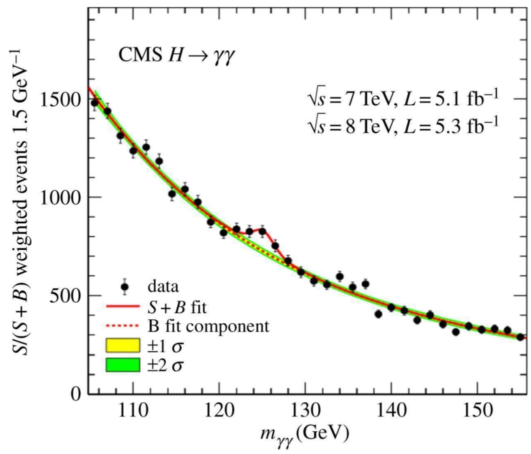
Higgs-Physik rückwärts

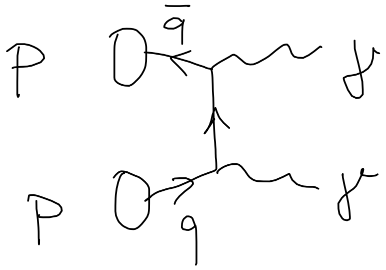
Higgs-Entdeckung



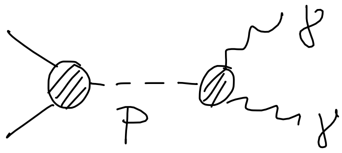
Warum ist das ein Higgs-Signal?

LHC : pp

$p = (\text{quarks} + \text{gluonen})$

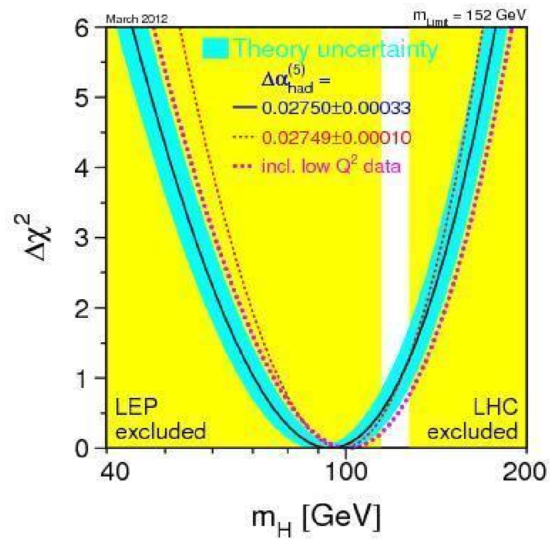


peak: „on-shell" production eines Teilchens



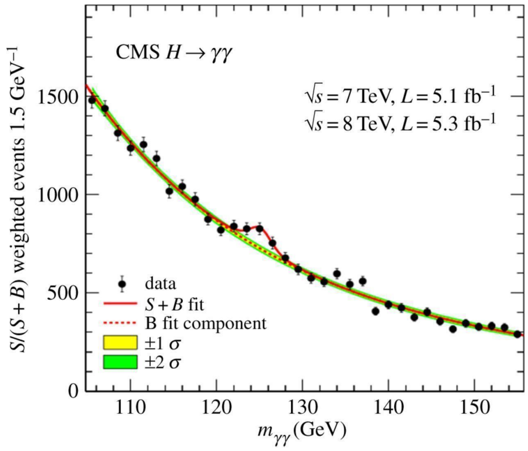
$$p^2 = M^2 = m_{\gamma\gamma}^2$$

1) Peak an erwarteter Stelle



2) Peak hat die „richtige" Höhe

Warum ist das die „richtige" Höhe?

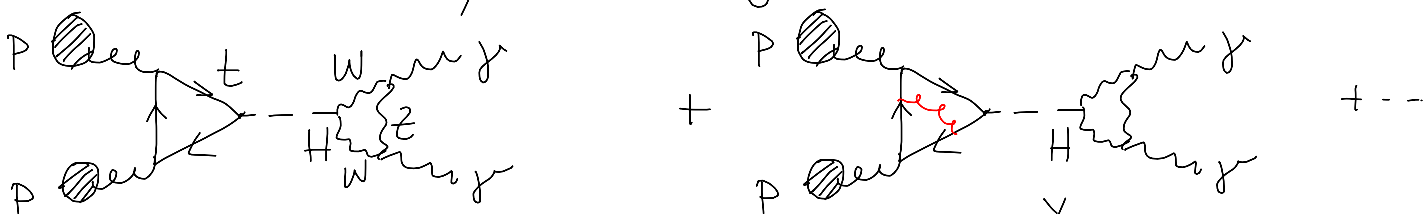


$$\Phi = \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi_0 \end{pmatrix} \quad +\tfrac{1}{2}, \; -\tfrac{1}{2} \qquad \phi_0 = v + H$$

Höhe $\hat{=}$ Anzahl an Higgsbosonen $\hat{=}$ Erzeugungsrate

$\hat{=}$ Wirkungsquerschnitt

Berechnet über Feynman-Diagramme:



$$A_\mu = B_\mu \cos\theta_W + W^3_\mu \sin\theta$$

γ

$\vec{W} \cdot \vec{I}$

Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC

The CMS Collaboration

References

[1] F. Englert and R. Brout, "Broken symmetry and the mass of gauge vector mesons", *Phys. Rev. Lett.* **13** (1964) 321, doi:10.1103/PhysRevLett.13.321.

[2] P. W. Higgs, "Broken symmetries, massless particles and gauge fields", *Phys. Lett.* **12** (1964) 132, doi:10.1016/0031-9163(64)91136-9.

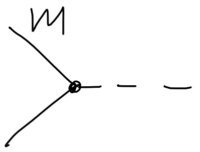
[3] P. W. Higgs, "Broken symmetries and the masses of gauge bosons", *Phys. Rev. Lett.* **13** (1964) 508, doi:10.1103/PhysRevLett.13.508.

[4] G. S. Guralnik, C. R. Hagen, and T. W. B. Kibble, "Global conservation laws and massless particles", *Phys. Rev. Lett.* **13** (1964) 585, doi:10.1103/PhysRevLett.13.585.

[60] R. V. Harlander and W. B. Kilgore, "Next-to-next-to-leading order Higgs production at hadron colliders", *Phys. Rev. Lett.* **88** (2002) 201801, doi:10.1103/PhysRevLett.88.201801, arXiv:hep-ph/0201206.

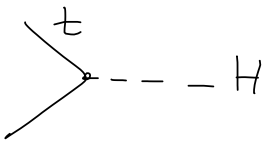
Warum diese Feynman-Diagramme?

Standardmodell: Higgs-Boson koppelt an Masse



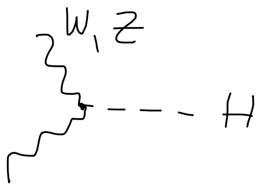
$\sim m$

$m_t = 172$ GeV $= 10^5 \cdot m_u$, $m_{Gluon} = 0$



→ FeynGame

$$\left.\begin{array}{l} M_W = 82 \text{ GeV} \\ M_Z = 91 \text{ GeV} \end{array}\right\} \text{schwache Kopplung}$$



→ FeynGame

Warum koppelt das Higgs an Masse?

Das Higgsfeld hat einen Vakuumerwartungswert.

Teilchen = minimale (Quanten-)Anregungen eines Feldes um seinen Grundzustand

$\phi(x) = v + H(x)$

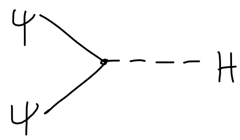
$\Rightarrow H(x) \hat{=}$ Quantenfeld des Higgsteilchens

In der Lagrangedichte:

$$\mathcal{L} = \cdots + y \cdot \bar{\psi}(x)\psi(x)\phi(x) + \cdots$$

$$= \cdots + \underbrace{y v \bar{\psi}(x)\psi(x)} + y\bar{\psi}(x)\psi(x)H(x)$$

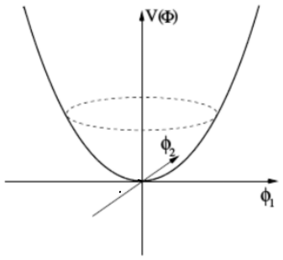
$$\Rightarrow m_\psi = y v \quad , \quad y = \frac{m_\psi}{v}$$



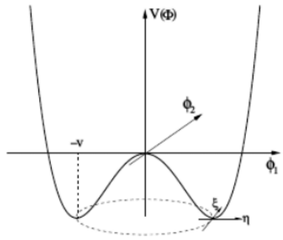
Warum hat das Higgsfeld einen Vakuumerwartungswert?

$$\mathcal{L} = \dots + V(\phi) + \dots \qquad \phi = v + H$$

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



$\mu^2 > 0$



$\mu^2 < 0$

Warum ist $\mu^2 < 0$?

$\rightarrow$ offene Frage!

Warum brauchen wir das ?

Lagrangedichte hat Symmetrien, die durch explizite Massenterme gebrochen würden.

z.B.

$$\mathcal{L}\left(e^{i\alpha(x)}\phi(x), A_\mu(x) - \frac{1}{e}\partial_\mu\alpha(x), \dots\right) = \mathcal{L}(\phi(x), A_\mu(x), \dots)$$

$\Rightarrow$ $\mathcal{L}$ kann keinen Term der Form $m_A^2 A_\mu A^\mu$ enthalten

Stattdessen: $(D_\mu\phi)^+(D^\mu\phi)$, $D_\mu = \partial_\mu + ieA_\mu$

$$\Rightarrow \left(\partial_\mu + ie\left(A_\mu - \frac{1}{e}(\partial_\mu\alpha)\right)\right)e^{i\alpha}\phi =$$

$$= e^{i\alpha}\left(\partial_\mu + i(\partial_\mu\alpha) + ieA_\mu - i(\partial_\mu\alpha)\right)\phi = e^{i\alpha}D_\mu\phi$$

Quantisierung: $\phi(x) = v + H(x)$

$$(D_\mu\phi)^+ D^\mu\phi = (\partial_\mu + ieA_\mu)(v+H)(\partial^\mu - ieA^\mu)(v+H) =$$

$$= \dots + e^2v^2A_\mu A^\mu + \dots$$

$$M_A^2 = 2e^2v^2$$

Warum brauchen wir die Symmetrien?

Renormierbarkeit! (Weinberg I, 5.3, 5.9)

Warum sind wir nicht glücklich mit dem Higgs?

$$\mathcal{L} = \cdots + m(\Lambda)\bar{\Psi}\Psi + \cdots + \frac{M^2(\Lambda)}{2}H^2 + \cdots$$

neue Physik

Strahlungskorrekturen: $m(\Lambda) = m + \alpha^2 \cdot c \cdot m \log\frac{\Lambda}{m}$

z.B. $\Lambda = 10^{19}\,\text{GeV}$ $\Rightarrow$ $m = m(\Lambda)(1 - 0.2\,c)$

$\alpha = 0.1$

$$M^2(\Lambda) = M^2 + \alpha^2 \tilde{c}\Lambda^2 \Rightarrow M^2 = M^2(\Lambda) - \tilde{c}\,10^{36}\,\text{GeV}^2$$

$(125\,\text{GeV})^2$

Ist der schwache Isospin erhalten?

1) Nein.
Eine Quantenzahl ist nur erhalten, wenn alle Terme in der Lagrangefunktion Gesamtquantenzahl haben.
Betrachte z.B. Massenterm des Elektrons:

$$m_e \bar{e} e = m_e (\bar{e}_L e_R + \bar{e}_R e_L)$$

e_L, e_R: links-/rechts-chirales Elektron

Elektrische Ladung: $Q(e_R) = Q(e_L) = -1$
$Q(\bar{e}_R) = Q(\bar{e}_L) = +1$

$$\Rightarrow Q(\bar{e}_R e_L) = Q(\bar{e}_L e_R) = Q(\bar{e}_L) + Q(e_R) = 0$$

$\Rightarrow$ Massenterm erhält die elektrische Ladung

Aber: 3. Komponente des Isospin:

$$I_3(e_L) = -I_3(\bar{e}_L) = -\frac{1}{2}, \quad I_3(e_R) = I_3(\bar{e}_R) = 0$$

$$\Rightarrow I_3(\bar{e}_L e_R) = \frac{1}{2} + 0 = \frac{1}{2}, \quad I_3(\bar{e}_R e_L) = -\frac{1}{2} \neq I_3(\bar{e}_L e_R)$$

$\Rightarrow$ Massenterm verletzt Isospin!
[$m\bar{e}e$ hat keine definierte Isospin-Ladung]

Ebenso: Yukawa-Wechselwirkungsterm:

$$H\bar{e}e = \underbrace{H\bar{e}_L e_R}_{I_3 = -\frac{1}{2}+\frac{1}{2}+0 = 0} + \underbrace{H\bar{e}_R e_L}_{I_3 = -\frac{1}{2}+0-\frac{1}{2} = -1}$$

$\Rightarrow$ Isospin nicht erhalten!

2) Aber: Ohne spontane Symmetriebrechung ist Isospin erhalten.

- Es gibt dann ja keine Massenterme
- Stattdessen: Yukawa-WW:

$$(\bar{\nu}_e, \bar{e})_L \begin{pmatrix} \phi^- \\ \phi_0 \end{pmatrix} e_R = \bar{\nu}_{eL} \phi^- e_R + \bar{e}_L \phi_0 e_R \qquad (*)$$

$$I_3 = -\tfrac{1}{2} + \tfrac{1}{2} + 0 = 0 \qquad +\tfrac{1}{2} - \tfrac{1}{2} + 0 = 0 \qquad \checkmark$$

- Bei spontaner Symmetriebrechung wird aus dem 2. Term: $\bar{e}_L \phi_0 e_R = \frac{1}{\sqrt{2}} \bar{e}_L (v + H) e_R$

$$= \underbrace{\frac{v}{\sqrt{2}} \bar{e}_L e_R}_{\text{Massenterm}} + \underbrace{\frac{1}{\sqrt{2}} \bar{e}_L e_R H}_{\text{Yukawa-WW}}$$

Der 1. Term in (*) enthält das Goldstone-Boson ϕ^-, das „weg-geeicht" wird.

- Beachte: Durch die Symmetriebrechung erhält das Vakuum eine Isospinladung.
  Isospinerhaltung ist also „versteckt": I_3 bleibt erhalten, wenn man das Vakuum mit berücksichtigt.
  z.B. entsteht die Masse des Elektrons durch dessen Yukawa-WW mit dem Vakuum: