rückreaktion ständig weiter ablaufen. In [2] wurden zur Veranschaulichung eine Reihe von Modellexperimenten und Denkmodellen vorgestellt, die den scheinbaren Widerspruch zwischen „Gleichgewicht“ und „dynamisch“ überwinden helfen:

1. *Stechheberversuch*: Die Füllstände einer gefärbten Flüssigkeit in zwei Glaszylindern repräsentieren die Konzentrationen von Edukten bzw. Produkten (Abb. 2). Hin- und Rückreaktion werden mit Hilfe von zwei Glasrohren dargestellt, mit denen Flüssigkeit von einem Zylinder in den anderen übertragen wird. Die Glasrohre haben unterschiedliche Querschnittsflächen, so dass sich in Abhängigkeit von der jeweiligen Füllhöhe unterschiedliche „Reaktionsgeschwindigkeiten“ für Hin- und Rückreaktion einstellen. Schon nach wenigen Durchgängen beobachtet man eine Annäherung an eine Gleichgewichts-Füllhöhe der beiden Zylinder, die sich dann

nicht mehr ändert.

2. *Kugelspiel*: Hier werden die Edukte/Produkte durch Kugeln verschiedener Farbe symbolisiert, die in einen Beutel (Reaktionsgefäß) gegeben werden. Zufällig werden Kugeln gezogen und nach bestimmten Regeln durch Kugeln anderer Farbe ersetzt. Auch hier beobachtet man einen Übergang ins Gleichgewicht.
3. *Holzapfelkrieg*: Dabei handelt es sich um eine Geschichte über unliebsame Äpfel, die über eine Grundstücksgrenze geworfen werden (Abb. 3). Der Junge auf der rechten Seite schafft es nicht, seine Gartenhälfte vollständig von den Äpfeln zu befreien. Der alte Mann ist zwar unbeweglicher, jedoch liegen auf seiner Seite die Äpfel dichter beisammen, so dass er immer einen Teil der Äpfel zurückwerfen kann. Im Gleichgewicht werden gleich viele Äpfel hin und zurück geworfen; eine stationäre Verteilung stellt sich ein. Die Temperaturabhängigkeit des Gleichgewichts kann man dadurch in die Geschichte einbauen, dass sich bei warmem Wetter die Gicht des Alten bessert, so dass er die Äpfel besser über den Zaun werfen kann. Im Gleichgewicht werden bei ansteigender Temperatur daher mehr Äpfel auf der Seite des Jungen liegen.

4 | Das frühe Universum bei $t = 1$ min

● Wechseln wir den Schauplatz und begehen uns ins frühe Universum, eine Minute nach dem Urknall. Zu dieser Zeit war die Temperatur bereits auf etwa 10^9 K abgesunken, entsprechend einer thermischen Energie von weniger als 1 MeV. Der Kosmos ist strahlungsdominiert, auf jedes Nukleon kommen etwa 10^9 Photonen. Neutronen und Protonen haben sich längst aus Quarks gebildet (das geschah bei einer Temperatur von 10^{12} K) und auch Elektron-Positron-Paare werden thermisch nicht mehr erzeugt (dazu wird eine Energie von 1 MeV benötigt, entsprechend 10^{10} K). Kurzum, das Universum ist für menschliche Verhältnisse zwar immer noch sehr unwirtlich, aber wir befinden uns schon in einem Zeitraum, der nicht mehr von Hochenergiephysik geprägt wird. Nun laufen die kernphysikalischen Prozesse ab, die für die Entstehung der leichten Elemente verantwortlich sind und mit denen wir uns im Folgenden befassen wollen. Eine anschauliche Vorstellung vom Zustand des Universums

bei $t = 1$ min vermittelt Kasten 1.

5 | Kernreaktionen im frühen Universum

● In den ersten drei Minuten nach dem Urknall entstanden aus freien Protonen und Neutronen die leichten Elemente bis zur Massenzahl 7 (der entsprechende Ausschnitt aus der Nuklidkarte ist in Abb. 4 gezeigt). Theoretische Modelle zum Kerngleichgewicht erklären die unterschiedlichen Häufigkeiten der Elemente, die damals erzeugt wurden [5, 6]. Ihre Vorhersagen können mit den beobachteten Elementhäufigkeiten verglichen werden. Dieser Vergleich ist die früheste quantitativ überprüfbare Aussage des kosmologischen Standardmodells. Mithilfe der Vorüberlegungen zum chemischen Gleichgewicht können wir diese Ergebnisse qualitativ nachvollziehen.

Zwischen dem dynamischen Gleichgewicht bei chemischen Reaktionen und demjenigen bei der Elemententstehung im frühen Universum lässt sich eine vollständige Analogie herstellen. So wie in einem Reagenzglas chemische Reaktionen ablaufen, fanden im frühen Universum bei der Kollision zweier Teilchen Kernreaktionen statt. Bei Temperaturen von 10^9 K wurden Kernbindungen ebenso schnell aufgebrochen, wie sie entstanden sind, es stellte sich ein dynamisches Gleichgewicht zwischen Hin- und Rückreaktion ein.

Betrachten wir als Beispiel die wichtige Reaktion, die zur Bildung von Deuterium (${}^2_1\text{H}$; meist als D abgekürzt) führt:



Bei einem Stoß können sich ein Proton und ein Neutron zu einem Deuteriumkern zusammenlagern; die Bindungsenergie von Deuterium beträgt 2,22 MeV. Ebenso kann bei Auftreffen eines Photons der Deuteriumkern wieder zerfallen (die Ergebnisse aus Kasten 1 zeigen, dass an den nötigen Photonen kein Mangel herrschte). Hin- und Rückreaktion laufen gleichermaßen ab, im Gleichgewicht stellt sich eine stabile Verteilung zwischen Protonen, Neutronen und Deuteriumkernen ein. Die Analogie zum chemischen Gleichgewicht ist so tragfähig, dass sogar die quantitativen Aussagen übertragen werden können. Für die relative Häufigkeit („Konzentration“) von Deuterium gilt eine zum Massenwirkungsgesetz analoge Beziehung:

Eine anschauliche Vorstellung vom Universum 1 min nach dem Urknall.

In der Oberstufe können die Schülerinnen und Schüler die folgenden Abschätzungen teilweise selbst vornehmen und dabei ihre Kenntnisse aus dem vorangegangenen Physikunterricht anwenden ($E = hf$, Solarkonstante).

- 1) **Dichte der Materie:** Die Materie im Universum besteht hauptsächlich aus Protonen und Neutronen. Für die Materiedichte entnimmt man aus der Literatur den Wert $\rho \approx 0,1 \text{ kg/m}^3$ [5, Fig. 3.1]. Zur Veranschaulichung: Dieser Wert liegt um etwa eine Größenordnung niedriger als die Dichte von Luft auf der Erdoberfläche ($\rho = 1,3 \text{ kg/m}^3$).

- 2) **Teilchenzahldichte:** Wie viele Teilchen befinden sich in einem Kubikmeter? Man kann auch fragen: Wie viele Protonen und Neutronen haben zusammen eine Masse von 100 g? Dies lässt sich berechnen, wenn man weiß, dass die Nukleonenmasse $1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ beträgt:

$$n_N = \frac{0,1 \text{ kg/m}^3}{1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}} = 6 \cdot 10^{25} \frac{1}{\text{m}^3}.$$

- 3) **Teilchenzahldichte von Luft:** Um einen anschaulichen Vergleich zu haben, vergleichen wir mit der Teilchenzahldichte von Luft. Sie lässt sich mit der folgenden Überlegung ermitteln: Luft ist in guter Näherung ein ideales Gas mit einem Molvolumen von 22,4 l. Die Teilchenzahldichte von Luft beträgt daher:

$$n_{\text{Luft}} = \frac{6 \cdot 10^{23}}{22,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3} = 2,6 \cdot 10^{25} \frac{1}{\text{m}^3}.$$

Die Materie besitzt also zum Zeitpunkt der Nukleosynthese etwa die gleiche Teilchenzahldichte wie heute die Luft auf der Erdoberfläche. Die Materie im frühen Kosmos ist allerdings sehr viel heißer und die thermische Strahlung sehr viel intensiver. Dies zeigen die beiden folgenden Abschätzungen.

- 4) **Photonendichte im frühen Universum:** Aus Beobachtungen der kosmischen Hintergrundstrahlung (WMAP) kann man das Verhältnis η der Teilchenzahldichten von Nukleonen und Photonen erschließen. Es ergibt sich der Wert

$$\eta = \frac{n_N}{n_\gamma} = 6 \cdot 10^{-10}.$$

Die Teilchenzahldichte der Photonen bei $t = 1 \text{ min}$ lässt sich daher mit dem oben angegebenen Wert von n_N zu 10^{35} Photonen pro Kubikmeter berechnen.

- 5) **Photonendichte auf der Erde:** Von der Sonne trifft in jeder Sekunde eine Strahlungsenergie von 1367 J auf einen Quadratmeter der Erdatmosphäre (Solarkonstante). Die Photonen, die in einer Sekunde auf einen Quadratmeter einströmen, befinden sich in einem Quader mit dem Volumen $1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 3 \cdot 10^8 \text{ m}$ (Lichtgeschwindigkeit). Um abzuschätzen, wie viele Photonen dies sind, nehmen wir vereinfachend an, dass alle die gleiche Energie besitzen, und zwar die eines Photons mit einer Wellenlänge von 550 nm:

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} = 3,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 2,26 \text{ eV}.$$

Um eine Energie von 1367 J zu übertragen, muss sich eine Anzahl von $1367 \text{ J} / 3,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 3,8 \cdot 10^{21}$ Photonen in diesem Volumen befinden. Dies ergibt eine Teilchenzahldichte

$$n_\gamma = \frac{3,8 \cdot 10^{21}}{3 \cdot 10^8 \text{ m}^3} = 1,3 \cdot 10^{13} \frac{1}{\text{m}^3}.$$

d. h. ein um viele Größenordnungen kleinerer Wert als im frühen Universum. Jedes Photon besitzt noch dazu eine wesentlich geringere Energie (eV statt MeV).

- 6) Insgesamt kann man sagen, dass die Teilchenzahldichte zum Zeitpunkt der Nukleosynthese etwa der von Luft auf der Erde entspricht, die Photonenzahl aber sehr viel größer als auf der Erde ist. Vor allem ist die Temperatur der Materie und der Photonen im frühen Universum sehr viel höher.
- 7) Obwohl der Vergleich mit den Verhältnissen auf der Erde anschaulich ist, wäre das treffendere Vergleichsobjekt die großräumige Dichte und Temperatur im heutigen Kosmos. Diese sind aber sehr viel geringer als im frühen Universum (Temperatur der kosmischen Hintergrundstrahlung von 3 K, Materiedichte $\approx 1 \text{ Atom/m}^3$); sie sind durch die Expansion des Universums stark „verdünnt“ worden.

$$\frac{c_{\text{Produkte}}}{c_{\text{Edukte}}} \sim e^{\frac{B_D}{kT}}. \quad (5)$$

Die beiden Formeln (3) und (5) unterscheiden sich nur dadurch, dass in (5) die Bindungsenergie des Deuteriums B_D statt der Aktivierungsenergie auftritt. Für genauere quantitative Aussagen lässt sich die Gesetzmäßigkeit noch präzisieren. Benutzt man statt der Konzentration c die übliche Bezeichnung X für den relativen Massenanteil der jeweiligen Reaktionsteilnehmer, lautet das „Massenwirkungsgesetz“ für die Reaktion (4) [6]:

$$\frac{X_D}{X_p X_n} = 16,3 \eta \left(\frac{T}{m_N} \right)^{\frac{3}{2}} e^{\frac{B_D}{kT}}. \quad (6)$$

Dabei bezeichnet η das Verhältnis von Nukleon- und Photonenzahlen im Universum (empirisch: $\eta = 6 \cdot 10^{-10}$) und m_N die Nukleonenmasse von 939 MeV/ c^2 . Eine Beziehung der gleichen Form gilt für das Anzahlverhältnis von Protonen und Neutronen im thermischen Gleichgewicht:

$$\frac{X_p}{X_n} = e^{\frac{B_p}{kT}}. \quad (7)$$

Hierbei ist $B_p = 1,3$ MeV die Differenz der Ruheenergien von Neutron und Proton. Berücksichtigt man schließlich noch, dass die Summe aller relativen Massenanteile 1 ergeben muss, erhält man eine dritte Gleichung:

$$X_n + X_p + X_D = 1, \quad (8)$$

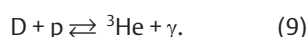
Mit (6)-(8) liegt ein System aus drei Gleichungen für die drei Unbekannten X_n , X_p und X_D vor. Durch Lösen des Gleichungssystems können wir die relativen Elementhäufigkeiten bestimmen.

Abb. 5 zeigt die Lösung des Gleichungssystems (6)-(8), die über die in den Gleichungen auftretenden Faktoren von der Temperatur bzw. der thermischen Energie kT abhängt. Dargestellt ist das sich einstellende Kerngleichgewicht für verschiedene Energien im Bereich zwischen 0,03 MeV und 1 MeV. Man erkennt: Für hohe Energien existiert die Materie ausschließlich in Form von ungebundenen Protonen und Neutronen. Das Gleichgewicht liegt ganz auf der linken Seite der Reaktionsgleichung (4). Umgekehrt liegt für niedrige Temperaturen fast ausschließlich der gebundene Zustand (Deuterium) vor; das Reaktionsgleichgewicht liegt auf der rechten Seite. Diese Verschiebung des Reaktionsgleichgewichts in Abhängigkeit von der Temperatur ist voll-

ständig analog zu derjenigen beim Bou-douard-Gleichgewicht in Abb. 1.

6 I Reaktionsnetzwerke

● Ist erst einmal Deuterium gebildet, kann es nicht nur durch die Rückreaktion von (4) wieder zerfallen, sondern es kann seinerseits wieder an Kernreaktionen teilnehmen, die zur Bildung schwererer Kerne führen, etwa ${}^3\text{He}$:



Auf diese Weise bildet sich ein ganzes Netzwerk von Reaktionen aus, dass den unteren Bereich der Nuklidkarte bis zur Massenzahl 7 umfasst (Abb. 4). Die Schülerinnen und Schüler können den Umgang mit der Nuklidkarte üben, indem sie die Reaktionswege nachvollziehen. Beispielhaft sind in Abb. 6 die wichtigsten Kernreaktionen gezeigt, die bei der Entstehung der leichten Elemente eine Rolle spielen. An den mit Fragezeichen markierten Stellen sollen in diesem Aufgabenbeispiel (aus [7]) die fehlenden Reaktionsgleichungen ergänzt werden. Der Umgang mit der Nuklidkarte wird so in einen Kontext eingebettet, der für die Schülerinnen und Schüler in der Regel interessant ist und zudem den Einblick in hochaktuelle Forschung ermöglicht.

7 I Abkopplung aus dem thermischen Gleichgewicht

● Während die geschilderten Kernreaktionen ablaufen, expandiert das Universum. Durch die Expansion des Raumes erfüllt die gleiche Energiemenge einen immer größeren Raum, die Energiedichte sinkt. Das Universum kühlt ab. Temperatur und thermische Energie als Funktion der Zeit sind in logarithmischer Auftragung in Abb. 7 dargestellt [5,6].

Für die Nukleosynthese bedeutet die Expansion des Universums zweierlei: Zum einen wird das Reaktionsgleichgewicht in Richtung niedrigere Temperaturen verschoben. Die relative Häufigkeit der Elemente ändert sich. Wie das Deuterium-Beispiel in Abb. 5 gezeigt hat, liegt das Gleichgewicht bei hohen Temperaturen auf der Seite der ungebundenen Protonen und Neutronen, während es bei sinkender Temperatur bei den gebundenen Zuständen (hier dem Deuterium) liegt.

Die Aussage, dass bei niedrigen Temperaturen gebundene Zustände vorliegen, kann noch nicht die ganze Wahrheit sein. Denn

im heutigen Universum liegt keinesfalls die meiste Materie in Form von stark gebundenen Atomkernen vor. Im Gegenteil: Das weitaus häufigste Element ist Wasserstoff. Hier kommt der zweite Aspekt der Expansion des Universums ins Spiel. Denn nicht nur die Energie wird verdünnt, sondern auch die Materie. Ihre Dichte nimmt kontinuierlich ab. Was dies für das Kerngleichgewicht bedeutet, zeigt sich nur auf mikroskopischer Beschreibungsebene. Die phänomenologische thermodynamische Beschreibung kann den Übergang ins Nichtgleichgewicht nicht beschreiben; wie beim Übergang von der Thermodynamik zur statistischen Mechanik muss auf kinematische Überlegungen zurückgegriffen werden.

Um das thermische Gleichgewicht aufrecht zu erhalten, müssen ständig Stöße zwischen den Reaktionspartnern stattfinden, so dass Hin- und Rückreaktionsprozesse in ausreichender Zahl ablaufen. Durch die zunehmende Verdünnung der Materie aufgrund der Expansion des Universums werden diese Stöße allerdings seltener. Die Dichte wird irgendwann so gering, dass zu wenige Stöße zwischen den Reaktionspartnern stattfinden, um der sich mit der Temperatur ändernden Gleichgewichtsverteilung zu folgen. Die Häufigkeitsverteilung der Elemente weicht mehr und mehr von der Gleichgewichtsverteilung ab. Man sagt: Die Materie koppelt aus dem thermischen Gleichgewicht ab, die Elementhäufigkeiten „frieren ein“.

Abb. 8 zeigt die Vorhersage der theoretischen Modelle für die relative Häufigkeit der leichten Elemente als Funktion der Zeit (und damit auch der Temperatur) [5,6]. Wie beim Beispiel der Deuteriumentstehung in Abb. 5 verschiebt sich das Reaktionsgleichgewicht mit sinkender Temperatur hin zu den gebundenen Zuständen. Im frühen Universum wird diese Gleichgewichtsverschiebung allerdings durch die Abkopplung der verschiedenen Elemente modifiziert. So friert das Verhältnis von Neutronen zu Protonen z. B. bei einer Energie von 1 MeV (entsprechend 10^{10} K) auf den Wert 1/6 ein und folgt danach nicht mehr der thermischen Gleichgewichtsverteilung. Dies beeinflusst die Menge des entstehenden ${}^4\text{He}$, denn wenn alle vorhandenen Neutronen in Heliumkerne eingebaut sind, kann kein weiteres Helium entstehen. Die verbleibenden Protonen bleiben größtenteils ungebunden, aus ihnen wird der Wasserstoff, der heute im Universum dominiert. In chemischer Terminologie: Durch

das Einfrieren des Neutronen/Protonen-Verhältnisses bei der Abkopplung liegen die Edukte für die Heliumsynthese nicht in stöchiometrischen Verhältnissen vor; ein Teil davon (die meisten Protonen) nehmen nicht an der Reaktion teil.

Wie man in Abb. 8 erkennt, verändern sich die Elementhäufigkeiten nach etwa 1000 s nicht mehr (bis auf die instabilen freien Neutronen, die mit einer Halbwertszeit von 10 min zerfallen). Zu diesem Zeitpunkt sind alle Kernreaktionen aus dem Reaktionsnetzwerk in Abb. 6 so selten geworden, dass sie die Elementhäufigkeiten nicht mehr ändern. Die Nukleosynthese im frühen Universum ist damit abgeschlossen. Schwerere Elemente als ${}^7\text{Li}$ sind nicht entstanden.

6 | Vergleich mit den Beobachtungen

● Abb. 8 zeigt, dass nach der Nukleosynthese die Elementhäufigkeiten während der nächsten 10 h konstant bleiben. Wenn sie sich auch während der folgenden 13,7 Milliarden Jahre nicht mehr verändern würden, könnten wir sie mit den heute beobachteten Häufigkeiten vergleichen. So erstaunlich es klingt: Das ist im Wesentlichen der Fall. Zwar wird z. B. ${}^4\text{He}$ durch das Wasserstoffbrennen in Sternen erzeugt. Aber dadurch werden die Spuren des Urknalls nicht verwischt. Die Urknall-Nukleosynthese sagt einen ${}^4\text{He}$ -Anteil von ca. 25 % an der gesamten Materiedichte voraus, während in Sternen bisher nur 1 % bis 4 % erzeugt worden sind.

Die Messung der Elementhäufigkeiten im Universum ist keinesfalls einfach, vor allem wenn man „urtümliche“ Orte beobachten will, in denen sich seit dem Urknall möglichst wenig geändert hat. Umso beeindruckender ist der in Abb. 9 gezeigte Vergleich von Theorie und Beobachtung. Auf der senkrechten Achse sind die vorhergesagten Elementhäufigkeiten aufgetragen. Die waagerechte Achse gibt die Abhängigkeit vom Parameter η wieder, dem Verhältnis von Nukleon- und Photonenzahlen, der z. B. auch in Gl. (6) auftritt. Lange Zeit war η nur ungenau bekannt. Erst bei den Präzisionsmessungen der kosmischen Hintergrundstrahlung (WMAP, 2003) konnte der Wert von η , der als senkrechter Balken in Abb. 9 eingezeichnet ist, präziser bestimmt werden.

Die waagerechten Bänder zeigen die Beobachtungsbefunde. Ihre gute Übereinstimmung mit den Vorhersagen ist einer der

überzeugendsten Bestätigungen des Urknall-Modells. Insbesondere gilt dies, wenn man die logarithmische Skala von der Abbildung berücksichtigt: Die Elementhäufigkeiten variieren über 10 Größenordnungen und werden dennoch sehr gut vorhergesagt.

Wie wir gesehen haben, werden die Häufigkeiten der Elemente wesentlich von der Abkopplung aus dem thermischen Gleichgewicht bestimmt. Dieser Prozess hängt empfindlich von den Details der Kernreaktionen wenige Minuten nach dem Urknall ab. Dies macht die Nukleosynthese zu einer sehr feinfühligsten Probe. Die robuste Vorhersage von 25 % Helium-Massenanteil testet das Urknall-Modell sogar bis zum Zeitpunkt des Einfrierens des Neutron/Proton-Verhältnisses bei $t \approx 1$ s. Zum Vergleich: Die kosmische Hintergrundstrahlung, die ebenfalls Präzisionsvergleiche zwischen Vorhersagen und Beobachtungen ermöglicht, entstand erst etwa 100 000 Jahre nach dem Urknall.

7 | Epilog: Die Entstehung der schwereren Elemente

● Bei der Urknall-Nukleosynthese entstehen keine schwereren Elemente als ${}^7\text{Li}$. Die Reaktionen, die hin zu den schwereren Elementen führen, sind nicht schnell genug, um während der Verdünnung durch die fortschreitende Expansion des Universums zu konkurrieren. Eine Tatsache, die die Schülerinnen und Schüler mit der Nuklidkarte nachprüfen können ist, dass es keine stabilen Isotope mit den Massenzahlen 5 und 8 gibt. Der Weg zu ${}^{12}\text{C}$ führt über seltene Dreierstöße von Heliumkernen, ein Prozess, der zu langsam abläuft, um bei der Urknall-Nukleosynthese eine Rolle zu spielen.

Wo aber kommen Kohlenstoff, Sauerstoff und alle schwereren Elemente, die man heute auf der Erde findet? Sie entstanden erst viel später bei Kernumwandlungen in Sternen. Elemente schwerer als Eisen bildeten sich sogar erst, wenn Sterne als Supernova explodierten. Durch solche Explosionen lange vor der Entstehung des Sonnensystems wurde die Sternmaterie im Weltraum verteilt und trug zur Entstehung von Sonne und Erde bei. Weil es einen anderen Ursprung für die schweren Elemente nicht gibt, liegt hier eine für Schülerinnen und Schüler beeindruckende Erkenntnis: Sie können sicher sein, dass jedes Kohlenstoffatom, jedes Eisen- und jedes Sauerstoffatom in ihrem Körper schon einmal durch eine Supernova hindurchgegangen ist.

tom in ihrem Körper schon einmal durch eine Supernova hindurchgegangen ist.

Literatur

- [1] H. Erhardt, R. Müller: Ein Gruppenpuzzle zum Thema Strahlentherapie, PdN-PhiS 8/57 (2008), S. 41.
- [2] K. Höner: Vom statischen zum dynamischen chemischen Gleichgewicht, PdN-PhiS 3/54 (2005), S. 18.
- [3] E. Riedel: Allgemeine und Anorganische Chemie, Berlin: de Gruyter (1985).
- [4] H. Wambach (Hrsg.): Materialien-Handbuch Kursunterricht Chemie. Kinetik – Gleichgewichte – Massenwirkungsgesetz (Bd. 3), Aulis, Köln 1993.
- [5] G. Börner: The Early Universe – Facts and Fiction, Springer, Berlin 2003.
- [6] E. W. Kolb, M. S. Turner: The Early Universe, Addison Wesley, Redwood City 1990.
- [7] Kuhn Physik 7–9 Nordrhein-Westfalen, Westermann, Braunschweig (erscheint 2009).

Anschrift des Verfassers

Prof. Dr. Rainer Müller, Institut für Fachdidaktik der Naturwissenschaften, Abt. Physik und Physikdidaktik, Technische Universität Braunschweig, Pockelsstraße 11, 38106 Braunschweig
E-Mail: rainer.mueller@tu-bs.de

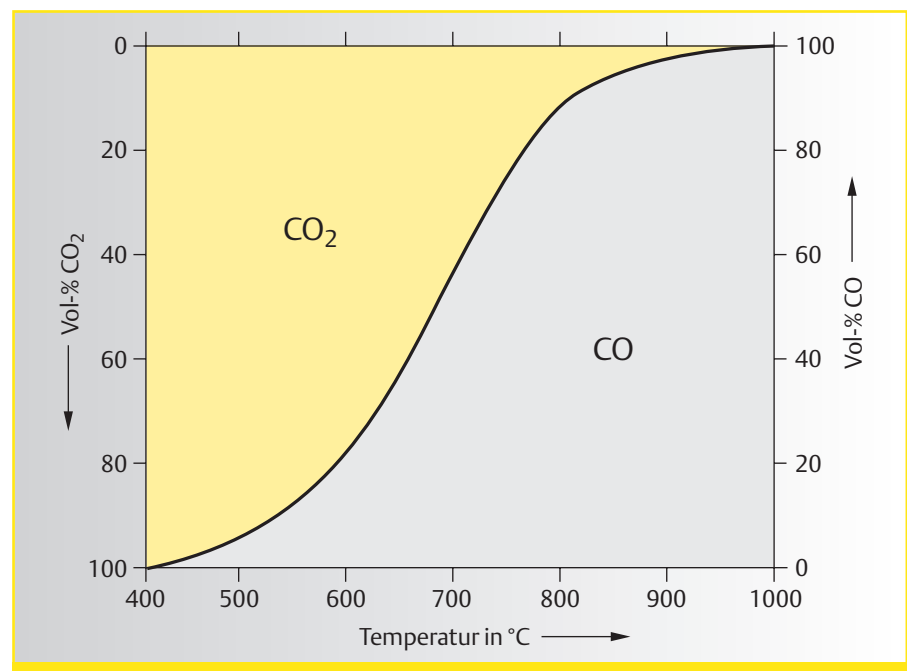


Abb. 1: Temperaturabhängigkeit des Boudouard-Gleichgewichts

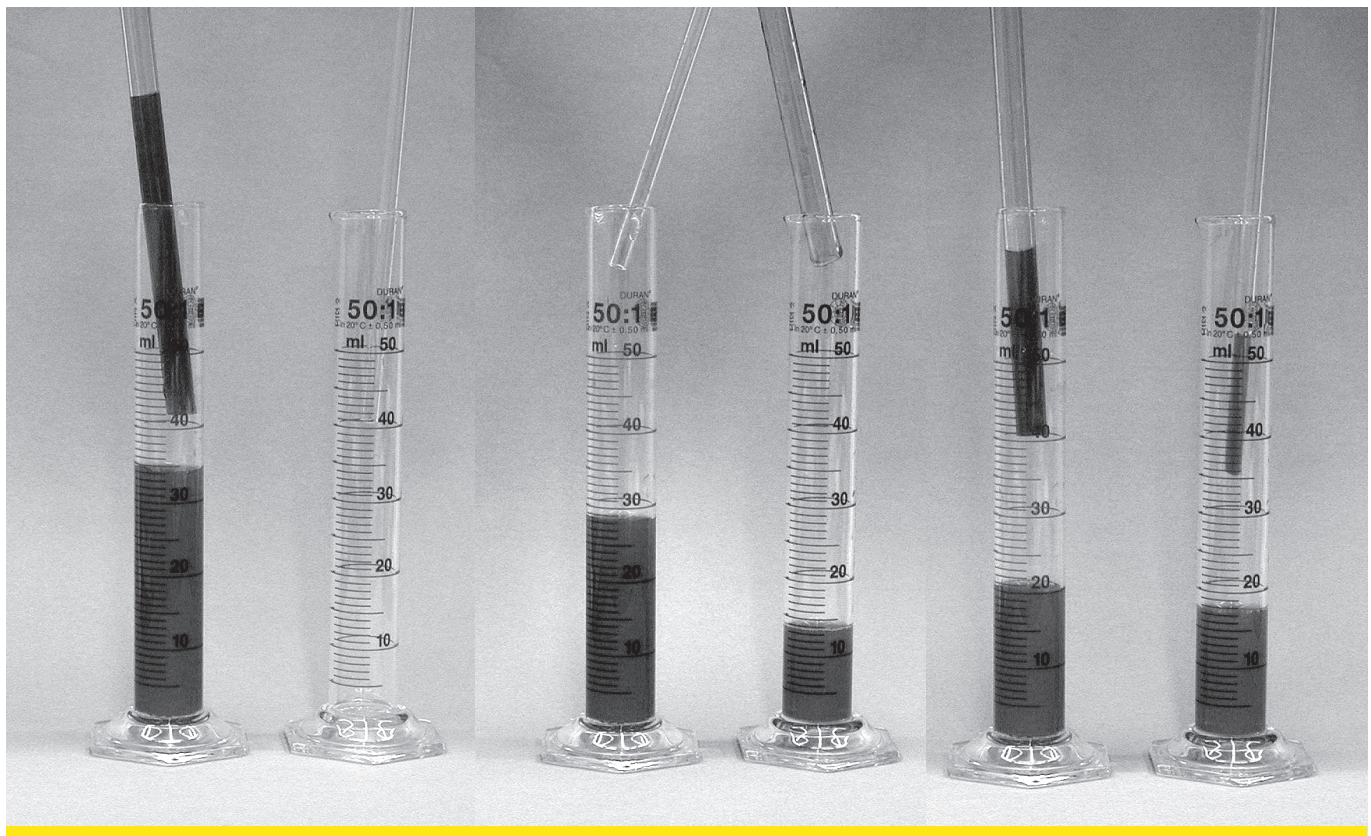


Abb. 2: Stechhebersversuch [2]

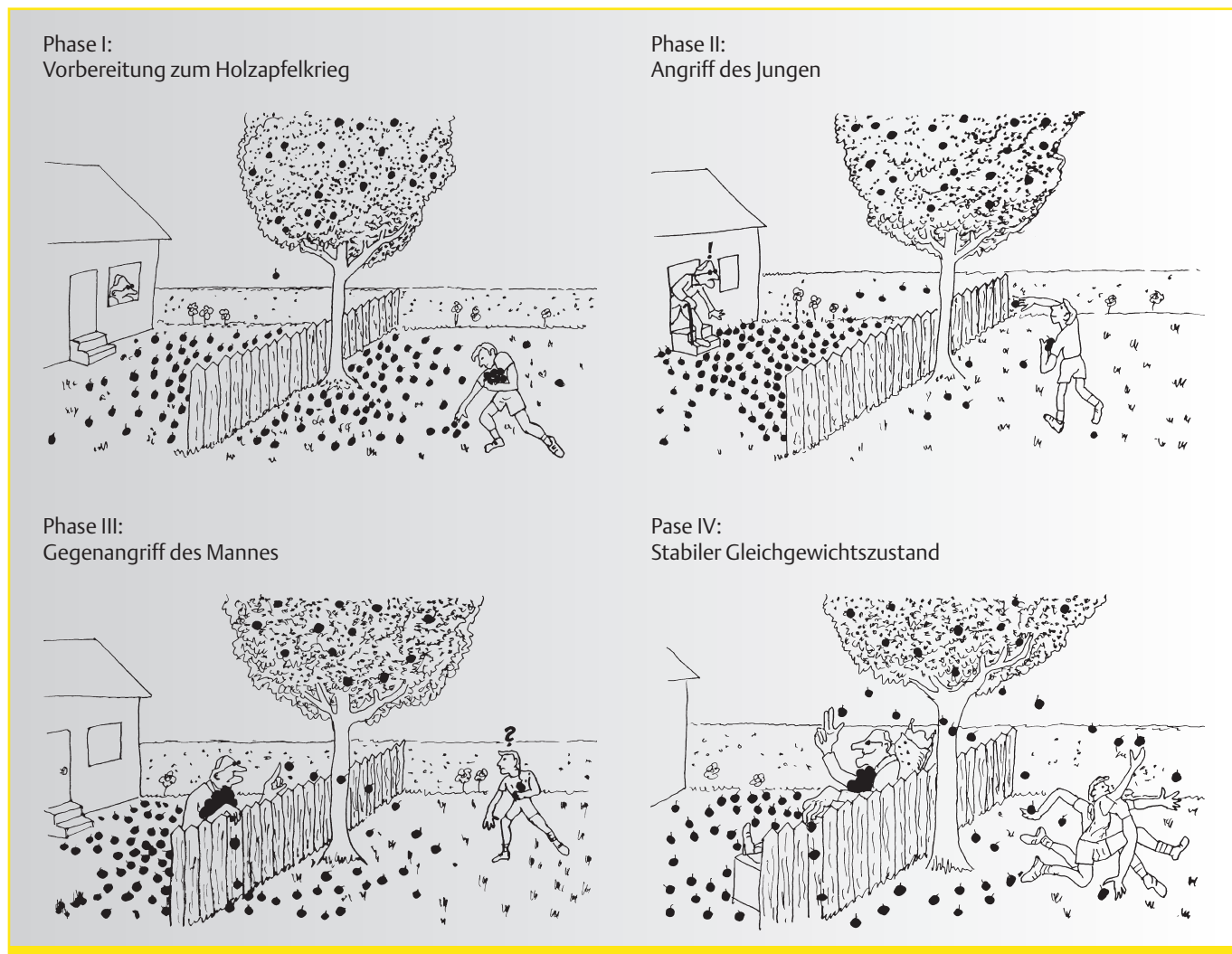


Abb. 3: Der große Holzapfelkrieg (Abb. entnommen aus [4])

	⁵ Be	⁶ Be 92 keV	⁷ Be 53,2 d	⁸ Be 5,57 eV	⁹ Be stabil 100 %
	P	α: 100,00 % P: 100,00 %	ε: 100,00 %	α: 100,00 %	
³ Li	⁴ Li 6,03 MeV	⁵ Li ≈ 1,5 MeV	⁶ Li stabil 7,59 %	⁷ Li stabil 92,41 %	⁸ Li 839,9 ms
P	P: 100,00 %	P: 100,00 % α: 100,00 %			β ⁻ α: 100,00 % β ⁻ : 100,00 %
	³ He stabil 0,000137 %	⁴ He stabil 99,999863 %	⁵ He 0,60 MeV	⁶ He 806,7 ms	⁷ He 150 keV
			N: 100,00 % α: 100,00 %	β ⁻ : 100,00 %	N
¹ H stabil 99,985 %	² H stabil 0,015 %	³ H 12,32 a	⁴ H 4,6 MeV	⁵ H 5,7 MeV	⁶ H 1,6 MeV
		β ⁻ : 100,00 %	N: 100,00 %	N: 100,00 %	N: 100,00 %
		Neutron 10,23 min			
		β ⁻ : 100,00 %			

Abb. 4: Ausschnitt aus der Nuklidkarte mit den leichtesten Elementen

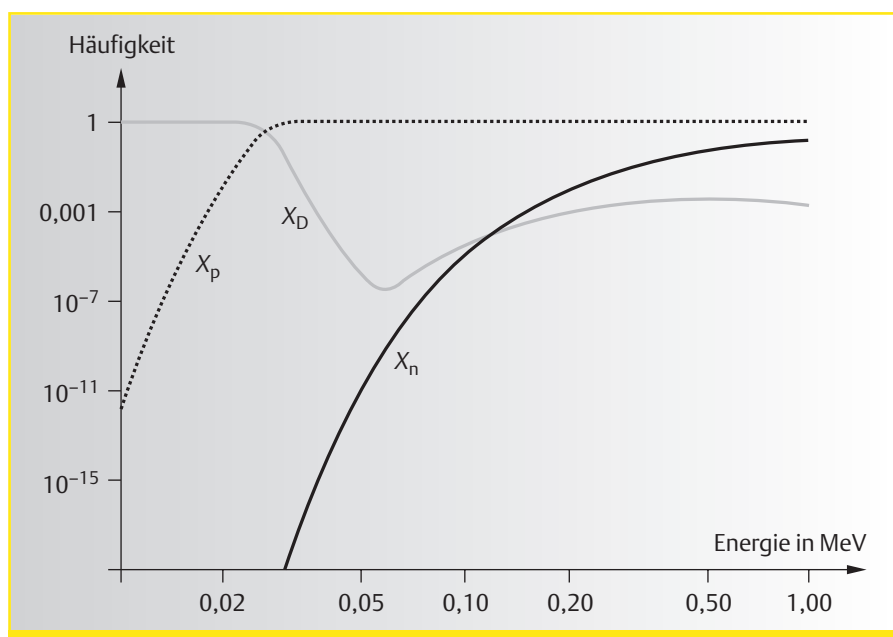


Abb. 5: Kerngleichgewicht bei der Bildung von Deuterium als Funktion der Energie (und damit auch der Temperatur)

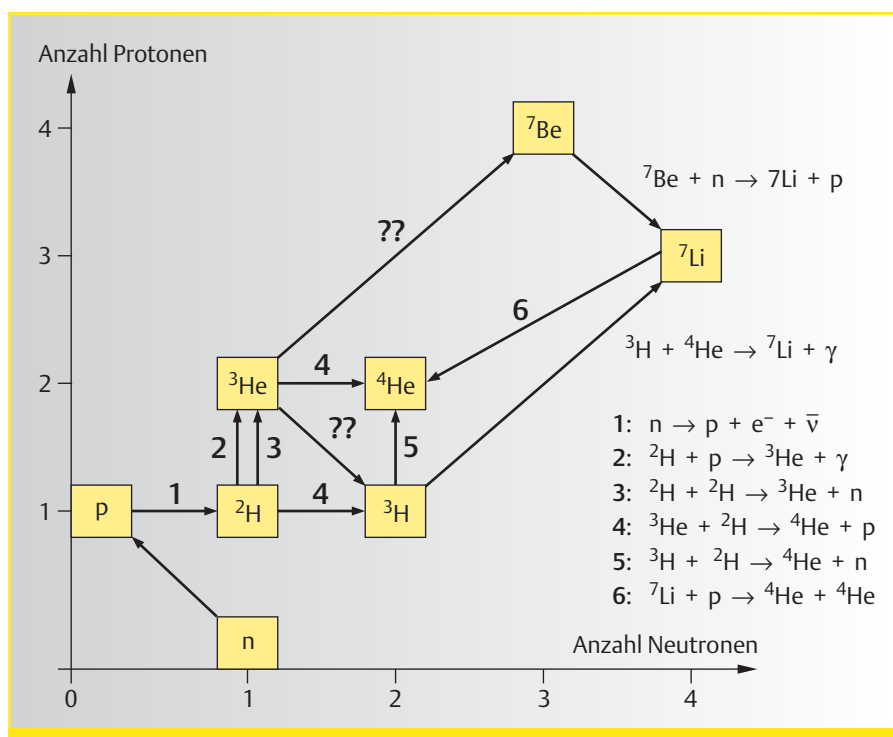


Abb. 6: Das Reaktionsnetzwerk bei der Bildung der leichten Elemente umfasst einen ganzen Ausschnitt aus der Nuklidkarte. Schülerinnen und Schüler können die fehlenden Einträge ergänzen (aus [7]).

Astroteilchenphysik – Physik und Chemie fachübergreifend

R. Müller

In der Chemie ist das dynamische Gleichgewicht von Hin- und Rückreaktion ein wichtiger Unterrichtsinhalt. In der Kernphysik lässt sich dies als Analogie aufgreifen. Bei der Nukleosynthese, der Entstehung der Elemente im frühen Universum liegt ein dynamisches Kerngleichgewicht vor, für das ähnliche Gesetze wie beim chemischen Gleichgewicht gelten. Damit lässt sich ein spannender Inhalt aus der aktuellen Forschung im Unterricht behandeln.

PdN-PhIS 6/57, S. x

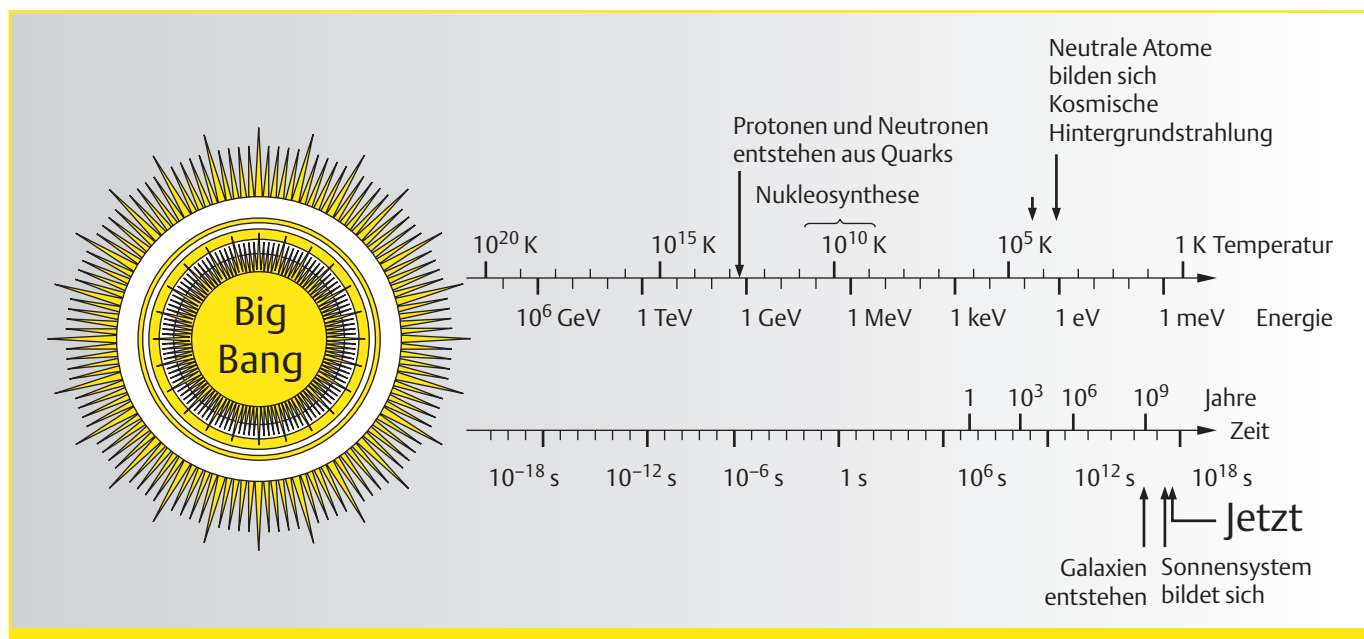


Abb. 7: Temperatur und Energie im expandierenden Universum als Funktion der Zeit

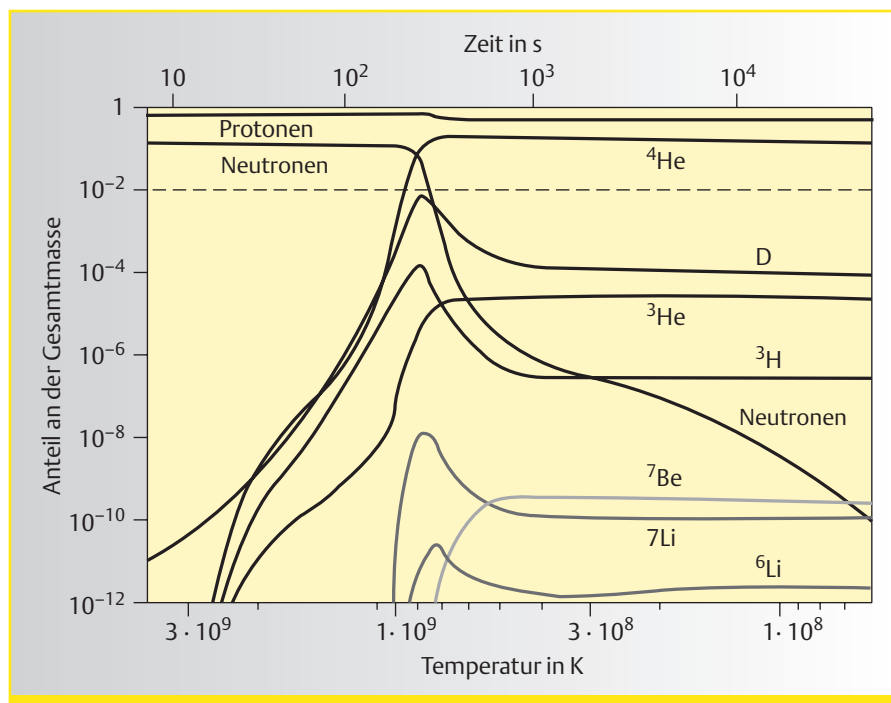


Abb. 8: Entwicklung der Elementhäufigkeiten im zeitlichen Verlauf bei absinkender Temperatur

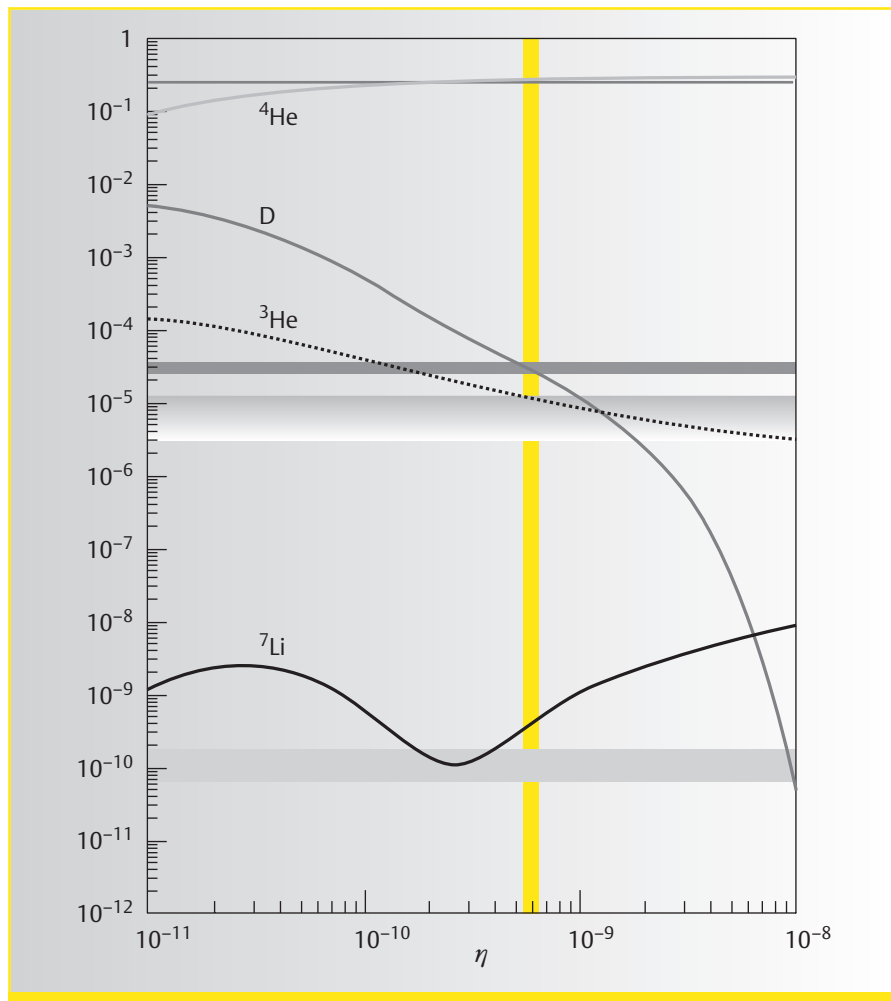


Abb. 9: Elementhäufigkeiten (Kurven) im Vergleich zu den Beobachtungen (waagerechte und senkrechte Balken). Für ^4He ist der Anteil an der Gesamtmasse der Materie im Universum aufgetragen, für die anderen Kerne ihre Häufigkeit im Vergleich zu der von Wasserstoff.