

DER FRÜHE KOSMOS: CHEMIE MIT URKNALL

von

Dierck-Ekkehard LIEBSCHER
Astrophysikalisches Institut Potsdam

Gegenstand der Kosmologie ist das Weltall als reelles Ganzes, das beobachtet, beschrieben und erklärt werden soll. Dabei wird gleichzeitig die globale Konsistenz der bekannten physikalischen Gesetze in einem prinzipiell abgeschlossenen, d.h. universellen System vor Augen geführt, in dem keine Erklärung auf ein Außerhalb zurückgreifen darf, ohne ihren Sinn zu verlieren. Wegen der Einmaligkeit des Objekts und der Unmöglichkeit seiner Präparation für einen Versuch ist zur Kosmologie eine metatheoretische Voraussetzung nötig, die nicht bewiesen, aber auch nicht widerlegt werden kann. Wenn man diese Voraussetzung nicht akzeptiert, kann man sich anderen Dingen zuwenden: die Kosmologie könnte dann nur noch beschreiben, aber keine Erklärungen der Entwicklung und Struktur des Kosmos geben. Diese Voraussetzung ist das kosmologische Prinzip: Überall wird mit demselben Wasser gekocht. Damit ist gemeint, daß die irdisch gefundenen und getesteten physikalischen Gesetze universell sind und daß der beobachtbare Teil des Kosmos repräsentativ für das Ganze ist. Im Großen, d.h. in allen mit dem Horizont vergleichbaren Skalen, muß der Kosmos homogen sein. Die Forderung der Isotropie, d. h. der Richtungsunabhängigkeit seines Zustands im Großen, ist mehr zufälliger Natur, weil die Milchstraße die Beobachtung behindert. Allerdings ist sie durch die Entdeckung der Hintergrundstrahlung und den Nachweis ihrer Isotropie besser beobachtungsseitig zu stützen als die Homogenität. Das kosmologische Prinzip ist Erbe der Cusanischen Vorstellung einer Welt ohne Mittelpunkt und Rand.

Ist der Kosmos im großen homogen, dann ist Expansion bzw. Kontraktion als Gesamtbewegung möglich. Die Abstände der Kilometersteine im Kosmos, der Galaxien, verändern sich großräumig mit einem universellen Skalenfaktor $R[t]$. Damit sind auch genügend große expansionsfeste Volumina thermodynamisch abgeschlossene Systeme. Expansionsfest soll heißen, daß sich die Grenzen dieser Volumina mit der kosmischen Expansion ausdehnen. Diese Grenzen soll man sich also etwa durch Galaxien ohne Pekuliarbewegung abgesteckt denken (Abb.1). Auch wenn diese Grenzen nur gedacht sind und über sie hinweg ein Austausch von Materiekomponenten und Teilchen aller Art stattfindet, ist wegen der Homogenität die Bilanz eines solchen Austauschs immer ausgeglichen, so wie die Grenzfläche von Wasser und Dampf immer von vielen Molekeln passiert wird, im Gleichgewicht aber beide Richtungen das gleiche Verkehrsaufkommen haben. Ein expansionsfestes Volumen ist also wie ein abgeschlossenes Volumen, und wir können alle Prozesse zwischen den verschiedenen Komponenten des Systems als Prozesse in einem thermodynamisch abgeschlossenen Volumen bilanzieren. Charakteristisch für den Kosmos ist nun die Expansion aus extrem dichten Zuständen heraus, so daß die zu erwartenden Prozesse als Chemie mit Urknall angesehen werden müssen.

Nun erlaubt das Newtonsche Gravitationsgesetz keinen homogenen Kosmos endlicher Dichte. Dieses Newtonsche Paradoxon wird von der Allgemeinen Relativitätstheorie gelöst.

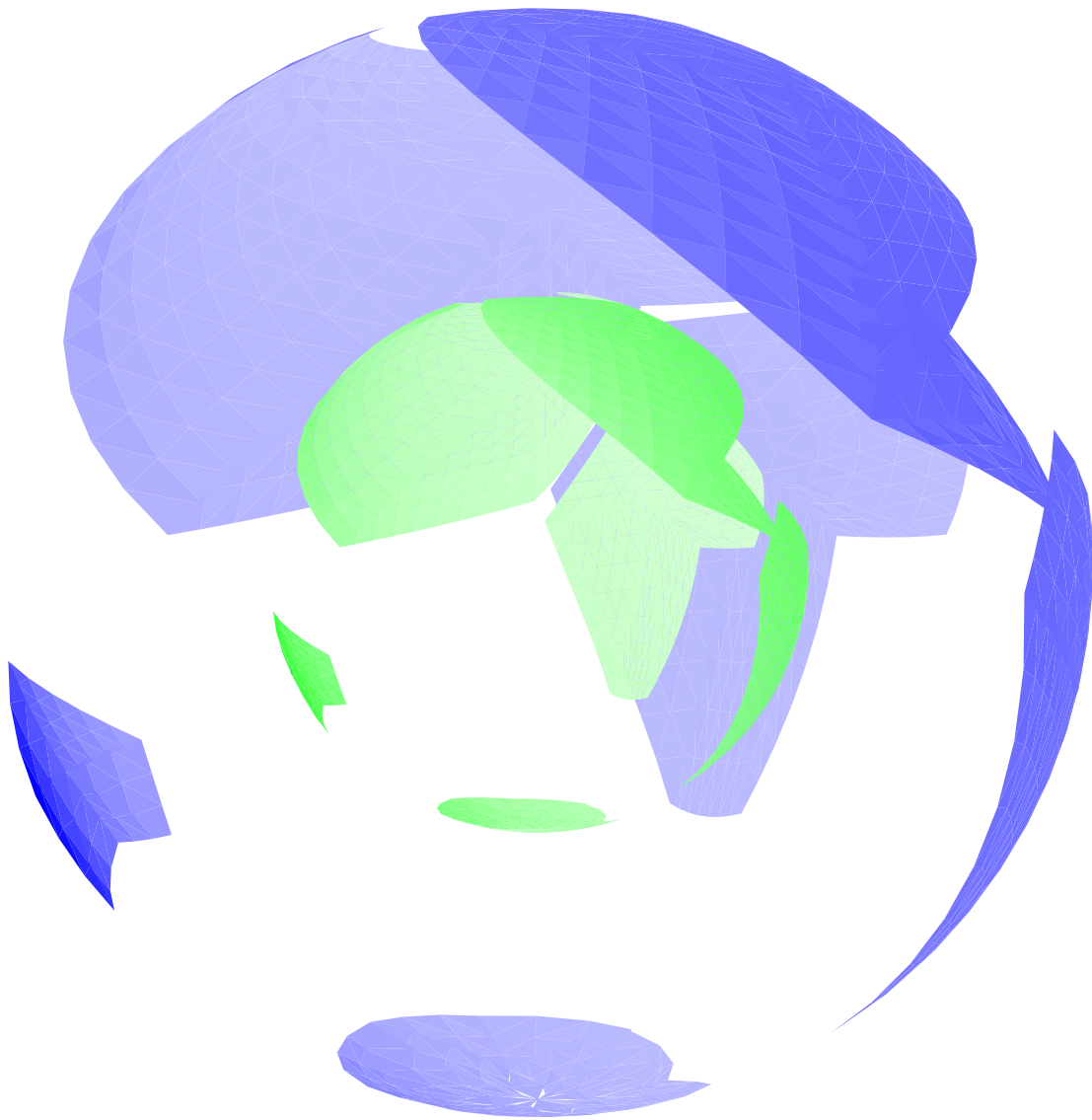


Figure 1: Modell der homogenen Expansion einer Kugelfläche
Dargestellt sind expansionsfeste Figuren, die ihre relative Konfiguration nicht ändern, aber dennoch eine expansionsbedingte Relativgeschwindigkeit erfahren, die immer proportional zum Abstand der expansionsfesten Punkte ist (Hubblesches Gesetz).

Die Entwicklung des Skalenfaktors $R[t]$ wird durch die Einsteinschen Gleichungen bestimmt, die die Proportionalität von Weltkrümmung und Massendichte behaupten. Für den homogenen Kosmos zerfällt zum einen die Krümmung der Welt in das Quadrat der Expansionsrate und die Krümmung des Raums, zum anderen die Massendichte (ρ) in einen reellen (positiver Druck p) und einen virtuellen Teil (negativer Druck) der auch die Namen Vakuum oder kosmologische Konstante (Λ) tragen kann. Als Proportionalitätsfaktoren treten die Lichtgeschwindigkeit c und die Gravitationskonstante G auf. Die Krümmung des Raums kann positiv, null oder auch negativ sein. Das Vorzeichen wird mit dem Krümmungsindex k bezeichnet.

$$\begin{array}{ccccccc} \text{Quadrat} & & \text{Krümmung} & & \text{virtuelle} & & \text{reelle} \\ \text{der} & + & \text{des} & \propto & \text{Dichte} & + & \text{Dichte} \\ \text{Expansionsrate} & & \text{Raums} & & p = -\rho c^2 & & p \geq 0 \end{array}$$

$$\left(\frac{1}{R} \frac{dR}{cdt} \right)^2 + \frac{k}{R^2} = \frac{\Lambda}{3} + \frac{8\pi G}{3c^2} \rho_{\text{reell}}$$

Dies sind die Friedmannschen Gleichungen. Sie haben die Form einer Bilanz. Die gemessene Expansionsrate ist durch Raumkrümmung und Massendichte austariert.

Der Rest ist Thermodynamik. In der Vergangenheit, bei höherer Kompression, muß das Universum wärmer gewesen sein. Damit können wir auf die Existenz von Wärmestrahlung im Kosmos schließen. Wir haben also neben einem effektiv druckfreien Anteil der Massendichte, wie er durch die Verteilung der Galaxien angezeigt wird, auch eine Strahlungsdichte zu unterstellen. Deren wesentliche Komponente wird heute als Strahlungshintergrund aller anderen kosmischen Objekte beobachtet. Das Spektrum dieses Hintergrunds gehorcht dem klassischen, von Planck gefundenen Strahlungsgesetz, aus dem man die Temperatur zu 2.73 K bestimmen kann. Aufgrund des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik fällt die Massendichte dieser Strahlung bei der Expansion wie R^{-4} , also schneller als die der heute wesentlichen druckfreien Komponente $\rho_{\text{druckfrei}} \propto R^{-3}$. Das heute beobachtete Verhältnis von Hintergrundstrahlung und mittlerer Dichte zeigt, daß bei einer Rotverschiebung von $z > 1100$ die Strahlungsdichte so groß war, daß keine Atome ihre Elektronen binden konnten und die Materie im Kosmos ein im wesentlichen homogenes Plasma aus verschiedenen Teilchenarten gewesen sein muß. Der durch die Rotverschiebung von $z = 1100$ bezeichnete Zeitpunkt trennt die Frühgeschichte von der unmittelbar beobachtbaren Geschichte des Kosmos. Vor diesem Zeitpunkt war der Kosmos undurchsichtig für elektromagnetische Strahlung, danach war er durchsichtig: Die neutralen Atome stören die Lichtausbreitung nur wenig.

Die Frühgeschichte bestand aus temperaturgesteuerten quasichemischen Umsetzungen der verschiedenen Komponenten des Plasmas, die immer den Charakter einer Kondensation hatten: Es bildeten sich gebundene Systeme geringerer Energie, wobei die freiwerdende Energie vom Strahlungsfeld aufgenommen wurde, das die Rolle des klassischen Wärmebades spielt. Der Zeitpunkt der einzelnen Reaktionen war im wesentlichen durch die Reaktionsenergie bestimmt. Diese Energie ist einer Temperatur proportional, die zu einem Zeitpunkt erreicht wird, der durch die Expansion des Kosmos bestimmt wird. In der Zeit zwischen dem

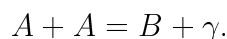
Zerfall des symmetrischen Vakuums (Ende der Inflation) und der Bildung der neutralen Atome (Rekombination) gilt angenähert $t \propto T^{-2}$. Die Skala der Reaktionsenergien wird so auf die Zeitachse abgebildet (Tab.1).

Tabelle: Energien und Zeitpunkte typischer Reaktionen

Reaktion	typische Energie	typische Temperatur*	Zeit nach dem Zerfall des Vakuums
Entstehung des Baryonenüberschusses	10^{15} GeV	10^{28} K	10^{-36} s
Annihilation der Baryonenpaare	2 GeV	10^{14} K	10^{-6} s
Bildung des Heliums	10 MeV	10^9 K	100 s
Bildung der neutralen Atome	10 keV	3000 K	360000 a

* Wegen der Abhängigkeit des genauen Prozeßbeginns von den Verhältnissen der Teilchenzahlen weichen die Temperaturen von der direkten Proportionalität $E = kT$ nach unten ab.

Die einzelnen Reaktionen verliefen je nach Reaktionsgleichung und Reaktionsgeschwindigkeit. Die Spuren, die sie hinterlassen haben, sind zweifach: einmal sind es die direkten Reaktionsprodukte, die Auskunft über die Zusammensetzung des Plasmas vor der Reaktion geben, zum anderen sind es die unverbrauchten Relikte der Reaktionen, die Auskunft vor allem über die Geschwindigkeit der Reaktionen geben. Wir betrachten als Beispiel die Bildung eines gebundenen Zustands B (Molekel) aus zwei gleichen Bausteinen A unter Freisetzung der Bindungsenergie, die wir symbolisch als Photon γ kennzeichnen wollen.



Die Bindungsenergie sei ΔE . Bei jeder Temperatur gibt es ein Gleichgewicht zwischen gebundenen und freien Teilchen. Bei hohen Temperaturen ($kT > \Delta E$) gibt es im Gleichgewicht sehr wenig Molekel, weil die Dichte der relevanten Photonen groß ist, bei niedrigen Temperaturen dagegen wenig freie Teilchen: die geringere Konzentration der Photonen wird durch eine höhere Konzentration der Molekel B kompensiert. Die Gleichgewichtskonzentration $\xi_{\text{Gleichgewicht}} = 2N_A / (2N_A + N_B)$ ist für sehr hohe Temperaturen Eins und kann mit der Temperatur bis auf Null fallen. Der Fall der Temperatur und der Gleichgewichtskonzentration der freien Teilchen wird durch die Expansion bestimmt und gesteuert.

Damit sich die tatsächliche Konzentration auf die Gleichgewichtskonzentration einstellen kann, müssen mikroskopische Prozesse stattfinden, bei denen sich zwei freie Teilchen treffen und binden. Es gibt für die freien Teilchen eine typische Zeit, in der dies gerade einmal passieren kann. Diese Zeit ist um so kürzer, je schneller die Teilchen sind, je größer sie sind und je dichter sie sind:

$$\text{Stoßfreie Zeit} = \frac{1}{\text{Reaktionsrate}} = \frac{1}{\text{Dichte} \times \text{Querschnitt} \times \text{Geschwindigkeit}}$$

Sie bestimmt, wie schnell sich ein verändertes Gleichgewicht einstellen kann. Mit der Expansion des Kosmos fällt nun nicht nur Temperatur und Gleichgewichtspunkt, sondern auch Dichte und Reaktionsgeschwindigkeit. Irgendwann kann sich das Gleichgewicht nicht mehr einstellen, weil der Prozeß zu langsam wird – wenn etwa die Reaktionsrate kleiner als die Expansionsrate des Kosmos wird. Eine Reaktion kommt in Gang, weil sich der Kosmos expansionsbedingt abkühlt, und sie bricht ab, weil sich der Kosmos expansionsbedingt verdünnt (Abb.2). Dieser Punkt ist umso eher erreicht, je kleiner die Teilchen (genauer ihre Reaktionsquerschnitte) sind. Die charakteristische Zahl ist

$$r = \sqrt{\frac{\hbar^3 G}{c}} \frac{g^*}{\sigma \Delta E}.$$

Sie gibt die Größenordnung des nicht umgesetzten Restes an. Dabei ist ΔE die charakteristische Energie, G die Gravitationskonstante, g^* die effektiven Freiheitsgrade der relativistischen Teilchen ($m_0 c^2 < kT$), σ der Reaktionsquerschnitt und ν die Konzentration der Reaktionspartner.

Wir können diese Schlüsse auf verschiedene Prozesse anwenden.

- Neutrinos mit hypothetischen Ruhmassen von < 30 eV sind so klein, daß der Prozeß $2\nu = 2\gamma$ bereits aufhört, während die Konzentration der Neutrinos noch gleich der der Photonen ist, und mit ungefähr dieser Konzentration müßten wir heute noch rechnen.
- Der Querschnitt von Baryonen und Antibaryonen ist bei der Zerstrahlung ($B + \bar{B} = 2\gamma$) so groß, daß nur eine Konzentration $N_{B\bar{B}}/N_\gamma \approx 10^{-19}$ übrigbleiben kann, nachdem die Temperatur unter $kT = m_B c^2$ gefallen ist. Da wir heute eine um zehn Größenordnungen höhere Baryonenkonzentration beobachten, muß diese Zahl als Überschuß bereits vor der Zerstrahlung der Paare vorhanden gewesen sein (Abb.3). Dies ist ein wichtiger Schluß, der besonders bei der Wahl konkreter Modelle für einheitliche Feldtheorien der Elementarteilchen eine Rolle spielt. Deren Parameter müssen so gewählt werden, daß ein solcher Baryonenüberschuß als Ergebnis eines baryonenladungsunsymmetrischen Zerfalls in einer extrem frühen Zeit entstehen kann.
- Neutronen sind zwar instabil, jedoch setzt die Bildung von Deuteronen aus Neutronen und Protonen ein, bevor alle Neutronen zerfallen sind. Die Anzahl der heute in Atomkernen gebundenen und durch diese Bindung stabilisierten Neutronen informiert uns über die Zeitspanne, die zwischen dem Ausklinken des n - p -Gleichgewichts und dem Einsetzen der Deuteriumsynthese vergangen ist, und mittelbar über die Expansionsrate

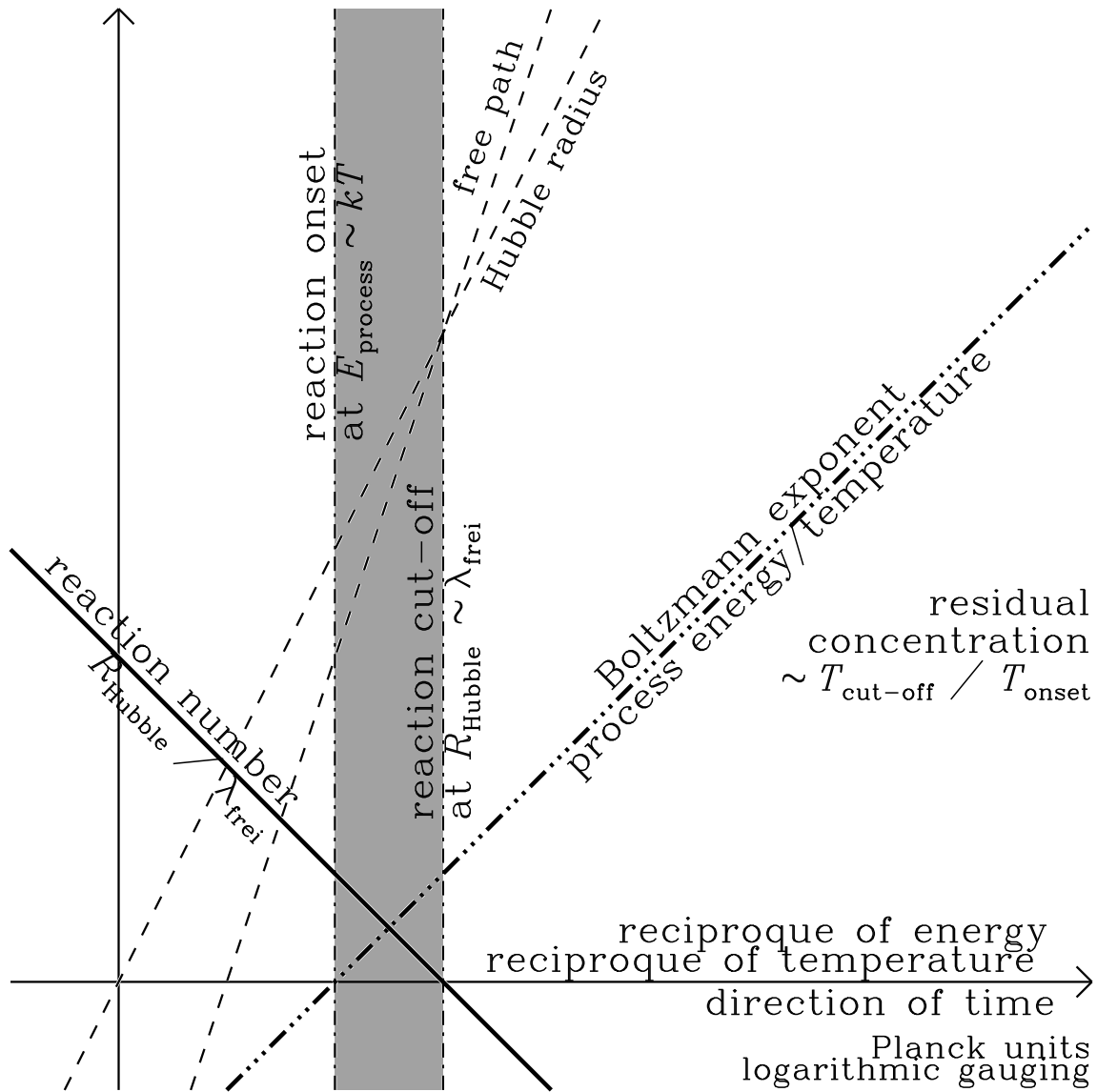


Figure 2: Schematischer Ablauf eines Kondensationsprozesses

Der Prozeß verläuft unter ständiger expansionsbedingter Abnahme der Temperatur. Er setzt bei einer Temperatur ein, die durch die Bindungsenergie bestimmt und durch die Kapazität der Strahlung modifiziert wird, und verringert die Konzentration der Ausgangskomponenten. Dies geschieht zunächst quasistatisch, d.h. im thermischen Gleichgewicht. Nach einem durch die Reaktionsrate bestimmten Punkt verlangsamt sich die Reaktion durch die Verdünnung der Komponenten und kommt schließlich zum Stillstand.

in dieser Zeit. Die Expansionsrate wiederum ist hauptsächlich bestimmt durch die Anzahl der zu diesem Zeitpunkt noch photonenhäufigen Teilchensorten, genauer über die Anzahl der verschiedenen Neutrinos. Wir schließen auf die Existenz von nicht mehr als 3 Sorten leichte Neutrinos (Elektronen-Neutrino, μ -Neutrino und τ -Neutrino).

- Deuteronen als Zwischenstufe zur primordialen Heliumsynthese setzen sich so spät und langsam um, daß ein Rest von etwa 10^{-5} Masseanteilen Deuterium nicht umgesetzt wird. Der genaue Prozentsatz dieses primordialen Deuteriums ist eine wichtige Beobachtung zur Bestimmung des genauen Zahlenverhältnisses von Baryonen und Photonen. Wir schließen heute auf

$$\frac{N_B}{N_\gamma} \approx 4 \cdot 10^{-9}.$$

Dies ist vor allem deshalb ein wichtiges Ergebnis, weil es zweifelsfrei feststellt, daß die Bausteine der klassischen Atome in keinem Falle häufig genug sind, um in der Bilanz der Friedmann-Gleichungen die beobachtete Expansionsrate aufzuwiegen, ohne daß andere reelle oder virtuelle Materie oder auch Raumkrümmung zur Bilanz beitragen.

Soll die Bilanz der Friedmann-Gleichung ohne virtuelle Materie und Raumkrümmung ausgeglichen sein, muß es dunkle Materie geben, die mit Baryonen und Photonen elektromagnetisch nicht wechselwirkt. Wir suchen heute ebenso, Komponenten der dunklen Materie zu identifizieren, wie auch die genaue Entwicklung der Expansionsrate zu bestimmen und Krümmung und Dichte des Vakuums (die virtuelle Materie) zu messen. Wie diese Messung auch immer ausfällt, zunächst waren Krümmung und Vakuum in der Zeit vor der Rekombination kaum von Belang. Die Dichte der Strahlung überwog in der gesamten Frühgeschichte, da sie wie R^{-4} steigt, während die Dichte der druckfreien Komponenten nur wie R^{-3} steigt, die Raumkrümmung nur wie R^{-2} und die Dichte der virtuellen Masse überhaupt nicht. Je weiter wir in die Vergangenheit zurückdenken, desto heißer war das Universum und desto reiner bestand es nur aus lichtschnellen Teilchen. Es waren die Erfolge der Elementarteilchentheorie, die nun vermuten lassen, daß der unsymmetrische Zustand, in dem die verschiedenen Teilchensorten verschiedene Massen haben, wie der Permanentmagnet eine Curie-Temperatur hat, oberhalb der sich etwa auch die Unterschiede in den Massen aufheben. Diese Curie-Temperatur des Vakuums liegt in der Nähe von 10^{28} K. Solch ein Kosmos hat dann in der Zeit mit mutmaßlich höherer Temperatur einen "symmetrischen" Zustand, dessen Vakuumenergiedichte wir zu kennen glauben (10^{97} J m⁻³). Bei der Abkühlung unter die Curie-Temperatur bestimmt dieses Vakuum eine exponentielle Expansion (Inflation), bevor es sich in reelle Materie (Strahlung) umwandelt – bestenfalls bis auf einen Rest von etwa 10^{-9} J m⁻³.

Wie das Universum vor dieser Inflation ausgesehen hat, ist eine offene Frage. Sie sollte offen bleiben: Genau dann kann man nämlich annehmen, daß das Universum in der Inflationsphase seine Vorgeschichte vergessen hat und die Physik allein – beginnend vom Ende der Inflation – die Grobzüge der großräumigen Struktur und der mikroskopischen Zusammensetzung, wie wir sie in unserer kosmischen Nachbarschaft beobachten, erklären kann.

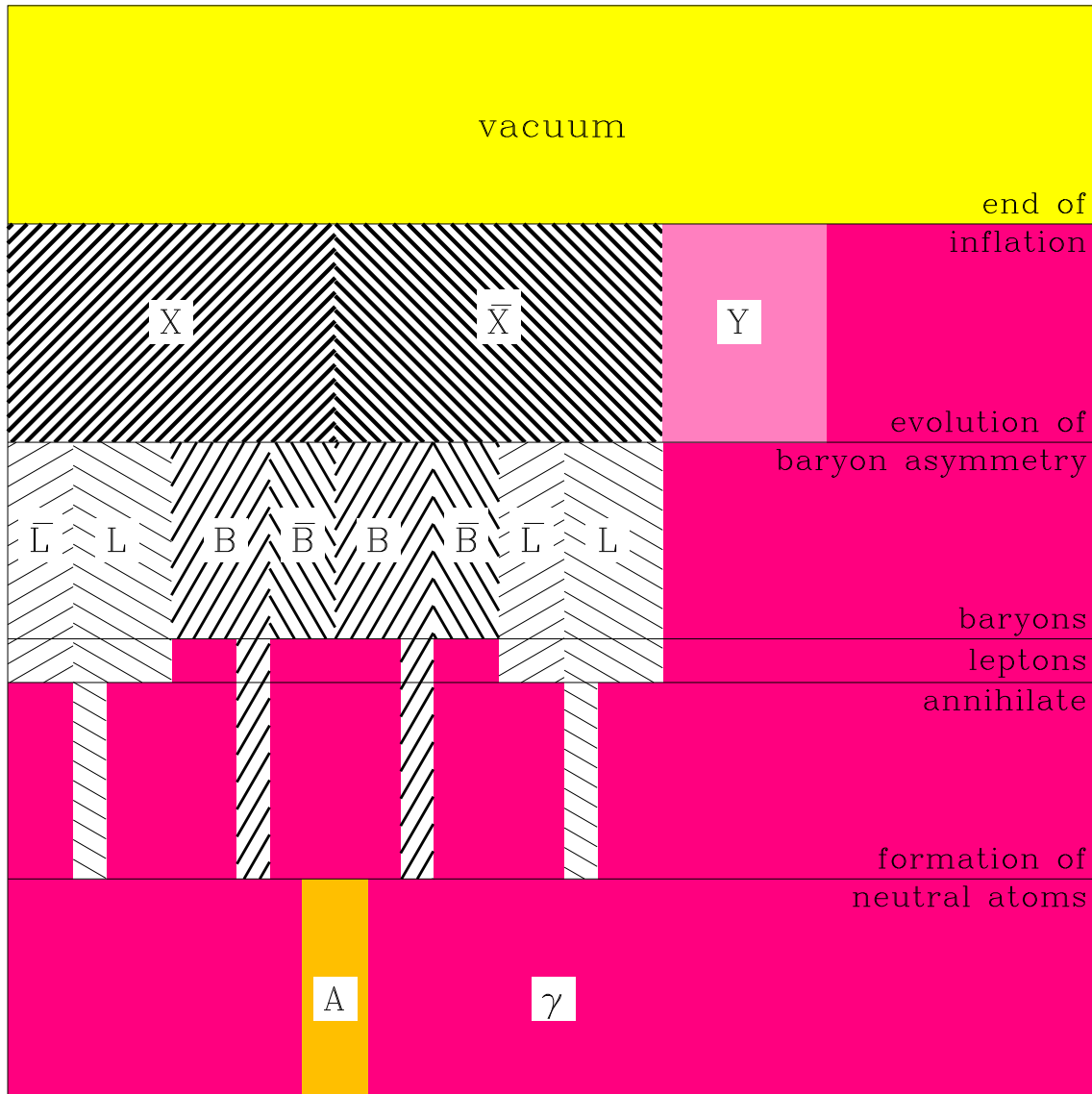


Figure 3: Die Entstehung der Baryonenkonzentration

Am Ende der Inflation zerfällt das Vakuum in leichte ("Photonen") und schwere Teilchen, die wiederum auf die Entwicklung der Baryonenkonzentration Einfluß haben (X , \bar{X}) oder nicht (Y). Die X -Teilchen zerfallen unter Erhalt der elektrischen Ladung in Leptonen (symbolisiert durch e^+ , e^-) und Teilchen mit Baryonenladung (bezeichnet mit B und \bar{B}), alle extrem leicht ($m_B \approx 10^{-15} m_X$). Asymmetrie heißt, daß die Raten $\frac{X \rightarrow B}{X \rightarrow \bar{B}}$ und $\frac{\bar{X} \rightarrow \bar{B}}{\bar{X} \rightarrow B}$ nicht übereinstimmen. Deshalb bleiben nach der Annihilation von B mit \bar{B} und e^- mit e^+ Baryonen und Leptonen übrig, die schließlich neutrale Atome in einer Menge bilden, wie sie ohne den asymmetrischen Zerfall der X , \bar{X} nicht möglich wäre.