

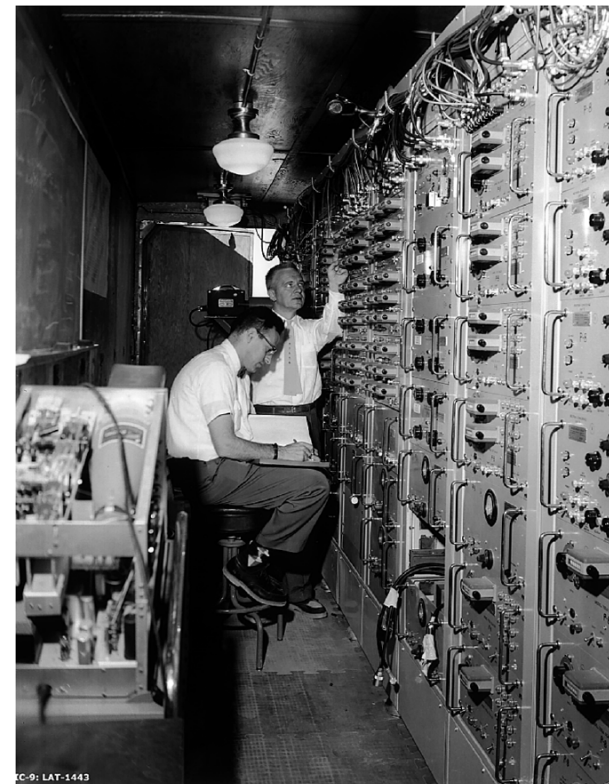
Schlüsselexperimente der Teilchenphysik: **Entdeckung des Neutrinos**

Maximilian Papst

11.12.2015

Gliederung

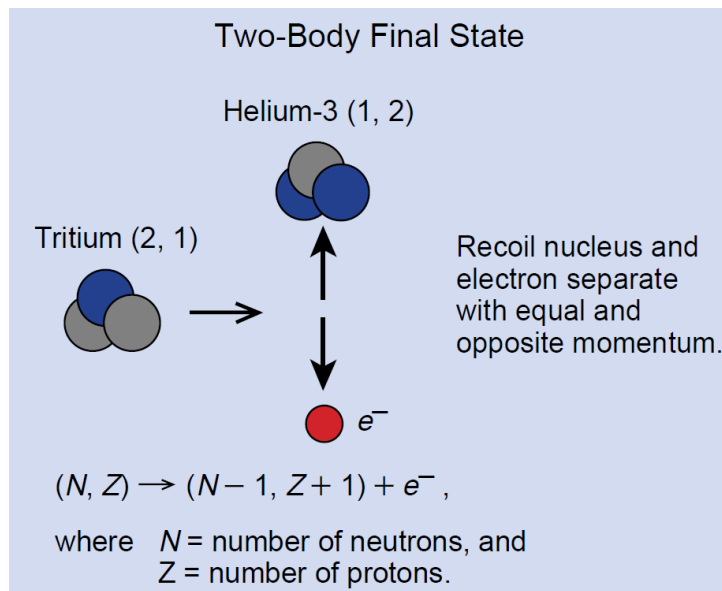
- Historischer Kontext
 - Beta-Zerfall
 - Fermi-Wechselwirkung
- Experimentelle Umsetzung
 - Probleme
 - Hanford Experiment
 - Savannah River Experiment
 - Ergebnisse
- Ausblick



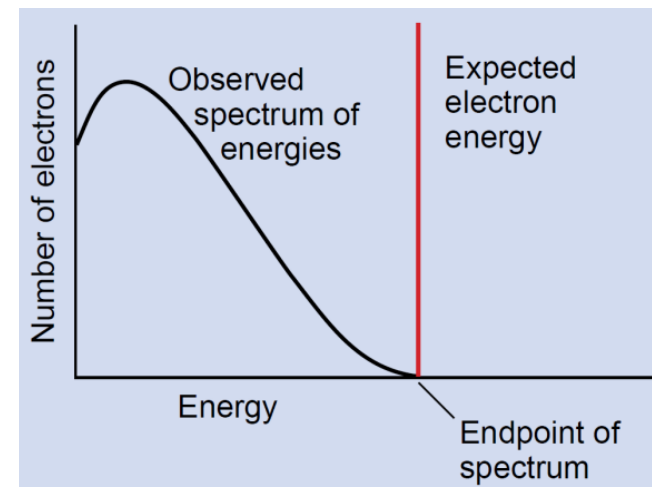
phys.ufl.edu/

Beta-Zerfall

- Anfang 20. Jhd.: Zweikörperzerfall
 - Impulsbeträge gleich, kin. Energie des e^- festgelegt
- Chadwick (1914): Kontinuierliches Beta-Spektrum (Widerspruch?)



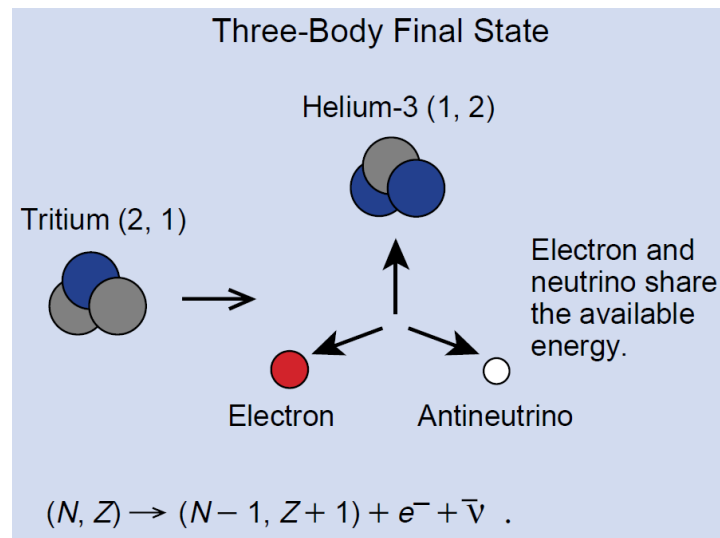
[permalink](#)



[permalink](#)

Beta-Zerfall

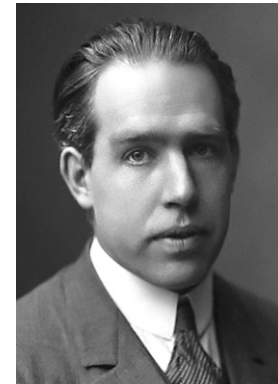
- Beta decay crisis
 - Niels Bohr: Energieerhaltung nur im Mittel
 - Wolfgang Pauli (1930): Existenz eines „Neutrons“
 - Dreikörperzerfall



[permalink](#)

11.12.2015

Historischer Kontext



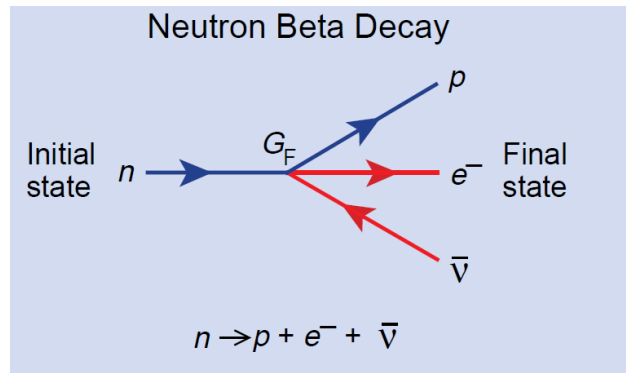
Niels [Bohr](#)



Wolfgang [Pauli](#)

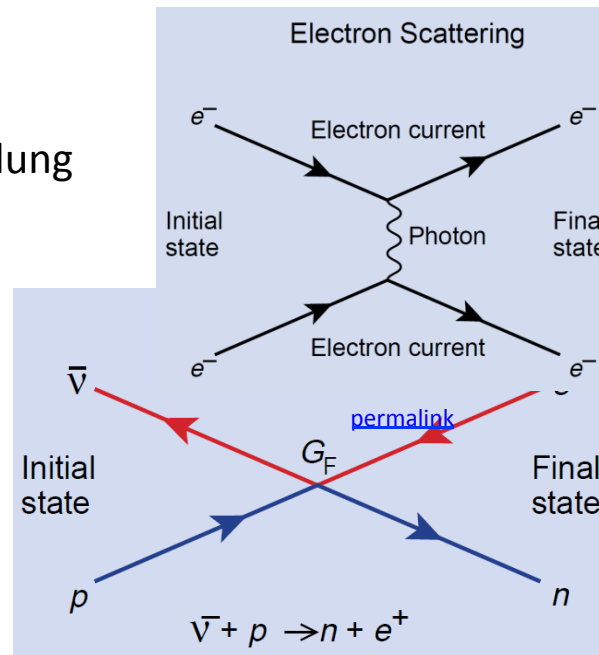
Fermi-Wechselwirkung

- Formulierung des Beta-Zerfalls, Neutrino als Fermion (1934)
- basierend auf Diracs QED
- Einführung schwacher Ladung
 - Reichweite der Kraft ist null
 - WW als Transfer schwacher Ladung
 - Stärke der WW: Fermikonst. G_F

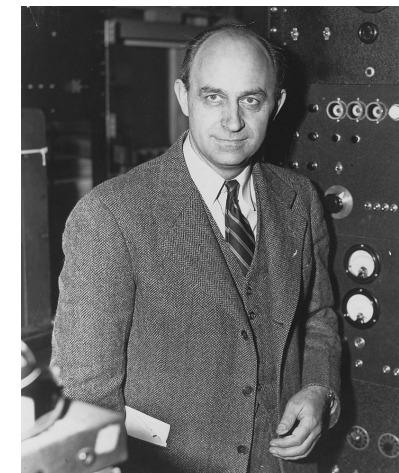


[permalink](#)

11.12.2015



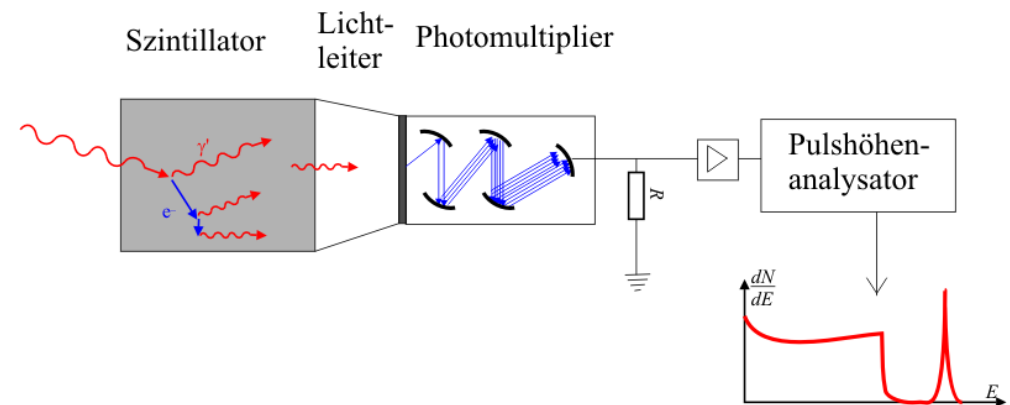
Historischer Kontext



Enrico [Fermi](#)

Probleme

- Neutrales Teilchen *sehr* geringer Masse (wenige eV)
 - Inverser Beta-Zerfall zum Nachweis
- unwahrscheinlich, Antineutrino in Materie einzufangen (schwache WW)
- Vorhersage von Hans Bethe und Rudolf Peierls: $\sigma \sim 10^{-44} \text{ cm}^2$
- Neueste Entwicklungen um 1950
 - Kernreaktor als starke Neutrinoquelle
 - (organische) Flüssigszintillatoren



Hanford Experiment

- Projekt „Poltergeist“ unter Reines/Cowan ab 1951
- Neutrinoquelle: neuer Plutonium-Reaktor in Hanford Site
- Wichtigkeit der Abschirmung



[Hanford](#) Engineering Works near Richland, Washington



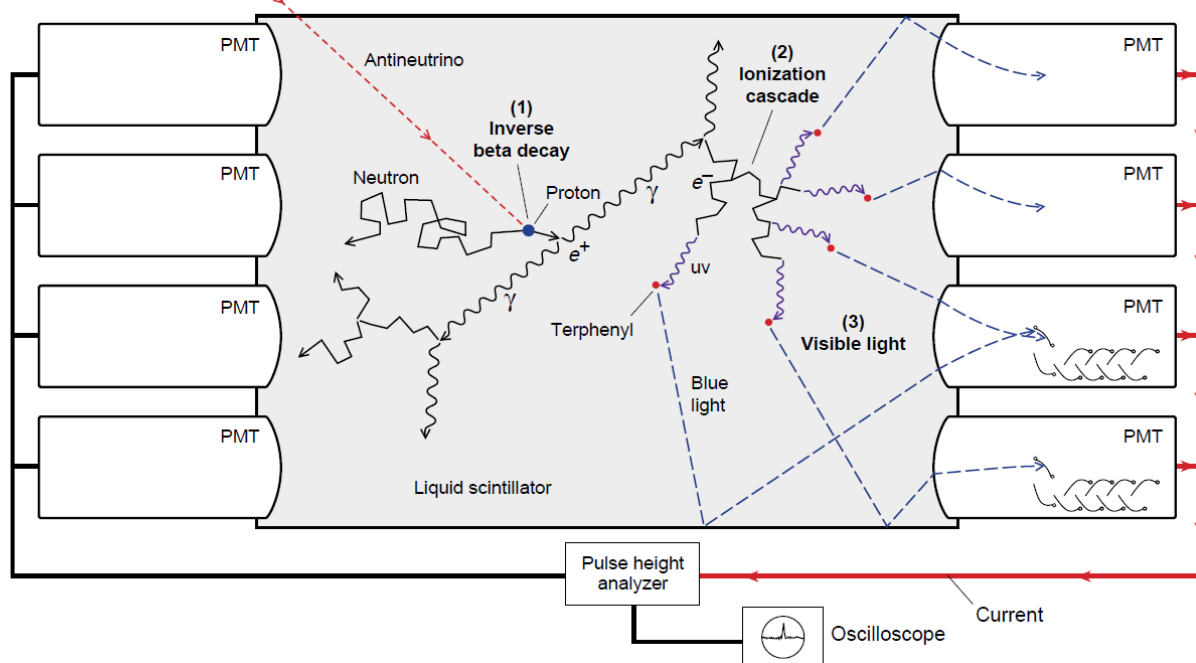
Frederick [Reines](#)



Clyde [Cowan](#)

Hanford Experiment

Inverser β -Zerfall: $\bar{\nu} + p^+ \longrightarrow e^+ + n$



- Flüssigszintillator als target und Detektionsmedium
- Positronendetektion aus Paarvernichtung

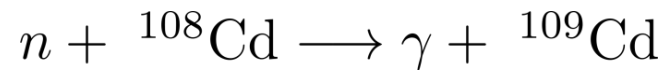
$$e^+ + e^- \longrightarrow \gamma + \gamma$$

- Pulshöhenanalysator
- Bed.: prompt-coincidence (0.2 μ s)

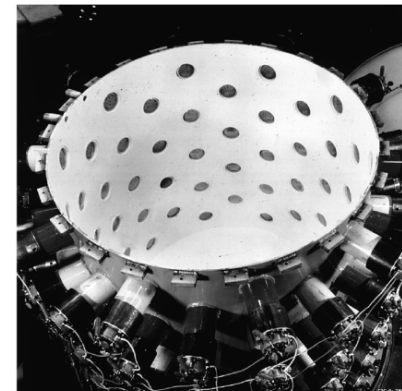
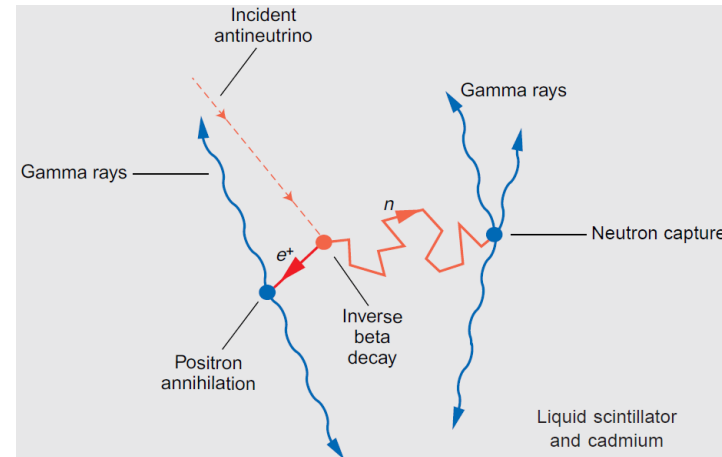
[permalink](#)

Hanford Experiment

- Cadmium zur Neutronendetektion



- delayed-coincidence nach 1-9 μs
- 2 unabhängige Schaltkreise mit time-delay-analyzer
- Detektoreigenschaften
 - 300 l Volumen
 - 71 cm Durchmesser
 - 76 cm Höhe
 - 90 Photomultiplier



phys.ufl.edu/

Hanford-Detektor

Hanford Experiment

- Erwartete Signalrate: $0.1\text{-}0.3 \text{ min}^{-1}$; gemessen: $(0.41 \pm 0.20) \text{ min}^{-1}$

TABLE I. Listing of data.

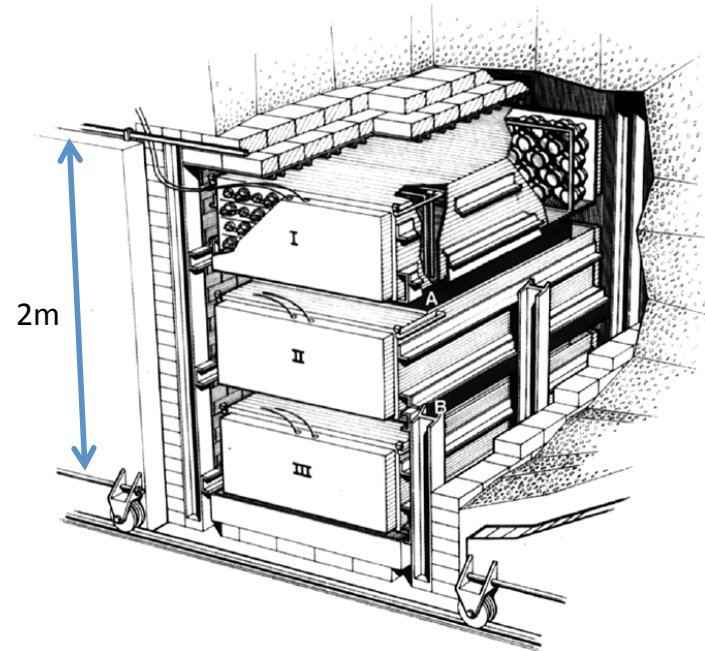
Run	Pile status	Length of run (seconds)	Net delayed pair rate counts/min	Accidental background rate counts/min
1	up	4000	2.56	0.84
2	up	2000	2.46	3.54
3	up	4000	2.58	3.11
4	down	3000	2.20	0.45
5	down	2000	2.02	0.15
6	down	1000	2.19	0.13

[„Detection of the Free Neutrino“, F. Reines and C. L. Cowan Jr., PhysRev.92.830, 1953]

- Schlechtes Signalrauschverhältnis (1:20), Hintergrund durch cosmoics

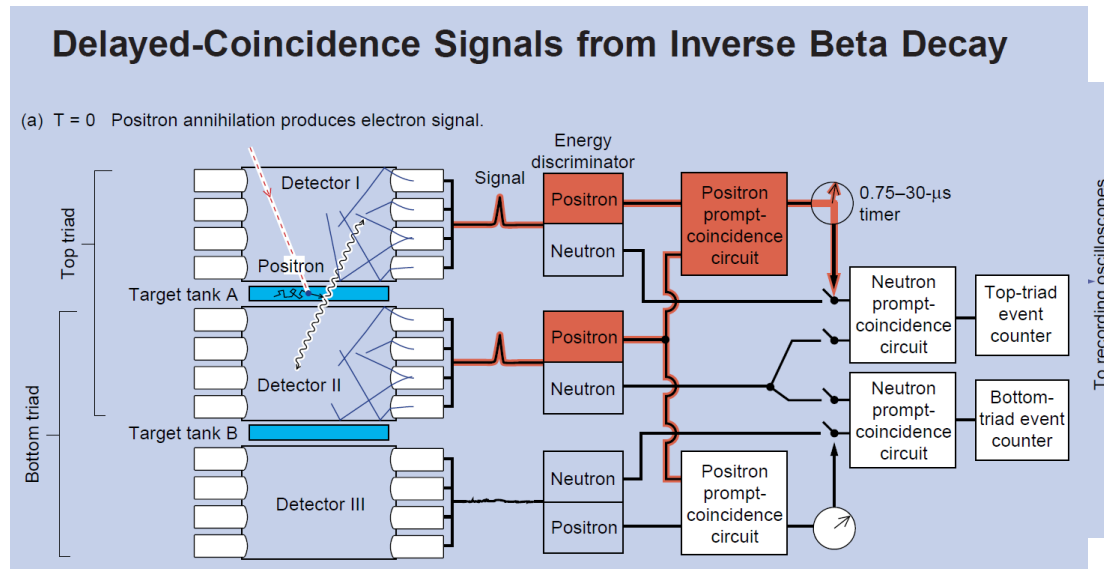
Savannah River Experiment

- Standortwechsel 1955: Tritium-Reaktor (Savannah River Plant)
- bessere Abschirmungsmöglichkeiten
- target-Behälter A,B
 - 200 l Wasser mit gelöstem CdCl_2
- Szintillationsdetektoren I,II,III
 - 1400 l Flüssigszintillator
 - 110 Photomultiplier
- Unterscheidung von Störsignalen



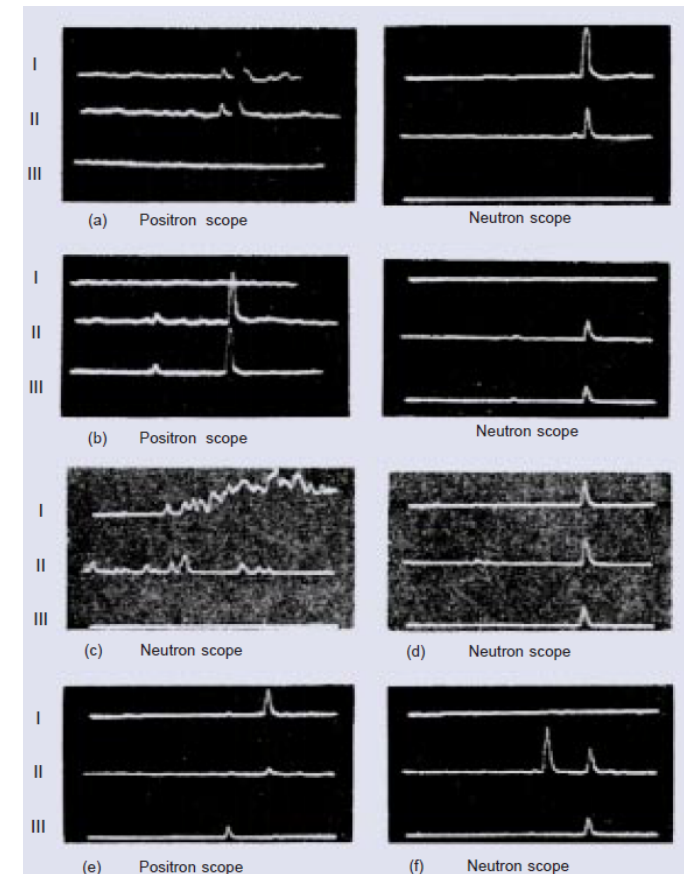
[„Detection of the Free Antineutrino“, F. Reines et al., PhysRev.117.159, 1960]

Savannah River Experiment



[permalink](#)

- Bedingung für Akzeptanz eines Signals
 - Zeitraum
 - Energiebereich
- räumliche Zuordnung des Signalursprungs



Ergebnisse

- [„Detection of the Free Neutrino: a Confirmation“, F. Reines et al., Science - Vol. 124, 1956]: 5% Übereinstimmung mit $\sigma = 6.3 \cdot 10^{-44} \text{ cm}^2$
- [„Free Antineutrino Absorption Cross Section. I.“, F. Reines and C. L. Cowan Jr., PhysRev.113.273, 1959]: $\sigma = (11.0 \pm 2.6) \cdot 10^{-44} \text{ cm}^2$
- Paritätsverletzung bei schwacher WW; [„Detection of the Free Antineutrino“, F. Reines et al., PhysRev.117.159, 1960]: $\sigma = (10.0 \pm 1.7) \cdot 10^{-44} \text{ cm}^2$
- Publikation 1960: „Detection of the Free Antineutrino“

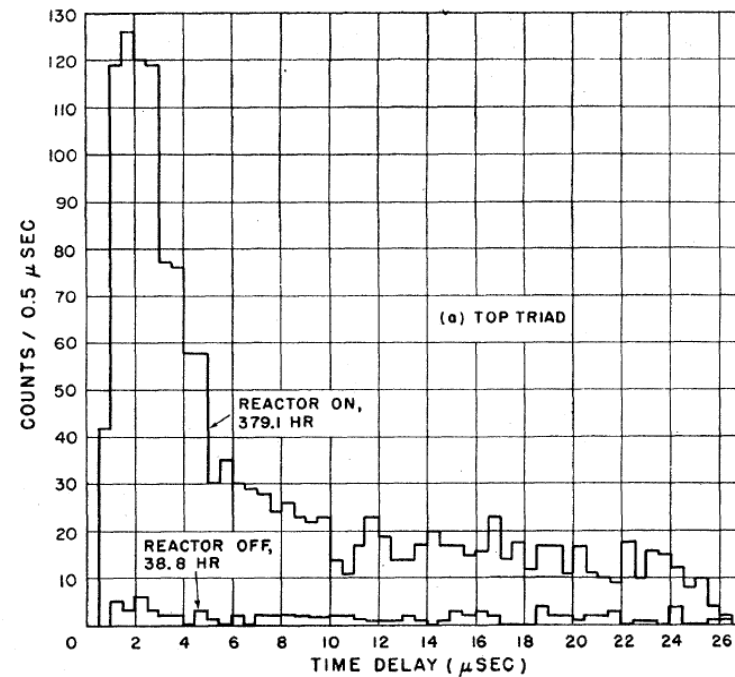
Ergebnisse

- Prüfung des Signals auf Reaktorabhängigkeit: reactor on vs. reactor off

TABLE I. Summary of first series.^a

Triad	$\bar{\nu}$ flux ^b factor	Run length (hr)	Total counts	Calculated accidental counts	Net rate (hr ⁻¹)
(a) Top	1.03	192.7	283	114	0.88 ± 0.10
Bottom	1.04	171.8	224	95	0.75 ± 0.10
(b) Top	0	67.3	55	31.8	0.34 ± 0.14
Bottom	0	69.7	44	39.7	0.06 ± 0.13
(c) Top	0	63.2	48	27.6	0.32 ± 0.14
Bottom	0	63.2	38	35.3	0.04 ± 0.14
(d) Top	1.07	264.5	320	124.9	0.74 ± 0.08
Bottom	1.07	264.5	302	157.2	0.55 ± 0.08

[„Detection of the Free Antineutrino“, F. Reines et al., PhysRev.117.159, 1960]



Top triad, series 2 and 3b

Ergebnisse

Ansatz für den Wirkungsquerschnitt:

$$\sigma = \frac{R}{3600 F N \epsilon_n \epsilon_\beta} \text{ cm}^2$$

$R = (1.5 \pm 0.1) \text{ hr}^{-1}$ durchschnittliche Signalrate pro Triade

$N = 1.1 \cdot 10^{28}$ Anzahl der Wasserstoffkernen in jedem target-Behälter

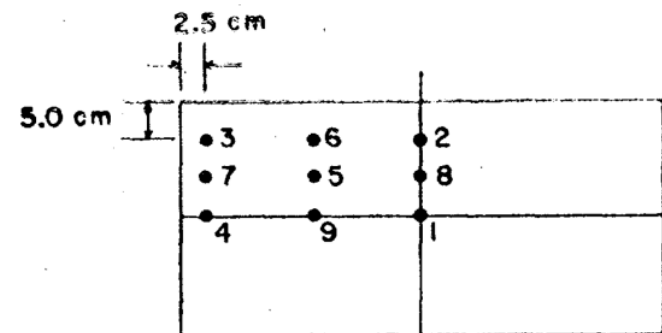
$\epsilon_n = 0.17 \pm 0.06, \epsilon_\beta = 0.15 \pm 0.02$ Detektionseffizienzen für Neutron bzw. Positron

$F = 1.2 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ durchschnittlicher $\bar{\nu}$ -Fluss

Ergebnisse

- Neutronendetektionseffizienz
 - Verwendung einer Pu-Be-Probe
 - Mittelung über verschiedene Positionen
 - Vergleich mit a priori Schätzung
- Positronendetektionseffizienz
 - Verwendung von Cu-64 gelöst im Wassertarget
- experimenteller Wert: $\sigma = (12_{-4}^{+7}) \cdot 10^{-44} \text{ cm}^2$
- Übereinstimmung mit theoretischem Wert (1959): $\sigma = (10.0 \pm 1.7) \cdot 10^{-44} \text{ cm}^2$

Positionierung der Pu-Be-Quelle auf target-Tank

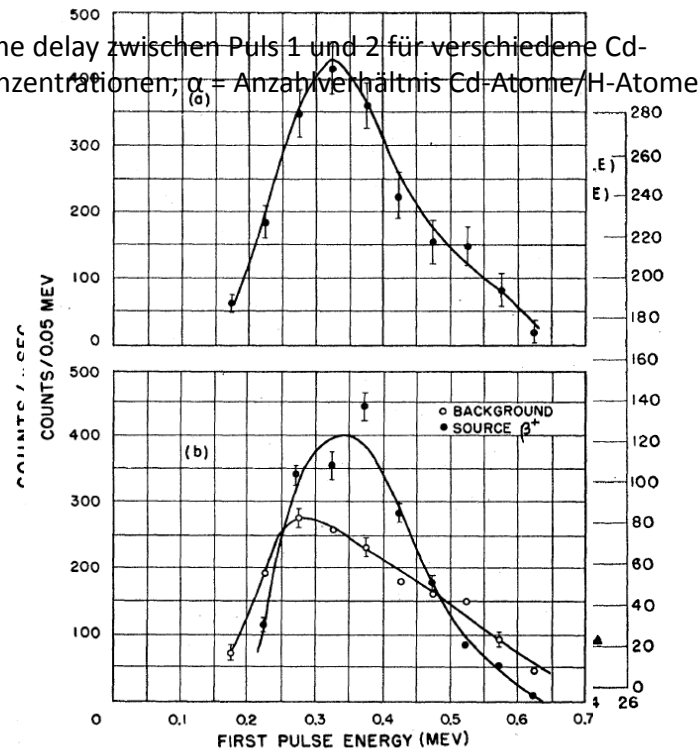


[„Detection of the Free Antineutrino“, F. Reines et al., PhysRev.117.159, 1960]

Ergebnisse

Pulshöhenspektrum des ersten Pulses (oben);
Spektrum von Cu-64 mit Hintergrund (unten)

Time delay zwischen Puls 1 und 2 für verschiedene Cd-Konzentrationen; α = Anzahlverhältnis Cd-Atome/H-Atome



[„Detection of the Free Antineutrino“, F. Reines et al.,
PhysRev.117.159, 1960]

- Erstes Signal aufgrund von Positronannihilation
 - Variation der Dicke einer Bleiabschirmung
 - Vergleich mit Cu-64 Positronquelle
- Zweites Signal aufgrund von Neutroneneinfang
 - Erhöhung der Cd-Konzentration im target
- Proportionalität zur target-Zahl
 - 1:1 H₂O-D₂O-Gemisch als target
- delayed coincidence durch Reaktorantineutrinos
 - Verstärkung der Abschirmung

Ausblick

- Grundlage der Neutrinophysik
 - Etablierung im Standardmodell
- 1963 Entdeckung des Myon-Neutrinos
 - Hinweis auf 2. Generation von Elementarteilchen
- Nobelpreis erst 1995 u.a. an Reines
 - Ursache: Änderungen des Wirkungsquerschnitts
- [„Study of reactor antineutrino interaction with proton at BUGEY nuclear power plant“, Y. Declais et al., Physics Letters B 338, 1994]: $\sigma = 9.36 \cdot 10^{-44} \text{cm}^2 \pm 1.4\%$

Quellen

- „Study of reactor antineutrino interaction with proton at BUGEY nuclear power plant“, Y. Declais et al., Physics Letters B 338, 1994
- „Free Antineutrino Absorption Cross Section. I.“, F. Reines and C. L. Cowan Jr., PhysRev.113.273, 1959
- <http://permalink.lanl.gov/object/tr?what=info:lanl-repo/lareport/LA-UR-97-2534-02>
- <http://www.nature.com/physics/looking-back/ellis/index.html>
- <http://www.phys.spbu.ru/content/File/Library/studentlectures/schlippe/pp05-10.pdf>
- <http://www.ps.uci.edu/~superk/neutrino.html>
- http://www.phys.ufl.edu/~korytov/phz6355/note_A17_neutrino.pdf
- http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1995/press.html
- http://www.phys.ufl.edu/~avery/course/4390/reference/neutrino_discovery_reines_cowan.pdf
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Cowan-Reines-Neutrinoexperiment>
- <http://hydrogen.physik.uni-wuppertal.de/hyperphysics/hyperphysics/hbase/particles/cowan.html>
- „Free Antineutrino Absorption Cross Section“, F. Reines and C. L. Cowan Jr., PhysRev.113.273 (1959)
- „Detection of the Free Antineutrino“, F. Reines et al., PhysRev.117.159 (1960)