



Dunkle Materie

Eine unendliche Geschichte?

Christian Spiering, DESY

**Vortrag auf der Tagung
„Die Evolution des Kosmos“
Freie Akademie, Potsdam, 15. Mai 2015**

Dr. Christian Spiering
Deutsches Elektronensynchrotron DESY
15738 Zeuthen, Platanenallee 6
christian.spiering@desy.de



Dunkle Materie – eine unendliche Geschichte?

1 Einleitung

Die Mehrzahl der Astronomen und Physiker nimmt heute an, dass der größte Teil der kosmischen Materie aus unsichtbarer, *dunkler* Materie besteht – Teilchen, die mit normaler Materie nur (oder *fast* nur) über die Gravitationskraft in Wechselwirkung treten. Niemandem ist es bisher gelungen, diese hypothetischen Teilchen nachzuweisen. Allerdings kann man mit ihrer Hilfe eine Reihe grundlegender astronomischer und kosmologischer Befunde erklären. Diese Befunde zeigen sich auf räumlichen Skalen, die von einigen Lichtjahren bis hin zur Ausdehnung des gesamten sichtbaren Universums reichen; eine schwindelerregende Spanne.

Die Wortkombination „Dunkle Materie“ wird erstmals 1922 benutzt. Als ein wirklich überraschendes, als *rätselhaftes* Phänomen betritt Dunkle Materie allerdings erst im Jahr 1933 die astronomische Bühne, sodass man sich darüber streiten kann, ob sich seine Geschichte mittlerweile über ein knappes Jahrhundert oder nur über 82 Jahre dehnt. Aber erst nachdem sich der Terminus in den 1970er Jahren in der Wissenschaft etabliert hatte und langsam sogar im öffentlichen Bewusstsein ankam, wagte sich eine stetig wachsende Anzahl von Physikern an den Versuch, die hypothetischen Teilchen dieser Materie nachzuweisen.

Würden die Teilchen nur über die Gravitation mit ihrer Umwelt in Verbindung treten, wären diese Versuche zur Erfolglosigkeit verurteilt. Es hat sich jedoch herausgestellt, dass man einige kosmologische Tatsachen am besten erklären kann, wenn die Teilchen der Dunklen Materie zusätzlich zur Gravitation eine weitere Form der Wechselwirkung haben. Diese müsste ähnlich stark wie jene der Neutrinos (siehe unten) sein. Genau auf dieser Annahme (besser: auf dieser *Hoffnung*) basieren die Experimente in tiefen Höhlen, bei denen man – nahezu unbeeinflusst durch Störeinflüsse – nach den seltenen Reaktionen der Dunkle-Materie-Teilchen sucht, nach Reaktionen also, die vermittels dieser zusätzlichen Wechselwirkung verlaufen sollen.

Selbstverständlich hat es über die Jahre nicht an alternativen Erklärungsversuchen für die erwähnten astronomischen Befunde gefehlt. Der bekannteste ist die „MODified Newtonian Dynamics“ (MOND), auf die ich weiter unten kurz eingehen werde. Alles in allem dürfte aber wohl die Annahme von Dunkler Materie die Gesamtheit aller Beobachtungen am besten erklären. In den letzten anderthalb Jahrzehnten scheint zudem das Phänomen der *Dunklen Energie* – obwohl selbst noch völlig unverstanden – die Hypothese von *Dunkler Materie* zusätzlich zu favorisieren. Dunkle Energie und Dunkle Materie (mit einer lächerlich kleinen Beimischung normaler Materie) können im Rahmen des sogenannten kosmologischen Standardmodells die astronomischen Beobachtungen mit Prozentgenauigkeit beschreiben. Ob diese Genauigkeit vielleicht nur ein Trugbild vorgaukelt oder nicht, soll dahingestellt bleiben. Beeindruckend ist sie allemal!

In den folgenden Abschnitten zeichne ich die historische Entwicklung der Hinweise auf Dunkle Materie nach, gebe eine kurze Einführung in Begriffe und Sachverhalte der Teilchenphysik und der

Kosmologie, führe die Teilchenkandidaten für Dunkle Materie ein und beschreibe die entsprechenden Suchmethoden. Zum Abschluss versuche ich einen Ausblick auf das nächste Jahrzehnt, das für unser Verständnis oder (vielleicht genau umgekehrt!) völliges *Nichtverständnis* von Dunkler Materie entscheidend sein könnte.

2 Frühe Hinweise

1933 publizierte der in den USA forschende Schweizer Astronom Fritz Zwicky die Ergebnisse einer Analyse der Bewegungen von Galaxien [Zwicky 1933]. Zwicky hatte sich Galaxien ausgesucht, die Teile eines größeren Haufens von Galaxien waren, insbesondere jene des sogenannten Coma-Clusters. Aus der gemessenen Leuchtkraft der Einzelgalaxien schätzte er ihre Massen ab, aus der Verschiebung der Spektrallinien zum Blauen (bzw. Roten) hin ihre Geschwindigkeit in unsere Richtung (bzw. von uns weg). Er stellte fest, dass die Galaxien sich innerhalb des Clusters völlig ungeordnet bewegen. Sie sind dabei aber im Mittel so schnell, dass sie durch die sichtbare Gesamtmasse des Clusters nie und nimmer zusammen gehalten werden könnten. Der Coma-Cluster hätte längst auseinandergefliegen sein müssen! Tatsächlich, so Zwicky, wäre eine etwa 400-mal höhere Masse als die aus der Leuchtkraft berechnete notwendig gewesen, um den Cluster stabil zu halten: Dunkle Materie.

Wie oben erwähnt, hat Zwicky den Begriff „dunkle Materie“ nicht erfunden. Erstmals benutzt wird er in einer Arbeit des niederländischen Astronomen Jan Kapteyn, der Sterne in unserer unmittelbaren Nachbarschaft beobachtete [Kapteyn 1922]. Er vermaß, wie diese Sterne senkrecht zur galaktischen Ebene „oszillieren“. Dabei kam er zu dem Ergebnis, dass knapp das Doppelte von der Masse der sichtbaren Sterne notwendig ist, um diese Oszillationsbewegungen zu erklären. Es war allerdings leicht vorstellbar, dass die fehlende Masse durch ganz normale lichtschwache Sterne oder Planeten (von interstellarem Gas wusste man damals kaum etwas) aufgebracht wird. Darum ergab sich kein Hinweis auf größere Mengen dunkler oder gar rätselhafter Materie in der galaktischen Scheibe – weder bei Kapteyn noch bei anderen Astronomen wie James Jeans oder Jan Hendrik Oort, die ähnliche Untersuchungen von Anfang der 1920er bis Mitte der 1930er Jahre durchführten. Kapteyn verwendete zwar als erster den Begriff „dunkle Materie“, aber ohne den spektakulären Klang, den später das Zwicky'sche Massenverhältnis von 400:1 auslösen musste. Erst Zwicky legte darum den Grundstein dafür, dass aus dunkler Materie (mit kleinem d) die Dunkle Materie (mit großem D) werden sollte.

3 Rotationskurven von Galaxien

In den folgenden 20 Jahren wurden Zwickys Untersuchungen mit anderen Galaxienhaufen oder mithilfe von Paaren von Galaxien nachvollzogen. Die Methoden wurden verfeinert; die Zahlenwerte waren je nach Objekt nicht unbedingt so hoch wie bei Zwicky, sondern schwankten zwischen 5 und 100. Aber der wesentliche Befund blieb: man beobachtete durchgehend viel zu wenig Masse, um die Bewegungen innerhalb dieser Systeme zu beschreiben.

Wirklich Fahrt gewann die Geschichte der Dunklen Materie erst wieder am Ende der 1960er und dann in den 1970er Jahren. Jetzt begann man, systematisch die Rotationsgeschwindigkeiten von

Spiralgalaxien zu vermessen, und die sind weit einfacher zu beschreiben, als die ungeordneten von Galaxien in Galaxienhaufen.

Schon 1966 hatten Radioastronomen die winzigen Spektralverschiebungen der 21-cm Linie gemessen, die von atomarem Wasserstoff in der Galaxie M33 emittiert wird. Dabei stellten sie fest, dass anders als erwartet die Rotationsgeschwindigkeit in den Außenbereichen nicht abnimmt sondern annähernd konstant bleibt. Der Australier Kenneth Freeman publizierte daraufhin 1970 eine inzwischen klassische Arbeit, in der er aus diesem Befund die Existenz unsichtbarer Materie ableitete [Freeman 1970]. Noch systematischer waren die Untersuchungen, die von 1970 an Vera Rubin am Carnegie Institute in Washington im optischen Bereich anstellte [Rubin 1970]. Sie vermaß die Rotationskurven einer Vielzahl von Galaxien über die gesamte Ausdehnung der Scheibe. Möglich wurde das durch den Einsatz von gerade erst verfügbar gewordenen elektronischen Bildverstärkern. So konnten Rubin und ihr Mitarbeiter Ken Ford auch von den lichtschwachen Objekten in den Außenbereichen von Spiralgalaxien Spektren aufnehmen, darunter insbesondere extrem schwach leuchtende Gaswolken. Ergebnis: das gleiche Bild. Die Rotationsgeschwindigkeiten nehmen nach außen hin nicht ab!

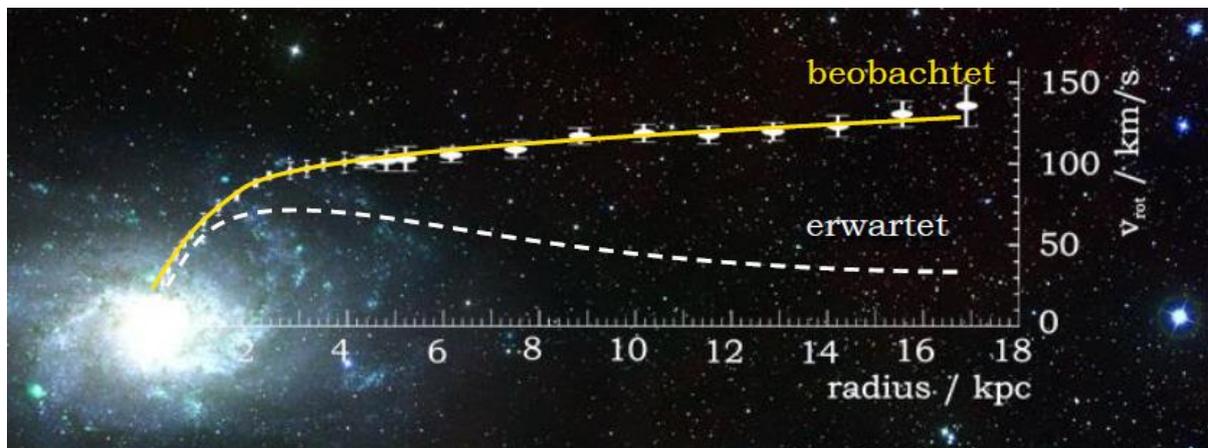


Abb.1: Rotationsgeschwindigkeit unserer Nachbargalaxie M33 [Lang 2015].

Warum dieses Ergebnis überraschend ist, kann man sich anhand der Rotationsgeschwindigkeiten in unserem Sonnensystem veranschaulichen. Gemäß den Keplerschen Gesetzen fällt die Rotationsgeschwindigkeit eines Planeten mit der Wurzel der Entfernung ab. Uranus und Neptun trödeln also verglichen mit der Erde, und diese wiederum verglichen mit Merkur. Grund dafür ist, dass praktisch alle Materie des Sonnensystems in der Sonne selbst vereint ist. Die Masse der Planeten ist im Vergleich dazu vernachlässigbar. Genau für diesen Fall gilt das 3. Keplersche Gesetz. In Galaxien ist es nicht ganz so: die sichtbare Materie ist im Vergleich zum Sonnensystem nach außen hin verschmiert. Darum sollte die Rotationsgeschwindigkeit zunächst einmal ansteigen; wenn dann aber allmählich der Großteil der Masse innerhalb der Umlaufbahn liegt, sollte sie stetig abfallen, so wie es die untere Kurve in Abb. 1 zeigt. Das ist nicht der Fall: gemessen wurde die obere Kurve.

Um die Galaxien trotz der mit den großen Geschwindigkeiten verbundenen gewaltigen Fliehkräfte zusammenzuhalten, sind deutlich stärkere Kräfte notwendig, als man aufgrund der sichtbaren Materie erwarten kann. Auch diese Beobachtung lässt sich durch die Existenz von Dunkler Materie erklären, welche sich über den Rand der Galaxis erstreckt und die Galaxie wie ein Halo einschließt.

Die Masse dieses Halos aus Dunkler Materie wird auf etwa das Zehnfache der „normalen“ Materie geschätzt, selbstverständlich mit gewissen Schwankungen von Galaxie zu Galaxie.

Rubins Ergebnisse, zusammen mit dem unten noch zu beschreibenden Befund zur Elementhäufigkeit im Kosmos, kann man als die beiden wesentlichen „Weckrufe“ für Teilchenphysiker verstehen. Tatsächlich begannen sie in den späten 1970er Jahren, die Prototypen der heutigen tonnenschweren Experimente zur Suche nach Dunkler Materie zu entwickeln.

4 Gravitationslinsen

Laut der Allgemeinen Relativitätstheorie kann Licht durch große kosmische Massen merklich abgelenkt werden. Wenn sich zwischen einer Lichtquelle und uns eine solche große Masse befindet, wirkt sie auf das Licht wie eine Linse. Bei genau passenden Entfernungen zwischen Lichtquelle, Linse und Beobachter können die Lichtsignale einfach nur auf kleines Gebiet fokussiert und dadurch verstärkt werden. Im Allgemeinen wird die Gravitationslinse aber dazu führen, dass die Lichtquelle in Form von Mehrfachbildern oder eines Ringes („Einstein-Ring“) erscheint. Das erste solche Mehrfachbild wurde 1979 entdeckt: das Doppelbild ein und desselben Quasars, beide Bilder mit exakt identischen Spektren. Ein Jahr später fand man zwischen den beiden Bildern eine Galaxie, die halb so weit von der Erde entfernt war wie der Quasar. Sie wirkt als Linse.

An dieser Stelle komme ich auf die Galaxienhaufen zurück, die den ersten klassischen Befund für Dunkle Materie geliefert hatten. Sie sind aufgrund ihrer großen Masse ideale Kandidaten für Gravitationslinsen und wurde als solche auch schon in den 1980er Jahren identifiziert. Aber erst die Beobachtungen mit dem Hubble-Teleskop ab 1994 erlaubten es, die entsprechenden Bilder so gut aufzulösen, dass man aus den beobachteten Verzerrungen der Hintergrundobjekte genaue Rückschlüsse auf das Gravitationspotential der Haufen schließen konnte. Auch hier deutete die Gravitationskraft auf eine etwa zehnmal größere Masse, als man aus anderen astronomischen Beobachtungen erwartete. Anders als Zwicky kann man heutzutage dabei auch die Masse des Gases zwischen den Galaxien berücksichtigen, die weit höher ist als die Masse der Galaxien selbst. Dieses Gas ist aufgrund des Gravitationspotentials so heiß, dass es im Röntgenbereich leuchtet. Die ersten Röntgensatelliten gab es aber erst zwei Jahrzehnte nach Zwickys Beobachtung.

Interessante Hinweise auf Dunkle Materie liefern solche Galaxienhaufen, die in der Vergangenheit kollidiert sind und sich gegenseitig durchdrungen haben. Der gesamte Raum zwischen den Galaxien des Haufens wird von einem diffusen Gas erfüllt, das durch die Kollision erhitzt, komprimiert und abgebremst wird. Durch Reibungsprozesse überträgt sich dieser Abbremsprozess auch, wenngleich sehr abgeschwächt, auf die Galaxien, die in das Gas eingebettet sind. Die Dunkle Materie macht den Abbremsprozess allerdings überhaupt nicht mit.

Das bekannteste Beispiel für so ein Objekt ist der Bullet- Haufen (Abb.2). Das heiße Gas, identifiziert mithilfe eines Röntgensatelliten, ist in der Mitte als rötliche Struktur zu sehen. Man sieht sehr schön die Bugwelle des nach rechts strebenden Haufens. Der Rest der Materie (Galaxien und insbesondere Dunkle Materie) hat die Abbremsung nicht mitgemacht. Die Ausdehnung und die Masse dieses Restes kann über den Gravitationslinseneffekt sichtbar gemacht werden [Clowe 2006].

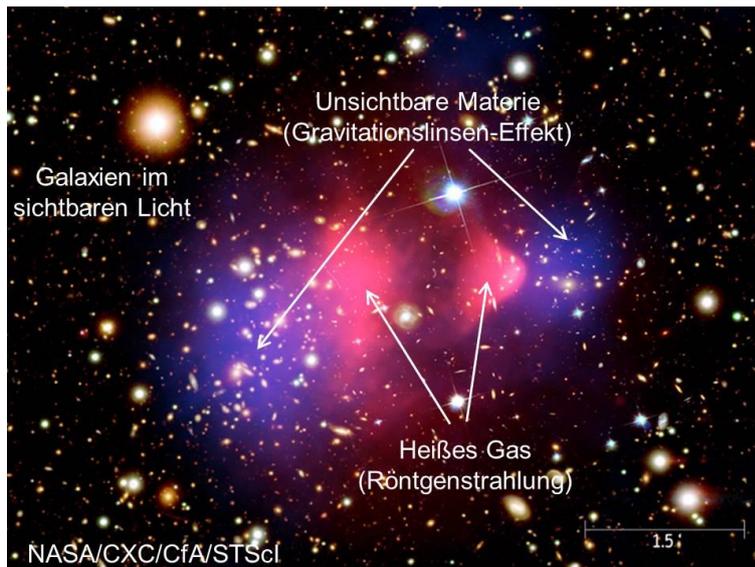


Abb. 2: Der Bullet-Haufen mit dem abgebremsten heißen Gas in der Mitte und dem kaum gebremsten Rest (Dunkle Materie und Galaxien) links und rechts. In der farblichen Darstellung sind Befunde im sichtbaren Licht in Gelb, in Röntgenlicht in Rot, und aus dem Gravitationslinseneffekt bestimmte in Blau markiert. Adaptiert aus [Clowe 2006].

5 MACHOS

Es wird unten noch erläutert werden, warum die Dunkle Materie nicht aus normaler Materie (Protonen, Neutronen etc.) bestehen kann. Trotzdem wäre es ja nicht ausgeschlossen, dass ein beträchtlicher Teil derjenigen Dunklen Materie, die als Halo um Galaxien liegt und etwa das Zehnfache von deren sichtbarer Masse ausmacht, aus normaler Materie besteht. An Kandidaten dafür mangelt es nicht. Lichtschwache Objekte von ein paar Tausendstel oder Hundertstel der Sonnenmasse („Braune Zwerge“) oder planetenartige Himmelskörper wären die Top-Kandidaten. Ausgebrannte Sterne von rund einer Sonnenmasse (weiße Zwerge), die bis zu zehntausendmal lichtschwächer als die Sonnen sein können, Neutronensterne oder schwarze Löcher sind andere Kandidaten.

Es schien aussichtslos, solche *Massive Compact Halo Objects* (MACHOs) nachweisen zu können, bis 1986 der polnische Astronom Bohdan Paczynski die Idee hatte, hierfür den Gravitationslinseneffekt auszunutzen [Paczynski 1986]. Abb.3 skizziert die Idee: Man beobachtet von der Erde aus eine Anzahl von Sternen in der Großen Magellanschen Wolke, einer kleinen Begleitgalaxie unserer Milchstraße. Wenn sich zwischen einen der Sterne und uns ein MACHO schiebt und als Gravitationslinse wirkt, und wenn MACHO-Masse und Abstandsverhältnisse so beschaffen sind, dass das Licht des Sterns auf uns fokussiert wird, dann wird das Licht für einen gewissen Zeitraum nicht etwa durch Abdeckung abgeschwächt sondern, umgekehrt, *verstärkt*. Von veränderlichen Sternen kann man MACHOs sehr gut dadurch unterscheiden, dass die Aufhellung völlig symmetrisch sein muss (also nicht etwa langsamer abklingt als aufscheint), dass sie sich nicht wiederholt und schließlich dass sie nicht von der Wellenlänge abhängt.

Im Jahr 1993 meldete die Zeitschrift Nature unter der Überschrift „The Footprint of Dark Matter?“ die ersten drei solcher Mikrolinseneffekte, die von zwei unterschiedlichen Teams nachgewiesen worden waren [Alcock 1993, Aubourg 1993]. Allerdings hat sich die Aufregung seitdem schon längst wieder gelegt – obwohl inzwischen eine beträchtliche Anzahl weiterer MACHOs entdeckt wurden,

darunter Braune und Weiße Zwerge. Ihre Anzahl und Masse ist letzten Endes einfach viel zu klein, um einen nennenswerten Beitrag zum dunklen Halo um unsere Galaxis zu leisten.

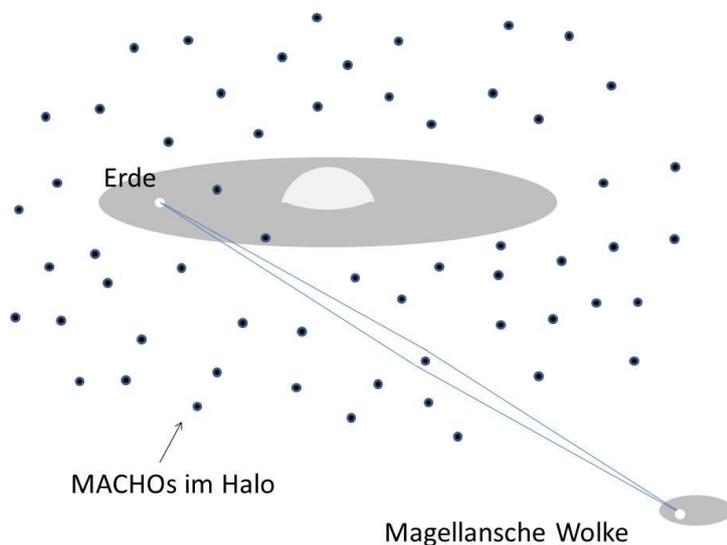


Abb.3: Suche nach MACHOs über Mikrogravitationslinsen

6 MOND vs. Dunkle Materie

Obwohl die Hypothese der Dunklen Materie bis heute von der großen Mehrheit der Fachleute favorisiert wird, ist seit drei Jahrzehnten eine alternative Hypothese auf dem Markt und hat mit bemerkenswertem Erfolg eine Reihe von Tests bestanden: die MODified Newtonian Dynamics, kurz MOND. Diese Hypothese wurde 1983 von Mordechai Milgrom aufgestellt, einem jungen israelischen Physiker [Milgrom 1983]. Milgrom nahm an, dass die bewährten Gesetze der Newtonschen Mechanik für große Entfernungen und sehr kleine Beschleunigungen modifiziert werden müssen. Kraft ergibt sich dann nicht einfach als Produkt aus Masse und Beschleunigung (wie bei Newton), sondern aus Masse und dem Quadrat der Beschleunigung (wobei der Übergang von einem Regime in das andere fließend ist). Zur Veranschaulichung der Größenordnungen: die Erdbeschleunigung im erdnahen Raum beträgt knapp 10 m/s^2 , die Beschleunigung, die das Sonnensystem in Richtung des galaktischen Zentrums erfährt, aber nur winzige 10^{-10} m/s^2 , also hundert Milliarden Mal weniger.

Dadurch, dass man mit dem Quadrat der Beschleunigung multipliziert, ist die Kraft, die vonnöten ist, um diese Beschleunigung zu bewirken, größer als wenn man die Masse nur mit der Beschleunigung selbst malnimmt. Man braucht also keine höhere Masse anzunehmen, um die beobachteten Beschleunigungen und die hohen Geschwindigkeiten an den Rändern der Galaxien zu erklären. Zur Erklärung der Rotationskurven reicht genau die aus der Leuchtkraft berechnete (und auf das Vorhandensein von interstellarem Gas korrigierte) Masse aus. Auf diese Weise erübrigt sich die Dunkle Materie.

Milgroms Hypothese kann die Rotationskurven von Spiralgalaxien bestens beschreiben, genauso gut oder sogar besser als Dunkle Materie. Kürzlich hat MOND sich auch für elliptische Galaxien als

erfolgreich erwiesen und außerdem die Bewegung von zehn voneinander sehr verschiedenen Zwerggalaxien um die Andromeda-Galaxie herum erklärt. Schwierigkeiten hat MOND jedoch bei der Beschreibung von kollidierenden Galaxien oder Galaxienhaufen (wie dem oben beschriebenen Bullet-Cluster) und der Lichtablenkung durch Materie. Vor etwa zehn Jahren wurde MOND so erweitert, dass es im Prinzip auch auf diese Phänomene angewandt werden kann. Die erweiterte Theorie (bekannt unter dem Kürzel TeVeS) ist jedoch alles andere als einfach und ästhetisch. Sie ergibt sich nicht aus „first principles“, sondern hat ein wenig den Charakter eines eklektizistischen Anbaus an ein ehemals einfaches Gebäude. Der Wind mag sich drehen, wenn MOND noch weiter entwickelt wird und gleichzeitig die Suche nach Dunkle-Materie-Teilchen erfolglos bleibt. Für den Moment aber bleibt es dabei: alle Befunde zusammen, astronomische wie kosmologische, favorisieren die Hypothese der Dunklen Materie gegenüber MOND. Insbesondere zu etlichen kosmologischen Befunden für Dunkle Materie, wie etwa zu der beobachteten Häufigkeit von schwerem Wasserstoff oder der 3K-Strahlung (s.u.), wird MOND prinzipiell nichts beitragen können.

7 Der Urknall

Seit den Beobachtungen, die Edwin Hubble Ende der 1920er Jahre am Mount-Wilson-Teleskop in Kalifornien anstellte, wissen wir, dass das Universum als Ganzes sich ausdehnt. Diese Beobachtung rechtfertigte nachträglich die Arbeiten des Leningrader Mathematikers Alexander Friedman. Er hatte schon 1922 gezeigt, dass Einsteins Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie in den meisten Fällen zu einem nicht-statischen Universum führen, zu einem Universum also, das sich entweder zusammenzieht oder ausdehnt. Einstein hatte zuvor, um sein Universum statisch zu halten, willkürlich einen stabilisierenden Term in die Gleichungen eingefügt, die sogenannte kosmologische Konstante Λ (sprich: Lambda).

Die Konstante Λ war also nach Hubble zunächst einmal überflüssig; Einstein bezeichnete sie später launig als „seine größte Eselei“.

Wenn man die Fluchtbewegungen der Galaxien zurückrechnet, landet man irgendwann bei einem Zeitpunkt, zu dem das heute beobachtbare Universum auf ein winziges Volumen konzentriert gewesen sein musste. Mit den aktuellen Messungen der Fluchtgeschwindigkeit ergibt sich dieser Zeitpunkt zu etwa 13,8 Milliarden Jahre. Die Dichte der Materie muss damals unvorstellbar groß gewesen sein.

1948 veröffentlichte der in die USA emigrierte Russe George Gamow zusammen mit zwei jüngeren Mitarbeitern mehrere Arbeiten, in denen er die physikalischen Bedingungen dieser extrem dichten, heißen Phase untersuchte [Alpher 1948]. Einerseits musste seinen Rechnungen zufolge in der ersten Minute nach dem „Urknall“ (so der kurz darauf eingeführte Name) die heute beobachteten Elemente entstanden sein. Das ist, wie wir heute wissen, falsch – es waren nur die allerleichtesten Elemente. Zum anderen musste damals sehr viel Strahlung freigesetzt sein. Diese Strahlung musste sich zusammen mit der Expansion des Universums abgekühlt haben (die Wellenlänge der Photonen wurde durch die Ausdehnung vom Kurzwelligen ins Langwellige auseinandergezogen). Nach Gamovs Rechnung sollte sie heute im Bereich von einem Zentimeter liegen (im sogenannten Mikrowellenbereich), was einer Temperatur des Photonengases zwischen 5 und 50 Kelvin entspricht.

Von diesen Rechnungen wussten Arno Penzias und Robert Wilson nichts, als sie 1965 mit ihrer Hornantenne in New Jersey/USA die aus dem Kosmos eintreffende Radiostrahlung im cm-Bereich untersuchten. Sie entdeckten eine völlig gleichmäßig aus allen Richtungen einfallende Mikrowellenstrahlung, deren Intensitätsmaximum bei Wellenlängen von etwas über einem Millimeter einer Temperatur von etwa 3 Kelvin entspricht [Penzias 1965]. Erst der Kontakt mit der Gruppe von Robert Dicke in Princeton, die sozusagen in Gamovs Fußstapfen forschte, machte klar, womit sie es zu tun hatten: mit dem von Gamov vorhergesagten Abglanz der heißen Ursuppe. Die Entdeckung dieser 3K-Strahlung, auch kosmische Hintergrundstrahlung genannt, war nach Hubbles Entdeckung der Galaxienflucht der zweite wichtige Befund für den Urknall und wurde 1978 mit dem Nobelpreis ausgezeichnet. Der genaue Temperaturwert beträgt 2.725 Kelvin.

Übrigens gab es im Jahr 2006 einen weiteren Nobelpreis für die Vermessung der 3K-Strahlung, diesmal mit dem COBE-Satelliten Anfang der 1990er Jahre: an John Mather als Gesamtverantwortlichen des COBE-Projekts und an George Smoot, der mit seinem auf COBE installierten Spezialinstrument winzige Fluktuationen der 3K-Strahlung um ihren Mittelwert herum entdeckte. Diese Fluktuationen wurden sofort als ein starkes Argument für eine explosionsartige Aufblähung des Universums bei etwa 10^{-35} Sekunden nach dem hypothetischen Zeitpunkt Null erkannt, für die berühmte „kosmische Inflation“. Aus der Vermessung dieser Fluktuationen konnte man im Folgenden wesentliche Grundgrößen des sogenannten kosmologischen Standard-Modells (s.u.) mit großer Genauigkeit bestimmen.

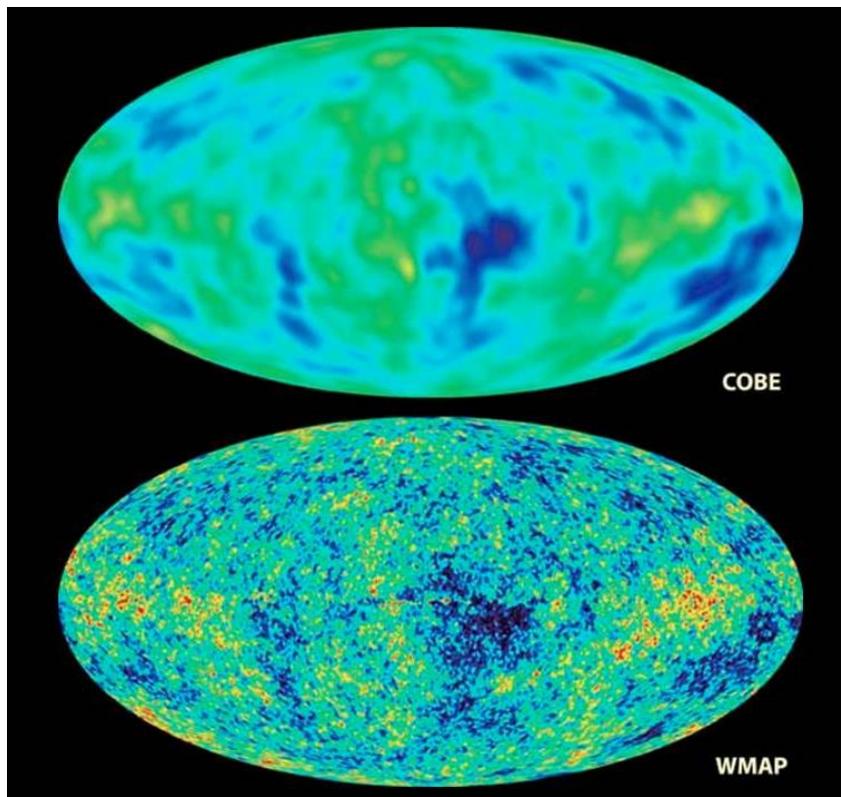


Abb. 4: Die Fluktuationen der Hintergrundstrahlung, wie sie 1992 von COBE (oben) und – mit weit besserer Auflösung – knapp 20 Jahre später mit dem Satelliten WMAP (unten) gemessen wurden. Helle (gelbe) Flecken bezeichnen Gebiete mit höherer, dunkle (blaue) Flecken solche mit niedrigerer Temperatur. Die maximalen Abweichungen vom Mittelwert liegen bei 50-100 μ K (Bild: NASA/WMAP Team).

Die Hintergrundstrahlung befand sich nach der eigentlichen Frühphase für etwa 380 000 Jahre im thermischen Gleichgewicht mit der normalen Materie, weil die Photonen fortlaufend an den elektrisch geladenen Hauptbestandteilen der normalen Materie (positive geladene Atomkerne und negativ geladene Elektronen) gestreut wurden. Erst als die Temperatur auf etwa 3000 Grad gesunken war – und das war nach den erwähnten 380 000 Jahren – konnten die Elektronen an die Kerne ankoppeln und elektrisch neutrale Atome bilden. Damit waren die Photonen mit einem Mal frei und „entkoppelten“ vom Rest der Materie. Von nun an führten sie nahezu ein Eigenleben, was immer der Rest der Materie auch machte (etwa zu Galaxien zu verklumpen oder sich zu Sternen zu verdichten). Das einzig Wesentliche was den Photonen im Weiteren wiederfuhr, war die Vergrößerung ihrer Wellenlänge, d.h. ihre Abkühlung. Sie machte aus dem 3000 Kelvin heißen Photonengas die heutige schwache Radiostrahlung, die einer Temperatur von 2.725 Kelvin entspricht.

Die dritte starke Stütze für das Urknall-Modell wurde durch das Verhältnis von Helium zu Wasserstoff im Universum geliefert. Hierzu muss man wissen, dass praktisch alle schweren Elemente erst in den Sternen und bei Supernova-Explosionen erbrütet wurden. Der allergrößte Teil der normalen Materie besteht schlicht und einfach aus 2 Elementen: Helium-4 und Wasserstoff. Ein Wasserstoffkern besteht aus einem Proton, ein Helium-4-Kern besteht aus zwei Protonen und zwei Neutronen.

Protonen und Neutronen waren knapp eine Sekunde nach dem Urknall in gleicher Menge vorhanden. Neutronen sind aber etwas schwerer als Protonen. Als sich im Folgenden durch Abkühlung die Energie verringerte, welche den Teilchen in Umwandlungsreaktionen zur Verfügung stand, dann mussten irgendwann in den Reaktionen netto mehr Protonen anfallen als Neutronen: für die Umwandlung eines Protons in ein Neutron war einfach nicht immer genügend zusätzliche Energie vorhanden. Zudem sind Protonen stabil, während die Lebensdauer freier Neutronen nur knapp 15 Minuten beträgt. Neutronen wären also nach einiger Zeit sämtlich aus der kosmischen Inventarliste verschwunden, wenn sie nicht einen „rettenden Hafen“ gefunden hätten. Dieser rettende Hafen waren Helium-Kerne. Einmal im Helium-Kern gebunden, wäre nämlich zusätzliche Energie notwendig gewesen, um ein Neutron in das leichtere Proton umzuwandeln. Und die (s.o.) war nicht mehr da.

Allerdings konnten Protonen und Neutronen erst bei ausreichend niedrigen Temperaturen zu schweren Kernen zusammenklumpen, ohne gleich wieder auseinandergerissen zu werden. Die Rettung der Neutronen war also ein Balanceakt. Einerseits musste die Temperatur noch so hoch sein, dass nicht alle Neutronen verschwunden waren, andererseits musste sie niedrig genug sein, dass sich Kerne bilden konnten. Ohne Verluste an Neutronen ging es klarerweise nicht ab, aber *einige* mussten noch da sein, damit überhaupt Helium-Kerne entstehen konnten. Andererseits: wären gar keine Neutronen verschwunden, dann wären alle Protonen mit den Neutronen in Helium-Kernen gebunden worden und die Welt bestünde nur aus Helium.

Genauere Rechnungen zum Abkühlungsprozess und der Kernreaktionen ergeben, dass der Neutronenverlust schließlich zu einem Massenverhältnis He/H von knapp 1/3 führt. Genau das wurde auch beobachtet und stellt die dritte beeindruckende Bestätigung des Urknall-Modells dar.

8 Die kosmische Dichte: Flaches oder gekrümmtes Universum?

Die „Geometrie“ des Universums hängt von seiner Dichte ab. Wenn diese Dichte – gemittelt über das ganze Universum einschließlich der Leerräume zwischen den Galaxien – gleich einer gewissen kritischen Dichte ist, dann ist das Universum „flach“ und folgt der Euklidischen Geometrie (Parallelen schneiden sich erst im Unendlichen, die Winkelsumme eines Dreiecks ist 180° etc.). Diese kritische Dichte (ρ_{krit}) beträgt etwa 10^{-29} g/cm³. Das entspricht nicht mehr als etwa 5 Protonen pro Kubikmeter. Das Verhältnis von tatsächlicher Dichte (ρ) zu kritischer Dichte wird mit Ω bezeichnet: $\Omega = \rho/\rho_{\text{krit}}$.

Für $\Omega = 1$ ist das Universum flach und unendlich ausgedehnt, für $\Omega > 1$ ist es geschlossen (wie etwa eine Kugeloberfläche, auf der sich Parallelen sehr wohl schneiden und die Winkelsumme in einem Dreieck größer als 180° ist) und hat ein endliches Volumen, für $\Omega < 1$ ist es hyperbolisch (etwa wie ein Sattel) und ist ebenfalls unendlich ausgedehnt. In Modellen ohne kosmologische Konstante Λ (bzw. ohne Dunkle Energie) dehnt sich ein Universum mit $\Omega = 1$ bzw. $\Omega < 1$ für ewig aus, eines mit $\Omega > 1$ kollabiert irgendwann unter dem Einfluss der Schwerkraft der Massen, die es enthält. Nach Hinweisen auf etwas wie „Dunkle Energie“ ist dieser Schluss auf die Zukunft des Universums, wie er in Abb. 5 dargestellt ist, allerdings nicht mehr zulässig.

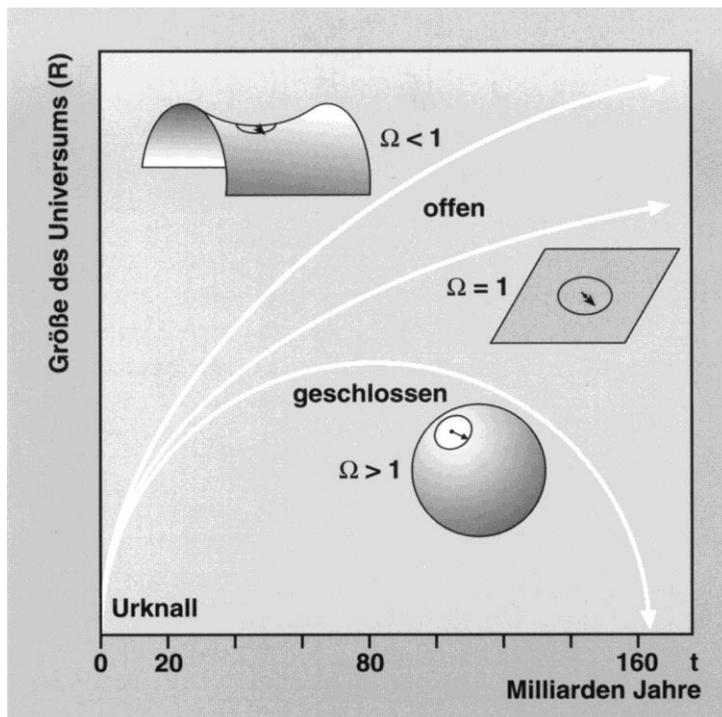


Abb. 5: Geometrie und Entwicklung von Universen mit unterschiedlichen Materiedichten aber ohne kosmologische Konstante oder „Dunkle Energie“ (Bild entnommen aus [Bührke 1997])

Alle Messungen deuten darauf hin, dass das Universum flach ist, d.h. Ω exakt gleich Eins ist. Man nimmt an, dass ein solches flaches Universum beim Urknall etwa 10^{-35} Sekunden nach dem hypothetischen Zeitpunkt Null durch den im vorigen Abschnitt erwähnten explosionsartigen Vorgang („Inflation“) erzeugt wurde. Dabei wurde das Universum schlagartig auf das 10^{50} -fache aufgeblasen. Man stelle sich vor, die Erde würde um einen solchen Faktor „aufgeblasen“. Niemand würde dann

über Entfernungen des Erddurchmessers oder sogar des Durchmessers des Sonnensystems noch die geringste Krümmung auf dieser Riesenkugel ausmachen können. Wir würden annehmen müssen, dass wir nicht auf einer Kugeloberfläche sondern auf einer völlig ebenen Fläche leben, in einer „flachen Welt“! In unserem Zusammenhang ist dabei interessant, dass die gemessenen Werte für die leuchtende Materie nur einige Prozent der kritischen Dichte ausmachen und darum, wenn Ω partout gleich 1 sein soll, ein großer Teil des kosmischen Inventars unsichtbar sein muss.

9 Elementhäufigkeit und Dunkle Materie

Der Befund aus dem vorigen Abschnitt wurde durch die Analyse der Elementhäufigkeit erhärtet. Der in Abschnitt 8 geschilderte Weg von freien Protonen und Neutronen (Sammelbegriff: Nukleonen) zu Helium-4-Kernen geht nämlich nicht durch direkten Zusammenschluss von zwei Protonen und zwei Neutronen zu Helium-4 vonstatten und hängt darüber hinaus empfindlich von der Dichte von Nukleonen zum damaligen Zeitpunkt ab.

Bei der Helium-4-Synthese lagern sich zuerst jeweils ein Neutron und ein Proton zu einem Kern des schweren Wasserstoffs (Deuterium) zusammen:



Ein Teil der Deuterium-Kerne lagert ein weiteres Proton oder Neutron an, wodurch ein Kern von ${}^3\text{He}$ oder ${}^3\text{H}$ (Tritium) entsteht. Erst mit diesem Inventar geht es über die Reaktionen



endlich zu Helium-4. Und mit einigen wenigen Kernen von ${}^3\text{H}$, ${}^3\text{He}$ und ${}^4\text{He}$ gelingt es sogar, ${}^7\text{Li}$ und ${}^7\text{Be}$ zu erschaffen. Damit endet aber die Kette fürs erste. Schwerere Elemente entstehen erst Millionen und Milliarden Jahre später in Sternen.

Ist die Dichte von Nukleonen sehr hoch, so geht der Weg durch die Zwischenstufen sehr schnell und die Teilchen finden sehr schnell ihren endgültigen Hafen in ${}^4\text{He}$ -Kernen: es bleibt wenig ${}^3\text{He}$ und praktisch gar kein Deuterium übrig. Ist die Dichte dagegen zu gering, schaffen es viele Nukleonen nicht bis zu ${}^4\text{He}$ und es bleibt mehr ${}^3\text{He}$ und Deuterium zurück.

Abb. 6 zeigt die Häufigkeiten der leichten Elemente entsprechend dem Urknallmodell für verschiedene Nukleon-Dichten (gemessen im Verhältnis zur Photonendichte, also jenes Photonengases, das heute die 3K-Strahlung bildet) vorhersagt. Der Überlappungsbereich der Messwerte mit den theoretischen Kurven ergibt $\Omega_{\text{Nukleon}} \sim 0.04$. Falls die tatsächliche Dichte des Universums also gleich der kritischen Dichte sein sollte, dann trüge normale Kernmaterie nur etwa 4% dazu bei!

Dieser Befund erhärtet nicht nur astronomische Befunde zu Dunkler Materie, sondern er beweist auch ziemlich klar, dass es sich bei dieser Materieform nicht um „normale“ Materie aus Nukleonen handeln kann.

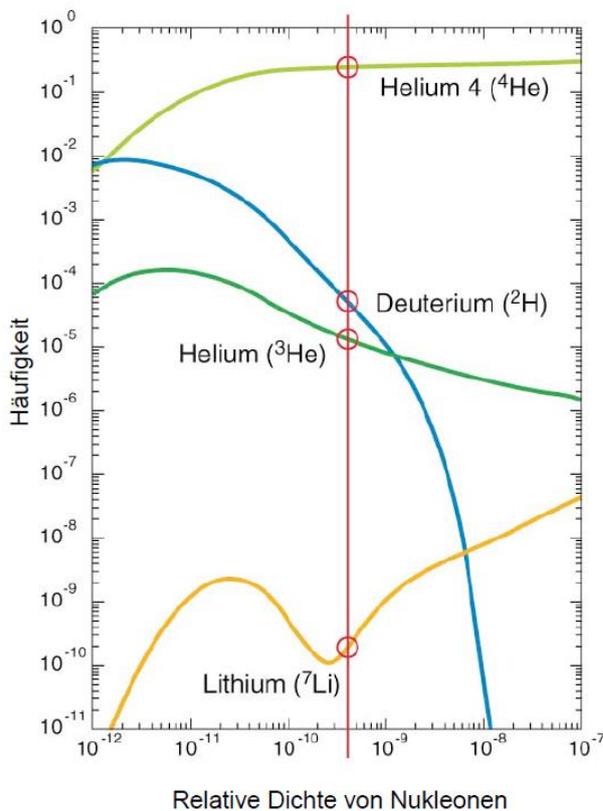


Abb. 6: Erwartete Elementhäufigkeiten in Abhängigkeit der Nukleonen-Dichte relativ zur Dichte von Photonen. Die Kreise markieren die tatsächlich gemessenen Häufigkeiten, die senkrechte Linie den Dichtewert, der aus der Untersuchung der 3K-Strahlung mit dem WMAP-Satelliten folgt. Es ergibt sich konsistent eine relative Nukleonen-Dichte von $3 - 4 \times 10^{-10}$, was $\Omega_{\text{Nukleon}} \sim 0.04$ entspricht (Abb. WMAP Science Team)

10 Dunkle Materie und Strukturbildung

Wenn man sich Abb. 4 ansieht und die winzigen, hingesprenkelten Abweichungen von einigen 10 Mikrokkelvin betrachtet, also ein Zehntausendstel der Mitteltemperatur von 2.725 Kelvin, dann fragt man sich, wie daraus das heutige Universum mit seinen riesigen Leerräumen entstanden ist, in dem sich andererseits hochdichte Materieansammlungen wie Galaxien und Sterne befinden (hochdicht natürlich nur im Vergleich zur mittleren Dichte des Kosmos, nicht zu jener der Erde). Haben die 13.8 Milliarden Jahre tatsächlich ausgereicht, um diesen Verklumpungsprozess zu seinem jetzigen Stadium zu führen?

Nimmt man an, dass es nur normale Materie gibt, dann lautet die Antwort „Nein“. Mit dieser Annahme hätten die Schwankungen in der Hintergrundstrahlung (die denen der Materiedichte bei 380 000 Jahren entsprechen) etwa hundertmal größer sein müssen, also nicht bei 10 μK , sondern bei 1 mK liegen müssen.

Nun kann man aber fragen: gab es bei 380 000 Jahren eine Form von Materie, der diese Schwankungen schon aufgeprägt waren, und zwar deshalb, weil sie vorher ungestört durch thermische Ausgleichsprozesse und aufgrund ihrer eigenen Gravitation schon „vorklumpen“ konnte? An dieser Stelle ist klar, wie die Antwort auf diese Frage lauten dürfte: „Ja, Dunkle Materie!“.

Abb. 7 illustriert den Prozess. Völlige Gleichverteilung von normaler und Dunkler Materie am Anfang. Nach tausend Jahren hat die Gravitation schon ihr Werk begonnen: die Dunkle Materie beginnt langsam, sich in dichteren und weniger dichten Bereiche anzuordnen, ein Prozess, der für die normale Materie aufgrund ihrer elektromagnetischen Wechselwirkung noch nicht losgehen kann; alle ihre Strukturen wurden nämlich sofort wieder ausgewaschen. Nach 380 000 Jahren haben die mittlerweile beträchtlichen Zusammenballungen Dunkler Materie Gravitationsssenken geschaffen, in welche die normale Materie nun nur noch hineinrudeln und sich dann weiter zusammenballen muss. Genau in diesen vorgeformten Gravitationsssenken liegen dann die späteren Galaxienhaufen und Galaxien.

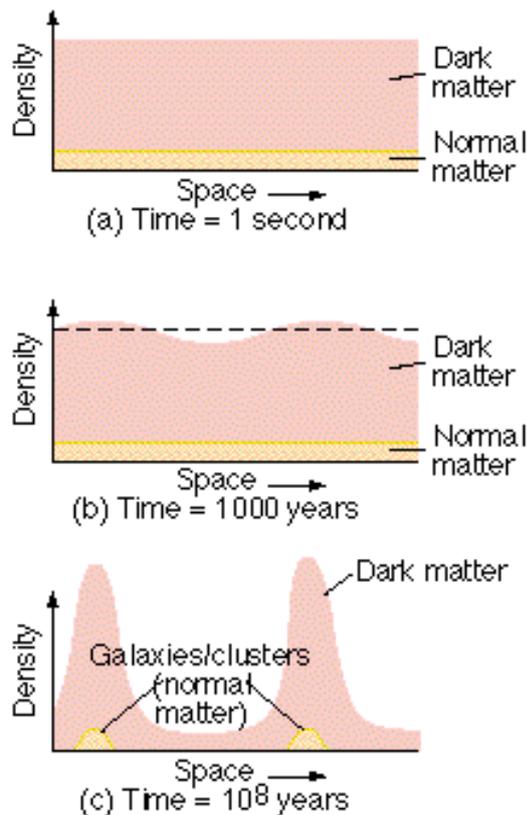


Abb. 7: Strukturbildung mittels Dunkler Materie: Die räumliche Dichteverteilung für normale und für Dunkle Materie in der ersten Sekunde nach dem Urknall, nach 1000 Jahren und nach 100 Millionen Jahren (Abb. adaptiert aus [Chaisson 1999]).

Interessant ist dabei, dass man anhand der relativen Häufigkeit von groß- und kleinskaligen Strukturen Rückschlüsse auf die Masse der Teilchen ziehen kann, aus denen Dunkle Materie besteht. Gäbe es z.B. kaum Strukturen von der Größenklasse von einzelnen Galaxien oder kleinen Galaxienhaufen, dann müsste man annehmen, dass die Teilchen der Dunklen Materie vor 13 Milliarden Jahren so schnell waren (nahe der Lichtgeschwindigkeit), dass sie kleinere Strukturen wieder auseinandergetrieben und damit verwischt hätten. Die Tatsache, dass sich in der Realität kleinere Strukturen gebildet haben, bedeutet darum, dass die Dunkle Materie aus ziemlich massiven Teilchen bestehen muss. Das schließt u.a. auch aus, dass Dunkle Materie aus Neutrinos (s.u.) besteht. Man bezeichnet Materie aus schweren, schon damals nicht mehr relativistischen Teilchen als Kalte Dunkle Materie (*Cold Dark Matter*, kurz CDM). Die leichten, schnellen Neutrinos dagegen waren heiße Dunkle Materie (*Hot Dark Matter*).

11 Dunkle Energie und das Standard-Modell des Kosmologie

Im Jahr 1998 stellten zwei Gruppen unabhängig voneinander Ergebnisse vor, die das bisherige Modell des Universum über den Haufen warfen und ein völlig neues kosmisches Inventarstück hinzufügten: „Dunkle Energie“ [Riess 1998, Perlmutter 1998]. Wir haben nicht die leiseste Ahnung, was sich hinter diesem Begriff verbirgt; wir wissen allerdings, dass sich diesen Messungen zufolge die Expansionsgeschwindigkeit des Universums nicht etwa verringert, sondern im Gegenteil kräftig erhöht. Man hat darum den Eindruck, als wenn der Expansionsprozess durch irgendeine unbekannte Energie noch einmal frisch befeuert wird.

Die Physiker (3 Nobelpreise im Jahr 2011) hatten die Helligkeiten einer Klasse von extrem weit entfernten Supernovae untersucht, die eine wie genormt erscheinende (nämlich immer annähernd gleiche) Lichtemission haben. Aus der Kombination der auf der Erde gemessenen Lichtstärke und der Rotverschiebung konnte man schließen, dass das Universum vor wenigen Milliarden Jahren begonnen haben musste, beschleunigt zu expandieren. Die Supernova-Resultate sowie die Untersuchungen von großräumigen Galaxienstrukturen und der Hintergrundstrahlung legten nahe, dass die Dichte dieser Dunklen Energie einem Beitrag von 70% der kritischen Dichte entspricht.

Das passte auf überraschende Weise zu den Befunden der Materiebestandteile des Kosmos. Die Summe aus normaler Materie und Dunkler Materie hatte nämlich bisher notorisch nur eine Dichte $\Omega \sim 0.3$ ergeben. Das ist weit weniger als das Modell der kosmischen Inflation nahelegt und als es die meisten Kosmologen schon aus „ästhetischen“ Gründen immer gerne gehabt hätten: $\Omega = 1$! Die Dunkle Energie liefert genau den Fehlbetrag zu $\Omega=1$. Im wahrsten Sinne des Wortes *genau*, denn das auf diesen Resultaten fußende Standardmodell der Kosmologie beschreibt die Gesamtheit der Befunde inzwischen mit Prozent-Genauigkeit. Das war vor 20 Jahren gänzlich anders, als Kosmologie zu weiten Teilen eine Wissenschaft vager Von-Bis-Angaben war.

Abb. 8 fasst die kosmologischen Befunde zusammen. Auf der x-Achse ist diejenige Energiedichte aufgetragen, die als *Masse* auftritt und die Expansion durch ihre Schwerkraft abbremst: Ω_M . Hier bezieht sich Masse sowohl auf normale als auch auf Dunkle Materie. Auf der y-Achse ist diejenige Energiedichte aufgetragen, die wie ein Strahlungsdruck wirkt und die Expansion antreibt: Ω_Λ . Das Λ erinnert daran, dass die Dunkle Energie sich ähnlich bemerkbar macht, wie die berühmte, zwischenzeitlich verworfene kosmologische Konstante. Die hervorgehobenen Flächen markieren die Kombinationen von Ω_M und Ω_Λ , die sich aus den verschiedenen Analysen ergeben. Die Supernova-Analyse ist auf die Differenz der beiden Werte sensitiv und sagt im Wesentlichen, dass $\Omega_\Lambda - \Omega_M$ annähernd 0.4 beträgt. Die Analyse der Hintergrundstrahlung (CMB für Cosmic Microwave Background) ist auf die Summe der Werte sensitiv und ergibt $\Omega_M + \Omega_\Lambda \sim 1$. Die Analyse großräumiger Strukturen (Galaxien-Cluster) schließlich ist nur auf die Materiedichte sensitiv und ergibt $\Omega_M \sim 0.3$. Alle zugelassenen Bereiche schneiden sich bei $\Omega_M \sim 0.3$ und $\Omega_\Lambda \sim 0.7$.

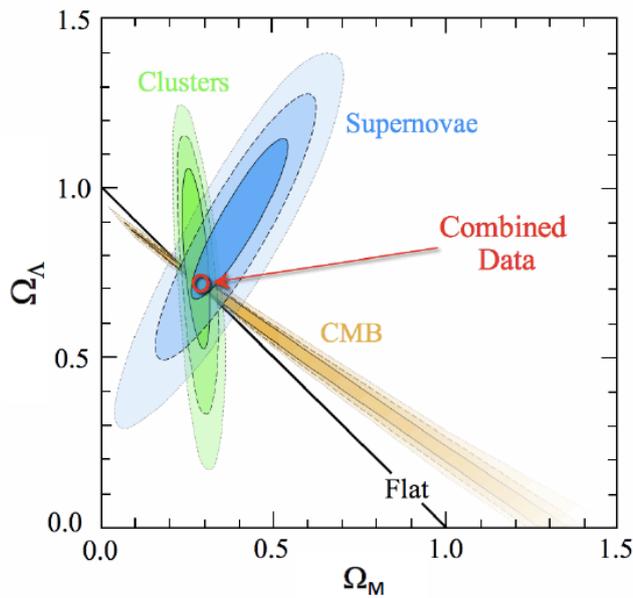


Abb 8: Messungen der Dichte von Materie (Ω_M) und von Dunkler Energie (Ω_Λ) einschließlich ihrer Fehlerbereiche. Die Befunde sind mit einem flachen Universum sowie $\Omega_M \sim 0.3$ und $\Omega_\Lambda \sim 0.7$ konsistent. Adaptiert von [Kowalski 2008]

Normale Materie, die in dem obigen Bild unter Ω_M subsummiert wird, spielt eine untergeordnete Rolle. Ihr Anteil beträgt nur etwas über 4%. Abbildung 9 macht die Gesamtbilanz auf.

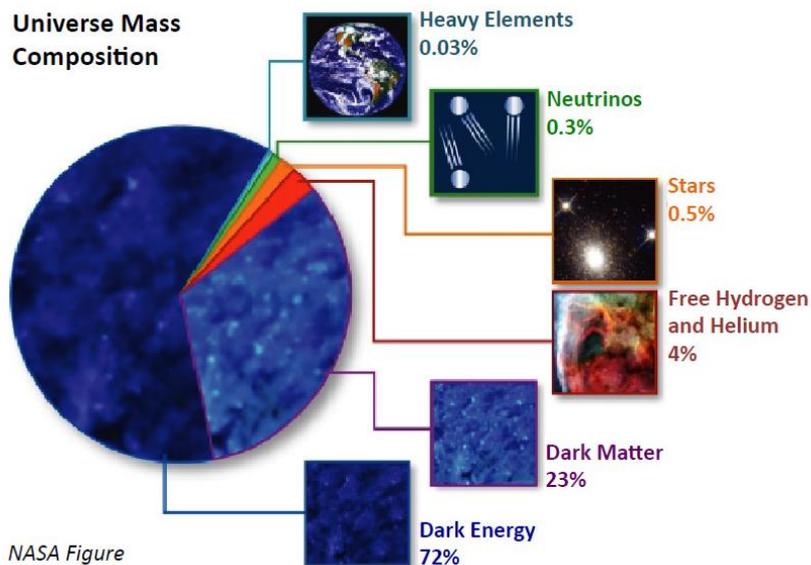


Abb. 9:
Das kosmische Inventar
(Abb.: NASA)

Nur ein halbes Prozent der Materie sitzt in Sternen, und die schweren Elemente jenseits von Lithium tragen sogar nur 0.3 Promille bei. Sie stammen nicht aus dem Urknall, sondern sind erst später in Sternen erzeugt worden. Die Neutrinos mit ihrem Massenanteil von 3 Promille allerdings stammen aus dem Urknall. Sie haben sich in den ersten Sekundenbruchteilen nach dem Urknall „entkoppelt“ und führen seitdem ihr Eigenleben, ähnlich wie die 3K-Photonen 380 000 Jahre später. Die drei Promille sind ein Maximalwert und orientieren sich an dem heute bekannten Maximalwert der Neutrinomasse.

Abb. 9 illustriert die Werte von vor etwa 5 Jahren. Die heutigen genauen Werte unter Einschluss der Messungen der 3K-Strahlung mit dem Planck-Satelliten sind in der Tabelle angegeben.

Alter des Universums	Ω_{Λ}	Ω_M	$\Omega_{\text{normale Materie}}$
(13.81±0.04) Mrd. Jahre	0.684±0.009	0.316±0.009	0.0488 ±0.0006

Die Fehler für die Dichtewerte liegen im Prozentbereich – eine fantastische Präzision! Bei aller Begeisterung über die erreichte Genauigkeit ist aber ein Wort der Vorsicht angebracht. Wenn der Kosmologe sagt „Das ist zu schön um *falsch* zu sein“, fällt einem automatisch die Redewendung „Das ist zu schön um *wahr* zu sein“ ein. Es ist schon einmal in der Astronomie gelungen, Planeten- und Sternbewegungen mit großer Akkuratess, aber mit dem falschen Weltbild zu beschreiben. Das war vor Kopernikus, Galilei und Kepler, als man im Rahmen des geozentrischen Weltbildes die Planetenbewegungen erfassen konnte, indem man die Planeten auf komplizierten, Epizyklen genannten Bahnen wandern ließ. Die Beschreibung durch Planeten auf Kreisbahnen um die Sonne funktionierte zunächst schlechter als jene mit Epizyklen; erst die Keplerschen Ellipsen machte das heliozentrische Weltbild konkurrenzfähig.

Das Standardmodell der Kosmologie ist sicher besser abgesichert und kritischer abgeklopft worden als die Epizyklen. Auch hat sich beim kosmischen Standardmodell niemand hingesezt und unentwegt Schnörkel auf Schnörkel angestrickt, damit es endlich stimmt. Trotzdem kann der Erfolg vorgetäuscht sein und die Wahrheit am Ende ganz anders aussehen. Für den Moment aber ist das Standardmodell das beste verfügbare Handwerkszeug der Kosmologen und wurde durch jede neue Beobachtung bestätigt.

12 Teilchen und Kräfte

Wir gehen davon aus, dass es sich bei Dunkler Materie um irgendeine Form von Teilchen handelt und nicht um ein Kontinuums-Phänomen. Deshalb ist an dieser Stelle ein kleines Intermezzo zu Elementarteilchen und zu den Kräften, die zwischen ihnen wirken, angebracht.

Im Jahr 1932 kannte man ganze drei Elementarteilchen: Proton, Neutron und Elektron. Vier, wenn man das Lichtteilchen (das Photon) noch dazurechnet. Atomkerne sind aus Protonen und Neutronen aufgebaut, die Atomhülle aus Elektronen. Das sollte sich in den 1930er Jahren rasant ändern und in den 1960er Jahren zu einem regelrechten Teilchenzoo führen, mit mehr als 100 Mitgliedern.

Dieser Zoo wurde durch das Quarkmodell auf einige wenige Grundbausteine reduziert: sechs Quarks und sechs sogenannte Leptonen. Aus ihnen sind alle Mitglieder des unübersichtlichen Teilchenzoos aufgebaut. Sie sind in Abb.10 aufgeführt, zusammen mit den Sonderteilchen, die für die Vermittlung von Kräften verantwortlich sind, und mit dem vor drei Jahren nachgewiesenen Higgs-Boson, dessen Existenz theoretisch masselosen Teilchen zu einer Masse verhilft.

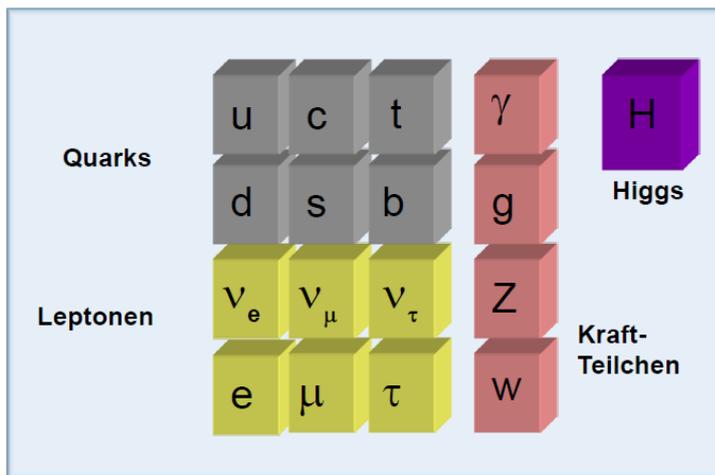


Abb. 10:
Die Grundbausteine der Materie

Sieht man von den Kraftteilchen und dem Higgs ab, dann kann man drei Familien von Materiebausteinen unterscheiden. Die erste besteht aus u- und d-Quarks, den Elektronneutrinos (ν_e) und dem Elektron, samt ihren Antiteilchen. Eigentlich könnte es damit sein Bewenden haben: Protonen und Neutronen bestehen aus u- und d-Quarks, und bei radioaktiven Zerfällen spielen ebenfalls nur u- und d-Quarks, Elektronen und Neutrinos (bzw. deren Antiteilchen) eine Rolle. Die Teilchen von Familie 2 und 3 werden nur an Beschleunigern oder durch kosmische Strahlen im Universum erzeugt. In Familie 2 sind das z.B. die strange- und charm-Quarks (s und c), die Myonen (μ) und die Myon-Neutrinos (ν_μ).

Neutrinos

Ich möchte den Neutrinos einige detailliertere Bemerkungen widmen. Einmal, weil sie über viele Jahre als die vielversprechendsten Kandidaten für Dunkle Materie gehandelt wurden. Zum anderen, weil sie seit etwa drei Jahrzehnten Gegenstand bzw. Hilfsmittel meiner eigenen Forschungstätigkeit sind.

Neutrinos wurden 1930 von dem Physiker Wolfgang Pauli zur Erklärung der „fehlenden“ Energie im radioaktiven Beta-Zerfall ($n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$) postuliert, aufgrund ihrer schwachen Wechselwirkung aber erst 1956 an einer äußerst intensiven Neutrinoquelle, einem Kernreaktor in den USA, über die Reaktion $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$ nachgewiesen. Die drei Neutrinosorten Elektron-Neutrino (ν_e), Myon-Neutrino (ν_μ) und Tau-Neutrino (ν_τ) können sich über einen Prozess, den man „Neutrino-Oszillation“ nennt, auf ihrem Weg von der einen Sorte in eine andere Sorte umwandeln.

Neutrinos zeichnen sich durch eine extrem geringe Reaktionsfreudigkeit aus. Von 60 Milliarden Neutrinos, die in jeder Sekunde pro Quadratcentimeter auf der Erde treffen, stoßen auf ihrem Weg durch den Erdball nur ein knappes Dutzend mit einem Atomkern zusammen, der Rest durchquert die Erde völlig unbeeinflusst. Das macht den Nachweis sehr schwierig. Auf der anderen Seite befähigt es Neutrinos, aus Himmelskörpern zu entweichen, die für Licht undurchsichtig sind. Damit sich etwa elektromagnetische Strahlung die 700 000 km dem Sonneninnern zur Sonnenoberfläche hocharbeiten kann – über unendlich viele Absorptions- und Re-Emissionsprozesse –, vergehen einige

hunderttausend Jahre. Dabei wird die innen noch 15 Millionen Grad heiße Strahlung auf etwa 6 000 Grad heruntergekühlt. Anders Neutrinos: sie behalten ihre Ausgangsenergie bei, verlassen die Sonne nach gut 2 Sekunden und kommen 8 Minuten später auf der Erde an. Sie sind also ideale kosmische Boten, wenn man von der Schwierigkeit des Nachweises einmal absieht.

Der Nachweis kosmischer Neutrinos findet durchweg tief unter der Erde oder in tiefem Wasser oder Eis statt. An der Erdoberfläche würden die seltenen Neutrinoreaktionen völlig von Störsignalen überdeckt, z.B. von Reaktionen geladener kosmischer Strahlung (Protonen und schwere Atomkerne), die wie ein Regen permanent auf die Erdatmosphäre prasselt.

Die Reaktionsfreudigkeit von Neutrinos wächst mit ihrer Energie. Während von den 60 Milliarden Sonnenneutrinos im keV- bis MeV-Bereich kaum ein Dutzend beim Durchqueren des Erdballs wechselwirkt, schaffen es im TeV-Bereich schon einige Prozent der Neutrinos nicht durch die gesamte Erde ($1 \text{ TeV} = 10^3 \text{ GeV} = 10^6 \text{ MeV} = 10^9 \text{ keV}$). Das macht den Nachweis bei hohen Energien um einiges leichter.

In direkten Messungen der Neutrino-Massen zeigte sich bisher kein Hinweis auf eine Ruhemasse. Die entsprechende experimentelle obere Grenze für Elektron-Neutrinos liegt bei 2.3 eV. Aus kosmologischen Daten ergibt sich sogar eine noch strengere Grenze, nämlich etwa 1 eV für die Summe aller drei Neutrinomassen.

Wie oben erwähnt, sind aus dem Urknall ähnlich viele Neutrinos wie 3K-Photonen übriggeblieben. Man weiß also, wie viele Neutrinos pro Kubikzentimeter der Kosmos enthält (400-500) und kann sich fragen, ob die erwähnte Masse (bzw. Massengrenze), multipliziert mit der Neutrinoanzahl ausreicht, um die Dunkle Materie zu konstituieren. Die Antwort ist Nein. Die Neutrinomasse müsste bei rund 25 eV liegen und nicht bei einem Elektronenvolt. Außerdem hätten die schnellen Neutrinos (Hypothese der heißen Dunklen Materie, s.o.) kleinere Strukturen im frühen Universum sehr schnell verwischt und ein falsches Bild der räumlichen Struktur des Kosmos ergeben.

Bisher wurden Neutrinos von zwei extraterrestrischen Quellen nachgewiesen: von der Sonne (keV-MeV) und 1987 von einer Supernova in der Großen Magellanschen Wolke (einige MeV). Dafür wurde 2002 ein Nobelpreis an Raymond Davis (USA) und Masatoshi Koshiba (Japan) vergeben. Im Jahre 2013 gelang es unserem IceCube-Experiment am Südpol zudem, höchstenergetische kosmische Neutrinos im Bereich von 10 TeV bis 2 PeV ($1 \text{ PeV} = 10^3 \text{ TeV}$) nachzuweisen, allerdings bisher ohne eindeutige Zuordnung zu eine Quelle [Aartsen 2013].

Die Grundkräfte und ihre Vereinigung

Neben den eigentlichen Materiebausteinen, den Quarks und Leptonen sind in Abb. 10 auch „Kraftteilchen“ aufgeführt. In der Sprache der Quantenphysik werden Kräfte durch den Austausch spezieller Feld-Teilchen vermittelt. Wir kennen 4 Grundkräfte: die elektromagnetische Kraft, die schwache Kraft, die starke Kraft und die Gravitationskraft. Wir lassen die letzte einmal beiseite, denn es ist bisher nicht gelungen, sie befriedigend in der Quantensprache zu beschreiben.

Elektromagnetische Kräfte werden durch Photonen (γ) vermittelt, die starke Kraft durch den Austausch sogenannten Gluonen (g) und die schwache Kraft durch den Austausch von W- und Z-

Bosonen. Im Rahmen der sogenannten Großen Vereinheitlichenden Theorien der Teilchenphysik kann man diese drei Kräfte durch eine gemeinsame Theorie beschreiben. Solche Theorien gelten streng erst bei extrem hohen Energien, wie sie etwa im Urknall geherrscht haben. Heutzutage ist die Symmetrie gebrochen und die drei Kräfte erscheinen als völlig unterschiedliche Phänomene.

Neutrinos wechselwirken nur über die schwache Kraft (daher die Reaktionsunwilligkeit). Wie alle Teilchen unterliegen sie dem Einfluss der Gravitationskraft. Bei den anderen Teilchen kommt noch die elektromagnetische Kraft hinzu und bei den Quarks schließlich noch die starke Kraft.

Einer der Ansätze, die drei Kräfte zu vereinigen (sowie eine Anzahl weiterer Probleme in der Teilchenphysik zu lösen!) nennt sich Super-Symmetrie (SUSY). In supersymmetrischen Theorien wird jedem normalen Teilchen ein SUSY-Partner zugeordnet, der genau den entgegengesetzten Eigendrehimpuls („Spin“) hat: den Quarks die „Squarks“, den Leptonen die „Sleptonen“, dem Higgs das „Higgsino“ etc.

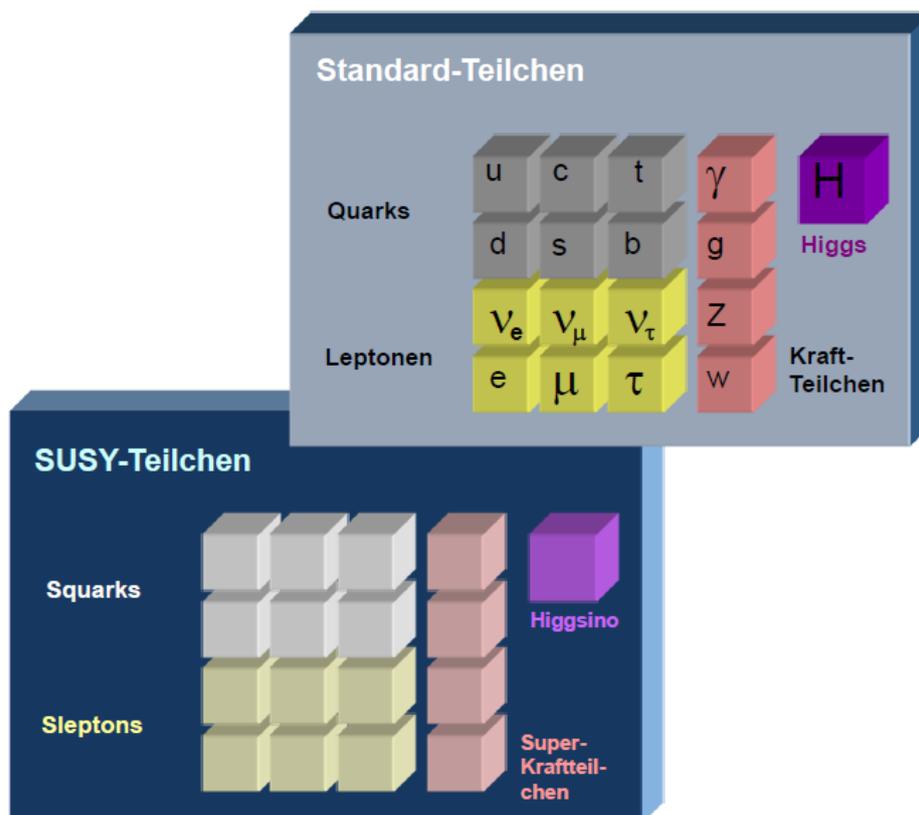


Abb. 11: Standard-Teilchen und SUSY-Teilchen

SUSY-Teilchen können weit schwerer als ihre „normalen“ Partner sein. Sie müssen außerdem, ähnlich wie Neutrinos, sehr schwach wechselwirken (wofür aber andere Kraftteilchen verantwortlich sein müssen als die W- und Z-Bosonen). Sie sind, mit einem Wort, ideale Kandidaten für Dunkle Materie!

13 Die Kandidaten der Teilchenphysik für Dunkle Materie

Im Moment gibt es zwei Kandidaten für Dunkle Materie, die aus Sicht der Teilchenphysiker als „theoretisch wohlbegründet“ gelten dürfen: Das leichteste Teilchen aus der Familie der SUSY-Teilchen und das *Axion*.

SUSY WIMPs: Die Wechselwirkungswahrscheinlichkeit derjenigen SUSY-Teilchen, bei denen überhaupt eine Chance auf ihren Nachweis besteht, liegt wahrscheinlich 3 bis 10 Größenordnungen unter der von Neutrinos, ihre Masse irgendwo zwischen einigen GeV und einigen –zig TeV. In ihrer Eigenschaft als Dunkle-Materie-Kandidaten werden diese Teilchen für gewöhnlich als WIMPs bezeichnet, als „Weakly Interacting Massive Particles“. Auf die verschiedenen Nachweismöglichkeiten für WIMPs, auf die fantastische Steigerung der Empfindlichkeit der Suchexperimente in den letzten 20 Jahren, aber auch auf die mittlerweile peinlich vielen Fehlmeldungen zu angeblichen Entdeckungen soll im nächsten Absatz eingegangen werden.

Pech hätten wir, wenn das leichteste SUSY-Teilchen das Gravitino wäre. Dessen Wechselwirkungswahrscheinlichkeit liegt noch einmal 15-20 Größenordnungen unter jener von WIMPs, was sie zwar nicht als Kandidaten für Dunkle Materie disqualifiziert, aber jeden direkten Nachweis ausschließt.

Superschwere Dunkle Materie: Dunkle-Materie-Teilchen müssen nicht unbedingt schwach wechselwirkend sein. Wenn sie genügend massiv sind – sagen wir eine Million Mal so schwer wie die leichtesten SUSY Teilchen – dann würde auch eine Million Mal weniger von diesen Teilchen ausreichen, um die Gesamtmasse von Dunkler Materie auf die Waage zu bringen. Dann gäbe es nicht unbedingt deshalb so selten Reaktionen mit anderen Teilchen, weil die Wechselwirkung so schwach ist, sondern deshalb, weil schlicht und einfach so wenig dieser Teilchen im Kosmos herumfliegen.

Auch in dieser Klasse haben supersymmetrische Theorien Kandidaten anzubieten: etwa die sogenannten *Q-Balls*, die gut und gerne eine Milliarde Mal so schwer wie die Standard SUSY-WIMPs sein können. Sie könnten eine sehr hohe Wechselwirkungsstärke haben (z.B. 10^{15} mal mehr als Neutrinos), ohne dass wir sie notwendigerweise entdeckt haben müssten; einfach weil es so wenige sind! Obwohl ihre Existenz sich nicht so zwingend aus SUSY Theorien ergibt wie die von WIMPs, lohnt es sich allemal, danach zu suchen. Mit unserem Neutrinoteleskop IceCube am Südpol tun wir das.

Ein weitere Möglichkeit wäre, dass es sich bei Dunkler Materie um sogenannte *topologische Defekte* handelt, Raum-Zeit-Regionen, die beim Übergang zwischen verschiedenen „Aggregatzuständen“ des frühen Universums wie Defektstellen in einem ansonsten regelmäßigen Kristall eingefroren sind. Das könnten Objekte mit Teilchencharakter sein (wie etwa *magnetische Monopole*, nach denen wir in IceCube ebenfalls suchen), es können aber auch ausgedehnte Regionen von galaktischen Dimensionen sein, die *kosmischen Strings* (nicht zu verwechseln mit den „Superstrings“ der Teilchenphysiker, die Objekte weit unterhalb der atomaren Skala sind).

Axionen: Diese Teilchen ergeben sich aus einer Theorie, die Roberto Peccei und Helen Quinn Ende der 1970er in Stanford/USA entwickelten [Peccei 1977]. Auch hier geht es um Symmetrieüberlegungen, allerdings nicht wie bei SUSY im Rahmen von Vereinheitlichungstheorien, sondern als Ergänzung zur Theorie der starken Kraft. Diese Teilchen müssten extrem leicht sein,

zwischen einem Millionstel und einem Hundertstel Elektronenvolt ($10^{-6} - 10^{-2}$ eV). Anders als Neutrinos sollen Axionen im frühen Universum niemals im thermischen Gleichgewicht mit dem Rest der Materie gewesen sein. Sie wären darum „kalt geboren“ und dann natürlich auch kalt (und damit langsam) geblieben. Axionen würden darum trotz ihrer winzigen Masse als Kandidaten für Kalte Dunkle Materie taugen.

Diese hypothetischen Teilchen wechselwirken mit Magnetfeldern. In starken Magneten könnten sie dabei Photonen im GHz-Bereich erzeugen, die wiederum in supraleitenden Spulen ein Radiosignal induzieren müssten. Der bekannteste Detektor dieser Art steht an der University of Washington und heißt ADMX (Axion Dark Matter eXperiment [webpage-ADMX]). Vor der Inbetriebnahme von ADMX hatte eine andere Gruppe eine offenbar fälschliche Entdeckung gemeldet. Das viel empfindlichere ADMX dagegen hat bis jetzt nichts gesehen. Eine neue, empfindlichere Version des Instruments wird gerade aufgebaut. Indem es die Spulen sukzessive über einen großen Frequenzbereich durchstimmt, wird ADMX im nächsten Jahr (also 2016) fast den ganzen interessanten Massenbereich durchforstet haben. Ein Entwicklungsprogramm für „ADMX-HF“ mit einer nochmals gesteigerten Empfindlichkeit und einem zu hohen Frequenzen erweiterten Suchbereich ist gerade gestartet worden.

Neutrinos: Dass keines der drei normalen Neutrinos die Dunkle Materie konstituieren kann, hatte ich oben schon erwähnt. Diese Teilchen sind einfach zu leicht. Eine vierte Neutrinofamilie, deren Mitglieder ähnlich geartete Reaktionsraten zeigen wie die der ersten durch Familien, ist durch Experimente an Teilchenbeschleunigern ausgeschlossen. Was aber, wenn die Neutrinos einer vierten oder fünften Familie nicht einfach nur schwach, sondern *gar nicht* mit normaler Materie wechselwirken? Solche hypothetischen Neutrinos werden unter dem Namen „sterile Neutrinos“ seit kurzem viel diskutiert. Die Diskussion wurde u.a. durch Beobachtungen von Neutrinos losgetreten, die aus Kernreaktoren herausfliegen. Dort meint man neuerdings ein Neutrinodefizit gemessen zu haben, dass durch die „Oszillation“ von Elektronneutrinos (die im Reaktor entstehen) in schwere Neutrinos erklärbar wäre. Die Masse dieser Neutrinos müsste im keV-Bereich liegen. Sie müssten bei jeder Wechselwirkung, also *steril* sein, sonst hätten sie sich an Beschleunigern – zumindest indirekt – schon bemerkbar gemacht. Sterile Neutrinos wären ein Zwischending zwischen heißer Dunkler Materie und kalter Dunkler Materie, also so etwas wie *warme* Dunkle Materie.

Im Moment laufen viele Experimente an, um der Frage nach sterilen Neutrinos genauer auf den Grund zu gehen. Solange diese Experimente die bisherigen Hinweise nicht auf eine sicherere Basis stellen, lohnt es sich aus meiner Sicht nicht, sterile Neutrinos als Dunkle-Materie-Kandidaten ernsthaft in Betracht zu ziehen. Das hindert natürlich Physiker keineswegs daran, astrophysikalische Befunde daraufhin abzuklopfen, ob man sie auch (oder vielleicht sogar am besten!) mit sterilen Neutrinos erklären kann. So wurde z.B. Anfang 2014 von mehreren Forschungsgruppen, unabhängig voneinander, ein Röntgensignal bei einer Energie von 3.5 keV in Galaxien und Galaxienhaufen entdeckt. Normale astrophysikalische Erklärungsversuche waren bisher wenig erfolgreich. Elegant dagegen erscheint vielen Forschern die Erklärung, dass ein steriles Neutrino in ein normales Neutrino hinüberoszilliert, wobei es ein Photon mit exakt 3.5 keV abstrahlt. Auch hier heißt es: abwarten, bis bessere Daten vorliegen. Das wird mit dem japanischen Astro-H-Satelliten der Fall sein, der im nächsten Jahr in den Orbit gehen soll.

Abb. 12 gibt einen Überblick über die Kandidaten für Dunkle Materie. Neben den schon angesprochenen Teilchen finden sich hier auch Axinos (die supersymmetrische Ausgabe von Axionen) und WIMPzillas, extrem schwere Verwandte der WIMPs. Eingezeichnet sind die Bereiche für den Wirkungsquerschnitt (also die Wahrscheinlichkeit, dass dieses Teilchen mit Materie reagiert) und für die Teilchenmasse. Der Wirkungsquerschnitt ist hier in der Einheit Picobarn (pb) angegeben. $1 \text{ pb} = 10^{-36} \text{ cm}^2$. Man beachte die mehr als 40 Größenordnungen, über die sich die Wirkungsquerschnitte erstrecken, und die 30 Größenordnungen für die Massenwerte. „Das ist ein weites Feld.“ würde Fontane sagen.

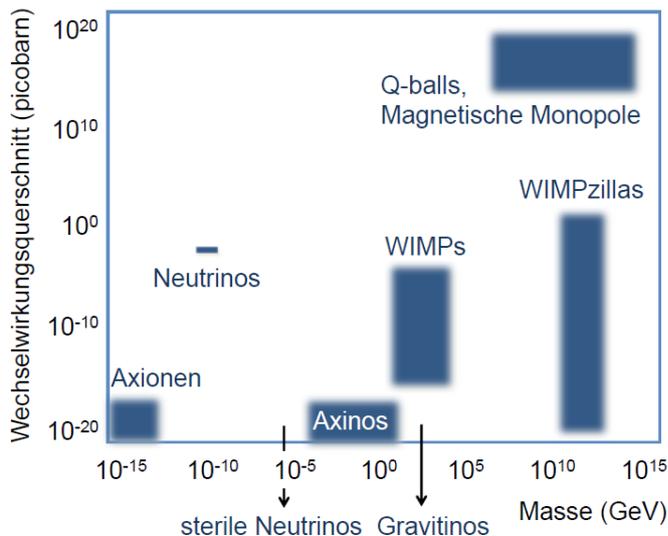


Abb 12: Die Kandidaten für Dunkle Materie mit den möglichen Bereichen für ihren Wirkungsquerschnitt und ihre Masse.

14 Suche nach WIMP Dark Matter

Prinzipiell gibt es drei Methoden, WIMPs zu entdecken. Sie sind in Abb. 13 dargestellt.



Abb. 13: Drei Wege nach den Teilchen der Dunklen Materie zu suchen [Spiering 2008].

1. *Direkter Nachweis:* Hier versucht man die Rückstoßprodukte nachweisen, die bei den seltenen Reaktionen von WIMPs in unterirdischen Detektoren erzeugt werden. Die Detektoren müssen sich tief unter der Erde befinden, um Sekundärteilchen der kosmischen Strahlung abzuschirmen. Bei den Detektoren handelt es sich einerseits um hochreine Kristalle, z.B. aus Germanium oder Silizium, die bei Temperaturen von 10-20 mK (also 20 Tausendstel Grad über dem absoluten Nullpunkt) betrieben werden, andererseits um flüssige Edelgase wie Xenon oder Argon. Man misst die extrem geringen Licht- und Ionisationssignale (bei den Kristalldetektoren auch die Wärmeschwingungen), die durch das Rückstoßprodukt erzeugt werden.
2. *Indirekter Nachweis:* WIMPs können nicht nur sehr schwach mit normaler Materie reagieren, sondern auch mit sich selbst. Wenn sich irgendwo genügend viele WIMPs angesammelt haben, dann können sie aufeinander treffen und „annihilieren“ – womit man meint, dass sie in normale Materie zerstrahlen und keines der beiden WIMPs übrig bleibt.

Ein relativ naher Ort, wo die WIMP-Dichte besonders hoch sein müsste, ist die Sonne, weil sie WIMPs auf Grund ihrer Schwerkraft einfangen kann. Je mehr WIMPs sich im Verlaufe der Jahrmillionen im Sonneninnern ansammeln, umso größer ist die Chance, dass zwei von ihnen aufeinandertreffen und zerstrahlen. Die Teilchen, die in diesem Prozess entstehen, werden natürlich gleich wieder in der Sonne absorbiert, allerdings mit einer Ausnahme: den Neutrinos. Die Suchstrategie besteht also darin, nach einem Überschuss hochenergetischer Neutrinos aus der Richtung der Sonne zu fahnden. Eine Verwechslung diese Neutrinos mit normalen Sonnenneutrinos, die bei den Kernreaktionen im Sonneninnern erzeugt werden, ist aufgrund der viel geringeren Energie der Letzteren ausgeschlossen.

Eine andere Möglichkeit des indirekten Nachweises besteht darin, nach Gamma-Strahlen (γ) mit einem charakteristischen Spektrum zu suchen, wie sie vielleicht durch Annihilationsprozesse im galaktischen Zentrum oder im Halo entstehen. Und schließlich kann man nach geladenen Antiteilchen wie Antiprotonen (\bar{p}) oder Positronen (e^+) suchen, deren Anzahl und Energieverteilung sich nicht durch normale Stöße der kosmischen Strahlung erklären lassen.

3. Schließlich könnten SUSY-Teilchen beim Aufeinanderprallen von Protonen wie etwa im Large Hadron Collider (LHC) in Genf erzeugt werden. Ihr Vorhandensein würde sich dadurch bemerkbar machen, dass in der Gesamtbilanz aller erzeugten Teilchen Energie fehlt; so ähnlich wie sich vor fast hundert Jahren das Vorhandensein von Neutrinos durch fehlende Energie im radioaktiven Betazerfall ankündigte. Bis jetzt hat man dieses charakteristische Energiedefizit noch nicht beobachtet, aber nach der kürzlichen Wiederinbetriebnahme des LHC mit fast verdoppelter Energie kann sich das (hoffentlich!) ändern.

Natürlich hieße die Entdeckung von SUSY-Teilchen noch nicht automatisch, dass das dann auch die Teilchen der Dunklen Materie sind. Wenn aber das LHC Resultat mit den

Ergebnissen von direkten oder indirekten Befunden zusammenpassen würde, dann läge eine entsprechende Interpretation zumindest sehr nahe.

Wenn man nach den Meldungen der Presse geht, dann müssten Teilchen der Dunklen Materie schon fünf- bis sechsmal entdeckt worden sein. Eines der entsprechenden Messergebnisse steht schon seit über einem Jahrzehnt im Raum, und seine statistische Signifikanz ist inzwischen über jeden Zweifel erhaben. Es wurde mit einem „relativ“ simplen Detektor erzielt, der aus hochreinen NaI-Kristallen besteht, anfangs 100 kg, inzwischen 250 kg. Detektiert wird hier das winzige Lichtsignal (Szintillationslicht), das geladene Teilchen wie etwa die Rückstoßkerne aus WIMP-Reaktionen aussenden. Der Detektor heißt DAMA (von DArk MATter) und steht im italienischen Untergrundlabor LNGS, tief im Gran Sasso Massiv. Die DAMA-Gruppe um ihre Leiterin Rita Bernabei von der Universität Rom beobachtet, dass die Signalrate nach Abzug der Störeffekte im Jahresrhythmus schwankt, wie in Abb. 14 gezeigt [Bernabei 2008]. Die anfänglich noch stark streuenden Datenpunkte, die durchaus noch Zweifel an der periodischen Veränderung offen ließen, folgen nach Erweiterung des Detektors auf 250 kg ganz offensichtlich einer Sinuskurve.

Die Interpretation der DAMA-Gruppe ist die folgende: Das Sonnensystem bewegt sich mit etwa 230 km/s im Vergleich zum Ruhesystem der Galaxis. Es pflügt darum mit etwa dieser Geschwindigkeit durch den „See“ aus galaktischen WIMPs. Andererseits rotiert die Erde mit 30 km/s um die Sonne. Diese Geschwindigkeit (genauer: die Geschwindigkeitskomponente entlang der galaktischen Bewegung) erhöht die Relativgeschwindigkeit zwischen WIMPs und Erde für ein halbes Jahr und erniedrigt sie für das nächste Halbjahr. Bei größerer Relativgeschwindigkeit zwischen Erde bzw. den NaI-Kristallen in DAMA steigt die Reaktionsrate, bei kleinerer Relativgeschwindigkeit sinkt sie.

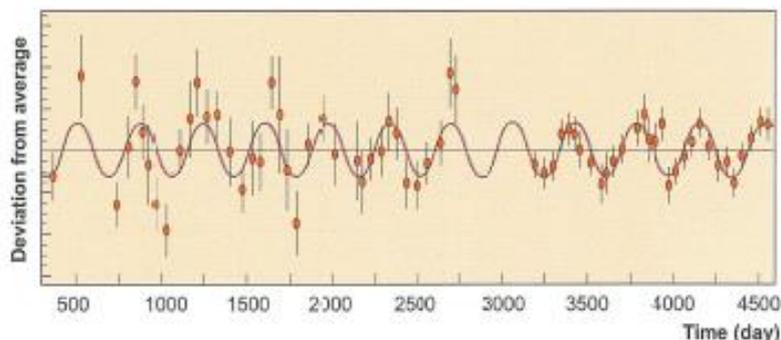


Abb. 14: Die Schwankungen der Datenrate im DAMA-Experiment, gemessen über 12 Jahre. Die Periode der Schwankungen beträgt 365 Tage (adaptiert von [Bernabei 2008]).

Statistisch ist der Befund völlig klar; unklar ist, ob er wirklich etwas mit Dunkler Materie zu tun hat. Rita Bernabei behauptet seit vielen Jahren ebenso kämpferisch wie beharrlich, dass daran überhaupt kein Zweifel bestehen könne. Ihr Resultat könne nur mit Teilchen der Dunklen Materie erklärt werden, wobei deren Masse im Bereich von 7-15 GeV liegen müsse. Das Problem ist nur, dass andere Experimente mit inzwischen weit höherer Empfindlichkeit den Effekt auch hätten sehen müssen. Das ist aber nicht der Fall. Natürlich hat die DAMA-Gruppe Argumente gefunden, die zu erklären versuchen, warum nur ihr NaI-Detektor das WIMP-Signal sieht, aber Detektoren mit Xenon-Gas oder Germanium-Kristallen nicht. Überzeugend sind diese Klimmzüge für die meisten Experten nicht. Wahrscheinlich lässt sich der Widerspruch nur dadurch lösen, dass eine unabhängige Gruppe das Experiment an einem anderen Ort wiederholt. Im Idealfall läge dieser Ort auf der Südhalbkugel der Erde. Wären die jährlichen Schwankungen nämlich nicht auf WIMPs sondern auf die irdischen

Jahreszeiten und ihren Warm/Kalt-Variationen zurückzuführen, dann müsste die rätselhafte Schwankung im Süden um ein halbes Jahr versetzt sein. Wären WIMPs die Ursache, so gäbe es keine Phasenverschiebung.

Die Interpretation der DAMA-Ergebnisse bleibt zwar offen, aber die Schwankungen sind wenigstens statistisch signifikant. Das kann man leider von einer Reihe anderer Beobachtungen nicht sagen. Mindestens drei stammen aus den letzten sieben Jahren und wurden in Untergrundlabors gemacht. Die aufreizend nach Dark Matter aussehenden Ereignisse des CRESST-Experiments im Gran Sasso-Laboratorium haben sich als Resultat von Störeffekten erwiesen, die von den Forschern selbst identifiziert und dann beseitigt wurden. Die drei Ereignisse des CDMS-Detektors in den USA (2009 gemeldet) liegen im Rahmen normaler statistischer Ausreißer. Tatsächlich hat die CDMS-Kollaboration das selbst belegen können, nachdem sie mehr Daten ausgewertet hatte. Die jahreszeitlichen Schwankungen, die für den CoGent Detektor, ebenfalls USA, gemeldet wurden, lassen jeden, der etwas von Statistik versteht, ratlos zurück. Jedes Mal aber gab es vorschnelle Pressemeldungen, in den USA einen regelrechten Presserummel. Das tut dem Gebiet nicht gut. Wer soll bei der nächsten diesbezüglichen Meldung noch glauben, dass es lohnt, sie bis zu Ende zu lesen? Und etwas weiter gedacht: Wer soll den Klimaforschern den Klimawandel abnehmen, wenn die Kollegen in der Grundlagenforschung (oder wenn nicht sie selbst, dann die Presse) immer wieder Fehlalarm auslösen? Es muss ja nicht immer so schlimm kommen wie mit den Neutrinos, die angeblich schneller als Licht fliegen, oder den angeblichen Hinweisen auf Gravitationswellen aus dem Urknall, die der BICEP-Detektor am Südpol fälschlich gemeldet hatte – die beiden größten Pleiten der wissenschaftlichen Außenwirkung in den Jahren 2013 bzw. 2014. Fünf falsche oder völlig wacklige Meldungen zu Dunkler Materie haben letztlich den gleichen Effekt. Und es sind inzwischen weit mehr als Fünf!

Ein weiteres zweifelhaftes Resultat stammt aus der indirekten Suche nach Dunkler Materie. In den Daten des Fermi-Satelliten, dessen LAT-Detektor Gamma-Strahlung im GeV-Bereich aufzeichnet, zeigte sich angeblich ein Peak bei etwa 135 GeV Energie, der sofort als mögliches Resultat der Zerstrahlung von 135-GeV schweren WIMPs in zwei Gamma-Quanten interpretiert wurde und ein Flut von Theorie-Veröffentlichungen nach sich zog. Bezeichnenderweise stammte die Analyse [Weniger 2012] nicht von einem Mitglied des Fermi-Teams selbst. Inzwischen hat sich der Effekt in Luft aufgelöst.

Offen ist zurzeit noch, wie die endgültige Antwort des *Alpha Magnetic Spectrometer* AMS aussehen wird. AMS ist auf der Internationalen Raumstation installiert und misst die Spektren geladener Teilchen und Anti-Teilchen. Dabei zeigt sich die Andeutung eines Überschusses von Antiprotonen im Vergleich zu dem, was normale astrophysikalische Prozesse liefern. AMS wurde von Nobelpreisträger Samuel Ting initiiert und hat zwei Milliarden Dollar gekostet. Da liegt es nahe, dass der genannte Überschuss sofort als „Fingerprint of Dark Matter“ gedeutet wird, anstatt abzuwarten, was genauere Analysen mit mehr Daten, gepaart mit verbesserten astrophysikalischen Simulationen, liefern werden.

Ähnlich gelagert ist der Fall eines möglichen leichten Überschusses von Gamma-Strahlen aus den Zentralbereichen unserer Galaxis, der mit dem Fermi-Satelliten beobachtet wurde. Dan Hooper, Autor eines gut lesbaren Buches über Dunkle Materie [Hooper 2008] und notorisch bereit, exotischen Erklärungen den Vorzug vor konventionellen zu geben, schlug sogleich vor, dass das ein

Hinweis auf die Annihilation Dunkler-Materie-Teilchen im galaktischen Zentrum sei. Da der von ihm abgeschätzte Massenbereich der Teilchen nicht zu den Vorhersagen der Standard-SUSY-Versionen passte, wurde das neue Teilchen von einigen Kollegen zunächst etwas spöttelnd auf den Namen „Hooperon“ getauft. Aber das war noch nicht das Ende der Geschichte. Als man ein paar Jahre später den Beitrag von bekannten Quellen besser abschätzen konnte, ließ sich der trotzdem noch verbleibende Restüberschuss „praktischerweiser“ mit SUSY-WIMPs erklären – und stieß eine neue Welle von Spekulationen an.

Bei aller Kritik, die ich in den letzten Absätzen geäußert habe, muss betont werden, dass dieses Forschungsgebiet, insbesondere die Experimente in Untergrundlabors, sich im Allgemeinen durch alles andere als Oberflächlichkeit auszeichnet. Im Gegenteil, es ist Experimentierkunst am Rande des Möglichen, bei sorgfältiger Ausschaltung aller denkbaren Störsignale, die ein Dunkle-Materie-Signal vortäuschen könnten. Die meisten Experimente (und das sind weltweit mehr als ein Dutzend!) haben *nichts* gesehen und das auch so publiziert. Kein Wunder natürlich, dass diese Mehrzahl nicht das Echo hervorruft wie Positivmeldungen, auch wenn die Letzteren vermutlich falsch sind.

Mit dem IceCube-Detektor am Südpol [webpage IceCube] suchen wir natürlich auch nach WIMPs, genauer: nach den Neutrinos aus WIMP-Annihilationen. Wir suchen nach solchen Überschüssen aus der Richtung der Sonne, aus dem Zentrum der Erde, und aus dem galaktischen Halo. Alle unsere Suchprogramme haben bisher nur negative Resultate geliefert und damit einige konkrete Formulierungen der SUSY-Theorie ausschließen können. Eine positive Entdeckung wäre uns selbstverständlich lieber gewesen, aber: Falsifikation von Hypothesen ist auch ein Erkenntnisfortschritt!

Das Wechselspiel zwischen experimentellen Ergebnissen und theoretischen Erwartungen ist in Abb. 15 illustriert. In der Abbildung ist der Wirkungsquerschnitt von Dunkle-Materie-Teilchen gegen die Masse dieser Teilchen aufgetragen. Bei bekannter Gesamtmasse von Dunkler Materie und einer bestimmten hypothetischen Masse eines einzelnen Teilchens kann man sich leicht ausrechnen, wie hoch der Wirkungsquerschnitt sein müsste, um z.B. 3 Ereignisse in irgendeinem realen Detektor zu registrieren. Wenn man kein Ereignis sieht, dann kann man diesen (oder einen höheren) Querschnitt mit mehr als 95% Wahrscheinlichkeit ausschließen.

Der gegenwärtige Ausschlussbereich ist in der Abbildung rot unterlegt und mit „ruled out“ gekennzeichnet. Er hat sich während der letzten zehn Jahre um fast einen Faktor 100 nach unten verschoben und dabei einen nicht unbeträchtlichen Teil der für SUSY-Teilchen möglichen Querschnitte („generic WIMPs“, blaue Fläche) ausgeschlossen. Links oben ist mit „detections?“ dunkelgrün der Bereich markiert, der z.B. von DAMA nahegelegt wird. Die DAMA Ergebnisse passen zwar nicht zu den SUSY-WIMPs, aber sie passen zu dem Bereich, den sogenannte Asymmetric Dark Matter (ADM) Modelle nahelegen (hellblau). ADM-Modelle gehen von der Annahme aus, dass die heutige Häufigkeit von dunkler Materie die gleiche Erklärung hat wie die Häufigkeit von normaler Materie: eine Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie. Die Genesis von ADM im frühen Universum unterscheidet sich erheblich von jener der Standard-WIMPs.

Schließlich gibt es der Abbildung noch den gelben Bereich ganz unten. In diesem Bereich wären die WIMP-Reaktionen derartig selten, dass sie noch unter der Rate von solaren Neutrinos (für kleine WIMP-Massen) und Neutrinos aus der Erdatmosphäre (für größere WIMP-Massen) liegen. Das ist

eine natürliche Grenze, die man nur durch zwei Eigenschaften von WIMP-Reaktionen unterbieten kann. Erstens: Die Rate von WIMP-Reaktionen muss einer jährlichen Modulation mit einer ganz bestimmten Phase unterliegen. Zweitens: Wenn man die Richtung der Ereignisse messen könnte, dann müssten WIMP-induzierte Ereignisse bevorzugt aus der Richtung kommen, die welche die Erde den WIMP-See durchpflügt. Bei Sonnen- oder Atmosphärenneutrinos wäre das nicht der Fall.

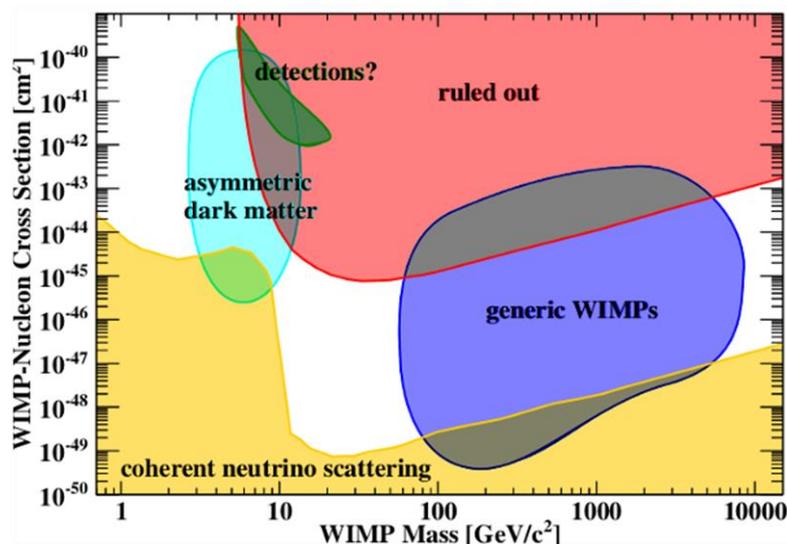


Abb. 15: Ausgeschlossene und theoretisch bevorzugte Parameterbereiche für WIMPs (vereinfachte Darstellung, entnommen [Lang 2013]). Erklärung siehe Text.

Neuartige Detektoren, die auch die Richtung bestimmen könnten, werden im Moment entwickelt, allerdings auf Sparflamme. Immerhin sind noch 2-4 Dekaden in der Empfindlichkeit zu bewältigen, ehe nur noch dieses letzte Mittel bleibt, um WIMP-Signale von Neutrino-Signalen zu unterscheiden. Zwei Dekaden, also eine um einen Faktor Hundert verbesserte Empfindlichkeit, erwarten wir für das nächste Jahrzehnt. Deutsche Physiker spielen hier mit den Experimenten XENON und CRESST eine Spitzenrolle [XENON-webpage, CRESST-webpage].

15 Ausblick

Das Phänomen der Dunklen Materie ist und bleibt eine der größten Herausforderungen der Physik. Dunkle Materie ist vor 82 Jahren – als eine auch damals schon rätselhafte Nebenfigur – auf der Bühne erschienen und hat ihren Part inzwischen zu einer Hauptrolle ausgebaut. Die Rätselhaftigkeit ist geblieben, aber immerhin hat man inzwischen eine ganze Reihe möglicher *Kandidaten* für Dunkle Materie, an erster Stelle SUSY-WIMPs und Axionen.

Entlang dieser beiden Hypothesen kann es in den nächsten Jahren durchaus zu einem Durchbruch kommen. ADMX wird schon im nächsten Jahr einen Großteil des theoretisch möglichen Massenbereichs für Axionen absuchen. Die Ein-Tonnen-Version des XENON-Detektors („XENON1T“) wird im Jahr 2016 Daten präsentieren, welche die doppelte, zwei Jahre später sogar die zehnfache Empfindlichkeit existierender Experimente haben. Ein Detektor mit nochmals fünfmal höherer Empfindlichkeit ist in Vorbereitung. Weltweit beteiligen sich etwa ein Dutzend Gruppen an diesem Rennen, an dessen Ziel ein Nobelpreis winkt.

Ganz so einfach wird es aber mit einem Nobelpreis nicht werden. Ein Signal in einem Xenon-Detektor etwa möchte man gerne durch ein Signal in einem Detektor mit einem anderen Target-Kern wie etwa Argon, Germanium oder Silizium bestätigt sehen, ehe man der Dunkle-Materie-Interpretation Glauben schenkt. Und auch *das* mag noch nicht ausreichen um zu verstehen, ob es sich wirklich um ein SUSY-Teilchen handelt oder um etwas ganz anderes. Für die SUSY-Interpretation kommt man nicht darum herum, dass am LHC endlich SUSY-Teilchen entdeckt werden. Und wenn es einem schließlich nicht reicht zu wissen, wie hoch die WIMP-Dichte im erdnahen Raum ist, sondern im galaktischen Zentrum oder im Halo, dann benötigt man die indirekten Suchexperimente. Die Suche nach Dunkler Materie ist also wirklich eine konzertierte Aktion an allen drei Fronten: direkter Nachweis, indirekter Nachweis und Erzeugung am LHC.

Nachdem man WIMPs entdeckt hätte, würde als nächstes die genaue Erforschung ihrer Eigenschaften folgen. Wie groß ist ihre Masse? Was für einen Spin haben sie? Wie genau koppeln sie an normale Materie? Und weiter: Wie sind sie im galaktischen Halo verteilt? Damit könnte eine völlig neue Astronomie beginnen, eine Astronomie der Dunklen Materie.

Es könnte aber auch sein, dass weder am LHC supersymmetrische Teilchen entdeckt werden noch die WIMP-Suchexperimente Erfolg haben. Gleichzeitig könnten auch die Axion-Experimente ohne positives Resultat bleiben. Ist damit das Rennen beendet?

Ich glaube nicht. Das *Konzept* der Dunklen Materie wäre damit noch nicht falsifiziert (man kann es wahrscheinlich prinzipiell nicht falsifizieren), nur eben gewisse Hypothesen über ihre Natur. Selbstverständlich würde man eine weitere, um einen weiteren Faktor 10 empfindlichere Generation von Detektoren anpeilen und Argumente finden, dass eine Entdeckung in greifbarer Nähe sei. Es dürfte dann allerdings immer schwieriger sein, die entsprechenden Geldmittel zu finden, denn etwas ganz so „greifbar Nahes“ ist wie SUSY-WIMPs muss man erst einmal finden! Und empfindlichere Detektoren kosten einfach mehr. Die jetzigen Detektoren liegen in der Preisklasse von 5-20 Millionen Euro, eine übernächste Generation wird man nicht unter 30-100 Millionen pro Detektor haben können.

Im Augenblick ist allerdings kein Grund zum Pessimismus gegeben. Zu groß ist der Sprung in der Empfindlichkeit der Detektoren, den wir erwarten dürfen, und zu vielfältig die Eigenschaften möglicher Kandidaten. Was immer als Resultat an seinem Ende steht: das nächste Jahrzehnt wird spannend!

Danksagung: *Ich danke Josef Jochum, Johannes Knapp, Rafael Lang, Thomas Naumann und Matthias Steinmetz für hilfreiche Bemerkungen, J. Knapp darüber hinaus für seine gründlichen Korrekturen am Manuskript.*

Literatur

- Aartsen, M. et al.: *Evidence for High-Energy Extraterrestrial Neutrinos at the IceCube Detector*, Science 22 vol. 342, no 6161, p. 920 (2013)
- Alcock, C. et al.: *Possible gravitational microlensing of a star in the Large Magellanic Cloud*, Nature 365, p. 621 (1993) und <http://arXiv.org/pdf/astro-ph/9309052>
- Alpher, Ralph; Bethe, Hans and Gamow, George: *The origin of chemical elements*, Physical Review 73, p. 803 (1948)
- Aubourg, E. et al.: *Evidence for gravitational microlensing by dark objects in the Galactic halo*, Nature 365, p. 623 (1993)
- Bernabei, Rita, et al.: *First results from DAMA/LIBRA and the combined results with DAMA/NaI*, European Physics Journal C56, p. 333 (2008) und <http://arXiv:0804.2741>
- Bührke, Thomas: *Geheimnisvolle Schattenwelt – Dunkle Materie im All*, Franckh-Kosmos Verlag, Stuttgart (1997)
- Chaisson, Eric and McMillan, Steve: *Astronomy Today*, Prentice Hall (1999), p. 640
- Clowe, Douglas, et al.: *A Direct Empirical Proof of the Existence of Dark Matter*, Astrophysical Journal 648, p. L109 (2006) und <http://arXiv.org/pdf/astro-ph/0608407>
- Freeman, Kenneth: *On the disks of spiral and SO galaxies*, Astrophysical Journal 160, p.811 (1970)
- Hooper, Dan: *Dunkle Materie*, Springer-Verlag 2008.
- Kapteyn, Jan: *First Attempt at a Theory of the Arrangement and Motion of Sidereal System*, Astrophys. Journ 55, p. 302 (1922)
- Kowalski, Marek, et al: *Improved cosmological constraints from new, old and combined Supernova data sets*, Astrophysical Journal 686, p. 749 (2008) und <http://arxiv.org/pdf/0804.4142.pdf>
- Lang, Rafael: *Ups and Downs in the Search for Dark Matter*, Physics 6, p. 136 (2013)
- Lang, Rafael: *Das Geheimnis der Dunklen Materie*, Physik Journal 13, p. 11 (2015)
- Milgrom, Mordechai: *A modification of Newtonian dynamics as a possible alternative to the hidden dark matter hypothesis*, Astrophysical Journal 270, p. 365 (1983)
- Paczynski, Bohdan: *Gravitational microlensing by the galactic halo*, Astrophysical Journal 304, p. 1 (1986)
- Peccei, Roberto and Quinn, Helen: *CP-Conservation in the Presence of Pseudoparticles*, Phys. Review Letters 38, p. 1440 (1977)
- Penzias, Arnold and Wilson, Robert: *A measurement of excess antenna temperature at 4080 Mc/s*, Astrophysical Journal 142, p. 419 (1965)
- Perlmutter, Saul, et al: *Measurements of Omega and Lambda from 42 high redshift supernovae*. Astrophysical Journal 517, p. 565 (1998) und <http://arXiv.org/pdf/astro-ph/9812133>
- Riess, Adam, et al.: *Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant".* Astronomical Journal 116, p. 1009 (1998) und <http://arXiv.org/pdf/astro-ph/9805201>
- Rubin, Vera und Ford, Kent: *Rotation of the Andromeda Nebula from a Spectroscopic Survey of Emission Regions*, Astrophysical Journal 159, p. 379 (1970)

Spiering, Christian und das ASPERA Roadmap Committee: *Astroparticle Physics – the European Strategy* (2008), <http://www.aspera-eu.org>

Spiering, Christian: *High-Energy Neutrino Astronomy - A Glimpse of the Promised Land*, *Uspekhi Fiz, Nauk* 184, p.510 (2014) und <http://arXiv:1402.2096>

Weniger, Christoph: *A Tentative Gamma-Ray Line from Dark Matter Annihilation at the Fermi Large Area Telescope*, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 1208, p. 7 (2012) und <http://arXiv:1204.2797>

Webpage-ADMX: <http://depts.washington.edu/admx/>

Webpage-CRESST: <http://www.cresst.de/>

Webpage-IceCube: <http://icecube.wisc.edu/>

Webpage-XENON: <http://xenon.astro.columbia.edu/>

Zwicky, Fritz: *Die Rotverschiebung extragalaktischer Nebel*, *Helvetica Physica Acta* 6, 110 (1933)