Gibt es dunkle Materie ?

Antworten aus astronomischer und kosmologischer Sicht

Michael Flohr

Institut für Theoretische Physik ◇ Universität Hannover

Gibt es dunkle Materie ?

- Einführung . . .
  - Wie kommt man auf “dunkle Materie”?
- Astronomische Evidenz . . .
  - Wo gibt es dunkle Materie?
- Kosmologische Gründe . . .
  - Warum gibt es dunkle Materie?
- Experimentelle Suche . . .
  - Was ist dunkle Materie?
- Statt einer Zusammenfassung . . .
  - Fragen an die Kosmologen.

Dunkle Materie

Alle Beobachtungen in der Astronomie, abgesehen von kosmischer Teilchenstrahlung und ein paar Weltraummissionen, beruhen auf elektromagnetischer Strahlung, die von Teleskopen empfangen wird.

- **Definition:** Materie heißt *dunkel*, wenn sie bisher nicht beobachtet wurde, sondern ihre Existenz nur indirekt durch ihre gravitative Wechselwirkung mit sichtbarer Materie erschlossen werden kann.
- Die Existenz dunkler Materie wird auch aufgrund kosmologischer Modelle vorhergesagt. Die Struktur des Universums bei großen Skalen kann ohne dunkle Materie nicht erklärt werden.

Motivation

- Seit über 50 Jahren sorgfältige astronomische Suche nach Masse im Universum. Vergleich sichtbarer Masse mit dynamischen Abschätzungen: Materie in Galaxien zu 90%, im Universum zu 99%, unbekannt.
- Gesamtmasse auch dann viel zu gering für geschlossenes Universum.
- Theorie: Dunkle Materie sowohl baryonisch, als auch nicht-baryonisch.
- Dunkle Materie dominiert interne Kinematik, Verklumpungseigenschaften und Bewegung galaktischer Systeme.
- Dunkle Materie wichtig für Ausbildung und Entwicklung von Struktur im Universum. Ohne dunkle Materie ist die Bildung von Galaxien nicht möglich!

Anfänge

- Konzept 1933 von F. Zwicky eingeführt, um große Geschwindigkeiten der Galaxien des Coma Berenices Haufen zu verstehen.
- Erste Evidenz für dunkle Materie in einzelnen Galaxien 1959 mit Dynamik der lokalen Gruppe durch F. Kahn & L. Waljter: Andromeda kollidiert mit $120\,\mathrm{km\,s^{-1}}$ mit uns $\Longrightarrow$ Masse der lokalen Gruppe ist $M = 4 \cdot 10^{12} M_\odot$.
  - Diskrepanz: Masse von Sternen, Planeten, schwarzen Löchern, braunen Zwergen, Gas und anderen unbekannten baryonischen Objekten ergibt gerade 1% davon.
- Erst in den 70ern allgemein akzeptiert, dass Galaxien einen wesentlichen Anteil der Masse in unbekannter Form enthalten.

Astronomische Evidenz

Größenordnung

- 0.3 pc: Raumsonden und Planetenbahnen in unserem **Sonnensystem**.
- 2–100 pc: Geschwindigkeitsdispersion in **Kugelsternhaufen** und planetarischen Nebeln.
- 1–100 kpc: Rotationskurven von **Zwerggalaxien**, elliptischen Galaxien und **Spiralgalaxien**.
- 2–10 Mpc: Massenbestimmung von **Galaxienhaufen**.
- 25–200 h^{-1} Mpc: Großräumige Strukturen (**Superhaufen**, Voids, Zelluläre Strukturen): Analyse von Geschwindigkeits- und Massenverteilungen.
- $\sim 1\,h^{-1}$Gpc: Kosmologische Modelle und die **kosmische Hintergrundstrahlung** (CMB).

Sonnensystem

- Messungen der Rektaszension von Uranus und Neptun seit 1978 zeigen systematische Abweichung von $0.5''$ nach nur 10 Jahren.
- Beobachtungen von Uranus vor 1900 können nicht mit dessen Rektaszension gefittet werden.
- Beobachtungen von Neptun durch Lalande (1795) und Galileo (1613) vor dessen Entdeckung passen nicht. Abweichungen sind 4-fach größer, als der geschätzte Fehler der Lalande-Sichtungen.

Residuen sind deutlich größer als bekannte Messungenauigkeit erwarten läßt. Sie reichen jedoch nicht als Evidenz für eine Abweichung vom Newtonschen Gravitationsgesetz, setzen jedoch obere Schranken.

Sonnensystem

- Die Pioneer 10 und 11 Sonden erfahren eine anomale Beschleunigung von $\sim 8.5 \cdot 10^{-8}\,\mathrm{cm\,s^{-2}}$ in Richtung der Sonne. Zurückgesandte Signale haben Frequenzanomalie $\nu_{\text{obs}} = \nu_{\text{model}} \left(1 - \frac{at}{c}\right)$.
- Analyse mit unterschiedlichen physikalischen Strategien und Computercodes, unabhängige Folgestudien.
- Effekt auch bei Voyager, Galileo und Ulyssus Sonden.
- Ausgeschlossene Ursachen sind z.B. Verzerrungen der Elektronik durch Gezeitenkräfte, nicht-isotrope thermische Strahlung der Nuklearbatterien, dunkle Objekte im Kuiper-Gürtel, unbekannte Wiederstandskräfte.

Konsens heute: Die Anomalie kann nicht durch bekannte Physik bzw. Eigenschaften der Sonden erklärt werden.

Der galaktische Halo

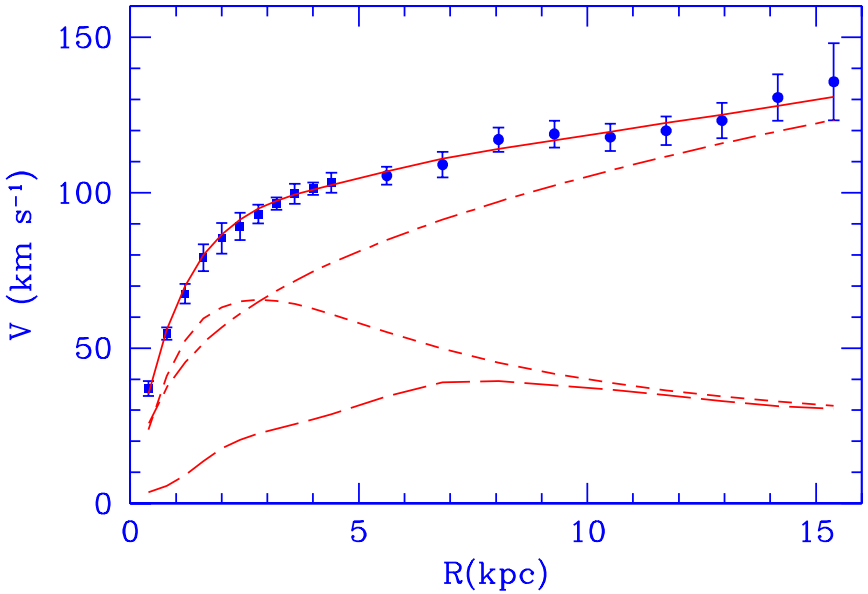
- Sprialgaxien (wie Milchstraße) sind häufigster Typ.
- Rotation von Sternen und Gas um das Zentrum hängt von Masse innerhalb des Orbits ab:

$$\boldsymbol{F}_{\text{grav}} = \frac{G\,m\,M(r)}{r^2}\hat{\boldsymbol{r}} \quad \stackrel{!}{=} \quad \boldsymbol{F}_{\text{c.p.}} = \frac{m\,v(r)^2}{r}\hat{\boldsymbol{r}}.$$

- Messungen der Rotationsgeschwindigkeiten erlauben, $M(r)$ zu bestimmen $\Longrightarrow$ Rotationskurven.
- Sichtbare Materie (Sterne und Gas) reicht nicht aus. Am Rande der sichtbaren Scheibe typischerweise $M_{\text{dark}}/M_{\text{lum}} = 10:1$.
- Halos haben universelle Struktur: $\rho(r) \propto 1/(r^2 + r_{\text{c}}^2)$. Innerer Bereich hat konstante Dichte, Übergang zu isothermischer Dichteverteilung bei $\rho_{\text{c}} \propto v_{\text{Halo}}$ (einige kpc).

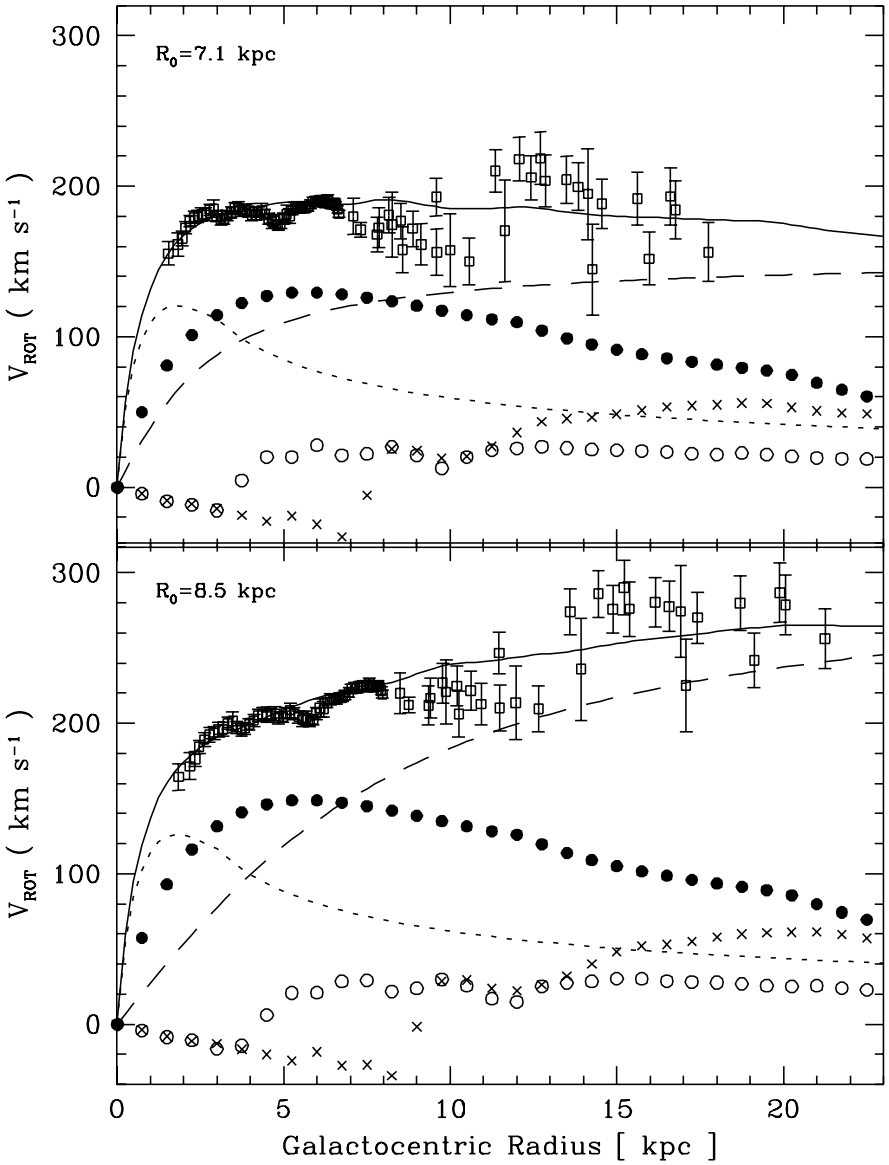
Der galaktische Halo

- Rotationskurve von M33. Halo erstreckt sich weit über sichtbaren Teil der Galaxis ($\sim$ 300 kpc).
- Über 150,000 Galaxien mit ähnlichen Kurven bekannt.
- — — Gas, - - - - Sterne, — - — - Halo, ——— gesamt.



Der galaktische Halo

- Rotationskurve für die Milchstraße ist schwieriger zu bestimmen.
- Abhängig von unserer Position und Bahngeschwindigkeit.
- Lokale Dichte unseres Halo ergibt sich zu ca. 0.3 GeV/cm^3.
- Neueste Messungen: $2.6 \cdot 10^6\, M_\odot$ im Zentrum innerhalb 0.01 pc.

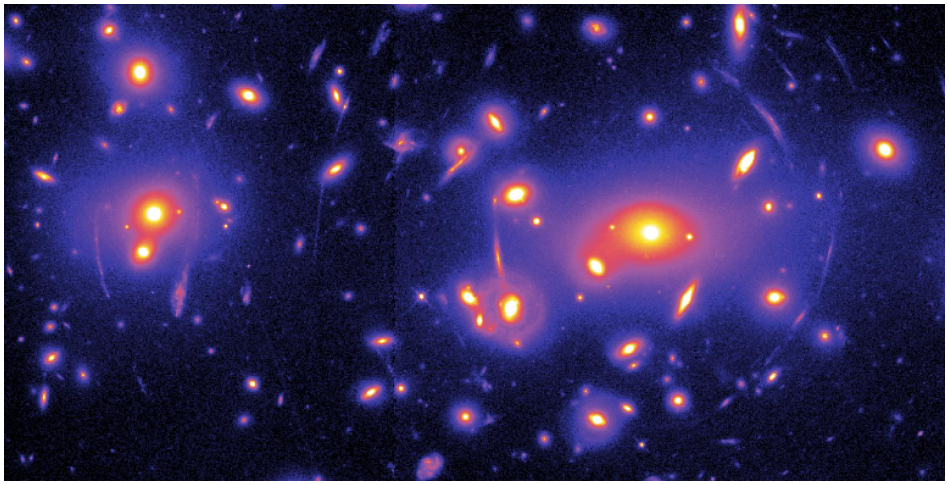


Der galaktische Halo

- Standardmethode der Massenbestimmung über Virialsatz: Verknüpft über $2\langle E_{\text{kin}}\rangle + \langle E_{\text{pot}}\rangle = 0$ die mit Dopplereffekt messbare kinetische Energie mit Gravitationspotential.
  - **Problem:** Halo enthält nur sehr wenige sichtbare *Tracer*-Objekte (z.B. besitzt Milchstraße nur 12 Satellitengalaxien).
  - **Lösung:** Satellitenverteilungen vieler heller Spiralgalaxien statistisch auswerten $\Longrightarrow$ typischer Halo.
- Halo deutlich größer als 100 kpc, jenseits keine Tracer.
- **Puzzles:** Galaktische Satelliten vermeiden Orbits in der Hauptebene. Masse des Halo von Spiralgalaxien seltsamerweise unabhängig von der Luminosität.

Der galaktische Halo

- Alternativ: Massive dunkle Objekte sind Gravitationslinsen. Stärke der Bildbeugung Maß für Masse der Linse.
- **Problem:** Objekte im Halo verzerren Bilder von Hintergrundgalaxien nur um $\lesssim 1\%$ (weak lensing).
- **Lösung:** Statistische Auswertung vieler Galaxien $\Longrightarrow$ projizierte Masseverteilung.
- Datensatz von 5000 Galaxien: Halo größer als 100 kpc und von quasi-isothermaler Struktur.



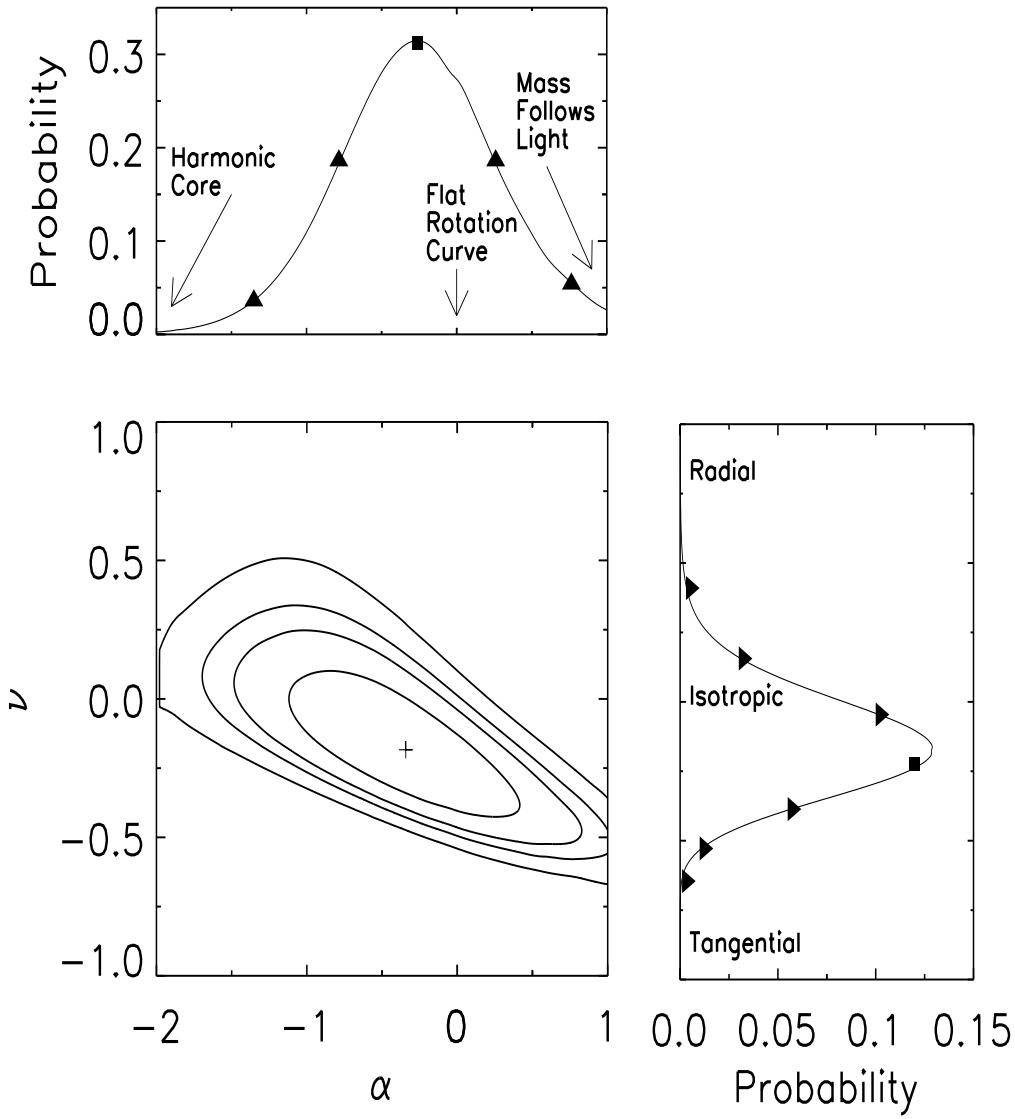
Sphärische Zwerggalaxien

- Systeme von $\sim 10^6$ Sternen, umkreisen große Galaxien. Typische Skala ist $\sim$ 200–600 pc, viel größer als Kugelsternhaufen.
- **Methode:** Messung der Geschwindigkeiten von hellen, einzeln auflösbaren Sternen in Zwerggalaxien unserer lokalen Gruppe.
- **Ergebnis:** Geschwindigkeiten $\sim 10\,\mathrm{km\,s^{-1}}$, eine Größenordnung höher als mit der beobachtbaren Masse der Sterne erwartet.

Sphärischen Zwerggalaxien sind kleinste bekannte Objekte mit dunkler Materie, gleichzeitig haben sie höchsten Anteil an dunkler Materie aller bekannten galaktischen Systeme!

Sphärische Zwerggalaxien

- Alte Sternpopulation, kaum ISM.
- 159 Geschwindigkeiten von Sterngiganten in der sphärischen Zwerggalaxie Draco.
- $\rho(r) \sim r^{-\alpha}$ Massenverteilung, ν Anisotropie der Geschwindigkeit.
- Deutliche Evidenz für einen ausgedehnten Halo aus dunkler Materie.



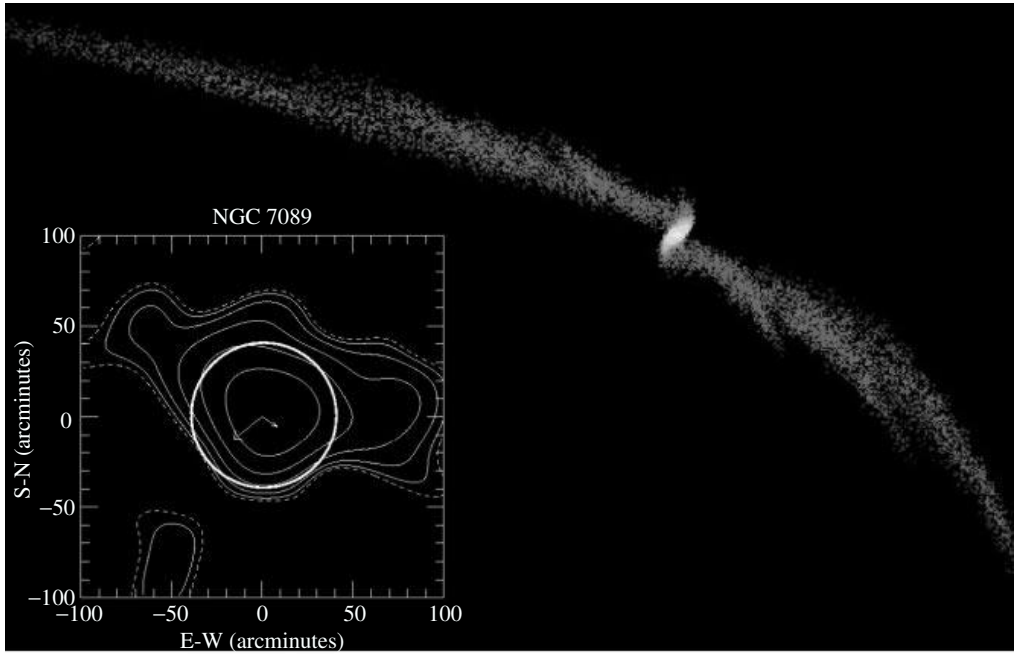
Kugelsternhaufen

- Ballungen von $\sim 10^6$ Sternen, sind ein Bestandteil des Halos von Galaxien. Typische Skala (Gezeitenradius) ist $\sim$ 5–50 pc, typische Entfernung vom galaktischen Zentrum ist $\sim$ 35 kpc.
- **Methode:** Messung der Radialgeschwindigkeiten von hellen auflösbaren Sternen und Vergleich mit Modellierung des Haufens auf Konsistenz mit beobachteter Masseverteilung.
- Simulationen ergeben niedrige Verhältnisse $M_{\text{tot}}/M_{\text{lum}}$, konsistent mit den leichten Sternen, die man in Haufen erwartet (stellare Massefunktion).

Es gibt keinerlei Evidenz für dunkle Materie in Kugelsternhaufen!

Kugelsternhaufen

- **Simulation:** Lose gebundene Sterne gehen durch Gezeitenkräfte mit Hauptgalaxie verloren, in Einklang mit Beobachtungen.
- Geringste Mengen dunkler Materie würden ausreichen, diesen Effekt zu verhindern.



Galaxienhaufen

- Größte existente Strukturen im gravitativen Gleichgewicht (Zeit seit BigBang für größere Strukturen zu kurz).
- Hauptmasse ist relativ gleichmäßig verteilte dunkle Materie, herausgezogen aus den individuellen Halos.
- Genügend groß um ursprünglichen Materie-Inhalt des Kosmos zu repräsentieren (keine dissipativen und Feedback-Prozesse wie in Galaxien).
- Mehrere Methoden:
  - Viriale Abschätzungen mit Galaxien als Tracern,
  - Intergalaktisches Röntgengas als hydrostatische Flüssigkeit $(\rho(\boldsymbol{r}), T(\boldsymbol{r}))$ im gravitativen Gleichgewicht behandeln (Nachteil: nur Projektion beobachtbar),
  - Gravitationslinsen.

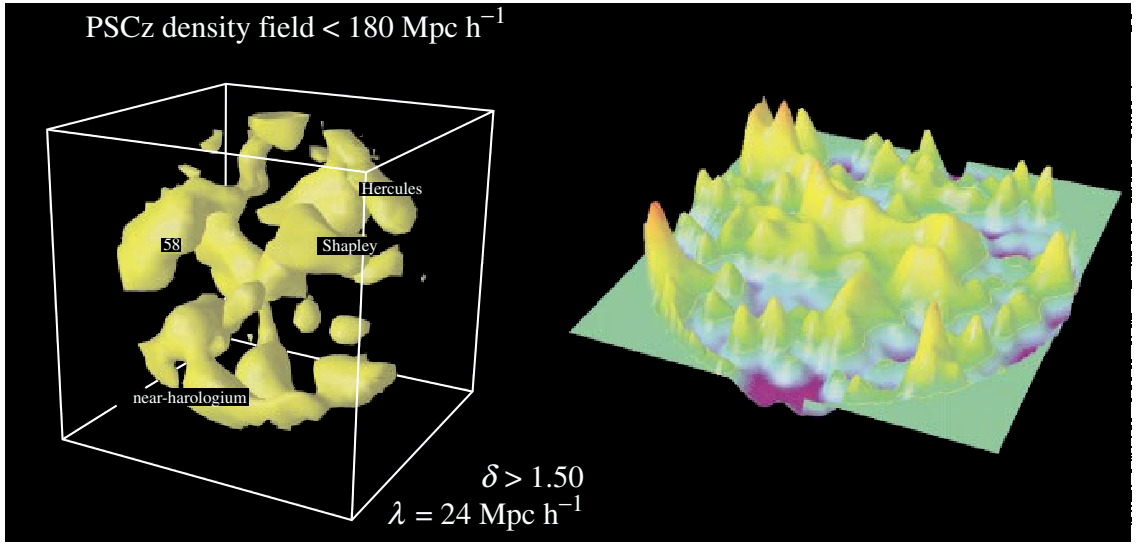
Galaxienhaufen

- Masseverteilung von Clustern: 2% in Galaxien, 98% sind dunkle Materie und intergalaktisches Röntgengas (ROSAT: Röntgengas macht 10–40% der Masse aus).

- Masse/Leuchtkraft Verhältnis von Clustern im Vergleich mit kritischer Massedichte liefert $\sim$ 1000 $M_\odot/L_\odot$ und $\Omega_m \sim 0.2$. Hierbei ist $\rho_{\text{crit}} = 3H_0^2/8\pi G \sim 5 \cdot 10^{-29}\,\text{g}\,\text{cm}^{-3}$ mit $H_0 = 71\,\text{km}\,\text{s}^{-1}\,\text{Mpc}^{-1}$.
- Masse/Baryonen Verhältnis im Vergleich zur theoretischen, universellen Baryonendichte liefert $\Omega_m \sim 0.3$.

Masseverteilung auf sehr großen Skalen

- Durchmusterung des Himmels nach Galaxien mit großer Rotverschiebung: Beziehung zwischen Verteilung von Galaxien und Verteilung von Masse.
- Bestimmen der Masseverteilung erfordert weitere Information, wie die Eigengeschwindigkeiten der Galaxien (*peculiar motion* als Abweichungen von der reinen Hubble-Expansion).



Masseverteilung auf sehr großen Skalen

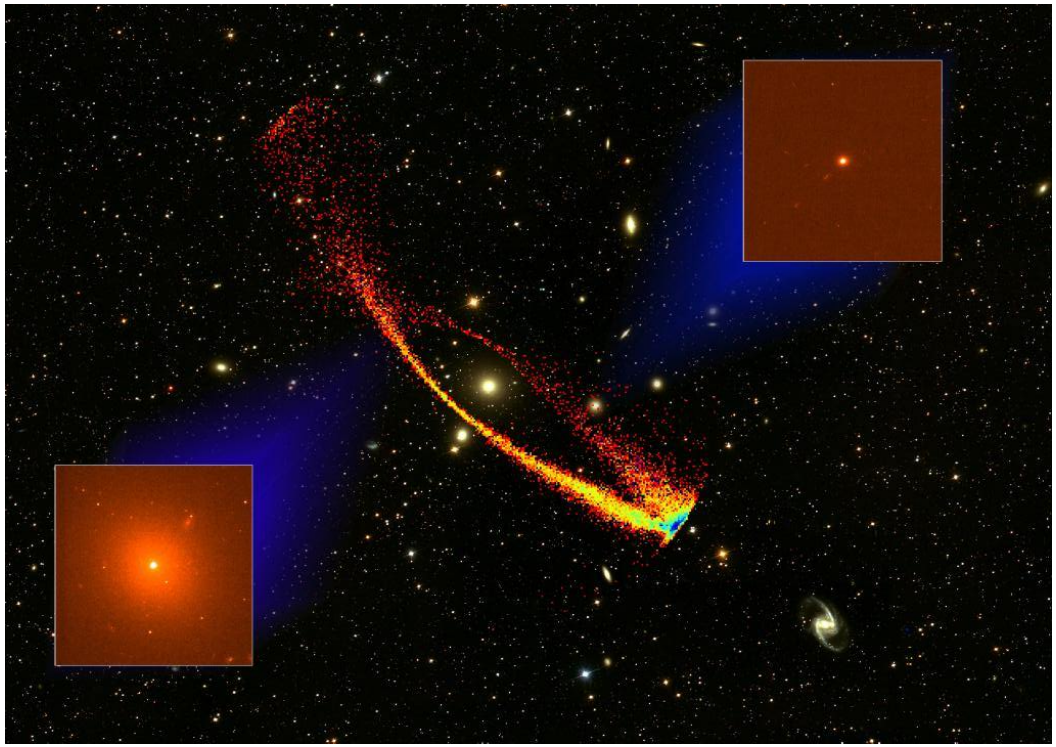
- **Problem:** Galaxien sind keine guten Tracer.
- Evidenz für dunkle Materie $\Omega_m \gtrsim 0.2$ auf Skalen von 100 Mpc^3.
- Möglicherweise gleichmäßig verteilte Komponente ist sehr schwer nachzuweisen (*hot dark matter*).
- **Problem:** Niedrige Eigengeschwindigkeiten der Galaxien drücken Wert für Ω_m.
- **Lösung?** Mit sich selbst wechselwirkende dunkle Materie $\Longrightarrow$ Wechselwirkungen Halo-Halo und Halo-Gruppen (*ram-pressure*) bremsen Eigenbewegungen der Galaxien.
- **Zukunft:** ultraweak lensing an großräumigen Superstrukturen, schwierig, aber nicht unmöglich.

Zusammenfassung der Evidenz

- Sehr gute Evidenz für dunkle Materie besonders auf großen Skalen.
- *Keine* dunkle Materie in Kugelsternhaufen und in den Zentren von Spiralgalaxien.
- Nur Galaxien niedriger Luminosität zeigen bis ins Zentrum flache Rotationskurven und $v_{\text{peak}} < 150\,\text{km}\,\text{s}^{-1}$. Galaxien mit $v_{\text{peak}} > 150\,\text{km}\,\text{s}^{-1}$ haben im Innern steil ansteigende Rotationskurven.
- Micro lensing erbrachte bis jetzt keine Evidenz für größere Dichte an MACHOS.
- **Satelliten-Katastrophe:** CDM sagt wesentlich mehr Satelliten voraus, als für normale Galaxien beobachtet werden. :-(

Zusammenfassung der Evidenz

- **Ausweg:** Entdeckung eines neuartigen Typs von Galaxien angekündigt, **ultrakompakte Zwerggalaxien**.
- Wurden zuvor für Sterne unserer Galaxis gehalten.
- Vermutlich Zwerggalaxien, die äußere Sterne verloren haben. Neueste Simulationen bestätigen dies.



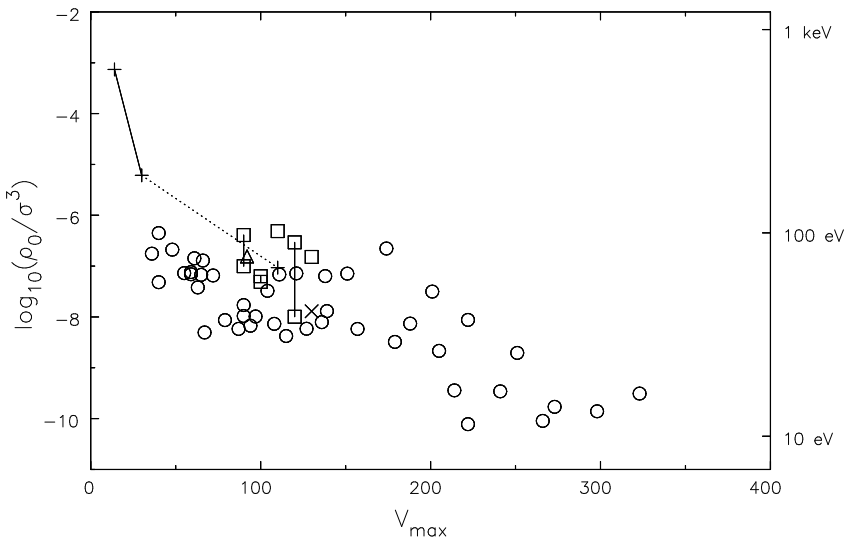
Paradoxien

- **Problem:** Hierarchische Modelle sagen Halobildung mit Navarro-Frenk-White Profil $\rho(r) \propto \frac{1}{r(r+r_\mathrm{c})^2}$ voraus (*cuspy halos*). Dunkle Materie dominiert das Zentrum.
- Galaxien mit Balken bei cuspy Halos nicht stabil. :-(
- Bei schweren Halos müssten wir mehr Galaxien mit 4,6,8 oder 10 Spiralarmen beobachten. :-(
- **Disk-Halo-Verschwörung:** Rotationskurven zeigen keinerlei Struktur bei Übergang $\rho_\mathrm{dark} \lesseqgtr \rho_\mathrm{lum}$. :-(
- **Oberflächenhelligkeits-Verschwörung:** Rotationsgeschwindigkeiten unabhängig von Verteilung der luminosen Materie (Tully-Fisher-Relation $v \propto L^\alpha$, $\alpha \sim 4$). :-(

Paradoxien

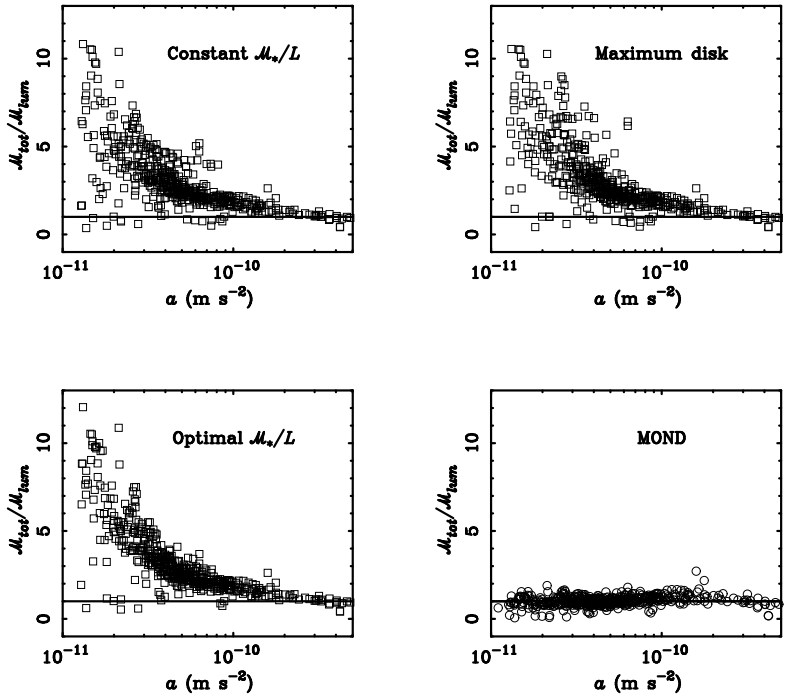
- **Drehimpuls-Katastrophe:** In hierarchischen Verschmelzungsmodellen gibt die gekühlte baryonische Materie Drehimpuls an den Halo ab $\Longrightarrow$ Disks der Galaxien um eine Größenordnung zu klein. :−(

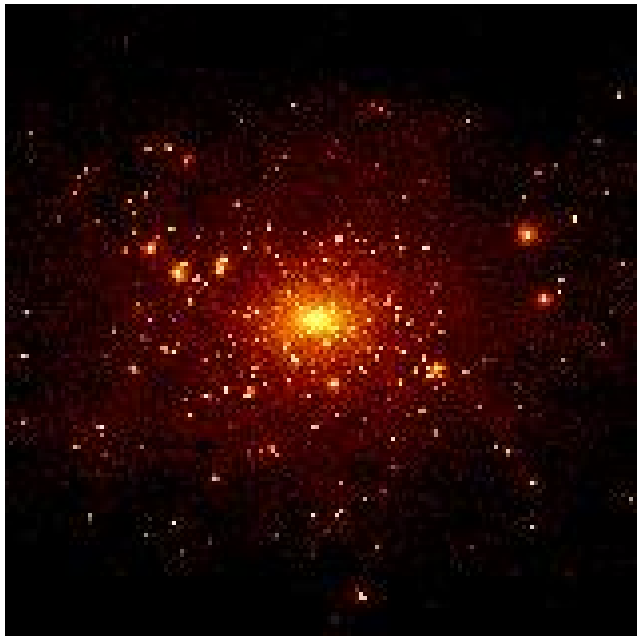
- **Konzentrations-Katastrophe:** Dunkle Materie aus kollisionslosen fermionischen Teilchen sollten zu kollabierten Halos mit universeller Maximaldichte ρ_0/σ^3 im Phasenraum führen. :−(



MOND

- **Alternative:** Modifikation des Gravitationsgesetzes $\mu(a/a_0)\boldsymbol{a} = \boldsymbol{a}_{\text{Newton}}$ mit $\mu(x \gg 1) \to 1$ und $\mu(x \ll 1) \to x$.
- Neue fundamentale Skala, keine Kovarianz, keine passende kosmologische Theorie. :-(
- Durch neueste SDSS Resultate zu Satellitengalaxien vermutlich ausgeschlossen. :-)





Theoretische Motivation

- Kosmos zumindest auf sehr großen Skalen homogen und isotrop $\Longrightarrow$ Friedmann-Lemaître-Modelle als Lösung der Einsteinschen Gravitationsgleichungen.
- Zeitliche Entwicklung der Raumausdehnung durch dimensionslosen Skalenfaktor $a(t)$ beschrieben (Hubble-Expansion):

$$H(t) := \frac{\dot{a}}{a} = H_0 \sqrt{\Omega_m a^{-3} + (1 - \Omega_m - \Omega_\Lambda) a^{-2} + \Omega_\Lambda}\,.$$

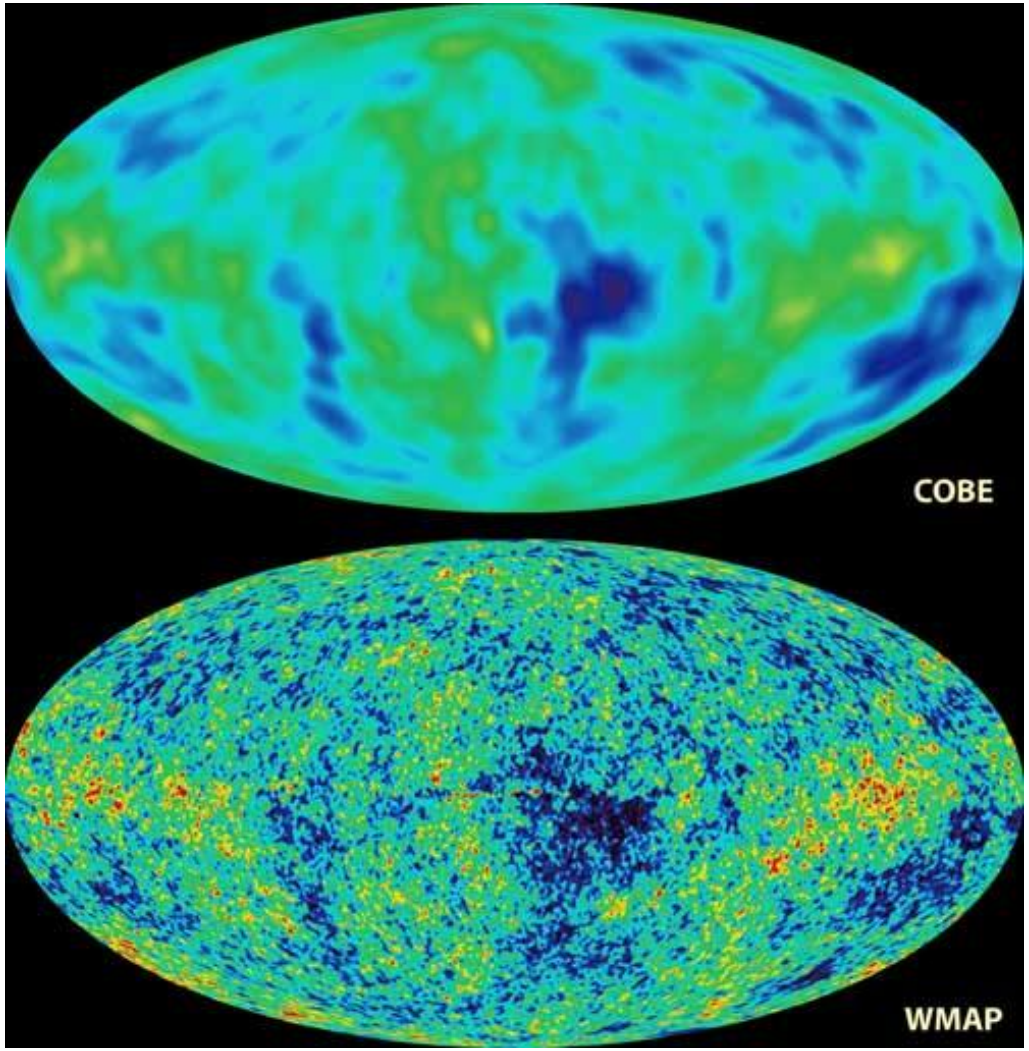
- $H_0 = H(t_0)$ heutige Ausdehnungs-Rate, Normierung $a(t_0) = 1$.
- Dimensionslose Dichten $\Omega_m = \frac{8\pi G}{3H_0^2}\rho$ und $\Omega_\Lambda = \frac{c^2}{3H_0^2}\Lambda$.

Theoretische Motivation

- CMB bestätigt Theorie des heißen Urknalls.
- Kleine Fluktuationen $\sim 10^{-5}$ der Hintergrundstrahlung von sehr frühen Inhomogenitäten der Masseverteilung.
- Konsens: Galaxien entstanden aus Fluktuationen auf sehr viel kleinerer Skala, die durch noch unbekannte Quanteneffekte in der Masseverteilung erzeugt wurden.
- CMB legt die kosmologischen Parameter weitgehend fest, WMAP Resultate:
  - $\Omega_0 = 1.02 \pm 0.02$, $h = 0.71^{+0.04}_{-0.03}$,
  - $\Omega_\Lambda = 0.73 \pm 0.04$, $t_0 = 13.7 \pm 0.2\,\text{Gyr}$,
  - $\Omega_b = 0.044 \pm 0.004$, $\Omega_b\Omega_\gamma^{-1} = (6.1 \pm 0.3) \cdot 10^{-10}$,
  - $\Omega_m = 0.27 \pm 0.04$, $\Omega_b\Omega_m^{-1} = 0.17 \pm 0.01$,
  - $\Omega_\nu h^2 < 0.0076$ (95% CL) $\Longrightarrow$ $\Omega_\nu \sim \Omega_{\text{lum}}$.

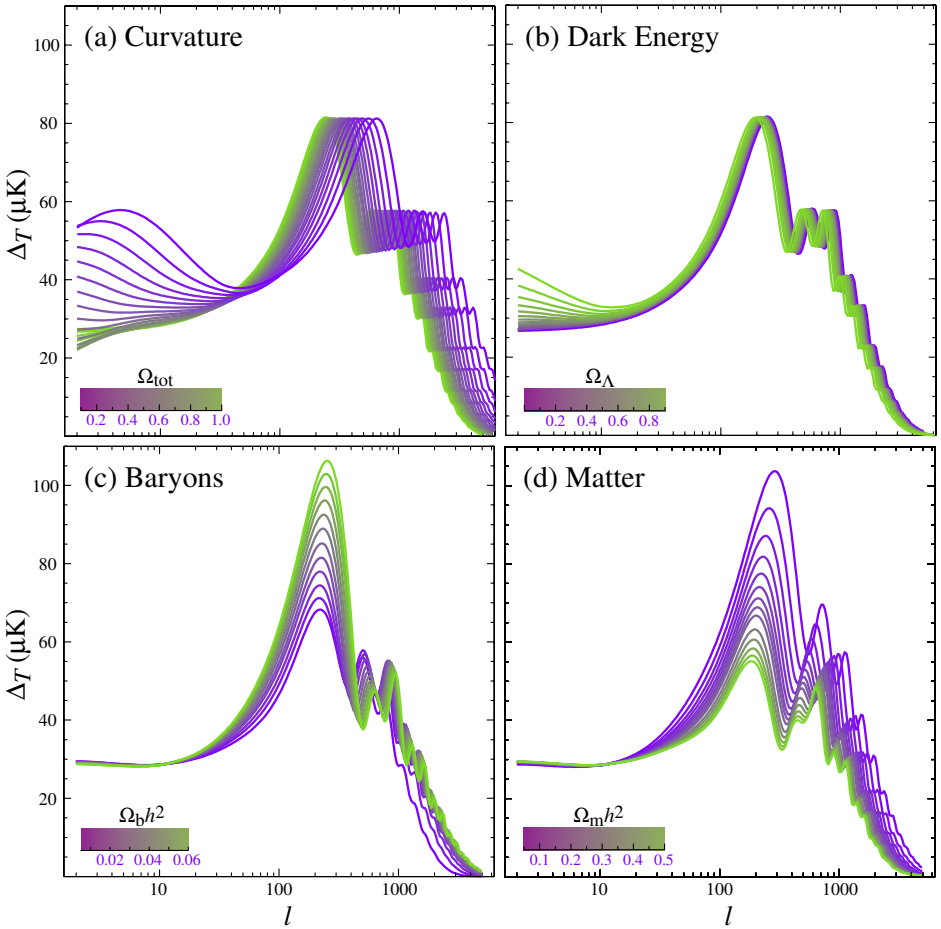
Theoretische Motivation

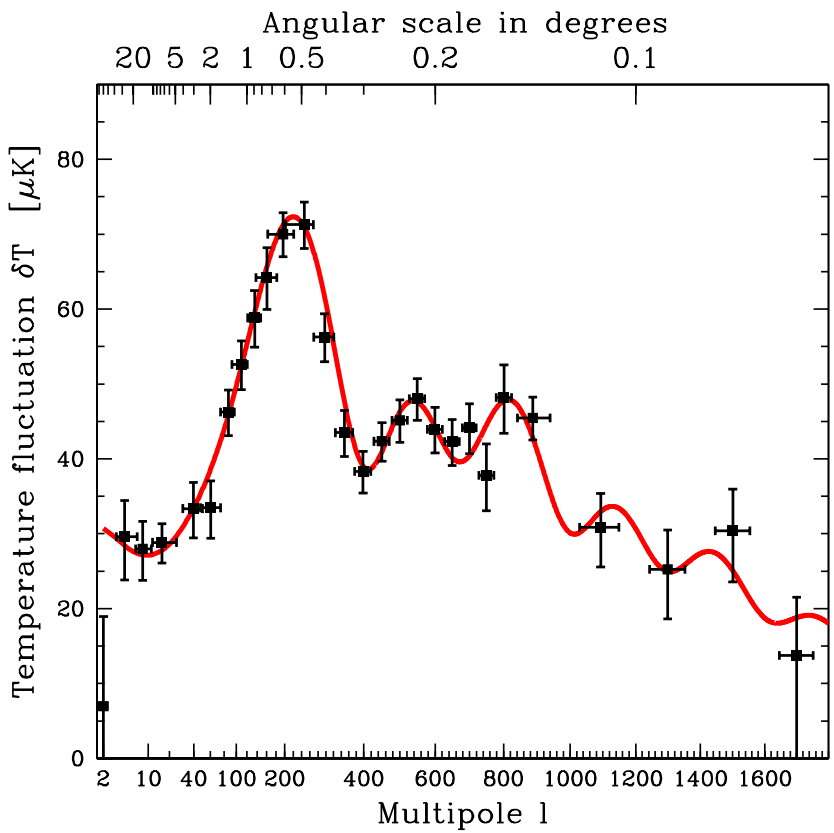
- WMAP erbrachte enorm verbesserte Winkelauflösung.



Theoretische Motivation

- Frequenz und Amplitude der Fluktuationen abhängig von genauer Form der physikalischen Prozesse $\Longrightarrow$ Fouriertransformation zu Multipolspektrum.





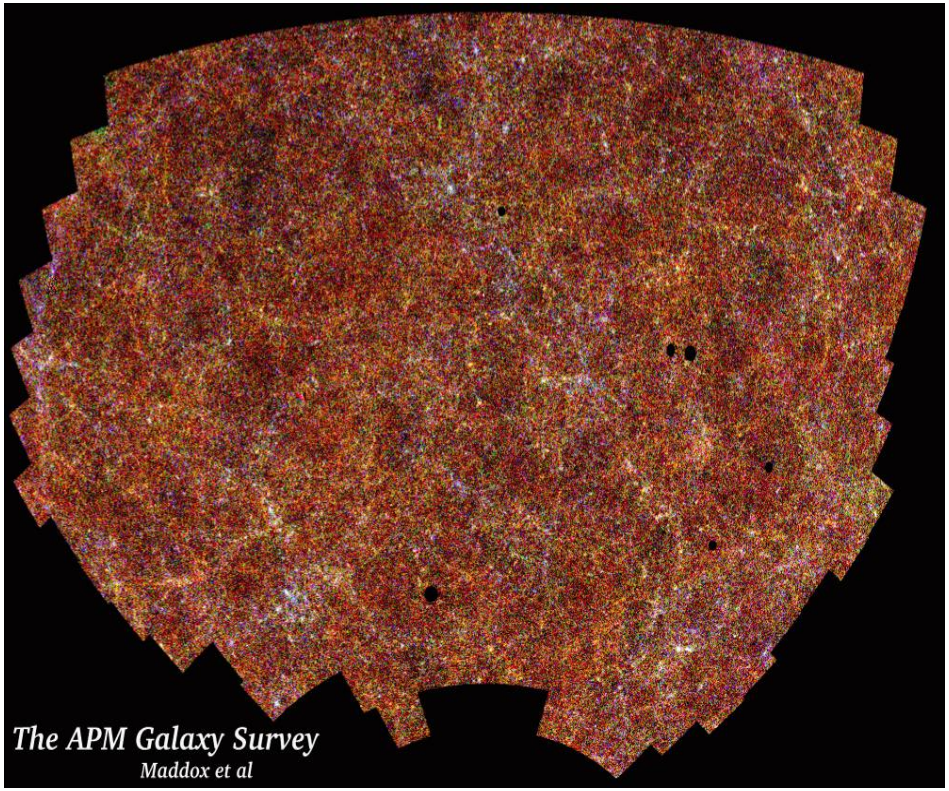
Theoretische Motivation

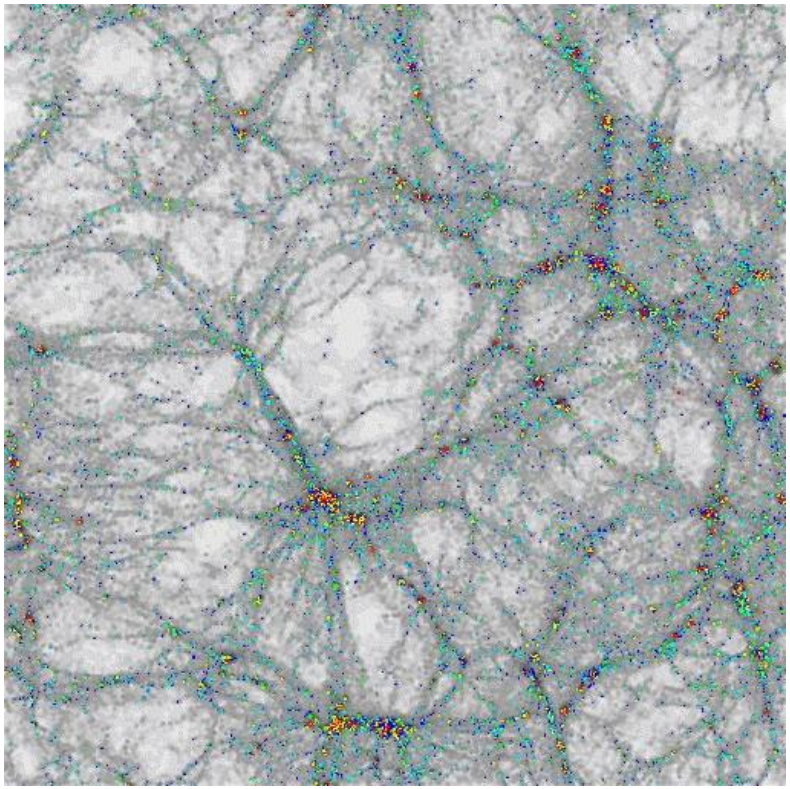
- Menge und Art der dunklen Materie beeinflussen empfindlich die hierarchische Strukturbildung im Universum.
  - Heiße (HDM) oder kalte (CDM) dunkle Materie $\longleftrightarrow$ top-to-bottom oder bottom-to-top Hierarchien,
  - Baryonische oder nicht-baryonische dunkle Materie $\longleftrightarrow$ Art und Stärke der Verklumpung.
- Big Bang Nukleosynthese liefert obere Schranke für baryonische Materie.
- Auch baryonische Materie ist nur zu circa 20% bekannt.
- Kosmologische Konstante $\Lambda > 0$.

Mit inflationärer Kosmogonie ($\Omega_0 = 1$) favorisieren umfangreiche Simulationen das ΛCDM Modell.

Kosmologische Gründe

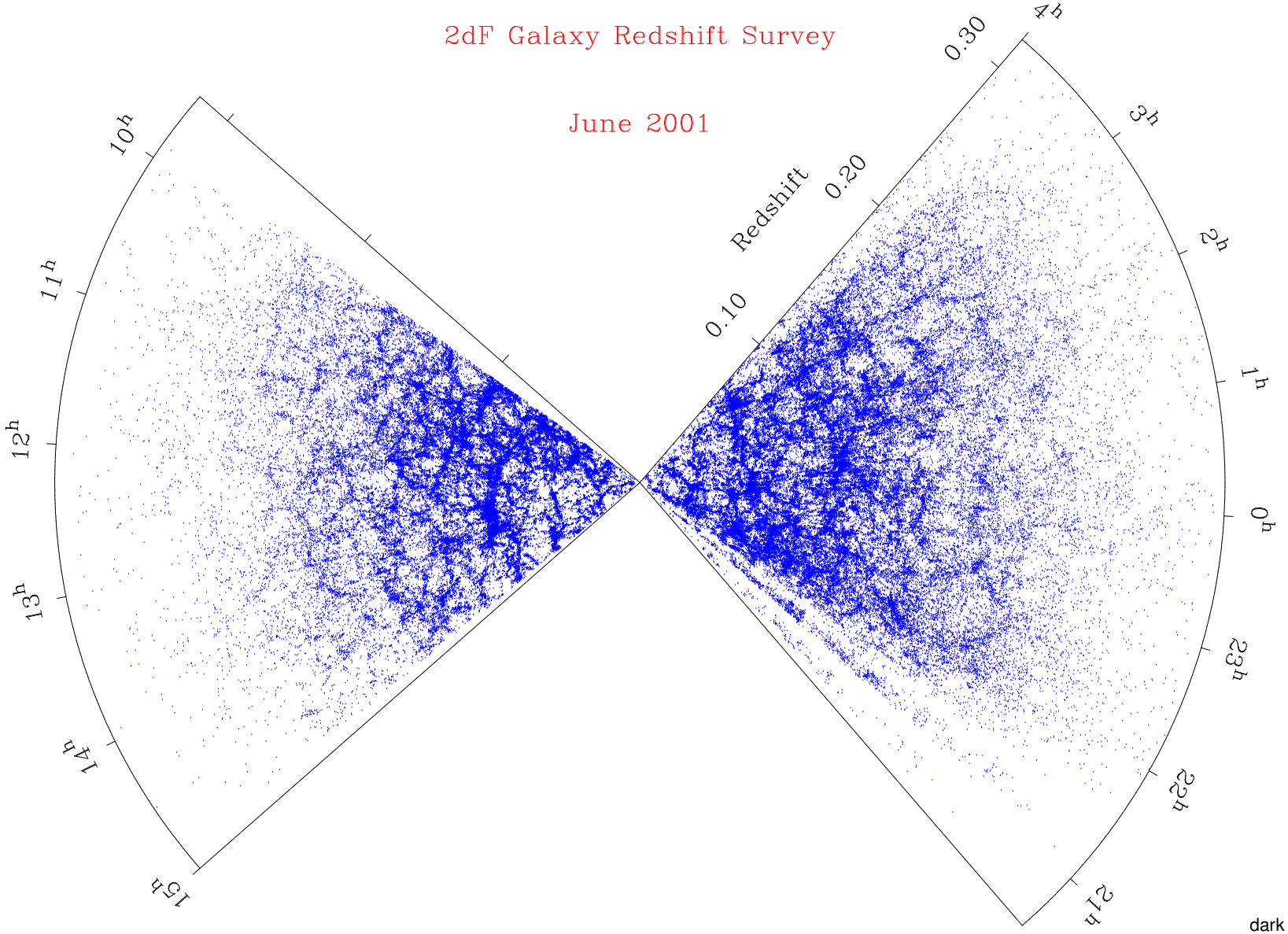
- Simulationen mit CDM sagen schaumartige makroskopische Struktur des Kosmos in Übereinstimmung mit den großen Galaxie-Durchmusterungen voraus.





Kosmologische Gründe

- Rotverschiebungen für $\sim$ 250,000 Galaxien vermessen.



Kosmologische Gründe

- **Big Bang Nukleosynthese:** Diskrepanz zwischen maximal erlaubter *baryonischer* Materie zum gesamten Materieinhalt des Universums:
  - Häufigkeit leichter Elemente und Isotope hängt empfindlich von Ω_b ab. Messungen liefern Schranken $0.004 < \Omega_b h^2 < 0.024$, also $0.008 < \Omega_b < 0.048$ für akzeptable Werte der Hubble-Konstanten.
  - CMB zeigt: $\Omega_0 \approx 1$ und $\Omega_\gamma \approx 5 \cdot 10^{-5}$.
  - Vermessung Typ Ia Supernovæ: $\Omega_\Lambda \approx 0.7$ mit $\Lambda > 0$.

  Zusammen genommen: $\Omega_0 = \Omega_b + \Omega_d + \Omega_\Lambda + \Omega_\gamma$.
- Mit $\Omega_b + \Omega_d \approx 0.31$ sind uns also über 85% der Materie nicht bekannt!

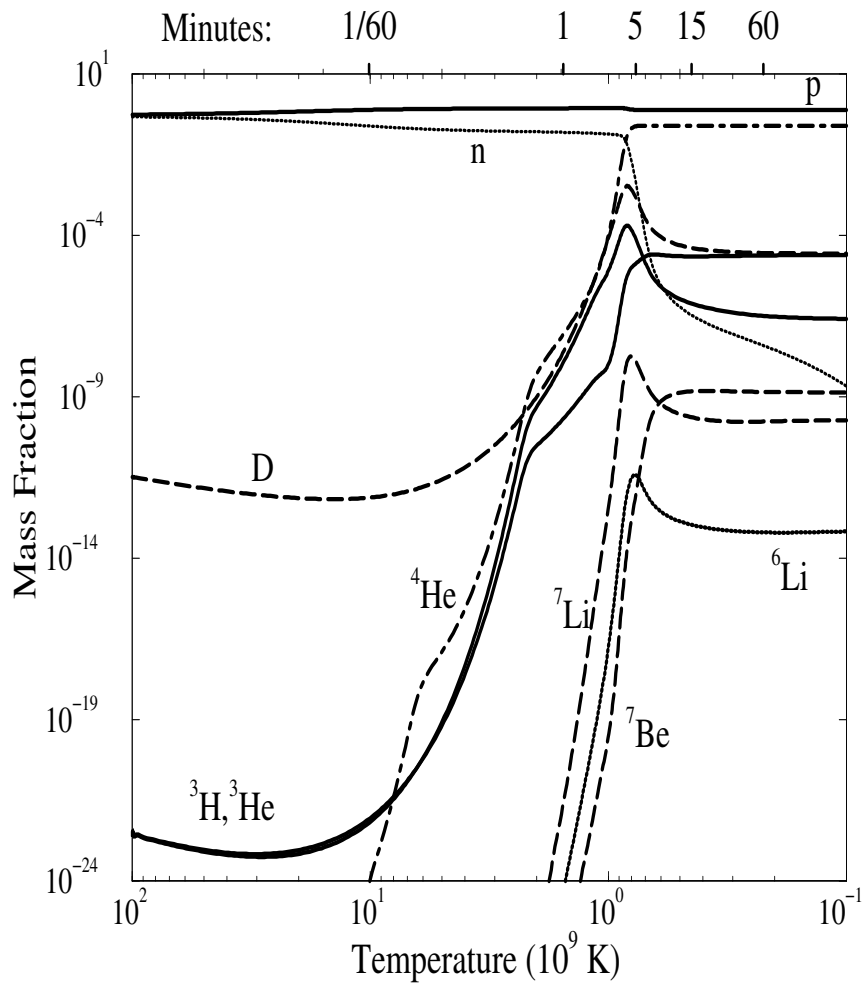
Kosmologische Gründe

Größenordnung

- $[t = 0, T = \infty]$: Big Bang.
- $[10^{-35}$ sec, 10^{27} K$]$: Ende der Inflation.
- $[100$ sec, 10^{9} K$]$: Bildung von D und He.
- $[1$ month, 10^{7} K$]$: CMB Spektrum festgelegt, Prozesse zur Erzeugung von γ langsamer als Expansionsrate.
- $[10\,000$ yrs, $20\,000$ K$]$: Energiedichte von Strahlung und Materie etwa gleich groß.
- $[300\,000$ yrs, 3000 K$]$: "Rekombination" von Atomen, letzte Streuung von Photonen der CMB. Beginn der "dunklen Zeitalter".
- $[1000 > z > 5.5]$: Irgendwann, vermutlich bei $z \approx 20$, wurde Universum wieder fast vollständig ionisiert. Bis heute hierarchische Strukturbildung.

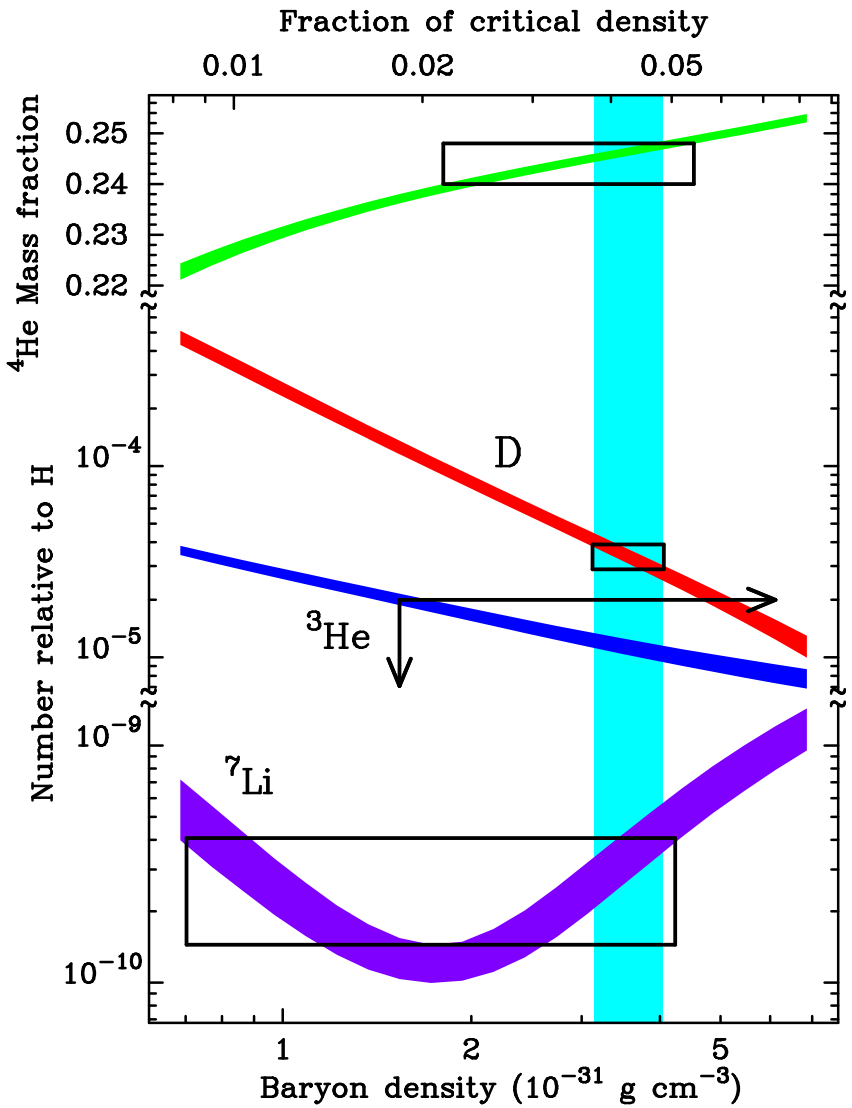
Kosmologische Gründe

- Bei $T \approx 10^{12}$ K sind schon alle heute existierenden Baryonen erzeugt.
- Neutrinos frieren bei $T \approx 10^{10}$ K aus.
- Danach werden Gleichgewichtsreaktionen
  $\mathrm{p} + \mathrm{e} \leftrightarrow \mathrm{n} + \nu$ und
  $\mathrm{p} + \bar{\nu} \leftrightarrow \mathrm{n} + \mathrm{e}^+$ selten.
- $$\frac{n_\mathrm{n}}{n_\mathrm{p}} = \exp\left(-\frac{\Delta m\, c^2}{k_\mathrm{B} T}\right) \approx \frac{1}{3}.$$



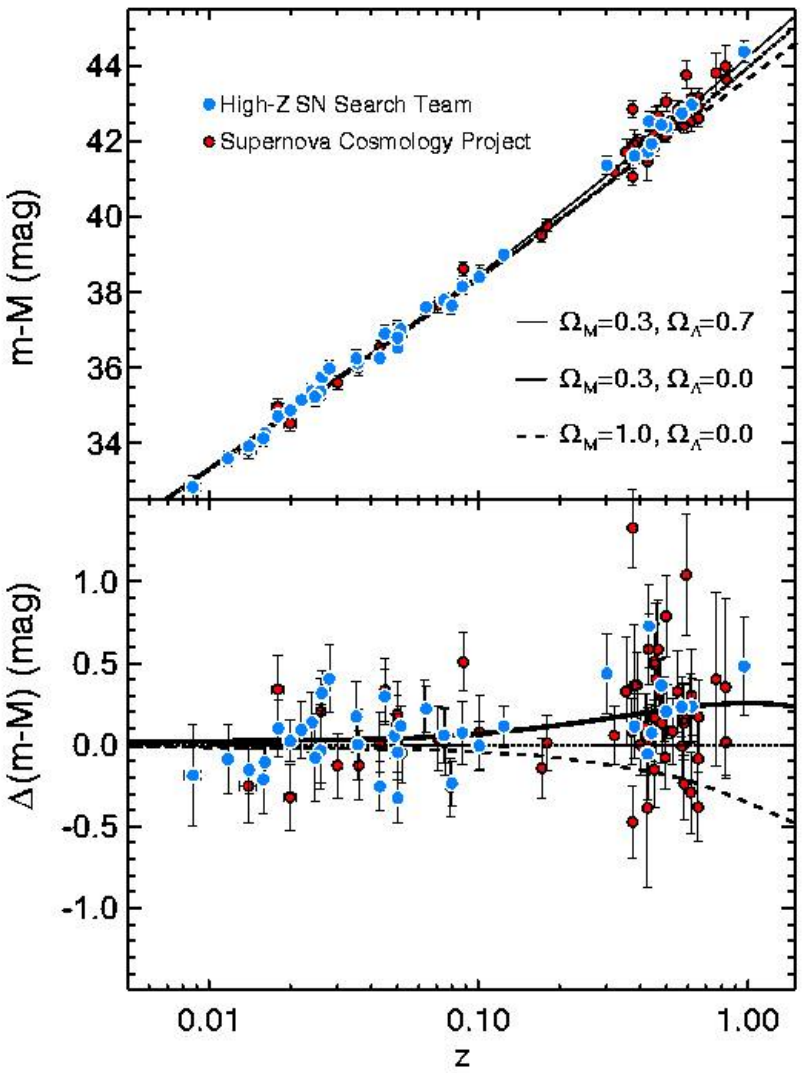
Kosmologische Gründe

- Bis $T \approx 8 \cdot 10^8$ K und $t \sim 3$ min durch Neutronenzerfall $n_\mathrm{n}/n_\mathrm{p} \approx 1/7$.
- $k_\mathrm{B}T \ll E_b$: Deuterium nicht länger durch Photonen zerstört.
- Sofortige Bildung von ^{4}He aus D wegen sehr viel größerer Bindungsenergie: “Flaschenhals der Kernsynthese”.
- $$\frac{4\,n_\mathrm{He}}{4\,n_\mathrm{He} + n_\mathrm{H}} \approx 0.25.$$



Kosmologische Gründe

- **Typ Ia Supernovæ:** Universeller Prozess, daher universelle Helligkeit.
- Eignen sich zum Kalibrieren von Entfernungsmessungen über Rotverschiebung.
- Resultat: Die Expansion des Universums beschleunigt sich $\Longrightarrow$ kosmologische Konstante $\Lambda > 0$.



Suche nach dunkler Materie

- Baryonische dunkle Materie $\longrightarrow$ massive kompakte Halo-Objekte MACHOS.
  - Rote und braune Zwerge,
  - Weiße Zwerge,
  - Neutronensterne und schwarze Löcher,
  - Gasförmiger Wasserstoff.
- Exotische Materie $\longrightarrow$ schwach wechselwirkende massive Teilchen WIMPS.
  - Neutrinos,
  - Neutralinos,
  - Axions.
- Modifiziertes Gravitationsgesetz $\longrightarrow$ MOND.

Rote und braune Zwerge

- Rote Zwerge etwa 4-mal häufiger als alle anderen Sterne zusammen, 0.5 $M_\odot > M >$ 0.08 $M_\odot$.
- Braune Zwerge sind leichter als $\sim$ 0.08 $M_\odot$, zu leicht für Fusion von H. Anzahl schwer abzuschätzen, aber vermutlich $\geq$ Gesamtzahl der Sterne.

:-(Rote Zwerge nicht häufig genug, gesamte Masse $<$ 1% der Halomasse.

:-(Braune Zwerge produzieren micro lensing mit Zeitskalen $\sim$ 15 Tage in Richtung der Magellanschen Wolken. Beobachtete Ereignisse haben aber $\sim$ 40 Tage $\Longrightarrow$ min $M_{\text{lens}} \gtrsim$ 0.1 $M_\odot$.

;-) Felsbrocken ebenfalls nicht möglich, schwerere Elemente nicht ausreichend vorhanden.

Weiße Zwerge

- Objekte mit Masse $\sim 0.5\,M_\odot$, Überreste von Sternen mit 1–8 $M_\odot$. Vermutlich etwa 100 mal seltener als rote und braune Zwerge.
- :-) Masse entspricht der wahrscheinlichsten Masse der beobachteten Mikro-Linsen.
- :-(Ihre Anzahl kann nicht sehr unterschätzt werden, da ihre Vorgängersterne sonst *Metalle* in zu großer Konzentration in das ISM abgeben müssten.
- :-(Größere Anzahl weißer Zwerge im Halo impliziert zu große Anzahl an Hauptreihensternen als Vorgängersterne im Halo.
- ;-) Beige Zwerge ($M \sim 0.2\,M_\odot$)? Nicht in diesem Universum.

Neutronensterne & schwarze Löcher

- Neutronensterne sind Überreste von Sternen mit Masse $\sim$ 8–20 $M_\odot$, schwarze Löcher enstehen aus Sternen mit Masse $>$ 20 $M_\odot$.

:-(Können keinen substantiellen Anteil der dunklen Materie ausmachen, da ihre Vorgängersterne zu viele *Metalle* und zu viel Hintergrundlicht produzieren würden.

:-) Sterne mit mehr als $\sim 10^5\, M_\odot$ kollabieren direkt zu schwarzen Löchern, ohne nennenswerte Lichtproduktion und Nukleosynthese.

:-| Supermassive schwarze Löcher haben als Mikro-Linse ein Zeitskala von $\gtrsim$ 50 Jahren, zu lang für derzeitige Durchmusterungen.

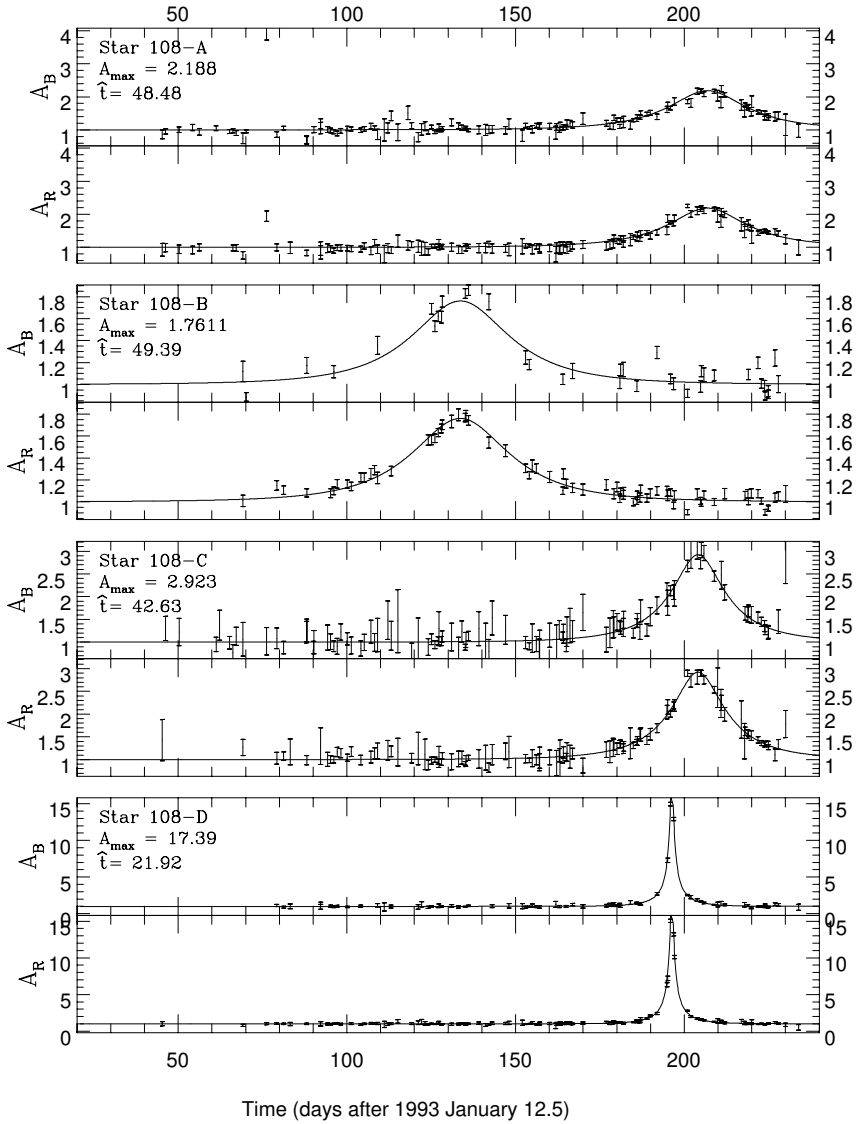
- Schwarze Löcher mit Masse $\gtrsim 10^5\, M_\odot$ sind die derzeit einzigen genuinen MACHO-Kandidaten.

Wasserstoff-Gas

- Etwa 70–75% der sichtbaren Materie ist Wasserstoff.
- :-(Schwierig, Wolken aus Wasserstoff zu verstecken. Neutrales Gas emittiert 21 cm Radiowellen.
- :-(ROSAT und CHANDRA haben ionisierten Wasserstoff als Röntgengas entdeckt und quantifiziert.
- :-(Auch andere Gase elektromagnetisch nachweisbar. Bis auf blaue kompakte Zwerggalaxien keine Objekte mit $M_{\text{gas}}/M_{\text{stars}} \gg 1$.
- :-) Allerdings früher anscheinend ionisiertes Gas in großer Menge vorhanden (Lyman α-Wald).
- :-) *Kaltes* ionisiertes Gas ist eine Möglichkeit, und wäre nicht beobachtbar.
- :-(Abkühlmechanismen schlecht verstanden.

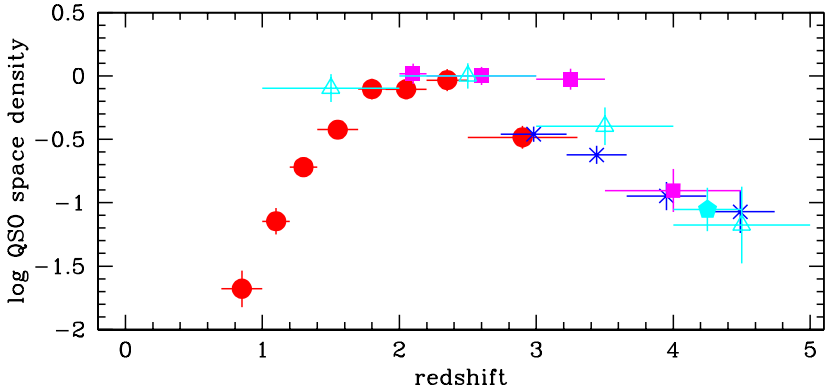
Micro Lensing

- Kriterium: Verstärkung frequenzunabhängig.
- Kriterium: Universeller Verlauf in der Zeit (Pacyński Kurven).
- Problem: Effekt hängt von Distanzen, Masse und Geschwindigkeit der Linse ab.
- Messungen einmalig!
- Kaustiken bei Binärsystemen.



CDM und HDM (nicht-baryonisch)

- Heiße dunkle Materie war zu Beginn der Galaxienbildung relativistisch und ist es heute noch ($E \propto |\boldsymbol{p}|c$).
  - Neutrino.
- Kalte dunkle Materie war bei Beginn der Galaxienbildung bereits nicht-relativistisch ($E \propto m\,c^2$).
  - Axion,
  - Neutralino, Photino, ...
- Beobachtung: Galaxienbildung bei $z = 5$ bis $z = 2$, Superhaufen bilden sich erst jetzt, $z = \lambda'/\lambda - 1 = 1/a(t) - 1$.



Heiße dunkle Materie

- Heiße dunkle Materie kann nicht durch Gravitation kollabieren.
- :-) Neutrions haben Masse (SUPERKAMIOKANDE), sind also HDM.
- :-(HDM dominierter Kosmos zeigt Strukturbildung von großen zu kleinen Strukturen, im Widerspruch zur Beobachtung.
- :-(Neutrinos als HDM sind für die Bildung von Halos nicht geeignet (Fermi-Dirac Statistik $\Longrightarrow m_\nu > 80\,\mathrm{eV}$).
- :-(CMB und Strukturbildung des Kosmos $\Longrightarrow$ heiße dunkle Materie irrelevant, ΛCDM Modelle.

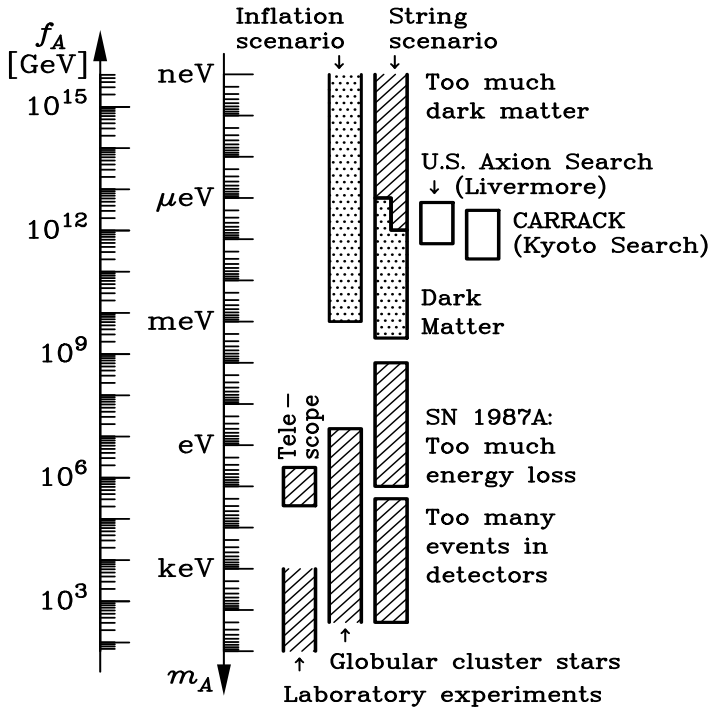
WIMPs

- **Axionen:** benötigt, um CP-Verletzung in QCD zu vermeiden.

:-) Entstanden als Bose-Einstein-Kondensat im frühen Universum, nie im thermischen Gleichgewicht $\Longrightarrow$ trotz Masse $m_{A^0} \approx 10^{-5}$ eV nicht-relativistisch (CDM).

:-(Nachweis durch Wechselwirkung mit magnetischem Feld $\Longrightarrow$ schwache Mikrowellenstrahlung $A^0 \to \gamma\gamma$.

:-(Bisherige Experimente um Faktor 1000 zu kleine Empfindlichkeit, kommen nun aber in kosmologisch interessante Bereiche.



WIMPs

- Schwach wechselwirkende massive Teilchen, waren im thermischen Gleichgewicht, aber nicht-relativistisch (CDM).
- WIMP-Massendichte abhängig von Annihilationsrate, $\Omega_{\text{wimp}} = \dfrac{7 \cdot 10^{-27}\,\text{cm}^3\,\text{s}^{-1}}{\langle \sigma_{\text{annih}}\, v_{\text{relativ}} \rangle}$. Für $\Omega_{\text{wimp}} = \Omega_d$ ist $\sigma_{\text{annih}} \approx \sigma_{\text{weak}}$ von Teilchen mit Masse $\approx 100\,\text{GeV}$.

:-) SUSY hat schwach wechselwirkende Teilchen dieser Größenordnung: Neutralino leichtester SUSY-Partner.

:-| Hypothese: 80% der Materie ist Neutralinos, die Halos der Galaxien und großen Teil des IGM bilden. Lokale Dichte ist $\rho_{\text{neutralino}} \approx 3 \cdot 10^5\,\text{GeV}\,\text{m}^{-3} \approx 3000\,\text{m}^{-3}$.

:-(Theoretisches Problem: cuspy Halos.

WIMPs

:-) Idee: Messung von elastischen Stößen mit Atomkernen mit Kernzahl $A \sim 80$ da ΔE_{max} bei $A\, m_{\text{p}} \approx m_{\text{wimp}}$.

:-(Raten $\approx \dfrac{M_{\text{Detektor}}}{A\, m_{\text{p}}} \dfrac{\rho_{\text{Halo}}}{m_{\text{wimp}}} \sigma_{\text{wimp}} \langle v_{\text{wimp}} \rangle \approx 1\,\text{week}^{-1}\,\text{kg}^{-1}$.

:-(Kleine kinetische Energie $< 100\,\text{keV}$, $v_{\text{wimp}} \sim 200\,\text{km}\,\text{s}^{-1}$.

:-(Hintergrund von Rückstoßelektronen natürlicher Strahlung 10^6 mal größer. Diskrimination der exponentiellen Verteilung $\left(\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}x}\right)_A \approx 10 \left(\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}x}\right)_{\text{e}^-}$ schwierig.

:-(Verwechselung mit Neutronenstrahlung möglich $\Longrightarrow$ Experimente unterirdisch äquivalent zu $> 1000\,\text{m}\ \text{H}_2\text{O}$.

:-(Hochreine Detektormaterialien nötig.

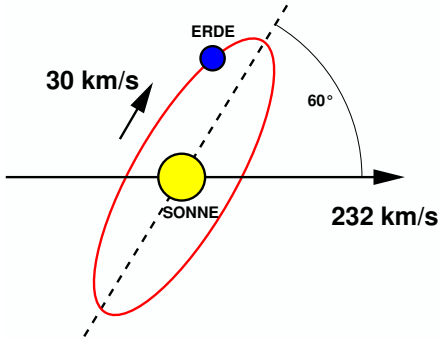
:-(Kopplung via Spin dominant über skalare Kopplung $\Longrightarrow$ unterhalb der experimentellen Möglichkeiten.

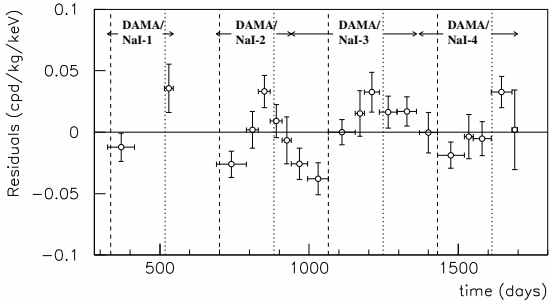
WIMPs

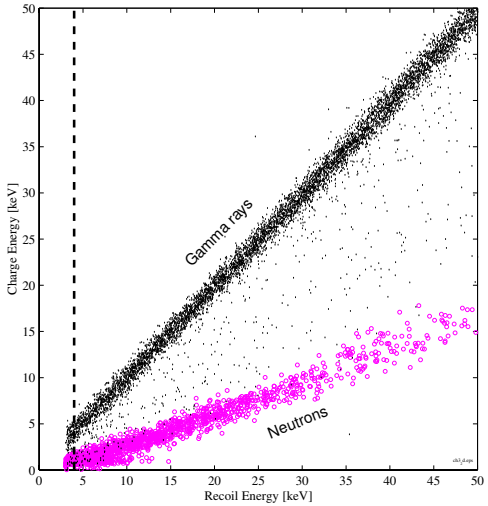
- Detektion der Ladungen $\Longrightarrow$ Halbleiterdetektoren. **Problem:** keine Unterscheidung zwischen e^- und Kern Rückstoßereignissen. **Lösung:**
  - Meiste Energie wird in Phononen umgewandelt $\Longrightarrow$ zusätzliche Messung der Wärmeenergie (CDMS).
  - Messung von Szintillationslicht (DAMA).
- **Alternative:** Indirekte Beobachtung von Annihilationsprodukten:
  - Hochenergetische Neutrinos aus dem Erdinnern.
  - Beobachtung hochenergetischer Teilchen aus Halo.
- **Alternative:** Erzeugen von WIMPS in Teilchenbeschleunigern (Tevatron, LHC).

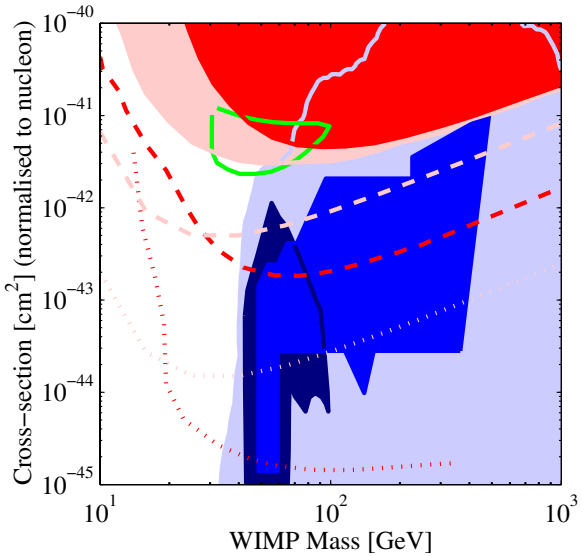
WIMPs

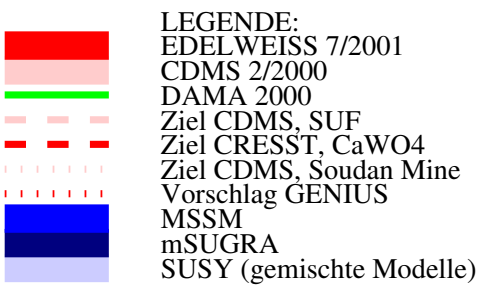
- DAMA und CDMS widersprechen sich, LIBRA & CDMS II?. Annahme: Dunkle Materie gleichmäßig verteilt. CDM-Simulationen: Dunkle Materie extrem inhomogen! :-(











Fragen an die Kosmologen

Ob zuerst das Licht da war
oder doch eher die Dunkelheit;
ob es irgendwo nichts gibt,
und ob von etwas,
wenn ihr so weitermacht,
etwas übrigbleibt,
von der guten alten Materie,
außer einer Überdosis Mathematik?

Könnt ihr mir sagen,
ob es sein Bewenden hat
mit 22 Dimensionen,
oder sollen es ein paar mehr sein?
ob das Jenseits ein Wurmloch ist,
und auf wie viele Paralleluniversen
ich mich gefaßt machen muß?

Ehrfürchtig lausche ich
euern exakten Märchen,
ihr Hohepriester.
So viele Fragen. An wen,
wenn nicht an euch,
die letzten Mohikaner
der Metaphysik,
soll ich sie richten?

(HANS MAGNUS ENZENSBERGER)