

Gammastrahlen enthüllen Dunkle Materie

Die Verteilung der bisher nicht direkt nachweisbaren Dunklen Materie in unserer Galaxis ist kürzlich anhand von Gammastrahlen rekonstruiert worden, die bei ihrer Vernichtung entstehen. Sie waren mit einem Teleskop auf einem Satelliten der Nasa gemessen worden.

Von Georg Wolschin

Die Entschlüsselung Dunkler Materie ist ein wesentliches Ziel moderner theoretischer und experimenteller physikalischer Forschung. Aus einer Vielzahl von Messungen der Bewegungen in Galaxien und Galaxienhaufen, aus der Statistik des Gravitationslinseneffekts, Untersuchungen der Strukturbildung im Weltall oder den Anisotropien der kosmischen Hintergrundstrahlung (siehe Spektrum der Wissenschaft Heft 5, Seite 8, 2003) schliesst man indirekt auf die Existenz Dunkler Materie.

Der Schweizer Astronom Fritz Zwicky hatte sie in den 1930er Jahren erstmals anhand der Galaxienbewegungen im Coma-Cluster postuliert. Sie trägt bis zu einem Viertel zur Energiedichte des Universums bei, aber man kennt ihre physikalische Natur und Zusammensetzung bisher nicht. Bekannt sind heute nur die etwa fünf Prozent baryonischer (gewöhnlicher) Materie, welche direkten Beobachtungen und Messungen zugänglich sind. Nach dem in der heutigen Forschung weitgehend akzeptierten Paradigma ist der fehlende Teil der Energiedichte von mehr als 70 Prozent der sogenannten Dunklen Energie zuzuschreiben, die homogen im Weltall verteilt ist – allerdings ist die Evidenz dafür keineswegs so gut gesichert wie im Fall der weitgehend in Galaxien lokalisierten Dunklen Materie.

Die Lokalisierung bedeutet auch, dass sich die Teilchen der Dunklen Materie mit Geschwindigkeiten deutlich unterhalb der Lichtgeschwindigkeit bewegen. Man spricht deshalb von "nichtrelativistischen" Teilchen, die eine vergleichsweise große Ruhemasse haben, ungeladen sind und nur schwach wechselwirken. Würden sie auch stark oder elektromagnetisch wechselwirken, hätte man sie längst direkt nachgewiesen.

Für solche schwach wechselwirkenden massiven Teilchen, oft WIMPs genannt (für "Weakly interacting massive particles") gibt es zahlreiche

theoretische Vorhersagen. Beispielsweise postuliert man ((im Rahmen einer sogenannten supersymmetrischen Erweiterung des Standardmodells der Teilchenphysik, s.u.)), dass es ein stabiles neutrales Teilchen – das Neutralino – geben muss, aus dem wesentliche Anteile der Dunklen Materie bestehen könnten. Auch eine Erweiterung der Quantenchromodynamik, welche die Kräfte zwischen den Quarks beschreibt, sagt die Existenz eines sehr leichten Teilchens voraus (das Axion), welches ebenfalls als ein Kandidat für Dunkle Materie gilt.

Bisher waren alle Versuche, solche Teilchen mit speziell dafür entwickelten Detektoren ((wie CRESST oder CAST)) nachzuweisen, nicht erfolgreich, werden jedoch mit noch empfindlicheren Nachweisgeräten fortgesetzt. Vielleicht ist es aussichtsreicher, WIMPs am 2007 in Betrieb gehenden Hadronencollider LHC (Large Hadron Collider) am Cern in Genf künstlich zu erzeugen und nachzuweisen – aber heute ist noch offen, ob das gelingt.

Im Universum sollte die Anzahldichte der WIMPs ungefähr von derselben Größenordnung wie die der Baryonen sein – also derjenigen Teilchen, aus denen normale Materie besteht. Deren Anzahl ist seit der Entstehung des Universums durch gegenseitige Vernichtung von Teilchen und Antiteilchen um zehn Größenordnungen reduziert worden – übrig geblieben sind die stabilen Teilchen, aus denen unsere Welt besteht.

In ähnlicher Weise sollten auch die Teilchen der Dunklen Materie im frühen Universum im thermischen Gleichgewicht mit allen anderen Teilchen erzeugt – und ihre Anzahldichte im Laufe der weiteren Entwicklung des Weltalls durch gegenseitige Vernichtung von Teilchen und Antiteilchen stark reduziert worden sein. Bei ihrer Vernichtung erzeugen WIMPs monoenergetische Quarkpaare, deren Energie der WIMP_Masse entspricht. Sie bilden vor allem neutrale Pionen mit einer mittleren Lebensdauer von $8 \cdot 10^{-17}$ Sekunden, und zerfallen dann bevorzugt ((98,8% Wahrscheinlichkeit)) in zwei Gammaquanten. Von galaktischen Magnetfeldern werden Gammastrahlen nicht abgelenkt, und auch andere Wechselwirkungen spielen keine große Rolle, so dass sich mit Hilfe dieser Strahlung die Verteilung der Dunklen Materie im Halo unserer Galaxis rekonstruieren lassen sollte, weil sie zurück zur Quelle weisen.

Jetzt gibt es die ersten überzeugenden Anzeichen für einen Nachweis Dunkler Materie in unserer Galaxis aus der Analyse eines Überschusses an Gammastrahlen, der mit dem Gammastrahlen-Teleskop EGRET (Energetic Gamma Ray Emission Telescope) auf dem Compton-Satelliten der NASA von S.D. Hunter und Mitarbeitern bereits im Jahre 1997 festgestellt worden war. Dieses Teleskop sammelte von 1991 bis 2000

Daten, aber eine Analyse im Hinblick auf einen möglichen Nachweis der Dunklen Materie wurde erst jetzt abgeschlossen.

Entscheidend ist dabei die Abtrennung des Gammastrahlsignals aus der Vernichtung von DM-Teilchen vom Untergrund, der überwiegend ebenfalls aus dem Zerfall von neutralen Pionen herrührt (Bild 3, gelb). Sie werden allerdings auf anderem Weg erzeugt, nämlich bei der inelastischen Streuung kosmischer Strahlung (meistens sind das Protonen) an Gasatomen ((genauer: den Kernen von Gasatomen)) in der galaktischen Scheibe. Dieser Untergrundanteil des Gamma-Spektrums lässt sich aus dem bekannten Energiespektrum der kosmischen Strahlung berechnen, mit dem in Bild 3 dargestellten Ergebnis.

Wie von der EGRET-Kollaboration bereits 1997 detailliert dargestellt, wird bei hohen Energien von mehr als einer Milliarde Elektronenvolt mehr als doppelt soviel Gammastrahlen-Fluss gemessen, wie vom Untergrund aus der kosmischen Strahlung her erwartet wird. Kürzlich wurde nun an der Universität Karlsruhe von einer Arbeitsgruppe um Wim de Boer gezeigt, dass der gemessene "Überschuss" an Gammastrahlung auf die Annihilation der Dunklen Materie zurückzuführen ist (roter Bereich in Bild 3; *Astronomy and Astrophysics*, 444 (2005) 51). Bei Kenntnis der Verteilung von sichtbarer und Dunkler Materie (Bild 2) lässt sich dann die gemessene Rotationskurve der Galaxis korrekt wiedergeben, d.h. die gemessene Rotationsgeschwindigkeit als Funktion des Abstandes vom Zentrum der Galaxis (Bild 1).

Der Überschuss an Gammastrahlung wurde in 180 verschiedenen Himmelsrichtungen beobachtet. Seine statistische Signifikanz beträgt mehr als 10 Standardabweichungen – es kann sich hier sicher nicht um statistische Fluktuationen handeln. In jeder Richtung liessen sich die Daten mit einer WIMP-Masse von 60 Milliarden Elektronenvolt ausgezeichnet – mit ähnlicher Qualität wie in Bild 3 – reproduzieren. Es sind jedoch auch Anpassungen der Daten mit WIMP-Massen zwischen 50 und 100 Milliarden Elektronenvolt möglich. Mit Modellen ohne Dunkle Materie lässt sich die spezielle Gestalt der Rotationskurve nicht erklären.

Die anhand des Gammaüberschusses mögliche Rekonstruktion der Verteilung Dunkler Materie in der Milchstraße ergibt ein sehr erstaunliches Ergebnis: in der galaktischen Ebene gibt es zwei Ringe mit Abständen von vier und 14 Kiloparsek vom Zentrum – unser Sonnensystem liegt mit einem Abstand von acht Kiloparsek vom Zentrum also genau in der Mitte zwischen diesen beiden Ringen aus Dunkler Materie (gelber Kreis im Bild).

Die Gravitationsanziehung vom galaktischen Zentrum auf Sterne innerhalb des äußeren Rings ist als Folge der Anziehungskraft des äußeren Rings reduziert, und Sterne mit hohen Umlaufgeschwindigkeiten verlassen dadurch in dieser Region ihre Bahnen. Die Folge ist an dieser Stelle ein Minimum in der Rotationskurve, wie es in der Tat gemessen wird (Bild 1). Da sich ausserhalb des Rings die Gravitationskräfte vom Zentrum und vom Ring addieren, ergibt sich dort das gemessene Maximum.

Die äußere Ringstruktur ist möglicherweise auf eine Zwerggalaxie zurückzuführen, von der Milchstrasse eingefangen wurde – diese Hypothese wird jedenfalls unterstützt durch die Entdeckung von hunderten Millionen sehr alter Sterne in dieser Region, die nicht originärer Teil der galaktischen Scheibe sein können, da sie große senkrechte Abstände zur Scheibe haben ((und ihre Geschwindigkeitsdispersion gering ist)).

Lage und Gestalt des inneren Rings fallen mit einem ((direkt nachweisbaren)) Ring aus molekularem Wasserstoff zusammen. Da sich solche Moleküle aus atomarem Wasserstoff in der Gegenwart von Staub oder schweren Sternen bilden, legt dies die Existenz eines attraktiven Gravitationspotentials in dieser Region nahe, in dem sich genügend Staub ansammeln kann – wie es durch die Ansammlung Dunkler Materie erklärt werden kann. Der Beitrag des inneren Rings zur Rotationskurve ist in Bild 1 ebenfalls deutlich.

Der hier geschilderte, noch immer indirekte Nachweis der Verteilung Dunkler Materie in unserer Galaxis beruht wesentlich auf der Annahme, dass die Vernichtung von DM-Teilchen energiereiche ((harte)) Gammastrahlung erzeugt. Ansonsten werden keine weiteren Annahmen über die Natur der Dunklen Materie gemacht. Die bisher plausibelsten WIMP-Kandidaten sind Ergebnis der sogenannten Supersymmetrie, in der die im Standardmodell bisher vorhandene Zahl an elementaren Teilchen verdoppelt wird: Zu jedem Boson (Teilchen mit ganzzahligem Spin) kommt als “Superpartner” ein Fermion (Teilchen mit gebrochenzahligem Spin), und umgekehrt.

Bis heute wurde keiner dieser Superpartner der uns bekannten Elementarteilchen gefunden – dennoch ist das vergleichsweise leichte Neutralino eines der plausibelsten Kandidaten für Dunkle Materie. Es bleibt zu hoffen, dass es sich in den teilchenphysikalischen Experimenten nachweisen lässt, die 2007 am LHC in Genf beginnen werden. Zunächst legt jedoch die jetzige Interpretation des EGRET-Gammaüberschusses den Schluss nahe, dass die Dunkle Materie zumindest im Gammalicht wesentlich besser “sichtbar” ist als noch vor kurzem vermutet.

Bildvorschläge zu: Gammastrahlen enthüllen Dunkle Materie, SdW 3 (2006)

Alle Bilder aus: W. de Boer et al., *Astronomie and Astrophysics* 444 (2005) 51

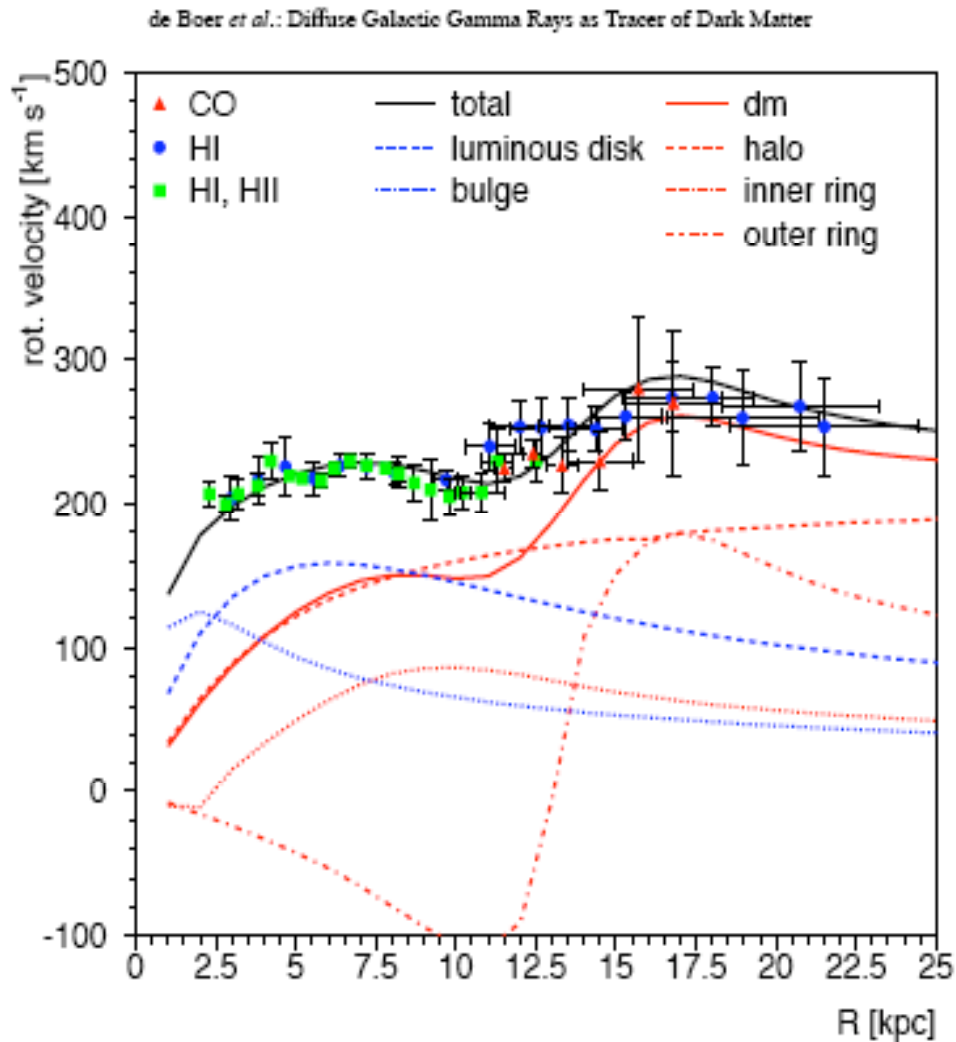


Bild 1: Rotationskurve unserer Galaxis. Bei großen Abständen vom Zentrum überwiegt der Beitrag von Dunkler Materie (rot). Der Anteil von der leuchtenden Scheibe aus baryonischer Materie (blau gestrichelt) fällt zu großen Abständen hin ab. Die Anteile der Dunklen Materie sind aus Gammastrahlen-Daten vom EGRET-Satelliten ermittelt worden.

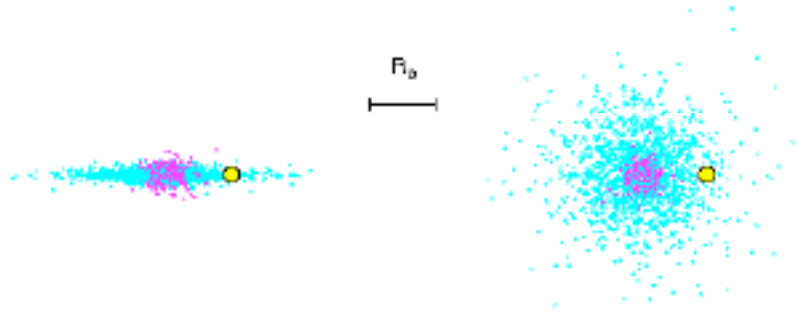
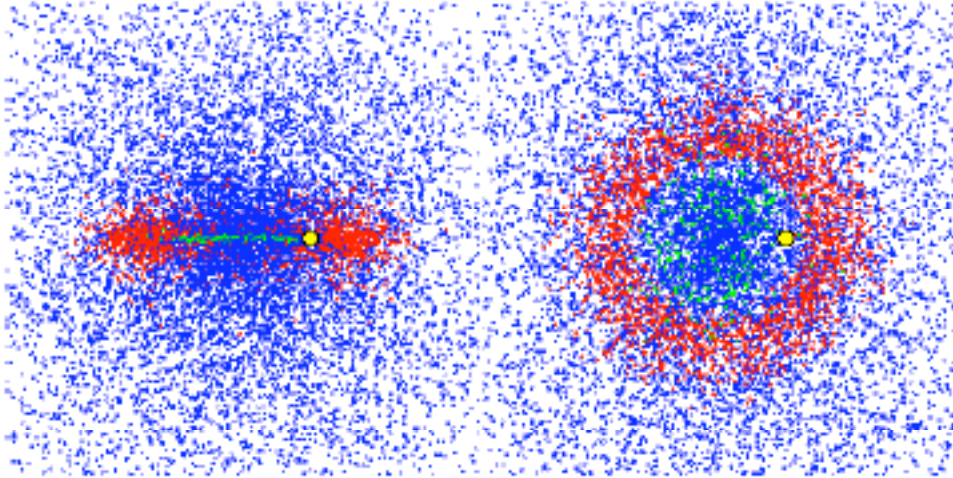


Bild 2: Visualisierung von Dunkler Materie (oben) und normaler “baryonischer” Materie (unten) in unserer Galaxis im Querschnitt (links) und in der Draufsicht (rechts). Die Position der Sonne ist jeweils gelb markiert.

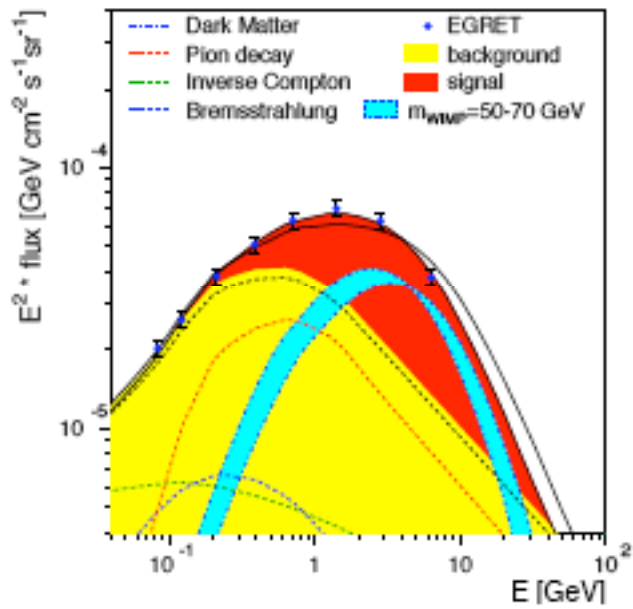
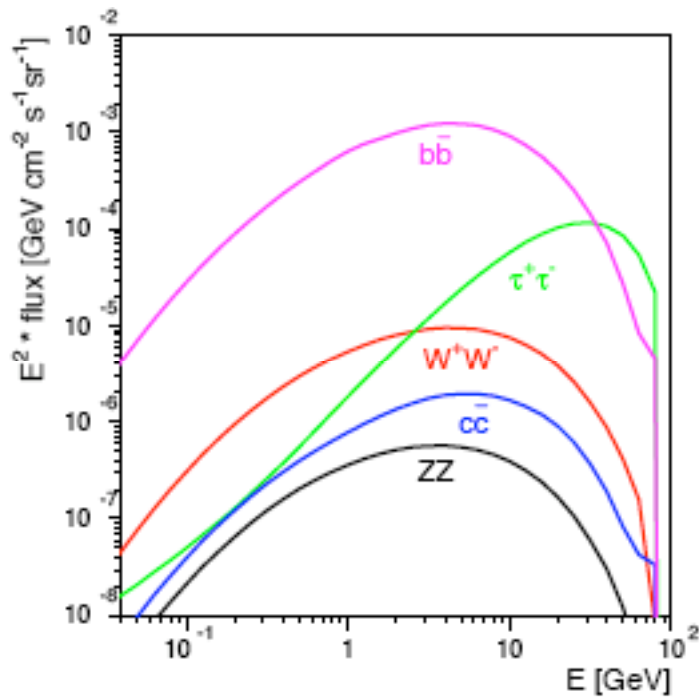


Bild 3: Spektrum des vom EGRET-Satelliten gemessenen Gammastrahlen-Flusses im Vergleich mit dem Gammahintergrund (gelb), und dem Signal, das auf die Zerstrahlung von Dunkler Materie zurückgeführt wird. Die blaue Region entspricht Gammastrahlen von WIMPs mit Massen zwischen 50 und 70 Milliarden Elektronenvolt.



((Bild 4: Erwartetes Gammastrahlen-Spektrum aus der Vernichtung von WIMPS (Weakly Interacting Massive Particles) in b-Quarks, tau-Leptonen, W-Bosonen, c-Quarks, und Z-Bosonen. – sollte entfallen, da fuer den Beitrag zu speziell))