
Entdeckung von Neutrinos

Felix Geyer

23. November 2018

Seminar: Schlüsselexperimente der Teilchenphysik

Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

Geschichtlicher Überblick

Die Postulierung des Neutrinos

Fermi's Theorie des β -Zerfalls

Cowan und Reines: „From Poltergeist to Particle“

Erste Idee: Atombombe

Das Hanford Experiment

Das Savannah River Experiment

Ausblick

Literatur

Geschichtlicher Überblick

Die Postulierung des Neutrinos

Fermi's Theorie des β -Zerfalls

Cowan und Reines: „From Poltergeist to Particle“

Erste Idee: Atombombe

Das Hanford Experiment

Das Savannah River Experiment

Ausblick

Literatur

Geschichtlicher Überblick

Jahr	Ereignis
bis 1930	β -Zerfall = Zwei-Körper-Zerfall \rightarrow Problem beim Energiespektrum
1930	Pauli postuliert das Neutrino
1934	Fermi stellt die erste Theorie des β -Zerfalls auf
1955	Maximale Paritätsverletzung im β -Zerfall
1956	C. L. Cowan Jr. und F. Reines detektieren das erste freie Neutrino
1962	Zweiter Flavour des Neutrinos ν_μ
1970-1990er	Neutrinos werden intensiv genutzt, um die Struktur der Nukleonen zu erforschen
1990	Beschränkung der Familienzahl der Neutrinos auf 3 (aus Breite des Z^0 am LEP)
2000	Dritter Flavour ν_τ wird entdeckt
1998-2000	Neutrinos haben eine Masse (Neutrinooszillationen)

Geschichtlicher Überblick

Die Postulierung des Neutrinos

Fermi's Theorie des β -Zerfalls

Cowan und Reines: „From Poltergeist to Particle“

Erste Idee: Atombombe

Das Hanford Experiment

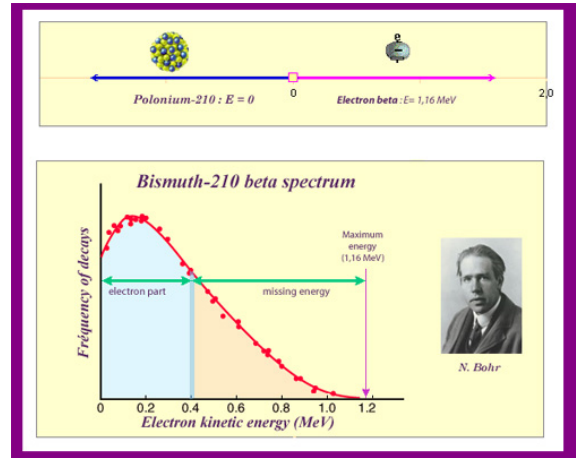
Das Savannah River Experiment

Ausblick

Literatur

Der β -Zerfall

- Um 1930 wurde angenommen, dass sich der β -Zerfall aus drei Teilchen zusammensetzt:
 $n \rightarrow p + e^-$
 → somit Energie des Elektrons im Ruhesystem des Neutrons diskret festgelegt
- Problem entstand, als für das Elektron im β -Zerfall ein kontinuierliches Energiespektrum zwischen keiner und der maximalen verfügbaren Energie gemessen wurde
 → Niels Bohr hinterfragte die Gültigkeit der Energieerhaltung
- Außerdem ist bei diesem Zerfall die Drehimpulserhaltung verletzt



Bildrechte: Institut national de physique nucléaire et de physique des particules [1].

Paulis Postulat

- Pauli postulierte in einem Brief an die „Gruppe der Radioaktiven“ in Tübingen die Existenz eines ungeladenen, sehr leichten ($< 1/100 m_p$), bisher unentdeckten Teilchens mit halbzahligem Spin, das ebenfalls beim β -Zerfall entsteht
- Dadurch wäre die Erklärung des kontinuierlichen Energiespektrums des Elektrons kein Problem mehr, da nun ein 3-Körper-Zerfall vorliegt

Geschichtlicher Überblick

Die Postulierung des Neutrinos

Fermi's Theorie des β -Zerfalls

Cowan und Reines: „From Poltergeist to Particle“

Erste Idee: Atombombe

Das Hanford Experiment

Das Savannah River Experiment

Ausblick

Literatur

Geschichte der Theorie

- Fermi besuchte die siebte Solvay-Konferenz im Oktober 1933, auf welcher im Bereich der Atomphysik vor allem die Entdeckung des Neutrons und des Positrons und die Neutrino-Hypothese diskutiert wurden
→ Fermi war infolgedessen gut informiert in Sachen Nuklearphysik
- Anfang 1934 veröffentlichte er die erste Theorie zum β -Zerfall
→ das *Nature*-Magazin verweigerte die Veröffentlichung eben jener Theorie mit der Begründung, dass sie auf spekulativen Ideen beruhe



Bildrechte: A&E Television
Networks [2].

Kinematik des β -Zerfalls

- $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$
- Wie bereits erwähnt, wurde angenommen, dass der β -Zerfall ein Zwei-Körper-Zerfall ist
→ das Teilchen, welches die Energieerhaltung und die Drehimpulserhaltung „rettet“, wird von Fermi Neutrino („kleines Neutron“) getauft
- Energiebetrachtung

$$m_n^2 + \mathbf{p}_n^2 = (m_p^2 + \mathbf{p}_p^2) + (m_e^2 + \mathbf{p}_e^2) + (m_\nu^2 + \mathbf{p}_\nu^2)$$

- Mit vernachlässigbarer Masse des Neutrinos und vernachlässigbaren Impulsen des Protons und des Neutrons

$$m_n^2 = m_p^2 + (m_e^2 + \mathbf{p}_e^2) + \mathbf{p}_\nu^2$$

Kinematik des β -Zerfalls

- Mit $W^2 = m_n^2 - m_p^2$ ergibt sich

$$(\mathbf{p}_e^2 + \mathbf{p}_\nu^2) = W^2 - m_e^2 \quad (1)$$

- Aus den experimentellen Ergebnissen folgt, dass die kinetische Energie des Elektrons immer $\neq 0$ ist
→ somit folgt aus (1)

$$\sqrt{m_e^2 + \mathbf{p}_e^2} \leq W \quad (2)$$

- Bei maximalem \mathbf{p}_e und $m_\nu = 0$ wäre die Gleichheit in (2) gegeben
- Dass dies nie experimentell bestätigt wurde, lässt zwei Schlüsse zu
 - $m_\nu = 0$ und $\mathbf{p}_\nu \neq 0$
 - $m_\nu \neq 0$

Geschichtlicher Überblick

Die Postulierung des Neutrinos

Fermi's Theorie des β -Zerfalls

Cowan und Reines: „From Poltergeist to Particle“

Erste Idee: Atombombe

Das Hanford Experiment

Das Savannah River Experiment

Ausblick

Literatur

Überblick

- Frederick Reines war während und nach Ende des Zweiten Weltkrieges beteiligt an Test mit nuklearen Bomben
→ Er wusste, dass dieser „man-made star“ eine sehr intensive Neutrinoquelle war.
- Erste Idee: Ein Detektor neben einer Atombombe
- Hanford Experiment
- Savanna River Experiment



Frederick Reines [3]



Clyde Cowan Jr. [3]

Geschichtlicher Überblick

Die Postulierung des Neutrinos

Fermi's Theorie des β -Zerfalls

Cowan und Reines: „From Poltergeist to Particle“

Erste Idee: Atombombe

Das Hanford Experiment

Das Savannah River Experiment

Ausblick

Literatur

Entstehung der Idee

- Nach reiflicher Überlegung kam Reines zu dem Schluss, dass eine Atombombe der beste Weg sei, um Neutrinos zu messen
→ durch den sehr intensiven Neutrino-Impuls wären die messbaren Signale möglicherweise gut vom Untergrund zu unterscheiden.
- Reines befragte Fermi zu diesem Thema, während dieser in Los Alamos weilte
→ Fermi teilte seine Meinung im Bezug darauf, dass eine Atombombe die beste Quelle sei
- Während einer ungeplanten Landung in Kansas City kam Reines mit Cowan ins Gespräch und beide beschlossen, sich an etwas sehr herausforderndes heranzuwagen

Die Detektion

- Da bisher alle Erkenntnisse über Neutrinos nur aus den fehlenden Energien oder Impulsen bestimmter Zerfälle stammten, musste der tatsächliche Beweis für die Existenz eines Neutrinos an einem beliebigen Punkt außerhalb eines Zerfalls stattfinden

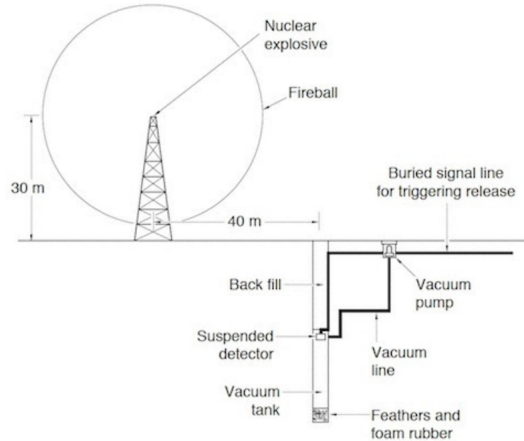
- Zu untersuchende Reaktion:



- Problem: Kurz nach Fermi's Theorie zum β -Zerfall, berechneten Bethe und Peierls, dass bei wenigen MeV der Wirkungsquerschnitt bei $\sim 10^{-44} \text{ cm}^2$ liegt

Der Detektor

- Ein weiterer Grund für die Untersuchung dieses Zerfalls: Der neue flüssige Szintillationsdetektor
→ das entstehende Licht kann mit den ebenfalls relativ neuen Photomultipliern detektiert werden
- Reines und Cowan erkannten, dass dieser neue Detektor auch auf den großen Skalen ($\sim 1 \text{ dm}^3 - 1 \text{ m}^3$), die für diesen Versuch benötigt werden, anwendbar ist
- Die erste Idee war es, ein großes Gefäß mit flüssigem Szintillatormedium mit vielen Photomultipliern auf der Außenhülle des Gefäßes zu bauen
→ die aus Reaktion (3) entstandenen Positronen erleiden Paarvernichtung und die entstehenden Photonen können detektiert werden



Schematische Zeichnung des Aufbaus zur Detektion von Neutrinos mittels einer Atombombe [3].

Die neue Idee I

- Neben einer Abschirmung, die Gammastrahlung und Neutronen abhält, soll auch die verzögerte Koinzidenz zwischen den entstehenden Positronen und Neutronen genutzt werden, um Untergrund zu filtern
→ diese Methode reduziert den Untergrund drastisch, sodass ein Kernspaltungsreaktor als Neutrino-Quelle ausreicht
- Ein Reaktor im Hanford Nuklearkomplex wird ausgewählt
- Indem das flüssige Szintillationsmedium mit Bor oder Cadmium versetzt wird, lässt die mittlere Zeit zwischen zwei Events einstellen
→ $10 \mu\text{s}$
- Volumen des zylindrischen Detektors: $\sim 0,28 \text{ m}^3$, umgeben von 2 Batterien á 45 Photomultipliern, die isotrop um die Mantelfläche des Zylinders verteilt sind

Die neue Idee II

- Maßnahmen zur Reduktion des Untergrundes
 - Kosmische Strahlungs-Anti-Koinzidenz, Quecksilber und ein Bleisschild gegen natürliche Radioaktivität
 - Eintauchen des Detektors in eine Borax-Wasser-Lösung zur Reduktion des Neutronen-Untergrundes, welcher durch den Reaktor selbst erzeugt wird
- Erwartete Zählrate etwa 1,8 m vom Reaktor entfernt: $1/5 \text{ min}^{-1}$
- Vorteil gegenüber der Bombe: Das Experiment lässt sich leicht beliebig oft wiederholen
- „Project Poltergeist“ war geboren

Geschichtlicher Überblick

Die Postulierung des Neutrinos

Fermi's Theorie des β -Zerfalls

Cowan und Reines: „From Poltergeist to Particle“

Erste Idee: Atombombe

Das Hanford Experiment

Das Savannah River Experiment

Ausblick

Literatur

„Project Poltergeist“

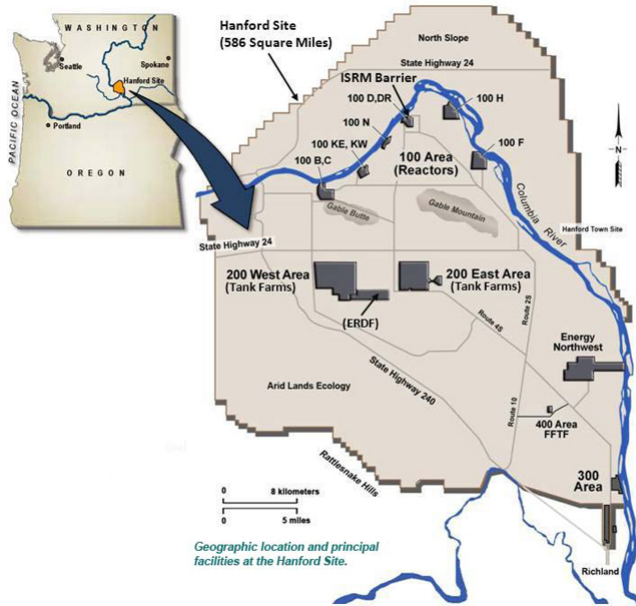


Zylindrischer Detektor mit 90 Photomultipliern, genannt „Herr Auge“ [3].

Das Team



F. Newton Hayes, Capt. W. A. Walker, T. J. White, Frederick Reines, E. C. Anderson, Clyde Cowan (von links nach rechts) [3].



Karte des Hanford Nuklearkomplexes [4].

Nebeneffekte des Detektors

- Zahlreiche Fragen noch offen, z.B.
 - Ist der Szintillator durchlässig genug, damit das Licht detektiert werden kann?
 - Überlagert das Rauschen der vielen Photomultiplier das Signal zu stark?
- Detektiert mit fast 100 % Effizienz Neutronen und Gammastrahlung
→ lässt sich z.B. nutzen für Myon-Lebensdauern oder Myon Einfang
- Da ein Mensch in gehockter Stellung in den Detektor passte, wurde probeweise die Radioaktivität von ^{40}K in einigen Menschen gemessen



Wright Langham wird in den Detektor hinabgelassen [3].

Durchführung

- Herr Auge wurde 1,83 m entfernt vom Reaktor aufgestellt
- Es wurden mehrere Mischungen des Szintillatormediums ausprobiert: Toluol, Mineralöl oder Terphenyle
- Aufgrund von Problemen bei der Untergrundabschirmung wurden die Abschirmung mehrmals umgestellt und umgeschichtet
- Weiße Farbe löste sich unter der Einwirkung des Toluol basierten Szintillatormediums von den Wänden des Detektors ab
- Führt Messungen mit ein- und ausgeschaltetem Reaktor durch



Herr Auge platziert in einem Schild aus Paraffinwachs, Borax-Blöcken und Blei [3].

Die Ergebnisse des Hanford Experimentes

- Nach ein paar Monaten wurde das Experiment beendet
- Hoher reaktorunabhängiger Untergrund durch kosmische Strahlung und elektisches Rauschen erschwerten die Messung
- „Spur eines Signals“: $(0,4 \pm 0,2) \text{ min}^{-1}$
→ auch wenn der Reaktor ausgeschaltet war
- Zurück in Los Alamos wurde die Quelle des reaktorunabhängigen Rauschens untersucht
→ Eine Messung unter der Erde ließ darauf schließen, dass der Untergrund von kosmischer Strahlung erzeugt wurde

Geschichtlicher Überblick

Die Postulierung des Neutrinos

Fermi's Theorie des β -Zerfalls

Cowan und Reines: „From Poltergeist to Particle“

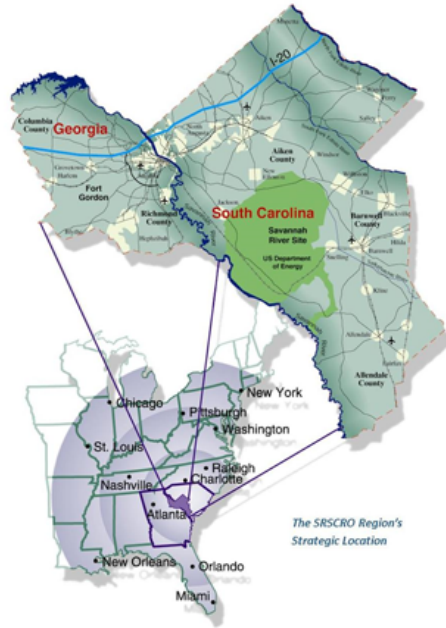
Erste Idee: Atombombe

Das Hanford Experiment

Das Savannah River Experiment

Ausblick

Literatur

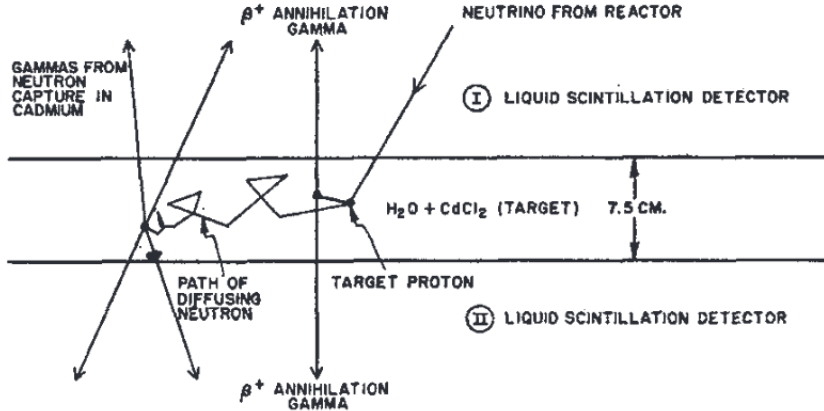


Karte des Savannah River Plants [5].

Savannah River Plant

- November 1955 wurde das Experiment an einem neuen Schwerwasserreaktor im Savannah River Plant in Aiken, South Carolina, aufgebaut
 - Der Reaktor war gut geeignet für die Suche nach Neutrinos
 - Ein gut abgeschirmter Platz 11 m vom Reaktorkern entfernt
 - 12 m unter dem Erdboden in einem massiven Gebäude
 - Reaktorleistung von 700 MW
- hoher (Anti-)Neutrinofluss ($1,2 \cdot 10^{23} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) und reduzierter Einfluss der kosmischen Strahlung als Vorteile gegenüber der Messung beim Hanford Experiment
- Trotz dieser gute Vorraussetzungen wurden an 100 Tagen über eine Periode von einem Jahr gemessen

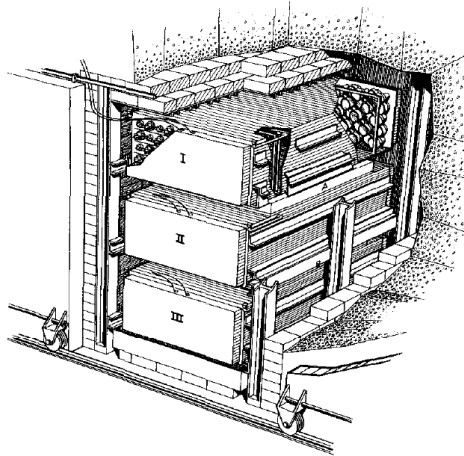
Schema des Messvorganges



Schematische Darstellung des Messvorganges im Szintillatormedium [6].

Cowan und Reines: „From Poltergeist to Particle“: Das Savannah River Experiment

Schema des Aufbaus



Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus des Savannah River Experimentes [7].

Cowan und Reines: „From Poltergeist to Particle“: Das Savannah River Experiment

Messungen während des Experimentes

Die Serie von Messungen sollten zeigen, dass

- das durch den Reaktor bedingte verzögerte Koinzidenzsignal mit der Theorie vereinbar ist.
- der erste Impuls des Signals von der Positron Annihilation stammt.
- der zweite Impuls vom Neutroneneinfang stammt.
- das Signal eine Funktion der Anzahl der Protonen im Tank ist.
- keine andere Strahlung außer die der Neutrinos für die Signale verantwortlich ist.

Cowan und Reines: „From Poltergeist to Particle“: Das Savannah River
Experiment

Signal-Rate

- Beobachtete korrelierte, reaktorbezogene Signalrate: $(3,0 \pm 0,2) \text{ h}^{-1}$
- Vergleich zwischen dem theoretischen und dem experimentellen Wirkungsquerschnitt
 - $\sigma_{\text{exp}} = (12^{+7}_{-4}) \cdot 10^{-44} \text{ cm}^2$
 - $\sigma_{\text{th}} = (5 \pm 1) \cdot 10^{-44} \text{ cm}^2$

Erster Impuls

- Durch Variation der Bleischicht zwischen Wassertank und dem flüssigen Szintillatormedium auf einer Seite bewiesen, dass der erste Pulse von der Positron Annihilation stammt
→ durch gesunkene Positron-Detektionseffizienz in dem zusätzlich abgeschirmten Szintillationsdetektor sank das Signal in diesem Teil des Detektors, aber nicht in den anderen Teilen

Cowan und Reines: „From Poltergeist to Particle“: Das Savannah River Experiment

Zweiter Impuls

- Durch die Variation der Cadmium-Konzentration im Wasser bewiesen, dass der zweite Impuls vom Neutroneneinfang stammt
→ ohne Cadmium verschwindet die korrelierte Rate komplett
- Das Spektrum der Zeitintervalle zwischen erstem und zweitem Impuls stimmt mit dem erwarteten Spektrum für Gammastrahlen überein, die aus einem Neutroneneinfang resultieren

Signal als Funktion der Anzahl der Protonen

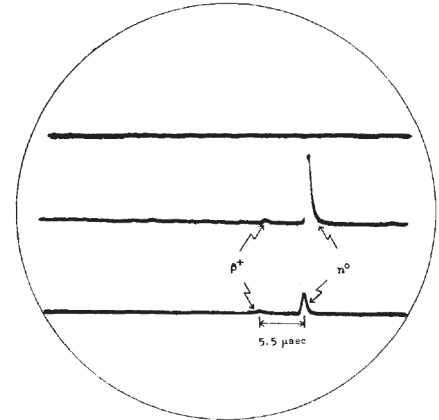
- Durch Änderung der Protonendichte im Tank ergeben sich keine drastischen Änderungen in der Detektoreffizienz sowohl für Neutrino als auch für Untergrundereignisse
→ Durch eine Mischung von leichtem und schwerem Wasser zu ungefähr gleichen Teilen sank die Signalrate auf $0,4 \pm 0,1$ dessen, was für 100 % H₂O gemessen wurde

Absorptionstest

- Ein zusätzliches Schild zur Abschwächung von Gammastrahlung und Neutronen um mindestens eine Größenordnung wurde installiert
→ Signalrate von $(1,74 \pm 0,12) \text{ h}^{-1}$ mit und von $(1,69 \pm 0,17) \text{ h}^{-1}$ ohne zusätzliches Schild

Zusammenfassung

- Erwartete Resultate der Tests bestätigten die Entdeckung des Neutrinos bzw. des Antineutrinos
- Im Juni 1956 teilten Cowan und Reines Wolfgang Pauli per Telegramm die Entdeckung des Neutrinos mit
- Acht Jahre später Bestätigung durch Beschleuniger-Experiment
- Ca. 20 Jahre später beobachteten andere Forschungsgruppen ebenfalls den Zerfall $\bar{\nu}_e + p$ an Reaktoren im Hinblick auf Neutrinooszillationen



Ein charakteristisches Messergebnis [6].

Cowan und Reines: „From Poltergeist to Particle“: Das Savannah River Experiment

Die damals bekannten Eigenschaften des Neutrinos

- Spin: $\frac{1}{2}\hbar$
- Masse: $< 1/500 m_e$
- Magnetisches Moment: $< 10^{-9} \mu_B$
- Wirkungsquerschnitt der Reaktion $\nu_- + p^+ \rightarrow \beta^+ + n^0$ bei 3 MeV: $\sim 10^{-43} \text{ cm}^2$
- Neutrino (ν_+) und Antineutrino (ν_-) sind nicht gleich

Cowan und Reines: „From Poltergeist to Particle“: Das Savannah River Experiment

Geschichtlicher Überblick

Die Postulierung des Neutrinos

Fermi's Theorie des β -Zerfalls

Cowan und Reines: „From Poltergeist to Particle“

Erste Idee: Atombombe

Das Hanford Experiment

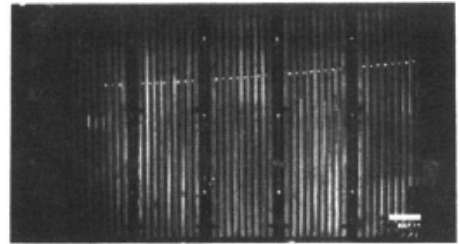
Das Savannah River Experiment

Ausblick

Literatur

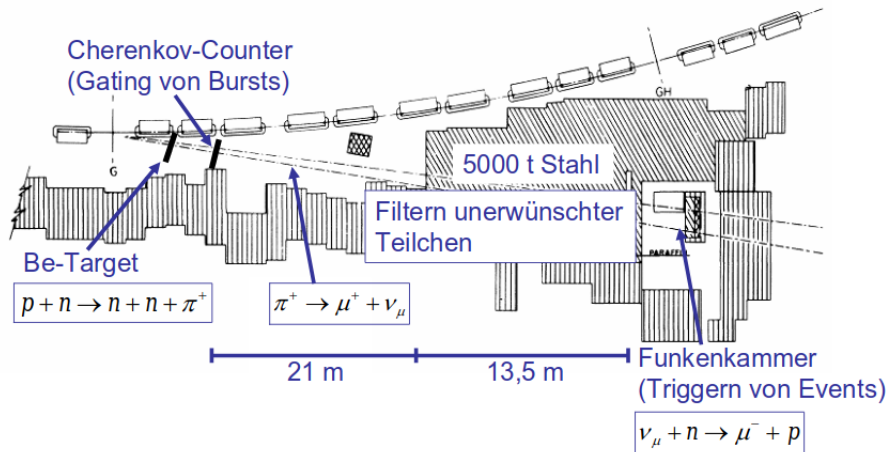
Entdeckung des Myon-Neutrinos

- 1962 wurde das Myon-Neutrino von Leon Lederman, Melvin Schwartz und Jack Steinberger am „Alternating Gradient Synchrotron“ in Brookhaven entdeckt
- Reaktionskette: $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \xrightarrow{\text{Stahlwand}} \nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + p$
- Beginn von hochenergetischen Neutrino-Beams an Beschleunigern



Spur eines Myons mit $p_\mu > 700 \text{ MeV}$ [8].

Schematischer Aufbau des Experimentes

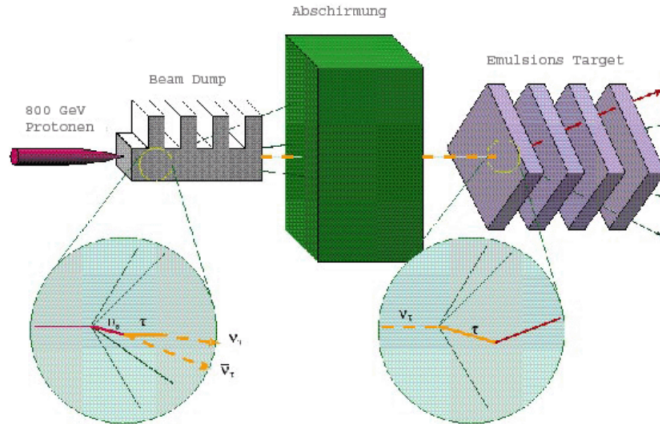


Experimenteller Aufbau am Alternating Gradient Synchrotron [8].

Die Entdeckung des Tau-Neutrinos

- Entdeckung im Jahr 2000 am Fermilab durch DONUT (**D**irect **O**bservation of **NU** **T**au)
- $\nu_\tau + n \rightarrow p + \tau^-$
- Sehr aufwendig zu entdecken, da Tau-Neutrino wie bei der Entdeckung des Myon-Neutrinos indirekt durch geladenen Leptonenpartner beobachtet
→ Lebensdauer des τ : $(290,3 \pm 0,5) \text{ fs}$
- Nur eins von 10^{18} Myon-Neutrinos aus dem Strahl traf auf einen Eisenatomkern und produzierte ein τ^-
- Spur des τ^- in einer Emulsion nachgewiesen
→ Zerfallslänge von 2,3 mm

Schematischer Aufbau des Experimentes



Experimenteller Aufbau am Fermilab [9].

Nachfolgende Experimente mit Beteiligung von Frederick Reines [7]

- Elastische Streuung zwischen Neutrino und Elektron (1956-1976)
→ kleinster je gemessener Wirkungsquerschnitt
- Neutrino-Wechselwirkung mit Deuteronen (1956-1979)
 - 1969 $\bar{\nu}_e + d \rightarrow n + n + e^+$ „charged-current“
 - 1979 $\bar{\nu}_e + d \rightarrow n + p + \bar{\nu}_e$ „neutral-current“
- Detektion von atmosphärischen Neutrinos
→ Am 23.02.1965 erstes natürliches Neutrino entdeckt
- Stabilität des Neutrinos und Hinweis auf Neutrinooszillationen (1979)

Weitere Neutrino-Experimente

ANTARES Cherenkov-Detektor im Mittelmeer

→ sensitiv auf kosmische ν_μ

Homestake Mine in der Nähe von Rapid City in South Dakota

→ solares Neutrinoproblem

IceCube Cherenkov-Detektor am Südpol

→ sensitiv auf atmosphärische und kosmische Neutrinos der drei Familien

Kamiokande Cherenkov-Detektor in Kamioka, Japan

→ sensitiv auf solare und atmosphärische Elektron-Neutrinos

Geschichtlicher Überblick

Die Postulierung des Neutrinos

Fermi's Theorie des β -Zerfalls

Cowan und Reines: „From Poltergeist to Particle“

Erste Idee: Atombombe







Das Hanford Experiment

Das Savannah River Experiment

Ausblick

Literatur

Literatur I

-  Institut national de physique nucléaire et de physique des patricules. *The Neutrino Hypothesis*. http://www.radioactivity.eu.com/site/pages/Neutrino_Hypothesis.htm. Aufgerufen am 27.09.2018.
-  Biography.com Editors. *Enrico Fermi Biography*. <https://www.biography.com/people/enrico-fermi-9293405>. Aufgerufen am 03.11.2018.
-  Keith Robert Rielage. *Los Alamos and the Neutrino: 60 years of discovery*. <https://permalink.lanl.gov/object/tr?what=info:lanl-repo/lareport/LA-UR-16-24221>. Aufgerufen am 10.11.2018.
-  UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. *Projects & Facilities*. <https://www.hanford.gov/page.cfm/projectsfacilities>. Aufgerufen am 12.11.2018.
-  SRS Community Reuse Organization. *SRS Community Reuse Organization*. <https://www.srsco.org/>. Aufgerufen am 16.11.2018.
-  Frederick Reines und Clyde Cowan jun. „The Neutrino“. In: *Nature* 178 (Sep. 1956), 446 EP -. URL: <https://doi.org/10.1038/178446a0>.

Literatur II



Frederick Reines. „The Neutrino: From Poltergeist to Particle“. In: *Nobel Lectures* (Dez. 1995), S. 202–222. URL: <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/reines-lecture.pdf>.



Ulrich Uwer. *Entdeckung des Myon-Neutrinos*.
<https://www.physi.uni-heidelberg.de/~uwer/lectures/Seminar/KeyExp/2007/MyonNeutrino.pdf>.
Aufgerufen am 20.11.2018.



Emanuel Jacobi. *Das Myon- und das Tau-Neutrino*.
<https://web.physik.rwth-aachen.de/~hebbeker/lectures/sem0304/jacobi.pdf>. Aufgerufen am 20.11.2018.