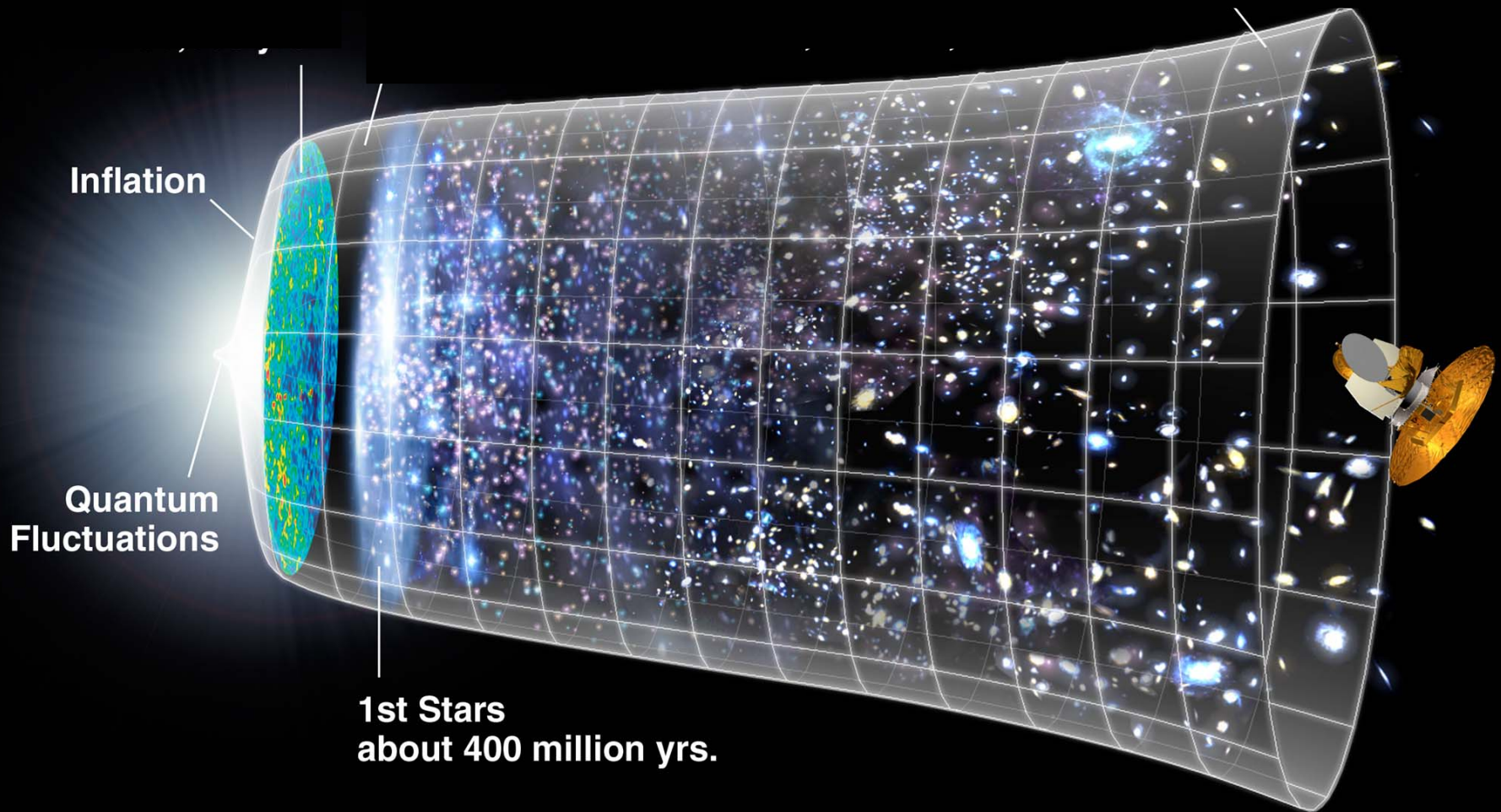


11. Die Geschichte des Universums

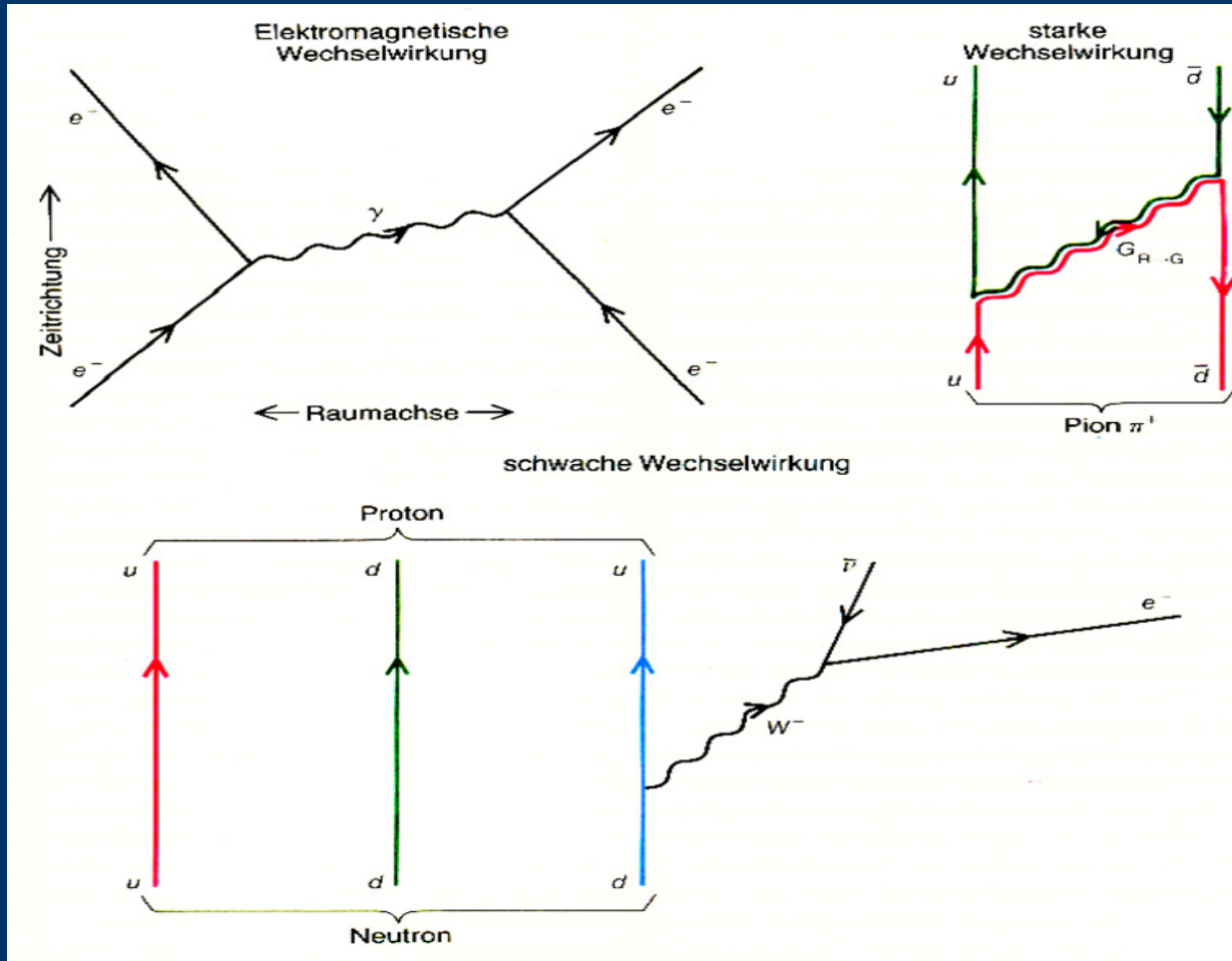


1st Stars
about 400 million yrs.

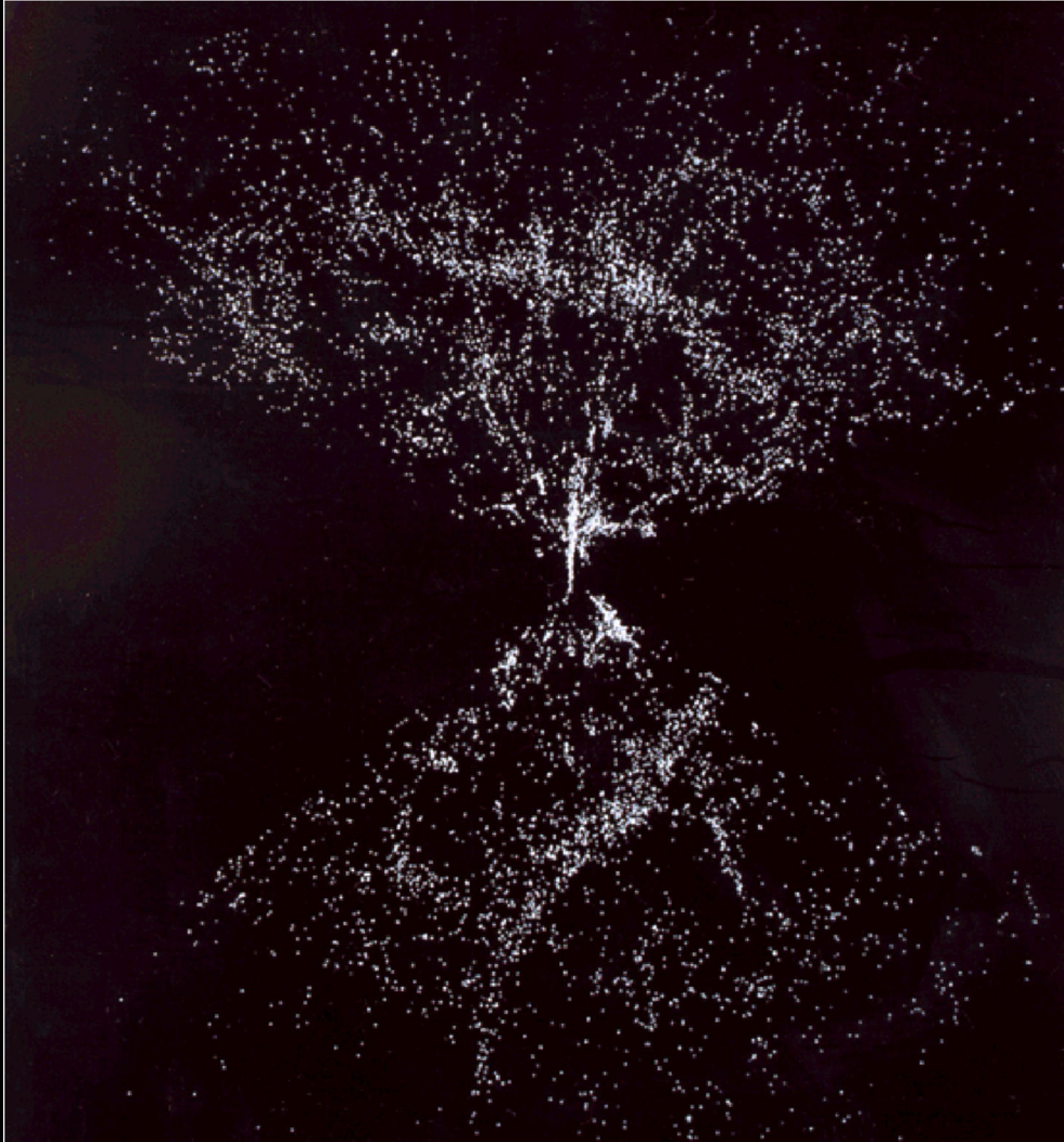
Big Bang Expansion

1. Hinweise auf eine Geschichte, Dynamik 13.7 billion years
2. Planck-Skala
3. Die ersten drei Minuten
4. Offene Fragen

Wiederholung: Die fundamentalen Wechselwirkungen



+ Gravitation



Verteilung von ca.
11.000 Galaxien.

Die dunklen Keile links
und rechts resultieren
aus dem
verfälschenden
Einfluss der
Milchstraße.

Maximale Distanz

~ 450 Mill. Lichtjahre

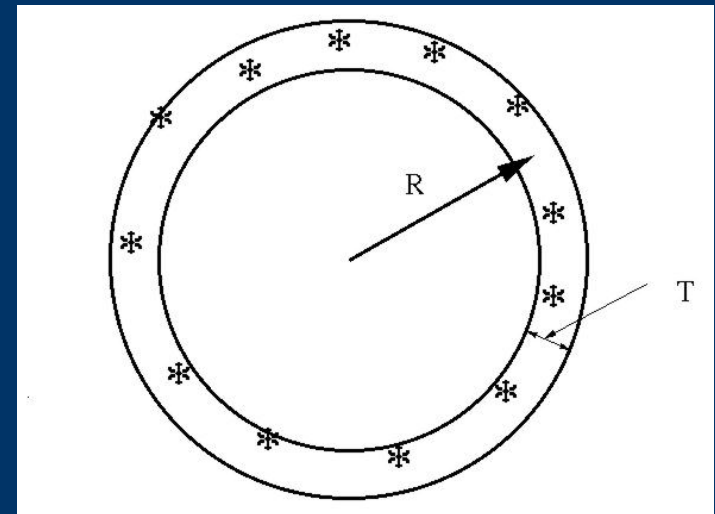
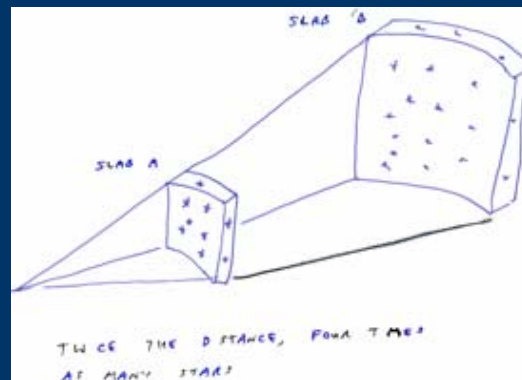
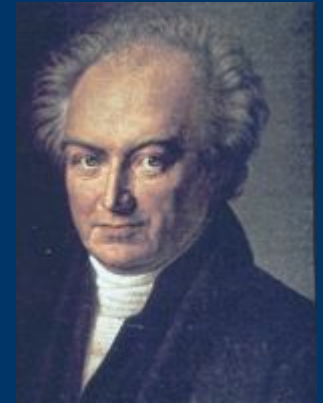
~ $4,5 \cdot 10^{24}$ m

Olbers Paradoxon:

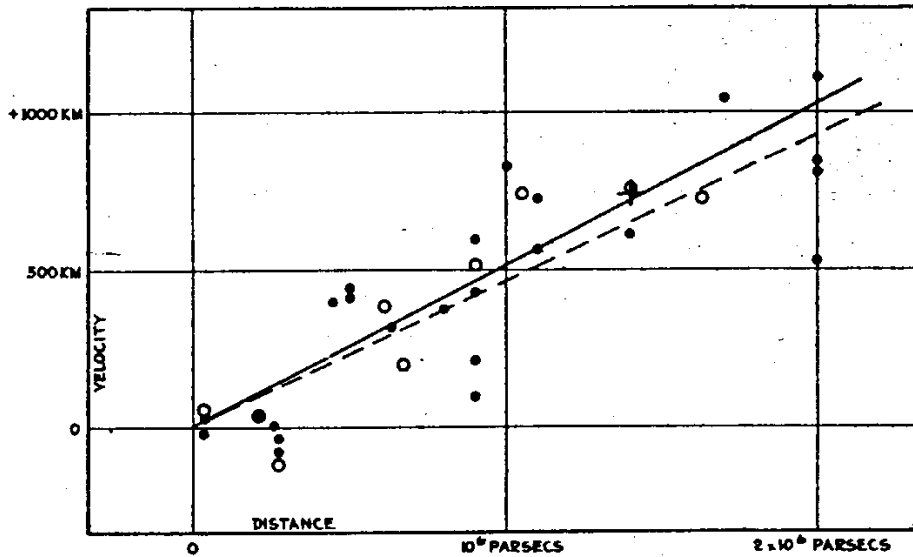
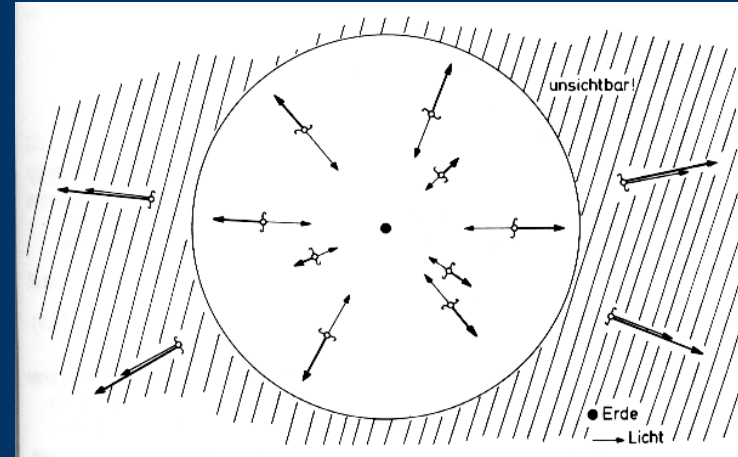
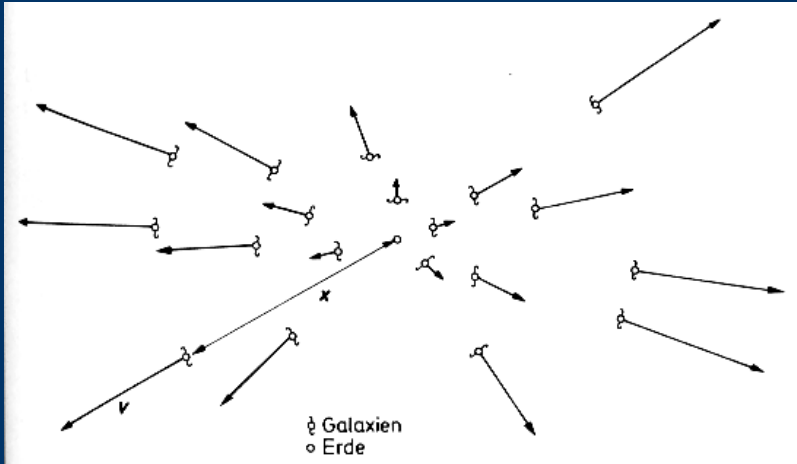
Es wird Nacht →
Universum kann nicht statisch sein!

Denn: je größer R , desto schwächer das Licht, das von den Sternen kommt ($\sim 1/R^2$),
aber desto mehr Sterne ($\sim R^2$), d.h. wir erhalten aus jeder Entfernung den gleichen Beitrag an Licht

Fazit: es sollte immer Tag sein!



Fluchtbewegung der Galaxien und „Horizont“



Hubble 1929

Expansion des Universums (Hubble 1929)

Fluchtgeschwindigkeit von Galaxien im Abstand R

$$v = H \times R$$

Hubble Konstante $H \approx 3 \cdot 10^{-17} \text{ } \kappa \text{ sec}$, $0.4 < \kappa < 1$
($H = 70 \text{ (km/s)/Mpc}$, $+2.4/-3.2$).

Entfernteste Galaxien: $v \approx c$ (Rotverschiebung)

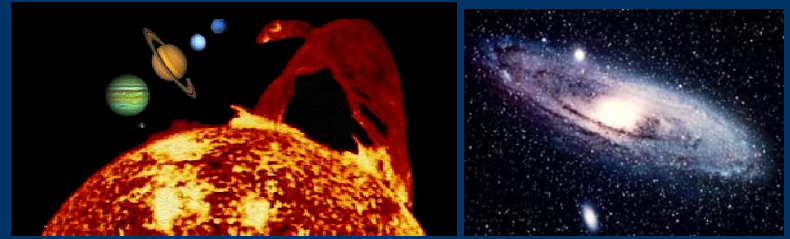
→ sichtbares Universum $R_U \approx 10^{26} \text{ m}$

→ Weltalter $t_U \approx R_U/c \approx 1/H \approx 10^{10} \text{ Jahre}$ (13-14 Mrd. Jahre)

→ Lemaitre, Gamov: ``URKNALL`` oder ``Big Bang``

Physik light I:

?



Was folgt aus:

$$G_N \approx 6,7 \times 10^{-11} \text{ m}^3/(\text{kg s}^2)$$

$$c \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$1/H \approx 4,3 \times 10^{17} \text{ s (!)} \quad ?$$

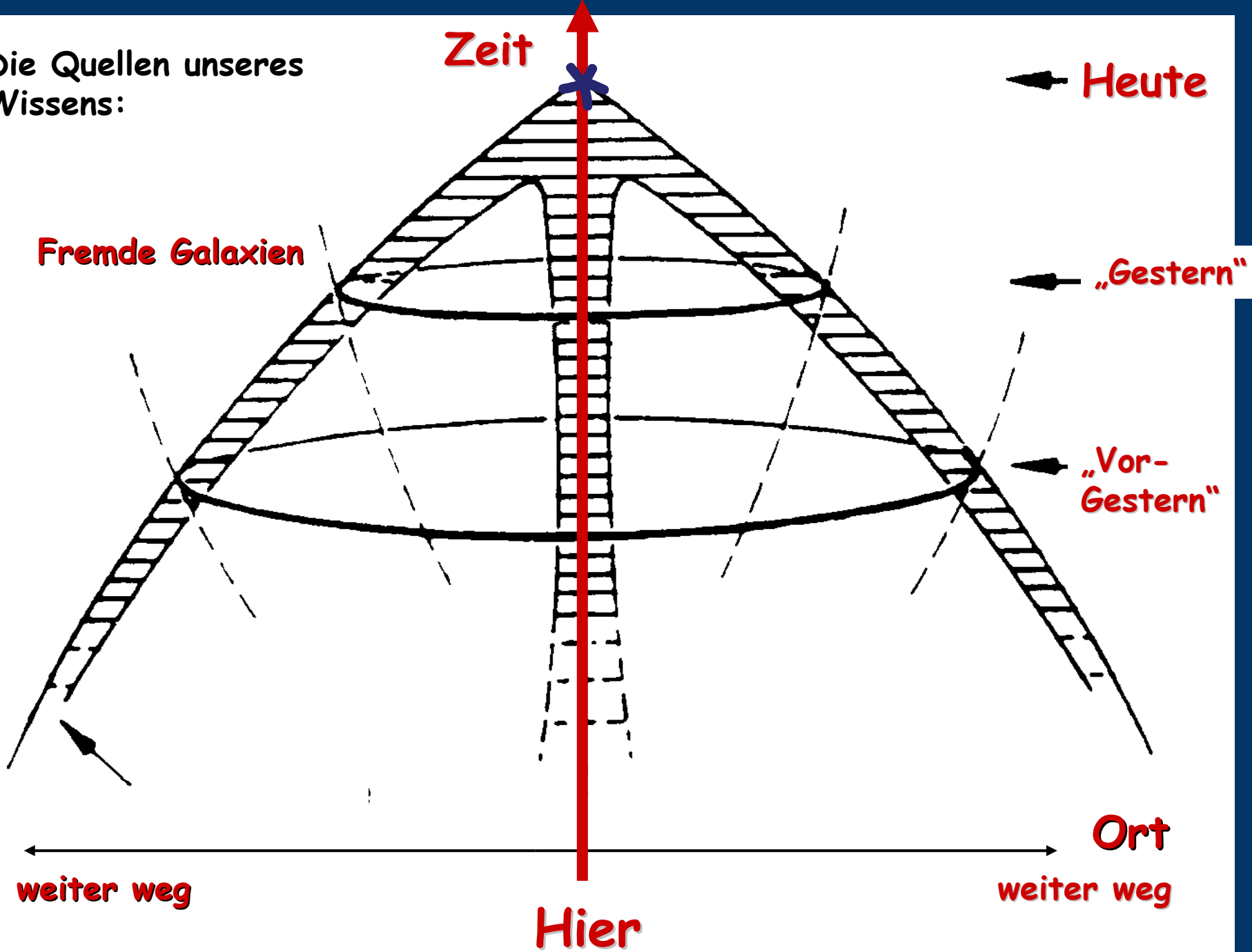
$1/H \sim 13,4$ Mrd. Jahre \Rightarrow Weltalter

$c/H \sim 1,27 \times 10^{26}$ m Weltradius R_U

$c^3/2G_N H \sim 10^{53}$ kg kritische Masse der Welt ($R=R_U$)

Fazit: nur Aussagen über die Welt als Ganzes möglich

Die Quellen unseres Wissens:



Zeit

Heute

Fremde Galaxien

„Gestern“

„Vor-Gestern“

weiter weg

Ort

weiter weg

Hier

Penzias und Wilson 1965: Es gibt eine kosmische Hintergrundstrahlung



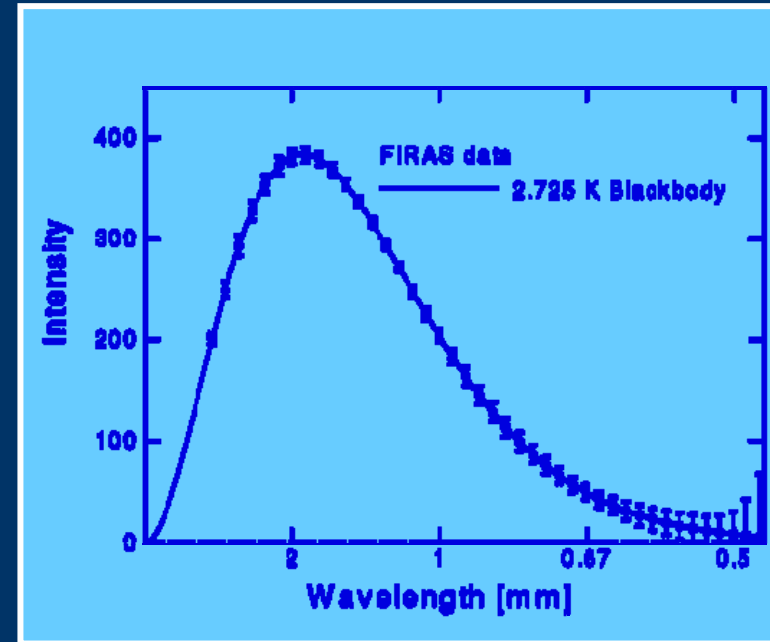
Hohlraumstrahlung:

Die Energie der ausgesandten Strahlung hängt von der Wellenlänge ab

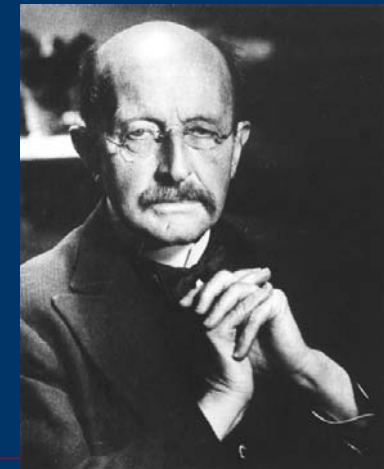
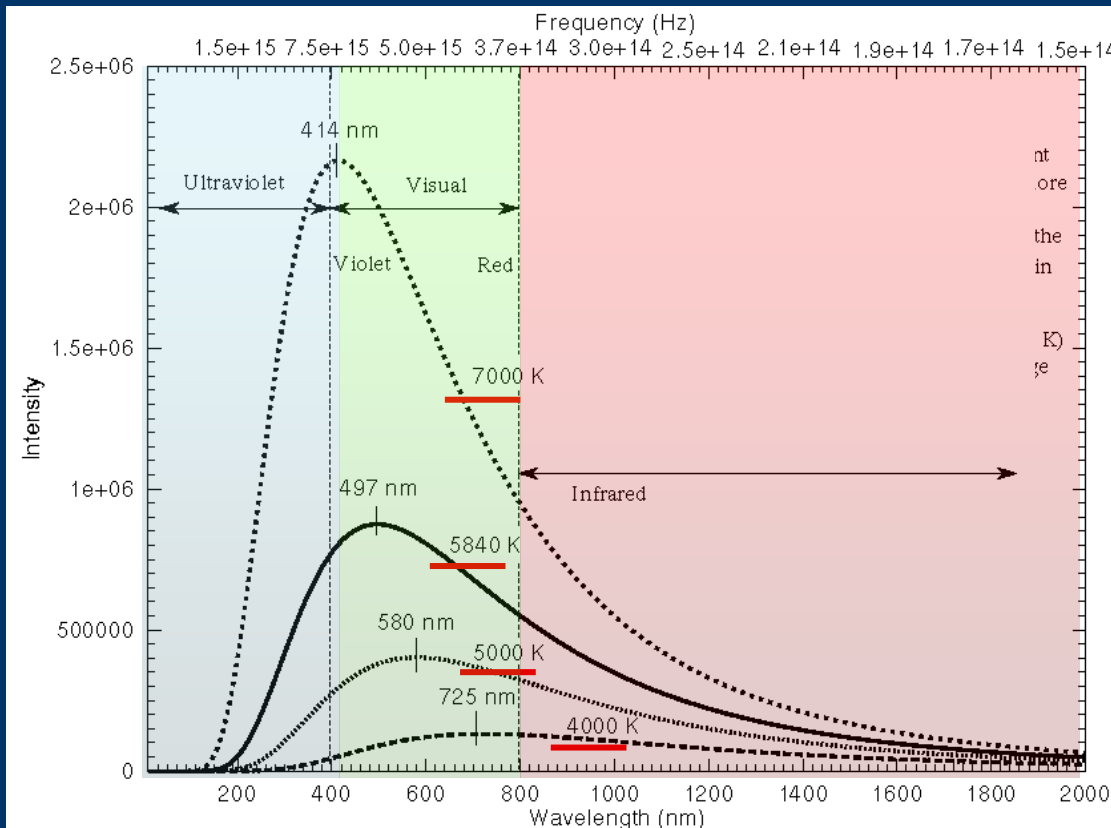
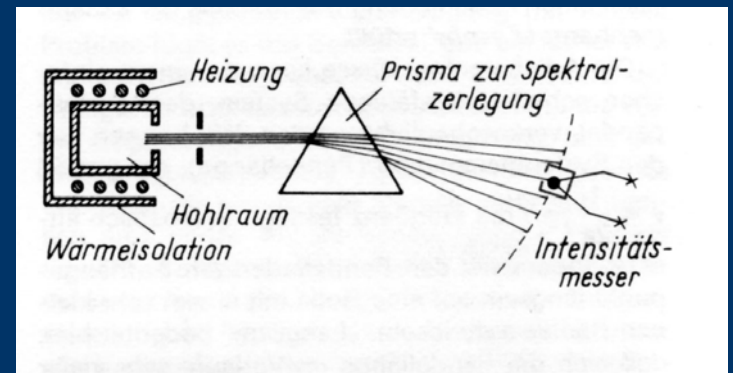
Aber was war der Ofen mit einer Temperatur von 2,7 K?

Zahl der Photonen mit Wellenlänge $\lambda \dots \lambda + \Delta \lambda$:

$$8\pi \times (V/\lambda)^3 \times (\Delta \lambda/\lambda) [e^{hc/\lambda T} - 1]^{-1}$$



Ein Blick zurück: Hohlraumstrahlung und das Plancksche Wirkungsquantum

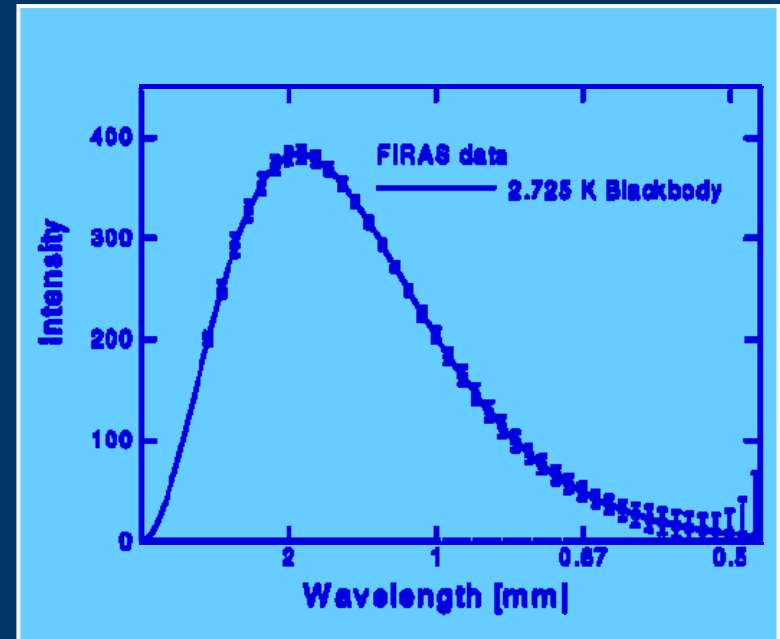
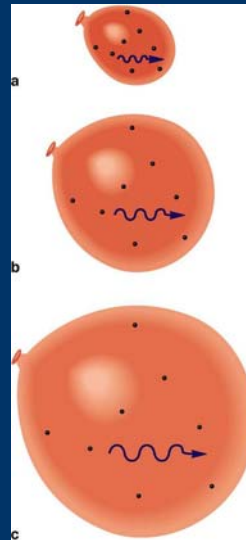


Penzias und Wilson 1965: Es gibt eine kosmische Hintergrundstrahlung



Hohlraumstrahlung

Die Energie der ausgesandten Strahlung hängt von der Wellenlänge ab



Kosmische Expansion:

$$R(t)/R(0) = r(t)$$

$$V \sim r(t)^3$$

$$\lambda \sim r(t)$$

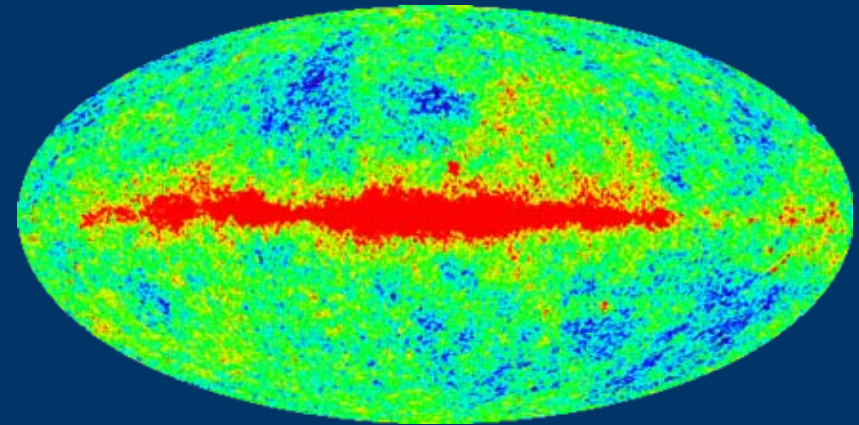
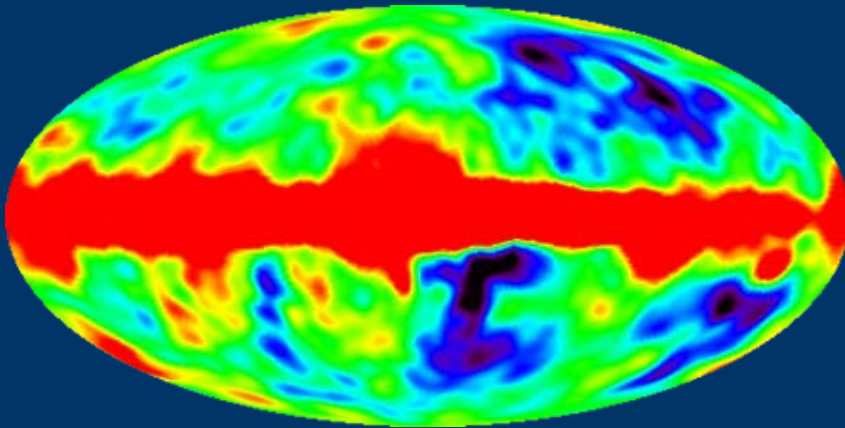
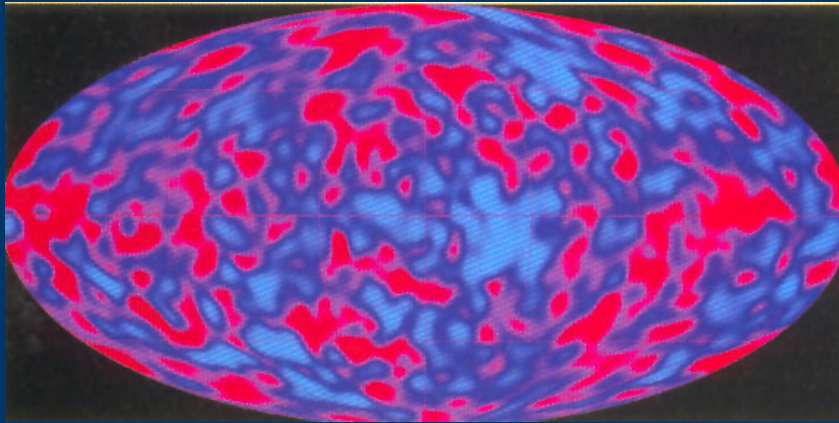
$$\lambda T = \text{constant}$$

$$\Rightarrow T \sim r(t)^{-1}$$

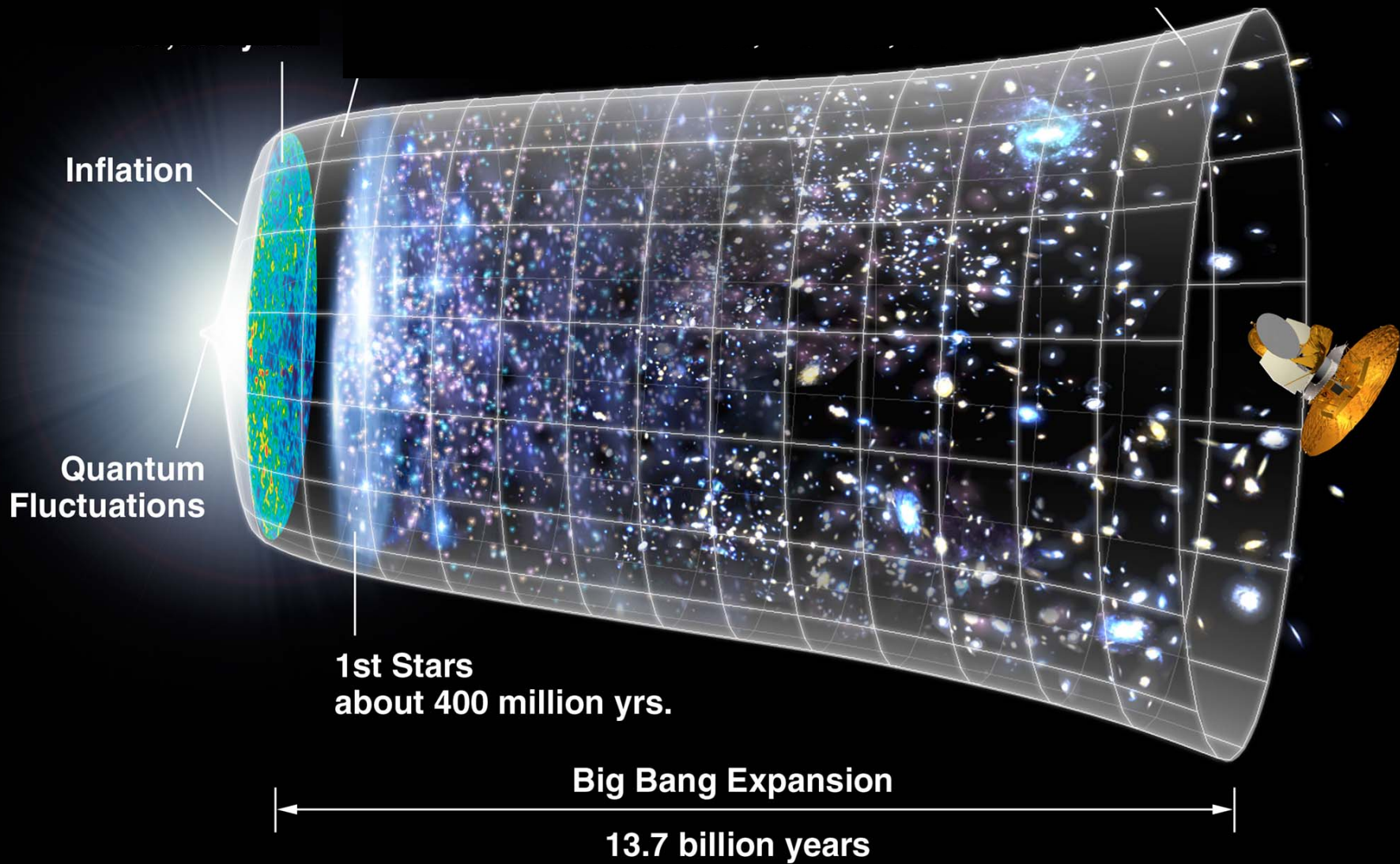
Zahl der Photonen mit Wellenlänge $\lambda \dots \lambda + \Delta \lambda$:

$$8\pi \times (V/\lambda)^3 \times (\Delta \lambda/\lambda) [e^{hc/\lambda T} - 1]^{-1}$$


Temperaturschwankung der Hintergrundstrahlung

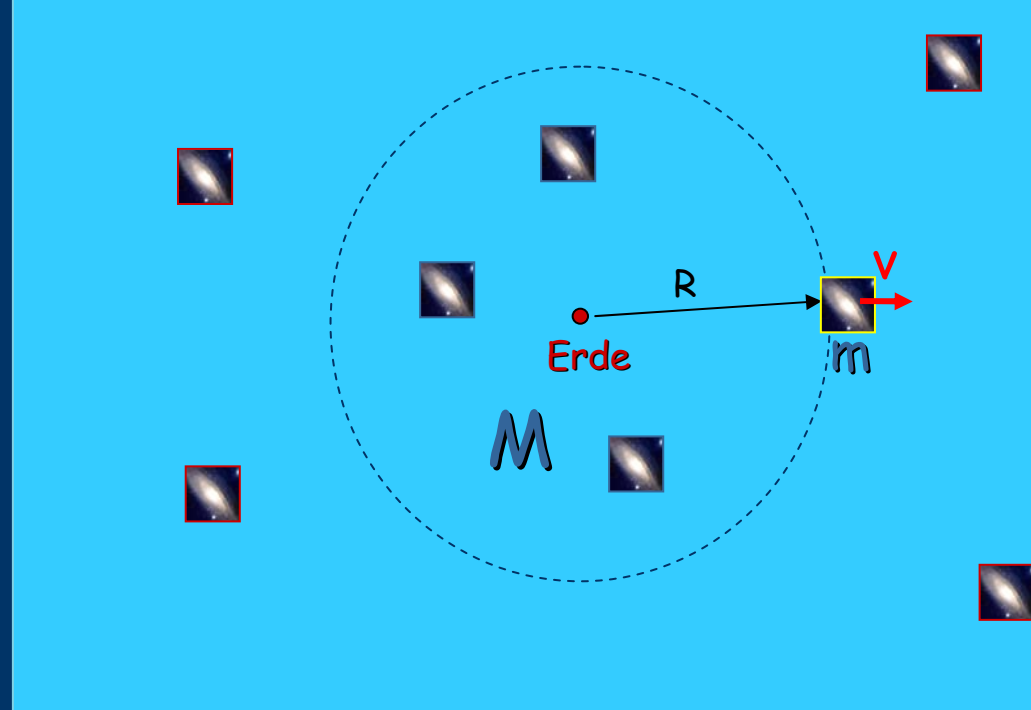


Temperaturschwankungen der Hintergrundstrahlung: $\frac{\Delta T}{T} \lesssim 10^{-5}$.



Dynamik des Universums am Beispiel der Bewegung einer fernen Galaxie

Die Galaxie  wird von allen in der blauen Kugel befindlichen Massen $M = 4\pi\rho R^3/3$ (anderen Galaxien) angezogen, nicht dagegen von den außen liegenden!
(Das wusste schon Newton)



Energie der Bewegung: $mv^2/2$


Energie der Lage: $-G_N mM / R$

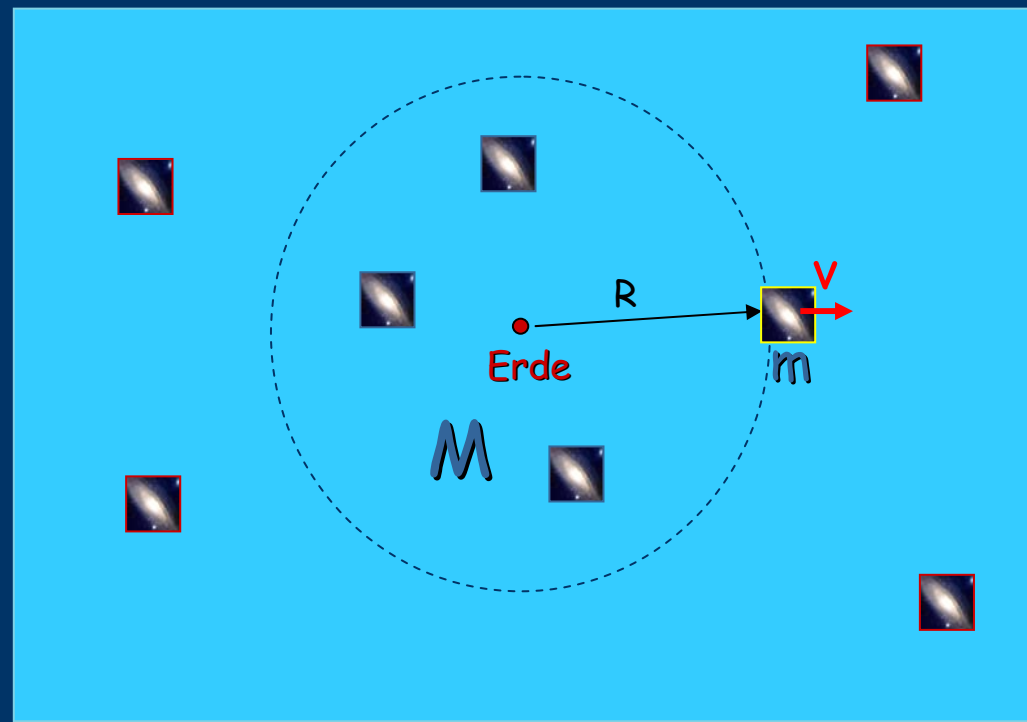
Gesamtenergie ist erhalten: "Krümmung"

$$E = mv^2/2 - G_N mM/R = -kmc^2/2$$

$$v^2/R^2 = (8\pi/3)G\rho \quad -kc^2/R^2 = H^2$$

Dynamik des Universums am Beispiel der Bewegung einer fernen Galaxie

Die Galaxie  wird von allen in der blauen Kugel befindlichen Massen $M = 4\pi\rho R^3/3$ (anderen Galaxien) angezogen, nicht dagegen von den außen liegenden!
(Das wusste schon Newton)



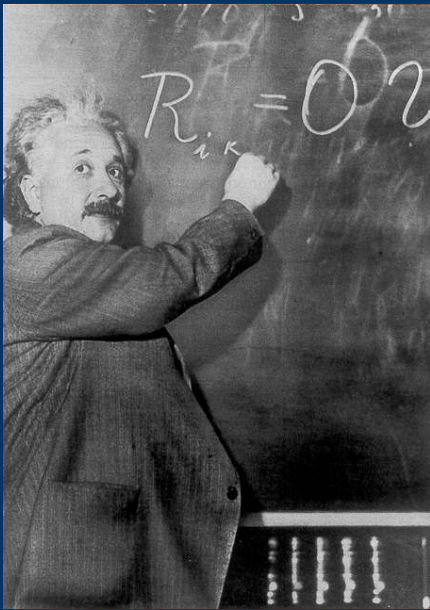
Energie der Bewegung: $mv^2/2$

Energie der Lage: $-G_N mM / R$

Gesamtenergie ist erhalten: "Krümmung"

$$E = mv^2/2 - G_N mM/R = -kmc^2/2 + \Lambda mc^2 R^2/2 \quad \text{Einsteins "größte Eselei"}$$

$$v^2/R^2 = (8\pi/3)G\rho + \Lambda c^2/2 - kc^2/R^2 = H^2$$

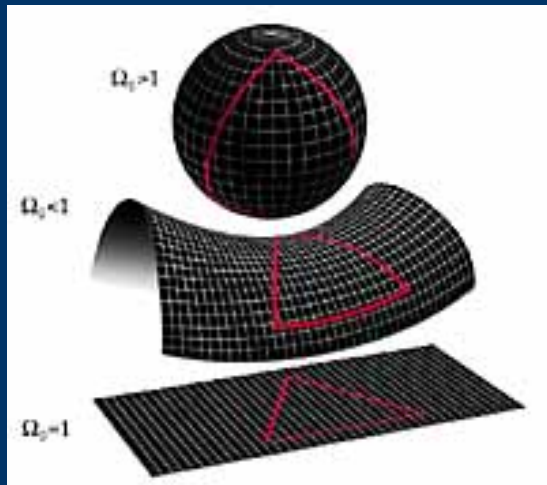


Einstein 1915:

Schwerkraft \Rightarrow

Materie krümmt die Raum-Zeit!

$$1/(\text{Krümmungsradius } R)^2 = 8\pi/3 \times G_N / c^2 \times \text{Materiedichte}$$



$$\text{Zeit}(r) = (1 - r^2/R^2(r)) \times \text{Zeit}(\infty)$$

- Newtons Welt $r/R_k = 0$
- Sonnenoberfläche: $r/R \sim 1/1500$
- Neutronenstern: $r/R \sim 1/2$
- Schwarzes Loch: $r/R = 1$

Die Friedmann-Gleichung



$$H^2 \equiv (v/R)^2 = 8\pi/3 \times G_N \rho - k (c/R)^2 = H^2 \Omega - k(c/R)^2$$

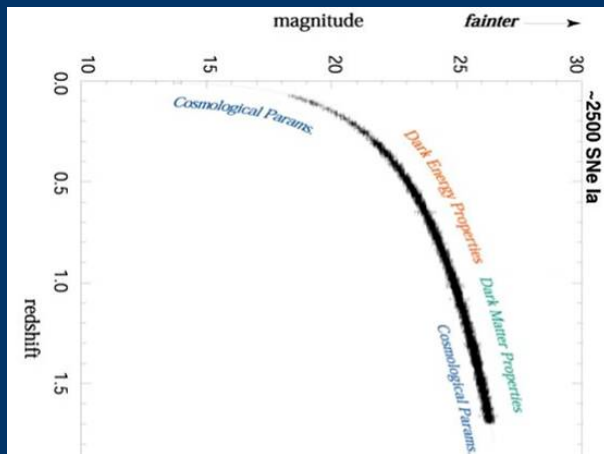
$$\Omega \equiv 8\pi G_N \rho / 3H^2 = \Omega_{\text{Stern}} + \Omega_{\text{dunkel (Baryon+Nichtbaryon)}} + \Omega_{\text{Strahlung}} + \Omega_{\Lambda}$$

$\Omega_{\text{Stern}} \approx 0,005$ Sterne

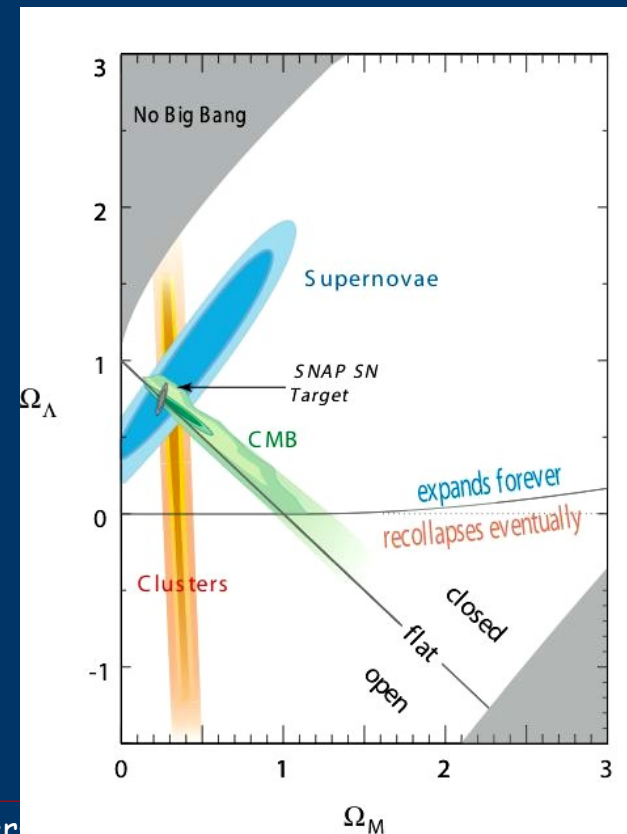
$\Omega_{\text{dunkel, Baryon}} \approx 0,05$ Gaswolken, braune Zwerge

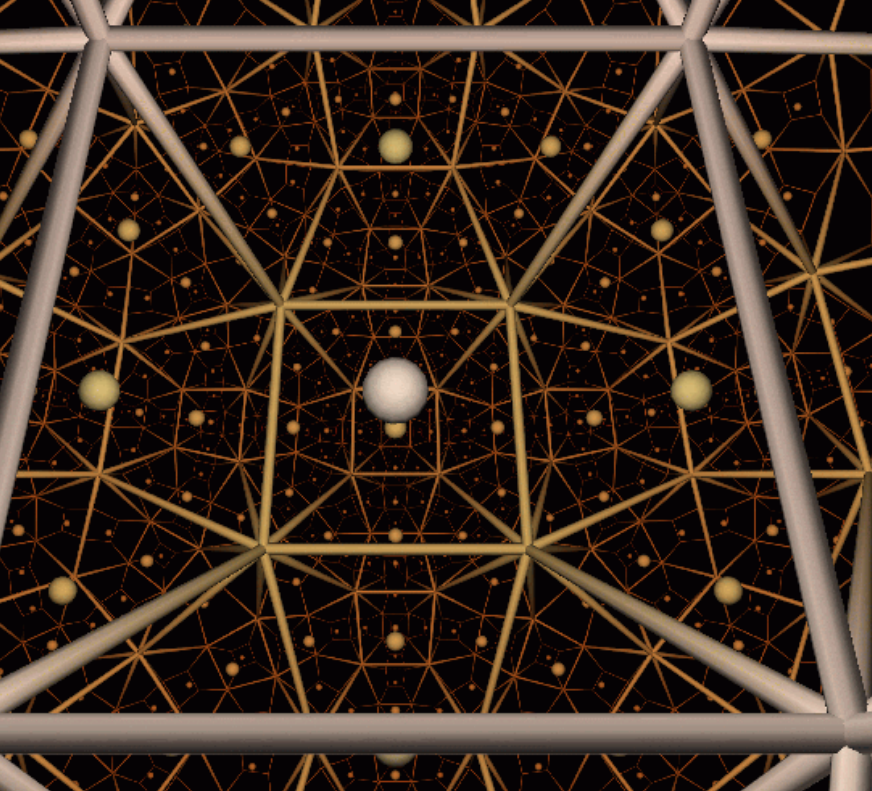
$\Omega_{\text{dunkel, Nichtbaryon}} \approx 0,245$ Axions, Neutralinos?

$\Omega_{\Lambda} \approx 0,7$ dunkle Energie

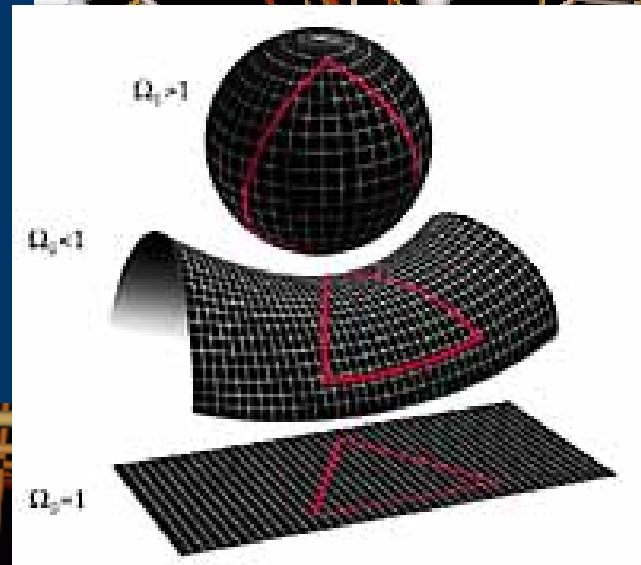
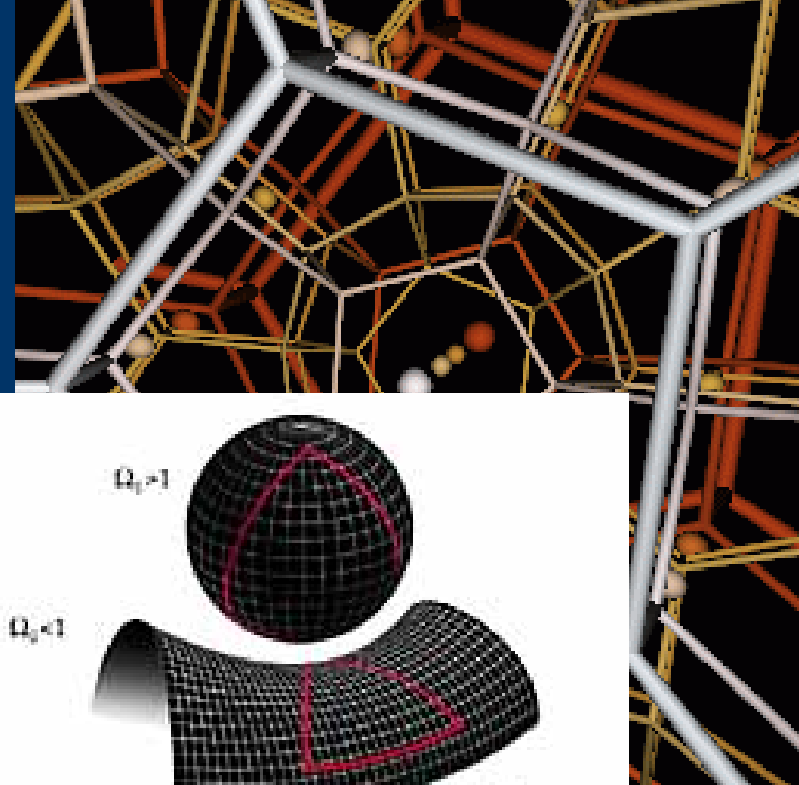


There is strong and confirming evidence for the existence of a cosmological vacuum density. Plotted are the 68% and 95% confidence regions of the matter density Ω_M and vacuum energy density Ω_L for current data from supernovae (Knop et al. 2003), cluster measurements (based on Allen et al. 2003), and CMB data with H_0 priors (outer contours: Lange et al. 2001, inner: Spergel et al. 2003). These results rule out a simple flat $\Omega_M=1, \Omega_L=0$ cosmology, and indeed the supernovae data rule out cosmologies without vacuum energy. Their consistent overlap is a strong indicator for dark energy dominating the universe with some 70% of the energy density. Also shown is the expected confidence region from just the SNAP supernova program, for $\Omega_M=0.28, \Omega_L=0.72$.

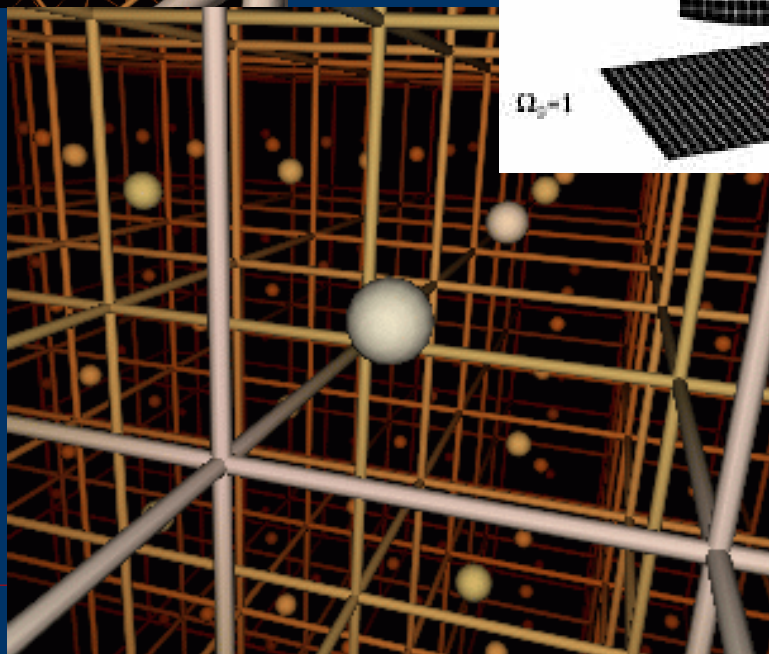




$k < 0$



$k > 0$



$k = 0$

□ Experiment: Universum ist flach: $k=0$, d.h. $\rho=\rho_c$

$$\Rightarrow \quad v^2/R^2 - 8\pi G\rho/3 = -c^2\Lambda/3$$

Falls $\Lambda=0$, dann $\rho_c \sim H^2/G \sim (R_u \sim)^2/(c|_{\text{Planck}}^2)$

Die vorhandene ``geklumpte Materie`` (diese bewirkt Gravitationseffekte) ergibt nur $\rho_c/3$!

Der Rest : kosmologische Konstante, dunkle Energie, Quintessenz,...

Wirkt wie ``negative`` Gravitation

Problem : sehr feine Abstimmung am Anfang nötig (1: 10^{125}) !

□ Strahlungsdominiertes Universum

$$v^2/R^2 - 8\pi R_0^4 G \rho_{S,0} / 3R^4 = kc^2/3 - c^2\Lambda/3$$

$c^2\rho_{S,0}$ Strahlungsenergiedichte zum Zeitpunkt t_0

R_0 : Ausdehnung zum Zeitpunkt t_0

$$v \sim R/t, \quad R(t) \sim t^{1/2}$$

Materiedominiertes Universum : $R(t) \sim t^{2/3}$

Quantengravitation und Schwarze Löcher

1. Relativistische Quanteneffekte

Heisenbergsche Unschärfe-Relation
(1927)

Ort Impuls

$$\begin{array}{ccc} \downarrow & \downarrow & \\ \Delta x & \cdot \Delta p & \gtrsim \hbar \end{array}$$

Einsteinsche Energie-Impuls-Beziehung
(1905)

$$E = \sqrt{(mc^2)^2 + (cp)^2}$$

Relativistische Effekte klein,
falls

$$mc > p \gtrsim \Delta p \gtrsim \frac{\hbar}{\Delta x}$$

oder

$$\Delta x > \lambda_c \approx \frac{\hbar}{mc},$$

$$\lambda_{c,\text{Elektron}} \approx 4 \cdot 10^{-13} \text{ m}$$

Für $\Delta x \ll \lambda_c$ sind relativistische Quanten-Effekte
wichtig!

2. Relativistische Gravitationseffekte

Newton's Gravitationsgesetz

Gravitationsenergie einer Masse m mit Radius R (Newton 1686)

$$E_G \approx -G \frac{m^2}{r}, \quad G = 6,67 \cdot 10^{-8} \text{cm}^3 \text{g}^{-1} \text{sec}^{-2}$$

Relativistische Effekte für Gravitation

wichtig falls $|E_G| \gtrsim mc^2$

$$r \lesssim G \frac{m}{c^2} = r_c \quad \text{Schwarzschild-Radius}$$

(Schwarzes Loch)

$$r_{c,\text{Erde}} \approx 5\text{mm}$$

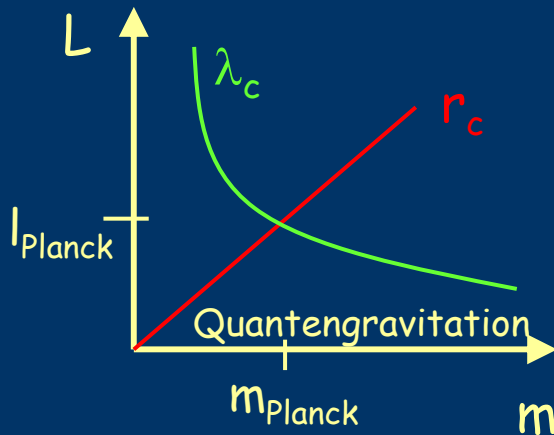
Ein Teilchen, das mit Lichtgeschwindigkeit von der Oberfläche einer Masse mit Radius $r < r_c$ startet, kann nicht ins Unendliche entweichen.

Relativistische Quantengravitation

Masse m im Raumgebiet Δx : relativistische **und** Quanten- und Gravitationseffekte wichtig, falls

$$\Delta x \lesssim \text{Min}(\lambda_c, r_c) \approx \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} = l_{\text{Planck}} \equiv 1,6 \cdot 10^{-35} \text{ m}$$

Planck-Länge



$$E_{\text{Planck}} \approx 1,2 \cdot 10^{28} \text{ eV} = k_B T_{\text{Planck}}$$

$$T_{\text{Planck}} \approx 1,4 \cdot 10^{32} \text{ K}$$

$$t_{\text{Planck}} \approx 5,4 \cdot 10^{-44} \text{ s} = \hbar$$

$$\hbar / E_{\text{Planck}}$$

$$m_{\text{Planck}} \approx 2 \cdot 10^{-5} \text{ g} = E_{\text{Planck}} / c^2$$

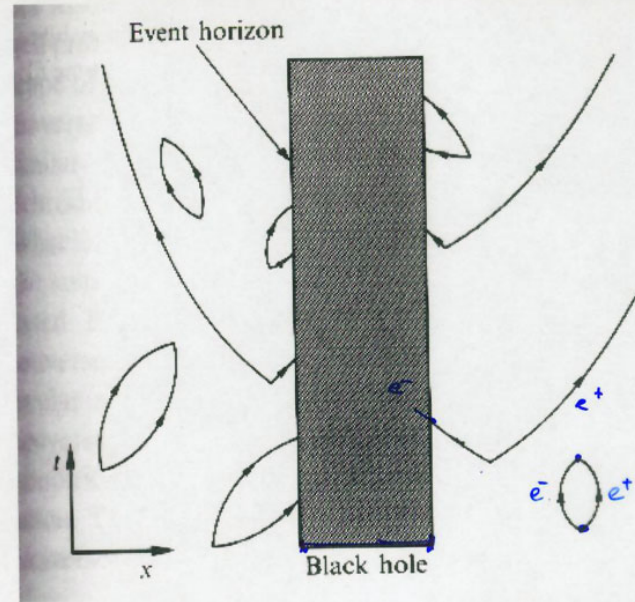
Es gibt bisher keine Physik für Skalen kleiner als die Planckskala ($t < 10^{-43} \text{ s}$)

Raum-Zeit-Schaum aus Mini-Black-Holes, die sich bilden und wieder verdampfen? **String-Theorie??**

Verdampfung Schwarzer Löcher

S. Hawking: Schwarze Löcher "verdampfen"

Zeit



Zerlege Oberfläche des Schwarzen Loches in Flächen der Ausdehnung l_{Planck} , jedes Flächenelement kann in 2 (oder mehr) Zuständen sein.

Entropie: $S_{\text{BH}} \approx 4\pi (r_c / l_{\text{Planck}})^2$

Wäre Stern mit Masse der Sonne ein Schwarzes Loch, dann $r_c \approx 3 \text{ km}$ und $T_{\text{BH}} \approx 10^{-7} \text{ K}$. Der Stern wäre nach 10^{66} Jahren verdampft.

Oberfläche eines Black holes - $4\pi r_c^2$ **Raum**
 kleinstes Oberflächenelement - l_{Planck}^2
 $W = 2^{4\pi r_c^2 / l_{\text{Planck}}^2}$ (jedes Element hat 1 bit)

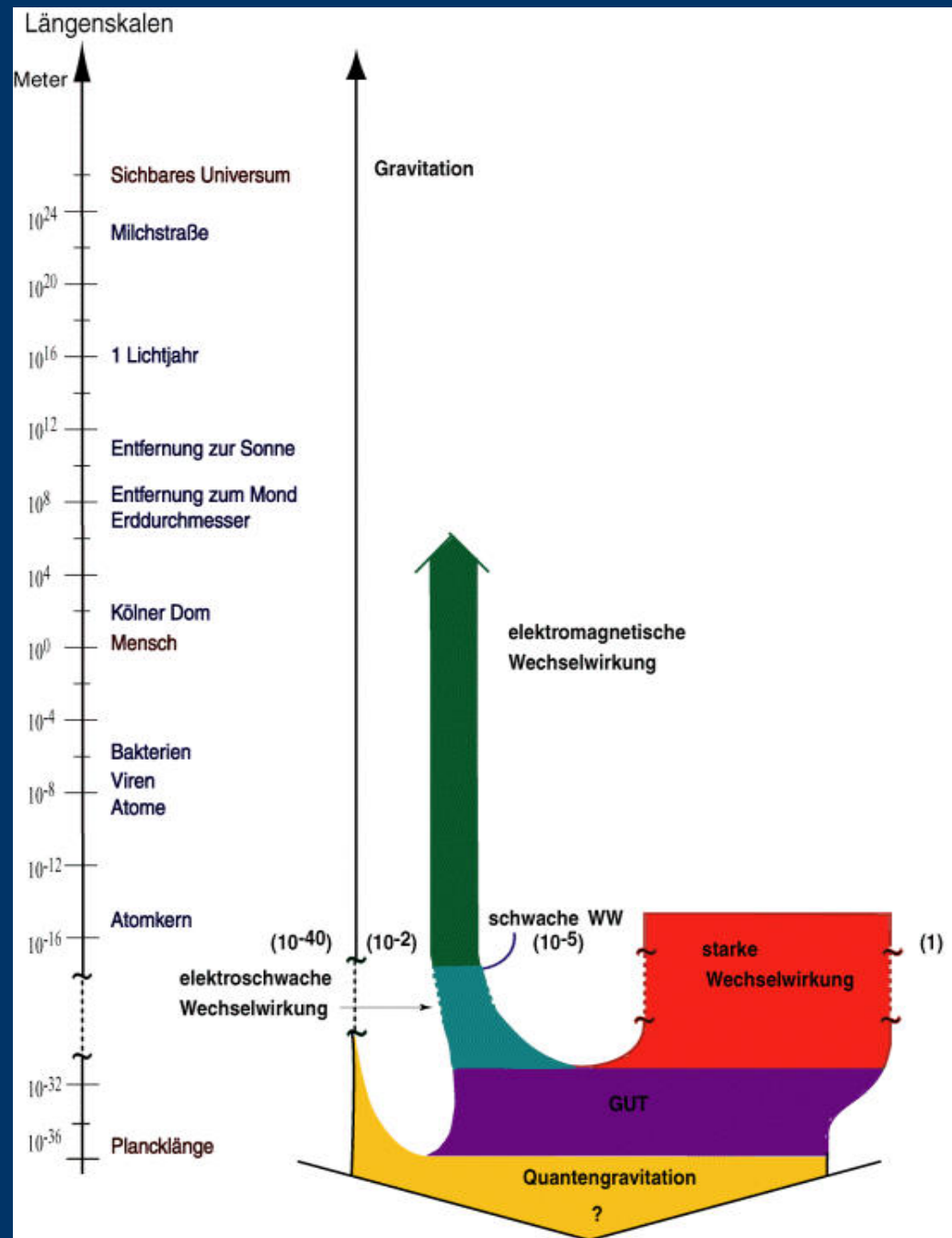
$S_{\text{BH}} = k_B \frac{4\pi r_c^2}{l_{\text{Planck}}^2} \ln 2$ $E = mc^2$

$T_{\text{BH}} = \left(\frac{\partial S}{\partial E}\right)^{-1} = \frac{\hbar c^3}{8\pi k_B G M}$

$M = M_{\text{Sonne}}$, $r_c = 3 \text{ km}$, $T_{\text{BH}} = 10^{-7} \text{ K}$, $\tau_L = 10^{66} \text{ Jahre}$

$M = M_{\text{Planck}}$, $r_c = l_{\text{Planck}}$, $T_{\text{BH}} = E_{\text{Planck}} / k_B$, $\tau_L = t_{\text{Planck}}$

Vereinigung der fundamentalen Wechselwirkungen

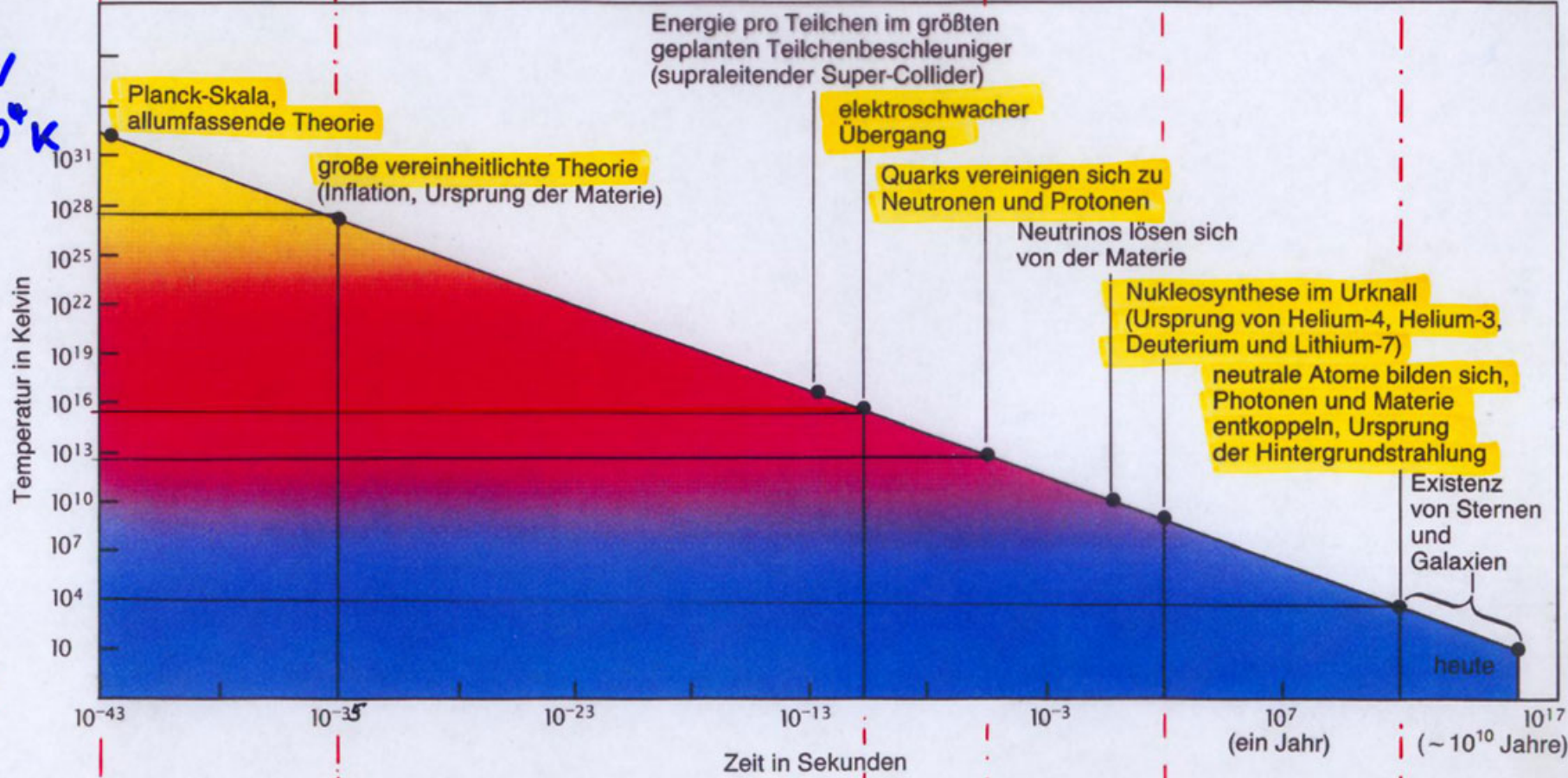


I

II: Starke und Elektro-
Schwache Kraft sep.
Baryogenese, Inflation?

III. IV. V.
W, Z-B. Quarks
 10^{14} eV $> 5 \cdot 10^{16} \text{ eV}$
 $\sim 10^{15} \text{ K}$ $\sim 10^{12} \text{ K}$

$1 \text{ eV} \hat{=} 10^4 \text{ K}$



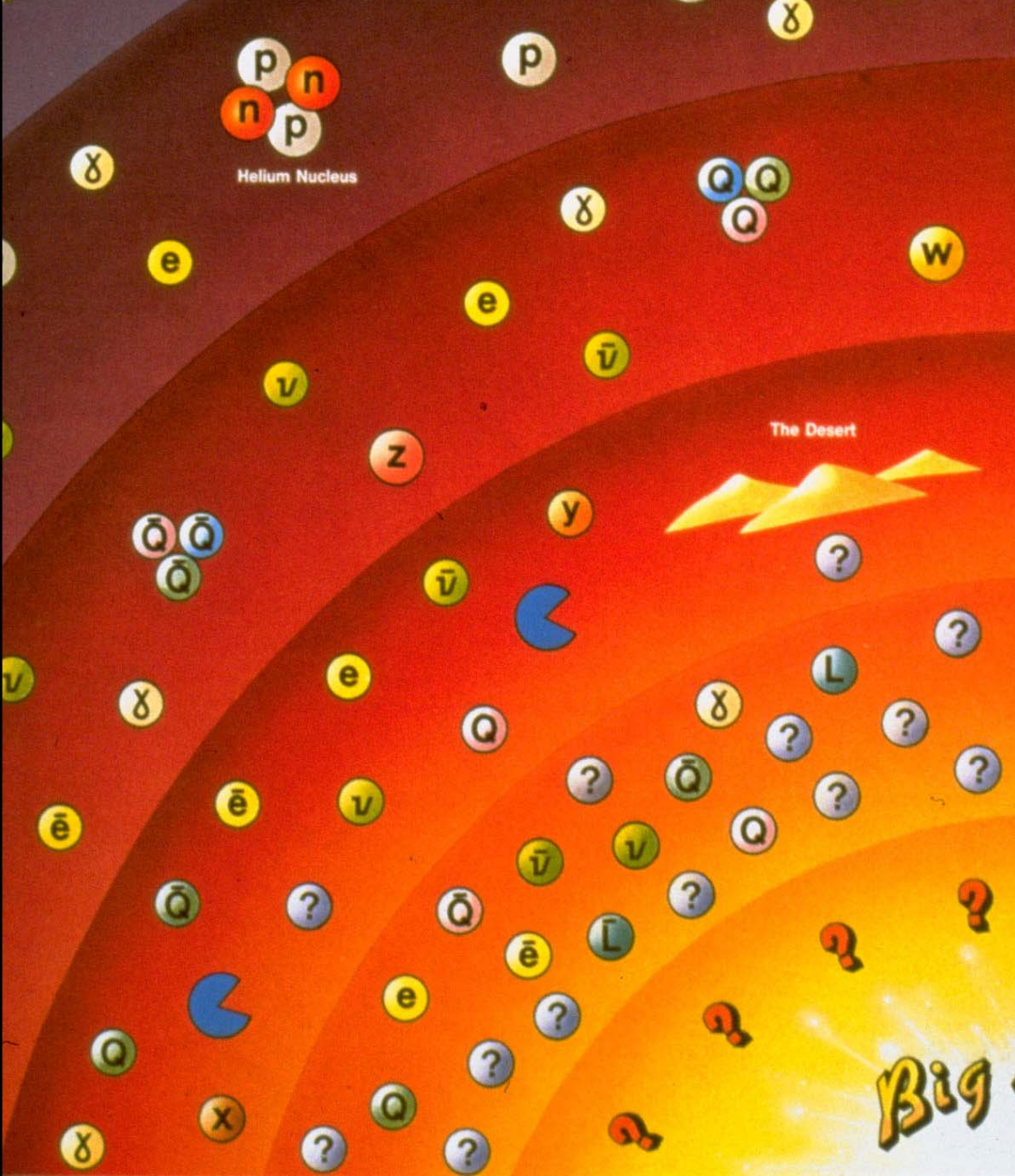
?

Geschichte des Universums I

10^{-10} 10^{-5} $3 \text{ min} \sim 10^2$



Helium Nucleus



Nucleosynthesis of Helium

10² sec.

Disappearance of Positrons

LEPTON EPOCH

Confinement of Quarks
Formation of Protons, Neutrons

Disappearance of Antiquarks

10⁻¹⁰ sec.

ELECTROWEAK EPOCH

QUARK EPOCH

Asymmetry $Q - \bar{Q}$, $L - \bar{L}$

Magnetic Monopoles?

10⁻³⁴ sec.

Cosmic Inflation?

GRAND UNIFICATION EPOCH

10⁻⁴³ sec.

QUANTUM GRAVITY EPOCH

Big Bang

RADIATION DOMINATED ERA



Geschichte des Universums II

I.) Energiedichte von ultra-relativistischen Teilchen dominiert : $E \approx cp$,
Energiedichte $\sim (R_{\text{Planck}} / R_t)^4$

Hintergrundstrahlung:

$$T_+ = T_{\text{Planck}} R_{\text{Planck}} / R_+$$

Strahlungsdominanz:

$$R_+ / R_{\text{Planck}} = (t / t_{\text{Planck}})^{1/2}$$

$$\rightarrow T_+ = T_{\text{Planck}} (t_{\text{Planck}} / t)^{1/2}$$

Trennung von Starker und Elektroschwacher Kraft bei 10^{24} eV d.h. 10^{-35} s \rightarrow II.)

Eine kurze Geschichte des Universums

- $t \approx 10^{-43} \text{ s}$

Ⓘ

$$T \approx 10^{22} \text{ K} \hat{=} 10^{28} \text{ eV}$$

Das Universum verläßt die Planck-Ära, Starke + Elektroschwache Kraft sind vereint (GUT)

Energiedichte dominiert von relativistischen Teilchen
 $\sim \frac{1}{R^4} \sim T^4$

- $t \approx 10^{-35} \text{ s}$

$$R_u \approx 1 \text{ mm}$$

$$T \approx 10^{28} \text{ K} \approx 10^{24} \text{ eV}$$

Ⓜ

Aufbrechung ^{des WW} in $\left. \begin{array}{l} \rightarrow \text{Starke} \\ \rightarrow \text{Elektroschwache} \end{array} \right\} \text{Kraft}$

Beginn der Baryogenese

Inflation?

- $t \approx 10^{-10} \text{ s}$

$$(R_u \approx 10^{12} \text{ m})$$

Ⓝ

$$T \approx 10^{15} \text{ K} \approx 10^{11} \text{ eV}$$

Elektroschwache Wechselwirkung wird aufgebrochen
 $10^{11} \text{ eV} \hat{=} \text{Energie der W, Z-Bosonen}$ "Suppe" aus Quarks + Leptonen

Details I

II.) Entstehung der Baryonen*-Assymetrie: mehr Teilchen als Anti-Teilchen

*Baryon: Fermion, das
Starke Kraft spürt.

III.) Trennung von Schwacher und elektromagnetischer Kraft nach $10^{-10}s$:

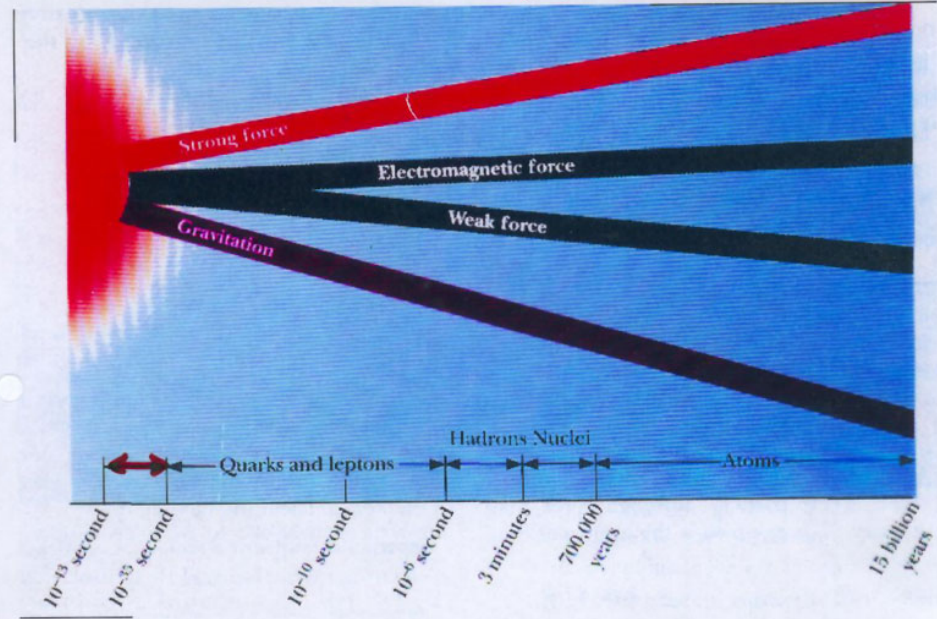
$$T \approx 10^{15} \text{ K} \approx 10^9 \text{ eV} \approx mc^2$$

der W- und Z- Bosonen

Universum : Photonen +
Quark-Leptonen-Suppe
Ausdehnung ca. 10^{12} m

I: $10^{-43} \text{ s} < t < 10^{-35} \text{ s}$

"GUT"
große vereinigte Theorie



Starke + Elektroschwache Kraft sind zu
einer einzigen Kraft vereinigt

Baryonen-Entstehung? (mehr Teilchen als
Antiteilchen)

- A. Sakharov: (i) keine Baryonen-Erhaltung
(ii) CP-Verletzung
(iii) kein thermisches Gleichgewicht

Am Ende: $n_{\bar{p}}/n_B \approx 10^9!$

Details II

IV.) $10^{-5}s$

$$k_B T \approx m_{\text{proton}} c^2 / 3 \rightarrow$$

Quarks vereinigen sich zu Hadronen

Nach $10^{-2}s$: Universum besteht aus Photonen (γ), Elektronen (e^-), Neutrinos (ν_e) + Anti-Teilchen und eine wesentlich kleinere Zahl von Protonen (p) und Neutronen (n), Ausdehnung $10^{16}m$.

Nach $10^{-1}s$: $k_B T$ entspricht $(m_n - m_p)c^2$, Protonen werden favorisiert.

$1s$: e^+, e^- rekombinieren da $k_B T \approx m_e c^2 \rightarrow \nu_e$ koppeln ab

- $t \approx 10^{-5}s$, $T \approx 3 \cdot 10^{12} K \hat{=} 3 \cdot 10^8 eV$

Quarks vereinigen sich zu Hadronen

IV

- $t \approx 10^{-2}s$, $T \approx 10^{11} K \hat{=} 10^7 eV$

Universum besteht aus Photonen, $e^+, e^-, \bar{\nu}, \nu$ und einer kleinen Zahl p, n

Es gibt schnelle Umwandlung von $p \leftrightarrow n$



- $t \approx 0.1 s$, $T \approx 3 \cdot 10^{10} K \hat{=} 3 \cdot 10^6 eV$

$$c^2(m_n - m_p) = 2 \cdot 10^7 eV$$

\rightarrow Protonen werden gegenüber den Neutronen favorisiert

- $t \approx 1s$, $T \approx 10^{10} K \hat{=} 10^6 eV$

$m_e c^2 = 0.5 \cdot 10^6 eV \rightarrow e^+, e^-$ rekombinieren zu Photonen

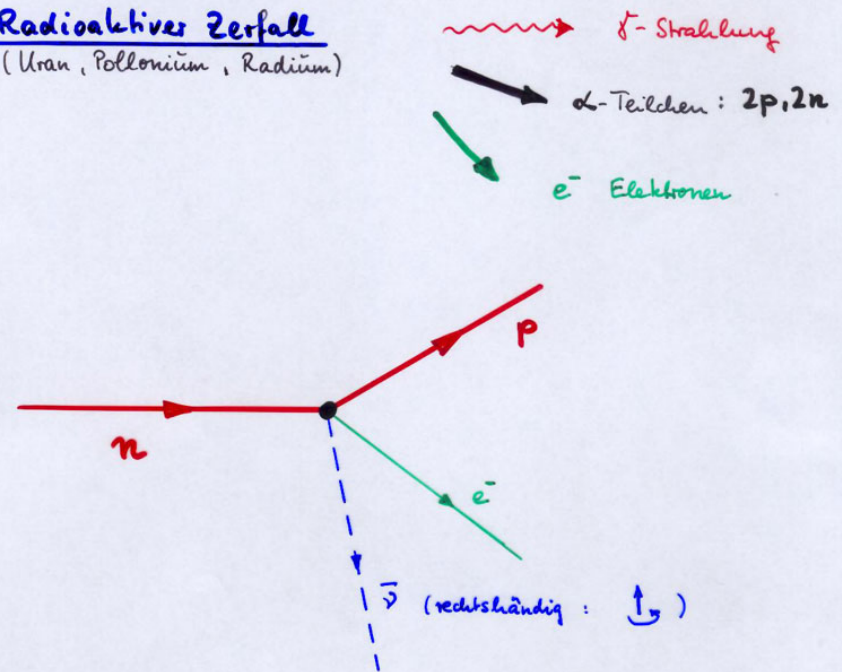
keine Neutrinoproduktion mehr

\rightarrow Abkoppelung des Neutrinos

Prozesse der Schwachen Wechselwirkung

Die Schwache Kraft (oder schwache Wechselwirkung)

Radioaktiver Zerfall
(Uran, Polonium, Radium)



1933 E. Fermi: Neutron transformiert sich in Proton, Elektron, Anti-Neutrino

Schwache Wechselwirkung = Wechselwirkung von 4 Fermionen

Analog : $\mu^{\pm} \rightarrow e^{\pm} + \nu + \bar{\nu}$

History of the Universe



Details III

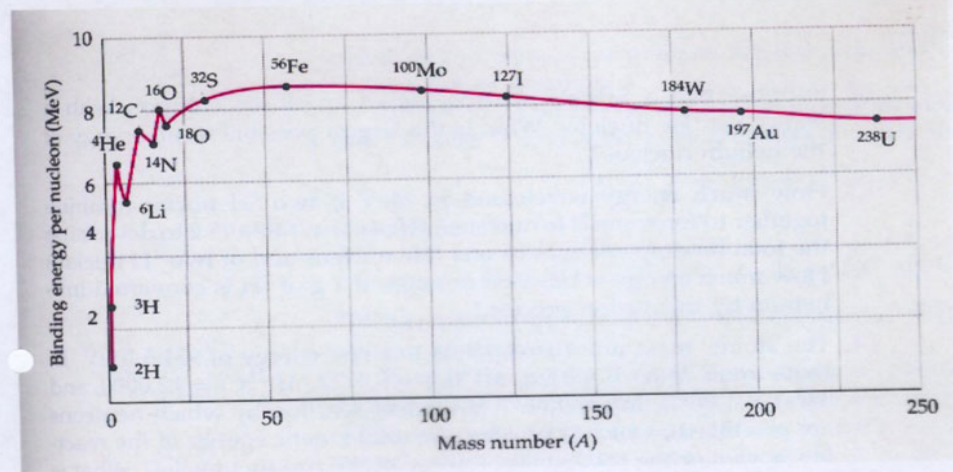
V.) Nach 10^2 s: Universum besteht aus γ , ν , e^- , p , n
Dichte $\approx 40 \rho_{\text{Wasser}}$

3-4 min: $k_B T \approx 10^9 \text{ K} \sim 10^5 \text{ eV}$,
→ Beginn des Synthese schwererer Elemente,
Abschluss nach wenigen Stunden!!
→

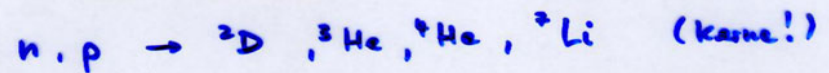
76% Wasserstoff, 24% Helium + leichte Elemente (ionisiert)

Nach 10^4 Jahren: nicht-relativistische Materie dominiert.
 10^5 Jahre: $T \approx 4000 \text{ K}$
Bildung neutraler Atome →
Alter der Hintergrundstrahlung

V. Nach 3-4 min: Nukleosynthese:



$$T \approx 10^9 \text{ K} \hat{=} 10^5 \text{ eV}$$

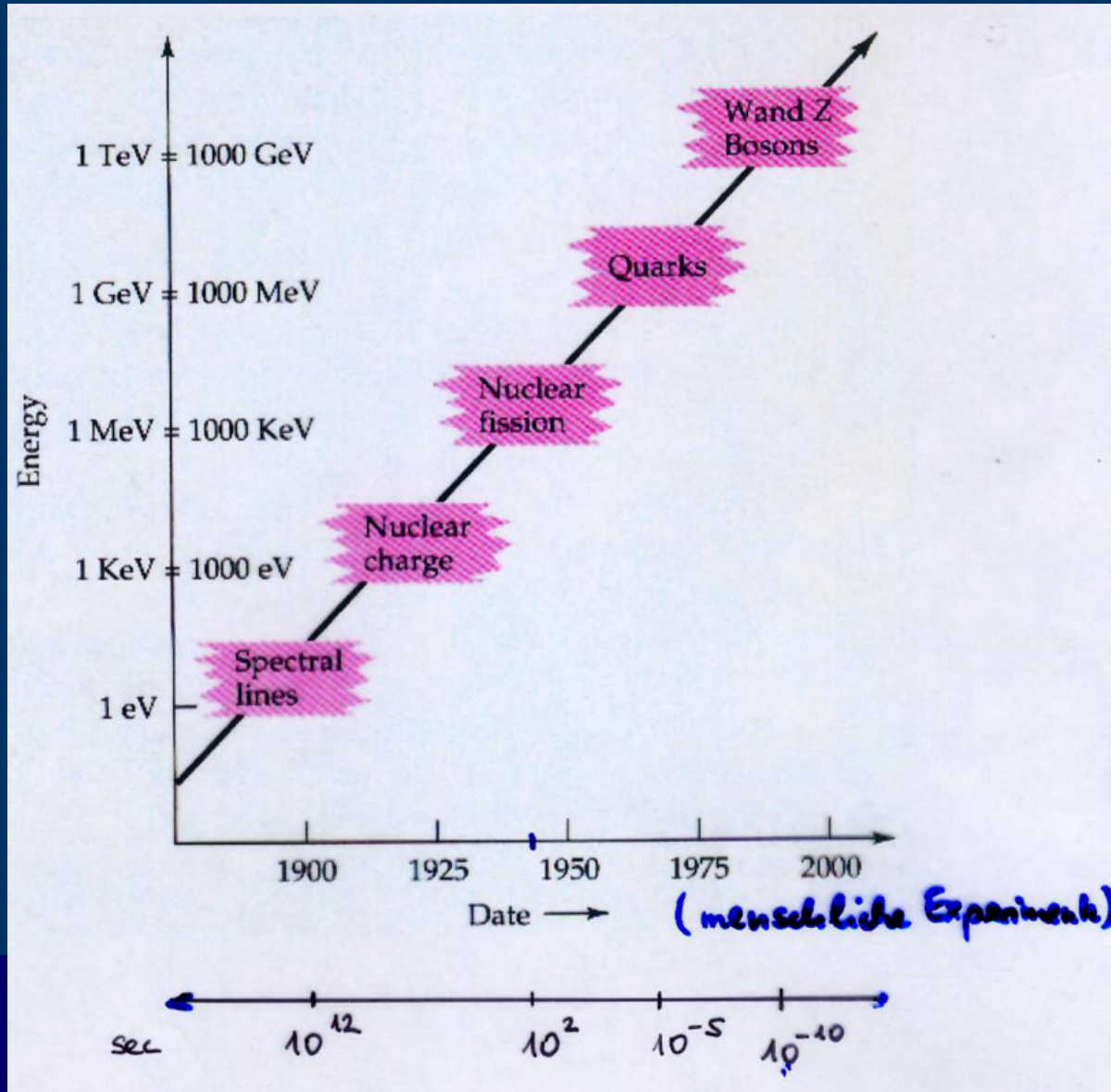


Nach wenigen Stunden: $\sim 76\%$ H (Protonen)
 $\sim 24\%$ He
+ weitere leichte Elemente
+ Photonen (10^{10} / Baryon)
+ Neutrinos

Nach 10^4 Jahren: $T \approx 10^5 \text{ K}$ → Energiedichte durch nicht-relativ. Materie dominiert

$T \approx 4000 \text{ K} \hat{=} 4 \text{ eV}$ → Bildung neutraler Atome,
Abkühlung der Strahlung → Hintergrundstrahlung.

Erreichte Energien als Funktion der Zeit



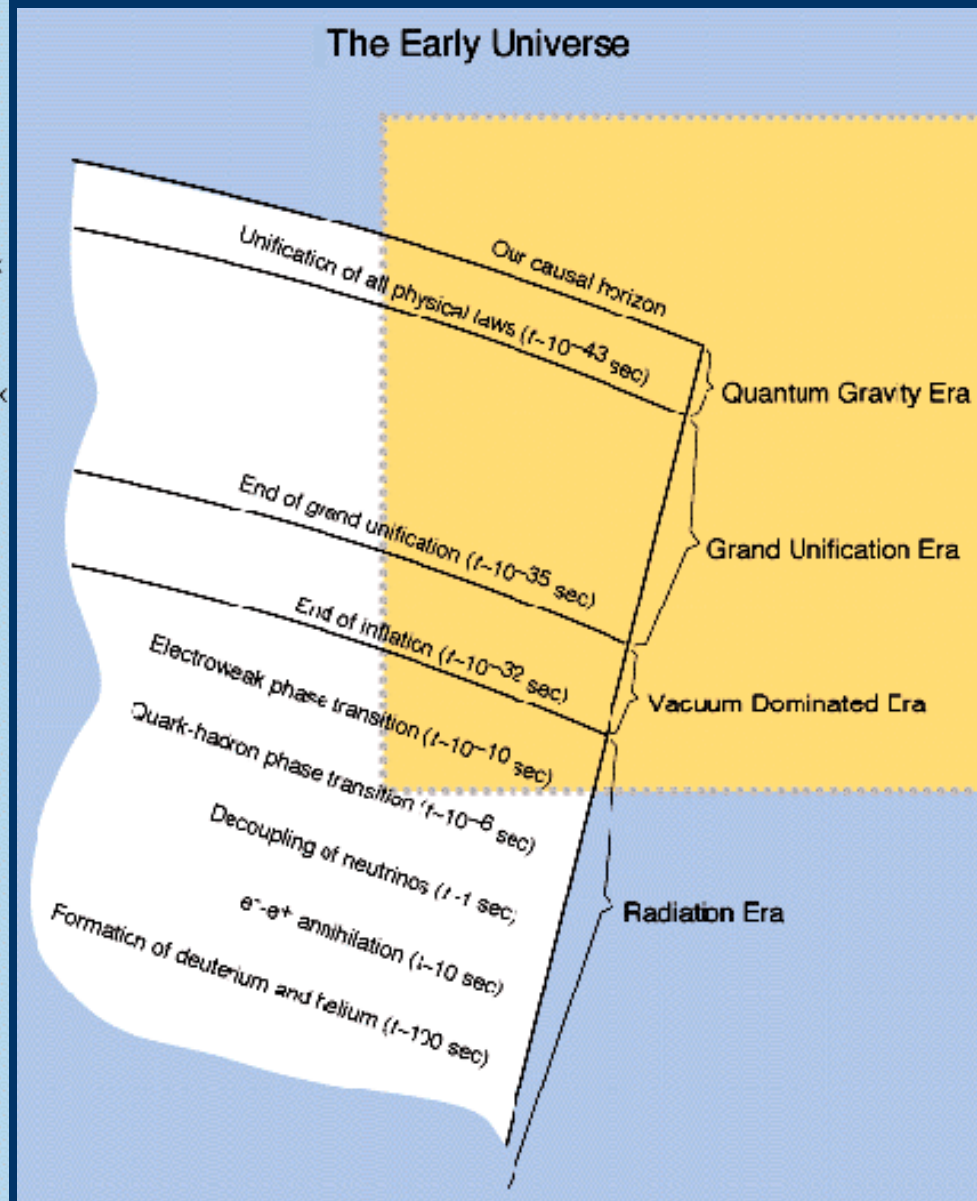
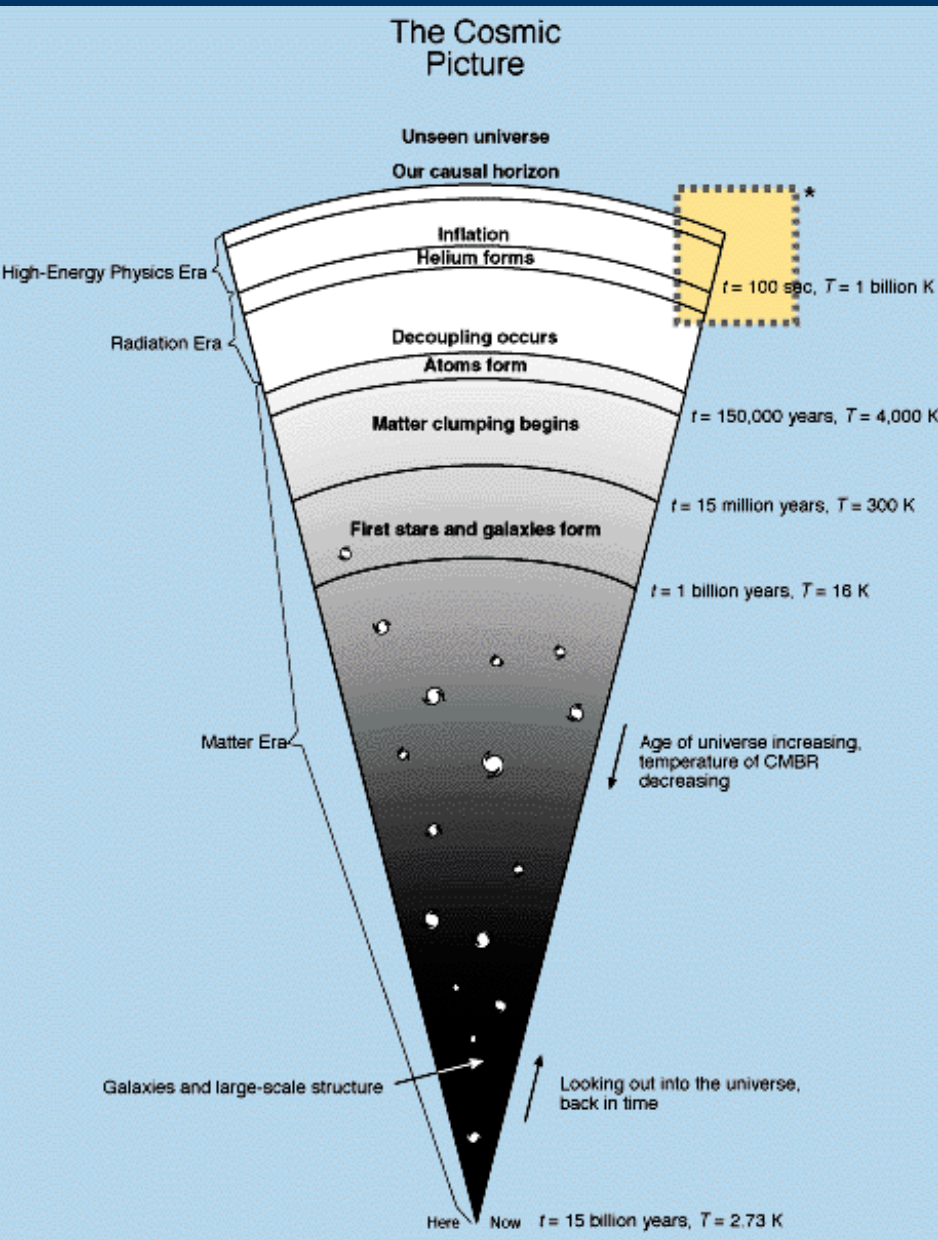
Geschichte des Universums VI

- $t \approx 10^3 - 10^{10}$ Jahre , $T \approx 10$ K

Galaxien bilden sich

- $t \approx 10^{10}$ Jahre , $T = 2,7$ K : HEUTE!

Das frühe Universum



Inflation

Flachheit des Universums
Homogenität der
Hintergrundstrahlung?
keine Monopole (Ausdünnung)

Linde, Steinhardt, Guth, ...:

Higgsfeld
produziert für kurze Zeit
endliche kosmologische
Konstante Λ
→ exponentielle
Expansion des
Universums

Dauer 10^{32} s
 $10^{-26} \text{ m} \rightarrow 10^{74} \text{ m}$

Offene Probleme "Inflation"

- Warum ist nach 10^{10} Jahren die Dichte so nah an der kritischen?

$$\text{heute: } 0.1 \rho_c < \rho < 2 \rho_c$$



$$t = 10^{-10} \text{ s} \rightarrow \frac{\rho - \rho_c}{\rho_c} < 10^{-25} \quad !!!$$

- Warum ist das Universum so homogen auf großen Skalen?
Hintergrundstrahlung stammt von 120 000 kausal nicht zusammenhängenden Regionen
- Ursache der räumlichen Irregularitäten auf kleinen Skalen?

Linde, Guth : Higgsfeld produziert kosmologische Konstante

Dunkle Materie
Neutrino-Massen
⋮

Chaotische Inflation

