

Seminar Astroteilchenphysik

Nicht-Baryonische, dunkle Materie

Frank Eibofner

26.März 04

Übersicht

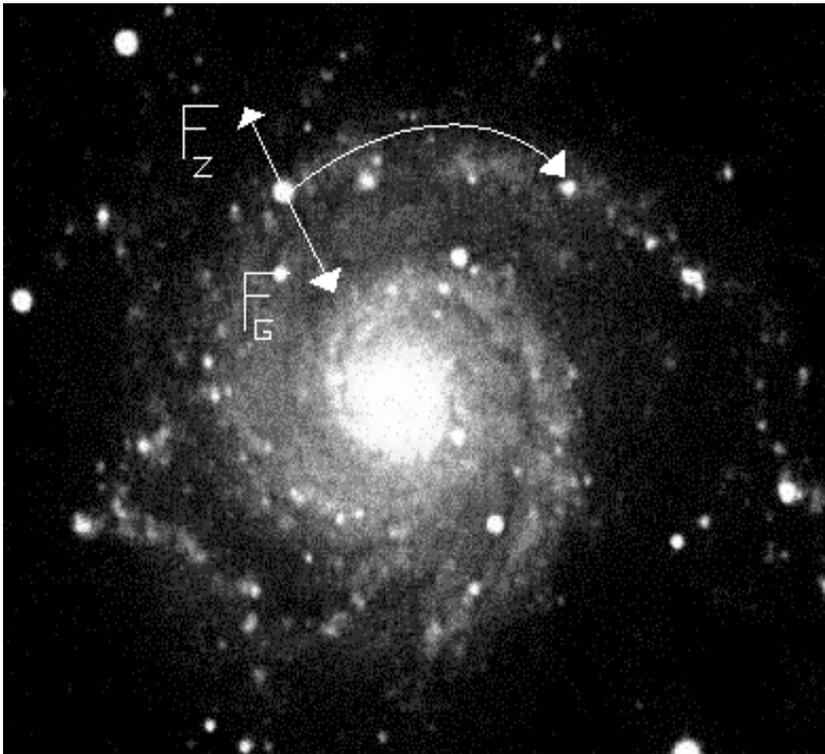
- **1.) Hinweise auf dunkle Materie**
 - Historisch
 - Massenbestimmungsverfahren
- **2.) Theorien**
 - Nicht-Teilchen
 - Teilchen
 - Nicht-baryonisch
 - Baryonisch
 - Axionen
 - WIMPs
- **3.) Nachweismethoden**
 - Axionen
 - WIMPs

1. Hinweise auf dunkle Materie

- **1846 Herschel, LeVerrier: Bahnkurve des Uranus → Neptun**
- **1862 Bessel, Clark: Bahnkurve des Sirius → Doppelstern, erster weißer Zwerg**
- **1933 Zwicky: Sternbewegungen im Coma-Galaxiehaufen → dunkle Materie**

1. Hinweise auf dunkle Materie

Rotationskurven von Spiralgalaxien



Aus der Gleichgewichtsbedingung, Fliehkraft = Gravitationskraft folgt für die Sternengeschwindigkeit:

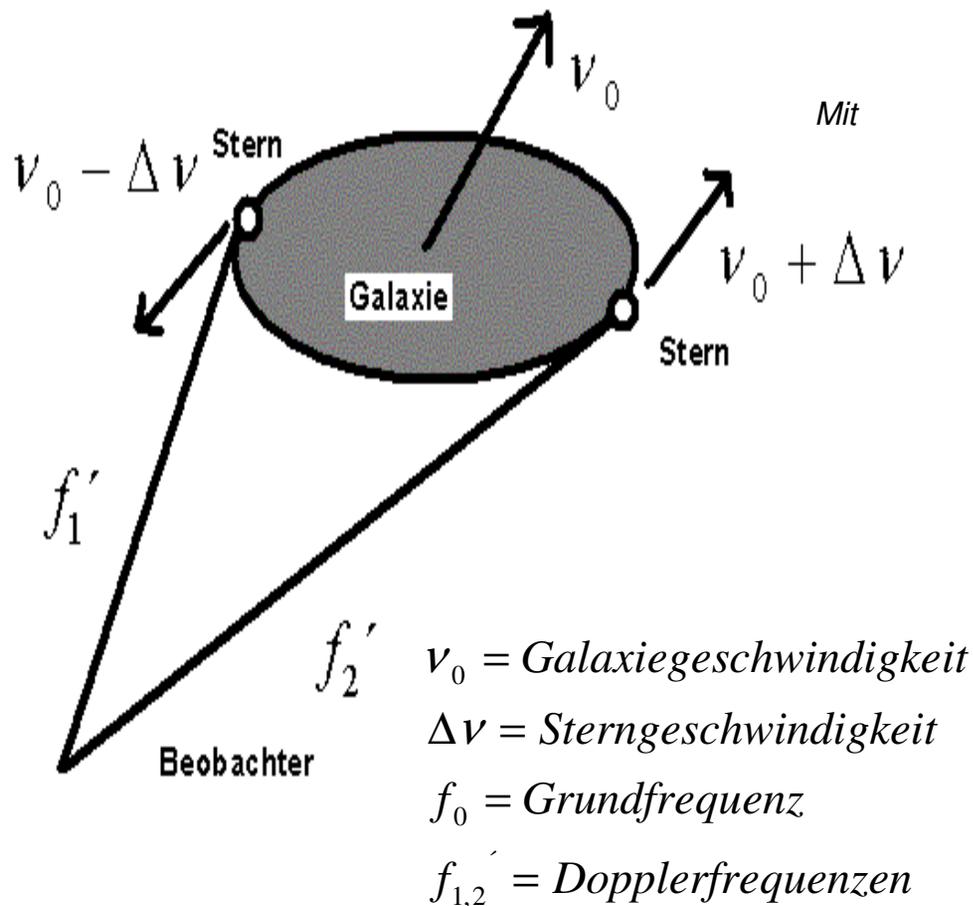
$$\frac{G * m * M_r}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$$
$$\Rightarrow v(r) = \sqrt{\frac{G * M_r}{r}} \propto \sqrt{\frac{1}{r}}$$

M_r = Masse die von Bahnkurve eingeschlossen wird

R = Abstand Stern-Galaxiezentrum

1. Hinweise auf dunkle Materie

Dopplermessungen



Die wahren Geschwindigkeiten der Sterne lassen sich durch Dopplermessungen der 21cm Linie der Hyperfeinstruktur des Wasserstoffs bestimmen.

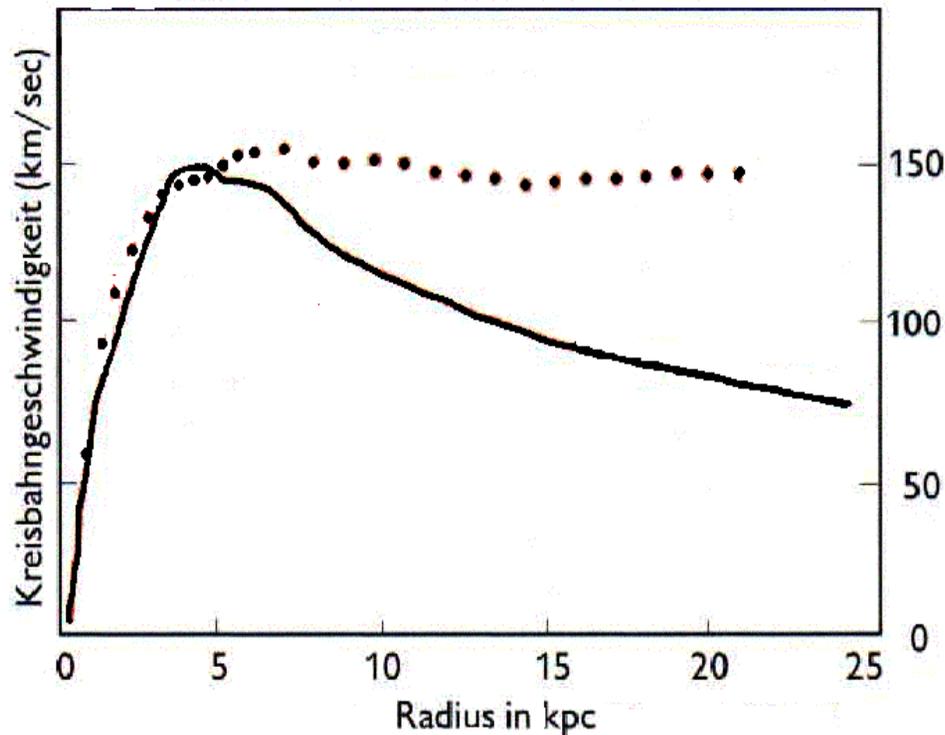
$$\frac{f' \pm f_0}{f_0} = \frac{v_0 \pm \Delta v}{c}$$

$$\Delta f' = f_1' - f_2' = \frac{f_0}{c} * 2\Delta v$$

$$\Delta v = \frac{\Delta f' * c}{2f_0} = v(r)$$

1. Hinweise auf dunkle Materie

Sterngeschwindigkeiten in Abhängigkeit des Abstands vom Galaxiezentrum



Messwerte → gepunktete Linie

Theorie → durchgezogene Linie

Ergebnis:

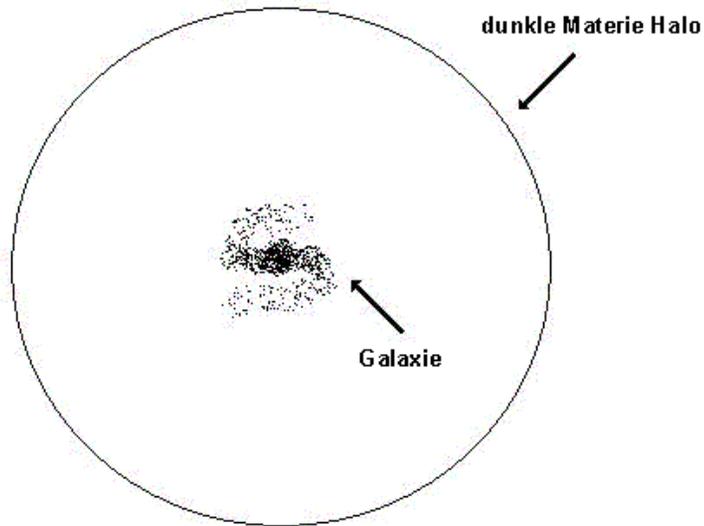
$$v^2 = \frac{G * M_r}{r} = \text{const.}$$

$$\Rightarrow M(r) = \frac{v^2 * r}{G} \propto r$$

$$\Rightarrow \rho(r) \propto \frac{1}{r^2}$$

1. Hinweise auf dunkle Materie

Dunkle Materie Halo



$$\Rightarrow \rho(r) \propto \frac{1}{r^2}$$

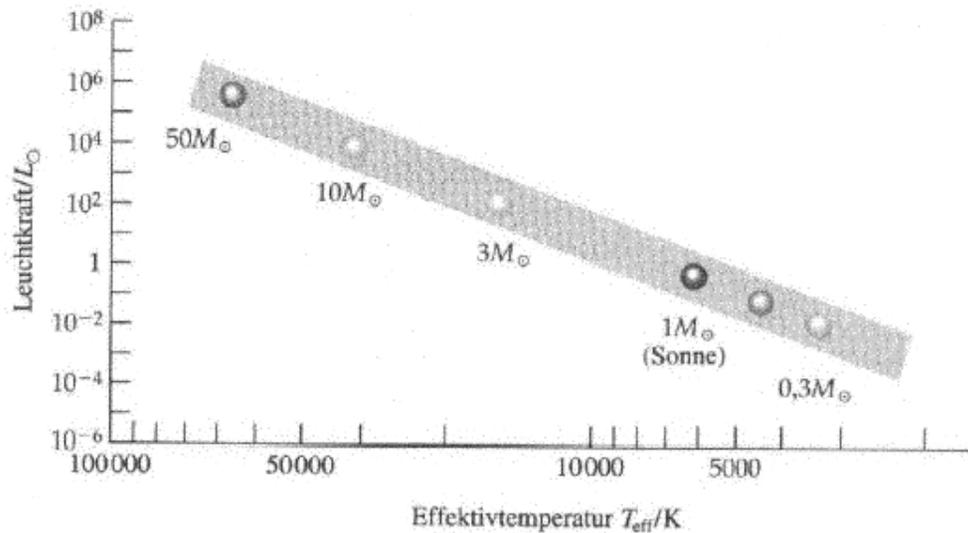
Diese Dichteverteilung lässt sich durch einen Halo aus dunkler Materie erklären, der um die Galaxie liegt, und dessen Ausdehnung ungefähr zehnmal größer als die Galaxie ist, und dessen Masse ungefähr 90% der Gesamtmasse der Galaxie ausmacht.

1. Hinweise auf dunkle Materie

Masse-Leuchtkraft-Beziehung

Eddingtons Masse-Leuchtkraft
Beziehung für Hauptreihensterne

$$L \propto M^4$$



$$L = 4\pi r^2 * S$$

$$T_{eff} = \left(\frac{L}{4\pi R^2 * \sigma} \right)^{1/4}$$

T_{eff} = Effektive Temperatur

L = Leuchtkraft

S = Strahlungsstrom

r = Abstand Stern-Erde

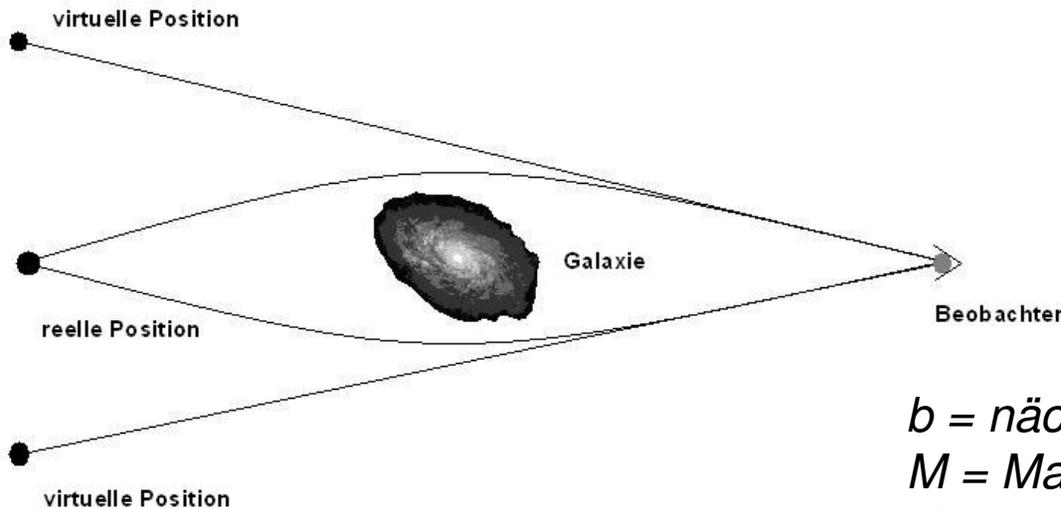
R = Sternradius

σ = Stefan-Boltzmann Konstante

1. Hinweise auf dunkle Materie

Gravitationslinsen

Nach der Allgemeinen Relativitätstheorie werden Photonen durch große Massen abgelenkt. Es entstehen Vielfachbilder → Ablenkwinkel.



$$\theta = \frac{4MG}{bc^2}$$

$$\Rightarrow M = \frac{bc^2 \theta}{4G}$$

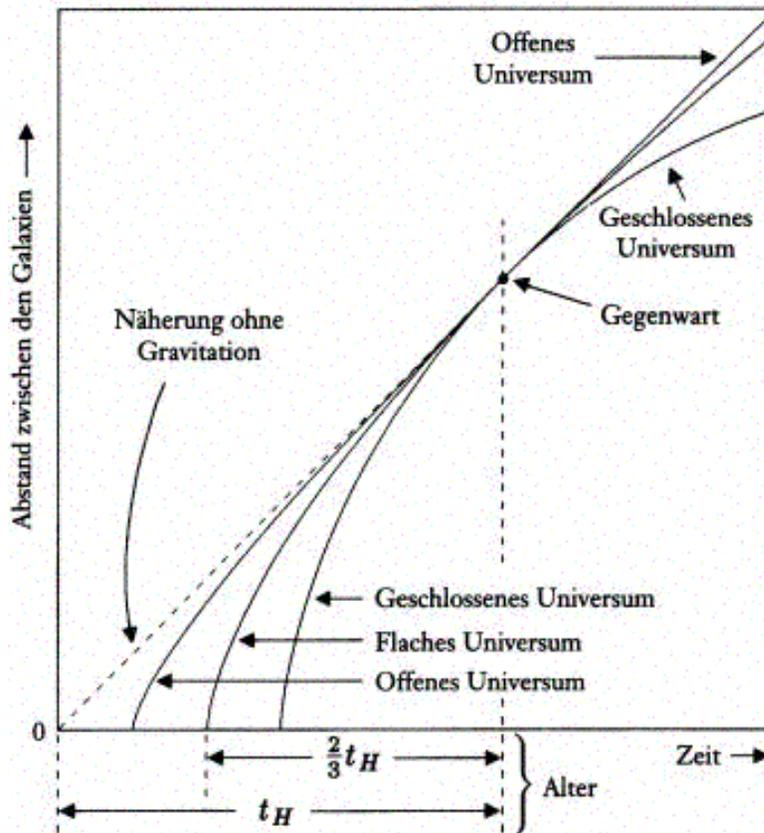
b = nächster Annäherungspunkt

M = Masse des ablenkenden Objekts

θ = tatsächlicher Ablenkwinkel

1. Hinweise auf dunkle Materie

Dichteparameter Ω



Standard Urknalltheorie basiert auf Allgemeiner Relativitätstheorie, die Homogenität und Isotropie fordert. Massendichte = kritischer Dichte

→ Dichteparameter $\Omega = 1$

aus sichtbarer Materie aber nur

$$\Omega_{sicht} = 0,003$$

→ Fast gesamte Dichte durch dunkle Materie

1. Hinweise auf dunkle Materie

Ergebnisse:

- **Sichtbare Rand der Galaxie ist nicht der tatsächliche Rand**
 - **Masse-Leuchtkraft Berechnungen liefern bloß einen geringen Teil der Masse, die durch Gravitationslinsen und Galaxierotationen vorhergesagt werden.**
 - **Allgemeine Relativitätstheorie fordert höhere Massen dichte.**
- ~97% der Materie muss dunkel sein.**

2. Verschiedene Theorien zur Erklärung der Massendifferenz

- **Nicht-Teilchen Theorien**
 - MOND
 - gefaltetes Universum
 - Kosmische Konstante
- **Teilchentheorien:**
 - Baryonische Materie
 - Nicht-Baryonische Materie

2. Verschiedene Theorien zur Erklärung der Massendifferenz

MOND (MOdified Newton Dynamics)

Keine dunkle Materie, sondern
Modifikation des 2. Newtonschen
Axioms.

Für sehr kleine Beschleunigungen wird
neue Naturkonstante a_0 eingeführt

$$F = m\mu\left(\frac{a}{a_0}\right)a$$

*mit $\mu(x)=1$ für $x \gg 1$
und $\mu(x)=x$ für $x \ll 1$
folgt für Spiralgalaxien:*

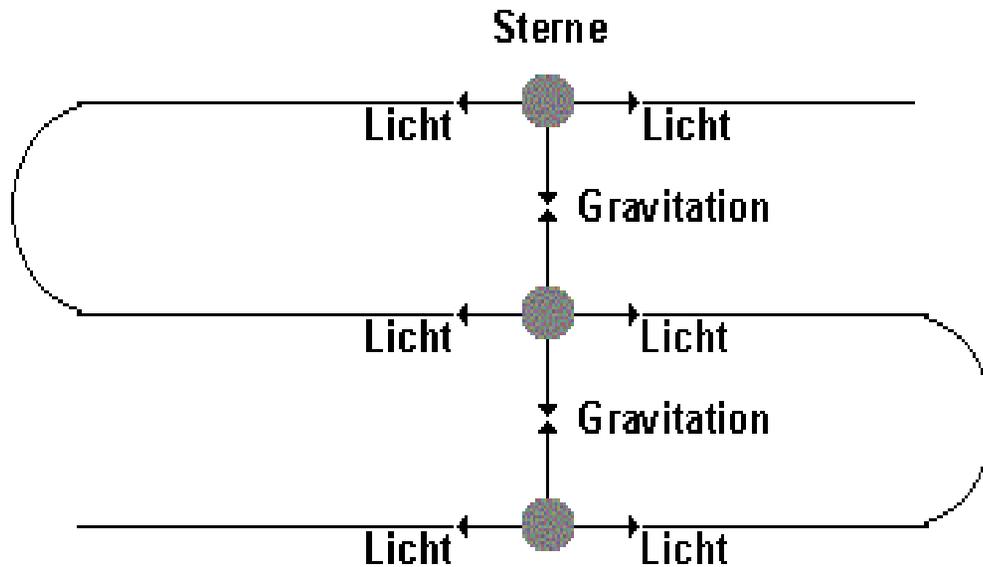
$$\Rightarrow \frac{GmM}{r^2} = \frac{m}{a_0} a^2$$

$$\Rightarrow a = \frac{\sqrt{GMa_0}}{r}$$

$$\Rightarrow v^2 = \sqrt{GMa_0} = \text{const.}$$

2. Verschiedene Theorien zur Erklärung der Massendifferenz

Gefaltetes Universum



- Licht muss langen Weg nehmen

- Gravitation wirkt durch die Zwischenräume hindurch

→ Materie nicht sichtbar

2. Verschiedene Theorien zur Erklärung der Massendifferenz

Nicht-verschwindende kosmische Konstante

→ Führt zu dunkler Energie
 → Λ CDM - Theorie

$\Omega_{\text{tot}} h^2 \approx 1$	$\Omega_{\text{Materie}} h^2 \approx 0.3$	$\Omega_{\text{Baryonisch}} h^2 \approx 0.03$	$\Omega_{\text{hell}} h^2 \approx 0.003$
			$\Omega_{\text{dunkel}} h^2 \approx 0.03$
		$\Omega_{\text{Nicht-baryonisch}} h^2 \approx 0.3$	$\Omega_{\text{HDM}} h^2 < 0.01$ Leichte Neutrinos
			$\Omega_{\text{CDM}} h^2 \approx 0.3$ WIMPs, Axionen
	$\Omega_{\text{Vakuumsenergie}} h^2 \approx 0.7$		

2. Verschiedene Theorien zur Erklärung der Massendifferenz

Baryonische dunkle Materie

„normale“, aber nicht leuchtende Materie

- Planeten, Planetoiden
- Braune Zwerge
- Schwarze Zwerge
- Gaswolken
- Staub
- Schwarze Löcher

➤ MACHOs (Massive Cosmic Halo Objects)

2. Verschiedene Theorien zur Erklärung der Massendifferenz

Nicht-Baryonische dunkle Materie

Zwei Gruppen nicht-baryonischer dunkle Materie:

- **CDM (Cold Dark Matter)**

 - Spät entkoppelt, dadurch nicht relativistisch.**

 - Wichtig für kleine Strukturen**

 - WIMPs, Axionen**

- **HDM (Hot Dark Matter)**

 - Früh entkoppelt, relativistische Teilchen**

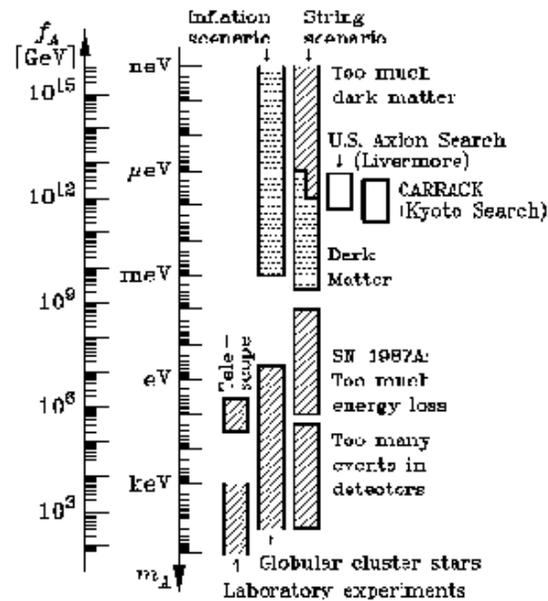
 - Wichtig für große Strukturen**

 - Neutrinos**

2. Verschiedene Theorien zur Erklärung der Massendifferenz

Axionen

- 1977 vorgeschlagen zur Lösung des starken CP-Problems
- Eigenschaften ähnlich eines leichten, schwach wechselwirkenden, neutralen Pions
- Erzeugung durch Primakoff-Effekt
- Axion noch nicht entdeckt; Masse kann eingeschränkt werden.



2. Verschiedene Theorien zur Erklärung der Massendifferenz

WIMPs

- **Weakly Interacting Massive Particles**
- **1970 mit Supersymmetrie eingeführte Teilchen**
- **Paarweise Erzeugung unter Erhaltung der R-Parität**
- **Zerfallskette führt auf das leichteste supersymmetrische Teilchen (LSP), das Neutralino (Photino + 2 Higgsino + Zino)**
- **LSP ist stabil**

Name	Spin	Superpartner	Spin
Graviton	2	Gravitino	3/2
Photon	1	Photino	1/2
Gluon	1	Gluino	1/2
$W^{+, -}$	1	$Wino^{+, -}$	1/2
Z^0	1	Zino	1/2
Higgs	0	Higgsino	1/2

Name	Spin	Superpartner	Spin
Electron	1/2	Selectron	0
Muon	1/2	Smuon	0
Tau	1/2	Stau	0
Neutrino	1/2	Sneutrino	0
Quark	1/2	Squark	0

3. Nachweismethoden

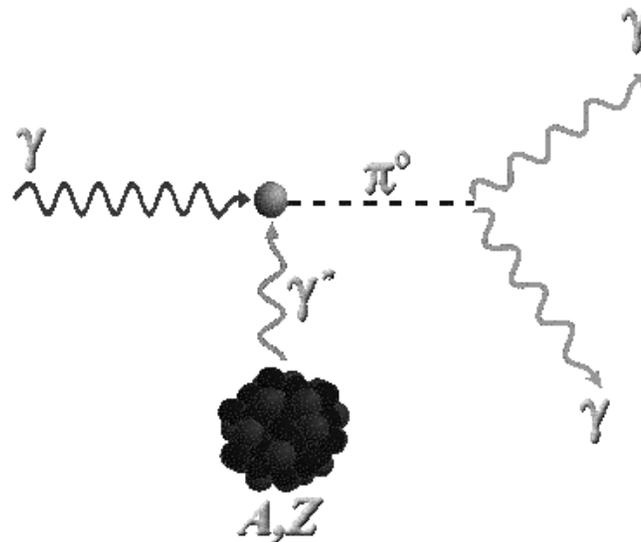
Axionennachweis

Primakoff-Effekt:

Thermisches Photon wandelt sich im Kernfeld oder in starkem Magnetfeld in ein Axion um.

Inverser Primakoff-Effekt:

Axion wechselwirkt im starken Magnetfeld mit einem virtuellen Photon und zerfällt in ein reelles Photon.



3. Nachweismethoden

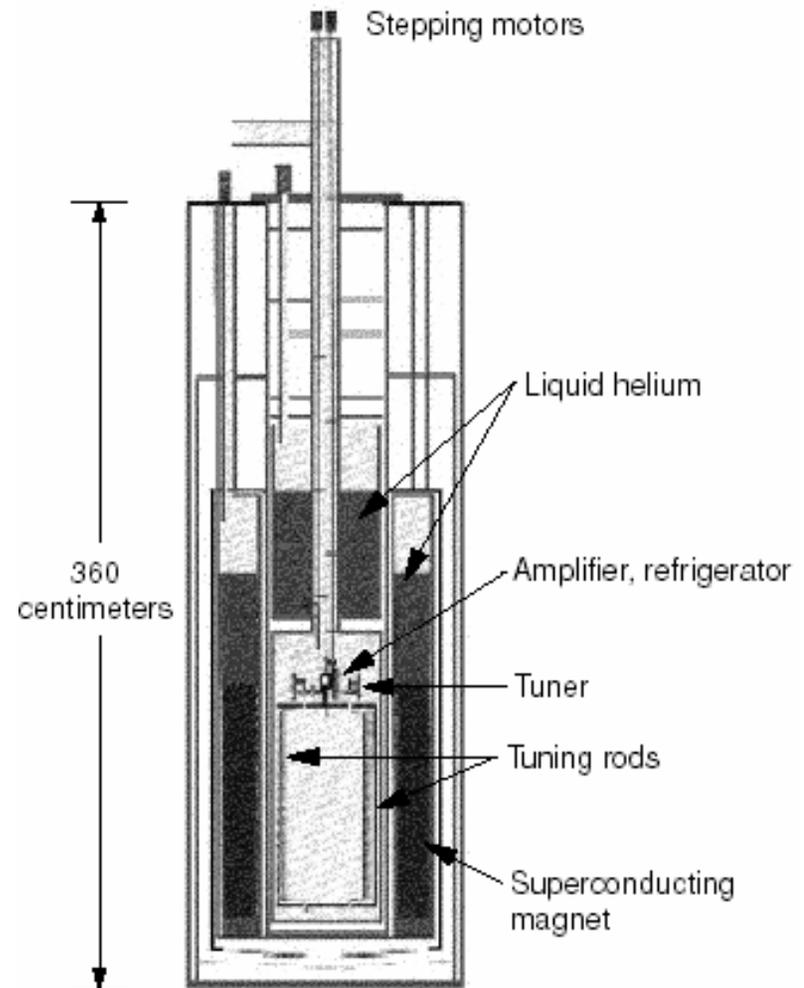
Axionennachweis

Livermore-Experiment:

- Resonator 1m hoch, durchstimmbar von 0,3-3GHz (1,2-12 μ eV)
- 8T supraleitenden Magneten (Gewicht 6t)
- Erwartete Signalstärke 10^{-22} W
- Rauscharmer Transistor (\sim 1,5K)

→ Bis jetzt keine Axionen beobachtet

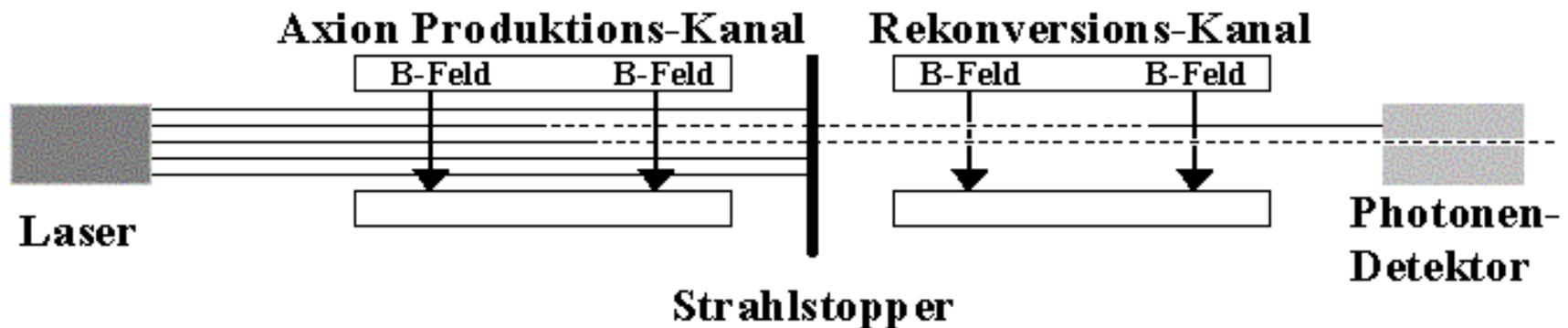
Nächste Generation, dieses Jahr, arbeitet mit SQUIDs (\sim 0,002K) auch bei $f > 3$ GHz



3. Nachweismethoden

Axionennachweis

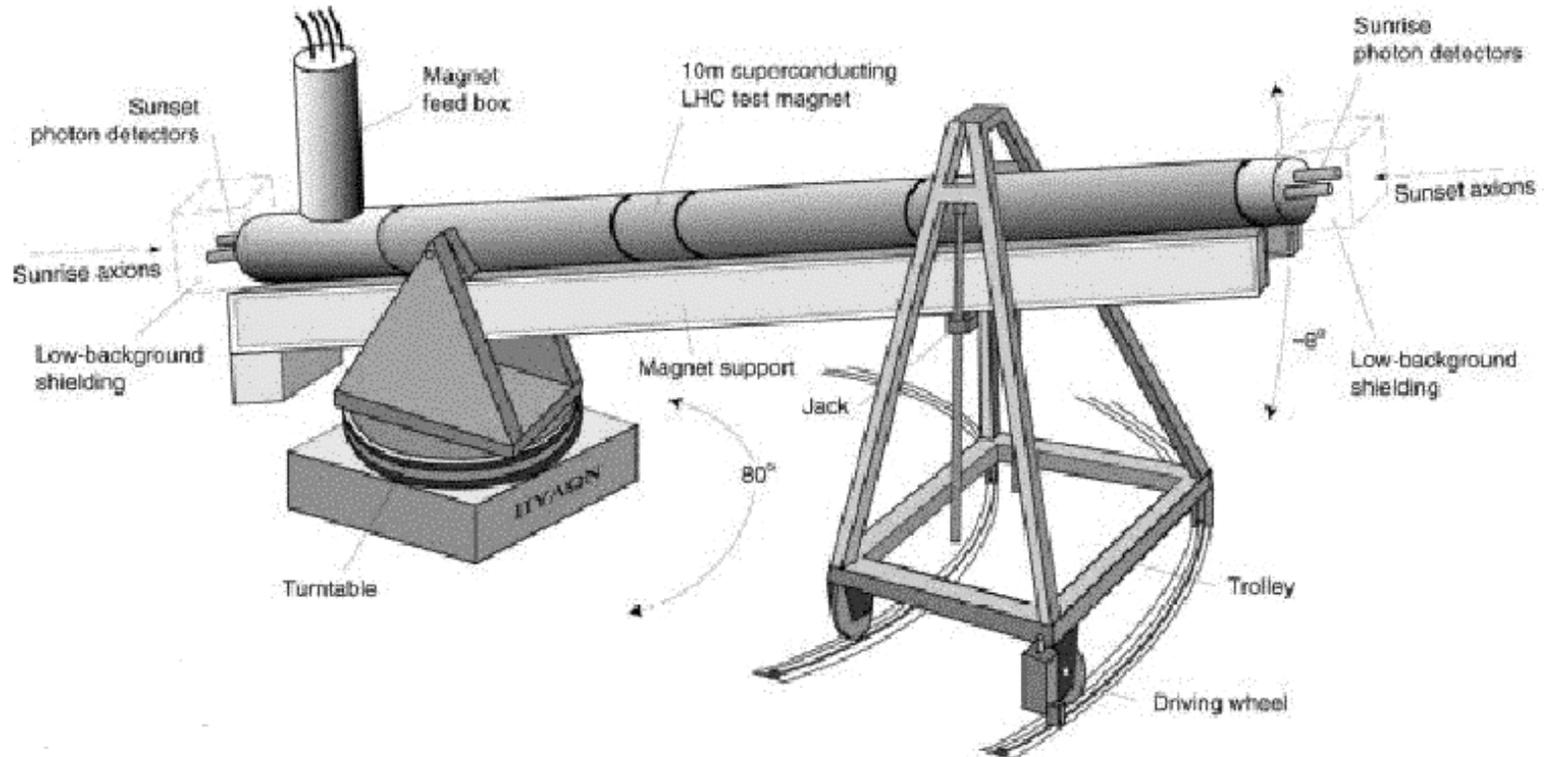
Nachweis von „selbthergestellten“ Axionen durch starke Photonenquellen (Laser) und Magnetfelder hat bis jetzt auch keine positiven Ergebnisse geliefert.



3. Nachweismethoden

Axionennachweis

Cern Axion Solar Telescope (CAST)



3. Nachweismethoden

WIMPs-Nachweis

- **Kryogendetektoren:** Supraleiter, die knapp unter der Sprungtemperatur betrieben werden. Durch Stoß werden Gitterschwingungen (Phononen) erzeugt, die zur Erwärmung führen → Widerstand
- **Ionisationsdetektoren:** Durch Stoß mit einem Neutralino schlägt der Atomkern beim Nachbaratom Elektronen aus der Hülle → Elektronen-Loch-Paar → messbarer Strom
- **Szintillationsdetektor:** Durch Rückstoß erzeugte Ionen fangen Elektronen ein und fallen dann in den Grundzustand zurück → Lichtblitz

Um den Untergrund herauszufiltern ist es sinnvoll mindestens zwei Detektortypen zu kombinieren.

3. Nachweismethoden

WIMPs-Nachweis

Experimente

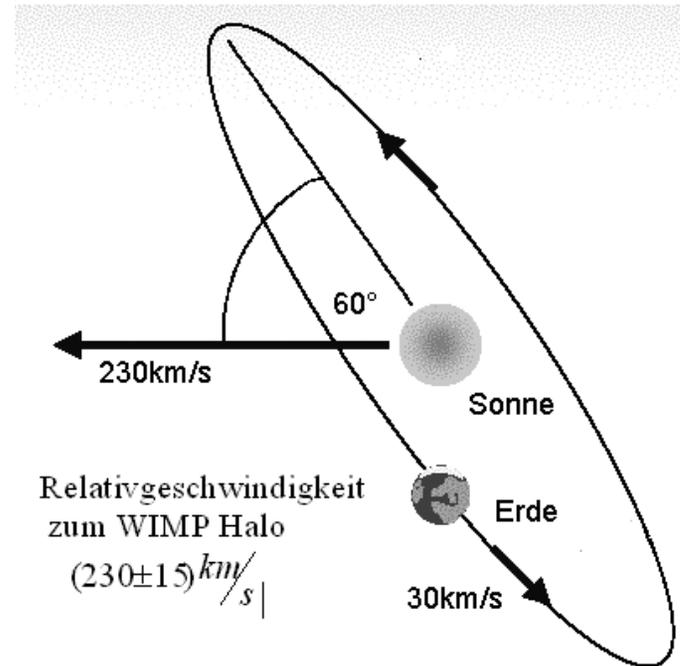
<u>Projekt</u>	<u>Ort</u>	<u>Beginn</u>	<u>Detektortyp</u>	<u>Material</u>	<u>Masse kg</u>	<u>Diskrimination</u>
UKDMC	Boulby (Engl.)	1997	Szintillation	Natriumiodid	5	keine
DAMA	Gran Sasso (Ital.)	1998	Szintillation	Natriumiodid	100	keine
ROSEBUD	Canfranc (Span.)	1999	kryogen	Aluminiumoxid	0,05	thermisch
PICASSO	Sudbury (Kan.)	2000	Tröpfchen	Freon	0,001	keine
SIMPLE	Rustrel (Fra.)	2001	Tröpfchen	Freon	0,001	keine
DRIFT	Boulby (Engl.)	2001	Ionisation	Schwefelwasserstoff	0,16	Richtung
Edelweiss	Frejus (Fra.)	2001	kryogen	Germanium	1,3	Ionisation, thermisch
ZEPLIN I	Boulby (Engl.)	2001	Szintillation	flüssiges Xenon	4	Zeit
HDMS	Gran Sasso (Ital.)	2001	Ionisation	Ge-73	0,2	Zeit
CDMS II	Soudan (USA)	2003	kryogen	Silizium, Germanium	7	Ionisation, thermisch
ZEPLIN II	Boulby (Engl.)	2003	Szintillation	flüssiges Xenon	30	Ionisation, Szintillation
GENIUS-TF	Gran Sasso (Ital.)	2003	Ionisation	Germanium	10	keine
CRESST II	Gran Sasso (Ital.)	2004	kryogen	Calcium-Wolframoxid	10	Szintillation, thermisch

3. Nachweismethoden

WIMPs-Nachweis

DAMA (Dark Matter Search) Gran Sasso

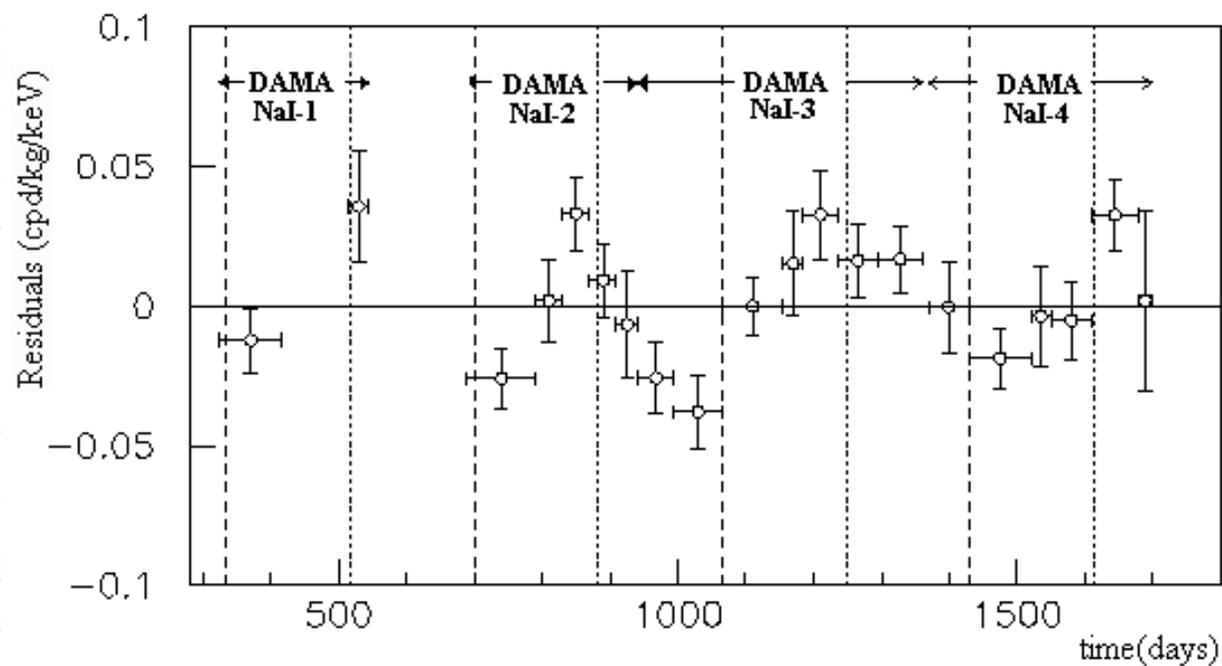
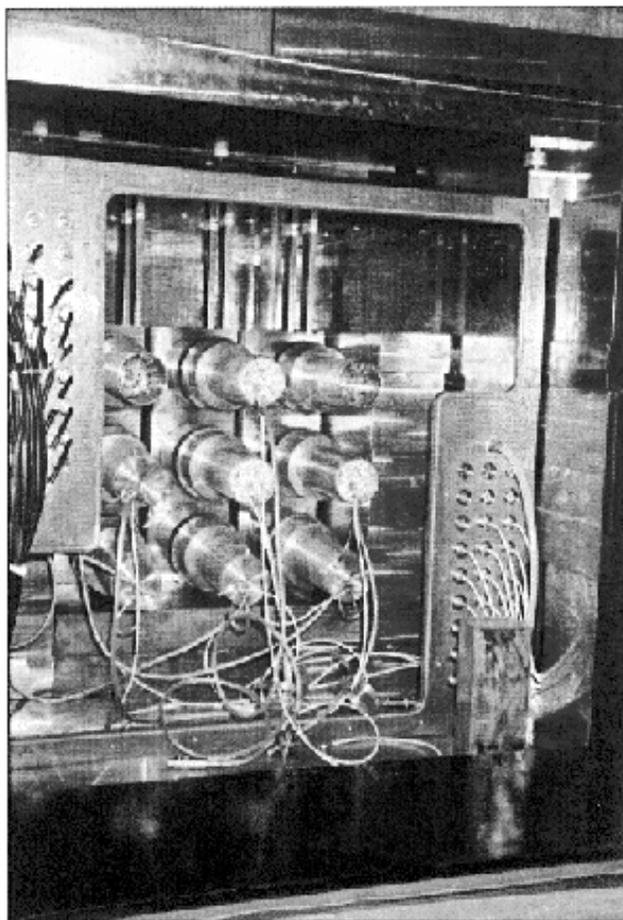
- Seit 1996 im Gran Sasso
 - Detektormasse ~100kg Natriumiodid
 - Nur Szintillation
 - Bis 2002 in Betrieb ~58000kg x Tage
 - Seit 2003 LIBRA (Large Sodium Iodid Bulk for Rare Processes) mit 250kg NaI
- Einziges Experiment mit positivem Ergebnis



3. Nachweismethoden

WIMPs-Nachweis

DAMA

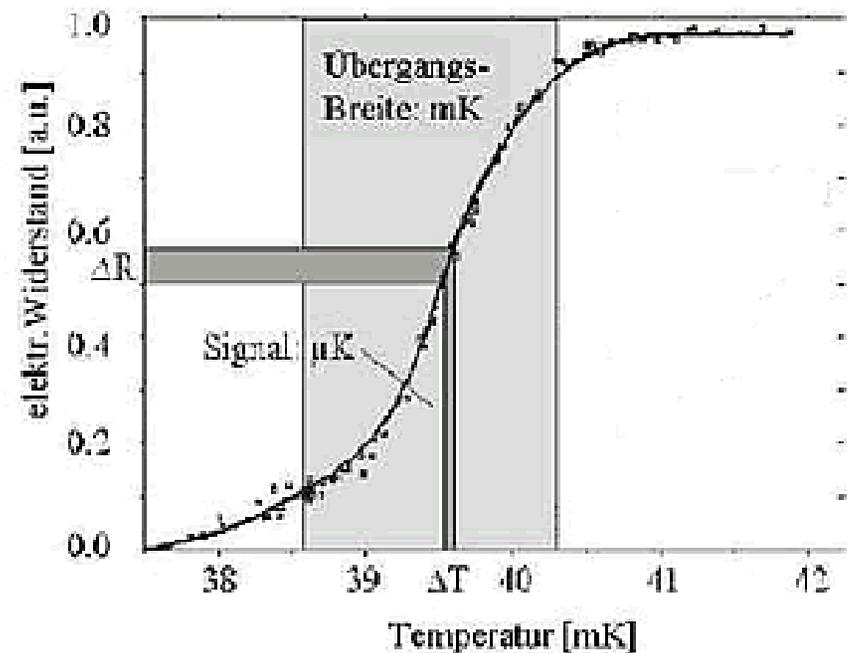


3. Nachweismethoden

WIMPs-Nachweis

CRESST (Cryogenic Rare Event Search with Superconducting Thermometers)

- Gran Sasso ~1400m tief
- Blei- und Kupferabschirmung 20 + 14 cm
- Hochreine Materialien (keine Radioaktivität)
- 4 x 262g Saphir-Detektoren bei 15mK
- Kryogen- und Szintillationsdetektor
- SQUIDs

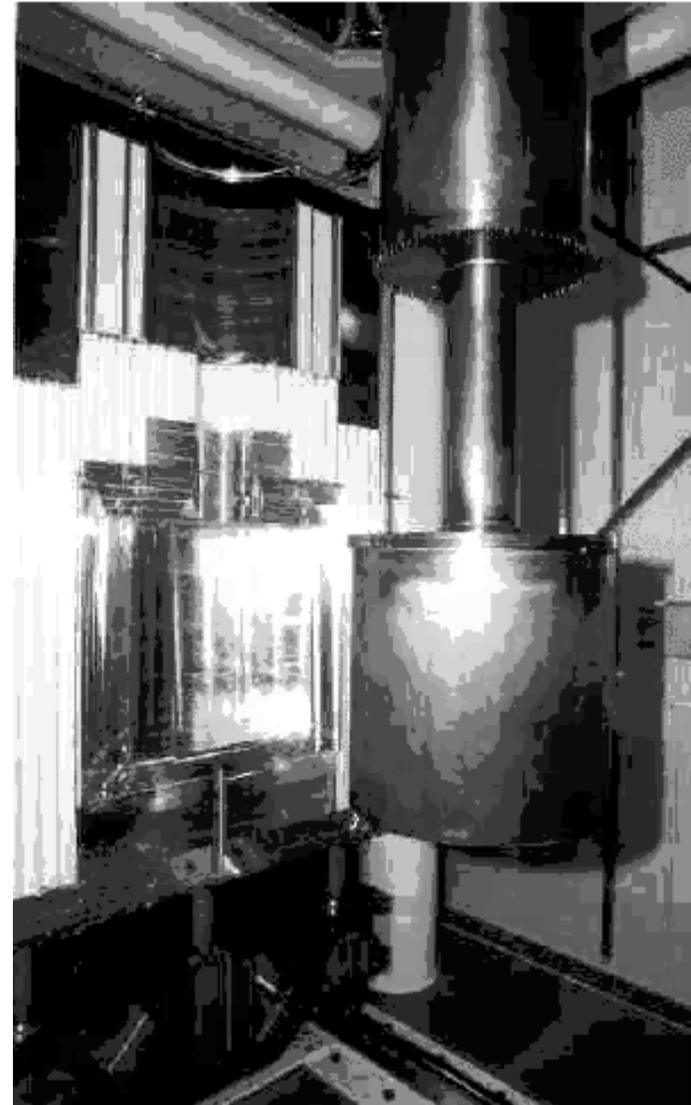
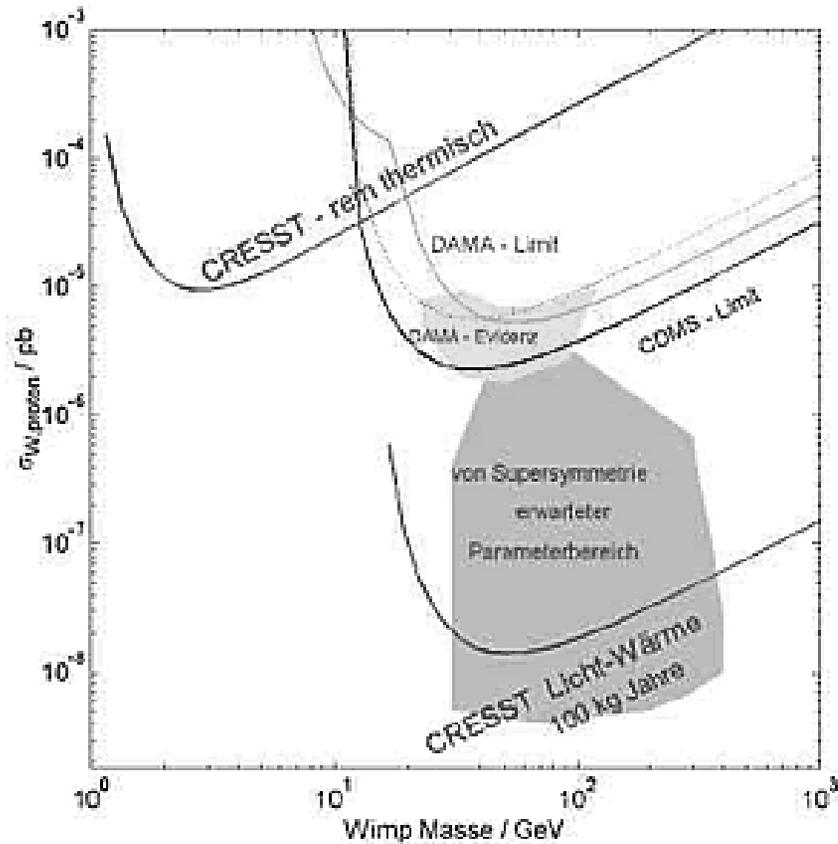


3. Nachweismethoden

WIMPs-Nachweis

CRESST – Aufbau: Kryostat, Abschirmung, Kühlfinger

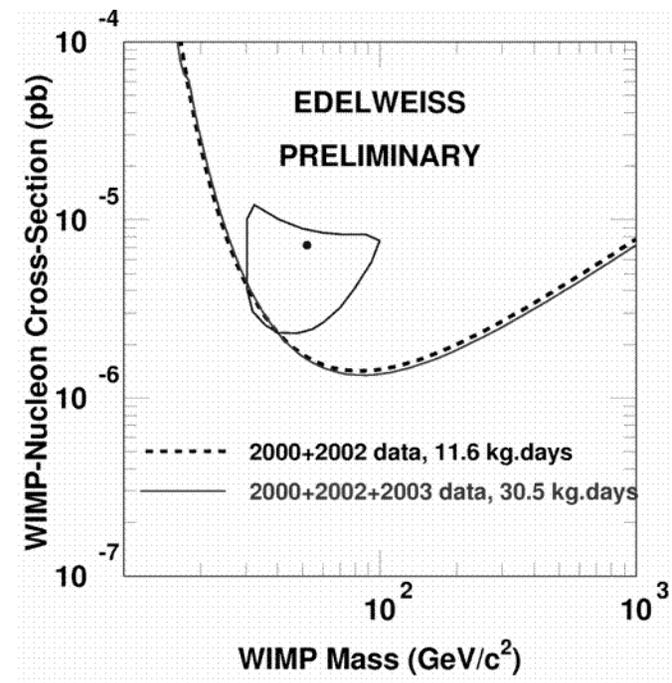
Ausschluß-Skizze:



3. Nachweismethoden

Edelweiss (Expérience de détecter les WIMPs en Site Souterrain)

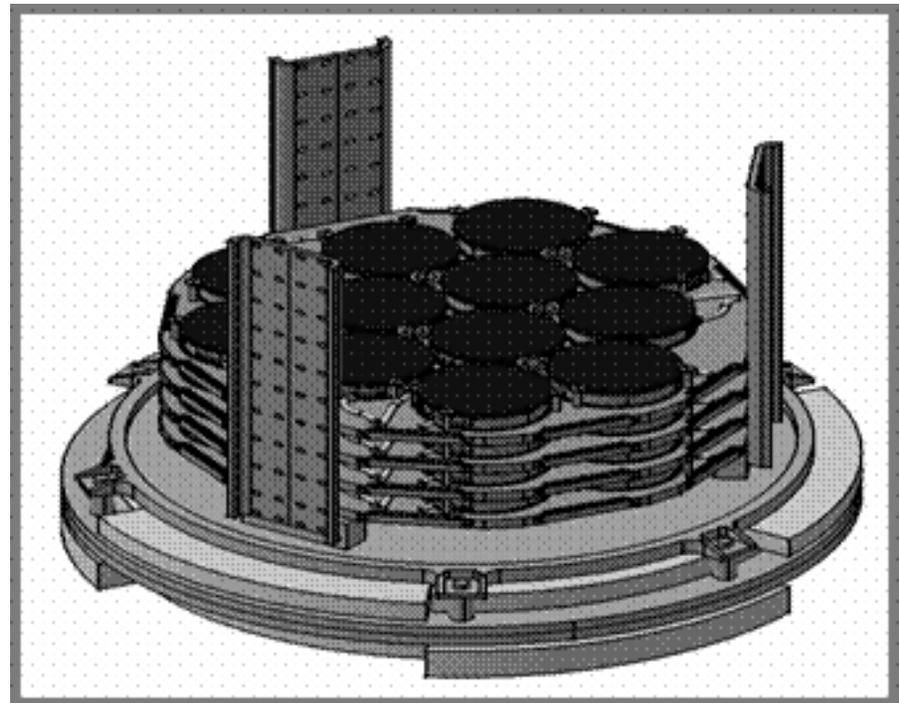
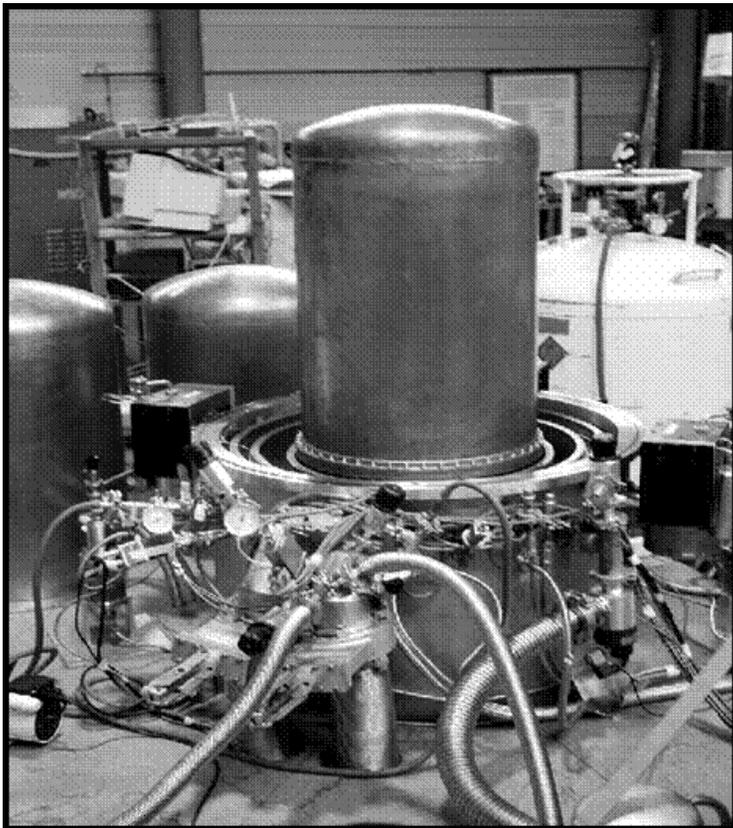
- Frejus-Tunnel ~1800m (4Myonen/m²/Tag)
- Abschirmung 20cm Blei + Kupfer + 50cm Polyethylen
- Edelweiss: 3 x 320g Germanium-Detektoren bei 17mK
- Edelweiss2: 100l Kryostat bei 20mK, 120 x 320g Germanium → 0,01cnts/kg/day
- Zusätzlich zur Erwärmung wird Strom gemessen
- Wirkungsquerschnitt bis $10^{-9} pb$



3. Nachweismethoden

WIMPs-Nachweis

Edelweiss



3. Nachweismethoden

WIMPs-Nachweis

- **Aus DAMA: WIMPs mit Masse von $\sim 60\text{GeV}$, ausschließlich mit Szintillations-Detektoren über 7 Jahre.**
- **CRESST hat mit Szintillations- und thermischen Detektoren im selben Bereich keine Ereignisse nachweisen können**
- **Edelweiss hat mit Szintillations- und Ladungs-Detektoren im gesamten DAMA Bereich ebenfalls keine Ereignisse, die von WIMPs kommen nachweisen können.**

3. Nachweismethoden

WIMPs-Nachweis

Neutralino-Antineutralino-Vernichtung

Eine weitere Möglichkeit mit der Neutralinos nachgewiesen werden könnten, ist die Neutralino-Antineutralino-Vernichtung. Durch diese Vernichtung können Neutrinos, Photonen, Protonen, Antiprotonen, Elektronen und Positronen entstehen.

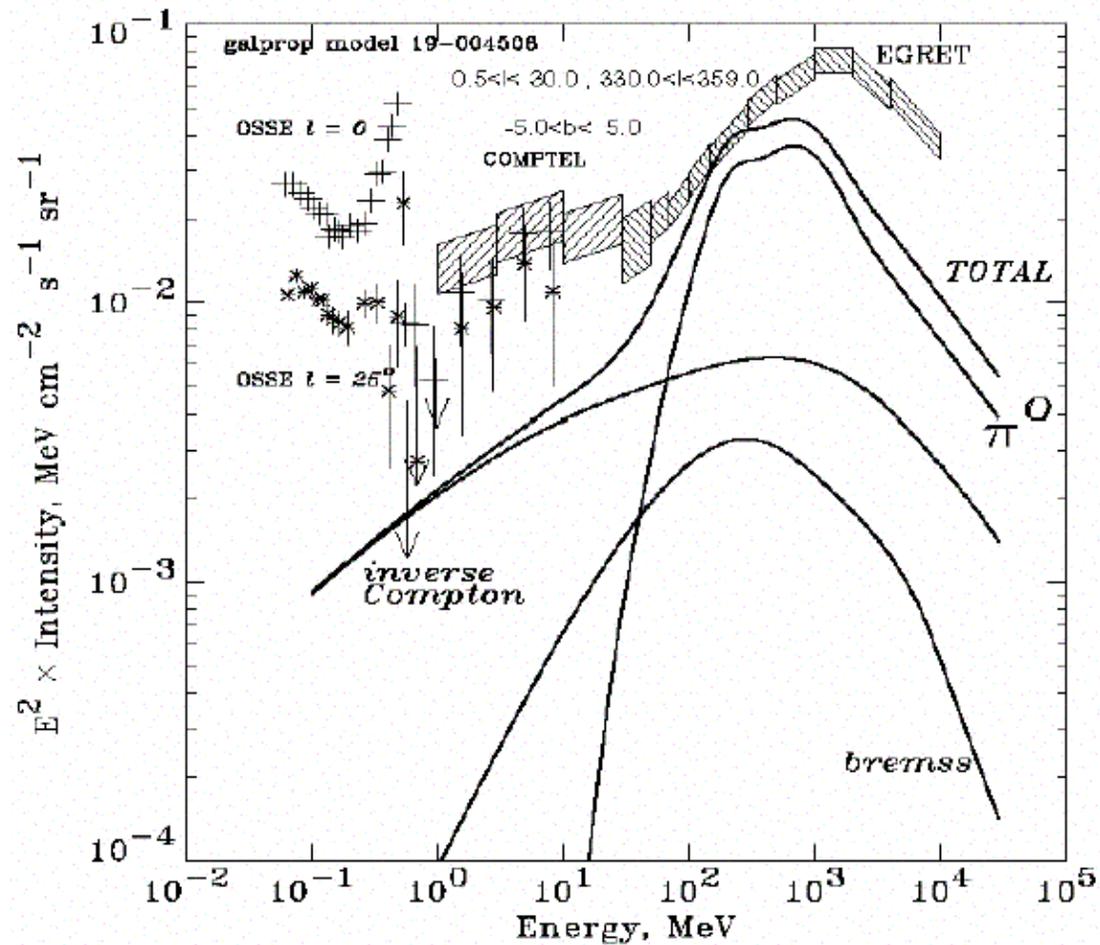
Messungen der Antiproton-, Positronen- und Gamma-Energien durch:

- BESS (Balloon-borne Experiment with a Superconducting Solenoidal magnet)**
- HEAT (High Energy Antimatter Telescope)**
- EGRET (Energetic Gamma Ray Experiment Telescope)**

3. Nachweismethoden

WIMPs-Nachweis

Neutralino-Antineutralino-Vernichtung

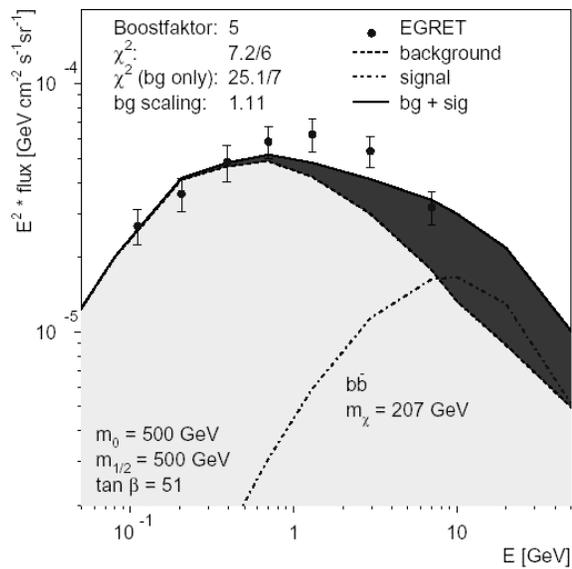


3. Nachweismethoden

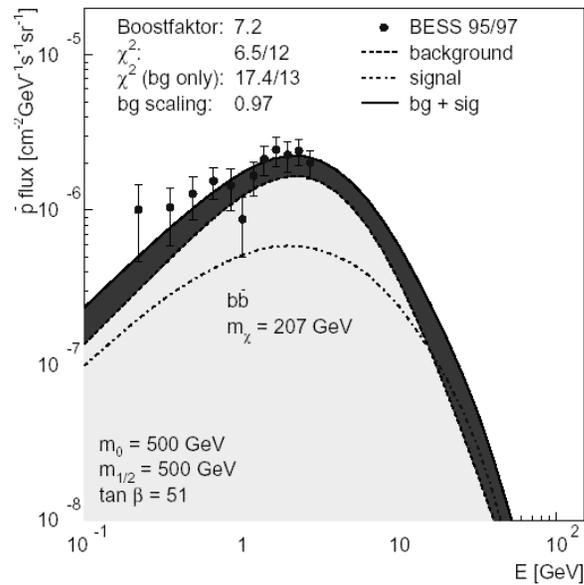
WIMPs-Nachweis

Neutralino-Antineutralino-Vernichtung

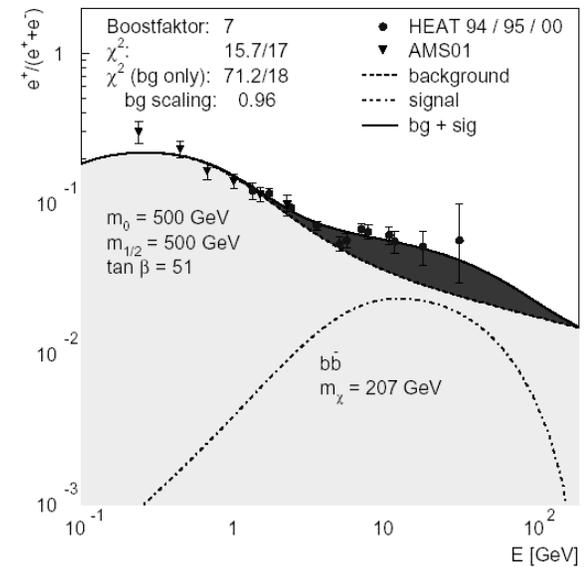
Antiprotonen



Positronen



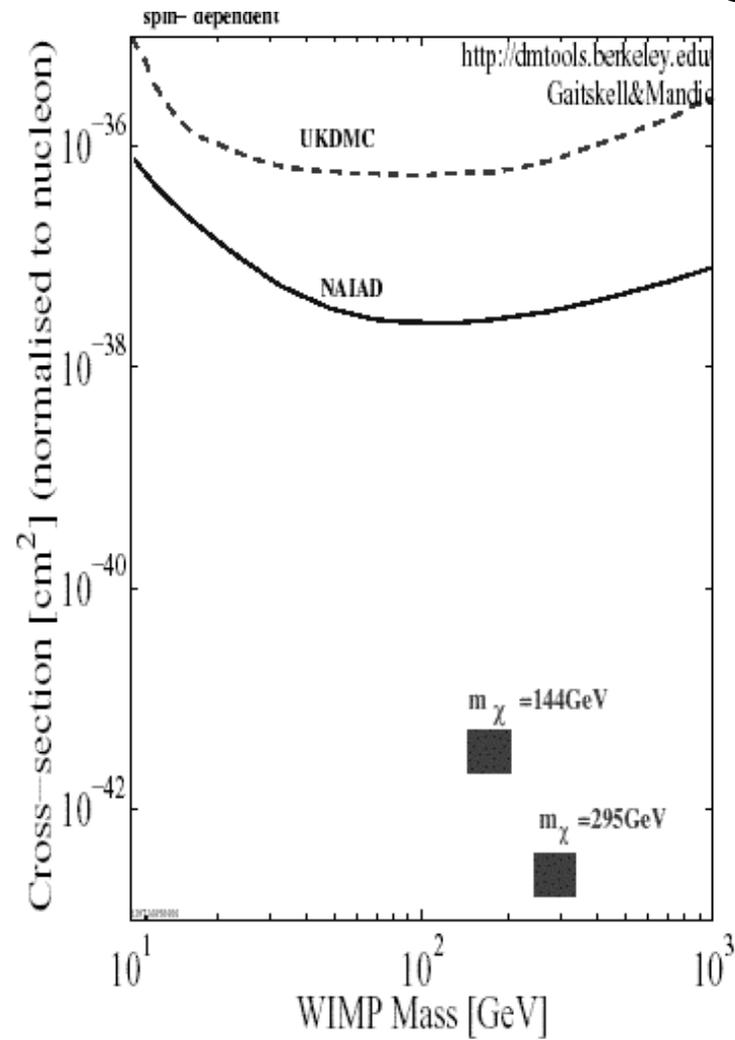
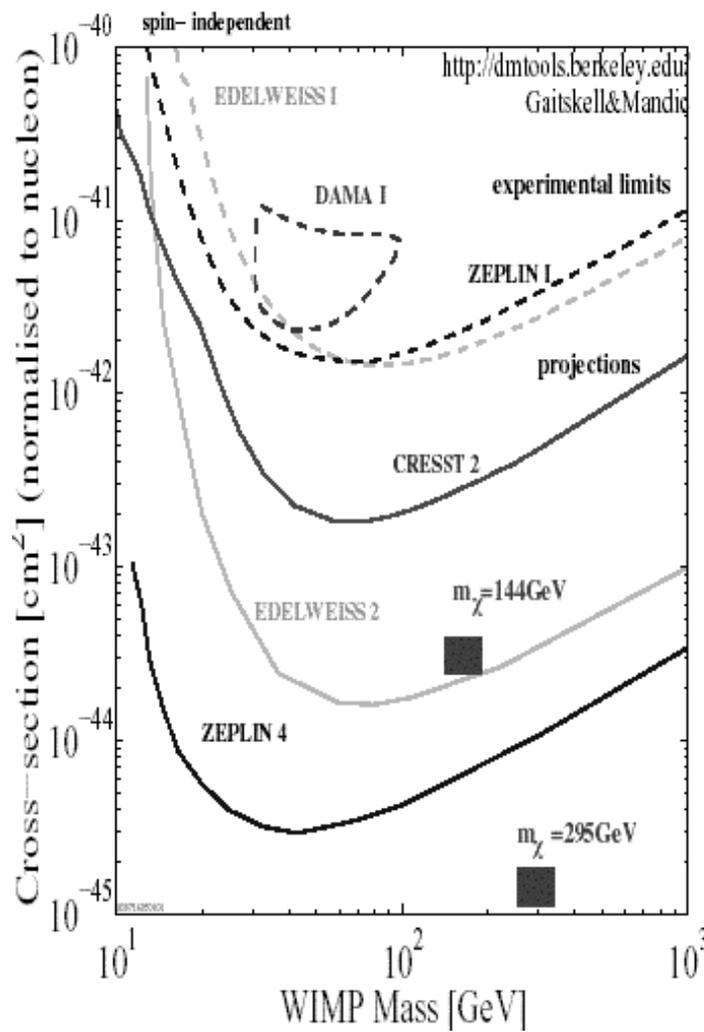
Gamma



3. Nachweismethoden

WIMPs-Nachweis

Neutralino-Antineutralino-Vernichtung



Literatur:

- P. Tipler, Physik, Spektrum-Verlag
- W. Demtröder, Experimentalphysik 4, Springer-Verlag
- H.V. Klapdor-Kleingrothaus, Teilchenastrophysik, Teubner-Verlag
- N. Arkani-Hamed, Spektrum der Wissenschaft Okt. 2000
- M. Milgrom, Spektrum der Wissenschaft Okt. 2002
- M. Tegmark, Spektrum der Wissenschaft Dez. 2003
- V. Springel, Physik-Journal
- M. Türler, Cern Courier
- arXiv.org
 - W. deBoer:
 - Indirect Evidence for Neutralinos as Dark Matter
 - Positron Fraction from the Dark Matter annihilation in the CMSSM
 - Indirect Evidence of the Supersymmetric Nature of Dark Matter from...
 - J. Jochum:
 - CRESST Dark Matter Search
 - P. diStefano:
 - The CRESST Experiment: Recent results and Prospects
- www.astroteilchenphysik.de
- <http://www.lngs.infn.it/>
- <http://edelweiss.in2p3.fr/>
- <http://nomadinfo.cern.ch/CAST/>
- Sonstiges internet