

# TEILCHENPHYSIK FÜR FORTGESCHRITTENE

Teilchenphysik und Kosmologie

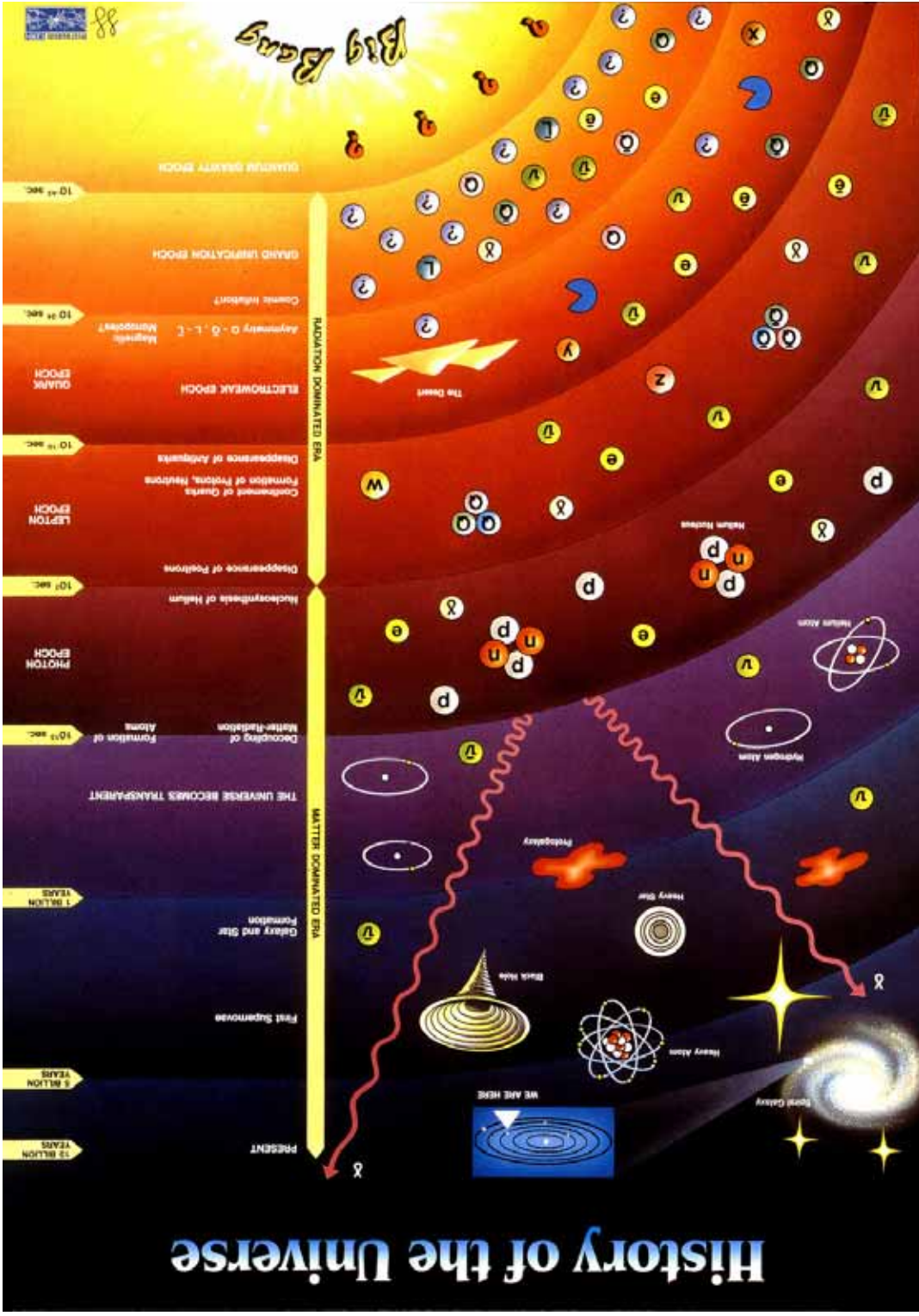
(teilweise in Anlehnung an Skript R. Klanner/T. Schöner)

**Caren Hagner**  
**Achim Geiser**



Universität Hamburg, IExpPh  
Sommersemester 2007

1. Die quantenmechanische Beschreibung von Elektronen
2. Feynman-Regeln und –Diagramme
3. Lagrange-Formalismus und Eichprinzip
4. QED
5. Starke Wechselwirkung und QCD
6. Schwache Wechselwirkung, elektro-schwache Vereinigung und der Higgs-Mechanismus
7. Der Higgs-Mechanismus
8. Mischung von Quarks und Leptonen
- 8.1 Eigenschaften der Neutrinos – Massen und Oszillationen
- 8.2 CKM-Matrix und CP-Verletzung (nach Kosmologie)
9. Teilchenphysik und Kosmologie
- 9.1 Big Bang Modell
- 9.2 Dunkle Materie und Dunkle Energie
10. Jenseits des Standardmodells: Wie geht es weiter?  
– Träume der Teilchenphysiker



**Direkte Verbindung Teilchenphysik und Kosmologie**

zunehmende Energie -> Reise rückwärts in Geschichte des Universums

-> Annäherung an den Urknall

# 9. TEILCHENPHYSIK UND KOSMOLOGIE\*)

## 9.1 Big-Bang Modell

- Expansion des Universums, Hubble-Konstante
- Kosmische Hintergrundstrahlung
- Geschichte des Universums (Urknall → heute)
- „Flaches“ Universum und Inflationsmodell

## 9.2 Dunkle Materie und Dunkle Energie

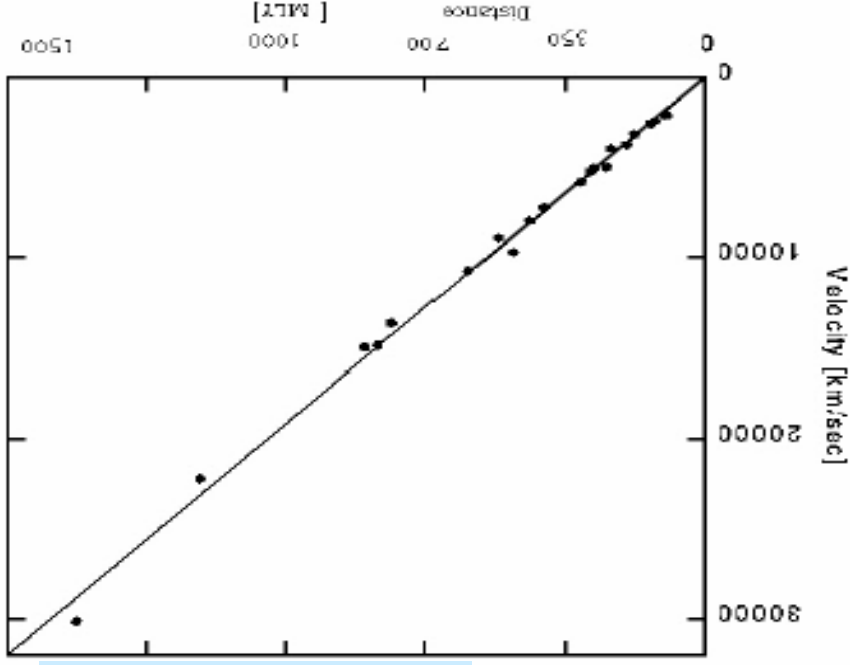
- Baryonische Materie
- Evidenz für Dunkle Materie
- Anisotropie der kosmischen Hintergrundstrahlung
- Beschleunigte Ausdehnung des Universums →
- Dunkle Energie
- Zukunft des Universums

\*) Folien zum Teil von Vorlesung O. Steinkamp Kern- und Teilchenphysik, Uni Zürich WS 03/04

Eine sehr leserliche Einführung:

Wie alt ist die Welt, F.Bosch Preprint GSI 2004-15

( $1 \text{ pc} = 1 \text{ par sec} = 3.26 \text{ Lichtjahre}$ )



Hubble Konstante:  $H_0 \approx 70 \text{ km/s pro Mpc}$

- Galaxien entfernen sich in alle Richtungen
- Geschwindigkeit proportional zur Entfernung →

## 1929: Edwin Hubble

später „meine größte Eseler“

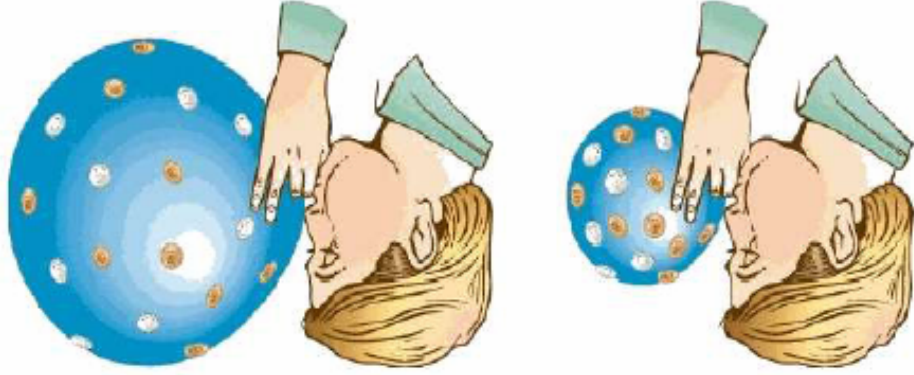
Einstein führt dazu kosmologische Konstante in die Zustandsgleichung des Universums (in ART) ein;

Anfang 20<sup>tes</sup> Jahrhundert: statisches Universum →

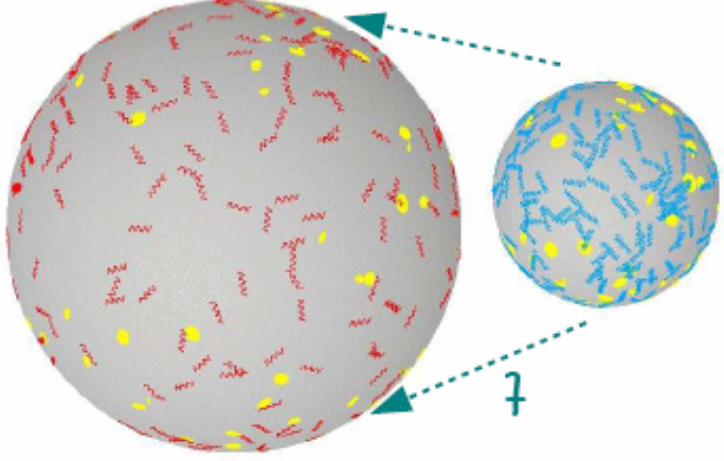
## Hubble Konstante::

## Interpretation: Universum expandiert!

- Analogie: Punkte (Galaxien) auf Oberfläche eines Luftballons (Universum)



gehe in der Zeit zurück:

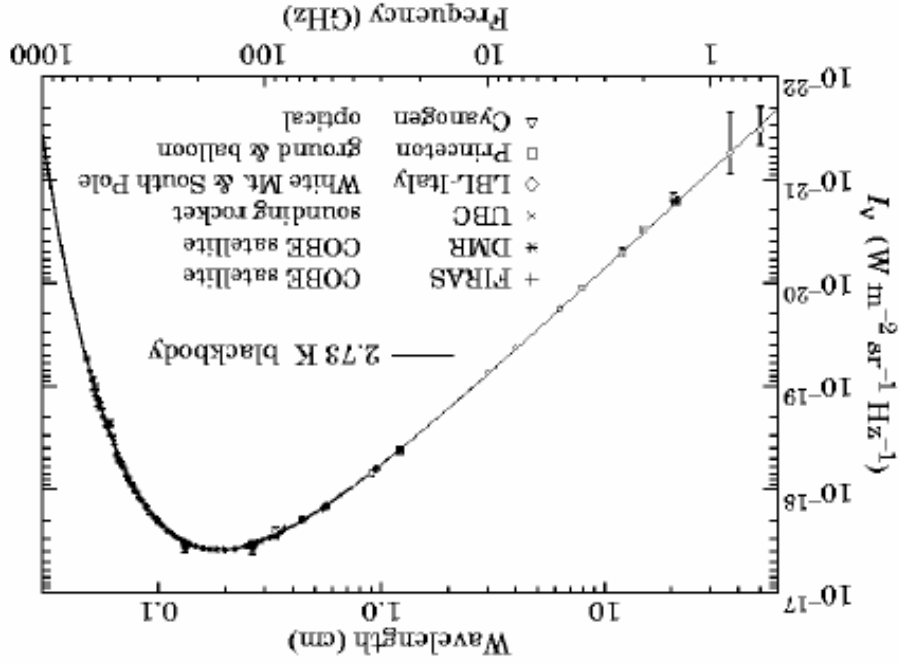


- Abstände werden kleiner => Energiedichte und Temperatur nehmen zu
- => Ursprung des Universums: Singularität
- Abstände unendlich klein, Energiedichte / Temperatur unendlich gross
- Alter des Universums:  $1 / H_0 \approx 15 \times 10^9$  Jahre (wenn  $H_0$  konstant)

# KOSMISCHE HINTERGRUNDSTRAHLUNG (CMB)

Entdeckt 1965 durch A.Penzias und R.Wilson (Nobelpreis 1978)

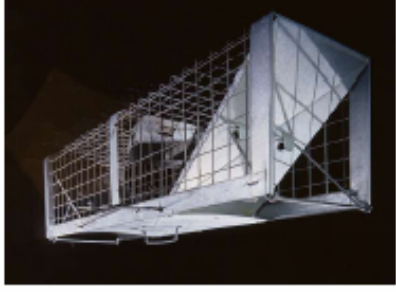
- "Rausch-Signal" im Mikrowellenbereich
- perfektes Schwarzkörper-Spektrum: Temperatur  $T = 2.73 \text{ K}$
- extrem isotrope Verteilung: Inhomogenitäten  $\Delta T/T < 10^{-5}$



Penzias' und Wilson's Antenne



... und ihr Instrument gegen "white dielectric material"



# KOSMISCHE HINTERGRUNDSTRAHLUNG

## Schwarzkörperpektrum:

$$R(\lambda) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

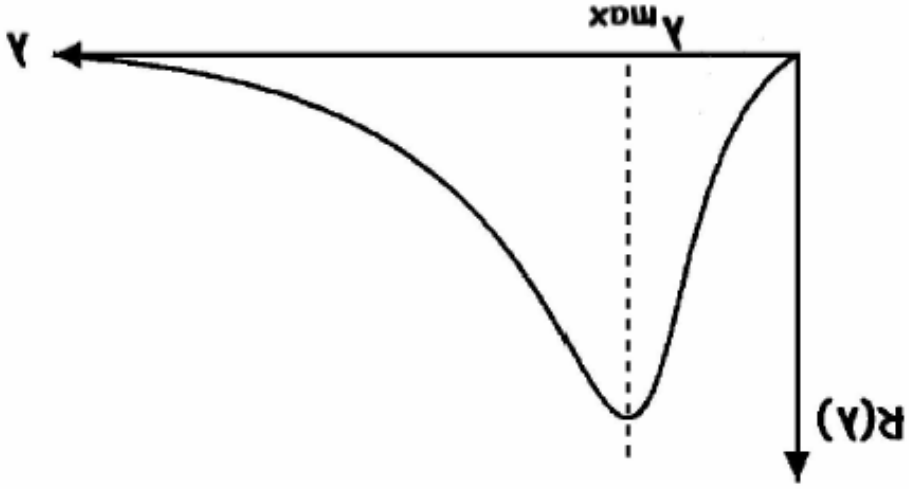
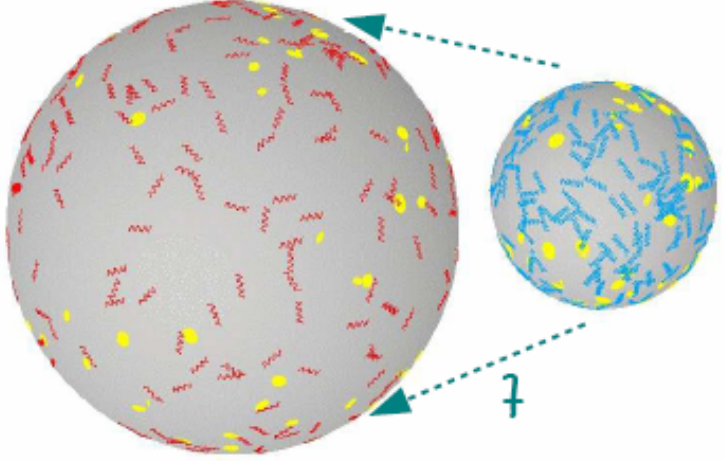
- $\lambda_{\max} \cdot T = \text{konstant}$

## Expansion des Universums:

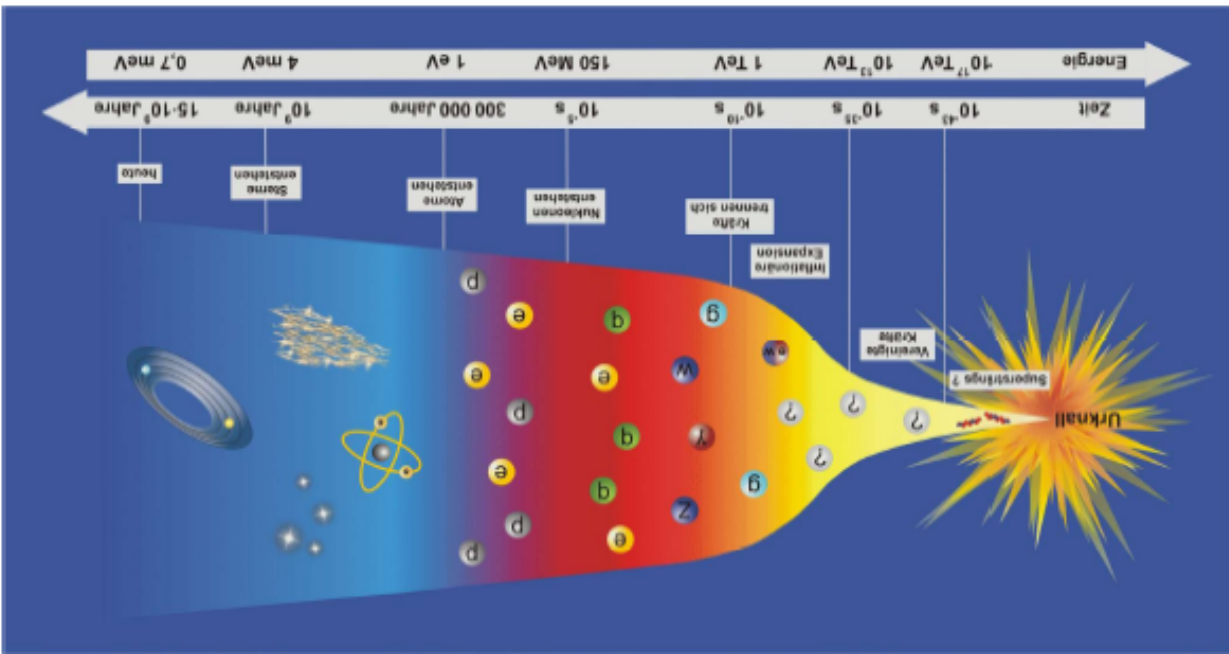
- Wellenlänge  $\lambda$  der Photonen nimmt zu
- Energie  $E = h\nu$  der Photonen nimmt ab
- Temperatur  $T$  nimmt ab

## => Kosmische Hintergrundstrahlung:

- Überbleibsel hochenergetischer Röntgen-Strahlung: "Echo des Urknalls" (Vernichtungs-Strahlung)



- Urknall vor  $\sim 15 \times 10^9$  Jahren: Beginn von Raum und Zeit
- Singularität: unendlich hohe Energiedichte und Temperatur
  - danach: Universum expandiert und kühlt sich dabei ab
  - Physik des Universums zu jeder Zeit bestimmt durch die herrschende Dichte und Temperatur (Energie der Photonen)



# GESCHICHTE DES UNIVERSUMS



# GESCHICHTE DES UNIVERSUMS

- Quanten-Effekte in der Gravitation

$$t \lesssim 10^{-43} \text{ s} \Leftrightarrow T \gtrsim 10^{32} \text{ K} \quad [10^{19} \text{ GeV}]$$

spielen wichtige Rolle

=> unsere Naturgesetze brechen zusammen

$$t \approx 10^{-43} \text{ s} \Leftrightarrow T \approx 10^{32} \text{ K}$$

- alle Wechselwirkungen sind gleich stark (grosse Vereinheitlichung)
- alle elementare Teilchen sind erzeugt:
  - Quarks, Leptonen, Eichbosonen, Higgs ?, ...

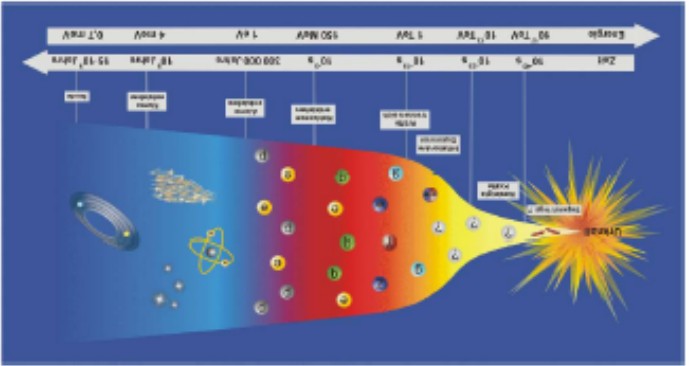
- Teilchen sind in statistischem Gleichgewicht mit elm. Strahlung: für  $E > 2 \cdot M_x$

- Paarerzeugung:  $\gamma + \gamma \rightarrow$  Teilchen + Antiteilchen

- Annihilation: Teilchen + Antiteilchen  $\rightarrow 2 \gamma$

- für  $E > 2 \cdot M_x$  "ausfrieren"  $\rightarrow$  keine Paarbildung nur Zerstrahlen - falls Teilchen Antiteilchen-Symmetrie exakt bleibt keine Materie übrig!

$$k_B = 8.610^{-5} \text{ eV/K} \rightarrow T = 300 \text{ K} \sim 1/40 \text{ eV}$$



# GESCHICHTE DES UNIVERSUMS

$$t \approx 10^{-35} \text{ s} \Leftrightarrow T \approx 10^{27} \text{ K}$$

- inflationäre Expansion um Faktor  $\sim 10^{50}$

- verursacht durch GUT Symmetriebrechung ?

$$t \approx 10^{-11} \text{ s} \Leftrightarrow T \approx 3 \times 10^{15} \text{ K} \quad [\sim 250 \text{ GeV} - \text{LEP/TeVatron}]$$

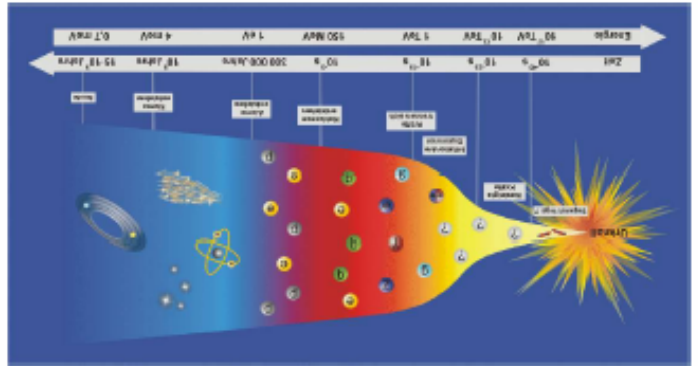
- Symmetriebrechung zwischen elm. und schwacher Wechselwirkung - Masse der Eichbosonen ( $W^\pm$  und  $Z^0$ ) beginnt wichtig zu werden

**Baryogenese:** => kleiner Überschuss von Materie über Antimaterie

$$t \approx 10^{-5} \text{ s} \Leftrightarrow T \approx 2 \times 10^{12} \text{ K}$$

- Quarks in Hadronen gebunden  $[\sim 2 \text{ GeV}]$

CP Verletzung  
Baryonen-Zahl Verletzung



# GESCHICHTE DES UNIVERSUMS

$$t \approx 10^{-5} \text{ s} \Leftrightarrow T \approx 10^{13} \text{ K: } [\sim \text{GeV}]$$

$p + \bar{p} \rightarrow \text{Hadronen} <-\gamma, s, \dots$  aber  $\cancel{p + \bar{p}}$

• Protonen/Antiprotonen annihilieren

• Kleiner Überschuss an Protonen bleibt übrig ( $\approx 1 \text{ Baryon} / 10^9 \text{ Photonen}$ )

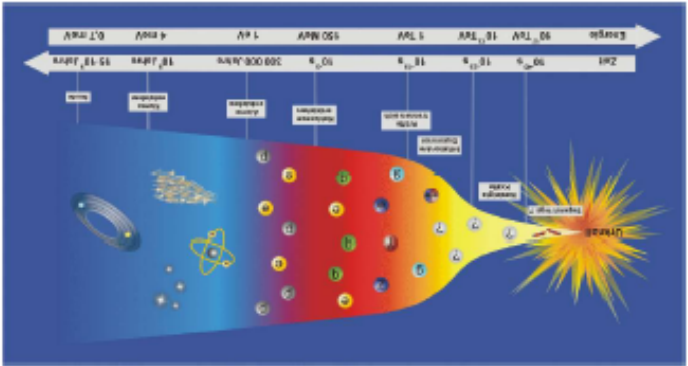
warum???

$$t \approx 1 \text{ s} \Leftrightarrow T \approx 10^{10} \text{ K: } [\sim \text{MeV}]$$

$p + e^- \cancel{\rightarrow} n + \bar{\nu}_e$  und  $n + e^+ \cancel{\rightarrow} p + \bar{\nu}_e$

• Teilchendichte zu klein, schwache Wechselwirkung "friert aus"

- Verhältnis Protonen / Neutronen  $\approx 6 / 1$



# GESCHICHTE DES UNIVERSUMS

$t \approx 100 \text{ s} \Leftrightarrow T \approx 10^9 \text{ K}$ : [0.1 MeV]

$e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$  aber  $\cancel{\gamma + \gamma \rightarrow e^+ + e^-}$

• Elektronen/Positronen annihilieren,

kleiner Überschuss an Elektronen

• Nukleosynthese = Entstehung der leichtesten Atomkerne beginnt  
 $p + n \rightarrow {}^2\text{H} + \gamma$  (Bindungsenergie von Deuterium: 2.2 MeV)

$t \approx 1000 \text{ s} \Leftrightarrow T \approx 4 \times 10^8 \text{ K}$ :

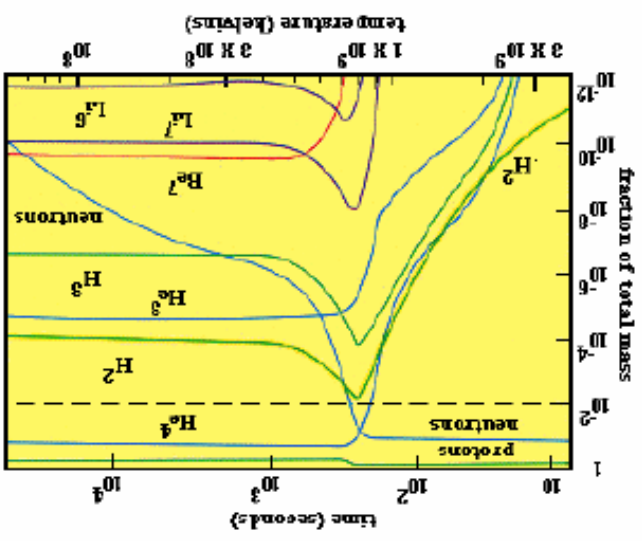
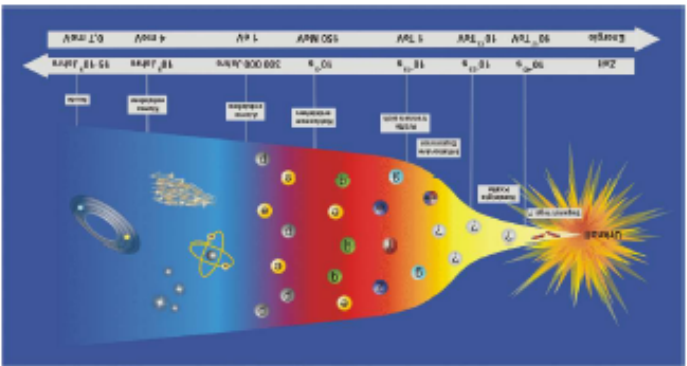
• Nukleosynthese leichter Kerne abgeschlossen

• Universum besteht aus:

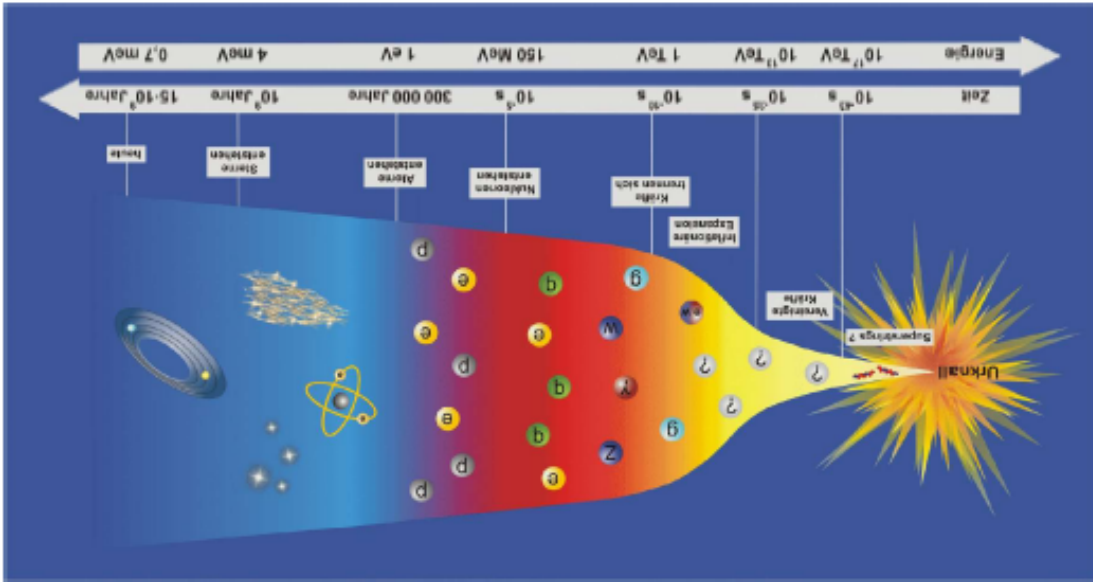
76 % Protonen, 24 %  ${}^4\text{He}$ ,  $-10^{-5} {}^3\text{He}$ ,  $-10^{-10} \text{Li}$ !

• schwerere Kerne erst später erzeugt

(Kernfusion in Sternen + Supernovae)



- $t \approx 300.000 \text{ Jahre} \Leftrightarrow T \approx 3000 \text{ K: } [\sim \text{eV}]$
- Energie der Photonen kleiner als Ionisationsenergie von Atomen
  - Materie und elm. Strahlung "entkoppeln" voneinander
  - Universum für Photonen "durchsichtig" => Kosmische Hintergrundstrahlung
  - Wechselwirkung zwischen Materie dominiert durch Gravitation
- => Bildung von Sternen, Galaxien etc.



# GESCHICHTE DES UNIVERSUMS

# KRITISCHE DICHT

## Klassische Betrachtung:

- betrachte Testmasse  $m$  im Gravitationsfeld einer Masse  $M$ :

- Fluchtgeschwindigkeit:  $\frac{1}{2} m v^2 > \frac{G M m}{r}$

- Hubble:  $v = H r$ , homogene Massenverteilung:  $M = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho$

- => Kritische Massendichte:  $\rho_c = \frac{3 H^2}{8 \pi G}$

Korrekte Rechnung in ART ergibt gleiches Resultat:

- => Kritische Energiedichte:  $\rho_c = \frac{3 H^2 c^2}{8 \pi G}$

Definition:  $\Omega = \rho / \rho_c = \text{Energiedichte} / \text{Kritische Dichte}$

# ZUKUNFT DES UNIVERSUMS

$\Omega > 1$ : "offenes Universum"

• Expansion des Universums setzt

sich in alle Ewigkeit fort

• Raum-Zeit Geometrie ist hyperbolisch

$\Omega > 1$ : "geschlossenes Universum"

• Expansion kommt zum Stillstand,

Universum kollabiert wieder

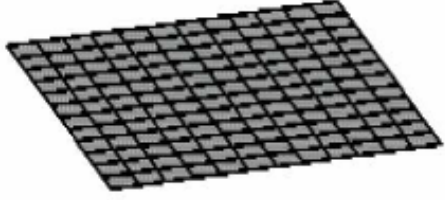
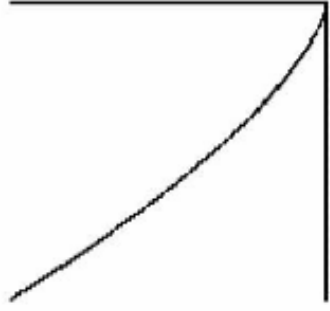
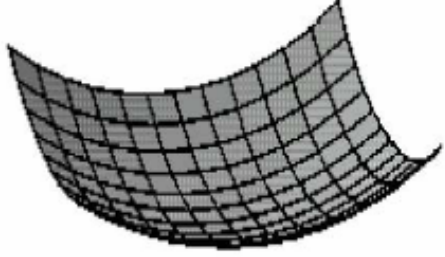
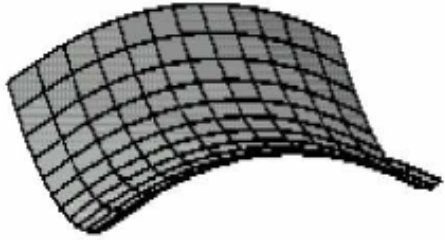
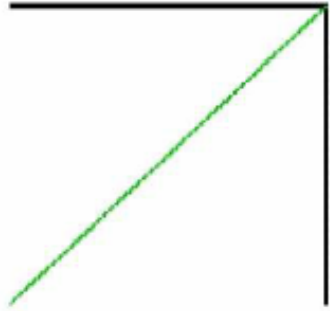
• Raum-Zeit Geometrie ist sphärisch

$\Omega = 1$ : "flaches Universum"

• Expansion kommt asymptotisch zum

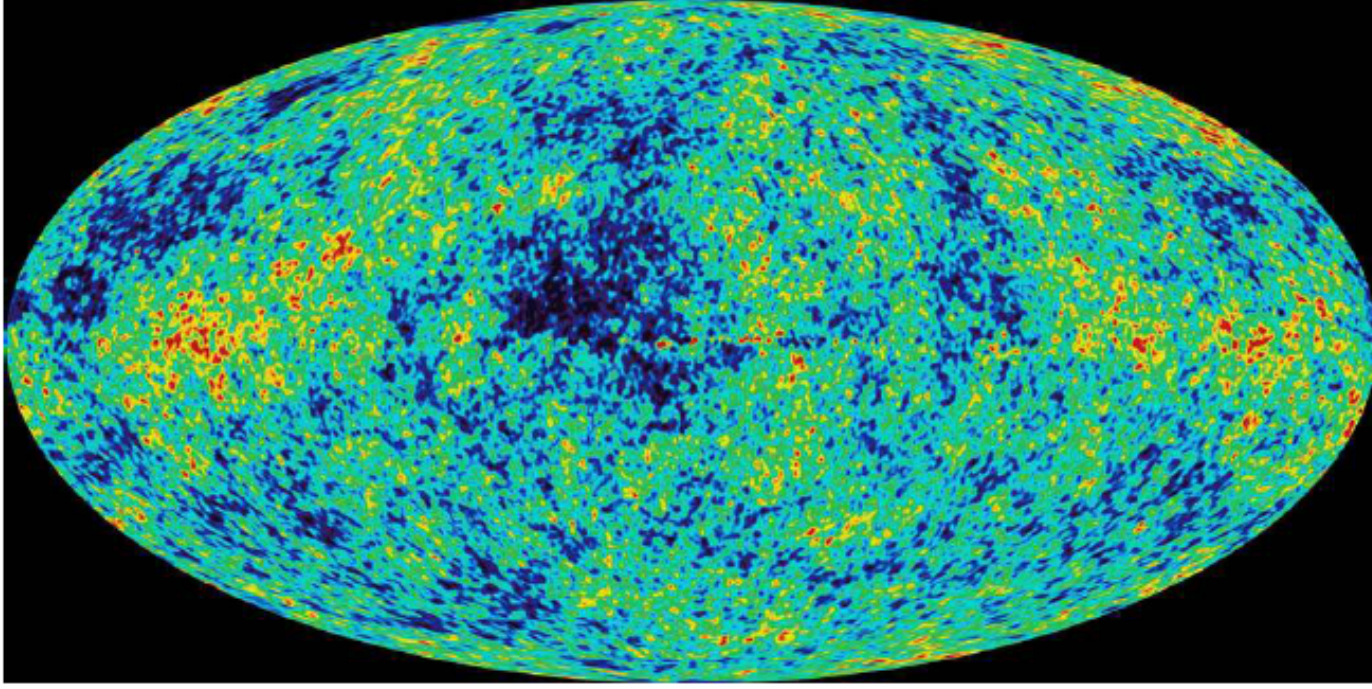
Stillstand, kein Kollaps

• Raum-Zeit Geometrie ist flach

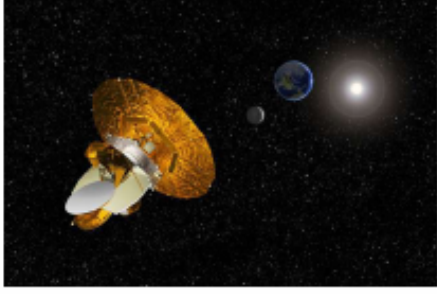


# MESSUNG DER ENERGIEDICHTE $\Omega$

WMAP: messe Anisotropie der kosmischen Hintergrundstrahlung \*)



- Temperaturschwankungen  $\pm 30 \mu\text{K} \Rightarrow \Delta T / T \approx 10^{-5}$
- Ursprung: Dichteschwankungen im frühen Universum  
höhere Dichte  $\Leftrightarrow$  höhere Temperatur



\*) nach Abzug der Dipolkomponente (Bewegung relativ zum CMS Urknall !)



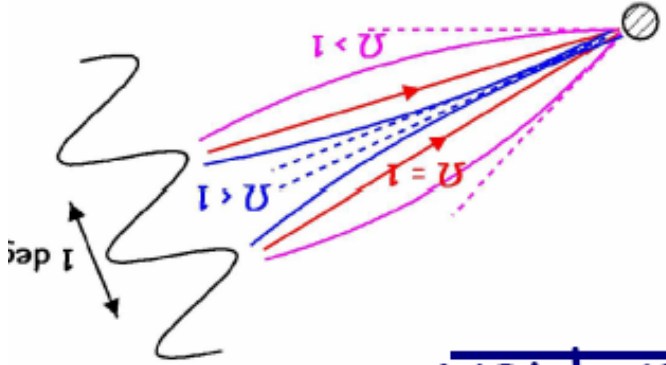
# MESSUNG DER ENERGIEDICHTE $\Omega$

Messe Winkelausdehnung der Anisotropien:

- Dichteschwankungen periodisch (Schallwellen)
- Ausbreitung elm. Strahlung nach Entkopplung:

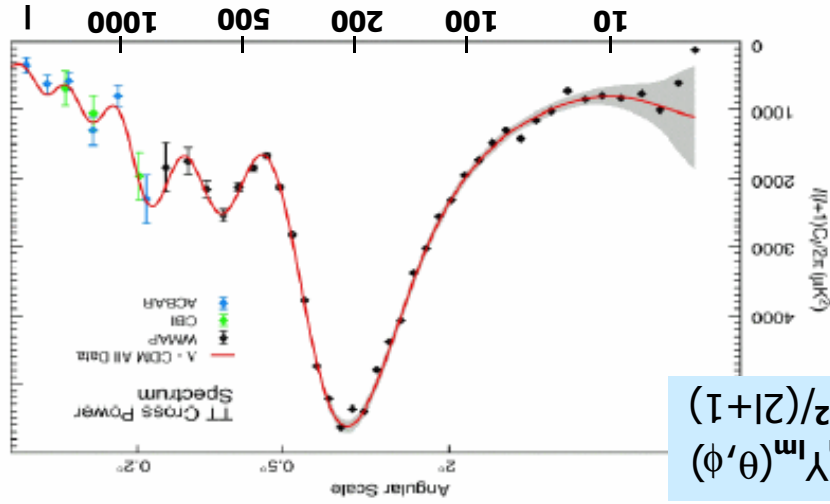
=> Krümmung des Universums

=> Winkelausdehnung abhängig von  $\Omega$



$$\delta T = \sum_{l,m} a_{lm}^T(\theta, \phi)$$

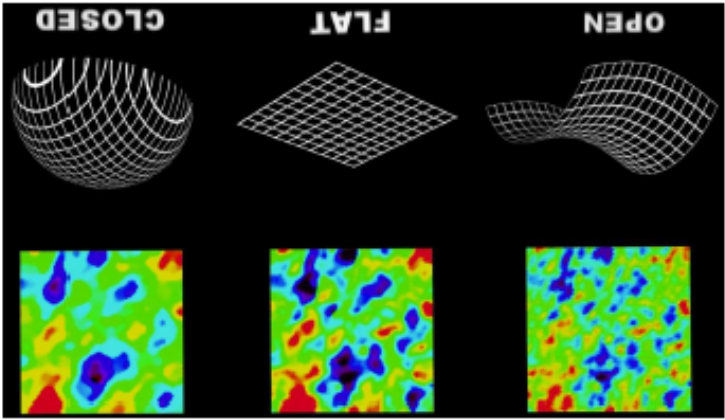
$$C_l = |a_{lm}^T|^2 / (2l+1)$$



$$\Omega = 1.02 \pm 0.02$$

Resultat:

Universum ist flach!



# INFLATIONSMODELL

## Warum flaches Universum?

- Zufall ???

aber: Dichte im jungen Universum  
müsste extrem genau stimmen ...

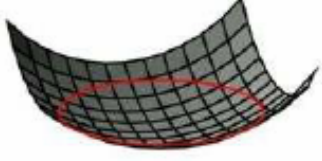
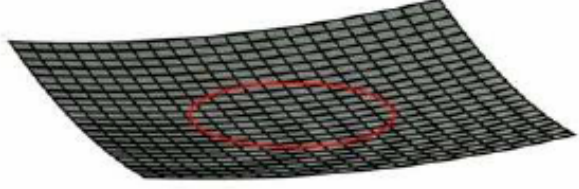
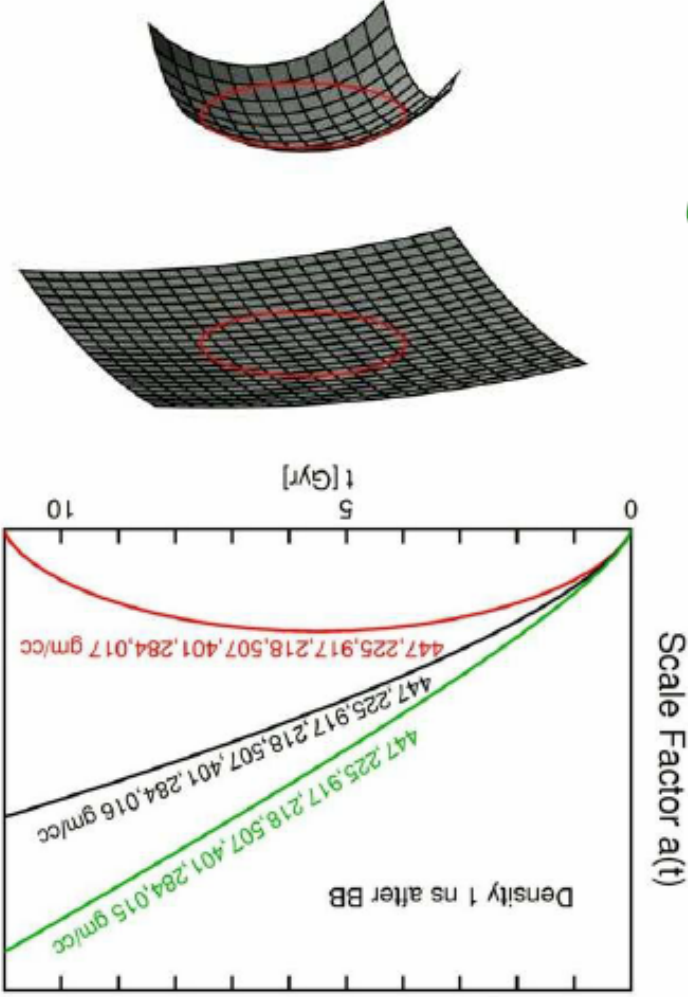
(z.B. nach 1 ns auf  $1 / 10^{23}$ )

## Elegantere Erklärung:

- ca  $10^{-35}$  s nach Urknall kurze Phase  
inflationärer Expansion um Faktor  $\sim 10^{50}$
- sichtbarer Teil des Universums kleiner  
Ausschnitt des ursprünglichen Raumes\*)

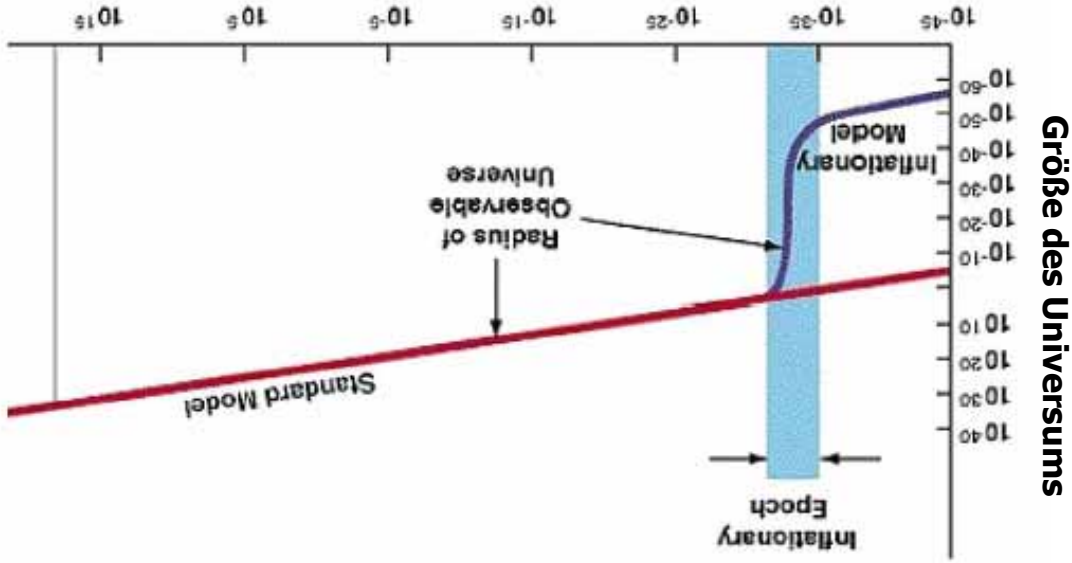
=> erscheint uns flach, unabhängig von tatsächlicher Krümmung

(Erinnerung: Aufblasen eines Ballons) \*) viele Universen mit denen wir keinen Kontakt?



# INFLATIONSMODELL

## Woher inflationäre Expansion?

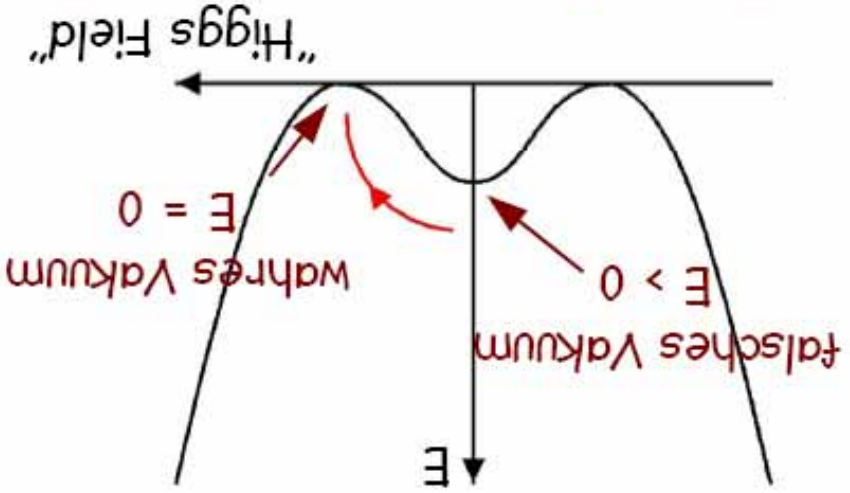


- Universum ursprünglich in "falschem Vakuum" = labilem Gleichgewicht
- Kleiner Teil fällt in "wahres Vakuum" (durch Quanten-Fluktuation)
  - => wahres Vakuum expandiert sehr schnell in falsches Vakuum
  - => Energie wird freigesetzt => sehr schnelle Expansion

\*) um 50 Größenordnungen in  $10^{-32}$  s

Siedeverzug

(vgl.: Higgs-Mechanismus)



# BARYONISCHE MATERIE

- leuchtende Materie

(Sterne, Galaxien, Gaswolken...)

$$\Rightarrow \Omega_L - 0.005$$

- Anisotropie der kosmischen

Hintergrundstrahlung

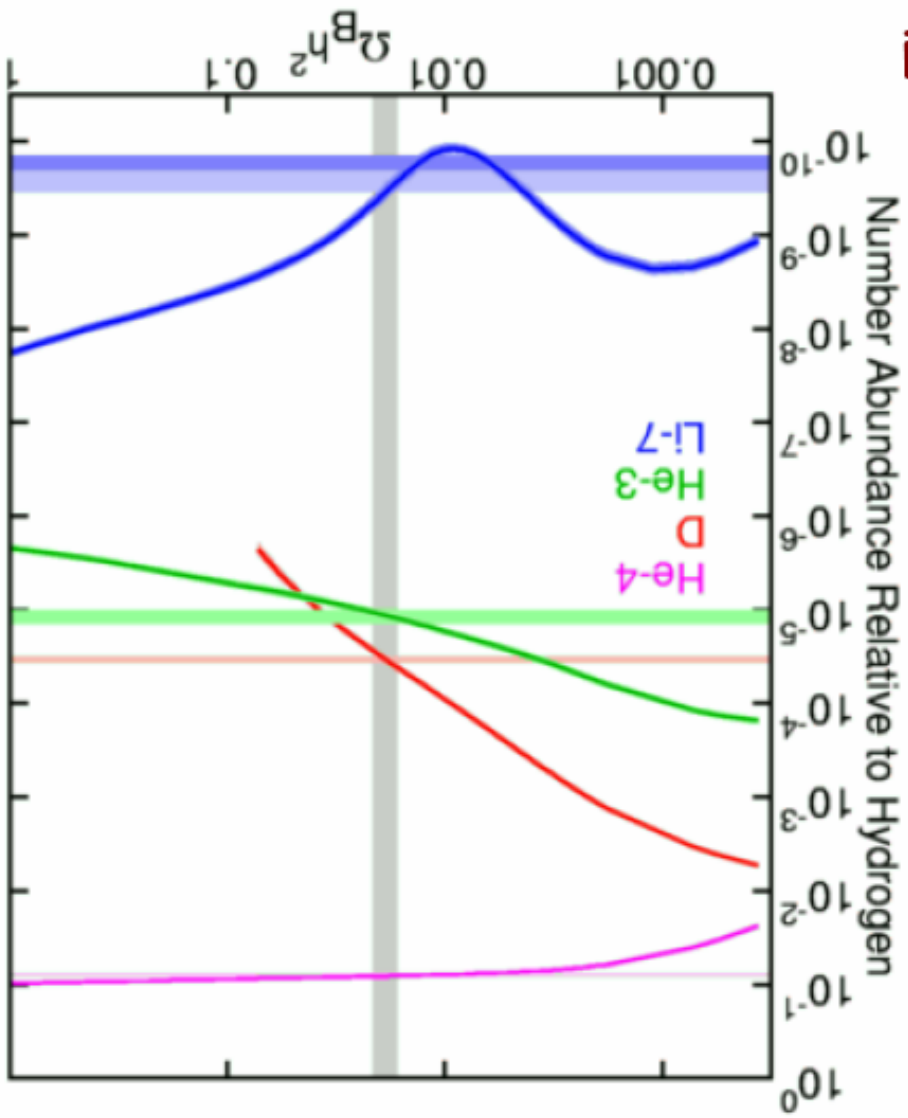
- Häufigkeit leichter Elemente

(aus Nukleosynthese)

$$\Rightarrow \Omega_B - 0.05$$

=> alles worüber wir das letzte halbe Jahr gesprochen haben, macht nur

5 % der Dichte des Universums aus !



# DUNKLE MATERIE

## Rotationskurven von Galaxien:

- messe Rotationsgeschwindigkeit der Sterne als Funktion des Abstands R vom Zentrum der Galaxie (erstmalig durch Zwicky, -1930)
- leuchtende Materie: vor allem im Zentrum der Galaxie konzentriert

=> Kepler:

$$\frac{GMm}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$$

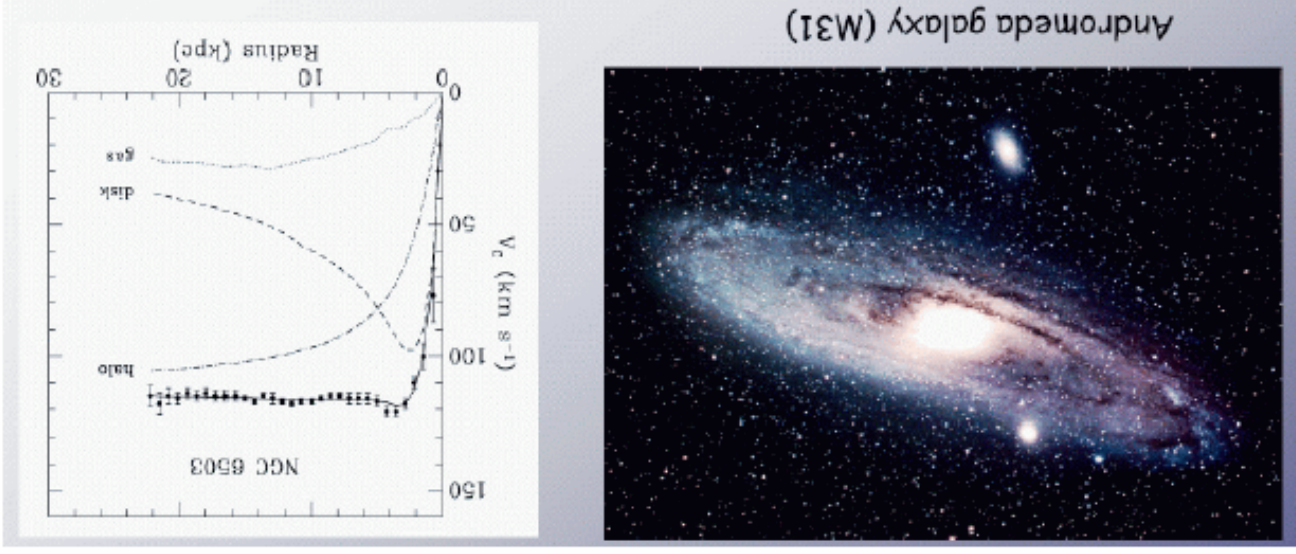
$$v^2 = \frac{GM}{r}$$

$$v \propto r^{-1/2}$$

Messungen:

v - konstant

=> unsichtbarer Halo aus "Dunkler Materie"

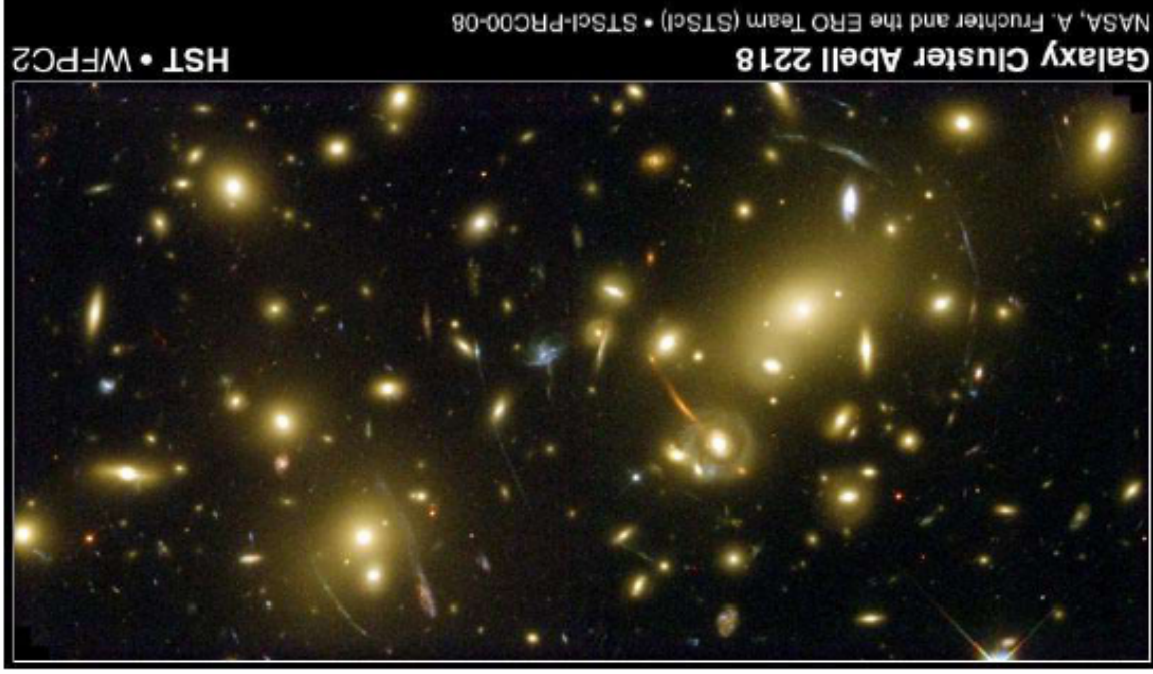
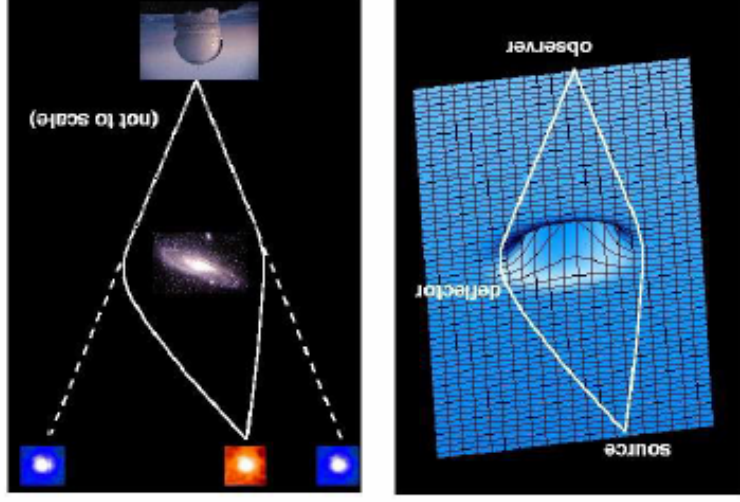


# DUNKLE MATERIE

## Gravitational Lensing:

- Ablenkung des Lichts einer entfernten Galaxie im Gravitationsfeld einer näheren Galaxie => sehe mehrfaches Bild der entfernten Galaxie
- bestimme Masse der näheren Galaxie aus Stärke der Ablenkung

=> grössere Masse als  
aus sichtbarer Materie



# WORAUS BESTEHT DIE DUNKLE MATERIE?

## Astronomische Objekte ?

- Braune Zwerge ?
- "Jupiters" ?
- super-massive schwarze Löcher?

## Elementarteilchen ?

- Neutrinos ? - höchstens 20 %
- "exotische" Teilchen ?

WIMPs: Weakly Interacting Massive Particle  
- müssen Masse haben  
- müssen el. neutral sein

grosse Anzahl Experimente  
Problem: sehr kleine WQ  
=> Produktion am LHC ?

höchstens 20 %

- Axionen (neutrale Bosonen, postuliert um CP-Verletzung zu erklären) ?
- LSP (lightest supersymmetric particle: Neutralino, Photino, Higgsino) ?

# BESCHLEUNIGTE EXPANSION

„Survey“ von Supernovae (Typ Ia):  
 • Explosionen alter „ausgebrannter“ Sterne:  
 => absolute Leuchtkraft gut verstanden

• messe Rotverschiebung

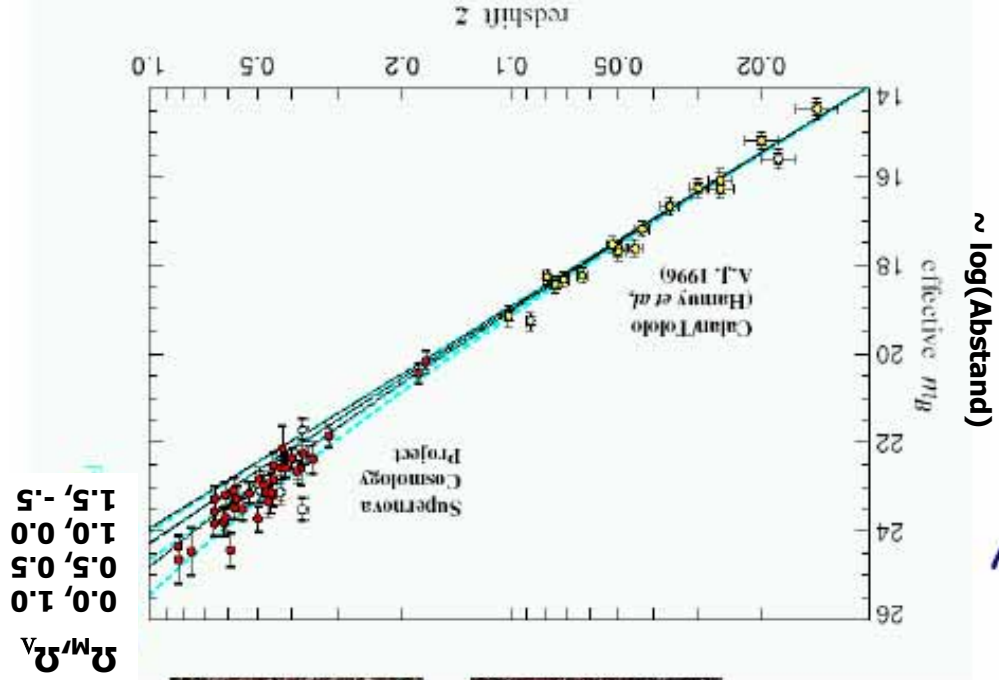
=> berechne Fluchtgeschwindigkeit  $v$   
 => berechne Entfernung  $d = v / H_0$

• messe Scheinbare Leuchtkraft:

=> kleiner als aus berechneter Entfernung erwartet

=> wahre Entfernung grösser

Interpretation: Expansionsgeschwindigkeit des Universums nimmt zu!

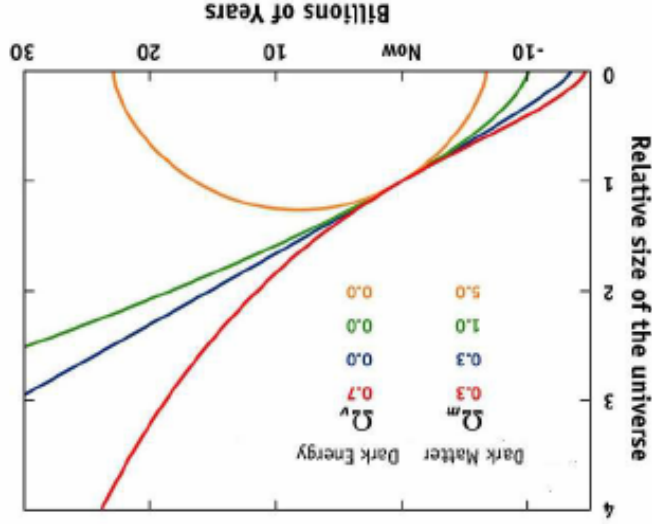




# DUNKLE ENERGIE

Beschleunigte Expansion => repulsive Kraft!

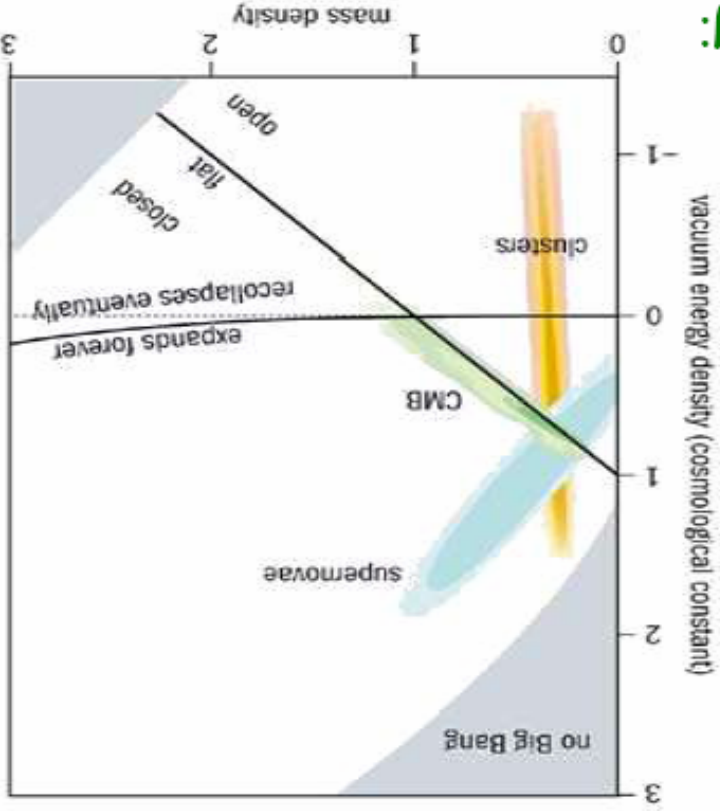
- Ursache: "Dunkle Energie" (= Einsteins kosmologische Konstante)
- keine Ahnung was Dunkle Energie ist ...



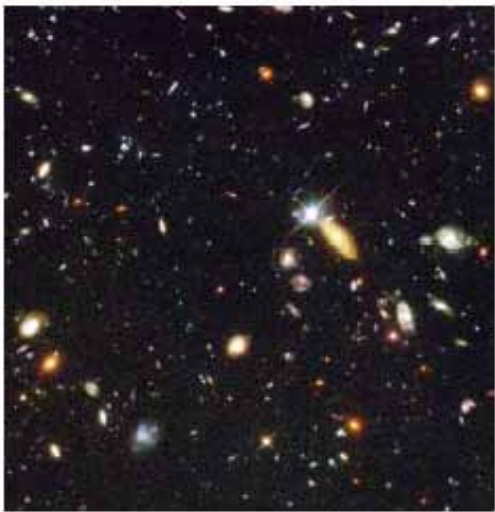
• Kombiniere Resultate aus Supernovae und

Anisotropie der kosm. Hintergrundstrahlung:

=> Dunkle Energie macht ~ 70 % der Energiedichte des Universums aus !!



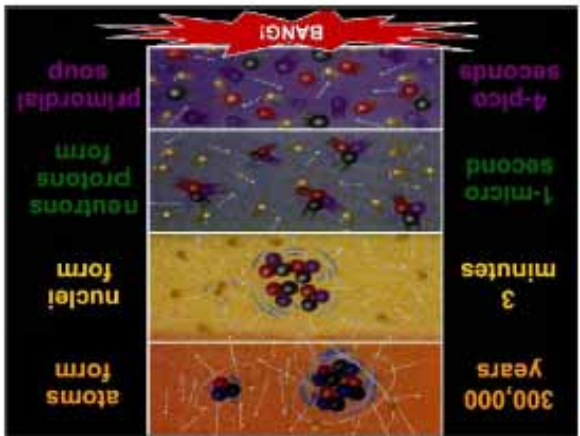
$\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau, e, \mu, \tau, \pi^+, \pi^-, K^+, K^-, \dots$



... Zukunft: ewige Ausdehnung, Kältetod

- 0.5 % leuchtende Materie
- 5 % Baryonische Materie
- 25 % Dunkle Materie
- 70 % Dunkle Energie

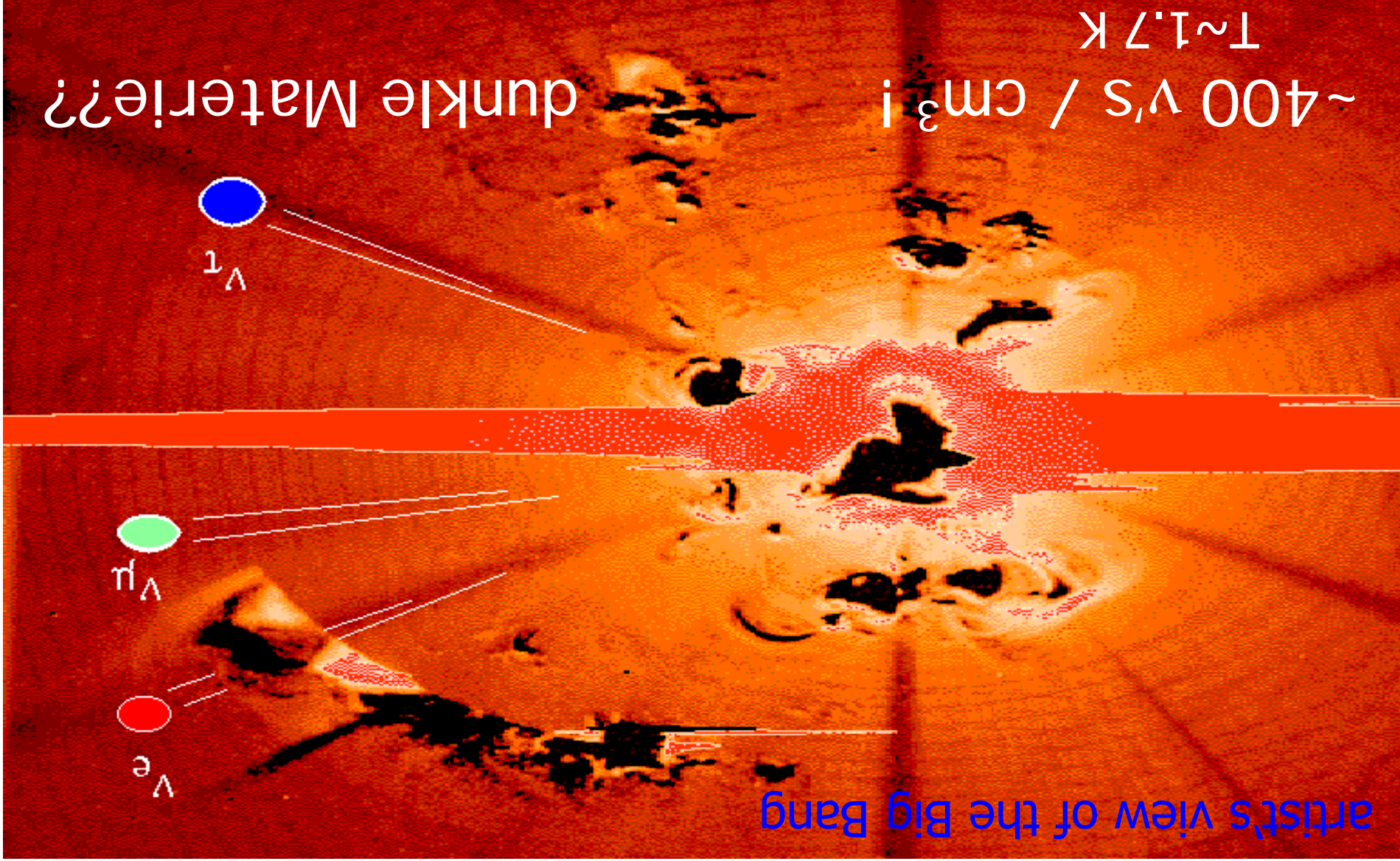
Heute: totale Energiedichte = kritische Dichte



- Urknall vor etwa  $15 \times 10^9$  Jahren
- danach Expansion und Abkühlung
  - kurze Phase inflationärer Ausdehnung
  - etwa  $10^{-35}$  s nach dem Urknall

# VERGANGENHEIT U. ZUKUNFT DES UNIVERSUMS

# Neutrinos in der Kosmologie



## Kosmologie + Teilchenphysik zur Zeit eines der spannendsten Gebiete der Grundlagenforschung – Gruppen von UNI-HH aktiv in dieser Forschung

- Universum dehnt sich aus → Standard Modell der Kosmologie: "Big Bang Modell"
- Dank unseres Verständnisses der Teilchen- und Kernphysik können wir die Entwicklung des Universums bis zu etwa  $10^{-11}$  Sekunden nach dem Urknall zurückverfolgen ( $T \sim 3 \cdot 10^{15}$  K oder  $\sim 250$  GeV)
- Extrapolation zu kürzeren Zeiten möglich mit Hilfe der Physik "jenseits des Standardmodells der Teilchenphysik" (Große Vereinigung – Quantengravitation)
- Enges Zusammenspiel von Teilchenphysik und Kosmologie – sowohl in den Methoden, als auch in Wissenschaft
- Seit > 10 Jahren kennen wir dank astro-physikalischer Messungen (Schwarzkörperstrahlung, Rotationskurven Galaxien, Gravitationslinsen, Supernovae mit großer Rotverschiebung, ...) die Zusammensetzung des Universums:
  - 5% "normale Materie" (diese Vorlesung)
  - 25% "dunkle Materie" (jenseits des SM ?)
  - 70% "dunkle Energie" (bisher gibt es nur Spekulationen um was es sich dabei handelt)

## Zusammenfassung Kapitel 9