

# Kompaktseminar „Das frühe Universum“

Frank Eibofner  
Betreuung: Prof. H. Clement  
26. März 2004

## Nicht-Baryonische dunkle Materie

### 1.) Hinweise auf dunkle Materie

#### Historische Beobachtungen „dunkler“ Objekte:

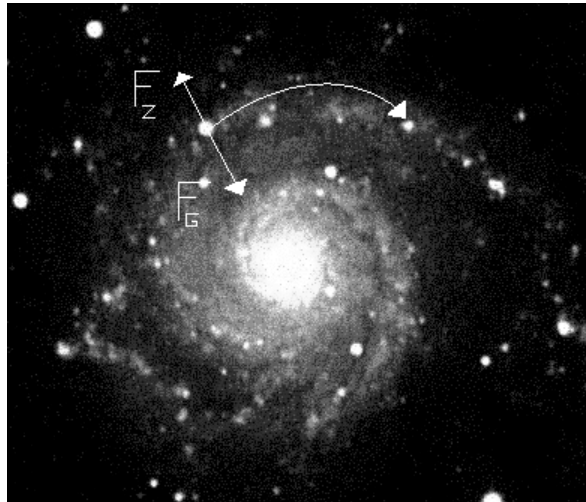
1781 entdeckten William und Caroline Herschel den Uranus. Die Berechnung der Bahnform stieß jedoch auf unlösbare Schwierigkeiten. Um 1840 stellte J.J. LeVerrier die Hypothese auf, dass sich hinter dem Uranus noch ein weiterer Planet befinden könnte, durch dessen Anziehungskraft der Uranus von seiner berechneten Bahn abgelenkt würde. 1846 hatte LeVerrier seine Berechnungen fertig gestellt und wenige Tage später wurde der Planet Neptun, an der vorhergesagten Position, entdeckt.

Etwa zur selben Zeit fiel dem Königsberger Astronom Friedrich Wilhelm Bessel auf, dass die Bahn des Sterns Sirius Unregelmäßigkeiten aufweist, die sich nur durch die Anwesenheit eines zweiten Sternes, der an Sirius zerrt, erklären ließen. 1862 entdeckte der Amerikaner Clark, dass es sich bei Sirius um ein Doppelsternsystem handelt, wobei der zweite Stern ein weißer Zwerg ist.

In beiden Fällen wurde aus der Abweichung der Bahnform, auf die Existenz bislang unbekannter Himmelskörper geschlossen.

#### Rotationskurven von Spiralgalaxien:

Eine ähnliche Situation ergibt sich bei der Beobachtung von Sternen in Spiralgalaxien. 1933 hat der Schweizer Fritz Zwicky entdeckt, dass im Coma-Galaxiehaufen nicht genug sichtbare Galaxien bzw. Sterne vorhanden sind, um ihre Bewegungen aufgrund der Gravitation erklären zu können. Die Bahnkurven und die Geschwindigkeiten der Sterne innerhalb der Galaxien, lassen sich nur unter Annahme einer größeren Masse erklären. Durch Doppler-Messungen von Sternen kann deren Bahngeschwindigkeit, innerhalb einer Galaxie, gemessen werden, aus der dann, mit Hilfe newtonscher Mechanik,  $\text{Gravitation} = \text{Zentrifugalkraft}$ , die Masse bestimmt werden kann, die innerhalb der Bahnkurve liegt..

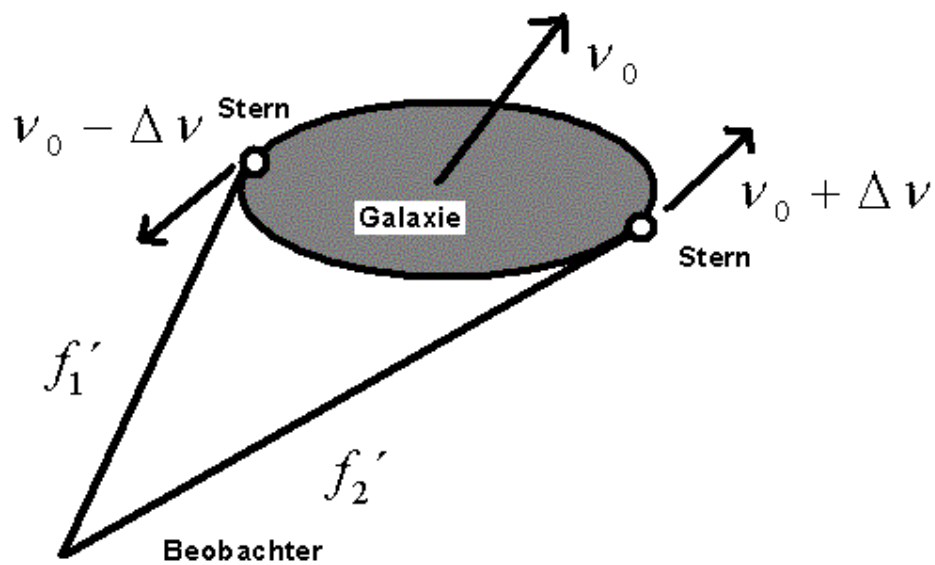


Aus der Gleichgewichtsbedingung folgt für die Geschwindigkeit:

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

$M_r$  = Masse einer Galaxie innerhalb von  $r$   
 $r$  = Abstand Stern-Zentrum

Aus Dopplermessungen, meist mit der 21cm Linie der Hyperfeinstruktur des Wasserstoffs, der Sternengeschwindigkeiten erhält man jedoch andere Resultate für die Sternengeschwindigkeiten.



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

$$\text{Mit } \Delta f' = f'_1 - f'_2 = \frac{f_0}{c} * 2\Delta v$$

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

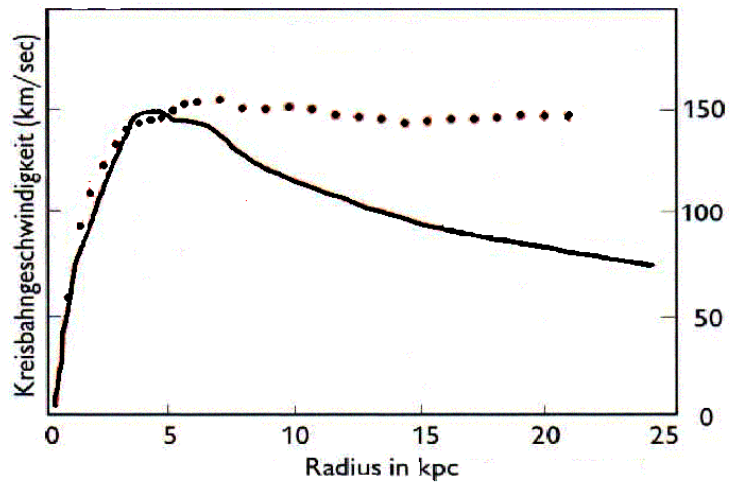
$v_0 = \text{Galaxiegeschwindigkeit}$

$\Delta v = \text{Sternengeschwindigkeit}$

$f_0 = \text{Grundfrequenz}$

$f_{1,2}' = \text{Dopplerfrequenzen}$

Nach der Theorie müssten die Geschwindigkeiten der Sterne mit dem Radius abnehmen (durchgezogene Linie). Messungen ergeben aber, dass die Sternengeschwindigkeit nicht vom Radius abhängt, sondern konstant bleibt (gepunktete Linie).

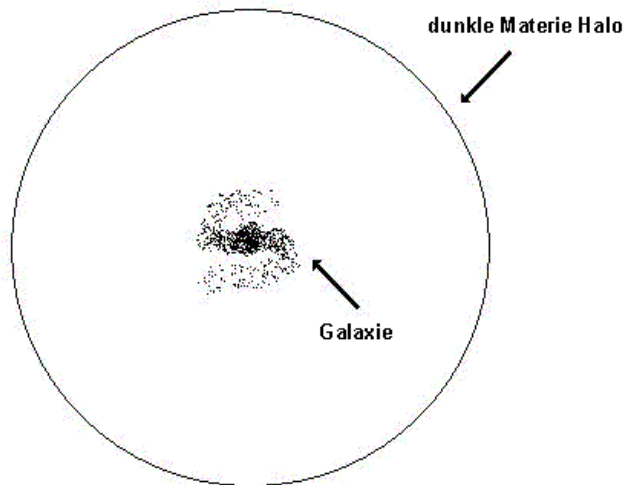


$$v^2 = \frac{G * M_r}{r} = const.$$

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

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

Diese Materiedichte-Verteilung kann man erklären, indem man annimmt, dass sich um die Galaxie ein Halo aus dunkler Materie befindet, der ungefähr 90% der Gesamtmasse ausmacht.



Masse-Leuchtkraftbeziehung:

Um nun herauszufinden wie groß die Masse *aller* Sterne in dieser Galaxie ist, misst man die Masse von nicht-exotischen Sternen, Hauptreihensterne, mit Hilfe der Leuchtkraft-Masse-Beziehung. Dazu misst man den Strahlungsstrom  $S$  der auf der Erde ankommt, mit dem man auf die Leuchtkraft  $L$  und auf die effektive Temperatur  $T_{eff}$  schließen kann.

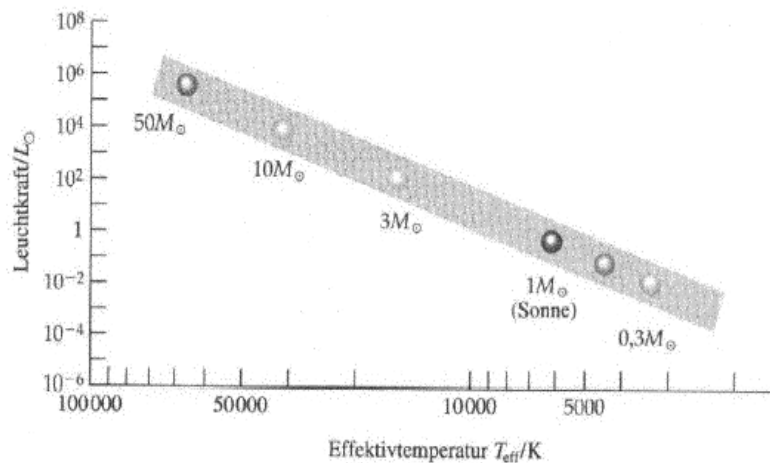
$$L = 4\pi r^2 * S$$

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

$r$  = Abstand Stern-Erde

$R$  = Sternradius

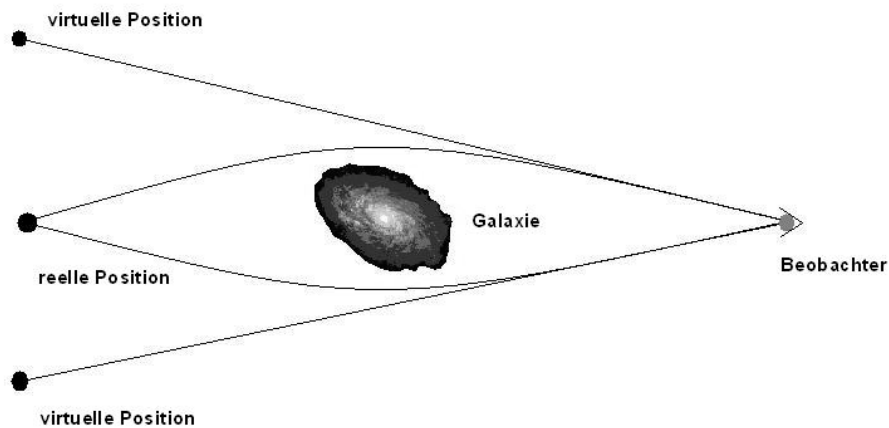
$\sigma$  = Stefan-Boltzmann Konstante



Die Theorie von Eddington sagt nun voraus, dass die Leuchtkraft eines Hauptreihensterns proportional zur vierten Potenz der Masse ist. Die Messungen werden an Sternen vorgenommen, die leicht zu bestimmen sind. Durch Hochrechnung auf alle Sterne einer Galaxie und kleiner Korrekturen durch Planeten und Gaswolken, kann somit die baryonische Masse der Galaxien bestimmt werden.

### Gravitationslinsen:

Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie sagt vorher, dass Licht im Schwerefeld von Körpern abgelenkt wird. Die Messung dieser Lichtablenkung am Sonnenrand während einer Sonnenfinsternis im Jahre 1919 brachte den Durchbruch für die Anerkennung der Einsteinschen Gravitationstheorie. Die Lichtablenkung ist umso stärker, je größer die Masse und um so geringer der Abstand des Lichtstrahls vom ablenkenden Körper ist. Diese Abhängigkeit des Ablenkwinkels erlaubt es daher im Prinzip, mittels der gravitativen Lichtablenkung Massen zu messen oder Massenverteilungen im Universum zu untersuchen. Dabei ist von besonderer Bedeutung, dass die Lichtablenkung unabhängig von der Natur und dem Zustand der Materie des Deflektors ist, d.h. mit dem Gravitationslinseneffekt misst man sowohl die bekannte, leuchtende Materie als auch die Dunkle Materie..



Die Allgemeine Relativitätstheorie sagt für den Ablenkwinkel  $\theta$  voraus:

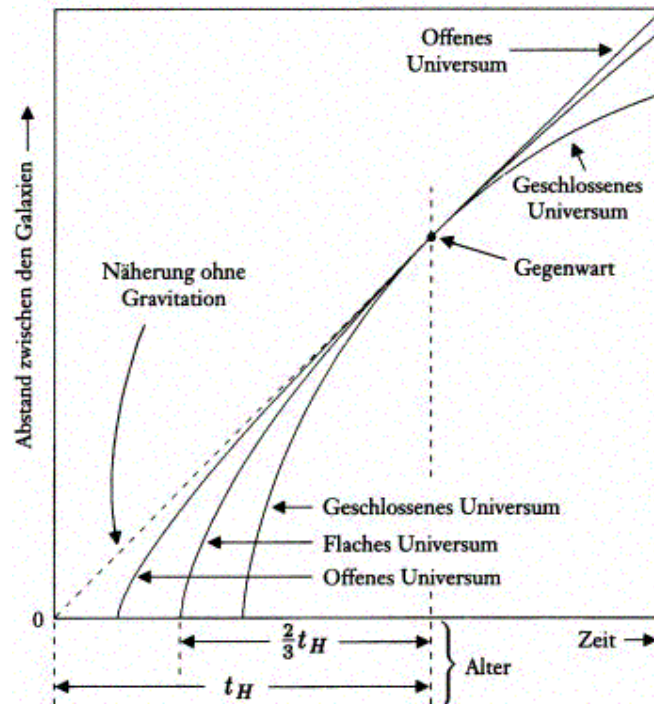
$$\theta = \frac{4MG}{bc^2}$$

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

$b$  = nächster Anäherungspunkt  
 $M$  = Masse des ablenkenden Objekts  
 $\theta$  = tatsächlicher Ablenkwinkel

Offenes- oder geschlossenes Universum:

Der Dichteparameter  $\Omega$  gibt die relative Massendichte des Universums bezüglich der kritischen Dichte an. Der Dichteparameter ist damit ein Maß für die Stabilität des gesamten Kosmos, denn für  $\Omega = 1$  erhält man das stabile flache Universum, während für  $\Omega > 1$  das System kontrahieren, für  $\Omega < 1$  immer stärker expandieren muss. Da die Dichte der sichtbaren Materie mit etwa  $2 \cdot 10^{-28} \text{ kg/m}^3$  etwa um den Faktor 50 kleiner ist als die kritische Dichte, ergibt sich für sichtbare Materie der Dichtefaktor  $\Omega \approx 0,02$ . Das Standard-Urknallmodell eines flachen Universums basiert auf der Allgemeinen Relativitätstheorie von Einstein und fordert als Voraussetzung Homogenität und Isotropie im Weltraum. Eine wesentliche Voraussetzung ist die Annahme, dass die Massendichte gleich der kritischen Dichte ist. Damit muss der Dichteparameter die Größe  $\Omega = 1$  haben, was mit den Beobachtungen nicht übereinstimmt.



### Ergebnisse der Messungen:

- Der sichtbare Rand der Galaxien ist nicht der tatsächliche Rand.
- Beim Vergleich der drei Methoden, liefert die Leuchtkraft-Massen Methode nur ein Bruchteil der aus Bahnkurven- und Gravitationslinsen-Effekt berechneten Masse.
- Allgemeine Relativitätstheorie fordert höhere Massendichte.

Das heißt, 97% der Masse in Galaxien und Universum sind dunkel.

## 2.) Verschiedene Theorien zur Erklärung der Massendifferenz

### MOND (MOdified Newton Dynamics)

1983 hat M. Milgrom vorgeschlagen das 2. Newtonschen Axiom so zu modifizieren, dass man ohne dunkle Materie auskommt. Hierzu wird für sehr kleine Beschleunigungen, in der Größenordnung, wie sie in Galaxien vorkommen, eine neue Naturkonstante  $a_0$  eingeführt. Für Beschleunigungen die wesentlich größer als  $a_0$  sind, gilt weiterhin das normale Newtonsche Gesetz wonach die Kraft proportional der Beschleunigung ist. Für Beschleunigungen die klein gegenüber  $a_0$  sind, wird das Newtonsche Gesetz modifiziert; die Kraft ist nun zum Quadrat der Beschleunigung proportional. Man kann  $a_0$  so wählen, dass die beobachtete Masse gerade die beobachteten Sternengeschwindigkeiten zur Folge haben. Problematisch ist allerdings, dass sie eben extra auf dieses Problem zugeschnitten ist und ihr die physikalischen Grundlagen fehlen.

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

mit  $\mu(x)=1$  für  $x \gg 1$   
und  $\mu(x)=x$  für  $x \ll 1$

Daraus folgt für Spiralgalaxien:

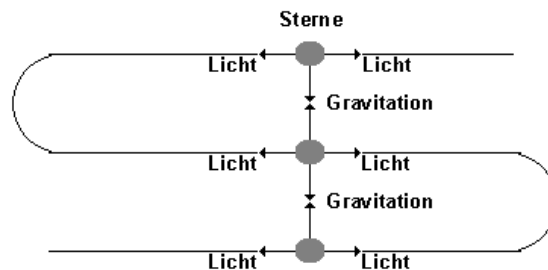
$$\Rightarrow \frac{GmM}{r^2} = \frac{m}{a_0} a^2$$

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

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

Weitere Nicht-Teilchen-Theorien:

- Gefaltetes Universum: Stellt man sich das Universum wie ein Blatt Papier vor, dann kann sich Licht auf dessen Oberfläche bewegen. Die Gravitationskraft kann zusätzlich senkrecht zur Oberfläche wechselwirken. Bei einem flachen Universum hat die zusätzliche Ausbreitungsrichtung der Gravitation keinen Effekt. Wenn das Universum nun aber gefaltet ist, dann können Sterne die auf der „Oberfläche“ sitzen, schon miteinander gravitativ wechselwirken, obwohl das Licht von Stern 1, Stern 2, seit dem Urknall, noch gar nicht erreicht hat. Somit wäre Stern 1 für Stern 2 dunkle Materie und umgekehrt.



- Wenn man von einer nicht-verschwindenden, kosmischen Konstanten ausgeht, die sich aus der 3K-Hintergrundstrahlung ergibt, addieren sich fünf Komponenten zur kritischen Massendichte, dabei ist die dunkle Materie nicht mehr der Hauptbestandteil, sondern die dunkle Energie.
  1. Baryonische Materie, mit ungefähr 5%.
  2. Dunkle Materie, mit ungefähr 25%
  3. Neutrinos tragen, aufgrund ihrer von Null verschiedenen, aber sehr kleinen Massen, nur sehr wenig bei weniger als 0,01% (bei einer Tau-Neutrino Masse von  $<1\text{eV}$ ).
  4. Photonen der kosmischen Hintergrundstrahlung liefern wegen  $E=mc^2$  auch einen Beitrag zur Massendichte. Dieser ist heute minimal, mit ungefähr 0,005%, war aber im frühen Universum der überwiegende, weil die mittlere Photonenergie mit der Temperatur stark anwächst.
  5. Dunkle Energie, die am einfachsten durch eine kosmologische Konstante

$$\Lambda > 0$$



eingeführt wird. Wegen ihrer gravitativen Abstoßung ist sie nicht geklumpt, sondern diffus verteilt und dominiert heute eindeutig mit ungefähr 70%..

$\Omega_{\text{tot}} h^2 \approx 1$	$\Omega_{\text{Materie}} h^2 \approx 0.3$	$\Omega_{\text{Baryonisch}} h^2 \approx 0.03$	$\Omega_{\text{hell}} h^2 \approx 0.003$
			$\Omega_{\text{dunkel}} h^2 \approx 0.03$
		$\Omega_{\text{Nicht-baryonisch}} h^2 \approx 0.3$	$\Omega_{\text{HDM}} h^2 < 0.01$ Leichte Neutrinos
			$\Omega_{\text{CDM}} h^2 \approx 0.2$ WIMPs, Axionen
	$\Omega_{\text{Vakuumsenergie}} h^2 \approx 0.7$		

#### Baryonische dunkle Materie, MACHO

Als baryonische dunkle Materie gelten Planeten, ausgebrannte Sterne, schwarze Löcher, braune und weiße Zwerge und Objekte, die keine Sterne geworden sind oder Überreste solcher, also Gaswolken und Staubpartikel. Alle diese Objekte haben gemeinsam, dass sie keine oder kaum elektromagnetische Wellen aussenden. Deshalb sind sie sehr schwer aufzufinden. Allerdings kann man über die primordiale Synthese das Verhältnis von Baryonen zu Photonen im frühen Universum voraussagen, das ebenfalls in den Mikrowellenhintergrund eingeht. Daraus berechnet sich die sichtbare baryonische Materie zu ungefähr 10% der gesamten baryonischen Materie. Der Rest, die dunkle baryonische Materie, wird unter dem Sammelbegriff MACHO (Massive Compact Halo Objects) zusammengefasst.

#### Nicht-baryonische dunkle Materie

Dadurch, dass die geforderte Gesamtmasse des Universums um ein vielfaches größer als die Gesamtmasse der baryonischen Materie ist, muss es also noch die nicht-baryonische, dunkle Materie geben, die nach heutigen Theorien mindestens 90% der gesamten dunklen Materie ausmacht. Nicht baryonische Materie folgt aus der Urknalltheorie und der daraus berechneten Baryonendichte und ist außerdem für die Strukturbildung von Galaxien und Galaxiehaufen wie sie heute zu beobachten sind unerlässlich. Die Eigenschaften nicht-baryonischer dunkler Materie sind:

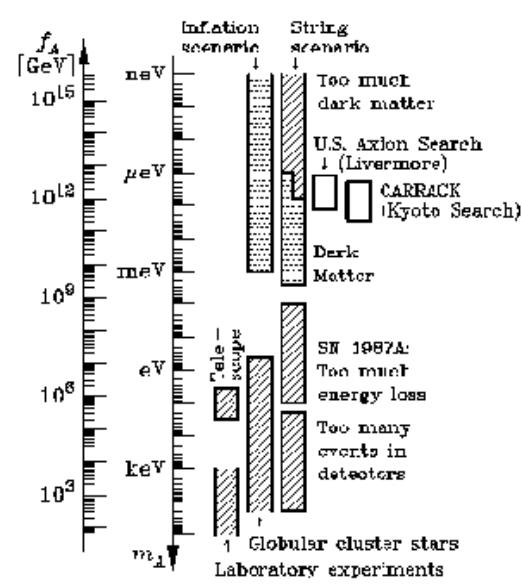
- Stabil
- Schwer (WIMPs)
- Elektrisch neutral
- Gravitativ- und schwach-wechselwirkend

Nicht-baryonische dunkle Materie kann im Wesentlichen in zwei Gruppen unterteilt werden. Die heiße dunkle Materie (HDM) und die kalte dunkle Materie (CDM).

*HDM:* Heiße dunkle Materie sind vor allem Neutrinos, wobei heiß bedeutet, dass sie sich fast mit Lichtgeschwindigkeit durch das frühe Universum bewegt haben. Neutrinos galten als plausible Kandidaten für dunkle Materie, allerdings hat sich ihre Masse als zu gering herausgestellt. Außerdem hätten zu viele Neutrinos nicht zu den Strukturen im Universum geführt, die man heute beobachten kann. Im Allgemeinen fehlt es unter Annahme ausschließlich heißer dunkle Materie an kleinen Strukturen z.B. Zwerggalaxien.

*CDM:* Kalte dunkle Materie bezeichnet hypothetische Teilchen die sich seit ihrer Entstehung nur langsam von der Stelle bewegen, bzw. Teilchen die sich sehr spät entkoppelt haben. Im Standardmodell der Teilchenphysik kommt für kalte dunkle Materie kein Teilchen in Frage. Doch in Erweiterungen dieses Modells finden sich viele mögliche Kandidaten für kalte dunkle Materie. Weil kalte dunkle Materie keine großen Strukturen wie Cluster und Supercluster erklären kann, ist es sinnvoll eine Mischung aus heißer und kalter dunkler Materie im Verhältnis von 30:70 anzunehmen, um zum heutigen Aussehen des Universums zu gelangen.

- Axion: Axionen wurden 1977 in der Elementarteilchenphysik vorgeschlagen, um zu erklären, warum bei der starken Wechselwirkung im Gegensatz zur schwachen Wechselwirkung keine Verletzung der CP Symmetrie auftritt. Bei einer Verletzung der Symmetrie, müsste das Neutron ein um den Faktor  $\sim 10^9$ , gegenüber dem jetzigen Grenzwert, größeres Dipolmoment haben. Um dieses Problem zu lösen, wird das Axion eingeführt.  
Die Eigenschaften des Axions ähneln denen eines neutralen, leichten Pions, welches sehr schwach wechselwirkt.  
Die Erzeugung von Axionen kann beispielsweise durch den Primakoff-Effekt erfolgen: dabei wechselwirkt ein thermisches Photon in Anwesenheit eines starken Feldes, z.B. eines Magnets oder einem Kernfeld, mit einem virtuellen Photon und wird dann zu einem Axion.  
Quellen von Axionen sind z.B. Supernovae, Sterne und Halos. Aus diesen Quellen kann man Beschränkungen für die Axionmasse vorhersagen. Die Supernova SN 1987a in der Großen Magellanschen Wolke liefert durch Messungen der Breiten empfangener Neutrinos einen Maximalwert von  $10^{-3}$  eV. Die Kosmologie fordert, dass die Axionmasse nicht unterhalb von etwa  $10^{-6}$  eV liegen darf, um die kritische Dichte des Universums zu erhalten. Es ergibt sich also ein Massenbereich für das Axion von  $10^{-6}$  und  $10^{-3}$  eV. Es handelt sich also um ein sehr leichtes Teilchen. In hoher Zahl könnte es jedoch einen Teil zur kalten dunklen Materie beitragen.



- WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles): Die wahrscheinlichsten Kandidaten für WIMPs sind supersymmetrische Teilchen. Die Supersymmetrie wurde 1970 entwickelt um Probleme, für die das Standardteilchenmodell nicht ausreichte, z.B. für die Grand Unification Theory, zu lösen. Es wird postuliert, dass es zu jedem fermionische Teilchen ein bosonische Superteilchen gibt und umgekehrt. Dabei werden die fermionische Partner mit der Nachsilbe „ino“, und die bosonische Partner mit der Vorsilbe „s“ bezeichnet zum Beispiel Squarks. Solche Teilchen werden paarweise unter Erhaltung der R-Parität, eine Eigenschaft der Superteilchen, erzeugt. Schwere supersymmetrische Teilchen zerfallen, ebenfalls unter Erhaltung der R-Parität in leichtere supersymmetrische Teilchen. Am Ende dieser Zerfallskette steht das leichteste SUSY-Teilchen, das LSP. Dieses Teilchen ist stabil und existiert deshalb seit der primordialen Synthese. Dieses LSP wird auch Neutralino genannt. Es besteht aus einer Kombination eines Photinos, eines Zinos und zwei Higgsinos.

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

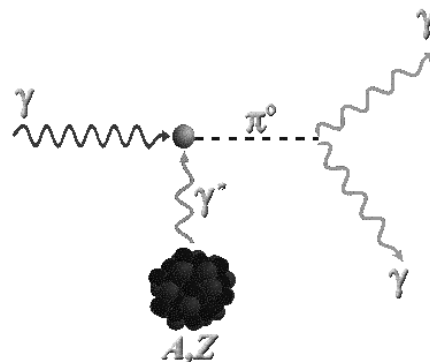
  

Name	Spin	Superpartner	Spin
Electron	1/2	Selectron	0
Muon	1/2	Smuon	0
Tau	1/2	Stau	0
Neutrino	1/2	Sneutrino	0
Quark	1/2	Squark	0

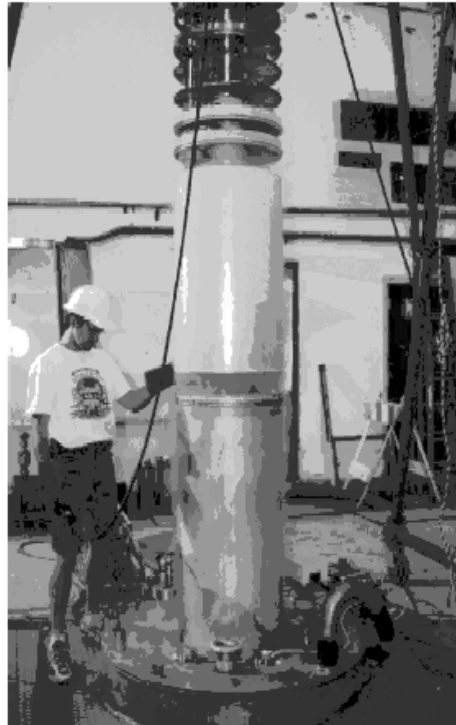
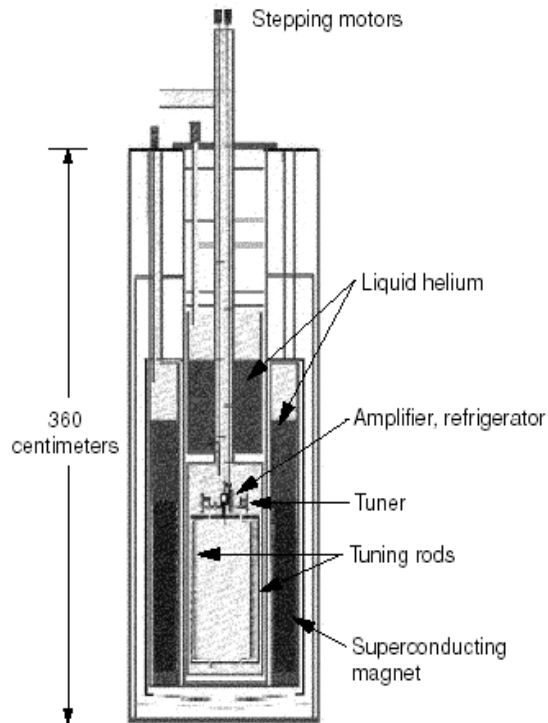
### 3.) Wie kann man nicht-baryonische dunkle Materie nachweisen?

#### Axion:

Das zur Zeit einzige Experiment, das eine ausreichend hohe Genauigkeit hat, um Axionen nachzuweisen ist das amerikanische Livermore Experiment. Das Experiment beruht auf der Theorie, dass Axionen durch den Primakoff Effekt erzeugt werden, also durch Umwandlung von thermischen Photonen durch Streuung an Kernen, ähnlich wie Pionen. .



Auf der Erde kann man die Axionen durch den inversen Effekt nachweisen, indem man sie in starke Magnetfelder bringt. Dort zerfallen sie dann, unter Wechselwirkung mit einem virtuellen Photon, in ein reelles Photon mit einer Frequenz im Mikrowellenbereich. Dieses Photon kann dann in einem durchstimmbaren Mikrowellen Resonator gemessen werden.

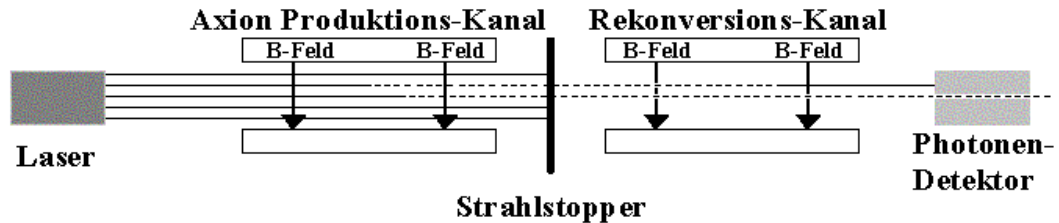


Der Resonator von Livermore ist 1m hoch und hat einen Durchmesser von einem halben Meter. Er ist umgeben von einem 8T starken, supraleitenden Magneten, der 6t wiegt. Der Resonator ist im Bereich von 0,3-3 GHz durchstimmbar (das entspricht einer Axionenmasse von 1,2-12,4 $\mu\text{eV}$ ). Dies geschieht durch zwei Stäbe im Hohlraum, einer aus Metall und einer aus Keramik, die wenn sie radial, in Nanometerschritten, bewegt werden die Frequenz entweder erhöhen oder verkleinern. Die erwartete Signalstärke der Axion beträgt  $10^{-22}$  W. Um dieses Signal zu messen, muss es mit einem extrem rauscharmen ( $\sim 1,5\text{K}$ ), supraleitenden HFET (Heterostructure Field Effect Transistor) verstärkt werden. Mit diesem Gerät wurden bis jetzt allerdings noch keine Axionen beobachtet.

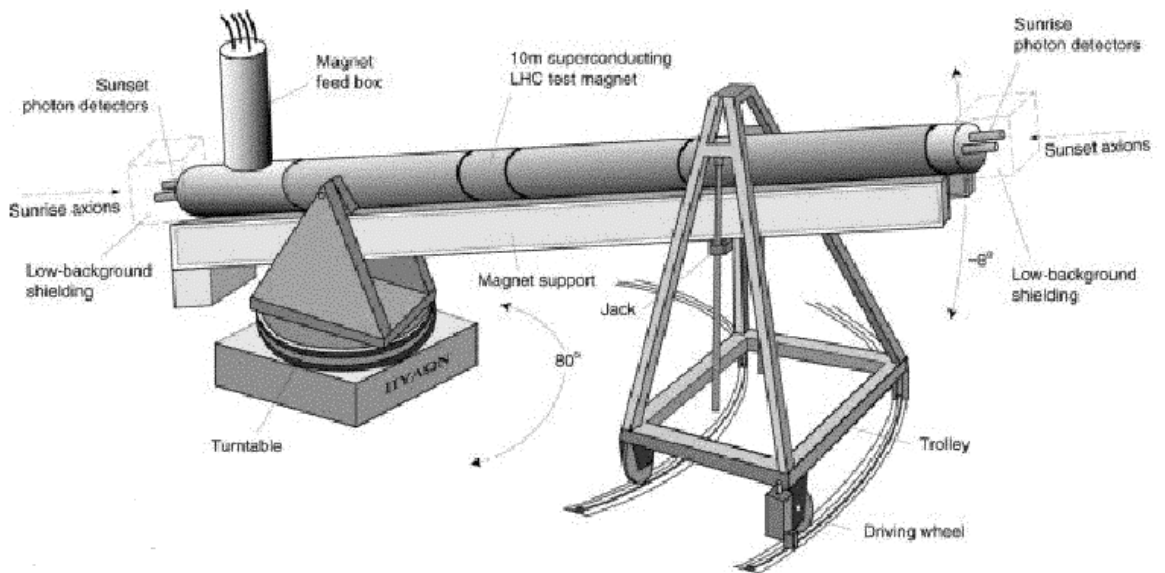
Die nächste Generation soll dann, Baubeginn ab Mitte 2004, mit SQUIDs (Superconducting Quantum Interference Device) arbeiten, die ein noch geringeres Rauschen ( $\sim 0,002\text{K}$ ) haben und die bei Frequenzen über 3GHz arbeiten können.

Eine Möglichkeit mit der man Axionen direkt nachweisen könnte, ist mit einem starken Laser. Der Laserstrahl geht dabei durch ein starkes Magnetfeld und trifft dann auf eine

lichtundurchlässige Wand. Axionen die im Magnetfeld erzeugt worden sind, können die Wand durchdringen. Hinter der Wand ist ein zweites Starkes Magnetfeld, in dem die Axionen wieder in Photonen umgewandelt werden, welche dann mit einem Photonen-Detektor registriert werden können.



Ein weiteres Experiment zur Axion-Suche ist am CERN aufgebaut, das CAST-Experiment (Cern Axion Solar Telescope). Es soll mit seinen 2 Stahlrohren die jeweils 10m lang sind und von einem 9T starken Magnetfeld umgeben sind solare Axionen aufspüren. Beide Enden der Rohre sind mit Röntgendetektoren ausgerüstet, die zweimal täglich für je 1,5h auf die Sonne gerichtet sind. Die restliche Zeit des Tages wird für Untergrundmessungen genutzt.



## WIMPs:

Es gibt drei verschiedene Detektortypen mit denen es möglich ist WIMPs zu messen:

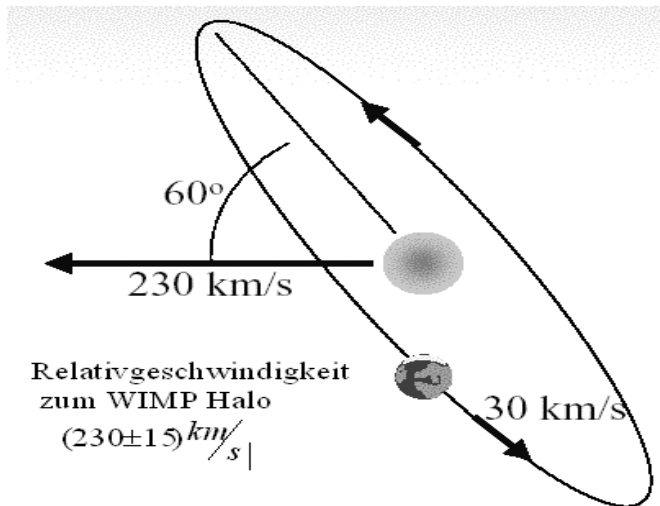
- Kryogen Detektoren: Kryogen Detektoren arbeiten bei Temperaturen von  $\sim 25\text{mK}$  und verwenden Halbleiter-Sensoren um einen Temperaturanstieg, der durch Phononen verursacht wird, zu messen.
- Ionisations Detektoren: Ein Atomkern, der von einem Neutralino getroffen wird, schlägt durch den Rückstoß bei seinen Nachbaratomen Elektronen aus (Elektron-Loch-Paar). Diese Elektronen führen zu einem messbaren Strom. Meistens wird als Material Germanium genutzt.
- Szintillations Detektoren: Diese Detektoren nutzen die vom Rückstoßkern erzeugten Ionen. Diese fangen nach kurzer Zeit Elektronen ein und fallen unter Aussendung eines Photons in den Grundzustand zurück. Durch flüssiges Xenon werden diese Blitze verstärkt und verlängert (einige Nanosekunden) können dann mit Sekundärelektronenvervielfachern gemessen werden.

Sinnvoll ist es nicht nur mit einem Detektortyp zu arbeiten, sondern eine Kombination zu verwenden. Unerwünschte Ereignisse, aufgrund radioaktiven Zerfalls und Höhenstrahlung, lassen sich so besser ausfiltern.

<b><u>Projekt</u></b>	<b><u>Ort</u></b>	<b><u>Beginn</u></b>	<b><u>Detektortyp</u></b>	<b><u>Material</u></b>	<b><u>Masse kg</u></b>	<b><u>Diskrimination</u></b>
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

- DAMA (DARk MATter Search):

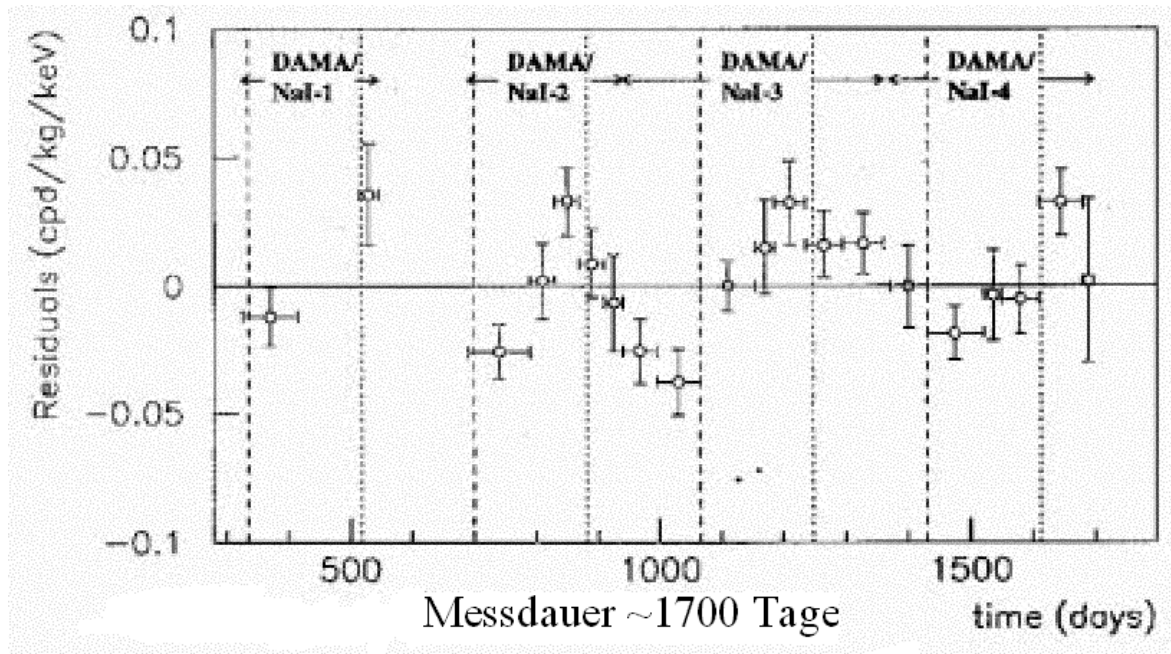
Um WIMP's von anderen Elementarteilchen – z.B. den aus der überall vorkommenden, natürlichen Radioaktivität – unterscheiden zu können machte sich das DAMA-Experiment, das sich im Gran Sasso Massiv in Italien befindet, die von den amerikanischen Astrophysikern. Drukier, Freese und Spergel 1986 vorhergesagte jahreszeitliche Schwankung des WIMP-Stroms zunutze.



Während des Umlaufs unseres Planetensystems um das Zentrum der Milchstraße, sollten auf die Erde einströmende WIMP's keine besondere Vorzugsrichtung genießen. Um die vermutete, gravitative Wirkung ausüben zu können, müssten diese sphärisch gleichmäßig verteilt sein. Der Umlauf von Planeten und ganzer Planetensysteme stört jedoch diese Gleichverteilung. Daher erwartet man, dass in unserem Sonnensystem der Strom von WIMP's im Juni größer sein sollte, da dann die Umlaufgeschwindigkeit der Erde um die Sonne der unseres gesamten Planetensystems entspricht und sich so beide Geschwindigkeiten addieren. Natürlich auf der Erde vorkommende Elementarteilchen sollten von dieser Schwankung natürlich nicht betroffen sein. Tatsächlich konnte DAMA schon in den ersten beiden Messperioden eine solche Variation des galaktischen WIMP-Stroms nachweisen. Die Ergebnisse lassen auf ein Teilchen schließen, das etwa 60 Mal schwerer ist als das Proton, gleichzeitig aber auch eine Billion Mal schlechter mit anderen Teilchen wechselwirkt, d.h. ein Wirkungsquerschnitt von ungefähr  $\sigma = 10^{-6} \text{ pb}$ . Da DAMA aber nur ein Detektortyp verwendet, einen Szintillationsdetektor mit 100kg hochreinem NaI, und außerdem das einzige Experiment ist, das WIMPs nachgewiesen hat, muss man das Ergebnis relativ skeptisch sehen. DAMA wird zurzeit auf eine gesamte Detektormasse von 250kg aufgerüstet. Dieses Experiment heißt dann LIBRA (Large sodium Iodine Bulk for RARE processes).

Weitere Experimente, die versuchen die Messungen von DAMA zu reproduzieren sind CRESST und Edelweiss.

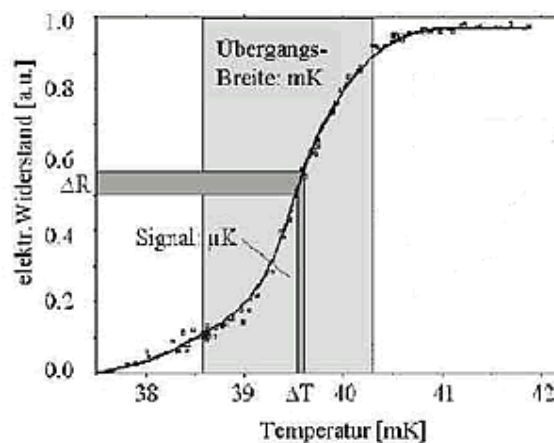




- *CRESST* (Cryogenic Rare Event Search with Superconducting Thermometers):

Zur Abschirmung vor Umgebungsradioaktivität ist der Kryostat von *CRESST*, in dem die Detektoren installiert sind, mit insgesamt 35cm Kupfer und Blei umgeben. Trotzdem würde die kosmische Strahlung eine zu hohe Rate an Störsignalen verursachen, weshalb sich *CRESST* ebenfalls im Gran Sasso Untergrundlabor befindet.

Die Detektoren bestehen aus Saphir- oder  $\text{CaWO}_4$ -Kristallen (Calcium-Wolframat). Die durch die Streuung von WIMPs an Atomkernen deponierte Energie führt zu einer geringen Temperaturerhöhung, die gemessen werden kann und damit zu einem Signal führt. Um eine so geringe Temperaturerhöhung messen zu können liegt die Betriebstemperatur der Detektoren bei etwa 0.02K. Als Thermometer verwendet *CRESST* supraleitende Filme, die an ihrem Phasenübergang zur Supraleitung stabilisiert werden. Eine kleine Temperaturschwankung wird damit in eine relativ große Änderung des Widerstandes übertragen.



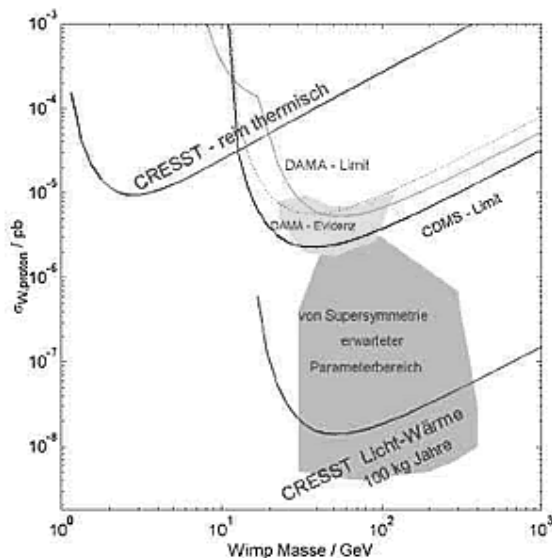
Je leichter die WIMPs sind, desto geringer sind die bei Kernstößen übertragenen Energien. Daher sind rein thermische Detektoren besonders geeignet, um nach WIMPs mit niedriger Masse zu suchen.

Mit den  $\text{CaWO}_4$ -Kristallen werden zusätzlich auch szintillierende Absorber verwendet, d.h. bei einem Streueignis werden neben thermischer Energie auch Photonen erzeugt. Das Verhältnis von Photonen zu thermischer Energie ist unterschiedlich für Gammastrahlung und Kernrückstöße. Werden gleichzeitig thermische Energie und Photonen gemessen, so können die WIMP-Streuungen vom Gammauntergrund und damit vom überwiegenden Teil des radioaktiven Untergrunds unterschieden werden.

Die vom Absorberkristall emittierten Photonen werden bei CRESST mit einem zweiten benachbarten kleineren Tieftemperatur-Detektor gemessen. Damit steigt die Sensitivität für kleine Zählraten und kleine Wirkungsquerschnitte um viele Größenordnungen. Diese Art von Detektoren ist daher geeignet, um bei höheren WIMP-Massen nach sehr kleinen Wirkungsquerschnitten zu suchen.

Die rein thermischen Detektoren zeigen im relevanten Energiebereich einen Untergrund von nur einem Ereignis pro keV pro Tag und Kilogramm Detektormaterial.

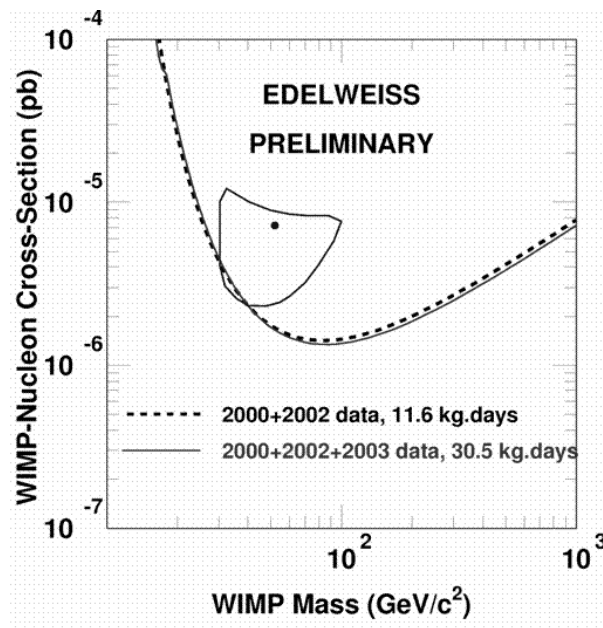
Zur Zeit hat CRESST eine Detektormasse von 10kg. Die Planungen gehen dahin, Tieftemperatur-Kalorimeter auf Detektormassen bis hin zu mehreren 100kg auszubauen.



○ *Edelweiss (Expérience de détecter les WIMPs en Site Souterrain)*

Das EDELWEISS Experiment befindet sich 1780m tief im französischen Fréjus-Tunnel. Dort werden 3 kryogene Germanium-Halbleiterzähler einer Masse von je 320g bei einer Temperatur von 17mK betrieben. Natürliche Radioaktivität wird hier aufgrund der kombinierten Auslese der bei einer Wechselwirkung entstandenen thermischen Energie und Ladung unterdrückt. Dies geschieht so effektiv, dass im Messbereich für Kern-Rückstöße durch WIMPs während einer effektiven Messzeit von 30kg-Tagen lediglich 2 Ereignisse registriert wurden, die

vom erwarteten Untergrund stammen. Daraus leiten sich die in der Abbildung gezeigten Obergrenzen für den WIMP-Nukleon Wirkungsquerschnitt als Funktion der WIMP-Masse ab.



Gezeigt ist ebenfalls der von DAMA favorisierte Parameterbereich. Mit der von EDELWEISS erzielten Sensitivität kann nicht nur der DAMA-Bereich ausgeschlossen werden, auch erste Teile von Bereichen, die in theoretischen Modellen der Supersymmetrie als mögliche Parameter vorhergesagt werden, können erstmalig experimentell getestet werden. In einer neuen Generation von Experimenten soll die bisher erreichte Sensitivität um mehr als 2 Größenordnungen, also in Bereiche von Wirkungsquerschnitten von  $\sigma = 10^{-9} \text{ pb}$  deutlich verbessert werden. Damit werden erstmals große Bereiche theoretischer Vorhersagen experimentell zugänglich. Um dieses Ziel zu erreichen, muss die effektive Messzeit entsprechend gesteigert werden, was durch erheblich mehr Detektormaterial (EDELWEISS-2 bis zu 120 Ge-Detektoren mit je 320g Masse) angestrebt wird.

Aufgrund der enormen Sensitivitäts-Steigerung treten allerdings bisher vernachlässigbare Untergrundquellen in das Blickfeld: Selbst bei einer extrem niedrigen Myonrate von ca.  $4 \frac{1}{\text{m}^2} * \text{Tag}$  im Fréjus-Tunnel, was einer

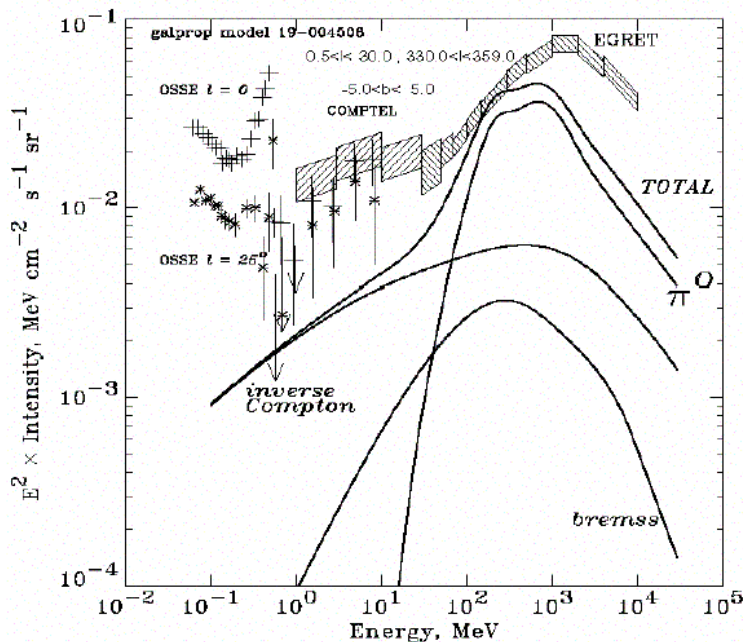
Myonenunterdrückung gegenüber Meeresniveau von  $4 * 10^{-7}$  entspricht, würden unerkannte Neutronen aus tief-inelastischen Streuungen von Myonen an den Materialien in der Umgebung des Detektors den dominanten und die Sensitivität bei etwa  $\sigma = 10^{-7} \text{ pb}$  begrenzenden Untergrund darstellen. Deshalb müssen die Detektoren von einem Myonenzähler umgeben werden, um möglichen Neutronen-Untergrund durch das aktive Erkennen der Neutronen produzierenden Myonen zu eliminieren. Aufgrund der massiven Abschirmung der Detektoren mit Kupfer, 20cm dickem Blei und 50cm dickem Polyethylen beträgt die zu überdeckende Fläche des Myonenzählers für das EDELWEISS-2 Experiment ca. 140m². Die

Datenaufnahme des EDELWEISS-1 Experiments wurde Ende 2003 beendet. In diesem Jahr wird die komplett neue Konfiguration der EDELWEISS-2 Phase aufgebaut und Ende 2004/Beginn 2005 mit der Messung der ersten 30 Bolometer begonnen.

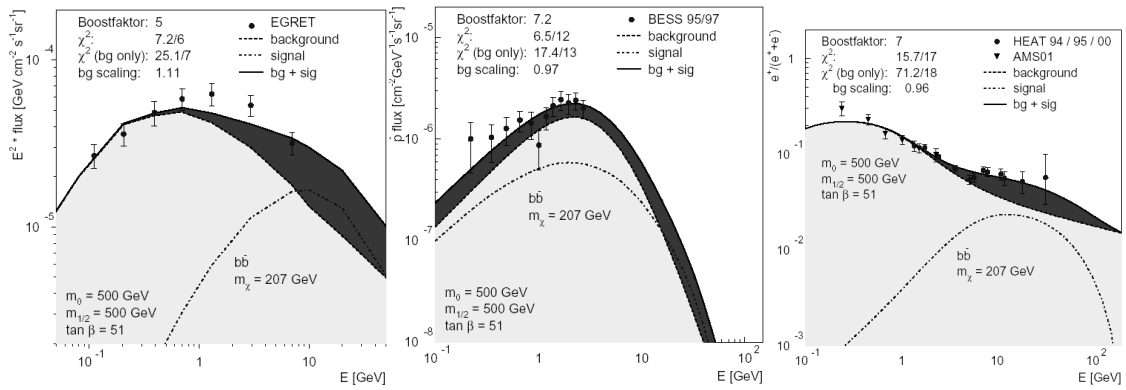
Neutralino-Antineutralino-Vernichtung:

Eine andere Möglichkeit WIMPs (Neutralinos) nachzuweisen ist durch Neutralino–Anti-Neutralino – Vernichtung.

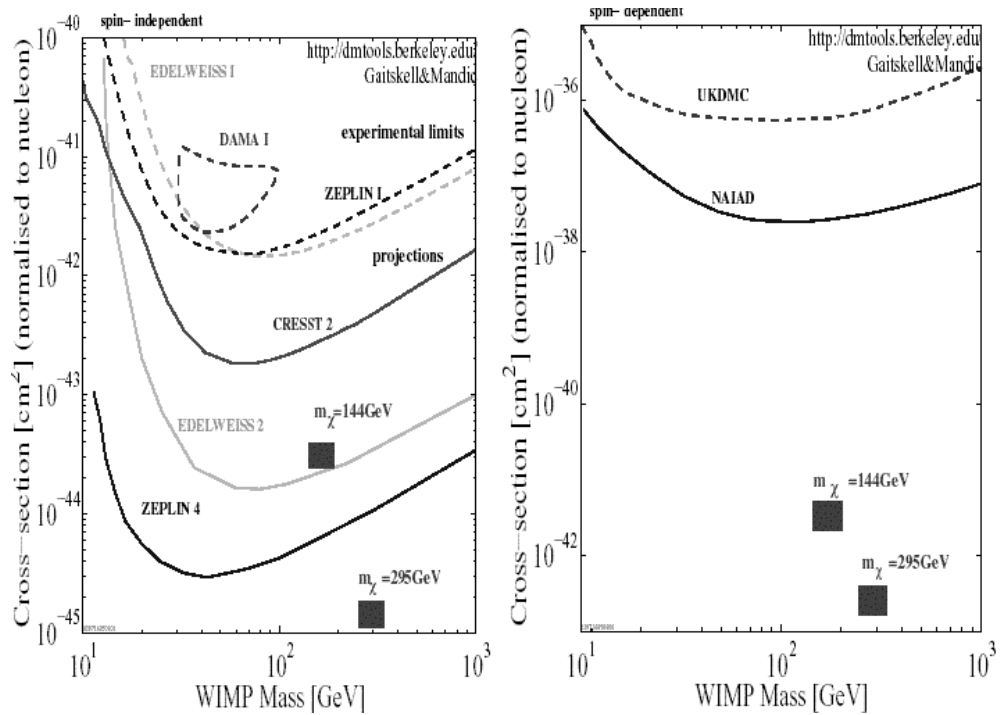
Messungen der Antiproton-, Positronen- und Gamma-Energien von BESS (Balloon-borne Experiment with a Superconducting Solenoidal magnet), HEAT (High Energy Antimatter Telescope) und EGRET (Energetic Gamma Ray Experiment Telescope) liefern das Ergebnis, dass konventionelle Theorien nicht ausreichen um die Spektren zu erklären. Die Messwerte der Satelliten liegen über den theoretischen Werten.



Wenn man nun davon ausgeht, dass bei einer Neutralino – Antineutralino – Vernichtungen Neutrinos, Photonen, Protonen, Antiprotonen, Elektronen und Positronen entstehen und diese Teilchen unter Berücksichtigung der zurzeit besten Modelle zur Supersymmetrie zu den Satellitendaten hinzuaddiert, so ist die Lücke zwischen Theorie und Messwerten praktisch geschlossen.



Dies ist ein gutes Indiz für dunkle Materie. Allerdings sind die Wechselwirkungsquerschnitte, der so vorhergesagten Teilchen so gering, dass nur die neusten Detektoren eine so hohe Genauigkeit aufweisen können.



Literaturangaben:

- **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.astroteilchenphysik.de)
- <http://www.lngs.infn.it/>
- <http://edelweiss.in2p3.fr/>
- <http://nomadinfo.cern.ch/CAST/>
- **Sonstiges internet**