Dunkle Materie

Oliver Bär

Habilitationsvortrag
HU Berlin, 1. Februar 2011

Dunkle Materie

Oliver Bär

Übersicht

1) Evidenz für Dunkle Materie

2) Woraus besteht die Dunkle Materie ?

Analogon: Die Entdeckung des Planeten Neptun

Bouvard

1821 Alexis Bouvard entdeckt Unregelmässigkeiten in der Bahn des Planeten Uranus

Er schreibt sie dem Einfluß eines noch unbekannten Planeten zu (‘dunkle Materie’)

Le Verrier

1845/46 Urbain Le Verrier berechnet aufgrund der Daten des Uranus die Position des unbekannten Planeten

Er übermittelt die Position an den Astronomen Johann Galle in Berlin

Galle

Sep 1846 Galle findet den Neptun an der berechneten Position

Dunkle Materie in Galaxien

NGC 6503

NGC 5746

Beispiele für Spiralgalaxien

Dunkle Materie in Galaxien

Rotationskurven

$$v_{\mathrm{rot}}(r) = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}}$$

$$M(r) = 4\pi \int_0^r \rho(\tilde{r})\tilde{r}^2 \mathrm{d}\tilde{r}$$

Massendichte

Begemann et al 1991

Naive Erwartung

$$v_{\mathrm{rot}}(r) \propto \frac{1}{\sqrt{r}}$$

Beobachtung (≅ 1000 Galaxien)

Persic, Salucci 1995

$$v_{\mathrm{rot}}(r) \approx \mathrm{konstant}$$

➡ Existenz dunkler Materie

Dunkle Materie in Galaxien

NGC 6503

NGC 5746

Galaxien sind eingebettet in Dunkle Materie Halos

Genaue Form der Dichteverteilung wird kontrovers diskutiert

cusp oder *core* ?

Dunkle Materie in Galaxienhaufen

Galaxienhaufen sind die grössten gravitativ gebundenen Objekte im Universum
Sie bestehen aus 3 Komponenten

- Hunderten von Galaxien
- Intra-Haufengas (ICM)
  mit Temperaturen $T \sim 10^7\ K$
  - ➥ Emission von Röntgenstrahlung
  - ➥ Messung der Gasmasse möglich
    (*Chandra X-ray Observatory*)
  - ➥ $M_{\mathrm{Gal}} \approx 0.13\, M_{\mathrm{Gas}}$ Allen et al 2002 Lin et al 2004
- Dunkler Materie

Galaxiehaufen1E0657-558

Messung der einzelnen Massenbeiträge
zeigt Dominanz der Dunklen Materie !

Dunkle Materie in Galaxienhaufen

Massenbestimmung von Galaxienhaufen

- Virialsatz ('Virialmasse')
  Annahme: dynamisches Gleichgewicht

Angewendet bei Entdeckung von Dunkler Materie im Coma-Haufen durch Fritz Zwicky (1933)

Dunkle Materie in Galaxienhaufen

Massenbestimmung von Galaxienhaufen

- Virialsatz ('Virialmasse')
  Annahme: dynamisches Gleichgewicht

- Messung über Temperatur der Röntgenstrahlung
  Annahmen: hydrostatisches Gleichgewicht, ideales Gas

- Gravitationslinseneffekt (*weak and strong gravitational lensing*)
  Große Fortschritte in den letzten 10 Jahren
  Wichtige Beiträge zum Verständnis von Dunkler Materie

Massey et al 2010

Prinzip Gravitationslinse

Galaxienhaufen Abell 2218

Dunkle Materie in Galaxienhaufen

Observable f_{Gas}

$$\frac{M_{\mathrm{Gas}} + M_{\mathrm{Gal}}}{M_{\mathrm{Haufen}}} \approx f_{\mathrm{Gas}}(1 + 0.13)$$

Messung an 42 Haufen liefert

$$f_{\mathrm{Gas}} = 0.1104 \pm 0.0016$$

➥ (inklusive Korrekturen)

$$\frac{M_{\mathrm{Gas}} + M_{\mathrm{Gal}}}{M_{\mathrm{Haufen}}} \approx 0.15$$

Allen et al 2008

bzw.

Dunkle Materie ≈ 5.7 Baryonische Materie !

↑

Gas + Galaxien

Dunkle Materie in Galaxienhaufen

Gravitationslinseneffekt erlaubt Messung der Dichteverteilung im Haufen

Clowe et al 2006

Galaxiehaufen1E0657-558

Zentren der Gesamtmassenverteilung ≠ Zentren der Masse des Gases

Dunkle Materie in Galaxienhaufen

Interpretation:

Clowe et al 2006

- 2 kollidierende Unterhaufen
  ➥ *'Bullet-cluster'*

- Galaxien und Dunkle Materie durchfliegen einander ungestört und bilden Zentren der Massenverteilung

- Ionisiertes Intra-Haufengas wechselwirkt stark, wird abgebremst und 'hinkt hinterher'.

Galaxiehaufen 1E0657-558
'Bullet cluster'

Dunkle Materie

Intra-Haufengas

Dunkle Materie in Galaxienhaufen

Bullet cluster liefert obere Schranke
für die Selbstwechselwirkung der Dunklen Materie

Abschätzung

Randall et al 2008

Inverse mittlere freie Weglänge $\frac{1}{\lambda} = \sigma n = \frac{\sigma}{m}\rho$

➥ $$\frac{\sigma}{m} < 1.25 \frac{\mathrm{cm}^2}{\mathrm{g}}$$

Abschätzung liefert starke Einschränkungen
an Modelle mit
selbstwechselwirkender Dunkler Materie

Spergel et al 2000

Galaxiehaufen 1E0657-558
'Bullet cluster'

Dunkle Materie

Intra-Haufengas

Dunkle Materie in Galaxienhaufen

Bullet cluster liefert 'Nagel zum Sarg' für MOND Theorien

- MOND:
  Modified Newtonian Dynamics
  Milgrom 1983, ...
- Generischer Name für Theorien mit modifizierter Gravitationswechselwirkung
- Gedacht als Alternative zu Dunkler Materie
- Aber: Kann die Separation

Zentrum Masse ↔ Zentrum Gas

nicht befriedigend erklären

Galaxiehaufen 1E0657-558
'Bullet cluster'

Dunkle Materie Intra-Haufengas

Dunkle Materie in Galaxienhaufen

MACS J0025.4

Kollidierende Haufen sind keine Seltenheit !

MACS J0025.4
analysiert in Bradac et al 2008

weitere 17 mit Separation > 10" gefunden
Shan et al 2010

Dunkle Materie auf kosmologischen Skalen

Einige Definitionen der Kosmologie

- Robertson-Walker Metrik $$\mathrm{d}s^2 = -c^2\mathrm{d}t^2 + a(t)^2\left(\frac{\mathrm{d}r^2}{1-kr^2} + r^2\mathrm{d}\Omega^2\right)$$

  Skalenfaktor

- Friedmann-Gleichun $$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{k}{a^2} = \frac{8\pi G_\mathrm{N}}{3}\left(\rho_\Lambda + \rho_\mathrm{m} + \rho_\mathrm{rad}\right)$$

  Energiedichten

- Hubble-Parameter $$H = H(t)$$

  Heutiger Wert $$H_0 = h\,\frac{100\,km}{s\cdot Mpc}$$ mit $$h = 0.74 \pm 4$$ Riess et al 2009

➡ $$\frac{k^2}{H^2a^2} = \Omega_\Lambda + \Omega_\mathrm{m} + \Omega_\mathrm{rad} - 1$$

Energiedichten

Friedmann-Gleichung umgeschrieben

Dunkle Materie auf kosmologischen Skalen

Messungen der kosmischen Hintergrundstrahlung (*CMB*)

A. Penzias und R. Wilson
1965

COBE Satellit
1989 - 1993

WMAP Sonde
2003 - 2010

Ursprung:

380 000 Jahre nach dem Urknall ➡ Rekombination (e^- + Kerne → Atome)

Universum wird ‘durchsichtig’

Dunkle Materie auf kosmologischen Skalen

Temperaturmessung in der kosmischen Hintergrundstrahlung

WMAP, 2009

$$T = 2.726K \qquad \frac{\delta T(\theta,\phi)}{T} \sim 10^{-5}$$

Fourier-Zerlegung

$$\frac{\delta T(\theta,\phi)}{T} = \sum_{l,m} a_{lm} Y_{lm}(\theta,\phi)$$

➥ $$C_l = \frac{1}{2l+1} \sum_{m=-l}^{m} |a_{lm}|^2$$

Leistungsspektrum

Dunkle Materie auf kosmologischen Skalen

WMAP, 2010

Lage des ersten *peaks* ($l \approx 220$) $\Rightarrow$ Das Universum ist flach ($k = 0$)

Dunkle Materie auf kosmologischen Skalen

Genaue Werte der anderern Parameter durch Kombination verschiedener Beobachtungen

Analyse der Daten ergibt

$$\Omega_{\mathrm{m}} h^2 = 0.136 \pm 0.004$$

$$\Omega_{\mathrm{b}} h^2 = 0.0227 \pm 0.0006$$

Beachte Genauigkeit!

+ 4 weitere kosmologische Parameter

➥ $$\frac{\Omega_{\mathrm{b}}}{\Omega_{\mathrm{m}}} \approx 0.17$$

wie in den Galaxienhaufen !

➥ $$\Omega_{\mathrm{DM}} h^2 = \Omega_{\mathrm{m}} h^2 - \Omega_{\mathrm{b}} h^2$$
$$= 0.110 \pm 0.006$$

Allen et al 2008

Der Hauptanteil der Materie im Universum ist dunkel und nicht-baryonisch

Nukleosynthese nach dem Urknall

Eine Sekunde nach dem Urknall: Entstehung leichter Elemente aus Protonen und Neutronen

- Erzeugte Elemente:

  Deuterium
  Helium 3, Helium 4
  Lithium

- Beruht auf Kernphysik
  (gut verstanden)

- Relative Häufigkeit (bezogen auf H)

  hängt stark ab von $\Omega_{\rm b} h^2$

Beispiel: Heliumerzeugung

➥ Beobachtung liefert starke Grenzen an $\Omega_{\rm b} h^2$

Nukleosynthese und baryonische Masse

Fit an die Daten liefert

$$0.019 \leq \Omega_{\mathrm{b}} h^2 \leq 0.024$$

- Deuterium hat kleinsten Fehler
  ➥ dominiert den Bereich
- Sehr gute Übereinstimmung mit kosmologischer Bestimmung
- Problematisch:

  ^{7}Li etwas zu klein

  Lithiumproblem (?)

  - Systematik ?
  - Neue Physik ?

Fields, Sakar 2009 (PDG 2010)

Zusammenfassung

Länge

- Gesicherte Existenz von dunkler Materie auf unterschiedlichen Längenskalen
- Dunkle Materie dominiert $\Omega_{DM} = 5\ \Omega_b$ (Fehler im Prozentbereich)
- Aus der Physik der Galaxie-Entstehung wissen außerdem

  Dunkle Materie muss kalt sein $\Leftrightarrow$ Nicht-relativistisch bei der Galaxien-Entstehung

White et al 1985
…
Springel et al 2006

Woraus besteht die Dunkle Materie ?

Dunkle Materie im Standardmodell ?

Teilchen im Standardmodell

Quarks

Leptonen

Austauschteilchen der Kräfte

Notwendige Eigenschaften eines Dunkle Materie Teilchens

- massive
- stabil
- nicht baryonisch
- kalt

Neutrinobeitrag

Reid et al 2009

$$\Omega_\nu = \sum_{i=1}^{3} \frac{m_{\nu_i}}{93\,\mathrm{MeV}} < 0.0067$$

➥ Dunkle Materie fordert neue Physik über das Standardmodell hinaus !

Einige Kandidaten für Dunkle Materie

(Meine !) grobe Klassifizierung

- Gut motivierte Kandidaten (inspiriert durch andere Probleme der Teilchenphysik)
  - Neutralino, Sneutrino, Gravitino
  - Axion, Axino
  - Sterile Neutrinos
- Weniger gut motivierte Kandidaten
  - Kaluza-Klein Zustände
  - CHAMPs
  - Selbstwechselwirkende Dunkle Materie
  - ...

Wünschenswerte Eigenschaften:

- Eingeführt aus mehr als einem Grund
- Natürliche Lösung des Dunkle-Materie-Problems (kein *'fine tuning'*)

WIMPs

Weakly Interacting Massive Particle

- Bezeichnet eine Klasse von Teilchen

  Wechselwirkungen:

  - ☑ Gravitation
  - ☑ Schwache Wechselwirkung
  - ☐ Elektromagnetismus
  - ☐ Starke Wechselwirkung

- Kommen in vielen Erweiterungen des Standardmodells natürlich vor

- Stabile WIMPs liefern auf natürliche Weise die nötige Dichte Ω_{DM}

WIMP Koinzidenz

(*WIMP miracle*)

Thermische Erzeugung von WIMPs im frühen Universum

Zel'dovich et al 1965

Prinzip (für massiven WIMP χ)

Temperatur

1. Alle Teilchen im thermischen Gleichgewicht

$$\chi\,\chi \underset{\text{Erzeugung}}{\overset{\text{Vernichtung}}{\rightleftarrows}} \bar{f}\,f$$

2. Abkühlen des Universums:
   WIMPs werden nicht mehr erzeugt

$$\chi\,\chi \underset{\text{Erzeugung}}{\overset{\text{Vernichtung}}{\rightleftarrows}} \bar{f}\,f$$

3. WIMP-Dichte nimmt stark ab
   WIMPs werden nicht mehr vernichtet

$$\chi\,\chi \underset{\text{Erzeugung}}{\overset{\text{Vernichtung}}{\rightleftarrows}} \bar{f}\,f$$

'freeze out'

➥ nichtverschwindende Dichte von WIMPs (heute !)

Das *WIMP miracle*

Quantitativ: Lösen der Boltzmanngleichung (numerisch)

Abschätzung:

$$\Omega_\chi \approx \frac{3 \times 10^{-27} \mathrm{cm}^3/\mathrm{s}}{\langle \sigma_\mathrm{A} v \rangle}$$

'Survival of the weakest'

Wirkungsquerschnitt für WIMP Vernichtung

Relativgeschwindigkeit der beiden WIMPs

Für die schwache WW findet man

$$\langle \sigma_\mathrm{A} v \rangle \sim \frac{g^4_\mathrm{schwach}}{16\pi^2 M_\chi^2}$$

Kopplungskonstante

WIMP Masse

➥ $\Omega_\chi \approx 0.1$

für typische Werte

$g_\mathrm{schwach} \approx 0.6$

$M_\chi = 100\,\mathrm{GeV}$

WIMPs ergeben auf natürliche Weise die gesuchte Dichte für Dunkle Materie !

' WIMP Koinzidenz'

Konkretes Beispiel
WIMPs durch Supersymmetry (SUSY)

- Fermion-Boson-Symmetrie

- Supersymmetrische Erweiterungen des Standardmodells haben größeren Teilcheninhalt

  SM $\leftrightarrow$ SUSY Partner

- Kanonische WIMP-Kandidaten für Dunkle Materie, z.B.

  Neutralino $\tilde{\chi}_1^0 \equiv \chi$

- Eigenschaften hängen von vielen Details ab ...

Dunkle Materie im CMSSM

Constrained Minimal Supersymmetric Standard Model

Detailierte Analyse im CMSSM liefert folgende Grenzen

Buchmueller et al 2009

- Neutralino als Dunkle Materie Kandidat mit

$$8 \cdot 10^{-3} \leq \Omega_\chi h^2 \leq 1.8$$ 95 % C.L.

➥ wie erwartet, da Neutralino ein WIMP ist !

- Mit Ω_{DM} aus den Beobachtungen folgt

$$80\mathrm{GeV} \leq M_\chi \leq 260\mathrm{GeV}$$ 95 % C.L.

➥ zu entdecken in zukünftigen Beschleuniger-Experimenten (falls es existiert !)

WIMPs in anderen Erweiterungen

- Theorien mit extra Dimensionen
  - Kaluza-Klein Dunkle Materie
  - Branon
- *Little-Higgs* Theorien
- ...

Details sehr verschieden
aber
astrophysikalisch alle äquivalent, da WIMPs

Jenseits von WIMPs

- WIMP Koinzidenz suggeriert schwach wechselwirkende Dunkle Materie

  ➥ $\Omega_{WIMP} \sim \Omega_{DM}$

- Bisher beobachtet:
  Gravitative Wechselwirkung

- Frage:

  WIMP Koinzidenz ohne WIMPs ???

SuperWIMPs

Feng et al 2003

Januar 2011

- WIMP ~~SUSY~~ Super WIMP
- Wechselwirkungen

WIMP	SuperWIMP	
☑	☑	Gravitation
☑	☐	Schwache Wechselwirkung
☐	☐	Elektromagnetismus
☐	☐	Starke Wechselwirkung

- SuperWIMPs wechselwirken nur gravitativ
  ➡ Wie rettet man die WIMP Koinzidenz ?

SuperWIMPs durch Zerfall von WIMPs

Annahme: Neben WIMP existiert ein leichterer SuperWIMPs
(SUSY-Beispiel: Neutralino und leichteres Gravitino)

Feng 2010

Lebensdauer WIMP $\tau \sim \frac{1}{G_{\mathrm{N}} M_{\mathrm{WIMP}}^3} \sim 10^3 - 10^7 s$ (Minuten bis Monate)

SuperWIMP Koinzidenz

Für Zerfälle 1 WIMP → 1 SuperWIMP gilt

$$\Omega_{\mathrm{SuperWIMP}} = \frac{M_{\mathrm{SuperWIMP}}}{M_{\mathrm{WIMP}}} \Omega_{\mathrm{WIMP}}$$

Für $M_{\mathrm{SuperWIMP}} \lesssim M_{\mathrm{WIMP}}$ folgt

$$\Omega_{\mathrm{SuperWIMP}} \sim \Omega_{\mathrm{DM}}$$

SuperWIMP Koinzidenz !

Einige SuperWIMP Kandidaten

Standard Modell Erweiterung	WIMP	$\xrightarrow{\text{Zerfall}}$	SuperWIMP	
Supersymmetrische Theorien, z.B.	Neutralino	$\longrightarrow$	Gravitino	Feng et al 2003 2004
	Stau - Lepton	$\longrightarrow$	Gravitino	
	Neutralino	$\longrightarrow$	Axino	Covi et al 1998
	...		...	...
Theorien mit extra Dimensionen (UED)	B^1 Teilchen	$\longrightarrow$	Graviton	Feng et al 2003
...				

Einzelheiten hängen von den Details des jeweiligen Modells ab

Einschränkungen an SuperWIMPs

Generisch WIMP $\xrightarrow{\text{Zerfall}}$ SuperWIMP + SM (z.B. Photon)

d.h. Erzeugung eines SM - Teilchens

- zu späten Zeiten
  (lange Lebensdauer des WIMPs)
- mit kinetischer Energie E_{SM}

➥ Eventuell Probleme mit Nukleosynthese !

SuperWIMPs und Nukleosynthese

Häufigkeit leichter Elemente gestört, z.B. durch

$\gamma\ D \rightarrow n\ p$

$\gamma\ He \rightarrow D\ D$

...

Cyburt et al 2003

➥ Nukleosynthese liefert Einschränkungen an

- WIMP Lebensdauer
- Energie des Photons

SuperWIMPs und Nukleosynthese

Feng et al 2003

- Ausgeschlossene Regionen

D low	D/H < 1.3 x 10^{-5}
D high	D/H > 5.3 x 10^{-5}
^{4}He low	Y_P < 0.227
^{7}Li low	^{7}Li/H < 0.9 x 10^{-10}

Cyburt et al 2003

- Quadratische Region:
  typische Werte für Neutralino WIMP

  - Region mit beobachteter ^{7}Li Häufigkeit

Feng et al 2003

SuperWIMPs *können* die beobachteten Diskrepanzen in der Nukleosynthese erklären
(*müssen* aber nicht ...)

Zusammenfassung Teil 2

- Theoretisch ideale Kandidaten für Dunkle Materie: WIMPs
  - Haben auf natürliche Weise die richtige Dichte Ω_{DM}
  - Haben typischerweise Massen und Wirkungsquerschnitte, die am LHC zugänglich sind
- Alternative: SuperWIMPs
  - Haben die richtige Dichte Ω_{DM} durch WIMP-Zerfall
  - Wechselwirken nur gravitativ → extrem schwer experimentell zu beobachten

Suche nach Dunkler Materie

Prinzipien

- Direkte Suche: Streuung von Dunkler Materie an Atomkernen

  χ Kern $\rightarrow$ χ Kern

  Experimente: IGEX, HDMS, GENIUS, TEXONO, COGENT, NAIAD, XMASS, KIMS CRESST, CUORE, CDMS, EDELWEISS, DAMA, EURECA, ZEPLIN, XENON, ...

- Indirekte Suche: Paarvernichtung von Dunkler Materie

  $\chi\,\chi \rightarrow$ SM SM (z.B. 2 Photonen oder Positronen plus ...)

  Experimente: HESS, MAGICVERITAS, CANGAROO-III, FGST, EGRET, GLAST, ...

Direkte Wimp-Suche

- WIMPs aus unserem galaktischen Halo streuen an Kernen im Detektormaterial
  - ➥ Energieübertrag an Kerne
  - ➥ messbare
    - Temperaturerhöhung
    - Ionisation
    - Szintilation

- Rate der Streuereignisse hängt ab von
  1. Menge des Detektormaterials
  2. WIMP-Nukleon Wirkungsquerschnitt
  3. WIMP-Masse
  4. WIMP-Dichte im galaktischen Halo
  5. WIMP-Geschwindigkeitsverteilung

- Wegen 5 ist die Rate jahreszeitabhängig !

Detektoren z.B. unter den Alpen

Direkte Wimp-Suche

Illustration

Relative Geschwindigkeit WIMP - Erde ist jahreszeitabhängig

Maximum ~ 2. Juni Minimum ~ 2. Dezember

Verwende als *'smoking gun'* für WIMP Streuung !

Drukier 1986
Freese 1998

DAMA/LIBRA Experiment

Bernabei et al 2010

Ergebnisse erfüllen mehrere Anforderungen an WIMP Signale:

- ✓ Modulation mit Periodendauer = 0.999 ± 0.002 Jahre
- ✓ Phasenverschiebung = 146 ± 7 Tage (Maximum am 2. Juni)
- ✓ Modulation nur im Energiebereich 2 - 6 keV, nicht bei höheren Energien
- ✓ Keine Modulation bei *two-hit-events*

Interpretation als WIMP Signal liefert $M_{\mathrm{WIMP}} \sim 10$ GeV

Savage et al 2009
Aprile et al 2010

Problem: Alle anderen Experimente finden nichts !

XENON100 Experiment

Beispiel: Ausschlußbereich von XENON100 (90% CL)

Aprile et al 2010

Mehr Daten sind nötig für strenge Konklusionen !

Danksagung

Kommunikation mit	Sven Heinemeyer
	Marek Kowalski
	Thomas Lohse
	Margarete Mühlleitner
	Juri Rolf
	Ulrich Schwanke