

## Welche Eigenschaften haben magnetische Monopole?

Ein Monopol ist definiert als ein Teilchen mit einer **einzelnen magnetischen Ladung**, die mit der magnetischen Ladung des Nordpols eines Magneten übereinstimmt. Entspricht die magnetische Ladung der des Südpols eines Magneten, spricht man von einem Antimonopol. Niemand hat bislang einen magnetischen Monopol beobachtet. Trotzdem gibt es einige Gründe, die für die Existenz von Monopolen sprechen:

- 1931 lieferte PAUL DIRAC die erste mögliche Erklärung für die Quantisierung der elektrischen Ladung, indem er magnetische Monopole postulierte <sup>[Dir31]</sup>. Aus seinen Berechnungen ergibt sich für den Betrag der **magnetischen Ladung  $g$**  ein ganzzahliges Vielfaches von  $e/2\alpha$  ( $\alpha$  Feinstrukturkonstante). Über die Masse dieser *Dirac-Monopole* konnte er jedoch keine Aussage machen.
- 1974 konnten t'Hooft <sup>[tHo74]</sup> und Polyakov <sup>[Pol74]</sup> zeigen, dass die Existenz von magnetischen Monopolen in den **GUTs (Grand Unified Theories)** nicht nur erlaubt, sondern sogar gefordert wird. Nach diesen Theorien sind magnetische Monopole extrem schwer; ihre Masse ist mindestens  $10^{16}$ -mal größer als die des Protons. Aufgrund ihrer Masse sind sie nicht besonders schnell. Man nimmt an, dass diese *GUT-Monopole*, von galaktischen Magnetfeldern beschleunigt, Geschwindigkeiten von  $v = 10^{-3}c$  ( $c$  ... Lichtgeschwindigkeit im Vakuum) nicht überschreiten. Die nötige Energie zur Erzeugung solch massiver Teilchen stand nur in den ersten Sekundenbruchteilen nach dem Urknall zur Verfügung. Danach konnten keine Monopole mehr erzeugt werden. Nimmt man nun an, dass die magnetische Ladung, ebenso wie die elektrische Ladung, erhalten bleibt, so konnte sich die Anzahl der Monopole im Universum danach nur noch durch Monopol-Antimonopol-Vernichtung ändern. Aus den GUTs folgt, dass die Monopolvernichtung nur eine untergeordnete Rolle spielt, was dazu führt, dass eine extrem große Anzahl von Monopolen auch heute noch vorhanden sein sollte. Aufgrund verschiedenster Beobachtungen (z. B. Helligkeit von Neutronensternen, Gesamtmasse des Universums, ...) ist eine derart große Monopoldichte jedoch auszuschließen. Diese Diskrepanz zwischen Beobachtung und Berechnung wird heute als das **Monopolproblem** bezeichnet. Die beste Lösung dieses Problems ergibt sich durch Einführung des „*Inflationären Universums*“:  
Durch die starke Expansion während der Inflation fand eine Verdünnung der Monopole statt und damit eine Verringerung der Monopoldichte. Leider lässt sich die Monopoldichte nach der Inflation und der damit verbundene Monopolfluss im heutigen Universum aus den GUTs nicht bestimmen. Aufgrund der Stärke der galaktischen Magnetfelder lässt sich jedoch eine obere Grenze für den Monopolfluss  $F_M$  angeben. Diese Grenze wird als Parker-Limit bezeichnet und beschränkt den möglichen Monopolfluss auf  $F_M \leq 10^{-15} \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ s}^{-1}$ .

---

### Literatur:

Teilchen, Felder und Symmetrien: Spektrum der Wissenschaft: Verständliche Forschung, Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft, Heidelberg 1988

<sup>[Dir31]</sup> P.A.M. Dirac: Proc. Roy. Soc. A **133** 60 (1931)

<sup>[tHo74]</sup> G. t'Hooft: Nucl. Phys. B **79** 276 (1974)

<sup>[Pol74]</sup> A. Polyakov: JETP Lett. **20** 194 (1974)

## Wie könnte man magnetische Monopole nachweisen?

Experimente zum Nachweis magnetischer Monopole lassen sich grob in vier Gruppen einteilen:

### 1. Induktionsexperimente

Fliegt ein Monopol durch eine Spule, so induziert er in dieser aufgrund seiner magnetischen Ladung einen elektrischen Strom. Diese Tatsache machen sich die Induktionsexperimente zu Nutze. Die Apparaturen bestehen zumeist aus einer isolierten supraleitenden Spule, die von einem Schild umgeben ist, der die Spule von allen äußeren Magnetfeldern abschirmt. Der Schild ist notwendig, da bestimmte Änderungen der Magnetfelder die gleichen Effekte erzeugen wie der Durchgang eines magnetischen Monopols. Wegen des notwendigen feldfreien Raums ist die Größe des Detektors sehr beschränkt. Typische Größenordnungen sind ein Quadratmeter.

Das erste Induktionsexperiment wurde von B. CABRERA an der Stanford-Universität durchgeführt <sup>[Cab82]</sup>. Es lieferte am 14. Februar 1982 ein Signal, das von einem magnetischen Monopol stammen könnte. Ob Cabrera wirklich einen Monopol beobachtet hat, oder ob das Signal lediglich der Effekt einer rätselhaften Störung im Experiment war, ist bis heute nicht eindeutig geklärt.

### 2. Ionisationsexperimente

Bei diesen Experimenten geht man davon aus, dass Monopole aufgrund des von ihnen erzeugten Magnetfeldes Atome ionisieren bzw. anregen können. Im Gegensatz zu den supraleitenden Induktionsexperimenten kann man Ionisationsexperimente von einigen hundert Quadratmetern konstruieren. Als Detektoren verwendet man meist Szintillationszähler kombiniert mit anderen Nachweisgeräten wie zum Beispiel Streamerkammern und Track-Etch-Detektoren. Durchqueren elektrisch oder magnetisch geladene Teilchen den Szintillator schnell genug, so verursachen sie Lichtblitze, welche von lichtempfindlichen Detektoren (Photomultipliern) registriert werden. Mit Hilfe der Streamerkammern kann man den Weg des geladenen Teilchens sehr genau verfolgen. Durch anschließendes Ätzen der Track-Etch-Platten lässt sich schlussendlich feststellen, ob die Spur von einem magnetischen Monopol erzeugt wurde.

Der MACRO-Detektor (Monopol Astrophysics and Cosmic Ray Observatory), 1500 Meter unter der Erde im italienischen Gran-Sasso-Massiv, ist ein Beispiel für ein solches Experiment <sup>[Ahl93]</sup>. Die meterdicke Felschicht über dem Detektor ist notwendig, um möglichst viele Störsignale von vornherein ausschließen zu können. Leider konnte MARCO in den elf Jahren seines Bestehens keinen magnetischen Monopol nachweisen. Das Experiment lieferte jedoch erstmals ein Flusslimit unter der Parker-Grenze für alle GUT-Monopole und Geschwindigkeiten, die sie nach den Theorien erreichen können.

### 3. Katalyse des Protonzerfalls

Im heutigen Standardmodell der Elementarteilchen ist das Proton stabil. Viele GUTs sagen jedoch einen Zerfall des Protons in ein Positron und ein neutrales Pion voraus. Das Pion zerfällt nach kurzer Zeit in zwei  $\gamma$ -Quanten und das Positron zerstrahlt mit einem Elektron. Die gesamte Ruheenergie des Protons würde also in Strahlung umgewandelt werden.

Ist das Proton tatsächlich nicht stabil, dann sagt die Theorie auch eine Katalyse des Protonzerfalls durch magnetische Monopole voraus. Aufgrund dieser Annahmen sollte

## Elektromagnetische Wechselwirkung Elektrisch + magnetisch = elektromagnetisch

es auch möglich sein, mit Hilfe der bestehenden Protonzerfallsexperimente Monopole nachzuweisen. Mit dem Super-Kamiokande-Detektor (Japan) sucht man unter anderem nach Protonzerfälle <sup>[Suz94]</sup>.

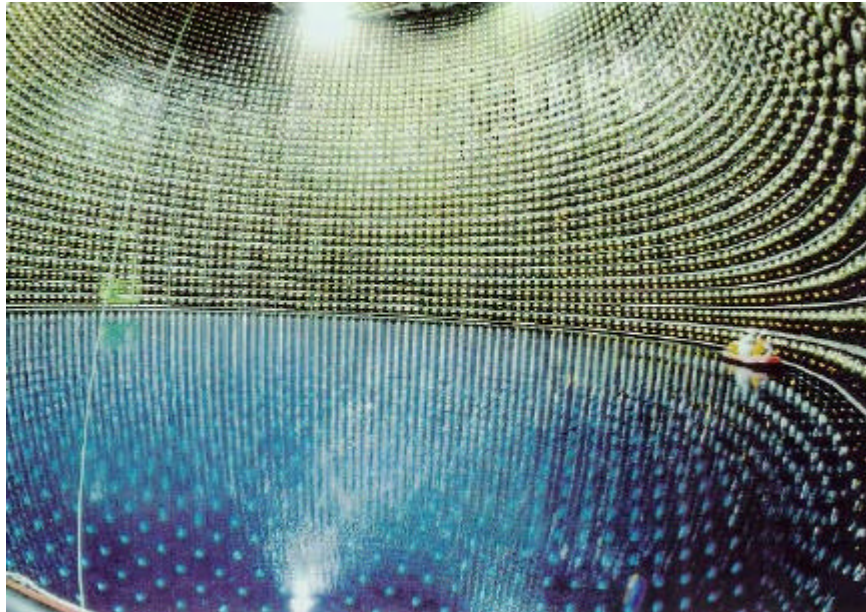


Abb.1: Halb mit Wasser gefüllter Super-Kamiokande-Detektor

Das Bild zeigt den erst halb mit Wasser gefüllten Super-Kamiokande-Detektor. An den Wänden sind 11200 Photomultiplier montiert. Sollte sich ein magnetischer Monopol in den mit 50000 Tonnen Wasser gefüllten Detektor verirren, könnte er entlang seines Weges Protonzerfälle katalysieren. Die dadurch erzeugte Strahlung könnte dann von den Photomultipliern nachgewiesen werden.

Leider konnte bis heute kein einziger Protonzerfall – geschweige denn von einem Monopol katalysierte Zerfälle – beobachtet werden. Das hatte jedoch zur Folge, dass die Untergrenze für die **mittlere Lebensdauer des Protons** auf  $10^{33}$  Jahre angehoben werden konnte.

#### 4. Nachweis durch Spuren in Gesteinsschichten

Man nimmt an, dass Monopole sich mit Kernen, die große magnetische Momente besitzen, zu gebundenen Monopol-Kern-Systemen verbinden können. Diese schweren Gebilde hinterlassen Schäden in der Gitterstruktur des von ihnen durchquerten Gesteins. Diese Spuren können dann durch chemisches Ätzen des Gesteins (Track-Etch-Methode) nachgewiesen werden. Alle Monopol-Kern-Systeme, die das Gestein Zeit seines Bestehens durchquerten, können so nachgewiesen werden. Allerdings darf das Gestein nie soweit erhitzt worden sein, dass die Spuren ausheilen konnten. Aus diesem Grund wurden neben einer Milliarde Jahre altem Erdgestein auch Felsmaterial vom Mond untersucht. Bisher leider ohne Erfolg.

---

#### Literatur:

Teilchenastrophysik: Klapdor-Kleingrothaus, Zuber, Teubner-Verlag Stuttgart 1997

<sup>[Cab82]</sup> B. Cabrera : Phys. Rev. Lett. **48** 1378 (1982)

<sup>[Ahl93]</sup> S.P. Ahlen et al. (MACRO-Koll.): Nucl. Inst. Meth. **324** 337 (1993)

<sup>[Suz94]</sup> Y. Suzuki: Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) **35** 273 (1994)

## Wie hat man die Welleneigenschaften von Elektronen gezeigt?<sup>1</sup>

LOUIS DE BROGLIE (1892-1987) stellte 1924 als erster Physiker die Hypothese auf, dass Teilchen auch als Wellen betrachtet werden können. Eines der ersten Experimente, das die Welleneigenschaften von Elektronen zeigte, wurde 1927 von CLINTON DAVISSON UND LESTER GERMER durchgeführt:

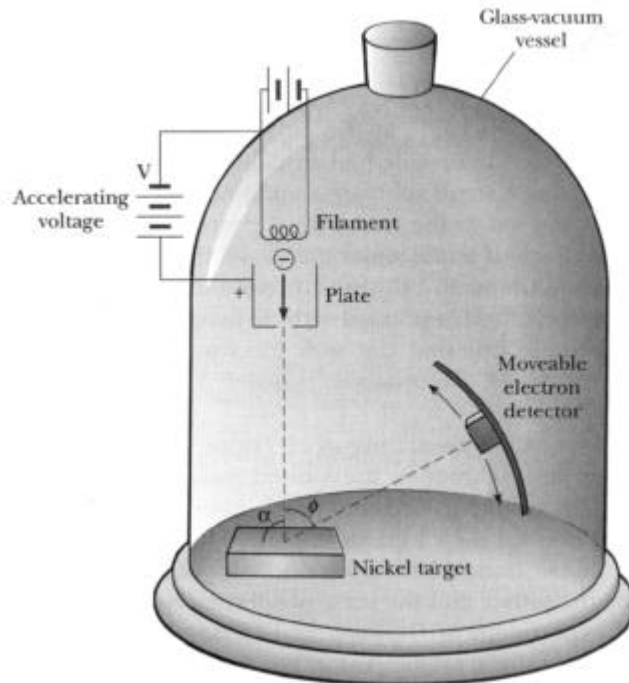


Abb.2: Schema des Davisson-Germer-Experiments zur Beugung von Elektronen an einem Nickelkristall

Dieses Experiment beruhte auf der Beugung von Elektronen an einem Nickelkristall. Die gebeugten Elektronen wurden mit Hilfe eines verschiebbaren Detektors registriert. Die so entstandenen Aufnahmen zeigten wie Beugungsbilder von Lichtwellen Interferenzerscheinungen.

Ein ähnliches Experiment (Beugung eines Elektronenstrahls beim Durchgang durch eine dünne Metallfolie), das im selben Jahr von GEORGE P. THOMSON und seinem Assistenten A. REID durchgeführt wurde, zeigte ebenfalls den Wellencharakter von Elektronen. C. Davisson und G. P. Thomson (Sohn von Sir John J. Thomson) erhielten im Jahre 1937 den Nobelpreis „für ihre experimentelle Entdeckung der Beugung von Elektronen durch Kristalle“.<sup>2</sup>

1961 konnten die Welleneigenschaften von Elektronen auch durch Beugung am Doppelspalt gezeigt werden.

---

### Literatur:

<sup>1</sup> Basiswissen 4, Seite 37

Die Teilchenjäger: Yuval Ne'eman, Yoram Kirsh, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1995

Modern Physics (2<sup>nd</sup> Edition): R. Serway, C. Moses, C. Moyer, Saunders 1994

<sup>2</sup> Übersetzte Begründung des Nobelpreiskomitees

## Ist es möglich zu „beamen“, d. h. ein Teilchen von einem Ort zu einem anderen zu versetzen?

Das „Beamen“ von Menschen, wie wir es aus Science-Fiction-Serien kennen, wird wohl für alle Zeit Utopie bleiben. Der Vorgang des Beamens wird dabei als Transport der gesamten, dem Menschen zugrundeliegenden Information beschrieben. Dabei ergibt sich jedoch ein Problem: Nach der Heisenberg'schen Unschärferelation ist es nicht möglich, Ort und Impuls eines Teilchens und damit die gesamte Information, die das zu beamende Objekt beschreibt, beliebig genau zu messen. Es ist jedoch möglich, dieses Problem für Teilchen des Mikrokosmos mit Hilfe von „verschränkten“ **Quantenzuständen** zu umgehen. Zwei verschränkte Teilchen sind stets auf mysteriöse Weise miteinander verbunden – jeder der beiden „Zwillinge“ weiß sofort, was mit dem anderen geschieht, selbst wenn beide Kilometer voneinander entfernt sind. <sup>[Ben93]</sup>

Eine solches Experiment – die „**Teleportation**“ eines Photons – gelang 1997 einer Gruppe von Physikern der Universität Innsbruck <sup>[Bou97]</sup>:

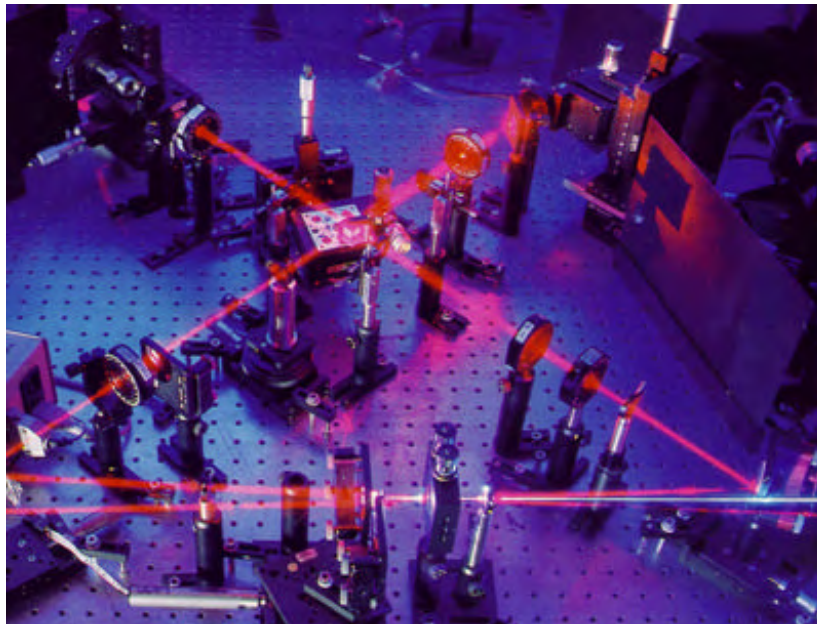


Abb.3: Experiment zur Teleportation von Photonen

ANTON ZEILINGER und sein Team benutzten für ihr Experiment verschränkte Photonen, die beim Auftreffen eines Laserstrahls auf einen Spezialkristall erzeugt wurden. Die Verschränkung von je zwei Photonen (A und B) bestand darin, dass ihre **Polarisationsrichtungen** stets senkrecht zueinander orientiert waren. Das Experiment war so aufgebaut, dass das Photon A, wenn es sich ca. einen Meter vom Photon B entfernt aufhielt, mit einem dritten Photon C in Kontakt kam (Bild 1). Dabei überlagerten sich ihre Polarisationszustände und es bestand die Möglichkeit, dass sich Photon A auch mit Photon C verschränkte (d. h. ihre Polarisationsrichtungen standen nun ebenfalls senkrecht zueinander). Weil Photon A aber immer noch mit Photon B verschränkt war, musste B in diesem Augenblick die Polarisationsrichtung von C annehmen (2). Das heißt, das einen Meter entfernte Photon B entsprach nun dem im Überlagerungszustand aufgegangenen und daher nicht mehr als eigenständiges Teilchen vorhandenen Photon C.



## Wie wurde das Pion gefunden?

Das Pion wurde bereits 1935, lange vor seinem experimentellen Nachweis, von HIDEKI YUKAWA als virtuelles Austauschteilchen der starken Kraft (zwischen den Nukleonen im Atomkern) postuliert. Aufgrund der geringen Reichweite der Kernkraft musste das Pion jedoch im Unterschied zum Austauschteilchen der elektromagnetischen Kraft (Photon,  $m_0 = 0$ ), eine Ruhemasse besitzen<sup>1</sup>. Mit den von Yukawa errechneten 100 bis 200 MeV/c<sup>2</sup> lag die Masse des Pions zwischen der Elektronenmasse (0,5 MeV/c<sup>2</sup>) und der Masse der Nukleonen (ca. 940 MeV/c<sup>2</sup>). Es wurden daher als Meson („Mittelgewicht“) bezeichnet. Ein scheinbar geeignetes Teilchen – das 1937 in der Höhenstrahlung nachgewiesene Myon (Müon)  $\mu$  ( $m_\mu$  ca. 106 MeV/c<sup>2</sup>) – wurde lange Zeit für das von Yukawa vorhergesagte Pion gehalten. Das einfach negativ geladene Myon gehört jedoch, wie wir heute wissen, wie das Elektron zur Familie der Leptonen („Leichtgewicht“). Seine Wechselwirkung mit den Nukleonen ist zu schwach, um als Austauschteilchen der starken Kraft in Frage zu kommen.

Nach diesem anfänglichen Verwirrspiel konnte CECIL POWELL schließlich im Jahre 1947 (echte) Pionen mithilfe von Detektoren, die auf dem *Pic du Midi* (Frankreich) auf 2877 m Seehöhe aufgestellt waren, nachweisen. Es zeigte sich, dass drei verschiedene existieren: Einfach negativ geladene ( $\pi^-$ ), einfach positiv geladene ( $\pi^+$ ) und neutrale ( $\pi^0$ ) Pionen.

Heute können Pionen auch durch Proton-Proton-Kollisionen in den Teilchenbeschleunigern erzeugt werden. Aufgrund ihrer geringen Lebensdauer (ca.  $10^{-8}$  s für geladene und  $10^{-16}$  s für das neutrale Pion) zerfallen die erzeugten Pionen jedoch nach kürzester Zeit wieder.

Mögliche Zerfälle :

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$$

Trotz der erfolgreichen Beschreibung der Kernkräfte mit Pionen als Austauschteilchen konnte der Yukawa-Ansatz nicht zu einer umfassenden Theorie der starken Wechselwirkung ausgebaut werden, denn Protonen, Neutronen und auch die Pionen sind nicht elementar, sondern aus mehreren **Quarks** zusammengesetzt. Die starke Wechselwirkung zwischen den Quarks wird heute mithilfe von Gluonen als Austauschteilchen beschrieben.

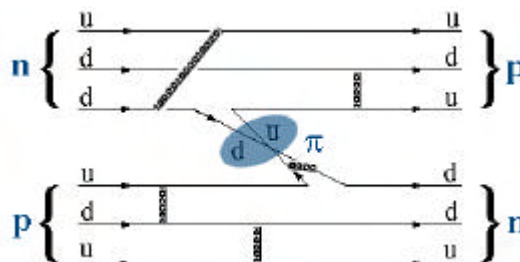


Abb. 4: Feynmangraph der Wechselwirkung zwischen Protonen und Neutronen.

(Ein Proton (p) besteht aus zwei up(u)- und einem down(d)-Quark, ein Neutron (n) aus zwei down(d)- und einem up(u)-Quark. Wellenlinien stellen Gluonen dar.)

Der Pionenaustausch zwischen Neutron und Proton lässt sich allerdings durch den oben skizzierten Feynmangraphen aus der „neuen“ Theorie der starken Kraft ableiten.

### Literatur:

<sup>1</sup> Basiswissen 4, Seite 42, 43

Spurensuche im Teilchenzoo: F. Close, M. Marten, C. Sutton, Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH Heidelberg 1989

## Wie funktioniert die Wilson'sche Nebelkammer?<sup>1</sup>

Der britische Physiker CHARLES T. R. WILSON (1869-1959) konstruierte im Jahre 1911 die nach ihm benannte Wilson'sche Nebelkammer, deren Prinzip er bereits 1896 entwickelt hatte. Sie besteht aus einem Zylinder, dessen eine Seite mit einer Glasplatte und dessen andere Seite von einem beweglichen Kolben verschlossen ist. Im Inneren des Zylinders befindet sich mit Wasserdampf gesättigte Luft. Durch schnelles Herausziehen des Kolbens, das heißt durch plötzliche Vergrößerung des Zylindervolumens, sinkt die Temperatur des Luft-Wasserdampf-Gemischs. Die Luft ist nun mit Dampf übersättigt. Solange keine Kondensationskeime, zum Beispiel kleine Staubteilchen oder Ionen vorhanden sind, kann der Dampf jedoch nicht zu Wassertropfen kondensieren. Durchquert nun ein geladenes Teilchen den Zylinder, so ionisiert es entlang seiner Bahn die Gasmoleküle und der Wasserdampf kann an den so erzeugten Ionen kondensieren. Die so von den Wassertöpfchen nachgezeichnete Spur des geladenen Teilchens kann dann durch die gläserne Deckplatte des Zylinders betrachtet oder fotografiert werden. Aus der Spurbreite kann man auf das Verhältnis von Ladung zu Geschwindigkeit des ionisierenden Teilchens schließen.

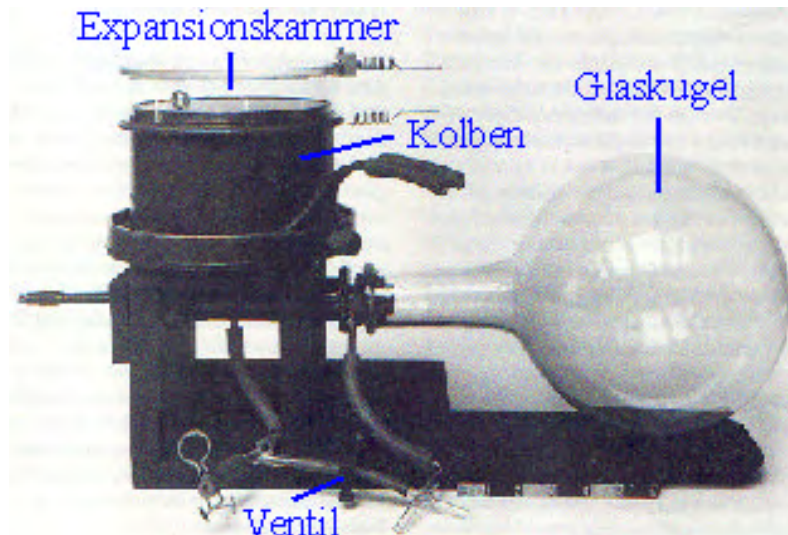


Abb.5: Wilson'sche Nebelkammer

Die Abbildung zeigt Wilsons erste Nebelkammer. Die eigentliche Kammer befindet sich links oben über dem schwarzen Zylinder, in dem sich der Kolben befindet. In der Glaskugel, die über ein Ventil mit dem Gehäuse unterhalb des Kolbens verbunden ist, wird ein Unterdruck erzeugt. Öffnet man das Ventil, wird der Kolben rasch nach unten gezogen und das Volumen der Kammer vergrößert sich sehr schnell. Durch die **adiabatische Expansion** kühlt die wasserdampfgesättigte Luft in der Kammer ab. Da die von der Luft aufnehmbare Dampfmenge mit der Temperatur abnimmt, ist die Luft in der Kammer nun mit Dampf übersättigt.

Wilson's Nebelkammer ermöglichte erstmals, Spuren von Teilchen, die kleiner als ein Atom sind, zu beobachten. Dafür wurde er 1927 mit dem Nobelpreis ausgezeichnet.

---

### Literatur:

<sup>1</sup> Basiswissen 4, Seite 53

Die Teilchenjäger: Yuval Ne'eman, Yoram Kirsh, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1995

Unterrichtsmaterial zur Nebelkammer nach Wilson unter: <http://www.zum.de/dwu/pap107vs.htm>



## Wie konnte Anderson sicher sein, dass das von ihm beobachtete Teilchen ein Positron war?

Elektrisch geladene Teilchen werden in Magnetfeldern abgelenkt. Die Krümmung  $1/r$  der Teilchenspuren ist proportional zur Ladung der Teilchen, aber umgekehrt proportional zu deren Impuls (dem Produkt aus seiner Masse und seiner Geschwindigkeit):  $r \approx Q/p$ .

ANDERSON nutzte diese Tatsache für seine Experimente mit der Nebelkammer. Je nach Orientierung des senkrecht zur Nebelkammer angeordneten Magnetfeldes wird die Bahn eines positiv geladenen Teilchen im bzw. gegen dem Uhrzeigersinn gekrümmt – die einer negativen Ladung genau umgekehrt. Um nun jedoch unterscheiden zu können, ob die beobachteten Spuren von einem von oben kommenden negativ geladenen oder einem von unten kommenden positiv geladenen Teilchen stammten, montierte Anderson eine sieben Millimeter dicke Bleiplatte in der Mitte der Nebelkammer.

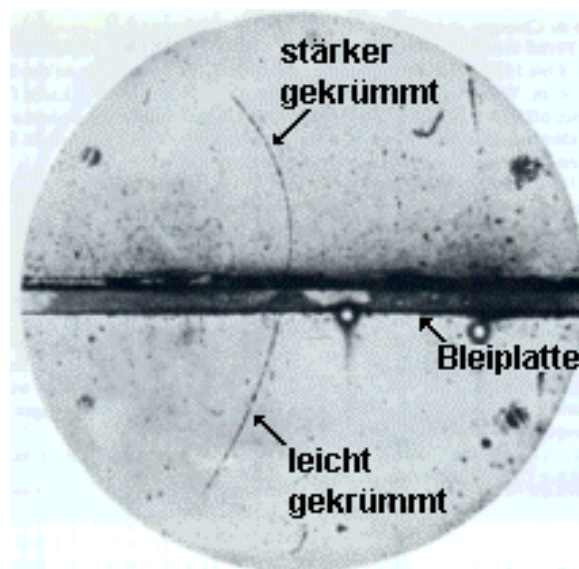


Abb.6: Positronspur in der Nebelkammer

Beim Durchgang durch die Platte verloren die Teilchen Energie, sodass ihre Bahn anschließend stärker gekrümmt war. Mit Hilfe dieses Aufbaus gelang Anderson die Aufnahme der Spur eines nachweislich positiv geladenen Teilchens, dessen Masse (ermittelt aus Breite und Krümmung der Spur) der des Elektrons entsprach. Er hatte damit das Positron entdeckt, wofür er 1936 den Nobelpreis entgegennehmen durfte.

---

### Literatur:

Spurensuche im Teilchenzoo: F. Close, M. Marten, C. Sutton, Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH Heidelberg 1989

## Elektromagnetische Wechselwirkung Gegen wen sind Antiteilchen?

**Es gibt ein negatives Antiproton und ein positives Antielektron (Positron). Kann man mit Antiproton und Positron ein Antiwasserstoffatom bauen?**

Nachdem ANDERSON das Positron entdeckt hatte, begannen viele Physiker auch nach dem Antiproton zu suchen. 1955 war es dann endlich so weit: Das Antiproton konnte erstmals in einem Teilchenbeschleuniger, dem BEVATRON in Berkely (Kalifornien), nachgewiesen werden. Heutige Beschleunigungsanlagen, wie zum Beispiel am CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) in Genf, sind in der Lage, große Mengen von Antiprotonen zu erzeugen. Das Antiproton ist ebenso wie das Proton stabil. Treffen jedoch Antiproton und Proton aufeinander, vernichten sich die Teilchen gegenseitig („**Annihilation**“). Im Vakuum und unter dem Einfluss starker elektrischer und magnetischer Felder können die Antiteilchen jedoch über einen längeren Zeitraum existieren. Abgeschirmt von der „normalen“ Materie können sich dann Antiproton und Positron zu Antiwasserstoff verbinden. Die ersten Antiwasserstoffatome konnten 1995 mit dem **LEAR (Low Energy Antiproton Ring)** am CERN erzeugt werden <sup>[Bau96]</sup>. LEAR war so aufgebaut, dass die in ihn eingebrachten Antiprotonen Elektron-Positron-Paare durch Streuung an Xenon-Kernen erzeugen konnten. Hatte das erzeugte Positron die gleiche Richtung und Geschwindigkeit wie das Antiproton, dann konnten sich die beiden zu einem Antiwasserstoffatom zusammenschließen.



Abb. 7: Schematische Darstellung der Antiwasserstoff-Erzeugung am LEAR

Die Ablenkmagneten, die die Antiprotonen im Ring halten, haben auf die neutralen Antiwasserstoffatome keinen Einfluss mehr. Die Antiatome verlassen daher den Ring und können dann durch die erneute Zerlegung in ihre Bestandteile, also über den gleichzeitigen Nachweis von Antiproton und Positron nachgewiesen werden. Insgesamt konnten so neun Antiwasserstoffatome nachgewiesen werden.

### Literatur :

<sup>[Bau96]</sup> G. Baur et al., Phys. Lett. **B 368** 251-258 (1996)

Erstmaliger Nachweis von Antiwasserstoff : K. Sachs, T. Seifick, W. Oelert, G. Baur, Spektrum der Wissenschaft 3/1996

## Wie genau kennt man die Masse von Protonen und Antiprotonen?

Die SI-Einheit der Masse ist das Kilogramm. Ein ruhendes Proton ist ca.  $1,6726231 \cdot 10^{-27}$  kg schwer. Um die Masse atomarer Teilchen anzugeben verwenden Physiker jedoch meist die Einheit  $\text{eV}/c^2$  bzw.  $\text{MeV}/c^2$  ( $1 \text{ MeV}/c^2 = 1,78266 \cdot 10^{-30}$  kg). Die Masse des Protons beträgt in dieser Einheit:  $m_p = 938,271998 \pm 0,000038 \text{ MeV}/c^2$  [PDG01].

Auch die Ruhemasse des Antiprotons  $\bar{p}$  wurde experimentell bestimmt. Sie unterscheidet sich im Rahmen der heute möglichen Messgenauigkeit nicht von der Masse des Protons. Daraus folgt für das Verhältnis Betrag der Differenz der Proton- und Antiprotonmasse zur Masse des Protons die derzeitige Grenze:  $|m_p - m_{\bar{p}}|/m_p < 5 \cdot 10^{-7}$ .

## Wie wirkt die Gravitation auf Antimaterie?

Die im LEAR erzeugten Antiwasserstoffatome existierten nur einige Milliardstel Sekunden – zu kurz, um ihr Verhalten im Gravitationsfeld der Erde beobachten zu können. Theoretisch kann sich die Fallbeschleunigung von Materie und Antimaterie unterscheiden. Ein extremes Szenario wäre eine abstoßende Wirkung der Gravitation auf Antimaterie (entspricht einer negativen Beschleunigung). Denkbar wäre aber auch, dass sich das Verhalten von Materie und Antimaterie unter Einfluss der Gravitation nur geringfügig unterscheidet. So könnte ein Antiwasserstoffatom etwas schneller bzw. langsamer fallen als ein Wasserstoffatom.

Erst wenn es Physikern gelingt, Antiwasserstoffatome über einen gewissen Zeitraum zu stabilisieren, wird die Wirkung der Gravitation auf Antimaterie experimentell überprüfbar sein.

---

### Literatur :

[PDG01] Citation: D.E. Groom *et al.* (Particle Data Group), Eur. Phys. Jour. **C15**, 1 (2000) and 2001 partial update for edition 2002 (URL: <http://pdg.lbl.gov>)

## Wofür erhielt R. Feynman den Nobelpreis?

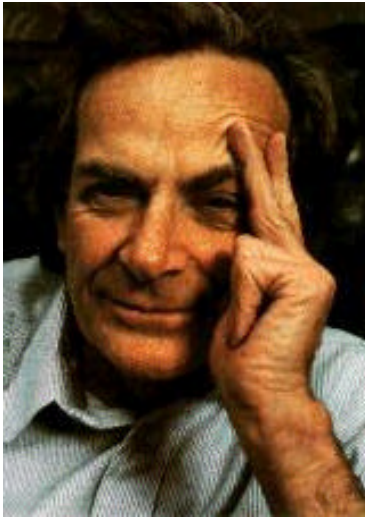


Abb. 8: Richard P. Feynman  
(1918-1988)

RICHARD P. FEYNMAN wurde am 11. Mai 1918 als ältester Sohn von Lucille und Melville Feynman in New York geboren. Bereits zu dieser Zeit soll sein Vater prophezeit haben, dass Richard einmal ein bedeutender Wissenschaftler werden würde. Melville Feynman war selbst sehr an den Naturwissenschaften interessiert, doch fehlte ihm in jungen Jahren das Geld, um seinen Interessen nachzugehen. Um seiner Prophezeiung nachzuhelfen, ging er mit seinem Sohn häufig in das Naturkundemuseum – wobei er es verstand, dem jungen Richard die ausgestellten Objekte und Schautafeln auf eine für Kinder anschauliche und interessante Weise zu erklären. Später kaufte er die *Encyclopaedia Britannica*, die Richard regelrecht verschlang. So wurde Richard Feynmans naturwissenschaftliches Interesse bereits in jungen Jahren geweckt und er entwickelte sich zu einem der bedeutendsten Physiker seiner Zeit.

Im Jahre 1936 begann er sein Studium am Massachusetts Institute of Technology (MIT), von wo aus er 1939 nach Princeton wechselte. 1942, nachdem er sein Studium mit einem Dokortitel für Physik abgeschlossen hatte, beteiligte er sich am *Manhattan Project* – dem geheimen Atombombenprojekt der USA. Nach dem 2. Weltkrieg lehrte er Physik an der Cornell University (1945-1950) und später am California Institute of Technology (1950-1959).

Am 21. Oktober 1965 erhielt Richard Feynman, gemeinsam mit JULIAN SCHWINGER und SIN-ITIRO TOMONAGA den Nobelpreis für Physik. Er wurde ihnen aufgrund ihrer „*grundlegenden Arbeit zur Quantenelektrodynamik mit weitreichenden Konsequenzen für die Physik der Elementarteilchen*“<sup>1</sup> zugesprochen.

Im Jahre 1988 starb Feynman im Alter von 70 Jahren.

---

<sup>1</sup> Übersetzte Begründung des Nobelpreiskomitees

### Literatur:

Richard Feynman: Leben und Werk des genialen Physikers, James Gleick, Droemer Knauer Verlag München 1993

## Welche Hobbys betrieb „Dick“ Feynman?

In seiner Freizeit entschlüsselte Feynman Maja Zahlensysteme, zeichnete und malte (unter anderem ein bei ihm in Auftrag gegebenes Bild für ein Bordell), spielte die Bongo-Trommel oder vertrieb sich die Zeit in den Spielcasinos von Las Vegas.



Abb.9: Von R. Feynman entworfene Briefmarke

Eine Anekdote, die sich Physiker gerne über Feynman erzählen, soll sich während seiner Zeit in Los Alamos, dem geheimen Standort des Atombombenprojekts der USA zugetragen haben: Feynman hatte durch Zufall bemerkt, dass man bei offenstehenden Tresoren mit Hilfe eines raffinierten Tricks den Zahlencode in Erfahrung bringen konnte. Es dauerte nicht lange, und Feynman öffnete alle Tresore in Los Alamos. Dem Direktor des Geheimprojekts blieb darauf hin nichts anderes übrig als eine Dienstanweisung zu erlassen, die es verbot, einen Safe in Anwesenheit von Richard Feynman zu öffnen.

---

### Literatur:

„Sie belieben wohl zu scherzen Mr. Feynman“: Abenteuer eines neugierigen Physikers: R. Feynman, Piper-Verlag München 1996

## Wie groß ist bzw. welche Einheit hat das Drehimpulsquantum $\hbar$ ?

Der Spin ist eine, nicht auf andere Eigenschaften zurückführbare, Grundeigenschaft von Teilchen. Im Unterschied zur Masse oder elektrischen Ladung ist er jedoch kein Skalar, sondern eine vektorielle Größe. Aus diesem Grund und wegen seiner Einheit wird er als eine Art Eigendrehimpuls des Teilchens beschrieben. Im Gegensatz zum Eigendrehimpuls in der klassischen Physik, sind für den Betrag des Spins nur halbzahlige oder ganzzahlige Vielfache von  $\hbar$  („h-quer“) erlaubt (d. h.:  $s = n/2 [\hbar]$  mit  $n = 0,1,2,3,\dots$ ).

Auch die Komponenten des Spinvektors in beliebige Richtungen des Raumes sind quantisiert. Sie können ebenfalls nur ganzzahlige Vielfache von  $\hbar/2$  sein. Für Teilchen mit Spin  $1/2 [\hbar]$  ergeben sich daher nur zwei Einstellungsmöglichkeiten: parallel:  $s = 1/2 [\hbar]$  („spin up“) oder antiparallel:  $s = -1/2 [\hbar]$  („spin down“) zu einem zur Messung des Spins angelegten Magnetfeld (d. h.: Erst durch die Messung entscheidet sich das Teilchen für eine der beiden Spineinstellungen). Ein Teilchen mit Spin 1 (z. B. Photon) hat drei mögliche Orientierungen. Die Anzahl der möglichen Spineinstellungen ist gleich  $2s + 1$  ( $s$  in Einheiten von  $\hbar$ ).

Es ist daher sinnvoll, den Spin eines Teilchens stets als ein Vielfaches von  $\hbar$  anzugeben. Das Drehimpulsquantum  $\hbar$  ist gleich  $h/2\pi$ . Es hat – wie das Planck'sche Wirkungsquantum  $h$  – die Einheit einer Wirkung (Energie·Zeit) und wird daher meist in Joulesekunden (Js) angegeben:

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = \frac{6,6260872(52) \cdot 10^{-34}}{2\pi} \text{ Js} = 1,0545571596(82) \cdot 10^{-34} \text{ Js}^i$$

Da die Energie der kleinsten Teilchen oft auch in Mega Elektronenvolt (MeV) angegeben wird, ist auch die Angabe von  $\hbar$  in MeVs gebräuchlich:

$$\hbar = 6,58211889(26) \cdot 10^{-22} \text{ MeV} \cdot \text{s}^i$$

---

<sup>i</sup> Zahlenwerte aus : CITATION: D.E. Groom *et al.*, European Physical Journal **C15**, 1 (2000), PDG WWW pages (URL: <http://pdg.lbl.gov/>)

### Literatur:

Basiswissen 4, Seite 12

Die Teilchenjäger: Yuval Ne'eman, Yoram Kirsh, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1995

## Durch welches Experiment kann man den Wert des Spins eines Teilchens bestimmen?

Die Existenz des Spins konnte 1922 von OTTO STERN und WALTER GERLACH gezeigt werden. In dem nach ihnen benannten **Stern-Gerlach-Experiment** nutzten sie den Zusammenhang zwischen dem Gesamtdrehimpuls (Gesamtdrehimpuls  $\mathbf{J} = \text{Bahndrehimpuls } \mathbf{L} + \text{Spin } \mathbf{S}$ ) und dem magnetischen Moment ( $\mathbf{m}$ ) eines Teilchens  $\mathbf{m} = \frac{q}{2m} \cdot \mathbf{J}$  – und die damit verbundene Ablenkung des Teilchens in einem Magnetfeld. Da bewegte elektrische Ladungen in einem Magnetfeld stets eine Ablenkung erfahren und für die Größe des magnetischen Moments neutraler Atome neben dem Spin auch der Bahndrehimpuls der Elektronen verantwortlich ist, konnten zur Beobachtung nur neutrale Atome mit Bahndrehimpuls  $L = 0$  verwendet werden.

Stern und Gerlach verwendeten für ihr Experiment neutrale Silberatome, die sie durch ein stark inhomogenes Magnetfeld schossen. Für ein Silberatom ist der Bahndrehimpuls gleich Null und die Spinkomponenten der Elektronen auf den inneren vollbesetzten Schalen kompensieren sich gegenseitig, sodass nur die Spineinstellung des äußersten Elektrons für die Ablenkung des Atoms im Magnetfeld verantwortlich ist. Die Spineinstellungen der Protonen und Neutronen im Kern können aufgrund der relativ großen Masse der Nukleonen – ca. 2000-mal größer als die Masse des Elektrons – vernachlässigt werden.

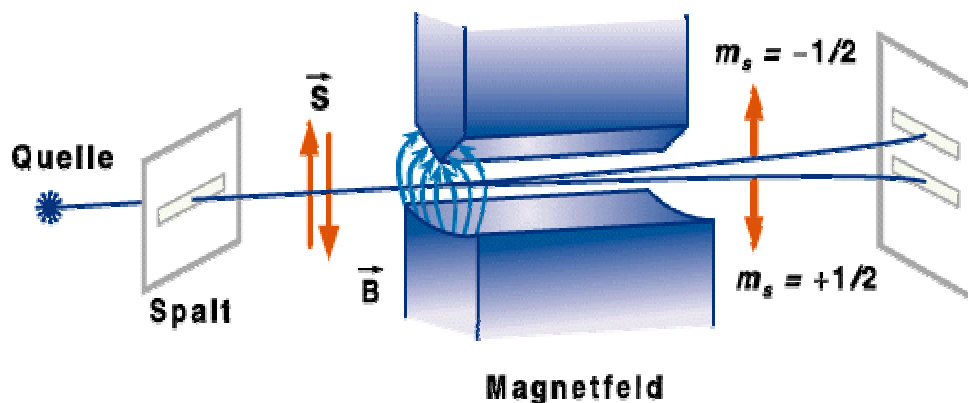


Abb. 10: Schema des Stern-Gerlach-Experiments

Ein Strahl von Silberatomen wurde durch das Magnetfeld geschickt und die abgelenkten Atome auf einem Nachweisschirm registriert. Es zeigt sich, dass die Hälfte der Atome um einen bestimmten Betrag nach oben, die andere Hälfte um denselben Betrag nach unten versetzt auf dem Schirm auftrafen. Dieses Bild kann nur entstehen, wenn die Spineinstellungen ( $m_s$ ) von jeweils 50 % der Atome senkrecht nach oben („spin up“) bzw. senkrecht nach unten („spin down“) zeigen und keine weiteren Orientierungen des Spins zugelassen werden.

---

### Literatur:

Die Teilchenjäger: Yuval Ne'eman, Yoram Kirsh, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1995  
Gerthsen Physik: D. Meschede, 21. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 2002

## Welchen Spin haben die Teilchen $W^+$ , $W^-$ , Pion, Graviton und Delta?

Teilchen werden, abhängig davon ob sie halbzahligen oder ganzzahligen Spin besitzen, in zwei Klassen unterteilt. Teilchen mit halbzahligem Spin sind zum Beispiel Elektronen, Neutronen, Protonen, Quarks und Neutrinos. Man nennt sie Spin-1/2-Teilchen oder auch **Fermionen**. Teilchen mit ganzzahligem Spin heißen **Bosonen**. Zu ihnen gehören die Austauschteilchen der vier fundamentalen Kräfte und die Mesonen.

- $W^+$  und  $W^-$  sind zwei der drei Austauschteilchen der schwachen Kraft. Ihr Spin ist 1 (in Einheiten von  $\hbar$ ).
- Die **Pionen** ( $\pi^+$ ,  $\pi^-$  und  $\pi^0$ ) gehören zur Gruppe der Mesonen. Wie alle Mesonen sind sie aus einem Quark und einem Antiquark mit jeweils Spin  $S = 1/2$  aufgebaut und besitzen daher eine ganzzahligen Spin. Für die drei Pionen gilt Spin  $S = 0$ , weil die Spins von Quark und Antiquark eines jeden Pions in entgegengesetzte Richtungen zeigen.
- Das **Graviton** ist das Austauschteilchen der Gravitation. Obwohl es bis heute nicht beobachtet werden konnte, wird ihm der Spin  $S = 2$  zugeschrieben.
- $\Delta^+$ ,  $\Delta^0$ ,  $\Delta^{++}$  und  $\Delta^-$  gehören zu den Baryonen. Jedes von ihnen besteht aus drei Quarks, deren Spins in dieselbe Richtung zeigen. Der Spin der vier Delta-Baryonen beträgt daher  $S = 3/2$ .

---

### Literatur:

Spurensuche im Teilchenzoo: F. Close, M. Marten, C. Sutton, Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH Heidelberg 1989

Teilchenphysik und Kosmologie: Eine Einführung in Grundlagen und Zusammenhänge: Michael Treichel, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2000

Elementarteilchenphysik, von den Grundlagen zu den modernen Experimenten: C. Berger, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2002



## Wie ist ein Laser aufgebaut?

Eine typische technische Anwendung der Quantenphysik ist der **LASER**<sup>1</sup> (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) – ein Gerät zur Erzeugung sehr intensiver, gerichteter und kohärenter Lichtstrahlen. Er beruht, wie der Name schon sagt, auf dem von ALBERT EINSTEIN formulierten Prinzip der *stimulierten Emission*:

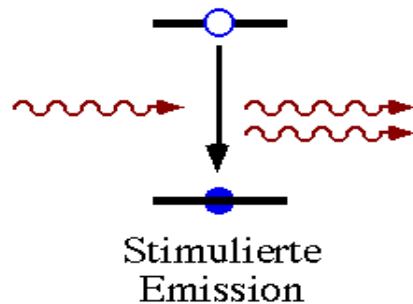


Abb.11: Prinzip der stimulierten Emission

Dieses Prinzip beschreibt die Tatsache, dass ein Photon mit geeigneter Energie ein Atom, das sich in einem angeregten Energiezustand befindet, stimulieren kann, seine überschüssige Energie in Form eines zweiten – mit dem ersten völlig identen Photons – abzugeben. Jedes dieser Photonen kann nun wiederum jeweils ein weiteres angeregtes Atom zur Abgabe eines identischen Photons anregen, sodass die Zahl der Photonen stark steigt. Trifft das Photon jedoch auf ein Atom, das sich im Grundzustand befindet, so wird es von diesem absorbiert und die Anzahl der Photonen sinkt wieder. Um die Photonenintensität zu verstärken, muss sich daher stets die Mehrzahl der Atome im angeregten Zustand befinden.

Ein Laser besteht daher aus einem geeigneten Medium (z. B. Rubinkristall), das unter dem Einfluss einer „Pumpquelle“ (pumpt Energie in das Medium) in einen angeregten Zustand übergeht. Um die Zahl der Photonen noch weiter zu verstärken, lässt man sie mit Hilfe von zwei Spiegel immer wieder durch das Medium laufen. Einer der beiden Spiegel ist so beschaffen, dass ein Teil der Photonen die Apparatur als Laserstrahl verlassen kann.

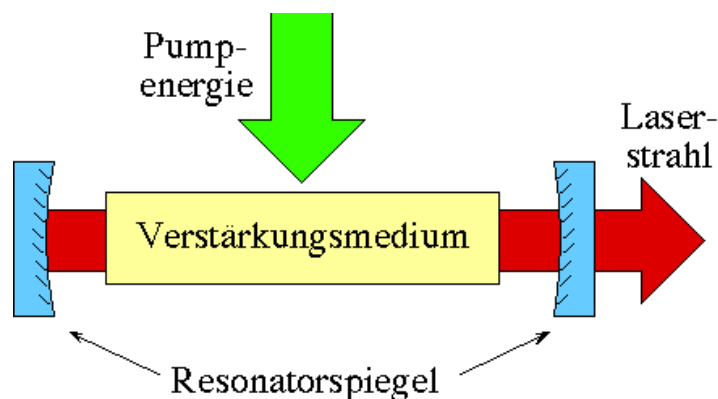


Abb. 12: Prinzipieller Aufbau eines Lasers

## Elektromagnetische Wechselwirkung Was SPINnt?

Der erste Laser wurde 1960 von T. H. MAIMAN gebaut. Als Verstärkungsmedium verwendete er einen Rubin-Kristall, der durch Blitzlampen gepumpt wurde. Heute gibt es neben Festkörperlasern auch Gas-, Halbleiter-, Flüssigkeits- und Elektronenlaser. Aufgrund der geringen Divergenz des Laserstrahls und den enormen Energien, die durch ihn übermittelt werden können, wird der Laser heute in vielen Sparten, wie z. B. Medizin, Messtechnik und Materialbearbeitung eingesetzt.

---

### Literatur:

<sup>1</sup> Basiswissen 2, Seite 127

Laser: eine revolutionäre Erfindung und ihre Anwendungen: Horst Weber, Beck Verlag München 1998

Der Laser - Eine elementare Darstellung von Grundlagen, Aufbau und Anwendungen: Gerd Koppelman, Praxis der Naturwissenschaften Physik, Heft 1/1986, S. 37-43

Gerthsen Physik: D. Meschede, 21. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 2002

**Wegen der Einsteinbeziehung  $E = m \cdot c^2$  kann zu jeder Masse eine äquivalente Energie angegeben werden und umgekehrt. Wie groß sind die Massen von Proton, Neutron und Elektron in Kilogramm?**

Physiker geben die Massen der kleinsten Teilchen meist in eV/c<sup>2</sup> bzw. MeV/c<sup>2</sup> an. Ein Elektronenvolt (eV) ist die Energie, die ein Elektron beim Durchlaufen einer Potentialdifferenz von einem Volt im Vakuum gewinnt. In der SI-Einheit der Energie, dem Joule, entspricht dies einem Wert von  $1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}\text{J}$ <sup>1</sup>.

Die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ( $c_0$ ) beträgt:  $c_0 = 2,99792458 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Daraus ergibt sich der Umrechnungsfaktor zwischen eV/c<sup>2</sup> und kg:

$$1 \frac{\text{eV}}{c^2} = \frac{1,60217733 \cdot 10^{-19} \text{kg} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}{(2,99792458 \cdot 10^8)^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}} \approx 1,78 \cdot 10^{-36} \text{kg}^2$$

Die Massen der Teilchen in Kilogramm sind daher:

<b>Proton:</b>	$m_p \approx 938 \cdot 10^6 \frac{\text{eV}}{c^2} \approx 1,67 \cdot 10^{-27} \text{kg}$
<b>Neutron:</b>	$m_n \approx 940 \cdot 10^6 \frac{\text{eV}}{c^2} \approx 1,67 \text{kg}$
<b>Elektron:</b>	$m_e \approx 0,511 \cdot 10^6 \frac{\text{eV}}{c^2} \approx 9,1 \cdot 10^{-31} \text{kg}$
<b>Photon:</b>	$m_\gamma = 0 \frac{\text{eV}}{c^2} = 0 \text{kg}$

---

<sup>1</sup> Basiswissen 3, Seite 2

<sup>2</sup> Zahlenwerte aus Particle Data Group: <http://pdg.lbl.gov>

## Wofür erhielt Isidor Rabi dem Nobelpreis?

ISIDOR RABI wurde am 29. Juli 1898 in Rymanow, das damals zur österreichischen Monarchie gehörte (heute in Polen), geboren. 1899 übersiedelte er mit seinen Eltern nach New York, wo er 1919 mit dem Studium der Chemie begann. Später wechselte er jedoch zur Physik. In seiner Abschlussarbeit (1927) beschäftigte er sich mit den magnetischen Eigenschaften von Kristallen. Inspiriert von Stern und Gerlachs Experiment, das die Aufspaltung eines Strahls von Silberatomen in einem inhomogenen magnetischen Feld aufgrund des vom Spin des äußersten Elektrons verursachten magnetischen Moments zeigt, entwickelte er 1938 ein Verfahren, um auch das viel kleinere magnetische Moment der Atomkerne (verursacht durch den Kernspin) experimentell messen zu können <sup>[Rab38]</sup> <sup>[Rab39]</sup>.

Im Jahre 1944 erhielt er „für die von ihm zur Aufzeichnung der magnetischen Eigenschaften von Atomkernen entdeckte Resonanzmethode“<sup>d</sup> den Nobelpreis.

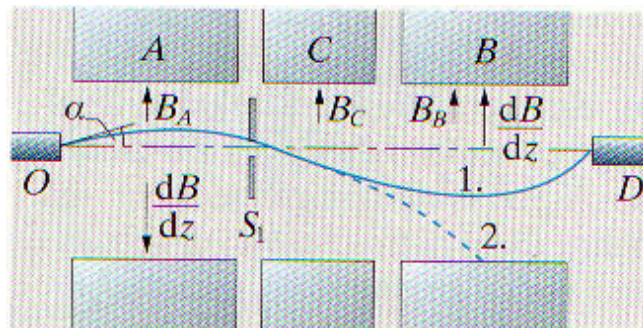


Abb. 13: Rabi-Experiment zur Messung des Kernspins an freien Atomen

Das Rabi-Experiment besteht im wesentlichen aus zwei Stern-Gerlach-Apparaturen A und B und einem dazwischen liegenden homogenen Magnetfeld C. Alle drei Felder haben dieselbe Richtung, die Gradienten der inhomogenen Felder A und B sind jedoch entgegengesetzt orientiert. Atome mit bestimmten Spineinstellungen, die unter dem Winkel  $\alpha$  in die Apparatur geschossen werden, erfahren im Feld A eine Kraft nach unten („Wurfparabel“). Durch einen schmalen Schlitz S gelangen diese Atome in das homogene Magnetfeld C, in dem sie sich geradlinig weiterbewegen. Im Feld B werden sie um dem gleichen Betrag nach oben abgelenkt und dann vom Detektor D registriert. Der „Trick“ des Experiments besteht darin, dass senkrecht zum homogenen Magnetfeld C ein magnetisches Wechselfeld  $C'$  angelegt wird. Bei geeigneter Frequenz  $\omega$  des Wechselfeldes ändern die Atome mit großer Wahrscheinlichkeit ihre Spineinstellungen. Danach wird die Ablenkung durch das Feld A aber im Bereich B nicht mehr kompensiert und die Atome fliegen am Detektor D vorbei. Mit Hilfe der Frequenzen, für die ein Intensitätsminimum am Detektor D registriert wird, und durch Messung der bei diesen Frequenzen auftretenden Ablenkungen der Atome, konnte Rabi die Kernspins und die von ihnen verursachten magnetischen Momente sehr genau bestimmen.

Das Rabi-Verfahren ist der Vorläufer der **Kernspintomographie** – einer Technik, die heute in Krankenhäusern zur Gewebeuntersuchung eingesetzt wird – und hat auch deshalb historisch große Bedeutung.

### Literatur:

<sup>[Rab38]</sup> I.I. Rabi, J.R. Zacharias, S. Millman, P. Kusch : Phys. Rev. **53** 318 (1938)

<sup>[Rab39]</sup> I.I. Rabi, S. Millman, P. Kusch: Phys. Rev. **55** 526-535 (1939)

Gerthsen Physik: D. Meschede, 21. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 2002

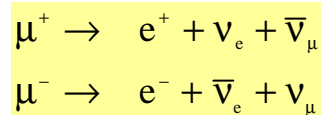
<sup>1</sup> Übersetzte Begründung des Nobelpreiskomitees

## Wie ist das Myon entdeckt worden?

Das Myon wurde bereits 1937 von CARL ANDERSON und SETH NEDDERMEYER in Detektoraufnahmen der kosmischen Höhenstrahlung beobachtet, doch vorerst für das von YUKAWA postulierte Austauschteilchen der starken Kraft (das Pion) gehalten.

Myonen haben die gleichen elektromagnetischen Eigenschaften wie Elektronen, sind jedoch mit einer Masse von  $105 \text{ MeV}/c^2$  ca. 200 mal schwerer als ihre leichten „Brüder“. Ebenso wie das Elektron besitzt auch das negativ geladene Myon ( $\mu^-$ ) ein Antiteilchen – das positiv geladene Anti-Myon ( $\mu^+$ ).

Elektron und Myon sowie das 1974 entdeckte Tau  $\tau$  ( $m_\tau = 1784 \text{ MeV}/c^2$ ) gehören zur Familie der Leptonen – Teilchen die von der starken Wechselwirkung nicht beeinflusst werden. Freie Myonen besitzen daher eine relativ lange mittlere Lebensdauer von  $2,2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ , bevor sie in ein Elektron bzw. Positron und zwei Neutrinos zerfallen:



---

### Literatur:

Die Teilchenjäger: Yuval Ne'eman, Yoram Kirsh, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1995  
Spurensuche im Teilchenzoo: F. Close, M. Marten, C. Sutton, Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH Heidelberg, 1989  
Spaceship Neutrino: Christine Sutton, Cambridge University Press New York 1992

## Wie ist die Beschleunigeranlage in Stanford (SLAC) aufgebaut?

Das SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) befindet sich am Gelände der Stanford-Universität in San Francisco und ist heute eine der führenden Beschleunigeranlagen der Welt.

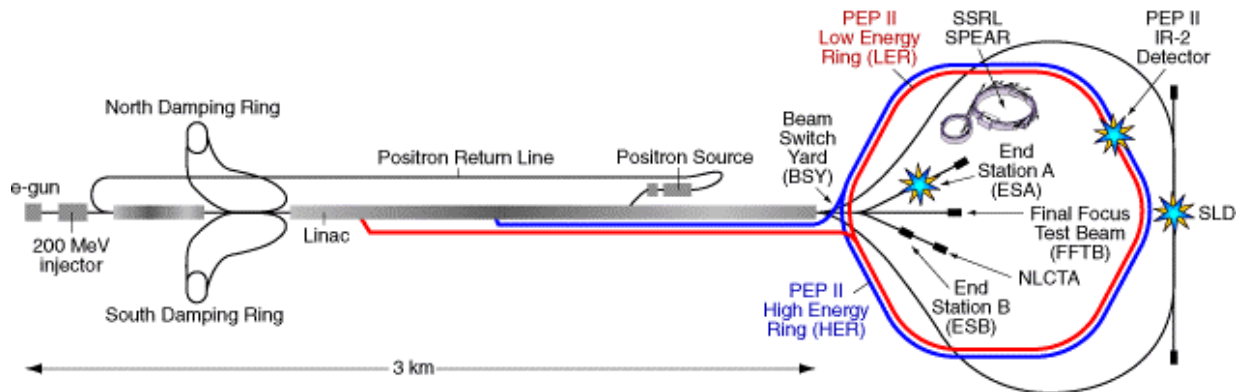


Abb. 14: Skizze des Stanford Linear Accelerator Centers in San Francisco, USA

Hauptbestandteil des SLAC ist der drei Kilometer lange Linearbeschleuniger LINAC (LInear ACcelerator), in dem die von einer Glühkathode (e-gun) abgestrahlten Elektronen auf nahezu Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden. Die beschleunigten Elektronen wurden ursprünglich zu den Endstationen (ESA, ESB) gelenkt und dort auf fixe Targets geschossen. Dadurch konnte man die innere Struktur von Protonen und Neutronen untersuchen (Nachweis der Quarks im Jahr 1968).

Heute werden im LINAC neben den Elektronen auch Positronen beschleunigt. Die Positronen werden erzeugt, indem man Elektronen auf ein festes Target (Positron Source) schießt. In der „Positron Return Line“ werden die Positronen dann zum Anfangspunkt des LINAC zurücktransportiert. In kurzen Zeitabständen werden Elektron- und Positron-Pakete in den Linearbeschleuniger eingebracht. Nachdem die Teilchenpakete einige Meter des LINACs durchflogen haben, werden sie in die beiden Ringe (North Damping Ring und South Damping Ring) gelenkt, um die Verbreiterung der Pakete möglichst gering zu halten. Anschließend werden sie im LINAC weiterbeschleunigt. Um neben den „fixed-Target“-Experimenten (nur ein geringer Teil der Energie des beschleunigten Teilchens geht in die Produktion neuer Teilchen ein) auch Kollisions-Experimente (die gesamte Energie der kollidierenden Teilchen steht für die Erzeugung neuer Teilchen zur Verfügung) durchführen zu können, wurde die Anlage weiter ausgebaut. 1980 wurden der PEP- (Positron-Elektron-Projekt) Speicherring in Betrieb genommen. Dieser wurde 1999 zum asymmetrischen Kreisbeschleuniger PEP II umgebaut, um etwaige Unterschiede zwischen Teilchen und Antiteilchen nachweisen zu können <sup>[Aub01]</sup>. PEP II besteht aus zwei übereinanderliegenden Beschleunigungsringen. Im unteren Ring werden Elektronen auf eine Energie von 9 GeV beschleunigt, im oberen Ring kreisen Positronen mit einer maximalen Energie von 3,1 GeV. Die beiden Teilchenstrahlen werden dann in einem Detektor (IR 2 bzw. BABAR) zur Kollision gebracht.

## Elektromagnetische Wechselwirkung Elektron mal drei

Zwischen 1989 und 1998 war ein weiterer Teil der Anlage, der SLC (Stanford Linear Collider) in Betrieb. Die im LINAC auf Energien von je 50 GeV beschleunigten Elektronen und Protonen wurden durch starke Magnetfelder auf zwei getrennte Bahnen gelenkt und stießen dann in einem bestimmten Punkt wieder aufeinander. Die Kollisionsprodukte wurden im SLD (SLC Large Detektor) aufgezeichnet. Unter anderem konnte so eine große Zahl von  $Z^0$ -Bosonen ( $m_Z = 91 \text{ GeV}/c^2$ ) erzeugt werden.

---

### Literatur:

<sup>[Aub01]</sup> B. Aubert et al. (BABAR Collaboration): Phys. Rev. Lett. **86** 2515-2522  
Stanford Linear Accelerator Center home page: <http://www.slac.stanford.edu>