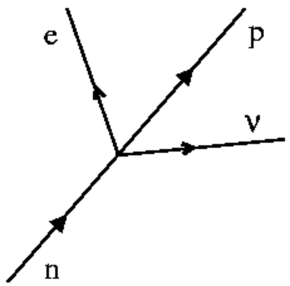
3. Vorlesung Higgs und elektroschwache WW, SS08
WIEDERHOLUNG: SCHWACHE W'WIRKUNG

Von Fermis Punkt-WW ...

$$M = G_{(F)}\left(\bar{u}_n \gamma_\mu u_p\right)\left(\bar{u}_\nu \gamma^\mu u_e\right)$$



... über das Wu-Experiment (!) und die Entdeckung der Paritätsverletzung im ^{60}Co-Zerfall ...

... zur (V-A)-Theorie der schwachen WW ...

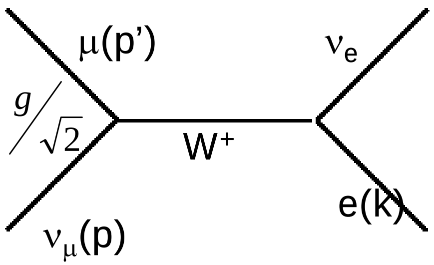
$$\bar{\psi}\gamma^\mu \frac{1}{2}\left(1-\gamma^5\right)\psi \equiv \frac{1}{2}\left(V^\mu - A^\mu\right)$$

$$M = G_{(F)}\left(\bar{u}_n \gamma_\mu \frac{1}{2}\left(1-\gamma_5\right)u_p\right)\left(\bar{u}_\nu \gamma^\mu \frac{1}{2}\left(1-\gamma_5\right)u_e\right)$$

Bestätigung z.B. im Pion-Zerfall:

$$\frac{\Gamma\left(\pi^- \to e^-\bar{\nu}_e\right)}{\Gamma\left(\pi^- \to \mu^-\bar{\nu}_\mu\right)} = \frac{m_e^2\left(m_\pi^2 - m_e^2\right)}{m_\mu^2\left(m_\pi^2 - m_\mu^2\right)} = 1.28\cdot 10^{-4}$$

Ansatz mit Eichboson:



$$M = \frac{g^2}{2}\left(\bar{u}_{(\mu)}\gamma^\mu \frac{1}{2}\left(1-\gamma_5\right)u_{(\nu\mu)}\right)\frac{-g_{\mu\nu}+q_\mu q_\nu}{q^2 - M_W^2}\left(\bar{u}_{(\nu e)}\gamma^\nu \frac{1}{2}\left(1-\gamma_5\right)u_{(e)}\right)$$

Vergleich mit Fermi zeigt bei Vernachlässigung des q^2-Propagators:

$$\frac{G_F}{\sqrt{2}} = \frac{g^2}{8M_W^2} \qquad \boxed{\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{G_F^2}{4\pi^2}\frac{\left(s-m_\mu^2\right)^2}{s} \approx \frac{G_F^2}{4\pi^2}\cdot s}$$

Das ist aber gleichbedeutend mit der Verletzung der Unitarität → verboten!

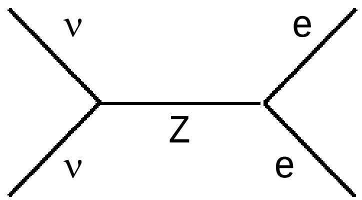
Lösung:

$$\frac{-g_{\mu\nu}+q_\mu q_\nu}{q^2 - M_W^2} \to \frac{1}{q^2 - M_W^2}$$

.... Allerdings neue Divergenzen bei externen W!
Lösung jetzt: Einführung eines neutralen Feldquants der schwachen WW: Z^0 mit

$$g_Z \sim g_W \sim e$$

Mehrere Indizien; Beobachtung 1973 in Gargamelle:



$$\bar{\nu}_\mu e^- \to \bar{\nu}_\mu e^-$$

'neutral current'

Auswahlregeln der schwachen hadronischen Prozesse
→ erklärt durch Cabibbo-Theorie:

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_C & \sin\theta_C \\ -\sin\theta_C & \cos\theta_C \end{pmatrix}\begin{pmatrix} d \\ s \end{pmatrix} \qquad W^- \to \bar{u}d' = \begin{cases} \bar{u}d\cos\theta_C \\ \bar{u}s\sin\theta_C \end{cases}$$

ELEKTRO-SCHWACHE EICHTHEORIE

Erinnerung: QED

– Lagrange-Dichte:

$$L = \overline{\psi}(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi - q\overline{\psi}\gamma^\mu A_\mu \psi - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}$$

– Eichtransformation (Phasenänderung):

$$\psi(x) \to \psi'(x) = \exp(iq\chi(x))\psi(x)$$

– damit einhergehend: kovariante Ableitung und Eichboson A_μ mit bestimmtem Transformationsverhalten:

$$\partial_\mu \to D_\mu = \partial_\mu + iqA_\mu$$

$$A^\mu(x) \to A'^\mu(x) = A^\mu(x) - \partial^\mu \chi(x)$$

– Die Physik (Lagrange-Dichte, Dirac-Gleichung) bleibt invariant! Die zugehörige erhaltene Quantenzahl ist die elektrische Ladung.

nicht-abelsche SU(2)-EICHTHEORIE

Jetzt: EW-Theorie, SU(2)$_{(L)}$:

– Lagrange-Dichte für schwaches Isospin-Dublett zweier Teilchen gleicher Masse

$$\psi = \begin{pmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \end{pmatrix} \quad \overline{\psi} = (\overline{\psi}_1, \overline{\psi}_2) \qquad\qquad L = \overline{\psi}\left(i\gamma_\mu \partial^\mu - m\right)\psi$$

Ziel: Eichinvarianz dieser Dichte unter lokalen SU(2)$_{(L)}$-Transformationen!

– Die entsprechende unitäre Transformation U (2×2):

$$\psi(x) \to \psi'(x) = U(x)\psi(x) = \exp\left(ig\sum_{j=1}^{3}\beta_j(x)T_j\right)\psi(x)$$

Die T_j sind 3 linear unabhängige spurlose 2×2-Matrizen:

$$T_j = \sigma_j / 2$$

Die drei Rotationswinkel α_j bilden einen Vektor im Isospin-Raum. Für die Generatoren T_j gilt:

$$\left[T_i, T_j\right] = i\varepsilon_{ijk}T_k$$

– Da det(U)=+1 und $U^+ = U^{-1}$ → SU(2)$_{(L)}$!

– Ziel Eichinvarianz → kovariante Ableitung:

$$\partial^\mu \to D^\mu = \partial^\mu + igT_j W_j^\mu$$

– Die W_j^μ sind drei neue Vektorfelder (eins für jeden Generator T_j). Damit folgt:

$$L = \overline{\psi}\left(i\gamma_\mu D^\mu - m\right)\psi = \overline{\psi}\left(i\gamma_\mu \partial^\mu - m\right)\psi - g\left(\overline{\psi}\gamma_\mu T_a \psi\right)W_a^\mu$$

Diese Dichte ist invariant, falls:

$$W_a^\mu \to W'^\mu_a = W_a^\mu - \partial^\mu \alpha_a(x) - g\varepsilon_{abc}\beta_b W_c^\mu$$

Der letzte Term stellt wie in der QCD die Selbst-WW der Eichbosonen dar, die entsteht, weil die T_j nicht vertauschen (nicht-abelsche Theorie)!

– Zur vollen Lagrange-Dichte fehlt noch der kinetische Term der Eichbosonen. Definiere Tensor:

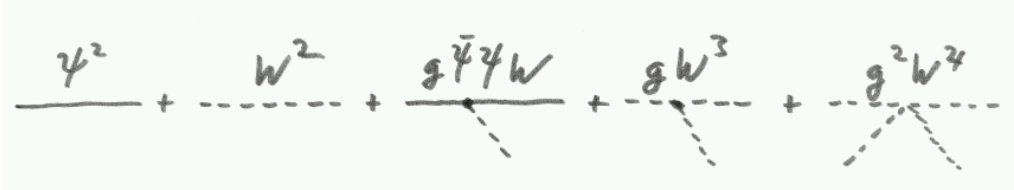
$$W_a^{\mu\nu} \equiv \partial^\mu W_a^\nu - \partial^\nu W_a^\mu - g\varepsilon_{abc}W_b^\mu W_c^\nu$$

damit folgt:

$$L = \overline{\psi}\left(i\gamma_\mu \partial^\mu - m\right)\psi - g\left(\overline{\psi}\gamma_\mu T_a \psi\right)W_a^\mu - \frac{1}{4}W_a^{\mu\nu}W_{a,\mu\nu}$$

Massenterm+ kin. Energie	Kopplung W-ψ, Staerke g	Kin. Energie der W

– Daraus folgen diese Vertizes der Theorie:



(MISS)ERFOLGE VON SU(2)-EW

Erfolge:

– Beschreibt Umwandlungen t↔b, e↔ν, etc..
– Sagt drei neue Eichbosonen voraus.
– Legt durch Symmetrieforderung Form der WW zwischen den Fermionen ψ und Bosonen fest.
– Verlangt dazu nur eine Naturkonstante: g
– Sagt Selbst-WW der Bosonen und deren Stärke voraus (nicht-abelsche Eichtheorie!).

Probleme:

1. Masse der Eichbosonen muss =0 sein, da ein Massenterm der Bosonen nicht eichinvariant ist:

$$L = m^2 W_{a,\mu} W_a^{\mu}$$

Aber: Masselose Theorie widerspricht den entdeckten schweren Eichbosonen W,Z!

2. Erklärt nicht die beobachtete Paritätsverletzung:
Sei $\psi = \psi_R + \psi_L$ mit

$$\psi_{L(R)} = \frac{1}{2}\left(1 \pm \gamma^5\right)\psi$$

dann:

$$\overline{\psi}\left(i\gamma_\mu D^\mu - m\right)\psi = \overline{\psi}_L\left(i\gamma_\mu D^\mu - m\right)\psi_L + \overline{\psi}_R\left(i\gamma_\mu D^\mu - m\right)\psi_R$$

Wwirkung gleich stark für beide Komponenten !!!

Eine Alternative ist, nur die linkshändigen, in schwachen Dubletts gruppierte Anteile zu transformieren und von rechtshändigen SU(2)-Singletts auszugehen:

$$\psi_L = \begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_L, \ldots, \begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}_L \qquad \psi_R = \nu_{eR}, e_R, \ldots, t_R$$

$$\psi_L \to \psi_L' = U\psi_L \qquad \psi_R \to \psi_R$$

Damit folgt als Lagrange-Dichte ...

$$L = \overline{\psi}_L i\gamma_\mu D^\mu \psi_L + \overline{\psi}_R i\gamma_\mu \partial^\mu \psi_R - m\overline{\psi}\psi$$

... und es tritt keine SU(2)-WW mehr auf für die rechtshändigen Anteile!

3. Massen der Fermionen widersprechen ebenfalls der Eichsymmetrie!
– ohne Paritätsverletzung:

$$m\overline{\psi}\psi = m\left(\overline{\nu}_e, \overline{e}\right)\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix} = m\overline{\nu}_e\nu_e + m\overline{e}e$$

→ gleiche Massen für Teilchen in einem Dublett!
– mit verschiedenen Massen von Neutrino und e:

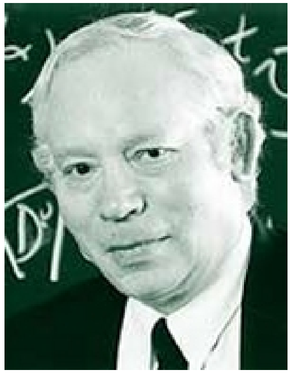
$$m\overline{e}e = m\overline{e}\left(e_L + e_R\right) = m\left(\overline{e}_L + \overline{e}_R\right)\left(e_L + e_R\right)$$
$$= m\left(\overline{e}_L e_L + \overline{e}_R e_L + \overline{e}_L e_R + \overline{e}_R e_R\right) = m\left(\overline{e}_R e_L + \overline{e}_L e_R\right)$$

... das ist aber nicht eich-invariant!

Neu: Die Lösung:

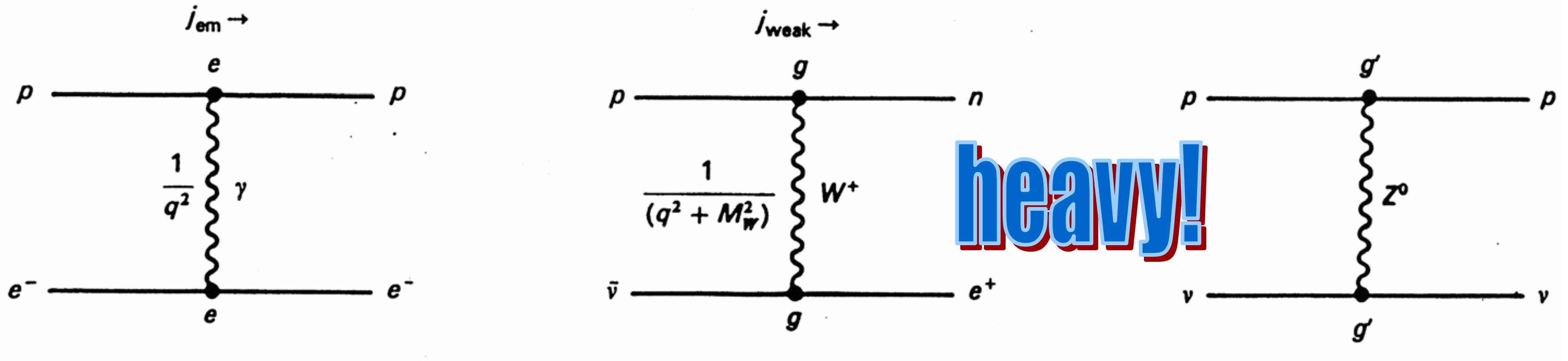
The Theory of GLASHOW, SALAM and WEINBERG ~ 1959-1968





(Nobel 1979)

Theory of the unified weak and electromagnetic interaction, transmitted by exchange of "intermediate vector bosons"



(a) Electromagnetic scattering

(b) Weak scattering (charged current)

(c) Weak scattering (neutral current)

DIE LÖSUNG: $SU(2)_L \times U(1)_Y$

Ziele:

– korrekte Eichbosonen: W^+, W^-, Z, Photon
– Paritätsverletzung
– erst noch keine Massen der Fermionen, Bosonen.

Weg: Verlange weitere U(1)-Wechselwirkung:

$$L = \sum_L \overline{\psi}_L i\gamma_\mu D^\mu \psi_L + \sum_R \overline{\psi}_R i\gamma_\mu D_0^\mu \psi_R - \frac{1}{4} W_a^{\mu\nu} W_{a,\mu\nu} - \boxed{\frac{1}{4} B^{\mu\nu} B_{\mu\nu}}$$

$$D^\mu = \partial^\mu + igT_a W_a^\mu + ig'\frac{Y}{2}B^\mu \qquad \text{L koppelt an W,B}$$

$$D_0^\mu = \partial^\mu + \quad 0 \quad + ig'\frac{Y}{2}B^\mu \qquad \text{R koppelt nur an B}$$

– g,g' sind die Kopplungen der $SU(2)_L$ und $U(1)_Y$.
– Y ist Ladung der $U(1)_Y$: Hyperladung $Q=T_3+Y/2$
– B^μ ist das Eichfeld der $U(1)_Y$ – NICHT das Photon:

$$U(1)_Y \neq U(1)_{EM}$$

Mit der Definition von Auf/Absteige-Operatoren ...

$$W^\pm = \frac{1}{\sqrt{2}}(W_1 \pm iW_2) \qquad T^\pm = \frac{1}{\sqrt{2}}(T_1 \pm iT_2)$$

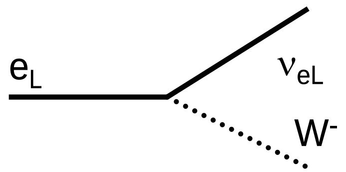
... und den physikalischen Eichfeldern $W^{\pm\mu}$ folgt:

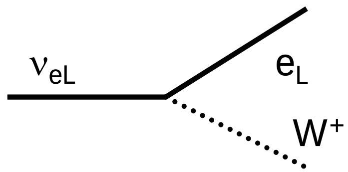
$$D^\mu = \partial^\mu + \underbrace{ig\left(T^+W^- + T^-W^+\right)^\mu}_{\text{Geladener Strom: } W^\pm.} + i\underbrace{\left(gT_3W_3^\mu + g'\frac{Y}{2}B^\mu\right)}_{\text{Neutraler Strom: } (Z,\gamma)?\ (B,W_3)?}$$

$$D_0^\mu = \partial^\mu + \qquad 0 \qquad + ig'\frac{Y}{2}B^\mu$$

Geladener Strom: $T^- = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad T^+ = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$

$$g\sum_L \overline{\psi}_L i\gamma_\mu \begin{pmatrix} 0 & W^+ \\ W^- & 0 \end{pmatrix}^\mu \psi_L = g\left(\overline{\nu}_{eL} i\gamma_\mu W^+ e_L + \overline{e}_L i\gamma_\mu W^- \nu_{eL}\right) + \ldots$$





Neutraler Strom: Verlange Elektromagnetismus:
Ladung $Q|\nu\rangle=0$, $Q|e_L\rangle=Q|e_R\rangle=-1$

$$L = \overline{\psi}_L i\gamma_\mu i\left(gT_3W_3^\mu + g'\frac{Y}{2}B^\mu\right)\psi_L + \overline{\psi}_R i\gamma_\mu i\left(g'\frac{Y}{2}B^\mu\right)\psi_R$$

$$= \sum_{e,\nu} \overline{\psi} i\gamma_\mu i\left(gT_3W_3^\mu + g'\frac{Y}{2}B^\mu\right)\psi$$

DIE LÖSUNG: $SU(2)_L \times U(1)_Y$

Noch einmal:

$$L_{W_3B} = \overline{\psi}_L i\gamma_\mu i\left(gT_3W_3^\mu + g'\frac{Y}{2}B^\mu \right)\psi_L + \overline{\psi}_R i\gamma_\mu i\left(g'\frac{Y}{2}B^\mu \right)\psi_R$$
$$= \sum_{e,\nu} \overline{\psi} i\gamma_\mu i\left(gT_3W_3^\mu + g'\frac{Y}{2}B^\mu \right)\psi$$

Das funktioniert, weil Operator der dritten Komponenten des schwachen Isospins T_3:

$$T_3|\nu_L\rangle = \frac{1}{2}|\nu_L\rangle \quad T_3|e_L\rangle = -\frac{1}{2}|e_L\rangle \quad T_3|e_R\rangle = 0$$

Übergang von W_3,B zu Z, Photon: Basiswechsel:

$$\begin{pmatrix} W_3 \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_W & \sin\theta_W \\ -\sin\theta_W & \cos\theta_W \end{pmatrix}\begin{pmatrix} Z \\ A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_W Z + \sin\theta_W A \\ \cos\theta_W A - \sin\theta_W Z \end{pmatrix}$$

θ_W: Weinberg- / elektroschwacher Mischungswinkel.

$$L_{\gamma Z} = \sum_{e,\nu} \overline{\psi} i\gamma_\mu i\left(g\sin\theta_W T_3 + g'\cos\theta_W \frac{Y}{2} \right)A^\mu\psi +$$
$$+ \sum_{e,\nu} \overline{\psi} i\gamma_\mu i\left(g\cos\theta_W T_3 - g'\sin\theta_W \frac{Y}{2} \right)Z^\mu\psi$$

Um auf die elektromagnetische WW zu kommen, muss gelten:

$$eQ = g\sin\theta_W T_3 + g'\cos\theta_W\, Y/2$$
$$= \qquad eT_3 + \qquad eY/2$$

... mit der Hyperladung $Y=2(Q-T_3)$ und:

$$e = g\sin\theta_W = g'\cos\theta_W$$

Hierdurch ist die EM-Ladung definiert. Beachte die Ähnlichkeit mit unserer alten Forderung: e=g=g'!

Kopplung an das Z^0:

$$g\cos\theta_W T_3 - g'\sin\theta_W\, Y/2 = \frac{e}{\cos\theta_W \sin\theta_W}\left(T_3 - \sin^2\theta_W Q\right)$$

Damit wird aus der Lagrange-Dichte:

$$L_{\gamma Z} = \overline{\psi} i\gamma_\mu i\left(eQA^\mu + \frac{e}{\cos\theta_W \sin\theta_W}\left(T_3 - \sin^2\theta_W Q\right)Z^\mu \right)\psi$$

Im Gegensatz zum W koppelt das Z auch an rechtshändige Ströme (B koppelt an L und R)
→ Modifikation der (V-A)-Kopplung! Für das Elektron:

$$\frac{1}{2}\left(c_V - c_A\gamma^5\right)\psi \quad c_V = 2\sin^2\theta_W - \frac{1}{2} \quad c_A = -\frac{1}{2}$$

QUANTENZAHLEN DER $SU(2)_L \times U(1)_Y$

	Q	T_3	$Y=2(Q-T_3)$	$g_Z=T_3-Q\sin^2\theta_W$	$2c_V$ $=2T_3-4Q\sin^2\theta_W$	$2c_A$ $=2T_3$
ν_{eL}	0	+1/2	-1	1/2	1	1
e_L	-1	-1/2	-1	$-1/2+\sin^2\theta_W$	$-1+4\sin^2\theta_W$	-1
ν_{eR}	0	0	0	0	0	0
e_R	-1	0	-2	$\sin^2\theta_W$	$4\sin^2\theta_W$	0
u_L	2/3	+1/2	1/3	$1/2-2/3\sin^2\theta_W$	$1-8/3\sin^2\theta_W$	1
d_L	-1/3	-1/2	1/3	$-1/2+1/3\sin^2\theta_W$	$-1+4/3\sin^2\theta_W$	-1
u_R	2/3	0	4/3	$-2/3\sin^2\theta_W$	$-8/3\sin^2\theta_W$	0
d_R	-1/3	0	-2/3	$1/3\sin^2\theta_W$	$4/3\sin^2\theta_W$	0

Aber was machen wir mit den Massen der Fermionen und Bosonen?
-> Higgs-Mechanismus (später)

Zunächst: gibt es die W-und Z-Bosonen tatsächlich?

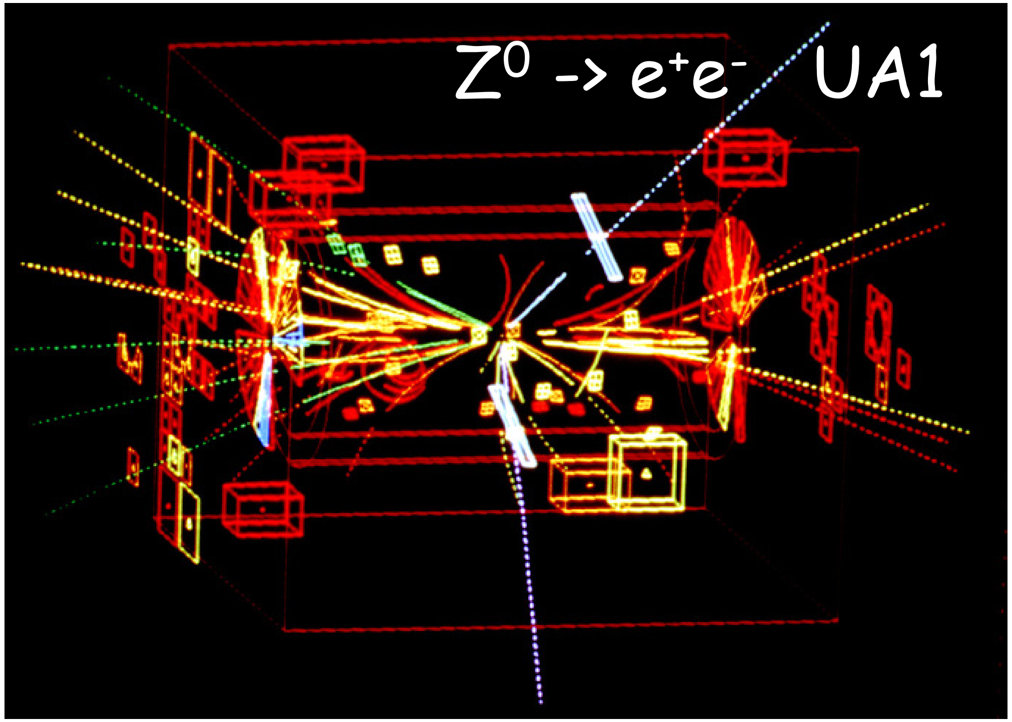
Entdeckung von W und Z (1983)

- To produce the heavy W and Z bosons (m ~ 80-90 GeV) need high energy collider!
- 1978-80: conversion of SPS proton accelerator at CERN into proton-antiproton collider
  challenge: make antiproton beam!
- success!
  -> first W and Z produced 1982/83

(Nobel 1984)

Carlo Rubbia

Simon van der Meer



ENTDECKUNG der W±- und Z-BOSONEN

Entdeckung der W- und Z-Bosonen

Mit der Entdeckung der neutralen Ströme (1973), der Entdeckung von Charm (1974) und der GSW Theorie der elektroschwachen WW war es 1975 klar, dass $\mathbf{m_W \sim 80}$ und $\mathbf{m_Z \sim 90}$ **GeV**

Rubbia+van der Meer: Umbau des CERN 450 GeV p-Synchrotrons für Proton-Anti-Proton-WW mit Luminosität ~50 Ereignisse/mb·sec (stochastische Kühlung, 1 Füllung/Tag!)

Bau von 2 Großdetektoren: **UA1 und UA2**

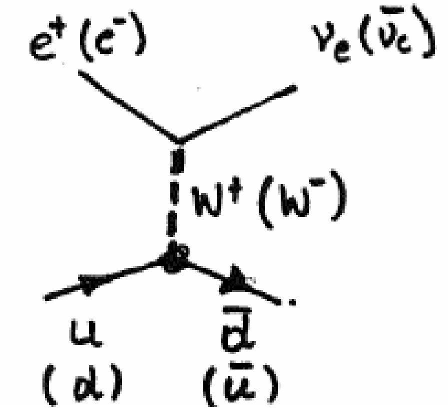
1983 W± und Z⁰ (mit vorhergesagten Eigenschaften) entdeckt

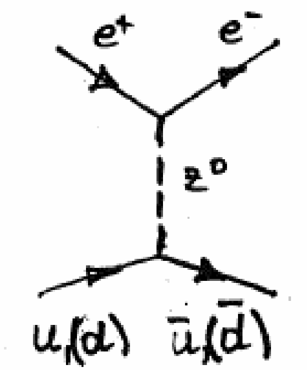
1989-2000: Präzisionsmessungen LEP in e^+e^-

jetzt: $\bar{p}\,p$ 2 TeV am Tevatron (FNAL-Chicago)

ab 2007: $p\,p$ 14 TeV am LHC (CERN-Genf)

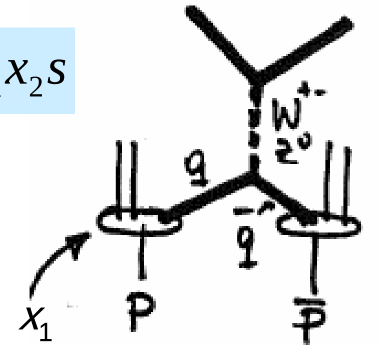
W± und Z⁰ Erzeugung in $\bar{p}\,p$ -Reaktionen





Quarkverteilung im Proton: Strukturfunktion $\mathbf{F_2(x,Q^2)}$

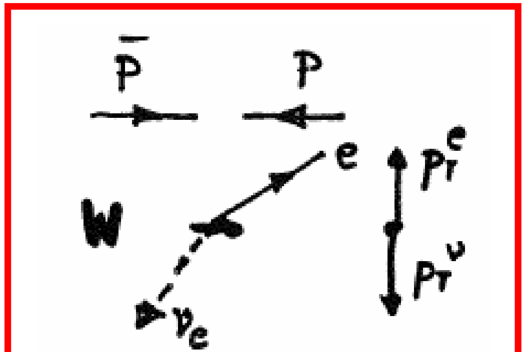
$$M_{W,Z}^2 = (x_1 p_p + x_2 p_{\bar{p}})^2 = x_1 x_2 s$$



Nachweis des W-Zerfalls:

$W^+ \rightarrow e^+\nu_e$, $\mu^+\nu_\mu$ } beobachtet p_T-missing*)

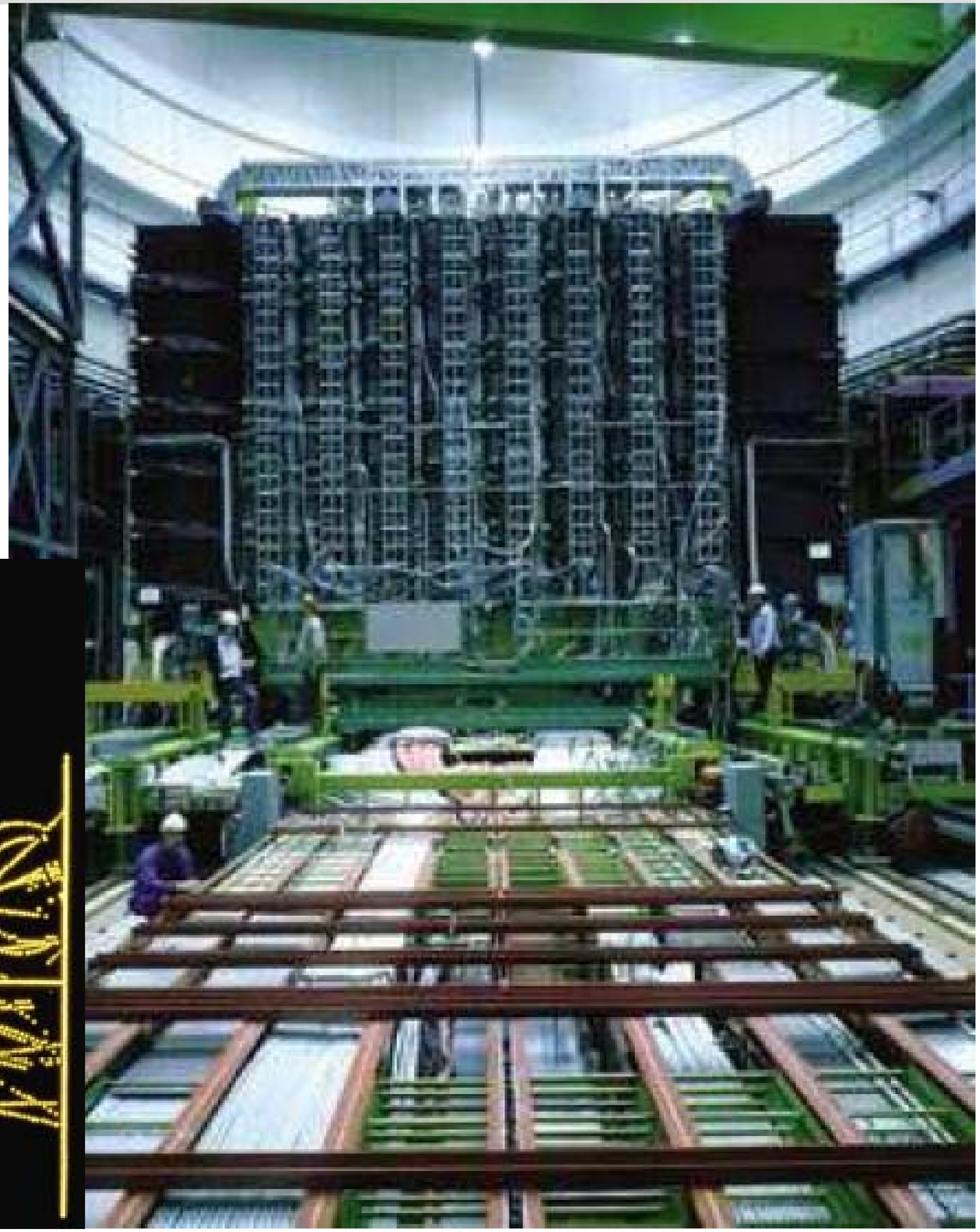
$\tau^+\nu_\tau$, $u\,\bar{d}$, $c\,\bar{s}$ } zu großer Untergrund +Auflösung — da wie normale 2-Jet-Ereignisse



$$-\vec{p}_T^{\,e} \approx \vec{p}_T^{\,\bar{\nu}} \quad |\vec{p}_T| \lesssim \frac{M_W}{2}$$

*) s relativ klein → W wird mit $p_T \sim 0$ erzeugt → e und ν_e Transversalimpuls entgegengesetzt $\sim M_W/2$
- für $x_1 \neq x_2$ → W hat Longitudinalimpuls

ENTDECKUNG der W±-und Z-BOSONEN



UA1-Detektor:

- Driftkammer 2x2x6m³ in 0.7 Tesla Feld, $\delta x \sim 0.2$mm
- Kalorimeter zur Erkennung von Elektronen
- Kammern und Fe-Absorber zur Erkennung und Vermessung von Muonen

erwartet: jedes 10^7 Ereignis: $p+p \rightarrow W(\rightarrow e\ \nu_e)+X$

„Typisches“ W-Ereignis:

e⁻

ENTDECKUNG der W±-und Z-BOSONEN

UA1 / UA2-Ergebnisse:

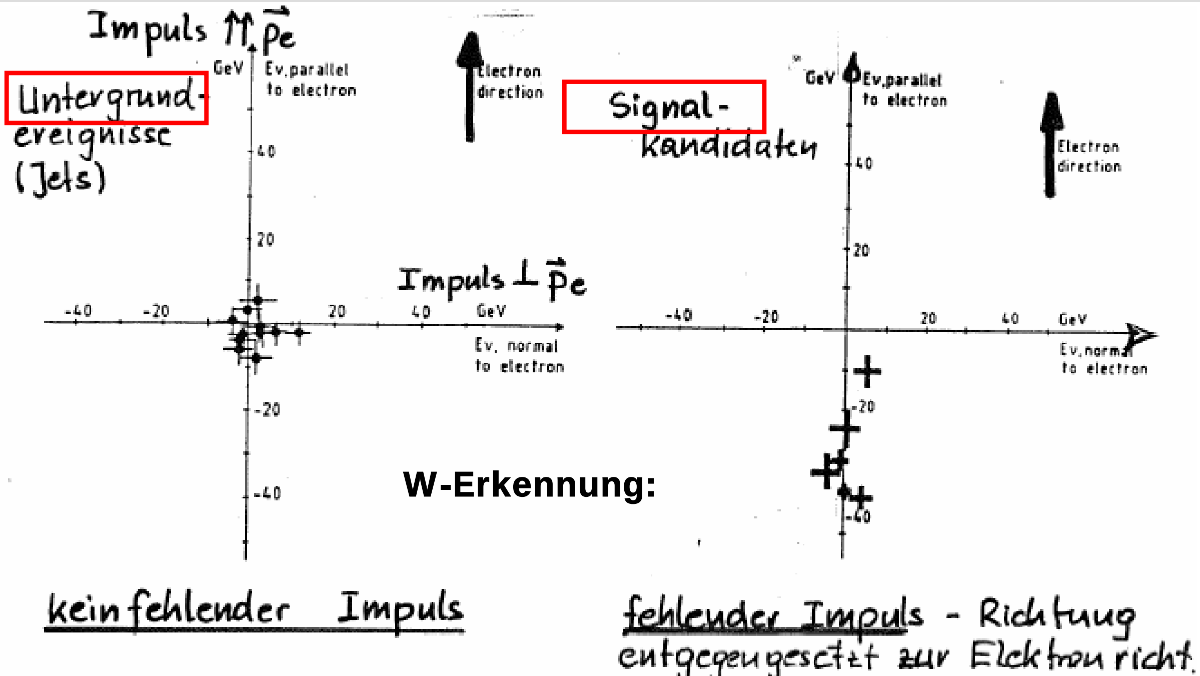
Jan.1983: 7 Ereignisse W→ $e\nu$

→ M_W=81±5 GeV

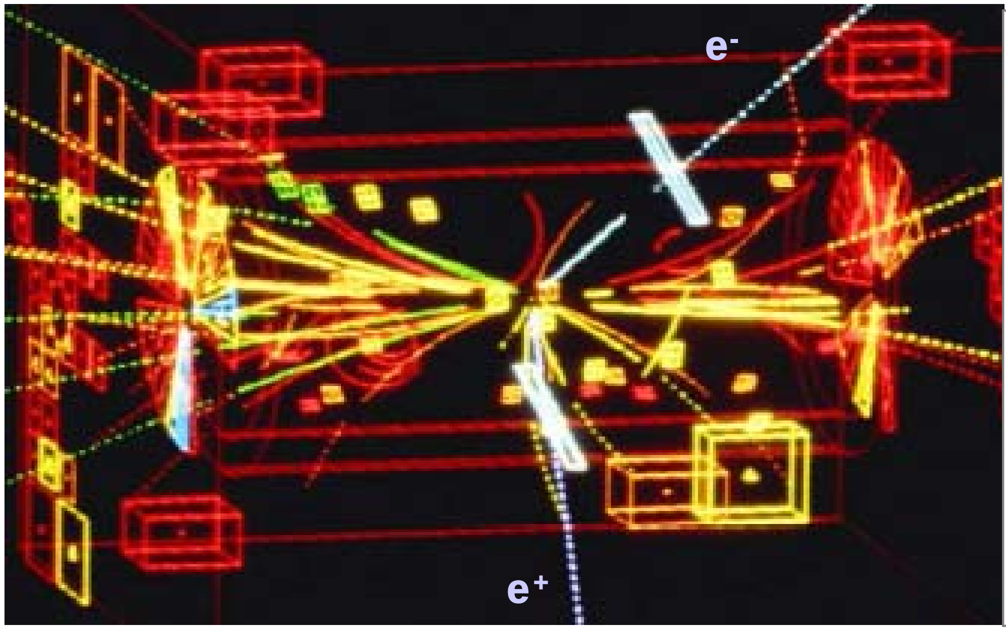
Juli 1983: 17 Ereignisse (UA1 +UA2) Z^0→ $e^+e^-/\mu^+\mu^-$ → M_Z=90 GeV

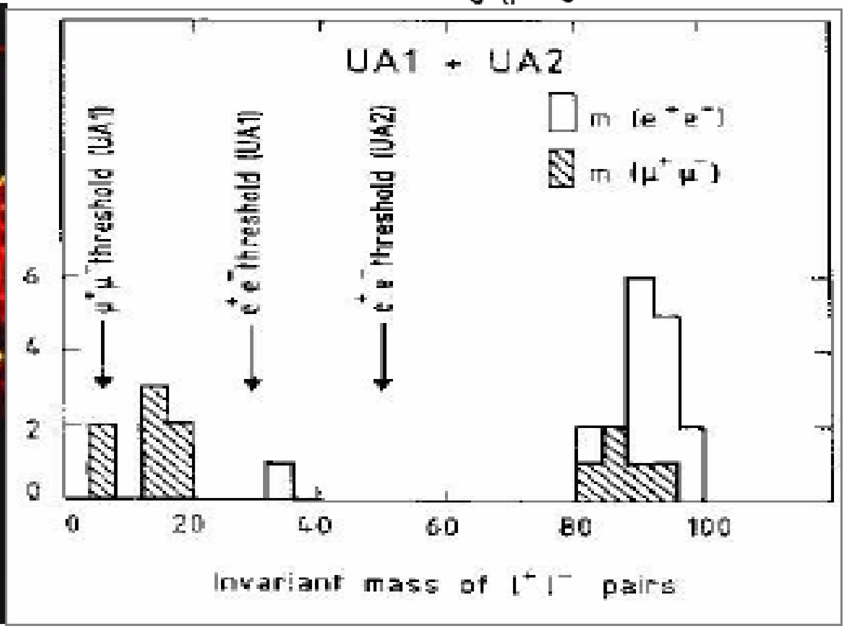
(σ x Γ ~10xkleiner! aber klarere Signatur, da kein „fehlendes“ Neutrino)

1984: Nobelpreis für S.van der Meer und C.Rubbia



Z^0-Ereignis in UA1

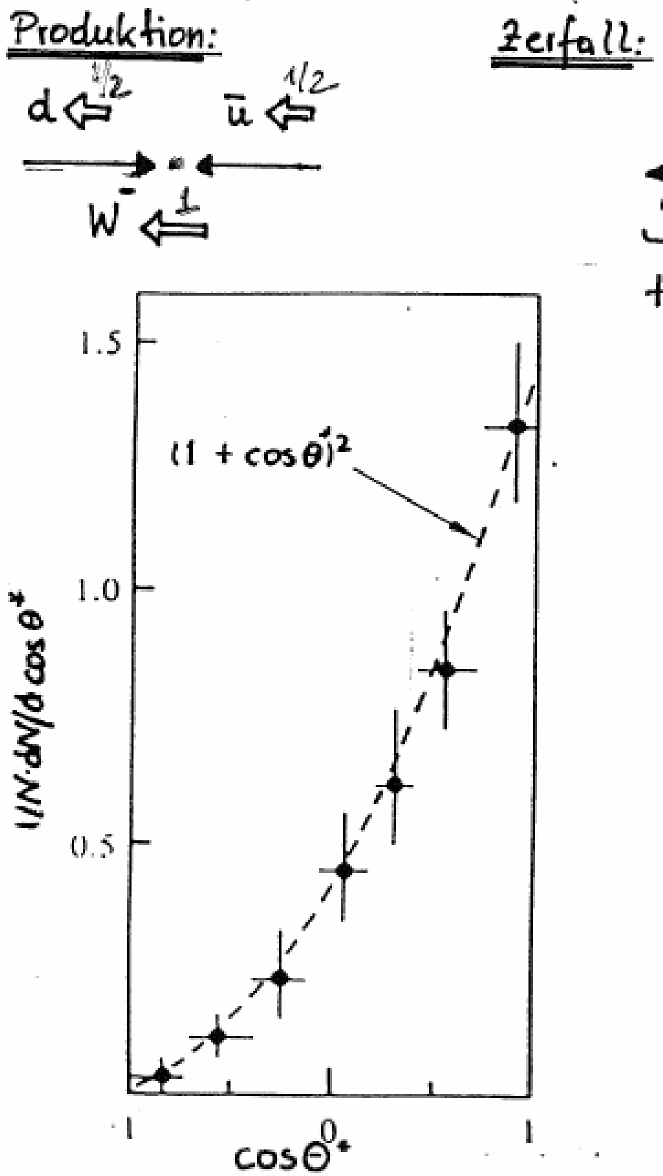


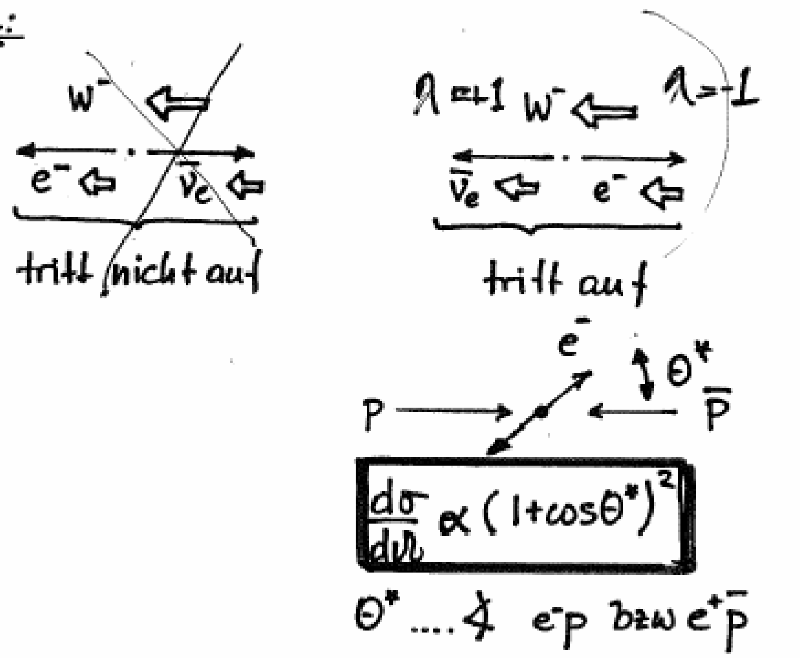


EIGENSCHAFTEN des W-BOSONs

Paritätsverletzung bei W-Erzeugung/Zerfall:

P-Verletzung in schwacher WW: nur links-händige Fermionenen und recht-händige Anti-Fermionen koppeln





Präzisionsbestimmung
M_W und Γ_W am TeVatron
und LEP in $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$:

m_W = 80.412 ± 0.042 GeV
Γ_W = 2.15 ± 0.09 GeV

√s (GeV)