

# Huch- ist das hier dunkel!

## Was es mit Dunkler Materie und Schwarzen Löchern so auf sich hat.

### Thema und Fragestellung

Schlagzeile im Mai 2007: „Hubble findet einen Ring aus Dunkler Materie.“ Die Bilder haben mich so beeindruckt, dass ich anfang, mich mit dem Thema Dunkle Materie zu beschäftigen.

Im Juni 2008 dann Weltuntergangsstimmung: „Werden durch das CERN Experiment schwarze Löcher erzeugt, die die Welt verschlingen können?“ Also habe ich mich nochmal mit dem Thema Schwarze Löcher beschäftigt und alles zusammengetragen, was ich zu diesen Themen weiß.

Mitte Oktober, als mein Projekt eigentlich schon druckreif war, hat Prof Kroupa von der Uni Bonn eine völlig neue Hypothese aufgestellt: Entweder die bisherigen Annahmen zur Dunklen Materie sind falsch, oder es gibt gar keine Dunkle Materie. Zu diesem neuen Aspekt, dem meine Arbeit fast zum Opfer gefallen ist, gibt es bisher noch keine weiteren Forschungsergebnisse.

### Der Ring aus Dunkler Materie



[http://hubblesite.org/gallery/album/entire\\_collection/pr2007017a/](http://hubblesite.org/gallery/album/entire_collection/pr2007017a/)

Dieses Bild zeigt den von Hubble entdeckten Ring. Er liegt im 5 Millionen Lichtjahre entfernten Galaxiehaufen ZwCl0024+1652 im Sternbild Fische und hat einen Durchmesser von 2,6 Millionen Lichtjahre. (Unsere Milchstraße hat gerade mal einen Durchmesser von 165 Tausend Lichtjahren.)

Wahrscheinlich ist der Ring vor etwa 2 Millionen Jahren durch den Zusammenstoß von zwei Galaxiehaufen entstanden.

Die Dunkle Materie wurde dabei zuerst im Zentrum zusammengezogen und dann wieder ins All hinausgeschleudert. Durch die Gravitationskräfte wurde diese Bewegung langsamer, die Dunkle Materie häufte sich an und blieb als ringförmige, wellenartige Struktur erhalten (wie Wasser, in das ein Stein gefallen ist). Diese Verteilung ist völlig anders als die „gewöhnliche Materie“ der benachbarten Galaxien und Gaswolken.

Dies ist der bisher stärkste Beweis, dass Dunkle Materie tatsächlich existiert, denn in allen bisher untersuchten Galaxiehaufen war die Verteilung beider Materieformen übereinstimmend.

## **Was ist Dunkle Materie überhaupt?**

Sie soll die Struktur der Galaxien, des Universums mitbestimmen, man kann sie aber nicht sehen. Um die Hypothesen zur Dunklen Materie zu verstehen, muss man zuerst einige Grundlagen kennen.

### Grundlagen

Nachdem schon Johannes Kepler und Galileo Galilei Regelmäßigkeiten der Bewegung von Objekten beschrieben hatten, formulierte Isaac Newton 1670 die Gesetze der Schwerkraft. Danach bewegen sich Planeten in regelmäßigen und elliptischen Bahnen um die Sonne. Je weiter die Planetenbahn von der Sonne entfernt ist, um so langsamer ist der Planet (zB ist die Erde dreimal so schnell wie der Saturn).

Vor ungefähr 100 Jahren entdeckte Jan Hendrik Oort, dass die „Scheibe“ der Milchstraße dünner ist, als die vorhandene Masse und deren Schwerkraftwirkung erklären würde. Etwa als ob die Atmosphäre durch die Schwerkraft der Erde zu stark zusammengehalten würde. Also meinte Oort, dass es noch unsichtbare „Dunkle Materie“ geben müsse, um diese Schwerkraft zu erzeugen.

Fritz Zwicky entdeckte, dass im Coma-Galaxienhaufen im Sternbild Virgo (300 Millionen Lichtjahre Distanz, etwa 1000 einzelne Galaxien) zuwenig sichtbare Masse vorhanden ist, um das System bei den hohen beobachteten Rotationsgeschwindigkeiten der einzelnen Objekte zusammenzuhalten.

Die Bewegungsenergie war zu groß für die sichtbare Masse. Weil der Galaxiehaufen aber trotzdem stabil war, musste eine Masse vorhanden sein, die er nicht sah, also Dunkle Materie. Eine Erklärung für diese Beobachtungen fand man noch nicht.

### Woher weiß man von Materie, die man nicht sehen kann?

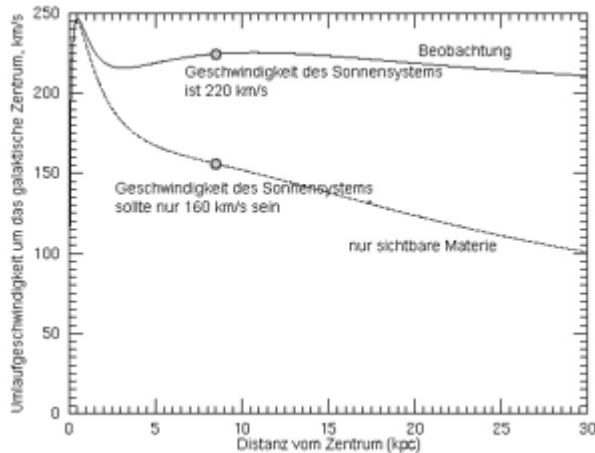
1. Die Schwerkraft müßte Galaxien eigentlich in sich zusammenstürzen lassen. Dass das nicht geschieht, verdanken sie der Drehung um sich selbst. Dadurch werden die Planeten nach außen gedrückt und durch die Schwerkraft in einer stabilen Bahn gehalten (wie bei einem Karussell).

Eigentlich sollten sich Objekte dichter am Zentrum schneller bewegen, als weiter entfernte. Messungen haben aber ergeben, dass das häufig nicht zutrifft.

Durch ein Teleskop betrachtet erscheinen Galaxien nicht als Punkte, sondern als Scheiben. Hier kann man vom Zentrum bis zum Rand einzelne Punkte betrachten. Aus den Spektrallinien des abgestrahlten Lichts kann man die Eigenbewegung in der Galaxie und die Fluchtgeschwindigkeit ablesen und ein Geschwindigkeitsprofil, auch Rotationskurve genannt, anfertigen. Eigentlich sollten die Geschwindigkeiten zum Rand hin kleiner werden. Oft misst man aber gleichbleibende oder sogar steigende Geschwindigkeiten, obwohl die sichtbare Masse nach außen abnimmt.

Also muss es zwischen den sichtbaren Objekten noch eine unsichtbare Menge an Materie geben, die man Dunkle Materie (dark matter, "DM") nennt.

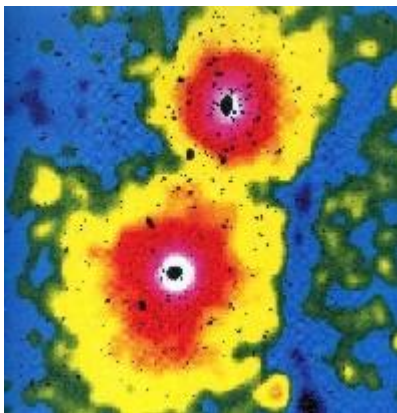
Auch in unserem Sonnensystem (wir kreisen mit  $220 \text{ km/s} = 792\,000 \text{ km/h}$  um das Zentrum der Milchstraße) muss es Dunkle Materie geben. Denn mit der sichtbaren Materie dürften es nur  $160 \text{ km/s}$  sein. Wir müssten also schon lange aus der Galaxie geschleudert worden sein.



<http://lexikon.astronomie.info/kosmos/dunklematerie/img/rot.gif>

2. Große Galaxiehaufen enthalten oft eine Menge heißes Gas, das durch die sichtbare Materie allein nicht zusammengehalten werden kann, sondern nur durch die angenommene Dunkle Materie.

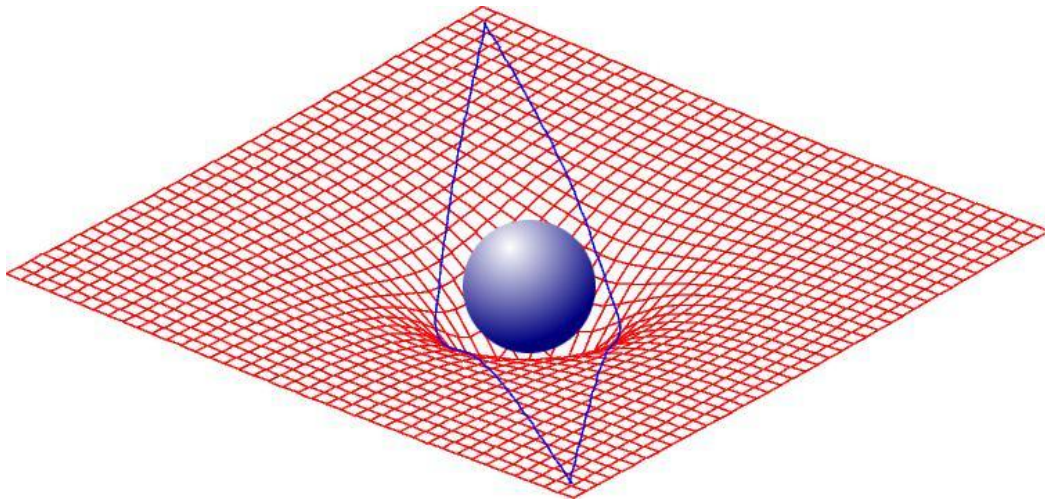
Die „normale“ Materie zeigt zwar die kosmischen Bewegungen an, aber ohne die Anziehungskräfte der Dunklen Materie wären die Gaswolken in den Leerräumen längst in die hellen Galaxien gestürzt. Die Dunkle Materie muss sich also in den Galaxiehaufen und auch in den Leerräumen dazwischen befinden.



*Galaxienhaufen Abell 3528:  
Messungen im Röntgenbereich  
Schwarz: Galaxien  
Farben: Gas unterschiedlicher Temperatur (bis 10 Millionen Grad, also sehr beweglich und dünn)  
Das Gas kann durch die geringe Masse der sichtbaren (schwarz eingezeichneten) Galaxien allein nicht im Galaxiehaufen gebunden werden.  
(Aufnahme ROSAT).*

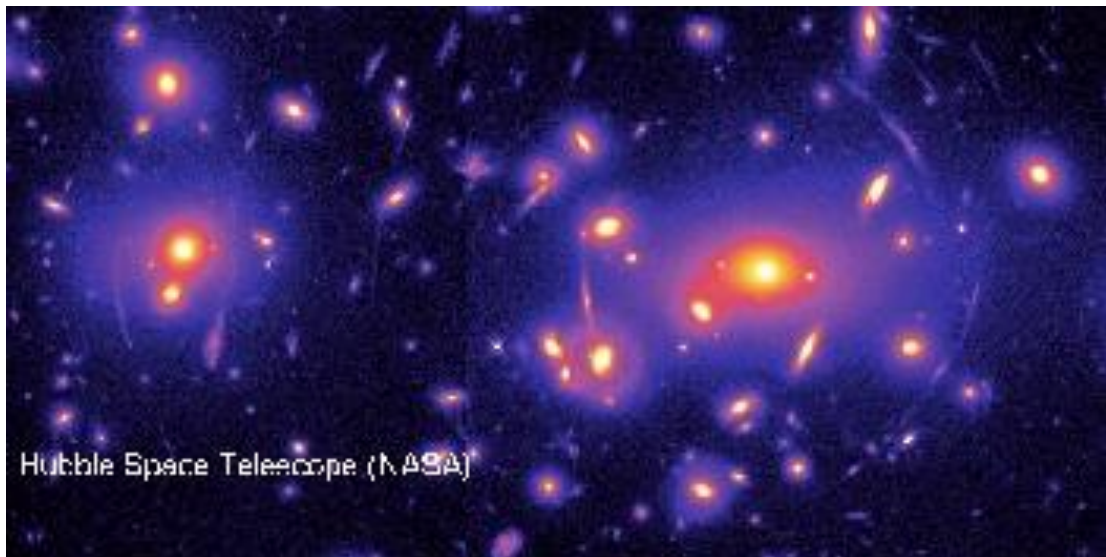
<http://www.astro.uni-bonn.de/~deboer/pdm/abell3528.jpg>

3. Weit entfernte Galaxien wirken oft „verzerrt“. Das kann man erklären, wenn es unterwegs eine große Menge unsichtbarer Masse gibt, die das Licht ablenkt. Nach der allgemeinen Relativitätstheorie verursachen große Materiemengen eine Raumkrümmung, die das Licht von dahinterliegenden Objekten durch ihre Schwerkraftwirkung ablenkt. („Gravitationslinse“). Das Licht kommt also extrem „gekrümmt“ zu uns, was wir sehen ist so etwas wie eine Fata Morgana im Universum.



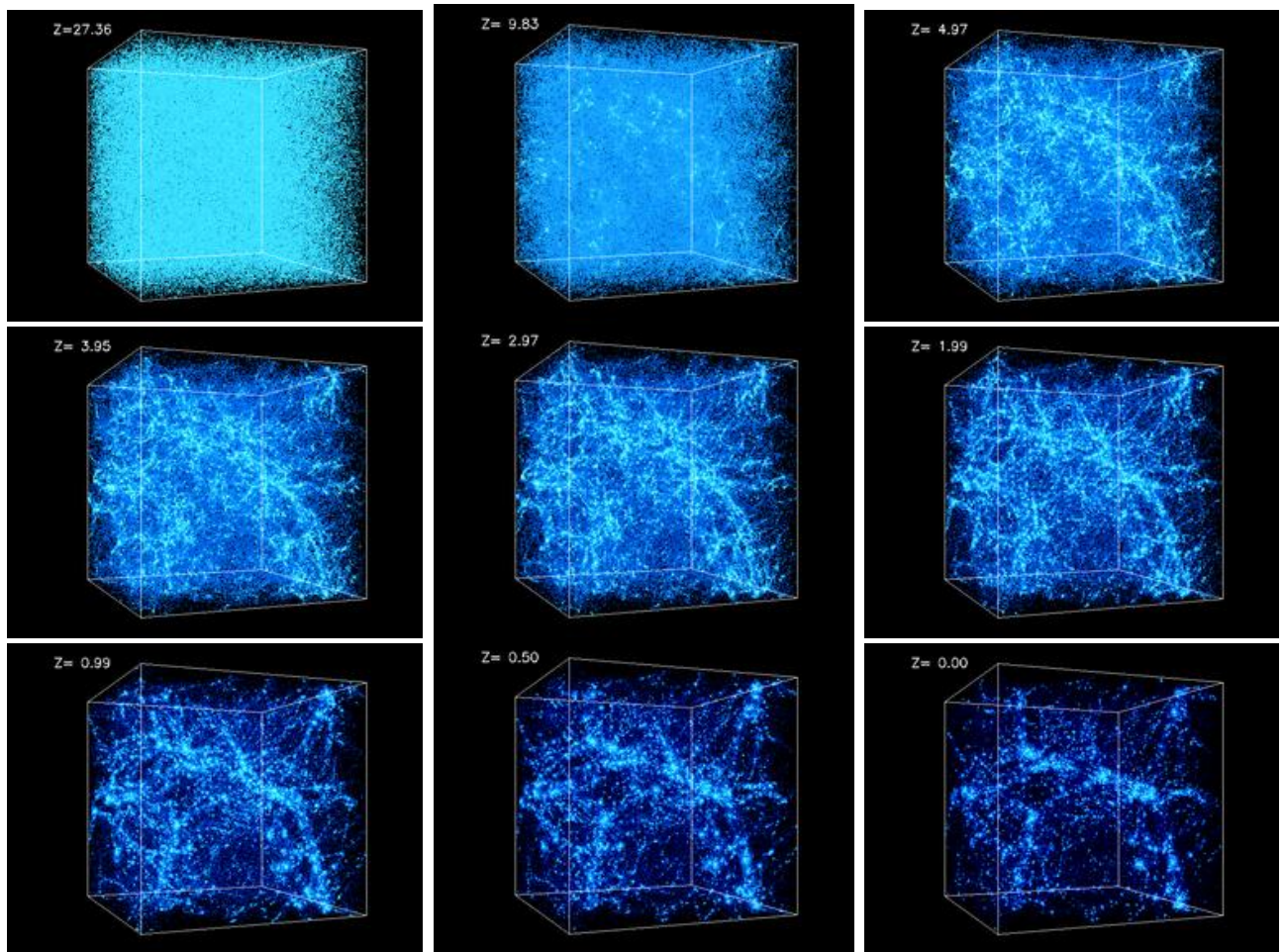
<http://www.ita.uni-heidelberg.de/~msb/gravLens/curvature.jpg>

Auch hierzu hat Hubble tolle Bilder vom Galaxiehaufen Abell 2218 geliefert. Durch ihre Schwerkraft verzerrt die vermutete Dunkle Materie die Bilder von dahinterliegenden Objekten zu punktförmigen Lichtquellen und Bögen, die sich scheinbar spiralförmig um ein Zentrum drehen.



<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/1995/14/image/a/>

4. Hierzu hat man ein Computermodell entworfen. 100 000 Jahre nach dem Urknall waren die Atome noch ziemlich gleichmäßig im Universum verteilt. Wenn sich diese kleinen Unterschiede im selben Tempo ausgebreitet hätten, dann würde es jetzt statt Galaxien nur ein dünnes Wasserstoff-Helium-Gemisch geben. Zur Galaxie-Entstehung muss es also etwas gegeben haben, was die am Anfang bestehenden leichten Abweichungen verstärkte: die Dunkle Materie. Im Modell nimmt man an, dass die Dichteunterschiede in der Dunklen Materie viel größer waren als im Helium-Wasserstoff-Gemisch. Die Dunkle Materie wirkte wie eine „Schwerkraftfalle“. Das Wasserstoff-Helium-Gas konnte sich dort ansammeln und verdichten. Daraus entstanden die Galaxien, die in Dunkle Materie eingebettet sein sollen.



<http://cosmicweb.uchicago.edu/filaments.html>

Hier sieht man nur jedes zehnte der am Computer berechneten Teilchen (insgesamt 2 Millionen). Durch wenige Teile werden ganze Galaxien dargestellt. Wenn man die Dunkle Materie in die Berechnungen einbezieht, dann bilden sich die jetzt zu sehenden Strukturen.

Die einzelnen Kästchen zeigen den Zustand x-Jahre nach dem Urknall:

- 120 Mio. Jahre - Raumausdehnung ca. 1/30 von heute-(Kantenlänge: 5 Millionen Lichtjahre)
- 500 Mio. Jahre - Raumausdehnung ca. 1/10 von heute-(Kantenlänge: 15 Millionen Lichtjahre)
- 930 Mio. Jahre - Raumausdehnung ca. 1/6 von heute-(Kantenlänge: 25 Millionen Lichtjahre)
- 1.220 Mio. Jahre - Raumausdehnung ca. 1/5 von heute-(Kantenlänge: 30 Millionen Lichtjahre),
- 1.710 Mio. Jahre - Raumausdehnung ca. 1/4 von heute-(Kantenlänge: 37,5 Millionen Lichtjahre),
- 2.600 Mio. Jahre - Raumausdehnung ca. 1/3 von heute-(Kantenlänge: 50 Millionen Lichtjahre),
- 4.800 Mio. Jahre -Raumausdehnung ca. 1/2 von heute-(Kantenlänge: 75 Millionen Lichtjahre),
- 7.500 Millionen Jahre - Raumausdehnung ca. 2/3 von heute-(Kantenlänge: 90 Millionen Lichtjahre) und
- 13.400 Millionen Jahre – heutige Ausdehnung-(Kantenlänge: 140 Millionen Lichtjahre).

Das Modell geht von Beobachtungen und Berechnungen aus, nach denen das Universum aus

- etwa 4 % „normaler“ Materie aus Protonen, Neutronen und Elektronen
- etwa 23 % Dunkler Materie, die kein Licht abstrahlt, aber auch keins verschluckt und nur über die Schwerkraftwirkung zu beobachten ist

- etwa 70% Dunkler Energie, die gegen die Schwerkraftwirkung der Materie (bremst die Ausdehnung des Universums ab) wirkt, es beschleunigt und weiter auseinandertreibt
- bis zu 3 % Neutrinos
- etwa 0,01 % kosmischer Hintergrundstrahlung besteht.

### Welche Objekte kommen überhaupt in Frage?

Auch hier wieder ein kleiner Ausflug in die Sternenkunde. In was sich „verglühte“ tote Sternen umwandeln, das hängt von ihrer Masse ab.

- Sterne, die mit unserer Sonne (Sonnenmasse 1) vergleichbar sind, haben eine Lebenserwartung von etwa 10 Milliarden Jahren. Dann blähen sie sich zu Roten Riesen auf, werfen ihre Hülle ab und schrumpfen zu weißen Zwergen. In diesem Stadium haben sie alle chemischen Elemente, bei denen dies mit den in ihnen ursprünglich herrschenden Temperaturen möglich war, entweder zur Kernfusion gebracht oder abgestoßen (und damit einen Teil ihrer Masse verloren).  
Die übriggebliebene Materie ist sehr dicht. Durch Gravitationskräfte wird sie weiter verdichtet (je mehr Masse, desto stärker die Gravitationskraft). Die Gravitationskraft reicht aber nicht aus, die Elektronen in die Protonen hinein zu drücken und dadurch einen Neutronenstern zu erzeugen.  
Die Dichte kann bis zu 10 Millionen Gramm pro Kubikzentimeter betragen, das ist das 10-Millionenfache der Dichte von Wasser. Ein Liter wiegt zehntausend Tonnen!  
Je größer die Dichte eines Weißen Zwergs ist, desto kleiner ist er.
- Ein weißer Zwerg gibt noch Wärmestrahlung ab, bis er schließlich zu einem schwarzen Zwerg wird. Dessen Oberflächentemperatur ist nach Aufbrauchen der Energievorräte soweit abgekühlt, dass keine Wärmestrahlung und sichtbares Licht mehr zu beobachten ist. Die bisher beobachteten kältesten weißen Zwerge entsprechen von der Temperatur etwa der kosmischen Hintergrundstrahlung und damit dem Alter des Universums. Schwarze Zwerge sind allerdings bisher nur eine Theorie, da unser Universum mit 13,7 Milliarden Jahren noch nicht alt genug ist, um schwarze Zwerge zu enthalten. Sie können damit nicht zur Dunklen Materie beitragen.
- Massereiche Sterne von über 8 Sonnenmassen verbrennen ihr Material sehr viel schneller, explodieren als Supernova und zurück bleibt ein Neutronenstern.  
Die große Ausgangsmasse sorgt dafür, dass die Sterne durch die Gravitationskraft noch stärker zusammengepresst (oder besser zusammengezogen) werden. Die Elektronen werden in die Protonen hineingedrückt und es bilden sich Neutronen, die dichter gelagert werden können als die geladenen und sich gegenseitig abstoßenden Protonen und Elektronen. Der Stern fällt dabei in Sekundenbruchteilen zu einem nur 10 – 20 (selten 50) km großen Neutronenstern zusammen und setzt dabei große Energiemengen frei.  
Die Dichte beträgt unvorstellbare  $10^{14} \text{ g/cm}^3$ . Ein Sandkorn Neutronenstern wiegt einhunderttausend Tonnen!  
Ein Neutronenstern hat ein etwa 1000 Milliarden mal stärkeres Gravitationsfeld als die Erde. Um ihn zu verlassen müsste man eine Fluchtgeschwindigkeit von etwa einem Drittel der Lichtgeschwindigkeit (100.000 km/s) aufbringen.  
Neutronensterne leuchten nicht mehr, geben aber noch Wärmestrahlung ab. Sie drehen sich extrem schnell um sich selbst (mehrere Umdrehungen pro Sekunde).

- Wenn die Achse des Magnetfelds nicht mit der Rotationsachse identisch ist, dann senden Neutronensterne in bestimmten Abständen starke elektromagnetische Wellen aus. Sie werden Pulsare genannt.
- Wenn die Masse eines Neutronensterns die kritische Grenze von 3 Sonnenmassen übersteigt, dann wird seine Gravitationswirkung so stark, dass er zu einem schwarzen Loch kollabiert.
- Schwarze Löcher sind so extrem verdichtet, dass sie sogar das Licht „einfangen“. (Im Idealfall eines nicht rotierenden, nicht geladenen Schwarzen Lochs wäre alle Masse in einem Punkt konzentriert – damit ist die Art der Materie dieser Masse mit den physikalischen Gesetzen bisher nicht beschreibbar.) Schwarze Löcher wirken durch ihre Masse als extrem starke Gravitationslinse, sodass das Licht so stark gekrümmt wird, dass es in das Schwarze Loch abgelenkt wird. Auch Teilchen, die sich einem schwarzen Loch nähern, werden extrem angezogen. Ab einer bestimmten Entfernung (dem Ereignishorizont) gibt es kein Entrinnen. Auch Sterne und ganze Galaxien stürzen dann in das Schwarze Loch, dass dadurch immer massereicher und stärker wird. Beobachten kann man also nur die Zone knapp außerhalb dieses Horizonts. Hier werden alle Teilchen extrem in die Länge gezogen (weil sie sich mit annähernder Vakuumlichtgeschwindigkeit auf das Loch zu bewegen), sie haben aber immer noch das gleiche Volumen. Man spricht auch von „Spaghettis“, weil die Form dann extrem lang und dünn ist. Diese Wirkung kann so stark sein, dass Sterne zerrissen werden und dabei noch einmal hell aufleuchten (Ultraviolett-Blitz).  
Man unterscheidet zwischen statischen und rotierenden schwarzen Löchern. Rotierende schwarze Löcher können einen Teil ihrer Rotationsenergie in sogenannte „Jets“ (leuchtende Gasstrahlen, die über eine Entfernung von mehreren Lichtjahren ins All geschleudert werden) umwandeln. Außerdem geben sie Wärmeenergie über die „Hawking- Strahlung“ ab.

Die primordialen oder Mini-Schwarzen-Löcher sind sehr klein. Sie haben nur eine Masse von etwa  $10^{-15}$  Sonnenmassen (etwa die Masse eines Bergs auf der Erde). Der Radius des Ereignishorizonts ist mit  $10^{-12}$  m kleiner, als ein Atom. Die Dichte beträgt ungeheure  $10^{48}$  g/cm<sup>3</sup>!

- Extrem massereiche Sterne von mehreren 10 Sonnenmassen explodieren immer als Hypernova und bilden sofort ein Schwarzes Loch. Dabei entsteht ein Gammablitz (Energie im Bereich harter Röntgen- und Gammastrahlung wird freigesetzt und schleudert einen Jet der Sternenmaterie ins All).
- Im Zentrum der Galaxien vermuten die Forscher Supermassenschwere Schwarze Löcher mit Millionen bis Milliarden Sonnenmassen.

### Zurück zur Suche nach der Dunklen Materie:

- Zuerst fallen natürlich alle Licht produzierenden, hellen und deswegen massereichen Sterne weg.
- Von den sogenannten M-Zwergen (etwa 0,3 Sonnenmassen) gibt es zu wenige und sie haben eine zu geringe Dichte.
- Weiße Zwerge sind relativ massearm. Für eine große Anzahl von Weißen Zwergen ist das Universum zu jung.

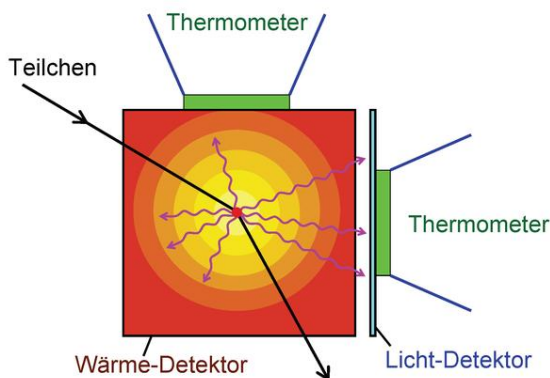
- Unsichtbare Neutronensterne und schwarze Löcher haben zwar hohe Massen bei kleinem Radius. Sie hätten bei der Entstehung aber Spuren von schweren Elementen aus Kernfusionen hinterlassen müssen. Und die sind zu selten vorhanden. Außerdem geht von beiden noch eine Wärmestrahlung aus, die der Dunklen Materie fehlt.
- Planeten und Kometen haben eine zu geringe Masse. Bei der hohen Zahl, die für die Erklärung der Dunklen Materie benötigt würde, wären häufige Kollisionen zu beobachten.
- Braune Zwerge haben eine relativ geringe Materiedichte, aber einiges an Masse und könnten einen Teil zur Dunklen Materie beitragen.

Aus den bisher gewonnenen Erkenntnissen haben Forscher berechnet, dass die Dunkle Materie nicht aus Protonen oder Neutronen bestehen kann.

Dunkle Materie bewegt sich seit dem Urknall mit deutlich weniger als Lichtgeschwindigkeit. Dunkle Materie geht mit anderer Materie keine Wechselwirkung ein außer der ausgeübten Gravitationskraft.

Man sucht also nach langsamen, schweren Teilchen, den WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles, schwach wechselwirkende massive Teilchen). Dies geschieht in Detektoren und Hochenergiebeschleunigern.

WIMPs sind zwar sehr massive Teilchen, allerdings treten sie mit anderer Materie nur schwach in Wechselwirkung. Sie durchfliegen sie, als ob sie nicht da wäre. Aber sehr selten muss es trotzdem zu Zusammenstößen mit anderen Atomkernen kommen. Im CRESST Experiment (*Cryogenic Rare Event Search with Superconducting Thermometers*) versucht man diesen Aufprall nachzuweisen. Dazu verwendet man Kristalle mit einer Temperatur von nur wenigen tausendstel Grad über dem absoluten Nullpunkt.



<http://www.weltderphysik.de/de/4766.php>

Der elektrische Widerstand eines dünnen Metallfilms, der auf der Kristalloberfläche angebracht ist, sinkt genau bei dieser niedrigen Temperatur auf null. (Supraleitung). Der Zusammenstoß des WIMP mit dem Atomkern erzeugt ein Zittern und die Temperatur erhöht sich vorübergehend. Beides kann man nachweisen, unter anderem durch den steigenden elektrischen Widerstand. Durch die Anregung des Atomkerns kommt es nach einer kurzen Verzögerung zu einer sehr schwachen Lichtstrahlung. Dieses Szintillationslicht kann man mit Siliziumplättchen messen. Diese Versuche müssen extrem gut gegen Streustrahlung abgeschirmt werden (tief unter Bergmassiven oder in Seen).

Elementarteilchenphysiker vermuten, dass die Dunkle Materie aus dem leichtesten supersymmetrischen Teilchen (SUSY-Teilchen, zB Neutralinos) besteht. Die SUSYs sind allerdings bisher nur hypothetisch.

Dass man sie bisher nicht herstellen konnte, liegt wahrscheinlich daran, dass sie zu massereich sind, um sie im Teilchenversuch zu erzeugen.

### **Erzeugung künstlicher Dunkler Materie durch Teilchenbeschleuniger:**

Am LHC (Large Hadron Collider) am CERN (*Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire, Europäische Organisation für Kernforschung*) sollen Protonen stark beschleunigt werden und aufeinander prallen. Die Bestandteile der Protonen (Quarks und Gluonen) werden dabei zusammenstoßen. Durch die extrem hohe Beschleunigungsenergie (fast bis zur Lichtgeschwindigkeit) der aufeinander abgeschossenen Teilchen will man einen Zustand kurz nach dem Urknall erzeugen. Nach theoretischen Erwartungen sollten dabei Teilchen der Dunklen Materie entstehen (zB. Neutralinos).



*Proton-Proton Beschleuniger im LEP-Tunnel am CERN*



<http://www.weltderphysik.de/de/4775.php>

*Blick entlang des LHC-Strahlführungssystems in dem 27 km langen unterirdischen Tunnel bei CERN in Genf*

### **Cern: Erzeugung schwarzer Löcher:**

Die Sorge ist, dass ab einer bestimmten Energiedichte ein sehr dunkles Objekt erzeugt werden muss. Ob sich wirklich der Ereignishorizont eines Schwarzen Lochs bildet, oder ein dunkles Objekt, bei dem die Fluchtgeschwindigkeit etwas unter Lichtgeschwindigkeit liegt, konnte bisher nicht geklärt werden.

Stephen Hawking hat nachgewiesen, dass durch die Ausstrahlung der „Hawking“ – Wärmestrahlung diese Minilöcher sehr schnell zerstrahlen werden. Sollte es also in den Versuchen am CERN tatsächlich gelingen, Mini-Schwarze-Löcher zu erzeugen, würden sie uns nicht gefährden, da sie zerstrahlen, bevor sie in der Lage sind, durch Massesammlung zu wachsen.

Die eventuell entstehenden Mikro-Löcher stellen also weder eine Bedrohung für die Beschleunigeranlage dar, noch für die Erde!

Zurzeit befindet sich der International Linear Collider = ILC in der Planungsphase. In diesem 35km langen Linearbeschleuniger sollen Elektronen und ihre Antiteilchen (Positronen), mit Energien von 500 bis etwa 1000 Milliarden Elektronenvolt aufeinander zu beschleunigt werden. Ob die dabei entstehenden Teilchen stabil genug sind, um Dunkle Materie zu erklären, bleibt abzuwarten.

## **Neueste Ansätze**

Ein Forscherteam um Prof. Pavel Kroupa und Benoit Famaey von der Uni Bonn kommt nach der Analyse der Materieverteilung in 28 unterschiedlichen Galaxien zu der überraschenden Überzeugung, dass „unser heutiges Weltbild wahrscheinlich nicht stimmt, dass also die Dunkle Materie nicht existiert. Dieses ist aber nicht "Standardlehrstoff", sondern ein sehr aktives Forschungsfeld an der Grenze des Bekannten.“ Prof. Kroupa schreibt in seiner Antwortmail auf meine Nachfrage weiter: „Für Dein Projekt würde ich vorschlagen, dass Du lediglich (falls Du willst) erwähnst, dass es neueste Entwicklungen gibt, welche neues Licht auf das Problem der Dunklen Materie werfen, dass diese aber so brandneu sind, dass es noch nicht viel populärwissenschaftliches dazu gibt.“

Es scheint einen rätselhaften Austausch zwischen der Dunklen Materie und der „normalen“, also sichtbaren Materie zu geben. Die Forschungsgruppe hat aus Beobachtungsdaten berechnet, wie groß die Menge Dunkler Materie in den inneren Bereichen der verschiedenen Galaxien (von Zwergsystemen bis zu großen Spiralgalaxien) sein muss. Merkwürdigerweise scheinen sich Sterne im kugelförmigen Zentrum großer Galaxien ganz normal zu verhalten. Hier wird keine Dunkle Materie benötigt. Außerhalb dieser Kugel verhalten sich Sterne aber nicht wie erwartet, sodass Dunkle Materie zur Erklärung dieses Verhaltens herhalten muss. Jetzt wurde das Verhältnis zwischen der Größe der umschließenden Kugelgrenzfläche (Innen) und der Gesamtmasse der sichtbaren Materie untersucht. Man fand heraus, dass diese sogenannte „Flächendichte“ konstant ist. Scheinbar wird die Dunkle Materie erst ab einer bestimmten Geschwindigkeit benötigt.

Die Analysen deuten auf zwei mögliche Erklärungen: Entweder ist die Beziehung zwischen normaler und Dunkler Materie komplexer als angenommen, oder Newtons Gravitationsgesetze und Einsteins Relativitätstheorie müssen nachgebessert und erweitert werden.

Mordehai Milgrom hatte schon 1983 vermutet, dass in galaktischen Dimensionen viel größere Gravitationskräfte wirken. Sie scheinen sehr stark mit der Verteilung der sichtbaren Materie zusammenzuhängen, die dann die einzige Gravitationsquelle bildet. Dann wäre das, was man bisher für Dunkle Materie hielt eine fünfte Kraft, die nur auf große Entfernungen wirkt.

Mit dieser neuen Forschungsrichtung würde auch erklärt, warum bisher noch niemand Teilchen der Dunklen Materie entdecken konnte. Bisher sind es nur Indizien, die dafür sprechen, dass das bisherige Kosmos-Modell nicht stimmt. Vielleicht wird dann auch die mysteriöse Dunkle Energie

als Hirngespinnst entlarvt. Für spannende Forschungen und Aufregung unter den Astronomen ist jedenfalls gesorgt.

## **Literatur**

Stephen W. Hawking: Eine kurze Geschichte der Zeit

[www.spacetelescope.org](http://www.spacetelescope.org)

[www.weltderphysik.de](http://www.weltderphysik.de)

[www.astro.uni-bonn.de](http://www.astro.uni-bonn.de)

[www.astronews.com](http://www.astronews.com)

[www.heise.de](http://www.heise.de)

[www.wissenschaft.de](http://www.wissenschaft.de)

[www.astroteilchenphysik.de](http://www.astroteilchenphysik.de)

[www.kworkquark.net](http://www.kworkquark.net)

[www.wissenschaft-online.de](http://www.wissenschaft-online.de)

[news.astronomie.info/sky200610/thema.html](http://news.astronomie.info/sky200610/thema.html)

[www.joergresag.privat.t-online.de](http://www.joergresag.privat.t-online.de)

[www.mpa-garching.mpg.de](http://www.mpa-garching.mpg.de)

[www.ketweb.de](http://www.ketweb.de)