

6.2 Detektoren

Motivation

Mit Detektoren werden gestreute Teilchen, Strahlung oder Produkte von Kern- und Elementarteilchenreaktionen nachgewiesen, wobei die Messaufgaben unterschiedlich sein können, typischerweise

- reine Zählexperimente
- Orts- und Winkelverteilung von Zählraten
- kinetische Energie und Impuls von Teilchen
- Identifikation der Teilchen
- Eigenschaften der Teilchen: Masse, Ladung, Spin, Lebensdauer
- Abbildung von Teilchenspuren

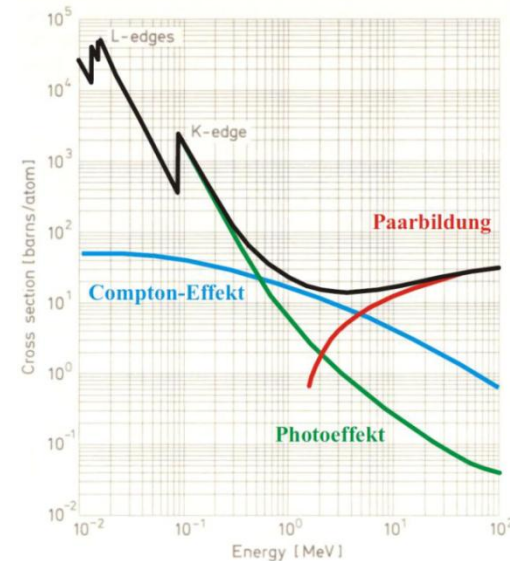
In den meisten Fällen soll die Information als elektrisches Signal vorliegen, das i.d.R. mit einem ADC (analog-digital converter) digitalisiert und auf einem Datenträger aufgezeichnet wird. Bei kleinen Experimenten kann das die Festplatte eines PC sein.

Bei großen Experimenten sind oft magnetische Datenspeicher im Einsatz z.B. Bandkassetten, die von einem Roboter gewechselt werden. Man kann auch nicht jedes Ereignis speichern, weil bei der Auslese eines großen Detektors Totzeit entstehen und die Datenmenge sehr groß würde, sondern die Elektronik/Software des Experiments muss schon während der Datennahme einen Teil der Ereignisse verwerfen (sog. "Trigger", der meist hierarchisch aufgebaut ist).

Jeder Detektor basiert auf der Wechselwirkung von Teilchen oder Strahlung mit Materie.

Wechselwirkung von Strahlung mit Materie (s. frühere Vorlesung über Röntgenstrahlung)

- Rayleigh-Streuung (bei niedriger Photonenenergie):
Streuung am gesamten Atom
- Compton-Streuung:
Streuung an Elektronen
- Photoeffekt: Absorption eines Photons, Emission eines Photons kleinerer Energie (Fluoreszenz) oder eines Auger-Elektrons
- Paarbildung (Photonenenergie min. 1,022 MeV):
Erzeugung eines Elektron-Positron-Paars



Wechselwirkung von geladenen Teilchen mit Materie

- inelastische Stöße mit Elektronen der Atomhüllen, Ionisation (Bethe-Formel, s. unten)
- bei Elektronen zusätzlich Verluste durch Bremsstrahlung, bei hoher Energie Bildung eines elektromagnetischen Schauers (Bremsstrahlung erzeugt Elektronen/Positronen, die wieder Bremsstrahlung erzeugen usw.), dessen Maximum typisch bei $6-7 x_s$ liegt (x_s = Strahlungslänge s. unten)
- Čerenkov-Strahlung, wenn Teilchengeschwindigkeit > Lichtgeschwindigkeit im Medium
- Winkelstreuung durch vielfache Stöße. Für die Standardabweichung des Winkels (in rad) für Teilchen mit Ladungszahl Z , Impuls p und Geschwindigkeit βc nach der Durchfluglänge x gilt die Näherungsformel

$$\sqrt{\langle \theta^2 \rangle} = Z \cdot \frac{20 \text{ MeV}/c}{p \cdot \beta} \cdot \sqrt{\frac{x}{x_s}} \cdot \left(1 + \frac{1}{9} \log_{10} \frac{x}{x_s} \right)$$

wobei x_s die sog. **Strahlungslänge** ist. Dies ist die Länge, nach der die Energie eines Elektrons durch Strahlung um den Faktor $1/e$ abgesunken ist (die Formel ist trotzdem auch für andere Teilchen geeignet, wird aber für sehr schwere Teilchen und kleine Geschwindigkeiten ungenau).
Einige Werte für x_s : Luft 300 m, Al 8,9 cm, Si 9,36 cm, Fe 1,76 cm, Pb 0,56 cm, W 0.35 cm.

Bethe-Formel (oder auch: Bethe-Bloch-Formel)

Herleitung: Integration der Coulomb-Kraft zwischen einem Projektil der Ladungszahl Z und quasi-freien Elektronen über die Zeit und über alle Stoßparameter + Korrekturen.

Der "spezifische" Energieverlust pro Länge dx durch Ionisation ist

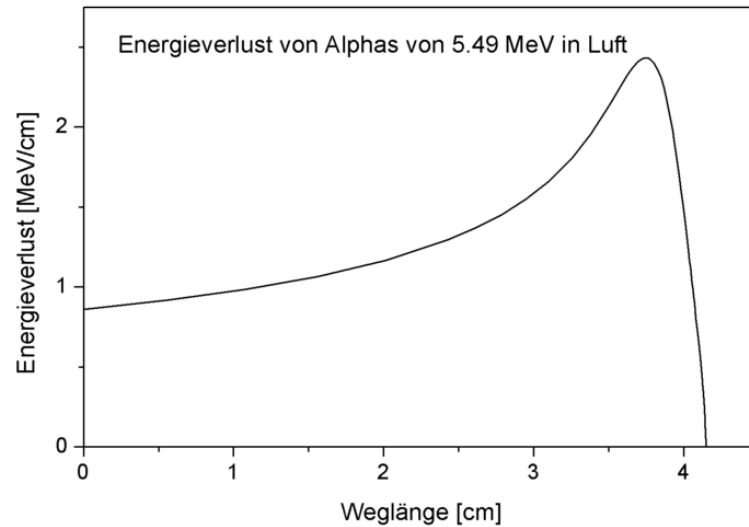
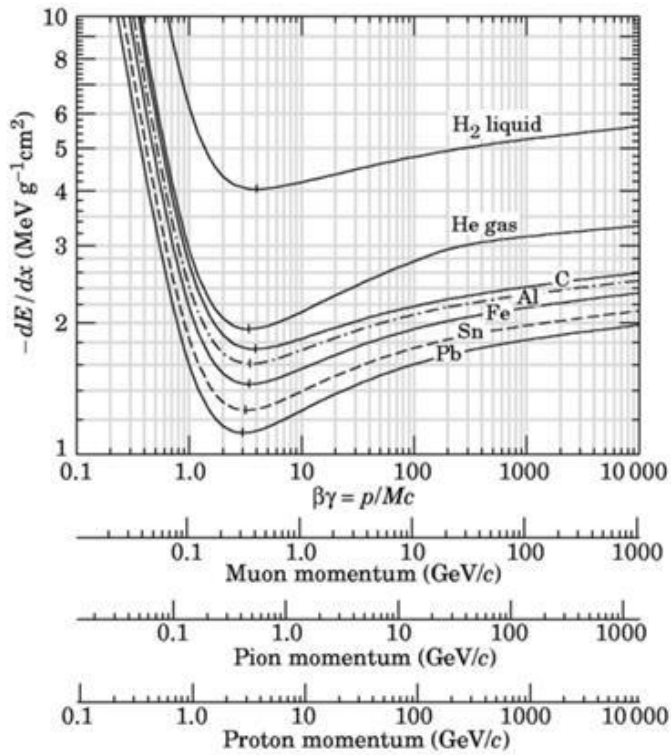
$$\frac{dE}{dx} = - \frac{Z^2 e^4 n_e}{4\pi \cdot \epsilon_0^2 \cdot m_e c^2 \beta^2} \left\{ \ln \frac{2m_e c^2 \cdot \beta^2}{E_b \cdot (1 - \beta^2)} - \beta^2 \right\} \quad \begin{array}{l} n_e = \text{Elektronendichte} \\ E_b = \text{mittlere Bindungsenergie} \end{array}$$

Mit zunehmender Teilchenenergie sinkt der spezifische Energieverlust und steigt ab ca. $\beta\gamma \approx 3$ wieder an. Teilchen im Bereich des Minimums (typisch GeV) heißen "minimal ionisierend".

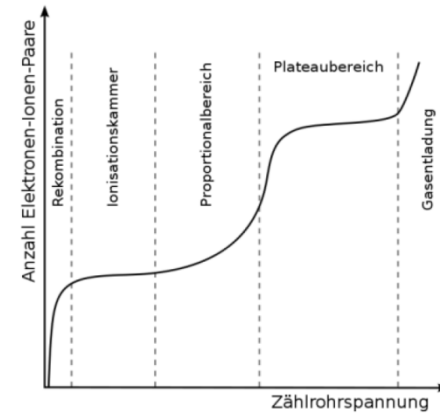
Der steile Anstieg von dE/dx bei kleiner Teilchenenergie bewirkt den "Bragg peak", einen hohen Energieverlust kurz bevor das Teilchen stehen bleibt, was bei der Strahlentherapie mit Protonen und Ionen ausgenutzt wird, um die Strahlendosis lokal zu deponieren.



Hans Bethe
(1906-2005)



Der Energieverlust pro Länge dE/dx hängt wesentlich von $\beta\cdot\gamma$ ab (β : Geschwindigkeit/ c ; γ : Lorentzfaktor). Das Minimum liegt (je nach Teilchensorte) im Bereich einiger 100 MeV bis einige GeV ("minimalionisierende Teilchen"). Bei höherer Energie steigt der Energieverlust pro Länge langsam an, bei ganz geringer Energie wird er sehr hoch ("Bragg peak" am Ende der Bahn eines Teilchens in Materie), was bei der Strahlentherapie mit Protonen und Ionen genutzt wird, um die meiste Energie lokal im Tumorgewebe zu deponieren.



Verschiedene Betriebsarten eines Zählrohrs (s. u.) in Abhängigkeit von der angelegten Spannung zwischen Anodendraht und dem umgebenden Zylinder



Einige grundlegende Detektortypen

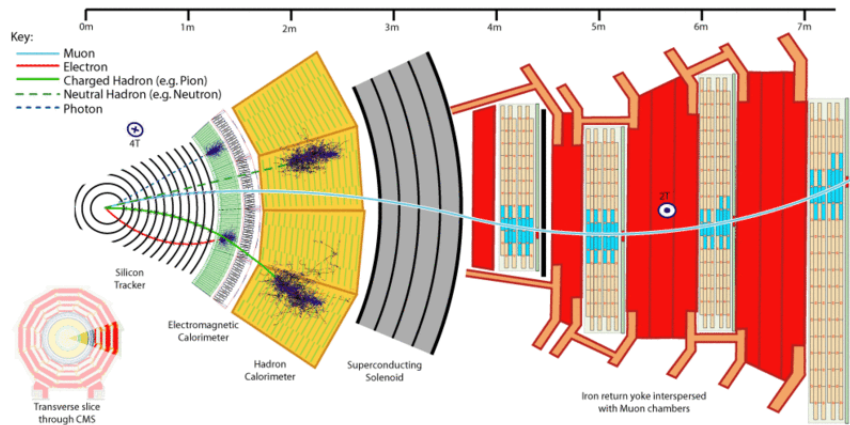
Messung von Energieverlusten oder der Gesamtenergie eines Teilchens oder Photons:

- **Proportionalzählrohr:** gasgefüllte Kammer, geladene Teilchen erzeugen Ionen und Elektronen, die zu entgegengesetzten Elektroden driften (oft ein Draht und ein umgebendes Rohr) . Verschiedene Regimes:
 - geringe Hochspannung zwischen den Elektroden (Ionisationskammer)
 - mittlere Spannung (Proportionalzähler): Sekundärionisation, aber Signal noch proportional zum Energieverlust
 - hohe Spannung (Geiger-Müller-Zählrohr): lawinenartige Sekundärionisation, keine Energiemessung
- **Halbleiterzähler:** in Sperr-Richtung betriebene Dioden, geladene Teilchen erzeugen Teilchen-Loch-Paare, die als Strom registriert werden. Auch für Photonen (Fotodioden)
- **Szintillationszähler:** Teilchen oder Photonen erzeugen Lichtblitze, die mit einem Fotomultiplier detektiert werden (im Fotomultiplier werden Elektronen durch den Lichtblitz freigesetzt und beschleunigt, schlagen lawinenartig weitere Elektronen aus einer Folge von Elektroden ("Dynoden"), so dass ein gut nachweisbarer Strompuls entsteht).

Ortsempfindliche Detektoren (messen insbesondere Impulse von Teilchen im Magnetfeld):

- **Photoplatte, Nebel- und Blasenkammer:** erzeugen optisch sichtbare Spuren, die als Fotografie vorliegen
- **Driftkammer, Zeitprojektionskammer:** gasgefüllte Kammern, bei denen Ionen/Elektronen zu einer Vielzahl von Drähten driften (Driftkammer, Ortsauflösung durch Ort des Drahts und Driftzeit) oder zu Proportionalzählern an Wänden des gasgefüllten Volumens driften (Zeitprojektionskammer, Ortsauflösung durch Auftreffpunkt + Driftzeit)
- **CCDs, Silizium-Streifen- und Pixeldetektoren:** segmentierte Halbleiterzähler. Bei CCDs wird die lokal entstehende Ladung zeilenweise von Pixel zu Pixel bis zum Rand verschoben (langsam). Streifendetektoren haben einen Verstärker pro Streifen auf einem Chip, manche Pixeldetektoren verstärken die Ladung direkt auf dem Pixel.
- **Szintillationsfaserdetektor:** Fasern aus szintillierendem Material können zu einem ortsauflösenden Detektor kombiniert werden und werden mit einem Fotomultiplier-Array oder Mikrokanalplatten ausgelesen.

Neutrale Teilchen wie Neutronen und Neutrinos werden i.d.R. durch Kernreaktionen nachgewiesen, bei denen geladene Teilchen entstehen. Bei Neutrinos geschieht dies nur über die schwache Wechselwirkung mit extrem kleinen Wirkungsquerschnitten, so dass sehr große Detektoren benötigt werden (z.B. IceCube am Südpol $\sim 1 \text{ km}^3$)



Radiale Verteilung verschiedener Detektoren, hier beim CMS-Experiment am LHC/CERN (CERN 2004).

Anwendung in der Elementarteilchenphysik

Große Experimente in der Teilchenphysik vermessen entweder Spuren von Kollisionen eines Teilchenstrahls mit einer ortsfesten Probe ("fixed-target") oder Spuren von Kollisionen gegenläufiger Strahlen in einem Beschleuniger oder Speicherring ("collider"). Sie bestehen i.d.R. aus mehreren Schichten von Detektoren für verschiedene Zwecke. Typische Anordnung mit zunehmendem Abstand vom Wechselwirkungspunkt:

- **Vertexdetektor (z.B. Siliziumstreifen oder -pixel):** genaue Vermessung von Teilchenspuren (Impuls) und Entstehungsort (Lebensdauer des primären Teilchens), Zuordnung mehrerer Spuren zu einem gemeinsamen Ausgangsort
- **Tracker (z.B. Driftkammer oder Zeitprojektionskammer) im Magnetfeld:** Die Vermessung der Radien von Spuren geladener Teilchen im Magnetfeld dient der Messung des Teilchenimpulses
- **Kalorimeter (z.B. Kombination aus schwerem Material und Szintillator):** Hier sollen Teilchen ihre gesamte kinetische Energie deponieren, die z.B. über die Lichtausbeute in Szintillatoren gemessen wird.
- **Myonkammern (z.B. Proportionalzähler):** Nachweis von geladenen Teilchen, die nicht im Kalorimeter gestoppt wurden (i.d.R. Myonen)

Die Messgrößen (Energie, Impuls...) ergeben sich oft nicht aus einer einfachen Eichung der Detektoren, sondern aus aufwändigen "Monte-Carlo"-Simulationen, in denen die Eigenschaften der Wechselwirkung und der Detektoren implementiert ist.

7 Elementarteilchenphysik

7.1 Historie

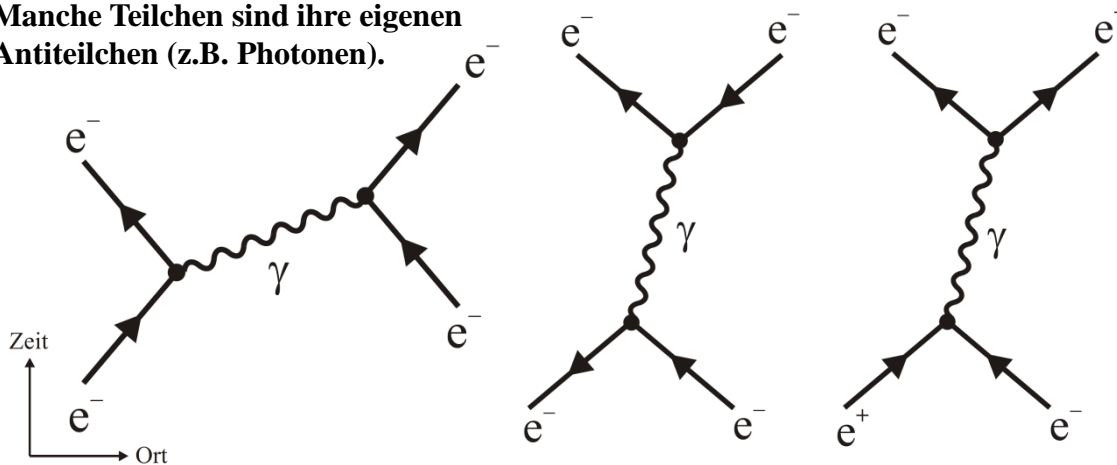
Antiteilchen

Durch die Entdeckung des Positrons 1932 (gleiche Masse und Wechselwirkung wie das Elektron, aber positiv geladen) wurde die Vorstellung von Antiteilchen etabliert. Sie ergibt sich theoretisch aus der relativistischen Quantenmechanik (Dirac 1927). Gemäß

$$E = \pm \sqrt{m_0^2 c^4 + p^2 c^2}$$

besteht die Möglichkeit negativer Teilchenenergie. Das Vakuum kann als "Dirac-See" beschrieben werden, der mit Teilchen negativer Energie gefüllt ist. Aufgrund des Pauli-Prinzips können Fermionen nicht in diese bereits besetzten Zustände übergehen, aber durch Aufbringen der zweifachen Ruheenergie können Teilchen von einem negativen in einen positiven Zustand gebracht werden. Das so entstehende "Loch" verhält sich wie ein Teilchen entgegengesetzter Ladung (Antiteilchen). Nach der Feynman-Stückelberg-Interpretation entspricht ein Antiteilchen dagegen einem Teilchen, das sich in der Zeit rückwärts bewegt.

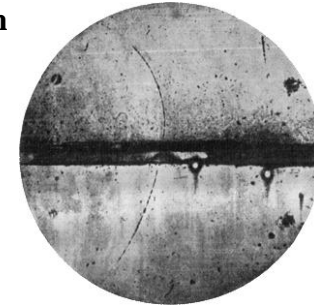
Manche Teilchen sind ihre eigenen Antiteilchen (z.B. Photonen).



Feynman-Diagramme veranschaulichen nicht nur Teilchenreaktionen, sondern man kann mit ihnen auch rechnen, z.B. gehört zu jedem Knoten (Vertex) eine Kopplungskonstante $\alpha^{1/2}$. Sie ähneln Minkowski-Diagrammen (Auftragung von Ort gegen Zeit), wobei es auf die Steigung der Linien (Geschwindigkeit) nicht so genau ankommt. Wenn man ein Feynman-Diagramm dreht, ergibt sich wieder ein sinnvolles Diagramm z.B. die Wechselwirkung zweier Elektronen durch Austausch eines (virtuellen) Photons (links) entspricht der Elektron-Positron-Annihilation und anschließender Paarbildung (rechts). Hierbei wurden die nach der Drehung in der Zeit rückwärts verlaufenden Elektronen durch vorwärts verlaufende Positronen ersetzt.



Paul A. M. Dirac (1902 - 1984)



Entdeckung des Positrons. Aus der Energieabnahme nach dem Durchgang durch eine Bleiplatte konnte auf die Richtung der Spur festgelegt werden.



Richard Feynman (1918 - 1988)

Myon und Pion

Die Kraft zwischen zwei geladenen Teilchen wird als Austausch eines Teilchens betrachtet. Im Fall der elektromagnetischen Wechselwirkung ist dies ein Photon. Da es masselos ist, ist die Kraft langreichweitig. Zur Erklärung der kurzreichweitigen starken Wechselwirkung wurde 1935 von Yukawa ein Austauscheteilchen mit Masse um 150 MeV postuliert. Yukawa-Potenzial:

$$V(r) = -g^2 \cdot \exp(-mcr / \hbar) \cdot 1/r$$

Tatsächlich fand C. Anderson 1936 ein 106 MeV*) schweres Teilchen durch Experimente mit kosmischer Strahlung (er hatte bereits 1932 das Positron entdeckt), das jedoch - wie sich erst 1946 eindeutig zeigte - nicht der starken Wechselwirkung unterlag und nicht das gesuchte Teilchen sein konnte. Es ähnelt eher dem Elektron - wengleich 200x schwerer - und wurde Myon genannt (Isidor Rabi: "Who ordered *that*?"). Seine Lebensdauer ist 2,2 μ s.

1947 fand C. Powell ein geladenes Teilchen der Masse 139,6 MeV, das in ein Myon zerfiel

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

Ihre Lebensdauer ist $2,6 \cdot 10^{-8}$ s. Später wurde auch ein neutrales Teilchen mit Masse 135,0 MeV entdeckt .

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma \quad \pi^0 \rightarrow e^+ + e^- + \gamma$$

Seine Lebensdauer ist $0,8 \cdot 10^{-16}$ s. Es zerfällt über die elektromagnetische Wechselwirkung, während die geladenen "Pionen" über die schwache Wechselwirkung viel langsamer zerfallen. Die Pionen unterliegen auch der starken Wechselwirkung, was z.B. folgende Reaktion mit Kernen zeigt

$$\pi^+ + {}^A_Z\text{X} \rightarrow \text{p} + {}^{A-1}_Z\text{X} \quad \pi^- + {}^A_Z\text{X} \rightarrow \text{n} + {}^{A-1}_Z\text{X}$$

Damit war das von Yukawa vorhergesagte Teilchen gefunden (die starke Wechselwirkung inzwischen als Austausch von Gluonen geschrien). Es ist das leichteste "Meson". Der Name rührt daher, dass die Masse des Pions im Bereich zwischen den leichten "Leptonen" (z.B. Elektron) und schweren "Baryonen" (z.B. Proton und Neutron) liegt. Allerdings ist das Pion nach heutiger Vorstellung nicht das Austauscheteilchen der starken Wechselwirkung.

*) die Werte der Massen sind gerundet und der Faktor c^2 (wie oft üblich) weggelassen



Hideki Yukawa
(1907 - 1981)



Carl Anderson
(1905 - 1991)



Cecil Powell
(190e - 1969)

Leptonen

Die Existenz eines (Elektron-)Neutrinos wurde 1930 aufgrund des Elektronenspektrums im β -Zerfall gefordert (W. Pauli). Auch beim Zerfall eines Pions in ein Myon ist ein Neutrino beteiligt. Nach der Entdeckung des Myons wurde aus der Kinematik seines Zerfalls in ein Elektron deutlich, dass zwei Neutrinos entstehen müssen:

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e \quad \mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$$

Direkt wurden Neutrinos erst 1956 nachgewiesen (C. Cowan, F. Reines; Nobelpreis 1995). Antineutrinos aus einem Reaktor bewirken die Reaktion

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+ \quad e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma \quad n + {}^{108}\text{Cd} \rightarrow {}^{109}\text{Cd} + \gamma$$

Diese Reaktion ist invers zum β -Zerfall. Neben dem Reaktor wurde ein Tank mit Wasser und darin gelöstem Cadmiumchlorid aufgestellt und die beteiligten Photonen in Koinzidenz nachgewiesen. Die Reaktion

$$\bar{\nu}_e + n \rightarrow p + e^-$$

wurde NICHT nachgewiesen. Hieraus und aus anderen Befunden ergab sich:

- jedem geladenen Lepton ist ein Neutrino zugeordnet, es gibt drei Leptonen-Familien.
- die e -Leptonenzahl, μ -Leptonenzahl und τ -Leptonenzahl ist jeweils für sich konstant.
- Leptonenzahl $L = \text{Zahl der negativ geladenen Teilchen plus der Neutrinos minus Zahl der Antiteilchen}$
(das τ -Lepton wurde 1975, das τ -Neutrino 2000 nachgewiesen)

Die Neutrinomassen konnten aus den Endpunkten des β -Spektrums noch nicht bestimmt werden, doch zeigt die Beobachtung von Neutrinooszillationen (Umwandlung von einer Familie in eine andere), dass es kleine Massendifferenzen und damit auch eine von Null verschiedene Masse geben muss (Nobelpreis 2015).

Die Neutrinooszillationen erklären auch, warum auf der Erde weniger Elektron-Neutrinos von der Sonne ankommen, als man aus Modellen der Sonne erwarten würde. Dieses "solare Neutrinoproblem" bestand seit den frühesten Beobachtung solarer Neutrinos um 1970. Diese Neutrinos kommen aus der Proton-Proton-Reaktion, bei der aus 4 Protonen ${}^4\text{He}$ entsteht. Die meisten Neutrinos kommen aus dem ersten Reaktionsschritt

$$p + p \rightarrow d + e^+ + \nu_e$$



Clyde Cowan
(1919 - 1974)



Frederick Reines
(1918 - 1998)