

Kerne und Teilchen

Moderne Experimentalphysik III

Vorlesung 12

MICHAEL FEINDT
INSTITUT FÜR EXPERIMENTELLE KERNPHYSIK

Das Standardmodell

Suche nach W und Z

- $e^+e^- \rightarrow Z^0$ möglich für $\sqrt{s} = 2E \geq M_Z$ seit 1989 (LEP, SLC)

 $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$ möglich für $\sqrt{s} \geq M_{W^+}$ seit 1996 (LEP II)
 } „saubere“ Bedingungen

- Entdeckung gelang 1983 ff. **Carlo Rubbia, Simon v. d. Meer**

 (CERN, UA1) am Hadron-Collider Sp \bar{p} S: **(Nobelpreis 1984)**

$$u\bar{u} \rightarrow Z^0 \quad d\bar{d} \rightarrow Z^0 \quad d\bar{u} \rightarrow W^- \quad u\bar{d} \rightarrow W^+$$

Wenn aus p + p : $\sqrt{s} = \sqrt{\langle x_v \rangle \cdot \langle x_s \rangle \cdot s_{beam}}$ = 82 GeV $\Rightarrow \sqrt{s_{beam}} \approx 600$ GeV

$\begin{matrix} 0.12 \downarrow & & \downarrow 0.04 \\ \langle x_v \rangle & \cdot & \langle x_s \rangle \end{matrix}$

Wenn aus p + \bar{p} : $\sqrt{s} = \sqrt{\langle x_v \rangle^2 \cdot s_{beam}}$ = 82 GeV $\Rightarrow \sqrt{s_{beam}} \approx 320$ GeV

- Signatur: $Z^0 \rightarrow e^+e^-, \mu^+\mu^-$ hochenergetische Leptonpaare

$$W^+ \rightarrow e^+ \nu_e, \mu^+ \nu_\mu$$

$\begin{matrix} \uparrow & & \uparrow \\ e^+ & & \mu^+ \end{matrix}$

nur 1 hochenergetische Leptonspur
+ fehlender Transversalimpuls (vom Neutrino)

UA1- Experiment: Entdeckung des W

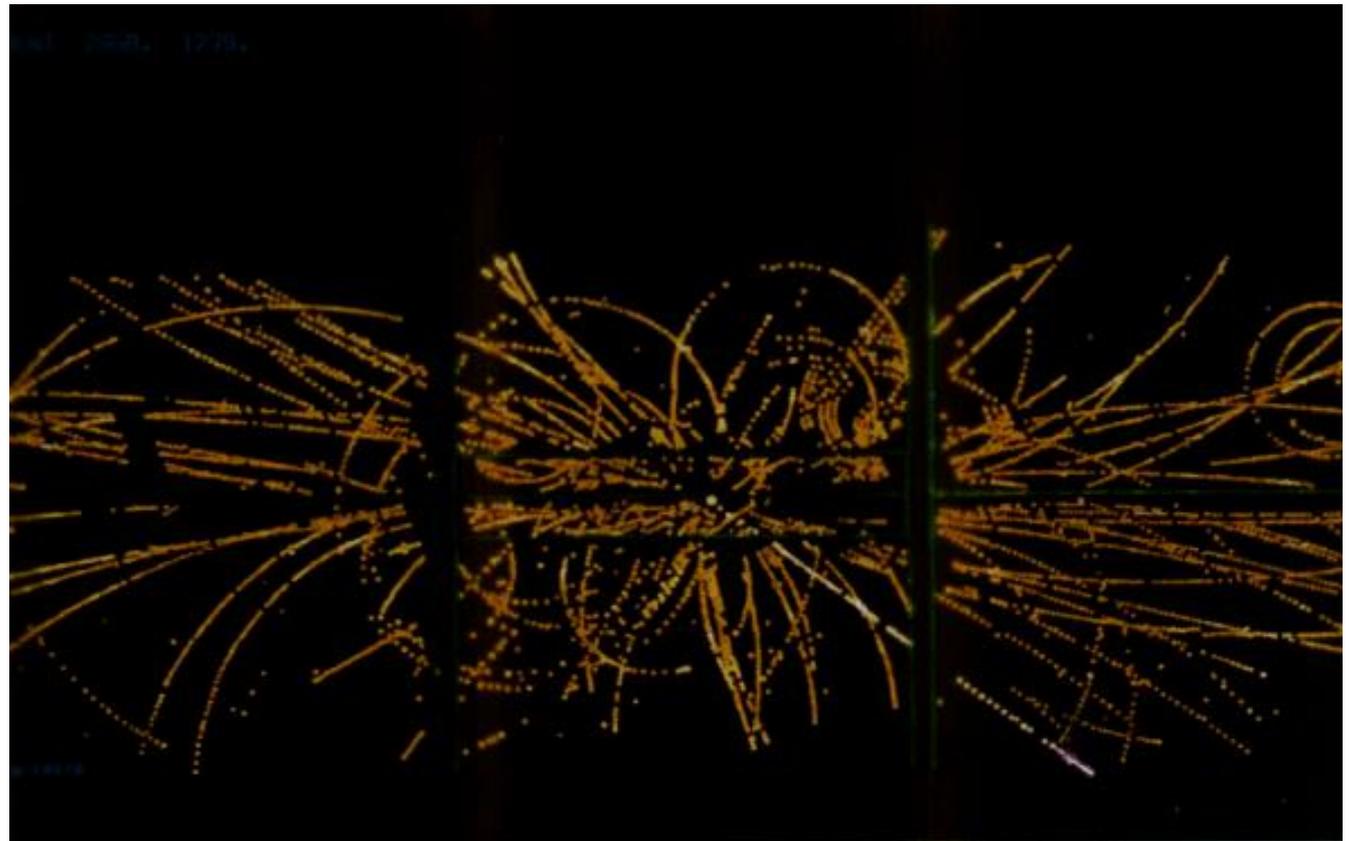
$$p\bar{p} \rightarrow W^\pm X$$



$$e^\pm \nu$$



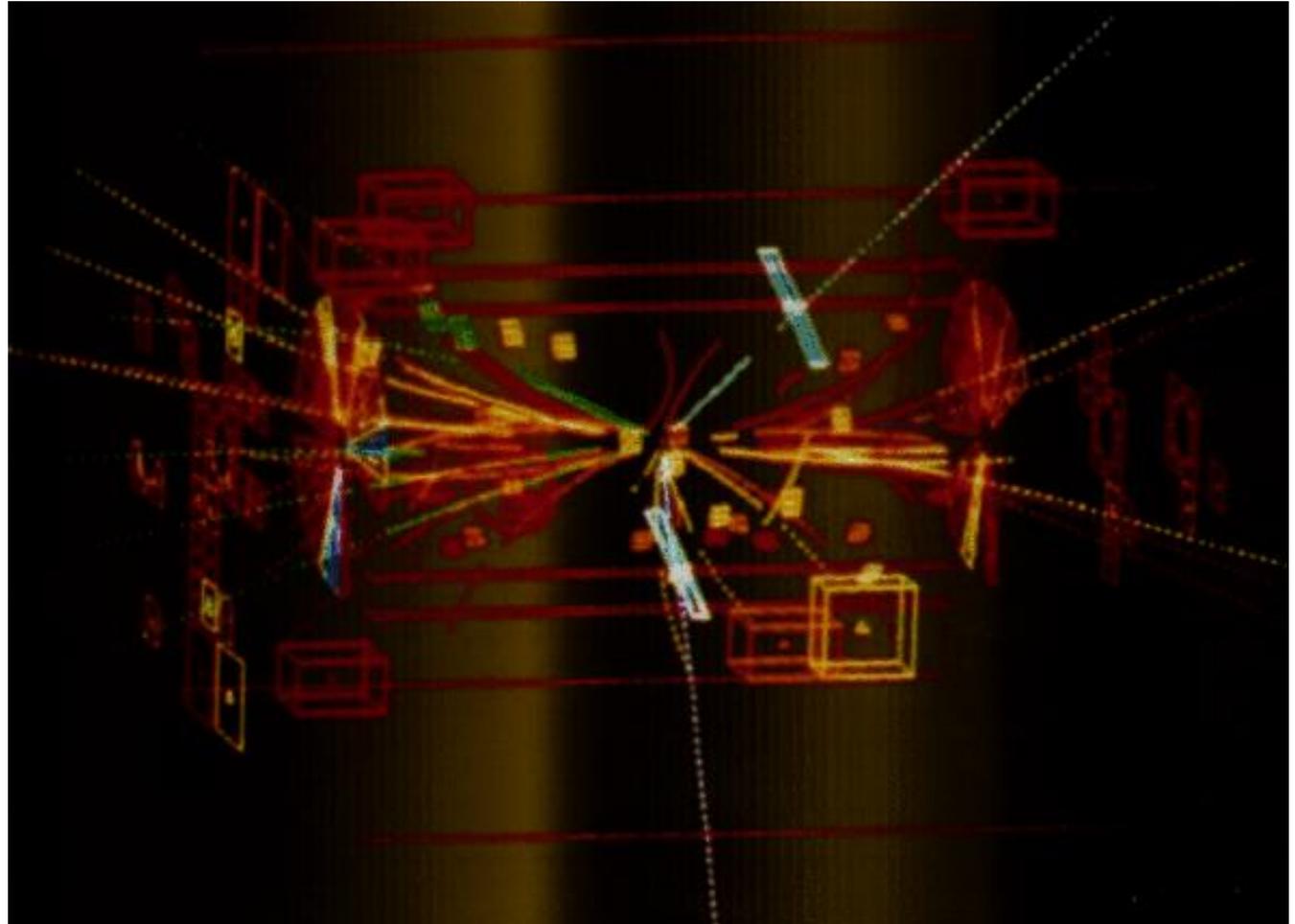
fehlende Energie
fehlender Impuls

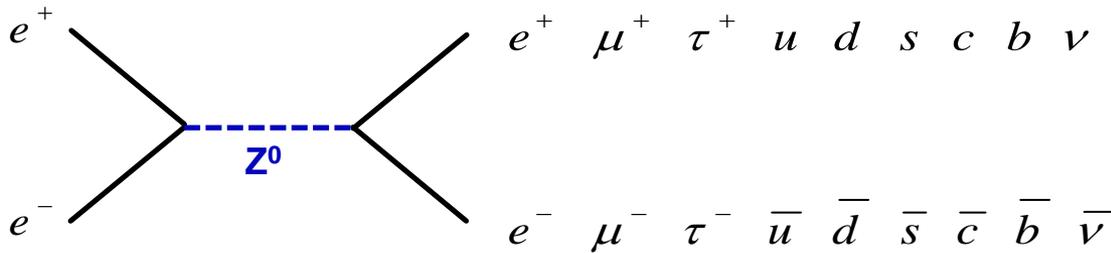


UA1- Experiment: Entdeckung des Z

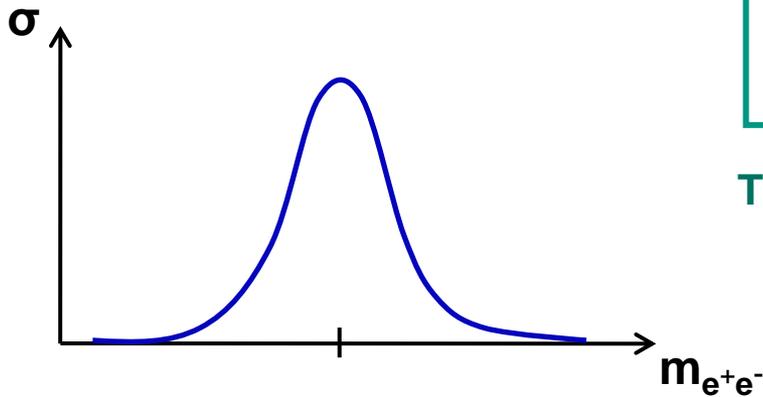
$$Z^0 \rightarrow e^+ e^-$$

UA1





Wie kann man $Z^0 \rightarrow \nu \bar{\nu}$ messen ?



$$\Gamma_{ee} + \Gamma_{\mu\mu} + \Gamma_{\tau\tau} + \Gamma_{qq} \quad \text{vergl. mit} \quad \Gamma_{tot}$$

$$\Gamma_{\nu\nu} = \Gamma_{tot} - \Gamma_{sichtbar}$$

Theorie für # ν - Familien =

1
 2
3
 4
 5

⇒

W- und Z- Zerfälle

- $W^\pm \rightarrow e^\pm \bar{\nu}_e^{(-)}$ mit $10.9 \pm 0.4\%$
- $\mu^\pm \bar{\nu}_\mu^{(-)}$ $10.2 \pm 0.5\%$
- $\tau^\pm \bar{\nu}_\tau^{(-)}$ $11.3 \pm 0.8\%$
- Hadronen** $\approx 68\%$

- W koppelt an alle linkshändigen Fermionen gleich stark.
(Die 3. Quark-Familie ist zu schwer: $m_{\text{top}} = 172 \text{ GeV} \rightarrow m_W = 81 \text{ GeV}$.)

⇒ nur 2 $q\bar{q}$ x 3 Farben berücksichtigen:
 $(u\bar{d}'), (\bar{c}s')$

1	:	1	:	1	:	3	:	3
1/9		1/9		1/9		1/3		1/3
						2/3		

- $Z \rightarrow 6$ leptonische + 5 hadronische Kanäle

Erwartung:

<u>1 : 1 : 1</u>	:	<u>1 : 1 : 1</u>	:	3 : 3 : 3 : 3 : 3
$e\bar{e}, \mu\bar{\mu}, \tau\bar{\tau}$		$\nu_e\bar{\nu}_e, \nu_\mu\bar{\nu}_\mu, \nu_\tau\bar{\nu}_\tau$		$u\bar{u} \quad d\bar{d} \quad s\bar{s} \quad c\bar{c} \quad b\bar{b}$

Experiment: $Z_0 \rightarrow e^+e^- ; \mu^+\mu^- ; \tau^+\tau^-$ je 3.4 % $Z_0 \rightarrow \nu \bar{\nu}$ 20 % $Z_0 \rightarrow$ Hadronen 70 %	}	keine Leptonuniversalität? auch Kopplung an el. Ladung?
---	---	--

elektroschwache Vereinheitlichung

(Weinberg – Salam – Modell)

■ Definition schwacher Isospin T

Fermionen			T	T ₃	Z _f
$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}_L$	1/2	+1/2 -1/2	0 -1
e_R	μ_R	τ_R	0	0	-1
$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}_L$	1/2	+1/2 -1/2	+2/3 -1/3
u_R	c_R	t_R	0	0	+2/3
d_R	s_R	b_R	0	0	-1/3

Zwei Dubletts koppeln an W^\pm

Drei Singletts koppeln nicht an W^\pm

$Z_f - T_3 = \text{konst.}$ in einem Dublett

T_3 in CC (charged current)-Reaktionen erhalten:

$$T_3(W^\pm) = \pm 1$$

das sieht aus wie zwei Komponenten eines schwachen Triplets

⇒ es sollte noch ein W^0 geben mit
 $T = 1, T_3 = 0$

elektroschwache Vereinheitlichung

- W^0 sollte gleiche Kopplung haben wie W^\pm , deshalb kann W^0 nicht Z^0 sein
- **Postuliere Existenz eines Bosons B^0 mit $T=0$ und $T_3=0$** (Singlett im schwachen Isospin)

	schwache Kopplung g $T = 1$	schwache Kopplung g' $T = 0$
$T_3 = +1$	$\begin{pmatrix} W^+ \\ W^0 \\ W^- \end{pmatrix}$	B^0
$T_3 = 0$		
$T_3 = -1$		

koppeln an Fermionen, ohne T_3 zu ändern, d.h. Flavour wird nicht geändert

- Experiment: es gibt 2 neutrale Vektorbosonen: γ und Z^0
- **elektroschwache Vereinheitlichung:**

γ und Z^0 sind Linearkombinationen von W^0 und B^0

$$\begin{aligned}
 |\gamma\rangle &= \cos \theta_w |B^0\rangle + \sin \theta_w |W^0\rangle \\
 |Z^0\rangle &= -\sin \theta_w |B^0\rangle + \cos \theta_w |W^0\rangle
 \end{aligned}$$

θ_w : Weinberg Winkel

elektroschwache Vereinheitlichung

- komplizierte Kopplungen des Z^0

$$g_z(f) = \frac{g}{\cos \theta_w} \cdot (T_3 - z_f \cdot \sin^2 \theta_w)$$

Photon γ koppelt an el. Ladungen von ℓ_L, ℓ_R, q_L, q_R , nicht an ν 's

- Relationen:

$$\tan \theta_w = \frac{g'}{g} \quad \sin \theta_w = \frac{g'}{\sqrt{g^2 + g'^2}} \quad \cos \theta_w = \frac{g}{\sqrt{g^2 + g'^2}}$$

$$e = g \cdot \sin \theta_w \quad \alpha_{\text{schwach}} \propto g^2 \quad \alpha_{\text{em}} \propto e^2$$

$$\frac{e^2}{g^2} = \sin^2 \theta_w = 0.23124 \quad (24)$$

experimentell aus:

- νe – Streuung
- Z^0 – Breite
- $m_w/m_z = \cos \theta_w$
- elektroschwacher Interferenz

Parameter und Merkmale des Standardmodells

Kopplungskonstanten	$e, g, \sin \theta_W$	} (> 22 Parameter)
Boson – Massen	m_W, m_{Higgs}	
Lepton – Massen	m_e, m_μ, m_τ ; $m_\nu = 0$ → nicht mehr	
Quark – Massen	$m_u, m_d, m_c, m_s, m_t, m_b$	
Parameter der CKM–Matrix	3 Winkel θ_i , Phase δ	
QCD Parameter	Λ_{QCD}	

- L, B separat erhalten
- $\nu_L, \bar{\nu}_R, m_\nu = 0$
- V-A – Kopplung
- $q(e^+) = q(p)$ obwohl Lepton- und Quarksektor völlig getrennt sind
- **Eichsymmetrie:**

SU(3)	x	SU(2)	x	U(1)
stark		schwach		e.m.
(8 Gluonen)		W^\pm, W^0		B^0

Beyond the Standard – Modell?

- Viele Ansätze, z.B.
 - **große Vereinheitlichung GUT (Grand Unified Theory)** aller drei Wechselwirkungen (bei $\approx 10^{15}$ GeV)
 - **SUPERSYMMETRIE (SUSY):**
zu jedem $\left\{ \begin{array}{l} \text{Fermion} \\ \text{Boson} \end{array} \right\}$ gibt es einen $\left\{ \begin{array}{l} \text{bosonischen} \\ \text{fermionischen} \end{array} \right\}$ Partner
 - **Superstring – Theorien** (Gravitation)
- Ziele
 - Reduktion der Parameter
 - Proton-Zerfall (Baryon – Antibaryon – Asymmetrie im Universum)
 - Vermeidung von theoretischen Schwierigkeiten aufgrund punktförmiger Struktur im Standardmodell (quadratische Divergenzen)

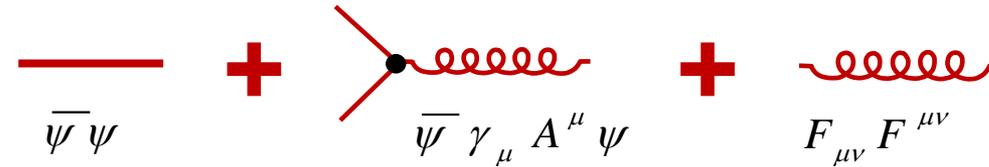
Eichsymmetrie

- Elektrodynamik: U(1) : **lokale Phaseninvarianz der Wellenfunktion**

⇒ ersetze ∂_μ durch kovariante Ableitung $D_\mu = \partial_\mu - ieA_\mu(x)$

das führt zur Wechselwirkung zwischen geladenen Fermionen und Photonen

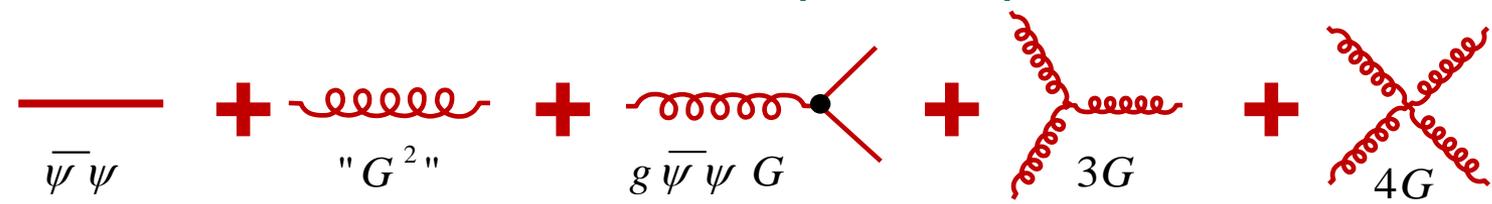
QED - Lagrangefunktion

$$\mathcal{L} = \bar{\psi} \psi + \bar{\psi} \gamma_\mu A^\mu \psi + F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$


Die Physik hängt nicht von der Phase der Wellenfunktion ab!

- Starke WW: SU(3): - lokale Transformation α im Farbraum
- 8 Eichfelder (Gluonen)

QCD - Lagrangefunktion

$$\mathcal{L} = \bar{\psi} \psi + "G^2" + g \bar{\psi} \psi G + 3G + 4G$$


Die Physik hängt nicht davon ab, welche Farbe ich rot und welche blau nenne!

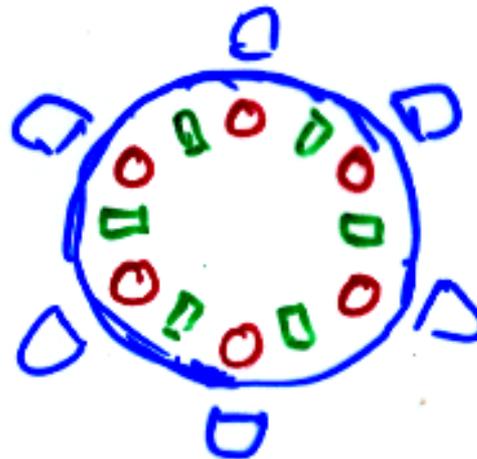
Massen in Eichsymmetrien

- Elektroschwache WW: $U(1) \times \underbrace{SU(2)}_{\substack{\text{schwache WW} \\ \text{Eichbosonen } W^+, W^0, W^-}}$
- Eichprinzip funktioniert nur für **MASSELOSE** Eichbosonen
- Aber: W – Masse ist sehr hoch...
- Ausweg: **Spontane Symmetriebrechung**
Higgs - Mechanismus
- Massenterm in Lagrange – Funktion:

$$\mathcal{L} = \underbrace{\frac{1}{2} (\partial_\mu \phi)(\partial^\mu \phi)}_{\text{kinetischer Term}} - \underbrace{\frac{1}{2} m^2 \phi^2}_{\text{Massenterm } \propto \phi^2}$$

Spontane Symmetriebrechung

Der Grundzustand einer Theorie hat eine geringere Symmetrie als die Lagrangefunktion



Spontane Symmetriebrechung:

Der erste, der sich spontan für eine Serviette entscheidet, definiert für alle, welche wem gehört (linke oder rechte)

runder Tisch mit 6 Gedecken
und 6 Servietten zwischen den Tellern

Symmetrie:

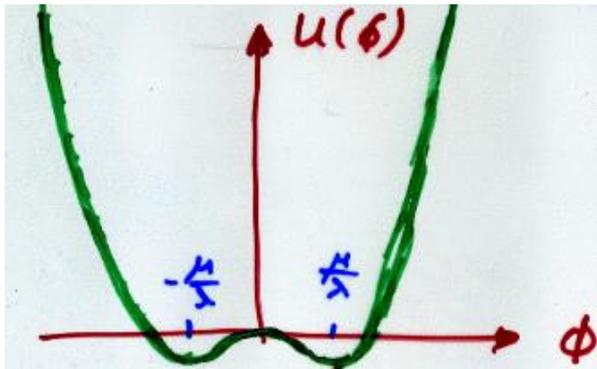
Jeder sieht rechts und links von ihm eine Serviette. Es ist völlig undefiniert, welche ihm gehört.

⇒ **Problem: sehr großer Tisch, an mehreren Stellen werden quasi simultan Entscheidungen getroffen** ⇒ **lokale Symmetrie**

Das Higgs – Potential

$$L = T - U$$

Potential $U(\phi) = -\frac{1}{2}\mu^2\phi^2 + \frac{1}{2}\lambda^2\phi^4$



↑ spontan gebrochene Symmetrie
am Minimum

Minimum nicht um Null, sondern bei:

$$\phi = \pm \mu/\lambda$$

Neue Variable η für das Feld:

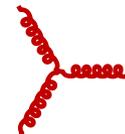
$$\eta = \phi \pm \mu/\lambda$$

η beschreibt massives Teilchen:

$$L = \frac{1}{2}(\partial_\mu \eta)(\partial^\mu \eta) - \mu^2 \eta^2 \pm \mu \lambda \eta^3 - \frac{1}{4} \lambda^2 \eta^4$$

kinetischer Term

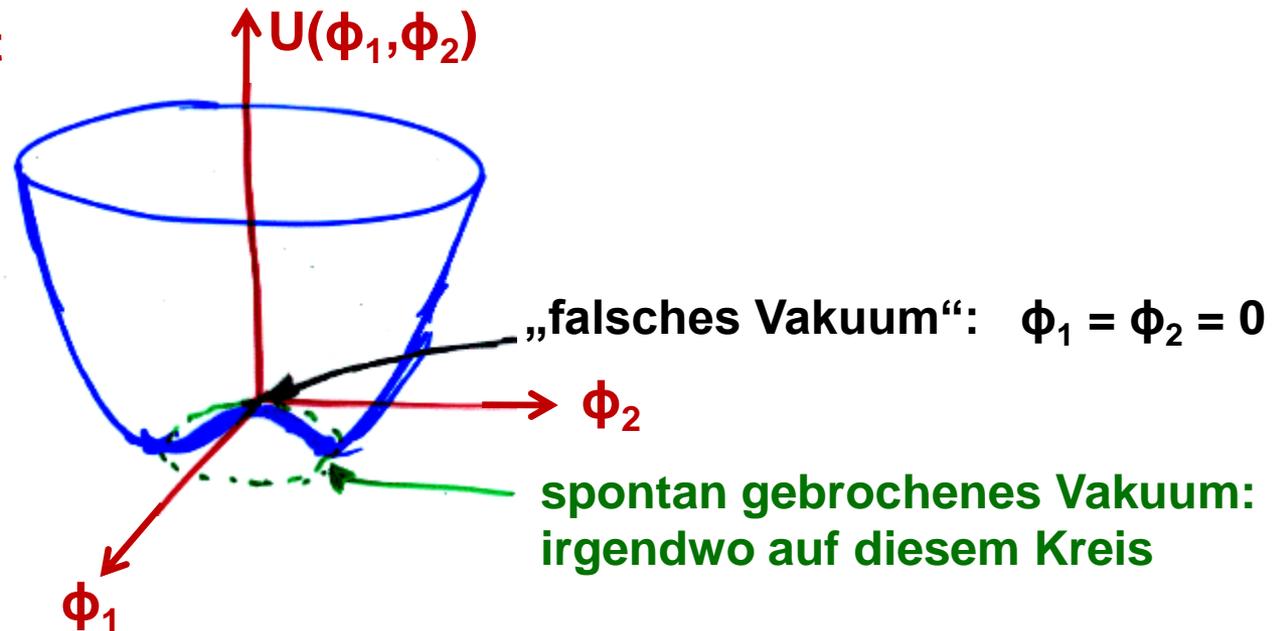
Massenterm $\propto \phi^2$



Zweidimensionales Higgs – Potential

- hier diskrete Symmetrie, aber in mehreren Dimensionen ist das kontinuierlich:

Mexican Hat Potential



Higgs – Mechanismus

- 1) addiere Potential, dessen Grundzustand **die Symmetrie des Potentials spontan** bricht. Der Grundzustand ist nicht bei $\phi = 0$.
 - 2) als Konsequenz taucht ein **masseloses Goldstone – Boson auf**.
 - 3) **Lokale Eichinvarianz** und Wahl einer **speziellen Eichung** sorgt für:
 - **Verschwinden des masselosen Goldstone – Bosons**
 - **Erzeugung eines Massenterms für Eichbosonen**
 - **Erzeugung eines skalaren massiven Teilchens, des Higgs – Bosons**
-
- Das Goldstone – Boson wird vom masselosen Eichfeld „aufgefressen“, das dadurch Masse erhält.
 - Oder: Masseloses Vektorfeld hat nur 2 Freiheitsgrade (transversale Polarisation). Mit Masse erhält es einen 3. Freiheitsgrad (longitudinale Polarisation), der vom Goldstone – Boson kommt.

Massen – Generierung von Fermionen

- Kopplung von masselosen Fermionen mit Higgs – Teilchen erzeugt einen Massenterm in der Lagrangefunktion

$$\bar{\psi} H \psi \quad m \bar{\psi} \psi$$

- Da durch die spontane Symmetriebrechung auch im Grundzustand der Vakuum – Erwartungswert ungleich Null ist, ist die Masse immer vorhanden

$$m_{\text{Higgs}} > 114 \text{ GeV}$$

Suche nach Higgs – Bosonen : LEP II
 Tevatron
 ⇒ LHC

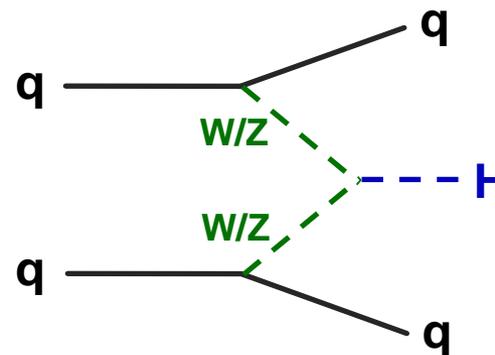
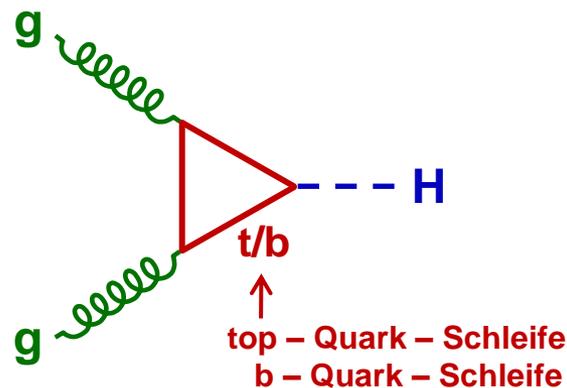
Higgs – Boson koppelt an Masse

- Zerfälle je nach Masse hauptsächlich in schwerste kinematische erlaubte Teilchenpaare:

Masse:	H	→	b\bar{b}	schmal  breit
⋮	H	→	W⁺W⁻	
160 GeV	H	→	ZZ	
⋮	H	→	t\bar{t}	
350 GeV	H	→	t\bar{t}	

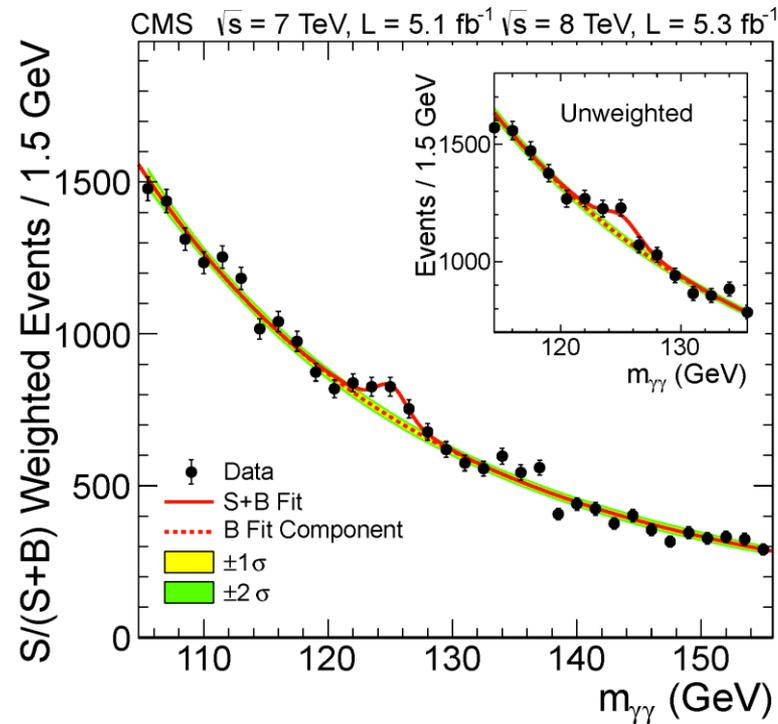
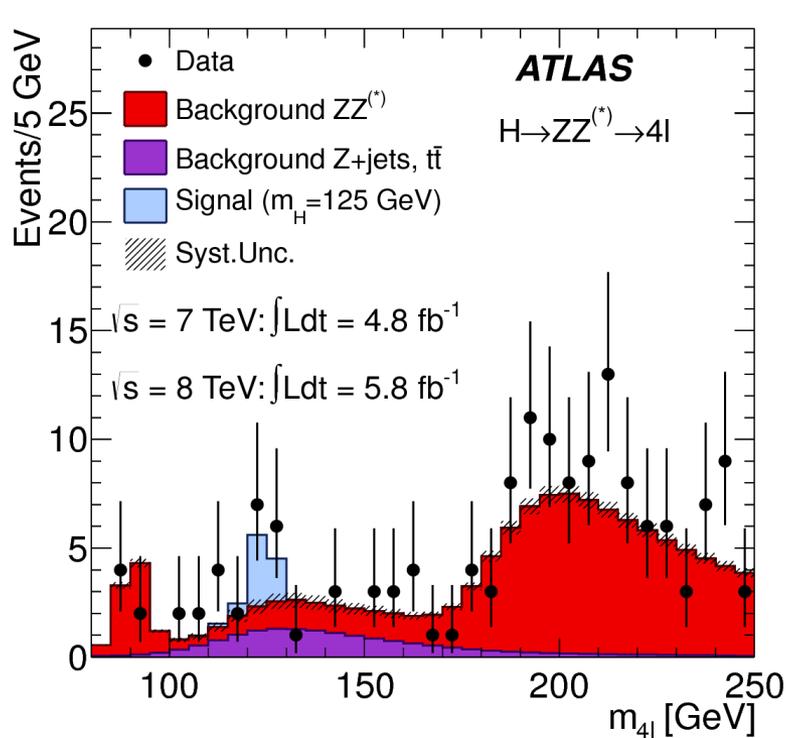
Das Higgs – Boson war das letzte fehlende Teilchen im Standardmodell

- Erzeugung am LHC:



Entdeckung des Higgs-Bosons

2012: Entdeckung durch ATLAS und CMS

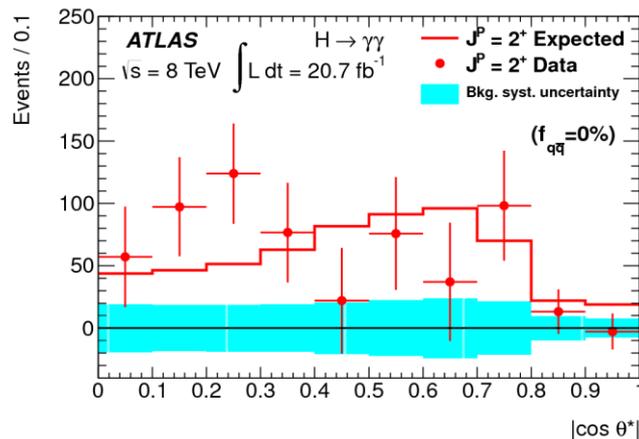
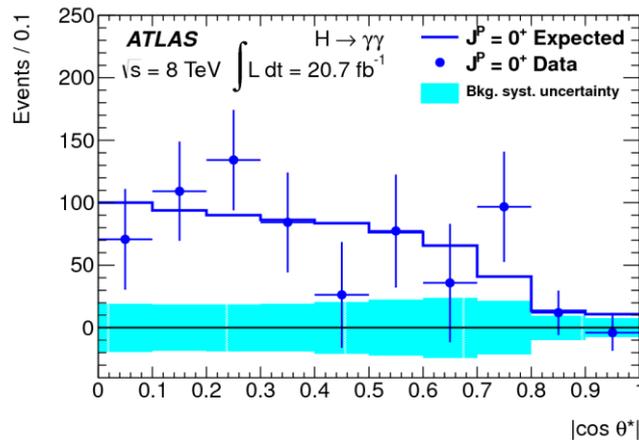


2013: Nobelpreis Peter Higgs, François Englert



Vermessung des Higgs-Bosons

■ Masse: 125.9 ± 0.4 GeV



CMS Preliminary
Individual Results

$VH \rightarrow b\bar{b}$ arXiv:1310.3687
 $\mu(m_H = 125.0 \text{ GeV}) = 1.0 \pm 0.5$

$H \rightarrow \tau\tau$ arXiv:1401.5041
 $\mu(m_H = 125.0 \text{ GeV}) = 0.78 \pm 0.27$

$H \rightarrow \gamma\gamma$ HIG-13-001
 $\mu(m_H = 125.0 \text{ GeV}) = 0.78 \pm 0.27$

$H \rightarrow WW$ arXiv:1312.1129
 $\mu(m_H = 125.6 \text{ GeV}) = 0.72 \pm 0.19$

$H \rightarrow ZZ$ arXiv:1312.5353
 $\mu(m_H = 125.6 \text{ GeV}) = 0.93 \pm 0.27$

$\sqrt{s} = 7$ TeV, $L \leq 5.1 \text{ fb}^{-1}$ $\sqrt{s} = 8$ TeV, $L \leq 19.7 \text{ fb}^{-1}$

