

Abbildung 6.8: a) Elastische Streuung eines WIMP an einem Kern. b) Messprinzip für die gleichzeitige Messung von Temperatur und Ionisation in einem WIMP-Detektor.

Sonnenmasse machen nach diesen Ergebnissen etwa 20% des Halos aus. Die EROS-Kollaboration setzt niedrigere Grenzen.

### 6.3.2 Detektoren zum WIMP-Nachweis<sup>1</sup>

**Elastische WIMP-Streuung:** Eine Möglichkeit der Suche basiert darauf, dass WIMPs an Atomkernen elastisch streuen können und dabei einen Rückstoß auf die Kerne übertragen (Abb. 6.8a). Man muß allerdings die seltenen Streuungen, die nur sehr wenig Energie deponieren, in einem Detektor identifizieren können. Die größte Schwierigkeit der Experimente ist die zu erwartende extrem niedrige Streurrate der WIMPs. 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 Minen oder Tunneln betrieben werden, um die kosmische Höhenstrahlung abzuschirmen. Das weltweit größte Labor für derartige Experimente befindet sich in Italien im Gran Sasso Tunnel. 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 insgesamt 100kg NaI-Detektoren Hinweise auf passende Schwankungen gefunden. Einige Experimente sind unterwegs, dies zu überprüfen. Die bisher erzielten Grenzen für die Streuraten von WIMPs haben den Bereich, den man nach den Vorhersagen der Supersymmetrie erwarten würde, noch nicht erreicht. Die Streurrate könnte 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.

**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

<sup>1</sup>Dieser Abschnitt basiert auf der Web-Seite der deutschen Astroteilchenphysiker:  
<http://www.astroteilchenphysik.de>

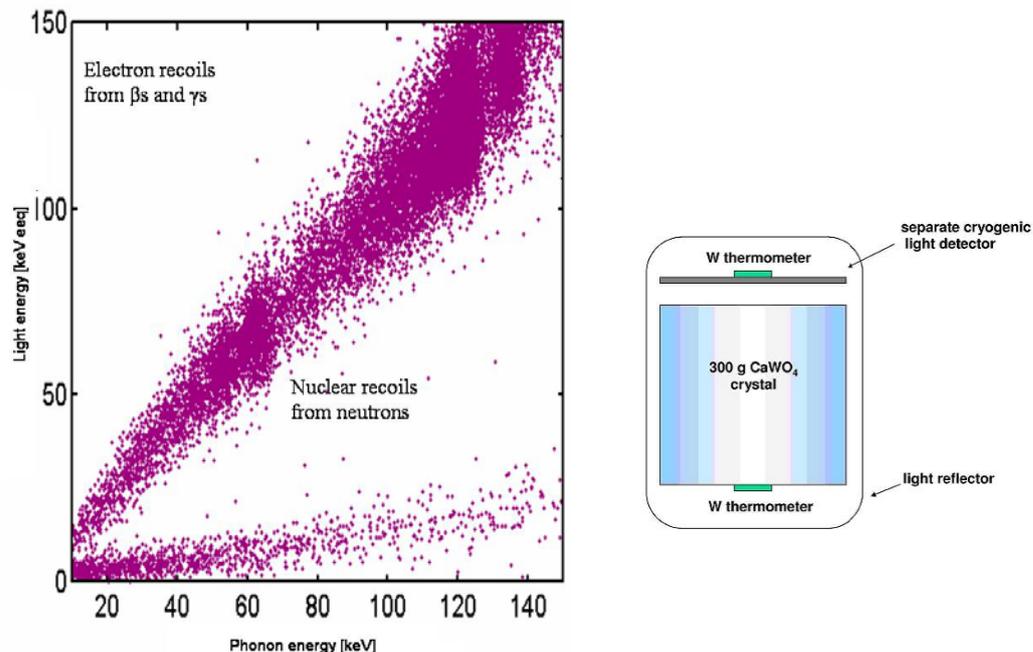


Abbildung 6.9: Links: Lichtausbeute gegen Phononenergie (Temperaturmessung) in einem  $\text{CaWO}_4$ -Kristall (rechts Detektorprinzip) für  $\beta$ - und  $\gamma$ -Zerfälle von Kernen und bei Neutronenstreuung an Kernen.

Temperatursprung pro deponierter Energie am größten ist. Besonders günstig ist der Betrieb des Detektors an der Sprungtemperatur zum Supraleiter (zum Beispiel bei dem Szintillatorkristall  $\text{CaWO}_4$  zwischen 7 und 9 mK). Bei Messung mit Squids ist man auf einzelne Phononen, die durch den Rückstoß des Kern angeregt werden, sensitiv.

Eine neue Entwicklung ist die Kombination einer Temperaturmessung mit der Messung der Ionisation, die die Rückstoßkerne in dem Kristall erzeugen (Abb. 6.8b). 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 ( $\text{CaWO}_4$ -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. 6.9 für das Beispiel eines szintillierenden Kristalls sieht, lässt sich damit der Untergrund von  $\beta$ - und  $\gamma$ -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. Die Leistungsfähigkeit dieser Methoden wurde kürzlich dadurch deutlich, dass EDELWEISS mit einer Messung

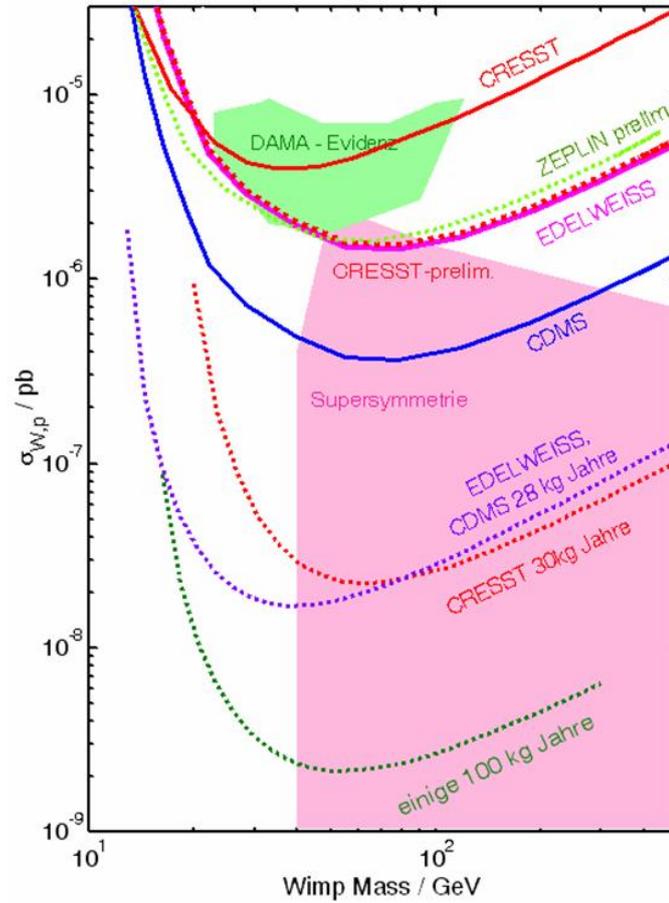


Abbildung 6.10: Darstellung der erreichten und geplanten Ausschließungsgrenzen für WIMPs als Funktion der WIMP-Masse und des elastischen WIMP-Proton-Wirkungsquerschnitts. Eingezeichnet ist die von dem DAMA-Experiment gefundene Evidenz (allerdings im Widerspruch zu drei anderen Experimenten) und der Bereich der SUSY-Vorhersage (die im Wirkungsquerschnitt bis etwa  $10^{-12}$  pb herunter gehen kann).

von nur wenigen Monaten mit einem nur etwa 300 Gramm schweren Germanium-Target in den Bereich der 'DAMA-Evidenz' vorgestoßen ist, wozu zuvor 100 kg an Detektor-Material erforderlich waren (Abb. 6.10). Auch CRESST zeigt jetzt Messungen mit ähnlichen Ausschlußgrenzen. Da EDELWEISS und CRESST keine Signale beobachtet haben, ergibt sich ein Widerspruch zu der von DAMA beobachteten Evidenz. Ob die DAMA Evidenz durch etwas anderes als WIMPs hervorgerufen wird, ist noch unklar. Mit bestimmten Annahmen über die Eigenschaften von WIMPs und deren Verteilung im Halo der Milchstraße, lassen sich die beiden Messungen noch gemeinsam erklären. Alle drei genannten Experimente, CRESST, EDELWEISS und CDMS, arbeiten zur Zeit am Aufbau von Tieftemperatur-Kalorimetern mit Targetmassen von bis zu 10 kg. Man kann erwarten, dass die Messungen sehr bald den Hinweis auf die Existenz von WIMPs bestätigen oder ausschließen werden.

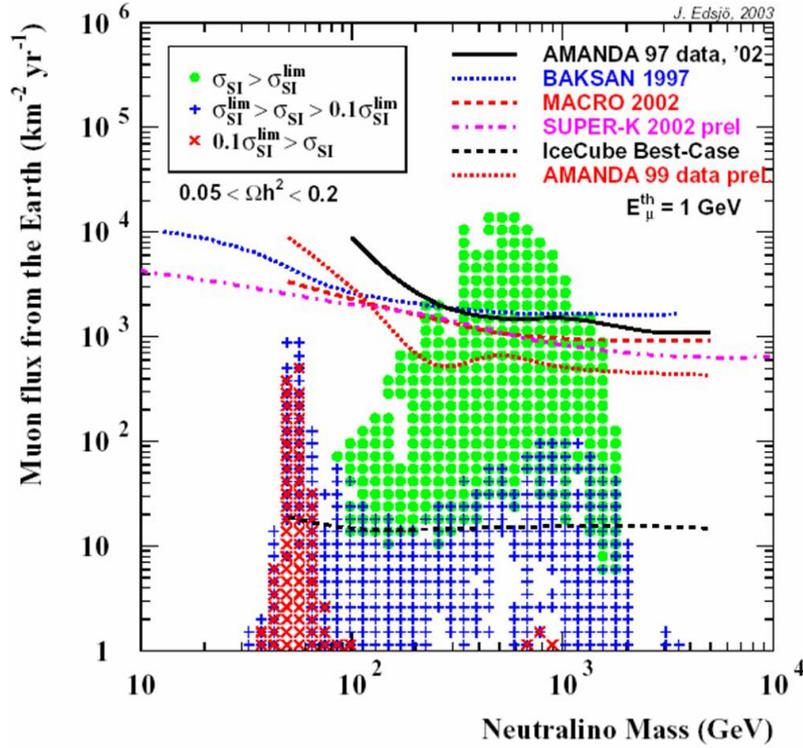


Abbildung 6.11: Grenzen für Myon-Flüsse, die durch Neutralino-Annihilation in der Sonne in verschiedenen Detektoren sichtbar wären. Die markierten Flächen entsprechen verschiedenen theoretischen Modellen. Der durch IceCube wird ein großer Teil der Modelle getestet werden.

### 6.3.3 Analyse 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 Sonne könnte sich DM ansammeln. Mit verschiedenen Neutrinodektoren (Abschnitt 3.3.6) wurde nach WIMP-Annihilation in der Sonne gesucht. Es wurde kein Signal beobachtet; die Ausschließungsgrenzen sind in Abb. 6.11 gezeigt.

**Beitrag der WIMP-Annihilation zum galaktischen Gamma-Spektrum:** Die von EGRET (Abb. 3.41) gemessene diffuse Gamma-Strahlung aus unserer Galaxis (Abb. 3.37, siehe Abschnitt 3.4.2) ist auf mögliche Beiträge von Neutralino-Annihilation untersucht worden (W. deBoer et al., 2005).

Zur Beschreibung des Spektrums werden zunächst die konventionellen Beiträge berechnet:

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

$$p + p \rightarrow n \pi^0 + X, \quad \pi^0 \rightarrow \gamma\gamma, \quad (6.8)$$

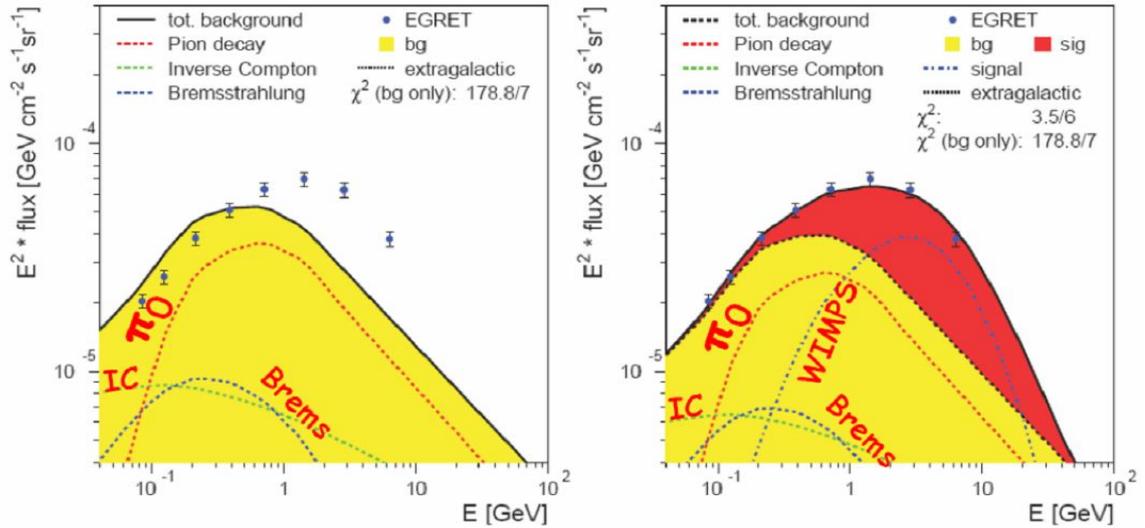


Abbildung 6.12: EGRET-Messungen des galaktischen Gamma-Spektrums verglichen mit Berechnungen verschiedener Beiträge. Links: Die Beiträge bekannter Quellen scheinen das Spektrum nicht zu beschreiben; rechts: der zusätzlich Beitrag von der Annihilation von Neutralinos mit einer Masse von etwa 60 GeV beschreibt das Spektrum.

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

Diese Beiträge allein ergeben ein Defizit im Bereich von etwa 100 MeV bis 100 GeV (Abb. 6.12 links). Durch Hinzunahme eines Beitrags von der Annihilation von WIMPs, angenommen als Neutralinos, die als ihre eigenen Antiteilchen mit sich selbst annihilieren können, kann das Spektrum sehr gut beschrieben werden (Abb. 6.12 rechts). Die Gammas stammen dabei vor allem aus der wohlbekanntem Fragmentation von Quarks, die als Quark-Antiquark-Paar in der Annihilation erzeugt werden:

$$\chi\bar{\chi} \rightarrow q\bar{q} \rightarrow n \pi^0 + X, \quad \pi^0 \rightarrow \gamma\gamma. \quad (6.9)$$

Die relevanten  $\pi^0$ - und  $\gamma$ -Multiplizitäten und -Spektren sind von Beschleunigerexperimenten sehr gut bekannt. Mit einer Neutralinomasse von etwa 60 GeV ergibt sich ein konsistentes Bild für die Reaktionsrate (6.6) heute und zur Zeit der Entkopplung der Neutralinos im frühen Universum. Allerdings ist die zusätzliche Annahme zu machen, dass die DM klumpt (wie auch die übrige Materie). Der notwendige Überhöhungsfaktor der Dichte ist etwa 100 (das wird wohl auch aus anderen Gründen als vernünftig angesehen). Die Gamma-Spektren wurden getrennt in sechs verschiedenen Richtungen relativ zur galaktischen Ebene analysiert und konnten immer mit den gleichen Parametern gut beschrieben werden. Außerdem ist das Modell in der Lage, auch die bei der Milchstraße recht komplizierte Geschwindigkeitsverteilung als Funktion des Abstandes vom galaktischen Zentrum gut zu beschreiben (Abb. 6.13). Die Milchstraße hat zwei Ringe höherer Materiedichte, die man auch in der DM wiederfindet.

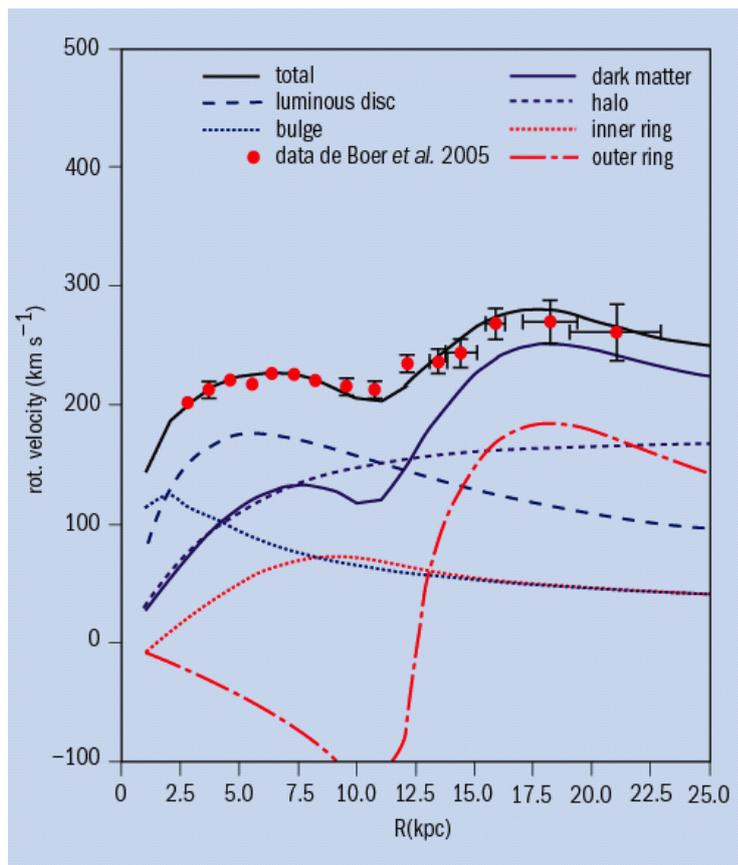


Abbildung 6.13: Rotationskurve

Nach Aussage der Autoren des Modells ist die sich ergebende Neutralinomasse von etwa 60 GeV verträglich mit den Ausschließungsgrenzen von Beschleunigerexperimenten.

### 6.3.4 Nachweis von Axionen

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. 6.14a). 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. 6.15). 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. 6.14b) in Röntgenphotonen umgewandelt, von den Detektoren nachgewiesen und anhand ihrer charakteristischen Energie als Axionen identifiziert werden.

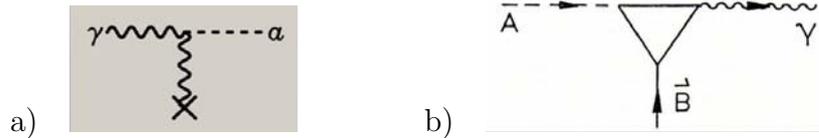


Abbildung 6.14: a) Zwei-Photon-Erzeugung eines Axions durch den Primakoff-Effekt; b) inverser Primakoff-Effekt in einem Magnetfeld: Konversion eines Axions in ein Photon.

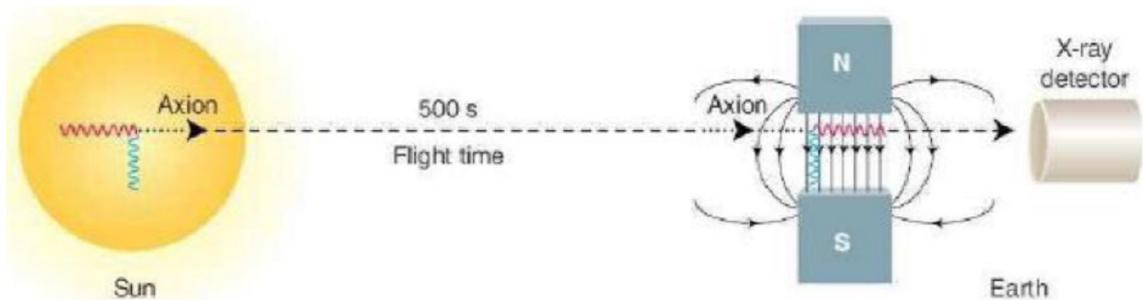


Abbildung 6.15: Cast-Experiment zum Nachweis solarer Axionen.

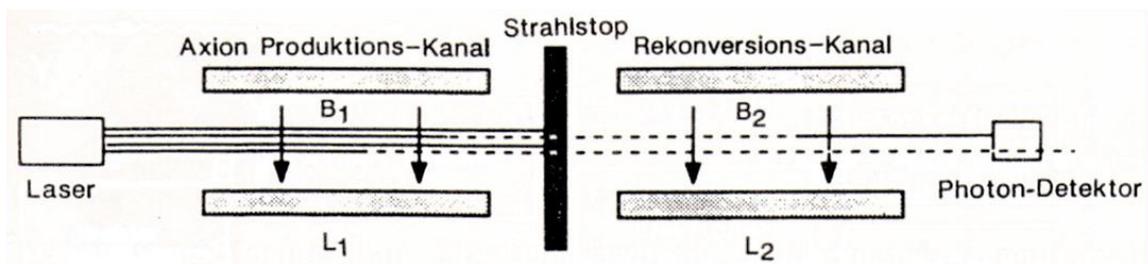


Abbildung 6.16: Axion Erzeugung durch einen Laserstrahl in einem Magnetfeld und Nachweis über inversen Primakoff-Effekt.

In einem anderen Experiment (Abb. 6.16) wird die Sonne durch einen starken Laserstrahl ersetzt, der in dem ersten Teil eines Magneten Axionen erzeugen und im zweiten Teil, hinter einer Abschirmung des Laserstrahls, sie wieder nachweisen soll.

Die Experimente haben bisher keinen positiven Effekt beobachtet und bestimmen Ausschließungsgrenzen als Funktion der Axionmasse und der Gamma-Axion-Kopplung (Abb. 6.17).

### 6.3.5 Beschleunigerexperimente

Eine wesentliche physikalische Motivation für den Bau von Beschleunigern mit sehr hohen Energien (bereits laufend: TEVATRON beim Fermilab, ab 2007: 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.

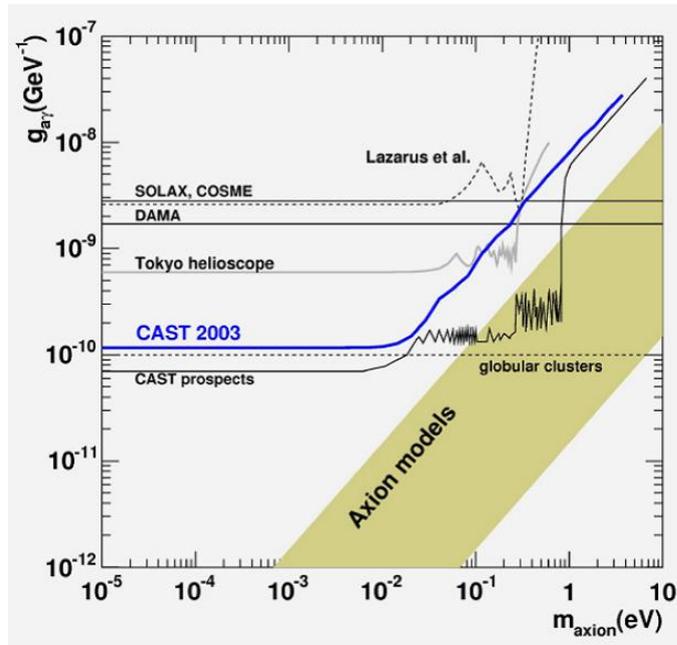


Abbildung 6.17: Ausschließungsgrenzen für Axionen als Funktion der Axionmasse und der Gamma-Axion-Kopplung.

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-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.