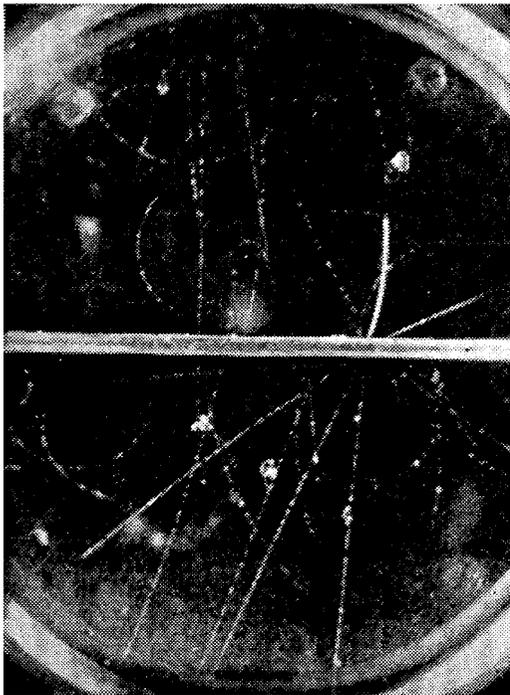


Elementarteilchen

Ich werde heute versuchen, die Elementarteilchenphysik einzuführen. Neben den bekannten Protonen, Neutronen und Elektronen haben wir bereits das Neutrino, das Photon, das Myon und das Pion kennengelernt. Ich werde anfangs eine kurze historische Einleitung geben, anschließend den gedanklich wichtigen “Achtfachen Weg” von Murray Gell-Mann erläutern, das Quarkmodell einführen und ins Standardmodell einbetten.

In einem zweiten Teil werde ich auf Neutrinooszillationen eingehen.

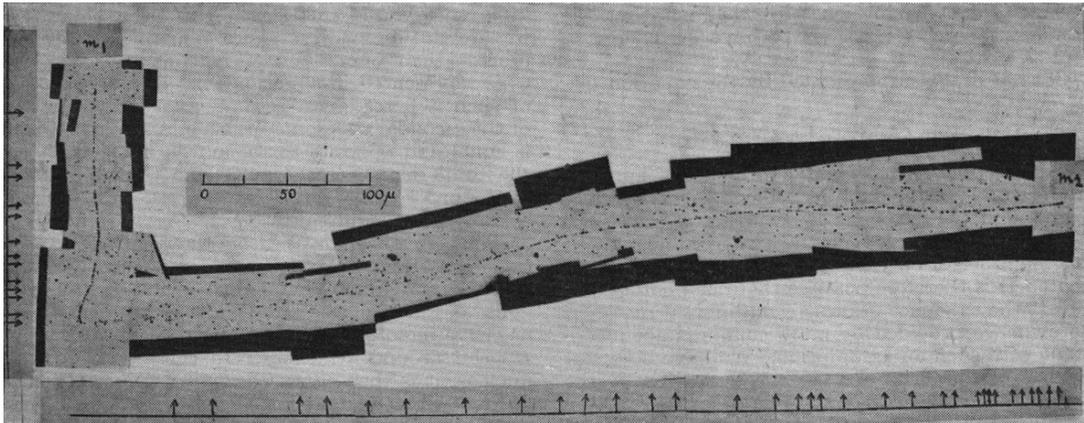
Die Entdeckung des Myons



Street und Stevenson und unabhängig Anderson und Neddermeyer haben 1937 mehrere Teilchen der galaktischen kosmischen Strahlung nachgewiesen, die etwa die Masse des Yukawaschen Pi-Mesons hatten. Dazu wurde eine Nebelkammer mit einer 3,5 mm dicken Bleiplatte in der Mitte durch Geigerzähler getriggert. In der rechten Bildhälfte oben ist eine Spur eines stärker ionisierenden Teilchens zu sehen. Interessanterweise stellte sich in Untersuchungen von Conversi, Piccioni und Rossi während des zweiten Weltkrieges heraus, dass das vermeintliche Pi-Meson nicht mit Kernen wechselwirkte, also nicht das Pion sein konnte. Heute nennen wir es Myon².

²Ab und zu trifft man noch auf die (sehr) alte Bezeichnung μ -Meson. Das ist eine Fehlbezeichnung, das Myon ist kein Meson, sondern ein Lepton, aber da kommen wir noch dazu.

Die Entdeckung des Pions

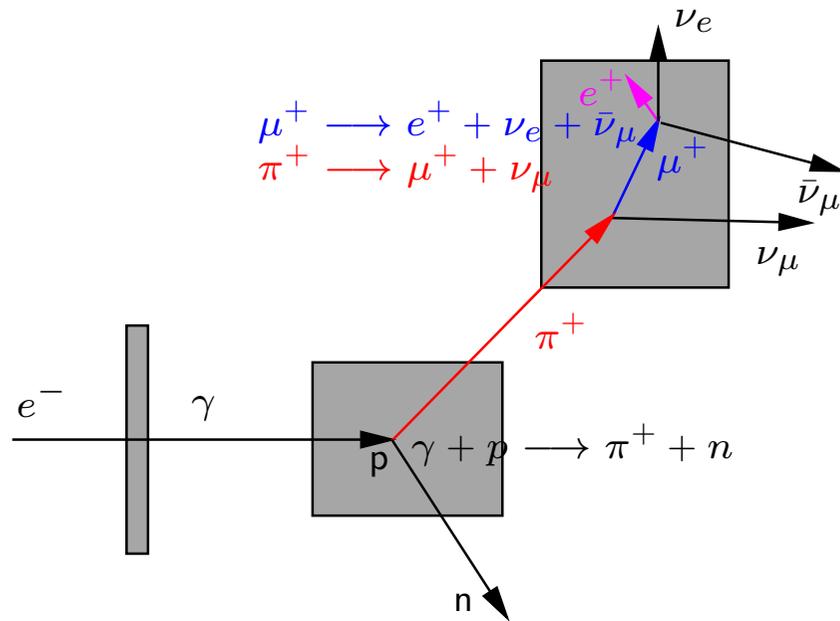


Die eigentliche Klärung um die Konfusion um das Yukawa'sche Pi-Meson hat eine Gruppe in Bristol um Cecil Powell gebracht³. Sie haben photographische Emulsionen auf dem Pic du Midi und auf dem Chacaltaya ex-

poniert und fanden in deren Auswertung zwei Zerfälle $\pi \rightarrow \mu + \nu$. Auf Meereshöhe fand man nur die Myonen weil sie länger leben als Pionen⁴! Nach Exposition von mehr Filmen auf dem Chacaltaya (5500 m) in Bolivien fanden sie weitere 10 solche Doppelzerfälle. Die Myonen aus dem Zerfall der Pionen hatten eine Reichweite von konstant etwa $600\mu\text{m}$ in der Filmemulsion.

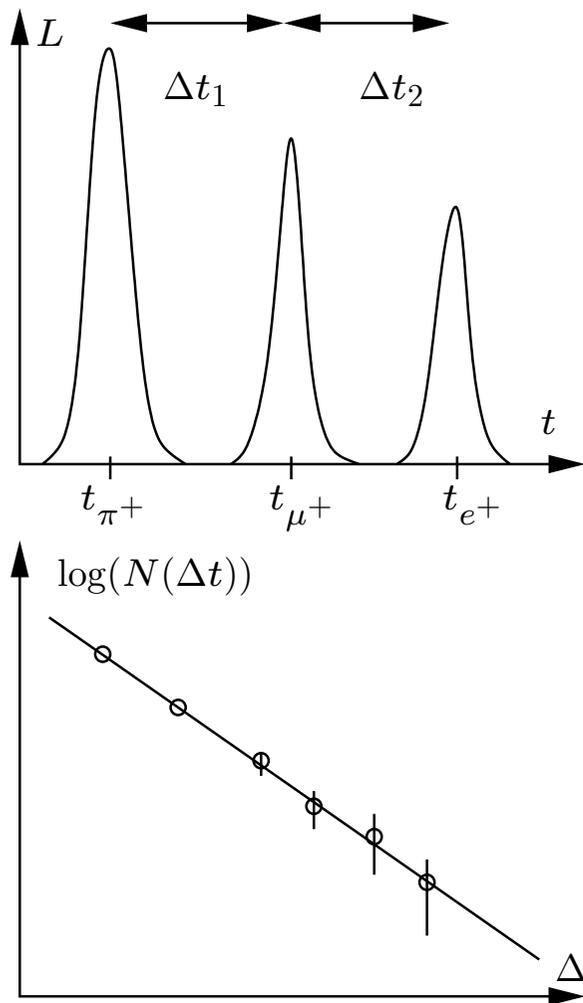
³Lattes, Muirhead, Occhialini und Powell, Nature, **159**, 694, (1947)

⁴ $\tau_{\mu} = 2,2 \times 10^{-6}\text{s}$, $\tau_{\pi\pm} = 2,6 \times 10^{-8}\text{s}$, ein schönes Beispiel für die Zeitdilatation.



Die Lebensdauer des Pions wurde 1950 von Chamberlain in Berkeley mit der links schematisch dargestellten Anordnung gemessen. Die im Berkeley Synchrotron beschleunigten 340 MeV Elektronen treffen auf ein Target, wo sie einen gerichteten γ -Strahl von bis zu 340 MeV erzeugten. Diese γ s reagieren im wasserstoffreichen Paraffin mit Protonen zu $\gamma + p \longrightarrow \pi^+ + n$. Das Pion wird im Szintillator nachgewiesen - es

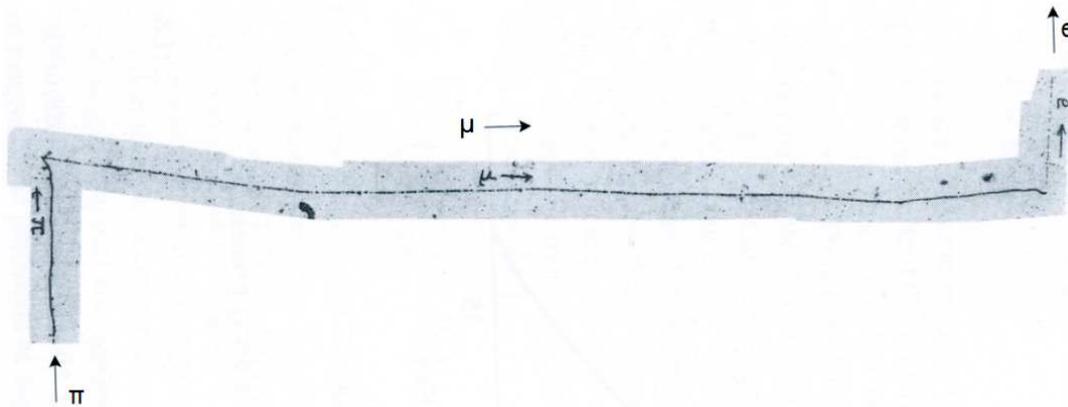
wird abgebremst und erzeugt dabei Szintillationslicht. Wenn es abgebremst ist, also keine kinetische Energie mehr hat, zerfällt es nach $\pi^+ \longrightarrow \mu^+ + \nu_\mu$. Die so erzeugten Myonen geben ihre kinetische Energie $E_{\text{kin}\mu} = (m_{\pi^+} - m_{\mu^+})c^2 - E_{\text{kin}\nu}$ auch an den Szintillator ab und zerfallen anschließend gemäß $\mu^+ \longrightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$. Das Positron zerfällt anschließend in zwei 511 keV Quanten.



Es entstehen also total drei Lichtblitze (vom π^+ , μ^+ und vom e^+), die Zeitdifferenz zwischen dem ersten und dem zweiten ist die Lebensdauer des Pions, die zwischen dem zweiten und dem dritten die Lebensdauer des Myons.

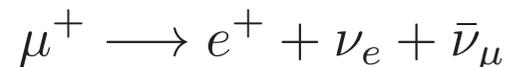
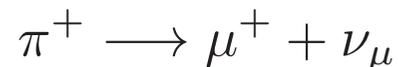
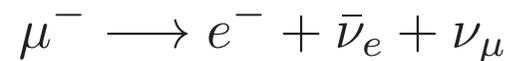
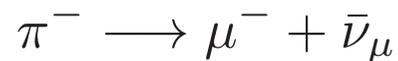
Natürlich sind die Zeitintervalle Δt_i nicht exakt gleich der Lebensdauer, sondern gemäß dem Zerfallsgesetz $N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t} = N_0 \cdot e^{-t/\tau}$ verteilt. Man muss also viele Zerfälle beobachten und eine Statistik über die Zeitdifferenzen führen. Trägt man die Häufigkeit eines bestimmten Intervalls von Zeitdifferenzen logarithmisch gegen die Zeitdifferenz auf, so wird man nach Acquisition von genügend Statistik eine Gerade erkennen deren Steigung gerade gleich der Zerfallskonstante oder der inversen Lebensdauer ist.

Erhaltung der Leptonenzahl



Eine weitere Aufnahme von Powells Gruppe zeigt ein Pion, welches in ein Myon zerfällt, welches wiederum in ein Elektron zerfällt. Wie funktioniert hier die Impulserhaltung? Offensichtlich muss ein neutrales (nicht-ionisierendes) Teilchen beim Pionenzerfall Impuls wegführen. Beim Myonenzerfall müssen es aber zwei solche Teilchen sein, weil Messungen zeigen, dass die Energie der Zerfallselektronen stark variiert. Heute schreiben wir die Reaktionen als

Beim Myonenzerfall müssen es aber zwei solche Teilchen sein, weil Messungen zeigen, dass die Energie der Zerfallselektronen stark variiert. Heute schreiben wir die Reaktionen als

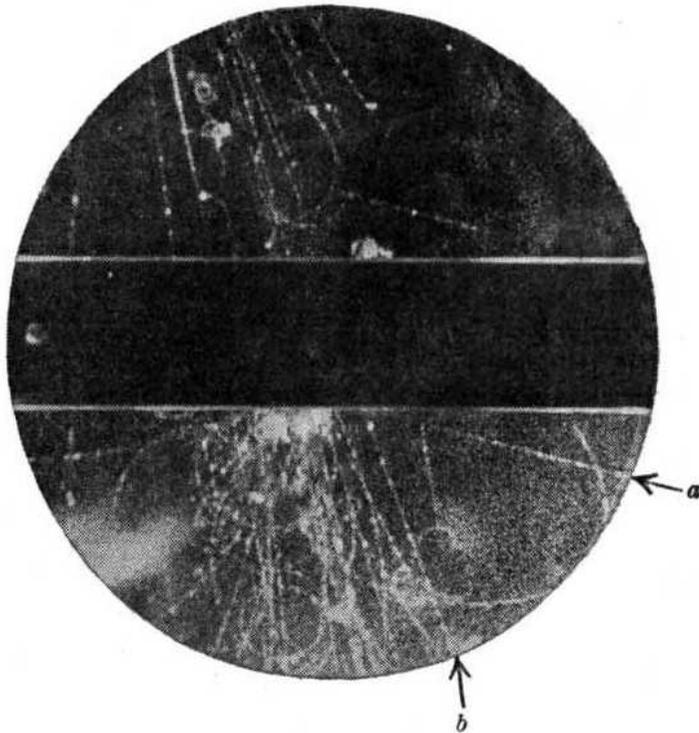


Es stellt sich heraus, dass bei allen Zerfällen die sog. **Leptonenzahl** erhalten sein muss. Elektronen und Myonen sind Leptonen, Pionen sind Mesonen. Also muss beim Zerfall $\pi \rightarrow \mu + \nu$ die Leptonenzahl null erhalten bleiben. Beim Zerfall $\mu \rightarrow e + 2\nu$ muss am Schluss eine Leptonenzahl eins herauskommen, wie auch eine **Myonenzahl** von eins, weshalb wie auf S. 7 $\mu \rightarrow e + \nu_e + \nu_\mu$. Es gilt:

Lepton	Leptonenzahl	Elektronenzahl	Myonenzahl	Tau-Zahl
e^-	1	1	0	0
ν_e	1	1	0	0
μ^-	1	0	1	0
ν_μ	1	0	1	0
τ^-	1	0	0	1
ν_τ	1	0	0	1

und entsprechend mit negativem Vorzeichen die Antileptonen e^+ , $\bar{\nu}_e$, etc. Das τ^- ist ein Lepton, welches wir noch nicht kennengelernt haben.

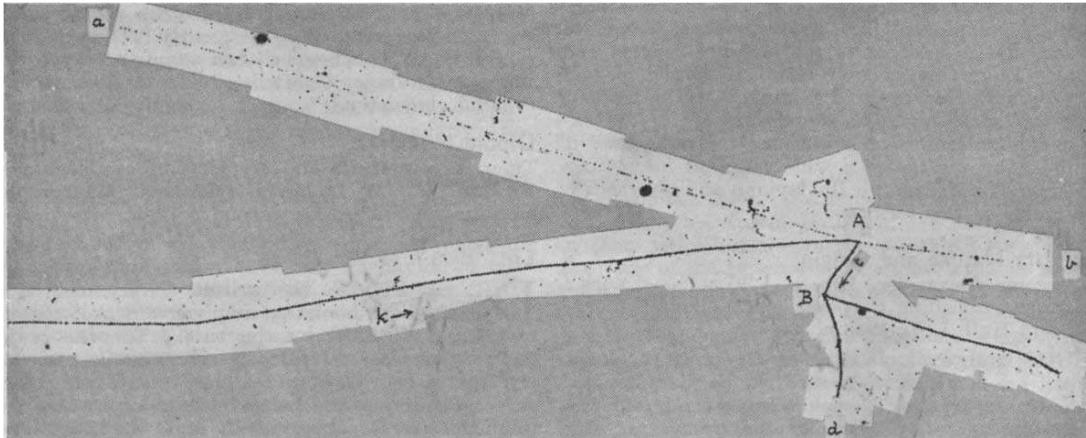
Seltsame Teilchen



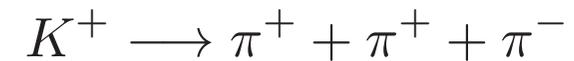
1947 schien es für eine kurze Weile, als ob die wesentlichen Punkte der Elementarteilchenphysik verstanden seien. Die Rolle des Myons war unklar⁵, aber alle anderen Teilchen hatten ihren Platz im Weltbild. Diese Situation änderte sich als Rochester und Butler⁶ im Dezember 1947 die Abbildung links veröffentlichten, welches ein π^+ (bei a) und ein π^- (bei b) zeigen, die durch Zerfall eines neutralen Teilchens (K^0 , ein Kaon) entstanden sein mussten. Dieses war durch die von oben einfallende kosmische Strahlung in der 3 cm dicken Bleiplatte produziert worden.

⁵Rabi soll "Who ordered that?" gesagt haben.

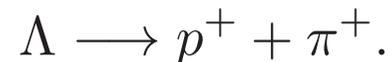
⁶Rochester, G. D. und Butler, C. C., *Nature*, **160**, 855 – 857, (1947)



Bald darauf publizierte Brown diese Abbildung, welche die Reaktion



zeigt. Es verhielt sich ähnlich wie die π -Mesonen, und die Mesonenfamilie wurde um das K^+ erweitert. 1950 folgte ein weiteres "V-Teilchen", welches aber in ein Proton und ein Pion zerfiel



Das Λ gehört wie das Proton in die Familie der Baryonen. Baryonen können also auch zerfallen, aber warum tut es das Proton nicht⁷?

⁷Sog. Grand Unified Theories sagen einen Protonenzerfall voraus, empirisch beträgt die Lebensdauer mindestens 10^{30} Jahre.

Erhaltung der Baryonenzahl

Genau wie bei der Erhaltung der Leptonenzahl gilt auch die Erhaltung der Baryonenzahl. In der Reaktion $\Lambda \longrightarrow p^+ + \pi^-$ bleibt die Baryonenzahl erhalten, ebenso in den Reaktionen

$$p + p \longrightarrow p + p + p + \bar{p}, \quad n \longrightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e.$$

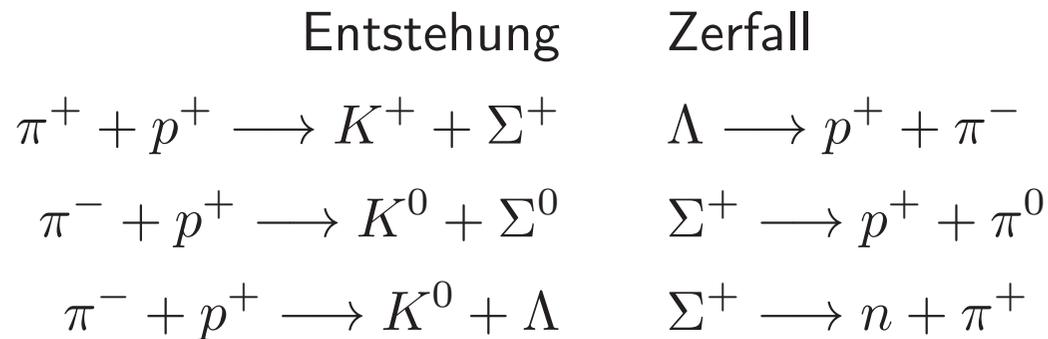
Λ , Proton und Neutron haben eine Baryonenzahl +1, ein Antiproton hat Baryonenzahl -1. Interessanterweise war es gerade die Erhaltung der Baryonenzahl, welche es erlaubte, das Λ als Baryon einzuordnen. Mit Teilchenbeschleunigern wurde eine Vielzahl von neuen Baryonen entdeckt.

Das Proton ist stabil, weil es das leichteste Baryon ist. Es kann in kein leichteres Baryon zerfallen⁸.

⁸Die Anzahl Mesonen braucht in einer Reaktion nicht erhalten zu bleiben.

“Seltsame” Teilchen II: Erhaltung der Strangeness

Die “seltsamen” Teilchen wurden so genannt, weil sie sehr schnell, auf Zeitskalen von 10^{-23} Sekunden (starke WW) entstanden, aber nur langsam ($\sim 10^{-10}$ Sekunden (schwache WW)) zerfielen. Es zeigte sich, dass “seltsame” (engl. strange) Teilchen nur in Paaren entstehen. Ordnet man den Kaonen eine strangeness $S = +1$ zu und den Λ und Σ -Teilchen ein $S = -1$ so bleibt die strangeness S in starken Wechselwirkungen (bei der Entstehung der seltsamen Teilchen) erhalten, bei ihrem Zerfall in der schwachen WW aber nicht:

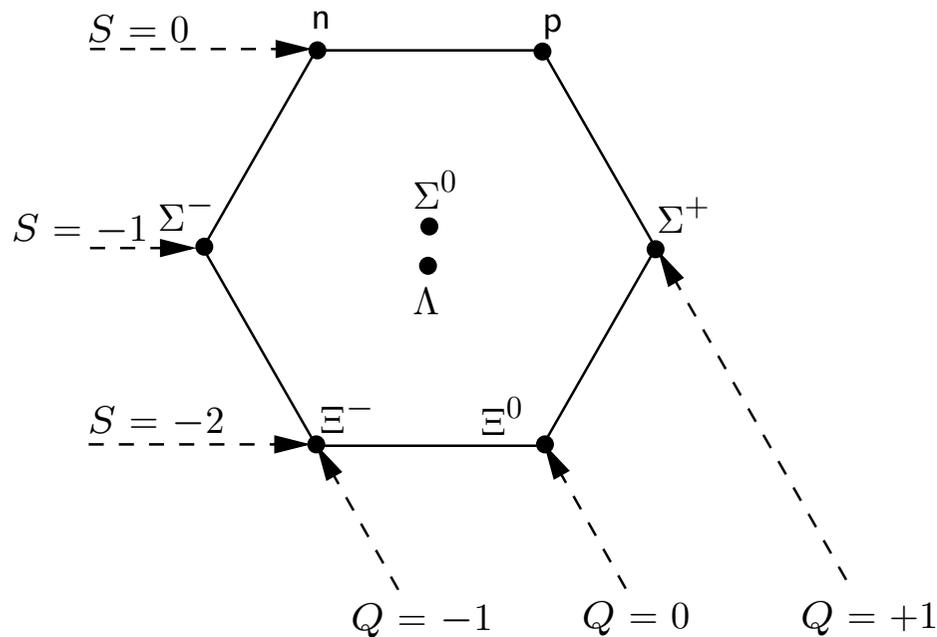


Willis Lambs Nobelpreis

1955 erhielt Willis Lamb für seine Entdeckung des Lambshifts im Wasserstoffatom den Nobelpreis. Seine Ansprache anlässlich der Preisverleihung begann er mit den folgenden Worten:

When the Nobel Prizes were first awarded in 1901, physicists knew something of just two objects which are now called ‘‘elementary particles’’: the electron and the proton. A deluge of other ‘‘elementary’’ particles appeared after 1930; neutron, neutrino, μ meson (sic!), π meson, heavier mesons, and various hyperons. I have heard it said that ‘‘the finder of a new elementary particle used to be rewarded by a Nobel Prize, but such a discovery now ought to be punished by a \$10,000 fine’’.

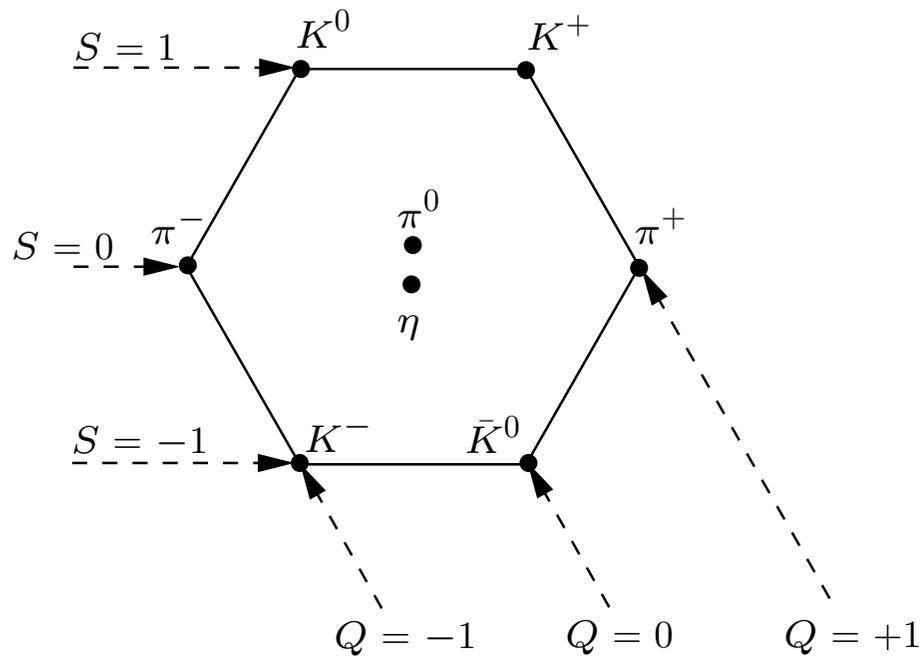
Gell-Manns Achtfacher Weg



Der Zoo an Elementarteilchen drohte 1960 bereits unübersichtlich zu werden. Die stark wechselwirkenden Teilchen waren die Baryonen und die Mesonen⁹, die wiederum nach Ladung, Seltsamkeit und Masse unterschieden werden konnten. Gell-Mann hat 1961 mit seinem "Achtfachen Weg" eine Ordnung in diesen Garten gebracht. Baryonen und Mesonen waren in geometrischen Figuren eingebettet, wie z. B. links das Baryonen-Oktett.

⁹und die Massen dieser lagen schon längst nicht mehr zwischen denen der Elektronen und der Protonen...

Mesonen im Achtfachen Weg

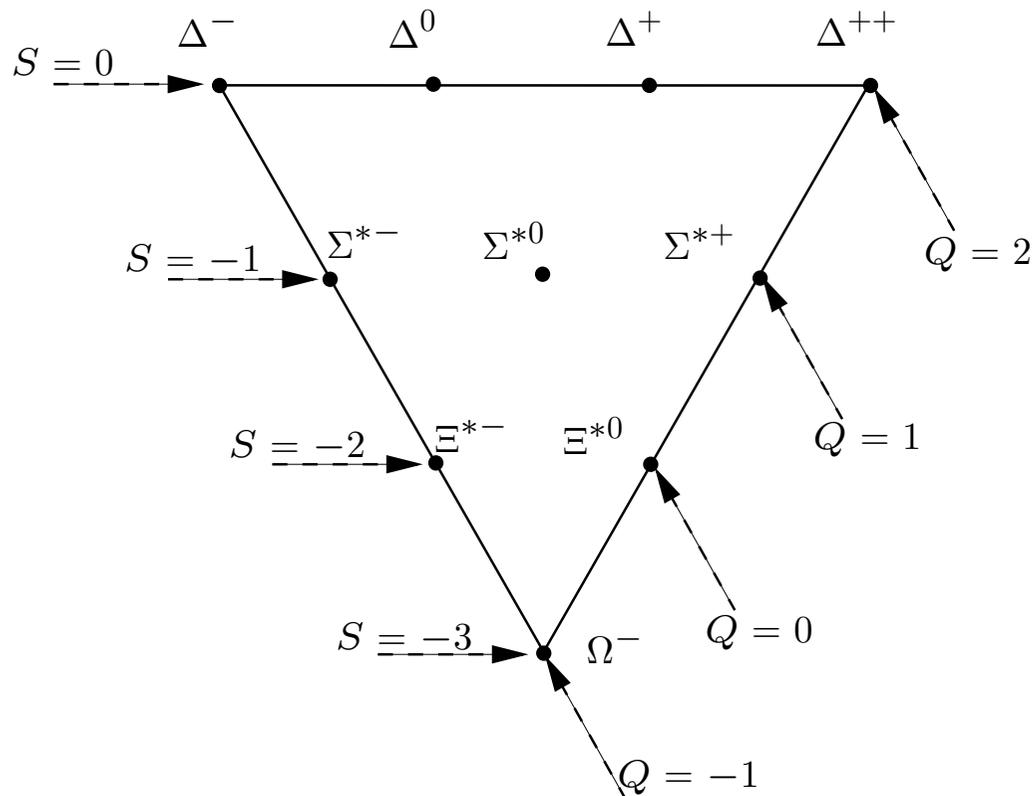


Auf ähnliche Weise konnte Gell-Mann die acht leichtesten Mesonen in ein Oktett (siehe links) passen. Diagonale Linien zeigen konstante Ladung, horizontale Linien konstante Seltsamkeit. In solchen wundersamen Figuren konnte der bekannte Zoo der Elementarteilchen systematisiert werden.

Diese Figuren sind natürlich nicht nur hübsch, sondern drücken eine Symmetrie der darunterliegenden Theorie der Elementarteilchen aus. Aber das ist ein anderes Kapitel.

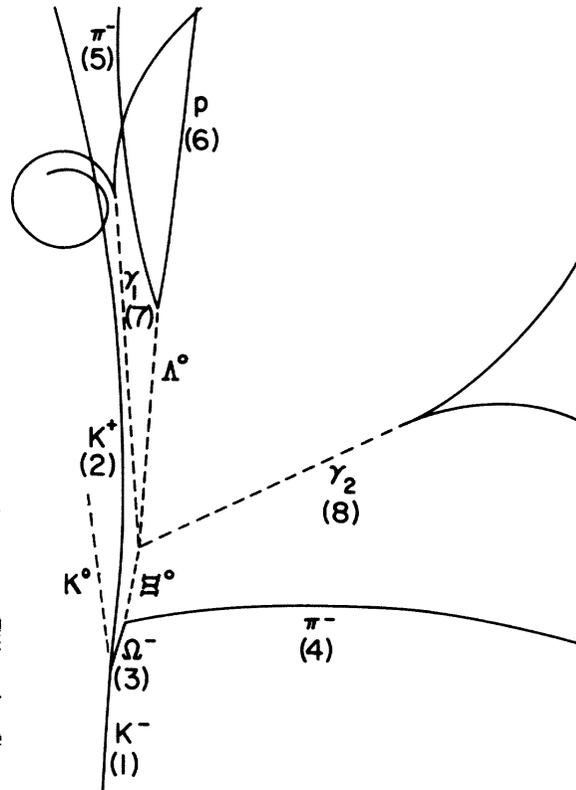
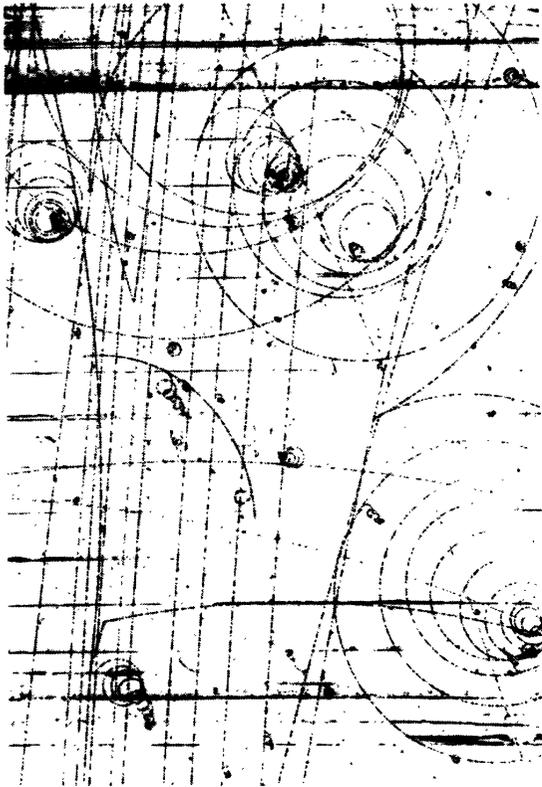
Elementarteilchen aus. Aber das ist ein anderes Kapitel.

Das Baryonen-Dekuplet: Voraussage des Ω^-



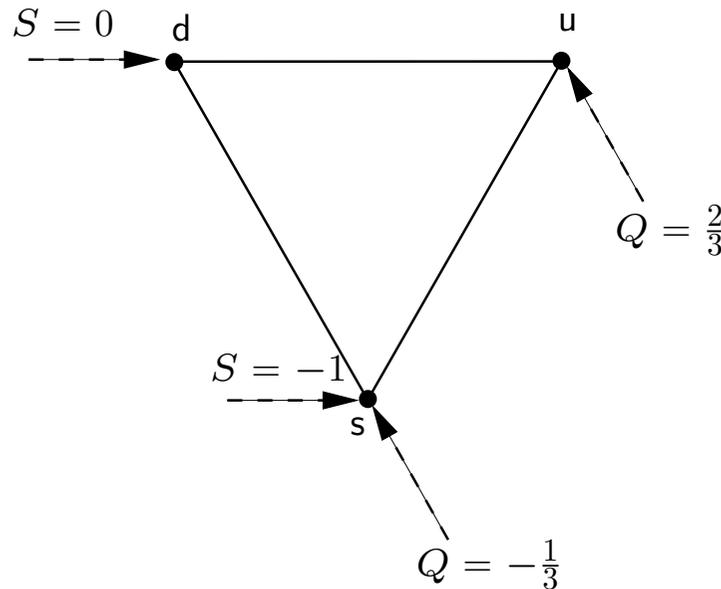
Als Gell-Mann weitere Baryonen in das links gezeigte Baryonen-Dekuplet einpasste, fand er, dass davon nur neun bekannt waren. Es musste zuunterst in der Ecke eines geben mit Ladung $Q = -1$ und Seltsamkeit $S = -3$. Ähnlich wie Mendeleev mit seinem Periodensystem die Elemente Gallium, Skandium und Germanium voraussagte, sagte auch Gell-Mann dieses Ω^- Teilchen und seine Eigenschaften voraus. Es wurde 1964 gefunden.

Die Entdeckung des Ω^-



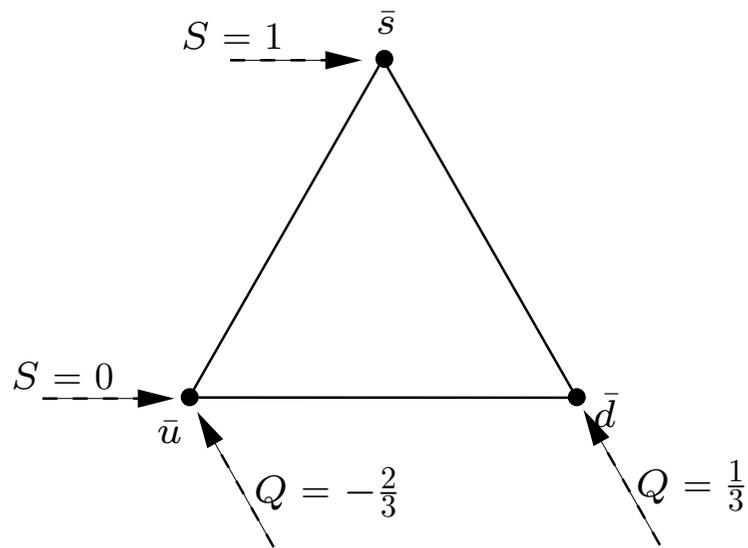
Barnes *et al.* haben das Ω^- 1964 nachgewiesen (Barnes *et al.*, Phys. Rev. Lett., **12**, 204 – 206, (1964)). Damit war der “Achtfache Weg” etabliert. Links ist Abb. 2 aus der Veröffentlichung von Barnes *et al.* abgebildet. Ein Strahl von K^- -Mesonen wurde auf eine mit Wasserstoff gefüllte Nebelkammer gerichtet. Suchen Sie die entsprechenden Spuren in der Photographie links!

Das Quarkmodell



Nach dem Erfolg des Achtfachen Weges stellt sich die Frage, wie er denn funktioniert. Gell-Mann und Zweig haben unabhängig ein Modell für die Baryonen und Mesonen entwickelt, in dem diese durch noch elementarere Teilchen zusammengesetzt sind. Gell-Mann nannte sie "Quarks". Zu dem Zeitpunkt brauchte es drei Sorten (flavors) von Quarks, das u (up) mit Ladung $2/3$ und $S = 0$, das d (down) mit $q = -1/3$ und $S = 0$ und das s (strange) mit $q = -1/3$ und $S = -1$.

Man kann sich nun fragen, warum wir denn die Elektronenladung e 'Elementarladung' nennen. Mehr dazu später.



Nach dem Modell gibt es auch Antiquarks (\bar{q}) mit umgekehrter Ladung und strangeness. Aus diesen Quarks und Antiquarks kann man nun alle Baryonen und Mesonen zusammensetzen. Dabei gelten zwei Regeln:

- 1.) Baryonen bestehen aus 3 Quarks (und Antibaryonen aus drei Antiquarks)
- 2.) Mesonen bestehen aus einem Quark und einem Antiquark.

. . . und eine dritte, die wir in Bälde kennenlernen werden.

Die Mesonen

$q\bar{q}$	Q	S	Meson
$u\bar{u}$	0	0	π^0
$u\bar{d}$	1	0	π^+
$d\bar{u}$	-1	0	π^-
$d\bar{d}$	0	0	η
$u\bar{s}$	1	1	K^+
$d\bar{s}$	0	1	K^0
$s\bar{u}$	-1	-1	K^-
$s\bar{d}$	0	-1	\bar{K}^0
$s\bar{s}$	0	0	??? $\longrightarrow \eta'$

Auf diese Art und Weise kann man neun Mesonen in einem Nonett erzeugen. Aber halt! Wir hatten doch auf Seite 15 von einem Mesonen-Oktett gesprochen! Hier sehen wir aber neun Kombinationen in der Tabelle links, was auch logischer erscheint. In der Tat war das η' im Achtfachen Weg als Singlett klassifiziert worden, es gehört aber – nach dem Quarkmodell – eigentlich in ein Mesonen-Nonett. Die Anti-Mesonen sind bereits im Mesonen-Nonett enthalten, so ist z. B. das $u\bar{d}$ (π^+) das Antiteilchen von $d\bar{u}$ (π^-).

Die Baryonen

qqq	Q	S	Baryon
uuu	2	0	Δ^{++}
uud	1	0	Δ^+
udd	0	0	Δ^0
ddd	-1	0	Δ^-
uus	1	-1	Σ^{*+}
uds	0	-1	Σ^{*0}
dds	-1	-1	σ^{*-}
uss	0	-2	Ξ^{*0}
dss	-1	-2	Ξ^{*-}
sss	-1	-3	Ω^-

Auf eine ähnliche Weise kann man zehn Baryonen im Baryonen-Dekuplett unterbringen. Das Baryon-Oktett ergibt sich aus denselben Kombinationen, aber ohne uuu , ddd , sss und mit einer Verdoppelung von uds . Das verlangt aber eine genauere Behandlung des Spins der Quarks als hier möglich ist. Weshalb kann denn z. B. uud sowohl ein Proton und ein Δ^+ ergeben? Das Proton ist der Grundzustand von uud , das Δ^+ der erste angeregte Zustand, etc. Die Bindungsenergien liegen allerdings in der Größenordnung von hunderten und Tausenden von MeV, vergleichbar mit der Ruhemasse des Protons, deshalb spricht man von neuen Teilchen.

Die Farbe (. . . die dritte Regel)

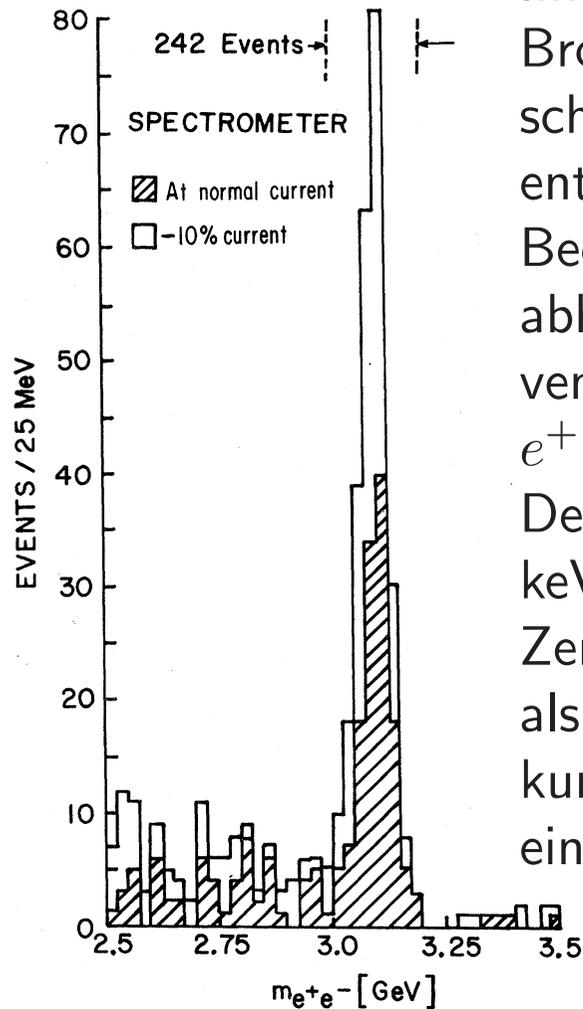
So erfolgreich das Quarkmodell auch aussehen mag, es hat einen gravierenden Nachteil. Niemand hat je ein Quark gesehen. Man kann ein Proton nicht auseinanderziehen und dann springen die Quarks plötzlich raus. Ferner hätten wir wegen des Pauliprinzips Schwierigkeiten, ein Δ^{++} (uuu) zusammensetzen. Quarks haben Spin $1/2$ und deshalb kann man drei u Quarks nicht in ein Teilchen verbauen. Greenberg hat dieses Problem 1964 durch das Einführen einer weiteren Quantenzahl, der Farbe, gelöst. Jedes Quark kann in drei Farben, rot, grün und blau vorkommen¹⁰. Dann kann ich ein Δ^{++} wieder aus drei sonst identischen Quarks zusammensetzen. Dabei gilt eine Regel:

⇒ **Alle natürlich vorkommenden Teilchen sind farblos.**

Dies bedeutet, dass die Summe der Farben (z. B. rot + antirot = 0) verschwindet oder alle drei Farben vorkommen. Darum gibt es auch keine Teilchen aus 4 Quarks und auch keine freien Quarks sondern eben nur Mesonen und Baryonen.

¹⁰Diese haben natürlich mit den Farben des Lichts überhaupt nichts zu tun!

Die Entdeckung des J/ψ -Mesons: Die Novemberrevolution



Im Sommer 1974 haben Ting und seine Mitarbeiter am Brookhaven National Lab (BNL) eine ausgeprägte und sehr schmale Resonanz in der Reaktion $p+\text{Be} \rightarrow x \rightarrow e^+ + e^-$ entdeckt. Sie nannten das Teilchen J und wollten diese Beobachtung vor Publikation sehr genau überprüfen. Unabhängig von ihnen haben Richter und Mitarbeiter im November 1974 am Stanford Linear ACelerator (SLAC) über $e^+ + e^- \rightarrow x$ dasselbe Teilchen entdeckt und ψ genannt. Der äußerst geringen Breite (Massenunschärfe, heute $93,4 \text{ keV}/c^2$) entspricht nach Heisenberg eine besonders lange Zerfallszeit von ca. 10^{-20} s . Das ist rund 1000 mal länger, als typische Zerfallszeiten unter der starken Wechselwirkung. Das J/ψ wurde bald als neues Meson bestehend aus einer **neuen Quarkfamilie**, dem “charm” interpretiert.

weitere zwei Quarksorten geben müsste. Das “bottom” oder “beauty” (b) wurde 1977 entdeckt, das “top” oder “truth” (t) erst 1995. Die Masse des top-Quarks ist mit $173,1 \pm 1,3 \text{ GeV}/c^2$ etwa so groß wie die eines Goldatoms. Seine Lebensdauer beträgt nur $\text{ca. } 5 \times 10^{-25} \text{ s}$, die Zeit, die benötigt wird, um Hadronen (Baryonen und Mesonen) zu bilden beträgt aber $\text{ca. } 10^{-23} \text{ s}$, weshalb das top-Quark keine Bindungen eingeht. Alle anderen Quarks können “hadronisieren”.

Noch 2012 habe ich geschrieben: Die große Masse des top macht es äußerst interessant als Forschungsobjekt für den Ursprung der Masse. Einige Varianten des sog. Standardmodells erlauben aufgrund der top-Masse Voraussagen für die Masse des bisher noch nicht gefundenen Higgs-Bosons. Dieses soll für den Ursprung der Masse aller Teilchen verantwortlich sein. Dazu werden wir aber in dieser Vorlesung nicht mehr kommen. Vielleicht werden wir Zeuge seiner Entdeckung am LHC.

Die Existenz des b und t wurde von Kobayashi und Maskawa vorausgesagt um die sog. CP -Verletzung im Kaonenzerfall zu erklären. Mehr dazu später.

Das Standardmodell: Träger der Wechselwirkungen/Käfte

Yukawa hatte vorgeschlagen, dass die Kerne, bestehend aus Protonen und Neutronen, durch ein Austauscheteilchen “zusammengehalten” werden, das Pion. Heute kennen wir Kerne als wesentlich komplexere Konglomerate aus Quarks. Die **starke Kraft** wird nach heutiger Kenntnis durch sog. **Gluonen** vermittelt, die zwischen Quarks ausgetauscht werden. Ein Gluon hat immer eine positive und eine negative Farbeinheit. Damit würden wir neun Gluonen erwarten, genauere Betrachtungen, die über den Inhalt dieser Vorlesung hinausgehen, zeigen, **es gibt acht Gluonen**. Weil Gluonen Farbe tragen, können sie auch miteinander wechselwirken, ein wesentlicher Grund für die Komplexität der sog. Quantenchromodynamik (QCD). Die **schwache Wechselwirkung** wird nach der elektroschwachen Theorie von Glashow, Weinberg und Salam durch die W^+ , W^- und Z **Bosonen** vermittelt. Sie wurden 1985 am CERN nachgewiesen ($m_W = 80,403 \pm 0,029 \text{ GeV}/c^2$, $m_Z = 91,188 \pm 0,002 \text{ GeV}/c^2$). Die **elektromagnetische Kraft** wird durch das **Photon** vermittelt.

Das Standardmodell: Leptonen

Lepton	Q	L_e	L_μ	L_τ	Masse [MeV/ c^2]
e	-1	1	0	0	0.511
ν_e	0	1	0	0	$< 2 \times 10^{-6}$
μ	-1	0	1	0	106
ν_μ	0	0	1	0	< 0.2
τ	-1	0	0	1	1777
ν_τ	0	0	0	1	< 1

Im Standardmodell ist alle Materie aus drei Arten von Elementarteilchen zusammengesetzt, **Leptonen, Quarks und Austauschteilchen**. Es gibt drei Generationen von Leptonen, links durch horizontale Linien getrennt. Leptonen werden durch ihre Ladung und Leptonenzahl (L_e, L_μ, L_τ) charakterisiert.

Zu jedem Lepton gibt es ein Antilepton mit umgekehrten Quantenzahlen. Ein Positron hat Ladung $Q = +1$ und Elektronenzahl $L_e = -1$. Somit gibt es insgesamt 12 Leptonen. Die Massen der Leptonen und Quarks können zwar über den Higgs-Mechanismus "erklärt" werden, berechenbar sind sie aber z. Zt. nicht¹¹.

¹¹Die relevanten Kopplungskonstanten können erst jetzt bestimmt werden, wo das Higgs-Bosons gefunden ist.

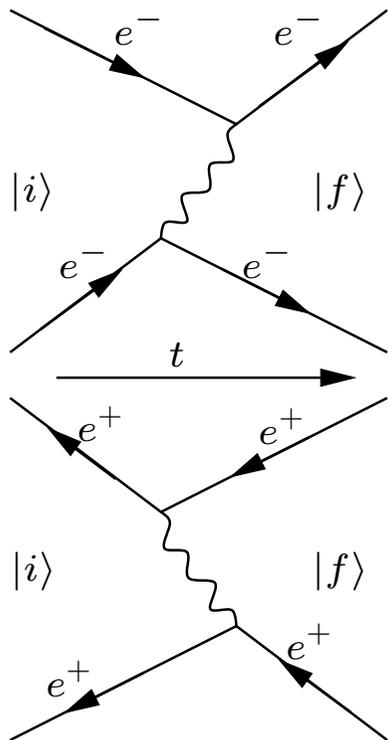
Das Standardmodell: Quarks

Quark	Q	D	U	S	C	B	T	Masse [MeV/ c^2]
d	$-1/3$	-1	0	0	0	0	0	5
u	$2/3$	0	1	0	0	0	0	2
s	$-1/3$	0	0	-1	0	0	0	100
c	$2/3$	0	0	0	1	0	0	1200
b	$-1/3$	0	0	0	0	-1	0	4200
t	$2/3$	0	0	0	0	0	1	174'000

Es gibt 6 Quarksorten (flavors u, d, s, c, b und t), die wiederum in drei Generationen unterteilt sind. Die entsprechenden Antiquarks haben wieder die umgekehrten Quantenzahlen und jedes Quark kann in den

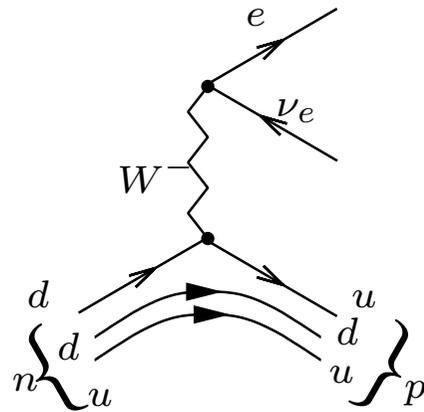
drei "Farben" rot, grün und blau vorkommen. Somit gibt es 36 verschiedene Quarks. Neben den 36 Quarks und 12 Leptonen gibt es noch die 12 Austauschteilchen (8 Gluonen, W^\pm - und Z -Bosonen und das Photon). Nach dem Standardmodell muss es zudem noch mindestens ein Higgs-Boson geben, womit es mindestens 61 "Elementarteilchen" gibt.

Wechselwirkungen und Feynman-Diagramme*

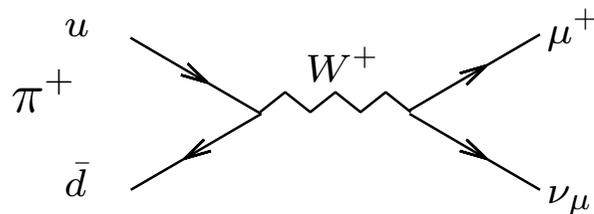


In der Elementarteilchenphysik wird die Wechselwirkung z.B. zwischen zwei Elektronen oft als Austausch eines Teilchens, eines Wechselwirkungs-Bosons, aufgefasst. Reaktionen, links beispielhaft die Streuung von zwei Elektronen aufgrund der Coulombkraft $e^- + e^- \longrightarrow e^- e^-$, werden dabei als sog. **Feynman-Diagramme** dargestellt. Wir legen hier die Konvention fest, dass die Zeit von links nach rechts läuft. Links ist also der Anfangszustand, rechts der Endzustand dargestellt. Läuft der Pfeil in Zeitrichtung, handelt es sich um ein Teilchen, läuft er gegen die Zeitrichtung, handelt es sich um ein Antiteilchen. Leptonen werden als gerade Linien gezeichnet, Photonen als Wellenlinien.

Beta- und Pionzerfall*



In der Abbildung links sind oben der β -Zerfall (Neutron zerfällt in ein Elektron und ein Antineutrino) und unten der Pionzerfall als Feynman-Diagramm dargestellt. Beim β -Zerfall verwandelt sich ein d -Quark in ein u -Quark (es gibt keine Quarkerhaltung). Damit wird das Neutron in ein Proton verwandelt und sendet ein Elektron und ein elektronisches Antineutrino aus. Der gesamte Prozess wird durch ein W^- -Boson vermittelt.



Beim Pionzerfall wird das aus einem u - und \bar{d} -Quark bestehende π -Meson (Pion) verwandelt in ein μ^+ und ein ν_μ . Auch hier gilt keine Quarkerhaltung (und keine Mesonenerhaltung). **Schwache Wechselwirkung!**

Erhaltungssätze für die verschiedenen Kräfte

erhaltene Größe	elm. WW	schwache WW	starke WW
Energie	ja	ja	ja
Impuls	ja	ja	ja
Drehimpuls	ja	ja	ja
Baryonenzahl	ja	ja	ja
Leptonenzahl	ja	ja	ja
Parität P	ja	nein	ja
Ladungskonjugation C	ja	nein	ja
Produkt $C \cdot P$	ja	nein	ja
Zeitumkehr T	ja	nein	ja
Produkt $C \cdot P \cdot T$	ja	ja	ja

Die Anzahl Neutrino-Generationen/Leptonenfamilien

Gibt es mehr als 3 Generationen? Empirische Untersuchungen des Zerfalls des Z^0 -Bosons geben (k)eine Antwort. Z^0 zerfällt unter anderem auch in Neutrino-Paare

$$Z^0 \rightarrow \nu_x + \bar{\nu}_x, \quad \text{wo } x = e, \mu, \tau$$

Unter der Annahme, dass die Neutrinomassen klein sind gegen die halbe Z^0 -Masse¹², $m_\nu \ll m_{Z^0}$, kann man zeigen, dass die Zerfallsraten in verschiedene Neutrino-Generationen etwa gleich sein müssen, also $\Gamma_\nu \doteq \Gamma_{\nu_e} + \Gamma_{\nu_\mu} + \Gamma_{\nu_\tau} + \dots = N_\nu \Gamma_\nu$. Die gesamte Zerfallsrate $\Gamma = \Gamma_{\text{Hadron}} + \Gamma_{\text{Lepton}} + \Gamma_\nu$ kann gemessen werden, die beiden ersten Terme können aus dem Standardmodell berechnet werden, wie auch die Zerfallsrate Γ_ν in eine Neutrino-Spezies. Vergleich mit den empirischen Daten zeigt $N_\nu = 3.00 \pm 0.08$, also dass es **drei Generationen von leichten Neutrini** gibt. Der Grund dafür ist unbekannt.

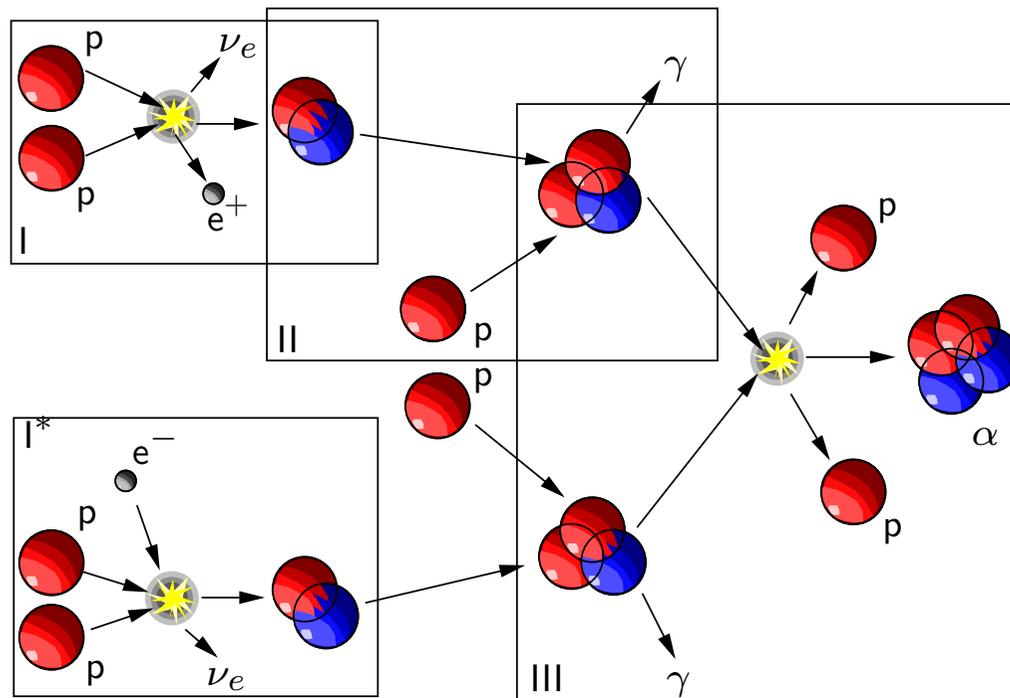
¹²was durch Messungen bestätigt wird, siehe Seiten 26 und 27

Weitere Informationen

Für Geschichten, die zu den Namen der Elementarteilchen führten, siehe <http://ed.fnal.gov/samplers/hsphys/folklore.html>

Bitte schauen Sie sich auf das nächste Mal P4_V1 (Relativitätstheorie) an!

Kernfusion in der Sonne: Die pp -Kette I



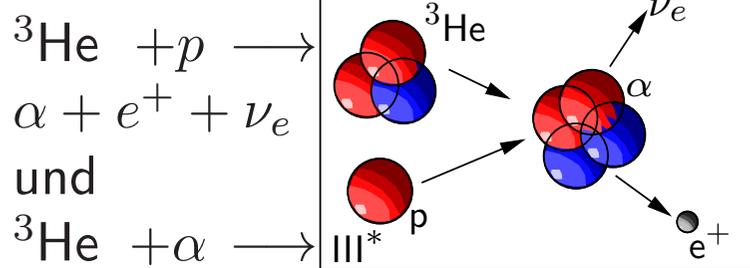
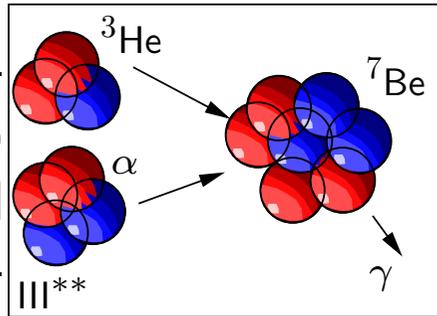
Die solare Fusion läuft primär über die sog. **p-p Kette**¹³, in der netto vier Protonen in ein α -Teilchen verschmelzen. Es werden drei (vier) Prozesse durchlaufen, dabei führen auch "verschiedene Wege zum Ziel". Sie sind in dieser und der nächsten Folie mit I - IV und Alternativen mit * bezeichnet. Im ersten Schritt gibt es zwei Varianten, $p + p \longrightarrow d + e^+ + \nu_e$ (mit I gekennzeichnet) oder $p + p + e^- \longrightarrow d + \nu_e$

(mit I* gekennzeichnet). Hier ist der Prozess mit drei Schritten gezeigt.

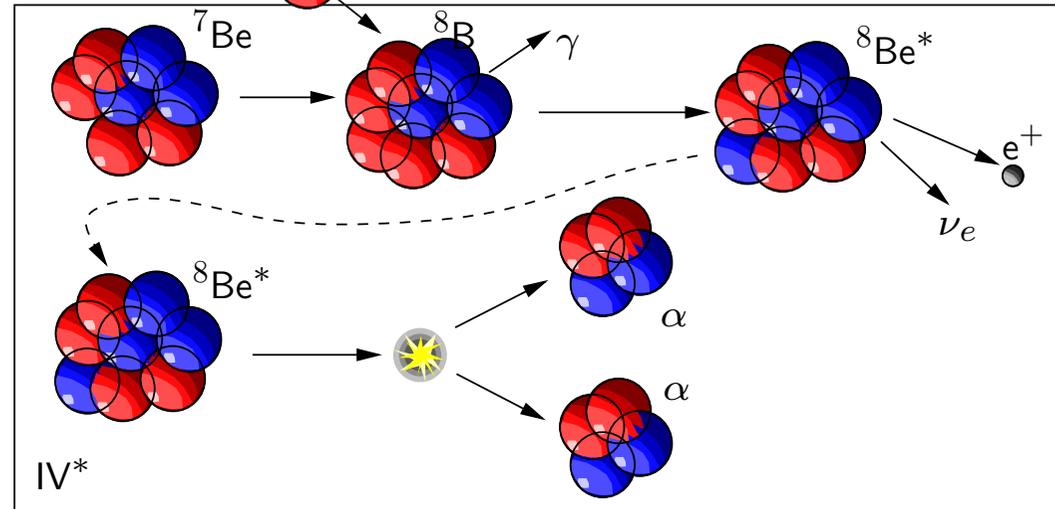
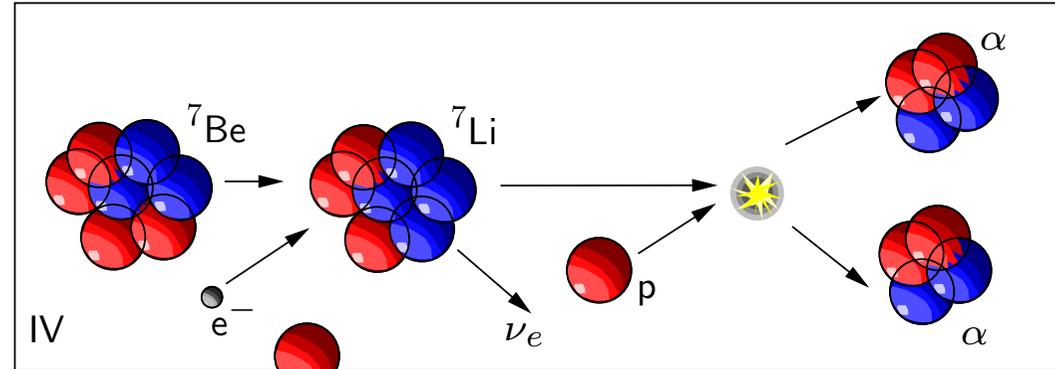
¹³In Sternen mit etwas größeren Massen (ab 1,3 mal größer) kann auch der CNO-Prozess beitragen.

Kernfusion in der Sonne: Die pp -Kette II

Weitere Möglichkeiten für den dritten (vierten) Schritt sind rechts dargestellt:

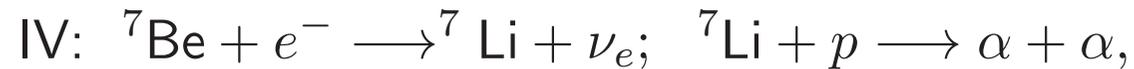


und
 ${}^3\text{He} + \alpha \rightarrow \text{III}^* + p$
 ${}^7\text{Be} + \gamma$
 Von III** \rightarrow
 2α ist es

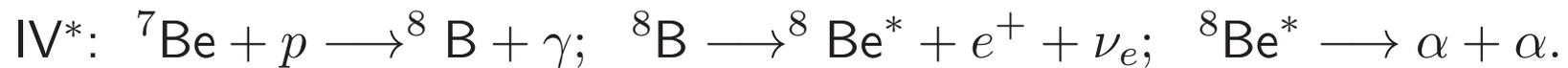


komplizierter.

Die letzte Reaktion (IV) kann über zwei Wege IV und IV* erfolgen,



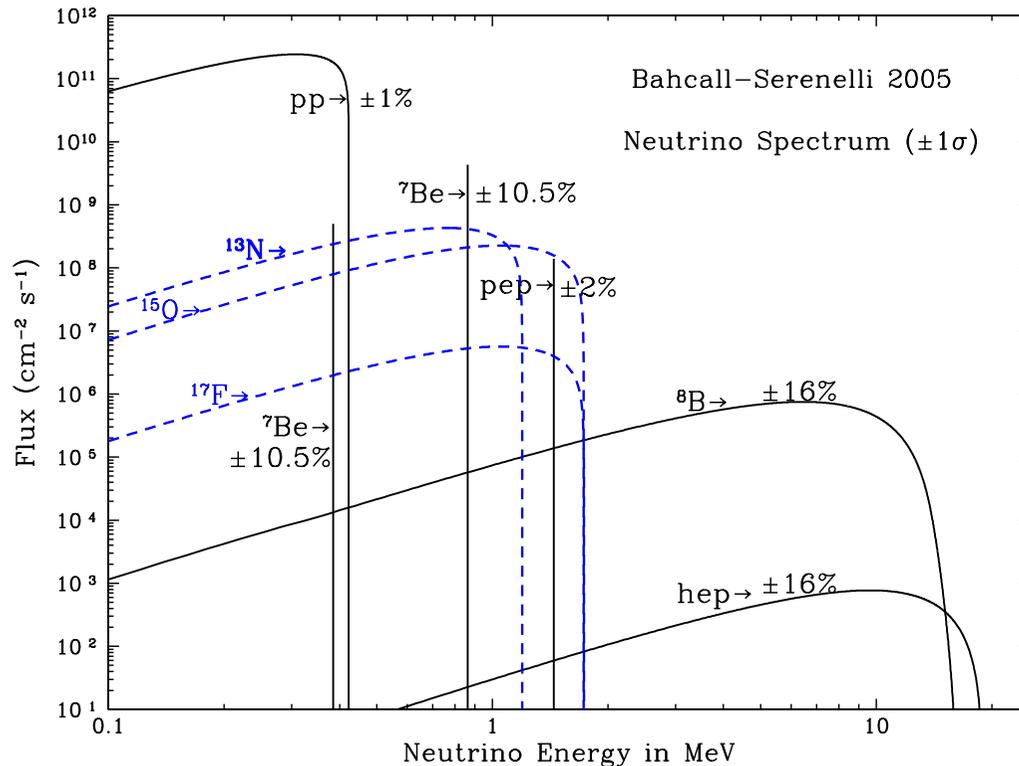
oder auch



Randbemerkung: Bei Reaktion I sehen wir ein wichtiges Prinzip: Man darf, wenn es energetisch erlaubt ist, einen Reaktionspartner mit seinem Antiteilchen “vertauschen”, wenn man es auf die andere Seite nimmt.



Das solare Neutrinoproblem



Bei den Reaktionen der p-p-Kette werden Neutrini freigesetzt. Am meisten kommen von der Reaktion $p + p \rightarrow d + e^+ + \nu_e$, bzw $p + p + e^- \rightarrow d + \nu_e$, haben aber nur eine geringe Energie. Das Spektrum links¹⁴ zeigt Neutrini aus den verschiedenen Prozessen. Dabei entstehen so viele Neutrini, dass, nach John Bahcall, jede Sekunde hundert Milliarden Neutrini durch unseren Daumennagel fliegen¹⁵!

¹⁴<http://www.sns.ias.edu/~jnb/SNviewgraphs/snviewgraphs.html>

¹⁵...und ein bis zweimal in unserem Leben eine Reaktion hervorrufen werden.

Das solare Neutrinoproblem II

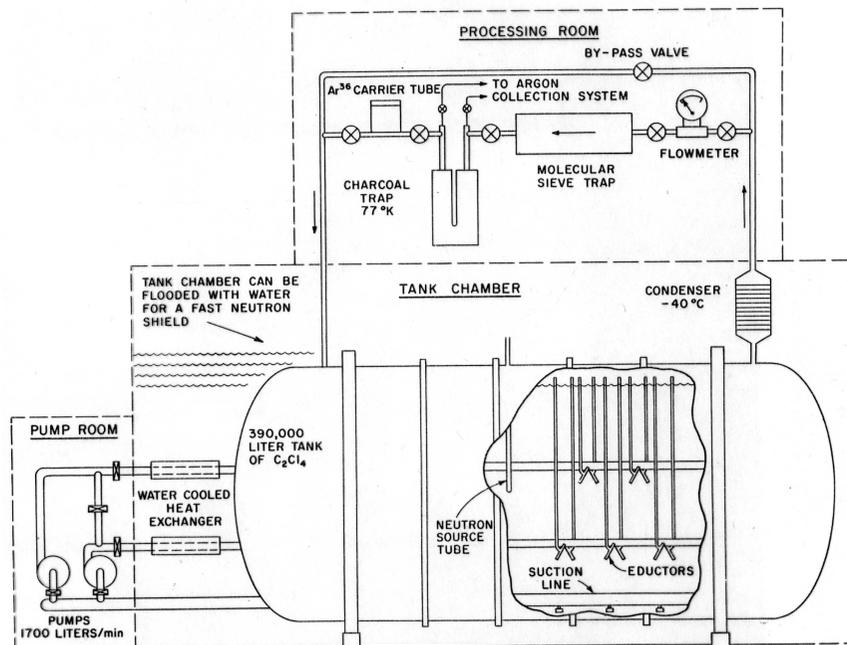


Figure 2.3. Schematic drawing of the argon recovery system. The pump-educator system forces helium gas through the tetrachloroethylene liquid and provides the helium gas flow through the argon collection system.

Der große Fluss an Neutrini bei der Erde sollte eigentlich messbar sein. In der Tat haben Davis und Mitarbeiter 1967 in einer stillgelegten Goldmine in Homestake, South Dakota, in fast 1500 m Tiefe solare Neutrini nachgewiesen. Dazu verwendeten sie einen 390'000-Liter Tank¹⁶, der mit Perchloräthylen gefüllt war (das sind 100'000 Gallonen. . .). Darin fand die Reaktion



¹⁶Quelle: <http://www.bnl.gov/bnlweb/raydavis/images>

Dem entspricht im Wesentlichen die Reaktion $\nu_e + n \longrightarrow p + e$. Dabei haben nur die Neutrini aus der ${}^8\text{B}$ -Fusionsreaktion (IV*) genügend Energie um diese Reaktion auszulösen. Deren Fluss beträgt $\Phi_{\nu_{8\text{B}}} \approx 10^7 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ und die Reaktionsrate wurde zwischen 1,5 und 5 pro Tag vorausgesagt.

Das entstehende ${}^{37}\text{Ar}$ mit einer Halbwertszeit von 34,95 Tagen hat Davis typischerweise einmal alle hundert Tage extrahiert und deren Anzahl bestimmt. Er fand systematisch zu wenige ν_e . **Das solare Neutrinoproblem** war geboren - mit der Zeit zeigte sich, dass systematisch **nur etwa ein Drittel** der erwarteten Neutrini gesehen wurde¹⁷.

¹⁷In seiner ersten Messung fand er 33 Ar Atome, die er aus 390'000 Litern extrahiert hatte.

Neutrinooszillationen I

Bruno Pontecorvo¹⁸ hatte eine äußerst einfache wie auch elegante Idee, wie man das solare Neutrino­problem lösen könnte. Er schlug vor, dass sich die elektronischen Neutrini auf dem Weg von der Sonne zur Erde in eine andere Sorte verwandeln, die Davis mit seinem Experiment nicht sehen konnte. Man nennt das heute **Neutrinooszillationen** und sie basieren im Wesentlichen auf derselben Mechanik wie ein gekoppeltes Pendel.

Der Einfachheit halber nehmen wir im Folgenden nur zwei Neutrinospezies an, ν_e und ν_μ . Die Verallgemeinerung auf drei Spezies trägt nichts zum physikalischen Verständnis bei und führt nur zu unübersichtlichen mathematischen Formeln.

Wenn sich eine Spezies in eine andere verwandeln kann, sind sie offensichtlich nicht Eigenzustände des Hamiltonoperators¹⁹.

Die stationären Neutrino-Zustände müssen also Linearkombinationen aus ν_e und

¹⁸Ein früher Assistent von Enrico Fermi und russischer Agent, der sich 1950 in die Sowjetunion absetzte.

¹⁹bzw. des Zeitentwicklungsoperators.

ν_μ sein,

$$\nu_1 = \cos \theta \nu_\mu - \sin \theta \nu_e; \quad \nu_2 = \sin \theta \nu_\mu + \cos \theta \nu_e. \quad (1)$$

Schreibt man die Koeffizienten als $\sin \theta$ und $\cos \theta$, so sind die Zustände bereits normiert. Die Schrödingergleichung sagt für solche Eigenzustände des Hamiltonoperators eine sehr einfache Zeitabhängigkeit voraus,

$$\nu_1(t) = \nu_1(0)e^{-iE_1t/\hbar}; \quad \nu_2(t) = \nu_2(0)e^{-iE_2t/\hbar}.$$

Beginnt ein Neutrino z. B. als ν_e , so gilt

$$\nu_e(0) = 1, \quad \nu_\mu(0) = 0, \quad \text{also} \quad \nu_1(0) = -\sin \theta, \quad \nu_2(0) = \cos \theta$$

und damit

$$\nu_1(t) = -\sin \theta e^{-iE_1t/\hbar} \quad \text{und} \quad \nu_2(t) = \cos \theta e^{-iE_2t/\hbar}.$$

Wir lösen Glg.1 durch Multiplikation mit $\sin \theta$ bzw. $\cos \theta$ und Addition bzw. Subtraktion nach ν_μ und ν_e auf und erhalten

$$\nu_\mu(t) = \cos \theta \nu_1(t) + \sin \theta \nu_2(t), \quad \nu_e(t) = -\sin \theta \nu_1(t) + \cos \theta \nu_2(t),$$

wie man durch Einsetzen leicht überprüfen kann. Für die zeitliche Entwicklung gilt dann,

$$\begin{aligned} \nu_\mu(t) &= \sin \theta \cos \theta \left(-e^{-iE_1 t/\hbar} + e^{-iE_2 t/\hbar} \right), \\ \nu_e(t) &= \sin^2 \theta e^{-iE_1 t/\hbar} + \cos^2 \theta e^{-iE_2 t/\hbar}. \end{aligned}$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein elektronisches Neutrino ν_e sich nach einer Zeit t in ein myonisches Neutrino, ν_μ , verwandelt hat, ist dann mit $\sin^2(\alpha/2) =$

$$(1 - \cos \alpha)/2$$

$$|\nu_\mu(t)|^2 = (\sin \theta \cos \theta)^2 \cdot \left(e^{-iE_2t/\hbar} - e^{-iE_1t/\hbar} \right) \left(e^{iE_2t/\hbar} - e^{iE_1t/\hbar} \right),$$

$$= \frac{\sin^2(2\theta)}{4} \left(1 - e^{i(E_2-E_1)t/\hbar} - e^{i(E_2-E_1)t/\hbar} + 1 \right),$$

$$= \frac{\sin^2(2\theta)}{4} \left(2 - 2 \cos \frac{(E_2 - E_1)t}{\hbar} \right),$$

$$= \frac{\sin^2(2\theta)}{4} 4 \sin^2 \left(\frac{E_2 - E_1}{2\hbar} t \right), \quad \text{und damit}$$

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu} = \left(\sin(2\theta) \sin \left(\frac{E_2 - E_1}{\hbar} t \right) \right)^2.$$

Man sieht, dass die Neutrini ihre Spezies oszillatorisch ändern solange die

Energien der Zustände ν_1 und ν_2 unterschiedlich sind. Man sieht auch, dass es sinnlos ist, nach der Masse eines elektronischen oder myonischen Neutrinos zu fragen. Ein Elektron- oder Myuonneutrino ist kein Masseneigenzustand und darum ist die Frage schlecht gestellt!

Massendifferenzen von ν_1 und ν_2

Wie unterschiedlich sind denn E_1 und E_2 , bzw. die Massen der Zustände ν_1 und ν_2 ? Die Energie eines relativistischen Teilchens mit Masse m und Impuls \vec{p} ist durch die relativistische Energie-Impuls-Beziehung gegeben, $E^2 - |\vec{p}|^2 c^2 = m^2 c^4$, also

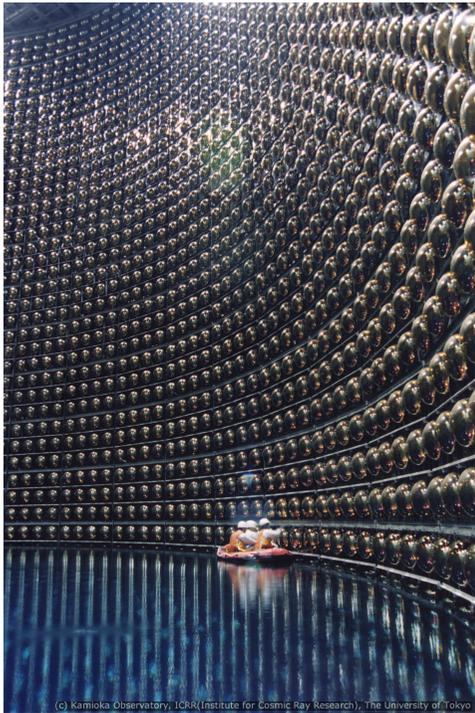
$$E^2 = |\vec{p}|^2 c^2 + m^2 c^4 = |\vec{p}|^2 c^2 \left(1 + \frac{m^2 c^2}{|\vec{p}|^2} \right), \quad \text{und damit}$$

$$E \approx |\vec{p}| c \left(1 + \frac{1}{2} \frac{m^2 c^2}{|\vec{p}|^2} \right) = |\vec{p}| c + \frac{m^2 c^3}{2|\vec{p}|}. \quad \text{Folglich mit } |\vec{p}_1| = |\vec{p}_2|$$

$$E_2 - E_1 \approx \frac{m_2^2 c^3 - m_1^2 c^3}{2|\vec{p}|} \approx \frac{(m_2^2 - m_1^2) c^4}{2E}, \quad \text{und folglich}$$

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu} = \left(\sin(2\theta) \sin \left[\frac{(m_2^2 - m_1^2) c^4}{2\hbar E} t \right] \right)^2$$

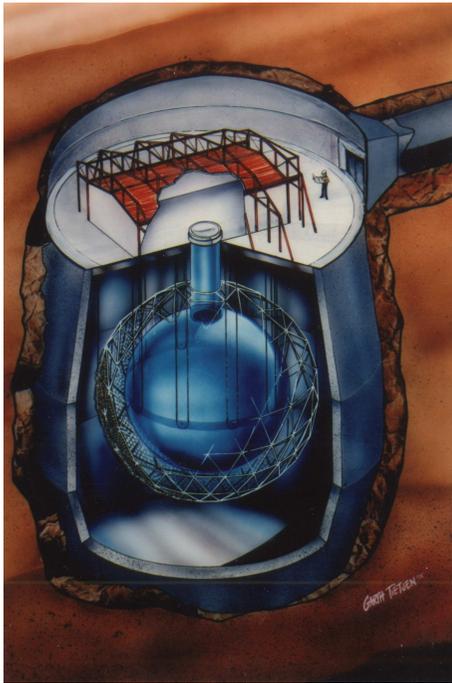
Messungen solarer und atmosphärischer Neutrini



Mit Superkamiokande wurden 2001 45% des erwarteten solaren Neutrinoflusses gemessen. In diesem Experiment (links gezeigt²⁰) wird Wasser eingesetzt und das bei der Reaktion $\nu_x + e \rightarrow \nu_x + e$ (ES) entstehende Čerenkov-Licht detektiert. Dabei reagieren alle Neutrinosorten, die Nachweiswahrscheinlichkeit für Elektronenneutrini ist allerdings ca. 6.5-mal größer als für die anderen. Weil die solaren ν_e in ν_μ und ν_τ umgewandelt worden sind, ist das 45%-Resultat schon ein guter Indikator für die Neutrinooszillationen. Weil Super-Kamiokande und Homestake so anders funktionieren, war ein direkter Vergleich mit den Homestake-Daten nicht gut möglich.

²⁰Mit freundlicher Genehmigung von Kamioka Observatory, ICRR (Institute for Cosmic Ray Research), The University of Tokyo. <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/gallery/index-e.html>

Sudbury Neutrino Observatory



Im kanadischen Sudbury wurde in einer stillgelegten Mine ein Acryl-Tank mit schwerem Wasser gefüllt. Er ist im Bild links²¹ als Umriss inmitten einer umgebenden Kugel von Photomultipliern zu sehen. Diese Anordnung wurde mit normalem Wasser umgeben. Im schweren Wasser finden neben der Reaktion $\nu_x + e \rightarrow \nu_x + e$ (ES) auch die beiden Reaktionen $\nu_e + d \rightarrow p + p + e$ (CC) und $\nu_x + d \rightarrow n + p + \nu_x$ (NC) statt. Damit kann nun der Fluss von ν_e und ν separat unter identischen Bedingungen gemessen werden²². Die Messungen stimmten mit den Berechnungen für den Fluss überein - das solare Neutrinoproblem gilt seither als gelöst.

²¹mit freundlicher Genehmigung des Sudbury Neutrino Observatory (SNO).

²²2001 fand SNO, dass Φ_{ν_e} 35% des erwarteten Flusses entsprach. Die Differenz SuperKamiokande-SNO ist 10%. 10% mal die Effizienz von 6.5 sind die fehlenden 65%.