

Suche nach Dunkler Materie in unserer Galaxie

K. Eitel, IK; W. de Boer, Institut für Experimentelle Kernphysik, Universität Karlsruhe

Dunkle Materie, was ist das?

Die Masse unseres Zentralgestirns, der Sonne, können wir nach Newton einfach aus der Umlaufgeschwindigkeit der Erde und ihres Abstandes zur Sonne bestimmen. Dieses Prinzip lässt sich auch auf große astronomische Objekte anwenden, um die Masse innerhalb der Umlaufbahn von Sternen oder selbst ganzen Galaxien zu bestimmen. Aus solchen Bewegungen von Galaxien stellte der schweizer-amerikanische Physiker und Astronom Fritz Zwicky bereits in den 1930er Jahren fest, dass es viel mehr gravitativ wirkende Masse als die uns sichtbare Masse geben muss. Dies gilt ebenso für unsere Galaxie, die Milchstraße, bei der Sterne so schnell um das galaktische Zentrum rotieren, dass sich mehr als nur sichtbare Materie in unserer Galaxie befinden muss.

Auch aus Beobachtungen des frühen Universums können wir auf Dunkle Materie (DM) schließen: So zeigen Messungen der Temperaturschwankungen in der kosmischen Hintergrundstrahlung (für die es 2006 den Physik-Nobelpreis gab), dass nur 5 % der Energie des Universums aus uns bekannter Materie wie Protonen, Neutronen und Elektronen besteht, der Rest aus einer uns unbekanntem Energieform [1]. Diese nicht direkt sichtbare Energie macht sich bemerkbar durch Gravitationseffekte. Erstaunlicherweise zeigen

die genannten Messungen, dass die unbekannt Energie in zwei Formen existiert: einer mit der uns bekannten anziehenden Gravitation wie bei gewöhnlicher Materie, die daher Dunkle Materie genannt wird, und aus einer Form, die eine abstoßende Gravitationskraft erzeugt, wie man es z. B. bei Vakuumenergie – oder allgemeiner einer kosmologischen Konstante – erwartet. Diese „Dunkle Energie“ macht dabei 72 %, die DM 23 %, die uns bekannte Materie aber nur 5 % der Gesamtenergie des Universums aus. Die Natur der DM und der Dunklen Energie zu entschlüsseln ist eine der zentralen Aufgaben in der Kosmologie, der Teilchen- und Astroteilchenphysik.

Aus der Verteilung der Galaxien und Galaxienhaufen, der so genannten Strukturbildung im Universum, folgert man, dass diese DM aus nicht-relativistischen, also schweren Teilchen besteht. Die DM ist dabei großräumiger als die sichtbare Materie, in so genannten Galaxien-Halos, verteilt, d. h. DM-Teilchen können höchstens die schwache Wechselwirkung spüren, da sie sich andernfalls durch die starke oder elektromagnetische Wechselwirkung genauso im Zentrum einer Galaxie ansammeln würden wie normale Materie. Folglich werden diese Teilchen „Weakly Interacting Massive Particles“, WIMPs, genannt, was im englischen für schwach wechselwirkende massive Teilchen, aber auch für Schwächlinge steht.¹⁾

Obwohl die Natur eines WIMPs unbekannt ist, kennen wir doch einige Eigenschaften: Diese Teilchen sind neutral (sonst würden wir sie sofort beobachten) und schwach wechselwirkend (wie oben erwähnt). In der bevorzugten Erweiterung des Standardmodells der Elementarteilchenphysik, der Supersymmetrie²⁾, ist das WIMP das leichteste supersymmetrische Teilchen [2], das ähnliche Eigenschaften wie ein Photon besitzt: es ist sein eigenes Antiteilchen und kann bei Kollision mit sich selbst vernichtet oder „annihiliert“ werden [3]. Aus dem genannten DM-Anteil an der Gesamt-Dichte von 23 % findet man eine thermisch gemittelte Annihilations-Rate, die in der Tat einer Rate oder physikalisch präziser einem Wirkungsquerschnitt der schwachen Wechselwirkung entspricht.

Bei der WIMP-Annihilation entstehen u. a. Gammastrahlen, Antiprotonen und Positronen. Die Gammastrahlen spielen eine entscheidende Rolle, da sie im Gegensatz zu den geladenen Teilchen nicht durch die interstellaren Magnetfelder abgelenkt werden und daher zur Quelle zeigen. Deshalb können sogar Gammastrahlen der gegenüberliegenden Seite unserer Galaxie beobachtet werden, allerdings mit Satelliten im Weltraum, da die Gammastrahlen in der Erdatmosphäre absorbiert werden.

Darüber hinaus sollte über die schwache Wechselwirkung, wenn auch sehr selten, ein Stoß eines

¹⁾ Neutrinos gehören auch zur Dunklen Materie. Sie können trotz ihrer geringen Masse aufgrund ihrer großen Häufigkeit – es gibt mehr als 1 Milliarde Neutrinos pro Proton im Universum – deutlich mehr zur Gesamtmasse des Universums beitragen als alle normale Materie. Die Bestimmung ihrer Masse mit dem KATRIN-Experiment ist deshalb von großer Bedeutung für die Kosmologie. Sie sind allerdings als Elementarteilchen viel zu leicht, um die beobachtete Strukturbildung im Universum zu erklären.

²⁾ Supersymmetrie ist eine Symmetrie zwischen Fermionen und Bosonen, d. h. zwischen Teilchen mit halbzahligen und ganzzahligen Eigendrehimpuls (Spin). WIMPs sind in dieser Theorie praktisch die supersymmetrischen Partner der Photonen der kosmischen Hintergrundstrahlung.

WIMPs aus der galaktischen DM-Wolke mit einem irdischen Detektor zu beobachten sein. Dabei gehen wir davon aus, dass die Sonne (und somit auch unsere Erde) mit einer mittleren Geschwindigkeit von 232 km/s um das galaktische Zentrum rotiert. Jeder Detektor auf der Erde bewegt sich dementsprechend gegen eine Wolke aus WIMPs, deren Eigenbewegung keine Vorzugsrichtung hat. Es gibt also grundsätzlich zwei Methoden zur Suche nach DM: die Suche nach den Zerfallsprodukten der WIMPs, die als indirekte Suche bekannt ist, da die WIMPs nicht direkt beobachtet werden, sowie die direkte Suche, bei der die WIMPs durch elastische Stöße in einem Detektor direkt beobachtet werden. Die direkten Suchen müssen tief unterirdisch durchgeführt werden, um den Untergrund der kosmischen Strahlung zu reduzieren, während die indirekten Suchen im Weltall durchgeführt werden, um die Absorption der Sekundärteilchen durch die Erdatmosphäre zu verhindern.

Im Weiteren werden wir zunächst auf die indirekte Suche eingehen und danach die direkte Suche diskutieren. An der indirekten Suche ist das KIT unter Leitung von W. de Boer mit einer Auswertung der EGRET-(Energetic Gamma Ray Emission Telescope)-Satellitendaten und mit dem AMS-(Alpha Magnetic Spectrometer)-Detektor beteiligt, der 2008 auf der Internationalen Raumstation ISS installiert werden soll. Unter Leitung von K. Eitel sucht das KIT mit dem EDELWEISS-(Expérience pour Detector Les Wimps en Site Souterrain)-Experiment auch direkt

nach DM. Dieses Experiment nimmt seit 2006 Daten auf.

Indirekte Suche nach Dunkler Materie

Wie oben erwähnt erlauben Gammastrahlen, den Halo aus DM unserer Galaxie zu rekonstruieren. DM-Annihilation (DMA) zeichnet sich aus durch einen diffusen Fluss von Gammastrahlen, die in allen Himmelsrichtungen das gleiche Spektrum, jedoch mit unterschiedlichen Intensitäten, aufweisen. Eine erste ausführliche Beobachtung der Gammastrahlen in allen Himmelsrichtungen wurde von EGRET durchgeführt, einem der vier Instrumente auf dem Satelliten Compton Gamma Ray Observatory (CGRO) der NASA, der von 1991 bis 2000 Daten sammelte. Bereits 1997 war ein Überschuss an hochenergetischen (>1 GeV) Gammastrahlen gegenüber der

Erwartung herkömmlicher Hintergrundquellen beobachtet worden [4]. Die meisten Gammastrahlen im Bereich von einigen GeV werden durch inelastische Streuung der kosmischen Strahlung an der interstellaren Materie erzeugt. Dies sind vornehmlich Proton-Proton-Kollisionen, deren Gammaskpektren an Teilchen-Beschleunigern gut vermessen wurde. Für Elektronen sind die Energieverluste durch Bremsstrahlung und Ionisation sehr viel höher und unsicherer, aber diese liefern nur einen relativ geringen Beitrag zum Gammafluss. Dies ist dargestellt in Abb. 1 für den Fluss zum galaktischen Zentrum hin [5]. Der Gesamtfluss des Untergrundes wird durch die gelbe Fläche dargestellt mit den einzelnen Komponenten als gestrichelte Linien. Man sieht, dass die Daten oberhalb 1 GeV einen weiteren Beitrag brauchen, der sehr gut beschrieben werden kann

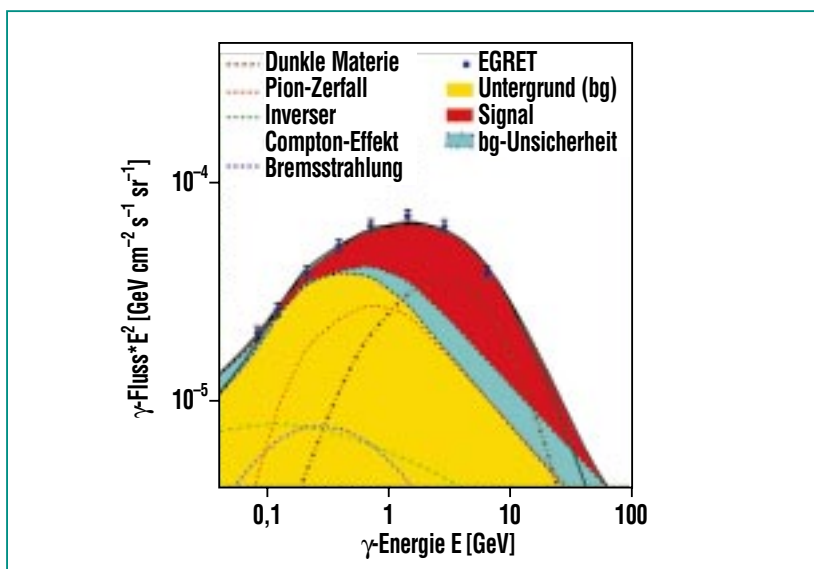


Abb. 1: Die diffuse Gammastrahlung in Richtung des Galaktischen Zentrums mit dem Beitrag des Untergrundes (gelb) und der Anihilation der Dunklen Materie (rot). Der blaue Streifen entspricht der Unsicherheit der Untergrund-Vorhersage, deren einzelne Beiträge gestrichelt eingezeichnet sind.

mit einem Beitrag der Annihilation eines WIMPs mit einer Masse von $60 \text{ GeV}/c^2$ (rote Fläche nach Addition der gestrichelten Beitrag zum Untergrund). Die Normierung von Untergrund und Signal wurde aus einem 2-Parameter-Fit der spektralen Formen von Untergrund und DMA bestimmt, wobei die Form des DMA-Spektrums aus Experimenten zur Elektron-Positron-Anihilation wohl bekannt, der Beitrag der DM a priori aber unbekannt ist. Daher gibt es zwei wesentliche Messungen: die mittlere Energie des Gammastrahlungs-Überschusses und die Intensität des Überschusses in den unterschiedlichen Himmelsrichtungen. Aus der Energie kann man die WIMP-Masse abschätzen, die dann in allen Himmelsrichtungen gleich sein muss, während aus der Intensitätsverteilung die Verteilung der DM in der Galaxie bestimmt werden kann. Wenn man sowohl die Verteilung

der sichtbaren als auch die der Dunklen Materie kennt, kann man das Graviationspotential bestimmen und damit die Umlaufgeschwindigkeiten der Sterne, d. h. die Rotationskurve bestimmen.

Der Überschuss an Gammastrahlung wurde in 180 verschiedenen Himmelsrichtungen beobachtet. In jeder Richtung ließen sich die Daten mit einer WIMP-Masse von $60 \text{ GeV}/c^2$ ausgezeichnet – mit ähnlicher Qualität wie in Abb. 1 – reproduzieren. Die Verteilung des Überschusses in den unterschiedlichen Himmelsrichtungen stimmt tatsächlich mit der Rotationskurve überein, wie in Abb. 2 gezeigt wird. Sogar der negative Beitrag zur Rotationskurve, der durch eine Art Torus von Dunkler Materie verursacht wird, wird von den EGRET-Daten korrekt beschrieben. Es wird vermutet, dass diese Substruktur der DM durch das Auseinander-

reißen der Zwerggalaxie Canis Major mittels Gezeitenkräfte entstanden ist [6]. Unsere Interpretation des EGRET-Gamma-Überschusses legt den Schluss nahe, dass die Dunkle Materie zumindest im Gammalicht wesentlich besser „sichtbar“ ist als noch vor kurzem vermutet. Es bleibt zu hoffen, dass sich das WIMP auch in der direkten Suche manifestiert und in den neuen teilchenphysikalischen Experimenten am CERN nachweisen lässt [7].

Das AMS-Experiment

Die indirekte Suche nach der DM wird energisch fortgesetzt, weil es die einzige Methode ist, unmittelbar etwas über die erwarteten Annihilationseigenschaften der WIMPs zu erfahren und gleichzeitig ihre Verteilung in der Galaxie zu bestimmen. Das geplante AMS-Experiment auf der ISS wird sowohl geladene als auch neutrale Teilchen vermessen [8]. Um die erwartete Antimaterie aus der DMA von den vielen Protonen und Elektronen der kosmischen Strahlung zu trennen, braucht man eine gewaltige Unterdrückung des galaktischen Untergrunds. Als Beispiel werden in Abb. 3 die Detektoren des AMS-02-Detektors gezeigt. Tatsächlich ist die Anzahl der Detektoren für die Teilchenidentifikation größer als für jeden bisher gebauten oder geplanten Detektor an einem Beschleuniger: Der Detektor besteht aus einem Silizium-Tracker, einem Flugzeit-Detektor (TOF), einem Ring-abbildenden Cerenkov-Zähler (RICH), einem elektromagnetischen Kalorimeter (ECAL), einem Amica Star Tracker (AST), Antikoinzidenz-Zählern (ACC) und einem Übergangs-Strah-

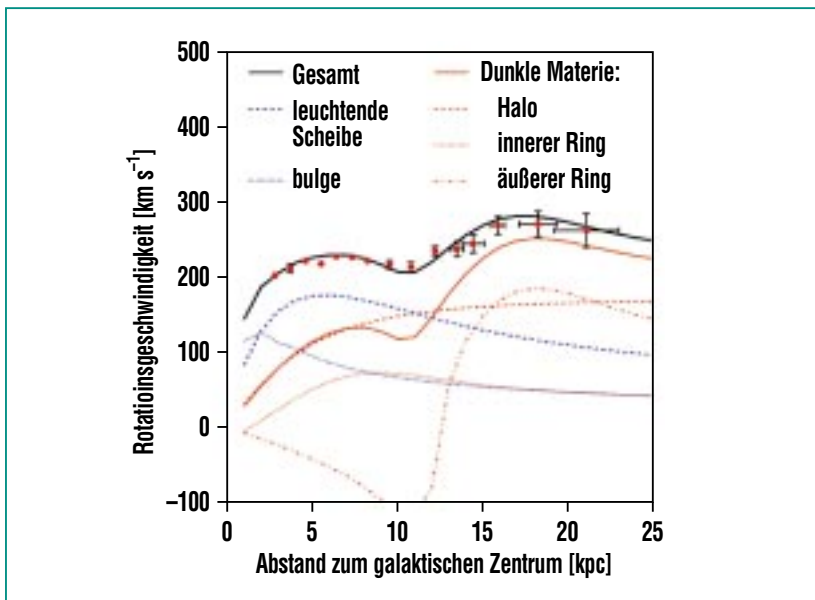


Abb. 2: Die Rotationskurve unserer Galaxie mit den Beiträgen der sichtbaren und Dunklen Materie (Halo plus Ringe) als gestrichelte Linien. Die Form der Beiträge der DM wurde aus der diffusen Gammastrahlung ermittelt.

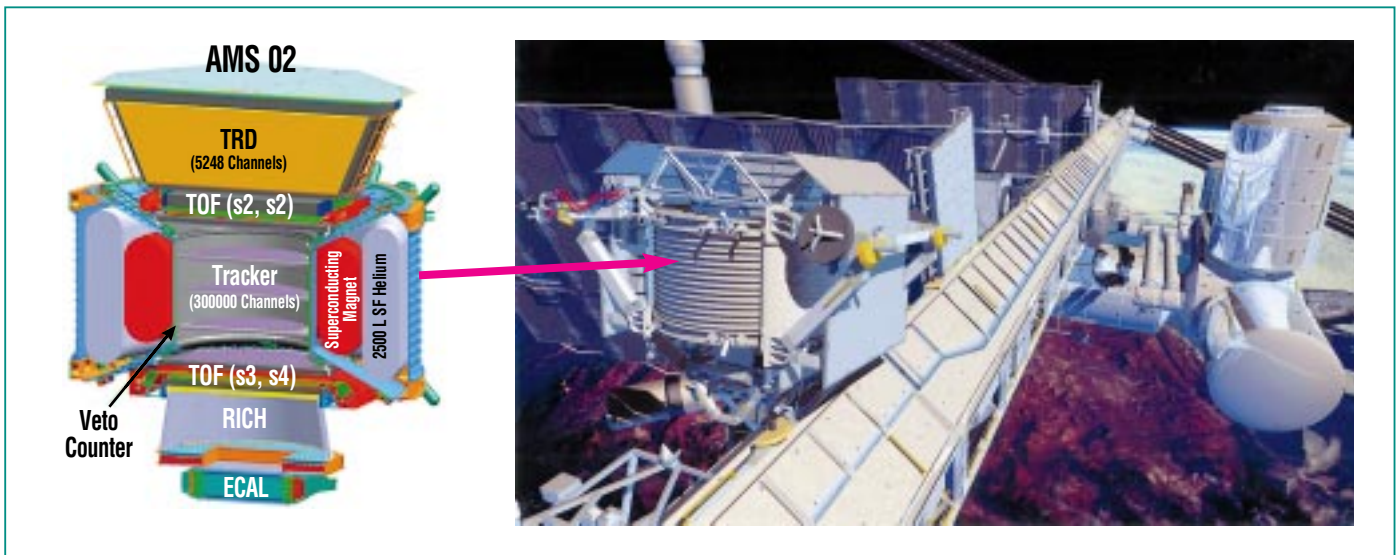


Abb. 3: Das AMS-02-Experiment: links schematisch, rechts Modellzeichnung nach Integration auf der ISS. Der Detektor ist ca. drei Meter hoch.

lungsdetektor (TRD). AMS-02 wird dann in der Lage sein, individuelle Elemente im Spektrum der kosmischen Strahlung bis zu einer Ladungszahl von $Z = 26$ (Eisen) aufzulösen. Die Universität Karlsruhe hat dabei die Verantwortung für die raumfahrtqualifizierte Auslese-Elektronik des Übergangs-Strahlungsdetektors übernommen.

partikelmodell lassen Werte von $\sigma = 10^{-43} \text{ cm}^2$ oder noch kleiner vermuten, was einer erwarteten Ereignisrate von nur einem Rückstoß pro Jahr und kg Detektormaterial entspricht! Um dennoch nach diesen seltenen, niederenergetischen Ereignissen zu suchen, werden hochreine kryogene Detektoren eingesetzt [9]. Dabei handelt es

sich z. B. um Germanium-Kristalle, die bei Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt, bei 0,017 Kelvin, betrieben werden. Abb. 4 beschreibt das Messprinzip für den Nachweis eines WIMP-Stoßes. Ein 320 g schwerer Germanium-Kristall ist mit 100 nm dicken Aluminium-Elektroden zur Auslese von Ionisationssignalen bedampft, an einer

Direkte Suche nach Dunkler Materie

Wie in der Einleitung erwähnt, kann man WIMPs aus der galaktischen Wolke nachweisen durch die elastische Streuung eines WIMPs an einem Atomkern, ähnlich dem Stoß zweier Billardkugeln. Während die Kinematik des Stoßes vollständig durch die Massen und Impulse der Stoßpartner beschrieben werden kann, ist die Wahrscheinlichkeit für einen solchen Prozess, der so genannte Wirkungsquerschnitt σ , noch unbekannt. Vorhersagen aus dem supersymmetrischen Element-

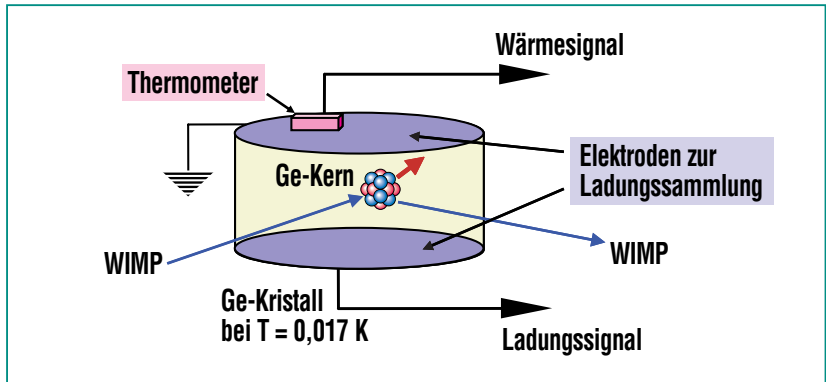


Abb. 4: Messprinzip eines Halbleiter-Bolometers. Kommt es zu einem elastischen Stoß eines WIMP-Teilchens mit einem Atomkern des Kristalls, führt der Kern-Rückstoß zu einer Temperaturerhöhung, die über ein Thermometer registriert wird. Gleichzeitig ionisiert der Ge-Kern seine Umgebung, was zu einem Ladungssignal führt, das an den Elektroden ausgelesen wird.

Oberfläche ist ein Spezial-Sensor aufgeklebt, der die Temperatur des Kristalls misst. Kommt es zu einem Kern-Rückstoß, so führt dies zu einem Temperaturanstieg, der der freigesetzten Energie entspricht. Gleichzeitig ionisiert der Ge-Kern das Material in seiner Umgebung, was zu einem Ladungssignal führt, das an den Oberflächenelektroden ausgelesen wird.

Durch das charakteristische Verhältnis von Ionisations- und Wärme-Signal kann ein Kern-Rückstoß von Rückstößen eines Elektrons, die bei radioaktiven Prozessen entstehen, separiert und somit radioaktiver Untergrund massiv unterdrückt werden. Abb. 5 zeigt Messdaten einer Kalibration eines Ge-Kristalls [10]. Dabei wurde der Detektor einer ^{252}Cf -Quelle ausgesetzt, die sowohl γ -Quanten als auch Neutronen emittiert. Während erstere an Elektronen des Kristalls streuen, stoßen Neutronen an den Atomkernen. Deutlich sind die getrennten Ereignistypen zu erkennen: Kern-Rückstöße zeichnen sich durch deutlich weniger Ionisation im Vergleich zur Gesamt-Rückstoßenergie aus (Q-Werte von ca. 0,3 oder 30 % des Wertes für Elektronen). Das rot markierte Band ist somit die Region, in der bei der Suche nach Dunkler Materie WIMP-Ereignisse zu erwarten sind.

Um weiteren Untergrund durch Reaktionen der kosmischen Strahlung in der Erdatmosphäre zu verhindern, wird die direkte Suche nach DM in Untergrundlabors durchgeführt, in denen dicke Gesteinsschichten vor kosmischer Strahlung schützen.

Das EDELWEISS-Experiment im Untergrundlabor von Modane

Das Institut für Kernphysik des Forschungszentrums Karlsruhe sowie das Institut für Experimentelle Kernphysik der Universität Karlsruhe (TH) sind seit 2003 am EDELWEISS-Experiment [11] beteiligt. Es befindet sich im Laboratoire Souterrain de Modane im französisch-italienischen Fréjus-Tunnel. Dort schirmt die 1780 Meter mächtige Gesteinsschicht der Alpen das Experiment gegen störende kosmische Strahlung ab. Abb. 6 zeigt ein Schema des experimentellen Aufbaus, wie er im Jahre 2005 als komplett neue Konfiguration (EDELWEISS-2) realisiert wurde. Bis zu 110 Detektoren können im Kryostaten bei 0,017 Kelvin betrieben wer-

den (Abb. 7). Umgeben ist der zentrale Kryostat von mehreren Lagen von Abschirmmaterialien gegen Umgebungs-Radioaktivität.

Diese passive Abschirmung wird nahezu hermetisch von einem 100 m² großen System aus Szintillator-Modulen umschlossen, das die Karlsruher Gruppe entworfen und aufgebaut hat. Dessen Aufgabe ist es, Myonen der kosmischen Strahlung in der Umgebung der Detektoren zu erkennen. Diese hochenergetischen Myonen produzieren in tief-inelastischen Stößen mit Materie hochenergetische Neutronen, die in die Germanium-Detektoren eindringen können. Dort stoßen sie dann an Atomkernen und erzeugen analog zur Kalibration wie in Abb. 5 Ereignisse im WIMP-Signalband. Un-

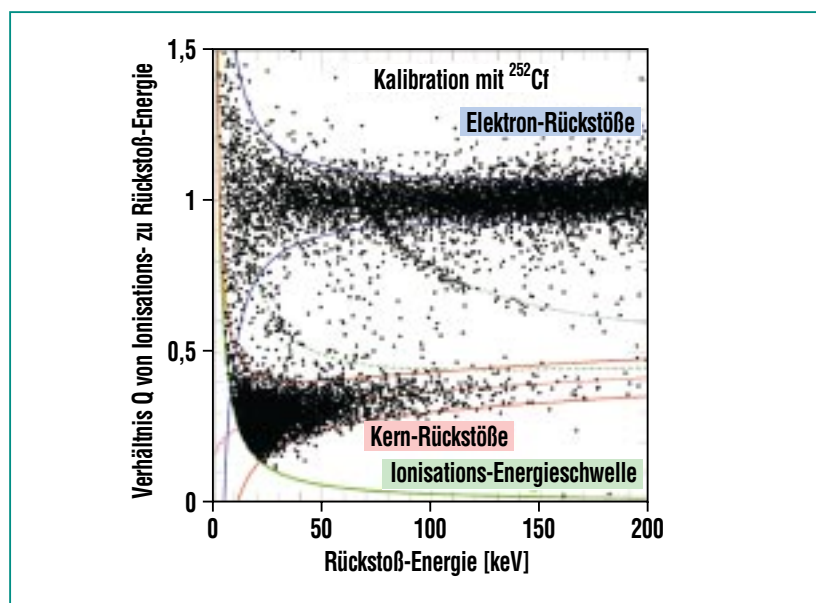


Abb. 5: Kalibration eines Ge-Bolometers durch Bestrahlung mit einer ^{252}Cf -Neutronenquelle: Deutlich erkennbar sind zwei Ereignispopulationen, die durch das Verhältnis von Ionisations- zu Rückstoß-Energie separiert werden können. Die auf das Ionisationssignal angelegte Energieschwelle (grüne Kurve) entspricht einer Rückstoßenergie von 3,5 keV. Die Bänder beschreiben die Bereiche, in denen 90 % der Elektron- bzw. Kern-Rückstöße liegen.

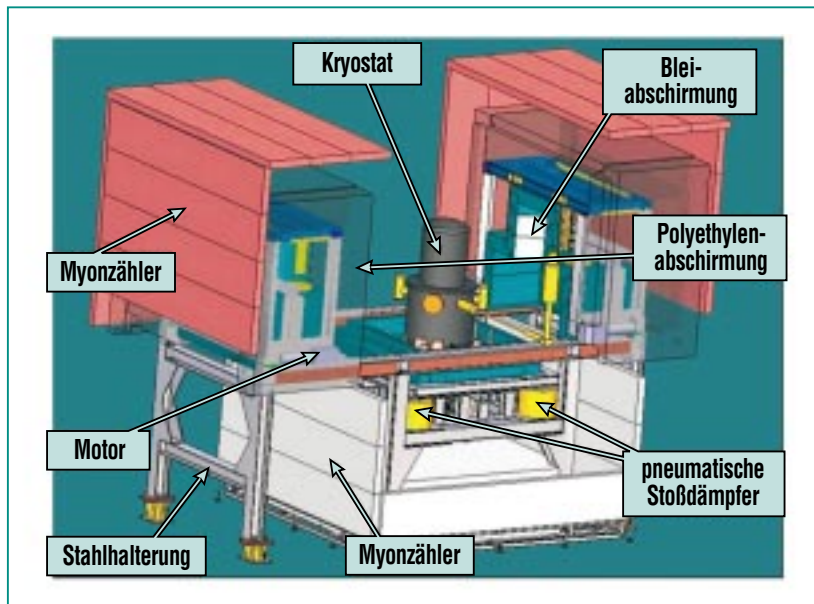


Abb. 6: Schema des Experiment-Aufbaus von EDELWEISS. Die Germanium-Bolometer befinden sich im Kryostaten, der gegen mechanische Vibrationen gesichert auf pneumatischen Stoßdämpfern ruht. Die Abschirmung aus Blei und Polyethylen sowie die Myonzähler sind im oberen Bereich mobil, um Zugang zum Kryostaten zu gewährleisten. Die gesamte Abschirmung ist von einem Myon-Vetosystem aus Plastikszintillatoren umgeben.

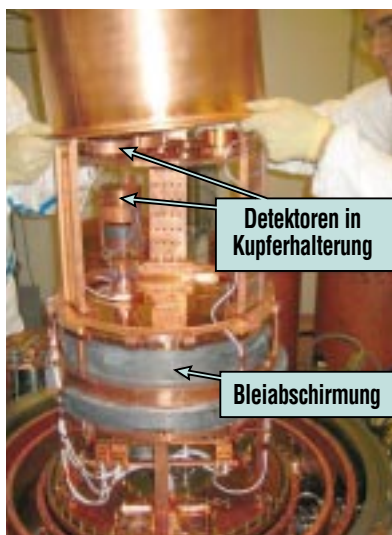


Abb.7: Der EDELWEISS-Kryostat mit der inneren Bleiabschirmung, Kabeldurchführung, der Halterung für die Einzelkristalle sowie einigen Detektoren in ihrer Kupfer-Halterung.

erkannte Myonen wären damit in der Lage, einen Neutronenfluss zu erzeugen, der die Sensitivität des Experiments für WIMPs massiv reduzieren würde. Die Signale der Myon-Vetozähler werden in einem autarken Datenaufnahmesystem registriert und über eine zentrale Experiment-Uhr mit den Germanium-Detektordaten synchronisiert. Vorläufige Analysen der Veto-Daten ergeben einen Myonenfluss im Untergrundlabor von Modane von $\Phi(\mu) = 3,7 \pm 0,5$ Myonen pro Tag und m^2 , der mit dem erwarteten Fluss von ca. 4 Myonen pro Tag und m^2 gut übereinstimmt.

In Abb. 8 sind die aktuellen experimentellen Resultate und zukünftigen Erwartungen der Suche nach Dunkler Materie als physikalische Parameter zusammengefasst. Gibt

es in einem Experiment keinen Hinweis auf ein WIMP-Signal, so kann eine bestimmte Ereignisrate pro Expositionszeit (typischerweise kg-Tage) ausgeschlossen werden. Da diese Rate aufgrund der Stoß-Kinematik und der experimentellen Energieschwelle von der WIMP-Masse und dem Wirkungsquerschnitt abhängt, ergibt sich somit eine Kurve, oberhalb derer diese Parameter ausgeschlossen sind. Gibt es dagegen Indizien für ein WIMP-Signal, so führt dies zu geschlossenen Parameterbereichen. Das EDELWEISS-Experiment in seiner ersten Ausbaustufe in einer Messphase von 2000 bis 2003 hat keine Hinweise auf WIMPs gemessen, was zu der braunen Ausschusskurve in Abb. 8 führt [12, 13]. Somit schließt EDELWEISS wie auch andere Experimente das Resultat eines älteren italienischen Experiments, DAMA [14], aus. Mit der nun anvisierten Expositionszeit von einigen kg-Jahren (gestrichelte Linie) wird EDELWEISS wie auch CDMS [15] und CRESST [16] in Parameterbereiche vorstoßen, die in supersymmetrischen Modellen der Elementarteilchenphysik als favorisiert gelten. Außerdem kann der Hinweis aus der indirekten WIMP-Suche der EGRET-Satelliten-Daten überprüft werden. Parallel zum Ausbau der bestehenden Experimente wird momentan in der gemeinsamen europäischen Studie EURECA (European Underground Rare Event Calorimeter Array) untersucht, wie auf der Basis der bewährten Detektortechnologie die Sensitivität für Dunkle Materie um einen weiteren Faktor 100 erhöht werden kann [17]. Dazu wären dann Detektoren mit einer Gesamtmasse von 1 Tonne erforderlich.

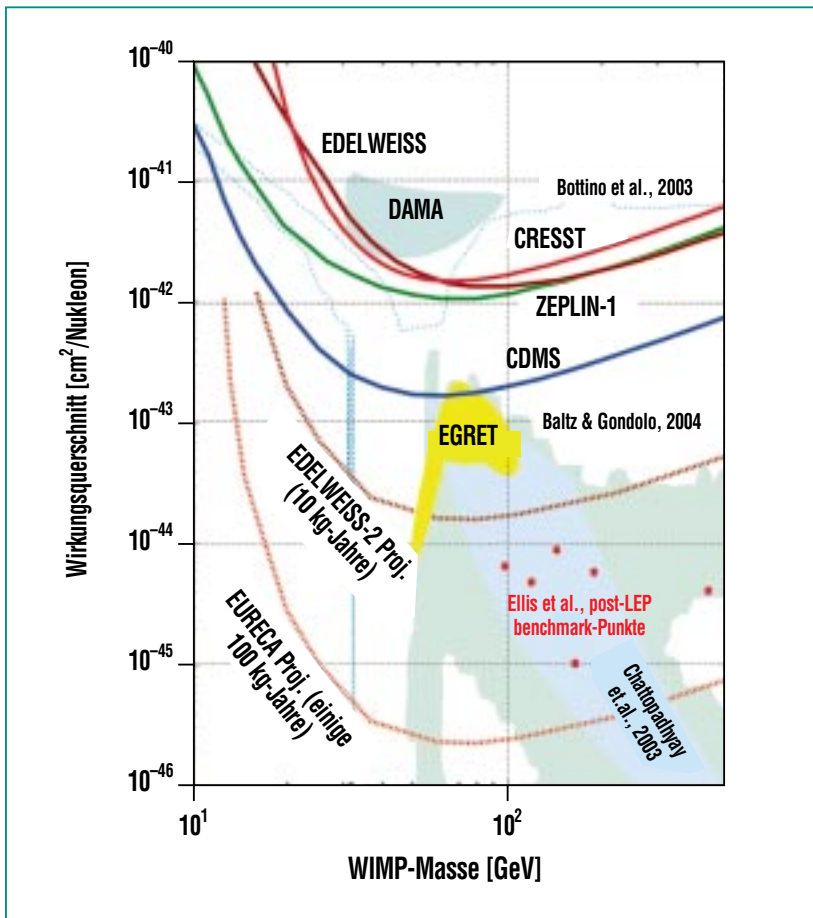


Abb. 8: Parameterbereich für die WIMP-Masse und die Stärke der Wechselwirkung von Dunkler Materie mit normaler Materie, des so genannten spin-unabhängigen Wirkungsquerschnitt eines WIMPs mit einem Atomkern, bezogen auf einen Kernbaustein (Nukleon). Parameterbereiche oberhalb der experimentellen Kurven sind ausgeschlossen, Hinweise von DAMA und EGRET führen zu den farbigen Parameterbereichen, von supersymmetrischen Modellen favorisierte Parameter sind ebenfalls als Farbbereiche bzw. benchmark-Punkte eingezeichnet.

Zusammenfassung

Die indirekte Suche nach DM mit Gammastrahlen hat einen interessanten Hinweis auf die Natur der DM gegeben. Der von EGRET beobachtete Überschuss an Gammastrahlen entspricht einer WIMP-Masse von ca. $60 \text{ GeV}/c^2$, wobei mit der Verteilung des Überschusses die Rotationskurve in unserer

Galaxis rekonstruiert werden konnte. Diese spannenden Ergebnisse werden bald durch neue detaillierte Satellitenexperimente überprüft. Parallel dazu erzielen wir mit der neuen Generation an Experimenten zur direkten Suche nach Dunkler Materie in den nächsten Jahren eine bisher unerreichte Empfindlichkeit und stoßen erstmalig deutlich in Bereiche vor, in

denen supersymmetrische Theorie-Modelle WIMPs vorhersagen. Im Weltraum wie auch tief unter der Erde könnten wir damit einem der großen Rätsel der Kosmologie auf die Spur kommen und die Natur der Dunklen Materie aufdecken. Wenn gleichzeitig an Beschleunigeranlagen neue Elementarteilchen gefunden werden, vor allem am Large Hadron Collider (LHC) am CERN in Genf, und man durch das Studium ihrer Eigenschaften feststellen würde, dass auch die beobachteten WIMPs zur Familie dieser neuen Teilchen gehören, wäre nicht nur das Rätsel der Dunklen Materie gelöst. Darüber hinaus wäre einmal mehr eine Verbindung zwischen der Physik des Allerkleinsten und der Astrophysik und Kosmologie aufgezeigt.

Unser Dank gilt dem HGF Impuls- und Vernetzungsfonds für die Förderung des EDELWEISS-Experiments im Rahmen des Virtuellen Instituts für Dunkle Materie und Neutrinos, VIDMAN. Wir danken außerdem dem Centrum für Elementarteilchenphysik und Astroteilchenphysik, CETA, der Universität Karlsruhe für die Unterstützung während der Aufbauarbeiten im Untergrundlabor von Modane und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) für die Unterstützung beim Bau des AMS-Detektors.

Literatur

- [1] D.N. Spergel et al.,
arXiv:astro-ph/0603449
- [2] W. de Boer,
Progress in Particle and Nuclear Physics 33 (1994) 201
- [3] G. Jungman et al.,
Phys. Rep. 267 (1996) 195
- [4] S.D. Hunter et al.,
Astroph. Journal 481 (1997) 205
- [5] W. de Boer et al.,
Astron. Astrophys. 444 (2005) 51
- [6] D.I. Dinescu et al.,
Astrophys. J. 631 (2005) L49
- [7] W. de Boer et al.,
Phys. Lett. B 636 (2006) 13
- [8] AMS homepage:
<http://ams.cern.ch/>
- [9] K. Eitel,
Progress in Particle and Nuclear Physics 57 (2006) 366
- [10] O. Martineau et al.,
Nucl. Instr. and Meth. A 530 (2004) 426
- [11] EDELWEISS homepage:
<http://edelweiss.in2p3.fr/>
- [12] V. Sanglard et al.,
Phys. Rev D 71, 122002 (2005)
- [13] A. Benoit et al.,
Phys. Lett. B 616 (2005) 25
- [14] R. Bernabei et al.,
Riv. N. Cim. 26n.1 (2003) 1
- [15] D.S. Akerib et al.,
Phys. Rev. Lett. 96, 011302 (2006)
- [16] G. Angloher et al.,
Astropart. Phys. 23 (2005) 325
- [17] H. Kraus et al.,
Journal of Physics: Conference Series 39 (2006) 139