

Erklärungsmodelle für Dunkle Materie

Jochen Müller

Scheinseminar Astro- und Teilchenphysik

15.07.2010

Begriffsklärung: “Dunkle Materie“

Was versteht man unter “Dunkler Materie“?

Dunkle Materie (DM) ist eine hypothetische Form von Materie, die so gering strahlt, dass man sie nicht direkt beobachten kann.

Dunkle Materie lässt sich verstecken in Form von...

- 1 ... **baryonischer Materie**, die so schwach leuchtet, dass wir sie nicht sehen.
- 2 ...**nicht-baryonischer Materie**, die nur schwach wechselwirkt und deshalb unsichtbar ist.

Kandidaten für nicht-baryonische DM: “heiße“, relativistische (HDM) und “kalte“, “langsame“ (CDM) Teilchen

Eine der folgenden zwei Aussagen ist wahr!

- 1 **Dunkle Materie existiert und wir beobachten die Auswirkungen ihrer Anziehungskraft.**
- 2 **Wir haben ein falsches Bild der Gravitation, durch das wir auf die Existenz einer Dunklen Materie schließen.**

Inhaltsverzeichnis

- 1 Evidenzen für dunkle Materie
 - Dunkle Materie in Spiralgalaxien
 - Dunkle Materie in Galaxienhaufen
 - Mikrowellenhintergrund und Strukturbildung
- 2 Erklärungsmodelle für dunkle Materie
 - Dunkle Sterne - MACHOs
 - Heiße dunkle Materie - Neutrinos
 - Kalte dunkle Materie - WIMPs
- 3 Modifizierte Newtonsche Dynamik (MOND)
- 4 Resumée zur dunklen Materie

Übersicht

- 1 Evidenzen für dunkle Materie
 - Dunkle Materie in Spiralgalaxien
 - Dunkle Materie in Galaxienhaufen
 - Mikrowellenhintergrund und Strukturbildung
- 2 Erklärungsmodelle für dunkle Materie
 - Dunkle Sterne - MACHOs
 - Heiße dunkle Materie - Neutrinos
 - Kalte dunkle Materie - WIMPs
- 3 Modifizierte Newtonsche Dynamik (MOND)
- 4 Resumée zur dunklen Materie

Rotationskurven

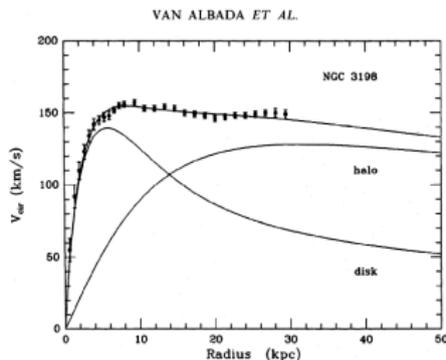


Abbildung 1 Rotationskurve der Spiralgalaxie NGC 3198

- Erwarteter Verlauf aufgrund der sichtbaren Materie: $v \sim \frac{1}{\sqrt{r}}$
- Aber: Gemessene Rotationskurven von Spiralgalaxien sind flach!
→ **Mehr Masse von Nöten!**

Emission von Röntgenstrahlung 1

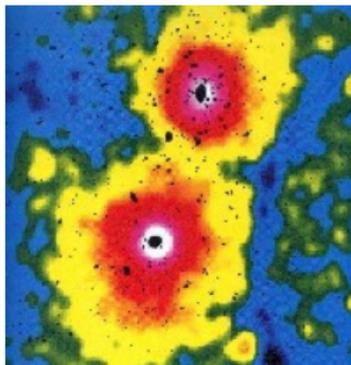


Abbildung 2 Röntgenstrahlung aus
Galaxienhaufen *Abell 3528*

- Aus Gebieten um Galaxienhaufen:
Röntgenstrahlung
- Temperatur des leuchtenden Gases:
 ≈ 10 Millionen K
- Damit Gas gravitativ gebunden bleibt:
→ **Mehr Masse von Nöten!**

Emission von Röntgenstrahlung 2

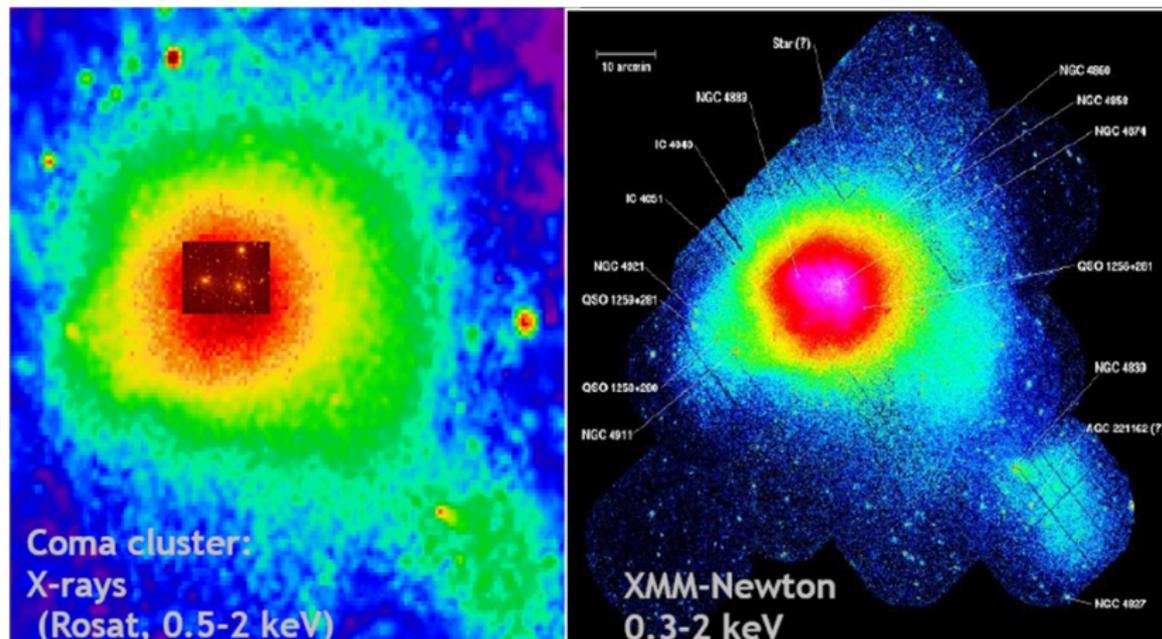
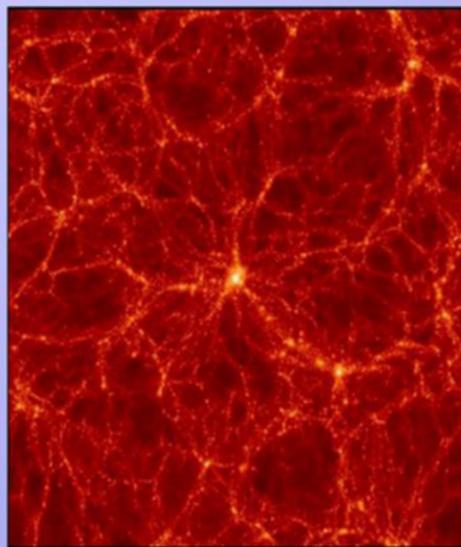


Abbildung 3 Röntgenstrahlung aus verschiedenen Galaxienhaufen

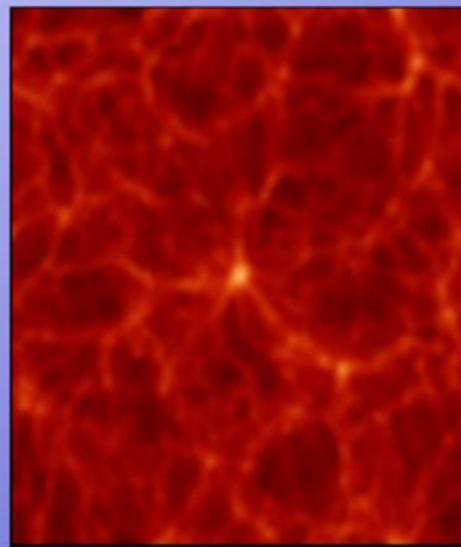
Strukturbildung und CMB

- Ursprung der Galaxien: Quantenfluktuationen nach dem Urknall
- HDM → “top-down“-Szenario: Bildung großer Strukturen und anschließend kleiner Strukturen
- CDM → “bottom-up“-Szenario: Aufbau von kleineren Strukturen zu größeren hin
- Beobachtungen (z.B. von Galaxien für $z \geq 6$ und CMB)
→ “bottom-up“-Szenario
- **“Bottom-up“-Szenario erfordert überwiegend CDM**

Simulationen zur Strukturbildung



kalt



heiß

Abbildung 4 Simulationen zur Strukturbildung mit "kalter" und "heißer" DM

Materie-Verteilung im Universum

Aus Messungen des WMAP-Satelliten ergibt sich:

Aktueller Kenntnisstand

$$\Omega_{tot} = \Omega_{Baryon} + \Omega_{heiß} + \Omega_{kalt}^{DM} + \Omega_{\Lambda}$$

- $\Omega_{tot} = 1.02 \pm 0.02$
- $\Omega_{\Lambda} = 0.73 \pm 0.04$
- $\Omega_{Materie} = 0.27 \pm 0.04$
- $\Omega_{Baryon} = 0.046 \pm 0.002$

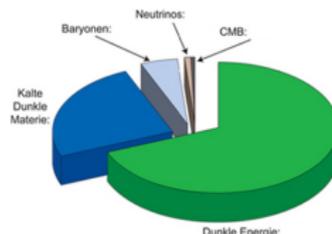


Abbildung 5 Energie-Materie-Verteilung im Universum

Übersicht

- 1 Evidenzen für dunkle Materie
 - Dunkle Materie in Spiralgalaxien
 - Dunkle Materie in Galaxienhaufen
 - Mikrowellenhintergrund und Strukturbildung
- 2 Erklärungsmodelle für dunkle Materie
 - Dunkle Sterne - MACHOs
 - Heiße dunkle Materie - Neutrinos
 - Kalte dunkle Materie - WIMPs
- 3 Modifizierte Newtonsche Dynamik (MOND)
- 4 Resumée zur dunklen Materie

Baryonisches Missing-Mass-Problem

Aus Elemententstehung im Urknall: Häufigkeiten der durch Fusion entstandenen Elemente (D, 3He , 4He , 7Li)

Abschätzung des Beitrags dieser baryonischen Materie

$$0.009 \leq \Omega_{\text{Baryon}} \leq 0.14$$

Abschätzung der sichtbaren, leuchtenden Materie

$$0.003 \leq \Omega_{\text{Lum}} \leq 0.007$$

→ Es muss mehr baryonische Materie geben als wir sehen!

In welchen Objekten versteckt sich baryonische DM?

- Nicht möglich: leuchtende Sterne
- Unwahrscheinlich: galaktischer Staub, kalte Gaswolken, Neutronensterne, Schwarze Löcher und Zwergsterne

⇒ Baryonische DM versteckt sich vermutlich in stellaren Objekten, die zu klein sind, um hinreichend hell zu leuchten

→ **MACHOs** (Massive Compact Halo Objects)

- Idealer Kandidat: **Braune Zwerge**

Beobachtung von MACHOs 1



- Erwartung: viele MACHOs im Halo der Milchstraße
- MACHOs messbar über Mikrogravitationslinseneffekt
- Experimente *MACHO*, *EROS* und *OGLE*: Entdeckung von ein Dutzend MACHOs im Halo der Milchstraße

Abbildung 6 Mikrogravitationslinseneffekt an MACHOs

Beobachtung von MACHOs 2

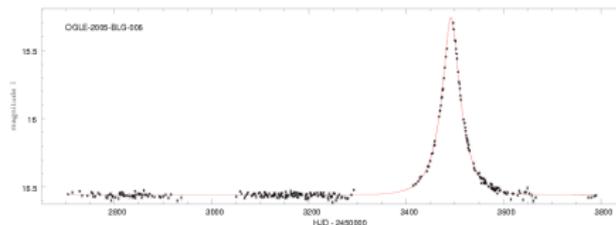


Abbildung 7 Lichtkurve durch Mikrogravitationslinseneffekt

- Aus mittlerer Helligkeitsphase \Rightarrow Masse des MACHOs
- Aus bisher gemessenen Helligkeitsexkursionen:
 $M_{\text{MACHO}} \approx 0.5 M_{\odot}$
- Großer Bereich des Massenspektrums wird ausgeschlossen

Hochrechnung auf den ganzen galaktischen Halo

Massenanteil dunkler Sterne: $(20^{+30}_{-12})\%$

Neutrinooszillationen

Aus Beobachtung von Neutrinooszillationen folgt:

Mindestens zwei Neutrinos haben eine Ruhemasse und tragen somit zur DM bei!

Eigenschaften von Neutrinos

- Nur schwache Wechselwirkung
- Ultra-relativistische Teilchen (für $m_\nu \ll 1 \text{ MeV}$)
 - "Heiße dunkle Materie" (HDM)
 - Für Verständnis von Galaxiestrukturen nicht ausreichend!
- Aber: Neutrinos sehr zahlreich vorhanden

Neutrindichte im Universum

$$n \approx 113 \text{ Neutrinos/cm}^3$$

⇒ Beitrag zur DM je nach Ruhemasse der Neutrinos

Ruhmassen von Neutrinos

Obere Schranken für Neutrinomassen aus direkten Massenbestimmungen

$$m_{\nu_e} < 2.5 \text{ eV}$$

$$m_{\nu_\mu} < 170 \text{ keV}$$

$$m_{\nu_\tau} < 18 \text{ MeV}$$

Obere Schranke für Neutrinomassen aus kosmologischen Betrachtungen

$$m_{\nu_{e\mu\tau}} < 200 \text{ eV}$$

→ Für τ -Neutrino deutlich bessere Schranke

- Für $m_\nu \sim 30 \text{ eV}$: ν s könnten gesamte DM darstellen
- Plausible Neutrinomasse: unterhalb 1 eV

Nachweis leichter Neutrinos

- Leichte Neutrinos im Halo
⇒ Scharfe Absorptionslänge im Spektrum höchstenergetischer Neutrinos gemäß:
 $\nu + \bar{\nu} \rightarrow Z^0 \rightarrow \text{Hadronen oder Leptonen}$
- Kriterium für Reaktion: $2m_\nu E_\nu = M_Z^2$

Absorptionslinie für $m_\nu = 10 \text{ eV}$

$$E_\nu = \frac{M_Z^2}{2m_\nu} = 4.2 \cdot 10^{20} \text{ eV}$$

- Verifizierung einer solchen Absorptionslinie ist eine große experimentelle Herausforderung

Bedarf an kalter DM

Strukturbildung (“bottom-up“-Szenario) und CMB erfordern
kalte dunkle Materie (CDM)

Kandidaten für CDM

- Anforderungen: neben Gravitation nur schwache Wechselwirkung
- Vierte Leptongeneration?
 - Aus LEP-Messungen zur Z^0 -Breite: Zahl der Neutrinos exakt drei
 - Für mögliche vierte Generation: $m_{\nu_x} \geq m(Z^0)/2 \approx 46 \text{ GeV}$
 - Masse zu groß für Erzeugung beträchtlicher Mengen im Urknall
- Alternative: WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles) und Axionen

Kandidaten für CDM

- Anforderungen: neben Gravitation nur schwache Wechselwirkung
- Vierte Leptongeneration?
 - Aus LEP-Messungen zur Z^0 -Breite: Zahl der Neutrinos exakt drei
 - Für mögliche vierte Generation: $m_{\nu_x} \geq m(Z^0)/2 \approx 46 \text{ GeV}$
 - Masse zu groß für Erzeugung beträchtlicher Mengen im Urknall
- Alternative: **WIMPs** (Weakly Interacting Massive Particles) und Axionen

WIMPs - Supersymmetrie

Supersymmetrie (SUSY) liefert Kandidaten für WIMPs

SUSY

- Anordnung aller Teilchen in Supermultipletts
- Boson \mapsto Bosino, Fermion \mapsto Sfermion
- Superpartner schwerer als bekannte Teilchen (SUSY gebrochen)
- Existenz einer multiplikativen Quantenzahl (R-Parität):
 $P_R = 1$ für SM-Teilchen und $P_R = -1$ für SUSY-Teilchen

WIMPs - Das LSP ¹

Erhaltung R-Parität \Rightarrow Existenz und Stabilität eines leichtesten, supersymmetrischen Teilchens (LSP)

Eigenschaften des LSP

- Aus experimentellen Beobachtungen: $M_{LSP} \gtrsim 10 \text{ GeV}$
- Aus theoretischen Gründen: $M_{LSP} < 1 \text{ TeV}$
- Wenn LSP elektrisch neutral \Rightarrow Nur schwache Wechselwirkung (WW)
 \Rightarrow Neutralino $\tilde{\chi}_{1,2,3,4}^0$ ist idealer Kandidat für DM

¹Robert Karl: Suche nach SUSY am LHC

Nachweis der LSPs

- Nachweis der LSPs sehr schwierig, aufgrund...
 - ...der geringen WW-Stärke des LSP
⇒ Geringe Ereignisrate
 - ...des hohen Untergrunds
- Mögliche Nachweismethode: Annihilation von WIMPs → Kosmische Strahlung

Annihilation von WIMPs

Annihilationsprozess von WIMPs

$$\chi + \bar{\chi} \rightarrow q + \bar{q} \rightarrow n\pi^0 + X, \quad \pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$$

- In Gravitationspotentialen stellarer Objekte: Erhöhte WIMP-Dichte
⇒ Erhöhte Annihilationsraten
⇒ Erhöhter Fluss kosmischer Strahlung aus diesen Quellen
⇒ Verstärktes Gamma-Spektrum

EGRET-Messungen des galaktischen Gamma-Spektrums

Vergleich mit Berechnungen verschiedener Beiträge:

- Pion-Zerfall (π^0), Inverse Compton-Streuung (IC), Elektron-Bremsstrahlung (Brems)
- Links: Die Beiträge bekannter Quellen
- Rechts: Zusätzlicher Beitrag von der Annihilation von Neutralinos mit einer Masse von etwa 60 GeV

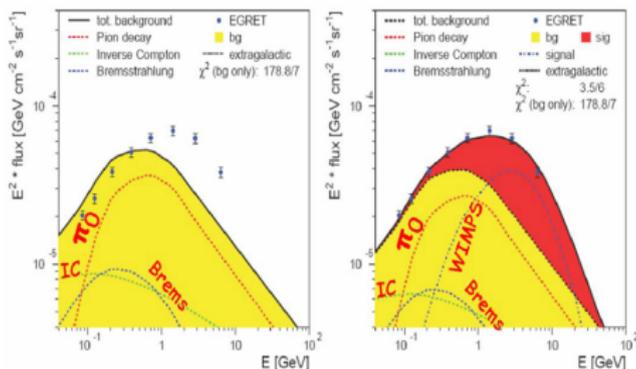


Abbildung 8 EGRET-Messungen

Übersicht

- 1 Evidenzen für dunkle Materie
 - Dunkle Materie in Spiralgalaxien
 - Dunkle Materie in Galaxienhaufen
 - Mikrowellenhintergrund und Strukturbildung
- 2 Erklärungsmodelle für dunkle Materie
 - Dunkle Sterne - MACHOs
 - Heiße dunkle Materie - Neutrinos
 - Kalte dunkle Materie - WIMPs
- 3 **Modifizierte Newtonsche Dynamik (MOND)**
- 4 Resumée zur dunklen Materie

MOND - Idee 1

- Ziel: Modifikation der Newtonschen Bewegungsgleichungen von Materie im Gravitationsfeld
→ Erklärung flacher Rotationskurven von Spiralgalaxien
- Vorgeschlagen von Mordehai Milgrom, 1983

MOND - Idee 2

Gravitative Kraft bleibt erhalten: $F = G \frac{mM}{r^2}$

Änderung der Bewegungsgleichungen

$$F = m \cdot \mu(a/a_0) \cdot a$$

$$\mu(x) = 1 \text{ wenn } x \gg 1$$

$$\mu(x) = x \text{ wenn } x \ll 1$$

Signifikante Veränderungen für große Abstände r !

$$\Rightarrow \frac{GM}{r^2} = \mu(a/a_0) \cdot a \quad \begin{matrix} a/a_0 \ll 1 \\ \Rightarrow \end{matrix} \quad a = \frac{\sqrt{GMa_0}}{r}$$

$$\Rightarrow \mathbf{v}^2 = \sqrt{\mathbf{GM}a_0}$$

Experimentell: $a_0 = 1.2 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}^2$

MOND - Resumée

- MOND kann Rotationskurven von Spiralgalaxien erklären (nach Konstruktion)
- Was ist die physikalische Bedeutung a_0 ?
- Verletzung des starken Äquivalenzprinzips

⇒ Im Vergleich zu anderen DM-Theorien erscheint MOND als nicht durchsetzungsfähige Alternative

ABER: Kritisches Hinterfragen etablierter Gesetze für Physik äußerst wichtig!

Übersicht

- 1 Evidenzen für dunkle Materie
 - Dunkle Materie in Spiralgalaxien
 - Dunkle Materie in Galaxienhaufen
 - Mikrowellenhintergrund und Strukturbildung
- 2 Erklärungsmodelle für dunkle Materie
 - Dunkle Sterne - MACHOs
 - Heiße dunkle Materie - Neutrinos
 - Kalte dunkle Materie - WIMPs
- 3 Modifizierte Newtonsche Dynamik (MOND)
- 4 Resumée zur dunklen Materie

Erklärungsmodelle für DM - Zusammenfassung

- Es gibt baryonische DM
(reicht nicht aus um Dynamik von Galaxien zu erklären)
- Neutrinos haben eine Masse und tragen somit zur DM bei
(HDM)
- Strukturbildung und CMB erfordern eine kalte dunkle Materie
(CDM)
- Aussichtsreichster Kandidat: WIMP
(**Muss noch gefunden werden!**)
- MOND kann Rotationskurven von Spiralgalaxien erklären
(Konzept jedoch fraglich!)

Erklärungsmodelle für DM - Schlusswort



Aufgrund der Evidenzen für DM, erscheint folgendes Szenario plausibel: DM wie ein Cocktail aus...

- ...überwiegend kalter dunkler Materie
- ...etwas baryonischer Materie
- ...und einem "Schuss" leichter Neutrinos

-  Claus Grupen, Astroteilchenphysik, Verlag Vieweg, 1. Auflage
September 2000
-  Jeffrey Bennett, Megan Donahue, Nicholas Schneider, Mark
Voit, Astronomie - Die kosmische Perspektive, PEARSON
Studium, 5. Auflage
-  <http://www.astro.uni-bonn.de/peter/Lectures/intro4.pdf>
-  <http://pulsar.sternwarte.uni-erlangen.de/wilms/>
-  <http://de.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Hauptseite>
-  [http://www-
zeuthen.desy.de/kolanosk/astro0506/skripte/dm01.pdf](http://www-zeuthen.desy.de/kolanosk/astro0506/skripte/dm01.pdf)
-  [http://www-
zeuthen.desy.de/kolanosk/astro0506/skripte/dm02.pdf](http://www-zeuthen.desy.de/kolanosk/astro0506/skripte/dm02.pdf)