

Albert Kristensen

6C3

2023-2024

# **Die Entdeckung und Erforschung der Dunklen Materie**

Lycée Ermesinde Mersch

Tuteur: Harald Schleicher

## **Inhaltsverzeichnis**

<u>1. Einleitung</u>	Seite 1
<u>2. Grundlagen der Teilchenphysik</u>	Seite 3
<u>3. Geschichte der Dunkle-Materie-Forschung</u>	Seite 10
<u>4. Aktuelle Beobachtungen und Experimente</u>	Seite 15
<u>5. Theoretische Modelle</u>	Seite 21
<u>6. Experimentelle Suche nach Dunkler Materie</u>	Seite 30
<u>7. Zusammenhang mit anderen astrophysikalischen Phänomenen</u>	Seite 33
<u>8. Zusammenfassung</u>	Seite 34
<u>9. Literaturverzeichnis</u>	Seite 36

# 1. Einleitung

## Dunkle Materie und die Geheimnisse des Universums

Unser Universum ist ein faszinierendes und komplexes Netzwerk aus Galaxien, Sternen und Planeten. Die sichtbare Materie, die aus Atomen besteht, macht jedoch nur einen kleinen Teil der Gesamtmasse des Universums aus. Ein Großteil der kosmischen Masse bleibt im wahrsten Sinne des Wortes im Dunkeln. Dieses geheimnisvolle Element, das wir als „Dunkle Materie“ bezeichnen, ist zu einem der faszinierendsten Rätsel der modernen Astrophysik geworden.<sup>1)2)</sup>

Die Entdeckung der Dunklen Materie geht auf Beobachtungen zurück, die scheinbare Abweichungen in der Bewegung von Galaxien und Galaxienhaufen zeigen. Mit den klassischen Modellen der Teilchenphysik, die die sichtbare Materie beschreiben, lassen sich diese Beobachtungen nicht erklären. Die Suche nach der Herkunft der Dunklen Materie ist daher zu einem Schlüsselgebiet der Forschung geworden, das nicht nur unser Verständnis über die Struktur des Universums erweitern, sondern auch grundlegende Fragen über den Ursprung von Materie und Energie beantworten könnte.<sup>5)</sup>

## Ziele und Ursprung von diesem „Travail Personnel“

Dieses „Travail Personnel“ widmet sich der faszinierenden Welt der Dunklen Materie. Der Leser und ich werden in die Grundlagen dieser mysteriösen Substanz eintauchen, die Entwicklung ihrer Erforschung in der Geschichte erkunden, die aktuellen Bemühungen erleuchten und ihren Geheimnissen auf die Spur kommen. Dabei werden wir uns mit theoretischen Modellen, experimentellen Ansätzen und den neuesten Entwicklungen in der Erforschung der Dunklen Materie beschäftigen. Das Ziel ist, nicht nur die Rätsel der Dunklen Materie zu beleuchten, sondern auch einen Blick in die Zukunft der Astrophysik zu werfen und die Grenzen unseres Wissens über das Universum neu erstellen und erweitern.

Ich habe dieses Thema gewählt, weil mein „Projet Personnel“ Astrophysiker ist und weil ich die Idee, dass ich ein „Travail Personnel“ über Dunkle Materie machen will, schon längere Zeit im Hinterkopf hatte. Die Idee kam, weil ich ein Video darüber gesehen habe. Ich bin ebenfalls in der Entreprise „LEM.Science“ und beschäftige mich unter anderem mit Myonen (Elementarteilchen im Standardmodell der Teilchenphysik).

## Hintergrund: Die Entdeckung der Dunklen Materie

Die Erforschung der Dunklen Materie begann Mitte des 20. Jahrhunderts, als Astronomen begannen, die Geschwindigkeiten von Galaxien in Galaxienhaufen zu untersuchen. Zu ihrer Überraschung stellten sie fest, dass die sichtbare Materie allein nicht ausreichte, um die beobachteten Rotationsgeschwindigkeiten und Bewegungen der Galaxien zu erklären. Nach den Prinzipien der Newtonschen Physik hätten die äußeren Teile einer Galaxie langsamer rotieren müssen als die inneren, so wie die äußeren Planeten langsamer um die Sonne kreisen als die inneren. Die Realität war jedoch anders: Die Rotationskurven zeigten eine unerwartete Gleichförmigkeit, als gäbe es eine unsichtbare Masse, die die Gravitationskräfte beeinflusst.<sup>5)</sup>

Eine entscheidende Wende kam in den 1960 und 1970er Jahren, als die Astrophysikerin Vera Rubin und ihr Team die Rotationskurven von Spiralgalaxien eingehend untersuchten. Ihre Beobachtungen bestätigten die Anomalien und legten den Grundstein für die Hypothese der Dunklen Materie. Seither haben zahlreiche weitere Beobachtungen, von Gravitationslinsen bis hin zu Untersuchungen des kosmischen Mikrowellenhintergrunds, die Existenz der Dunklen Materie bestätigt.<sup>5)</sup>

## Motivation zur Erforschung der Dunklen Materie

Die Motivation, Dunkle Materie zu erforschen, geht über reine Neugier hinaus. Ihre Existenz beeinflusst nicht nur die Struktur und Dynamik von Galaxien und Galaxienhaufen, sondern hat auch erhebliche Auswirkungen auf unser grundlegendes Verständnis des Universums. Einige der wichtigsten Motive sind der Einfluss auf die Bildung und Entwicklung von Galaxien, der Gravitationslinseneffekt, also dass sich Licht um massereiche Objekte wie bei einer Linse krümmt, und die potenzielle Veränderung der fundamentalen Physik. Es lässt sich also sagen, dass die Faszination für das uns Unbekannte zusammen mit den Auswirkungen auf unser Verständnis des Weltraums und der Grundlagenphysik die Motivation zur Erforschung der Dunklen Materie antreibt.<sup>4)</sup>

## **2. Grundlagen der Teilchenphysik**

### **Zusammensetzung des Universums**

Nach dem Standardmodell der Kosmologie besteht das Universum aus 4 Komponenten. Nur für 4% dieser Materie haben wir physikalische Theorien, die auch experimentell bestätigt wurde. Hier sind die ungefähren Prozentsätze des Anteils an der Materie der 4 Komponenten:

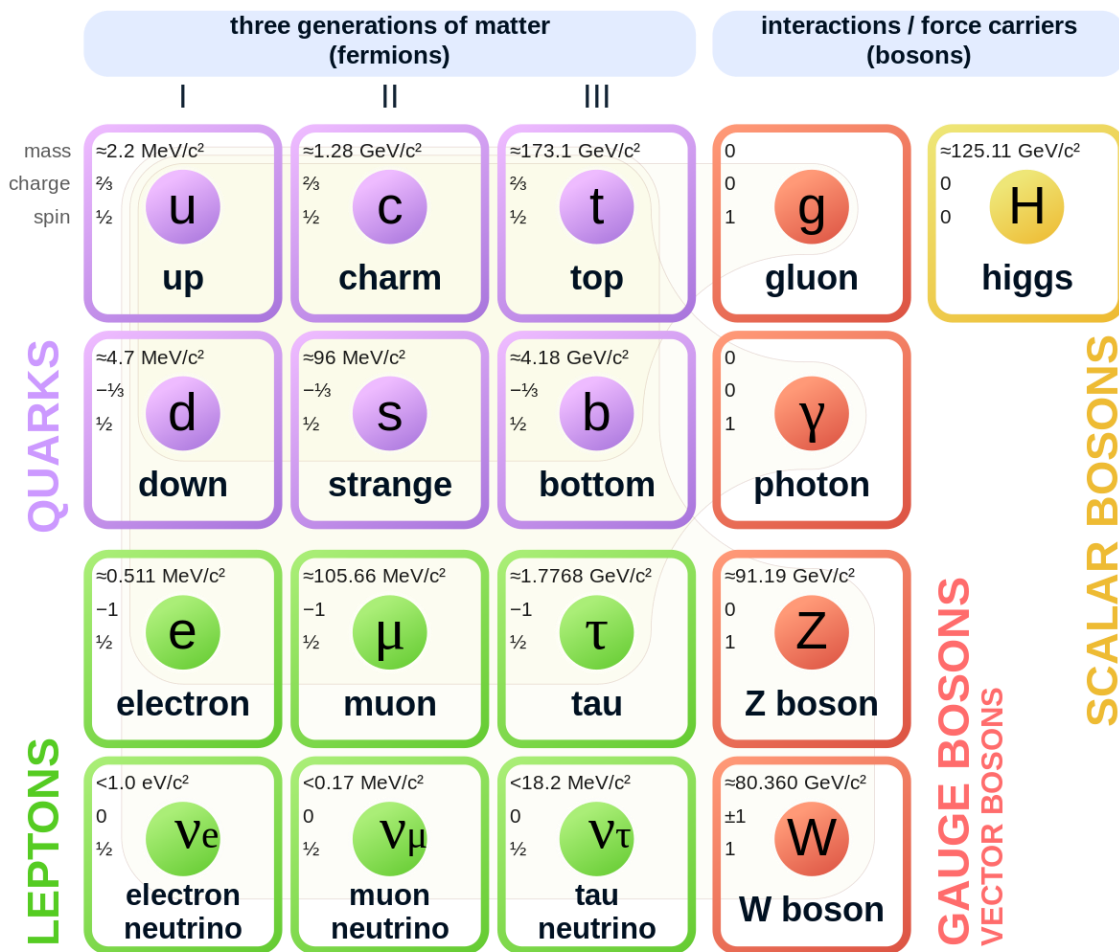
- 73% Dunkle Energie
- 23% Dunkle Materie
- 4% Gewöhnliche Materie
- 0,3% Neutrinos

Wenn man also von Materieteilchen spricht, beschreibt man nur 4% der gesamten Materie. Damit werden diese Teilchen gemeint:

- 6 Leptonen: Elektron + Elektron-Neutrino, Myon + Myon-Neutrino, Tau + Tau-Neutrino
- 6 Quarks (mit den „Flavors“): Up + Down, Charm + Strange, Top + Bottom, welche die Protonen und Neutronen aufbauen
- 6 Bosonen: Gluon + Photon + Z-Boson + W-Boson (alle bewiesen), Higgs-Boson, Graviton (nicht experimentell bewiesen), die Kräfte übertragen<sup>4)</sup>

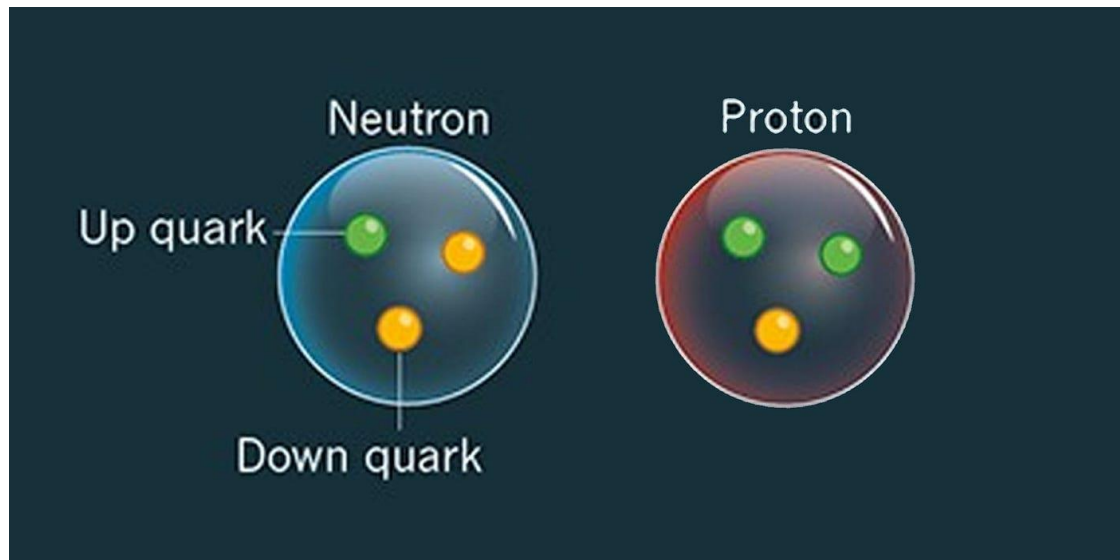
Materie besteht aus verschiedenen Molekülen. Diese sind von Atomen aufgebaut, also von Grundstoffen. Die wiederum bestehen aus noch kleineren Teilchen: Protonen, Neutronen und Elektronen. Protonen sind positiv, Neutronen neutral und Elektronen negativ geladen.

# Standard Model of Elementary Particles



Standardmodell der Teilchenphysik<sup>25)</sup>

Das liegt daran, dass Protonen und Neutronen aus Quarks, also aus noch kleineren Teilchen bestehen. Diese Quarks haben eine elektrische Ladung, und zwar hat ein Up-Quark eine positive Ladung von  $\frac{2}{3}$ , während das Down-Quark eine negative Ladung von  $\frac{1}{3}$  besitzt. Das Proton besitzt 2 Up-Quarks und 1 Down-Quark ( $+2/3 + +2/3 + -1/3 = +1$  (positiv geladen)) und das Neutron besteht aus 1 Up-Quark und 2 Down-Quarks ( $+2/3 + -1/3 + -1/3 = 0$  (neutral geladen)). Außer der Ladung gibt es auch noch den Spin, der den Eigendrehimpuls angibt. Ein halbzahliger Spin bedeutet, dass man nicht genau sagen kann, wo das Teilchen sich befindet, welches man bei ganzzahligem Spin kann. Bei allen Fermionen ist dieser  $\frac{1}{2}$ . Ich könnte ein ganzes Travail Personnel über den Spin schreiben, aber dieses handelt über Dunkle Materie. Dann gibt es die Quarks Charm, Strange, Top und Bottom. Sie sind viel seltener, da sie eine viel kürzere Lebensdauer haben. Doch ihre Masse ist größer.<sup>25)35)</sup>



### *Der Aufbau von Neutronen und Protonen*

Dann gibt es noch andere Teilchen, die Leptonen (vom Griechischem „leptos“ = leicht): das sind die Elektronen, Myonen und Tauonen und ihre Neutrinos. Elektronen sind die anderen Bauteile der Atome. Sie umkreisen den Kern, der aus Protonen und Neutronen besteht. Elektronen sind negativ geladen, bestehen aber nicht aus kleineren Teilchen. Das Myon ist ein anderes Lepton (ebenfalls negativ geladen), welches in der Erdatmosphäre durch einen sekundären Zerfall entsteht. Es ist der große, schwere Bruder des Elektrons. Man kann Myonen auch messen, wie zum Beispiel in dieser Schule. Durch die Anzahl der Myonen kann man die kosmische Strahlung bestimmen. Das Tauon ist das schwerste Lepton und sozusagen der extrem große Bruder. Es ist auch negativ geladen und hat eine sehr kurze Lebensdauer, aber für Elementarteilchen ist sie dennoch ziemlich lang. Wie das Myon sollte es mit seiner Geschwindigkeit (fast Lichtgeschwindigkeit) die Strecke von der Entstehung in der Erdatmosphäre zur Oberfläche nicht zurücklegen können. Aber durch die spezielle Relativitätstheorie von Einstein lässt sich dieses Phänomen erklären.<sup>35)</sup>

Diese drei Teilchen haben auch ihre Neutrinos. Die sind die kleinsten bislang entdeckten Teilchen und entstehen beim Zerfall des jeweiligen Leptons. Sie wechselwirken nicht elektromagnetisch, das heißt sie sind nicht sichtbar, da sie kein Licht reflektieren oder absorbieren. Sie könnten 2 Jahre lang durch Blei fliegen, bis sie auf einen Atomkern treffen würden und abgebremst werden würden. In diesem Augenblick durchqueren Billionen von Neutrinos durch deinen Körper, die vielleicht Milliarden von Lichtjahren gereist sind. Wir können sie messen, wenn wir einen Tank mit Wasser auffüllen. Da das Licht im Wasser langsamer wird und energiereiche Neutrinos nicht, können sie in ein Elektron treffen und dieses auf eine Geschwindigkeit beschleunigen, die schneller ist als Licht im Wasser, sodass das Elektron eine bestimmte Strahlung aussendet, die wir messen können. Neutrinos haben eine neutrale Ladung und nur eine sehr kleine Masse. Sie entstehen bei Kernreaktionen und wurden 1930 von Wolfgang Pauli vorhergesagt, damit bei (Atom-) Kernreaktionen keine Masse verloren ging. Neutrinos können ihre „Identität“ mit der Zeit wechseln, wenn sie sehr schnell durch das Weltall fliegen. So, jetzt sind wir fertig mit den Fermionen...

# Standard Model of Elementary Particles

	three generations of matter (elementary fermions)			three generations of antimatter (elementary antifermions)			interactions / force carriers (elementary bosons)	
	I	II	III	I	II	III		
mass	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	0	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>ū</b> antiup	<b>c̄</b> anticharm	<b>t̄</b> antitop	<b>g</b> gluon	<b>H</b> higgs
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>d̄</b> antidown	<b>s̄</b> antistrange	<b>b̄</b> antibottom	<b>γ</b> photon	
	<b>e</b> electron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>e<sup>+</sup></b> positron	<b>μ̄</b> antimuon	<b>τ̄</b> antitau	<b>Z</b> Z <sup>0</sup> boson	
	<b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	<b>ν̄<sub>e</sub></b> electron antineutrino	<b>ν̄<sub>μ</sub></b> muon antineutrino	<b>ν̄<sub>τ</sub></b> tau antineutrino	<b>W<sup>+</sup></b> W <sup>+</sup> boson	<b>W<sup>-</sup></b> W <sup>-</sup> boson
	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	1	1	1	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	<b>e</b> electron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>e<sup>+</sup></b> positron	<b>μ̄</b> antimuon	<b>τ̄</b> antitau	<b>Z</b> Z <sup>0</sup> boson	
	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$
	0	0	0	0	0	0	1	-1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	1
	<b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	<b>ν̄<sub>e</sub></b> electron antineutrino	<b>ν̄<sub>μ</sub></b> muon antineutrino	<b>ν̄<sub>τ</sub></b> tau antineutrino	<b>W<sup>+</sup></b> W <sup>+</sup> boson	<b>W<sup>-</sup></b> W <sup>-</sup> boson

Standardmodell der Teilchenphysik mit Antimaterie

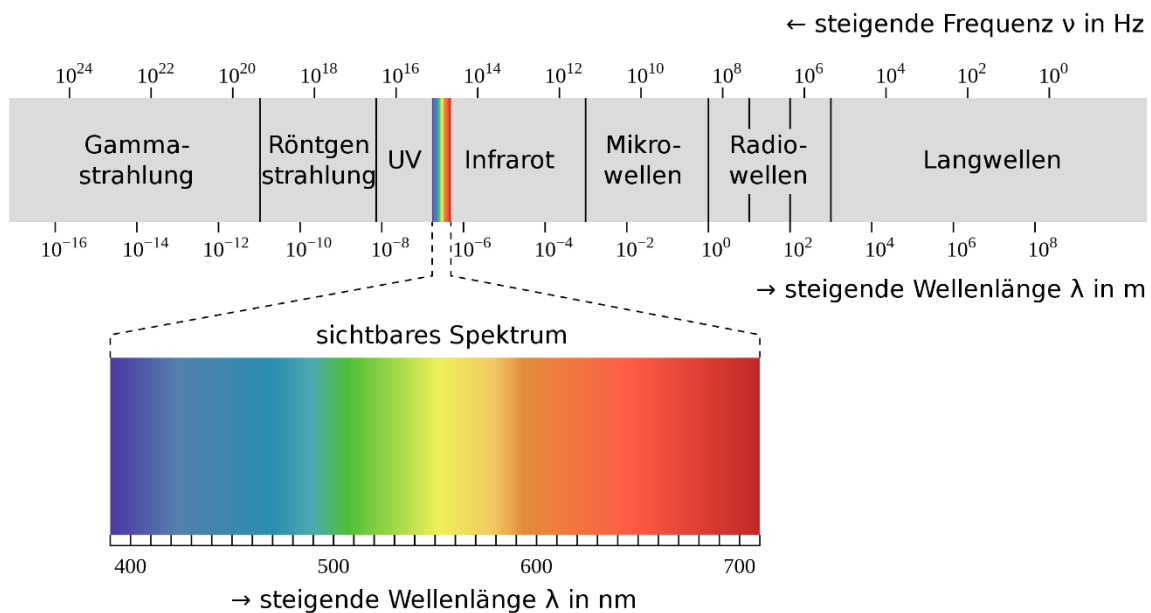
... nein wir sind noch nicht ganz fertig mit den Fermionen. Jedes Fermion hat sein Antiteilchen, doch der einzige Unterschied ist die elektrische Ladung, die umgekehrt ist. Es wird bei der Entstehung des entsprechenden Teilchens erzeugt und kann bei einer Kollision mit einem Teilchen seiner Art zusammen mit diesem vernichtet werden. Dadurch entsteht genau die Menge an Energie, damit Einsteins Gleichung  $E = mc^2$  stimmt. Diese Energie kann in verschiedenen Formen abgegeben werden, wie zum Beispiel elektromagnetische Strahlung bzw. Licht.<sup>35)</sup>

Die andere Gruppe der Elementarteilchen, die Bosonen, sind zuständig für die Wechselwirkungen im Universum. Sie sind Teilchen, aber nicht alle von ihnen haben eine Masse. Auch sie haben Antiteilchen, doch das sind sie selbst. Das erste Boson ist das Gluon. Es überträgt die starke Wechselwirkung zwischen Quarks. Man kann sich Gluonen als Klebebänder vorstellen, die die Quarks im Proton oder Neutron zusammenhalten. In Wirklichkeit werden sie aber von den Quarks ausgesendet und von den anderen aufgenommen. Dadurch wechseln die Quarks ständig ihre Identität, die auch „Farbe“ genannt wird. Dabei übertragen die Gluonen diese Farbe zwischen den Quarks. Doch Gluonen sind nicht nur zwischen den Quarks vorhanden, sondern binden auch die Protonen und Neutronen im Atomkern. Außerdem sind sie für den radioaktiven Alpha-Zerfall verantwortlich.<sup>42)</sup>

Als nächstes haben wir die Z-, W<sup>+</sup>- und W<sup>-</sup>-Bosonen. Die drei sind für die schwache Wechselwirkung zuständig. Alle Leptonen sind schwach wechselwirkende Teilchen, doch alle Teilchen haben eine schwache Hyperladung, damit sie dennoch schwach Wechselwirken können. Wenn zum Beispiel ein Up-Quark in einem Proton ein W<sup>+</sup>-Boson aussendet, verwandelt es sich in ein Down-Quark und das Proton wird zu einem Neutron. Das Quark verliert hierbei +1 Ladung, also  $(+\frac{2}{3} - (+1) = -\frac{1}{3})$ . Dadurch verwandelt sich das Up-Quark in ein Down-Quark und aus dem Proton wird ein Neutron und

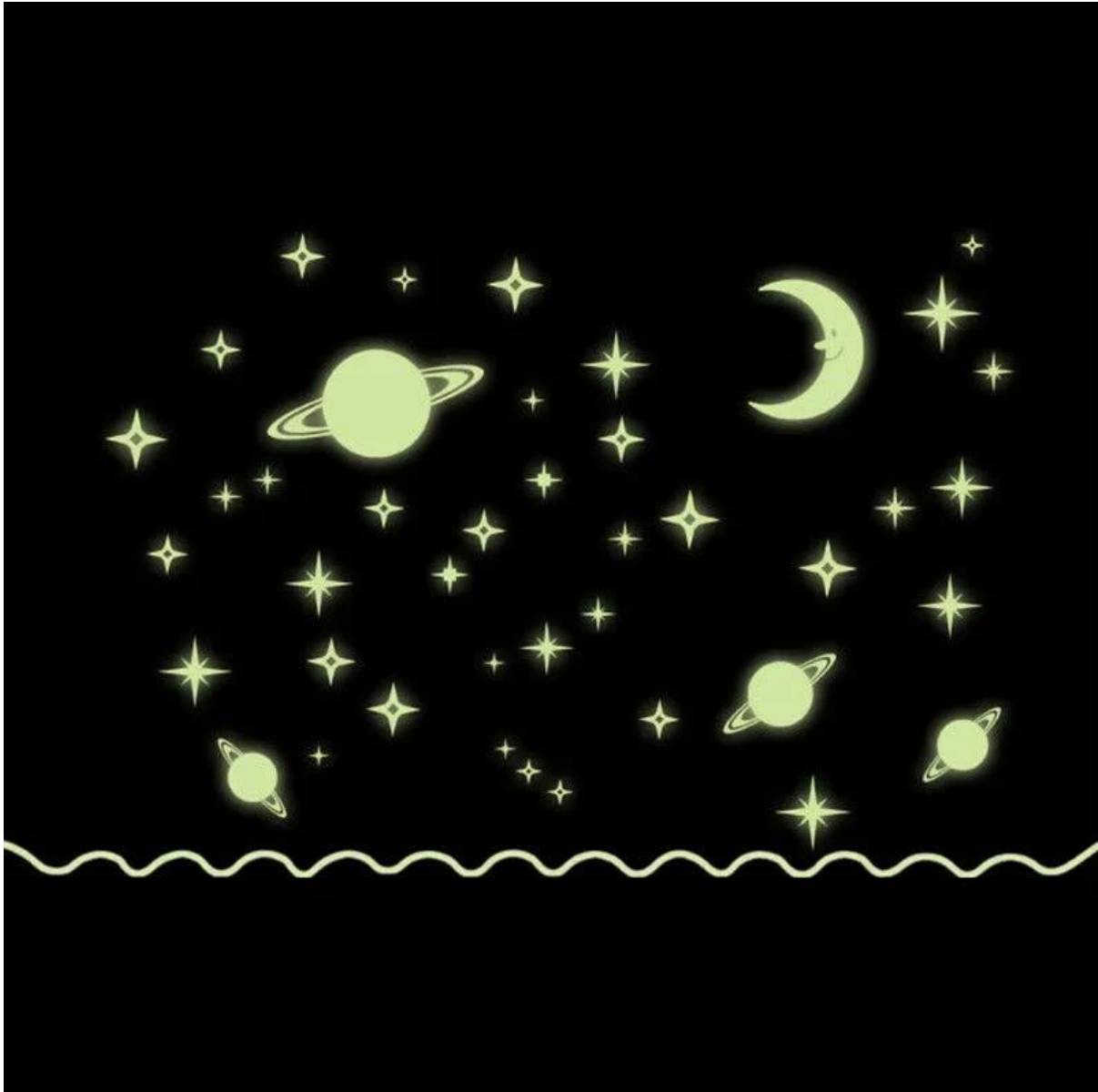
das  $W^+$ -Boson zerfällt in ein Positron und in ein Elektron-Neutrino. Das nennt man Beta<sup>+</sup>-Zerfall und entsteht oft in protonreichen Atomkernen. Der andere Beta-Zerfall ist der Beta<sup>-</sup>-Zerfall, der genau umgekehrt wirkt: Ein Down-Quark in einem Neutron emittiert ein  $W^-$ -Boson und verwandelt sich in ein Up-Quark ( $-\frac{1}{3} - (-1) = +\frac{2}{3}$ ). Das  $W^-$ -Boson zerfällt in ein Elektron und in ein Anti-Elektron-Neutrino. Das Z-Boson ist den W-Bosonen ähnlich, jedoch ist es ungeladen und bei seiner Wechselwirkung ändert es nicht die „Farbe“ der Teilchen. Außerdem wechselwirkt es auch mit elektrisch ungeladenen Teilchen.<sup>38)42)</sup>

Jetzt kommen wir zum Photon. Das Photon hat keine Masse, aber eine Energie und einen Impuls. Das Photon (Spin 1) vermittelt die elektromagnetische Strahlung. Unter elektromagnetischer Strahlung versteht man unter Anderem Radiowellen, Mikrowellen, Wärmestrahlung, Licht, Röntgenstrahlung und Gammastrahlung.



### Elektromagnetisches Spektrum<sup>45)</sup>

Kurz gesagt ist das Photon ein Elementarteilchen ohne richtige Größe. Es kann nicht geteilt, sondern nur erzeugt und zerstört werden. Es ist ein Teilchen und eine Welle gleichzeitig. Es ist sozusagen ein Energiepaket. Gammastrahlung ist die Strahlung mit der kleinsten Wellenlänge, da die Gammastrahlen die höchst-energetischen Photonen sind. Langwellen haben sehr niedrige Energiewerte und sehr lange Wellen. Doch alle sind Teilchen und Wellen gleichzeitig und bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit. Unsere Augen haben sich nur deshalb an das sichtbare Spektrum gewöhnt, weil es sich anders im Wasser verhält. Und da wir vor langer Zeit im Wasser lebten, entwickelten sich die Augen so, dass wir nur diesen Teil sehen können. Wenn etwas mit einem Elektron im Kern kollidiert, schleudert es das Elektron durch die Aufnahme der Energie in eine andere Bahn um den Kern. Das ist instabil und das Elektron will so schnell wie möglich zurück in die ursprüngliche Bahn. Wenn dies geschieht, gibt es die Energie in Form von einem Photon ab, dabei erreicht dieses Photon sofort Lichtgeschwindigkeit. Ein Beispiel hierfür sind fluoreszierende Leuchtsterne. Hier prallen Photonen am Tag auf die Elektronen in den Sternen und senden diese auf eine höhere Bahn um den Kern. Diese Elektronen wollen so schnell wie möglich zurück auf ihre ursprüngliche Bahn, wodurch sie Energie in Form von Photonen abgeben. Das geschieht auch tagsüber, jedoch sehen wir es nur in der Dunkelheit, wenn nur sehr wenig oder gar kein Licht zu sehen ist.<sup>48)</sup>



*Fluoreszierende Leuchtsterne*

Das letzte Boson ist das Higgs-Boson. Es ist vielleicht das wichtigste Teilchen im Zusammenhang mit der Dunkle-Materie-Forschung. Um zu verstehen, was das Higgs-Boson überhaupt ist, müssen wir zum Beginn des Universums zurückgehen. Alles um uns herum besteht aus Teilchen. Doch am Anfang des Universums hatten keine Teilchen eine Masse. Sie flogen alle mit Lichtgeschwindigkeit durch den Raum. Sterne, Planeten und Leben konnten nur dank der Masse dieser Teilchen entstehen, die sie vom sogenannten Higgs-Feld. Das Higgs-Feld ist ein Energiefeld, von dem angenommen wird, dass es überall im Universum existiert. Wenn ein Teilchen durch das Feld hindurchfliegt, wird es verlangsamt und erhält eine Masse. Man kann es sich als ein Ozean vorstellen. Wenn etwas sich fortbewegen will, muss es das Wasser „wegdrücken“. Einige Objekte müssen mehr Wasser wegdrücken als andere und deshalb hat alles eine Masse. Das verhindert, dass Teilchen mit einer Masse sich mit Lichtgeschwindigkeit fortbewegen. Im Higgs-Feld wird die Energie aber nicht einfach so in Masse umgewandelt, sondern das Teilchen wandelt die Energie durch Wechselwirkungen mit dem Higgs-Feld durch das Higgs-Boson um. Das Higgs-Boson hat eine Masse, jedoch keine Ladung und einen Spin von 0. Die Entdeckung des Higgs-Bosons wurde 2013 am CERN offiziell

angekündigt, und seitdem hat es das Leben vieler Menschen beeinflusst. Bei der Entdeckung im Teilchenbeschleuniger wurden die Grenzen der Technologie erweitert, die jetzt im Alltag benutzt werden. Einige Erkenntnisse der Teilchenphysik werden bei medizinischen Therapien benutzt, um Krebs und Probleme im Herz und Gehirn zu erkennen. Zu den Vorteilen im astrophysikalischen Teil kommen wir später zurück.<sup>49)50)</sup>

### 3. Geschichte der Dunkle-Materie-Forschung

Die Ursprünge der dunklen Materie lassen sich bis in die 1600er Jahre zurückverfolgen. Bald nachdem Isaac Newton seine Theorie der universellen Schwerkraft vorgestellt hatte, begannen einige Astronomen über die Existenz von Objekten zu spekulieren, die wenig oder gar kein Licht aussenden, aber dennoch durch ihre Anziehungskraft auf helle Objekte wie Sterne und Planeten erkannt werden könnten. Diese Idee wurde in den 1700er Jahren verstärkt, als Pierre Laplace argumentierte, dass einige Objekte massiv genug sein könnten, um jegliches Licht, das sie aussenden, einzufangen (eine vereinfachte Vorstellung von einem schwarzen Loch), und in den 1800er Jahren nutzten Urbain Le Verrier und John Couch Adams Gravitationsanomalien in der Bewegung des Uranus, um das Vorhandensein von Neptun vorherzusagen. Zu diesem Zeitpunkt hatten die Astronomen bereits das Vorhandensein von Dunkelnebeln nachgewiesen, die nur durch das Licht sichtbar sind, das sie von hellen Objekten hinter sich absorbieren. Es war klar, dass es im Universum mehr gab, als mit dem sichtbaren Licht gesehen werden konnte.<sup>66)</sup>

Nun müssen wir nach Kalifornien in die 1930'er Jahre. Fritz Zwicky, ein in Bulgarien geborener Schweizer Astronom, arbeitete am California Institute of Technology (CalTech). Im Jahre 1933 arbeitete er mit dem Coma-Galaxienhaufen.

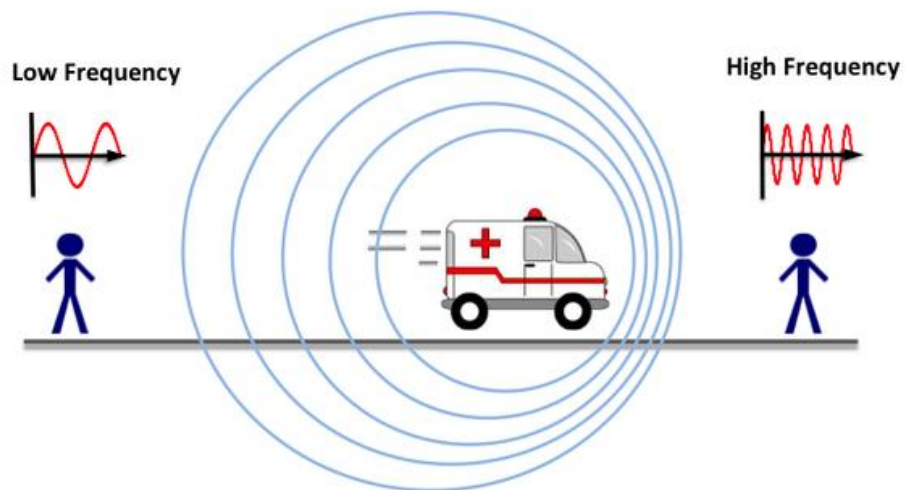


*Der Coma-Galaxienhaufen<sup>58)59)</sup>*

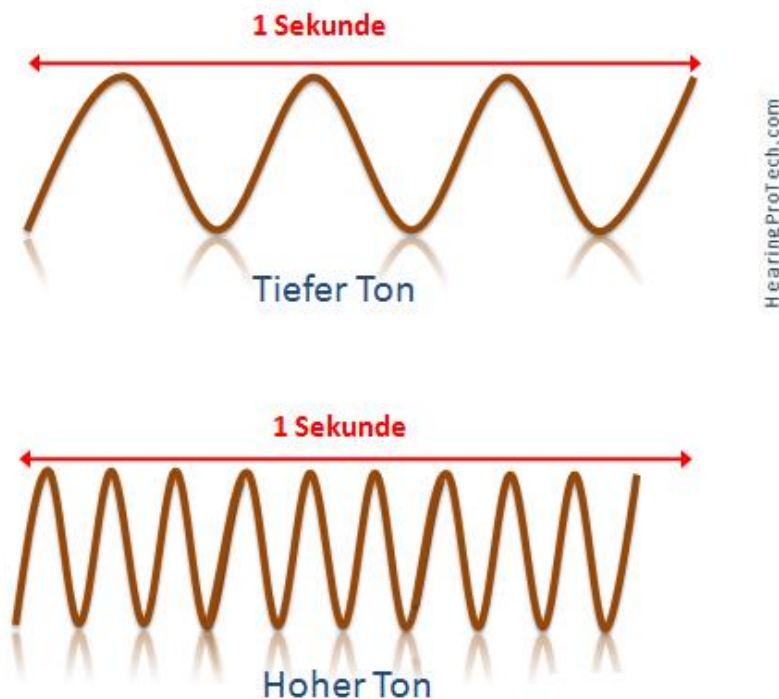
Als er die Geschwindigkeit der einzelnen Galaxien berechnen wollte, benutzte er die von seinem Kollegen Edwin Hubble entdeckte Rotverschiebung.<sup>53)60)</sup> Die Rotverschiebung ist ein Fall des Doppler-Effekts. Der Doppler-Effekt besagt, dass eine Schallquelle, die sich in Richtung des Hörers bewegt, an Frequenz zunimmt, der Schall also höher klingt. Ein Beispiel hierfür ist, wenn ein

Krankenwagen an dir vorbeifährt. Wenn der Krankenwagen auf dich zukommt, klingt es heller, als wenn der Krankenwagen sich von dir entfernt.

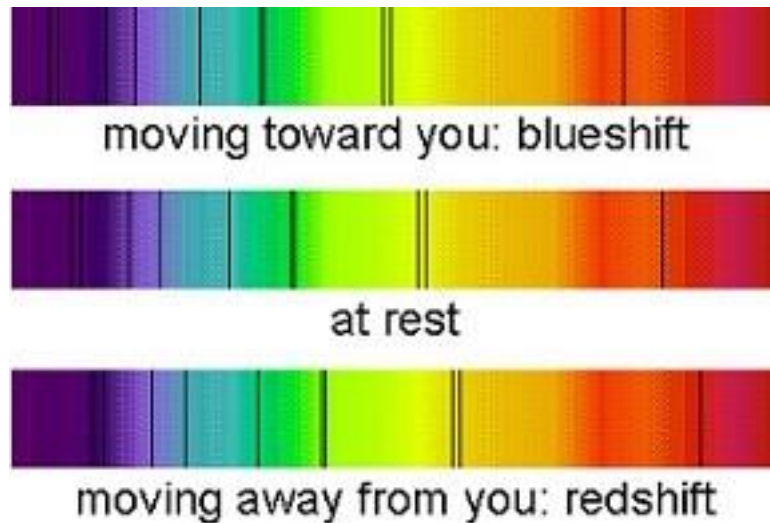
## Doppler Effect



Das liegt daran, dass Schall nichts anderes als Wellen ist. Wenn die Quelle sich bewegt, werden Wellen in die Fahrtrichtung komprimiert und in die entgegengesetzte Richtung gestreckt. Bei den kürzeren Wellen bedeutet das, dass sie eine höhere Frequenz haben, die wir als höheren Ton wahrnehmen.



Da Licht auch eine Welle ist, kann man das gleiche beobachten wie beim Ton, nur dass eine höhere Lichtfrequenz bedeutet, dass die „Farbe“ des Lichts sich ändert. So wird zum Beispiel aus rot blau, wenn etwas auf einen zukommt und umgekehrt, wenn es sich entfernt. <sup>60)61)</sup>

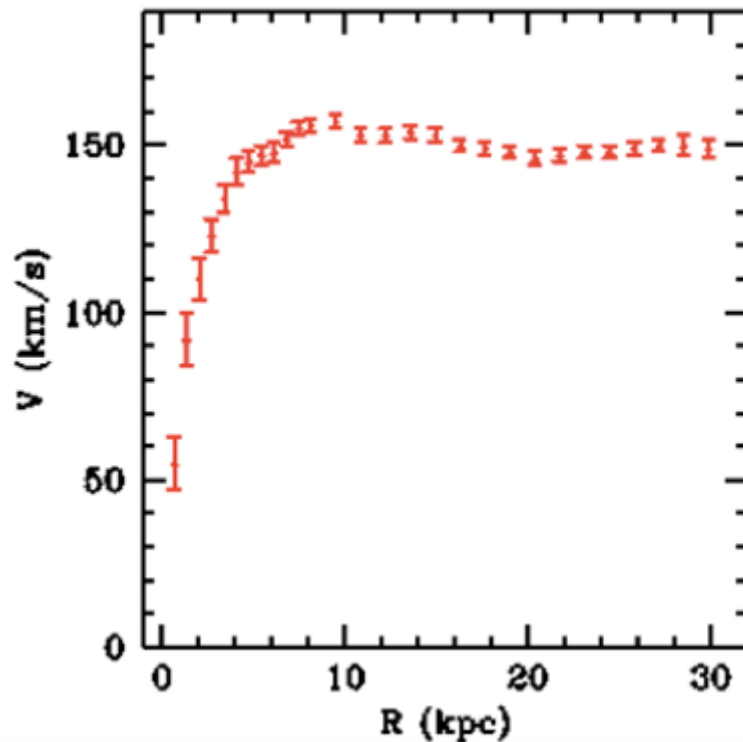


### Blau- und Rotverschiebung<sup>56)</sup>

Zwicky konnte also die Relativgeschwindigkeiten der verschiedenen Galaxien bestimmen, indem er ihre Farbe beobachtete. Hierbei war wichtig, dass er die Expansion des Universums mit einberechnete, da die Rotverschiebung dadurch verstärkt wird. Er bestimmte also die relative Geschwindigkeit der Galaxien und konnte mithilfe des Virialsatzes als mathematisches Modell die Gesamtmasse des Coma-Haufens bestimmen. Zu seiner Überraschung kam er auf ein Resultat, welches viel höher war als vermutet. Den Berechnungen zufolge enthielt der Haufen etwa 400-mal die Masse, die man aus dem Licht der Sterne nahelegte. Er nannte diese fehlende Masse „Dunkle Materie“. <sup>69)</sup>

In den folgenden Jahrzehnten wurde der Virialsatz auf andere Galaxienhaufen angewandt, wobei ähnliche Ergebnisse erzielt wurden. Nicht jeder akzeptierte diese Ergebnisse, vor allem weil der Virialsatz eine statistische Berechnung ist, die von bestimmten Annahmen abhängt. So wird beispielsweise davon ausgegangen, dass die Galaxienhaufen durch die Schwerkraft gebunden sind. Vielleicht fliegen die Galaxien in diesen Haufen tatsächlich voneinander weg, so dass der Virialsatz einfach nicht zutrifft. Aber es gibt noch eine weitere Beweislinie, die für die Dunkle Materie spricht. Eine, die nicht so leicht abgetan werden kann. <sup>66)</sup>

In den frühen 1900er Jahren begannen Astronomen, die Spektren von Galaxien zu untersuchen. Daraus konnten sie die Geschwindigkeiten der Sterne in Abhängigkeit von ihrer Entfernung vom galaktischen Zentrum bestimmen, was als galaktische Rotationskurve bekannt ist. Im sichtbaren Licht betrachtet, haben die meisten Galaxien ein helles Zentrum, das mit zunehmender Entfernung vom Zentrum schwächer wird. Dies würde bedeuten, dass sich die meisten Sterne (und damit die meiste Masse) in der Nähe des Zentrums einer Galaxie befinden. Wenn das der Fall ist, würde man erwarten, dass sich Sterne, die weit vom Zentrum entfernt sind, viel langsamer bewegen als Sterne in der Nähe des Zentrums, so wie in unserem Sonnensystem die Erde die Sonne viel schneller umkreist als der weit entfernte Pluto. Als Max Wolf und Vesto Slipher die Rotationskurve der Andromeda-Galaxie maßen, stellten sie fest, dass sie im Grunde flach ist, was bedeutet, dass sich die Sterne unabhängig von ihrer Entfernung vom galaktischen Zentrum mit derselben Geschwindigkeit bewegen. <sup>66)</sup>



Eine Galaxienrotationskurve, die die konstante Rotationsgeschwindigkeit der Sterne bei großen Radien zeigt <sup>56)</sup>

Eine Lösung dieses Rätsels war, dass Andromeda von einem Halo aus Dunkler Materie umgeben ist, so dass ihre Masse nicht im Zentrum konzentriert ist. Während andere Galaxien ähnliche Rotationskurven aufwiesen, was für das Vorhandensein Dunkler Materie zu sprechen schien, war selbst Fritz Zwicky skeptisch. Gas und Staub innerhalb einer Galaxie könnten eine Art Widerstand auf sich schnell bewegende Sterne ausüben, argumentierte er, und so die Rotationskurven abflachen. Doch in den 1950er Jahren war die Radioastronomie so weit fortgeschritten, dass sie monoatomaren Wasserstoff über die berühmte 21-Zentimeter-Linie\* nachweisen konnte. Radiobeobachtungen sowohl der Andromedagalaxie als auch unserer eigenen Milchstraßengalaxie zeigten ähnlich flache Rotationskurven. Da Wasserstoff das bei weitem am häufigsten vorkommende Element im Universum ist, bewiesen die Ergebnisse, dass nicht nur Sterne, sondern auch das Gas etwaiger Dunkelnebel die Galaxien mit ähnlichen Geschwindigkeiten umkreisten. Entweder enthielten die Galaxien bedeutende Dunkle Materie, oder unser Verständnis der Schwerkraft war völlig falsch. <sup>66)</sup>

Als die Beweise für Dunkle Materie zunahmen, wurde bald klar, dass es ein ernstes Problem gab. Unter der Annahme, dass unsere Gravitationstheorien korrekt sind, muss die Dunkle Materie sowohl in den Galaxien als auch in den Galaxienhaufen viel zahlreicher sein als die leuchtende Materie. Wenn es sich bei dieser dunklen Materie um Dinge wie Dunkelnebel handelte, müsste ihre Anwesenheit durch das von ihnen absorbierte Licht nachweisbar sein. Wenn es so viel Dunkle Materie gibt, darf sie nicht nur nicht leuchten, sie darf auch kein Licht absorbieren. Es konnte sich nicht einfach um normale Materie handeln, die kalt und dunkel ist, sondern es musste etwas ganz anderes sein. Diese Idee war so radikal, dass viele Astronomen die Gültigkeit der Newtonschen Gravitation in Frage stellten. In den 1980er Jahren gab es mehrere alternative Gravitationsmodelle, von denen das berühmteste die von Mordehai Milgrom vorgeschlagene Modifizierte Newtonsche Dynamik (MoND) war. Während diese Modelle für Dinge wie Zwerggalaxien gut funktionierten, waren sie für Dinge wie Galaxienhaufen entsetzlich. Modelle für Dunkle Materie waren nicht unproblematisch, aber sie stimmten besser mit den Beobachtungen überein. <sup>66)</sup>

In den letzten Jahrzehnten konnten wir anhand von Daten aus Gravitationslinsen und Deep-Sky-Durchmusterungen unsere Modelle der Dunklen Materie weiter verfeinern. Aus der großräumigen Verteilung der Galaxien wissen wir, dass die Dunkle Materie kalt und langsam sein muss, so dass die zahllosen Neutrinos, die mit nahezu Lichtgeschwindigkeit durch den Kosmos sausen, nicht die Dunkle Materie erklären können. Aus der Gravitationslinsenanalyse kennen wir die Verteilung der Dunklen Materie in den Galaxien. Durch die Beobachtung der Verteilung der Dunklen Materie in kollidierenden Galaxien wissen wir, dass die Dunkle Materie nicht nur nicht mit dem Licht wechselwirkt, sondern auch nicht stark mit der normalen Materie oder sich selbst. Dies bestätigt zwar die Existenz der Dunklen Materie, erschwert aber auch die Bestimmung der Dunklen Materie selbst.<sup>66)</sup>

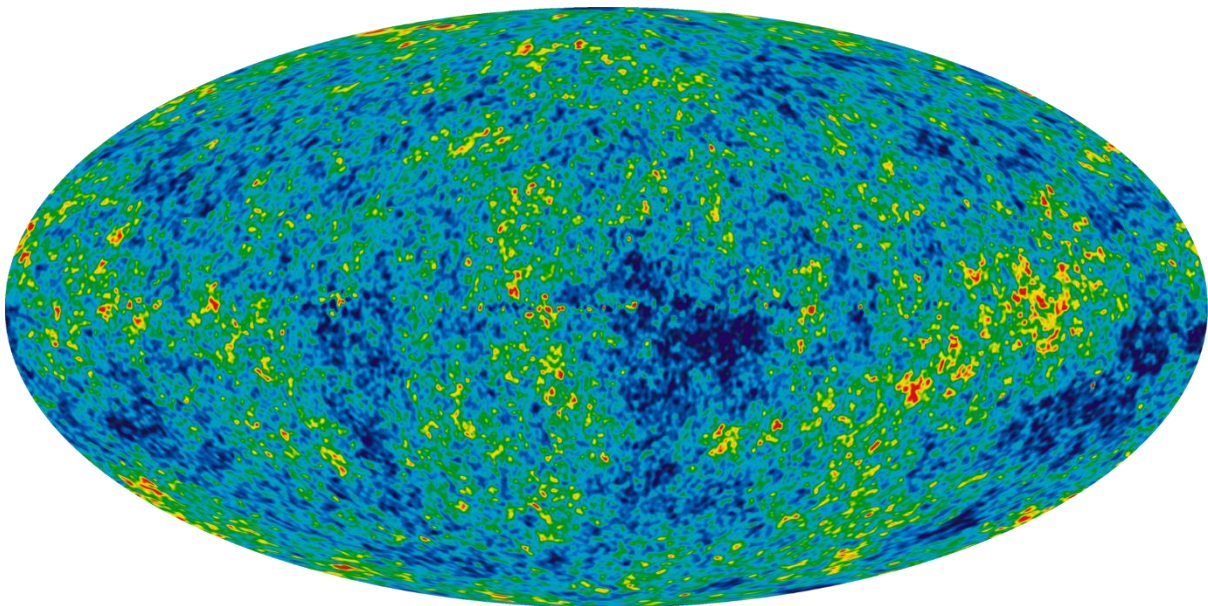
Die jüngste Herausforderung im Zusammenhang mit Dunkler Materie besteht darin, ihre Zusammensetzung zu bestimmen. Die populärste Idee ist, dass es sich um massereiche Teilchen mit schwacher Wechselwirkung (WIMPs) handelt, aber diese Teilchen sollten mit denselben Experimenten nachgewiesen werden können, die zur Beobachtung astrophysikalischer Neutrinos verwendet werden. Bislang gibt es keine Beweise für diese Teilchen. Direkte Versuche, Dunkle Materie nachzuweisen, haben lediglich dazu geführt, dass unsere Möglichkeiten für Dunkle Materie nicht mehr gegeben sind. Nachdem wir uns mehr als ein Jahrhundert lang mit Dunkler Materie beschäftigt haben, ist sie uns immer noch ein Rätsel.<sup>66)</sup>

## 4. Aktuelle Beobachtungen und Experimente

### CMB

Das CMB (Cosmic Microwave Background) ist eine Mikrowellenhintergrundstrahlung, die im ganzen Universum herrscht. Sie ist kurz nach dem Urknall entstanden und hat eine große Bedeutung für die Astrophysik, da sie als Beweis für die Urknalltheorie gilt. Sie entstand als das Universum nach dem Urknall so weit abkühlte, dass sich die ersten Atome bilden konnten. Diese Wasserstoffatome sendeten Photonen frei, die wir jetzt als das CMB wahrnehmen. Durch die Expansion des Universums wurde die Raumzeit gedehnt, was die Wellenlänge dehnte, also eine Rotverschiebung bei der Strahlung verursachte. Heute ist das Universum ein kaltes Meer aus Photonen im Mikrowellenbereich mit einer Durchschnittstemperatur von 2,7K (-270°C). Diese Photonen sind überall um uns herum und sind verantwortlich für etwa 1% des Rauschens auf unseren Fernsehern.<sup>2)71)</sup>

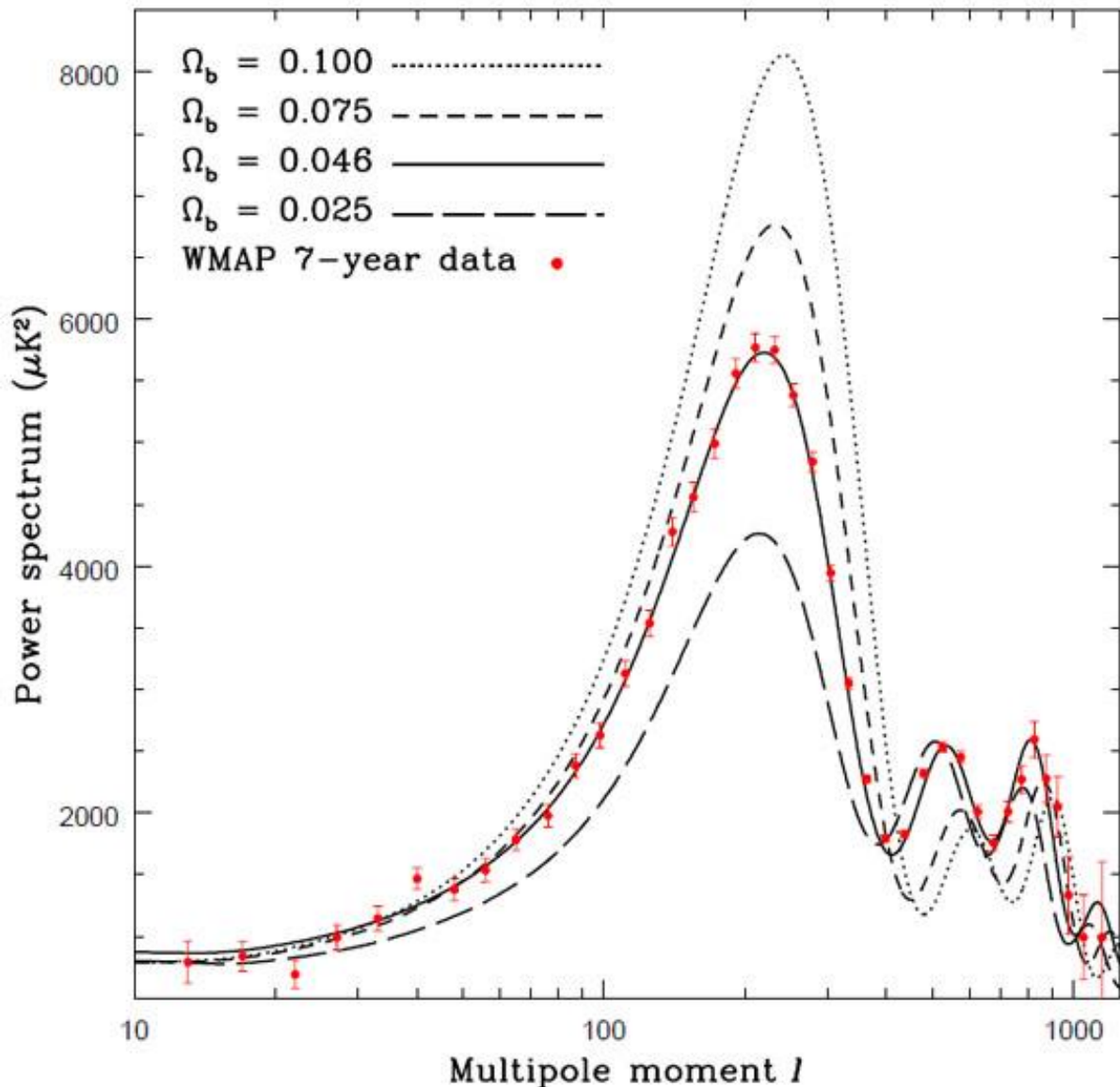
Bei seiner Entdeckung in den 1960er Jahren erwies sich der CMB als bemerkenswert gleichmäßig über den Himmel verteilt. Erst 1992 entdeckte der Satellit Cosmic Background Explorer (COBE) Temperaturschwankungen (oder Wellen) in einer Größenordnung von 1:100000. Die Temperaturkarten des CMB bilden eine Momentaufnahme des Universums, als es noch extrem jung war. Diese Wellen spiegeln also winzige Dichtefluktuationen in der Ursuppe der Teilchen wider. Es wird angenommen, dass diese Dichteschwankungen durch die Anziehungskraft zu den uns heute bekannten Strukturen (Sterne, Galaxien und Galaxienhaufen) anwachsen. Dies ist das Modell der gravitativen Instabilität der Strukturbildung.<sup>71)</sup>



*Temperaturschwankungen in der Hintergrundstrahlung, aufgenommen durch die Raumsonde WMAP (Mission 2001–2010)*

Wenn man nun die Größe der verschiedenen Stellen mit gleicher Temperatur in ein Diagramm umwandelt, bekommt man mehrere Spitzen<sup>7)</sup>. Das geschieht, da wenn es mehr Masse gibt, versammelt sich die Masse an verschiedenen Orten und bildet größere Stellen mit gleicher Dichte

(dadurch gibt es weniger kleine Stellen). Dunkle Materie interagiert nicht mit Photonen, doch da an den Stellen hoher Masse sich auch viel sichtbare Materie ansammelt, erhalten wir diesen Effekt, durch den wir ausrechnen können, wie viel Dunkle Materie im Vergleich zur Sichtbaren vorhanden war/ist.



Wie der Anteil  $\Omega_b$  der sichtbaren (baryonischen) Materie das Diagramm ändern würde und die Messdaten des WMAP zum Vergleich<sup>75)</sup>

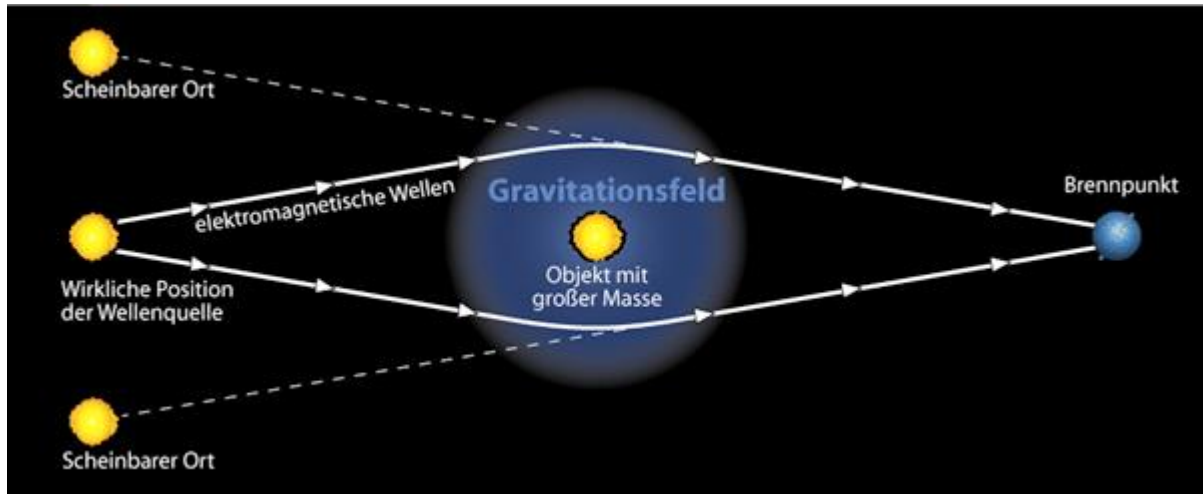
Durch die Daten der WMAP-Raumsonde vermuten wir nun, dass  $\Omega_b = 0,046$ , was uns das Verhältnis von ungefähr 5/1 der Dunklen Materie gegenüber der baryonischen Materie.<sup>76)</sup>

### Bullet Cluster – Galaxienhaufen

Der Bullet Cluster (1E 0657-56) besteht aus zwei kollidierenden Galaxienhaufen.<sup>79)</sup> Diese Kollision war das energiereichste Ereignis des Universums seit dem Urknall. Das Forscherteam hat mehr als 100 Stunden lang mit dem Chandra-Weltraumteleskop den Galaxienhaufen 1E0657-56 beobachtet. Er ist auch als „Bullet Cluster“ bekannt, da er eine markante Wolke beinhaltet, die aus Hunderte

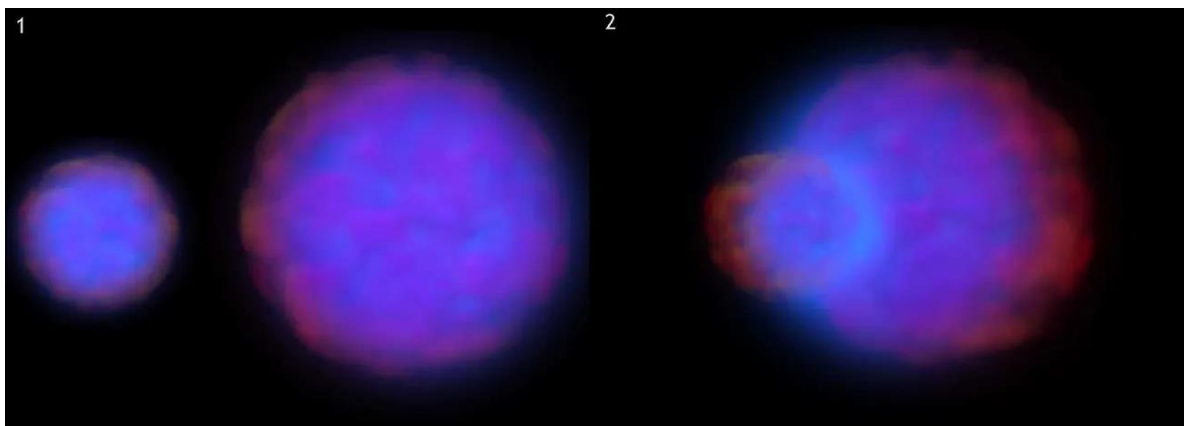
Millionen Grad heißem Gas besteht und an eine Gewehrkugel erinnert. Die Röntgenbilder des Chandra-Teleskops zeigen den Forschern zufolge, dass die Form durch einen Wind verursacht wird, der durch die Hochgeschwindigkeits-Kollision eines kleineren mit dem größeren Galaxienhaufen entstanden ist.<sup>78)</sup>

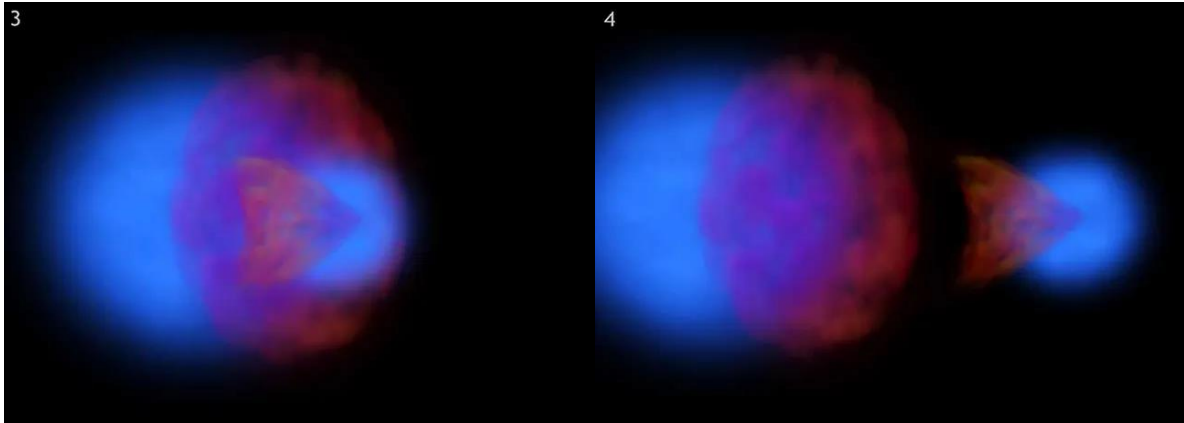
Parallel dazu bestimmten die Wissenschaftler mit mehreren optischen Teleskopen, darunter das Hubble-Weltraumteleskop, die Verteilung der Masse in den beiden Haufen. Dies gelang mit Hilfe des so genannten Gravitationslinseneffekts: Die Schwerkraft eines Himmelskörpers verzerrt das Licht von Objekten, die sich hinter ihm befinden. Steht der Beobachter im richtigen Abstand zu beiden, wirkt das Objekt im Vordergrund wie eine Linse - ein Effekt, den Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie vorhergesagt hatte.<sup>78)</sup>



*Der Gravitationslinseneffekt: Durch die Untersuchung der Umgebung massereicher Galaxienhaufen, die sowohl normale als auch Dunkle Materie enthalten, können Astronomen verzerrte Hintergrundgalaxien identifizieren, die durch die Gravitationslinse des Haufens gelenkt werden, und ihre Verzerrung rückgängig machen. Mathematische Modelle dieser Ergebnisse geben Aufschluss über den Ort und die Eigenschaften der dichtesten Materiekonzentrationen im Haufen, sowohl der sichtbaren als auch der Dunklen.<sup>80)81)</sup>*

Das heiße Gas, das bei der Kollision der beiden Galaxienhaufen aufgewirbelt wurde, wurde den Forschern zufolge durch eine Kraft ähnlich dem Luftwiderstand abgebremst. Die Dunkle Materie in beiden Haufen wurde jedoch nicht gestoppt, da sie - abgesehen von der gegenseitigen Anziehung - nicht mit dem Gas wechselwirkt. Dunkle und sichtbare Materie wurden also bei der Kollision auseinandergerissen.<sup>78)</sup>





1: Kollision zwischen zwei Galaxienhaufen: Heißes Gas, das den größten Teil der normalen Materie im Galaxienhaufen ausmacht, ist hier in Rot zu sehen, Dunkle Materie in Blau

2: Zusammenstoß: Das Gas in beiden Galaxienhaufen wird von einem Effekt ähnlich dem Luftwiderstand abgebremst, ...

3: ...während die Dunkle Materie nicht gebremst wird, weil sie nicht mit sichtbarer Materie interagiert (und auch nicht mit sich selbst)

4: Das Ergebnis: Die dunkle Materie aus beiden Galaxienhaufen trennt sich vom heißen Gas und reißt mit ihrer Schwerkraft nur einen kleinen Teil des Gases mit sich

Fotos: NASA/CXC/M. Weiss



Bilder des „Bullet Cluster“ mit sichtbarer (rot) und Dunkler (blau) Materie durch Röntgenaufnahmen (links) und im sichtbaren Spektrum (rechts) Fotos: X-ray: NASA/CXC/CfA/M.Markevitch <sup>82)</sup>

„Das ist der erste direkte Beweis, dass Dunkle Materie existieren muss“, sagte Douglas Clowe von der Universität Arizona. Es gibt zwar alternative Theorien, denen zufolge die Schwerkraft auf kosmische Entfernungen stärker wirkt als auf kleine Distanzen, und die deshalb ohne Dunkle Materie auskommen. Doch diese Rechenmodelle könnten die Vorgänge im „Bullet Cluster“ nicht erklären, meinen Clowe und seine Kollegen. „Wenn das heiße Gas die massereichste Komponente der Galaxienhaufen wäre, wie es die alternativen Theorien vorsehen, würden wir die Trennung von Dunkler und normaler Materie nicht sehen.“<sup>78)</sup>

## XENON & DAMA/LIBRA

Das XENON-Forschungsprojekt ist ein Projekt zum direkten Nachweis von Dunkler Materie. Es besteht aus vielen Experimenten, die in den unterirdischen Laboratori Nazionali del Gran Sasso in Italien durchgeführt werden. Das DAMA/LIBRA, versucht mithilfe von einem Teilchendetektor Teilchen zu finden, die den Kriterien der Dunklen Materie entsprechen. Über 50 andere Experimente haben versucht, Dunkle Materie direkt nachzuweisen, doch nur DAMA/LIBRA hat etwas gefunden. Der Natriumiodid-Szintillation-Detektor besteht aus sieben sieben Kilogramm schweren Kristallen aus reinem Natriumiodid. Die Idee ist, dass im sehr seltenen Zufall, dass ein Dunkle-Materie-Teilchen einen Atomkern trifft, es seine Energie weitergibt, was einen bestimmten Lichtstrahl Namens Szintillation erzeugt, die durch sehr empfindliche Lichtdetektoren aufgenommen werden. Dabei gibt es aber ein Problem: Sogar das reinste Natriumiodid enthält minimale Mengen radioaktives Kalium, welches zerfällt und lässt dabei ein Elektron und einen Gammastrahl. Das Elektron kann eine Szintillation hervorrufen und als Dunkle-Materie-Teilchen wahrgenommen werden. Um dies zu verhindern hat man das Ganze in einem Behälter mit 12 Tonnen linearem Alkylbenzol untergetaucht. Alkylbenzol ist ein flüssiger Szintillator, der Licht abgibt, wenn er Gammastrahlung ausgesetzt wird. Dieses Licht kann durch Lichtdetektoren im Behälter entdeckt werden. Wenn also eine Detektion im Kristall und im Behälter gleichzeitig stattfindet, war es höchstwahrscheinlich ein Kaliumzerfall. Aber es gibt noch ein Problem: Kosmische Strahlung. Myonen können auch Szintillationen auslösen. Deshalb hat man es unterirdisch gebaut (Dadurch verlieren Myonen ihre Energie und zerfallen), doch sogar über 1 Kilometer unter der Erde wie im Laboratori Nazionali del Gran Sasso kommen einige Myonen an. Deshalb sind über dem Behälter Myonendetektoren angebracht, sodass wenn im Kristall und in einem der Myonendetektoren gleichzeitig (Myonen fliegen mit fast Lichtgeschwindigkeit) eine Detektion stattfindet, kann ausgeschlossen werden, dass es Dunkle Materie war.<sup>7)(84)(85)</sup>

Der Detektor ist schon seit über 20 Jahren in Betrieb, und jedes Jahr hat es die gleichen merkwürdigen Resultate. Die Zahl der Detektionen erreicht ein Maximum im Juni und ein Minimum im November. Aber wieso würde die Dunkle Materie solche spezifischen Schwingungen haben? Eine Antwort ist, dass die Milchstraße, unsere Galaxie, von viel Dunkler Materie umschlossen ist. Unsichtbare Teilchen, die in zufällige Richtungen fliegen. Den meisten Theorien zufolge interagiert die Dunkle Materie nur durch Schwerkraft und umschließt deshalb massive Objekte. Unser Sonnensystem bewegt sich durch die Milchstraße mit einer bestimmten Geschwindigkeit, 220 Kilometer pro Sekunde, um genau zu sein. Das bedeutet, dass wir uns ebenfalls durch Dunkle Materie mit dieser Geschwindigkeit bewegen, doch die Erde umkreist die Sonne mit 30 Kilometern pro Sekunde, was bedeutet, dass wir uns für eine Hälfte des Jahres mit der Sonne, also schneller durch Dunkle Materie und die andere gegen die Sonne bewegen, also langsamer durch Dunkle Materie. Die Idee ist, dass wir mehr Dunkle Materie begegnen, wenn wir uns am schnellsten durch sie bewegen, was im Juni der Fall ist, und am wenigsten, wenn wir uns langsamer durch sie bewegen, was im November zutrifft. Die tatsächliche Geometrie ist ein wenig komplizierter, da das Sonnensystem um 60 Grad relativ zur Scheibe der Milchstraße geneigt ist, aber die Idee funktioniert immer noch. Das bei DAMA/LIBRA beobachtete Signal könnte also auf diese Bewegung durch Dunkle Materie zurückzuführen sein. Oder es könnte auch nichts mit Dunkler Materie zu tun haben, sondern etwas wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Bodenfeuchtigkeit, der Schnee auf den Berg, unter dem der Detektor liegt, oder die Touristenanzahl in Italien. Alle diese Beispiele schwanken mit einer Periode von einem Jahr. Das ist der Grund, weshalb ein fast identisches Experiment auf der Südhalbkugel in Australien gebaut wird, weil da die Jahreszeiten umgekehrt sind, aber unsere Bewegung durch Dunkle Materie ist dieselbe. Wenn wir also die gleichen Resultate finden, haben wir einen direkten Beweis für Dunkle Materie und können nach den Teilchen suchen. „Ein großes Problem, welches DAMA/LIBRA hat, ist dass es andere sehr ähnliche Experimente gibt, die nichts sehen. Dies hat zu einer großen Unsicherheit darüber geführt, ob das DAMA/LIBRA-Signal wirklich Dunkle Materie ist. (...) Wir wissen es nicht, richtig? Die Lieblingssache der Wissenschaft...“, erklärt Professor Geraint Lewis am Sydney Institute for Astronomy.<sup>7)(84)(85)</sup>

## 5. Theoretische Modelle

### MoND

Es ist sehr normal sich zu fragen, ob wir wirklich eine unbekannte Art Teilchen brauchen, um zu erklären, wie sich die Schwerkraft verhält. Es könnte ja auch sein, dass wir einen Fehler bei unserer jetzigen Theorie der Schwerkraft begangen haben. Wir suchen schon seit 90 Jahren nach der Dunklen Materie und haben immer noch keine eindeutigen Beweise, dass Teilchen existieren, die Dunkle Materie ausmachen. Das ist die Denkweise einiger Astrophysiker\*innen, die MoND (modifizierte newtonsche Dynamik) befürworten. Bei MoND wird das zweite newtonsche Gesetz ( $F = m a$ ) modifiziert, sodass eine Erklärung der Rotationsgeschwindigkeit ohne zusätzliche Masse entsteht. MoND ist eine sehr kontroverse Hypothese, trifft aber den Beobachtungen zu. Allerdings lassen sich zahlreiche gravitative Vorgänge nicht erklären, wie zum Beispiel den Gravitationslinseneffekt oder späte Stadien der Galaxienverschmelzung im Bullet Cluster. Ebenso stimmen die Vorhersagen von MoND zur Umlaufbahn des Saturns und der Umlaufgeschwindigkeit von „großen Doppelsternen“ (*wide binary stars*) nicht mit den Beobachtungen überein.<sup>86)</sup>

### MACHOs

MACHOs steht für „massive astrophysical compact halo\* objects“ und war einer der ersten vorgeschlagenen Kandidaten für Dunkle Materie. Diese Objekte, darunter Neutronensterne, braune und weiße Zwerge, bestehen aus gewöhnlicher Materie. Sie senden Licht im für uns unsichtbaren Spektrum aus. Der Grund ist, dass sie nicht groß genug sind, um zu leuchtenden Sternen oder schwarzen Löchern zu werden.

Eine Möglichkeit, sie zu beobachten, ist die Beobachtung der Helligkeit entfernter Sterne. Da sich Lichtstrahlen biegen, wenn sie an einem massiven Objekt vorbeigehen, kann das Licht einer fernen Quelle von einem näheren Objekt gebündelt werden und so eine plötzliche Aufhellung des fernen Objekts bewirken. Dieser Effekt, der als Gravitationslinseneffekt bekannt ist, hängt davon ab, wie viel normale und Dunkle Materie sich in einer Galaxie befindet - wir können ihn nutzen, um die Menge an Materie in der Umgebung zu berechnen. Heute wissen wir jedoch, dass es unwahrscheinlich ist, dass sich genug dieser dunklen Körper ansammeln könnten, um die riesige Menge an Dunkler Materie zu bilden, die es gibt.<sup>87)</sup>

### Neutrinos

Neutrinos können nach dem Verständnis der Physiker keine Dunkle Materie darstellen. Das Standardmodell erklärt, wie die Grundbausteine - die Fundamentalteilchen - und drei der vier bekannten Kräfte das Universum erschaffen haben. Fundamentalteilchen sind subatomare Teilchen, die aus keinem anderen Teilchen bestehen; Elektronen sind ein Beispiel dafür, ebenso wie Neutrinos (siehe Kapitel 2).<sup>89)</sup>

Was Neutrinos als Dunkle Materie ausschließt, ist, dass sie im Standardmodell als „heiße“ Teilchen gelten, d. h. sie bewegen sich mit Geschwindigkeiten nahe der Lichtgeschwindigkeit. Damit ein Teilchen als Dunkle Materie gelten kann, muss es „kalt“ sein oder sich im Vergleich zum Licht langsam bewegen.<sup>89)</sup>

Deshalb haben Wissenschaftler eine Theorie aufgestellt, in der die Existenz sogenannter „sterilen Neutrinos“ vorkommt. Das hypothetisch sterile Neutrino wechselwirkt nur durch Schwerkraft und gegebenenfalls durch eine bislang unbekannte Wechselwirkung. Es könnte viel schwerer und langsamer als das normale Neutrino sein. Es würde zusammen mit einem normalen Neutrino entstehen, könnte andere Theorien, die nicht mit dem Standardmodell arbeiten unterstützen und würde als warme Dunkle Materie gelten (nicht heiß, aber auch nicht kalt, das heißt, die Masse liegt zwischen

300 und 3000 eV\*). Hierbei ist zu beachten, dass wir noch fast kein Teilchen entdeckt haben, die eine Masse von 300-3000 eV besitzen, was es unwahrscheinlich macht, dass sterile Neutrinos existieren. Außerdem würde es die Symmetrie des Universums verletzen, die besagt, dass die Zusammenhänge und physikalischen gleich bleiben, wenn alle Teilchen durch ihre Antiteilchen ersetzt und gleichzeitig alle Raumkoordinaten gespiegelt werden.<sup>90)91)92)93)94)</sup>

Die Hauptrolle, die die Dunkle Materie bei der Entstehung des Universums spielte, bestand darin, dass sie sich zu großen Massen verklumpte, deren Schwerkraft dann normale Materie anzog und so die großräumigen Strukturen des Universums bildete. Wäre die Dunkle Materie heiß, würden sich die Teilchen zu schnell bewegen, um diese Klumpen zu bilden, d. h. es gäbe keine Galaxien (zumindest nicht in den Größenordnungen, in denen wir sie beobachten). Dennoch beobachten wir diese Klumpen oder Halos\* Dunkler Materie, die Galaxien umgeben.<sup>89)</sup>

Ein weiterer Aspekt der Neutrinos, der sie als Kandidaten für Dunkle Materie ausschließt, ist, dass sie nicht wirklich unsichtbar sind - zumindest nicht so, wie Physiker es definieren. Wenn ein Wissenschaftler von einem unsichtbaren Teilchen spricht, bedeutet dies in der Regel, dass noch nie eine Kollision mit einem anderen Teilchen beobachtet wurde. Forscher haben jedoch beobachtet, dass Neutrinos mit anderen Teilchen über die schwache Wechselwirkung wechselwirken.<sup>89)</sup>

Hoffentlich ist die Dunkle Materie nicht völlig unsichtbar, sonst könnten wir sie niemals direkt „sehen“. Und da bestätigt wurde, dass die Dunkle Materie gravitativ wechselwirkt, hoffen Astronomen und Teilchenphysiker, dass es einige stark unterdrückte Wechselwirkungen gibt, die noch zu sehen sind.<sup>89)</sup>

## Axionen

Axionen sind hypothetische Elementarteilchen, die, sollten sie existieren, eine problematische Ausnahme von einer Regel der CP-Symmetrie\* bereinigen würden. Es gibt zwar einige verlockende Anzeichen für ihre Existenz, aber die Physik muss erst noch bestätigen, ob sie die Lösung sind, nach der gesucht wird, oder ob es sich nur um eine Wunschblase handelt. Lustigerweise ist es nach einem Waschmittel benannt, in der Hoffnung, dass es den schmutzigen Fleck der Ausnahme der CP-Symmetrie abwaschen würde. Sollten sie existieren, hätten sie eine Masse von 50 bis 1500 Mikroelektronenvolt\*, und damit bis zu zehn Milliarden Mal leichter als das Elektron. Die Masse hat eine Bedeutung für wie viel das Axion wechselwirkt. Wäre das Axion leichter, würde es weniger mit Materie wechselwirken, als wenn es schwerer wäre. Die erste Version der Theorie sagte voraus, dass das Axion viel mit anderer Materie wechselwirken würde, also dass es eine große Masse besäße. Das Problem ist, dass wenn es viel wechselwirken würde, müssten wir es zumindest indirekt in Experimenten entdeckt haben, was bislang noch nicht erreicht wurde. Deshalb besteht die zweite Version der Theorie aus „unsichtbaren“ Axionen. Unsichtbar deshalb, weil sie viel leichter und viel weniger mit anderer Materie wechselwirken. Heutzutage gibt es so viele Versionen, dass sie ein ganzes Spektrum ausmachen. Die Wissenschaft ist sogar so weit gegangen, dass es Theorien über axion-ähnliche Teilchen gibt, die nicht mehr das Problem der CP-Symmetrie lösen. Einige Wissenschaftler vermuten sogar, dass es mehrere Arten von axion-ähnlichen Teilchen gibt. Physiker lieben es, wenn eine einfache Lösung mehrere Probleme lösen kann, was bei Axionen nicht ganz unwahrscheinlich ist. Bei allen Dunkle-Materie-Kandidaten stellt sich die Wissenschaft die Frage, wann und wie die Teilchen entstanden sind. Die meisten Kandidaten-Teilchen würden im frühen Universum durch thermische Produktion entstanden sein. Die Idee ist, dass das Universum sehr heiß war und Teilchen sehr oft mit hoher Energie kollidierten, wobei Dunkle Materie entstanden ist, die noch heutzutage überlebt hat. Das Problem bei den Axionen ist, dass weil sie so unregelmäßig mit anderer Materie wechselwirken, würde dieser Mechanismus nicht genug Axionen erzeugen können, um für die gesamte Masse der Dunklen Materie zu decken. Das bedeutet nicht unbedingt, dass

Axionen nicht Dunkle Materie sein können, sondern dass man über neue Entstehungswege nachdenken soll. Eine Möglichkeit ist, dass wenn ein Teilchen eine potenzielle Energie besitzt und diese Energie umwandelt, könnten dabei Axionen entstehen und die gesamte Masse der Dunklen Materie decken, sofern sie eine Masse von  $10^{-5}$  eV\* besitzen (dabei würden sie die kleinste Masse der Teilchen besitzen, die eine Masse haben). Dabei lösen sie immer noch das Problem der CP-Symmetrie. Axionen sind also wahrscheinlicher als Neutrinos in Sachen Dunkle Materie, aber vielleicht ist es nur weil sie noch so dunkel für uns sind.<sup>94)95)96)</sup>

## Lambda-CDM-Modell

Das Lambda-CDM-Modell beschreibt das ganze Universum mit sechs Parametern seit dem Urknall. Der Name besteht aus zwei Teilen: der griechische Buchstabe  $\Lambda$  (Lambda), der für die Expansion des Universums (kosmologische Konstante) zuständig ist, und CDM, was für Cold Dark Matter (kalte Dunkle Materie) steht. Lambda-CDM beziehungsweise  $\Lambda$ CDM gilt auch als Standardmodell der Kosmologie. Es ist also ein Modell, in dem eine Kosmologische Konstante und kalte Dunkle Materie herrscht. Die Entwicklung des Modells begann in den 1920er Jahren, als klar wurde, dass Albert Einsteins Relativitätstheorie die Gravitation korrekt beschreiben kann und dass sich das Universum ausdehnt. Durch diesen letzten Punkt begannen Wissenschaftler\*innen zu vermuten, dass alles einen Anfang hatte, wo das gesamte Universum an einem Punkt konzentriert war. Dann geschah etwas, das wir noch nicht erklären können; der unendlich kleine Punkt explodierte und das Universum war geboren. Nachdem das Universum den Urknall erlebt hatte, kühlte es ab und dehnte sich aus. So erklärt es auch die Kosmische Hintergrundstrahlung (CMB; siehe Kapitel 4), die der Hauptgrund für den Erfolg des Lambda-CDM-Modells ist. Ende der 1990er Jahre hat man auch entdeckt, dass das Universum immer schneller expandiert, es muss also eine Kraft geben, die das verursacht, und das hat man die Dunkle Energie genannt. Diese Dunkle Energie verhält sich nach all dem, was wir bislang wissen, genau wie die Kosmologische Konstante von Albert Einstein. Dabei hat er es in seiner Relativitätstheorie eingebaut, um seinen Gleichungen für ein expandierendes Universum entgegenzuwirken, er wollte nämlich ein statisches Universum. Später hat man diese Kraft mit  $= 0$  weggerechnet, da man beobachtet hat, dass das Universum eben nicht statisch, sondern expandierend ist. Als man dann aber entdeckte, dass das Universum immer schneller expandiert, wurde klar, dass die Kosmologische Konstante einen Wert haben muss, der größer als 0 ist. Um das Jahr 2000 herum wurde klar, dass man ein kosmologisches Modell braucht, das sowohl die Dunkle Materie als auch die kosmologische Konstante (Dunkle Energie) beschreiben kann. Und das ist das Lambda-CDM-Modell.

Mit „kalter“ Dunkler Materie ist nicht die Temperatur gemeint, sondern, dass sie nicht aus anderen Teilchen besteht und viel langsamer als die Lichtgeschwindigkeit ist. Kalte Dunkle Materie passt am besten zu dem, was man beobachtet, weil sie nicht in der Lage ist, Energie in Form von Photonen abzugeben, weil sonst würden wir sie ja sehen, und sie wechselwirkt nur über die Gravitation.<sup>1)2)97)</sup>

## WIMPs

WIMPs steht für Weakly Interacting Massive Particles (schwach wechselwirkende massive Teilchen). Das „schwach“ ist ein Wortspiel; WIMPs würden mit sich selbst und mit anderen Formen von Masse nur über die schwache Kraft (und die Gravitation) wechselwirken. Weitere Wortspiele: Das Wort WIMP wurde geschaffen, nachdem der Begriff MACHO (Massive Astrophysical Compact Halo Object) in die wissenschaftliche Literatur eingegangen war.<sup>98)</sup>

WIMPs sind massereiche Teilchen, weil sie nicht leicht sind; sie hätten eine Masse, die wesentlich größer ist als die Masse eines Protons (zum Beispiel). Da sie massereich sind, wären WIMPs wahrscheinlich kalt; in der Astrophysik bedeutet „kalt“ nicht „unter null Grad Celsius“, sondern dass die Durchschnittsgeschwindigkeit der Teilchen weit unter  $c$  liegt. Neutrinos sind Teilchen mit schwacher Wechselwirkung, aber sie sind nicht massereich, also können sie keine WIMPs sein (außerdem sind Neutrinos nicht hypothetisch, und sie sind heiß, sehr heiß ... sie bewegen sich mit Geschwindigkeiten, die nur ein winziges bisschen unter  $c$  liegen).<sup>98)</sup>

Oder vielleicht doch ..., wenn es eine Art von Neutrino gibt, das wirklich, wirklich massiv ist (sagen wir ein TeV\*), dann wäre es sicherlich ein WIMP! Die jüngsten Ergebnisse der WMAP-Raumsonde scheinen jedoch diese Art von WIMP-als-Neutrino auszuschließen.<sup>98)</sup>

## SUSY

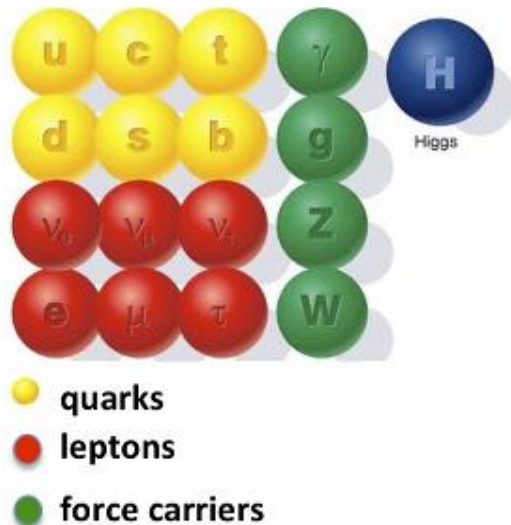
Das Standardmodell hat bei der Vorhersage dessen, was Experimente bisher über die Grundbausteine der Materie gezeigt haben, hervorragend funktioniert, aber Physiker erkennen an, dass es unvollständig ist. Die Supersymmetrie ist eine Erweiterung des Standardmodells, die darauf abzielt, einige der Lücken zu schließen. Sie sagt für jedes Teilchen des Standardmodells ein Partnerteilchen voraus. Diese neuen Teilchen würden ein großes Problem des Standardmodells lösen - die Bestimmung der Masse des Higgs-Bosons. Wenn die Theorie korrekt ist, sollten supersymmetrische Teilchen bei Kollisionen am LHC\* auftreten.<sup>101)</sup>

Auf den ersten Blick scheint das Standardmodell vorauszusagen, dass alle Teilchen masselos sein sollten - eine Vorstellung, die im Widerspruch zu dem steht, was wir um uns herum beobachten. Theoretiker haben einen Mechanismus entwickelt, um Teilchen Masse zu verleihen, der die Existenz eines neuen Teilchens, des Higgs-Bosons, voraussetzt. Es ist jedoch rätselhaft, warum das Higgs-Boson leicht sein sollte, da es durch Wechselwirkungen mit Teilchen des Standardmodells sehr schwer werden würde. Die zusätzlichen Teilchen, die von der Supersymmetrie vorhergesagt werden, würden die Beiträge zur Higgs-Masse von ihren Standardmodell-Partnern aufheben, was ein leichtes Higgs-Boson möglich macht. Die neuen Teilchen würden durch dieselben Kräfte wechselwirken wie die Teilchen des Standardmodells, aber sie hätten unterschiedliche Massen. Würden supersymmetrische Teilchen in das Standardmodell aufgenommen werden, könnten die Wechselwirkungen der drei Kräfte - Elektromagnetismus, starke und schwache Kernkraft - bei sehr hohen Energien genau die gleiche Stärke haben, wie im frühen Universum. Eine Theorie, die die Kräfte mathematisch vereinigt, wird als große vereinheitlichte Theorie bezeichnet - ein Traum von Physikern wie Einstein.<sup>101)</sup>

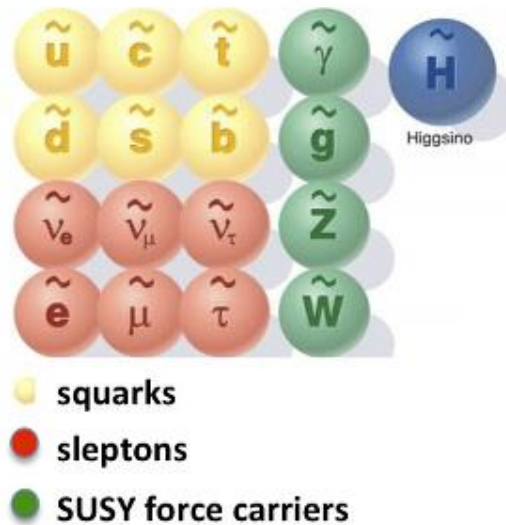
Die Supersymmetrie würde auch die beiden unterschiedlichen Klassen von Teilchen, die als Fermionen und Bosonen bekannt sind, miteinander verbinden. Teilchen wie die des Standardmodells werden aufgrund einer Eigenschaft, die als Spin bezeichnet wird, als Fermionen oder Bosonen klassifiziert. Fermionen haben alle eine halbe Spin-Einheit, während Bosonen 0, 1 oder 2 Spin-Einheiten haben. Die Supersymmetrie sagt voraus, dass jedes der Teilchen im Standardmodell einen Partner mit einem Spin hat, der sich um eine halbe Einheit unterscheidet. Bosonen werden also von Fermionen begleitet und andersherum. Mit den Unterschieden im Spin sind auch Unterschiede in den kollektiven Eigenschaften verbunden. Fermionen sind sehr widerspenstig; jedes Fermion muss sich in einem anderen Zustand befinden. Bosonen hingegen sind sehr klientelistisch; sie bevorzugen den gleichen Zustand. Fermionen und Bosonen scheinen so unterschiedlich zu sein wie nur möglich, doch die Supersymmetrie bringt die beiden Typen zusammen.<sup>101)</sup>

Schließlich sagen viele Theorien voraus, dass das leichteste supersymmetrische Teilchen (Neutralino) stabil und elektrisch neutral ist und nur schwach mit den Teilchen des Standardmodells wechselwirkt. Dies sind genau die Eigenschaften, die für die Dunkle Materie erforderlich sind. Das Standardmodell allein bietet keine Erklärung für die Dunkle Materie. Die Supersymmetrie ist ein Rahmenwerk, das auf dem starken Fundament des Standardmodells aufbaut, um ein umfassenderes Bild unserer Welt zu zeichnen. Vielleicht ist der Grund, warum wir immer noch einige dieser Fragen über das Innenleben des Universums haben, der, dass wir bisher nur die Hälfte des Bildes gesehen haben.<sup>101)</sup>

## The known world of Standard Model particles



## The hypothetical world of SUSY particles



Das erweiterte Standardmodell mit den SUSY-Teilchen. Hierbei ist zu beachten, dass alle Antiteilchen auch einen supersymmetrischen Partner haben.<sup>100)</sup>

## Gravitonen & Gravitinos

Ein weiteres Problem des Standardmodells ist, dass es die Gravitation nicht direkt erklären kann. Klar, es gibt das Higgs-Boson, welches den Elementarteilchen Masse gibt, jedoch gibt es kein Boson, das die Gravitationskraft überträgt. Vielleicht gibt es eins, aber wir haben es noch nicht entdeckt. Das ist der Gedanke hinter den Gravitonen. Sie sollten einen Spin von 2 haben, masselos und elektrisch neutral sein. In den Theorien, in denen Gravitonen Dunkle Materie sind, können sie ja nicht masselos sein, weshalb wir hier von massereichen Gravitonen reden. Die Theorie besagt, dass massereiche Gravitonen bei Kollisionen zwischen gewöhnlichen Teilchen in der heißen und dichten Umgebung des frühen Universums in den wenigen Augenblicken nach dem Urknall entstanden sind. Forscher an der Korea University und der Universität von Lyon haben vor kurzem eine theoretische Studie ausgetragen, in der sie die Möglichkeit erforschten, dass massereiche Gravitonen gute Dunkle-Materie-Kandidaten sein könnten. „Unsere Studie begann mit der Betrachtung von verzerrten Extradimensionen, die in den letzten 20 Jahren intensiv untersucht wurden“, so Giacomo Cacciapaglia, einer der Forscher, die die Studie durchgeführt haben, gegenüber Phys.org. „Wenn sich die Schwerkraft in diesem unsichtbaren Raum ausbreitet, materialisiert sie massive Gravitonen. Ihre Kopplung an gewöhnliche Materie ist sehr schwach, da sie gravitativen Ursprungs sind.“<sup>15)102)104)105)</sup>

Der Prozess, durch den massive Gravitonen theoretisch erzeugt werden könnten, ist extrem selten. Aus diesem Grund wäre die Rate, mit der diese Teilchen erzeugt werden, deutlich niedriger als die Produktionsrate sichtbarer Materie. Cacciapaglia und seine Kollegen Haiying Cai und Seung Lee fragten sich, ob im frühen Universum genügend massive Gravitonen erzeugt wurden, um sie als Kandidaten für dunkle Materie in Betracht zu ziehen. „Durch die Berechnung der Produktionsrate dieser Teilchen entdeckten wir, dass einige Prozesse unterhalb der Skala verstärkt werden, in der das Higgs-Boson Massen für die sichtbaren Teilchen erzeugt, nämlich eine Pikosekunde nach dem Urknall“, so Cacciapaglia. „Wir haben gezeigt, dass diese Verstärkung ausreicht, um die richtige Menge an Dunkler Materie in Form von massiven Gravitonen mit Massen unterhalb von MeV\* zu erzeugen.“<sup>15)102)104)105)</sup>

„Dies stellt eine direkte Verbindung zwischen der am Large Hadron Collider\* in Genf untersuchten Physik und der Physik der Gravitation und der Dunklen Materie im frühen Universum her“, so Cacciapaglia. „Unsere Ergebnisse deuten darauf hin, dass die gravitative Dunkle Materie eine Pikosekunde nach dem Urknall entsteht, zu einem Zeitpunkt, zu dem die Teilchenphysik durch die aktuellen Theorien gut beschrieben ist.“<sup>15)102)104)105)</sup>

Die supersymmetrischen Partner der Gravitonen, die Gravitinos, sind auch möglicherweise Dunkle Materie. Sie könnten stabil oder instabil sein, wobei beide Theorien für Dunkle Materie gelten. Sollten sie existieren, hätten sie einen Spin von  $3/2$ , eine Masse von maximal 1 TeV, wobei es leichter als dieses Maximum sein müsste, um der Dunklen Materie zu entsprechen, und neutral geladen. Es ist also extrem schwer und würde sogar über die starke und elektromagnetische Kraft mit der gewöhnlichen Materie wechselwirken. Weil sie so schwer wären, müssten sie nur in sehr geringer Dichte existieren, was die Detektion schwerer macht.<sup>15)102)104)105)</sup>

Bislang wissen wir nur sehr wenig über Gravitonen und Gravitinos (falls es sie überhaupt gibt). Jedoch sind sie nicht als Kandidat auszuschließen.<sup>15)102)104)105)</sup>

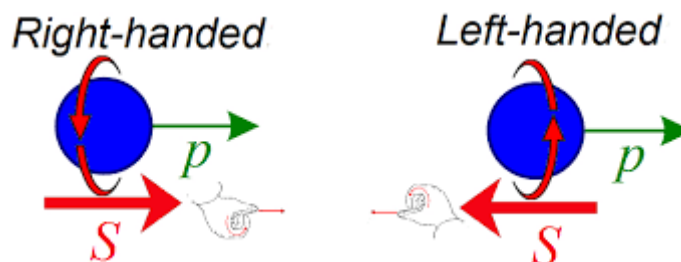
## Mirror

Um zu verstehen, was Mirror-Teilchen sind, müssen wir als erstes verstehen, was Spin eigentlich genau ist. Jedes Teilchen hat einen Spin, also einen Eigendrehimpuls. Stephen Hawking beschreibt den Spin in seinem Buch *Eine kurze Geschichte der Zeit* den Spin so: „Ein Teilchen mit dem Spin 0 ist ein Punkt: Es sieht aus allen Richtungen gleich aus. Ein Teilchen mit dem Spin 1 ist dagegen wie ein Pfeil: Es sieht aus verschiedenen Richtungen verschieden aus. Nur bei einer vollständigen Umdrehung (360 Grad) sieht das Teilchen wieder gleich aus. Ein Teilchen mit dem Spin 2 ist wie ein Pfeil mit einer Spitze an jedem Ende. Es sieht nach einer halben Umdrehung (180 Grad) wieder gleich aus. Entsprechend sehen Teilchen mit höherem Spin wieder gleich aus, wenn man Drehungen um kleinere Bruchteile einer vollständigen Umdrehung vollzieht. Zudem gibt es Teilchen, die nach einer Umdrehung noch nicht wieder gleich aussehen: Es sind dazu vielmehr zwei vollständige Umdrehungen erforderlich! Der Spin solcher Teilchen wird mit  $1/2$  angegeben.“<sup>10)</sup>

Jetzt erinnern wir uns mal an die Axionen und die CP-Symmetrie. Bei den Axionen war es so, dass sie erklären, warum die CP-Symmetrie nicht gebrochen wird. Das CP-Symmetrie-Problem kann aber auch anders gelöst werden, und zwar durch die Existenz sogenannter Mirror-Teilchen. Die Theorie in ihrer heutigen Form wurde 1991 beschrieben, obwohl die Grundidee weiter zurückreicht. Mirror-Teilchen interagieren untereinander auf die gleiche Weise wie gewöhnliche Teilchen, mit dem Unterschied, dass gewöhnliche Teilchen linkshändige Wechselwirkungen haben, während Spiegelteilchen rechtshändige Wechselwirkungen haben. Auf diese Weise stellt sich heraus, dass die CP-Symmetrie als exakte Symmetrie der Natur existieren kann, vorausgesetzt, dass für jedes gewöhnliche Teilchen ein Mirror-Teilchen existiert. Um zu verstehen, was mit links- und rechtshändig gemeint ist, müssen wir verstehen, was Spin und Parität sind. Der Spin ist eigentlich ein magnetischer Dipol und der Spin gibt diesen an. Wenn man ein geladenes Teilchen drehen lässt, erzeugt es in der Tat ein Magnetfeld, und man kann das Teilchen so beschreiben, dass es ein Dipol in eine bestimmte Richtung hat. In Wirklichkeit ist der Spin eine rein Quantenmechanische Eigenschaft, die man durch das Lösen einiger relativistischer Gleichungen bekommt. Der Grund, weshalb man sich den Spin nicht als Drehung vorstellen soll, ist das Neutron, das ebenfalls einen Spin hat, jedoch ohne Ladung. Um es besser zu veranschaulichen, stellen wir uns eine Magnetspule vor, die aus Leitungen besteht, die von oben gesehen mit dem Uhrzeigersinn drehen. Wenn der Strom an ist, erzeugen sie ein elektrisches Feld, das in eine Richtung zeigt. In diesem Feld haben Dipole ihre niedrigste Energie, wenn sie in die gleiche Richtung wie das Feld zeigen. Ein Beispiel ist die Nadel eines Kompasses, die immer nach Norden zeigt, weil sie potenzielle Energie abgibt, um in den Zustand zu gelangen, in dem sie keine potenzielle Energie mehr hat. Bei der Drehung wandelt sie die potenzielle Energie in kinetische Energie (Bewegungsenergie) um und hat das Minimum an Energie erreicht. Jedoch ist der Spin eine quantenmechanische Eigenschaft, er kann also in beide entgegengesetzte Richtungen

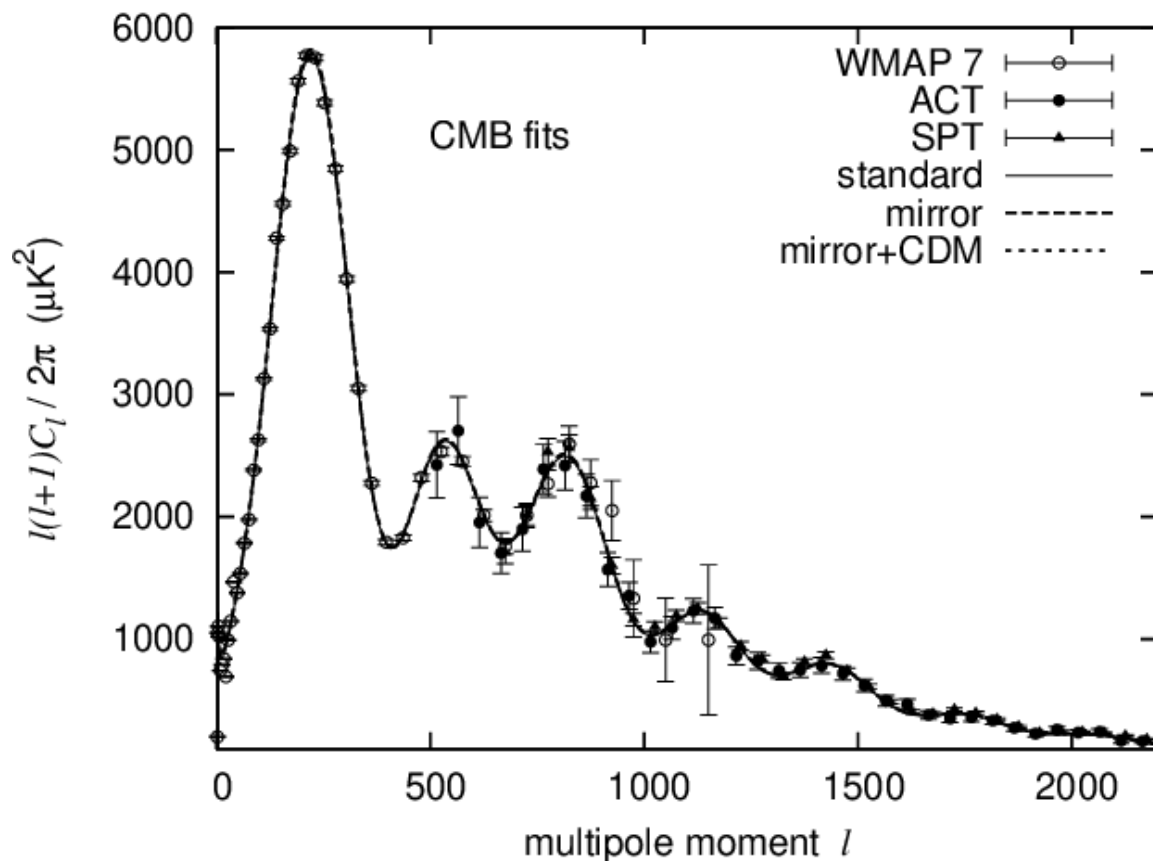
gleichzeitig zeigen. Ein Beispiel ist, wenn zwei Elektronen von zwei verschiedenen Atomen nebeneinander sind. Jetzt könnte man meinen, dass es vier Mögliche Zustände gäbe: beide nach oben, Elektron 1 nach oben und Elektron 2 nach unten, Elektron 1 nach unten und Elektron 2 nach oben und beide nach unten, jedoch ist es nicht so. Beide Elektronen zeigen nach oben und nach unten gleichzeitig, bis wir eins von ihnen messen. Bei einer Messung zeigen sie immer in entgegengesetzte Richtungen, also Elektron 1 nach oben und 2 nach unten oder umgekehrt. <sup>109)110)111)112)</sup>

Jetzt wo wir wissen, was Spin ist, können wir uns die Parität anschauen, die den Grund für Mirror-Teilchen bildet. Als Parität bezeichnen wir eine Eigenschaft von Teilchen, die wenn man ihre räumlichen Koordinaten negativ macht, die umgekehrte Richtung hat, jedoch das Teilchen den Spin gleich behält. Diese Paritätstransformation ist nicht das gleiche wie eine Spiegelung, denn bei einer Spiegelung würde die Richtung gleich bleiben und der Spin umgekehrt sein. Hier spricht man dann von links- und rechtshändigen Teilchen, je nachdem, ob Spin und Parität in dieselbe Richtung zeigen. Wenn dies der Fall ist, nennt man das Teilchen rechtshändig und wenn der Spin in die andere Richtung zeigt als die Parität, ist es linkshändig. <sup>109)110)111)112)113)114)</sup>



*Unterschied zwischen links- und rechtshändigen Teilchen<sup>115)</sup>*

Das Problem mit der CP-Symmetrie ist, dass es nur linkshändige Neutrinos gibt, was eine Asymmetrie ist. Um die Symmetrie wiederherzustellen hat man also eine Kopie des Universums postuliert, das sich unter Paritätstransformation genau umgekehrt verhält. In diesem Mirror-Universum gäbe es dann nur rechtshändige Neutrinos. Wenn es Mirror-Materie gibt, würde sie nur schwach mit sichtbarer Materie wechselwirken. Das liegt daran, dass die Kräfte zwischen Mirror-Teilchen durch Mirror-Bosonen vermittelt werden. Mit Ausnahme des Gravitons kann keines der bekannten Bosonen mit seinem Mirror-Partner identisch sein. Die einzige Möglichkeit, wie Mirror-Materie mit gewöhnlicher Materie über andere Kräfte als die Gravitation in Wechselwirkung treten kann, besteht in der kinetischen Vermischung von Mirror-Bosonen mit gewöhnlichen Bosonen. Diese Wechselwirkungen können nur sehr schwach sein. <sup>109)110)111)112)113)114)</sup>



Messdaten des CMB (siehe Kapitel 5) im Vergleich zu Mirror-Materie <sup>106)</sup>

## Mehrere Dimensionen

Nun kommen wir zu einer Theorie, die ich selbst entwickelt habe (es gibt wahrscheinlich auch andere, die das gleiche gedacht haben). Stellen wir uns vor, dass ein Organismus in einer eindimensionalen Welt lebt. In diesem Kapitel sprechen wir ausschließlich von Raumdimensionen. In einer eindimensionalen Welt kann sich der Organismus nur nach vorne und nach hinten auf dem Strich bewegen, der die eindimensionale Welt darstellt. Wenn wir eine zweite Dimension mit einem anderen Organismus hinzufügen, kann sich dieser nach vorne, hinten, links und rechts bewegen. Diese zweite Dimension besteht eigentlich aus unendlich vielen Strichen, also eindimensionale Welten. Das bedeutet, dass wenn sich das zweidimensionale Wesen zufällig durch den Strich, also die Welt, bewegt, wo der erste Organismus sich befindet, „sieht“ der das zweidimensionale Wesen im als Punkt (0-dimensional), der sich ändert, wenn das zweidimensionale Wesen sich bewegt, da für ihn der unendlich dünne Strich seine Welt ist. Für ihn „sieht“ es so aus, als ob aus dem nichts etwas (ein Punkt) auftauchen würde. Weil wir nicht wissen, ob eindimensionale Wesen etwas sehen können, ganz zu schweigen von zweidimensionalen Wesen, nehmen wir es einfach an. Wenn das zweidimensionale Wesen den Strich verlässt, sieht es für das eindimensionale Wesen so aus, als ob es verschwinden würde.

Wenn wir nun das Ganze eine Dimension höher setzen und den Beobachter zweidimensional und ein dreidimensionales Wesen hinzufügen, geschieht ungefähr das gleiche, aber es ist einfacher es sich vorzustellen. Wir (dreidimensionale Wesen) sehen zum Beispiel Objekte „hinter“ einer zweidimensionalen Mauer, die zweidimensionale Wesen nicht sehen, weil sie in ihrer Sicht steht. Außerdem können bestimmen, wie dick die Mauer ist. Wir sehen Objekte dahinter, weil wir eine Perspektive haben, die zweidimensionale Wesen nicht besitzen: die dritte Dimension. Sollten wir durch eine zweidimensionale Scheibe durchdringen, auf der ein zweidimensionaler Beobachter ist,

würde der, ähnlich wie beim eindimensionalen Beobachter, einen Querschnitt von uns sehen, der sich mit uns bewegen würde.

Jetzt kommen wir zum Teil, der für Dunkle Materie spannend ist, nämlich wenn es eine vierte Raumdimension gäbe. Dann wären nämlich vierdimensionale Objekte für uns verändern, wenn sie sich durch unsere Welt bewegen. Das ist, weil unsere Perspektive auf drei Dimensionen beschränkt ist. So ein sich veränderndes Objekt nennt man ein Tesseract, was eine Art doppelter Würfel ist, bei dem alle Seiten senkrecht zueinander sind (es gibt viele Animationen im Internet, jedoch gibt es Limits, weil wir ein 4D-Objekt in einer 3D-Welt auf einem 2D-Bildschirm sehen). Diese 4-D Objekte würden also vielleicht in unsere Welt eindringen und wieder verschwinden. Und falls sie genau wie bei niedrigeren Dimensionen durch unsere dreidimensionalen Objekte durchgehen können, weil dreidimensionale Objekte in ihrer Welt nur so sind, wie zweidimensionale Objekte in unserer Welt (keine richtige Form haben), und falls wir sie nicht sehen können, könnten solche Teilchen oder Objekte nur mit der Gravitation wechselwirken und Dunkle Materie ausmachen.

## **6. Experimentelle Suche nach Dunkler Materie**

### **Axionen**

Axionen sind sehr schwer zu finden, weil sie nur sehr selten wechselwirken. Die meisten Experimente fokussieren sich auf eine spezifische Wechselwirkung, die in einem Magnetfeld entstehen kann. In einem Magnetfeld können Axionen sich in Photonen umwandeln, und ähnlicherweise können sich Photonen in Axionen umwandeln. Das nennt man den Primakoff-Effekt. Es könnte also in den Kernen der Sterne und ähnliche Orte, wo es heiße astrophysikalische Plasmen gibt, zum Primakoff-Effekt kommen. Es gibt viele Experimente, die nach dieser Wechselwirkung suchen, also nach Photonen, die von Axionen stammen (wenn aus dem nichts ein Photon auftaucht). Ein Experiment, das ADMX (Axion Dark Matter eXperiment) an der University of Washington, benutzt ein starkes Magnetfeld, um Signale der Axionen in Halos\* der Milchstraße zu entdecken. Das Experiment hat bislang noch kein Signal empfangen, jedoch hat es geholfen, das Spektrum der Eigenschaften der Axionen zu verengen.

### **WIMPs**

Es gibt eine ganze Reihe - aktiver oder geplanter - Experimente, die nach WIMPs suchen. Die Jagd nach WIMPs erfordert hochsensitive Experimente, die in der Lage sind, diese Teilchen von anderen Hintergrundstrahlung zu unterscheiden. Eine der vielversprechendsten Methoden ist die direkte Detektion, bei der speziell abgeschirmte Detektoren nach WIMPs "abhorchen", die durch die Erde fliegen. Solche Experimente werden in unterirdischen Laboren wie bei DAMA/LIBRA durchgeführt, um kosmische Strahlung und andere Störquellen zu minimieren. Präzise Kalibrierung der Detektoren ist entscheidend, um extrem schwache WIMP-Signale von Hintergrundsignalen zu unterscheiden. Der Detektor überwacht kontinuierlich das Eintreffen möglicher WIMP-Partikel und zeichnet die gewonnenen Daten auf. Die gesammelten Daten werden sorgfältig analysiert, um nach charakteristischen Merkmalen von WIMPs zu suchen.

Es könnte sich herausstellen, dass WIMPs völlig hypothetisch bleiben (die Teilchen, aus denen sich die Dunkle Materie zusammensetzt, sind z. B. keine WIMPs) oder nur ein kleiner Bestandteil der Dunklen Materie sind. In letzterem Fall würden sie den MACHOs nicht nur deshalb folgen, weil sie erst später benannt wurden ... MACHOs wurden im Halo\* der Milchstraße entdeckt, aber es gibt nicht annähernd genug von ihnen, um die Rotationskurve unserer Galaxie zu erklären.

Die Suche nach WIMPs ist eine der größten Herausforderungen der modernen Physik. Trotz intensiver Bemühungen konnte bisher noch kein direkter Nachweis dieser Teilchen erbracht werden. Die Empfindlichkeit der Detektoren muss weiter erhöht und mögliche Quellen von Hintergrundstrahlung noch besser ausgeschlossen werden. Kontinuierliche Verbesserungen bei Sensoren, Kühlung und Abschirmung sind notwendig, um die Nachweisgrenze zu senken. Die Weiterentwicklung theoretischer Modelle kann helfen, die Eigenschaften von WIMPs genauer zu bestimmen und die Suche zu fokussieren. Große internationale Forschungskollaborationen bündeln Ressourcen und Expertise, um die Suche nach WIMPs voranzubringen.

### **SUSY**

Wenn es dort draußen neue Teilchen gibt, ist der Large Hadron Collider (LHC\*) am CERN der ideale Ort, um nach ihnen zu suchen. Die Theorie der Supersymmetrie legt nahe, dass zu jedem der bekannten Elementarteilchen eine ganz neue Familie von Partnerteilchen existiert. Diese Partnerteilchen könnten verschiedene Lücken in den derzeitigen wissenschaftlichen Erkenntnissen

schließen, z. B. die Quelle der mysteriösen dunklen Materie im Universum, die „unnatürlich“ geringe Masse des Higgs-Bosons, die anomale Art und Weise, wie sich das Myon dreht, und sogar die Beziehung zwischen den verschiedenen Naturkräften. Aber wenn es diese supersymmetrischen Teilchen gibt, wo könnten sie sich verstecken?

In einer aktuellen Studie von Proton-Proton-Kollisionsdaten aus dem zweiten Durchlauf des LHC\* (2015-2018) gibt die ATLAS-Kollaboration den bisher umfassendsten Überblick über ihre Suche nach einigen der schwer fassbaren Arten supersymmetrischer Teilchen - solchen, die nur selten durch die „schwache“ Kernkraft oder die elektromagnetische Kraft erzeugt werden können. Die leichtesten dieser supersymmetrischen Teilchen mit schwacher Wechselwirkung könnten die Quelle der dunklen Materie sein.

Die erhöhte Kollisionsenergie und die höhere Kollisionsrate sowie neue Suchalgorithmen und maschinelle Lerntechniken haben eine tiefere Erforschung dieses schwer zugänglichen Gebiets der Supersymmetrie ermöglicht.

Die ATLAS-Physiker haben die Ergebnisse von acht Suchläufen zusammengetragen, von denen jeder auf eine andere Weise nach Beweisen für supersymmetrische Teilchen sucht. Die kombinierte Leistung und Empfindlichkeit der verschiedenen Suchstrategien hat es den ATLAS-Forschern ermöglicht, Zehntausende von Supersymmetriemodellen zu untersuchen, die jeweils unterschiedliche Vorhersagen über die Massen der supersymmetrischen Teilchen enthalten.

Diese ATLAS-Suche hat eine noch nie dagewesene Empfindlichkeit und erforscht einen breiten Bereich von Massen supersymmetrischer Teilchen. Die ATLAS-Physiker suchten nach Hinweisen auf „laborgefertigte“ Dunkle Materie, d. h. auf Dunkle Materie, die in LHC\*-Kollisionen erzeugt wurde. Ihre Suche hat sich als komplementär zu anderen Experimenten erwiesen, die nach natürlicher Dunkler Materie suchen, die aus dem Urknall übrig geblieben ist. Im Gegensatz zu den Kollisionsexperimenten, bei denen die Dunkle Materie nicht gesehen werden muss, um auf ihr Vorhandensein schließen zu können, sind die letztgenannten Experimente auf eine ausreichend große Wahrscheinlichkeit angewiesen, dass Teilchen der dunklen Materie auf normales Material treffen und daher entdeckt werden.

Eines der wichtigsten Ergebnisse dieser Kombination von Suchvorgängen besteht darin, dass einige Bereiche für die Massen supersymmetrischer Teilchen, die zuvor als günstig angesehen wurden und in denen das Teilchen der dunklen Materie etwa die Hälfte der Masse des Z-Bosons oder des Higgs-Bosons hat, nun fast vollständig ausgeschlossen werden konnten.

Ein weiterer Vorteil einer solchen umfassenden Studie ist das Verständnis dafür, welche Supersymmetriemodelle noch nicht erforscht wurden. ATLAS hat Beispiele für solche überlebenden Modelle präsentiert, die zur Optimierung künftiger Suchen genutzt werden können. Obwohl die möglichen Verstecke für supersymmetrische Teilchen systematisch reduziert werden, bleiben viele

hartnäckig ausweichend. Um die Empfindlichkeit der ATLAS-Suche für diese Modelle zu verbessern, sind mehr Kollisionsdaten und weitere clevere Entwicklungen in der Suchstrategie erforderlich.

## Gravitinos

Aus Simulationen weiß man, wie viel Dunkle Materie in unserem Weltall vorhanden sein muss. Daraus lässt sich eine Dichte der Dunkle-Materie-Teilchen vorhersagen. Zum Vergleich: Bestünde Dunkle Materie beispielsweise aus Protonen, bräuchte man etwa ein Proton pro Kubikzentimeter, um die erforderliche Masse an Dunkler Materie zu liefern. Da das Gravitino allerdings viel schwerer als ein Proton ist, gäbe es nur etwa ein Teilchen pro zehntausend Kubikkilometer. Somit kämen Gravitinos sehr viel seltener vor als die leichteren Kandidaten und das macht es schwieriger, sie zu beobachten. <sup>15)102)104)105)</sup>

Eine Möglichkeit wäre es, mit Detektoren tief im Untergrund unserer Erde nach Gravitinos zu suchen. Die von uns postulierten Gravitinos treten zwar mit Materie in Wechselwirkung, dringen aber aufgrund ihrer hohen Masse – anders als die meisten Teilchen – ungestört in die Erde ein. Aber auch andere Teilchen, wie beispielsweise Myonen, dringen bis in den Untergrund. Doch aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften ließen sich die Gravitinos von den anderen Teilchen unterscheiden. Allerdings sind Gravitinos so selten, dass man wahrscheinlich sehr lange auf ein Signal warten müsste. <sup>15)102)104)105)</sup>

Unsere Erde fliegt nun seit etwa 4,5 Milliarden Jahren durch das Sonnensystem. In dieser Zeit sind möglicherweise einige Gravitinos durch die Erde geflogen und haben dabei eventuell Spuren hinterlassen. Man könnte also auf eine Art Fossiliensuche gehen, bei der unsere Erde als natürlicher Detektor dient. Vielleicht haben Gravitinos in sonst sehr stabilen und langlebigen Kristallstrukturen wie der des britischen Krondiamanten eine Spur hinterlassen. Das ist zwar sehr spekulativ, aber ein Blick würde sich vielleicht lohnen. <sup>15)102)104)105)</sup>

## Mirror

Die Resultate des DAMA/LIBRA und des CoGeNT\* in den USA könnten durch Mirror-Teilchen erklärt werden. Wenn Mirror-Materie in großen Mengen im Universum existiert und wenn sie mit gewöhnlicher Materie durch Photonen-Mirror-Photonen-Mischung wechselwirkt, dann könnte dies in Experimenten zum direkten Nachweis dunkler Materie wie DAMA/NaI und seinem Nachfolger DAMA/LIBRA nachgewiesen werden. Tatsächlich ist es einer der wenigen Kandidaten für Dunkle Materie, die das positive DAMA/NaI-Signal für Dunkle Materie erklären können und gleichzeitig mit den Null-Ergebnissen anderer Experimente für dunkle Materie vereinbar sind. Wir warten also noch auf die Resultate des Zwillingsexperimentes von DAMA/LIBRA in Australien. <sup>109)110)111)112)113)114)119)</sup>

## Mehrere Dimensionen

Wir brauchen ein besseres Verständnis von höheren Dimensionen, um überhaupt Experimente aufzubauen, die nach diesen Teilchen suchen. Die Theorie ist noch sehr unbekannt und es liegt noch ein langer Weg vor uns, wenn wir damit die Entdeckung der Dunklen Materie erreichen wollen.

## **7. Zusammenhang mit anderen astrophysikalischen Phänomenen**

Dunkle Energie ist eine geheimnisvolle Komponente des Universums, die eine repulsive Kraft ausübt und für die beschleunigte Expansion des Universums verantwortlich ist. Die Natur der Dunklen Energie ist noch weitgehend unbekannt. Das Zusammenspiel zwischen Dunkler Materie und Dunkler Energie bestimmt die Dynamik und Entwicklung des Universums auf großen Skalen. Obwohl ihre genaue Beziehung noch erforscht wird, sind diese beiden unsichtbaren Komponenten entscheidend für unser Verständnis der Kosmologie.<sup>120)</sup>

Dunkle Materie bildet die Gerüststruktur, um die sich normale Materie wie Galaxien und Galaxienhaufen anlagert. Ihr Gravitationseinfluss führt zum Kollabieren und Wachstum dieser Strukturen über Milliarden von Jahren. Unter dem Einfluss der Gravitation formt sich die Dunkle Materie in einem komplexen Netzwerk aus Filamenten und Knotenpunkten. An diesen Knotenpunkten sammelt sich die normale Materie und bildet die beobachtbaren Strukturen wie Galaxien und Galaxienhaufen. Ausgehend von kleinen Strukturen wie Galaxien wachsen unter dem Einfluss der Dunklen Materie über Milliarden von Jahren immer größere kosmische Strukturen wie Galaxienhaufen und Superclusters heran. Dieses hierarchische Wachstum prägt die Verteilung und Morphologie der heutigen Strukturen im Universum.<sup>120)</sup>

Die Verteilung und Bewegung der Dunklen Materie bestimmt maßgeblich die Struktur und Dynamik der Galaxien. Beobachtungen zeigen, dass Galaxien von großen Halos aus Dunkler Materie umgeben sind, die ihre Entwicklung prägen. Die Interaktion zwischen Dunkler Materie und normaler Materie beeinflusst auch die Morphologie und Eigenschaften verschiedener Galaxientypen, von Spiralgalaxien bis hin zu elliptischen Galaxien.<sup>120)</sup>

Schwarze Löcher sind extrem kompakte Objekte mit einer so starken Gravitation, dass selbst Licht nicht entweichen kann. Sie spielen eine wichtige Rolle in der Entwicklung von Galaxien. Sowohl Dunkle Materie als auch Schwarze Löcher sind entscheidend für die Struktur und Entwicklung von Galaxien. Das Zusammenspiel dieser beiden Komponenten ist ein aktives Forschungsfeld in der Astrophysik.<sup>120)</sup>

Wie genau Dunkle Materie mit normaler Materie, Dunkler Energie und Gravitationsfeldern interagiert, ist noch nicht vollständig verstanden. Weitere Forschung in diesem Bereich kann unser Bild vom Universum entscheidend erweitern.<sup>120)</sup>

Die Rolle der Dunklen Materie in der Strukturbildung und Evolution des Universums ist ein zentrales Thema der Kosmologie. Neue Beobachtungen und Simulationen sollen ihre genauen Beiträge zu diesen Prozessen aufklären.<sup>120)</sup>

## **8. Zusammenfassung**

Dunkle Materie ist eine der größten Herausforderungen in der modernen Kosmologie und Astrophysik. Sie macht etwa 85% der gesamten Materie im Universum aus, ihre Natur ist jedoch bis heute nicht vollständig geklärt. In den folgenden Abschnitten werden die Eigenschaften, der Nachweis und mögliche Kandidaten für Dunkle Materie, sowie offene Fragen und Forschungsansätze näher beleuchtet.

Dunkle Materie interagiert nicht mit elektromagnetischer Strahlung und ist daher für das menschliche Auge unsichtbar. Sie wirkt sich jedoch aufgrund ihrer Gravitationskraft auf die Bewegung von Galaxien und die Struktur des Universums aus. Kosmologische Beobachtungen zeigen, dass Dunkle Materie eine nicht-leuchtende, nicht-baryonische Substanz ist, die hauptsächlich in Galaxienhaufen und großräumigen Strukturen des Kosmos konzentriert ist.

Obwohl Dunkle Materie nicht direkt beobachtet werden kann, gibt es verschiedene indirekte Nachweise für ihre Existenz. Dazu gehören die Beobachtung von Gravitationslinseneffekten, Messungen der Rotationskurven von Galaxien und Galaxienhaufen sowie Analysen der kosmischen Hintergrundstrahlung. Diese Beobachtungen zeigen, dass die Masse der sichtbaren Materie allein nicht ausreicht, um die beobachteten Phänomene zu erklären. Stattdessen deutet alles auf das Vorhandensein einer zusätzlichen, unsichtbaren Komponente - der Dunklen Materie - hin.

WIMPs sind hypothetische Teilchen, die nur sehr schwach mit normaler Materie wechselwirken. Sie sind derzeit einer der Hauptkandidaten für die Dunkle Materie.

Axionen sind extrem leichte, schwach wechselwirkende Teilchen, die möglicherweise einen Beitrag zur Dunklen Materie leisten könnten.

MACHOs sind riesige, kompakte Objekte wie schwarze Löcher oder Neutronensterne, die sich in den Halos von Galaxien befinden könnten.

Einige Wissenschaftler spekulieren, dass die beobachteten Effekte, die Dunkle Materie zugeschrieben werden, auf Modifikationen der allgemeinen Relativitätstheorie zurückzuführen sein könnten.

Trotz jahrzehntelanger Forschung ist die genaue Natur der Dunklen Materie nach wie vor unbekannt. Zu den offenen Fragen gehören, welche Teilchen oder Objekte die Dunkle Materie bilden, wie sie sich auf kosmischen Skalen verteilt ist und wie sie mit normaler Materie wechselwirkt. Um diese Fragen zu beantworten, verfolgen Physiker verschiedene experimentelle und theoretische Forschungsansätze, wie die direkte und indirekte Suche nach Dunkler Materie, Computersimulationen der Strukturbildung im Universum und die Weiterentwicklung der kosmologischen Theorie.

Das Rätsel der Dunklen Materie ist eines der größten Geheimnisse der modernen Physik. Ihr Verständnis ist entscheidend für unser Wissen über die Entstehung und Entwicklung des Universums. Dunkle Materie spielt eine Schlüsselrolle bei der Bildung von Galaxien und Galaxienhaufen sowie bei der Strukturbildung auf großen Skalen. Nur mit einem umfassenden Modell der Dunklen Materie können Kosmologen und Astrophysiker die Beobachtungen des Universums vollständig erklären und seine Zukunft vorhersagen. Die Lösung des Dunklen Materie-Rätsels könnte daher bahnbrechende Erkenntnisse über die Grundlagen unseres Universums liefern.

## 9. Literaturverzeichnis

### Lexikon

#### 21-Zentimeter-Linie:

Die HI-Linie (H-Eins-Linie), auch Wasserstofflinie, ist in der Astronomie die Bezeichnung für die Radiostrahlung des neutralen Wasserstoffs. Der auch verwendete Ausdruck 21-Zentimeter-Linie rührt von der entsprechenden Wellenlänge im Vakuum her. In der Radioastronomie spielt diese Strahlung eine wichtige Rolle, weil ihre Untersuchung Auskunft über die Dichteverteilung, Geschwindigkeit und Temperatur von Wasserstoffatomen im Universum gibt.<sup>121)</sup>

#### Halo:

Der Halo (von altgriechisch *hálōs* ‚Lichthof‘) einer Galaxie ist ein annähernd kugelförmiger Bereich, der größer ist als die Galaxie selbst und in dessen Zentrum die Galaxie eingebettet ist.<sup>122)</sup>

#### eV:

Das Elektronvolt ist definiert als die kinetische Energie, die ein Elektron bei Durchlaufen einer Beschleunigungsspannung von 1 Volt gewinnt. Es ist somit gleich dem Produkt aus der Elementarladung  $e$  und der Maßeinheit Volt (V).<sup>123)</sup>

#### CP-Symmetrie:

Die Erwartung, dass physikalische Zusammenhänge und Gesetze gleich bleiben, wenn alle Teilchen durch ihre Antiteilchen ersetzt und gleichzeitig alle Raumkoordinaten gespiegelt werden.<sup>94)</sup>

#### CPT-Symmetrie:

Die Erwartung, dass physikalische Zusammenhänge und Gesetze gleich bleiben, wenn alle Teilchen durch ihre Antiteilchen ersetzt, gleichzeitig alle Raumkoordinaten gespiegelt werden und die Zeit rückwärts vergeht.<sup>94)124)</sup>

#### LHC:

Der Large Hadron Collider am CERN ist ein zirkularer Teilchenbeschleuniger mit einem Umfang von 27 Kilometer.<sup>124)</sup>

#### CoGeNT:

Das CoGeNT-Experiment ist auf der Suche nach dunkler Materie. Es verwendet einen einzigen Germaniumkristall (~100 Gramm) als sehr kalten Detektor für WIMP-Teilchen. CoGeNT wird seit 2009 im Soudan Underground Laboratory betrieben.<sup>125)</sup>

## Referenzen:

- 1) [https://de.wikipedia.org/wiki/Dunkle\\_Materie](https://de.wikipedia.org/wiki/Dunkle_Materie)
- 2) [https://en.wikipedia.org/wiki/Dark\\_matter](https://en.wikipedia.org/wiki/Dark_matter)
- 3) <https://www.youtube.com/watch?v=DmWV7Zovct8>
- 4) [https://www.youtube.com/watch?v=QAa2O\\_8wBUQ](https://www.youtube.com/watch?v=QAa2O_8wBUQ)
- 5) <https://www.weltdrphysik.de/gebiet/universum/dunkle-materie/>
- 6) <https://www.youtube.com/watch?v=OuL2Mx2Kus8>
- 7) <https://www.youtube.com/watch?v=6etTERFUIUI>
- 8) <https://www.maths2mind.com/schluesselwoerter/dunkle-materie>
- 9) [https://www.mpi-hd.mpg.de/lin/research\\_DM.de.html](https://www.mpi-hd.mpg.de/lin/research_DM.de.html)
- 10) <https://de.wikipedia.org/wiki/Spin>
- 11) [https://en.wikipedia.org/wiki/Higgs\\_boson](https://en.wikipedia.org/wiki/Higgs_boson)
- 12) <https://de.wikipedia.org/wiki/Boson>
- 13) <https://www.ardmediathek.de/video/alpha-centauri/was-sind-quarks/ard-alpha/Y3JpZDovL2JyLmRlL3ZpZGVvL2Y1MzlmNzQ5LWU3MmUtNDhlYy05OGEyLWNjZmE4OGYzZDgzNw>
- 14) <https://www.youtube.com/watch?v=7fgKBJDMO54>
- 15) <https://de.wikipedia.org/wiki/Graviton>
- 16) <https://www.youtube.com/watch?v=sB1EPGmpzyg>
- 17) <https://home.cern/science/physics/supersymmetry>
- 18) <https://dulwichscience.wordpress.com/2015/01/23/what-is-supersymmetry-by-jan-rybojad/>
- 19) <https://www.youtube.com/watch?v=EYPtfKUMoQk>
- 20) <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphy.2013.00033/full>
- 21) <https://arxiv.org/pdf/2305.13367.pdf>
- 22) <https://pro-physik.de/zeitschriften/download/15634>
- 23) [https://www.humboldt-foundation.de/fileadmin/Entdecken/Newsroom/Dossier\\_Max-Planck-Humboldt-Forschungspreis/Max-Planck-Forschungspreistraeger\\_2005/broschuere\\_mpf\\_05.pdf](https://www.humboldt-foundation.de/fileadmin/Entdecken/Newsroom/Dossier_Max-Planck-Humboldt-Forschungspreis/Max-Planck-Forschungspreistraeger_2005/broschuere_mpf_05.pdf)
- 24) <https://home.cern/science/physics/matter-antimatter-asymmetry-problem>
- 25) [https://de.wikipedia.org/wiki/Standardmodell\\_der\\_Teilchenphysik](https://de.wikipedia.org/wiki/Standardmodell_der_Teilchenphysik)
- 26) <https://www.nagwa.com/en/videos/215139676594/>
- 27) <https://www.youtube.com/watch?v=6etTERFUIUI>
- 28) <https://home.cern/science/physics/standard-model>
- 29) <https://www.spektrum.de/news/quantenfeldtheorie-das-standardmodell-berechnen/1958050>
- 30) <https://thenextweb.com/news/future-dark-matter-research-will-ultimately-be-decided-by-politicians>
- 31) <https://www.youtube.com/watch?v=0GUTJQCeKBE>
- 32) <https://cds.cern.ch/record/1281949/files/p101.pdf>
- 33) <https://learnattack.de/schuelerlexikon/physik/myon-und-tauon>
- 34) <https://www.leifiphysik.de/kern-teilchenphysik/teilchenphysik/grundwissen/starke-wechselwirkung-0>
- 35) <https://www.youtube.com/watch?v=QXQloYUV6wc>
- 36) <https://www.youtube.com/watch?v=LR2fhwUFVwQ>
- 37) <https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/schwache-wechselwirkung/426>
- 38) <https://www.leifiphysik.de/kern-teilchenphysik/teilchenphysik/grundwissen/die-vier-fundamentalen-wechselwirkungen>
- 39) <https://www.leifiphysik.de/kern-teilchenphysik/teilchenphysik/grundwissen/schwache-wechselwirkung>
- 40) <https://www.leifiphysik.de/kern-teilchenphysik/teilchenphysik/grundwissen/teilchen-und-anti-teilchen>
- 41) <https://www.leifiphysik.de/kern-teilchenphysik/teilchenphysik/grundwissen/starke-wechselwirkung-0>

- 42) <https://www.leifiphysik.de/kern-teilchenphysik/teilchenphysik/grundwissen/wechselwirkungen>
- 43) <https://www.home.cern/science/physics/z-boson>
- 44) <https://www-static.etp.physik.uni-muenchen.de/fp-versuch/node5.html>
- 45) <https://de.m.wikipedia.org/wiki/Datei:EM-Spektrum.svg>
- 46) <https://www.youtube.com/watch?v=IXxZRZxafEQ>
- 47) [https://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetische\\_Welle](https://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetische_Welle)
- 48) <https://www.leifiphysik.de/quantenphysik/quantenobjekt-photon/grundwissen/einsteins-theorie-des-lichts>
- 49) <https://home.cern/science/physics/higgs-boson>
- 50) [https://simple.wikipedia.org/wiki/Higgs\\_field](https://simple.wikipedia.org/wiki/Higgs_field)
- 51) <https://www.mpg.de/13820073/neuer-kandidat-fuer-dunkle-materie>
- 52) <https://www.mpg.de/filme/dunkle-materie?c=11863749>
- 53) [https://www.mpg.de/7696088/mpik\\_jb\\_2013](https://www.mpg.de/7696088/mpik_jb_2013)
- 54) [https://www.youtube.com/watch?v=U4sw3-\\_pGo](https://www.youtube.com/watch?v=U4sw3-_pGo)
- 55) <https://www.youtube.com/watch?v=DDMOHLZtYLM>
- 56) <https://brilliant.org/wiki/dark-matter/>
- 57) [https://www.esa.int/Space\\_in\\_Member\\_States/Germany/Die\\_Raetsel\\_des\\_Universums\\_Dunkle\\_Materie\\_und\\_dunkle\\_Energie](https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Germany/Die_Raetsel_des_Universums_Dunkle_Materie_und_dunkle_Energie)
- 58) [https://scilogs.spektrum.de/prosa-der-astronomie/files/ComaCluster\\_Carroll\\_1024.jpg](https://scilogs.spektrum.de/prosa-der-astronomie/files/ComaCluster_Carroll_1024.jpg)
- 59) <https://scilogs.spektrum.de/prosa-der-astronomie/fritz-zwicky-der-vater-der-dunklen-materie/>
- 60) <https://www.mpifr-bonn.mpg.de/530224/rotverschiebung>
- 61) <https://www.hearingprotech.com/de/die-themen/der-larm/eigenschaften-des-schalls.html>
- 62) <https://www.youtube.com/watch?v=V9qC9dnNy5o>
- 63) <https://www.youtube.com/watch?v=OuL2Mx2Kus8>
- 64) <https://www.youtube.com/watch?v=0ZGIX7N-n7Y>
- 65) <https://www.youtube.com/watch?v=1GpPtfhB7s4>
- 66) <https://www.forbes.com/sites/briankoberlein/2016/09/19/the-dark-history-of-dark-matter/>
- 67) [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical\\_and\\_Theoretical\\_Chemistry\\_Textbook\\_Maps/Supplemental\\_Modules\\_\(Physical\\_and\\_Theoretical\\_Chemistry\)/Physical\\_Properties\\_of\\_Matter/Atomic\\_and\\_Molecular\\_Properties/Intermolecular\\_Forces/Specific\\_Interactions/Lennard-Jones\\_Potential](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_(Physical_and_Theoretical_Chemistry)/Physical_Properties_of_Matter/Atomic_and_Molecular_Properties/Intermolecular_Forces/Specific_Interactions/Lennard-Jones_Potential)
- 68) <https://www.youtube.com/watch?v=jbNSeTxUvww&t=9s>
- 69) <https://de.wikipedia.org/wiki/Lambda-CDM-Modell>
- 70) „Das Wissenschaftsbuch“ (vom Englischen ”The Science Book”)
- 71) <http://background.uchicago.edu/~whu/intermediate/intermediate.html>
- 72) <http://background.uchicago.edu/~whu/beginners/introduction.html>
- 73) [https://de.wikipedia.org/wiki/Hintergrundstrahlung#/media/Datei:Ilc\\_9yr\\_moll4096.png](https://de.wikipedia.org/wiki/Hintergrundstrahlung#/media/Datei:Ilc_9yr_moll4096.png)
- 74) <http://background.uchicago.edu/~whu/intermediate/driving2.html>
- 75) <https://ned.ipac.caltech.edu/level5/March10/Garrett/Figures/figure3.jpg>
- 76) <https://ned.ipac.caltech.edu/level5/March10/Garrett/Garrett3.html>
- 77) <https://www.semanticscholar.org/paper/Is-dark-matter-made-of-mirror-matter-Evidence-from-Ciarcelluti-Wallemacq/a298fcb8a023668ac13f04cd9a252d6d3f6730d1>
- 78) <https://www.spiegel.de/wissenschaft/weltall/astrophysik-direkter-beweis-fuer-dunkle-materie-entdeckt-a-432863.html>
- 79) [https://en.wikipedia.org/wiki/Bullet\\_Cluster](https://en.wikipedia.org/wiki/Bullet_Cluster)
- 80) <https://scilogs.spektrum.de/prosa-der-astronomie/zurueck-zu-start-zu-viel-dunkle-materie-in-galaxienhaufen/>
- 81) <https://science.nasa.gov/mission/hubble/science/science-highlights/shining-a-light-on-dark-matter/>
- 82) <https://www.spiegel.de/fotostrecke/dunkle-materie-wie-sich-die-mysterioese-substanz-verraet-fotostrecke-15761.html>

- 83) <https://www.br.de/nachrichten/wissen/neues-experiment-untergrundlabor-sucht-nach-dunkler-materie.UByYmPG>
- 84) <https://en.wikipedia.org/wiki/XENON>
- 85) <https://en.wikipedia.org/wiki/DAMA/LIBRA>
- 86) [https://de.wikipedia.org/wiki/Modifizierte\\_Newtonsche\\_Dynamik](https://de.wikipedia.org/wiki/Modifizierte_Newtonsche_Dynamik)
- 87) <https://theconversation.com/from-machos-to-wimps-meet-the-top-five-candidates-for-dark-matter-51516>
- 88) <https://www.youtube.com/watch?v=RnUOR1p69cY>
- 89) <https://www.astronomy.com/science/ask-astro-are-neutrinos-dark-matter/>
- 90) [https://de.wikipedia.org/wiki/Steriles\\_Neutrino](https://de.wikipedia.org/wiki/Steriles_Neutrino)
- 91) [https://en.wikipedia.org/wiki/Sterile\\_neutrino](https://en.wikipedia.org/wiki/Sterile_neutrino)
- 92) [https://en.wikipedia.org/wiki/Seesaw\\_mechanism](https://en.wikipedia.org/wiki/Seesaw_mechanism)
- 93) [https://en.wikipedia.org/wiki/Warm\\_dark\\_matter](https://en.wikipedia.org/wiki/Warm_dark_matter)
- 94) <https://de.wikipedia.org/wiki/CP-Verletzung>
- 95) <https://www.sciencealert.com/what-is-an-axion>
- 96) <https://open.spotify.com/episode/0cWmTzCrCd6QTbF6QsHsU?si=ePM3gnv1TiGE2nzITy5FTQ>
- 97) <https://sternengeschichten.podigee.io/578-sternengeschichten-folge-578-das-lambda-cdm-modell>
- 98) <https://www.universetoday.com/41878/wimps/>
- 99) <https://home.cern/news/news/physics/search-supersymmetric-dark-matter>
- 100) <https://arstechnica.com/science/2014/04/a-sort-of-particle-free-supersymmetry-found-in-exotic-materials/>
- 101) <https://home.cern/science/physics/supersymmetry>
- 102) <https://de.wikipedia.org/wiki/Gravitino>
- 103) <https://de.wikipedia.org/wiki/Neutralino>
- 104) <https://www.weltdrphysik.de/gebiet/universum/dunkle-materie/ein-neuer-kandidat-fuer-dunkle-materie/>
- 105) <https://phys.org/news/2022-03-massive-gravitons-viable-dark-candidates.html>
- 106) <https://www.semanticscholar.org/paper/Is-dark-matter-made-of-mirror-matter-Evidence-from-Ciarcelluti-Wallemacq/a298fcb8a023668ac13f04cd9a252d6d3f6730d1>
- 107) [https://en.wikipedia.org/wiki/Mirror\\_matter](https://en.wikipedia.org/wiki/Mirror_matter)
- 108) <https://www.quora.com/What-is-the-difference-between-mirror-matter-and-antimatter>
- 109) [https://en.wikipedia.org/wiki/Mirror\\_matter](https://en.wikipedia.org/wiki/Mirror_matter)
- 110) [https://en.wikipedia.org/wiki/Chirality\\_\(physics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Chirality_(physics))
- 111) [https://de.wikipedia.org/wiki/Chiralit%C3%A4t\\_\(Physik\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Chiralit%C3%A4t_(Physik))
- 112) [https://www.youtube.com/watch?v=v1\\_-LsQLwkA](https://www.youtube.com/watch?v=v1_-LsQLwkA)
- 113) [https://en.wikipedia.org/wiki/Parity\\_\(physics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Parity_(physics))
- 114) [https://de.wikipedia.org/wiki/Parit%C3%A4t\\_\(Physik\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Parit%C3%A4t_(Physik))
- 115) <https://inspirehep.net/files/38786658f2512887084441341f88a211>
- 116) <https://www.quantamagazine.org/in-a-dark-dimension-physicists-search-for-missing-matter-20240201>
- 117) <https://www.youtube.com/watch?v=8LzxvEoguLY>
- 118) [https://en.wikipedia.org/wiki/Primakoff\\_effect](https://en.wikipedia.org/wiki/Primakoff_effect)
- 119) <https://phys.org/news/2010-04-dark-mirror-candidate.html>
- 120) <https://www.studysmarter.de/schule/physik/astronomie/dunkle-materie>
- 121) <https://de.wikipedia.org/wiki/HI-Linie>
- 122) [https://de.wikipedia.org/wiki/Halo\\_\(Astronomie\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Halo_(Astronomie))
- 123) <https://de.wikipedia.org/wiki/Elektronenvolt>
- 124) Das Buch: „Particle Physics, a very short introduction” von Frank Close
- 125) <https://en.wikipedia.org/wiki/CoGeNT>

