

PHYSIK: GRAVITATIONSTHEORIE

DIE NEWTONSCHE GRAVITATIONSTHEORIE

GRUNDGESETZE DER MECHANIK

1. Ein Körper, auf den keine Kraft F wirkt ($F = 0$ & $a = 0$), verharrt im Zustand der Ruhe ($v = 0 =$ konstant) oder der gleichförmigen Bewegung ($v =$ konstant) auf geradliniger Bahn.
2. $F = m a$ d.h. eine Kraft F bewirkt eine Beschleunigung a
3. Kräfte treten immer paarweise auf. Sie sind gleich gross, aber entgegengesetzt gerichtet. Sie greifen im Allgemeinen an verschiedenen Körpern an.

Die Beschleunigung g eines Körpers ist unabhängig von seiner Masse & hat auf der Erdoberfläche den Wert von $10 \text{ m/s}^2 \rightarrow F_G = m g$

RELATIVISTISCHE MASSE

- Wirkt auf einen Körper ständig eine konstante Kraft F , also eine konstante Beschleunigung a , so nimmt seine Geschwindigkeit proportional zur Zeit t zu: $v = a t$
→ Je schneller wir sind, desto grösser ist die Masse
- Masse m & Energie W sind äquivalent (=gleichwertig): $W = m c^2$

MASSEDEFEKT

Beim Zusammenbau von Z Protonen & N Neutronen zu einem Atomkern $N + Z$ Kernteilchen entsteht ein Massendefekt. Diesem Massenverlust entspricht die Bindungsenergie ($W = \Delta m c^2$), die beim Zusammenbau frei wird & zur Zerlegung des Kerns in seine Einzelbausteine wieder aufgewendet werden muss → Massendefekt & Bindungsenergie sind zueinander äquivalent.

Beispiel ${}^3_2\text{He}$ -Kern: $m_{\text{He-Kern}} < 2 m_p + 1 m_n$
 $2,7 \text{ '}' 2,1' + '1,1' = '3'$

NEWTONSCHES GRAVITATIONSGESETZ

Wechselwirkung zwischen zwei Körpern ist proportional zur Masse m_1 $F_G \sim m_1$	Wechselwirkung zwischen zwei Körpern ist proportional zur Masse m_2 $F_G \sim M$	Wechselwirkung zwischen zwei Körpern ist umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstandes $F_G \sim 1/r^2$
---	---	---

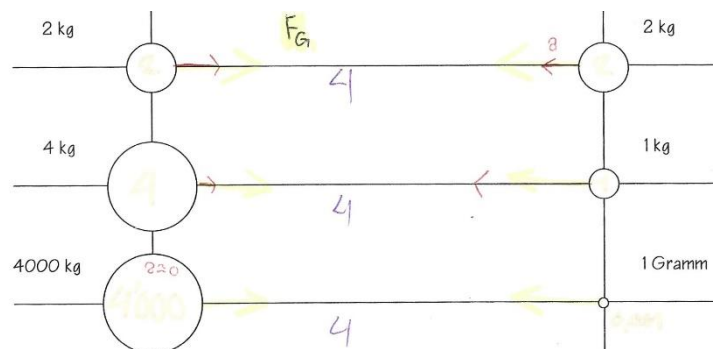
→ Je grösser die Masse des Produkts, desto grösser F_G

Zusammenfassung:

Zwei materielle Punkte (m & M) ziehen sich mit 'Gravitationskräften' an, deren Beträge dem Produkt der Massen m & M direkt proportional, dem Quadrat des Abstandes r umgekehrt proportional sind. Die Richtungen der Gravitationskräfte fallen mit der Verbindungslinie (Kraftwirkungslinie) der materiellen Punkte zusammen.

Betrag der Gravitationskraft

$$F_G = G m M / r^2, G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$$



GRAVITATION & RELATIVITÄT

Nach Newton ist der Gravitationseffekt momentan, d.h. wenn wir eine Masse bewegen würden wir aufgrund der neuen Position der Massen eine neue Kraft spüren → wir könnten nur Signale mit unendlich grosser Geschwindigkeit aussenden. => Einsteins Gesetz der Gravitation: Jedes Ding, das Energie besitzt, hat auch Masse (die der Gravitation unterliegt).

RESULTIERENDE BEWEGUNGEN

- Die einzigen Massen m & M in einem Raum werden aufgrund der gravitativen Wechselwirkung beschleunigt, da $F = m \cdot a$
- Kräfte/Wechselwirkungen zwischen m & M sind im Betrag gleich, aber entgegengesetzt gerichtet & verlaufen entlang der gemeinsamen Kraft-Wirkungslinie
- Beträge der Beschleunigungen sind umgekehrt proportional zu ihren Massen
- Beschleunigung führt zu zwei prinzipiell unterschiedlichen Bewegungen

Beschleunigung verändert nur den Betrag der Geschwindigkeit <-> gleichmässig beschleunigte (geradlinige) Bewegung

Beschleunigung verändert nur die Richtung der Geschwindigkeit <-> Kreisbewegung

GRAVITATIONSFELD

Dies ist der Raum in der Umgebung eines materiellen Körpers, in dem in jedem Raumpunkt auf einen anderen dorthin gebrachten Probekörper eine Wechselwirkung (Kraft) ausgeübt wird, die ihre Ursache in dem Vorhandensein der ersten Masse hat.

FELDLINIEN

Sie entstehen durch das Verbinden von Kraftvektoren gleicher *Richtung*. Die Feldlinien des Gravitationsfeldes der Erde sind also gerade Linien, die radial auf den Erdmittelpunkt gerichtet sind. Sie kommen aus der Unendlichkeit & enden im Zentrum der Masse m , schneiden oder berühren sich nie.

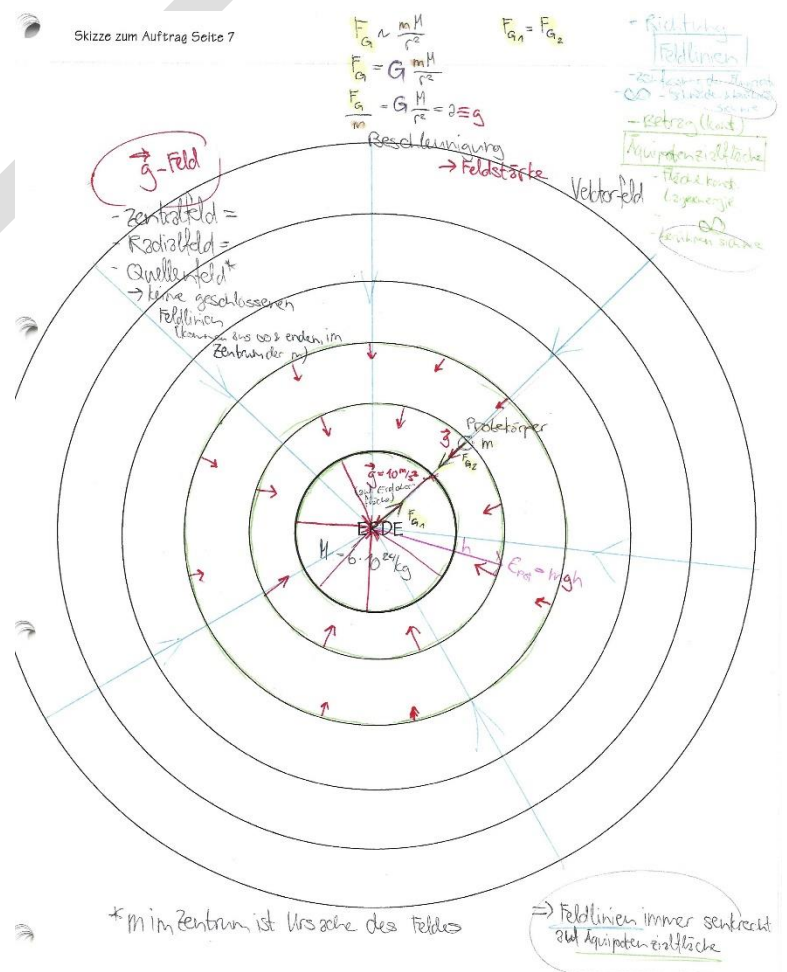
ÄQUIPOTENTIALFLÄCHEN

Sie entstehen durch das Verbinden von Kraftvektoren gleicher 'Stärke', d.h. gleichen *Betrages*. Dies sind also Flächen gleicher potentieller Energie, d.h. gleicher Lageenergie. Die potentielle Energie ist direkt proportional dem Abstand, resp. der Höhe.

Äquipotentialflächen des Gravitationsfeldes der Erde sind somit konzentrische Kugeln (Zwiebelschalenmodell). Sie gehen in die Unendlichkeit & berühren sich nie.

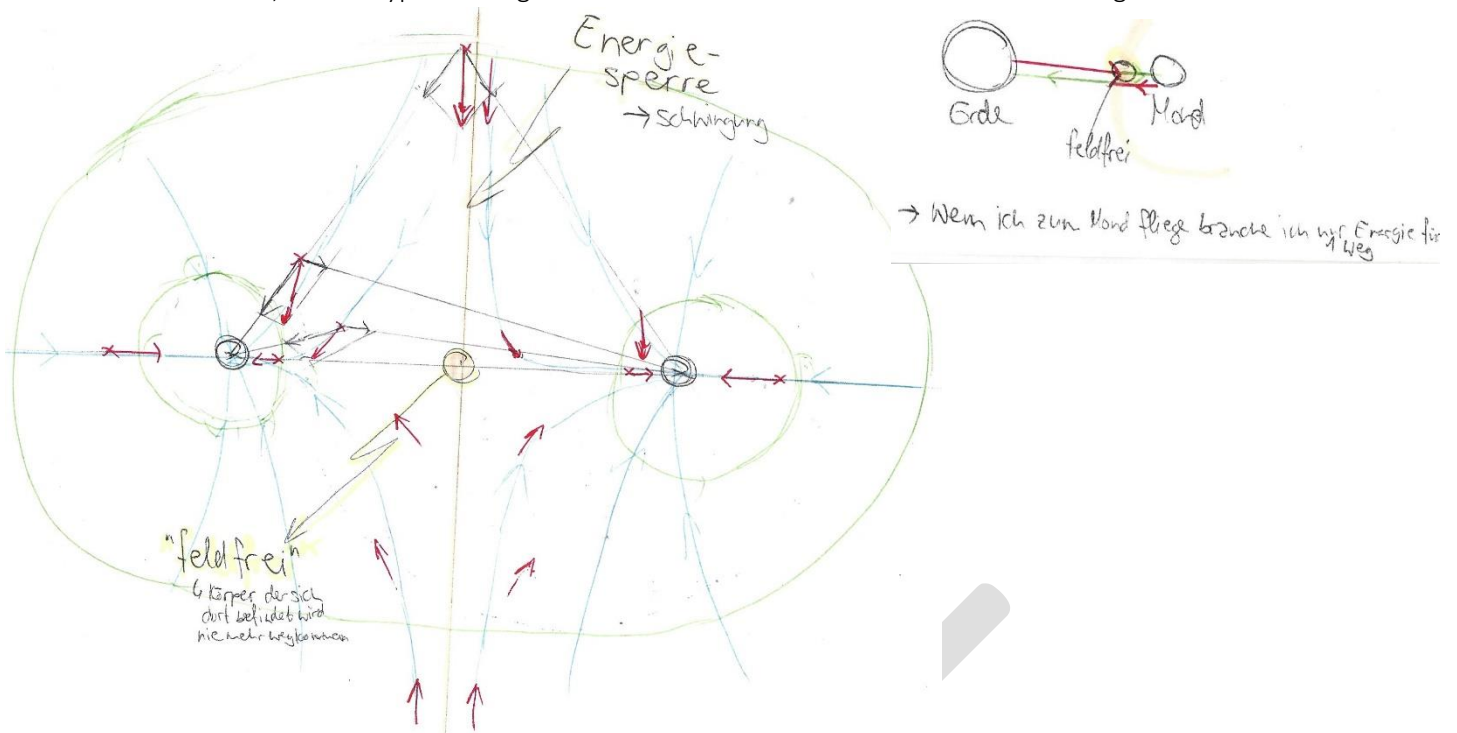
FELDSTÄRKE

Feldstärke g eines Feldes in einem bestimmten Feldpunkt ist der Quotient aus der Gravitationskraft F_G & der in diesem Punkt vorhandenen Probemasse m → physikalisch betrachtet ist die Feldstärke eine Beschleunigung.



RADIALFELD = QUELLENFELD = VEKTORFELD

Ein Kraftfeld, das die typischen Eigenschaften des Gravitationsfeldes der Erde aufzeigt.



KREISBAHNEN

BAHNGESCHWINDIGKEIT v_B

Mit welcher Geschwindigkeit bewegt sich ein Satellit auf einer Kreisbahn um die Erde, resp. ein Planet um die Sonne oder ein Mond um den Planeten? → Problem Kreisbewegung

$$\Rightarrow v_B = G m / r \text{ oder } v_B = r g$$

POTENTIELLE ENERGIE

Satellit auf seiner Bahn um die Erde besitzt nicht nur kinetische Energie (Bewegungsenergie) aufgrund seiner Bahngeschwindigkeit v , sondern auch potentielle Energie (Lageenergie) bezüglich der Erde - er bewegt sich mit konstanter Bahngeschwindigkeit auf einer Äquipotentialfläche.

$$\Rightarrow \text{potentielle Energie zweier Massen } M \text{ \& } m: E_{\text{POT}} = - G m M / r \text{ (negativ weil } G \text{ antiparallel zu } r \text{ ist } \rightarrow \alpha = 180, \cos(180) = -1; r \text{ ist der Abstand der beiden Massen)}$$

KOSMISCHE GESCHWINDIGKEITEN

1. KOSMISCHE GESCHWINDIGKEIT (ABSCHUSSGESCHWINDIGKEIT)

Mit welcher Geschwindigkeit müssen wir einen Satelliten von der Erde abschießen, damit er auf die Flughöhe x gelangt? → Problem Energieerhaltungssatz

$$\Rightarrow v_{\text{Abschuss}} = G M / r$$

2. KOSMISCHE GESCHWINDIGKEIT (FLUCHTGESCHWINDIGKEIT)

Mit welcher Geschwindigkeit müssen wir eine Rakete von der Erde abschießen, damit die aus dem Anziehungsbereich der Erde entfliehen kann, d.h. in die Unendlichkeit fliegen kann? → Problem Energieerhaltungssatz

$$\Rightarrow v_{\text{Flucht}} = 2 G M / r$$

GEOSTATIONÄRER SATELLIT

Er ist relativ zur Erdoberfläche in Ruhe (da er sich mit der Erde mit dreht). Wie gross ist seine Winkelgeschwindigkeit ω ? Wie gross ist der Abstand vom Erdmittelpunkt & wie gross ist die Höhe über der Erdoberfläche?

$$\Rightarrow \omega = 2\pi/T \quad v_B = \omega r_{\text{Planet}} \text{ oder } v_B = G M / r_{M-m} \quad r_{M-m} =$$

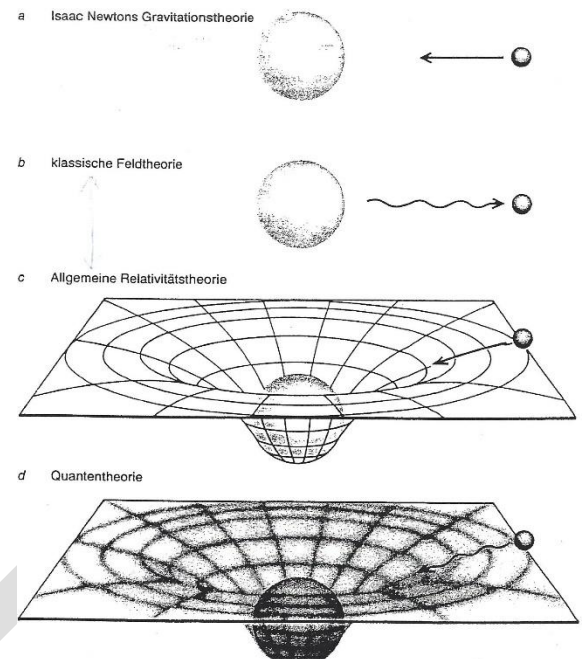
GRENZEN DER NEWTONSCHEN GRAVITATIONSTHEORIE

(a) Stärke der Kraft \leftrightarrow Abstand zwischen den Objekten \rightarrow Kraft/Wechselwirkung wirkt augenblicklich über diese Entfernung

(b) Ein Feld überträgt Kraft mit endlicher Geschwindigkeit

(c) Feldgleichungen der Gravitation beschreiben eine Raum-Zeit, die in der Nähe massereicher Objekte gekrümmt ist. Die Gravitationskraft zeigt sich durch die Bewegung von Objekten (Massen) entlang Wegen, die dem kürzest möglichen Abstand in einer gekrümmten Raum-Zeit entsprechen

(d) Der Weg der Bewegung von Massen ist unbestimmt.



SOL 09 - ASTROPHYSIK & KOSMOLOGIE

HELLIGKEIT & LEUCHTKRAFT DER STERNE

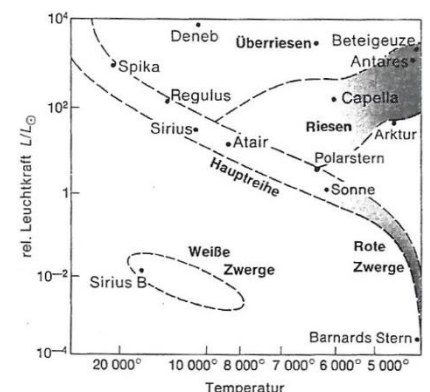
Sterne werden in sechs Grössenklassen eingeteilt: Sterne erster Grösse sind die hellsten, Sterne sechster Grösse die Schwächsten (mit blossen Auge gerade noch sichtbar). Einem Unterschied von einer Grössenklasse entspricht ein Helligkeitsverhältnis von $10^{0,4}$ (2,512).

Die **scheinbare Helligkeit I** ist die Lichtenergie, die pro Quadratmeter & Sekunde ins Fernrohr einfällt. Die **Leuchtkraft L** ist die Lichtenergie, die der Stern pro Sekunde insgesamt aussendet. Sie wird aus der Entfernung r & der scheinbaren Helligkeit eines Sternes berechnet. Bei pulsierenden Veränderlichen kann man die Leuchtkraft auch aus der Periode des Helligkeitswechsels bestimmen.

TEMPERATUR & RADIUS DER STERNE

Mithilfe des Wienschen Verschiebungsgesetzes kann man die Temperatur auf der Oberfläche eines Sternes berechnen. Es ergeben sich Werte zwischen 2'000 & 20'000 K. Die Spektrallinien geben Aufschluss über die chemische Zusammensetzung der Sterne (die meisten bestehen vorwiegend aus Wasserstoff).

Sternradien lassen sich aus Leuchtkraft & Temperatur bestimmen. Um einen ersten Überblick zu gewinnen, ordnet man Sterne im **Hertzsprung-Russell-Diagramm** nach Temperatur & Leuchtkraft an. In diesem kommt ein Grossteil bekannter Sterne entlang der **Hauptreihe** zu liegen. Die Radien dieser Sterne sind von ähnlich wie der Sonnenradius. Deutlich über ihr liegt die Reihe der **Roten Riesen**. Ihre Leuchtkraft übertrifft diejenige der Hauptreihensterne bei gleicher Temperatur um das 1000fache & sie sind etwa 100mal grösser. Unterhalb der Hauptreihe liegen die **Weissen Zwerge**. Ihre Leuchtkraft beträgt ungefähr ein Hundertstel der Leuchtkraft der Sonne & sie sind etwa 100mal kleiner. Durch Vergleich von Leuchtkraft & Helligkeit von Hauptreihensternen kann man ihre Entfernung berechnen (innerhalb der Milchstrasse & sogar in einigen benachbarten Sternsystemen).

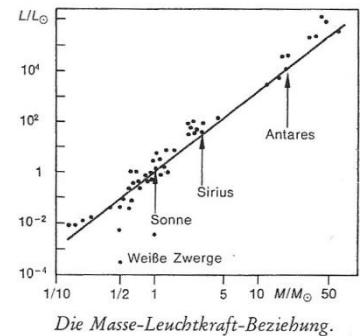


MASSE & DICHT DER STERNE

Mit dem 3. Keplerschen Gesetz kann man die Masse von Sternen in einem Dopplersystem bestimmen. Bei Hauptreihensternen besteht eine einfache Masse-Leuchtkraft-Beziehung. Die Massen aller Sterne liegen zwischen $0,01 M_{\text{Sonne}}$ & $100 M_{\text{Sonne}}$.

Aus Masse & Radius der Sterne kann man die Dichte berechnen. Die Dichte von Hauptreihensternen ist mit der Dichte von Wasser & anderen auf der Erde vorhandenen Materialien vergleichbar.

→ Dichte der Hauptreihensterne beträgt rund $1'000 \text{ kg/m}^3$. Die Dichten der Roten Riesen sind millionenmal geringer, die der Weissen Zwerge millionenmal grösser.



VERÄNDERLICHE STERNE

- **Bedeckungsveränderliche** Sterne sind Dopplersterne, die sich während des Umlaufs gegenseitig verdecken.
- **Pulsierende Veränderliche** Sterne sind Einzelsterne, deren Leuchtkraft sich periodisch verändert. Dieser Lichtwechsel kann einige Stunden, aber auch einige Jahre dauern & die Leuchtkraft ändert sich dabei bis zum 250fachen. Wichtigstes Bsp.: Die *Cepheiden*. Die Veränderung der Leuchtkraft kommt durch abwechselnde Ausdehnung & Kontraktion des Sternes zustande.
- **Novae** sind Sterne, bei denen explosionsartige Helligkeitsausbrüche auftreten. Sie sind 'Betriebsunfälle' in der Kernfusionsanlage des Sternes. Der Stern bläht sich auf das 100fache seines früheren Radius auf, während seine Leuchtkraft um einen Faktor 1'000 bis 100'000 ansteigt. Erst nach einigen Monaten oder Jahren nimmt die Leuchtkraft wieder langsam ab.
- **Supernovae** sind katastrophale Explosionen von Sternen, bei denen die Helligkeit auf das 100'000'000fache ansteigt.

AUFBAU VON GALAXIEN

Es ist ungeklärt, wie Galaxien entstehen & warum sich Sterne zu solchen spiralförmigen, abgeflachten Ellipsoiden oder anderen Formen vereinen. Der Grund für die Abflachung der Galaxien ist das Zusammenziehen einer Gaswolke, welche sich aufgrund ihrer Drehung abplattete & in Einzelsterne aufspaltete. Mithilfe des Doppler-Effekts kann man die Rotation unserer Galaxis bestimmen. Ungefähr einmal in 200 Mio. Jahren dreht sie sich um ihre Achse. Ihre Masse kann man aus der Rotationsgeschwindigkeit ermitteln → $M \approx 10^{10} M_{\text{Sonne}}$.

Der mittlere Abstand der Sterne in einer Galaxis beträgt einige Lichtjahre. Nicht die gesamte Materie ist in Sternen vereint, besonders in Spiralarmen findet man **interstellare Materie** in Form von Gas- oder Staubwolken. Wegen der geringen Dichte wird das interstellare Gas nur durch Beleuchtung von einem hellen Stern sichtbar. Dann beginnt sie selbst zu strahlen (**Emissionsnebel**) oder reflektiert das Sternenlicht (**Reflexionsnebel**). **Staubwolken** machen nur etwa 1% der interstellaren Materie aus. Als Dunkelwolken verändern sie oft den Durchblick auf dahinterliegende Sterne → Erklärung für 'sternenfreie Gebiete' innerhalb unserer Galaxis.

Die Galaxien sind durch die Entstehung aus grossen Gaswolken von zahlreichen **kugelförmigen Sternhaufen** umgeben. Ihre Verteilung ist nicht abgeflacht, sondern hat die ursprüngliche Form der Gaswolke. In diesen Sternhaufen sind man vor allem alte Sterne.

ENTSTEHUNG EINES STERNES

Bei tiefen Temperaturen erreichen die meisten Moleküle in einer Gaswolke nicht die zum Entweichen notwendige Fluchtgeschwindigkeit, sondern fallen unter der Wirkung der Gravitationskraft wieder zurück. Die Gaswolke breitet sich dann nicht im Raum aus, sondern zieht sich zusammen.

Wenn die Gaswolke mehrere hundert Lichtjahre ausgedehnt ist & eine Mindestmasse von $6300 M_{\text{Sonne}}$ aufweist, können sich Sterne bilden. Während sich die Wolke weiter zusammenzieht steigt ihre Dichte. Dadurch werden kleinere Teilwolken instabil & ziehen sich ebenfalls zusammen. So entsteht aus einer grossen Wolke interstellaren Gases eine Assoziation von Sternen.

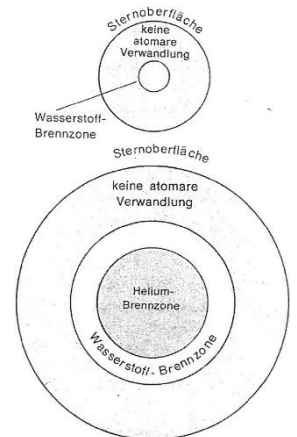
HAUPTREIHENSTERNE

Die Temperatur in einer kontrahierenden Gaswolke steigt solange an, bis Kernreaktionen im Inneren der Gaswolke einsetzen. Wenn die Kontraktion zum Stillstand kommt, leuchtet ein Stern auf. Wenn die Sternmasse unter einem Hundertstel Sonnenmasse ist, kühlt der Stern allmählich ab & wird zu einem planetenähnlichen Körper (**Schwarzer Zwerg**).

Damit der Stern stabil ist, muss der Gasdruck im Inneren der Gravitation das Gleichgewicht halten. Ist die kinetische Energie der Moleküle zu gross, fliegt der Stern auseinander. Ist sie zu klein, fällt der Stern zusammen. Die hohen Temperaturen im Sterninneren werden durch Kernfusion aufrechterhalten. Dabei wird Wasserstoff in Helium umgewandelt ('**Wasserstoffbrennen**'). Die Masse der Sonne reicht aus, um das Wasserstoffbrennen ca. 10 Mrd. Jahre aufrechtzuerhalten. In dieser Zeit verbleibt die Sonne auf der Hauptreihe. Die massereichen Sterne, die wir heute auf der Hauptreihe beobachten, sind erst vor relativ kurzer Zeit entstanden → in der Galaxis entstehen dauernd neue Sterne.

ALTERSPHASE DER STERNE

Wenn etwa 10% des Wasserstoffvorrates eines Sternes verbraucht sind, beginnt eine neue Entwicklungsphase. Das schwere Helium sammelt sich im Sterninneren an & die Fusion des Wasserstoffes geht in einer weiter aussen liegenden Schicht vor sich. Der Stern bläht auf & wird zum Roten Riesen. Für die Sonne wird dies in ca. 4 Mrd. Jahren der Fall sein, ihr Radius reicht dann weit über die Erdbahn hinaus.



ZUSAMMENBRUCH EINES STERNES

Das Gleichgewicht, welches ein Roter Riese nach seiner Expansion erreicht, ist nicht so stabil wie das Wasserstoffbrennen auf der Hauptreihe. Manche Sterne beginnen zu pulsieren, andere machen Nova-Ausbrüche. Bei massenreichen Sternen kann es auch zu Supernova-Ausbrüchen kommen, bei denen ein Teil der Sternmasse in den Raum geschleudert wird & dort eine Gaswolke bildet. Am Ende dieser Entwicklungsphasen bricht der Stern unter der Wirkung seines eigenen Gravitationsfeldes zusammen. Bei diesem Gravitationskollaps können der Arten von Himmelskörpern entstehen:

- **Weisser Zwerg:** Entsteht beim Zusammenbruch eines Sternes mit einer Masse von bis zu $2 M_{\text{Sonne}}$. *Beispiel: Sirius-Begleiter*
- **Neutronenstern:** Ist der innerste Teil eines Sternes, welcher nach einer Supernova-Explosion in sich zusammenstürzt (der grosse Teil wird nach aussen geschleudert). Die Explosion tritt bei einem Stern mit einer Masse zwischen $2 M_{\text{Sonne}}$ & $10 M_{\text{Sonne}}$ auf.
- **Schwarzes Loch:** Entsteht bei einer Sternmasse $> 10 M_{\text{Sonne}}$, wobei kommt der Kollaps nicht zum Stillstand kommt & der Stern immer weiter in sich zusammenstürzt.

WEISSE ZWERGE & NEUTRONENSTERNE

Die hohe Dichte von Weissen Zwergen zeigt, dass in ihnen Atome unter der Wirkung der Gravitation auf ein Hundertstel ihres üblichen Radius zusammengedrückt werden → jedem Elektron steht nur sehr wenig Raum zur Verfügung → sein Impuls & kinetische Energie steigen an.

Da der Druck der Elektronen nur bis zur **Chandrasekhar-Grenze** ($M = 1,4 M_{\text{Sonne}}$) der Schwerkraft zustande hält, entstehen Weisse Zwerge nur beim Gravitationskollaps *masseärmerer Sterne*.

Beim Zusammenbruch *massereicherer Sterne* hält der Druck der Elektronen dem Kollaps nicht stand & die Dichte der Materie nimmt immer weiter zu → Energie der Elektronen steigt solange an, bis sie ausreicht um aus Elektron & Proton ein Neutron entstehen zu lassen: $e + p \rightarrow n + \nu \Rightarrow$ **inverser β -Zerfall**. Dadurch werden die Elektronen allmählich aufgebraucht & die gesamte Sternmaterie verwandelt sich in Neutronen. Der Wegfall des Druckes der Elektronen bewirkt, dass der Gravitationskollaps umso rascher fortschreitet & der Stern immer höhere Dichte erreicht → Neutronen haben weniger Raum → ihr Impuls steigt. Erreichen die Dichten ungefähr die von Kernmaterie, kann der Druck der Neutronen den Kollaps zum Stillstand bringen. Eine Schockwelle geht durch den Stern & ein Teil der Sternmaterie wird nach aussen geschleudert, während im Inneren der Neutronenstern zurückbleibt (Radius von ca. 10km). Neutronensterne nennt man auch **Pulsare**, da sie eine pulsierende Strahlung aussenden (**Synchrotronstrahlung**)

SCHWARZE LÖCHER

Beim Kollaps eines Sternes mit der Masse $> 10 M_{\text{Sonne}}$ vermag auch der Druck der Neutronen der Gravitation nicht das Gleichgewicht halten → Stern fällt immer weiter in sich zusammen bis er schliesslich fast punktförmig wird. Infolge der Abnahme des Sternradius erhöht sich die Fluchtgeschwindigkeit & erreicht schliesslich Lichtgeschwindigkeit. Ist dieser **Schwarzschildradius** erreicht, können weder Licht noch Teilchen die Sternoberfläche verlassen & der Stern wird zum Schwarzen Loch.

Da Schwarze Löcher keinerlei Strahlung aussenden, ist ihre Existenz nur beobachtbar, wenn ein Stern eines Doppelstern-Systems kollabiert & ein Schwarzes Loch bildet.

EXPANSION DES UNIVERSUMS

Mithilfe des Doppler-Effekts lässt sich die **Rotverschiebung** erklären: Alle Spektrallinien entfernter Galaxien weisen eine Verschiebung zum roten Ende des Spektrums hin auf. Bewegt sich eine Galaxis mit der Geschwindigkeit v von der Erde weg, so empfangen wir das von ihr ausgehende Licht mit verminderter Frequenz f' . Aus der Rotverschiebung kann man die Geschwindigkeiten der Galaxien bestimmen. Die Fluchtgeschwindigkeit der Galaxien ist proportional zu ihrer Entfernung von der Erde. Der Proportionalitätsfaktor H heisst **Hubble-Konstante** ($1,6 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$). Sein Zahlenwert folgt aus den Messungen der Rotverschiebung \Rightarrow Alle Galaxien entfernen sich voneinander mit Geschwindigkeiten, die proportional zur Entfernung sind (waren vor ca. 20Mrd. Jahren alle in einem Punkt vereinigt). Die Hubble-Konstante ist eine Funktion der Zeit. Sie nimmt im Verlauf der Zeit allmählich ab & erscheint nur als Konstante, weil alle astronomischen Messungen sich nur auf einem Zeitraum von wenigen Jahrhunderten beziehen.

Die Allgemeine Relativitätstheorie liefert für den zukünftigen Verlauf der Expansion des Universums zwei Möglichkeiten:

1. Ist die mittlere Dichte geringer als ρ_c , reicht die Anziehung zwischen den Massen im Universum nicht aus, um die Expansion zu stoppen & umzukehren.
2. Ist die mittlere Dichte grösser als ρ_c , so wird die Expansion durch die Gravitationsanziehung allmählich gebremst & kommt zum Stillstand. Das Universum stürzt schliesslich wieder in sich zusammen.

GRÖSSE DES UNIVERSUMS

Weil seit dem Urknall rund 13Mrd. Jahre vergangen sind, kann Licht bisher nur aus einem Umkreis von 13 Mrd. Lichtjahren aus der Erde eingetroffen sein → ein **Welthorizont** begrenzt den uns zugänglichen Bereich des Universums auf einen Ausschnitt.

Die Entdeckung von nicht-euklidischen Geometrien & ihre physikalische Verwirklichung in der allgemeinen Relativitätstheorie haben gezeigt, dass das Universum auch endlich, aber unbegrenzt sein kann. Ein Beispiel wäre dafür wäre eine Kugel. In solchen dreidimensionalen **nicht-euklidischen Räumen** kehrt man bei einer Weltraumreise, die stets in dieselbe Richtung verläuft, nach langer Zeit wieder an den Ausgangspunkt zurück.

DAS FRÜHE UNIVERSUM

Aus der Rotverschiebung der Spektrallinien hat man geschlossen, dass das Universum vor ca. 13Mrd. Jahren in einem Urknall entstanden ist. Kurz nach dem Urknall war das Universum sehr heiss & intensive Kernschmelzungen fanden statt. In dieser Zeit sollte das Universum auch von **Schwarzer Strahlung** sehr hoher Temperatur gefüllt gewesen sein. Reste dieser Strahlung haben sich bis in unsere Zeit als **kosmische Hintergrundstrahlung** mit einer Temperatur 2,7 K erhalten. Diese Strahlung kann man aufgrund von Messen der Spektralverteilung erkennen.

Die Epochen der Kosmologie:

- **Zeitalter der Elementarteilchen:** Temperatur war so hoch, dass sich alle Elementarteilchen fast mit Lichtgeschwindigkeit bewegten & in ständigen Stößen immer neue Teilchen erzeugten, die rasch wieder zerfielen.
- **Zeitalter der Kernreaktionen:** Durch Stösse zwischen Protonen, Neutronen & anderen Teilchen bildeten sich Atomkerne, wobei auch ein Teil der chemischen Elemente entstand. Allerdings entstanden in diesen Sekunden nur leichte Elemente. Die Anderen müssen in Kernreaktionen gebildet worden sein, die später in Sternen & Super-Nova-Explosionen stattfanden.
- **Zeitalter der Strahlung:** Kernreaktionen kamen allmählich zum liegen & eine Mio. Jahre änderte sich nichts Wesentliches an der Struktur der Materie. Die intensive kosmische Strahlung in dieser Zeit liess die Entstehung von Sternen nicht zu.
- **Zeitalter der Sterne:** Aus Atomkernen & Elektronen konnten sich Atome bilden. In der Folge entstanden die ersten Sterngenerationen, aus deren Überresten auch unser Sonnensystem aufgebaut ist.

Zeit	Dichte in kg/m^3	Temperatur in K
10^{10} Jahre	10^{-27}	2,7
Zeitalter der Sterne		
10^6 Jahre	10^{-18}	10^4
Zeitalter der Strahlung		
1000 s	10	10^8
Zeitalter der Kernreaktionen		
10^{-4} s	10^{+18}	10^{12}
Zeitalter der Elementarteilchen		
0	∞	∞