

Dunkle Materie

Schriftliche Ausarbeitung des Vortrags vom 21. Dezember 2011
im Seminar zur Theorie der Teilchen und Felder

Patrick Steppeler¹

30. Dezember 2011

¹p.steppeler@online.de

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Experimentelle Evidenz	2
2.1	Rotationskurven	2
2.1.1	MOND	4
2.1.2	Dunkle Materie	4
2.2	Kosmische Hintergrundstrahlung und Strukturbildung	5
2.3	Weitere experimentelle Hinweise	6
3	Theoretische Erklärungsansätze	6
3.1	MACHOs	6
3.2	WIMPs	7
3.2.1	Neutrino	7
3.2.2	Axion	7
3.2.3	Neutralino	7
3.3	Boltzmann-Gleichung und Ausfrieren	8
4	Fazit	10
	Literatur	11

1 Einleitung

Die Welt und ihre Wirkprinzipien besser zu verstehen, könnte als eines der Hauptanliegen der Naturwissenschaften bezeichnet werden. Davon angetrieben hat der Mensch im Laufe der Jahrhunderte immer tiefere Einblicke in die Struktur und den Aufbau der Materie erlangt. Heute stellen wir allerdings fest, dass ein Großteil des Universums aus einer fremdartigen Materie zu bestehen scheint, die bisher kaum verstanden ist. Man spricht hier von *dunkler Materie*.

Im Folgenden soll eine Einführung in diese Thematik gegeben werden. Dazu werden zunächst einige experimentelle Hinweise auf die Existenz dunkler Materie aufgeführt. Es wird beschrieben, wie sich dunkle Materie bemerkbar macht, welche Widersprüche bzw. Probleme ohne selbige entstehen würden und welche Eigenschaften sie aufweist. Im anschließenden Kapitel wird eine Übersicht über mögliche Erklärungen seitens der Theorie gegeben.

2 Experimentelle Evidenz

2.1 Rotationskurven

Wir betrachten zunächst die Bewegung der Planeten unseres Sonnensystems um die Sonne. Diese bewegen sich auf Keplerbahnen, d. h. auf Ellipsen um unser Zentralgestirn. Da die Sonne etwa 99,85 % der Masse des Sonnensystems beherbergt, lässt sich die Bewegung eines jeden Planeten in guter Näherung als Zweikörperproblem auffassen, d. h. die übrigen Planeten werden bei der Berechnung seiner Bahnkurve vernachlässigt. Nähern wir die genannten Ellipsen durch Kreise an, so lässt sich die Bahngeschwindigkeit v in Abhängigkeit vom Bahnradius r bestimmen. Wenn m die Masse des jeweiligen Planeten, M die Masse der Sonne und G die Gravitationskonstante bezeichnet, so gilt

$$m \frac{v^2}{r} = \frac{GmM}{r^2}. \quad (1)$$

Die attraktive Gravitationskraft wird gerade durch die repulsive Zentrifugalkraft kompensiert. Umstellen nach v liefert

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}} \sim \frac{1}{\sqrt{r}}. \quad (2)$$

Diese Gesetzmäßigkeit lässt sich experimentell überprüfen. Hierbei wird der erwartete Zusammenhang zwischen Bahngeschwindigkeit und Radius bestätigt (vgl. Abbildung 1).

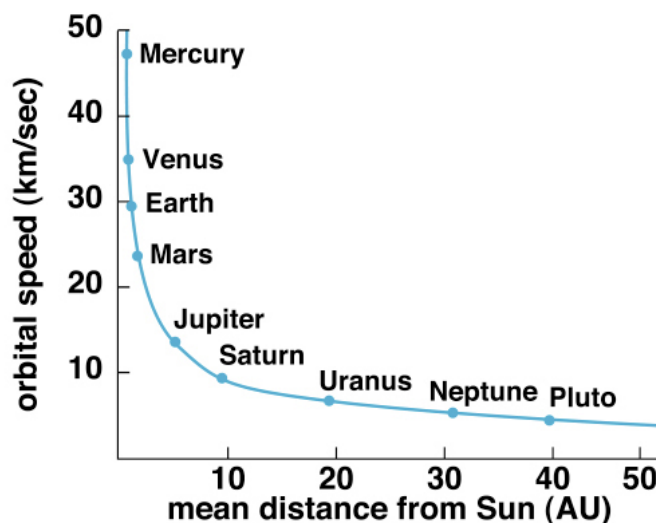


Abbildung 1: Die Rotationskurve unseres Sonnensystems

Wir betrachten nun die Rotationskurve einer Galaxie, namentlich der Galaxie NGC 3198. Es handelt sich hierbei um eine Spiralbalkengalaxie. In diesem Fall rotieren die Sterne um das galaktische Zentrum, ähnlich der Rotation der Planeten um die Sonne zuvor. Auch hier werden wir die Bewegung als kreisförmig annehmen.

Obwohl sich in den Zentren vieler Galaxien ein schweres schwarzes Loch befindet und die Sterndichte hier größer ist, muss an dieser Stelle von einer radiusabhängigen Massenverteilung $M(r)$ ausgegangen werden, da sich – im Gegensatz zum Sonnensystem – ein nennenswerter Anteil der Masse in dezentralen Regionen der Galaxie befindet. Im Falle der Milchstraße besitzt das zentrale schwarze Loch beispielsweise eine Masse von wenigen Millionen Sonnenmassen. Die Milchstraße beheimatet gleichzeitig etwa zwei Milliarden Sterne. Wenn wir für einen Moment von einer (unrealistischen) homogenen Massenverteilung der Dichte ρ ausgehen erhalten wir

$$M(r) = \frac{4}{3}\pi\rho r^3 \quad \Rightarrow \quad v = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}} \sim r. \quad (3)$$

Die Rotationsgeschwindigkeit der Sterne würde in diesem Fall linear mit dem Abstand zum galaktischen Zentrum wachsen. Auch wenn der obige Ansatz für die Massendichte die tatsächliche Situation nicht treffend wiedergibt, so erwarten wir auch in der Realität einen Anstieg der Bahngeschwindigkeiten bei kleinen Radien, da die Sterne in diesem Fall mit größeren Abstand dem Einfluss von mehr Masse ausgesetzt sind. Bei großen Radien sollte diese Überlegung allerdings nicht mehr gelten, da sich in den Außenbereichen der Galaxien nur sehr wenige Sterne befinden. Hier sollte also näherungsweise der Zusammenhang $v \sim 1/\sqrt{r}$ erfüllt sein, den wir schon zuvor erwähnt haben.

Eine genauere Analyse führt auf die Rotationskurve, die in Abbildung 2 als „disk“ zu sehen ist. Der experimentelle Befund ist mit „NGC 3198“ beschriftet.

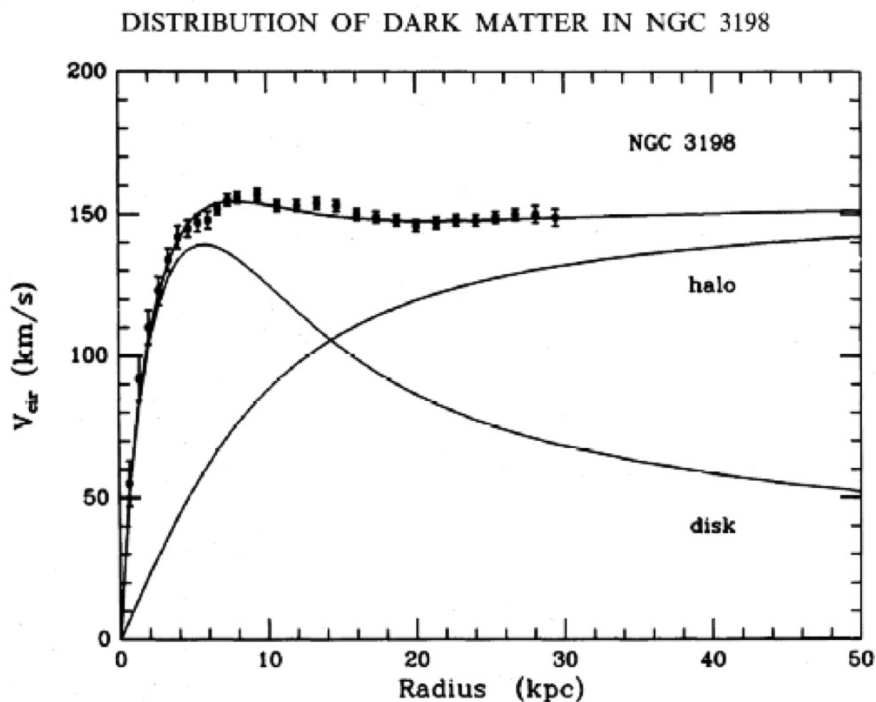


Abbildung 2: Die Rotationskurven der Galaxie NGC 3198

Wie man sieht weicht die experimentell gefundene Rotationskurve insbesondere für große Radien stark vom erwarteten Verhalten ab. Wie lässt sich dieser Umstand deuten?

2.1.1 MOND

Ein denkbarer Ansatz wäre eine Korrektur der zugrunde liegenden Theorie, d. h. in diesem Falle der Newtonschen Dynamik. Dieser Weg wird auch tatsächlich beschritten und firmiert unter dem Schlagwort *MOND* (Modifizierte Newtonsche Dynamik). Hierbei geht man davon aus, dass das übliche Newtonsche Kraftgesetz¹, also der Zusammenhang zwischen Kraft F und Beschleunigung a gegeben durch

$$F = ma, \quad (4)$$

lediglich eine Näherung bzw. ein Grenzfall für große Beschleunigungen ist. Unter „groß“ fallen dabei insbesondere auch alltägliche Beschleunigungen, d. h. beispielsweise die Erdbeschleunigung. Die Kreisbeschleunigung von Sternen, die sich weit außen in ihrer Galaxie befinden, ist hingegen klein, sodass hier eine Korrektur fällig wird. Das modifizierte Gesetz lautet

$$F = ma\mu\left(\frac{a}{a_0}\right), \quad (5)$$

wobei a_0 eine neue Naturkonstante ist. Die Funktion $\mu(x)$ ist nicht eindeutig festgelegt. Wesentlich ist lediglich, dass die Funktion die beiden Grenzfälle $\mu(x \gg 1) = 1$ und $\mu(x \ll 1) = x$ einschließt. In der Praxis verwendet man häufig die Funktionen

$$\mu(x) = \frac{1}{1+x} \quad \text{oder} \quad \mu(x) = \frac{1}{\sqrt{1+x^2}}. \quad (6)$$

Wie erwähnt erhält man somit im Falle großer Beschleunigungen die übliche Newtonsche Dynamik. Für die Bahnbewegung von Sternen in den Außenbereichen von Galaxien folgt mittels der Korrektur für kleine Beschleunigungen

$$\frac{GmM}{r^2} = m\frac{a^2}{a_0} \quad \Leftrightarrow \quad \frac{a_0GM}{r^2} = \frac{v^4}{r^2} \quad \Leftrightarrow \quad v = \sqrt[4]{a_0GM}. \quad (7)$$

Die Bahngeschwindigkeit ist demzufolge unabhängig vom Radius, was dem beobachteten Plateau für große Radien in Abbildung 2 entspricht. Obwohl die MOND die beobachteten Rotationskurven erklären kann und die übliche Newtonsche Mechanik als Grenzfall enthält, besitzt sie auch entscheidende Mängel.

- Die MOND lässt sich nicht oder nur unzureichend relativistisch verallgemeinern. Dieser Forderung sollte jedoch jede physikalische Theorie genügen.
- Die MOND erklärt neben den Rotationskurven keine weiteren Phänomene der dunklen Materie, die im Folgenden noch erwähnt werden.

2.1.2 Dunkle Materie

Alternativ zur MOND kann man sich auch fragen, wie die experimentellen Parameter, d. h. die Massenverteilung in der Galaxie, denn beschaffen sein müssen um die beobachtete Rotationskurve mithilfe der üblichen Newtonschen Dynamik zu erhalten. Hierbei gelangt man zu dem Schluss, dass sich in den Außenbereichen sehr viel nicht leuchtende also *dunkle Materie* befindet. Konkret lässt sich aus den Rotationskurven ablesen, dass etwa 5-25 mal soviel dunkle wie leuchtende Materie vorhanden sein muss und diese in einem sphärischen oder ellipsoidalen Halo um die Galaxie verteilt ist. Die Rotationskurve eines reinen Halos ist in Abbildung 2 ebenfalls eingetragen. Es lässt sich erahnen, dass die beobachtete Kurve aus einer Superposition der beiden unteren Kurven hervorgeht. Dabei drängt sich natürlich die Frage auf, was diese dunkle Materie denn nun ist. Hierauf werden wir in Abschnitt 3 zurück kommen.

¹Auf eine vektorielle Schreibweise wird an dieser Stelle verzichtet.

2.2 Kosmische Hintergrundstrahlung und Strukturbildung

Wir widmen unser Augenmerk nun der *kosmischen Hintergrundstrahlung*. Diese wird häufig als „Echo des Urknalls“ bezeichnet und ist entstanden als das Universum durchsichtig wurde, also zum Zeitpunkt der Entkopplung von Strahlung und Materie. Das Universum war dabei etwa 380000 Jahre alt und 3000 K heiß. Die kosmische Hintergrundstrahlung wurde von Satelliten wie COBE (Cosmic Background Explorer) und WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) sehr genau vermessen und als Schwarzkörperstrahlung mit einer Temperatur von etwa 2,7 K identifiziert. Sie zeichnet sich durch ihre räumliche Isotropie aus, die einen der Eckpfeiler der Urknalltheorie bildet. Man stellt jedoch fest, dass die räumliche Isotropie nicht völlig perfekt ist. Es liegen Temperaturanisotropien im Bereich von etwa 60 μ K vor.

Diese minimalen Fluktuationen sind für unser kosmologisches Modell essentiell. Schließlich geht man davon aus, dass die Strahlungsfuktuationen direkt mit Dichteschwankungen im frühen Universum verbunden sind². Diese Dichteschwankungen sind es, aus denen alle heutigen Strukturen wie z. B. Galaxien hervorgegangen sind. Hätte man keine Temperaturanisotropien gefunden, so wäre dies ein herber Rückschlag oder zumindest ein Problem für die Urknalltheorie gewesen, da sich aus einem perfekt homogenen Universum keine Strukturen bilden würden.

Die kosmische Hintergrundstrahlung lässt sich nun genauer in puncto *Strukturbildung* untersuchen. Das bedeutet, dass man überprüft, wie groß die anfänglichen Dichte- und die damit verbundenen Temperaturschwankungen sein müssten, um die heute beobachteten Strukturen im Universum hervorzubringen. Dabei stellt man fest, dass die gemessenen Temperaturanisotropien eigentlich zu klein sind, man bräuchte Fluktuationen im Bereich von einigen mK. Andernfalls wären die zugehörigen Dichteschwankungen zu gering.

Einen Ausweg bildet auch hier die *dunkle Materie*. Man geht davon aus, dass sich im frühen Universum zusätzlich zur baryonischen Materie dunkle Materie befunden hat. Diese unterstützt durch ihre gravitative Wechselwirkung den Strukturbildungsprozess, man spricht von „dunklen Kondensationskeimen“ oder Gravitationszentren. Fordert man weiterhin, dass die dunkle Materie nicht elektromagnetisch wechselwirkt, so findet keine Kopplung von Strahlung an dunkle Materie statt. Dadurch erhöhen sich die Temperaturanisotropien durch die Anwesenheit von dunkler Materie nicht.

Innerhalb dieses Szenarios lassen sich die beobachteten galaktischen Strukturen mit der gemessenen kosmischen Hintergrundstrahlung in Einklang bringen. Insbesondere lassen sich die Gesamtmenge der Materie Ω_M und die Menge der baryonischen Materie Ω_{BM} als unabhängige Parameter getrennt bestimmen. Man findet

$$\Omega_M = 0,3 \quad \text{sowie} \quad \Omega_{BM} = 0,04. \quad (8)$$

Diese Materiemengen sind in Einheiten der kritischen Dichte

$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G} \quad (9)$$

zu verstehen. Ein Energie- bzw. Materieinhalt von 1 würde in diesen Einheiten ein perfekt flaches Universum hervorrufen. H bezeichnet die Hubble-Konstante.

Die kosmische Strukturbildung im Kontext der dunklen Materie wurde im Rahmen der Millennium-Simulation näher untersucht. Hierbei handelt es sich um eine numerische Simulation unter Federführung des Max-Planck-Instituts Garching. Es wurden über zehn Milliarden Teilchen simuliert um die Strukturbildung im Universum aus anfänglichen Fluktuationen zu rekonstruieren. Dieses Vorhaben war von Erfolg gekrönt. Der wichtigste Parameter der Simulation war dabei die Menge der dunklen Materie Ω_{DM} . Es zeigte sich, dass die dunkle Materie die Strukturbildung maßgeblich prägt. Im Wesentlichen gibt die dunkle Materie eine Verteilung vor, welcher die baryonische Materie folgt. Die beste Übereinstimmung zwischen simulierten und realen Strukturen ergaben sich für

$$\Omega_{DM} = 0,23. \quad (10)$$

²Der genaue Zusammenhang soll an dieser Stelle nicht näher erörtert werden. Klar ist jedoch, dass Strahlung, die aus Gebieten mit einer höheren Materiedichte stammt, gravitativ rotverschoben wird.

Die Millennium-Simulation bescherte jedoch noch eine weitere Erkenntnis. Wäre der Großteil der dunklen Materie heiß, d. h. würde sie sich mit relativistischer Geschwindigkeit bewegen, so würden die simulierte Strukturbildung nicht die Realität rekonstruieren. In diesem Falle würden sich großskalige Objekte wie Galaxienhaufen vor kleineren Objekten wie Galaxien ausbilden. Man beobachtet jedoch den gegenteiligen Fall. Dunkle Materie muss demnach aus hauptsächlich kalten Komponenten bestehen.

2.3 Weitere experimentelle Hinweise

In vorangegangenen Sitzungen des diesjährigen Seminars gab es ebenfalls Hinweise auf die Existenz dunkler Materie. Diese werden an dieser Stelle kurz wiederholt.

Im Vortrag zur *Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker-Metrik* von Markus Michael ging es darum, ein Modell für die kosmologische Entwicklung zu finden. Die Expansion des Universums lässt sich dabei am Besten mit den Parametern

$$\Omega_{DE} = 0,7 \quad \text{und} \quad \Omega_M = 0,3 \quad (11)$$

beschreiben, wobei Ω_{DE} den Energiebeitrag der dunklen Energie beschreibt. Diese ist direkt mit der kosmologischen Konstante verbunden.

Der Vortrag von Matthias Holtkemper handelte von der *primordialen Nukleosynthese*. Hierbei ging man der Frage nach, welche Bedingungen im frühen Universum geherrscht haben mussten, um die heute beobachteten Elementhäufigkeiten sowie das heutige Photon-Baryon-Verhältnis zu erhalten. Insbesondere ließ sich hierüber die Gesamtmenge der baryonischen Materie zu

$$\Omega_{BM} = 0,04 \quad (12)$$

abschätzen. Fasst man diese beiden Punkte zusammen, so gelangt man erneut zu der Einsicht, dass ein Großteil der Materie nichtbaryonischen Ursprungs sein muss.

3 Theoretische Erklärungsansätze

3.1 MACHOs

Einen ersten Deutungsansatz zur dunklen Materie bilden die sogenannten *MACHOs* (Massive Astronomical Compact Halo Objects). Darunter versteht man schwere, gebundene, nichtleuchtende Objekte. Diese MACHOs sollen in den Außenbereichen der Galaxien in großer Zahl vorhanden sein, um so die beobachteten Rotationskurven erklären zu können. Kandidaten für MACHOs sind beispielsweise braune und weiße Zwerge, Neutronensterne oder schwarze Löcher. Die Erklärung besitzt jedoch einige Schwächen.

Zum Einen sollten die genannten Objekte im frühen Universum noch nicht existieren. Der gängigen Theorie nach sind beispielsweise Neutronensterne Endzustände von Sternen. Diese müssen sich erst im Laufe der Zeit ausbilden und sind im frühen Universum nicht vorhanden. Daher ist fraglich, wie eine aus MACHOs aufgebaute dunkle Materie die in 2.2 erwähnten Phänomene zur Strukturbildung verursachen soll.

Es gibt jedoch noch ein weiteres Problem. MACHOs lassen sich mithilfe des Gravitationslinseneffektes nachweisen. Die dabei auftretenden kurzzeitigen Aufhellungen eines Lichtsignals sind sehr charakteristisch, sodass der Effekt gut von anderen Ursachen abgegrenzt werden kann. Mithilfe dieser Methode wurde beispielsweise in der großen Magellanschen Wolke gezielt nach MACHOs gesucht. Es wurden auch MACHOs gefunden, allerdings in zu geringer Zahl, als dass diese die geforderte Menge an dunkler Materie gänzlich erklären könnten. MACHOs können demnach nur einen kleinen Teil der dunklen Materie ausmachen.

3.2 WIMPs

Ein alternativer Erklärungsversuch wird durch sogenannte *WIMPs* (Weak Interacting Massive Particles) unternommen. In diesem Falle geht man davon aus, dass die dunkle Materie nicht aus großen kompakten Objekten, sondern aus freien Elementarteilchen besteht. Diese sollen in großer Zahl in den galaktischen Halos sowie im frühen Universum vorhanden sein, um die experimentellen Befunde erklären zu können. Dabei müssen sie alle aufgeführten Eigenschaften erfüllen. Insbesondere dürfen WIMPs nicht elektromagnetisch wechselwirken, müssen nichtrelativistisch und massiv sein. Zusätzlich müssen WIMPs stabil sein, d. h. sie dürfen nicht innerhalb kurzer Zeitskalen³ zerfallen, da wir sie nicht nur für eine gewisse Zeitspanne, sondern generell für die in Abschnitt 2 genannten Phänomene verantwortlich machen möchten.

3.2.1 Neutrino

Das einzige elektrisch neutrale Fermion im Standardmodell der Teilchenphysik ist das *Neutrino*, welches in den drei Leptonfamilien e , μ und τ vorkommt. Auch wenn das Neutrino im Standardmodell als masselos betrachtet wird, kann diesem durch eine vergleichsweise einfache Erweiterung eine Masse zugesprochen werden. Tatsächlich deuten einige Experimente zur Neutrinooszillation – wie etwa das Super-Kamiokande Experiment in Japan – darauf hin, dass das Neutrino eine nichtverschwindende Masse besitzen muss. Zugleich versucht man beispielsweise beim KATRIN Experiment (Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment) diese Masse zu messen. Man stellt fest, dass die Masse⁴ des Elektronneutrinos kleiner als $2,3 \text{ eV}/c^2$ sein muss.

Die geringe Ruhemasse des Neutrinos hat jedoch zur Folge, dass es sich hierbei um ein relativistisches Teilchen handelt. Dunkle Materie, die aus Neutrinos besteht, wäre demnach heiß. Das steht jedoch im Widerspruch zu den in 2.2 aufgeführten Argumenten zur Strukturbildung. Des Weiteren generieren Neutrinos insgesamt nicht genügend Masse. Sie sind nicht massiv bzw. zahlreich genug um die dunkle Materie vollständig erklären zu können.

3.2.2 Axion

Ein eher exotischer Kandidat für dunkle Materie ist das *Axion*. Das Axion wurde 1977 im Zusammenhang mit dem starken CP-Problem⁵ postuliert. Als starkes CP-Problem bezeichnet man den Umstand, dass die starke Wechselwirkung im Experiment⁶ CP-erhaltend ist, sich in der Theorie – d. h. innerhalb der Quantenchromodynamik – jedoch ein Quantenfluktuationsterm einführen lässt, welcher die CP-Symmetrie bricht.

Dieser Fluktuationsterm beinhaltet einen freien Winkelparameter θ mit $0 \leq \theta \leq 2\pi$. Für $\theta = 0$ verschwindet der CP-verletzende Term. A priori ist jedoch unklar, warum sich der Parameter gerade auf diesen Wert einstellen sollte.

Zur Lösung dieses Dilemmas stellten Roberto Peccei und Helen Quinn den nach ihnen benannten Mechanismus vor. Hierin wird der Parameter θ derart mit einer neuen Symmetrie und hierüber mit einem Teilchen verbunden, dass sich sein Wert automatisch auf Null fixiert. Das so erhaltene Teilchen ist das pseudoskalare und massebehaftete Axion, welches als Kandidat der dunklen Materie betrachtet werden kann. Es sollte allerdings erwähnt werden, dass es bislang keine stichhaltigen experimentellen Hinweise auf die Existenz des Axions gibt.

3.2.3 Neutralino

Wenn wir die vorangegangenen Abschnitte bilanzieren, stellen wir fest, dass das Standardmodell der Teilchenphysik keinen wirklich geeigneten Kandidaten für die dunkle Materie enthält. Es bietet sich also an, einen Blick *jenseits des Standardmodells* zu werfen und dieses zu erweitern. Ein beliebter Ansatz hierzu ist die Supersymmetrie. Supersymmetrie spielt nicht nur im Zusammenhang

³„Kurz“ ist hier in Relation zum Alter des Universums zu verstehen.

⁴ c bezeichnet wie üblich die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum.

⁵Unter der Symmetrieeoperation CP versteht man das gleichzeitige Überführen eines Teilchens in sein Antiteilchen (Charge Conjugation) sowie die Spiegelung der räumlichen Koordinaten (Parity Inversion).

⁶Hierzu betrachtet man in der Regel das elektrische Dipolmoment des Neutrons.

mit dunkler Materie eine Rolle, der Ansatz ist vielfältig motiviert. Beispielsweise lassen sich die fundamentalen Kräfte in einer supersymmetrischen Theorie leichter vereinen.

In supersymmetrischen Theorien ordnet man jedem Teilchen mittels einer Symmetrieoperation einen Superpartner zu. Dabei wird jedem Boson ein Fermion zugeordnet und umgekehrt. Der Spin verringert sich stets um $1/2$, es sei denn es handelt sich um ein skalares Teilchen, dann wird der Spin um $1/2$ erhöht. Als neue Symmetrie führt man in der Regel die sogenannte R-Parität ein. Hierbei handelt es sich um eine neue, multiplikative Quantenzahl. Jedem Teilchen des Standardmodells wird dabei eine R-Parität von $+1$ und jedem Superpartner eine R-Parität von -1 zugesprochen. Wenn die R-Parität erhalten ist, hat dies zur Folge, dass das leichteste supersymmetrische Teilchen stabil ist – eine wichtige Voraussetzung für einen potentiellen Kandidaten der dunklen Materie.

Eine konkrete und häufig betrachtete Variante einer supersymmetrischen Theorie ist das *MSSM* (Minimales supersymmetrisches Standardmodell). Das MSSM zeichnet sich durch den kleinstmöglichen Teilcheninhalt unter den supersymmetrischen Theorien aus. In diesem Fall gibt es lediglich eine Symmetrieoperation, die zwischen Teilchen und Superpartner und umgekehrt transformiert. Es wird ein zusätzliches Higgs-Dublett postuliert um allen Superpartnern eine Masse zuzuordnen zu können. Alle Wechselwirkungen sind bereits durch das Standardmodell festgelegt, da es zu keinen neuen Eichsymmetrien kommt.

Für eine Vielzahl von Parametersätzen ergibt sich das *Neutralino* als das leichteste supersymmetrische Teilchen im MSSM. Das Neutralino χ ist ein Mischzustand aus den neutralen Eichfermionen und den neutralen Higgsfermionen. Es handelt sich um ein Majorana-Fermion mit einer Masse im Bereich von einigen Hundert GeV/c^2 . Majorana-Teilchen sind ihre eigenen Antiteilchen, das bedeutet insbesondere, dass sie elektrisch neutral sind. Das Neutralino gilt vielerorts als derzeitiger Favorit für die dunkle Materie und wird ausgiebig studiert. Allerdings gibt es bisher keine eindeutige experimentelle Evidenz für die Existenz von Supersymmetrie.

3.3 Boltzmann-Gleichung und Ausfrieren

Nimmt man an, dass beispielsweise das Neutralino die dunkle Materie ausmacht, so lassen sich mithilfe der *Boltzmann-Gleichung* quantitative Rückschlüsse über die zeitliche Entwicklung dieses Teilchens ziehen. Dabei geht man davon aus, dass das Neutralino mit seinem Antipartner – also sich selbst – durch einen bestimmten Prozess in zwei leichtere Teilchen l und \bar{l} übergehen kann.

$$\chi\chi \leftrightarrow l\bar{l}. \quad (13)$$

Wesentlich ist, dass dieser Prozess in beide Richtungen ablaufen kann, das bedeutet, dass aus einem $l\bar{l}$ -Paar zwei Neutralinos hervorgehen können. Ein Beispiel für ein solches leichtes Teilchen l ist das Bottom-Quark b .

Wie verhält sich die Neutralinodichte n_χ unter dieser Annahme im Laufe der Zeit t , d. h. während der kosmischen Evolution? Hierüber trifft die schon erwähnte Boltzmann-Gleichung eine Aussage. Diese lautet

$$\frac{dn_\chi}{dt} = -\langle\sigma_A v\rangle [(n_\chi)^2 - (n_\chi^{\text{eq}})^2] - 3Hn_\chi, \quad (14)$$

wobei der Wirkungsquerschnitt der Neutralinoannihilation bzw. -kreation durch σ_A gegeben ist. v bezeichnet die mittlere Relativgeschwindigkeit der Teilchen und n_χ^{eq} beschreibt die Neutralinodichte im thermischen Gleichgewicht. H bezeichnet wie schon zuvor die Hubble-Konstante. Der erste Term auf der rechten Seite entspricht der Teilchenvernichtung, der Zweite der Teilchenerzeugung. Der letzte Term berücksichtigt die Expansion des Universums, welche die Neutralinodichte ebenfalls verringert.

Der grafische Verlauf der Neutralinodichte ist in Abbildung 3 zu sehen. Hier ist die Neutralinodichte in einem mitbewegten Volumenelement gegen $x = m/T$ aufgetragen. m bezeichnet die Masse der Neutralinos, T die Temperatur des Universums. Der Ausdruck ist in natürlichen Einheiten zu verstehen, d. h. sowohl die Lichtgeschwindigkeit c als auch die Boltzmannkonstante k_B werden auf Eins gesetzt.

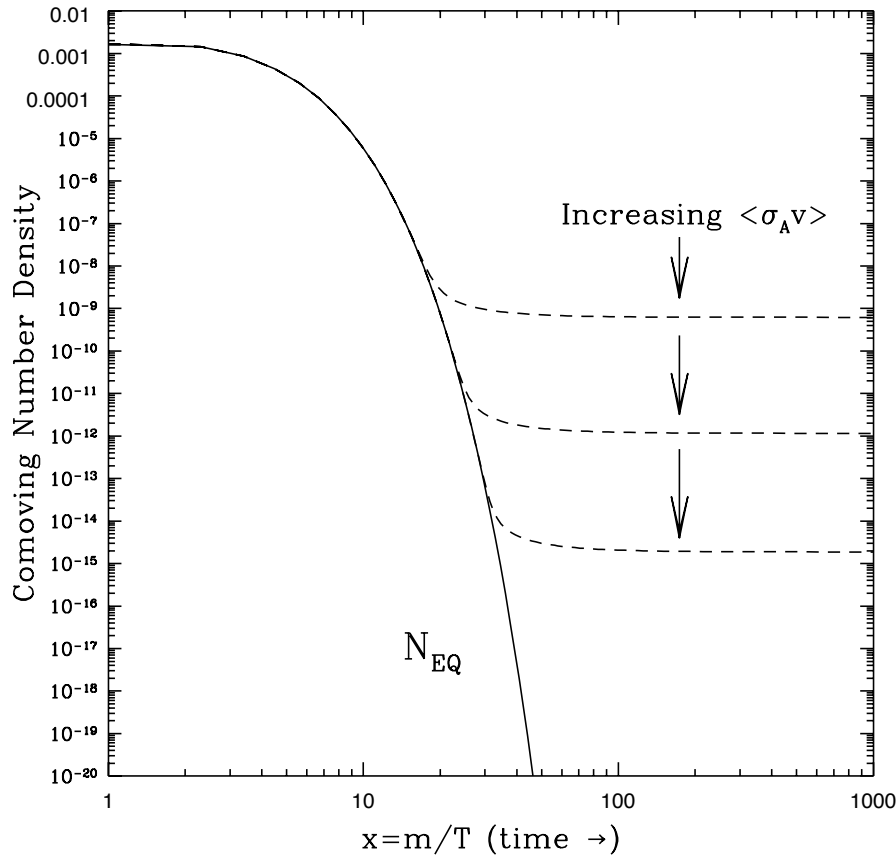


Abbildung 3: Grafische Darstellung der Entwicklung der Neutralinodichte nach der Boltzmann-Gleichung

Wir denken uns den Graphen zunächst nach links verlängert. Für Werte von $x < 1$ ändert sich die Neutralinodichte nicht. Innerhalb dieser kurzen Zeitspanne im frühen Universum kann die Expansion des Universums vernachlässigt werden. Die Teilchensorte befindet sich im thermischen Gleichgewicht und der Prozess (13) läuft in beiden Richtungen ab. Vernichtung und Erzeugung von Neutralinos gleichen sich insgesamt aus.

Dieses Verhalten verändert sich grundlegend, sobald $x > 1$ erfüllt ist. Aufgrund der höheren Masse der Neutralinos ist der Prozess $\bar{l}l \rightarrow \chi\chi$ nun exponentiell über einen Boltzmannfaktor unterdrückt. Hier gilt

$$n_{\chi}^{\text{eq}} \sim \exp\left(-\frac{m}{T}\right). \quad (15)$$

Von nun an vernichten sich also sehr viel mehr Neutralinos als solche erzeugt werden. Diese Überlegung bleibt solange richtig, bis die Expansionsrate des Universums H die Vernichtungsrate $\langle \sigma_{Av} \rangle n_{\chi}$ überwiegt. Zu diesem Zeitpunkt fallen die Neutralinos aus dem thermischen Gleichgewicht und folgen dem gestrichelt eingezeichneten Verlauf in Abbildung 3. Man nennt diesen Vorgang *Ausfrieren* und bezeichnet die verbliebenen Neutralinos als *Reliktdichte*. Anschaulich gesprochen entfernen sich die Neutralinos fortan schneller voneinander, als sie sich vernichten können. Dadurch bleibt die Neutralinodichte in einem mitbewegten Volumenelement konstant.

Wie groß die Reliktdichte ist, hängt folglich direkt vom Wirkungsquerschnitt bzw. vom Produkt $\langle \sigma_{Av} \rangle$ ab. Hieran lässt sich aus Sicht der Teilchenphysik anknüpfen. Schließlich lässt sich diese Größe für ein gegebenes Teilchen mit bekannten Wechselwirkungen berechnen. Das Resultat muss dann gerade so beschaffen sein, dass sich über den beschriebenen Mechanismus die beobachtete Reliktdichte, d. h. eine Menge an dunkler Materie von etwa $\Omega_{DM} = 0.23$ ergibt. Dieses Prinzip ermöglicht das Falsifizieren von Teilchenkandidaten zur dunklen Materie.

4 Fazit

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass es zum heutigen Zeitpunkt eine beachtliche experimentelle Evidenz für die Existenz dunkler Materie gibt. Neben den Rotationskurven von Galaxien lässt sich u. a. aus den Fluktuationen der kosmischen Hintergrundstrahlung ableiten, dass dunkle Materie in großer Menge vorhanden sein muss. Andernfalls wäre die Strukturbildung im Universum anders abgelaufen als wir sie heute beobachten bzw. diese lässt sich deutlich schlechter rekonstruieren. Für den Inhalt unseres Universums ergibt sich eine Zusammensetzung wie sie in Abbildung 4 dargestellt ist.

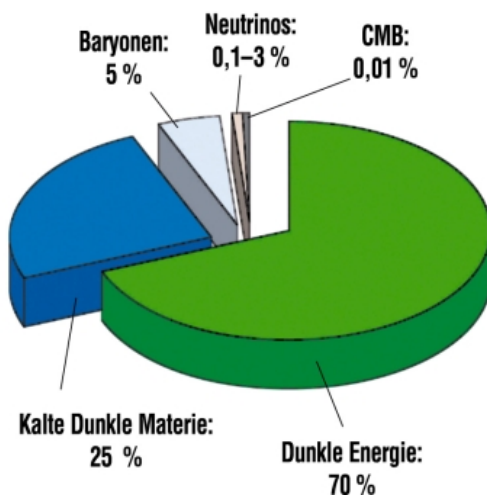


Abbildung 4: Energie- und Materieinhalt des Universums

Demnach besteht der Großteil des Universums aus dunkler Energie, über die wir kaum etwas wissen. Ein weiterer beachtlicher Teil, nämlich etwa 25 %, geht auf das Konto der dunklen Materie. Gewöhnliche baryonische Materie macht nur etwa 4-5 % aus. Einen weiteren, sehr kleinen Beitrag generieren die Neutrinos sowie die kosmische Hintergrundstrahlung.

Dennoch ist bislang völlig unklar, woraus die dunkle Materie besteht. Favorisiert werden derzeit WIMPs, allerdings liefert das Standardmodell der Teilchenphysik keinen wirklich geeigneten Kandidaten. Möglicherweise lässt sich die dunkle Materie erst im Rahmen einer supersymmetrischen Erweiterung des Standardmodells korrekt deuten. In diesem Zusammenhang gilt das Neutralino als vielversprechend.

Literatur

- [1] BÜHRKE, Thomas ; WENGENMAYR, Roland: *Geheimnisvoller Kosmos*
- [2] JUNGMAN, Gerard ; KAMIONKOWSKI, Marc ; GRIEST, Kim: Supersymmetric Dark Matter. In: *Physics Reports*
- [3] LIDDLE, Andrew: *Einführung in die moderne Kosmologie*
- [4] MORISON, Ian: *Introduction to Astronomy and Cosmology*
- [5] PERKINS, Donald: *Particle Astrophysics*
- [6] ROOS, Matts: *Introduction to Cosmology*
- [7] WEIGERT, A. ; WENDKER, H. J. ; WISOTZKI, L.: *Astronomie und Astrophysik*