

Warum dauerte es so lange, bis man das Neutrino fand?

Obwohl eine große Zahl an Neutrinos ständig die Erde durchquert, war es lange Zeit nicht möglich, sie experimentell nachzuweisen. Grund dafür ist die äußerst geringe Wechselwirkung zwischen Neutrinos und Materieteilchen:

- Neutrinos gehören im Standard-Modell der Elementarteilchen zur Familie der Leptonen. Wie alle Leptonen sind sie immun gegen die starke Kraft.
- Auch die elektromagnetische Kraft hat auf Neutrinos keinen Einfluss, da sie keine elektrische Ladung tragen.
- Die Masse der Neutrinos ist äußerst gering (lange Zeit nahm man sogar an, dass sie masselos sind), sodass sie auch von der Gravitation, der schwächsten der vier elementaren Kräfte, nahezu unbeeinflusst sind.
- Nur über die schwache Kraft können Neutrinos mit Materie wechselwirken.

Aufgrund der geringen Wechselwirkung sind Reaktionen zwischen Neutrinos und Materie überaus selten. Ungehindert durchdringen ca. 400 000 Milliarden Neutrinos jeden Menschen pro Sekunde. Um die Hälfte der ankommenden Neutrinos aufzuhalten, benötigte man eine $3 \cdot 10^8$ km dicke Stahlwand oder eine 3600 Lichtjahre breite Wassermauer!

PAULI sagte, nachdem er die Neutrinos eingeführt hatte um den radioaktiven β -Zerfall zu erklären: „*Ich habe etwas Schreckliches getan: Ich habe ein Teilchen vorausgesagt, das nicht nachgewiesen werden kann*“.

Literatur:

Spaceship Neutrino: Christine Sutton, Cambridge University Press New York 1992

Neutrino-Physik: Norbert Schmitz, Teubner-Verlag Stuttgart 1997

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

Durch welche experimentelle Anordnung wurde das Elektron-Neutrino nachgewiesen?

Das von WOLFGANG PAULI 1930 postulierte Neutrino konnte erstmals im Jahre 1956 von FREDERICK REINES und CLYDE COWAN^{[Rei56] [Rei59]} experimentell nachgewiesen werden. Als Neutrino-Quelle verwendeten sie in ihrem Experiment einen Kernreaktor. Ein Kernreaktor emittiert wegen des Neutronen-Überschusses der Spaltprodukte ständig eine große Zahl von Anti-Neutrinos ($\bar{\nu}_e$). Die Anti-Neutrinos können (mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit) von den Protonen eines Atomkerns eingefangen werden (Umkehrprozess des β -Zerfalls). Das Proton emittiert dabei ein Positron und verwandelt sich in ein Neutron: $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$

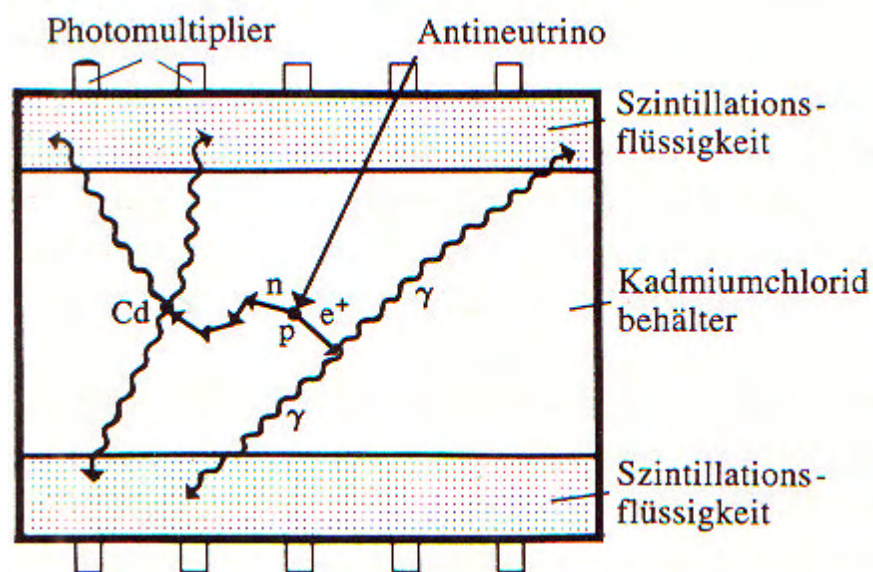


Abb. 15: Schematische Darstellung der Prozesse im Neutrino-Detektor

Der von Reines und Cowan gebaute Neutrino-Detektor besteht im Wesentlichen aus einem mit Kadmiumchloridlösung ($CdCl_2 + H_2O$) gefüllten Behälter. Wenn ein Proton der Lösung ein Anti-Neutrino absorbiert, wird ein Positron erzeugt, das kurz darauf mit einem Elektron in zwei Photonen zerstrahlt (Paarvernichtung). Die beiden Photonen besitzen jeweils eine Energie von etwa 0,51 MeV – ihre Fortpflanzungsrichtungen sind (aufgrund der Impulserhaltung) entgegengesetzt. Das aus dem Proton entstandene Neutron wird einige Tausendstelsekunden lang durch Zusammenstöße mit Wassermolekülen abgebremst und schließlich von einem Kadmiumkern eingefangen. Der Kadmiumkern emittiert infolgedessen mehrere Photonen mit einer Gesamtenergie von 9 MeV.

Um die bei dieser Reaktion erzeugten Photonen nachweisen zu können, ist der Behälter zwischen zwei Flüssig-Szintillationszählern aufgebaut. Flüssig-Szintillatoren enthalten eine Flüssigkeit, deren Atome durch Photonen ionisiert werden und daraufhin Licht emittieren. Um die Szintillationsflüssigkeit herum befinden sich Photomultiplier, deren Aufgabe darin besteht, die im Szintillatormaterial entstehenden Lichtblitze in messbare elektrische Impulse umzuwandeln und zu registrieren.

Schwache Wechselwirkung Woher kommen die Elektronen?

Durch die Registrierung mehrerer dem umgekehrten β -Zerfall entsprechender Signale (gleichzeitiger Nachweis zweier Photonen, deren Energie jeweils 0,51 MeV beträgt, gefolgt von einem Signal verursacht durch mehrere Photonen mit einer Gesamtenergie von 9 MeV) konnten F. Reines und C. Cowan die Existenz von Neutrinos beweisen. Um Störsignale zu minimieren wurde der Detektor unterirdisch, abgeschirmt durch meterdicke Schichten aus Erde und Metall, aufgebaut.

Literatur:

^[Rei56] F. Reines, C.L. Cowan: Nature **178** 446; 523 (erratum) (1956)
C.L. Cowan et al., Science **124** 103 (1956)

^[Rei59] F. Reines, C.L. Cowan: Phys. Rev. **113** 273 (1959)

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

Wie viele Supernova-Explosionen in unserer Galaxie hat man bis heute von der Erde aus gesehen?

Die Explosion eines Sterns als Supernova ist ein eindrucksvolles astronomisches Schauspiel. Einige Tage bis Monate leuchtet die Supernova millionenfach heller als der ursprüngliche Stern, der sie verursacht hat. Eine Supernova in unserer Galaxie, der Milchstraße, könnte sogar tagsüber zu sehen sein.

Supernova-Explosionen sind jedoch nicht besonders zahlreich. Eine grobe Abschätzung besagt, dass sie in unserer Galaxie im Mittel etwa alle 40 Jahre einmal vorkommen. Außerdem können wir nicht alle Explosionen von der Erde aus sehen, da die weiter entfernt liegenden vom Staub der Milchstraße verdeckt werden. Aufgrund dessen existieren nur einige wenige historisch gesicherte Aufzeichnungen von Supernova-Explosionen in unserer Galaxie.

Jahr der Beobachtung	Sternbild	Entdecker	Besonderheit
185 n. Chr.	Centaurus	chinesische Astronomen	Als „Gaststern“ mehr als acht Monate sichtbar.
1006 n. Chr.	Lupus	asiatische und europäische Astronomen	Ebenfalls mehrere Monate sichtbar, jedoch relativ schwach.
1054 n. Chr.	Taurus	chinesische Astronomen	Acht Wochen lang sogar tagsüber sichtbar. Die Überreste sind als „Krebsnebel“ heute noch sichtbar.
1572 n. Chr.	Cassiopeia	der dänische Astronom Tycho Brahe	Erstmals wurden die Koordinaten und die zeitliche Änderung der Helligkeit bestimmt.
1604 n. Chr.	Ophiuchus	Johannes Kepler	18 Monate lang mit freiem Auge sichtbar

Supernova-Explosionen in unsere Galaxie

Diese bisher niedrige Beobachtungsrate wird sich wahrscheinlich in Zukunft erhöhen, wenn eine Supernova allein durch die bei der Explosion in großer Zahl erzeugten Neutrinos nachgewiesen werden kann. Anders als das Licht (Photonen) können Neutrinos den kosmischen Staub der Milchstraße nahezu ungehindert durchqueren und schließlich von Neutrino-Detektoren auf der Erde nachgewiesen werden. (Ein plötzlicher Anstieg der Neutrinorate in Detektoren wurde erstmals bei der Supernova SN1987A beobachtet.)

Wie alle in den letzten Jahren beobachteten Supernovae hat auch SN1987A in einer anderen Galaxie (außerhalb der Milchstraße) stattgefunden.

Literatur:

dtv-Atlas zur Astronomie: Joachim Herrmann, Deutscher Taschenbuch Verlag München 1998

Eine Supernova erregte 1987 großes Aufsehen. Wo waren Neutrino-Messstationen aufgestellt, die diese Supernova beobachteten?

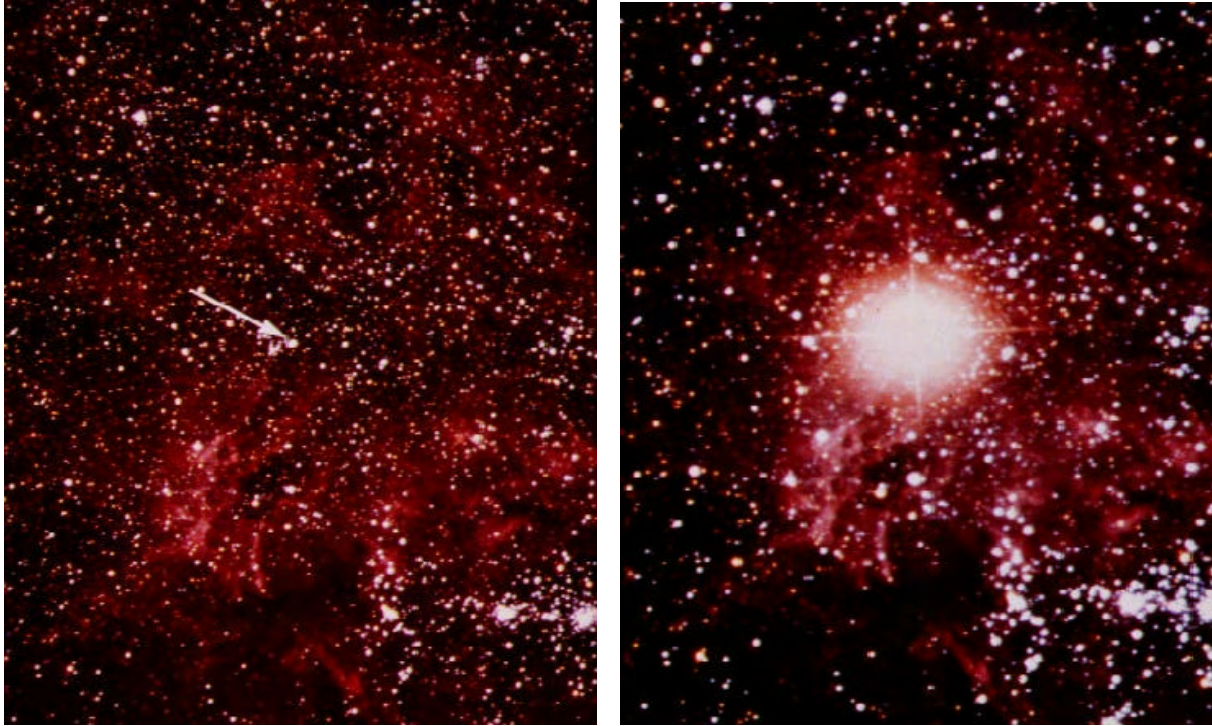


Abb.16: Aufnahmen des Himmelbereichs um die Supernova SN1987A vor bzw. nach der Explosion

Am 23.2.1987 beobachtete man die Supernova-Explosion¹ des Sterns Sanduleak (SK-69°2002), einem blauen Überriesen in unserer Nachbargalaxie, der Großen Magellanschen Wolke, ca. 165 000 Lichtjahre von der Erde entfernt. Bei dieser Supernova, die heute unter dem Namen SN1987A bekannt ist, wurden ca. 99 % der bei der Explosion frei werdenden Energie in Form von Neutrinos abgestrahlt. Dieser plötzliche Neutrino-Ausbruch konnte von zwei Neutrino-Detektoren nachgewiesen werden:

- **Kamiokande-Detektor**

Kamiokande (Kamioka Nucleon Decay Experiment) ^[Kos92] ist ein großer Wasser-Cerenkov-Detektor*, der 1983 seinen Betrieb aufnahm und später zum verbesserten Super-Kamiokande ausgebaut wurde. Die Anlage befindet sich in der Kamioka-Mine 300 km westlich von Tokyo (Japan) in einer Tiefe von 1000 m. Der mit 2140 Tonnen reinem Wasser gefüllte Detektor konnte am 23.2.1987 elf Neutrino-Ereignisse innerhalb von 12,4 Sekunden registrieren ^[Hir87].

* Großer Wassertank mit zahlreichen Photomultipliern auf der Oberfläche zur Messung des Cerenkov-Lichts, ursprünglich zum Nachweis von Protonenzerfällen erbaut.
(Siehe auch Seite 34)

- **IMB-Detektor**

Auch im IMB (Irvine-Michigan-Brookhaven)-Detektor ^[Bec92] konnten acht Neutrino-Ereignisse in einer Zeitspanne von 5,6 Sekunden nachgewiesen werden.

IMB, ebenfalls ein Wasser-Cerenkov-Detektor, wurde in den frühen Achtzigerjahren 600 m unter der Erde in der Morton-Mine in der Nähe von Cleveland, Ohio (USA) errichtet. Er war mit 5000 Tonnen reinem Wasser gefüllt.

Literatur:

¹ Basiswissen 4, Seite 83

^[Kos92] M. Koshiba: Phys. Rep. **220** 229 (1992)

^[Hir87] K.S. Hirata et al. (Kamiokande): Phys. Rev. Lett. **58** 1490 (1987)

^[Bec92] R. Becher-Szendy et al. (IMB): Phys. Rev. **D46** 3720 (1992); Phys. Rev. Lett. **69** 1010 (1992)

Wann und wie wurden μ -Neutrinos und τ -Neutrinos zum erstenmal nachgewiesen?

Entdeckung des μ -Neutrinos:

In den Fünfzigerjahren unterschied man zwischen drei verschiedenen Leptonen – Elektron (e^-), Myon (μ^-) und einem neutralen Teilchen, das Neutrino (ν) genannt wurde. Neutrinos traten beim β -Zerfall der Nukleonen zusammen mit Elektronen bzw. Positronen, aber auch beim Zerfall der geladenen Pionen zusammen mit Myonen in Erscheinung.

Myonen sind, anders als Elektronen, nicht stabil. Nach einer mittleren Lebensdauer von $2,2 \cdot 10^{-6}$ Sekunden zerfallen sie mit großer Wahrscheinlichkeit in ein Elektron und zwei Neutrinos (Myon-Zerfall¹). Ein weiterer scheinbar möglicher Zerfall des Myons in ein Elektron und ein Photon ($\mu^- \rightarrow e^- + \gamma$) konnte jedoch nie beobachtet werden. B. PONTECORVO lieferte 1959 eine mögliche Erklärung für das Fehlen dieses Zerfalls, indem er eine weitere Ladung des Myons postulierte. Elektronen sollten diese „Myonladung“ nicht besitzen. Beim Zerfall des Myons ($\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$) musste diese Ladung von einem der Neutrinos „übernommen“ werden. Das zweite Neutrino durfte, ebenso wie das Elektron, keine Myonladung besitzen – es sollten also zwei verschiedene Arten von Neutrinos existieren.

Das entscheidende Experiment, das Pontecorvos Vermutung bestätigen sollte, wurde 1962 im Protonsynchrotron in Brookhaven (USA) unter der Leitung von LEON LEDERMAN, MELVIN SCHWARTZ und JACK STEINBERGER durchgeführt.

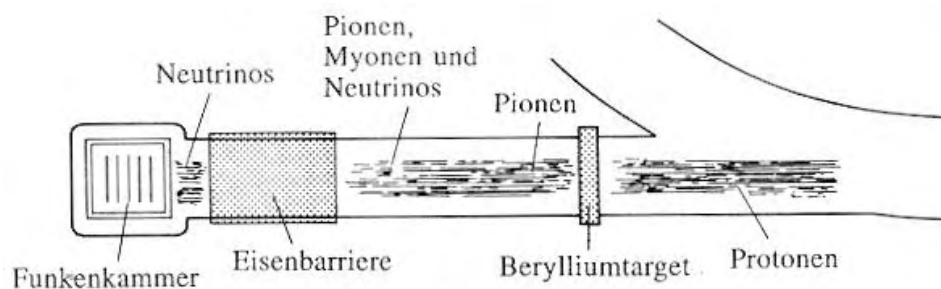


Abb. 17: Skizze des „Zwei-Neutrino-Experiment“ am Protonsynchrotron in Brookhaven (USA)

Die im Synchrotron auf eine Energie von 15 GeV beschleunigten Protonen wurden auf ein Target aus Beryllium geschossen. Beim Zusammenstoß der Protonen mit den Nukleonen des Targets wurde Pionen erzeugt. Einige dieser Pionen zerfielen im Flug in Myonen und Neutrinos bevor sie auf eine 13,5 m dicke Eisen-Abschirmung trafen. Alle Teilchen, mit Ausnahme der Neutrinos, wurden von der Abschirmung abgebremst, sodass hinter der Eisenwand nur Neutrinos übrigblieben. Schließlich trafen die Neutrinos auf eine gigantische Funkenkammer, die aus dicken Aluminiumplatten aufgebaut war. Jedesmal wenn ein Neutrino von einem Proton oder Neutron in einer der Platten absorbiert und ein geladenes Teilchen „herausgeschlagen“ wurde, entstand eine für das erzeugte Teilchen (Elektron oder Myon) charakteristische Funkenspür. Es zeigte sich, dass alle beobachteten Spuren ausschließlich von Myonen stammten. Das Experiment – heute unter dem Namen *Zwei-Neutrino-Experiment* bekannt – zeigte somit, dass „das Neutrino des Myons“ (ν_μ) nur Myonen und keine Elektronen erzeugt und sich deswegen vom „Neutrino des Elektrons“ (ν_e) unterscheiden muss.

Entdeckung des τ -Neutrinos:

Die Entdeckung des τ -Neutrinos, des letzten der zwölf elementaren Materieteilchen des Standardmodells, wurde am 21.7.2000 von einem Forschungsteam des Fermilab (Fermi National Accelerator Laboratory) in Chicago (USA) bekanntgegeben. Im sogenannten DONUT(Direct Observation of the NU Tau)-Experiment hatten sie seit 1997 einen energiereichen Protonenstrahl (800 GeV) auf einen Wolfram-Block geschossen und so, neben vielen anderen Teilchen, Tau-Neutrinos erzeugt. Um die τ -Neutrinos von den anderen Teilchen zu trennen, wurde der Teilchenstrahl durch Magnete (um geladene Teilchen herauszulenken) und anschließend auf eine 17 Meter dicke Stahlwand (die alle neutralen Teilchen bis auf die Neutrinos schluckte) geführt, sodass der Teilchenstrahl hinter der Abschirmung fast ausschließlich aus Neutrinos bestand.

Der Nachweis der τ -Neutrinos erfolgte im 15 Meter langen DONUT-Detektor, dessen Kernstück aus mehreren, hintereinander angeordneten Stahlplatten in einer Emulsion bestand. τ -Neutrinos erzeugten beim Zusammenstoß mit Stahlatomen Tau-Teilchen, die in der Emulsion ca. 2 mm lange Spuren hinterließen, bevor sie in andere Teilchen zerfielen. Sechs Millionen Spuren, die möglicherweise von Tau-Teilchen stammten, wurden in den folgenden Jahren aufgezeichnet. Vier (nach anderen Darstellungen fünf) dieser Spuren konnten schließlich tatsächlich auf Tau-Teilchen zurückgeführt werden und so τ -Neutrinos erstmals (indirekt) nachgewiesen werden.

¹ Siehe Seite 32

Literatur:

Neutrino-physik: Norbert Schmitz, Teubner-Verlag Stuttgart 1997

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

Die Zahl der ankommenden Neutrinos wurde seit 1968 mit dem sogenannten „Davis-Experiment“ gemessen. Wie verläuft dieses Experiment?

Das Davis- oder Homestake-Experiment ist das erste Experiment, in dem die bei Kernfusionen in der Sonne erzeugte Neutrinos auf der Erde nachgewiesen werden konnten.

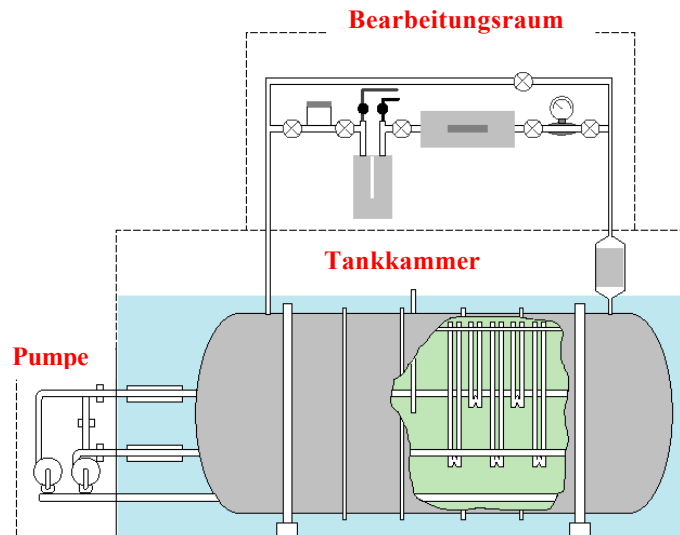


Abb. 18: Schematische Darstellung des Homestake-Detektors

Der von RAYMOND DAVIS ^[Dav94] ^[Dav96] vorgeschlagene Detektor bestand aus einem riesigen mit 615 Tonnen Perchlorethylen (C_2Cl_4) gefüllten zylindrischer Tank, der 1968 in der Homestake-Goldmine in South Dakota (USA) 1480 Meter unter der Erdoberfläche aufgebaut wurde. Energiereiche Sonnenneutrinos ($E_\nu \geq 0,814$ MeV) konnten auf ihrem Weg durch den Detektor von Cl^{37} -Kernen der Detektorflüssigkeit eingefangen werden. Die Cl^{37} -Kerne verwandelten sich infolgedessen in Ar^{37} -Kerne ($\nu_e + n \rightarrow p + e^-$). Da Ar^{37} radioaktiv ist, konnte der Ar^{37} -Anteil im Tank in regelmäßigen Zeitabständen gemessen und so die Anzahl der in diesem Zeitraum eingefangenen Neutrinos bestimmt werden. Dazu wurden bis zur Abschaltung der Anlage im Jahre 1993 alle zwei Monaten die im C_2Cl_4 gelösten Ar^{37} -Atome aus dem Tank gespült, indem man mit Pumpen Helium-Gas durch die Tankfüllung zirkulieren ließ. Im Bearbeitungsraum konnte dann der Anteil der Ar^{37} -Atome gemessen und so die Anzahl der eingefangenen Sonnenneutrinos bestimmt werden.

Diese Zahl der eingefangenen Neutrinos entsprach jedoch stets nur etwa einem Drittel der erwarteten Reaktionen. Diese Diskrepanz zwischen Theorie und Experiment wurde lange Zeit als „Solar-Neutrino-Problem“ bezeichnet. Heute nimmt man an, dass Neutrino-Oszillationen (Umwandlungen der Elektron-Neutrinos in Myon- und Tau-Neutrinos) für das Neutrinodefizit verantwortlich sind.

Literatur:

Neutrino-Physik: Norbert Schmitz, Teubner-Verlag Stuttgart 1997

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

^[Dav94] R. Davis: Prog. Part. Nucl. Phys. **32** 13 (1994); Proc. 13th Intern. Conference in Neutrino Physics and Astrophysics, Boston, USA, 1988, p. 518, eds. J. Schneps et al., World Scientific, Singapore, 1989

^[Dav96] R. Davis: Nucl. Phys. **B** (Prox. Suppl.) **48** 284 (1996)

Seit den 1990er Jahren gibt es ein weiteres Experiment in Italien (Gran Sasso). Wodurch unterscheidet sich dieses Experiment vom Davies-Experiment?

GALLEX (GALLium-EXperiment) ^[Kir92] ^[Ham96], ein Neutrino-Detektor im Gran Sasso Untergrundlaboratorium LNGS (Laboratorio Nazionale del Gran Sasso) 120 Kilometer östlich von Rom, wurde 1991 fertiggestellt.

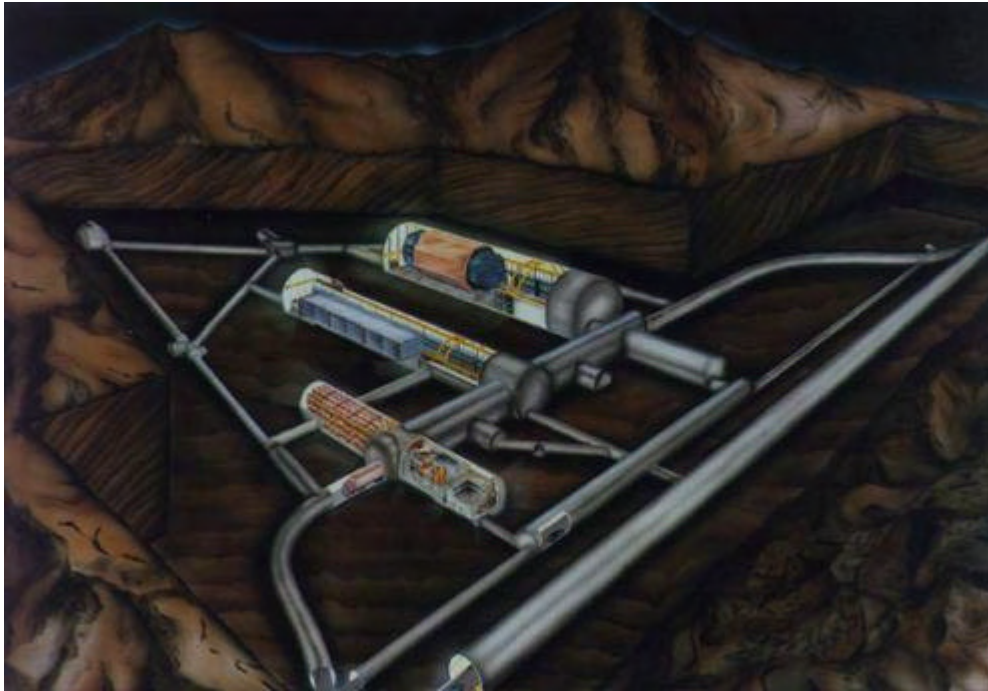


Abb. 19: Skizze des Gran Sasso Untergrundlaboratorium LNGS

Der Detektor besteht aus einem riesigen, mit 30,3 Tonnen Gallium (Ga^{71}) und 101 Tonnen Salzsäure-Galliumchlorid-Lösung ($\text{HCl} + \text{GaCl}_3$) gefüllten Behälter. Gallium ist für Experimente mit solaren Neutrinos besonders geeignet, da es eine relativ hohe Einfangrate besitzt und – anders als das im Davis-Experiment verwendete Perchlorethylen (C_2Cl_4) – Neutrinos mit geringeren Energien ($E_\nu \geq 0,233 \text{ MeV}$) ebenfalls an den Reaktionen teilnehmen. Ein Neutrino wird durch Einfang in einem Ga^{71} -Kern nachgewiesen, der sich infolgedessen in einen Germanium-Kern (Ge^{71}) umwandelt. Das Germanium wird dann durch seinen „Zerfall“ (Elektroneneinfang: $\text{Ge}^{71} + e^- \rightarrow \text{Ga}^{71} + \nu_e$) nachgewiesen.

Auch in diesem Experiment konnten nur etwa 50 % der erwarteten Sonnenneutrinos beobachtet werden.

Literatur:

^[Kir92] T. Kirsten: Physik in unserer Zeit **23** 246 (1992)

^[Ham96] W. Hampel et al. (GALLEX): Phys. Lett: **B388** 384 (1996)

Neutrino-Physik: Norbert Schmitz, Teubner-Verlag Stuttgart 1997

GALLEX Homepage: <http://www.mpi-hd.mpg.de/nuastro/gallex.html>

Die Richtung der Neutrinos wurde durch die Cerenkov-Strahlung nachgewiesen. Was versteht man darunter?

Bewegt sich ein geladenes Teilchen in einem Medium (mit Brechungsindex $n > 1$) mit einer Geschwindigkeit (v), die höher ist als die Lichtgeschwindigkeit in diesem Material ($c_M = \frac{c_0}{n}$), so entsteht Strahlung, die im Allgemeinen im blauen Spektralbereich des sichtbaren Lichts liegt. Dieser Effekt wurde 1934 von dem russischen Physiker P. A. CERENKOV (Nobelpreis 1958) entdeckt ^[Cer37].

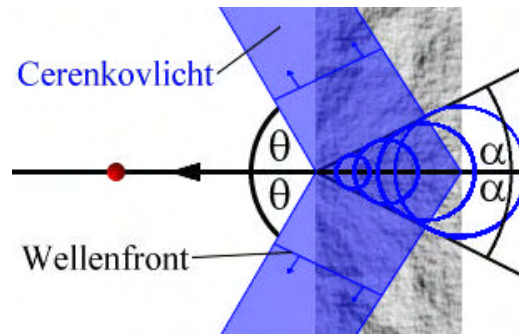


Abb. 20: Prinzipskizze zur Erzeugung eines Cerenkov-Lichtkegels

Cerenkov-Strahlung ist vergleichbar mit den Schallwellen, die zum Beispiel entstehen, wenn ein Flugzeug mit Überschallgeschwindigkeit fliegt: Die Schallwellen interferieren zum sogenannten Mach'schen Kegel (Öffnungswinkel ist gleich 2α) und werden innerhalb eines bestimmten Winkels (θ) um die Flugbahn des Überschallflugzeuges abgestrahlt.

Auch das Cerenkov-Licht wird kegelförmig in die Bewegungsrichtung des geladenen Teilchens abgestrahlt. Der Öffnungswinkel des Lichtkegels (2θ) ist durch den Brechungsindex des Mediums (n) und die Geschwindigkeit des Teilchens (v) bestimmt:

$$\cos \theta = \frac{c_M}{v} = \frac{c_0}{n \cdot v}$$

Aufgrund der Cerenkov-Strahlung können heute Neutrinos in riesigen Cerenkov-Detektoren (z. B. Super Kamiokande in Japan) aufgespürt und ihre Richtungen und Geschwindigkeiten bestimmt werden. Cerenkov-Detektoren bestehen meist aus einem riesigen, mit Wasser gefüllten Tank, an dessen Wänden tausende Photomultiplier befestigt sind und mit deren Hilfe das emittierte Licht nachgewiesen werden kann.

Die Neutrinos tragen zwar selbst keine elektrische Ladung (senden daher kein Cerenkov-Licht aus), sie können aber ihre Energie an geladene Teilchen „weitergeben“ (z. B. an freie Elektronen des Detektormaterials durch elastische Elektron-Neutrino-Streuung). Wurde genügend Energie übertragen, um das geladene Teilchen auf eine Geschwindigkeit $v > c_M$ zu beschleunigen, wird Cerenkov-Licht emittiert, und von den Photomultipliern aufgezeichnet. Aus dem Durchmesser der Cerenkov-Ringe kann dann die Geschwindigkeit der geladenen Teilchen bzw. der stoßenden Neutrinos berechnet werden.

Schwache Wechselwirkung
Neutrinos – Teilchen voller Rätsel

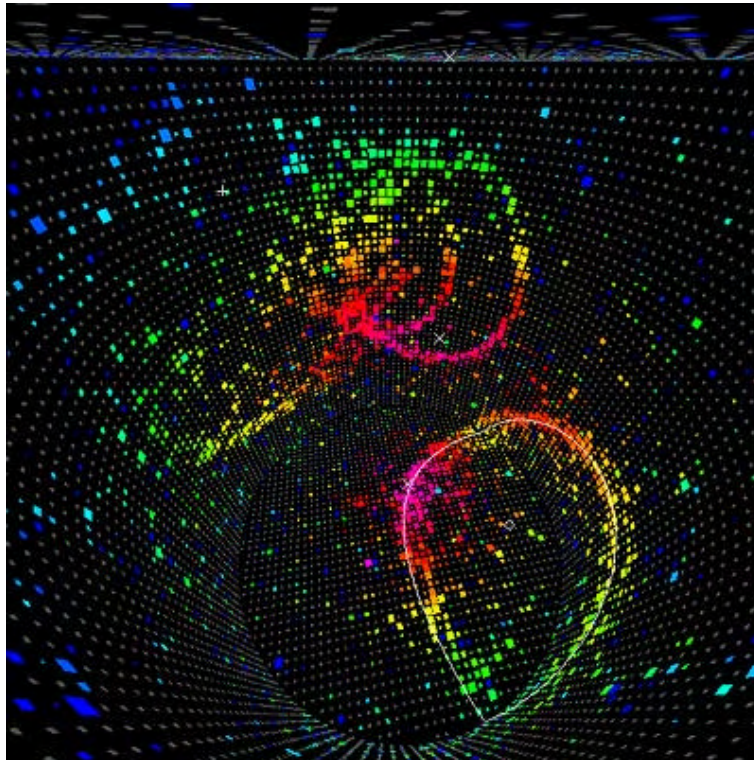


Abb. 21: Cerenkov-Ringe im Super-Kamiokande-Wasser-Cerenkov-Detektor

Literatur:

^[Cer37] P. A. Čerenkov: Phys. Rev. **52** 378 (1937)

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

Spaceship neutrino: Christine Sutton, Cambridge University Press New York 1992

Welches Experiment läuft in SNO ab?

Das **SNO** (Sudbury Neutrino Observatory) befindet sich in einer Nickel-Mine in der Nähe von Sudbury (Kanada) ca. 2000 Meter unter der Erdoberfläche.

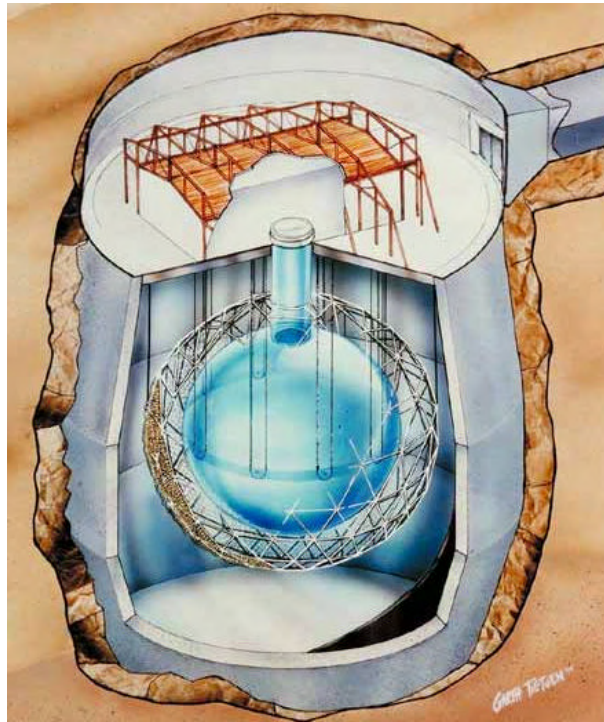


Abb.22: Skizze des "Sudbury Neutrino Observatory"

SNO ist ein Wasser-Cerenkov-Detektor, dessen Aufgabe darin besteht, Proton-Zerfälle und Neutrino-Reaktionen aufzuspüren. Der eigentliche Detektor besteht aus einer lichtdurchlässigen Kugel, die mit 1000 Tonnen schwerem Wasser (D_2O) gefüllt ist. Auf einem rostfreien Stahlgitter rund um das Gefäß befinden sich ca. 9500 Photomultiplier, welche die charakteristische Cerenkov-Strahlung detektieren. D_2O -Tank und Photomultiplier befinden sich in einem mit reinem Wasser gefüllten zehn Stockwerke hohen Zylinder, um den Detektor gegen radioaktive Strahlung abzuschirmen. Im Jahre 1999, neun Jahre nach Baubeginn, konnte SNO in Betrieb genommen werden.

Im SNO können drei verschiedene Neutrino-Deuterium-Reaktionen beobachtet werden:

- Die *elastische Neutrino-Elektron-Streuung*: $\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$ ($x = e, \mu$ oder τ)
wird auch in H_2O -Cerenkov-Detektoren (z. B. Super Kamiokande) beobachtet. Neutrinos beliebigen Flavors nehmen an dieser Reaktion (mit unterschiedlichem Wirkungsquerschnitt) teil. Aus dieser Reaktion kann der gesamte Neutrinofluss ermittelt werden.
- Die *Neutrino-Absorption durch Deuteronen*: $\nu_e + D \rightarrow e^- + p + p$
wird ausschließlich von Elektron-Neutrinos ausgelöst. Sie liefert erstmals die Möglichkeit, die Zahl der ankommenden Elektron-Neutrinos zu bestimmen.

Schwache Wechselwirkung Neutrinos – Teilchen voller Rätsel

- Die *Deuteron-Aufspaltung durch Neutrinos*: $\nu_x + D \rightarrow \nu_x + p + n$
an der wieder alle drei Neutrino-Generationen teilnehmen.

Es zeigte sich, dass der solare Neutrinofluss, berechnet aus der Neutrino-Absorptions-Reaktion, kleiner ist als jener, der aus der elastischen Neutrino-Elektron-Streuung ermittelt wird. Die Differenz lässt den Schluss zu, dass auch Sonnenneutrinos mit Myon- und Tau-Flavor an der Neutrino-Elektron-Streuung beteiligt sind. Sonnenneutrinos werden aber ausschließlich als Elektron-Neutrinos erzeugt – sie müssen ihren Flavor daher im Flug geändert haben. Im Jahre 2001 hatte das SNO-Team genügend Daten gesammelt, um mit 99,96 %iger Sicherheit sagen zu können, dass Neutrino-Oszillationen für das „Verschwinden“ von solaren Neutrinos verantwortlich sind. Daher ist man heute auch überzeugt, dass Neutrinos eine Masse besitzen.

Literatur:

Neutrino-Physik: Norbert Schmitz, Teubner-Verlag Stuttgart 1997

Sudbury Neutrino Observatory Homepage: <http://www.sno.phy.queensu.ca>

Welches sind die derzeitigen Messdaten für die Massen der drei Neutrinentypen?

Lange Zeit nahm man an, dass Neutrinos masselose Teilchen sind. Das SNO-Experiment hat jedoch gezeigt, dass sich verschiedene Arten von Neutrinos ineinander umwandeln können, was allerdings nur möglich ist, wenn die verschiedenen Neutrinosorten nicht alle die gleiche Masse haben. Wie schwer die Neutrinos nun tatsächlich sind, konnte bis heute noch nicht gemessen werden, es lassen sich aber Obergrenzen für die Neutrinomassen angeben:

Neutrinoart	Masse (MeV/c ²)
Elektron-Neutrino	$< 3 \cdot 10^{-6}$
Myon-Neutrino	$< 0,19$
Tau-Neutrino	$< 18,2$

Experimentell bestimmte obere Massengrenzen der Neutrinos¹

¹ Aus: D.E. Groom et al. (Particle Data Group), Eur. Phys. Jour. C 15, 1 (2000)

Literatur :

Spaceship Neutrino: Christine Sutton, Cambridge University Press New York 1992
Neutrinophysik: Norbert Schmitz, Teubner-Verlag Stuttgart 1997

Wie funktioniert eine solche Beschleunigungsstrecke?

Bewegt sich ein geladenes Teilchen durch ein elektrisches Feld, erfährt es eine Kraft, die das Teilchen beschleunigt bzw. seine Energie erhöht. Die Energiezunahme (ΔE) des Teilchens entspricht dabei dem Produkt aus seiner Ladung (Q) und der von ihm durchflogenen Spannungsdifferenz (ΔU): $\Delta E = Q \cdot \Delta U$

Die statische Spannung, die zwischen zwei Elektroden aufrecht erhalten werden kann, ist jedoch begrenzt, sodass die Energieaufnahme eines einfach geladenen Teilchens in einem elektrostatischen Feld nur wenige MeV betragen kann.

Weitaus höhere Energien erreichen die Teilchen im Linearbeschleuniger nach Wideröe:

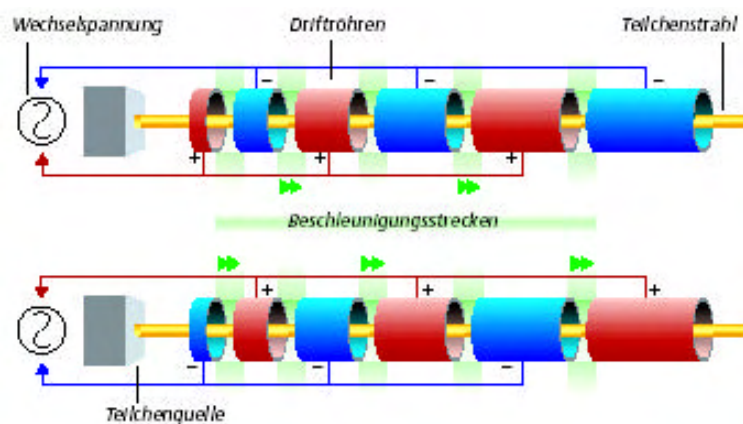


Abb. 23: Skizze einer Beschleunigungsstrecke mit Driftröhren

In diesem Beschleuniger durchlaufen die Teilchen eine Reihe von Metallröhren, die abwechselnd mit den beiden Polen einer Wechselspannungsquelle verbunden sind. Bei geeigneter Frequenz der Wechselspannung werden die **Driftröhren** immer dann umgepolt, wenn die Teilchen den feldfreien Innenraum der Röhren durchqueren, sodass sie im Spalt zwischen den Driftröhren stets eine beschleunigende Kraft erfahren. Ist die angelegte Frequenz konstant, müssen mit der steigenden Geschwindigkeit der beschleunigten Teilchen auch die Längen der Driftröhren zunehmen. Erst wenn die Teilchen nahezu Lichtgeschwindigkeit erreicht haben, bleibt die Röhrenlänge konstant, da die zugeführte Energie dann fast ausschließlich in die relativistische Massenzunahme der Teilchen eingeht.

Die gesamte Beschleunigungsstrecke befindet sich annähernd im Vakuum, damit die Teilchen nicht durch Zusammenstöße mit Luftmolekülen abgebremst werden.

Heute werden zur weiteren „Beschleunigung“ von Teilchen, die sich bereits mit nahezu Lichtgeschwindigkeit bewegen, anstelle der Driftröhren evakuierte Hohlraumresonatoren, sogenannte **Runzelröhren**, eingesetzt.

Schwache Wechselwirkung
Ein 30 km langes Mikroskop

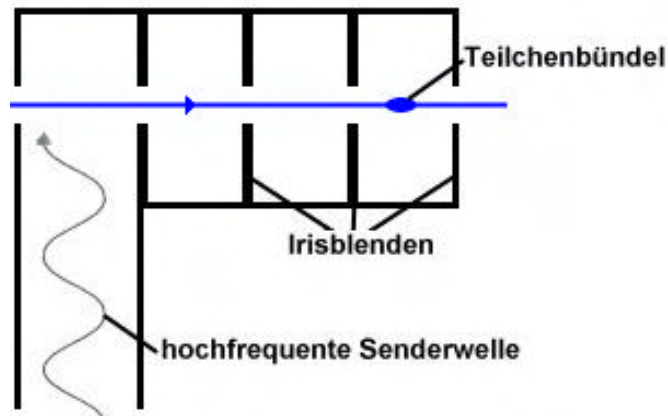


Abb. 24: Querschnittsskizze einer Runzelröhre

Ein in die Runzelröhre eingebrachtes geeignetes hochfrequentes elektromagnetisches Feld erzeugt im Inneren der Hohlräume eine stehende elektromagnetische Welle, deren Phasengeschwindigkeit durch Irisblenden reduziert und an die Geschwindigkeit der geladenen Teilchen angepasst werden kann. Stimmen die beiden Geschwindigkeiten überein, so spürt das Teilchen in jedem Hohlraum das gleiche elektrische Feld. Dies führt zu einer stetigen Beschleunigung bzw. Energieaufnahme des Teilchens (vgl. Wellenreiten), falls dieses im richtigen Moment in die Runzelröhre eingeschossen wird.

Literatur:

Physik der Teilchenbeschleuniger und Synchrotronstrahlungsquellen: K. Wille, Teubner-Verlag Stuttgart 1992

**Was bedeuten die Abkürzungen der einzelnen Beschleuniger am CERN?
Welche Teilchen können in den einzelnen Teilbeschleunigern beschleunigt werden und welche kinetische Energie erreichen sie dabei?**

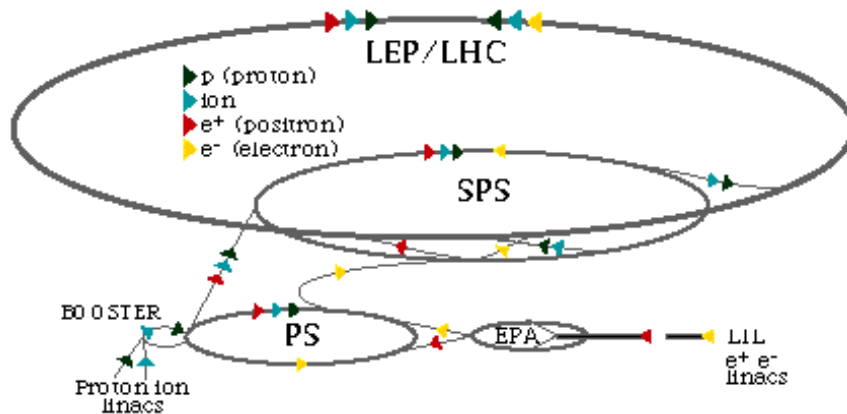


Abb. 25: Skizze der Beschleunigungsanlagen am CERN

CERN (Centre Européen de Recherches Nucléaires), das größte Forschungszentrum für Teilchenphysik weltweit, wurde im Jahre 1954 als Gemeinschaftsprojekt von zwölf europäischen Ländern gegründet. Mittlerweile ist die Zahl der Mitgliedsstaaten auf zwanzig angewachsen. (Österreich trat der Gemeinschaft im Jahre 1959 bei und finanziert seither etwa 2,2% der laufenden Kosten.) Die riesige Anlage, die heute aus mehreren, miteinander verbundenen Beschleunigern besteht (die älteren Beschleunigungsanlagen werden als „Vorbeschleuniger“ eingesetzt), erstreckt sich westlich von Genf über beide Seiten der schweizerisch-französischen Grenze.

- **Beschleunigungsstufen für Elektronen und Positronen:**

Elektronen werden in einem ersten Schritt im Linearbeschleuniger **LIL** (**L**EP **I**njector **L**inac) auf 200 MeV beschleunigt und teilweise auf ein festes Target gelenkt. Dabei entstehen u.a. Positronen, die zusammen mit den Elektronen auf 600 MeV weiterbeschleunigt werden. Im Akkumulatorkreisring **EPA** (**E**lectron **P**ositron **A**ccumulator) werden die Teilchen solange gespeichert, bis genügend Leptonen zur Verfügung stehen, um sie zu Bündeln von etwa 10^{11} Teilchen zusammenfassen zu können. Die Elektron- und Positronbündel werden in den Kreisbeschleuniger **PS** (**P**roton **S**ynchrotron) geleitet, in dem sie auf Energien von je 3,5 GeV weiterbeschleunigt werden. Im letzten „Vorbeschleuniger“ **SPS** (**S**uper **P**roton **S**ynchrotron) wird die Energie der Leptonen auf 23 GeV erhöht, mit der sie schließlich in den **LEP** (**L**arge **E**lectron **P**ositron **C**ollider) eingebracht werden. Im LEP konnten im Jahre 1999 Energien von bis zu 102 GeV pro Strahl erreicht werden.

Im Dezember 2000 wurde LEP abgeschaltet, um mit dem Bau des Proton-Proton-Beschleunigers **LHC** (**L**arge **H**adron **C**ollider) im 27 Kilometer langen Tunnel beginnen zu können, der im Jahre 2006 in Betrieb gehen soll.

- **Beschleunigungsstufen für Protonen und Ionen:**

Die ersten Beschleunigungsstufen für Protonen und Ionen sind ebenfalls Linearbeschleuniger. Im **Proton-Linac** erreichen Protonen eine Energie von 50 MeV, im **Ion-Linac** werden Blei-Ionen auf ca. 870 MeV ($4,2 \text{ MeV/u}^1$) beschleunigt. Beide Teilchenstrahlen werden in den Booster PSB (Proton Synchrotron Booster) gelenkt, in dem die Protonen auf 1 GeV und die Ionen auf 19,8 GeV (95 MeV/u) weiter beschleunigt werden. Im nächstgrößeren Beschleuniger, dem Proton Synchrotron (PS), können Protonen und Anti-Protonen eine maximale Energie von 28 GeV erreichen; die Energie der Blei-Ionen wird im PS auf 4,2 GeV/u erhöht. Die vorerst letzte Beschleunigungsstufe der Hadronen ist das Super Proton Synchrotron (SPS), in dem Proton- und Anti-Proton-Pakete mit Energien von 270 GeV pro Strahl aufeinander geschossen werden können. Die Ionen erreichen im SPS eine maximale Energie von 36,8 TeV (177 GeV/u). SPS wird ab 2005 als Vorbeschleuniger des LHC (Large Hadron Collider) eingesetzt werden, in dem erstmals Proton-Proton-Kollisionen mit ca. 7 TeV pro Teilchen beobachtet werden sollen. Die Energie der Blei-Ionen wird im LHC voraussichtlich auf ca. 570 TeV ($2,7 \text{ TeV/u}$) erhöht.

Literatur:

CERN Homepage: <http://public.web.cern.ch/Public/>

Physik der Teilchenbeschleuniger und Synchrotronstrahlungsquellen: K. Wille, Teubner-Verlag Stuttgart 1992

¹ u...Atomic Mass Unit: 1 u ist definiert als 1/12 der Masse eines Kohlenstoffatoms (^{12}C)
($m_{\text{pb}} = 207,98 \text{ u}$)

Wie werden Elektronen und Positronen erzeugt?

Die Elektronenstrahlquellen der Beschleunigeranlagen sind sogenannte „**Elektronenkanonen**“ (Electron-guns). Sie bestehen aus einer Elektronenquelle und einem angelegten elektrischen Feld, das die freigesetzten Elektronen beschleunigt.

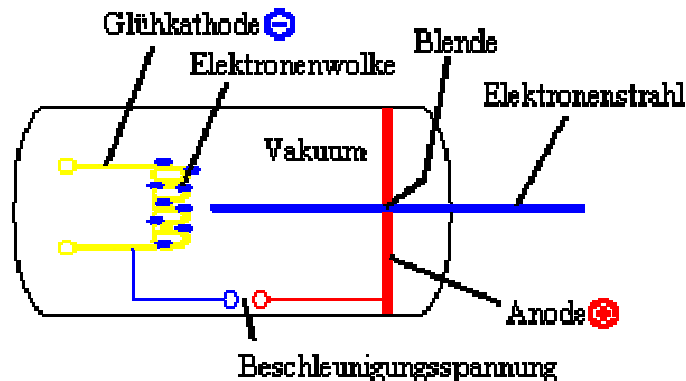


Abb.26: Skizze einer Elektronenkanone

Die einfachste Elektronenquelle ist ein stromdurchflossener Draht (z. B. der Leuchtdraht in einer Glühbirne). Durch den elektrischen Strom erhitzt sich der Draht und die Elektronen, die Träger des Stroms, können den Draht verlassen (Glühemission). Eine weitere Möglichkeit besteht darin, Elektronen durch (Laser-)Licht aus der Oberfläche eines Halbleiters herauszulösen (Photoeffekt). Bei polarisiertem Licht erhält man so polarisierte Elektronen.

Durch ein starkes elektrisches Feld zwischen Elektronenquelle (Kathode) und einer Metallplatte (Anode) werden die Elektronen in Richtung Anode beschleunigt. In der Metallplatte befindet sich ein kleines Loch, durch welches ein Teil der beschleunigten Elektronen die Elektronenkanone als Elektronenstrahl mit kleinem Durchmesser verlässt. Üblicherweise läuft die Elektronenkanone im Pulsbetrieb, d. h. dass das beschleunigende Feld zwischen Kathode und Anode immer nur für kurze Zeit eingeschaltet wird. Anstelle des kontinuierlichen Elektronenstrahls werden so einzelne Elektronenbündel erzeugt, die durch [Runzelröhren](#) weiterbeschleunigt werden können.

Ist die Energie der Elektronen groß genug (200 MeV im LIL, CERN), werden sie auf ein Target (z. B. dünne Metallfolie) geschossen und so Elektron-Positron-Paare erzeugt. Die Positronen werden mit Hilfe von Magneten aus dem Teilchenschauer herausgefiltert, gebündelt und anschließend (ebenso wie die Elektronen) weiterbeschleunigt.

Literatur:

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

Wonach will man mit LHC im Speziellen suchen?

- Eine der wichtigsten Aufgaben des Proton-Proton-Colliders **LHC** (**L**arge **H**adron **C**ollider), der gegenseitig umlaufende Protonpakete auf Endenergien von je 7 TeV beschleunigen und an vier Wechselwirkungspunkten zur Kollision bringen soll, ist die Suche nach den **Higgs-Teilchen** (siehe Themenheft, Seite 18).
Higgs-Bosonen spielen eine wichtige Rolle für die Bestätigung des Standardmodells, da sie eine mögliche Erklärung für die Abweichungen der Teilchenmassen vom Wert Null (wie im Standardmodell gefordert) liefern.
- Eine weitere Zielsetzung des LHC's ist die Suche nach **supersymmetrischen Teilchen**. Die Supersymmetrie (SUSY) (siehe Themenheft Seite 31) ist eine Erweiterung des Standardmodells, die jedem konventionellen Teilchen ein supersymmetrisches Partnerteilchen zuordnet:

Teilchen	SUSY-Teilchen
Quarks	Squarks
Leptonen	Sleptonen
Photonen	Photinos
Gluonen	Glunos
W-Bosonen, Z-Boson	Winos, Zinos
Higgs-Bosonen	Higgsinos

Teilchen und ihre hypothetischen SUSY-Partner

Zumindest das leichteste dieser Teilchen soll, sofern es existiert, im LHC erzeugt und nachgewiesen werden können.

- Weiters wird am LHC nach einer möglichen Substruktur der Quarks und Leptonen und nach der Existenz zusätzlicher schwerer Eichbosonen (W' und Z') gesucht, die von einigen Erweiterungen des Standardmodells vorhergesagt werden.

Literatur:

Large Hadron Collider Homepage: <http://lhc-new-homepage.web.cern.ch/lhc-new-homepage/>

Welche verschiedenen Typen von Detektoren werden in Teilchenbeschleunigern verwendet?

In Teilchenbeschleunigern werden zum Nachweis der bei den Teilchenkollisionen erzeugten Partikel Großdetektoren eingesetzt. Diese bestehen aus mehreren einzelnen Detektoren, die bei kollidierenden Teilchenstrahlen schichtweise um bzw. bei Experimenten mit einem festen Target hinter dem Kollisionspunkt angeordnet sind. Abhängig von den Eigenschaften wie Impuls, Energie und Ladung der gesuchten Teilchen variiert der Aufbau des Großdetektors; dennoch lässt sich stets eine ähnliche Grundabfolge der einzelnen Detektoren beobachten:

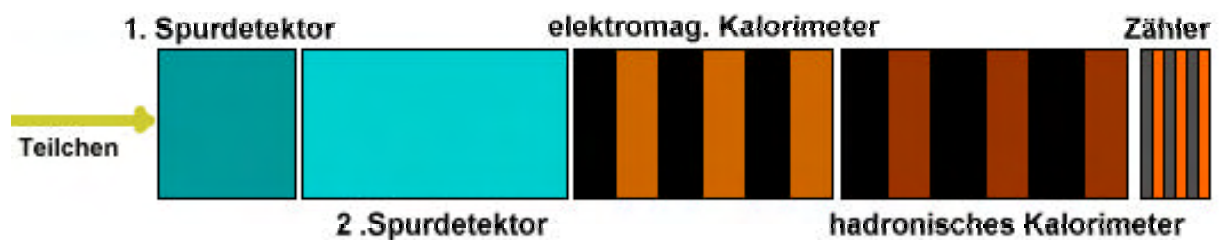


Abb. 27: Schema des schichtweisen Aufbaus eines Großdetektors

- **Erster Spurdetektor:**

Der erste Spurdetektor befindet sich in unmittelbarer Umgebung des Kollisionspunktes. Hier ist die Spurdichte besonders groß, weshalb hochpräzise Ortsdetektoren verwendet werden, um die vielen Spuren voneinander trennen und aufzeichnen zu können. Meist werden daher Schichten von **Halbleiterdetektoren**¹ oder **Driftkammern**² als erste Spurdetektoren eingesetzt, da diese die größte Ortsauflösung besitzen. Um neben der Bahn auch den Impuls der Teilchen bestimmen zu können, befindet sich der Detektor in einem starken Magnetfeld. Geladene Teilchen werden durch das magnetische Feld auf eine Kreisbahn gezwungen, aus deren Radius der Impuls des Teilchens berechnet werden kann.

- **Zweiter Spurdetektor:**

Im zweiten Spurdetektor werden ebenfalls Bahn und Impuls der erzeugten Teilchen gemessen. Die Ortsauflösung des zweiten Spurdetektors ist im Vergleich zum ersten etwas geringer, dafür wird von ihm ein größeres Volumen abgedeckt. Als zweite Spurdetektoren kommen meistens **Driftkammern** zum Einsatz.

- **Elektromagnetisches Kalorimeter:**

Kalorimeter werden eingesetzt, um die Gesamtenergie der Teilchen zu messen und diese auch zu absorbieren. Sie bestehen aus schichtweise angeordneten dicken Absorptionsplatten und dazwischen liegenden Detektorelementen (z. B. Szintillationszähler³). Tritt ein Teilchen in das Kalorimeter ein, löst es eine Teilchenkaskade aus Elektron-Positron-Paaren und Bremsstrahlungsphotonen aus, deren Energien von den Szintillationszählern gemessen werden. Der große Vorteil der Kalorimeter gegenüber Spurdetektoren besteht darin, dass sie auch ungeladene Teilchen nachweisen können.

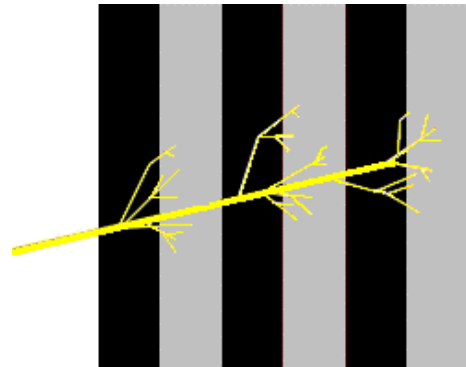


Abb. 28: Kalorimeterschema mit Teilchenkaskade

Mit einem elektromagnetischen Kalorimeter wird die Energie von Elektronen, Positronen und Photonen von etwa 100 MeV an gemessen. Die Dicke des Kalorimetermaterials (z. B. Bleiglas oder NJa-Kristall) ist so bemessen, dass diese leichten, elektromagnetisch wechselwirkenden Teilchen ihre Energien durch Paarerzeugung und Bremsstrahlung vollständig verlieren und vom Kalorimetermaterial absorbiert werden.

- **Hadronisches Kalorimeter:**

Im hadronischen Kalorimeter sind die Absorptionsschichten meistens sehr dick und bestehen aus Material mit sehr massiven Atomkernen (z. B. Eisen, Blei oder Uran), sodass Hadronen, die den Kernkräften unterliegen (z. B. Protonen, Neutronen oder Pionen), ebenfalls ihre gesamte Energie abgeben und absorbiert werden.

- **Zähler (Myonkammer):**

Myonen, die massereicheren Partner der Elektronen, hinterlassen in allen bisher besprochenen Detektorkomponenten nur eine Ionisationsspur und verlassen diese dann wieder fast ungebremst. Um sie nachzuweisen, werden Myonkammern eingesetzt. Diese Zähler sind ähnlich wie Kalorimeter aufgebaut, um die entlang der Myonspur erzeugten Ionen aufzuzeichnen. Im Unterschied zu allen anderen messbaren Teilchen können Myonen auch in dieser Detektorkomponente nicht absorbiert werden – sie setzen ihren Weg auch außerhalb des Großdetektors fort.

Literatur:

¹ Basiswissen 4, Seite 52

² Basiswissen 4, Seite 53

³ Basiswissen 4, Seite 52

Physik, Atome – Atomkerne – Elementarteilchen: H. Hänsel, W. Neumann, Spektrum Akademischer Verlag GmbH Heidelberg Berlin Oxford, 1995

Teilchen und Kerne, Eine Einführung in die physikalischen Konzepte: B. Povh, K. Rith, C. Scholz, F. Zetsche, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1993

Mit welcher experimentellen Anordnung wurden W^+ und W^- gesehen?

Die Austauscheteilchen der schwachen Kraft W^+ , W^- und Z^0 wurden 1968 von S. GLASHOW, S. WEINBERG und A. SALAM in der von ihnen entwickelten **elektroschwachen Theorie** vorhergesagt. Die Theorie sagte auch die Massen der W- und Z-Bosonen voraus: für das W^+ - und das W^- -Teilchen etwa $80 \text{ GeV}/c^2$, für das Z^0 -Teilchen etwa $90 \text{ GeV}/c^2$.

Ende der siebziger Jahre konnte jedoch keiner der existierenden Beschleuniger auch nur annähernd die benötigte Energie zur Verfügung stellen, um solch massive Teilchen zu erzeugen. Erst nach dem Umbau des Superprotonensynchrotrons (SPS) am CERN in einen Proton-Antiproton-Collider mit einer Gesamtenergie von 540 GeV bestand eine realistische Chance, W- und Z-Bosonen nachzuweisen.

Im Jahre 1981 konnten die ersten Proton-Antiproton-Stöße mit den beiden Detektoranlagen des Colliders **UA1** und **UA2** („Underground Area“) beobachtet werden. Im Januar 1983 gab CARLO RUBBIA, der Leiter der Arbeitsgruppe am UA1-Detektor, die Entdeckung von W-Bosonen bekannt ^[Arn83]. Von 10^6 Prototon-Antiproton-Stößen, die von jedem der beiden Detektoren registriert worden waren, konnten neun eindeutig auf Entstehung und anschließenden Zerfall von W-Teilchen zurückgeführt werden.

Literatur:

^[Arn83] G. Arnison et al., Phys. Lett. **122B** 103 (1983)

Hochenergiephysik: E. Lohrmann, Teubner-Verlag Stuttgart 1981

Wer hat für die Entdeckung der W- und Z-Bosonen den Nobelpreis erhalten und mit welcher Begründung?

Im Jahre 1984 erhielten CARLO RUBBIA (*1934) und SIMON VAN DER MEER (*1925) den Nobelpreis „für ihre entscheidenden Einsätze bei dem großen Projekt, das zur Entdeckung der Feldpartikel W und Z, Vermittler schwacher Wechselwirkungen, geführt hat“¹.



Der italienische Physiker **Carlo Rubbia** hatte 1976 vorgeschlagen, einen bereits existierenden Beschleuniger in einen Proton-Antiproton-Speicherring umzubauen, um die zur W- und Z-Erzeugung benötigten Energien erzeugen zu können. Er war später die führende Persönlichkeit bei der Suche nach den W- und Z-Teilchen am CERN.



Der Niederländer **Simon van der Meer** war der Erfinder der **stochastischen Kühlung**^[Mee83], einem Verfahren um die Ausdehnung der im Speicherring umlaufenden Teilchenstrahlen sukzessive zu verkleinern. Van der Meer leistete damit einen entscheidenden Beitrag zur Konstruktion des Proton-Antiproton-Colliders. Er leitete außerdem die technischen Arbeiten beim Aufbau der Anlage.

¹ Übersetzte Begründung des Nobelpreiskomitees

Literatur:

^[Mee83] S. van der Meer, Phys. Bl. **39** 117 (1983)

Nobel Foundation Homepage: <http://www.nobel.se>

Was sind die derzeit genauesten Werte der Massen von W^+ , W^- und Z^0 ?

In heutigen Beschleunigungsanlagen lässt sich eine große Zahl dieser W- und Z-Bosonen erzeugen. Dadurch ist es möglich, ihre Massen sehr genau zu bestimmen:

$$\begin{aligned} \text{Masse der beiden geladenen W-Bosonen: } & m_W = 80,419 \pm 0,056 \text{ GeV}/c^2 \text{ }^1 \\ \text{Masse des neutralen Z-Boson: } & m_Z = 91,1882 \pm 0,0022 \text{ GeV}/c^2 \text{ }^1 \end{aligned}$$

Wie war die historische Entwicklung der elektroschwachen Theorie bezüglich der drei Forscher Glashow, Weinberg und Salam?

Im Jahre 1957 äußerte JULIAN SCHWINGER, inspiriert durch die Vereinigung der elektrischen und magnetischen Kräfte zur elektromagnetischen Kraft, die Vermutung, dass elektromagnetische und schwache Prozesse als unterschiedliche Erscheinungsformen einer einzigen *elektroschwachen Kraft* beschrieben werden könnten. Sein Schüler SHELDON LEE GLASHOW (*1932) griff diese Idee in seiner Doktorarbeit auf. Er entwickelte 1960 ein Modell, das vier Austauschbosonen, zwei geladene (W^+ und W^-) und zwei neutrale (γ und Z^0), als Vermittler der elektroschwachen Wechselwirkung verlangte ^[Gla61]. In diesem Modell ist die unterschiedliche Stärke von schwacher und elektromagnetischer Wechselwirkung durch die unterschiedlichen Massen ihrer Feldquanten verursacht. Allerdings konnte Glashow die Massen der W- und Z-Bosonen nicht erklären.

Der Amerikaner STEVEN WEINBERG (*1933) und der Pakistani ABDUS SALAM (*1926) entwickelten unabhängig von einander im Jahre 1967 bzw. 1968, aufbauend auf Glashows Überlegungen, das heutige Modell der elektroschwachen Wechselwirkung ^[Wei67] ^[Sal68]. Ihr Modell geht von ursprünglich masselosen W- und Z-Teilchen aus, deren (scheinbare) Massen erst durch Ankopplung an das sogenannte Higgsfeld² erzeugt werden. Durch diesen „Trick“ konnten sie die Massen der schweren Austauschbosonen sehr genau vorhersagen.

1979 erhielten Glashow, Weinberg und Salam gemeinsam den Nobelpreis „für ihre Mitwirkung an der Theorie der Vereinigung schwacher und elektromagnetischer Wechselwirkung zwischen Elementarteilchen, einschließlich u. A. die Voraussage von schwachen neutralen Strömen“³.

Literatur:

^[Gla61] S.L. Glashow, Nucl. Phys. **22** 579 (1961)

^[Wei67] S. Weinberg, Phys. Rev. Lett. **19** 1264 (1967)

^[Sal68] A. Salam, Proc. 8th Nobel Symposium, Hrsg. N. Svartholm, Almquist und Wiskell, Stockholm (1968)

¹ Aus : D.E. Groom *et al.* (Particle Data Group), Eur. Phys. Jour. **C15**, 1 (2000) (URL: <http://pdg.lbl.gov>)

² Siehe Schülerbuch, Seite 18

³ Übersetzte Begründung des Nobelpreiskomitees

Wie sind die (Kopplungs-)Stärken der elektromagnetischen und der schwachen Wechselwirkung miteinander verknüpft?

Aus der Theorie von Glashow, Weinberg und Salam (GWS-Theorie) folgt, dass die Ladungen und damit auch die Stärken bzw. Kopplungskonstanten der elektromagnetischen und schwachen Wechselwirkung nicht unabhängig von einander sind. Sie sind über den von Weinberg eingeführten Winkel ($\Theta_W = 28,5^\circ$) wie folgt miteinander verknüpft:

$$e = g \cdot \sin \Theta_W$$

e ... elektrische Ladung

g ... schwache Ladung

Θ_W ... Weinbergwinkel

Das heißt, die elektrische Ladung ist bis auf einen konstanten Faktor genauso groß wie die schwache Ladung.

Literatur:

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

Einführung in die Elementarteilchenphysik: D.J. Griffiths, Akademischer Verlag Berlin 1996

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

Im Jahre 2000 wurde von einer Gruppe am CERN vermutet, Higgs-Teilchen gesehen zu haben. Welches Experiment war dies?

Die Higgs-Teilchen wurden nach dem britischen Physiker PETER HIGGS benannt, der ihre Existenz 1964 vorhersagte. Nach seiner Theorie sollen Higgs-Teilchen im Universum allgegenwärtig sein, mit fast allem wechselwirken und so für die verschiedenen Massen der Elementarteilchen verantwortlich sein.

Im Herbst 2000 konnten mit ALEPH und DELPHI, zwei der vier Detektoren des Elektron-Positron-Beschleunigers LEP am CERN, erste mögliche Anzeichen für das Higgs-Teilchen beobachtet werden. Kurze Zeit später stieß auch L3 (ein weiterer Detektor am CERN) auf Teilchenspuren, die möglicherweise von Higgs-Teilchen stammten.

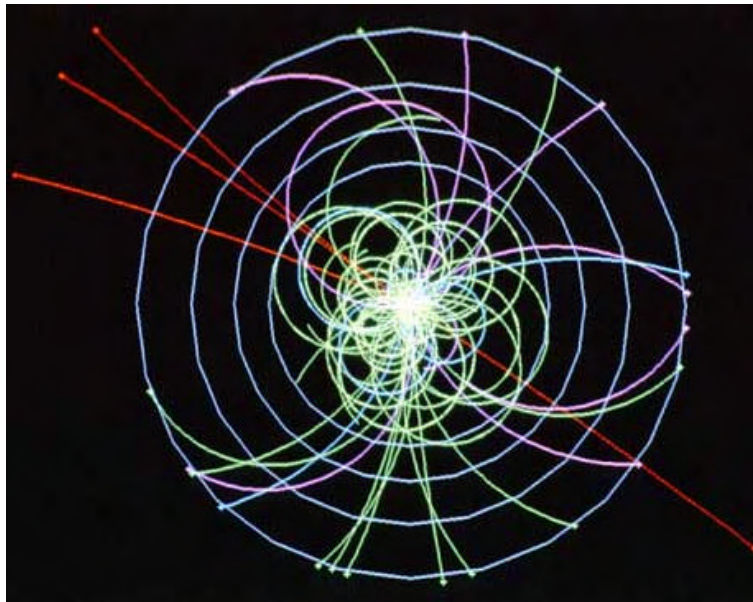


Abb. 29: Simulation eines Higgs-Boson-Signals am LEP

LEP, dessen Abschaltung zu diesem Zeitpunkt kurz bevorstand, um mit dem Bau des neuen Proton-Proton-Beschleunigers LHC beginnen zu können, erhielt daraufhin eine letzte „Galgenfrist“, die den Wissenschaftlern ermöglichen sollte, in weiteren Experimenten nachzuprüfen, ob die gemessenen Signale tatsächlich auf Higgs-Teilchen zurückzuführen sind und nicht durch andere Prozesse erzeugt wurden. Die bis Ende 2000 gemessenen Daten reichten jedoch nicht aus, um von einem eindeutigen Nachweis der Higgs-Teilchen am CERN sprechen zu können ^[Abb01]. Sollten die Spuren jedoch tatsächlich von Higgs-Teilchen verursacht worden sein, müsste dieses eine Masse von ca. $114 \text{ GeV}/c^2$ besitzen.

Literatur:

^[Abb01] G. Abbiendi, T. Kuhl et al, Phys.Lett.B **499**:38-52 (2001)

... und Er würfelt doch, Von der Erforschung des ganz Großen, des ganz Kleinen und der ganz vielen Dinge: H. Müller-Krumbhaar, H.-F. Wagner, Wiley-VCH Verlag Berlin 2001

Teilchen und Kerne, Eine Einführung in die physikalischen Konzepte: B. Povh, K. Rith, C. Scholz, F. Zetsche, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1993

Man hat Abschätzungen vorgenommen, dass das Higgs-Teilchen leichter sein muss als eine bestimmte Masse. Wie groß ist diese Masse? Wie kommt man auf diese Grenze?

Die Masse des bis heute hypothetischen Higgs-Teilchens lässt sich theoretisch nicht vorhersagen. Allgemeine Überlegungen zur Verträglichkeit mit anderen Größen des Standardmodells liefern allerdings eine obere Massengrenze von ungefähr $1 \text{ TeV}/c^2$. Eine etwas genauere Einschränkung der Higgsmasse lässt sich aus dem erwarteten Beitrag des Higgs zur Vakuumpolarisation¹ angeben: $m_{\text{Higgs}} < 600 \text{ GeV}/c^2$.

Die untere Massengrenze von ca. $100 \text{ GeV}/c^2$ ergibt sich aus der Tatsache, dass das Higgs-Teilchen bei bisherigen Experimenten noch nicht (eindeutig) nachgewiesen werden konnte. Der Proton-Proton-Beschleuniger LHC am CERN, der 2006 seinen Betrieb aufnehmen soll, wird in den Kollisionspunkten genügend hohe Energien zur Verfügung stellen, um Teilchen mit Massen von bis zu $1 \text{ TeV}/c^2$ zu erzeugen. Sollte das Higgs-Teilchen tatsächlich existieren, wird man es mit großer Wahrscheinlichkeit am LHC beobachten können.

¹ Siehe Seite 26

Literatur:

Einführung in die Elementarteilchenphysik: D.J. Griffiths, Akademischer Verlag, Berlin 1996

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

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

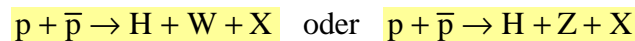
Auch in der amerikanischen Beschleunigeranlage Fermilab wird nach dem Higgs-Teilchen gesucht. Welche Beschleuniger stehen in Fermilab? Wie will man dort das Higgs-Teilchen entdecken?

Das Kernstück des Forschungszentrums FERMILAB (Fermi National Accelerator Laboratory) bei Chicago (USA) bildet der Proton-Antiproton-Beschleunigungsring TEVATRON, dessen Umfang 6,4 km beträgt. Mit den beim Zusammenstoß der Proton- und Antiproton-Pakete erreichbaren Kollisionsenergien von bis zu 2 TeV ist das Tevatron bis zum Beginn des LHC der stärkste Teilchenbeschleuniger der Welt. Die im Tevatron erzeugten Teilchen werden von zwei Großdetektoren, dem CDF (Collider Detector at Fermilab) und dem D-Null-Detektor aufgezeichnet.

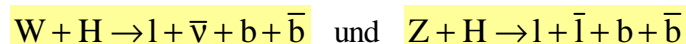


Abb. 30: Luftaufnahme des Fermilab bei Chicago, USA

Falls die Masse der Higgs-Teilchen kleiner als $180 \text{ GeV}/c^2$ ist, werden diese mit großer Wahrscheinlichkeit in nächster Zeit am Fermilab beobachtet werden können. Man erwartet, dass Higgs-Teilchen bei den Proton-Antiproton-Kollisionen im Tevatron bevorzugt zusammen mit einem W- oder Z-Boson und anderen Teilchen (X) erzeugt werden:



Higgs und W bzw. Z sind jedoch nicht stabil; sie zerfallen in weitere Teilchen z.B.:



in Leptonen (l), Neutrinos (ν), und Bottom-Quarks (b), deren Spuren dann vom einem der beiden Detektoren des Tevatrons aufgezeichnet werden.

Literatur:

Fermi National Accelerator Laboratory Homepage: <http://www.fnal.gov>

Wozu benötigte man den Weltäther, und aus welchem Grund verschwand er wieder?

Zu Beginn des 19. Jahrhunderts trat das Wellenbild des Lichts immer mehr in den Vordergrund. Alle anderen bekannten Wellen (z. B. Schallwellen oder Wasserwellen) waren stets an ein Medium gebunden, daher nahm man an, dass auch das Licht an irgendeine Form von Medium gebunden ist. Dieses Medium wurde **Äther**¹ genannt. Es wurde angenommen, dass der Äther den gesamten Raum durchdringt und sich jeder Körper, also auch die Erde, mit einer bestimmten Geschwindigkeit relativ zum Äther bewegt. Die beiden Physiker ALBERT ABRAHAM MICHELSON und EDWARD WILLIAMS MORLEY wollten 1887 die Geschwindigkeit der Erde im Äther mit Hilfe eines Interferometers bestimmen.

Doch so sorgfältig die beiden Forscher ihre Messungen auch ausführten, sie konnten keine Bewegung der Erde relativ zum Äther feststellen – d. h. die Lichtgeschwindigkeit blieb konstant. Zur Beseitigung dieses Problems wurden verschiedenste Lösungen vorgeschlagen. Anfang des 20. Jahrhunderts gelang es jedoch ALBERT EINSTEIN, die Ausbreitung des Lichts im Rahmen seiner speziellen Relativitätstheorie ohne Zuhilfenahme eines Trägermediums zu beschreiben, und das Äthermodell verschwand daraufhin wieder aus den Köpfen vieler Physiker.

Literatur:

¹ Siehe Basiswissen 4, Seite 14

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

Wo wurden die Experimente zur CP-Verletzung durchgeführt?

Bis 1956 nahm man an, dass alle physikalischen Prozesse bezüglich einer Raumspiegelung, der sogenannten **Parität P** , invariant sind. Ein Beobachter sollte daher nicht zwischen einem Experiment und dessen Spiegelbild unterscheiden können. Für die elektromagnetische und starke Wechselwirkung gilt die Paritätsinvarianz, für die schwache Wechselwirkung konnte jedoch 1957 von Frau CHIEN-SHIUNG WU (*1912) und ihren Mitarbeitern eine Verletzung der Paritätserhaltung beim β -Zerfall experimentell gezeigt werden.

Schwache Prozesse sind, im Unterschied zur elektromagnetischen und starken Kraft, auch bezüglich der **Ladungskonjugation C** (von „charge“), die jedes Teilchen in sein Antiteilchen überführt, nicht invariant. Kombiniert man C und P jedoch zu einer einzigen Operation, so schien zunächst auch die schwache Wechselwirkung unter dieser CP-Operation invariant zu sein. 1964 konnten jedoch die beiden US-Physiker JAMES W. CRONIN (*1931) und VAL L. FITCH (*1923) in Experimenten ^[Chr64] am Protonenbeschleuniger in Brookhaven (USA) nachweisen, dass bei Zerfällen der neutralen Kaonen auch die CP-Invarianz verletzt ist. Beide erhielten 1980 gemeinsam den Nobelpreis „für die Entdeckung von Verletzungen fundamentaler Symmetrieprinzipien im Zerfall von neutralen K-Mesonen“¹.

Die CP-Verletzung wird heute als mögliche Ursache für die Dominanz der Materie gegenüber Antimaterie in unserem Universum angesehen.

¹ Übersetzte Begründung des Nobelpreiskomitees

Literatur:

^[Chr64] J.H. Christenson, et al. : Phys. Rev. Let. **13** 138 (1964)

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

Physik, Atome – Atomkerne – Elementarteilchen: H. Hänsel, W. Neumann, Spektrum Akademischer Verlag GmbH Heidelberg Berlin Oxford 1995

Hochenergiephysik: E. Lohrmann, Teubner-Verlag Stuttgart 1981

Teilchen und Kerne, Eine Einführung in die physikalischen Konzepte: B. Povh, K. Rith, C. Scholz, F. Zetsche, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1993

Wie könnte man erkennen, dass die Hälfte des Universums aus Teilchen, die andere Hälfte aus Antiteilchen besteht?

Die Existenz von größeren Mengen an Antimaterie im Universum wird heute von den meisten Physikern bezweifelt. Nichts desto Trotz sucht man nach Hinweisen auf Sterne, Planeten und Galaxien aus Antimaterie:

1. Nachweis durch Teilchen-Antiteilchen-Vernichtung:

An den Begrenzungsflächen zwischen Materie- und Antimaterie-Systemen müsste durch permanente gegenseitige Vernichtung von Teilchen und Antiteilchen eine Strahlung emittiert werden. Eine solche Strahlung konnte jedoch im gesamten, für uns sichtbaren Weltallbereich bis heute nicht beobachtet werden. Daraus schließt man, dass Antimateriewelten, falls sie tatsächlich existieren, zumindest einige Milliarden Lichtjahre von der Erde entfernt sein müssen.

2. Nachweis durch schwere Anti-Atomkerne:

Mit Hilfe von riesigen Ballonen werden Geräte zum Nachweis von Antiteilchen in die oberen Schichten der Atmosphäre befördert. Man hofft, schwere Anti-Atomkerne nachweisen zu können, denn schon ein einziger Anti-Sauerstoff- oder Anti-Kohlenstoffkern würde beweisen, dass es Sterne aus Antimaterie gibt.

Literatur:

Antimaterie, auf der Suche nach der Gegenwelt: Dieter B. Herrmann, C.H. Beck Verlag München 1999