

10 Schwache Wechselwirkung und Elektroschwache Vereinigung

10.1 Grundlagen/Überblick

- Schwache Wechselwirkung ist eine der vier fundamentalen Wechselwirkungen
- Schwache Wechselwirkung koppelt an alle Fermionen (Quarks & Leptonen)
- Eichbosonen der schwachen Wechselwirkung sind massiv $\sim O(100) \text{ GeV}$
- Reichweite beschränkt auf $R \sim 1/M \sim 2 \times 10^{-18} \text{ m}$
- Schwache Wechselwirkung bildet keine gebundenen Zustände (beobachten nur Zerfälle)

Eigenschaften der schwachen Wechselwirkung

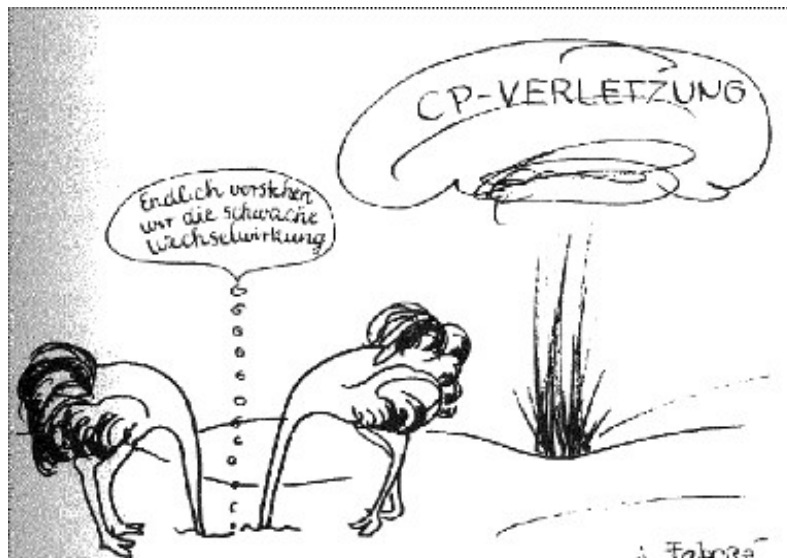
Schwache Wechselwirkung erhält:

Energie, (Dreh)Impuls, Ladung, Barionzahl, Leptonzahl, CPT

Schwache Wechselwirkung verletzt:

Parität (maximal): nur linkshändige Teilchen, rechtshändige Anti-Teilchen

CP: Niveau $\sim 10^{-3}$



J. Fabergé, CERN Courier, 6, Nr. 10, 193 (Oktober 1966). (Mit freundlicher Genehmigung von Frau Fabergé.)

Einteilung der Reaktionen

- Rein leptonische Reaktionen z.B.

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

- Semileptonische Reaktionen z.B.

$$d \rightarrow u e^- \bar{\nu}_e \quad (n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e)$$

$$d\bar{u} \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \quad (\pi^- \rightarrow \mu^- \nu_\mu)$$

$$\bar{s}u \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \quad (K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu)$$

$$s \rightarrow u e^- \bar{\nu}_e \quad (\Lambda \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e)$$

$$c \rightarrow s e^+ \nu_e \quad (D^+ \rightarrow \bar{K}^0 e^+ \nu_e)$$

- Nicht-leptonische Reaktionen: in Konkurrenz mit starker Wechselwirkung (nur Reaktionen mit $|\Delta S|=|\Delta Ch|=1$)

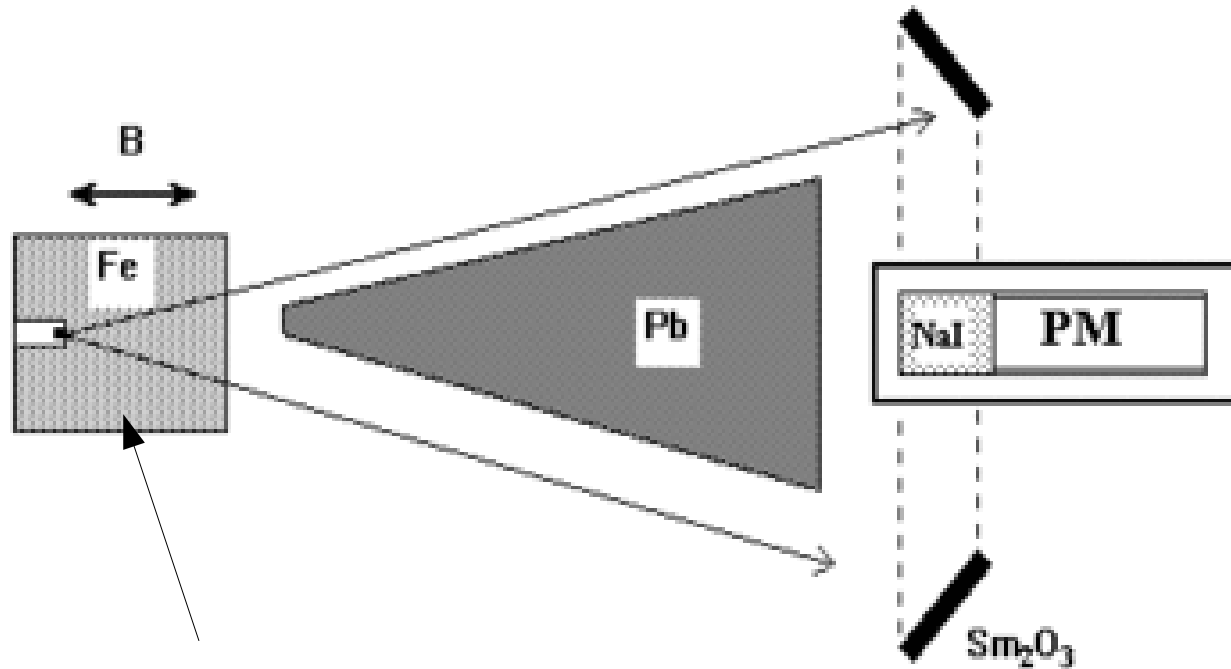
Experimentelle Grundlagen: Paritätsverletzung

- Paritätsverletzung:
 - Nachweis in β -Zerfällen von ^{60}Co (Experiment von Wu, 1956 - Nobelpreis für Yang&Lee 1957)
 - Zerfall von Pionen und Myonen (Garwin et al. 1957):
Polarisation der Myon-Spins aus Pionzerfall
 - Zerfall von polarisierten Hyperonen $\Lambda \rightarrow p\pi^-$ (ohne Neutrino!)

Helizität des Neutrinos

- Experiment von Goldhaber, Grodzins & Sunyar (1958)
- Europium ($J=0$) + $e^- \rightarrow$ Samarium* ($J=1$) + ν_e
- Samarium* zerfällt in 10^{-13} s: Zu schnell, um die Bewegungsrichtung zu erhalten
- Emittiertes Photon (MeV) in Richtung des Samarium-Spins erhält die Helizität des Neutrinos!
- Resonante Absorption der vorwärts emittierten Photonen
- Aus Messung der Polarisation (Helizität) des Photons \rightarrow Helizität des Neutrinos!

Experimenteller Aufbau: Goldhaber-Experiment (1958)

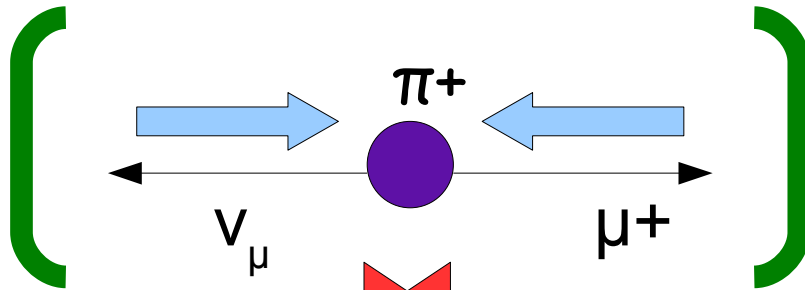


Magnetisiertes Eisen: Absorption ist abhängig von der Polarisationsrichtung des Photons

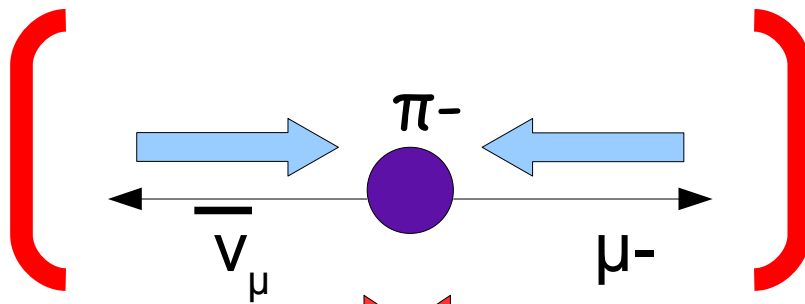
 Neutrinos: negative Helizität
Antineutrinos: positive Helizität

Experimentelle Grundlagen C-Verletzung

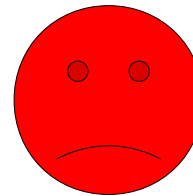
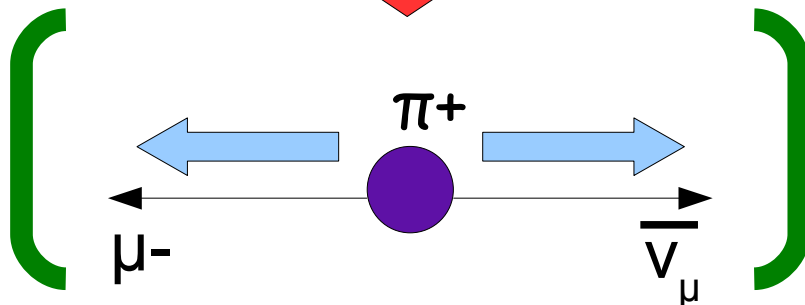
- Zerfall von Pionen $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$



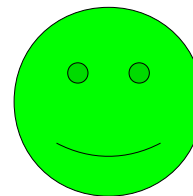
C



P



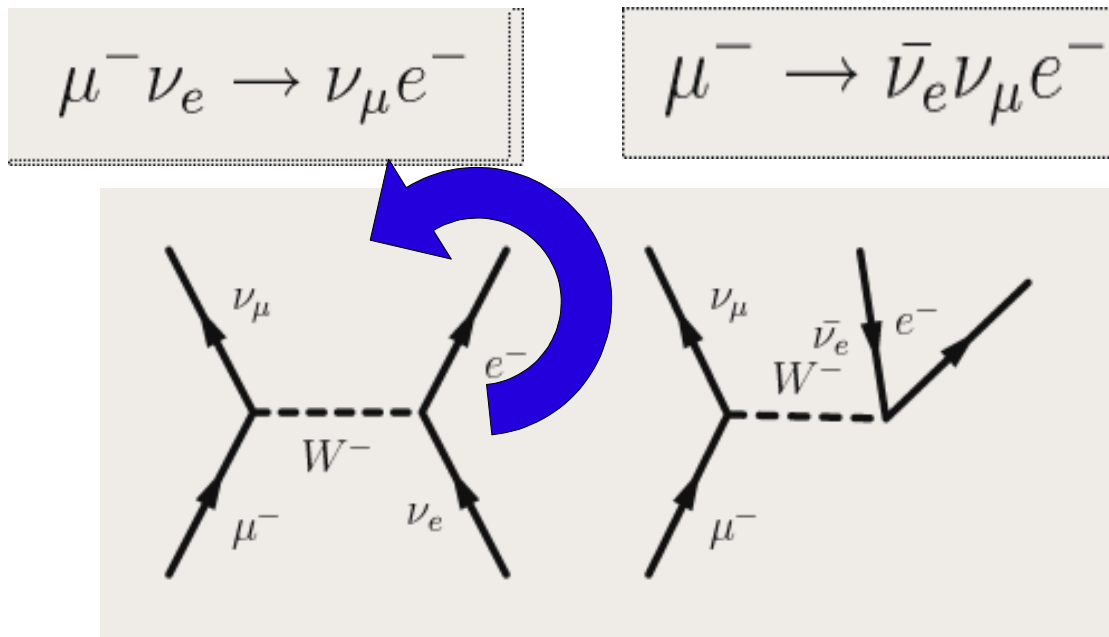
wegen „verkehrter“
Helizität des
Antineutrinos



10.2 Geladene Ströme (Tafel)

Kopplungskonstante

- Kopplungskonstante aus Myon-Lebensdauer (rein leptonischer Prozess)
- Berechnung mit Crossing-Symmetrie aus Prozess



- Zerfallsrate aus dem $|\text{Matrixelement}|^2$ ergibt:

$$\tau_\mu^{-1} = \frac{G^2 (m_\mu c^2)^5}{192 \cdot \hbar \pi^3}$$

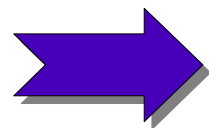
Kopplungskonstante der schwachen Wechselwirkung

- **Messgrößen:**

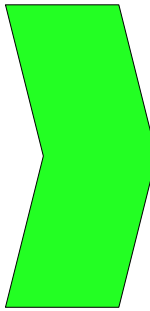
- $\tau_\mu = 2,19703(4) \mu\text{s}$, $m_\mu = 105,658369(9) \text{ MeV}$

- **Kopplungskonstante unter Berücksichtigung der endlichen m_e , Strahlungskorrekturen:**

$$\tau_\mu^{-1} = \frac{G^2 (m_\mu c^2)^5}{192 \cdot \hbar \pi^3} \cdot \left(1 - 8 \left(\frac{m_e}{m_\mu} \right)^2 \right) \left(1 + \frac{\alpha}{2\pi} \left(\frac{25}{4} - \pi^2 \right) \right)$$


$$\frac{G}{(\hbar c)^3} = 1,16637(1) \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$$

Vergleich schwache & elektromagnetische Wechselwirkung

- Mit $g = \sqrt{4\pi\alpha_w}$
 $g = M_W \sqrt{\frac{8G}{\sqrt{2}}} = 0,653$  $\alpha_w = \frac{1}{29,5}$
- Zum Vergleich elektrom. WW: $\alpha_{em} = \frac{1}{137}$

Die Kopplung der schwachen Wechselwirkung ist nicht schwächer als die Kopplung elektromagnetischen WW: Unterdrückt durch massives Austauschteilchen

Anmerkung zum leptonischen Zerfall

- Die Myon-Zerfallsbreite (bzw. Lebensdauer) ist ein Spezialfall der Reaktion:

$$\ell \longrightarrow \ell' \nu \bar{\nu} \quad \longrightarrow \quad \tau_\ell^{-1} = \frac{G^2 (m_\ell c^2)^5}{192 \cdot \hbar \pi^3}$$

- Für τ -Zerfälle ist jedoch

$$\frac{\Gamma(\tau^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau)}{\Gamma_{\text{total}}} = \frac{\Gamma(\tau^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau)}{\Gamma_{\text{total}}} \simeq 17 \%$$

- Für semi-leptonische Zerfälle von Quarks

$$\tau_{q \rightarrow \ell \nu X}^{-1} = \frac{G^2 (m_q c^2)^5}{192 \cdot \hbar \pi^3}$$

Schwache Wechselwirkung der Quarks (Tafel)

V_{CKM} : Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM)-Matrix

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.973 & 0.226 & 0.004 \\ 0.230 & 0.957 & 0.04 \\ 0.007 & 0.035 & 0.999 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

Aus der Kombination *aller* Messungen:

$V_{\text{CKM}} =$

$$\begin{pmatrix} 0.97383^{+0.00024}_{-0.00023} & 0.2272^{+0.0010}_{-0.0010} & (3.96^{+0.09}_{-0.09}) \times 10^{-3} \\ 0.2271^{+0.0010}_{-0.0010} & 0.97296^{+0.00024}_{-0.00024} & (42.21^{+0.10}_{-0.80}) \times 10^{-3} \\ (8.14^{+0.32}_{-0.64}) \times 10^{-3} & (41.61^{+0.12}_{-0.78}) \times 10^{-3} & 0.999100^{+0.000034}_{-0.000004} \end{pmatrix},$$

Anwendung: Zerfälle des τ -Leptons

- $M_\tau = 1777 \text{ MeV}/c^2 \rightarrow$ kann in u, d, s zerfallen

- Leptonischer Zerfall in $l=e, \mu$ $\Gamma_{\tau \rightarrow l\nu_l\nu_\tau} = \frac{G(m_\tau c^2)^5}{192 \pi^3}$

- Semi-leptonische Zerfälle in u, d, s , Annahmen

- Gleiche Kopplung für Quarks und Leptonen
- Aus jedem Quark bildet sich Hadron

$$\frac{\Gamma(\tau^- \rightarrow \nu_\tau d\bar{u})}{\Gamma(\tau^- \rightarrow l\nu_l\nu_\tau)} = \frac{\Gamma(\tau^- \rightarrow \nu_\tau + \text{nichtseltsame Hadronen})}{\Gamma(\tau^- \rightarrow l\nu_l\nu_\tau)} = 3 \cdot \cos^2 \theta_C$$

$$\frac{\Gamma(\tau^- \rightarrow \nu_\tau s\bar{u})}{\Gamma(\tau^- \rightarrow l\nu_l\nu_\tau)} = \frac{\Gamma(\tau^- \rightarrow \nu_\tau + \text{seltsame Hadronen})}{\Gamma(\tau^- \rightarrow l\nu_l\nu_\tau)} = 3 \cdot \sin^2 \theta_C$$

3 Farben!

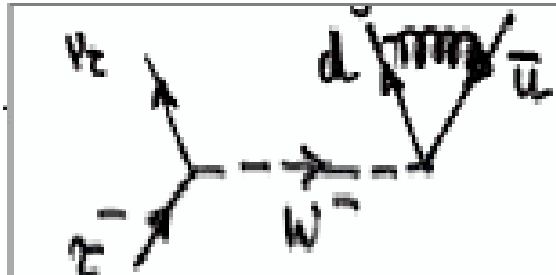


Summe: $\hbar\tau_\tau^{-1} = \Gamma_{\text{leptonisch}} + \Gamma_{\text{semileptonisch}} = 5 \frac{G(m_\tau c^2)^5}{192 \pi^3}$

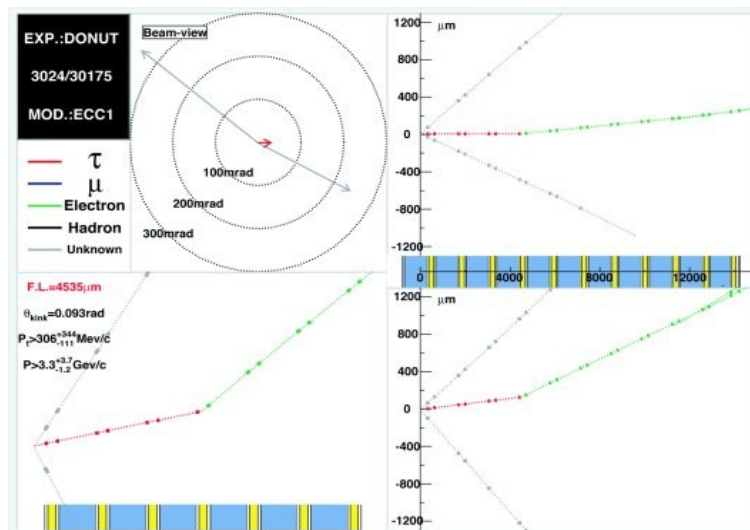
Vergleich mit Messungen

- Erwartete Lebensdauer: $\tau_{\text{theor}} = 3,2 \times 10^{-13} \text{ s}$
- Gemessene Lebensdauer: $\tau_{\text{exp}} = 2,90(1) \times 10^{-13} \text{ s}$

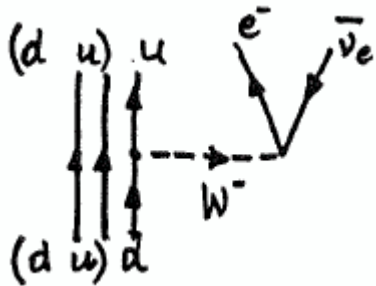
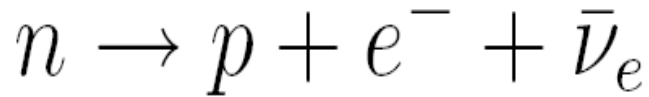
- Unterschied: QCD
- $c\tau = 87,11 \text{ } \mu\text{m}$



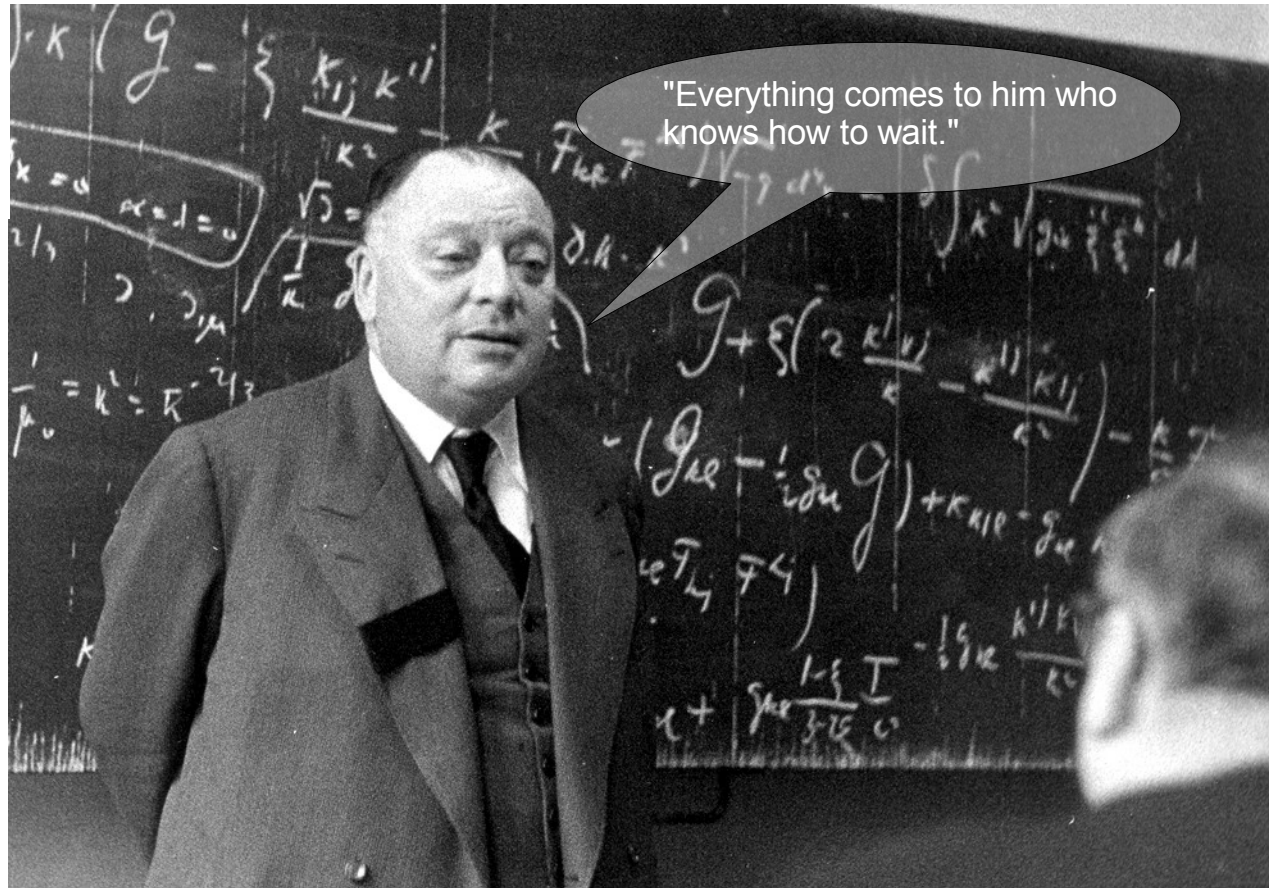
- Mit Spurendetektor auflösbar!
- Entdeckung des Tau-Neutrinos (2001, Fermilab am DONUT)



Neutron: β -Zerfall



- Beobachtet in Kernzerfällen
- Elektronspektrum kontinuierlich
- Pauli postuliert „Geisterteilchen“
- Nachweis 1956 (Nobelpreis 1955)

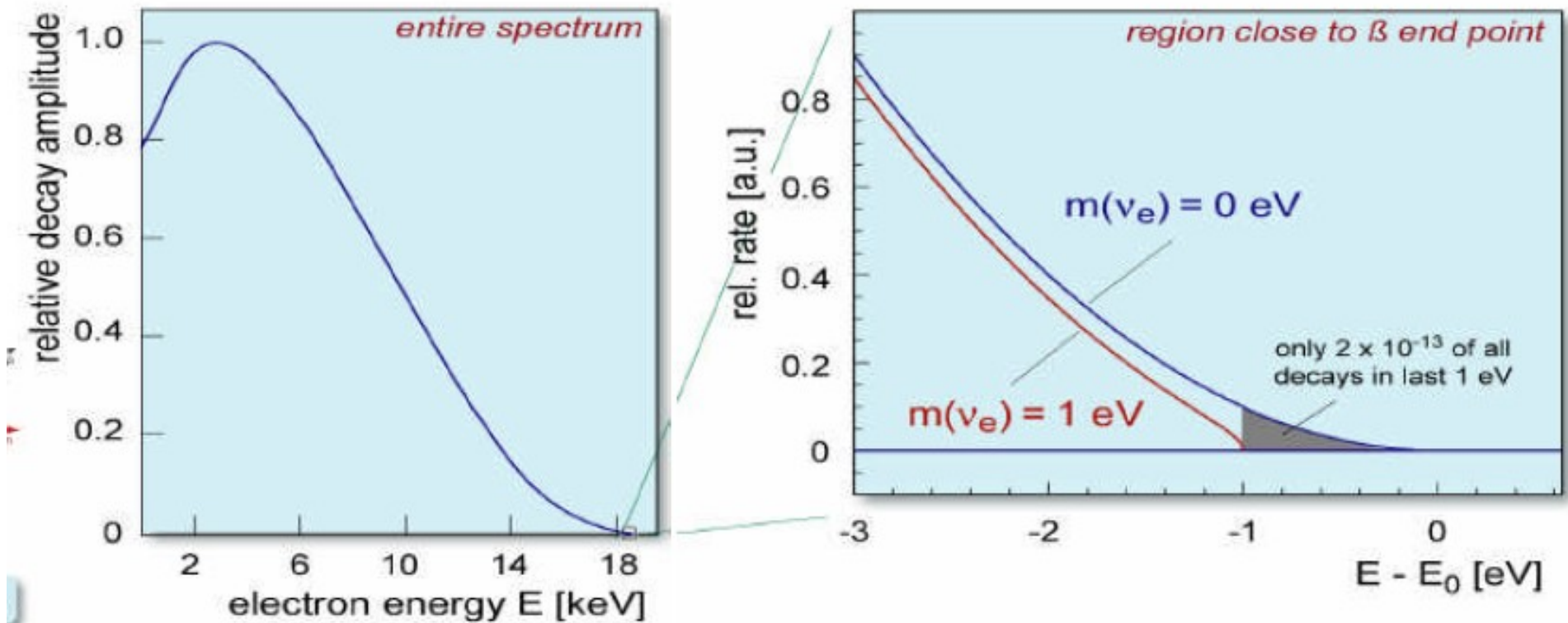


- Wolfgang Pauli (*1900, +1958), in HH mit P. Jordan (1955),
- 1923-1928 in HH (Habil.), Nobelpreis 1945

Neutrinomasse

- Elektronspektrum (Kap. 6): Modifiziert durch m_ν

$$\frac{dN}{dE} = K \times F(E, Z) \times p \times E_{\text{tot}} \times (E_0 - E) \times \sqrt{(E_0 - E)^2 - m_\nu^2} / m_e^2$$



Beste Limits: $m_\nu < 2.2 \text{ eV}/c^2$, neues Experiment in Vorbereitung
(x10 Sensitivität)

KATRIN* - Experiment

adiabatic guiding of β -particles along the magnetic field lines

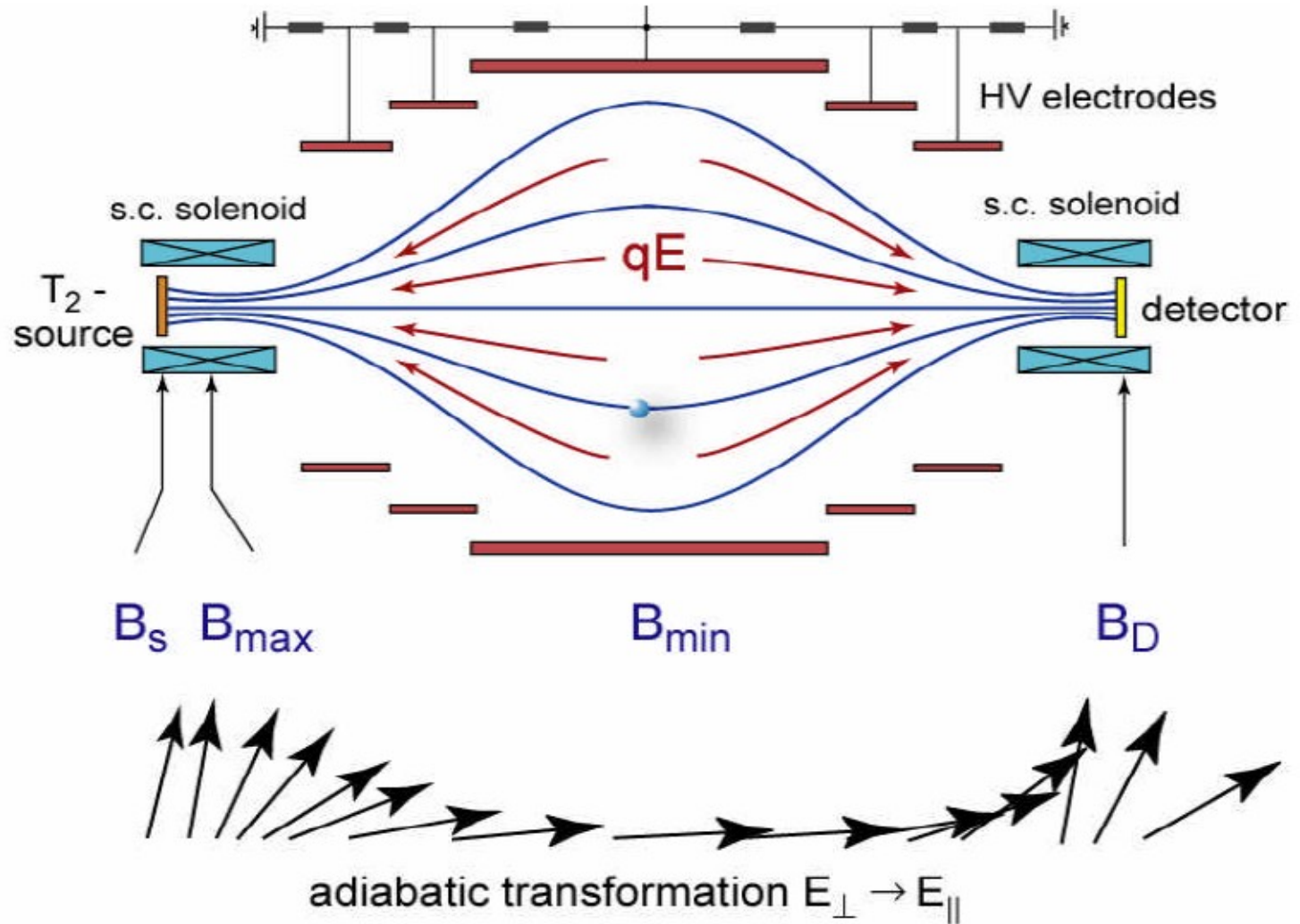
inhomogen. B-Feld:
stray field of 2 super-
conducting magnets

$$B_{\max} = 3 - 6 \text{ T}$$

$$B_{\min} < 1 \text{ mT}$$

very large solid angle !

$$\Delta\Omega \sim 2\pi$$



*Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment



Die verrückte Reise eines Vakuumentanks

