

# 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

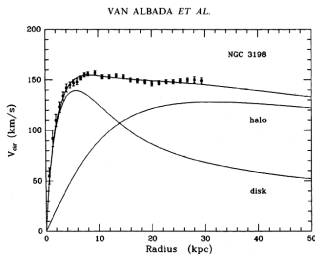


Abbildung 1 Rotationskurve der Spiralgalaxie NGC 3198

- 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

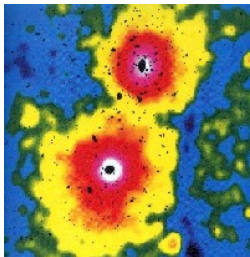


Abbildung 2 Röntgenstrahlung aus  
Galaxienhaufen *Abell 3528*

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



## Emission von Röntgenstrahlung 2

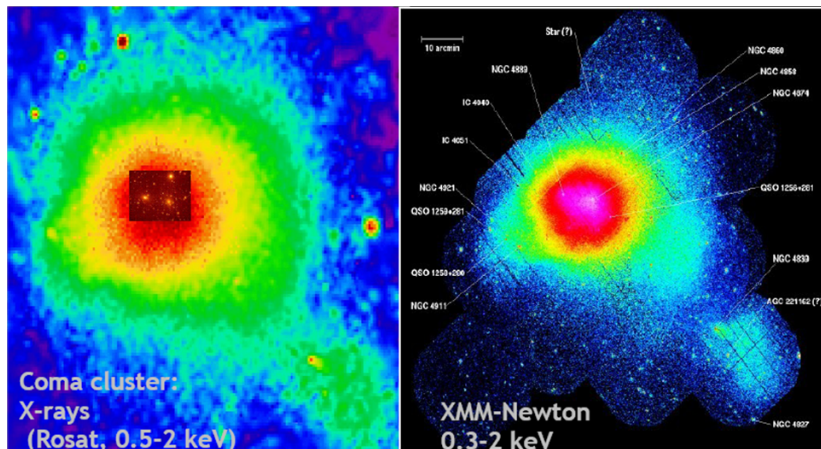
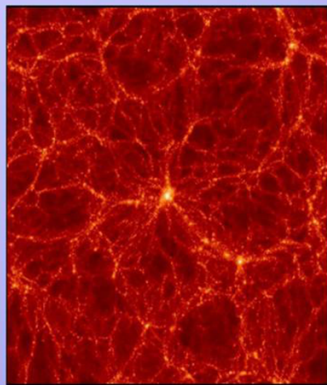


Abbildung 3 Röntgenstrahlung aus verschiedenen Galaxienhaufen

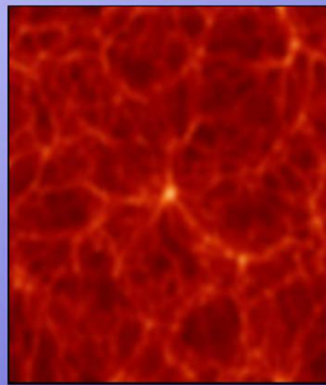
# Strukturbildung und CMB

- 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

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

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

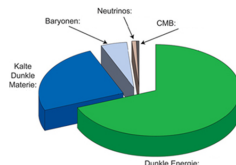


Abbildung 5 Energie-Materie-Verteilung im Universum

# 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,  $3\text{He}$ ,  $4\text{He}$ ,  $7\text{Li}$ )

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

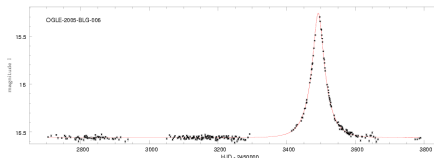


Abbildung 7 Lichtkurve durch Mikrogravitationslinseneffekt

- 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  $\tau$ -Neutrino deutlich bessere Schranke

- Für  $m_\nu \sim 30 \text{ eV}$ :  $\nu$ 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 <sup>1</sup>

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

<sup>1</sup>Robert 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 ( $\pi^0$ ), 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

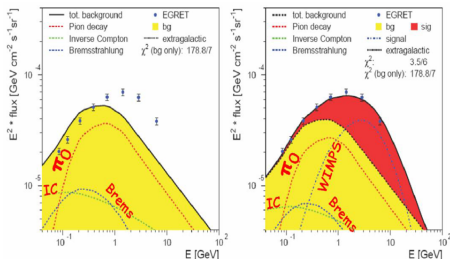


Abbildung 8 EGRET-Messungen

# 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)