

DUNKLE MATERIE

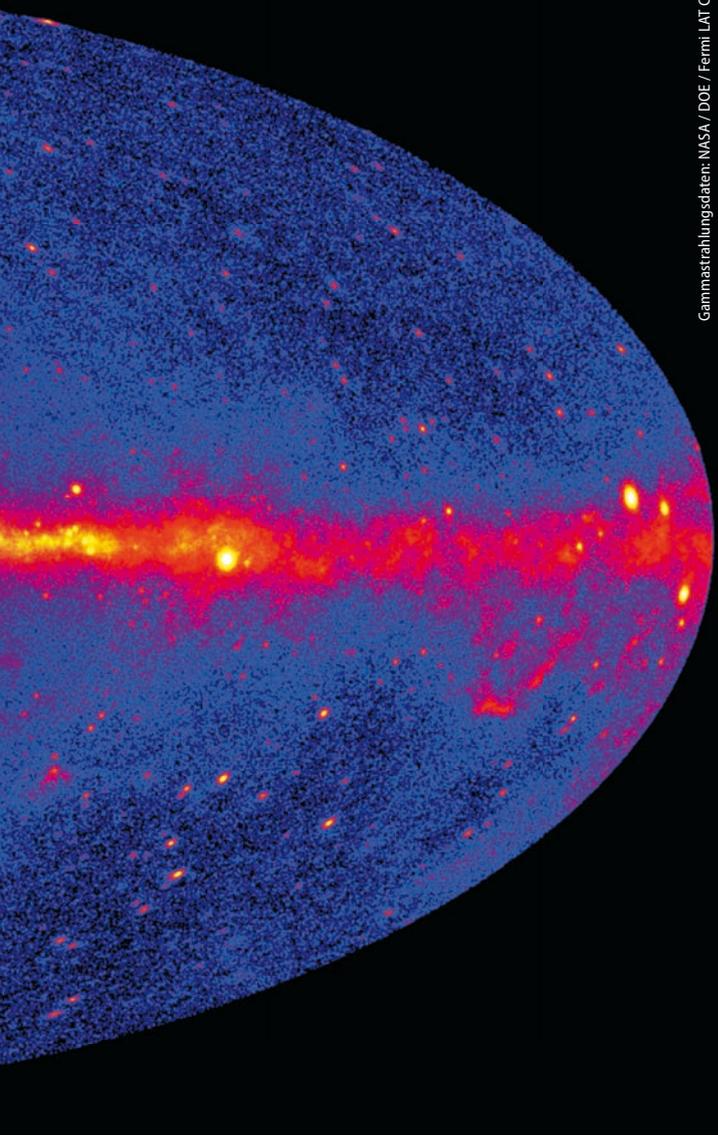
Der Nachweis der Vernichtung

Dunkle Materie lässt sich indirekt mittels Gammastrahlung, Neutrinos und kosmischer Strahlung suchen.

Christopher van Eldik

Anhäufungen Dunkler Materie inner- und außerhalb der Milchstraße lassen sich auch indirekt suchen. Die zugrundeliegenden Verfahren beruhen darauf, Reaktionsprodukte aus der gegenseitigen Vernichtung oder aus dem Zerfall „dunkler“ Teilchen nachzuweisen. Astrophysikalische Quellen und Modellunsicherheiten erschweren die Suche, die bislang trotz zunehmend empfindlicher Instrumente nicht von Erfolg gekrönt war. Für viele wichtige Annihilationskanäle und über einen großen Bereich von Massen ließen sich in den letzten Jahren aber teilchenphysikalische Eigenschaften der Dunklen Materie einschränken.

Ein möglicher Kandidat für Dunkle Materie sind WIMPs (vgl. den Artikel von M. Lindner et al.). Sie lassen sich indirekt nachweisen, indem man nach den Produkten aus einem möglichen Zerfall oder aus der Annihilation zweier WIMPs sucht. Wenn im Universum zwei WIMPs kollidieren und sich gegenseitig vernichten, können sich Teilchen des Standardmodells bilden wie Quark-Antiquark-Paare, Lepton-Antilepton-Paare oder Eichboson- bzw. Higgs-Paare (W^+W^- , Z^0Z^0 , hh). Bei ihrem Zerfall entstehen stabile geladene und ungeladene Teilchen (Elektronen und Positronen, Protonen und



Antiprotonen, Photonen sowie Neutrinos), die zur Erde gelangen und sich dort detektieren lassen. Der Nachweis der WIMPs erfolgt also *indirekt* über ihre stabilen Zerfallsprodukte. Die physikalisch wichtigsten Parameter, die es zu bestimmen gilt, sind die Masse der WIMPs und der über die Relativgeschwindigkeit v der WIMPs gemittelte Annihilationswirkungsquerschnitt $\langle\sigma v\rangle$. Besonders in Kombination mit Ergebnissen aus direkten WIMP-Suchen ist es damit möglich, die teilchenphysikalischen Eigenschaften der Dunklen Materie einzugrenzen und – bei erfolgreichem Nachweis – ein Fenster zur Physik jenseits des Standardmodells zu öffnen.

Im einfachsten Fall sollte der Annihilationswirkungsquerschnitt etwa demjenigen entsprechen, der im frühen Universum bei der Entkopplung der WIMPs von den übrigen Elementarteilchen vorgegeben hat [1]. Dieser thermische Wirkungsquerschnitt, $\langle\sigma v\rangle^{\text{therm}} \approx 3 \cdot 10^{-26} \text{ cm}^3/\text{s}$, dient als Richtschnur für die Empfindlichkeit, die indirekte Suchen erreichen müssen, um WIMPs zu detektieren. Sollte der Wirkungsquerschnitt aber, wie in manchen WIMP-Modellen erwartet, stark von der Relativgeschwindigkeit v abhängen oder die Annihilation resonant über ein Teilchen erfolgen, dessen Masse etwa der Annihilationsenergie entspricht, so sind auch viel größere (oder kleinere) Wirkungsquerschnitte möglich.

◀ Das Fermi-LAT-Instrument hat den Gammastrahlungshimmel bei Energien oberhalb von 1 GeV aufgenommen. Die Milchstraße erscheint als helles Band. In grün ist ein (stark überhöhtes) mögliches WIMP-Signal aus der inneren Milchstraße angedeutet.

Teilchenspektrometer im All, Gammastrahlungsteleskope und Neutrinodektoren auf der Erde dienen der indirekten WIMP-Suche im Massenbereich oberhalb von 10 GeV.¹⁾ In den letzten Jahren haben indirekte Suchen zwischen 10 GeV und 10 TeV viele Kandidaten für Dunkle Materie (z. B. einige supersymmetrische Modelle) ausgeschlossen. Diese Ausschlusslimits gelten in fast allen Suchen unter der Annahme, dass WIMPs in genau eine Sorte Teilchen des Standardmodells annihilieren. In der Praxis werden Limits für mehrere plausible Annihilationskanäle und als Funktion der angenommenen WIMP-Masse bestimmt.

Auf der Suche mit Photonen und Neutrinos

Photonen und Neutrinos sind ideal geeignet, um die Annihilation oder den Zerfall von WIMPs nachzuweisen. Während das galaktische Magnetfeld geladene Teilchen auf ihrem Weg von der Annihilationsregion zu uns ablenkt und sie dadurch ihre Richtungsinformation verlieren, können hochenergetische Photonen und Neutrinos auf direktem Wege fast ohne Absorption zur Erde gelangen. Ihre Richtungsinformation kann helfen, die WIMP-Suche auf vielversprechende Himmelsregionen zu konzentrieren, das Signal der WIMPs von demjenigen astrophysikalischer Quellen zu trennen und bei erfolgreichem Nachweis die Dichteverteilung der Dunklen Materie zu vermessen.

Die Suche nach WIMPs mit Massen über 10 GeV ist seit langem fester Bestandteil des Beobachtungsprogramms von Gammastrahlungs- und Neutrinooteleskopen. Für den Nachweis hochenergetischer Photonen und Neutrinos macht es keinen Unterschied, ob sie in astrophysikalischen Prozessen oder durch WIMP-Annihilationen bzw. -Zerfälle entstanden sind. Daher kommen bewährte Nachweis- und Analysetechniken zum Einsatz (**Abb. 1**).

Photonen mit einer Energie von 100 MeV bis 100 GeV lassen sich mit satellitenbasierten Instrumenten detektieren; hier liefert das Large Area Telescope (LAT) auf dem Fermi-Satelliten zurzeit die besten Daten. Der Photonennachweis erfolgt über Paarproduktion, also die Konvertierung des Photons in ein Elektron und ein Positron, deren Signale im Detektor eine Richtungs- und Energierekonstruktion erlauben. Fermi-LAT beobachtet zu jedem Zeitpunkt 20 Prozent des Himmels und deckt bei seiner Bewegung um die Erde alle drei Stunden den gesamten Himmel ab.

Die Nachweisfläche satellitenbasierter Instrumente ist auf etwa 1 m² beschränkt. Da der Photonenfluss stark mit der Energie abfällt, werden Photonen mit Energien von 50 GeV bis 100 TeV vom Erdboden aus registriert, wo die effektive Nachweisfläche einige 100 000 m² erreichen kann. Der Nachweis nutzt aus, dass das Photon in der Atmosphäre

1) Im Folgenden setzen wir der Einfachheit halber die Vakuumlichtgeschwindigkeit $c = 1$, d. h. wir geben Teilchenmassen in Energieeinheiten an.

eine Kaskade relativistischer Elektronen und Positronen – einen Teilchenschauer – erzeugt. Das HAWC-Experiment in Mexiko weist diese Schauer direkt über das Cherenkov-Licht nach, das sie in großen Wassertanks erzeugen. Das Instrument kann Tag und Nacht betrieben werden und deckt innerhalb von 24 Stunden etwa zwei Drittel des Himmels ab. Einen komplementären Weg beschreiben abbildende Cherenkov-Teleskope: H.E.S.S. (Namibia), MAGIC (La Palma) und VERITAS (Arizona) bilden das atmosphärische Cherenkov-Licht in Kameras ab. Aus der Bildinformation leiten sich Richtung und Energie des primären Photons ab. Die Himmelsabdeckung dieser Instrumente ist vergleichsweise klein, weil ihr Gesichtsfeld auf etwa 5 Grad Durchmesser beschränkt ist und Beobachtungen nur während der Nacht stattfinden können. Dafür besitzen diese Teleskope eine sehr gute Winkel- und Energieauflösung und sind sehr empfindlich. Mit dem Cherenkov Telescope Array (CTA) in Chile und auf La Palma wird in den nächsten Jahren ein neues Gammastrahlungs-Observatorium mit nochmals deutlich besserer Sensitivität in Betrieb gehen.

Da Neutrinos selten mit Materie wechselwirken, sind zu ihrem Nachweis riesige Detektorvolumina nötig. Beim größten Neutrinoobservatorium IceCube am Südpol ist in einer Tiefe von 1500 bis 2500 Metern ein Eisvolumen von 1 km^3 mit lichtempfindlichen Photomultipliern instrumentiert. Dringt dort z. B. ein Myon-Neutrino ein und wechselwirkt mit einem Atomkern des Eises, entsteht ein geladenes Myon. Dieses erzeugt entlang seiner Trajektorie durch den Detektor Cherenkov-Strahlung, die auf die Lichtsensoren trifft. Aus der Signalstärke und Ankunftszeit an den verschiedenen Photomultipliern lässt sich auf die Richtung und

Energie des Myons – und damit des primären Neutrinos – schließen. Ähnlich erfolgt der Nachweis von Elektron- bzw. Tau-Neutrinos. In der Tiefe des Mittelmeers arbeitet das ANTARES-Neutrinoobservatorium nach demselben Prinzip. Im sibirischen Baikalsee wird derzeit Baikal-GVD installiert, im Mittelmeer KM3NeT. Beide Neutrinoobservatorien werden ein mit IceCube vergleichbares Nachweisvolumen aufweisen.

Strategische Suche

Welche Regionen am Himmel eignen sich für die indirekte Suche nach Dunkler Materie? Die Rate, mit der WIMPs annihilieren, ist proportional zum Quadrat ihrer Dichte und zum Wirkungsquerschnitt $\langle\sigma v\rangle$ der Reaktion. Da der auf der Erde beobachtbare Photonen- bzw. Neutrinofluss quadratisch mit dem Abstand zur Annihilationsregion abnimmt, bieten sich für die Suche Regionen an, die eine große Dichte an Dunkler Materie aufweisen und nicht zu weit entfernt sind. Ähnliches gilt für den Zerfall von WIMPs; allerdings hängt dort die Zerfallsrate nur linear von der Dichte ab.

Die Suchregion sollte möglichst wenige oder keine astrophysikalischen Quellen enthalten, die ein WIMP-Signal überdecken können. Die Photonen und Neutrinos, die aus einer Annihilation hervorgehen, weisen meist eine breite Energieverteilung auf, deren Endpunkt durch die WIMP-Masse gegeben ist. Die Verteilung ist hauptsächlich durch die Teilchenphysik der Prozesse bestimmt, die auf die Annihilation folgen, und nimmt grob die Form einer mit der Energie abfallenden Potenzfunktion an (Abb. 2). Damit ähnelt das Energiespektrum der Sekundärteilchen denjenigen

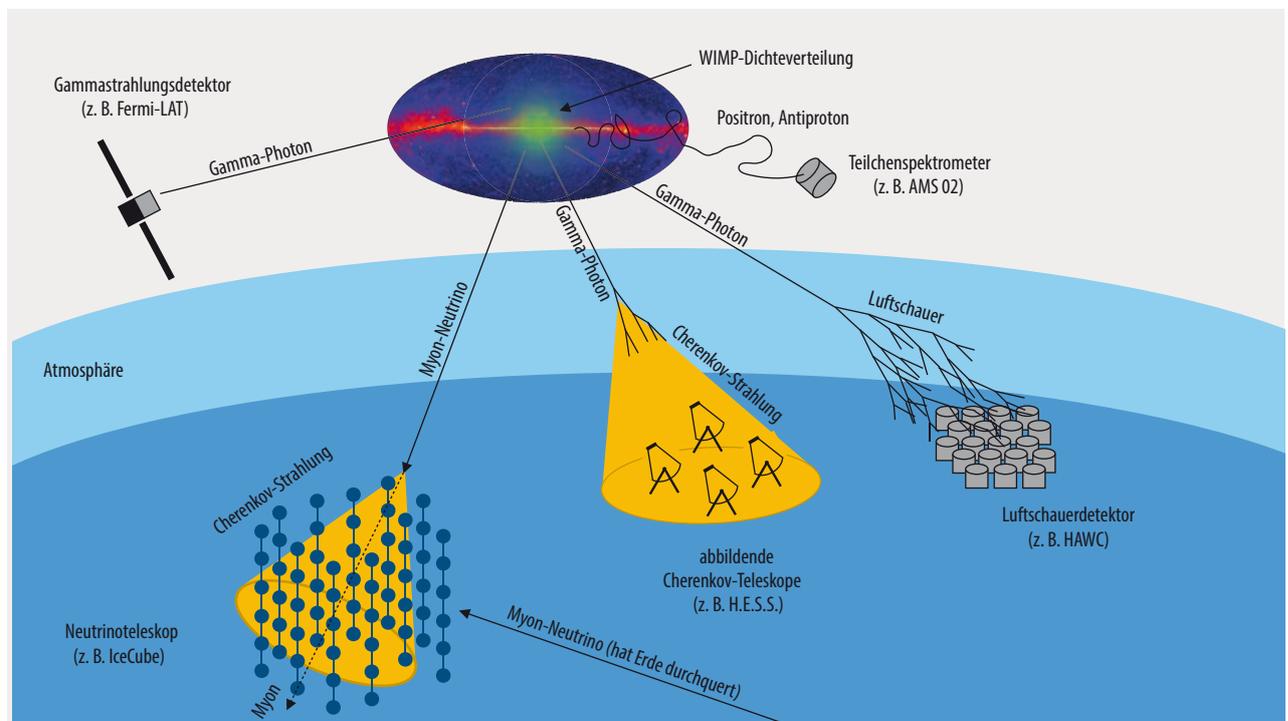


Abb. 1 Zum Nachweis von geladenen Teilchen, Neutrinos und Gammastrahlung aus dem All kommen verschiedene Verfahren zum Einsatz. Dabei ist es unerheblich, ob die Teilchen und Photonen aus der Annihilation von WIMPs (grüne Dichteverteilung) stammen oder aus astrophysikalischen Quellen (Gammastrahlungskarte). Antima-

terie und Photonen mit GeV-Energie werden aus dem Orbit nachgewiesen, Photonen mit einer Energie über 100 GeV vom Erdboden aus und Neutrinos mit Untergrunddetektoren. Neutrinoobservatorien nutzen häufig die Erde als Abschirmung vor kosmischer Strahlung, indem sie Neutrinos analysieren, welche die Erde durchquert haben.

von astrophysikalischen Quellen, was ihre Unterscheidung enorm erschwert. Eine Ausnahme bildet die direkte Anihilation in Photonensepaare, die in den meisten Modellen stark unterdrückt ist, aber eine gut zu identifizierende Linie bei derjenigen Photonenenergie erzeugt, die der WIMP-Masse entspricht.

Der genaue Verlauf des Energiespektrums hängt davon ab, in welche Elementarteilchen die WIMPs annihilieren. Entstehen zum Beispiel τ -Leptonen, werden im Mittel Photonen und Neutrinos höherer Energie produziert als bei Quark-Paaren (Abb. 2). Bei erfolgreicher Detektion einer Anihilation können diese Unterschiede helfen, die Kopplungen der WIMPs an die Teilchen des Standardmodells zu charakterisieren. Um das Anihilationssignal vom astrophysikalischen Untergrund zu trennen, eignen sie sich aber nur bedingt, da auch astrophysikalische Quellen sehr unterschiedliche Energiespektren besitzen können.

Am Ende ist die Wahl der Suchregion immer ein Kompromiss. WIMP-Suchen mit Photonen konzentrieren sich meist auf die innere Milchstraße (in unserer Nähe, aber reich an astrophysikalischen Quellen) und Zwerggalaxien oder Galaxiencluster (kein relevanter astrophysikalischer Untergrund, aber kleineres Signal). Suchen mit Neutrinos sind am erfolgversprechendsten für die innere Milchstraße, aber auch in Richtung der Sonne und des Erdkerns.

Suchen in der inneren Milchstraße, ...

Die Massendichte Dunkler Materie an der Position der Erde, also etwa 28 000 Lichtjahre vom Zentrum der Milchstraße entfernt, beträgt etwa $0,4 \text{ GeV/cm}^3$. Die sich daraus ergebende Teilchenzahldichte hängt von der unbekannt Masse der Teilchen ab. Verwenden wir als Richtwert beispielsweise die hundertfache Masse des Wasserstoffatoms, so sollten sich in jedem Kubikmeter des erdnahen Raums etwa 4000 WIMPs befinden. Simulationen legen nahe, dass die Dichte zum Zentrum der Milchstraße hin um mehrere Größenordnungen steigt. Wie der Anstieg verläuft und

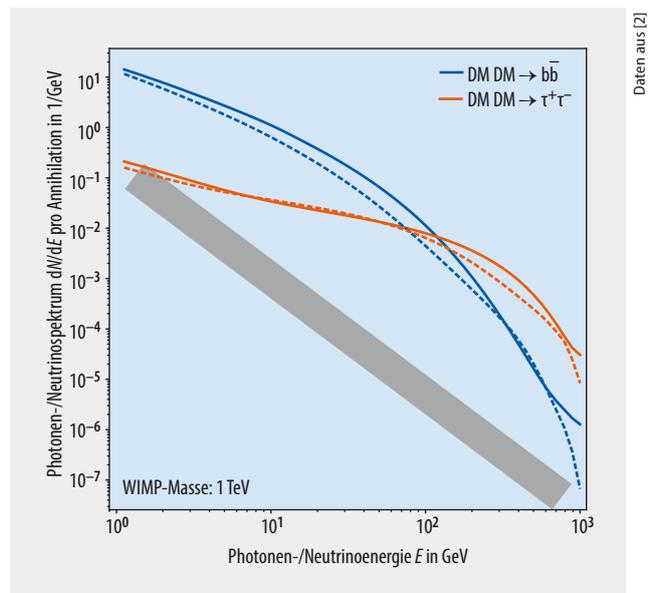


Abb. 2 Die Energieverteilung von Photonen (durchgezogen) und Neutrinos (gestrichelt), die in der Anihilation zweier WIMPs erzeugt werden, ähnelt einer Potenzfunktion. Das Spektrum unterscheidet sich je nach Anihilationskanal. Hier ist als Beispiel die Anihilation in zwei b-Quarks (blau) bzw. zwei τ -Leptonen (orange) gezeigt. Photonen und Neutrinos entstehen als Sekundärprodukte. Grau schattiert ist die typische Spektralform einer nicht-thermischen astrophysikalischen Gammastrahlungsquelle angedeutet.

welche Dichte sich im Zentrum einstellt, ist besonders im innersten Bereich mit großen Unsicherheiten behaftet. Steigt die WIMP-Dichte zum Galaktischen Zentrum hin allerdings so stark an, wie es viele Simulationen vorhersagen, so sind dort Massendichten von mehr als 10^3 GeV/cm^3 möglich. Damit würde eine Region von einigen Grad Radius um das Galaktische Zentrum das bei weitem stärkste Signal Dunkler Materie am Himmel erzeugen (Abb. 3).

Diese Eigenschaft macht die innere Galaxie zu einem der aussichtsreichsten Orte für die WIMP-Suche. Allerdings ist sie reich an astrophysikalischen Objekten, die

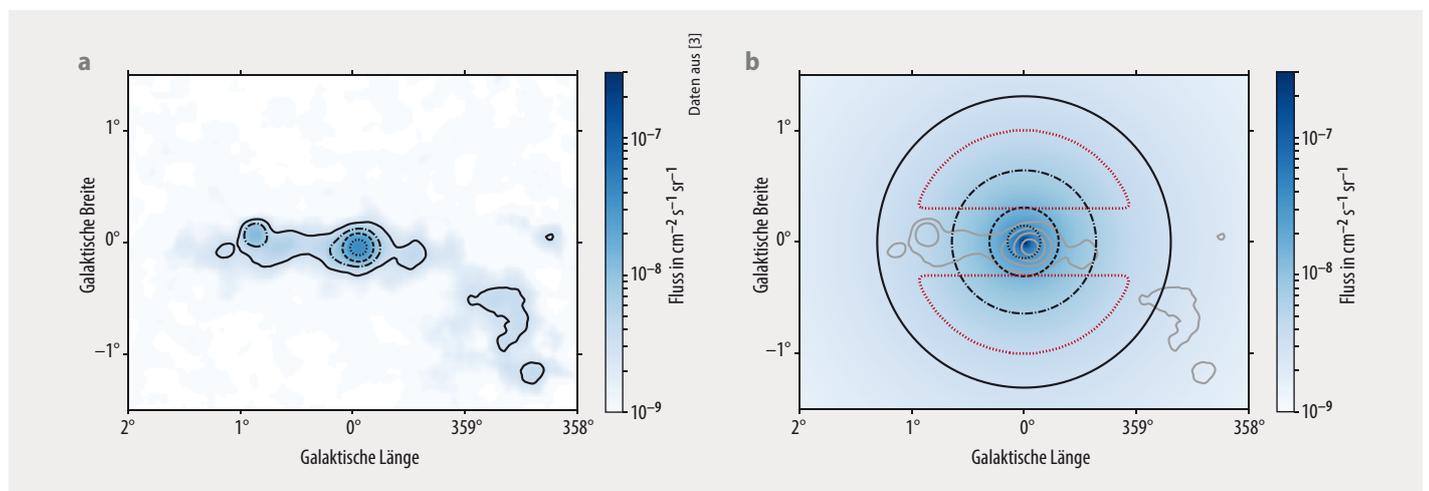


Abb. 3 Die H.E.S.S.-Teleskope haben astrophysikalische Gammastrahlung oberhalb von 1 TeV im innersten Bereich der Milchstraße gemessen (a). Alle Emissionen lassen sich astrophysikalischen Quellen zuordnen. b) zeigt das erwartete Gammastrahlungssignal aus der Anihilation von 10 TeV-WIMPs in τ -Leptonen für eine radial-

symmetrisch zum Zentrum hin stark ansteigende Dunkle-Materie-Dichte und einen aus Gründen der Sichtbarkeit sehr großen Wirkungsquerschnitt von $500 \cdot \langle \sigma v \rangle^{\text{therm}}$. Gleiche Konturen zeigen Linien gleicher Gammastrahlungsintensität. Typische Suchregionen (rot) liegen ober- und unterhalb des astrophysikalischen Signals.

geladene Teilchen auf Energien von mehr als 100 TeV beschleunigen können. Diese Teilchen bewegen sich durch das interstellare Medium und erzeugen hochenergetische Gammastrahlung und Neutrinos, wenn sie mit Gasvorkommen oder Photonen wechselwirken. Von der Erde aus erscheint die Gammastrahlung als breites Band entlang der Milchstraße (Abb. auf S. 48/49). Sie ist besonders bei GeV-Energien sehr intensiv und verursacht daher einen Untergrund für die WIMP-Suche.

Der Nachweis eines WIMP-Signals mit einer Energie im GeV-Bereich aus der inneren Galaxie kann nur gelingen, wenn dieser astrophysikalische Untergrund gut verstanden ist. Zu diesem Zweck werden die einzelnen astrophysikalischen Strahlungskomponenten mittels komplexer Simulationen möglichst vollständig modelliert und mit der gemessenen Gammastrahlungskarte verglichen. Was nach Abzug des Modells von den Daten an Gammastrahlung übrig bleibt, könnte aus der Annihilation oder dem Zerfall von WIMPs stammen. 2009 haben erste Hinweise auf ein mögliches WIMP-Signal in den Fermi-LAT-Daten für Aufregung gesorgt [4]: Die damals entdeckte schwache Emission aus dem galaktischen Zentrum lässt sich durch eine WIMP-Population mit einer Masse von einigen 10 GeV beschreiben. Studien haben allerdings gezeigt, dass auch eine Ansammlung einzelner nicht detektierbarer astrophysikalischer Quellen, z. B. Millisekundenpulsare, dieses Signal verursachen kann [5].

Die noch immer ungenaue Kenntnis des astrophysikalischen Untergrunds erschwert also in der inneren Galaxie die Suche nach WIMPs mit Photonen unterhalb von etwa 100 GeV deutlich. Bei größeren Photonenenergien

ist die Lage besser. Aber auch hier behindern diverse astrophysikalische Quellen die Suche – insbesondere genau im Zentrum, wo eine starke Punktquelle, die sehr sicher astrophysikalischer Natur ist, das WIMP-Signal überdeckt (Abb. 3). Trotzdem verbleiben innerhalb des Gesichtsfelds abbildender Cherenkov-Teleskope genug Bereiche, um nach WIMP-Annihilationen zu suchen. Zwar ist an diesen Stellen das erwartete Signal deutlich kleiner als direkt im Zentrum, trotzdem wurden dort mit mehreren hundert Stunden Beobachtungszeit die zurzeit besten Limits für den Annihilationswirkungsquerschnitt für TeV-WIMPs erreicht (Abb. 4). Für den Massenbereich von 10 TeV bis über 1 PeV lieferte das HAWC-Instrument Limits, die aus einer Region mit mehr als 30 Grad Durchmesser im Norden des Galaktischen Zentrums gewonnen wurden. Diese oberen Schranken liegen zwar für alle Standard-Annihilationsszenarien deutlich über dem thermischen Wirkungsquerschnitt, sind aber sehr robust, da sie durch die große Analyseregion sehr viel weniger von der genauen Dichte der WIMPs in der inneren Milchstraße abhängen als die Beobachtungen aus dem Galaktischen Zentrum.

Für Neutrinoobservatorien ist die innere Milchstraße die Suchregion der Wahl. Da diese Instrumente einen Großteil des Himmels gleichzeitig beobachten, lässt sich eine sehr große Himmelsregion um das Galaktische Zentrum zur Suche nutzen. Analysen sind in vielen Fällen auf den Nachweis von Myon-Neutrinos optimiert, deren Myon-Spuren im Detektormedium eine klare Signatur mit guter Richtungsauflösung ermöglichen. Die Experimente ANTARES und IceCube haben mehrere Jahre im Massenbereich von 10 GeV bis 100 TeV gesucht (Abb. 4), ohne einen Hinweis auf ein Annihilationssignal zu finden. Ihre Empfindlichkeit erreicht noch nicht diejenige abbildender Cherenkov-Teleskope. Dafür ist die Suche mit Neutrinos in der Milchstraße (noch) nicht durch astrophysikalischen Untergrund limitiert und durch die große Analyseregion deutlich weniger empfindlich auf die genaue Dichteverteilung der WIMPs. Zudem lassen sich mit Neutrinos Annihilationsszenarien testen, die mit Photonen nur schwer zugänglich sind – etwa die direkte Annihilation in Neutrino-Paare.

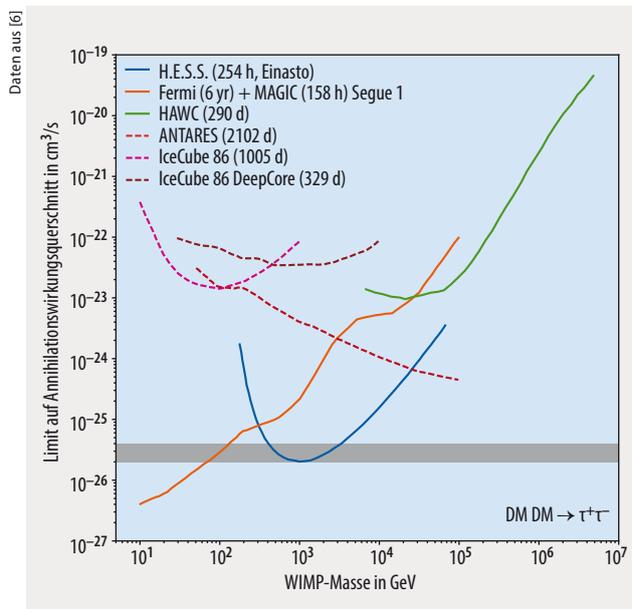


Abb. 4 Die oberen Schranken für den WIMP-Annihilationswirkungsquerschnitt für ausgewählte Gammastrahlungs- und Neutrinoexperimente sind berechnet unter der Annahme, dass die Annihilation vollständig in τ -Leptonen erfolgt. Die Messungen von Fermi und MAGIC beruhen auf Beobachtungen von Zwerggalaxien. Alle anderen Schranken sind aus Beobachtungen der inneren Milchstraße abgeleitet. Der grau markierte Bereich gibt den thermischen Wirkungsquerschnitt $(\sigma v)^{\text{therm}}$ an.

... in Zwerggalaxien ...

Bei manchen Objekten in unserer näheren Umgebung verrät uns ihr Masse-zu-Leuchtkraft-Verhältnis, dass sie zu einem sehr großen Teil aus Dunkler Materie bestehen dürften. Die Rede ist von kugelförmigen Zwerggalaxien, die gravitativ an die Milchstraße gebunden und frei von Gammastrahlungsuntergrund sind. Das WIMP-Signal aus Richtung dieser Objekte ist jedoch um Größenordnungen kleiner als dasjenige aus der inneren Galaxie. In WIMP-Suchen werden daher häufig Beobachtungen mehrerer Zwerggalaxien kombiniert, sodass die daraus resultierenden oberen Schranken für den Annihilationswirkungsquerschnitt in einigen Fällen mit den Beobachtungen der inneren Galaxie konkurrieren können. In einer Analyse der Fermi-LAT-Daten von 15 Zwerggalaxien in Kombination mit MAGIC-Beobachtungen der Zwerggalaxie Segue 1 wurde beispielsweise der thermische Wirkungsquer-

schnitt für Massen unterhalb 100 GeV bei Annihilation in τ -Leptonen ausgeschlossen (Abb. 4). Unser Wissen über die Dichte(-verteilung) Dunkler Materie in Zwerggalaxien ist noch mit großen Unsicherheiten behaftet, was die ermittelten Limits deutlich verschieben kann. Sollte aber in Zukunft ein Gammastrahlungssignal aus Richtung einer Zwerggalaxie detektiert werden, wäre das wegen der Untergrundfreiheit ein sehr starkes Indiz für den erfolgreichen Nachweis Dunkler Materie.

... und in der Sonne

Im Gravitationsfeld der Sonne werden WIMPs eingefangen und durch Stöße mit den Wasserstoffkernen der Sonne abgebremst. Dadurch können sie in den Sonnenkern absinken, was dort die Dichte von WIMPs erhöht und damit auch die Zahl der Annihilationen. Unter der Annahme, dass sich dadurch ein Gleichgewicht zwischen Einfang und Annihilation einstellt, können Neutrinoobservatorien über die Suche eines Annihilationssignals aus der Sonne den spinabhängigen Streuquerschnitt der WIMPs an Wasserstoffkernen testen. Die von ANTARES und IceCube indirekt bestimmten Grenzwerte von WIMP-Massen zwischen 10 GeV und 10 TeV gehören derzeit zu den besten. Sie sind komplementär zu den Ergebnissen direkter Suchen.

Hinweise durch Antimaterie

Unter den stabilen geladenen Teilchen sind hochenergetische Positronen und Antiprotonen als Botenteilchen besonders interessant, weil sie selten durch astrophysikalische Prozesse entstehen, gleichzeitig aber bei der Annihilation von WIMPs genauso häufig produziert werden sollten wie Elektronen bzw. Protonen. Allerdings lenkt das galaktische Magnetfeld diese geladenen Teilchen auf dem Weg zu uns ab, sodass sie nicht auf ihre Quellen zurückzeigen. Allein ein „zu häufiges“ Vorkommen könnte jedoch schon ein Hinweis auf Dunkle Materie sein.

Aktuelle Messungen mit dem Alpha Magnetic Spectrometer (AMS-02) auf der Internationalen Raumstation zeigen, dass das Energiespektrum kosmischer Antiprotonen weitgehend mit der Annahme verträglich ist, dass sich diese Teilchen in interstellaren Stößen hochenergetischer Protonen und Kerne bilden [7]. Bei Energien von 10 bis 20 GeV ist allerdings ein leichter Überschuss an Antiprotonen aufgetreten, der sich durchaus als WIMP-Signal interpretieren lässt [8]. Die statistischen und systematischen Unsicherheiten sind zurzeit noch zu groß, um von einer Entdeckung zu sprechen. Hier sind mehr Messdaten notwendig sowie ein besseres Verständnis, wie das variable Magnetfeld unserer Sonne den Fluss der Antiprotonen beeinflusst.

Bereits 2008 hat das PAMELA-Experiment gezeigt, dass in unserem Sonnensystem der Anteil von Positronen an der Gesamtheit von Elektronen und Positronen stark mit der Energie wächst [9]. Dieser Anstieg, den AMS mittlerweile bis zu Energien von mehreren 100 GeV sehr präzise vermessen hat [10], ist nur zu erklären, wenn es Quellen von Positronen in der Milchstraße gibt, die recht nahe an der Erde liegen. Lange wurde spekuliert, dass der Positronen-

überschuss auf nahe Pulsare zurückzuführen ist. Neuere HAWC-Beobachtungen weisen aber darauf hin, dass der Positronenanteil aus diesen Quellen an der Position der Erde klein gegenüber dem gemessenen Signal ist [11]. Dass Annihilationen von WIMPs die Quelle dieser Positronen sein könnten, ist auf jeden Fall noch nicht ausgeschlossen.

Fazit

Trotz langjähriger Suchen mit empfindlichen Instrumenten widersetzt sich die Dunkle Materie hartnäckig einem indirekten Nachweis, obwohl einige Grenzwerte unterhalb des thermischen Wirkungsquerschnitts liegen. Noch empfindlichere Messungen mit bestehenden und zukünftigen Instrumenten werden hoffentlich dazu beitragen, das Rätsel der Dunklen Materie zu lüften und – zusammen mit Experimenten zum direkten Nachweis und Untersuchungen an Beschleunigern – helfen, ihre Eigenschaften zu entschlüsseln.

Literatur

- [1] *M. Tanabashi et al.* (Particle Data Group), *Phys. Rev. D* **98**, 030001 (2018)
- [2] *M. Cirelli et al.*, *J. Cosm. Astrop. Phys.* **3**, 051 (2011)
- [3] *H. Abdalla et al.* (H.E.S.S. Coll.), *Astron. Astrophys.* **612**, A1 (2018)
- [4] *L. Goodenough und D. Hooper*, arXiv:0910.2998 (2009)
- [5] *K. N. Abazajian und M. Kaplinghat*, *Phys. Rev. D* **86**, 083511 (2012)
- [6] *H. Abdallah et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **117**, 111301 (2016); *M. L. Ahnen et al.* (MAGIC Coll.), *J. Cosm. Astrop. Phys.* **2**, 039 (2016); *A. U. Abeysekara et al.*, *J. Cosm. Astrop. Phys.* **2**, 049 (2018); *A. Albert et al.*, *Phys. Lett. B* **769**, 249 (2017); *M. G. Aartsen et al.*, *Eur. Phys. J. C* **76**, 531 (2016); *M. G. Aartsen et al.*, *Eur. Phys. J. C* **77**, 627 (2017)
- [7] *M. Aguilar et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **117**, 091103 (2016)
- [8] *A. Cuoco, M. Krämer und M. Korsmeier*, *Phys. Rev. Lett.* **118**, 191102 (2017); *I. Cholis, T. Linden und D. Hooper*, *Phys. Rev. D* **99**, 103026 (2019)
- [9] *O. Adriani et al.*, *Nature* **458**, 607 (2009)
- [10] *L. Accardo et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **113**, 121101 (2014)
- [11] *A. U. Abeysekara et al.*, *Science* **358**, 911 (2017)

Der Autor



Christopher van Eldik (FV Teilchenphysik) studierte Physik in Dortmund und promovierte dort 2004 über Proton-Kern-Wechselwirkungen am HERA-Speicherring (DESY, Hamburg). 2005 wechselte er zur Astroteilchenphysik und beschäftigt sich seit dieser Zeit mit Gammastrahlungsastrophysik. Seit 2011 ist er Professor für Experimentalphysik am Erlangen Centre

for Astroparticle Physics der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

Prof. Dr. Christopher van Eldik, Physikalisches Institut, Universität Erlangen-Nürnberg, Erwin-Rommel-Str. 1, 91058 Erlangen