
Lexikon

der



Astrophysik

von



Andreas Müller

aus dem

Wissensportal für Astrophysik

<http://www.mpe.mpg.de/~amueller>

April 2007

Abbildungsverzeichnis

5.1	Hubble Deep Field - North von 1996.	2
5.2	Lockman Hole Deep Field 2005.	3
5.3	Starre vs. differenzielle Rotation.	9
5.4	12 Pentagone konstituieren einen Dodekaeder.	11
5.5	Doppler-Blauverschiebung und Doppler-Rotverschiebung einer Lichtwelle. . .	12
5.6	Λ und andere Formen Dunkler Energie.	18
5.7	5 SN Ia in verschiedenen Wirtsgalaxien, beobachtet mit HST 2006.	20
5.8	w-Parameter der Zustandsgleichungen verschiedener kosmischer Ingredienzen. .	22
5.9	Anteile der Energieformen im Universum.	24
5.10	3D-Karte der Dunklen Materie in einem Himmelsausschnitt.	30

5 Lexikon D

5.1 Deep Fields

Die extrem lang belichteten Fotos von Himmelsarealen heißen im Jargon **deep fields** (dt. wörtlich: 'tiefe Felder'), weil durch die lange Belichtungszeit extrem weit entfernte und dunkle Objekte - in der Regel Galaxien - auf dem Foto zum Vorschein kommen. Gelegentlich liest man den deutschen Begriff *Tiefenfeldbeobachtungen* als Übersetzung von *deep fields* oder *deep field observations*.

5.1.1 Technische Feinheiten

Das Himmelsfeld, das mit den Teleskopen fotografiert wird, ist typischerweise so groß, wie die Fläche des Vollmondes (etwa Bruchteile von bis einige Quadratgrad). Das Areal muss gut ausgewählt werden, so dürfen z. B. keine hellen Sterne im Vordergrund (engl. *foreground stars*) stören, weil das zur Überbelichtung führen würde. Der ebenfalls strahlende *Hintergrund* (engl. *background*) muss gut bekannt sein, damit der Astronom die Leuchtkraft der ihn interessierenden Quelle richtig einordnet. Typischerweise wird eine astronomische Deep-Field-Quelle erst interessant, wenn die Belichtungszeit einige Tage überschreitet. Der Astronom kann jedoch nicht ununterbrochen sein Teleskop bei solch langen Zeiten auf die Quelle richten. Deshalb werden in einem gewissen Zeitabstand Einzelaufnahmen vom immer wieder gleichen Himmelsfeld gemacht, die hinterher mittels Computersoftware zu einem einzigen Deep Field kombiniert werden. Dabei betragen die Einzelbelichtungszeiten nur wenige Stunden.

5.1.2 HDF-N: Die Mutter aller deep fields

Die Deep-Field-Beobachtungen sind ein sehr modernes und aktives Feld der Astronomie und werden **in allen Wellenlängenbereichen** der elektromagnetischen Strahlung betrieben. Begonnen hat es im Optischen mit dem Weltraumteleskop *Hubble*. Im Januar 1996 wurde das Ergebnis von zehn aufeinander folgenden Beobachtungsnächten (vom 18. bis 28. Dezember 1995) präsentiert: das *Hubble Deep Field - North*, *HDF-N*, siehe Foto 5.1 (Credit: *Robert Williams and the Hubble Deep Field Team STScI/NASA 1996*). Dieses HDF-N besteht aus 276 Einzelbildern, die im *Großen Wagen* (ziemlich genauer oberhalb des Punktes, wo die Deichsel an den Wagen angreift) aufgenommen wurden. Somit erklärt sich das Attribut *North*, weil es sich um ein Deep Field am Nordhimmel handelt. Diese Bilder wurden zu einem einzigen Deep Field zusammengefügt. Das Schöne an dem Bild ist, dass die **Tiefe des Alls in Echtfarben** abbildet wird, so wie sie sich unserem Auge darstellen würde, wenn wir so lange belichten und so scharf gucken könnten.

5.1.3 Und was sehen wir?

Das All ist bunt! Keine tiefe Schwärze, sondern ein farbfrohes Gewimmel von Galaxien in den unterschiedlichsten Entwicklungszuständen breitet sich vor dem faszinierten Betrachter

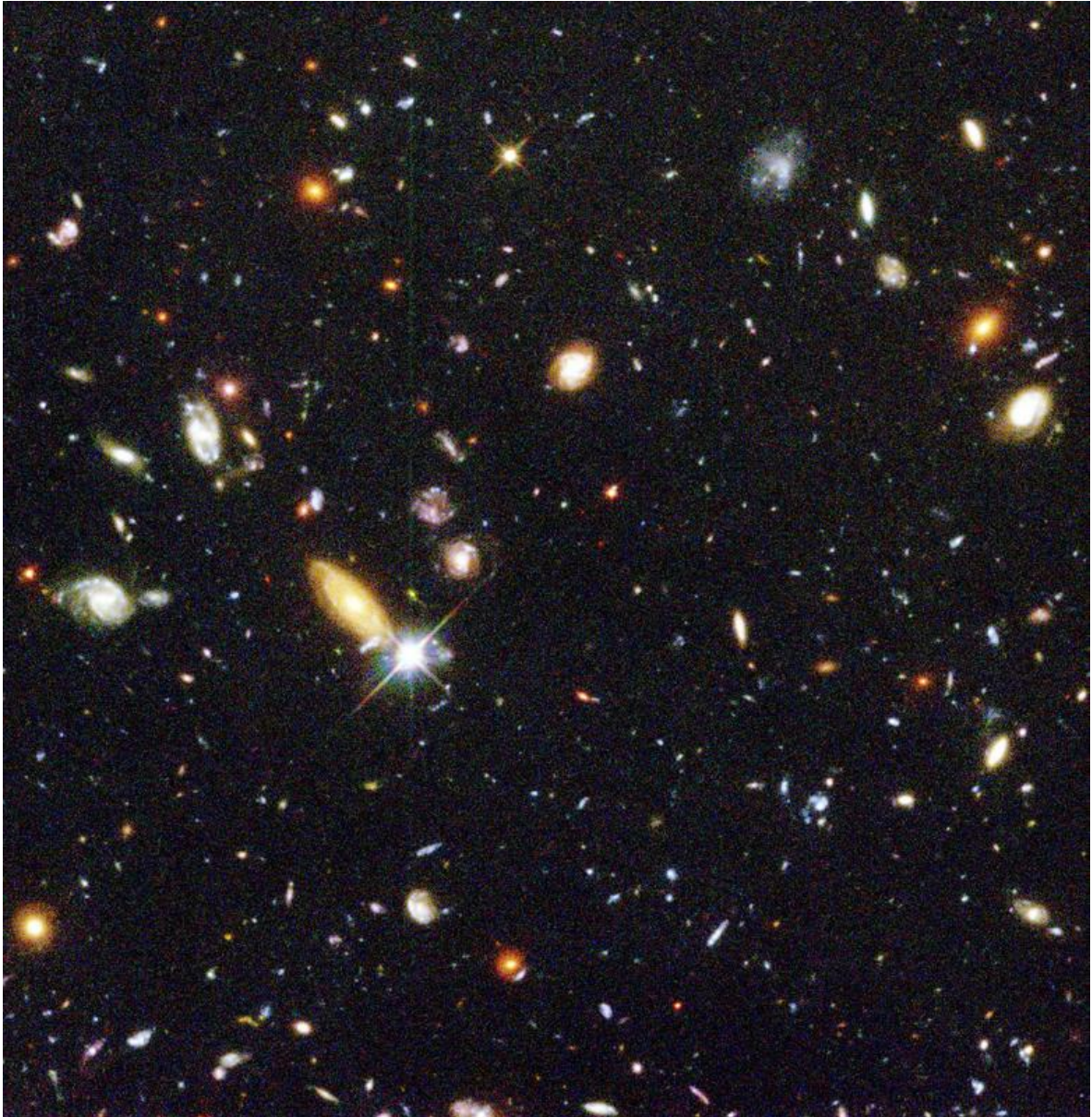


Abbildung 5.1: Hubble Deep Field - North von 1996.

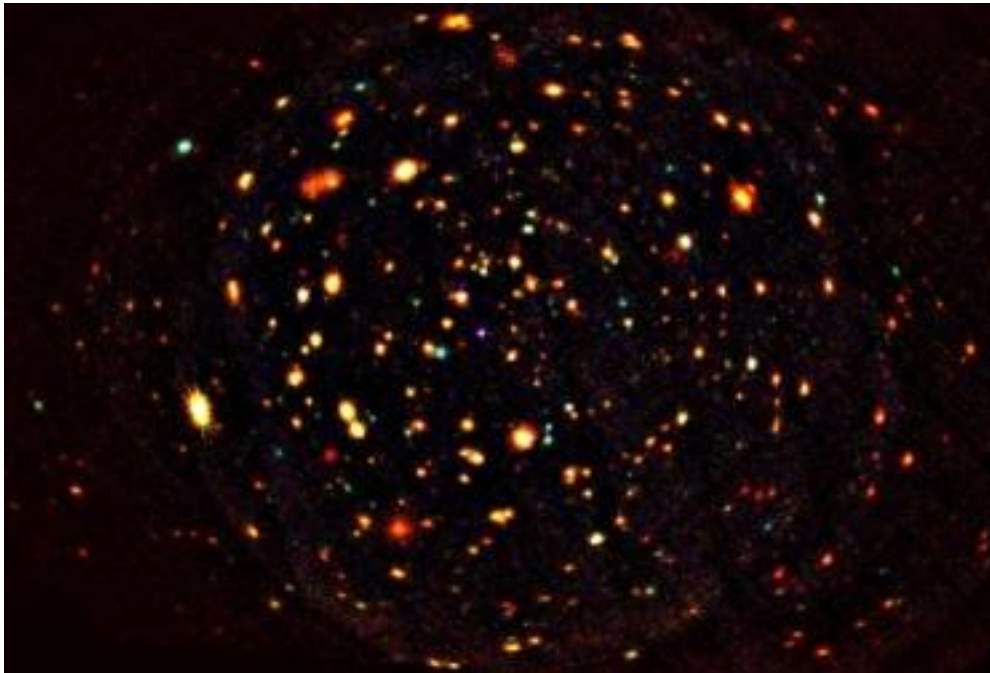


Abbildung 5.2: Lockman Hole Deep Field 2005.

aus! Das HDF-N enthält (gemäß Auswahlkriterium) kaum Vordergrundsterne, sondern nur Galaxien. Ihre Farben verraten etwas über ihre Natur und Entfernung, denn aufgrund der kosmologischen Rotverschiebung rötet und verdunkelt sich die Strahlung mit zunehmender Entfernung wegen der Expansion des Universums.

Der Informationsgehalt von Deep Fields ist für Astronomen von unschätzbarem Wert, weil sie aus der Analyse der Einzelspektren einer jeden Quelle im Bild sich ein **Bild vom Kosmos in 3D** machen können. So folgt (mit etwas Glück und viel Können) für jede Galaxie die Leuchtkraft (Aktivität), Zusammensetzung (Metallizität), Morphologie (Hubble-Typ), Sternentstehungsrate etc. in unterschiedlichen Epochen, also Entfernungen. Die Astronomen betreiben mit diesen Daten Kosmologie und erforschen die **Strukturbildung** im Universum. Eine Schlüsselfrage lautet: Wie sind Galaxien überhaupt entstanden?

5.1.4 Harte Strahlung verrät Lochwachstum

Eine brisante Forschungsfrage, die mit Deep Fields untersucht wird, ist die Entstehung und Entwicklung von supermassereichen Schwarzen Löchern (SMBHs), von denen es mindestens ein Exemplar im Zentrum einer (fast) jeden Galaxie gibt. In der Nähe Schwarzer Löcher geht es turbulent und hochenergetisch zu. Deshalb nutzen die Astronomen hier Strahlung mit sehr hoher Energie, nämlich Röntgenstrahlung (einige wenige bis einige zehn keV).

Das Foto 5.2 zeigt ein Deep Field, gewonnen aus Röntgenstrahlung, die mit dem europäischen Röntgenteleskop XMM-Newton eine Woche lang aufgesammelt wurde. Damit wir es betrachten können, muss jeder 'Röntgenfarbe' eine der Grundfarben zugeordnet werden - sonst wäre das Foto für uns unsichtbar! Es ist in der Röntgenastronomie weit verbreitet den Energiebereich der Strahlung von 0.5-2 keV rot, von 2-4.5 keV grün und von 4.5-10

keV blau darzustellen. Das Foto ist das so genannte *Lockman Hole X-ray Deep Field*, ein Deep Field im Röntgenbereich, das im Himmelsfeld des Lockman Hole aufgenommen wurde (Credit: *Günther Hasinger et al.* 2005, ESA/XMM-Newton). Das Lockman Hole zeichnet sich durch besondere Transparenz aus, weil das intergalaktische Gas in dieser Blickrichtung dünn verteilt ist (deshalb *hole*, dt. 'Loch'). Astrophysiker beschreiben das so, dass die Säulendichte von neutralem Wasserstoff (HI) im Lockman Hole besonders niedrig ist, $N_{\text{H}} \sim 5.7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$. Diese Entdeckung hat der Astronom *Felix Lockman* 1986 gemacht.

5.1.5 Verdanken Menschen ihre Existenz Schwarzen Löchern?

Die bunten Quellen sind vor allem Aktive Galaktische Kerne (AGN), etwa hundert Stück, deren extreme Leuchtkraft von zentralen superschweren Löchern gespeist wird. Dadurch dass die AGN unterschiedliche Entfernungen haben und Rotverschiebungen bis zu $z \sim 4$ erreichen, sehen wir hier SMBHs in ganz unterschiedlichen Entwicklungsstadien. Wir blicken daher etwa 12 Mrd. Jahre in die Vergangenheit und sehen den frühen Kosmos, in dem es weder Erde, noch unsere Sonne gab! Röntgen-Deep-Fields verraten somit etwas über das Lochwachstum (engl. *black hole growth*) und den Entwicklungszusammenhang zwischen Galaxie und zentralem Loch. Eine aktuell diskutierte Frage ist z. B. was zuerst da war: die Galaxie oder das Loch? Diese Frage kursiert auch als Huhn-Ei-Problem (engl. *hen-egg problem*), weil hier genauso wenig klar ist, wer zuerst da war. Klar ist: es handelt sich um einen ganz gravierenden Fall von Lochfraß.

5.1.6 Ambitionierte Großprojekte

Deep Fields helfen diese kosmologischen Fragen der Strukturbildung zu lösen. Astronomen versuchen dabei sämtliche Möglichkeiten auszuschöpfen und bündeln daher sowohl ihre technischen, als auch ihre finanziellen Ressourcen. In modernen, internationalen Großprojekten findet eine weltumspannende Zusammenarbeit statt. Astronomen knöpfen sich ein ausgewähltes Himmelsfeld vor und blicken salopp gesagt mit allem darauf, was sie haben! Eines dieser Projekte ist COSMOS, bei dem die Weltraumteleskope XMM und Chandra (beide Röntgen), Hubble (optisch), Spitzer (Infrarot) und GALEX (UV, geplant) sowie verschiedene, erdgebundene Teleskope Beobachtungsdaten von einem zwei Quadratgrad großen Himmelsfeld sammeln. Die Datenmenge ist immens, so befinden sich z. B. zwei Millionen Galaxien im Deep Field. Der erste Schwung der Datenflut wird zurzeit analysiert und interpretiert.

5.1.7 Weblinks

- ◇ Hubble Deep Field - North auf der Website des Weltraumteleskops Hubble: noch mehr Bild- und Informationsmaterial
- ◇ Das internationale COSMOS-Projekt am CalTech und XMM-COSMOS am MPE (Projektkoordinator: *Günther Hasinger*)

5.2 Derricks Theorem

Nein, dieses Theorem besagt nicht, dass grundsätzlich Harry den Wagen vorfährt. Es handelt sich nicht um eine Krimiseriengesetzmäßigkeit, sondern um seriöse Skalarfeldtheorie. Damit

niemand im Dunkeln tappert, hier die Kernaussage des Derrick-Theorems (nach *G.H. Derrick* 1964):

Es gibt keine stabilen, zeitunabhängigen Skalarfeldlösungen in einer flachen 4D Raumzeit

Schon eine zeitabhängige Phase im (komplexwertigen) Skalarfeld kann dieses Theorem umgehen. Diese Regel kann bei Stabilitätsbetrachtungen von **Bosonensternen** in der Astrophysik kompakter Objekte verwendet werden.

5.3 de-Sitter-Kosmos

Ein relativistisches Modell des ganzen Universums, das wichtig ist für die Kosmologie. Das de-Sitter-Universum ist dynamisch, aber **materiefreie** und wurde von dem holländischen Astronom *Willem de Sitter* bereits im Jahr 1917 entwickelt. Dieser Kosmos ist flach und hat eine **positive kosmologische Konstante**.

5.3.1 Zum Pionier

Willem de Sitter (1872 - 1934) studierte Mathematik in Groningen in den Niederlanden. Später arbeitete er dort im astronomischen Labor. Kurz vor der Jahrhundertwende war er am Cape-Observatorium in Süd-Afrika und ab 1908 Professor für Astronomie an der Universität Leiden. 1919 wurde er Direktor an der Sternwarte Leiden. Wir verdanken de Sitter Arbeiten zur Sternverteilung in der Milchstraße und vor allem das de-Sitter-Universum aus dem Jahr 1917 - im gleichen Jahr erfand Einstein die kosmologische Konstante Λ . Kollege de Sitter, der mit Einstein zu dieser Zeit Kontakt pflegte, hat ein dynamisches Konkurrenz-Modell zu Einsteins statischem Universum vorgelegt. 1932 publizierten beide ein neues Modell, das **Einstein-de-Sitter-Universum**.

5.3.2 Weit weg von der Wirklichkeit

Materiefreiheit ist natürlich eine schlechte Eigenschaft, um das reale Universum beschreiben zu wollen, wissen die Astronomen doch um große Mengen an baryonischer Materie, Dunkler Materie und darüber hinaus von der Dunklen Energie. Aufgrund dieser Eigenschaft verstößt der de-Sitter-Kosmos gegen das Machsche Prinzip. Dennoch ist das de-Sitter-Universum gerade für die theoretische Kosmologie von Interesse. Denn in diesem dynamischen Universum lässt sich gut die Expansion am Modell studieren. Diese Ausdehnung wird getrieben von der kosmologischen Konstante (Einsteins Lambda-Term, Λ), die man hier als eine mögliche Form der Dunklen Energie verstehen kann.

5.3.3 Lösung der Einstein-Gleichungen

Unter dem Gesichtspunkt der Allgemeinen Relativitätstheorie ist das de-Sitter-Universum eine Lösung der Einsteinschen Feldgleichungen *mit* Lambda-Term, aber *verschwindendem* Energie-Impuls-Tensor. Es handelt sich also eigentlich um eine Raumzeit, die auch mit der Bezeichnung *de-Sitter-Lösung* versehen wird. Wenn man nun ein realistischeres Modell aufstellen möchte, so kann man z. B. den Energie-Impuls-Tensor wieder berücksichtigen und die Materie im Kosmos durch eine ideale Flüssigkeit beschreiben. Dann resultieren deutlich kompliziertere Lösungen, die auch anders genannt werden, nämlich Friedmann-Weltmodelle (siehe dort für eine detaillierte Beschreibung).

5.3.4 de-Sitter & Anti-de-Sitter

Die kosmologische Konstante darf im de-Sitter-Modell unterschiedliches Vorzeichen annehmen. Bei positiver kosmologischer Konstante spricht man von der de-Sitter-Raumzeit; bei negativem Vorzeichen der kosmologischen Konstante hingegen von der **Anti-de-Sitter-Raumzeit** (AdS) auf. Diese Energieform, eine 'negative Λ -Flüssigkeit', ist im Gegensatz zur Dunklen Energie anziehend (*attraktiv*). In den Randall-Sundrum-Modellen verwendet man sogar eine höherdimensionale Welt mit fünf Dimensionen. Das Universum dort ist ein fünfdimensionaler Anti-de-Sitter-Raum (AdS₅).

5.3.5 Literaturquelle

- ◊ Website: MacTutor History of Mathematics archive, University of St. Andrews, Scotland; darin die Biographie von W. de Sitter

5.4 DGP-Szenario

Das DGP-Szenario ist ein Branenmodell, das nach den Erfindern *Dvali*, *Gabadadze* und *Porrati* benannt wurde. Wie in allen Branenmodellen, wird eine höherdimensionale Welt, der so genannte **Bulk** angenommen, d. h. es gibt räumliche Extradimensionen.

5.4.1 Motivation von mehr Raum

Die Motivation für einen solch verwegen anmutenden Vorschlag ist die beobachtete Eigenschaft der Gravitation, dass sie viel schwächer ist, als die anderen drei physikalischen Grundkräfte (elektromagnetische Kraft, schwache Kraft, starke Kraft). Dieses Phänomen wird mit dem Begriff **Hierarchieproblem** betitelt. Das Problem kann dadurch gelöst werden, dass man mehr Raumdimensionen einführt und dass man annimmt, dass nur die Gravitation in diesen Bulk kommen kann, nicht jedoch die anderen Naturkräfte. Freilich handelt man sich mit der eleganten Lösung etwas vollkommen Neues ein: mehr Raum! Leider wird dieses Szenario nicht die schlechte Wohnungssituation in Großstädten entschärfen können, weil Mieter Objekte des Standardmodells sind.

5.4.2 Eigenschaften des DGP-Modells

Sowohl Bran als auch Bulk haben im DGP-Szenario den Charakter der Minkowski-Metrik, d. h. die Raumzeiten sind **flach**, wie in der Speziellen Relativitätstheorie (SRT). Der entscheidende Unterschied ist, dass die Welt der SRT vierdimensional (4D) ist, aber der Bulk im DGP-Modell 5D ist - es gibt also **eine Extradimension mehr**. Die Raumzeit der Bran ist hingegen 4D wie in der SRT, weil die Bran (eine *3-Bran*) ein Unterraum des Bulks ist. Die Extradimension ist von der Größe her **unendlich** ausgedehnt, d. h. sie ist **nicht kompaktifiziert**. Die 4D-kosmologische Konstante wurde vereinfachend null gesetzt.

5.4.3 Was leistet das DGP-Modell?

Dieses Bulk-Branenmodell gewährleistet den Übergang zur gewöhnlichen Newtonschen Gravitation in 4D auf der Bran. Genauer gesagt vermitteln bei *kleinen* Abständen die 4D-Gravitonen, die in diesem Szenario auftreten, das klassische 4D-Newton-Potential mit

dem charakteristischen $1/r$ -Abfall. Bei *großen* Abständen hingegen wird ein entsprechend modifiziertes 5D-Potential bedeutsam, das mit $1/r^2$ skaliert. Das DGP-Modell sagt also voraus, dass eine **modifizierte Gravitation** (engl. *modified gravity*) bei großen Längenskalen einsetzt.

5.4.4 Bei welcher Längenskala verändert sich die Gravitation?

Die Übergangslängenskala r_0 ist im Modell ein freier Parameter und hängt von der 5D-Planck-Masse (im Bulk) und der 4D-Planck-Masse (auf der Bran) ab. Die klassische (4D-)Planckskala liegt bei etwa 10^{19} GeV. Nimmt man für den Bulk eine *reduzierte* Planckskala von 1 TeV an, so liegt die Übergangslängenskala gerade im Bereich der Größe des Sonnensystems ($r_0 \sim 10^{15}$ cm). Das würde bedeuten, dass für kosmisch deutlich größere Distanzen, die einige 10 bis 100 Astronomische Einheiten deutlich übersteigen, die Modifikation des Newtonschen Gravitationspotentials zu einem $1/r^2$ -Verhalten auftreten sollte. Das wird astronomisch jedoch nicht beobachtet! Entsprechend muss man (im Rahmen dieses speziellen Modells) schließen, dass die Übergangslängenskala um viele Größenordnungen größer bzw. die 5D-Planck-Masse entsprechend deutlich kleiner sein muss, als die TeV-Skala - vielleicht um das 100 bis 1000fache.

Alternativ dazu ist denkbar eine Kompaktifizierung der Extradimensionen zuzulassen. Das geschieht beispielsweise im ADD-Szenario, und es zeigt sich, dass dann eine reduzierte Planck-Skala im TeV-Bereich möglich wäre.

5.4.5 weitere Branenmodelle

Neben dem DGP-Modell gibt es weitere Branenmodelle in der modernen Hochenergiephysik. In jedes Modell gehen unterschiedliche Eigenschaften des Bulk-Branen-Systems und Voraussetzungen ein. Prominente Modelle sind das **ADD-Szenario**, die **Randall-Sundrum-Modelle** und das **Zyklische Universum**.

5.4.6 Originalveröffentlichungen

- ◇ *Dvali, G., Gabadadze, G. & Porrati, M.*: Metastable gravitons and infinite volume extra dimensions, Phys. Lett. **B 484**, 112, 2000
- ◇ *Dvali, G., Gabadadze, G. & Porrati, M.*: 4D gravity on a brane in 5D Minkowski space, Phys. Lett. **B 485**, 208, 2000

5.5 Diffeomorphismus

Von speziellem Interesse unter den Morphismen ist in der theoretischen Physik der **Diffeomorphismus**. Dieser spezielle Homomorphismus ist invertierbar und eine 'glatte' Abbildung.

5.5.1 Einsteins Theorie braucht keine Bühne

Was hat das mit Physik zu tun? Die Allgemeine Relativitätstheorie (ART) diktiert **Diffeomorphismusinvarianz**. Eine treffende und anschauliche Übersetzung dieser Eigenschaft ist **Hintergrundunabhängigkeit**. Ein 'Hintergrund' ist eine nicht-dynamische,

also statische, Struktur, auf der die physikalischen Objekte agieren (siehe auch Hintergrundmetrik). In diesem Sinne ist Hintergrund die *Bühne der Physik*. Die knappe Aussage der ART ist nun, dass es diese statische Bühne nicht gibt! Es ist **nicht** von Belang, *wo* die physikalischen Objekte in einer Raumzeit lokalisiert sind (absolute Positionierung), sondern *wie* sie relativ zueinander stehen (relationale Positionierung). Der Diffeomorphismus bewerkstelligt gerade mathematisch eine 'Verschiebung' der dynamischen, physikalischen Objekte. Die gerade beschriebene Unabhängigkeit (Invarianz) von dieser Verschiebung mündet gerade in die Diffeomorphismusinvarianz (engl. Abkürzung *diff-invariance*). Alle allgemein relativistischen Theorien sind notwendig diffeomorphismusinvariant.

5.5.2 Bezug zur Loop-Quantengravitation

Diese Eigenschaft ist eine wichtige Voraussetzung für die Loop-Quantengravitation (LQG). Weil sie die Konzepte von Quantenmechanik und ART zu vereinen sucht, geht auch die Hintergrundunabhängigkeit wesentlich ein. Damit unterscheidet sie sich deutlich von dem kanonischen Zugang in den Quantenfeldtheorien (QED, QCD etc.) und den Stringtheorien. Denn in beiden Fällen agieren die dynamischen Objekte, die (Eich-)Felder vor einem Hintergrund. Man kann sagen, dass die konzeptionellen Implikationen der ART in diesen Theorien nicht richtig verinnerlicht sind.

Einer der Pioniere auf dem Gebiet der LQG, der theoretische Physiker *Carlo Rovelli*, drückt es so aus:

'Pictorially, GR is not physics over a stage, it is the dynamical theory of the stage itself.'
Übersetzung: *'Anschaulich ist die ART nicht die Physik auf einer Bühne, sondern eine dynamische Theorie der Bühne selbst'.*

5.6 differenzielle Rotation

Rotation ist eine wichtige Eigenschaft von Himmelskörpern. Spiralgalaxien rotieren, Sterne rotieren, Planeten rotieren um ihr Zentralgestirn, so auch die Erde um die Sonne, sogar Schwarze Löcher rotieren (Kerr-Lösung).

5.6.1 Drehimpuls in der klassischen Mechanik

Physikalisch ausgedrückt hat ein Körper, der rotiert, **Drehimpuls**. Allgemein berechnet man den Drehimpuls $\mathbf{J}$ in der klassischen Mechanik (unquantisiert, unrelativistisch) mittels des Vektorprodukts aus dem radialen Abstand $\mathbf{r}$ des Teilchens zum Drehzentrum mit dem Impuls des rotierenden Teilchens $\mathbf{p}$: $\mathbf{J} = \mathbf{r} \times \mathbf{p} = \mathbf{r} \times m\mathbf{v}$. Im letzten Schritt wurde ausgenutzt, dass der Impuls eines Teilchens das Produkt aus Masse m und Geschwindigkeit $\mathbf{v}$ ist.

5.6.2 Rotationsformen

Vergleicht man nun das Rotationsverhalten von Probeteilchen um ein Drehzentrum, so lässt sich unterschiedliches Rotationsverhalten charakterisieren, die in Abbildung 5.3 vorgestellt werden. Zu Beginn, also vor der Rotation, mögen Testteilchen auf einer Linie liegen. Dann setzen zwei unterschiedliche Rotationstypen ein (links gegenüber rechts unten).

Eine **differenzielle Rotation** ist zu unterscheiden von der **starren Rotation**. Bei der starren Rotation rotieren Punkte (Testteilchen in der Abb.) mit verschiedenem

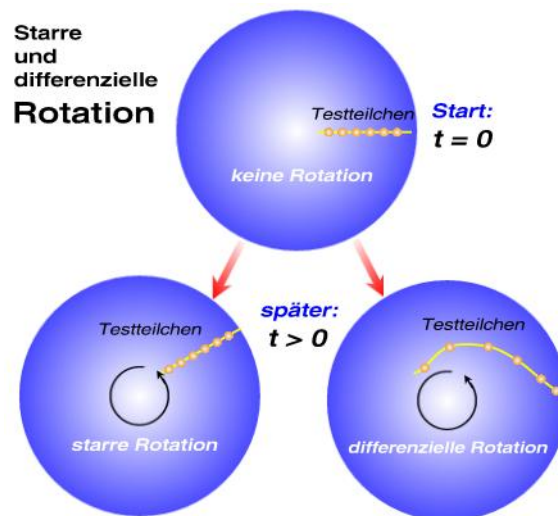


Abbildung 5.3: Starre vs. differentielle Rotation.

Abstand zum Drehzentrum mit *gleicher* Winkelgeschwindigkeit, also auf einer immer gleich bleibenden Verbindungslinie (mathematisch: die radiale Ableitung der Winkelgeschwindigkeit ist konstant). Das ist in der Abbildung links unten dargestellt. Die Winkelgeschwindigkeit entspricht übrigens dem Quotienten aus Umlaufgeschwindigkeit und Radius der Bahn. Winkel- und Umlaufgeschwindigkeit sind nicht dasselbe!

Bei der differentiellen Rotation rotieren Punkte verschiedenen Abstands mit *unterschiedlicher* Winkelgeschwindigkeit (die radiale Ableitung der Winkelgeschwindigkeit ist abhängig vom Abstand, Radius). Das ist in der Abbildung recht unten zu sehen. Verständlich wird der Unterschied im Rotationsverhalten anhand von Beispielen: Eine starre Rotation erfüllen alle starren Festkörper (daher der Name), weil sie nicht deformierbar sind, z. B. ein Karussell. Eine differentielle Rotation ist in einer Kepler-Scheibe, also beispielsweise bei den Planeten im Sonnensystem gegeben. Die Winkelgeschwindigkeit von Merkur ist höher, als die der Erde.

5.6.3 Bezug zu Akkretion und MHD

Differentielle Rotation ist eine wesentliche Voraussetzung, damit die magnetische Rotationsinstabilität (MRI) funktioniert. Die MRI ist ein wichtiger Mechanismus, der in der Magnetohydrodynamik von Akkretionsflüssen auftritt.

5.7 Distanzmodul

Eine wichtige Relation in der Astronomie, die die Entfernung eines leuchtenden Objekts, beispielsweise eines Sterns, in Bezug setzt zu dessen Helligkeit (dort finden sich weitere Details zum Entfernungsmodul).

Bei ermittelter Distanz r aus Entfernungsbestimmungsmethoden, folgt die **absolute Helligkeit** M daher direkt aus bekannter (weil beobachteter) **scheinbarer Helligkeit** m .

Die Formel lautet:

$$m - M = -2.5 \log \frac{F(r)}{F(10)} = 5 \log \frac{r}{10\text{pc}}.$$

5.7.1 wichtige Anwendung: Entfernungsbestimmung

Oder umgekehrt, wie es bei Cepheiden, RR Lyrae Sternen, Supernovae Typ Ia oder anderen Standardkerzen gemacht wird: aus beobachteter, scheinbarer Helligkeit m und aus theoretischen Sternmodellen fixierten absoluten Helligkeiten M folgt die Entfernung! Diese letzte Anwendung ist besonders wichtig in der Vermessung des Universums, der *Kosmometrie*. Die Kenntnis der Entfernung kosmischer Quellen ist für die Astronomen von großem Wert, weil andere physikalische Größen häufig von der Entfernung abhängen.

5.7.2 Beispiel: Sonne

Wer einmal mit der Gleichung 'spielen' mag, sei dazu eingeladen, die scheinbare visuelle Helligkeit der Sonne, $m_V = -26.7^{\text{mag}}$, und ihre absolute visuelle Helligkeit, $M_V = 4.87^{\text{mag}}$, einzusetzen, um den Abstand der Sonne zur Erde zu berechnen. Und siehe da: das Ergebnis sind gerade etwa 150 Millionen Kilometer oder **eine Astronomische Einheit**.

5.7.3 Kosmologie

Bei sehr großen Entfernungen muss das oben formulierte Distanzmodul mit den Methoden der relativistischen Kosmologie verallgemeinert werden. Zusätzlich gehen dann in die Formel die kosmologischen Parameter ein, die das jeweilige Friedmann-Weltmodell festlegen. Ein gut geeigneter Entfernungsbegriff ist dann die so genannte Leuchtkraftdistanz.

5.8 Dodekaeder-Universum

Ein relativ neues, aber hypothetisches kosmologisches Modell für ein **geschlossenes** Universum, das von *Luminet et al.* 2003 in der Zeitschrift Nature vorgestellt wurde (astro-ph/0310253). Es handelt sich um ein alternatives Modell zur konventionellen Kosmologie (flacher Euklidischer Kosmos), das allerdings mit Beobachtungsdaten des Mikrowellensatelliten WMAP verträglich ist.

5.8.1 Eigenschaften des 'Fußball-Universums'

Das Dodekaeder-Universum ist nicht flach, sondern besitzt eine positive Krümmung ($k = +1$). Der totale Dichteparameter ist deshalb ebenfalls knapp oberhalb von 1, weicht mit einem angenommenen Wert von 1.013 im Dodekaeder-Raum jedoch nur wenig vom flachen Universum ab. Bisher können die Beobachtungen der Hintergrundstrahlung dieses Szenario nicht ausschließen.

Das Dodekaeder-Universum besteht aus 120 Pentagon-Dodekaedern, die eine **Hypersphäre** bilden. Die Hypersphäre ist die 3D-Oberfläche einer 4D-Kugel. Das Pentagon-Dodekaeder ist ein dreidimensionales, fußballähnliches Gebilde, das sich aus 12 Pentagonen (Fünfecken) zusammensetzt, wie die Abbildung 5.4 illustriert. Einen Zwölfflächner bezeichnet man generell als Dodekaeder. Das Ganze hat einen historischen Bezug, denn das Dodekaeder

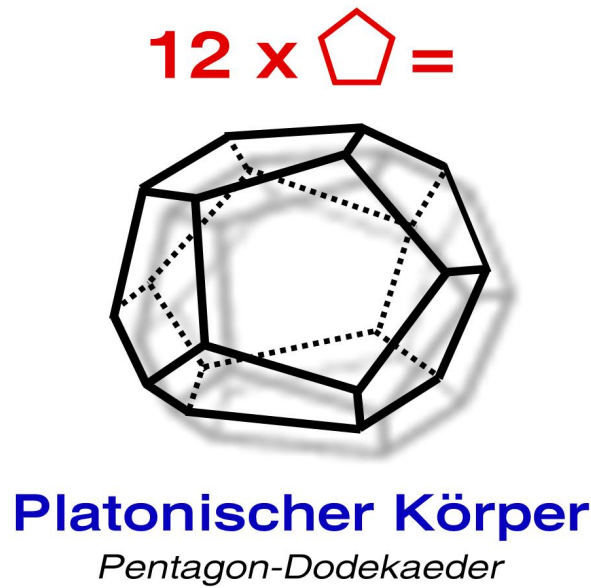


Abbildung 5.4: 12 Pentagone konstituieren einen Dodekaeder.

gehört zu den fünf **Platonischen Körpern**, konvexen, geometrischen Körpern, die sich aus regelmäßigen Polygonen (Vielecken) konstituieren.

Die Ausbreitung von Dichtewellen im Dodekaeder-Universum ist bisher mit den Messdaten aus der Hintergrundstrahlung verträglich. Die charakteristische Struktur von Obertönen in der Strahlungsverteilung der Drei-Kelvin-Strahlung kann deshalb durch ein offenes oder geschlossenes Euklidisches Universum (Krümmung null) oder ein geschlossenes Dodekaeder-Universum (positive Krümmung) erklärt werden.

5.8.2 Fußball oder Horn?

Eine noch neuere Alternative eines Universums mit negativer Krümmung (*hyperbolisches Universum*) ist das Horn-Universum (*Aurich et al. 2004*).

5.8.3 Aktuelle Entwicklungen

Luminets Forschergruppe hat mittlerweile darüber berichtet, welche Verteilungen auf den Polarisationskarten der Hintergrundstrahlung zu erwarten sind, wenn das Universum eine nicht-triviale Topologie hat ([astro-ph/0601433](#)). Bislang sind das nur Hypothesen, die auf theoretischer Basis stehen, aber noch nicht beobachtet wurden. Die Kosmologen hoffen, dass der neue Satellit PLANCK, der 2008 starten soll und die Hintergrundstrahlung in noch größerem Detail vermessen wird, baldige Klärung darüber bringen wird, in welchem Universum wir denn nun tatsächlich leben.

Eine detaillierte Beschreibung zu den topologischen Aspekten des Universums befindet sich unter dem Eintrag Topologie.

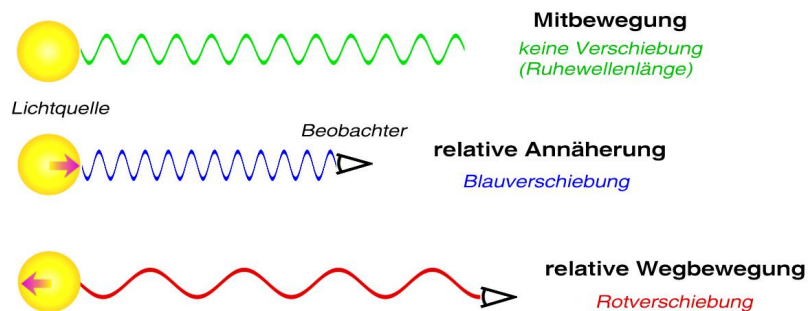


Abbildung 5.5: Doppler-Blauverschiebung und Doppler-Rotverschiebung einer Lichtwelle.

5.9 Doppler-Effekt

Der Doppler-Effekt gehört zu den wichtigsten Phänomenen in der Physik. Es handelt sich um einen Effekt, der mathematisch beschreibt, wie sich die Wellenlänge einer Welle verändert, wenn sich der Wellenerreger oder der Wellenempfänger bewegen. Vertraut ist uns dieser Effekt im Alltag, wenn sich die Tonhöhe einer relativ zu uns bewegten Schallquelle verändert, z. B. das Martinshorn eines Rettungswagens oder das Motorengeräusch in der Formel-1. Der Doppler-Effekt tritt allerdings nicht nur **bei akustischen Wellen** auf, sondern vor allem auch **bei elektromagnetischen Wellen** - das macht ihn bedeutsam für die Astronomie.

5.9.1 Namenspatte

Der Doppler-Effekt wurde nach dem österreichischen Physiker und Mathematiker *Christian Johann Doppler* (1803 - 1853) benannt. Er veröffentlichte 1842 bei der Böhmischen Gesellschaft der Wissenschaften in Prag das Papier *Über das farbige Licht der Doppelsterne und einiger Gestirne des Himmels*. Darin modellierte Doppler das Licht fälschlicherweise als longitudinale Welle - bereits 1821 hatte *A.J. Fresnel* (1788 - 1827) behauptet, dass Licht eine *transversale* Welle sei. Wie wir heute wissen, hatte Fresnel Recht, doch die wesentliche Aussage von Dopplers Arbeit bleibt bestehen. Doppler machte darüber hinaus den bemerkenswerten und weitsichtigen Kommentar, dass Astronomen den von ihm entdeckten Effekt benutzen werden, um die Bewegung und Entfernung der Sterne zu messen - er sollte Recht behalten.

5.9.2 akustischer Doppler-Effekt

Schallwellen breiten sich in einem Medium, z. B. Luft oder Wasser, mit der Schallgeschwindigkeit aus. Die empfangene Frequenz erhöht sich bzw. die empfangene Wellenlänge verkürzt sich, wenn sich die Schallquelle auf den Empfänger zu bewegt. Die sich ausbreitende Welle wird anschaulich gewissermaßen gestaucht. Entfernt sich die Schallquelle, passiert das genaue Gegenteil, denn die empfangene Frequenz wird niedriger bzw. die empfangene Wellenlänge wird erhöht. Dann wird die sich fortpflanzende Welle anschaulich gesprochen gedehnt.

5.9.3 Doppler-Effekt bei Licht

Bei dem Doppler-Effekt von elektromagnetischer Strahlung verhält es sich ein bisschen anders: Licht benötigt kein Medium um sich auszubreiten und kann sich sogar im Vakuum fortpflanzen. Aus diesem Grund empfangen Astronomen überhaupt elektromagnetische Signale kosmischer Quellen. *Albert Einstein* hat bei der Begründung seiner Spezielle Relativitätstheorie 1905 gefordert, dass Licht sich immer gleich schnell ausbreitet - **unabhängig** von dem Bewegungszustand der Lichtquelle! Diese experimentell verifizierte Forderung heißt **Postulat von der Konstanz der Vakuumlichtgeschwindigkeit c** . Es hat gravierende Konsequenzen für unser Verständnis von Raum und Zeit. Offensichtlich ist der Doppler-Effekt von Licht völlig anders, als derjenige akustischer Wellen, deren Fortpflanzungsgeschwindigkeit ja variieren kann.

Phänomenologisch bleibt das oben Gesagte erhalten: Die empfangene Lichtfrequenz ν_{obs} erhöht sich bzw. die empfangene Wellenlänge verkürzt sich, wenn sich die Lichtquelle mit der Relativgeschwindigkeit v auf den Beobachter zu bewegt. Weil dies einer Veränderung der Lichtfarbe mit der emittierten Frequenz ν_{em} zum Blauen hin entspricht, nennen Physiker diesen Effekt **Blauverschiebung**.

Entfernt sich die Lichtquelle, wird die empfangene Strahlungsfrequenz kleiner bzw. die empfangene Lichtwellenlänge wird größer. Die Physiker sprechen dann von einer **Rotverschiebung**, genauer einer Doppler-Rotverschiebung. Die beiden Fälle fasst Abbildung 5.5 zusammen. Quantitativ berechnet man das mit den Gleichungen für den speziell relativistischen Doppler-Effekt:

$$\begin{aligned}\nu_{\text{obs}} &= \sqrt{\frac{1+v/c}{1-v/c}} \nu_{\text{em}} && \text{Doppler-Blauverschiebung } (\nu_{\text{obs}} > \nu_{\text{em}}) \\ \nu_{\text{obs}} &= \sqrt{\frac{1-v/c}{1+v/c}} \nu_{\text{em}} && \text{Doppler-Rotverschiebung } (\nu_{\text{obs}} < \nu_{\text{em}})\end{aligned}$$

5.9.4 Der Doppler-Faktor

Physiker schreiben diese Gleichungen gerne noch kompakter und benutzen dazu den Lorentz-Faktor γ ist und die in der Relativitätstheorie übliche auf die Vakuumlichtgeschwindigkeit normierte Geschwindigkeit $\beta = v/c$. Umschreiben und zusammenfassen der beiden Gleichungen oben führt zur Gleichung:

$$D_{\pm} = 1/[\gamma(1 \pm \beta)] = \nu_{\text{obs}}/\nu_{\text{em}}.$$

Hierin ist D der **Doppler-Faktor**. Das Pluszeichen gilt für eine Doppler-Rotverschiebung und das Minuszeichen für eine Doppler-Blauverschiebung.

Der Doppler-Faktor kann in der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) verallgemeinert werden und heißt dann oft nicht mehr D , sondern g -Faktor g , Rotverschiebungsfaktor oder relativistisch verallgemeinerter Doppler-Faktor (siehe auch *A. Müller: The Onset of General Relativity: gravitationally redshifted emission lines*, Astron. Nachr. 327, 1024, 2006; ePrint: astro-ph/0610791).

Der Doppler-Faktor bzw. g -Faktor ist von grundlegender Bedeutung in der Strahlungsphysik, weil er einerseits das Maß dafür ist, wie die **Strahlungsenergie** vom Ruhesystem ins Beobachtersystem verschoben wird und weil er andererseits in hoher Potenz den **Strahlungsfluss**, also die gemessene Intensität der Doppler-verschobenen Strahlung, beeinflusst. Generell ist das Verhältnis aus spektraler Strahlungsintensität I_{ν}

und dritter Potenz der Frequenz ν - beide betrachtet im *gleichen* Bezugssystem - eine **Invariante**. Daraus folgt die folgende, sehr nützliche Gleichung, um vom Ruhesystem auf das Beobachtersystem zu transformieren:

$$\begin{aligned} I_\nu/\nu^3 &= \text{const} \\ \Rightarrow I_{\nu,\text{obs}}/\nu_{\text{obs}}^3 &= I_{\nu,\text{em}}/\nu_{\text{em}}^3 \\ \Leftrightarrow I_{\nu,\text{obs}} &= D^3 I_{\nu,\text{em}} \end{aligned}$$

5.9.5 Vorsicht: drei Arten der Rotverschiebung!

Die Rotverschiebung involviert eine Reihe von Missverständnissen. Die oben erläuterte Doppler-Rotverschiebung darf auf gar keinen Fall mit der **kosmologischen Rotverschiebung** verwechselt werden! Hintergrund ist, dass die Rotverschiebung als Verschiebung im Spektrum ganz unterschiedliche physikalische Ursachen haben kann. Bei der Doppler-Rotverschiebung ist die Ursache eine Bewegung, genauer gesagt eine Relativbewegung, die zu einer Entfernung zwischen Emitter und Beobachter führt. Es gibt aber noch zwei weitere Formen der Rotverschiebung, die nur mit Einsteins ART zu verstehen sind. Da ist zunächst die kosmologische Rotverschiebung. Sie beruht darauf, dass sich eine Raumzeit ausdehnt. Genau das geschieht mit unserem Universum: der ganze Raum (präzise: die Raumzeit) expandiert, so dass auch die darin enthaltenen Lichtwellen auseinander gezogen werden. Das geschieht beispielsweise mit der kosmischen Hintergrundstrahlung seitdem sie sich in der Rekombinationsepoche (vor gut 13 Mrd. Jahren) ausbreitet. Entsprechend entfernen sich auch die Galaxien voneinander, weil sich das Universum immer mehr vergrößert - das geschieht sogar **beschleunigt**, weil die Dunkle Energie den Kosmos auseinander treibt.

Es wäre nun **völlig falsch** die kosmologischen Rotverschiebungen zu benutzen, um kosmische Fluchtgeschwindigkeiten von weit entfernten Galaxien auszurechnen. Dass das keinen Sinn macht, erkennt man schnell daran, dass für weit entfernte Systeme diese Fluchtgeschwindigkeit die nach Einstein nicht überschreitbare Vakuumlichtgeschwindigkeit übersteigt. Solche Rechnungen machen keinen Sinn, zumal ein Geschwindigkeitsbegriff für ein sich ausdehnendes Raumzeitgitter von zweifelhaftem Wert wäre.

Die letzte Form der Rotverschiebung ist die **Gravitationsrotverschiebung**. Sie ist auch nur mit Einsteins ART zu verstehen. Licht verliert nämlich Energie, wenn es in einem Gravitationsfeld ausbreitet. In der Sprache Einsteins ist Schwerkraft eine *gekrümmte Raumzeit* und Licht folgt hier ausgezeichneten Bahnen, den so genannten Nullgeodäten. Anschaulich argumentiert kämpfen die Lichtwellen wie eine startende Rakete mit der Gravitation und verlieren Energie. Während einer Rakete der Treibstoff ausgeht, bedeutet Energieverlust für Photonen eine Verschiebung zum Roten hin. In diesem Fall spricht der Physiker von einer Gravitationsrotverschiebung, weil die Ursache der Rotverschiebung die Gravitation ist. Extrem wird dieser Effekt bei einem Schwarzes Loch: am Ereignishorizont haben die Lichtwellen all ihre Energie und Intensität an die Gravitation verloren. Das verleiht dem Loch die charakteristische Schwärze.

Im Allgemeinen ist eine beobachtete Rotverschiebung die Summe aus diesen drei Rotverschiebungen, also Doppler-Rotverschiebung, Gravitationsrotverschiebung und kosmologische Rotverschiebung. Das erschwert natürlich die Arbeit des Astronomen, und er benötigt weitere Informationen über den Emitter, um die Gewichtung der Rotverschiebungen herauszufinden.

5.9.6 Beispiele aus der Astronomie

- ◇ Mit der **Doppler-Whobbling-Methode** bestimmen Planetenjäger die Relativgeschwindigkeiten von Sternen entlang der Sichtlinie (so genannte *Radialgeschwindigkeit*) und können aus dem Hin- und Herpendeln eines Sterns indirekt auf einen extrasolaren Planeten schließen - ohne ihn direkt zu beobachten! Über die Kepler-Gesetze gelingt sogar eine Massenbestimmung des Planeten (bei bekannten Sternparametern).
- ◇ Die **Geschwindigkeiten eines Sternenvinds** bestimmen die Astronomen bequem mit der Doppler-Blauverschiebung.
- ◇ Die Wellenlängen der Spektrallinien verschiedener Elemente und Moleküle kennen die Astronomen aus Untersuchungen im Labor. Sie kennen also die Wellenlängen der Übergänge im Ruhesystem. Beobachten sie nun die gleiche spektrale Signatur bei einer kosmischen Quelle, so folgen bei Kenntnis der zugrunde liegenden Physik, die Eigenschaften des Emitters, z. B. sein Bewegungszustand, das Temperaturmilieu (Doppler-Verbreiterung) oder - bei hohen Entfernung - die kosmologische Rotverschiebung. Bei relativistisch verbreiterten **Eisenlinien**, die in der Nähe Schwarzer Löcher ausgesandt werden, können alle drei Rotverschiebungen relevant sein.
- ◇ Das historische Paradebeispiel ist die Entdeckungsgeschichte der **Quasare**: Das Spektrum dieser Form leuchtkräftiger Aktiver Galaktischer Kerne wurde erst verstanden, als der Astronom *Maarten Schmidt* die Emissionslinien als hohe kosmologische Rotverschiebungen (nicht Doppler-Rotverschiebung!) deutete. Das entlarvte die Quasare als extrem weit entfernte, extragalaktische Objekte des jungen Universums.
- ◇ Die **Jets** von kompakten Objekten bewegen sich in der Regel mit relativistischen Geschwindigkeiten. Die Strahlung der Jets wird somit vom speziell relativistischen Doppler-Effekt beeinflusst. Ein extremes Beispiel sind die Jets der **Blazare**, die auf den Beobachter zeigen und stark blauverschoben sind.

5.9.7 Faustformel für blauverschobene, relativistische Jets

Für das letztgenannte Beispiel benutzen Astronomen eine knappe Schreibweise, in die der Jet unter beliebigen Winkeln orientiert sein kann. Der relativistische Jet möge mit einem Neigungswinkel i (*Inklination*) auf den Beobachter zeigen. Dieser Winkel sei so definiert, dass $i=0^\circ$ bedeute, dass der Jetstrahl genau auf den Beobachter zeige und $i = 90^\circ$, dass der Jetstrahl senkrecht zur Sichtrichtung sei (keine Geschwindigkeitskomponente in Richtung Beobachter). Der Doppler-Faktor D für Blauverschiebung der Jetemission berechnet sich dann gemäß dieser Gleichung:

$$D = 1/[\gamma(1 - \beta \cos i)].$$

Anschaulich projiziert der Kosinus den Jetgeschwindigkeitsvektor auf die Blickrichtung.

5.9.8 longitudinaler und transversaler Doppler-Effekt

Anhand der letzten Gleichung ist ein interessantes Phänomen zu zeigen: Selbst wenn der Jet nicht auf den Beobachter zeigt ($i=90^\circ$) gibt es einen Doppler-Effekt! Denn der erste Term in der Klammer ('1') bleibt bestehen. Es bleibt eine Abhängigkeit vom Lorentz-Faktor, der wiederum eine Funktion des Geschwindigkeitsfelds des Jets ist. Die Bewegungen im Jet tragen immer noch zu einem Doppler-Effekt bei, obwohl relativ zum Beobachter gar keine Relativgeschwindigkeit vorliegt! Dieser resultierende Doppler-Effekt für diesen Spezialfall heißt **transversaler, speziell relativistischer Doppler-Effekt**, weil der Doppler-Effekt hier senkrecht (d. h. *transversal*) zur Blickrichtung auftritt. Dieser Beitrag wird nur bei relativistischen Geschwindigkeiten bedeutsam - bei kleinen Geschwindigkeiten gegenüber der Vakuumlichtgeschwindigkeit wird $\gamma \sim 1$ und somit $D \sim 1$ und schließlich $\nu_{\text{obs}} \sim \nu_{\text{em}}$. Dieser Ausdruck kann für die ART verallgemeinert werden. Dann skaliert der Doppler-Faktor mit der Lapse-Funktion.

Demgegenüber wird der Doppler-Effekt mit Geschwindigkeitskomponente des Emitters in Blickrichtung **longitudinaler Doppler-Effekt** genannt.

5.9.9 Literaturquelle

- ◇ Website: MacTutor History of Mathematics archive, University of St. Andrews, Scotland; darin die Biographie von C.J. Doppler

5.10 Drei-Kelvin-Strahlung

Eine alternative Bezeichnung für die **kosmische Hintergrundstrahlung**. 1965 stellten *A.A. Penzias* und *R.W. Wilson* fest, das aus dem Weltraum eine gleichmäßig in alle Raumrichtungen verteilte (*isotrope*) elektromagnetische Strahlung im Bereich der *Mikrowellen* zu detektieren ist.

5.10.1 Viele Wellenlängen, aber eine Temperatur

Diese Strahlungsverteilung entspricht einer exakten **Planck-Kurve**. Damit kann sie einem Schwarzen Strahler (Wärmestrahler) mit einer bestimmten Temperatur zugeordnet werden: Sie beträgt 2.7 Kelvin, also fast drei Kelvin, was den Namen *3K-Strahlung* rechtfertigt. Die Messung wurde so interpretiert, dass sie nicht irdischen, sondern kosmischen Ursprungs sei.

5.10.2 Relikt des heißen Urknalls

1929 gelang den amerikanischen Astronomen *Vesto Melvin Slipher* und *Edwin Powell Hubble* die Messung der Fluchtbewegung einiger Galaxien. Dieser so genannte Hubble-Effekt untermauert daher die These eines expandierenden Universums. Diese Beobachtung an Galaxien und die isotrope Drei-Kelvin-Strahlung sind die beiden gewichtigsten Argumente für den heißen Urknall (siehe dort für sämtliche Belege des Urknalls). Gemäß dieser Interpretation wurde die Drei-Kelvin-Strahlung vom *expandierenden Feuerball* emittiert, dem jungen, heißen Universum, als die Strahlung von der Materie entkoppelte. Dies geschah bei einer kosmologischen Rotverschiebung von $z \sim 1100$ und wird Rekombinationsära in der Kosmologie genannt. Mit der weiteren Expansion des Universums kühlte der Feuerball aus und erreichte schließlich die im lokalen Universum ($z = 0$) beobachtbare Temperatur von

knapp drei Kelvin. Die sich ausdehnende Raumzeit kühlte die anfangs heiße Urstrahlung auf fast den absoluten Nullpunkt ab.

5.10.3 Klarer Fall von Gammel-Licht

Eine kosmologische Rotverschiebung von etwa 1100 entspricht einer Epoche von etwa 400000 Jahren nach den Urknall. Damit ist die kosmische Hintergrundstrahlung das älteste Signal, das Menschen jemals aufgezeichnet haben!

5.10.4 Substruktur in der 3K-Strahlung

Mittlerweile wurden die Beobachtungsmethoden verfeinert: die kosmische Mikrowellen-Hintergrundstrahlung (engl. *cosmic microwave background radiation*, **CMBR**) wurde mit Ballonen (BOOMERANG, MAXIMA) und Satelliten (COBE, WMAP, ab 2008: PLANCK) beobachtet. Dabei stellte sich heraus, dass die Verteilung **geringfügige Anisotropien** auf der Skala von einigen Mikrokkelvin (10^{-6} Kelvin) aufweist. Diese wurden so interpretiert, dass der Hintergrundstrahlung bereits erste Informationen von **jungen Galaxien** aufgeprägt wurden. Sie machen sich als Temperaturfluktuation in der Verteilung der Hintergrundstrahlung am Himmel bemerkbar. Weitere Einzelheiten werden im Eintrag Hintergrundstrahlung vorgestellt.

5.11 Dunkle Energie

5.11.1 Einführung: Licht & Materie

Um diesen Begriff erklären zu können, muss weiter ausgeholt werden: Betrachtet der Mensch seine Umwelt, so ist er umgeben von Licht und Materie. Die Physik entwickelt sehr überzeugende Modelle, was man sich unter Licht und Materie vorstellen muss: Licht ist elektromagnetische Strahlung. Seit der klassischen Elektrodynamik, die im 19. Jahrhundert entdeckt wurde, ist das bekannt. Mit den Methoden der Quantentheorie wurde die Quantisierung des Lichts in Photonen entdeckt. Materie hingegen ist aus äußerst kleinen Teilchen aufgebaut, den Quarks und Leptonen. Die starke Kraft hält die Quarks zusammen, so dass sie Bausteine komplexerer Teilchen werden. So bestehen Protonen und Neutronen, die Teilchen im Atomkern, aus je drei Quarks. Die Materie in unserem alltäglichen Umfeld besteht ausschließlich aus Quarks und Leptonen. Sie ist baryonisch - wie die Physiker sagen. Anmerkung: Präziser wäre es, Materie in eine hadronische und eine leptonische Form zu klassifizieren.

5.11.2 Noch eine Zutat: Dunkle Materie

Als ob diese Physik von Licht und Materie nicht schon kompliziert genug wäre, entdeckten die Astronomen die Notwendigkeit einer Materieform, die nicht (oder sehr schwach) leuchtet. Sie bekam den Namen Dunkle Materie. Anfang des 20. Jahrhunderts wurde anhand der Rotation von Galaxien erkannt, dass die leuchtende Materie (Sterne, Gas und Staub) nicht ausreicht, um das Rotationsverhalten zu erklären. Seither können Astronomen immer wieder bestätigen, dass es Dunkle Materie geben muss. Kandidaten für Dunkle Materie sind schwere Teilchen, die nicht oder kaum elektromagnetisch strahlen und nur schwach wechselwirken. Diese Teilchenklasse heißt WIMPs (engl. *weakly interacting*

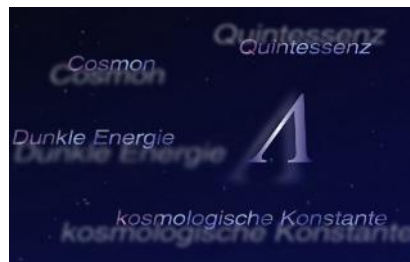


Abbildung 5.6: Λ und andere Formen Dunkler Energie.

heavy particles). Weitere Materieformen, die zur Dunklen Materie beitragen könnten, sind supersymmetrische Teilchen. Bislang wurde zwar keines gesichert nachgewiesen oder experimentell in Teilchenbeschleunigern hergestellt, aber es gibt ein paar Hinweise aus der Hochenergiephysik und Stringtheorie, dass die Supersymmetrie in der Natur eine Rolle spielt.

5.11.3 Und endlich: Dunkle Energie

Kommen wir nun über den Umweg des (halbwegs) Bekannten zum völlig Unbekannten, zur Dunklen Energie. Die Bezeichnung *Dunkle Energie* (engl. *dark energy*) wurde von dem Kosmologen *Michael S. Turner* (Universität Chicago, USA) im Jahr 1990 erfunden. Dunkle Energie meint eine Energieform im Universum, die weder baryonischer Natur ist, noch mit der Dunklen Materie identifiziert werden kann. Sie ist dunkel, weil sie sich nicht durch elektromagnetische Strahlung bemerkbar macht. Die Dunkle Energie tritt dadurch in Erscheinung, dass sie die **Dynamik des Universums** signifikant beeinflusst. Die Dunkle Energie sorgt für die kosmische Expansion! Wir wissen von der Dunklen Energie, weil die sichtbaren Objekte im Universum (Galaxien, Strahlung) die Expansion anzeigen und indirekt auf etwa Dunkles schließen lassen. Die Methoden der Astronomie erlauben es sogar, die Anteile der baryonischen und Dunklen Materie mit demjenigen der Dunklen Energie zu vergleichen. Das Resultat ist, sie mit **über zwei Dritteln** den größten Anteil ausmacht: Dunkle Energie dominiert das (späte) Universum!

5.11.4 Formen von Dunkler Energie

Die Dunkle Energie ist demnach ein wichtiger physikalischer Bestandteil der modernen kosmologischen Modelle. Es ist allerdings nicht klar, worum es sich genau bei der Dunklen Energie physikalisch handelt: Die physikalische Natur der Dunklen Energie ist unklar! Es wurden bisher verschiedene Quellen für Dunkle Energie vorgeschlagen:

kosmologische Konstante Λ

Die historisch zuerst entdeckte Form, die man im Nachhinein als Dunkle Energie bezeichnen muss, wurde von *Albert Einstein* (1879 - 1955) im Jahr 1917 vorgeschlagen. Er führte in den Feldgleichungen seiner Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) den so genannten **Lambda-Terme** (manchmal auch Λ -Glied genannt) ein. Dieses Lambda erweiterte die rechte Seite der Feldgleichung dort, wo der Energie-Impuls-Tensor steht. Dieser kosmologische Parameter beeinflusst die Dynamik des Kosmos, je nachdem ob er positiv, negativ oder null ist. Ein

negativer Wert von Λ macht sich als *kosmische Anziehung (Attraktion)* bemerkbar und lässt das Universum in sich zusammenfallen ('Anti-de-Sitter'). Dieses negative Λ wirkt also in Richtung der Gravitation. Ein positiver Wert von Λ wird Dunkle Energie genannt. Er wirkt in der Form einer Antigravitation, was man auch als *kosmische Abstoßung (Repulsion)* bezeichnet. Bei verschwindendem Λ wird die Dynamik des Kosmos nur durch die darin enthaltene Materie bestimmt. Einstein führte den Lambda-Term ein, um das damals von ihm aus ästhetischen Gründen favorisierte statische Universum physikalisch zu erklären. Der amerikanische Astronom *Edwin Hubble* fand jedoch 1929, dass die Galaxien einer Fluchtbewegung unterliegen und sich das Universum ausdehnt. Dieser Hubble-Effekt widerlegte schlagartig das Modell eines statischen Universums, so dass Einstein sein kosmologisches Lambda verwarf. Er bezeichnete diese Idee als seine 'größte Eselei'.

In der Folgezeit stellte sich jedoch heraus, dass man das kosmologische Λ nicht ohne weiteres verschwinden lassen konnte, wie besonders der belgische Kosmologe *Abbé Georges Lemaître* (1894 - 1966) erkannte. So fand es unter der Bezeichnung kosmologische Konstante Einzug in die moderne Kosmologie. Bis heute ist sie unverzichtbar! Denn auch mit Lambda-Term als Ingredienz kann man kosmologische Gleichungen finden, in denen das Universum expandiert. Die globale Beschreibung des dynamischen Kosmos gelingt in der relativistischen Kosmologie mit den Friedmann-Weltmodellen. Es handelt sich um Modell-Universen, die mathematisch gut verstanden sind. Ein Friedmann-Universum ist eine Lösung der Friedmann-Gleichung, die man aus den Feldgleichungen der ART mit dem Energie-Impuls-Tensor einer idealen Flüssigkeit plus Lambda-Term für Raumzeiten konstanter Krümmung erhält. Warum geht ein Kosmologe so vor? Die Materie im Kosmos kann man näherungsweise wie eine strömende, nicht wechselwirkende Flüssigkeit beschreiben. So folgt, dass der Energie-Impuls-Tensor einer idealen Flüssigkeit geeignet ist. Der Ansatz einer konstanten Krümmung ergibt sich aus der Erfüllung des kosmologischen Prinzips: Kein Punkt im Universum ist einem anderen gegenüber ausgezeichnet. Die Universen mit nicht verschwindendem Lambda sind Bestandteil der so genannten **Λ -Kosmologie**.

Astronomen messen den Materiegehalt des Universums und dessen Expansionsgeschwindigkeit z. B. anhand von sehr weit entfernten Sternexplosionen. Es handelt sich dabei um hochrotverschobene Supernovae (SN) vom Typ Ia, also extrem weit entfernte, explodierende Weiße Zwerge. Im Rahmen des *Supernova Cosmology Project* (SCP) wurde dabei erstmals 1998 beobachtet, dass die **Ausdehnung des Universums sogar beschleunigt** wird (*Perlmutter et al.*, publiziert 1999)! Es liegt also keine konstante Expansionsgeschwindigkeit (siehe auch Hubble-Konstante) vor, was als eine der wichtigsten Entdeckungen in der Kosmologie gewertet werden muss.

Die Sternexplosionen gestatten auch zu beurteilen, ob sich über kosmologisch gesehen sehr lange Zeiten (Mrd. Jahre!) die unterschiedlichen Energieformen im Universum zeitlich verändern. So haben die **Permanenz-Messungen der Dunklen Energie** an SN Ia ergeben, dass Einsteins kosmologische Konstante favorisiert werden muss (*Riess et al.* 2004). Sie hat einen w -Parameter von $w = -1$. Das bestätigen neuere Messungen an einer Gruppe von 24 SN Ia, die mit dem Weltraumteleskop Hubble beobachtet wurden. Fünf davon zeigt die Abbildung 5.7: die Wirtsgalaxien vor den Sternexplosionen (untere Reihe) und nach den Explosionen mit hell aufleuchtenden SN Ia (Credit: Pressemitteilung NASA/ESA, STScI, A. G. Riess, November 2006). Die neuen Supernovadaten geben sogar noch strengere Auflagen für die Dunkle Energie: sie muss schon vor neun Milliarden Jahren konstant gewesen sein. Damit erscheinen die zeitlich veränderlichen Formen Dunkler Energie nicht bevorzugt.

Diese Resultate konnten von dem aktuellen Supernova-Survey **ESSENCE** (*E*quation of



Abbildung 5.7: 5 SN Ia in verschiedenen Wirtsgalaxien, beobachtet mit HST 2006.

State: SupErNovae trace Cosmic Expansion) 2007 bestätigt werden: 60 SN Typ Ia mit einer maximalen Rotverschiebung bis $z \sim 1$ wurden analysiert. Unter der Annahme eines flachen Universums und unter Berücksichtigung der Beschränkungen für baryonische Materie folgt aus diesen Beobachtungen ebenfalls $w = -1.05$ und $\Omega_m = 0.274$ (Wood-Vasey et al. 2007, astro-ph/0701041; Miknaitis et al. 2007, astro-ph/0701043; erscheinen in ApJ). Damit ist ESSENCE konsistent mit den zuvor veröffentlichten Resultaten des *SuperNova Legacy Surveys* (SNLS, Perlmutter et al.). Kombiniert man beide Surveys so folgt: $w = -1.07$ und $\Omega_m = 0.267$. Die Beweislast für Einsteins statischen w-Parameter ($w = -1$; $w' = 0$) ist derzeit erdrückend!

Das Universum hat nach derzeitigem Kenntnisstand in der Epoche $0 < z < 1$ einen Übergang von **abgebremster Ausdehnung** in eine **beschleunigte Ausdehnung** durchlaufen. Das illustriert sehr gut die rote Kurve im Diagramm von der WMAP-Website, das unter dem Eintrag Friedmann-Weltmodell besprochen wird. Genau diesen 'kosmischen Umschwung' wollen die Supernovaforscher nachweisen. Und sie wollen noch mehr: sie würden gerne die Permanenz der Dunklen Energie auch für deutlich größere kosmologische Rotverschiebungen testen. Leider kommt den Astronomen dabei eine Eigenschaft der Supernovae Typ Ia in die Quere, aus der sie auch ihren Nutzen ziehen: die ziemlich konstante, intrinsische Helligkeit. Sie hat nämlich den Nachteil, dass SN Ia nicht beliebig weit beobachtbar sind - zumindest mit dem aktuellen Stand der Teleskoptechnologie. Derzeit ist bei einer kosmologischen Rotverschiebung von $z \sim 1.5$ Schluss! Vielleicht ist bei dieser Problematik schon eine Lösung in Sicht: Bei den (langzeitigen) Gammastrahlenausbrüchen wurden Relationen gefunden, die es erlauben könnten **GRBs als Standardkerzen** zu nutzen! Denn die so genannte *Firmani-Relation* (erklärt unter Eintrag Gamma Ray Burst) erlaubt Rückschlüsse auf z . GRBs könnten dann die SN Ia ablösen, weil sie durch ihre noch größere Leuchtkraft bis $z \sim 6$ und mehr beobachtbar sind!

Kosmologen nutzen bei diesen kosmologischen Untersuchungen nicht nur Sternexplosionen, sondern auch Beobachtungen der kosmischen Hintergrundstrahlung und der großräumigen Anordnungen der Galaxienhaufen auf der Gpc-Skala aus. Alle drei unabhängigen Methoden liefern übereinstimmende Ergebnisse und ermöglichen zusammengekommen eine

sehr genaue Messung der kosmologischen Parameter. Die Analysen der kosmologischen Modelle zeigen, dass es im Kosmos eine Dunkle Energie gibt. Die physikalische Natur des Λ -Terms ist aber nach wie vor unklar. Es wurde vorgeschlagen, dass sich die **Energiedichte des Quantenvakuums** in Form einer kosmologischen Konstante manifestiere. Verfolgt man diesen Ansatz, so findet man in den Quantenfeldtheorien eine Abhängigkeit der Vakuumenergiedichte in der vierten Potenz der Energie. Physiker nennen das eine *Ultraviolettdivergenz* oder *Ultraviolett katastrophe*, weil bei hohen Energien die Vakuumenergiedichte 'ins Unendliche wächst'. Typischerweise schneiden die Physiker deshalb die Energie bei der (klassischen) Planck-Skala, bei etwa 10^{19} GeV, ab. Die Konsequenz ist, dass die Vakuumenergiedichte endlich bleibt und einen maximalen Wert von 10^{92} g cm $^{-3}$ nicht überschreitet. Solche theoretischen Maßnahmen retten leider die Beobachtung nicht: Denn die astronomische Beobachtung liefert eine kritische Dichte von etwa 10^{-29} g cm $^{-3}$. Das heißt zwischen Theorie und Experiment liegt ein gigantischer Unterschied von etwa **120 Größenordnungen!** Das zur beobachteten, kritischen Dichte gehörige Λ ist sehr klein, aber nicht null und beträgt etwa $(10^{-3} \text{ eV})^4$!

Quintessenzen

Aus dieser Hypothese von einer Verbindung zum Quantenvakuum erwächst demnach ein fundamentales Skalenproblem, wenn man von einer kosmologischen Konstante ausgeht. Die Problematik führte auf die Idee, sich von der Konstanz (Zeitunabhängigkeit) zu verabschieden und eine **zeitabhängige Dunkle Energie** in Erwägung zu ziehen. Diese neue Form Dunkler Energie bekam auch einen neuen Namen: Quintessenz. Eine solche zeitabhängige Dunkle Energie kann besser an die Beobachtungen angepasst werden und löst auch das so genannte **Koinzidenzproblem**, nämlich dass sie im lokalen Universum gerade von der Größenordnung der gewöhnlichen und Dunklen Materie ist. Mit dieser variablen Dunklen Energie kann auch der w -Parameter andere Werte als -1 annehmen. Typische Quintessenz-Modelle liefern einen Wert von $w = -1/3$ (vergleiche Diagramm 5.8).

topologische Defekte

Eine weitere Form Dunkler Energie sind die topologischen Defekte mit einem w -Parameter von $-2/3$. Es handelt sich dabei um 'Fehlstellen', die Relikte einer vorangegangenen, spontanen Symmetriebrechung sind. In den Defekten selbst ist allerdings noch die volle Symmetrie erhalten. Bisher gibt es keinerlei Evidenz seitens astronomischer Beobachtung für topologische Defekte, aber sie können auch nicht als additive Form Dunkler Energie ausgeschlossen werden.

Phantom-Energie

Die Phantom-Energie (*Caldwell et al., 2003*) ist eine Erscheinungsform Dunkler Energie mit besonders drastischen Konsequenzen: der w -Parameter ist noch kleiner als bei der Kosmologischen Konstante und unterschreitet daher den Wert von -1 . Dann führt die Entwicklung des Universums in den Big Rip, den totalen Zerriss von allem, was sich darin befindet - von der makroskopischen bis zur subatomaren Skala! Wann sich der Big Rip ereignet, hängt vom genauen Zahlenwert des w -Parameters ab. Bei $w = -1.2$ bleiben noch etwa 50 Milliarden Jahre, demnach etwa das 10fache des jetzigen Alters der Erde... Neuste Analysen zeigen allerdings dass mit der Phantom-Energie eine Produktion ultrahochenergetischer

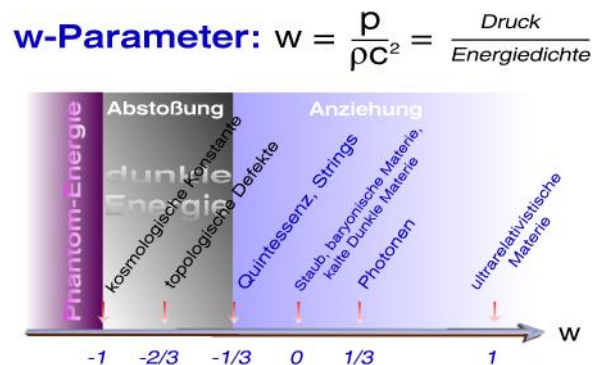


Abbildung 5.8: w-Parameter der Zustandsgleichungen verschiedener kosmischer Ingredienzen.

Teilchen einhergeht, die nicht in der kosmischen Strahlung beobachtet wurden (*Bean et al. 2005*).

Chaplygin-Gas

Das Chaplygin-Gas (siehe dort für Details) wurde bereits 1904 erfunden und 2001 als möglicher Antrieb der kosmischen Expansion vorgeschlagen (*Kamenshchik et al. 2001*). Es handelt sich um eine exotische Flüssigkeit mit einer sehr ungewöhnlichen Zustandsgleichung. Dieses Gas ist ein **Verwandlungskünstler**, weil es als Staub, Dunkle Materie oder Dunkle Energie (z. B. Quintessenz) in Erscheinung treten kann. Damit eignet es sich, um in frühen Entwicklungsepochen des Universums als Staub zu fungieren und in späten als Ersatz der Dunklen Energie. Diese Energieform ist zwar konsistent mit Beobachtungsdaten der experimentellen Kosmologie, aber sie polarisiert die Physikergemeinde aufgrund der mysteriösen Zustandsgleichung.

ohne Dunkle Energie

Die simpelste Lösung wäre, dass man etwas, was man nicht versteht, einfach verschwinden lässt. Geht's auch ohne Dunkle Energie? Ja, zumindest wird auch diese Variante diskutiert. Die Idee ist, dass die beobachtete, kosmische Expansion nicht etwa durch eine Dunkle Energie getrieben wird, sondern durch Dichteschwankungen in der Materie (*Kolb et al. 2005; astro-ph/0506534*). Wie weit dieser Vorschlag trägt ist unklar - das Gros der Kosmologen favorisiert allerdings eine Existenz der Dunklen Energie.

5.11.5 Inhalt bestimmt Zukunft

Die Abbildung oben zeigt sämtliche Materieformen, deren Existenz im Universum nachgewiesen ist oder aktuell diskutiert wird. Der w-Parameter eignet sich zur Unterscheidung und Klassifizierung der Materie anhand ihrer Zustandsgleichung.

Das Schicksal des Universums hängt also von seinem Materieinhalt (bzw. präzise formuliert von den Massen- und Energiedichten) ab. Ist genug Materie vorhanden, so gewinnt die Gravitationskraft über die expansiven Kräfte. Als Folge davon wird die Expansion irgendwann aufhören und das Universum wieder kollabieren. Dieses Szenario nennt man Big Crunch

(‘Großes Knirschen’). Es ist sogar denkbar, dass wieder ein singulärer Zustand erreicht wird und es wieder zu einem Urknall (dem Big Bang) kommt. Dieses periodische Szenario von Expansion und Kollaps nennt man **pulsierendes Universum**.

Ist jedoch zuwenig Materie vorhanden, so wird die Expansion nie aufgehalten werden können: Das Universum wird langsam auskühlen und als **kaltetes Universum** enden. Dieses Szenario kennt man unter der Bezeichnung Big Whimper (‘Großes Wimmern’). Es ist nach aktueller Einschätzung das wahrscheinlichste Ende des Kosmos.

Zwischen diesen beiden Extremen ist ein besonderer Zustand, wo ein kritischer Materieinhalt - oder bezogen auf das Volumen des Universums - eine **kritische Dichte** liegt. Rechnerisch kann man einen Wert für diese kritische Dichte tatsächlich ableiten, wenn man die bereits erwähnten Friedmann-Gleichungen untersucht. Diese folgen wiederum als Bewegungsgleichungen des Kosmos aus den Einsteinschen Feldgleichungen mit dem Ansatz der so genannten Robertson-Walker Metrik. Die kritische Dichte hängt dann wiederum - so stellt sich heraus - nur von Konstanten und der Hubble-Konstanten ab, die man mittlerweile sehr genau messen kann (aktueller Zahlenwert laut WMAP3: $H_0 = 73 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$).

5.11.6 Zusammensetzung des Kosmos

Die Kosmologen verwenden gerne dimensionslose Größen, die sie mit dem letzten Buchstaben des griechischen Alphabets Omega bezeichnen und **Dichteparameter** nennen. Omega ist gerade der Quotient von beobachtetem Materieinhalt zu kritischem Materieinhalt. Beide Größen folgen nun aus der Beobachtung: Die Hubble-Konstante bestimmt die kritische Dichte; die beobachtete Materie bestimmt sich aus der Beobachtung leuchtender Materie, nur indirekt ableitbarer Dunkler Materie und dem Anteil Dunkler Energie. Es ist in der modernen Kosmologie üblich, die einzelnen Anteile für Omega mit einem Index zu versehen, je nachdem um welche Materieform es sich handelt (siehe dazu auch unter dem Eintrag Friedmann-Weltmodelle):

- ◇ Index B oder b bestimmt den Anteil baryonischer Materie. Das ist im Prinzip die ‘gewöhnliche’ Materie, die uns umgibt, z. B. Atome.
- ◇ Index HDM steht für *Hot Dark Matter*, also heiße Dunkle Materie. Unter ‘heiß’ versteht man in diesem Zusammenhang, dass sich diese Materie im Zeitalter der Galaxienentstehung mit relativistischen Geschwindigkeiten bewegte, also Geschwindigkeiten, die vergleichbar sind mit der Vakuumlichtgeschwindigkeit. Dazu zählen beispielsweise die Neutrinos.
- ◇ Index CDM steht für *Cold Dark Matter*, also kalte Dunkle Materie. ‘Kalt’ bedeutet entsprechend, dass sich die Materie nicht-relativistisch bewegte, als die Galaxien entstanden.
- ◇ Index m steht für Materie (engl. *matter*). Kosmologen fassen hier die Anteile baryonischer, kalter Dunkler und heißer Dunkler Materie zusammen. Das ist die am häufigsten zu lesende Variante.
- ◇ Schließlich steht der griechische Großbuchstabe Lambda Λ als Index für den Anteil der mysteriösen Dunklen Energie, die sich in ihrer Natur fundamental von den anderen Konstituenten der Materiedichte unterscheidet.

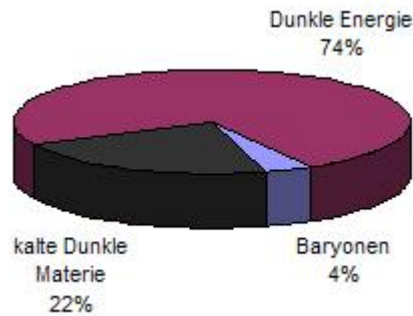


Abbildung 5.9: Anteile der Energieformen im Universum.

Die Messergebnisse für die Dichteparameter der einzelnen Spezies wurden vor allem durch Beobachtungen der kosmischen Hintergrundstrahlung (*Cosmic Microwave Background*, CMB) von Ballon-Experimenten (BOOMERANG, MAXIMA) und Infrarot- bzw. Mikrowellensatelliten (COBE, WMAP, künftig PLANCK) gemacht. Die Daten von weit entfernten Supernovae Typ Ia sind unabhängige Messobjekte. Hintergrundstrahlung und SN Ia zusammen ergeben sehr präzise Messresultate und eine sehr genaue Vorstellung von der Zusammensetzung des Universums. Die **Beiträge zu 'kosmischen Materieformen'** wurden durch aktuelle Messungen des Mikrowellen-Satelliten WMAP korrigiert zu (Stand März 2006, Quelle *WMAP Homepage*; siehe Abbildung 5.9)

- ◇ gewöhnliche Materie (Baryonen): 4%
- ◇ Heiße Dunkle Materie (HDM): irrelevant (in Spuren),
- ◇ Kalte Dunkle Materie (CDM): 22%,
- ◇ Dunkle Energie (Λ): 74%.

Der Anteil der Dunklen Energie dominiert eindeutig! Auch Beobachtungen des so genannten 'Lyman- α -Waldes' - charakteristische Absorptionslinien von Wasserstoff - im Spektrum von Quasaren, die schweren Galaxienhaufen, die als Gravitationslinsen fungieren und die Supernovae vom Typ Ia bestätigen die dominante Rolle der kosmologischen Konstante. Die einzelnen Dichteparameter kann man aufsummieren und laut Friedmannscher Theorie muss diese Summe gleich 1 sein. Das beobachtete Ergebnis liegt nahe 1, so dass der Dichteparameter für die Krümmung (Omega mit Index k) verschwinden muss. Anders gesagt: Wir leben also in einem **flachen Universum**, das von einer **Lambda-CDM Kosmologie** bestimmt wird (Kürzel *flat Λ CDM*). In einem flachen Kosmos gelten auch auf der großen Skala die Sätze der ebenen Geometrie, die *Euklidische Geometrie*.

5.11.7 Streuung zerstreut die Zuversicht?

Anfang 2004 kamen jedoch Zweifel an den Anteilen der kosmischen Ingredienzen auf, weil der **Sunyaev-Zel'dovich Effekt** einen stärkeren Einfluss haben könnte, als bislang angenommen. In diesem Streuprozess werden die CMB-Photonen an heißen Elektronen des Clustergases (dem heißen Umgebungsgas der Galaxienhaufen) gestreut. Diese Compton-Streuung verfälscht dann die Informationen, die die Hintergrundstrahlung ins lokale

Universum bis zum irdischen Beobachter trägt. Es ist allerdings nicht anzunehmen, dass die Streuung völlig das Konzept der Dunklen Energie zunichte macht! Die genauen Einflüsse müssen jedoch geprüft werden. Das ist aktuelle kosmologische Forschung.

5.11.8 Resümee

Die Natur der Dunklen Energie ist nach wie vor rätselhaft. Erst assoziierten die Kosmologen mit ihr (wie beschrieben) das Quantenvakuum. Physikalisch gesehen ist das eine brillante Idee, denn das 'fein verteilte, überall anzutreffende Nichts' würde sich in diesem Szenario erst auf den ganz großen, kosmologischen Distanzen bemerkbar machen und als dynamisch relevant für den Kosmos entpuppen. Auf der kleinen Skala, z. B. in unserem Sonnensystem, gibt es das Quantenvakuum natürlich auch, aber die Längenskala ist zu klein, als dass das Quantenvakuum dynamisch relevant für das Sonnensystem und die Bewegung der Planeten wäre. (Aus dem gleichen Grund darf man bei der Beschreibung der Planeten mit den Kepler-Gesetzen die Expansion des Universums getrost vernachlässigen!) Das Quantenvakuum darf wohl als die bislang beste Hypothese für die physikalische Natur der Dunklen Energie gewertet werden. Leider führt diese qualitativ hervorragende Idee in ein quantitatives Desaster in Form eines Skalenproblems von 120 Größenordnungen.

Die Bezeichnung *Dunkle Energie* ist wohl etwas irreführend: Man kann nicht argumentieren, dass diese Energieform in jedem Fall gemäß des Masse-Energie-Äquivalents $E = mc^2$ den Raum krümmt. Nur für ein negatives Lambda hat man eine 'kosmische Anziehung' in Richtung der Gravitation. Die Beobachtungen sprechen jedoch für ein positives Λ , für die Ausdehnung des Universums.

Die Dunkle Energie kann jedoch sehr unterschiedliche Erscheinungsformen haben: als Cosmon (Wetterich, Universität Heidelberg, 1987), als Radion im Ekpyrotischen Modell bzw. Zyklischen Universum (Khoury et al. 2001; Steinhardt & Turok 2001), als Spintessenz (Boyle et al., 2001), als kompaktifizierte Extradimensionen (Giddings, 2003) oder als Phantom-Energie (Caldwell et al., 2003). Alle diese Modelle involvieren ein Skalarfeld, das an die relativistische Gravitation koppelt, d. h. Gravitation und Skalarfeld wechselwirken miteinander. Welches Modell und welche Interpretation für unser Universum tatsächlich zutrifft, müssen Messdaten zeigen. Bisher sind alle genannten Spekulationen im Bereich des Möglichen - wenn auch die ersten Permanenzmessungen an Dunkler Energie Einsteins konstantes Λ nahe legen (Wang & Tegmark 2004, astro-ph/0403292; Riess et al. 2004, astro-ph/0402512; ESSENCE, s. o.).

2006 wurde die Konstanz der Dunklen Energie erneut erschüttert: aktuelle Messresultate anhand von weit entfernten Gammastrahlenausbrüchen (GRBs) legen nahe, dass die Dunkle Energie doch variabel sein solle (Schaefer et al., Nature online, 2006). Dieses Resultat basiert auf 52 GRBs, die entstanden, als sehr massereiche Sterne explodierten und zu einem stellaren Schwarzen Loch wurden. Die Explosionen ereigneten sich, als der Kosmos rund 1.5 Mrd. Jahre alt war und wurden aufgrund ihrer hohen Entfernung erst vor kurzem mit Satelliten beobachtet. Der charakteristische Verlauf der Lichtkurve, also die Abnahme der Helligkeit mit der Zeit, sowie die Maximalhelligkeit des Ausbruchs wiesen dabei auf eine zeitabhängige Dunkle Energie hin. Nach Einschätzung der Fachkollegen ist Schaefers Resultat strittig, weil die Explosionen der ersten Sterne im Kosmos und ihre stellare Umgebung noch nicht gut genug verstanden sind. Weiterhin ist problematisch, dass Schaefer zur Auswertung der Daten sowohl sehr weit entfernte, als auch relativ nahe GRBs benutzte - eine Pauschalbehandlung, die vielleicht nicht in Ordnung ist.

Die vielfältigen Ergebnisse zeigen, dass Eigenschaften der Dunklen Energie und ihr Einfluss

auf das Universum kontrovers diskutiert werden und weiterhin spannende Neuigkeiten und Überraschungen zu erwarten sind.

5.11.9 Dunkle Energie in der Stellarphysik

Das Konzept der Dunklen Energie wurde - der Kosmologie entlehnt - im Jahr 2001 auch für einen neuen Typus kompakter Objekte übernommen: Gravasterne. Sie haben im Innern an sich ein Vakuum, das jedoch ein Reservoir von Dunkler Energie birgt. Es handelt sich dabei um ein **gravitatives Analog zur Bose-Einstein-Kondensation**. Diese ('de Sitter'-) Blase stellt nach außen einen (isotropen) Druck zur Verfügung, der eine dünne Materieschicht stabilisiert. Die Schicht besteht aus ultra-kalter Materie, die als relativistische, ideale Flüssigkeit beschrieben werden kann. Im Gravitationskollaps eines massereichen Vorläufersterns oder eines Sternhaufens, könnte sich diese Materiekonfiguration ausbilden, ohne dass ein Horizont entsteht: Die Entweichgeschwindigkeit bleibt bei Gravasternen **unterhalb der Lichtgeschwindigkeit**. Sie sind nicht so schwarz wie die Schwarzen Löcher. Ob es Gravasterne und Schwarze Löcher tatsächlich in der Natur gibt, wie es astrophysikalische Modelle vorsehen, muss noch gezeigt werden!

Wenn es wirklich Gravasterne geben sollte und unser Universum nach aktuellen Messungen zum größten Teil auch aus Dunkler Energie besteht, so haben wir es grundsätzlich in unserem Universum mit einer Substanz zu tun, die äußerst rätselhaft ist. Diese seltsame Energieform bestimmt demnach im Wesentlichen die Entwicklung des Universums und damit auch unser Schicksal!

5.11.10 Jagd auf Dunkle Energie mit eRosita

Um dem Geheimnis der Dunklen Energie mit astronomischen Beobachtungen auf die Spur zu kommen, entwickelt das Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik zusammen mit weiteren Partnern aus Wissenschaft und Industrie ein neues Röntgenteleskop. Dieses Teleskop namens eRosita (engl. Akronym für *extended Roentgen Survey with an Imaging Telescope Array*) ist der Nachfolger der erfolgreichen ROSAT-Mission und wird voraussichtlich 2011 starten. Dieses Instrument kombiniert in idealer Weise Sammelfläche, Gesichtsfeld und Auflösungsvermögen und wird neue Maßstäbe in der Röntgenastronomie setzen. Zur Analyse der Dunklen Energie wird die Röntgenstrahlung von Galaxienhaufen ausgewertet (siehe dazu Urknall, Abschnitt '5. Zeuge').

5.11.11 Fazit

Die moderne, relativistische Kosmologie bietet gute Ansätze und Interpretationen für die Dunkle Energie. Die astronomischen Beobachtungen werden weiterhin Beschränkungen auferlegen, die uns nach und nach der Lösung dieses Rätsels näher bringen werden. Es ist nicht untertrieben zu sagen, dass die Dunkle Energie eines der größten Geheimnisse der Physik ist.

Expansion hin oder her - schließen wir die Diskussion der Dunklen Energie mit ihrer geringen praktischen Bedeutung:

If the universe is expanding, why can't I find a parking space?
Übersetzung: 'Wenn das Universum expandiert, warum kann ich keinen Parkplatz finden?'
(Woody Allen)

5.11.12 Weitere Informationen

- ◇ Vortrag: Einsteins Universum - Das Geheimnis der Dunklen Energie, November 2005
- ◇ eRosita-Website am MPE

5.12 Dunkle Materie

Unter dieser Sammelbezeichnung versteht man jede Materieform im Universum, die nur sehr schwach leuchtet, so dass man sie schwierig mit herkömmlichen Methoden der Astronomie beobachten kann. Im engeren Sinne meinen die Astronomen sogar Materie, die gar nicht mit elektromagnetischer Strahlung wechselwirkt und damit eine völlig andere Materieform darstellt, als die, die uns umgibt und aus der wir selbst bestehen.

5.12.1 Weshalb denkt man sich sowas aus?

Motiviert ist die Dunkle Materie (engl. *dark matter*, DM) durch die rätselhaften astronomischen Messdaten in der Dynamik von Galaxien und Galaxienhaufen. Schon 1932 beobachtete *Jan Hendrik Oort* Rotationsgeschwindigkeiten von Sternen in der Milchstraße und spekuliert über die Existenz von 'nebulöser, dunkler Materie' (*Oort, J.H.*, Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands 6, 249, 1932). Auch *Fritz Zwicky* stellte 1933 zusätzliche Beschleunigungen der Bewegung von Galaxien innerhalb von Galaxienhaufen fest (*Zwicky, Fritz*, Helv. Phys. Acta 110, 6, 1933). Innerhalb einer Galaxie, z. B. in der Kinematik der rotierenden, galaktischen Scheibe, gab es ebenfalls seltsame Abweichungen. So bemerkten Astronomen Anfang der 1980er Jahre, dass die Rotationskurven der galaktischen Scheibe in vielen Galaxien ein anomales Profil zeigen (*Bosma, A.*, AJ 86, 1791, 1981; *Rubin et al.* ApJ 261, 439, 1982): sie fallen nach außen zu größeren Radien gar nicht ab, wie man es mit der Newtonschen Gravitation erwarten würde. Die heute favorisierte Lösung besteht darin, dass neben der sichtbaren, leuchtenden Materie die Existenz einer zusätzlichen Materieform, eben der **Dunklen Materie**, gefordert wird. Sie erklärt die erreichten Geschwindigkeiten der Sterne und Gaswolken in der Galaxie (die so genannte *Geschwindigkeitsdispersion*). In Galaxienhaufen machen die sichtbaren Sterne nur 1% der gesamten Haufenmasse aus, etwa 90% liegen in Form der Dunklen Materie vor, der Rest ist intergalaktisches Gas. Die Dunkle Materie könnte das bekannte Missing-Mass-Problem lösen.

Auch auf der großen kosmologischen Skala (engl. *large scale structure*, LSS) bestimmt die Dunkle Materie die Dynamik. Vor allem dominiert jedoch die Dunkle Energie (engl. *dark energy*, DE) die Kosmodynamik: sie sorgt durch ihren antigravitativen Einfluss für die Expansion des Universums.

5.12.2 Physikalische Natur der Dunklen Materie

Aber die Natur der Dunklen Materie ist Gegenstand aktueller Forschung. Astronomen unterschieden anfangs die *baryonische* von der *nicht-baryonischen* Dunklen Materie. Baryonische Materie ist aus Baryonen, also im Prinzip **Quarks** zusammengesetzt. Im Gegensatz zu den Mesonen, die aus Quark und zugehörigem Antiquark (siehe Antimaterie) bestehen, sind die Baryonen (bestehend aus drei Quarks) recht stabil und langlebig. Die bekanntesten Baryonen sind das Proton und das Neutron, die man unter der Bezeichnung Nukleonen subsumiert. Sie konstituieren die Atomkerne der Elemente. Daneben spielen die

Elektronen eine vergleichbar wichtige Rolle. Sie gehören zur Klasse der Leptonen, weisen keine weitere Substruktur auf und sind punktförmig. Die uns umgebende Materie wird durch das Standardmodell der Teilchenphysik sehr gut beschrieben.

5.12.3 Baryonische Dunkle Materie

Zur baryonischen Dunklen Materie zählt man zum Beispiel Planeten. Schon in unserem Sonnensystem sind von der Sonne weit entfernte Planeten und Zwergplaneten schwer zu entdecken, wie die jüngsten Fälle zeigen. Deutlich komplizierter wird es wenn die Planeten um andere Sterne kreisen. Solche extrasolaren Planeten werden vielfach übersehen, und Astronomen kennen aktuell etwa 200 Stück.

Auch die Braunen Zwerge zählen zur baryonischen Dunklen Materie. Diese intermediären Objekte zwischen Planet und Stern leuchten besonders kräftig im Infrarot. Vermutlich ist die Zahl der Planeten und Braunen Zwerge aber zu gering, als dass sie einen entscheidenden Anteil an der gesamten (baryonischen und nicht-baryonischen) Dunklen Materie hätten.

Im Halo von Galaxien befinden sich Objekte, die man MACHOs, *Massive Compact Halo Objects*, nennt. Sie sorgen dafür, dass es regelmäßig zu Mikrolinsen-Ereignissen (engl. *microlensing events*) kommt. Dabei zieht ein MACHO direkt auf der Sichtlinie vor einem Stern im Halo vorbei und sorgt durch einen Gravitationslinseneffekt für einen kurzzeitigen Helligkeitsanstieg des Sterns. Die Lichtkurve ist symmetrisch und kann relativ einfach von anderen veränderlichen Sternen unterschieden werden. Als MACHO-Kandidaten kommen die bereits genannten Vertreter der baryonischen Dunklen Materie in Frage: Braune Zwerge, Planeten oder leuchtschwache M-Sterne (*M-Zwerge*, *M* meint den Spektraltyp).

Natürlich sind auch die Schwarzen Löcher im Kosmos ein großes Reservoir Dunkler Materie. Hinter den Ereignishorizonten aller Schwarzen Löcher des Universums befinden sich vermutlich viele Trilliarden Sonnenmassen. Man zählt sie zwar zur baryonischen Materie hinzu, die Natur dieser kompakten Masseform ist im Detail jedoch völlig unklar: Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie besagt, dass die Masse eines Schwarzen Loches in einer intrinsischen punkt- (Schwarzschild-Lösung) oder ringförmigen (Kerr-Lösung) Singularität steckt!

5.12.4 Nicht-baryonische Dunkle Materie

Neutrinos & WIMPs

Nicht-baryonische Materie ist eher exotischer Natur und Gegenstand der Teilchenphysik. Eigentlich meint der Begriff Dunkle Materie im engeren Sinne nur die nicht-baryonische Form. Die Physiker zählen viele Elementarteilchen zu dieser mysteriösen Materieform, und zwar Teilchen, die sie bereits nachgewiesen haben oder die sie im Rahmen eines theoretischen Modells fordern. Populär sind beispielsweise die Neutrinos, von denen man mittlerweile sicher weiß, dass sie eine endliche Masse haben. Allerdings sind die Neutrinomassen äußerst gering, wie die Superkamiokande-Experimente in Japan gezeigt haben. Neutrinos sind zwar extrem zahlreich im Kosmos, doch tragen sie insgesamt nicht signifikant zur nicht-baryonischen Dunklen Materie bei (vergleiche aktuelle WMAP-Daten). Da sind die großen Brüder der schwach wechselwirkenden Neutrinos schon viel interessanter, nämlich die ebenfalls schwach wechselwirkenden WIMPs (engl. Akronym für *Weakly Interacting Massive Particles*, also schwach wechselwirkende, massive Teilchen).

SUSY-Kandidaten

Eine populäre Theorie der Elementarteilchenphysik und der Stringtheorien ist die **Supersymmetrie** (SUSY). Die SUSY sagt einen ganzen 'Zoo' neuer Teilchen voraus! Sie werden übersichtlich mittels Quantenzahlen (Spin, Ladung etc.) sortiert. Zu den bekannten Teilchen des Standardmodells kommen neue Teilchen, die so genannten **supersymmetrischen Partner** hinzu. So postulieren die SUSY-Theoretiker beispielsweise das *Photino* als supersymmetrischen Partner des Photons oder das *Neutralino* als Partner für das Neutrino. Es gibt viele weitere Superpartner zu bereits verifizierten Teilchen des Standardmodells. Allerdings gibt es bisher **für keines dieser SUSY-Teilchen experimentelle Evidenz**. Besonders interessant als Kandidat für die nicht-baryonische Dunkle Materie ist ein SUSY-Teilchen, das Neutralino, das bei diversen astronomischen Beobachtungen in Erwägung gezogen wird. Die Hinweise darauf sind jedoch recht schwach.

Weitere Kandidaten

Das **Axion** ist ein weiterer Kandidat und wurde aus einer Brechung der *Peccei-Quinn-Symmetrie* der Lagrangedichte der Quantenchromodynamik als massives Goldstone-Boson abgeleitet. Es weist vermutlich eine sehr geringe Masse von 10^{-5} eV auf und ist ein **CDM-Kandidat**, der bislang vergeblich gesucht wurde.

5.12.5 kalte und heiße Dunkle Materie

Es gibt eine weitere Nomenklatur für Dunkle Materie: Kosmologen unterscheiden heiße Dunkle Materie (engl. *Hot Dark Matter*, **HDM**) und kalte Dunkle Materie (engl. *Cold Dark Matter*, **CDM**). 'Heiß' bedeutet, dass sich der Kandidat im Zeitalter der Galaxienentstehung mit relativistischen Geschwindigkeiten bewegte, also Geschwindigkeiten, die vergleichbar sind mit der Lichtgeschwindigkeit; 'kalt' bedeutet entsprechend, dass er sich nicht-relativistisch bewegte. Ein Beispiel für die HDM sind die Neutrinos.

5.12.6 Eine Welt ohne Dunkle Materie?

Es gibt auch alternative Modelle, die ohne Dunkle Materie auskommen. Eine solche Theorie ist **MOND** (und deren relativistische Erweiterung TeVeS), die jedoch auch eine alternative Gravitationstheorie neben der Einsteinschen Theorie darstellt. MOND ist ein unkonventioneller Ansatz. Die meisten Astrophysiker favorisieren die ART mit Dunkle Materie.

5.12.7 3D-Kartographie der Dunklen Materie

Die Existenz der Dunklen Materie wird durch aktuelle Beobachtungen gefestigt. So hat ein Team internationaler Astronomen unter Beteiligung des MPEs die dreidimensionale Verteilung der Dunklen Materie in einem Himmelsausschnitt bestimmt (*Massey et al.* Nature 445, 286, 2007).

Die Astronomen wählten für diese Analyse ein sehr gut untersuchtes Himmelsareal, das **COSMOS-Feld**, aus. COSMOS steht für *Cosmic Evolution Survey*. Hier führt eine große Kollaboration internationaler Astronomen Tiefenfeldbeobachtungen in ganz unterschiedlichen Spektralbereichen durch. Im COSMOS-Feld haben etwa 500000 Galaxien Platz - das ist der größte Volumen, das Astronomen bislang analysiert haben!

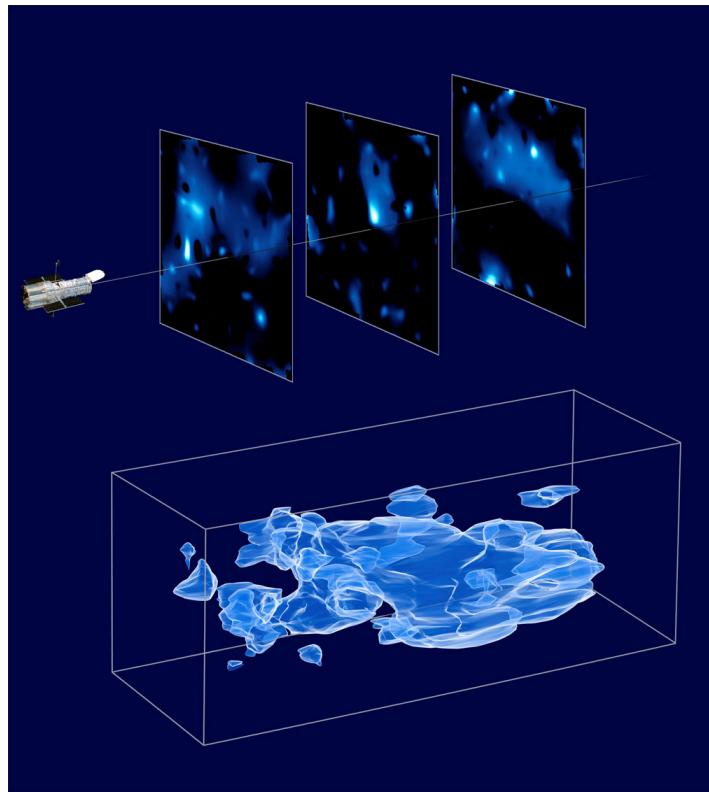


Abbildung 5.10: 3D-Karte der Dunklen Materie in einem Himmelsausschnitt.

Zur Kartographierung der Dunklen Materie nutzten die Astronomen den **Gravitationslinseneffekt** aus: durch den Einfluss von normaler baryonischer Materie und Dunkler Materie wird Licht von Hintergrundquellen abgelenkt. Auf diese Weise verrät sich die Dunkle Materie indirekt. Der Gravitationslinseneffekt wurde im Himmelsfeld mit dem Weltraumteleskop Hubble (HST) bestimmt. Um nun nur den Anteil der Dunklen Materie zu bestimmen, muss der Einfluss der normalen Materie herausgerechnet werden. Das gelingt dadurch, dass zusätzlich die Röntgendaten im COSMOS-Feld benutzt werden, die mit dem europäischen Röntgenteleskop XMM-Newton gesammelt wurden (*Hasinger et al.* ApJS COSMOS Special Issue, 2007). Die Röntgenstrahlung stammt gerade von heißem Gas, sodass aus den Röntgendaten direkt die normale, baryonische Materie bestimmt werden kann. Nun zieht man die Verteilung der normalen Materie (XMM-Daten) von der Verteilung der normalen plus Dunklen Materie (HST-Daten) ab, und findet die dreidimensionale Verteilung der Dunklen Materie, wie sie in der Abbildung 5.10 dargestellt wird (Credit: NASA/ESA, *Massey, CalTech; Finoguenov, MPE*). Von links nach rechts nimmt die kosmologische Rotverschiebung zu, so dass rechts weiter entfernte Strukturen zu sehen sind, die entsprechend zu früheren Zeiten im Universum vorgeherrscht haben. Zu früheren kosmologischen Epochen (im Bild rechts) war die Dunkle Materie relativ gleichmäßig verteilt. Im Laufe der Entwicklung des Universums bildeten sich jedoch durch die Wirkung der Gravitation **Klumpen aus Dunkler Materie** - sind im Bild links gut sichtbar. Die Astronomen sehen durch diese Beobachtungen die Modelle der kosmologischen Strukturbildung bestätigt. Denn in den konzentrierten Bereichen von Dunkler Materie sammelte sich auch die normale Materie. Schließlich entstanden daraus die Galaxien und Galaxienhaufen. Beobachtungen wie diese helfen demnach zu verstehen, wie sich das Universum entwickelt und welche Rolle dabei die Dunkle Materie gespielt hat.

5.12.8 Galaktischer Gasdiebstahl: Die Großen sind die Bösen

Unser heimischer Galaxienhaufen, die Lokale Gruppe, wird dominiert von der Milchstraße und der Andromedagalaxie M31, weil sie am meisten auf die Waage bringen. Doch es gibt auch **kleine Zwerggalaxien**, die die massereichen Galaxien umkreisen wie Bienen den Honig. Drei dieser kleinen Begleitgalaxien sind *Draco*, *Ursa Minor* und *Andromeda IX*, die allesamt extrem leuchtschwach sind. Erst 2006 wurden neue Zwerggalaxien dieser Gattung (engl. *dwarf spheroidals*, dSphs) entdeckt (*Belokurov et al.* 2006; *Zucker et al.* 2006). Einige von ihnen sind uns so nah wie die Magellanschen Wolken (~ 50 kpc), aber bei weitem nicht so hell. Seltsamerweise werden diese 'dunklen Minigalaxien' von Dunkler Materie dominiert. Sie enthalten kaum normales, leuchtendes Gas. Woher kommt das?

Einen wichtigen Beitrag zur Lösung dieser Frage haben neue **Simulationen der Dynamik in Galaxienhaufen** geliefert (*Mayer et al.* Nature 445, 738, 2007; astro-ph/0702495). Sie demonstrieren, dass die Zwerggalaxien nicht immer so dunkel waren. Auch die Minigalaxien waren vor langer Zeit reich an leuchtendem Gas. Doch ihnen wurde zum Verhängnis, dass sie in die Nähe größerer Galaxien (wie Milchstraße und Andromeda) kamen. Vor etwa zehn Milliarden Jahren verloren sie einen großen Anteil der baryonischen, leuchtenden Materie durch die **Gezeitenwechselwirkung** mit den großen Nachbargalaxien. Dabei kam den Galaxienriesen die *kosmische Ultraviolett-Hintergrundstrahlung* zu Hilfe: Sie heizte das Gas in den Zwerggalaxien so sehr auf, dass es nur locker gebunden und leicht zu stibitzen war. Bei der Dunklen Materie blieb die UV-Strahlung wirkungslos, sodass die Dunkle Materie in den Zwergen verblieb. Die Quelle der UV-Hintergrundstrahlung sind Quasare und massereiche,

jungen Sterne (*Haardt & Madau* 1996). Ohne Gas, keine Sterne - Deshalb stoppte vor etwa 10 Mrd. Jahren auch Sternentstehung in Zwerggalaxien. Was heute noch sichtbar ist, ist eine kleine Ansammlung von Sternen (*stellare Komponente*), die eingebettet ist in einen Halo Dunkler Materie.

Die Vorhersage der Simulationen (N-Körper plus SPH) ist: *alle* massereichen Galaxien sollten von ein paar Satellitengalaxien umkreist werden, die dominiert werden von Dunkler Materie. Viele Zwerggalaxien werden noch vermisst. Dieses **Missing-Satellites-Problem** (*Moore et al.* 1999) könnte durch die Existenz einiger dieser dunklen Zwerggalaxien gelöst werden. Der Computer hat uns so gezeigt, wie aus kleinen Strahlemännern unglückselige Schattengestalten werden.

5.12.9 Unbekannter Goliath

Die dominante Rolle in der Kosmologie spielt die **Dunkle Energie**. Über zwei Drittel macht ihren Anteil an den kosmischen Energieformen aus. Die uns vertraute, gewöhnliche (baryonische) Materie, bestehend vor allem aus Protonen und Neutronen, ist mit einem Anteil von nur 4% eindeutig schwächer vertreten und eher ein fast irrelevanter Nebeneffekt. Frei nach Astrophysiker Harald Lesch, Universitätssternwarte München: '*Wir sind ein Dreckeffekt!*' Lassen wir den kosmischen Staubsauger lieber in der galaktischen Abstellkammer.

Kontakt

Dr. Andreas Müller

Technische Universität München (TUM)
Exzellenzcluster Universe
Boltzmannstraße 2
D-85748 Garching
Germany

<http://www.universe-cluster.de>

andreas.mueller@universe-cluster.de

+49 (0)89 - 35831 - 71 - 04