
CERN

Sophia Borowka (CERN)

Higgs-Theorie

Programm

Teil I:

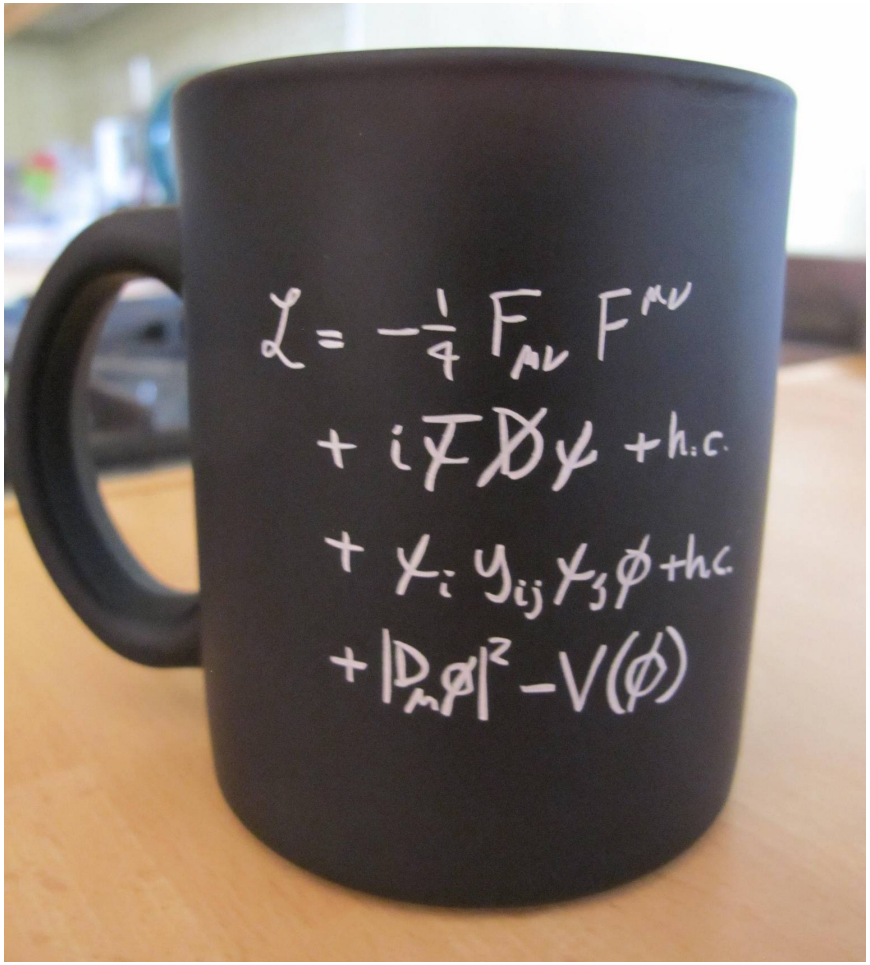
1) Kurze Wiederholung: Der Lagrangian des Standardmodells
2) Das Standardmodell ohne Higgsterme
3) Die Auswirkung der Higgsterme

Teil II:

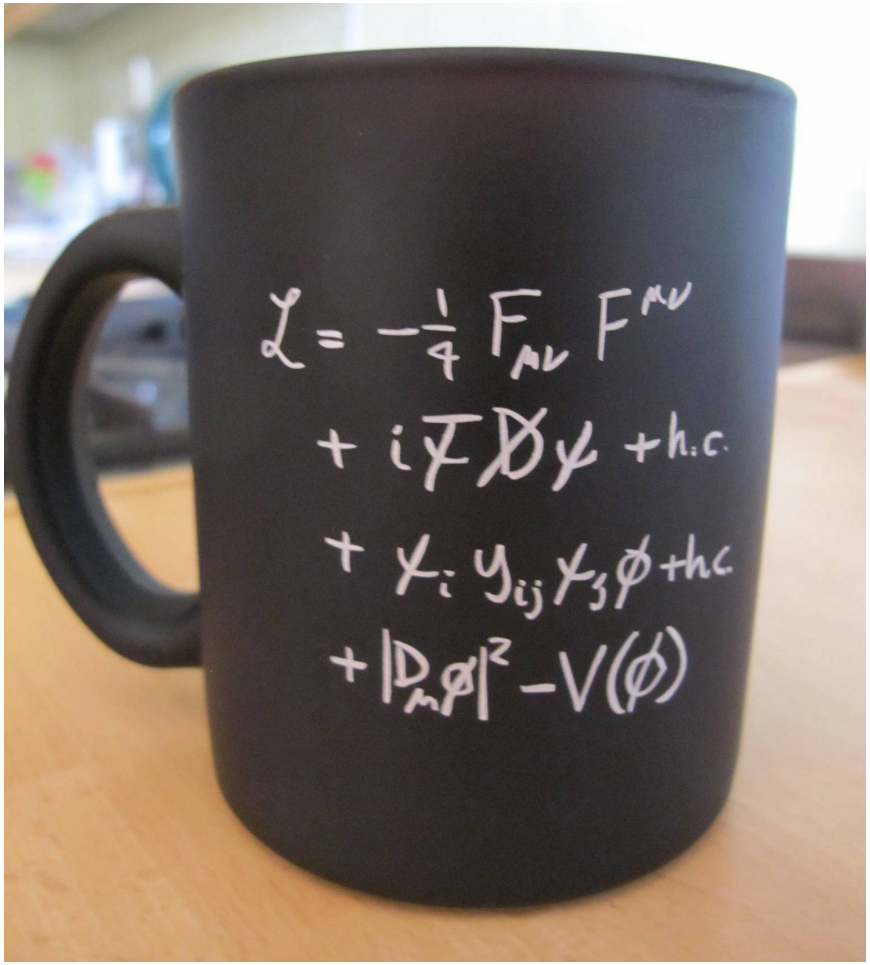
4) Theoretische Argumente für die Higgsbosonentdeckung
5) Wenn Zeit: Präzise Theorievorhersagen
6) Higgsbosonentdeckung im Experiment
7) Was seitdem geschah...

Der Lagrangian des Standardmodells

Standardmodell-Lagrangian



Standardmodell-Lagrangian



Felder der Wechselwirkungsteilchen

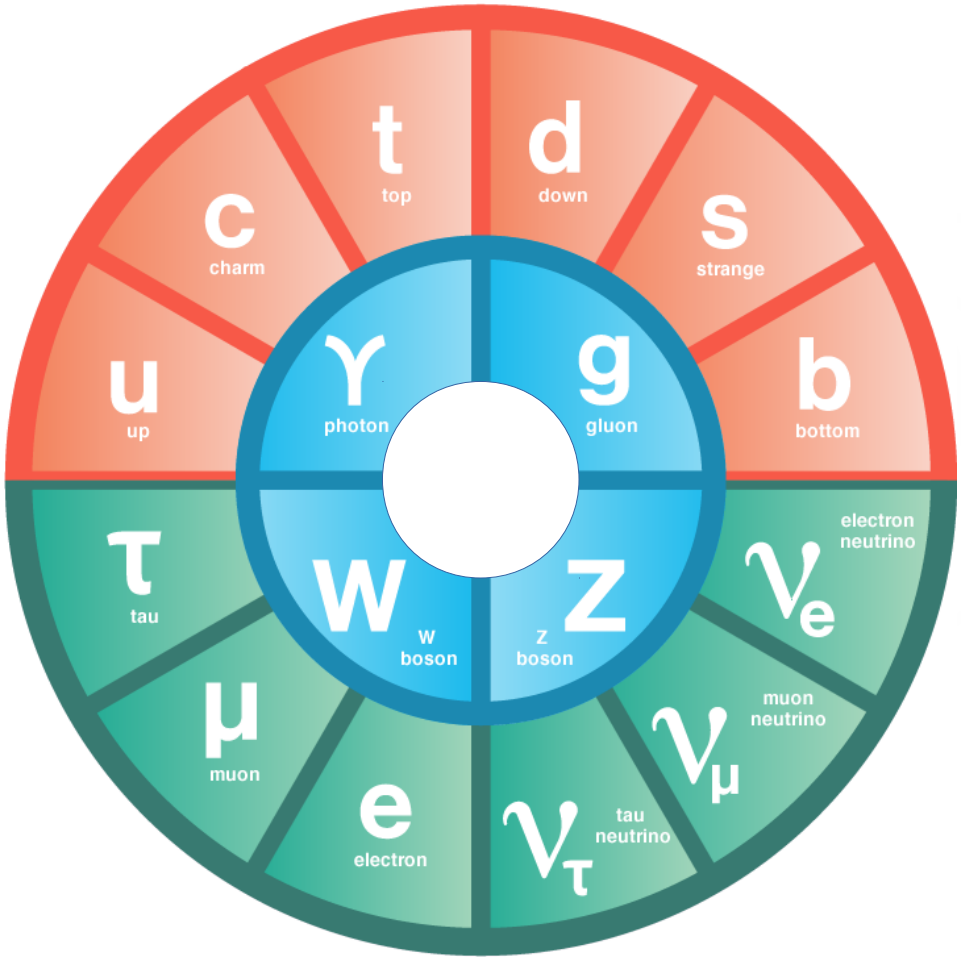
Freie Teilchen im Raum und deren Wechselwirkung mit den Feldern

Teilchenmassen

Higgsfeld und Wechselwirkung, Higgspotenzial

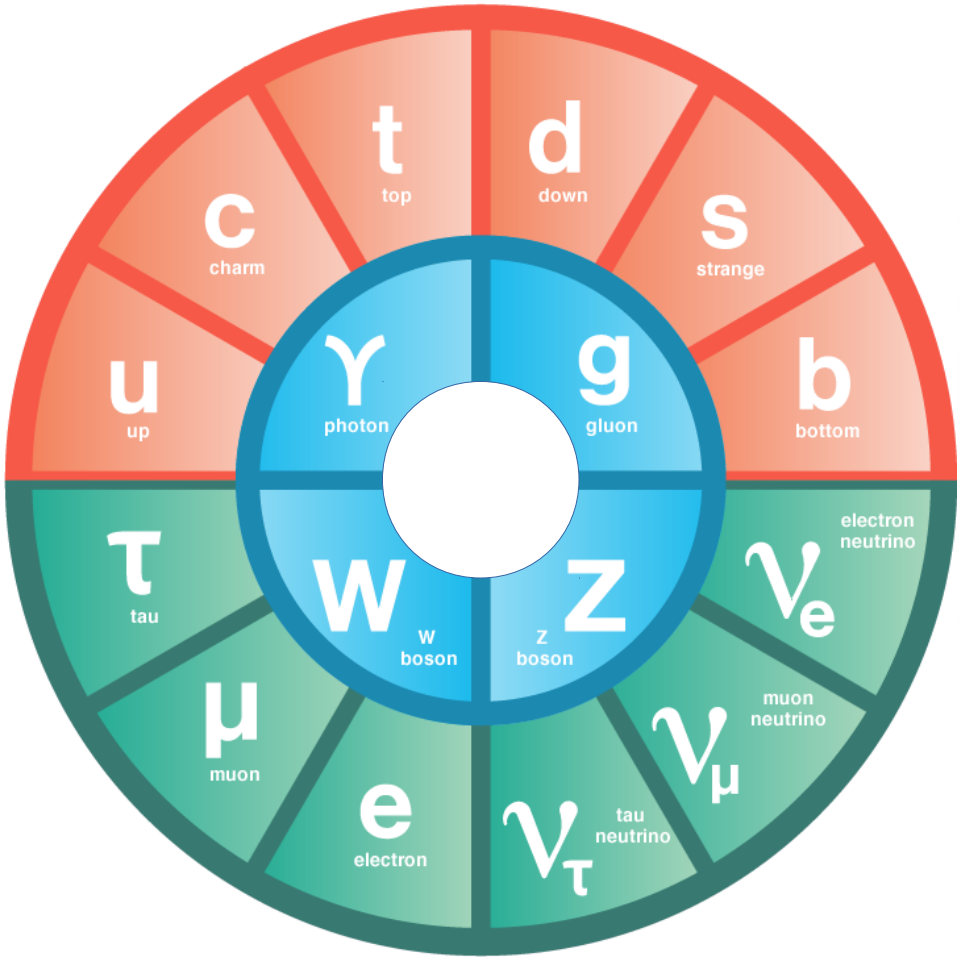
Das Standardmodell ohne Higgsterme

Standardmodell ohne Higgs



https://www.symmetrymagazine.org/standard-model

Standardmodell ohne Higgs



$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$

$$+ \bar{\psi} \gamma_\mu i D^\mu \psi$$

https://www.symmetrymagazine.org/standard-model

Auswirkungen kein Higgs

1) Vakuum hat keine Grundenergie

2) Unitarität wird verletzt

3) Woher kommen die Eichbosonmassen?
   Massen sind nicht invariant unter Eichtransformationen!

4) Woher kommen die Fermionmassen?
   Masseterme sind keine Lorentz-Skalare!

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \bar{\psi} \gamma_\mu i D^\mu \psi$$

Auswirkungen kein Higgs

1) Vakuum hat keine Grundenergie

2) Unitarität wird verletzt

3) Woher kommen die Eichbosonmassen?
   Massen sind nicht invariant unter Eichtransformationen!

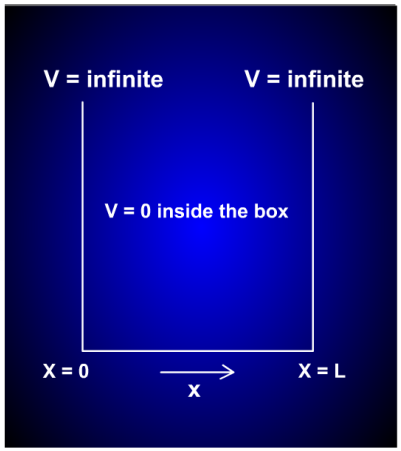
4) Woher kommen die Fermionmassen?
   Masseterme sind keine Lorentz-Skalare!

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \bar{\psi} \gamma_\mu i D^\mu \psi$$

Vakuum

- Fundamental für Beschreibung vom Übergang von der Quantenmechanik zur Quantenfeldtheorie
- Quantenmechanik: Heisenbergsche Unschärferelation gilt für Ort und Impuls (nicht-relativistische Teilchen)

$$\Delta p \geq \frac{\hbar}{2L}\,,\; L = \Delta x$$

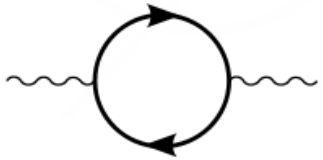


Vakuum

- Relativistische Teilchen: Energie und Impuls werden auf selbe Ebene gehoben

$$E = \sqrt{m^2c^4 + p^2c^2} \quad \text{und es gilt:} \quad \Delta E \geq \frac{\hbar c}{2L}$$

- Problem der QM: wenn $\Delta E = 2mc^2$ erreicht wird, Generierung von Teilchen-Antiteilchen Fluktuationen (virtuelle Teilchen) aus dem Vakuum



2 virtuelle Teilchen

- Einführung der Quantenfeldtheorie

Vakuum

- Entwicklung Ende 1940 – Anfang 1950er Jahre
- von Richard P. Feynman, Julian Schwinger & Sin-Itiro Tomonaga

1965

Vakuum

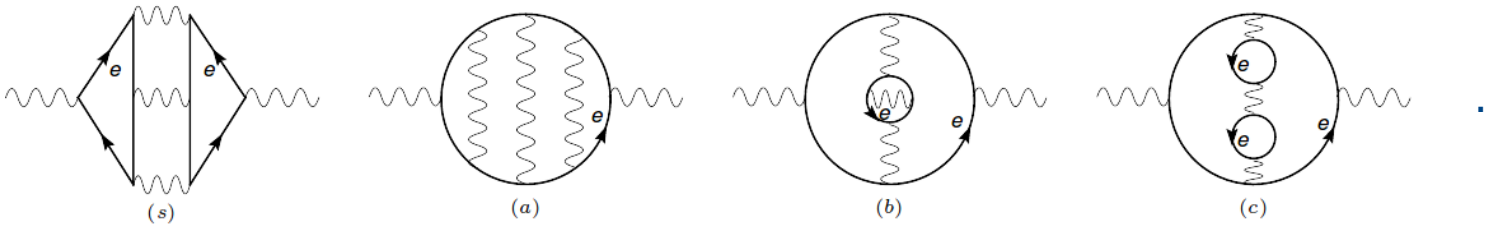
- Es gibt ein Vakuum aus dem Teilchen-Antiteilchen-Paare entnommen werden können
- Das Vakuum enthält keine Energie, aber eine Energieunschärfe...
- ...und damit Vakuumfluktuationen

Superpositionsprinzip der Quantenmechanik:

alle möglichen Zustände werden überlagert (addiert)

Superpositionsprinzip der Quantenfeldtheorie:

alle möglichen Vakuumfluktuationen werden aufsummiert

…  .

Auswirkungen kein Higgs

1) Vakuum hat keine Grundenergie

2) Unitarität wird verletzt

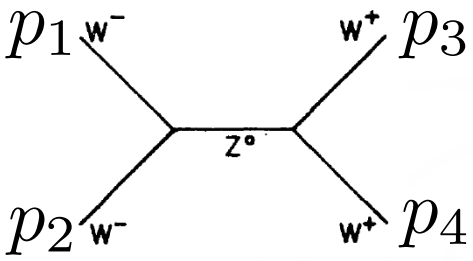
3) Woher kommen die Eichbosonmassen?
   Massen sind nicht invariant unter Eichtransformationen!

4) Woher kommen die Fermionmassen?
   Masseterme sind keine Lorentz-Skalare!

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \bar{\psi} \gamma_\mu i D^\mu \psi$$

Unitaritätsverletzung

- Konvention: Abkürzungen für Energien



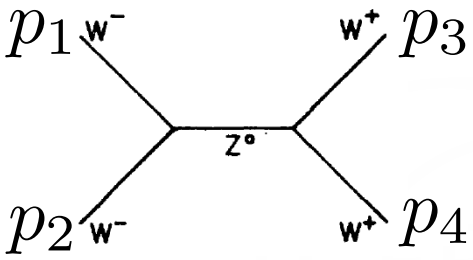
$$s = (p_1 + p_2)^2 = (p_3 + p_4)^2$$

$$t = (p_1 - p_3)^2 = (p_2 - p_4)^2$$

$$u = (p_2 - p_3)^2 = (p_1 - p_4)^2$$

Unitaritätsverletzung

- Konvention: Abkürzungen für Energien

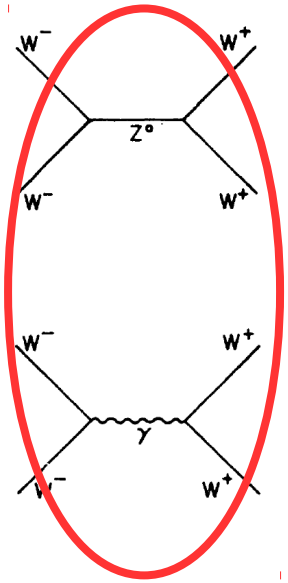


$$s = (p_1 + p_2)^2 = (p_3 + p_4)^2$$

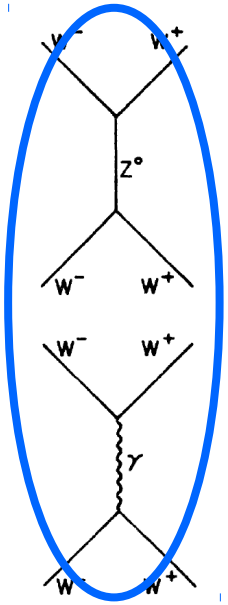
$$t = (p_1 - p_3)^2 = (p_2 - p_4)^2$$

$$u = (p_2 - p_3)^2 = (p_1 - p_4)^2$$

„s-Kanal“



„t-Kanal“



Unitaritätsverletzung

- WW-Streuungsamplituden wachsen mit E^4

$$i\mathcal{M}_4 = i\frac{g^2}{4m_W^4}\left[s^2+4st+t^2-4m_w^2(s+t)-\frac{8m_W^2}{s}ut\right]$$

$$i\mathcal{M}_t^{\gamma+Z} = -i\frac{g^2}{4m_W^4}\left[(s-u)t-3m_W^2(s-u)+\frac{8m_W^2}{s}u^2\right]$$

$$i\mathcal{M}_s^{\gamma+Z} = -i\frac{g^2}{4m_W^4}\left[s(t-u)-3m_W^2(t-u)\right]$$

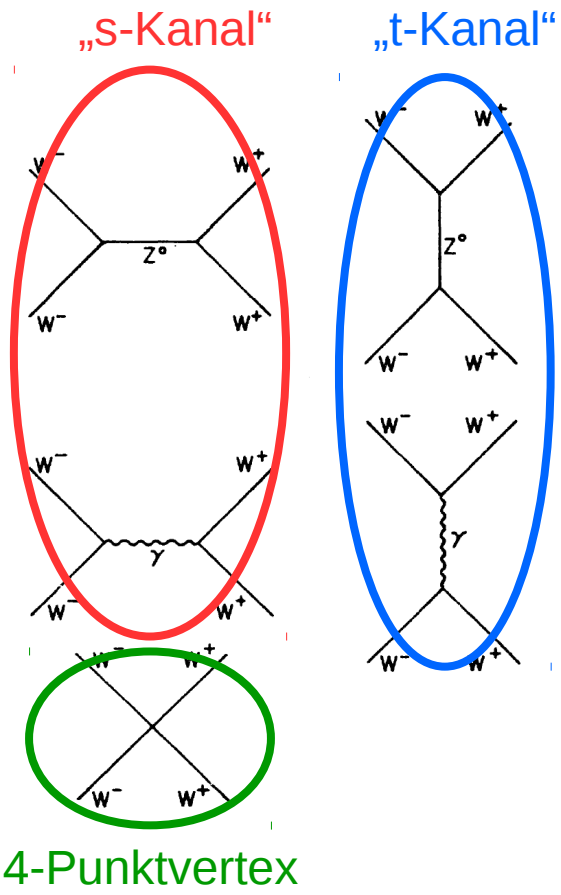
- Nach Addition: E^4-Terme fallen heraus, aber…

$$i\mathcal{M}^{\text{gauge}} = -i\frac{g^2}{4m_W^2}u \cdot \text{ höhere Ordnungen}$$

- ...WW-Streuung wächst quadratisch mit der Energie

  → **Beobachtungswahrscheinlichkeit kann >1 sein!**

- NB: Betrachte nur longitudinale Polarisationen (Effekt bei transversalen Polarisationen nicht so stark)



Auswirkungen kein Higgs

1) Vakuum hat keine Grundenergie

2) Unitarität wird verletzt

3) Woher kommen die Eichbosonmassen?
   Massen sind nicht invariant unter Eichtransformationen!

4) Woher kommen die Fermionmassen?
   Masseterme sind keine Lorentz-Skalare!

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \bar{\psi} \gamma_\mu i D^\mu \psi$$

Eichbosonmassen

- Elektroschwacher Teil des Lagrangian (Photon, W und Z):

$$\mathcal{L}_{YM} = -\frac{1}{4} B_{\mu\nu} B^{\mu\nu} - \frac{1}{4} W^a_{\mu\nu} W^{\mu\nu}_a$$

Abelscher Anteil U(1): $B^{\mu\nu} = \partial^\mu B^\nu - \partial^\nu B^\mu$

Nicht-Abelscher Anteil SU(2): $W^a_{\mu\nu} = \partial_\mu W^a_\nu - \partial_\nu W^a_\mu + g\,\epsilon^{abc}\, W_{b,\mu}\, W_{c,\nu}$

- Massenterme sähen so aus:

$$\mathcal{L}_{mass} = \frac{1}{2}\, m_A^2\, A_\mu\, A^\mu$$

würden aber aus unterschiedlichen Blickwinkeln anders aussehen → brechen die Eichsymmetrie!

$$A^\mu \;\rightarrow\; U(x) \left(A^\mu + \frac{i}{g}\, \partial^\mu \right) U^{-1}(x)$$

Eichbosonmassen

- Elektroschwacher Teil des Lagrangian (Photon, W u

$$\mathcal{L}_{YM} = -\frac{1}{4} B_{\mu\nu} B^{\mu\nu} - \frac{1}{4} W^a_{\mu\nu} W$$

Abelscher Anteil U(1): $B^{\mu\nu}$ $\partial^\mu B^\nu - \partial^\nu B^\mu$

Nicht-Abelscher Anteil SU(2): $= \partial_\mu W^a_\nu - \partial_\nu W^a_\mu + g\,\epsilon^{abc}\,W_{b,\mu}\,W_{c,\nu}$

- Massenterme säh aus:

$$\mathcal{L}_{mass} = \frac{1}{2}\, m_A^2\, A_\mu\, A^\mu$$

wü ber aus unterschiedlichen Blickwinkeln anders sehen → brechen die Eichsymmetrie!

$$A^\mu \;\rightarrow\; U(x)\left(A^\mu + \frac{i}{g}\,\partial^\mu\right) U^{-1}(x)$$

widerspricht der Beobachtung: schwache Kraft hat kleine Reichweite!

Auswirkungen kein Higgs

1) Vakuum hat keine Grundenergie

2) Unitarität wird verletzt

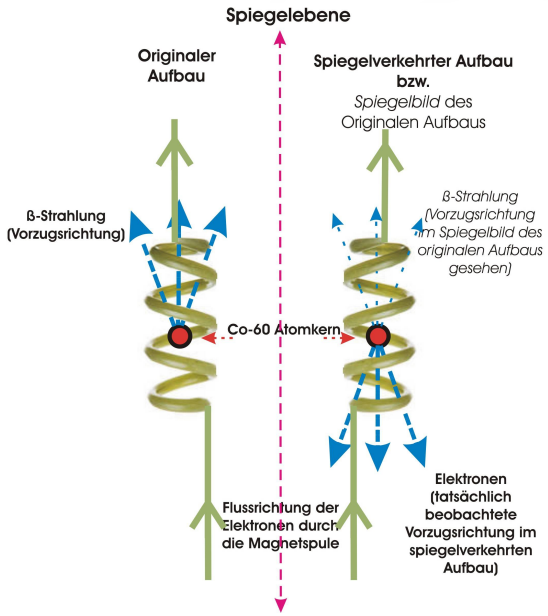
3) Woher kommen die Eichbosonmassen?
   Massen sind nicht invariant unter Eichtransformationen!

4) Woher kommen die Fermionmassen?
   Masseterme sind keine Lorentz-Skalare!

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \bar{\psi} \gamma_\mu i D^\mu \psi$$

Fermionmassen - Einschub

- Elektromagnetische und starke Wechselwirkung: keine Unterscheidung zwischen links und rechts
- Schwache Wechselwirkung: Unterscheidung zwischen links und rechts



Prinzip des Nachweises der Paritätsverletzung im Wu-Experiment (Nobelpreis 1957)

- Koppelt an linkshändige Teilchen und rechtshändige Antiteilchen

Fermionmassen

- Dirac-Gleichung enthält eigentlich einen Masseterm:

$$(\mathrm{i}\gamma_\mu \partial^\mu - m)\psi = 0$$

- Masse der Fermionen (= Quarks, Leptonen) aus Dirac-Term?

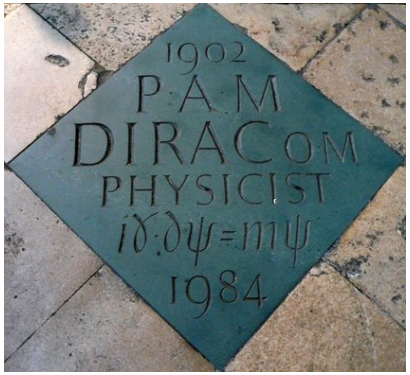
$$m_f \bar{\psi}\psi = m_f \left(\bar{\psi}_R \psi_L + \bar{\psi}_L \psi_R\right)$$

- Nein im Standardmodell! Masseterm ist kein Lorentz-Skalar

z.B. $\psi_L = E_L,\ \bar{\psi}_R = \bar{e}^-_R,\ E_L = \begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}_L,\ e^-_R$

- Außerdem: Quantenzahlen nicht erhalten

  → Brechung der globalen Eichsymmetrie



Westminster Abbey,
vor Newtons Grabstätte

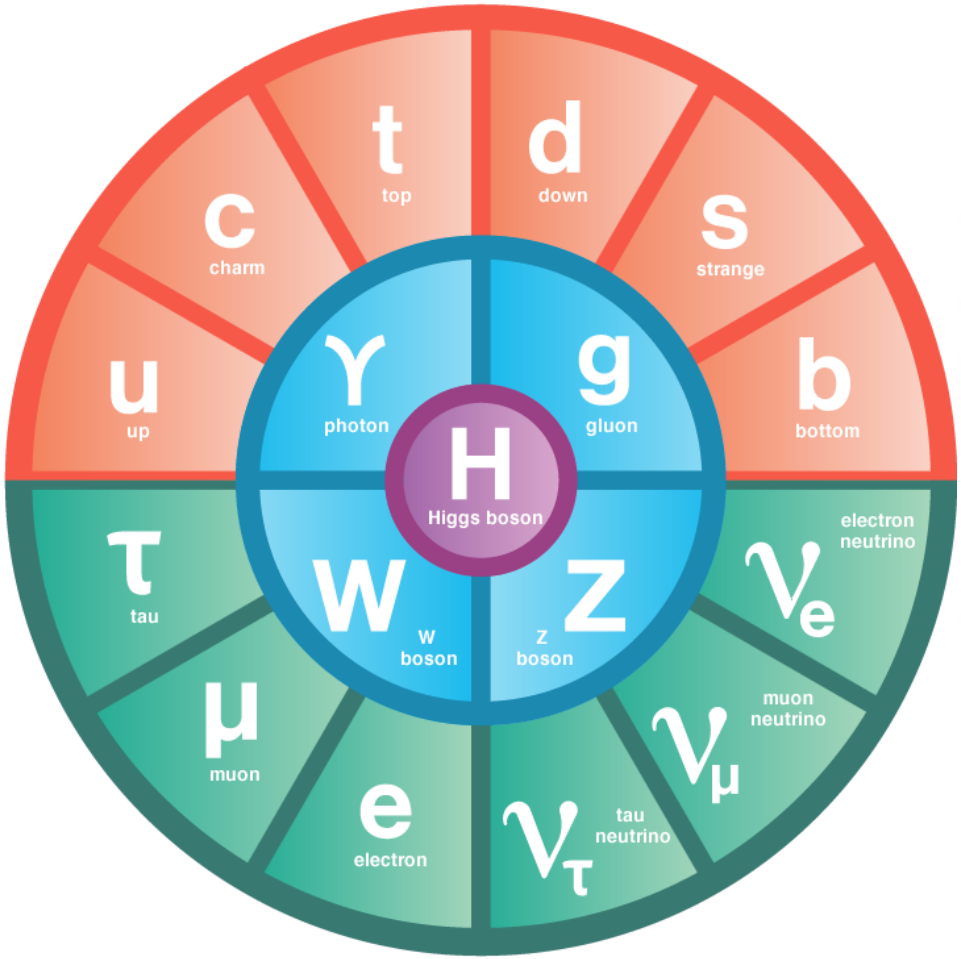
Fazit

Ohne Higgsmechanismus...

- haben Fermionen keine Masse
- haben Botenteilchen keine Masse
- liegt der Grundzustand bei Null Energie
- gibt es kein Higgsteilchen
- gilt das Standardmodell nur bei niedrigen Energien

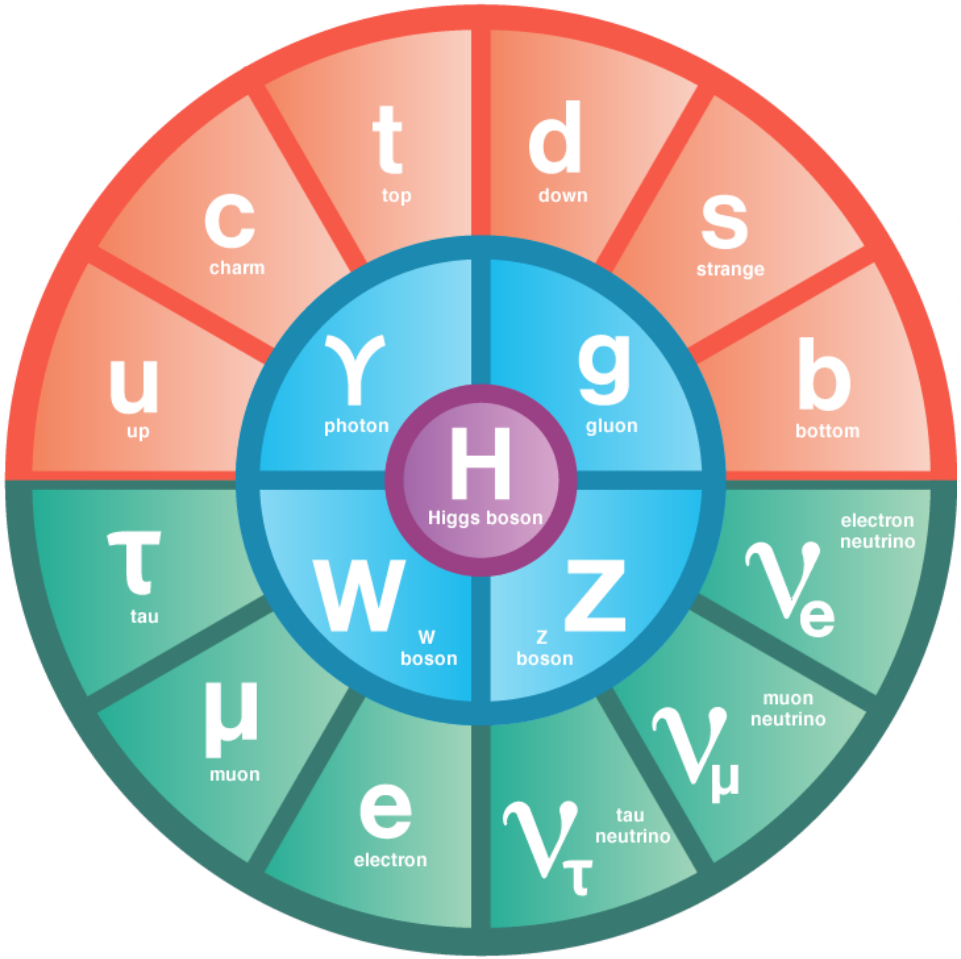
Die Auswirkung der Higgsterme

Standardmodell mit Higgs



https://www.symmetrymagazine.org/standard-model

Standardmodell mit Higgs



$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \bar{\psi} \gamma_\mu i D^\mu \psi + \psi_i y_{ij} \psi_j \phi + \text{h.c.} + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$

https://www.symmetrymagazine.org/standard-model

Auswirkungen mit Higgs

1) Vakuum hat Grundenergie
2) Unitarität wird **nicht** verletzt
3) Eichbosonmassen entstehen durch spontane Symmetriebrechung
4) Fermionmassen entstehen durch Kopplung an das Higgsfeld
5) Es existiert ein Higgsboson

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \bar{\psi} \gamma_\mu i D^\mu \psi + \psi_i y_{ij} \psi_j \phi + \text{h.c.} + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$

Auswirkungen mit Higgs

1) Vakuum hat Grundenergie

2) Unitarität wird **nicht** verletzt

3) Eichbosonmassen entstehen durch spontane Symmetriebrechung

4) Fermionmassen entstehen durch Kopplung an das Higgsfeld

5) Es existiert ein Higgsboson

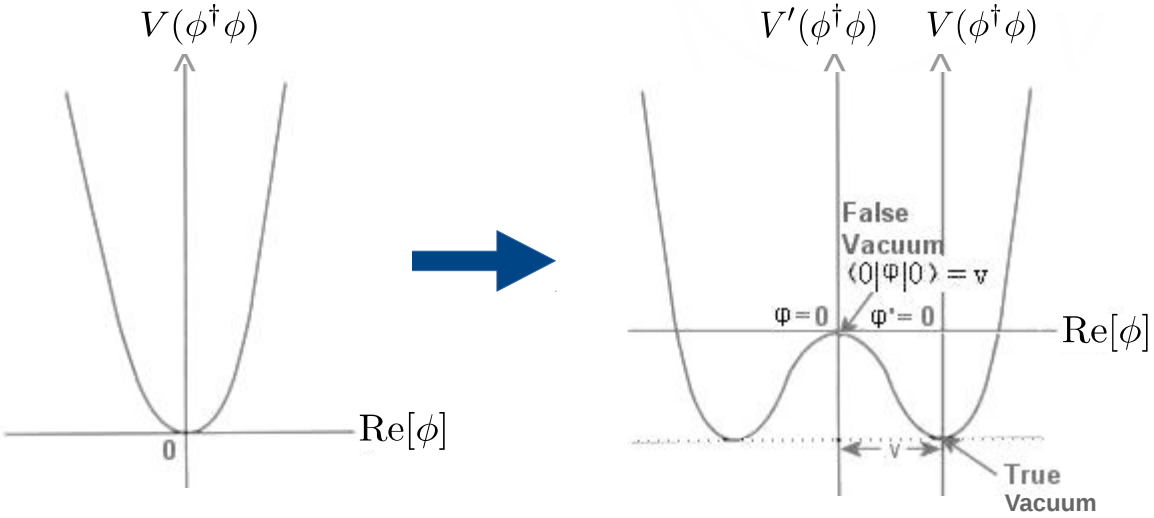
$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \bar{\psi} \gamma_\mu i D^\mu \psi + \psi_i y_{ij} \psi_j \phi + \text{h.c.} + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$

Das Higgspotenzial

Das Higgspotenzial lautet:

$$V(\phi^\dagger\phi) = \mu^2\phi^\dagger\phi + \lambda(\phi^\dagger\phi)^2$$

Das bedeutet für den Grundzustand: $\min[V(\phi^\dagger\phi)] = \sqrt{\frac{-\mu^2}{\lambda}} = v$



Auswirkungen mit Higgs

1) Vakuum hat Grundenergie
2) Unitarität wird **nicht** verletzt
3) Eichbosonmassen entstehen durch spontane Symmetriebrechung
4) Fermionmassen entstehen durch Kopplung an das Higgsfeld
5) Es existiert ein Higgsboson

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \bar{\psi} \gamma_\mu i D^\mu \psi + \psi_i y_{ij} \psi_j \phi + \text{h.c.} + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$

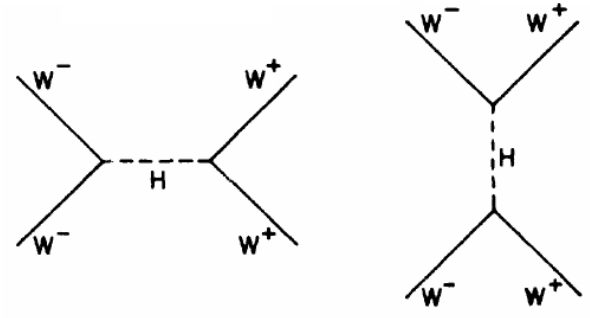
Unitaritätserhaltung

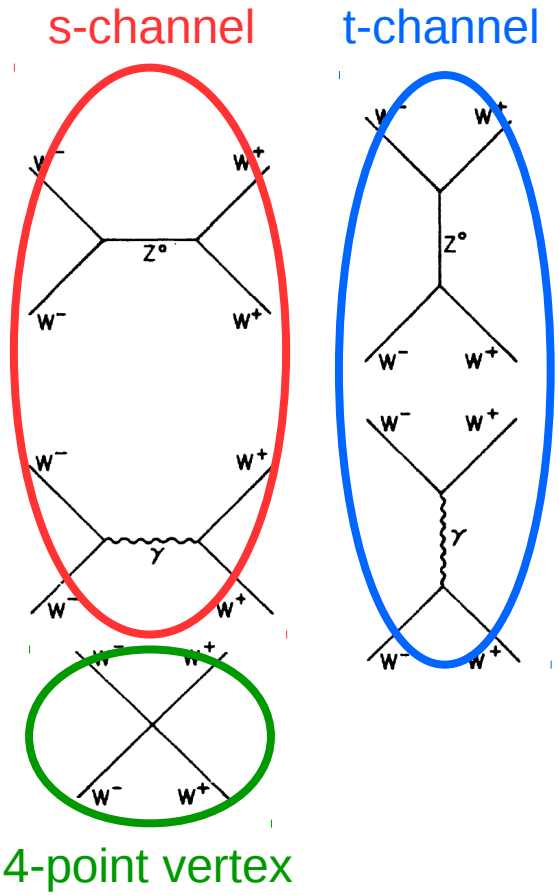
- WW-Streuungsamplituden wachsen mit E^2

$$i\mathcal{M}^{\text{gauge}} = -i\frac{g^2}{4m_W^2}u \;+ \text{höhere Ordnungen}$$

- Amplitude mit ausgetauschtem Higgsboson

$$i\mathcal{M}^{\text{Higgs}} \simeq i\frac{g^2}{4m_W^2}u \;+ \text{höhere Ordnungen}$$





- **Beobachtungswahrscheinlichkeit wieder <1!**

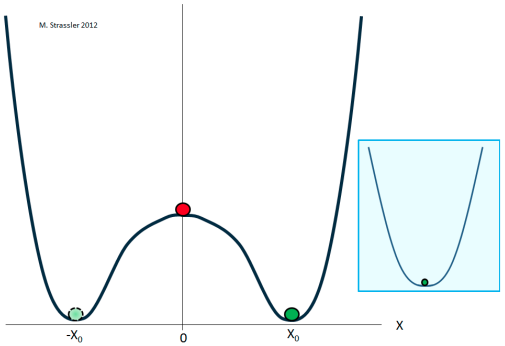
B.W.Lee, C.Quigg, and H.B.Thacker 1977

Auswirkungen mit Higgs

1) Vakuum hat Grundenergie
2) Unitarität wird **nicht** verletzt
3) Eichbosonmassen entstehen durch spontane Symmetriebrechung
4) Fermionmassen entstehen durch Kopplung an das Higgsfeld
5) Es existiert ein Higgsboson

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \bar{\psi} \gamma_\mu i D^\mu \psi + \psi_i y_{ij} \psi_j \phi + \text{h.c.} + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$

Eichbosonmassen



$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \bar{\psi}\gamma_\mu i D^\mu \psi + \psi_i y_{ij} \psi_j \phi + \text{h.c.} + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$

- Eichsymmetrie wird spontan gebrochen
- Aus $|D_\mu \Phi|^2$ erhält man die Massen der Botenteilchen:

Photon: $M_A = 0$

W-Boson: $M_W = gv/2$

Z-Boson: $M_Z = \frac{v}{2}\sqrt{g^2 + g'^2}$

g: schwache Kopplung, g‘: elektromagnetische Kopplung

Auswirkungen mit Higgs

1) Vakuum hat Grundenergie
2) Unitarität wird **nicht** verletzt
3) Eichbosonmassen entstehen durch spontane Symmetriebrechung
4) Fermionmassen entstehen durch Kopplung an das Higgsfeld
5) Es existiert ein Higgsboson

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \bar{\psi} \gamma_\mu i D^\mu \psi + \psi_i y_{ij} \psi_j \phi + \text{h.c.} + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$

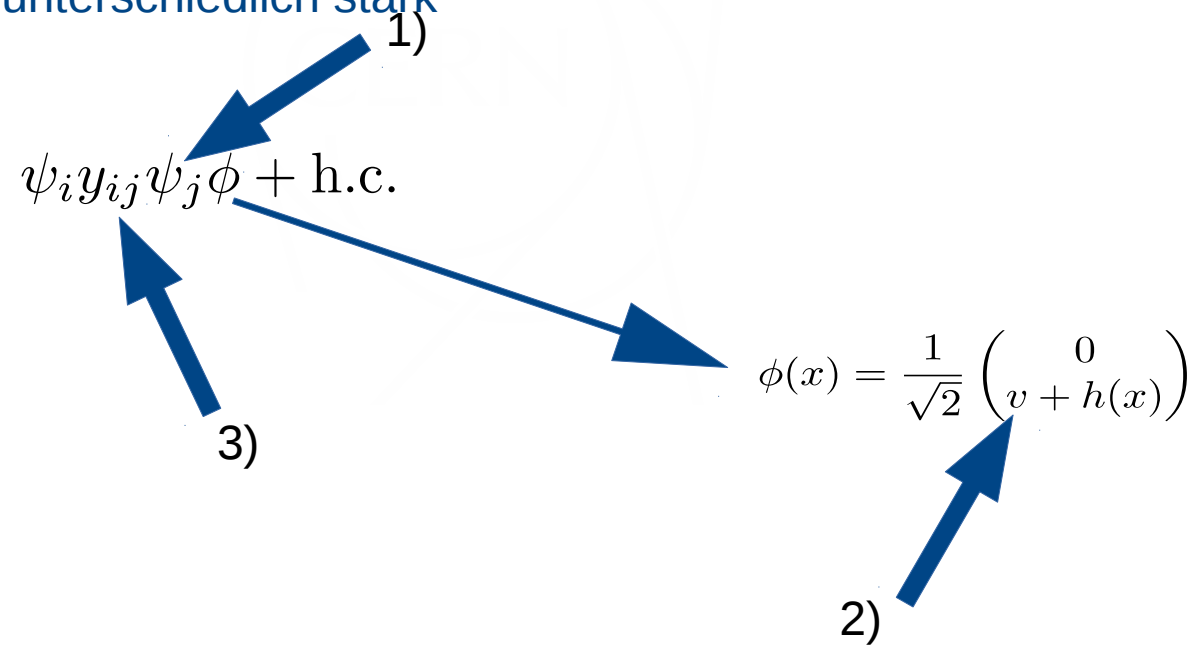
Fermionmassen

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \bar{\psi}\gamma_\mu i D^\mu \psi + \psi_i y_{ij} \psi_j \phi + \text{h.c.} + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$

1) Quarks und Leptonen interagieren mit Higgsfeld

2) Grundzustandsenergie wird benutzt um Masse zu generieren

3) Interaktion ist unterschiedlich stark



Auswirkungen mit Higgs

1) Vakuum hat Grundenergie
2) Unitarität wird **nicht** verletzt
3) Eichbosonmassen entstehen durch spontane Symmetriebrechung
4) Fermionmassen entstehen durch Kopplung an das Higgsfeld
5) Es existiert ein Higgsboson

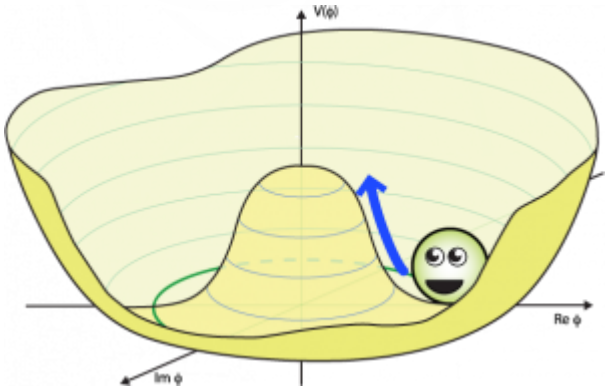
$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \bar{\psi} \gamma_\mu i D^\mu \psi + \psi_i y_{ij} \psi_j \phi + \text{h.c.} + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$

Das Higgsboson

- Higgsboson ist Anregung des Grundzustands des Higgsfeldes

$$\phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v + h(x) \end{pmatrix}$$

- Anregung = zusätzliche Energie wird in massives Teilchen umgewandelt



Theoretische Hinweise vor Higgsentdeckung

Aus Theoretikersicht

1) Unitaritätsgrenze

2) Elektroschwache Präzisionsmessungen

3) Vorhersage der Produktion und des Zerfalls des Higgsbosons

Aus Theoretikersicht

1) Unitaritätsgrenze

2) Elektroschwache Präzisionsmessungen

3) Vorhersage der Produktion und des Zerfalls des Higgsbosons

Unitaritätsgrenze

Damit Kompensation noch wirksam, darf Higgsboson nicht zu schwer sein. Obere Schranke an die Masse:

$$M_H < \left(\frac{8\pi\sqrt{2}}{3G_F}\right)^{1/2}$$

$$\approx 3.5\, G_F^{-1/2} \approx 1\mathrm{TeV}$$

$$G_F^{-1/2} \approx 300\mathrm{GeV}$$

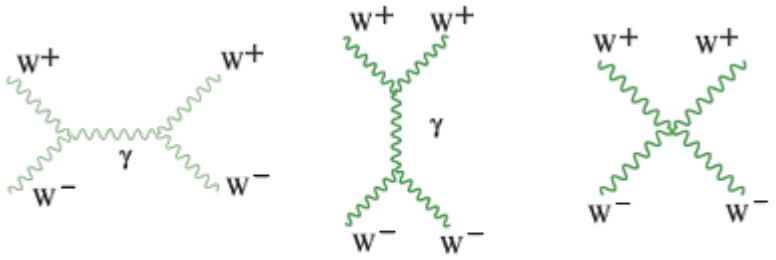


FIG. 1: Contributions to *WW* scattering amplitude. It violates unitarity at about 1 TeV

Aus Theoretikersicht

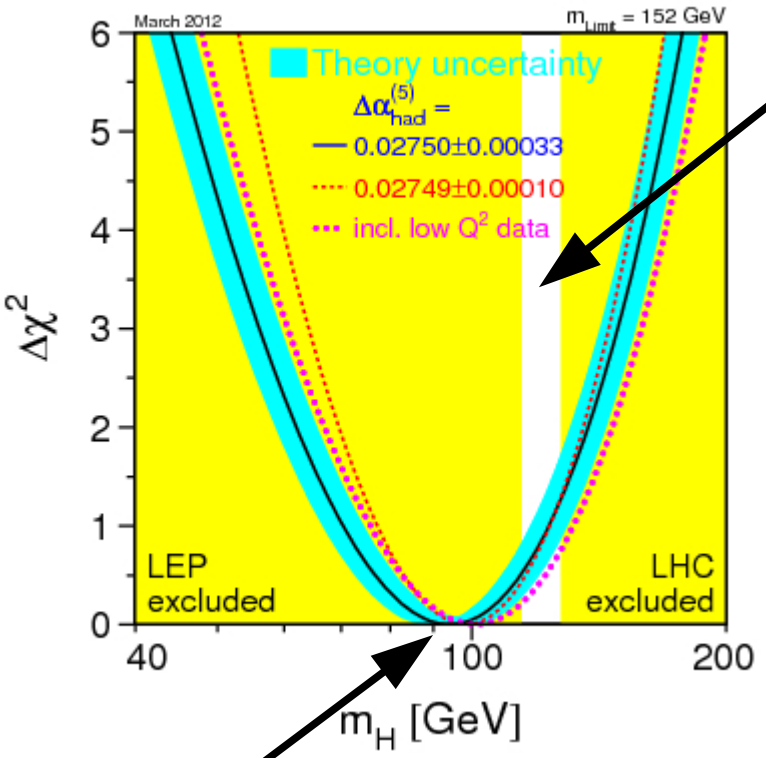
1) Unitaritätsgrenze

2) Elektroschwache Präzisionsmessungen

3) Vorhersage der Produktion und des Zerfalls des Higgsbosons

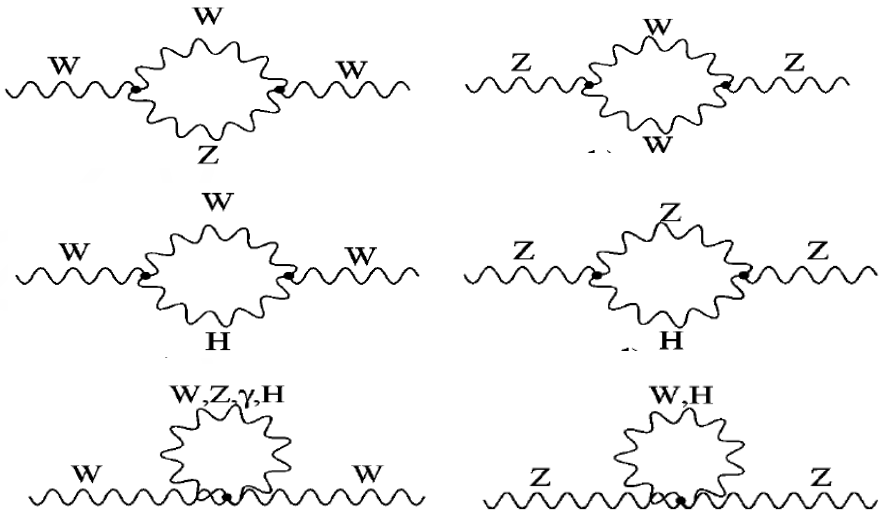
Präzisionsmessungen

„blue-band“ Vorhersageplot:



Direkte Suchen ergeben:

Higgsboson muss zwischen 114.4 GeV und 127 GeV liegen



Theorievorhersage: $91^{+30}_{-23}\mathrm{GeV}$

http://lepewwg.web.cern.ch/LEPEWWG/, https://arxiv.org/pdf/hep-ph/9606253.pdf

Aus Theoretikersicht

1) Unitaritätsgrenze

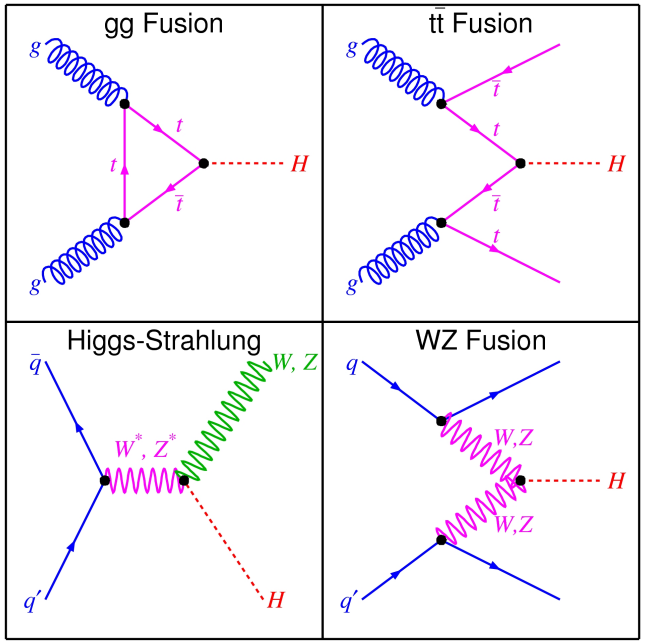
2) Elektroschwache Präzisionsmessungen

3) Vorhersage der Produktion und des Zerfalls des Higgsbosons

Higgsboson-Produktion

Energien: 7 TeV, 8 TeV, 13 TeV

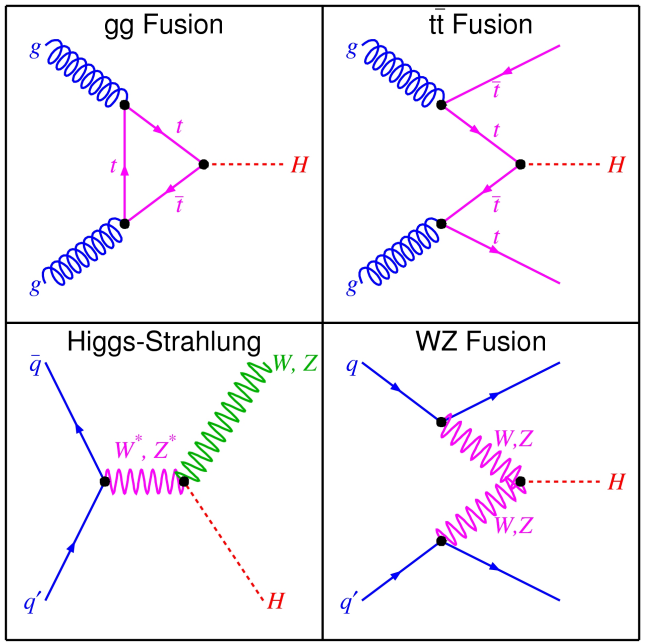
Anfangszustand: Proton-Proton Paar

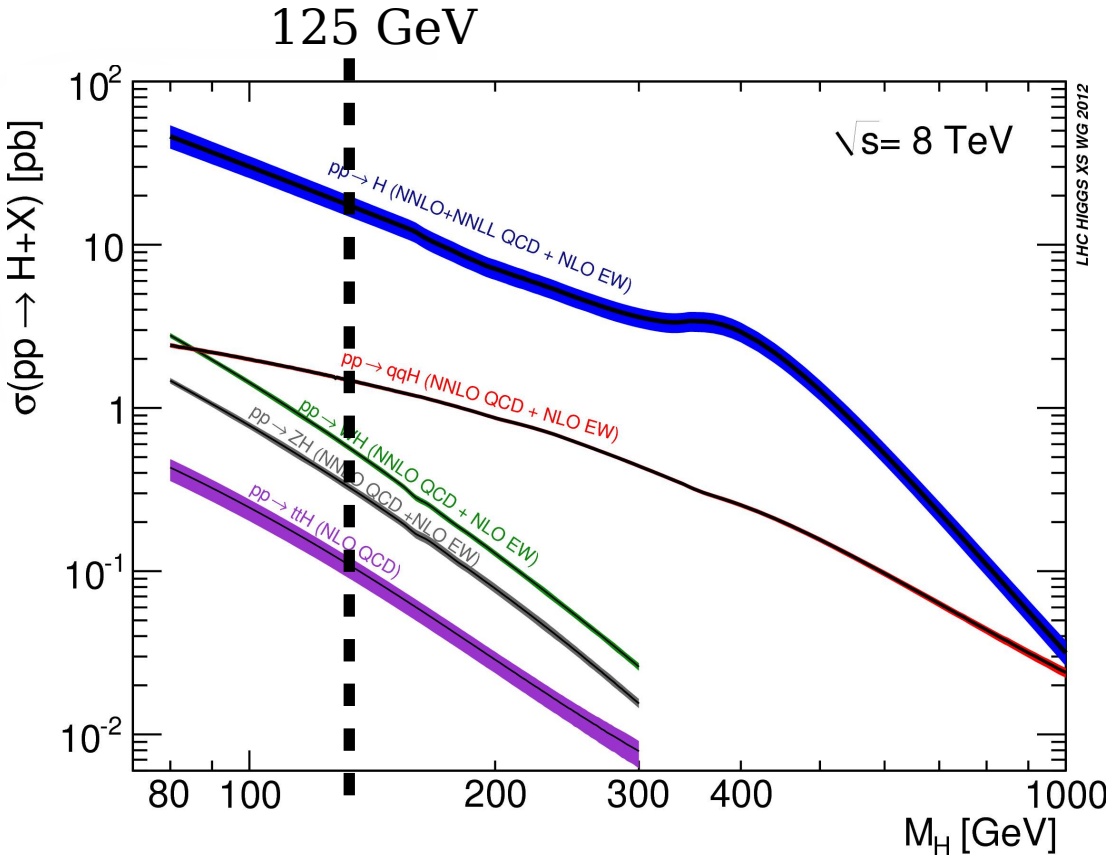


Higgsboson-Produktion

Energien: 7 TeV, 8 TeV, 13 TeV

Anfangszustand: Proton-Proton Paar

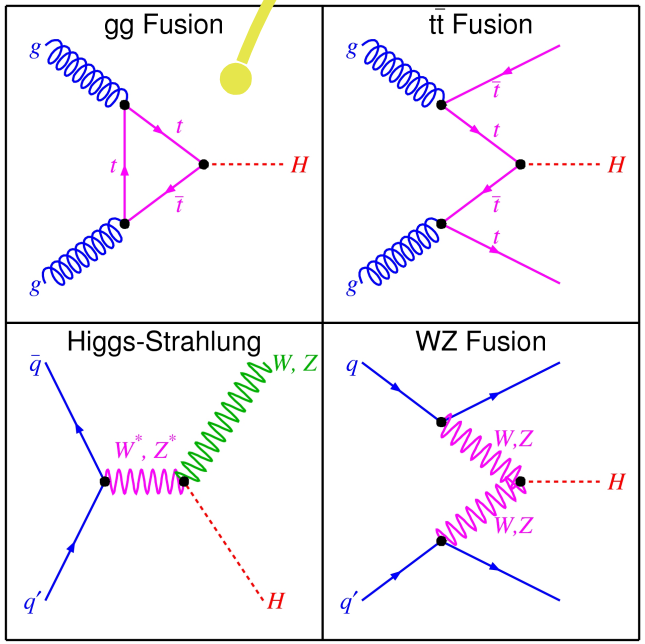


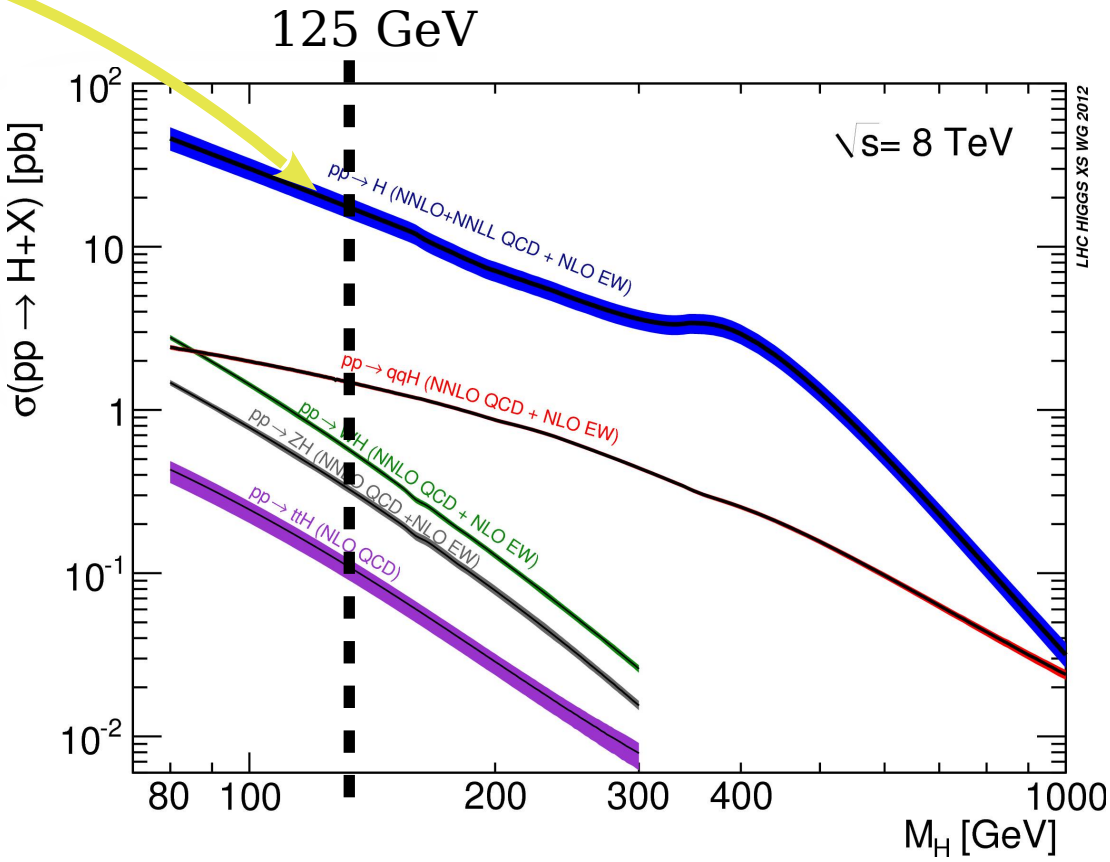


Higgsboson-Produktion

Energien: 7 TeV, 8 TeV, 13 TeV

Anfangszustand: Proton-Proton Paar

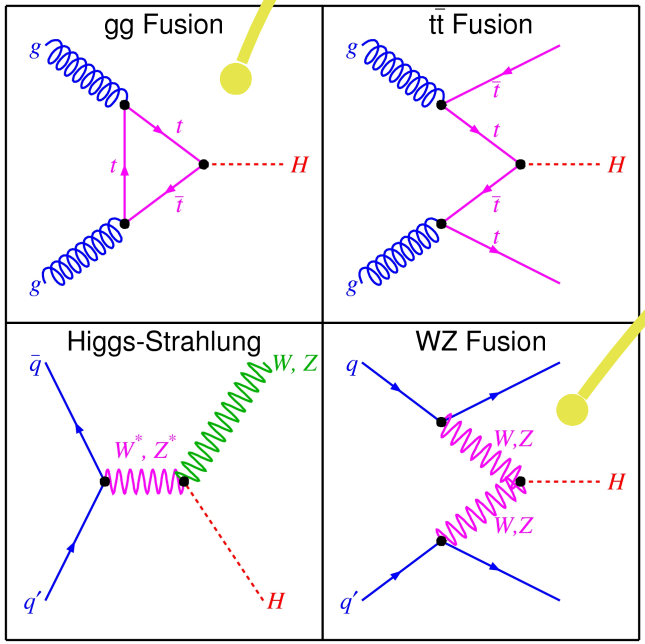


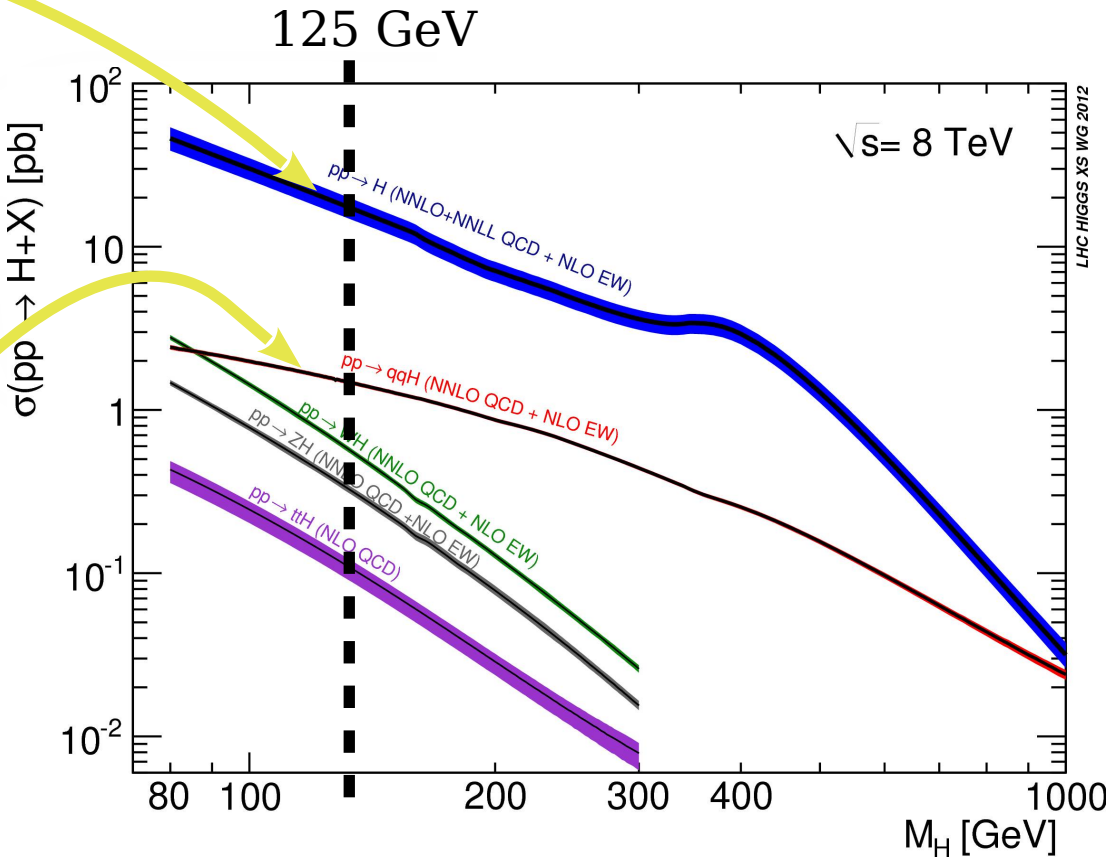


Higgsboson-Produktion

Energien: 7 TeV, 8 TeV, 13 TeV

Anfangszustand: Proton-Proton Paar

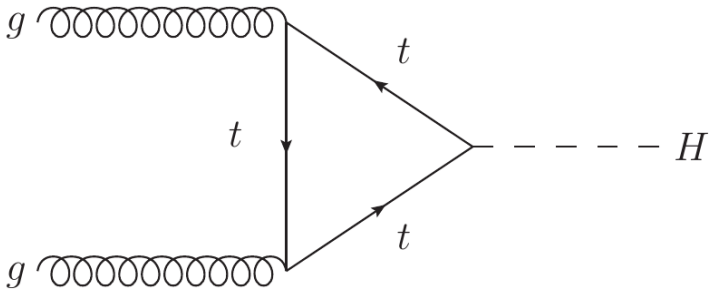


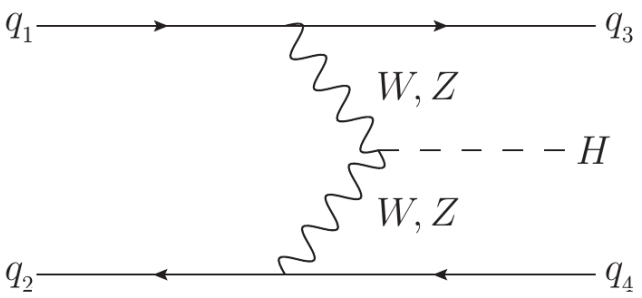


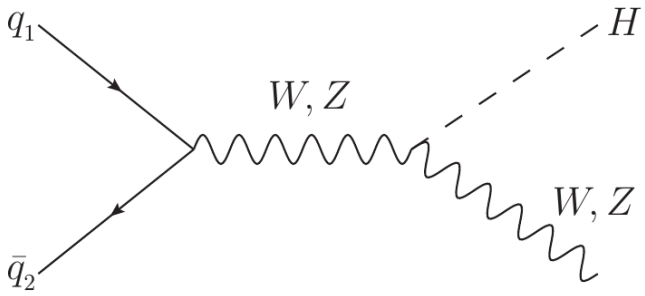
Einschub: Schleifenkorrekturen

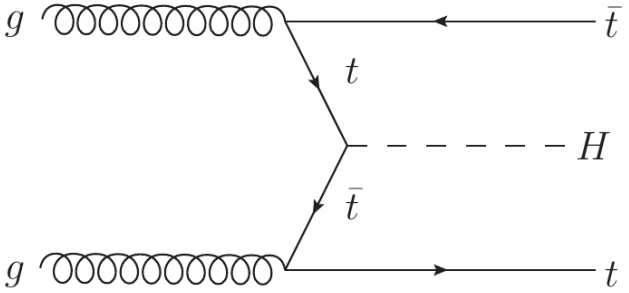
Schleifendiagramme

Recap: Interaktionen relativistischer Teilchen werden über Feynmandiagramme beschrieben.





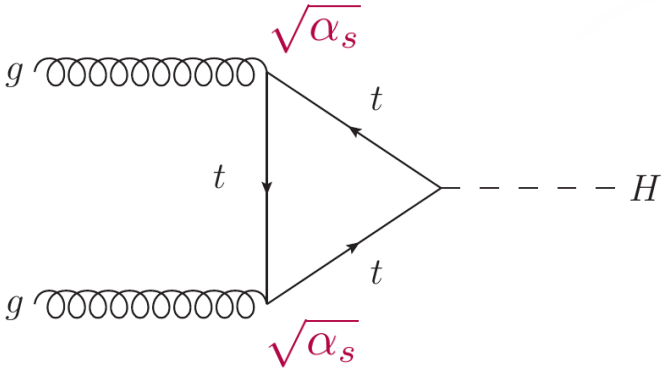


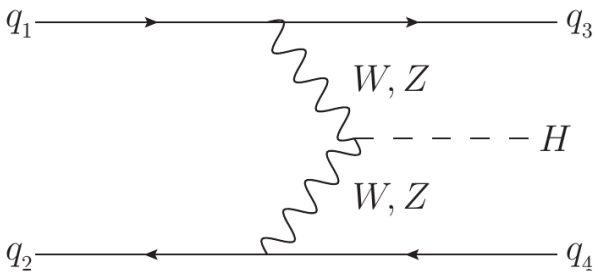


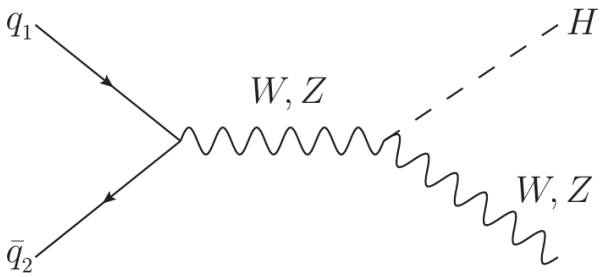
Schleifendiagramme

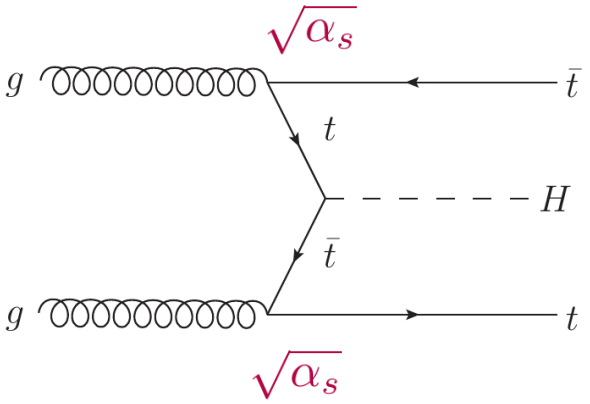
Recap: Interaktionen relativistischer Teilchen werden über Feynmandiagramme beschrieben

Größe der starken Kopplung: $\alpha_s \sim 0.1$





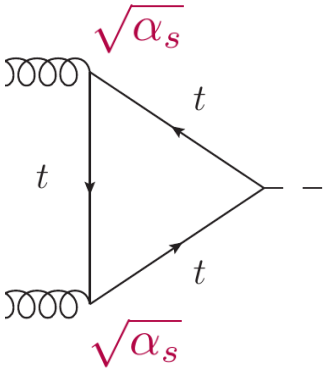




Schleifendiagramme

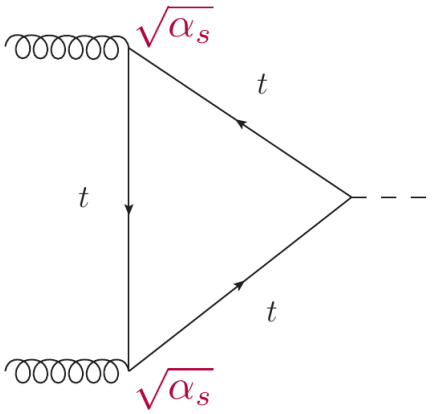
Recap: Interaktionen relativistischer Teilchen werden über Feynmandiagramme beschrieben

Größe der starken Kopplung: $\alpha_s \sim 0.1$



Schleifendiagramme

Quantenfeldtheorie: durch Vakuumfluktuation entstehen virtuelle Teilchen



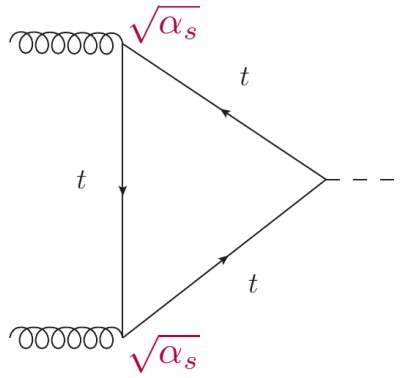
$$\alpha_s \sim 0.1$$

$$\propto \int_0^\infty \frac{\mathrm{d}^4 k}{(k^2 - m_t^2 + i\delta)\cdots}$$

Integral:
Addition aller möglichen Impulse der virtuellen Teilchen

Schleifendiagramme

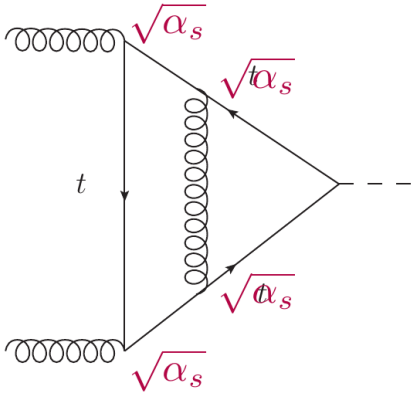
Quantenfeldtheorie: durch Vakuumfluktuation entstehen virtuelle Teilchen



$$\alpha_s \sim 0.1$$

$$\propto \int_0^\infty \frac{\mathrm{d}^4 k}{(k^2 - m_t^2 + i\delta)\cdots}$$

Integral: Addition aller möglichen Impulse der virtuellen Teilchen

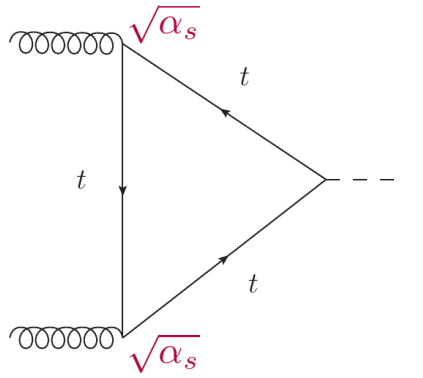


$$\alpha_s^2 \sim 0.01$$

$$\propto \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{\mathrm{d}^4 k_1 \, \mathrm{d}^4 k_2}{(k_1^2 - m_1^2 + i\delta)((k_2 + p)^2 - m_2^2 + i\delta)\cdots}$$

Schleifendiagramme

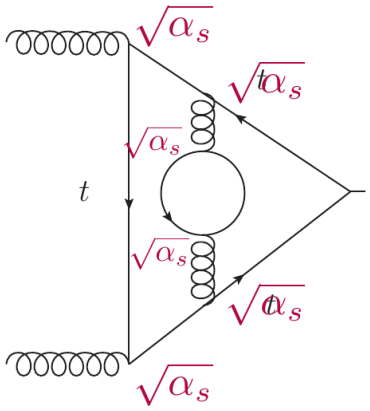
Quantenfeldtheorie: durch Vakuumfluktuation entstehen virtuelle Teilchen



$$\alpha_s \sim 0.1$$

$$\propto \int_0^\infty \frac{\mathrm{d}^4 k}{(k^2 - m_t^2 + i\delta)\cdots}$$

Integral: Addition aller möglichen Impulse der virtuellen Teilchen

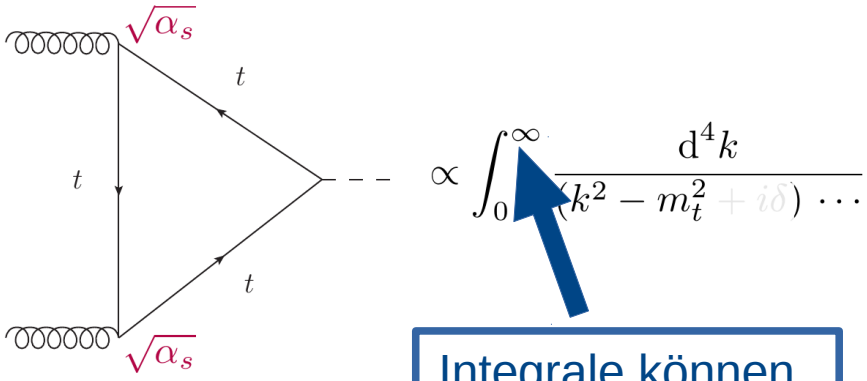


$$\alpha_s^3 \sim 0.001$$

$$\propto \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{\mathrm{d}^4 k_1\, \mathrm{d}^4 k_2\, \mathrm{d}^4 k_3}{(k_1^2 - m_1^2 + i\delta)((k_1 - k_2)^2 - m_2^2 + i\delta)((k_3 + p)^2 - m_3^2 + i\delta)\cdots}$$

Probleme mit Schleifen

Quantenfeldtheorie: durch Vakuumfluktuation entstehen virtuelle Teilchen



$$\propto \int_0^\infty \frac{\mathrm{d}^4 k}{(k^2 - m_t^2 + i\delta)\cdots}$$

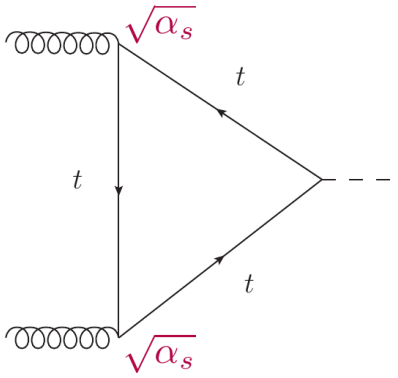
Integrale können divergieren

Integral: Addition aller möglichen Impulse der virtuellen Teilchen

$$\int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{\mathrm{d}^4 k_1\, \mathrm{d}^4 k_2\, \mathrm{d}^4 k_3}{(k_1^2 - m_1^2 + i\delta)((k_1 - k_2)^2 - m_2^2 + i\delta)((k_3 + p)^2 - m_3^2 + i\delta)\cdots}$$

Probleme mit Schleifen

Quantenfeldtheorie: durch Vakuumfluktuation entstehen virtuelle Teilchen



$$\propto \int_0^\infty \frac{\mathrm{d}^4 k}{(k^2 - m_t^2 + i\delta)\cdots}$$

Integral: Addition aller möglichen Impulse der virtuellen Teilchen

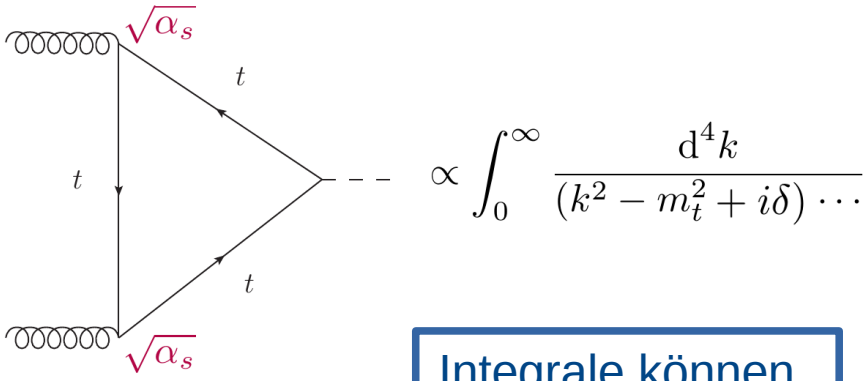
Integrale können divergieren

Konturintegral in komplexer Ebene

$$\int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{\mathrm{d}^4 k_1\, \mathrm{d}^4 k_2\, \mathrm{d}^4 k_3}{(k_1^2 - m_1^2 + i\delta)((k_1 - k_2)^2 - m_2^2 + i\delta)((k_3 + p)^2 - m_3^2 + i\delta)\cdots}$$

Probleme mit Schleifen

Quantenfeldtheorie: durch Vakuumfluktuation entstehen virtuelle Teilchen



$$\propto \int_0^\infty \frac{\mathrm{d}^4 k}{(k^2 - m_t^2 + i\delta)\cdots}$$

Integrale können divergieren

Integral: Addition aller möglichen Impulse der virtuellen Teilchen

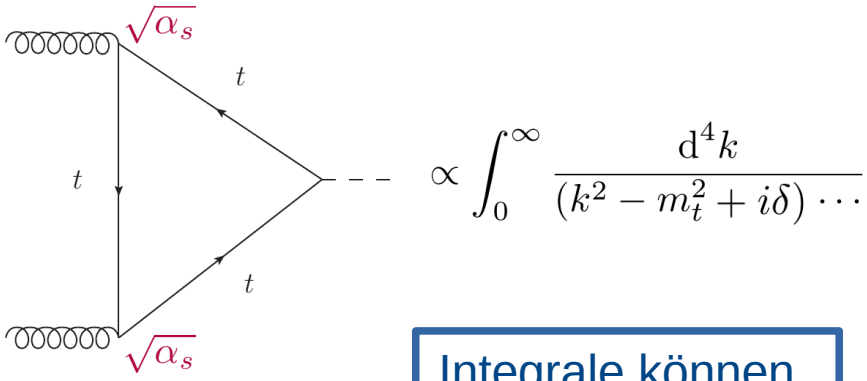
Konturintegral in komplexer Ebene

$$\int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{\mathrm{d}^4 k_1\, \mathrm{d}^4 k_2\, \mathrm{d}^4 k_3}{(k_1^2 - m_1^2 + i\delta)((k_1 - k_2)^2 - m_2^2 + i\delta)((k_3 + p)^2 - m_3^2 + i\delta)\cdots}$$

Integrationsvariablen verflochten

Probleme mit Schleifen

Quantenfeldtheorie: durch Vakuumfluktuation entstehen virtuelle Teilchen



$$\propto \int_0^\infty \frac{\mathrm{d}^4 k}{(k^2 - m_t^2 + i\delta)\cdots}$$

Integrale können divergieren

Integral: Addition aller möglichen Impulse der virtuellen Teilchen

Konturintegral in komplexer Ebene

$$\int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{\mathrm{d}^4 k_1 \, \mathrm{d}^4 k_2 \, \mathrm{d}^4 k_3}{(k_1^2 - m_1^2 + i\delta)((k_1 - k_2)^2 - m_2^2 + i\delta)((k_3 + p)^2 - m_3^2 + i\delta)\cdots}$$

Integrationsvariablen verflochten

Abhängigkeit von vielen Parametern/Skalen

Fazit

- Durch Schleifenbeiträge können fundamentale Fragen an das Standardmodell gestellt werden
- Mit jeder Schleifenordnung schrumpft die Größe des Beitrags zur Gesamtvorhersage
- Um genaue Vorhersagen für Colliderexperimente zu machen müssen Schleifenbeiträge berücksichtigt werden

Frage:

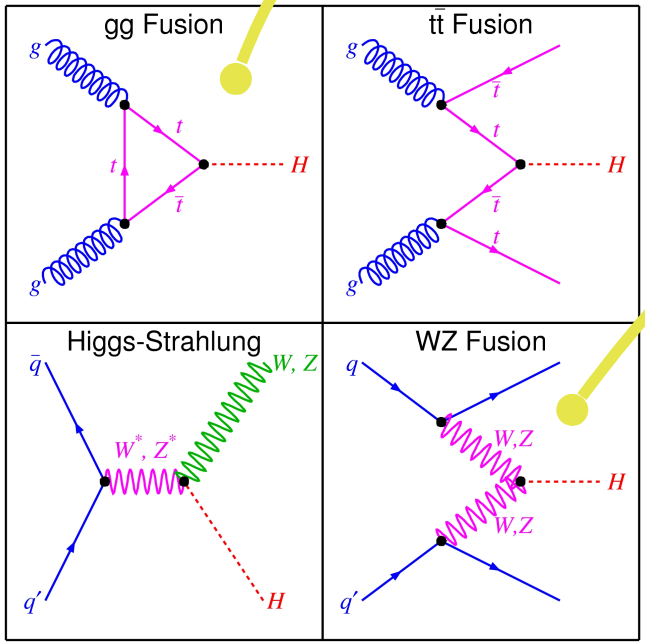
Sind die Schleifenbeiträge immer kleiner als die Baumdiagramme?

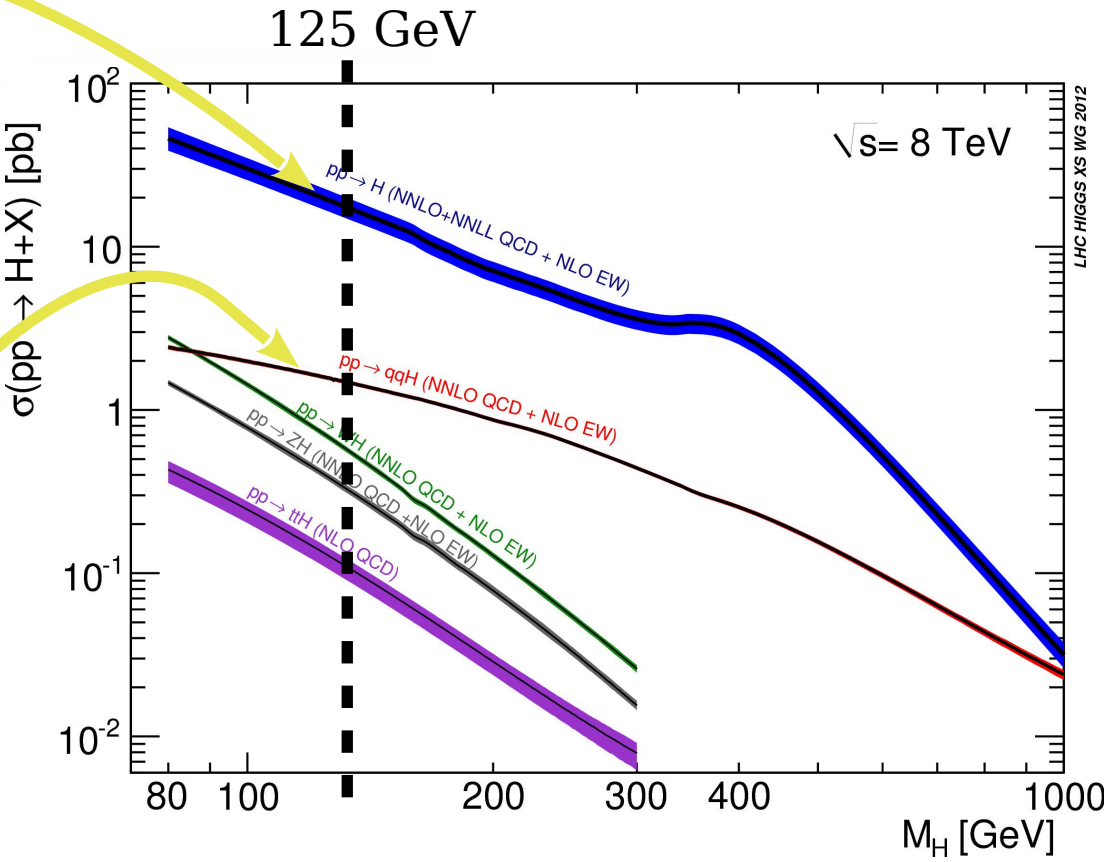
Entdeckung des Higgsbosons (Fortsetzung)

Higgsboson-Produktion

Energien: 7 TeV, 8 TeV, 13 TeV

Anfangszustand: Proton-Proton Paar





Higgsboson-Zerfall

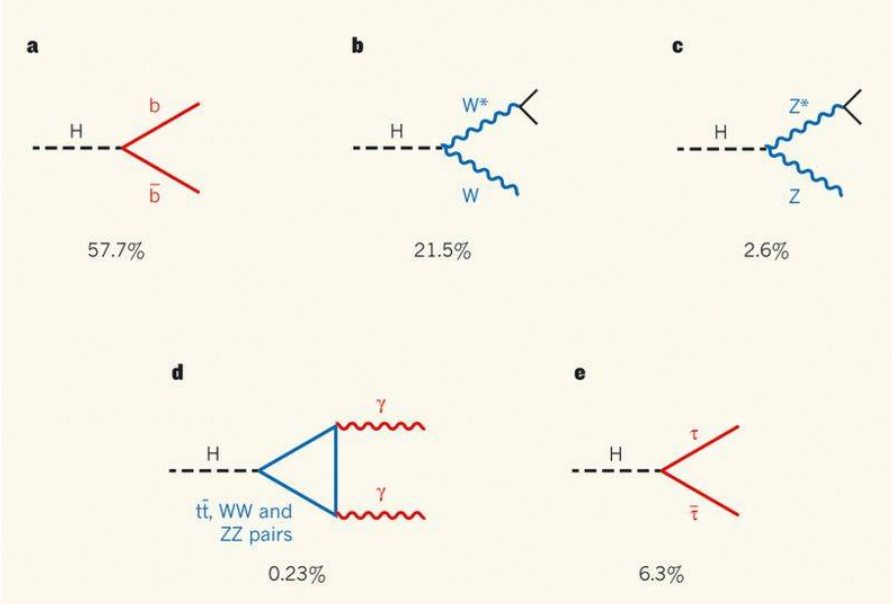
- Higgsboson ist instabil (kurze Lebensdauer):

$$\tau_H = 10^{-22}\mathrm{sec} \quad \rightarrow \quad \lambda \approx \tau_H \times c \approx 10^{-5}\,\mathrm{nano}m$$

- nur Zerfallsprodukte sind detektierbar

Higgsboson-Zerfall

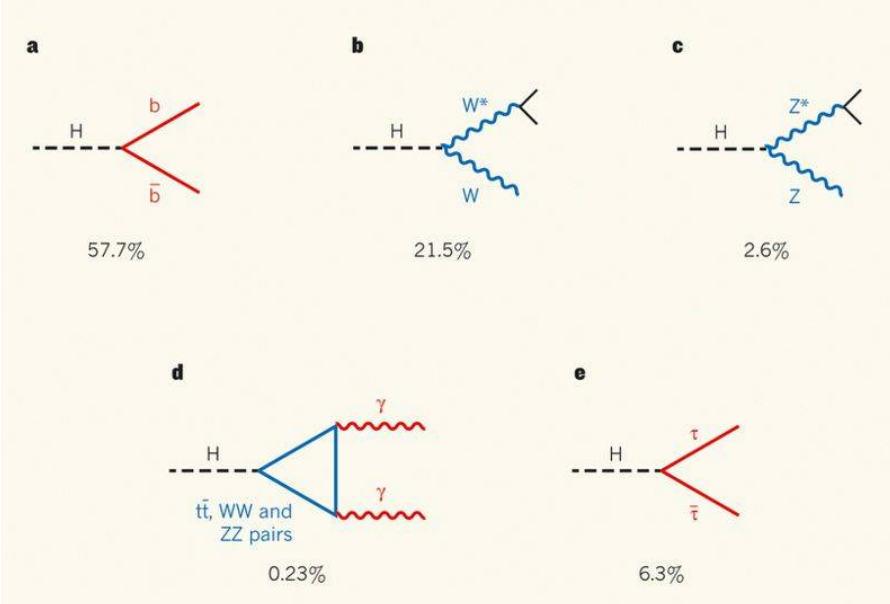
Zerfallskanäle:



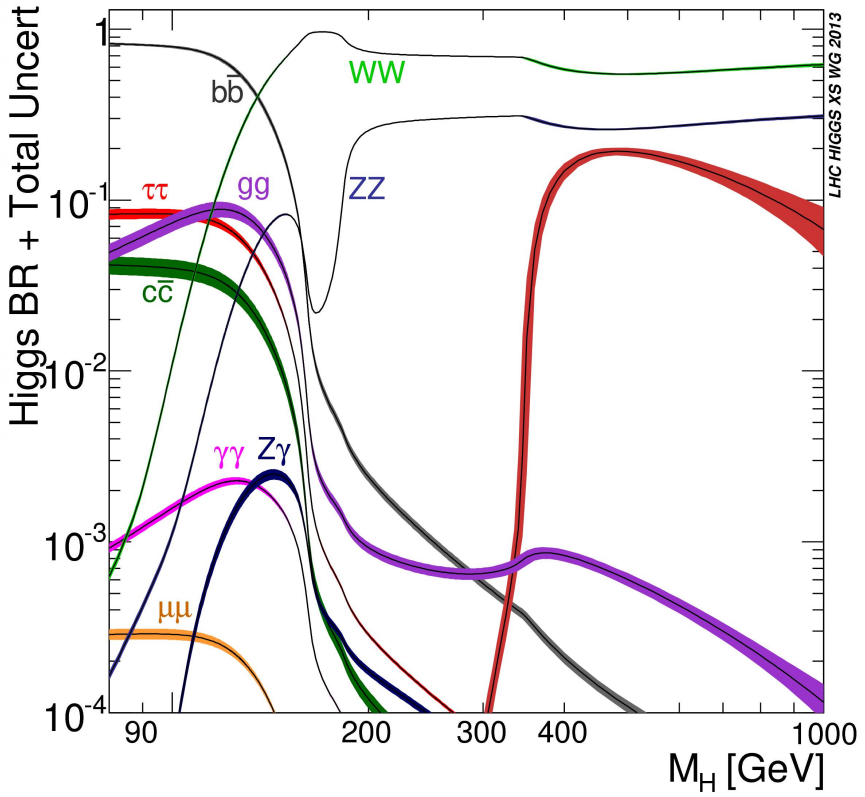
www.nature.com/articles/496439a

Higgsboson-Zerfall

Zerfallskanäle:

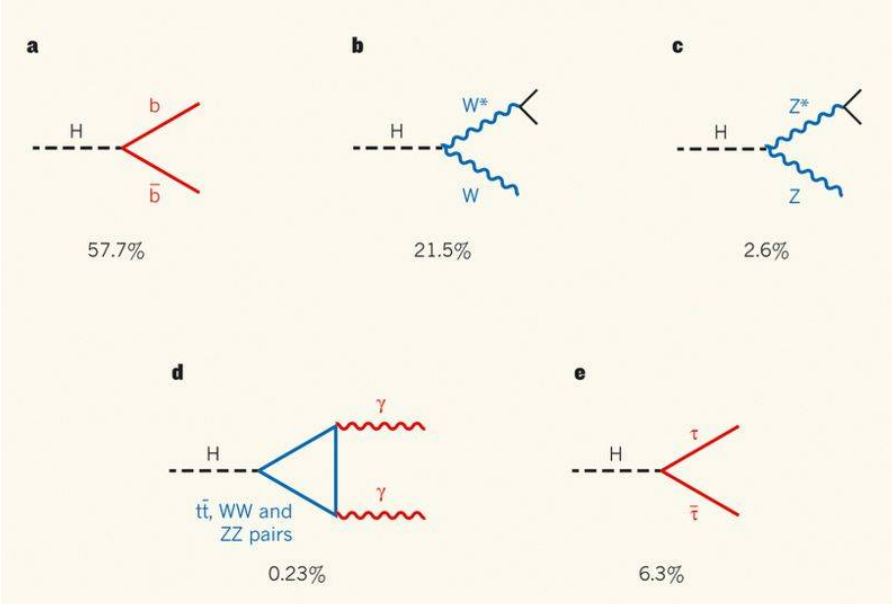


www.nature.com/articles/496439a

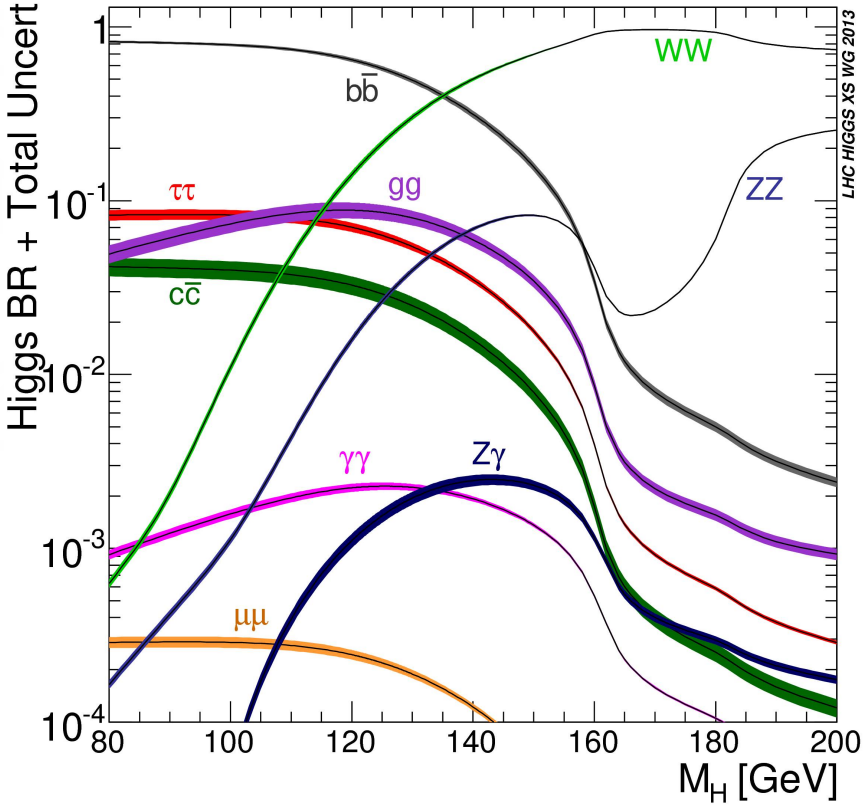


Higgsboson-Zerfall

Zerfallskanäle:

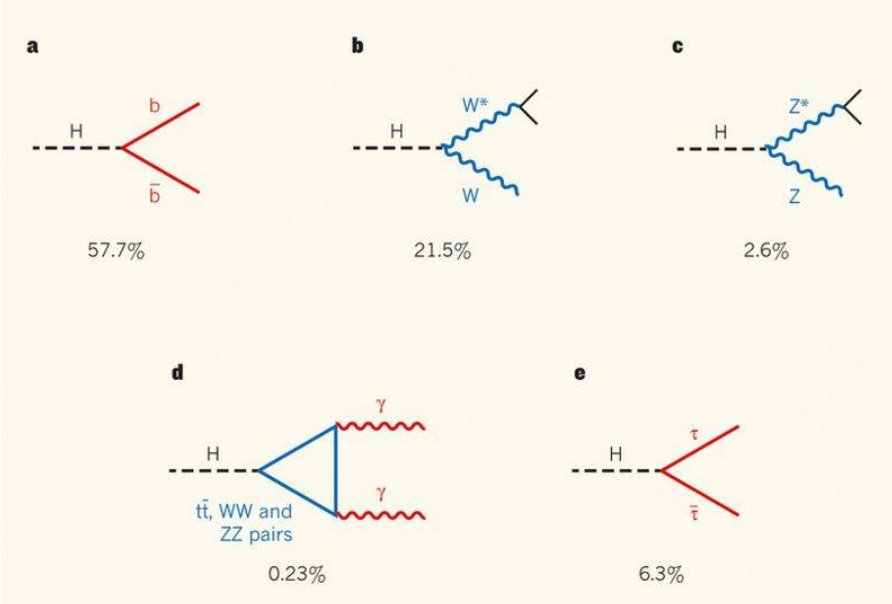


www.nature.com/articles/496439a

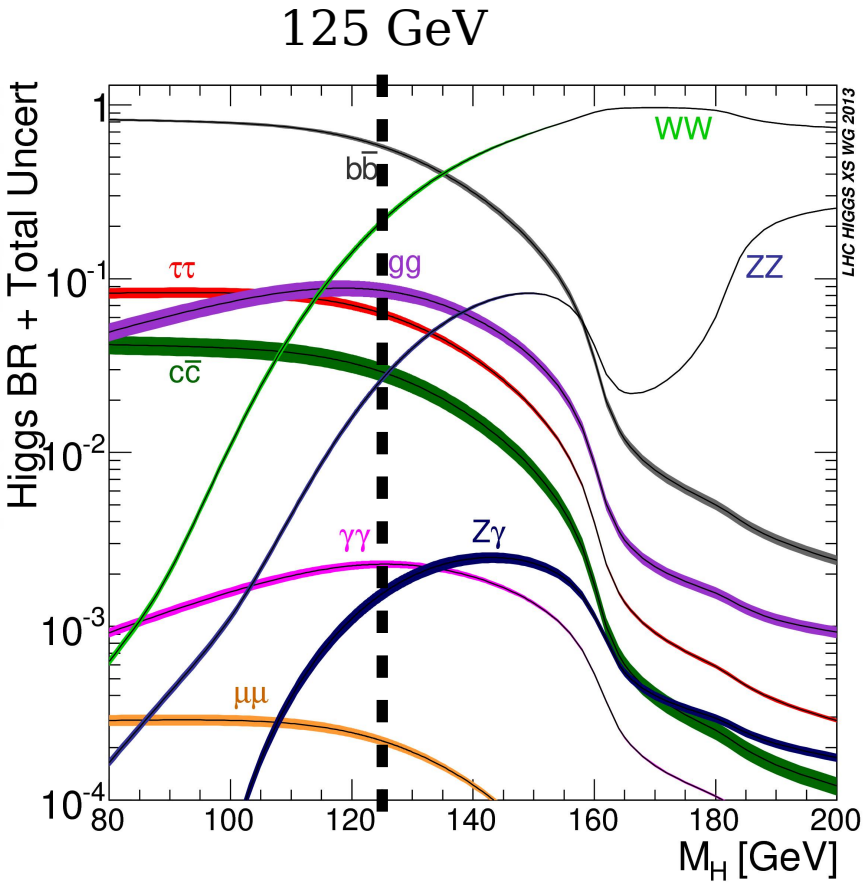


Higgsboson-Zerfall

Zerfallskanäle:

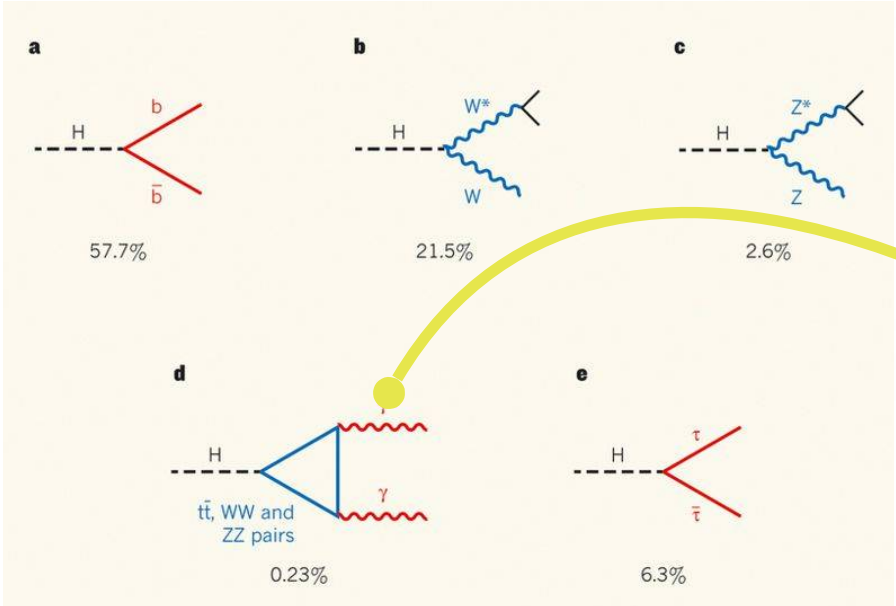


www.nature.com/articles/496439a

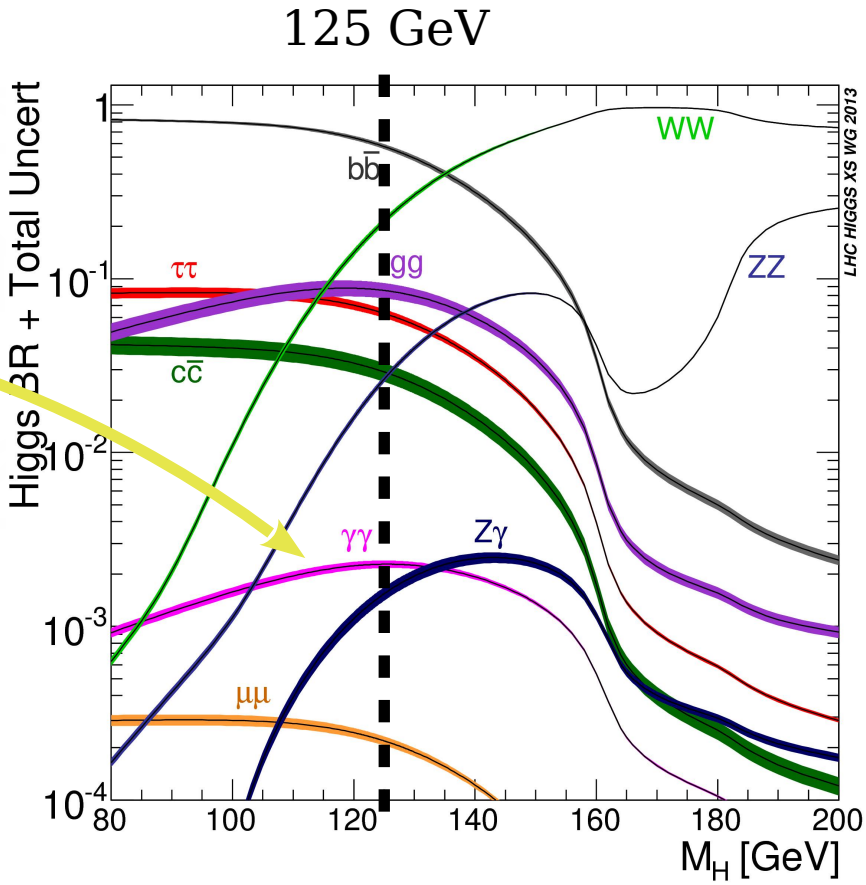


Higgsboson-Zerfall

Zerfallskanäle:

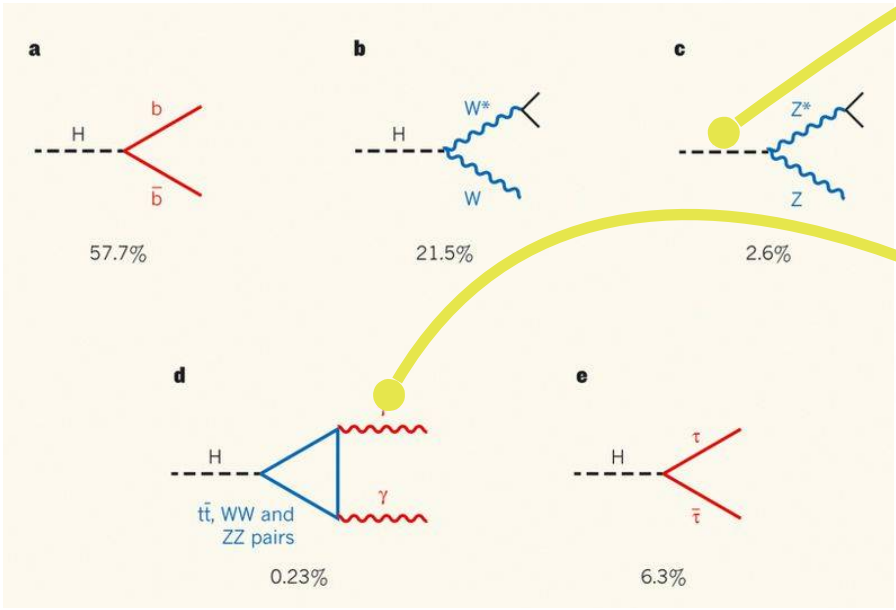


www.nature.com/articles/496439a

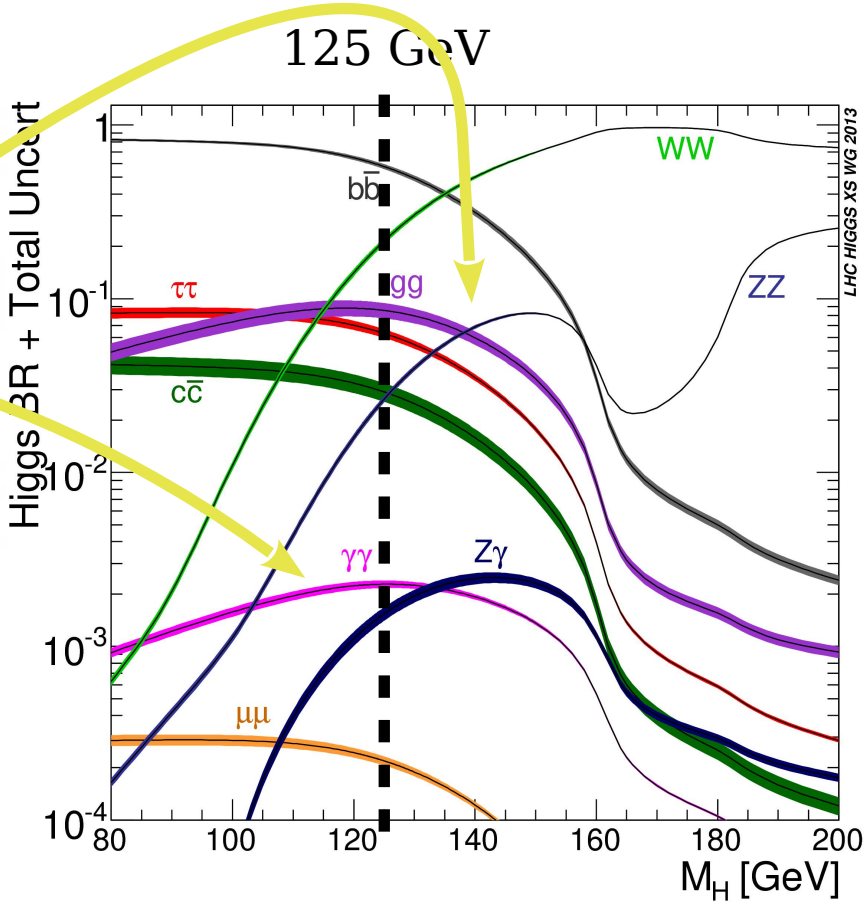


Higgsboson-Zerfall

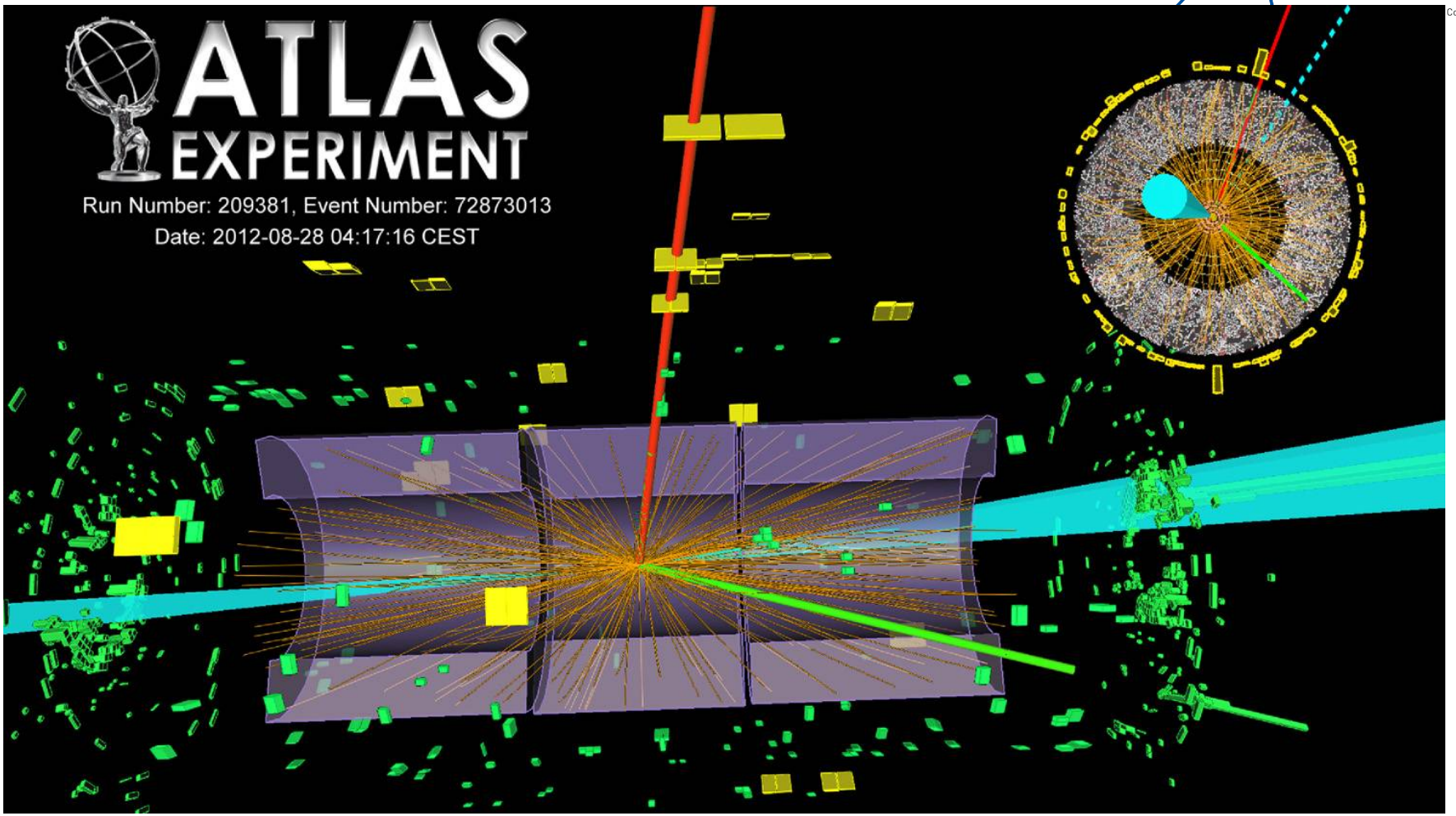
Zerfallskanäle:



www.nature.com/articles/496439a

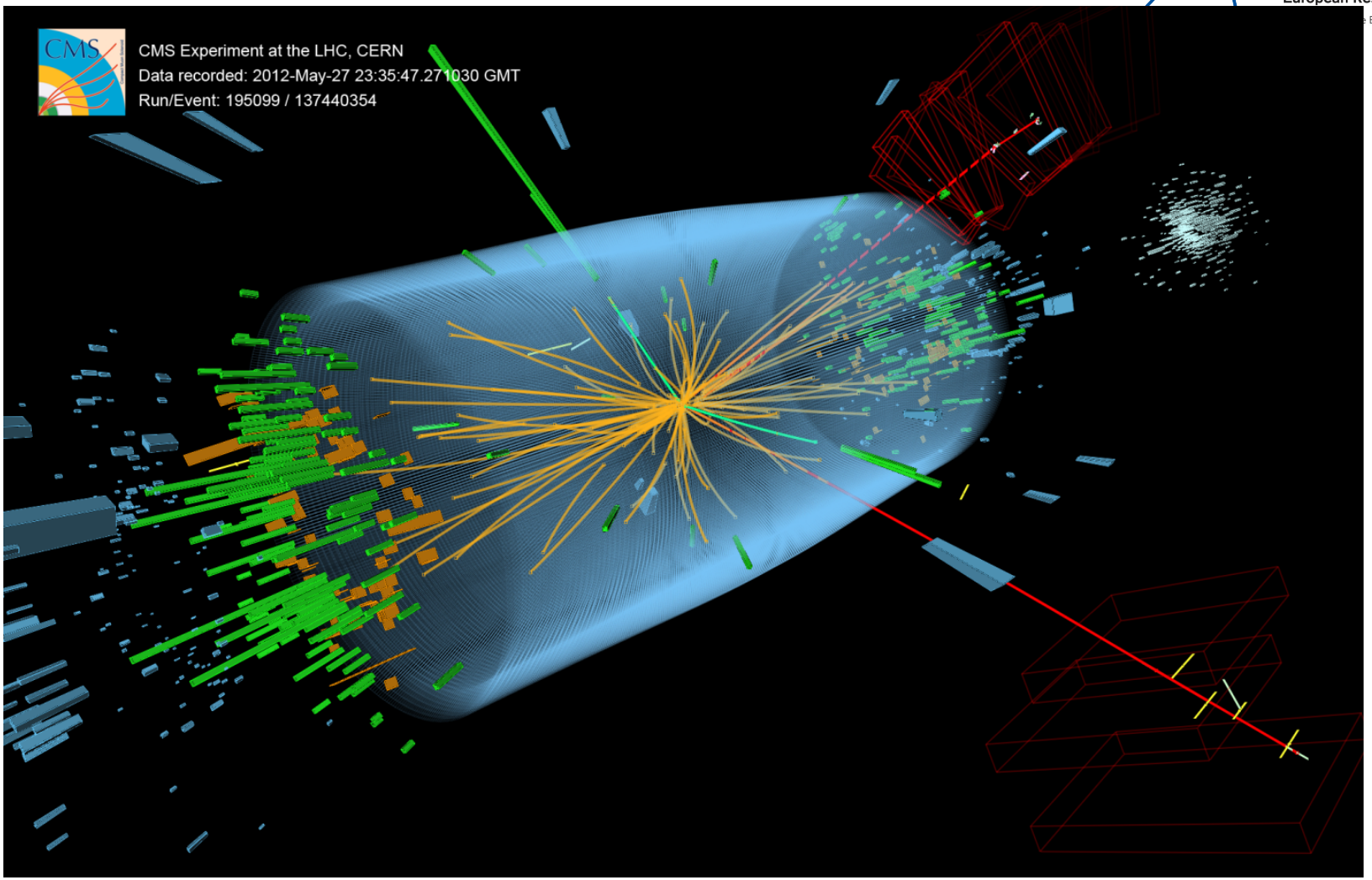


Higgsboson-Kandidat ATLAS



http://press.cern/multimedia

Higgsboson-Kandidat CMS

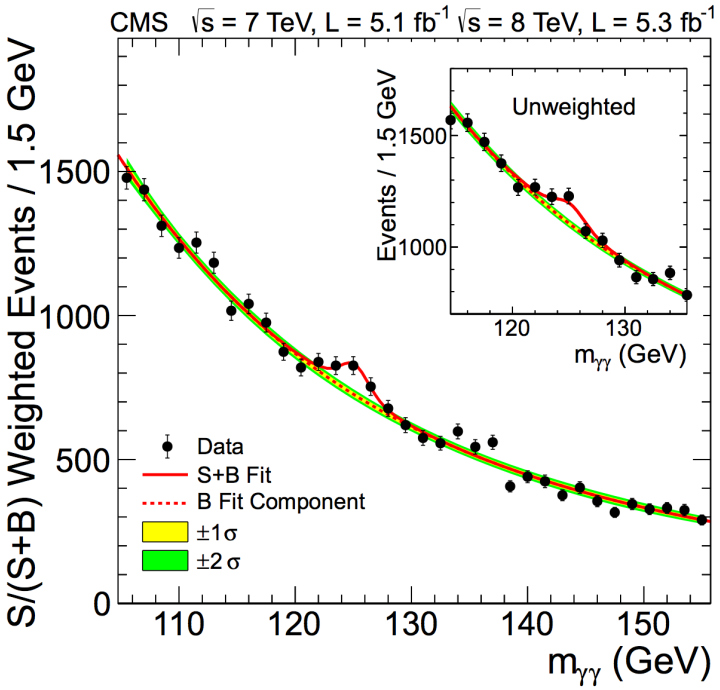


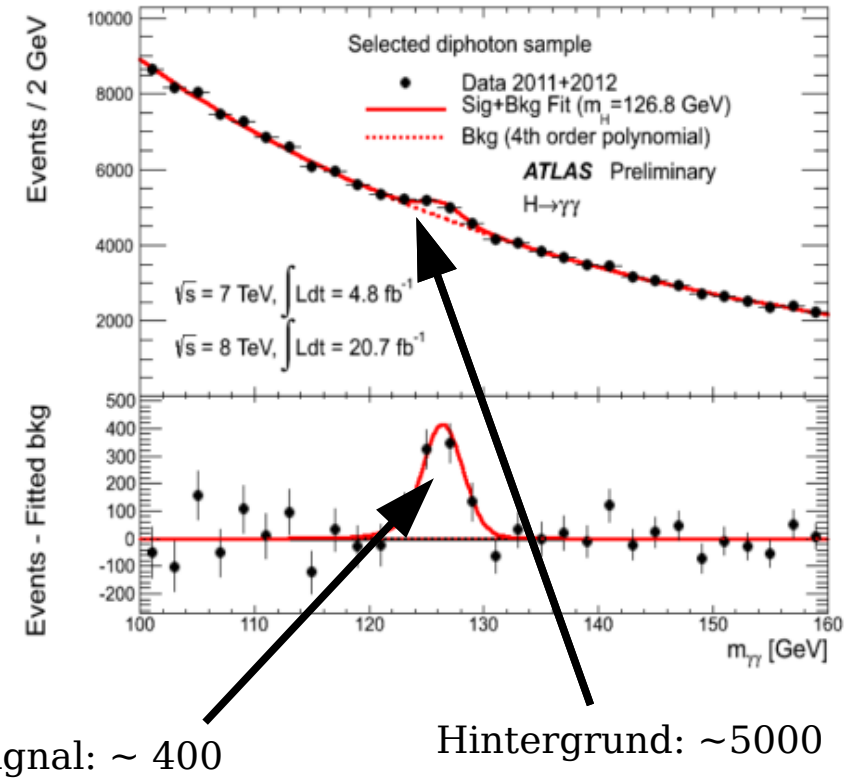
http://press.cern/multimedia

Die Entdeckungsprozesse

Produktion in Gluon-Fusion und Zerfalls in die Eichbosonen: $\gamma, Z^0, W^{\pm}$

$$gg \rightarrow H \rightarrow \gamma\gamma$$





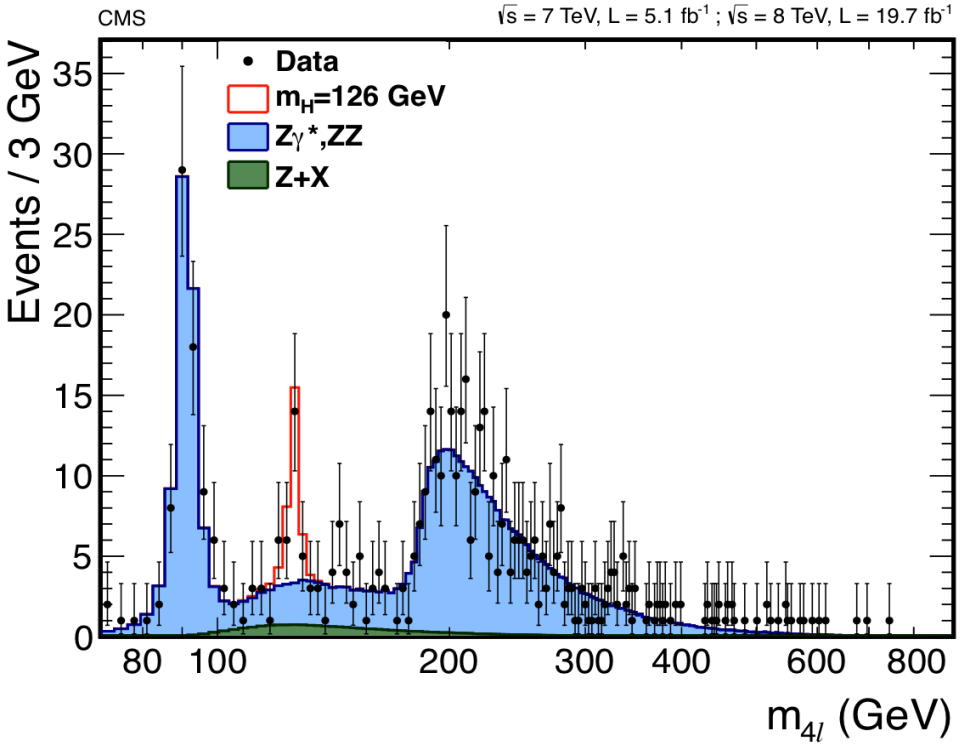
Signal: ~ 400

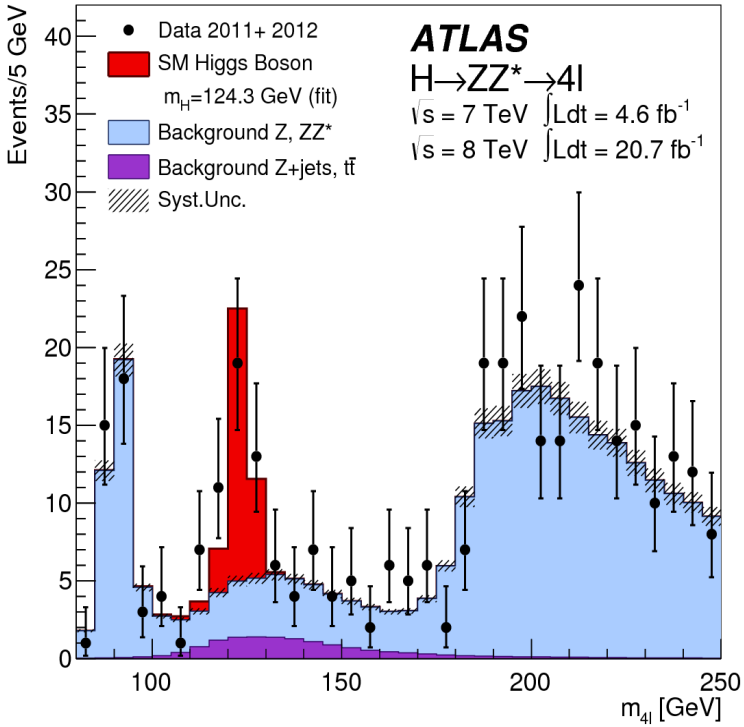
Hintergrund: ~5000

Die Entdeckungsprozesse

Produktion in Gluon-Fusion und Zerfalls in die Eichbosonen: $\gamma, Z^0, W^{\pm}$

$$gg \rightarrow H \rightarrow Z^0 Z^0 \rightarrow 4\ell$$



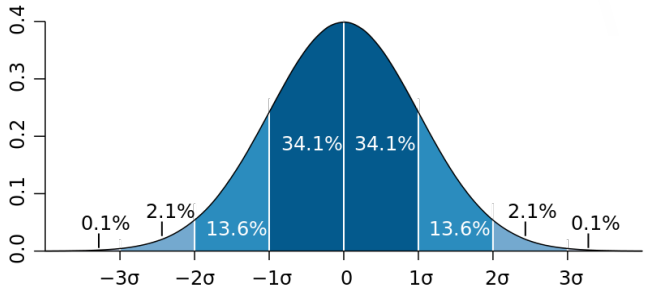


Signifikanz einer Entdeckung

Hypothese:
das gesehene Signal ist nur eine Fluktuation des Untergrunds

p-value p_0:
Wahrscheinlichkeit, dass das Signal nur eine Fluktuation des Untergrunds ist.

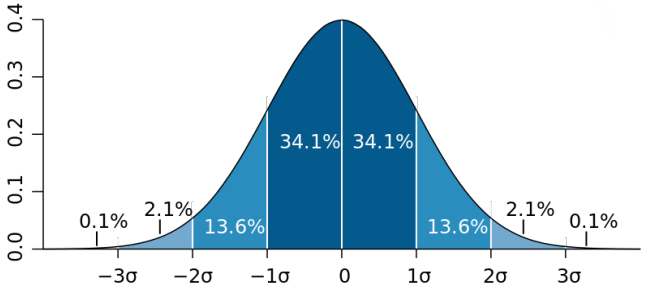
Annahme: Messungen sind gaussverteilt



$$1\sigma = 68.2689492\%$$
$$5\sigma = 99.9999426697\%$$

Signifikanz einer Entdeckung

Annahme: Messungen sind gaussverteilt



$$1\sigma = 68.2689492\%$$
$$5\sigma = 99.9999426697\%$$

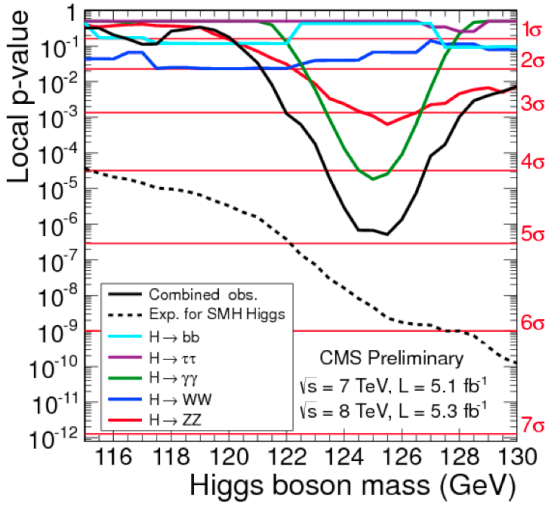
Hypothese:
das gesehene Signal ist nur eine Fluktuation des Untergrunds

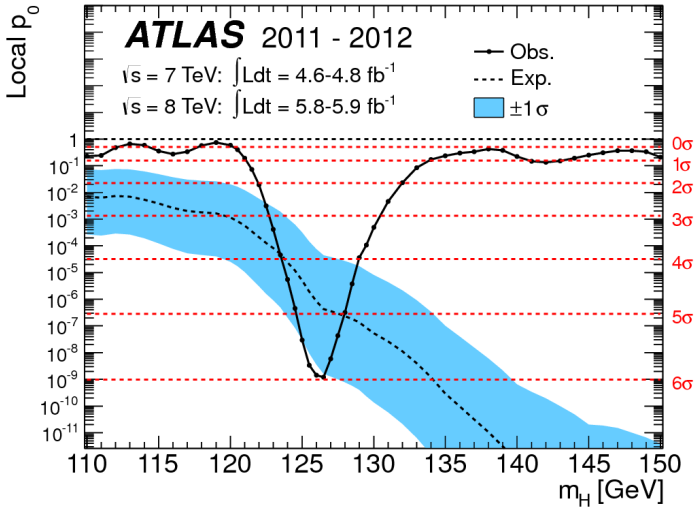
p-value p_0:
Wahrscheinlichkeit, dass das Signal nur eine Fluktuation des Untergrunds ist.

Als Entdeckung gilt es, wenn

$$p_0 \lesssim 1 - 5\sigma$$
$$\lesssim 10^{-7} \qquad \leftrightarrow 1{:}10\ \text{Mio.}$$

Signifikanz einer Entdeckung



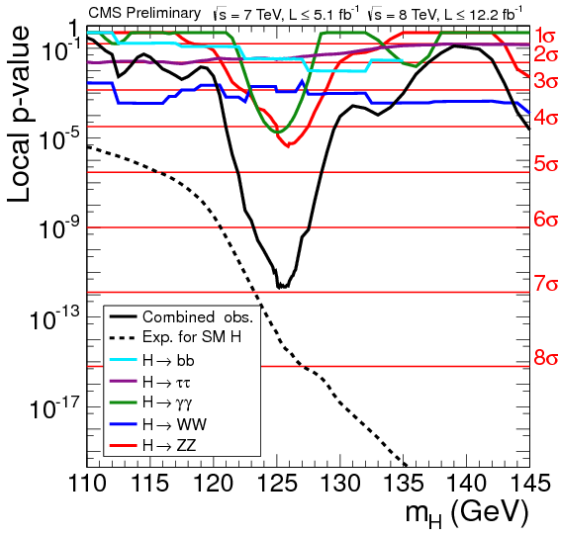


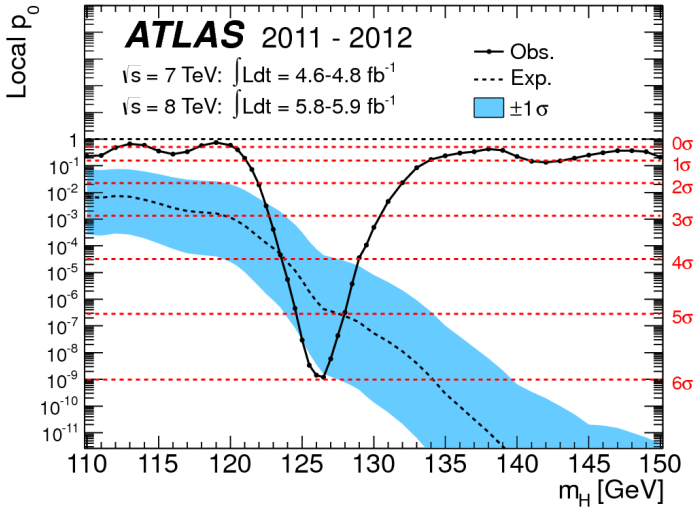
Als Entdeckung gilt es, wenn:

$$p_0 \lesssim 1 - 5\sigma$$
$$\lesssim 10^{-7} \quad \text{(1:10 Mio.)}$$

https://cdsweb.cern.ch/record/1459463, https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/PAPERS/HIGG-2012-27

Signifikanz einer Entdeckung





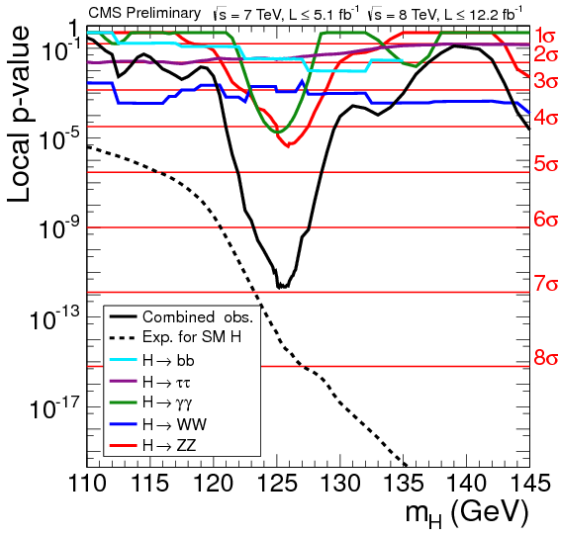
Als Entdeckung gilt es, wenn:

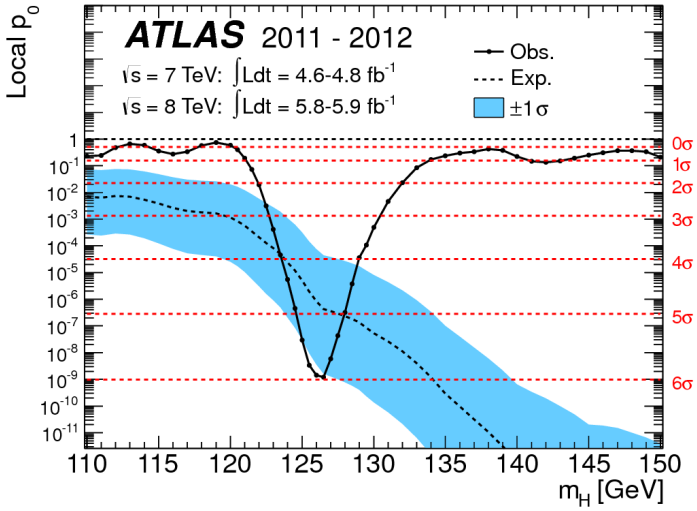
$$p_0 \lesssim 1 - 5\sigma$$
$$\lesssim 10^{-7} \quad \text{(1:10 Mio.)}$$

http://cms.web.cern.ch/news/highlights-cms-results-presented-hcp

https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/PAPERS/HIGG-2012-27

Signifikanz einer Entdeckung





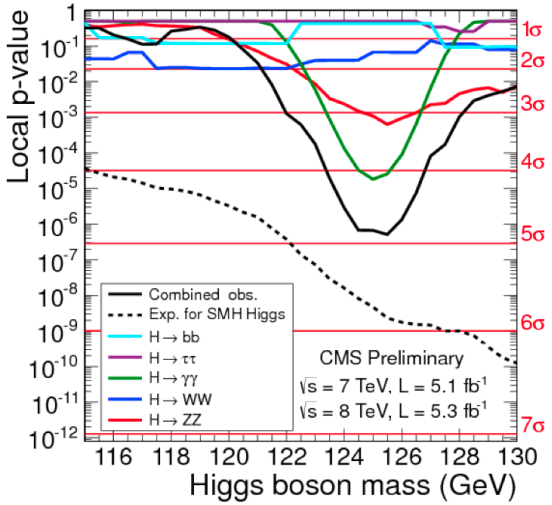
Als Entdeckung gilt es, wenn:

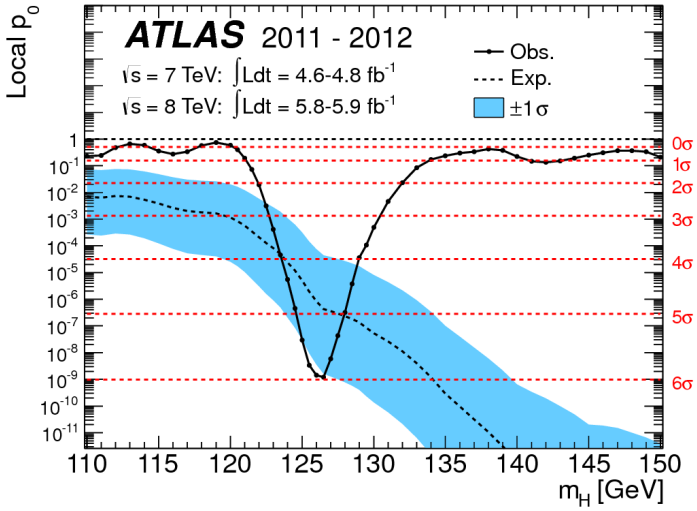
$$p_0 \lesssim 1 - 5\sigma$$
$$\lesssim 10^{-7} \quad \text{(1:10 Mio.)}$$

http://cms.web.cern.ch/news/highlights-cms-results-presented-hcp

https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/PAPERS/HIGG-2012-27

Signifikanz einer Entdeckung





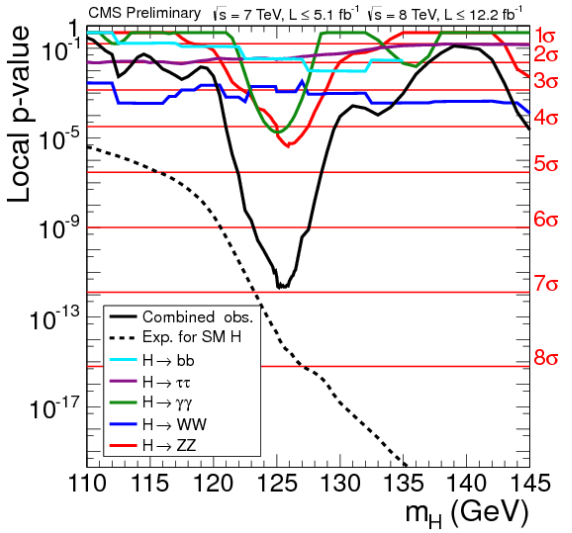
Als Entdeckung gilt es, wenn:

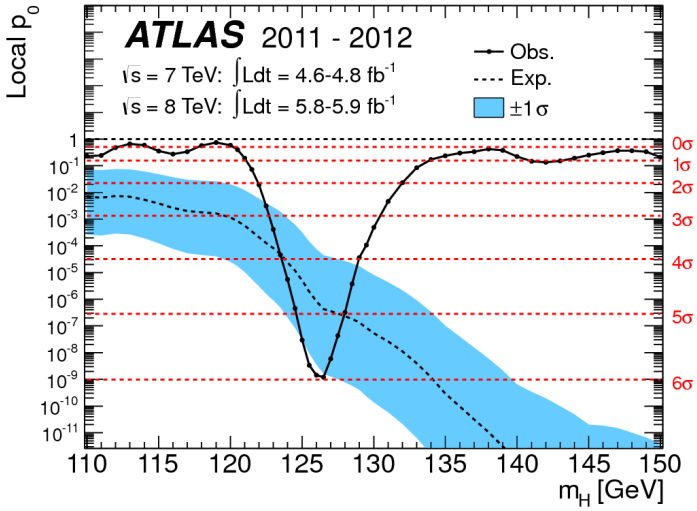
$$p_0 \lesssim 1 - 5\sigma$$
$$\lesssim 10^{-7} \quad \text{(1:10 Mio.)}$$

http://cms.web.cern.ch/news/highlights-cms-results-presented-hcp

https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/PAPERS/HIGG-2012-27

Signifikanz einer Entdeckung





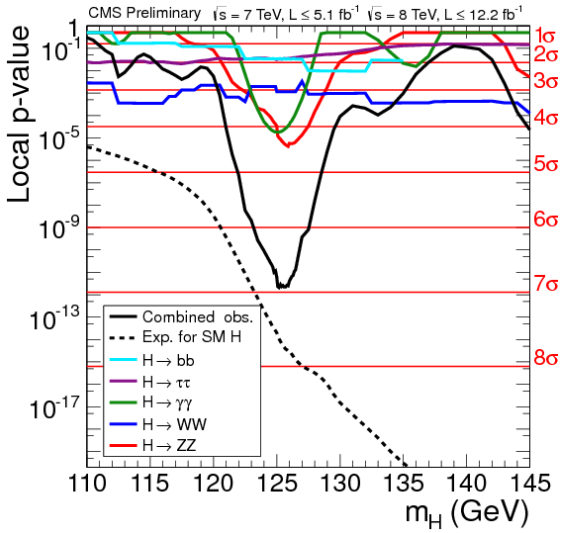
Als Entdeckung gilt es, wenn:

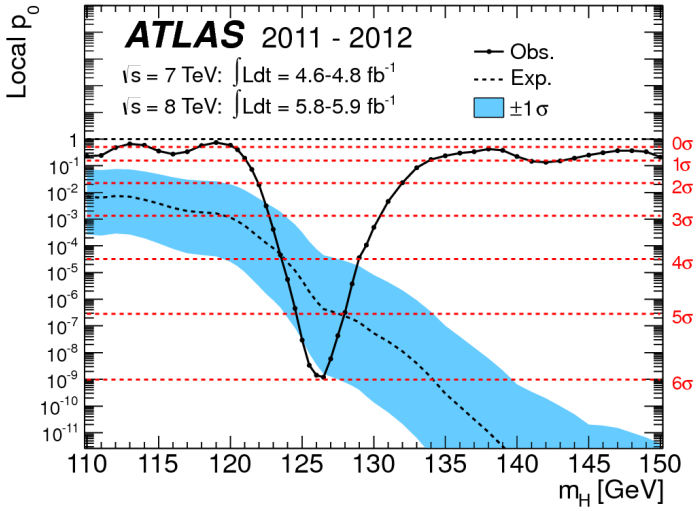
$$p_0 \lesssim 1 - 5\sigma$$
$$\lesssim 10^{-7} \quad \text{(1:10 Mio.)}$$

http://cms.web.cern.ch/news/highlights-cms-results-presented-hcp

https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/PAPERS/HIGG-2012-27

Signifikanz einer Entdeckung





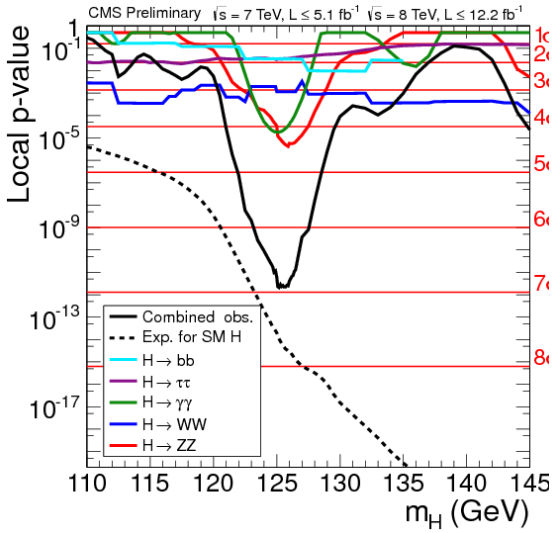
Als Entdeckung gilt es, wenn:

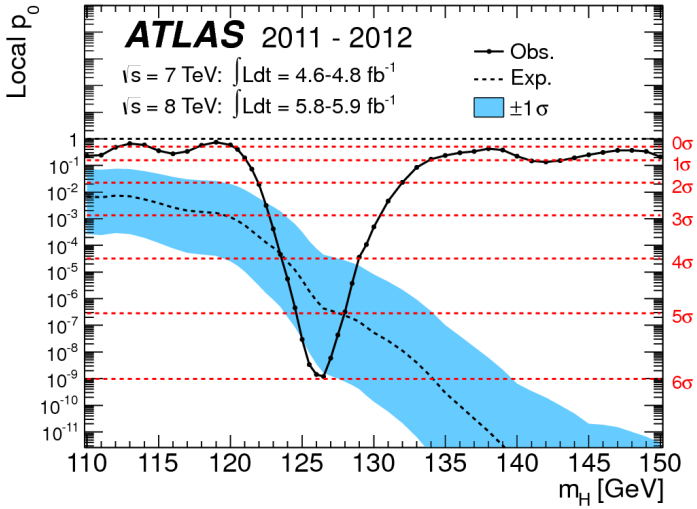
$$p_0 \lesssim 1 - 5\sigma$$
$$\lesssim 10^{-7} \quad \text{(1:10 Mio.)}$$

http://cms.web.cern.ch/news/highlights-cms-results-presented-hcp

https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/PAPERS/HIGG-2012-27

Signifikanz einer Entdeckung





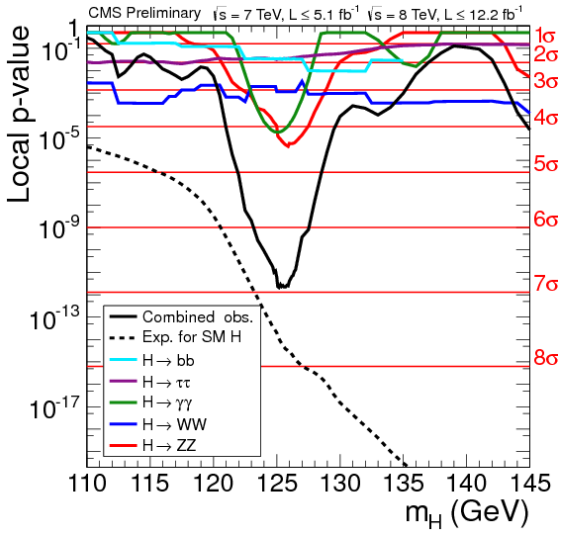
Als Entdeckung gilt es, wenn:

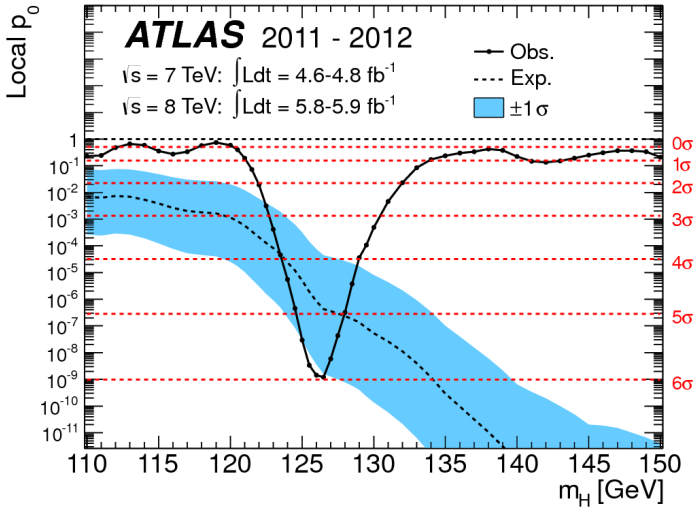
$$p_0 \lesssim 1 - 5\sigma$$
$$\lesssim 10^{-7} \quad \text{(1:10 Mio.)}$$

http://cms.web.cern.ch/news/highlights-cms-results-presented-hcp

https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/PAPERS/HIGG-2012-27

Signifikanz einer Entdeckung





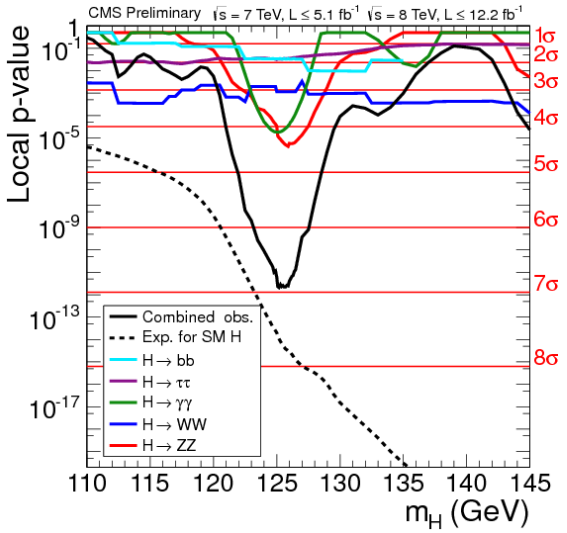
Als Entdeckung gilt es, wenn:

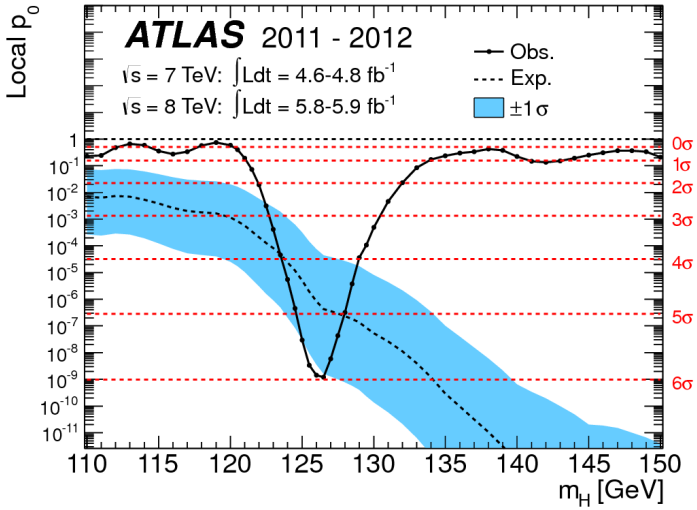
$$p_0 \lesssim 1 - 5\sigma$$
$$\lesssim 10^{-7} \quad \text{(1:10 Mio.)}$$

http://cms.web.cern.ch/news/highlights-cms-results-presented-hcp

https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/PAPERS/HIGG-2012-27

Signifikanz einer Entdeckung





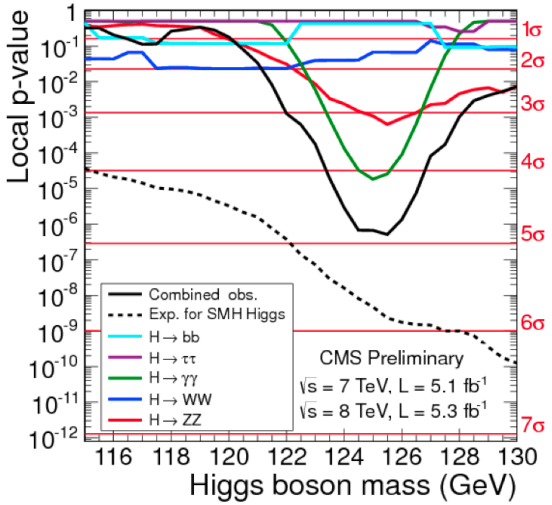
Als Entdeckung gilt es, wenn:

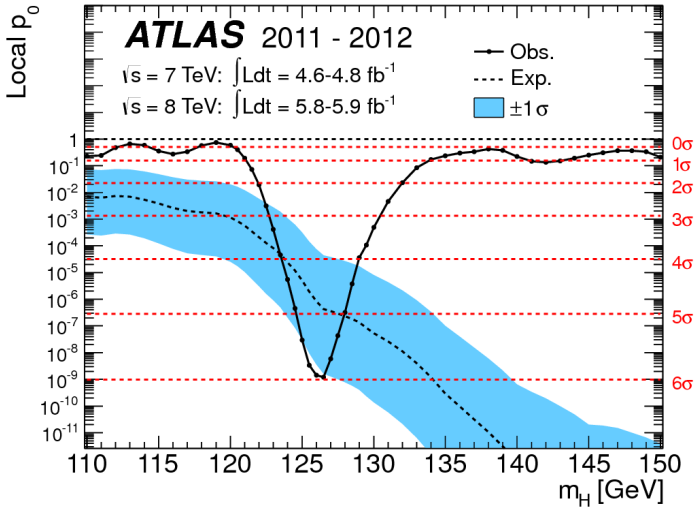
$$p_0 \lesssim 1 - 5\sigma$$
$$\lesssim 10^{-7} \quad \text{(1:10 Mio.)}$$

http://cms.web.cern.ch/news/highlights-cms-results-presented-hcp

https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/PAPERS/HIGG-2012-27

Signifikanz einer Entdeckung





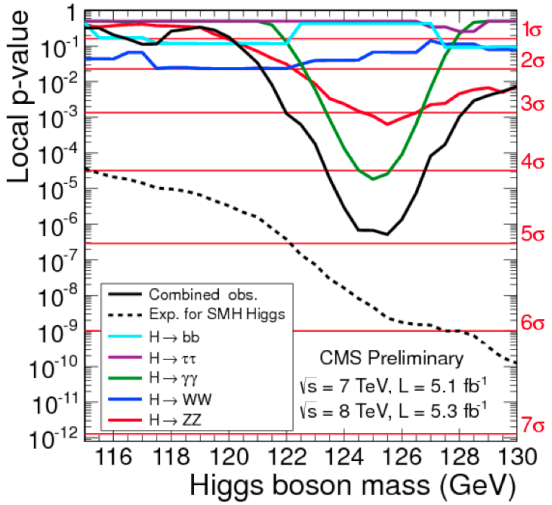
Als Entdeckung gilt es, wenn:

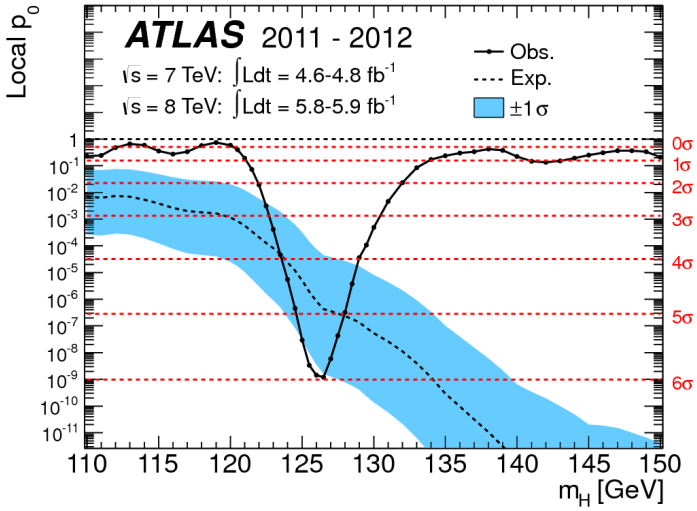
$$p_0 \lesssim 1 - 5\sigma$$
$$\lesssim 10^{-7} \quad \text{(1:10 Mio.)}$$

http://cms.web.cern.ch/news/highlights-cms-results-presented-hcp

https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/PAPERS/HIGG-2012-27

Signifikanz einer Entdeckung





Als Entdeckung gilt es, wenn:

$$p_0 \lesssim 1 - 5\sigma$$
$$\lesssim 10^{-7} \quad \text{(1:10 Mio.)}$$

→ 6 zusätzliche Würfel nach Run 1

http://cms.web.cern.ch/news/highlights-cms-results-presented-hcp

https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/PAPERS/HIGG-2012-27

Nobelpreis 2013

The Nobel Prize in Physics 2013
François Englert, Peter Higgs

Share this: 2K

The Nobel Prize in Physics 2013

Photo: A. Mahmoud
François Englert
Prize share: 1/2

Photo: A. Mahmoud
Peter W. Higgs
Prize share: 1/2

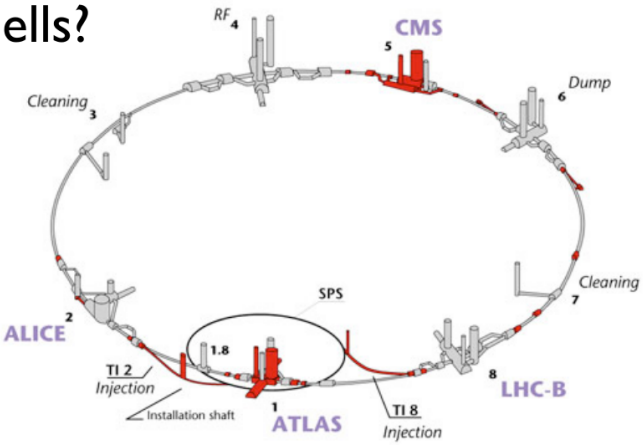
The Nobel Prize in Physics 2013 was awarded jointly to François Englert and Peter W. Higgs *"for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN's Large Hadron Collider"*
https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2013/

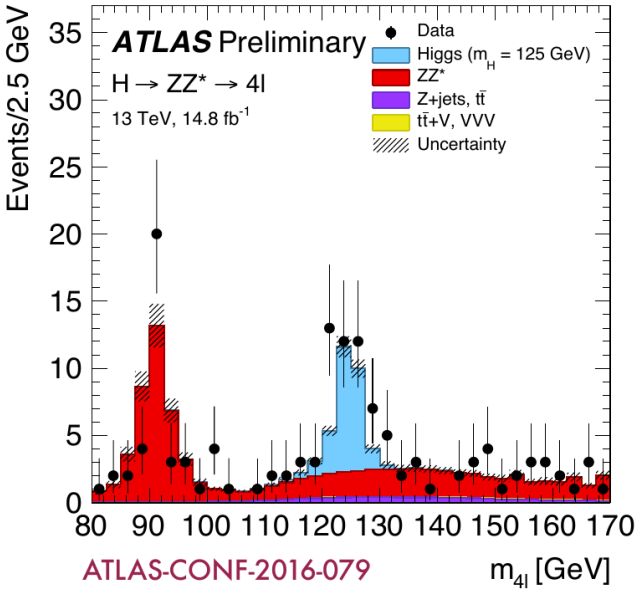
http://press.cern/multimedia

Was seitdem geschah...

Higgssektor-Eigenschaften

- 2012: neues Teilchen am LHC entdeckt
- Ist es das Higgs-Boson des Standardmodells?





- Masse: mit allen bisherigen SM Vorhersagen kompatibel

$$m_H = 125.09 \pm 0.21(\text{stat.}) \pm 0.11(\text{syst.})\ \text{GeV}$$ ATLAS & CMS combination '2015

$$(E_0 = m\,c^2)$$

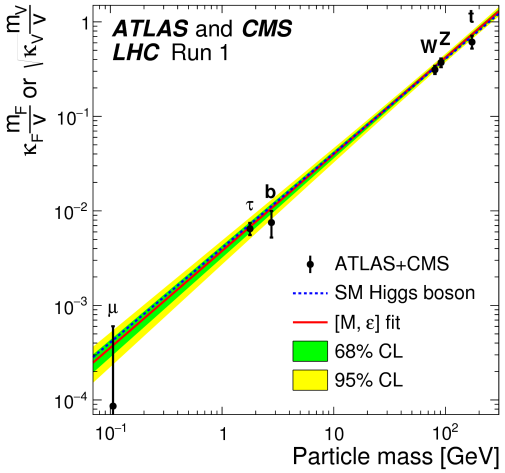
- Quantenzahlen: Spin = 0, Parität = +1 CMS '2014, ATLAS '2015
  (andere Quantenzahlen mit über 99,9% Sicherheit ausgeschlossen)

Higgssektor-Eigenschaften

1) Wechselwirkung des Higgsbosons mit den Quarks und Leptonen

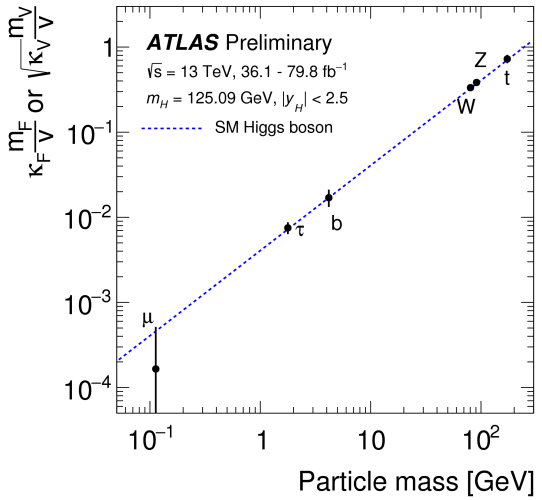
2016:

https://doi.org/10.1007/JHEP08(2016)045



2018:

ATLAS-CONF-2018-031



2) Lebensdauer

3) Wechselwirkung des Higgsbosons mit sich selbst

→ Präzisionsmessungen: Motivation für genauere Collider

Offene Fragen?