

Kapitel 8

Dunkle Materie

8.1 Hinweise auf Dunkle Materie

Die kosmologischen Parameter: In Tabelle 2.3 in Abschnitt 2.5.5 sind die kosmologischen Parameter nach unserem heutigen Kenntnisstand zusammengestellt. Die wesentlichen Ergebnisse sind (Tabelle 8.1, Abb. 8.1):

- Das Universum ist flach: $\Omega \approx 1$.
- Die Materie trägt nicht dominant zur Gesamtdichte bei: $\Omega_M \approx 27\%$.
- Der größte (und am wenigsten verstandene Anteil) ist die ‘Dunkle Energie’: $\Omega_\Lambda \approx 73\%$.
- Von dem Materieanteil ist nur ein geringer Teil ‘normale’, baryonische Materie: $\Omega_B \approx 5\%$.
- Der tatsächlich sichtbare leuchtende Teil ist wiederum etwa eine Größenordnung kleiner: $\Omega_{vis} \approx 0.5\%$.
- Der überwiegende Materieanteil ist ‘Dunkle Materie’: $\Omega_{DM} \approx 23\%$.

Bei der Dunklen Materie (DM) unterscheidet man ‘kalte Dunkle Materie’ (Cold Dark Matter, CDM) und ‘heiße Dunkle Materie’ (Hot Dark Matter, HDM): ‘kalt’ bedeutet, dass die DM aus nicht-relativistischen ($v \ll c$), meistens schweren Teilchen



Abbildung 8.1: Anteile der Energie/Massen-Dichte an der Gesamtdichte des Universums, die etwa gleich der kritischen Dichte (siehe (2.16, 2.18)) ist.

Tabelle 8.1: Beiträge zur Energie/Massen-Dichte des Universums relativ zur kritischen Dichte ($\Omega = \rho/\rho_c$).

Gesamtdichte:	$\Omega = 1.02 \pm 0.02$
Dunkle Energie:	$\Omega_\Lambda = 0.73 \pm 0.04$
gesamte Materie:	$\Omega_M = 0.27 \pm 0.04$
baryonische Materie:	$\Omega_B = 0.046 \pm 0.002$

besteht, während 'heiße' DM aus leichten Teilchen mit relativistischen Geschwindigkeiten, zum Beispiel leichten Neutrinos, besteht. Alle Hinweise deuten darauf hin, dass die DM im wesentlichen 'kalte Dunkle Materie' ist, mit einem kleinen Anteil 'heiße Dunkle Materie', der durch die bekannten Neutrinos mit den experimentelle Massengrenzen gesättigt sein könnte.

Hinweise für Dunkle Materie: Hinweise für Dunkle Materie kommen vor allem von folgenden Analysen:

- Geschwindigkeitsverteilung von Sternen in Galaxien;
- Kinematik von Galaxienhaufen;
- Temperaturfluktuationen der Mikrowellenhintergrundstrahlung;
- Strukturbildung im Universum auf verschiedenen Skalen.

Die verschiedenen Hinweise sollen im Folgenden einzeln diskutiert werden.

Geschwindigkeitsverteilung von Sternen in Galaxien: Aus der Gleichheit von Zentrifugal- und Gravitationskraft für einen Stern mit der Masse m und Geschwindigkeit v auf einer Bahn mit Abstand r vom Zentrum einer Galaxie folgt:

$$\frac{m v^2}{r} = \frac{G m M(r)}{r^2} \quad (8.1)$$

Wobei $M(r)$ die Masse der Galaxie innerhalb der Bahn ist. Für Sterne, die sich am äußeren Rand der Galaxis befinden, sollte danach die Geschwindigkeit wie

$$v \sim \frac{1}{\sqrt{r}} \quad (8.2)$$

abfallen. Tatsächlich beobachtet man aber für große r

$$v \rightarrow \text{const}, \quad (8.3)$$

wie am Beispiel des Andromeda-Nebels in Abb. 8.2 gezeigt wird. Dieses Verhalten kann durch einen Halo von dunkler Materie mit einem Dichteprofile $\sim 1/r^2$ und einer Ausdehnung weit über die Galaxis hinaus erklärt werden (Abb. 8.3). Dieser Halo müsste dann mehr als 2/3 der Gesamtmasse der Galaxis haben.

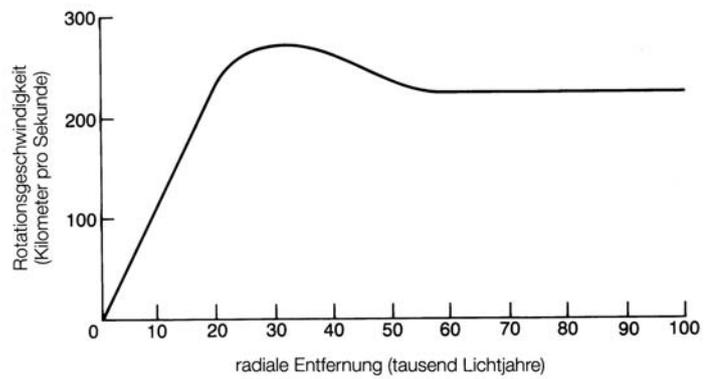


Abbildung 8.2: Oben: Geschwindigkeitsverteilung von Sternen im Andromeda-Nebel als Funktion des Abstandes vom Zentrum der Galaxis. Unten: Andromeda-Nebel.

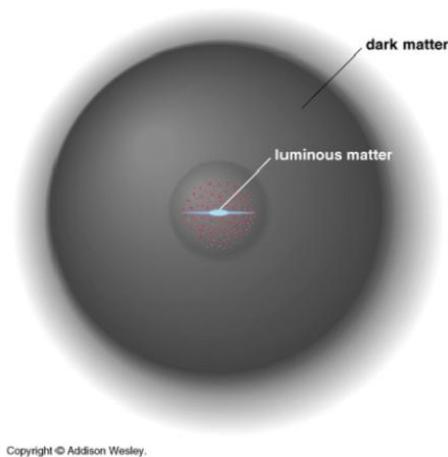


Abbildung 8.3: Schematische Darstellung des DM-Halos um eine Galaxis.

Kinematik von Galaxienhaufen: Es gibt großräumige Anhäufungen von Galaxien, auf die man den Virialsatz anwenden kann. Dieser Satz gibt einen Zusammenhang zwischen den mittleren kinetischen und potentiellen Energien der Galaxien, vorausgesetzt, dass das System abgeschlossen ist und sich im mechanischen Gleichgewicht befindet:

$$2 \langle E_{kin} \rangle + \langle E_{pot} \rangle = 0 \quad (8.4)$$

Die entsprechenden Analysen der Galaxienbewegungen deuten ebenfalls darauf hin, dass es einen erheblichen Anteil dunkler Materie gibt.

Als erster beobachtete Fritz Zwicky 1933, dass der Coma-Haufen (ein Galaxienhaufen bestehend aus etwa 800 Einzelgalaxien) nicht durch die Gravitationswirkung seiner sichtbaren Bestandteile (im wesentlichen der Sterne der Galaxien) zusammengehalten wird. Er stellte fest, dass das 400-fache der sichtbaren Masse notwendig ist, um den Haufen gravitativ zusammenzuhalten. Seine Hypothese, dass diese fehlende Masse in Form Dunkler Materie vorliege, stieß in der Fachwelt auf breite Ablehnung.

Temperaturfluktuationen der Mikrowellenhintergrundstrahlung: In Abschnitt 2.5 wurde diskutiert, dass sich aus der Analyse der Mikrowellenhintergrundstrahlung die Existenz von Dunkler Materie ergibt. Die Werte in Tabelle 8.1 basieren im Wesentlichen auf diesen Analysen. Der physikalische Grund für die hohe Sensitivität der CMB-Fluktuationen kann anhand der Abb. 2.17 erklärt werden: das Gravitationspotential, in dem die Photon-Baryon-Flüssigkeit schwingt, wäre ohne DM nicht tief genug. Die Schärfe der Fluktuationsstrukturen bis zu sehr kleinen Skalen deutet darauf hin, dass die DM im Wesentlichen ‘kalt’ sein muss.

Strukturbildung im Universum: Strukturbildung im Universum auf verschiedenen Skalen deutet darauf hin, dass zusätzliche, gravitativ wechselwirkende Materie notwendig ist. Der Vergleich der Simulationen von Strukturbildung im Universum (Abb. 8.4), die sich wegen dem großen Rechenaufwand noch im Anfangsstadium befinden, mit beobachteten Galaxienverteilungen (Abb. 8.5) deuten auch darauf hin, dass die DM dominant ‘kalt’ sein muss.

8.2 Kandidaten und ihre Eigenschaften

Es gibt viele mehr oder weniger exotische Kandidaten für die Dunkle Materie, zum Beispiel:

- Neutrinos,
- WIMPs,
- Axionen,
- Topologische Raum-Zeit-Defekte.

Alternativ wurde untersucht, ob man auch mit normaler baryonischer Materie die Beobachtungen, insbesondere die Bewegung astronomischer Objekte, erklären kann:

- Machos
- Modifikation der Gravitationstheorie

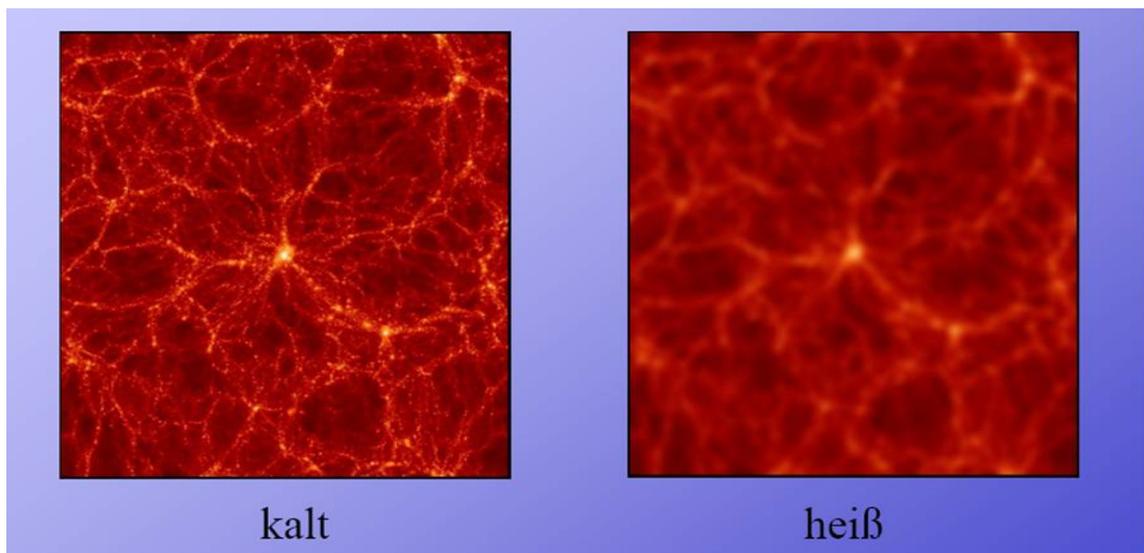


Abbildung 8.4: Simulationen von Strukturbildung in einer Massendichteverteilung auf Grund der Gravitationswechselwirkung.

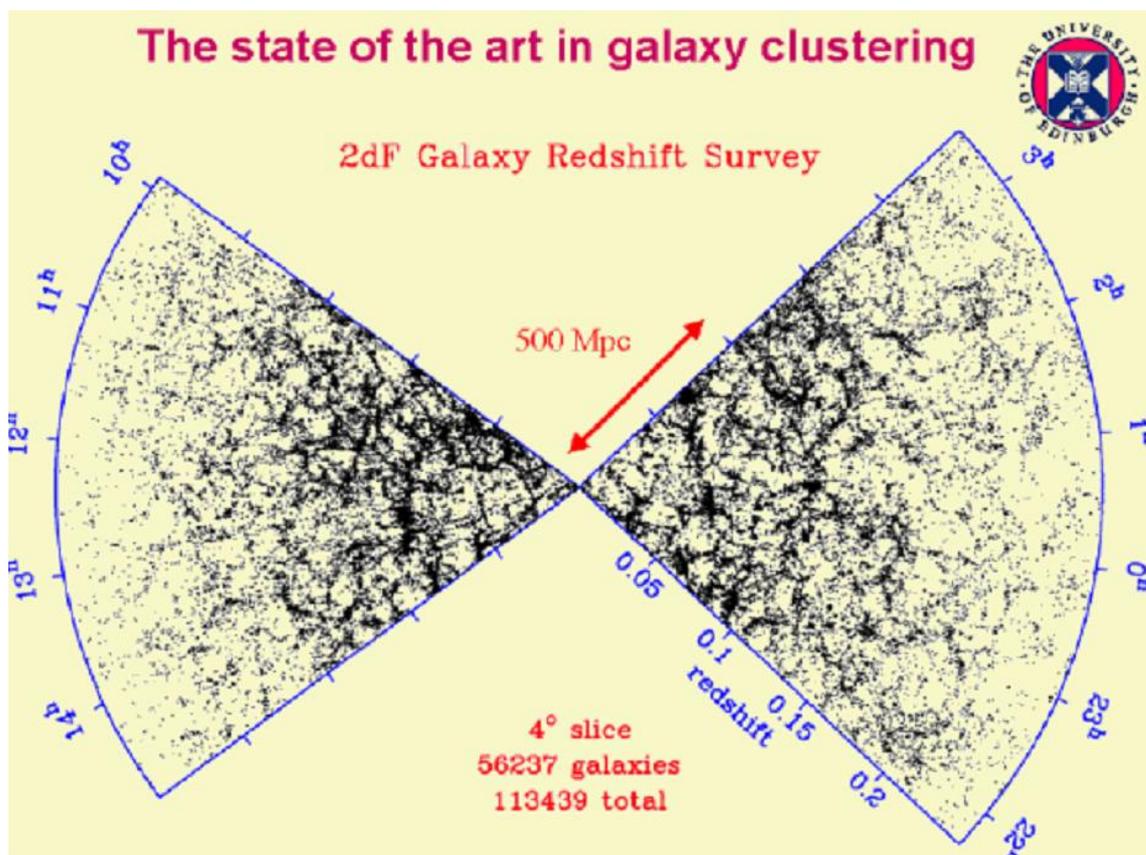


Abbildung 8.5: Beobachtete Verteilung der Galaxien im Universum.

8.2.1 Neutrinos

Wenn Neutrinos Masse haben, ist die Neutrino Hintergrundstrahlung ein guter Kandidat, um wenigstens einen Teil der dunklen Materie, als heiße DM, zu erklären. Massen im Sub-eV-Bereich, wie sie von den Analysen der Neutrino-Oszillationen nahegelegt werden, sind mit einem kleinen Beitrag zur DM verträglich. Es verbleibt ein größerer Anteil, der ‘kalt’ sein muss.

Bestünde die Dunkle Materie zum größten Teil aus schnellen leichten Teilchen, heißer Dunkler Materie, hätte das für den Strukturierungsprozess im Universum ein so genanntes Top-Down-Szenario zur Folge: Dichteschwankungen wären zuerst auf großen Skalen kollabiert, es hätten sich erst Galaxienhaufen, dann Galaxien, Sterne usw. gebildet. Im Widerspruch dazu zeigen Altersbestimmungen von Galaxien, dass sie vorwiegend alt sind, während manche Galaxienhaufen sich gerade im Entstehungsprozess befinden. Ein Bottom-Up-Szenario, eine hierarchische Strukturentstehung, gilt als erwiesen. Daher kann heiße Dunkle Materie allenfalls einen kleinen Teil der gesamten Dunklen Materie ausmachen.

8.2.2 WIMPs

‘Weakly Interacting Massive Particles’ mit Massen bis zu einigen 100 GeV sind die am meisten favorisierten Kandidaten für DM. Es sollte sich um Teilchen handeln, die nach dem Urknall aus dem thermodynamischen Gleichgewicht zwischen Erzeugung und Vernichtung entkoppelten. Da im Standardmodell der Teilchenphysik Teilchen mit den passenden Eigenschaften (schwer, stabil, sehr schwach wechselwirkend, ...) nicht zur Verfügung stehen, gehören die WIMP-Kandidaten zum Bereich ‘Jenseits des Standardmodells’, zum Beispiel ist das leichteste supersymmetrische Teilchen (lightest supersymmetric particle, LSP) ein favorisierter Kandidat.

SUSY-Teilchen als WIMPs

Warum Supersymmetrie? Die Supersymmetrie (SUSY) ist eine Symmetrie zwischen Fermionen und Bosonen, mit der Eigenschaft, Raum-Zeit-Symmetrien mit inneren Symmetrien von Teilchen vereinen zu können. Obwohl sie bereits Anfang der 1970iger Jahre entwickelt wurde (Wess, Zumino) und es bisher keine experimentellen Belege für eine supersymmetrische Natur gibt, werden supersymmetrische Szenarien sehr ernst genommen, weil diese Theorie offene Fragen der Teilchenphysik beantworten könnte. Hier sollen nur kurz in Stichworten die wichtigsten Argumente zusammengefasst werden:

- SUSY beseitigt mathematische Inkonsistenzen im Standardmodell: unphysikalische Divergenzen, die auf der TeV-Skala zum Tragen kämen, heben sich durch Hinzunahme supersymmetrischer Diagramme weg.
- Die laufenden Kopplungskonstanten der elektromagnetischen, schwachen und starken Wechselwirkungen treffen sich in einem Punkt, der Vereinigungsskala M_{GUT} , allerdings erst wenn man die Supersymmetrie hinzunimmt treffen sich alle drei genau in einem Punkt. Der Vereinigungspunkt rutscht mit SUSY höher, auf $M_{GUT} \approx 2 \cdot 10^{16}$ GeV.

Teilchen und ihre supersymmetrischen Partner (SUSY)			
Spin	Normales Teilchen	Superpartner	Spin
1/2	Leptons (e, ν_e , ...) Quarks (u, d, ...)	Sleptons (\tilde{e} , $\tilde{\nu}_e$, ...) Squarks (\tilde{u} , \tilde{d} , ...)	0
1	Gluons W^\pm Z^0 Photon (γ)	Gluinos Wino Zino Photino ($\tilde{\gamma}$)	1/2
0	Higgs	Higgsino	1/2
2	Graviton	Gravitino	3/2

Abbildung 8.6: Die elementaren Teilchen im Standardmodell und ihre SUSY-Partner.

- Durch das Verschieben der GUT-Skala zu höheren Werten verschiebt sich die theoretische Erwartung der Protonlebensdauer nach oben und wird mit den experimentellen Grenzen verträglich.
- SUSY scheint eine Voraussetzung für eine Quantentheorie der Gravitation zu sein (String-Theorien sind supersymmetrisch).

SUSY-Teilchenspektrum: Die Fermion-Boson-Symmetrie impliziert, dass es zu jedem Teilchen des Standardmodelllls einen SUSY-Partner gibt, dessen Spin sich gerade um 1/2 unterscheidet. Dadurch hat ein Fermion ein Boson als Partner und umgekehrt (Abb. 8.6). SUSY wäre eine exakte Symmetrie, wenn die Massen der Partner gleich wären. Die experimentelle Grenzen zeigen aber, dass die Massen erheblich größer sein müssen (zumindest für die leichten Fermionen), so dass die Symmetrie gebrochen ist.

Der geringe Einfluss, den SUSY in dem uns zur Zeit zugänglichen Energiebereich hat, kann, neben den hohen Massen, dadurch erklärt werden, dass es eine erhaltene Quantenzahl gibt, die R-Parität, die nur assoziierte Produktion von SUSY-Teilchen erlaubt. Dann sollte das leichteste SUSY-Teilchen (LSP, lightest supersymmetric particle) stabil sein. Die besten Kandidaten für das LSP sind das Neutralino und das Gravitino. Das Neutralino, Symbol χ , ist im allgemeinen eine Linearkombination aus den vier neutralen Spin-1/2 SUSY-Teilchen Photino, Zino und zwei Higgsinos. Das Gravitino ist der Superpartner des Gravitons. An Beschleunigern ist bisher erfolglos nach dem LSP gesucht worden, was je nach Modell LSP-Massen bis etwa zur Z^0 -Masse ausschließt.

LSP-Eigenschaften: Das LSP ist einer der möglichen Kandidaten für Dunkle Materie (durchaus bemerkenswert, dass es dafür aber nicht erfunden wurde). Bei genügend hohen Temperaturen nach dem Urknall hat es sich im thermodynamischen Gleichgewicht zwischen Erzeugung und Vernichtung befunden:

$$\chi + \bar{\chi} \leftrightarrow X_i \bar{X}_i, \quad (8.5)$$

wobei $X_i\bar{X}_i$ Teilchen-Antiteilchen-Paare (i steht für verschiedene Teilchen) sind. Entsprechend der Diskussion in Abschnitt 2.2.2, entkoppeln die LSPs aus dem Gleichgewicht, wenn die Reaktionsrate Γ kleiner als die Expansionsrate H des Universums wird (2.44): $\Gamma < H$. Nach (2.43) hängt die Reaktionsrate von Wirkungsquerschnitt σ , Teilchendichte n , Teilchengeschwindigkeit v ab:

$$\Gamma = n \langle \sigma v \rangle \quad (8.6)$$

Bei einem gegebenen Wirkungsquerschnitt und einer LSP-Masse (die in die Boltzmann-Verteilung des thermischen Gleichgewichts eingeht, vergleiche dazu die Diskussion der Nukleosynthese in Abschnitt 2.4) lassen sich aus der Expansionsrate die heutige WIMP-Dichte, die Temperaturverteilung und daraus die Reaktionsrate berechnen.

Nachweis: Folgende Möglichkeiten zum Nachweis von SUSY-WIMPs werden verfolgt:

- WIMPs können mit sich selbst annihilieren, bei der Annihilation entsteht Vernichtungsstrahlung oder ein Teilchen-Antiteilchen-Paar. Deshalb wird in der Kosmischen Strahlung nach entsprechenden Signalen von Antiteilchen (Positronen und Antiprotonen) und hochenergetischen Gammas gesucht (Abschnitt 8.3.3).
- WIMPs sollten elastische Stöße mit normaler Materie machen. Danach wird mit sehr empfindlichen Detektoren gesucht (Abschnitt 8.3.2).
- In den Beschleunigern mit den höchsten Energien wird nach der Produktion von SUSY-Teilchen gesucht. Das LSP sollte als stabiles, sehr schwach wechselwirkendes Teilchen mit der Signatur ‘fehlende Energie’ zu erkennen sein (Abschnitt 8.3.5).

8.2.3 Axionen

Axionen sind Teilchen, die postuliert wurden, um die Abwesenheit von CP-Verletzung in der Starken Wechselwirkung zu erklären (Peccei-Quinn-Mechanismus, 1977). Der Hintergrund in Kürze: in der Starken Wechselwirkung tritt eine Phase auf, die zu CP-verletzenden Effekten (zum Beispiel nichtverschwindendes elektrisches Dipolmoment des Neutrons) führen müsste. Die experimentellen Grenzen für solche Effekte bedeuten, dass die Phase sehr nahe oder gleich Null sein muss (aus den Messungen elektrischer Dipolmomente des Neutrons und von Kernen folgt für die Phase $\theta < 4 \cdot 10^{-10}$). Da es als ‘unnatürlich’ angesehen wird, dass eine Naturkonstante zufällig mit hoher Genauigkeit einen ausgezeichneten Wert annimmt, hat man nach einer Symmetrie gesucht, die die Phase natürlicherweise zu Null macht und auch gegen Korrekturen höherer Ordnung ‘schützt’. Diese Symmetrie ist eine $U(1)$ -Symmetrie, die allerdings ein zusätzliches Teilchen (Goldstone-Boson) mit sich bringt, das Axion.

Das Axion ist ein neutraler Pseudoskalar ($J^P = 0^-$) und ähnelt damit dem neutralen Pion, hat aber nur eine sehr kleine Masse von etwa $10^{-3} \dots 10^{-6}$ eV. Wie das π^0 zerfällt das Axion in zwei Photonen:

$$A^0 \rightarrow \gamma\gamma \quad (8.7)$$

Die Kopplung an die Photonen ist sehr schwach (über Loop-Diagramme, Abb. 8.14b) und damit die Lebensdauer des Axions lang (vergleichbar mit schwachen Zerfällen). Axionen könnten in Sternen in ähnlicher Rate wie Neutrinos produziert werden (über den Primakoff-Effekt, siehe unten) und damit zu der DM beitragen. Aus dem Produktionsprozess in Sternen würden sie als kalte DM hervorgehen. Wenn, wie meistens angenommen, ihre Lebensdauer kurz gegen das Alter des Universums ist, dann gäbe es praktisch keine HDM-Axionen mehr, die aus dem thermischen Gleichgewicht nach dem Urknall hervorgegangen wären.

8.2.4 Topologische Raum-Zeit-Defekte

Durch die spontane Brechung der GUT-Symmetrien sollten topologische Defekte wie Monopole, kosmische Strings, Domänenwände, usw. entstanden sein. Zur Zeit sind solche Objekte zur Erklärung von DM wenig aktuell, weil die experimentellen Ausschließungsgrenzen relativ hoch liegen, zum Beispiel für magnetische Monopole.

8.2.5 Machos

Wenn man glaubt, nicht-baryonische Materie einführen zu müssen, um die DM zu erklären, sollte man zunächst verstehen, was zum Beispiel in unserer Galaxis an nicht-leutender, normaler baryonischer Materie vorhanden ist. Eine Klasse, die zu solcher Materie beiträgt, sind ‘massive compact halo objects’, MACHOs, zu denen zum Beispiel Braune Zwerge gehören. Experimente zur quantitativen Bestimmung der Häufigkeit und Massen solcher Objekte in dem Halo der Milchstraße, die weiter unten diskutiert werden, ergaben, dass diese Objekte nicht ausreichen, um die DM-Effekte zu erklären.

8.2.6 Modifikation der Gravitationstheorie:

Alternativ wurde untersucht, ob man auch mit normaler baryonischer Materie die Beobachtungen, insbesondere der Bewegung astronomischer Objekte, erklären kann. Durch Änderung des Newton’schen Gesetzes der Gravitationskraft kann man die mit der sichtbaren Materie korrelierten kinematischen Inkonsistenzen, wie die Rotationskurven in Galaxien und die Bewegungen in Galaxienhaufen, ohne zusätzliche nicht-baryonische Materie erklären. Die Modifikation des Gravitationsgesetzes hat aber so weitreichende Implikationen, dass noch nicht klar ist, ob zum Beispiel die experimentellen Befunde zur Sternentstehung und zu den CMB-Fluktuationen einer MOND-Theorie (‘Modified Newtonian Dynamics’) widersprechen.

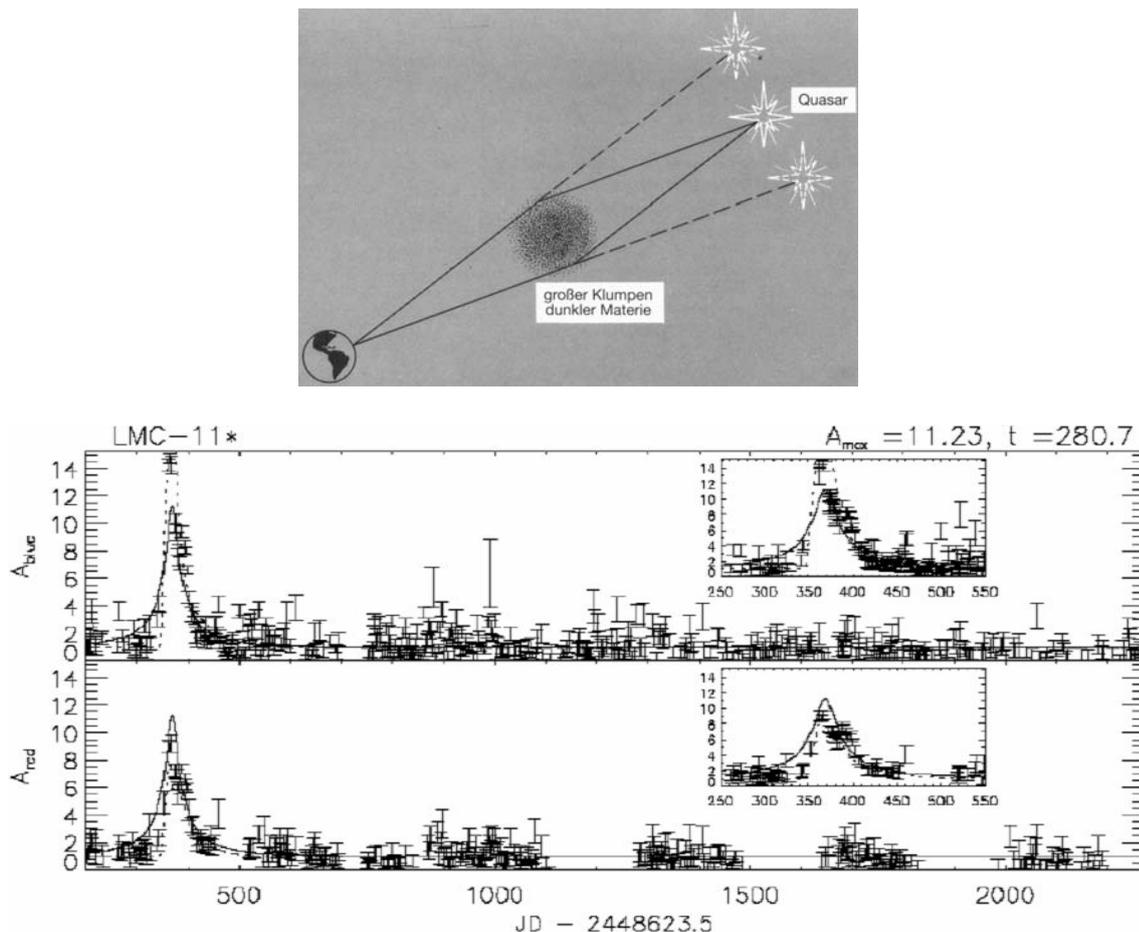


Abbildung 8.7: Die Wirkung einer Gravitationslinse zum Nachweis kompakter Dunkler Materie. Oben: Das Licht einer entfernten Quelle kann durch das Gravitationsfeld eines massiven Objektes, das eventuell sonst nicht zu sehen wäre, fokussiert werden. Unten: Lichtkurven von einem in der großen Magellanschen Wolke beobachteten Stern im blauen und roten Spektralbereich. Das simultane Aufleuchten mit gleicher Stärke in beiden Lichtkurven entspricht der Erwartung, wenn ein massives Objekt in der Milchstraße vor dem Stern vorbeifliegt.

8.3 Nachweis von Dunkler Materie

8.3.1 Machos

Mit Hilfe des Gravitationslinseneffekts haben die Experimente MACHO und EROS versucht, die Machos gegen hell leuchtende extragalaktische Objekte zu beobachten (siehe Abb. 8.7 oben). Es gibt inzwischen mehrere gut belegte Macho-Kandidaten (Abb. 8.7 unten). Allerdings würden diese Halo-Objekte baryonische Materie sein, und damit nicht die fehlende nicht-baryonische Materie erklären.

Das Ergebnis des MACHO-Experimentes nach 5.7 Jahren Suche mit einem auf der Erde stationierten Teleskop: die Beobachtung von 11.9 Millionen Sternen in der großen Magellanschen Wolke, jeweils über eine Zeit von 34 bis 230 Tagen, ergab 13 bis 17 Macho-Ereignisse, die alle Kriterien erfüllen. MACHOs mit 0.1 bis 1.0