

# Dunkle Materie, dunkle Energie

von Mario Lang

28. Juni 2011

Handout, im Rahmen des Hauptseminars „Der Urknall und seine Teilchen, SS 2011“

## Zusammensetzung des Universums

Unser Universum besteht aus mehr als nur der sichtbaren Materie. Genau genommen macht die sichtbare Materie sogar nur rund vier Prozent der gesamten Dichte des Universums aus. 23 % unseres Universums bestehen aus der sogenannten dunklen Materie, einer Materieart, die bisher nur über ihre gravitative Wirkung in Erscheinung getreten ist und noch nicht nachgewiesen werden konnte. Die dunkle Materie wird benötigt, um verschiedene, beobachtbare Effekte beschreiben zu können, die ohne ihre Existenz nicht erklärbar wären. Die restlichen 73 % unseres Universums bestehen aus einer noch viel weniger verstandenen Energieform, der dunklen Energie. Auch sie konnte bisher noch nicht nachgewiesen werden, ihre Existenz gilt aber als gesichert. Das Wissen über die Zusammensetzung unseres Universums verdanken wir verschiedenen Experimenten und Messungen. So kann aus der Tatsache eines flachen Universum, welcher Fakt durch Messungen der Hintergrundstrahlung bestätigt werden kann (siehe Vortrag über CMB), ein Zusammenhang zwischen der Dichte der dunklen Energie und der gesamten Materie hergeleitet werden. Unter Vernachlässigung der Strahlungsdichte  $\rho_s$ , und nach Einführung einer auf die kritische Dichte  $\rho_c$  normierten Dichte  $\Omega$ , ergibt sich der folgende Zusammenhang

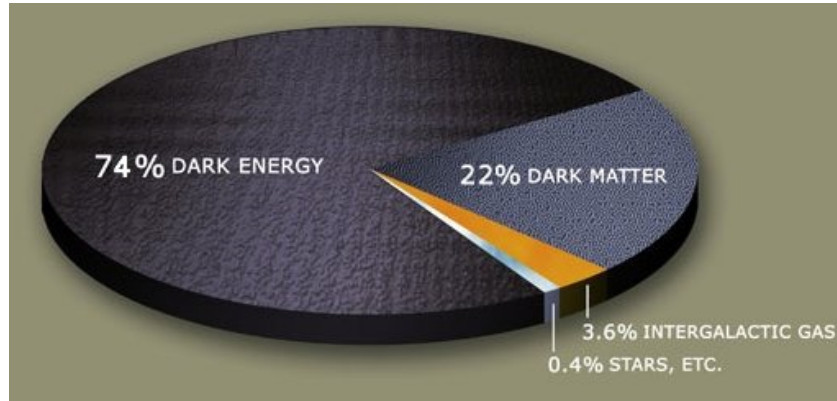
$$\Omega_\lambda + \Omega_m = 1$$

Hierbei steht  $\Omega_\lambda$  für die normierte Dichte der dunklen Energie und  $\Omega_m$  für die normierte Dichte der gesamten Materie, also der Summe der dunklen Materie und der bekannten Materie.

Ein weiterer Zusammenhang zwischen diesen beiden Parametern kann aufgestellt werden,

$$\Omega_\lambda = c + b \cdot \Omega_m$$

wobei die Konstanten  $c$  und  $b$  aus Beobachtungen der Supernovae Explosionen bestimmt werden können. Durch die beiden eben angeführten Beziehungen kann man eindeutig auf



**Abbildung 1:** Zusammensetzung des Universums. Das Universum besteht zu 4% aus bekannter Materie, zu 23% aus dunkler Materie und zu 73% aus dunkler Energie. Damit sind 96% des Universum für uns noch unbekannt. Entnommen von <http://en.wikipedia.org/wiki/File:DarkMatterPie.jpg>

$\Omega_\lambda$  und  $\Omega_m$  schließen. Schlussendlich muss nur noch die Dichte der bekannten Materie bestimmt werden, um die tatsächliche Zusammensetzung des Universums zu kennen. Diese Dichte kann man aus dem Leistungsspektrum der kosmischen Hintergrundstrahlung bestimmen. So gibt hier das Verhältnis der Höhe des ersten Peaks zur Höhe des zweiten Peaks direkt Aufschluss über die Dichte an bekannter Materie  $\Omega_b$  (siehe Christian Sander, Dissertation). Nimmt man alle Ergebnisse der verschiedenen Messungen zusammen, so ergibt sich das bekannte Diagramm, welches die Zusammensetzung unseres Universums beschreibt (siehe Abb. 1)

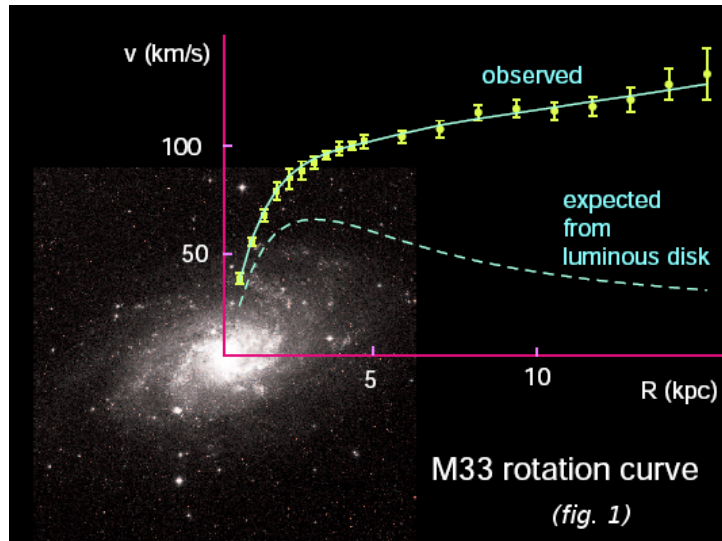
## Evidenzen dunkler Materie und dunkler Energie

Im vorherigen Abschnitt ist die Zusammensetzung des Universums aufgeführt. Es stellt sich natürlich noch die Frage woher man weiß, dass dunkle Materie und dunkle Energie tatsächlich existieren.

### Evidenzen dunkler Materie

Die Existenz dunkler Materie kann durch drei wesentliche Punkte dargelegt werden. So kann man mit Hilfe von Gravitationslinsen, Rotationsgeschwindigkeiten von Sternen in Spiralgalaxien und der Struktur des Universums auf die Existenz von Materie, zusätzlich zur bekannten Materie, schließen.

So bewegen sich die Sterne am Rande von Spiralgalaxien mit Geschwindigkeiten, die viel größer sind, als sie auf Grund der sichtbaren Materie und den Keplergesetzen eigentlich sein dürften. Geht man nur von einer Materieverteilung aus, die der sichtbaren entspräche, so würde man für große Abstände einen Abfall der Rotationsgeschwindigkeit mit  $\frac{1}{\sqrt{R}}$  erwarten. Wobei  $R$  für den Abstand vom Zentrum der Galaxie steht. Tatsächlich konnte dieser Abfall jedoch nicht beobachtet werden (siehe Abb. 2). Somit kann man

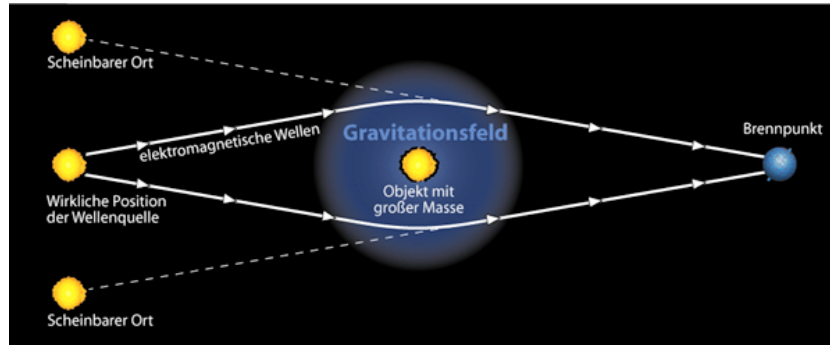


**Abbildung 2:** Rotationsgeschwindigkeit von Sternen in Spiralgalaxien. Gestrichelt ist die erwartete Kurve eingezeichnet, die proportional zu  $\frac{1}{\sqrt{R}}$  abfällt und zu deren Berechnung, die sichtbare, bekannte Materie als Grundlage dient. Die tatsächlich beobachteten Geschwindigkeiten sind hier gelb eingezeichnet. Man erkennt, dass die Geschwindigkeiten von Sternen, die sich weit außerhalb des Rotationszentrum der Spiralgalaxie befinden, viel größer als die erwarteten sind. Dieser Effekt, kann durch die Existenz eines Halos aus dunkler Materie erklärt werden. Entnommen aus [http://w3.ihe.ac.be/icecube/3\\_Activities/1\\_WIMPs%20Analysis/](http://w3.ihe.ac.be/icecube/3_Activities/1_WIMPs%20Analysis/)

davon ausgehen, dass mehr als nur die sichtbare Masse existieren muss.

Gravitationslinsen sind massenreiche Objekte, die, wie er aus der Allgemeinen Relativitätstheorie bekannt ist, die Bahn von Lichtstrahlen krümmen und der Beobachter auf der Erde sieht nicht die tatsächliche Position der Lichtquelle sondern eine projizierte (siehe Abb. 3). Dieser Effekt sorgt dafür, dass manche leuchtende Galaxien durch diese Gravitationslinsen mehrmals, oder als Mehrfachbilder dargestellt werden. Die Lichtablenkung ist abhängig von der tatsächlichen Masse der Gravitationslinse, und der Vergleich der beobachteten mit der erwarteten Ablenkung, zeigt auf, dass mehr als nur die sichtbare Materie vorhanden sein muss.

Als dritte Evidenz können die Anisotropien in der Kosmischen Hintergrundstrahlung dienen. Diese Anisotropien entstehen durch Akustische Oszillationen im Universum vor der Entkopplung von Strahlung und Materie. Für das Auftreten dieser Oszillationen muss es zufällige Dichtefluktuationen der dunklen Materie gegeben haben. In den Bereichen mit mehr dunkler Materie nimmt, wegen des erhöhten Gravitationspotentials, die Zahl der Elektronen und Protonen zu, womit auch der Strahlungsdruck in diesem Bereich ansteigt und eine Region mit einer etwas höheren Temperatur entsteht (siehe Vortrag über CMB). Die Existenz der Anisotropien in der Kosmischen Hintergrundstrahlung kann nicht angezweifelt werden und damit muss zu ihrer Erklärung auch dunkle Materie vorhanden sein.



**Abbildung 3:** Schema der Funktionsweise einer Gravitationslinse. Licht welches von einer Quelle ausgesandt wird, erfährt durch eine große Masse eine Ablenkung. Diese Ablenkung sorgt dafür, dass im Beobachtungspunkt nicht der wahre Ort der Quelle gesehen wird, sondern ein scheinbarer. Die Stärke der Ablenkung hängt mit der Masse der Gravitationslinse (des Gravitationsfeldes) zusammen. Über die sichtbare Masse und die Ablenkung kann auf noch fehlende Masse in der Gravitationslinse geschlossen werden. Entnommen aus [http://www.dlr.de/Portaldaten/1/Resources/portal\\_news/newsarchiv2009\\_3/Gravitationslinse.gif](http://www.dlr.de/Portaldaten/1/Resources/portal_news/newsarchiv2009_3/Gravitationslinse.gif)

## Evidenzen dunkler Energie

Die Evidenzen dunkler Energie sind teilweise im Laufe dieses Handouts schon angeklungen. So weiß man aus dem Leistungsspektrum der kosmischen Hintergrundstrahlung, dass das Universum flach ist und die Dichte damit mit der kritischen Dichte übereinstimmen muss. Alleine aus der Dichte der Materie (dunkler und bekannter) kann dies jedoch nicht erklärt werden. Es muss also ein großer Teil des Universums aus dunkler Energie bestehen.

Eine zweite Evidenz ist auch schon angeklungen. Beobachtungen von Supernova Explosionen lassen den Schluss zu, dass die Ausdehnung des Universums eine beschleunigte Ausdehnung ist. Diese Tatsache kann nicht mit der alleinigen Existenz von gravitativ wirkenden Materieformen erklärt werden. Diese sollten dafür sorgen, dass die Ausdehnung des Universums auf jeden Fall nicht beschleunigt, sondern verlangsamt wird. Um die Beschleunigung zu erklären, benötigt man eine Energieform, die antigravitativ wirkt, also einen negativen Druck hat. Diese Energieform stellt genau die dunkle Energie dar.

## Erklärungsmodelle

Bisher ist also klar geworden, dass es dunkle Materie und dunkle Energie gibt und zu wieviel Prozent sie in unserem Universum vorhanden sind. Es wurde jedoch noch nicht klar gemacht aus was dunkle Materie und dunkle Energie bestehen. Diese Frage ist auch nicht vollständig zu klären, da bisher keine direkten Nachweise gelangen. Daher ist alles im folgenden Abschnitt aufgeführte, keine physikalisch gesicherte Aussage, sondern es sind Vermutungen und mögliche Erklärungen für die dunkle Materie und dunkle Energie.

## Erklärungsmodelle dunkler Materie

Als aussichtsreichste Kandidaten zur Erklärung der dunklen Materie zählen im Moment die sogenannten WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles). Das sind massenbehaftete Teilchen die nur gering wechselwirken und geringe Geschwindigkeiten aufweisen. In unserem Standardmodell findet sich leider kein solches Teilchen, die Erweiterung des Standardmodells mit der Supersymmetrie liefert aber mögliche Kandidaten. So zählt das leichteste neutrale Supersymmetrieteilchen, das leichteste Neutralino, zu den aussichtsreichsten Kandidaten. Andere Supersymmetriemodelle schlagen das Gravitino, das SUSY Teilchen zum Graviton, vor.

Alles in allem kann damit die dunkle Materie eventuell erklärt werden, aber die Existenz dieser Teilchen sollte dazu erst noch nachgewiesen werden.

## Erklärungsmodelle dunkler Energie

Zur Erklärung der dunklen Energie ist das Modell der kosmologischen Konstanten, einer konstanten Vakuumenergie, am meisten verbreitet. Dabei geht man davon aus, dass in unserem Universum von Beginn an eine konstante Vakuumenergie vorhanden war. Da jedoch sowohl die Strahlungsdichte als auch die Materiedichte abfallen, kommt irgendwann der Zeitpunkt, an dem diese Vakuumenergiedichte die Strahlungs- und Materiedichte dominiert. Ab diesem Zeitpunkt kommt es auch zur Beschleunigung der Expansion. Das Problem dieses Modells besteht darin, dass die tatsächliche Dichte an dunkler Energie mit  $\rho_\lambda \approx 6 \cdot 10^{-27} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ , viel geringer ist, als sie unter Berücksichtigung der Quantenchromodynamik vorhergesagt wurde  $\rho_{\text{vak}} \approx 10^{24} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ . Diese Differenz von ungefähr 50 Größenordnungen kann bisher noch nicht geklärt werden.

Daher gibt es auch einige Vertreter, die in der dunklen Energie keine konstante Vakuumenergie sehen, sondern sie als skalares Feld, welches sich dynamisch ändern kann, betrachten. Dieses Modell des skalaren Feldes, auch Quintessenz genannt, "verknüpft die Dunkle Energie mit einem neuartigen, ultraleichten Teilchen, dessen Einfluss auf die Energiedichte des Alls von der Zeit abhängt." <sup>1</sup> Die Quintessenz Theorie beschreibt die tatsächliche Vakuumenergie besser, hat jedoch auch seine Schwachstellen. So müsste dieses leichte Teilchen eine Masse von  $10^{-30} \cdot m_e$  besitzen, wobei  $m_e$  die Elektronenmasse ist. Dieser Fakt ist schwer vorstellbar, da nach unserem heutigen Wissen schon das Elektron punktförmig ist.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Theorien zur Beschreibung der dunklen Energie noch nicht sehr ausgereift sind und, dass die Werte ihre Vorhersagen sehr stark von den tatsächlich beobachteten abweichen.

## Literatur

- <http://www.weltderphysik.de/de/4752.php>
- <http://www.usm.uni-muenchen.de/people/saglia/dm/galaxien/alldt/node58.html>

---

<sup>1</sup>Zitat aus: Dan Hooper, Dunkle Materie - Die kosmische Energielücke, Spektrum, 2006

- <http://www.weltderphysik.de/de/1110.php>
- <http://www.uni-heidelberg.de/presse/ruca/ruca03-3/dunkle.html>
- [http://www-ekp.physik.uni-karlsruhe.de/~deboer/html/Lehre/Kosmo\\_WS2010](http://www-ekp.physik.uni-karlsruhe.de/~deboer/html/Lehre/Kosmo_WS2010)
- [http://astro.berkeley.edu/~mwhite/sciam03\\_short.pdf](http://astro.berkeley.edu/~mwhite/sciam03_short.pdf)
- [http://www.physik.uni-regensburg.de/forschung/wegscheider/gebhardt\\_files/skripten/kosmolKonsta](http://www.physik.uni-regensburg.de/forschung/wegscheider/gebhardt_files/skripten/kosmolKonsta)
- [http://www-ekp.physik.uni-karlsruhe.de/~deboer/html/Lehre/HS\\_WS2006/DM-DE%20final.pdf](http://www-ekp.physik.uni-karlsruhe.de/~deboer/html/Lehre/HS_WS2006/DM-DE%20final.pdf)
- [http://www.desy.de/~troms/teaching/WiSe1011/talks/Heinemann\\_DM\\_handout.pdf](http://www.desy.de/~troms/teaching/WiSe1011/talks/Heinemann_DM_handout.pdf)
- [http://www.physik.unizh.ch/~lbaudis/astroph0607/lecture13\\_080207.pdf](http://www.physik.unizh.ch/~lbaudis/astroph0607/lecture13_080207.pdf)
- <http://www.mpg.de/327453/forschungsSchwerpunkt>
- <http://pulsar.sternwarte.uni-erlangen.de/wilms/teach/cosmosemi/wilms.pdf>
- <http://www.jrank.org/space/pages/2301/dark-energy.html>
- Anna Weigel, Kosmische Hintergrundstrahlung, Hauptseminar 2011 - Der Urknall und seine Teilchen, KIT
- Dan Hooper, Dunkle Materie - Die kosmische Energielücke, Spektrum, 2006
- Christian Sander, INTERPRETATION DES ÜBERSCHUSSES IN DIFFUSER GALAKTISCHER GAMMA-STRAHLUNG OBERHALB 1 GeV ALS ANNIHILATIONSSIGNAL DUNKLER MATERIE, Dissertation, 2005, KIT