

Keine Dunkle Materie in der Milchstraße bis 15kpc - Abschätzung der Gesamtmasse und Spiralarmstrukturen -

Klaus Retzlaff

Zusammenfassung: Auf Basis der Newtonschen Gravitationstheorie erfolgen eine Minimalabschätzung der Gesamtmasse der Milchstraßengalaxie sowie die Bestimmung der radialsymmetrischen Massenverteilung durch Anpassung der berechneten an die gemessene Rotationskurve. Das Modell besteht aus 3 Komponenten, einer punktförmigen Zentralmasse, dem Bulge und der Scheibe. Ein hypothetisch angenommenes Halo aus Dunkler Materie (DM) wird in diesem Modell mit dem Ziel weggelassen, zu ermitteln, ob die Annahme eines Dunklen Halos zur Beschreibung der Rotation der Galaxie überhaupt erforderlich ist. Es wird kein spezifisches Profil der Massenverteilung vorgegeben, dafür wird in äquidistanten Abständen von 1kpc die Massendichte variiert und zwischen diesen Stützstellen interpoliert. Die Ergebnisse zeigen Variationen der Dichteverteilung, die mit den bekannten Spiralarmstrukturen korreliert sind. Durch den Verzicht auf eine Halokomponente ergibt die Simulation eine Untergrenze für die galaktische Masse. Die Simulation führt zu dem Ergebnis, dass die Rotation der Milchstraße für einen Bereich bis 15 kpc allein auf Grund der beobachtbaren baryonischen Materie erklärt werden kann und ein Anteil Dunkler Materie nicht erforderlich ist. Die gemessenen Rotationskurvendaten geben über 12kpc hinaus auf Grund ihrer erheblichen Streuung keine Grundlage für eine sinnvolle Simulation.

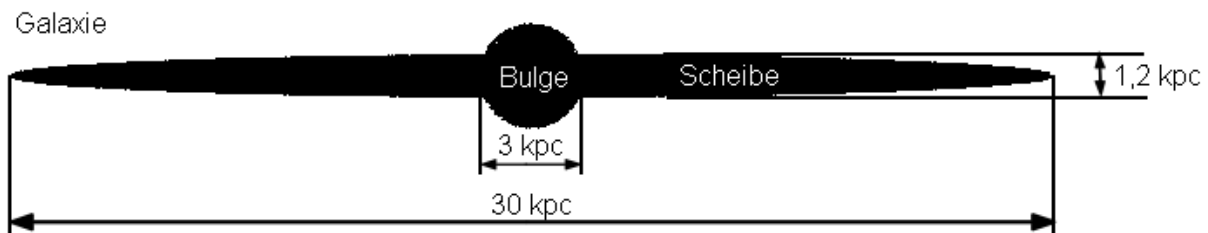


Abbildung 1: Der Aufbau der Milchstraße: Die Daten für die geometrischen Abmessungen wurden der Simulation zugrunde gelegt. Die dritte Komponente des Modells, eine zentrale Masse, ist in dieser Skizze nicht eingezeichnet.

Das Modell

der Milchstraßengalaxie besteht aus 3 Komponenten, einer zentralen Punktmasse, dem kugelförmigen Bulge und der Scheibe. Die Form der Scheibe ist ein Rotationsellipsoid. Bulge und Scheibe definieren das Volumen der Galaxis.

Innerhalb dieses Volumens werden Koordinaten von Massenpunkten stochastisch gleichmäßig verteilt. Die Anzahl dieser Massenpunkte wurde schrittweise vergrößert bis eine Unabhängigkeit der Simulationsergebnisse von der Anzahl der Massenpunkte beobachtet werden konnte. Diese Unabhängigkeit der Simulationsergebnisse ist mit einer Anzahl von 200.000 Massenpunkten gesichert. Die vorgelegten Daten beruhen auf einer Simulation mit 1.000.000 Massenpunkten. Koordinaten mit einem gleichen Abstand zum

galaktischen Zentrum erhalten stets die gleiche Masse zugeordnet, d.h. die Massenverteilung ist im gesamten Modell radialsymmetrisch bezüglich der Scheibenebene.

Ein spezifisches Profil, wie es in vielen Modellen üblich ist, wurde nicht vorgegeben. Dafür sind in Abständen von jeweils 1kpc Stützstellen einer Verteilungsfunktion festgelegt worden, zwischen denen die Massen linear interpoliert wurden. Dadurch wurde es möglich, die berechnete Rotationskurve auch an Schwankungen der gemessenen Rotationskurve anzupassen. Diese Schwankungen spiegeln die sonnenseitige Spiralarmstruktur der Milchstraßengalaxie annähernd wieder. Die Verteilung im Bulge wird jedoch nur grob beschrieben, da die Stützstellen einen Abstand von 1kpc haben, der Bulge aber gerade einen Radius

Keine Dunkle Materie in der Milchstraße bis 15kpc - Abschätzung der Gesamtmasse und Spiralarmstrukturen -

Klaus Retzlaff

von 1,5kpc aufweist. Künftige Simulationen müssen hier ein feineres Netz an Stützstellen verwenden, doch für die Untersuchung in relativer Entfernung zum Bulge und insbesondere der äußeren Milchstraße ist die Feinstruktur des Bulge von unwesentlicher Bedeutung.

Die simulierte Rotationskurve wird erzeugt, indem die komplette Wirkung **aller** Einzelmassen auf die Testmasse berechnet wird, und nicht nur die Massen innerhalb der jeweiligen Bahn berücksichtigt werden, weil Letzteres nur in einer Verteilung mit Kugelsymmetrie auf Grund des Schalentheorems zulässig wäre. Massenschätzungen auf Basis des Schalentheorems führen zu einer erheblichen systematischen Überschätzung der Masse. Aus diesem Grund ist auch die Ableitung der Evidenz der Dunklen Materie unter der Voraussetzung der Kugelsymmetrie unzulässig und nicht einmal näherungsweise richtig.

Um zufällige irrelevante lokale Einflüsse auf die Testmasse zu verhindern, wurden Massen aus einem Bereich von 750 pc um die Testmasse herum aus der Berechnung ausgeblendet.

Bei Modellen mit gleichzeitig großen und kleinen Werten (galaktische Dimensionen und Kleinheit der Gravitationskonstante) können numerische Artefakte problematisch sein. Um numerische Artefakte auszuschließen, bzw. abzuschätzen, wurden die Parameter für die rotationselliptische Scheibe so verändert, dass eine Kugel entstand. Für die Kugel wurde eine Handrechnung mit den Simulationsergebnissen verglichen und Übereinstimmung festgestellt. Numerische Artefakte sind vernachlässigbar.

Daten für die Simulation

Um die Verhältnisse in der Milchstraße zu simulieren, sind empirische Daten erforderlich. Da sich die Sonne innerhalb der Galaxis befindet, sind die Daten mit unterschiedlich großen Unsicherheiten

verbunden. Angaben in der Literatur schwanken stark, was auch die Möglichkeit der Interpretation einschränkt. Sofue, Honma und Omodaka legten 2008 Simulationsergebnisse vor, wobei sie von einem Sonnenabstand zum Zentrum von 8kpc und einer Bahngeschwindigkeit von 200km/s ausgingen[1]. Die Rotationskurve in der Arbeit [1] ist daher vergleichsweise abgesenkt. Insgesamt schwanken die Angaben für die Höhe der Rotationskurve und die Lage der Sonne in der Milchstraße sehr. Man sieht in Abbildung 2 eine Rotationskurve für den in [1] genannten Sonnenabstand und die Sonnengeschwindigkeit.

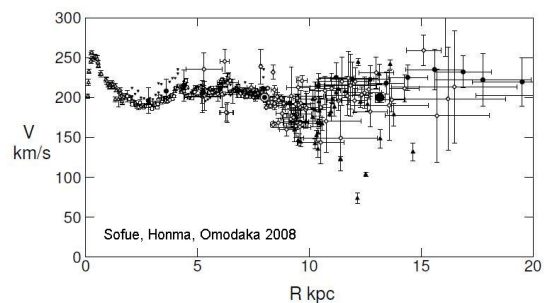


Abbildung 2: Rotationskurve der Milchstraße, die Messdaten für die Sonne sind hier 8,0 kpc Abstand und 200 km/s, lt. [1].

Diese Daten unterscheiden sich von einer älteren Arbeit der Autoren Honma und Sofue aus dem Jahr 1997 [2].

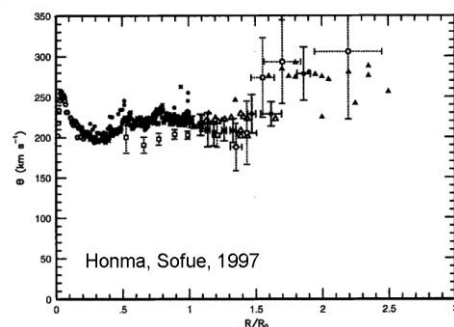


Abbildung 3: Rotationskurve mit einem Sonnenabstand von 8,5 kpc und 220 km/s, lt. [2].

In [3] geben die Autoren einen Abstand der Sonne vom galaktischen Zentrum mit ca. 7,54 kpc an. In [4] ist die Sonnenposition wieder mit 8,0 kpc angegeben.

Keine Dunkle Materie in der Milchstraße bis 15kpc - Abschätzung der Gesamtmasse und Spiralarmstrukturen -

Klaus Retzlaff

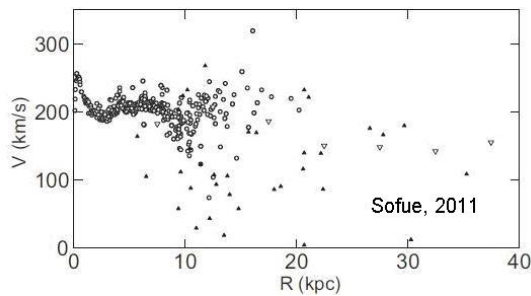


Abbildung 4: Rotationskurve lt. [4] mit 8,0 kpc und 200 km/s für die Sonne, aber anderer Streuung der Kurve (vergleiche Abbildung 2).

Allein aus den Jahreszahlen der Veröffentlichungen lässt sich kein Kriterium für die Auswahl ableiten. Unter Berufung auf die genauesten VERA Daten für stellare Maserquellen wird für die Sonnengeschwindigkeit 200 km/s genannt (Honma et al 2007 und Oh et al 2009). In der Zeitschrift „Sterne und Weltraum“ (2010) in [5] werden leider ohne Angabe der Primärquelle die Werte 7,94 kpc für den Abstand und 222 km/s für die Geschwindigkeit als die genauesten bekannten Daten genannt. Nach Messungen mit dem *Very Long Baseline Array* (VLBA) (2009) wird die Geschwindigkeit der Sonne zu 266,67 km/s bestimmt. Der Sonnenabstand wird mit 28.000 Lichtjahren, d.h. mit rund 8,59 kpc angegeben - entsprechend hoch fällt die Massenabschätzung aus [6]. Dem gegenüber beziehen sich C. M. Bidin et al auf 220km/s, wobei sie betonen, dass eine Unbestimmtheit der Sonnenposition für eine Distanz zwischen 7,5 bis 8,5 kpc irrelevant für ihr Ergebnis ist und Dunkle Materie in der Sonnenumgebung nicht nachweisbar sei [8].

Eine Schwierigkeit für die Simulation besteht in der Auswahl geeigneter Datensätze. Für eine erste abschätzende Simulation erscheint eine mittlere Wahl sinnvoll. Der folgenden Simulation ist die Kurvenform gemäß Abbildung 3 zugrunde gelegt worden. Allerdings erfolgte eine Transformation der Daten auf die Werte von 7,94 kpc und 222 km/s. Sie entsprechen damit den Werten, welche lt.

Sterne und Weltraum [5] als die besten bekannten Daten gelten sollen. Die Implementierung der Kurvendaten erfolgte durch Ausmessung der Grafik in Abbildung 3 vermittels eines speziellen Computerprogramms.

Methoden

Die Simulation wurde auf Basis der ausgewählten Rotationsmesskurve mit einer minimalen Gesamtmasse für die Galaxie gestartet. Es erfolgte eine schrittweise Erhöhung der Masse bis eine bestmögliche Anpassung der berechneten Rotationskurve an die gemessene Rotationskurve erfolgen konnte. Für die Anpassung der Messdaten an die Messkurve wurde der beste Fit genommen. Es wurden 15 Messpunkte variiert. Zur Messung der Anpassungsgüte diente die Standardabweichung. Für den besten Fit wurde eine Standardabweichung von 1,7 km/s für die Rotationsgeschwindigkeit akzeptiert und ist damit übergenau, d.h. die Anpassung hat eine deutlich höhere Genauigkeit als die Messdaten.

Resultate

Die folgende Grafik (Abbildung 5) zeigt die simulierte Rotationskurve zusammen mit den Messdaten.

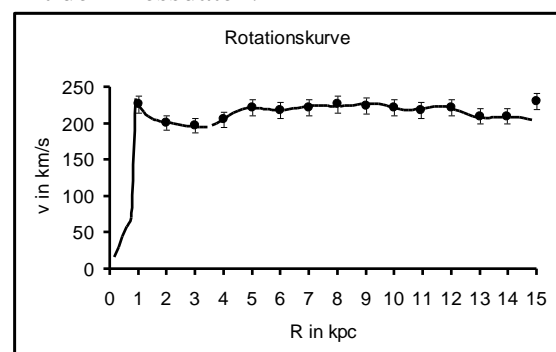


Abbildung 5: Die Grafik zeigt die simulierte Rotationskurve für 7,94 kpc Sonnenabstand und 222 km/s Bahngeschwindigkeit der Sonne um das galaktische Zentrum. Eingezeichnet sind die Messdaten (siehe Text) mit einem Fehlerbalken von 5%, die Anpassung erfolgte aber auf knapp 0,8% und ist damit übergenau.

Keine Dunkle Materie in der Milchstraße bis 15kpc - Abschätzung der Gesamtmasse und Spiralarmstrukturen -

Klaus Retzlaff

Der Simulation wurden die folgenden Parameter zugrunde gelegt:

Tabelle 1: Daten der Simulation

Durchmesser Bulge	3,0kpc
Durchmesser Scheibe	30,0kpc
zentrale Dicke der Scheibe	1,2kpc
Position der Sonne	7,94kpc
Standardabweichung Fit	1,7 km/s

Die Resultate sind:

Tabelle 2: Ergebnisse der Simulation

Gesamtmasse der Galaxis	$107,5 \cdot 10^9 m_s$
zentrale Punktmasse	$1,000 \cdot 10^{10} m_s$
Masse im Bulge incl. Zentraler Punktmasse	$1,924 \cdot 10^{10} m_s$
Masse Scheibe bis 15kpc	$8,826 \cdot 10^{10} m_s$
Masse Bulge	17,93%
Masse Scheibe	82,07%
mittlere Dichte im Buge	$1,364 m_s / pc^3$
mittlere Dichte der Scheibe	$1,58 \cdot 10^{-1} m_s / pc^3$
Masse innerhalb der Sonnenbahn	$7,86 \cdot 10^{10} m_s$
Masse innerhalb der Sonnenbahn	73,11%
Dichte in der Sonnenumgebung	$1,12 \cdot 10^{-1} m_s / pc^3$

Es hat sich das folgende Dichteprofil ergeben (Abbildung 6):

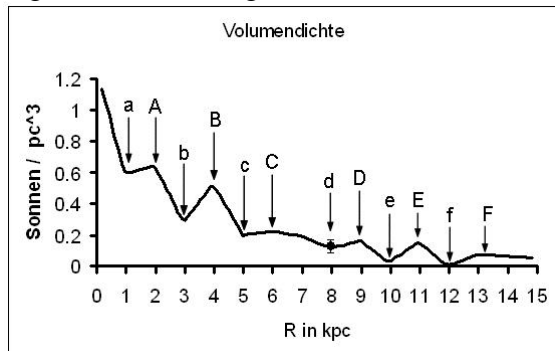


Abbildung 6: Dichteprofil bis 15kpc und die gemessene Dichte in der Sonnenumgebung $0,118 \pm 0,006 m_s / pc^{-3}$ mit Fehlerbalken für die

Messung von 30% an der Position „d“ auf Grund unterschiedlicher Literaturangaben. Die Grafik zeigt auch die Bezeichnungsstruktur für das Spiralarmschema.

Für die Positionen von Minima und Maxima in der Volumendichte haben sich die folgenden interpolierten Werte in kpc ergeben (Tabelle 3):

Tabelle 3: Interpolierte Minima und Maxima der Volumendichte. Kleinbuchstaben bezeichnen die Minima, Großbuchstaben die Maxima. Die Positionen sind in kpc angegeben.

Struktur	Position	Struktur	Position
a	1,1	d	8,0
A	1,9	D	9,0
b	3,0	e	10,0
B	3,9	E	11,0
c	5,0	f	12,0
C	6,0	F	13,2

In [7] wird von einer linearen Funktion

$$M(R) = \sum_{r < R}^R m(r)$$

ausgegangen, was auf bestimmten Modellannahmen beruht. Hier im halofreien Modell ist diese Funktion jedoch nicht linear und trotzdem ist die Folge eine annähernd konstante Rotation in der Scheibe, wenn von den Schwankungen auf Grund der Spiralarmstruktur abgesehen wird (Abbildung 7).

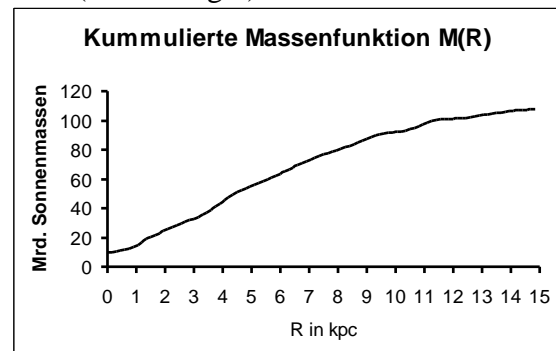


Abbildung 7: Die Funktion $M(R)$ zeigt keinen linearen Anstieg, trotzdem ist die Rotationskurve flach. Das ist eine direkte Folge der Scheibengeometrie.

Diskussion

Die Angaben und Abschätzungen für die Gesamtmasse der Milchstraßengalaxie

Keine Dunkle Materie in der Milchstraße bis 15kpc - Abschätzung der Gesamtmasse und Spiralarmstrukturen -

Klaus Retzlaff

haben eine erhebliche Streubreite. Diese Streubreite hängt von den jeweils zugrunde gelegten Messdaten, den geometrischen, bzw. strukturellen Annahmen über den Aufbau der Milchstraße sowie die in Betracht gezogene Ausdehnung ab. Insbesondere ist es für den Vergleich wichtig, den von verschiedenen Autoren jeweils betrachteten Ausdehnungsbereich zu berücksichtigen. In der vorliegenden Tabelle 4 sind die Daten aus entsprechenden Untersuchungen zusammengefasst:

Tabelle 4: Abschätzungen der Gesamtmasse für die Milchstraßengalaxie aus der Literatur [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15].

Jahr	Masse in $10^{11} m_s^1$	R_{\max} in kpc	Autoren
1922	0,1 – 1,0	8	Kapteyn ²
1983	6,3 – 11,5	44	Innanen et. al.
1987	$\approx 10,0$	100	Benny Tremaine
1987	2,4	46	Little Tremaine
1988	4,0 – 10,0	50	Rohlfs Kreitschmann
1989	8,1 – 21,0	120- 210	Zaritsky et al.
1992	≈ 13	230	Kulesa, Lynden- Bell
1992	≈ 4	35	Fich und Tremaine
1992	$\approx 2,4$	20	Merrifield
1996	3,8 – 6,0	50	Kochaneck
1996	≈ 2	15	Honma, Sofue
2008	≈ 2	20	Honma, Sofue, Omodaka
2011	6,02 – 8,04	385	Sofue
2012	1,075	15	Retzlaff

Grundsätzlich ist der Datenvergleich auf Grund der variierenden Annahmen und

¹ m_s steht für Sonnenmassen.

² Dieser Wert ist zur historischen Würdigung des Autors eingefügt, für die Betrachtungen ist er ohne Bedeutung.

Modelle nicht trivial, ein gewisser Eindruck entsteht, wenn die Ergebnisse in einer Grafik verglichen werden, siehe Abbildung 8 und 9. Die Streuung der Daten zeigt sich sowohl im Bereich der sichtbaren Milchstraße, als auch im Bereich des vermuteten dunklen Halos. Im Unterschied zu früheren Studien über große Distanzen ist die Gesamtmasse für einen Bereich bis 385 kpc (Sofue 2011) deutlich reduziert (siehe Abbildung 8). Doch eine Reduzierung auf großen Skalen zieht auch eine Reduzierung der Konzentration Dunkler Materie innerhalb der sichtbaren Milchstraße nach sich. So wird von Sofue in [15] für die Sonnenumgebung ($R_0 = 8kpc$) ein Wert von $(6,12 \pm 0,80) \cdot 10^{-3} m_s / pc^3$ angegeben. Das ist eine sehr geringe Dichte, doch auch andere Autoren finden DM-Abschätzungen in einer geringen Größenordnung von wenigen $10^{-3} m_s / pc^3$. Die verschiedenen Studien werden auch von Bidin et al. diskutiert. Bidin et al. zitieren einen Wertebereich von $5 - 15 mm_s / pc^3$. Das ist sehr wenig, aber immer noch genug, dass Bidin et al. meinen, das hätten sie messen können. Gefunden haben sie jedoch $0 \pm 1 mm_s / pc^3$, also nichts [8]. Die Annahmen der Sternengeschwindigkeiten seien falsch gewesen. Nach der Korrektur der EOS vom 25.5.2012 wurde die Existenz Dunkler Materie bestätigt, sie soll in der Nähe der Sonne den Wert von $0,008 \pm 0,002 m_s \cdot pc^{-3}$ aufweisen. Die Existenz Dunkler Materie scheint erheblich von den zugrunde gelegten Annahmen abhängig zu sein!

Keine Dunkle Materie in der Milchstraße bis 15kpc - Abschätzung der Gesamtmasse und Spiralarmstrukturen -

Klaus Retzlaff

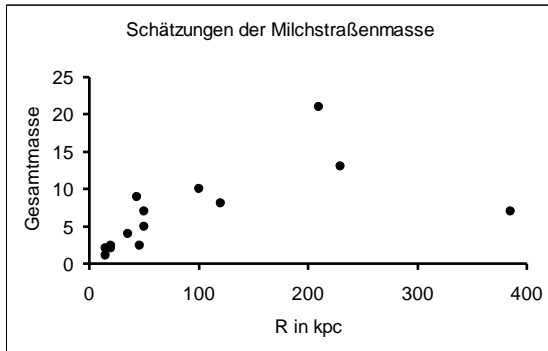


Abbildung 8: Schätzungen der Masse der Milchstraße für verschiedenen Modelle und Ausdehnungen entsprechend der Tabelle 4. Die Angaben sind in $10^{11} m_s$.

Tatsächlich ist die Dichte an Dunkler Materie in der Sonnenumgebung unabhängig vom konkreten Modell unterhalb von knapp 2 Größenordnungen des Fehlerbalkens für die bekannte Menge an sichtbarer Materie. Das bedeutet zunächst einmal, dass die Rotation der Milchstraße ohne jedes Problem grundsätzlich auch ohne Rückgriff auf Dunkel Materie beschrieben werden kann, wenn man sich auf den Bereich der sichtbaren Scheibe beschränkt.

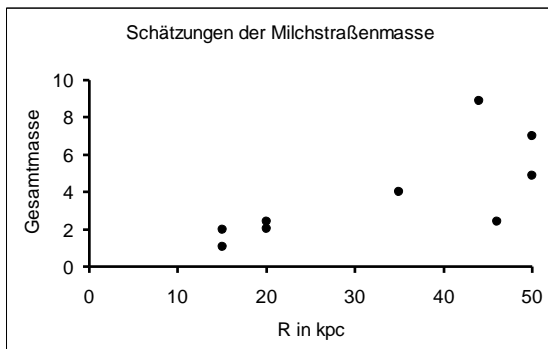


Abbildung 9: Schätzung der Masse der Milchstraße für verschiedene Modelle bis Maximal 50kpc.

Dass viele Studien überhaupt eine Menge an Dunkler Materie für den sichtbaren Bereich der Milchstraße angeben, das hat folgenden Grund: Es ist nicht so, dass man in diesem Bereich festgestellt hätte, dass es zu wenig baryonische Materie geben würde, um die Rotation der sichtbaren Scheibe zu erklären, sondern man hat von dem unverstandenen Bereich über 15kpc

hinaus die Simulationsergebnisse für das Halo auf den sichtbaren Bereich bezogen. Das ist nicht automatisch zulässig, weil keine Kenntnis über die Anordnung der Dunklen Materie besteht. Die DM-Halo-Modelle sind hypothetisch. Die Profile beruhen selbst auf Computerexperimenten zur galaktischen Dynamik und Galaxientstehung, also nicht auf direkten Beobachtungen. Verwendung finden Profile, wie das NFW (Navarro, Frenk und White) [18] oder andere, z.B. das von Kent [19], Letzteres wird in [1] verwendet. Es wird von der Existenz dieser Dunklen Halos ausgegangen, weil die Theorie der Galaxientstehung und das Konkordanzmodell ohne Dunkle Materie in erhebliche Schwierigkeiten geraten.

Lässt man die Annahme eines Halos fallen, so ist es trotzdem möglich, die Rotation der Milchstraßengalaxie im sichtbaren Bereich zu beschreiben.

Da in der vorliegenden Simulationsstudie das Halo fortgelassen wurde, konzentriert sich die Masse der Milchstraße in Bulge und Scheibe. Das bewirkt eine im Vergleich zu einer kugelförmigen Verteilung höhere Gravitationswirkung in der Scheibenebene, so dass in der Folge eine wesentlich geringere Masse ausreicht, die beobachtbare Rotation hervorzurufen. Man sieht diese deutlich geringere Masse in Abbildung 9 beim Vergleich der Werte bei 15kpc. Der Wert für die Masse ist nur halb so groß, wie der von Honma und Sofue [2].

Doch dieses Vorgehen, d.h. das Weglassen des Halos, kann nur gerechtfertigt sein, wenn sich im Ergebnis der Simulation die beobachtete Materieverteilung einstellt. Für die Volumendichte in der Sonnenumgebung hat die Simulation einen Wert von $0,112 m_s / pc^3$ ergeben, welcher der beobachteten Dichte an baryonischer Materie von $0,118 \pm 0,006 m_s / pc^3$ überraschend genau entspricht [16]. Dieser Wert enthält $0,093 m_s / pc^3$ stellare Materie

Keine Dunkle Materie in der Milchstraße bis 15kpc - Abschätzung der Gesamtmasse und Spiralarmstrukturen -

Klaus Retzlaff

und $0,025m_s / pc^3$ interstellares Medium. Andere Quellen nennen Werte zwischen $0,1-0,13m_s / pc^3$ [16]. Damit wäre sogar eine etwas höhere Dichte noch im Einklang mit einem Modell ohne Dunkle Materie und ohne Halokomponente. Betrachtet man das Dichteprofil in Abbildung 6 etwas genauer, so ist zu erkennen, dass sich die Sonne in einer Senke, d.h. nahe dem Punkt d befindet. Vielleicht liegt ja nur ein lokales Phänomen vor? Um dieses zu prüfen, können wir die Dichte zwischen 6 und 10 kpc linear interpolieren und finden dann bei einer Standardabweichung von $\pm 0,0649m_s / pc^3$ einen Dichtebereich von $0,0845-0,2143m_s / pc^3$ mit einem mittleren Wert von $0,1494m_s / pc^3$ an der Sonnenposition. Dieser Wert liegt rund 27% über dem simulierten Wert von $0,112m_s / pc^3$. Das Ergebnis schließt zwar grundsätzlich das Vorhandensein minimaler Anteile an Dunkler Materie nicht aus, doch die erhebliche Standardabweichung bringt große Dichteschwankungen innerhalb der Galaxie deutlich zum Ausdruck. Diese Schwankungen schließen einen Vergleich lokaler Werte mit Simulationsergebnissen von Modellen mit vorgegebenen Profilen in denen sich die Schwankungen glätten aus. Simulationsergebnisse im genannten Bereich von $5-15m_s / pc^3$ für Dunkle Materie sind angesichts der Dichteschwankungen einfach zu klein, um interpretationsfähig zu sein. Diese Schwierigkeiten zeigen sich auch bezüglich der den Dichtefluktuationen folgenden Geschwindigkeitsfluktuationen. Innerhalb des Bereichs von 6 bis 10 kpc ergibt sich bei einer linearen Regression für die Geschwindigkeit eine Standardabweichung von $\pm 2,635 \frac{km}{s}$. Bezogen auf die Geschwindigkeit der

Sonne von $222 \frac{km}{s}$ ist das eine Schwankung von rund 1,187 %, doch die Unsicherheit der Sonnengeschwindigkeit und Sonnenposition ist ja nicht zu vergessen! Ob die $\pm 2,635 \frac{km}{s}$ einen großen oder kleinen Bereich markieren hängt aber auch davon ab, wie groß der Effekt Dunkler Materie auf die Geschwindigkeit ist. Um diesen Betrag abzuschätzen, gehen wir von den Daten von Sofue, Honma und Omodaka aus [14]. Für die Sonnenposition bei 8kpc und einer Sonnengeschwindigkeit von $200 \frac{km}{s}$ geben sie die folgenden Massen an, die sich innerhalb seiner Sphäre mit dem Radius der Sonnenbahn befinden sollen:

$$M_{Bulge}(R_s) = 1,75 \cdot 10^{10} m_s$$

$$M_{Disk}(R_s) = 4,33 \cdot 10^{10} m_s$$

$$M_{Halo}(R_s) = 0,831 \cdot 10^{10} m_s$$

Die Geschwindigkeit der Sonne kann in einfacher Weise mittels der Beziehung

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{R_s} (M_{Bulge} + g \cdot M_{Disk} + M_{Halo})}$$

berechnet werden, wobei g ein Formfaktor ist, der die besondere Geometrie der Scheibe berücksichtigt. Mit den Werten aus [14] findet man $g = 1,218393$ für die Sonnenposition. Welche Geschwindigkeit hätte die Sonne im Modell von Sofue, Honma und Omodaka, wenn das Halo fehlen würde? Für diesen Fall finden wir einen Wert von $194,1 \frac{km}{s}$. Die Dunkle Materie liefert also einen Effekt von $5,9 \frac{km}{s}$ und dieser ist damit in der Größenordnung der Schwankungen. Da ein Vergleich lokaler Daten so unterschiedlicher Modelle problematisch ist, sollte ein globalerer Vergleich weiterhelfen, und man könnte die Massen innerhalb der Sonnensphäre vergleichen.

Keine Dunkle Materie in der Milchstraße bis 15kpc - Abschätzung der Gesamtmasse und Spiralarmstrukturen -

Klaus Retzlaff

Für die Gesamtmasse innerhalb der Sonnenbahn ergibt die halofreie Simulation $7,86 \cdot 10^{10} m_s$, während [14] den Wert $6,911 \cdot 10^{10} m_s$ liefert. Doch die Modelle gehen von unterschiedlichen Voraussetzungen aus. Transformiert man das Modell von Sofue, Honma und Omodaka auf die Werte $7,94 kpc$ und $222 \frac{km}{s}$ unter Wahrung der Proportionalität aller Komponenten (Bulge, Disk und Halo), so erhält man als Gesamtmasse $8,388 \cdot 10^{10} m_s$, für den Bulge-Anteil ergibt sich $2,124 \cdot 10^{10} m_s$, für die Scheibe $5,255 \cdot 10^{10} m_s$ und für den Haloanteil $1,009 \cdot 10^{10} m_s$. Wir haben also im transformierten Modell von Sofue, Honma und Omodaka eine höhere Gesamtmasse innerhalb der Sonnenbahn und die Summe aus Bulge und Scheibe ist mit $7,379 \cdot 10^{10} m_s$ nur geringfügig kleiner als im halofreien Modell ($7,86 \cdot 10^{10} m_s$).

Ist das ein interpretationsfähiger Unterschied? Um diese Frage zu beantworten nehmen wir an, die Differenz sei Dunkle Materie im halofreien Modell. Wir können für diesen Fall wiederum die Wirkung auf die Geschwindigkeit abschätzen. Im halofreien Modell wäre die Dunkle Materie dann aber im Bulge und in der Scheibe zu finden. Da wir kein Profil vorgeben, nehmen wir vereinfacht ein konstantes Mischungsverhältnis von baryonischer und Dunkler Materie an. Der sich daraus ableitende Effekt Dunkler

Materie beträgt dann $6,9 \frac{km}{s}$, also rund 3,1% der Bahngeschwindigkeit. Doch das besagt nur das Eine: Wenn man schon nicht genau weiß, ob sich die Sonne mit 200, 220 oder 267 km/s um das galaktische Zentrum bewegt, wenn unklar ist, ob sie sich bei 7,5 kpc, bei 8,0kpc oder bei 8,5 kpc befindet, wie will man dann einen

Wert für einen kleinen durch Dunkle Materie verursachten Geschwindigkeitsanteil überhaupt zur Grundlage einer empirischen Untersuchung des Anteils der Dunklen Materie innerhalb der Galaxie machen?

Die ganzen Schwierigkeiten der Bestimmung eines Anteils Dunkler Materie beruhen auf einem einzigen Tatbestand, dass eben dieser Anteil, wenn es ihn überhaupt gibt, so klein ist, dass ein Nachweis auf Grund der Dominanz der baryonischen Materie, ihren Fluktuationen und den Ungenauigkeiten der Messdaten scheitert.

Diese Aussage hat aber keine andere Bedeutung als die, dass die Dunkle Materie zur Beschreibung der galaktischen Rotation innerhalb des sichtbaren Bereichs überhaupt nicht erforderlich ist.

Doch es kommt noch ein gewichtiges Argument hinzu, welches auf eine konzeptionelle Problematik der profilbasierten Simulationen hinweist. Eine theoretisch korrekte Bestimmung Dunkler Materie auf Basis einer Computersimulation hätte nach Möglichkeit genau die Verteilung der sichtbaren Materie abzubilden, und die als Resultat der Anpassung aus der Simulation resultierende Dichteverteilung damit zu vergleichen. Die Differenz

$\zeta(\vec{r})_{Simulation} - \zeta(\vec{r})_{leucht}$ könnte dann als Verteilung Dunkler Materie gedeutet werden. Gewiss hat man hier ein erhebliches Problem die Dichte $\zeta(\vec{r})_{leucht}$ genau zu bestimmen. Doch vom Prinzip wäre es die korrekte Strategie. Eine unterstellte Gemeinsamkeit zwischen baryonischer und Dunkler Materie ist, dass beide Materieformen gravitativ wechselwirken. Gegenüber der Gravitation sollte es also gar keinen Unterschied zwischen den Teilchen der einen und der anderen Art geben. Demzufolge dürfte ein Teilchen gleich welcher Art, dunkel oder baryonisch, nicht zwischen den Profilen

Keine Dunkle Materie in der Milchstraße bis 15kpc

- Abschätzung der Gesamtmasse und Spiralarmstrukturen -

Klaus Retzlaff

„wählen“. Wenn in den Simulationen die Dunkle Materie dem Halo zugeschlagen wird und das Halo-Profil als Profil der DM-Verteilung gedeutet wird, so unterstellt diese Vorgehensweise zusätzliche hypothetische Eigenschaften beider Materieformen in Bezug auf die Gravitation.

Was bleibt, ist das Ergebnis, dass die lokale Dichte, wie sie aus der Simulation ohne Halokomponente folgt, mit der gemessenen Dichte leuchtender Materie in der Sonnenumgebung gut übereinstimmt.

Um eine Aussage über das Vorhandensein der Dunklen Materie treffen zu können, erscheint die Betrachtung größerer Bereiche notwendig. Der Bereich vom Zentrum bis zur Position der Sonne ist schon diskutiert worden. In diesem Bereich befinden sich nach dem halofreien Modell 73,11% und lt. [17] rund 70% der leuchtenden Materie innerhalb der Sonnenbahn. Legt man die Werte von Sofue, Honma und Omodaka für Bulge, Disk und den Ring (Spiralarm) lt. [14] zugrunde, wären ebenfalls 73,25% der leuchtenden Materie innerhalb der Sonnenbahn vorhanden. Doch damit ist die Gesamtmasse im halofreien Modell identisch mit der Masse der leuchtenden Materie. Die Gesamtmasse der Galaxie incl. Halo ist in [14] natürlich deutlich größer, da ein kugelförmiges DM-Halo auf Grund des Volumens selbst bei geringer Dichte eine große Gesamtmasse repräsentieren kann. In einem Modell ohne Halokomponente wird dagegen deutlich weniger Materie benötigt.

Ein Vergleich der Massen von Bulge und Scheibe mit Literaturwerten ist schwierig zu führen, denn sofern es sich um Simulationsergebnisse handelt, beruhen diese auf vorgegebenen Profilen die sich über das gesamte Volumen erstrecken. Diesen Profilen ist dann die entsprechende Masse zugeordnet und es werden die Massenangaben um die Parameter der jeweiligen Profile ergänzt, z.B. den half-

mass scale radius. Da die vorliegende halofreie Simulation keine Profile verwendet sondern in ihr direkt die lokalen Massendichten variiert wurden, sind Bulge und Scheibe räumlich abgegrenzt definiert. Die Werte in Tabelle 2 beziehen sich daher auf die Funktion $M(R)$, d.h. die Masse für den Bulge ist durch $M_{Bulge} = M(R < R_{Bulge})$ definiert und entsprechend gilt $M_{Scheibe} = M_{Galaxie} - M_{Bulge}$ für die Scheibe. Trotzdem kann für den Bulge eine relativ gute Übereinstimmung festgestellt werden und man kann vermuten, dass der leicht vergrößerte Wert, sich aus den unterschiedlichen Definitionen ergibt – siehe Tabelle 5. Die Werte für die Masse der Scheibe sind in Tabelle 6 aufgeführt.

Tabelle 5: Abschätzungen der Masse vom Bulge unserer Milchstraße.

Masse Bulge	Halbwertsradius	
$1,8 \cdot 10^{10} m_s$	0,5kpc	[1]
$1,652 \cdot 10^{10} m_s$	0,522kpc	[4]

Tabelle 6: Abschätzungen der Masse vom Bulge unserer Milchstraße.

Masse Disk	Halbwertsradius	
$6,5 \cdot 10^{10} m_s$	3,5kpc	[1]
$3,41 \cdot 10^{10} m_s$	3,19kpc	[4]

Tabelle 7: Summe der Masse vom Bulge und Scheibe.

Masse Bulge +Disk, R_s, V_s	
$8,3 \cdot 10^{10} m_s, 8kpc, 200 \frac{km}{s}$	[1]
$5,062 \cdot 10^{10} m_s, 8kpc, 200 \frac{km}{s}$	[4]

Tabelle 7 zeigt die aus den Simulationen lt. [1] und [4] sich ergebenden Gesamtmassen bei Weglassen der Halo-Komponente. Bleibt abschließend das erstaunliche Resultat zu diskutieren, dass in den relativ leichten Schwankungen der Rotationskurve

Keine Dunkle Materie in der Milchstraße bis 15kpc - Abschätzung der Gesamtmasse und Spiralarmstrukturen - Klaus Retzlaff

sich die Spiralarmstruktur der Milchstraße spiegelt. Dieses Resultat verweist darauf, dass lokale Effekte eine relative Dominanz gegenüber globalen Schwereinflüssen haben, denn das Modell ist nicht auf die Abbildung von Spiralarmstrukturen ausgerichtet. Aus diesem Grund müssen relative Ungenauigkeiten bezüglich der Lage der Dichtemaxima, d.h. des Abstandes der Spiralarme vom Zentrum der Milchstraße in Kauf genommen werden. Trotzdem gelingt eine Zuordnung der Maxima und Minima zu den bekannten Spiralarmstrukturen und ihren Zwischenräumen. Wir betrachten hier nur die Maxima und vergleichen die Positionen mit dem vermessenen NASA-Bild (Abbildung 10).

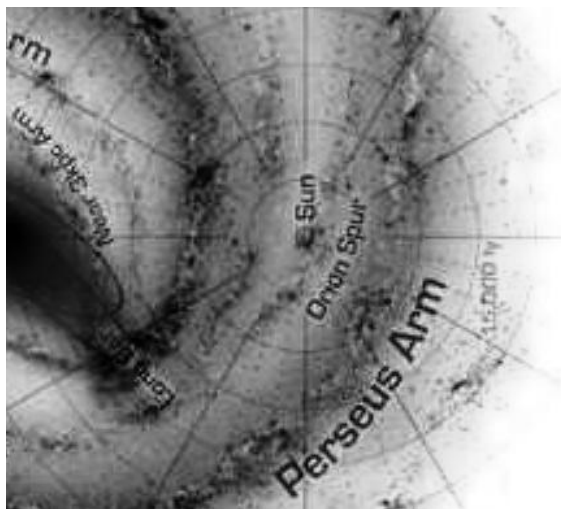


Abbildung 10: Ausschnitt NASA / JPL – Caltech / R. Hurt / (SSC Caltech) SSC-2008-10b. Für die Vermessung der Spiralarme auf der Linie Zentrum Sonne wurde ein Abstand für die Sonnenposition mit 7.94 kpc angenommen.

Die Vermessung der Spiralarmposition und der Vergleich mit den Ergebnissen der Simulation ist der folgenden Tabelle 8 zu entnehmen. Die systematisch wachsende Abweichung zu großen Radien ist ein Hinweis auf eine ungenaue Bestimmung der Sonnenposition. Da die Simulation aber gar nicht das Ziel hatte die genauen Spiralarmstrukturen bezüglich ihrer

Position zu bestimmen, ist nur maßgeblich, dass alle bekannten Strukturen sich in der Dichteverteilung abbilden.

Tabelle 8: Positionen der galaktischen Spiralarmstrukturen. Vermessen unter der Annahme der Sonnenposition im Abstand von 7.94 kpc vom galaktischen Zentrum

Struktur	NASA-Bild	Simulation
Near 3kpc-Arm	2,0	1,9
Norma-Arm	3,5	3,9
Scutum-Centaurus-Arm	5,0	6,0
Orion-Spur	8,4	9,0
Perseus-Arm	10,3	11,0
Outer-Arm	13,3	13,2

Wir haben gesehen, dass die Annahme Dunkler Materie auf Grund der Unsicherheiten der Daten und Modellannahmen nicht verifizierbar ist. Ein Modell ohne ein Halo aus Dunkler Materie, bestehend aus einer galaktischen Zentralmasse, einem Bulge und einer Scheibe kann die Rotation der Galaxie bis zu einem Radius von 15kpc ohne Rückgriff auf Dunkle Materie erklären. Darüber hinaus können Schwankungen in der Rotationskurve auf die Spiralarmstrukturen zurückgeführt werden. Es kann daher auch angenommen werden, dass Spiralarmstrukturen allein aus der Dynamik der sichtbaren Materie zu erklären sind.

Gewidmet meiner Frau Ilona
für ihre Geduld mit mir.

Meinen besten Dank für das kritische Korrekturlesen, Herrn Prof. Bertram Schmidt, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.

Keine Dunkle Materie in der Milchstraße bis 15kpc - Abschätzung der Gesamtmasse und Spiralarmstrukturen -

Klaus Retzlaff

Quellen

- [1] Yoshiaki Sofue, Mareki Honma and Toshihiro Omodaka, Unified Rotations Curve of the Galaxy – Decomposition into de Vaucouleurs Bulg, Disk, Dark Halo, and the 9-kpc Rotation Dip, PASJ: Publ. Astron. Soc. Japan, 2008
- [2] M. Honma, Y. Sofue, Rotation Curve of Galaxy, 1997, PASJ, 49, 453
- [3] Sofue, Y., Nagayama, T., Matsui, M., and Nakagawa, A., Near-Solar-Circle Method for Determination of the Galactic Constants, PASJ: Publ. Astron. Soc. Japan
- [4] Sofue Y., A Grand Rotation Curve and Dark Matter Halo in the Milky Way Galaxy, PASJ: Publ. Astron. Soc. Japan, 2011
- [5] Zeitschrift: Sterne und Weltraum, Rubrik: Zum Nachdenken, Max-Planck-Institut für Astronomie Heidelberg, Ausgabe 08/2010
- [6] Artikel auf AstroNews.com, VLBA, Milchstraße massereicher als gedacht, 6. Januar 2009
- [7] M. Steinmetz, Die Milchstraße als Labor, Physik Journal der DPG, März 2012
- [8] Bidin C., Carraro G., Mendez r., Smith R., Kinematical and chemical vertical structure of the Galactic thick disk II, A lack of dark matter in the solar neighbourhood, preprint arXiv:1204.3924 of European Southern Observatory, April 2012
- [9] K. Ashman, Dark Matter in Galaxies, 1992, PASP, 104,1109
- [10] J. B. Bahacall, Self-Consistent Determination of the Total Amount of Mater Near the Sun, 1984, ApJ, 276, 1969
- [11] N. Bahcall, Dark Matter, 1996, astr-ph/9611080 11 Nov. 1996
- [12] J. Benney, W. Dehen, The Outer Rotation Curve of the Milky Way, 1997, MNRAS, 287, 287L, 5
- [13] M. Fich, S. Traine, The Mass of the Galaxy, 1991, ARA&A, 29, 209
- [14] Y. Sofue, M. Honma, T. Omodaka, Unified Rotation Curve of the Galaxy – Decomposition in to de Vaucouleurs Bulge, Disk, Dark Halo, and the 9-kpc Rotation Dip, PASJ, Pupl. Astron. Soc. Japan, Nov. 2008
- [15] Y. Sofue, A Grand Rotation Curve an Dark Matter Halo in the Milky Way Galaxy, PASJ, Publ. Astron. Soc. Japan, Oct. 2011
- [16] Aus dem Vergleich diverser stark variirender Literaturdaten.
- [17] Zeitschrift: Sterne und Weltraum, Rubrik: Zum Nachdenken, Max-Planck-Institut für Astronomie Heidelberg, Ausgabe 10/2010
- [18] J.F. Navarro, C.S. Frenk, S.D.M. White, 1996 ApJ, 462, 563 1996
- [19] S.M. Kent, AJ, 91, 1301, 1996