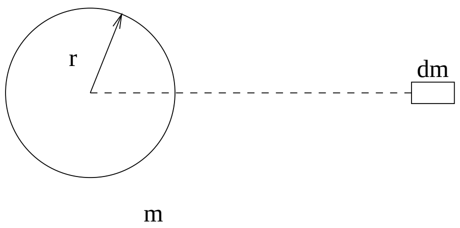
10 Astrophysik und Kosmologie

10.1 Sterne und Sternentwicklung

Sterne entstehen aus Ansammlungen von Wasserstoff im Weltraum, die sich durch die eigene Schwerkraft zusammenziehen. Dabei wird Gravitationsbindungsenergie frei, die den Stern aufheizt. Wir betrachten die Masse dm, die aus dem Unendlichen auf die Masse m, Radius r gebracht wird:



$dV = -\gamma\frac{mdm}{r} = -dE_B$ freiwerdende Bindungsenergie. Wir rechnen sehr vereinfacht mit einer konstant bleibenden Dichte ϱ:
$m = \varrho\frac{4\pi}{3}r^3$
$\Rightarrow r = \left(\frac{3}{4\pi}\frac{m}{\varrho}\right)^{\frac{1}{3}}$
$\Rightarrow dE_B = \gamma\sqrt[3]{\frac{4\pi\varrho}{3}}m^{\frac{2}{3}}dm$

Bei der Formation eines Sterns der Masse M und des Radius r wird also die Bindungsenergie

$$\underline{E_B} = \int_0^M dE_B = \gamma\sqrt[3]{\frac{4\pi\varrho}{3}}\int_0^M m^{\frac{2}{3}}dm = \gamma\sqrt[3]{\frac{4\pi\varrho}{3}}\frac{3}{5}M^{\frac{5}{3}} = \underline{\frac{3}{5}\frac{M^2}{R}} \text{ frei.}$$

Im Fall der Sonne sind das etwa $E_B = 4 \cdot 10^{41}J$. Das entspricht der Energieproduktion der Sonne von einigen Millionen Jahren. Da die Sonne aber ein Alter von ca. $5 \cdot 10^9$Jahren hat, ist die Gravitationsenergie nicht die Quelle der Sonnenenergie!

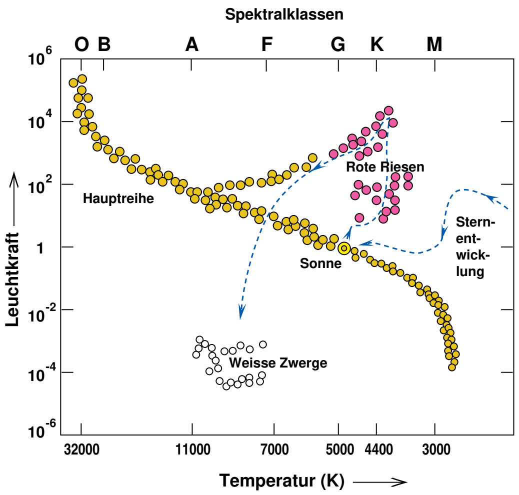
Für Wasserstoffansammlungen mit $m \gtrsim 10^{-2}M_\odot$ (Sonnenmasse $M_\odot = 2 \cdot 10^{30}kg$) reicht die Temperaturerhöhung im Sterninneren, durch die freiwerdende Bindungsenergie, um die Fusion von Wasserstoff zu Helium in Gang zu setzen. Der Jupiter ($m \approx 2 \cdot 10^{27}kg$) wäre fast zum Stern geworden!

Die hohe Temperatur, die durch die Kernfusion in aufrechterhalten wird, baut einen hohen Druck auf, der mit dem Gravitationsdruck im Gleichgewicht steht. Näherungsweise kann man den Druck nach der idealen Gasgleichung berechnen $pV = nRT$. Für den Kern der Sonne erhält man $p \approx 2 \cdot 10^{15}Pa = 2 \cdot 10^{10}atm$.

Sterne verbringen die meiste Zeit ihres Daseins damit Wasserstoff in Helium umzuwandeln. Je massereicher ein Stern ist, desto höher ist die Temperatur im Inneren. Eine höhere Temperatur bedeutet aber, dass die Kernfusion sehr viel schneller abläuft, weil auf Grund der Maxwell-Boltzmann-Verteilung viel mehr Protonen genügend hohe kinetische Energie haben, um die Coulomb-Abstoßung zu überwinden. Massenreiche Sterne haben eine größere Leuchtkraft und ein kürzeres Leben, weil sie ihren Wasserstoff schneller verbrauchen. Näherungsweise gilt:

$$\frac{L}{L_\odot} \approx \left(\frac{M}{M_\odot}\right)^4$$
normiert auf die Parameter der Sonne $\odot$

Sterne werden in einem Hertzsprung-Russel-Diagramm klassifiziert. Die Leuchtkraft eines Sternes, hier bezogen auf die Sonne, wird aufgetragen über die Oberflächentemperatur, die aus der beobachteten Spektralklasse ermittelt wird. Sterne strahlen in guter Näherung wie schwarze Körper.



y95366Mnich

Die allermeisten Sterne befinden sich auf der sogenannten Hauptreihe, wie z.B. die Sonne. Das sind die Sterne, die Wasserstoff in Helium verwandeln.

$$4\,{}^{1}_{1}H \rightarrow {}^{4}_{2}He + 2e^{+} + 2\nu_{e}$$

Sie befinden sich in einem relativ stabilen Gleichgewicht. Die Hauptreihe wird begrenzt einerseits, weil bei zu leichten Objekten wie dem Jupiter die Kernfusion nicht in Gang gesetzt werden kann. Auf der anderen Seite verbrauchen massive Sterne ihren Wasserstoffvorrat sehr schnell und haben nur eine sehr kurze Lebensdauer.

Was passiert nun, wenn ein Stern seinen H-Vorrat aufgebraucht hat (Genauer: wenn im Inneren des Sterns die H-Konzentration unter einen kritischen Wert gefallen ist)?

Das Innere des Sterns zieht sich zusammen, weil der thermische Druck nicht mehr aufrecht erhalten werden kann. Dabei erhöht sich die Temperatur im Inneren (Gravitation!), bis es zur Fusion von Heliumkernen kommt und sich ein neues Gleichgewicht einstellt:

$${}^{4}_{2}He + {}^{4}_{2}He \rightleftarrows {}^{8}_{4}Be \qquad {}^{8}_{4}Be + {}^{4}_{2}He \rightarrow {}^{12}_{6}C$$

(${}^{8}_{4}Be$ ist sehr instabil, es steht mit ${}^{4}_{2}He$ im thermonuklearen Gleichgewicht)

Dieses neue Gleichgewicht im Sterninneren, bei erhöhtem Druck und Dichte, erfordert eine höhere Energieproduktion. Der erhöhte Strahlungsdruck führt dazu, dass sich die äußere, noch sehr wasserstoffreiche Hülle aufbläht und dabei abkühlt. Der Stern wird zum <u>roten Riesen</u>. Z.B. wird die Sonne in dieser Phase in ca. $5 \cdot 10^{9}$Jahren die inneren Planeten verschlucken und sich etwa bis zur Erdbahn ausdehnen! Rote Riesen verlieren auch einen großen Teil ihrer Masse in Form von Wasserstoff, der in den Weltraum abgegeben wird. Das Heliumbrennen ist nicht so ergiebig. Deshalb, und durch die höhere Energieproduktion, dauert das Heliumbrennen wesentlich kürzer als das Wasserstoffbrennen.

Nach der Heliumfusion können weitere Phasen folgen, in denen schwerere Elemente erzeugt werden z.B.

$${}^{4}_{2}He + {}^{12}_{6}C \rightarrow {}^{16}_{8}O \qquad {}^{12}_{6}C + {}^{12}_{6}C \rightarrow {}^{20}_{10}Ne + {}^{4}_{2}He$$
$$\searrow {}^{23}_{11}Na + p$$
$$\vdots$$
$${}^{16}_{8}O + {}^{16}_{8}O \rightarrow {}^{28}_{14}Si + {}^{4}_{2}He + \ldots$$

Das geht so lange gut, bis der Stern beim Eisen $^{56}_{26}Fe$ angekommen ist. Schwerere Kerne können zwar noch durch Einfang von Protonen, Neutronen, α-Teilchen etc. gebildet werden, das dem Stern allerdings Energie entzieht.

Was passiert nun, wenn der Stern keine Energie mehr durch Kernfusion gewinnen kann? Das Schicksal ist durch die Masse bestimmt, die der Stern auf der Hauptreihe hatte.

I) $\approx 0,5 - 8M_\odot$: Die Kernfusion stoppt bereits beim Kohlenstoff und Sauerstoff. Dieser CO-Stern zieht sich zusammen, erhitzt sich und stößt seine äußeren Schichten ab. Es entsteht ein weißer Zwerg (hohe Oberflächentemperatur, kleine Leuchtkraft auf Grund der kleinen Oberfläche). Weiße Zwerge haben typischerweise einen Radius von $10^7 m$, d.h. etwa die Größe der Erde!
Weiße Zwerge werden stabilisiert durch den Fermi-Druck der Elektronen. Dieser Druck entsteht, weil eine Verkleinerung des Sternvolumens eine Erhöhung der Dichte der Elektronen zur Folge hat. Die Fermi-Energie und damit die mittlere Energie der Elektronen steigt aber mit der Dichte n: $E_F = \frac{(3\pi^2)^{\frac{2}{3}}}{2}\frac{\hbar^2}{m}n^{\frac{2}{3}}$. Ein weißer Zwerg ist ein riesiger CO-Kristall!

Weiße Zwerge strahlen ihre Energie langsam ab und kühlen aus. Ihre Lebensdauer ist typisch 10^{10}Jahre.

II) $\gtrsim 8M_\odot$: Hier laufen die Kernfusionen bis hinauf zum Eisen. Die Überbleibsel solcher massiven Sterne haben eine Masse, die größer ist als die Chandrasekhar-Grenze: $M_{Ch} \approx 1,4M_\odot$. Oberhalb dieser Grenze können weiße Zwerge nicht existieren, weil der Fermi-Druck der Elektronen nicht ausreicht, um den Gravitationskollaps zu stoppen. Das Leben eines solchen Sterns endet in einer Supernova-Explosion bei der gigantische Energiemengen in sehr kurzer Zeit ($\approx$ einige Sekunden!) freigesetzt werden; typisch $10^{48}J$ ($\approx$ Ruhemasse der Sonne!). Supernovae leuchten für ein paar Wochen so hell wie eine ganze Galaxie. Bei der Explosion wird viel Materie in den Weltraum abgegeben. Alle Elemente auf der Erde, die schwerer sind als Helium, stammen aus Supernova-Explosionen. Beim Kollaps des Sterns geschieht im freien Fall. Dabei erhöht sich die Fermi-Energie der Elektronen so weit, das sie Protonen in Neutronen umwandeln können. $p + e^+ \rightarrow n + \nu_e$

99% der Energie einer Supernova wird in wenigen Sekunden in Form von Neutrinos freigesetzt, die einzigen Teilchen, die den dichten Kern des Sterns durchdringen können!

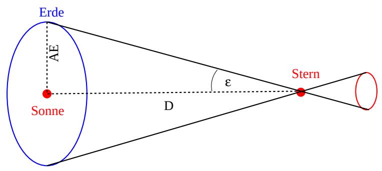
Der Stern besteht jetzt im wesentlichen nur noch aus Neutronen. Sobald sich die Neutronen sehr nahe kommen, baut sich wiederum ein Fermi-Druck auf, der den Stern stabilisieren kann. Ein mögliches Resultat einer Supernova-Explosion ist also ein Neutronenstern mit einem typischen Radius von 10km. Mit anderen Worten: ein gigantischer Atomkern aus Neutronen! Effekte der allgemein Relativitätstheorie auf einem Neutronenstern sind von der Größenordnung 1 (z.B. Rotverschiebung, Lichtablenkung).

Wenn die Masse des Reststerns größer ist als etwa $2 - 3M_\odot$ kann auch der Fermi-Druck der Neutronen den Gravitationskollaps nicht mehr stoppen. Soviel wir heute wissen, gibt es keinen Effekt, der den Gravitationsdruck kompensieren und den Stern stabilisieren könnte. Das Objekt wird zu einer Singularität in der Raum-Zeit, ein schwarzes Loch.

10.2 Strukturen im Universum

Um die Anordnung von Sternen im Weltraum zu bestimmen, muss man neben der Winkelposition auch die Entfernung messen, was natürlich viel schwieriger ist. Es gibt viele Verfahren, die für unterschiedliche Entfernungen anwendbar sind und gegeneinander kalibriert werden müssen (kosmische Leiter). Hier sind drei der wichtigsten Mehtoden beschrieben.

A) Die Entfernung sehr naher Sterne kann man durch Messung ihrer Parallaxe vor dem kosmischen Hintergrund bestimmen.



Dazu benutzt man die größtmögliche Ortsänderung, nämlich die Erdumlaufbahn. Der mittlere Abstand Erde-Sonne ist $150 \cdot 10^6 km$, genannt astronomische Einheit (AE). Die Entfernung eines Sterns, der eine Parallaxe ε von einer Bogensekunde hat, wird Parsec genannt.

$$\varepsilon = 1" = \frac{2\pi}{360 \cdot 60 \cdot 60} \approx 4,8 \cdot 10^{-6}$$

1Parsec= $1pc = \frac{1AE}{1''} = 3,1 \cdot 10^{13} km = 3,26$ Lichtjahre (Ly)

Der nächste Nachbar der Sonne ist α-Centauri in einer Entfernung von $4,3Ly = 1,3pc$. Diese Methode funktioniert bis zu Distanzen von einigen 100pc.

B) Für größere Abstände benutzt man Sterne, deren absolute Leuchtkraft L bestimmt werden kann (Standardkerzen). Aus der beobachteten, scheinbaren Leuchtkraft L_S bestimmt man den Abstand d: $L_S = \frac{L}{4\pi d^2}$. Das bekannteste Beispiel sind die δ-Cepheïden. Das sind pulsierende Riesensterne $M \approx 6 - 10 M_\odot$, $L = 10^3 - 10^5 L_\odot$. Der Radius, die Oberflächentemperatur und die Leuchtkraft dieser Sterne oszilliert mit einer Periode, die mit der Masse, und damit der absoluten Leuchtkraft, anwächst.

Der Zusammenhang wurde 1908 von H. Leawitt bei Sternen in der großen Magellanschen Wolke entdeckt. Und 1923 konnte E. Hubble damit nachweisen, das der Andromeda-Nebel außerhalb der Milchstraße liegt (Entdeckung der Galaxien!).

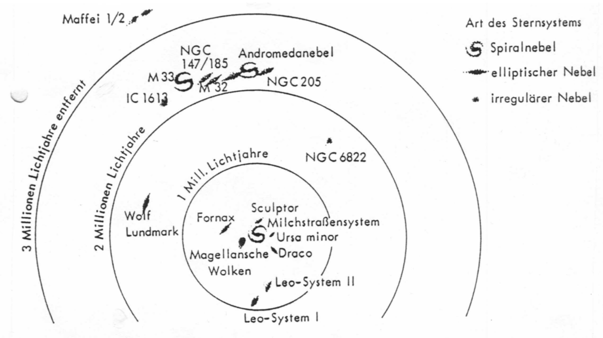
Der Zusammenhang zwischen Leuchtkraft und Periode muss kalibriert werden Leider gibt es keine δ-Cepheïden in unserer Nachbarschaft, die trigonometrisch vermessen werden könnten. Man braucht deshalb viele komplizierte Zwischenschnitte.
Die Methode der δ-Cepheïuden ist bis $\approx$ 20Mpc anwendbar (Hubble Space Telescope).

C) Supernovae

Doppelsternsysteme, bei denen zwei Sterne gravitationell gebunden sind, sind recht häufig. Es gibt nun solche Systeme, bei denen ein weißer Zwerg Masse von seinem (nahen) Begleiter abzieht. Wenn dieser weiße Zwerg dabei die Chandrasekhar-Masse erreicht, kommt es zu einer charakteristischen Supernova, sogenannter Typ Ia.

Da diese Supernovae genau an der Chandrasekhar-Grenze passieren, ist die freigesetzte Energie bzw. die absolute Leuchtkraft immer gleich (innerhalb etwa $\pm 40\%$). Sie können daher als Standardkerzen dienen und zwar zu 1000Mpc ($3 \cdot 10^9$Ly!). Auch bei Supernova Ia muss zunächst die absolute Leuchtkraft kalibriert werden durch andere Distanzmessungen. Die Leuchtkraft ist i.w. gegeben durch β^+-Zerfälle in der Hülle: $^{56}Ni \rightarrow ^{56}Co \rightarrow ^{56}Fe$ mit $T_{\frac{1}{2}} = 6,1$d bzw 78d.

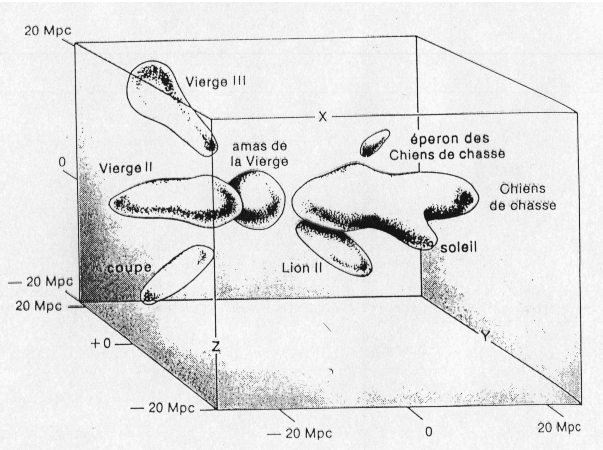
Mit Hilfe der Entfernungsmessungen kann man sich nun ein dreidimensinales Bild des Universums machen. Sterne sind in Galaxien angeordnet. Es gibt verschiedene Typen: Spiralgalaxien, elliptische, irreguläre ...). Wir befinden uns in einer Spiralgalaxie, die wir Milchstraße nennen. Sie ist eine dünne Scheibe mit ca. 10kpc Radius und 3kpc Dicke. Die nächste Spiralgalaxie ist Andromeda in einer Entfernung von $0,7$Mpc$= 2 \cdot 10^6$Ly.



C Schema der lokalen Nebelgruppe

Galaxien bilden Gruppen; z.B. sieht die nähere Umgebung der Milchstraße so aus (Polardiagramm)

Die Gruppen der Galaxien bilden Haufen, sogenannte Cluster, und Superhaufen. Auf einer Skala von ± 20Mpc ($= 60 \cdot 10^6$Ly) sieht unsere Umgebung etwa so aus:



Andere Darstellungsweise:

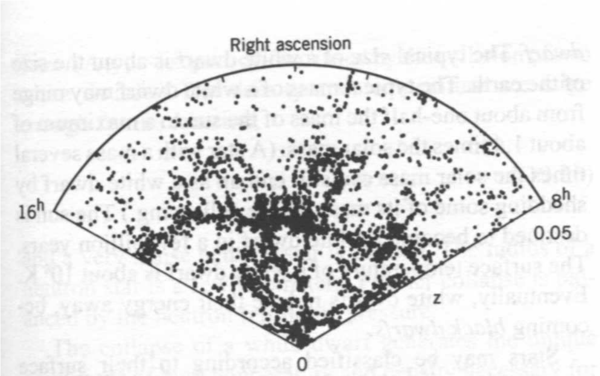


FIGURE 19-11 The Great Wall of galaxies.
From M. J. Geller and J. P. Huchra, "Mapping the Universe," *Science* **246**, 897 (1989).

In einer Theorie der Entstehung des Universums muss auch die Bildung solcher Strukturen erklärt werden.

<u>Dunkle Materie</u>

Galaxien sind Systeme, die durch Gravitation gebunden sind, genau wie das Sonnensystem. Deshalb rotieren die Sterne um das Zentrum ihrer Galaxie. Die Sonne, die etwa 10kpc vom Zentrum der Milchstraße entfernt ist, hat eine Bahngeschwindigkeit von $2,5 \cdot 10^5 \frac{m}{s}$. (Zum Vergleich: die Bahngeschwindigkeit der Erde um die Sonne ist $3 \cdot 10^4 \frac{m}{s}$). Im Verlauf ihrer Existenz ($5 \cdot 10^9 a$) hat die Sonne das Zentrum etwa 41 mal umrundet. Das Alter der Sonne ist also 41 galaktische Jahre.

Aus der Rotationsgeschwindigkeit von der Sonne kann man die eingeschlossene Masse der Milchstraße M_G berechnen:

$$\begin{aligned}
&\text{Zentifugalkraft} = \text{Gravitationskraft} \\
&\frac{m_\odot v^2}{r} = \gamma \frac{m_\odot M_G}{r^2} \\
&\boxed{M_G = \frac{r v^2}{\gamma}}
\end{aligned}$$

Es stellt sich heraus, das diese Masse M_G wesentlich größer ist, als die Masse M_L, die man aus der Leuchtkraft der Sterne abschätzen kann.

Das gleiche gilt für alle anderen Galaxien. Man kann die Geschwindigkeit einzelner Sterne relativ zur Erde v aus der Doppler-Verschiebung der Linienspektren bestimmen, z.B. des Wasserstoffs:

$$Z = \frac{\lambda' - \lambda}{\lambda} = \frac{\sqrt{1+\beta}}{\sqrt{1-\beta}} - 1 = \beta + \frac{1}{4}\beta^2 + \ldots \qquad \beta = \frac{v}{c}$$

λ' beobachtete, λ emmitierte Wellenlänge

Aus der relativen Geschwindigkeit kann man nun die Rotationsgeschwindigkeit des Sterns um das Zentrum der Galaxie und damit die eingeschlossene Masse ableiten. Man findet immer, dass die so bestimmte Masse M_G einer Galaxie viel größer ist, als die „leuchtende“ Masse M_L

$$M_G \approx 10 - 20 M_L$$

Das ist der entscheidende Hinweis, dass es dunkle Materie geben muss. Allerdings wissen wir nicht genau, in welcher Form sie vorliegt (Braune Zwerge wie Jupiter, Neutrinomassen, neue unbekannte Elementarteilchen).

10.3 Entwicklung des Universums

Im Jahr 1929 entdeckte E. Hubble, dass sich die Galaxien von uns entfernen (Rotverschiebung der Spektren), und zwar um so schneller, je weiter die Galaxie entfernt ist.

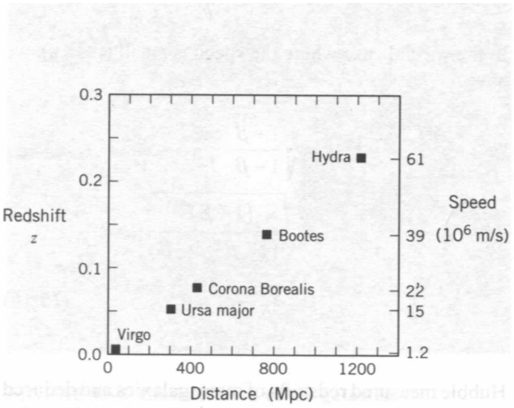


FIGURE 19-7 Experimental evidence for Hubble's law. The amount of redshift of radiation from a distant galaxy is proportional to the distance to the galaxy.

Das Hubble-Gesetz sagt, dass die Fluchtgeschwindigkeit v proportional zur Entfernung d ist

$\boxed{v = H_0 \cdot d}$

Hubble-Konstante

$H_0 \approx 70 \frac{km/s}{Mpc}$

Das Hubble-Gesetz gilt nur für große Distanzen. In Galaxiehaufen wird die Fluchtgeschwindigkeit durch Eigenbewegung der Galaxien überlagert. Z.B. bewegt sich Andromeda auf uns zu.

Kosmologisches Prinzip

Das kosmologische Prinzip sagt, dass auf grossen Distanzen das Universum für jeden Beobachter gleich aussieht. Das Universum hat kein Zentrum.
Mit anderen Worten: Wir nehmen an, dass die Erde kein irgendwie ausgezeichneter Ort im Universum ist und dass Beobachtungen, die wir machen, wie z.B. das Hubble-Gesetz überall im Universum gemacht werden. Das können wir natürlich nicht überprüfen!
Wir schließen also, dass von lokalen Störungen abgesehen, sich zwei beliebige Punkte im Universum, z.B. zwei Galaxien, voneinander entfernen. Das Universum dehnt sich aus. Von Einstein stammt die zweidimensionale Analogie der Oberfläche eines Ballons, der aufgeblasen wird.

Die Hubble-Konstante hat die Dimension einer inversen Zeit:

$$H_0 = 70\frac{km/s}{Mpc} = \frac{70 km/s}{10^6 \cdot 3,1 \cdot 10^{13} km} \approx \frac{0,7}{\pi 10^{17} s}$$

$$\boxed{H_0 = \frac{1}{1,5 \cdot 10^{10} a}}$$

Das ist ein Hinweis auf das Alter des Universums. Wenn wir H_0 als konstant annehmen, waren offenbar vor 15 Milliarden Jahren alle Galaxien am gleichen Ort. Seit dem Urknall (engl. Big Bang) expandiert das Universum.

Wir wollen die zeitliche Entwicklung des Universums etwas genauer betrachten. Wir nehmen an:

- Das Universum ist homogen und isotrop (kosmologisches Prinzip). Das gilt für große Distanzen.
- Die Gravitation ist die einzige Wechselwirkung, die auf kosmologische Distanzen wirkt.

Dann wird die zeitliche Entwicklung des Universums durch die Friedmann-Gleichung beschrieben:

$$\boxed{H^2(t) \equiv \left(\frac{\frac{d}{dt}R}{R}\right)^2 = \frac{8\pi}{3}\cdot\gamma\varrho - h\frac{c^2}{R^2}}$$

$H(t)$: Hubble-Parameter, der heutige Wert ist die Hubble-Konstante H_0
$R(t)$: Größe des Universums
$\varrho(t)$: mittlere Massendichte
γ: Gravitationskonstante
k: Krümmung des Raums

Der erste Term $\frac{8\pi}{3}\gamma\varrho$ ist leicht verständlich. Er beschreibt die Verlangsamung der Expansion $H(t) = \frac{1}{R}\frac{dR}{dt}$ durch die Gravitation, die von der Massendichte ϱ abhängt. Das ist völlig analog zur Abbremsung eines Steins, der im Schwerefeld der Erde nach oben geworfen wird.

Der zweite Term $k\frac{c^2}{R^2}$ ist nur mit Hilfe der allgemeinen Relativitätstheorie ableitbar. Der Parameter k beschreibt die Krümmung des Raums und er kann drei Werte annehmen: $k = 0, -1, +1$. Für $k = 0$ fällt dieser Term weg und wir haben ein <u>flaches</u> Universum, in dem die Euklidische Geometrie gilt, d.h. der uns allen geläufige Fall.
Die Fälle $k = -1$ und $k = +1$ beschreiben ein offenes bzw. geschlossenes Universum, in dem die euklidische Geometrie nicht gilt!

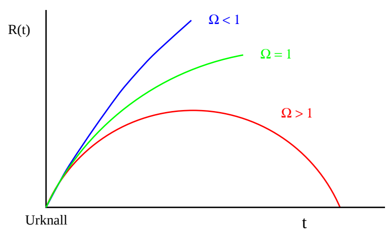
Wir führen jetzt die kritische Dichte ϱ_c und den Dichteparameter Ω ein und schreiben die Friedmann-Gleichung um:

$$\varrho_c = \frac{3H^2}{8\pi\gamma}, \Omega = \frac{\varrho}{\varrho_c} \quad \Rightarrow \quad \boxed{H^2(\Omega - 1) = k\frac{c^2}{R^2}}$$

Offenbar wird die Geometrie des Universums, d.h. von k, durch den Dichteparameter Ω bestimmt.

$\Omega < 1 \quad \Rightarrow \quad k = -1$ offenes Universum
$\Omega = 1 \quad \Rightarrow \quad k = 0$ flaches, euklidisches Universum
$\Omega > 1 \quad \Rightarrow \quad k = +1$ geschlossenes Universum

Die zeitliche Entwicklung des Universums für die drei Fälle sieht so aus:



$\Omega \leq 1$: das Universum expandiert für alle Zeiten
$\Omega > 1$: es erreicht einen Umkehrpunkt, ab dem es beginnt zu kollabieren

Der heutige Wert der kritischen Dichte beträgt

$$\varrho_c \approx 7\cdot 10^{-27}\frac{kg}{m^3} = 4\frac{\frac{\text{GeV}}{c^2}}{m^3} = \frac{4m_p}{m^3}$$

Aus Abschätzungen der gesamten, leuchtenden Materie erhält man für den Massenparameter $\Omega_L = \frac{\varrho_L}{\varrho_c} \approx 0,01$. Das würde bedeuten, dass wir in einem offenen Universum leben. Wir wissen aber aus der Dynamik der Galaxien und Galaxienhaufen, dass es viel mehr nichtleuchtende, dunkle Materie gibt. Der Wert $\Omega = 1$, der von vielen Physikern bevorzugt wird, kann deshalb nicht ausgeschlossen werden. Daher können wir heute nicht endgültig entscheiden, in welchem der drei möglichen Universen wir leben.

Für das Alter gilt

$\Omega \ll 1$	$H(t) = H_0 = const$	$\tau = \frac{1}{H_0}$	z.B. nur leuchtende Materie
$\Omega = 1$	$H(t)$	$\tau = \frac{2}{3}\frac{1}{H_0}$	

Bemerkungen: Wir haben die Friedmann-Gleichung ohne kosmolgische Konstante diskutiert. Sie wurde von Einstein eingeführt, um ein statisches Universum zu behalten und nach Hubbles Entdeckung wieder zurückgenommen. Heute diskutiert man sie wieder als eine Art Druck, der der Gravitation entgegenwirkt. Sehr neue experimentelle Beobachtungen scheinen darauf hinzudeuten, dass es tatsächlich eine kosmolgische Konstante gibt.

10.4 Die Geschichte des Universums von $t = 0$ bis heute

Wir können die Geschichte nicht wirklich bei $t = 0$ beginnen. Das Universum war zu diesem Zeitpunkt ein Punkt mit unendlich hoher Energiedichte und Temperatur. Im Verlauf der Expansion nimmt diese Energiedicht ab und das Universum kühlt ab. Wichtige Stationen in der Entwicklung (aus dem Buch von Rohlf):

Geschichte des Universums

Zeit (1/H)	Größe (k=0)	T	Energie/ Teilchen	Energiedichte	Physik
$10^{-43}s$	$10^{-35}m$	$10^{32}K$	10^{19}GeV	$10^{123}\mathrm{GeV}/m^3$	Planck
$10^{-38}s$	$10^{-29}m$	$10^{29}K$	10^{16}GeV	$10^{111}\mathrm{GeV}/m^3$	Vereinigung der Wechselwirkungen
$10^{-12}s$	$10^{-3}m$	$10^{16}K$	1TeV	$10^{59}\mathrm{GeV}/m^3$	Electroweak unification
$10^{-6}s$	$10^{3}m$	$10^{13}K$	1GeV	$10^{47}\mathrm{GeV}/m^3$	Bildung von Hadronen
$1s$	$10^{8}m$	$10^{10}K$	2MeV	$10^{37}\mathrm{GeV}/m^3$	Neutronen „erstarren“, e^+ verschwinden
$10^{2}s$	$10^{11}m$	$10^{9}K$	100keV	$10^{31}\mathrm{GeV}/m^3$	Bildung von Atomkernen
$10^{13}s$	$10^{22}m$	$3 \cdot 10^{3}K$	0, 3eV	$10^{9}\mathrm{GeV}/m^3$	Atome, Galaxien und Sterne entstehen
$5 \cdot 10^{17}s$	10^{26}	$3K$	$2 \cdot 10^{-4}$eV	$4 \cdot 10^{-4}\mathrm{GeV}/m^3$	heute

- $10^{-43}s$: Das ist der frühstmögliche Zeitpunkt, zu dem wir eine vage Aussage machen können. Die Temperatur ist $10^{23}K$, das entspricht einer mittleren Energie der Teilchen von $E \approx kT = 10^{19}$GeV. In diesem Stadium spielt die Gravitation zwischen den Teilchen eine Rolle, die wir aber nicht quantenmechanisch beschreiben können.

- $10^{-38}s$: In diesem Energiebereich vermuten wir, das die drei bekannten Wechselwirkungen elektromagnetisch, schwach und stark durch eine gemeinsame beschrieben werden.

- $10^{-12}s$: Von jetzt an befinden wir uns auf sicherem Boden. Die Temperatur ist $T = 10^{16}K$ was einer Energie von $E = kT = 1000$GeV entspricht. Das sind Bedingungen, wie wir sie an Beschleunigern studieren können. Wir kennen alle Teilchen und ihre Wechselwirkungen. Materie und Antimaterie wird erzeugt und vernichtet (thermisches Gleichgewicht)

z.B. $e^+e^- \leftrightarrow \gamma\gamma$, $\nu\bar{\nu} \leftrightarrow Z$, $q\bar{q} \leftrightarrow gg$ etc.
Ein sehr wichtiger Punkt ist, dass wir annehmen, dass es zu diesem Zeitpunkt noch genau soviel Materie wie Antimaterie gab. Heute besteht das Universum aber ausschließlich aus Materie. Es gibt zwei Erklärungen:
a) Es gab damals bereits einen winzig kleinen Überschuss an Materie
$\frac{N_{Fermion} - N_{Antifermion}}{N_{Fermion}} \approx 10^{-10}$
b) Fermionen und Antifermionen haben leicht unterschiedliche Wechselwirkungen. Um das aber theoretisch zu erklären benötigt man mindestens <u>drei Generationen</u> der Fermionen. Das ist z.Z. die einzige, plausible Erklärung, die wir für die Existenz der drei Kopien der Fermionen haben.

- <u>$t = 10^{-6}s$:</u> $kT = 1$GeV Von jetzt an können freie Quarks nicht mehr existieren. Die Quarks und Antiquarks haben annihiliert und es verbleibt ein kleiner Überschuss an Quarks. Diese Quarks sind in Nukleonen gebunden. Es gibt gleich viel Neutronen wie Protonen.

- <u>$t = 1s$:</u> Die Temperatur ist auf $kT = 2$MeV gefallen. Von nun an spielt der Massenunterschied zwischen Neutron und Proton eine Rolle. Die Reaktion $e^+ + n \to \bar{\nu}_e + p$ hat eine größere Wahrscheinlichkeit (Wirkungsquerschnitt) als $e^- + p \to \nu_e + n$. Freie Neutronen sind aber instabil, sie zerfallen mit $T_{\frac{1}{2}} = 616s \approx 10min$ in Protonen. Die Zahl der Neutronen wird sinken, bis es zur Bildung von Atomkernen kommen kann.
Auch das Gleichgewicht $e^+e^- \leftrightarrow \gamma\gamma$ verlagert sich zu den Photonen. Es bleibt wiederum ein kleiner Überschuss an Elektronen. Die Photonen bilden die <u>kosmische Hintergrundstrahlung</u>, die noch heute nachweisbar ist.

- <u>$t = 10^2s$:</u> Die Temperatur beträgt $kT = 100$keV. Die Energie der Protonen und Neutronen ist jetzt soweit gefallen, dass es zur Bildung von Atomkernen kommen kann. Viele Neutronen sind aber inzwischen zerfallen, so dass die Zahl der Protonen etwa dreimal höher ist.
Ein für unsere Existenz sehr entscheidender Punkt ist, dass es keine stabilen Kerne mit $A = 5$ oder $A = 8$ gibt. Das ist der Grund dafür, dass die Kernsynthese nur zur Bildung von ${}^4_2He$ führt. Auch Deuterium und ${}^3_2He$ werden meistens in ${}^4_2He$ umgewandelt. Das Universum besteht nach der Kernsynthese aus 74%H und 26%He, andere Kerne wie ${}^7_3Li$ kommen nur in Spuren vor. Alle schweren Elemente sind nicht im Urknall, sondern viel später in den Sternen entstanden!

- <u>$t = 10^{13}s$:</u> $\approx 10^6 a$. Die Temperatur ist $kT = 0,3$eV. Jetzt erst kann es zur Bildung von Atomen kommen. Das Universum wird auch für die kosmische Hintergrundstrahlung durchsichtig. An Stellen mit erhöhter Dichte beginnt die Formation von Sternen und Galaxien. Die ersten Sterne beginnen nach $\approx 10^9 a$ zu leuchten.

- <u>heute:</u> Die Temperatur beträgt $T = 2,7K$. Das Universum ist immer noch erfüllt von der kosmischen Hintergrundstahlung. Das ist die Strahlung eines perfekten schwarzen Körpers, der inzwischen auf $2,7K$ abgekühlt ist. Die Strahlung ist bei der Vernichtung von Materie und Antimaterie entstanden. Die Zahl der Photonen ist etwa 10^{10} mal höher als die Zahl der Protonen im heutigen Universum, sie ist also ein Maß für die Materie-Antimaterie Asymmetrie.
Ein sehr interessantes, aktuelles Forschungsgebiet ist die genaue Analyse der Hintergrundstrahlung. In ihr müssen sich die Dichtfluktuation im frühen Universum wiederfinden, die

letztendlich zur Ausbildung der Strukturen (Sterne, Galaxien, Haufen) geführt haben. In einem perfekt homogenen Universum wäre es niemals zur Ausbildung von Sternen gekommen.

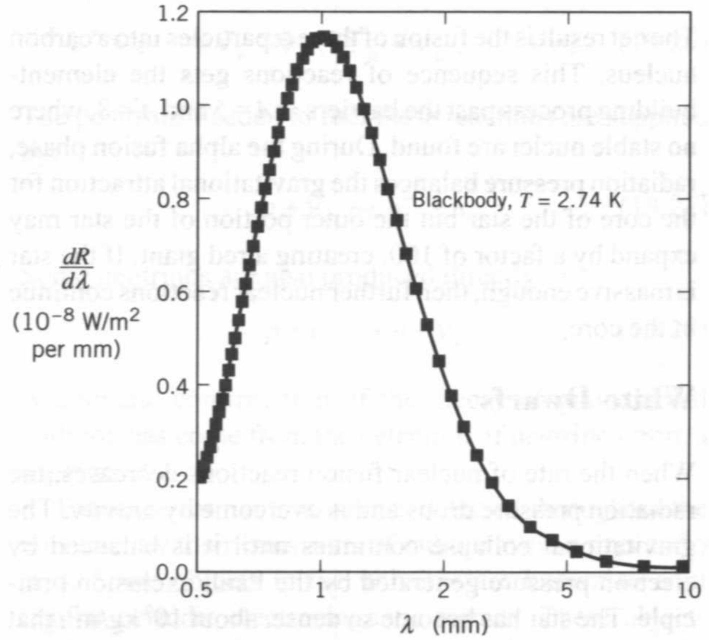


FIGURE 19-13 Results from the Cosmic Background Explorer (COBE) satellite.
After J.C. Mather et al., *Astro Jour*. **354**, L37 (1990).