

Einsteins Universum

Das Geheimnis der Dunklen Energie



Andreas Müller

Max-Planck-Institut für
extraterrestrische Physik, Garching

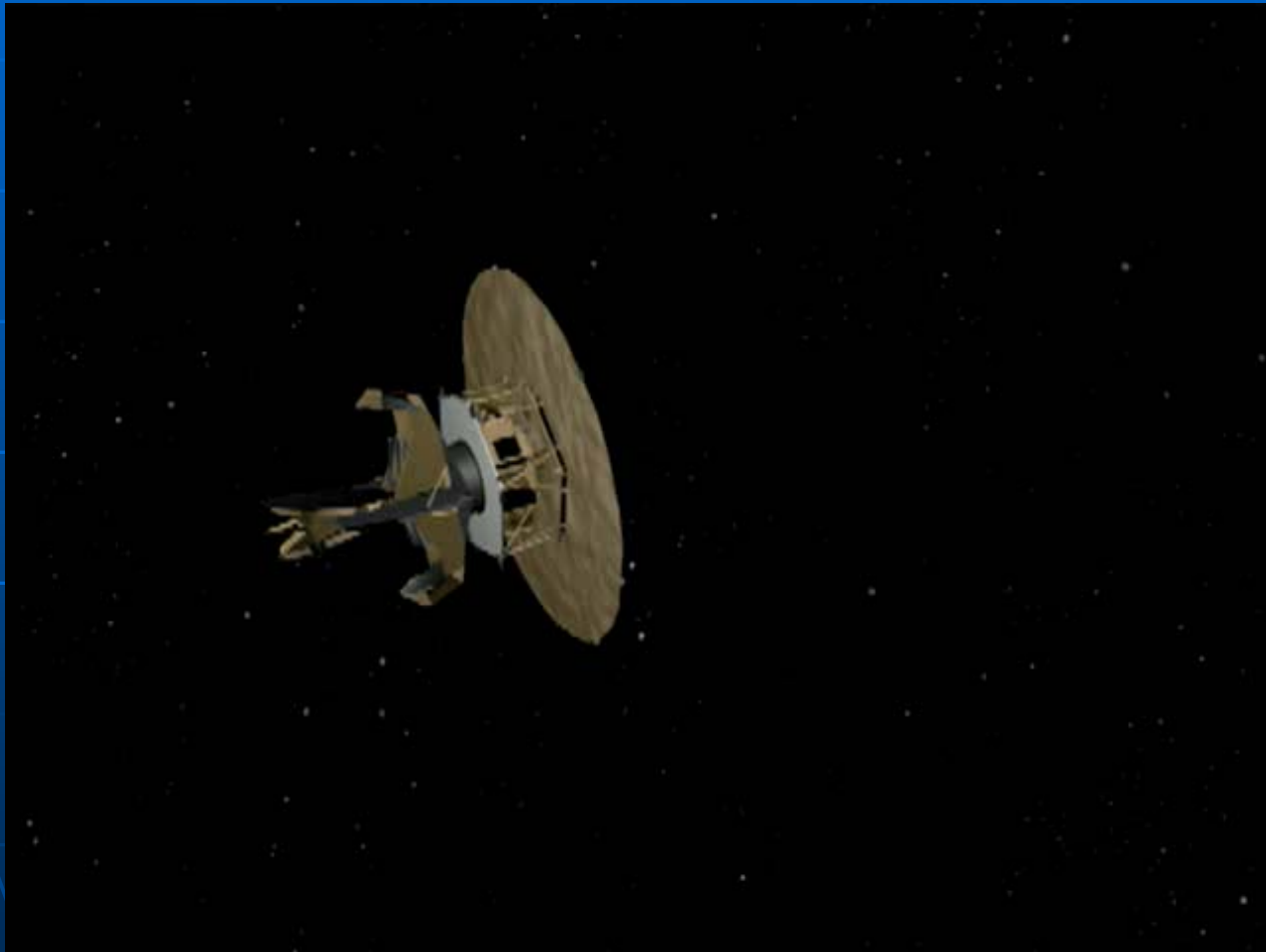
Übersicht

- Zeitreise zum Ursprung
- Historische Meilensteine
- Grundlagen der Kosmologie
- Beobachtung
- Formen Dunkler Energie
- Zukunft des Universums

A

Zeitreise zum Ursprung

Reise zum Urknall



WMAP Website, <http://map.gsfc.nasa.gov/>

Zeitreise zum Ursprung



*„Ein Blick an den Himmel
ist eine Zeitreise“*

A Historische Meilensteine

Kosmologische Konstante



*Albert Einstein
(1879 – 1955)*

Bildquelle: Wikipedia


$$\mathbf{G}_{\mu\nu} - \Lambda \mathbf{g}_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} \mathbf{T}_{\mu\nu}$$

- Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie
- 1917: Λ -Term
- statisches Universum
- 1931: „Einsteins Eselei“

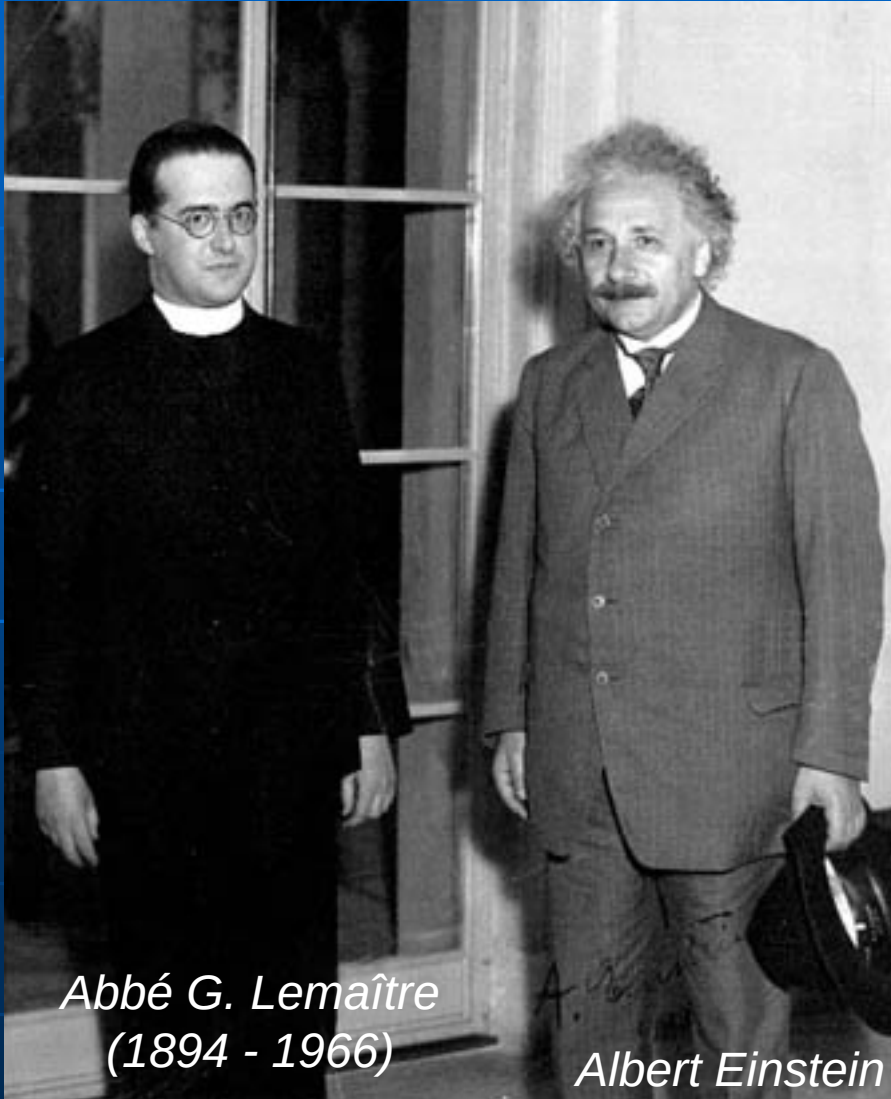
Bewegter Raum



Aleksandr A. Friedmann
(1888 - 1925)

- Pionier dynamischer Universen
- 1922: Entdeckung der Friedmann-Gleichungen
- Friedmann-Modell:
 $\Lambda = 0$, $k = +1$ oder -1 , $p = 0$
- später: pulsierende Universen mit $\Lambda < 0$

Geburt des Raums

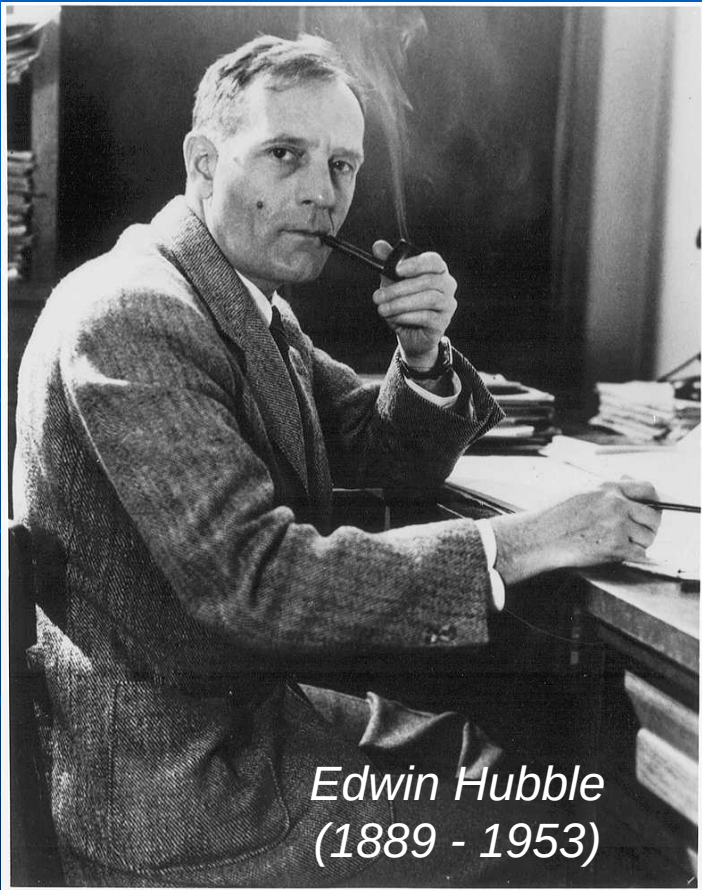


Abbé G. Lemaître
(1894 - 1966)

Albert Einstein

- 1925: Entdeckung eines expandierenden Kosmos als Lösung der Feldgleichungen
- $\Lambda > 0$, $k = +1$
- Friedmann-Lemaître-Modell
- Geburt des Raums (Nature 1931), „Vater des Urknalls“

Galaxienflucht



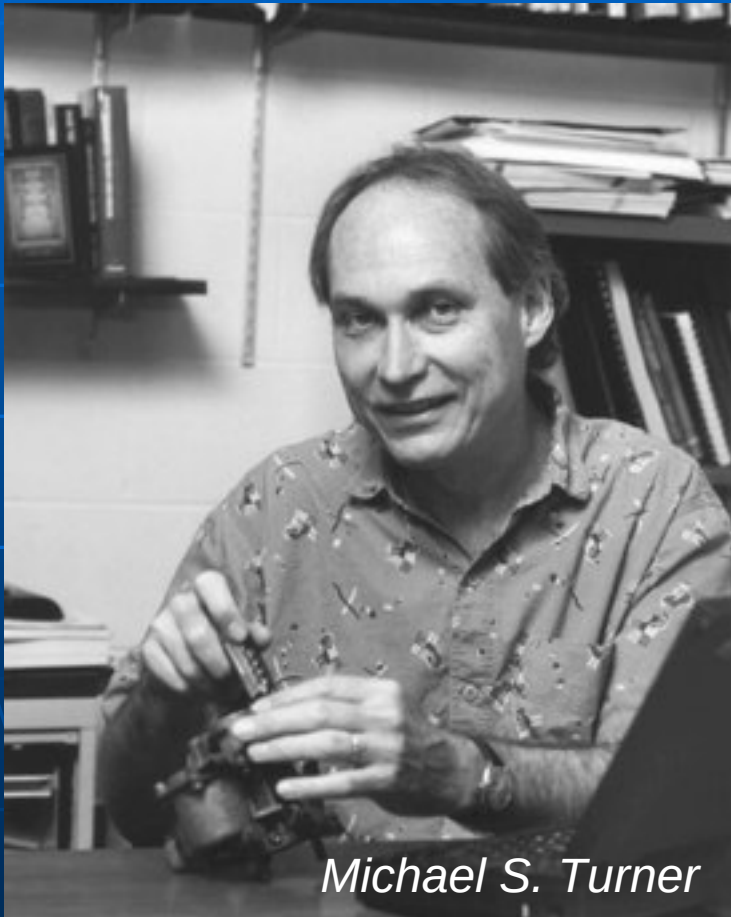
Edwin Hubble
(1889 - 1953)

- 1929: empirischer Befund der Fluchtbewegung von Galaxien
- Hubble-Gesetz:

$$cz = H_0 D$$

- (gültig bis $z \sim 0.1$ bzw. 420 Mpc)
- Hubble-Konstante
 $H_0 = 72 \text{ km/s/Mpc}$ ist Maß für Expansionsgeschwindigkeit des Kosmos

Dunkle Energie



Michael S. Turner

- Rückkehr der kosmologischen Konstante in die moderne Kosmologie
- erfand 1990 den Begriff Dunkle Energie (*dark energy*)

1 Grundlagen der Kosmologie

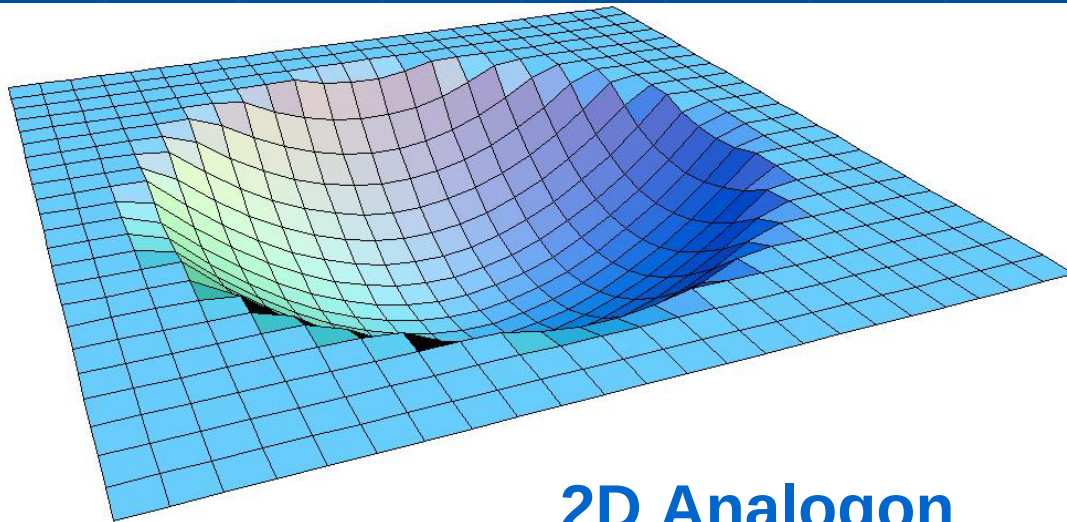
Einsteins Raumzeit

klassische Mechanik

Relativitätstheorie

Raum + Zeit = Raumzeit

$$3 + 1 = 4$$



2D Analogon

Blick zurück

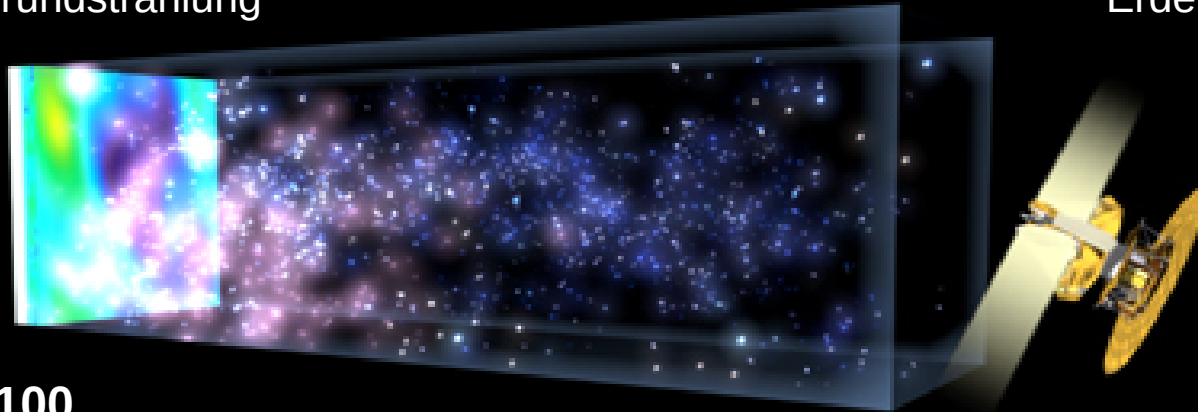
Ursprung der
Hintergrundstrahlung

Beobachter auf der
Erde

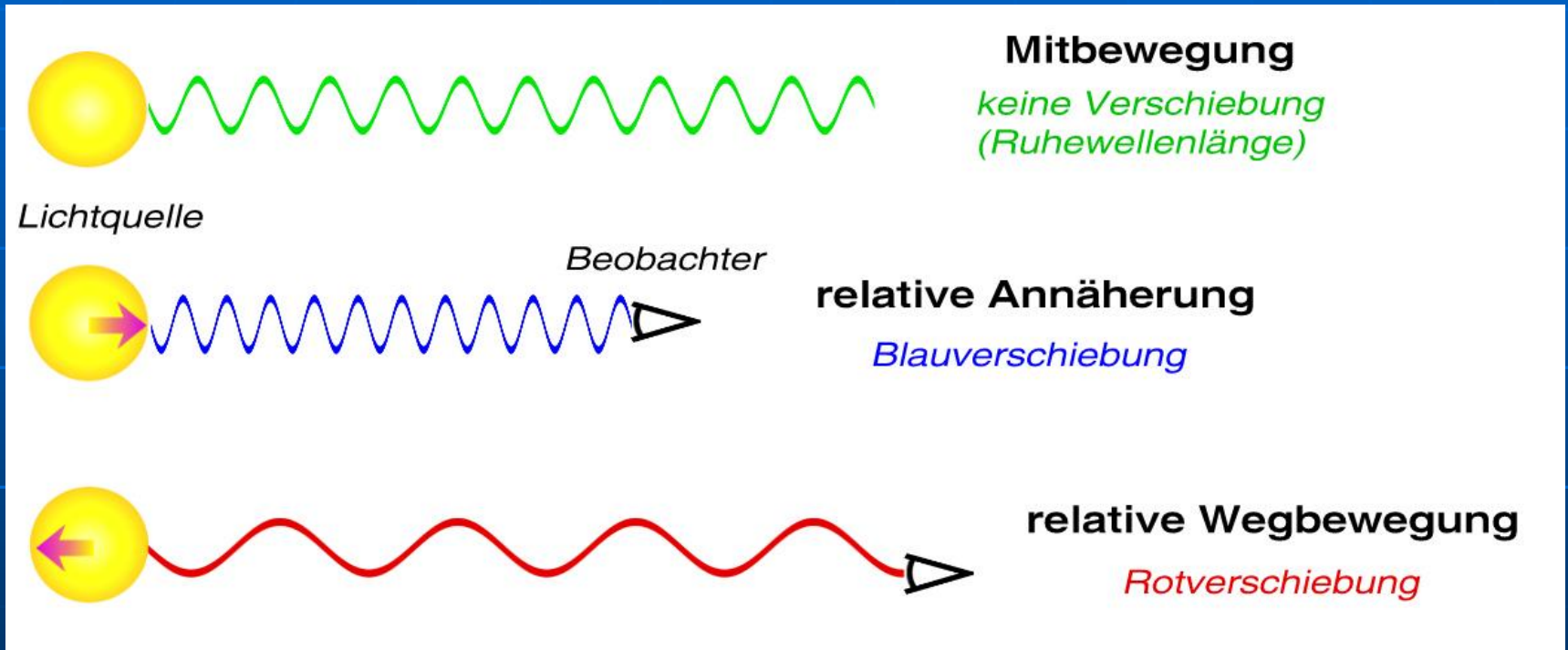
$z \sim 1100$

Entstehung von Sternen
und Galaxien

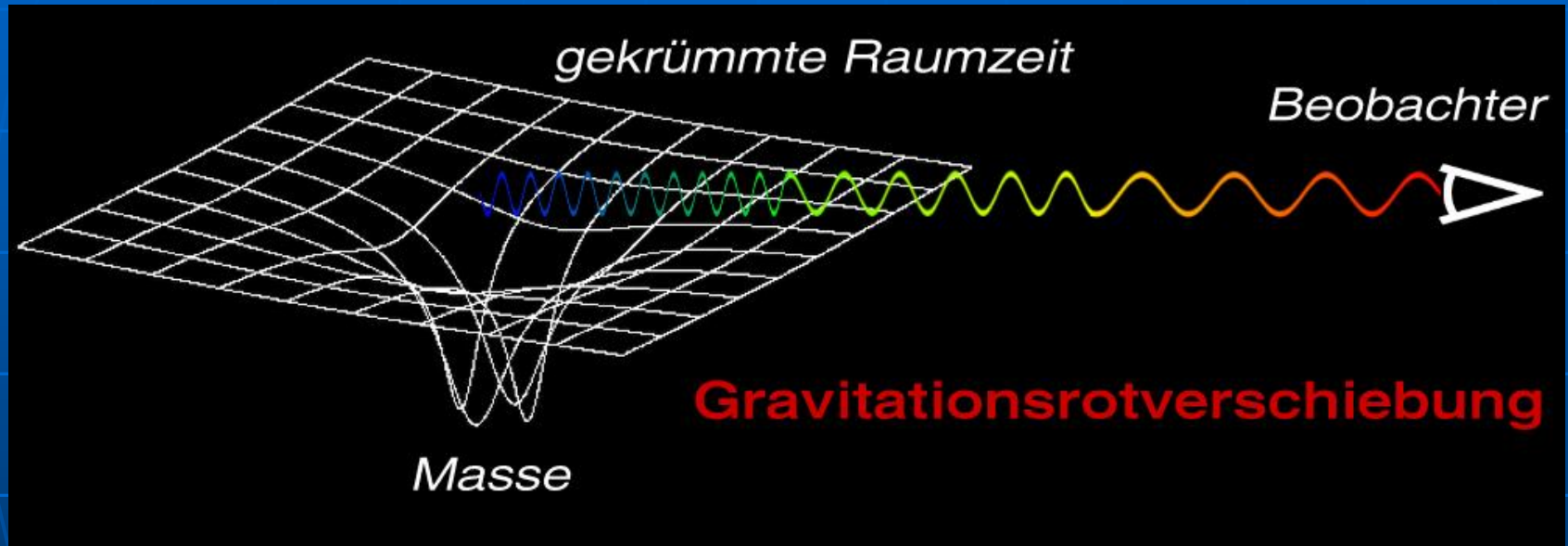
$z = 0$



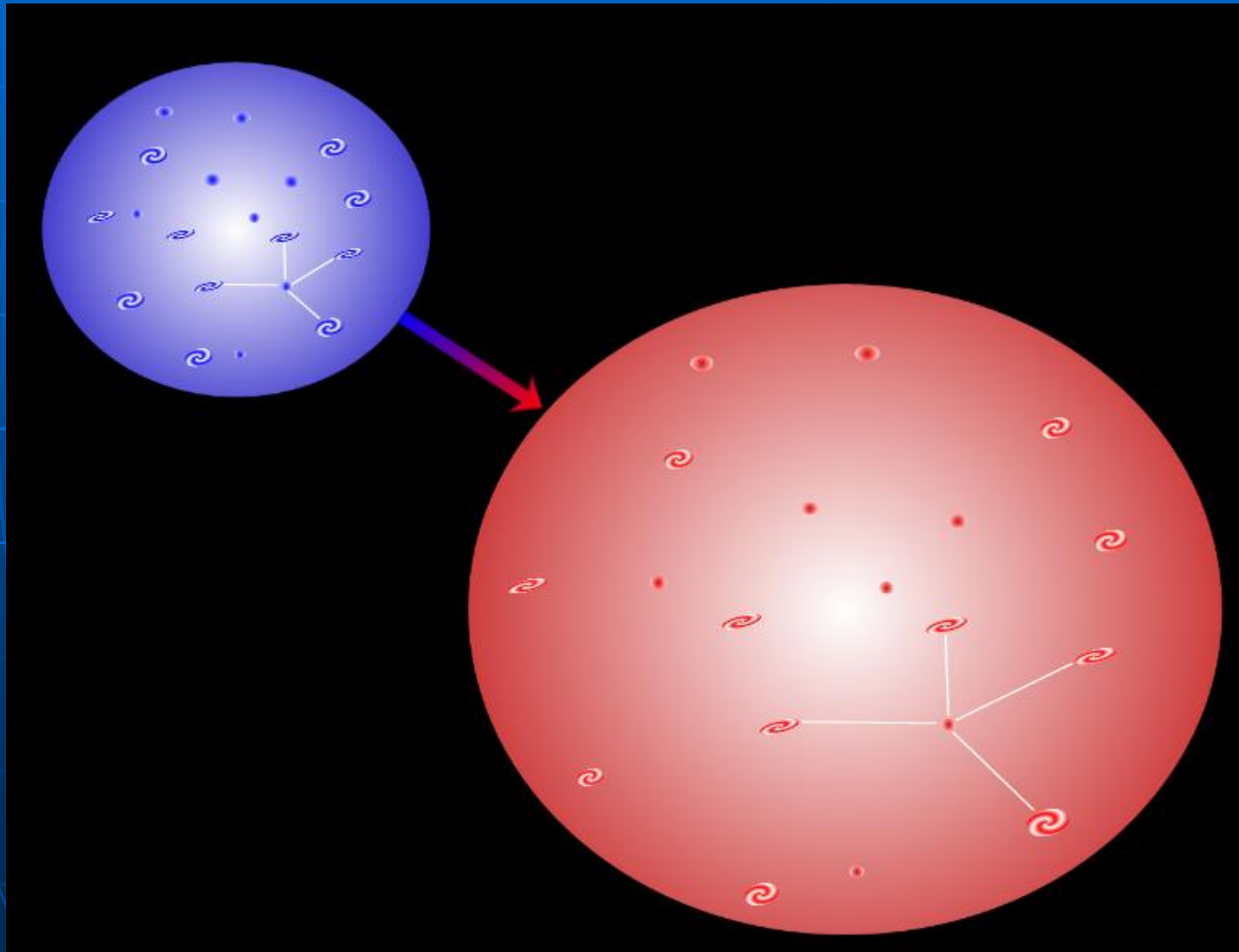
Doppler-Effekt



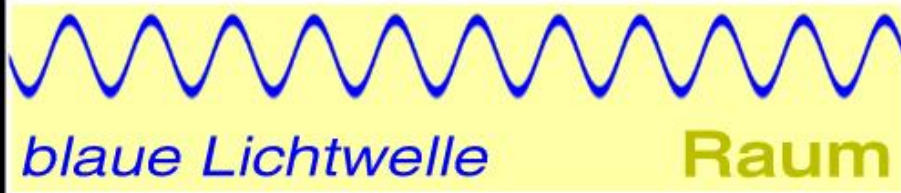
Fallendes Licht



Expandierender Raum



Gedehntes Licht



Rotverschiebung

$$z = z_{\text{cosmo}} + z_{\text{grav}} + z_{\text{Doppler}}$$

Expansion des Universums,
wichtig auf großer Raumskala,
Kosmologie!

wichtig bei starken Gravitationsfeldern,
z.B. Schwarze Löcher, Neutronensterne

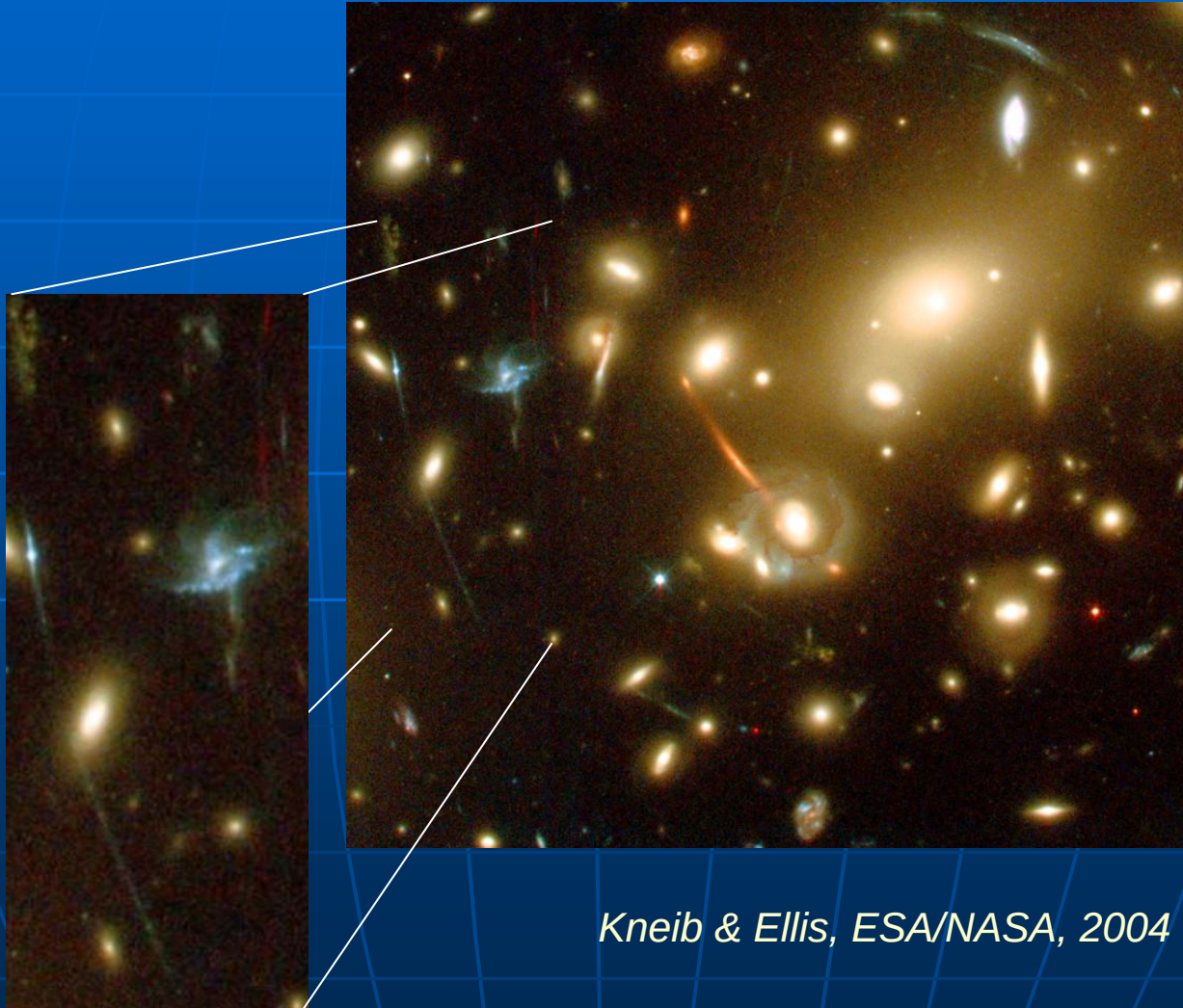
reiner Bewegungseffekt,
nur lokal wichtig
(Andromedagalaxie)

Dunkle Materie

- zusätzliche Materieform, Natur unklar!
- wechselwirkt schwach, aber nicht elektromagnetisch
- gefordert zur Klärung der Stabilität des Coma-Haufens bestehend aus 800 Galaxien (Zwicky 1933)
- gefordert zur Klärung des Rotationsverhaltens von Galaxien (Rubin 1960)
- Astroteilchenphysik: WIMPs (*weakly interacting massive particles*)
- supersymmetrische DM (*Dark SUSY*), z.B. leichtester Kandidat: Neutralino χ mit 520 GeV
- Spektrum kosmischer Strahlung: „Knie“ aus WIMP-Vernichtungsstrahlung?



Gravitationslinsen



Kneib & Ellis, ESA/NASA, 2004

A

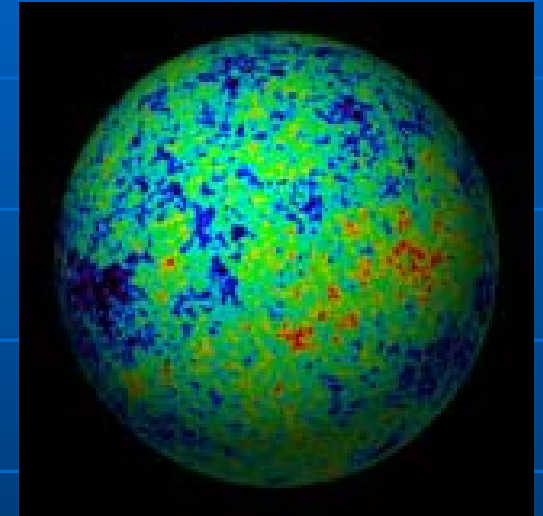
Beobachtung

Kosmische Hintergrundstrahlung

- Theoretisch vorhergesagt 1950 (Hoyle) und 1956 (Gamov): Wärmestrahlung des heißen Urplasmas des kleinen und jungen Universums
- 1965 von Penzias & Wilson per Zufall entdeckt (Nobelpreis 1978)
- Relikt aus prähistorischer Zeit: $z \sim 1100$
- Alter des Kosmos: 380 000 Jahre
- Das Älteste, was Menschen messen!
- stark rotverschoben im lokalen Universum:
Drei-Kelvin-Strahlung (*Planck-Strahler*)

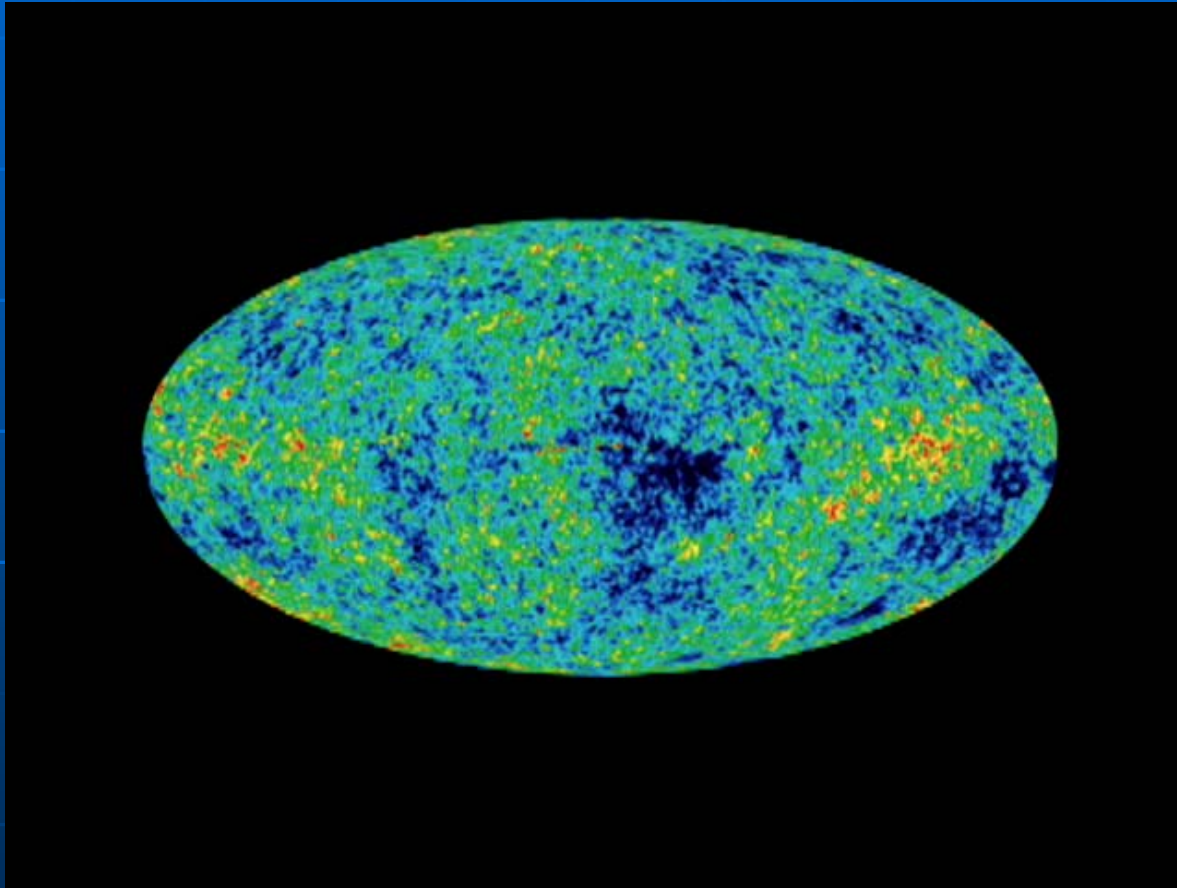
Kosmische Hintergrundstrahlung

- Karte der Hintergrundstrahlung zeigt: Universum ist isotrop, viel mehr als blauer Himmel an einem sonnigen Tag!
- Aber: geringe Schwankung im Bereich von 10^{-5} Kelvin wegen ersten Strukturen: inhomogene Dunkle Materie
⇒ Schwingungen im Urplasma
- bestens vermessen mit COBE, WMAP, BOOMERANG, MAXIMA, ...
- aktuell: Polarisation, Sunyaev-Zel'dovich-Effekt



WMAP Website

Himmelskarte der Urstrahlung



rot: wärmer blau: kälter

WMAP Website

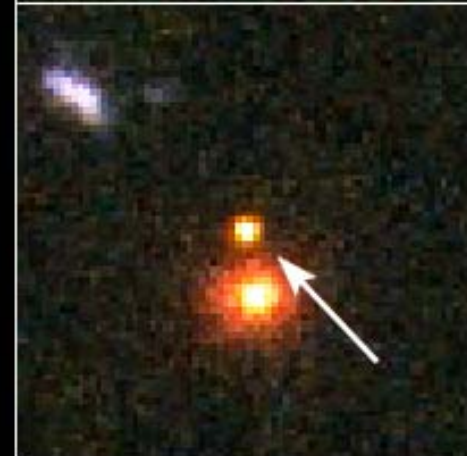
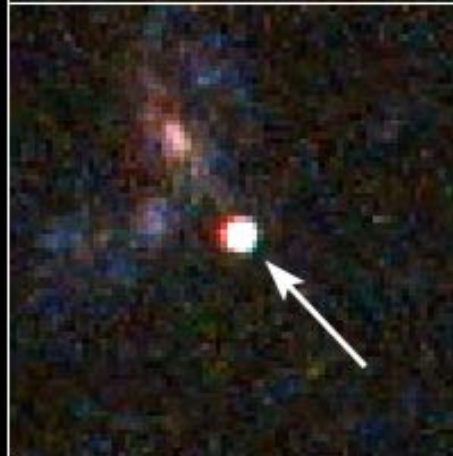
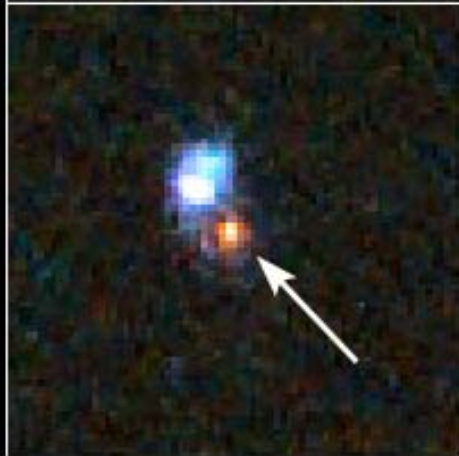
Supernovae Ia

- ◆ SN Ia: explodierende Weiße Zwerge (WDs)
- ◆ gute Standardkerzen: Maximalmasse eines WDs ist $1.46 M_{\odot}$ (*Chandrasekhar-Masse*)
- ◆ fällt mehr Masse (z.B. von einem Begleitstern) auf den Zwerg, so explodiert er als Wasserstoffbombe
- ◆ immer etwa gleiche absolute Helligkeit!
- ◆ gute Meilensteine im Kosmos zur Zuordnung Rotverschiebung $\Rightarrow$ Distanz

Supernovae Ia

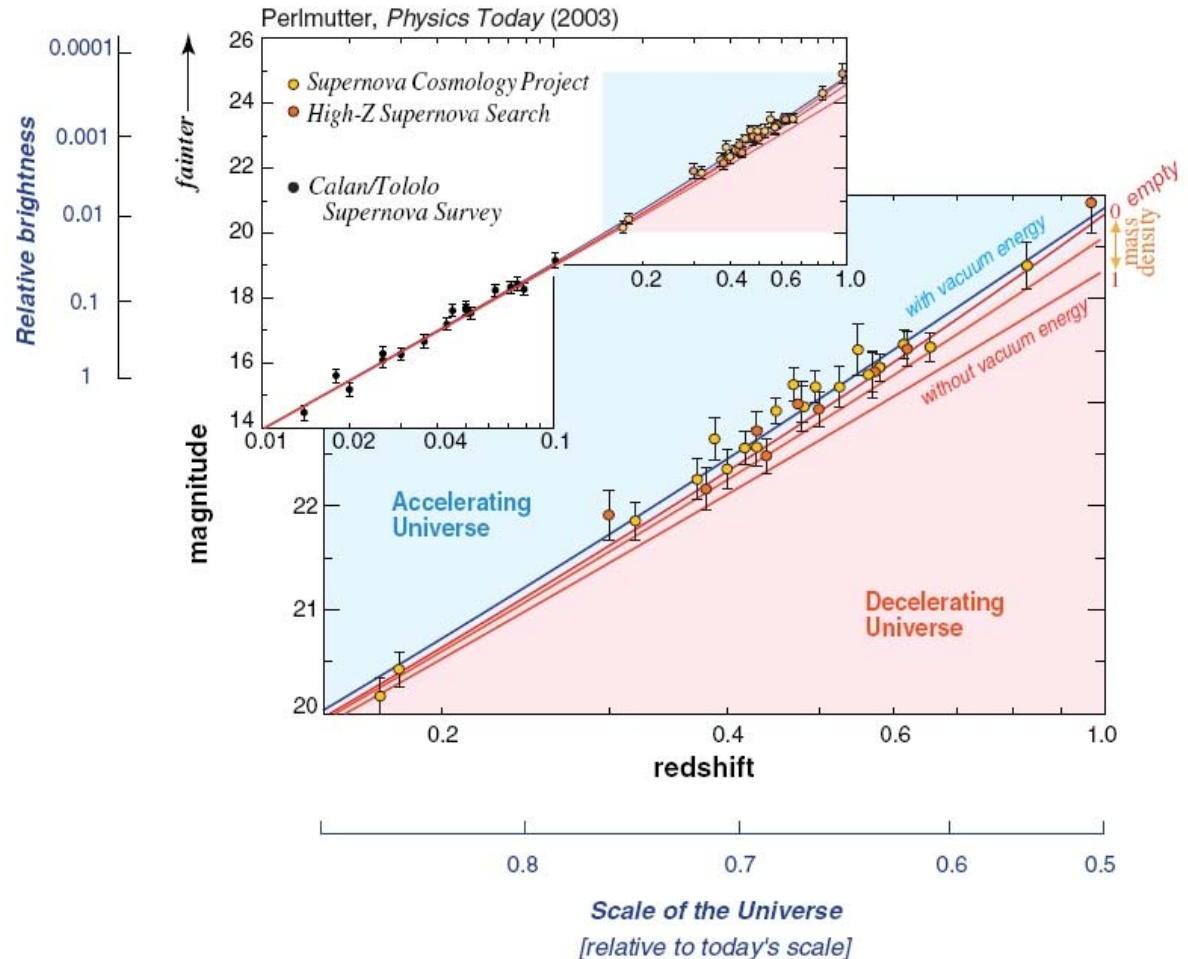
Distant Supernovae

Hubble Space Telescope • ACS



Hubble-Diagramm mit Sternexplosionen

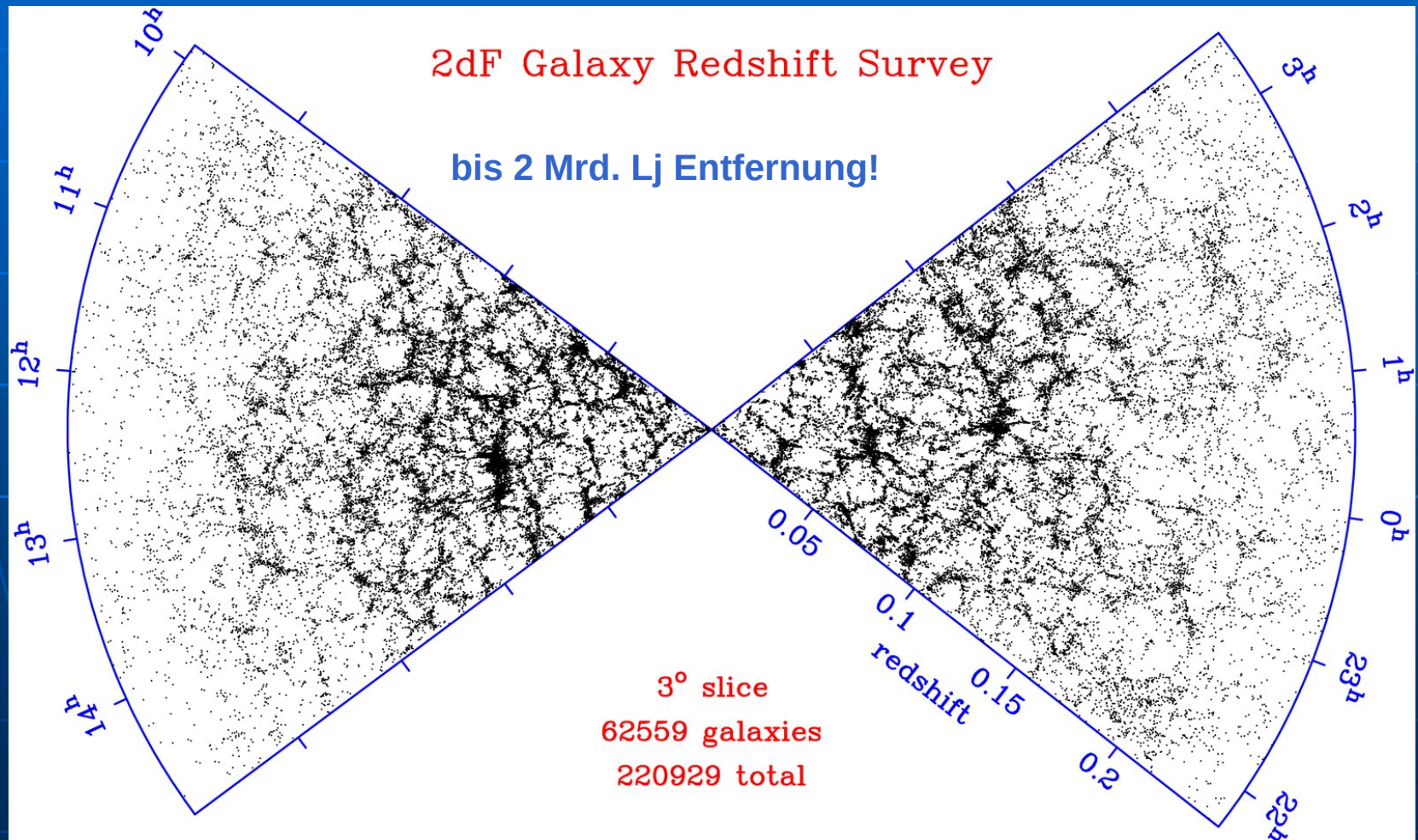
- große z :
Zusammenbruch
der Linearität!
- Kurve beschränkt
kosmologische
Parameter



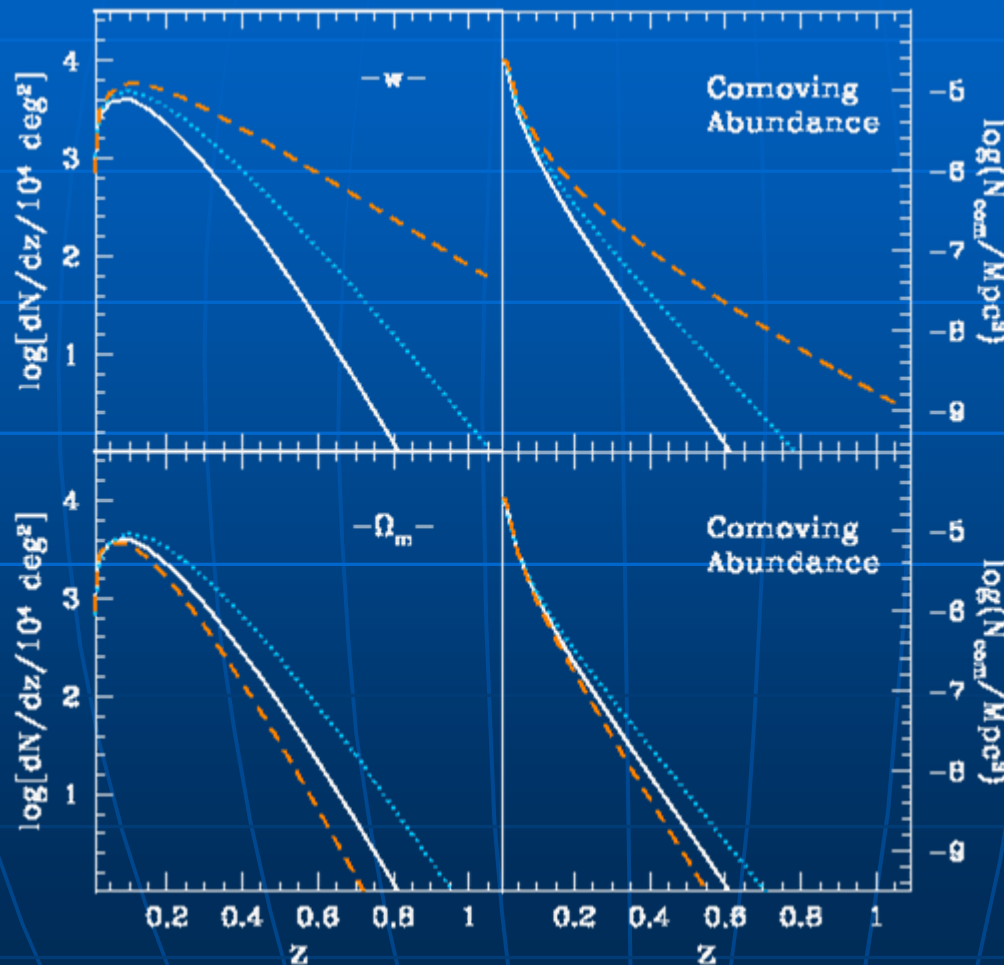
Galaxienhaufen

- Idee: räumliche Verteilung der Galaxien hängt von kosmologischen Parametern ab
- Werkzeug: langbelichtete Beobachtungen, vor allem mit Röntgenteleskopen (*X-ray deep surveys*), liefern Galaxienverteilung
- Resultat: Messung beschränkt
 - Dichteparameter Ω 's,
 - Parameter der Zustandsgleichung w ,
 - dessen zeitliche Entwicklung dw/dz

räumliche Galaxienverteilung



Galaxien enthüllen Universum



$$w = -1$$

$$w = -0.6$$

$$w = -0.2$$

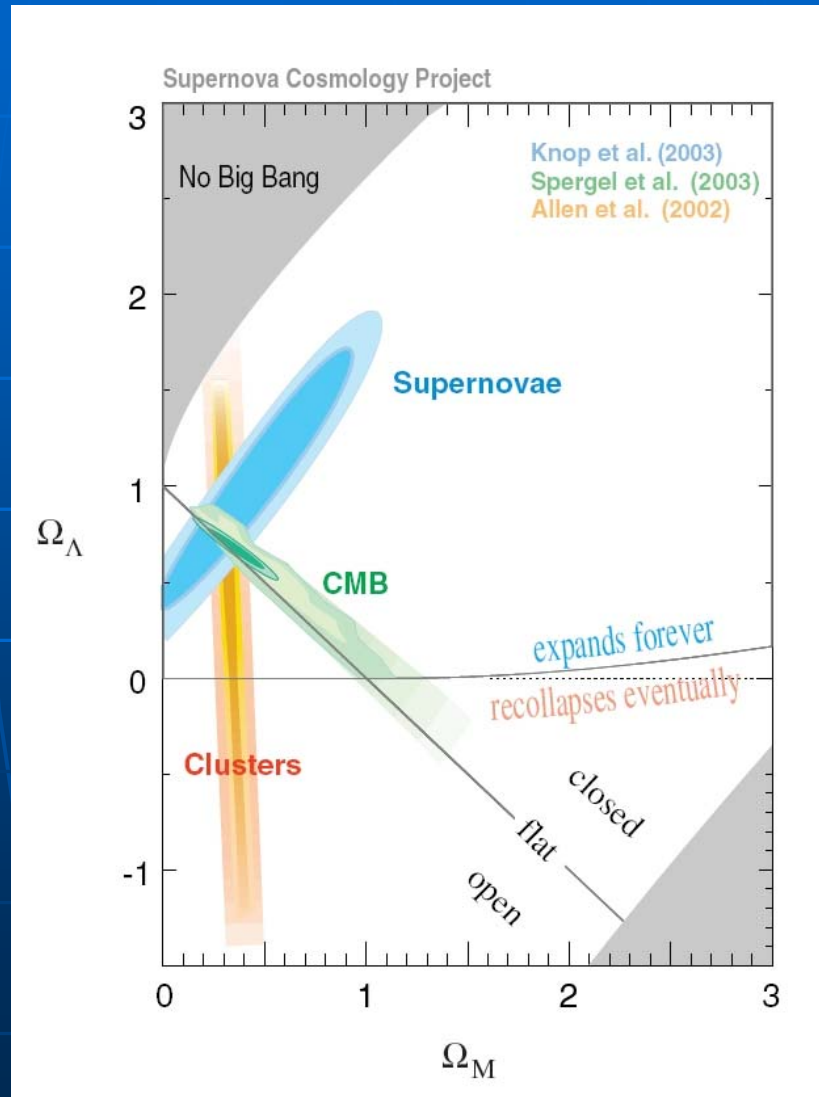
$$\Omega_m = 0.27$$

$$\Omega_m = 0.30$$

$$\Omega_m = 0.33$$

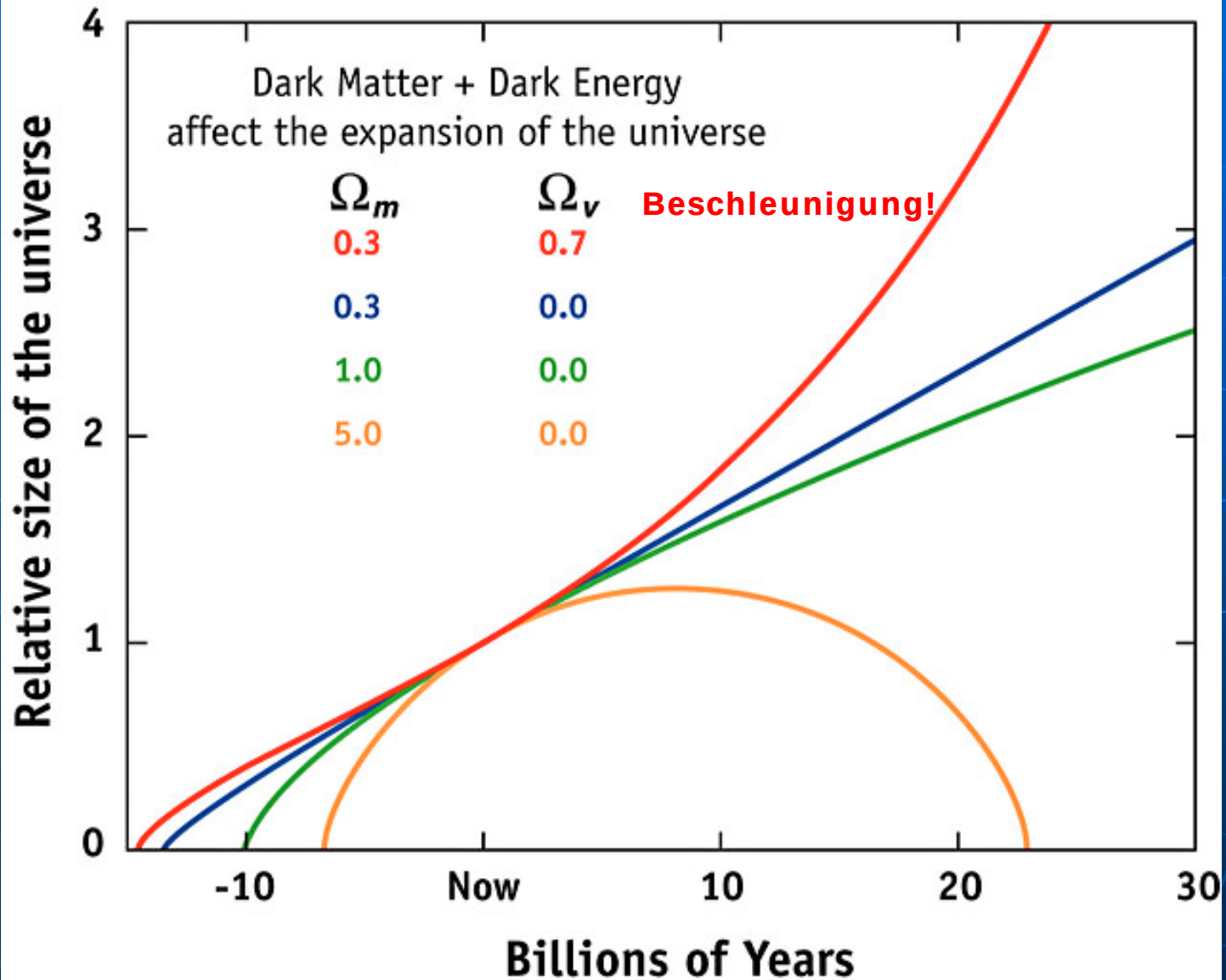
Kosmische Zutaten

$$\Omega_{\Lambda} \sim 0.7$$



$$\Omega_m \sim 0.3$$

EXPANSION OF THE UNIVERSE

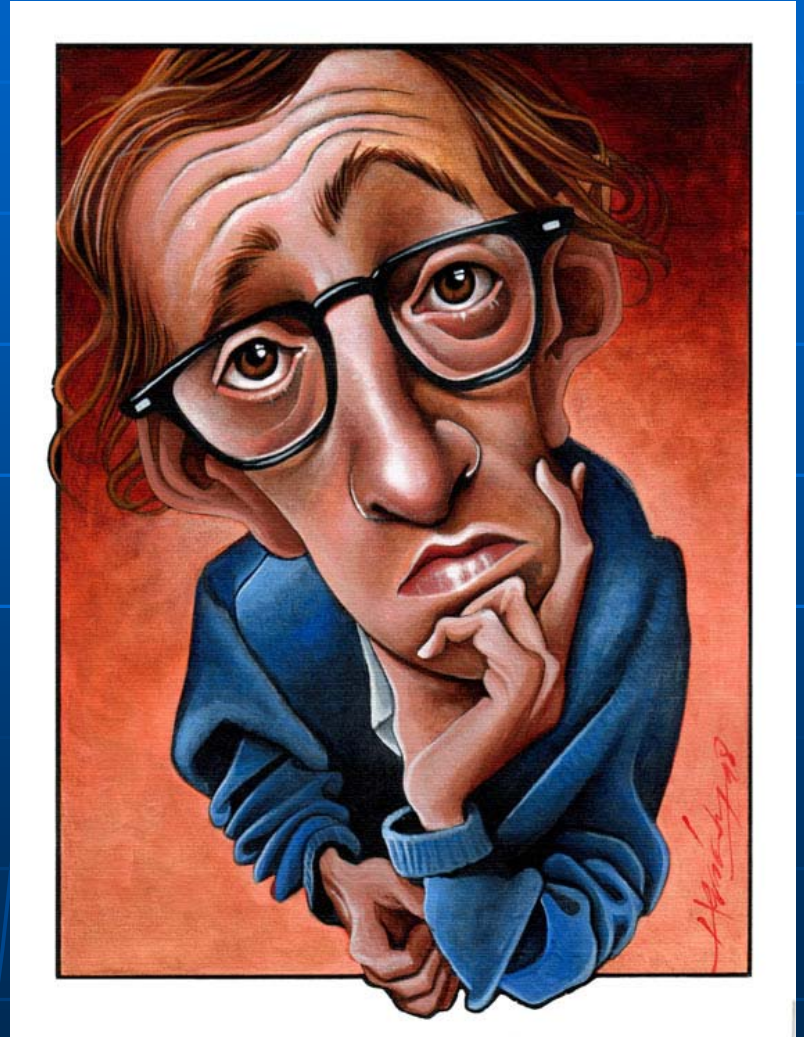


Standardmodell der Kosmologie

- $\Omega_\Lambda \sim 0.73$, dominante Dunkle Energie
- $\Omega_m \sim 0.23 \pm 0.04 = 0.27$, großer Anteil Dunkler Materie, aber gewöhnliche (baryonische) Materie „kosmisch irrelevant“
- $H_0 = 72 \text{ km/s/Mpc}$, Hubble-Konstante
- $\Omega_k \sim 0$, flaches Universum: Euklidische Geometrie
- Λ CDM: flat cold dark matter dominated Universe
- Säulen: CMB, SN Ia, LSS, Nukleosynthese, Alter

Woody Allen

„If the Universe is expanding,
why can't I find a parking space?“



A

Formen Dunkler Energie

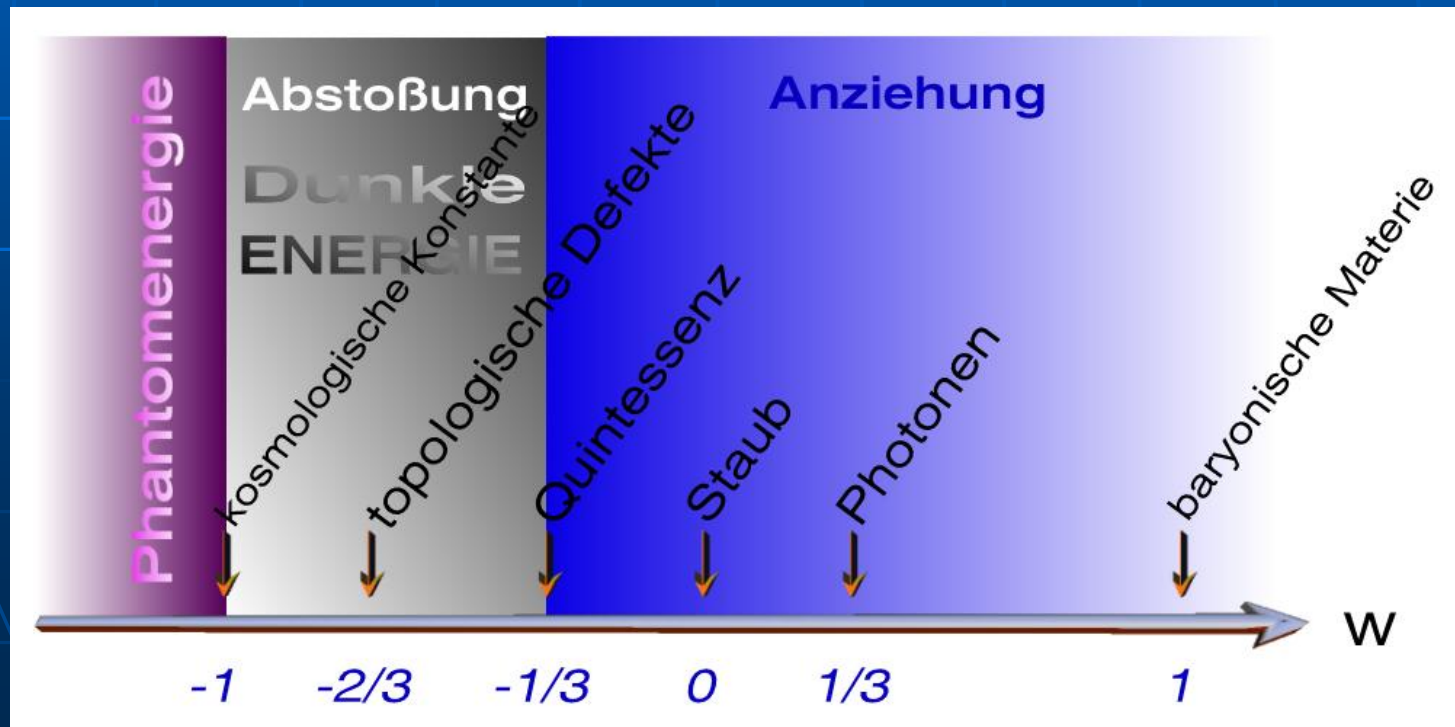
Parameter w

$$w = \frac{p}{\rho c^2}$$

Dunkle Energie:
negativer Druck!

Antigravitation

⇒ kosmische Beschleunigung



kosmologische Konstante

- EinsteinTM
- keine zeitliche Entwicklung der Dunklen Energie (unabhängig von Rotverschiebung)
- 10^{-29} g/cm^3 Dichte; assoziiert mit dem Quantenvakuum?
- $w = -1$
- aktuell von astronomischen Beobachtungsdaten favorisiert!



Quintessenzen

- mathematisch: Skalarfeld
- physikalisch: extrem leichtes Teilchen
- Motivation: Kleinheit von Λ , Koinzidenzproblem
- Lösung: sich zeitlich entwickelnde Dunkle Energie (abhängig von Rotverschiebung), die *inhomogen* den Raum ausfüllt
- mittlerweile viele Ausprägungen:
Cosmon ($\sim 10^{-33}$ eV), Radion, Spintessenz, k-Essenz,...
erweiterte Quintessenz: Kopplung an die Krümmung
- $w = -1/3$
- nicht ganz ausgeschlossen, aber aktuell wenig Unterstützung von Beobachtungen!

topologische Defekte

- ebenfalls ein Skalarfeld
- Feld verknüpft mit spontanen Symmetriebrechung (vgl. Higgs-Teilchen)
- im Innern der Defekte: Erhaltung der Symmetrie
- beobachtbar als Anisotropien in der Hintergrundstrahlung
- $w = -2/3$
- ebenfalls nicht ganz ausgeschlossen, aber bislang keine Evidenz: Zerstörung der topologischen Defekte durch Ausdünnung wegen Expansion?

Phantomenergie

- ungewöhnlicher Ansatz (*Caldwell 1999*)
- zeitabhängige, drastischste Form Dunkler Energie, die erst sehr spät wichtig wird
- Expansionsrate nimmt zu!
- $w < -1$ (*super-negative Zustandsgleichung*)
- nicht ganz ausgeschlossen durch Fehlerbalken des w -Parameters ($w = -0.78 \dots -1.22$)
- Big Rip: Universum endet im totalen Zerriss!
- Beispiel: $w = -1.2 \Rightarrow$ Big Rip in 50 Mrd. Jahren!
- Nebeneffekt: Produktion ultrahochenergetischer Teilchen $\Rightarrow$ in Widerspruch mit Beobachtung kosmischer Strahlung

Chamäleon-Feld



Bildquelle: Saxifraga/Sytske Dijkse

- 2003 von Khoury & Weltman geprägt
- auch ein sich zeitlich entwickelndes Skalarfeld
- Chamäleon-Effekt: Teilchenmasse abhängig von *lokaler* Materiedichte: hohe Dichte (Erde) $\Rightarrow$ hohe Teilchenmasse $\Rightarrow$ Verletzung des ÄP unterdrückt
- bisher konsistent mit Tests der ART
- Vorhersagen:
 - variable Gravitationskonstante G ,
Feinstrukturkonstante α
 - Verletzung des Äquivalenzprinzips
 - schnelleres Wachstum kleiner Strukturen als Λ CDM

Chaplygin-Gas

- erfunden von Chaplygin für Aerodynamik
- $p = -A/\rho$, Konstante $A > 0$
- früh: Verhalten wie Staub (materiedominierter Kosmos)
- spät: Verhalten wie perfekte Flüssigkeit mit negativem Druck $\Rightarrow$ bewirkt auch beschleunigten Kosmos
- attraktiv: Entwicklung von staubdominiertem Universum zu de-Sitter-Universum
- Problem: Gravitationskollaps erschwert! ($c_s = c$)
- erweitertes Chaplygin-Gas $A \rightarrow A(a)$ (*dark fluid*)

Alternative I: klassische ART ohne Dunkle Energie

- Strukturbildung: Ausbildung von Inhomogenitäten
- $\Rightarrow$ könnte sich wie eine kosmologische Konstante auswirken!
- kein breiter Konsens, aber aktuelles Forschungsgebiet
- doch Einsteins Eselei

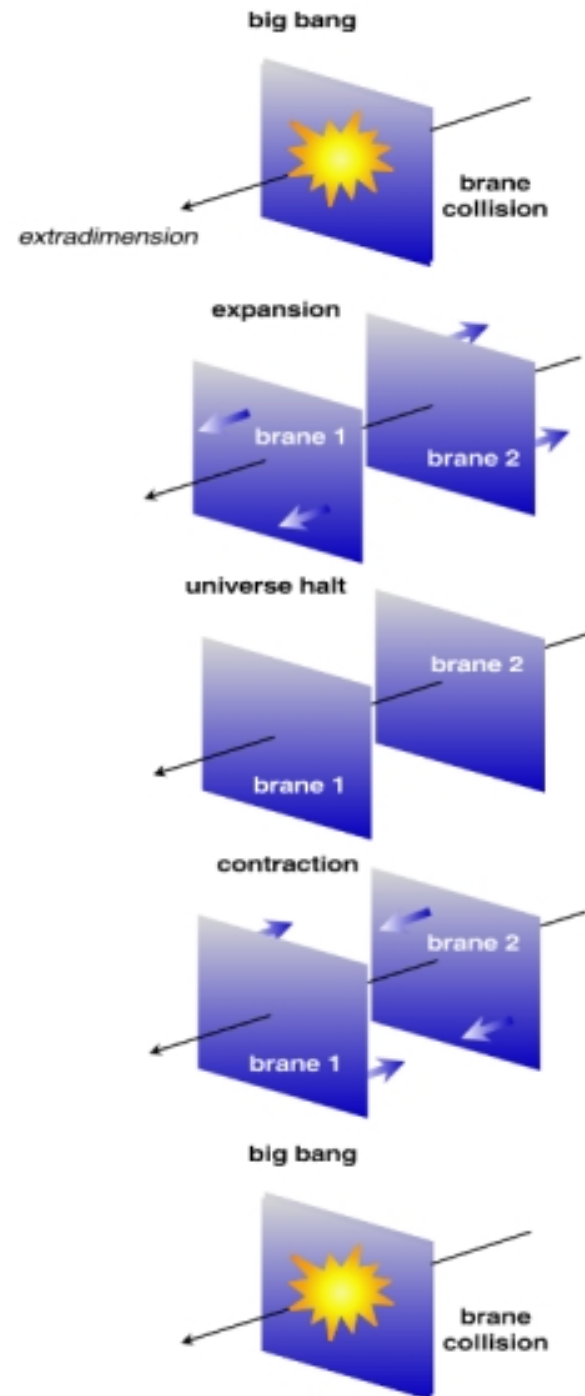
Alternative II: neue Gravitationstheorie

- Branenwelten und Stringtheorien haben mehr als drei räumliche Dimensionen der ART:
Extradimensionen
- unser Universum liege auf einer 3-Bran, eingebettet in höherdimensionales Gebilde (*bulk*)
- Branen-Theorien (z.B. Dvali-Gabadadze-Porrati Branenwelt) verhalten sich auf großer Skala wie ART
- genaue Anzahl weiterer Dimensionen unklar, aber evt. am CERN (LHC 2007) zu testen
- weitere Gravitationstheorie:
Loop-Quantengravitation

Zyklisches Universum

- kosmischer Unfall: Kollision zweier Branen
- Gegeneinanderschwingen verursacht ein neues Skalarfeld: das *Radion*
- Eine Bran: unser Vorläuferuniversum
- spekulativ! wie testen?
- aber attraktiv: Ursache für den Urknall

(Steinhardt & Turok 2001)



A Zukunft des Universums

Zukunft des Universums

- eigentlich unklar!
- aktueller Konsens:
ewige Expansion mit Auskühlen
Big Whimper: kalter, dunkler Kosmos
- Alternativen:
Big Rip (Phantomenergie)
Big Crunch (Quintessenzen) oder
Zyklisches Universum (Radion)
- philosophisch attraktiv:
wiederkehrendes, pulsierendes
Universum

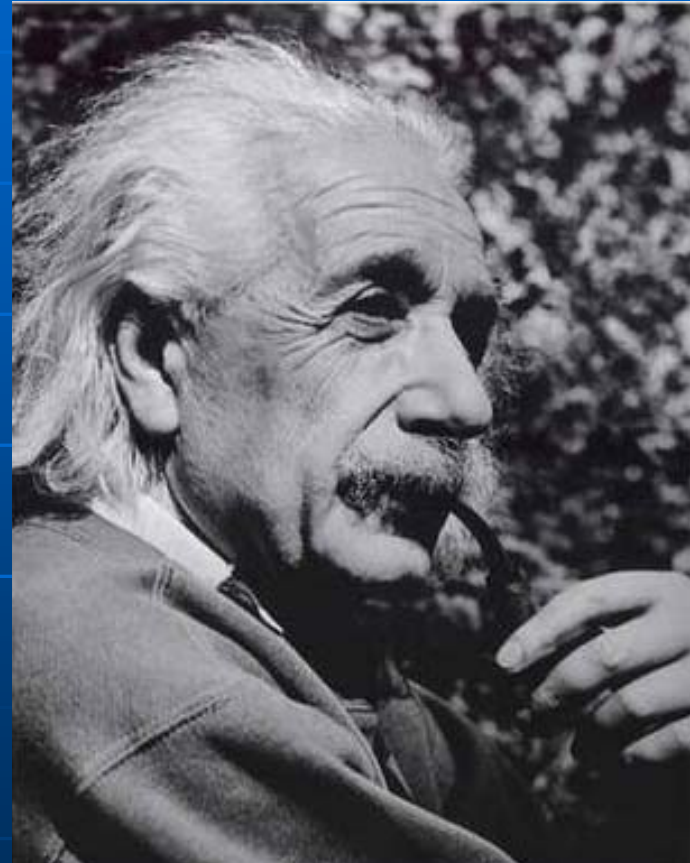
Klar gibt es
Lammda!



Bildquelle: www.wuerzburg.de

Einstein

„Das Schönste, was wir erleben
können, ist das Geheimnisvolle.“



Weitere Informationen

- Website Andreas Müller

Vorträge: www.mpe.mpg.de/~amueller/astro_ppt.html

Web-Lexikon: www.mpe.mpg.de/~amueller/glossar.html

- Website des Satelliten WMAP: <http://map.gsfc.nasa.gov/>
- Publikation: Bean, Carroll & Trodden 2005, astro-ph/0510059
- Buch von H. Lesch & J. Müller (2001): „Kosmologie für Fußgänger“
- Kosmologie-Vorlesungsskripte:

M. Camenzind (Landessternwarte Heidelberg):
<http://www.lsw.uni-heidelberg.de/users/mcamenzi/CosmoVorl.html>

M. Bartelmann (Institut für Theoretische Astrophysik, Heidelberg):
<http://www.ita.uni-heidelberg.de/~msb/Lectures/cosmology.pdf>