

Relativitätstheorie – Fragen 1

Spezielle Relativitätstheorie:

Was ist der **Lichtäther**?

Warum hat man ihn gebraucht?

Warum wurde der Lichtäther fallen gelassen?

Spezielle Relativitätstheorie:

Experiment von Michelson–Morley

Wie ist das Experiment aufgebaut?

Was sollte es messen?

Was hat es gemessen?

Was war die Folgerung daraus?

Spezielle Relativitätstheorie:

Was ist das **Relativitätsprinzip**?

Definition der **Lichtgeschwindigkeit**?

Spezielle Relativitätstheorie:

Die Zeit

Was ist die Definition der Zeit?

Kommt uns die Zeit immer gleich schnell vor?

Wie misst man die Zeit?

Relativitätstheorie – Antworten 1

Das **Relativitätsprinzip** besagt, dass alle Inertialsysteme gleichberechtigt sind. Die Naturgesetze sind in allen Inertialsystemen durch dieselben Gleichungen beschrieben.

Inertialsysteme sind Systeme, in denen keine äußeren Kräfte wirken (wie die Schwerkraft). Es gilt der **Trägheitssatz**: Ein Körper ist in Ruhe oder er bewegt sich mit konstanter Geschwindigkeit auf geradliniger Bahn (ähnlich wie im Weltall – in kurzer Zeit)

Die **Lichtgeschwindigkeit** ist im Vakuum in allen Richtungen gleich groß und hat den Wert $c = 299\,792\,458$ m/s – unabhängig von der Bewegung der Lichtquelle und des Beobachters.

Huygens interpretierte **1690** das Licht als **Wellenphänomen** und führte den Äther als Trägermedium ein, in Analogie zur Luft für den **Schall**. Dieser **Lichtäther** durchdrang nach seiner Vorstellung die feste Materie ebenso wie den leeren Raum des **Weltalls**. Das Konzept in sich wies schon die Schwäche auf, dass der Äther einerseits Eigenschaften eines **starren Körpers** haben musste, um die Querschwingungen des Lichts aufnehmen zu können, andererseits aber Eigenschaften einer **Flüssigkeit** zeigen musste. Untersuchungen zur Äthertheorie hatten zwischenzeitlich zu der Annahme geführt, dass der Ätherstoff etwa $1,5 \cdot 10^{11}$ mal leichter sein musste als **atmosphärische Luft**.

Der Lichtäther sollte irgendwie im Weltraum fixiert sein und die Relativbewegung der Erde dazu sollte einen **Dopplereffekt** auslösen, so dass das Licht in unterschiedlichen Richtungen verschieden schnell sich ausbreiten sollte (Bei Gegenwind kann der Schall sich nicht so schnell nach vorne ausbreiten).

Aber das **Experiment von Michelson–Morley** zeigte, dass die Licht–Geschwindigkeit in allen Richtungen gleich groß ist. Es erschien unplausibel, dass sich der Lichtäther mit der Erde mitbewegen sollte, was als einzige Lösung noch übrig geblieben wäre. Daher wurde das Modell „Lichtäther“ fallen gelassen.

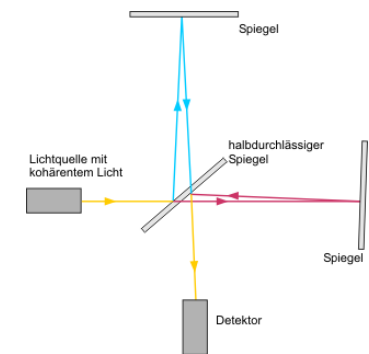
Augustinus von Hippo, (**354 – 430** in Algerien) war einer der vier **lateinischen Kirchenlehrer** der **Spätantike** und ein wichtiger **Philosoph** an der Epochenschwelle zwischen Antike und Mittelalter. Er sagt über die Zeit: „Was also ist die **Zeit**? Wenn niemand mich danach fragt, weiß ich’s, will ich’s aber einem Fragenden erklären, weiß ich’s nicht.“

Er sprach von der **Subjektivität des Zeiterlebens**, das nicht exakt erfassbar ist.

Einstein sagt dazu: Wenn man zwei Stunden lang mit einem netten Mädchen zusammensitzt, meint man, es wäre eine Minute. Sitzt man jedoch eine Minute auf einem heißen Ofen, meint man, es wären zwei Stunden. Das ist Relativität.

Wir haben uns auf eine **Zeitmessung** geeinigt, die mit den regelmäßigen Naturvorgängen zusammenhängt – wie: Tagesrhythmus, Pendelbewegung, **Atomschwingung**.

Der Aufbau des **Michelson-Morley-Experiments** (siehe Abb.) war: Ein Lichtstrahl wurde an einen halbdurchlässigen Spiegel in zwei Lichtstrahlen geteilt, wobei der eine senkrecht zur Bewegungsrichtung der Erde und der andere parallel zur Bewegungsrichtung der Erde verlief. In einen bei beiden Lichtstrahlen gleichen Abstand wurden die Lichtstrahlen gespiegelt und wiederum auf den Halbspiegel geworfen. Dieser führte beide Lichtstrahlen zusammen, wodurch diese interferieren konnten. Es wurde ein Interferenzmuster erzeugt. Die ganze Apparatur wurde nun um 90° gedreht. Dadurch wurden die Strahlen vertauscht und es sollte sich somit das Interferenzmuster verschieben. Dieses sah jedoch genau so wie das erste aus. Das **Michelson-Morley-Experiment** sollte die Relativbewegung der Erde im Lichtäther messen. Es war ein Fehlschlag. Eine Bewegung der Erde durch einen **Äther** konnte nicht nachgewiesen werden und somit auch nicht der Äther selber.



Daraus erwuchsen erste **Zweifel** an der Existenz eines Lichtäthers.

Relativitätstheorie – Fragen 2

Spezielle Relativitätstheorie:

Die Relativität von „**Gleichzeitigkeit**“
Wann finden 2 Ereignisse gleichzeitig statt?

Synchronisation von Uhren

Spezielle Relativitätstheorie:

Lorentzkontraktion (Längenkontraktion)

Warum ändert sich die Länge einer vorbeifliegenden Rakete?

Mit welchem Faktor?

Spezielle Relativitätstheorie:

Was ist die **Zeitdilatation**?

Wie groß ist die Zeitdilatation
bei halber Lichtgeschwindigkeit
des bewegten Systems?

Spezielle Relativitätstheorie:

Galilei–Transformation
versus
Lorentz–Transformation

Relativitätstheorie – Antworten 2

Aus der **Relativität der Gleichzeitigkeit** folgt einer der bekanntesten Effekte der Relativitätstheorie, die **Längenkontraktion**. Um nämlich die Länge eines bewegten Objekts zu messen, muss man gleichzeitig den Ort der Spitze und des Endes des bewegten Objektes messen. Damit ist solch eine Längenmessung von der Geschwindigkeit des Betrachters abhängig. Je schneller ein Objekt gegenüber dem Messsystem unterwegs ist, desto mehr weicht die Definition von Gleichzeitigkeit des Objekts von der des Messenden ab. **Die vom Messenden gleichzeitig vorgenommenen Messungen von Spitze und Ende finden aus der Sicht des Objekts zunächst an der Spitze statt und erst später am Ende.** Hierdurch wird das Objekt kürzer gemessen als es im Ruhesystem ist.

Der **Verkürzungsfaktor** ist die Wurzel aus $1 - v^2/c^2$

Seien x, y, z, t die Orts- und Zeitkoordinaten im ersten System, x', y', z', t' die **Koordinaten** im zweiten System, das sich mit der **konstanten** Geschwindigkeit v_x gegenüber dem ersten System in Richtung der x -Achse bewegt. Wenn man zusätzlich annimmt, dass zum Zeitpunkt 0 die Nullpunkte der Systeme übereinstimmen, erhält man als einfachste Form der **Galileitransformation** die vier Formeln:

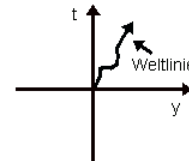
$$x' = x + tv_x, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = t$$

Die **Lorentztransformation** nimmt folgende Gestalt an:

$$\begin{aligned} x' &= \gamma(x - vt) \\ y' &= y \\ z' &= z \end{aligned} \quad t' = \gamma \left(t - \frac{vx}{c^2} \right) \quad \text{wobei} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

und c die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ist.

Es gilt $\gamma \geq 1$. Für Geschwindigkeiten nahe der Lichtgeschwindigkeit wird γ sehr groß. Für kleine Geschwindigkeiten (im Alltagsleben beobachtete Geschwindigkeiten sind in diesem Sinne



Raumzeitdiagramm eines bewegten Teilchens

immer klein) ist $\gamma \approx 1$. Die Lorentztransformation wird für $c \rightarrow \infty$, und daher $\gamma = 1$, zur **Galileitransformation**.

In der linken Darstellung sieht man nun, wie sich ein Teilchen in der Raumzeit bewegt. Wenn es eine gleichmäßige Geschwindigkeit hat, ergibt sich eine schräg ansteigende gerade Linie. Durch beschleunigte oder verzögerte Bewegung erhält man eine Kurve. Bei Beschleunigung bewegt sich die Kurve von der Zeitachse weg, durch Abbremsen wieder auf sie zu. Solche Linien, ob Kurven oder Geraden innerhalb der Raum-

zeit nennt man **Weltlinien**.

Wann finden 2 Ereignisse gleichzeitig statt?

Dazu muss man die Information dieser Ereignisse haben. Die erhalten wir z.B. mit Lichtgeschwindigkeit, wenn es um optische Phänomene geht – mit all den Unsicherheiten (hat sich die Lichtquelle bewegt?).

Ruhen beide Systeme, von denen wir die Information erhalten, ist alles einfach: **Zwei Ereignisse werden als gleichzeitig erkannt, wenn die von ihnen ausgehenden Lichtsignale einen in der Mitte tischen ihnen befindlichen Beobachter gleichzeitig erreichen.**

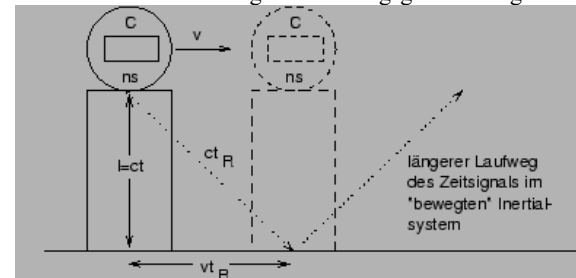
Im bewegten System ist das anders:

Vom Halbierungspunkt eines Maßstabs werden zwei Lichtsignale in entgegengesetzte Richtungen geschickt. Schon aufgrund der Symmetrie dieser Situation kommen die beiden Photonen im Ruhesystem des Maßstabs **gleichzeitig** an den beiden Enden an. Wenn derselbe Prozess aber in einem relativ dazu bewegten Inertialsystem betrachtet wird, sieht alles ganz anders aus: Aufgrund des **Postulats** von der **Konstanz der Lichtgeschwindigkeit** bewegen sich **beide** Photonen auch in diesem System mit **derselben** Lichtgeschwindigkeit c . Falls sich der Maßstab (im neuen System) nach rechts bewegt, läuft sein linkes Ende dem nach links fliegenden Photon entgegen, während sein rechtes Ende dem nach rechts fliegenden Photon davonläuft. Das Ankommen der Photonen an den Enden des Maßstabs kann daher in diesem System **nicht gleichzeitig** stattfinden.

Die Synchronisation von Uhren kann mit einem elektromagnetischem Impuls erfolgen. Dabei muss man aber den Weg berücksichtigen und die damit verbundene Zeit-Verzögerung.

Die Zeit dehnt sich

Für einen bewegten Beobachter verstreicht die Zeit langsamer: Das ergibt sich zwangsläufig, wenn die Lichtgeschwindigkeit immer gleich bleibt. Wieso das so ist, versteht man, wenn der bewegte Beobachter die Zeit mit einer **Lichtuhr** misst: Zwischen zwei Spiegeln läuft ein Lichtstrahl hin und her. und mit jeder Ankunft des Lichtstrahls am Spiegel zählt die Uhr einen Takt weiter. Im fliegenden Raumschiff tickt diese Uhr mit normaler Geschwindigkeit (Bild). Betrachten wir Raumschiff und Uhr aber von der stehenden Erde aus, so sehen wir, wie die Lichtstrahlen einen Zickzackweg zurücklegen (Bild). Da dieser Weg länger ist, laufen von uns aus gesehen die Uhren im Raumschiff langsamer. Diese Zeitdehnung ist bei Alltagsgeschwindigkeiten extrem klein.



Bei **halber Lichtgeschwindigkeit** des bewegten Systems wird die Zeit verlängert auf

Kehtwert von $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \sqrt{1 - \frac{c^2/4}{c^2}} = \sqrt{1 - \frac{1}{4}} = 0,866 \rightarrow 1:0,866 = 1,15$ (15% langsamer)

Relativitätstheorie – Fragen 3

Spezielle Relativitätstheorie:

Wie funktioniert die **Geschwindigkeitsaddition**

Spezielle Relativitätstheorie:

Die relativistische Masse(nzunahme)

Spezielle Relativitätstheorie:

Die relativistische Energie

Spezielle Relativitätstheorie:

Äquivalenz von Masse und Energie

Relativitätstheorie – Antworten 3

Einstein konnte die Formel für die **Gesamtenergie eines Körpers** herleiten: Bei Bewegung mit Geschwindigkeit v und Ruhemasse m_0 ergibt das:

$$E = \frac{m_0 \cdot c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = m_0 \cdot c^2 + \frac{3}{8} \cdot \frac{m_0 v^4}{c^2} + \dots$$

Der erste Term ist die **Ruheenergie** $m_0 \cdot c^2$

Die **relativistische kinetische Energie** leitet sich von der Einsteinformel $E = m_v \cdot c^2$ ab, wenn man die Ruheenergie $E_0 = m_0 \cdot c^2$ abzieht, das ergibt:

$$E_{\text{kin}} = (m_v - m_0)c^2 = \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) \cdot m_0 c^2$$

$$\approx \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} m_0 c^2 = \frac{1}{2} m_0 v^2 = \text{klassische } E_{\text{kin}}$$

Diese Näherung gilt für Geschwindigkeiten, die klein gegenüber der Lichtgeschwindigkeit sind

Formt man die Einsteinformel $E_{\text{kin}} = m_v c^2 - m_0 c^2$ auf m um, so ergibt sich $m = m_0 + \frac{E_{\text{kin}}}{c^2}$. Das kann man so interpretieren: Führt man einem Körper die Energie E_{kin} zu, so erhöht sich seine Masse um $\frac{E_{\text{kin}}}{c^2}$

Massendefekt ergibt sich, wenn sich die Kernbestandteile zu einem Kern binden und die Bindungsenergie sich in verringerter Masse des Kerns ausdrückt.

Wenn sich eine Rakete mit halber Lichtgeschwindigkeit bewegt und einen Lichtstrahl in Fahrtrichtung aussendet, so müssen sich beide Geschwindigkeiten so addieren, dass wieder die Lichtgeschwindigkeit entsteht, obwohl sich die Rakete bewegt.

Das leistet die Formel:

$$u = \frac{u' + v}{1 + \frac{u' \cdot v}{c^2}} \quad \text{wobei } u' \text{ die Geschwindigkeit im System } S' \text{ ist, } u \text{ die Geschwindigkeit im System } S, \text{ wenn sich } S' \text{ relativ zu } S \text{ mit Geschwindigkeit } v \text{ bewegt.}$$

Beispiel: $u' = c$ und $v = c/2 \rightarrow u = \frac{c + c/2}{1 + \frac{c \cdot c/2}{c^2}} = \frac{\frac{3}{2}c}{\frac{3}{2}} = c$

Die Masse wächst

Nicht nur Raum und Zeit verändern sich für einen schnell bewegten Beobachter, sondern auch die Massen. Warum das so ist, zeigt der Blick in ein fliegendes Raumschiff. Die Astronautin wirft eine blinkende Lampe gegen die Wand und lässt sie zerschellen, Von der Erde aus betrachtet scheint die Lampe langsamer zu fliegen, da die Zeit im Raumschiff langsamer verstreicht.

Dennoch muss die Wucht mit der die Lampe an die Wand prallt, für beide Beobachter gleich sein, denn beide sehen sie ja zerschellen. Deshalb muss, von der Erde aus gesehen, die Masse des Radios gewachsen sein.

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Beispiel: Teilchenbeschleuniger \rightarrow neue Teilchen

Relativitätstheorie – Fragen 4

Grundlagen der **Allgemeinen Relativitätstheorie**

Die Rotverschiebung im Gravitationsfeld

Grundlagen der **Allgemeinen Relativitätstheorie**

Uhren im Gravitationsfeld

Grundlagen der **Allgemeinen Relativitätstheorie**

Maßstäbe im Gravitationsfeld

Grundlagen der **Allgemeinen Relativitätstheorie**

Raumkrümmung

Relativitätstheorie – Antworten 4

Bringt man einen Maßstab A der Länge L_A in die Nähe einer schweren Masse M , so wird er kürzer als ein weit entfernter Vergleichsmaßstab B der Länge L_B

$$L_A = L_B \cdot \left(1 - \frac{GM}{c^2 r}\right)$$

Daraus kann man auf die **Raumkrümmung** in der Nähe von großen Massen schließen.

Begründung: Maßstäbe werden in der Massennähe verkürzt, so dass mehr Maßeinheiten in der Massennähe erforderlich sind, was nur durch eine **Raumkrümmung** erklärbar wird.

Beweis durch Experimente:

- Shapiro-Experiment 1965: Radarstrahl von der Erde zur Venus und retour wird bei Sonnennähe um 36 km länger
- Gravitationswellen 1974 von Joseph Taylor und Russel Hulse in einem Doppelsternsystem mit Pulsar (Verlangsamung der Pulse)
- Lichtablenkung 1919 bei einer Sonnenfinsternis: Ein Stern, der eigentlich hinter der Sonne stehen sollte ist neben der Sonne zu sehen.
- Gravitationslinseneffekt bei großen Massen (Schwarzes Loch): Ein Sternsystem ist rechts und links von der Großen Masse zu sehen.
- Periheldrehung des Merkur: Durch die Sonnenehe des Merkur ist die Raumkrümmung durch die Sonne so stark, dass die Hauptachse der Ellipsenbahn sich um 9,55 Winkelminuten pro Jahrhundert dreht.

Steigt ein Lichtstrahl im Gravitationsfeld empor, so verringert sich seine Frequenz auf $f^c = f \cdot \left(1 - \frac{gH}{c^2}\right)$ weil er gegen die Gravitation arbeiten muss und daher Energie ($E=hf$) verliert.

Das ergibt eine Frequenzveränderung in Richtung Rot.

Schickt man einen Lichtstrahl vom Boden zu einer Raumstation zur Zeitsynchronisation, so ergibt sich dort eine Verringerung der Frequenz, was zu der Vermutung im Raumschiff führt, dass die Uhr am Boden langsamer geht:

$$T_{\text{Boden}} = T_{\text{Raumschiff}} \cdot \left(1 - \frac{gH}{c^2}\right) \quad \text{bzw.} \quad = T_{\text{Raumschiff}} \cdot \left(1 - \frac{GM}{c^2 r}\right)$$

g=Erdbeschleunigung, H die Höhe über dem Erdboden,

G=Gravitationskonstante, M Masse der Erde, r Abstand der Uhr vom Erdmittelpunkt

Das muss insbesondere bei dem GPS-Positionierungssystem beachtet werden.

Relativitätstheorie Quantenphysik – Fragen 5

Relativitätstheorie–Überblick

Relativitätstheorie und Quantentheorie

Stellung der Relativitätstheorie innerhalb der Entwicklung der Physik

Historische Bedeutung der Relativitätstheorie,

klassische Physik und moderne Physik

Quantenphysik

Photonenhypothese

Scheitern der klassischen Physik
Photonenkonzept

Quantenphysik

Photonenhypothese

Plancksche Gleichung
Energie und Impuls der Photonen

Relativitätstheorie Quantenphysik – Antworten 5

Der **Photoeffekt** behandelt das Freisetzen elektrisch geladener Teilchen aus einem Material, wenn dieses von elektromagnetischer Strahlung (etwa Licht oder Ultraviolettstrahlung) getroffen wird. Dieser Effekt wurde 1886 von Heinrich Hertz erstmals .Unoxidierte Metalle geben im negativ aufgeladenen Zustand Elektronen ab, wenn ihre Oberfläche durch Licht bestrahlt wird. Die von den Elektronen aufgenommene kinetische Energie hängt von der Frequenz (und damit von der Farbe) des bestrahlenden Lichtes ab und nicht von dessen Intensität. Dies stand im Gegensatz zur klassischen Physik, die dies nicht erklären konnte, da nach allem, was man damals wusste, die Energie einer Welle von deren Amplitude und nicht von der Frequenz abhängig ist.

Albert Einstein zeigte 1905, dass eine Beschreibung des Lichts durch Lichtquanten, heute Photonen genannt, den Effekt gut erklären kann. Insofern gilt der fotoelektrische Effekt als eines der Schlüsselexperimente zur Begründung der [Quantenphysik](#), da er den Versuch aufgrund der Lichtquantenhypothese erklärte. Einstein wurde 1921 für diese Arbeit mit dem [Nobelpreis für Physik](#) ausgezeichnet.

Die Energie E elektromagnetischer Strahlung einer gegebenen Frequenz f kann nur in bestimmten Portionen absorbiert und emittiert werden. Die Energie einer Strahlung kann sich also nur um den folgenden Betrag ändern (= Energie eines Photons)

$$E = h \cdot f$$

Der Impuls p eines Photons beträgt damit

$$p = \frac{h}{\lambda} \quad \text{mit } h=6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

Damit kann man auch den **Strahlungsdruck p in Sternen** erklären.

Die **Relativitätstheorie** hat das Verständnis von **Raum und Zeit** revolutioniert und Phänomene aufgedeckt, die sich der anschaulichen Vorstellung entziehen. Die betreffenden Phänomene lassen sich jedoch mathematisch präzise beschreiben und sind experimentell bestens bestätigt.

Die Relativitätstheorie hat Widersprüche in der Elektrodynamik ausgeräumt, die Ende des 19. Jahrhunderts Probleme machten. Mit der neuen Definition der Zeit, die auf der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit beruht, wurde die Physik revolutioniert.

Wenn man **die Geschwindigkeit sehr klein** in Bezug auf die Lichtgeschwindigkeit wählt, so geht die Relativitätstheorie in die klassische Physik von Newton über.

Ebenso geht die Allgemeine Relativitätstheorie **bei Abwesenheit von großen Massen** in die klassische Physik über.

Während die **Relativitätstheorie** die Physik der großen Maßstäbe beherrscht und richtige Voraussagen für die Astrophysik liefert – beschäftigt sich die **Quantenphysik** mit den kleinsten Teilen – den Quarks und deren Wechselspiel in den Elementarteilchen. Damit sind drei der 4 Grundkräfte vereinbar – die starke und schwache Wechselwirkung und die elektromagnetische Kraft. Aber die Gravitation spielt da nicht mit.

Eins der großen Probleme des Theoriengebäudes der Physik besteht derzeit darin, dass seine beiden Säulen, die Relativitätstheorie und die Quantenphysik, in ihrer Beziehung zueinander das **Korrespondenzprinzip** (neue Theorie enthält ältere Theorie als Spezialfall) nicht erfüllen. Beide Theorien haben daher nur einen begrenzten Gültigkeitsbereich, so dass die heutige Physik keine abgeschlossene Beschreibung der Natur liefern kann. Es wird daher nach einer Theorie der so genannten **Quantengravitation** gesucht, bei der die Relativitätstheorie und die Quantenphysik als Grenzfall im Sinne des Korrespondenzprinzips enthalten sind.

Quantenphysik – Fragen 6

Quantenphysik

Photonenhypothese

Comptoneffekt
Streuung von Röntgenstrahlen an Kristallen

Berechnung der Comptonwellenlänge
aus dem Teilchenkonzept der Strahlung

Quantenphysik

Lichtteilchen und Lichtwelle

Quantenphysik

De Broglie Beziehung (Materiewelle)

Quantenphysik

Doppelspaltversuch

Quantenphysik – Antworten 6

Im Jahre 1923 stellte der französische Physiker Louis de Broglie die Hypothese auf, dass **Elektronen auch Welleneigenschaften** zeigen mit einer Wellenlänge von

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_0E}} \text{ mit } m_0 = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg Elektronenmasse (} h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Js)}$$

und einer kinetischen Energie E.

Teilchenbeugung entsteht wenn ein Elektronenstrahl durch einen engen Spalt von Atomen in einem Nickelkristall geschickt werden. Die Ablenkung ist dann $\sin \varphi = n\lambda/d$

→ $\lambda = 0,165 \text{ nm}$ für $n = 1$ und $d = 0,2 \text{ nm}$ und $\varphi = 50^\circ$
wenn eine Spannung von 54 Volt angelegt wird

Als **Compton-Effekt** bezeichnet man die Verminderung der Frequenz von Photonen bei der **Streuung** an (quasi-) freien Elektronen um einen Wert Δf (die Energie $E = h \cdot f$ sinkt um $\Delta E = h \cdot \Delta f$).

Bei der **Streuung von Röntgenstrahlen** an einem Graphitblock entdeckte man, dass die Frequenz der gestreuten Röntgenstrahlen niedriger wurde. Daher vermutete man, dass die Energie an die nahezu freien Elektronen im Körper abgegeben wurde, die dann schneller dahinziehen konnten.

Die **Comptonwellenlänge** der gestreuten Strahlung lässt sich berechnen, wenn man annimmt, dass das Licht aus Photonen-Teilchen besteht, die Energie und Impuls haben und in ein Billardspiel mit den Elektronen eintreten. Energie- und Impulserhaltungssatz genügen, um dann die neue Wellenlänge zu berechnen.

Beim **Doppelspaltexperiment** lässt man kohärentes Licht auf eine Blende mit zwei schmalen Schlitzen fallen. Auf einem Beobachtungsschirm hinter der Blende zeigt sich dann ein Interferenzmuster aus hellen und dunklen Streifen. Dieses Muster entsteht durch Interferenz der Lichtwellen von den beiden Blendenöffnungen.

Das Experiment kann nicht nur mit Licht, sondern auch mit 'Teilchen' (Elektronen, Neutronen, Atomen usw.) durchgeführt werden. Es zeigt sich auch in diesen Fällen ein Interferenzmuster wie bei Durchführung mit Licht. Das bedeutet, dass auch klassische Teilchen unter bestimmten Bedingungen Welleneigenschaften zeigen. (Man spricht dann von '**Materiewellen**'). Mit dem Doppelspaltexperiment kann man also sehr schön den **Welle-Teilchen-Dualismus** demonstrieren, der nur im Rahmen der **Quantenmechanik** erklärt werden kann.

Born'sche Deutung II: Das Verhalten der Elektronen beim Durchgang durch einen engen Spalt wird durch eine Wellenfunktion Ψ beschrieben. Die Wahrscheinlichkeit W des Auftreffens eines Elektrons an einer bestimmten Stelle des Schirmes wird durch das Quadrat der Amplitude dieser Wellenfunktion Ψ bestimmt.

Betrachtet man ein einzelnes Elektron, so kann man nicht entscheiden, durch welchen Spalt es gegangen ist. Wenn man nicht entscheiden kann, durch welchen Spalt das Elektron gegangen ist, kann man nicht von einer „Bahn“ des Elektrons sprechen. Misst man gleich hinter dem Spalt die Elektronen, so verschwindet das Interferenzbild. Wenn man also weiß, durch welchen Spalt das Elektron geht, dann interferieren die Teilchenwellen nicht zum Streifenmuster.

Licht verhält sich in einem Experiment wie eine **Welle** (Reflexion, Brechung, Beugung, Dispersion) und in einem anderen Experiment wie ein **Teilchen** (eine Fotografie mit wenig Licht wird pixelig).

Das ist der sogenannte **Welle-Teilchen-Dualismus**. Das hat die Physiker am Anfang so geärgert, dass einer gesagt hat: „*Am Montag, Mittwoch Freitag ist das Licht ein Teilchen. Am Dienstag, Donnerstag und Samstag eine Welle und am Sonntag ruht es*“

Heute hat sich die Sichtweise geändert auf: Es ist weder Teilchen noch Welle, sondern ein **Quantenobjekt**, das mit einer Theorie der **Quantenelektrodynamik** beschrieben werden kann. Das ist für den Alltag der Menschen jedoch nicht direkt zugänglich.

Bei der Beugung der Lichtwelle am Spalt entsteht ein **Streifenmuster**. Die Streifen bestehen aus kleinen Pünktchen der Photonen, die dort dichter werden, wo das Quadrat der Amplitude der zugeordneten Welle am größten ist. →

Born'sche Deutung I: Das Quadrat der Amplitude einer Lichtwelle ist der Wahrscheinlichkeit proportional, Photonen in einem bestimmten Raumbereich anzutreffen.

Quantenphysik – Fragen 7

Quantenphysik

Heisenberg'sche Unschärferelation

Gedankenexperiment mit Elektronenkanone,

Quantenphysik

Heisenberg'sche Unschärferelation

Energie–Zeit–Unschärfe

Einschränkung der Berechenbarkeit und Kausalität

Quantenphysik

Tunneleffekt Erklärung

Quantenphysik

Tunneleffekt Rastertunnelmikroskop

Quantenphysik – Antworten 7

a) **Einsperrung bedeutet Bewegung:** Durch Einsperren eines Teilchens auf einen engen Raum (Elektron auf 10^{-10} m Atomdurchmesser, Proton auf 10^{-15} m Atomkerndurchmesser) ergibt sich durch die Unschärferelation, dass der Impuls eine Mindestgröße bekommt, das Teilchen also mit immer größerer Geschwindigkeit und Energie herumflitzt, je kleiner der Raum wird, wo es sein kann.

b) **Der Tunneleffekt** entsteht, wenn eine Energiebarriere, die für klassische Teilchen nicht überwindbar wäre (Alpha-Teilchen im Kerninneren, das durch die Kernkraft eigentlich drinnen bleiben soll) durch kurzfristigen Energieüberschuss diese Barriere überwindet. Da das nur sehr kurzzeitig möglich ist, ist es nur für sehr schnelle Teilchen möglich die Energiebarriere zu überwinden. Laut Statistik kann das aber nur sehr wenige Teilchen betreffen, die so hohe Impulse haben, daher geschieht der α -Zerfall sehr selten.

Von außen schaut es so aus, als würde ein Tunnel in die Energiebarriere gegraben worden sein, daher der Name Tunneleffekt.

Das **Rastertunnelmikroskop** ist ein Mikroskop, das in der Oberflächenphysik eingesetzt wird, und ein Objekt durch "Abtasten" abbildet.

Es wird eine elektrisch leitende Spitze systematisch (in einem *Raster*) über das Untersuchungsobjekt gefahren. Sowohl Nadel als auch Objekt sind von Elektronenwolken umgeben. Der Abstand zwischen dem Objekt und der Spitze wird nun so gering gehalten, dass die Elektronen zwischen der Spitze und dem Objekt ausgetauscht werden (**Quantenmechanischer Tunneleffekt**). Dies geschieht üblicherweise bei einer Entfernung von unter 1 nm.

Wird nun eine elektrische Spannung zwischen dem Untersuchungsobjekt und der Spitze angelegt, so kann ein Strom, der so genannte **Tunnelstrom** fließen. Die Stärke dieses Stroms hängt sehr stark (exponentiell) vom Abstand der Nadel zum Objekt ab. Die Höhe der Spitze wird fortlaufend so verändert, dass der Strom konstant bleibt. Somit lässt nun über die Position der Spitze das dreidimensionale Bild der Oberfläche rekonstruieren. Die Auflösung ist bei diesem Verfahren so hoch, dass die atomare Struktur der Oberfläche sichtbar wird.

In der Quantenphysik besagt die **Heisenbergsche Unschärferelation** oder **Unbestimmtheitsrelation**, dass der Ort x und der Impuls p eines Teilchens nicht gleichzeitig beliebig genau bestimmt werden können. Sie wurde 1927 von Werner Heisenberg entdeckt. Danach gilt für die Ortsunschärfe Δx und die Impulsunschärfe Δp stets

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{4\pi} = \frac{\hbar}{2}$$

wobei $h = 6,6261 \cdot 10^{-34}$ Js das Planck'sche Wirkungsquantum ist.

Ein **Elektronenstrahl** aus einer Elektronenkanone (TV-Röhre) soll durch einen Einzelspalt **gebeugt** werden. Der Spalt hat die Breite d , der Beugungswinkel des ersten Beugungsminimums ist α , dann gilt:

$$\sin \alpha = \frac{\lambda}{d} . \text{ Da die Impulse der Elektronen nicht Null sind, sondern um einen Mittelwert}$$

$\Delta p = p \cdot \sin \alpha$ streuen, so gilt: $\Delta p \cdot \Delta x = p \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \Delta x = h$ und weil der Elektronenimpuls $p = \frac{h}{\lambda}$ ist und

$$d = \Delta x \text{ gilt } \rightarrow \boxed{\Delta x \cdot \Delta p \approx h}$$

Die Zweite Unschärfe-Formulierung: $\boxed{\Delta E \cdot \Delta t \approx \hbar}$ gibt eine Erklärung für eine kurze Energieschwankung. Brauchbar für die Erklärung des Tunneleffekts.

Laplace träumte davon, dass ein **Geist** (Dämon), der alle Anfangsbedingungen der Weltraummechanik kennen würde, auch alle zukünftigen Bewegungen vorhersehen könnte. Durch die quantenmechanische Unschärfe der Anfangsbedingungen lässt sich **keine Voraussage über längere Zeiträume** mehr machen. Das ist wie beim Billard, wenn eine Kugel 10 weitere treffen soll. Durch kleinste Ungenauigkeiten lässt sich die Bahn nicht mehr vorhersehen (Chaos-effekt)

Quantenphysik Chaostheorie – Fragen 8

Quantenphysik

**Elektronenmikroskop
Prinzip**

CHAOS–Theorie

Das chaotische System

Quantenphysik

**Elektronenmikroskop
Hauptbestandteile**

CHAOS–Theorie

Kausalität und Vorhersagbarkeit

Quantenphysik Chaostheorie – Antworten 8

Physikalische Systeme, die besonders sensitiv auf kleine Änderungen der Anfangsbedingungen reagieren, werden **chaotisch** genannt. Dann sind keine Voraussagungen über das zukünftige Verhalten möglich.
Beispiel: Wetter, Billardstöße über mehrere Kugeln,...

Wenn ähnliche Ursachen zu ähnlichen Wirkungen führen, spricht man von KAUSALITÄT. Das war bisher die Grundlage der Naturgesetze, die man sich als absolut kausal vorgestellt hat, so dass **Laplace** von einem **Dämon** gesprochen hat, der den Weltenlauf **vorausberechnen** könnte, wenn er alle Daten der Planeten und Sterne hätte.

Ist die Kausalität aber nur **schwach**, wie es bei der **Wärmelehre** der Fall ist, kann man nur mehr grobe Voraussagungen machen, so dass im extremen Fall auch das Gegenteil eintreffen kann (Wetterprognose)

Ein [Elektronenmikroskop](#) ist ein Mikroskop, welches das Innere oder die Oberfläche einer Probe mittels Elektronenstrahlen abbilden kann. Da schnelle Elektronen eine sehr viel kleinere Wellenlänge als sichtbares Licht haben und die Auflösung eines Mikroskops durch die Wellenlänge begrenzt ist, kann mit einem Elektronenmikroskop eine deutlich höhere Auflösung (derzeit etwa 0,1 nm) erreicht werden als mit einem Lichtmikroskop (etwa 200 nm).

Neben dem offensichtlichsten Vorteil des Elektronenmikroskops, der enormen Vergrößerung, bietet das Elektronenmikroskop auch eine wesentlich bessere plastische Abbildung. Die Objekte müssen jedoch **sehr aufwendig präpariert** werden. So darf das Objekt bei der Betrachtung in einem Elektronenmikroskop nur wenige Atomschichten dick sein. Außerdem herrscht in Elektronenmikroskopen ein **Hochvakuum**. All diese Voraussetzungen machen es unmöglich, lebende Organismen zu beobachten.

In der Biologie kam es zu bahnbrechenden Entdeckungen: So wurden beispielsweise die **Ribosomen** entdeckt, die eine wichtige Rolle bei der Proteinsynthese spielen.

Die Hauptbestandteile eines Elektronenmikroskops sind:

- ❖ Die **Elektronenkanone**, die die freien Elektronen in einer Kathode (als Elektronenquelle dient ein Wolframdraht) erzeugt und in Richtung einer ringförmig um die Strahlachse liegenden Anode beschleunigt. Zwischen Anode und Kathode liegt eine Hochspannung von wenigen kV bis zu 3 MV.
- ❖ **Elektronenmagnetlinsen**, die die Flugbahnen der Elektronen ablenken können. Meistens werden magnetische Linsen verwendet, welche die gleiche Funktion wie Glaslinsen im Lichtmikroskop haben.
- ❖ Das **Vakuum**, das dafür sorgt, dass die Elektronenquelle arbeiten kann und die Elektronen auf ihrem Weg nicht durch Kollision mit Luftmolekülen behindert werden.
- ❖ **Detektoren**, die die Elektronen selbst oder sekundäre Signale registrieren.

CHAOS–Klima– Fragen 9

CHAOS–Theorie

Einfache Rückkopplung

Schmetterlingseffekt

Globaler Klimawandel

Das globale Klima

Globaler Klimawandel

Der Treibhauseffekt

Globaler Klimawandel

Zukunftsszenarien

CHAOS-Klima- Antworten 9

Treibhauseffekt durch CO₂ und andere den Glashauseffekt erzeugende Gase (Methan,...):

Die kurzwelligigen Strahlen der Sonne können herein, die langwelligen Wärmestrahlungen von der Erdoberfläche aber nicht mehr so gut hinaus. Das ergibt eine Zunahme der Temperatur. Ganz ohne CO₂ hätten wir Temperaturen weit unter 0°C. Mit der Zunahme von CO₂ um 1,5 ppm (parts per million) pro Jahr und einer Basis von 400 ppm CO₂ pro Kubikmeter Luft (2015) wird die Erreichung des Klimaziels (maximal 2° Erderwärmung bis 2100) immer schwerer.

Die Hauptemittenten sind **Verbrennung von Kohle, Erdöl und Erdgas** (bei Erdgas nur halb so viel).

In Klimamodellen versucht man die Zukunft der Erderwärmung abzuschätzen. Wobei es **verstärkende Faktoren** gibt (Auftauen der **Tundraböden** und damit Entweichen von Methan, **Auftauen der Arktis** und damit weniger Reflexion der Lichtstrahlen am Eis). Oder abschwächende Faktoren (Aufsaugen des CO₂ im Meerwasser – **Kohlendioxid**, Abbau durch Pflanzen, bei starker **Bewölkung**: Reflexion des Sonnenlichts, bei Vulkanausbrüchen: Verdunkelung, durch industrielle Luftverschmutzung ebenfalls Verdunkelung – „global dimming“)

Der **Golfstrom** kann dann anfangen zum Stottern, wenn Süßwasser von Grönland das Meerwasser entsalzt und er nicht mehr Abtauchen kann. Dann ist der Temperatureausgleich zwischen Äquator und der nördlichen Hemisphäre gestört und das **El-Nino-Phänomen** (heißes Äquatorwasser und die Folgen) kann stärker werden mit Verschiebungen der Klimazonen und damit mehr Regen einerseits und mehr Dürre andererseits.

Erfolgt durch eine Information über den Zustand eines Systems eine Rückführung zur Steuerung des Systems, so spricht man von **Rückkopplung**.

Beispiele:

Verstärkung von Signalen, Klingel, Schaukeln, Räuber-Beute-Systeme, Schweinezyklus,...

Was ist der **Schmetterlingseffekt**?

Ein Schmetterling in China kann durch einen Flügelschlag ein Gewitter in Europa auslösen, da eventuell eine Luftströmung ausgelöst wird, die diesen Endeffekt hat. Wäre der Schmetterling still gewesen, hätte das Wetter einen anderen Verlauf genommen. Das gilt aber nicht für jedes Wetterphänomen.

Das globale Klima zeigt starke Schwankungen im Lauf der Jahrtausende. Wärme- und Kälteperioden wechseln einander ab. So gab es vor ca. 7000 Jahren eine **Wärmeperiode**, zwischen dem 15. und der Mitte des 19. Jahrhunderts dagegen einen Kälteperiode, die sogenannte „**Kleine Eiszeit**“, die vor allem im 15. Jahrhundert zu kalten Wintern mit vielen Gletschern und zugefrorenen Seen führte. (Ursache: Vukane?) Zwischen 1860 und 2000 stieg die globale Mitteltemperatur um 0,6°C. Das fällt mit der expandierenden Industrialisierung und Verwendung von Kohle und Erdöl zusammen. Seit dem Beginn des 20. Jahrhunderts haben die **globalen Niederschläge** im Mittel um 5–10% zugenommen. In der Sahelzone allerdings auf die Hälfte gesunken, in Europa und Nordamerika etwa um 30% gestiegen.

Derzeit steigt der **Meeresspiegel** pro Jahr um 3mm – wegen dem Abschmelzen des Grönland- und Antarktiseises und der thermischen Ausdehnung des Wassers.

Klima-Halbleiter – Fragen 10

Globaler Klimawandel

Temperaturstrahlung

Globaler Klimawandel

Wien'sches Verschiebungsgesetz

Globaler Klimawandel

Stefan-Boltzmann'sches Gesetz

Halbleiter

Reiner Halbleiter

Klima-Halbleiter – Antworten 10

Der österreichische Physiker **Josier STEFAN** stellte 1879 die These auf, dass die gesamte Strahlungsleistung P eines heißen Körpers zur 4. Potenz seiner Temperatur T proportional ist.

Ludwig Boltzmann konnte dies 1884 mit Hilfe thermodynamischer Überlegungen (er ging von Atomen aus, die Schwingungen vollführen) bestätigen.

Die Strahlungsleistung P eines schwarzen Strahlers mit der Oberfläche A und der Temperatur T beträgt:

$$P = \sigma \cdot T^4 \cdot A \quad \text{mit } \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$$

Damit kann man auch die menschliche Strahlungsleistung berechnen (Emission 700 Watt, Imission 600 Watt – Die Differenz von 100 Watt muss dauernd geleistet werden)

Unter einem **Halbleiter** versteht man einen [Festkörper](#), dessen [elektrische Leitfähigkeit](#) stark temperaturabhängig ist und der von daher je nach Temperatur sowohl als [Leiter](#) als auch als [Nichtleiter](#) betrachtet werden kann. Die Leitfähigkeit eines Halbleiters nimmt mit steigender Temperatur zu, womit diese auch als [Heißeleiter](#) bezeichnet werden. Die Leitfähigkeit lässt sich ferner durch das Einbringen von Fremdatomen aus einer anderen Hauptgruppe, das sogenannte [Dotieren](#), in weiten Grenzen steuern. Bedeutung für die [Mikroelektronik](#) erlangen Halbleiter aber insbesondere dadurch, dass ihre Leitfähigkeit auch durch Anlegen einer Steuerspannung oder eines Steuerstroms (wie z. B. beim [Transistor](#)) verändert werden kann.

Die wichtigsten Halbleiter sind **Silicium** und **Germanium**. Sie stehen im Periodensystem unter Kohlenstoff in der 4. Gruppe und sind daher sehr gut vernetzbar. Während beim Kohlenstoff Bindungen durch Elektronenpaare in die 4 Nachbarrichtungen erfolgen und relativ stabil bleiben, sind die Elektronen bei den Halbleitern lockerer gebunden und können freier über den Kristall wandern – also schwach leitfähig werden.

Jeder Körper sendet elektromagnetische Wellen aus, das wird **Temperaturstrahlung** genannt, da es von der Temperatur abhängt, welche Wellenfrequenzen ausgesendet werden. Bei Temperaturen bis 500°C sind sie im infraroten Bereich, bei höheren Temperaturen wird auch sichtbares Licht emittiert. Die Emission hängt auch von der Oberflächenbeschaffenheit des Strahlers ab. Ein Körper, der im sichtbaren Bereich des Spektrums besonders viel Strahlung absorbiert bzw. emittiert (das geht wechselweise) – wird als **SCHWARZER STRAHLER** bezeichnet. (Kann auch ein Eisbär sein).

Idealerweise ist das ein Hohlraum, der schwarz bemalt ist.

Plankh hat entdeckt, dass die Emission und Absorption von el. magn. Wellen der Frequenz f nur in Quanten erfolgt, mit der minimalen Einheit hf .

Mit $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ – das Plankh'sche Wirkungsquantum

Das **Wien'sche Verschiebungsgesetz** (nach Wilhelm Wien benannt) gibt seit 1895 als Vereinfachung des Plankh'schen Strahlungsgesetzes das Frequenzmaximum einer Temperaturstrahlung an:

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}.$$

Damit kann man auch die Oberflächentemperatur der Sonne berechnen, wenn man die Wellenlänge der maximalen Strahlung kennt.

Oder die Wellenlänge der Menschenstrahlung, wenn man die Körpertemperatur kennt.

Halbleiter – Fragen 11

Halbleiter

Halbleiter

Dotierter Halbleiter

Halbleiterdiode

Halbleiter

Halbleiter

Gleichrichter

Transistor

Halbleiter – Antworten 11

Die **Gleichrichtung** von elektrischen Wechselströmen wird insbesondere mit [Röhren](#) oder [Halbleiter-Dioden](#) durchgeführt.

Sie kann durch mehrere Schaltungen erfolgen:

1. Durch eine einfache **Diodenschaltung** entsteht ein Gleichstrom, bei dem jede zweite Halbwelle des Wechselstroms fehlt.
2. Durch die [Gleichrichterbrücke](#) werden diese Halbwellen in ihrer Polarität umgedreht und gelangen so ebenfalls in den Gleichstrom.

Um Gleichstrom mit konstanter Spannung zu erhalten, muss der durch Gleichrichtung erhaltene gepulste Gleichstrom, auch [Mischstrom](#) genannt, noch durch [Kondensatoren](#) geglättet werden.

Kleinste Mengen von fremden Atomen verändern den spezifischen Widerstand eines Halbleiters sehr stark. Diese "Verunreinigung" des reinen Halbleitermaterials mit Fremdatomen bezeichnet man als **Dotieren eines Halbleiters**.

Das Dotieren eines Halbleiters mit Fremdatomen bestimmt die Eigenschaften des Halbleiters.

Halbleiter die mit einem fünfwertigen Element dotiert werden nennt man

n-Leiter oder Donator. Halbleiter die mit einem dreiwertigen Element dotiert werden nennt man **p-Leiter oder Akzeptor**.

Ein **Transistor** ist ein elektronisches [Halbleiterbauelement](#), das zum [Schalten](#) und zum [Verstärken](#) von [elektrischen Strömen](#) und [Spannungen](#) verwendet wird. Die Bezeichnung ist eine Kurzform für die englische Bezeichnung *Transfer Varistor*, die den Transistor als einen durch Strom steuerbaren [Widerstand](#) beschreiben sollte.

Unterschieden werden zwei Arten von Transistoren.

1. [Bipolare Transistoren](#) werden durch Stromfluss angesteuert. Deren Anschlüsse werden mit *Basis, Emitter, Kollektor* bezeichnet. Ein kleiner [Strom](#) auf der Basis-Emitter-Strecke kann dabei einen großen Strom auf der Kollektor-Emitter-Strecke steuern.
2. Bei [Feldeffekttransistoren](#) (kurz: FET) werden die Anschlüsse als [Gate](#) (engl. Tor, Gatter), [Drain](#) (engl. Abfluss), [Source](#) (engl. Quelle) bezeichnet. Der Strom auf der Drain-Source-Strecke wird hier durch die [Spannung](#) zwischen Gate und Source gesteuert. Die Steuerung erfolgt (nahezu) stromlos.

Die wichtigsten Bauelemente der Halbleiterelektronik - Dioden, Transistoren, integrierte Schaltkreise - beruhen auf der Kombination von [n- und p-Halbleitern](#). Man kann z.B. einen Siliziumkristall so dotieren, dass er in der einen Hälfte n-leitend, in der anderen p-leitend ist. Beide Kristallhälften sind zunächst nach außen neutral. Wegen der ständigen Wärmebewegung treten Elektronen aus dem n-Gebiet in das p-Gebiet und Defektelektronen aus dem p-Gebiet in das n-Gebiet ([Diffusion](#)). Dadurch entsteht zwischen den Kristallhälften eine schmale **Grenzschicht**, in der Elektronen und Defektelektronen **rekombinieren**. In dieser [Grenzschicht](#) ist deshalb die Konzentration der beweglichen Ladungsträger beiderlei Vorzeichens klein. Man bezeichnet sie als [pn-Übergang](#).

Die Grundlage der **Halbleiterdiode** ist ein n-p-dotierter Halbleiterkristall, dessen Leitfähigkeit abhängt von der Polung der Betriebsspannung an Anode (p-dotiert) und Kathode (n-dotiert). Der [p-n-Übergang](#) (graue Fläche) ist eine Zone, die frei von beweglichen Ladungsträgern ist, da die positiven des p-Kristalls sich hier mit den negativen des n-Kristalls ausgeglichen (**rekombiniert**) haben. Da sich die ebenfalls vorhandenen ortsfesten Ladungen nicht rekombinieren können, herrscht innerhalb der Zone ein elektrisches Feld, welches einen Ladungstransport unterbindet. Dieses Feld kann durch eine von außen angelegte Spannung - je nach Polung - kompensiert werden, dann wird der p-n-Übergang **leitfähig**, oder er kann verstärkt werden, dann bleibt er **gesperrt**.

Halbleiter-Kernphysik – Fragen 12

Halbleiter

Transistor

Schaltungen

Halbleiter

Optoelektronische Bauelemente

Kernphysik

Die Masse der Atomkerne

Kernphysik

Radien von Atomkernen

Halbleiter-Kernphysik – Antworten 12

Atomdurchmesser ca. 10^{-10} m, Kern 10^{-15} m

Der Kern besteht aus positiv geladenen Protonen und neutralen Neutronen. Die **Kernladungszahl** gibt die Anzahl der Protonen an. Die **Nukleonenzahl** die Anzahl von Protonen und Neutronen – das entspricht auch etwa der **Massenzahl**, da die Elektronen fast nichts zur Masse des Atoms beitragen.

Die **Massenzahl** ist eine Durchschnittszahl über real vorkommende Isotopengemische. Bei Kohlenstoff kommt C12 mit 98,9% vor, der Rest sind C13 und C14 (radioaktiv). In der **Nuklidkarte** werden die Atomarten aufgezeichnet. Speziell **Isotope** – das sind Atome mit gleicher Protonenzahl, aber unterschiedlicher Neutronenzahl

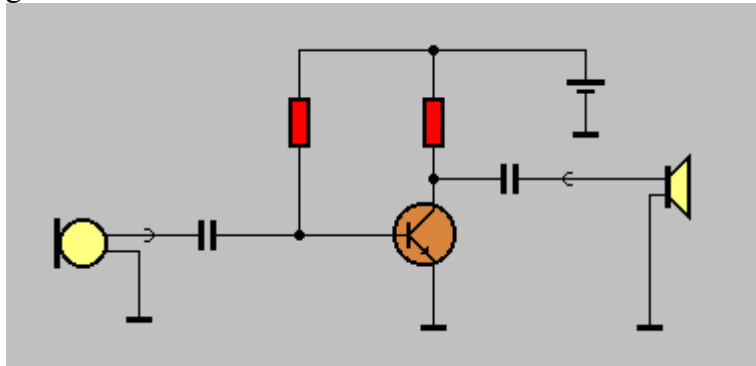
$r \approx r_0 \sqrt[3]{A}$ mit $r_0 \approx 1,42 \cdot 10^{-15}$ m (Radius eines Wasserstoffkerns oder eines Protons) [A = Massenzahl]

Die Masse eines Protons = $1,6726 \cdot 10^{-27}$ Die Masse eines Neutrons = $1,6749 \cdot 10^{-27}$
Beim „Zusammensetzen“ von Protonen und Neutronen zu einem Atom gibt es einen **Massendefekt**, da heißt, die Gesamtmasse ist in einem Atom kleiner als die Summe der Protonen- und Neutronenmassen. Das bedeutet, dass hier die Bindungsenergie (=fehlende Masse mal Lichtgeschwindigkeit zum Quadrat laut Einstein) den Massendefekt verursacht. Das nutzt die Sonne zur Kernfusion von Wasserstoffen zu Helium und gibt diese Energie als Strahlung ab.

Um den Radius eines Atomkerns zu bestimmen, schießt man Elektronen mit Energien von einigen hundert MeV (Mega-Elektronenvolt) auf Atome. Die hochenergetischen Teilchen durchqueren die Elektronenhülle fast ohne Ablenkung und werden nur am Atomkern selbst gestreut. Aus der Winkelverteilung der gestreuten Elektronen lässt sich auf den Radius des Atomkerns schließen.

Es gilt: $r \approx r_0 \sqrt[3]{A}$ mit $r_0 \approx 1,2 \cdot 10^{-15}$ m (= Radius eines Wasserstoffkerns oder eines Protons) [A = Massenzahl]

Die **Emitterschaltung** ist die am häufigsten eingesetzte **Verstärkerschaltung**. Das Prinzip des Verstärkers lässt sich mit einem Mikrophon am Eingang und einem Lautsprecher oder Kopfhörer am Ausgang zeigen.



Prinzip des NF-Verstärkers in Emitterschaltung

Feldeffekt-Transistoren (FET) werden unter Nutzung ihres spannungssteuerbaren Widerstandes häufig als **elektronische Schalter** eingesetzt.

Fotodioden (alt: Photodioden) sind **Dioden**, die **Licht** in einen **elektrischen Strom** umwandeln.

Durch die Bestrahlung mit Licht werden bei in Sperrrichtung betriebener Diode **Ladungsträger** freigesetzt, die zu einem **Stromfluss** führen. Der Fotostrom ist über viele Größenordnungen linear zum Lichteinfall.

Eine **Leuchtdiode** (auch **LED** für *Light Emitting Diode* bzw. *lichtemittierende Diode*) ist ein elektronisches **Halbleiter**-Bauelement.

Wird durch die Diode ein Strom in Durchflussrichtung geschickt, strahlt sie Licht ab.

Solarzelle: ist eine spezielle Photodiode, die Strom erzeugt bei Lichteinfall. Im Bereich des pn-Übergangs werden die Paare freier Ladungsträger durch das dort bestehende Feld der Donator- und Akzeptor-Ionen getrennt und weitergeleitet.

Kernphysik – Fragen 13

Kernphysik

Die Kernkraft

Kernphysik

Der Kernspin

Kernphysik

Radioaktivität, Strahlungsarten

Kernphysik

Radioaktiver Zerfall

Kernphysik – Antworten 13

Radioaktive Stoffe senden ohne äußeren Einfluss ionisierende Strahlen aus:

α - Strahlung: Sie besteht aus zweifach positiv geladenen Heliumkernen. Ihre Reichweite beträgt in der Luft 5-7 cm. Bei der Wechselwirkung mit anderen Atomen spalten sie von diesen Elektronen ab und es entstehen positive Ionen. Abschirmung erfolgt z.B. schon durch ein Blatt Papier.

β - Strahlung: Besteht aus Elektronen, die bei der Umwandlung von Neutronen in Protonen und Elektronen und weitere Elementarteilchen im Kern entstehen. Die Reichweite in der Luft beträgt einige Meter.

γ - Strahlung: Kurzwellige, elektromagnetische Strahlung, die durch elektrische oder magnetische Felder nicht abgelenkt wird. Sie entsteht, wenn ein Atomkern von einem angeregten in einen niedrigeren Energie-Zustand übergeht. Abschirmung durch dicke Bleiplatten.

Neutronenstrahlen: Es handelt sich um Neutronen, die aus dem Atomkern emittiert werden. Sie können durch die Elektronenhülle in den Atomkern eindringen und so das Element radioaktiv machen. Dabei wird der Kern zu einem Isotop (= ein Atom, das sich nur durch die Zahl seiner Neutronen von einem Atom desselben Elements unterscheidet); die Atommasse wird um eins erhöht.

α - Zerfall: Beim diesem Zerfall werden Heliumkerne, die aus 2 Protonen und 2 Neutronen bestehen, ausgesandt. Das bisherige Element hat dann 2 Protonen weniger und insgesamt 4 Kernbestandteile weniger. (${}_{92}^{238}U \rightarrow {}_2^4He + {}_{90}^{234}Th$)

β - Zerfall: Dabei werden Elektronen aus dem Kern herausgeschleudert. Der daraus entstehende Kern hat ein Proton mehr als der ursprüngliche, denn ein Neutron des Kernes hat sich in ein Proton und ein Elektron umgewandelt. (${}_{90}^{234}Th \rightarrow e^- + {}_{91}^{234}Pa$)

(C-14-Zerfall in Elektron und Antineutrino: ${}_{6}^{14}C \rightarrow {}_{7}^{14}N + e^- + \bar{\nu}$)
Dieser Zerfall lässt sich durch den **Zerfall des Neutrons in ein Proton und ein Elektron** erklären!

γ - Zerfall: Dabei fallen einzelne Nukleonen (Protonen oder Neutronen) von einem höheren auf ein niederes Energieniveau. Dabei wird ein γ-Quant in Form eines Photons abgegeben. Abschirmung ist nicht möglich, nur Abschwächung mit Blei und Beton.

Neutronenzerfall: freie Neutronen sind instabil und können in ein Proton, ein Elektron und einige andere Elementarteilchen zerfallen.

In Atomkernen mit mehreren Protonen wirkt die **Coulombkraft** wegen der gleichartigen positiven Ladung als Abstoßungskraft. Dennoch halten die Atomkerne zusammen. Es sind innerhalb des Atomkernes Kräfte wirksam, die die Nukleonen im Kern zusammenhalten – die **Kernkräfte**:

1. Kernkräfte besitzen eine sehr kleine Reichweite. Diese liegt in der Größenordnung von $3 \cdot 10^{-15} \text{ m}$.
2. Kernkräfte besitzen sehr große Beträge.
3. Die Kernkräfte sind ladungsunabhängig.
4. Bei den Kernkräften handelt es sich um Austauschkräfte. Dabei spielen bestimmte Elementarteilchen eine Rolle, die man als Gluonen bezeichnet.

Quanteneffekt im Atomkern: Durch die Einsperrung der Protonen und Neutronen auf den engen Raum des Atomkerns erhalten sie auf Grund der Heisenbergschen Unschärferelation eine hohe Geschwindigkeit ($\Delta p \cdot \Delta x > h \rightarrow m \cdot \Delta v \cdot \Delta x > h \rightarrow \Delta v > \frac{h}{m \cdot \Delta x} \sim 6,5 \cdot 10^7 \text{ m/s} = \text{ein Fünftel der Lichtgeschwindigkeit}$) – es geht also sehr dynamisch zu im Kern!

Auch werden die Protonen und Neutronen im Kern auf ähnlich gebauten **Orbitalen = Energiestufen** rasen, wie es die Elektronen in der Hülle machen. Auf jeder Energiestufe habe 2 Protonen und 2 Neutronen Platz

Wie die Elektronen der Atomhülle haben auch die einzelnen Kernbausteine einen **Eigendrehimpuls (SPIN)** und verhalten sich wie winzige Magnete. Bei Kernen mit gerader Nukleonenzahl können sich die magnetischen Momente der Kernbausteine gegenseitig aufheben. Beim Wasserstoffatom jedoch nicht, da es nur ein Proton hat. Bringt man ein Wasserstoffatom in ein Magnetfeld (z.B. im Kernspintomografen), so kann man den Spin parallel oder antiparallel zum Feld einstellen. Mit einem kurzen Radiowellenimpuls kippt das Wasserstoffproton von einem in den anderen Zustand und sendet ein ähnliches Radiosignal aus, wie es empfangen hat. Das kann man analysieren und die Struktur der Wasserstoffatomverteilung im menschlichen Gewebe bestimmen. Das ergibt die Schichtbilder, die zur Diagnose in der Medizin genutzt werden (oder in der Chemie in der **NMR-Spektroskopie: nuclear magnetic resonance**)

Kernphysik – Fragen 14

Kernphysik

Radioaktiver Zerfall

Kernphysik

Radioaktive Altersbestimmung

Kernphysik

Strahlenschutz

Kernphysik

Kernfusion

Kernphysik – Antworten 14

Die **Ionendosis** gibt an, wie viele Ionen pro kg Luft entstehen [Einheit: Coulomb/kg *alt: 1 Röntgen $\approx \frac{1}{4}$ milliCoulomb/kg*]

Die **Energiedosis** gibt die absorbierte Strahlungsenergie pro kg (Menschen)masse an [Joule/kg = Gray (Gy) = 100 rad]

Die für den Menschen wichtige Maßeinheit ist die **Äquivalentdosis**, wo die Wirkung der verschiedenen Strahlenarten berücksichtigt wird (α -Strahlung mit Zusatzfaktor 20) [1J/kg = 1 **Sievert** (Sv) = 100 rem = Beginn der *siechenden* Todesgrenze]

innere und äußere Strahlenbelastung des Menschen durch Sonne und Erdstrahlen: ca. **1 mSv pro Jahr**

AKW-Arbeiter: 50 mSv Pro Jahr

Todesgrenze: 8 Sv \rightarrow 100% Tote

Wichtig: 1 Mikro-Sievert pro Stunde ist 8,8 Milli-Sievert pro Jahr bei dauernder Bestrahlung – 8 mal mehr als in der Natur! (Bei Berichten über Tschernobyl und Fukushima wurde immer der Stundenwert angegeben!)

Schutzmaßnahmen gegen Strahlung:

Abstand von radioaktiven Materialien halten: Je größer der Abstand, desto geringer ist die Stärke der radioaktiven Strahlung und damit desto geringer die Wahrscheinlichkeit einer bleibenden Veränderung im Körper des Menschen (quadratisches Abstandsgesetz!)

Strahler mit möglichst **geringer Aktivität** verwenden: Je geringer die Strahlendosis ist, die auf den Menschen wirkt, desto geringer die eintretenden Veränderungen durch die radioaktive Strahlung.

Strahlung so gut wie möglich **abschirmen**: Je besser die Abschirmung, desto weniger Strahlungsenergie wirkt auf den Menschen ein, desto geringer also auch die Gefahr einer radioaktiven Schädigung.

Strahlung **nicht länger als nötig einwirken** lassen: Je geringer die **Strahlendosis**, desto geringer auch eventuelle Veränderungen im Körper des Menschen.

Bei der Fusion von leichten Kernen wird Bindungsenergie in Form von Strahlung freigesetzt. In **Sternen** erfolgt eine stufenweise Fusion von Wasserstoffkernen zu Heliumkernen. Solche Reaktionen erfolgen bei einem Druck von Milliarden bar und Millionen Grad Kelvin.

Auf der **Erde** versuchen Physiker diesen Prozess nachzubilden und verwenden dazu Wasserstoffisotope mit 1 oder 2 Neutronen (Deuterium und Tritium). ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n} + \gamma$
Dabei entsteht bei 1g Helium eine Energie von ca. 120 000 kWh. Das entspricht 12 Tonnen Steinkohle.

Das Problem dabei ist, dass man enorme Kräfte braucht um die Protonen einander zu nähern, das kann durch **enorme Hitze** (einer Wasserstoffbombe) oder durch kurzzeitiges Erhitzen mit Laserstrahlen erfolgen.

Weiteres Problem ist die Fassung des Plasmas, das dabei entsteht in einem Gefäß. Das ist derzeit nur durch ein kompliziert gestaltetes Magnetfeld in einem TOMAHAK möglich.

Weiters nutzt man den **Pinch-Effekt**, das ist das Zusammenziehen eines von genügend großem elektrischen Strom durchflossenen Plasmas zu einem dünnen, komprimierten Plasmaschlauch oder -faden infolge der Wechselwirkung des Plasmastroms mit dem von ihm erzeugten Magnetfeld.

Es ist derzeit nicht abzusehen, ob es wirklich möglich ist, Kernfusion in großem Stil für Energieerzeugung zu nutzen. Es wird experimentiert mit Magnetfeldern, die durch Superkühlung auf tiefen Temperaturen mit einem supraleitenden „ewigen“ Strom betrieben werden.

Also – **Außen Superkalt und Innen Superheiß** – was für ein

Der radioaktive Zerfall verläuft bei verschiedenen Atomen unterschiedlich schnell. Ein Maß dafür ist die **Halbwertszeit**: das ist jene Zeit, nach der jeweils die Hälfte der radioaktiven Atome zerfallen ist. Die Zerfallsprodukte sind meist selbst wieder radioaktiv. Diese "Tochternuklide" zerfallen mit anderen Halbwertszeiten zu neuen Nukliden.

Mögliche Formel: $N(t) = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}}$

mit Halbwertszeit T, Anfangsmenge N_0 und $N(t)$ = momentane Menge an Atomen, die zum Zeitpunkt t noch nicht zerfallen sind.

Die **Aktivität** der radioaktiven Elemente gibt an, wie viele Zerfälle pro Sekunde stattfinden. Einheit Becquerel: 1Bq = 1Zerfall pro Sekunde

Früher gab es noch die Einheit Curie = 37.000.000.000 Bq, die von 1Gramm Radium ausgehen, das Marie Curie 1889 untersucht hat.

Früher gab es noch die Einheit Curie = 37.000.000.000 Bq, die von 1Gramm Radium ausgehen, das Marie Curie 1889 untersucht hat.

Grenzwerte für Lebensmittel nach Tschernobyls Reaktorunfall:

Milch: **5 nCi** (= 200 Becquerel) **pro Liter** Cäsium 137 bzw. Jod 131

Halbwertszeit von radioaktiven Strahlern: Zeit, in der die Aktivität auf die Hälfte gefallen ist:

Radon ${}_{220}$ – 25 sec	Jod ${}_{131}$ – 8 Tage	Sr ${}_{90}$ – 28 Jahre	Cs ${}_{137}$ – 30 Jahre
Uran ${}_{235}$ – 4,5 Mrd.Jahre	Plutonium ${}_{239}$ – 66 Jahre		Cs ${}_{134}$ – 2 Jahre

Mit radioaktiven Stoffen kann man Altersbestimmung betreiben, wenn man die Ausgangsmenge N_0 eines Stoffes kennt (aus den Zerfallsprodukten wird rückgerechnet) und die momentane Meng.

Die **C14-Radiokarbonmethode** funktioniert so: C14 hat eine Halbwertszeit von ca. 5730 Jahren. In lebenden Bäumen ist immer ein gleichbleibender Anteil von C14 neben C12 vorhanden. Beim toten Baum wird C14 abgebaut. Aus dem verbliebenen Anteil von C14 kann man das Alter schätzen.

Für längere Zeiträume kann man **Kalium-40** mit einer Halbwertszeit von $1,3 \cdot 10^9$ Jahren oder **Uran-238** mit einer Halbwertszeit von $4,5 \cdot 10^9$ Jahren verwenden. Uran zerfällt in mehreren Schritten bis hin zum Blei-206. Daraus kann man z.B. auf das Alter der Erdgesteine schließen: 2,5–3,9 Mrd. Jahre.

Kernphysik – Fragen 15

Kernphysik

Kernspaltung

Kernphysik

Atombombe

Kernphysik

Kernreaktor

Teilchenphysik

Linear- und Zirkularbeschleuniger

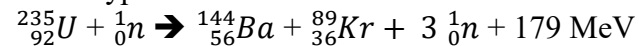
Kernphysik – Antworten 15

Die Entwicklung der **Kernwaffen** erfolgte im 2. Weltkrieg. Albert Einstein schrieb einen Brief an den Präsidenten der USA, Theodor Roosevelt, in dem er auf die Gefahr der Entwicklung einer deutschen Atombombe hinwies. Daraufhin wurde die Atombombe entwickelt und in Hiroshima und Nagasaki zu Kriegsende ausprobiert (200 000 Tote und viele strahlenverseuchte Menschen).

Die **Atombombe** besteht aus 2 unterkritischen Massen aus 50 kg Uran oder 16 kg Plutonium, die mit einem Sprengsatz zusammengeschoßen werden. Dann zündet die Kettenreaktion und die Bombe explodiert.

Die **Wasserstoffbombe** beruht auf dem Fusionsprinzip – Wasserstoff wird zu Helium fusioniert wie in der Sonne. Dazu muss der Druck und die Temperatur sehr hoch sein. Das wird durch die Explosion einer Atombombe im Inneren der Wasserstoffbombe erzeugt. Zum Betrieb braucht man Deuterium und Tritium, da normaler Wasserstoff keine Neutronen hat.

Im Jahre 1938 (Kriegsbeginn) entdeckten Otto Hahn und Fritz Strassmann in Berlin die KERNSPALTUNG. Sie konnten sich nicht erklären, warum Uran unter Beschuss mit Neutronen zu den Elementen Barium und Krypton zerfällt:



Die Erklärung gaben Lise Meitner und Otto Frisch im Jahre 1939 in der Zeitschrift Nature bekannt – die Kernspaltung war erfunden!

Dabei entstehen weitere Neutronen, die andere Kerne spalten können. Dabei entsteht eine Kettenreaktion, die bei einer kritischen Masse von 50 kg zur Atombombe wird.

Ist die Dichte geringer, kann thermische Energie im Atomreaktor gewonnen werden.

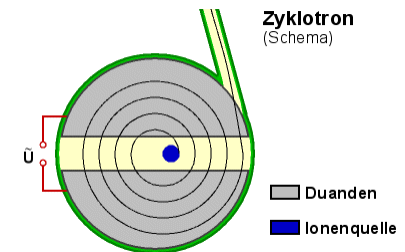
Ein **Linearbeschleuniger**, LINAC oder **Linac** (von [englisch](#) *linear accelerator*) ist ein [Teilchenbeschleuniger](#), der [geladene](#) Teilchen wie [Elektronen](#), [Positronen](#) oder [Ionen](#) in gerader Linie beschleunigt.

Das **Zyklotron** ist ein [Teilchenbeschleuniger](#). Es besteht aus einem großen [Elektromagneten](#), zwischen dessen Polen sich eine flache runde Vakuumkammer befindet. Im Inneren der Kammer sind der Beschleunigungsspalt und die [Ionenquelle](#).

Ein **Synchrotron** ist ein [Teilchenbeschleuniger](#), in dem geladene [Elementarteilchen](#), [Elektronen](#), [Protonen](#) oder ionisierte [Atome](#) ([Ionen](#)) auf sehr hohe ([relativistische](#)) [Geschwindigkeiten](#) beschleunigt werden, wodurch die Teilchen sehr hohe [kinetische Energien](#) erhalten. Zur Beschleunigung wird ein passend [synchronisiertes hochfrequentes elektrisches Wechselfeld](#) ([Mikrowellen](#)) verwendet.

Das Ganze findet im **Vakuum** statt.

Damit erforscht man die Struktur der kleinsten Teilchen – **Elementarteilchen** (Elektron, Proton, Neutron, Mesonen,...)



Kernreaktoren bestehen aus dem Containment mit **Brennstäben** mit dem spaltbaren Material (Uran) und dazwischen **Regelstäben**, die herausgezogen und hineingestoßen werden können. Diese bestehen aus Cadmium, das die Neutronen leicht absorbiert. Das Ganze ist in einer **Kühlflüssigkeit** (Wasser, flüssiges Natrium), die zirkuliert und die entstehende Wärme in einem Wärmetauscher (beim Druckwasserreaktor oder direkt – beim Leichtwasserreaktor) abgibt, worauf Wasser auf Dampftemperatur erhitzt wird und eine **Turbine** antreibt. Das Wasser muss durch einen großen **Turm gekühlt** und in einen Fluss eingeleitet werden, der dadurch um 1–5°C erwärmt wird!

Die **ausgebrannten Brennstäbe** enthalten viele radioaktive Spaltelemente und sind hochradioaktiv (im Gegensatz zu den neuen Brennstäben, die praktisch ungefährlich sind!). Sie müssen in **Abklingbecken** mit Wasser abkühlen und werden dann in **Wiederaufbereitungsanlagen** in die einzelnen Elemente zerlegt und 10% wird wiederverwertet. Der Rest ist hochradioaktiver Sondermüll. Dann sollte eine **Endlagerung in stabilen Bergwerken** erfolgen, aber dagegen gab es immer Widerstand der Bevölkerung, daher gibt es noch keine Endlager. „Wir überwachen bis in alle Ewigkeit die abgebrannten Brennstäbe“

Teilchenphysik – Fragen 16

Teilchenphysik

Teilchenphysik

Teilchen–Antiteilchen

Zerfall von Teilchen

Teilchenphysik

Teilchenphysik

Quarks

Leptonen

Teilchenphysik – Antworten 16

Quarks sind elementare Bausteine der Hadronen (= Baryonen und Mesonen):
up, down und strange, die alle Spin $\hbar/2$ haben
 Es gibt dazu die Antiquarks **uq, dq, sq**, die als Bausteine der Mesonen auftauchen.

Baryonen (schwer) haben 3 Quarks:
 Proton $p = u u d$ (Ladung $2/3 + 2/3 - 1/3 = 1$)
 Neutron $n = u d d$ (Ladung $2/3 - 1/3 - 1/3 = 0$)

Mesonen (mittelschwer) haben 2 Quarks:
 $\pi^+ = u \bar{d}$ (Ladung: $2/3 + 1/3 = 1$)

Leptonen (e, γ) haben keine Quarks (, sind also selber welche)

FARBE: Löst das Problem, dass drei u-Quarks in einem Ω^- -Teilchen sind. Eines mit Spin up, eines mit Spin down. Fürs dritte gäbe es keine weitere Unterscheidung (gemäß Pauli-Prinzip) mehr, also muss die **Farbe** her (**rot, blau, grün**). Im Proton sind alle drei Farben (=weiß).

Der experimentelle Nachweis von Quarks ist dem Streuversuch von Rutherford ähnlich.

Leptonen sind: Elektron, Myon, Tauon + Antiteilchen ++ Neutrinos
 Sie enthalten keine Quarks, sind selber welche. Alle Leptonen haben einen **Spin** von $1/2$ und gehören damit zu den **Fermionen**

Es wirkt nur die schwache Wechselwirkung und die elektromagnetische Kraft auf die Leptonen. Es gilt das Pauli-Ausschlussprinzip wie bei den Quarks, ...
 Die schwache Wechselwirkung wandelt Neutronen in Protonen um und umgekehrt. Die schwache Wechselwirkung kann **Leptonen** in andere Leptonen und **Quarks** in andere Quarks umwandeln. Sie kann außerdem Quark-Antiquark- und Lepton-Antilepton-Paare erzeugen und vernichten. Zwei solcher Vorgänge laufen immer gemeinsam ab. Beim **Beta-Zerfall** wird ein Quark umgewandelt und ein Lepton-Antilepton-Paar erzeugt, ...

Zur Gruppe der Leptonen gehören auch die **Neutrinos**. Der Name deutet an, dass sie sehr leicht und elektrisch neutral sind. Auch von den Neutrinos gibt es drei Arten: Elektronen-Neutrinos, Myonen-Neutrinos und Tauonen-Neutrinos. Diese Namen deuten schon an, dass man die Leptonen - ebenso wie die **Quarks** in drei Gruppen einteilt. Jedem Neutrino ist ein anderes Lepton zugeordnet und in bestimmten Reaktionen treten immer in charakteristischer Weise Tauonen-Neutrino mit Tauon, Elektronen-Neutrino mit Elektron und Myonen-Neutrino mit Myon gemeinsam auf.

Durch die Beschleunigungsanlagen konnten die Physiker neben Proton, Elektron und Neutron weitere Elementarteilchen entdecken. So entdeckten sie zu jedem Teilchen auch das **Anti-Teilchen**, das die gleiche Masse und den gleichen Spin wie das Teilchen hat, jedoch die andere Ladung.

1932 wurde das **Positron e^+** in der kosmischen Strahlung entdeckt. Das Photon ist, da es keine Ladung hat, sein eigenes Antiteilchen. Trifft ein Positron auf ein Elektron, so vernichten sich beide in einem Energieblitz, der 2 Photonen gleicher Energie erzeugt ($E=mc^2$).
 $e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$ (energiereiche Röntgenstrahlung).

β^+ – Strahler, z.B. Kohlenstoff C-11, emittieren Positronen e^+ , die in der Medizin verwendet werden, um Tumore zu entdecken, da dort die entsprechenden chemischen Substanzen gespeichert werden, die Positronen emittieren. Die γ -Quanten werden registriert und damit kann der Ort des Tumors entdeckt werden
(Positronen-Emissions-Tomografie PET)

Die meisten der künstlich (oder in der kosmischen Strahlung) erzeugten Teilchen zerfallen sehr rasch wieder in andere Teilchen.
 Zum Beispiel kann ein negatives Pion (π^-) mit einem Proton reagieren und erzeugen Λ^0 und K^0 die erzeugten Teilchen zerfallen nach 10 cm Laufstrecke (bei fast Lichtgeschwindigkeit). Das ergibt ca. $3 \cdot 10^{-10}$ Sekunden Lebensdauer. Die Lebensdauer ist eine Angabe der Halbwertszeit der Teilchen.

Fermionen sind die bekannten Teilchen Elektron, Proton und Neutron. Es gibt aber auch andere Teilchen (Neutrino, Myon, Tauon, sowie Delta, Lambda, Omega). Sie haben den Spin $1/2$ oder $3/2$. Es gilt das Pauli-Prinzip: Zwei Teilchen müssen sich in mindestens einer Quantenzahl unterscheiden.

Bosonen sind Teilchen, die Spin 0, 1, 2 haben. Hier gilt das Pauli-Prinzip nicht. Vertreter sind: Photon, Z, W-Boson, die Gluonen.

	Leichte Teilchen	Hadronen
Fermionen-Gruppe Mit Spin ungerade-halbzahlig	Leptonen: Elektron, Positron, Neutrino $^{\mu\tau}$, Myon $^-$, Tauon $^{+-}$	Baryonen: Proton, Neutron, Delta $^{++}$, Lambda 0 , Omega $^-$
Bosonen-Gruppe Mit ganzzahlige-geradem Spin	Eichbosonen = Kraftüberträger: Photon (el-magn.Kraft), Z 0 , W $^-$ -Boson (schwache Kernkraft), Gluon (starke Kernkraft), Graviton (hypothetisch: Grav.kraft)	Mesonen: Pion $^{+-0}$, Psi-on, Kaon $^{+-0}$

Astrophysik – Fragen 17

Astrophysik

Helligkeit und Temperatur von Sternen

Astrophysik

Masse von Sternen

Astrophysik

Entwicklung von Sternen

Astrophysik

Schwarze Löcher

Astrophysik – Antworten 17

Sternentwicklung von Gaswolke zu Stern der Hauptreihe, dann je nach steigender Masse

- weißer Zwerg → Supernova → roter Riese (unter 1,4facher Sonnenmasse)
- Neutronenstern und Pulsar (unter 3,2facher Sonnenmasse)
- schwarzes Loch (über 3,2facher Sonnenmasse)

Eine **Supernova** ist das schnell eintretende, helle Aufleuchten eines Sterns am Ende seiner Entwicklung durch eine Explosion, bei der der Stern selbst vernichtet wird. Die Leuchtkraft des Sterns nimmt dabei millionen- bis milliardenfach zu, er wird für kurze Zeit so hell wie eine ganze Galaxie.

Sterne von der Größe der Sonne enden als extrem dichter weißer Zwergstern, der ohne eigene Energiequelle schließlich verlischt. Bei Sternen mit etwas mehr Masse (Chandrasekhar-Grenze) ist hier noch nicht Schluss. Ihr zurückgebliebener Kern fällt unter dem Druck der eigenen Schwerkraft weiter in sich zusammen, bis sogar Atomkerne und Elektronen zusammen gepresst werden. Dabei entsteht ein Neutronenstern, der, wenn er rotiert, wie ein kosmischer Leuchtturm Radiostrahlung aussendet und als Pulsar registriert werden kann.

Die Riesen unter den Sternen enden in dem kompaktesten Objekt, das überhaupt vorstellbar ist, nämlich in einem einzigen Massenpunkt. Selbst die Kernkräfte halten dem Druck der Gravitation nicht Stand, so dass nichts mehr den Zusammensturz aufhalten kann. Es entsteht ein Schwarzes Loch, dem nicht einmal Licht entfliehen kann, und das sich nur durch seine enorme Schwerkraft bemerkbar macht.

Brennstoffreihe in den Sternen:

Wasserstoff → Helium → Kohlenstoff, Sauerstoff, Mg, Fe

dann in der Supernova-Explosion noch eine Fusion bis Uran, aber ohne Brennstoffwirkung

Schwarze Löcher entstehen bei der Endphase des Sterns, wenn die Sternmasse über der 3,2fachen Sonnenmasse ist. Dabei fällt der Stern immer weiter in sich zusammen, so dass er eine Grenze passiert, die **Schwarzschild- Radius** genannt wird. Sobald ein Stern diesen unterschritten hat (für die Sonne wären es 2,5 km), bildet sich der **Ereignishorizont**. Dieser ist sozusagen eine magische Grenze. Alle Ereignisse, die innerhalb dieses Horizontes geschehen, können von der Außenwelt (also dem gesamten restlichen Universum) nicht wahrgenommen werden.

Daher kann man ein **Schwarzes Loch** auch nicht sehen, und daher hat es auch seinen Namen.

Materie und Licht wird in das Loch gezogen und nicht mehr ausgespuckt.

Die **Naturgesetze** sind in Schwarzen Löchern nicht mehr gültig. So wird zum Beispiel die Gravitation in Fliehkraft umgewandelt.

Laut Theorie könnten Schwarze Löcher auch **Wurmlöcher** bilden.

Diese verbinden zwei Stellen des Raums oder der Zeit. Es könnte sogar eine Verbindung mit einem anderen Universum schaffen.

Jedoch konnten noch keine Wurmlöcher nachgewiesen werden.

Stephen Hawking hat nachgewiesen, dass das schwarze Loch auch **Strahlung aussenden kann**, denn wenn ein virtuelles Teilchenpaar am Ereignishorizont gebildet wird, kann eines ins schwarze Loch fallen und das andere herauskommen.

Die Helligkeit von Sternen wurde früher in Größenklassen (1.–6Klasse). Heute definiert man:

Scheinbare Helligkeit I ist die Lichtenergie, die pro Quadratmeter und Sekunde auf die Erde fällt. Zwei Sterne unterscheiden sich um eine Größenklasse (= Magnitude m), wenn sich ihre Helligkeiten um den Faktor $z \sim 2,51$ unterscheiden.

Zur Bestimmung der **Leuchtkraft L** (= gesamte Lichtenergie, die der Stern pro Sekunde aussendet) benötigt man die Entfernung des Sternes r von der Erde. Die Leuchtkraft $L = 4\pi r^2 \cdot I$.

Unsere Sonne hat eine mittlere Leuchtkraft (unter allen Sternen) mit $4 \cdot 10^{26}$ Watt.

Die **Oberflächentemperatur** des Sterns kann mit dem WIEN'schen Verschiebungsgesetz erfolgen. Die Wellenlänge des Intensitätsmaximums der Strahlung λ_{\max} ergibt die Temperatur $T = 2,9 \cdot 10^{-3} / \lambda_{\max}$.

Für die Sonne ist das ca. 5800 Grad Kelvin. Andere Sterne haben Temperaturen von 2000–45000 K.

Die Masse von Doppelsternsystemen lässt sich aus der Umlaufdauer und dem Abstand r der Sterne der Massen M1 und M2 berechnen mit dem 3.Kepler'schen Gesetz: $r^3/T^3 = G(M1+M2)/(4\pi^2)$.

Kennt man dies von einigen Sternen, kann man die Masse-

Leuchtkraft-Beziehung benutzen, um die Masse von den anderen Sternen zu schätzen.

Je größer die Masse, desto größer die Leuchtkraft.

Astrophysik – Fragen 18

Astrophysik

Kosmologie

Aufbau und Verteilung der Galaxien

Die Expansion des Universums

Kosmologie

Kosmologie

Der Urknall

Die Hintergrundstrahlung

Astrophysik – Antworten 18

Die Theorie der vereinten Kräfte (Grand Unified Theory) sagt, dass die Ausdehnung des Weltalls kurz nach seiner Entstehung mit ungeheurer Geschwindigkeit erfolgte – mit einer **INFLATION**.

Das war nach der **Planckzeit** (10^{-43} s nach dem Urknall). Erst danach kann man von Raum und Zeit reden. Innerhalb dieser Zeit begann die Inflation etwa bei 10^{-35} s und dauerte bis zu einem Zeitpunkt zwischen 10^{-33} s und 10^{-30} s nach dem Urknall.

Alle 10^{-35} s verdoppelt sich die Größe des Universums.

Am Ende der Inflationsphase haben sich starke und elektroschwache Wechselwirkung getrennt. Es entstehen **Quarks und Leptonen**, die Grundbausteine des Universums. Die Leptonen unterliegen nur mehr der elektroschwachen Wechselwirkung. Die Expansion verlangsamt sich. Sobald die Temperatur unter 10^{15} K sinkt, können W- und Z-Bosonen (Trägerteilchen der schwachen Wechselwirkung) nicht mehr frei erzeugt werden. Daher trennen sich schwache und elektromagnetische Wechselwirkung.

Zusammen mit der Gravitation existieren nur mehr die 4 bekannten Wechselwirkungen.

Erst nach 10 Sekunden, bei Temperaturen unterhalb von 10^9 K, vereinigten sich Protonen und Neutronen durch Kernfusion zu ersten **Deuterium-Atomkernen**. Diese wurden zum größten Teil in Helium-4-Kerne umgewandelt. Nach etwa 3 Minuten hatte die Temperatur und Dichte der Materie soweit abgenommen, dass die Kernfusion zum Erliegen kam. Die übriggebliebenen freien Neutronen waren nicht stabil und zerfielen im Verlauf der nächsten Minuten in **Protonen und Elektronen**. Insgesamt bildeten sich in den ersten drei Minuten zu 25 % Helium-4 (^4He) und 0,001 % Deuterium sowie Spuren von Helium-3 (^3He), Lithium und Beryllium. Die restlichen 75 % stellten Protonen, die späteren Wasserstoffatomkerne.

Bei der Untersuchung von Radiosignalen 1965 beobachteten 2 Physiker eine cm-Strahlung, die aus allen Richtungen kommt. Das entspricht einer Temperatur von 2,7 K → die **Hintergrundstrahlung**.

Man nimmt an, dass dies auf eine Strahlung von 3000 Kelvin 400 000 Jahre nach dem **Urknall** hinweist (durch Expansion ist die Strahlung abgekühlt)

Schwierig ist es heute noch zu erklären, warum sich aus dem Energieimpuls des Urknalls nicht die entstehenden Teilchen und Anti-Teilchen gegenseitig vernichtet haben, sondern **die Teilchen übrig geblieben** sind und die Sterne entstehen konnten.

OFFENE FRAGEN:

- Was ist die dunkle Energie, die das Universum immer schneller zum Auseinanderdriften drängt?
- Woraus besteht die dunkle Materie, welche die Spiralarme der Galaxien erzeugt?
- Wieso haben sich Materie und Antimaterie nicht nach der Inflation gegenseitig vernichtet, sondern es blieb nur die Materie über.
- Wieso ist die Hintergrundstrahlung isotrop (= in allen Richtungen gleich groß)?
- Wieso sind die Galaxien so unregelmäßig verteilt?

Die Sonne ist einer von ca. 200–300 Milliarden Sterne in unserer Galaxis – der **Milchstraße**. Von oben gesehen hat sie Spiralarme, von der Seite ist sie wie ein Diskus.

Durchmesser 100000 Lichtjahre, wir sind ca. 25000 Lichtjahre vom Zentrum entfernt und umrunden das Zentrum in ca. 230 Millionen Jahren. Der zu uns nächste Stern ist Alpha Centauri in ca. 4 Lichtjahren Entfernung.

Im Zentrum der Galaxis ist ein **Schwarzes Loch**.

Quasare wurden zunächst als Radioquellen und später auch als optische Galaxien geortet. Sie sind sehr klein, aber ihre Leuchtkraft ist 100mal größer als die Leuchtkraft normaler Galaxien. Teilweise ändern sie ihre Leuchtkraft innerhalb einer Woche um 3 Größenklassen. Ihre Ausdehnung kann daher nur wenige Lichttage betragen – wie in unserem Sonnensystem. Mit großer Wahrscheinlichkeit sind Quasare neu entstehende massenreiche Schwarze Löcher in den Zentren junger Galaxien.

Unsere Galaxis gehört zu einer Gruppe von 50 Galaxien. Die nächsten sind die **Magellanschen Wolken** in einer Entfernung von 170 000 Lichtjahren. Andromeda ist so nahe, dass wir mit ihr in vermutlich 4 Mrd. Jahren kollidieren.

Die Verteilung der Galaxien ist äußerst unregelmäßig, was nicht erklärbar ist.

Die Spiralarmstruktur der Galaxien weist darauf hin, dass es **dunkle Materie** geben muss, damit die Bewegung der Sterne am äußeren Rand schneller ist als mit der Gravitationswirkung der sichtbaren Materie.

Die Entwicklung des Weltbildes über unser Weltall kam von **Aristoteles**: wo der Kosmos = endlich + ewig, Mittelpunkt Erde + Mond + Sonne + Planeten + Sterne auf Sphären umkreisen die Erde.

zur Kopernikanischen Wende: Sonne = Brennpunkt der Ellipsenbahnen der Planeten

heute: Urknalltheorie, expandierendes Universum (Rotverschiebung der Spektrallinien der Sterne deutet auf Doppler-Effekt, auf Entfernung aller Sterne und Galaxien voneinander, je weiter, desto schneller)

. **Hubble-Gesetz: Ausbreitungsgeschwindigkeit = $v = H \cdot r$** .

($H \approx 2,3 \cdot 10^{-18} \text{ s}^{-1}$ → pro Megaparsec = 3,26 Mio. Lichtjahre erhöht sich die **Fluchtgeschwindigkeit der Galaxien** jeweils um 74,3 km/s.

Daraus kann man auf einen **Urknall** vor etwa 13,7 Milliarden Jahren schließen.