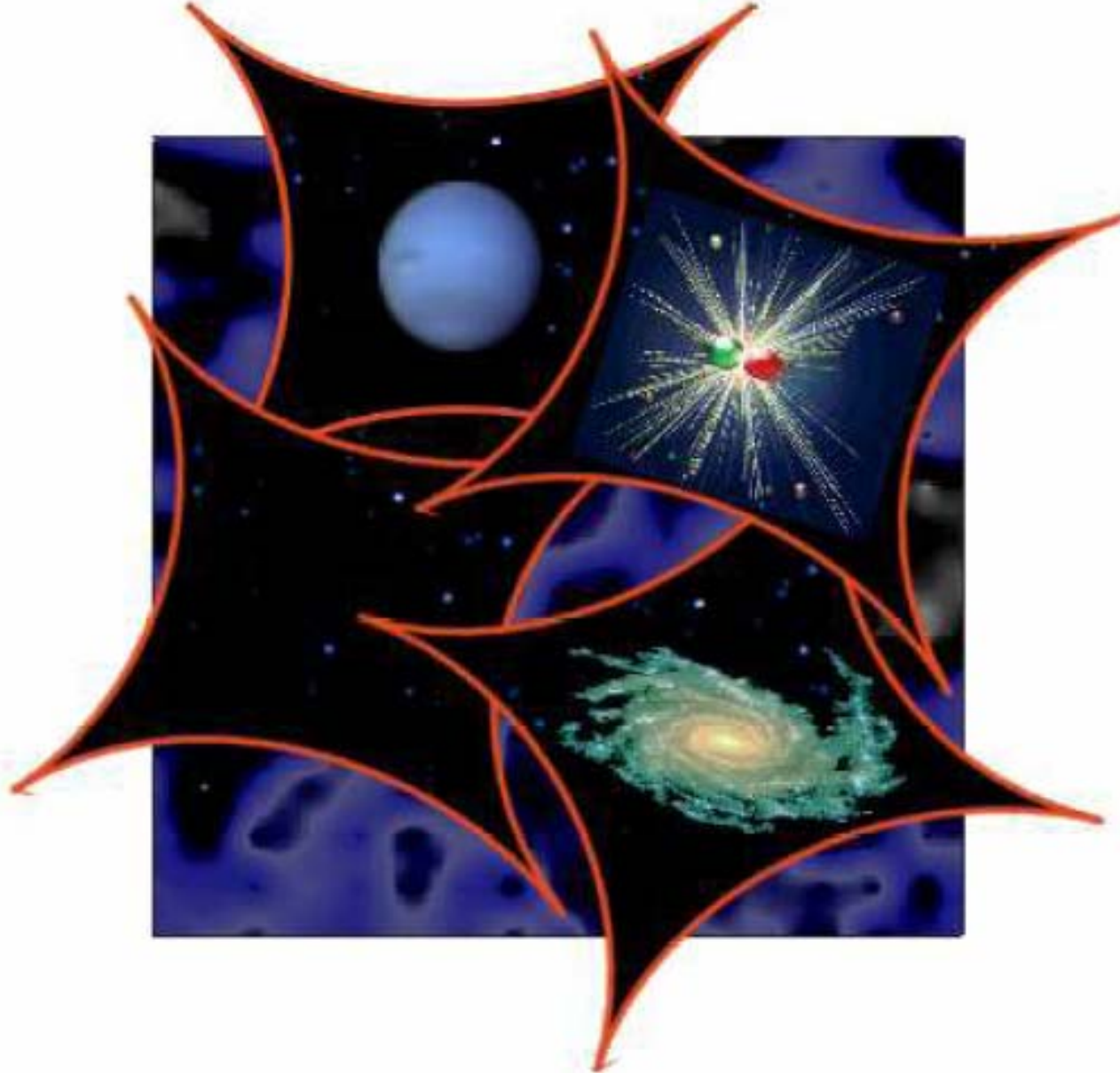




Dunkle Rätsel im Universum

Weitere Informationen zum Thema

<http://www.astroteilchenphysik.de/topics/dm/dm.htm>

- ▶ **Gamma-Astro**
- ▶ Kosmische Strahlung
- ▶ Neutrinos
- ▶ Dunkle Materie
- ▶ Termine

Astroteilchenphysik

Gamma-
Astronomie



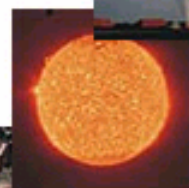
Kosmische
Strahlung



Dunkle
Materie



Neutrinos



Um die Struktur und Entstehung der Materie in den Anfängen des Universums aufzuklären, erleben Astronomie und Elementarteilchenphysik gegenwärtig in der Astroteilchenphysik eine stürmische Phase der Annäherung. Auf diesen Internet-Seiten möchten wir Ihnen die deutschen Beiträge zur Astroteilchenphysik vorstellen.

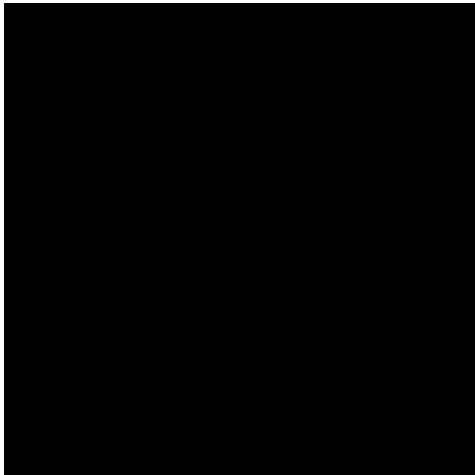
Die Experimente befinden sich zum Teil an entlegenen Plätzen wie dem Südpol, der argentinischen Steppe oder dem Südwesten Afrikas. Andere in tiefen Tunneln oder auf hohen vulkanischen Gipfeln. Vielleicht sind Sie als

JournalistIn oder auch als SchülerIn an den Neuigkeiten dieser Forschung interessiert oder einfach nur daran, wie man sich an solchen Standorten mit den Anfängen des Universums beschäftigen kann.

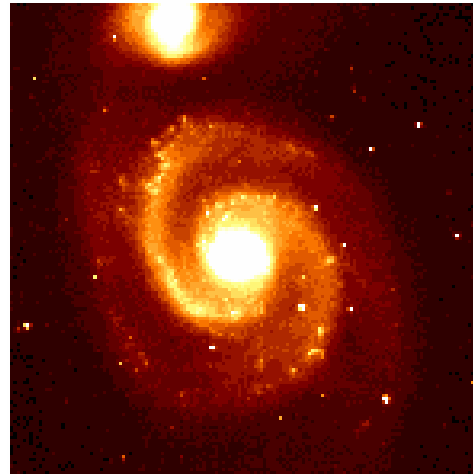
Wir hoffen, Ihnen hier einige nützliche Informationen anzubieten.

Für Fragen an die Forscher oder für Kommentare zu dieser Website haben wir **Eingabemöglichkeiten** eingerichtet.

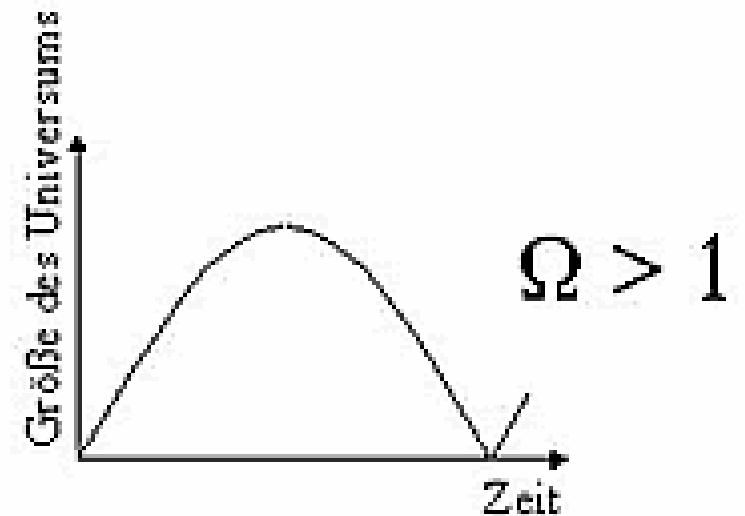
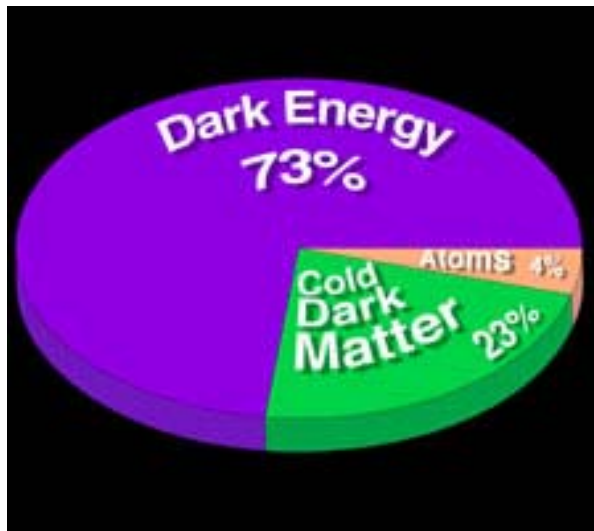
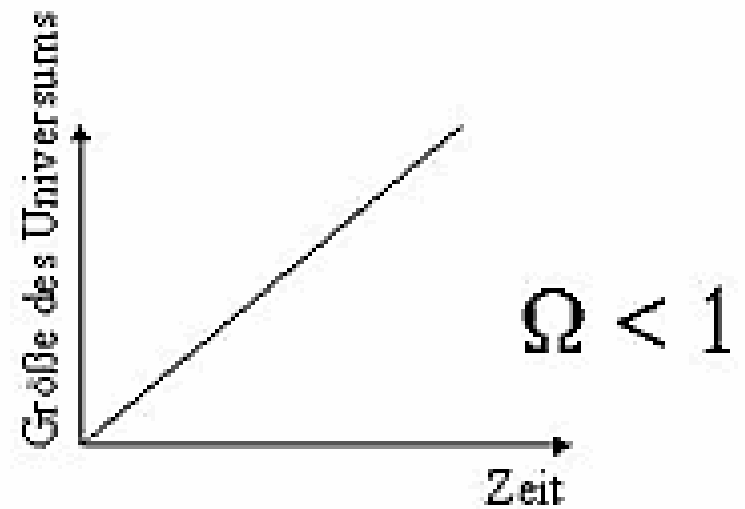
Das Problem, das man nicht sieht ...



Dunkle Materie



Keine Dunkle Materie



Übersicht

- Warum Dunkle Materie? Notwendigkeit aus astronomischen Beobachtungen
- Was sind die Kandidaten für die „Dunkle Materie“?
- Alternativen zur Dunklen Materie
- Astronomie & Teilchenphysik: WIMPs und Neutralinos
- Teilchen-Experimente
- Warum Dunkle Energie?
- Ketzerei Teil II: Alternativen

The background of the slide features a cosmic scene. A large, bright, yellowish-white starburst or galaxy core is positioned in the upper right. Below it, a spiral galaxy with a yellowish core and greenish-blue arms is visible. The background is a deep blue with scattered white stars. Overlaid on this is a large, dark, star-shaped pattern with eight points, outlined in a reddish-orange color. The text "Hinweise auf Dunkle Materie" is centered over the image in a large, black, sans-serif font.

Hinweise auf Dunkle Materie

Modell mit Inflation und kosmologischer Konstante

Raumkrümmung flacher Raum $k = 0$, Kritische Dichte $\varrho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G}$ Massendichte ϱ_{total}

Hubble-Konstante mit $H_0 \approx 71 \frac{\text{km/s}}{\text{Mpc}}$ folgt $\varrho_{\text{total}} = 9.2 \cdot 10^{-30} \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$

$$\Omega_{\text{total}} = \frac{\varrho_{\text{total}}}{\varrho_c} = 1$$

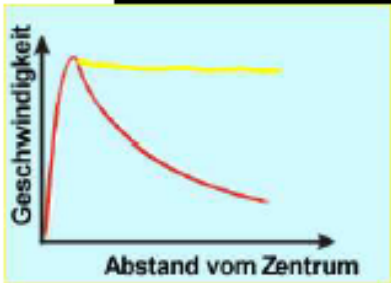
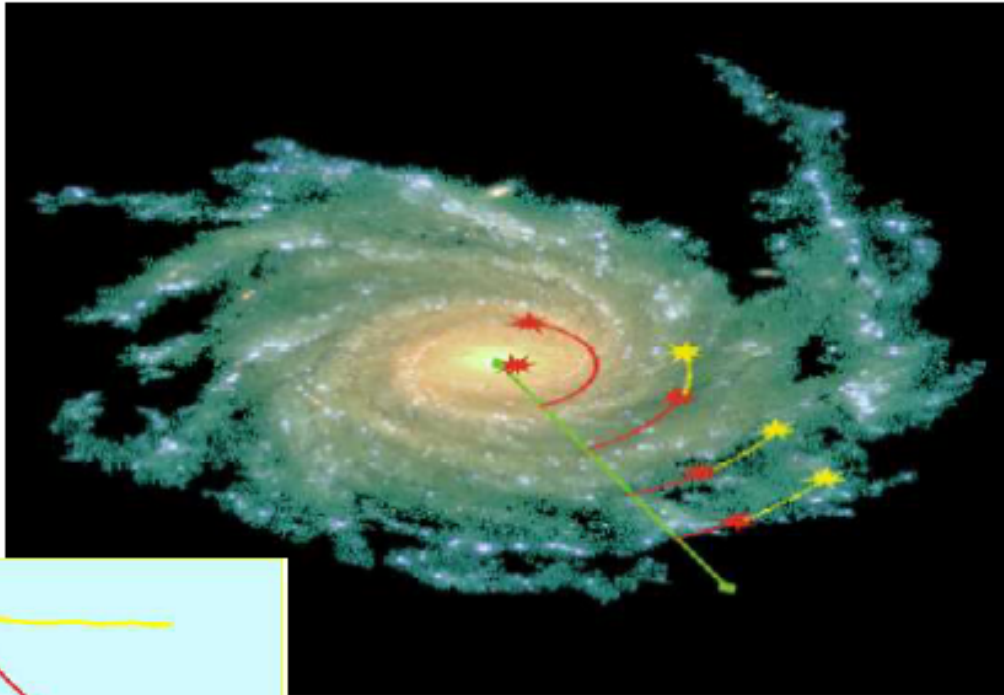
$$\Omega_{\text{baryon}} = \frac{\varrho_{\text{baryon}}}{\varrho_c} = 0.04, \quad \varrho_{\text{baryon}} = 3.7 \cdot 10^{-31} \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$\Omega_{\text{CDM}} = \frac{\varrho_{\text{CDM}}}{\varrho_c} = 0.23$$

$$\Omega_{\Lambda} = \frac{\varrho_{\Lambda}}{\varrho_c} = 0.73$$

DAS IST ES !

Dunkle Materie / Galaktische Dynamik



- 1932: Oort berichtet über eine „Dunkle Scheibe“ und beschreibt damit erstmals die „Dunkle Materie“ (Sternzählungen)
- 1933: Zwicky „Problem der fehlenden Masse“
- 1972: Sandage
- B.H. Margon: „Its a fairly embarrassing situation to admit that we can't find 90 % of the universe.“

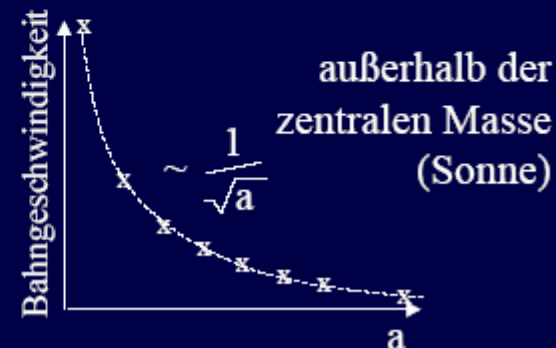
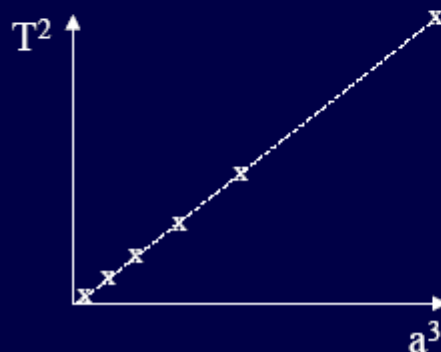
- Und sie dreht sich doch – zu schnell!
- Sterne müßten in Randbereichen wie mit Steinschleuder in den intergalaktischen Raum fortgeschleudert werden
- Unbeobachtete Mass in sphärischem (kugelförmigen) Halo

Dunkle Materie / Galaktische Dynamik

3. Kepler'sches Gesetz

Zusammenhang zwischen
Umlaufzeit T
und Bahnradius a
der Planeten im Sonnensystem

$$T^2 \sim a^3$$

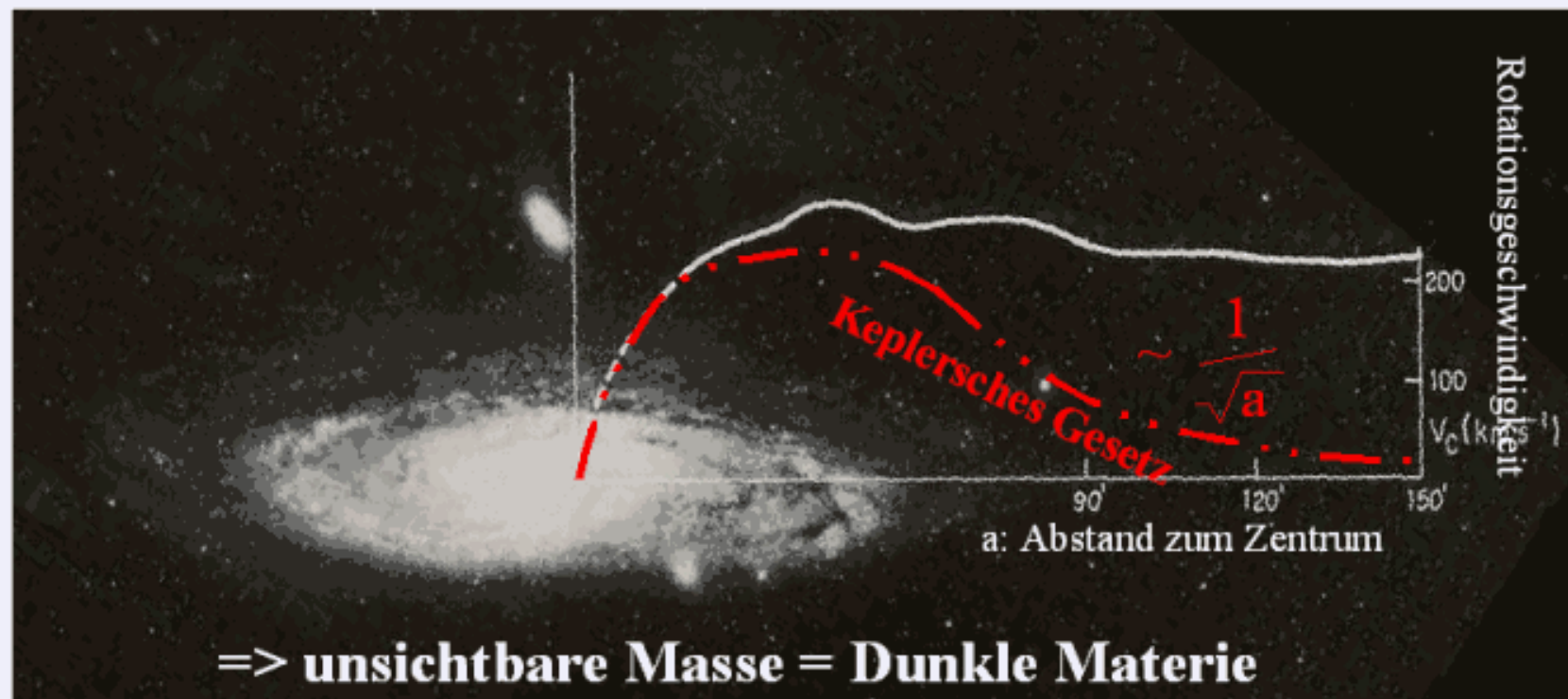


- Beobachtungen und Analysen der Planetenbahnen durch Brahe und Kepler ermöglichten Newton die Formulierung des Gravitationsgesetzes in der „Philosophiae Naturalis Principia Mathematica“ von 1687.

Dunkle Materie im Universum

Aus Messungen der 21 cm Wasserstoffgas-Strahlung

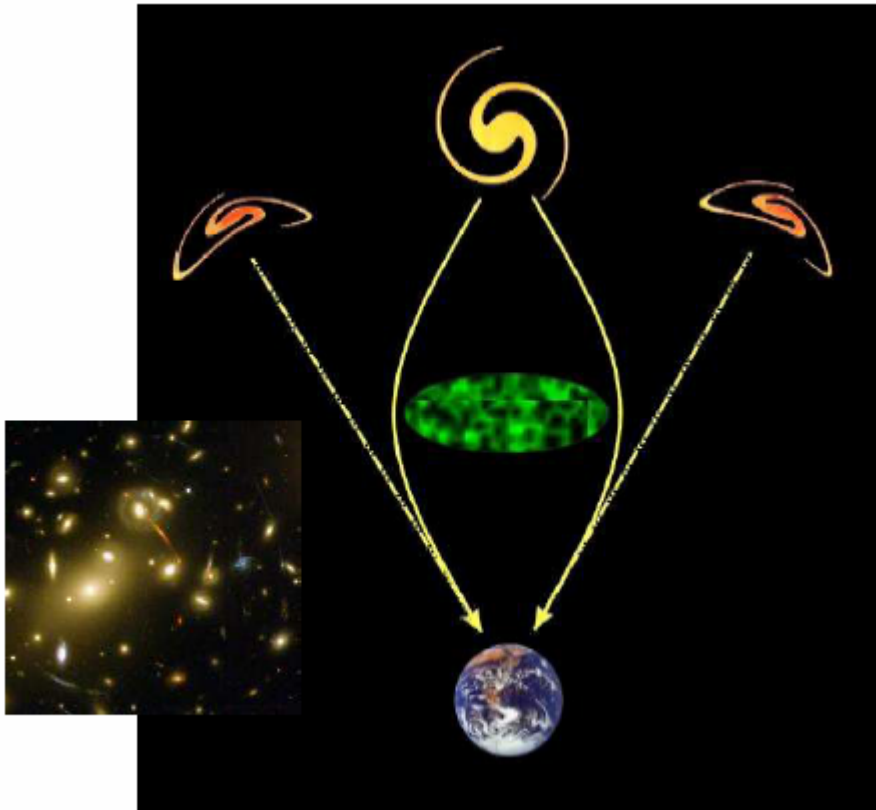
Rotations-Kurven: Geschwindigkeit der Orbitalbewegung
als Funktion des Abstandes zum Zentrum der Galaxie



$$\Omega_{mat} > \Omega_{Lum} \approx 0.01$$

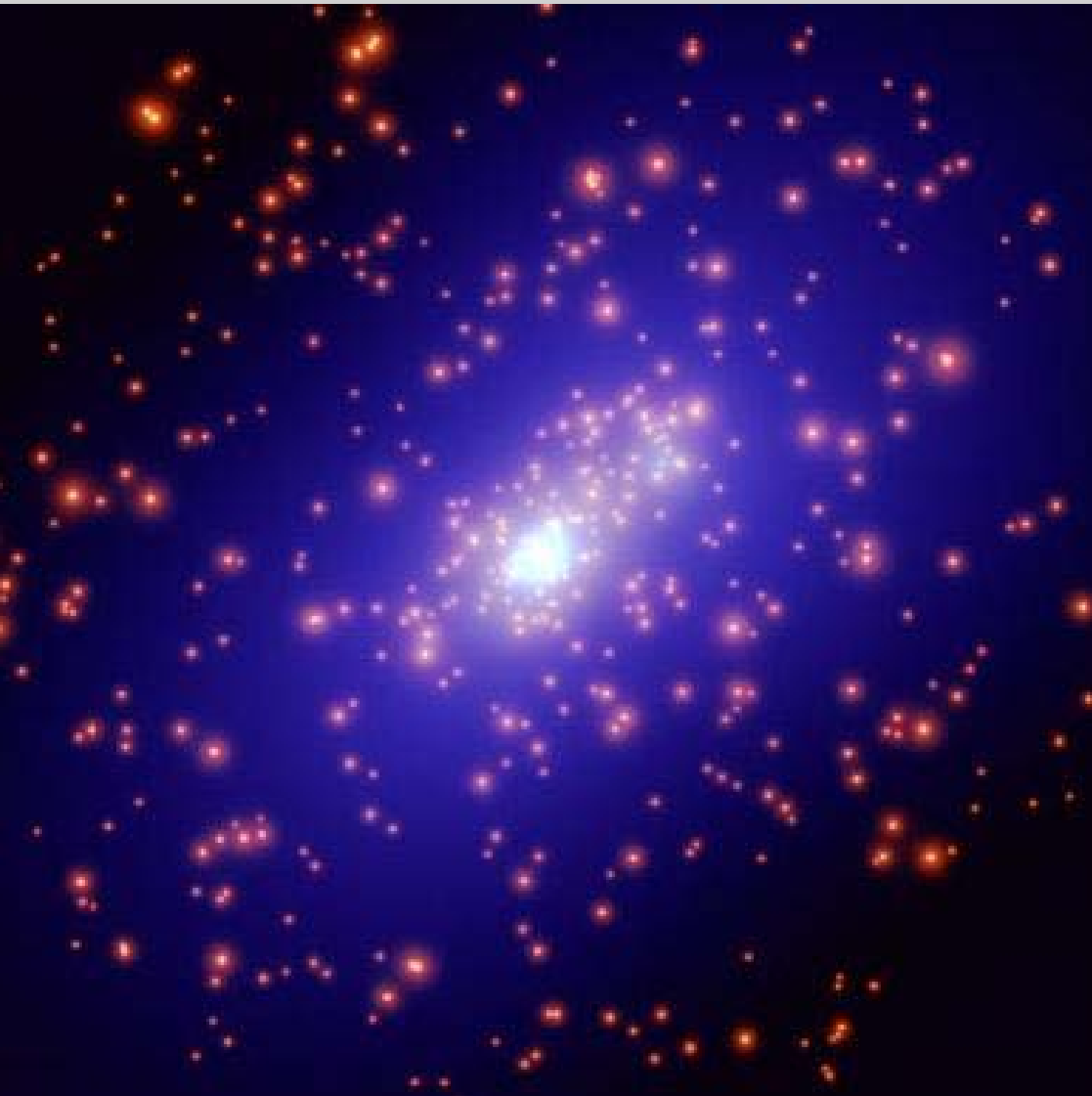
Dunkle Materie / Galaxienhaufen

Gravitationslinseneffekt



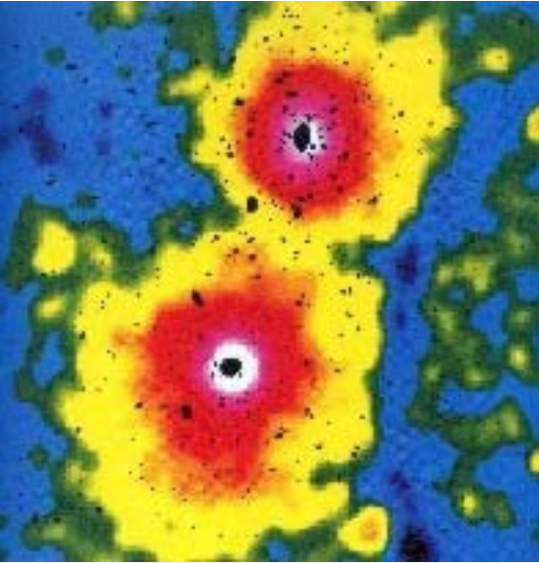
- Geschwindigkeiten der Galaxien in Galaxienhaufen hängen von der Gesamtmasse aller Galaxien im Haufen ab; durch Messung der Geschwindigkeiten den Galaxienhaufen „wiegen“
- Die meisten Haufen haben ca. 5-10 mehr Masse als Sterne und Gas ausmachen
- Leuchtende Bögen in der Nähe von sehr massereichen Galaxien
- Verteilung der Masse und Gesamtmasse der Galaxien-Linse können aus Form der Bögen bestimmt werden

Dunkle Materie

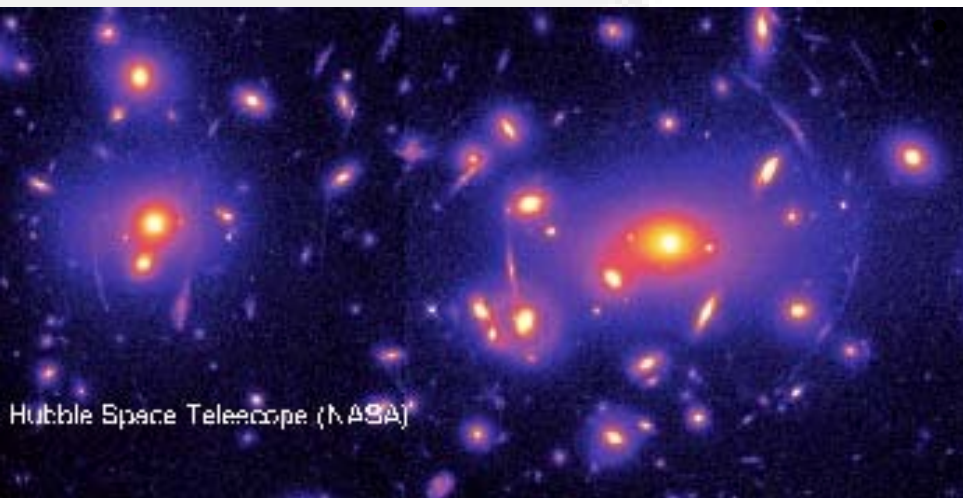


Falschfarben, Galaxienhaufen CI0024+1654,
Rötlich:herkömmliche Materie, weißblau: Dunkle Materie,
Gravitationsline

Dunkle Materie / Galaxienhaufen



*Der Galaxienhaufen Abell 3528 zeigt bei Messungen im Röntgenbereich ein riesiges leuchtendes Gebiet. Gas kann nur im Galaxienhaufen gebunden bleiben, wenn dessen Masse sehr gross ist. In diesem Fall braucht man deutlich mehr Masse, als die bekannten Massekomponenten (die in schwarz eingezeichneten Galaxien) erklären können: **Dunkle Materie** (Aufnahme ROSAT).*



*Die vom Galaxienhaufen Abell 2218 erzeugte Gravitationskraft bewirkt Verzerrung von Bildern der Hintergrundobjekte zu Punktquellen und Bögen. Aus der Form der Verzerrung und weiteren Informationen ist die Gesamtmasse des Galaxienhaufens modellierbar. Ein weiterer Fall für **Dunkle Materie** (Aufnahme HST).*

Dunkle Materie im Universum

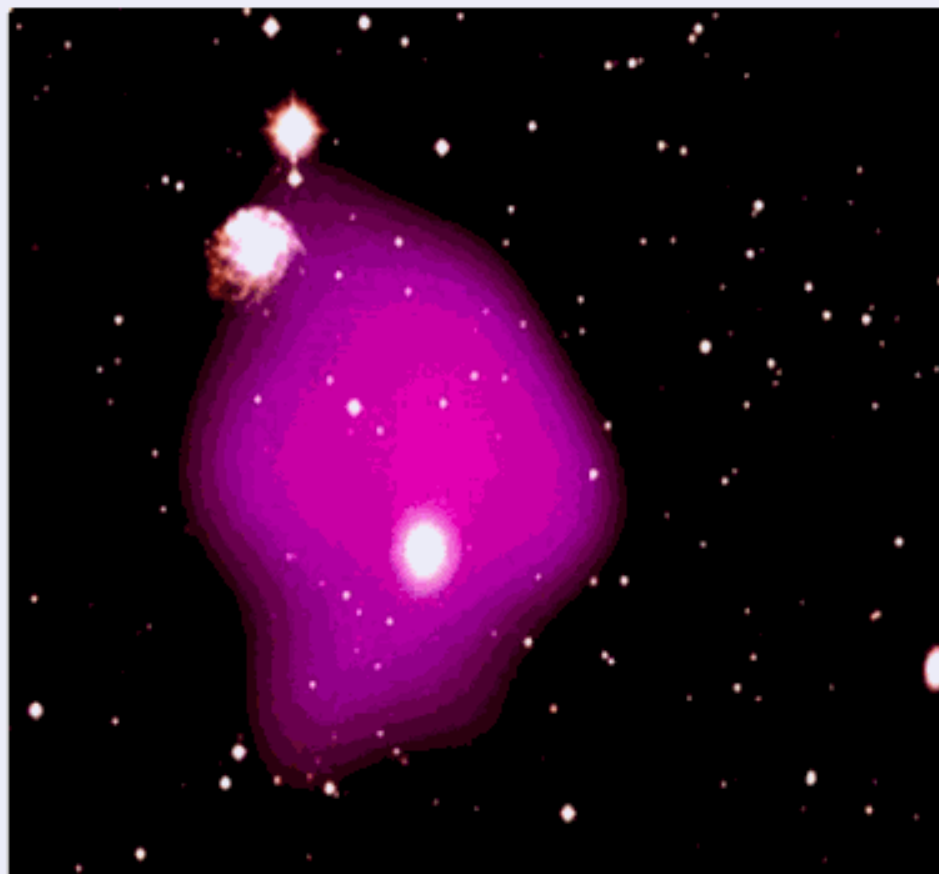
heißes Gas in Galaxien-Clustern
'zuviel' kinetische Energie

großräumige Bewegungen
der Galaxien mit 'zu hohen'
Geschwindigkeiten



$$\Omega_{Materie} \geq 0.30$$

$$\Omega_{Lum} \approx 0.01$$



Dunkle Materie / Sichtbare Materie



Dichte der sichtbaren Masse
(emittiert oder absorbiert elektromagnetische Strahlung)



$$\Omega_{\text{lum}} \approx 0.01$$

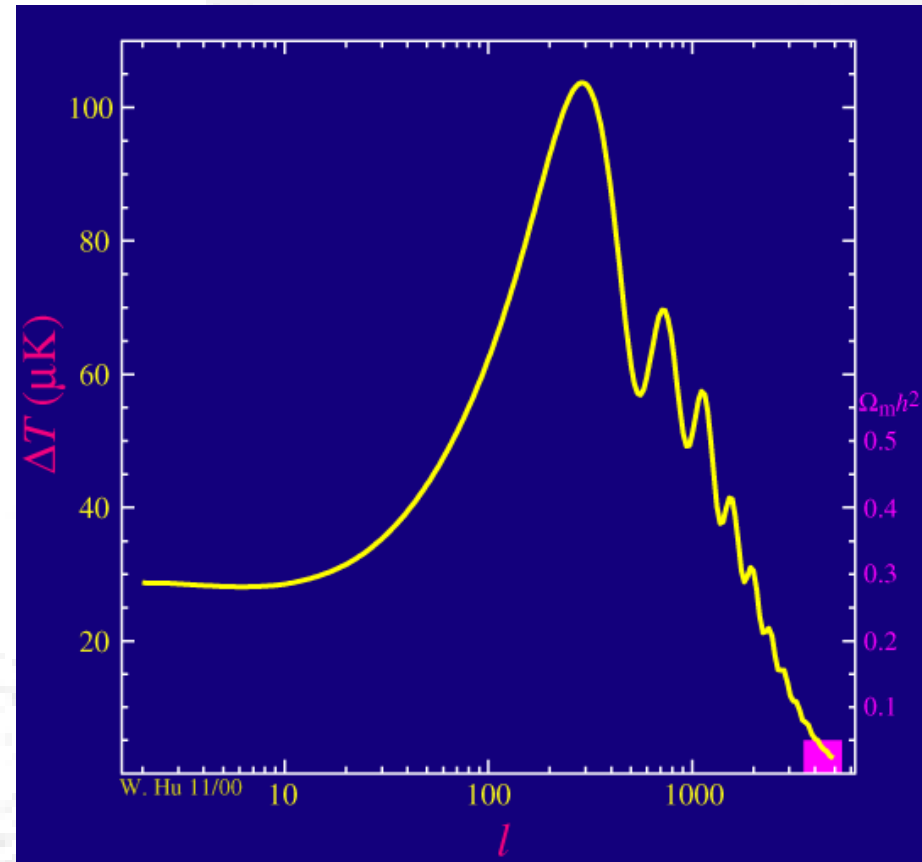
- Galaxienbewegungen
- Milchstraße und Andromeda-Galaxie werden vom Virgohaufen angezogen-> Dunkle Materie
- Lokale Gruppe enthält 10x mehr Dunkle Materie als sichtbare Materie

Dunkle Materie

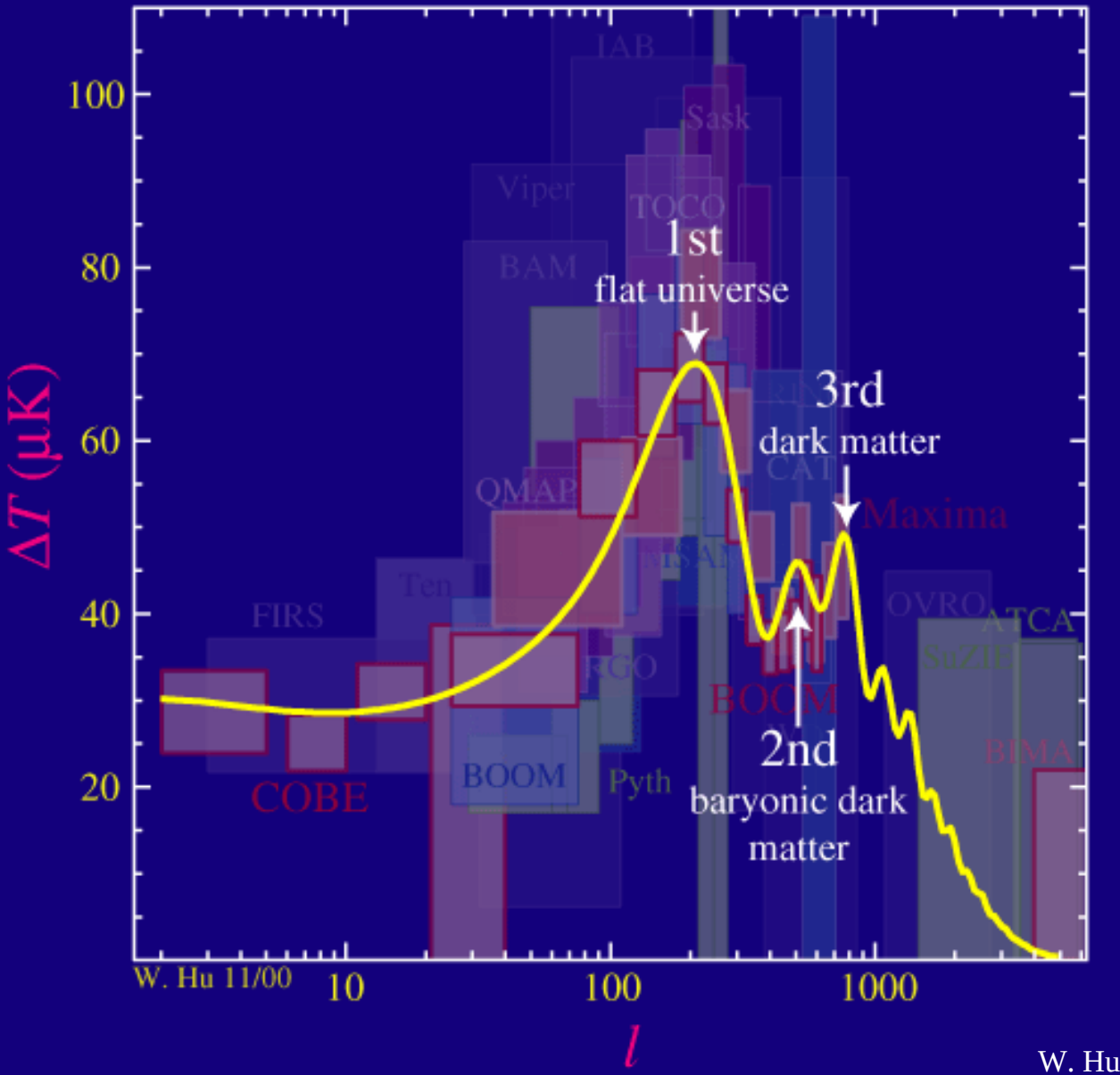
- Unsichtbare Galaxien: VIRGOHI21 ...

Dichte der Dunklen Materie

- Anstieg der Dichte der Dunklen Materie senkt die Amplitude der Peaks
- Geringere Dunkle Materie eliminiert den Baryonen-Effekt: hoher dritter Peak deutet auf Dunkle Materie



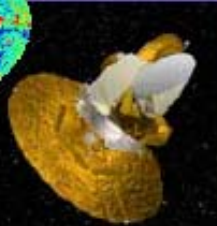
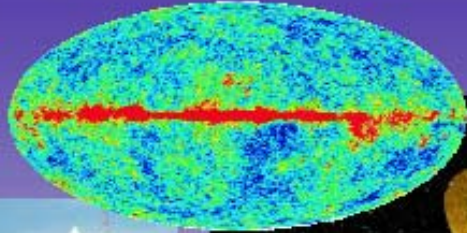
Bisher



- 1. Peak:
Universum ist flach
- 2. Peak:
dunkle
baryonische
Materie
- 3. Peak:
Dichte der
Dunklen
Materie

Dunkle Materie / WMAP

Ergebnisse WMAP Satellit



Wilkinson Microwave Anisotropy Probe

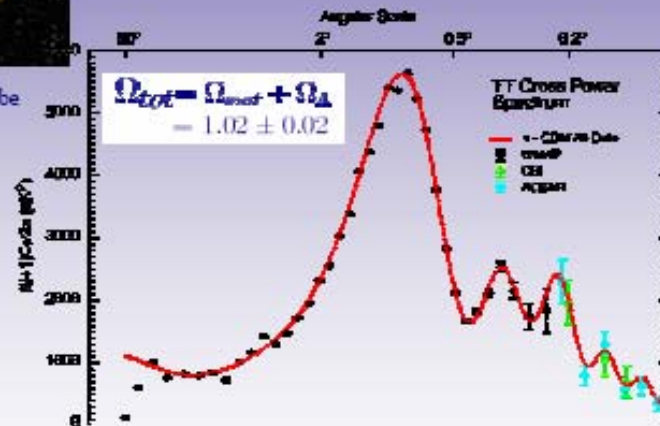
Anisotropie des kosmischen
Mikrowellen-Hintergrundes
(2.7K Strahlung)

⇒ Materie-Dichte
Baryonen-Dichte

$$\Omega_{mat} = 0.27 \pm 0.04$$

$$\Omega_{bar} = 0.044 \pm 0.004$$

$$\Omega_{bar} \ll \Omega_{mat}$$



Dunklen Materie nicht aus p und n ⇒ andere 'neue' Elementarteilchen

Josef Jochum

Nukleosynthese - Dichte der Baryonen

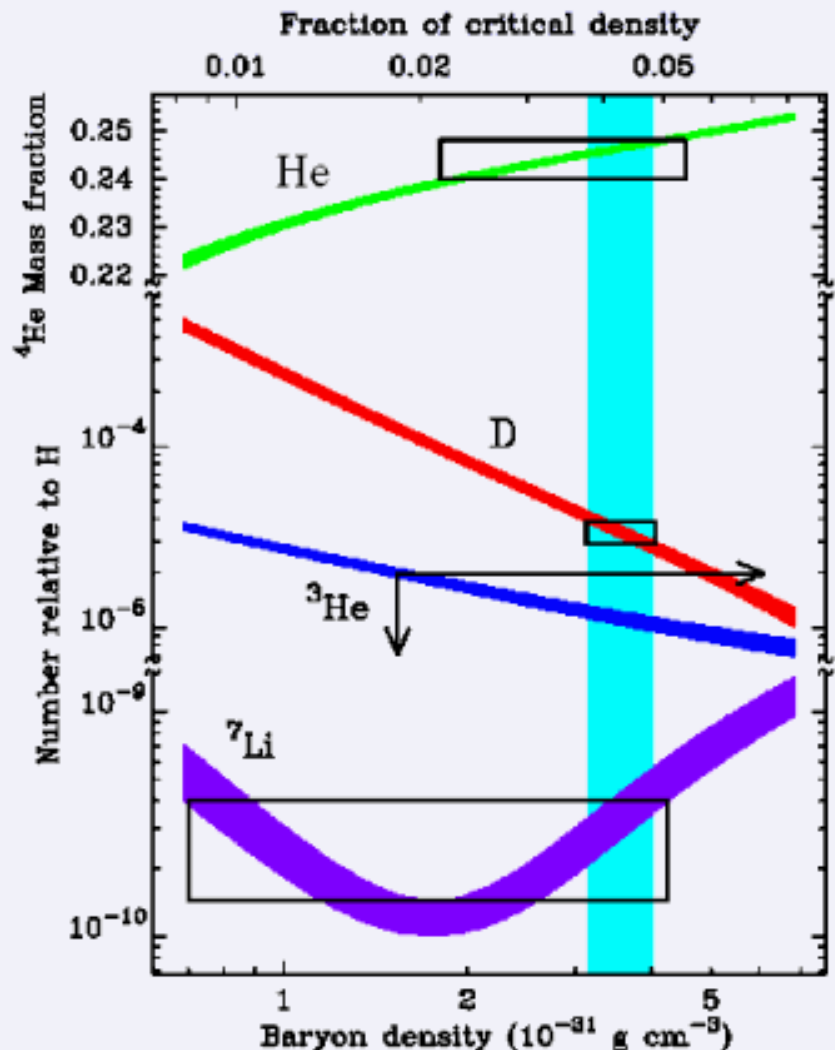
(primordial) Häufigkeiten
der leichten Elemente, spiegeln
das n/p-Verhältnis zur Zeit
der Nukleosynthese wieder
dieses n/p-Verhältnis hängt ab
von der Dichte der Baryonen
im Universum

leichte Elemente
=> Baryondichte

$$0.03 < \Omega_{Bar} < 0.05$$

$$\Omega_{Lum} < \Omega_{Bar} < \Omega_{Mat}$$

(0.01) (0.30)



Dunkle Materie / Zusammenfassung

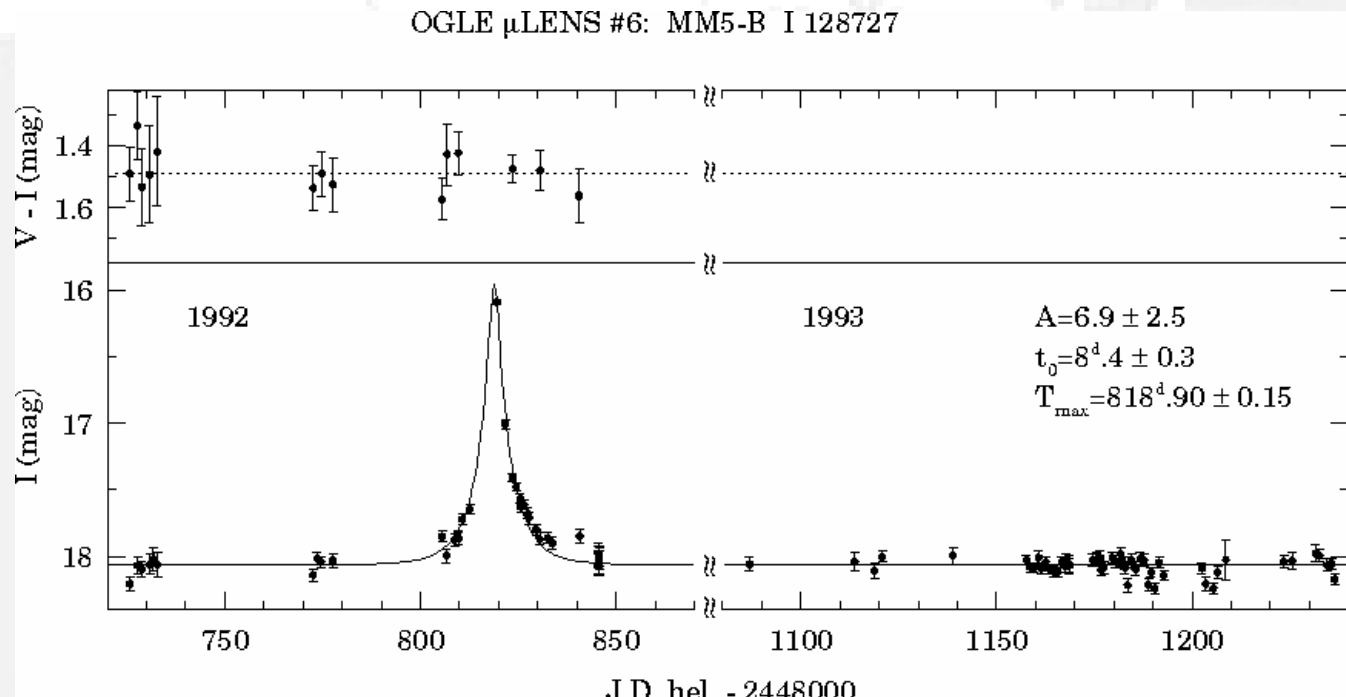
- **Argumente für die Existenz Dunkler Materie:**
- *Struktur und Bewegung*
 - a) *in der Milchstrasse* (Sternzählungen, Rotation der Scheibe)
 - b) *in anderen Galaxien* (Rotation ihrer Scheiben)
- Galaxienhaufen: Virialmasse, Röntgenstrahlung, Gravitationslinsen
- *Kosmologie und Dunkle Materie* (Modelle für Expansion, kritische Dichte, Dichteschwankungen)
- **Hypothesen zur Natur der Dunklen Materie** (Normale Objekte; nicht-normale Materie; Modified Newtonian Dynamics, MOND)
- **Wie könnte DM am besten versteckt sein?**
- *M Zwerge - Weiße Zwerge - Neutronensterne - Schwarze Löcher - Braune Zwerge - Planeten, Kometen, usw.*
- **DM oder keine DM?** (Ist die DM reell oder liegt ein Fehler in den Theorien vor? Omega-Lambda)

Woraus besteht Dunkle Materie?

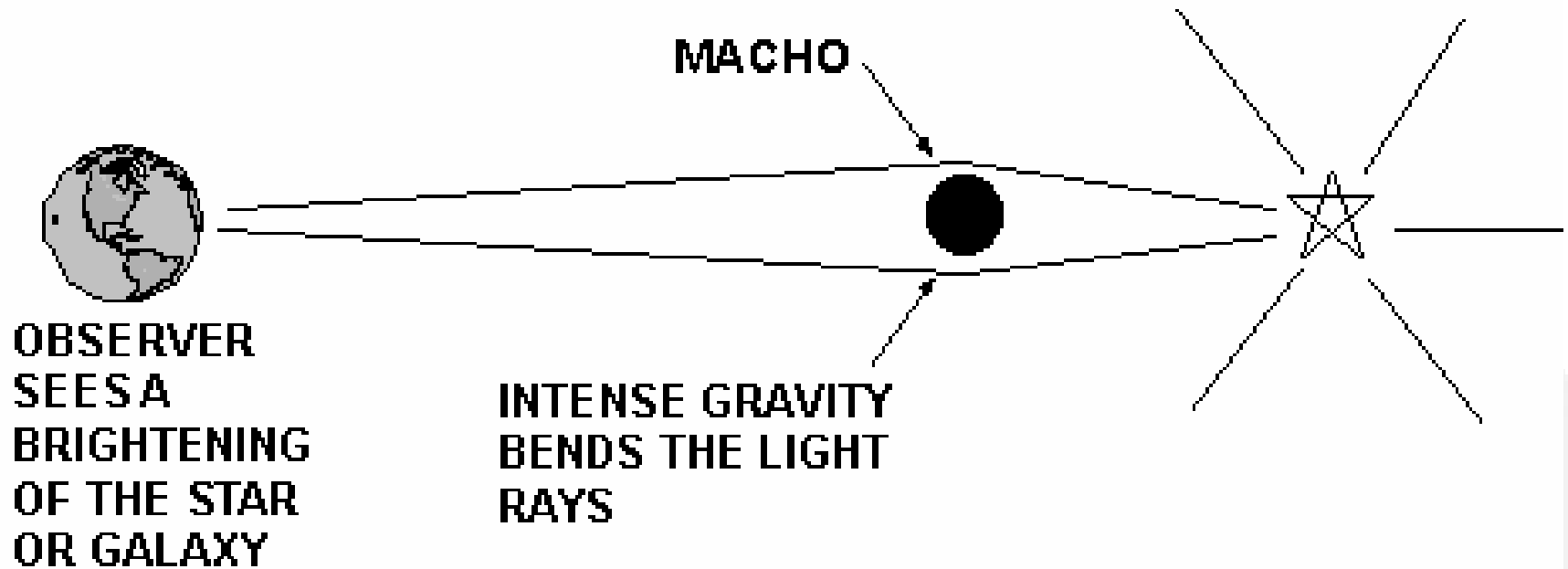


Gravitationslinsen: Kosmologische Aspekte (Galaktische Mikrolinsen)

- Galaxienhalos müssen dunkle Materie enthalten (Braune Zwerge? Massen kleiner 0.08 Sonnenmassen, Temperatur nicht hoch genug um Helium-Brennen zu starten), MACHO (Massive Compact Halo Object), Fluktuationen in Sternen in LMC, 1/3 Mio LMC-Sternen wird gerade deutlich verstärkt! 6 Gruppen beobachten
- Weniger Ereignisse als erwartet wenn Halo der Milchstraße komplett aus diesen Objekten besten würde (konsistent mit 50%)
- Ähnliches Experiment in Richtung galaktischer bulge: 200 Ereignisse



Auf der Suche nach Spiegel-Materie



Gravitational Lensing--how MACHOs focus light

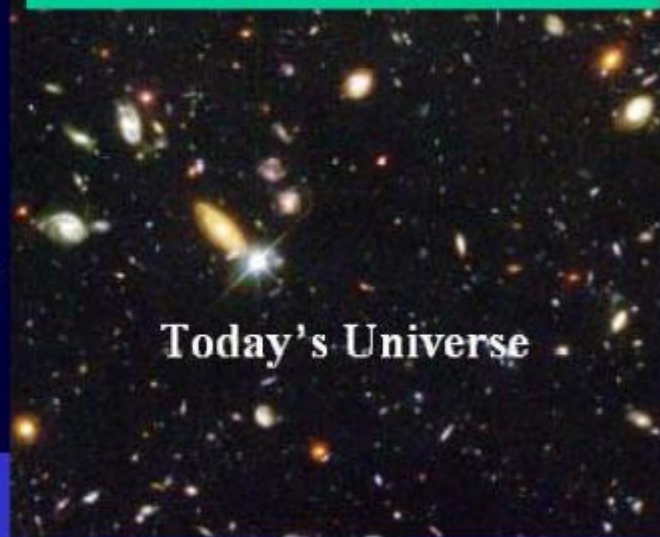
MACHO: Massive astrophysikalische kompakte Haloobjekte

$$\Omega_{\text{mat}} = 0.30, \Omega_{\text{bar}} = 0.05$$

Neutrinos ???



~ 85% of mass of universe
dark and exotic



Neutrinos are very light

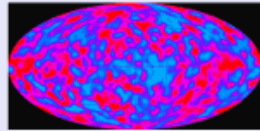
=> they move at high Speed ($\sim c$)

80% of the Universe made of Particles moving at high Speed

=> Density Fluctuations 'fly apart'

Strukturbildung - Dark Matter (HDM - CDM)

HDM (Hot Dark Matter)



Neutrinos: kleine Massen
=> relativistisch

=> Anteil der Neutrinos an
Dichteschwankungen
diffundiert schnell auseinander

=> Neutrinos dämpfen Bildung
'kleiner' Strukturen



CDM (Cold Dark Matter)

Bildung heutiger Strukturen
mit Neutrinos alleine nicht möglich

=> **nicht relativistische dunkle
(nichtbaryonische) Materie,
muß existieren**

Schwere, schwach wechselwirkende
Teilchen: WIMPs

oder Axionen, ...

Hauptkomponente der Dunklen Materie (CDM): bisher unbeobachtete Elementarteilchen
=> WIMP-Suche

da $m_\nu \neq 0$ auch ν 's als HDM wichtig (Strukturbildung !)

=> bessere Grenzen für m_ν (Σm_ν)

Josef Jochum

- Unebenheiten im frühen Universum zu gering, wachsen nur langsam mit der Zeit: Galaxien nicht zu erklären, Anfangsfluktuationen müssen um mehr als Faktor 1000 verstärkt worden sein: Dunkle Materie, wirkten als Schwerkraftfalle; Halos auf natürliche Weise entstanden

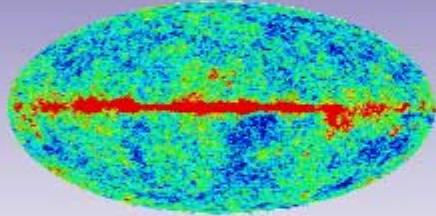
Dunkle Materie / Alternativen / Neutrinos

$$\Omega_{\text{mat}} = 0.27, \Omega_{\text{bar}} = 0.04$$



Neutrinos ???

frühes Universum



~ 85% der Masse
im Universum sind
dunkel und 'exotisch'



heutiges Universum

Neutrinos sind sehr leicht

=> hohe Geschwindigkeit ($\sim c$)

wenn 85% des Universums aus Teilchen hoher Geschwindigkeit

=> Dichte-Schwankungen 'fliegen auseinander'

Dunkle Materie aus Neutrinos: heutige Struktur hätte sich nicht gebildet

Dunkle Materie / Alternativen

- Und warum sie nicht funktionieren:
 - Weiße Zwerge, Neutronensterne, Schwarze Löcher: durch Kernfusion entstehen in den Sternen, die solchen Objekten vorausgehen, Elemente wie He -> würde die DM aus Sternenresten bestehen, müßte mehr He vorhanden sein, als beobachtet wird
 - Braune Zwerge: zu wenige!
 - Neutrinos: endliche Ruhemasse, Problem mit Strukturbildung im Universum; je leichter, desto schneller, desto stärker verwaschen sie kleinere Strukturen; um die Bildung der heute beobachteten Strukturen zu ermöglichen, müssen sie viel langsamer und damit schwerer sein als Neutrinos; im Standardmodell fehlen solche schweren Teilchen!
 - -----→ WIMPs

Zusammensetzung des Universums

- *Gewöhnliche (baryonische) Materie*:
Protonen, Elektronen, 5%
- *Strahlung*: Photonen der kosmischen
Hintergrundstrahlung, 0.005%
- *Heiße Dunkle Materie*: Neutrinos, 0.3%
- *Kalte Dunkle Materie*:
supersymmetrische Teilchen ? 25%
- *Dunkle Energie*: skalare Teilchen? 70%

Astronomie / Teilchenphysik / Astro-Teilchenphysik



Kosmologische
Beobachtungen



Teilchen-Physik



neue Elementarteilchen

Supersymmetrie (Erweiterung des bisherigen Standardmodells)
sagt das Neutralino-Teilchen voraus: Masse einige 10GeV~TeV

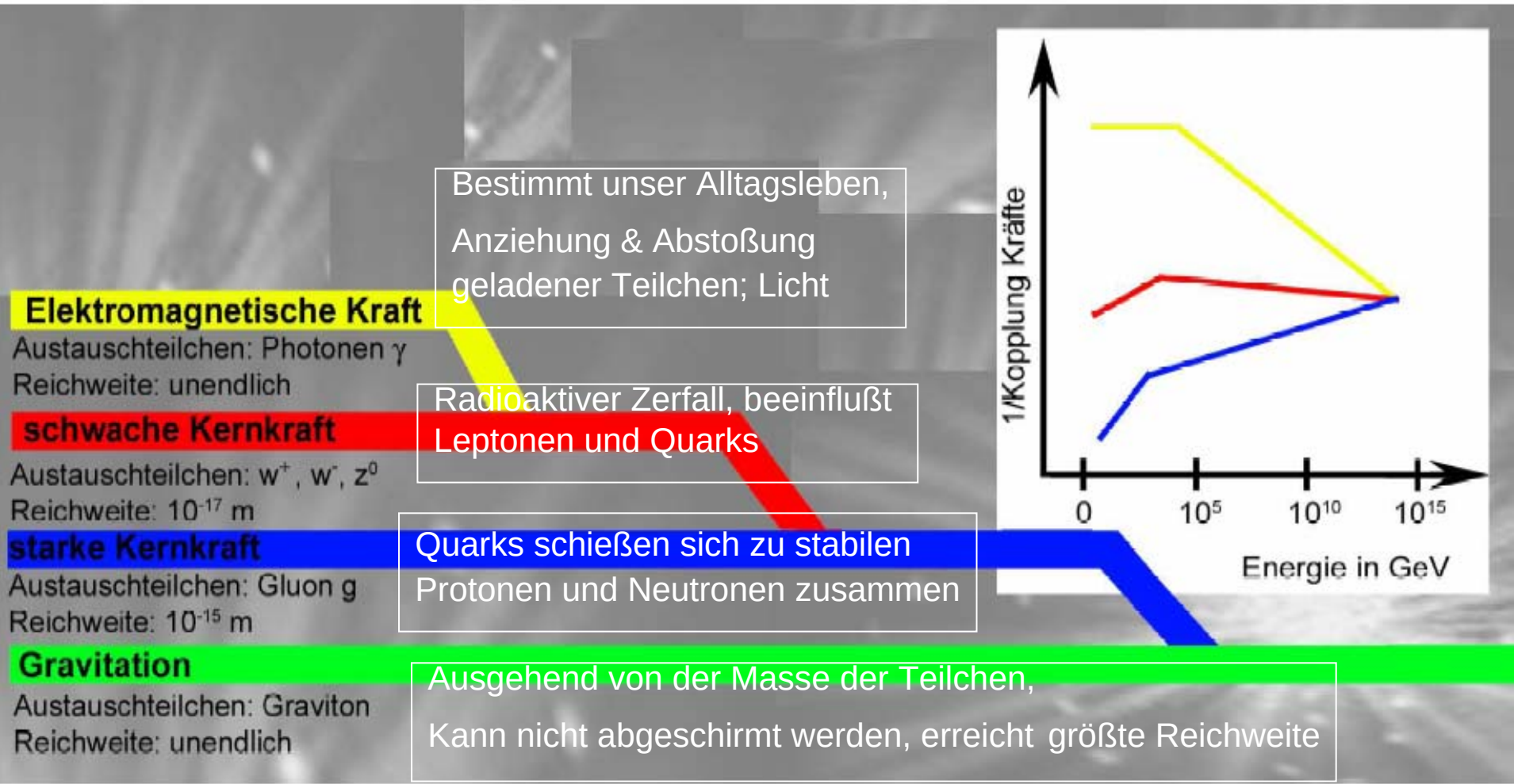
⇒ perfekter Kandidat für kalte Dunkle Materie

$$\chi = a\tilde{\gamma} + b\tilde{Z}^0 + c\tilde{H}_1^0 + d\tilde{H}_2^0$$

Josef Jochum

WIMPs / Experimente / WIMPs erzeugen

- In Beschleunigeranlagen CERN, DESY: zu schwer um bereits bei den bisher erreichten Energien erzeugt zu werden, d.h. schwerer als etwa die Hälfte der Masse eines Goldatoms!



Supersymmetrie und Kosmologie

- Standardmodell der Teilchenphysik: drei Naturkräfte können exakt beschrieben und erklärt werden, nur die Gravitation läßt sich nicht passend in dieses Modell einbauen
- Supersymmetrische Erweiterung des Standardmodells: alle Kräfte vereinen sich zu einer einzigen Urkraft bei sehr hohen Energien
- Preis für diese Supersymmetrie: viele neue Teilchen; zu jedem fundamentalen Teilchen des Standardmodells kommt ein supersymmetrischer Partner, dessen Spin-Quantenzahl um $\frac{1}{2}$ größer oder kleiner ist; **NOCH KEINES DIESER TEILCHEN WURDE BISLANG BEOBACHTET !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!**
- Ihre Massen sind im Bereich der Masse eines Goldatoms
- Das leichteste der neuen supersymmetrischen Teilchen müßte stabil sein und nur schwach wechselwirken: Neutralino (ein neutraler Superpartner zu den Eichbosonen mit Spin $\frac{1}{2}$)
- **Neutralino** weist genau die Eigenschaften auf, die das **WIMP** in der Kosmologie benötigt.

Astrophysik $\longleftrightarrow$ Teilchenphysik

Evidenz aus Beobachtungen
für kalte nichtbaryonische
Dunkle Materie
(CDM)



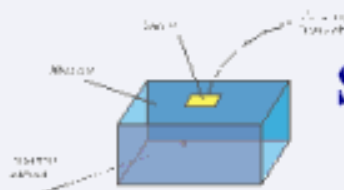
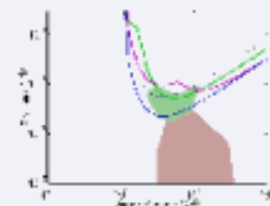
bisher unbeobachtete
Elementarteilchen
(WIMPs)

Evidenz aus Experimenten
für
 $m_\nu \neq 0$



Teilchenphysik
jenseits des Standardmodells
(und Beitrag zu HDM)

Supersymmetrie ... - Neutralino, neue Teilchen,
WIMP - Kandidat



**Suche nach Teilchen der Dunklen Materie
mit Tieftemperatur-Detektoren**

WIMP $\longleftrightarrow$ Supersymmetrie - Neutralino

sehr guter Kandidat für Dunkle Materie
in der supersymmetrischen Erweiterung

das leichteste supersymmetrische Teilchen (LSP)

Linearkombination aus: Photino, Zino, und Higgsinos

$$\chi = a\tilde{\gamma} + b\tilde{Z}^0 + c\tilde{H}_1^0 + d\tilde{H}_2^0$$

Neutralino χ : ungeladen, stabil, schwache WW

Masse 45 GeV - $\sim$ TeV

kann über Kernspin an normaler Materie streuen

oder kohärent an Nukleonen ($\sim A^2$)

relative Stärke hängt von der Zusammensetzung ab (a,b,c,d)

Neutralino / WIMP

- Neutralino, hypothetische Mischung aus den Superpartnern des Photons, des Z-Bosons und vielleicht noch anderen Teilchentypen
- Name unglücklich, erinnert an „Neutrino“, grundverschieden
- Schwer aber vermutlich das leichteste der supersymmetrischen Teilchen
- Ist „kollisionsscheu“, fror sehr früh aus dem Plasma, Dichte des Universums hoch, riesige Anzahl von Neutralinos wird erzeugt
- Unterliegt der: Gravitation (Astronomen), der Schwachen Kernkraft (Teilchenphysiker)
- Vermutlich strömt pro Sekunde eine Milliard Dunkle-Materie-Teilchen durch jeden Quadratmeter Weltraum

Neutralino / WIMP

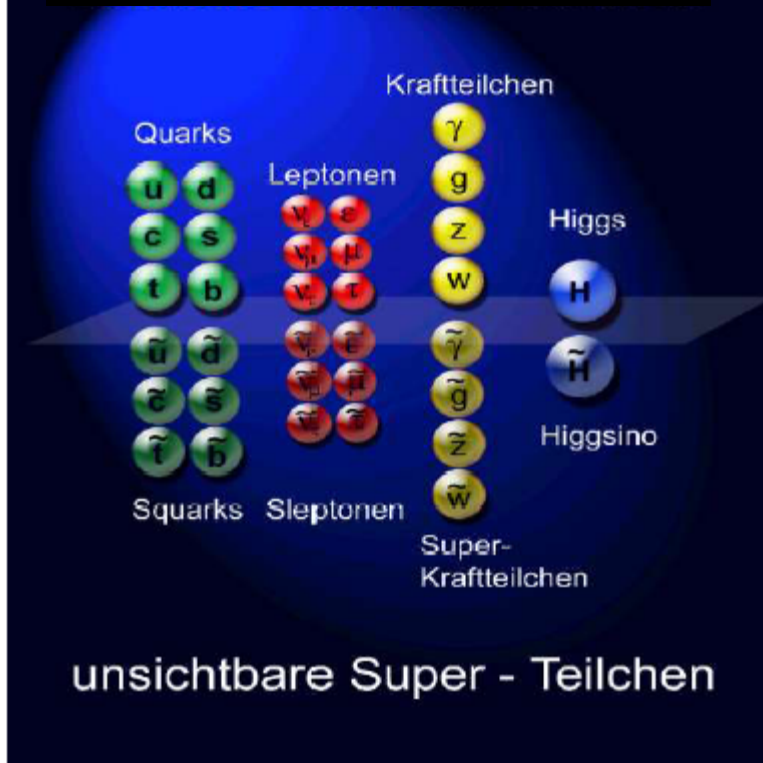
- Wechselwirkung zwischen Neutralinos und normaler Materie: **Anzahl der Ereignisse pro Tag in einem Kilogramm normaler Materie**
- Je nach theoretischen Details liegt das Resultat zwischen 0.0001 und 0.1 Ereignissen pro kg und Tag
- Derzeitige Experimente: am oberen Rand dieses Bereichs
- Hauptproblem: Unreinheit der Detektoren

The background of the slide features a cosmic scene. A central square area shows a deep blue space with a bright, multi-colored starburst or supernova remnant in the upper right. To the left of this is a large, pale blue sphere, possibly representing a planet or a distant star. The entire scene is framed by a dark, irregular shape with sharp, pointed edges, resembling a stylized star or a cross-section of a celestial body. Overlaid on this is a network of thin, glowing orange lines that form a complex, web-like pattern.

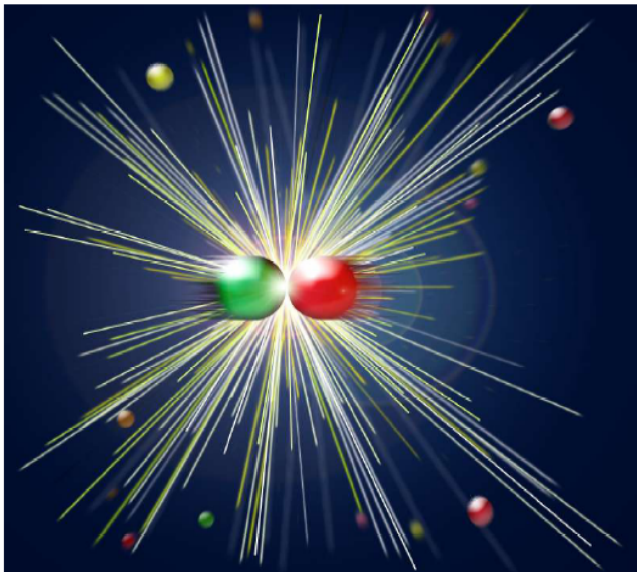
Experimentelle Suche nach WIMPs

Neutralinos / WIMPs / Halos

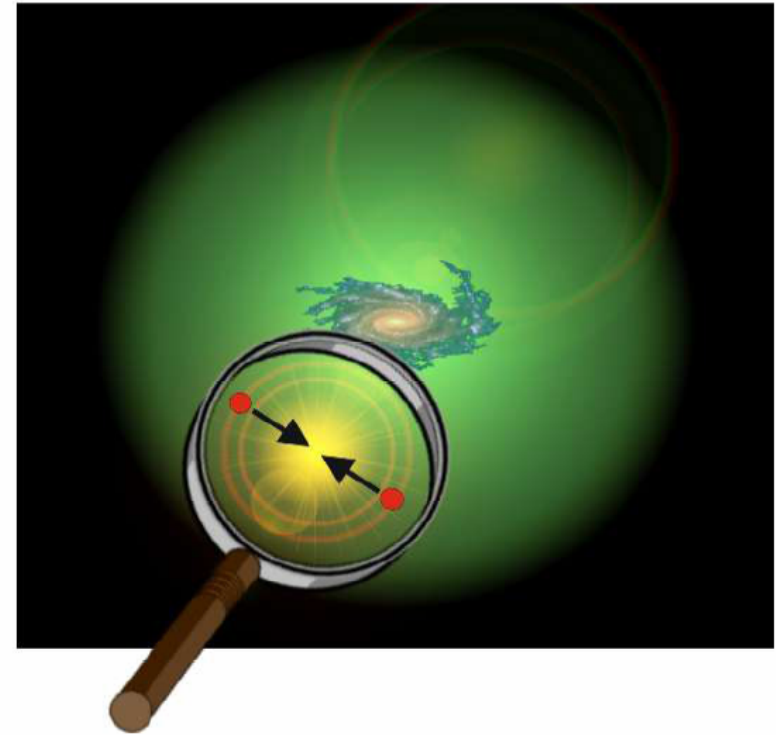
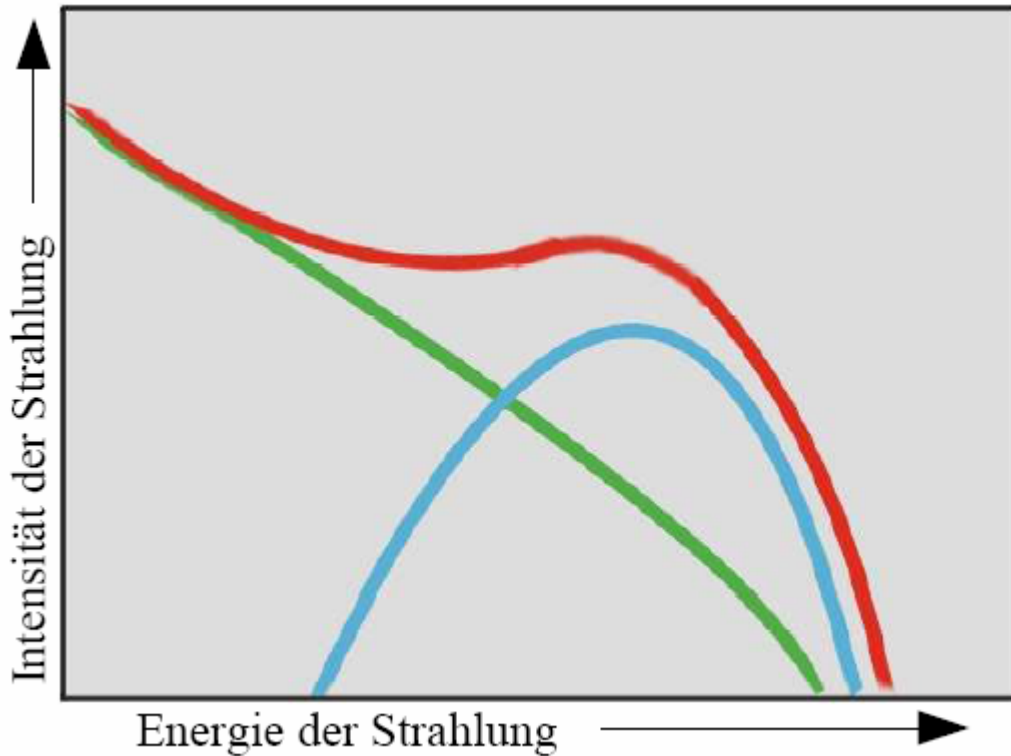
- WIMPs müssen Gesetzen der Schwerkraft gehorchen -> ziehen sich zu Klumpen (Halos) zusammen, in deren Zentren sich Galaxien bilden, WIMPs sind dicht gepackt, begegnen sich und vernichten sich in Energieblitz
- -> erklärt Gamma-Hintergrundstrahlung
- Warten auf den Superbeschleuniger LHC am CERN in Genf im Jahre 2007!!



- Neutralinos sind ihre eigenen Antiteilchen
- Selbstannihilation: Zwei aufeinandertreffende Neutralinos zerstrahlen über eine Zerfallskette mit anderen Teilchen als Zwischenprodukte in einem Blitz energiereicher Gammastrahlung; weiterhin entstehen Neutrinos, Positronen und Antiprotonen



Gamma-Hintergrund / Neutralinos



- Im Bereich des Maximums der sekundären Strahlung aus der Neutralino-Annihilation: EGRET Durchmusterung
- Energieverteilung der extragalaktischen Gamma- Hintergrundstrahlung (EGRET Himmelsdurchmusterung) s.o.
- Erwartet: Absinken der Intensität mit zunehmender Energie, da die Möglichkeiten zur Erzeugung der Strahlung mit wachsender Energie abnehmen (**grün**)
- Statt dessen: **rote** Linie, Anstieg
- Lösung: zusätzliche extragalaktische Entstehungsmöglichkeit annehmen, die gemäß der **blauen** Linie strahlt ... Neutralinos

WIMP - Direkter Nachweis

- Masse $GeV - TeV$
- Relativgeschwindigkeit 270 km/s
- lokale Dichte $\rho_\chi = 0.3 \text{ GeV/cm}^3$
- Wirkungsquerschnitt $\sigma_\chi < 10^{-36} \text{ cm}^2$

Streuung an den Kernen eines Targets

- Kernrückstöße
- Energie wenige keV
- sehr seltene Streuereignisse ($< 0.1 \text{ /Tag/kg}$)



Sehr sensitive Detektoren mit niedriger Energieschwelle

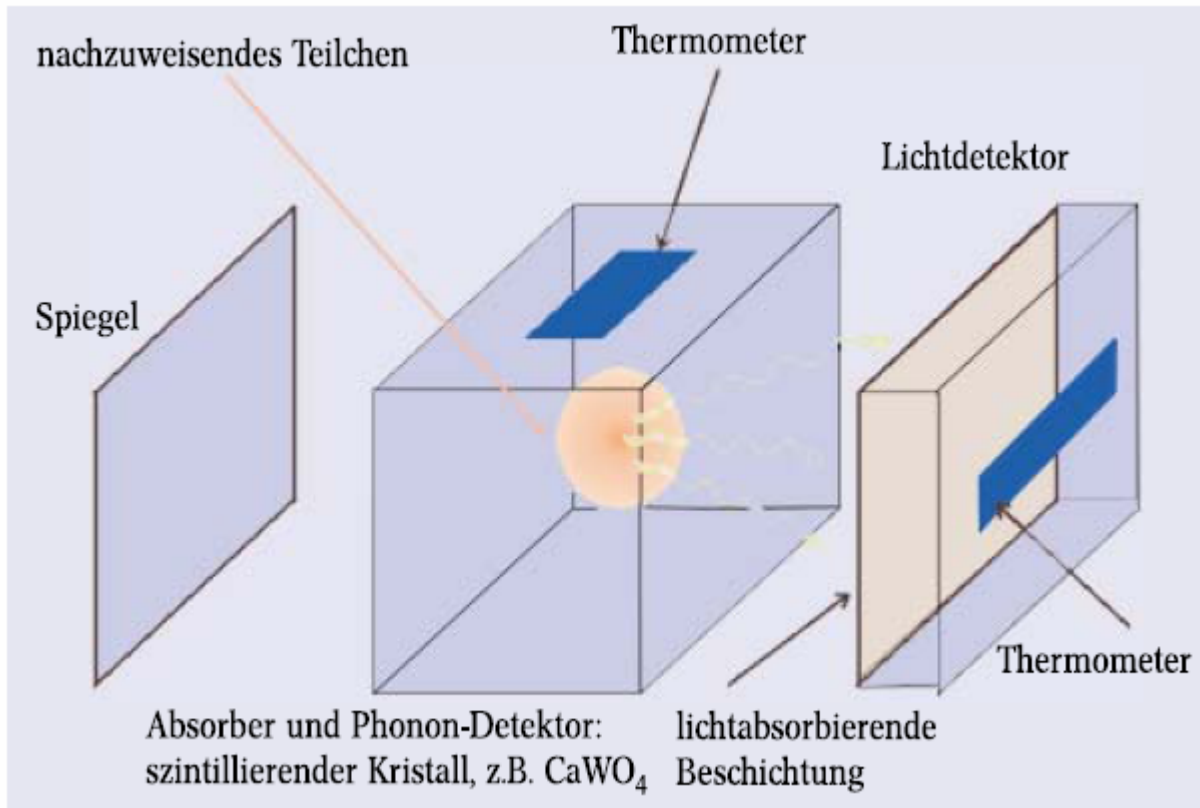
Abschirmung vor Radioaktivität

Verwendung radioaktivitäts-armer Materialien

Abschirmung vor kosmischer Strahlung: Untergrund-Labors

Signatur für WIMPs bzw. für Kernrückstöße

WIMPs / Experimente / Prinzip



- WIMPs streuen elastisch an Atomkernen und übertragen dabei Rückstoß auf die Kerne
- Seltene Streuereignisse, geringe Energie muß nachgewiesen werden
- Tieftemperatur-Kalorimeter, Temperaturen von 10-50 mK, Rückstoßenergie läßt sich direkt aus Temperaturerhöhung messen

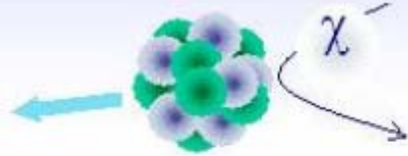
Prinzip der kryogenen Detektoren

Neutralinos / Experimentelle Nachweis

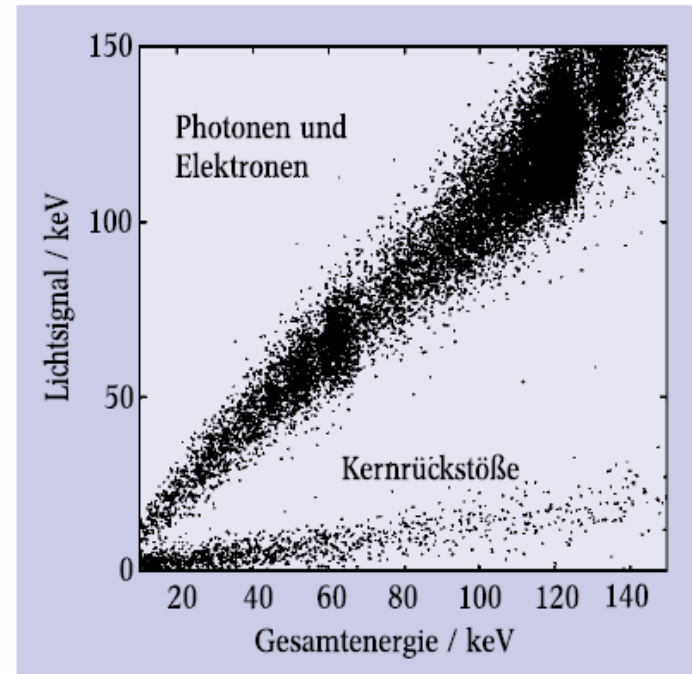
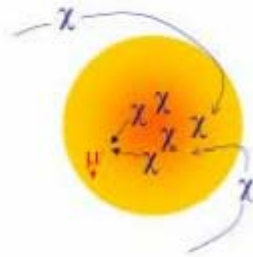
- Kryogene Detektoren: Nachweis der Erwärmung, die der Rückstoßkern in der umgebenden Materie erzeugt
- Rückstoßkern schlägt einige Elektronen aus benachbarten Atomen, in Germanium-Halbleiterdetektoren erzeugen diese einen Strom (Heidelberg-Moskau-Experiment)
- Anregung der vom Rückstoßkern erzeugten Ionen, diese fangen bald wieder ein Elektron ein und kehren in den Grundzustand zurück: Szintillationslicht entsteht (flüssiges Xenon); Fernziel: Detektor aus zehn Tonnen flüssigem Xenon, könnte sogar sehr gering wechselwirkende Neutralinos nachweisen; Xenon auch als Gas einsetzbar, Problem: muß von radioaktivem Krypton (Rückstand der Kernwaffentests) gesäubert werden; Gran-Sasso nutzt Natriumiodid (100 kg), DAMA größter Detektor der Welt

WIMPs / Experimente / Nachweis

- direct detection



- indirect detection



- Tieftemperatur-Kalorimeter mißt die gesamte deponierte Energie
- Gleichzeitig gemessenes Ladungs- oder Lichtsignal erlaubt es, für jedes Einzelereignis die Ionisations- (CDMS, EDELWEISS) bzw. Szintillations-Effizienz (CRESST) zu bestimmen

Tieftemperatur-Kalorimeter

Durch die Teilchenabsorption
werden im Absorber
(nichtthermische) Phononen emittiert

sehr sensitiv auf Kernrückstöße

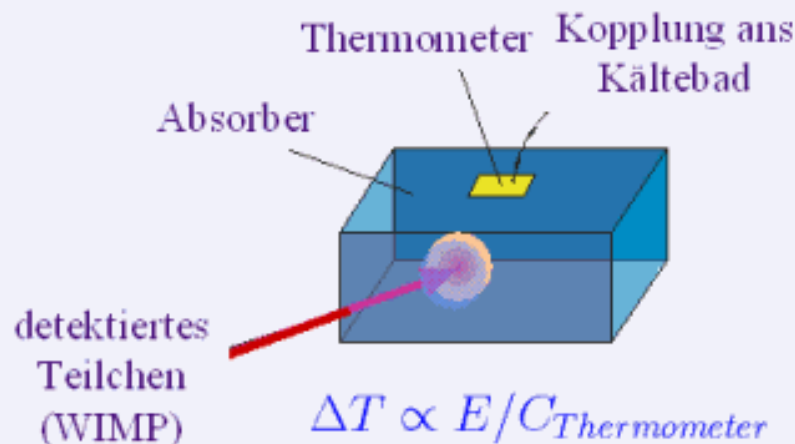
Die Absorption der Phononen
im Thermometer führt zu
einem Temperaturanstieg

niedrige Energieschwelle

hohe Energieauflösung

Tiefe Temperaturen (~20mK)
=> hohe Sensitivität, da C klein

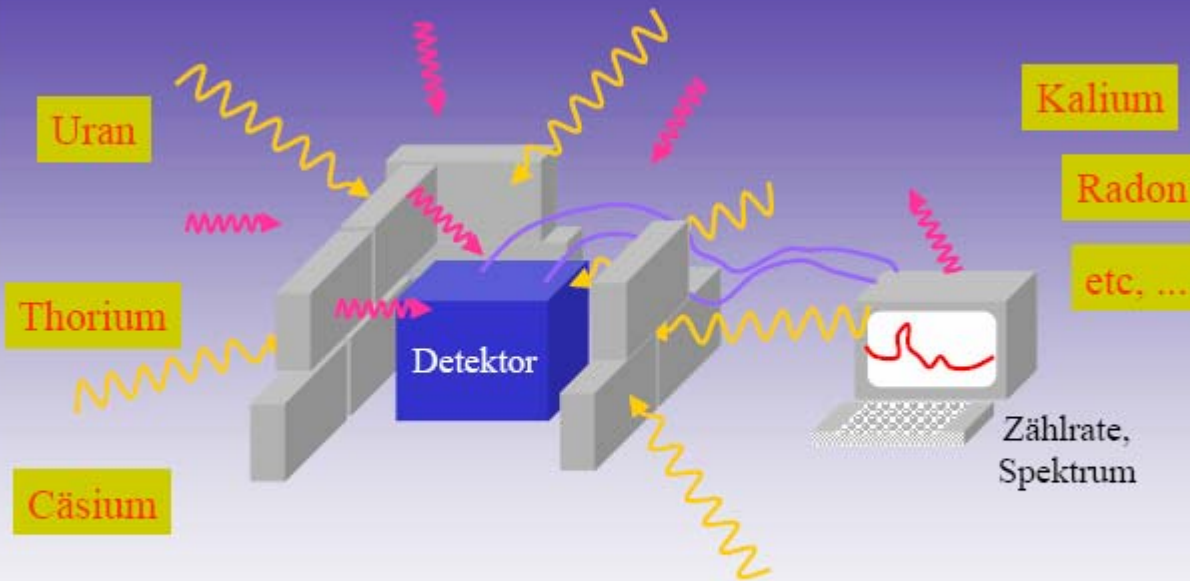
große Freiheit bei der
Wahl des Detektormaterials



Thermometer-Typen: Supraleitende Phasenübergangsthermometer
NTD - Ge Thermistoren (dotierte Halbleiter-Thermometer)

WIMPs / Experimente / Abschirmung

Radioaktivität in der Umgebung



Heutige Sensitivität ~ 50 Ereignisse/kg /Jahr (langfr. Ziel 1000 x weniger)

Umgebungs-Radioaktivität: $> 1\text{ Hz/kg} \sim 10^8$ Ereignisse /kg /Jahr

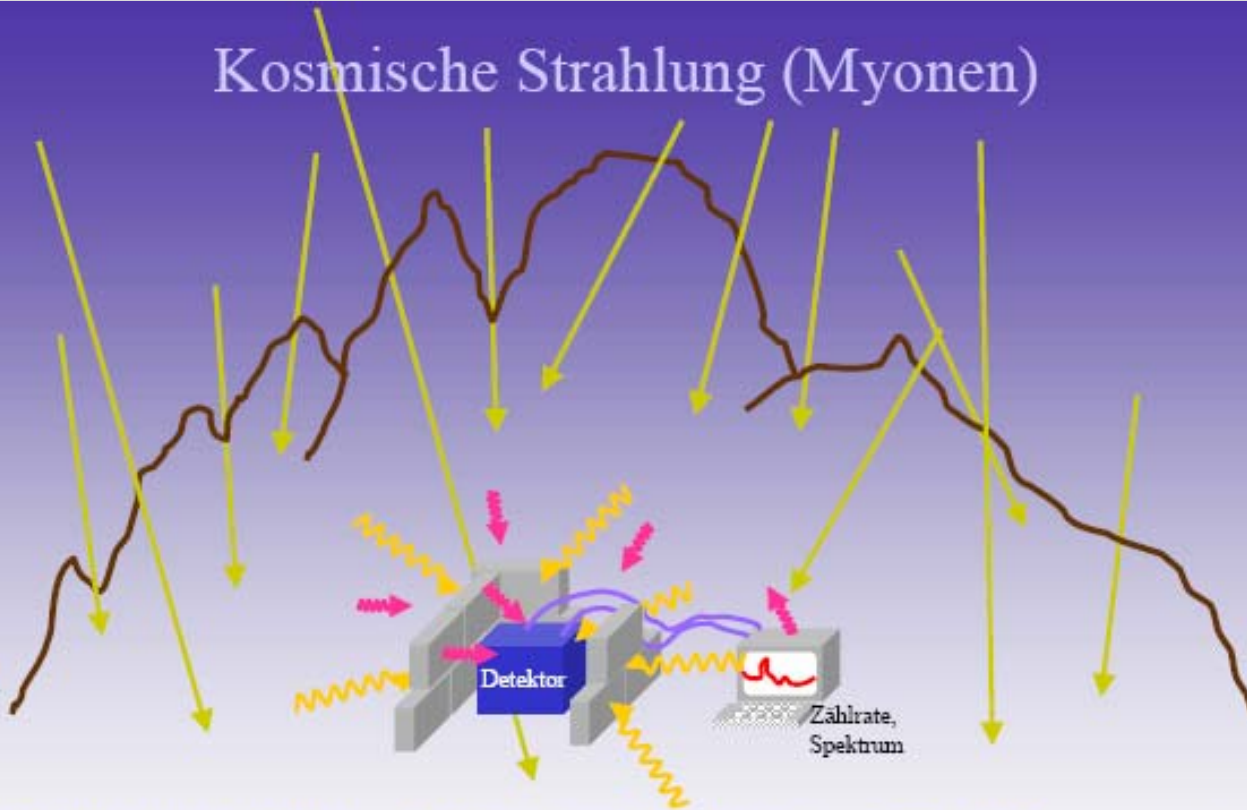
=> 'saubere' Abschirmung: (altes) Pb, Cu

Josef Jochum

- Problem: extrem niedrige Streurate der WIMPs
- Energiedepositionen durch Radioaktivität wesentlich häufiger
 - Umgebung des Detektors mit Materialien mit möglichst geringer Radioaktivität

WIMPs / Experimente / Abschirmung

Kosmische Strahlung (Myonen)

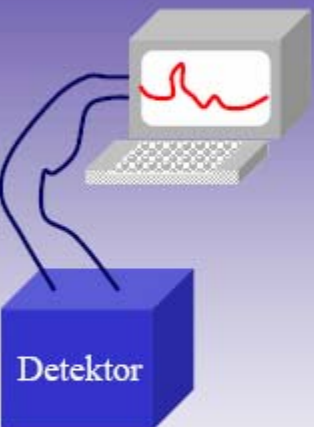


Heutige Sensitivität ~ 50 Ereignisse/kg /Jahr (langfr. Ziel 1000 x weniger)

Myonen $\sim 0.01\text{Hz/kg}$: $\sim 10^6$ Ereignisse /kg /Jahr
 ~ 1.5 km Gestein erforderlich $\Rightarrow$ Untergrund-Labor

- In tiefen Minen oder Tunneln um die kosmische Höhenstrahlung abzuschirmen
- Supersymmetrische Erweiterung des Standardmodells sagt Streuraten von WIMPs in Germanium voraus, die um bis zu vier bis fünf Größenordnungen kleiner sind als die derzeitige Nachweisgrenze
- Neue Strategien zur Reduzierung des Untergrunds notwendig

Experimentelle Suche nach Teilchen der Dunklen Materie



Josef Jochum

Sensitivität ist limitiert durch Rate an Untergrund-Ereignissen
=> niedriger Untergrund
=> Signatur für WIMPs

Heutige Sensitivität ~50 Ereignisse/kg /Jahr (langfr. Ziel 1000)

- Wenige Ereignisse pro Jahr in 100 kg Targetmasse erwartet

Abschirmung

^{210}Pb in Blei-Abschirmung
22 Jahre Halbwertszeit => altes Blei



Dunkle Materie / Experimente

Cryogenic Rare Event Search with Superconducting Thermometers (CRESST) - München:

CRESST (Cryogenic Rare Event Search with Superconducting Thermometers) - Gran Sasso

EDELWEISS (Experience pour DEtecter Les Wimps En Site Souterrain) – Experiment – Frejus-Tunnel

Heidelberg Dark Matter Search Experiment (HDMS)

Germanium Nitrogen Underground Setup (GENIUS)

Cryogenic Dark Matter Search (CDMS)

Particle Dark Matter searches with highly radiopure scintillators at Gran Sasso (DAMA)

UK Dark Matter Collaboration (UKDMC)

Dunkle Materie-Suche mit Tieftemperatur-Detektoren und Erkennung von Kernrückstößen

CDMS: Cryogenic Dark Matter Search

USA

University of California at Berkeley, Stanford University

University of California at Santa Barbara, Case Western Reserve University

Princeton University, University of Colorado at Denver, Santa Clara University

Stanford Campus

Lawrence Berkeley National Laboratory, Fermi National Accelerator Laboratory

ab 2003 Soudan Mine

National Institute of Standards and Technology

EDELWEISS: Expérience pour DEtecter Les Wimps En Site Souterrain

Frankreich

Collège de France, Institut de Physique Nucléaire de Lyon,

Centre d'Etudes de Saclay, Laboratoire Souterrain Modane,

Fréjus Tunnel

Centre de Spectrométrie Nucléaire Orsay

CRESST: Cryogenic Rare Event Search with Superconducting Thermometers

Deutschland

Max Planck Institut für Physik in München,

England

Technische Universität München,

Oxford University

Italien

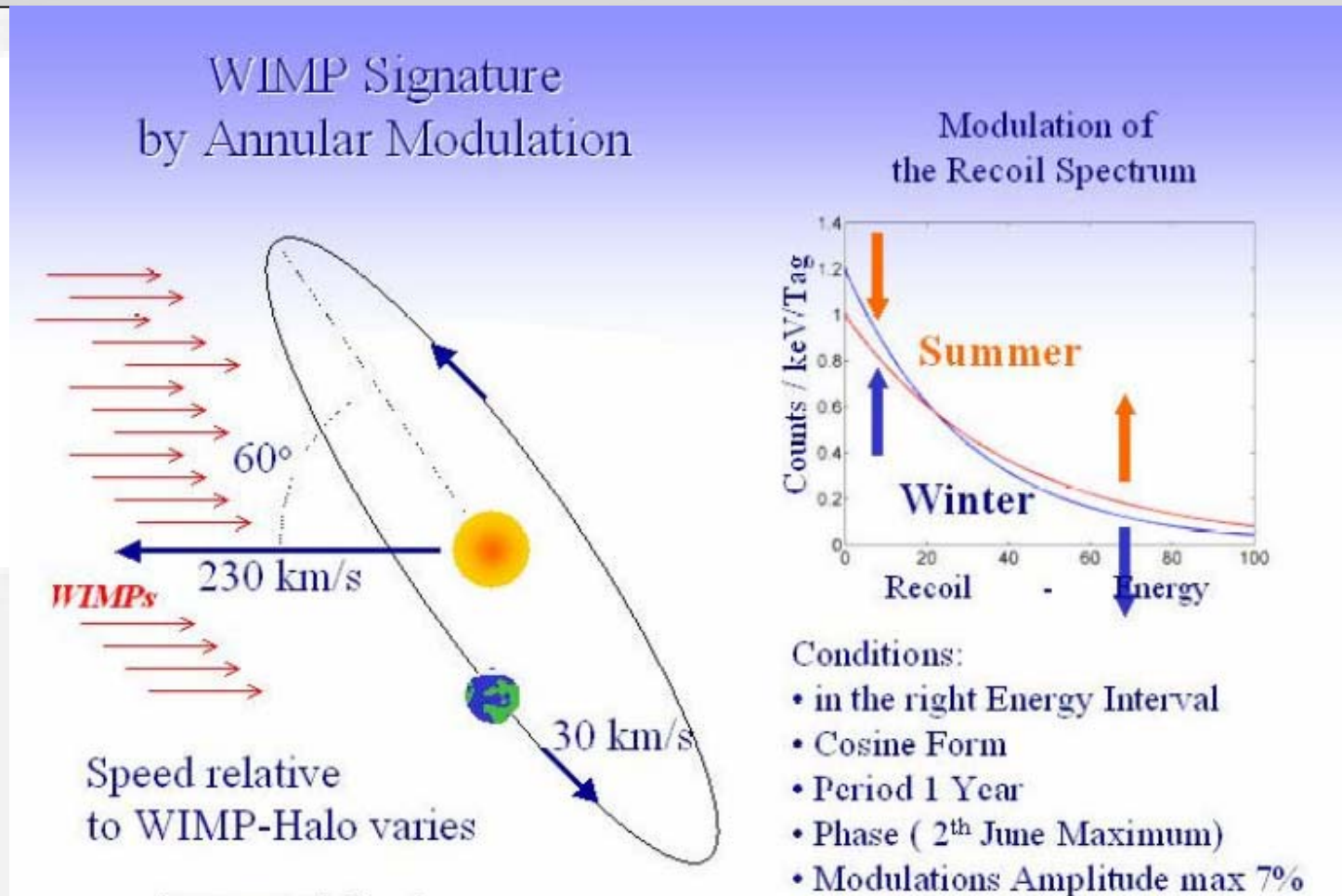
Laboratori Nazionali del Gran Sasso

Gran Sasso

Neutralinos / Experimente

- Bisläng nur Nullresultate!
- Bis auf DAMA: Ende 1998 jahreszeitliche Schwankung detektiert, aber: DAMA hat keine Mehrfachdetektoren zur Diskrimination zwischen Signal und Rauschen

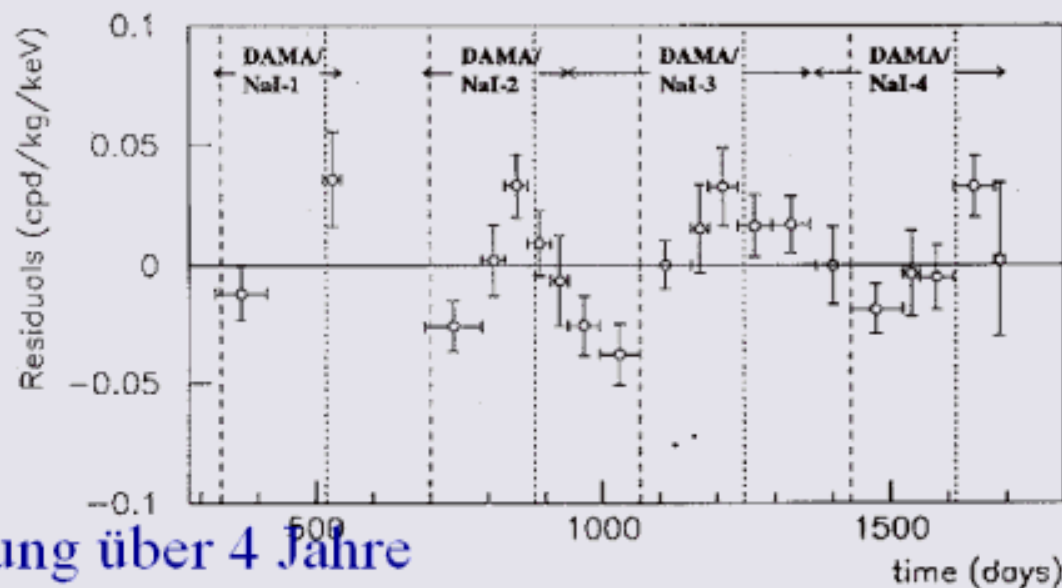
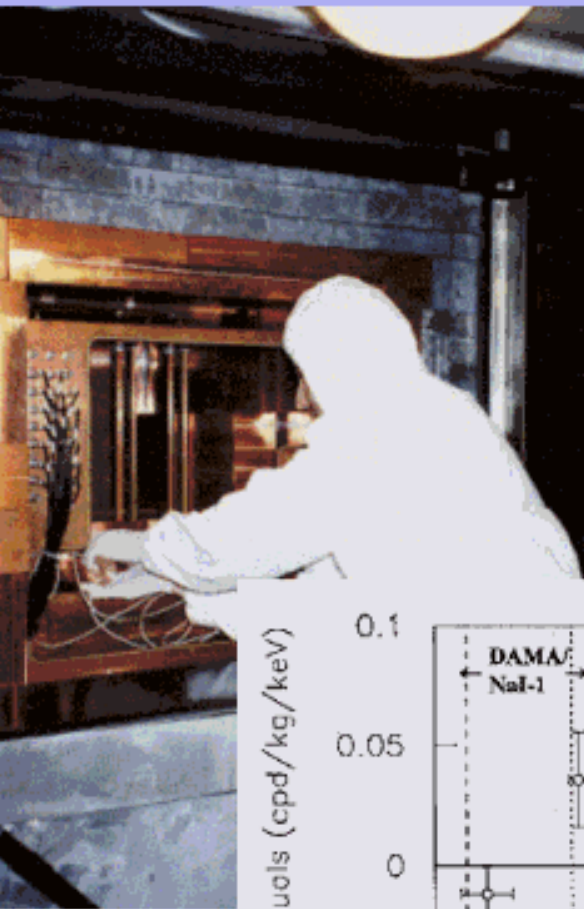
WIMPs / Experimente / Jahreszeitl. Rhythmus



- Bedingt durch Bewegung der Erde um die Sonne ändert sich die mittlere Geschwindigkeit relativ zu den WIMPs und damit das zu erwartende Rückstoßspektrum im jahreszeitlichen Rhythmus

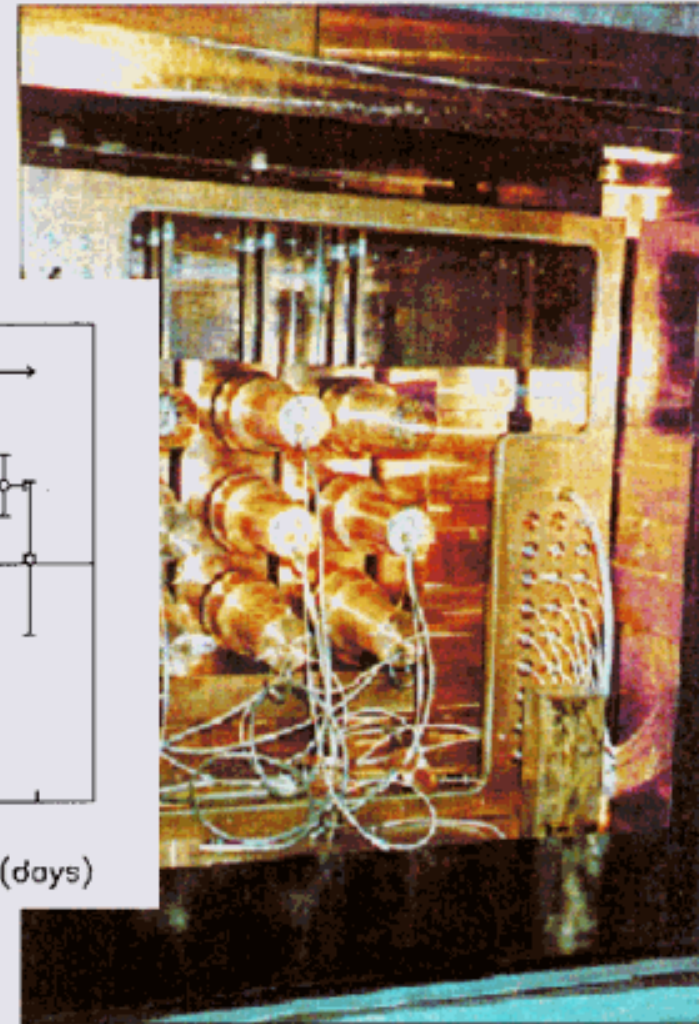
DAMA - Experiment: Positives Signal durch Nachweis jährlicher Modulation (Relativbewegung der Erde - DM-Halo)

im Gran Sasso
Untergrund Labor
~100kg NaI Detektoren
(9 x 9.7kg + 4x7.05kg)



Messung über 4 Jahre
(~ 58000 kg x Tage)

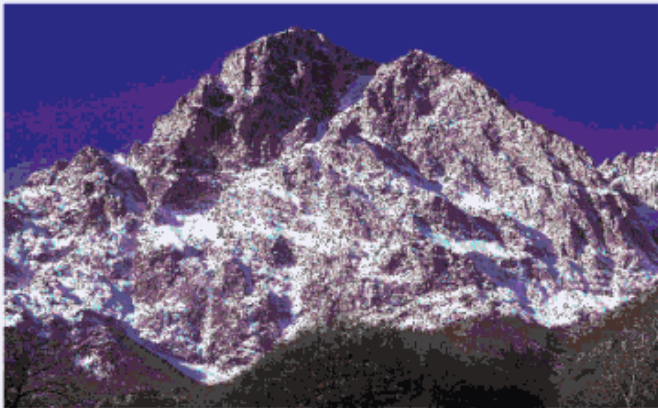
Phys.Letters **B480**, 23, (2000)



WIMPs / Experimente / CRESST

CRESST am Gran Sasso

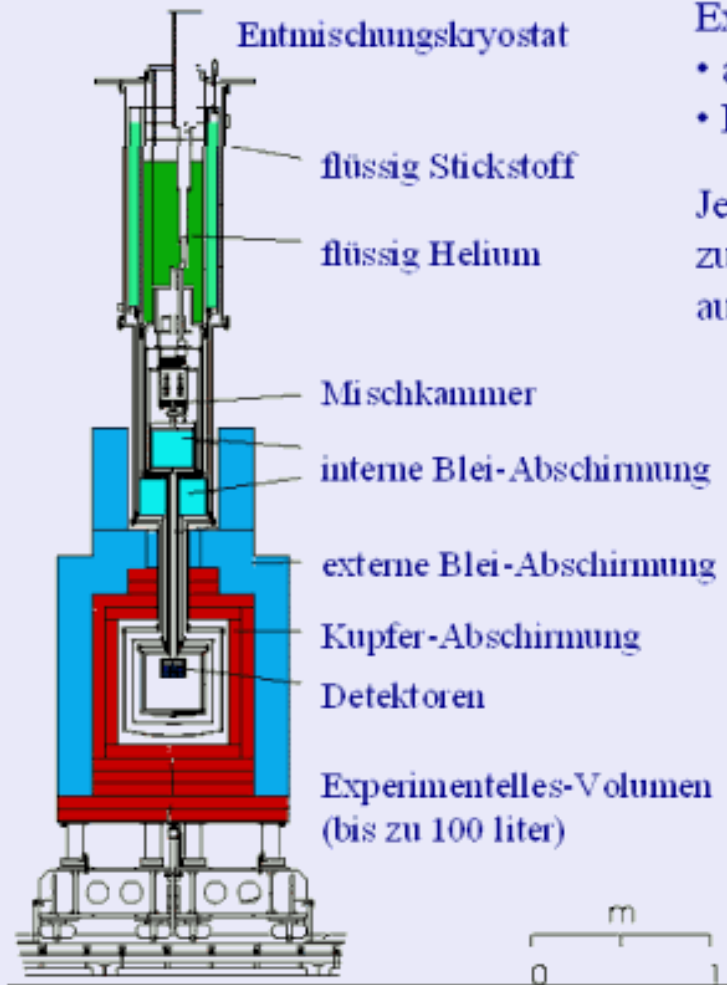
Cryogenic Rare Event Search with Superconducting Thermometers



Max Planck Institut für Physik, München
Technische Universität München
University of Oxford, England
Laboratori Nazionali del Gran Sasso, Italien

Josef Jochum

CRESST: Experimenteller Aufbau

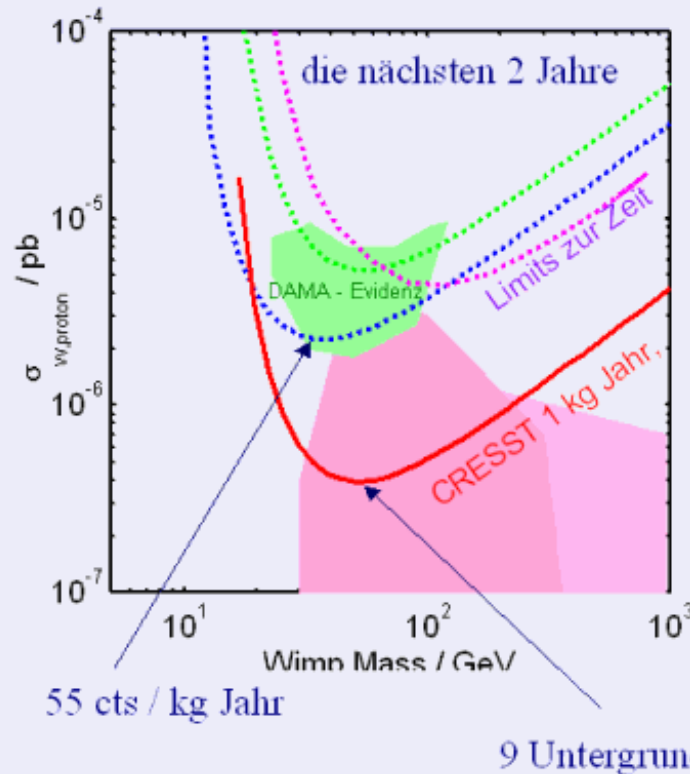


Experimentelles Volumen - Cold Box:

- abgeschirmt (14cm Cu + 20cm Pb)
- Kühlfinger durch Abschirmung

Jetzige ColdBox kann bis zu 100 kg Detektormaterial aufnehmen



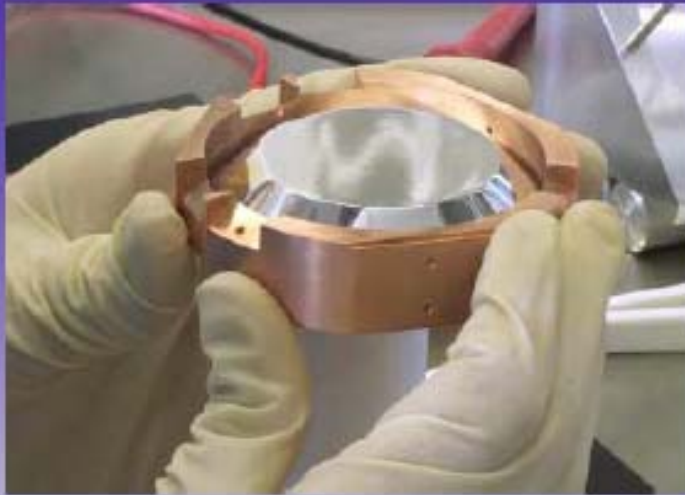


Projekte:

- Upgrade von 4 auf 66 SQUIDs
 - Neutronen Abschirmung
 - Muon-Veto
 - nach und nach Ausbau auf 33 Detektoren (je 300g)
- => DAMA Evidenz sehr bald überprüfbar
 => 10kg Target Masse
 => langfristig einige 10kg Jahre

- Die von DAMA gefundenen Hinweise auf WIMPs bestätigen oder ausschließen
- Tieftemperatur-Kalorimeter mit Detektormassen bis hin zu 1000 kg (Großteil des von der Supersymmetrie vorhergesagten Bereiches von Wirkungsquerschnitten abdecken)

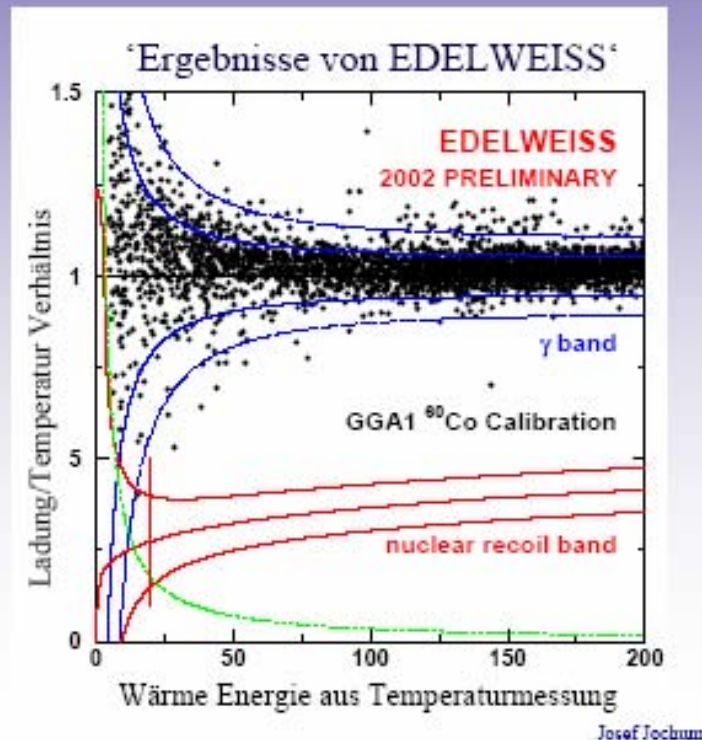
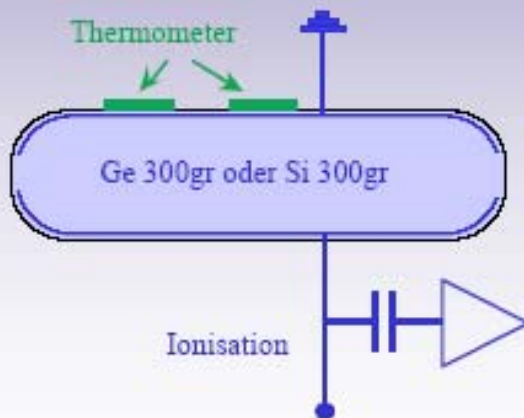
WIMPs / Experimente / EDELWEISS



Ergebnisse von EDELWEISS

Mai 2002

Ionisations-Temperatur-Messung
320g Ge-Detektor
Fréjus-Tunnel
einige Wochen



- 300 g statt 100 kg an Detektor-Material

Aktueller Status

Suche nach Teilchen der Dunklen Materie

Tiefemperatur Detektor Limits

Untergrund-Unterdrückung

EDELWEISS

Phys.Lett. B 513, 15, (2001)

5 kg Tage

CDMS

Phys.Rev.Letts 84, 5699, (2000)

Stanford Campus

17 m.w.e

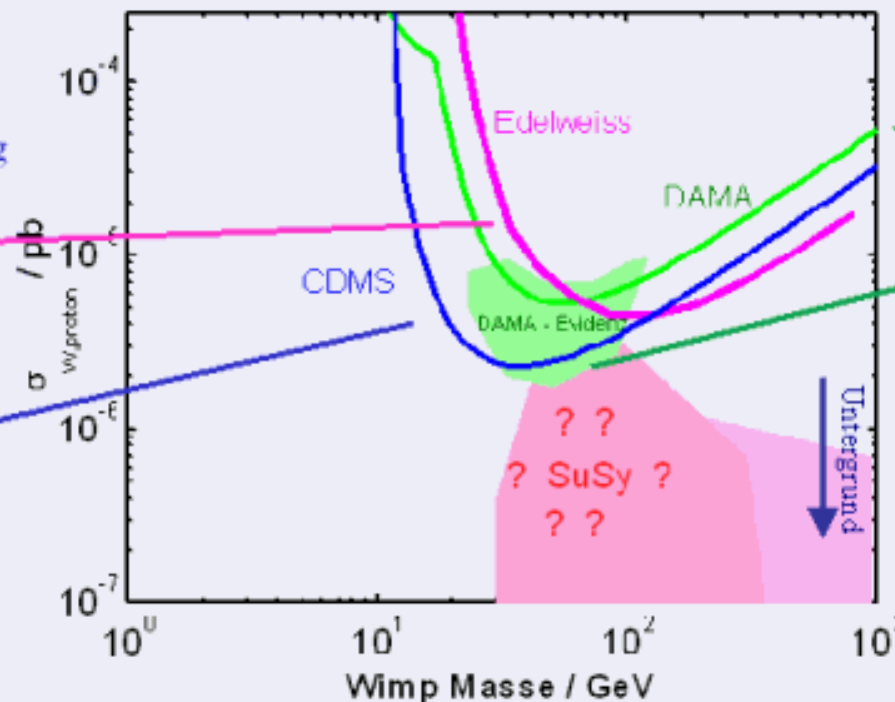
3 Monate

mit etwa

100gr

10.6 kg Tage

Detektoren mit Untergrund-Unterdrückung:
 10^3 bis 10^4 mal sensitiver



NaI DAMA Limits

NaI DAMA Evidenz

(60GeV, $5 \cdot 10^{-6}$ pb)

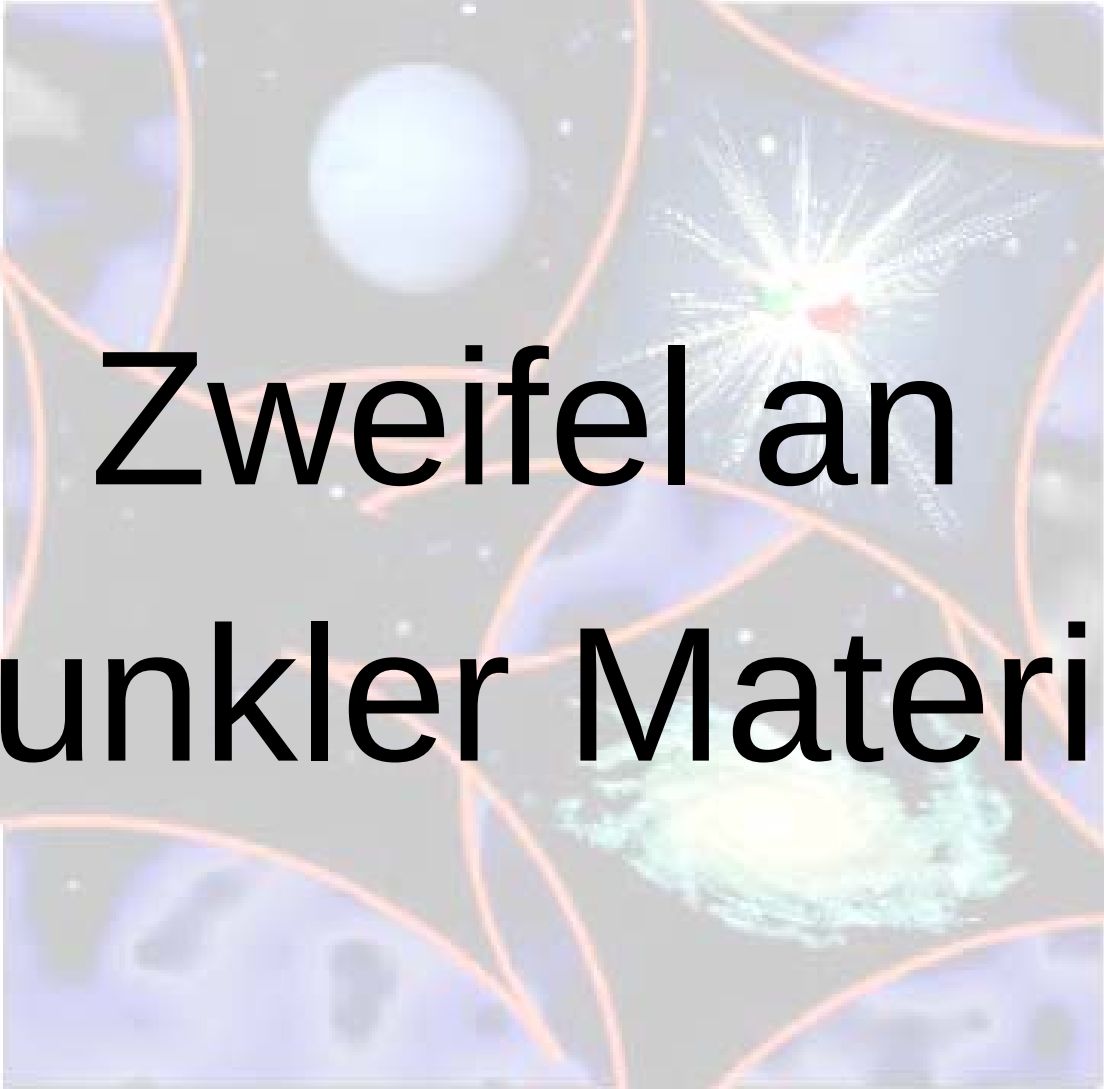
Phys.Lett, B480, 23, (2000)

im Gran Sasso Labor
ca 3500 m.w.e.

4 Jahre
mit etwa
100 kg

57986 kg Tage

Tiefemperatur-Kalorimeter sehr aussichtsreich

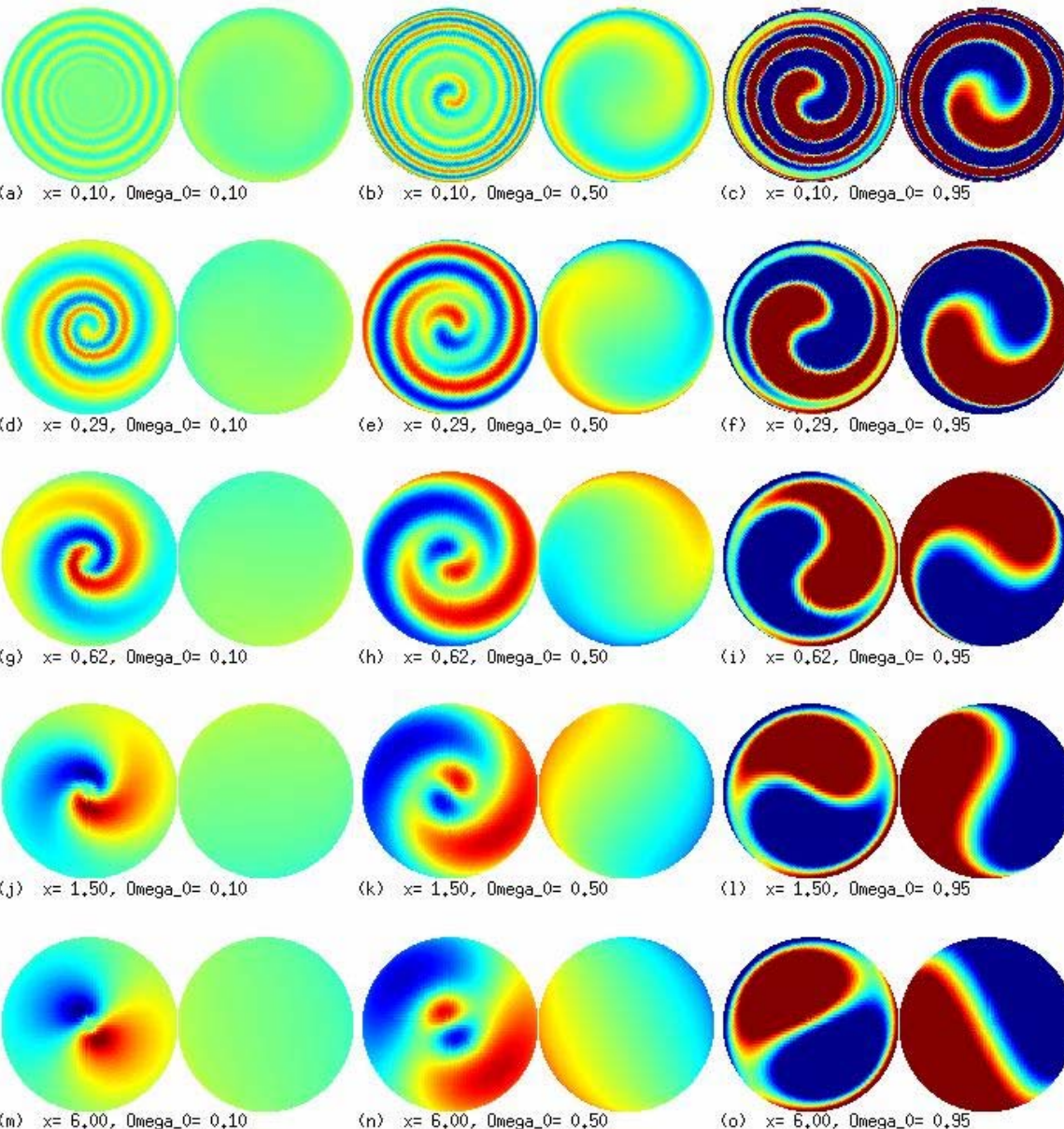
The background of the slide features a cosmic scene. In the upper right, there is a bright starburst or supernova remnant with radiating filaments. In the lower right, there is a spiral galaxy with a yellowish core and blueish-green arms. The entire scene is set against a dark blue space background with small white stars. Overlaid on this is a large, semi-transparent, reddish-orange star-like shape with eight points, resembling a stylized cross or a celestial body. The title text is centered over this graphic.

Zweifel an Dunkler Materie

Probleme mit WMAP-Resultaten

- WMAP und COBE finden ein Fehlen an Temperaturvariationen auf den größten Skalen (>60 Grad)
 - Statistisch? Himmel nur 360 Grad, nicht genügend großskalige Regionen für adäquates sampling
 - Oder: Probleme mit Inflation, Dunkler Energie, Topologie des Universums

Verletzung der kosmischen Isotropie?

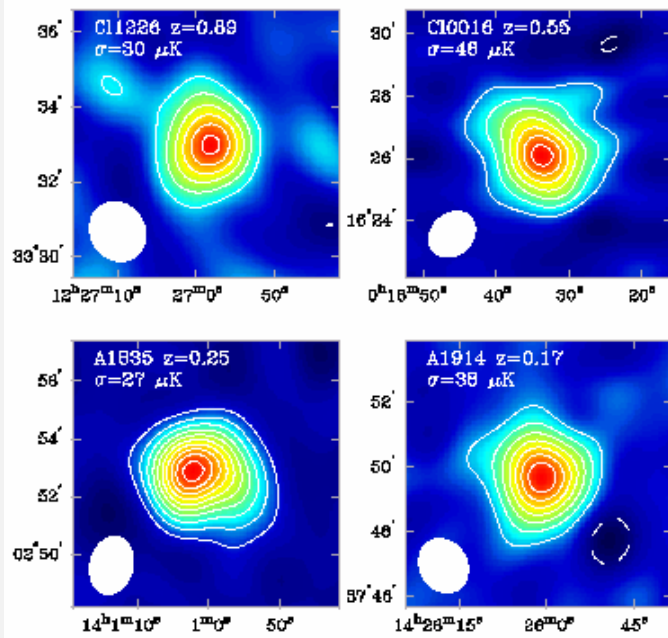
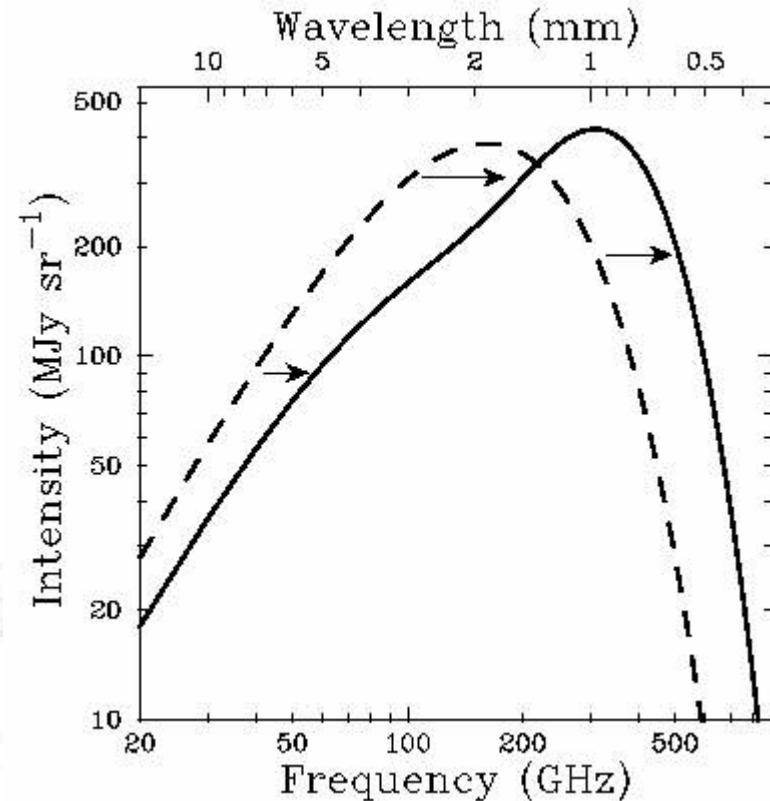


- Beispiele für durch Bianchi Modelle mit verschiedenen Parametern induzierte CMB Anisotropiemuster. Jeder Graph zeigt den gesamten Himmel in orthographischer Projektion
- Jaffe, Banday & Chluba

Zweifel an Dunkler Materie

- Galaxienhaufen können die Hintergrundstrahlung erheblich stören und verändern
- Sunyaev-Zeldovich-Effekt

$$\Delta\nu / \nu = -4 (k_B T_e / m_e c^2)$$



Cooperstock & Tieu

- Cooperstock & Tieu: Allgemein Relativistisches Galaxienmodell, gleichförmig rotierende Flüssigkeit ohne Druck, flache Rotationskurven *ohne* Dunkle Materie (NGC 3031, NGC 3198, NGC 7331); Sterne bewegen sich nur unter der Schwerkraft (gravitationsgebunden), in der Allgemeinen Relativitätstheorie ein intrinsisches nicht-lineares Problem (Auch wenn das Feld schwach und die Bewegungen nicht-relativistisch sind); bei Planeten: Planeten vernachlässigbar, Sonne enthält 99.86% der Gesamtmasse; Galaxien: Sterne, Gas, Staub, Schwarze Löcher (<1%) sind gemeinsam die Quelle der Gravitation
- Korzynski: hat zusätzliche Quelle eines Gravitationsfeldes in Form einer rotierenden flachen Scheibe: unphysikalisch
- Vogt & Letelier: Scheibe ist aus exotischer Materie
- Garfinkle; Cross: inkonsistent!
- Antwort und Verteidigung durch Cooperstock & Tieu

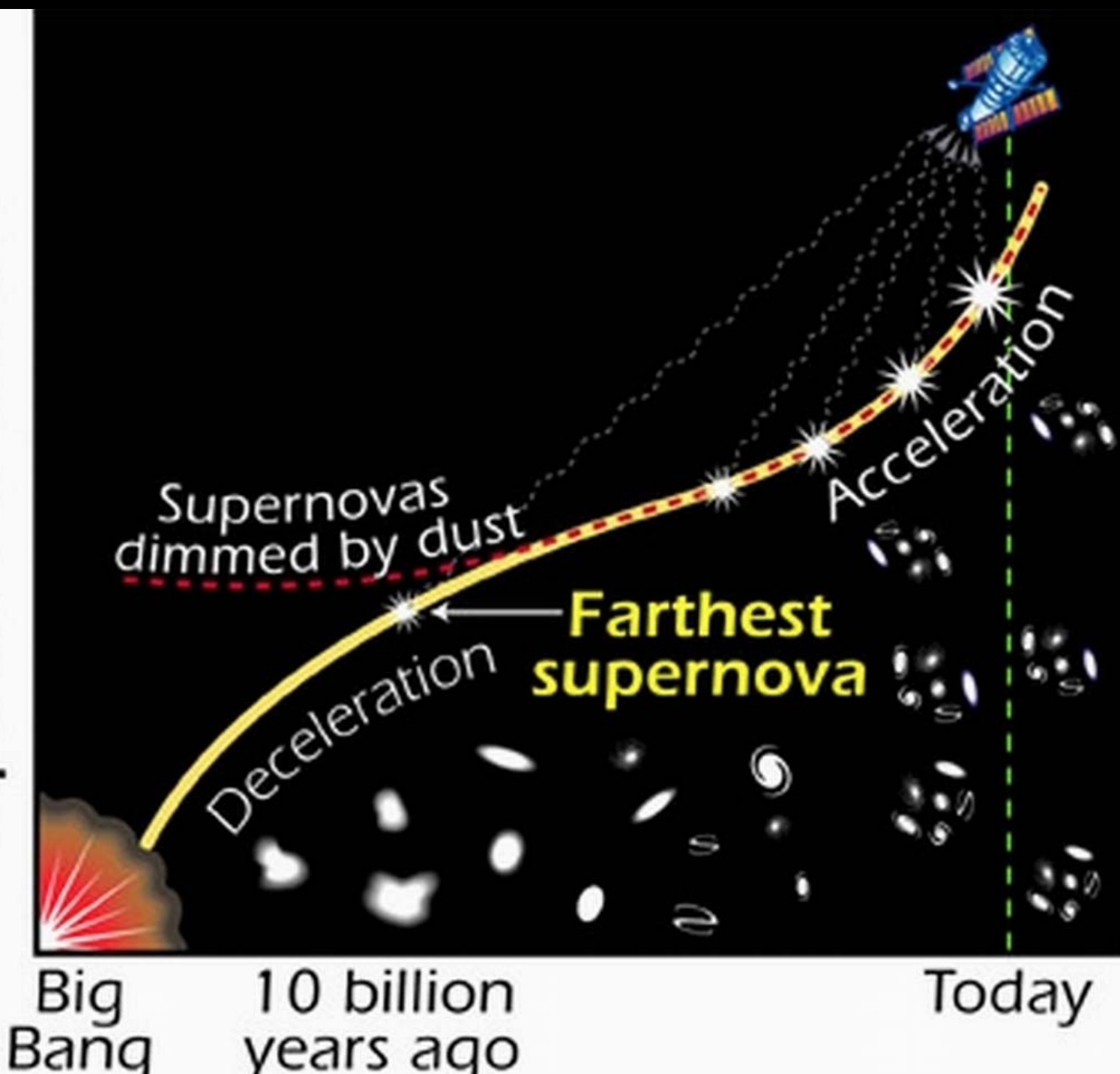
Zweifel an Dunkler Materie / MOND

- Bislang erfolgreich!
- MOND-Theorie: modified Newtonian dynamics, 1983, M. Milgrom, Newton's 2. Gesetz ($F=ma$) ist Näherungslösung für den hoch-beschleunigten Fall; Näherung eines allgemeineren Gesetzes, welches für alle Beschleunigungen gilt
- Untersuchungen: 3000 Satellitengalaxien
- MOND-Theorie zur Zeit falsch!

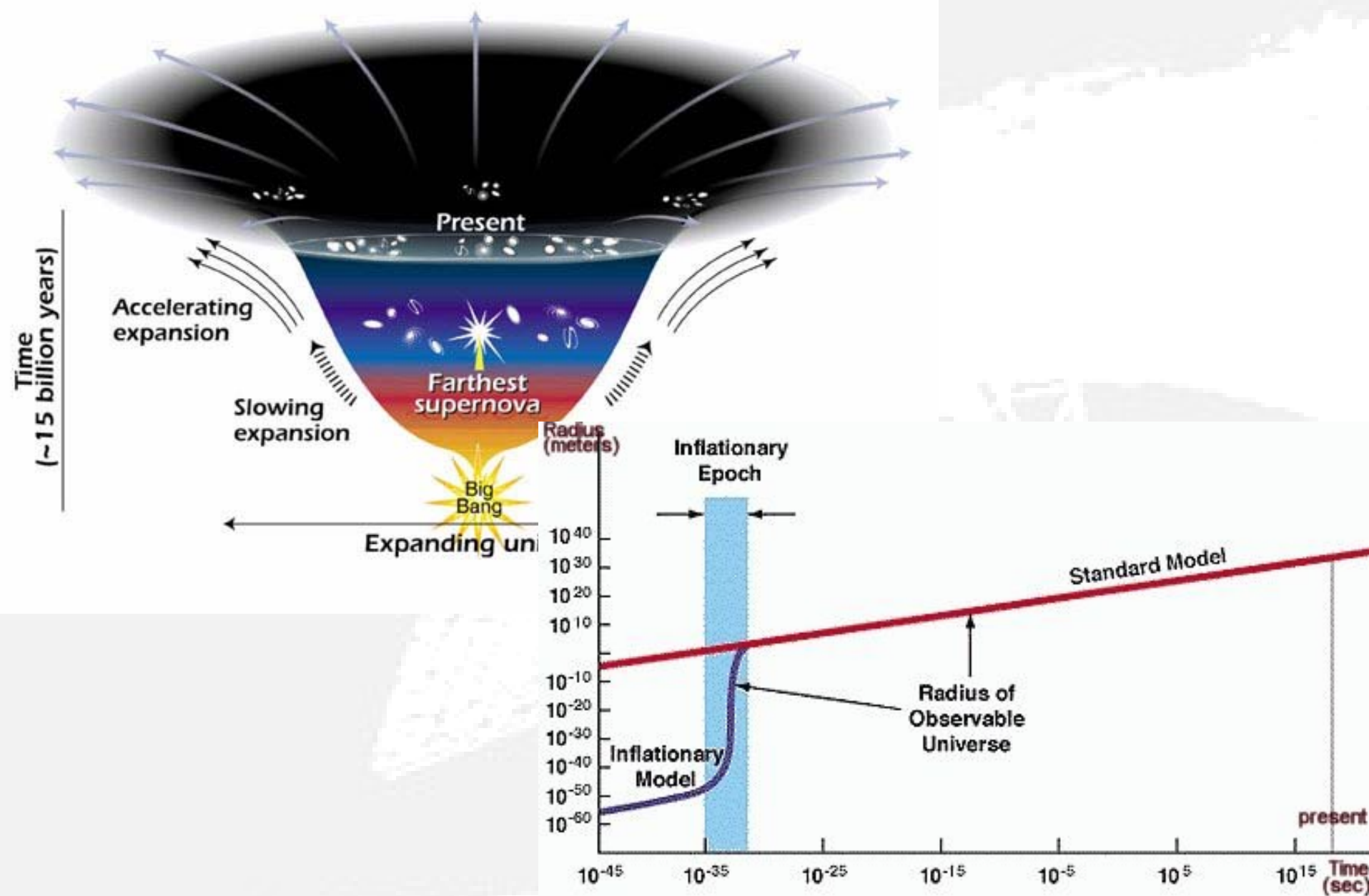
Dunkle Energie



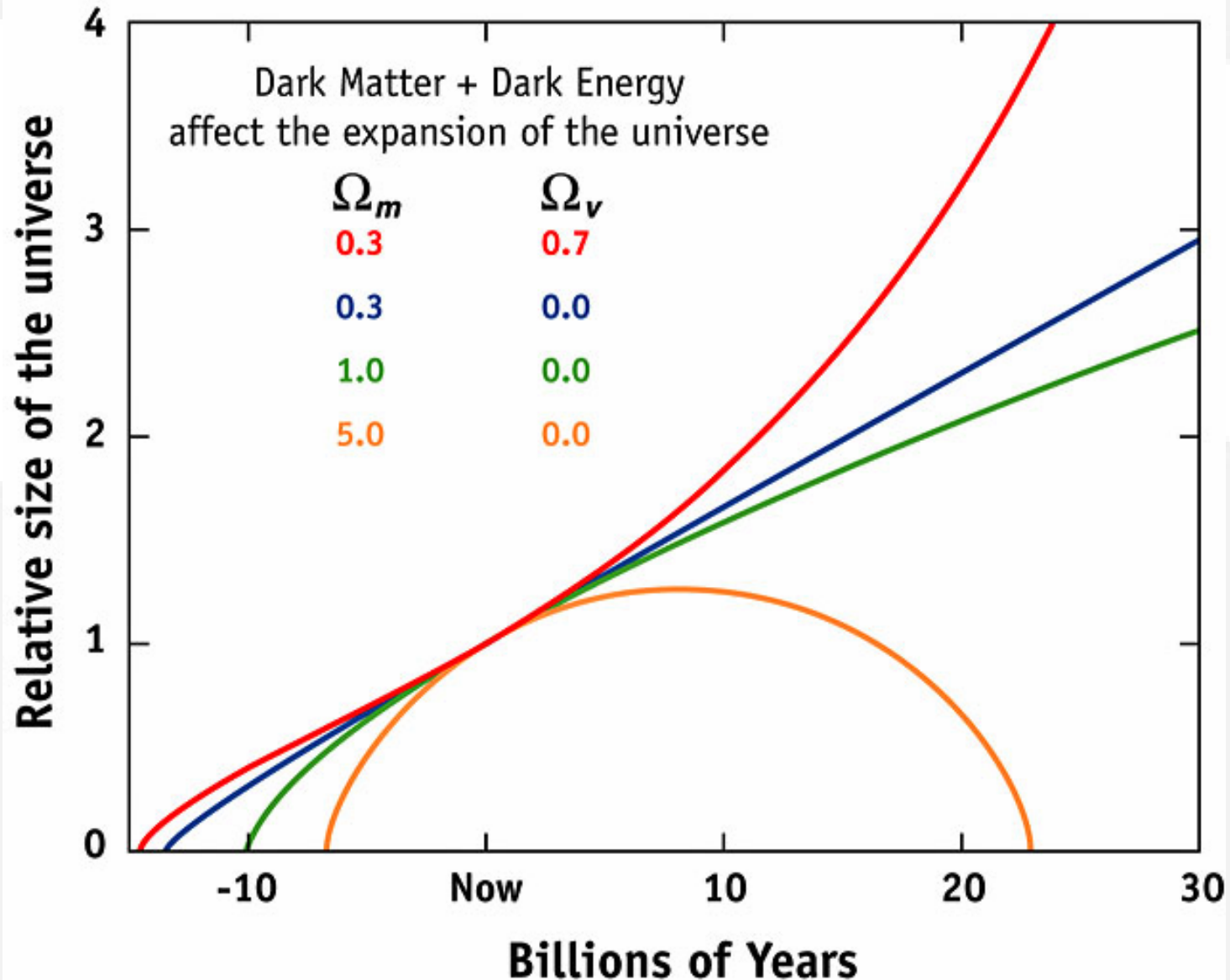
Expansion of universe



Dunkle Energie



Kritische Dichte und Expansion des Universums



Dunkle Energie / Experimentelle Hinweise

- Cosmic Lens All Sky Survey (CLASS), Tausende entfernter Radiogalaxien wurden kartiert, die Charakteristiken von Gravitationslinsen aufweisen: bei einem von 700 weit entfernten Quasaren fungiert eine davor liegende Galaxie als Linse (mit VLA, MERLIN, VLBI)
- Je schneller das Universum auseinander driftet, desto ausgedehnter ist es inzwischen, mit der Distanz wächst die Wahrscheinlichkeit, daß zwischen Quasar und Beobachtungsposten eine Galaxie liegt, die ihn als Trugbild erscheinen läßt
- Ergebnis: zwei Drittel der Energie im Universum muß Dunkle Energie sein

Dunkle Energie / Warum ?

- Existenz der Dunklen Energie folgt aus folgender Rechnung:
 - Wir kennen (?) sehr genau die totale Energiedichte im Universum. Findet man nun, daß die Summe aller klumpenden Materieformen (=Baryonen + Dunkle Materie) nur ungefähr 30% der totalen Energiedichte ausmacht, dann müssen die restlichen 70% homogen über das Universum verteilt sein.
 - Alle Teilchen mit genügend großer Masse müssen unter dem Einfluß der Gravitation Klumpen bilden und sollten sich daher in Galaxien oder Galaxienhaufen konzentrieren. Masselose oder extrem leichte Teilchen, die der Schwerkraft der Galaxienhaufen entfliehen können, sind die Photonen und die Neutrinos. Beide kommen jedoch nicht als Kandidaten für die Dunkle Energie in Frage.

Dunkle Energie

- Bestimmt die Entwicklung des Kosmos als Ganzes
- Treibt das Universum in Wechselwirkung mit der Gravitation wie nach einer Explosion auseinander
- In früheren Epochen der kosmologischen Entwicklung weit weniger bedeutend (Dunkle Materie dominierte, während der ersten 100 000 Jahre beherrschte die Strahlung das Geschehen)
- Ihr Druck wirkt negativ: verlangsamte Expansion hat sich mittlerweile in eine beschleunigte Expansion umgekehrt (Supernova-Explosionen).
- Beeinflußt die Lage des ersten Maximums der Anisotropien der kosmischen Hintergrundstrahlung
- Beeinflußt den gesamten charakteristischen Verlauf der Kurve mit Maxima und Minima

Dunkle Energie / Quintessenz

- Was wir wissen: ist völlig strukturlos, **verteilt sich in perfekter Gleichförmigkeit im Universum, ihr Druck ist negativ**
- Was ist Dunkle Energie? Einsteins „kosmologische Konstante“, dynamisches Quantenfeld („Quintessenz“) ?
- **Quintessenz** (von [lat. quinta essentia](#) „fünftes Seiendes“, das Wesentliche, Hauptsächliche, Wichtigste) ist
- in der Allgemeinsprache ein Synonym für *Kernpunkt*, *Endergebnis*, *Hauptgedanke*, *Wesen einer Sache*;
- in der [Philosophie](#) und [Alchemie](#) ein Synonym für [Äther](#), siehe [Quintessenz \(Philosophie\)](#);
- in [Österreich](#) ein Verein, der sich dem Datenschutz widmet, siehe [Quintessenz \(Verein\)](#).

Einstein

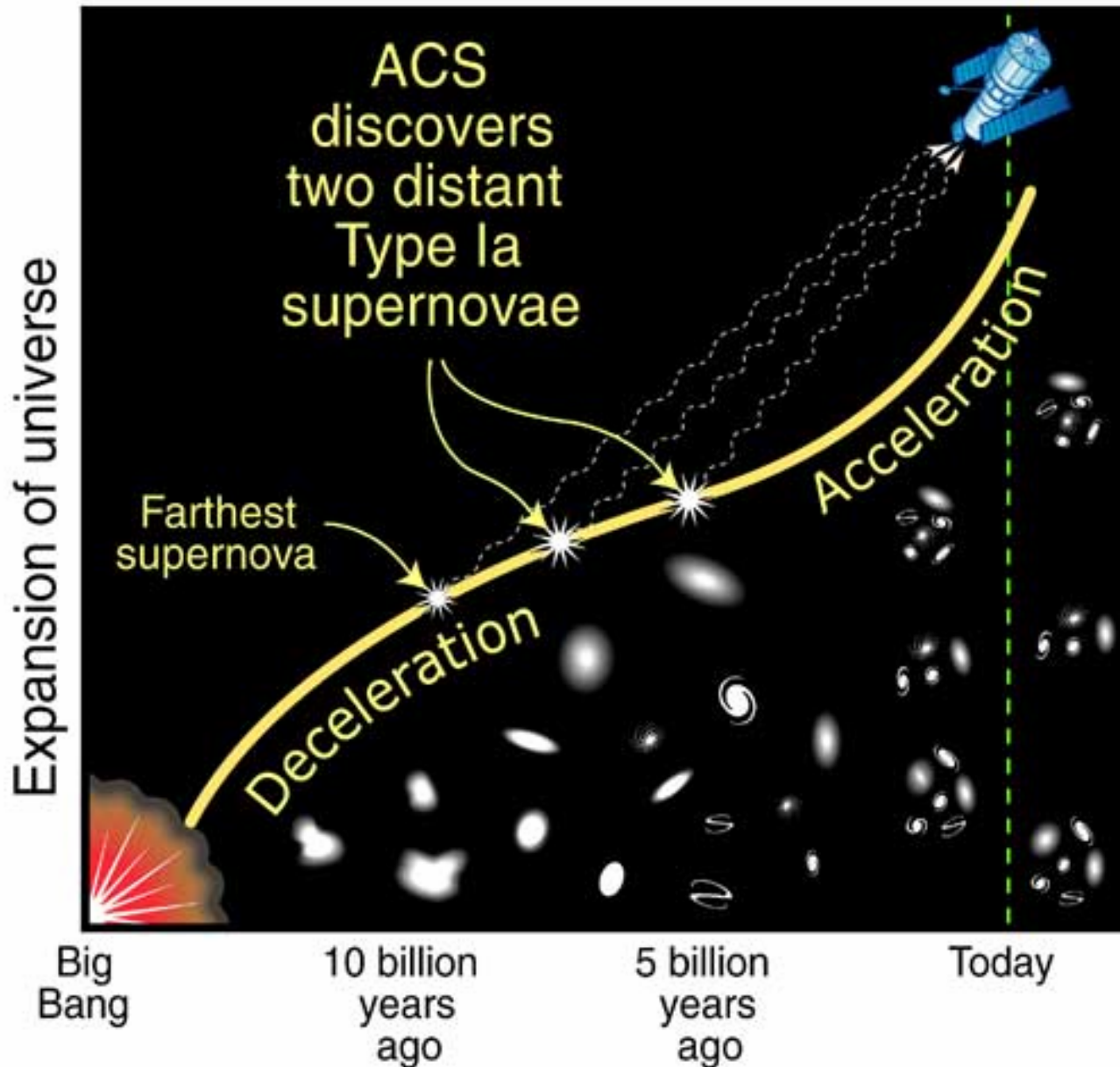
- „Seitdem ich die Kosmologische Konstante eingeführt habe, hatte ich ständig ein schlechtes Gewissen. Ich kann nicht glauben, daß es in der Natur solch etwas Hässliches tatsächlich gibt.“ (1947)
- 1917 nachträglich in seine Relativitätstheorie eingebaut, nachdem er festgestellt hatte, daß sich das Universum sonst entweder ausdehnen oder in sich zusammenfallen müßte
- Kosmologische Konstante = Gegenkraft zur Gravitation, hält das Universum im statischen Gleichgewicht
- Damals nur Milchstraße bekannt ..
- Hubble: Expansion des Universums -> Einstein bezeichnet KK als seine größte Eselei bezeichnet

Quintessenz

- Quintessenz beruht auf der Quantenfeldtheorie für das skalare Kosmon-Feld: durch den Austausch von virtuellen Kosmon-Quanten wird eine Kraft vermittelt
- 5. Kraft
- Äquivalenzprinzip wird verletzt: Körper nicht gleicher Masse aber verschiedener Zusammensetzung fallen auch im Vakuum nicht mehr gleich schnell; Satellit MICROSCOPE soll die winzigen Unterschiede messen
- Quintessenz sagt Zeitabhängigkeit der fundamentalen „Konstanten“ voraus
- Präziseste Möglichkeit, nach einer Zeitänderung der Kopplungskonstanten im frühen Universum zu fahnden: Änderung der Feinstrukturkonstanten durch Absorptionslinien im Licht ferner Quasare (im frühen Universum etwas weniger als ein Hunderttausendstel kleiner als heute)
- *Panta rei* – alles fließt

- Einsteins „größte Eselei“? Oder eine Dunkle Energie, die sich dynamisch verändert („Quintessenz“)?
- Unterschied: Zeitverhalten
 - Kosmologische Konstante kann in frühen Stadien der Entwicklung des Universums völlig vernachlässigt werden
 - Quintessenz kann schon zu Zeiten der Nukleosynthese eine Rolle gespielt haben
 - Beschleunigung der Expansion des Universums geringer für Quintessenz
 - Bisherige Messungen schließen einige Quintessenzmodelle aus

Pro und Contra Einstein



- 42 extrem weit entfernte Typ Ia Supernovae entdeckt und vermessen
- Dunkle Energie entweder gar nicht oder wenig veränderlich
- Kosmologische Konstante bleibt richtige Beschreibung

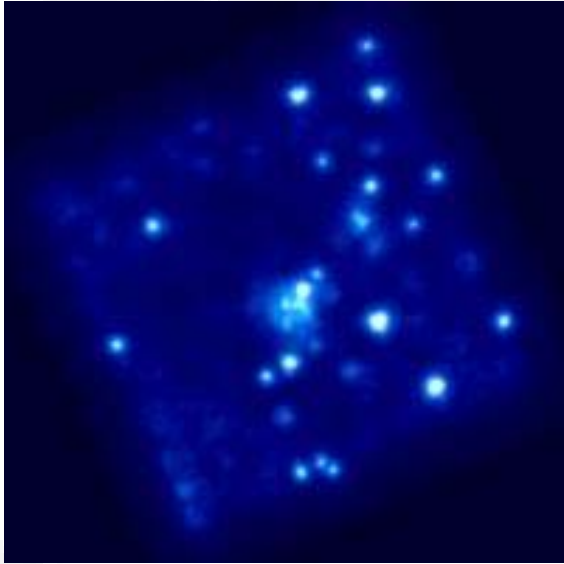
... Pro und Contra Einstein

- Hunderte entfernte Supernovae: Dunkle Energie verhält sich, wie die Kosmologische Konstante (Genauigkeit von 10%); frühere Expansion langsamer, jetzt schneller
- 52 Gamma-ray bursts: Dunkle Energie verändert sich mit der Zeit (B. Schaefer)

Ketzerei Teil II



Zweifel an Dunkler Energie



Der Galaxienhaufen RXJ0847.2+3449 in rund 7 Milliarden Lichtjahren Entfernung. **Foto:** ESA

- XMM-Newton: 8 Galaxienhaufen untersucht , bis zu 10 Lichtjahre entfernt
- In einem Universum mit hoher Materiedichte sollte ein Galaxienhaufen im Laufe der Zeit immer weiter anwachsen: junge Galaxienhaufen sollten weniger Masse haben als alte
- In einem Universum mit niedriger Materiedichte (unseres, + 70% Dunkle Energie) sollten Galaxienhaufen ser früh aufhören zu wachsen und damit ähnlich aussehen wie heute

Zweifel an Dunkler Energie

- XMM-Newton Daten: alte Galaxienhaufen unterscheiden sich deutlich von neuen Galaxienhaufen!!
- In der Vergangenheit gab es weniger Galaxienhaufen als heute
- => Universum weist hohe Materiedichte auf
- Eklatanter Widerspruch zum aktuellen „Dunkle Energie“-Modell
- Dunkle Energie gibt es möglicherweise nicht

Alternative zur Dunklen Energie

- Team italienischer und amerikanischer Forscher: vom Urknall hinterlassene **wellenförmige Verwerfungen des Raumes (Big Rip)**, größer als der sichtbare Kosmos!
- Überbleibsel der „inflationären Phase“, Weltall bläht sich in Sekundenbruchteilen gewaltig auf, Gravitationswellen=wellenförmige Verzerrungen des Raumes, Inflation bläht diese Welle auf
- Wellen nicht beobachtbar, beeinflussen dennoch die Entwicklung des Kosmos: langfristige Schwankungen der Expansionsgeschwindigkeit im „lokalen Kosmos“
- Überprüfbare Konsequenzen: Spuren in der kosmischen Hintergrundstrahlung -> Planck, 2007

Alles nur falsch berechnet ...

- Lambda-Problem, Energiedichte des Vakuums
- Aus Bequemlichkeit lange gleich 0 gesetzt, Hinweise darauf, daß sie nicht gleich 0 ist -> Bedarf an Dunkler Materie wird geringer
- J.L.Riley: light turning into matter as it ages ...

Modell mit Inflation und kosmologischer Konstante

Raumkrümmung flacher Raum $k = 0$, Kritische Dichte $\varrho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G}$ Massendichte ϱ_{total}

Hubble-Konstante mit $H_0 \approx 71 \frac{\text{km/s}}{\text{Mpc}}$ folgt $\varrho_{\text{total}} = 9.2 \cdot 10^{-30} \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$

$$\Omega_{\text{total}} = \frac{\varrho_{\text{total}}}{\varrho_c} = 1$$

$$\Omega_{\text{baryon}} = \frac{\varrho_{\text{baryon}}}{\varrho_c} = 0.04, \quad \varrho_{\text{baryon}} = 3.7 \cdot 10^{-31} \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$\Omega_{\text{CDM}} = \frac{\varrho_{\text{CDM}}}{\varrho_c} = 0.23$$

$$\Omega_{\Lambda} = \frac{\varrho_{\Lambda}}{\varrho_c} = 0.73$$

DAS IST ES !

Nicht so ganz!



Fortsetzung der Ketzerei: nächste Woche

17.02.2006 Die Zeit vor dem Urknall



17.02.2006 Die Zeit vor dem Urknall

- Standardmodell der Kosmologie
- Probleme des Standardmodells
- Kurz nach dem Urknall: Das „inflationäre Universum“
- Oder: Was war vor dem Urknall?
 - „Unglaubliche“ Neue Theorien:
 - Universum entsteht aus sich selber (Gott/Li, Princeton)
 - Multiversen (Linde, Stanford)
 - Paralleluniversum (Steinhardt, Princeton)
 - Schwarzes Loch als „Eizelle“ (Smolin, Pennsylvania State University)