

Evidenzen für Dunkle Materie

Bernhard Scherl

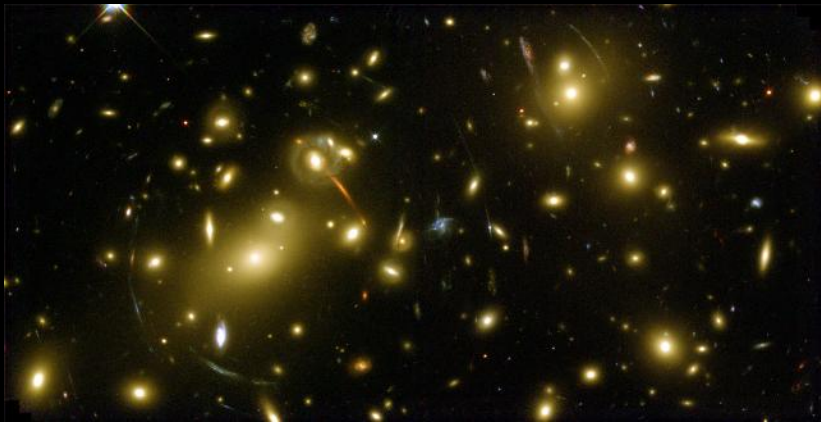
17. Juni 2010



Spiralgalaxie M81, [1]



Elliptische Galaxie NGC4565, [2]



Galaxienhaufen Abell 2218, [3]

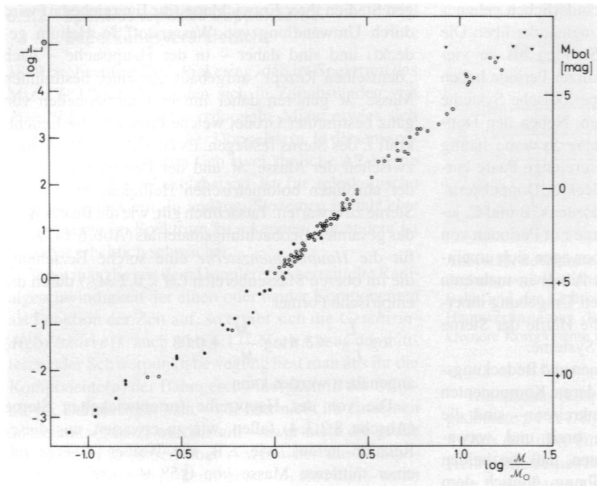
Inhalt

- 1 Kurzer geschichtlicher Exkurs
- 2 Massenbestimmung der leuchtenden Materie
 - Masse-Leuchtkraft-Beziehung der Sterne
 - Helligkeitsprofil von Galaxien
- 3 Dynamische Massenbestimmung
 - Rotationskurven von Spiralgalaxien
 - Dynamik elliptischer Galaxien
 - Röntgenstrahlung
- 4 Gravitationslinsen
 - Linsenabbildungen
 - Galaktischer Mikrolinseneffekt
 - Surveys und Resultate

Geschichtliches

- Jan Hendrik Oort 1932: Dicke der Scheibe der Milchstraße kleiner als durch vorhandene Masse und Gravitationswirkung selbiger erklärbar
- Fritz Zwicky 1933: Coma-Haufen nicht durch sichtbare Materie zusammenhaltbar (400fache Masse nötig)
- Vera Rubin 1960: Umlaufgeschwindigkeiten der Sterne höher als erwartet (seitdem wird Existenz dunkler Materie ernstgenommen)

Masse-Leuchtkraft-Beziehung der Sterne



Masse-Leuchtkraft-Beziehung der Sterne

- Leuchtkraft: Gesamte von einem Stern abgestrahlte Energie pro Sekunde
- Beziehung für Hauptreihensterne

Masse-Leuchtkraft-Beziehung (empirisch)

$$\frac{L}{L_{\odot}} = 0.23 \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{2.4} \text{ für } M < 0.43M_{\odot}$$

$$\frac{L}{L_{\odot}} = \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{4.0} \text{ für } M \geq 0.43M_{\odot}$$

manchmal auch verwendet: $L \propto M^{3.3}$ für alle Massen.

- Leuchtkraft ursprünglich bestimmt aus offensichtlicher Magnitude und Entfernung
- Masse ursprünglich aus Doppelsternen bestimmt
- Interessante Beobachtung: Sterne mit größerer Masse leben wegen deutlich höherer Leuchtkraft kürzer

Helligkeitsprofil von Galaxien

- Für Massenbestimmung anhand von leuchtender Materie Helligkeitsprofile benötigt
- Im Folgenden für Elliptische Galaxien und Spiralgalaxien
- Idee: Spektrum ähnlich wie in Sonnennähe führt zu ähnlicher Masseverteilung wie dort

Elliptische Galaxien

Verschiedene Typen:

- Normale Ellipsen: Leuchtkraft $L \sim 10^{9.2} L_{\odot}$ bis $L \sim 10^6 L_{\odot}$
- Zwerggalaxien: Leuchtkraft bis hinunter zu $L \sim 10^{3.2} L_{\odot}$ - je nach Typ aber auch deutlich leuchtkräftiger

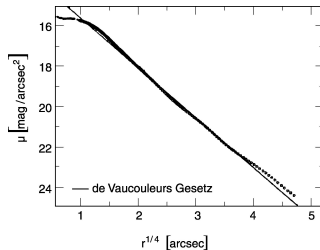
Helligkeitsprofile elliptischer Galaxien

Normale Ellipsen:

de Vaucouleurs-Profil

$I(R) = I(R_e) \exp(-7.669[(R/R_e)^{1/4} - 1])$ mit R_e = Effektivradius
(innerhalb dessen die Hälfte der Leuchtkraft emittiert wird)

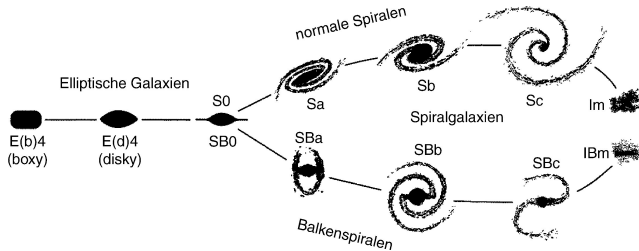
Galaxie NGC4472:



μ : mittlere Flächenhelligkeit

Spiralgalaxien

Typen von Spiralgalaxien:



- Fröhrentypen bis Spättypen (historisch bedingt)
- L_{bulge}/L_{disk} abnehmend (~ 0.3 bis ~ 0.05)
- Öffnungswinkel zunehmend ($\sim 6^\circ$ bis $\sim 18^\circ$)
- Helligkeitsstruktur nimmt zu: gleichmäßige Verteilung zu Klumpen

Helligkeitsprofile der Spiralgalaxien

Helligkeitsprofil des Bulges folgt etwa einem de Vaucouleurs-Profil:

Helligkeitsverteilung des Bulges

$$I_{bulge}(R) = I(R_e) \exp \left[C \cdot \left(\frac{R}{R_e} \right)^{1/4} - 1 \right] \text{ mit } R_e = \text{Effektivradius}$$

Helligkeitsprofil der Scheibe:

Helligkeitsverteilung der Scheibe

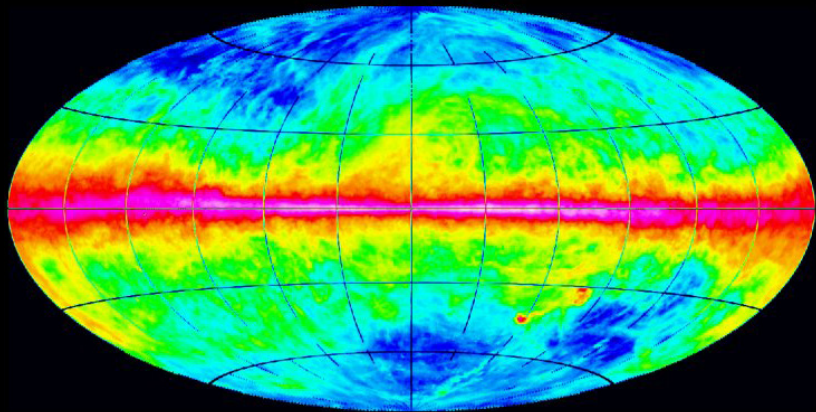
$$I_{disk}(R) = I(0) \exp \left(C \cdot \frac{R}{h_r} \right) \text{ mit } h_r = \text{Skalenlänge der Scheibe}$$

$I(0)$ ist nicht direkt messbar, da sich in der Mitte ja der Bulge befindet. Lösung: Extrapolation von außen (Kreisscheiben)

- $I(0)$ weist interessanterweise nur sehr geringe Dispersion auf

Dynamische Massenbestimmung

- Idee: Annahme, dass es nur leuchtende Materie gibt, widerspricht den Beobachtungen
- Es muss also noch etwas anderes geben
- Dies ist die Dunkle Materie
- Wie bestimmt man ihre Masse?



Radiobild unserer Galaxis, [2]

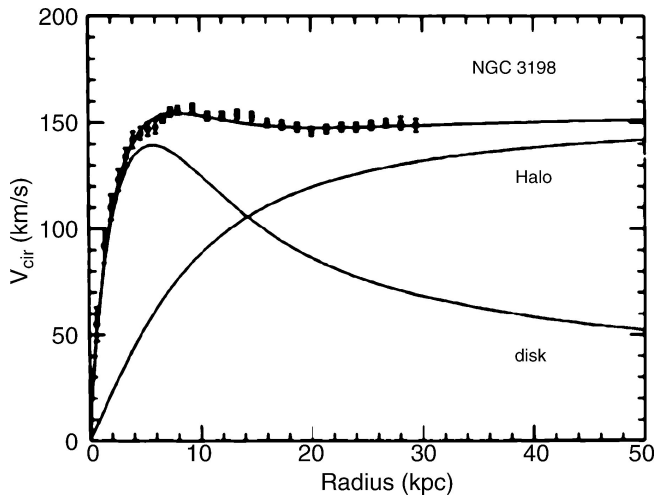
Messung der Rotationskurven

- Benötigtes Werkzeug: z.B. Radioteleskop
- Messung über Rotverschiebung der sichtbaren Materie an verschiedenen Punkten der Galaxis
- Gut dafür verwendbar: H-Linie bei 1420.406 MHz (21cm) - da diffus überall vorhanden
- $\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{v}{c}$
- Dadurch Rückschlüsse auf Masse möglich mittels
$$F_{\text{zentripetal}} = F_{\text{grav}}$$
- ausformuliert $\frac{mv^2}{r} = \frac{GMm}{r^2}$

Geschwindigkeit

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

Unterschied zwischen Erwartung und Praxis



Unterschied zwischen Erwartung und Praxis

- Mittelung der beiden Arme des Graphen (Symmetrie)
- Tatsächliche Kurve weicht deutlich von sichtbarer Materie („disk“) ab
- Daher muss es einen Halo aus uns bisher unbekanntem Material geben
- Im inneren Bereich der Galaxie dominiert die Scheibenmasse sehr deutlich (wird oft sogar als einziges angenommen)

Annahme dunkler Materie

- Was ist dieses unbekannte Material?
- Sendet keinerlei elektromagnetische Strahlung aus
- Daher in allen Wellenbereichen „dunkel“
- Macht sich aber gravitativ bemerkbar (z.B. in Rotationskurve)
- Folglich muss Differenz zwischen gravitativ gemessener Masse und sichtbarer Masse die dunkle Materie sein
- Man findet letztendlich

Masse der dunklen Materie

$$M_{\text{dunkel}}(r) = \frac{r}{G} \left[v^2(r) - v_{\text{leuchtend}}^2(r) \right]$$

Dynamik elliptischer Galaxien

- Problem: Elliptische Galaxien rotieren nicht, daher keine Rotationskurvenmessung möglich
- Was tun?
- Lösung: Betrachtung als Stern gas

Druckgestütztes Sterngas

- Galaxien können als Gas mit Materie als Teilchen aufgefasst werden
- Annahme: Isotherme Verteilung (Teilchen maxwellverteilt, aber „Temperatur“ nicht von Radius abhängig)
- Im hydrostatischen Gleichgewicht Druckgradient gleich Gravitationsbeschleunigung, also $\frac{dP}{dr} = -\rho \frac{GM(r)}{r^2}$
- Dichte einfach mittelbar mittels $\rho(r) = \langle m \rangle n(r)$
- Mit $P = nk_B T$ und $\frac{3}{2}k_B T = \frac{\langle m \rangle}{2} \langle v^2 \rangle$ folgt:
$$\frac{dP}{dr} = \frac{\langle v^2 \rangle}{3} \frac{d\rho}{dr} = \sigma_v^2 \frac{d\rho}{dr}$$
- Mit der eindimensionalen Geschwindigkeitsdispersion σ_v , die z.B. durch die Rot-/Blauverschiebung der H-Linie beobachtet werden kann, und bei isotroper Maxwellverteilung gilt dann $\langle v^2 \rangle = 3\sigma_v^2$

Virialsatz

- Da eine Galaxie als abgeschlossenes System im hydrostatischen Gleichgewicht betrachtet werden kann, gilt das Virialtheorem $2\overline{E_{kin}} + \overline{E_{pot}} = 0$
- Dabei sind $E_{kin} = \frac{1}{2} \sum_i m_i v_i^2$ und $E_{pot} = -1/2 \sum_{i \neq j} \frac{G m_i m_j}{r_{ij}}$
- Mit der Gesamtmasse $M := \sum_i m_i$, der massengewichteten Geschwindigkeitsdispersion $\langle v^2 \rangle := \frac{1}{M} \sum_i m_i v_i^2$ und dem gravitativen Radius $r_G := 2M^2 \left(\sum_{i \neq j} \frac{m_i m_j}{r_{ij}} \right)^{-1}$ ergibt sich mit Hilfe des Virialtheorems die Massenabschätzung

Massenabschätzung

$$M = \frac{r_G \langle v^2 \rangle}{G}$$

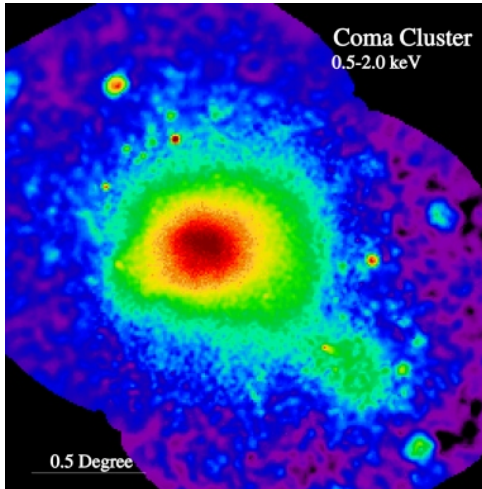
Messung: Galaxienhaufen

- Auch Galaxienhaufen als Gas (mit Galaxien als Teilchen) betrachtbar
- Problem bei Galaxienhaufen: Wie misst man nun r_G und $\langle v^2 \rangle$?
- Lösung für $\langle v^2 \rangle$ schon gefunden ($\langle v^2 \rangle = 3\sigma_v$)
- $r_g = \frac{\pi}{2} R_G$ mit $R_G = 2M^2 \left(\sum_{i \neq j} \frac{m_i m_j}{R_{ij}} \right)^{-1}$
- R_{ij} ist dabei der projizierte Abstand zwischen den Galaxien i und j
- Damit findet man:

Masse eines Galaxienhaufens

$$M = \frac{3\pi R_G \sigma_v^2}{2G}$$

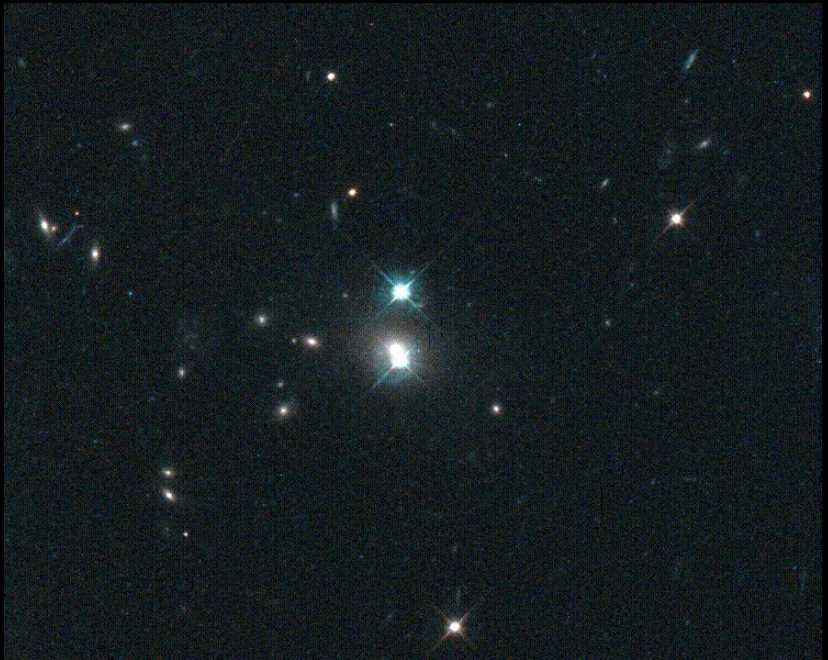
Röntgenstrahlung in Galaxienhaufen



- In Komma von Galaxienhaufen sendet „Röntengas“ heiße Röntgenstrahlung ($T \sim 10^7 - 10^8 \text{K}$) aus
- Aus Gasbetrachtung folgt daher im hydrostatischen Gleichgewicht wieder Masse

„missing mass“-Problem

- Masse-Leuchtkraft-Verhältnis aus leuchtender Materie etwa bei $3-10 \frac{M_{\odot}}{L_{\odot}}$
- Aus Dynamik von Galaxien etwa $50 \frac{M_{\odot}}{L_{\odot}}$
- Galaxienhaufen haben (aus Dynamik) sogar typische Werte von etwa $250 \frac{M_{\odot}}{L_{\odot}}$
- Großer Unterschied zeigt Existenz Dunkler Materie



Quasar Q0957+561 durch eine Gravitationslinse, [3]

Einsteinscher Ablenk Winkel

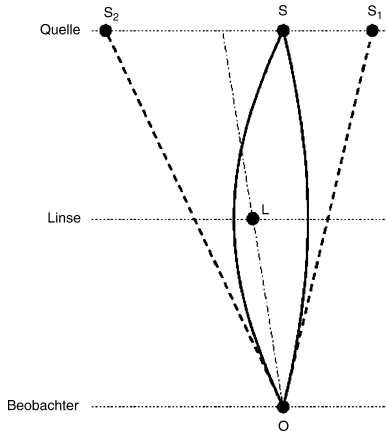
- Aus Allgemeiner Relativitätstheorie
- Lichtstrahl, der im Abstand ξ an Punktmasse M vorbeiläuft, wird um Winkel $\hat{\alpha}$ abgelenkt

Einsteinscher Ablenk Winkel

$$\hat{\alpha} = \frac{4GM}{c^2\xi}$$

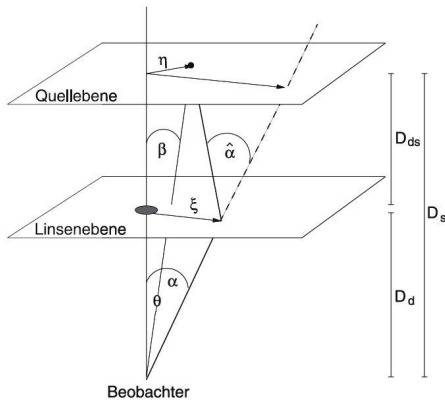
- 1919 während einer Sonnenfinsternis an Sonne korrekt gemessen (aber ungenau)
- Ungenaue Messung reichte für Anerkennung der ART

Doppelbilder



- Bei weit entfernten Linsen reicht Ablenkung für Doppelbild
- Entfernung der Sonne reicht dazu jedoch nicht aus

Linsengleichung für Punktmasse



Linsengleichung

$$\beta = \theta - \alpha \text{ mit}$$

$$\alpha := \frac{D_{ds}}{D_s} \hat{\alpha}(D_d \theta)$$

Mit dem Einsteinwinkel für
 Punktmassen

$\theta_E := \sqrt{\frac{4GM}{c^2} \frac{D_{ds}}{D_s D_d}}$ erhält
 man nun für die
 Linsengleichung

Linsengleichung

$$\beta = \theta - \theta_E^2 \frac{\theta}{|\theta|^2}$$

Linengleichung für Punktmasse

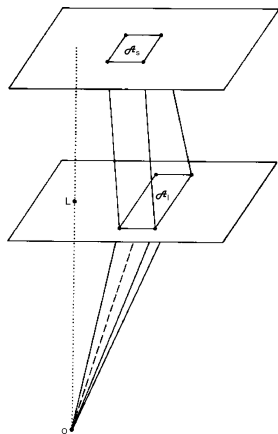
- Daraus erhält man $|\theta| = \beta + \theta_E$, also 2 Lösungen. Man erhält also auf jeder Seite der Linse ein Bild der Quelle.
- Für $\beta = 0$ erhält man eine ringförmige Abbildung (Einsteinring) mit Winkeldurchmesser $2\theta_E$.
- Durch Einsetzen des Einsteinwinkels in die Gleichung erhält man somit für $\beta = 0$ als Masse:

Linsenmasse

$$M = \frac{\theta^2 c^2 D_s D_d}{4G}$$

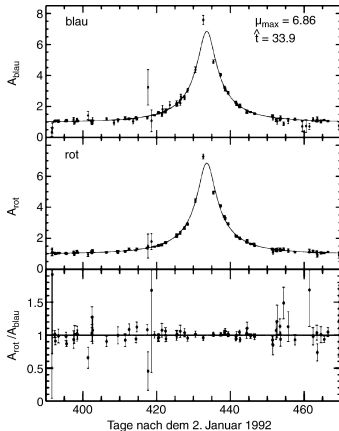
- Dadurch ist auch wieder einfach bestimmbar, dass es dunkle Materie geben muss.

Galaktischer Mikrolinseneffekt



- Stern als Linse in unserer Galaxis bewirkt Ablenkung, die so klein ist, dass sie nicht beobachtbar ist (mas-Bereich)
- Verstärkungseffekt der Linse (durch differentielle Ablenkung) ist jedoch beobachtbar (Liouville-Theorem)
- Fluss der Quelle müsste bekannt sein, ist er aber nicht
- Lösung: Zeitliche Variation durch Relativbewegung von Quelle, Linse und Beobachter

Galaktischer Mikrolinseneffekt



- Gut geeignet als Quelle:
Magellansche Wolken
- Lichtkurven hängen ab von
Quellenfluss, Zeitpunkt der
maximalen Verstärkung, kleinstem
Abstand der Quelle von optischer
Achse und charakteristischer
Zeitskala

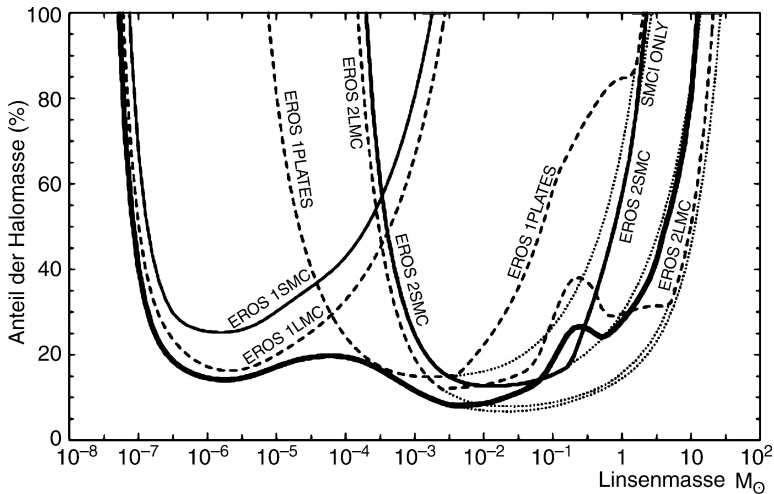
Surveys und Resultate

- Seit Anfang der 90er Experimente zur Beobachtung des Mikrolinseneffekts
- Damals: MACHO und EROS auf der Suche nach Ereignissen in Richtung Magellansche Wolke und OGLE in Richtung des galaktischen Bulges
- Mehr Linsenwahrscheinlichkeit in Richtung Bulge wegen Balken
- In Richtung Magellanscher Wolke weniger Ereignisse als erwartet für Fall, dass HALO aus MACHOs (Massive Astrophysical Compact Halo Object: baryonische, massive, nicht leuchtende Materie) - warum?





Surveys und Resultate

- Unklar - nur 20% des Erwartungswertes der Ereigniszahl wenn alle DM aus MACHOs bestünde sind schwierig zu interpretieren
- Auch die Masse ($0.5M_{\odot}$) schwierig zu interpretieren - weiße Zwerge?
- Eventuell schwarze Löcher aus der Frühzeit des Universums, aber unwahrscheinlich
- Bessere Erklärung bisher nicht gefunden





Massenbereich für MACHOs






Literatur

-  Ken Freeman, Geoff McNamara: *In Search of Dark Matter*, Springer-Verlag, Berlin, 2006
-  Peter Schneider: *Einführung in die extragalaktische Astronomie und Kosmologie*, Springer-Verlag, Berlin, 2006
-  Albrecht Unsöld, Bobo Baschek: *Der neue Kosmos*, 6. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 1999
-  Hannu Karttunen u.a.: *Fundamental Astronomy*, Fifth Edition, Springer-Verlag, Berlin, 2007

Literatur

-  Anne Lohfink: *Introduction to Astronomy I* (Skriptum zur Vorlesung), Erlangen, 2008
-  <http://www3.uni-bonn.de/die-universitaet/informationsquellen/presseinformationen/2005/332>
-  <http://www.astr.ua.edu/keel/agn/q0957.html>
-  <http://www.usm.uni-muenchen.de/people/saglia/dm/galaxien/alldt/node38.html>

Literatur

-  http://www.mpia-hd.mpg.de/Public/menu_q2.php?MPIA/Faltblatt-de/galkos.html
-  <http://www.astro.washington.edu/courses/labs/clearinghouse/labs/Hubclass/hubbleclass.html>
-  <http://www.weltderphysik.de/de/3309.php?i=3310>