

1 Indirekter Nachweis Dunkler Materie (DM)

1.1 Kurze Historie

Erste Hinweise darauf, dass die sichtbare Materie nicht die gesamte gravitativ wirksame Materie war, ergaben sich bereit in den 30er Jahren des 20. Jahrhunderts. Der Schweizer Astronom wandte den Virialsatz, der eine Beziehung zwischen der kinetischen und potentiellen Energie eines Vielteilchensystems herstellt, auf einen Galaxiehaufen an. Bei der Interpretation seiner Ergebnisse postulierte er als erstes die Dunkle Materie, die nicht mit Licht wechselwirkt. Dieses Konzept wurde ebenfalls verwendet um die außergewöhnlich schnelle Umlaufgeschwindigkeit von äußeren Sternen einer Galaxis zu erklären.

1.2 Arten von Dunkler Materie(DM)

Prinzipiell lässt sich die DM in baryonische und nicht-baryonische DM einteilen. Die einzigen relevanten Kandidaten für baryonische DM sind sogenannte MACHOS(Massive astrophysical compact halo objects); hierbei handelt es sich um massenreiche jedoch nicht, beziehungsweise nicht mehr in der Lage sind Kernfusionsreaktionen in ihrem Inneren durchzuführen. Deshalb erzeugen diese Objekte im Gegensatz zu normalen Sternen kein Licht. Beispiele für solche Objekte sind Braune Riesen (Massenreicher als Gasriesen aber massenärmer als Rote Riesen) oder alte erloschene Sterne(Neutronensterne, Schwarze Löcher...) MACHOS lassen sich über sogenannte Mikrogravitationslinsen(Licht wird in dem Gravitationsfeld des MACHOS abgelenkt) entdecken. Experimentelle Extrapolationen legen den Schluss nahe, dass ihr Beitrag zur DM minimal ist. Darüber hinaus ist durch die Theorie der Primordialen Nukleosynthese der Beitrag der Baryonenmasse zur Gesamtmasse des Universums stark beschränkt ($\Omega_B \approx 0,045$) Nichtbaryonische Materie kann heiß oder kalt sein; je nachdem bei welcher Temperatur sie sich von der Strahlung im frühem Universum entkoppelt hat. Das Neutrino war eine Zeit lang ein guter Kandidat für heiße dunkle Materie; heutzutage weiss man jedoch, dass ein hoher Neutrinobeitrag ein Top-Down-Szenario der Strukturbildung im Universum zur Folge hätte was dem allgemein akzeptierten Down-Top-Szenario widerspricht. Es besteht weitgehend Konsens, das bis jetzt der vielversprechendste Kandidat für einen Großteil der DM das sogenannte WIMP ist. Es wird als sehr schwer angenommen und gehört deshalb zur kalten DM. Der naheliegendste Kandidat für das WIMP wiederum ist das leichteste sogenannte Neutralino, das von supersymmetrischen Erweiterung des Standardmodells vorhergesagt wird.

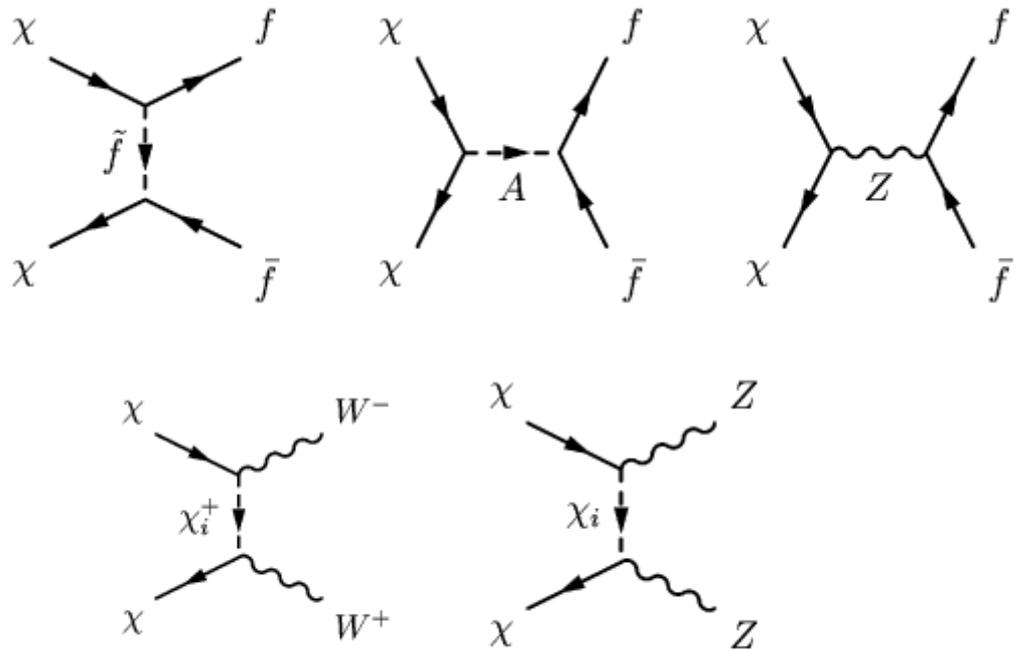
1.3 Das Neutralino

Neutralinos haben folgende Eigenschaften:

1. Trägt weder elektrische Ladung noch Farbladung
2. Unterliegt nur der schwachen Wechselwirkung und der Gravitation
3. Masse liegt wahrscheinlich zwischen 50GeV und einigen TeV
4. Wird aus den Überlagerungen der 2 neutralen Higgsinos und den neutralen Superpartnern der Eichbosonen des Standardmodells (Photino und Zino) gebildet
5. Neutralinos sind Majorana-Teilchen und damit mit ihren Antiteilchen identisch
6. Das leichteste Neutralino ist in R-Paritätserhaltenden, supersymmetrischen Theorien stabil

1.4 Was bedeutet Indirekter Nachweis?

Im Gegensatz zum direkten DM-Nachweis wird beim indirekten Nachweis nach Zerfallsprodukten der WIMPs gesucht. Da alle Neutralinos ihre eigenen Antiteilchen sind, können sie sich gegenseitig annihilieren. Beim Indirekten Nachweis von DM wird nach Zerfallsprodukten dieser Prozesse gesucht.



1.5 Verteilung der DM

Die WIMP-Dichte ist nicht ganz homogen. Da die WIMPs gravitativ wechselwirken sammeln sich in starken Gravitationspotentialen größere Mengen an WIMPs an. Damit befinden sich beispielsweise in Sternen eine größere Anzahl an WIMPs. Des weiteren gilt aufgrund der Rotationskurven der Galaxien, dass für die WIMP-Dichte auf größeren Skalen gilt $\rho \approx r^{-2}$. Damit ist die WIMP-Dichte im Inneren der Milchstraße besonders groß.

1.6 Neutrino-Annihilation

Folgende Feynmanngraphen sind die wichtigsten für die Annihilation zweier Neutralinos:

Die Endzustände der gezeigten Graphen zerfallen solange weiter, bis nur noch stabile Teilchen übrig sind. Der Nachweis von DM-Annihilation kann dann über folgende Teilchen erfolgen:

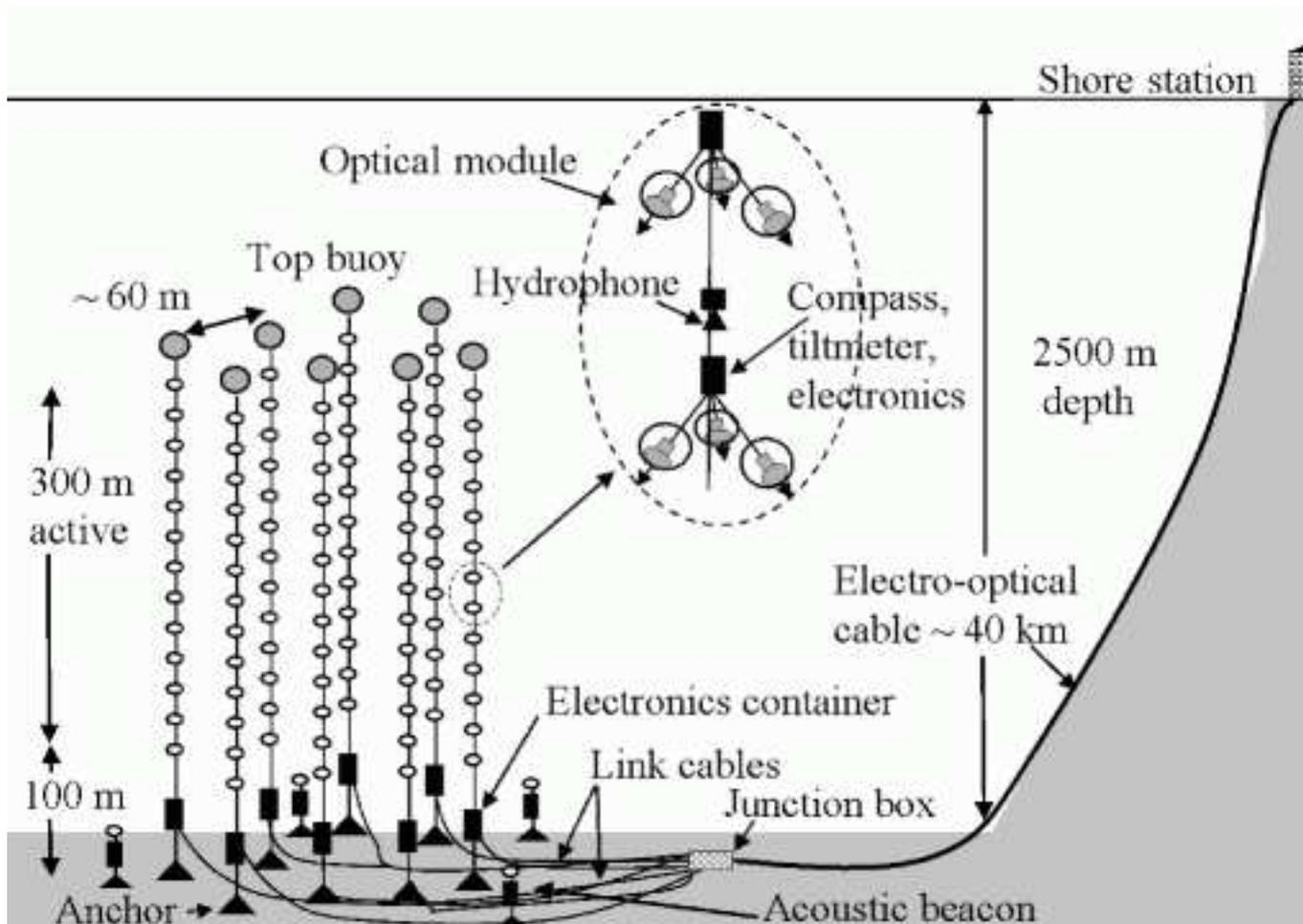
1. Neutrinos
2. Photonen (Gammastrahlung)
3. Geladene Teilchen

1.7 DM-Nachweis durch Neutrinos

WIMPs sammeln sich im Gravitationspotential der Sonne an. Damit steigt der Wirkungsquerschnitt für die Neutralinoannihilation in der Sonne lokal an. Die so erzeugten Neutrinos können auf der Erde mithilfe von Neutrinoobservatorien detektiert werden.

1.8 ANTARES (Astronomy with a Neutrino Telescope and environmental RESearch)

ANTARES ist ein Neutrinoobservatorium vor der Küste von Toulon in Südfrankreich. Es besteht aus 12 Kabeln, die am Meeresgrund befestigt sind und mithilfe von Bojen stramm gehalten werden. An jedem Kabel befinden sich mehrere Photomultiplier die jeweils in als Drillinge gruppiert sind und in Richtung des Meeresgrundes zeigen. Die gesamte Detektorfläche umfasst 0.1 km^2 .



1.8.1 ANTARES Messprinzip

Neutrinos wechselwirken kaum mit Materie und lassen sich deshalb nicht direkt nachweisen. Stattdessen wird versucht hochrelativistische Myonen nachzuweisen. Diese entstehen, wenn Neutrinos mit Materie (bspw. in der Erde unter dem Detektor) wechselwirken. Diese Myonen werden ebenfalls nicht direkt nachgewiesen, stattdessen messen die Photomultiplier die von den Myonen im Wasser erzeugte Terschernkovstrahlung. Da $v \approx c$ ist der Winkel der Abstrahlung bekannt und

der Pfad der Myonen kann innerhalb des Detektors nachverfolgt werden. Im Falle von ANTARES versucht man Neutrinos nachzuweisen, die die Erde von der Südhalbkugel betreten und kurz unter der Detektorfläche mit der Materie reagieren. Da sich der Detektor unter Wasser befindet lassen sich große Teile der Myonen, die von der kosmischen Strahlung oberhalb des Detektors herrühren, unterdrücken. Um diese Myonen vollends auszuschließen, misst man den Myonenfluss winkelabhängig. Es ist zu erwarten, dass der atmosphärische Myonenfluss stark winkelabhängig ist, während der Myonenfluss der von Neutrino-Reaktionen unter dem Detektor herrührt praktisch konstant bleibt.

1.8.2 Ergebnisse von ANTARES

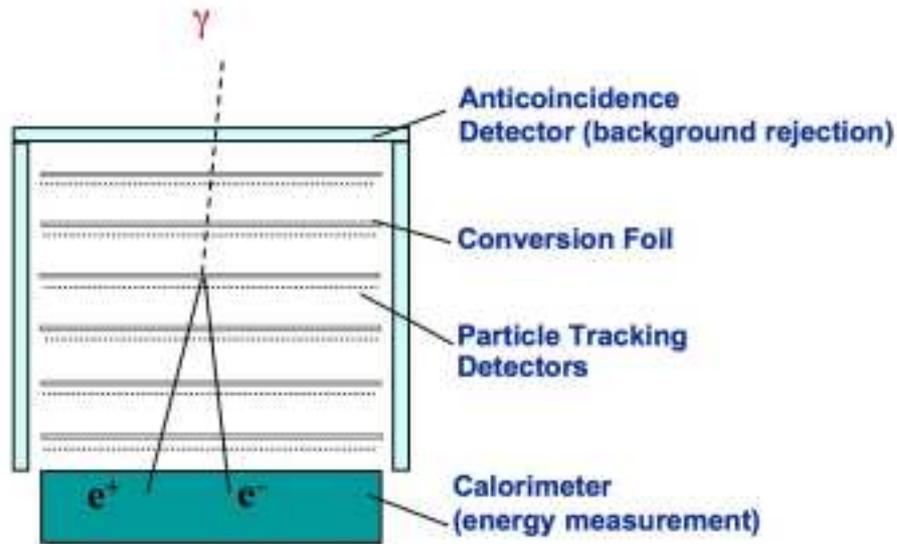
ANTARES hat bisher keinen Neutrinofluss feststellen können der von DM-Annihilationen herrühren könnte.

1.9 DM-Nachweis durch Gammastrahlung

Der größte Teil der Gammastrahlung bei der DM-Annihilation rührt von dem Zerfall von Pionen her. Gammastrahlung hat den Vorteil, dass sie kaum abgelenkt wird und sich deshalb sehr gut an ihren Entstehungsort zurückverfolgen lässt. Ein aussichtsreicher Ort für die Suche nach Gammastrahlung aus DM-Annihilationen ist das Zentrum der Milchstraße, da dort eine höhere WIMP-Dichte zu erwarten ist.

1.10 Fermi Gamma-ray Space Telescope

Das Fermi Gamma-ray Space Telescope wurde am 11. Juni 2008 gestartet. Am Bord des Satelliten befinden sich das LAT (Large Area Telescope) und das GBM (Gamma-ray Burst Monitor). Das LAT übernimmt Energiemessungen von Gammastrahlung im Bereich zwischen 10keV und 300GeV die unter anderem von der Annihilation von DM herrühren könnte.



1.11 Messprinzip vom LAT

Ein Gammaphoton durchläuft folgende Stationen:

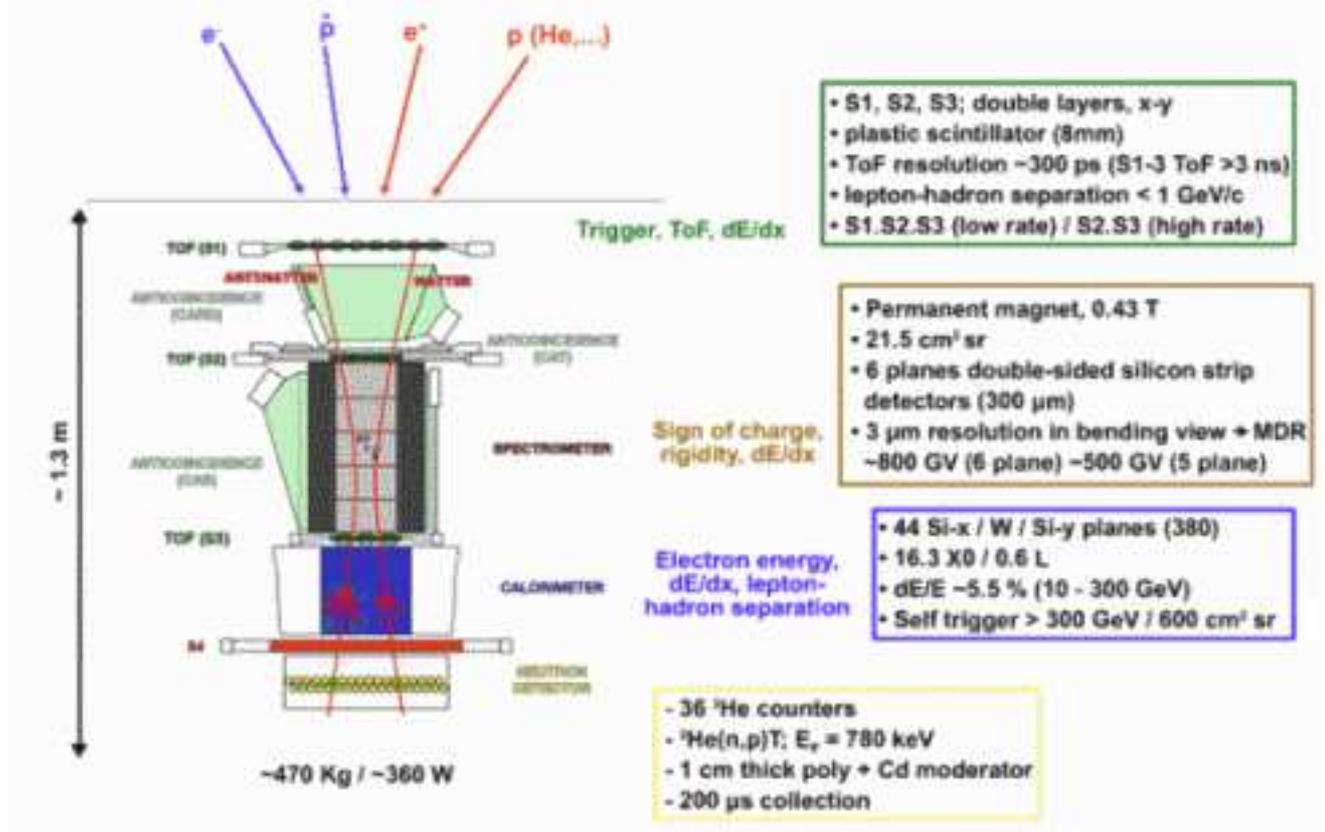
1. Gammas durchqueren das Antikoinzidenzschild ungehindert
2. Das Gamma zerfällt in der Wolframfolie in ein Elektron-Positron-Paar
3. Die Detektoren zeichnen die Bahnen des Paares auf
4. Das Kalorimeter misst die Energie des Paares (Und damit die Energie des Gammas)
5. Geladene Teilchen erzeugen ein Signal im Antikoinzidenzschild; in diesem Fall wird die Messung verworfen

1.12 Ergebnisse vom LAT

2012 wurde von Christoph Weniger ein Paper veröffentlicht, indem er einen schmalen Peak in dem vom LAT veröffentlichten Daten als die Annihilation zweier Neutralinos in zwei Gammas interpretierte. Die direkte Annihilation in zwei Gammas ist ein möglicher Prozess, allerdings ist dieser stark unterdrückt, weil es sich um ein Diagramm höherer Ordnung handelt. Die Gammalinie trat bei $E \approx 130 GeV$ auf und hatte eine Signifikanz von 3.2σ . Weitere Untersuchungen ließen jedoch die Wahrscheinlichkeit, dass diese Linie tatsächlich einen Hinweis auf DM liefert aber unwahrscheinlich erscheinen. Der Peak ist sehr klein und könnte auch beispielsweise von einer statistischen Schwankung herrühren.

1.13 PAMELA(Payload for Antimatter Exploration and Light-nuclei Astrophysics)

PAMELA ist eine Messgerät, dass als Extralast an dem russischen Erdbeobachtungssatelliten Resurs-DK1 befestigt ist. Gestartet wurde das Experiment im Juni 2006. Der Nachweis von Annihilation von DM soll über den Nachweis von geladenen Teilchen erfolgen. Da der Untergrund für Materie viel zu groß ist um DM-Signale nachweisen zu können, erfolgt der Nachweis über Positionen-und Antiprotonenflüsse.



1.14 Messprinzip von PAMELA

Die zwei wichtigsten Instrumente zur Messung von Antimaterieflüssen von PAMELA sind ein magnetisches Spektrometer und ein elektromagnetisches Kalorimeter:

1. Das Spektrometer misst das Verhältnis von p/q und das Vorzeichen der Ladung von geladenen Teilchen anhand der Krümmung und der Krümmungsrichtung der geladenen Teilchen
2. Das elektromagnetische Spektrometer sorgt für die Unterscheidung von Protonen und Positronen, bzw. Antiprotonen und Elektronen. Dies ist aufgrund der unterschiedlichen Wechselwirkungen der Teilchen möglich. Hadronenschauer werden durch die Starke WW erzeugt, während Leptonenschauer durch die elektromagnetischen WW erzeugt werden.

1.15 Ergebnisse von PAMELA

2008 wurden Daten veröffentlicht, die einen Positronenüberschuss aufweisen der Hinweise auf die Annihilation von DM nahe legte. Ein Antiprotonenüberschuss wurde jedoch nicht festgestellt welcher eigentlich von theoretischen Überlegungen her zu erwarten gewesen wäre. Noch bedeutender war jedoch, dass der Positronenfluss auch bei hohen Energien nicht abfiel. Ein solcher Abfall wäre zu erwarten, wenn die Positronen aus einer DM-Annihilation herrühren würden, da die WIMP-Masse eine Energieobergrenze bildet. Ein solcher Abfall könnte noch bei Energien außerhalb des Messbereiches von PAMELA stattfinden, hätte aber auf jeden Fall wenn er von DM-Annihilationen herrührt sehr schwere WIMPs zur Folge.