

Hanna Kradolfer
Götighoferstrasse 11
8586 Riedt b. Erlen
077 479 79 01
hakradol@ksr.ch

Kantonsschule Romanshorn
Klasse 3 Mdz
SLA

Einfluss Dunkler Materie auf die Rotationskurve von Galaxien



Fach: Physik
Betreuungsperson: Dr. Andreas Schärer
Abgabetermin: 11.9.2023

Abstract

Die Messungen und Berechnungen der Rotationskurven von Galaxien verdeutlichen, dass Dunkle Materie einen massgeblichen Einfluss auf diese Kurven ausüben muss. Die beobachteten Konstanten oder ansteigenden Geschwindigkeiten in den äusseren Galaxienregionen widersprechen den Erwartungen, die alleine auf sichtbarer Materie basieren. Diese Erkenntnis belegt die entscheidende Rolle der Dunklen Materie bei der Erklärung der Rotationsdynamik von Galaxien.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Die vier fundamentalen Wechselwirkungen	2
3 Dunkle Materie	2
4 Aufbau von Galaxien	4
4.1 Die Rotationskurve	4
4.2 Galaxien drehen zu schnell	5
4.3 Zusammenhang	9
5 Schlusswort	10
Literatur	11
Abbildungsverzeichnis	12

1 Einleitung

Der Nachthimmel fasziniert Menschen schon seit Urzeiten. Die Ägypter nutzten Sterne für die Zeitmessung, (Hornung, 1998) die Babylonier entwickelten komplexe astronomische Kalender, und die antiken Griechen betrachteten die Bewegungen der Himmelskörper als göttliche Botschaften (Friedrich, 1969). Das geozentrische Weltbild, bei dem sich alles um die Erde dreht, wurde durch das heliozentrische Weltbild, bei dem sich alles um die Sonne dreht, ersetzt (Walker, 1999). Danach folgte die Überlegung, dass sich die Sonne mit ihren Planeten um ein schwarzes Loch mit Millionen von anderen Sternen drehen würde. Aus der ursprünglichen Idee einer einzigen Galaxie entwickelte sich das Wissen, dass es möglicherweise unendlich viele Galaxien gibt. Die Annahme, dass das Universum statisch sei, konnte durch Beweise widerlegt werden und mit der beschleunigten Expansion des Universums ersetzt werden (Bührke, 2022). Durch Beobachtungen, Messungen und Überlegungen versuchen Astronom/innen unseren Nachthimmel zu verstehen und erklären zu können.

Seitdem ich einen Kurs über Zeitreisen und Schwarze Löcher besucht habe, in welchem Dunkle Materie thematisiert worden ist, bin ich fasziniert von diesem Thema. Aus diesem Grund habe ich mich für das Thema der Dunklen Materie entschieden. Die zentrale Fragestellung der Arbeit lautet: Wie beeinflusst Dunkle Materie die Rotationskurve von Galaxien? Um dies zu erörtern, behandle ich folgende Themen: In einem ersten Teil beschreibe ich die vier fundamentalen Wechselwirkungen und anschliessend was Dunkle Materie sein könnte. Im zweiten Teil werde ich als Erstes den Aufbau von Galaxien beschreiben, danach erkläre ich, was die Rotationskurve ist. Abschliessend erläutere ich den Zusammenhang zwischen der Rotationskurve von Galaxien und wie Dunkle Materie diese begründen kann.

2 Die vier fundamentalen Wechselwirkungen

Die vier Wechselwirkungen setzen sich aus der Gravitation, der elektromagnetischen Wechselwirkung, der schwachen Wechselwirkung und der starken Wechselwirkung zusammen. Jede Wechselwirkung hat eine eigene Ladung. Es können alle Phänomene und Prozesse, welche auf der Erde oder im Weltall beobachtet werden, mit den vier fundamentalen Wechselwirkungen beschrieben werden. Das Standardmodell der Teilchenphysik beschreibt drei der vier Wechselwirkungen, die Gravitation spielt keine zentrale Rolle, da die Teilchen eine sehr kleine Masse haben. Die Gravitation wird durch die allgemeine Relativitätstheorie beschrieben, die nicht Teil des Standardmodells ist. Sie wirkt zwischen allen Teilchen, welche eine Masse besitzen. Die elektromagnetische Wechselwirkung wirkt zwischen elektrisch geladenen Teilchen wie Elektronen und Protonen. Die schwache Wechselwirkung wirkt bei der Kernfusion. Die starke Wechselwirkung hält die Protonen zusammen. Die Gravitation und die elektromagnetische Wechselwirkung erfahren wir direkt in unserem Alltag, die schwache und starke Wechselwirkung jedoch nicht, da ihre Reichweite zu gering ist (Bührke, 2022).

3 Dunkle Materie

Es gibt zwei Arten von Dunkler Materie, die baryonische und die nicht baryonische Dunkle Materie.

Unter baryonischer Materie versteht man normale Materie, welche aus Elektronen, Neutronen und Protonen besteht. Damit sind zum Beispiel Objekte wie massenarme und daher leuchtschwache Sterne gemeint. Diese haben die Fachbezeichnung „MACHO“ was für „MAssive Compact Halo Objects“ steht. Diese können nicht direkt beobachtet werden. Braune Zwerge, Weiße Zwerge und Neutronensterne sowie Schwarze Löcher gehören auch zu der Kategorie baryonische Dunkle Materie (Bührke, 2022). Jedoch reicht die Masse dieser Objekte nicht aus, um alle Beobachtungen im All zu erklären(Moeller, 2010).

Nicht baryonische Materie, wie der Name verrät, besteht nicht aus Elektronen, Neutronen und Protonen. Es gibt verschiedene Vermutungen, was diese sein könnten (Anderl, 2023).

In Frage kommen WIMPs (weakly interacting massive particles), was auf Deutsch schwach

wechselwirkende, massenreiche Teilchen bedeutet. Diese Teilchen besitzen keine Ladung und somit auch kein elektrisches oder magnetisches Feld. Dadurch beschränkt sich ihre Wechselwirkung auf die Gravitation und die schwache Wechselwirkung. Das heisst, dass Dunkle Materie ungestört Planeten durchqueren könnte, wodurch sie auch so schwer zu detektieren sind. Es wird mit verschiedenen Methoden nach WIMPs gesucht. Die Suchmethoden basieren darauf, dass ein WIMP mit einem Atomkern zusammenstösst und das kann unterschiedliche Folgen haben, wie die Ionisation, die Szintillation oder die Phononen-Anregung. Bei der Ionisation schlägt das WIMP ein Elektron aus der Atomhülle heraus und ein messbarer elektrischer Strom wird erzeugt. Bei der Szintillation löst das WIMP einen kurzen Lichtblitz aus, wenn es auf einen Atomkern prallt. Bei der Phononen-Anregung kann die Kollision mit einem WIMP in einem Kristall Schwingungen des Kristallgitters auslösen, und dabei erhöht sich die Temperatur geringfügig. Jedoch wurde bis heute die Existenz von WIMPs noch nicht nachgewiesen.
(Bührke, 2022)

4 Aufbau von Galaxien

Es gibt verschiedene Arten von Galaxien, wie zum Beispiel die elliptische-, spiral-, balken-, linsenförmige-, und die irreguläre Galaxien. Sie unterscheiden sich in Struktur und Form. Grundsätzlich haben alle Galaxien ein Gravitationszentrum, um das sich die gesamte Galaxie dreht. Im Zentrum der Galaxie befindet sich ein schwarzes Loch, welches von einem sogenannten Bulge umgeben ist. Dieser Bulge ist eine riesige Sternenansammlung auf relativ engem Raum. Um das Zentrum herum erstreckt sich eine galaktische Scheibe, in der sich die meisten Sterne, interstellares Gas und Staub befinden. Je nach Art der Galaxie sind die Arme der Galaxie anders angeordnet, zum Beispiel sind diese spiralförmig in der Spiralgalaxie.

Um die Scheibe herum befindet sich ein sphärischer Halo, in dem sich Sterne und Kugelsternhaufen befinden (Ribas, 2020). Im Bild unten ist der Seitenriss vom Aufbau der Milchstrasse zu erkennen. Im Zentrum befindet sich das schwarze Loch, umgeben vom Bulge, welches sich inmitten der Galaxiescheibe befindet. Auf dem Bild ist zusätzlich unsere Sonne markiert.

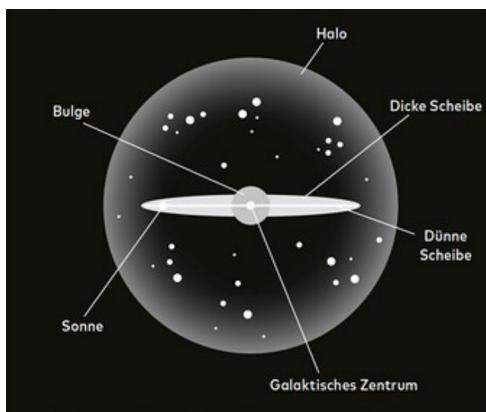


Abbildung 1: Aufbau der Milchstrasse (Anderl, 2023)

4.1 Die Rotationskurve

Rotationskurven geben an, wie sich die Geschwindigkeit von Objekten innerhalb einer Galaxie im Vergleich zum Abstand vom Zentrum verändern. Damit die Rotationskurve und die Massenverteilung von Galaxien berechnet werden können, müssen ihre Strukturen sowie ihre Zusammensetzungen aus Sternen, Staub, stellarem Gas und Dunkler Materie bekannt sein (Moeller, 2010).

Die universale Rotationskurve ist eine mathematische Formel, die die Rotationskurven von Galaxien anhand ihrer Gesamthelligkeit und ihres Radius charakterisiert. Dadurch kann darauf geschlossen werden, dass die hellsten Galaxien eine leicht abfallende Rotationskurve haben, mittlere Galaxien eine konstant flache und dunklere Galaxien eine monoton ansteigende Rotationskurve (Sofue & Rubin, 2001). Auf dem Bild ist die Art der Rotationskurve, die man bei Spiralgalaxien erwarten würde, zu sehen aufgrund der Verteilung der Sterne, dargestellt durch die gestrichelte Linie. Sie steht im Vergleich zu den gemessenen Geschwindigkeiten.

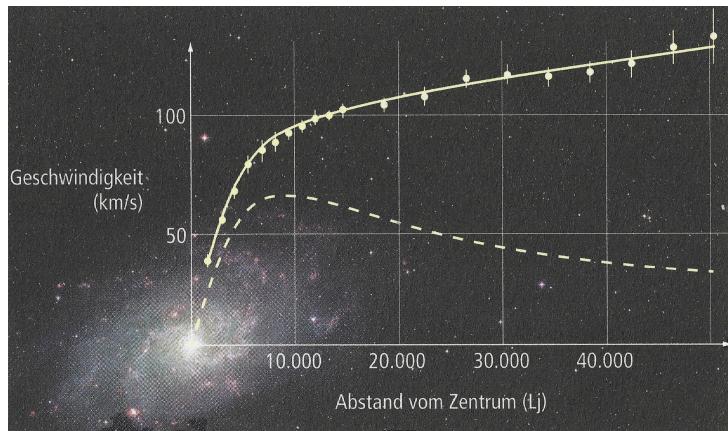


Abbildung 2: Berechnete und gemessene Rotationskurve der Galaxie Messier 33 (Bührke, 2022)

4.2 Galaxien drehen zu schnell

(ganzes Kapitel nach (Bührke, 2022))

Die Formel zu Berechnung von der Orbitalgeschwindigkeit lautet:

$$v = \sqrt[2]{\frac{G \cdot M}{r}}$$

G ist die Gravitationskonstante, M die Masse des Zentralobjektes und r die Distanz zwischen den Objekten. Bei M muss beachtet werden, dass die gesamte Masse innerhalb der jeweiligen Planetenbahn zählt. Von dieser Formel kann darauf geschlossen werden, dass sich das Objekt langsamer bewegt, je weiter weg es sich vom Zentrum befindet. Das trifft auch bei den Planeten in unserem Sonnensystem zu, da durch r dividiert wird. Dieses Gesetz kann auf alle Systeme, wo ein Körper einen Zentralbereich umkreist, angewendet werden.

Ähnlich ist es bei Galaxien. Im Zentrum der Galaxie befindet sich nicht eine einzige dominierende Masse, sondern der sogenannte Bulge. Dort befinden sich so viele Sterne, dass sie nicht mehr einzeln zu erkennen sind.

Mit der Spektroskopie, einer Technik bei der Licht in die verschiedenen Wellenlängen oder Frequenzen aufgeteilt wird, der fernen Sternsysteme können Aufschlüsse über die Bewegungen und Masse der Sterne gezogen werden. Jedoch erweist sich die Aufnahme von Spektren als Herausforderung, vor allem die Bestimmung der Geschwindigkeit von Objekten in den lichtschwachen Außenbereichen der Scheibe. Vergleicht man die hellen Zentralgebiete mit den äusseren Gebieten, sind dort nicht mehr viele Sterne zu erwarten. Daraus lässt sich der Schluss ziehen, dass die Geschwindigkeit mit zunehmendem Abstand vom Zentrum abnehmen muss, ähnlich wie im Sonnensystem.

Jedoch beobachtete Horace Babcock im Jahr 1939, der mit einem neuen Spektrografen die Rotationskurve der Andromeda-Galaxie mass, etwas Überraschendes. Anstelle einer abfallenden Rotationskurve blieb sie bis in die Außenbereiche konstant, sie schien sogar eher zuzunehmen.

Wenn die Geschwindigkeit der Körper mit wachsendem Abstand vom Zentrum nicht abnimmt, sondern konstant bleibt, muss sich innerhalb der Umlaufbahn unsichtbare Materie befinden, welche eine erhebliche Schwerkraft ausübt. Vereinfacht ausgedrückt: Galaxien haben zu wenig Masse, als dass sie sich so schnell drehen könnten. Für ein besseres Verständnis kann man sich ein Kettenkarussell vorstellen, dessen Sessel sich so schnell drehen, dass die Ketten reissen. Jedoch halten die Spiralgalaxien aus unerklärlichen Gründen zusammen.

Der Astronom Jan Hendrik Oort stiess im selben Jahr auf das gleiche Problem, als er Daten von der Galaxie NGC 3115 auswertete. Diese Galaxie zählt zu den linsenförmigen, mit einem zentralen Bulge und einer ausgeprägten Scheibe ohne Spiralarme. Oort kam wie Babcock, der in der Andromeda Galaxie zu hohe Geschwindigkeiten der Objekte weit vom Zentrum entfernt mass, auf dasselbe Ergebnis. Die Umlaufgeschwindigkeiten der Sterne nehmen mit wachsendem Abstand vom Zentrum nicht ab. Oort kam zum Schluss, dass die Massenverteilung fast keine Beziehung zu der des Lichts habe. Er vermutete, dass es sehr lichtschwache und damit nicht mehr erkennbare Zwergsterne geben müsse, welche eine Erklärung für die fehlende Masse wäre.

Vera Rubin, eine der ersten Frauen, die sich in dieser zu der Zeit männerdominierten For-

schungsrichtung durchsetzte, beobachtete die Geschwindigkeit von etwa 1000 Sternen in der Milchstrasse und kam 1965 zu demselben Schluss: Die Rotationskurve ist flach und nimmt nicht ab, wie es erwartet worden wäre.

Obwohl viele Wissenschaftler/innen zu demselben Schluss kamen, nämlich einer zu schnellen Rotationskurve von Galaxien, zweifelten viele an diesen Ergebnissen. Erst 1971, als die Messgeräte besser wurden und dadurch auch die Messdaten genauer, wurden Lösungen für dieses Problem gesucht. Eine erste Vermutung war eine grosse Menge an Zwergsternen in den äusseren Bereichen der Galaxien, diese wären somit nicht mehr erkennbar. Jedoch ergab sich dadurch die Frage, warum sich ausschliesslich nur Zwersterne in den Aussenbereichen befinden und keine helleren Sterne, welche erkennbar sein müssten.

1970 stiess Frank Hohl auf ein weiters Problem mit den zu hohen Drehgeschwindigkeiten von Galaxien. Er simulierte die Sternensysteme einer Spiralgalaxie mit theoretischen Masseteilchen, unter Einfluss der Gravitation. Nach wenigen Umdrehungen wurde die Galaxiescheibe instabil, die Sterne brachen aus ihren Kreisbahnen und die Spiralgalaxie verformte sich in eine balkenartige Struktur. Jedoch kann von der Häufigkeit von Spiralgalaxien im Universum darauf geschlossen werden, dass dies nicht zutrifft, Spiralgalaxien behalten ihre Form.

Auf eine mögliche Lösung für die Instabilität und die fehlende Materie von Galaxien kamen 1972 James Peebles, Jeremiah Ostriker und Jaan Einasto; Galaxien mussten von einer riesigen Wolke aus unsichtbarer Dunkler Materie umgeben sein, einem sogenannten Halo oder einer Korona aus Dunkler Materie. Dieser Halo müsste zweieinhalbmal mehr Materie enthalten als die Galaxie selbst.

Es gibt auch Wissenschaftler/innen und Wissenschaftler, die an der Existenz Dunkler Materie zweifeln. Sie sehen nicht den Fehler in den zu schnellen Rotationskurven, sondern in den newtonschen Gravitationsgesetzen, die verwendet werden, um die Rotationskurven zu berechnen. Mordehai Milgrom entwickelte deshalb eine alternative Gravitationstheorie, die „MOND“ („MOdified Newtonian Dynamics“) genannt wird, was für „Modifizierte Newtonsche Dynamik“ steht. Diese modifizierte Theorie kann zwar das Phänomen der zu schnellen Rotationskurven ohne die Existenz von Dunkler Materie erklären, weist jedoch auch viele Probleme auf. Zum Beispiel lässt sich mit dieser Theorie die Entstehung der Galaxien aus dem Urgas nicht erklären.

Seit dem Einsatz des Weltraumteleskops Gaia im Jahr 2013 wurden viele Fortschritte erzielt. Dieses Teleskop erfasst die Positionen, Bewegungen, Helligkeiten und Farben von mehr als einer Milliarde Sternen in unserer Milchstrasse mit bisher unerreichter Präzision. Mit Daten von 1,8 Milliarden Objekten in der Milchstrasse wurde die Rotationskurve der Milchstrasse genauestens berechnet. Zuerst nimmt die Rotationskurve stetig zu und in einem Abstand von 15000 Lichtjahren erreicht sie einen Höchstwert von 230 Meter pro Sekunde. Die Geschwindigkeit bleibt fast konstant, sie sinkt nur leicht, auf etwa 200 Meter pro Sekunde, ab. Ausserdem kam man durch diese und viele andere Untersuchungen zum Schluss, dass die Gesamtmasse der Sterne zusammen 50 bis 70 Milliarden Sonnenmassen ausmacht und die Dunkle Materie, welche sich vorwiegend im Halo befindet, knapp eine Billion Sonnenmassen beträgt, ungefähr 15- bis 20-mal so viel wie die Masse aller Sterne.

Mit Hilfe der berechneten Rotationskurve kann ein räumliches Computer-Modell des Dunklen Materie Halos berechnet werden. Dieser Halo ist nahezu kugelförmig und hat einen Radius von fast einer Million Lichtjahre. Dadurch könnte der Halo der Milchstrasse theoretisch bis zum Halo der Andromeda Galaxie reichen. Die Dichte der Dunklen Materie nimmt vom Zentrum der Galaxie quadratisch ab. Mit diesem Modell kann die Dichte der Dunklen Materie in unserem Sonnensystem berechnet werden. Dieser Wert ist ausschlaggebend für alle Experimente, mit welchen Dunkle-Materie-Teilchen direkt nachgewiesen werden sollten.

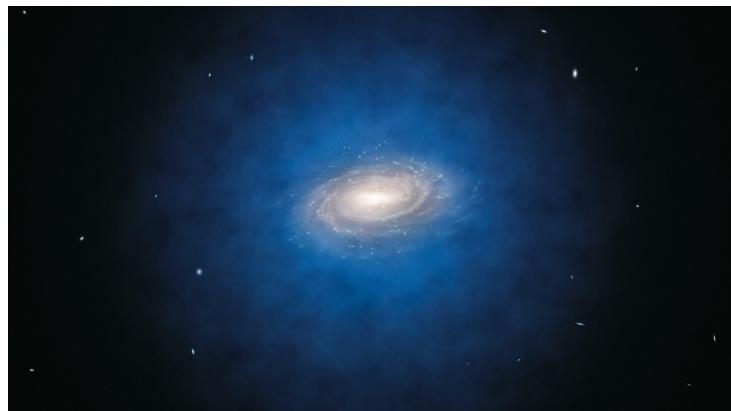


Abbildung 3: Veranschaulichung des Dunklen-Materie-Halos der Milchstrasse (Bührke, 2022)

4.3 Zusammenhang

Wenn die Masse einer Galaxie allein aufgrund der sichtbaren Materie (Sterne, Gas und Staub) berechnet wird, kann die erwartete Rotationskurve vorhergesagt werden, diese nimmt mit zunehmender Entfernung vom Zentrum ab. Wenn Astronom/innen jedoch tatsächlich die Rotationsgeschwindigkeit von Sternen und Gas in Galaxien messen, stellen sie fest, dass die beobachteten Rotationskurven von den erwarteten Rotationskurven abweichen. Anstatt abzunehmen, zeigen die beobachteten Rotationskurven, dass die Rotationsgeschwindigkeit konstant bleibt oder sogar mit zunehmender Entfernung vom Zentrum ansteigt. Die Abweichung zwischen den erwarteten und beobachteten Rotationskurven von Galaxien kann durch die Existenz von Dunkler Materie erklärt werden. Die Dunkle Materie erhöht die Massendichte in den äusseren Bereichen von Galaxien und trägt dazu bei, dass die Rotationsgeschwindigkeiten in diesen Bereichen konstant bleiben oder sogar ansteigen.

5 Schlusswort

Die Untersuchung der Rotationskurven von Galaxien hat gezeigt, dass die beobachteten Geschwindigkeiten der Sterne und der Gase in den äusseren Regionen von Galaxien oft nicht den Erwartungen entsprechen, die auf Grundlage der sichtbaren Materie allein getroffen wurden. Diese Diskrepanz zwischen den beobachteten Rotationskurven und den theoretisch vorhergesagten Kurven kann nur durch die Anwesenheit von Dunkler Materie erklärt werden. Dunkle Materie, obwohl unsichtbar und noch nicht bewiesen, übt eine starke Gravitationskraft aus, die die sichtbare Materie in einer Galaxie beeinflusst. Die Dunkle Materie bildet eine unsichtbare Halo-Struktur um das Zentrum der Galaxie herum und trägt wesentlich zur Rotationsdynamik bei. Die Anwesenheit von Dunkler Materie erklärt, warum die Rotationskurven in den äusseren Regionen von Galaxien flach bleiben, anstatt wie erwartet, abzufallen.

Obwohl Dunkle Materie noch nie nachgewiesen wurde, deutet sehr viel darauf hin, dass es sie gibt. Mich fasziniert, wie durch Beobachten von Sternen, die über Tausende von Lichtjahren entfernt sind, so viel herausgefunden werden kann. Der Gedanke, dass Dunkle Materie ein so wichtiger Teil sein muss, finde ich erstaunlich.

Literatur

- Anderl, S. (2023). *Dunkle materie: Das grosse rätsel der kosmologie* (2nd ed.). München: C.H.Beck.
- Bührke, T. (2022). *Was ist dunkle materie: Die suche nach der unsichtbaren kraft im all* (1st ed.). Stuttgart: Franckh-Kosmos Verlags-GmbH.
- Friedrich, B. (1969). *Geschichte der astronomie* (1st ed.). Mannheim: Bibliographisches Institut, B.I.-Wissenschaftsverlag.
- Hornung, E. (1998). *Die nachtfahrt der sonne* (1st ed.). Düsseldorf: Artemis und Winkler.
- Moeller, A.-K. (2010). *Rotation von galaxien* (Bachelor thesis). Universität Bielefeld, Example City, CA. (Available at https://www2.physik.uni-bielefeld.de/fileadmin/user_upload/theory_e6/Bachelor_Theses/Bachelorarbeit_AnnKristinMoeller.pdf)
- Ribas, I. (2020). *Unsere galaxis: Eine faszinierende reise durch die milchstrasse* (1st ed.). München: National Geography.
- Sofue, Y., & Rubin, V. (2001, January). Rotation Curves of Spiral Galaxies. *Abgerufen am 2. September 2023 von Arxive: https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2001ARA&A..39..137S*, 39, 137-174.
- Walker, C. (1999). *Astronomy befor the telescope* (1st ed.). London: British Museum Press.

Abbildungsverzeichnis

1	Abbildung 1: Aufbau Milchstrasse	4
2	Abbildung 2: Berechnete und beobachtete Rotationskurve	5
3	Abbildung 3: Dunkle Materie Halo der Milchstrasse	8

Hiermit versichere ich, dass ich die vorstehende Arbeit selbstständig angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäss übernommen wurden, habe ich als solche gekennzeichnet.

Hanna Kradolfer