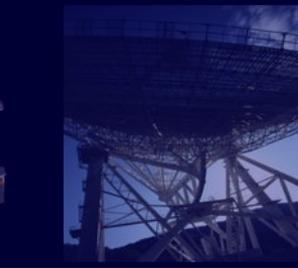
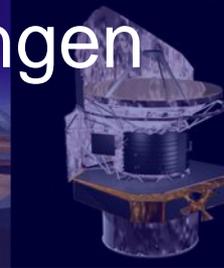
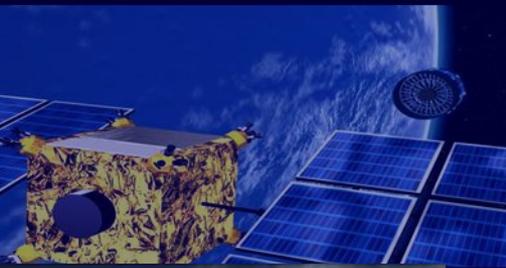


Multifrequenz-Beobachtungen in der Astronomie Wintersemester 2007/8



Themen & Daten

- 19.10.: Überblick
- 02.11.: Erste Ergebnisse der Durchmusterungen
- 16.11.: Hochenergie-Astronomie
- 30.11.: Update: Neue Teleskope
- 14.12.: Dunkles (Materie & Energie)
-

2008

- **11.01: Fortsetzung: Dunkles (Materie & Energie)**
- 25.01.: Mikrowellenhintergrund
- 08.02.: Virtuelle Observatorien

Ganz kurz ...



- Omega: Dichteparameter; Quotient von beobachtetem Materieinhalt zu kritischem Materieinhalt; beide Größen folgen aus der Beobachtung: Hubble-Konstante bestimmt die kritische Dichte; die beobachtete Materie bestimmt sich aus der Beobachtung leuchtender Materie, nur indirekt ableitbarer Dunkler Materie und dem Anteil Dunkler Energie
 - Index: B, b , baryonische Materie; gewöhnliche Materie
 - HDM, Hot Dark Matter, heiß bedeutet, daß sich diese Materie im Zeitalter der Galaxienentstehung mit relativistischen Geschwindigkeiten bewegte (Neutrinos ...)
 - CDM, Cold Dark Matter
 - M , Materie: baryonisch + kalte Dunkle Materie, Heiße Dunkle Materie
 - Λ , Index für die Dunkle Energie
- w -Parameter: Druck/Energiedichte
- SUSY: Supersymmetrie
- MOND: Modified Newtonian ... kommt ohne Dunkle Materie aus, stellt auch alternative Gravitationstheorie neben der Einsteinschen Theorie dar. ART mit Dunkler Materie wird normalerweise favorisiert.

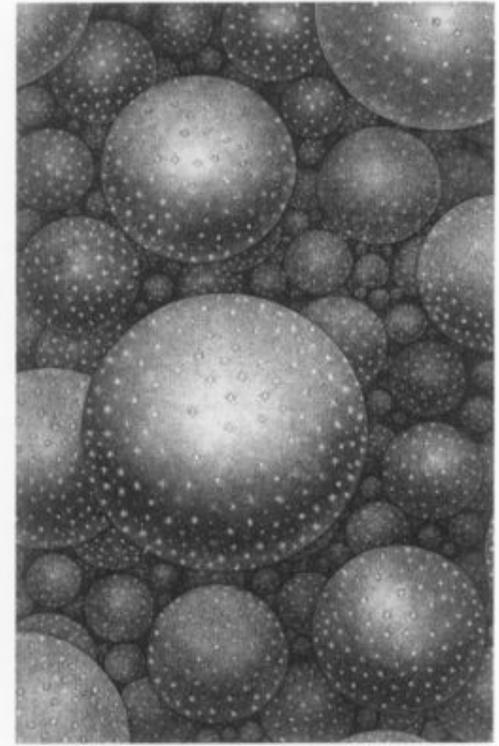
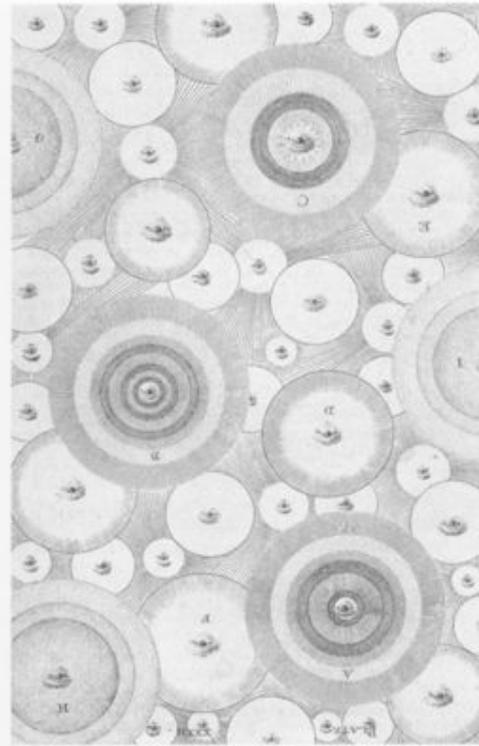
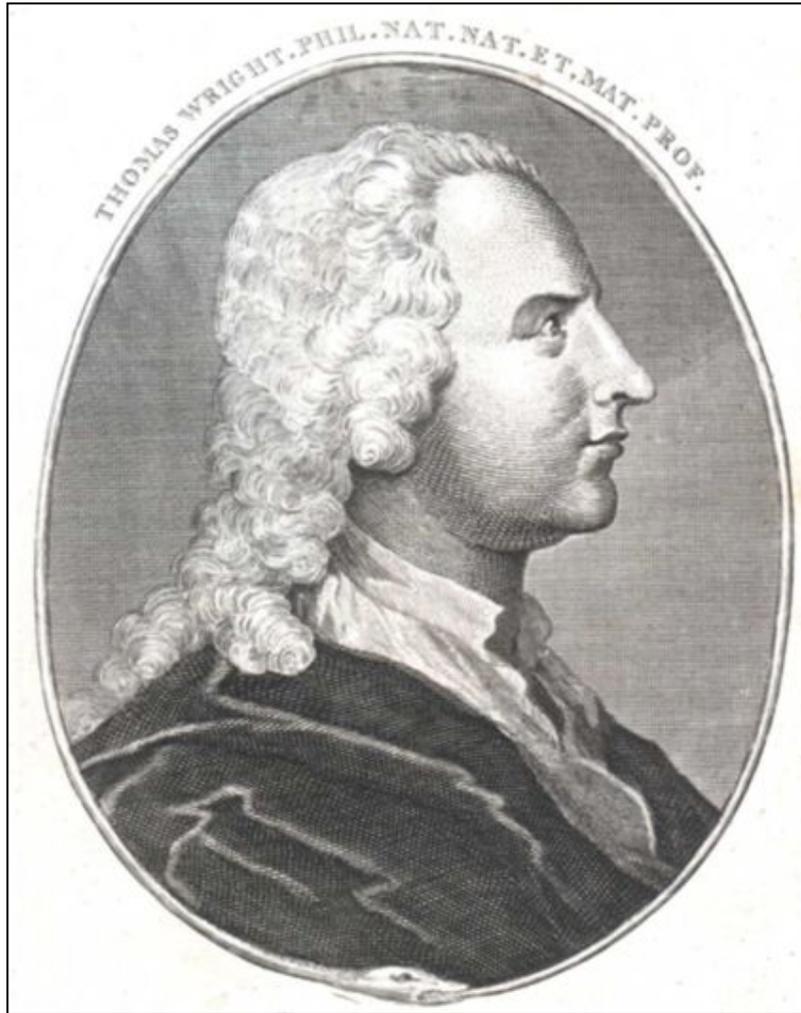
The background consists of a dense pattern of overlapping circles of various sizes. Each circle is filled with a dark, grainy texture and contains several small, white, star-like specks, resembling a microscopic view of a material or a stylized representation of a galaxy field.

Das Geheimnis der

Dunklen Materie

Woraus besteht das Universum?

Thomas Wright (1750), An Original Theory of the Universe



THOMAS WRIGHT: THE COSMOS, 1750. Wright, an instrument-maker and amateur astronomer, was perhaps the first man to attempt to rationalize the large-scale structure of the cosmos. The Copernican revolution and the invention of the telescope both combined to produce a perception of a much vaster universe. Wright speculated that it might be

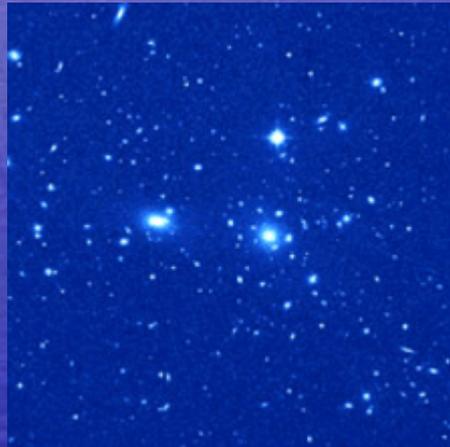
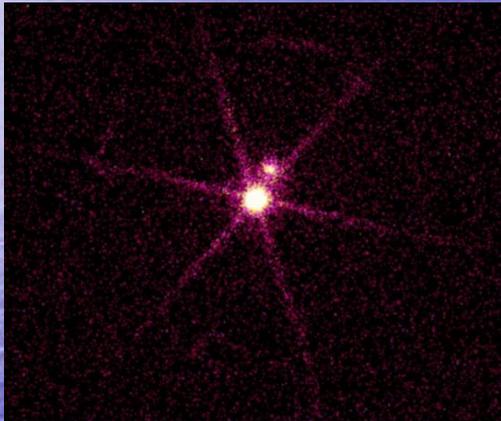
infinite, that the sky visible from the earth, with its concentration of stars in the Milky Way, might be a discrete system, and that such systems might be replicated throughout the universe. Although Wright's ideas were not empirically based, they were in some senses prophetic.

The British Library, 49.c.15

Historisches

1844: Brief von Bessel an Gauss: Bessel interpretiert Wackeln des Sirius durch Gravitationswechselwirkung mit benachbartem (damals unsichtbaren) Körper.

heute: Siriusbegleiter ist Weißer Zwerg Sirius B

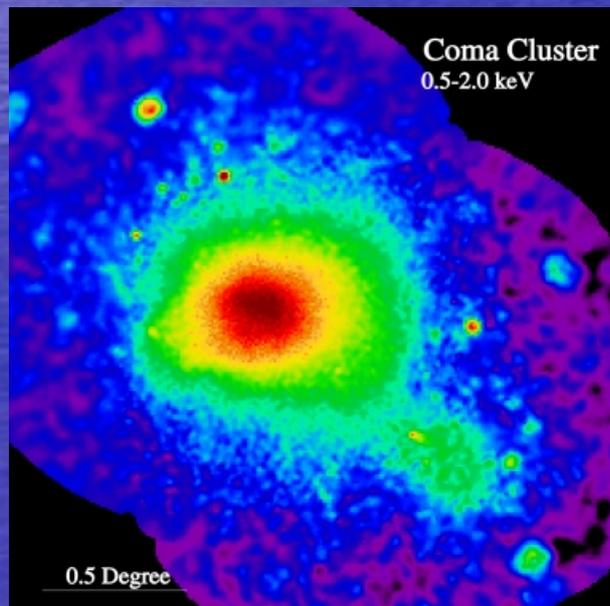


1932: Jan Hendrik Oort beobachtet Rotationsgeschwindigkeiten von Sternen in der Milchstraße und spekuliert über die Existenz von „nebulöser, dunkler Materie“

Historisches

1933: Zwicky: Galaxien im Coma-Haufen bewegen sich jenseits der Fluchtgeschwindigkeit. D. h. es muss mehr Masse (das 400fache) als die sichtbare vorhanden sein, falls die Galaxien gravitativ gebunden sind.

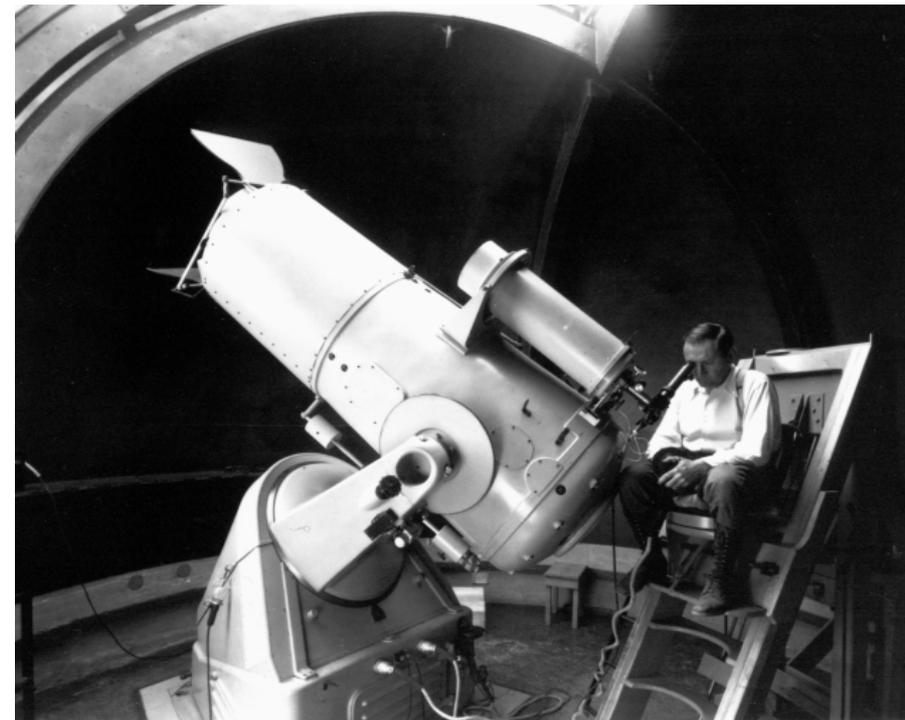
heute: Coma-Haufen ist kein Einzelfall



Am Anfang



Der schweizerisch-amerikanische Astronom Fritz Zwicky (1898 – 1974) schloss aus Beobachtungen der Dynamik von Galaxien, dass diese Sternsysteme einen erheblichen Anteil an nichtleuchtender Materie enthalten.



Am Anfang



- Entdeckte kompakte Galaxien
- Supernovae erzeugen Neutronensterne
- 1937: erste Überlegungen zu Galaxien als Gravitationslinsen (Einstein hatte nur an Sterne gedacht)
- Entdeckte 123 Supernovae
- Krebsnebel sei Überrest der von chinesischen Astronomen beobachteten Supernova von 1054
- Supernovae als Standardkerzen zur Entfernungsmessung zu verwenden

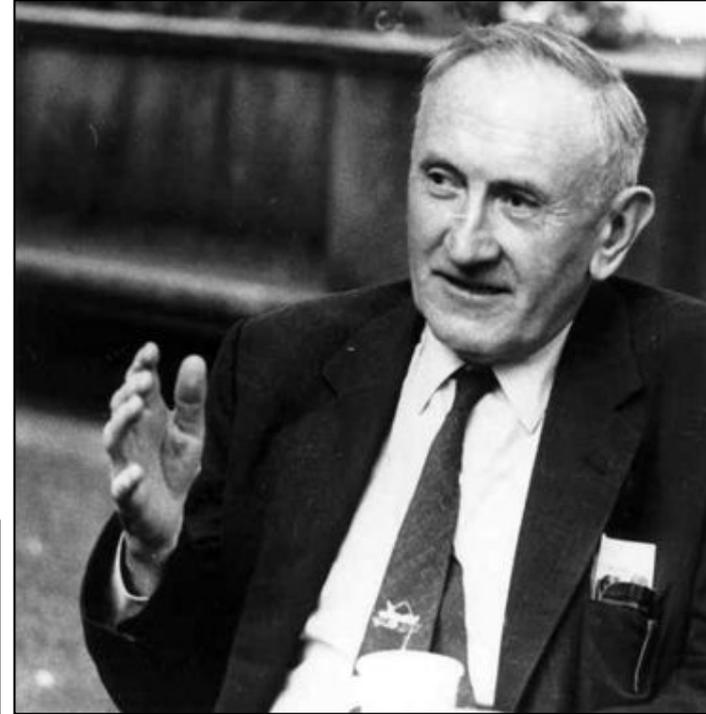
- Neben seiner astronomischen Tätigkeit beschäftigte er sich mit der Methodik, aus Ideen konkrete Produkte zu entwickeln (Morphologische Analyse; iterative Methode aus Analyse und Synthese)

Dunkle Materie in Galaxienhaufen

Fritz Zwicky:

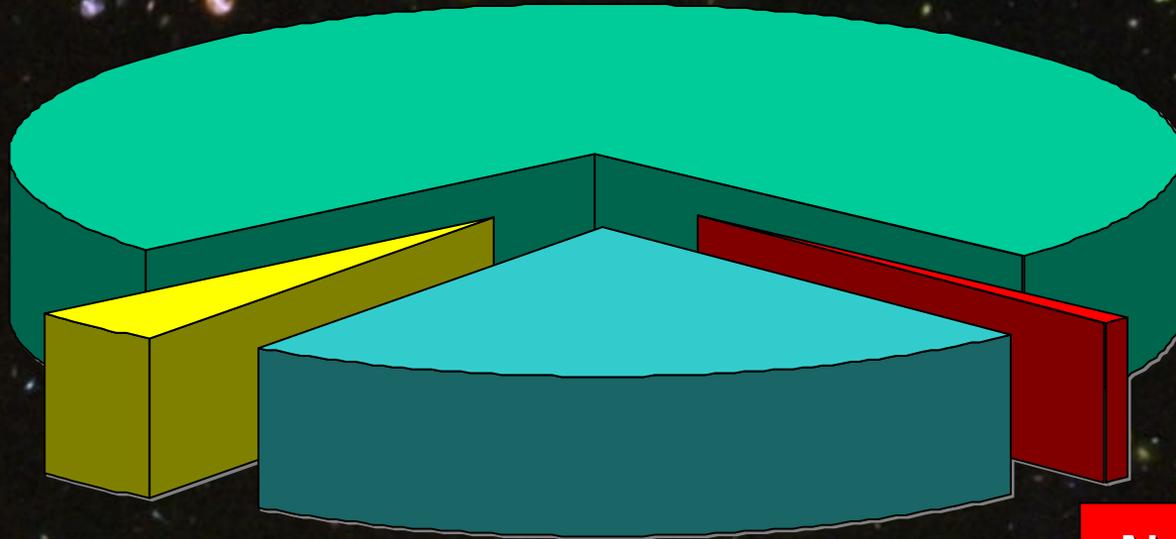
Die Rotverschiebung von Extragalaktischen Nebeln

Helv. Phys. Acta 6 (1933) 110



Um, wie beobachtet, einen mittleren Dopplereffekt von 1000 km/sek oder mehr zu erhalten, müsste also die mittlere Dichte im Comasystem mindestens 400 mal grösser sein als die auf Grund von Beobachtungen an leuchtender Materie abgeleitete¹). Falls sich dies bewahrheiten sollte, würde sich also das überraschende Resultat ergeben, dass **dunkle Materie** in sehr viel grösserer Dichte vorhanden ist als leuchtende Materie.

Dunkle Energie 73%
(Kosmologische Konstante)



Normale Materie 4%
(davon nur ca. 10%
leuchtend)

Dunkle
Materie 23%

Neutrinos
0.1–2%

Struktur von Spiralgalaxien

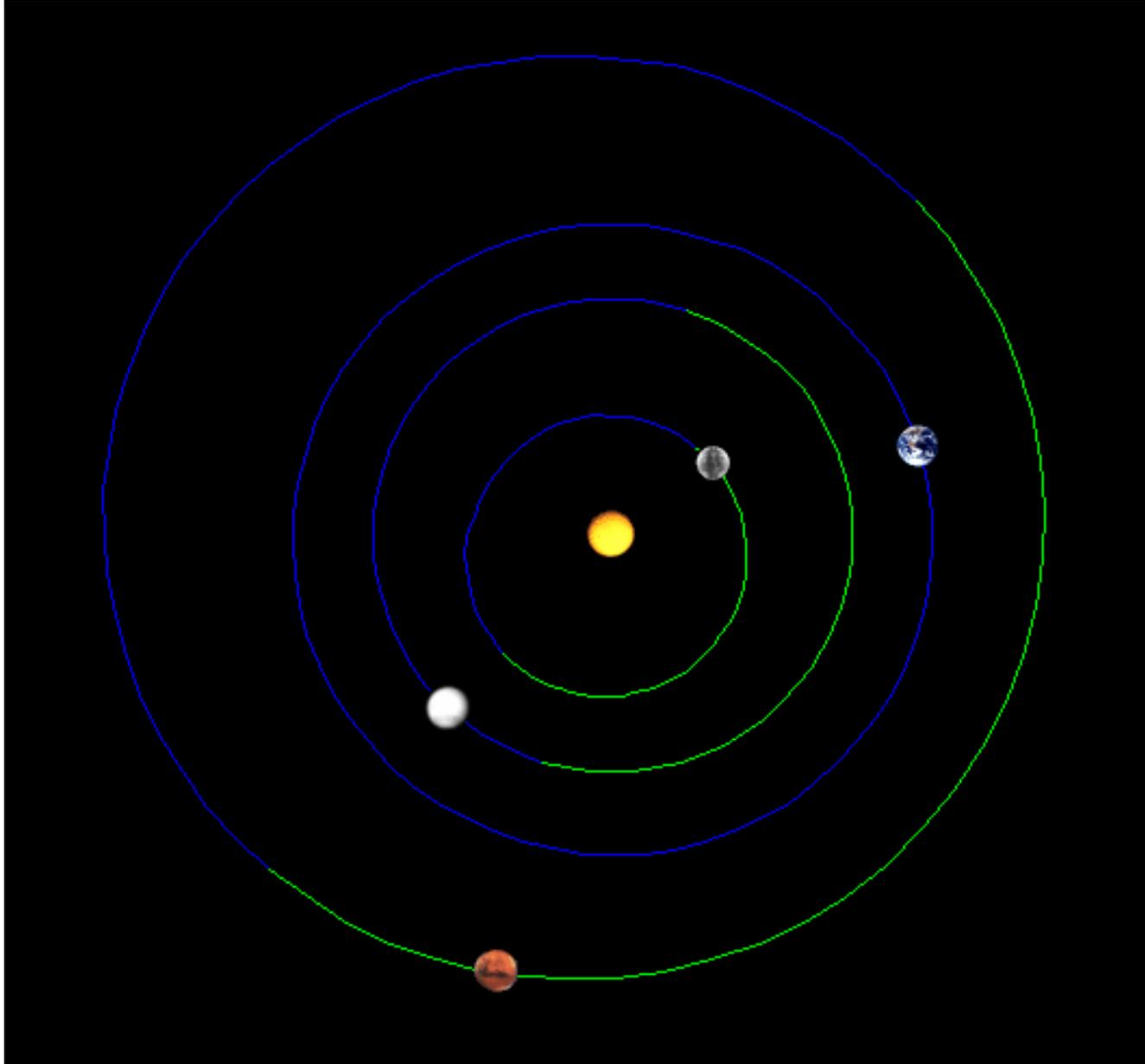


Spiralgalaxie NGC 2997

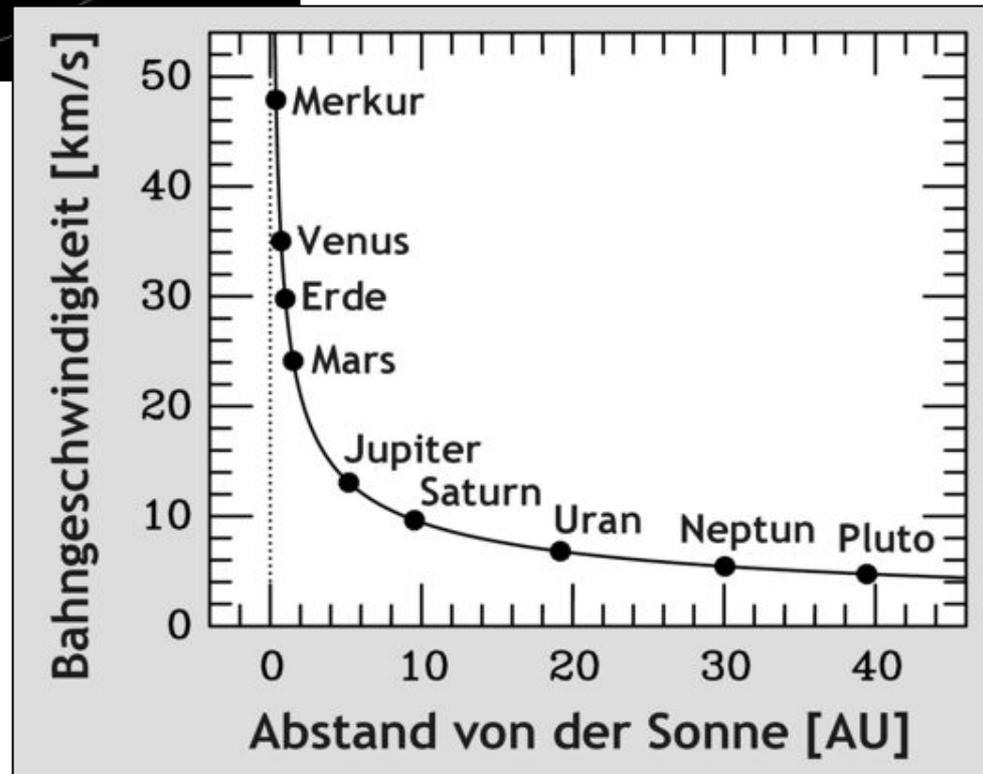
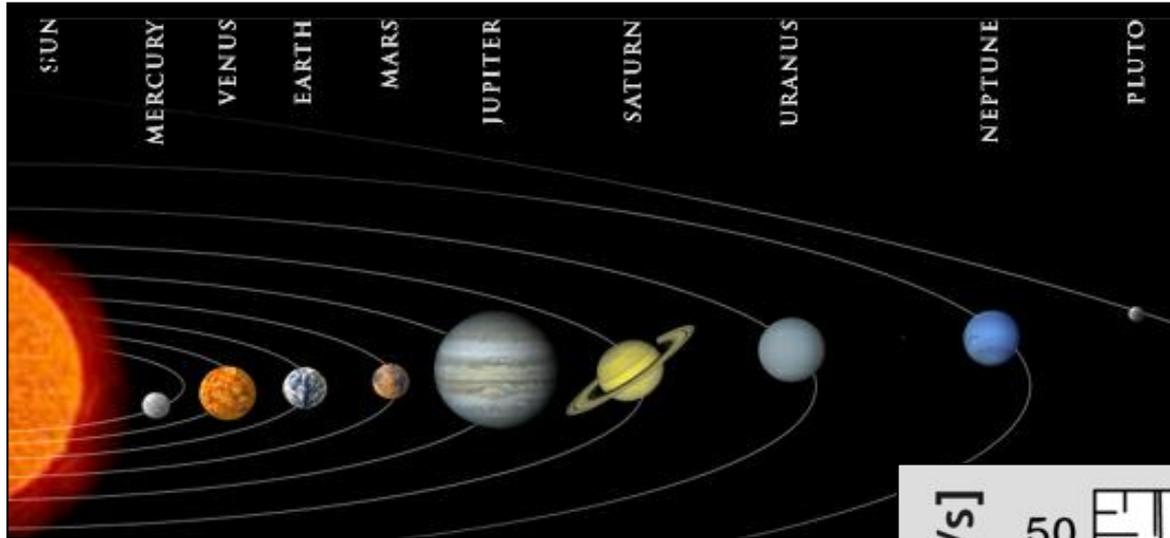


Spiralgalaxie NGC 891

Sonnensystem



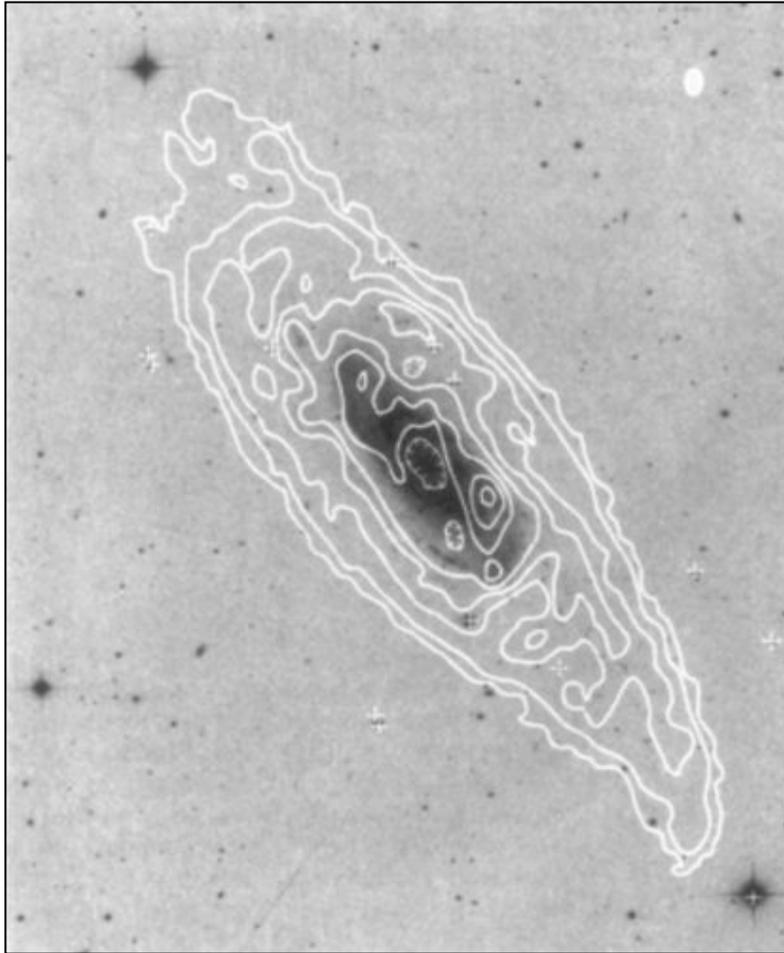
„Rotationskurve“ des Sonnensystems



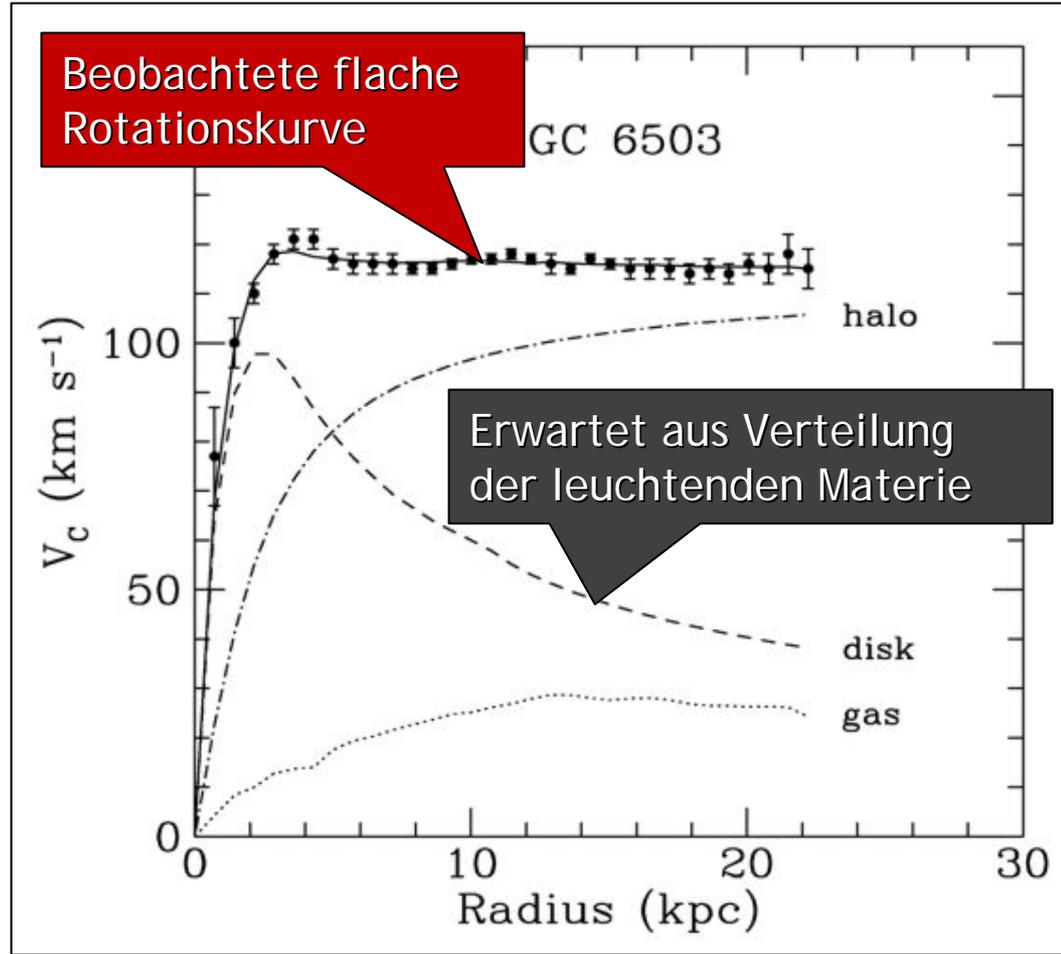
Kepler'sches Gesetz

$$v_{\text{Bahn}} = \sqrt{\frac{G_{\text{Newton}} M_{\text{Zentral}}}{\text{Abs t and}}}$$

Galaktische Rotationskurven aus Radiobeobachtungen



Spiralgalaxie NGC 3198 mit überlagerten Konturen der Wasserstoff-Säulendichte [ApJ 295 (1985) 305]



Rotationskurve der Galaxie NGC 6503 durch Radiobeobachtungen der Wasserstoffbewegung [MNRAS 249 (1991) 523]

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

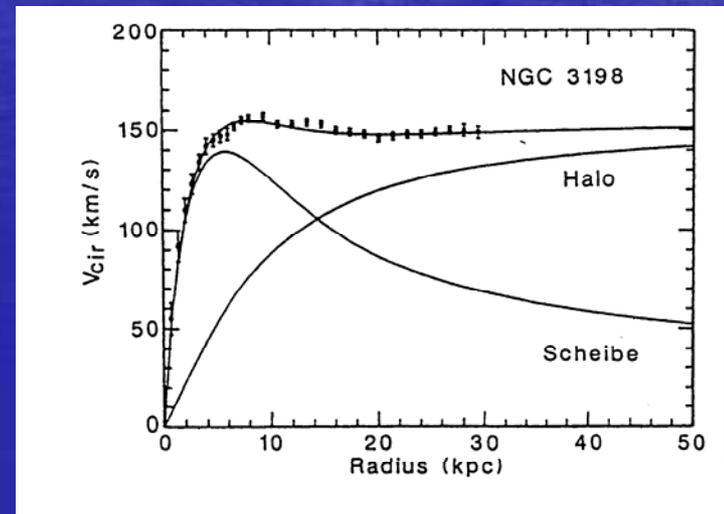
innerhalb der Galaxie. Ausserhalb ist mit $M = \text{const}$

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

Aber: Messung mithilfe von Dopplerverschiebung ergibt für große r:

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

Dies kann durch Dunkle Materie in einen sphärischen Halo um die Galaxie erklärt werden.



Weitere Gründe für einen dunklen Halo:

- mehr Scheibengalaxien und weniger Balkengalaxien
- Galaxien mit polaren Ringen: $v = \text{const}$ in Ring und Scheibe
- Rotationsgeschwindigkeit Magellanschen Wolke um Milchstraße
- Geschwindigkeitsfeld in elliptischen Galaxien
daraus folgt bis zu 99% Dunkle Materie (z.B. M87)



Elliptische Galaxie M87



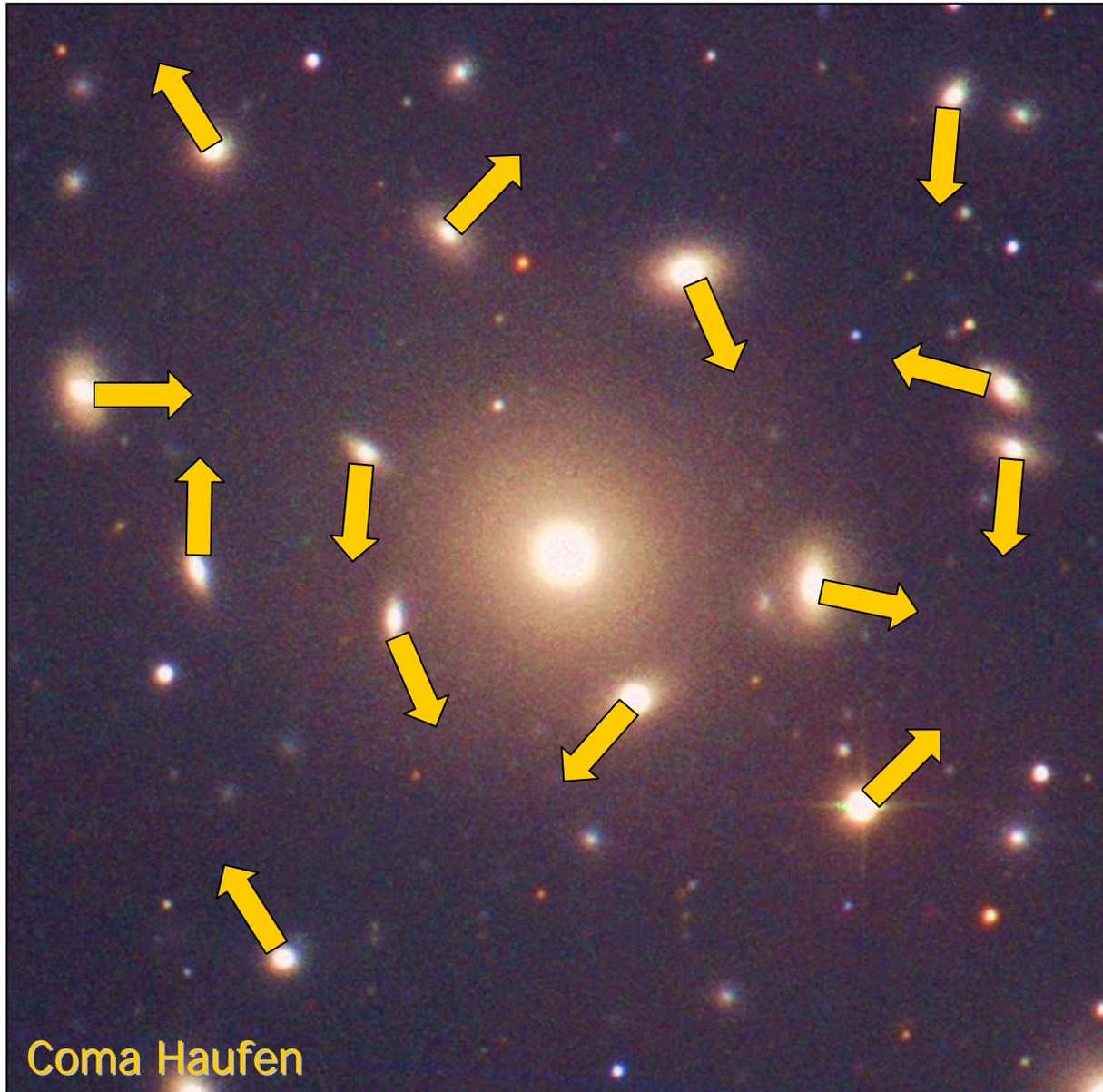
Spiralgalaxie M100

Es gibt viel zu entdecken ...



Dunkler Halo

Dunkle Materie in Galaxienhaufen



Ein gravitativ gebundenes System vieler „Teilchen“ gehorcht dem Virialsatz

$$2\langle E_{\text{kin}} \rangle = -\langle E_{\text{grav}} \rangle$$

$$2\left\langle \frac{mv^2}{2} \right\rangle = \left\langle \frac{G_N M_r m}{r} \right\rangle$$

$$\langle v^2 \rangle \approx G_N M_r \langle r^{-1} \rangle$$

Geschwindigkeitsmessung durch Dopplereffekt von Spektrallinien



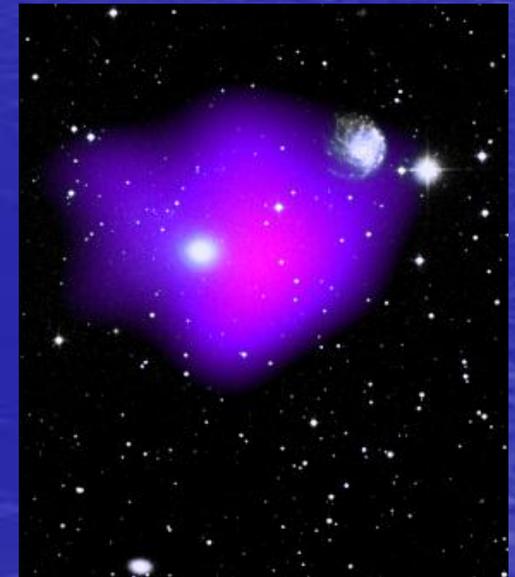
Massenabschätzung

Röntgenemission von Gashalos

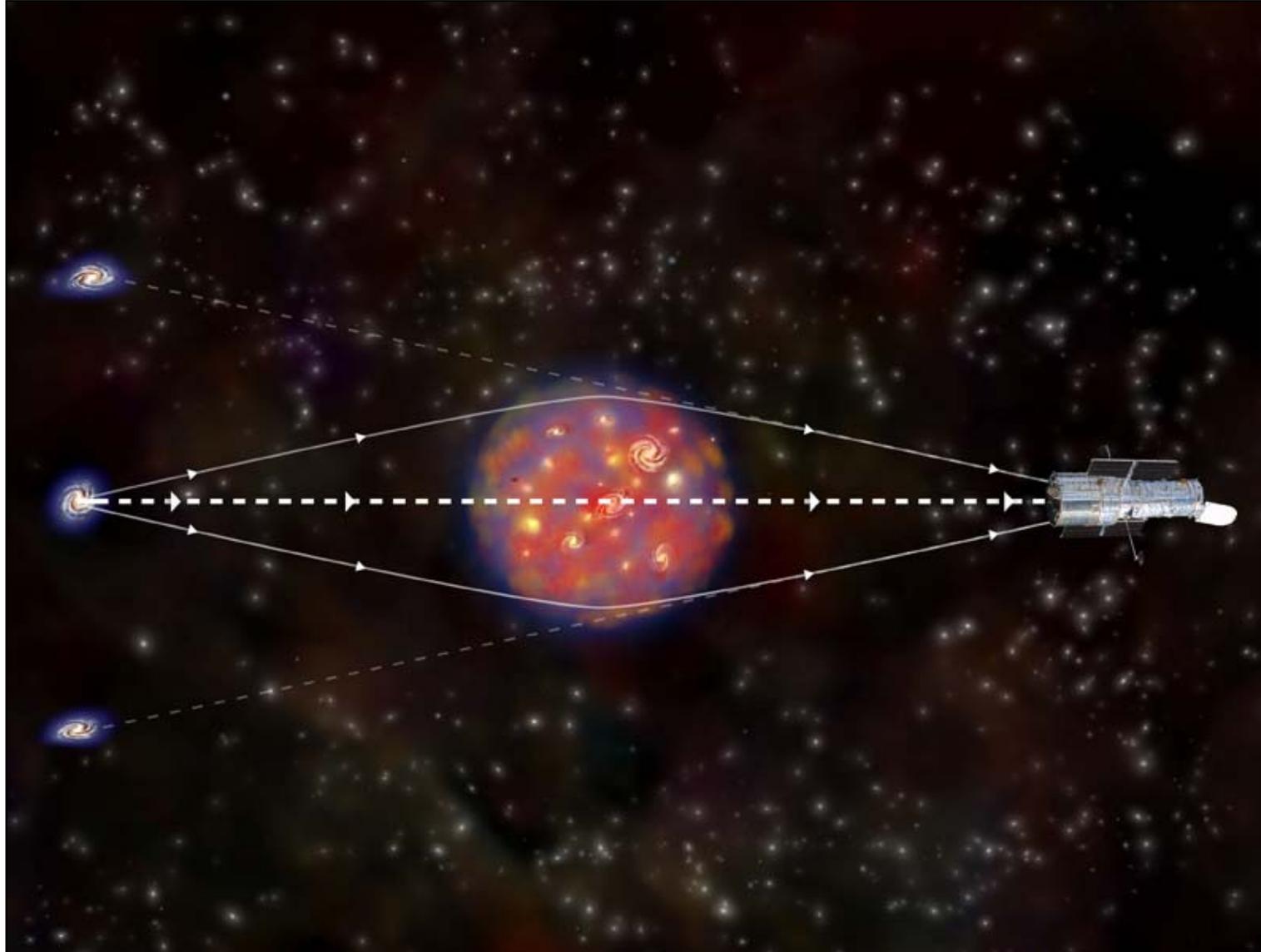
- Messung der Röntgenemission von Gashalos von elliptischen Galaxien ergibt eine Temperatur von 10^7 K - 10^8 K damit ist die Geschwindigkeit höher als Fluchtgeschwindigkeit, d.h. es muß mehr Masse vorhanden sein:

$$v_F = \sqrt{\frac{2G \cdot M}{r}} \ll \sqrt{\frac{3k \cdot T}{m}} = v_{Th}$$

- Röntgenemission vom Galaxienhaufen NGC 2300:
mit $T = 10^7$ K, zum Haufenzentrum hin konzentriert, d.h. gravitative Bindung des Gases ist wahrscheinlich. Weitere Beobachtungen kleiner Galaxienhaufen:
10% - 30% der Masse: heißes Röntgenemission



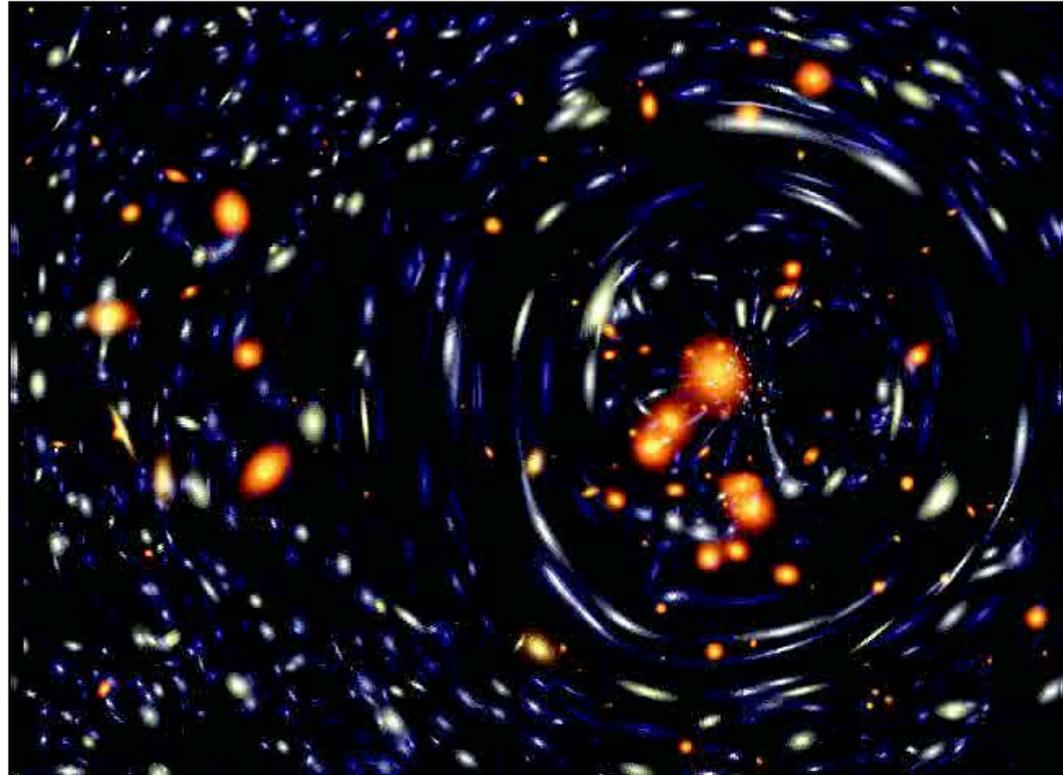
Lichtablenkung durch Gravitation („Gravitationslinse“)



Gravitationslinseneffekt in Galaxienhaufen



Galaxienhaufen CI 0024+1654
[Hubble Space Telescope]



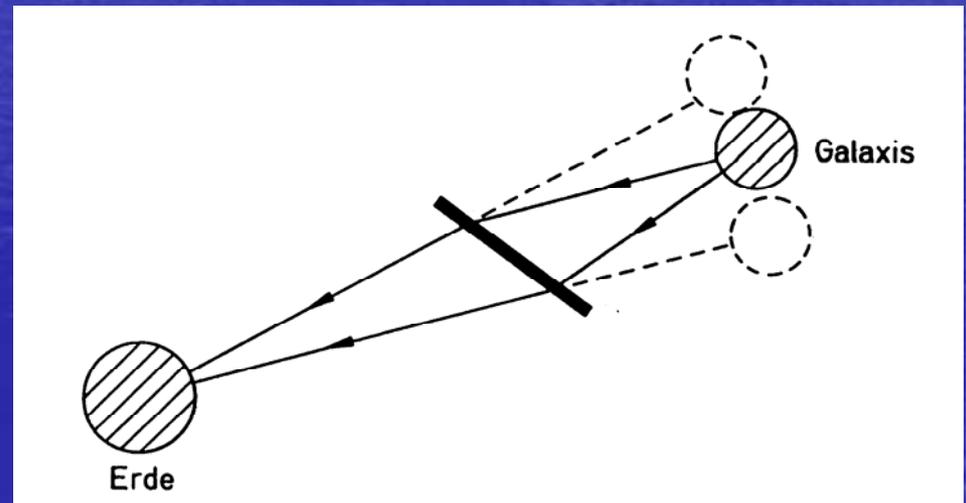
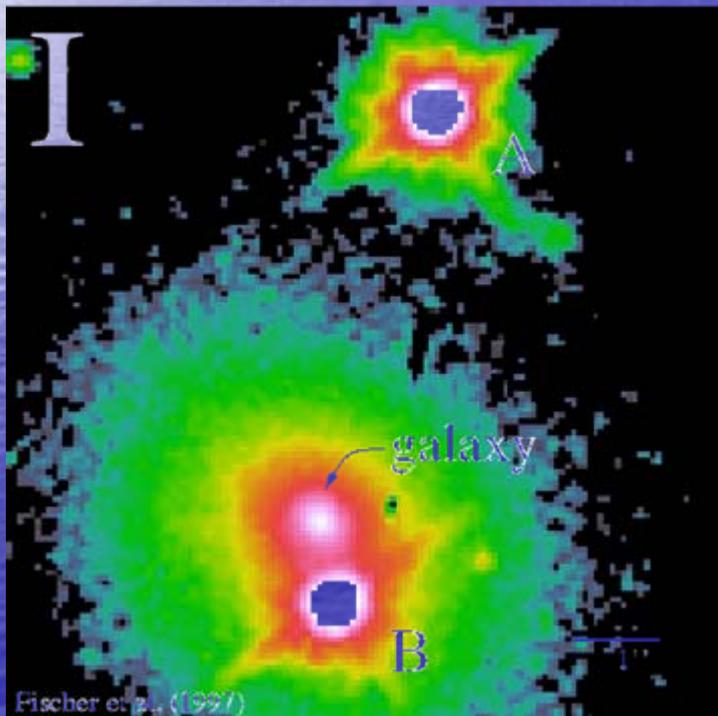
Numerische Simulation

Erste Beobachtung 1979 Doppelquasar Q0957+561

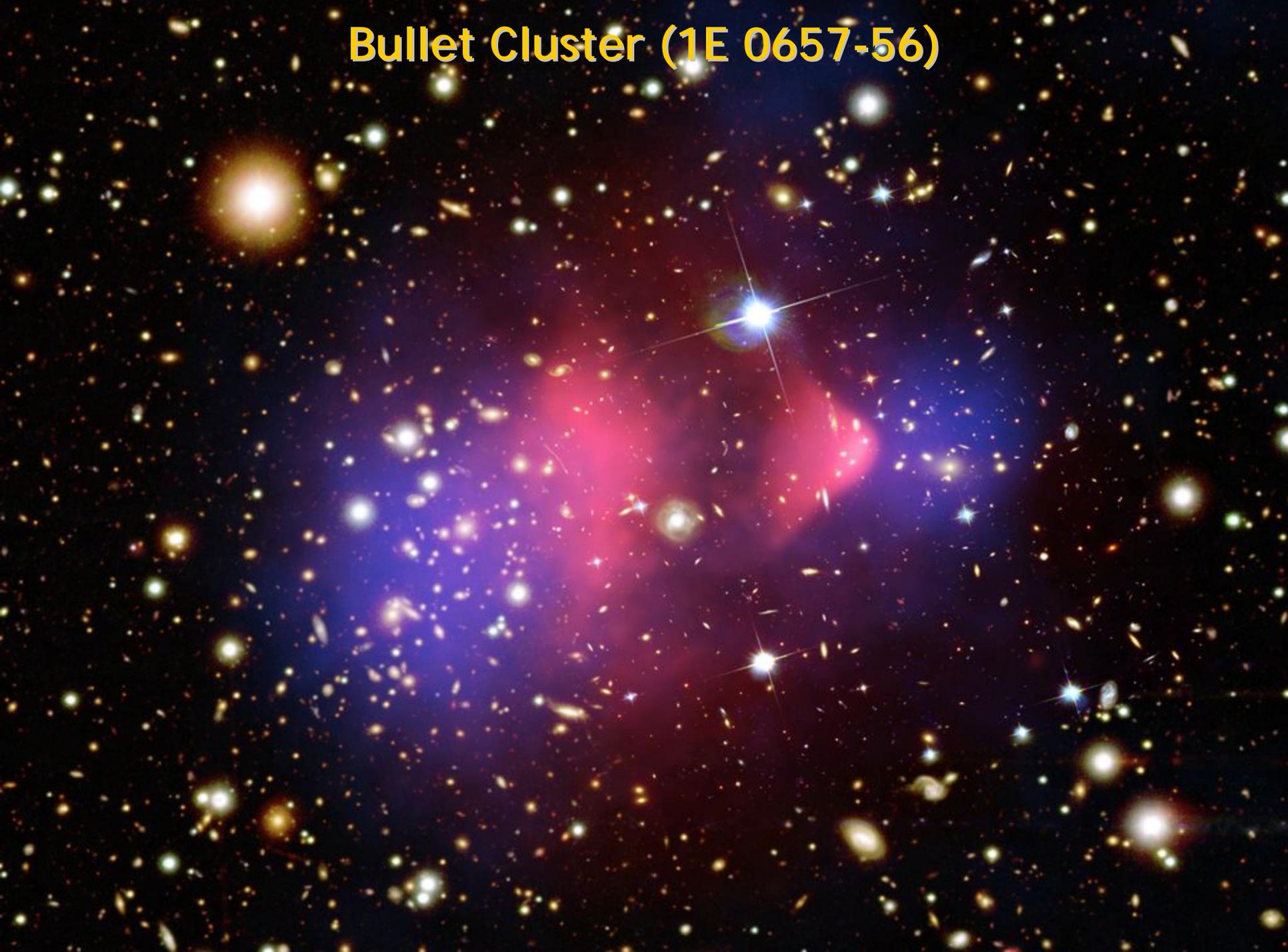
Aus Messung des Einstein-Radius ist Massenbestimmung möglich:

$$R_e = \frac{2\sqrt{2}}{c} \cdot (G \cdot m \cdot x \cdot (L-x))^{\frac{1}{2}} \sim \sqrt{m}$$

mit L: Abstand Quelle-Beobachter,
x: Abstand Linse-Beobachter,
m: Linsenmasse



Bullet Cluster (1E 0657-56)



Expandierendes Universum und Urknall



Hubble'sches Gesetz

$$V_{\text{Expansion}} = H_0 \times \text{Abstand}$$

Hubble-Konstante

$$H_0 = h \, 100 \, \text{km s}^{-1} \, \text{Mpc}^{-1}$$

Messwert

$$h = 0.72 \pm 0.04$$

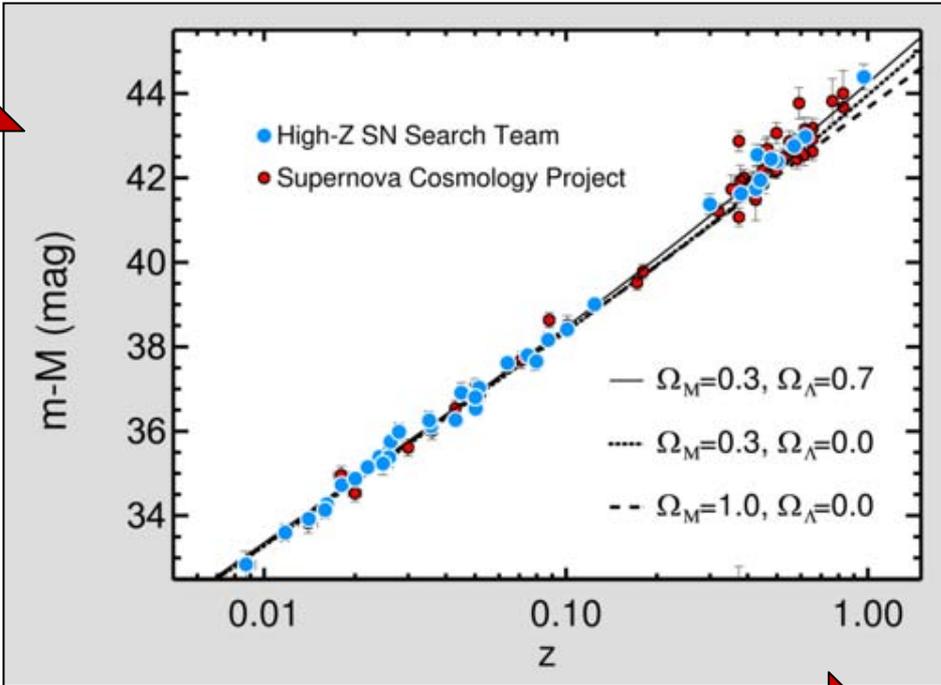
$$\begin{aligned} 1 \, \text{Mpc} &= 3.26 \times 10^6 \, \text{Lichtjahre} \\ &= 3.08 \times 10^{24} \, \text{cm} \end{aligned}$$

Expansionsalter des Universums

$$t_0 \approx H_0^{-1} \approx 14 \, \text{Milliarden Jahre}$$

Hubble Diagramm

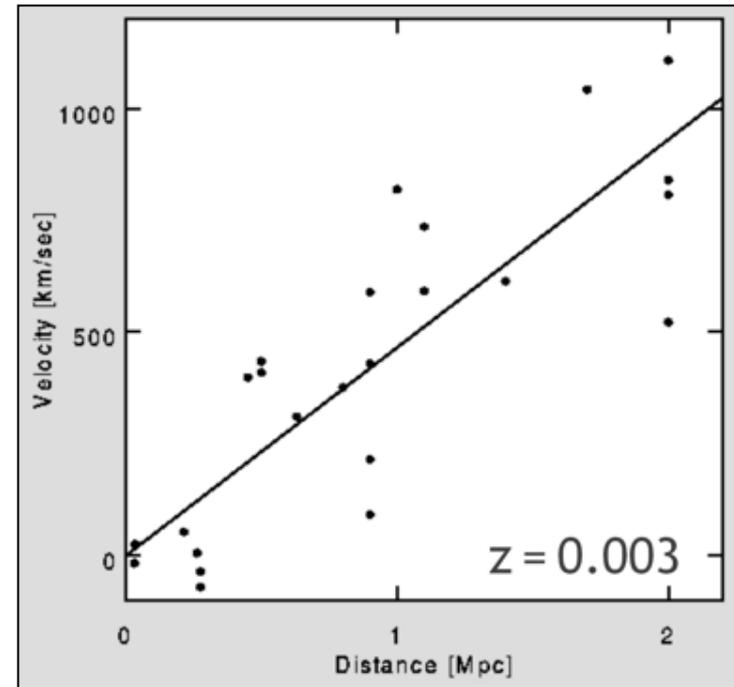
Scheinbare Helligkeit
(Entfernung)



Rotverschiebung
(Fluchtgeschwindigkeit)

Supernovae vom Typ Ia als
kosmologische Standardkerzen

Hubbles Originaldaten (1929)



Hubble Diagramm

Hubble ermittelte einen Wert von $500 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, entsprechend einem Weltalter von nur 2 Milliarden Jahren. Problematisch im Vergleich zu Altersbestimmungen von Gesteinen.

Deutliche Korrektur in den 1950ern nach Entdeckung verschiedener Sternpopulationen durch Walter Baade (Hubble hatte zu geringe Helligkeiten für die Cepheiden angenommen).

Intensive Debatte in den 1970er bis zu den 1990er Jahren:

Allan Sandage und Gustav Tammann: $50 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$

Gerard de Vaucoulerus und Sidney van den Bergh: $100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$

Heute:

Hubble-Weltraumteleskop ergab: $72 \pm 8 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$

WMAP + 2dFGRS : $73 \pm 3 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$

CHANDRA : $76.9 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$

CHANDRA-Messungen basierend auf Sunjajew-Seldowitsch-Effekt. Photonen der Hintergrundstrahlung werden von dem heißen Cluster-Gas auf höhere Frequenzen gebracht.

Hubble Diagramm

Hubble-Konstante beschreibt die Expansionsrate des Universums zum heutigen Zeitpunkt. Wird mittlerweile als **Hubble-Parameter** benannt, Da die Hubble-Konstante keine echte Konstante ist, sondern sich mit der Zeit Verändert.

Der Kehrwert der Hubblekonstante ist die Hubblezeit. Bei gleichförmiger Expansion in einem leeren Universum wäre sie gleich dem Weltalter. Je nach Gehalt des Universums an Materie, dunkler Materie und dunkler Energie kann die Expansion verzögert oder beschleunigt werden, so daß das Weltalter von der Hubblezeit verschieden ist.

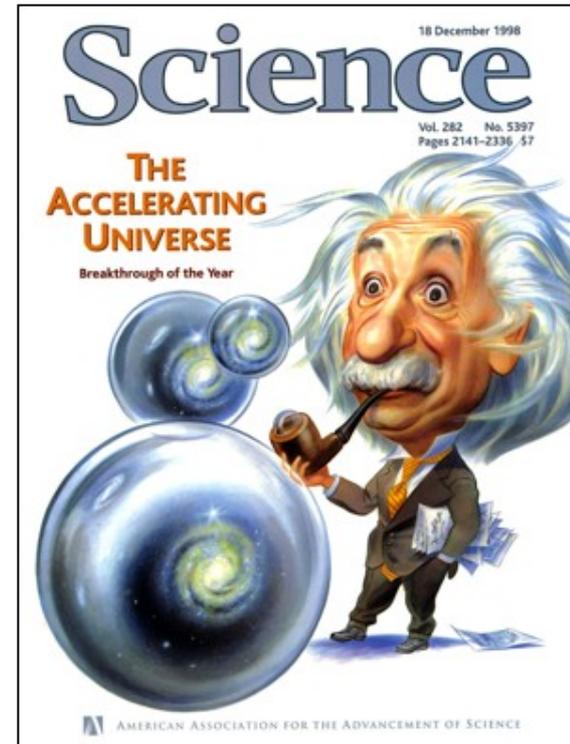
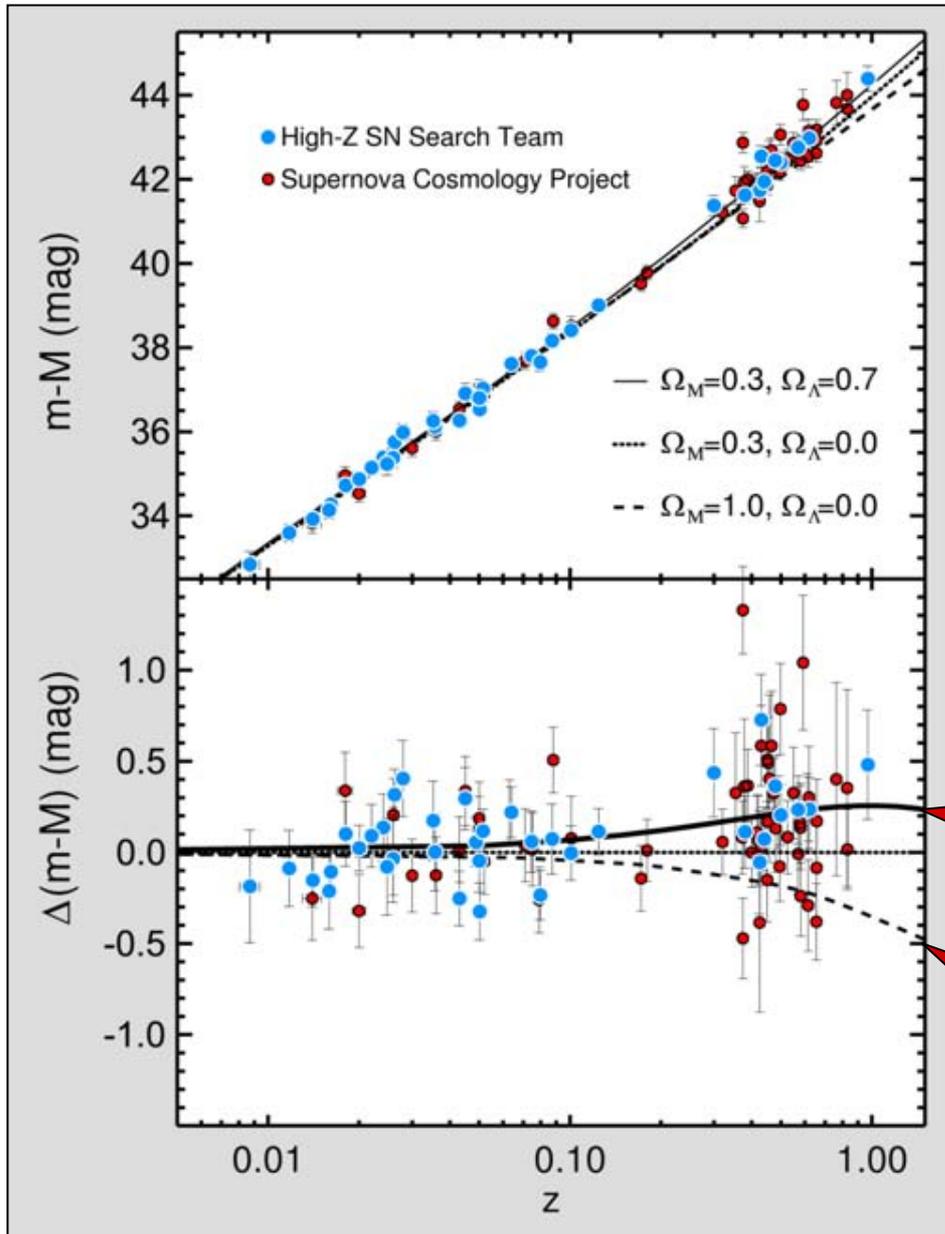
WMAP Messungen und 2dFGRS

(2-degree Field Galaxy Redshift Survey)

ergibt sich eine Hubblezeit von 13.3 Milliarden und ein Weltalter von 13.7 Milliarden Jahren



Hubble Diagramm - Beschleunigte Expansion

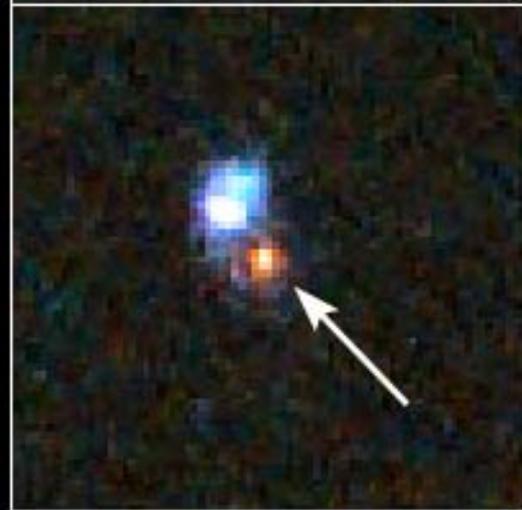


Beschleunigte
Expansion

Abgebremste Expansion
(Normale Materie)

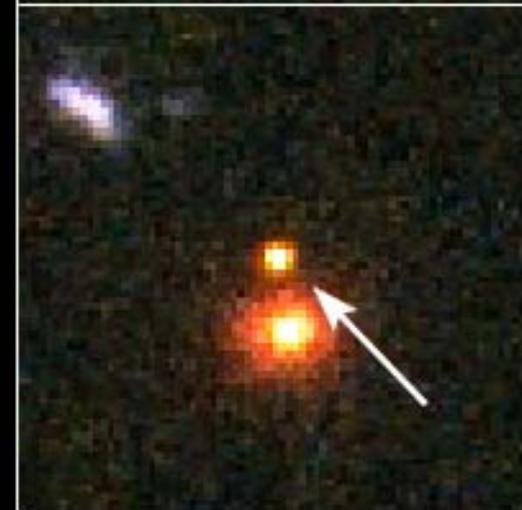
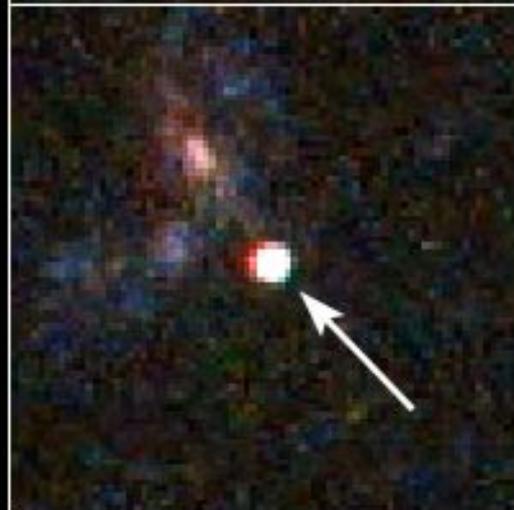
Supernovae Ia

Distant Supernovae



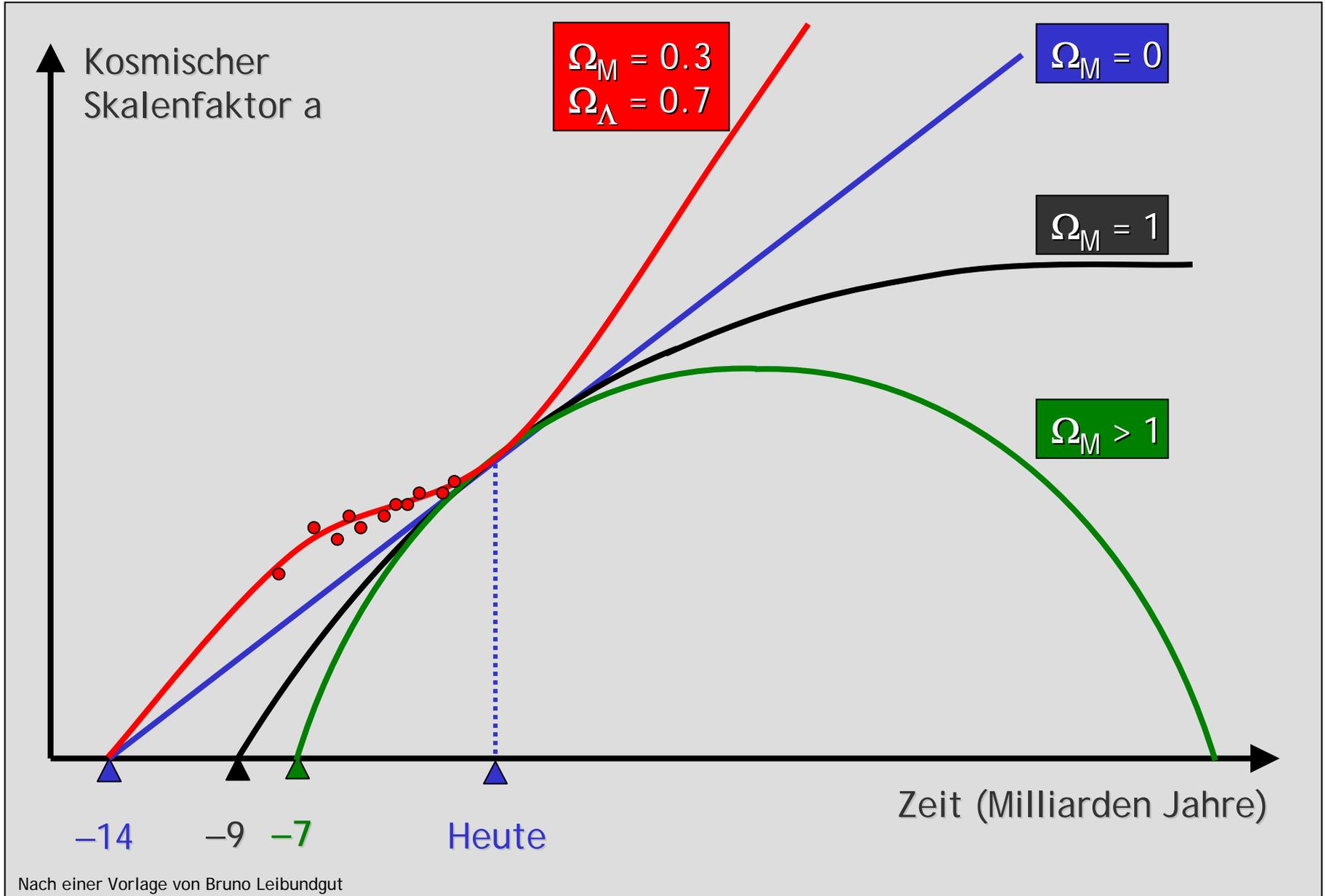
NASA and A. Riess (STScI)

Hubble Space Telescope - ACS



STScI-PRC04-12

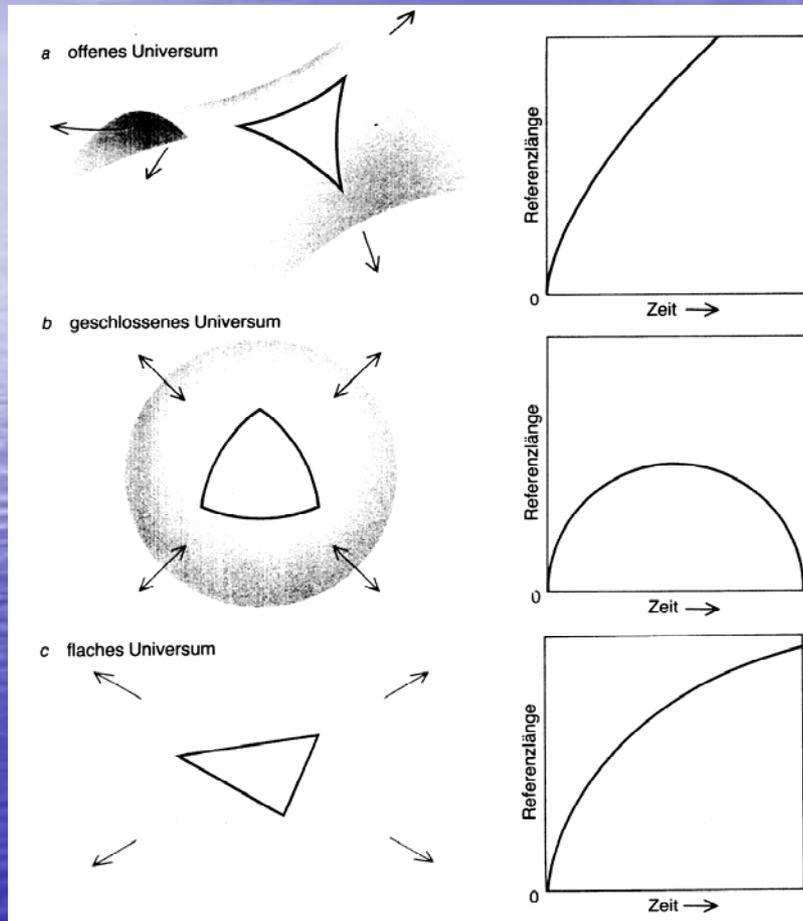
Expansion verschiedener kosmologischer Modelle



$$k \sim T + V$$

$$(H(t))^2 - \frac{8}{3} \pi \cdot G \rho(t) = -\frac{k}{R^2(t)}$$

3 Szenarien für die Zukunft des Universums:



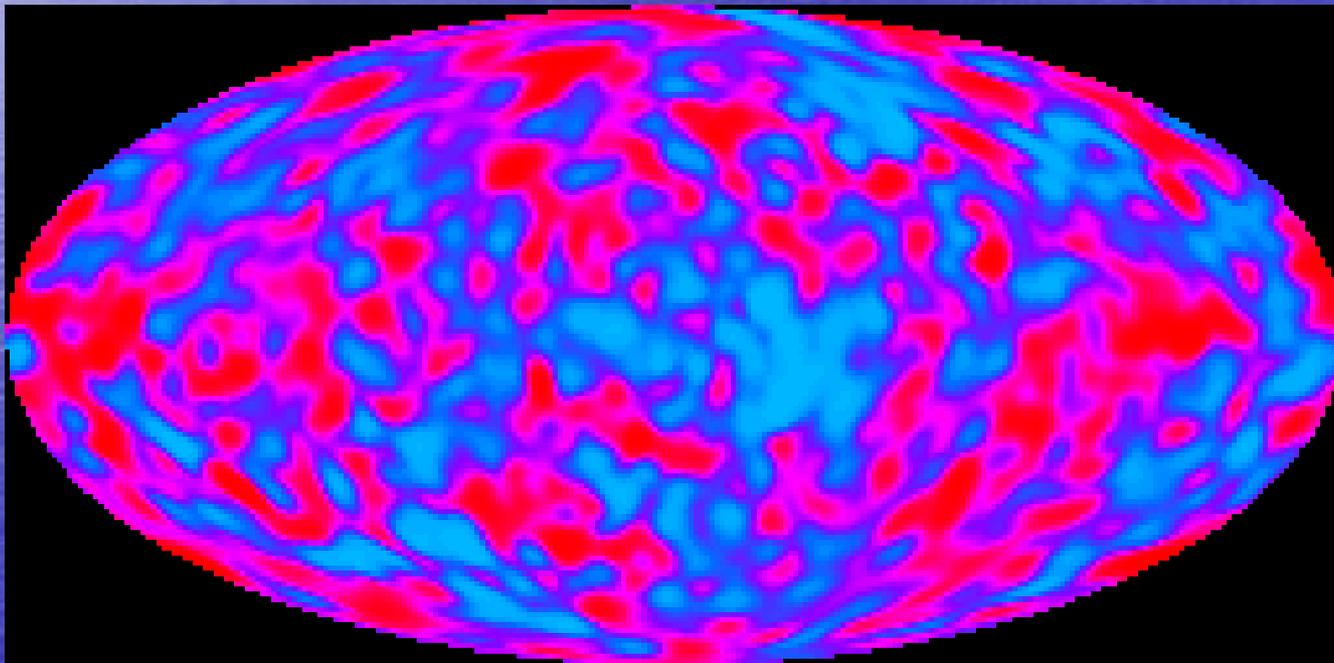
$k < 0$: Universum offen,
unendliche Expansion,
„Big Whimper“ (Großes Wimmern)

$k > 0$: Universum geschlossen,
„Big Crunch“ (Großes Knirschen)

$k = 0$: Universum flach, $T+V = 0$,
asymptotische Expansion

Inflationäres Universum erklärt:

- **Horizontproblem:** großskalige Homogenität und Isotropie
- **Glattheitsproblem:** extreme Uniformität am Anfang
- **Monopolproblem:** Abwesenheit von magnetischen Monopolen



Einsteins „Größte Eselei“

Dichte gravitierender Masse & Energie

Newton'sche Konstante

Krümmungsterm
ist sehr klein oder Null
(Euklidische Raumgeometrie)

Friedmann Gleichung für
Hubbles Expansionsrate

$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G_N}{3} \rho - \frac{k}{a^2} + \frac{\Lambda}{3}$$



Yakov
Borisovich
Zeldovich
1914-1987



Kosmologische Konstante Λ
(neue Naturkonstante)
erlaubt statisches Universum
durch „globale Antigravitation“

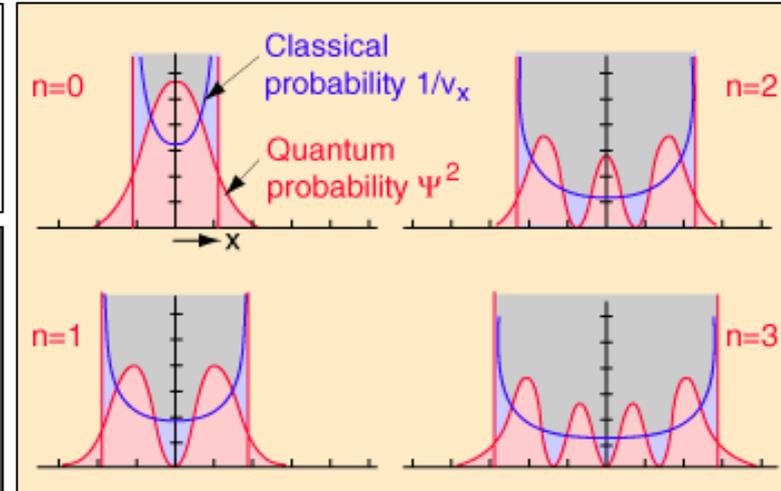
- Quantenfeldtheorie der Elementarteilchen und ihrer Wechselwirkungen impliziert unausweichlich Vakuumfluktuationen
- Grundzustand (Vakuum) besitzt gravitierende Energie
- Vakuumenergie ρ_{vac} äquivalent zu Λ

Nullpunktenergie der Quantenfelder

Energieniveaus des harmonischen Oszillators

$$E_n = \left(\frac{1}{2} + n \right) \hbar \omega$$

Nichtverschwindende Nullpunktenergie wegen Heisenberg'scher Unschärferelation: Ort und Impuls nicht gleichzeitig bestimmt und also nicht gleichzeitig exakt Null



Elektromagnetisches Feld:
E und B nicht gleichzeitig Null
wegen Unschärferelation

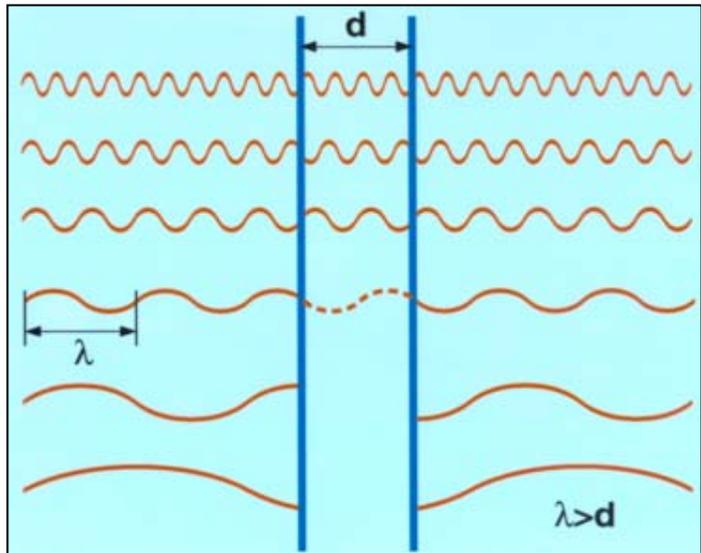
Energiedichte im Grundzustand (Vakuum) ist Summe über unendliche viele Oszillatoren

$$\rho = \left\langle \frac{E^2 + B^2}{2} \right\rangle = \sum_n \frac{\hbar \omega_n}{2} = \infty$$

Nominelle Vakuumenergie der Quantenfelder
 $+\infty$ für jeden bosonischen Freiheitsgrad (Photonen etc.)
 $-\infty$ für jeden fermionischen Freiheitsgrad (Elektronen etc.)
Wie zu interpretieren ???

Casimir Effekt (1948)

Eine messbare Manifestation der Nullpunktenergie des elektromagnetischen Feldes



Langwellige Feldmoden zwischen den Platten werden „verdrängt,“ so dass dort die Vakuumenergie geringer ist als im freien Raum



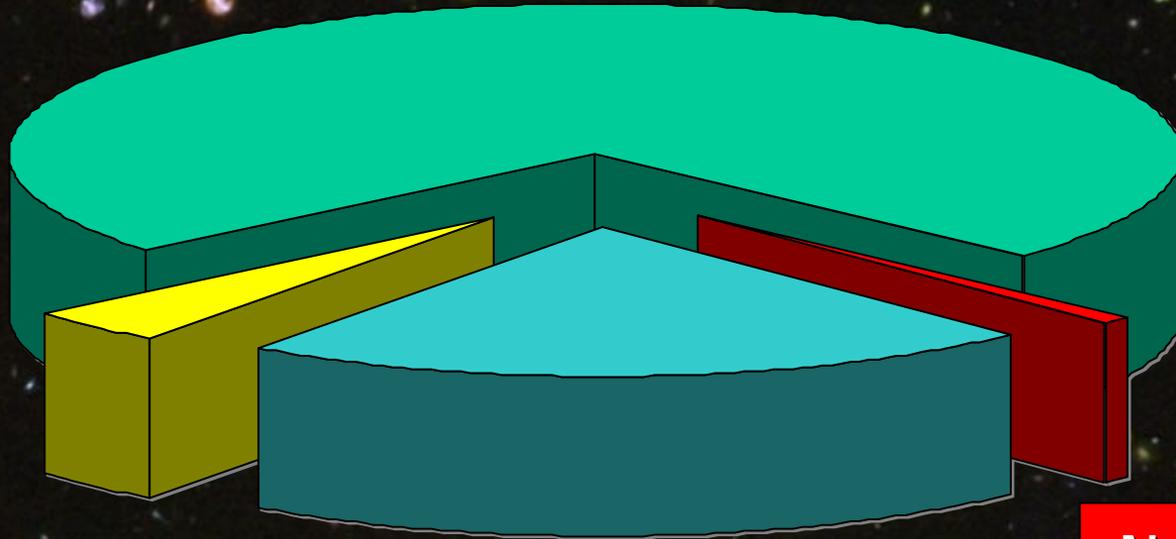
Hendrik Bogt Casimir
(1909 – 2000)

$$F = \frac{\pi^2}{240} \frac{\hbar c}{d^4} A \approx 1.3 \times 10^{-7} \text{ N} \left(\frac{1 \mu\text{m}}{d} \right)^4 \left(\frac{A}{1 \text{ cm}^2} \right)$$

Casimir Kraft zwischen parallelen Platten (Abstand d , Fläche A)

Bordag et al., New Developments in the Casimir Effect, Phys. Rept. 353 (2001)

Dunkle Energie 73%
(Kosmologische Konstante)



Normale Materie 4%
(davon nur ca. 10%
leuchtend)

Dunkle
Materie 23%

Neutrinos
0.1–2%



Das Geheimnis der
Dunklen Materie
Geht es ohne?

MOND-Theorie: modified Newtonian dynamics theory

Unterhalb von $a_0 = 10^{-8} \text{ cm s}^{-2}$ geht die Gravitationsbeschleunigung über in

$$a_G = \frac{G \cdot M}{r^2} + \frac{\sqrt{G \cdot M \cdot a_0}}{r}$$

Eine höhere Gravitationsbeschleunigung bewirkt eine schnellere Umlaufbewegung. Dies könnte die flachen Rotationskurven der Galaxien erklären.

Problem: Zerstört Äquivalenz von träger und schwerer Masse in ART

Zeitabhängige Gravitationskonstante: $G(t)$

$G(t)$ hätte großen Einfluss auf die primordiale Elementhäufigkeit . Präzessionstests konnten bisher keine zeitliche Variation von $G(t)$ nachweisen.

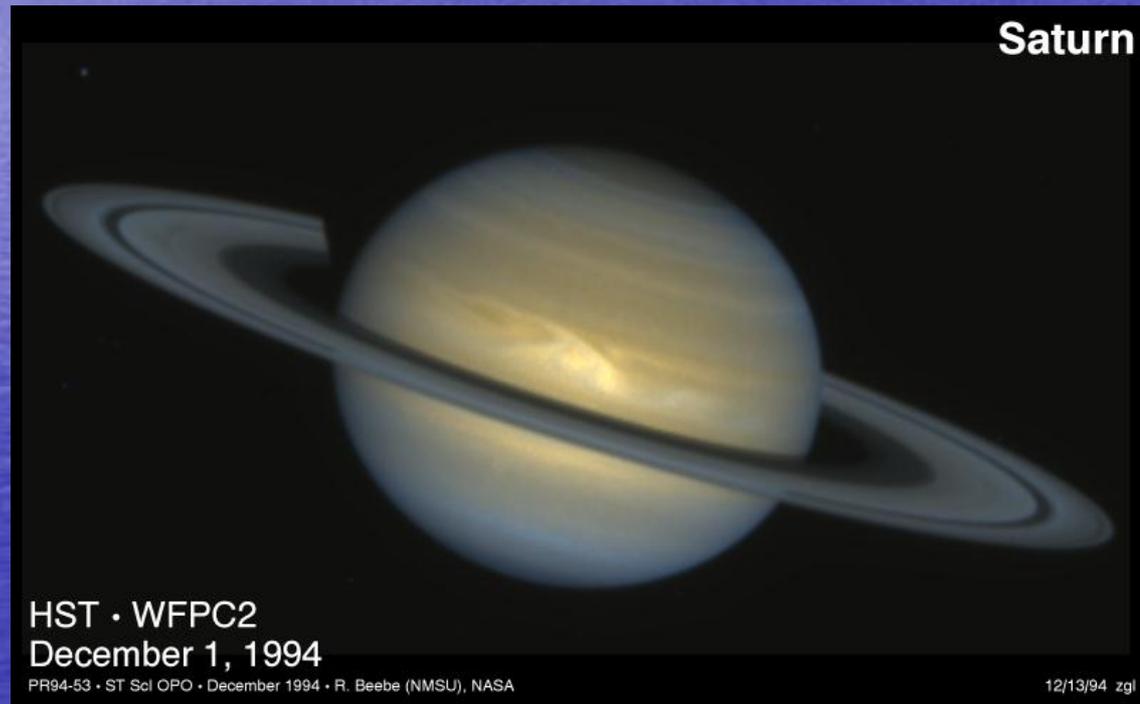
Fazit: Diese Kandidaten lösen nur einen Teil der beobachteten Probleme.



Das Geheimnis der
Dunklen Materie
Woraus besteht sie?

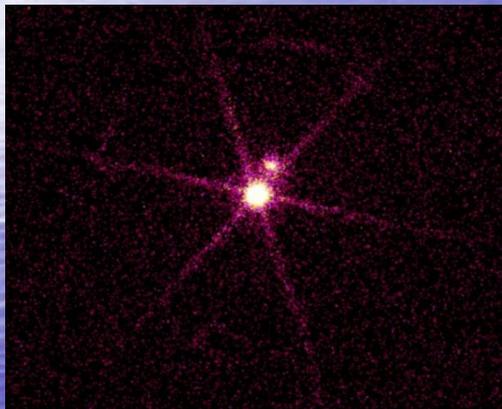
Baryonische Dunkle Materie

- Planeten:
- $m < 1\% M_S$
 - keine innere Energiequelle, schwer beobachtbar
 - zu viele Planeten: Kollisionen mit anderen Objekten
 - es gibt zu wenig Planeten für $\Omega = 1$

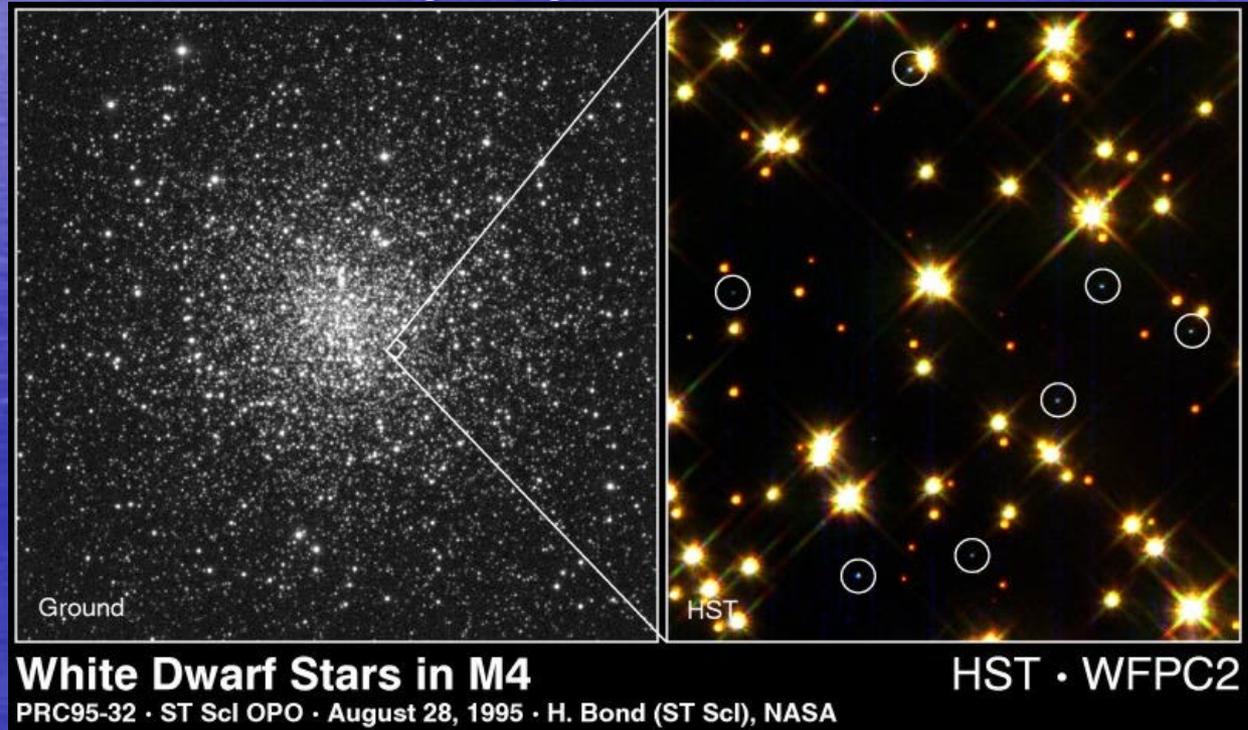


Weißer Zwerge:

- Endstadium der Entwicklung massenarmer Sterne
- $0.5 M_{\odot} < m < 1.2 M_{\odot}$
- Kernmaterie ist entartet, daher sehr kompakt
- Oberfläche kalt, daher lichtschwach
- werden erst nach einigen Milliarden Jahren gebildet
- Universum nicht alt genug für ausreichend Weiße Zwerge

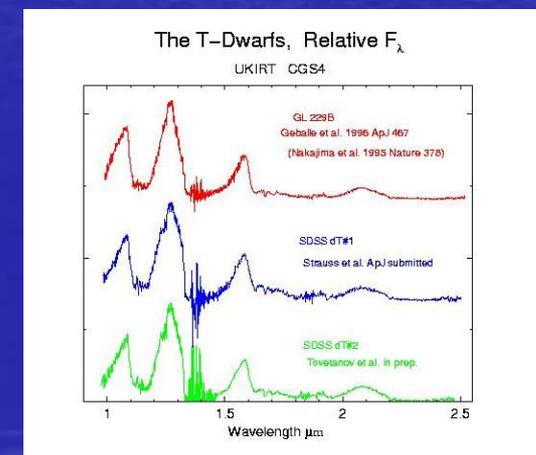
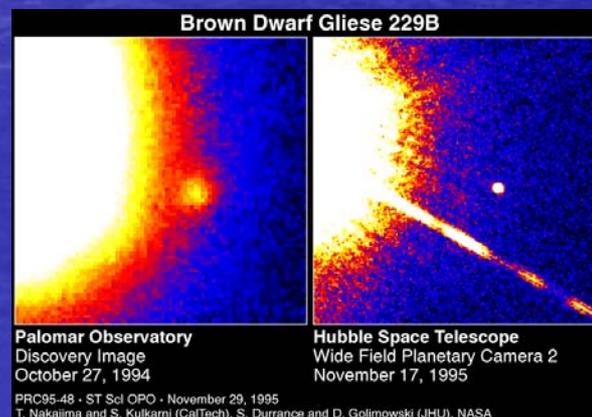
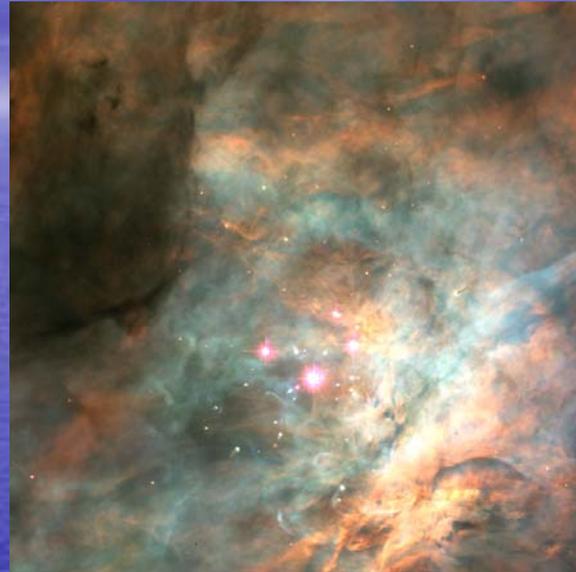


Sirius B

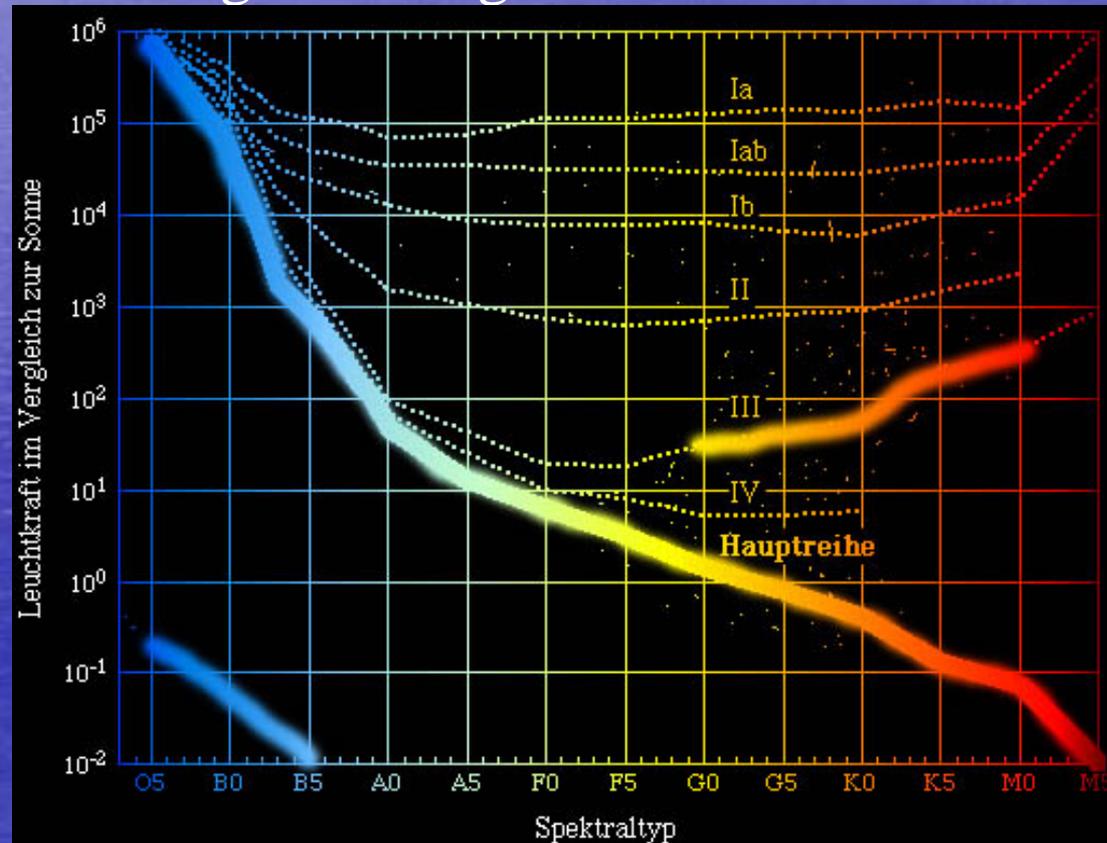


- Braune Zwerge:
- $m < 0.08$ Sonnenmassen, d.h. keine Kernfusion
 - Abstrahlung von Infrarotstrahlung aus Kontraktion
 - guter Kandidat, da dunkel und klein

Trapez im
Orionnebel



- M Zwerge:
- kalte, kleine Sterne am Ende der Hauptreihe
 - $T = 3500 \text{ K}$, Infrarotstrahlung
 - $0.08 M_S < m < 0.5 M_S$, $0.1 R_S < r < 0.6 R_S$
 - sehr lange Lebensdauer
 - zu wenig M Zwerge beobachtet für $\Omega = 1$



- MACHOs:
- Massive Compact Halo Objects
 - Mikrolinsen-Ereignisse, kurzzeitiger Helligkeitsanstieg
 - Braune Zwerge, Planeten, leuchtschwache M-Sterne

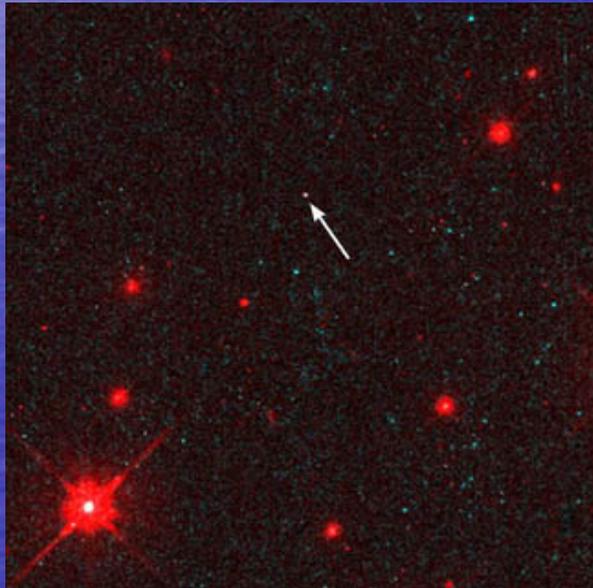
Neutronensterne: • Endstadium der Entwicklung massereicher Sterne
• $m \approx 1.4M_{\odot}$, sehr hohe Dichte: $d = 2 \cdot 10^{18} \text{ kg/m}^3$

Schwarze Löcher: • $m > 2.2M_{\odot}$
• so kompakt, dass Licht nicht mehr entkommt

Aber: Massereiche Sterne erzeugen schwere Elemente. Anzahl der schweren Elemente zu gering für ausreichend Neutronensterne und Schwarze Löcher

Kometen, Staub, Gas, Schneebälle: Dichte zu gering

Neutronenstern
im Sternbild
Corona Australis



Kern der
Galaxie
NGC 6251

Grenzen für baryonische Dunkle Materie:

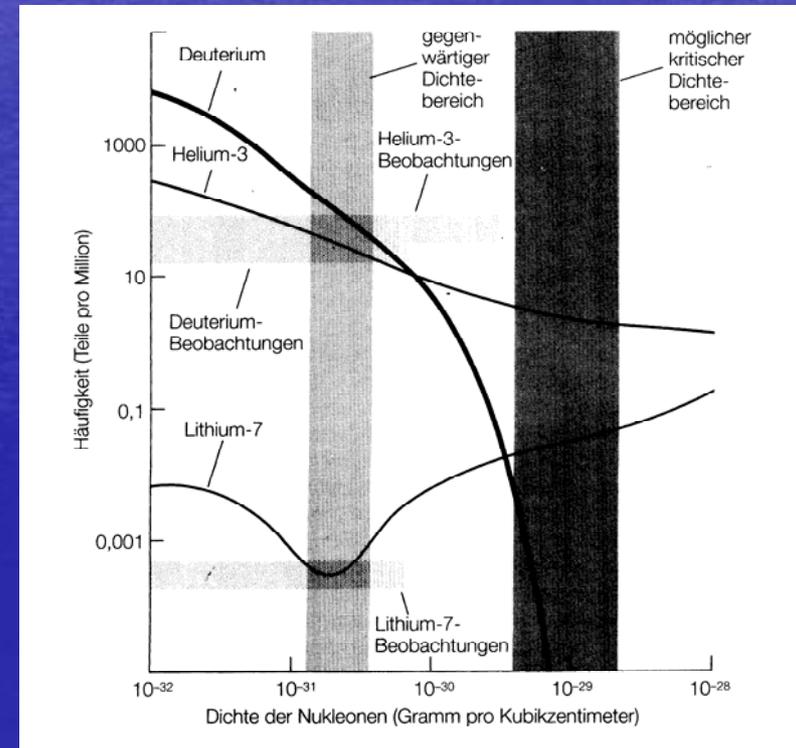
Primordiale Nukleosynthese (3 min. nach dem Urknall):
Entstehung der leichten Elemente.

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

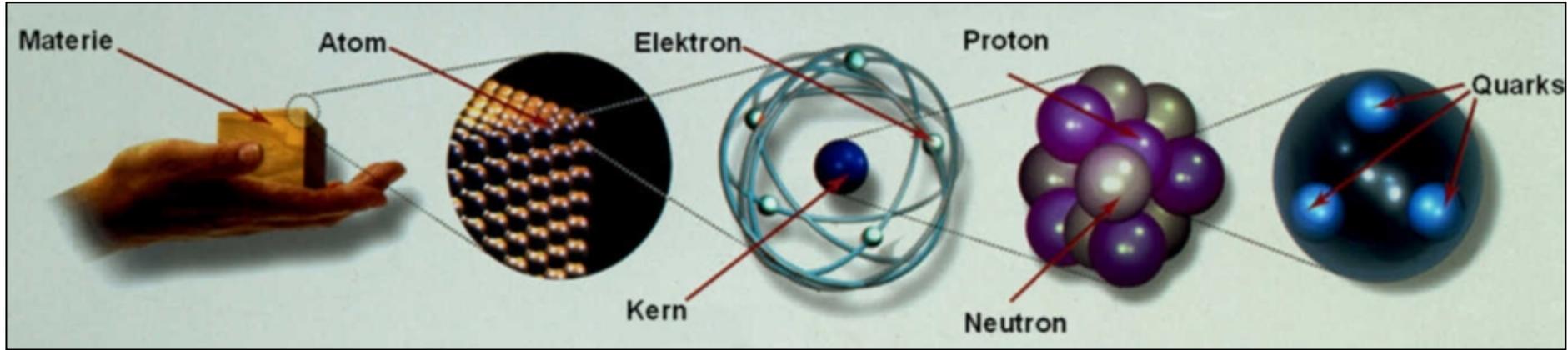
$$\Rightarrow \Omega_{bar} < 0.1 - 0.2$$

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

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



Periodensystem der Elementarteilchen



	Quarks		Leptonen	
	Ladung +2/3	Ladung -1/3	Ladung -1	Ladung 0
1. Familie	Up u	Down d	Elektron e	e-Neutrino ν_e
2. Familie	Charm c	Strange s	Myon μ	μ -Neutrino ν_μ
3. Familie	Top t	Bottom b	Tauon τ	τ -Neutrino ν_τ
Gravitation				
Schwache Wechselwirkung				
Elektromagnetische Wechselwirkung				
Starke Wechselwirkung				

Sloan Digital Sky Survey



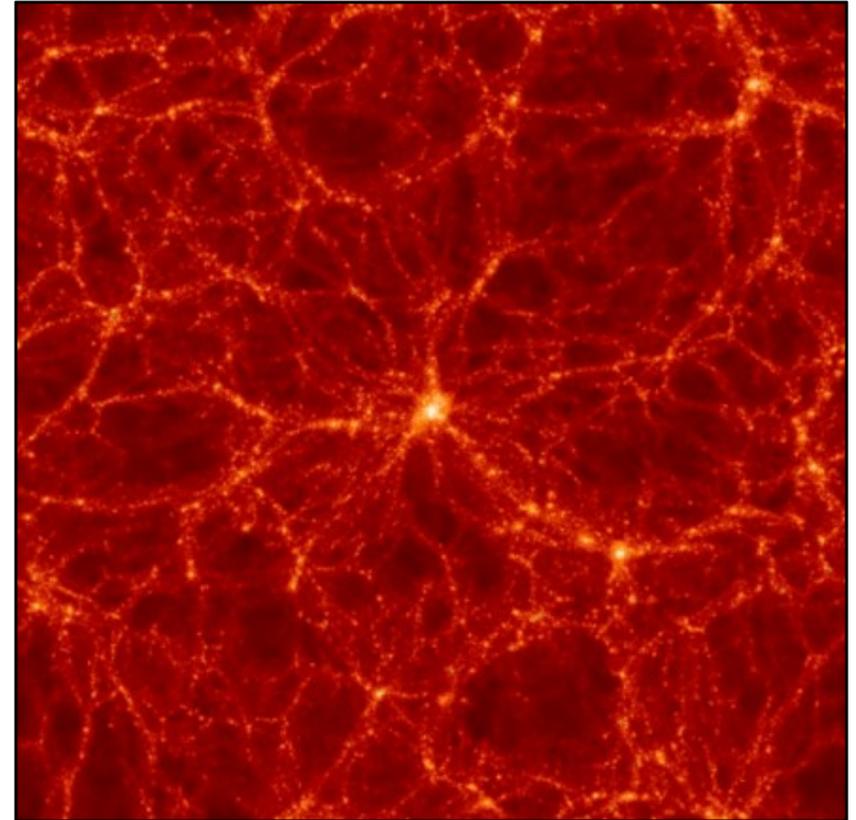
Strukturbildung im Universum

Fast völlig homogen



Starke Dichteschwankungen

Struktur in der
Materieverteilung
(insbesondere Galaxien)
bildet sich durch die
Gravitationsinstabilität
primordialer
Dichteschwankungen



Galaxienbildung erfordert große Mengen dunkler Materie

Nicht-baryonische Dunkle Materie

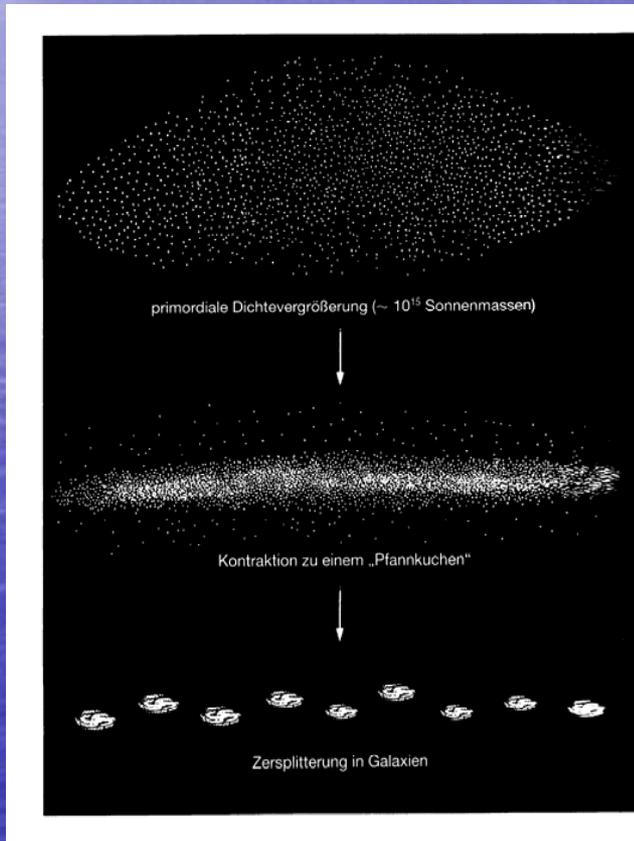
Strukturbildung:

Kalte Dunkle Materie: Bottom-Up | Heisse dunkle Materie: Up-Bottom

Dichte-
vergrößerung

Kontraktion

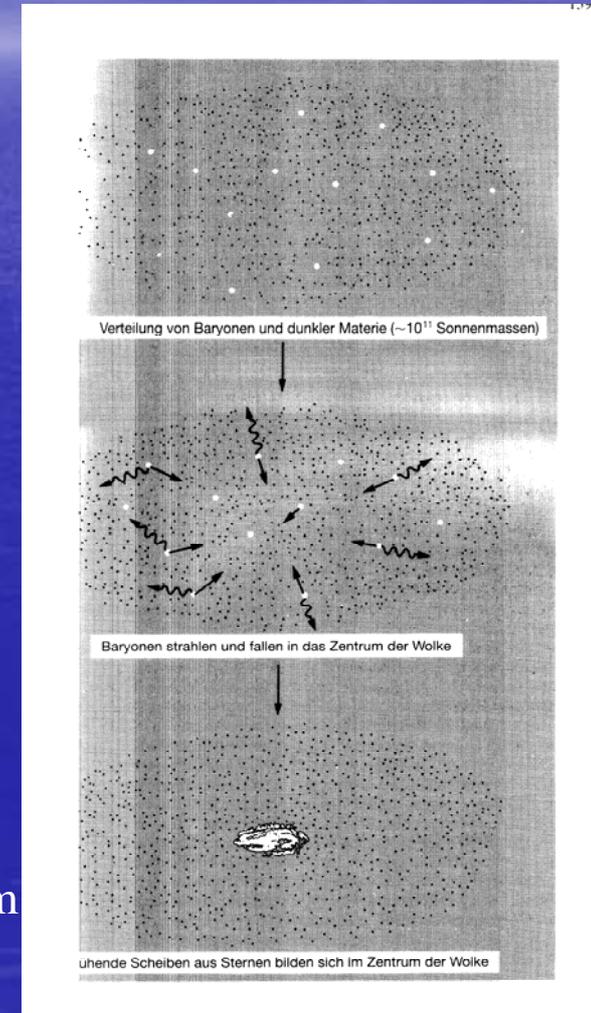
Zersplitterung
in Galaxien



Homogene
Verteilung

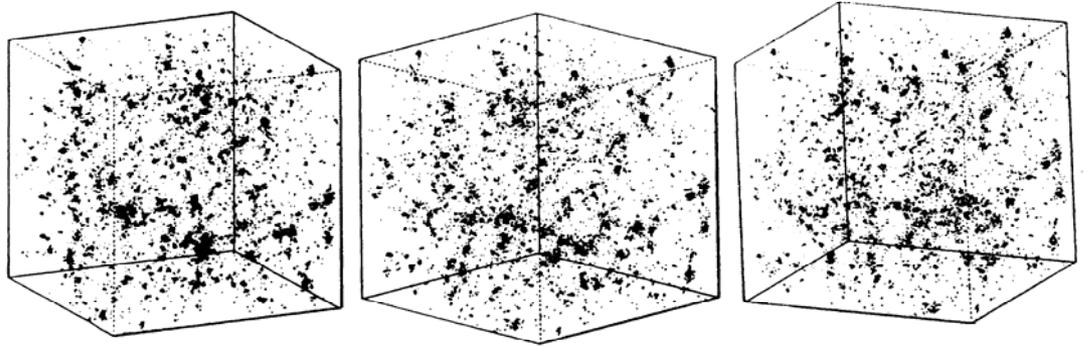
Baryonen
strahlen und
fallen ins
Zentrum

Scheiben aus
Sternen bilden
sich im Zentrum

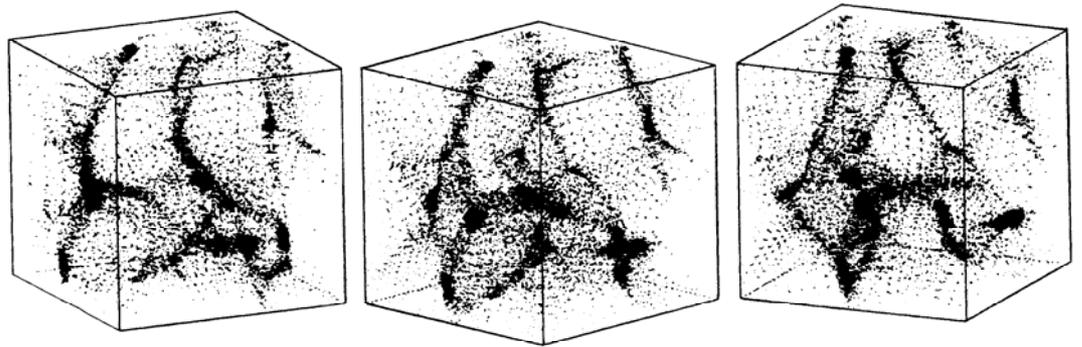


Computersimulation:

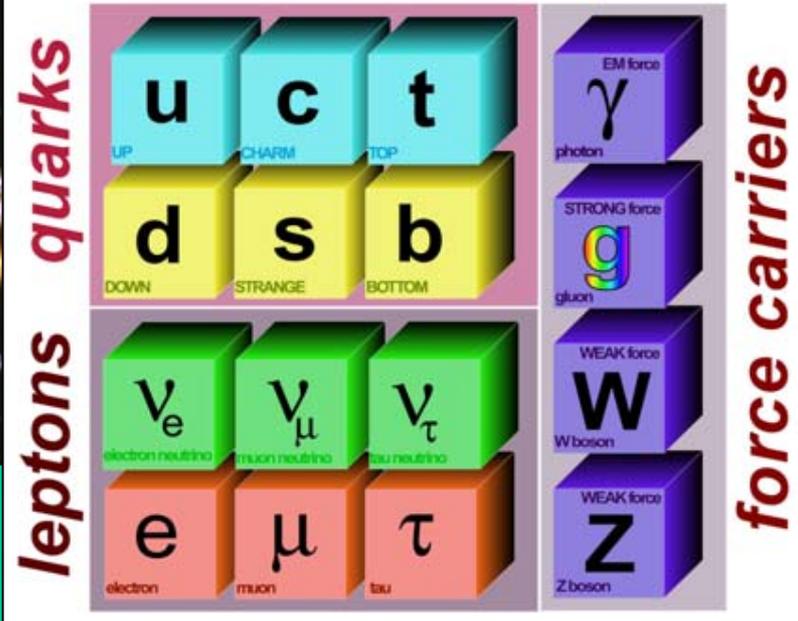
Kalte Dunkle Materie



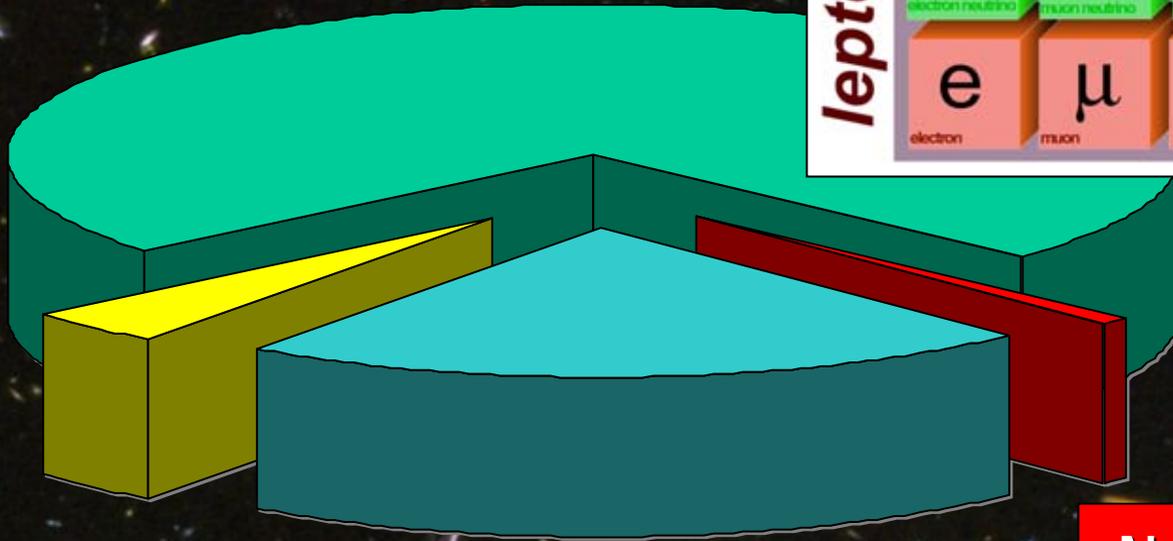
Heisse Dunkle Materie



The Standard Model of Elementary Particles



Dunkle Energie 73%
(Kosmologische Konstante)



Normale Materie 4%
(davon nur ca. 10%
leuchtend)

Dunkle
Materie 23%

Neutrinos
0.1–2%

Heisse Dunkle Materie: Leichte Neutrinos

- relativistisch
- frieren 1s nach Urknall bei 10^{10} K aus
- Neutrinomassen im Bereich der kritischen Dichte, wenn die Summe über die Massen zwischen 15eV und 65eV ist
- Aus SNO Experiment:
Summe der Neutrinomassen 0.05 eV - 8.4 eV, das entspricht
 $0.001 < \Omega_\nu < 0.18$
- Stimmt gut, mit der beobachteten Strukturbildung überein, denn bei einem neutrinodominierten Universum setzt die Klumpung zu spät ein, um z.B. Zwerggalaxien zu erklären

Fazit: Benötigen auch Kalte Materie

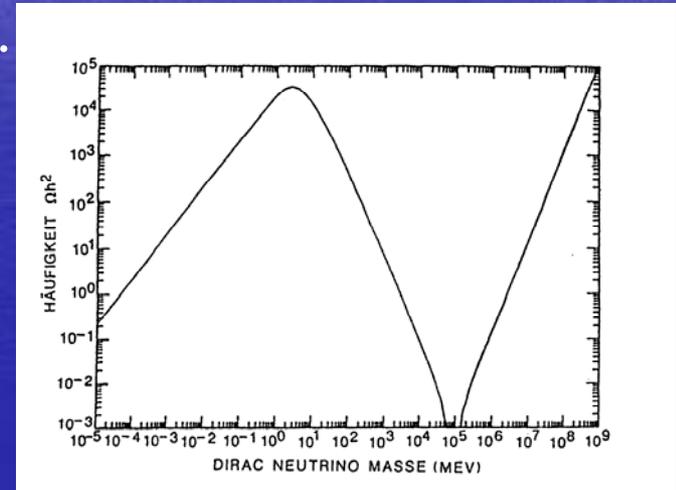
Kalte Dunkle Materie: WIMPS, Axionen...

WIMPS: Weakly Interacting Massive Particles

- nichtrelativistische Teilchen mit Massen von einigen GeV - TeV
- Boltzmann-Gleichung:
Häufigkeit invers proportional zum Vernichtungsquerschnitt, d.h. je schwächer Teilchen wechselwirken, desto häufiger sind sie.
- Kandidaten: schwere Neutrinos, LSP,...

Schwere Neutrinos:

- Neutrinos mit $m < 100$ eV und $m > 5$ GeV sind kosmologisch stabil
- Aus Messung der Z^0 Zerfallsbreite am LEP $m > 45$ GeV
- Obergrenze für ein stabiles punktförmiges Teilchen $m < 340$ TeV



Alternative zu schweren Neutrinos: Neutralinos

Im Rahmen sogenannter supersymmetrischer Theorien besitzt jedes Boson einen fermionischen Partner und umgekehrt

Spin	Standardteilchen	Superpartner	Spin
1/2	Leptons (e, ν_e, \dots) Quarks (u, d, \dots)	Sleptons ($\tilde{e}, \tilde{\nu}_e, \dots$) Squarks ($\tilde{u}, \tilde{d}, \dots$)	0
1	Gluons W^\pm Z^0 Photon (γ)	Gluinos Wino Zino Photino ($\tilde{\gamma}$)	1/2
0	Higgs	Higgsino	1/2
2	Graviton	Gravitino	3/2

- Falls die „R-Parität“ erhalten ist, ist das leichteste S-Teilchen stabil
- Als bester Kandidat für die dunkle Materie gilt das „Neutralino“, das einem schweren Majorana-Neutrino ähnelt

$$\text{Neutralino} = C_1 \text{ Photino} + C_2 \text{ Zino} + C_3 \text{ Higgsino}$$

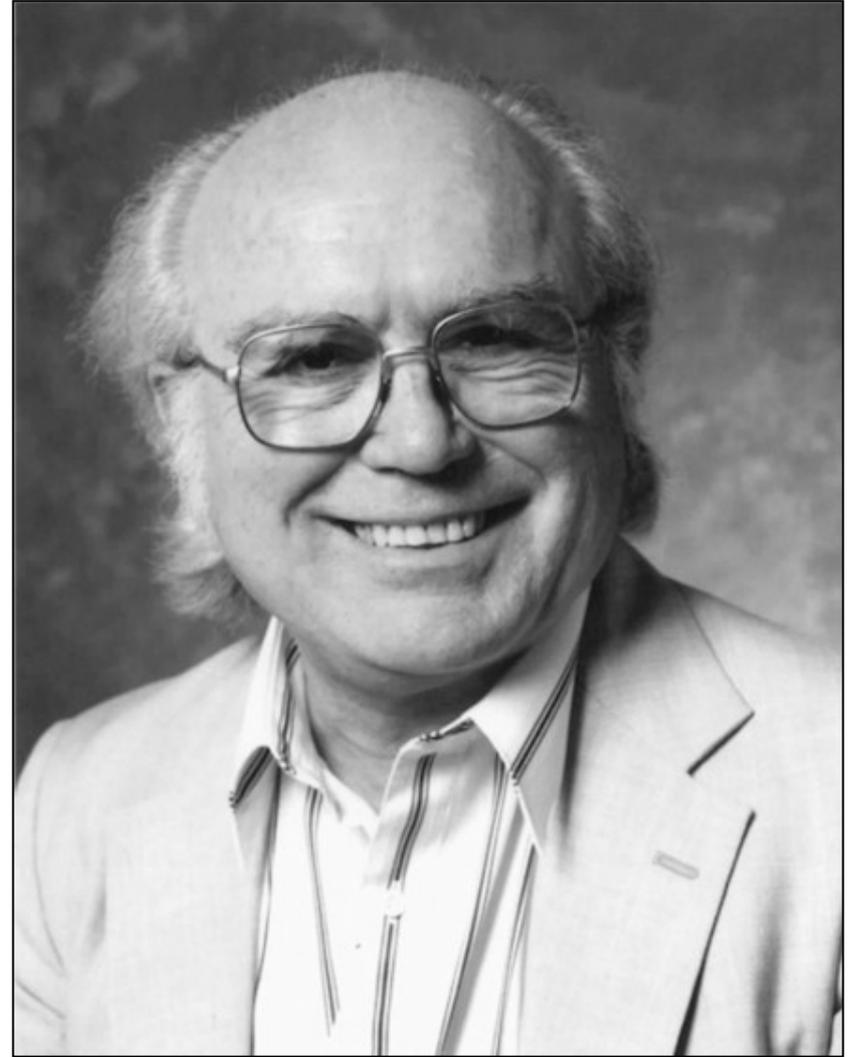
Supersymmetrische Teilchen (SUSY)

- Jedem Teilchen wird ein supersymmetrischer Partner zugeordnet.
(Fermion \rightarrow Boson, Boson \rightarrow Fermion)
- R-Parität: Neue erhaltene multiplikative Quantenzahl
R = 1 : Teilchen, R = -1 : Partnerteilchen $R = (-1)^{3B+L+2S}$
- Wegen R-Erhaltung muss ein stabiles SUSY Teilchen existieren,
das LSP (lightest supersymmetric particle)
- LSP wechselwirkt wahrscheinlich nur schwach und gravitativ
- experimentelle Obergrenze $\frac{n(LSP)}{n(Photon)} < 10^{-15} - 10^{-30}$
- Kandidaten: Photino, Higgsino, Zino (S=1/2); Sneutrino (S=0);
Gravitino (S=3/2). Am wahrscheinlichsten Gaugino:
Mischung der Teilchen mit S = 1/2. $M > 10 \text{ GeV}$

„Erfinder“ der Supersymmetrie



Julius Wess (1934–2007)
Direktor emeritus MPI Physik

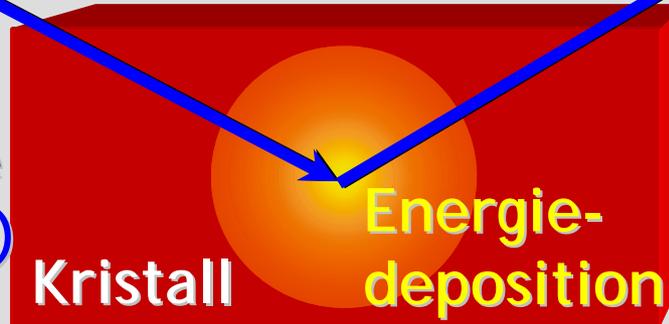


Bruno Zumino
(geb. 1923)

Suche nach Neutralinos als Dunkler Materie

Direkte Methode (Labor-Experimente)

Galaktisches
Teilchen der
dunklen Materie
(z.B. Neutralino)



Gemessen wird
Rückstoss-Energie
(einige keV) durch

- Ionisation
- Szintillation
- Kryogenisch

PHYSICAL REVIEW D

VOLUME 31, NUMBER 12

15 JUNE 1985

Detectability of certain dark-matter candidates

Mark W. Goodman and Edward Witten

Joseph Henry Laboratories, Princeton University, Princeton, New Jersey 08544

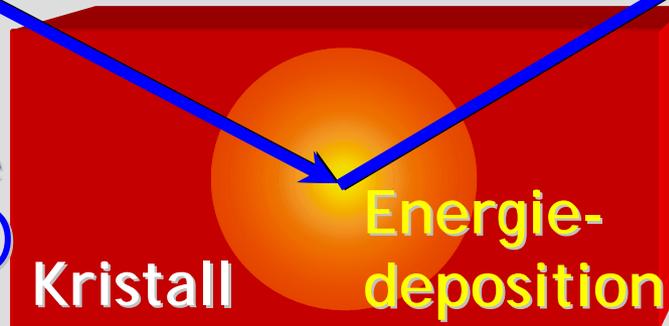
(Received 7 January 1985)

We consider the possibility that the neutral-current neutrino detector recently proposed by Drukier and Stodolsky could be used to detect some possible candidates for the dark matter in galactic halos. This may be feasible if the galactic halos are made of particles with coherent weak interactions and masses $1-10^6$ GeV; particles with spin-dependent interactions of typical weak strength and masses $1-10^2$ GeV; or strongly interacting particles of masses $1-10^{13}$ GeV.

Suche nach Neutralinos als Dunkler Materie

Direkte Methode (Labor-Experimente)

Galaktisches Teilchen der dunklen Materie (z.B. Neutralino)

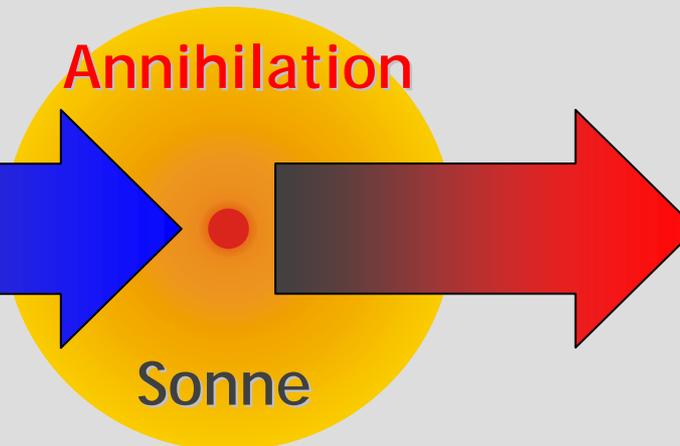


Gemessen wird Rückstoss-Energie (einige keV) durch

- Ionisation
- Szintillation
- Kryogenisch

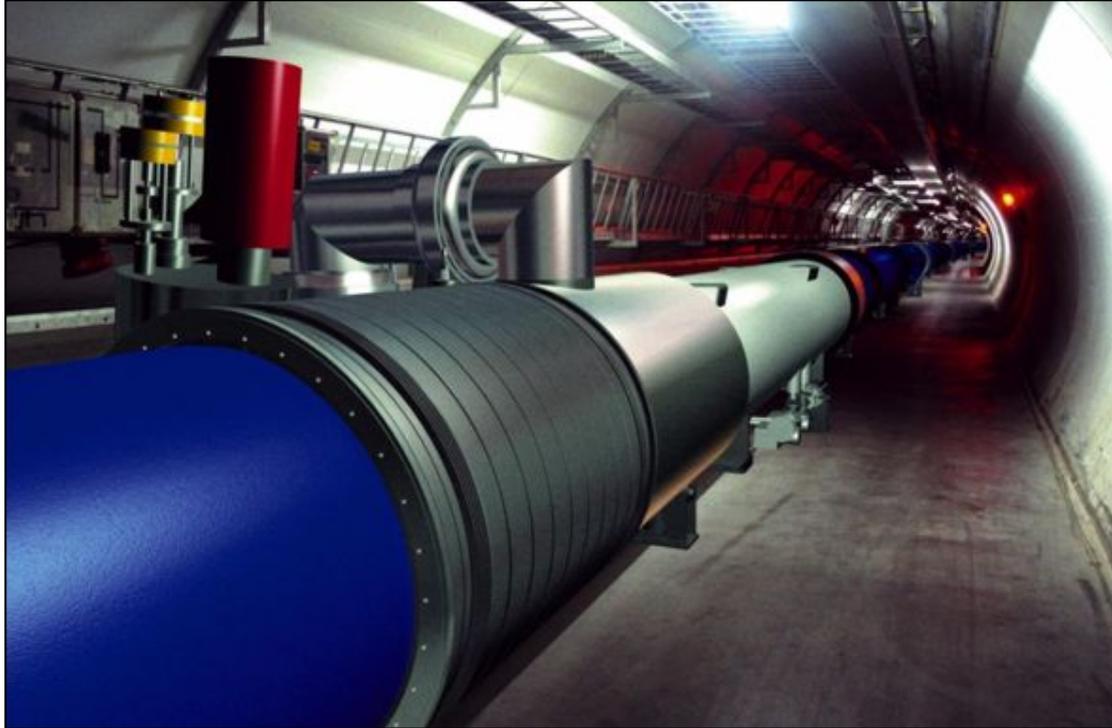
Indirekte Methode (Neutrino-Teleskope)

Galaktische dunkle Materie-teilchen werden akkretiert



Neutrinos hoher Energie (GeV - TeV) können gemessen werden

Suche nach SUSY mit dem Large Hadron Collider (LHC)



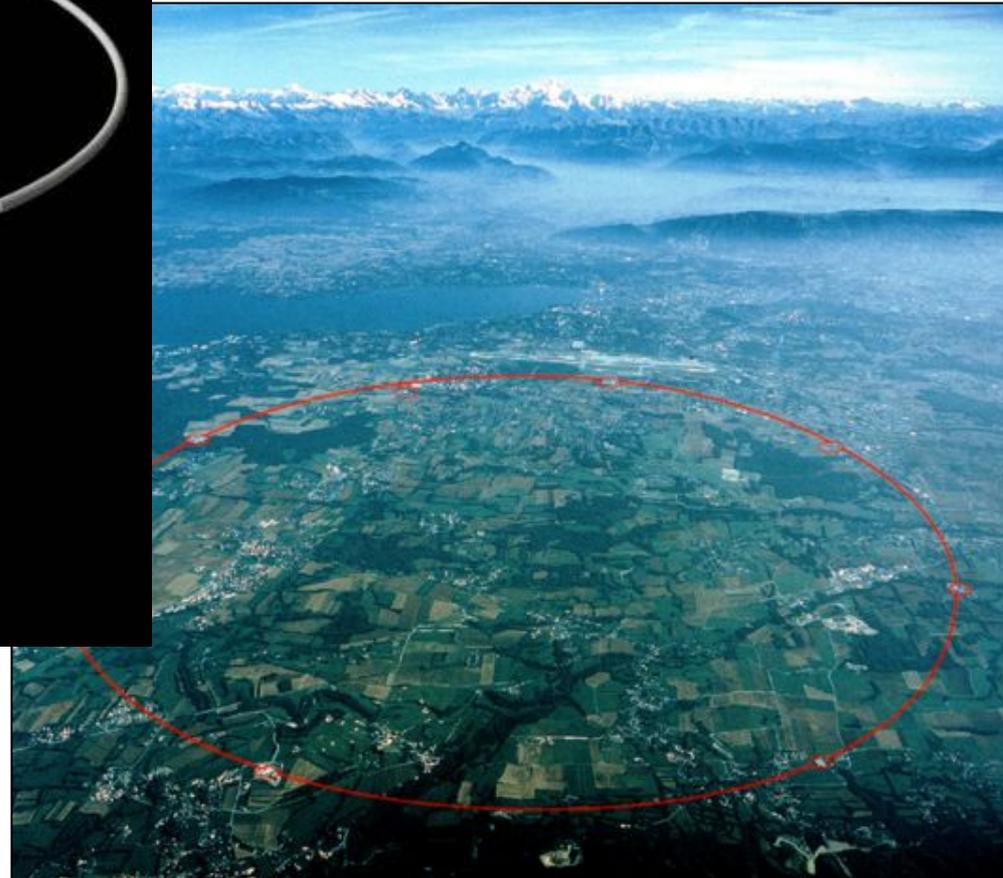
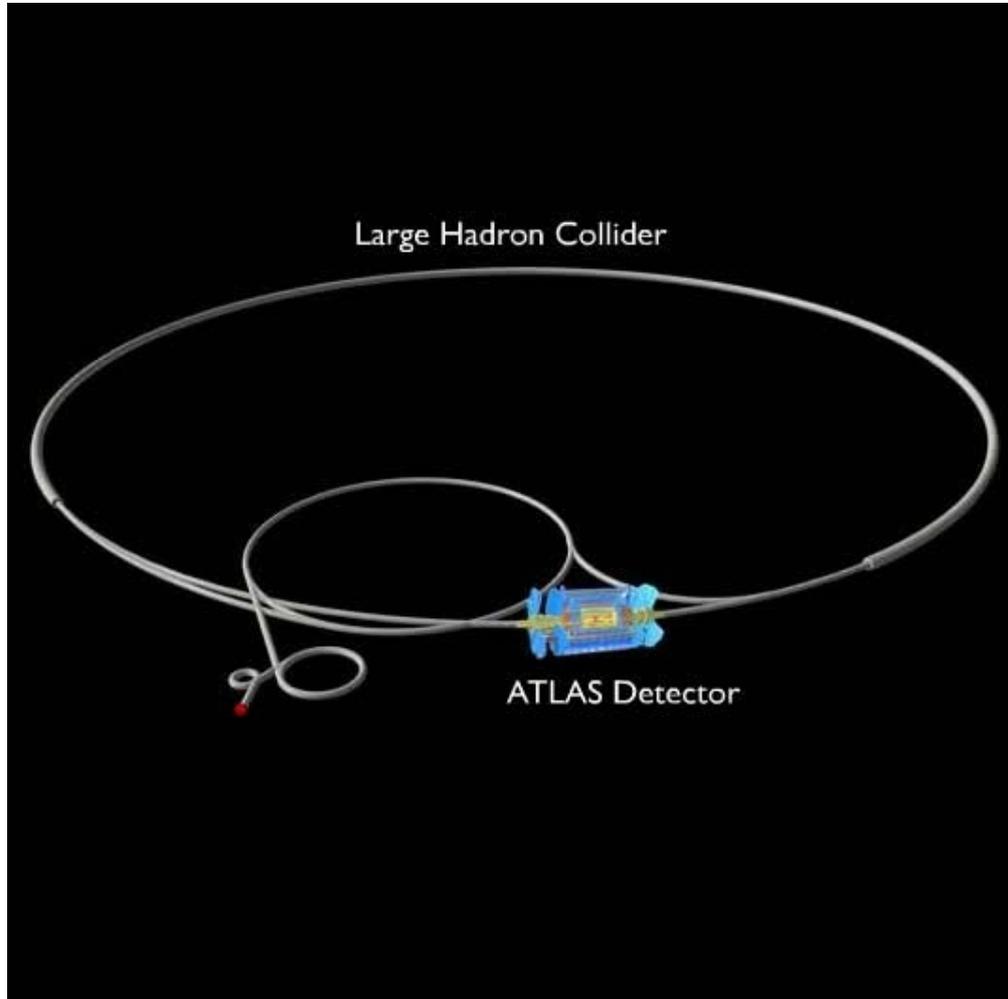
LHC am CERN (Genf)
Betrieb ab 2008



- Protonen werden mit den bisher höchsten Energien zur Kollision gebracht
- Entdeckung neuer Teilchen wird erwartet, z.B. Higgs-Teilchen und die supersymmetrischer Partner der normalen Materie

Simulation einer Proton-Proton Kollision am LHC

LHC am CERN (Genf)
Betrieb ab 2008



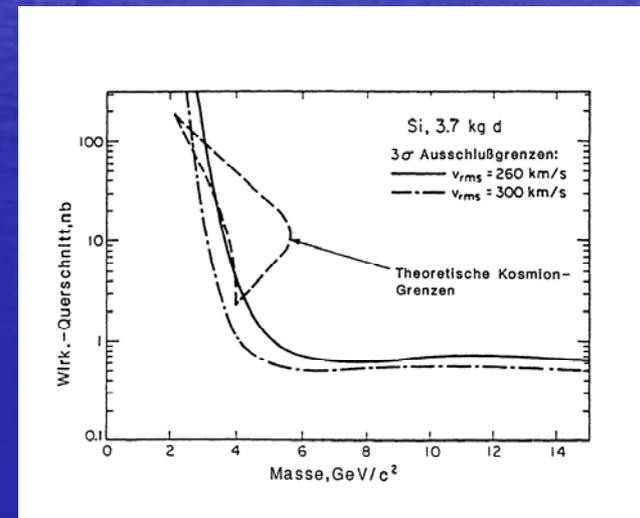
Axionen:

- hypothetisches Teilchen im Zusammenhang mit der starken CP-Verletzung (Theta-Problem)
- tritt bei der Brechung der chiralen Peccei-Quinn-Symmetrie auf
- übernimmt in etwa die Rolle des Goldstone-Bosons beim Higgs-Mechanismus
- möglicher Massenbereich (experimentell) : $10^{-5} \text{ eV} < m < 10^{-3} \text{ eV}$

$$m_a \approx 0.62 \frac{10^7 \text{ GeV}}{f_a} \quad \text{mit} \quad f_a \leq 10^{12} \text{ GeV}$$

Kosmionen:

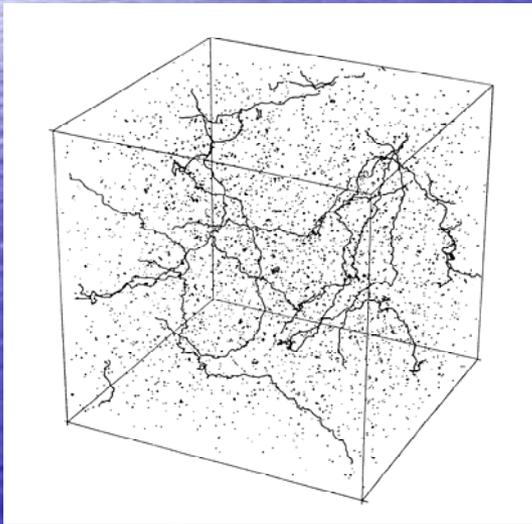
- Einführung zur Lösung des solaren Neutrinoproblems
- Einfang von Kosmionen im Sonneninnern beeinflusst Energietransport und Neutrinoproduktion der Sonne
- $m = 4 - 11 \text{ GeV}$, $\sigma = 10^{-36} \text{ cm}^{-2}$, durch Experimente ausgeschlossen
- Neutrinooszillationen lösen auch das Neutrino problem



- Schattenmaterie:
- Stringtheorie der Eichgruppe $E_8 \otimes E_8$
 - Aufspaltung in E_8 Materie, E_8 Schattenmaterie
 - Beide Sektoren wechselwirken nur über Gravitation

- Quark-Nuggets:
- makroskopische Gebilde aus u, d, s-Quarks
 - Bildung in hypothetischen QCD-Phasenübergang
 - Dichte $d = 10^{15} \text{ g cm}^{-3}$, $1 \text{ GeV} < m < M(\text{Neutronenstern})$

- Topologische Defekte:
- Symmetriebrechung der GUT-Symmetrie in $SU(3)$ und $SU(2) \otimes U(1)$ 10^{-36} s nach Urknall
 - Higgsfeld richtet sich mit zufälligen Orientierungswinkeln aus
 - an Grenzen: topologisch stabile Defektstellen, bestehend aus Urvakuum (hohe Massendichte)
 - z.B: Magnetische Monopole, kosmische Strings, domain walls, Texturen
 - Dichte des kosmischen Strings etwa $10^{22} \text{ g cm}^{-1}$
 - Nachweis z. B. über Gravitationslinseneffekt



Zusammenfassung:

- kalte Dunkle Materie: kann große Strukturen z.B. Cluster und Supercluster nicht erklären
- heiße Dunkle Materie: kann kleine Strukturen z.B. Zwerggalaxien nicht erklären
- deshalb: gemischte Modelle beschreiben beobachtetes Universum am besten. Beispiel:

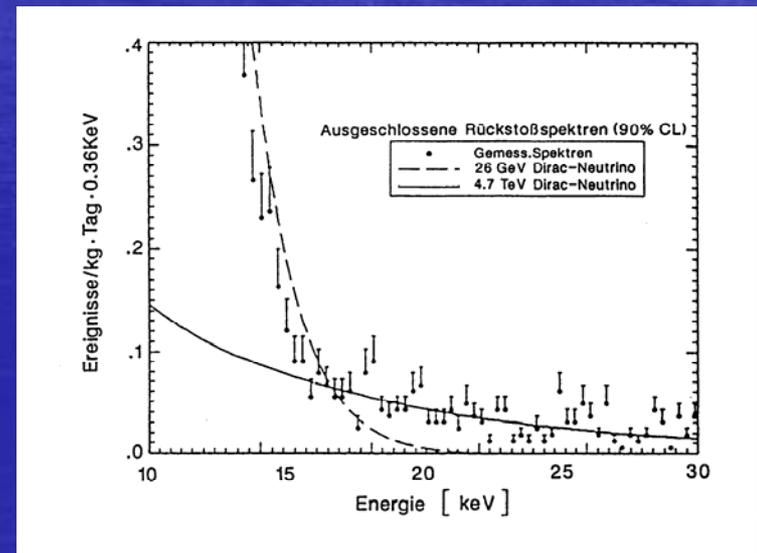
baryonisch:	1% sichtbare Baryonen
	7% unsichtbare Baryonen
nicht-baryonisch:	20% heiße Dunkle Materie
	72% kalte Dunkle Materie

Nachweis der Dunklen Materie

Direkte Experimente: Nachweis von WIMPS

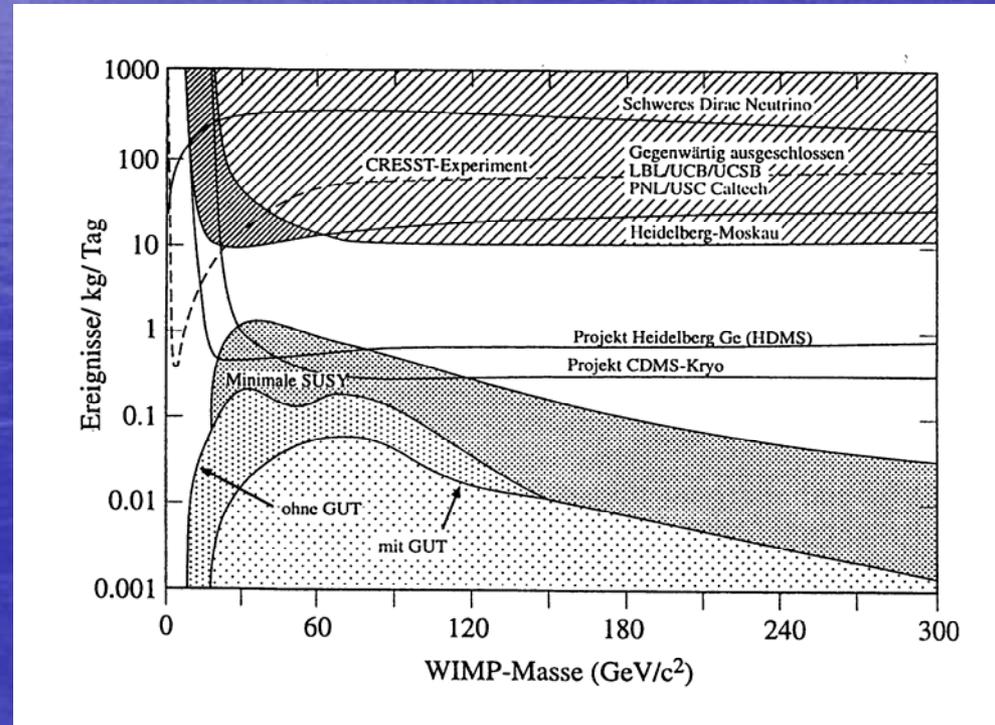
Ionisation in Halbleiterzählern

- elastische WIMP-Kern-Streuung im Halbleiterdetektor
- Erzeugung von Elektron-Loch-Paaren, die messbaren Strom erzeugen
- spinunabhängige Wechselwirkung: Dirac-Neutrinos, Sneutrinos
- spinabhängige Wechselwirkung: Majorana-Neutrinos, LSP
- Heidelberg-Moskau-Experiment:
Ausschluss schwerer Dirac-Neutrinos
mit $26 \text{ GeV} < m < 4.7 \text{ TeV}$
- bei spinabhängiger Wechselwirkung
noch weite Massenbereiche offen



Kryogene Detektoren

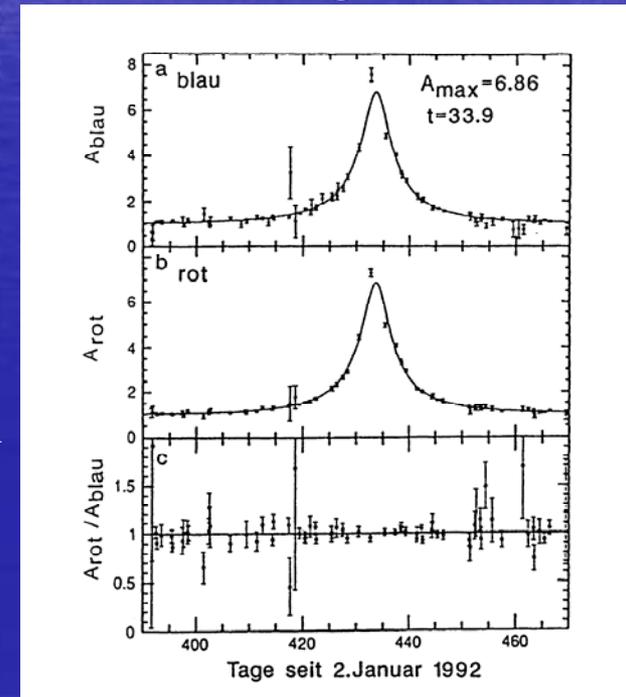
- Supraleitende Spule, knapp unterhalb der Sprungtemperatur betrieben
- Rückstossenergie zerstört lokal die Cooper-Paare, dadurch wird Spule normalleitend, Spannungssignal kann nachgewiesen werden



Indirekte Experimente

Suche nach Machos: massive compact halo objects

- Mikrolensing: Verstärkung und Modifikation von Bildern von Sternen aufgrund des Durchgangs von einem massiven Objekt
- MACHOS: $10^{-5} M_{\odot} < m < 10^2 M_{\odot}$
- Ergebnisse von EROS und MACHOS aus Beobachtung der Grossen Magellanschen Wolke:
 - einige Kandidaten mit $m = 0.5 \pm_{0.2}^{0.3} M_{\odot}$
- bis zu 50% des dunklen Halos könnte aus MACHOS bestehen
- Aus Abwesenheit sehr kurzer Ereignisse: Objekte mit $10^{-4} M_{\odot} < m < 0.03 M_{\odot}$ bilden weniger als 20% des Halos



Teilchen-Antiteilchen-Vernichtung

- Nachweis von Photonen und Neutrinos aus Teilchen-Antiteilchen-Vernichtung
- Akkumulation und Vernichtung von Dunkler Materie in Sternen (z.B. Kosmionen)
- hochenergetische Neutrinos (GeV-TeV) aus Photino-oder Sneutrino-Vernichtung in der **Sonne**: Z.B. aus Kamiokande Ausschlußgrenzen: Photino: $4 \text{ GeV} < m < 12 \text{ GeV}$, Sneutrino: $4 \text{ GeV} < m < 90 \text{ GeV}$
- Einfang von Dunkler Materie in der **Erde** und Vernichtung: Suche nach aufwärts fliegenden Myonen und Neutrinos aus Neutralino-Antineutralino-Vernichtung in der Erde
- Einschränkungen für einige SUSY-Modelle
- Teilchen Antiteilchen-Vernichtung innerhalb des **Halos**:
 $\delta\bar{\delta} \rightarrow q\bar{q} \rightarrow \pi^0 \rightarrow 2\gamma$ oder $\delta\bar{\delta} \rightarrow q\bar{q} \rightarrow \bar{p} + \dots$
- Beitrag zur Gammahintergrundstrahlung oder signifikanter Fluß von Antiprotonen oder Positronen
- Bisher noch keine Ergebnisse aus experimentellen Daten

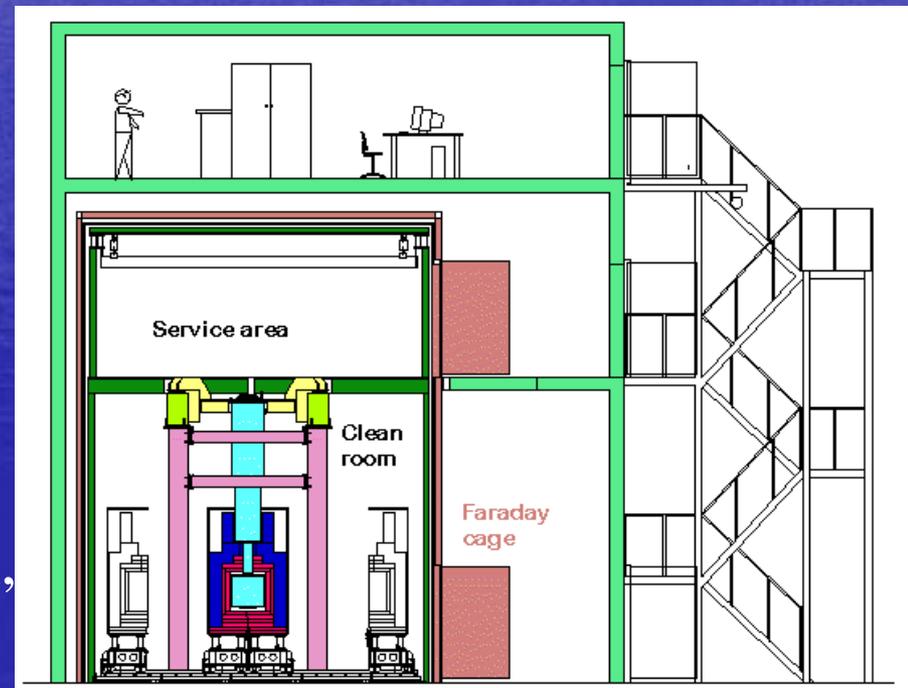
CRESST:

Cryogenic Rare Event Search with Superconducting Thermometers

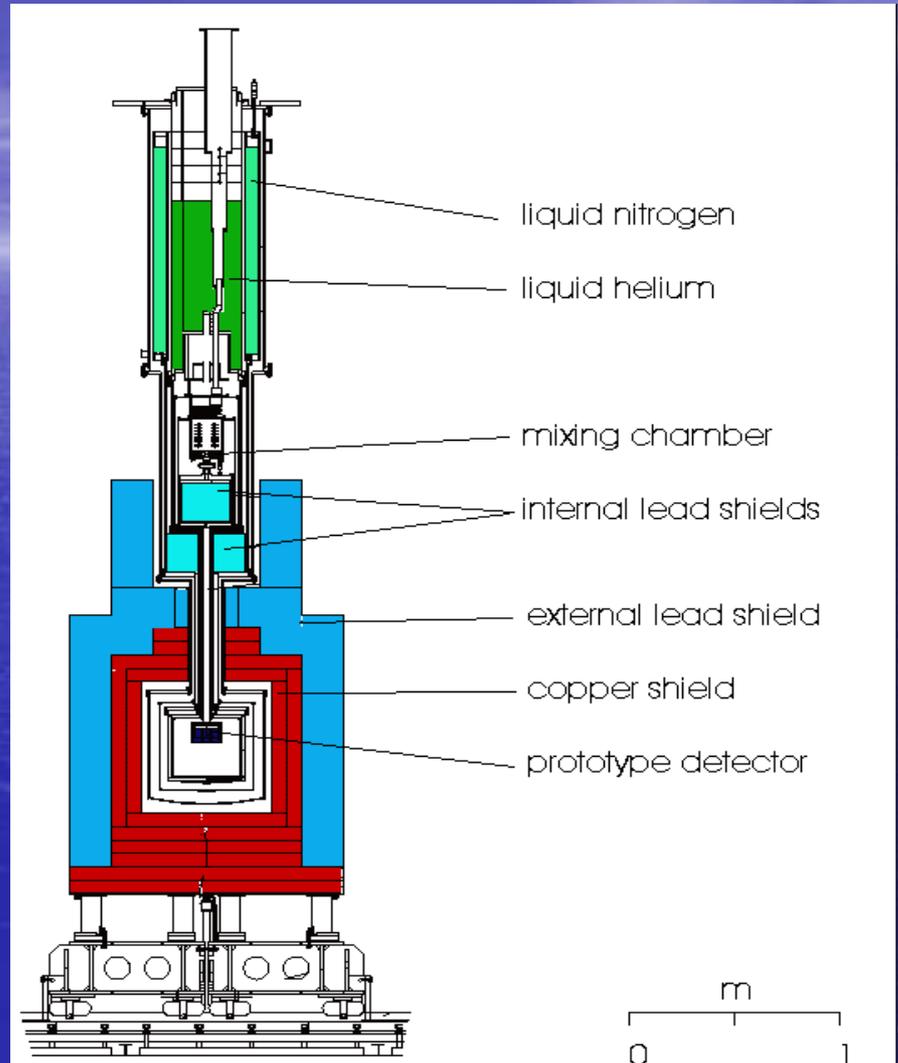
- Kryogener Detektor, der WIMPS im galaktischen Halo sucht
- Besonders sensitiv für WIMPS mit kleinen Massen und spinabhängigem Wirkungsquerschnitt
- Konnte bekannte Ausschlußgrenzen für kleine Massen erweitern

Aufbau des Experiments

- im Gran Sasso Untergrundlabor
3500 m.w.e.
- Kühlkammer aus wenig radioaktiven Material im Reinraum untergebracht
- Kryostat gelagert auf Luftpolstern, in einem Faradayschen Käfig

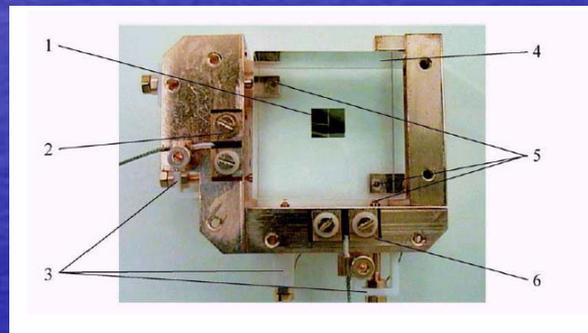
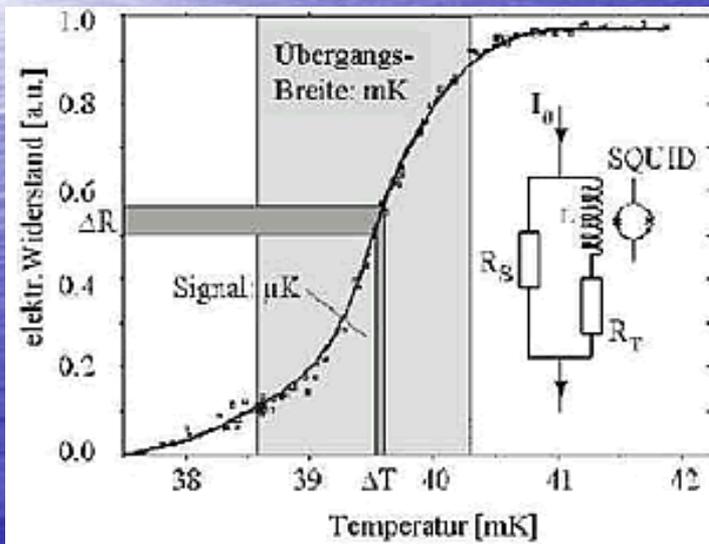


Kryostat



- Kalorimeter:
- 262g Saphir-Absorber (4 cm*4 cm*4cm)
 - Wolfram-Thermometer $T_C=15$ mK (3mm*5mm)
 - Energieauflösung 133 eV bei 1.5 keV
 - Energieschwelle einige 100 eV

wichtig: niedrige Wärmekapazitäten bei kleinen Temperaturen, damit niedrige Energieschwelle (auch sensitiv für kleine WIMP-Massen) und hohe Energieauflösung $\Delta T \sim \frac{E}{C_{\text{Thermometer}}}$



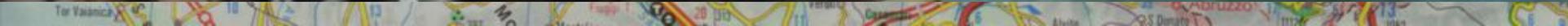
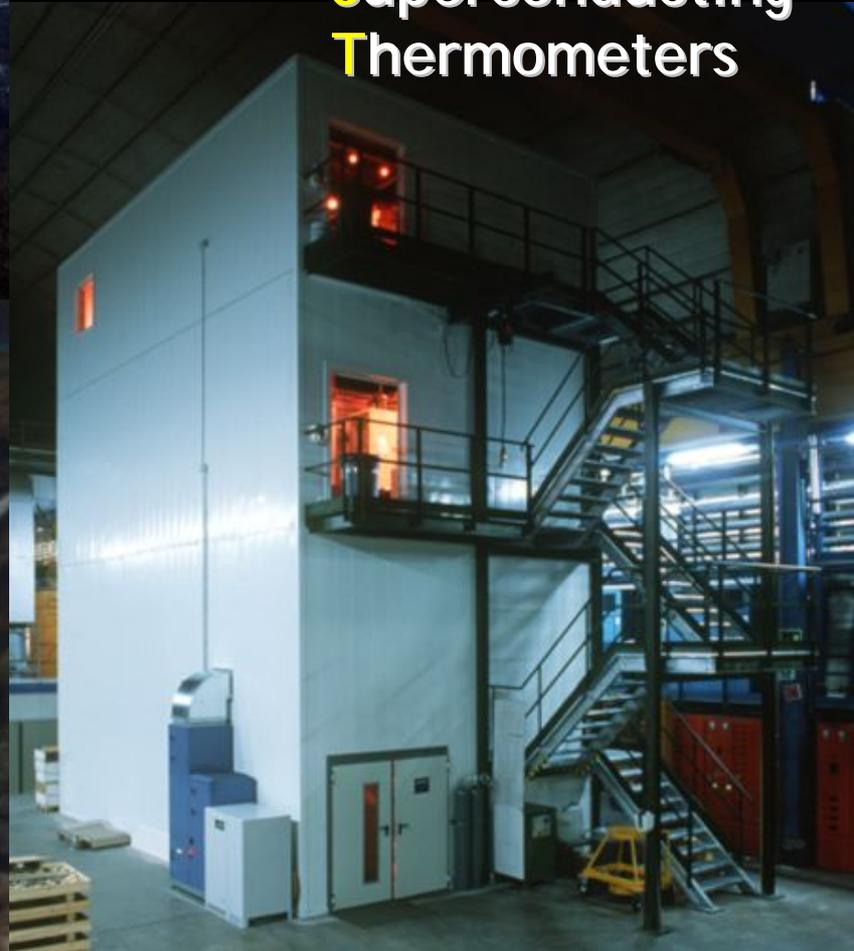
Kalibration: radioaktive Gammaquellen, alle 30 s Wärmepulse

Triggereffizienz: 100% bei $E > 580$ eV

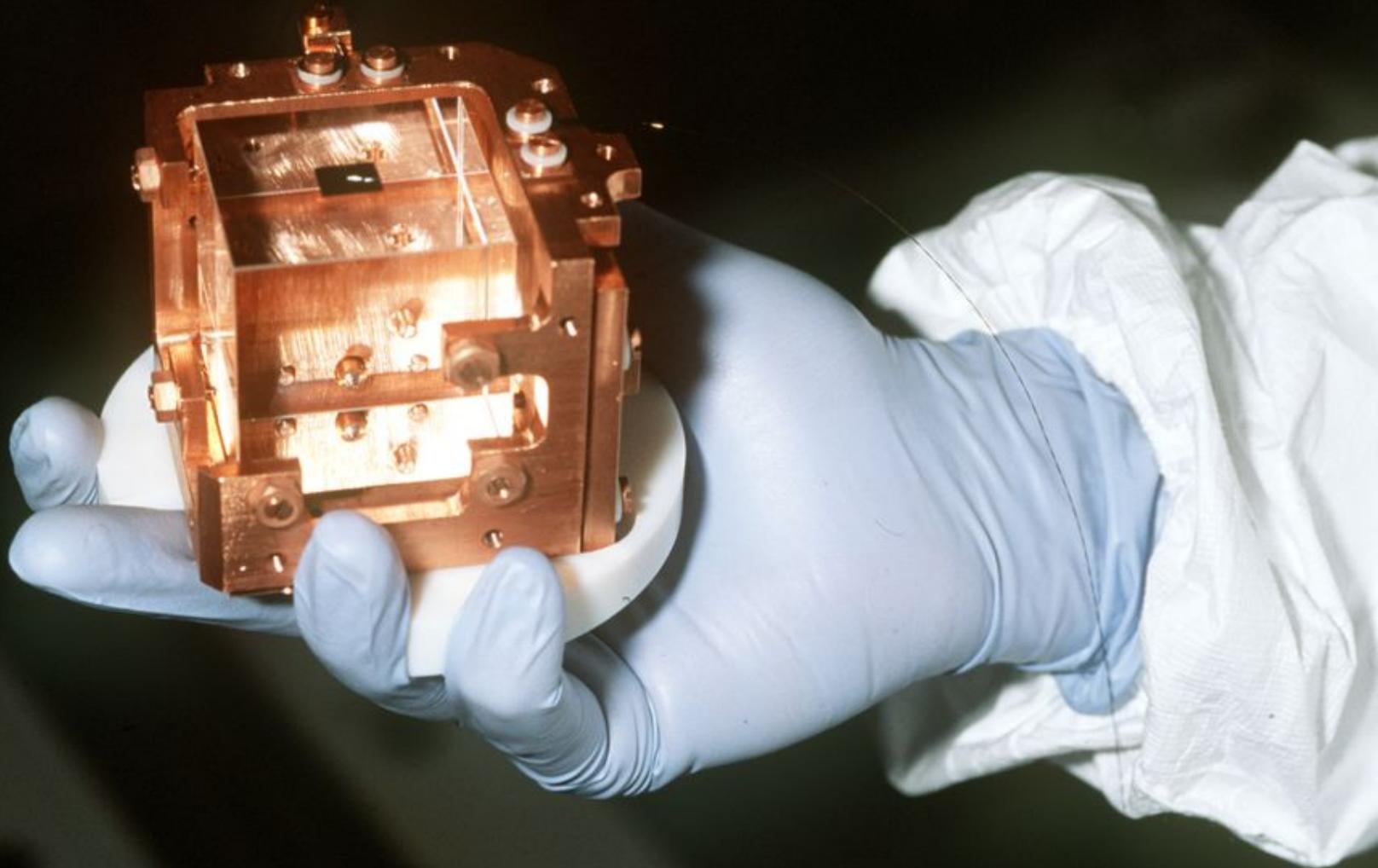
CRESST Experiment im Gran Sasso Labor



Cryogenic
Rare
Event
Search with
Superconducting
Thermometers

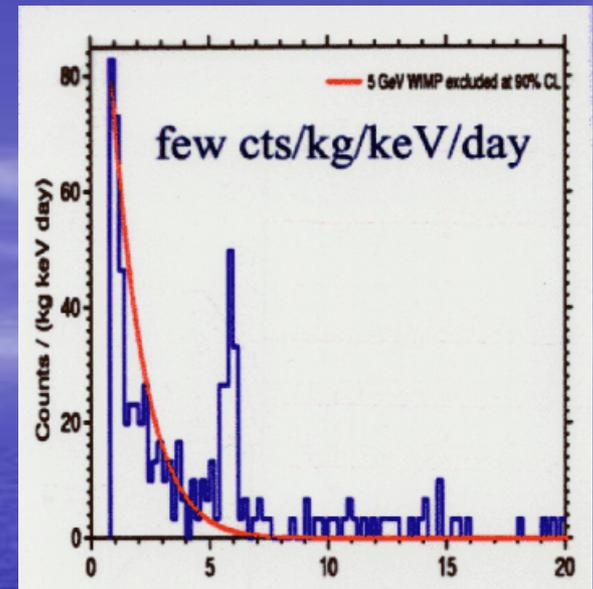


Einer der CRESST Detektor Kristalle

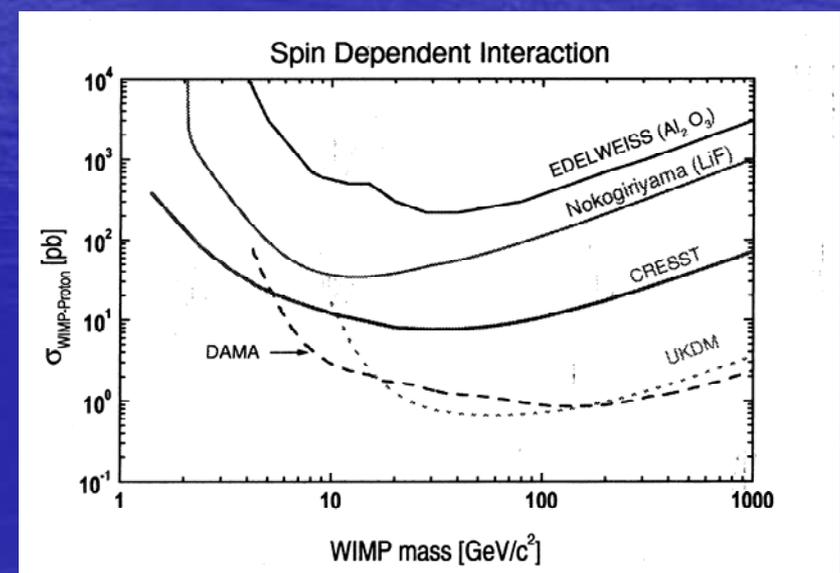
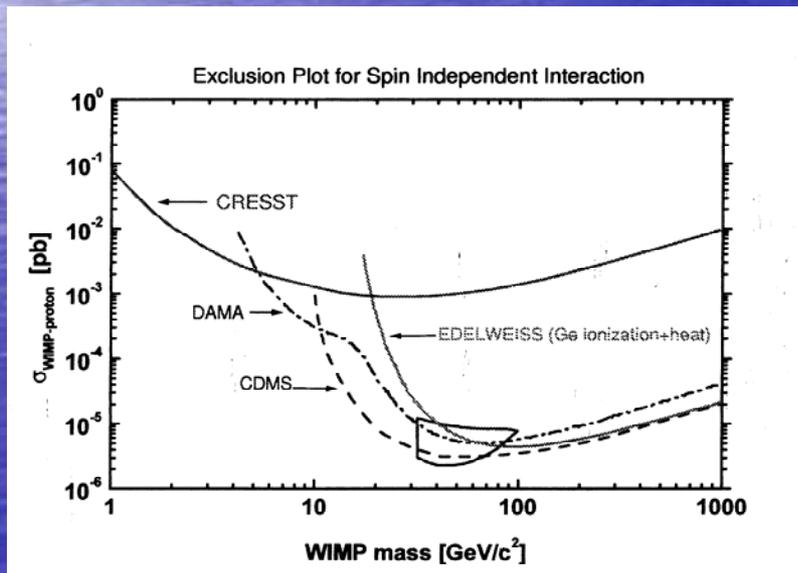


Ergebnisse von CRESST 1:

- nach Koinzidenz-Cut und Signalform-Cut: 320 Events (WIMPS + Untergrund)
- Peak bei 5.9 keV: Verunreinigung mit ^{55}Fe

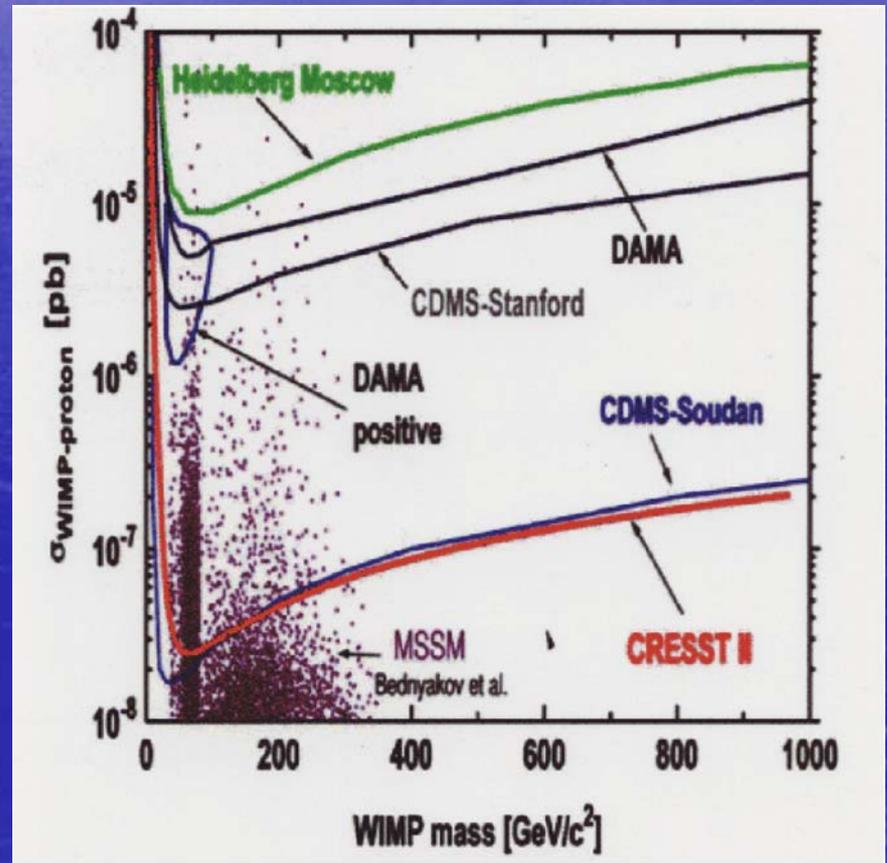


Ausschlussplots für spinunabhängige und spinabhängige Wechselwirkung



CRESST 2

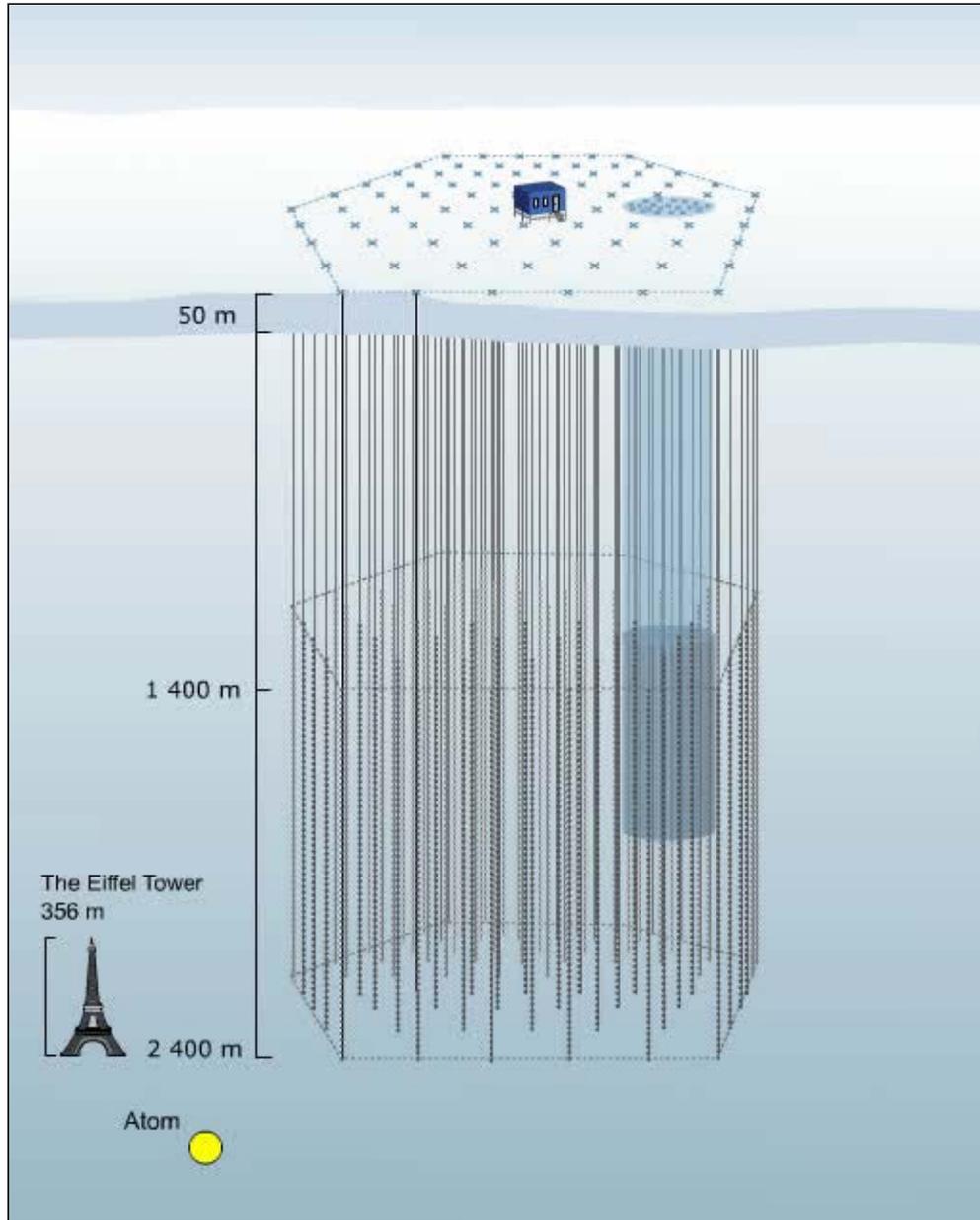
Einbau von szintillierenden Absorbern(CaWO_4) zur gleichzeitigen Detektion von Licht und Phononen zur Reduktion des Untergrunds.
Vergrößerung des Detektormaterials auf zunächst 10 kg



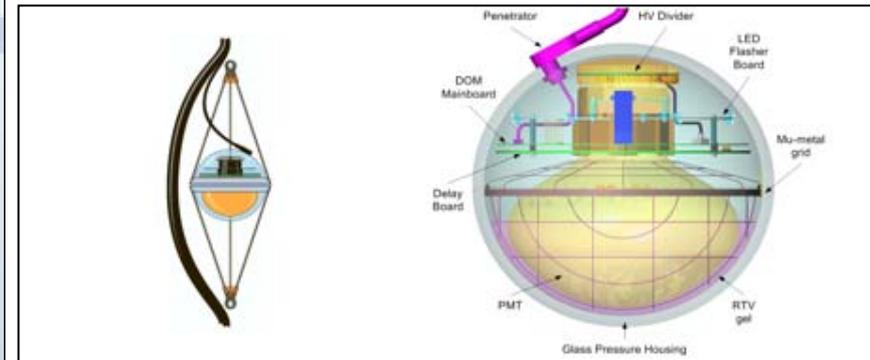
WIMP direct detection in underground facilities experiments currently running (or in preparation)

LABORATORY	EXPERIMENT	TECHNIQUE
Bern (Switzerland)	ORPHEUS	(SSD) Tin Superconducting Superheated Detector
Boulby (UK)	NAIAD ZEPLIN I ZEPLIN II DRIFT	NaI scintillators (46-65 Kg) Liquid Xe scintillator (4 Kg) Liquid-Gas Xe (scintillation/ionization) (30 Kg) (R+D) Low pressure Xe TPC 1m ³ (R+D)
Canfranc (Spain)	IGEX GEDEON ANAIS ROSEBUD	Ge ionization detector (2.1 Kg) Set of Ge ionization detector (in project) (4x7x2 Kg) NaI scintillators (110 kg) CaWO ₄ and BGO scintillating bolometers (50-200 g)
Frejus/Modane (France)	EDELWEISS	Sets of Ge thermal+ionization detectors (n x 320 g)
Gran Sasso (Italy)	H/M HDMS GENIUS-TF DAMA LIBRA Liquid-Xe CaF ₂ CRESST CUORICINO CUORE	Ge ionization detector (2.7 Kg) Ge ionization in Ge well Set of Ge crystals in LN ₂ (40 Kg) NaI scintillators (~100 Kg) NaI scintillators 250 kg (starting) Liquid Xe scintillator (6 Kg) Scintillator Set of CaWO ₄ scintillating bolometers (n x 300 g) Set of TeO ₂ thermal detector (41 Kg) 1000x760 g TeO ₂ (in project)
KAMIOKA (Japan)	XMASS	Large mass Xe scintillators (R+D)
Rustrel (France)	SIMPLE	(SDD) Superheated Droplets Detectors (Freon)
Soudan (USA)	CDMS	Sets of Ge and Si thermal + ionization detectors
SNO (Canada)	PICASSO	(SDD) Superheated Droplets Detectors (Freon)
OTO (Japan)	ELEGANTS V ELEGANTS VI	Large set of massive NaI scintillators (670 kg) CaF ₂ scintillators

Das IceCube Neutrino-Teleskop am Südpol



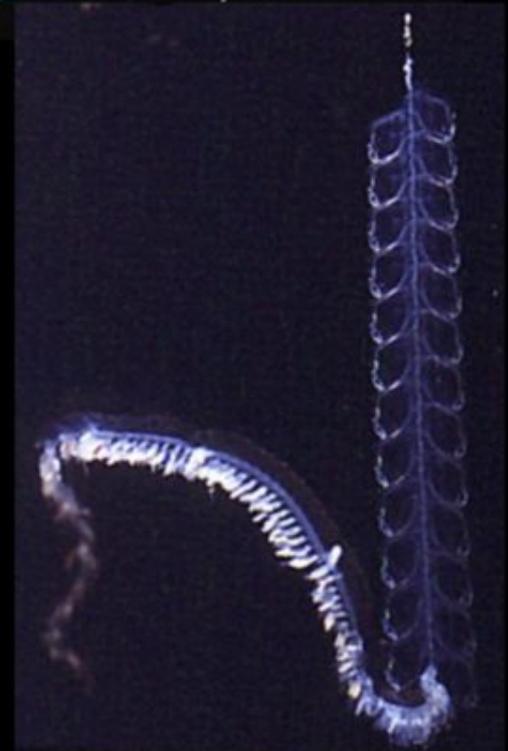
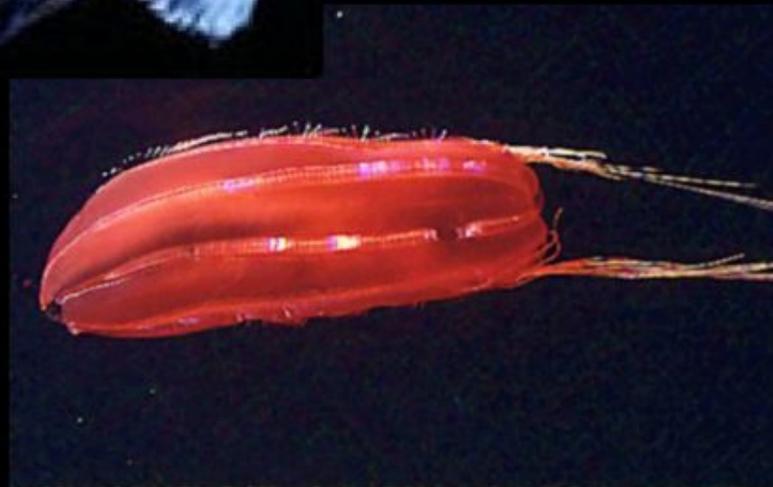
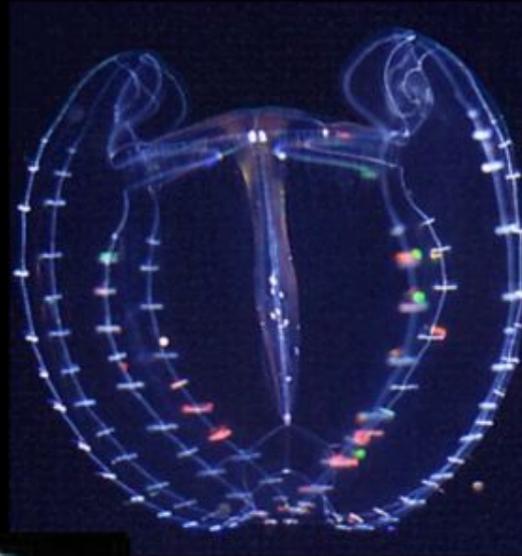
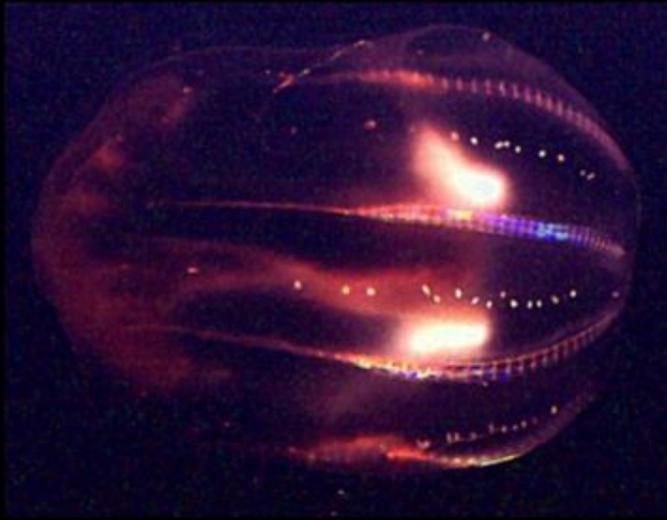
- 1 km³ antarktisches Eis mit Photosensoren instrumentiert
- 22 Trossen von 80 installiert (2007)
- Fertigstellung bis 2011 geplant



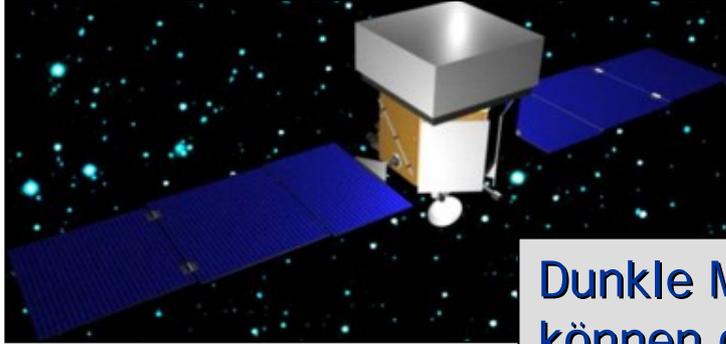
ANTARES - Neutrino teleskop im Mittelmeer



Leuchtende Lebewesen der Tiefsee



Kann man die dunkle Materie sehen?



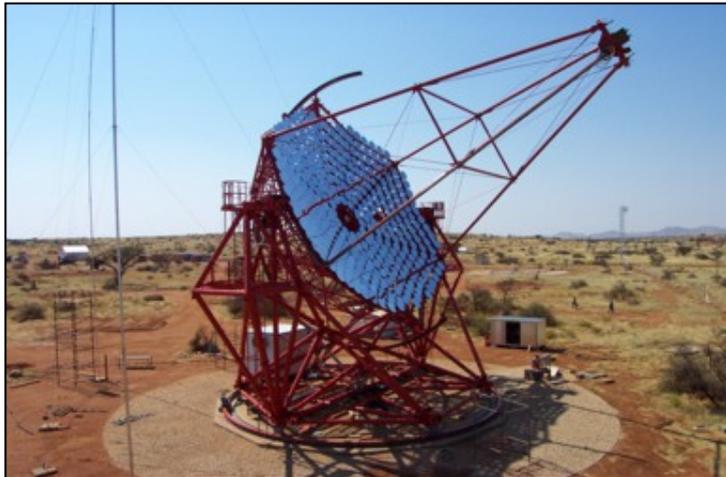
GLAST Satellit
(Start 2008)

Dunkle Materieteilchen
können direkt „zerstrahlen“

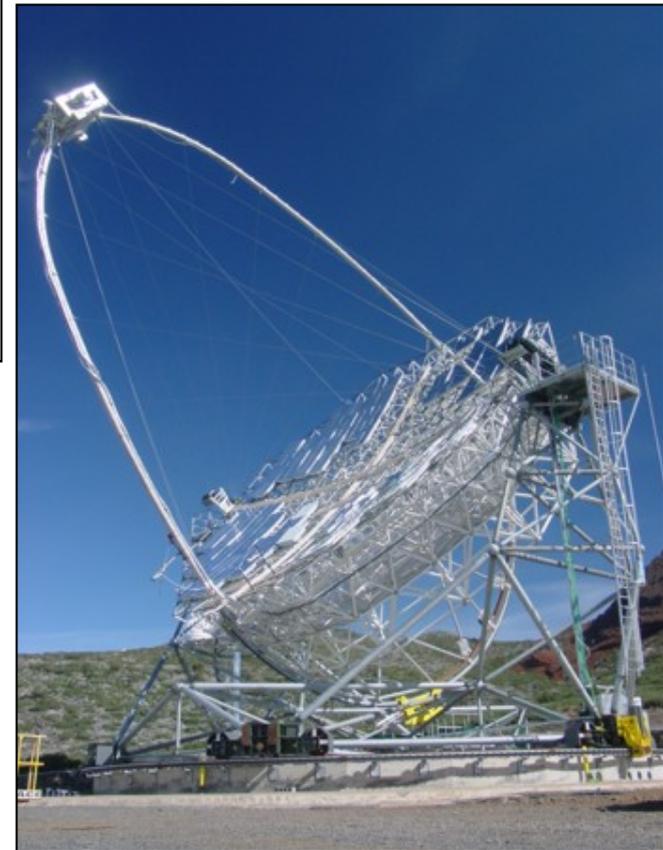
$$\chi\chi \rightarrow \gamma\gamma$$

Der dunkle Halo der Galaxie
könnte in hochenergetischer
Gamma-Strahlung schwach
leuchten

HESS Luftschauder
Teleskop, Namibia



MAGIC Luftschauder
Teleskop, La Palma



Some Dark Matter Candidates

Supersymmetric particles

- Neutralinos
- Axinos
- Gravitinos

Little Higgs models

Axions

Kaluza-Klein excitations

Mirror matter

Sterile neutrinos

Wimpzillas (superheavy particles)

MeV-mass dark matter

Q-balls

Primordial black holes

Gauge hierarchy problem

CP Problem of strong interactions

Large extra dimensions

Exact parity symmetry

Right-handed states should exist

Super GZK cosmic rays

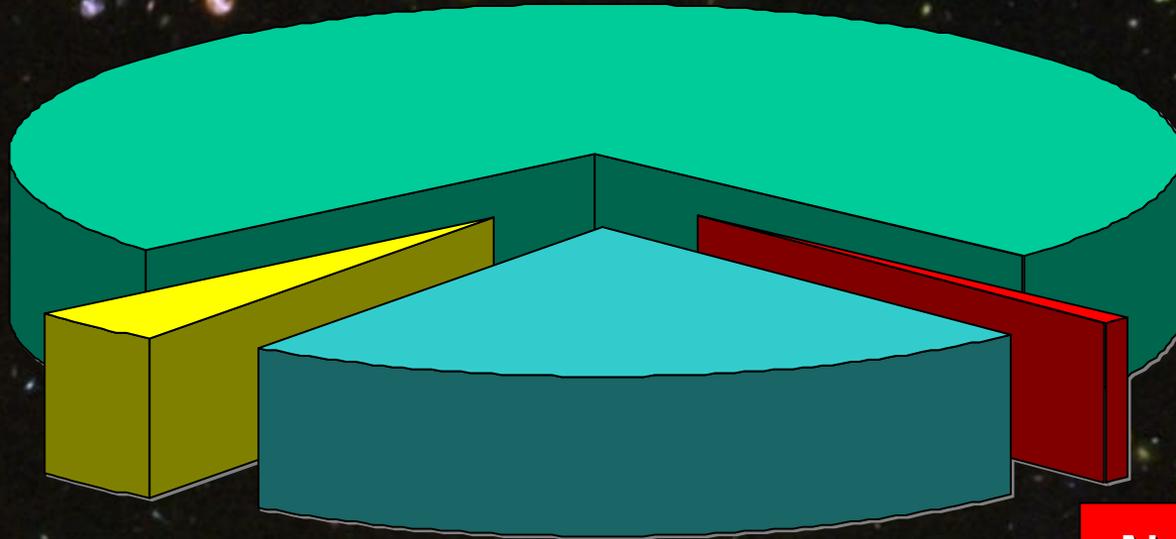
Explain cosmic-ray positrons

Why not ?

Zusammenfassung

- Starke Hinweise darauf, dass Dunkle Materie existiert und $\Omega = 1$ (Rotationskurven, Gravitationslinseneffekt, Strukturbildung...)
- Dunkle Materie könnte sich in etwa zusammensetzen aus:
 - baryonisch: 1% sichtbare Baryonen (Sterne,...)
 - 7% unsichtbare Baryonen (Braune Zwerge,...)
 - nicht-baryonisch: 20% heiße Dunkle Materie (leichte Neutrinos,...)
 - 72% kalte Dunkle Materie (LSP, ...)
- Kosmologische Konstante könnte Teil der Dunklen Materie ersetzen
- Experimente liefern Massengrenzen für WIMPS
- Einige wenige MACHOS beobachtet
- Aber: bisher Hauptbestandteil der Dunklen Materie noch nicht bekannt
- Damit: weitere Experimente zur Suche nach WIMPS (CRESST 2, LHC)

Dunkle Energie 73%
(Kosmologische Konstante)



Normale Materie 4%
(davon nur ca. 10%
leuchtend)

Dunkle
Materie 23%

Neutrinos
0.1–2%

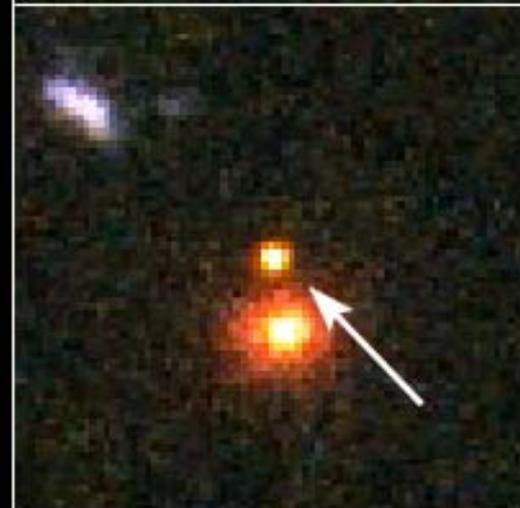
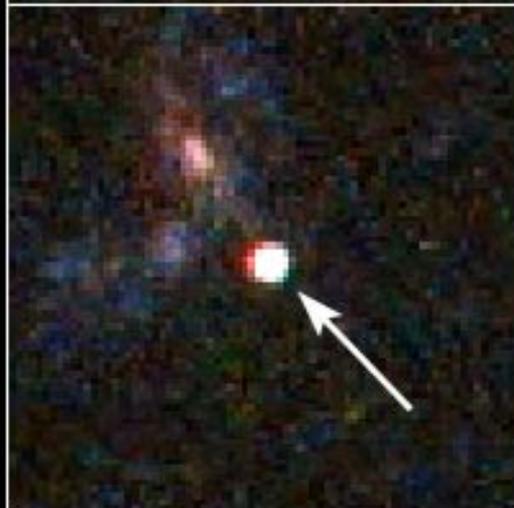
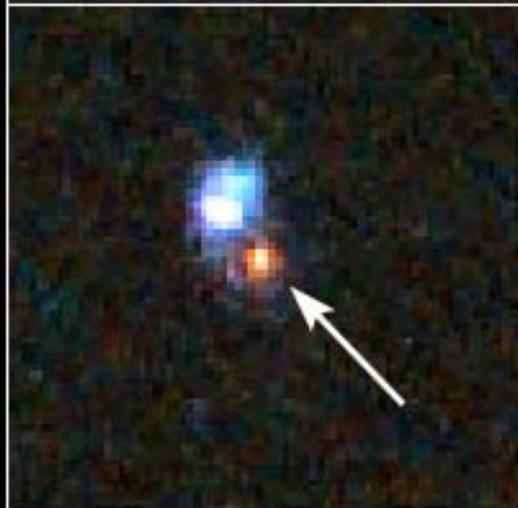
The background of the image is a vibrant cosmic scene. It features a dense field of purple and magenta nebulae, with intricate filamentary structures and bright spots of light. Interspersed among these are numerous galaxies, some appearing as bright, multi-colored points of light (yellow, orange, and blue) against the dark space. The overall effect is a rich, multi-layered representation of the universe's energy and matter.

Das Geheimnis der
Dunklen Energie

Supernovae Ia

Distant Supernovae

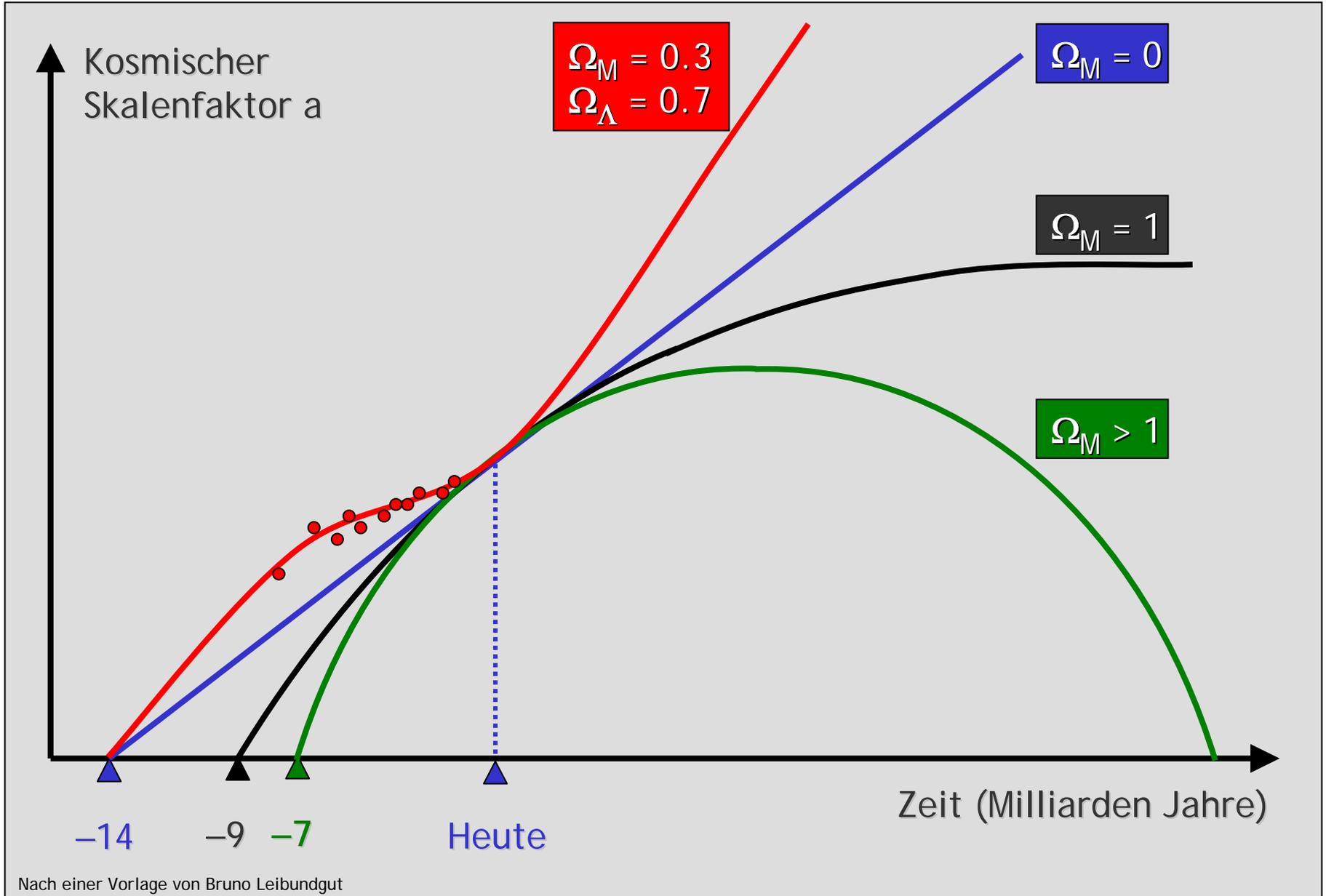
Hubble Space Telescope - ACS



NASA and A. Riess (STScI)

STScI-PRC04-12

Expansion verschiedener kosmologischer Modelle

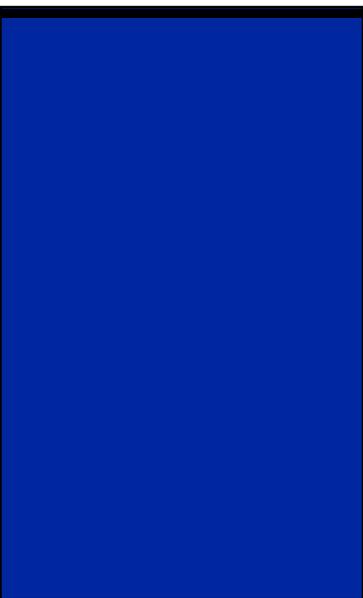


Cosmic Coincidence



Is this mysterious dark energy the original cosmological constant Λ , a quantum zeropoint sea?

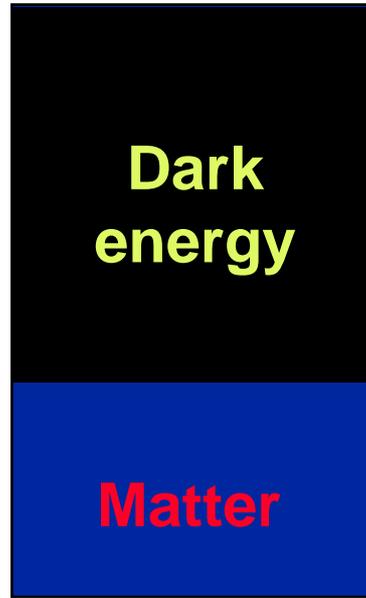
Think of the energy in Λ as the level of the quantum “sea”.
At most times in history, matter is either drowned or dry.



Size=1/4



Size=1/2



Today



Size=2

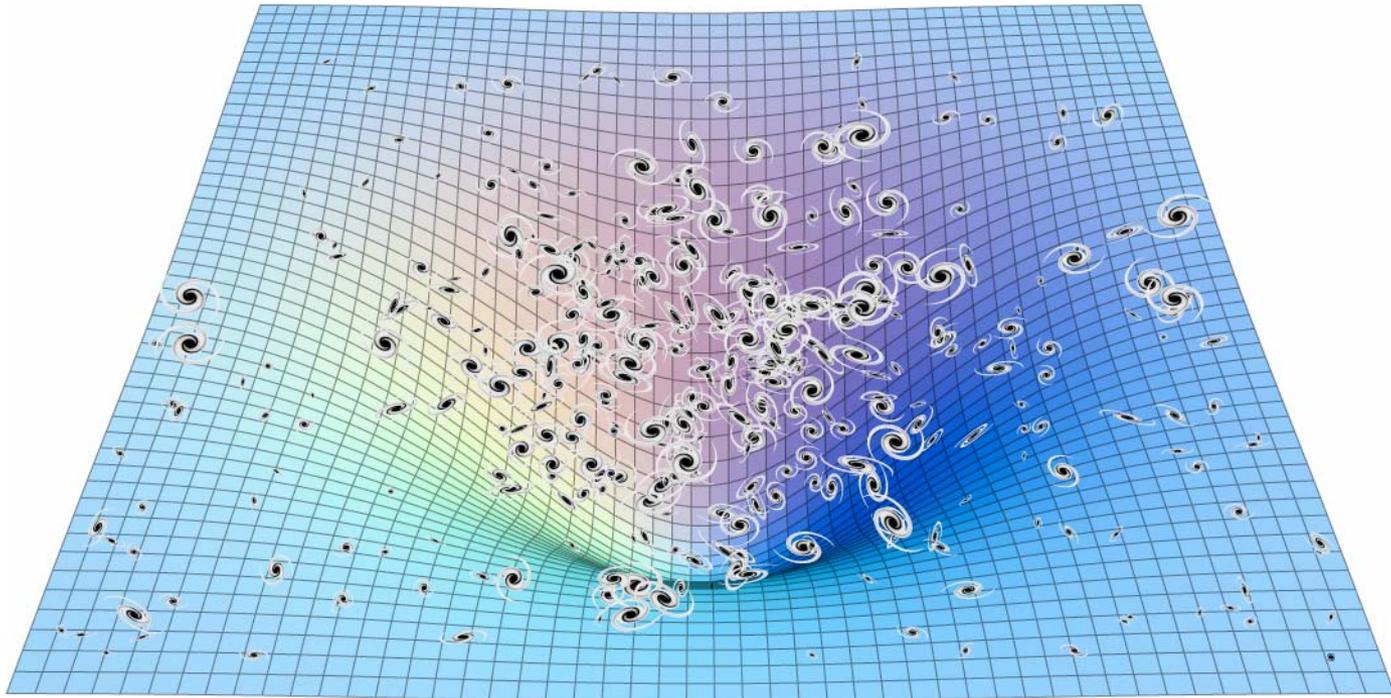


Size=4

Dark Energy

The influence of dark energy on the cosmic expansion *slows* the growth of inhomogeneities in the dark matter and baryons.

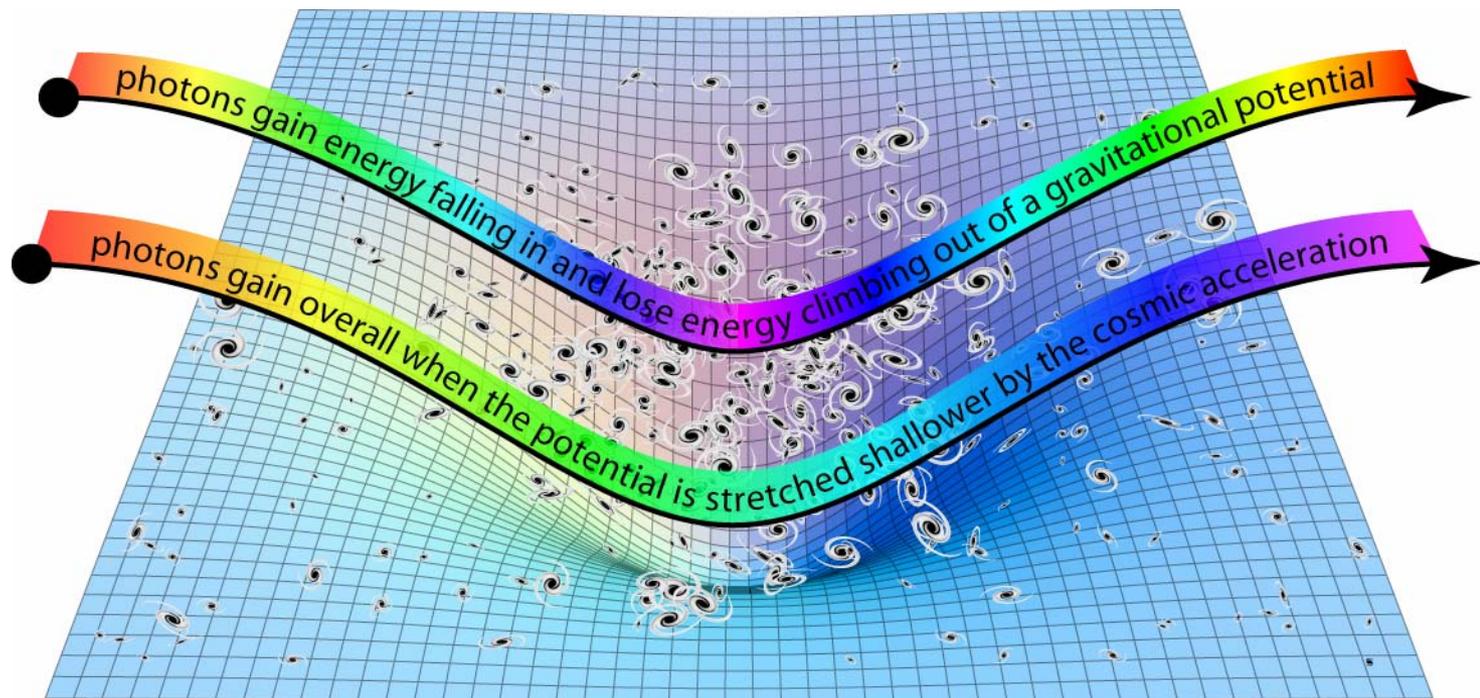
$$\ddot{\delta}_m + 2H\dot{\delta}_m = \frac{3}{2}H^2\Omega_m(t)\delta_m$$



Dark Energy

The influence of dark energy on the cosmic expansion leads to the *integrated Sachs-Wolfe* effect in the cosmic microwave background

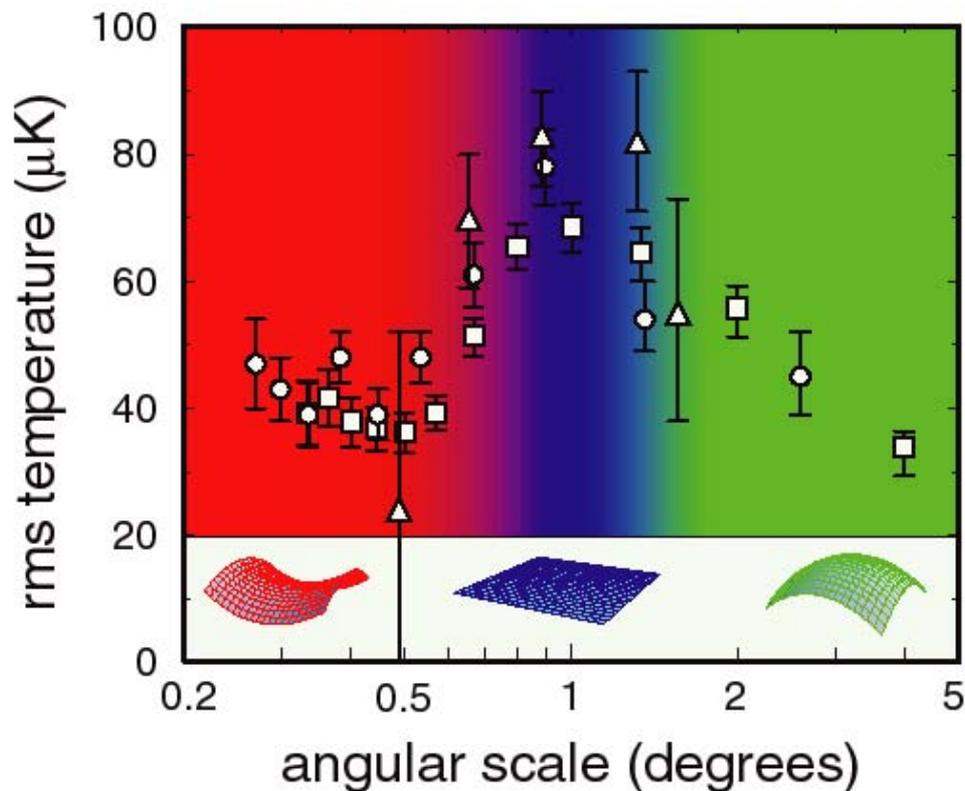
$$\ddot{\phi} + 4H\dot{\phi} + (\dot{H} + 3H^2)\phi = \frac{3}{2}H^2\Omega_m(t)\phi$$



Dark Energy

The influence of dark energy on the cosmic expansion modifies the distance to the CMB last scattering surface

$$r(a) = \sin \left(\sqrt{k} \int_a^{a_0} \frac{da'}{a'^2 H(a')} \right) / \sqrt{k}$$

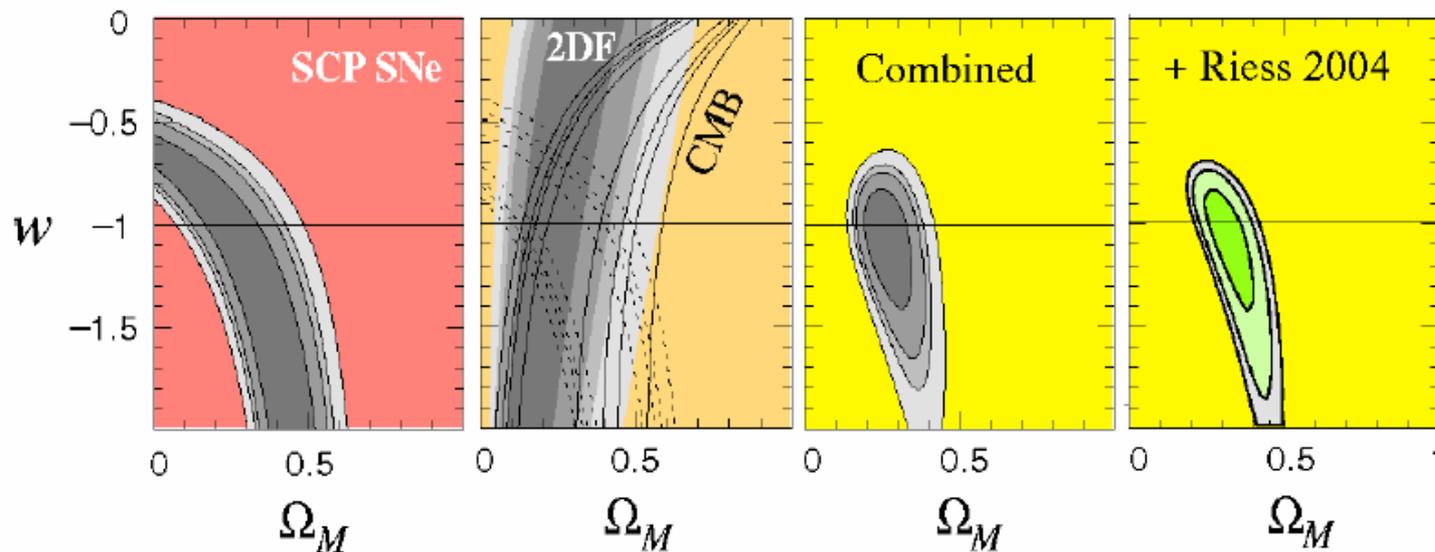


Dark Energy

evaluate classical tests of cosmology to constrain “w”

$$P(\theta_i | m_n) \propto \exp\left(-\frac{1}{2}\chi^2[\theta_i | m_n]\right)$$

$$\chi^2[\theta_i | m_n] = \sum_n \left(\frac{5 \log_{10} d_L(\theta_i, z_n) + M - m_n^{obs}}{\sigma(m)_n} \right)^2$$



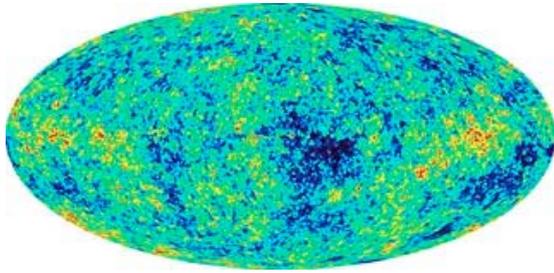
We need to explore further frontiers in high energy physics, gravitation, and cosmology.

New quantum physics? Does nothing weigh something?
Einstein's cosmological constant, Quintessence, M/String theory

New gravitational physics? Is nowhere somewhere?
Quantum gravity, supergravity, extra dimensions?

We need new, highly precise data

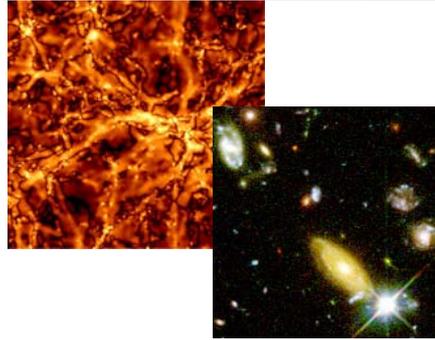
Cosmic Archaeology



CMB: direct probe of quantum fluctuations

Time: 0.003% of the present age of the universe.

(When you were 0.003% of your present age, you were 2 cells big!)



Cosmic matter structures: less direct probes of expansion

Pattern of ripples, clumping in space, growing in time.

3D survey of galaxies and clusters - Lensing.



Supernovae: direct probe of cosmic expansion

Time: 30-100% of present age of universe

(When you were 12-40 years old)

Standard Candles



Brightness tells us distance away (lookback time)

Redshift measured tells us expansion factor (average distance between galaxies)

Astrophysical Uncertainties



For accurate and precision cosmology,
need to identify and control systematic uncertainties.

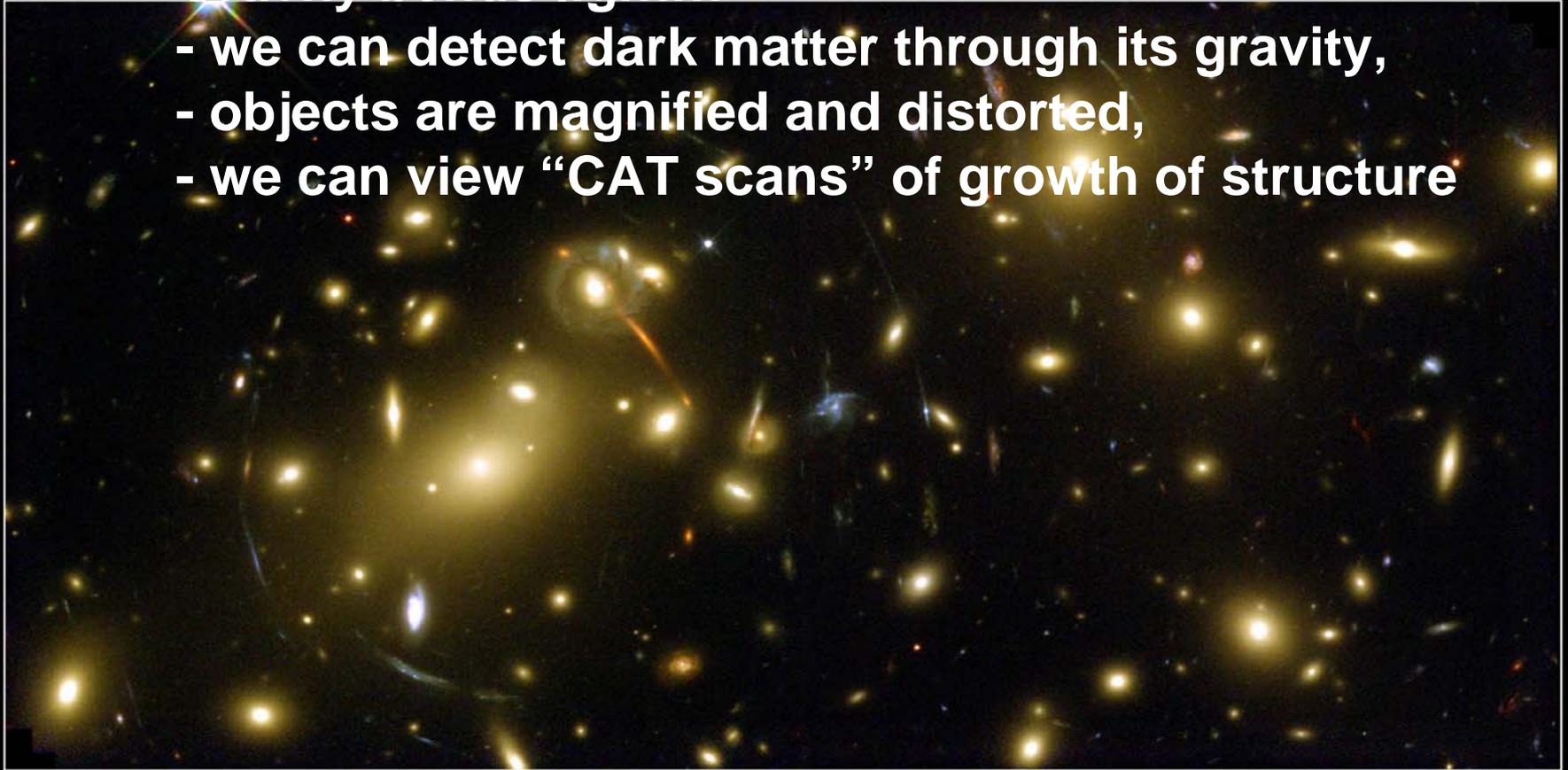
Systematic	Control
Host-galaxy dust extinction	Wavelength-dependent absorption identified with <i>high S/N multi-band photometry</i> .
Supernova evolution	Supernova subclassified with <i>high S/N light curves and peak-brightness spectrum</i> .
Flux calibration error	<i>Program to construct a set of 1% error flux standard stars.</i>
Malmquist bias	Supernova discovered early with <i>high S/N multi-band photometry</i> .
K-correction	Construction of a <i>library of supernova spectra</i> .
Gravitational lensing	Measure the average flux for a <i>large number of supernovae in each redshift bin</i> .
Non-Type Ia contamination	Classification of each event with a <i>peak-brightness spectrum</i> .

Gravitational Lensing



Gravity bends light...

- we can detect dark matter through its gravity,
- objects are magnified and distorted,
- we can view “CAT scans” of growth of structure



Galaxy Cluster Abell 2218
Hubble Space Telescope • WFPC2

Gravitational Lensing



Lensing measures the mass of clusters of galaxies.

By looking at lensing of sources at different distances (times), we measure the **growth of mass**.

Clusters grow by swallowing more and more galaxies, more mass.

Acceleration - *stretching space* - **shuts off growth**, by keeping galaxies apart.

So by measuring the growth history, lensing can detect the level of acceleration, the amount of **dark energy**.

Dark Energy

There are numerous other proposed models of dark energy.



Artistic view of a universe filled by a turbulent sea of dark energy

Dunkle Energie



- Lambda-Term, kosmologische Konstante (Einstein), beeinflusst die Dynamik des Kosmos (0,1,-1); negativer Wert bedeutet kosmische Anziehung, positiver Wert heißt Dunkle Energie; bei verschiedenem Lambda wird die Dynamik des Kosmos nur durch die darin enthaltene Materie bestimmt; Universen mit nichtverschwindendem Lambda sind Bestandteil der so genannten Lambda-Kosmologie; wird zur Zeit bevorzugt!!!!

Neue Supernovadaten geben noch strengere Auflagen für die Dunkle Energie: sie muß schon vor neun Milliarden Jahren konstant gewesen sein. Damit erscheinen die zeitlich veränderlichen Formen Dunkler Energie nicht bevorzugt.

Alle drei unabhängigen Messmethoden liefern übereinstimmende Ergebnisse und ermöglichen zusammengekommen eine sehr genaue Messung der kosmologischen Parameter.

Energiedichte des Quantenvakuums könnte sich in Form einer kosmologischen Konstanten manifestieren. Aber!!! Zwischen Theorie und Experiment liegt ein gigantischer Unterschied von etwa 120 Größenordnungen

Dunkle Energie



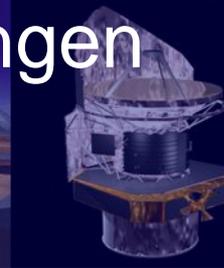
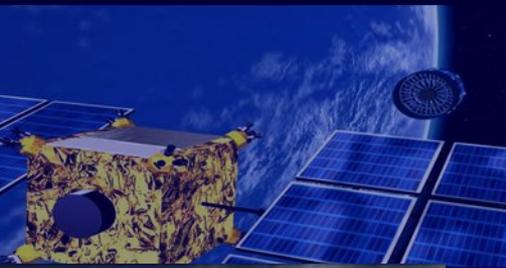
- Quintessenzen: zeitabhängig Dunkle Energie; kann besser an die Beobachtungen angepasst werden; w -Parameter (Druck/Energiedichte) kann andere Werte als -1 annehmen; typische Quintessenz-Modelle liefern einen Wert von $w = -1/3$
- Topologische Defekte: w -Parameter von $-2/3$; Fehlstellen, Relikte einer vorangegangenen, spontanen Symmetriebrechung
- Phantom-Energie: w -Parameter kleiner als -1 ; Big Rip. Totaler Zerriss von allem, was sich darin befindet – von der makroskopischen bis zur subatomaren Skala. Wann sich das ereignen würde, hängt vom genauen Zahlenwert des w -Parameters ab. Bei $w = -1.2$ bleiben noch ca. 50 Milliarden Jahre. Damit wäre aber Produktion ultrahochenergetischer Teilchen verbunden, die nicht in der kosmischen Strahlung beobachtet wurden

Dunkle Energie



- Chaplygin-Gas: exotische Flüssigkeit mit einer sehr ungewöhnlichen Zustandsgleichung, Verwandlungskünstler, kann als Staub, Dunkle Materie oder Dunkle Energie in Erscheinung treten; mysteriöse Zustandsgleichung
- Ohne Dunkle Energie: simpelste Lösung. Kosmische Expansion

Multifrequenz-Beobachtungen in der Astronomie Wintersemester 2007/8



Themen & Daten

- 19.10.: Überblick
- 02.11.: Erste Ergebnisse der Durchmusterungen
- 16.11.: Hochenergie-Astronomie
- 30.11.: Update: Neue Teleskope
- 14.12.: Dunkles (Materie & Energie)
-

2008

- 11.01: Fortsetzung: Dunkles (Materie & Energie)
- **25.01.: Gravitationswellen & mehr**
- 08.02.: GPS & die Erde