

3. Vorlesung



3. Kosmologie, oder Was ist die Masse des Universums?

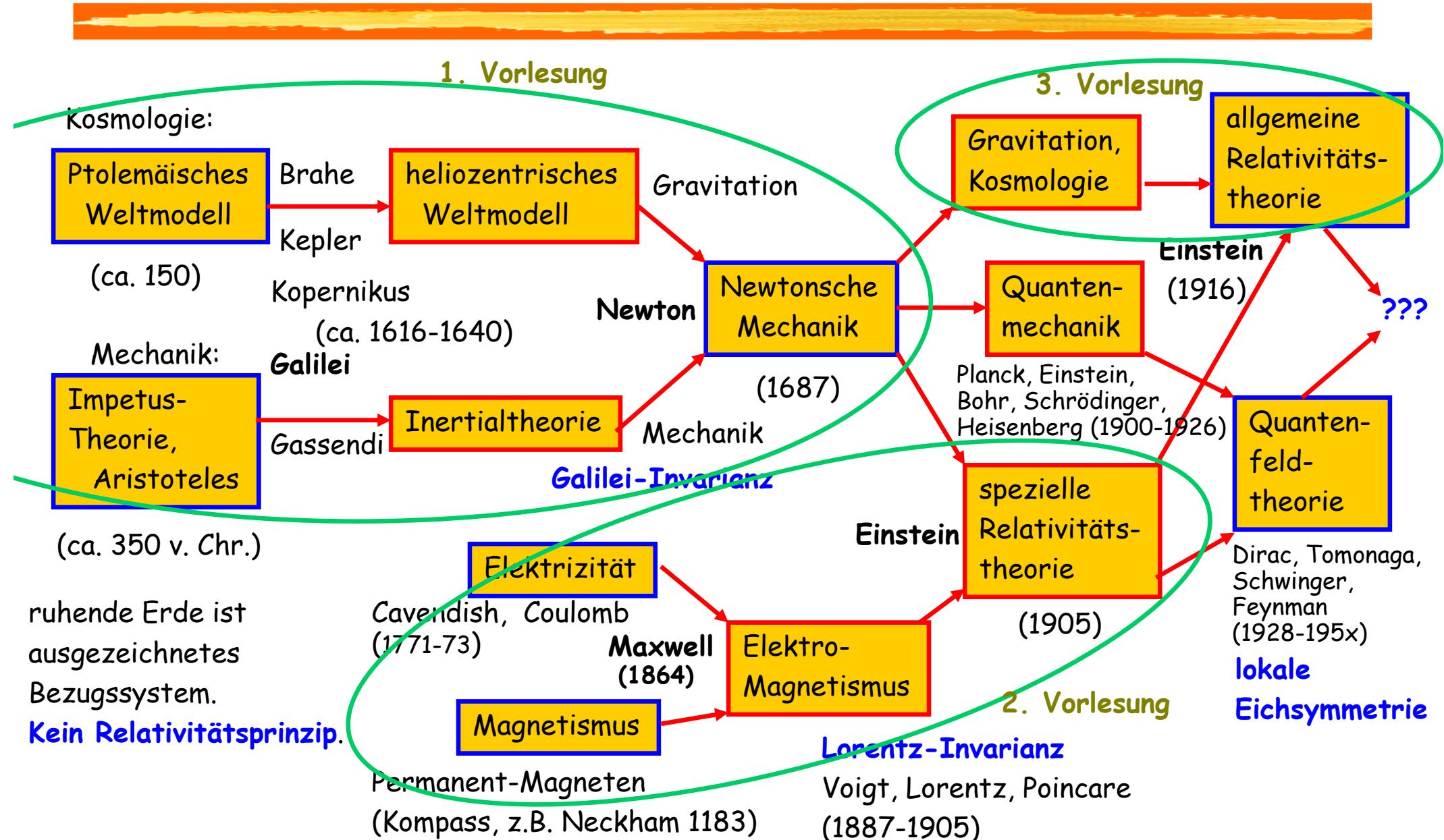
Literatur: beliebiges Lehrbuch Kosmologie/ Astrophysik

z.B. Klapdor-Kleingrothaus/Zuber, Teilchenastrophysik

(mit Beiträgen ausgeliehen aus Vorträgen von A. Jersak und K. Wohlfart)

- Woraus besteht das Universum?
- Wie groß ist das Universum?
- Hat es ein "Ruhesystem"?
- Wie groß ist seine Masse?

Raum-Zeit-Symmetrien und die Vereinheitlichung der Kräfte



Woraus besteht das Universum?



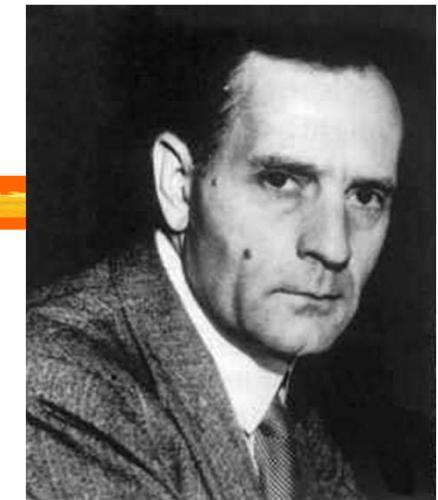
- Expandierendes Universum
- Sichtbare Materie
- Dunkle Materie
- Dunkle Energie

Das Hubble-Gesetz

(in einer modernen Form)

Galaxien scheinen sich
voneinander zu entfernen:

Rezessionsgeschwindigkeit v der Galaxien
ist rigoros proportional ihrem Abstand D



Edwin Hubble 1929

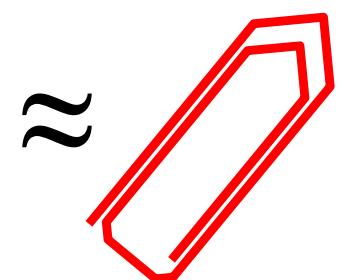
$$v(t) = H(t) \cdot D(t)$$

$H(t)$... Hubble-Expansionsparameter

misst die Expansionsgeschwindigkeit des Universums



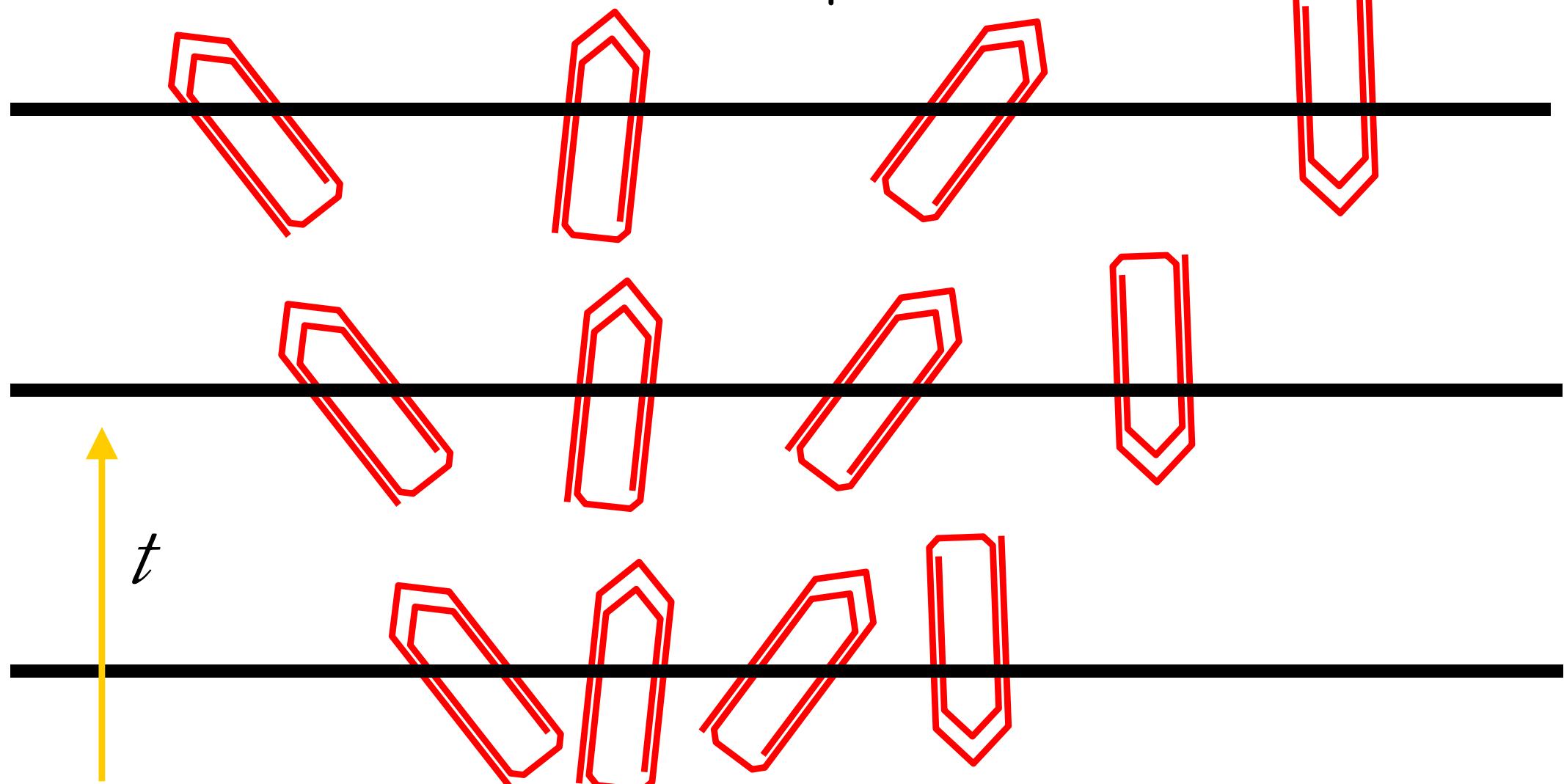
Gute
Näherung:



Quelle:
APOD

Der Raum **expandiert**
aber bleibt lokal immer gleich.

Galaxien entfernen sich voneinander,
aber sie **ruhen im Raum** und expandieren nicht.



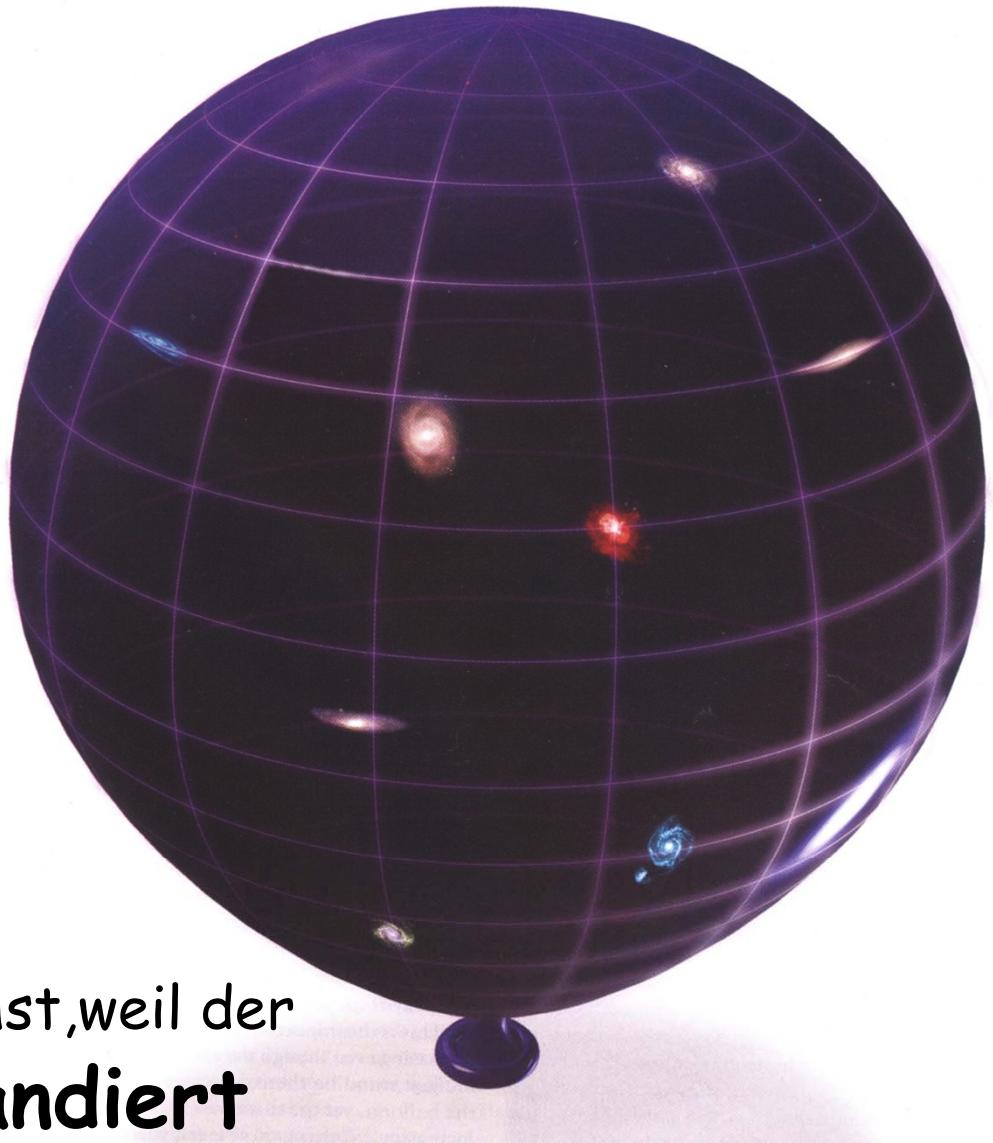
2-dimensionales Modell der Expansion

C.H.Lineweaver and T.M.Davis,
Scientific American, March 2005

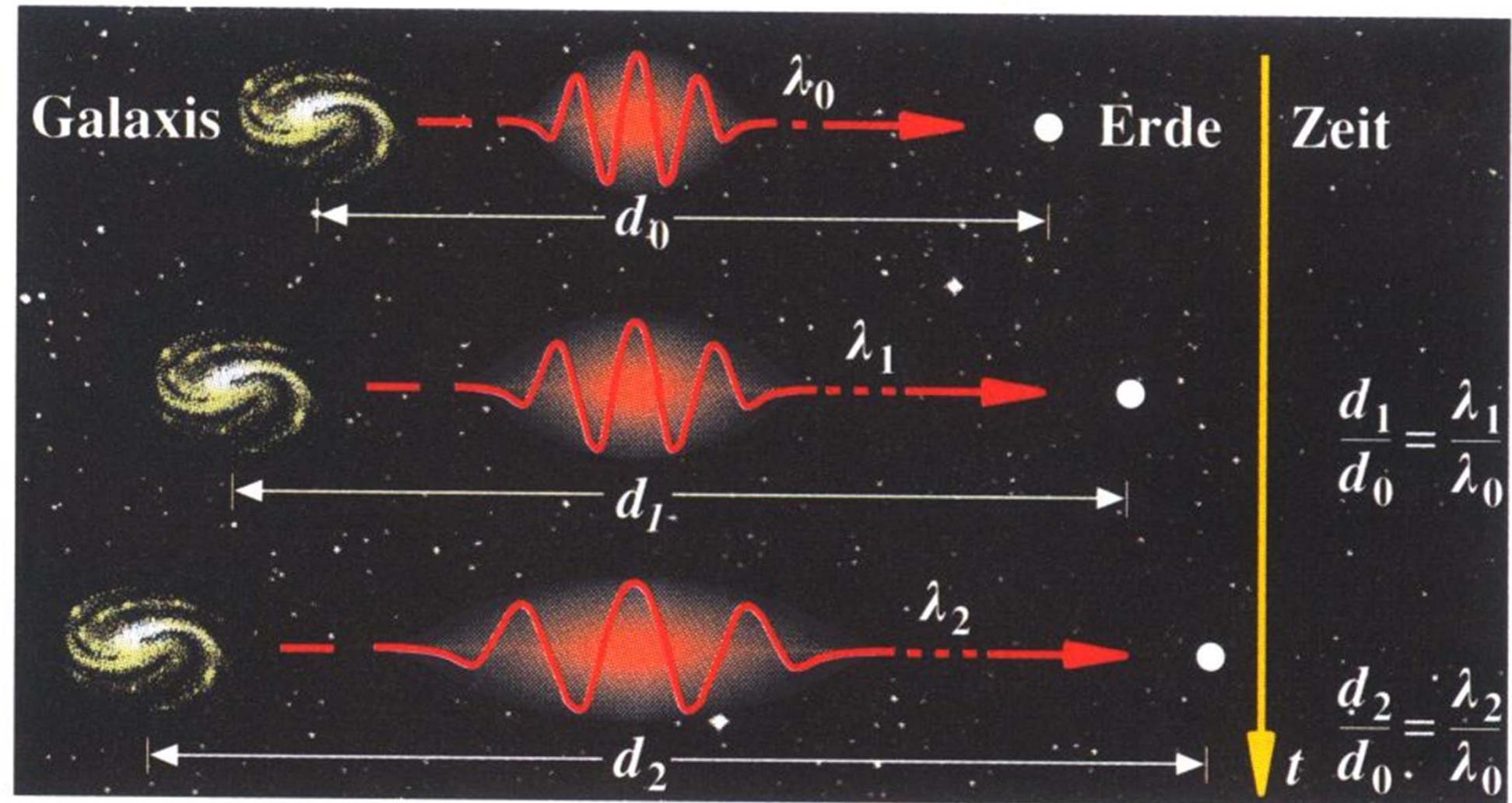
BIG BANG

Baffled by the expansion of the universe?
You're not alone. Even astronomers
frequently get it wrong

By Charles H. Lineweaver and
Tamara M. Davis



Abstand zwischen Galaxien wächst, weil der
Raum dazwischen expandiert
Galaxien selbst bewegen sich NICHT!



B 5: Durch die Expansion des Raumes vergrößert sich die Wellenlänge des Lichts von einer fernen Galaxis.

Kosmologische Rotverschiebung z



- Expansion der Wellenlänge λ des Lichtes während des Fluges durch den expandierenden Raum
- Hat nichts zu tun mit dem Bewegungszustand der Quelle.
=> **kein Dopplereffekt!**

$$1 + z = \frac{\lambda_{\text{beob}}}{\lambda_{\text{emis}}}$$

seit langem beobachtet!
(Hubble)

=> der Raum expandiert!

Typische beobachtete Werte von Z

- Erste Beobachtungen von Hubble 1929

$$D < 0,04 \text{ Gly} \quad z < 0.0003$$

- Galaxien auf dem Hubble-Abstand

$$D = D_H = 14 \text{ Glyn} \quad v = c \quad z = 1.5$$

- Quasare bis $z \approx 6.4$

- CMB Quelle: $v = 3c$ $z = 1090$

Urknall



■ Universum expandiert
=> war es einmal sehr klein?
Urknall !

bestätigt durch Beobachtung der
kosmischen Hintergrundstrahlung (3K):
"Echo" des Urknalls => später mehr

Rotationskurven von Spiralgalaxien

Erwartetes Verhalten der Rotationsgeschwindigkeit einer Spiralgalaxie:

Aus $G \frac{m \cdot M}{r^2} = \frac{m \cdot v^2}{r}$ folgt $v = \sqrt{\frac{G \cdot M}{r}}$

Mit $M = \frac{4}{3} \pi \cdot \rho \cdot r^3$ folgt $v = (\frac{4}{3} \pi \cdot G \cdot \rho \cdot r^2)^{\frac{1}{2}} \sim r$

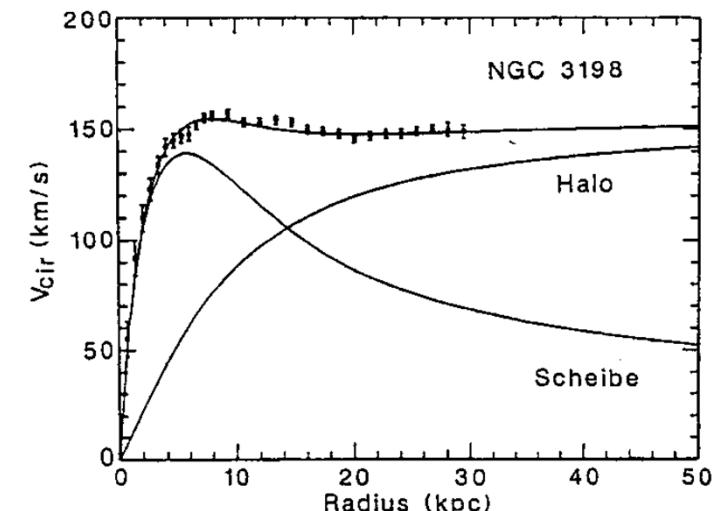
innerhalb der Galaxie. Ausserhalb ist mit $M = \text{const}$

$$v \sim \frac{1}{\sqrt{r}}$$

Aber: Messung aufgrund von
Dopplerverschiebung ergibt für große r :

$$v(r) = \text{const} \Rightarrow M \sim r$$

Erklärung durch
„Dunkle Materie“ in einen
sphärischen Halo um die Galaxie



Dunkle Materie um Spiralgalaxien



Dunkle Materie

im Halo um
eine Galaxie

Dunkle Masse
 $\approx 10 \times$
sichtbare Masse

Kandidaten:

- braune Zwerge?
(baryonisch)
- Neutrinos?
(leptonisch)
- WIMPS/SUSY?
(neue Physik)
- ...

Artist's view

Grenzen für baryonische Dunkle Materie:

Primordiale Nukleosynthese (3 min. nach dem Urknall):
Entstehung der leichten Elemente.

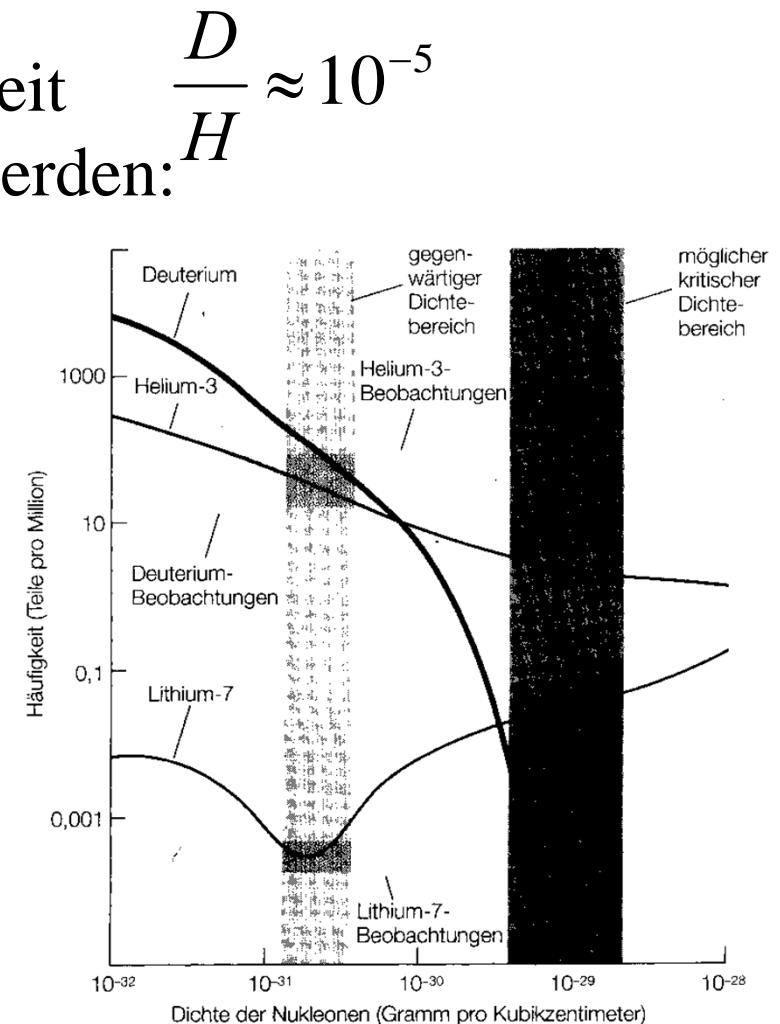
Aus der gemessenen Deuteriumhäufigkeit $\frac{D}{H} \approx 10^{-5}$
kann die Baryonendichte abgeschätzt werden:

$$\Rightarrow \Omega_{bar} < 0.1 - 0.2$$

Dies reicht aus, um z.B. die
Rotationskurven von Galaxien zu
erklären.

Aber: Circa 80% der Materie
besteht dann aus
nicht-baryonischer Materie

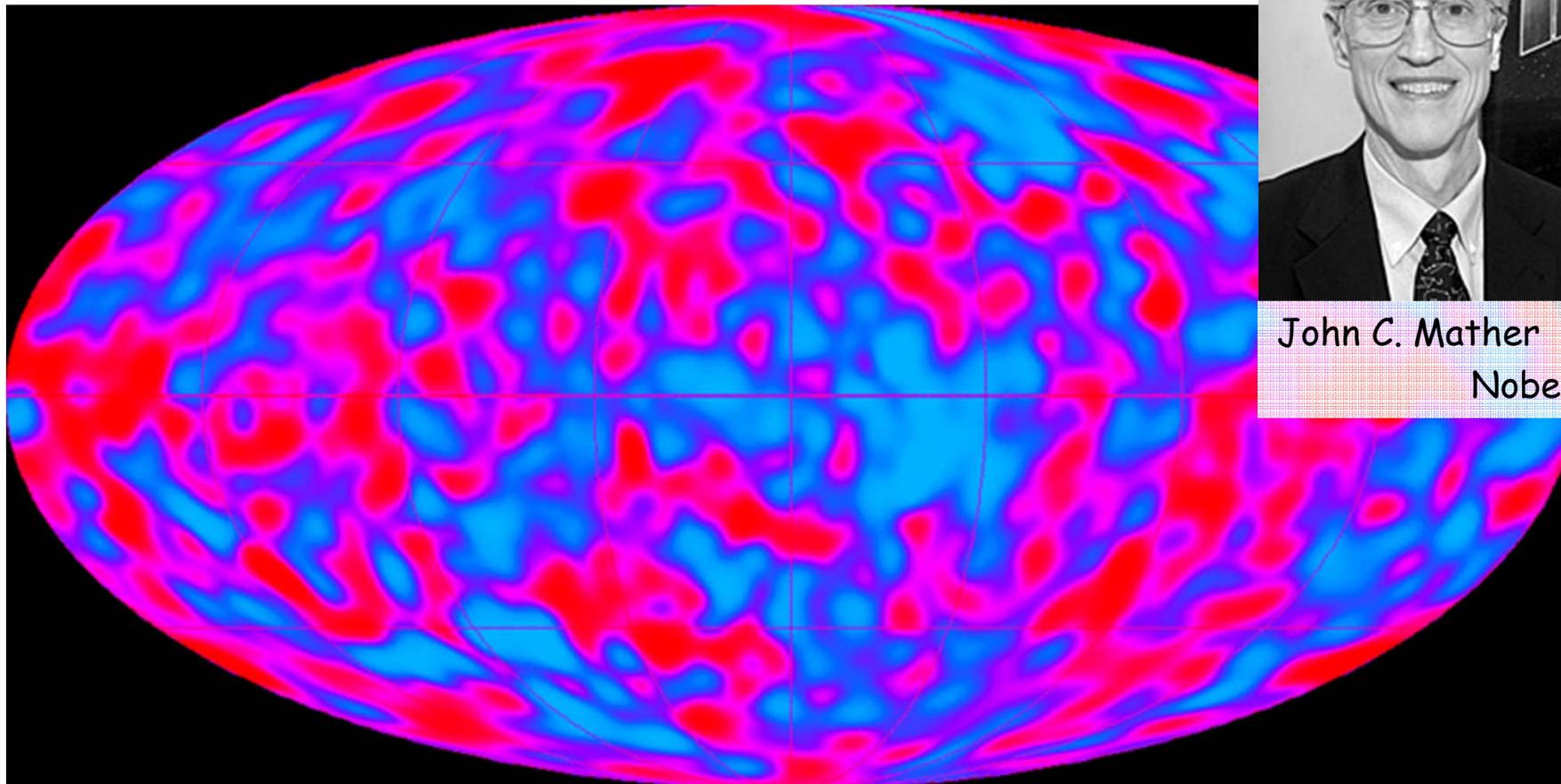
Woher wissen wir das?



Kosmische Hintergrundsstrahlung (CMB)

aus allen Himmelsrichtungen mit Temperatur $T_0 = 2,7..^{\circ}\text{K}$
Temperaturschwankungen nur **sehr fein** $0,000\,02^{\circ}\text{K}$

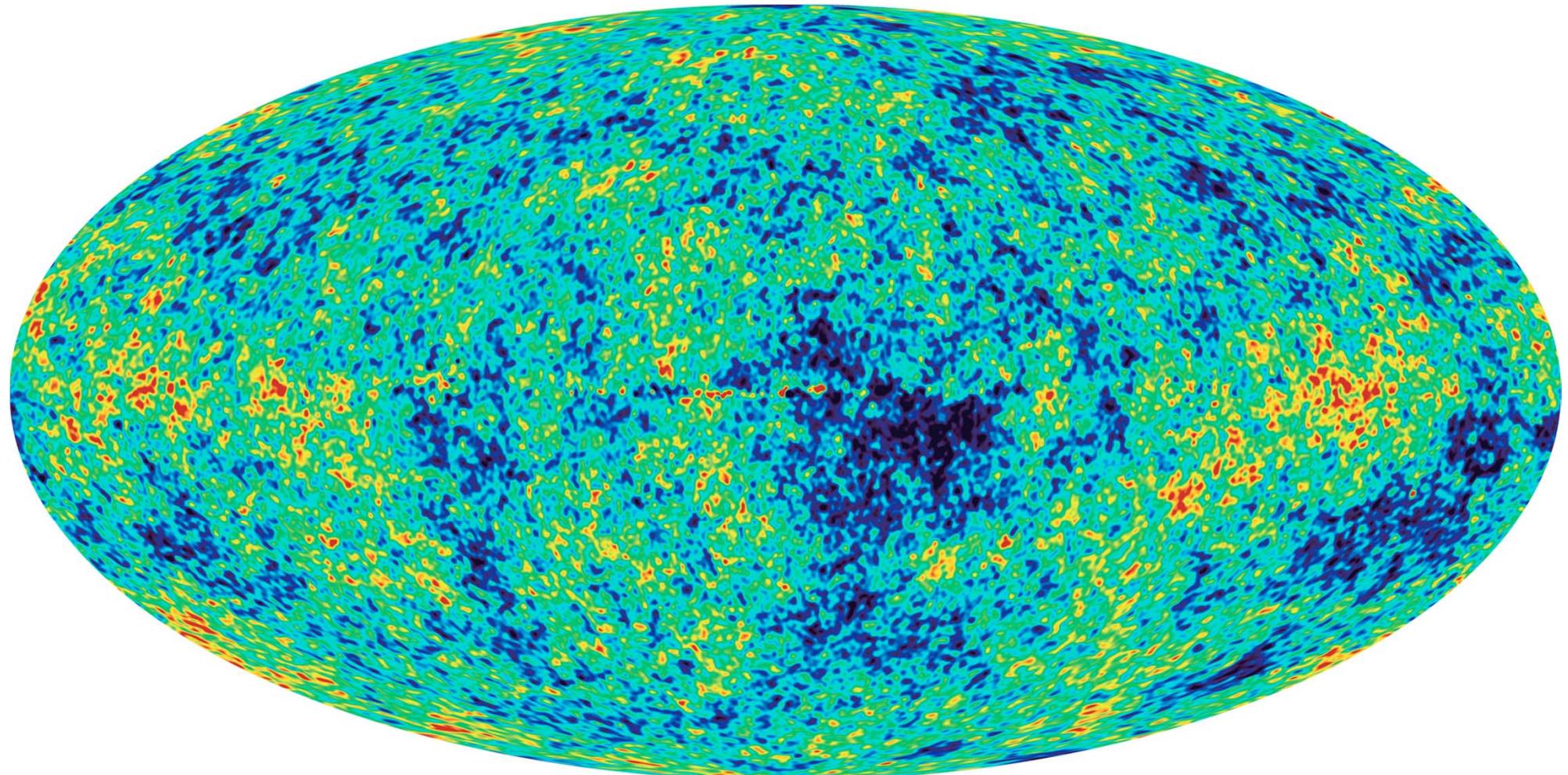
COBE Satellit:



Kosmische Hintergrundsstrahlung (CMB)

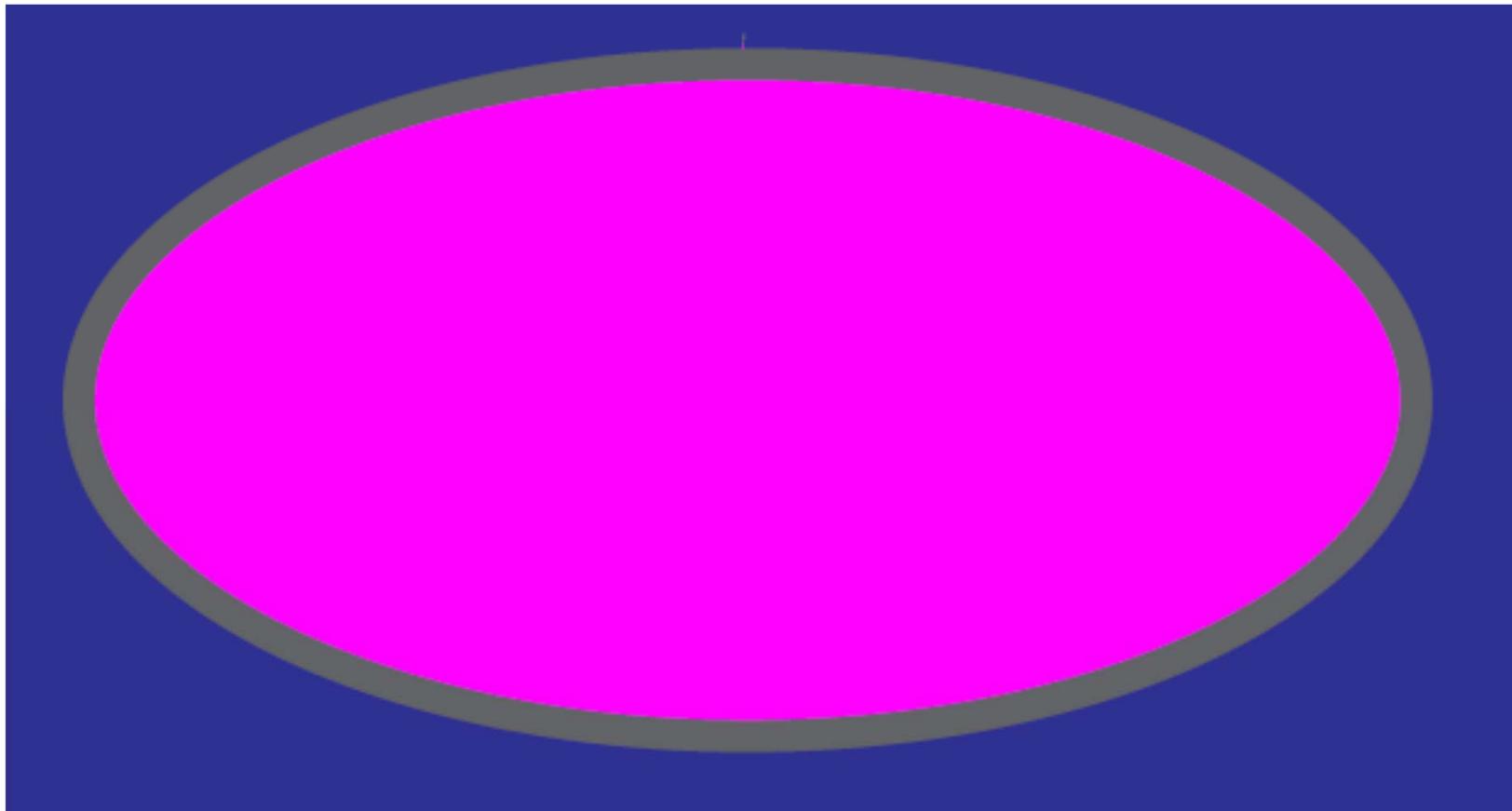
aus allen Himmelsrichtungen mit Temperatur $T_0 = 2,7..^{\circ}\text{K}$

Temperaturschwankungen nur **sehr fein** $0,000\,02^{\circ}\text{K}$ (WMAP Satellit)



Kosmische Mikrowellen-Hintergrundsstrahlung (CMB)

aus allen Himmelsrichtungen bei **größerer** Temperaturauflösung: $T_0 = 2,7..^{\circ}\text{K}$



Auf kosmologischen Skalen ist das **beobachtbare Universum überall gleich** (gleichmäßige Materieverteilung)
... aber nur im "Ruhesystem" des Urknalls ! -> **ausgezeichnetes Koordinatensystem**

Kosmische Zeit t

gültig in ganzem Universum

allgemeine Relativitätstheorie

=> kein Inertialsystem (spez. Relativitätsth.)

dafür notwendig

weil das Universum überall gleich ist,
ist es auch überall gleich alt

⇒ Universumsalter t

wird durch die Expansionsbewegung wie durch
eine Sanduhr definiert

Heute: $t = t_0$ ($= 14 \text{ Gy}$)

Kosmische Skala $a(t)$



- Abstand normiert auf den heutigen

$$a(t) = \frac{D(t)}{D(t_0)}$$

- Alle Längenskalen in der Kosmologie sind proportional zu der kosmischen Skala

$$D(t) = D(t_0) \cdot a(t)$$

**$a(t)$ bestimmt die Expansion
auf allen Abständen gleichzeitig**

$a(t)$ beschreibt die Expansion

- $a(t_0) = 1$ $D(t_0)$ heute
- $a(t) = 2$ $D(t) = 2D(t_0)$
- $a(t) = 1/1000$ $D(t) = D(t_0)/1000$

$$H(t) = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)}$$

Wie schnell expandiert das Universum?

- Hubble-Gesetz: $v(t) = H(t) D(t)$
- $H(t)$ gross ... schnellere Expansion
- $H(t)$ klein ... langsamere Expansion

$$H(t) = ? \Leftrightarrow a(t) = ?$$

Empirische Eigenschaften des $H(t)$:

■ $H(t)$ ist t -abhängig

■ Nach dem Urknall nimmt für lange Zeit ab

$H(t) \sim 1/t \Rightarrow$ verlangsamte Expansion

■ Seit ein paar Gy

$H(t) \approx \text{const} \Rightarrow$ beschleunigte Expansion

■ Der heutige Wert („Hubble-Konstante“):

$$H(t_0) = 70 \text{ km/s Mpc} \quad (1 \text{ Mpc} = 3 \text{ 000 000 ly})$$

THEORIE der Expansion

- Gleichungen der Einsteinschen Allgemeinen Relativitätstheorie (ART)

$$H^2(t) = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho_{Materie}(t) + \frac{1}{3} \Lambda - (\text{Krümmungsterm})$$

Kosmologische Konstante Λ

- von Einstein 1917 eingeführt
 - zur Kompensation des negativen Materiebeitrags, um ein statisches Universum zu erreichen
- nachträglich bedauert, aber wieder hochaktuell !

kritische Dichte des Universums

Materie krümmt den Raum

Kritische Dichte Ω : Dichte bei der Krümmung $k = 0$:

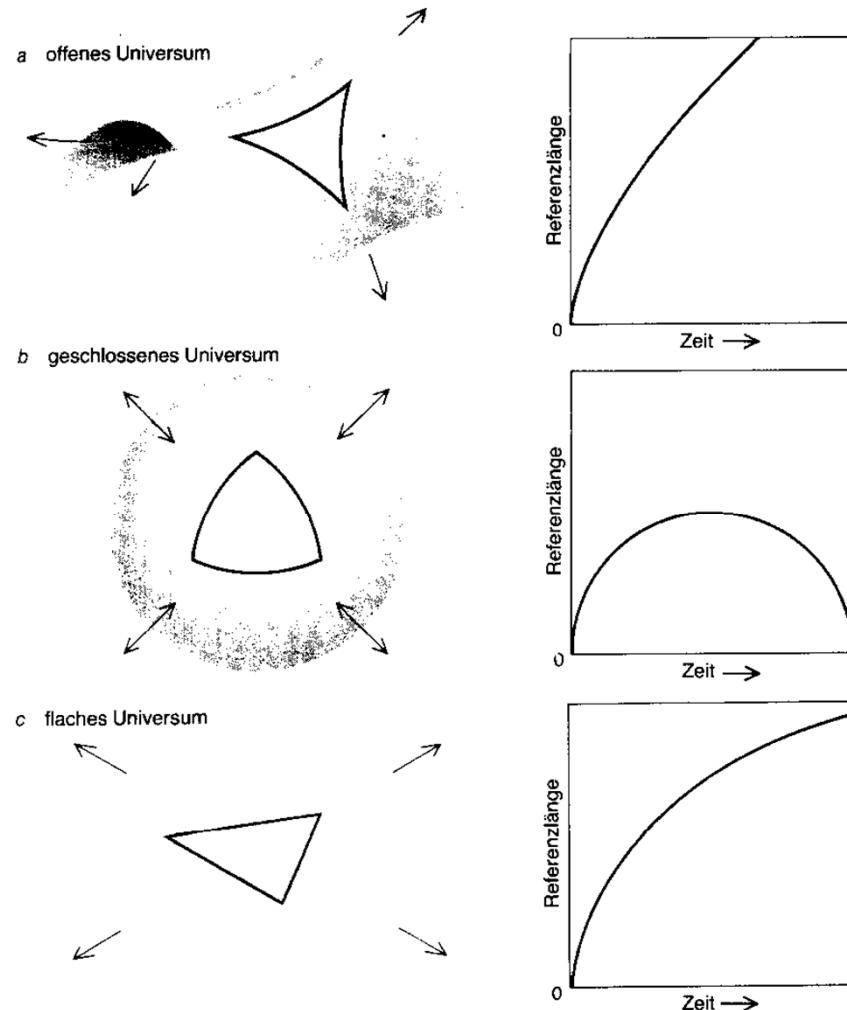
$$\rho_c = \frac{3}{8} \frac{H^2(t) - [\Lambda c^2/3]}{G\pi}$$

mit $\rho_0 = \Omega \cdot \rho_c$ folgt:
(Definition)

$$\Omega = \frac{8\pi \cdot G \cdot \rho_0}{3H^2 - [\Lambda c^2]}$$

Zukunft des Universums (vereinfacht)

3 Szenarien für die Zukunft des Universums: (falls $\Lambda = 0$)



$$\Omega < 1$$

$k < 0$: Universum offen,
unendliche Expansion

$$\Omega > 1$$

$k > 0$: Universum geschlossen,
„Big Crunch“

$$\Omega = 1$$

$k = 0$: Universum flach,
asymptotische Expansion

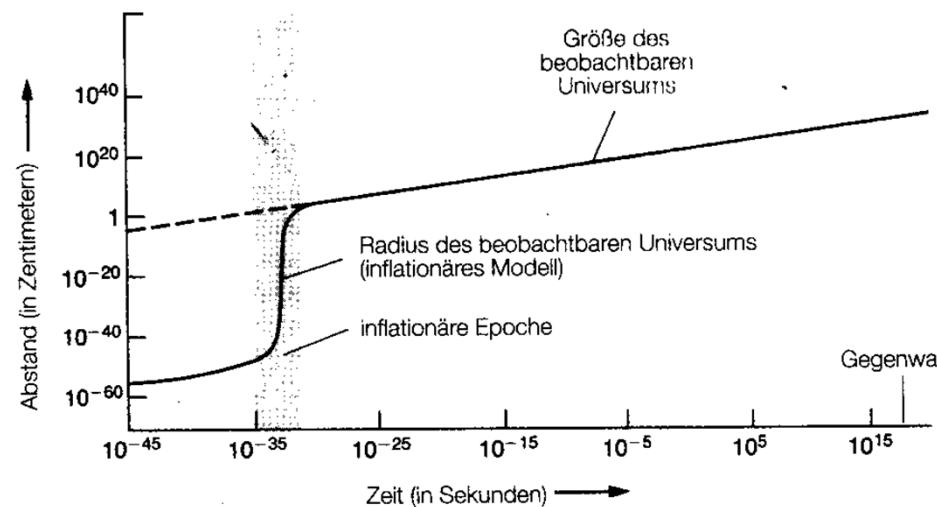
Inflation

Vermutung $\Omega = 1$, da $\Omega(t) = k \left(\frac{dR(t)}{dt} \right)^{-2} + 1$ für $k \neq 0$ instabil ist.

Beispiel: $\Omega(\text{heute}) = 1 - 10^{-2}$ $\Omega(1 \text{ s}) = 1 - 10^{-16}$

deshalb **inflationäres Universum**:

in inflationärer Phase ($10^{-34} \text{ s} - 10^{-31} \text{ s}$) exponentielle Expansion,
dadurch Glättung der anfänglichen Krümmung des Universums
und $\Omega(\text{heute}) = 1$.



THEORIE der Expansion

- Gleichungen der Einsteinschen Allgemeinen Relativitätstheorie (ART)

$$H^2(t) = \left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho_{Materie}(t) + \frac{1}{3} \Lambda - (\text{Krümmungsterm})$$

Beschleunigung:

$$\ddot{a}(t) = \frac{1}{3} \left(-4\pi G \cdot \rho_{Materie}(t) + \Lambda \right) a(t)$$

Qualitative Beschreibung der Expansionsbeschleunigung:



Materie ρ bremst die Expansion

$$\ddot{a}(t) < 0$$

Wieviel Materie?

Einstein'sche Kosmologische Konstante

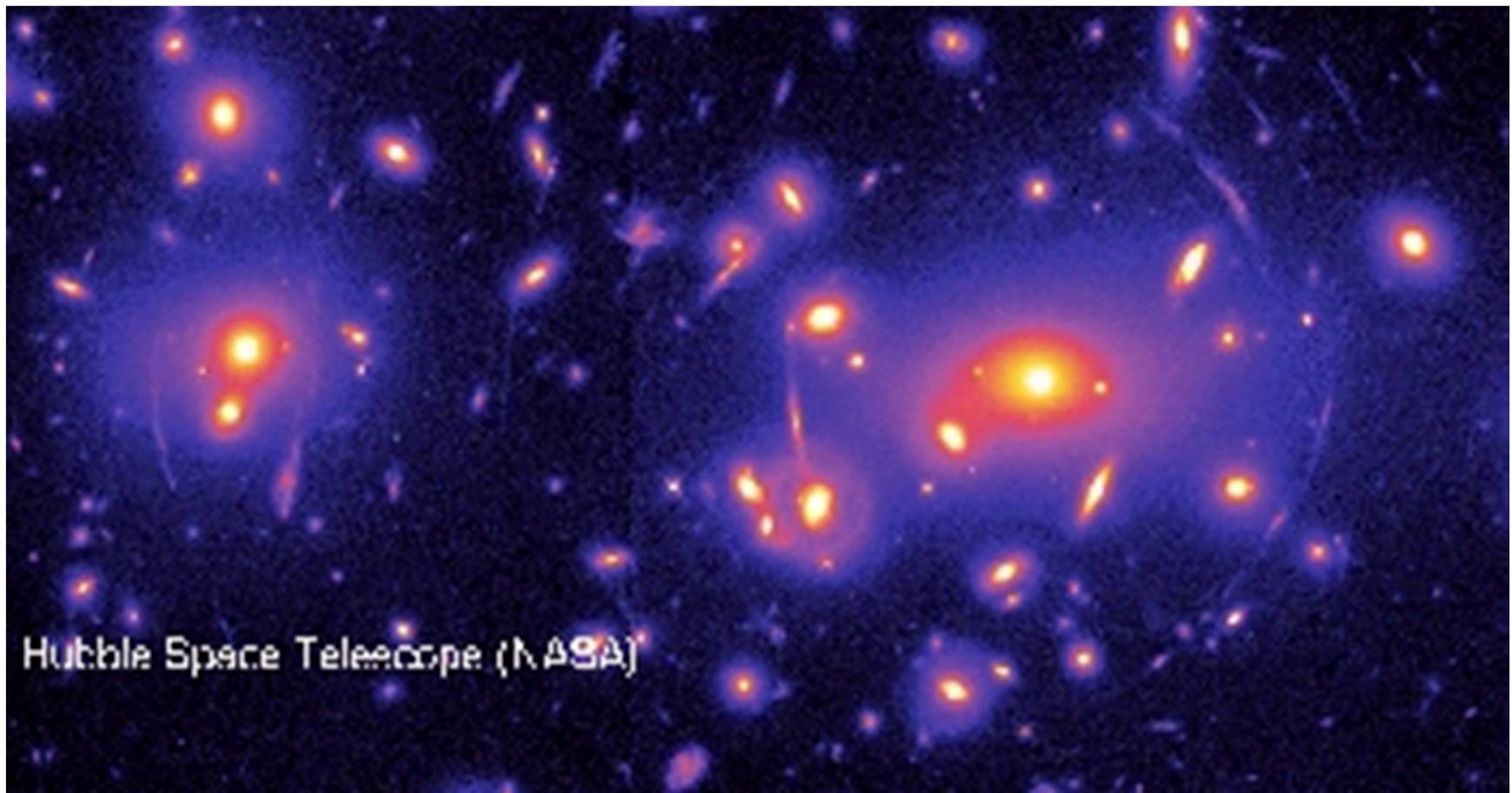
Λ beschleunigt die Expansion

$$\ddot{a}(t) > 0$$

ist $\Lambda = 0$
oder nicht?

Gravitationslinseneffekt

Erzeugen von Mehrfachbildern aufgrund von Massen zwischen Quelle und Beobachter

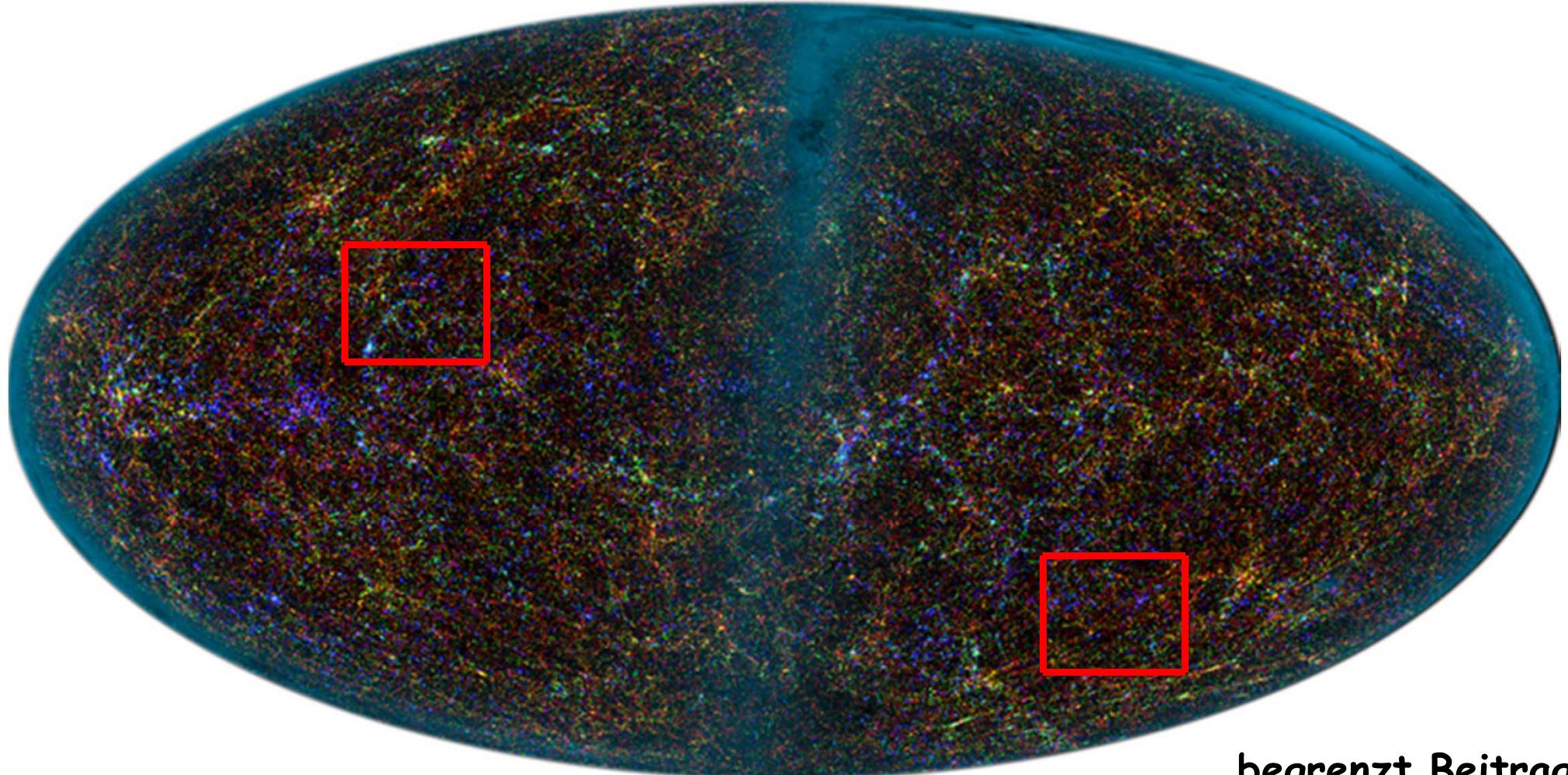


Hubble Space Telescope (NASA)

Galaxienhaufen Abell 2218

**sensitiv auf unsichtbare
grosse Massen**

Verteilung der Galaxien über den ganzen Himmel



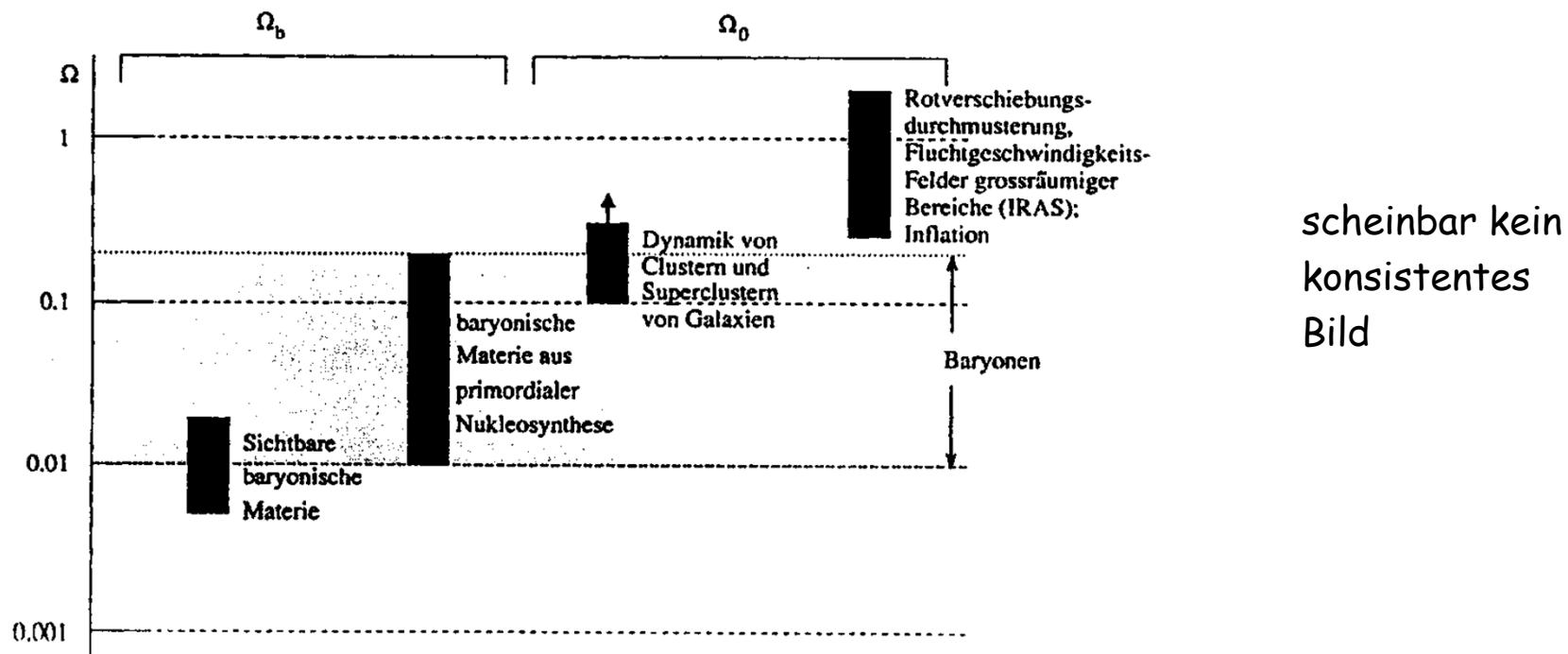
begrenzt Beitrag
von Neutrinos
und Baryonen

<http://spider.ipac.caltech.edu/staff/jarrett/papers/LSS/>

Messungen der Dichte

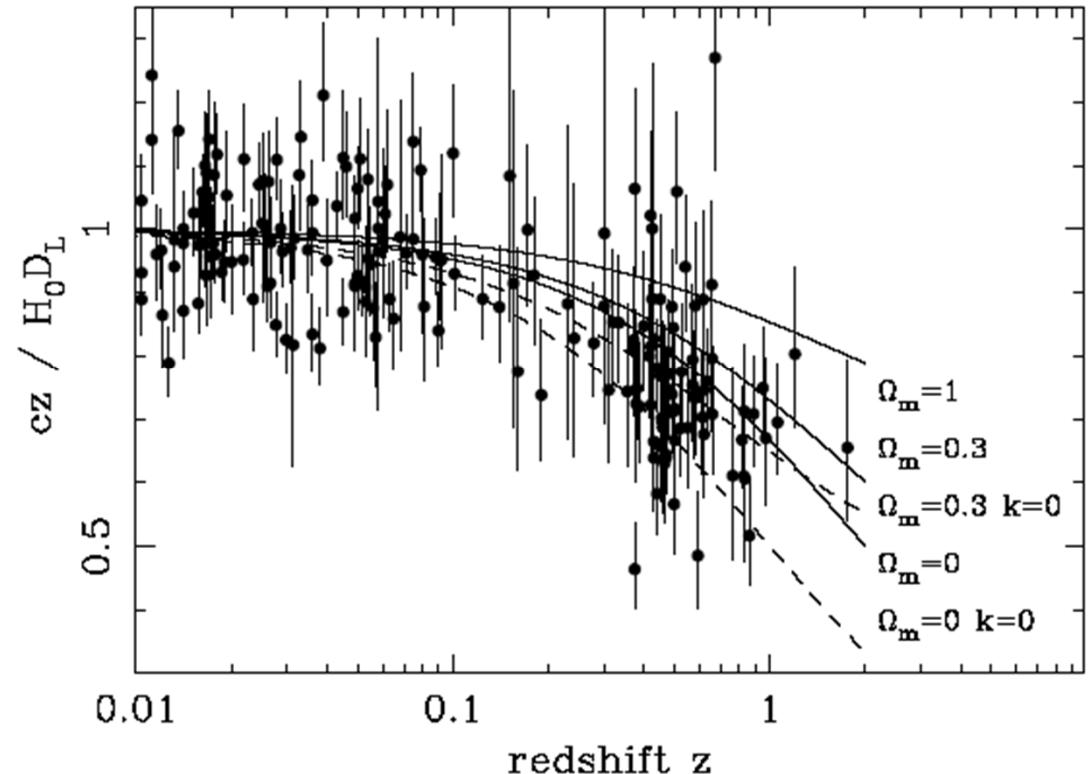
Messwerte für Ω

- Luminosität von Galaxien: $\Omega = 0.02$
- Dynamik von Clustern und Superclustern: $0.1 < \Omega < 0.3$
- Fluchtgeschwindigkeit großräumiger Bereiche: $0.25 < \Omega < 2$



Entdeckung der letzten 10-15 Jahre:

Supernovae-
Beobachtungen =>
die Expansion
beschleunigt
sich!



Ein Beschleunigungsterm
wie das Λ ist notwendig

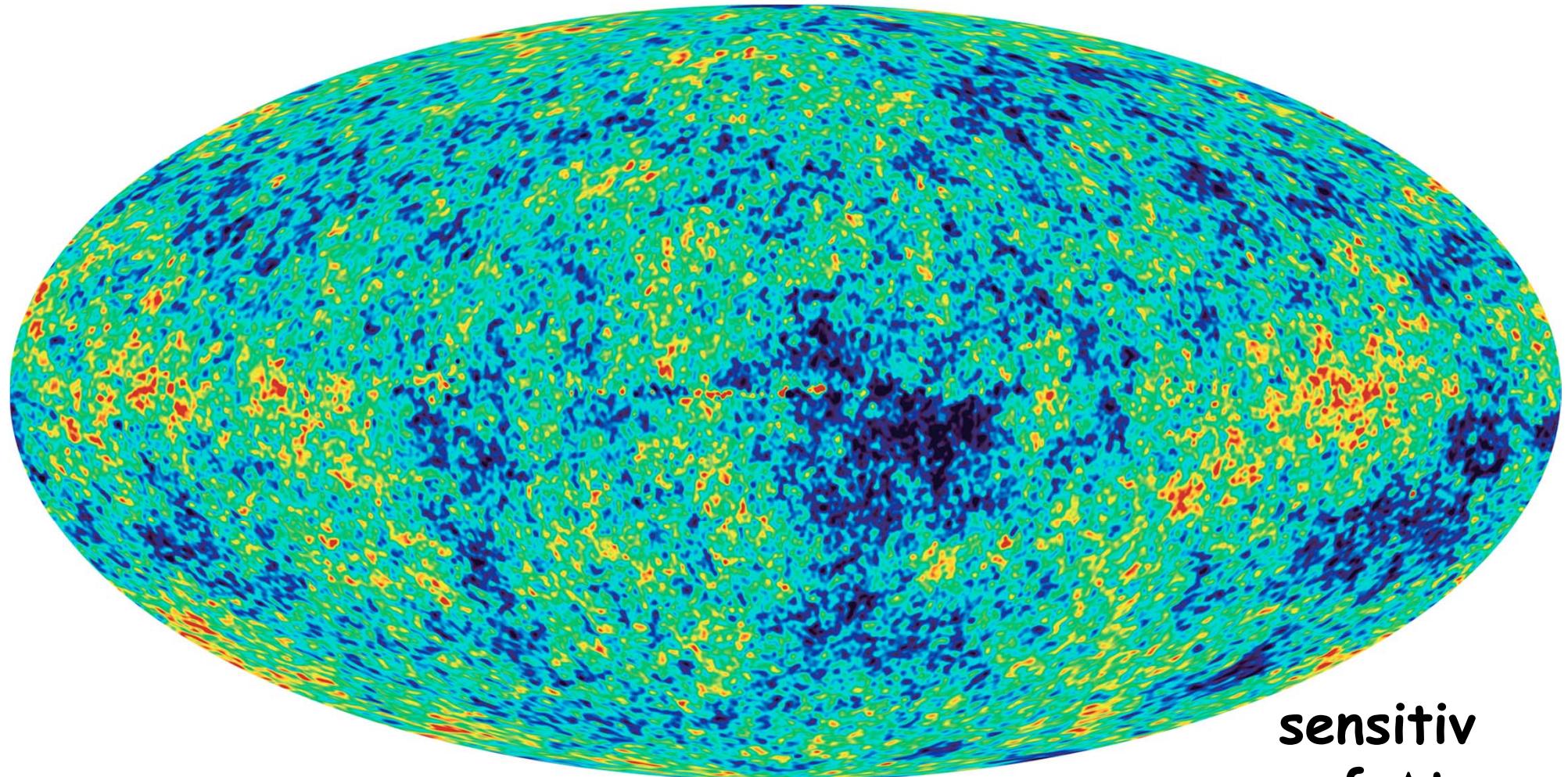


S. Perlmutter B.P. Schmidt A.G. Riess
Nobel 2011

Kosmische Hintergrundsstrahlung (CMB)

aus allen Himmelsrichtungen mit Temperatur $T_0 = 2,7..^{\circ}\text{K}$

Temperaturschwankungen nur **sehr fein** $0,000\,02^{\circ}\text{K}$ (WMAP Satellit)



sensitiv
auf Λ !

WMAP Spektrum der Fluktuationen

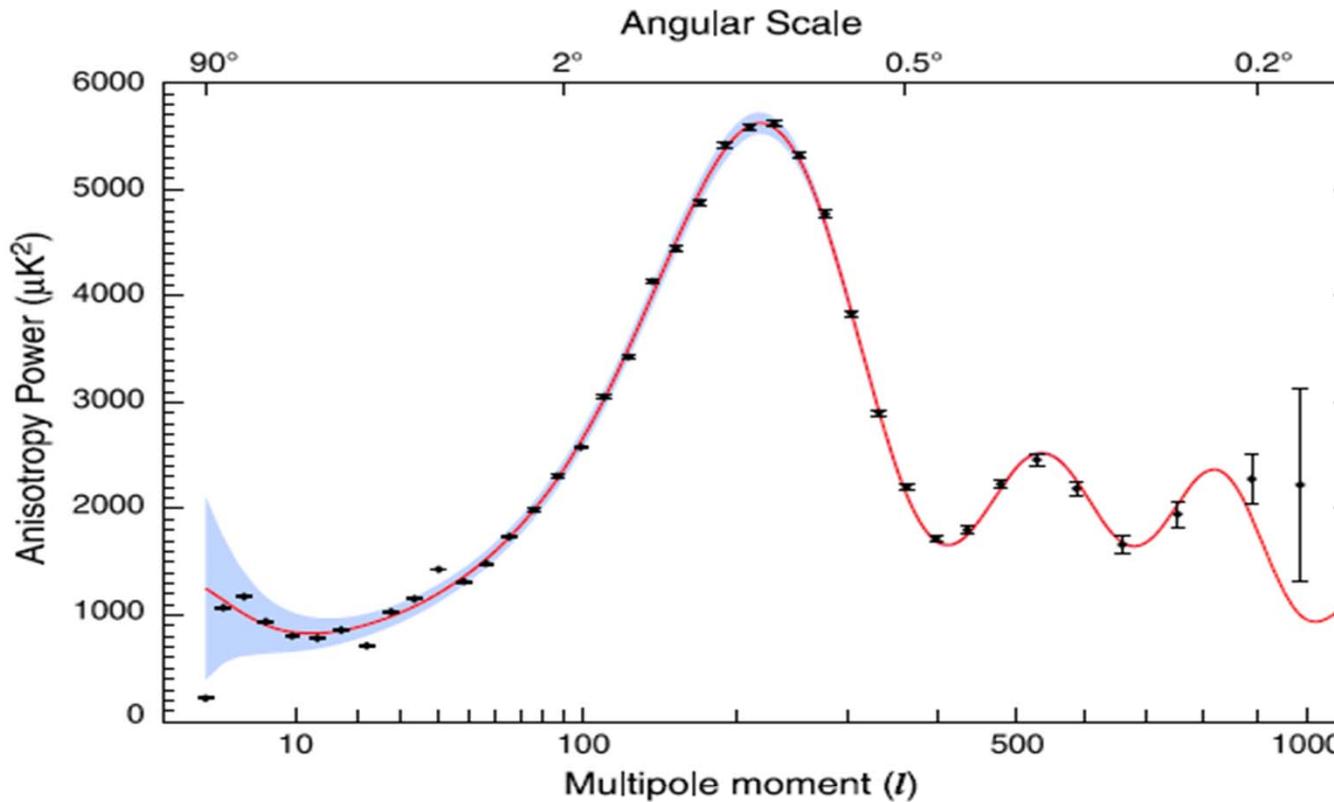


Figure 21.2: The angular power spectrum of the cosmic microwave background temperature from WMAP3. The solid line shows the prediction from the best-fitting ΛCDM model [2]. The error bars on the data points (which are tiny for most of them) indicate the observational errors, while the shaded region indicates the statistical uncertainty from being able to observe only one microwave sky, known as cosmic variance, which is the dominant uncertainty on large angular scales. [Figure courtesy NASA/WMAP Science Team.]

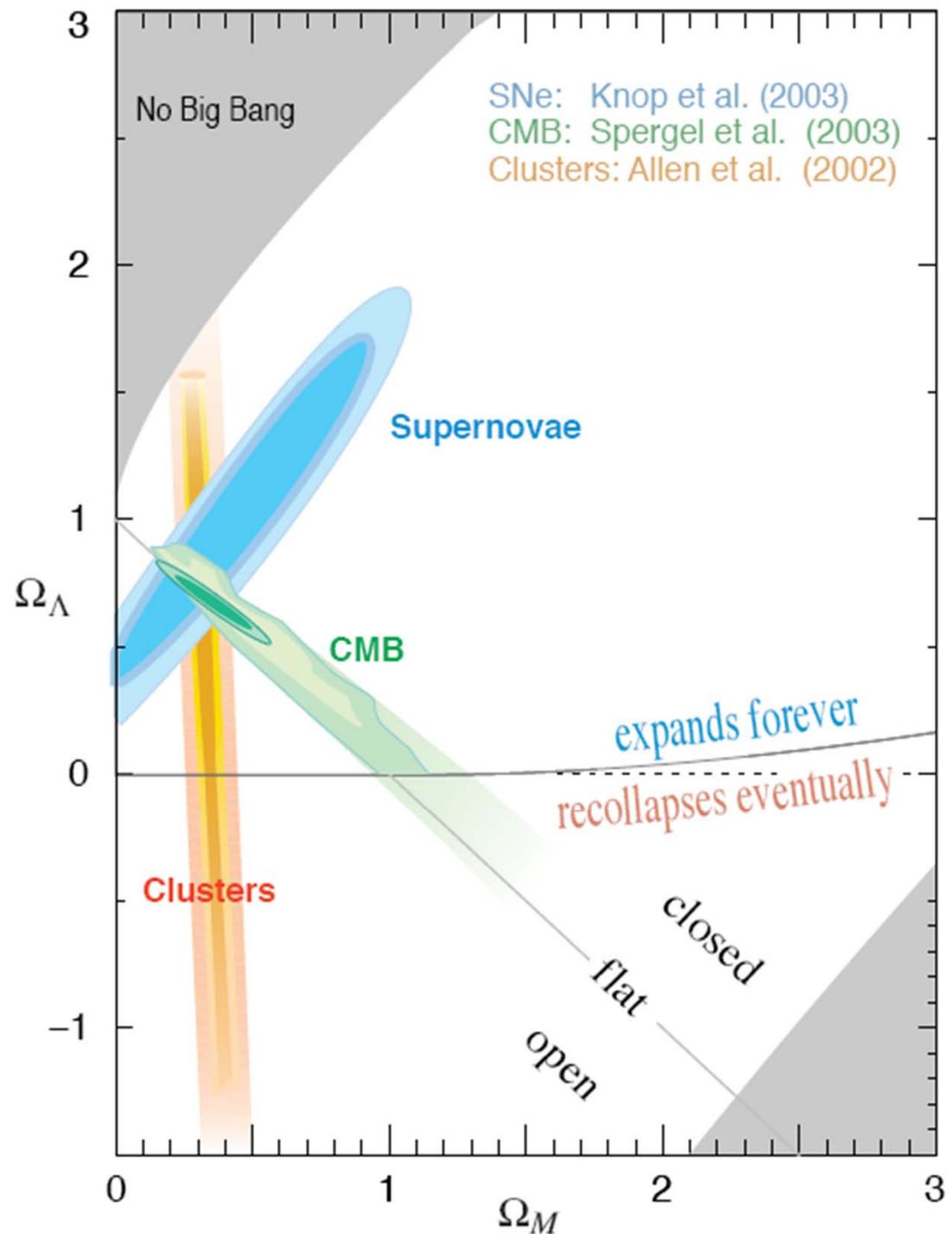
Dichte



des Universums

Ω_Λ : Beitrag von Λ
zur kritischen Dichte

Ω_M : Beitrag der Materie
zur kritischen Dichte



Was bewirkt die Beschleunigung?

■ Naturkonstante

= kosmologische Konstante Λ à la Einstein?

Wert: $\sim \text{meV}$

■ Energie des Vakuums (Quanteneffekt)?

Zu erwarten, aber Theoretiker können sie nicht berechnen
(sie können schon, aber der Wert liegt bis zu
120 Größenordnungen daneben ...)

■ Quintessenz? Ein neues Feld $\approx \Lambda(t)$?

Vorschlag von Ch. Wetterich (Heidelberg) u.A.

Dunkle Energie

Naturkonstante Λ , Vakuumenergie,
Quintessenz, ???

Kosmologen brauchen *irgendetwas* davon:

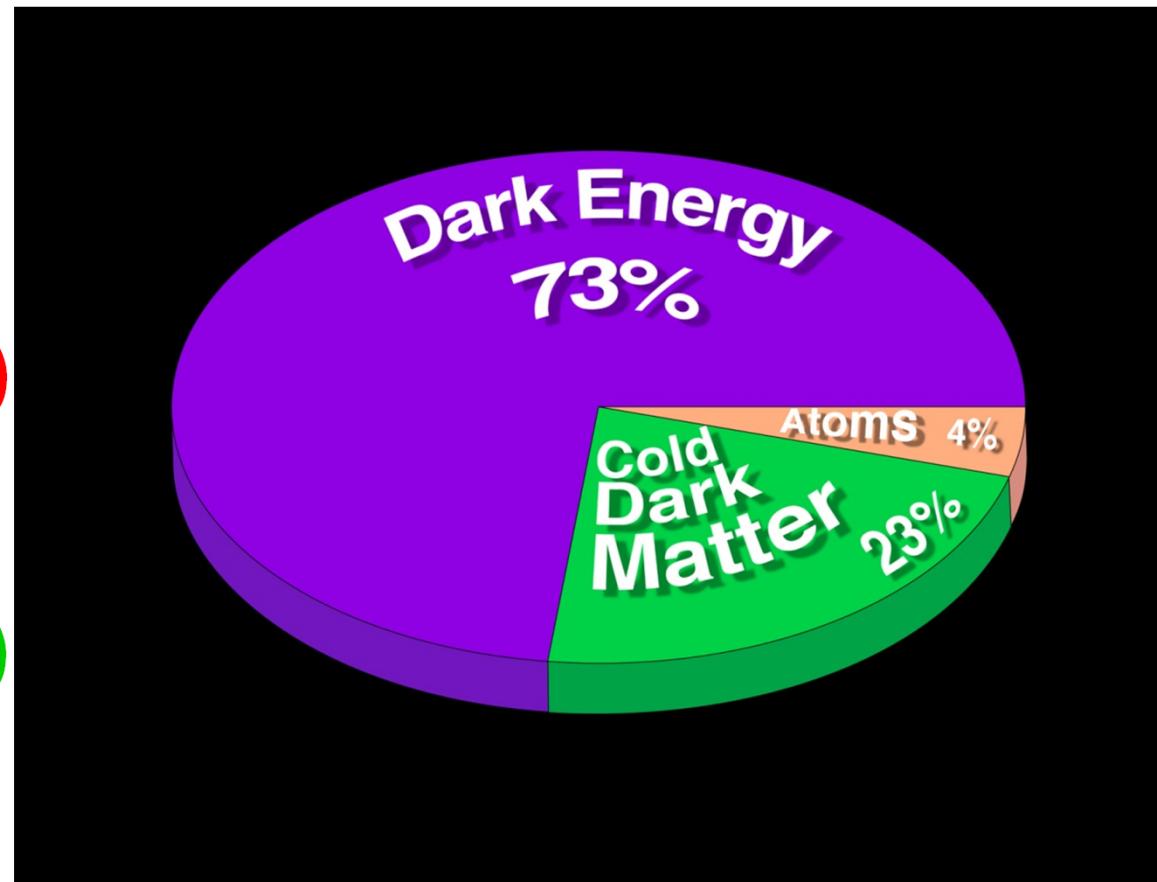
„DUNKLE ENERGIE“

Niemand weiss, was das ist,
weil es **durchsichtig** (unbeobachtbar) ist!

- Spannung des leeren Raumes („negativer Druck“)
- Eine ganz neue Kategorie?

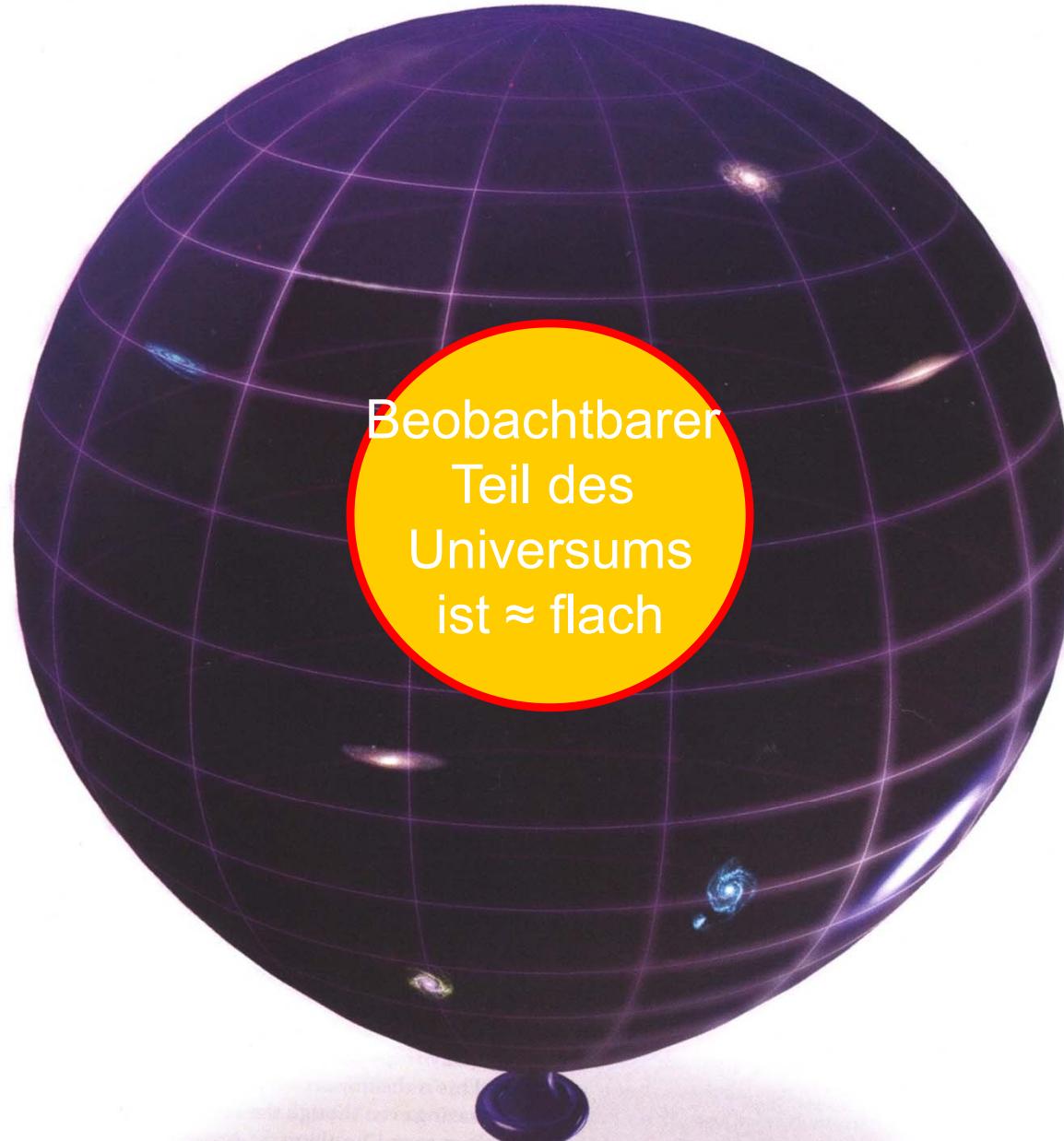
Energie im heutigen Universum

- 73 % dunkle Energie dominiert
- 4% bekannte Materie \approx Atome (Sterne, H-Gas, wir)
- 23 % unbekannte Materie („dunkle Materie“)
- Materie bremst, dunkle Energie beschleunigt die Expansion



WMAP

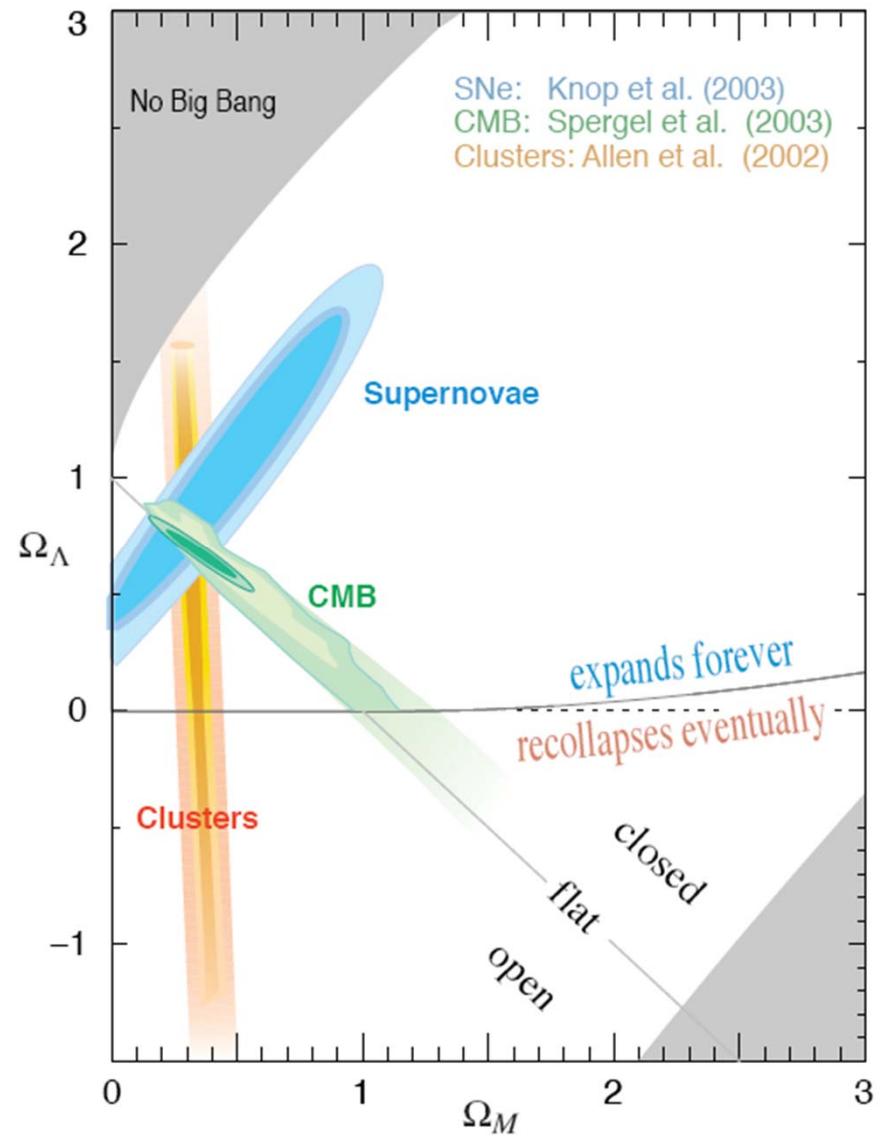
Beobachtung: Universum fast flach!



Luftballon-
Oberfläche
als 2-dim
Modell des
Universums

Wie gross ist das Universum?

- Wir wissen es nicht genau
- Radius auf jeden Fall sehr gross
(Universum fast flach)
könnte aber gerade eben noch geschlossen sein!



Was ist die Masse des Universums?



- Frage nur sinnvoll für geschlossenes Universum
- nur Λ : $\rho \cdot 2\pi^2 R^3 = \pi c^2 / 2G\sqrt{\Lambda}$
- mit Materie: größer!

Zukunft des Universums?

