

Besonders deutlich wird das Lichtband der Milchstraße bei Fotografie des Nachthimmels, wodurch auch die lichtschwächeren Sterne dargestellt werden. Die Namengebung stammt aus der griechischen Antike: Zeus soll seinen unehelichen Sohn Herakles an der Brust seiner schlafenden Ehefrau Hera trinken lassen, wodurch er göttliche Kräfte erhielt. Als Hera aufwachte, stieß sie den Säugling weg, wobei sich ein Strahl Muttermilch über den Himmel ergoß.

Stelle den räumlichen Zusammenhang zwischen den beiden Diagrammen und der Beobachtung her.

5. Untersuchung großer Strukturen im All

5.1 Unsere Milchstraße

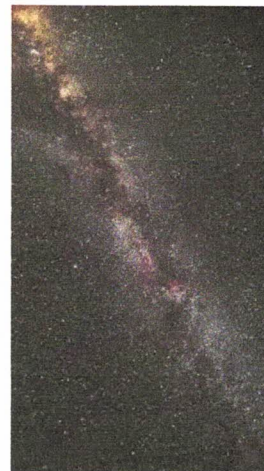
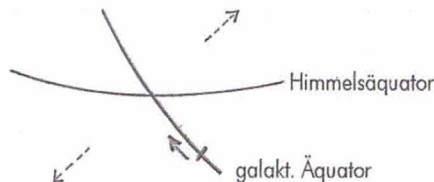
Beobachtung:

Bei guten Beobachtungsbedingungen zeichnet sich am Nachthimmel ein helles Lichtband mit

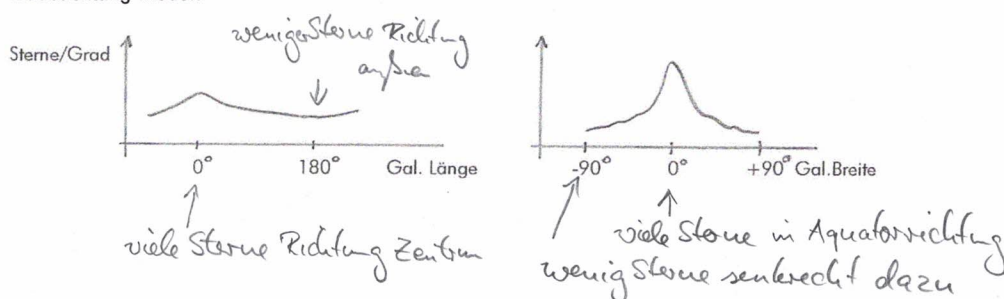
sehr vielen Sternen ab.

Die Mittelachse der Milchstraße bezeichnet man

als *galaktischen Äquator*, dieser ist etwa um 30° gegenüber dem Himmelsäquator geneigt (siehe Skizze).



Im 18. Jahrhundert führte man Zählungen der Sterne bezogen auf das galaktische System (Länge längs des Äquators, Breite quer dazu) durch. Die Messdaten spiegeln die Beobachtung wieder.



Im inneren Teil der Zeichnung ist deutlich die "Untertassensektion" mit der Position unseres Sonnensystems zu erkennen.

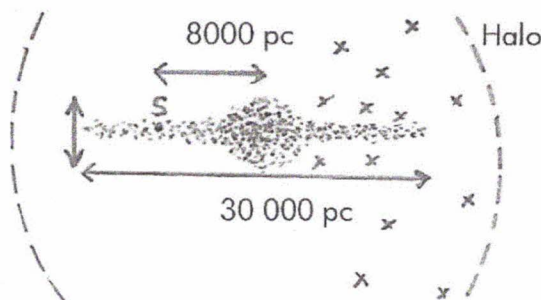
Überlege Dir, weshalb dieses Modell sehr gut die Beobachtungsdaten (Diagramme) auf der vorherigen Folie erklärt!

Diese Zeichnung wird im Abitur immer wieder gefragt. Man sollte sie inklusive Größenangaben reproduzieren können.

Modell unserer Milchstraße

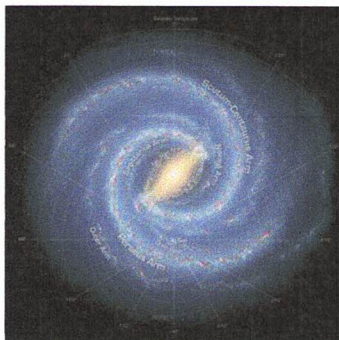
Auf der Basis der Beobachtungsdaten setzte sich das Bild einer "Ufo-ähnlichen" räumlichen Verteilung der Sterne durch, wobei wir selbst uns innerhalb dieser Struktur befinden (Seitenansicht siehe Zeichnung).

Allgemein werden so große Sternansammlungen als *Galaxien* bezeichnet (griech. "gala": Milch).



Die typische Ufo-Form unserer Galaxie ist umgeben von einem kugelförmigen Bereich (galaktisches Halo), in dem sich noch eine Menge älterer kleiner Kugelsternhaufen befinden.

Die nebenstehende Abbildung ist natürlich kein Foto, sondern eine künstlerische Darstellung, da wir unsere eigene Galaxie nicht von außen fotografieren können.



In Draufsicht betrachtet verteilen sich die Sterne dabei allerdings nicht gleichmäßig, sondern sind in Spiralarmen konzentriert. (siehe Darstellung aus wikipedia.de)

Aus Positionsmessungen der Sterne unserer Milchstraße gegenüber dem Hintergrund weit entfernter Fixsterne lässt sich die Rotationsgeschwindigkeit unserer Milchstraße bestimmen (vgl. Kap. 4.2). Daraus berechnen wir mit einem einfachen Modell die Masse unserer Milchstraße: Die Sonne bewegt sich mit einer Geschwindigkeit von 225 km/s um das Zentrum.

a) Berechne daraus die Gesamtmasse der Galaxie unter der Modellvorgabe, dass diese vollständig im Zentrum konzentriert ist.

b) Abb. 31.13 auf S.155 vergleicht die beobachtete Geschwindigkeit mit der, die man berechnen würde, wenn man die beobachtete Masse (in Form von Sternen) zugrunde legt. Warum schließt man aufgrund der Messung auf eine nicht sichtbare (dunkle) Materie?

Größe der Milchstraße:

Die Bewegung eines Sterns um das galaktische Zentrum ergibt sich aus dem

Gleichheit von Zentrifugalkraft und Gravitationskraft

$$a) F_G = F_Z$$

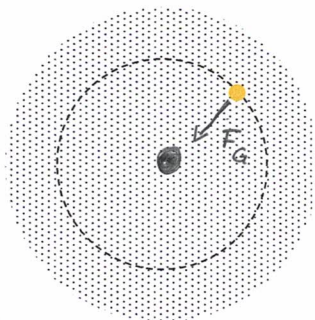
$$G \cdot \frac{m \cdot m_s}{r^2} = m_s \frac{v^2}{r}$$

$$(*) m = \frac{v^2 r}{G} = \frac{(225 \cdot 10^3 \frac{m}{s})^2 \cdot 8000 \cdot 3,086 \cdot 10^{16} m}{6,67 \cdot 10^{-11} m^3 kg^{-1} s^{-2}}$$

$$= 1,87 \cdot 10^{41} kg = 9,4 \cdot 10^{10} m_s$$

" 100 Milliarden Sonnen "

b) Die tatsächliche Geschwindigkeit der Sonne bei der Umrundung des galaktischen Zentrums ist höher als aufgrund der beobachteten Masse. Also muss mehr Masse in der Galaxie vorliegen (Gleichung *).



Die Entstehung unserer Milchstraße sehen wir heute ganz analog zur Entwicklung unseres Sonnensystems als Ergebnis der Wirkung von Gravitation und Rotation auf kosmische Materie.

Unsere Vorstellung von der Struktur unserer Heimatgalaxie ist natürlich auch von der Beobachtung anderer Galaxien geprägt, die wir im Gegensatz zu unserer eigenen auch von außen betrachten können.

Entstehung der Milchstraße

Man geht heute davon aus, dass sich die Milchstraße vor etwa 10 Mrd.

Jahren aus einer kugelförmigen rotierenden Gaswolke entwickelt hat, deren Ausdehnung dem heutigen Halo entspricht. In diesem Bereich kam es zunächst lokal zu Verdichtungen, aus denen

sich die Kugelsternhaufen entwickelten.

Die restliche Wolke flachte durch Rotation ab wodurch sich die heutige Ufo-förmige Gestalt ergab.

Hier entstanden viele weitere Sterne.



zum Vergleich
Andromeda-Galaxie
(aus wikipedia.de)

Selbst-Check:

- Beobachtung der Milchstraße
- Modell der Milchstraße
- Größe der Milchstraße
- Entstehung der Milchstraße
- Begriff Galaxie

Aufgabe:

Typisch für eine Abituraufgabenstellung ist die Anforderung, einen Querschnitt unserer Milchstraße wie auf Folie 2 zu skizzieren (mit Maßangaben). In Ermangelung weiterer sinnvoller Abituraufgaben kannst Du hier mit der Abituraufgabe "Elektra" aus 2009 nochmals Techniken aus dem Kapitel 4 üben. Suchbegriff auf Leifphysik: "elektra".

Für eine Vermessung des Universums reichen die bisherigen Instrumente zur Entfernungsmessung (Parallaxe, HRD) noch nicht aus. In diesem Kapitel lernst Du zwei neue Verfahren kennen (Cepheiden-Methode und Quasare), die sich insbesondere für weite, intergalaktische Entfernungen eignen.

Die Sternklasse δ -Cepheiden ist nach dem vierthellsten Stern im Kepheus bezeichnet, bei dem man die Pulsation der Helligkeit zuerst beobachtete.

Tatsächlich ist der Mechanismus etwas komplizierter als hier dargestellt.

Erkläre, weshalb in der Kontraktionsphase die Abstrahlung trotz kleinerem Sternradius zunimmt.

5.2 Kartographierung des Universums

Pulsation bei δ -Cepheiden:

Der Übergang vom Hauptreihen- zum Rote-Riesen-Stadium ist oft geprägt von Instabilität im Stern, die sich in einer

Schwankung in der Energiehaushalt abzeichnet.

Für den Beobachter führt das zu einer Schwankung der Helligkeit (siehe Skizze).

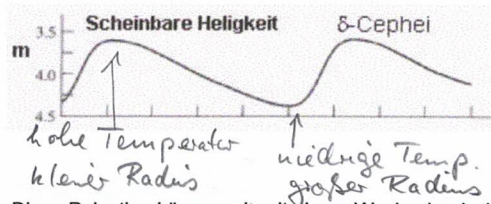


Abb. aus Iliophysik.de nach Caroli und Ostlie: Modern Astrophysics

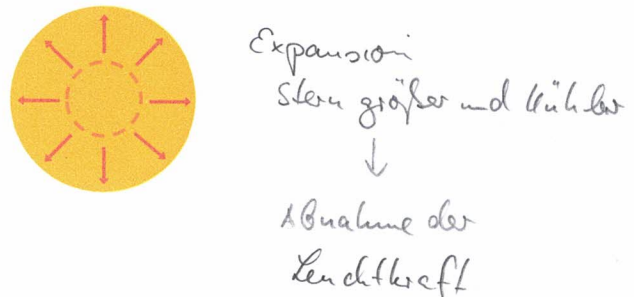
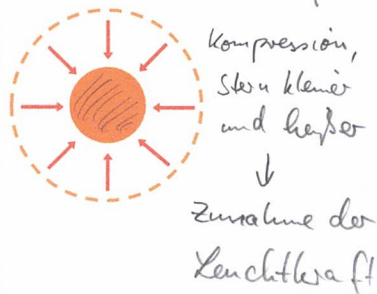
Diese Pulsation können wir mit einem Wechsel zwischen

Kompression und Expansion erklären,

wobei in der Verdichtungsphase durch Zunahme der Hüllentemperatur

die Leuchtkraft zunimmt

was durch Zunahme des Drucks wiederum zur Expansion führt (Skizze).



Die erste systematische Untersuchung hierzu führte die amerikanische Astronomin Henrietta Leavitt 1912 am an den nahegelegenen Sternhaufen "Große und kleine Magellansche Wolke" durch.

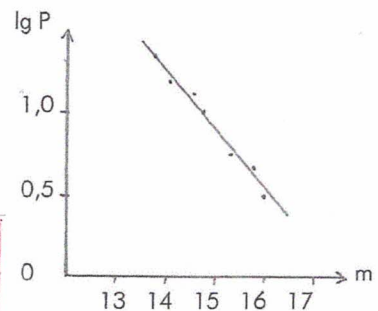
Beschreibe den Zusammenhang qualitativ!

Diese Formel taucht auch im Abitur immer wieder auf. Du findest sie in der Formelsammlung bei Entfernungsbestimmung.

Periodendauer-Helligkeits-Beziehung bei δ -Cepheiden

Beim Vergleich von mittleren scheinbaren Helligkeiten m und Periodendauern P der Helligkeitsschwankungen fand man einen systematischen Zusammenhang, der in logarithmischer Darstellung (beachte Achsenbeschriftung) abgebildet ist. Da die untersuchten Sterne alle ungefähr gleich weit entfernt waren, ergab sich auch für die absoluten Helligkeiten ein quantitativer Zusammenhang:

$$\bar{M} = -1,67 - 2,54 \cdot \lg\left(\frac{P}{1d}\right)$$



s. 158/1, HV 837 $\rightarrow P = 40d, \bar{m} = 13,15$

$$\bar{M} = -1,67 - 2,54 \cdot \lg 40 = -5,74$$

$$\bar{m} - \bar{M} = 5 \lg \frac{r}{10pc}$$

$$13,15 - (-5,74) = 5 \lg \frac{r}{10pc}$$

$$18,89 = 5 \lg \frac{r}{10pc} \quad | :5$$

$$\lg \frac{r}{10pc} = 3,778 \quad | 10^{...}$$

$$r = 10^{3,778} \cdot 10pc = 5998 \cdot 10pc = 60 kpc$$

$$= 1,96 \cdot 10^5 Lj$$

Bearbeite die Buchaufgabe S.158/1 für mindestens ein Beispiel. Die zugehörigen Graphiken findest Du auf S.156.

Die Entdeckung der Galaxienflucht bildet die Grundlage für die Urknall-theorie (Big Bang Theory) und damit für unser aktuelles Bild von der Entwicklungsgeschichte des Universums.

Nach Edwin Hubble ist auch das erste nicht-erdgebundene Teleskop benannt, das heute aus dem Orbit perfekte Aufnahmen von weit entfernten Sternen und Galaxien liefert.

Galaxienflucht:

Edwin Hubble bestimmte 1924 mit Hilfe der Cepheiden - Methode die Abstände zahlreicher Galaxien für die zuvor Vesto Slipher bereits die Geschwindigkeit mit Hilfe des Doppler - Effekts gemessen hatte. Auf Basis der groben Datenlage vermutete er, dass sich Galaxien umso schneller von uns weg bewegen je weiter sie entfernt sind.

$$v_r = H_0 \cdot r$$

Die Hubble-Beziehung erlaubt die Entfernungsbestimmung von Galaxien

aufgrund ihrer Geschwindigkeit. Der Proportionalitätsfaktor H_0 (Hubble-Konstante) konnte in den letzten Jahren immer genauer bestimmt werden:

$$2010: H_0 = 72 \pm 8 \frac{\text{km}}{\text{s}} \text{ Mpc}^{-1}$$

(H hat sich in Laufe der Entwicklungsgeschichte des Universum tatsächlich verändert, mit H_0 wird ihr aktueller Wert bezeichnet)

Die Geschwindigkeit wird meist als Bruchteil der Lichtgeschwindigkeit angegeben:

$$v_r = z \cdot c$$

- a) Bearbeite im Buch die kleine Rechenaufgabe S.160/1.
b) Zusatz: Arbeite die Musteraufgabe auf S.160 durch.

Übungsaufgabe:

$$v_r = H_0 \cdot r$$

$$r = \frac{v_r}{H_0} = \frac{0,13 \cdot 3 \cdot 10^5 \frac{\text{km}}{\text{s}}}{72 \frac{\text{km}}{\text{s}}} \text{ Mpc} = 542 \text{ Mpc} \\ = 0,54 \text{ Gpc} = 1,8 \text{ GLj}$$

Selbst-Check:

- Cepheiden (Prinzip)
- Periodendauer-Helligkeits-Beziehung
- Hubble-Gleichung
- Hubble-Konstante

Übungsaufgaben:

Auch wenn wir Quasare noch nicht behandelt haben, kannst Du eine alte Abituraufgabe von 2000 schon vollständig lösen. Suchbegriff auf Leifiphysik: "cepheiden und quasare".

Ein Leifitest umfasst dieses und das vorherige Kapitel. Suchbegriff auf Leifiphysik: "quiz zu größeren strukturen im weltall"

Die Interpretation der Galaxienflucht als Ausdehnung des Raumes wirkt für uns etwas künstlich, da wir aus der Alltagserfahrung lieber mit einer Bewegung der Galaxien in Bezug auf den Raum argumentieren würden. Die moderne Interpretation impliziert vor allem, dass der Raum (und auch die Zeit) erst entstanden sind (wobei dieser Prozess immer noch andauert). Die Hintergrundstrahlung, die einem schwarzen Körper von 3 K Temperatur entspricht, ist quasi der feinverteilte Rest der Explosion.

5.3 Kosmologie

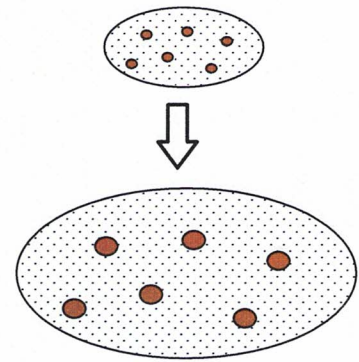
Expansion des Universums:

Die von Hubble gefundene Galaxienflucht fand eine vorläufige Interpretation im Paradigmenwechsel durch Lemaitre:

Die Galaxien bewegen sich nicht etwa innerhalb eines statischen Raumes,

der Raum selbst dehnt sich aus.

(dadurch nimmt der Abstand der Galaxien zu → Rosinenkuchenmodell/Luftballonmodell).



The Big Bang Theory:

Idee: Man könnte den von Hubble beobachteten Expansionsprozess

in der Zeit zurück verfolgen

Ergebnis: Ausgangspunkt der Expansion war ein

ein Punkt (Singularität) unendlich hoher Energiedichte

Interpretation: Start des Universums als Urknall (ohne Geräusch)

"Nachhall": 3 K - Hintergrundstrahlung in allen

Raumrichtungen messbar

(Schwarzkörper - Strahlung für 3 Kelvin)



Die Bestimmung des Alters des Universums ist überaus simpel (wenn man das Verfahren kennt). Hier wird deutlich, wie wichtig es für die Astronomen ist, die Hubble-Konstante möglichst genau zu bestimmen. Wir gehen aber davon aus, dass diese selbst nicht konstant über die Zeit war.

Das Alter des Universums

Die Expansionszeit lässt sich leicht aus den Abständen und Geschwindigkeiten von Galaxien berechnen, das Hubble-Gesetz führt dann zu einer interessanten Schlussfolgerung:

$$\left. \begin{array}{l} v = \frac{r}{t} \\ v = H_0 \cdot r \end{array} \right\} \frac{r}{t} = H_0 \cdot r \rightarrow \frac{1}{t} = H_0 \rightarrow t = \frac{1}{H_0}$$

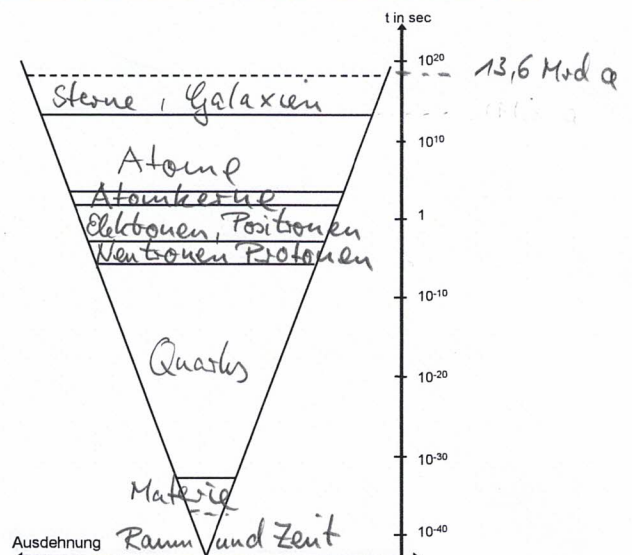
$$\begin{aligned} t &= \frac{1 \text{ s Mpc}}{72 \text{ km}} \\ &= \frac{15 \cdot 10^6 \cdot 3,086 \cdot 10^{13} \text{ km}}{72 \text{ km}} \\ &= 13,6 \text{ Mrd a} \end{aligned}$$

Das Alter des Universums ist der Kehrwert der Hubble-Konstanten

Die Entwicklung des Universums

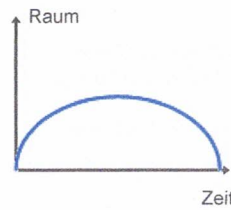
Die Strukturen, die wir heute im All beobachten können, haben sich erst im Laufe der Zeit aus der Energie des Urknalls entwickelt. Typisch dafür ist, dass zu Beginn zunächst die kleinsten Teilchen entstanden sind und nach und nach daraus immer größere Objekte wurden.

Beachte die logarithmische Zeitskala in der Graphik.

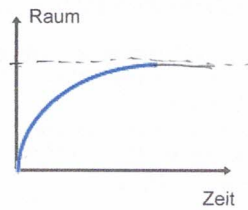


Der russische Mathematiker Friedmann modellierte basierend auf der Gravitationskraft und der kinetischen Energie drei mögliche Szenarien für die räumliche Entwicklung des Universums.

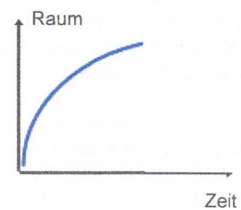
Weitere Entwicklung des Universums: Die Friedmann-Modelle



Ausdehnung kommt durch Gravitation zum Stillstand, Universum fällt in sich zusammen → neue Singularität.



Ausdehnung strebt asymptotisch gegen Grenzwert



Ausdehnung wird zwar immer langsamer aber dennoch beliebig groß

Durch aktuelle Messungen konnten alle drei Modelle widerlegt werden.

Tatsächlich wird die Expansionsgeschwindigkeit immer größer (Erklärung mit "dunkler Energie").

im Widerspruch zur Gravitation

Galaxienhaufen

Die Galaxien sind nicht gleichmäßig im Universum verteilt, sondern häufen sich in bestimmten Bereichen → Galaxienhaufen.

Der Haufen, in dem unsere Milchstraße liegt, heißt lokale Gruppe.

Viele Galaxienhaufen bilden wieder größere Strukturen → Superhaufen (die lokale Gruppe ist Teil des Virgo-Superhaufens)

Ein schönes Hubble-Bild von einem Galaxienhaufen gibt's auf wikipedia, Suchbegriff „galaxienhaufen“

Quasare sind die hellsten, größten, schnellsten und entferntesten Strahlungsquellen, die wir messen können und erlauben uns, die Ausdehnung des Universums so weit wie möglich zu ermitteln.

Quasare:

• "quasi stellare Objekte"

sieht aus wie Stern, ist aber viel zu groß (+ ≈ Lichttage)
untypisches Spektrum

• sehr hell (etwa 1000-mal

heller als eine Galaxie)

• große Rotverschiebung → hohe Geschwindigkeit → große Entfernung

• Mechanismus:

super-massereiches schwarzes Loch im Zentrum einer Galaxie saugt Material so schnell ein
→ beschleunigte Ladungen erzeugen Synchrotronstrahlung

• eignen sich zur Messung sehr großer Entfernungen (Hubble-Gesetz)

Damit haben wir alle Methoden zur Entfernungsbestimmung durch. Einen guten Überblick über die "kosmische Entfernungsleiter" gibt die Tabelle im Buch S. 163.

• eignen sich zur Messung sehr großer Entfernungen (Hubble-Gesetz)

Selbst-Check:

- Expansion des Universums und Urknall
- Alter des Universums
- Entwicklung des Universums
- Galaxienhaufen
- Quasare

Übungsaufgabe:

Eine Übungsaufgabe zu den Quasaren findest Du im Buch S. 162.