Dunkle Materie: ein Überblick

Peter Wolff
Kontaktadresse: wolff@wolff.ch

14. August 2007

1 Einführung

Es gibt verschiedene, denkbare Formen dunkler Materie, die man (bisher) nicht über ihre elektromagnetische Strahlung sehen kann, sondern nur indirekt über ihre gravitativen Wirkungen:

1. Ferne, „genügend“ geklumpte, „ganz normale“ Materie, die nicht oder nur schwach leuchtet: Z.B. braune oder erkaltete weisse Zwerge, gar nur Steinbrocken oder Neutronensterne und schwarze Löcher bzw. überdichte Massen aller Grössen, wenn sie nicht von gut sichtbaren Akkretionsscheiben umgeben sind; auch Staub und Gas ist nicht immer leicht zu erkennen.
2. Teilchen, die nicht elektromagnetisch wechselwirken, wie z.B. die Neutrini, von denen es zwar sehr viele gibt, die man aber nur mit sehr grossem Aufwand detektieren kann und die zudem beobachtungstechnisch eher mit dem Licht als mit Materie zu vergleichen sind, da sie uns Kunde z.B. aus dem Sonneninnern oder von relativ nahen Supernovae geben können.
3. Spekulative, ziemlich schwere und kosmisch gesehen langlebige Teilchen, die nur gravitativ und allenfalls noch schwach wechselwirken und aufgrund ihrer annahmegemäss schweren Masse schon rein gravitativ zum Klumpen neigen. Solche dunkle Materie nennt man heute meist Dunkle Materie oder präziser exotische, nicht baryonische, dunkle Materie, und ich nenne sie oft einfach Geistermaterie, denn bisher sind die Erfinder dieser Materie den Beweis schuldig geblieben, dass diese Spekulationen mehr als ad-hoc-Annahmen sind; das erinnert halt alles sehr an’s berühmt berüchtigte Phlogiston.

Beobachtungen an Galaxien und Galaxienhaufen weisen aber deutlich auf dunkle Materie hin, mindestens wenn Newtons Gravitationstheorie auch auf kosmischen Skalen gilt bzw. gelten sollte:

2 Die rotationsstabile Galaxiendynamik

Die wichtigsten, gut gesicherten Fakten:

1. Im Aussenbereich von Spiralgalaxien findet man flache Rotationskurven, was schon nach Kepler nicht zu erwarten ist. Damit meint man, dass die Umlaufgeschwindigkeit von Körpern oder Gas ausserhalb der Galaxien(haupt)masse mit dem Abstand nicht wie erwartet abnimmt, sondern etwa konstant bleibt: Insbesondere die 21-cm-Linie des neutralen Wasserstoffs ist gut beobachtbar, und weil es solchen Wasserstoff praktisch überall gibt, erhält man so vollständige Rotationsgeschwindigkeitskurven dieses Gases bis in fernste Aussenbereiche von Galaxien.

2. Es gilt die Tully/Fisher-Regel, wonach die Sättigungsgeschwindigkeit im Aussenbereich einer Galaxie proportional zur vierten Wurzel der Leuchtkraft ist und damit auch zur Masse, falls die Leuchtkraft der Galaxie etwa proportional zu ihrer Masse ist.

3. Die beobachteten Abweichungen von Kepler/Newton beginnen grössenordnungsmässig unterhalb newtonscher Gravitationsbeschleunigungen von $a_0 \sim Hc$, wenn H die Hubblekonstante und c die Lichtgeschwindigkeit ist, was auf eine kosmische Ursache hinweist.

Die Gesamtheit dieser Merkmale nenne ich die **MOND-Artigkeit** der Spiralgalaxiendynamik.

Die wichtigsten Erklärungsansätze:

1. Es gibt einen gigantischen Halo dunkler Materie im Aussenbereich von Spiralgalaxien. Rückschlüsse, ob es sich um normale, baryonische oder exotische Materie handelt, sind aufgrund der beobachteten MOND-Artigkeit der Spiralgalaxiendynamik aber nicht möglich.

2. Newtons Gravitationstheorie ist für „genügend“ kleine Gravitationsbeschleunigungen falsch. Die bis heute mit Abstand erfolgreichste und einfachste, bekannte Alternative ist der MOND-Ansatz von Mordechai Milgrom von 1983. Mit ihm lässt sich die „MOND-Artigkeit“ der Spiralgalaxiendynamik allein mit der Gravitationswirkung der sichtbaren Materie erklären. Es gibt inzwischen auch andere Theorien, die diese MOND-Artigkeit „erklären“ können. Diese sind aber bisher weder bekannt noch anerkannt; eine davon ist meine Weltpotentialtheorie (WPT) [6]. Der beste mir bekannte Überblick zum MOND-Ansatz – mindestens wenn das Fehlen von Formeln nicht stört – stammt von Milgrom selbst und erschien im Spektrum der Wissenschaft im Oktober 2002 [2] (frei im Netz zugänglich ist aber nur der etwas überholte, amerikanische Originalartikel: MOND-PDF). Besonders viele untersuchte Galaxien findet man in [3], und seit 2004 gibt es auch eine relativistische MOND-Version von Bekenstein.

Zusammenfassend kann man sagen, dass man die MOND-Artigkeit der Spiralgalaxiendynamik als einen fast sicheren, himmelsmechanischen Beweis für das Versagen von Newton und damit auch der ART auf galaktischen Skalen bzw. für Gravitationsbeschleunigungen kleiner etwa $a_0 \sim Hc$ ansehen kann, wenn H die Hubblekonstante und c die Lichtgeschwindigkeit ist.

3 Die druckstabile Haufendynamik

Die wichtigsten, gut gesicherten Fakten:

1. Man findet in Haufen generell so grosse Streuungen der Galaxiengeschwindigkeiten, dass die bis heute direkt sichtbare und bekannte Materie nicht ausreicht, um die Haufen zusammenhalten zu können; mindestens bei grossen Haufen gilt dies nicht nur für Newton, sondern auch für MOND. Der älteste Hinweis auf gewaltige Mengen dunkler Materie stammt von solchen Geschwindigkeitsstreuungen im Comahaufen, die Fritz Zwicky Anfang der Dreissigerjahre ermittelt und mit Hilfe des Virialsatzes analysiert hatte [1].

2. Das „Röntgengas“ in Haufen ist generell so heiss, dass die bis heute direkt sichtbare und bekannte Materie nicht ausreicht, um das Gas zusammenzuhalten; dies gilt nicht nur für Newton, sondern auch für MOND. Dieses Röntgengas, die direkt sichtbare Hauptmasse der Haufen, wurde erst Jahrzehnte nach Zwickys obigem Hinweis auf dunkle Materie gefunden.

3. Die Gravitationslinsenmethode ergibt im Allgemeinen eine Gesamtmasse, die unter Zugrundelegung der ART mit obigen, beiden Methoden gut übereinstimmt.

4. Beobachtungen an sich durchdringenden Haufen (Geschosshaufen [4, 5]) belegen, dass es neben den Galaxien und dem heissen Gas in diesen Haufen noch dunkle Materie geben muss, die – wie die Galaxien – von Haufendurchdringungen nichts merkt. Über die Art (baryonisch oder nicht) sagen diese Beobachtungen jedoch nichts aus!

Die obigen Gesamtmassenbestimmungen hängen alle von der verwendeten Gravitationstheorie ab. Insofern sind obige Haufenfakten weniger gut „gesichert“ als die MOND-Artigkeit der Spiralgalaxien, auch wenn seit etwa 10 Jahren bekannt ist, dass auch mit dem MOND-Ansatz in (grossen) Haufen – im Gegensatz zu den Galaxien – nicht alle dunkle Materie „wegerklärt“ werden kann.

Zu beachten ist auch, dass – vor allem verglichen mit der sehr einfachen Situation im Aussenbereich von Galaxien – Haufen sehr komplexe Gebilde sind; man denke beispielhaft an die Kühlströme und Heizeffekte aus der Kernregion. Darum ist es nicht wirklich klar, ob die Annahme, dass sich die Haufen in einem Gleichgewichtszustand befinden, „ausreichend“ gut erfüllt ist. Für Massenbestimmungen über den Linseneffekt spielt das zwar keine Rolle, für Massenbestimmungen aus Geschwindigkeitsstreuungen der Galaxien und aus der Temperatur des heissen Gases und ihrem radialen Verlauf könnte das aber schon eine gewisse Bedeutung haben.

Die wichtigsten Erklärungsansätze:

1. Im Rahmen von Newton gibt es dunkle Materie in einer Menge, die die Masse der bekannten Galaxien und des Gases um etwa einen Faktor sechs übersteigt.
2. Im Rahmen von MOND ist der Bedarf an dunkler Materie zwar kleiner, aber er bleibt bestehen. Sanders – weil er von einer Urknallkosmologie ausgeht – nimmt z.B. massive Neutrini an, die aber letztlich auch nichts anderes als exotische, nicht baryonische Materie sind. Die Situation mit alternativen Gravitationstheorien ohne Urknall, wie der WPT, wurde noch nicht näher untersucht, da sie – wenigstens für die radialen Geschwindigkeitskomponenten – von MOND deutlich abweicht und auch komplexer als MOND ist. Der grosse Vorteil von Theorien ohne Urknall liegt darin, dass sie keine exotische Materie brauchen (siehe unten).

Zusammenfassend kann man sagen, dass es in Haufen vermutlich noch grosse Mengen unsichtbarer Materie geben muss, was im Gegensatz zu (Spiral)Galaxien im Innenbereich grosser Haufen nicht sonderlich erstaunlich ist. Solche Haufen besitzen ja auch einen (oder mehrere?) supermassive, etwa gigasonnenmassenschwere Kerne, was man noch gar nicht sehr lange weiss. Zu bedenken ist auch, bevor sichere Schlüsse möglich werden, dass elliptische Galaxien, von denen es meist einige im Zentralbereich gibt, noch ziemlich schlecht verstanden sind.

4 Die kosmische Waben- oder Filamentstruktur

Diese Strukturen zeigen auch Mikrolinsenuntersuchungen, die zudem zeigen, dass sich die Vorkommen allfälliger Dunkler Materie und der direkt sichtbaren Materie überlappen, was die Strukturbildungsmodelle der Standardtheorie erwarten, da sich die baryonische Materie in den von der hypothetischen, exotischen Materie gebildeten gravitativen Potentialtöpfen sammeln muss. Aber auch alternative Gravitationstheorien mit weniger oder gar keiner dunklen Materie lassen dies erwarten, da durch die Auswertung der Linsenbeobachtungen mit der ART die Linsenwirkungen normaler Materie in diesem Fall im Allgemeinen systematisch unterschätzt werden.

5 Dunkle Materie: ein Muss nur für Urknalltheorien

Aus folgenden Gründen ist die Friedmann/Lemaître-Kosmologie mit Urknall zwingend auf exotische, nicht baryonische, dunkle Materie angewiesen:

1. Im Rahmen des Standardmodells mit Inflation kann die Menge der baryonischen Materie berechnet werden, und sie ist für ein flaches Friedmannall, wie es die Standarddatenabgleiche zwingend verlangen, viel zu klein, weswegen man zusätzliche, nicht baryonische Massen annehmen muss, wenn das Modell widerspruchsfrei sein soll. Allerdings erhält man auch damit die verlangte Flachheit des Friedmannraumes nicht; dazu braucht es einen weiteren ad-hoc-Ansatz, die dunkle Energie, auf die wir hier aber nicht näher eingehen.
2. Für die Strukturbildung reicht die Zeit seit dem Urknall nicht, weil die baryonische Materie erst zu spät mit dem Zusammenklumpen beginnen kann. Exotische Materie, die weder el.magn. noch stark wechselwirkt, kann damit schon früher anfangen und so auch den Baryonen dabei helfen, vor allem, wenn die Baryonengesamtmasse deutlich kleiner ist als die der Geistermaterie. Es gibt aber Beobachtungshinweise, dass man selbst mit solch spekulativen ad-hoc-Annahmen nicht genug Zeit für die Strukturbildung gewinnt.
3. Im Rahmen der Urknalltheorie kann man die beobachtete Grösse der Fluktuationen der Hintergrundstrahlung, die den Dichteschwankungen in der Ursuppe entsprechen und die am Anfange der in 2. genannten Strukturbildung stehen sollen, ohne exotische Dunkelmaterie nicht verstehen, mindestens wenn man die Inflation als gegeben/gesichert annimmt.

Im Rahmen des Urknalldogmas stützen sich 1., 2. und 3. gegenseitig, aber nur wenn man vergisst, dass man ohne die hochspekulative, physikalisch bisher völlig unverstandene Inflation noch nicht einmal die hohe Isotropie der Hintergrundstrahlung verstehen kann.

Zusammenfassend lässt dies nur einen Schluss zu: Die Urknall- bzw. Standardtheorie der Kosmologie ist wegen der Vielzahl zwingend nötiger ad-hoc-Annahmen sehr wahrscheinlich falsch.

6 Schlussfolgerungen

Es kann heute als sicher gelten, dass man exotische oder wenigstens nicht baryonische, dunkle Materie, wie Neutralini oder Neutrini, nur zur Stützung der Urknalltheorie braucht, aber nicht für die Erklärung der Galaxien- und Haufendynamik. Weiter legt die MOND-Artigkeit der Spiralgalaxiendynamik nahe, dass schon Newton auf galaktischen und grösseren Skalen falsch ist, weshalb man die Erforschung von Gravitationstheorien ohne Urknall, die die beobachtete MOND-Artigkeit ohne dunkle Materie erklären können, intensivieren sollte; ein Entwurf einer solchen Theorie existiert in Form der WPT, die im Kern einer Lichtermüdungstheorie entspricht, in der die Rotverschiebung gravitativ durch ein r-proportionales, kosmisches Weltpotential bewirkt wird [6].

Literatur

[1] Fritz Zwicky, Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln, Helvetica Physica Acta 6, 1933, Seiten 110-127

[2] Mordechai Milgrom, Streit um die Dunkle Materie, Oktober 2002, Spektrum der Wissenschaft

[3] Robert H. Sanders u. Stacy S. McGaugh, Modified Newtonian Dynamics as an Alternative to Dark Matter, 30. April 2002, astro-ph/0204521

[4] Marusa Bradac u.a., Strong and weak lensing united III: Measuring the mass distribution of the merging galaxy cluster 1E0657-56, 18. Aug. 2006, astro-ph/0608408

[5] Rainer Kayser, Galaxienhaufenkollision enthüllt Dunkle Materie, 22. Aug. 2006, astronews

[6] Peter Wolff, Weltpotentialtheorie – Kosmologie ohne Urknall und dunkle Materie