

8.3 Nachweis von Dunkler Materie

8.3.1 Machos

Mit Hilfe des Gravitationslinseneffekts haben die Experimente MACHO, EROS und OGLE (Refs. siehe Review 22 in [17]) versucht, die Machos gegen hell leuchtende extragalaktische Objekte zu beobachten (siehe Abb. 8.8 oben). Es gibt inzwischen mehrere gut belegte Macho-Kandidaten (Abb. 8.8 unten). Allerdings würden diese Halo-Objekte baryonische Materie sein, und damit nicht die fehlende nicht-baryonische Materie erklären.

Das Ergebnis des MACHO-Experimentes nach 5.7 Jahren Suche mit einem auf der Erde stationierten Teleskop: die Beobachtung von 11.9 Millionen Sternen in der großen Magellanschen Wolke, jeweils über eine Zeit von 34 bis 230 Tagen, ergab 13 bis 17 Macho-Ereignisse, die alle Kriterien erfüllen. MACHOs mit 0.1 bis 1.0 Sonnenmasse machen nach diesen Ergebnissen etwa 20% des Halos aus (mit einer oberen Grenze von 40%). Die EROS-Kollaboration setzt niedrigere Grenzen.

8.3.2 Suche nach elastischer WIMP-Streuung

Eine Möglichkeit der Suche basiert darauf, dass WIMPs an Atomkernen elastisch streuen können und dabei einen Rückstoß auf die Kerne übertragen (Abb. 8.9a). Die Experimente sind wegen der geringen Rückstoßenergie und der zu erwartenden kleinen Streurrate extrem schwierig.

Experimentelle Bedingungen: Zur Abschätzung der **Rückstoßenergie** nimmt man an, dass sich die WIMPs im Schwerpunktsystem unserer Galaxis mit thermischen Geschwindigkeiten bewegt (die Temperatur ist beim Ausfrieren etwa $T_f \approx (m_\chi/20)(c^2/k)$ und fällt mit der adiabatischen Ausdehnung etwa mit $1/R^2$ ab). Die thermischen Geschwindigkeiten sind klein gegenüber der Geschwindigkeit des Sonnensystems relativ zur Galaxis von 220 km/s. Deshalb wird eine mittlere WIMP-Geschwindigkeit relativ zu einem erdgebundenen Detektor zu 220 km/s angenommen. Für WIMP-Massen zwischen 10 GeV und 10 TeV sind die zu erwartenden Rückstoßenergien der Kerne (zum Beispiel Ge, Xe) nur 1 bis 100 keV.

Die Streurrate ist durch den lokalen WIMP-Fluss, $j_\chi = n v$, und den Streuquerschnitt gegeben:

$$\Gamma_{\text{elast}} = n v \sigma_{\chi,N}. \quad (8.10)$$

Für unsere Umgebung wird die DM-Dichte zu $\rho_{DM} = 0.3 \text{ GeV}/\text{cm}^3$ mit den in Abschnitt 8.1 diskutierten kinematischen Betrachtungen abgeschätzt. Mit

$$n = \frac{\rho_{DM}}{m_\chi} \quad (8.11)$$

ergibt sich, dass die Rate elastischer Streuungen, Γ_{elast} in (8.10) nur noch von der WIMP-Masse und dem elastischen WIMP-Kern-Streuquerschnitt abhängt. Deshalb werden die bisher erhaltenen Ausschließungsgrenzen als Funktion dieser beiden Parameter aufgetragen (siehe Beispiele weiter unten).

Die größte Schwierigkeit der Experimente ist die zu erwartende extrem niedrige Streurrate der WIMPs. Für SUSY-WIMPs wäre die Streuung eine elektro-schwache

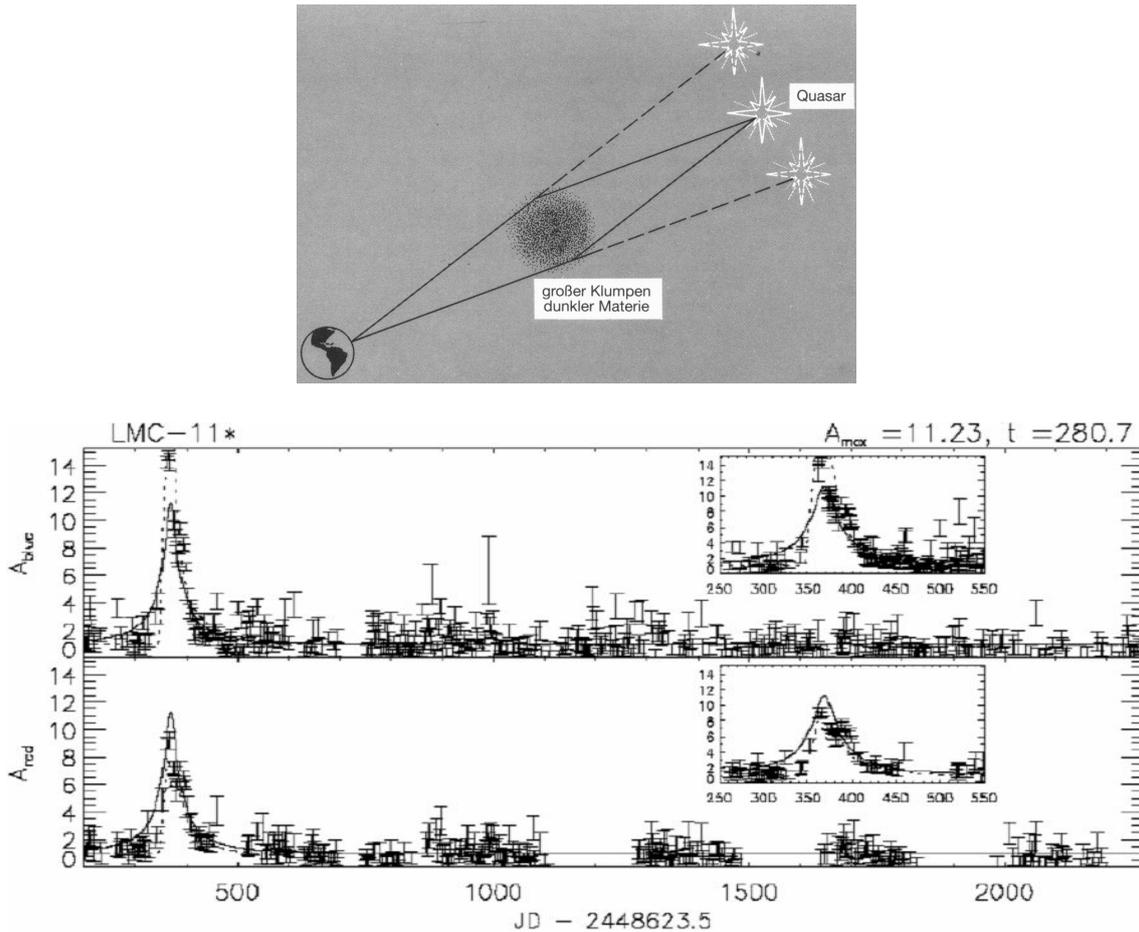


Abbildung 8.8: Die Wirkung einer Gravitationslinse zum Nachweis kompakter Dunkler Materie. Oben: Das Licht einer entfernten Quelle kann durch das Gravitationsfeld eines massiven Objektes, das eventuell sonst nicht zu sehen wäre, fokussiert werden. Unten: Lichtkurven von einem in der großen Magellanschen Wolke beobachteten Stern im blauen und roten Spektralbereich. Das simultane Aufleuchten mit gleicher Stärke in beiden Lichtkurven entspricht der Erwartung, wenn ein massives Objekt in der Milchstraße vor dem Stern vorbeifliegt.

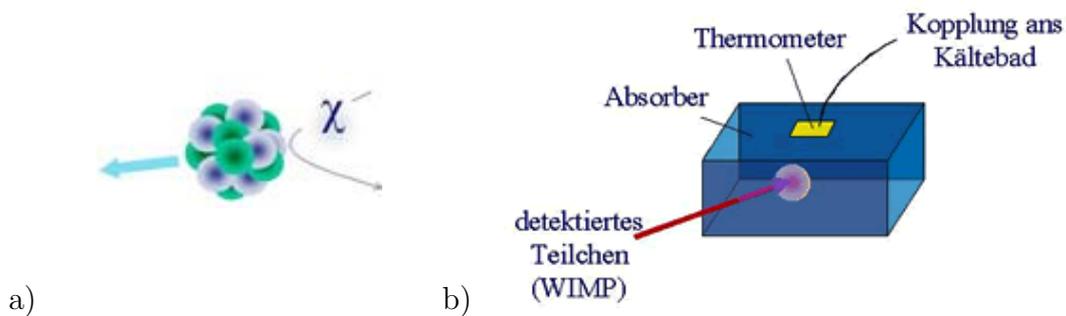


Abbildung 8.9: a) Elastische Streuung eines WIMP an einem Kern. b) Messprinzip eines Kryo-Detektors zum Nachweis von elastischer WIMP-Streuung durch die Messung eines Temperatursprungs in einem Kristall.

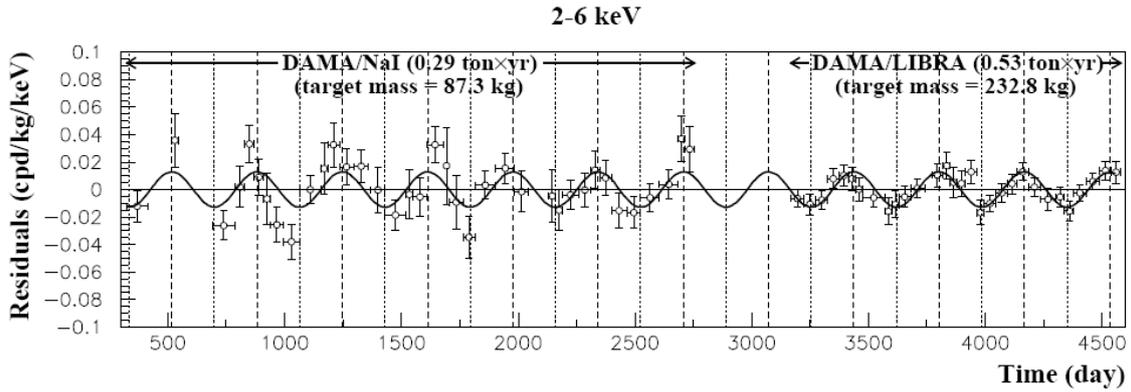


Abbildung 8.10: Messungen der jährlichen Modulation der Rate von Kernrückstoß-Ereignissen durch das DAMA-Experiment (in der vergrößerten und verbesserten Version DAMA/LIBRA).

Wechselwirkung mit einem entsprechend kleinen Wirkungsquerschnitt (zur Erinnerung: in SUSY-Modellen bleiben die Kopplungen die gleichen wie beim Standardmodell). Ohne entsprechende Vorkehrungen sind Energiedepositionen durch Radioaktivität viel häufiger. Der Detektor darf daher nur mit Materialien umgeben werden, die möglichst wenig Radioaktivität enthalten. Außerdem müssen die Experimente in tiefen Bergwerken oder Tunneln betrieben werden, um die kosmische Höhenstrahlung abzuschirmen. Das weltweit größte Labor für derartige Experimente befindet sich in Italien im Gran-Sasso-Tunnel, wo auch die beiden unten angesprochenen Detektoren DAMA und CRESST betrieben werden. Die ebenfalls besprochenen Experimente CDMS und EDELWEISS befinden sich in der Soudan Mine in Minnesota beziehungsweise dem Frejus-Tunnel an der Grenze zwischen Frankreich und Italien.

Das DAMA-Experiment (NaI-Szintillator): Bedingt durch die Bewegung der Erde um die Sonne sollte sich unsere mittlere Geschwindigkeit relativ zu den WIMPs und damit das zu erwartende Rückstoßspektrum im jahreszeitlichen Rhythmus verändern. Das Experiment DAMA (Dark MATter search) im Gran-Sasso-Labor hat in mehrjährigen Messungen mit jetzt 250 kg NaI-Detektoren, bei einer gesamten Exposition von 0.82 Tonnen \times Jahre, Hinweise auf Modulationen mit einer Jahresperiode gefunden (Abb. 8.10).

Die Ergebnisse sind mit mehr als 8σ signifikant, aber scheinen im Widerspruch zu den Ergebnissen mehrerer anderer Experimente zu stehen (siehe die Ergebnisse der Kryo-Experimente im nächsten Paragraphen). Kritiker fragen, ob die DAMA-Kollaboration alle normalen Effekte mit jahreszeitlicher Schwankung ausgeschlossen haben. Da die Amplitude der Modulation nur größenordnungsmäßig 1% der gesamten Rate beträgt, wird auch hinterfragt, ob die Gesamtrate und die Eigenschaften der einzelnen Ereignisse mit einer WIMP-Hypothese verträglich sind. Andererseits könnte es sein, dass die anderen Experimente, die alle andere Detektortechnologien benutzen, auf die DAMA-Ereignisse nicht sensitiv sind, weil die Natur doch anders als die Modelle ist.

Neue Experimente mit ähnlichen Detektortechnologien sollen nun die DAMA-Ergebnisse überprüfen. Die DAMA-Ergebnisse wie auch die bisher erzielten Grenzen

für die Streuraten von WIMPs der anderen Experimente haben den Bereich, den man nach den Vorhersagen der Supersymmetrie erwarten würde, noch nicht erreicht. Die Streuraten könnten bis zu vier oder fünf Größenordnungen kleiner sein. Um WIMPs nachzuweisen, muß uns daher die Natur entweder mit einem hohen Wirkungsquerschnitt entgegenkommen, oder es sind neue Strategien bei der weiteren Reduzierung des Untergrundes notwendig.

Kryo-Detektoren: Als Detektoren mit hoher Empfindlichkeit und der Fähigkeit, Untergrund zu diskriminieren, werden Kristalle bei Temperaturen von $O(10\text{ mK})$ verwendet. Für kalorimetrische Messungen sind niedrige Temperaturen günstig, weil die Temperatursprung pro deponierter Energie am größten ist. Besonders günstig ist der Betrieb des Detektors an der Sprungtemperatur zum Supraleiter (zum Beispiel bei dem Szintillatorkristall CaWO_4 zwischen 7 und 9 mK). Bei Messung mit Squids (Superconducting QUantum Interference Device) ist man auf einzelne Phononen, die durch den Rückstoß des Kern angeregt werden, sensitiv.

Eine wesentliche Erhöhung der Sensitivität ergibt sich durch Kombination einer Temperaturmessung mit der Messung der Ionisation, die die Rückstoßkerne in dem Kristall erzeugen (Abb. 8.9b). Dabei kann die Ionisation auf verschiedene Weise gemessen werden, zum Beispiel durch Ladungssammlung in einem Halbleiterdetektor (Ge-Detektor im EDELWEISS-Experiment) oder durch Lichtmessung bei einem szintillierenden Kristall (CaWO_4 -Detektor im CRESST-Experiment). Durch den sogenannten Quenching-Effekt bei sehr hoher Ionisationsdichte, wie bei einem langsamen, schweren Kern, ist die Ionisationsausbeute relativ unterdrückt. Das Verhältnis der über Phononen gemessenen Energie zu der über die Ionisation gemessenen ist kleiner als bei der Ionisation von beispielsweise minimal ionisierenden Teilchen. Wie man an Abb. 8.11 für das Beispiel eines szintillierenden Kristalls sieht, läßt sich damit der Untergrund von β - und γ -Radioaktivität effizient unterdrücken.

Auf der Messung der Ionisationsladung basieren das amerikanische Experiment CDMS (Cryogenic Dark Matter Search) und das französische, im Frejus-Tunnel installierte Experiment EDELWEISS (Experience pour DETecter Les Wimps En Site Souterrain). Das unter deutscher Federführung im Gran Sasso Labor installierte Experiment CRESST (Cryogenic Rare Event Search with Superconducting Thermometers) mißt die Ionisation über Szintillationslicht.

Abbildung 8.12 zeigt WIMP-Ausschlussgrenzen von Kryo-Experimenten und die von DAMA beobachteten Evidenz in der Abhängigkeit von der WIMP-Masse und dem WIMP-Nukleon-Streuquerschnitt (die Streuung an Kernen wird mit der an einzelnen Nukleonen über die bekannten Kernformfaktoren in Beziehung gesetzt). Ebenfalls eingezeichnet ist der Bereich der SUSY-Vorhersage, die im Wirkungsquerschnitt bis etwa 10^{-12} pb herunter gehen kann, was mindestens drei Größenordnungen unterhalb der zur Zeit erreichbar scheinenden Messgenauigkeit liegt.

Offensichtlich stehen die DAMA-Evidenz und die Ausschlussgrenzen in Widerspruch zueinander. Ob die DAMA-Evidenz durch etwas anderes als WIMPs hervorgerufen wird, ist noch unklar. Alle genannten Experimente sammeln weiterhin Daten, zum Teil mit erhöhten Targetmassen um die das relevante Produkt Targetmasse \times Zeit zu vergrößern.

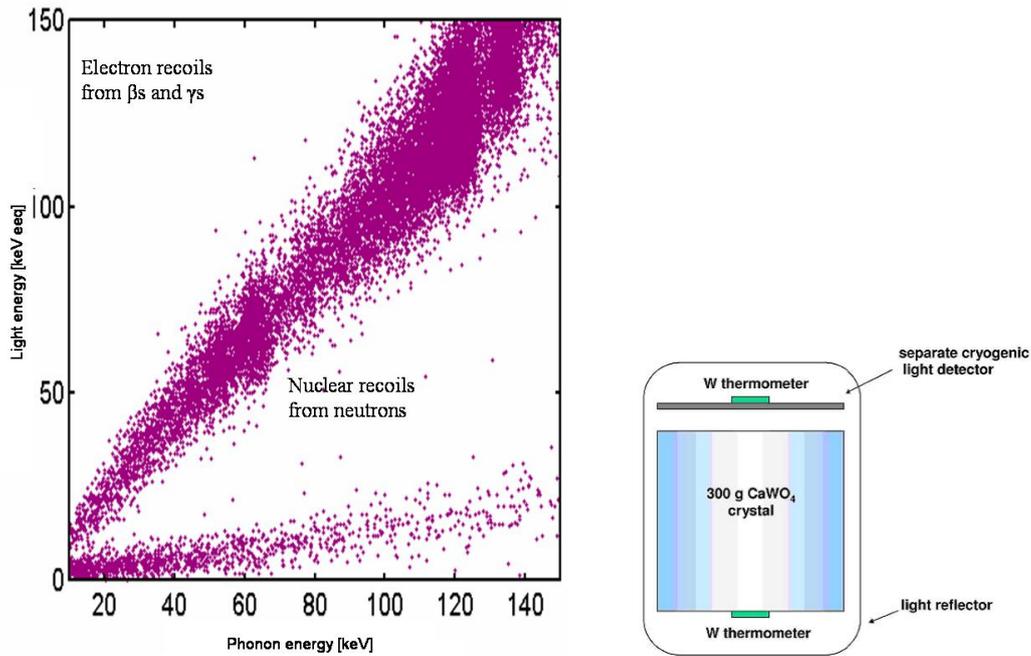


Abbildung 8.11: Links: Lichtausbeute gegen Phononenergie (Temperaturmessung) in einem CaWO_4 -Kristall (rechts Detektorprinzip) für β - und γ -Zerfälle von Kernen und bei Neutronenstreuung an Kernen.

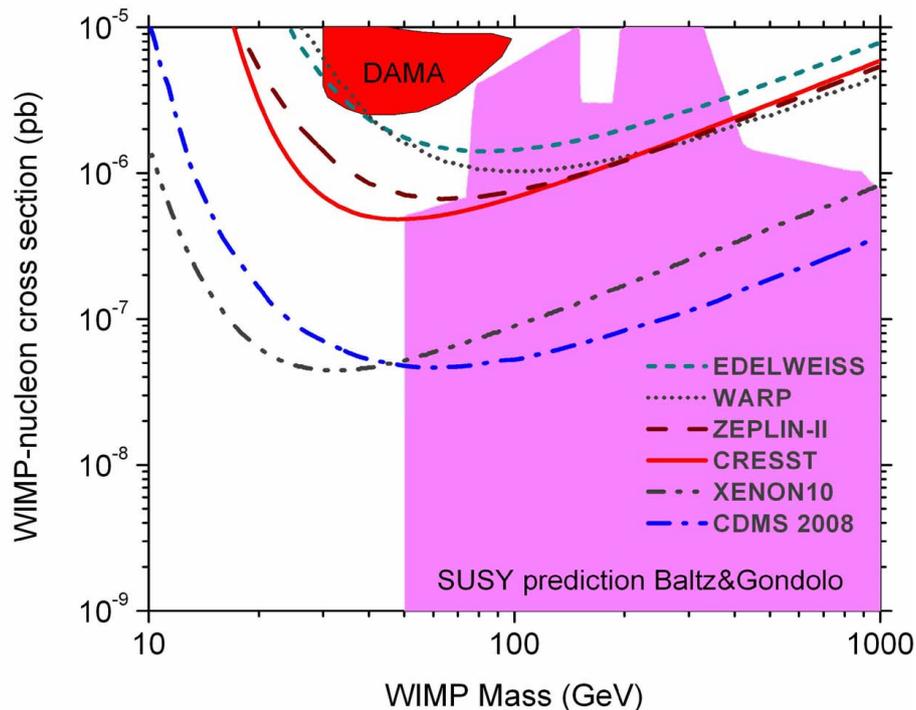


Abbildung 8.12: Ausschließungsgrenzen für WIMPs als Funktion der WIMP-Masse und des elastischen WIMP-Nukleon-Wirkungsquerschnitts. Ebenfalls eingezeichnet ist die von dem DAMA-Experiment gefundene Evidenz sowie der Bereich der SUSY-Vorhersage. Die Abbildung stammt aus der Veröffentlichung der dargestellten CRESST-Resultate (APP 31 (2009) 270).

8.3.3 DM-Suche in Kosmischer Strahlung

Die durch WIMP-Annihilationen im Weltall erzeugten Teilchen würden zur Kosmischen Strahlung beitragen. Wegen der notwendigen Untergrundunterdrückung eignen sich für den Nachweis von WIMP-Annihilationen am ehesten Neutrinos, Gammas und Antiteilchen, wie Antiprotonen und Positronen.

Annihilation in Neutrinos: Im Gravitationspotential der Erde oder der Sonne könnten sich WIMPs ansammeln, wenn diese durch Streuung an der Materie Energie verlieren. Damit würden sich in Erde und Sonne erhöhte Wahrscheinlichkeiten für WIMP-Annihilation ergeben, bei der auch als Endprodukte Neutrinos entstehen. Mit verschiedenen Neutrinodetektoren (Abschnitt 5.5) wurde nach WIMP-Annihilation in der Erde und der Sonne gesucht. Es wurde kein Signal beobachtet, was in eine Grenze für den elastischen Streuquerschnitt als Funktion der WIMP-Masse umgerechnet werden kann. In Abb. 8.13 sind diese Grenzen für ein Neutralino im Rahmen eines bestimmten SUSY-Modelles (MSSM) gezeigt. Für ein bestimmtes SUSY-Modell hängt die Neutralino-Annihilation nur noch von der Neutralino-Dichte ab, das heißt in diesem Fall von dem Streuquerschnitt an dem Wasserstoff der Sonne, der den Einfang in der Sonne bestimmt. Mit diesem Argument kann die Messung der Neutralino-Annihilation in der Sonne mit den direkten WIMP-Suchen in Verbindung gebracht werden. Da Neutralinos eine Spin besitzen könnte der Streuquerschnitt abhängig vom Spin der Kerne sein (zum Beispiel über Spin-Spin-Kopplungsterme). Da Wasserstoff einen Spin hat, wird in der Sonne der spin-abhängige Querschnitt gemessen. Die direkten Suchen messen dagegen mit den meisten Targetmaterialien den spin-unabhängigen Querschnitt, der auch für das Targetmaterial "Erde" maßgeblich ist.

Beitrag der WIMP-Annihilation zum galaktischen Gamma-Spektrum: Die von EGRET (Abb. 4.1) gemessene diffuse Gamma-Strahlung aus unserer Galaxis (Abb. 4.2, siehe Abschnitt 4.2) ist auf mögliche Beiträge von Neutralino-Annihilation untersucht worden (W. deBoer et al., 2005). Obwohl das EGRET-Spektrum von dem Nachfolger FERMI nicht bestätigt werden konnten und wahrscheinlich nicht korrekt ist, wollen wir hier kurz die Überlegungen skizzieren

Zur Beschreibung des Spektrums wurden zunächst die konventionellen Beiträge berechnet:

- Zerfall neutraler Pionen, die in der Wechselwirkung der CR mit dem interstellaren Medium erzeugt werden

$$p + p \rightarrow n \pi^0 + X, \quad \pi^0 \rightarrow \gamma\gamma, \quad (8.12)$$

- Bremsstrahlung von Elektronen,
- Inverser Comptoneffekt von Elektronen an Photonen verschiedener Hintergrundstrahlungsquellen.

Diese Beiträge allein ergaben ein Defizit im Bereich von etwa 100 MeV bis 100 GeV (Abb. 8.14 links). Durch Hinzunahme eines Beitrags von der Annihilation von WIMPs,

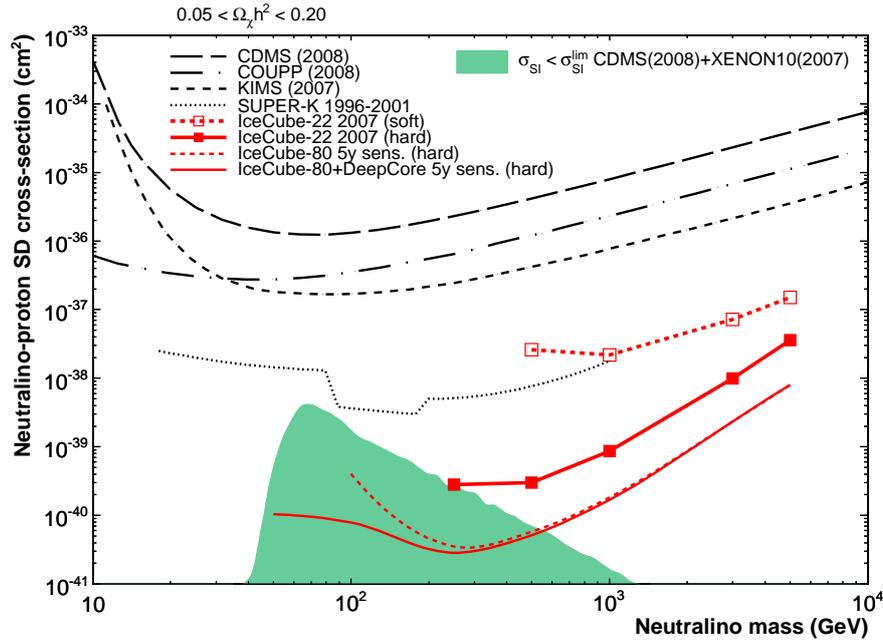


Abbildung 8.13: Grenzen für den spin-abhängigen Neutralino-Proton-Wirkungsquerschnitt als Funktion der Neutralino-Masse von verschiedenen Experimenten. Erläuterungen dazu im Text. Die getönte Fläche ist das Gebiet, dass durch direkte Suchen bisher nicht ausgeschlossen ist. Die Abbildung stammt aus der Veröffentlichung der IceCub-Kollaboration (PRL 102, 201302 (2009)).

angenommen als Neutralinos, die als ihre eigenen Antiteilchen mit sich selbst annihilieren können, konnte das Spektrum sehr gut beschrieben werden (Abb. 8.14 rechts). Die Gammas stammen dabei vor allem aus der wohlbekannten Fragmentation von Quarks, die als Quark-Antiquark-Paar in der Annihilation erzeugt werden:

$$\chi\bar{\chi} \rightarrow q\bar{q} \rightarrow n\pi^0 + X, \quad \pi^0 \rightarrow \gamma\gamma. \quad (8.13)$$

Die relevanten π^0 - und γ -Multiplizitäten und -Spektren sind von Beschleunigerexperimenten sehr gut bekannt. Mit einer Neutralinomasse von etwa 60 GeV ergab sich ein konsistentes Bild für die Reaktionsrate (8.8) heute und zur Zeit der Entkoppelung der Neutralinos im frühen Universum. Allerdings ist die zusätzliche Annahme zu machen, dass die DM klumpt (wie auch die übrige Materie) und zwar mit einem Überhöhungsfaktor der Dichte von etwa 100.

In Abb. 8.15 wird ein Vergleich der EGRET-Daten mit den neuen FERMI-Daten gezeigt. Die FERMI-Kollaboration hat die gleiche Analyse mit ihren Daten wiederholt und findet im Rahmen der systematischen Fehler (die kleiner als bei EGRET sind) keine Notwendigkeit für Beiträge von Neutralino-Annihilationen.

8.3.4 Nachweis von Axionen

Axionen-Annihilation in Magnetfeldern: Axionen können in einem starken Magnetfeld in Photonen konvertieren. In der Reaktion

$$a + \gamma_B \rightarrow \gamma \quad (8.14)$$

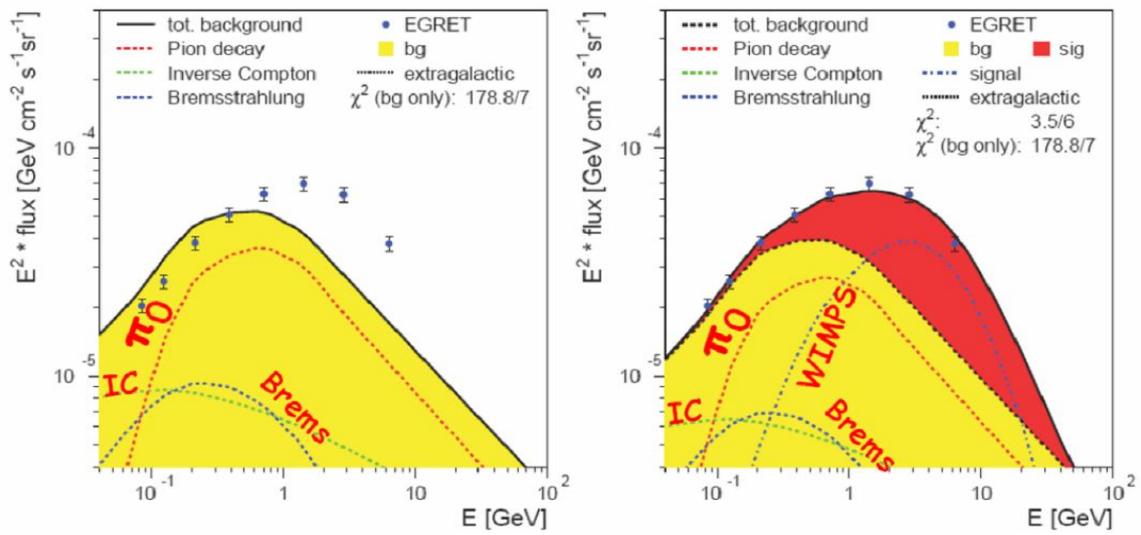


Abbildung 8.14: EGRET-Messungen des galaktischen Gamma-Spektrums verglichen mit Berechnungen verschiedener Beiträge. Links: Die Beiträge bekannter Quellen scheinen das Spektrum nicht zu beschreiben; rechts: der zusätzlich Beitrag von der Annihilation von Neutralinos mit einer Masse von etwa 60 GeV beschreibt das Spektrum.

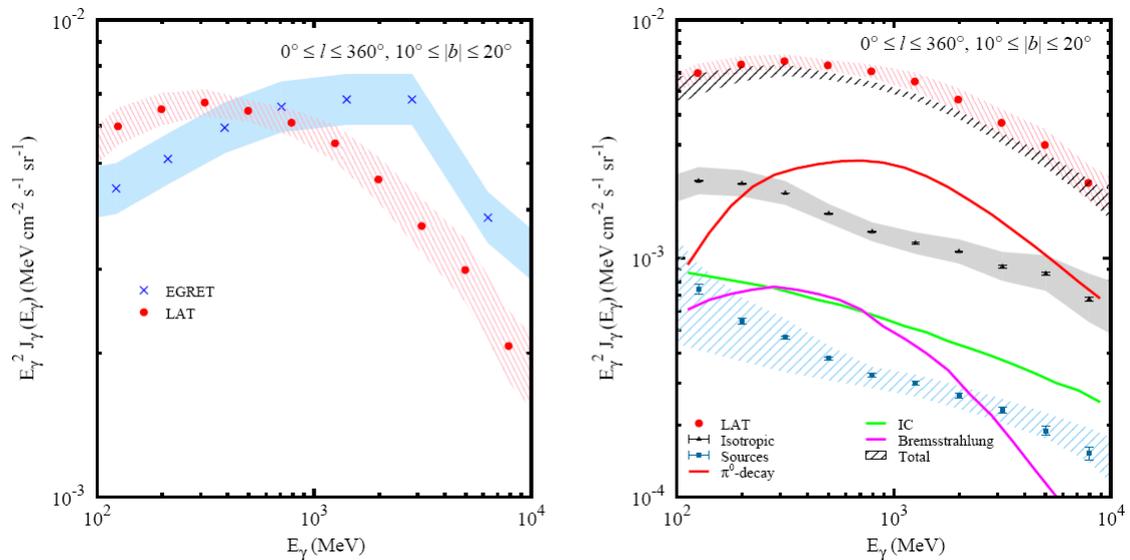


Abbildung 8.15: Das von FERMI aufgenommene Gamma-Spektrum im Vergleich zu dem EGRET-Spektrum zeigt, dass keine nicht-konventionellen Beiträge berücksichtigt werden müssen. Die Abbildungen stammen aus einem Konferenzbericht und sind vorläufig (ICRC09).

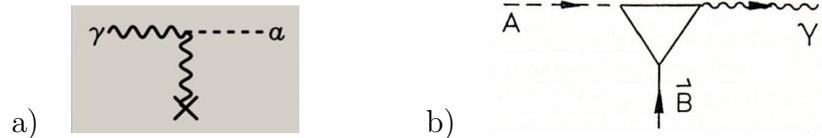


Abbildung 8.16: a) Zwei-Photon-Erzeugung eines Axions durch den Primakoff-Effekt; b) inverser Primakoff-Effekt in einem Magnetfeld: Konversion eines Axions in ein Photon.

koppelt das Axion a an ein Feldquant des Magnetfeldes und wandelt sich in ein Photon um (Abb. 8.16b), das für ein “kaltes” Axion, also den Kandidaten für “cold dark matter” (CDM), im Mikrowellen-Bereich liegt. In verschiedenen Experimenten wird nach Axionen gesucht, indem eine Kavität auf eine Frequenz abgestimmt wird, die der Masse der Axionen entspricht:

$$m_a c^2 = \hbar \omega_{res}. \quad (8.15)$$

Durch Resonanzeffekte würde ein mögliches Axionsignal so verstärkt, dass es messbar wird. Auf diese Weise wurden CDM-Axionen mit Massen im μeV -Bereich ausgeschlossen.

Axionen aus der Sonne: Axionen können im Innern von Sternen in vergleichbarer Häufigkeit wie Neutrinos durch den sogenannten Primakoff-Effekt erzeugt werden. Der Primakoff-Effekt ist die Zwei-Photon-Erzeugung eines Teilchens durch Streuung eines reellen Photons an einem Photon des Coulomb-Feldes eines Kerns (Abb. 8.16a). Die Axionen verlassen den Stern anschließend aufgrund ihrer geringen Wechselwirkungswahrscheinlichkeit nahezu ungehindert.

Um Axionen nachzuweisen, wird im CAST-Experiment ein LHC-Dipolmagnet mit einem Magnetfeld von etwa 9 T verwendet (Abb. 8.17). Dieser Magnet hat in seinem Inneren zwei Hohlräume, und an seinen beiden Enden insgesamt drei verschiedenen Röntgendetektoren (pn-CCD, Time Projection Chamber, Micromegas).

Der Magnet selbst befindet sich auf einem fahr- und drehbaren Gestell, mit dem er auf die Sonne oder auf andere interstellare Objekte ausgerichtet wird. Axionen sollen in dem starken Magnetfeld durch inversen Primakoff-Effekt (Abb. 8.16b) in Röntgenphotonen umgewandelt, von den Detektoren nachgewiesen und anhand ihrer charakteristischen Energie als Axionen identifiziert werden.

Axionen-Erzeugung in einem Magnetfeld: In einem anderen Experiment wird die Sonne durch einen starken Laserstrahl ersetzt, der in dem ersten Teil eines Magnetes Axionen erzeugen und im zweiten Teil, hinter einer Abschirmung des Laserstrahls, sie wieder nachweisen soll (Abb. 8.18). Das Licht würde dann anscheinend durch eine optisch dichte Wand gehen.

Die Experimente haben bisher keinen positiven Effekt beobachtet und bestimmen Ausschließungsgrenzen als Funktion der Axionmasse und der Gamma-Axion-Kopplung (Abb. 8.19).

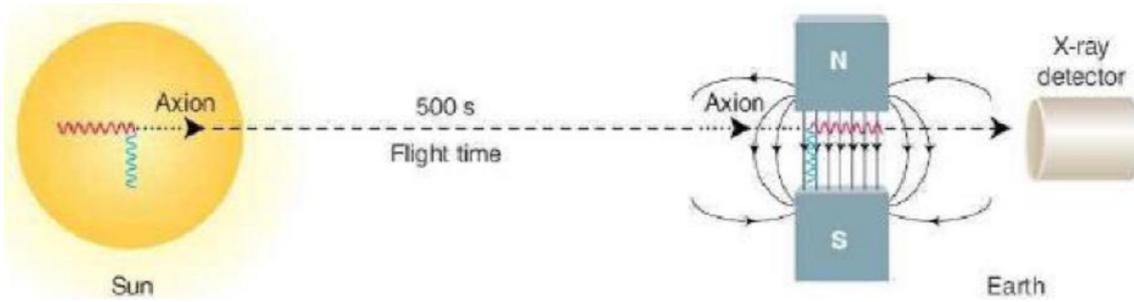


Abbildung 8.17: Cast-Experiment zum Nachweis solarer Axionen.

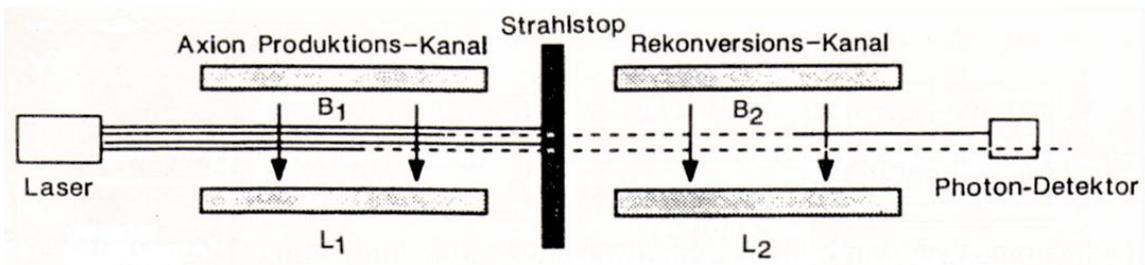


Abbildung 8.18: Axion Erzeugung durch einen Laserstrahl in einem Magnetfeld und Nachweis über inversen Primakoff-Effekt.

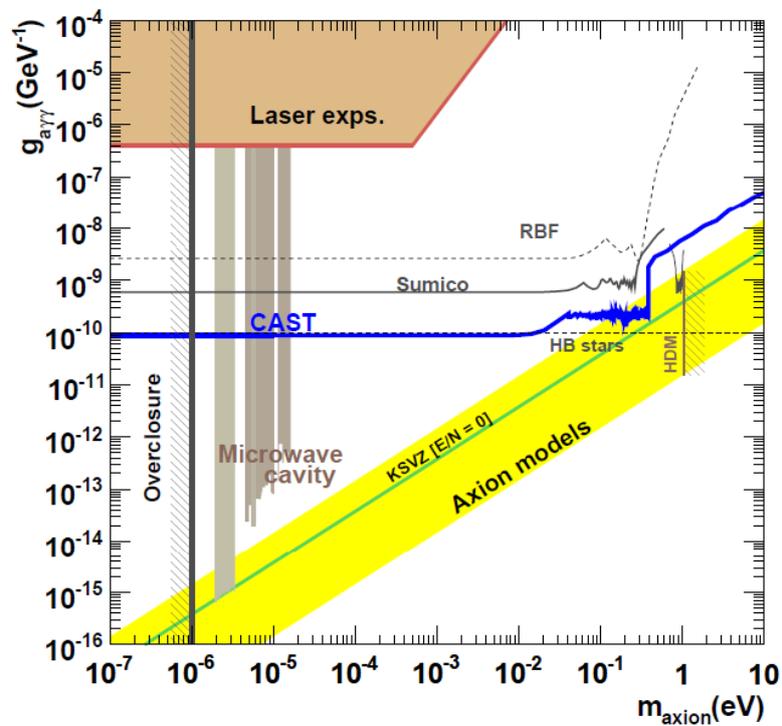


Abbildung 8.19: Ausschließungsgrenzen für Axionen als Funktion der Axionmasse und der Gamma-Axion-Kopplung (aus NJP 11 (2009) 105020).

8.3.5 Beschleunigerexperimente

Eine wesentliche physikalische Motivation für den Bau von Beschleunigern mit sehr hohen Energien (TEVATRON beim Fermilab, LHC beim CERN, der geplante 'International Linear Collider' ILC) ist die Suche nach SUSY-Teilchen. Signaturen sind Ereignisse mit hohen Transversalimpulsen (wegen der hohen Massen), bei dem LSP wäre es eine hohe fehlende Energie, wenn es stabil ist und im Detektor keine Wechselwirkung macht.

Es wäre ein großer Triumph der theoretischen Teilchenphysik und der Experimentierkunst, wenn eine Bestätigung des Supersymmetrie-Modells sowohl von den Beschleunigerexperimenten als auch von den WIMP- und Astroteilchen-Experimenten käme.

Die Jagd nach der dunklen Materie ist in vollem Gange. Vielleicht stellt sich heraus, dass mehrere Effekte beitragen. Das Ziel ist, die Entwicklung des Universums zu verstehen, zum Beispiel, ob es ewig expandiert oder wieder in sich zusammenfällt und dann wieder in einem neuen Urknall beginnt.

