

Kosmologie

Prof. Dr. Gregor Herten
Fakultät für Physik
Universität Freiburg

Studentenseminar
Teilchenphysik und Kosmologie
WS 2001/02

- Weltmodelle
- kosmologische Konstante
- kosmologische Inflation
- experimentelle Überprüfung der Urknalltheorie

Grundlagen der Kosmologie

Grundlagen:

Bei der Längenskala, die für das Universum als Ganzes relevant ist, spielt nur die Gravitationskraft eine Rolle, obwohl sie schwach ist.

Denn:

- Materie ist neutral, d.h. keine e.m. Kraft
- schwache und starke WW sind kurzreichweitig.

Aber kurz nach dem Urknall waren starke, schwache und e.m. WW dominant.

Theorie der Gravitation: Allgemeine Relativitätstheorie

Theorie der anderen Kräfte: Standardmodell der Teilchenphysik

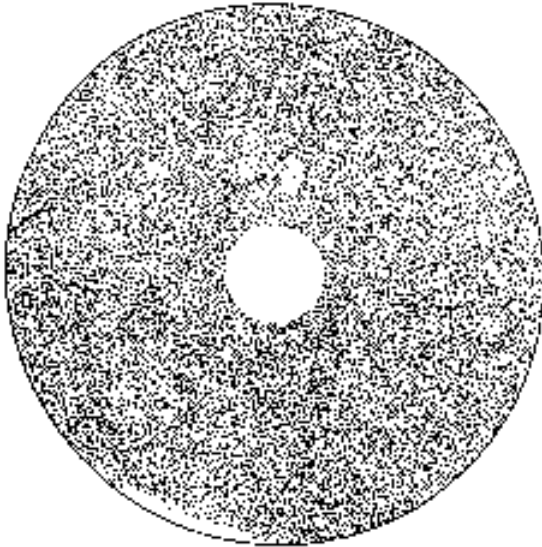
Geschichte der Kosmologie

- 1917 (Einstein): Allgemeine Relativitätstheorie (ART). Die ART ist keine Eichtheorie. Gravitation wird als Krümmung des Raumes gedeutet.
- 1917 (Einstein): Vorstellung eines statischen Universums
- 1922 (Friedmann): nicht-stationäre Lösungen der Feldgleichungen mit einem Urknall.
- 1929 (Hubble): Entdeckung der Rotverschiebung
- 1964 (Penzial, Wilson): Entdeckung der 3 K - Hintergrundstrahlung.
- 1992 (COBE): Entdeckung von Fluktuationen in der Hintergrundstrahlung.
- 1998 Entdeckung der beschleunigten Expansion des Universums.

Symmetrie des Universums

Zur Beschreibung des Universums werden 2 Symmetriannahmen verwendet:

1) Das Universum ist um uns herum isotrop.



Verteilung von 33 000 Radioquellen.
Die weißen Stellen kommen durch
Abschattungen (der Erde, Milchstraße)
zustande.

- Radiogalaxien sind isotrop verteilt
 - 3K-Hintergrundstrahlung ist isotrop
- Die größten Strukturen sind 100 M ly groß.
Das Universum ist etwa 100 mal größer.

2) Kosmologisches Prinzip

Unsere Position im Universum ist durch nichts ausgezeichnet

Folgerung:

Das Universum ist um jeden Punkt isotrop, d.h. es ist homogen.

Raum-Zeit-Struktur

- 3-dimensionaler Euklidischer Raum $ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2$

- Minkowski Raum $ds^2 = \sum_{\mu, \nu=1}^4 g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$ mit $g_{\mu\nu} = (1, -1, -1, -1)$

- Allgemeine Relativitätstheorie $ds^2 = \sum_{\mu, \nu=1}^4 g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$

Nun hat $g_{\mu\nu}$ auch nicht-diagonal Elemente (Krümmung des Raumes).

Isotropes, homogenes Universum

Für den Spezialfall eines isotropen, homogenen Universums kann man die Metrik des Raumes angeben. (Robertson-Walker Metrik):

$$ds^2 = dt^2 - R^2(t) \left[\frac{kr^2}{1-kr^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2 \right]$$

r, θ, ϕ : mitbewegte Koordinaten

$R(t)$: Skalenfaktor, "Radius des Universums" , einzige zeitabhängige Größe, d.h. das Universum behält seine Form und ändert nur die Skala.

k : charakteristische Krümmung
 $k=1$ geschlossen, spärlich
 $k=0$ flach, euklidisch
 $k=-1$ offen, hyperbolisch

Bedeutung des Skalenfaktors $R(t)$

Wir betrachten zwei Raumpunkte, die durch die mitbewegten konstanten Koordinaten r, θ, Φ zueinander festgelegt sind. Kräftefreie Teilchen behalten diese Koordinaten.

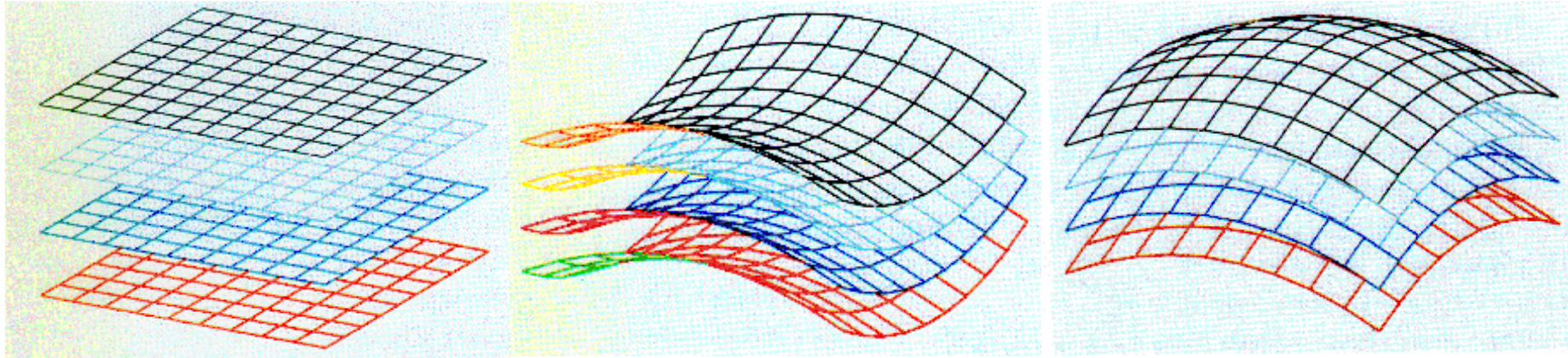
Die globale zeitliche Änderung der Skala (Ausdehnung des Raumes) wird durch den Skalenfaktor $R(t)$ beschrieben.

Beispiel: Luftballon

Auf der Oberfläche des Luftballons sind zwei Münzen geklebt. Punkte auf der Münze werde mit den Koordinaten r, θ, Φ beschrieben.

Die globale Ausdehnung des Luftballons wird durch den Skalenfaktor $R(t)$ beschrieben. Die Form des Luftballons bleibt unverändert.

Blätterung der Raum-Zeit



flach

hyperbolisch

sphärisch

Aufgrund der Symmetrie der Raum-Zeit kann die Raumzeit in drei-dimensionale Hyperflächen konstanter Zeit zerlegt werden (Blätter). Zeitliche Änderungen treten nur durch eine globale Ausdehnung auf, die durch den Skalenfaktor $R(t)$ beschrieben wird.

$$k = 1: \textit{sphärisch} \quad \sum \alpha_i > 180^\circ$$

$$k = 0: \textit{flach} \quad \sum \alpha_i = 180^\circ$$

$$k = -1: \textit{hyperbolisch} \quad \sum \alpha_i < 180^\circ$$

Bestimmung der Krümmung durch
Messung der Winkelsumme im Dreieck.

Dynamik des Universums

Zur Berechnung der zeitlichen Änderung des Universums werden die Einsteinschen Feldgleichungen verwendet.

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}R g_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi}{c^4}GT_{\mu\nu}$$

$R_{\mu\nu}$: Ricci – Tensor

R : Krümmungsradius

Λ : kosmologische Konstante

G : Gravitationskonstante

$T_{\mu\nu}$: Energie – Impuls Tensor

Dynamik des Universums

Spezialfall:

homogen, isotrop $\rightarrow R(t)$ beschreibt die Ausdehnung des Universums.

Lösungen: Zwei Friedmann-Gleichungen für den zeitartigen und den raumartigen Teil der Feldgleichungen.

$$1) \quad H^2(t) \equiv \left(\frac{\dot{R}}{R} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho_m - \frac{k}{R^2} + \frac{\Lambda}{3} \qquad 2) \quad \left(\frac{\ddot{R}}{R} \right) = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho_m + \frac{3p_m}{c^2} \right) + \frac{\Lambda}{3}$$

$H(t)$ ist der Hubble Parameter. Er beschreibt die Expansionsgeschwindigkeit des Universums. Sein heutiger Wert ist:

$$H_0 = H(t_0) = (65 \pm 10) \text{ km/s Mpc} = (65 \pm 10) \cdot 3,24 \cdot 10^{-20} \text{ 1/sec,}$$

d.h. in 100 Jahren ändert sich die Größe des Universums um den Bruchteil $6 \cdot 10^{-9}$.

ρ_m : Materie- und Energiedichte

p_m : Materiedruck

Dynamik des Universums

Gewöhnliche, nicht relativistische Materie: $p_m = 0$

Relativistische Materie (Strahlung): $p_m = (1/3) \rho_m c^2$

Für $t < 10\,000$ y dominierte die Strahlung im Universum.
Heute dominiert die Materie, d.h. $p_m = 0$

Wir betrachten die erste Friedmann-Gleichung zu $t=t_0$

$$1 = \frac{8\pi G}{3H_0^2} \rho_m + \frac{\Lambda}{3H_0^2} - \frac{k}{R_0^2 H_0^2}, \quad d.h. \quad \boxed{1 = \Omega_M + \Omega_\Lambda + \Omega_k}$$

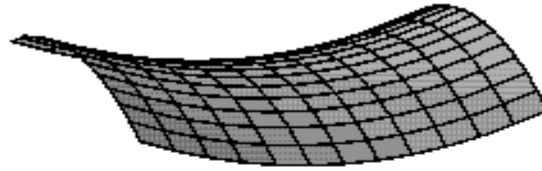
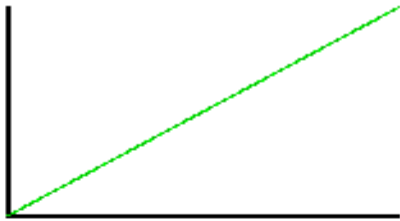
mit

$$\Omega_M = \rho_m / \rho_{krit}, \quad \rho_{krit} = 3H_0^2 / 8\pi G$$

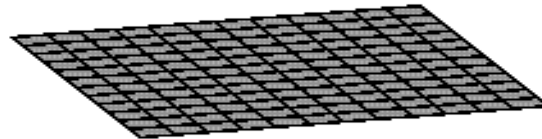
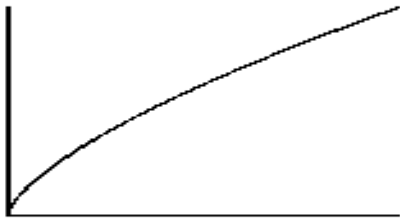
$$\Omega_\Lambda = \rho_\Lambda / \rho_{krit}, \quad \rho_\Lambda = \Lambda / 8\pi G$$

$$\Omega_k = -k / R_0^2 H_0^2$$

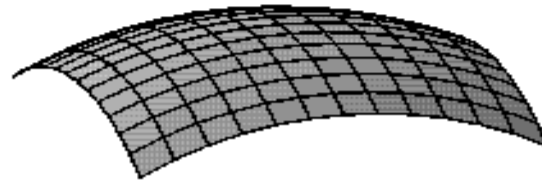
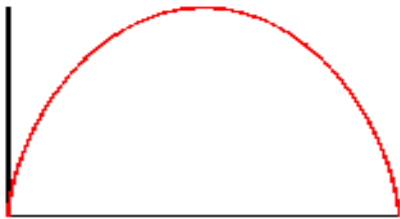
Energie- und Massendichte des Universums



Das Universum ist offen.
Winkelsumme (im Δ) $< 180^\circ$.
 $\Omega < 1$



Das Universum ist flach.
Winkelsumme = 180° .
 $\Omega = 1$



Das Universum ist geschlossen.
Winkelsumme $> 180^\circ$.
 $\Omega > 1$

Materie: Anziehung unter Gravitation

Vakuumenergie: positives Λ : Abstoßung unter Gravitation (Anti-Gravitation)

Kritische Dichte: $\rho_{\text{krit}} \approx 4 \text{ Protonmassen} / \text{m}^3$, $\Omega = \text{Dichte/kritische Dichte}$

$$\Omega = \Omega_{\Lambda} + \Omega_{\text{M}}$$

Bremsparameter q_0

Das Universum wird durch die Gravitationsanziehung der Materie abgebremst. Allerdings ist es auch möglich, dass ein positiver kosmologischer Term zu einer Beschleunigung des Universums führt.

Für den heutigen Bremsparameter q_0 erhält man:

$$q_0 \equiv \frac{-\ddot{R}}{R_0 H_0^2} = \frac{1}{2} \Omega_M - \Omega_\Lambda$$

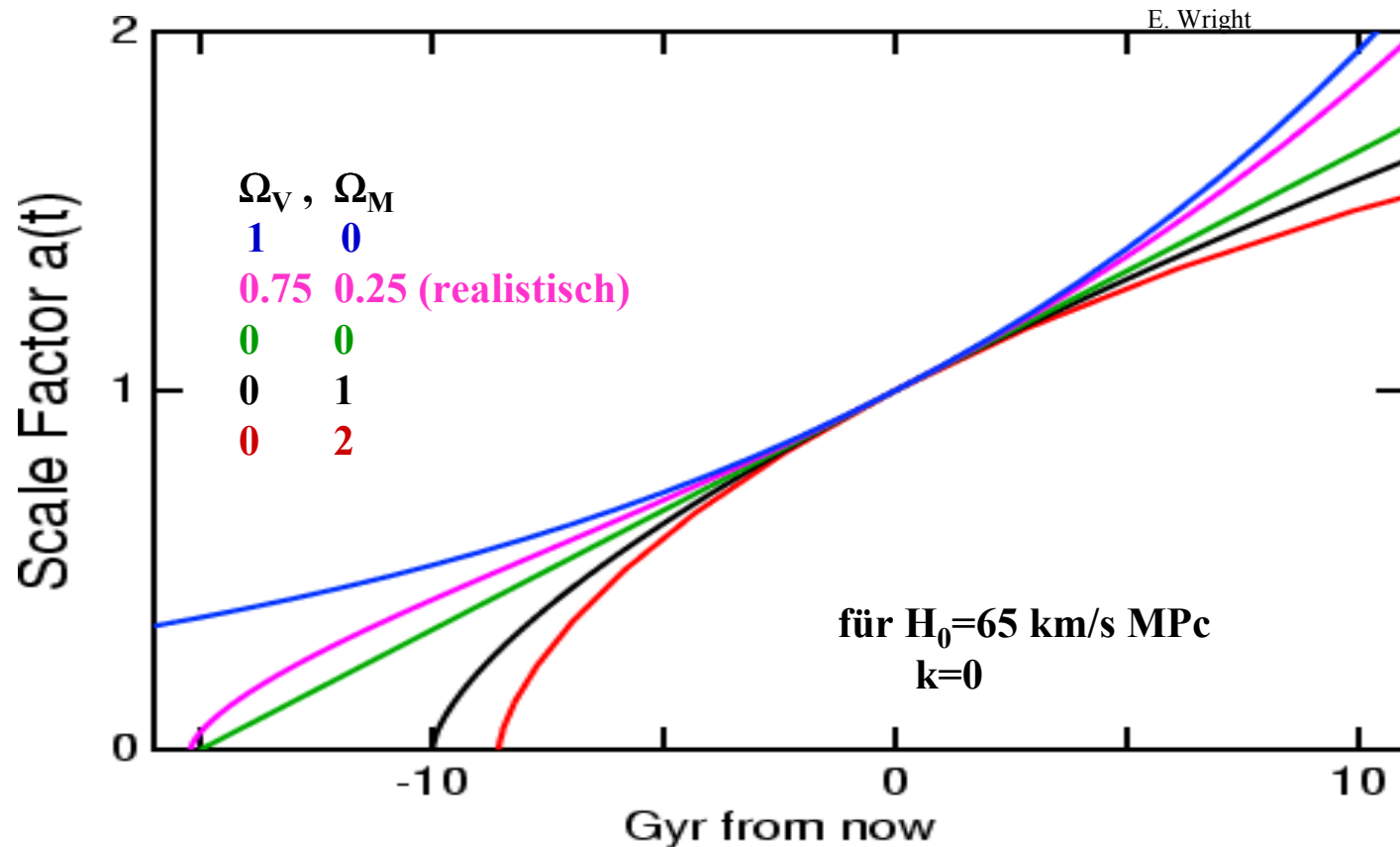
$\frac{1}{2} \Omega_M = \Omega_\Lambda$, d.h. $q_0 = 0$: statisches Universum

$\frac{1}{2} \Omega_M > \Omega_\Lambda$, d.h. $q_0 > 0$: gebremste Ausdehnung

$\frac{1}{2} \Omega_M < \Omega_\Lambda$, d.h. $q_0 < 0$: beschleunigte Ausdehnung

Weltmodelle

Die Entwicklung des Universums wird somit im wesentlichen durch die Energiedichte und die kosmologische Konstante bestimmt.

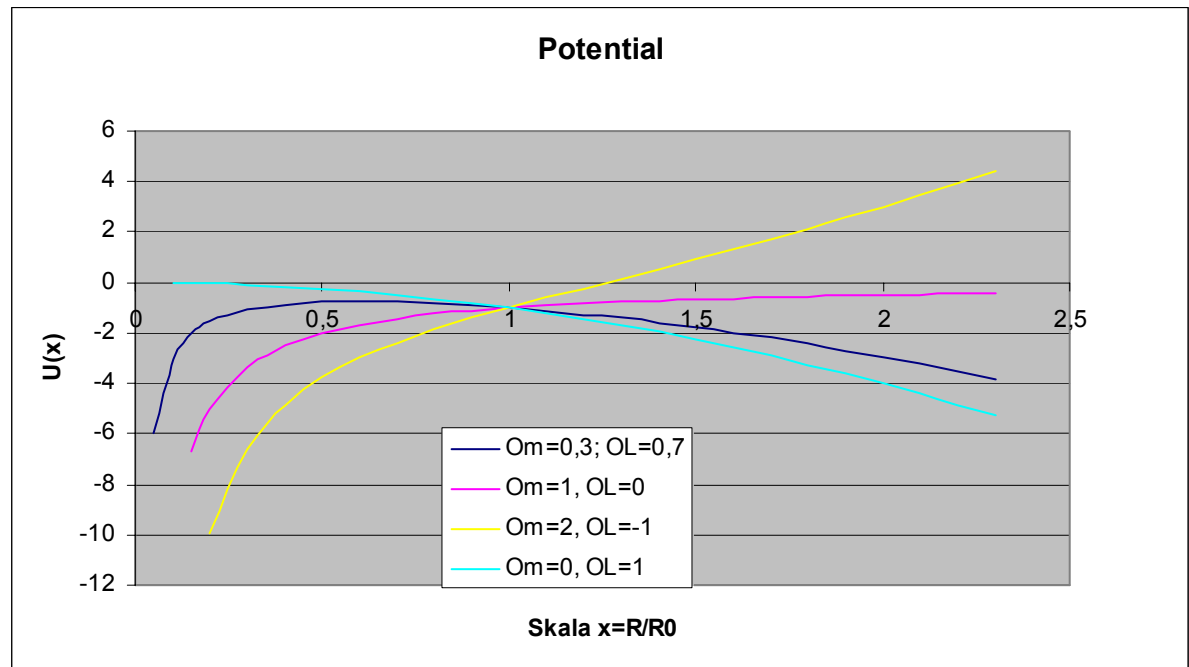


Interpretation der Friedmann-Gleichungen

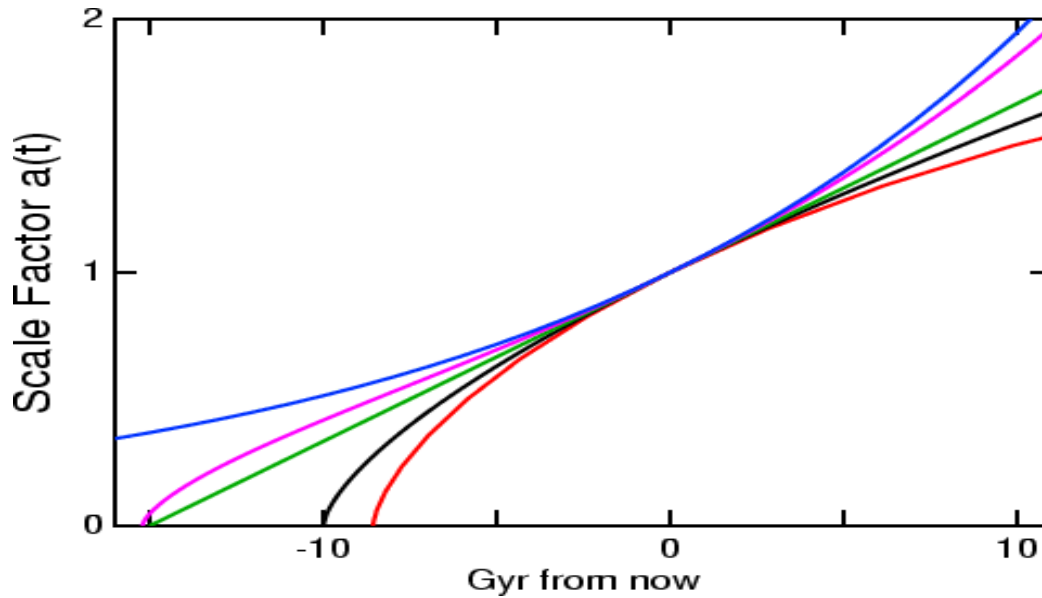
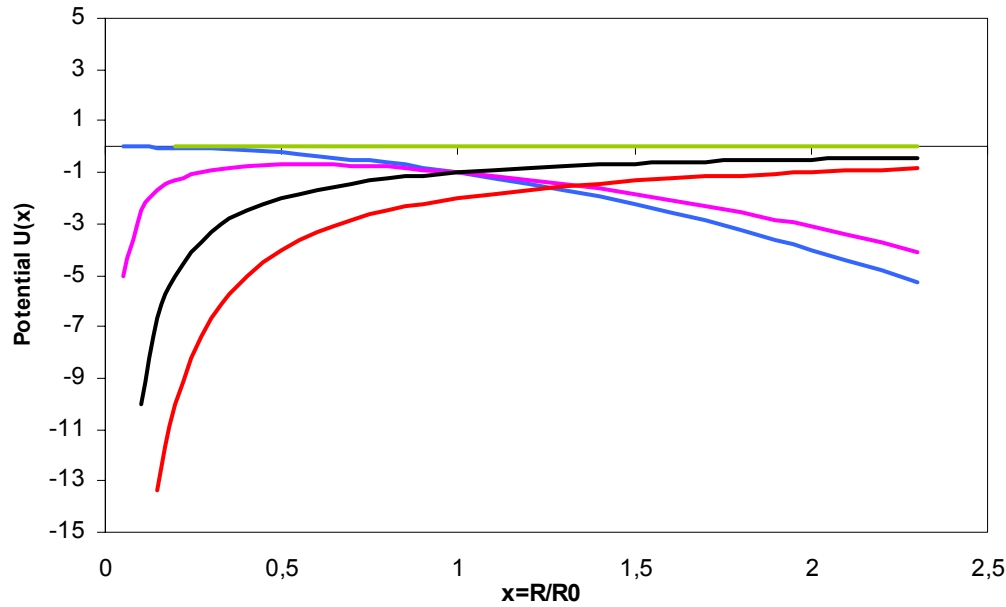
Zur anschaulichen Interpretation der Friedmanngleichungen wählen wir: $p_m = 0$ und $\rho_m R^3 = \text{const}$ (Massenerhaltung). Dann erhält man:

$$\left(\frac{dx}{d\tau}\right)^2 + U(x) = \Omega_k, \text{ mit } U(x) = -\frac{\Omega_M}{x} - \Omega_\Lambda x^2, \quad x(\tau) = R(t)/R_0(t), \quad \tau = H_0 t$$

Dies entspricht in der Newtonschen Mechanik der Bewegung eines Teilchens in einem Potential $U(x)$.

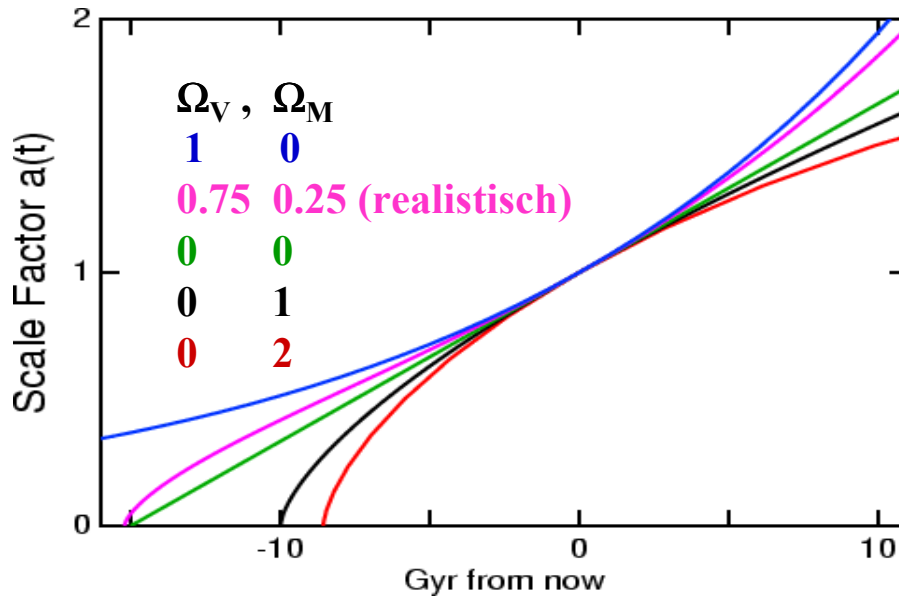


Weltmodelle



Ω_V	Ω_M
1	0
0.75	0.25 (realistisch)
0	0
0	1
0	2

Das Problem der Kosmologischen Konstante



Für das Alter des Universums erhält man annähernd:

$$H_0 t_0 \cong \frac{2}{3} (0.3 + 0.7 \Omega_M - 0.3 \Omega_\Lambda)^{-0.3}$$

- Durch Messung von H_0 und t_0 (Alter des Universums) erhält man Grenzen für Ω_M und Ω_Λ .
- Positive Werte von Ω_Λ führen zu größerem Alter (früher war die Ausdehnungsrate des Universums sehr viel kleiner)
- Für $\Omega_\Lambda \rightarrow 1 + (7/3) \Omega_M$ wird $t_0 \rightarrow \infty$. Für $\Omega_\Lambda > 1 + (7/3) \Omega_M$ gibt es keinen Urknall.
- Aus dem gemessenen Alter (Alter von Kugelsternhaufen) $t_0 \sim 15$ Mrd. Jahre kann man Grenzen für Ω_Λ bestimmen: $\Omega_\Lambda \lesssim 1$.

Kosmologische Konstante: Vakuumfluktuationen

Aus der Quantenmechanik wissen wir, dass ein harmonischer Oszillator eine Grundzustandsenergie ungleich 0 hat (wegen Unschärferelation): $E = \frac{1}{2} \hbar \omega$

In der Quantenfeldtheorie hat der Grundzustand (Vakuum) ebenfalls eine von Null verschiedene Grundzustandsenergie: $\rho_{\text{vac}} = K^4 / 8 \pi^2$; K = Abschneideparameter

Ohne Gravitation interessiert uns ρ_{vac} nicht, da nur Energiedifferenzen wichtig sind. Aber die Gravitation wirkt auf die Gesamtenergie. Vakuumfluktuationen führen zu einem zusätzlichen kosmologischen Term: $\Lambda_{\text{vac}} = 8 \pi G \rho_{\text{vac}}$

Mit $\Lambda = \Lambda_0 + \Lambda_{\text{vac}}$ und $K = 100 \text{ GeV}$ (elektroschwache Energie-Skala)

erhält man $\rho_{\text{vac}} = 10^{55} \rho_{\text{krit}}$

Damit Λ klein genug bleibt, müsste $\Lambda_0 = -\Lambda_{\text{vac}}$ auf 52 Stellen genau!

- Lösungen:
- eine neue, verbesserte Quantentheorie hat $E_0=0$ (Supersymmetrie).
 - ein neuer Mechanismus macht $\Omega_\Lambda \lesssim 1$.

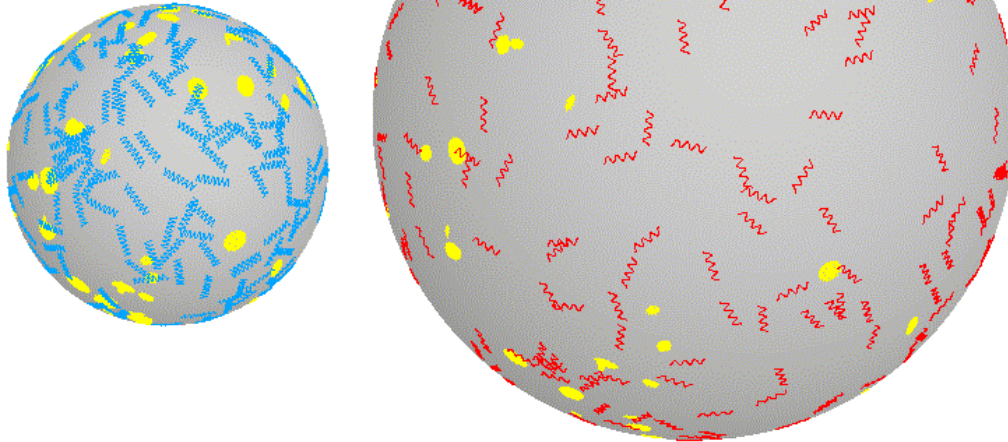
Messung Kosmologischer Größen

Um Informationen über das Universum zu bekommen, müssen wir die Größen Ω_M , Ω_L , O_k messen. Dazu bieten sich folgende Möglichkeiten an.

- Messung des Hubble-Diagramms bei hohen Rotverschiebungen, am besten eignen sich Supernova vom Typ Ia
- Anisotropie der 3K Hintergrundstrahlung

Messung des Hubble- Diagramms

Expanding Balloon Analogy
Photons move and redshift
Galaxies spread apart but stay the same size



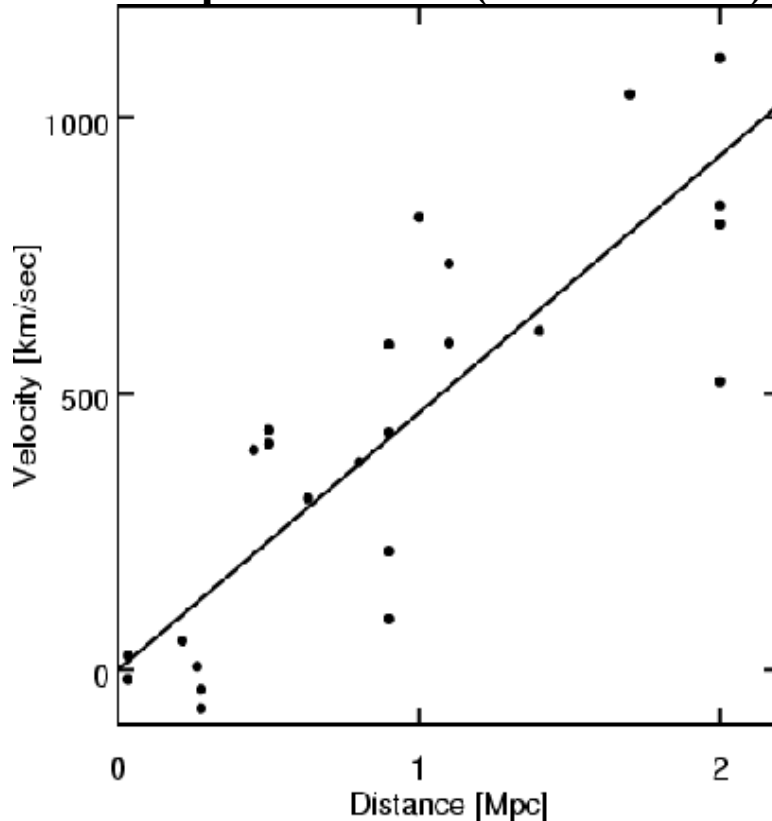
Durch die Ausdehnung des Universums (der Skala) vergrößert sich der Abstand der Galaxien voneinander. Lokal (mitgeführte Koordinaten) ändert sich die Physik aber nicht, d.h. innerhalb einer Galaxie überwiegen die Gravitationskräfte aufgrund der Massen. Galaxien sind wie Münzen, die auf den Ballon geklebt werden – sie ändern ihre Größe nicht.

Photonen bewegen sich lokal mit Lichtgeschwindigkeit c . Bei ihrer Ausbreitung im Universum vergrößert sich die Wellenlänge mit der Ausdehnungsskala des Universums. Dies führt zu einer Rotverschiebung. Sie ist nicht auf den Dopplereffekt zurückzuführen, sondern auf die Ausdehnung des Raumes.

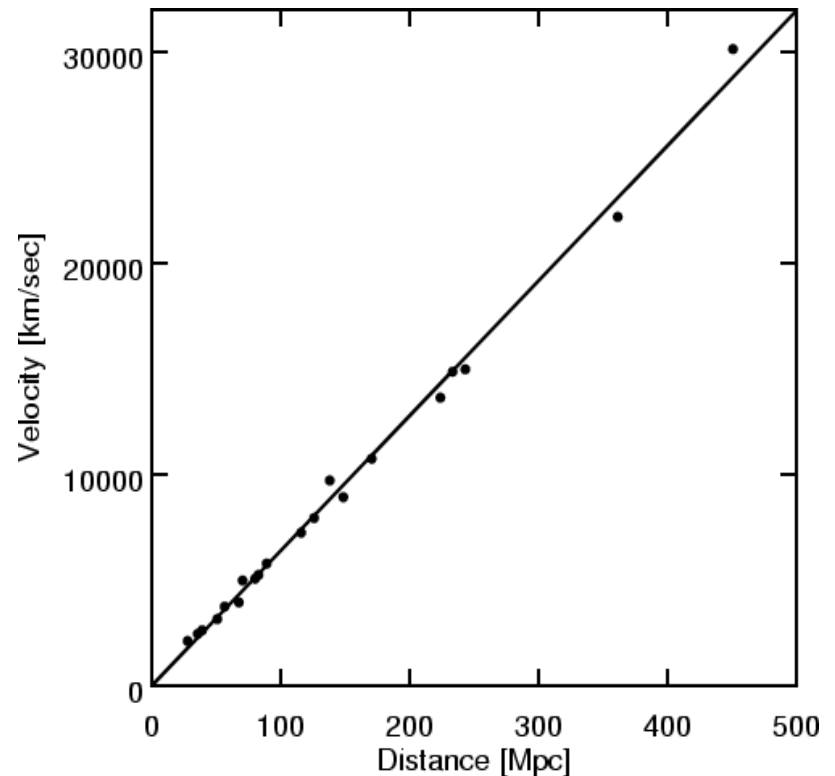
$$\text{Rotverschiebung } z: 1 + z = \frac{\lambda}{\lambda_0} = \frac{R(t)}{R(t_0)} = 1 + H_0(t - t_0) - \frac{1}{2}q_0 H_0^2(t - t_0)^2 + \dots$$

Hubble Gesetz

Cepheid Sterne (Hubble 1929)



Supernovae (Riess, Press, Kirshner 1996)



Mit $r=c(t-t_0)$ folgt $cz=H_0 r$ für den ersten Term. Interpretiert man cz als Geschwindigkeit so erhält man die bekannte lineare Hubble Beziehung zwischen v und r .

Diese Interpretation als Fluchtgeschwindigkeit ist aber für große z ($z \sim 1$) nicht

korrekt. Neue Messungen ergeben **$H_0 = 65 \pm 10 \text{ km/s Mpc}$** .

Hubble Diagramm

Zur Messung des Hubble Diagramms muss man

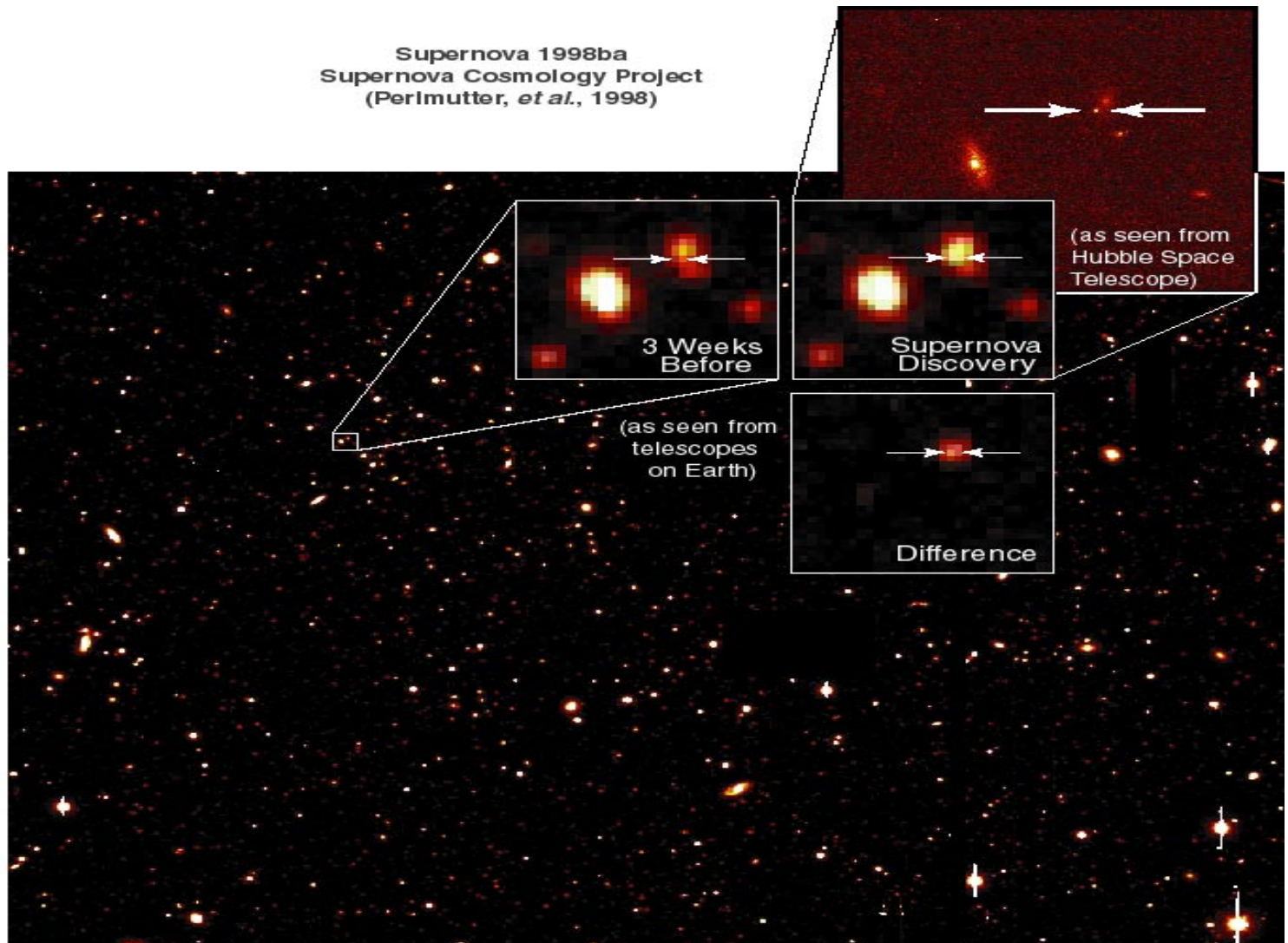
- die Rotverschiebung z einer Galaxy bestimmen. Dies gelingt durch Analyse von Spektrallinien.
- weiterhin muss die Entfernung bestimmt werden. Dies erfolgt über die gemessenen Helligkeit (scheinbare Magnitude) m der Galaxien. Allerdings benötigt man dazu ‚Standardkerzen‘, bei denen die ausgesandte Intensität (absolute Magnitude) M bekannt ist. Besonders eignen sich Supernova Typ Ia (Explosion eines weißen Zwergs).

Helligkeitsdistanz: $D_L = \sqrt{L / 4\pi F}$, L : Luminosität der Quelle
 F : beobachteter Energiefluss

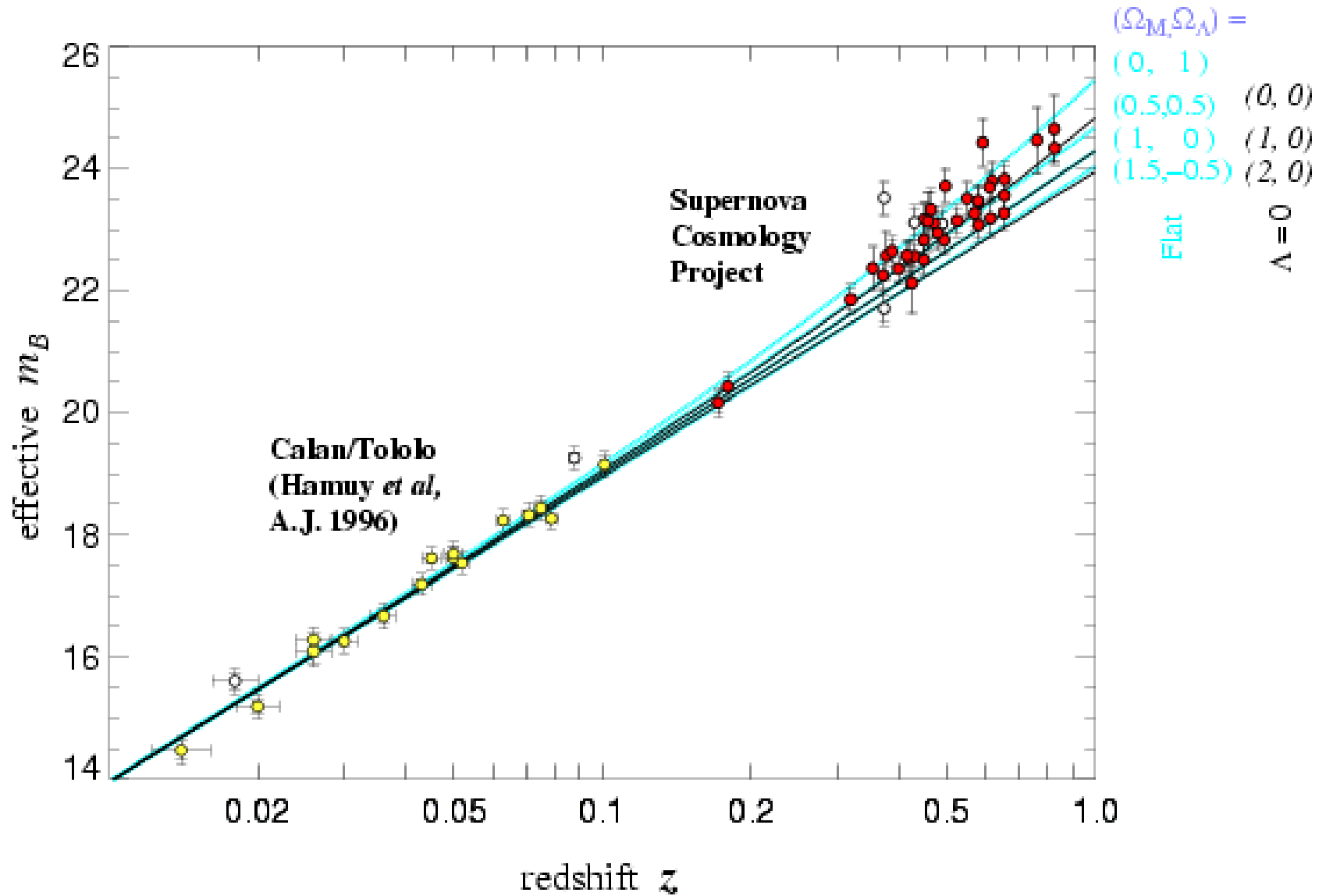
$$D_L(z) = \frac{c}{H_0} d_L(z, \Omega_M, \Omega_\Lambda), \quad d_L \text{ dimensionslos}$$

$$\text{Zusammenhang: } m = M + 5 \log d_L(z, \Omega_M, \Omega_\Lambda) - 5 \log(H_0 \cdot 1 \text{ Mpc} / c) + 25$$

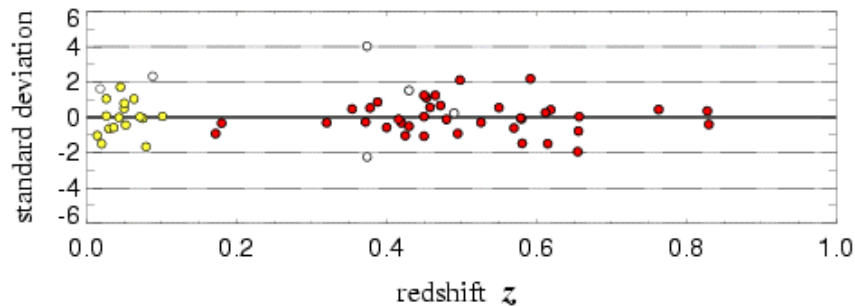
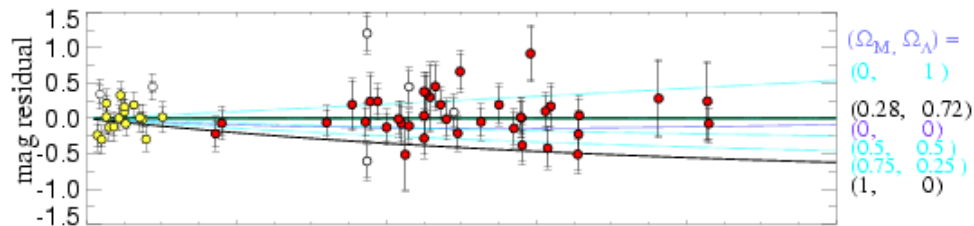
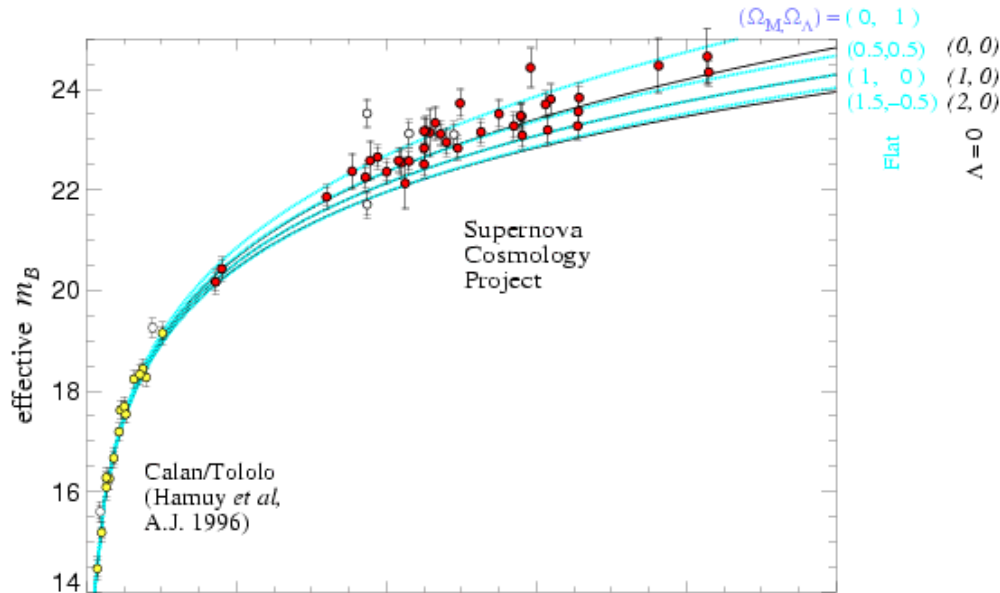
Suche nach Supernova Explosionen



Supernova Typ Ia



Supernova Typ Ia

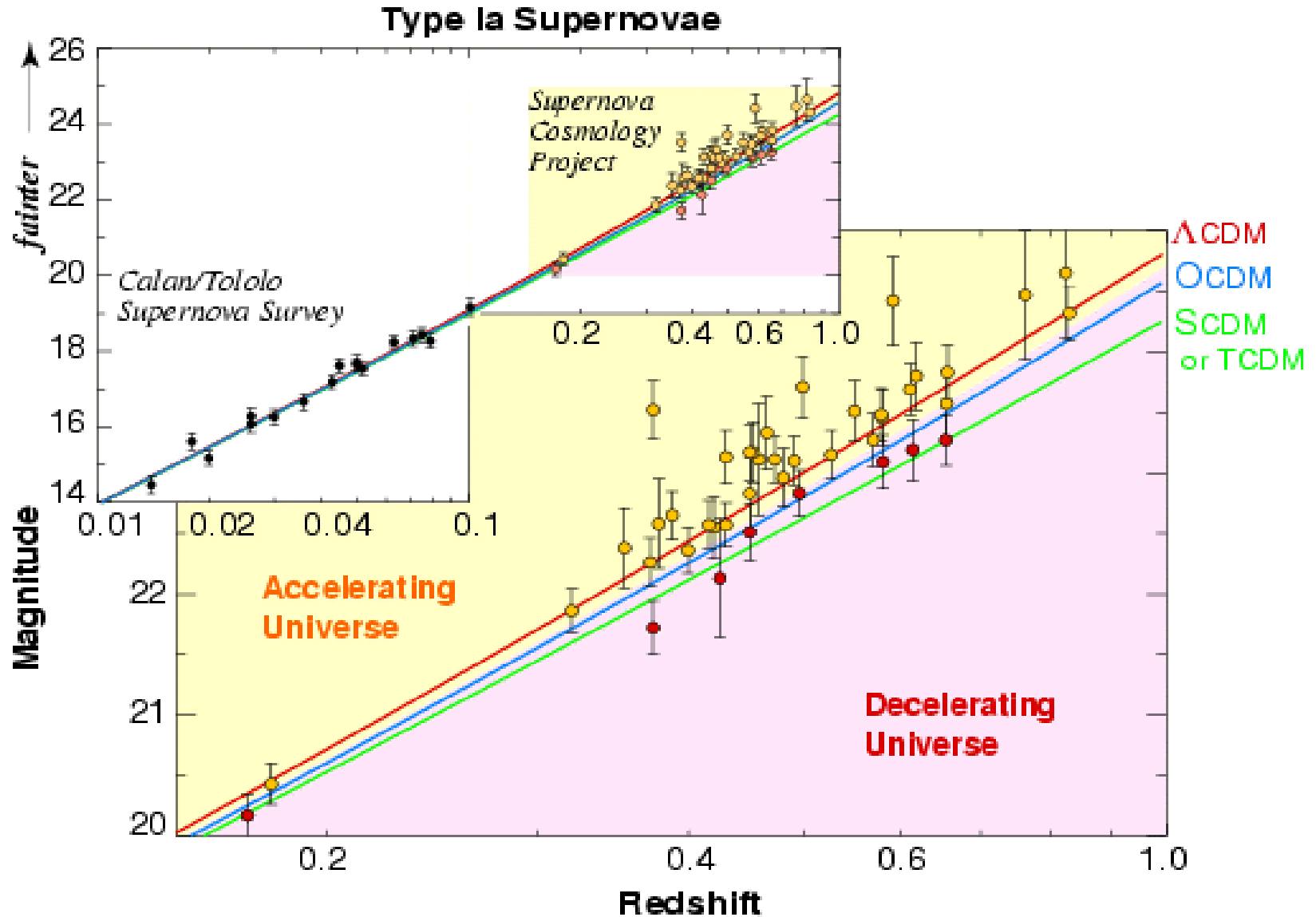


Perlmutter, *et al.* (1998)

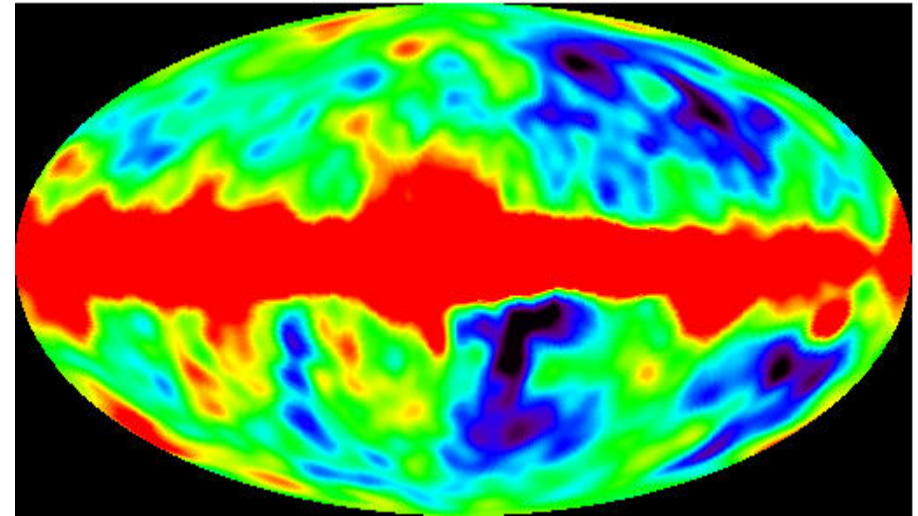
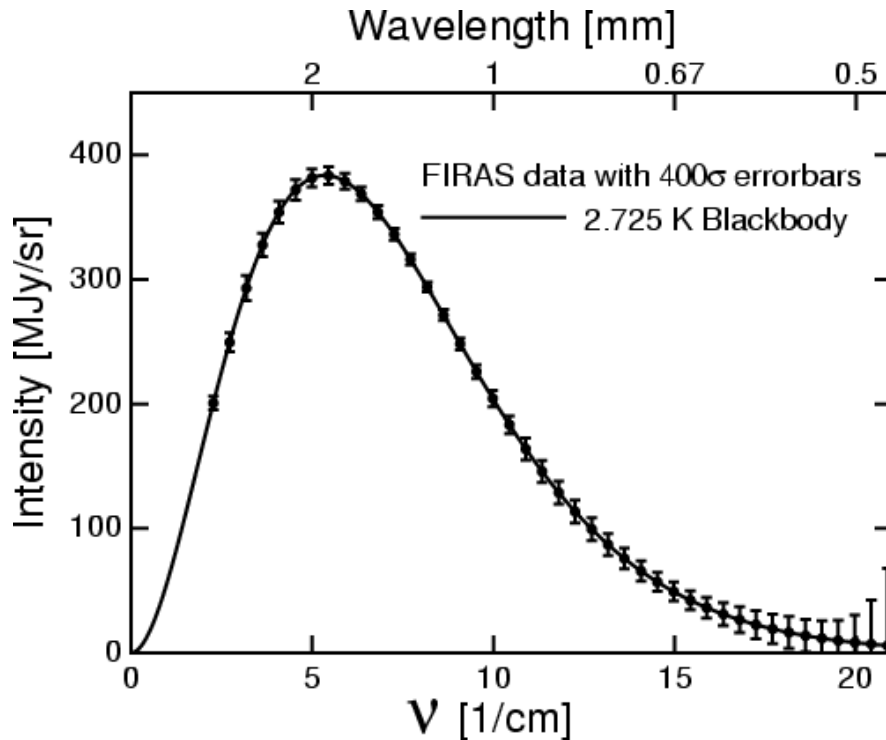
Messungen von Supernovae bei hohem z zeigen, dass die beste Übereinstimmung erzielt wird, wenn

$$\Omega_M \sim 0.3 \quad \text{und} \quad \Omega_\Lambda \sim 0.7$$

Das beschleunigende Universum



Messung der Hintergrundstrahlung



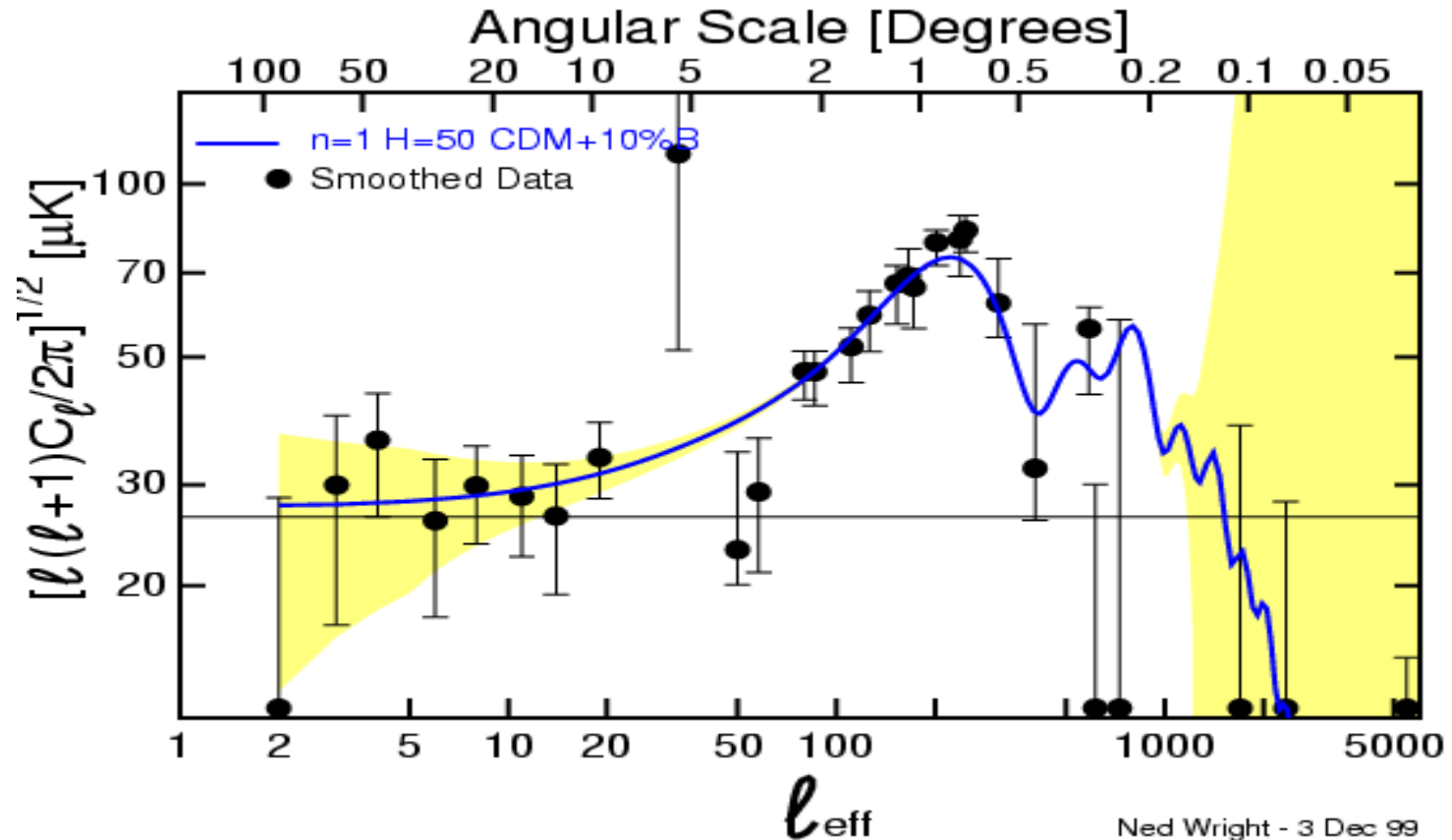
sehr geringe Temperaturschwankungen

rot: $T=2.725\text{K} + 0.00002\text{ K}$

blau: $T=2.725\text{K} - 0.00002\text{ K}$

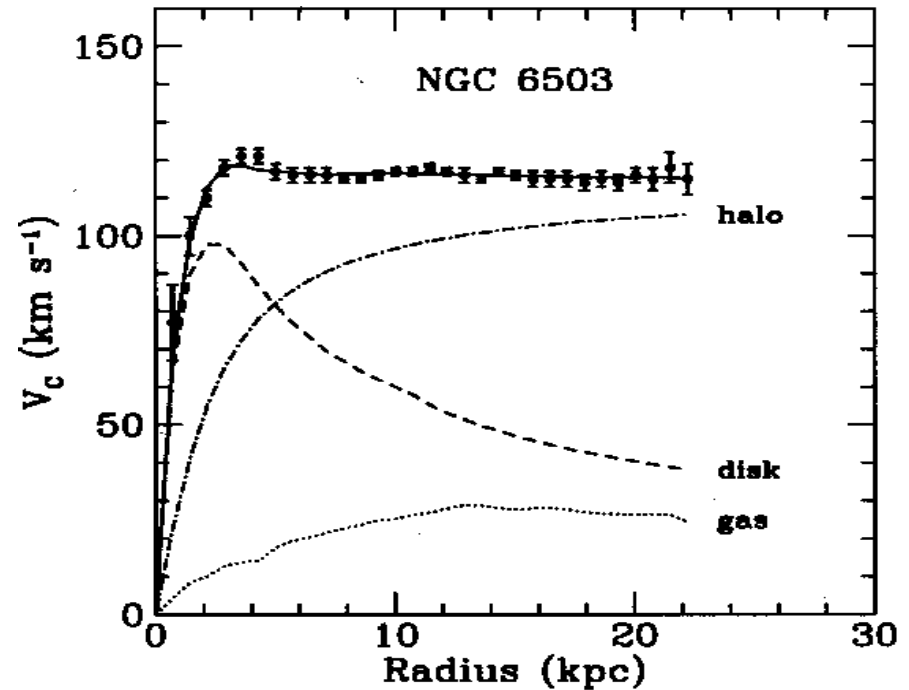
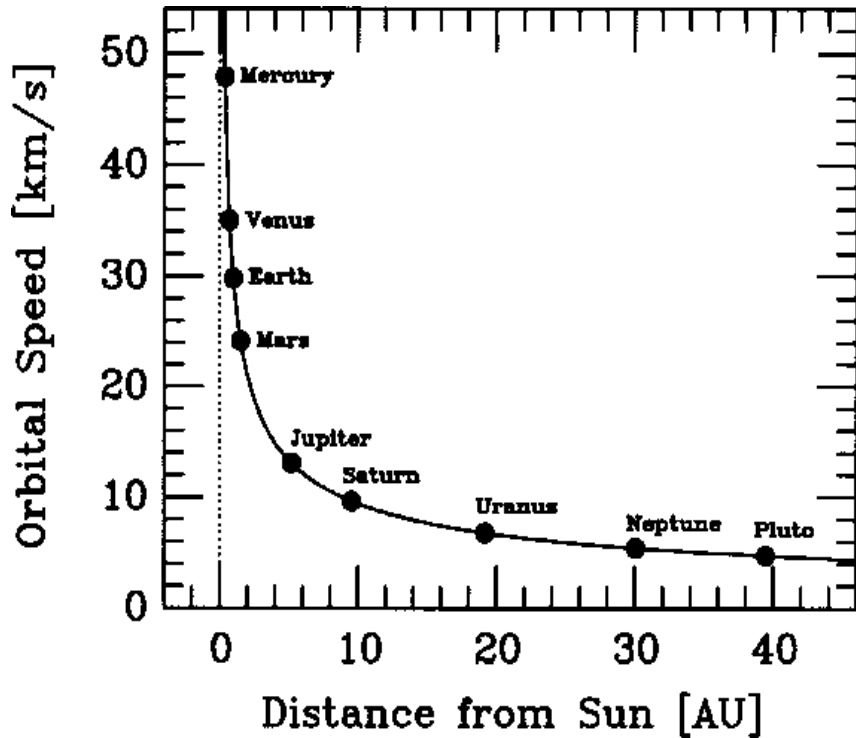
Die Messungen zeigen, dass sich das Universum im Alter von 300 000 Jahren im thermischen Gleichgewicht befand und sehr homogen und isotrop war.

Messung der Hintergrundstrahlung



Maximum: $l_{\text{max}} \approx 200 / \sqrt{\Omega}$; somit $\Omega \approx 1$. Das Universum hat eine flache Geometrie, d.h. die Winkelsumme im Dreieck ist 180° .

Dunkle Materie



Rotationsgeschwindigkeit der Planeten um die Sonne.

Rotationsgeschwindigkeit der Sterne um das Zentrum der Galaxie NGC 6503.

Dunkle Materie: Interpretation der Messungen

Dichte der dunklen Materie in unserem Teil der Milchstraße entspricht ca. 300 000 H-Atome pro m^3 .

Die kritische Dichte ist ca. 4 H-Atome pro m^3 .

Gemittelt über große Bereiche (Supercluster von Galaxien) misst man Massendichten von > 1 H-Atom pro m^3 .

Dies ist mehr als 10 mal höher als die optisch sichtbare Massendichte (Sterne).

Folgerung: mehr als 90 % der Materie ist unsichtbar

Kandidaten für Dunkle Materie

Astrophysik:

Planeten, erloschene Sterne, schwarze Löcher

- sie können einen Beitrag leisten, aber nicht alles erklären.

Teilchenphysik:

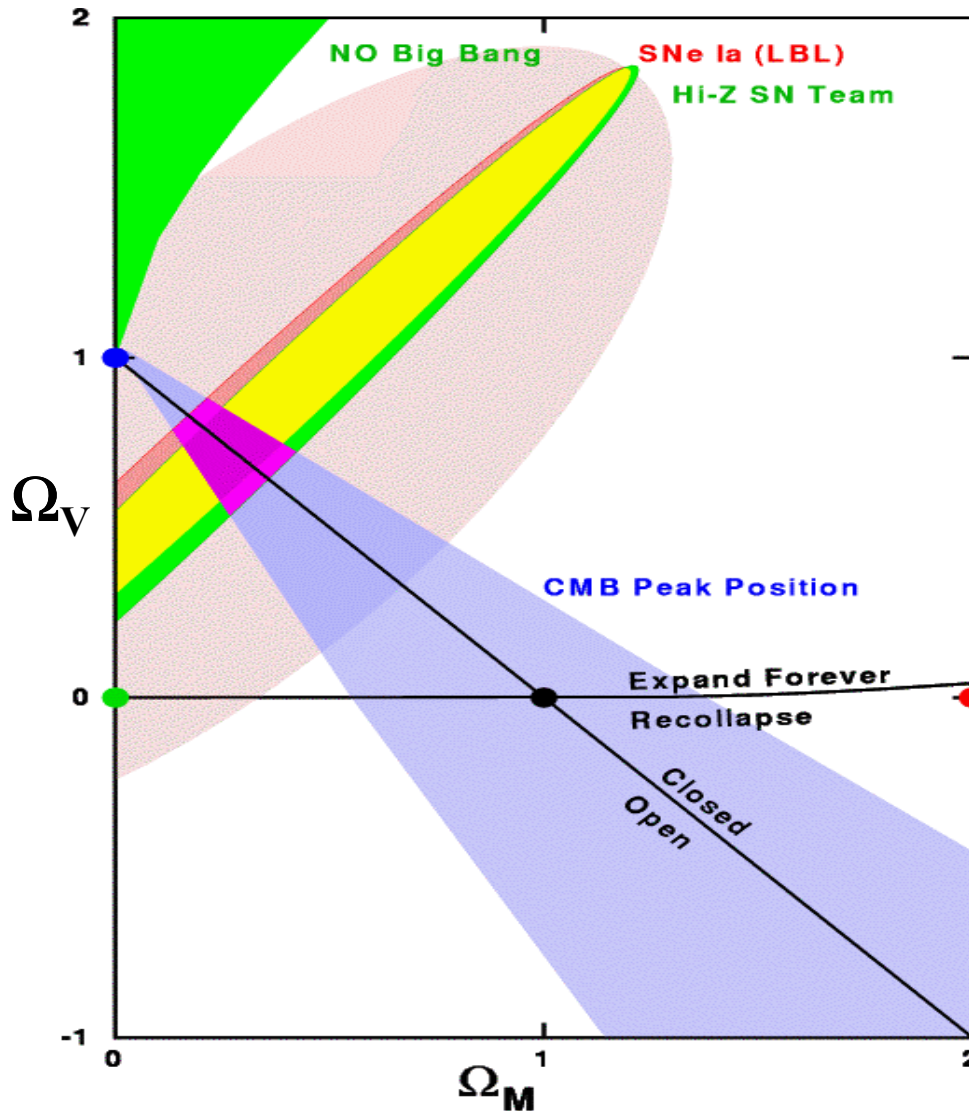
Neutrinos mit kleiner Masse

- Experimentelle Hinweise auf kleine Neutrinomassen von Super-Kamiokande.
- Aktives Forschungsgebiet. Neue Experimente in Vorbereitung.

Neue, stabile Teilchen

- vorhergesagt in Superstring Theorien
- Entdeckung am LHC Beschleuniger möglich

Zusammenfassung der Messungen

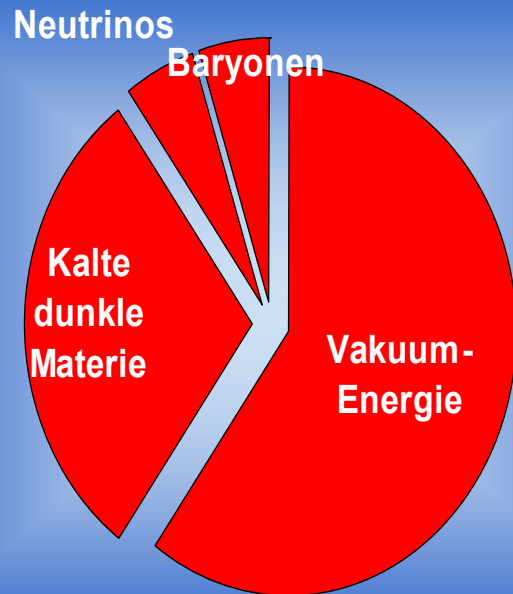


Hintergrundstrahlung (CMB):
 $\Omega = \Omega_V + \Omega_M = 1.0 \pm 0.2$

Das Universum is flach.

CMB & SNe:
 $\Omega_V = 0.7 \pm 0.2$
 $\Omega_M = 0.3 \pm 0.2$

Energie und Materie im Universum



Kritische Dichte: $\rho_{\text{krit}} \approx 4 \text{ Protonen/m}^3$

Gesamtdichte = $1.0 \pm 0.2 \rho_{\text{krit}}$

Vakuumenergie: $70 \pm 20 \%$

Kalte dunkle Materie: $25 \pm 10\%$

Neutrinos: $0.3\% < \rho_{\text{neu}} < 15\%$

Baryonen: $5 \pm 0.5 \%$

Sterne: 0.5%

Probleme des Urknallmodells

Die Entwicklung des Universums läßt sich gut innerhalb des Urknallmodells mit den kosmologischen Parameters beschreiben.

Allerdings gibt es keine Erklärung für die Entstehung und für die Anfangsbedingungen.

Fragen:

1) Warum expandiert das Universum? Bisher keine Antwort.

Vermutlich kann Leben nur in dieser Phase des Universums existieren.

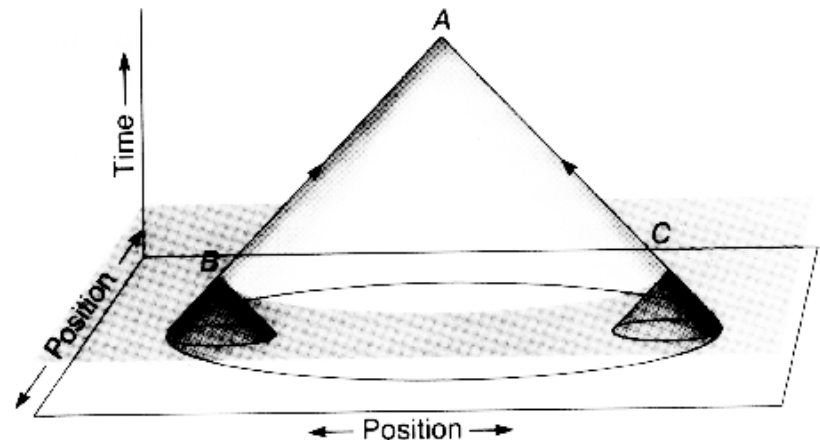
Die Entwicklung des Lebens benötigt einige Mrd. Jahre.

Nach ca. 30 Mrd. Jahren erlöschen die Sterne.

2) Horizontproblem: Weshalb ist die CMB-Strahlung so isotrop?

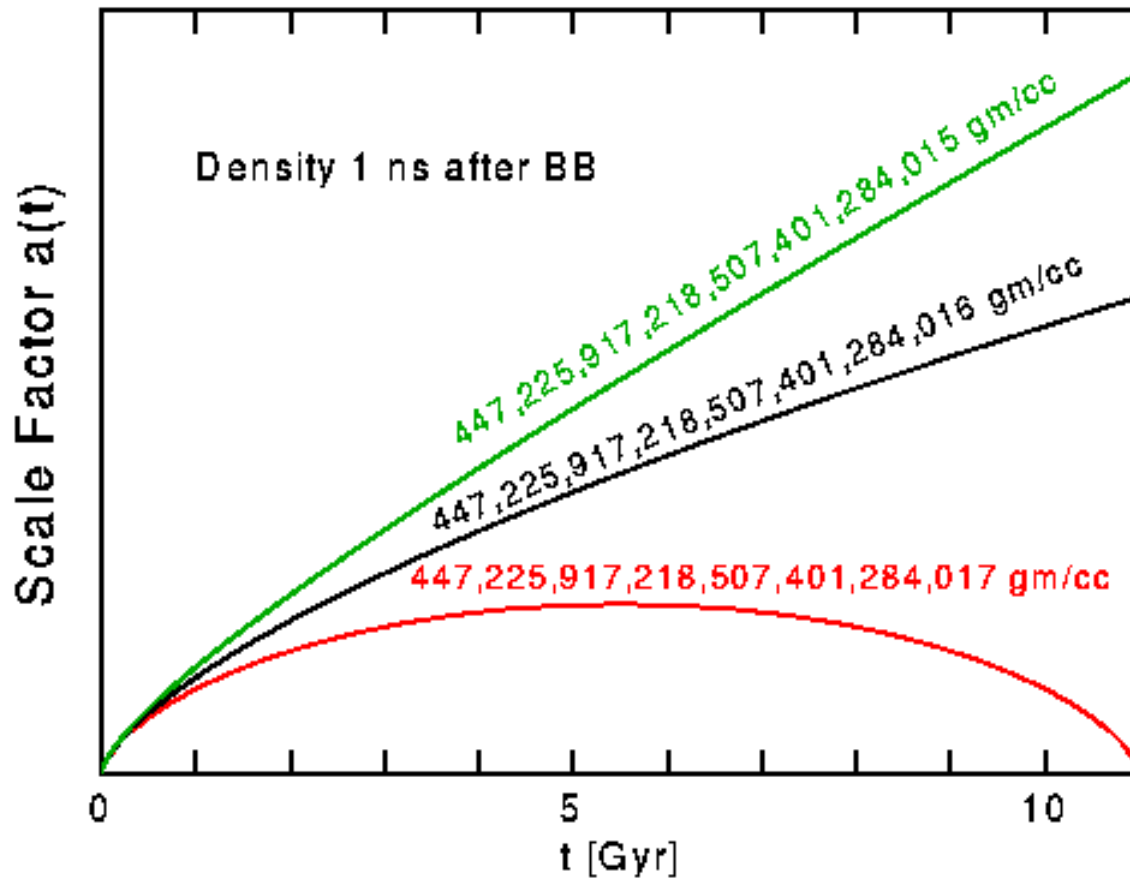
- heute erreichen uns Photonen aus Punkten im Weltraum, die beim Aussenden nicht innerhalb des Horizontes waren (Alter * Lichtgeschwindigkeit).

Sie konnten somit nicht im thermischer Gleichgewicht sein.



Probleme des Urknallmodells

3) Warum ist das Universum räumlich flach?



Kleinste Abweichungen (10^{-24}) von der kritischen Dichte führen bei der Expansion zu stark gekrümmten Räumen. Somit mußte das Universum kurz nach dem Urknall mit hoher Genauigkeit genau eine kritische Dichte gehabt haben.

Kosmologische Inflation

2. Friedmann Gleichung:
$$\left(\frac{\ddot{R}}{R}\right) = -\frac{4\pi G}{3}\left(\rho_m + \frac{3p_m}{c^2}\right) + \frac{\Lambda}{3}$$

Spezialfall: Materie mit negativem Druck: $p_M \ll -\rho_M c^2 / 3, \Lambda = 0$

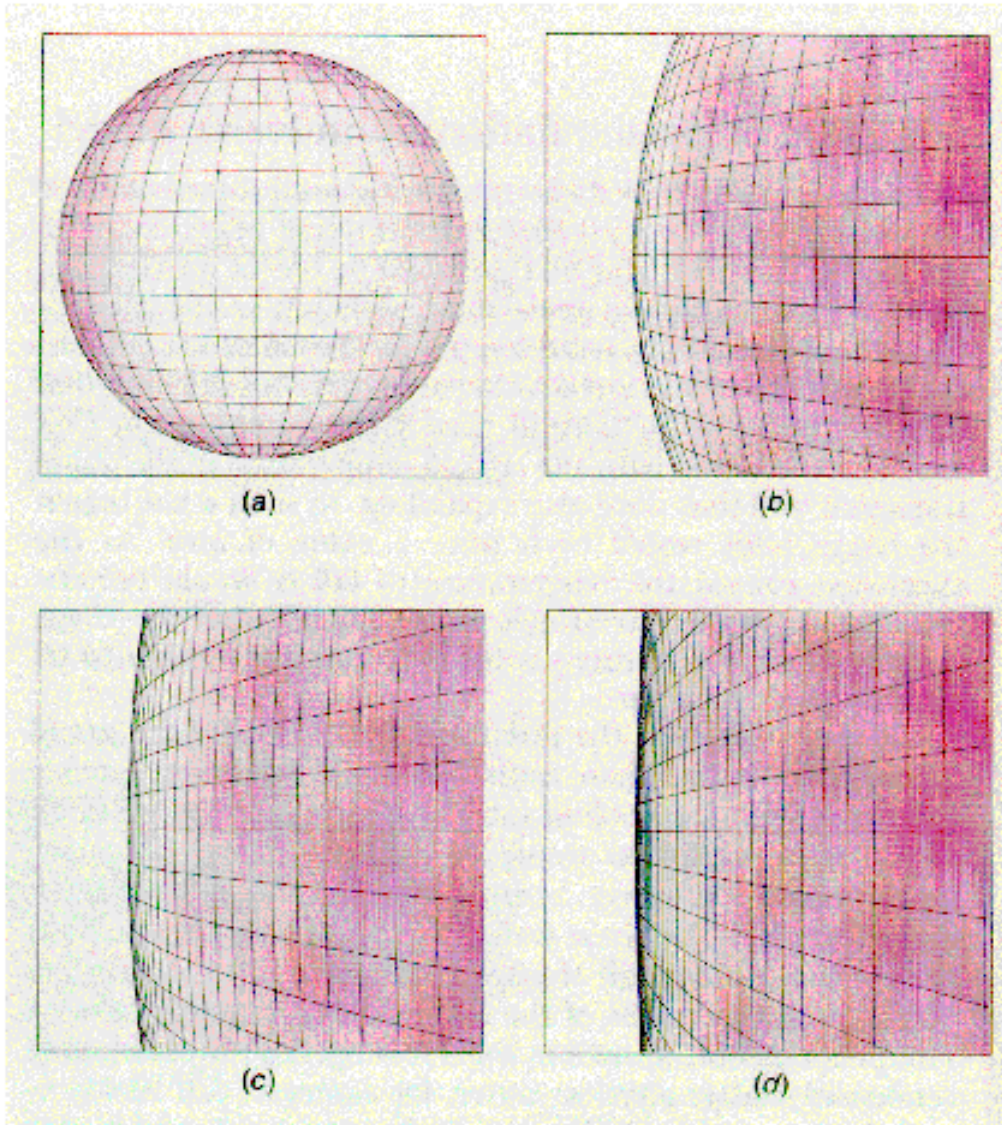
somit
$$\ddot{R} = 4\pi G p_M R / c^2$$

Dies führt zu einem exponentiell anwachsenden Universum (Inflation).

$$R(t) = R_0 \exp(t / \tau), \quad \tau = c / \sqrt{4\pi G p_M}$$

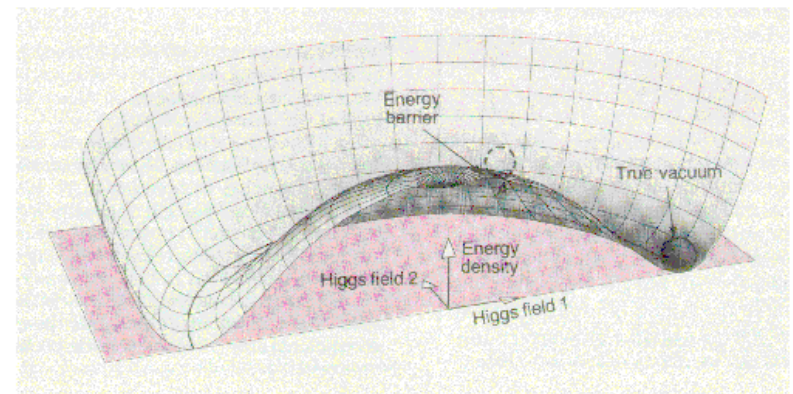
Es gibt wichtige Hinweise, dass eine solche Aufblähung des Universums in einem frühen Stadium auftrat. Es liefert eine Erklärung für die 2. und 3. Frage. Kleine Bereiche, die im thermischen Gleichgewicht waren, werde enorm aufgebläht (Faktor 10^{26}). Sie sind sehr viel größer als das heutige Universum. Durch die Inflation wird der Raum flach.

Kosmologische Inflation



Durch die Inflation wird aus einem anfänglich gekrümmten Raum am Ende ein flacher Raum mit $\Omega=1$.

Die inflationäre Phase findet bei A im Übergang des Higgsfeldes vom 'false' zum 'true' Vakuum statt.



Kurze Geschichte des Universums

Urknall

Die Ursache des Urknalls ist unbekannt. Mit dem Urknall entstehen Raum und Zeit. Wir wissen nichts über das Geschehen bis zur Planckzeit ($< 10^{-43}$ sec) . Es fehlt eine Quantentheorie der Gravitation. Vermutlich ist eine Unterscheidung von Raum und Zeit in dieser Phase nicht sinnvoll.

10^{-43} sec bis 10^{-34} sec

Das Universum ist 10^{32} Grad (10^{19} GeV) heiß. Zunächst existiert eine einzige vereinheitlichte 'Urkraft'.

Nun separiert die Gravitationskraft als eigenständige Kraft und erhält die Eigenschaften wie in der Allgemeinen Relativitätstheorie beschrieben.

Die anderen Kräfte sind noch vereinigt.

Kurze Geschichte des Universums

Inflation: 10^{-34} sec bis 10^{-32} sec

Anfangs sind die Kräfte noch vereinigt. Nun separiert die starke Kraft. Das Higgsfeld nimmt in einer kleinen Region einen anderen Energiezustand an. Dies entspricht einem negativen Druck, der beim Übergang in den neuen Vakuumzustand zu einer enormen Aufblähung führt. Innerhalb von 10^{-32} sec wird das Universum um einen Faktor 10^{50} gedehnt.

Vor der Inflation:

Ereignis-Horizont ($c \cdot t$): 10^{-27} m

Größe des beobachtbaren Universums: 10^{-51} m

Nach der Inflation:

Ereignis-Horizont: 10^{23} m

Größe des beobachtbaren Universums: 10^{-1} m

Heute:

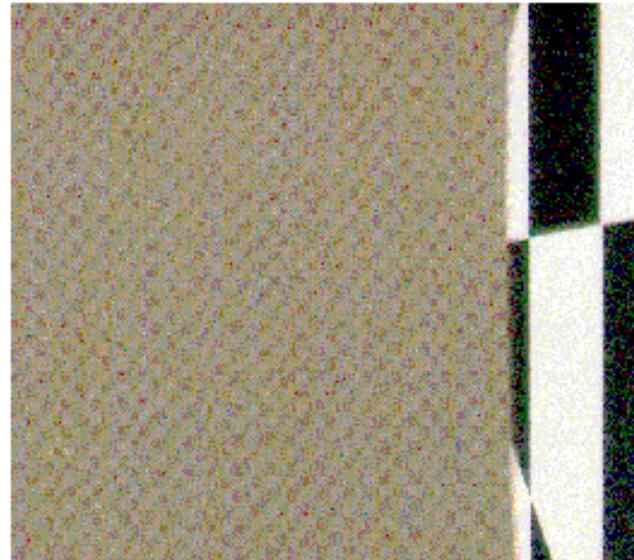
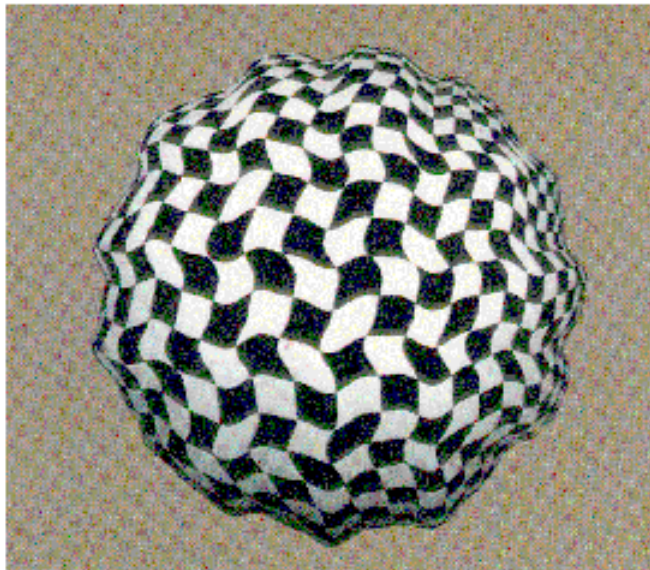
Ereignis-Horizont: 10^{50} m

Größe des beobachtbaren Universums (15 Mrd Jahre $\cdot c$): 10^{26} m

Kurze Geschichte des Universums

Konsequenzen der Inflation:

- 1) Das Universum wird homogen und isotrop.
Anfängliche Inhomogenitäten werden verschmiert.
- 2) Das Universum wird flach.
Anfängliche Krümmungen des Raumes werden geglättet.



Kurze Geschichte des Universums

10⁻³² sec:

Die Inflation ist beendet. Die normale Expansion wird fortgesetzt. Die Materie besteht aus Quarks und Leptonen. Auf sie wirken Gravitation, starke Kraft und die noch vereinigte elektroschwache Kraft. Heute beobachten wir im Universum nur Anhäufungen von Materie und keine Antimaterie. Vermutlich existierte damals ein kleiner Überschuss (10^{-9}) an Materie gegenüber Anti-Materie. Daraus entstanden später Sterne und Galaxien. Diese Asymmetrie zwischen Materie- und Antimaterie lässt sich nur verstehen, wenn eine CP-Verletzung in den Wechselwirkungen auftrat. Dieser Effekt ist in der Teilchenphysik bei niedrigen Energien beobachtet worden. Die Ursache der CP-Verletzung im frühen Universum ist noch nicht bekannt.

10⁻¹¹ sec:

Die Temperatur fällt unter 10^{15} Grad. Die elektroschwache Kraft teilt sich in die elektromagnetische und die schwache Kraft.

Kurze Geschichte des Universums

10⁻⁶ sec:

Quarks und Antiquarks vernichten sich. Dabei entstehen viele Photonen. Der winzige Überschuss (10^{-9}) an Materie führt dazu, dass alle Antiquarks vernichtet werden, aber ein Bruchteil von 10^{-9} Quarks übrig bleibt. Es bildet sich ein Quark-Gluon Plasma.

10⁻⁴ sec:

Das beobachtbare Universum ist so groß wie unser heutiges Sonnensystem. Die Quarks verbinden sich und bilden Protonen und Neutronen. Es gibt keine freien Quarks mehr.

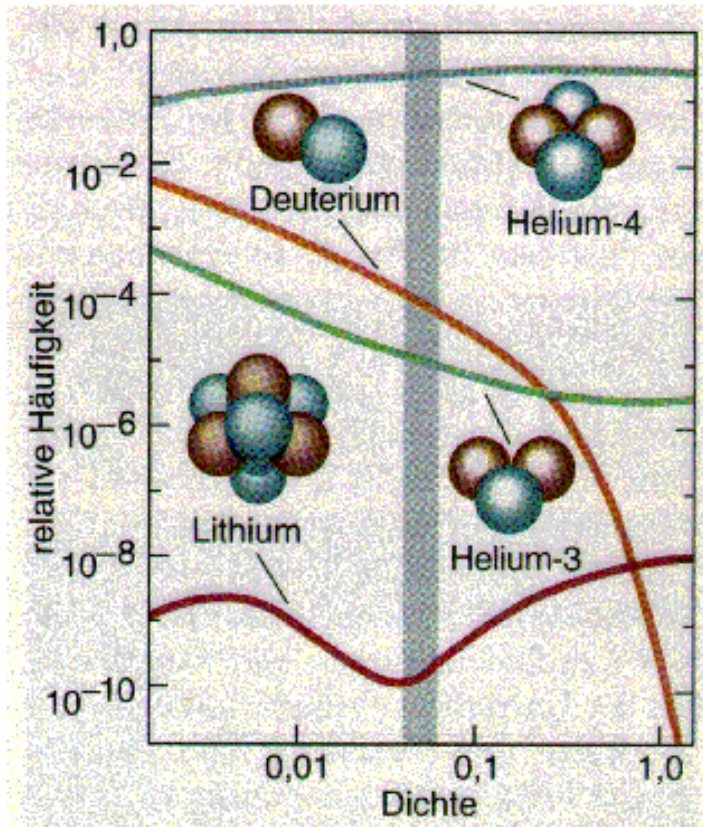
1 sec:

Die Neutrinos haben bisher häufig mit Protonen und Neutronen reagiert. Mit fallender Temperatur nimmt die Reaktionsrate ab. Das Universum wird für Neutrinos transparent. Sie breiten sich ungehindert aus und bilden eine Neutrino-Hintergrundstrahlung ($T=1,95\text{ K}$, $n = 340\text{ Neutrinos/cm}^3$).

Kurze Geschichte des Universums

100 sec:

Protonen und Neutronen verbinden sich und bilden Helium und andere leichte Elemente. Die gemessenen Häufigkeit der leichten Elemente bestätigt die Urknalltheorie.



Messwerte:

^4He : Wird auch durch Fusion in Sternen erzeugt. Dieser kleine Beitrag muss abgezogen werden.

Messung: $Y_p(^4\text{He}) = 0.23 \pm 0.02$

Deuterium: Nur primordiale Produktion

$$10^{-5} < D/H < 2 \cdot 10^{-4}$$

^3He : $1.2 \cdot 10^{-5} < ^3\text{He} / H < 1.5 \cdot 10^{-4}$

$^7\text{Li}/H = (1.4 \pm 0.2) \cdot 10^{-10}$

Wichtige Bestätigung des Urknallmodells.

gem. Baryondichte = $(5 \pm 0.5) \%$

Gregor Herten

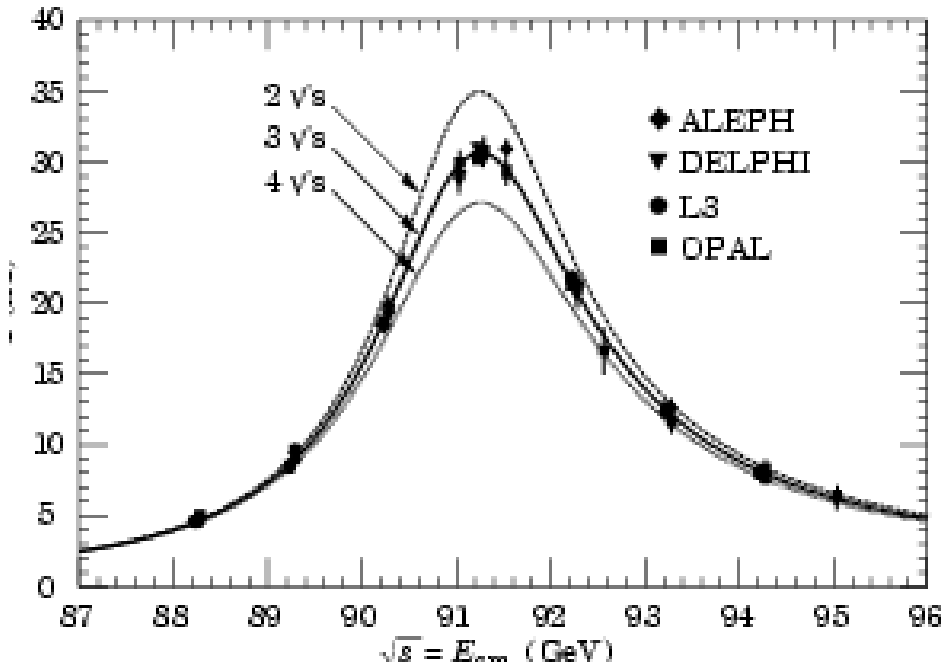
Teilchenphysik und Kosmologie

Kurze Geschichte des Universums

Im Urknallmodell hängt die ^4He Häufigkeit $Y(^4\text{He})$ ab von:

- Anzahl der Neutrinos N_ν (mehr Neutrinos bedeutet höhere Temperatur)
- Lebensdauer der Neutronen τ_n (größere Lebensdauer = mehr Neutronen)
- Baryon/Photon Verhältnis η (mehr Baryonen bedeutet mehr ^4He)

$$Y(^4\text{He}) = 0.230 + 0.013 (N_\nu - 3) + 0.014 (\tau_n - 922) + 0.011 \ln(\eta \cdot 10^{10})$$



LEP:

$$N_\nu = 2.994 \pm 0.012$$

Neutronlebensdauer:

$$\tau_n = 887.0 \pm 2.0 \text{ sec}$$

Die gute Übereinstimmung von $Y(^4\text{He})$ in Messung und Theorie ist eine wichtige Bestätigung der Urknalltheorie.

Kurze Geschichte des Universums

300 000 Jahre:

Photonen reagieren ständig mit freien Elektronen und Protonen. Nun sinkt die Temperatur. Elektronen und Protonen verbinden sich und bilden Atome. Es gibt keine Freien Elektronen mehr. Das Universum wird transparent für Licht. Das Licht breitet sich ungehindert aus und bildet die 3K Hintergrundstrahlung. Die 3K Strahlung ist eine wichtige Bestätigung der Urknalltheorie. Die Temperaturschwankungen sind sehr gering (1/50 000). Geringe Fluktuationen in der Hintergrundstrahlung waren Ausgangspunkt für die Entstehung von Materiehaufen.

	300 000 Jahre	heute
Größe des Universums	1	1500
Wellenlänge des Lichtes	1	1500
Temperatur	4500 K	3 K

Kurze Geschichte des Universums

1 Mrd. Jahre:

Anfängliche Dichteschwankungen verstärken sich aufgrund der Gravitationskraft. Es entstehen riesige Gaswolken. Daraus bilden sich Sterne und Galaxien. Eine so schnelle Galaxiebildung lässt sich nur verstehen, wenn zusätzlich zur baryonischen Materie noch weitere dunkle Materie vorlag. Nur dann ist die Gravitationskraft stark genug. Beste Übereinstimmung für kalte dunkle Materie (z.B. Supersymmetrische Teilchen, Axionen). Massive Neutrinos (heisse dunkle Materie) alleine können die Strukturbildung nicht erklären.

15 Mrd. Jahre: heute

30 Mrd. Jahre: Die meisten Sterne sind erloschen.

10³⁵ Jahre: Atomkerne zerfallen (?). Es gibt nur noch Licht, Neutrinos, Schwarze Löcher, dunkle Materie (?). Die Vakuumenergie überwiegt. Das Universum dehnt sich immer schneller aus.

10⁸⁰ Jahre: Schwarze Löcher mit 1000 Sonnenmassen zerstrahlen. Die Ausdehnung des Universums wird immer mehr beschleunigt.

Zusammenfassung

Die Kosmologie ist ein experimenteller Zweig der Physik geworden. Messungen erhält man einerseits aus Beobachtungen in der Astrophysik (Hubble-Parameter, Strukturbildung, Häufigkeit der leichten Elemente, 3K-Strahlung) und der Teilchenphysik andererseits (Standardmodell, Neutrinos, dunkle Materie, Kernreaktionen).

Ergebnisse:

- gute Übereinstimmung mit Urknallmodell + Inflation
- das Universum ist auf großen Skalen flach, d.h. $k=0$, $\Omega_V + \Omega_M = 1$
- deutliche Hinweise für Vakuumenergie $\Omega_V \sim 0.7$
- Materiedichte $\Omega_M \sim 0.3$, davon ca. 90% dunkle Materie.

Zukünftige Messungen

- Teilchenphysik (LHC: Higgs, SUSY)
- Astrophysik (Supernovae bei hohem z , MAP Messungen der 3K Strahlung, Strukturbildung im Universum)