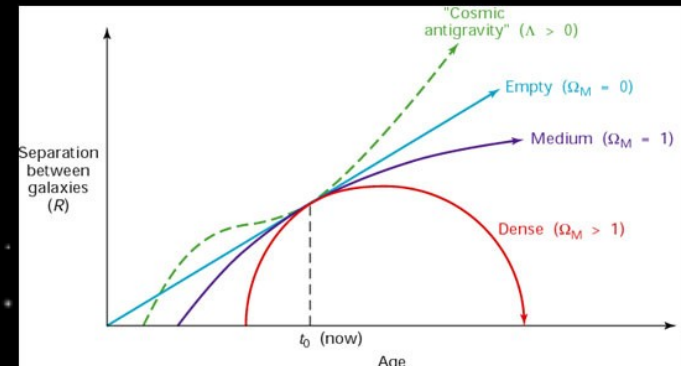
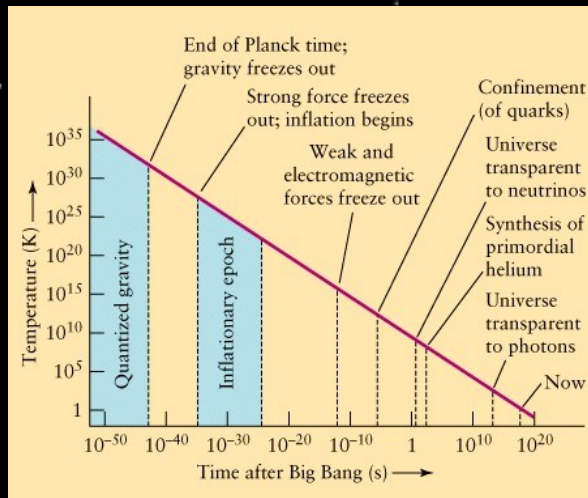
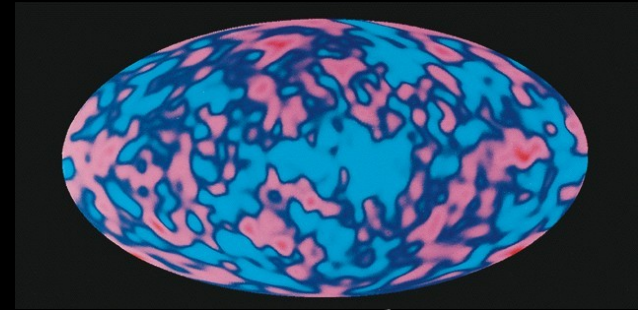
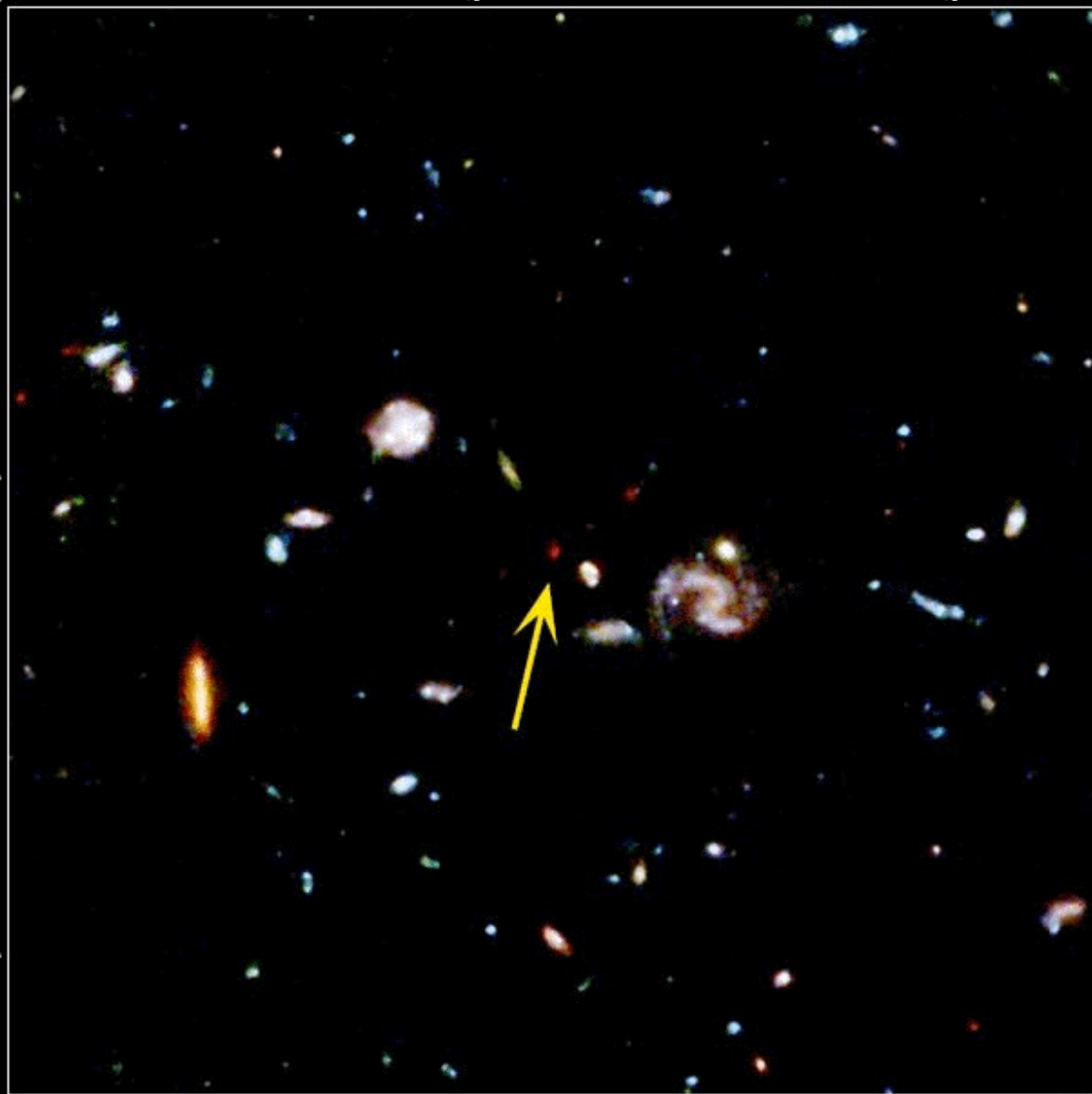


# Kosmologie

1. Einige Beobachtungen
  - a) Entfernte Galaxien
  - b) Homogen und Isotrop
  - c) Olbers Paradox
2. Die Entstehung des Universums
3. Kosmologische Parameter
4. Dunkle Energie



# Galaxien am Rande des Universums ?



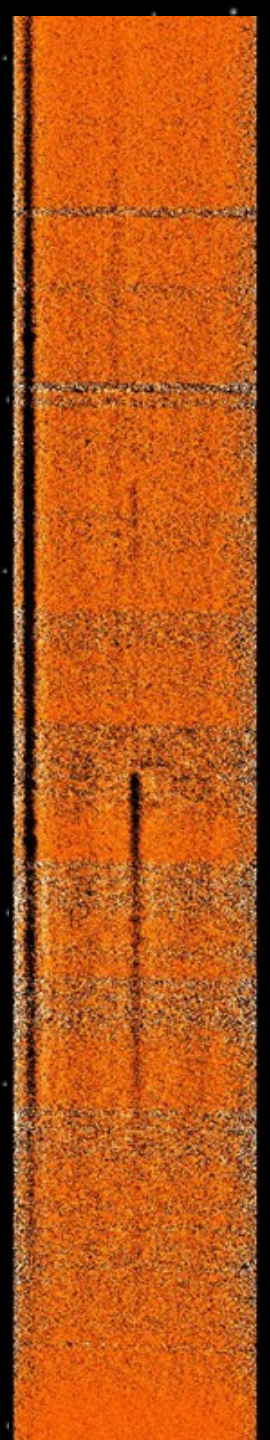
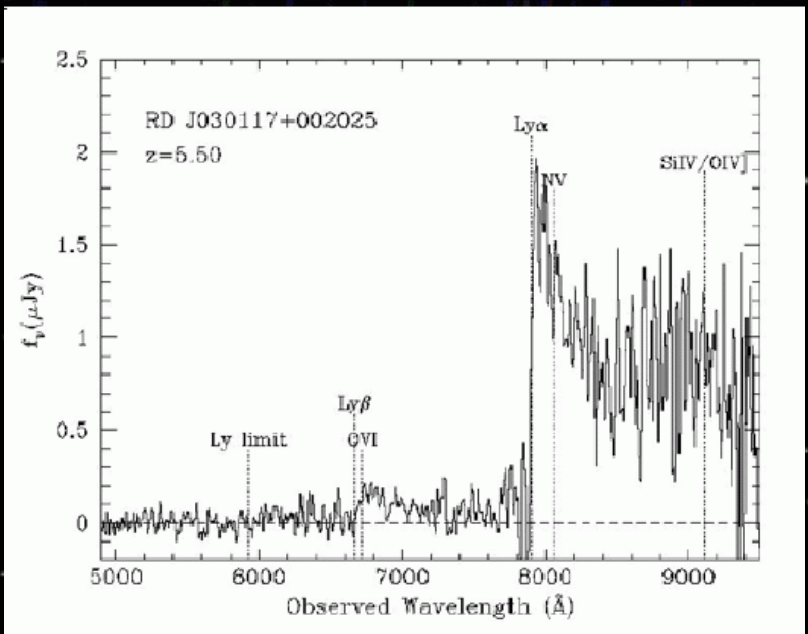
4 Gpc

Distant Galaxy in the Hubble Deep Field HST • WFPC2  
PRC96-24b • ST Scl OPO • June 26, 1996 • K. Lanzetta (SUNY Stony Brook) and NASA

# High z-Quasar vom 18.02.2000

$z = 5.5$

d.h. Ly $\alpha$  um 550%  
verschoben vom UV  
nach 8000 Å



# Rekord-Quasare und GRBs

SDSS J1030+0524       $z=6.28$       Mai 03

SDSS J1148+5251       $z=6.41$       Mai 03

SDSS J2329-0301       $z=6.43$       Juni 07

GRB 090423     $z=8.2$  (13,035 Mrd. L.Jahre) April 09

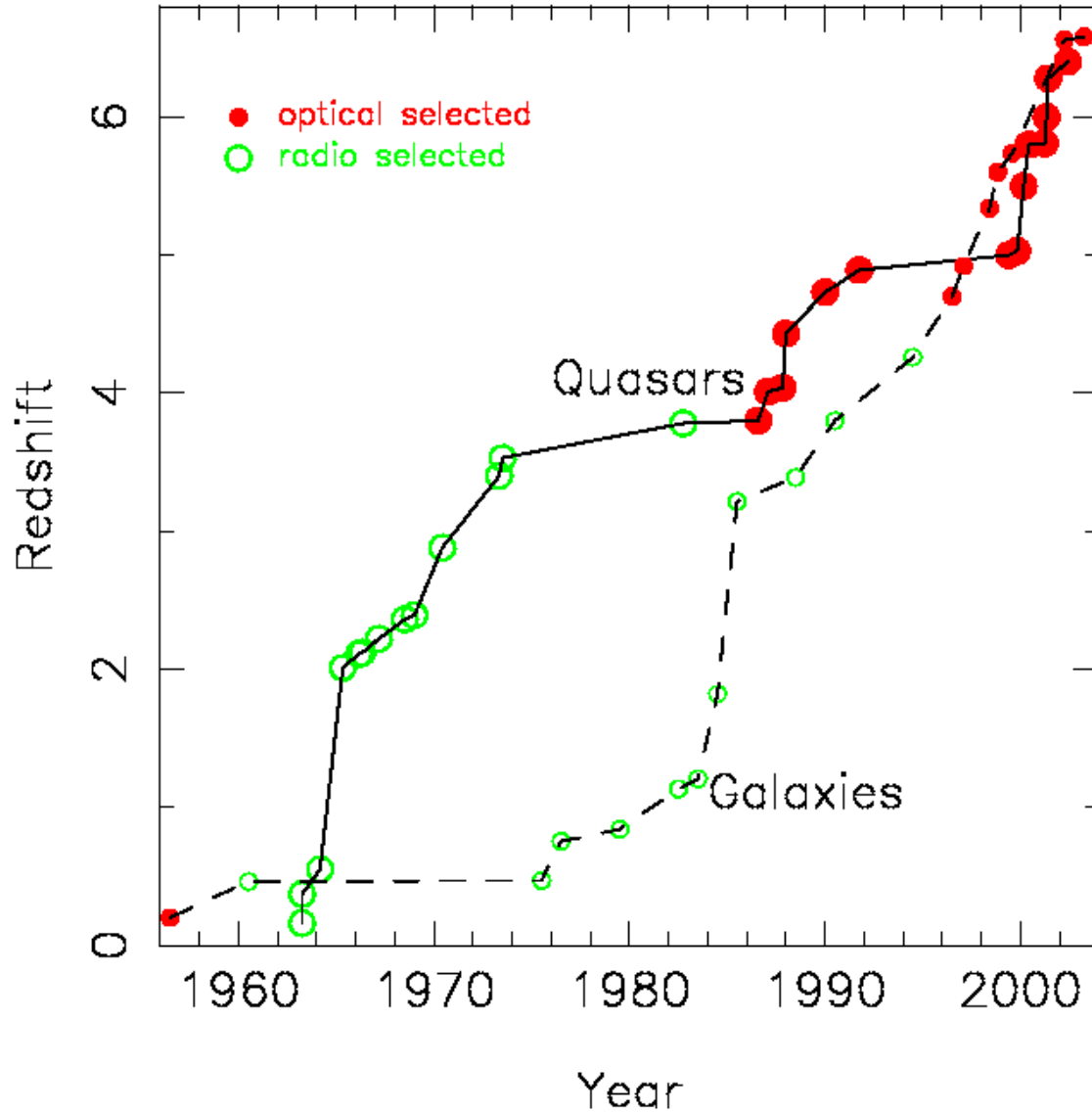
Rotverschiebung:  $z = \Delta\lambda/\lambda$

Relativistische Dopplerverschiebung:

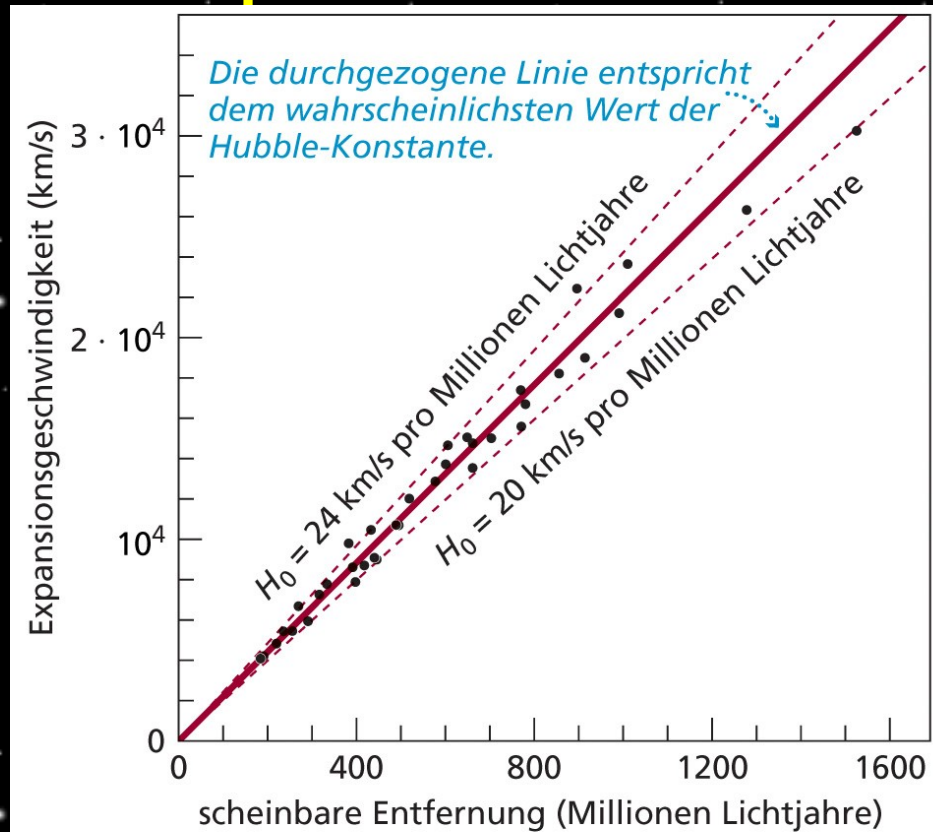
$$v/c = [(z+1)^2 - 1] / [c (z+1)^2 + 1]$$

# Exploring the Edge of the Universe

New  $z \sim 7$  galaxies



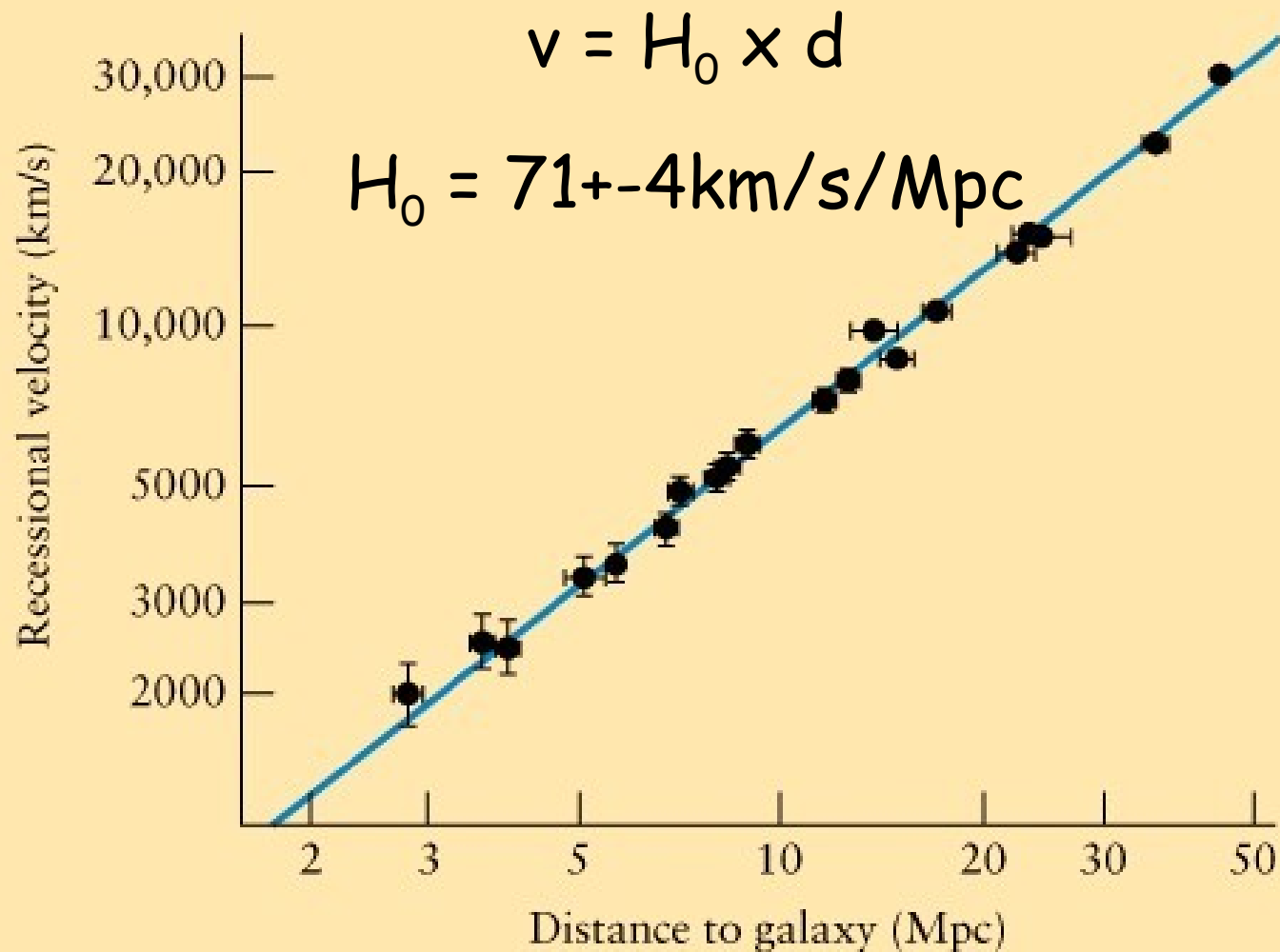
# Entfernungsmessung mit Typ Ia Supernovae



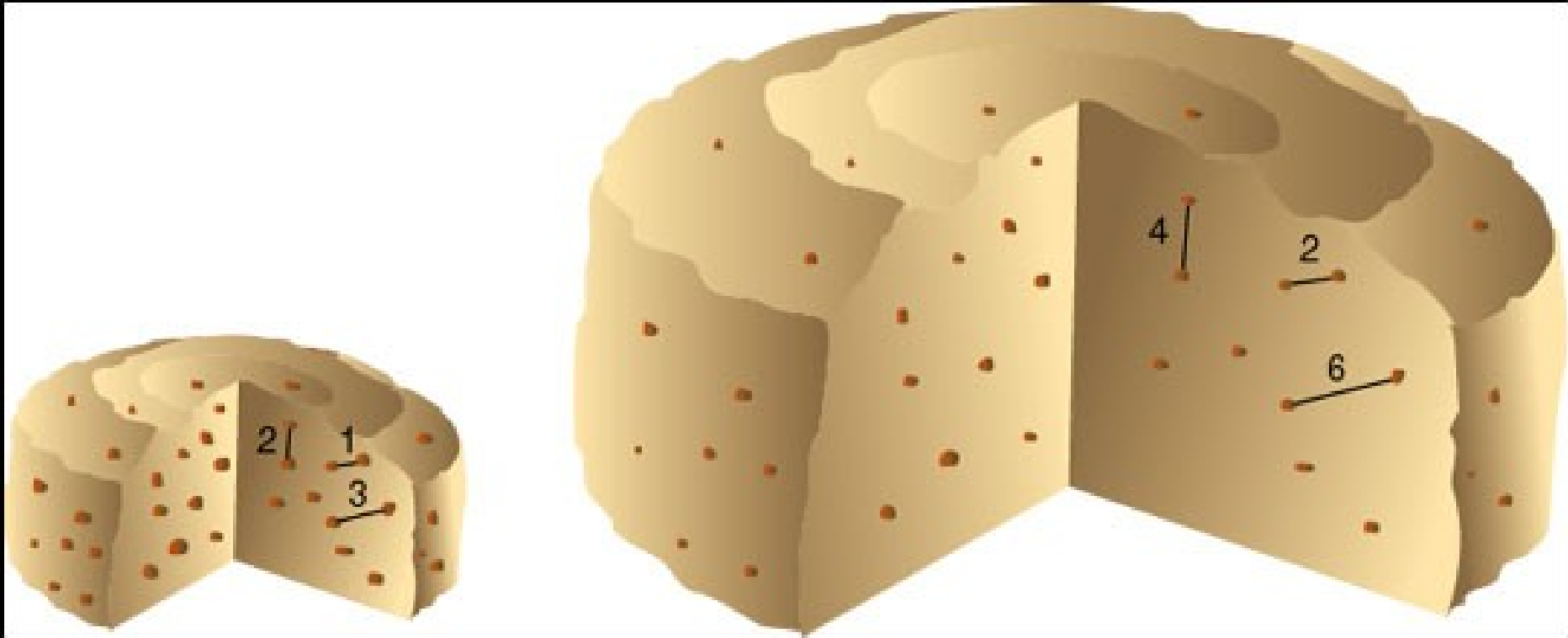
**Abbildung 20.21:** **IF** Typ Ia-Supernovae können eingesetzt werden, um das Hubble'sche Gesetz bis in sehr große Entfernungen zu untersuchen. Die Punkte in dieser Zeichnung zeigen die scheinbaren Entfernungen der Typ Ia-Supernovae in Abhängigkeit der Geschwindigkeiten, mit denen sich die Galaxien, in denen sie auftraten, von uns entfernen. Alle diese Punkte liegen in der Nähe einer geraden Linie; das zeigt, dass sich diese Supernovae gut als Standardkerzen eignen.



# Hubble Expansion



# Expansion des Universums





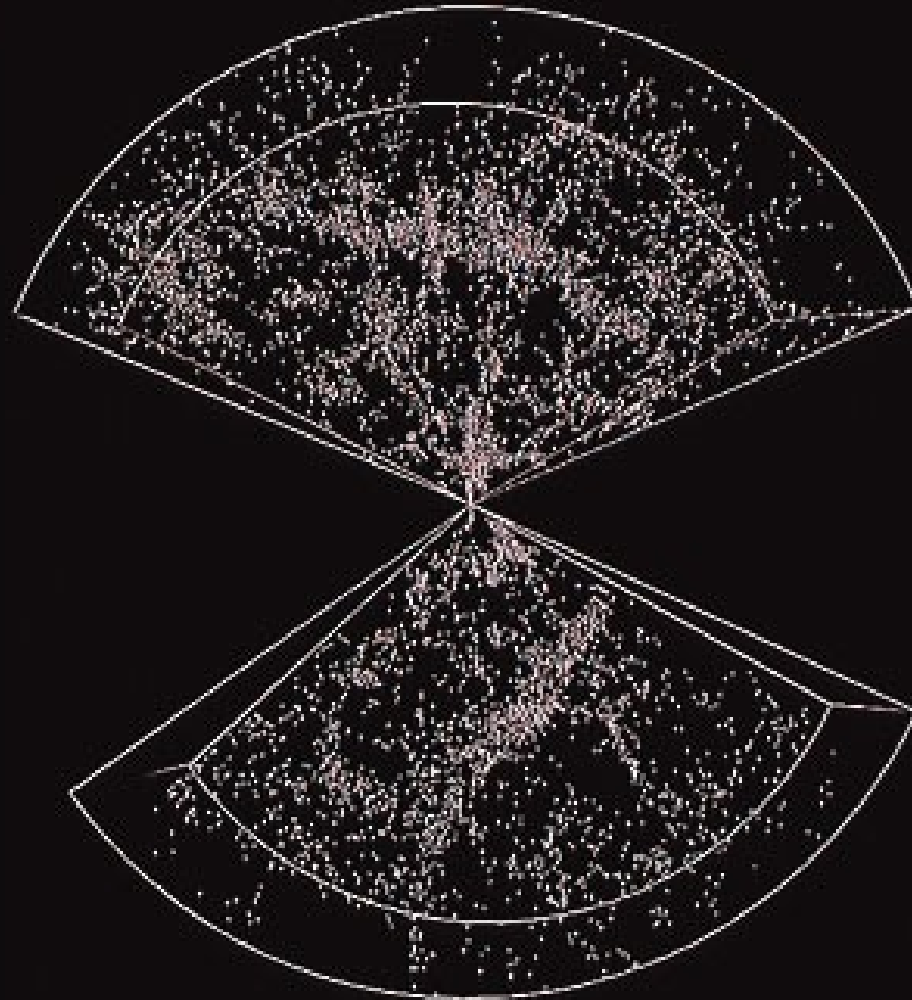
# Das Universum

The Cosmos: Astronomy in the New Millennium

By Pasachoff/Filippenko

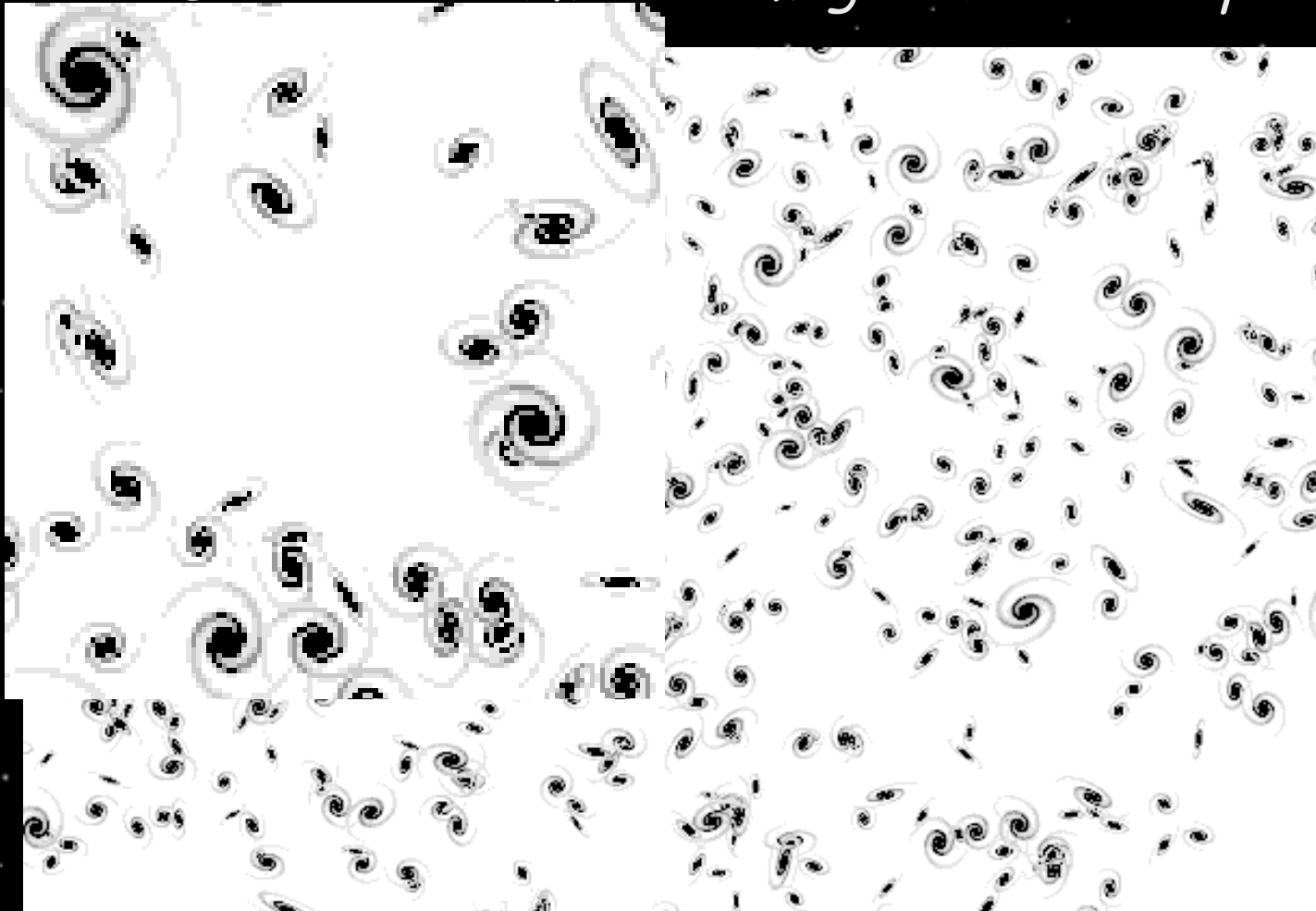
p8 third: slices of the Universe

Courtesy of Margaret Geller and John Huchra

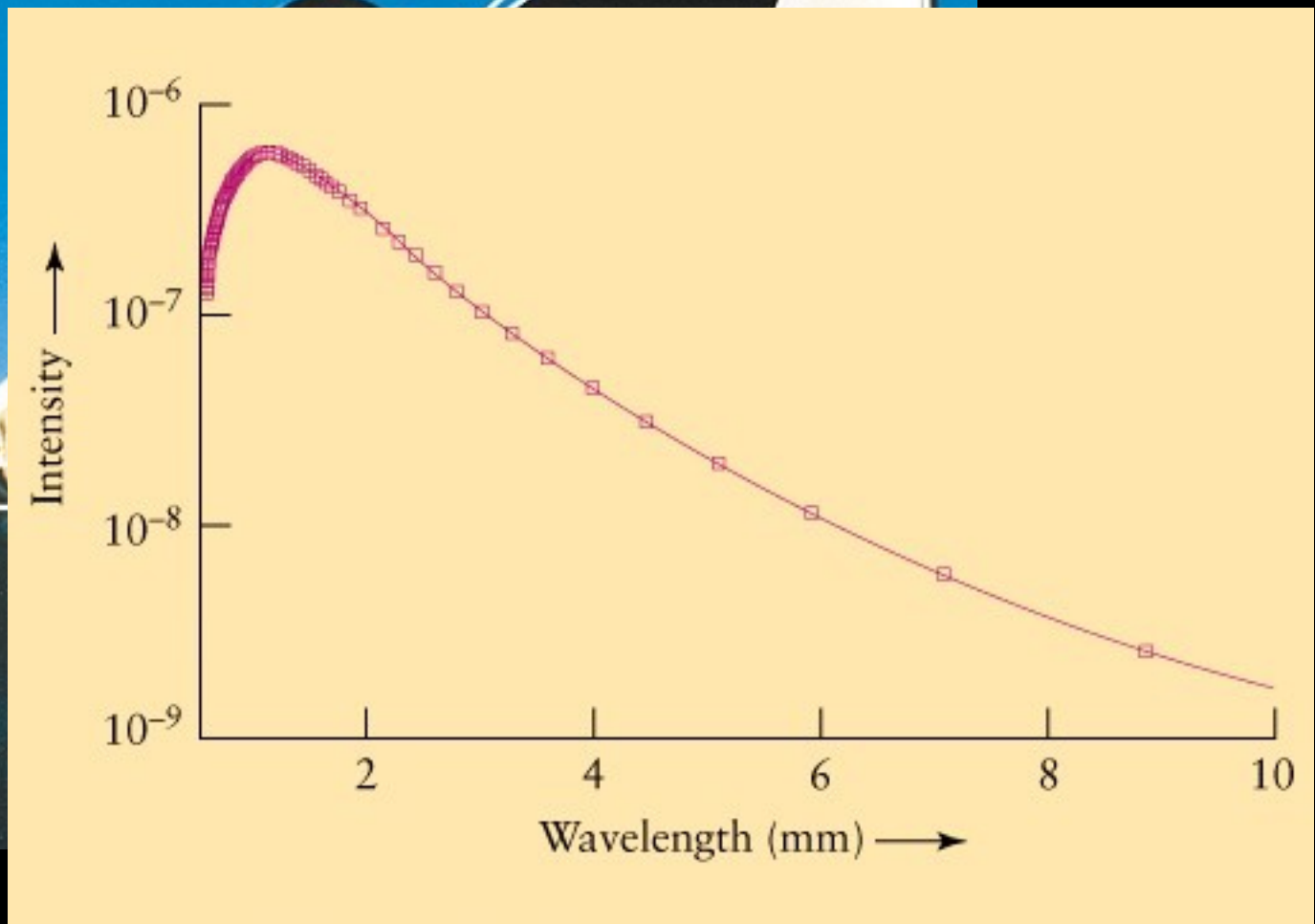
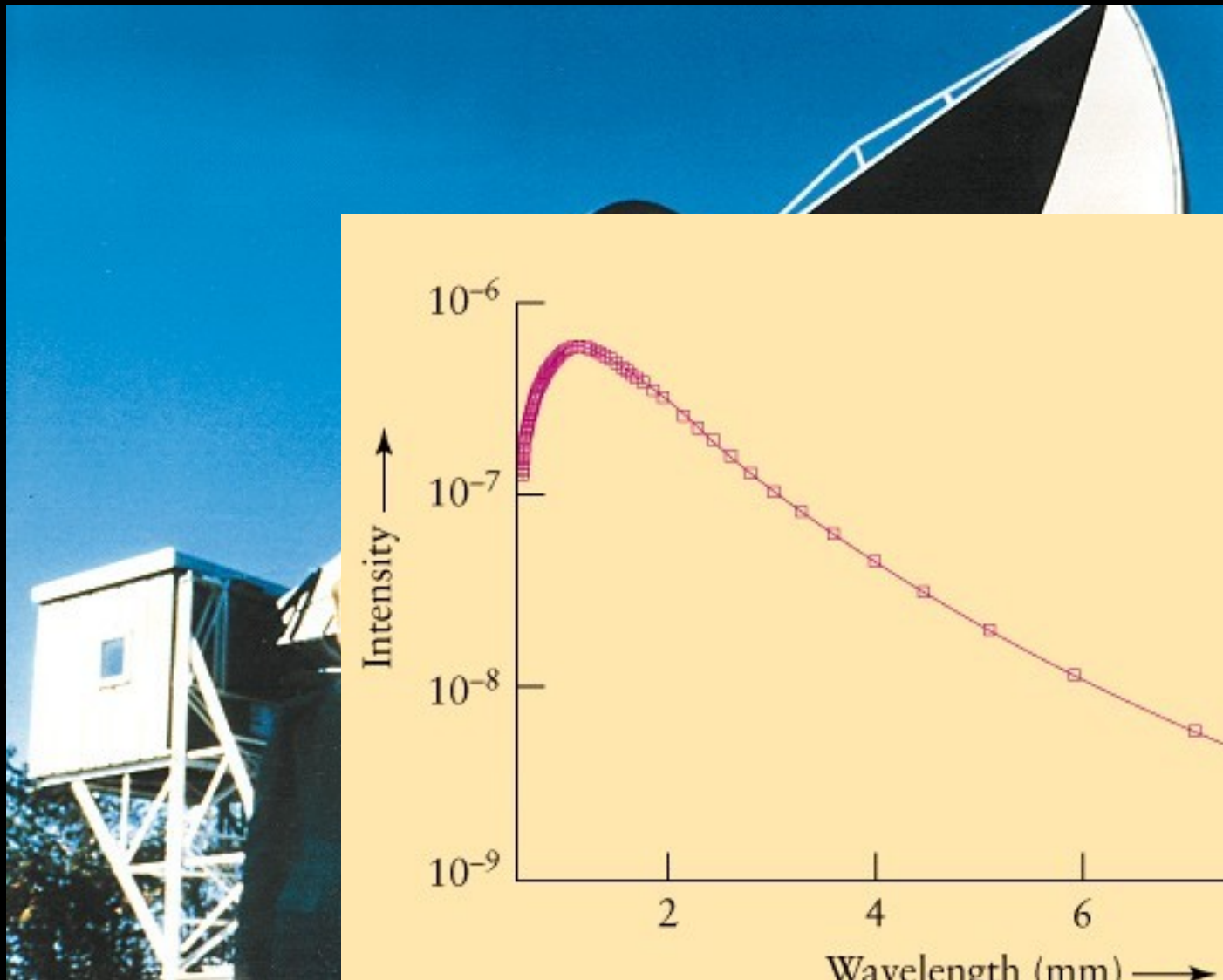


# Das kosmologische Prinzip

Das Universum ist *homogen* und *isotrop*



# Die Kosmische Hintergrundstrahlung

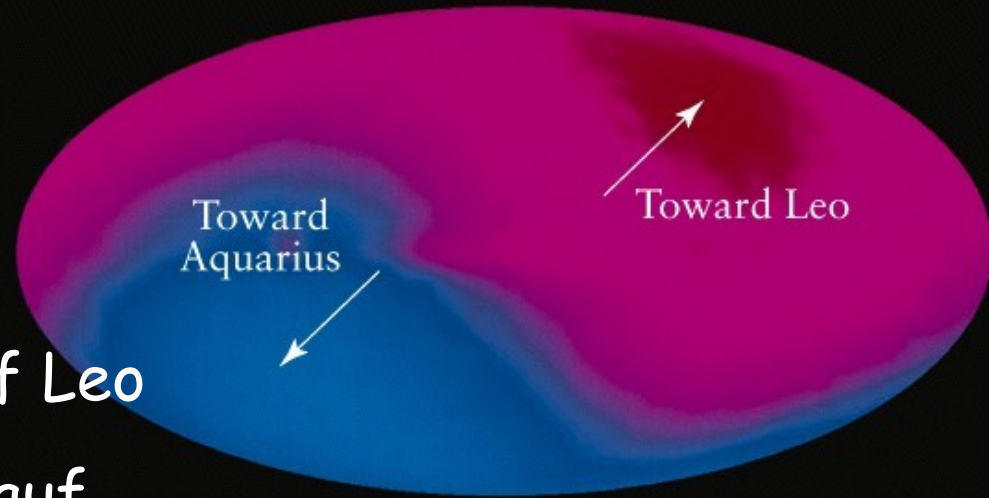


# Die Kosmische Hintergrundstrahlung



COBE  
1989-1994

$T = 2.73K$



Wir mit 390km/s auf Leo

MW mit 600km/s auf  
Shapley concentration



# Olbers Paradoxon



- das Universum ist endlich groß aber sehr alt
- das Universum ist unendlich groß aber nicht unendlich alt
- die Sterne leuchten über einen begrenzten Zeitraum ( $10^{12}$  J)

Es kann aber nicht zeitlich und räumlich unendlich sein!

# Beobachtungen und Kosmologie

## Beobachtungen:

- Rotverschiebung
- Homogene und isotrope Verteilung von Galaxien
- Kosmische Hintergrundstrahlung

## Kosmologie:

- Newton'sche Kosmologie
- Steady State Theorie
- Big Bang

# Newton'sche Kosmologie

Newton: Statisches Universum →  
Materie ist gleichmäßig verteilt

Für expandierendes Universum:

Bewegungsgleichung in allgemeinsten Form setzt  $H = H(t)$  und  
einen Verzögerungsparameter  $q_0$

(Gravitation zwischen den Galaxien) voraus.

Die Lösung eines solchen Ansatzes führt auf  
Weltmodelle, die von einer Singularität  
unendlicher Dichte aus entweder monoton  
expandieren oder periodisch oszillieren.

Statische Modelle sind als Lösung *nicht* möglich.

*Allerdings sind auch Lösungen mit  $v > c$  erlaubt!*



# Steady State Theory

Von Hoyle, Bondi & Gold

Das Universum dehnt sich für immer aus  
Neue Materie entsteht dazwischen,  
Das neue Galaxien bildet.

# Einsteins Kosmologie

Die relativistische Feldtheorie der Gravitation erlaubt nun zeitabhängige Geometrie und damit gekrümmte expandierende Räume.

Die *relativistische Kosmologie* ist die erste Theorie, die eine in sich konsequente und widerspruchsfreie Beschreibung der Welt als *Ganzes* ermöglicht!

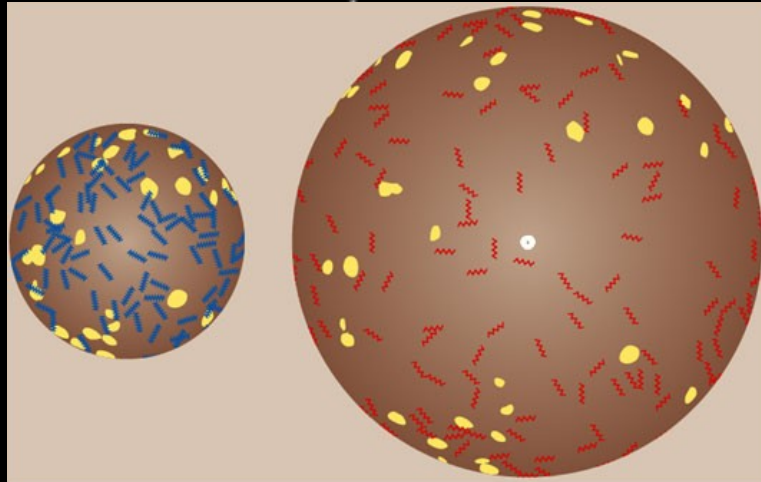
- Schwarze Löcher sind möglich
- Zeitdilatation bei steigender Gravitation langsamer
- Licht wird in Gravitationsfeldern abgelenkt
- Gravitationswellen treten auf
- das Universum expandiert

Um ein statisches („einzig sinnvolles“) Universum zu erzeugen, führte Einstein den  $\Lambda$ -Term (kosmologische Konstante) ein.

# Die Expansion des Universums

Edwin Hubble entdeckte, dass alle Galaxien voneinander wegfliegen und das Universum damit kein Zentrum hat.

**Kosmologische Rotverschiebung**



Big Bang

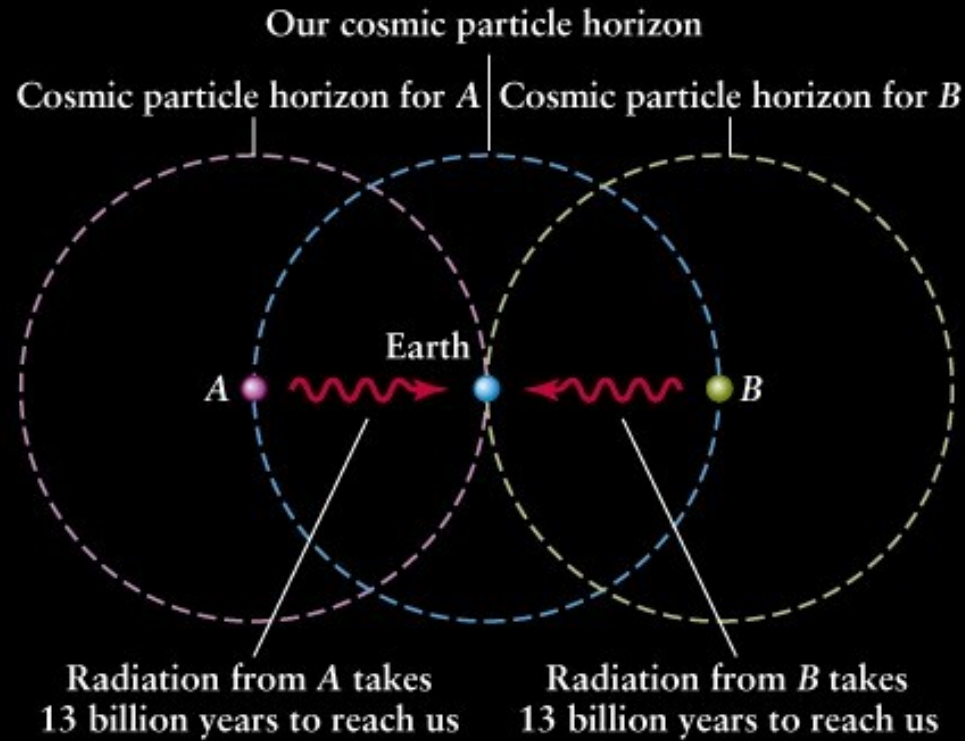
$$H = 71 \text{ km/s/Mpc} = \frac{71 \text{ km/s}}{3.1 \times 10^{13+6} \text{ km}} = 2.3 \times 10^{-18} \text{ 1/s}$$

Alter des Universums:  $(2.3 \times 10^{-18})^{-1} \text{ s} = 13.8 \text{ Milliarden Jahre}$

Annahme: Expansionsgeschwindigkeit ist/war konstant!

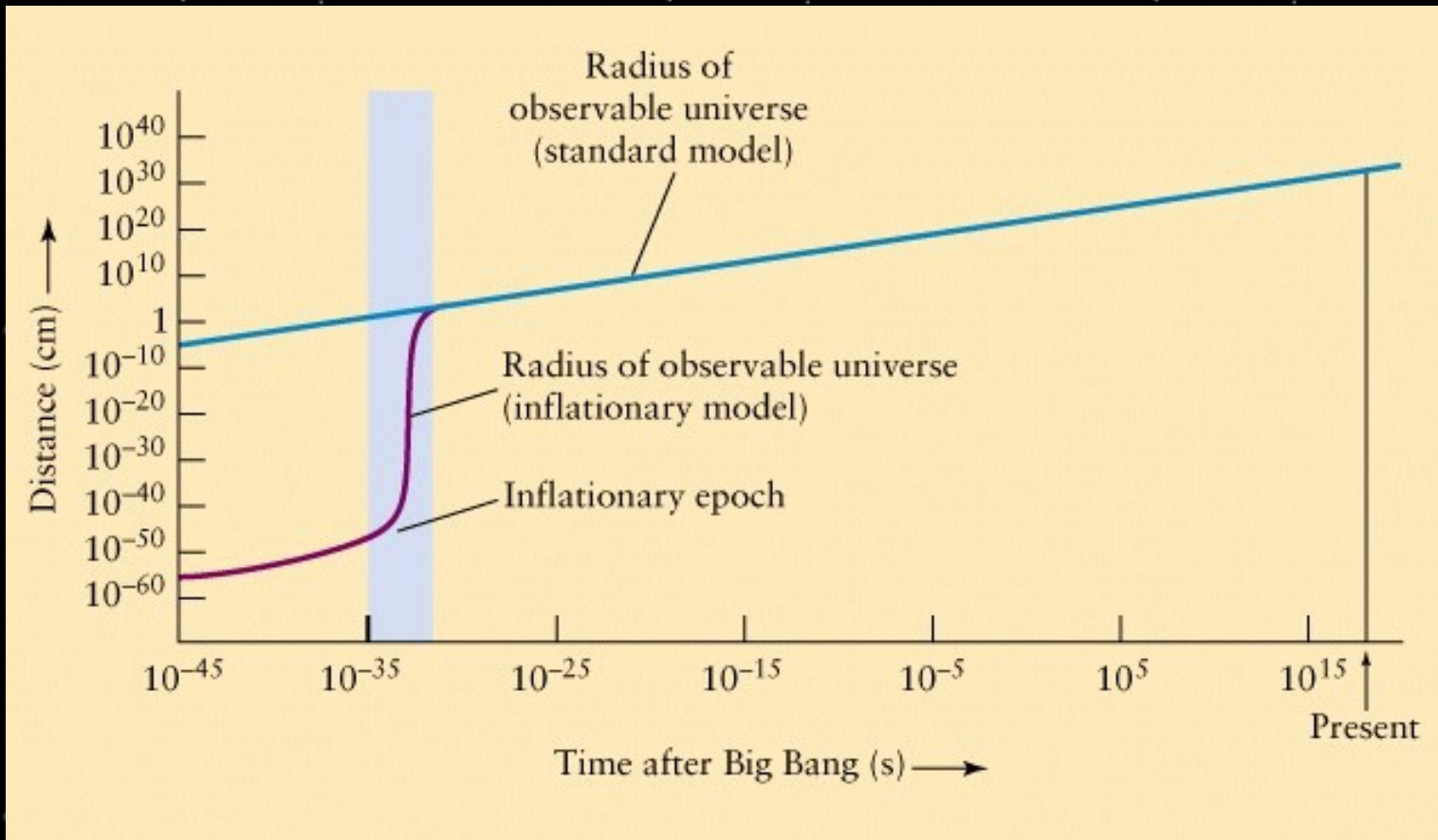
$H_0 \times t_0 = 1$  nur für ein *leeres* Universum!

# Isotropie Problem



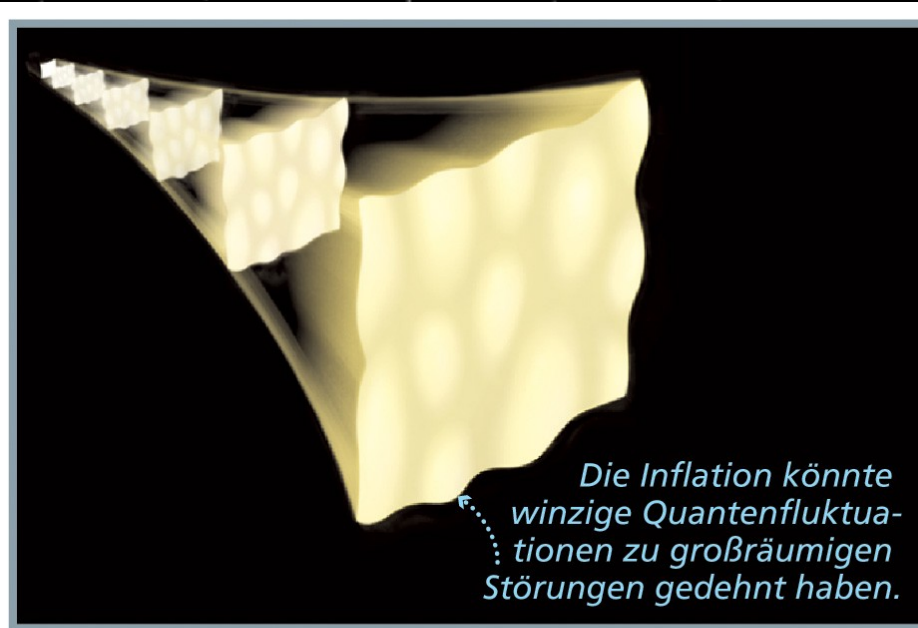
Wie kann die kosmische Hintergrundstrahlung so isotrop sein,  
wenn es Stellen gibt die mehr als 14 Milliarden Lichtjahre  
auseinander liegen?  
→ Inflationstheorie

# Inflationstheorie



Expansion für  $10^{-24}$ s um Faktor  $10^{50}$   
 Das Universum vor der Inflation hatte einheitliche  
 Temperatur.

# Inflationstheorie



**Abbildung 23.13:** Während der Inflation wurden Störungen in der Raumzeit um einen Faktor von etwa  $10^{30}$  gedehnt. Aus den Maxima dieser Schwankungen sind so die Dichteerhöhungen entstanden, aus denen sich alle Strukturen bildeten, die wir im heutigen Universum beobachten können.

Expansion für  $10^{-24}$ s um Faktor  $10^{30} - 10^{50}$   
Das Universum vor der Inflation hatte einheitliche Temperatur.

# Big Bang nach G. Gamov (1946)

Die Physik kennt vier Kräfte :

- Gravitationskraft
- Elektromagnetische Kraft
- Starke Wechselwirkung
- Schwache Wechselwirkung

Bis ca.  $10^{-43}$  s nach dem Urknall geht man davon aus, daß die letzten drei Kräfte vereint waren, nur die Gravitationskraft war eigenständig. Dies nennt man die „Grand Unification Era“

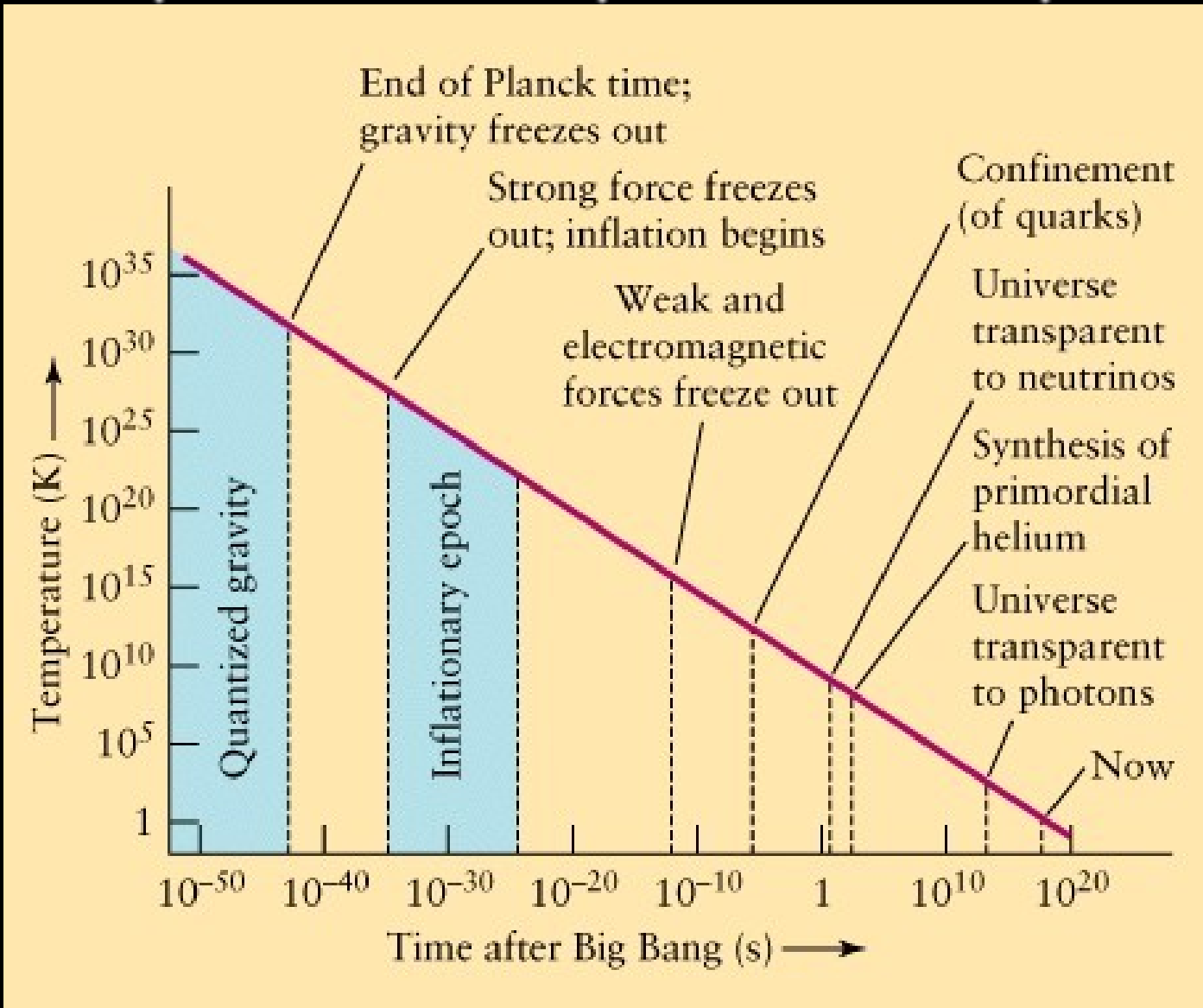
*Am Anfang*

(zum Zeitpunkt  $\tau_p = (Gh/c^5)^{1/2} = 5.4 \times 10^{-44}$  s bei  $10^{32}$ K)

*waren alle gleich!*



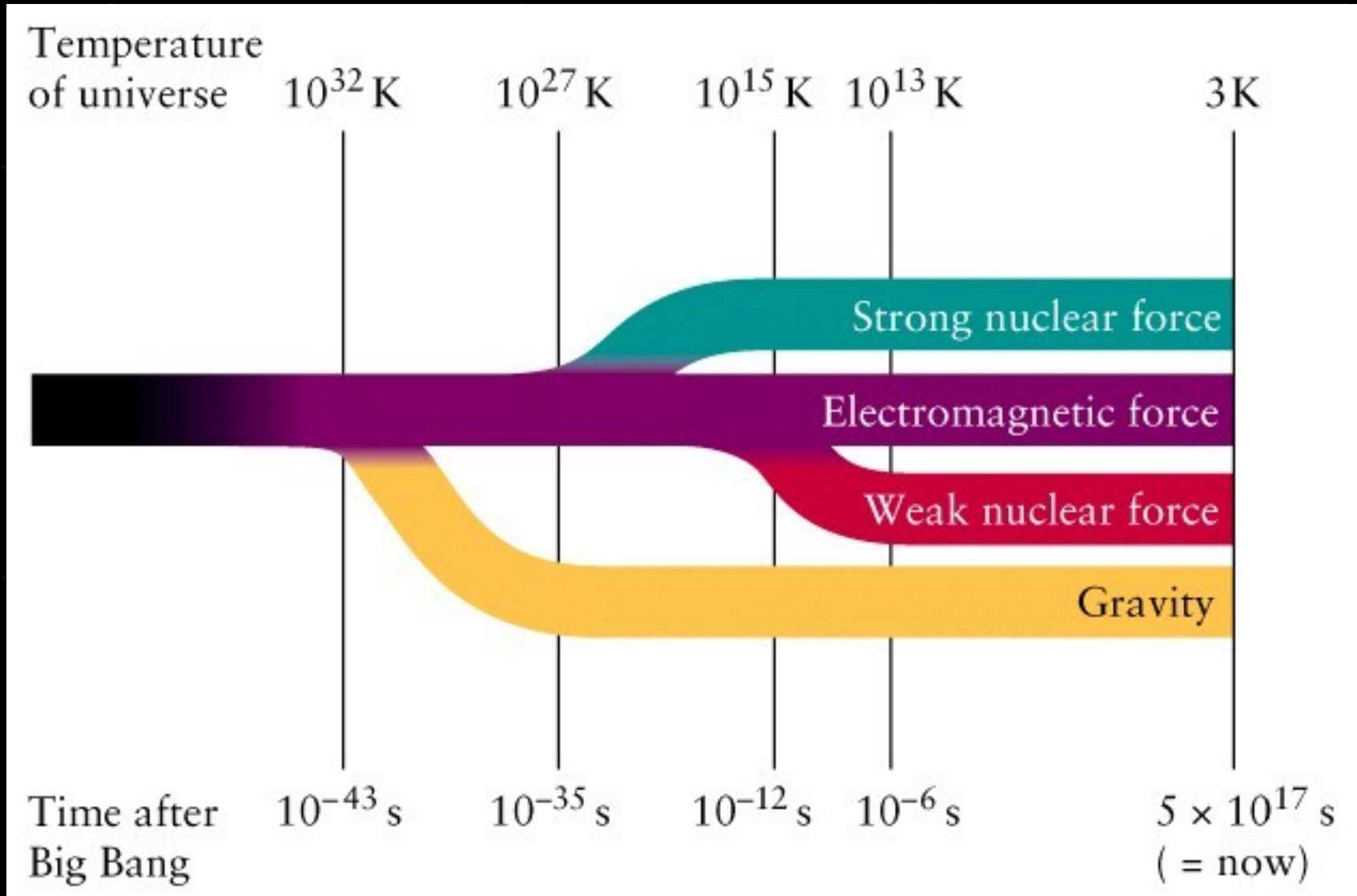
# Geschichte des Universums



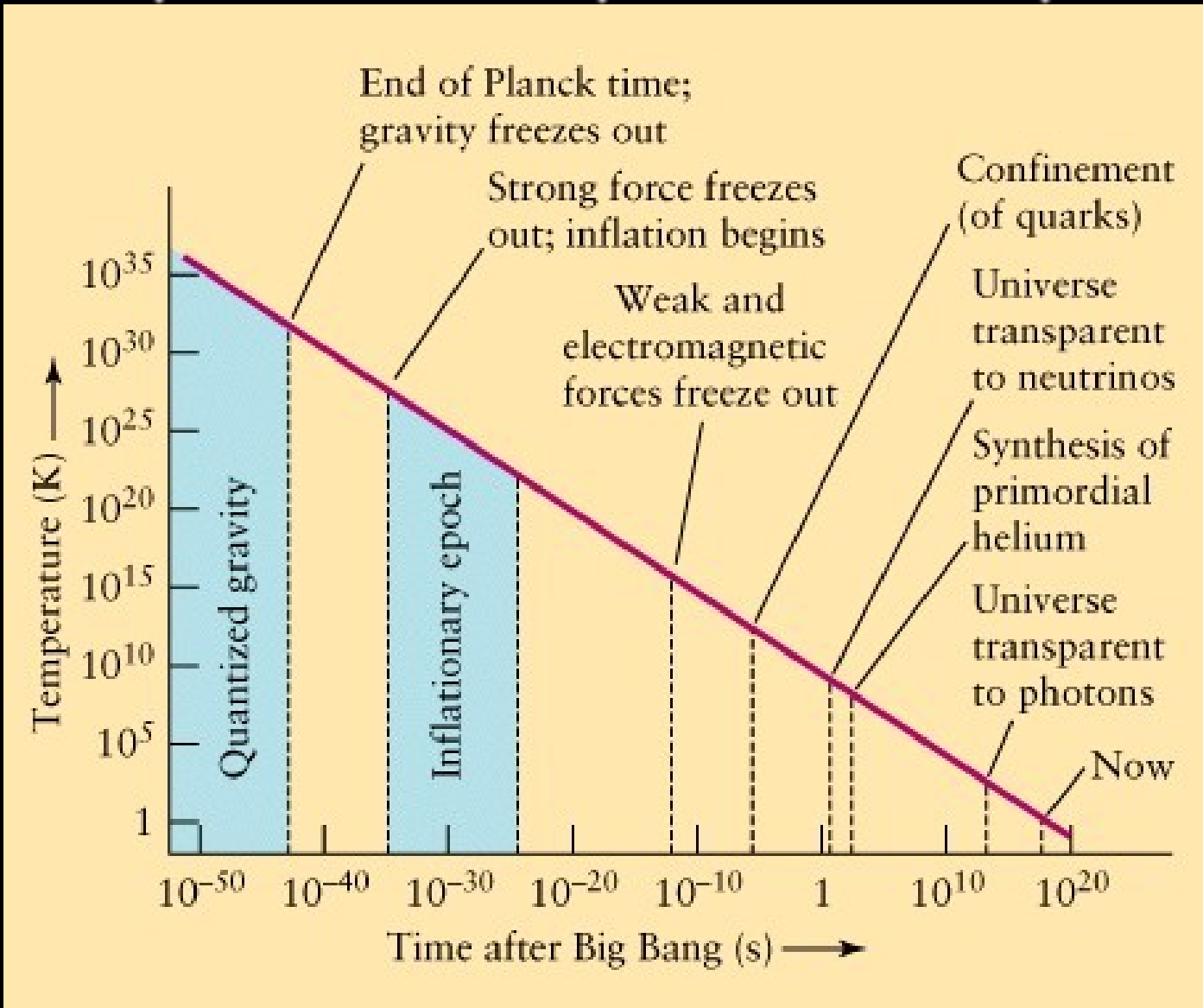
# Die erste Sekunde

- Am Anfang waren alle 4 Kräfte vereinigt bis zur Planck Zeit von  $10^{-43}\text{s}$ ,  $10^{32}\text{ K}$ . Dann „fror“ die Gravitation aus.
- Nach  $10^{-35}\text{s}$  und  $10^{27}\text{K}$  fror die starke Wechselwirkung aus (die Protonen und Neutronen zusammenhält) und es begann die Inflation.
- Inflation  $10^{-35}\text{s}$  bis  $10^{-24}\text{s}$ : das Universum expandiert um Faktor zwischen  $10^{30} - 10^{50}$
- Nach  $10^{-12}\text{s}$  ( $10^{15}\text{K}$ ) friert die schwache Wechselwirkung aus (die Quarks zusammenhält) Die Teilchen verhalten sich nun wie wir es kennen.
- Confinement: ca.  $10^{-6}\text{s}$  oder  $10^{13}\text{K}$  Protonen und Neutronen bilden sich, da die Temp. nicht mehr hoch genug ist sie in Quarks auseinanderzureissen.

# Unification of Four Forces

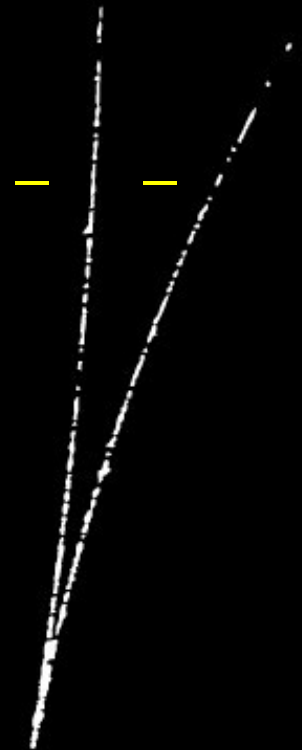
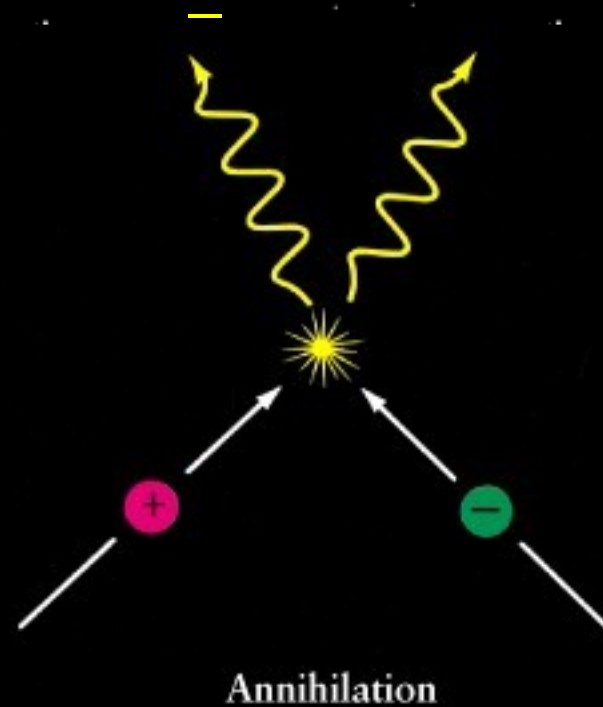
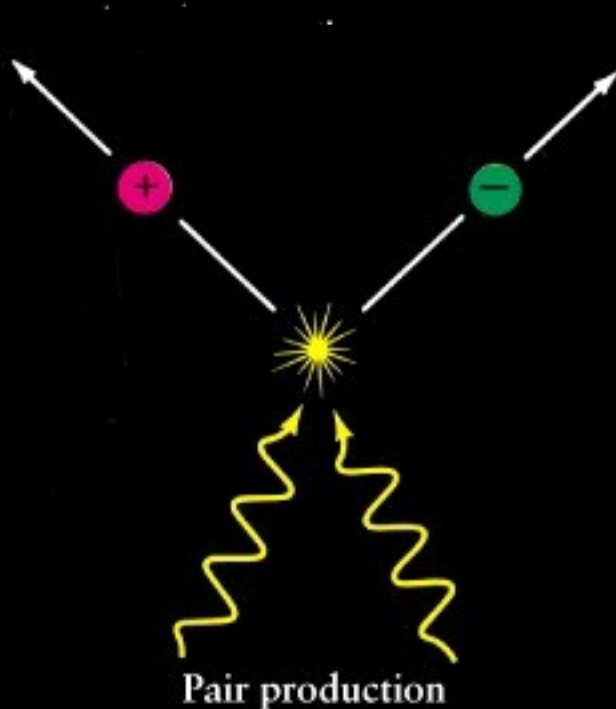


# Geschichte des Universums



# Das strahlungsdominierte Universum

- In der ersten Lebenssekunde des Universums gab es viel „pair production“ nach  $E = mc^2$ . Das Universum war voll von Protonen, Neutronen, Elektronen und deren Antimaterie in einem extrem heißen Bad von Photonen.



# Das strahlungsdominierte Universum

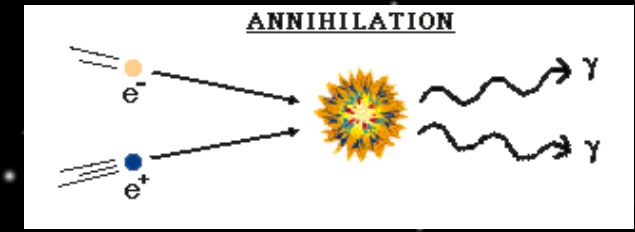
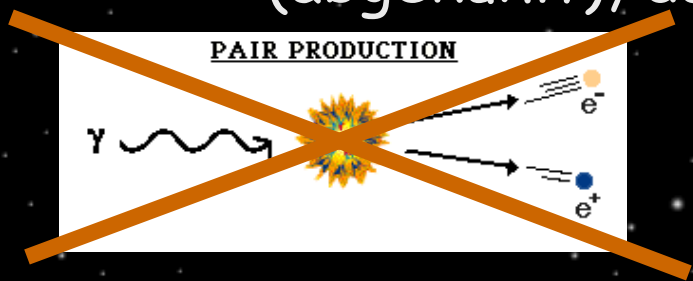
- In der ersten Lebenssekunde des Universums gab es viel „pair production“ nach  $E = mc^2$ . Das Universum war voll von Protonen, Neutronen, Elektronen und deren Antimaterie in einem extrem heißen Bad von Photonen.

Erzeugung von  $\gamma$ , Leptonen ( $e, e, \bar{\mu}$ ) und Baryonen ( $p, p, n, n$ ).

- Nach 1 Sekunde gibt es keine Pair production mehr. Durch Bruch der Symmetrie gibt es 1 000 000 001 Teilchen für jede 1 000 000 000 Antiteilchen.
- Im Zeitraum danach (ca. 1 s nach dem Urknall) bei  $3 \times 10^9$  K entkoppelten die Neutrinos von der Materie, d.h. sie entwickelten sich unabhängig von ihr weiter.

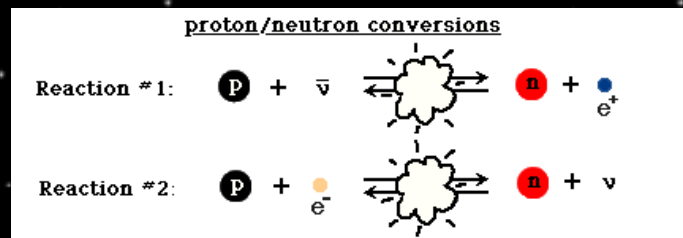
# Die 1. Minute

- nach 15 Sek. hat sich das Universum soweit ausgedehnt (abgekühlt), dass  $\gamma$  keine  $e + \bar{e}$  mehr erzeugen.

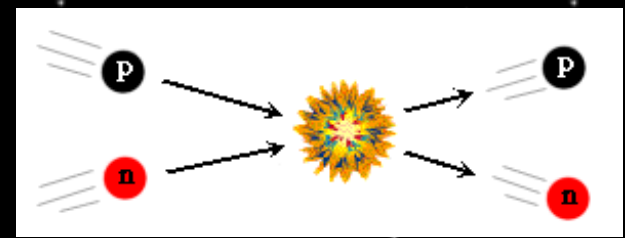


- Sinkt die Temperatur unter  $10^9$  K, so finden hauptsächlich Umwandlungen von Protonen zu Neutronen statt :

- die Anzahl von p und n bleibt konstant!



$n/p = 0.14$





# Bildung von Premordialen Elementen

- Das Universum kühlt auf  $10^9\text{K}$ : Protonen und Neutronen formen Atome:

In den ersten 3 Minuten bilden sich

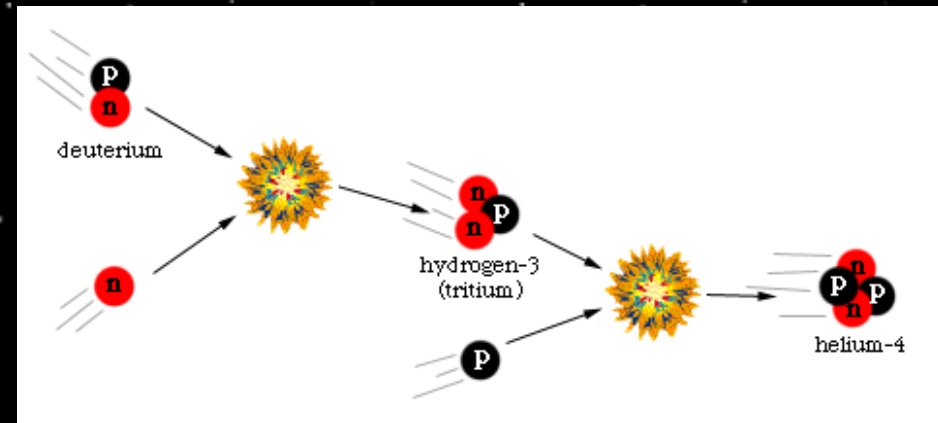
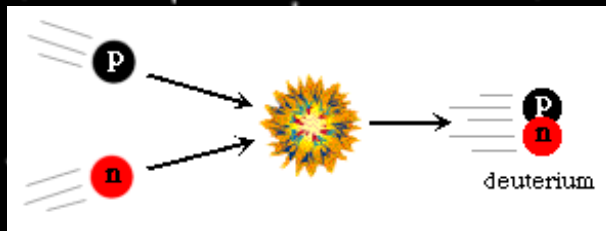
H, He, Li

Danach ist das Universum zu kalt, um schwere Elemente zu bilden.

— —

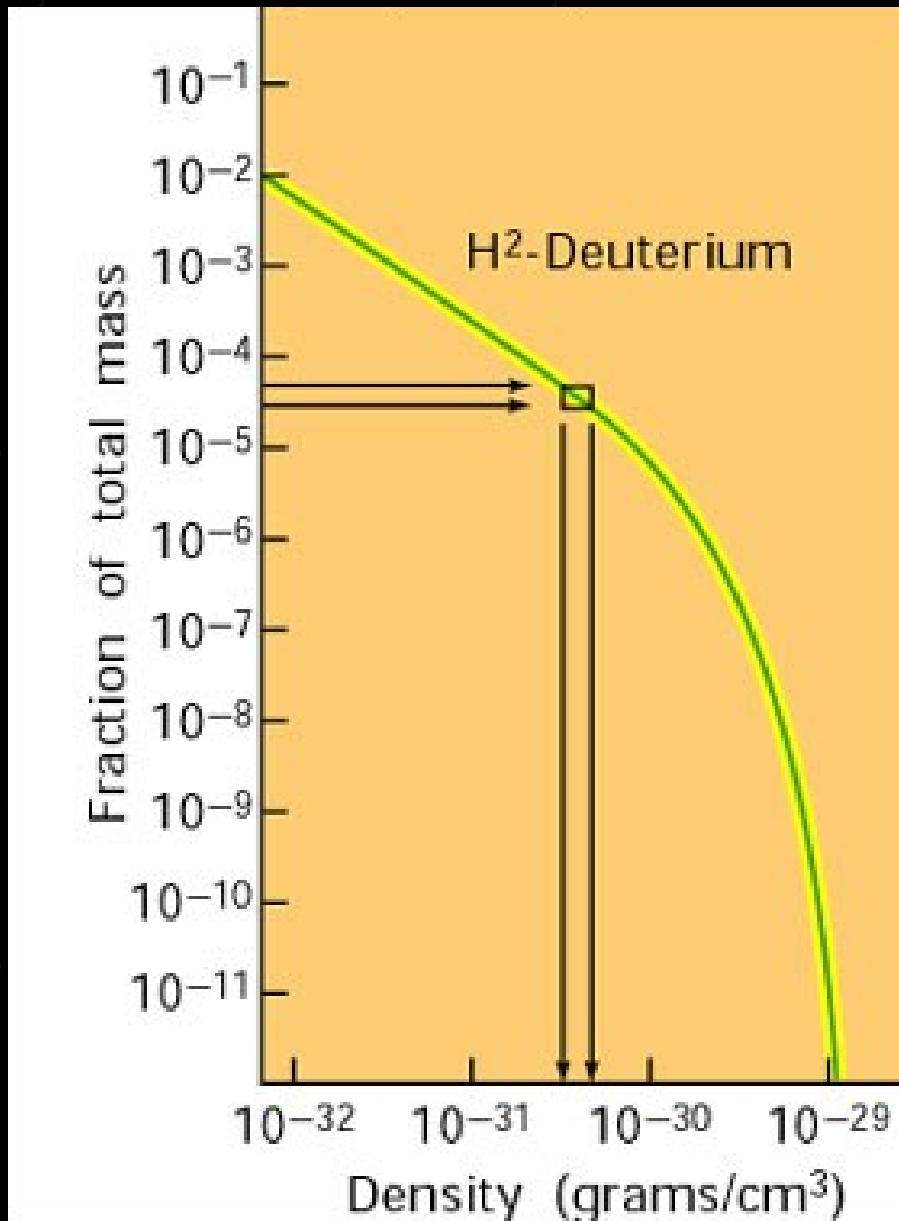
# Bildung von Atomen

- bei ca.  $10^8$  K verbinden sich n mit p ( $t < 10$  min) und bilden einen  $^2\text{D}$  Kern, dann  $^3\text{H}$  und schließlich  $^4\text{He}$ .



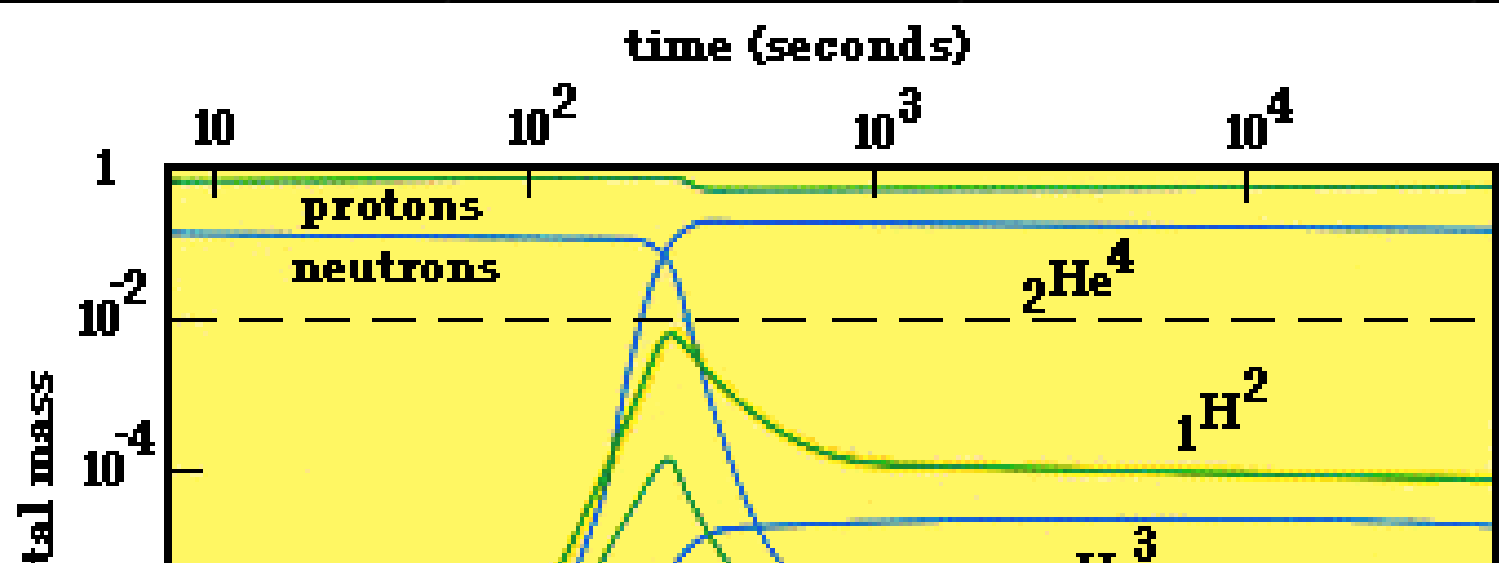
Die Bildung des **Deuterium** ( $\text{D}/\text{H} = 2 \times 10^{-4}$ ) hängt empfindlich von der *primordialen* Baryonendichte ab  
*(10mal höhere Baryonendichte hinterlässe kein Deuterium)*

# Die Photonen - Ära

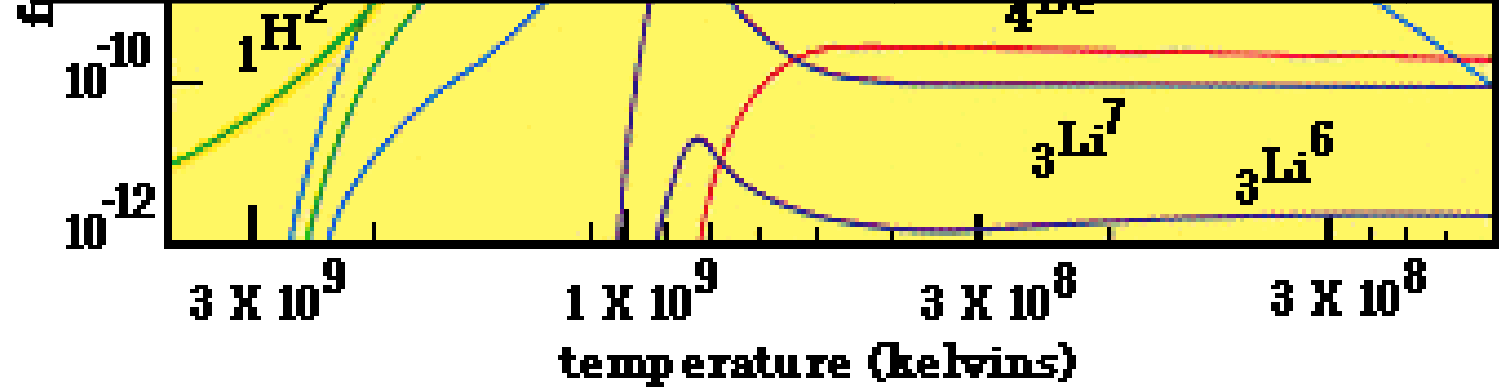


Die Bildung des **Deuterium** ( $D/H = 2 \times 10^{-4}$ ) hängt empfindlich von der *primordialen* Baryonendichte ab (*10mal höhere Baryonendichte hinterließe kein Deuterium*)

# Primordiale Nukleosynthese nach Gamov



Gamov leitete eine kosmische Hintergrundstrahlung von 5 K aus der Nukleosynthese ab

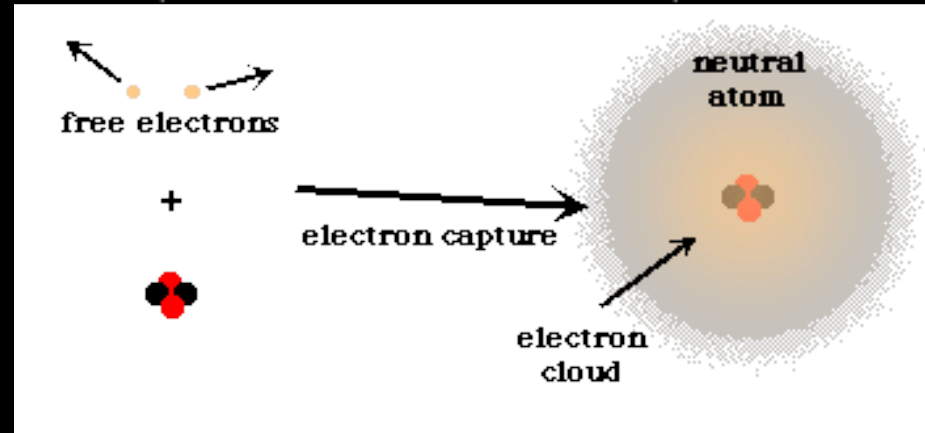


# Rekombination/Entkopplung

- Nach 300 000 Jahren kühlt das Universum auf 3000K und die Energie der Photonen reicht nicht mehr zur Ionisation von Wasserstoff. Es bilden sich neutrale Atome. „Rekombination“, „Materiedominiertes Universum“
- Entkopplung von Photonen und Materie
- Die Photonen können sich ungehindert ausbreiten. Wir können diese Photonen in Form der kosmischen Strahlung sehen:
- Kosmische Hintergrundsstrahlung:
  - bei 3000K ist das Wien max bei 0.001 mm
  - Inzwischen hat sich das Universum ausgedehnt und die Wellenlänge mitgedehnt auf 1mm, 3K
- Heute:  $4 \times 10^8$  CMB Photons pro  $m^3$   
 $\frac{3}{H}$  pro  $m^3$

# Die Materie - Ära: Das gläserne Universum

- nach 300 000 Jahren bei 3000 K (re)kombinieren die e mit den Kernen und bilden neutrale Atome

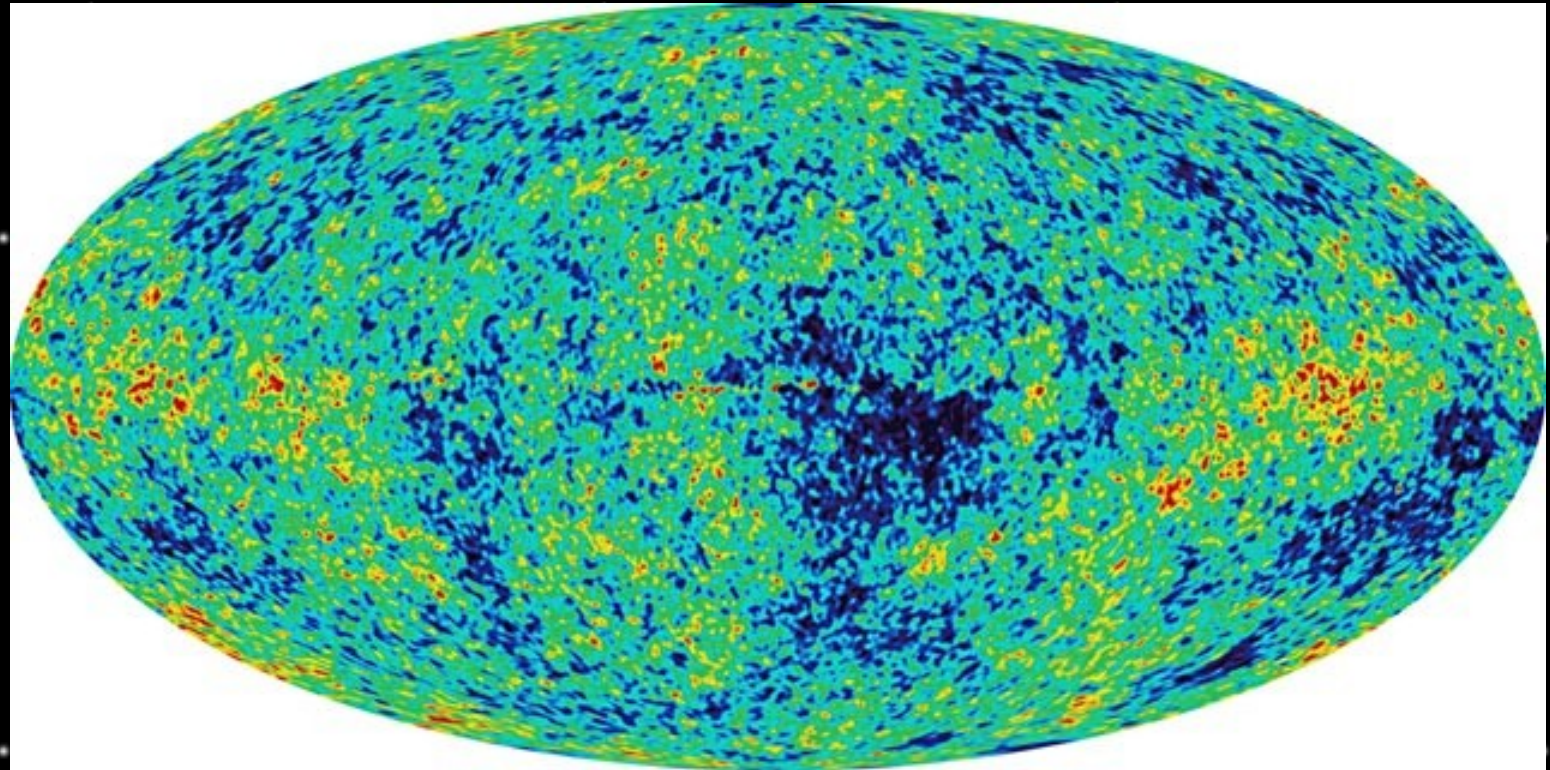


$n(\text{He})/n(\text{H}) = 0.08$  bzw.  $0.25$  nach Masseanteilen.  
Das tatsächlich gemessene Verhältnis ist ein weiterer Test für die Urknall-Theorie!

- die (Re-)Kombination der Elektronen machte das Universum bei  $z = 1200$  „durchsichtig“ ( $\gamma$  sind endlich frei).

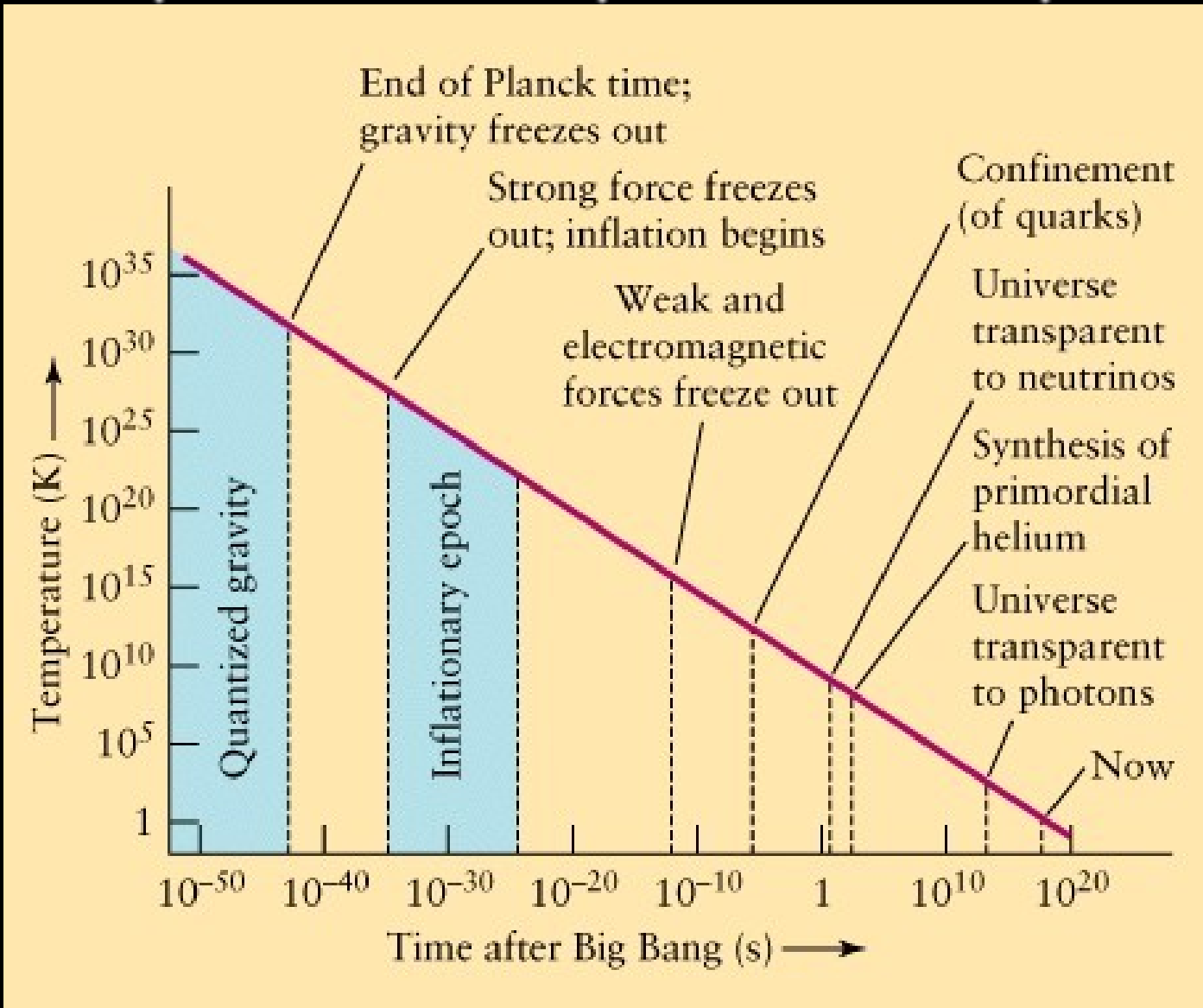
Die Mikrowellen-Hintergrund-Strahlung zeigt uns also das Universum zum Zeitpunkt des Entkoppelns!

# Kosmische Hintergrundstrahlung





# Geschichte des Universums



# Bildung von Galaxien

- Zu Anfang: Wasserstoff und Heliumwolken. Durch Quantenoszillationen und die Inflation, gibt es Dichteunterschiede von 1 : 10 000 im Mikrowellenhintergrund
- Die dichteren Wolken kollabieren und bilden die heutigen Strukturen → Simulationen
- Unbekannt:
  - Haben sich erst Sterne gebildet, dann Galaxien?
  - Oder erst Galaxien dann Sterne?
  - Oder beide gleichzeitig?
  - Warum haben die Strukturen die uns bekannten Groessen?

# Bildung von Galaxien

Der helle Fleck stellt den Moment des Urknalls dar, als das Universum seinen Anfang nahm.

Die dramatische Vergrößerung kennzeichnet die Inflation – die schnelle Ausdehnung, die am Ende der GUT-Ära stattgefunden haben kann.

Im frühen Universum war es überall hell. Die allmähliche Farbänderung veranschaulicht die allmähliche Abkühlung.

Die unregelmäßige Oberfläche bei 380 000 Jahren kennzeichnet den Moment, als sich die Photonen erstmals frei durch das Universum bewegen konnten. Wir können diese Photonen heute immer noch als kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung beobachten.

Nach der Entstehung der kosmischen Hintergrundstrahlung blieb das Universum dunkel, bis die ersten Sterne und Galaxien entstanden.

Die Ära der Galaxien begann, als das Universum etwa eine Milliarde Jahre alt war. Diese Ära dauert bis heute an.

$10^{29}$  K

andauerte.

Elektroschwache Ära

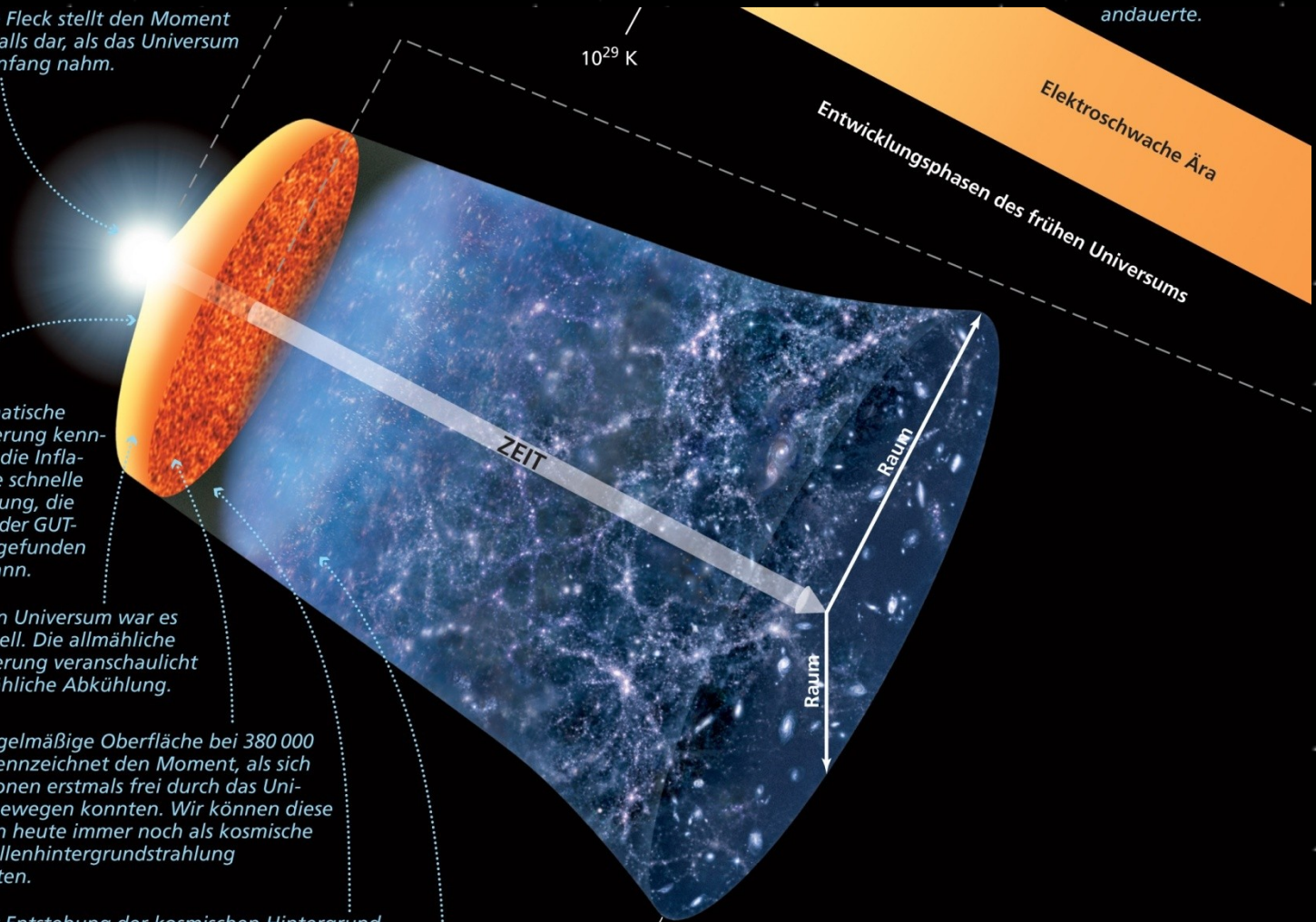
Entwicklungsphasen des frühen Universums

ZEIT

Raum

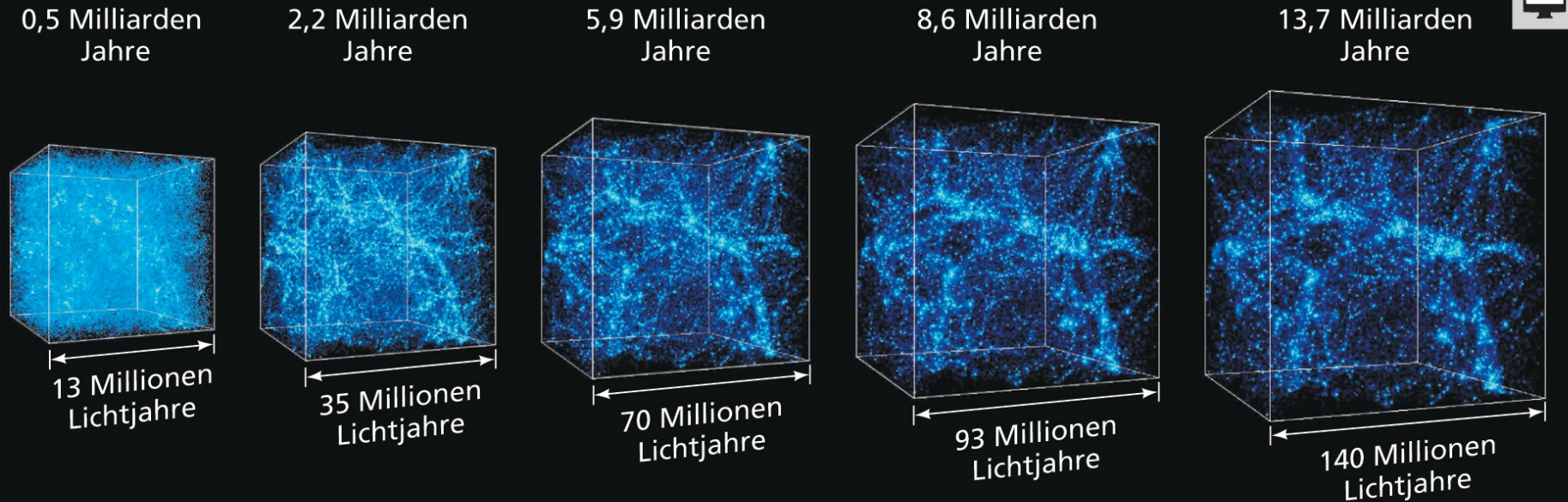
Raum

14 Milliarden Jahre (Gegenwart)





# Der simulierte Kosmos

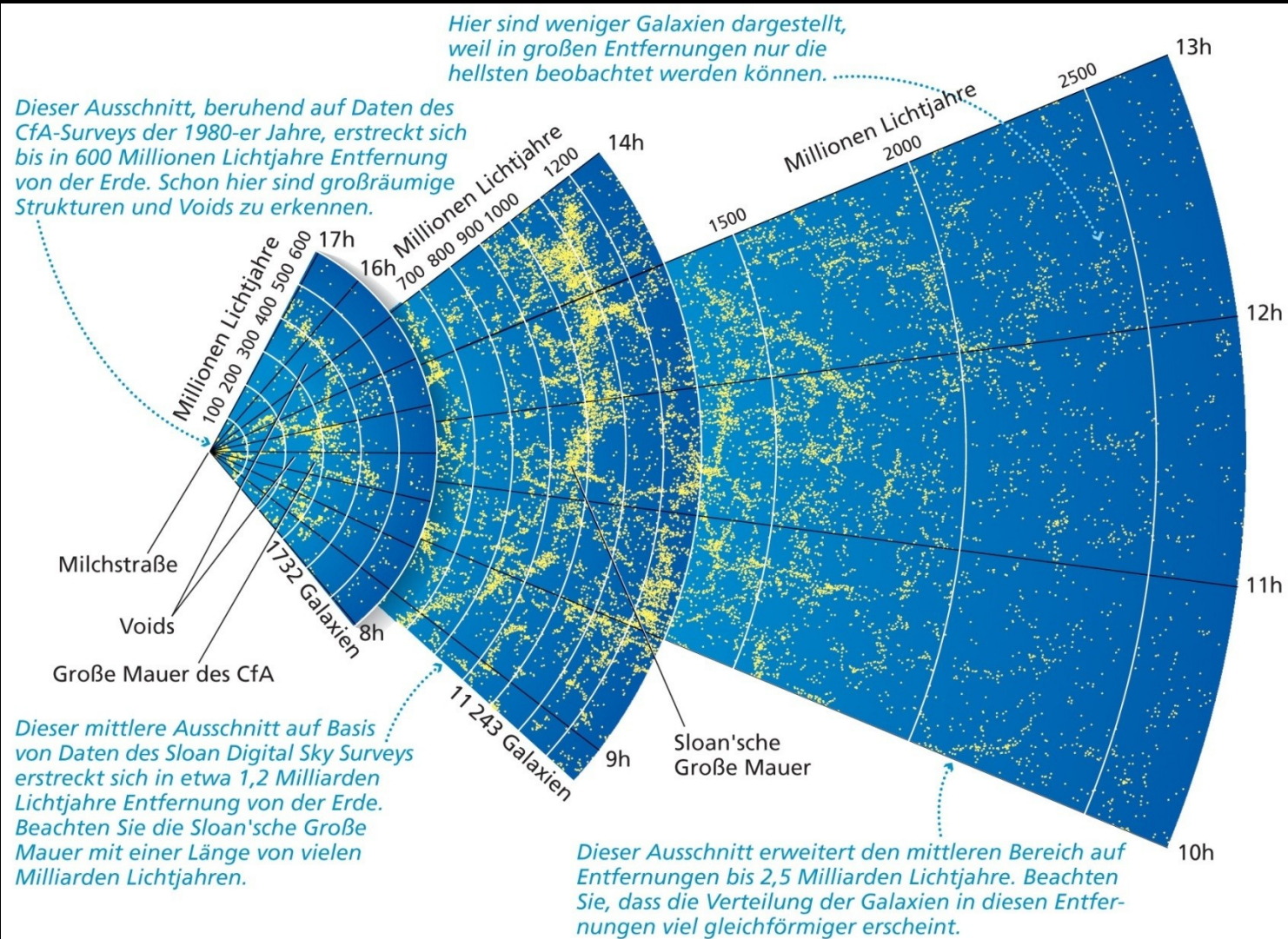


*Im Verlauf der Expansion des Universums ziehen dichtere Regionen immer mehr Materie an und erzeugen so eine „klumpige“ Verteilung.*

*nicht maßstabsgetreu*

**Abbildung 22.15:** **IF** Supercomputersimulation der Entstehung großer Strukturen. Die fünf Würfel zeigen die Entwicklung einer Region, die zur heutigen Zeit 140 Millionen Lichtjahre umfasst. Die oberen Markierungen geben das Alter des Universums wieder, die unteren zeigen die Ausmaße des im Lauf der Zeit expandierenden Würfels. Beachten Sie, dass die Materieverteilung im frühen Universum kaum Verdichtungen aufweist (linkes Bild). Die Strukturen werden im Lauf der Zeit aber immer deutlicher, da die dichtesten Bereiche immer mehr Materie anziehen.

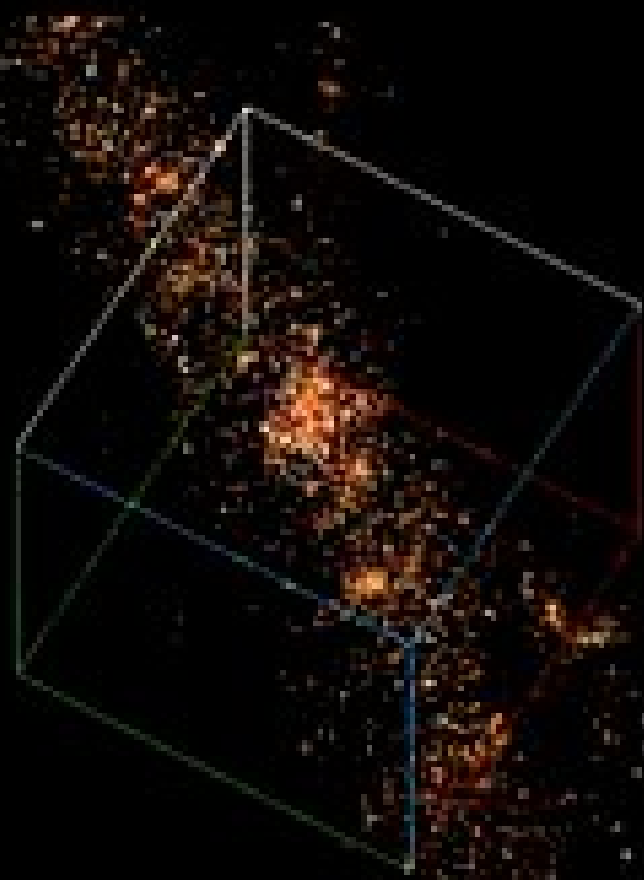
# Bildung von großen Strukturen im Universum



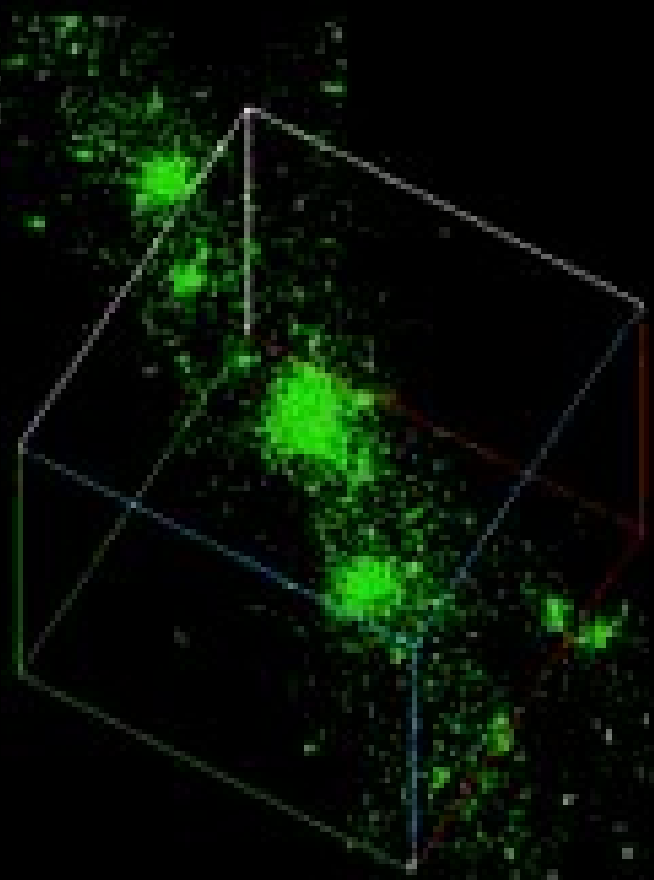
**Abbildung 22.14:** Jede dieser drei keilförmigen Flächen zeigt einen Ausschnitt unseres Universums, der sich von unserer Milchstraße aus in den Weltraum erstreckt. Jeder Punkt entspricht einer Galaxie, die entsprechend ihrer Entfernung von der Erde aufgetragen ist. Wie zu erkennen ist, sind die Galaxien keineswegs gleichmäßig verteilt. Vielmehr bilden sie lange Ketten und Bögen um riesige Voids, in welchen sich nur wenige Galaxien befinden. (Die Ausschnitte sind nicht wirklich flach, sondern haben eigentlich eine Dicke von mehreren Grad. Der Ausschnitt des CfA-Surveys auf der linken Seite passt nicht genau zu den beiden Ausschnitten des Sloan-Surveys.)



# Bildung von Sternen und Galaxien



Gas



Dark Matter

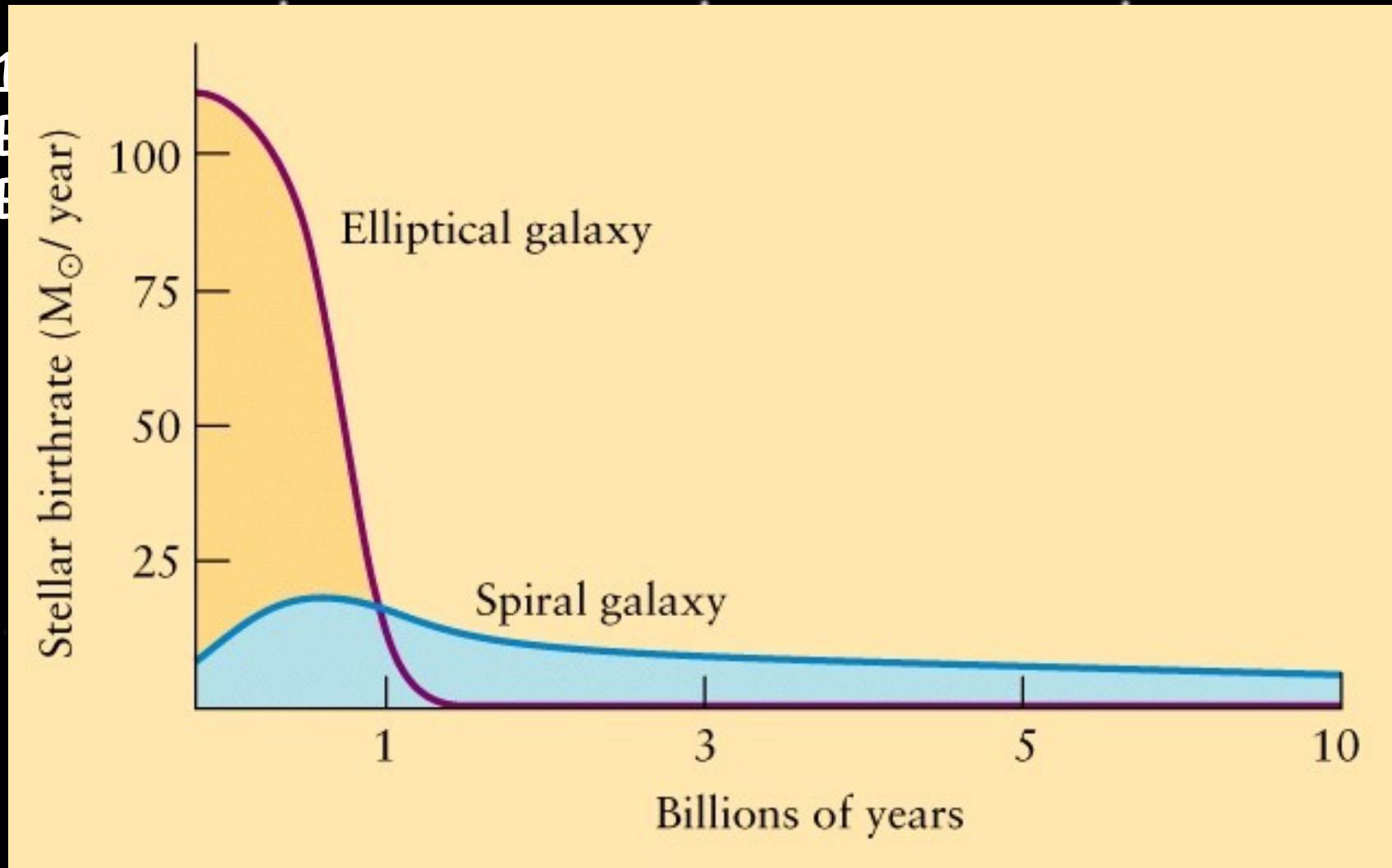
# Heutiges Universum

The Cosmos: Astronomy in the New Millennium  
By Pasachoff/Filippenko  
16-18: Coma Cluster  
Courtesy of NOAO/Nigel Sharp





# Bildung von Galaxien (2)



Bestimmt die Sternentstehungsrate den Galaxientyp?

# Die Zukunft des Universums

Kritische Dichte  $2.4 \times 10^{-26} \text{kg/m}^3$  ( $14 \text{ H} / \text{m}^3$ )

(für  $\Lambda=0$ )

Dichte  $>$  kritische Dichte  $\rightarrow$  Big Crunch (bound)

Dichte = kritische Dichte  $\rightarrow$  Bei  $t=\text{unendl.}$ ,  $v=0$  (unbound)

Dichte  $<$  kritische Dichte  $\rightarrow$  Big Chill (unbound)

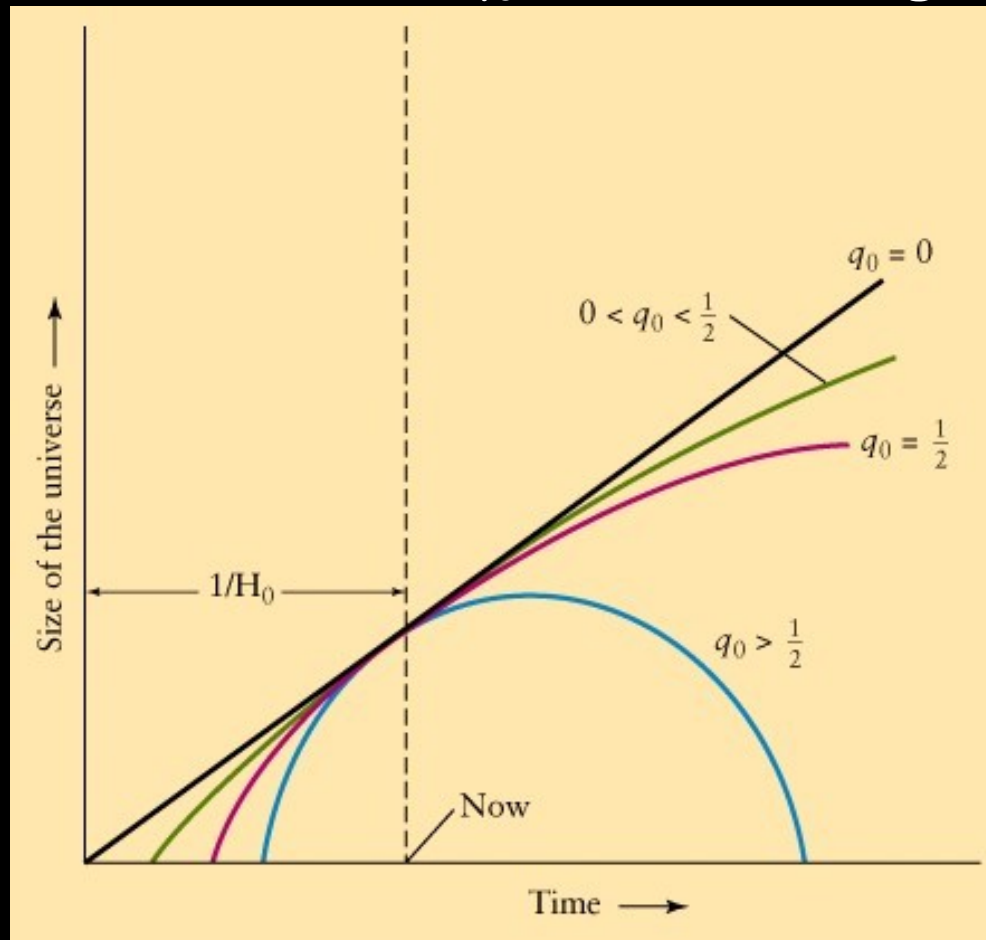
Leuchtende Materie:  $5 \times 10^{-28} \text{kg/m}^3$  (2% von kr. Dichte)

Dunkle Materie ?

$\Lambda$  ?

# Bremsfaktor (deceleration Parameter)

Bremsfaktor  $q_0 =$  Abweichung von Hubble



$q_0 = 0$  H konstant

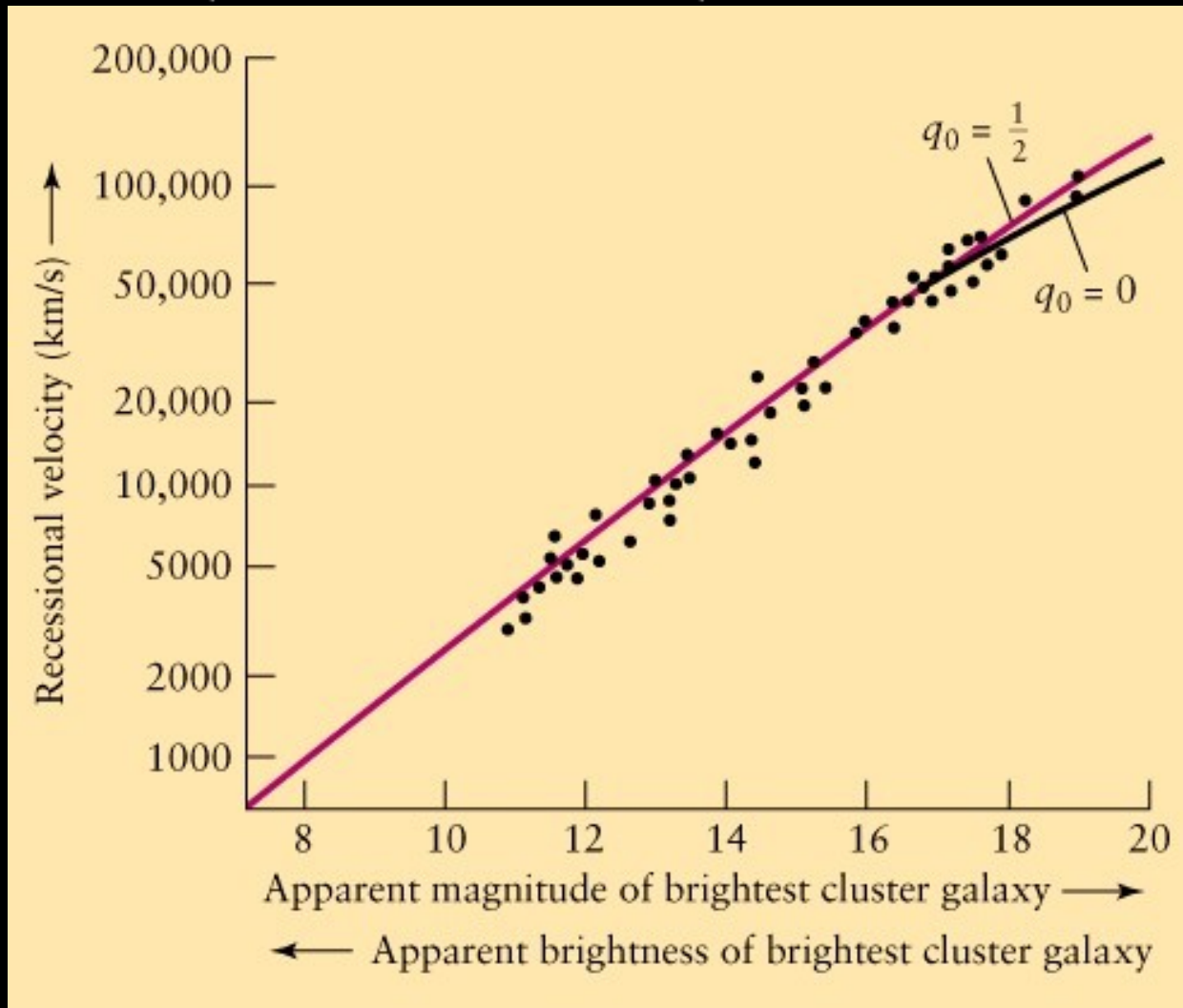
$q_0 = \frac{1}{2}$  kritische Dichte ( $\Lambda=0$ )

$q_0 > \frac{1}{2}$  Big Crunch

$0 < q_0 < \frac{1}{2}$  unbound

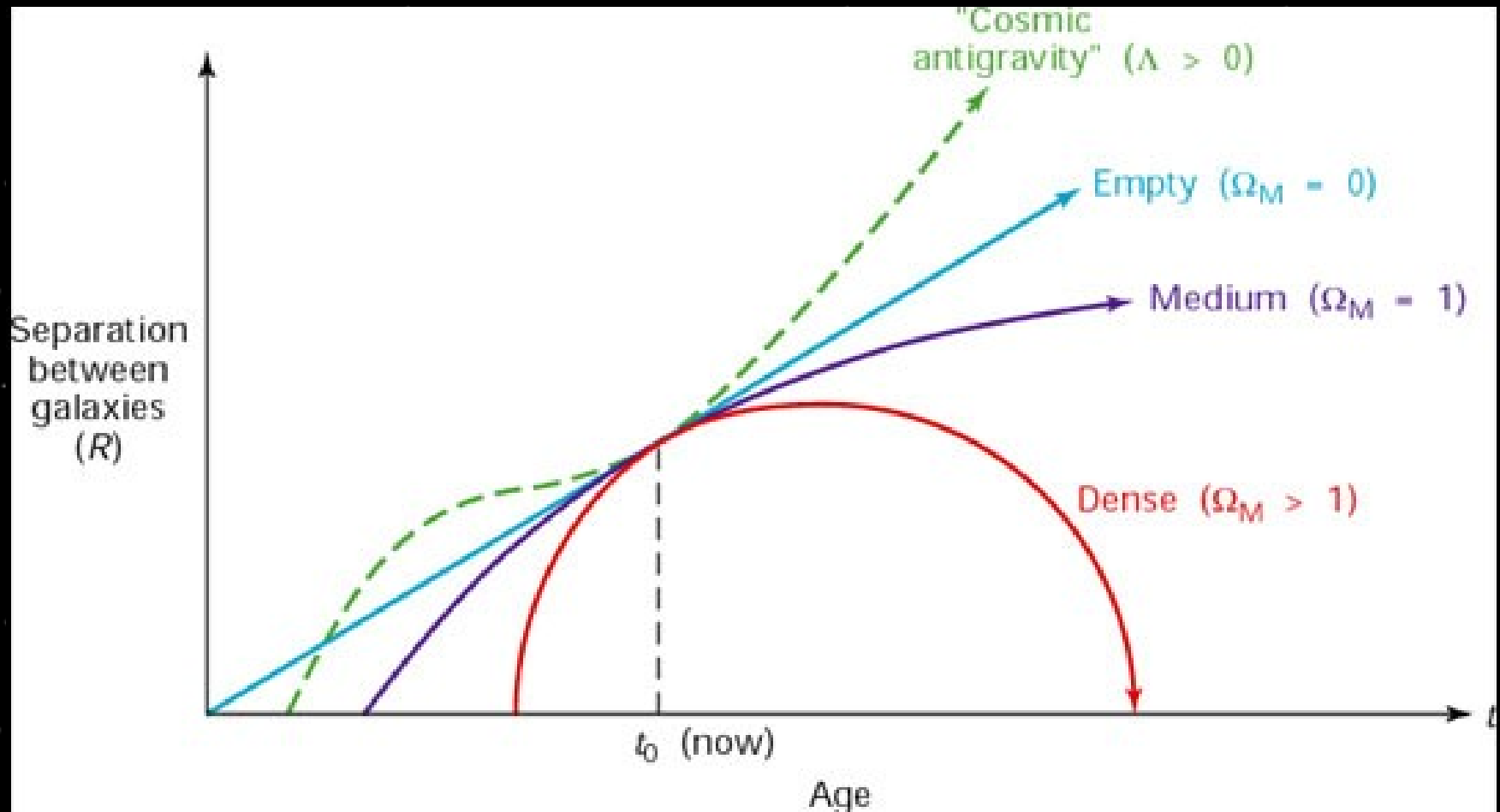
$q_0 < 0$  extra Beschleunigung

# Bremsfaktor (deceleration parameter)



$0 < q_0 < \frac{1}{2}$  unbound  
 $q_0 > 1/2$  bound

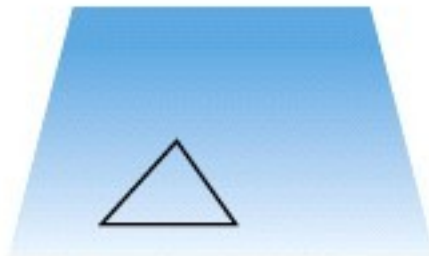
# Geschichte der Expansion des Universums



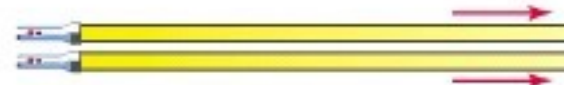
# Geometrie unseres Universums



a Spherical space  $q_0 > \frac{1}{2}$



b Flat space  $q_0 = \frac{1}{2}$



c Hyperbolical space  $q_0 < \frac{1}{2}$



# Kosmologische Parameter

$$H_0 = 71 \pm 4 \text{ km/s/Mpc}$$

$$\Omega_0 = 1.02 \pm 0.02$$

$$\Omega_{\text{matter}} = 0.27 \pm 0.04$$

$$\Omega_{\text{baryon}} = 0.044 \pm 0.004$$

$$\Omega_{\Lambda} = 0.73 \pm 0.04$$

$$t_0 \text{ (seit Big Bang)} = 13.7 \pm 0.2 \times 10^9 \text{ Jahr}$$

$$t_{\text{dec}} \text{ (CMBR)} = 379\,000 \pm 8000 \text{ Jahre}$$

$$t_r = 180 \pm 220 \times 10^6 \text{ Jahre (erste Sterne)}$$



# Dunkle Energie nach Wetterich (1)

Kritische Dichte:

$\rho_c = 3 H^2 M$ , mit  $M$  reduzierte Planck Masse

$\Omega_b = \rho_b / \rho_c$  Anteil der Baryonen an der (kritischen) Dichte

Zusammensetzung des Universums:

$\Omega_b = 0.045$  von Nukleosynthese, CMB

$\Omega_{dm} = 0.225$  von Nukleosynthese, CMB

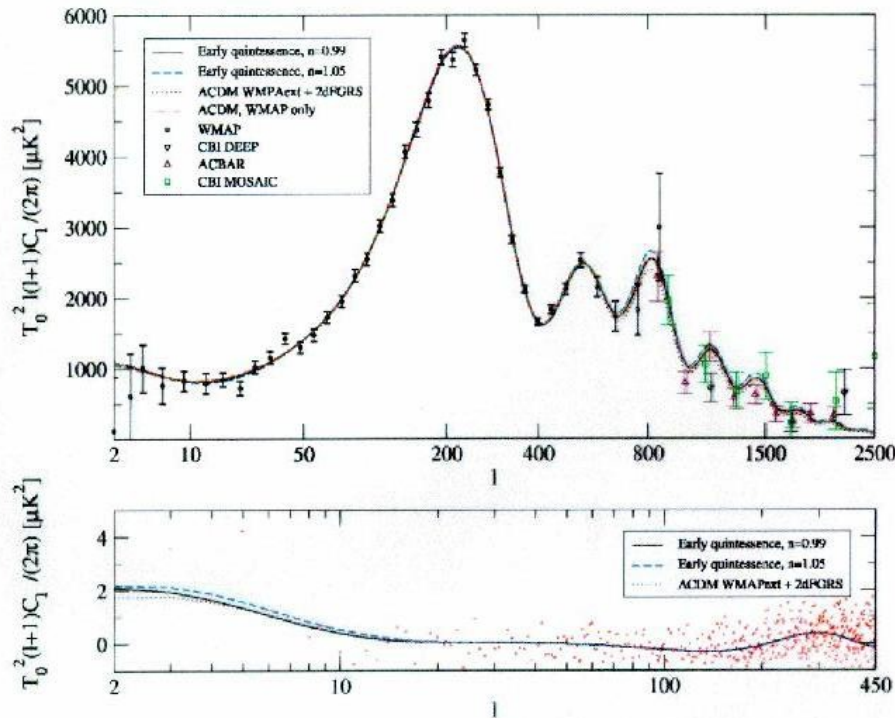
$\Omega_h = 0.75$  dunkle Energie

Räumlich flaches Universum  $\Omega_{tot} = 1$

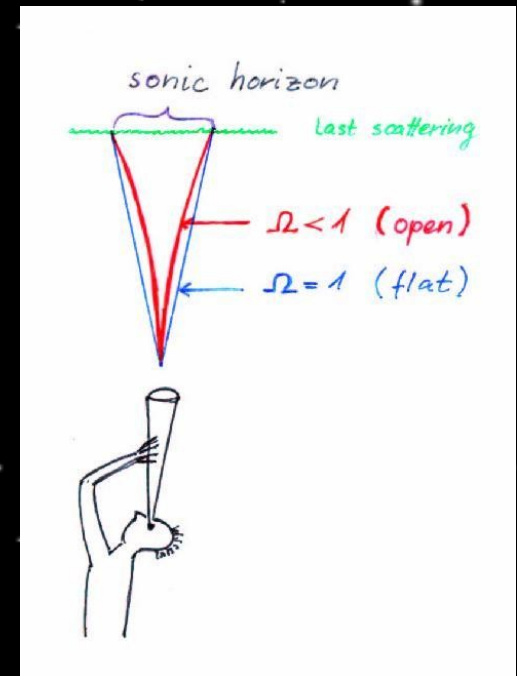
Theorie :  $\Omega_{tot} = 1$

# Dunkle Energie nach Wetterich (2)

Beobachtung (WMAP)  $\Omega_{\text{tot}} = 1$



R. Caldwell, M. Doran, C.H. Mueller, G. Schafer, CW



# Dunkle Energie nach Wetterich (3)

Räumlich flaches Universum  $\Omega_{\text{tot}} = 1$

Theorie :  $\Omega_m + x = \Omega_{\text{tot}} = 1$

$x = 0.7$  dunkle Energie:

räumlich homogen (sonst sähe man Klumpen)

zeitlich ? – statisch: Einstein  $\Lambda$

-- variabel: Quintessenz

Was ist die dunkle Energie???

# The Big Bang



drART

