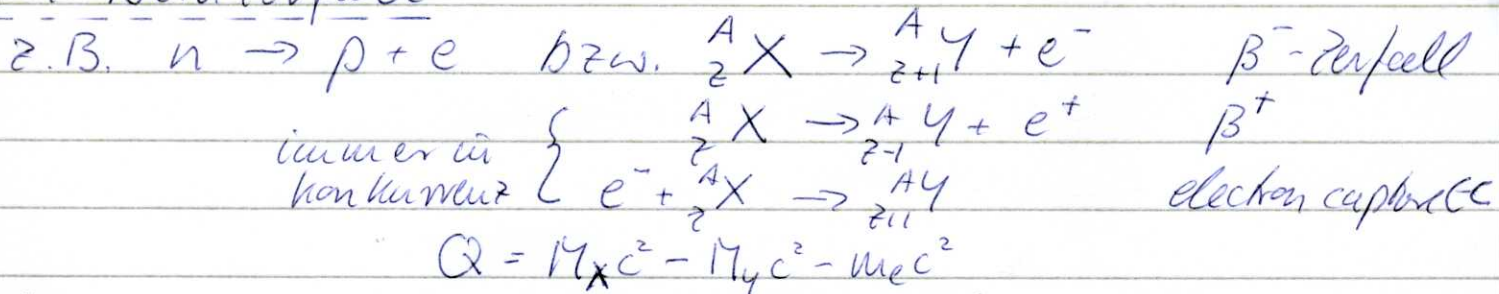


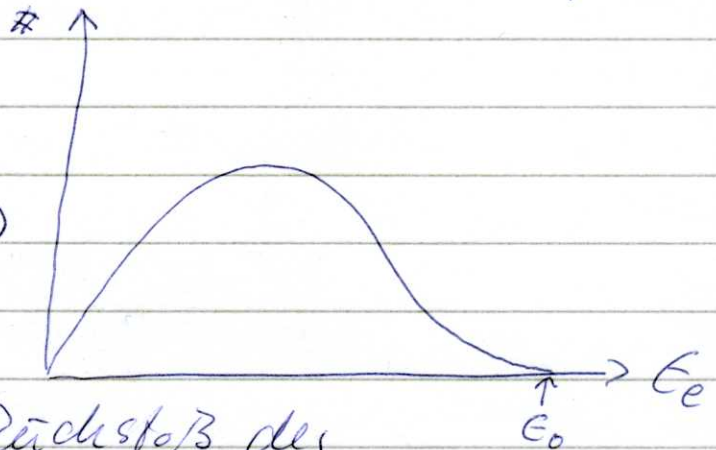
# 7. Schwache Wechselwirkung

## 7.1. Betazerfall



Bereits in 1920iger Jahren beobachtet: im Gegensatz zu  $\alpha$ -Spektrum mit diskreten Linien ist  $\beta$ -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: Rate

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

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

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

↑ 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  $E_0 = T_e + p_e c \approx dp_e/dE_0 = \frac{1}{c}$   
 siehe  $v = 1$

$$\rightarrow S_3(p_e) = \frac{dS_e dS_{\bar{\nu}}}{(2\pi\hbar)^6 c} p_e^2 p_{\bar{\nu}}^2 dp_e$$

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

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

über Winkel gemittelt  
 für Matrixelement

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

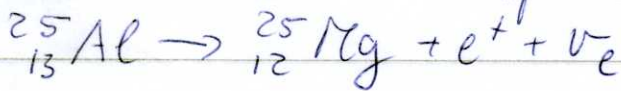
$$W = \frac{W}{t_{1/2}} = \frac{1}{2\pi^3 c^3 \hbar^7} |\langle \Psi_f | H_w | \Psi_i \rangle|^2 \int_0^{p_0} F(Z, T_e) (E_0 - T_e)^2 p_e^2 dp_e$$

$\uparrow$  konstant für Coulombwechselwirkung zwischen  
 Elektron und Kern  $A, Z$

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

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

sogenannte komparative Halbwertszeit, hängt nur vom Matrixelement ab;  $\log f t$  charakterisiert seine Grösse  
 optimaler Fall: Zerfall zwischen "Spiegelkernen"



keine Änderung der Kernwellenfunktion

$\sim$  ideale Überlapp, Matrixelement maximal

$\sim$  Grösse von  $H_w$

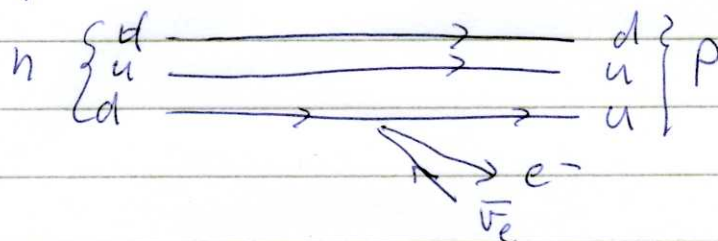
$$E_0 = 3.24 \text{ MeV} \quad t_{1/2} = 7.6 \text{ s} \quad \text{aus Tabelle} \quad \log f t = 3.5$$

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

Bedeutung  $\langle \sigma \rangle^2$  dividiere durch Volumen eines Nucleons  $\sim \Delta H_w = 10^{-4} \text{ MeV}$  Kopplungskonst. der schwachen WW  $G_F = 8.9 \cdot 10^{-5} \text{ MeV}^2 \text{ fm}^{-3}$ . Schwache Energie verteilt sich Vol. eines Nucleons  $10^{-4} \text{ MeV}$ , vgl. m. Masse 1000 MeV durch starke WW

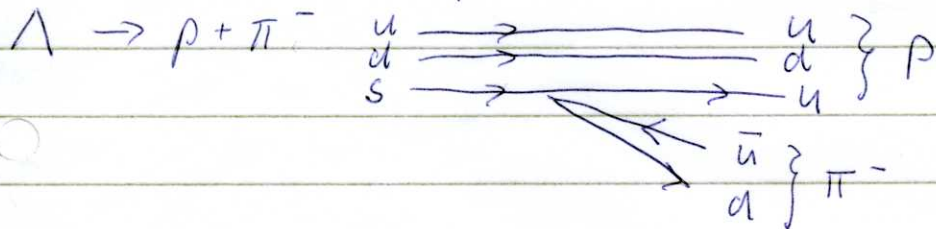
### 7.2. Schwache Ströme

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

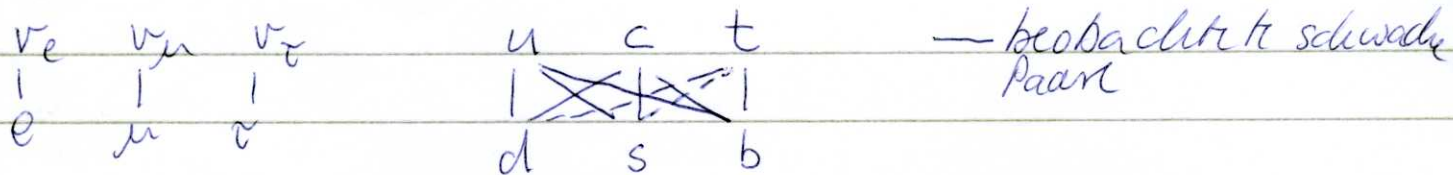


ebenso  $\pi^- (d\bar{u}) \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$  (auslaufendes Teilchen, u, äquivalent zu einlaufendem Antiteilchen  $\bar{u}$ )

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



### schwache Paare

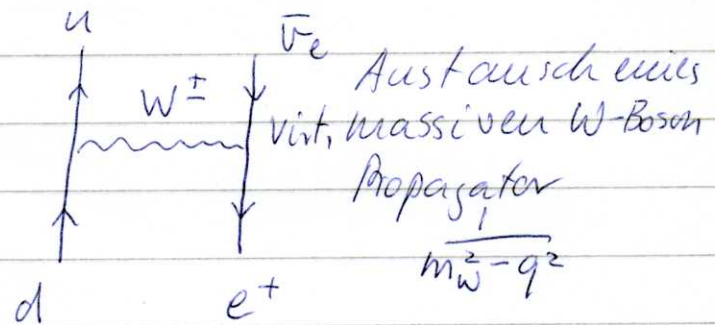
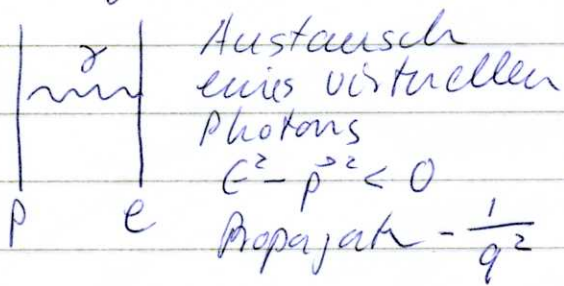


und entsprechend für Antiteilchen

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

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

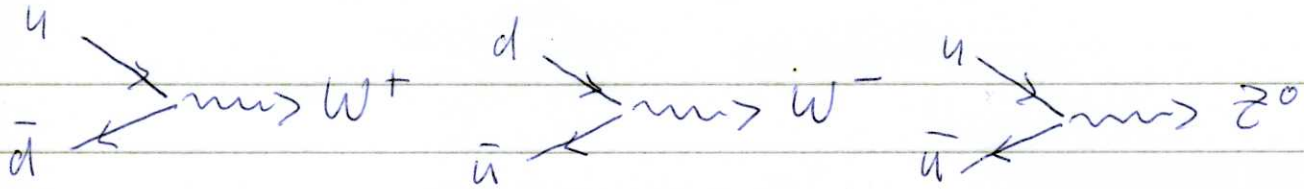


Anfang der 1960er Jahre formulieren Glashow,  
Weinberg und Salam eine Feldtheorie, die  
die em und die schwache WW in Korpuskel  
die elektroschwache WW. Eine renormierbare  
Eichtheorie; die Austauschbosonen werden  
(z.T.) massiv durch einen spontanen Symmetrie-  
bruchmechanismus (Higgsmechanismus)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

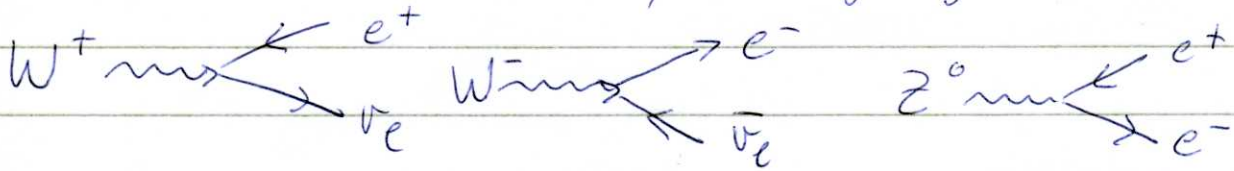
Voraussetzung: Existenz massiver Austauschbo-  
sonen  $Z^0$  und  $W^\pm$

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)



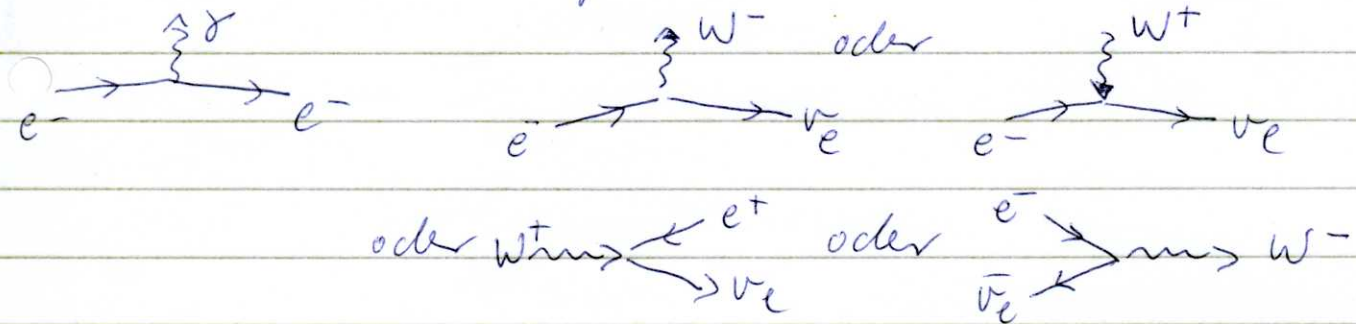
Zustände sind sehr kurzlebig ( $10^{-25}$  s)  
 zerfallen hauptsächlich in  $q\bar{q} \rightarrow 2$  Jets, nicht  
 von viel häufigerer starker WW zu unterscheiden  
 (bzw nur sehr schwer), aber gelegentlich auch



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

$M_W = 80.399^{(23)} \text{ GeV}/c^2 \quad \Gamma = 2.085^{(42)} \text{ GeV}$   
 $M_Z = 91.1876^{(21)} \text{ GeV}/c^2 \quad \Gamma = 2.4952^{(20)} \text{ GeV}$

jetzt zu rick 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  $W^-$

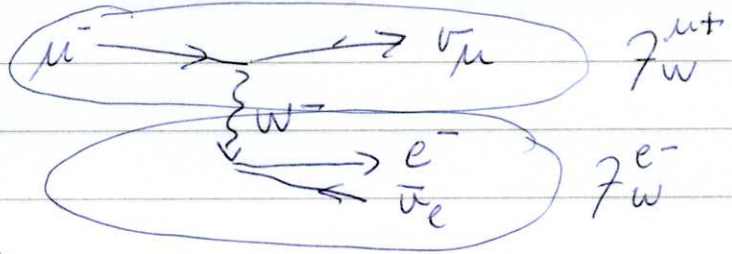
Schwache WW: schwacher Strom wechselwirkt  
 mit konjugiertem schwachen Strom durch

Austausch eines W-Bosons

z. B. Muon zerfall  $\mu^- \rightarrow \nu_\mu$

$J_W^{ut}$  positiver muonischer  
schwacher Strom

$J_W^{e^-}$  negativer elektronischer  
schwacher Strom

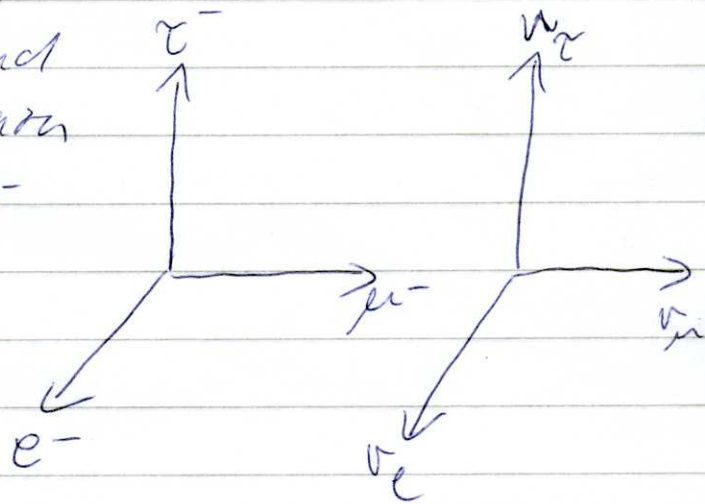


Struktur:  $J_W^{e^-} \propto \tilde{e} \cdot \nu_e + \tilde{\mu} \cdot \nu_\mu + \tilde{\tau} \cdot \nu_\tau$

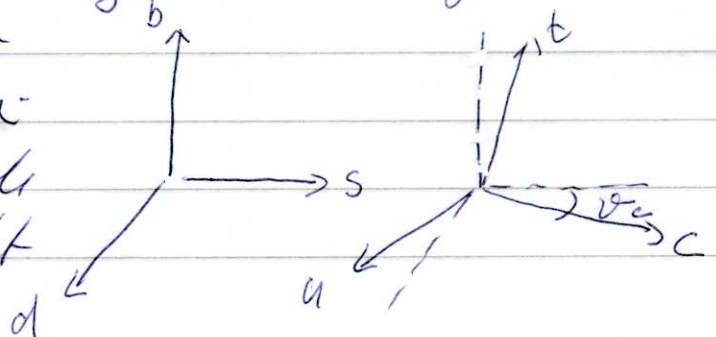
Vermeidungspopate Erzeugungsopate

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 verbindet  
jeweils ein Leptonen inner-  
halb einer Generation



Für Quarks verbindet schwacher Strom auch ver-  
schiedene Generationen. Stellen wir uns wie da  
vor, daß Quarks einer Ladung ein orthogonales  
3-d-ein Koordinatensystem  
aufspannen, aber System für  
die beiden Ladungszustände  
um einen Winkel  $\theta_c$  verdreht



jeht 9 Beiträge zu Skalarprodukt

$$f_w^{ht} \propto \tilde{d} \cdot u + \tilde{s} \cdot u + \tilde{b} \cdot u + \dots$$

$\uparrow$   $\uparrow$   
 $\cos \theta_c$   $\sin \theta_c$

Bestimmung von Cabibbo-Winkel  $\theta_c$

Vertikale Neutronenfall  $d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$   $p = 11 \text{ GeV}$

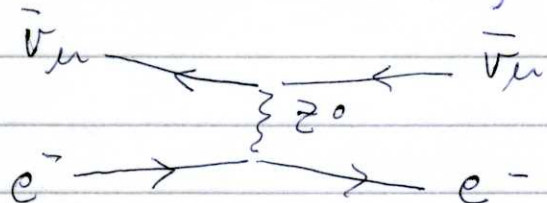
und Lambda-Neutronfall  $s \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$   $p = 100 \text{ GeV}$

Rate  $\propto |< \dots >|^2$ . Phasenraum  $\sim$  dividierte Phasenraum heraus  $\sim$  komparative Halbwertszeit und ft-Wert  $\neq |< \dots >|^2 = \frac{\cos^2 \theta_c}{\sin^2 \theta_c} \sim \theta_c = 13.4^\circ$

best. Wert aus allen bekannten Fällen  $\theta_c = 12.9 \pm 0.1^\circ$   
 $\cos \theta_c = 0.974$   $\sin \theta_c = 0.221$

allgemeiner:  $3 \times 3$  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 Strahls ändert sich am Vertex nicht, Austauschboson neutral



entdeckt 1973 in Blasen-Kammer Gargamelle

am CERN in Neutrino-

Elektron elastischer Streuung

optional:

→ 1787-1

schwache Ladung: dimensionslose Kopplungskonstante  $g_w^2 / \hbar c$  (analog  $e^2 / \hbar c = 1/137$ )  $= \frac{1}{\sqrt{2} \cdot 4\pi} \frac{1}{\hbar c} \left( \frac{m_W c^2}{\hbar c} \right)^2 G_F$

mit  $G_F$  aus Muonfall und  $m_W \sim g_w^2 / \hbar c \approx \frac{1}{240}$

(hat zu korrekter Vorhersage der W-Masse geführt!)

Schwäche nicht wegen Kopplungskonstante sondern Masse Austauschboson