

DUNKLE MATERIE

KURZVORTRAG ZUR VORLESUNG „VOM URKNALL ZU DEN STERNEN - EINE EINFÜHRUNG IN DIE
KOSMOLOGIE“

NATURWISSENSCHAFTLICHE FAKULTÄT II - PHYSIK



CLAUDIA UEHLER
25. JANUAR 2012

1 Warum Dunkle Materie?

Das Universum besteht nur zu einem kleinen Teil aus baryonischer Materie ($\approx 4\%$), von der wiederum nur 10% Licht aussendet und dadurch sichtbar ist; den größten Teil machen die Dunkle Materie ($\approx 26\%$) und die dunkle Energie ($\approx 70\%$) aus. Wie sich aber die Idee der Dunklen Materie entwickelt hat, wird nun erläutert.

1.1 Rotationsgeschwindigkeit

Misst man die Rotationsgeschwindigkeit einer Galaxie, so zeigt sich, dass die Schwerkraft der beobachteten Masse nicht ausreicht, um die Geschwindigkeitsverteilung zu erklären.

Die Rotationsgeschwindigkeit einer Galaxie lässt sich messen, indem man das Linienspektrum der Sterne beobachtet. Das Spektrum wird gemäß des Dopplereffekts zu größeren Wellenlängen hin verschoben, wenn sich die Sterne entfernen, und zu kleineren, wenn sich die Sterne dem Beobachter nähern. Der Betrag dieser Verschiebung zeigt die Geschwindigkeit an. Betrachtet man nun aber die Geschwindigkeitsverteilung in Abhängigkeit vom Abstand zum Galaxiezentrum, so ergeben sich einige Ungereimtheiten.

Setzt man Zentrifugal- und Gravitationskraft gleich, so ergibt sich, dass die Rotationsgeschwindigkeit mit $\propto \sqrt{\frac{1}{R}}$ abnehmen müsste.

$$\frac{mv(R)^2}{R} = \frac{GMm}{R^2}, \quad v(R) = \sqrt{\frac{GM}{R}} \quad (1)$$

Allerdings widersprechen dem die Rotationskurven [s. Abb. 1 und 2]: ausgehend vom Zentrum erreichen die Geschwindigkeiten schnell einen Maximalwert, auf dem sie dann fast unabhängig vom Radius verharren. Die Massenverteilung in Galaxien ist also sehr viel ausgedehnter, als die Lichtverteilung.

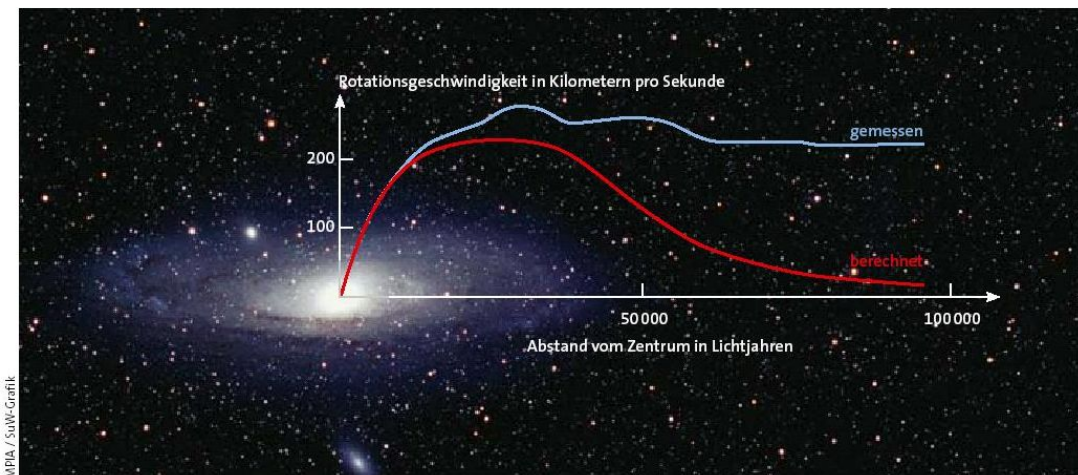


Abbildung 1: Rotationsgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Abstand zum Zentrum (aus [1])

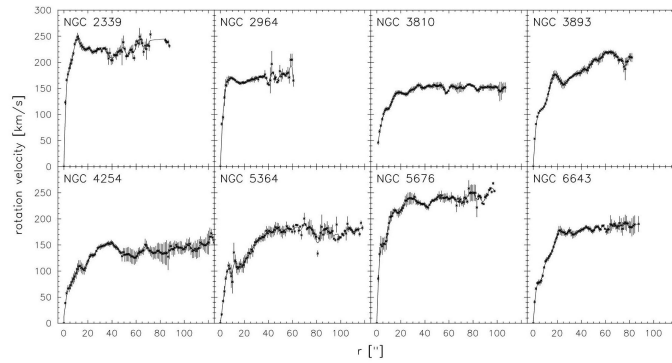


Abbildung 2: Rotationsgeschwindigkeiten verschiedener Galaxien in Abhängigkeit zum Abstand zum Zentrum (aus [4])

Benutzt man nun Radioteleskope, so kann man die Radiostrahlung von neutralen Wasserstoffwolken beobachten. Diese kommen mit weit größeren Abständen vom Galaxiezentrum vor [s. Abb. 3]. Misst man auch hier wieder die Geschwindigkeit, so ergibt sich ebenso, dass die Rotationskurven der Galaxie flach nach außen weitergehen, bis hin zu einem Vielfachen Durchmesser im sichtbaren Licht.

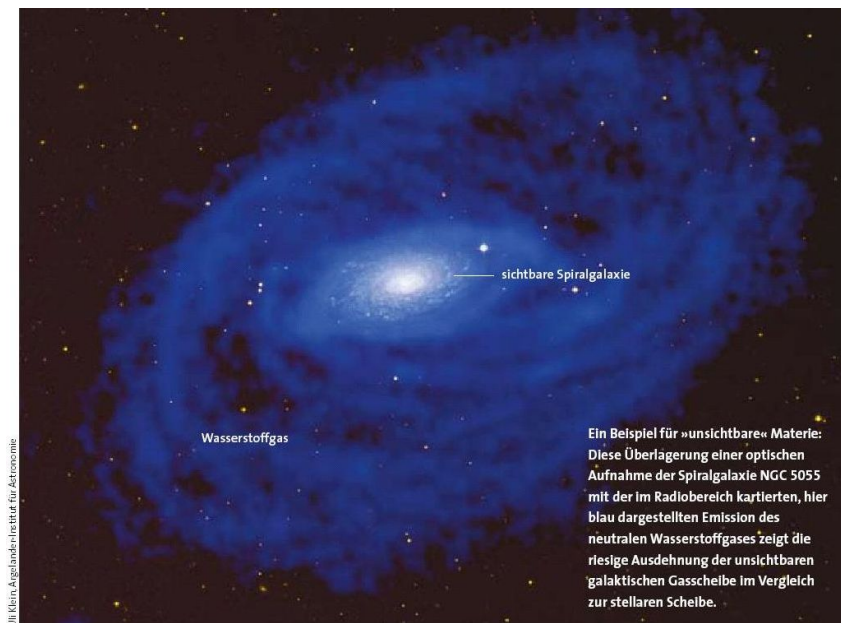


Abbildung 3: Die Galaxien sind viel weiter ausgedehnt, als sichtbare Strahlung erahnen lässt (aus [1])

Aber auch nun stellt sich heraus, dass die Masse und die Verteilung der Sterne und des Wasserstoffgases nicht ausreichen, um den Verlauf der Rotationsgeschwindigkeiten zu erklären. (Ein Beispiel: Galaxien mit 10 Milliarden Sonnenleuchtkräften haben eine Gesamtmasse von 1,5 Billionen Sonnen.)

Wenn man nun anstatt Galaxien Galaxienhaufen betrachtet, entdeckt man durch die Messung von Röntgenstrahlung heißes Wasserstoffplasma, jedoch auch hier benötigt es ein Vielfaches der gemessenen Masse, damit Gravitations- und Zentrifugalkraft im Gleichgewicht miteinander stehen.

Unter der Voraussetzung, dass das newtonsche Gravitationsgesetz auch auf Skalen von Galaxien bzw. Galaxienhaufen gilt, schloss man aufgrund der Resultate auf die Dunkle Materie. Es müsste also einen kugelförmigen Halo aus DM geben, dessen Dichte mit $\rho \propto \frac{1}{R^2}$ abfällt, seine Masse also linear zunimmt [s. Abb. 4].

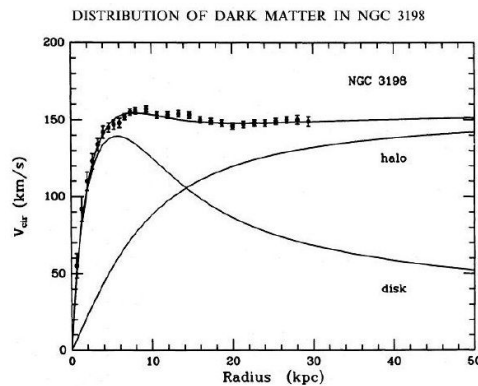


Abbildung 4: Rotationsgeschwindigkeit für die Galaxie NGC 3198 (aus [2])

1.2 Gravitationslinseneffekt

Die Messung der Verteilung Dunkler Materie über Rotationsgeschwindigkeiten hat aber folgenden Nachteil:

Galaxien stehen nicht isoliert im Raum. Das nimmt man aber für das genannte Verfahren an, wenn man Gravitations- und Zentrifugalkraft gleichsetzt. Sie verändern sich im Laufe der Zeit von einem Gleichgewichtszustand in einen neuen; sie wechselwirken mit anderen Galaxien und man weiß nie, in welchem Status der Gleichgewichtsfindung sich das betrachtete Objekt gerade befindet.

Ein Ausweg bildet nun der Gravitationslinseneffekt. Lichtstrahlen, die nah an einer großen Masse, zum Beispiel einem Galaxienhaufen, vorbeilaufen, werden abgelenkt, sodass sie sich zur Masse hin krümmen [s. Abb. 5]. Da die Masse also ähnlich einer Sammellinse wirkt, nennt man sie Gravitationslinse.

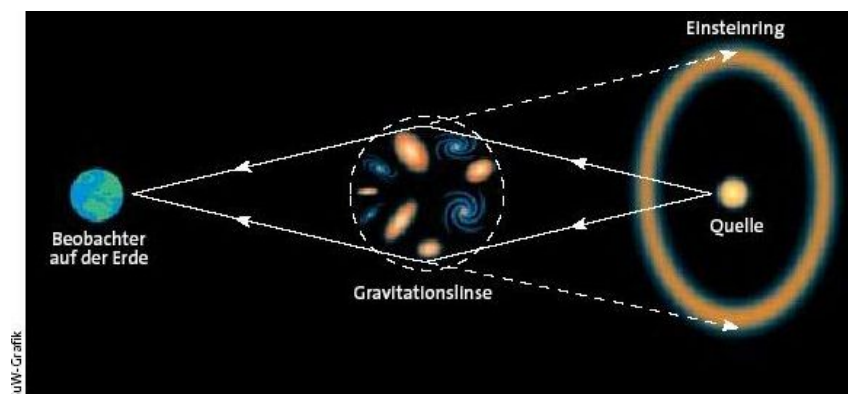


Abbildung 5: Schematische Darstellung einer Gravitationslinse (aus [1]). Hier handelt es sich um einen sogenannten „Einsteinring“

Strahlen, die mit unterschiedlichem Abstand an dem massereichen Objekt vorbeilaufen, werden unterschiedlich stark abgelenkt. Das Bild der Lichtquelle hinter der Gravitationslinse wird also

verzerrt oder vervielfältigt, die Linse wirkt astigmatisch. Man unterscheidet zwischen Microlensing (sehr geringe Ablenkung des Lichts durch einzelne Sonnen), starkem Gravitationslinseneffekt und dem schwachen Gravitationslinseneffekt. Beim selten beobachteten, starken Effekt werden durch die starke Ablenkung gleich mehrere Bilder des Ausgangsobjekts erzeugt, man erhält z.B. einen Einsteinring oder ein Einsteinkreuz [s. Abb. 6].

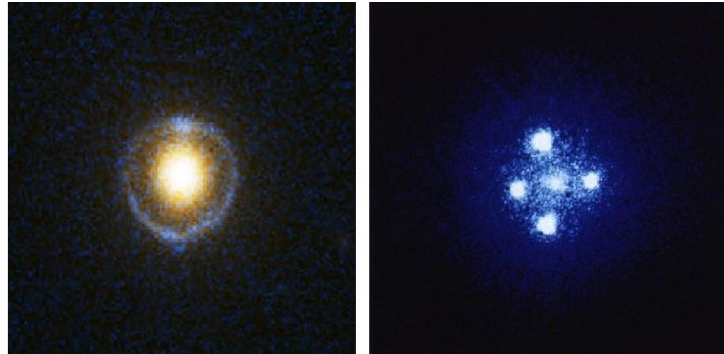


Abbildung 6: Resultate des starken Gravitationslinseneffekts: Einsteinring und Einsteinkreuz (aus [3])

Viel öfters als der starke tritt der schwache Gravitationslinseneffekt auf, der die Ausgangsbilder nur schwach verstärkt oder schwach verzerrt. Da er aber so häufig vorkommt, ist er zu einem wichtigen Beobachtungswerkzeug für die moderne Astronomie geworden.

Nun will man den Grad der messbaren Verzerrung mit der Verteilung der Masse in der Gravitationslinse miteinander in Verbindung setzen. Da Galaxien in der Regel nicht kreisrund sind, muss man dazu über mehrere, sich überlagernde, Bilder von verschiedenen Galaxien mitteln, damit man in der Summe ein Bild erhält, das ohne die Wirkung der Gravitationslinse ungefähr rund wäre. An diesem Bild kann man dann die eventuelle Verzerrung ablesen und Karten der Materieverteilung in der Gravitationslinse erstellen.

Ein Lichtstrahl, der im Abstand ξ an einer Punktmasse $M(\xi)$ vorbei läuft, wird um den Winkel α abgelenkt:

$$\alpha(\xi) = \frac{4GM(\xi)}{c^2} \frac{1}{\xi} \quad (2)$$

Durch verschiedene Messungen kann man nun den Winkel und daraufhin die Masse der Gravitationslinse bestimmen.

Ein Beispiel [s. Abb. 7]: Betrachte nun den etwa drei Milliarden Lichtjahre entfernten Galaxienhaufen 1E0657.556. Dabei handelt es sich eigentlich um zwei Haufen, die vor etwa 100 Millionen Jahren zusammengestoßen sind. Das Bild beinhaltet sowohl links und rechts die beiden Haufen, die ungehindert aneinander vorbeiziehen konnten, als auch mittig die beiden Plasmawolken, die aufgrund starker Wechselwirkung nicht mehr zu unterscheiden sind und die die Hauptmasse der sichtbaren Materie ausmachen. Zusätzlich zeigt es aber auch die Verteilung der gravitierenden Masse (blau) im Doppelhaufen an. Man muss feststellen, dass der Hauptanteil der Materie deutlich außerhalb des Plasmas liegt und somit eine dritte Komponente - die Dunkle Materie - darstellt, die maßgeblich für den Gravitationslinseneffekt ist. Diese Komponente bewegte sich nach dem Zusammenstoß der Haufen mit den Galaxien ungestört weiter.



Abbildung 7: Kollision zweier Galaxienhaufen. Analysen des Gravitationslinseneffekts ergeben dieses Bild; die Verteilung der gravitierenden Materie ist in blau dargestellt (aus [1])

2 Mögliche Kandidaten für die DM

Um eine erste Idee für die Art der Dunklen Materie zu erhalten, betrachtet man zunächst den Mikrowellenhintergrund. Dieser hat minimale Intensitätsschwankungen, welche vermutlich Dichteschwankungen im frühen Universum anzeigen, die dann durch ihre Eigengravitation zu den jetzigen schwamm- und filamentartigen Strukturen des Universums heranwachsen konnten [s. Abb. 8].

Wäre die Dunkle Materie jedoch ähnlich beschaffen, wie die gewöhnliche Materie, so könnten sich die winzigen Dichteschwankungen kaum innerhalb den 13,7 Mrd. Jahren zu den heutigen Strukturen entwickeln. Daraus resultiert die Annahme, dass sich die DM aus Elementarteilchen zusammensetzt, die nur schwach mit normaler Materie wechselwirken und nicht mit Licht. Denn dann würden die Dichtefluktationen erheblich stärker heranwachsen, als es der Mikrowellenhintergrund verrät, weil sie dann aufgrund fehlender direkter Wechselwirkung weit schwächere Spuren in der Strahlung hinterlassen hätten, als es gewöhnliche Materie tut.

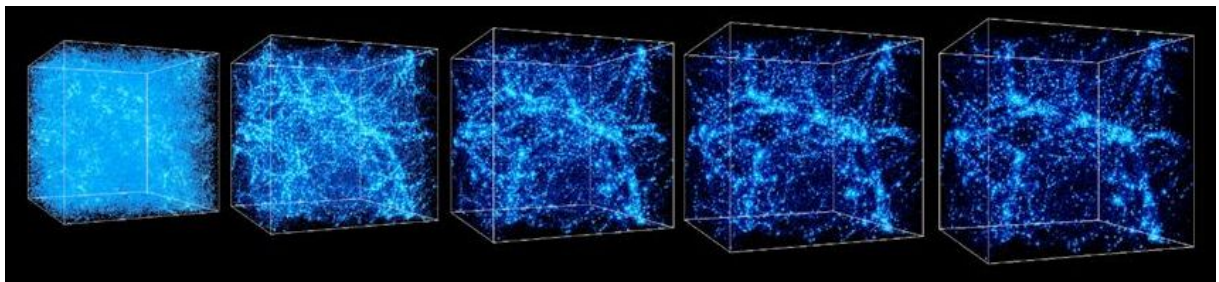


Abbildung 8: Simulation zur Strukturbildung (aus [4]).

$\Omega_{\text{tot}} h^2 \approx 1$	$\Omega_{\text{Materie}} h^2 \approx 0.3$	$\Omega_{\text{Baryonisch}} h^2 \approx 0.03$	$\Omega_{\text{hell}} h^2 \approx 0.003$
			$\Omega_{\text{dunkel}} h^2 \approx 0.03$
		$\Omega_{\text{Nicht-baryonisch}} h^2 \approx 0.3$	$\Omega_{\text{HDM}} h^2 < 0.01$ Leichte Neutrinos
			$\Omega_{\text{CDM}} h^2 \approx 0.3$ WIMPs, Axionen
$\Omega_{\text{Vakuumenergie}} h^2 \approx 0.7$			

Abbildung 9: Die Anteile der verschiedenen Komponenten am Universum (aus [8]).

2.1 Baryonische Materie

Mögliche Kandidaten für baryonische dunkle Materie sind MACHOS (Massive Compact Halo Objects). Dazu zählen:

- Braune Zwerge
 - Objekte mit $m < 0,1$ Sonnenmassen, also zu geringe Masse, um eine Wasserstofffusion auszuführen
 - schwer beobachtbar, senden kein sichtbares Licht, nur Infrarotstrahlung, aus (da sie nur eine Oberflächentemperatur von 25-170 °C besitzen).
 - guter Kandidat für die DM, da sie klein und häufig sind, tragen laut Ergebnissen (2008) zu 10% der Gesamtmasse an Baryonen bei
- Neutronensterne, Schwarze Löcher (BH)
 - Endzustand der Entwicklung sehr massereicher Sterne (bei Neutronensternen oder stellaren Schwarzen Löchern), Endprodukt von Sternkollisionen und -verschmelzungen (bei mittelschweren BH)
 - aufgrund ihrer sehr hohen Dichten und Massen könnte sehr viel Dunkle Materie in ihnen verborgen sein
 - Problem: Massereiche Sterne erzeugen mittels Kernfusion schwere Elemente, welche durch Supernova-Explosionen an den Raum zurückgegeben werden. Die beobachtete Menge an schweren Elementen deutet jedoch auf eine zu geringe Gesamtzahl der Supernova-Explosionen hin, sodass nicht genügend Neutronensterne und Schwarze Löcher gebildet werden konnten, um die DM zu erklären.
- Weiße Zwerge
 - ein Weißer Zwerg ist ein kleiner massearmer Stern im Endstadium seiner Entwicklung ($0,5M \leq m \leq 1,2M$), der nur eine sehr kleine Leuchtkraft aufweist (aufgrund der kleinen Oberfläche; ungefähr Erdgröße)
 - Problem: das Alter des Universums reicht vermutlich nicht aus, um genügend Weiße Zwerge hervorzubringen, die benötigt wären, um die DM zu erklären, da sie eine Entwicklungszeit von mehreren Mrd. Jahren benötigen.

2.2 Nichtbaryonische Materie

Wie wir aufgrund der vorherigen Betrachtung der Hintergrundstrahlung feststellen können, muss der Großteil der Dunklen Materie jedoch aus nichtbaryonischer Materie bestehen. Also nimmt man an, dass die Dunkle Materie aus Elementarteilchen mit schwacher WW besteht. Man kann nun unterscheiden zwischen heißer und kalter DM und Axionen (hypothetisches Elementarteilchen, das zur Lösung eines Problems aus der Quantenchromodynamik führen würde.)

- Heiße DM (Schnelle, heiße WW-arme Teilchen). Ein Kandidat hierfür wären die Neutrinos, aber ihre maximale Masse reicht nicht aus, um die Frage um die DM zu klären. Ein weiteres Problem: würde das Universum zum Großteil aus heißer DM bestehen, so hätte das für den Strukturierungsprozess zur Folge, dass erst Galaxienhaufen, danach Galaxien und Sterne entstanden wären. Dies ist jedoch ein Widerspruch zu den heutigen Erkenntnissen.
- Kalte DM (WIMPS, Weakly interacting massive particles). Hierfür hat man bisher noch keine Elementarteilchen entdeckt, ist jedoch auf der Suche nach ihnen. Ein Teilchen aus der Supersymmetrietheorie, das LSP, käme dafür in Frage.

3 MOND - eine Alternativlösung

Eine Alternativlösung zur Dunklen Materie stellt die von Milgrom vorgeschlagene Theorie MOND (Modifizierte Newton'sche Mechanik) dar. Diese eher umstrittene Theorie löst das Massenproblem dadurch, in dem es das Newtonsche Gravitationsgesetz von der Beschleunigung abhängig macht. Demnach gilt:

$$F = m \cdot a \cdot \mu\left(\frac{a}{a_0}\right), \quad \text{mit} \quad \mu(x) = \begin{cases} 1 & \text{für } x \gg 1 \\ x & \text{für } x \ll 1 \end{cases} \quad (3)$$

Der altbekannte Newtonsche Ausdruck ist also eine gute Näherung für Beschleunigungen, die sehr viel größer als 0 sind. Zwischen den Sternen ist die Gravitationswechselwirkung jedoch sehr klein, es würde also das modifizierte Gravitationsgesetz gelten. Milgrom bestimmte für die Konstante a_0 anhand vieler Messungen einen Wert von $a_0 = 1,2 \cdot 10^{-10} \frac{m}{s^2}$.

Bei großer Entfernung vom Galaxienzentrum ($a < a_0$) würde sich nun ergeben:

$$F = m \cdot a \cdot \mu\left(\frac{a}{a_0}\right) = m \cdot a \cdot \frac{a}{a_0} = \frac{GMm}{R^2} \quad (4)$$

$$\frac{a^2}{a_0} = \frac{GM}{R^2}, \quad a = \sqrt{\frac{GM \cdot a_0}{R^2}} = \frac{v^2}{R} \quad (5)$$

$$\Rightarrow v^2 = \sqrt{GM \cdot a_0} \quad (6)$$

Die Geschwindigkeit wäre nun also konstant. Diese Theorie ist jedoch sehr umstritten, denn eine Modifikation des Gravitationsgesetzes allein würde z.B. Abbildung [7] nicht erklären.

4 Literaturverzeichnis

- [1] Bartelmann, Steinmetz, Dem Dunklen Universum auf der Spur, Sterne und Weltraum, 08/2010
- [2] van Albada, Bahcall, Begeman, Sancisi, Distribution of dark matter in the spiral galaxy NGC 3198, 08/1985, 1985ApJ...295..305V
- [3] <http://hubblesite.org/gallery/album/exotic/pr2005032g/> Einsteinring
<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/1990/20/image/a/> Einsteinkreuz
- [4] <http://www.desy.de/troms/teaching/WiSe1011/index.html>
- [5] <http://www.astro.uni-bonn.de/deboer/pdm/pdmdmtxt.html#braunezwerge>
- [6] Astronomie – Planeten, Sterne, Galaxien. GEO Bibliographisches Institut und F.A. Brockhaus AG GEO Themenlexikon. Bd 5. GEO, Mannheim 2007
- [7] http://ned.ipac.caltech.edu/level5/Sept01/Milgrom2/Milgrom_contents.html
- [8] Eibofner, Nicht-Baryonische Dunkle Materie, 03/2004