



Warum es Dunkle Materie geben muss

Facharbeit zum Seminarfach Astronomie

Verfasser: Baute, Felix

Jahrgang: 12

Fachlehrer: Herr Riemer

Abgabedatum: 07.03.2022, Bramsche

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	2
2. Allgemeines.....	2
2.1 Was ist Dunkle Materie und warum muss es sie geben?.....	2
2.2 Mögliche Formen Dunkler Materie.....	3
2.2.1 Baryonische Dunkle Materie.....	3
2.2.2 Heiße Dunkle Materie.....	3
2.2.3 Kalte Dunkle Materie.....	3
2.3 Zusammensetzung des Universums.....	4
3. Nachweise Dunkler Materie.....	4
3.1 Röntgenstrahlung.....	4
3.2 Korrelierte Phonon/Photon-Detektierung.....	5
4. Die Entstehung der Dunklen Materie.....	5
5. Gravitationslinseneffekt.....	6
5.1 Starker Gravitationslinseneffekt.....	7
5.2 Schwacher Gravitationslinseneffekt.....	7
5.3 Mikrolinseneffekt.....	8
6. Beobachtungsgeschichte.....	8
7. Die Millennium Simulation.....	9
8. Alternativen zu Dunkler Materie.....	10
8.1 MOND-Hypothese.....	10
8.2 TeVeS-Gravitationstheorie.....	11
8.3 STVG-Gravitationstheorie	11
8. Fazit.....	12
9. Quellenverzeichnis.....	13
10. Versicherung der selbstständigen Erarbeitung und Anfertigung der Facharbeit.....	14
11. Einverständniserklärung zur Veröffentlichung.....	14

1. Einleitung

Bestimmt jeder hat sich schon einmal gefragt: Was ist eigentlich da draußen? Woraus besteht das Universum überhaupt? Die Antworten auf diese Fragen sind nicht so leicht, wie man vielleicht annehmen mag. So ist zwar die Zusammensetzung der uns bekannten Materie im Universum bekannt, jedoch deckt diese gerade einmal einen kleinen Bestandteil der gesamten Zusammensetzung des Universums ab. Der Rest des Universums besteht wohl aus der sogenannten Dunklen Materie sowie der Dunklen Energie.¹

Was diese Dunkle Materie ist, warum es sie geben muss und was es für alternative Theorien zu ihr gibt, wird im folgendem Text erläutert.

2. Allgemeines

2.1 Was ist Dunkle Materie und warum muss es sie geben?

Wir können Dunkle Materie nicht sehen. Ebenfalls wissen wir auch gar nicht genau, was Dunkle Materie überhaupt ist. Jedoch wissen wir, dass sie existieren muss. Denn ohne irgendeine weitere Form von Materie, würde die Gravitation der uns bekannten Materie nicht stark genug sein um zum Beispiel Galaxien zusammenhalten zu können. Sterne würden lediglich verstreut in unserem Universum schweben, sich jedoch nicht zu einem Konstrukt, wie einer Galaxie, zusammenhalten können. Aufgrund dessen muss also noch irgendetwas in unserem Universum existieren, was genug Gravitationskraft hat, um Konstrukte wie Galaxien zusammenzuhalten, Dunkle Materie.²

1 <https://supernova.eso.org/germany/exhibition/1114/>

2 https://www.youtube.com/watch?v=QAa2O_8wBUQ

2.2 Mögliche Formen Dunkler Materie

2.2.1 Baryonische Dunkle Materie

Eine mögliche Form der Dunklen Materie ist die gewöhnliche Materie oder auch Baryonische Dunkle Materie genannt. Diese Materie besteht sowohl aus Protonen, Neutronen, als auch Elektronen, besitzt jedoch zu wenig elektromagnetische Abstrahlung, um ein detektierbares Leuchten zu erzeugen. Die Namensgeber sind hier die Baryonen Protonen und Neutronen. Ein Beispiel für diese Form der Dunklen Materie sind die MACHOs, die Massive Compact Halo Objects. Diese MACHOs sind massereiche, kompakte Halo-Objekte, das heißt sie sind aus baryonischer Masse bestehende Himmelskörper innerhalb des Halos einer Galaxie.³

2.2.2 Heiße Dunkle Materie

Ein weiteres Modell der Dunklen Materie ist die Heiße Dunkle Materie (kurz: HDM). Diese besteht im Gegensatz zu der Baryonischen Dunklen Materie aus nicht-baryonischen Teilchen, das heißt nicht aus der uns bekannten Materie. Diese Teilchen bewegen sich mit Geschwindigkeiten, welche nahe der Lichtgeschwindigkeit liegen, durch das Universum. Die Neutrinos sind ein Beispiel für diese Form der Dunklen Materie. Neutrinos sind neutral geladene Teilchen mit sehr geringer Masse. Aufgrund der geringen Masse soll es den Neutrinos also möglich sein, sich nahezu mit Lichtgeschwindigkeit zu bewegen.⁴

2.2.3 Kalte Dunkle Materie

Die Kalte Dunkle Materie (kurz: CDM) ist eine Form der Dunklen Materie, welche wieder auf nicht-baryonischen Teilchen beruht. Diese nicht-

3 https://www.edugroup.at/fileadmin/DAM/eduhi/data_dl/IB-Arten_von_Dunkler_Materie_v1.pdf

4 https://www.edugroup.at/fileadmin/DAM/eduhi/data_dl/IB-Arten_von_Dunkler_Materie_v1.pdf

baryonischen Teilchen unterliegen nur der Gravitation sowie der schwachen Wechselwirkung und bewegen sich aufgrund dessen mit nichtrelativistischen Geschwindigkeiten, was bedeutet, dass die Geschwindigkeit nicht durch Einsteins Relativitätstheorie beeinflusst wird.⁵

2.3 Zusammensetzung des Universums

Der kleinste Anteil, aus dem das Universum besteht, ist mit 5% die uns bekannte Materie sowie Energie. Hiermit ist all das gemeint, was Licht reflektiert und wir es als Menschen in der Theorie sehen können. In diese Kategorie fallen also unter anderem Galaxien, Planeten, Atome, aber auch wir selbst. Die gesamte uns bekannte Materie besteht aus 75% Wasserstoff, 24% Helium und einem kleinen Anteil von 1% an schwereren Elementen. Einen bereits größeren Anteil unseres Universums macht mit 27% die Dunkle Materie aus. Jedoch der mit 68% größte Anteil unseres Universums besteht aus Dunkler Energie. Mithilfe dieser unbekanntes Energie wird die immer schneller werdende Expansion unseres Universums begründet.⁶

3. Nachweise Dunkler Materie

3.1 Röntgenstrahlung

Im Jahre 2014 wurde nach Untersuchungen von entfernten Galaxien von einer bisher unentdeckten Spektrallinie in der Röntgenstrahlung Sprache gehalten. Diese neue Spektrallinie soll nun als ein neuer Hinweis auf Dunkle Materie gelten, da bereits vor längerer Zeit die Theorie aufgestellt wurde, dass Dunkle Materie bei ihrem Verfall Röntgenstrahlung aussenden könnte.

Nach einem Ansatz des Physikers Joachim Kopp und seinem Team soll diese in der Spektrallinie gemessene Röntgenstrahlung von dem sich

5 https://www.edugroup.at/fileadmin/DAM/eduhi/data_dl/IB-Arten_von_Dunkler_Materie_v1.pdf

6 https://de.wikipedia.org/wiki/Universum#Alter_und_Zusammensetzung

gegenseitigen vernichten von Teilchen der Dunklen Materie (Paarvernichtung) stammen. Damit dies jedoch möglich ist, müssten Dunkle Materieteilchen eine nur sehr geringe Masse von etwa ein paar Kiloelektronenvolt haben. Auf diese Erkenntnis folgte Kritik, da angenommen wird, dass bei einer so leichten Dunklen Materie keine Galaxien hätten entstehen können. In Joachim Kopps Modell ist die Paarvernichtung jedoch in zwei Phasen geteilt. In der ersten wird erstmals ein Zustand gebildet, welcher sich daraufhin in die Röntgenstrahlung auflöst.⁷

3.2 Korrelierte Phonon/Photon-Detektierung

Ein weiterer Nachweis von Dunkler Materie besteht in schwach wechselwirkenden massiven Teilchen beziehungsweise WIMPs. Beim Untersuchen dieser WIMPs benutzt man verschiedene Dinge, wie Wolfram-Dünnschicht-Phasenübergangs-Sensoren als eine Art Thermometer, um damit Temperaturerhöhungen festzustellen. Jedoch beobachtet man nicht nur Temperaturerhöhungen, sondern ebenfalls Wechselwirkungen, welche sich von Störereignissen, wie zum Beispiel radioaktive Verunreinigungen unterscheiden.⁸

4. Die Entstehung der Dunklen Materie

Die Entstehung der Dunklen Materie ist ein stark umstrittenes Thema, welches mit vielen verschiedenen Theorien zu begründen versucht wird. Eine Theorie, aufgestellt von Wissenschaftlern der Johannes Gutenberg-Universität Mainz, aus dem Jahre 2017 soll nun aber eine Alternative zu der vorherrschenden Theorie der WIMP-Paradigma bieten. Entgegen

7

https://de.wikipedia.org/wiki/Dunkle_Materie#Nachweis_durch_korrelierte_Phonon/Photon-Detektierung

8

https://de.wikipedia.org/wiki/Dunkle_Materie#Nachweis_durch_korrelierte_Phonon/Photon-Detektierung

ursprünglicher Annahmen zeigen die Wissenschaftler nun nämlich, dass Dunkle Materie nicht unbedingt seit dem Anfang ihrer Existenz stabil gewesen ist, sondern durchaus zu Beginn der Entstehung des Universums instabil gewesen sein könnte. Das Problem bei dieser Theorie ist jedoch, dass die Stabilität mit einem Symmetrieprinzip erklärt wird. Dieses Symmetrieprinzip wird also laut den Wissenschaftlern gebrochen, was wiederum auch einen Zerfall von Dunkler Materieteilchen möglich machen würde und damit die Theorie bestärkt. In dem elektroschwachen Phasenübergang des Universums wurde die Symmetrie laut den Wissenschaftlern dann wieder hergestellt, wobei die Dunkle Materie stabilisiert und damit das Vorkommen dieser im All fixiert wurde. Mit dieser Theorie soll letztendlich aber nicht nur die Entstehung Dunkler Materie erklärt, sondern auch der Zusammenhang von Materie und Antimaterie, also Materie mit entgegengesetzter elektrischer Ladung, in unserem Universum dargestellt werden.⁹

5. Gravitationslinseneffekt

Große Ansammlungen von Masse (Gravitationslinsen) können den Raum durch das lenken elektromagnetischer Wellen in eine andere Richtung krümmen. Dadurch kann wiederum von Sternen stammendes Licht abgelenkt werden. Mithilfe der Beobachtung verschiedener Intensitäten der Lichtablenkung sollte man die Masse des Sternes, von welchem das Licht stammt, berechnen können. Erstmals wurde der Gravitationslinseneffekt im Jahre 1919 während der Sonnenfinsternis am 29. Mai experimentell benutzt. Jedoch war das Ziel hier nicht etwa die Bestimmung der Masse der Sonne, sondern die erste experimentelle Überprüfung von Einsteins allgemeinen Relativitätstheorie. Darauf folgend wurde der Effekt aber auch für andere Dinge, wie die Berechnung der Masse von Sternen. Jedoch kam mit der Zeit ein Problem auf. Die Lichtablenkung der Ansammlungen von Masse wichen

⁹ <https://prisma.uni-mainz.de/neue-theorie-zur-entstehung-dunkler-materie-vorgestellt/>

voneinander ab, obwohl die Masse der Gravitationslinsen scheinbar gleich waren. Dies bedeutete also, dass eine andere, unsichtbare, Masse die Lichtablenkung der Gravitationslinsen beeinflusste. Hiermit entstand nun ein neuer Hinweis auf die Existenz Dunkler Materie, da Dunkle Materie sowohl unsichtbar ist, als auch in Mengen vorkommt, welche groß genug sind um einen Einfluss auf die Lichtablenkung zu haben. Es gibt aber nicht nur den einen Gravitationslinseneffekt, sondern wird er grundsätzlich in drei verschiedene Arten von Effekten eingeteilt.¹⁰

5.1 Starker Gravitationslinseneffekt

Der starke Gravitationslinseneffekt entsteht im Normalfall nur bei sehr großen Objekten, wie zum Beispiel Galaxien, Galaxienhaufen oder schwarzen Löchern. Bei dieser Art des Gravitationseffekts wird das Licht des hinter der Gravitationslinse liegenden Objektes nicht nur leicht verzerrt, sondern oftmals in zwei oder sogar mehr Objekte verschoben. Dieses Phänomen des starken Gravitationslinseneffekts wurde erstmals im Jahr 1979 an dem „Twin Quasar Q0957+561“ festgestellt. Eine weitere, recht bekannte Beobachtung ist das im Jahre 1985 entdeckte Einsteinkreuz. Dieses besteht im Gegensatz zum „Twin Quasar Q0957+561“ nicht nur aus einer visuellen Verdoppelung, sondern gleich aus einer vierfachen Abbildung des Objektes.¹¹

5.2 Schwacher Gravitationslinseneffekt

Schwache Gravitationslinseneffekte entstehen bei entweder kleinen oder sehr weit entfernten Gravitationsfeldern. Bei dieser Art des Effektes kann man die Auswirkungen der Gravitationslinse nicht direkt erkennen, weil das Objekt, welches hinter der Linse liegt zu schwach beziehungsweise zu klein ist um es bei uns zu erkennen. Jedoch kann man die Gravitationslinse dennoch erkennen. Hierzu muss aber nicht das Objekt direkt hinter der Linse, sondern andere Objekte im Hintergrund, wie zum Beispiel weiter

¹⁰ <https://de.wikipedia.org/wiki/Gravitationslinseneffekt>

¹¹ <https://de.wikipedia.org/wiki/Gravitationslinseneffekt>

entfernte Galaxien oder ähnliches beobachtet werden. Bei einer bestimmten Anordnung dieser im Hintergrund liegenden Galaxien, oftmals eine kreisförmige Anordnung, kann man davon ausgehen, dass diese durch eine Gravitationslinse hervorgerufen wird. Das Problem bei dem Erkennen von schwachen Gravitationslinseneffekten ist aber, dass eine große Menge von im Hintergrund liegenden Galaxien untersucht werden muss um ein Ergebnis erkennen zu können, was oftmals sehr lange dauert.¹²

5.3 Mikrolinseneffekt

Die letzte Form des Gravitationslinseneffekts ist der Mikrolinseneffekt. Bei diesem erfolgt gar keine wirkliche Lichtverzerrung, sondern eher eine Lichtbündelung. Aufgrund der geringen Ablenkung des Lichtes führt die Gravitationslinse hier nämlich dazu, dass in einem kleinem Beobachtungsraum ein temporärer Helligkeitsanstieg wahrzunehmen ist. Dieser Mikrolinseneffekt kann, gegensätzlich zu den anderen beiden Formen, auch entstehen, wenn ein einzelner Stern vor einem wesentlich schwächeren Objekt liegt und das Licht dieses Objektes bündelt und somit für eine kurze Zeit verstärkt.¹³

6. Beobachtungsgeschichte

Erstmals wurde Dunkle Materie im Jahre 1932 von dem niederländischen Astronom Jan Hendrik Oort vermutet. Er entdeckte in dem Bereich der Scheibe der Milchstraße eine deutlich höhere Dichte, als die zu dieser Zeit bekannte. Sie betrug statt den damals bekannten Werten von $0,038 \text{ M}_{\odot}/\text{pc}^3$ einen Wert von $0,092 \text{ M}_{\odot}/\text{pc}^3$. Jedoch stellte sich später heraus, dass sich dieser Dichteunterschied nicht mit Dunkler Materie zu erklären lies, sondern lediglich mit damals nicht wahrgenommenem Gas und Staub. Schon ein Jahr später aber kam eine neue Vermutung von Dunkler Materie auf. Der Schweizer Physiker und Astronom Fritz Zwicky entdeckte nämlich, dass die

¹² <https://de.wikipedia.org/wiki/Gravitationslinseneffekt>

¹³ <https://de.wikipedia.org/wiki/Gravitationslinseneffekt>

in dem Galaxienhaufen „Coma-Haufen“ enthaltene Masse bei weitem zu gering ist, um diesen überhaupt zusammenzuhalten. Er schloss daraus, dass es eine andere Quelle von Masse geben muss, welche circa das 400-Fache von der sichtbaren Masse enthält, um den Galaxienhaufen zusammenhalten zu können. Damals lehnte ein Großteil der Fachwelt seine Theorie jedoch ab. Erst 27 Jahre nach Zwickys Entdeckung, im Jahre 1960, kam die Theorie der Dunklen Materie erneut auf und wurde infolge einer Analyse von der US-Amerikanischen Astronomin Vera Rubin über die Umlaufgeschwindigkeiten von Sternen in Spiralgalaxien nun weitgehend ernst genommen. Sie stellte fest, dass sich die Umlaufgeschwindigkeit von Sternen mit zunehmender Entfernung vom Galaxiezentrum nicht sonderlich verringert, was laut Prognosen jedoch der Fall sein müsste. Diese Beobachtungen wurden mithilfe der Rotationskurve festgehalten. Durch weitere Beobachtungen über die nächsten Jahre wurde die Existenz von Dunkler Materie immer wahrscheinlicher, bis letztendlich im Jahr 2006 die stärksten Hinweise auf Dunkle Materie aufgrund von des Gravitationslinseneffekts, der Galaxienverteilung und der Röntgenemission im Bullet-Cluster beobachtet wurden.¹⁴

7. Die Millennium Simulation

Es gibt jedoch nicht nur Experimente oder ähnliches um die Dunkle Materie erklären beziehungsweise nachweisen zu können, sondern wird die Theorie der Dunklen Materie auch benutzt, um andere Dinge zu erklären oder zu simulieren. Ein Beispiel einer solchen ist die Millennium Simulation. Eine Simulation, welche von Wissenschaftlern des Virgo-Konsortiums, das heißt von Wissenschaftlern aus Deutschland, Kanada, Japan, Großbritannien und den USA durchgeführt wurde. Sie wurde durchgeführt, um die Entstehung von Großstrukturen, wie Galaxien und Sternen seit des Urknalls nachvollziehen zu können. Es wurde ein würfelförmiger Raum mit einer Kantenlänge von 2 Milliarden Lichtjahren jeweils in Zeitabständen von 10

¹⁴ https://de.wikipedia.org/wiki/Dunkle_Materie#Beobachtungsgeschichte

Millionen Jahren über 11.000 Zeitschritte, das heißt über das gesamte Alter des heutigen Universums, simuliert. Aufgrund des Faktes, dass die Dunkle Materie einen großen Bestandteil der Masse unseres Universums einnimmt, spielte sie auch in dieser Simulation eine große Rolle. Auf der simulierten Fläche wurde insgesamt eine Menge virtueller Dunkler Materie eingesetzt, welche 10 Trillionen Sonnenmassen entspricht. Im Verlaufe der Simulation wurde schnell klar, dass die Ergebnisse gut mit den Beobachtungen in unserem Universum übereinstimmen und ebenfalls Konstrukte, wie Galaxien und Galaxienhaufen entstanden. Es folgten zwei weitere Millennium Simulationen, Millennium II und Millennium XXL. Millennium II hatte im Gegensatz zu der ursprünglichen Millennium Simulation einen kleineren Raum mit weniger Teilchen betrachtet, womit beobachtet werden konnte, ob die Ergebnisse bei einer niedrigeren Auflösung von den Ergebnissen bei einer höheren Auflösung abweichen. Die Millennium XXL Simulation war die aufwendigste der Millennium Simulationen. Sie wurde im Jahre 2010 auf einem der damaligen Top-15-Supercomputern, dem JUROPA durchgeführt. Sie betrachtete, mit einer Kantenlänge von 12 Milliarden Lichtjahren, einen deutlich größeren Raum als die beiden vorigen Simulationen, was zu einem circa 15 mal so großem beobachtetem Volumen wie bei der ursprünglichen Simulation führte. Die Ergebnisse dieser größten Simulation wurden für die Bestimmung der Verteilung von Galaxien und Halos von Dunkler Materie zu untersuchen und damit weiterhin erklären zu können, wie große Strukturen in unserem Universum entstehen konnten.¹⁵

8. Alternativen zu Dunkler Materie

Dunkle Materie ist aber nicht die einzige Theorie womit Sachen, wie zum Beispiel die zu geringe Gravitationskraft für das Zusammenhalten von Galaxien durch die uns bekannte Materie erklärt werden kann. Nach dem Newtonschen Gravitationsgesetz beziehungsweise der Allgemeinen

¹⁵ <https://de.wikipedia.org/wiki/Millennium-Simulation>

Relativitätstheorie ist Dunkle Materie zwar die einzige Möglichkeit, jedoch wurden mehrere umstrittene Theorien aufgestellt, welche nicht etwa eine neue Materie Komponente, sondern eine komplette Änderung der Gravitationstheorien impliziert.¹⁶

8.1 MOND-Hypothese

Eine dieser Hypothesen ist die Modifizierte Newtonsche Dynamik Hypothese (kurz: MOND- Hypothese). Erstmals wurde sie im Jahr 1983 von Physiker Mordehai Milgrom vorgeschlagen und hat vorerst nur wenige Anhänger für sich gewonnen. Sie kritisiert, dass bei den newtonschen Bewegungsgesetzen nicht beachtet wurde, dass schon bei kleinen Änderungen der Beschleunigungen, große Unterschiede in der Bewegung vorkommen. Ein weiteres Argument der Befürworter der MOND-Hypothese ist, dass bereits mehrere Verbesserungen an der newtonschen Gravitationstheorie vorgenommen wurden und damit keine weitere Modifikation ausgeschlossen ist.¹⁷ Große Kritik an der MOND-Hypothese besteht jedoch darin, dass kürzlich entdeckt wurde, dass die Zwerg-Galaxie „NGC1052-DF2“ ohne Dunkle Materie auskommt, was die MOND-Hypothese endgültig widerlegen soll.¹⁸

8.2 TeVeS-Gravitationstheorie

Physiker Jacob David Bekenstein entwickelte die MOND-Hypothese im Jahre 2004 in die Tensor-Vektor-Skalar-Gravitationstheorie (kurz: TeVeS) weiter. Auf der Grundlage der MOND-Hypothese geht auch diese nicht von Dunkler Materie und Dunkler Energie aus, sondern von einer Änderung der allgemeinen Relativitätstheorie. Im Gegensatz zu der MOND-Hypothese wird hier aber nicht der Einfluss von der Beschleunigung auf die Bewegung

¹⁶ https://de.wikipedia.org/wiki/Dunkle_Materie

¹⁷

https://de.wikipedia.org/wiki/Modifizierte_Newtonsche_Dynamik#cite_note-2

¹⁸ <https://idw-online.de/de/news?print=1&id=702237>

kritisiert, sondern eher eine andere Herangehensweise an das Formulieren von Gravitationsstärke in Abhängigkeit von der Entfernung zur Masse vorgeschlagen. Während die allgemeine Relativitätstheorie die Raumgeometrie lediglich mit Hilfe eines einzelnen Tensors darstellt, kommt bei der TeVeS-Gravitationstheorie ein Tensor, ein Skalar, sowie ein Vektor zum Einsatz.¹⁹

8.3 STVG-Gravitationstheorie

Eine weitere Theorie ist die Skalar-Tensor-Vektor-Gravitationstheorie (kurz: STVG), entwickelt von John Moffat. Sie ist ebenfalls eine weitere modifizierte Theorie der Gravitation und wird deshalb auch Modifizierte Gravitation (kurz: MOG) genannt. Sie besagt, dass die Gravitation auf größeren Distanzen eine stärker Wirkung hat, als die bisherigen Theorien besagen. Dies würde also alternativ zu Dunkler Materie beziehungsweise Dunkler Energie die schnelle Bewegung von Sternen am Rande von Galaxien erklären.²⁰

8. Fazit

Die Dunkle Materie wird vermutlich noch für viele Jahre ein ungelöstes Rätsel in der Astronomie bleiben und es wird eines der großen Ziele für Wissenschaftler darstellen, herauszufinden, was Dunkle Materie überhaupt genau ist, woraus sie besteht und vielleicht sogar ob man sie eventuell doch sehen kann. Es werden sicherlich noch zahlreiche Theorien aufgestellt, welche versuchen, die Dunkle Materie zu erklären, oder sogar Grundlegende Modelle, wie die allgemeine Relativitätstheorie in Frage stellen. Ich habe mich nun viel mit der Dunklen Materie, sowie alternativen zu dieser auseinandergesetzt und im Endeffekt bin ich zu dem Schluss gekommen, dass man einfach keine sichere Schlussfolgerung in Erwägung ziehen kann. Auch wenn es heute unter anderem aufgrund der Widersprüche

19 <https://de.wikipedia.org/wiki/Tensor-Vektor-Skalar-Gravitationstheorie>

20 <https://de.wikipedia.org/wiki/Skalar-Tensor-Vektor-Gravitationstheorie>

gegen die allgemeine Relativitätstheorie scheint, als wenn nur die Theorie der Dunklen Materie und Dunklen Energie wirklich Sinn ergibt, kann dies in ein paar Monaten theoretisch durch bahnbrechende Entdeckungen schon wieder komplett anders aussehen. Letztendlich kann uns nur die weitere Erforschung und Erkundung des Universums und der Dunklen Materie zu antworten verhelfen. Jedoch selbst wenn die Rätsel der Dunklen Materie einmal gelöst werden, und man weiß, was diese genau ist, wird all dies vermutlich nur noch mehr Fragen und Mysterien aufwerfen, die es für die Wissenschaftler gilt zu klären.

9. Quellenverzeichnis

- https://de.wikipedia.org/wiki/Dunkle_Materie
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Gravitationslinseneffekt>
- <https://de.wikipedia.org/wiki/MACHO>
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Millennium-Simulation>
- https://de.wikipedia.org/wiki/Modifizierte_Newtonsche_Dynamik#cite_note-2
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Skalar-Tensor-Vektor-Gravitationstheorie>
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Tensor-Vektor-Skalar-Gravitationstheorie>
- https://de.wikipedia.org/wiki/Universum#Alter_und_Zusammensetzung
- <https://idw-online.de/de/news?print=1&id=702237>
- <https://prisma.uni-mainz.de/neue-theorie-zur-entstehung-dunkler-materie-vorgestellt/>
- <https://supernova.eso.org/germany/exhibition/1114/>
- https://www.edugroup.at/fileadmin/DAM/eduhi/data_dl/IB-Arten_von_Dunkler_Materie_v1.pdf
- <https://www.youtube.com/watch?v=8RMV2voGFNw>
- <https://www.youtube.com/watch?v=DmWV7Zovct8>
- <https://www.youtube.com/watch?v=1B3pG0XqmQk>
- https://www.youtube.com/watch?v=QAa2O_8wBUQ

10. Versicherung der selbstständigen Erarbeitung und Anfertigung der Facharbeit

Hiermit versichere ich, dass ich die Arbeit selbständig angefertigt, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt und die Stellen der Facharbeit, die im Wortlaut oder im wesentlichen Inhalt aus anderen Werken (auch aus dem Internet) entnommen wurden, mit genauer Quellenangabe kenntlich gemacht habe. Verwendete Informationen aus dem Internet sind nach Absprache mit der Fachlehrerin bzw. dem Fachlehrer vollständig im Ausdruck zur Verfügung zu stellen.

Bramsche, den 07.03.2022

A handwritten signature in cursive script that reads "Felix Baute". The signature is written in black ink on a white background and is positioned above a horizontal line.

Unterschrift der Schülerin / des Schülers

11. Einverständniserklärung zur Veröffentlichung

Hiermit erkläre ich, dass ich damit einverstanden bin, wenn die von mir verfasste Facharbeit der schulinternen Öffentlichkeit zugänglich gemacht wird.

Bramsche, den 07.03.2022

A handwritten signature in cursive script that reads "Felix Baute". The signature is written in black ink on a white background and is positioned above a horizontal line.

Unterschrift der Schülerin / des Schülers