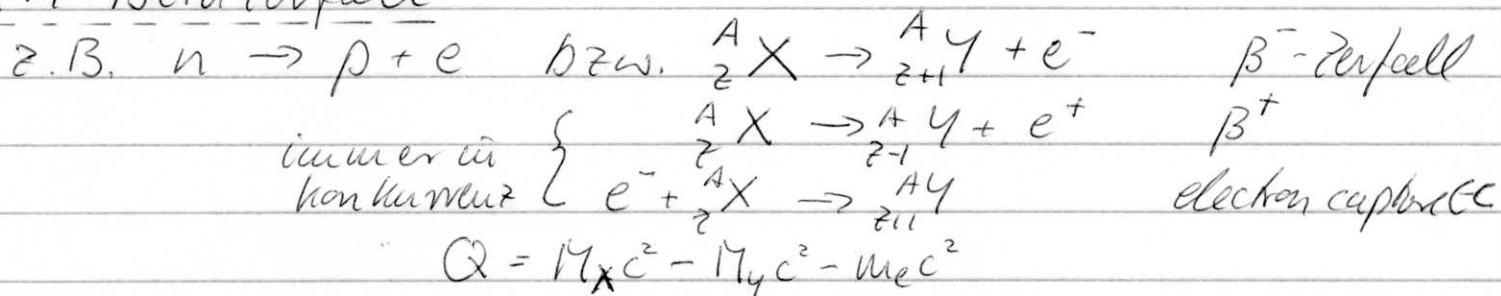


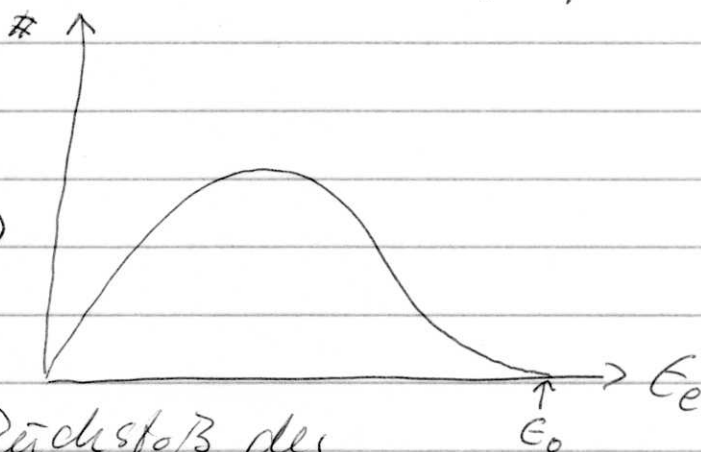
7. Schwache Wechselwirkung

7.1. Beta Zerfall



Bereits in 1920'iger Jahren beobachtet: im Gegensatz zu α -Spektrum mit diskreten Linien ist β -Spektrum kontinuierlich

→ führte Pauli dazu, im Endzustand 3 Teilchen zu postulieren; ein (praktisch?) masseloses neutrales Teilchen, Neutrino, nimmt Teil der freigesetzten Energie mit (Rückstoß des Kerns praktisch vernachlässigbar) $E_0 = Q - E_R \approx Q$



Wie können wir dann Form des Spektrums verstehen?
Erinnerung Fermi's Goldene Regel:

$$W = dP/dt = \frac{2\pi}{\hbar} |\langle \Psi_f | H_{\text{int}} | \Psi_i \rangle|^2 g(E)$$

3 Teilchenphasenraum unter Bedingung, daß im cm $\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \vec{p}_3 = 0$ d.h. nur 2 der Impulse können unabhängig variieren, der 3. ist fest

$$g_3 = \frac{V^3}{(2\pi\hbar)^6} \frac{d}{dE} \int d^3p_1 d^3p_2 = \frac{V^3}{(2\pi\hbar)^6} \frac{d}{dE_0} \int p_e^2 dp_e p_{\bar{\nu}}^2 dp_{\bar{\nu}} d\Omega_e d\Omega_{\bar{\nu}}$$

↑ fest! also: wie ändert sich g_3 mit Variation der max. Energie E_0

Berechnung des Elektronenspektrums:

für Impuls zwischen p_e und $p_e + dp_e$.

p_e und E_0 sind gegeben, d.h. $d/dE_0 \rightarrow$ kein Effekt auf Elektronenenergie

für masseloses Neutrino $E_0 = T_e + p_\nu c \approx dp_\nu/dE_0 = \frac{1}{c}$
 siehe $V \approx 1$

$$\rightarrow g_3(p_e) = \frac{d\Omega_e d\Omega_{\bar{\nu}}}{(2\pi\hbar)^6 c} p_e^2 p_{\bar{\nu}}^2 dp_e$$

$$= \frac{d\Omega_e d\Omega_{\bar{\nu}}}{(2\pi\hbar)^6 c} p_e^2 (E_0 - T_e)^2 dp_e \quad \text{und}$$

$$dW = \frac{1}{2\pi^3 c^3 \hbar^7} |\langle \Psi_f | H_W | \Psi_i \rangle|^2 p_e^2 (E_0 - T_e)^2 dp_e$$

über Mittelwert
des Matrixelement

hat Maximum; geht $\rightarrow 0$ für
 $p_e \rightarrow 0$ und $T_e \rightarrow E_0$

$$W = \frac{\ln^2}{t_{1/2}} = \frac{1}{2\pi^3 c^3 \hbar^7} |\langle \Psi_f | H_W | \Psi_i \rangle|^2 \int_0^{p_0} F(z, T_e) (E_0 - T_e)^2 p_e^2 dp_e$$

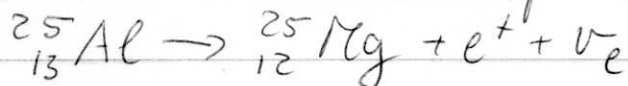
$\uparrow$ korrekturen für Coulombwechselwirkung zwischen Elektron und Kern AZ

$f m_e^5 c^7$ mit f tabelliert

$$f \cdot t_{1/2} = \frac{\text{konst.}}{|\langle \quad \rangle|^2}$$

sogenannte komparative Halbwertszeit, hängt nur vom Matrixelement ab; $\log ft$ charakterisiert seine Grösse

optimaler Fall: Zerfall zwischen "Spiegelkernen"



keine Änderung der Kernwellenfunktion

$\sim$ ideale Überlapp, Matrixelement maximal

$\sim$ Grösse von H_W

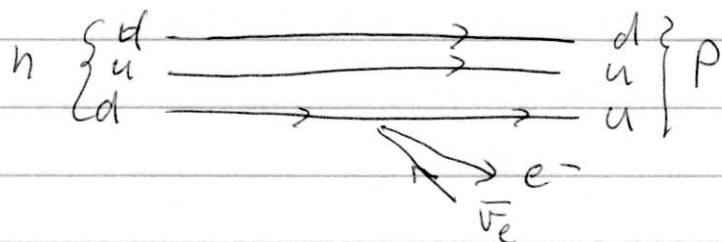
$$E_0 = 3.24 \text{ MeV} \quad t_{1/2} = 7.6 \text{ s} \quad \text{aus Tabelle} \quad \log ft = 3.5$$

$$|\langle \quad \rangle|^2 = \frac{2\pi^3 \hbar^7 c^7 \ln^2}{(m_e c^2)^5 c} \frac{1}{10^{3.5} \text{ s}} \quad \text{oder} \quad \langle H_W \rangle = 1.2 \cdot 10^{-4} \text{ MeV fm}^3$$

Bedeutung $\langle \rangle$? dividiert durch Volumen
eines Nukleons $\sim$ Kopplungskonst. der schwachen
WW $G_F = 8.9 \cdot 10^{-5} \text{ MeV fm}^3$

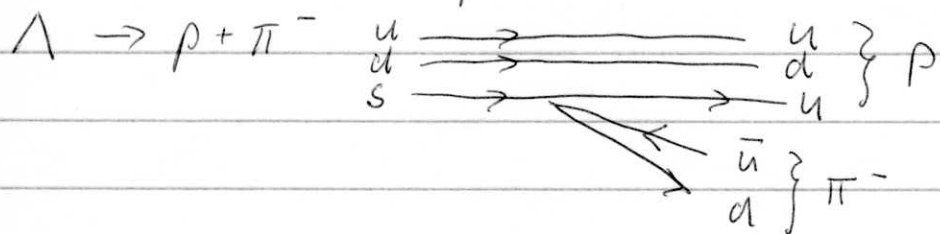
7.2. Schwache Ströme

starke und em WW erhalten Flavor von Quarks (und Leptonen), aber im β -Zerfall ändert sich Flavor



ebenso $\pi^- (d\bar{u}) \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$ (auslaufendes Teilchen, u , äquivalent zu einlaufendem Antiteilchen $\bar{u}$)

- schwache WW verändert u und d oder umgekehrt
- Leptonpaare gehören immer zur selben Generation
- bei Quarkpaaren um β das komplizierter sein, wir wissen daß $\Lambda (uds)$ schwach zerfällt



schwache Paare

$\bar{\nu}_e$ ν_μ $\bar{\nu}_\tau$
|
e μ τ

u c t
|
d s b

— beobachtete schwache Paare

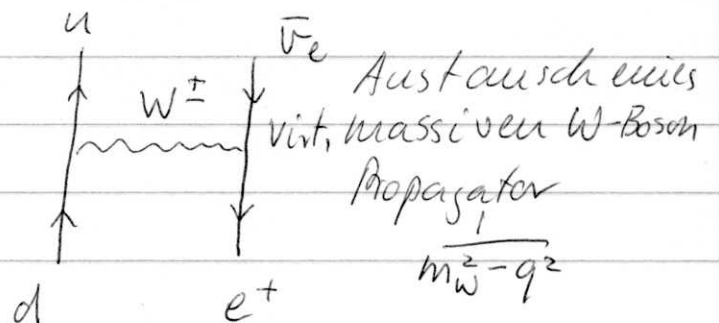
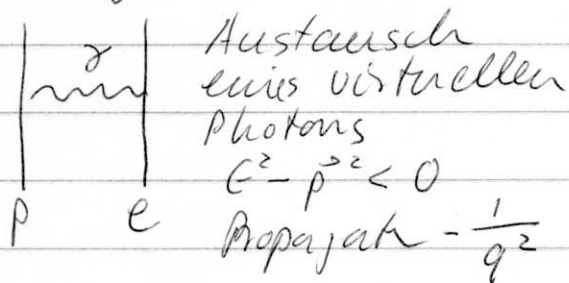
und entsprechend für Antiteilchen

es gibt semi leptonische $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$
hadronische $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$
oder rein leptonische $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$ } schwache Prozesse

in einem schwachen Prozess wechselwirken
jeweils 2 schwache Paare miteinander
12 schwache Paare $\leftrightarrow \frac{1}{2} 12(12+1) = 78$ verschie-
dene Prozesse der schwachen WW
alle exp. zugänglich beobachtet

Wie wechselwirken schwache Paare?

analog zur em WW Austausch eines Vektorbosons



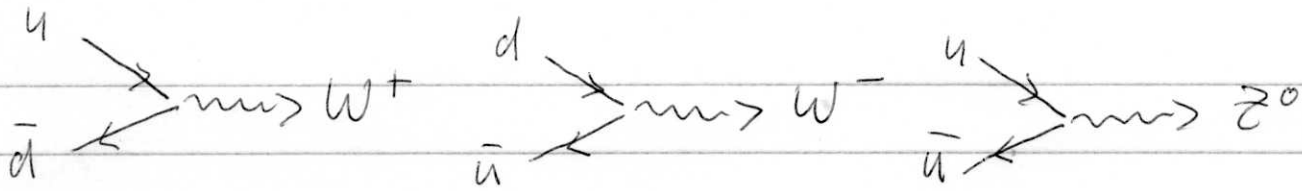
Anfang der 1960er Jahre formulieren Glashow,
Weinberg und Salam eine Feldtheorie, die
die em und die schwache WW in Einklang
die elektroschwache WW. Eine renormierbare
Eichtheorie, die Austauschbosonen werden
(z.T.) massiv durch einen spontanen Symmetrie-
brechungsmechanismus (Higgsmechanismus)
(Nobelpreis 1979)

Vorhersage: Existenz massiver Austauschbo-
sonen Z^0 und $W^\pm$

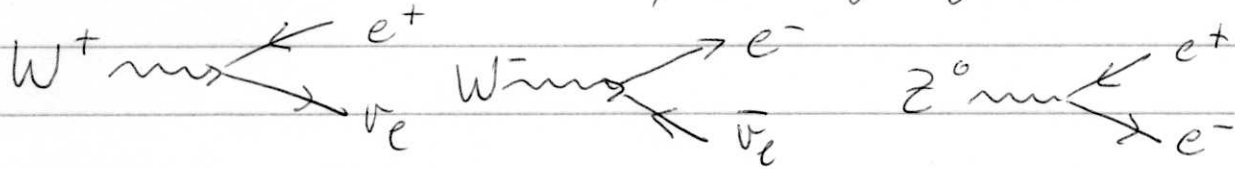
Existenz neutraler schwacher Ströme (s.u.)

1983 wurden $W^\pm$ und Z^0 am dafür gebauten
 $p\bar{p}$ Kollider von 2 Experimenten entdeckt
(UA1 und UA2)

7-5



Zustände sind sehr kurzlebig (10^{-25} s)
zerfallen hauptsächlich in $q\bar{q} \rightarrow 2$ jets, nicht
von viel häufigerer starker WW zu unterscheiden
(bzw nur sehr schwer), aber gelegentlich auch

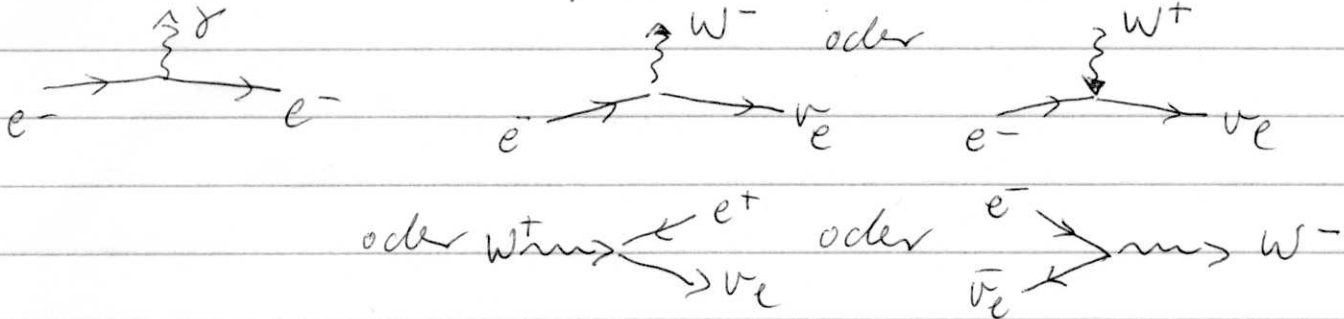


$\sigma(u\bar{d} \rightarrow W^+ \rightarrow e^+ \nu_e) \approx 5 \text{ nb}$, während bei $\sqrt{s} = 540 \text{ GeV}$
 $\sigma_{pp}^{\text{tot}} \approx 50 \text{ mb}$ Unterdrückung um 7 Grössenordn.!

$$M_W = 80.398 \text{ GeV}/c^2 \quad \Gamma = 2.141 \text{ GeV}$$

$$M_Z = 91.1876 \text{ GeV}/c^2 \quad \Gamma = 2.4952 \text{ GeV}$$

geht zurück zu schwachen Strömen: $\rightarrow$ t
ein Strom positiver schwacher Strom



Emission eines W^- oder Absorption eines W^+
entsprechend: konjugierter schwacher negativer
Strom $\leftrightarrow$ Emission eines W^+ o. Absorption W^-

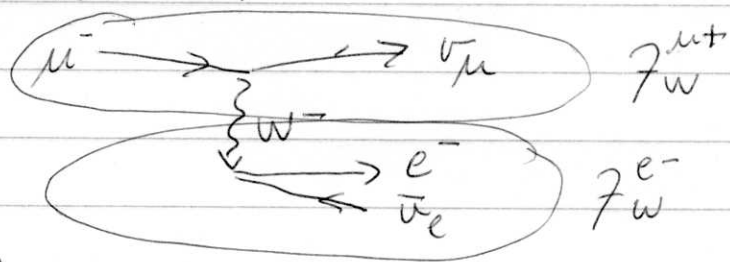
Schwache WW: schwacher Strom wechselwirkt
mit konjugiertem schwachen Strom durch

Austausch eines W -Bosons

z. B. Muon zerfall

$\mathcal{L}_W^{\mu+}$ positiver muonischer
schwacher Strom

$\mathcal{L}_W^{e-}$ negativer elektronischer
schwacher Strom



Struktur: $\mathcal{L}_W^{e+} \propto \tilde{e} \cdot \tilde{\nu}_e + \tilde{\mu} \cdot \tilde{\nu}_\mu + \tilde{e} \cdot \tilde{\nu}_e$

Vereinigungspunkt

Erzeugungsoperator

Leptonischer schwacher Strom zu verstehen als
Summe von 3 Skalarprodukten von Einheitsvek-
toren die in ihre Richtung den 3 geladenen
Leptonen bzw. Neutrinos entsprechen

3 geladene Leptonen zeigen in

3 orthogonale Richtungen und

3 neutrale Leptonen bilden dann

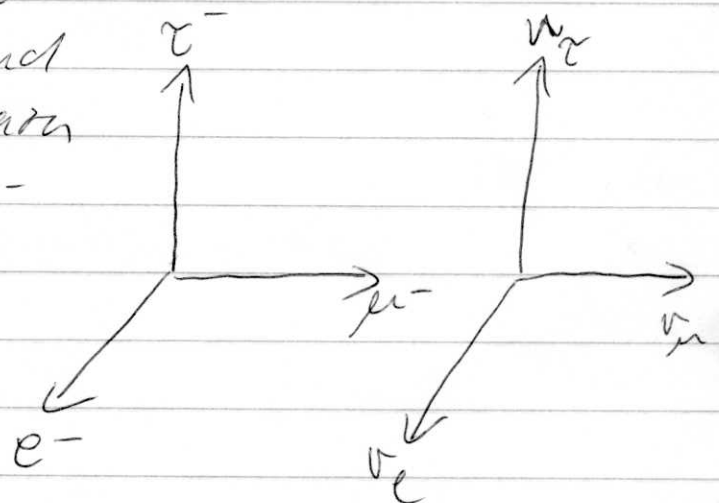
paralleles 3-d Koordinaten-

System $\sim$ Skalarprodukte

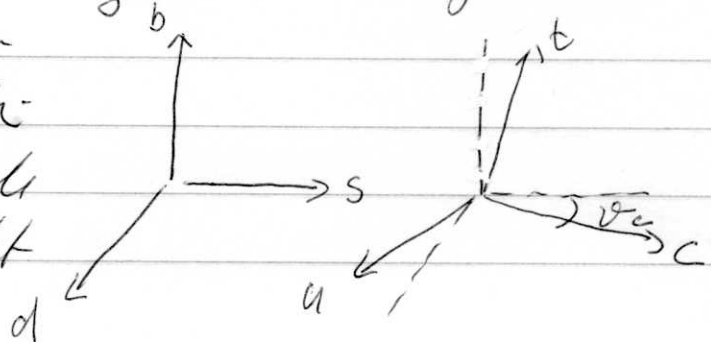
neutral + geladen verbinden

jeweils um Leptonen inner-

halb einer Generation



Für Quarks verbindet schwache Generation ver-
schiedene Generationen. Stellen wir uns wie da
vor, daß Quarks eine Ladung ein orthogonales
3-dim Koordinatensystem
aufspannen, aber System für
die beiden Ladungszustände
um einen Winkel $\frac{\pi}{2}$ verdreht



jeht 9 Beiträge zu Skalarprodukt

$$f_w^{ht} \propto \underbrace{\tilde{d} \cdot u}_{\cos \vartheta_c} + \underbrace{\tilde{s} \cdot u}_{\sin \vartheta_c} + \tilde{b} \cdot u + \dots$$

Bestimmung von Cabibbo-Winkel ϑ_c

Vergleiche Meron π -fall $d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$

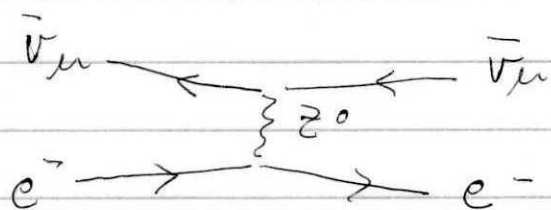
und Cabibbo π -fall $s \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$

Rate $\propto |< >|^2$. Phasenraum $\sim$ dividierte Pha-
senraum heraus $\sim$ komparative Halbwertszeit od
ft-Wert $\propto |< >|^2 = \frac{\cos^2 \vartheta_c}{\sin^2 \vartheta_c} \sim \vartheta_c = 13.4^\circ$

best. Wert aus allen bekannten Fällen $\vartheta_c = 13.7 \pm 0.1^\circ$
 $\cos \vartheta_c = 0.98$ $\sin \vartheta_c = 0.22$

allgemeiner: 3×3 Matrix Cabibbo-Kobayashi-Maskawa
Matrix, 9 Elemente, 4 freie Parameter, 3 Winkel
+ 1 imaginäre Phase (Nobelpreis Kobayashi-Maskawa 2008)

neutrale
Schwache Ströme: Voraussage der Feldtheorie der
elektroschwachen WW - bedeutet, el. Ladung
innerhalb eines schwachen Stroms ändert sich
am Vertex nicht



entdeckt 1973 in Blasen-
kammer Gargamelle
am CERN in Neutrino-
Elektron elastischer Streuung