

„Dunkle Materie als Saatkerne für Strukturbildung und die direkte Nachweismethode dunkler Materie“

Christoph Bayer

Hauptseminar
Astroteilchenphysik

SS 09

Inhaltsverzeichnis

1. Dunkle Materie als Saatkerne für Strukturbildung

- 1.1 Λ CDM-Modell
- 1.2 CMB
- 1.3 heutige Strukturen
- 1.4 Indizien für dunkle Materie in unmittelbarer Umgebung

2. Indirekte Nachweismethoden von dunkler Materie

- 2.1 Teilchenkandidaten
- 2.2 WIMP-Kern-Kollisionen
- 2.3 DAMA/LIBRA
- 2.4 XENON10
- 2.5 EDELWEISS
- 2.6 Ausblick

Einführung

Dunkle Materie – wir wissen, was wir nicht wissen.

Es fällt sehr schwierig, in Anbetracht derzeitiger experimenteller Ergebnisse, konkrete Aussagen über deren Zusammensetzung und Definition zu formulieren.

Nichts desto trotz spielt dunkle Materie, innerhalb der Entstehungstheorie unseres Universums bis zu heutigem Datum, eine sehr wesentliche Rolle und hilft uns heutige Strukturen zu verstehen. Im Nachfolgenden werden wir uns mit den Zusammenhängen zwischen Strukturbildung und dunklen Materieerscheinungen auseinandersetzen – stets mit Hinblick auf deren Teilchencharakter und den damit verbundenen Schwierigkeiten ihre Existenz in verschiedensten Versuchen zu verifizieren.

1.1 Das Λ CDM-Modell

Das Λ CDM-Modell stellt für uns das derzeitig gängigste Modell unseres Universums dar. Innerhalb dieses Modells gelingt es uns den Entstehungsprozess mit aktuellen Entdeckungen und Erkenntnissen über unser Universums in Einklang zu bringen. Hier seien einige wesentliche Eigenschaften vermerkt:

- die exponentielle Ausbreitungsgeschwindigkeit
- die Anisotropie der Hintergrundstrahlung
- die Entwicklung großräumiger Strukturen
- die Flachheit der Raum-Zeit
- das geschätzte Alter unseres Universums (13,7 Mrd. Jahre)

Ein Zusammenhang zu kalter, dunkler Materie ist uns an dieser Stelle keinesfalls ersichtlich. Aber die nähere Betrachtung der Anisotropie sollte als Denkanstoß genügen.

1.2 WMAP

Bereits aus Beobachtungen der Experimente COBE und WMAP wissen wir von der Anisotropie der Materieverteilung zum Zeitpunkt der Rekombination ($T=380.000$ Jahre).

(für weitere Information verweise ich auf den Vortag „ von „“).

Unseren Erkenntnissen über den Zeitpunkt der Rekombination steht die heutige Materieverteilung im Universum gegenüber. Doch in wie weit ist es uns möglich die zeitliche Entwicklung von 380.000 Jahren bis heute rückzuvollziehen?

1.3 heutige Strukturen

Das 2dF Redshift Survey gibt uns einen Ersteindruck über die strukturelle Anordnung bis vor 2 Mrd. Jahren. Es handelt sich hierbei um eine Kartographie von 232.155 Galaxien in Abhängigkeit der Rotverschiebung. Stark rotverschobenes Licht entstammt aus früheren Zeiten unseres Universums, während Licht ohne Rotverschiebung in unmittelbarer Nähe unserer Milchstraße emittiert wird. Der Vergleich der unterschiedlichen Emissionsorte gibt uns Aufschluss über die jeweilige Materieverteilung. Hierbei kommt man schnell zu folgendem Ergebnis:

Die Struktur zum Zeitpunkt vor 2 Mrd. Jahren war um ein Deutliches weniger ausgeprägt, als wir es heutzutage beobachten können.

Erscheint uns die gravitative Wechselwirkung baryonischer Materie zunächst als nächstliegende Lösung, so wissen wir mittlerweile aus Berechnungen gravitativer Kontraktionen, dass die geringe Anzahl an baryonischer Materie nicht ausreichen würde, innerhalb von 13 Mrd. Jahren den Strukturbildungsprozess in beobachtetem Maße zu begründen. Es bedarf weiterer Materie – uns nicht sichtbarer Materie – dunkler Materie.

Mittlerweile gibt es einige Simulationen, die sich mit der Strukturbildung aufgrund gravitativer Wechselwirkung zwischen baryonischer Materie mit dunkler Materie befassen.

Aufgrund des hohen DM-Anteils in unserem Universum wird baryonische Materie innerhalb einer solchen Simulation nicht berücksichtigt.

Ich möchte an dieser Stelle auf die Millenniumsimulation in München verweisen:

<http://www.mpa-garching.mpg.de/galform/virgo/millennium/>

Aber auch weitere Beobachtungen lassen uns dunkle Materie vermuten – sogar in unmittelbarer Umgebung unserer Milchstraße.

1.4 Indizien für dunkle Materie in unmittelbarer Umgebung

Gravitationslinsen:

Gravitationslinsen stellen für uns ein wesentliches Indiz für die Existenz dunkler Materie dar. Die hierbei zu geringe gravitative Wechselwirkung von Licht mit baryonischer Materie, lässt uns auf großräumige dunkle Materieverteilungen schließen. Das Zusammenspiel aus Interpretation von Linseneffekten und Masseabschätzungen baryonischer Materie innerhalb von Galaxien-Clustern, ermöglicht die Berechnung der zur Rechtfertigung der Linseneffekte notwendige Dunkle-Materieverteilung.

Rotationsgeschwindigkeiten:

Die Beobachtung der Geschwindigkeit baryonischer Materie innerhalb einer Galaxie lässt uns auf einen galaktischen DM-Halo schließen. Der bereits aus der klassischen Mechanik bekannten Zusammenhang zwischen Rotationsgeschwindigkeit und Radius einer rotierenden Scheibe, besagt einen Abfall mit $1/r$.

Tatsächlich lassen sich derartige Erwartungen experimentell nicht bestätigen. Stattdessen halten sich Fluktuationen der Rotationsgeschwindigkeiten in Grenzen. Die Rotationsgeschwindigkeit der baryonischen Materie bleibt trotz höheren Radius' annähernd konstant. Da die baryonische Materieverteilung innerhalb einer Galaxie derartige Phänomene ausschließt, finden diese Anomalien in einem DM-Halo (mit $m(r) \sim r$) Begründung.

Neben Navarro-Frenk-White haben sich auch Simulationen wie der „Via lactea“ mit der mathematischen Beschreibung eines DM-Halos befasst. Interessant ist hierbei, dass wir bei dunkler Materie eine Boltzmann-Verteilung zu Grunde legen. Im Gegensatz zu einer Vielzahl von Teilchenexperimenten gibt es bei der Suche nach Teilchen der dunklen Materie (sogenannten WIMPs) keine Vorzugsrichtung. Stattdessen bewegen wir uns mit unserem Sonnensystem durch eine als homogen vorausgesetzte DM-Verteilung. Dies entspricht einer mittleren WIMP-Geschwindigkeit von 270 km/s bei einer Energiedichte von $0,3 \text{ GeV/cm}^3$.

2.1 Teilchenkandidaten

Unsere bisherigen kosmologischen Anforderungen an unsere WIMPs reduzieren sich auf drei wesentliche Eigenschaften:

stabil:

Das WIMP sollte natürlich ein stabiles Teilchen sein.

schwache Wechselwirkung:

Eine sehr schwache Wechselwirkung gewährleistet einen sehr hohen dunklen Materieanteil, da die Wahrscheinlichkeit von Zerfallsprozessen bereits bei sehr hohen Energiedichten frühzeitig abnimmt. „Only the weakest will survive!“

Für ein WIMP liegt diese Ausfrieretemperatur bei 5 GeV, bei einer WIMP-Masse von 100 GeV.

Im Vergleich hierzu: Die Ausfrieretemperatur eines Neutrinos liegt bei 3 MeV, bei einer Neutrino-Masse von 0,3 eV.

nicht relativistisch:

Die zweite Anforderung an ein WIMP besteht in der verhältnismäßig geringen Bewegungsgeschwindigkeit. Innerhalb von dunkler Materie differenzieren wir zwischen heißer, relativistischer und kalter, nicht relativistischer, dunkler Materie. Ein Rückblick auf die Auswertung von DM-Simulationen gibt uns Aufschluss. Für verschiedene Variationen des Verhältnisses von kalter zu heißer DM, bekommen wir sehr unterschiedliche Ergebnisse. Lediglich hohe CDM-Anteile liefern uns das erwünschte Ergebnis der heutigen Struktur unseres Universums. Vernachlässigt man CDM zu Gunsten der HDM, so sind 13,7 Mrd. Jahre nicht ausreichend, DM-Strukturen auszubilden, wie wir sie heute vorfinden. Die hohe kinetische Energie und der sehr viel geringere gravitative Einfluss der HDM führt zur sehr viel homogeneren Materieverteilungen, als wie wir sie mittels sehr schwerer WIMPs zu begründen versuchen.

Suchen wir nun innerhalb bereits existierender Teilchenmodelle nach einem potentiellen Teilchenkandidaten, so erweist sich das sogenannte Neutralino als sehr trefflich.

Bei einem Neutralino handelt es sich um das leichteste supersymmetrische Teilchen – einer Linearkombination aus verschiedenen Flavorzuständen (Binos, Winos, Zinos, Photinos und Higgsinos), dessen Bino-Anteil in hohem Maße dominiert.

2.2 WIMP-Kern-Kollisionen

An dieser Stelle beschränken wir uns ausschließlich auf direkte Nachweismethoden von WIMPs – den WIMP-Kern-Kollisionen. Hierbei handelt es sich um einfallende WIMPs, die an einer speziellen Target-Masse streuen. Um den eigentlichen Streuprozess nachzuweisen, verwenden wir drei verschiedene Nachweismethoden.

- a) Szintillation
- b) Ionisation
- c) Temperaturmessung

Bei heutigen Experimenten beschränkt man sich nicht mehr auf eine Nachweismethoden, sondern optimiert die Messgenauigkeit durch synchrone Messung zweier Messmethoden.

An dieser Stelle sei vermerkt, dass die Rückstoßenergie bei lediglich 50keV liegt – ein für Teilchenstoßprozesse ungewöhnlich niedriges Energieniveau.

2.3 DAMA / LIBRA

Eines der interessantesten Experimente ist DAMA bzw. LIBRA, der aktuelle Nachfolger, im Gran-Sasso-Massiv bei Rom. Beide Experimente sind die derzeitigen einzigen Experimente, deren Ergebnisse an einen experimentellen Nachweis eines WIMPs glauben lassen. Bestätigung sehen die Forscher bei DAMA / LIBRA in der zyklischen Fluktuation der Ereignishäufigkeit. Diese Variation lässt sich bereits aus dem Frenk-Navarro-White-Profil ableiten – mit einer Toleranzgrenze von $\pm 7\%$.

Der Grund für eine derartige Fluktuation liegt in der Rotation der Erde um die Sonne. Erdbewegungen in Bewegungsrichtung des Sonnensystems führen zu einer höheren Ereignishäufigkeit – Erdbewegungen in Gegenrichtung des Sonnensystems zu einer geringeren Ereignismenge.

Da sich sowohl theoretische als auch tatsächlich gemessene Ereignisfluktuationen decken, spricht für das Messergebnis von DAMA / LIBRA. Vergleiche zu anderen Experimenten wie XENON10 und EDELWEISS lassen jedoch an den Messergebnissen zweifeln.

Auch der Umstand, dass sich dieser Versuch ausschließlich auf Szintillation beschränkt, lässt Fragen offen.

2.4 XENON10

Im Gegensatz zu DAMA / LIBRA setzt XENON10 auf Xenon als Targetmasse. Hierbei werden sowohl Szintillations- als auch Ionisationsprozesse beobachtet. Die Synchronisation beider Messmethoden erlaubt eine genauere Differentiation zwischen Messereignissen und Untergrundstrahlungsprozessen.

Es konnten bei diesem Versuch lediglich 10 potentielle WIMP-Ereignisse gemessen werden. Aufgrund der unterschiedlichen Messgenauigkeiten und Störsignalen wurden die 10 Ergebnisse nicht als WIMP-Stoßprozesse gewertet.

Derzeit laufen die Vorbereitungen für XENON100 mit einer Targetmasse von 100kg. Mittels der höheren Targetmasse erhofft man die Ereignishäufigkeit potentieller WIMP-Stoßprozesse deutlich zu erhöhen.

2.5 EDELWEISS

EDELWEISS setzt im Gegensatz zu den anderen beiden Versuchen auf die Kombination aus Temperaturmessung und Ionisation. Die über Phononen übertragenen Stoßprozesse werden an einem Thermistor registriert und in ein elektrisches Signal umgewandelt. Ionen werden über einen, den Absorber umschließenden Ionisationsring detektiert und gleichfalls in ein elektrisches Signal überführt.

Im Gegensatz zu XENON10 ist die Rückstoßtoleranz mit 90% deutlich höher. Dennoch – trotz der sehr hohen Rückstoßtoleranz ließen bisherige Ergebnisse in keinsten Weise auf WIMP-Kern-Kollisionen schließen.

Mit dem aktuellen Experiment EDELWEISS II wird sowohl eine weitere Genauigkeit der Teilchen-Selektion, als auch eine höhere Targetmasse angestrebt. Die Detektormasse beläuft sich derzeit auf 30kg – die Rückstoßtoleranz liegt bei 99,98 %.

2.6 Ausblick

Da uns derzeit sowohl die Masse als auch der Wirkungsquerschnitt der WIMPs unbekannt sind, sind ausschließlich Angaben über den Wirkungsquerschnitt in Abhängigkeit der Masse sinnvoll. Hierbei variiert der Wirkungsquerschnitt zwischen 10^{-41} und 10^{-46} cm^2 .

Hohe Wirkungsquerschnitte (innerhalb gleicher WIMP-Massen) sind bereits durch Versuche wie EDELWEISS, XENON10, WARP, CRESST und CDMS ausgeschlossen. Um die Messgenauigkeiten für kleinere Wirkungsquerschnitte zu steigern werden derzeit weitere Experimente aufgebaut bzw. optimiert.

Zu Ihnen zählen EDELWEISS II und EURECA.

Noch immer ist nicht klar in wie weit sich WIMP-Kern-Kollisionen in bisher angenommener Art und Weise nachweisen lassen. Auch der Umstand dass DAMA / LIBRA als einziges Experiment annimmt, WIMPs detektiert zu haben, räumt Zweifel an der Richtigkeit des bisher angenommenen WIMP-Teilchen-Modells nicht aus.

Während die experimentelle Physik noch im Dunklen nach Dunklem sucht, gibt es bereits erste theoretische Ansätze den WIMPs, ähnlich unserem Standardmodell, verschiedene Anregungszustände zuzuschreiben. Gegebenenfalls wird es möglich sein, anhand dieses Ansatzes die unterschiedlichen Ergebnisse zwischen DAMA / LIBRA und den Experimenten wie XENON10 und EDELWEISS zu begründen. Wir sind optimistisch.