

TU Dortmund
Studentenseminar: Kosmologie und Teilchenphysik

Handout zum Vortrag über

Dunkle Materie

erstellt von: Stephan Escher <stephan.escher@tu-dortmund.de>

Datum: 23.11.2015

1 Einleitung

Ein ungeklärtes Problem der Kosmologie ist die dunkle Materie, deren Existenz durch zahlreiche Beobachtungen begründet wird. Bisher gab es nur Hinweise auf dunkle Materie durch die Gravitation. Diese Materie muss aus stabilen nicht-baryonischen Teilchen bestehen. Verschiedene Theorien bringen vielversprechende Kandidaten wie dem WIMP, den sterilen Neutrinos, den Gravitinos oder den Axionen hervor. Die Suche nach dunkler Materie ist auf die drei Bereiche direkte Detektion, indirekte Detektion und Produktion gestützt.

2 Evidenz

Es gibt verschiedene kosmologische Beobachtungen, die auf die Existenz dunkler Materie hindeuten. In diesem Kapitel werden einige davon vorgestellt.

2.1 Rotation astronomischer Objekte

Der erste Hinweis auf dunkle Materie wurde in den 1930er Jahren von Fritz Zwicky entdeckt durch Beobachtungen am Coma Cluster.

Dazu hat er die Rotationsgeschwindigkeit der Galaxien und Sterne in Abhängigkeit des Abstandes zum Cluster- Mittelpunkt über den Dopplereffekt bestimmt. Über den Virialsatz konnte er so die Masse des Cluster bestimmen.

$$M \propto \frac{3R \langle v \rangle^2}{G}$$

Außerdem bestimmte er die Leuchtkraft des Clusters. Das resultierende Masse-Leuchtkraft-Verhältnisses ist 100 mal größer als bei Sternen unserer Galaxie. Das deutet auf einen Überschuss an nicht leuchtender Masse hin.

Mit Hilfe des Gravitationslinseneffekts kann ebenfalls eine Massenbestimmung durchgeführt werden. Dadurch kann beispielsweise das Ergebnis aus dem Virialsatz überprüft werden. Auch diese Methode deutet auf einen großen Anteil elektromagnetisch neutraler Materie hin.

Beobachtungen von Rotationsgeschwindigkeiten innerhalb einer Galaxie zeigen auch Probleme auf. Auf die Sterne wirken die Gravitationskraft und die Zentrifugalkraft in gleicher Stärke weshalb eine mit $\frac{1}{\sqrt{r}}$ nach außen abfallende Rotationsgeschwindigkeit erwartet wird. Gemessen werden jedoch fast konstante Geschwindigkeiten (siehe Abb.1).

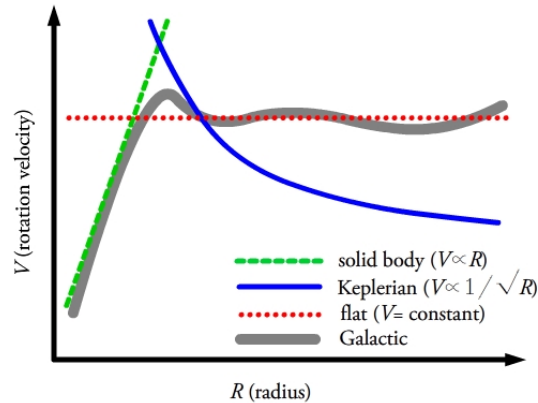


Abbildung 1: Rotationsgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Abstandes zum Galaxiemittelpunkt

Eine mögliche Erklärung ist ein kugelförmiger Halo aus dunkler Materie.

2.2 kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung

Das kosmische Mikrowellenspektrum ist sehr isotrop und besitzt einen Mittelwert von etwa 2,7 K mit relativen Schwankungen von $5 \cdot 10^{-5}$. Winzige Dichtefluktuationen zur Zeit der Materie-Strahlungs-Entkopplung lassen sich durch die Temperaturfluktuationen im CMB messen. Daraus können Rückschlüsse auf die Materieverteilung im heutigen Universum gezogen werden.

$$\Omega_0 = 1,003 \pm 0,02 \rightarrow \text{heutiges Universum ist flach } (k = 0)$$

$$\Omega_B = 4,6\% \quad \Omega_{DM} = 23\% \quad \Omega_\Lambda = 72\%$$

Das Universum besteht also zu 23% aus einer nicht-baryonischen Materie Form.

2.3 Strukturbildung

Die Dichtefluktuationen im CMB sind die Entstehungspunkte heutiger Galaxien und Cluster. N Teilchen Simulationen werden berechnet um die Materieverteilung zu bestimmen, die notwendig ist aus diesen Dichtefluktuationen die heute beobachteten Strukturen im Universum zu schaffen. Simulationen die überwiegend kalte dunkle Materie (CDM) annehmen können das Universum auf großen Skalen gut erklären. Es hat sich jedoch gezeigt, dass auf kleineren Skalen (Galaxiegröße) warme dunkle Materie (WDM) ein besseres Ergebnis liefert. Wäre überwiegend heiße dunkle Materie (HDM) vorhanden, würden die Strukturen zu stark 'ausgewaschen' werden.

Wahrscheinlich liegt also überwiegend CDM oder WDM vor.

3 Kandidaten

Viele verschiedene theoretische Ansätze werden diskutiert um die dunkle Materie zu erklären. In diesem Kapitel werden einige der vielversprechendsten Kandidaten vorgestellt.

3.1 WIMP

WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles) sind schwach wechselwirkende massive Elementarteilchen, die vor allem im Rahmen der Supersymmetrie (SUSY) postuliert werden. Die Masse der Wimps χ liegt zwischen $m_\chi > 10$ GeV und $m_\chi < 1$ TeV. In der Frühphase des Universums befanden sie sich im thermischen Gleichgewicht. Durch die Expansion des Universums nahm ihre Dichte ab wodurch die Annihilation aussetzte. Dieses sogenannte thermische Ausfrieren setzt für Teilchen mit hoher Masse (hohem WQS) später ein (siehe Abb.2).

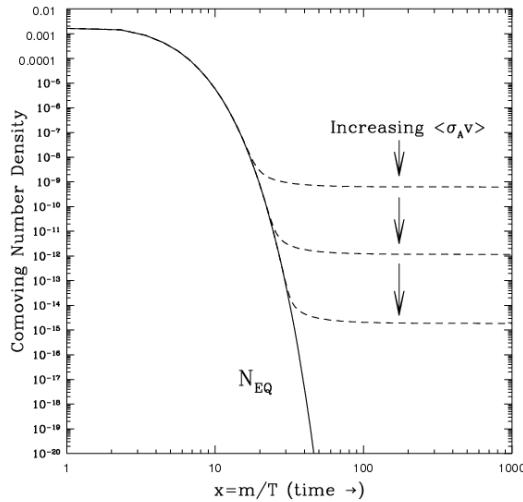


Abbildung 2: thermische Ausfrieren

Mit der geschätzten WIMP-Masse kann aus diesem Prozess der Wirkungsquerschnitt (WQS) berechnet werden. Das Ergebnis von $3 \cdot 10^{-26} \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$ stimmt ziemlich genau mit dem WQS der schwachen Wechselwirkung überein. Außerdem liefern stabile WIMPs auf natürliche Weise die beobachtete dunkle Materie Dichte weshalb vom 'WIMP-miracle' gesprochen wird.

Gute Kandidaten für WIMPs kommen aus dem minimalen supersymmetrischen Standardmodell (MSSM), welches jedem Standardmodell-Teilchen einen supersymmetrischen Partner (SP) zuordnet. Die MSSM führt eine neue multiplikative Erhaltungsgröße ein, die R-Parität. Diese erlaubt nur paarweise Erzeugung und Vernichtung von SP, weshalb der leichteste SP (LSP) stabil sein muss. Neutralinos oder das Gravitino werden als gute Kandidaten für das LSP angesehen, was sie automatisch interessant für die Erklärung dunkler Materie macht.

3.2 Neutrinos

Die heute bekannten Neutrinos sind die einzig möglichen Kandidaten des Standardmodells. Der Nachweis von Neutrinooszillationen hat gezeigt, dass Neutrinos eine Masse haben. Zusammen mit ihrer bekannten Dichte aus dem CMB zeigt sich jedoch, dass Neutrinos nur $0,1\% < \Omega_\nu < 4\%$ ausmachen können. Außerdem sind sie ultra-relativistisch und für Strukturbildung wird hauptsächlich CDM oder WDM benötigt.

Erweiterungen des Standardmodells zur Erklärung von Neutrinomassen (seesaw-Mechanismus) postulieren zusätzlich zu den 3 linkshändigen Neutrinos 3 rechtshändige. Diese sind elektrisch

neutral und wechselwirken nur über die Gravitation (steril). Bei einer Masse im keV Bereich sind sie ein guter Kandidat für warme dunkle Materie.

3.3 Axionen

Axionen wurden ursprünglich zur Lösung des starken CP-Problems der Quantenchromodynamik postuliert. Die Masse kann durch kosmologische Überlegungen/Messungen auf den Bereich $10^{-6} \text{ eV} < m_a < 10^{-3} \text{ eV}$ eingeschränkt werden. Sie werden mit sehr kleinem Impuls erzeugt und stellen daher einen sehr leichten Kandidat für CDM dar.

4 experimentelle Suche nach dunkler Materie

Die experimentelle Suche nach dunkler Materie kann in die drei Bereiche direkte Detektion, indirekte Detektion und Produktion unterteilt werden.

4.1 direkte Detektion

Bei der direkten Detektion wird versucht dunkle Materie aus unserem kosmischen Halo über elastische Stöße mit Atomkernen nachzuweisen. Die Wechselwirkungsrate R ist dabei abhängig von dem WIMP-Kern WQS der WIMP Masse der WIMP Dichte und Geschwindigkeitsverteilung sowie der Menge des Detektormaterials.

$$R = \int_{E_{min}}^{E_{max}} \int_{v_{min}}^{v_{max}} \frac{2\rho}{m_\chi} \frac{d\sigma}{d\|\vec{q}\|} v f(v) dv dE_R$$

Durch abschätzen der Größen ergibt sich die Streurrate: 1 Ereignis pro Kilo Detektormaterial pro Jahr. Daher ist die Minimierung und das Herausrechnen des Untergrundes eine der größten Herausforderungen der direkten Detektion.

Die relative Geschwindigkeit der WIMPs $v \approx 220 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ ist, aufgrund der Erdrotation um die Sonne, einer jahreszeitabhängigen Schwankung von 5 % unterworfen. Das DAMA Experiment hat tatsächlich so eine Schwankung messen können (Abb. 3).

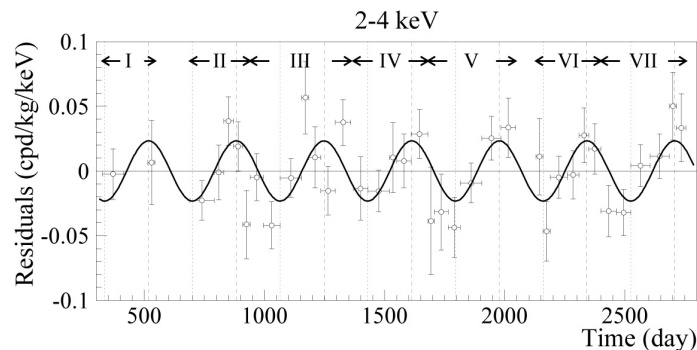


Abbildung 3: Messung des DAMA Experimentes der jahreszeitabhängigen Schwankung der WIMP-Rate

Jedoch wird vermutet das ein systematischer Fehler vorlag, da andere Experimente den von DAMA detektierten Bereich für dunkle Materie bereits ausgeschlossen haben.

4.2 indirekte Detektion

Die indirekte Suche nach dunkler Materie versucht die Produkte aus WIMP-Vernichtungsprozessen zu messen. Dabei wird angenommen, dass sich WIMPs im Gravitationspotential schwerer Objekte (z.B. Galaxie, Sonne) ansammeln. Eine erhöhte Dichte führt zu einer erhöhten Anihilationsrate, die über die entstehenden Standardmodell-Teilchen (Neutrinos, Gammas...) gemessen werden kann.

Beispielweise hat das EGRET Experiment die diffuse Gamma-Strahlung unserer Galaxie gemessen, welche auf einen möglichen Beitrag von Neutralino-Annihilation untersucht wurde. Das EGRET-Spektrum wurde jedoch von dem Nachfolger FERMI widerlegt.

4.3 Produktion

Ein Hauptgrund für den Bau hoch-energetischer Beschleunigerexperimente wie dem LHC ist die Suche nach SUSY-Teilchen. Wenn die Schwerpunktsenergie der Teilchenstrahlen im Bereich der WIMP-Masse ist kann dieses effektiv produziert werden. Da das LSP stabil ist und nicht mit dem Detektormaterial wechselwirkt macht es sich durch eine große fehlende Energie bemerkbar. Der Nachweis geschieht daher über die Energie-Impuls-Beziehung.

5 Zusammenfassung

Die Existenz der dunklen Materie ist die beste Erklärung für viele verschiedene Beobachtungen. Es gibt mehrere Theorien die gute Kandidaten für dunkle Materie hervorbringen. Neuere Erkenntnisse über die Strukturbildung deuten auf größtenteils warme dunkle Materie hin, weshalb Kandidaten wie sterile Neutrinos und Gravitinos besonders attraktiv sind. Zur Zeit gibt es noch keinen experimentellen Nachweis für dunkle Materie. Allerdings ist es nicht unwahrscheinlich, dass eine Entdeckung kurz bevorsteht, da wir die dunkle Materie immer besser verstehen und sensiblere Detektoren bzw. energetischere Beschleuniger gebaut werden.