

Kosmologie

der Allgemeinen Relativitätstheorie

Das frühe Universum



George Lemaître



- Er war der erste, der nicht nur die Expansion des Universums vorhersagte, sondern auch den Zustand der Materie in der Nähe der Singularität zum Zeitpunkt $t=0$ untersuchte.
- Er ging davon aus, daß zu diesem Zeitpunkt die gesamte Materie in einem „Atome primitif“ oder „Uratom“ konzentriert war.
- Dieses Uratom explodierte und seine Fragmente bilden schließlich die Galaxien.

Quelle: Wikipedia



Dichte in Abhängigkeit vom Skalenfaktor

Länge/Entfernung abhängig vom Skalenfaktor: $\frac{L(t)}{L_0} = \frac{R(t)}{R_0}$

Fläche abhängig vom Skalenfaktor: $\frac{F(t)}{F_0} = \left(\frac{R(t)}{R_0}\right)^2$

Volumenelement abhängig vom Skalenfaktor: $\frac{U(t)}{U_0} = \left(\frac{R(t)}{R_0}\right)^3$

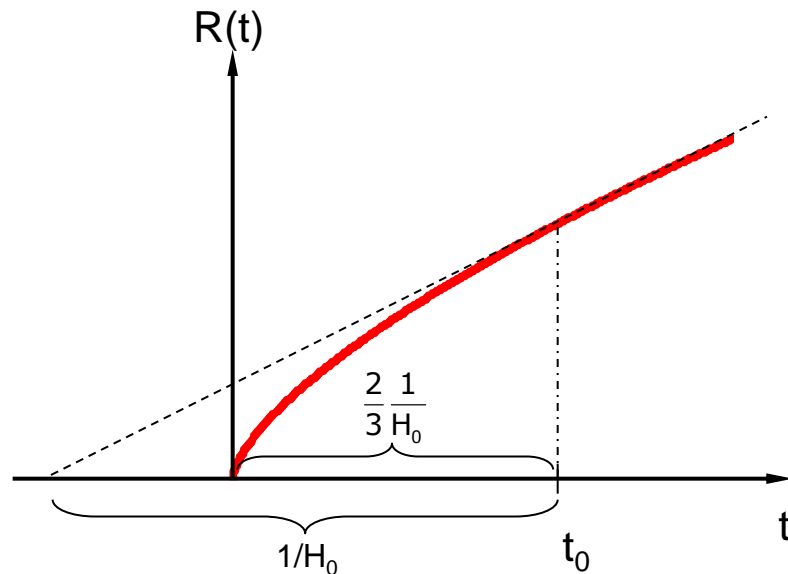
Das Volumenelement U enthält N Teilchen; die Teilchendichte n (Teilchen pro m^3) ist dann $n=N/U$.

Teilchendichte abhängig vom Skalenfaktor: $n(t) = n_0 \cdot \left(\frac{R_0}{R(t)}\right)^3$



Hubble-Konstante und Weltalter

Hubbles Wert für die Expansion: $H_0 = 500 \text{ kmsec}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$



Weltalter bei gleichmäßiger Expansion:

$$T_u = \frac{1}{H_0} \approx 2 \cdot 10^9 \text{ Jahre}$$

Weltalter bei dem Einstein-de Sitter Modell:

$$T_u = \frac{2}{3} \frac{1}{H_0} \approx 1,3 \cdot 10^9 \text{ Jahre}$$

Erst der heute akzeptierte Wert der Hubble-Konstanten in Verbindung mit dem Λ CDM-Modell liefert ein vernünftiges Weltalter.



„Big Bang“ als Schimpfwort



- Fred Hoyle prägte in den 1940er Jahren den Begriff „big bang“ (im Sinne von „Knalleffekt“), um die Idee des Urknalls verächtlich zu machen.
- Zusammen mit Bondi und Gold schufen sie die „Steady-State-Theorie“.
- Bei dieser Theorie expandiert das Universum, die Dichte aber bleibt durch permanente Erzeugung von Materie konstant.
- Die Unfähigkeit dieser Theorie, die Hintergrundstrahlung zu erklären, brachte das Ende.

Fred Hoyle

Quelle: <http://th.physik.uni-frankfurt.de/~jr/physlist.html>



George Gamow (1904 – 1968)



Quelle: <http://www.febs-iubmb-2005.com/ads.php>

- Gegen Ende der 1940er Jahre untersuchte eine Gruppe von Physiker um G. Gamow den Zustand des frühen Universums, wie es sich entsprechend der Urknall-Theorie ergab.
- Es muß nicht nur eine extrem hohe Dichte haben, sondern muß auch sehr heiß sein.
- Die Strahlungsdichte überwog die der Masse.
- Das Nachglühen dieser Strahlung erfüllt fortan das gesamte Universum.
- Die heutige Temperatur müßte zwischen 5 und 50 Kelvin liegen.

Steven Weinberg



- Steven Weinbergs wesentlichen Arbeiten liegen auf dem Gebiet der Quantenfeldtheorie und deren Weiterentwicklung zu den „Großen vereinheitlichten Theorien (GUT)“.
- Seit 1960 beschäftigt er sich mit der Kosmologie.
- Er wurde zum Pionier im Grenzgebiet zwischen Elementarteilchenphysik und Kosmologie.
- Das Erscheinen – 1977 – seines Buchs „Die ersten drei Minuten“ markiert den Beginn der intensiven Erforschung des frühen Universums.

Quelle: Wikipedia

Dichte und Temperatur in Abhängigkeit vom Skalenfaktor $R(t)$

- Wir legen für die Überlegungen der Einfachheit halber das Einstein-de Sitter Modell zugrunde und
- das Weltalter betrage 15 Milliarden Jahre:

$$\text{Skalenfaktor: } R(t) \propto t^{2/3}$$

$$\text{Massendichte: } \rho_m(t) \propto t^{-2}$$

$$\text{Strahlungsdichte: } \rho_r(t) \propto t^{-8/3}$$

$$\text{Strahlungstemperatur: } T_r(t) \propto t^{-2/3}$$



Reise in die Vergangenheit

Heutige Massendichte im Universum: $\rho_m^{(\text{heute})} \approx 1 \text{ Teilchen pro m}^3$

Massendichte bei einem Weltalter von 15 Millionen Jahren: $\rho_m^{(15 \text{ Mio})} \approx \rho_m^{(\text{heute})} \cdot \left(\frac{1}{1000}\right)^{-2} \approx 10^6$

Das entspricht der heutigen Massendichte in Galaxien. Das bedeutet daß zu dieser Zeit, einer Rotverschiebung von $z > 100$ und einer Strahlungstemperatur von 270 Kelvin keine Galaxien existieren konnten.

Bei einer Rotverschiebung $z \approx 1000$ ist das Universum ca. 300.000 Jahre alt und hat eine Temperatur von ca. 3000 Kelvin: Zeitpunkt der Rekombination:

- Wasserstoff wird vollständig ionisiert und
- das Universum wird undurchsichtig



Das frühe Universum

Die heutige Dichte der Hintergrundstrahlung ρ_r beträgt $1/4000$ der heutigen Massendichte ρ_m .

Bei einem Weltalter von ca. 100.000 Jahren und $z \approx 4000$ sind Massen- und Strahlungsdichte gleich.

Dieser Zeitpunkt definiert den Beginn/das Ende des „frühen Universums“.

Ab diesem Zeitpunkt in die Zukunft ist das Universum *materie-*
dominiert;

in die Vergangenheit ist es *strahlungsdominiert* und den Verlauf der (Strahlungs-) Dichte und Temperatur kann beschrieben werden:

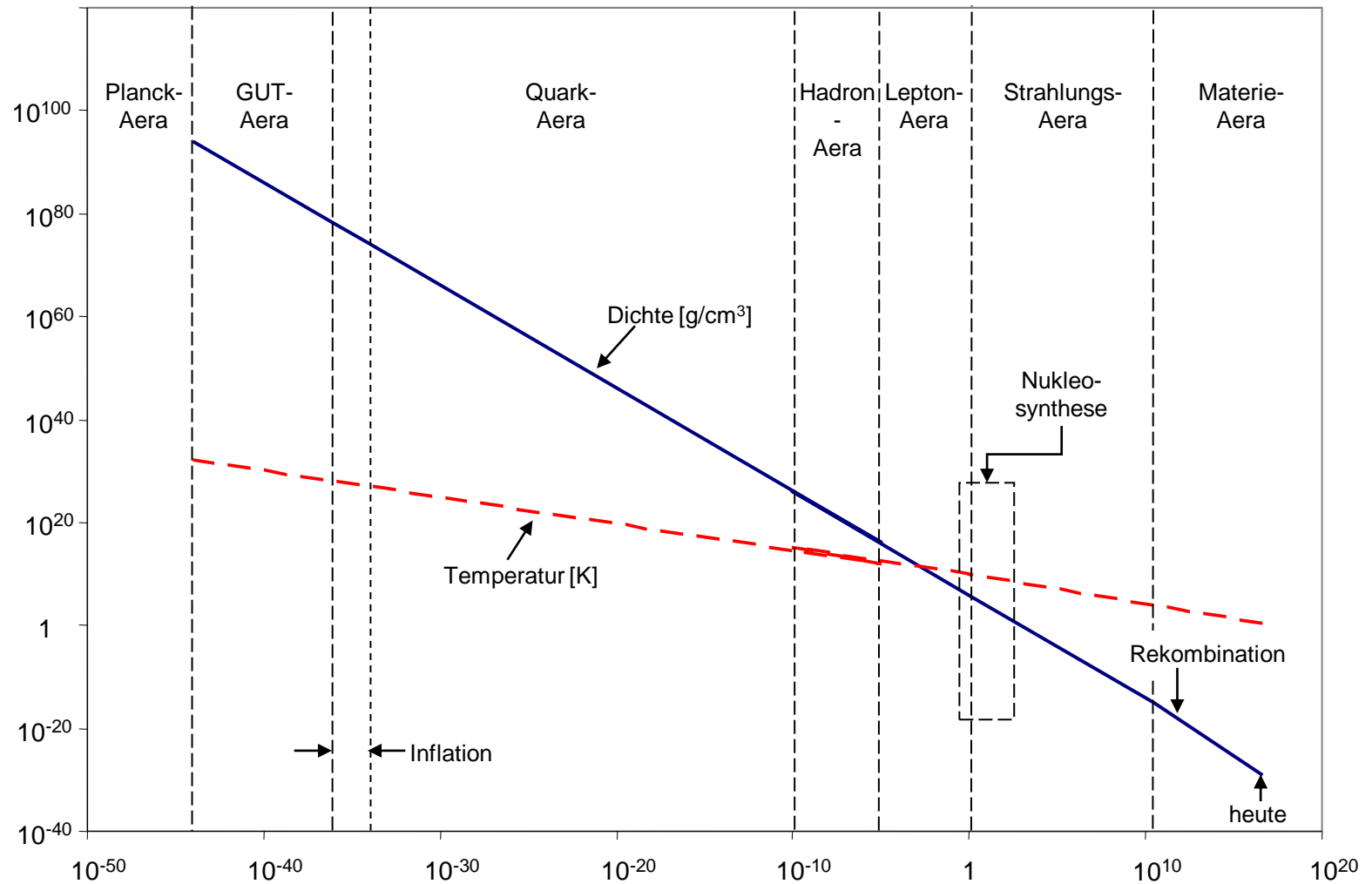
$$\rho \cdot t^2 = 1 \cdot 10^6$$

$$t \cdot T^2 = 1 \cdot 10^{20}$$

(Dichte ρ in $[g/cm^3]$, Temperatur T in Kelvin, Zeit t in $[sec]$)



Temperatur- und Dichteverlauf

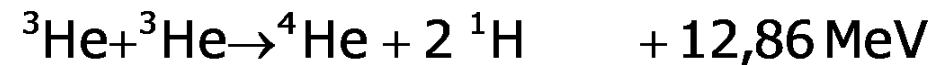
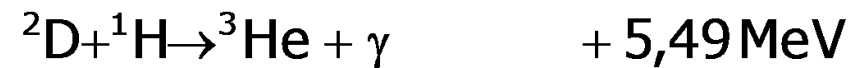
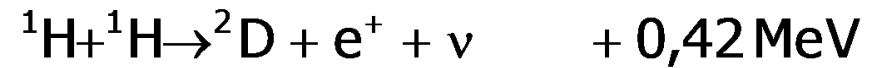
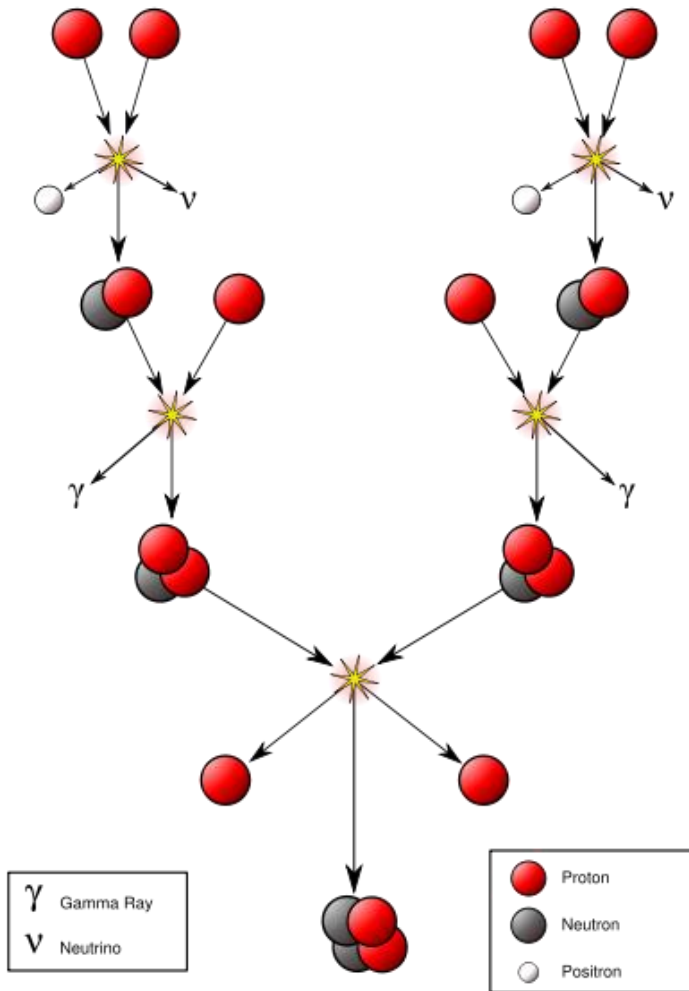


Strahlungs-Ära

- Beginn bei einem Weltalter von 1 Sekunde
 - Temperatur 10^{10} Kelvin
 - Strahlungsdichte $\rho_r \approx 10^6 \text{ g/cm}^3$ (1 Tonne pro cm^3)
 - Massendichte $\rho_m \approx 10^{-1} \text{ g/cm}^3$
- Ende bei 100.000 Jahren ($\approx 3 \cdot 10^{12} \text{ sec}$)
- Bei einem Alter von 100 Beginn der *Nukleosynthese*
 - Temperatur bei 10^9 Kelvin
 - Dauer ca. 200 Sekunden
 - 25 % der Materie wird in Helium verwandelt (fusioniert), Rest ist Wasserstoff und geringe Anteile Deuterium, Helium-3 und Lithium.
 - Energiegewinn durch Fusion gering: herrschende Temperatur wird um ca. 10 Grad steigen, der Zuwachs an Strahlungsenergie liegt bei ca. $1:10^8$.



Kernfusion – p-p-Kette



Energieüberschuß: 26,2 MeV

Quelle: Wikipedia



Ruheenergie und Schwellentemperatur

Telchen	Ruheenergie [MeV]	Schwellentemperatur [Grad K]
Photon	0	0
Leptonen:		
Neutrinos	0	0
Elektron	0,511	$5,93 \cdot 10^9$
Myon	105,66	$1,23 \cdot 10^{12}$
Hadronen:		
π^0 -Mesonen	134,96	$1,5662 \cdot 10^{12}$
π^\pm -Mesonen	139,57	$1,6197 \cdot 10^{12}$
Proton	938,26	$1,0888 \cdot 10^{13}$
Neutron	939,55	$1,0903 \cdot 10^{13}$

(1 Joule = $k \cdot 7,234 \cdot 10^{22}$ K, $k = 1,38006 \cdot 10^{-23}$ [JK⁻¹])



Leptonen-Ära

- Beginn bei einem Weltalter von 10^{-4} Sekunden
 - Temperatur 10^{12} Kelvin
 - Strahlungsdichte $\rho_r \approx 10^{14}$ g/cm³
- Ende bei einem Weltalter von 1 Sekunde bei einer Temperatur von 10^{10} K
- Temperatur ist so hoch, daß Leptonenpaare (Teilchen und Antiteilchen) spontan entstehen und wieder vernichtet werden – Annihilation; entsprechende Neutrinos werden dabei erzeugt.
- Mit sinkender Temperatur hört die Paarentstehung auf und übrig bleiben Protonen, Neutronen und Elektronen; die Neutrinos können sich nun frei bewegen.
- Heute kommen auf die 400 Photonen der Hintergrundstrahlung ca. 900 Neutrinos aller Sorten.



Hadronen-Ära

- Beginn bei einem Weltalter von 10^{-10} Sekunden
 - Temperatur $\geq 10^{13}$ Kelvin
- Die Temperatur liegt in einem Bereich, in dem Hadronen spontan entstehen und sofort wieder vernichtet werden können.
- Zum Ende der Hadronen-Ära überwiegt bei abnehmender Temperatur die Paarvernichtung, zuletzt verschwinden die Pionen und übrig bleiben die Leptonen.
- Warum existiert dann trotzdem in der Folge normale Materie?
- Es bleiben tatsächlich Protonen und Neutronen erhalten in einem Verhältnis 2 Neutronen zu 10 Protonen.



Warum nur „normale“ Materie?

Die einfachste Antwort auf die Frage, warum nur „normale“ Materie existiert, ist die, daß ein minimaler Überschuß an Materie gegenüber Antimaterie vorhanden war.

Warum das so war, kann (momentan) nicht beantwortet werden, trotzdem kann man den Betrag des Überschusses abschätzen:

Anzahl der Baryonen: $N = N^+ + N^-$ Überschuß: $\Delta N = N^+ - N^-$

Verhältnis Überschuß zu Gesamtzahl: $\frac{\Delta N}{N} = \frac{N^+ - N^-}{N^+ + N^-}$

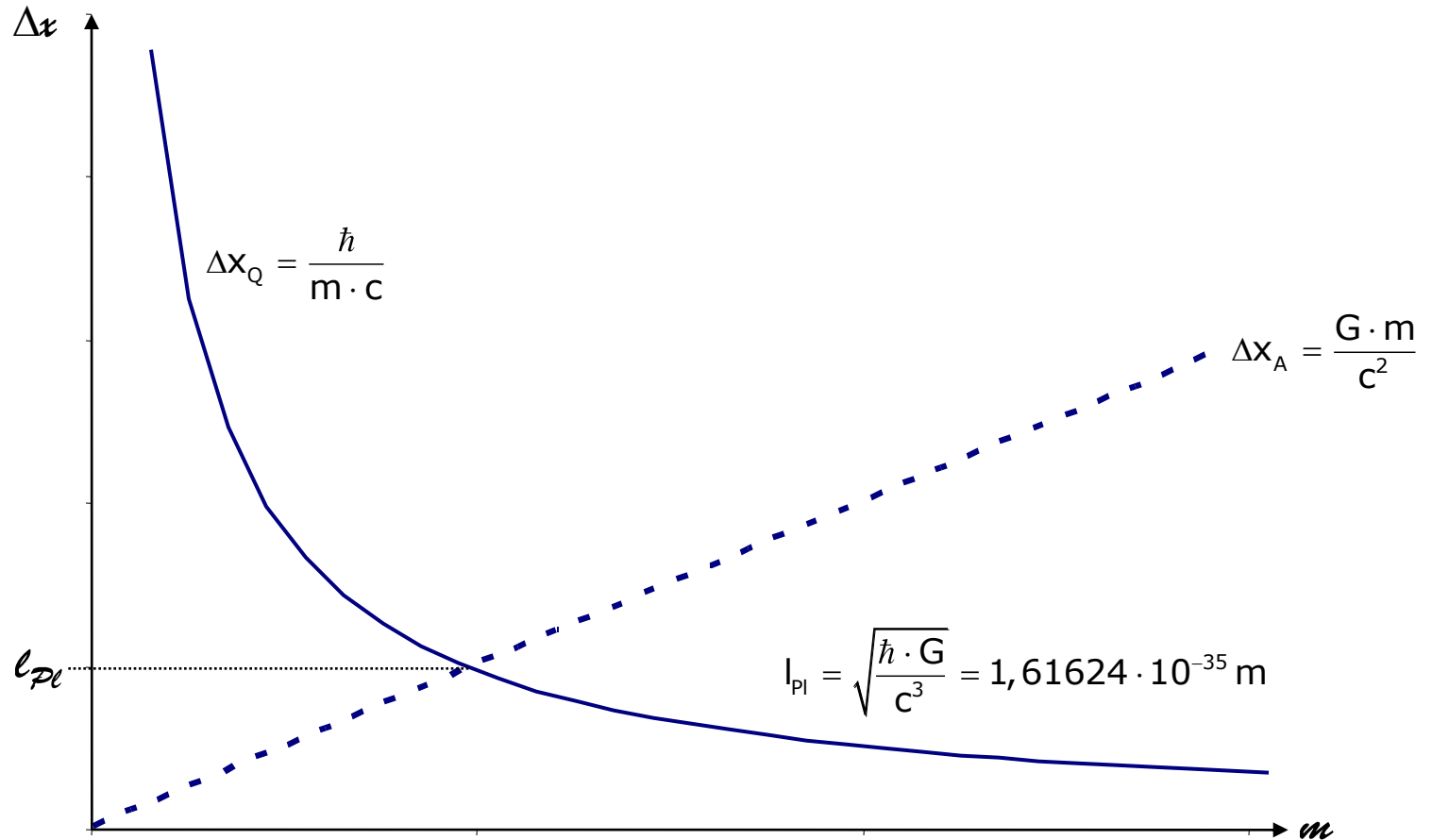
N ist in etwa gleich der Anzahl der Photonen und Neutrinos, die durch Annihilation entstanden und noch heute existieren.

Heute ist das Verhältnis Baryonen zu Photonen und Neutrinos 10^{-9} :

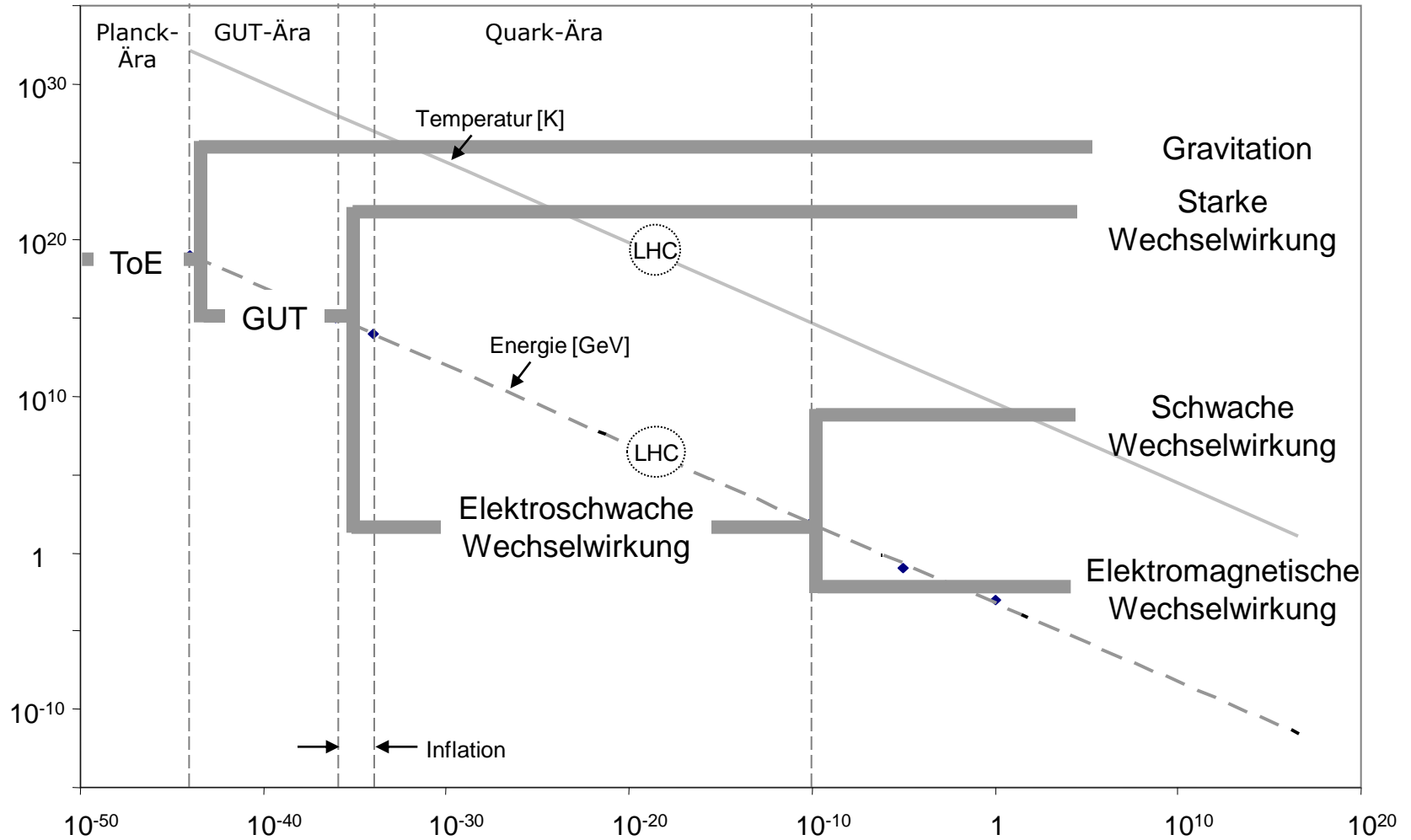
$$\frac{\Delta N}{N} = 10^{-9}$$



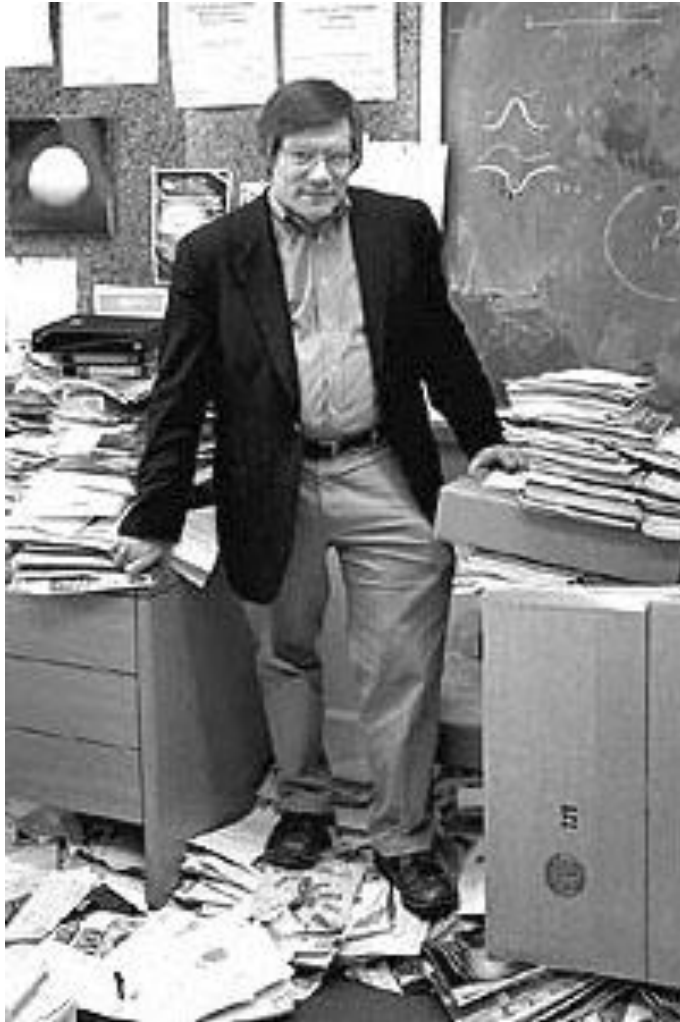
Planck-Länge



Aufspaltung der Grundkräfte der Physik



Alan Guth



- Seine theoretischen Arbeiten zu magnetischen Monopolen im Rahmen der „großen vereinheitlichten Theorien“ führten ihn zur Erkenntnis, daß das Universum eine Phase exponentiellen Wachstums gehabt haben mußte; die *Inflation*.
- Mit dieser Theorie konnte er bisher ungelöste Probleme der Kosmologie erklären:
 - neben der Frage heute fehlender magnetischer Monopole
 - das *Flachheitsproblem* und
 - *Horizontproblem*.
- Sein Buch „*Die Geburt des Kosmos aus dem Nichts*“ wurde zum Bestseller.

Quelle: <http://sciencewriter.org/2007/>

Inflation – beschleunigte Expansion des Universums

- Nach der Planck-Ära,
 - ab 10^{-44} sec
 - bei einer Temperatur von 10^{32} Kelvin und
 - einer Dichte von 10^{94} g/cm³expandiert das Universum gebremst wie ein Friedmann-Universum.
- Nach der GUT-Ära
 - bei 10^{-36} sec,
 - einer Temperatur von 10^{28} Kelvin und
 - einer Dichte von 10^{78} g/cm³setzt ein Phasenübergang ein: starke und elektroschwache Wechselwirkung trennen sich.
- Zwischen 10^{-36} und 10^{-34} sec bewirkt ein *negativer Druck* des „falschen Vakuums“ eine beschleunigte Expansion.

$$\frac{R_e}{R_a} = e^n = \text{Inflations – Faktor}$$



Der Inflations-Faktor

Der Inflations-Faktor kann mit den GUT nicht vorhergesagt werden. Man schätzt für η einen Wert zwischen 50 und 100.

$$\eta = 50 \Rightarrow \text{Inflations – Faktor} \approx 5 \cdot 10^{21}$$

$$\eta = 100 \Rightarrow \text{Inflations – Faktor} \approx 3 \cdot 10^{43}$$

Würde man z.B. ein Proton mit einem $\eta = 92$ aufblähen, würde es das gesamte heute sichtbare Universum umfassen.

Während der Inflation bleibt die Dichte annähernd konstant bei 10^{78} g/cm^3 ; die Temperatur fällt allerdings stark ab. Gegen Ende der Inflationsphase wird die latente Energie wieder frei und die Temperatur steigt auf den Wert zu Beginn der Inflation.

Nach der Inflationsphase expandiert das Universum entsprechend einem Friedmann-Modell.



Magnetische Monopole

Magnetische Monopole sollen einen Radius von $r_m = 10^{-29}$ cm haben. Sie interagieren nicht mit anderen Teilchen und ihr gegenseitiger Abstand ist in der Größenordnung von r_m .

Fände keine Inflation statt, so kann man abschätzen, daß sich das Universum seit Beginn der Quark-Ära um den Faktor:

$$\frac{T_a}{T_{\text{heute}}} = \frac{10^{28}}{2,7} \approx 3 \cdot 10^{27}$$

ausgedehnt hat. Der gegenseitige Abstand der Monopole würde daher etwa 1/3 Millimeter betragen. Sie müßten nachweisbar sein.

Mit der Inflation ergibt sich aber ein Faktor von: $e^n \cdot \frac{T_a}{T_{\text{heute}}}$

Mit $e = 60$ erhielte man 1 Monopol pro Galaxie,
bei $e = 67$ 1 Monopol in der Hubble-Sphäre.



Flachheits-Problem

Das Problem stellte sich, als man um 1980 aus Beobachtungen schließen konnte, daß unser Universum Euklidische Geometrie besitzt, d.h. es hat eine Krümmung $K \approx 0$.

$$K = \frac{k}{R_k^2}$$

Bei einer Expansion ohne Inflation muß demnach das Universum auch mit $K \approx 0$ gestartet sein, ein extrem unwahrscheinlicher Fall.

Ist zu Beginn die Krümmungskonstante $k = 0$, so stellt sich das Problem nicht. Ist aber $k = \pm 1$, dann verringert sich während der Inflation jede beliebige Krümmung um den Faktor

$$\frac{K_e}{K_a} = e^{-2\eta}$$

Mit z.B. $\eta = 67$ reduziert die Inflation jede Krümmung um den Faktor 10^{-58} .



Horizont-Problem

Das Horizont-Problem wirft die Frage auf, warum die Hintergrundstrahlung über so große Distanzen bis auf 0,001 % gleichförmig ist.

Ein kausal verbundener Bereich hat einen Radius von $l_k = c \cdot t$

Zu Beginn der Inflation ist dieser Bereich, der als isotrop betrachtet werden kann:

$$l_a = c \cdot t_a \approx 3 \cdot 10^{-28} \text{ m}$$

Nach der Inflation ist dieser Bereich:

$$l_e = l_a \cdot e^{67} \approx 30 \text{ m}$$

Bis zum Zeitpunkt der Rekombination ist der isotrope Bereich angewachsen auf:

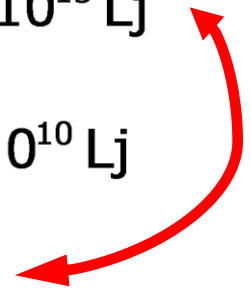
$$l_R \approx l_e \cdot 10^{31} \approx 10^{15} \text{ Lj}$$

Die Hubble-Sphäre hat heute einen Radius:

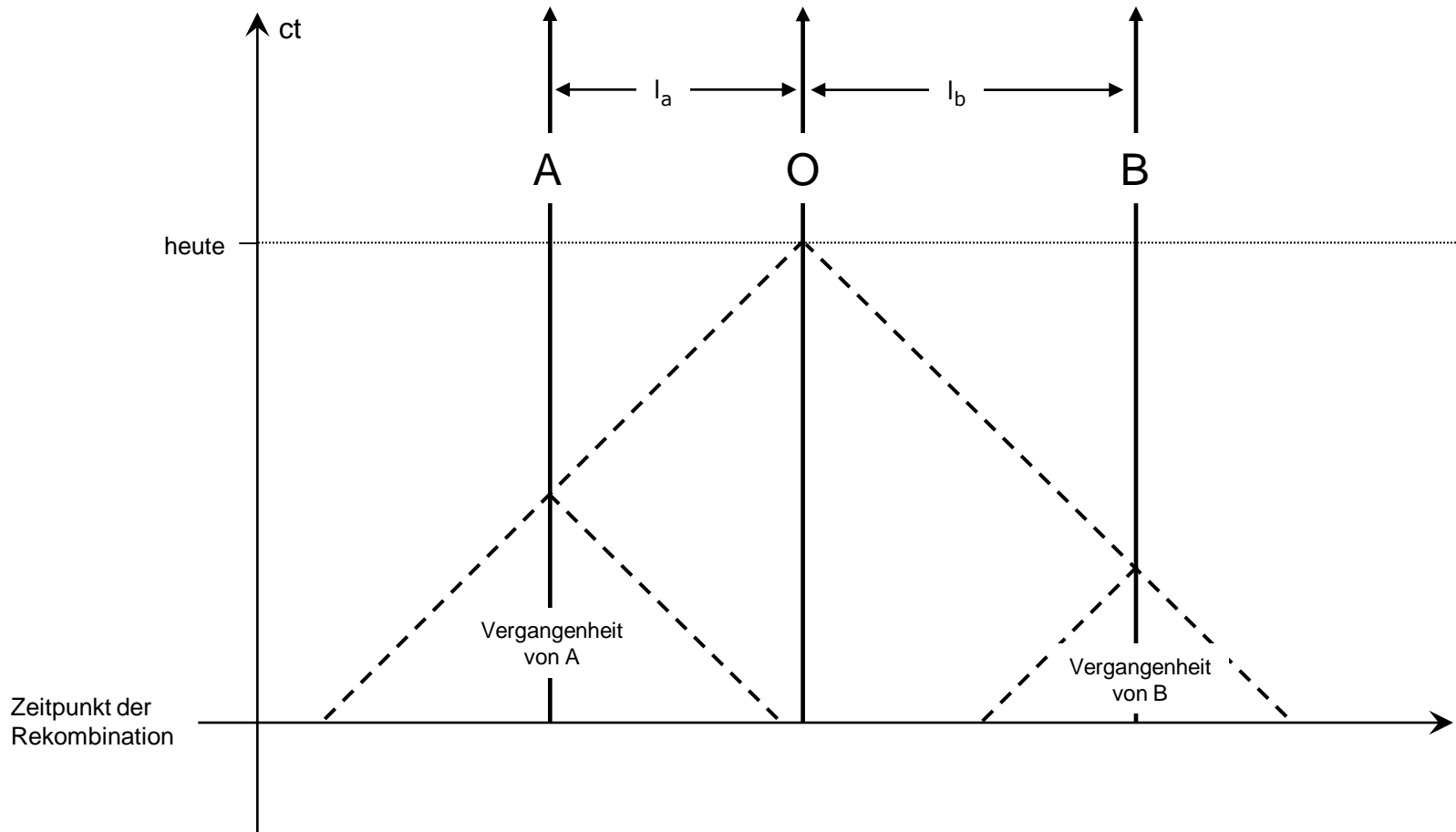
$$L_H^{(\text{heute})} \approx 1,3 \cdot 10^{10} \text{ Lj}$$

Mit dem Einstein-de Sitter Modell errechnet sich der Radius zu:

$$L_H^{(\text{Rec})} \approx 10^7 \text{ Lj}$$



Horizont-Problem



Das Standard-Modell der Kosmologie

- Wir leben in einem beschleunigt expandierenden, räumlich flachen Universum, das vor $13\pm 1,5$ Milliarden Jahren aus dem Urknall hervorging ($\Lambda > 0$; $k = 0$); Beweise dafür sind:
 - die galaktische Rotverschiebung,
 - die Existenz der kosmischen Hintergrundstrahlung;
 - das Alter der Sterne und
 - die Hubble-Konstante $H_0 = 72\pm 7 \text{ km sec}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$.
- Als das Universum etwa 1 Sekunde alt war, entstanden die ersten Elemente:
 - Wasserstoff zu ca. 76 %
 - ^3He zu ca. 24 %
 - in sehr geringem Anteil: D, ^4He und ^7Li .
- Etwa 300.000 Jahren nach dem Urknall wurde der Raum durchsichtig und es entstand die kosmische Hintergrundstrahlung einer Temperatur heute von $2,725\pm 0,001$ Kelvin und einem nahezu perfekten Spektrum eines schwarzen Körpers.



Kritik an Standard-Modell

- Wenn man die Thomson-Streuung der Photonen an freien Elektronen im Universum berücksichtigt, dann benötigt man kein Λ und die Expansion des Universums ist nicht beschleunigt.

Es muß allerdings statt der Vakuumenergie eine „exotische dunkle Materie“ in die FLRW-Modelle eingeführt werden.

(z.B. D.C. Choudhury, astro-ph/0607646)

- Problem Vakuum-Energie:
 - die *gemessene* Energiedichte ist $\varepsilon_{\text{gem}} \approx 10^{-10} \text{ erg/cm}^3$
 - nach dem *Weinberg-Salam Modell* der elektroschwachen Wechselwirkung berechnet:
 $\varepsilon_{\text{EW}} \approx 3 \cdot 10^{47} \text{ erg/cm}^3$
 - nach der Quantenchromodynamik berechnet: $\varepsilon_{\text{QCD}} \approx 1,6 \cdot 10^{36} \text{ erg/cm}^3$
 - nach GUT berechnet: $\varepsilon_{\text{GUT}} \approx 2 \cdot 10^{110} \text{ erg/cm}^3$

(z.B. S.M. Carroll, astro-ph/0004075)



Kritik an Standard-Modell

- Das Universum ist nicht homogen:
 - Das (nicht bewiesene) kosmologische Prinzip zusammen mit den FLRW-Modellen führt auf das Artefakt einer beschleunigten Expansion.
 - Mit Modellen für ein nichthomogenes Universum – Lemaître-Tolman Bondi (LTB) Modelle – lassen sich die Meßwerte der SNa_e 1a auch ohne Vakuum-Energie interpretieren.

(z.B. M.-N. Célérier, astro-ph/072416)

- Die Gravitationskonstante ist nicht konstant
 - Diese Idee wurde schon in den 1930er Jahren von P. Jordan zur Erklärung der Kontinentalverschiebung (ohne Erfolg).
 - Die „Gravitationskonstante“ wird zu einer Kopplungsgröße, die von der Distanz zweier sich anziehenden Massen abhängt.
 - Dieser Ansatz kommt mit einem Minimum an freien Parametern aus – keine dunkle Materie und keine dunkle Energie.

(z.B. J.W. Moffat et.al., astro-ph/0710.0364)

•

