

# **Baryonische Dunkle Materie**

Vortrag von Daniel Spielmann  
im Seminar „Das frühe Universum“  
WS 2003/04, Univ. Tübingen

# Übersicht

1. Einführung / Wiederholung

2. Kompakte Objekte

(a) MACHOs

i. Der Halo

ii. Microlensing

iii. MACHO- und EROS-Projekt

(b) In Frage kommende Typen

3. Baryonisches (dunkles) Gas

(a) Kaltes Gas

(b) Warmes/heißes Gas

# Einführung

Es gibt Materie, die so leuchtschwach ist, daß wir (de facto) kaum von ihr ausgesandte elektromagnetische Strahlung beobachten:

Dunkle Materie.

Argumente:

- Rotationskurven von Spiralgalaxien:  
Keine Keplerrotation, sondern  $\frac{\partial v}{\partial r} \approx 0$   
 $\Rightarrow M \sim R, \rho \sim \frac{1}{R^2}$ .
  - Rotationskurven mancher elliptischer Galaxien fallen hingegen ab (Beobachtungen planetarischer Nebel z.B. um M105).
- Dynamik von Galaxienhaufen:  
Virialsatz erlaubt Rückschluß aus Geschwindigkeit der Galaxien auf Gravitationspotential.

Es gibt Dunkle Materie, die (hinsichtlich ihrer Masse) ganz überwiegend aus Baryonen besteht.

Denn:

- Theorie über primordiale Nukleosynthese:  
 $\Omega_{baryon} = 0,039 \pm 0,004$ .
- WMAP:  $\Omega_{baryon} = 0,044 \pm 0,004$ .
- H- u. He-Absorptionslinien im Lyman- $\alpha$ -Wald:  
 $\Omega_{baryon} \geq 0,035$ .
- Dagegen  $\Omega_* \approx 0,003$ .

Wo befinden sich die baryonischen dunklen Objekte?

Welcher Art sind sie:

- Kompakte Objekte?
  - Leuchtschwache Sterne?
  - Sternüberreste (Schwarze Löcher, Neutronensterne, Weiße Zwerge)?
  - Braune Zwerge? Jupiterähnliche Objekte?
  
- Gas?

# Der galaktische Halo

Innerer Halo um die Milchstraße:  $R \approx 20$  kpc, enthält u.a. Kugelsternhaufen.

Für die Frage Dunkler Materie wichtig ist der äußere Halo.

- $R \approx 100$  kpc (60-200 kpc möglich).
- $M \approx 2 \cdot 10^{12} M_{\odot}$ .  
(Etwa das Zehnfache der Masse der sonstigen Milchstraße.)
- Form: Nicht sicher bekannt. Neuerer Wert  $q \approx 0,6$ . (Baryonische Materie  $\Rightarrow$  Dissipation  $\Rightarrow$  Abflachung.)

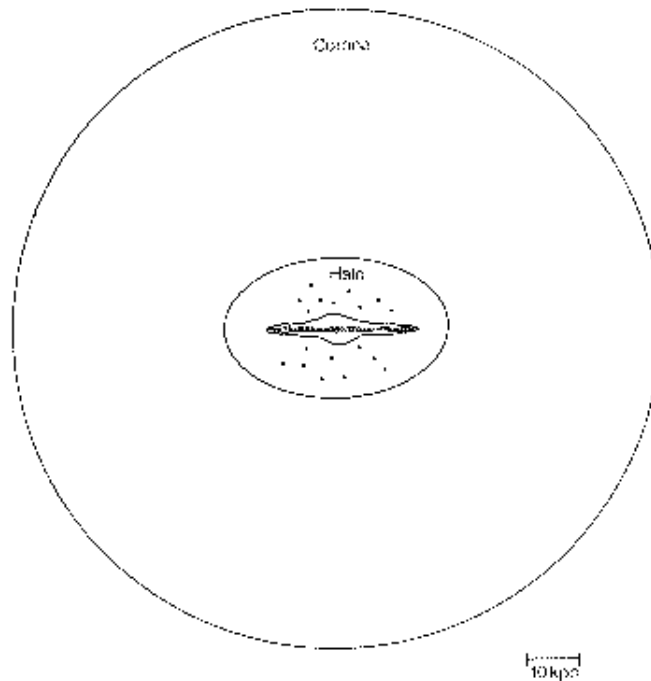


Abb. 1: Äußerer und innerer Halo.

- Über das ganze Universum gemittelt befindet sich mindestens zwanzigmal mehr Masse in Halos als in leuchtenden Galaxienkomponenten.
- Dunkle Materie in der galakt. *Scheibe*:  $< 10\%$  (aus Hipparcos-Daten).

# Microlensing

Zur Wiederholung:

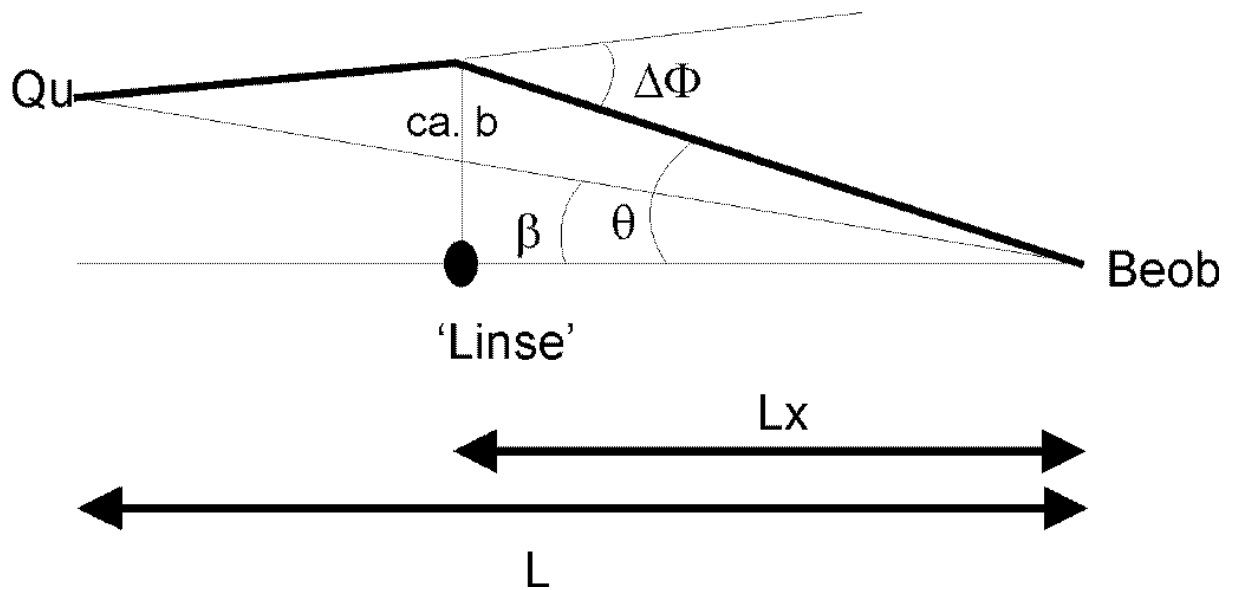


Abb. 2: Zum Gravitationslinseneffekt.

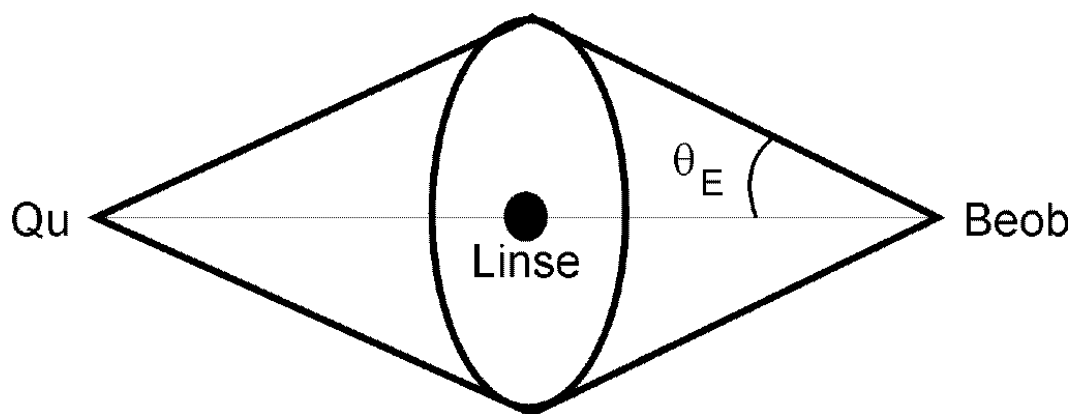


Abb. 3: Einsteinring.



Linsengleichung (vgl. Vortrag zu  $\Omega_{matter}$ ):

$$\beta(\theta) = \theta - \frac{L(1-x)b \cdot \Delta\Phi}{L^2x \theta} = \theta - \frac{(1-x)4GM}{Lx c^2\theta}$$

Für geg.  $\beta$  i.A. nicht *eindeutig* nach  $\theta$  lösbar  
 $\Rightarrow$  Mehrere Bilder.

Falls diese nicht auflösbar sind: Verstärkung  
der Quelle.

Für Punktmassen:

$$\mu = \frac{u^2 + 2}{\sqrt{u^2(u^2 + 4)}}$$

$$(wobei \quad u \equiv \frac{\beta}{\theta_E}, \quad \theta_E = \sqrt{\frac{4GM(1-x)}{c^2 Lx}})$$

- Macrolensing: Abbildung durch ausgedehnte Massenverteilung. Mehrere räumlich aufgelöste Bilder.

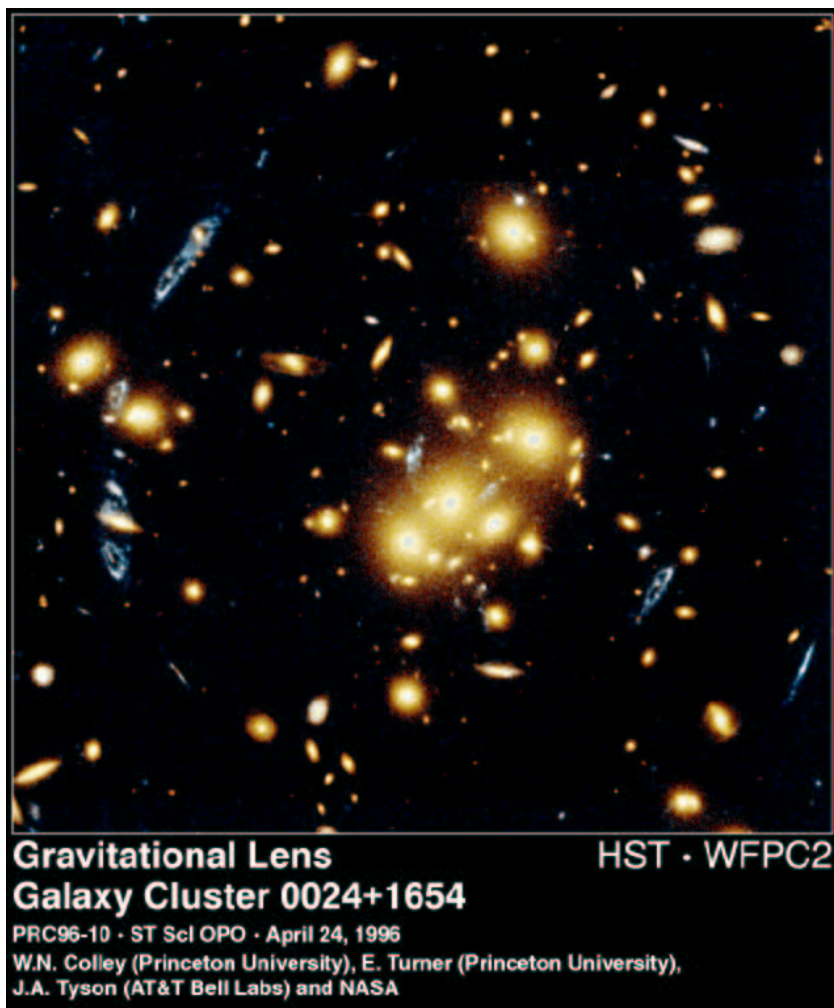


Abb. 4: Mehrere Bilder (blau) einer Galaxie.

- Microlensing: Abbildung durch kompakte Objekte. Bilder nicht auflösbar ( $\approx$  Millibosekunden).  
Bei Relativbewegung Quelle/Linse: Lichtkurve  $I(t)$ , charakterisiert durch
  - Achromatizität
  - Zeitliche Symmetrie.
- Im einfachen Microlensing-Fall (Ausdehnung der Objekte und Bewegung der Erde vernachlässigt) ist die Observable  $t_E \equiv \frac{\theta_E}{\omega}$  ( $\omega \equiv$  Winkelgeschwindigkeit der Linse) mit verschiedenen  $(m, r, v)$  der Linse verträglich (‘Entartung’).

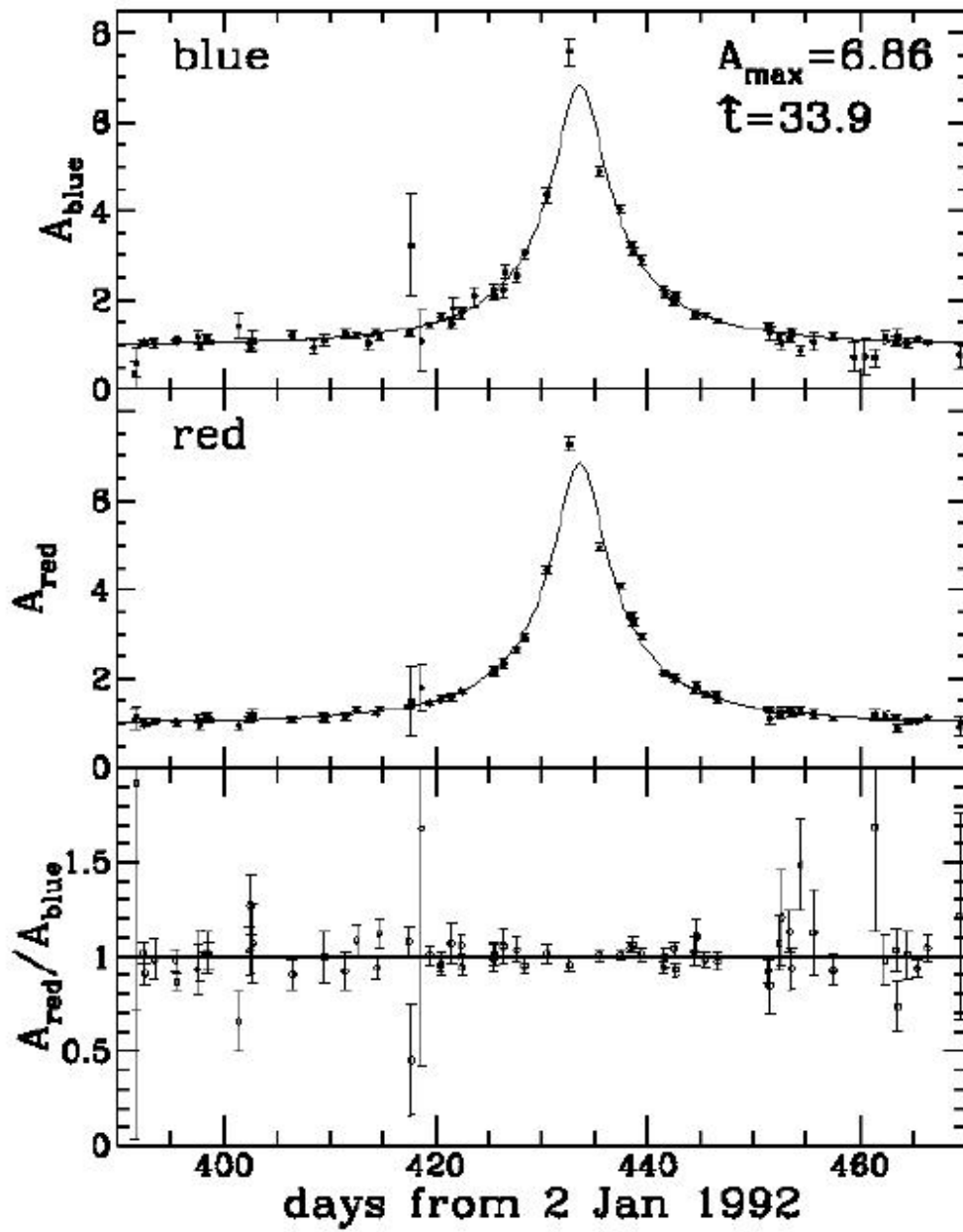


Abb. 5: Typische Lichtkurve (Daten & Fit).

- Mehr Information u.a. durch Änderung der Lichtkurve wg. Erdumlauf (Parallaxe).

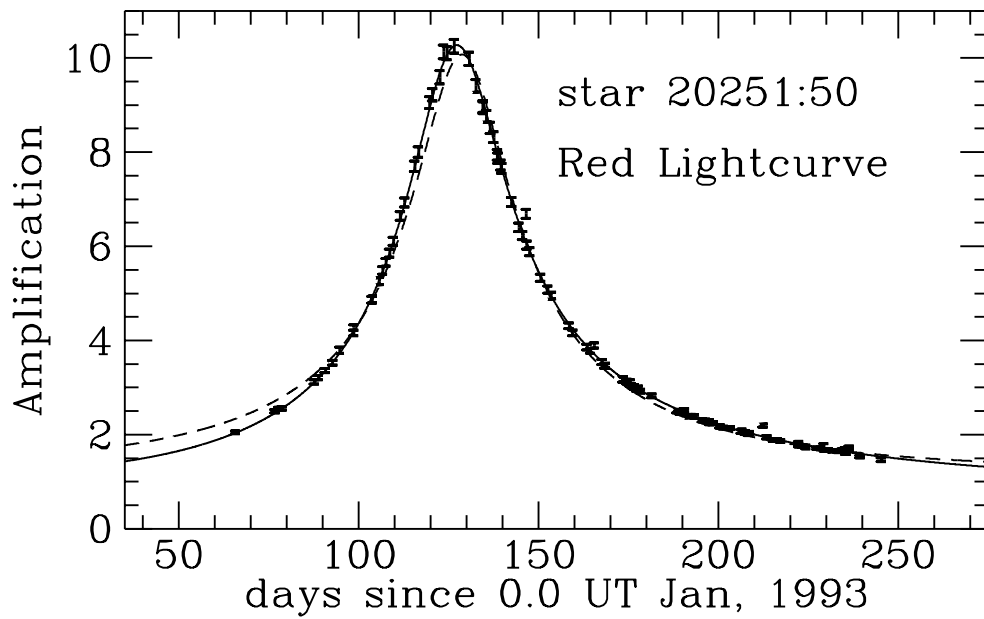


Abb. 6: Durchgezogene Linie: Bester Fit mit Erdbewegung, gestrichelt: bester Fit ohne Erdbewegung.

# MACHO-Projekt

MACHOs: massive compact halo objects

Für Halo-Objekte: Opt. Tiefe  $\tau \approx \left(\frac{v}{c}\right)^2 \approx 10^{-6}$ .

Falls  $\tau$  klein, ist  $\tau \approx$  Wahrscheinlichkeit für ein Gravitationslinsenereignis ( $\mu \geq 1,34 \Leftrightarrow u \leq 1$ ) bei einer zufällig ausgewählten Quelle.

$\Rightarrow$  Es müssen mehrere Millionen Sterne beobachtet werden!

MACHO-Projekt: 7,5 Jahre währende Beobachtungen (1992-99) mit einem 1,27m-Teleskop (Mt. Stromlo) in zwei Farben.

- In den ersten 5,7 Jahren Beobachtung von 11,9 Mio. Sternen in der Großen Magellanschen Wolke.

13–17 Microlensing-Ereignisse (aus bekannten Sternpopulationen nur 2–4 erwartet).

$\Rightarrow \tau_{LMC} = 1,2_{-0,3}^{+0,4} \cdot 10^{-7}$  ( $2d < t < 400d$ ).

- Wahrscheinlichste Werte für Massenanteil  $f$  und Einzelmasse  $M$  der MACHOs werden ermittelt.
- Ergebnis ist grundsätzlich vom verwendeten Halo-Modell abhängig.

#### Einige Probleme:

- ‚self-lensing‘ (nicht nur Quelle, auch Linse in der LMC).
- Quellen können Doppelsterne sein  $\Rightarrow$  keine Symmetrie der Lichtkurve.

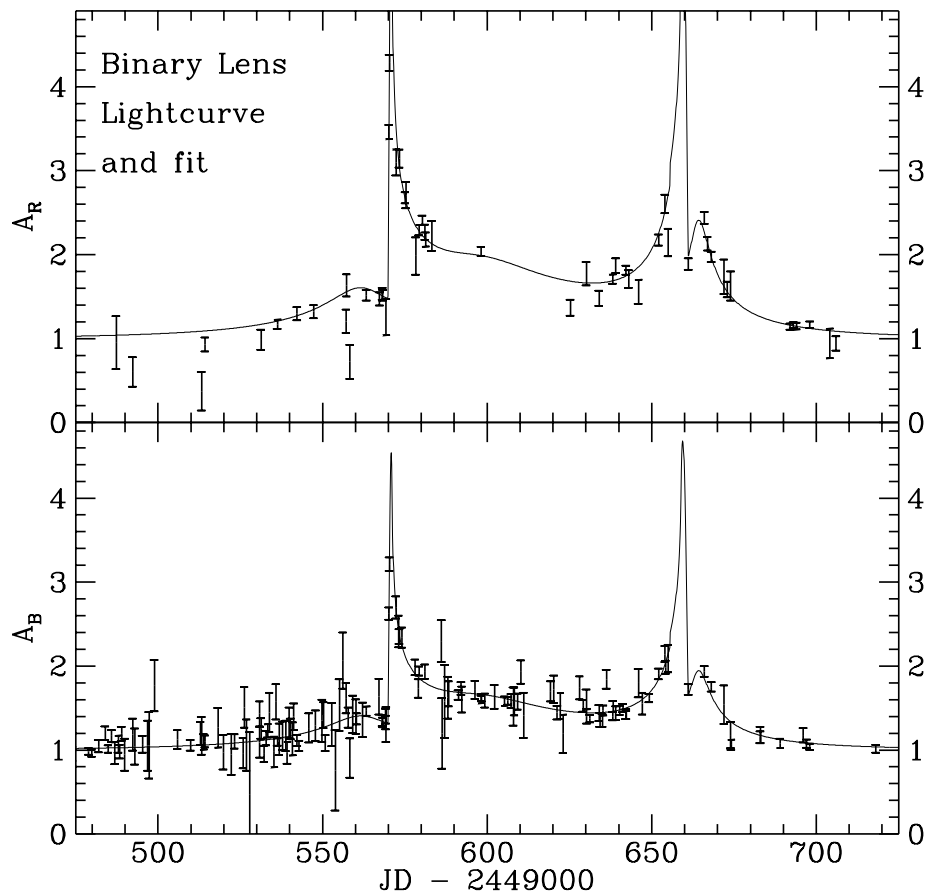


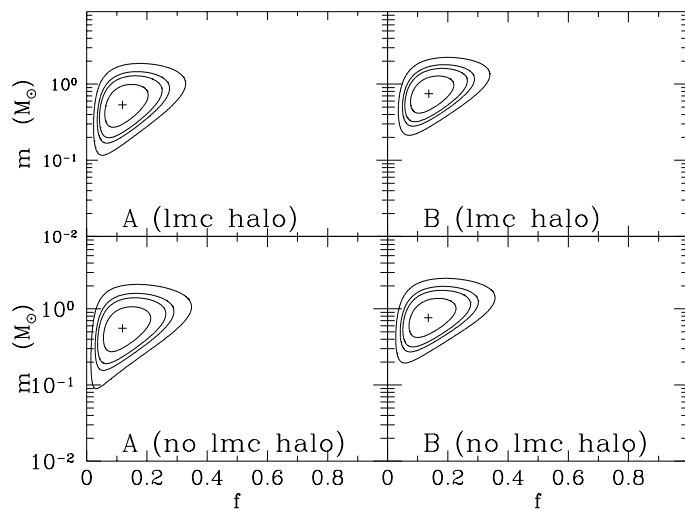
Abb. 7: Quelle ist Doppelstern.

- Veränderliche Sterne
  - Asymmetrie der Lichtkurve *auch* durch Parallaxeneffekt möglich.
- Supernovae in Galaxien hinter der LMC.

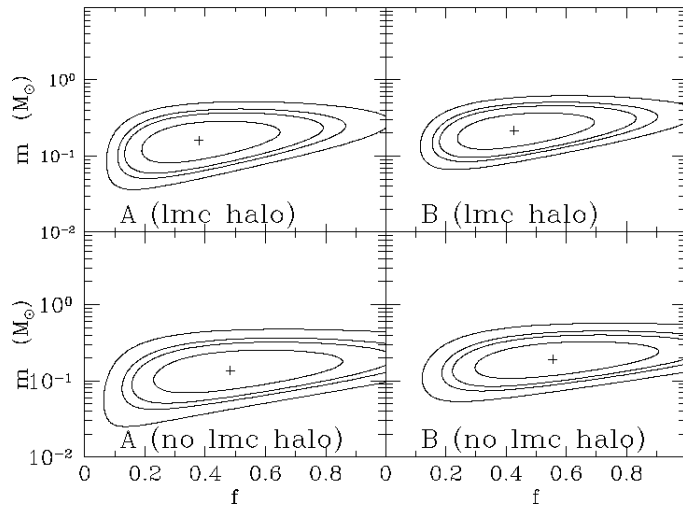


# Massenanteil $f$ & Einzelmasse $M$ für drei Halo-Modelle

Modell mit massereichem Halo



## Modell mit massearmem Halo



## Typisches Modell

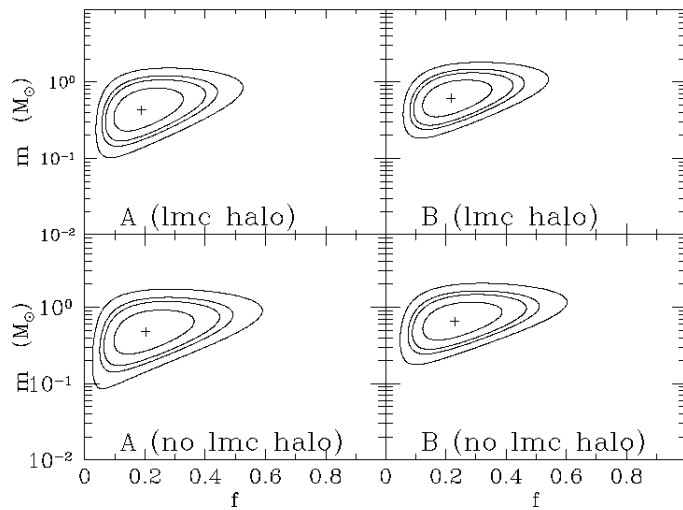


Abb. 8–10: Die Linien schließen Gebiete von  $p < 68\%$ ,  $90\%$ ,  $95\%$ ,  $99\%$  ein.

## Ergebnisse des MACHO-Projekts:

- Für mehrere plausible Modelle des Halos ist ein 100% MACHO-Halo mit hoher Wahrscheinlichkeit ( $> 99\%$ ) ausgeschlossen!
- Für ein typisches Modell:  $f \approx 20\%$ .  
(95% CL von 8 bis 50%.)
- $M \approx 0,5 M_{\odot}$ .  
Aber stark vom Halo-Modell abhängig (0,15 bis  $0,9 M_{\odot}$  möglich).
- (Nach neuen Ergebnissen Probleme mit allen Halo-Modellen. Evtl. inhomogene Verteilung und kleinere Masse der MACHOs.)

- MACHO-Masse innerhalb 50 kpc beträgt  $9_{-3}^{+4} \cdot 10^{10} M_{\odot}$ , unabhängig vom Halo-Modell.

### EROS-Projekt:

- 25 Mio. LMC-Sterne in 3 yr (EROS2), 4 Ereignisse.
- Größerer Raumwinkel als MACHO-Projekt, eher auch Außenbereiche der LMC  $\Rightarrow$  weniger ‚self-lensing‘.
- *Keine* positive untere Grenze für die Gesamtmasse dunkler kompakter Objekte unterhalb einiger  $M_{\odot}$ .

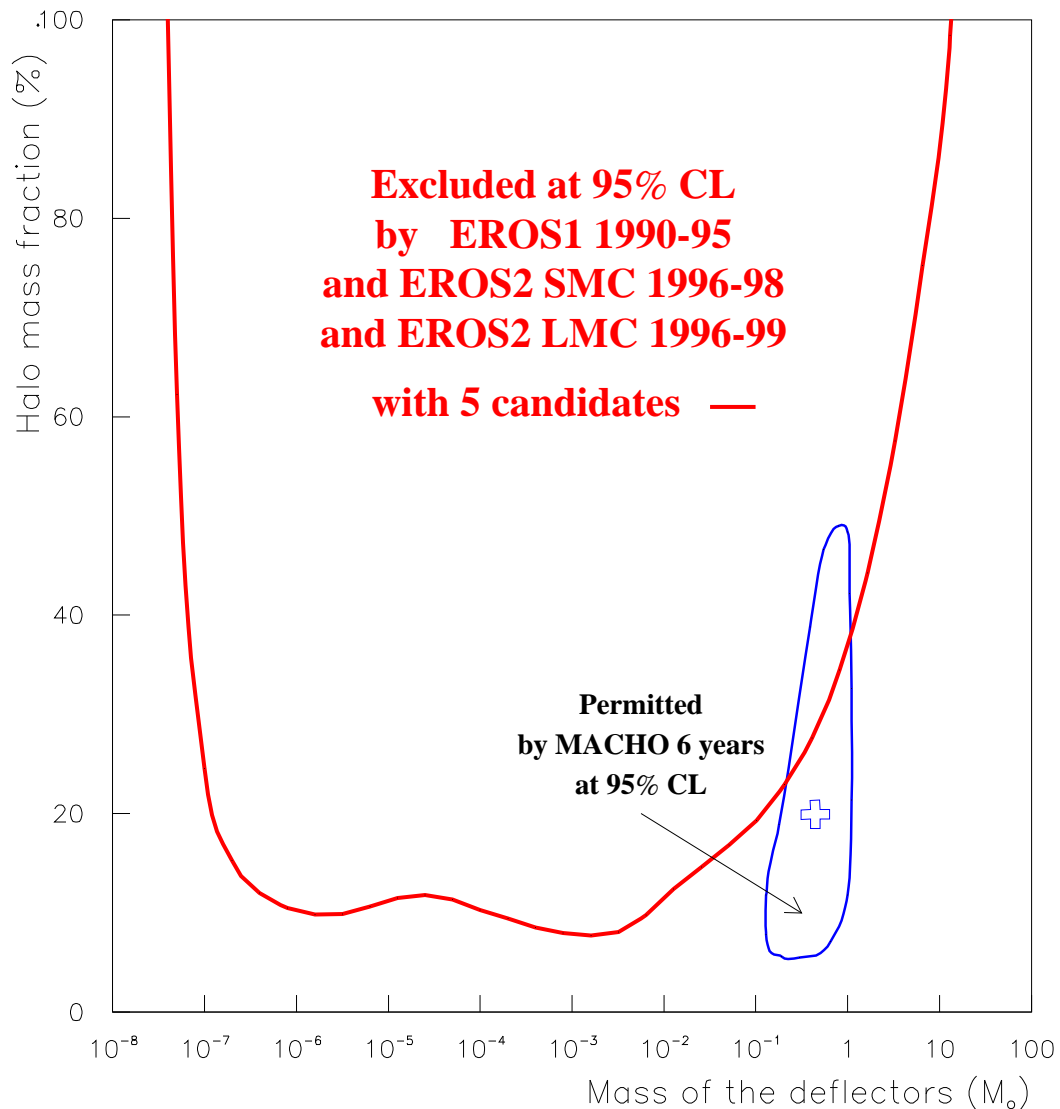


Abb. 11: Ergebnisse von MACHO und EROS.

⇒ Naheliegendste – nicht zwingende – Interpretation: Etwa 20% der Halo-Masse (große Unsicherheit) befindet sich in (leuchtschwachen) Weißen Zwergen.

## SUPERMACHO:

- Derzeit laufendes Projekt.
- Quantitative Verbesserung gegenüber MACHO. 100–200 Ereignisse erwartet.

# Überblick über kompakte Kandidaten

- Rote Zwerge:  
Nennenswerter Beitrag zum Halo der Milchstraße durch HST ausgeschlossen.

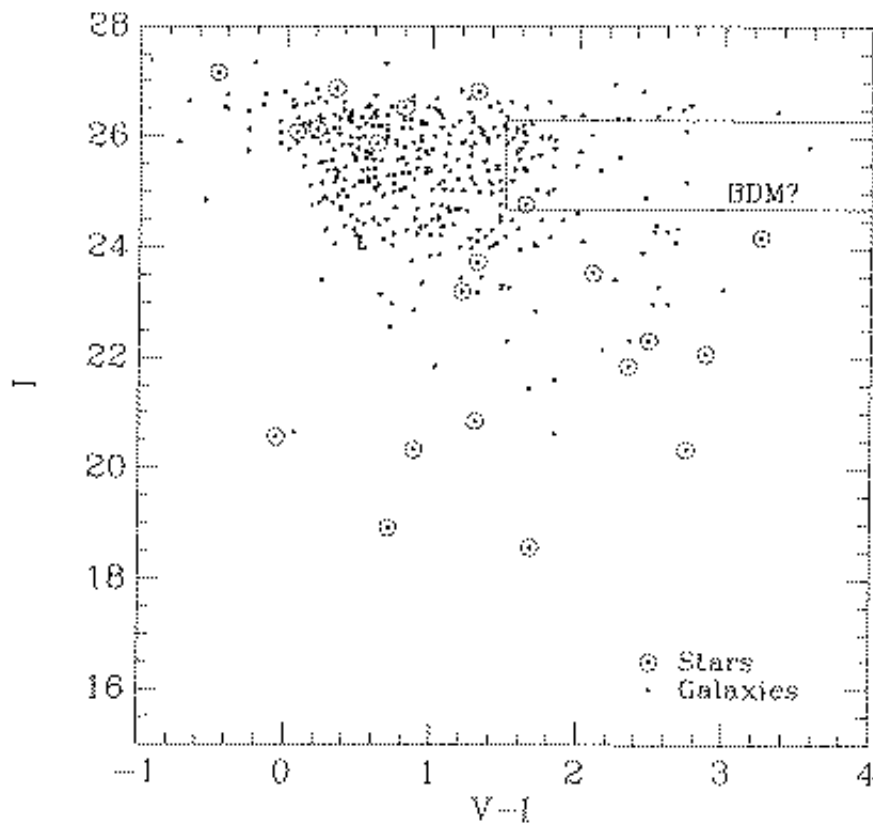


Abb. 12: Scheinbare Helligkeit (I) vs. Farbindex (V-I) für kompakte Objekte im HDF-North.

(*Roter Halo* um NGC 5907: Nicht abschließend geklärt, aber vermutlich untypisch.)

- Jupiterähnliche Objekte:  $M \leq 0,001 M_{\odot}$ 
  - Contra:  $t_E \approx 3$  d, aber keine Microlensing-Ereignisse mit  $t_E < 10$  d beobachtet!
- Braune Zwerge: 0,001 bis 0,08  $M_{\odot}$ , kein H-Brennen, ab 0,013  $M_{\odot}$  Deuteriumbrennen:
  - Früher favorisiert.
  - Microlensing-Beobachtungen sprechen gegen sie (falls ihre obere Massengrenze nicht umgangen werden kann).



- Neutronensterne ( $M < \text{Oppenheimer-Volkoff-Grenzmasse} \approx 2\text{--}3 M_{\odot}$ ), Schwarze Löcher
  - Contra: Nicht genügend heißes Gas und schwere Elemente beobachtet (sollten während der Entwicklung massereicher Vorgängersterne und bei Supernovae entstehen).
  - Neuere Ergebnis des MACHO-Projekts: Drei mögliche Microlensing-Ereignisse durch Schwarze Löcher ( $M \approx 6 M_{\odot}$ ).  
 ⇒ SL könnten 10% des Halo ausmachen (aber kleine Datenbasis).
  - Zudem möglich (eher mit chemischen Verhältnissen konsistent):
    - \* *Primordiale* SL (eigentlich nicht baryonisch)
    - \* SL mit Vorgängersternen  $M > 200 M_{\odot}$  (VMO) /  $10^5 M_{\odot}$  (SMO).

- Weiße Zwerge: Endstadium von Sternen zwischen  $\approx 1$  bis  $8 M_{\odot}$  ( $\approx 95-98\%$  aller Sterne).  
 $M < 1,44 M_{\odot}$  (Chandrasekhar-Grenzmasse).

Pro:

- Masse aus Microlensing-Beobachtungen paßt gut ( $\approx 0,5 M_{\odot}$ ).
- Entdeckung zweier alter WZ im Hubble Deep Field, spektroskopisch bestätigt (extrapoliert ca. 10% des lokalen Halo).
- Mögliche direkte Beobachtung kühler WZ (Untergrenze jedoch nur 2% des Halo).

- \* Kühle WZ ( $T_{eff} < 4500$  K) mit Wasserstoff in der Atmosphäre leuchten überwiegend blau statt rot. – Grund: Nicht-permanentes Dipolmoment von  $H_2$  (durch Kollisionen)  $\rightsquigarrow$  hohe Opazität oberhalb  $\lambda \approx 600$  nm.
- \* Unterscheidung von extragalaktischen Quellen durch Eigenbewegung.

### Contra:

- Elementhäufigkeiten (z.B. beob. [C/O] u. [N/O] in Population II-Sternen deutlich zu gering).
- Direkte Beob. von WZ im Halo: strittig, nicht zahlreich genug; indirekte Beob. (Microlensing): obere Grenze  $\approx 50\%$ .

- Spekulative Lösung: „Beige Zwerge“.
  - Massereiche Braune Zwerge: Kein Wasserstoffbrennen trotz  $0,1-0,3 M_{\odot}$ .
    - \* Grund: Langsame Akkretion ( $10^{-11}-10^{-9} M_{\odot}/\text{yr}$ ).
  - Besser verträglich mit den bekannten Elementhäufigkeiten.
  - Entstehung v.a. im frühen Universum (geringe Metallizität des akkretierten Gases notwendig).

# Gasförmige dunkle Baryonen?

- Falls sich Galaxien entlang der Hubble-Sequenz  $S_d \rightarrow S_a$  entwickeln, nimmt  $M/L$  mit  $t$  zu, also wandelt sich Dunkle Materie in Sterne um und muß somit aus gasförmigen Baryonen bestehen.

U.a. drei Möglichkeiten:

1. Dunkle Haufen aus  $H_2$ -Gas und Braunen Zwergen im äußeren Halo. Für  $r > 10-20$  kpc keine Dissoziation des  $H_2$  durch UV.
  - Nachweis: Streuung von Protonen (kosm. Strahlung) an kalten Molekülwolken verursacht Gammastrahlung.

- EGRET-Daten bestätigen Vorhersagen für Milchstraße (nicht für M31). Weitere Tests durch AGILE und GLAST (ab 2004/06).
- Kombination von Microlensing und Brechung/Absorption  $\Rightarrow$  Achromatizität der Lichtkurve aufgehoben.

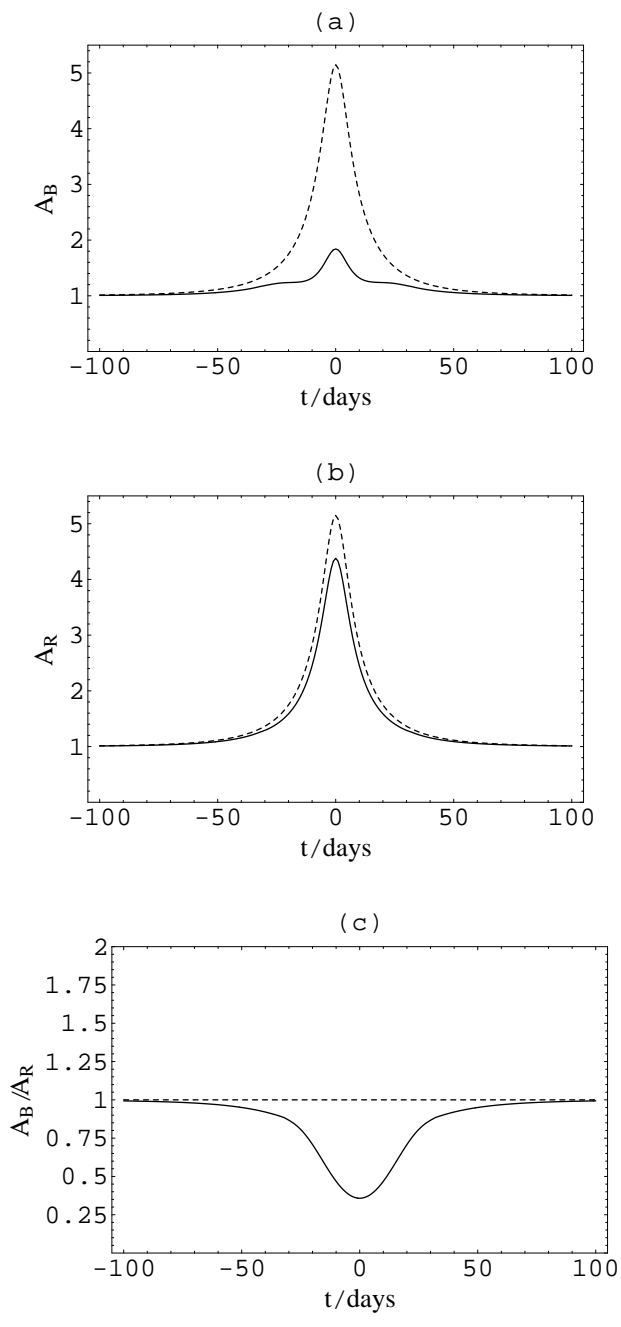


Abb. 13: Prognostizierte Lichtkurven für Modell mit Braunen Zwergen in kalten Molekülwolken.

## 2. Molekulares kaltes Gas ( $T \approx 3 \text{ K}$ ) in Klumpuskeln

- Anders als bekannte Molekülwolken: sehr kompakt und nicht mit Staubwolken assoziiert.
- Fraktale Struktur über 4–6 Größenordnungen  $\Rightarrow$  Inhomogenität (Masse könnte um Faktor 10 unterschätzt werden).
- Möglicherweise beobachtet (indirekt: via CO(1,0) (2,6mm)).



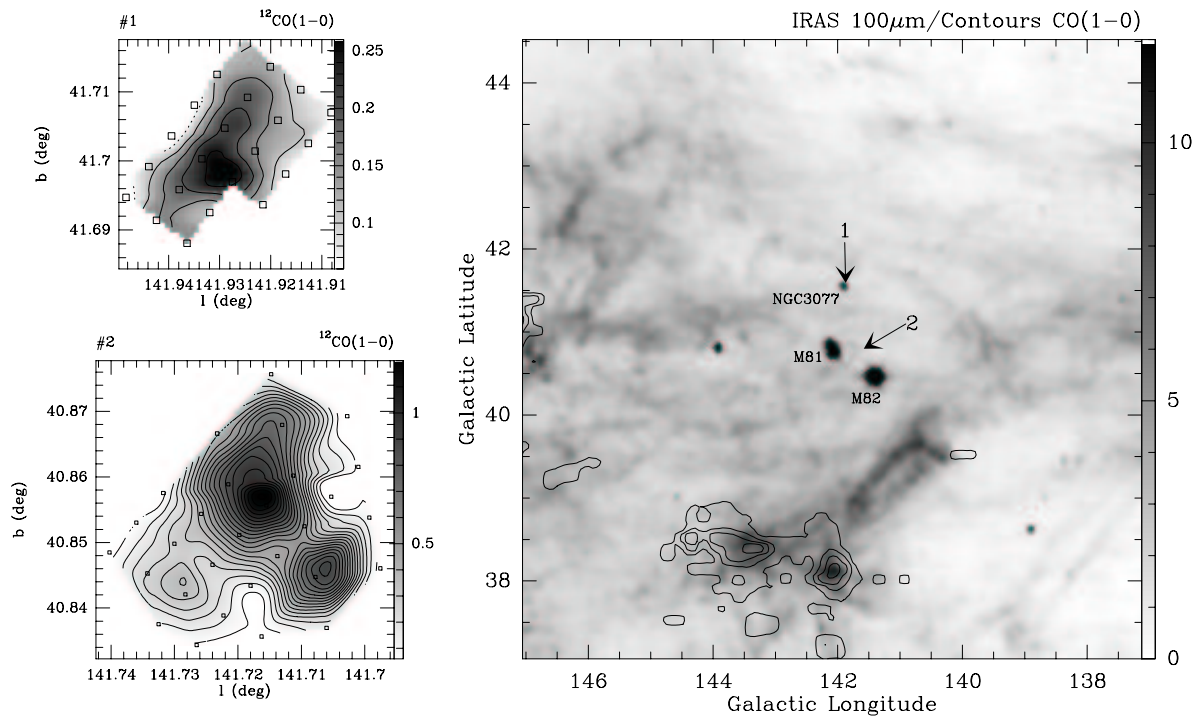


Abb. 14: Kompakte kalte Molekülwolken.

- Entfernung wahrscheinlich  $< 100$  pc, aber große Unsicherheit.  
Ausdehnung 50–5000 AE.  
 $M \approx M_{\text{Jupiter}}$ .
- Problem: Diese Wolken sollten im interstellaren Strahlungsfeld instabil sein.

### 3. WHIM (dünn verteiltes Warm-Heißes Inter-galaktisches Medium)

- Vorhersage aufgrund numerischer hydrodynamischer Simulationen.

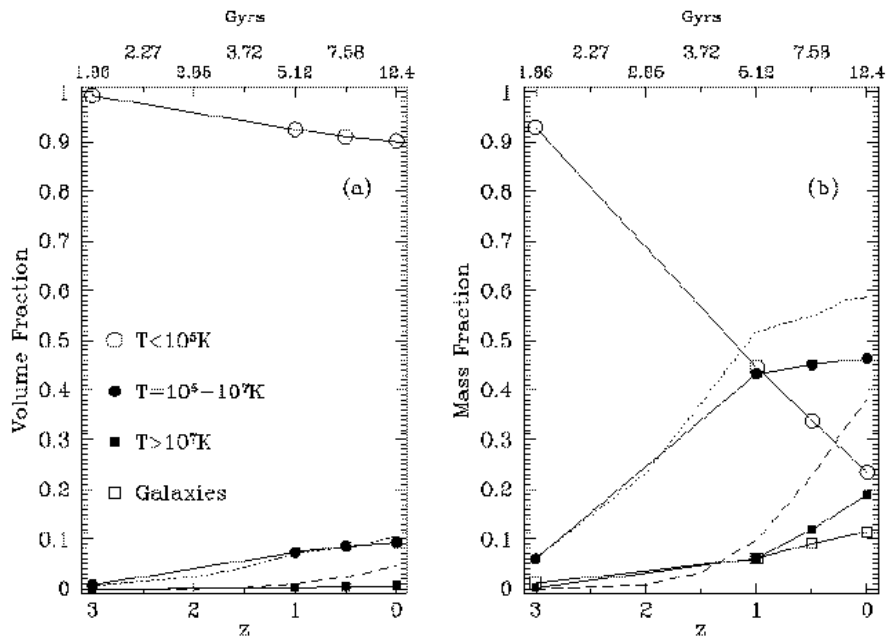


Figure 2

Abb. 15: Massenanteil vs.  $z \equiv \frac{\Delta\lambda}{\lambda_{emitt}}$ .

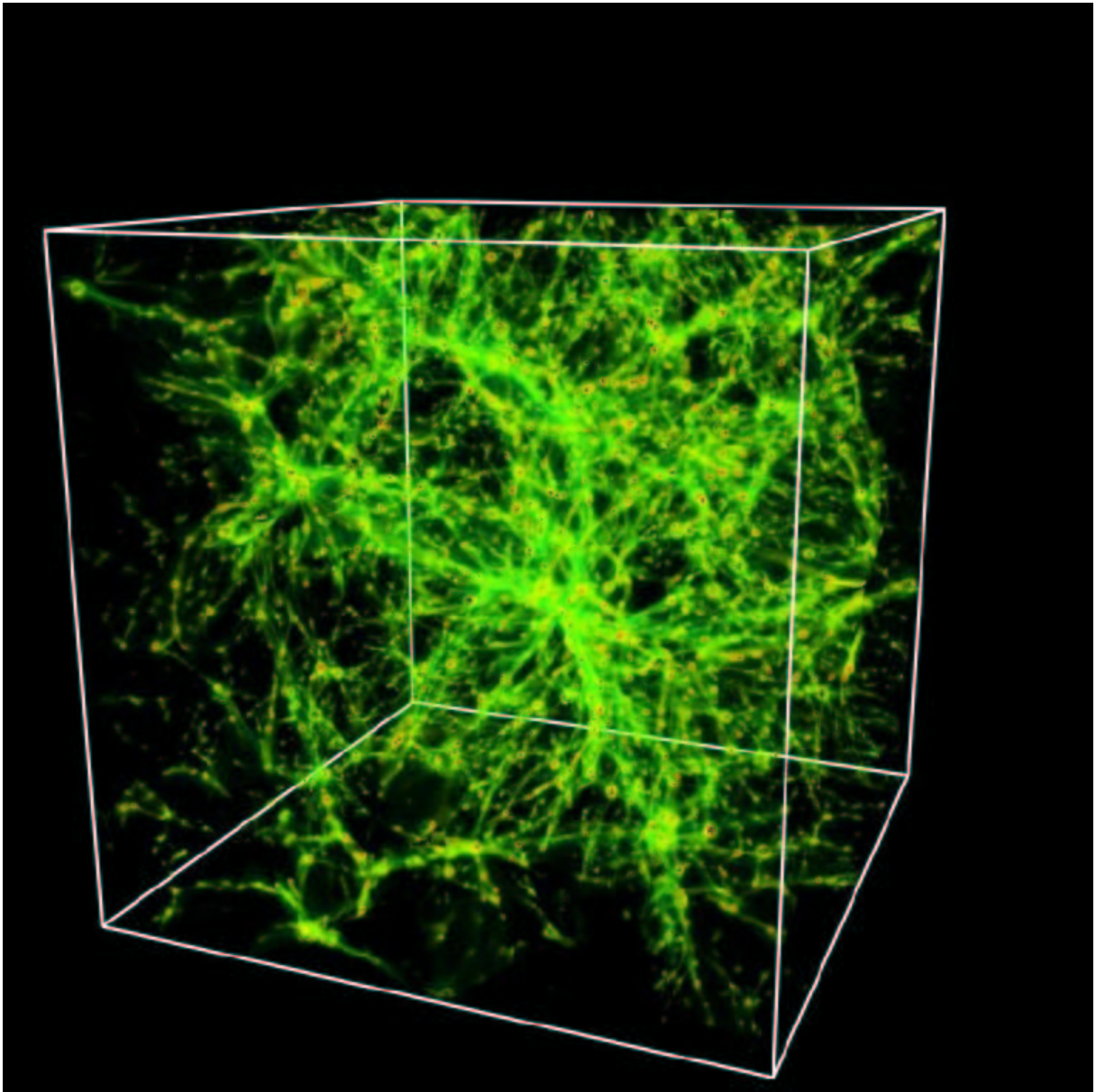


Abb. 16: Warm/heißes Gas ( $10^5$ – $10^7$  K) für  $z=0$ . Grün/gelb/rot: Zehn-/hundert-/tausendfaches der durchschnittlichen Baryondichte.

- $10^5 \text{ K} < T < 10^7 - 10^8 \text{ K}$ : Zu heiß für 21 cm, zu kalt für starke Röntgen-Strahlung  
⇒ Beobachtung schwierig.
- Theorie über Entstehung: Baryonisches Gas fällt auf sich bildende Galaxien und wird durch Stoßwellen erhitzt. Wegen geringer Dichte keine Abkühlung.
- Beobachtung u.a. über OVI-Absorption des Lichts ferner Quasare: 1032 u. 1038 Å.

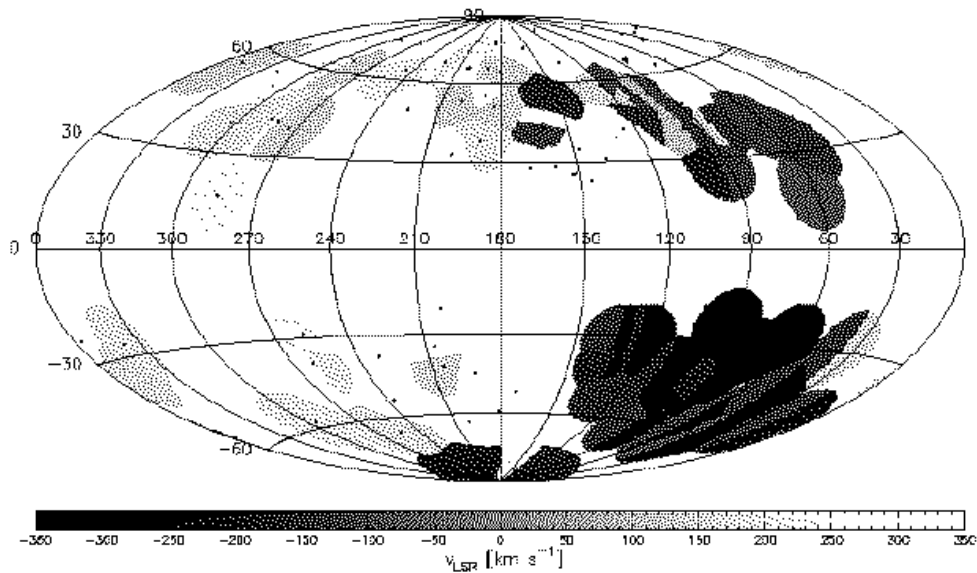


Abb. 17: OVI mit  $v_{LSR} > 100 \frac{km}{s}$  (Punkte: Quasare, Seyfert-Galaxien).

- Entfernung unsicher. Masse: Evtl.  $10^{12} M_{\odot}$  in der Lokalen Gruppe.
- Cosmic Origins Spectrograph hätte am HST installiert werden sollen und weitere Messungen durchführen können.

# Zusammenfassung

- MACHOs machen höchstens 50%, eher 20% der dunklen Halo-Materie aus.
- Hinsichtlich Art und Ort gasförmiger Baryonen ist derzeit noch kein sicherer Schluß möglich. Weitere Beobachtungen sind notwendig.
- $\Omega_{baryon} \approx 0,04$  impliziert aber, daß nicht alle dunkle Materie baryonischer Natur ist.

### Bildnachweis

Abb. 1: <http://fy.chalmers.se/number44/COURSES/COURSES-1999-00/UNIVERSE-2000/LECTURES/NOTES/galactic-structure-big.jpg>

Abb. 4: <http://opposite.stsci.edu/pubinfo/gif/CI0024.gif>

Abb. 5: Alcock et al.: Possible Gravitational Microlensing of a Star in the Large Magellanic Cloud, astro-ph/9309052.

Abb. 6: Alcock et al.: Recent Developments in Gravitational Microlensing and the Latest MACHO Results: Microlensing Towards the Galactic Bulge, astro-ph/9411114.

Abb. 7: Alcock et al.: A Binary Lensing Event Toward the LMC: Observations and Dark Matter Implications, astro-ph/9606012.

Abb. 8-10: Alcock et al.: The MACHO Project: Microlensing Results from 5.7 Years of LMC Observations, astro-ph/0001272.

Abb. 11: Milsztajn/Lasserre: Not enough stellar mass Machos in the Galactic halo, astro-ph/0011375.

Abb. 12: Flynn: Baryonic Dark Matter in the Milky Way Halo, 2001sdcm.conf...11F in NASA ADS.

Abb. 13: Bozza et al.: Microlensing by Compact Objects associated to Gas Clouds, astro-ph/0111079.

Abb. 14: Heithausen: Small-area molecular clouds without shielding, astro-ph/0208531.

Abb. 15+16: Cen/Ostriker: Where are the baryons?, astro-ph/9806281.

Abb. 17: Sembach et al.: Probing Baryons in Galactic Halos and Gas Near Galaxies, astro-ph/0208409

## Literaturverzeichnis

Alcock et al.: The Macho Project First-Year Large Magellanic Cloud Results: The Microlensing Rate and the Nature of the Galactic Dark Halo. *ApJ* 461: 84 (1996).

Alcock et al.: The MACHO Project Large Magellanic Cloud Microlensing Results from the First Two Years and the Nature of the Galactic Dark Halo. *ApJ* 486: 697 (1997).

Alcock: The Dark Halo of the Milky Way. *Science* 287: 74 (2000).

Alcock et al.: The MACHO Project: Microlensing Results from 5.7 Years of Large Magellanic Cloud Observations. *ApJ* 542: 281 (2000).

Alcock et al.: MACHO Project Limits on Black Hole Dark Matter in the 1-30  $M_{\odot}$  range. *ApJ* 550: L169 (2001).

Bahcall et al.: Where is the Dark Matter? *ApJ* 447: L81 (1995).

Bennett et al.: First Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Preliminary Maps and Basic Results, [http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/map/pub\\_papers/firstyear/basic/wmap\\_basic\\_results.ps](http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/map/pub_papers/firstyear/basic/wmap_basic_results.ps)

Bergström/Goobar: *Cosmology and Particle Astrophysics*. Chichester: Wiley-Praxis (1999), ch. 3: General relativity & ch. 5: Gravitational lensing.

Bozza et al.: Microlensing by Compact Objects associated to Gas Clouds. [astro-ph/0111079](http://astro-ph/0111079).

Buser: The Formation and Early Evolution of the Milky Way Galaxy. *Science* 287: 69 (2000).

Carr: Baryonic dark matter. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 32: 531 (1994).

Carr: Recent developments in the search for baryonic dark matter. [astro-ph/0102389](http://astro-ph/0102389).

Cen/Ostriker: Where are the baryons? *ApJ* 514: 1 (1999).

Crézé et al.: The distribution of nearby stars in phase space mapped by Hipparcos: I. The potential well and local dynamical mass. *Astron. Astroph.* 329: 920 (1998).

Combes/Pfenniger: Clumpuscule Formation at High Redshift. [astro-ph/9801319](http://astro-ph/9801319).



Flynn: Baryonic Dark Matter in the Milky Way Halo. 2001sdcm.conf...11F  
im NASA ADS.

Fukugita et al.: The cosmic baryon budget. *ApJ* 503: 518 (1998).

Gerhard/Silk: Baryonic Dark Halos: A Cold Gas Component? *ApJ*  
472: 34 (1996).

Gibson/Mould: The chemical residue of a white-dwarf dominated  
galactic halo. *ASpJ* 482: 98 (1997).

Graff et al.: MACHOs, White Dwarfs, and the Age of the Universe.  
*ApJ* 499: 7 (1998).

Griest: Galactic Microlensing as a method of detecting massive  
compact halo objects. *ApJ* 366: 412, 1991.

Griest: The Nature of the Dark Matter. In: Bonometto et al. (Hgg.):  
Dark Matter in the Universe. Amsterdam 1996, 343ff.

Hansen: Old and blue white dwarfs as a detectable source of mi-  
crolensing events. *Nature* 394: 860 (1998).

Hansen: The Origin of Primordial Dwarf Stars and Baryonic Dark  
Matter. *ApJ* 517: L39 (1999).

Hawthorn/Freeman: The Baryon Halo of the Milky Way: A Fossil  
Record of Its Formation. *Science* 287: 79 (2000).

Heithausen: Small-area molecular structures without shielding. *astro-  
ph/0208531*.

Hoeppe: Vermißte Baryonen in heißen Wolken? *Sterne und Welt-  
raum* 5/2003: 19.

Ibata et al.: Faint, moving objects in the Hubble Deep Field: Com-  
ponents of the dark halo? *ApJ* 524: L95 (1999).

Ibata et al.: Discovery of high proper motion ancient white dwarfs:  
nearby massive compact halo objects? *astro-ph/0002138*.

Jetzer: Clouds and diffuse baryonic dark matter. *Space Science Re-  
views* 100: 117 (2002).

Koester: White dwarfs: Recent developments. *The Astron. Astro-  
phys. Rev.* 11: 33 (2002).

Milsztajn: The galactic halo from microlensing. *Space Science Re-  
views* 100: 103 (2002).

Milsztajn/Lasserre: Not enough stellar mass Machos in the Galactic  
halo. *astro-ph/0011375*.

Nicastro et al.: The far-ultraviolet signature of the 'missing' baryons in the Local Group of galaxies. *Nature* 421: 719 (2003).

N.N.: Elliptische Galaxien ohne Dunkle Materie. *Sterne und Welt-  
raum* 9/2003: 14.

Oppenheimer et al.: Direct Detection of Galactic Halo Dark Matter. *Science* 292: 698 (2001).

Paczynski: Gravitational microlensing by the galactic halo. *ApJ* 304: 1 (1986).

Paolis et al.: A scenario for a baryonic dark halo. *Astron. Astrophys.* 195: 567 (1995).

Paolis: Baryonic dark matter as Machos and cold molecular clouds. *Mem. S.A. It.* 69-2: 421 (1998).

Paolis et al.: Baryonic dark matter. astro-ph/9708222.

Peacock: *Cosmological Physics*. Cambridge: CUP (1999), ch. 4: Gravitational lensing.

Pfenniger et al.: Is dark matter in spiral galaxies cold gas? *Astron. Astrophys.* 285: 79 (1994).

Popowski et al.: Recent Microlensing Results from the MACHO Project. astro-ph/0304464.

Rahvar: Statistical interpretation of LMC Microlensing Candidates. astro-ph/0309051.

Rauch et al.: The Opacity of the Ly $\alpha$  Forest and Implications for  $\Omega_{baryon}$  and the Ionizing Background. *ApJ* 489: 7 (1997).

Richer: White dwarfs sing the blues. *Nature* 394: 825 (1998).

Rudy et al.: The peculiar colours of the halo light in the edge-on spiral galaxy NGC5907.

Spiro et al.: Searches for dark matter. *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* 80: 95 (2000).

Srednicki: Dark matter. <http://pdg.lbl.gov>.

Straumann: Weak and strong lensing statistics. *Space Science Reviews* 100: 29 (2002).

Stubbs: Looking for Dark Matter Through a Gravitational Lens. A Next-Generation Microlensing Survey. <http://www.ctio.noao.edu/supermacho/mcdonnell.pdf>.

Weinberg et al.: A Lower Bound on the Cosmic Baryon Density. *ApJ* 490: 564 (1997).