

Sterne, Galaxien und das Universum

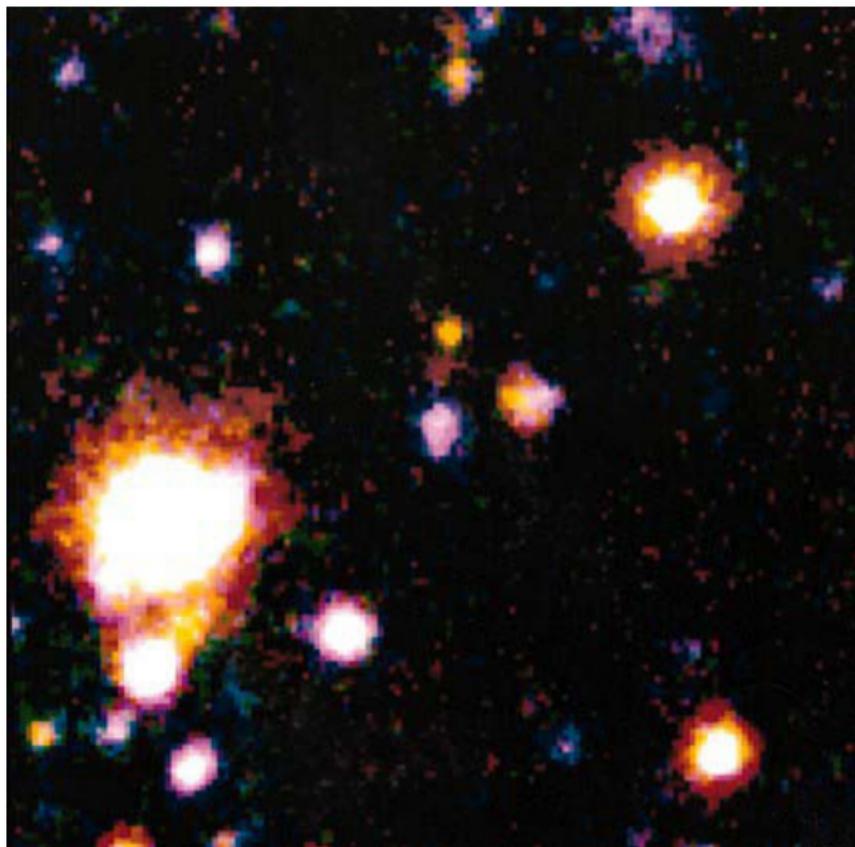
Teil 9: Kosmologie

Peter Hauschildt
yeti@hs.uni-hamburg.de

Hamburger Sternwarte
Gojenbergsweg 112
21029 Hamburg

5. Juli 2019

Entfernte Galaxien



Übersicht

- ▶ Olber's Paradox
- ▶ Expansion des Universums
- ▶ Big Bang
- ▶ Die Zukunft des Universums

Olbers' Paradox

- ▶ hat schon Kepler beschäftigt
- ▶ Damalige Vorstellung von Kosmos:
 - ▶ unendlich groß
 - ▶ unendlich alt
 - ▶ statisch
- ▶ Wenn das stimmt →
- ▶ in jeder Sehrichtung liegt ein Stern
- ▶ → der Nachthimmel müsste so hell wie ein mittlerer Stern sein!
- ▶ ist er aber nicht
- ▶ → *Olbers' Paradox*

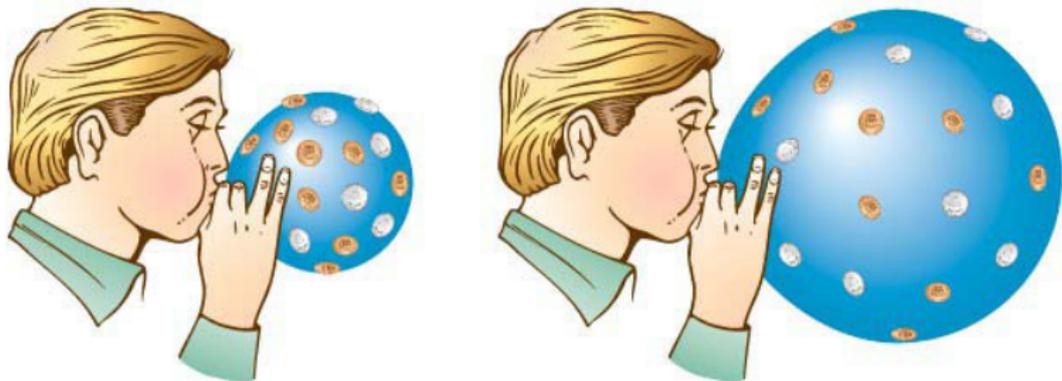
expandierendes Universum

- ▶ die alte Vorstellung des Universums ist *falsch*
- ▶ erster Hinweis: ART
- ▶ vollkommen anderes Verständnis von Raum und Zeit
- ▶ originale ART → Universum kann nicht statisch sein
- ▶ Einstein: Einführung einer ad-hoc Konstante:
- ▶ *Kosmologische Konstante*
- ▶ macht statisches Universum möglich
- ▶ aber: Hubble's Beobachtungen und Gesetz

$$v = H_0 d$$

- ▶ → Universum expandiert

expandierendes Universum



expandierendes Universum

- ▶ Kosmologisches Prinzip:
 - ▶ Homogen
 - ▶ Isotrop

expandierendes Universum

- ▶ der Raum selber expandiert
- ▶ → *kosmologische Rotverschiebung*
- ▶ ist *keine* Dopplerverschiebung!
- ▶ Raum zwischen Galaxien expandiert
- ▶ gravitativ gebundenes Objekt (Galaxie) expandiert nicht

Big Bang

- ▶ Universum expandiert
- ▶ → es war früher kleiner!
- ▶ Hubble Gesetz:

$$v = H_0 d$$

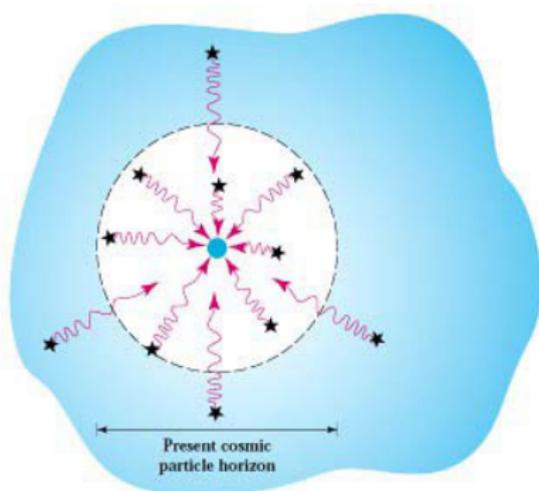
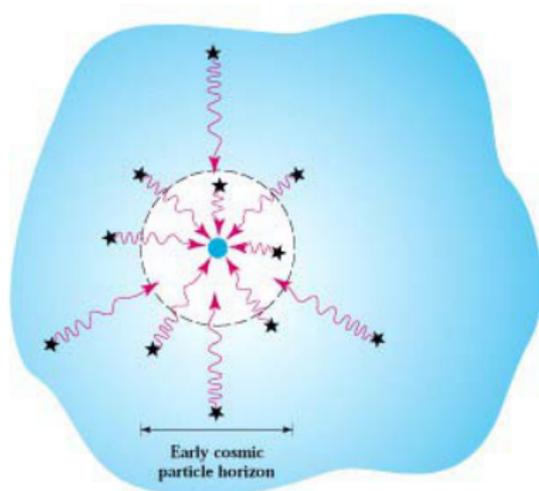
- ▶ damit waren alle Teile des Universum an einem Punkt zur Zeit

$$T_0 = \frac{d}{v} = \frac{d}{H_0 d} = \frac{1}{H_0}$$

Big Bang

- ▶ mit $H_0 = 75 \text{ km/s/Mpc}$ →
- ▶ $T_0 = 13 \text{ Gyr}$
- ▶ → vor ca. 13 Gyr entstand das Universum im
- ▶ *Big Bang*
- ▶ das Alter des Universums ist *endlich*
- ▶ → löst Olbers' Paradox:

Kosmischer Horizont



Big Bang

- ▶ Big Bang \rightarrow Universum \approx Zentrum eines Schwarzen Loches
- ▶ dort haben Raum/Zeit/Gesetze der Physik *keine* Bedeutung
- ▶ \rightarrow *Kosmische Singularität*
- ▶ nur nach Ablauf der *Planck Zeit*

$$t_P = \sqrt{\frac{Gh}{c}} = 1.35 \times 10^{-43} \text{ s}$$

'funktionieren' die Gesetze der Physik

Die Hintergrundstrahlung

- ▶ kann man den Big Bang nachweisen?
- ▶ kurz nach dem Big Bang war das Universum sehr heiß
- ▶ → es liefen überall thermodynamische Reaktionen ab
- ▶ → es bildet sich He (und wenig Li)
- ▶ hohe Temperaturen
- ▶ → Planck' Strahlungsfeld mit Maximum bei sehr hohen Energien

Die Hintergrundstrahlung

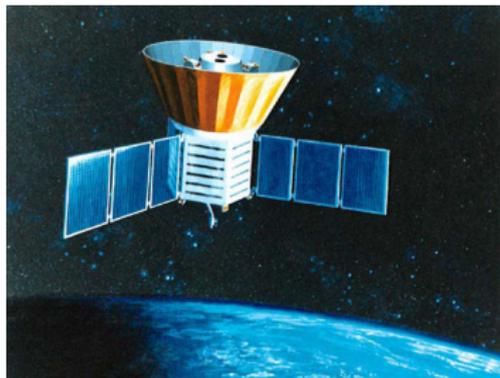
- ▶ seitdem hat sich der Raum 15 Gyr lang ausgedehnt
- ▶ → Rotverschiebung!
- ▶ → Photonen haben ca. 1 mm Wellenlänge
- ▶ → Temperatur der Strahlung ca. 3 K
- ▶ *Kosmische Hintergrundstrahlung*

Hintergrundstrahlung



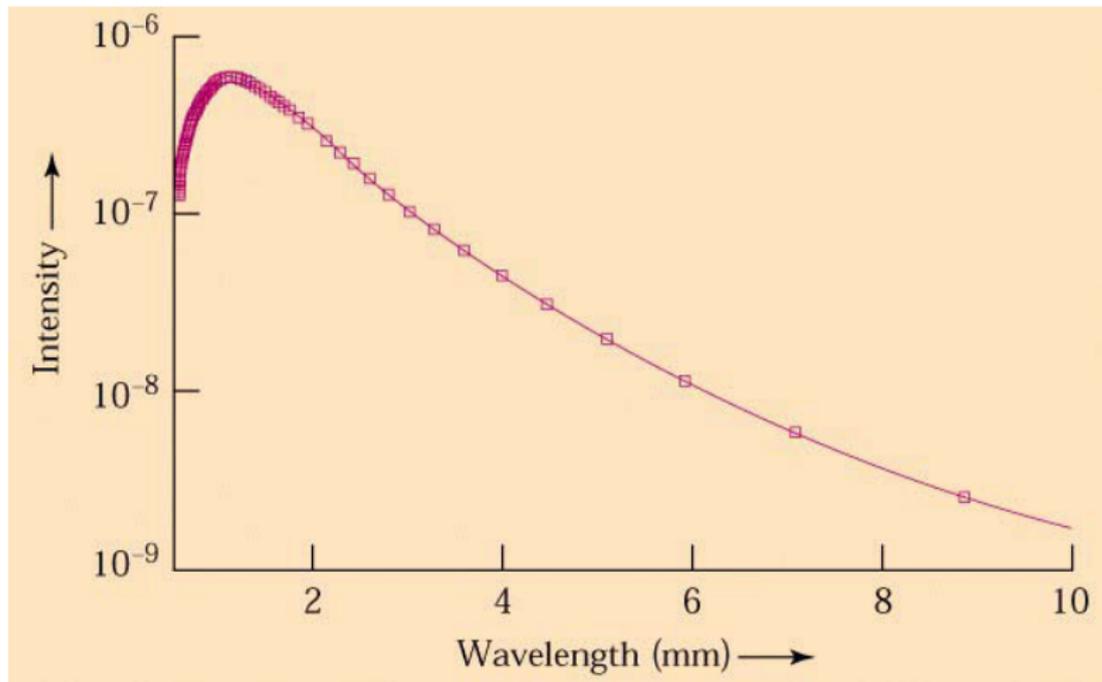
- ▶ durch Zufall gefunden mit dieser Antenne
- ▶ eigentlich gedacht für Mobil-Telephone
- ▶ Hintergrundrauschen!

Hintergrundstrahlung

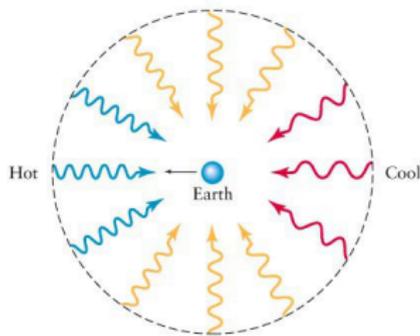


- ▶ genaueste Untersuchung:
- ▶ COBE Satellit (1989)
- ▶ Temperatur der Strahlung:
2.726 K

Hintergrundstrahlung

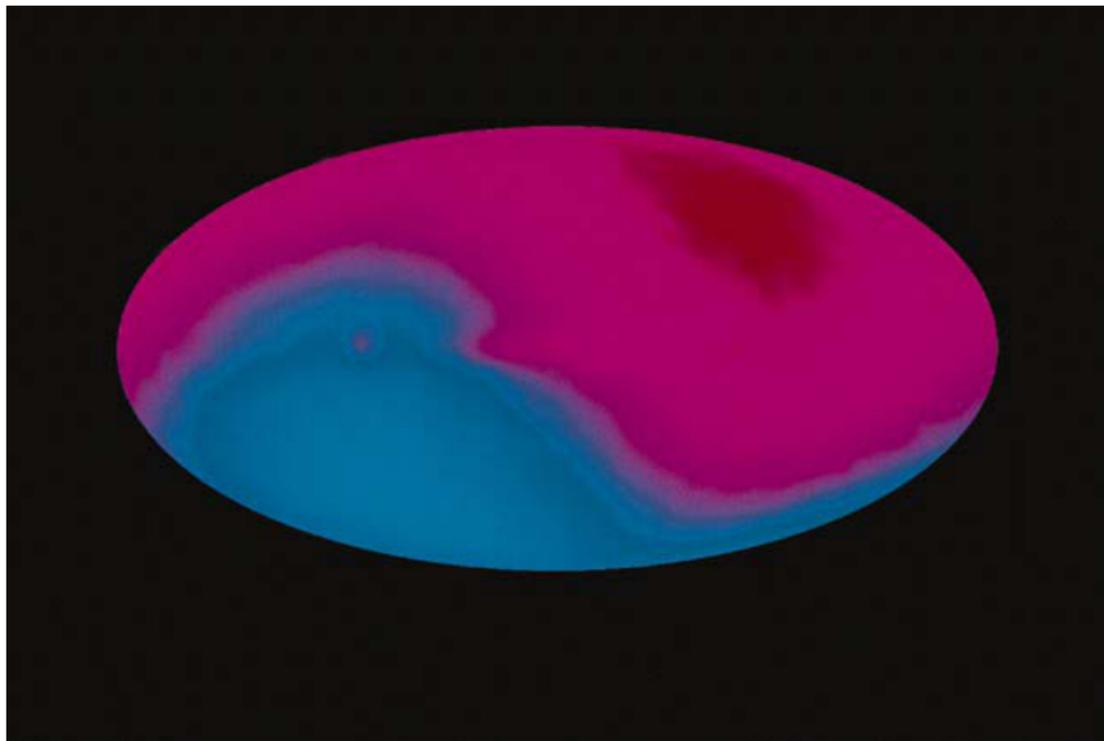


Hintergrundstrahlung



- ▶ nicht exakt isotrop:
- ▶ Sonnensystem bewegt sich
- ▶ → Doppler-Verschiebung
- ▶ 370 km/s, Richtung 'Löwe'

Hintergrundstrahlung



Great Attractor

- ▶ Milchstraße bewegt sich mit 600 km/s
- ▶ Richtung: Hydra-Centaurus Superhaufen
- ▶ dieser Superhaufen (und mehr) bewegt sich in Richtung des
- ▶ *Great Attractor*
- ▶ das scheint eine riesige Masse zu sein!

Das junge Universum

- ▶ Strahlung \rightarrow Energie \rightarrow Masse! ($E = mc^2$)
- ▶ \rightarrow Strahlungsdichte kann als Massedichte geschrieben werden
- ▶ Heute: Hintergrundstrahlung von 2.7 K
- ▶ \rightarrow Strahlungsdichte

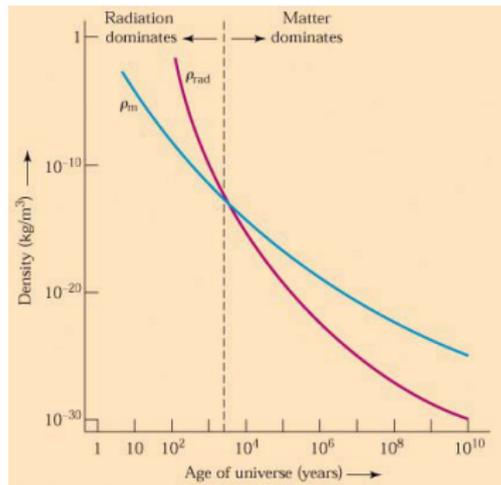
$$\rho_{\text{rad}} = 4.6 \times 10^{-31} \text{ kg/m}^3$$

- ▶ Vergleich mit mittlerer Materiedichte im Universum

$$\rho_{\text{m}} = 2 - 11 \times 10^{-27} \text{ kg/m}^3$$

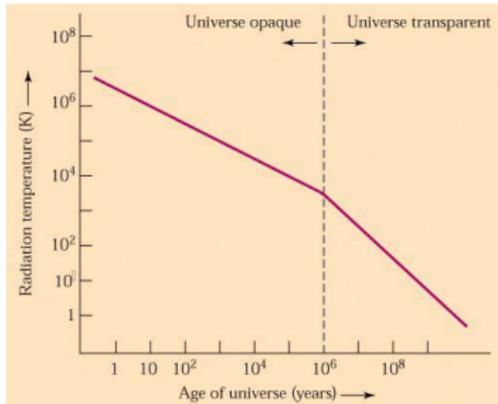
- ▶ \rightarrow Materie viel wichtiger
- ▶ \rightarrow *Materie-dominiertes Universum*

Das junge Universum



- ▶ das war nicht immer so!
- ▶ ρ_{rad} fällt viel schneller ab als ρ_m
- ▶ → früher war das Universum einmal
- ▶ *Strahlungs-dominiert*
- ▶ Übergang: ca. 2500 yr nach Big Bang
- ▶ bei $z = 25000$!

Das junge Universum



- ▶ ca. 300000 yr nach Big Bang
- ▶ → Temperatur fällt unter 3000 K
- ▶ dann kann ionisierter Wasserstoff rekombinieren
- ▶ → Rekombinationszeit

Das junge Universum

- ▶ dadurch wird das Universum auch durchsichtig
- ▶ → Strahlung und Materie entkoppeln
- ▶ wir können nicht weiter in die Vergangenheit des Universums sehen
- ▶ Hintergrundstrahlung sind die ältesten sichtbaren Photonen

Die Zukunft

- ▶ hängt von der Dichte des Universums ab!
- ▶ ist genug Materie da um die Expansion zu stoppen?
- ▶ Nein →
 - ▶ Expansion wird immer weitergehen
 - ▶ offenes Universum
- ▶ Ja →
 - ▶ Expansion wird stoppen und umkehren
 - ▶ geschlossenes Universum

Die Zukunft

- ▶ Grenzfall: kritische Dichte ρ_c

$$\rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G}$$

- ▶ $\rho_c \approx 1.1 \times 10^{-26} \text{ kg/cm}^3$
- ▶ sehr oft wird der Dichteparameter

$$\Omega_0 = \frac{\rho_m}{\rho_c}$$

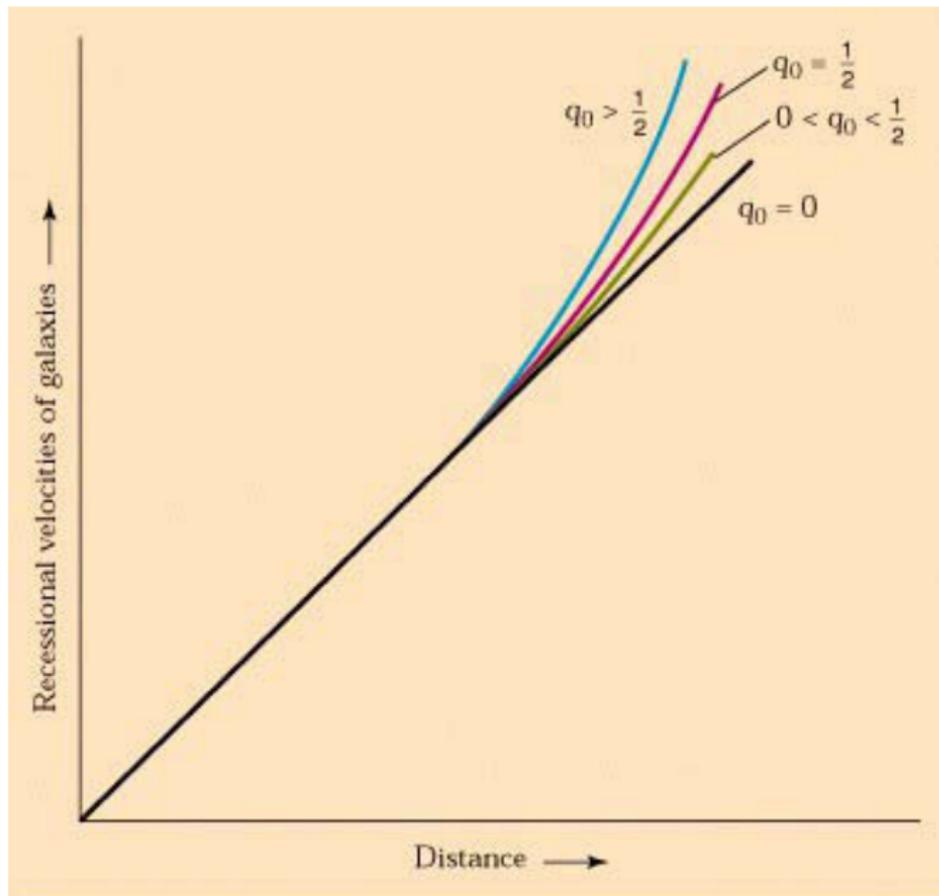
zum Vergleich benutzt

- ▶ offenes Universum: $0 \leq \Omega_0 < 1$
- ▶ marginal gebunden: $\Omega_0 = 1$
- ▶ geschlossen: $\Omega_0 > 1$

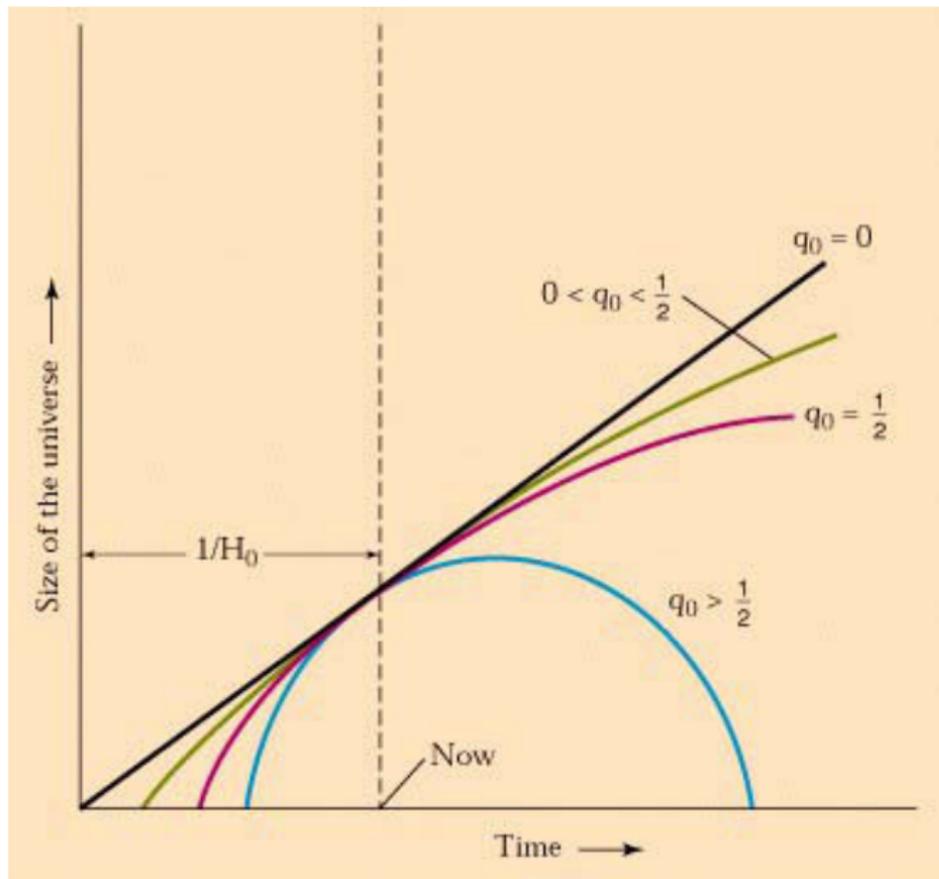
Die Zukunft

- ▶ Materie verlangsamt durch Gravitation die Expansion
- ▶ → Abweichungen vom Hubble Gesetz bei sehr großen Entfernungen
- ▶ gemessen mit dem 'deceleration parameter' q_0
- ▶ $q_0 = 0 \rightarrow$ kein Abbremsen
- ▶ $q_0 = 1/2 \rightarrow$ marginal gebunden, $\Omega_0 = 1$
- ▶ $q_0 < 1/2 \rightarrow$ offenes Universum

Die Zukunft

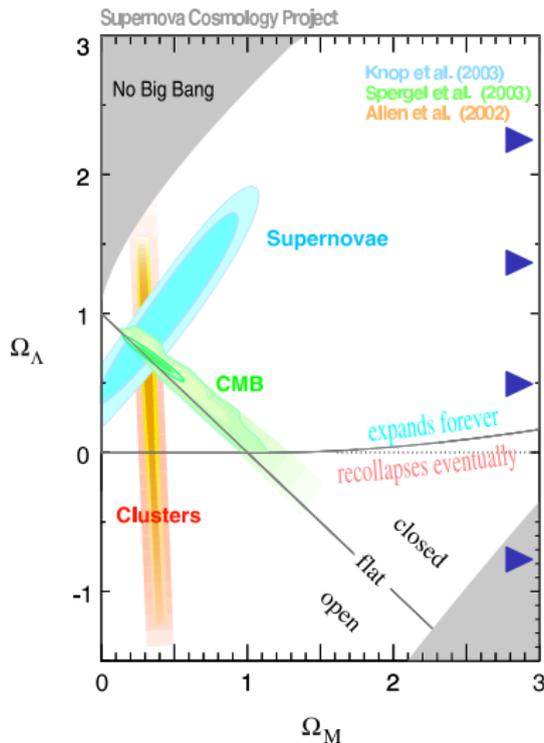


Die Zukunft



b

Die Zukunft



Bestimmung durch
Beobachtungen

Resultat: Expansion
beschleunigt

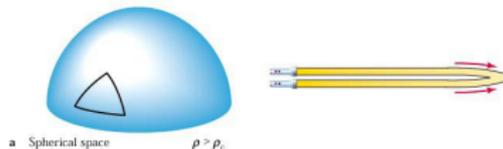
→ es muss so etwas wie
eine *Dunkle Energie*
geben!

alles weitere unbekannt!

Die Geometrie des Universums

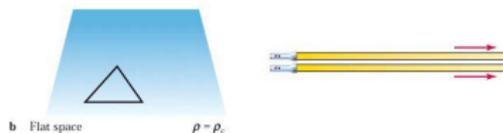
- ▶ ART →
- ▶ Massenverteilung bestimmt die Geometrie der Raum-Zeit
- ▶ → das Universum kann, je nachdem wie groß die Dichte ist verschieden Geometrien haben!
- ▶ es gibt 3 Möglichkeiten:

Die Geometrie des Universums



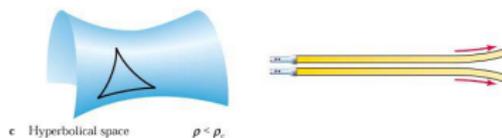
- ▶ sphärisches Universum
- ▶ positive Krümmung
- ▶ Mittlere Dichte höher als kritische Dichte
- ▶ geschlossenes Universum

Die Geometrie des Universums



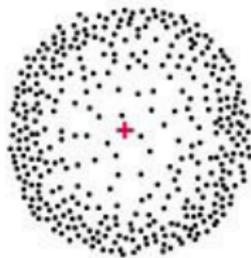
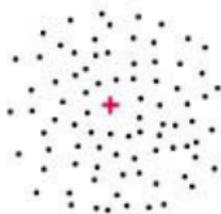
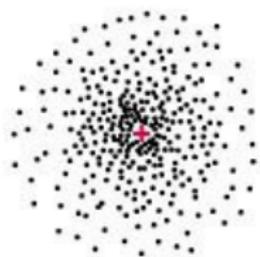
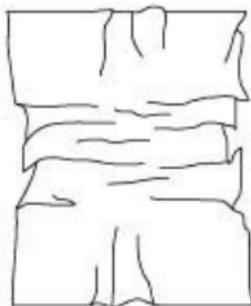
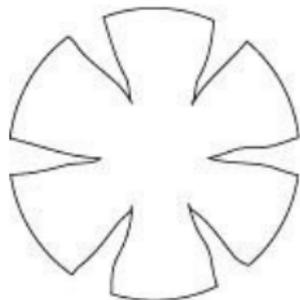
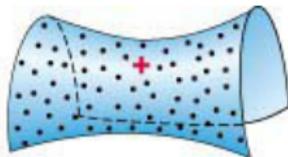
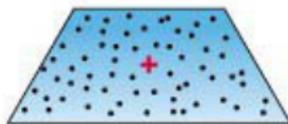
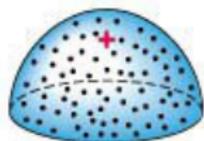
- ▶ flaches Universum
- ▶ keine (Null) Krümmung
- ▶ Mittlere Dichte gleich der kritischen Dichte

Die Geometrie des Universums



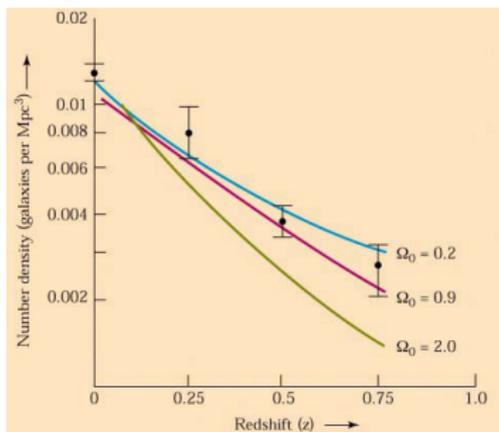
- ▶ hyperbolisches Universum
- ▶ negative Krümmung
- ▶ Mittlere Dichte geringer als kritische Dichte
- ▶ offenes Universum

Die Geometrie des Universums



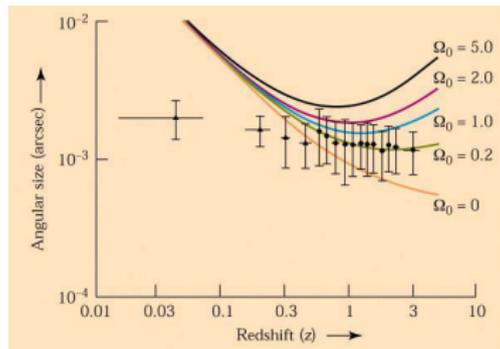
► im Prinzip bestimmbar durch Galaxienzählungen!

Die Geometrie des Universums



- ▶ Dichte von Galaxien
- ▶ je nach Geometrie →
- ▶ verschiedene Möglichkeiten

Die Geometrie des Universums



- ▶ scheinbare Größe von Galaxien
- ▶ → ebenfalls durch Geometrie bestimmt
- ▶ diese Figuren gehen von $\Lambda = 0$ aus ...

Die ferne Zukunft

- ▶ Universum scheint für immer zu expandieren
- ▶ in 10^{12} yr wird es kein Gas für neue Sterne geben
- ▶ Galaxien werden immer dunkler mit dem Sterben der letzten Sterne
- ▶ 10^{15} yr: keine Sterne oder Gas/Staub mehr
- ▶ nur noch WDs, NS, Schwarze Löcher
- ▶ dann werden langsam aber sicher sich durch Kollisionen immer größere Schwarze Löcher bilden
- ▶ 10^{31} yr: Schwarze Löcher von $10^{15} M_{\odot}$
- ▶ diese könnten über noch längere Zeiten verdampfen
- ▶ in ca. 10^{106} yr ...