Wechselwirkung von Neutrinos und Kopplung an W und Z Bosonen

Martin Wolf

Fakultät für Physik und Astronomie
Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg

16. Mai 2007

Agenda

1 Eigenschaften der Neutrinos

2 Beschreibung von WW
- Erhaltungsgrößen
- relativistische Kinematik
- Feynman-Graphen
- Feynman-Regeln
- Wechselwirkungsquerschnitt

3 Die schwache WW
- Eigenschaften
- Der geladene Strom
- Der neutrale Strom

4 Die elektroschwache Vereinheitlichung

Eigenschaften der Neutrinos

- gehören zu den Leptonen mit Spin 1/2 $\Rightarrow$ keine starke WW
- elektrisch neutral $\Rightarrow$ keine e.m. WW
- wechselwirken nur schwach
- 3 Neutrino-Flavour: ν_e, ν_μ, ν_τ
- sehr kleine Masse: $\nu_e < 2.3\text{eV}$, $\nu_\mu < 0.19\text{MeV}$, $\nu_\tau < 18.2\text{MeV}$

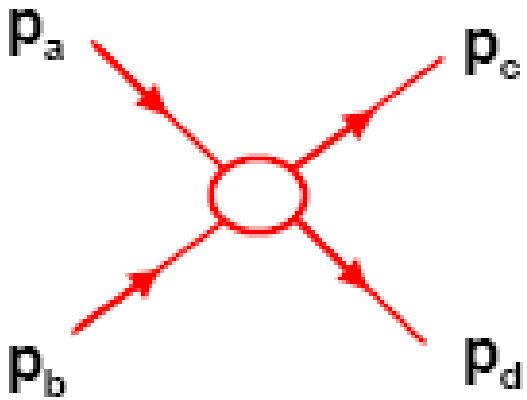
Beschreibung von WW - Erhaltungsgrößen in allen WW

- Energie- und Impulserhaltung
- Ladungserhaltung
- Leptonenzahlerhaltung (ausgenommen ν-Oszillation)
  $\longrightarrow$ Leptonenzahlen: L_e, L_μ, L_τ
  $\longrightarrow$ Materie (e^-, ν): $L = +1$, Antimaterie (e^+, $\overline{\nu}$): $L = -1$
- Baryonenzahlerhaltung

$\longrightarrow$ Ladung und Leptonenzahl sowohl für Gesamtreaktion als auch für Vertex erhalten!

Beschreibung von WW - relativistische Kinematik I

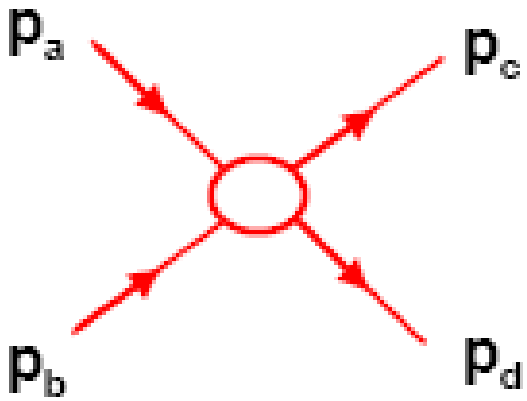
- In Teilchenphysik:
  $E >> m \Rightarrow E^2 = p^2 + m^2$
- Berechnungen mittels 4er-Vektoren:
  $x = (t, \vec{x})$, $p = (E, \vec{p})$
- Skalarprodukt von 4er-Vektoren (Lorentz-invariant):
  $p_1 \cdot p_2 = (E_1 E_2 - \vec{p_1}\vec{p_2})$
- 4er-Impulsquadrat = invariante Masse:
  $p^2 = E^2 - \vec{p}^2 = m^2$
- E- und p-Erhaltung in Streuung
  $\Rightarrow$ 4er-Impulserhaltung: $p_a + p_b = p_c + p_d$



Beschreibung von WW - relativistische Kinematik II

Mandelstam-Variablen:

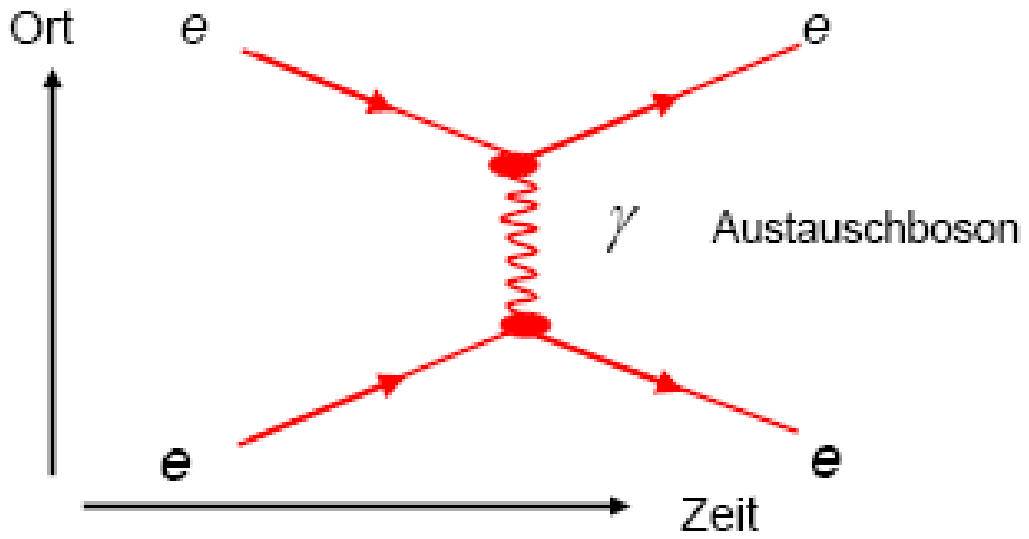
$$
\begin{aligned}
s &= (p_a + p_b)^2 \\
&\widehat{=} \text{ (Schwerpunktenergie)}^2 \\
t &= (p_a - p_c)^2 \\
&\widehat{=} \text{ 4er-Impulsübertrag von Teilchen } a \\
u &= (p_a - p_d)^2 \\
&\widehat{=} \text{ 4er-Impulsübertrag von Teilchen } a \text{ auf } d
\end{aligned}
$$



Es gilt: $s + t + u = m_a^2 + m_b^2 + m_c^2 + m_d^2$

Beschreibung von WW - Feynman-Graphen

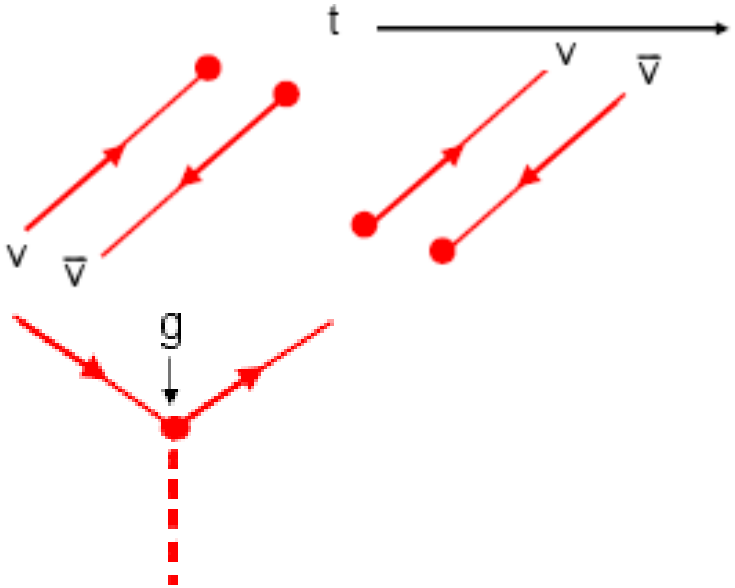
- WW kann anschaulich mittels Feynman-Graphen dargestellt werden
  $\longrightarrow$ symbolisieren Feynman-Rechenregeln
- Vermittlung der WW durch Austauschbosonen: γ, $W^{\pm}$, Z^0, g
- Kopplung der Bosonen mit WW-abhängigen Kopplungskonstanten



Beschreibung von WW - Feynman-Regeln I

Feynman-Graphen stellen Rechenregeln dar, um Übergangsamplituden störungstheoretisch zu berechnen:
$A(|i\rangle \rightarrow |f\rangle) = \langle f| H_{WW} |i\rangle \equiv M_{fi}$

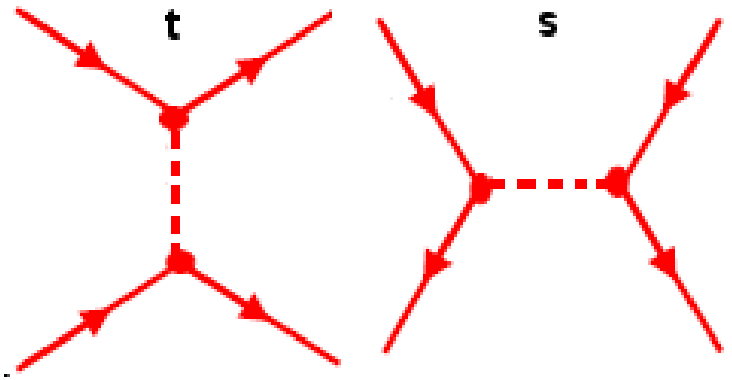
- ein-/auslaufende (Anti)Fermionen
- elementarer WW-Vertex mit Kopplungsstärke



Beschreibung von WW - Feynman-Regeln II

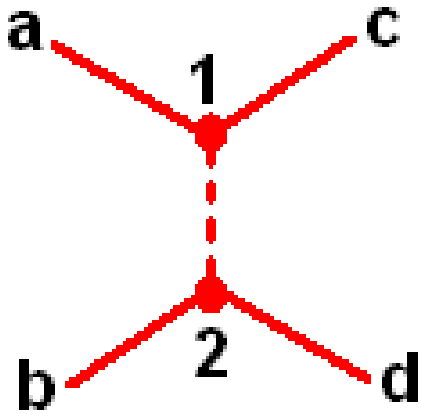
- ein-/auslaufende Teilchen müssen Energie/Impulsbeziehung für freie Teilchen erfüllen:
  $E^2 = p^2 + m^2$
- innere Linien (= Propagatoren) stellen virtuelle Teilchen dar:
  $E^2 \neq p^2 + m^2$ (wg. Unschärferelation erlaubt)
- 2 Arten von Prozesse möglich:

t-Kanal: $q^2 = t = (p_a - p_c)^2 < 0$
s-Kanal: $q^2 = s = (p_a + p_b)^2 > 0$



Beschreibung von WW - Feynman-Regeln III

- Übergangsamplitude $\propto$ Kopplungssärke und Propagator:



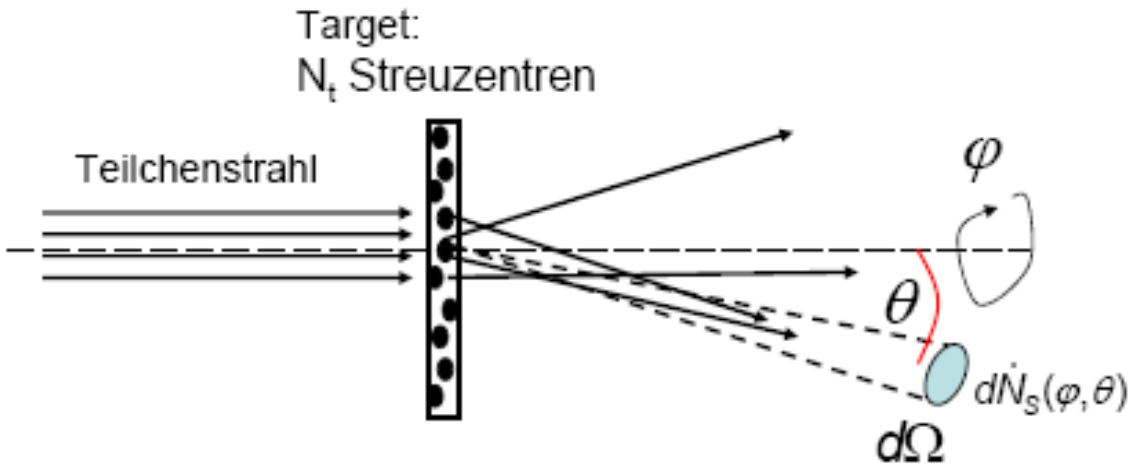
$$M_{fi} \propto \underbrace{\Psi_d^* \mathrm{Vertex}_2 \Psi_b}_{g} \cdot \underbrace{\mathrm{Propagator}}_{\frac{1}{q^2 - M^2}} \cdot \underbrace{\Psi_c^* \mathrm{Vertex}_1 \Psi_a}_{g}$$

Beschreibung von WW - Feynman-Regeln IV

- Physikalisch beobachtbarer Prozess wird durch kohärente Summation (d.h. auf Amplituden-Level) aller Feynman-Graphen, die zum gleichen Endzustand führen, beschrieben:
  $M_{fi} = \sum_k M_k$
- Messgrößen $\propto |M_{fi}|^2$
  $\Rightarrow$ Interferenzterme beim Quadrieren von M_{fi}

Wechselwirkungsquerschnitt I

= Maß für die Wahrscheinlichkeit der WW zweier Streupartner



Rate der in Raumelement $d\Omega$ gestreuter Teilchen:

$$d\dot{N}_s(\varphi,\theta) = \underbrace{\sigma(\varphi,\theta)}_{\text{WQ}} \cdot \Phi \cdot N_t \cdot d\Omega(\varphi,\theta)$$

Wechselwirkungsquerschnitt II

- Differenzieller WQ:

$$\frac{d\sigma(\varphi,\theta)}{d\Omega} = \frac{d\dot{N}_s(\varphi,\theta)}{\Phi \cdot N_t \cdot d\Omega}$$

- Totaler WQ:

$$\sigma_{\text{tot}} = \int d\sigma = \frac{1}{\Phi \cdot N_t} \int \frac{d\dot{N}_s}{d\Omega} d\Omega = \frac{\dot{N}_s}{\Phi \cdot N_t}$$

Dimension:

$$\frac{\text{Zeit}^{-}1}{\text{Zeit}^{-1} \cdot \text{Fläche}^{-1}} = \text{Fläche}$$

Einheit:

$$[\sigma] = 1\text{barn} = 10^{-28}\text{m}^2$$

Wechselwirkungsquerschnitt III

Fermi's Goldene Regel:

$$W = 2\pi \left|M_{fi}\right|^2 \rho_f(E)$$

W: Übergangswahrscheinlichkeit
$\rho_f(E) = \frac{dN_f}{dE}$: Zustandsdichte (Phasenraumfaktor), dN_f: Anzahl der Endzustände für Energieintervall $[E, E + dE]$

Wechselwirkungsquerschnitt IV

WQ für 2 Teilchenreaktion: $\underbrace{a+b}_{i} \rightarrow \underbrace{c+d}_{f}$

$$\sigma = \frac{W}{\beta_i} \qquad \beta_i\text{: Relativgeschw. zw. a und b}$$

$$W = 2\pi \left|M_{fi}\right|^2 \rho_2 = \int 2\pi \left|M_{fi}\right|^2 \frac{1}{(2\pi)^3} \frac{E_c E_d}{E_c + E_d} \left|\vec{p_c}\right| d\Omega_c$$

Im CMS:

$$\left|\vec{p_c}\right| = \left|\vec{p_d}\right| = \left|\vec{p_f}\right|, \beta_{c,d} = \frac{\left|\vec{p_{c,d}}\right|}{E_{c,d}}$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{(2\pi)^2} \left|M_{fi}\right|^2 \frac{\left|\vec{p_f}\right|^2}{\beta_i \beta_f} \overset{\text{Lorentz-Invariant}}{=} \frac{1}{64\pi^2} \frac{1}{s} \left|M_{fi}\right|^2$$

Einführung

Schwache Wechselwirkung hat in der Vergangenheit für eine Reihe von Überraschungen gesorgt:

- Flavor-Verletzung
- Paritätsverletzung
- CP Verletzung

Auch heute werden schwache Zerfälle als aussichtsreiche Prozesse zum Nachweis neuer physikalischer Phänomene untersucht.

Eigenschaften der schwachen WW

- 2 schwache Prozesse möglich:
  geladener Strom (CC - charged current),
  neutraler Strom (NC - neutral current)
- Austausch eines massiven Spin 1 $W^{\pm}$ bzw. Z^0 Bosons
- massiver Propagator
  $\propto \frac{1}{q^2 - M_{W,Z}^2}$
- kurzreichweitig: $R \lesssim \frac{1}{M_W} \approx 2.5 \cdot 10^{-3}\text{fm}$

Frage: Wie groß ist die Kopplungskonstante? Ist sie universell, wie in QED?

Eigenschaften der schwachen WW

- 2 schwache Prozesse möglich:
  geladener Strom (CC - charged current),
  neutraler Strom (NC - neutral current)
- Austausch eines massiven Spin 1 $W^{\pm}$ bzw. Z^0 Bosons
- massiver Propagator
  $\propto \frac{1}{q^2 - M_{W,z}^2}$
- kurzreichweitig: $R \lesssim \frac{1}{M_W} \approx 2.5 \cdot 10^{-3}\text{fm}$

Frage: Wie groß ist die Kopplungskonstante? Ist sie universell, wie in QED?

Eigenschaften des geladenen Stromes

- Kategorisierung in 3 Prozessklassen:
  leptonische, *semileptonische* und *nichtleptonische* Prozesse
- Austausch eines massiven $W^{\pm}$-Bosons
  $\Rightarrow m_{W^{\pm}} = 80$ GeV
- Kopplungskonstante: g_W
- Fermi's 4-Punkt-WW: $g_W \overset{q^2 \to 0}{\longrightarrow} G_F$:
  $\frac{G_F}{\sqrt{2}} = \frac{g_W^2}{8 M_W^2}$
  $G_F = 1.166 \cdot 10^{-5}\ \text{GeV}^{-2}$
- Leptonenzahlen L_e, L_μ und L_τ sind erhalten
- W-Boson koppelt nur an LH Teilchen

Eigenschaften des geladenen Stromes

- Kategorisierung in 3 Prozessklassen:
  leptonische, *semileptonische* und *nichtleptonische* Prozesse
- Austausch eines massiven $W^{\pm}$-Bosons
  $\Rightarrow m_{W^{\pm}} = 80$ GeV
- Kopplungskonstante: g_W
- Fermi's 4-Punkt-WW: $g_W \overset{q^2 \to 0}{\to} G_F$:
  $\frac{G_F}{\sqrt{2}} = \frac{g_W^2}{8M_W^2}$
  $G_F = 1.166 \cdot 10^{-5}\ \text{GeV}^{-2}$
- Leptonenzahlen L_e, L_μ und L_τ sind erhalten
- W-Boson koppelt nur an LH Teilchen

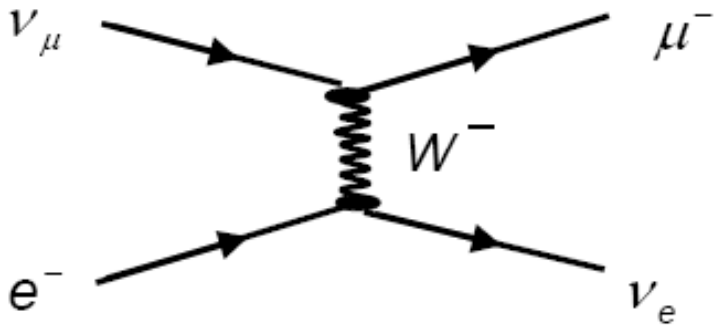
Leptonische Prozesse

$\Rightarrow$ W-Boson koppelt nur an Leptonen

$$\ell + \nu_\ell \quad \leftrightarrow \quad \ell' + \nu_{\ell'}$$
$$\ell + \overline{\nu_\ell} \quad \leftrightarrow \quad \ell' + \overline{\nu_{\ell'}}$$

Beispiele:

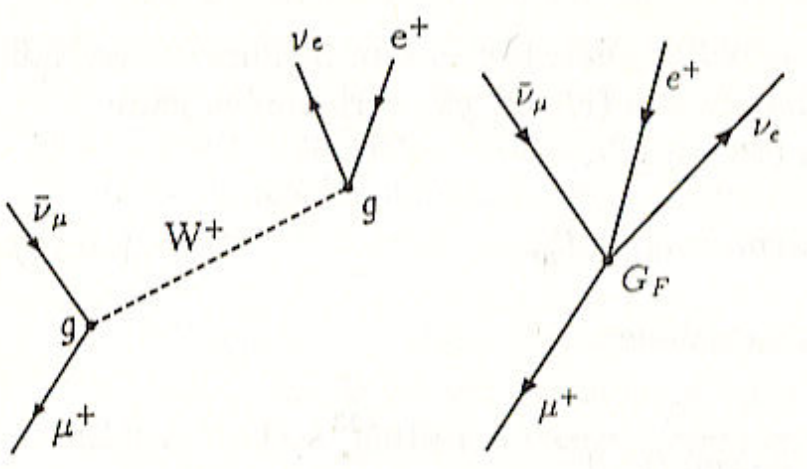
$\nu_\mu e^- \rightarrow \mu^- \nu_e$



$\nu_e e^- \rightarrow e^- \nu_e$
(hier auch Z-Austausch!)

Leptonische Prozesse - Myon-Zerfall

$$\mu^- \rightarrow e^- + \overline{\nu_e} + \nu_\mu$$
$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \overline{\nu_\mu}$$



Für die Zerfallsbreite erhält man unter Anwendung der Goldenen Regel und der Dirac-Gleichung:

$$\begin{aligned} \Gamma_{\mu e} &= \frac{1}{\tau_\mu} = \frac{G_F^2 m_\mu^5}{192\pi^3} \cdot (1+\varepsilon) \propto m_\mu^5 \\ m_\mu &= (105.6583692 \pm 0.0000094)\text{MeV} \\ \tau_\mu &= (2.19703 \pm 0.00004) \cdot 10^{-6}\text{s} \end{aligned}$$

Semileptonische Prozesse

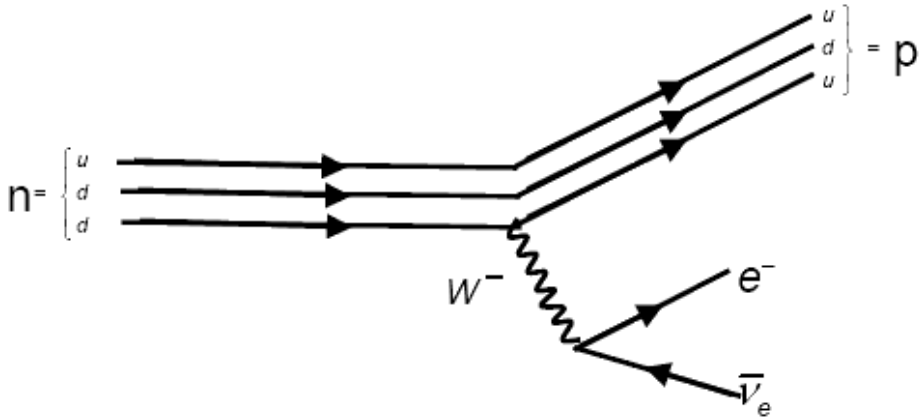
$\Rightarrow$ W-Boson koppelt an Leptonen und Quarks

$$q_1 + \overline{q_2} \quad \leftrightarrow \quad \ell + \overline{\nu_\ell}$$

Beispiele:

β-Zerfall des Neutrons

$n \longrightarrow p + e^- + \overline{\nu_e}$



Pion-Zerfall

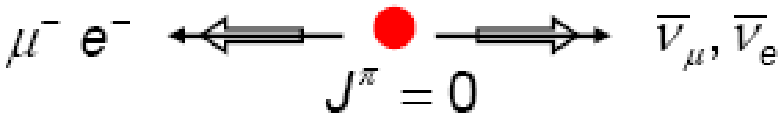
$\pi^- \longrightarrow \mu^- + \overline{\nu_\mu}$

Semileptonische Prozesse - Pion-Zerfall

$$\pi^- \longrightarrow \mu^- + \overline{\nu_\mu}$$
$$\pi^- \longrightarrow e^- + \overline{\nu_e}$$

$$\Gamma = \frac{1}{\tau} = \frac{G_F^2}{8\pi} f_\pi^2 m_\pi m_\mu^2 \left(1 - \frac{m_\mu^2}{m_\pi^2}\right)^2$$

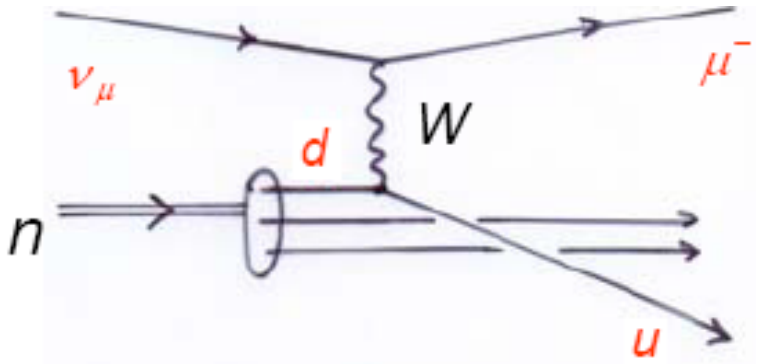
$$\frac{\Gamma(\pi^- \longrightarrow e^- \overline{\nu_e})}{\Gamma(\pi^- \longrightarrow \mu^- \overline{\nu_\mu})} = \left(\frac{m_e}{m_\mu}\right)^2 \left(\frac{m_\pi^2 - m_e^2}{m_\pi^2 - m_\mu^2}\right)^2 = 1.2 \cdot 10^{-4}$$



$\longrightarrow$ Helizitätsbewahrung bereits von Ruderman und Finkelstein (1949) vor Entdeckung der Paritätsverletzung vorgeschlagen

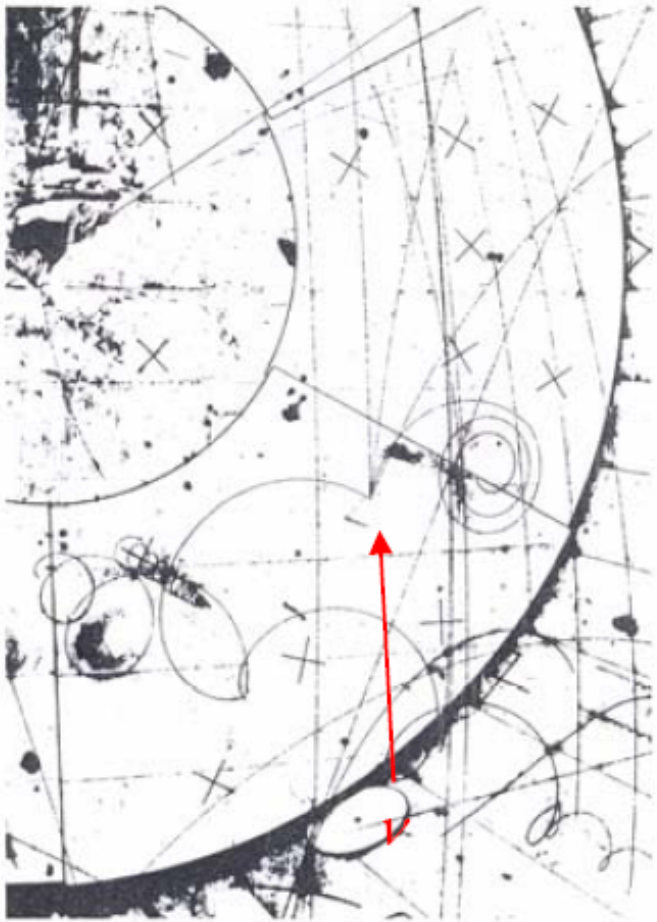
Semileptonische Prozesse - Neutrino-Nukleon-Streuung I

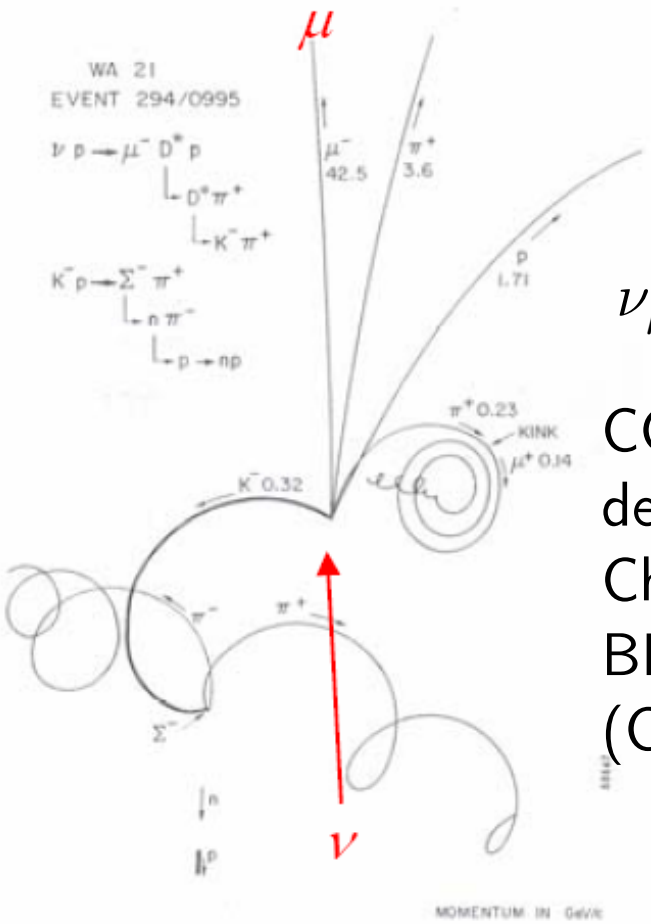
$$\nu_\mu N \leftrightarrow \mu^- X$$
$$\overline{\nu_\mu} N \leftrightarrow \mu^+ X$$



$\rightarrow$ Neutrinostrahlen wurden auch benutzt, um die Proton/Neutron Strukturfunktionen $F_2^{\nu N}$ bzw. $F_3^{\nu N}$ zu bestimmen
$\rightarrow$ Quarkverteilung (Valenz- und See-Quarks)

Semileptonische Prozesse - Neutrino-Nukleon-Streuung II





$$\nu_\mu + p \to D^{*+} + p + \mu^-$$

CC Neutrino-Ereignis bei der Produktion eines Charmed-Teilchens in der BEBC Blasenkammer (CERN SPS)

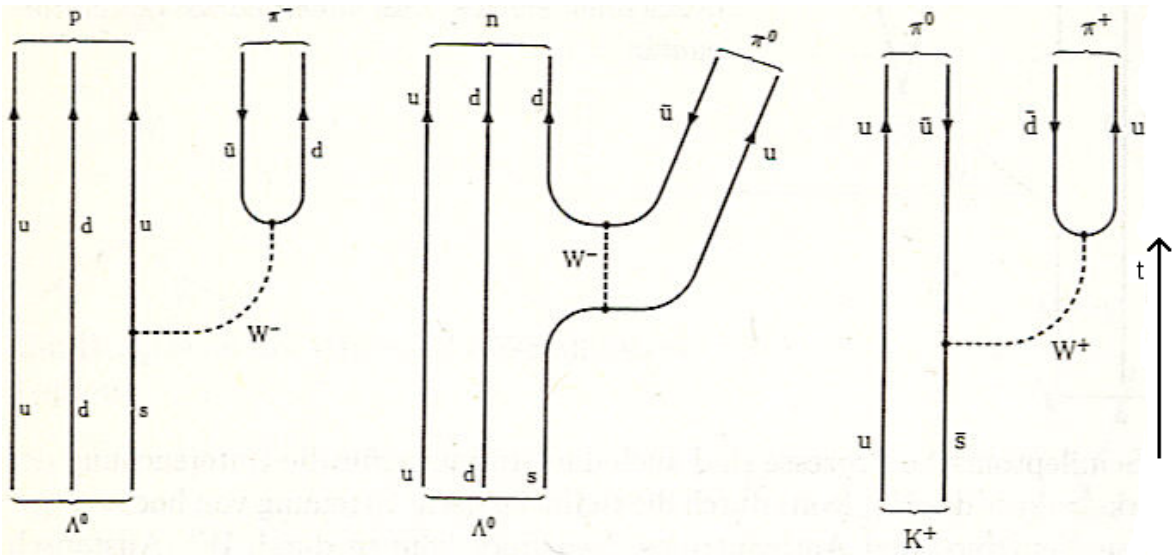
Nichtleptonische Prozesse

$\Rightarrow$ W-Boson koppelt nur an Quarks

$$q_1 + \overline{q_2} \quad \leftrightarrow \quad q_3 + \overline{q_4}$$

Beispiele:

- $\Lambda^0 \longrightarrow p + \pi^-$
- $\Lambda^0 \longrightarrow n + \pi^0$
- $K^+ \longrightarrow \pi^0 + \pi^+$

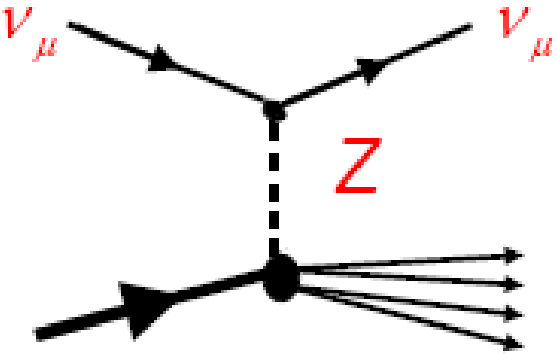


Wegen Ladungserhaltung nur Quarks mit Gesamtladung ± 1 kombinierbar!

Die Entdeckung 1973 - Experiment

- elektroschwache Vereinheitlichung von Glashow, Weinberg und Salam (1967/68) sagte Z^0-Boson voraus
- Entdeckung am CERN im Jahre 1973 mit der mit schwerem Freon (CF_3Br, Dichte $\rho = 1.5\mathrm{g/cm}^3$) gefüllte Blasenkammer „Gargamelle“ während ein $\nu_\mu/\overline{\nu_\mu}$-Strahl in ihr exponiert wurde
- Suche nach semileptonischen NC-Reaktionen:

$$\nu_\mu + N \rightarrow \nu_\mu + \text{Hadronen}$$
$$\overline{\nu_\mu} + N \rightarrow \overline{\nu_\mu} + \text{Hadronen}$$

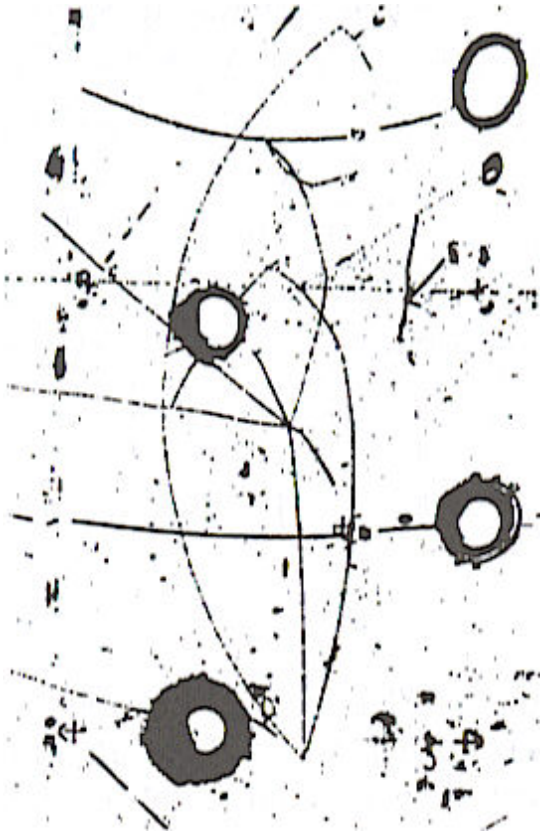


Die Entdeckung 1973 - Ergebnis (semileptonisch)

in der ν_μ-Exposition: 102 NC, 428 CC
in der $\overline{\nu_\mu}$-Exposition: 64 NC, 148 CC

$$R_\nu \equiv \frac{\sigma(\nu_\mu N \to \nu_\mu X)}{\sigma(\nu_\mu N \to \mu^- X)} = 0.22 \pm 0.04$$

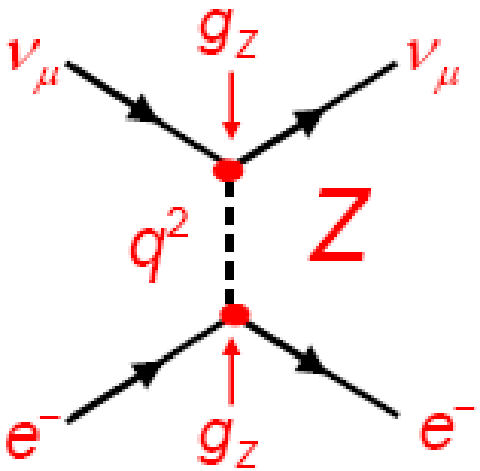
$$R_{\overline{\nu}} \equiv \frac{\sigma(\overline{\nu_\mu} N \to \overline{\nu_\mu} X)}{\sigma(\overline{\nu_\mu} N \to \mu^+ X)} = 0.43 \pm 0.12$$

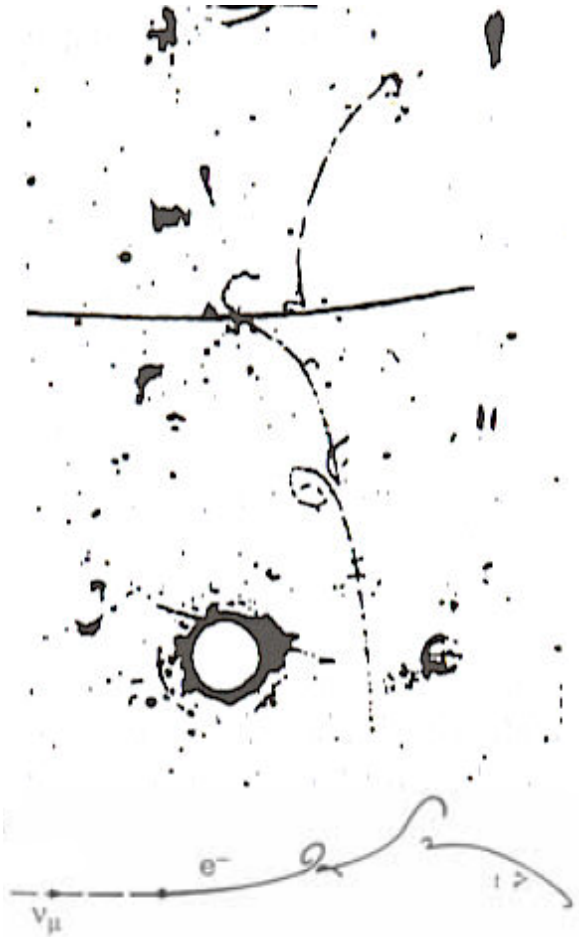


Die Entdeckung 1973 - Ergebnis (leptonisch)

Neben den semileptonischen Ereignissen wurden auch rein leptonische Ereignisse gefunden:

$$\nu_\mu + e^- \rightarrow \nu_\mu + e^-$$
$$\overline{\nu_\mu} + e^- \rightarrow \overline{\nu_\mu} + e^-$$





Z-Produktion mit Hadronen

2 Möglichkeiten: $p + p \rightarrow Z^0$ oder $p + \overline{p} \rightarrow Z^0$

$$u + \overline{u} \rightarrow Z^0$$
$$d + \overline{d} \rightarrow Z^0$$

Schwerpunktenergie:

$$\begin{aligned} M_Z &= \sqrt{\hat{s}} = \sqrt{< x_u >< x_{\overline{u}} > s} = 2 \cdot \sqrt{0.12 \cdot 0.04} \cdot E \\ E_{pp} &\approx 600\text{GeV} \\ E_{p\overline{p}} &\approx 350\text{GeV} \end{aligned}$$

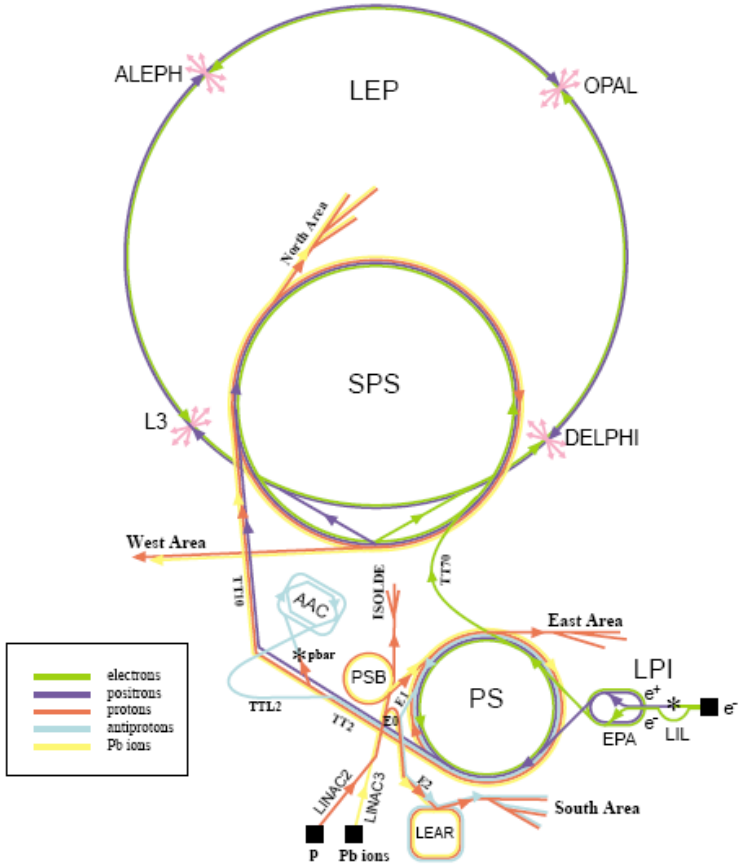
Z-Produktion am LEP

Erzeugung von Z^0-Bosonen in großer Zahl am LEP (CERN) seit 1989 möglich

$$e^+ + e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow e^+e^-, \mu^+\mu^-$$

Schwerpunktenergie:

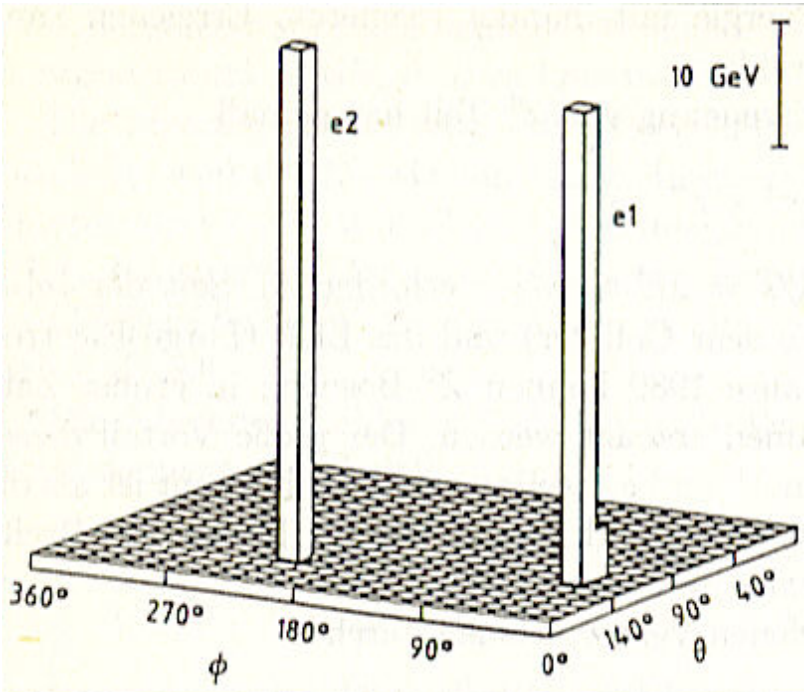
$$\begin{aligned} M_Z &= \sqrt{s} = 2E \\ E_{ee} &\approx 46\text{GeV} \end{aligned}$$



Z-Nachweis

Z-Nachweis erstmalig 1983 am CERN mit Experiment UA1

$$Z^0 \to e^+ + e^-$$
$$Z^0 \to \mu^+ + \mu^-$$



Lego-Diagramm für $q\bar{q} \to Z^0 \to e^+e^-$ (E_{e^-} über Streu- und Azimutwinkel des e^--Paares)

Bestimmung der Z-Masse

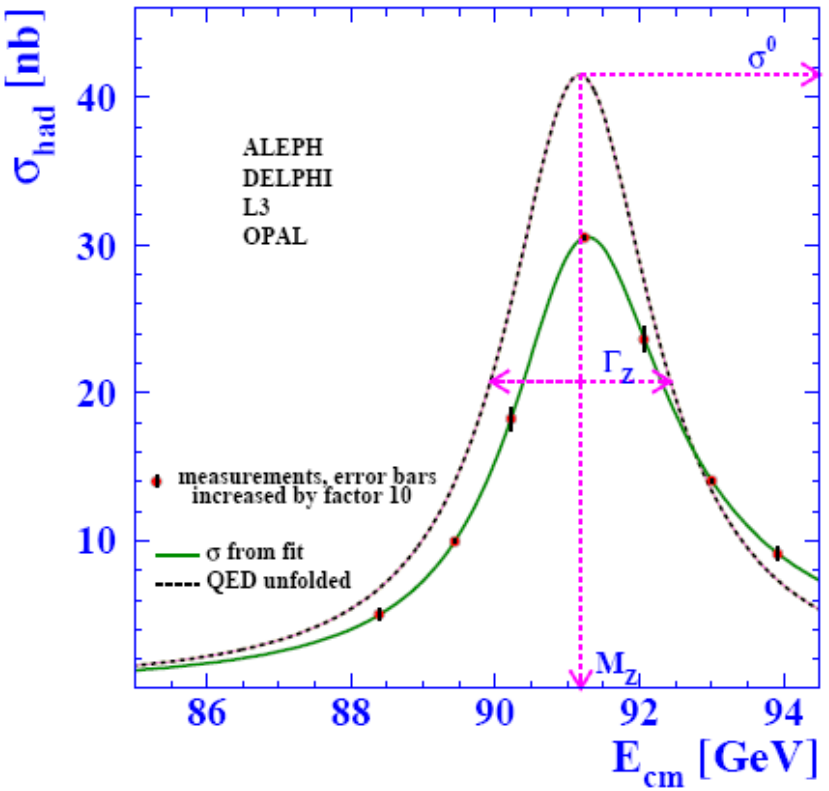
Variation der Schwerpunktsenergie bei e^+e^--Kollisionen (LEP)
$\Rightarrow$ WQ bei $E_{cm} = M_Z$ steigt
$\Rightarrow$ Z-Resonanzkurve

$$e^+e^- \longrightarrow Z^0 \longrightarrow f\bar{f}$$

Resonanzform einer Breit-Wiegner-Kurve:

$$\sigma_f(s) = \sigma_f^0 \cdot \frac{s\Gamma_Z^2}{(s-m_Z^2)^2 + s^2\Gamma_Z^2/m_Z^2}$$

$$\sigma_f^0 = \frac{12\pi}{m_Z^2}\frac{\Gamma_e\Gamma_f}{\Gamma_Z^2}$$



Eigenschaften des neutralen Stromes

- Austausch eines massiven Z^0-Bosons
  $\Rightarrow m_{Z^0} = 91$ GeV
- Kopplungskonstante: g_Z
- Fermi's 4-Punkt-WW: $g_Z \overset{q^2 \to 0}{\to} G_{NC}$:

$$\frac{G_{NC}}{\sqrt{2}} = \frac{g_Z^2}{8M_Z^2} = \frac{g_W^2}{8M_W^2} \cdot \underbrace{\frac{g_Z^2 M_W^2}{g_W^2 M_Z^2}}_{=1 \text{ im SM}} = \frac{g_W^2}{8M_W^2} = \frac{G_F}{\sqrt{2}}$$

- Z-Boson koppelt sowohl an LH, als auch an RH Teilchen
  ABER: mit unterschiedlicher Stärke

Ausgangspunkt

- Leptonen lassen sich in LH Dubletts und in RH Singuletts ordnen
- CC koppelt nur an LH Fermionen und bewirkt Übergänge innerhalb eines Dubletts
- NC koppelt an LH und RH Fermionen mit unterschiedlicher Stärke
- e.m. Strom (Photonen) koppelt an LH und RH Femionen mit gleicher Stärke

	I	II	III	
Leptonen	$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}_L$	LH Dubletts
	e_R^-	μ_R^-	τ_R^-	RH Singletts
Quarks	$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}_L$	LH Dubletts
	u_R d_R	c_R s_R	t_R b_R	RH Singletts

Fragen und Probleme

Fragen:

- Lässt sich W^+, W^-, Z^0 und γ gemeinsam theoretisch beschreiben?
- Ist $W^0 \equiv Z^0$? Doch was ist dann mit γ?

Probleme:

- $M_W \neq M_Z \Rightarrow$ unterschiedliche Masseneigenzustände
- unterschiedliche Kopplungseigenschaften (LH, LH + RH, Stärke)

Antworten und Lösungen

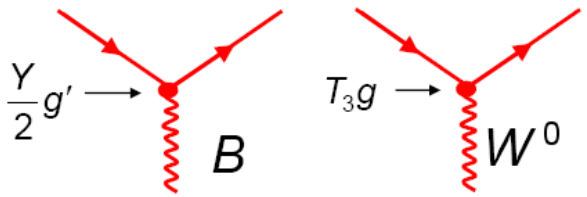
Antworten:

- Ja, W^+, W^-, Z^0 und γ lassen sich gemeinsam theoretisch beschreiben.
- Nein, $W^0 \neq Z^0$.

Lösungen:

- Einführung des schwachen Isospins T
  $\Rightarrow$ LH: T $= 1/2$, $T_3 = \pm 1/2$
  $\Rightarrow$ RH: T $= 0$, $T_3 = 0$
  $\Rightarrow$ W: T $= 1$, $T_3(W^-)$=-1, $T_3(W^+)$=+1
  $\Rightarrow$ Z,γ: T $= 0$
- Einführung eines zusätzlichen Eichfeldes B, das an die sogenannte schwache Hyperladung $\frac{Y}{2} = 2(Q - T_3)$ mit Stärke g' LH und RH koppelt

Der Weinberg-Winkel



$$|\gamma\rangle = +|B\rangle \cos\theta_W + |W^0\rangle \sin\theta_W$$
$$|Z\rangle = -|B\rangle \sin\theta_W + |W^0\rangle \cos\theta_W$$

θ_W: Schwacher Mischungswinkel (sog. Weinberg-Winkel)
Forderung: Kopplung von γ an Fermionen gleich e:

$$e = g \cdot \sin\theta_W = g' \cdot \cos\theta_W$$
$$g = \frac{e}{\sin\theta_w} \qquad g' = \frac{e}{\cos\theta_w}$$
$$\frac{m_W}{m_Z} = \cos\theta_W \Rightarrow \theta_W \approx 13°$$

Kopplungen im Standardmodell

- Photon-Kopplung an Fermionen (LH + RH, gleich stark)

$$\propto e \cdot Q_f$$

- W-Kopplung an Fermionen (nur LH)

$$\propto T_3 \cdot g = T_3 \cdot \frac{e}{\sin\theta_W}$$

- Z-Kopplung an Fermionen (LH + RH, unterschiedlich stark)

$$\text{LH:} \quad \propto \quad g_L \cdot \frac{g}{\cos\theta_W} \text{ mit } g_L = T_3^f - Q_f \cdot \sin^2\theta_W$$

$$\text{RH:} \quad \propto \quad g_R \cdot \frac{g}{\cos\theta_W} \text{ mit } g_R = -Q_f \cdot \sin^2\theta_W$$

Fragen? Vielen Dank!

The End.
Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!