

Dunkles Orakel zur Dunklen Materie

Im Rahmen der Satellitenmissionen PAMELA und Fermi wurden Energiespektren von Elektronen, Positronen, Antiprotonen und Gammastrahlung aus dem All gemessen. Die darin vermuteten Signale von Dunkler Materie ließen sich jedoch nicht zweifelsfrei nachweisen.

Von Georg Wolschin

Das Universum muss etwa fünfmal so viel unsichtbare, dunkle wie normale, leuchtende Materie enthalten. Das ergibt sich indirekt aus zahlreichen Beobachtungen, Messungen und Berechnungen. Die Teilchen der Dunklen Materie wurden allerdings trotz ihrer Häufigkeit bisher nicht entdeckt. Der Grund dafür ist, dass sie lediglich auf die Gravitation und sonst allenfalls noch auf die schwache Wechselwirkung ansprechen; gegenüber der starken und elektromagnetischen Kraft, die im Bereich gewöhnlicher Materie dominieren, sind sie dagegen unempfindlich. Physiker nennen sie deshalb *weakly interacting massive particles* (schwach wechselwirkende, massereiche Teilchen) oder kurz WIMPs. Ähnlich den allerdings fast masselosen

Neutrinos schwirren sie scharenweise wie Geister durchs All und durchdringen dabei auch unbemerkt die Erde und unsere Körper.

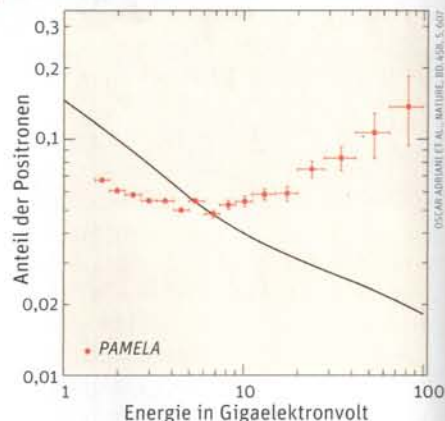
In den meisten theoretischen Modellen haben diese Teilchen die 100- bis 1000-fache Masse eines Protons. Als guter Kandidat gilt das leichteste der vier so genannten Neutralinos, welche in der supersymmetrischen Erweiterung des Standardmodells der Teilchenphysik auftreten.

Es gibt prinzipiell drei unterschiedliche Wege, die spukhaften WIMPs aufzuspüren. Am besten wäre es, sie direkt im Experiment zu erzeugen. Das wird mit hochenergetischen Proton-Proton-Kollisionen am Large Hadron Collider des europäischen Forschungszentrums CERN in Genf demnächst versucht.

Der zweite Weg ist der direkte Nachweis der Teilchen in abgeschirmten Untergrundlaboratorien. Dort hofft man sie an dem winzigen Rückstoß zu erkennen, den sie bei der Streuung an Atomkernen in hochempfindlichen Detektoren hervorrufen. Von den vielen internationalen Gruppen, die auf dieses Verfahren setzen, hat bisher allerdings nur eine (DAMA/LIBRA im italienischen Gran-Sasso-Laboratorium) positive Resultate veröffentlicht. Die können aber ohne unabhängige Bestätigung noch nicht als gesichert gelten.

Selbstvernichtung von »WIMPs«

Der dritte Weg zum Nachweis von WIMPs schließlich nutzt aus, dass Neutralinos ihre eigenen Antiteilchen sind und sich deshalb gegenseitig vernichten sollten, sobald zwei von ihnen zufällig zusammenstoßen. Detektoren im All – wie PAMELA und das Gammastrahlensatellitenteleskop Fermi – oder auf der Erde – wie das Tscherenkow-Detektor-



Die Zahl der Positronen, die bei der Wechselwirkung von kosmischer Strahlung mit interstellarer Materie entstehen, sollte zu hohen Energien hin abnehmen (schwarze Kurve). Die PAMELA-Messungen ergaben jedoch einen Anstieg (rote Punkte). Dieser kann von der Selbstvernichtung Dunkler Materie, aber auch von Pulsaren herrühren.

feld H.E.S.S. in Namibia – fahnden seit Kurzem nach den Produkten solcher Anihilationsereignisse. Dabei kann es sich neben Photonen vor allem um Elektronen und Protonen sowie deren Antiteilchen – Positronen und Antiprotonen – handeln, deren Energien in der Größenordnung der vermuteten WIMP-Masse liegen.

Dass solche Partikel wirklich von Dunkler Materie stammen, lässt sich jedoch nur schwer beweisen; denn bei genügend hohen Energien entstehen sie auch dann, wenn normale Teilchen – etwa aus der hochenergetischen kosmischen Strahlung – mit interstellarer Materie zusammenstoßen. Ein mögliches Unterscheidungsmerkmal ist aber, dass bei solchen konventionellen Prozessen die Häufigkeit von Elektronen und Positronen mit wachsender Energie gleichmäßig abnehmen sollte. Dagegen würde die WIMP-Selbstvernichtung für ein Maximum bei einer bestimmten Energie sorgen.

Inzwischen liegen erste Ergebnisse der Suche nach Signalen für die Anihilation von Dunkler Materie vor, und sie sind eher durchwachsen. So hat der Detektor PAMELA (*Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics*) der Europäischen Weltraumagentur ESA, der Mitte 2006 von dem russischen Satelliten Resurs DK1 ins All mitgenommen wurde, Elektronen und Positronen mit Energien im Bereich 1,5 bis 100 Mil-



Der PAMELA-Detektor befindet sich an der Außenseite des russischen Satelliten Resurs DK1. Er kann Antiteilchen wie etwa Positronen messen und sie von den entsprechenden Teilchen unterscheiden.

liarden Elektronvolt (GeV) aufgespürt (*Nature*, Bd. 458, S. 607) sowie das Verhältnis von Antiprotonen zu Protonen ermittelt (*Physical Review Letters*, Bd. 102, Artikel 051101).

In 500 Tagen Messzeit registrierte das Gerät etwa 1000 Antiprotonen, davon 100 mit mehr als 20 GeV. Bisher waren überhaupt nur zwei solche Teilchen mit derart hoher Energie in der kosmischen Strahlung entdeckt worden. Das erste Antiproton aus dem All entdeckten Astronomen 1979. Hauptquelle dieser Teilchen sind Stöße von Protonen der kosmischen Strahlung mit interstellarer Materie, vor allem Wasserstoff und Helium. Das für diesen Vorgang erwartete Verhältnis von Antiprotonen zu Protonen stimmt bei allen Energien sehr gut dem von PAMELA nachgewiesenen Wert überein. Ein Beitrag aus der Vernichtung von WIMPs zu den nachgewiesenen Antiprotonen ist demnach sehr unwahrscheinlich.

Hoffnung weckte dagegen zunächst das ermittelte Verhältnis von Positronen zu Elektronen. PAMELAs Magnetspektrometer kann die beiden Teilchen unterscheiden und so dieses Verhältnis als Funktion der Energie bestimmen. Zwar fällt die Messkurve bis etwa fünf GeV stark ab, was zu erwarten ist, wenn die Positronen bei normalen Partikelkollisionen entstehen. Jenseits von etwa zehn GeV steigt sie jedoch plötzlich stark an. Das verlangt nach einer anderen Erklärung – so etwa der Selbstvernichtung von WIMPs. Leider ist das nicht die einzige Möglichkeit: Die Positronen könnten auch von nahe gelegenen Quellen wie Pulsaren stammen.

Dabei handelt es sich um rotierende Neutronensterne, die wie kosmische Leuchttürme Radiopulse aussenden. Mit ihren extrem starken Magnetfeldern können sie Elektronen enorm beschleunigen. Die Folge ist eine elektromagnetische Kaskade, in deren Verlauf auch äußerst energiereiche Positronen erzeugt werden, die ins interstellare Medium entweichen. Da deren Reichweite gering ist, können sie nur von relativ nahe gelegenen Pulsaren zu uns gelangen.

Die bisherigen Messdaten von PAMELA reichen nicht aus, um zwischen beiden Möglichkeiten zu unterscheiden. Zusätzliche Hinweise erhoffen sich die Wissenschaftler deshalb vom Fermi-Satelliten, der im Juni 2008 gestartet wurde und in erster Linie kosmische Gam-

mastrahlung (Photonen) misst. Dabei registriert er Punktquellen wie Pulsare, die sich vorwiegend in der galaktischen Ebene befinden. Zusätzlich untersucht er das Spektrum der »diffusen« galaktischen Gammastrahlung, die aus allen Richtungen kommt.

Eine solche Messung hatte vor einigen Jahren schon der EGRET-Satellit vorgenommen – allerdings bei niedrigerer Energie und mit deutlich geringerer Präzision als Fermi. Die damaligen Daten zeigten einen höheren Fluss an kurzwelliger Gammastrahlung, als mit bekannten Prozessen erklärbar war (Spektrum der Wissenschaft 4/2006, S. 23). Als mögliche Quelle wurde Dunkle Materie vermutet, die demnach in zwei Ringen um das galaktische Zentrum der Milchstraße verteilt wäre. Bei ihrer Anihilation entstehen laut Theorie unter anderem Quark-Antiquark-Paare, aus denen neutrale Pionen hervorgehen, die wiederum in zwei Gammaquanten zerfallen. Die wesentlich genauere neue Messung hat das frühere EGRET-Resultat allerdings nicht bestätigt.

Zweimal falscher Alarm

Der Satellit Fermi weist hochenergetische Photonen dadurch nach, dass sie in den Wolframschichten seines Detektorsystems Elektron-Positron-Paare bilden; die Energie dieser Teilchenpaare wird dann in einem elektromagnetischen Kalorimeter gemessen und daraus die Energie der Lichtquanten bestimmt. Der Satellit kann deshalb prinzipiell auch direkt Elektronen und Positronen aus der kosmischen Strahlung messen, wenn auch nicht unterscheiden.

Dazu müssen nur einige Schwierigkeiten überwunden werden, was der Fermi-Kollaboration jedoch gelungen ist. Dadurch konnten die Forscher die bisher genaueste Messung des Elektronen- plus Positronenflusses zwischen 20 und 1000 GeV vornehmen (*Physical Review Letters*, Bd. 102, Artikel 181101). Sie zeigt jedoch gleichfalls keine Auffälligkeit, die auf Dunkle Materie hindeuten würde. Insbesondere fehlt ein Maximum im Bereich um 500 GeV, das kürzlich bei zwei Flügen des *Advanced Thin Ionization Calorimeter* (ATIC) mit einem Ballon am Südpol gefunden und als Hinweis auf die Selbstvernichtung von WIMPs interpretiert worden war.

Die Ergebnisse von Fermi passen zu den PAMELA-Daten und lassen sich



Der Satellit Fermi durchsucht das Universum nach hochenergetischer Gammastrahlung. Er kann aber auch Elektronen und Positronen messen, sie allerdings nicht unterscheiden.

durch konventionelle astrophysikalische Vorgänge erklären, die vor allem in Pulsaren ablaufen. Diese kosmischen Elektronenbeschleuniger liefern auch eine natürliche Erklärung für neue Messungen des kosmischen Elektronenspektrums mit dem Tscherenkow-Teleskopfeld H.E.S.S. in Namibia oberhalb einer Energie von 340 GeV (*arXiv:0905.0105*). Das von ATIC entdeckte Maximum fehlt hier ebenfalls. Die Daten von H.E.S.S. und Fermi stimmen in dem Energiebereich, in dem beide messen können, sehr gut überein.

Auf eindeutige Signale der Dunklen Materie werden wir also noch warten müssen; die eher prosaischen astrophysikalischen Interpretationen der Daten erscheinen den Experten bisher überzeugender. Doch die Untersuchungen gehen weiter. Fermi wird in den kommenden Jahren gut und gern die zehnfache Datenmenge über Elektronen und Positronen auch bei noch höheren Energien, bis 300 GeV, sammeln und PAMELA mit weiteren Messungen die statistische Aussagekraft ihrer Ergebnisse verbessern. Mittlerweile ist auch der Vorschlag der Kollaboration »Alpha Magnetic Spectrometer« (AMS) genehmigt, ein Spektrometer zum Nachweis von Antimaterie auf der Internationalen Weltraumstation mitfliegen zu lassen. Mit dieser Flut an Daten könnte es schließlich doch noch gelingen, die Dunkle-Materie-Hypothese zu bestätigen oder zu widerlegen.

Georg Wolschin lehrt an der Universität Heidelberg theoretische Physik.