

ASTROPHYSIK

Das Geheimnis der Dunklen Materie

Die Jagd nach Teilchen der Dunklen Materie kommt in ihre bisher spannendste Phase.

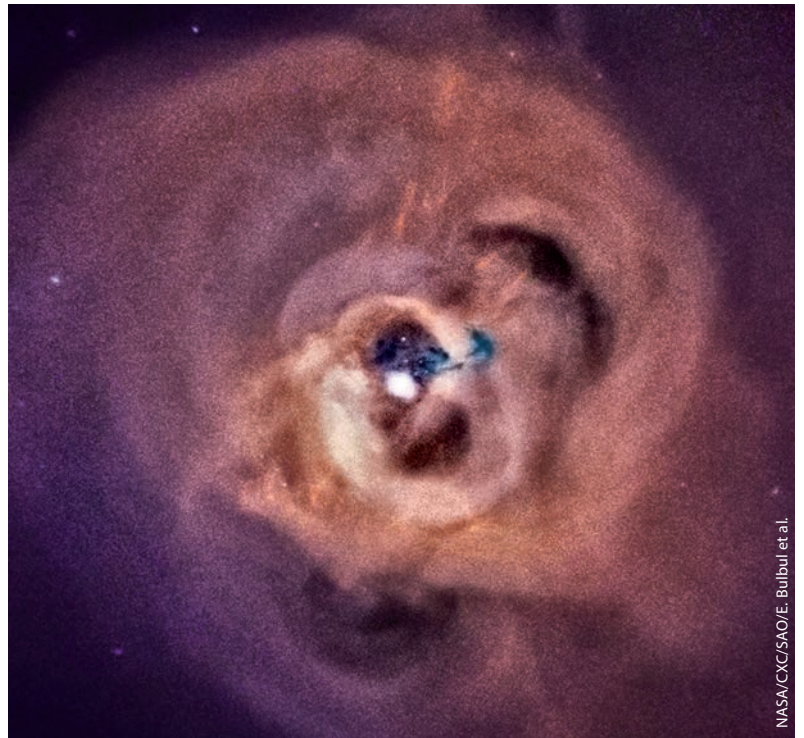
Rafael Lang

Zahlreiche kosmologische und astrophysikalische Beobachtungen legen die Existenz großer Mengen an Dunkler Materie nahe. Allerdings ist deren Natur noch gänzlich unbekannt. Völlig unterschiedliche Experimente versuchen, den Teilchen der Dunklen Materie auf die Schliche zu kommen. Einige von ihnen werden in den kommenden Monaten oder Jahren die vielversprechendsten Teilchenmodelle überprüfen.

Beim Blick an das nächtliche Firmament drängt sich die Frage auf: Welche Geheimnisse birgt das Universum? Dass es nicht nur leuchtende, sondern auch *dunkle* Materie beinhaltet, ist in der Astronomie schon lange klar. Jacobus Kapteyn verwendete bereits 1922 den Begriff der Dunklen Materie und bezeichnete damit Masse, deren Existenz lediglich aus Beobachtungen der Kinematik von Himmelskörpern abgeleitet wird [1]. Heute bezeichnet der Begriff im engeren Sinne *nichtbaryonische* Materie, also solche, die nicht aus Quarks aufgebaut ist. Da sie nicht an der elektromagnetischen Wechselwirkung teilnimmt, sollte sie besser *transparente* Materie heißen, aber der eingebürgerte Name ist für diese Spitzfindigkeit wohl zu populär.

Verschiedene kosmologische Beobachtungen deuten auf Unmengen Dunkler Materie hin [2]. In der primordialen Nukleosynthese – zwischen 3 und 15 Minuten nach dem Urknall – fanden sich in guter Näherung alle Neutronen mit Protonen zu stabilen ^4He -Kernen zusammen. Die restlichen Protonen bildeten den Wasserstoff, der das sichtbare Universum beherrscht. Andere Elemente waren stark unterdrückt, bieten aber eine empfindliche Methode, um die baryonische Dichte des Universums Ω_b zum Zeitpunkt der Nukleosynthese zu bestimmen [3]. War zum Beispiel die Dichte des Universums niedriger, so verpassten mehr einzelne Deuterium-Kerne die Fusion zum stabilen ^4He und blieben übrig. Aus Messungen dieses primordialen Deuteriums lässt sich daher berechnen, dass die Baryonen zur durchschnittlichen Gesamtdichte unseres Universums von $8 \times 10^{-27} \text{ kg/m}^3$ (das entspricht etwa fünf Wasserstoff-Atomen pro Kubikmeter) nur $\Omega_b = (5,0 \pm 0,4)\%$ beitragen. Schon wenige Minuten nach dem Urknall zeigt sich demnach, dass nur wenige Prozent des Universums aus bekannter Materie bestehen.

380 000 Jahre später hatte sich das Universum so weit abgekühlt, dass sich Elektronen und Kerne zu neutralen Atomen verbinden konnten, ohne gleich wie-



der ionisiert zu werden. Damit wurde das Universum für Photonen transparent. Die zu diesem Zeitpunkt ausgesandten Photonen sehen wir heute, stark gekühlt in den Mikrowellenbereich verschoben, als kosmische Hintergrundstrahlung. Sie ist in exzellenter Näherung isotrop und homogen, aber Präzisionsbeobachtungen machen winzige Temperaturschwankungen in der Größenordnung von nur 10^{-5} sichtbar (Abb. 1). Diese haben ihren Ursprung in Dichteschwankungen im frühen Universum: Je nach Stärke des Gravitationspotentials

Das Röntgenspektrum des Perseus-Haufens enthält eine Spektrallinie, die von Dunkler Materie herrühren könnte.

KOMPAKT

- Kosmologische und astrophysikalische Beobachtungen auf allen Größen- und Zeitskalen lassen sich mithilfe der Dunklen Materie schlüssig erklären.
- Verschiedene noch hypothetische Teilchen werden als Bausteine der Dunklen Materie diskutiert. Weakly Interacting Massive Particles (WIMPs), Axionen und sterile Neutrinos sind die zurzeit populärsten Kandidaten.
- Weltweit sind Wissenschaftlerteams auf der Suche nach solchen Teilchen, mit Satelliten- und Teleskopbeobachtungen, Beschleunigerexperimenten und speziellen Detektoren tief unter der Erde.

Prof. Dr. Rafael F. Lang, Department of Physics and Astronomy, Purdue University, West Lafayette, Indiana 47907, USA

haben die Photonen der Hintergrundstrahlung etwas mehr oder weniger Energie, also eine etwas höhere oder niedrigere Temperatur (Sachs-Wolfe-Effekt). Um diese Dichteschwankungen quantitativ zu analysieren, wird aus der Himmelskarte ein Leistungsspektrum berechnet. Hierzu wird die Karte in eine Reihe aus Kugelflächenfunktionen entwickelt, aus deren Koeffizienten sich das Leistungsspektrum ableitet (Abb. 1). Die dort gezeigten Schwankungen entsprechen den akustischen Schwingungen: Während die Schwerkraft Materie jeder Art zusammenklumpt, erfährt baryonische Materie eine entgegengesetzte Kraft aus dem Strahlungsdruck der Photonen. Wie immer, wenn sich zwei Kräfte gegenüberstehen, resultiert eine Schwingung mit einer charakteristischen Frequenz. Insbesondere aus der unterschiedlichen Höhe des ersten und dritten Peaks im Leistungsspektrum lässt sich die baryonische Dichte des Universums zu $\Omega_b = (4,9 \pm 0,1)\%$ berechnen. Um jedoch die Stärke der Peaks zu erklären, benötigt dieser Datensatz zusätzliche Materie, die zwar gravitativ klumpt, aber nicht mit dem Photonenbad wechselwirkt. Die Dichte dieser Dunklen Materie beträgt $\Omega_{DM} = (26,6 \pm 0,7)\%$ – rund fünfmal mehr als die bekannte baryonische Materie. Die restlichen $\Omega_\Lambda = (68,6 \pm 2,0)\%$ werden der Dunklen Energie zugeschrieben.

Ein dritter Hinweis auf die Dunkle Materie folgt aus der weiteren Entwicklung des Universums. Aus den winzigen Dichteschwankungen, die in der kosmischen Hintergrundstrahlung zu sehen sind, mussten innerhalb von wenigen Milliarden Jahren die enormen Strukturen entstehen, die wir heute beobachten, und das trotz der gleichzeitigen Ausdehnung des Universums. Wie aufwändige Simulationen an Supercomputern zeigen (siehe Titelbild dieses Hefts), reicht hierfür die baryonische Materie nicht aus. Erst die zusätzliche Schwerkraft großer Mengen an Dunkler Materie kann die Strukturentwicklung erklären. Zudem muss die Dunkle Materie nicht-relativistisch („kalt“) sein: Schnelle („heiße“) Dunkle Materie würde Strukturen auswaschen und die Strukturentwicklung behindern, anstatt dabei zu helfen.

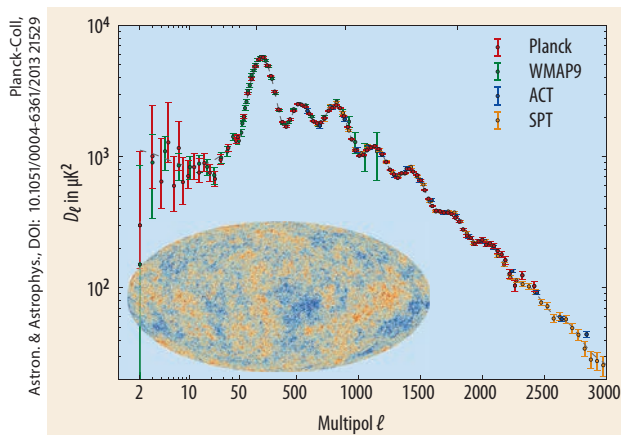


Abb. 1 Winzige Schwankungen in der kosmischen Hintergrundstrahlung (Inset) lassen sich mithilfe des Leistungsspektrums quantitativ auswerten. Auf der x-Achse sind die Multipole ℓ aufgetragen – je größer ℓ , desto kleinere Bereiche am Himmel werden aufgelöst.

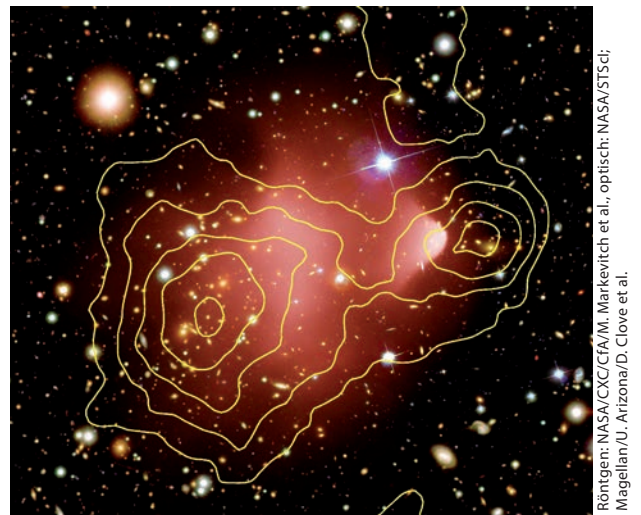


Abb. 2 Die Galaxien der Bullet-Haufen sind in dieser Hubble-Aufnahme in gelb/weiß gezeigt. Die meisten Baryonen befinden sich im Intracluster-Medium und leuchten im Röntgenlicht (Chandra-Aufnahme in rot). Dieses Gas wurde durch die Kollision komprimiert und abgebremst. Das zeigt sich an der namensgebenden „Bugwelle“ des rechten Haufens. Das Gravitationspotential der beiden Haufen wird von der Dunklen Materie dominiert (als Konturlinien gezeigt). Sie wechselwirkt nicht und hat sich daher (wie die Galaxien) von dem Röntgengas entfernt.

Astrophysik der Dunklen Materie

Auch viele astrophysikalische Beobachtungen weisen auf die Existenz der Dunklen Materie hin. Einen der frühesten Hinweise fand Fritz Zwicky im Coma-Galaxienhaufen mithilfe des Virialsatzes [4]: Ist ein System gravitativ gebunden, so kann seine kinetische Energie höchstens der Hälfte seines Gravitationspotentials entsprechen, da das System sonst auseinanderbrechen würde. Aus Beobachtungen der Geschwindigkeit einzelner Galaxien im Coma-Haufen konnte Zwicky deshalb auf dessen Gravitationspotential schließen. Dieses muss allerdings rund zehnmal so groß sein als aufgrund der beobachteten Materie erwartet.

Eine unabhängige Bestätigung dieses Sachverhaltes folgt auch aus der Analyse von Gravitationslinsen an Galaxienhaufen. Hierbei wird das Licht von Objekten, die hinter dem Haufen liegen, durch das Gravitationspotential des Haufens abgelenkt und verzerrt. Aus den beobachteten Verzerrungen der Hintergrundobjekte lässt sich also auf das Gravitationspotential des Galaxienhaufens schließen. Auch hier zeigt sich: Die Gravitationslinsen sind sehr viel stärker ausgeprägt als aufgrund der sichtbaren Materie erwartet, rund zehnmal mehr Materie bleibt unsichtbar. Dabei wird durchaus berücksichtigt, dass Galaxienhaufen weit mehr baryonische Materie enthalten, als im optischen Licht sichtbar ist. Konkret dominiert das Intracluster-Medium die baryonische Materie in Galaxienhaufen. Dieses Gas ist aufgrund des Gravitationspotentials so heiß, dass es im Röntgenlicht leuchtet. Es ist daher nicht dunkel im eigentlichen Sinne und lässt sich leicht der bekannten Materie zurechnen.

Ein besonders interessantes Studienobjekt sind Galaxienhaufen, die sich in der Vergangenheit gegenseitig

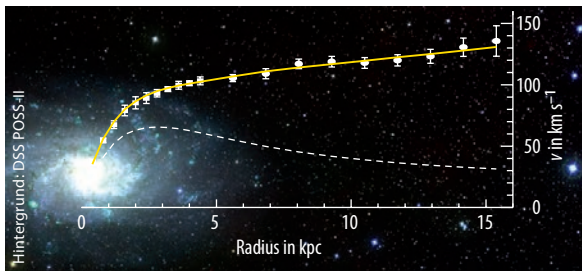


Abb. 3 Wie hier am Beispiel unserer Nachbargalaxie M33 gezeigt (Aufnahme von DSS), nehmen die Rotationsgeschwindigkeiten in Spiralgalaxien nicht wie nach dem Keplerschen Gesetz erwartet mit der Wurzel der Entfernung ab (weiß gestrichelt), sondern bleiben näherungsweise konstant. Ein zusätzlicher isothermaler Halo aus Dunkler Materie erklärt diese Beobachtung (gelbe Linie) [5].

durchdrungen haben. Das wohl bekannteste Beispiel sind die 2003 entdeckten Bullet-Haufen (**Abb. 2**). In Kollisionen von Galaxienhaufen durchdringen sich die Galaxien selbst ungehindert, da sie als Punktteilchen aufgefasst werden können. Im Gegensatz dazu ist das Intracluster-Medium ein diffuses Gas, das durch die Kollision komprimiert und abgebremst wird. Gravitationslinsen erlauben es, die Materieverteilung in den Galaxienhaufen (Konturlinien in **Abb. 2**) zu vermessen. Das Beispiel der Bullet-Haufen zeigt, dass die meiste Masse nicht dort ist, wo das Intracluster-Medium leuchtet, sondern sich stattdessen seit der Kollision schon weiterbewegt hat. Die Dunkle Materie durchdringt sich also ohne nennenswerte Wechselwirkung.

Heute sind bereits über ein Dutzend solcher Systeme bekannt. Anhand dieser untersucht man, ob zwischen dem Schwerpunkt der Galaxien (von einer optischen Aufnahme) und dem Schwerpunkt der Masse (von Gravitationslinsen) ein Unterschied besteht. Sollte die Dunkle Materie Wechselwirkungen zeigen, könnte dies zu ihrer Verlangsamung führen und damit zu einem messbaren Abstand der beiden Schwerpunkte. Bisher war es allerdings nur möglich, obere Schranken im Bereich von $\sigma/m \leq 10^{-24} \text{ cm}^2/(\text{GeV}/c^2)$ für die Streuquerschnitte der Dunklen Materie zu berechnen.

Als letztes Beispiel seien die Rotationskurven von Galaxien angeführt. Gemäß den Keplerschen Gesetzen sollte die Rotationsgeschwindigkeit eines Planeten bei der Bewegung um die Sonne mit der Wurzel der Entfernung abfallen. Selbstverständlich sollte das auch für die Drehbewegung in Spiralgalaxien gelten. Beobachtungen der Rotationskurven von Galaxien, zumeist im Radiobereich durchgeführt, ergeben jedoch ein gänzlich anderes Bild: Die Rotationskurven sind auch bis in die äußersten Gebiete näherungsweise flach (**Abb. 3**). Um die Galaxien trotz dieser erhöhten Fliehkräfte zusammenzuhalten, sind deutlich stärkere Kräfte nötig, als aufgrund der baryonischen Materie zu erwarten sind. Auch diese Beobachtung lässt sich durch die Existenz von Dunkler Materie schlüssig erklären. Ein einfacher sphärischer Halo im thermischen Gleichgewicht (ein isothermaler Halo) hat eine Massenverteilung, die linear mit dem Radius anwächst, und sorgt so für die konstante Rotationskurve. Aus Messungen der (eben-

falls flachen) Rotationskurve der Milchstraße sowie weiterer astronomischer Beobachtungen folgt, dass in Erdnähe mit einer Dichte an Dunkler Materie von $(8 \pm 3)M_{\text{Jupiter}}/pc^3 = (0,3 \pm 0,1)(\text{GeV}/c^2)/\text{cm}^3$ auszugehen ist [6]. Damit ergibt sich insbesondere die Möglichkeit, auch in Laborexperimenten auf der Erde nach dieser Dunklen Materie suchen zu können.

Die Suche nach Dunklen Teilchen

Wie diese kleine Auswahl an Beobachtungen zeigt, finden sich Hinweise auf die Dunkle Materie in fast allen Epochen und auf Größenskalen vom Kosmos als Ganzem bis zu Galaxien. Die wenigen alternativen Ansätze zur Dunklen Materie sind längst nicht so elegant und erfolgreich [7]. Damit stellt sich die dringende Frage: Was sind die Quanten der Dunklen Materie?

Die aktuellen Experimente lassen sich im Wesentlichen dem Nachweis drei verschiedener Teilchenkandidaten zuordnen: Axionen und ähnlichen leichten Teilchen, sterilen Neutrinos und WIMPs [2]. Diese werden im Folgenden kurz und mit den wichtigsten experimentellen Forschungsvorhaben vorgestellt.

Axionen

Die auf Roberto Peccei und Helen Quinn 1977 zurückgehenden (und von Frank Wilczek nach einem Waschmittel benannten) Axionen sind hypothetische Teilchen, die das starke CP-Problem elegant lösen [8]: Die CP-Symmetrie besagt, dass die Physik identisch ist, wenn man Teilchen durch Antiteilchen ersetzt und gleichzeitig die Koordinaten am Ursprung spiegelt.

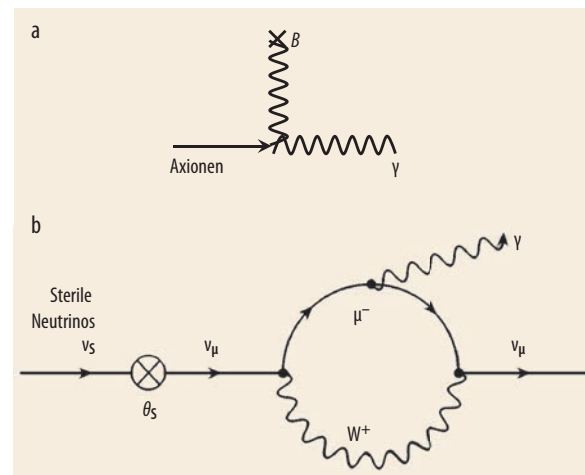


Abb. 4 Axionen (a) lassen sich über den in diesem Feynman-Graphen dargestellten Primakov-Effekt nachweisen: Ein Axion wechselwirkt mit einem (virtuellen) Photon, zum Beispiel aus einem starken Magnetfeld B . Das entstehende Photon γ entspricht der Masse des Axions. Sterile Neutrinos ν_s (b) können sich über einen Mischungswinkel θ_s in gewöhnliche Neutrinos umwandeln, deren Nachweis dann möglich ist. Im hier gezeigten Beispiel erzeugt ein Muon-Neutrino ν_μ ein Vakuum-Paar aus Muon μ^- und W-Boson W^+ . Diese virtuellen Teilchenpaare können nun Photonen abstrahlen, bevor sie sich wieder zum Neutrino vereinigen. Die Energie dieses Photons entspricht dabei der halben Masse des sterilen Neutrinos.

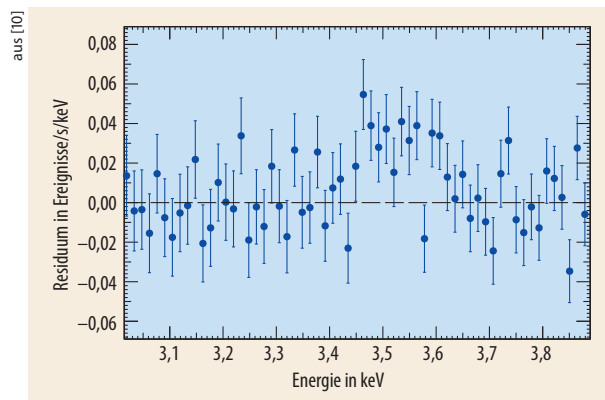


Abb. 5 Im Perseushaufen wurde Anfang 2014 diese Spektrallinie im Röntgenbereich bei etwa 3,5 keV gefunden. Sie könnte von Dunkler Materie stammen.

Die Lagrange-Funktion der Quantenchromodynamik (QCD) enthält nun einen Term, der diese CP-Symmetrie verletzt. Das wäre zunächst nicht besorgniserregend, ist doch eine kleine CP-Verletzung auch von der schwachen Wechselwirkung her bekannt. Allerdings wurde die CP-Verletzung in der QCD experimentell noch nicht gefunden und kann daher höchstens sehr klein sein. Peccei und Quinn erklärten dies dadurch, dass ein neu eingeführtes Quantenfeld den CP-verletzenden Term aufhebt; Axionen sind die Quanten dieses Feldes.

Abhängig von ihrer Masse und davon, wie sie im frühen Universum produziert wurden, könnten Axionen einen Teil der Dunklen Materie ausmachen. Das ADMX-Experiment an der Washington-Universität in Seattle sucht nach solchen Teilchen in einem Mikrowellen-Hohlraumresonator [9]. Ein starkes Magnetfeld von bis zu 8 T stellt (virtuelle) Photonen bereit, an denen sich die Axionen durch den Primakov-Effekt in (reelle) Photonen umwandeln können (Abb. 4a). Die schmale Resonanzfrequenz des Resonators wird nun über einen möglichst großen Frequenzbereich verstimmt. Deckt sie sich mit der Masse der Axionen, wandeln sich diese resonant um, sodass empfindliche Antennen ein Signal auffangen können. Da die Masse der Axionen unbekannt ist und für Dunkle Materie bei 1 bis 100 $\mu\text{eV}/c^2$ liegen sollte, muss das Experiment einen exzellenten Gütefaktor aufweisen, um diesen Bereich in erlebbarer Zeit abzufahren. Daher ist für das ADMX-Experiment ein erheblicher experimenteller Aufwand (unter anderem für Kühlung auf 100 mK) erforderlich. Sollten die Axionen jedoch entdeckt werden, wäre ihre Masse bekannt, sodass deutlich einfachere Experimente für weitere Untersuchungen ausreichen würden. ADMX wird womöglich schon 2016 den interessantesten Massebereich mit der nötigen Empfindlichkeit abgedeckt haben. Wir werden also schon bald wissen, ob die Dunkle Materie wesentlich aus Axionen besteht.

Neutrinos

Einen kleinen Teil der Dunklen Materie konnten wir bereits identifizieren: Neutrinos. Diese Teilchen sind neutral und unterliegen nicht der elektromagnetischen Wechselwirkung. Allerdings beträgt ihre Dichte Ω_ν we-

niger als ein Prozent. Zudem sind die bekannten („aktiven“) Neutrinos mit Massen unterhalb von $2 \text{ eV}/c^2$ relativistisch und daher viel zu leicht. Sterile Neutrinos dagegen sind hypothetische Teilchen, die nicht an der schwachen Wechselwirkung teilnehmen. Da die schwache Wechselwirkung von der Parität abhängt, wird üblicherweise angenommen, dass sterile Neutrinos rechtshändig sind, im Gegensatz zu den gewöhnlichen linkshändigen Neutrinos. Sterile Neutrinos könnten sich, wie auch die bekannten aktiven Neutrinos, über einen Mischungswinkel θ , ineinander umwandeln (Neutrinooszillation) und über ein Schleifendiagramm ein Photon abstrahlen (Abb. 4b). Im Endeffekt zeigt das dargestellte Diagramm einen Zwei-Körper-Zerfall, weshalb die Energie dieser Photonen gerade der halben Masse der sterilen Neutrinos entspricht, üblicherweise einige keV/c^2 . Daher ist es möglich, im Röntgenspektrum von astrophysikalischen Objekten, die reich an Dunkler Materie sind, nach Spektrallinien von sterilen Neutrinos zu suchen.

Tatsächlich wurde solch ein Signal Anfang 2014 im Röntgenlicht verschiedener Galaxienhaufen entdeckt (Abb. 5) [10]. Dieses Signal erscheint sehr robust: Die statistische Signifikanz beträgt über 3σ , zwei Gruppen haben das Signal unabhängig voneinander gefunden, es ist in drei verschiedenen Instrumenten der XMM- und Chandra-Röntgensatelliten zu sehen, im Perseushaufen (Abb. auf S. 35) sowie in der Andromedagalaxie, und selbst wenn die Spektren von über 70 Galaxienhaufen individuell je nach ihrer Entfernung rotverschoben und addiert werden, ist die Spektrallinie bei 3,5 keV vorhanden. Während astrophysikalische Erklärungsansätze bisher wenig erfolgreich waren, kann die Dunkle-Materie-Hypothese diese Spektrallinie erklären.

Weitere Beobachtungen und detaillierte Untersuchungen sind nötig, um mehr über die Natur dieser Linie zu erfahren. Große Hoffnungen ruhen insbesondere auf dem japanischen Astro-H-Satelliten, der 2015 starten soll. Seine Energieauflösung sollte es ermöglichen, Spektrallinien aus Elektronenübergängen im Plasma von solchen der Dunklen Materie anhand ihrer Breite zu unterscheiden.

WIMPs

Der größte experimentelle Aufwand zur Identifikation der Dunklen Materie konzentriert sich zurzeit auf Weakly Interacting Massive Particles (WIMPs) [11]. Dabei handelt es sich um Teilchen, die kurz nach dem Urknall mit dem Plasma im thermischen Gleichgewicht waren, also ständig vernichtet (Abb. 6a) und produziert (Abb. 6b) wurden. Durch die Ausdehnung und Abkühlung des Universums verlieren Teilchen im primordialen Plasma an Energie, bis schließlich die thermische Energie der leichteren Teilchen aus dem Standardmodell nicht mehr ausreicht, um die schwereren WIMP-Teilchen zu erzeugen. WIMPs dagegen können sich weiter gegenseitig vernichten, ihre Dichte nimmt rapide ab. Schließlich sind sie so dünn verteilt, dass ihre Paarvernichtung immer seltener wird und letztendlich ihre Dichte *einfriert*. Je größer

der Wirkungsquerschnitt ihrer Wechselwirkung, desto länger hält die Paarvernichtung an und desto weniger WIMPs bleiben übrig. In den 1980er-Jahren verbreitete sich die erstaunliche Erkenntnis, dass thermische Teilchen mit für die schwache Wechselwirkung typischem Wirkungsquerschnitt ($< 10^{-38} \text{ cm}^2$) und Masse ($> 100 \text{ GeV}/c^2$) gerade die heute beobachtete Dichte an Dunkler Materie ergeben würden. Dass sich hier viele Größenordnungen von Vorfaktoren aus der Kosmologie einerseits und der Teilchenphysik andererseits verkürzen, um zur richtigen Dichte zu kommen, gilt als starker Hinweis, dass wir mit der Suche nach WIMPs auf dem richtigen Weg sein könnten.

Die in Abb. 6 gezeigten Feynman-Graphen sind nicht nur für Kosmologie und Astrophysik relevant, sondern auch drei komplementäre Möglichkeiten für den Nachweis von WIMPs. Da zwei WIMPs zur gegenseitigen Paarvernichtung (Abb. 6a) nötig sind, ist die Häufigkeit dieses Prozesses proportional zur WIMP-Dichte im Quadrat. Damit sind solche Signale vor allem aus dem Zentrum von Galaxienhaufen, unserer Milchstraße oder aus dem Zentrum unserer Sonne zu erwarten. Zwerggalaxien sind weitere interessante Forschungsobjekte, da sie von der Dunklen Materie dominiert sind, was für das Signal-zu-Untergrund-Verhältnis günstig ist. Die Produkte der Paarvernichtung ergäben eine mehr oder weniger breite Spektrallinie, deren Energie der Masse der WIMPs entsprechen würde.

Das IceCube-Experiment am Südpol zielt darauf ab, nach Neutrinos aus diesem Prozess zu suchen. Das AMS-Experiment auf der Internationalen Raumstation ist ein komplexer Detektor für die kosmische Strahlung, wie er sonst nur von Beschleuniger-Experimenten bekannt ist. Im Zusammenhang mit Dunkler Materie sucht man mit AMS insbesondere nach Antiteilchen (Positronen, Anti-Protonen) aus der Paarvernichtung, da hier weniger astrophysikalische Untergründe die empfindliche Suche nach Signalen der Dunklen Materie behindern. Die HESS- und FERMI-Kollaborationen wiederum suchen nach hochenergetischen Gammastrahlen. Aus der Beobachtung von Zwerggalaxien war es möglich, relevante obere Schranken an die Paarvernichtungs-Querschnitte abzuleiten. Tatsächlich findet sich in den FERMI-Daten in einem Gebiet von etwa 10° um das galaktische Zentrum ein Überschuss an Gammastrahlen im Bereich von 0,5 bis 5 GeV [12]. Dieser könnte von hochenergetischer Strahlung von Quarks stammen, die aus der Paarvernichtung von eher leichten WIMPs mit Massen um 10 bis 50 GeV/c^2 entstehen. Die dafür nötigen Wirkungsquerschnitte stimmen gerade mit dem erwarteten Querschnitt eines thermischen Teilchens überein, und sogar die Winkelabhängigkeit entspricht der Erwartung aus der Paarvernichtung von Dunkler Materie in einem isothermalen Halo. Andererseits könnte dieses Signal aber auch ganz profan von Pulsaren stammen. Detaillierte Simulationen aller bekannten astrophysikalischen Quellen aus diesem Gebiet sind nötig, um den potenziellen Dunkle-Materie-Ursprung aufzuklären.

Der Nachweis von WIMPs, die an Beschleunigerexperimenten, wie CMS und ATLAS am LHC, produziert werden, ist eine besonders spannende Herausforderung. Da WIMPs kaum wechselwirken, würden sie, sofern erzeugt, den Detektor unbemerkt verlassen. Deshalb ist die gleichzeitige Produktion z. B. von einem Jet nötig (in Abb. 6b angedeutet), um den Detektor überhaupt zu triggern. Zudem könnten die WIMPs direkt produziert werden oder aus dem Zerfall eines weiteren schweren Teilchens entstehen. Das bedeutet, dass eine Vielzahl unterschiedlicher Prozesse zu untersuchen ist. Allen gemein ist dabei die Signatur fehlender (transversaler) Energie. Insbesondere für WIMP-Massen bis zu einigen 100 GeV/c^2 sind viele dieser Analysekanäle höchstempfindlich. Grundsätzlich können Beschleunigerexperimente WIMPs nur dann erzeugen, wenn die WIMP-Masse unterhalb der halben Kollisionsenergie liegt. Aus diesem Grund wird die bevorstehende Erhöhung der Schwerpunktsenergie des LHC von 8 auf 13 TeV, zusammen mit einer weiteren Erhöhung der Luminosität, mit Spannung erwartet.

Da auch gedrehte Feynman-Graphen physikalische Prozesse widerspiegeln (Crossing-Symmetrie), gibt es eine dritte Möglichkeit, um WIMPs nachzuweisen: die direkte Suche nach Streuereignissen (Abb. 6c). Typische Geschwindigkeiten in der Milchstraße liegen etwa bei einem Tausendstel der Lichtgeschwindigkeit, und so ist dieser Prozess einfache nichtrelativistische Streuung von WIMPs aus dem Halo an einem möglichst empfindlichen Target. Da die Masse der WIMPs im Bereich von GeV/c^2 bis TeV/c^2 zu erwarten ist, erhofft man sich insbesondere von Streuung am Atomkern einen nachweisbaren Energieübertrag. Das Rückstoßspektrum lässt sich leicht durch nichtrelativistische Streuung beschreiben; es fällt in guter Näherung exponentiell mit der Energie ab. Daher findet sich ein WIMP-Signal bei niedrigen Energien, also an der Detektor-Schwelle konzentriert, was die zuverlässige Analyse erschwert. Zusammen mit den geringen zu erwartenden Ereignisraten, gemessen in wenigen Ereignissen pro Jahr Messzeit und Tonne Targetmaterial, kommt daher der Unterdrückung bekannter Untergrundereignisse eine Schlüssel-

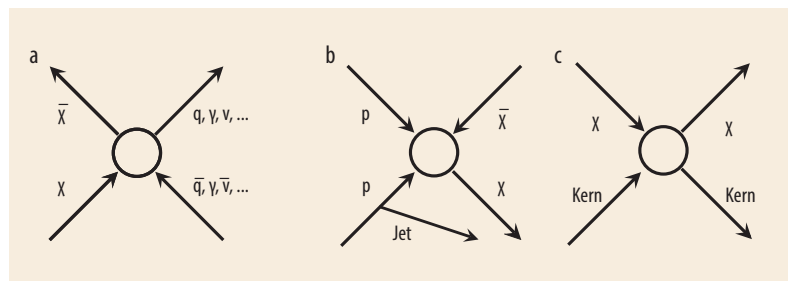


Abb. 6 Thermisch produzierte Teilchen χ lassen sich über drei verschiedene Kanäle nachweisen: Bei der Paarvernichtung (a) sucht man in astrophysikalischen Objekten nach entstehenden Teilchen des Standardmodells, insbesondere Photonen, Neutrinos oder Antiteilchen. In Beschleunigerexperimenten könnten sie

in einer Kollision zum Beispiel aus Protonen p entstehen (b), die Signatur wäre fehlende Energie in den rekonstruierten Teilchen. Schließlich könnten WIMPs an Teilchen des Standardmodells streuen (c), die experimentelle Signatur wäre ein kleiner Energieeintrag in einem empfindlichen Detektor.

Abb. 7 Der Kryostat von XENONIT. Zur Abschirmung von Radioaktivität befindet sich das Experiment im Gran-Sasso-Untergundlabor in einem zehn Meter großen Wassertank.



rolle zu. Um solche Experimente von der kosmischen Höhenstrahlung abzuschirmen, stehen sie tief unter Tage. Zum Teil werden alle Schrauben und Muttern auf möglichst geringe Radioaktivität hin ausgewählt.

Noch vor einigen Monaten wurden Signale von den drei Experimenten CRESST (im Gran-Sasso-Untergundlabor in Italien), CDMS-Si und CoGeNT (beide in der Soudan-Mine in den USA) heiß diskutiert. Alle drei hatten mehr Ereignisse gemessen, als die Kollaborationen aufgrund ihrer Modelle allgemeiner radioaktiver Untergründe erwartet hatten. Um die Verwirrung komplett zu machen, ließen sich alle drei Signale recht zwanglos durch ein einziges eher leichtes WIMP erklären. Aufgrund verbesserter Detektoren insbesondere der CRESST- und CDMS-Kollaborationen ist davon jedoch leider nichts mehr übrig geblieben. Die Überschüsse erklären sich offenbar als unvollständig verstandene Prozesse an den Oberflächen der Detektoren.

So richtet sich auch hier der Blick nach vorne. Vor allem Detektoren mit flüssigen Targets erlauben es, recht kostengünstig immer größer und immer empfindlicher zu werden. Zeitprojektionskammern (TPCs), die mit flüssigem Xenon gefüllt sind, gelten als Standard, da Xenon eine Vielzahl erstrebenswerter Eigenschaften vereint: So szintilliert Xenon hervorragend, kann von anderen radioaktiven Elementen getrennt und mit hohem Reinheitsgrad hergestellt werden und bietet aufgrund seiner hohen Massenzahl (131) viele Streuzentren für die Dunkle Materie. Während das XENON100-Experiment im Gran-Sasso-Untergundlabor eine TPC mit 62 kg flüssigem Xenon besitzt, ist unlängst in der Homestake-Mine (South Dakota) der LUX-Detektor mit 250 kg in Betrieb gegangen. Schon 2015 wird XENONIT am Gran Sasso mit 2000 kg in der TPC die bestehenden Empfindlichkeiten um zwei weitere Größenordnungen übertreffen (Abb. 7). Der damit untersuchte Parameterbereich aus Masse und Streuquerschnitt gehört aus vielerlei Gründen zu den spannendsten überhaupt, werden doch hier WIMPs erwartet, die an das Higgs-Boson koppeln: Würde ein Teilchen der Dunklen Materie mit dem Higgs-Boson wechselwirken, stünden die Chancen gut, es mit diesen Experimenten in den kommenden zwei oder drei Jahren zu entdecken.

Ausblick

Während das Problem der Dunklen Materie seit fast einem Jahrhundert besteht, sind doch die letzten und vor allem die kommenden paar Jahre die spannendsten in einer langen, zielgeführten Kampagne zu ihrer Enträtselung. Sollten Teilchen der Dunklen Materie in einem oder gar in mehreren der oben erwähnten Experimente entdeckt werden, ergäbe sich ein Fenster zur dunklen Seite des Universums, mit unüberschaubaren Auswirkungen. Von der elementaren anthropologischen Relevanz ganz abgesehen, ließe sich zum Beispiel durch eine WIMP- oder Axion-Astronomie das Geschichtsbuch unserer Milchstraße lesen: Da diese Teilchen nur schwach wechselwirken, sind Ereignisse aus der Vergangenheit, wie Kollisionen mit anderen Galaxien, noch immer in den Phasenräumen dieser Teilchen abzulesen.

Andererseits besteht durchaus die Möglichkeit, dass eine zweifelsfreie Entdeckung von Teilchen der Dunklen Materie in den kommenden Jahren ausbleibt. Schließlich könnte die Dunkle Materie auch aus vielen verschiedenen Teilchen bestehen oder aus allen oder keinem der oben erläuterten Hypothesen. Auf jeden Fall sind neue Ideen gefragt – für andersartige Teilchen und für Experimente zu deren Nachweis. Zudem wird sich natürlich die Frage stellen, wie lange mit den bestehenden Konzepten zur Suche nach diesen Teilchen fortgefahren werden sollte. Bei all diesen Unsicherheiten ist aber klar, dass wir die Natur der Dunklen Materie nur enträtseln können, indem wir ihren direkten experimentellen Nachweis versuchen.

Literatur

- [1] J. C. Kapteyn, *Astrophys. J.* **55**, 302 (1922)
- [2] J. Beringer et al., *Phys. Rev. D* **86**, 010001 (2012)
- [3] G. Steigman, *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* **57**, 463 (2007)
- [4] F. Zwicky, *Helv. Phys. Acta* **6**, 110 (1933)
- [5] E. Corbelli, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **342**, 199 (2003)
- [6] J. Bovy und S. Tremaine, *Astrophys. J.* **756**, 89 (2012)
- [7] B. Famaey und S. McGaugh, *Living Rev. Rel.* **15**, 10 (2012)
- [8] M. Kawasaki und K. Nakayama, *Ann. Rev. of Nuclear and Particle Science* **63**, 69 (2013)
- [9] S. J. Asztalos et al., *Phys. Rev. Lett.* **104**, 041301 (2010)
- [10] E. Bulbul et al., *Astrophys. J.* **789**, 13 (2014)
- [11] D. Hooper und E. A. Baltz, *Ann. Rev. of Nuclear and Particle Science* **58**, 293 (2008)
- [12] D. Hooper und T. R. Slatyer, *Phys. Dark Univ.* **2**, 118 (2013)

DER AUTOR

Rafael Lang (FV Teilchenphysik) studierte in Ulm und Melbourne und machte seine Diplomarbeit am DESY Zeuthen. Mit seiner Doktorarbeit am MPI für Physik in München über das CRESST-Experiment wechselte er zur direkten Suche nach Dunkler Materie. Seit seinem Postdoc an der Columbia Universität in New York arbeitet er am XENON-Projekt als Co-Koordinator der Datenanalyse. Nach seinem Ruf an die Purdue Universität in Indiana übernahm er mit seiner Gruppe die Verantwortung für die Kalibration des Experiments. Was ihm im flachen Indiana an Bergtouren fehlt, macht er durch Wandertouren mit dem Kajak wett.

