

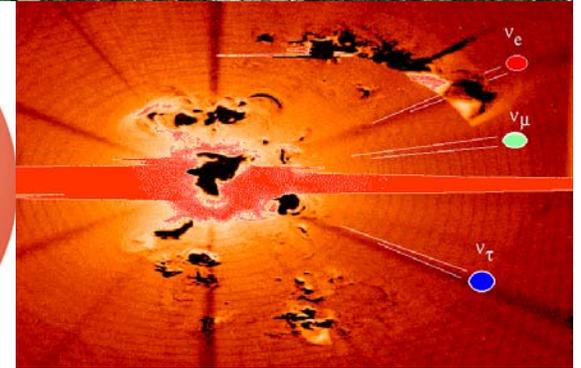
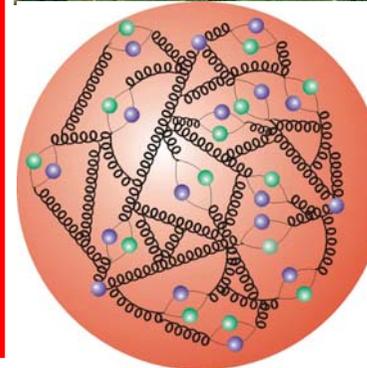
Was bedeutet Masse?

Ausgewählte Kapitel aus Teilchenphysik und Kosmologie

Achim Geiser, DESY + Uni HH

Fazit der Vorlesung

- Antworten auf einige der in der Einführung gestellten Fragen



Was ist Masse überhaupt?

- Träge Masse = schwere Masse
= Energie eines Teilchens in Ruhe, $m = E/c^2$
Masse ist Energie, und Energie ist Masse!

- **Woraus besteht sie?**

jegliche Form der Energie:

- Masse von Konstituenten, z.B. Nukleonen im Kern
- kinetische Energie von Konstituenten, z.B. Quarks im Proton
- Feldenergie, z.B. elektromagnetisches Feld, Gluonfeld
= interne Wechselwirkungsenergie, Bindungsenergie
- externe Wechselwirkungsenergie, z.B. Wechselwirkung mit Higgs-Hintergrundfeld (Yukawa-Masse), mit externem elektromagnetischem Feld (effektive Photon-Masse)

Zusammenfassung der semi-klassischen Betrachtungen

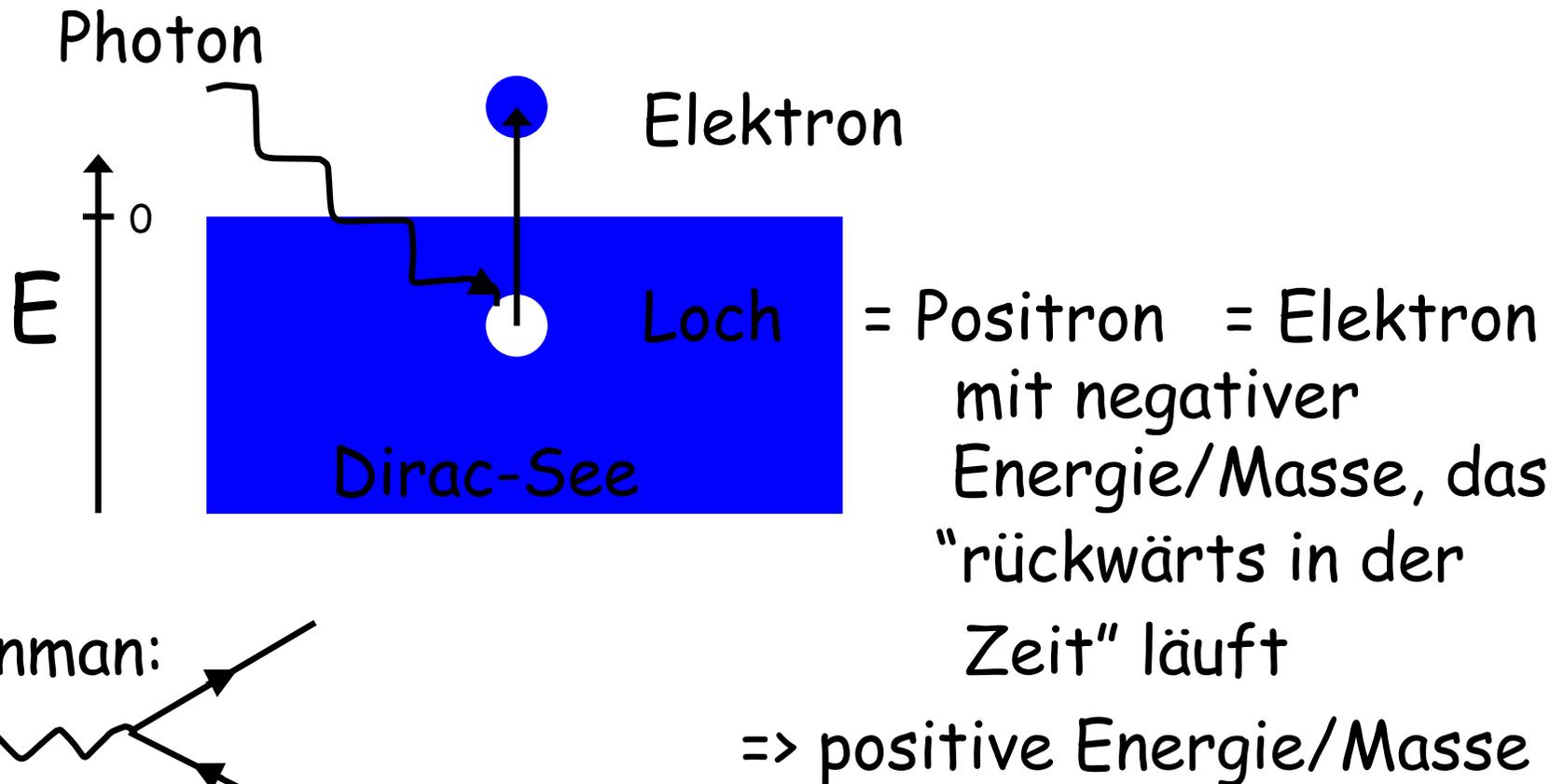
Masse = Energie, und Energie = Masse

- ⇒ Jedes zusammengesetzte mechanische System hat eine Masse.
- ⇒ Massive Systeme können aus (fast) masselosen Teilchen aufgebaut sein, z.B. Proton
- ⇒ Elektromagnetische Feldenergie trägt zur Masse eines Systems von geladenen Teilchen bei (potentielle Energie, siehe auch Aufgabe 2).
- ⇒ Jedes elektromagnetisch geladene Teilchen (Ladung oder magnetisches Moment) ist notwendigerweise massiv.
- ⇒ Jedem geladenen Teilchen kann ein „klassischer Radius“ $r = \alpha/m$ zugeordnet werden (Annahme: Gesamtmasse = Feldenergie). Dieser spielt eine Rolle in vielen semiklassischen Berechnungen, entspricht aber nicht der tatsächlichen „Größe“ eines Teilchens.
-> quantenmechanische Aspekte können meist nicht vernachlässigt werden. Dies gilt insbesondere für „elementare Teilchen“.

negative Masse? z.B. Löcher-Theorie der Positronen

- Dirac-See: Vakuum = gefüllt mit Zuständen negativer Energie
- Erzeugung eines Elektron-Positron-Paars:

Anregung eines Vakuumzustands:



negative Masse??

- z.B. Vakuumblyse in Flüssigkeit:
 - effektiv negative träge Masse: Impuls entgegengesetzt zu Geschwindigkeit
 - aber positive schwere Masse:
 - Kraft nach unten -> Impuls nach unten
 - > Bewegung nach oben!
 - > "fällt" nach oben!
- "echte" negative Masse (träge und schwere Masse negativ) würde nach unten fallen!
In der makroskopischen Welt nicht beobachtet (virtuell erlaubt)

Das Massenrätzel



Die Elektronenmasse: Was wissen wir?

- Das elektromagnetische Feld des Elektrons trägt signifikant zu seiner Masse bei -> **Elektron muss massiv sein.**
- Elektron = elementares (punktförmiges) Teilchen
-> **klassisch divergiert die Feldenergie wie $1/r$**
("klassischer Elektronenradius")
- **QED:** bei Abständen $< 1/2m_e$ sorgen Vakuumfluktuationen (Elektron-Positron-Paarzeugung) für eine **effektive "Verschmierung" der Ladungsverteilung** über einen Raumbereich $\sim 1/m_e^3$
-> die Divergenz der Masse wird auf eine **logarithmische Divergenz $\sim \ln(1/r)$** abgemildert.
- Die **unendlich große "nackte" Masse** muss so gewählt werden, dass sie diese Divergenz kompensiert -> **Renormierung!**
-> **Elektronenmasse kann NICHT berechnet werden.** **unbefriedigend!**
Gemessener Wert wird "von Hand" eingesetzt.
- $1/m_e$ ist **Untergrenze auf Lokalisierbarkeit** des Elektrons

Die Elektronenmasse: Was wissen wir?

- Die **resultierende physikalische Masse** hängt von der Energieskala $Q \sim 1/r$ ab ("laufende" Masse):
für $Q \ll 2m_e$: klassische Formeln gelten (Δm = klassische Feldenergie $\sim 1/r$)
für $Q \gg 2m_e$: $m(Q) = m(0) (1 - \alpha/\pi - 3\alpha/4\pi \ln(Q^2/m(0)^2))$

renormierte Masse

Integral über "klassischen" Anteil

Vakuumfluktuationen (Ladungsverschm.)

$$m(0) = 0.511 \text{ MeV}, \quad \alpha = 1/137$$

- Der Wert der **Feinstrukturkonstanten** hängt (logarithmisch) von m_e ab:
($2m_e$ ist Abschneideparameter für Laufen der Kopplungskonstanten)

$$\alpha(0) \rightarrow 0 \text{ für } m_e \rightarrow 0$$

-> **Atome würden nicht zusammenhalten!**

Herausforderung/Hoffnung für Zukunft: finde Theorie, die Masse berechenbar macht !!!

Massen sind nicht konstant: laufende Quarkmasse

■ QED: Elektronmasse (nach Renormierung):

für $Q \ll 2m_e$: klassische Formeln gelten (Δm = klassische Feldenergie $\sim 1/r$)

für $Q \gg 2m_e$: $m(Q) = m(0) (1 - \alpha/\pi - 3\alpha/4\pi \ln(Q^2/m(0)^2))$

renormierte Masse \nearrow

Integral über "klassischen" Anteil \nearrow

Vakuumfluktuationen (Ladungsverschm.) \nearrow

$m(0) = 0.511 \text{ MeV}$, $\alpha = 1/137$

■ QCD: Quarkmasse, z.B. u-Quark (nach Renormierung)

für $Q \approx \Lambda_{\text{QCD}}$: α_s divergiert \rightarrow klassische Feldenergie divergiert

\rightarrow kein klassischer Grenzfall! (freie Quarks existieren nicht)

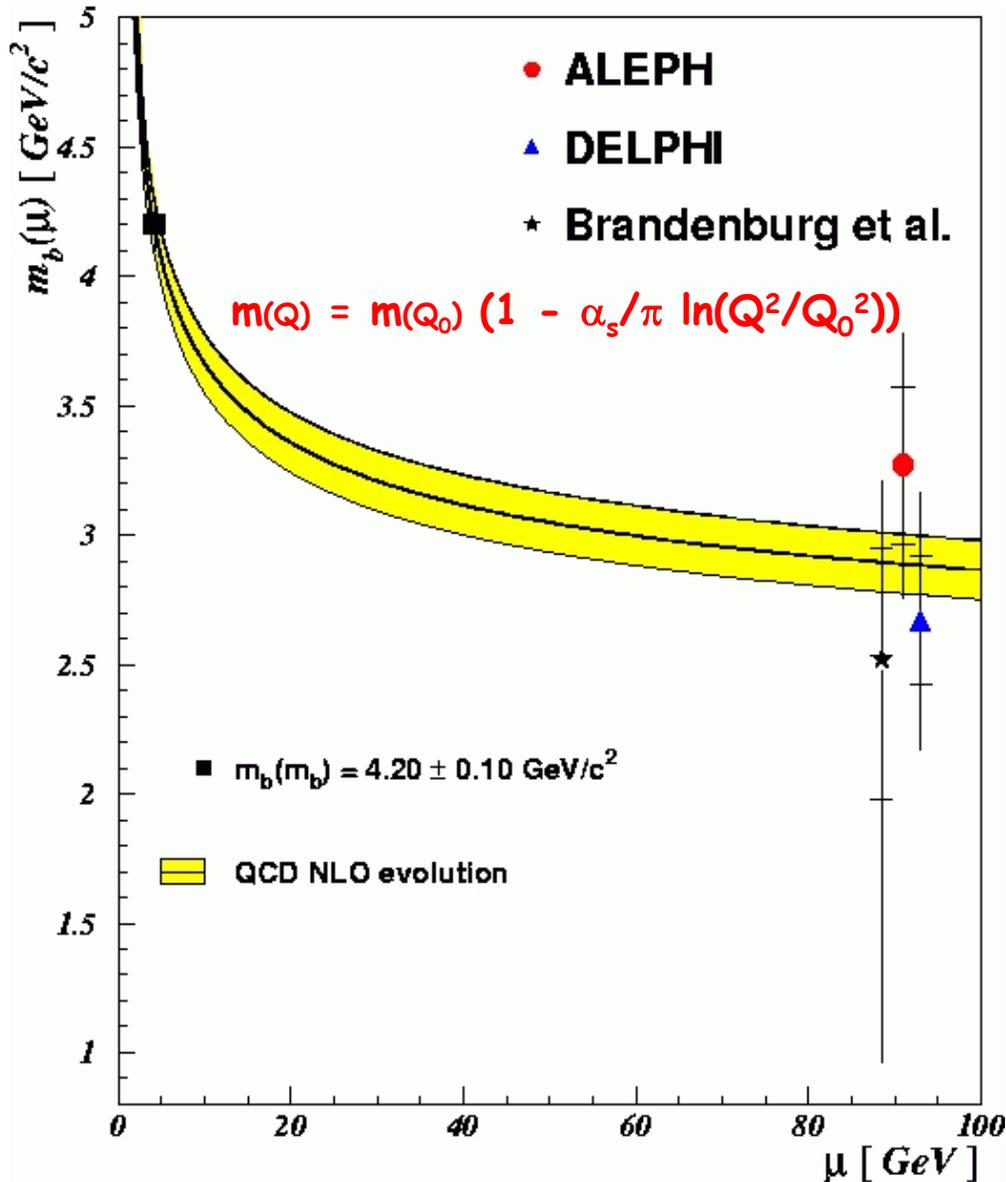
effektive Masse $m_u \sim 350 \text{ MeV} \sim \Lambda_{\text{QCD}}$

für $Q \gg m_u, \Lambda_{\text{QCD}}$: $m(Q) = m(Q_0) (1 - \alpha_s/\pi \ln(Q^2/Q_0^2))$

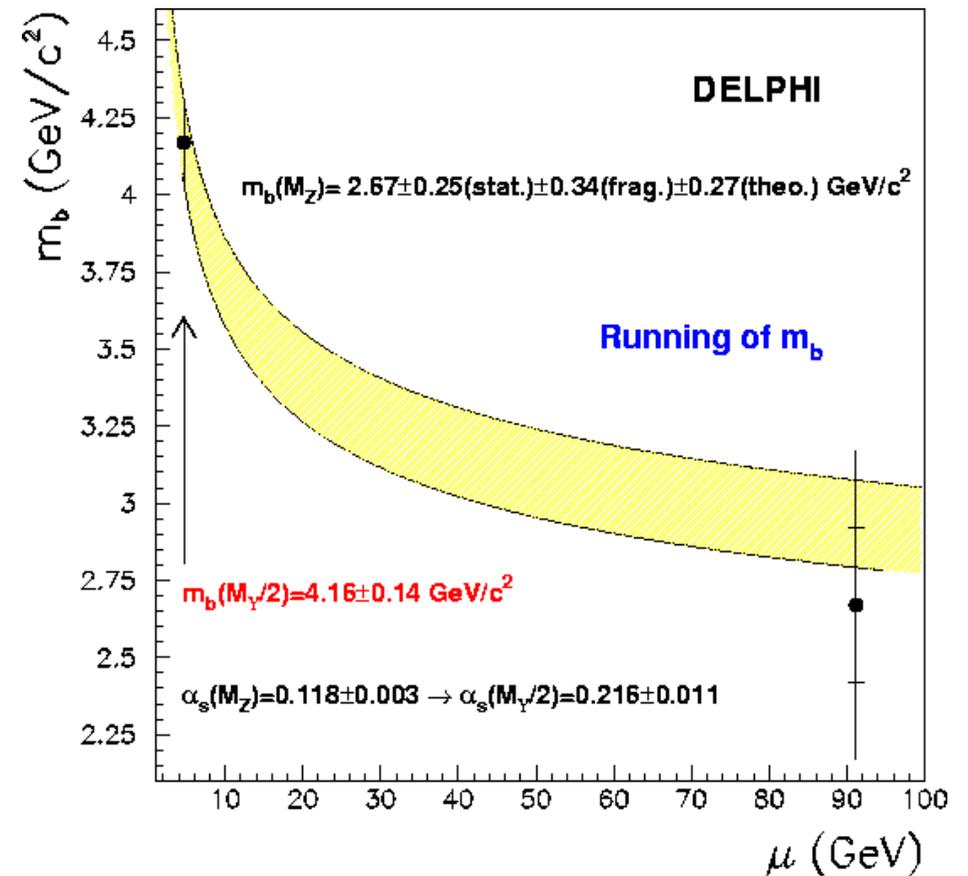
wie QED, nur mit zusätzlichem Faktor $C_F=4/3$

z.B. $Q \approx 2 \text{ GeV}$: $m_u \approx 2 \text{ MeV}$, $\alpha_s \approx 0.3$

Die laufende b-quark-Masse



LEP: $Z \rightarrow bb + \text{gluons}$,
 Messung des Phasenraums/
 Winkelverteilungen



Warum ist die Proton-Masse wichtig?

- 99% der Masse, aus der wir und unsere unmittelbare Umgebung bestehen, steckt in den Massen der Protonen und Neutronen der Atomkerne ($\sim 1\%$ Elektronmasse + Kern-Bindungsenergie).
- Protonen und Neutronen bestehen aus Quarks und Gluonen. Ihre Dynamik wird von der QCD beschrieben, $m_p \approx m_n$
Besonderheit: Laufende Kopplungskonstante α_s liefert charakteristische Energieskala Λ_{QCD}
- Asymptotische Freiheit \rightarrow Effekte bei kleinen Abständen tragen wenig zur Proton-Masse bei.
- Confinement ("große" Abstände) \Rightarrow Die Proton-Masse wird dominiert von Effekten bei der Skala $\sim \Lambda_{\text{QCD}}$ (~ 1 fm).

Fazit zur Proton-Masse:

- ~90% der Protonmasse ergibt sich aus der Bewegungsenergie (Feldenergie) der (fast) masselosen Quarks und masselosen Gluonen.
=> dynamische Massengenerierung.
Rest stammt aus Einfluss der (renormierten) Quark-Massen und QED-Beiträgen.
- Im Gegensatz zu den Quark- und Lepton-Massen ist die Protonmasse berechenbar! (aus gemessenen Werten von α_s oder Λ_{QCD}). Derzeitige Genauigkeit: ~ 10% (Gittereichtheorie)

Die top-Quark-Masse

- top-Quark ist schwerstes bekanntes "elementares" Teilchen

$$m_t \sim 170 \text{ GeV}$$

- Lebensdauer $\ll \Lambda_{\text{QCD}}$

\Rightarrow t zerfällt, bevor es fragmentiert

$$t \rightarrow W + b$$

\Rightarrow einziges Quark, dessen Masse direkt messbar ist

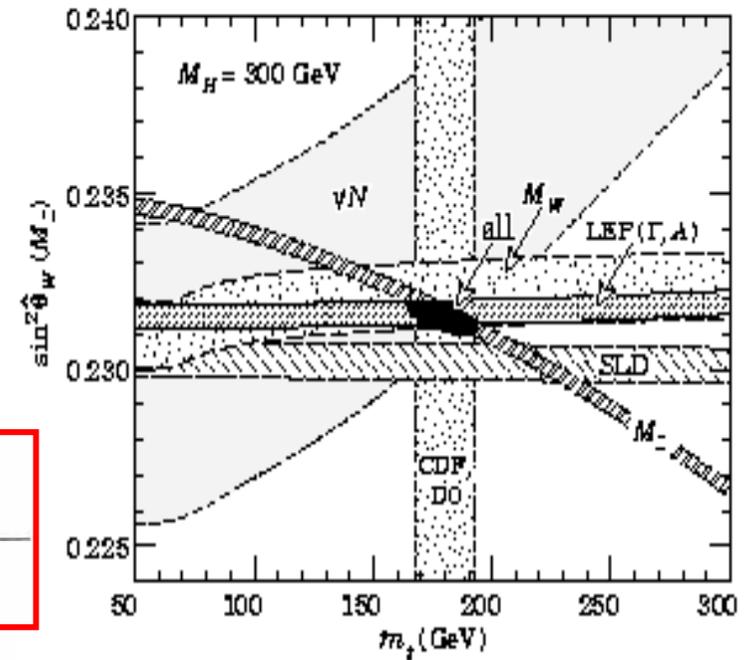
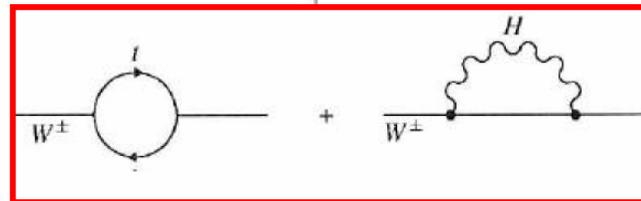
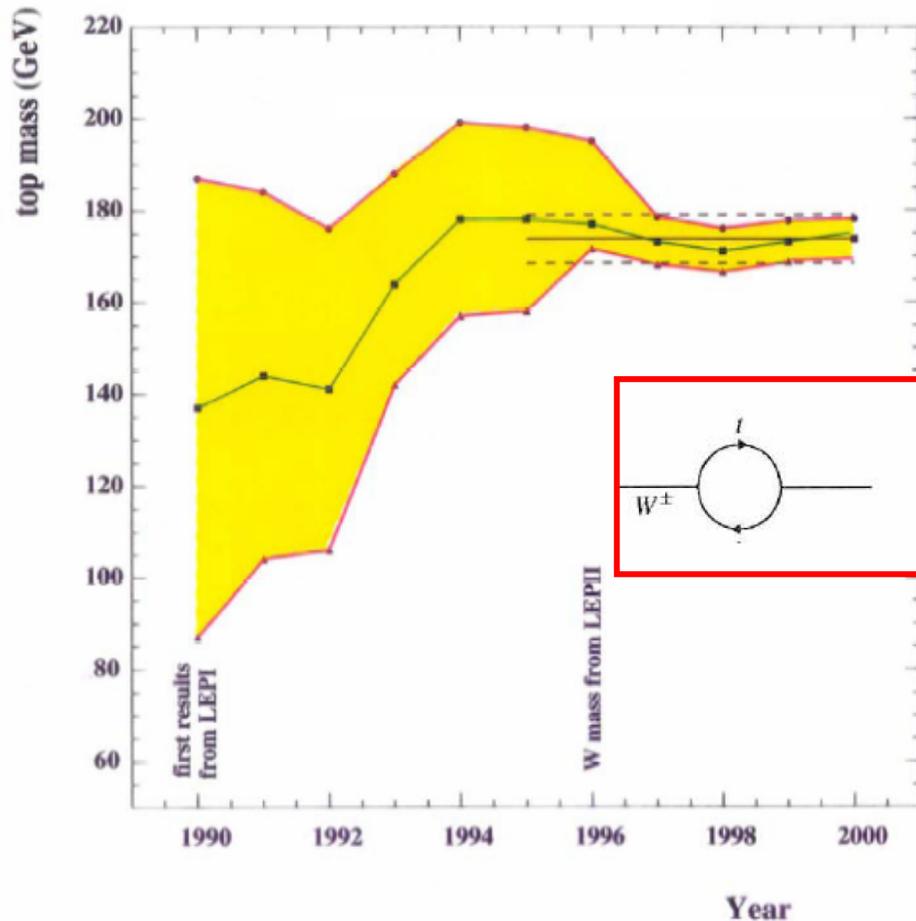
"physikalische" Masse:

$$m_t(\text{pole}) = m_t(m_t) \left(1 + \frac{4}{3} \alpha_s / \pi \right) \quad \begin{array}{l} \text{semi-klassischer Beitrag aus Gluonfeld} \\ \text{(wie bei QED)} \end{array}$$

"nackte"
renormierte Masse

Die Jagd nach dem top-Quark

Elektroschwache Präzisionsmessungen am LEP/CERN
sensitiv auf top-Quark-Masse und Higgs-Masse (Strahlungskorrekturen)



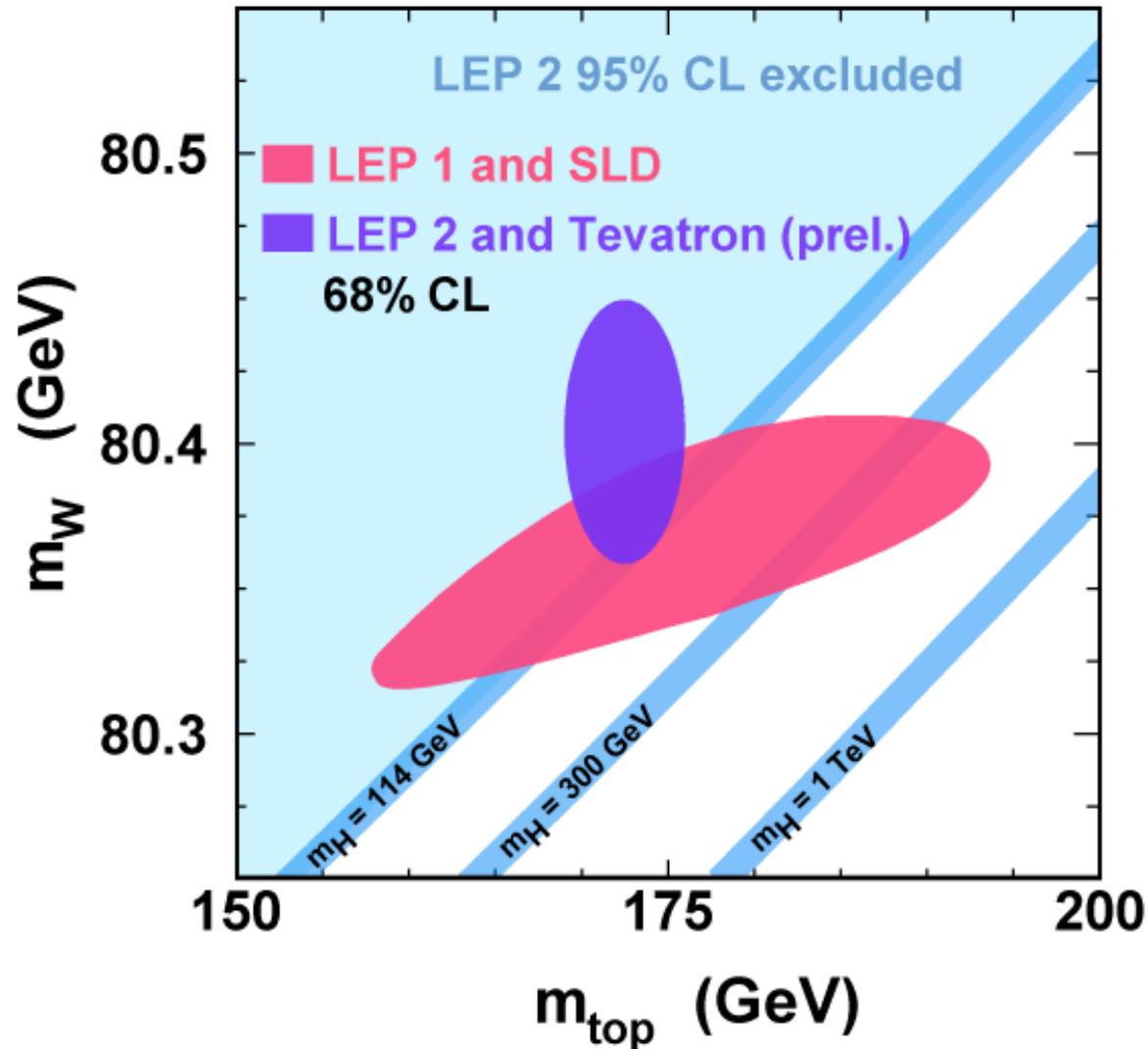
$$\propto \left(\frac{M_t}{M_W}\right)^2, \ln\left(\frac{M_h}{M_W}\right)$$

$\rightarrow M_t \sim 170 \text{ GeV}$

Quarkmassen: Was wissen wir?

- Quarkmassen-Spanne = 5 Größenordnungen,
~ 2 MeV (u) bis ~ 170 GeV (t)
- wie bei Leptonen: keine Ahnung, wieso!
renormierte Masse muss experimentell bestimmt
werden
Sonderrolle des top-Quarks?
- aber: Strahlungskorrekturen (Beiträge zu und von
umgebenden Feldern) berechenbar!
selbstkonsistentes Bild!
- wichtig: Higgs-Mechanismus, aber keine wirkliche
Erklärung

Top-W-Higgs-Massen-Fit



- bevorzugt leichtes Higgs!

Masseneigenzustände

- Zustände mit eindeutiger Masse
 - > eindeutiger 4er-Impuls (Impuls, Energie, Masse)
 - > monochromatische Wellen (für feste Energie)
- Eigenzustände der Wellenausbreitung
 - Propagatorterme
- zeitlich konstant (solange keine Wechselwirkung auftritt)
 - => T-Eigenzustände
 - => CP-Eigenzustände (CPT erhalten)

Eigenzustände der Wechselwirkung

- Zustände mit eindeutiger Kopplung
Wechselwirkungsterme
- Eigenzustände der Wellenausbreitung (Masse) und
der Wechselwirkung nicht notwendigerweise identisch
=> Mischung von Masseneigenzuständen in der
Wechselwirkung und umgekehrt.
- Interne Wechselwirkungen ändern die Masse

WW-Eigenzustände \neq Massenzustände

■ CKM -Matrix

-> Mischung der Quarks

-> $K^0 - \bar{K}^0$, $B^0 - \bar{B}^0$ - Oszillationen

-> CP-Verletzung in der schwachen Wechselwirkung

■ endliche Neutrinomassen, MNS-Matrix

-> Neutrinooszillationen

Majorana- oder Dirac-Masse?

-> noch zu klären (Leptonzahlverletzung!)

Warum überhaupt Higgs?

- SM durch Präzisionsmessungen bisher sehr gut bestätigt
 - z.B. Übereinstimmung von gemessenen Massen und Kopplungsstärken der Vektorbosonen W und Z

- Problem:
 - Die Einführung von massiven Vektorbosonen W, Z verletzt die Eichinvarianz
 - Linkshändigkeit der Schwachen WW \rightarrow Fermion-Massenterme verletzen Eichinvarianz!
 - Man hat die Generierung von Fermion- und Vektorbosonmassen noch nicht richtig verstanden

- Lösung:
 - Mechanismus der spontanen Symmetriebrechung (Higgs)

Eichinvarianz und massive Fermionen

- In QED und QCD: massive Fermionen erlaubt:
 - Phasentransformation (QED) ändert Masse nicht
 - $SU(3)_C$ -Transformation (QCD) ändert Masse nicht (rote, grüne, und blaue Quarks haben selbe Masse)

- In schwacher Wechselwirkung:
Masseterm zerstört Eichinvarianz, z.B. Elektron

$$-m_e \bar{e}e = -m_e \bar{e} \left(\frac{1}{2}(1 - \gamma_5) + \frac{1}{2}(1 + \gamma_5) \right) e = -m_e (\bar{e}_R e_L + \bar{e}_L e_R)$$

$SU(2)_L$: $e_L \rightarrow \nu_L$, e_R bleibt $e_R \rightarrow$ nicht invariant!

Zwei Gründe (einer würde reichen):

- Linkshändigkeit der schwachen WW
- Neutrinomasse \neq Elektronmasse (selbes $SU(2)$ -Dublett)

- Aber: Fermionen haben Masse \Rightarrow Problem!!

Lösung: Der Higgs-Mechanismus

- Alle Bosonen und Fermionen sind "eigentlich" masselos
- Masse "entsteht" durch Wechselwirkung mit einem Hintergrundfeld, dem Higgs-Feld ($SU(2)$ -Dublett).

Konsequenz: Masse transformiert sich effektiv wie ein $SU(2)_L$ -Dublett, nicht wie ein Skalar,
-> Eichinvarianz ist gerettet

Higgs-Mechanismus im Standard-Modell

- Φ ist ein Dublett komplexer skalarer Felder, $\Phi = \begin{pmatrix} \Phi^+ \\ \Phi^0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Phi_1 + i\Phi_2 \\ \Phi_3 + i\Phi_4 \end{pmatrix}$

- addiere zur Standard-Lagrange-Dichte

$$\mathcal{L}_{\text{SM}} = -\frac{1}{4}W_{\mu\nu}^a W_a^{\mu\nu} - \frac{1}{4}B_{\mu\nu}B^{\mu\nu} + \bar{L}iD_\mu\gamma^\mu L + \bar{e}_R iD_\mu\gamma^\mu e_R \dots$$

einen Higgs-Term (wie vorher)

$$\mathcal{L}_S = (D^\mu\Phi)^\dagger(D_\mu\Phi) - \mu^2\Phi^\dagger\Phi - \lambda(\Phi^\dagger\Phi)^2$$

mit dem Grundzustand

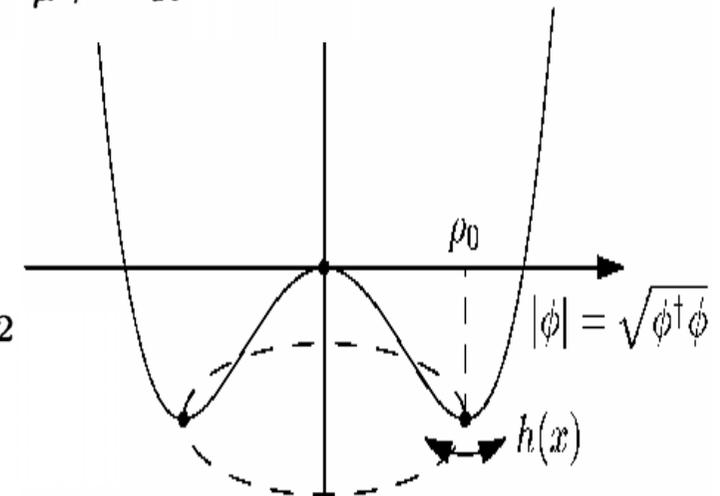
$$\langle\Phi\rangle_0 \equiv \langle 0|\Phi|0\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{v}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \text{ with } v = \left(-\frac{\mu^2}{\lambda}\right)^{1/2}$$

- reparametrisiere

$$\Phi(x) = \begin{pmatrix} \theta_2 + i\theta_1 \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(v + H) - i\theta_3 \end{pmatrix} = e^{i\theta_a(x)\tau^a(x)/v} \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(v + H(x)) \end{pmatrix}$$

- und führe Eichtransformation durch

$$\Phi(x) \rightarrow e^{-i\theta_a(x)\tau^a(x)} \Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v + H(x) \end{pmatrix}$$



-> Goldstone-Bosonen verschwinden

Yukawa-Kopplungen

- Nutze Tatsache dass ϕ Isodublett zur Definition eichinvarianter Fermion-Higgs-Kopplungen:

$$\mathcal{L}_F = -\lambda_e \bar{L} \Phi e_R - \lambda_d \bar{Q} \Phi d_R - \lambda_u \bar{Q} \tilde{\Phi} u_R + h.c.$$

- z.B. erster Term ausgeschrieben:

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_F &= -\frac{1}{\sqrt{2}} \lambda_e (\bar{\nu}_e, \bar{e}_L) \begin{pmatrix} 0 \\ v + H \end{pmatrix} e_R + \dots \\ &= -\frac{1}{\sqrt{2}} \lambda_e (v + H) \bar{e}_L e_R + \dots\end{aligned}$$

so dass

$$m_e = \left(\frac{\lambda_e v}{\sqrt{2}} \right), \quad m_u = \frac{\lambda_u v}{\sqrt{2}}, \quad m_d = \frac{\lambda_d v}{\sqrt{2}}$$

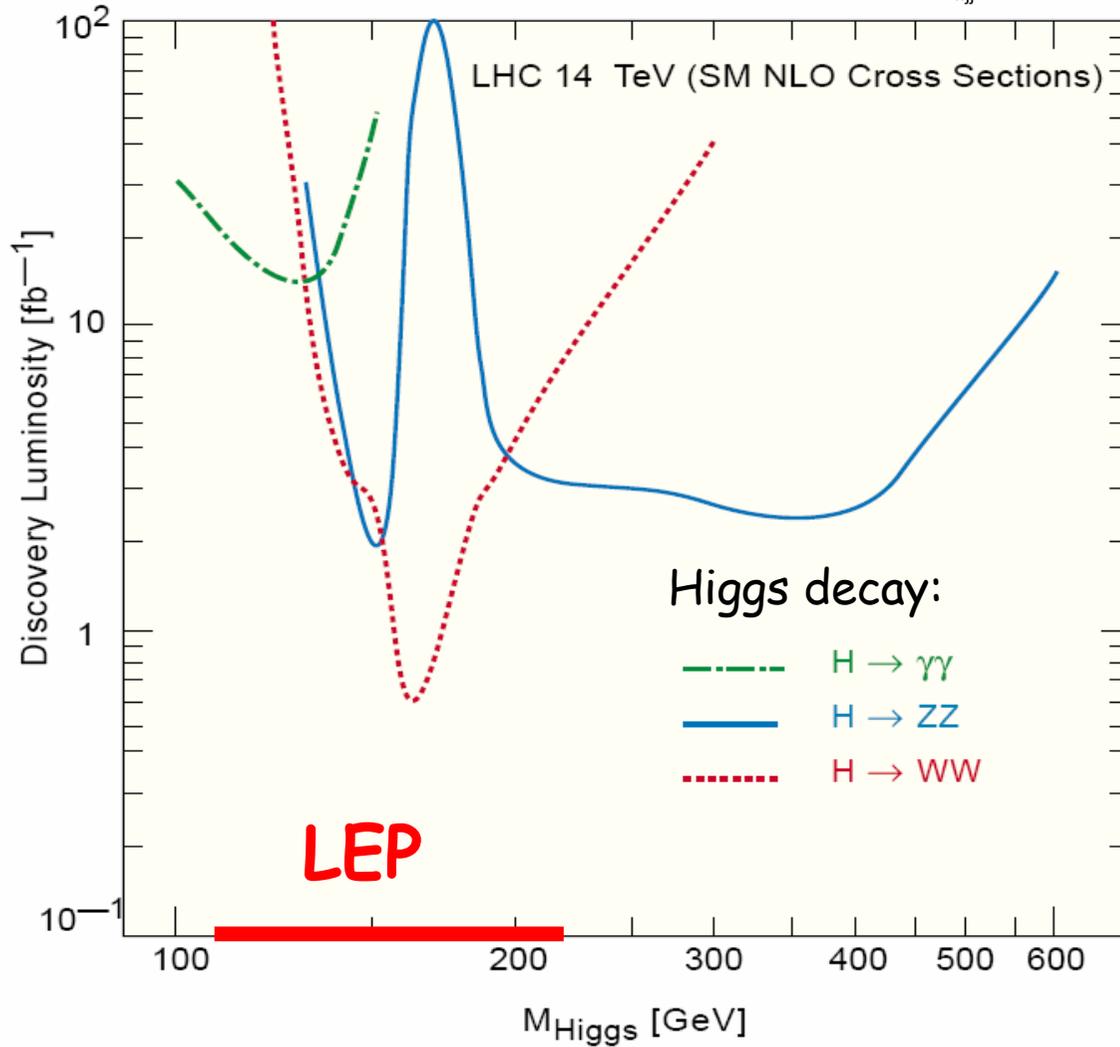
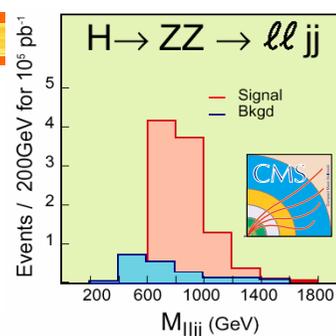
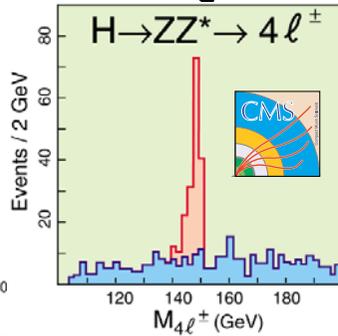
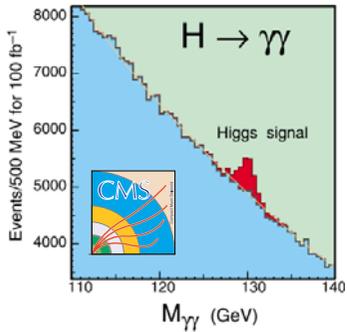
Masse der
Fermionen

- λ_i heissen Yukawa-Kopplungen,
(müssen experimentell bestimmt werden)

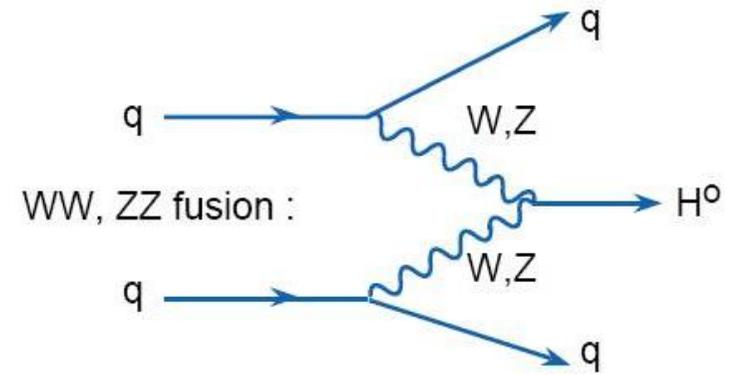
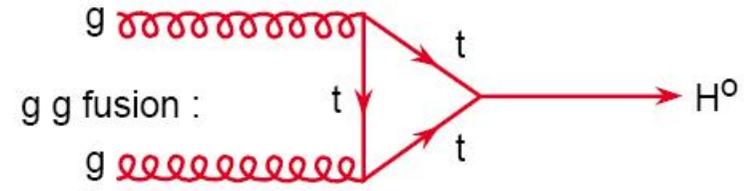
Masse im Standardmodell: Zusammenfassung

- Photonen und Gluonen sind masselos (Eichinvarianz!)
- W und Z sind "eigentlich" auch masselos, erhalten Masse durch Wechselwirkung mit Higgs-Hintergrundfeld
=> Masse **berechenbar** aus **Messung** der elektroschwachen Kopplung bei großen und kleinen Abständen ($G_F, \sin^2\theta_W$)
- Fermionen sind "eigentlich" ebenfalls masselos, aber erhalten Masse durch (vollkommen willkürliche) Kopplungen an das Higgs-Hintergrundfeld -> **keine Berechnung möglich**
- Physikalische Konsequenz: Existenz eines neutralen skalaren Bosons, das Higgs-Boson -> experimenteller Nachweis steht noch aus.
Wichtigste offene Frage des Standardmodells!
- **Higgs-Mechanismus liefert Möglichkeit der Massen, liefert aber nicht deren Werte, insbesondere für die Fermionen -> es muss noch mehr dahinter stecken!**

The Quest for the Higgs at LHC

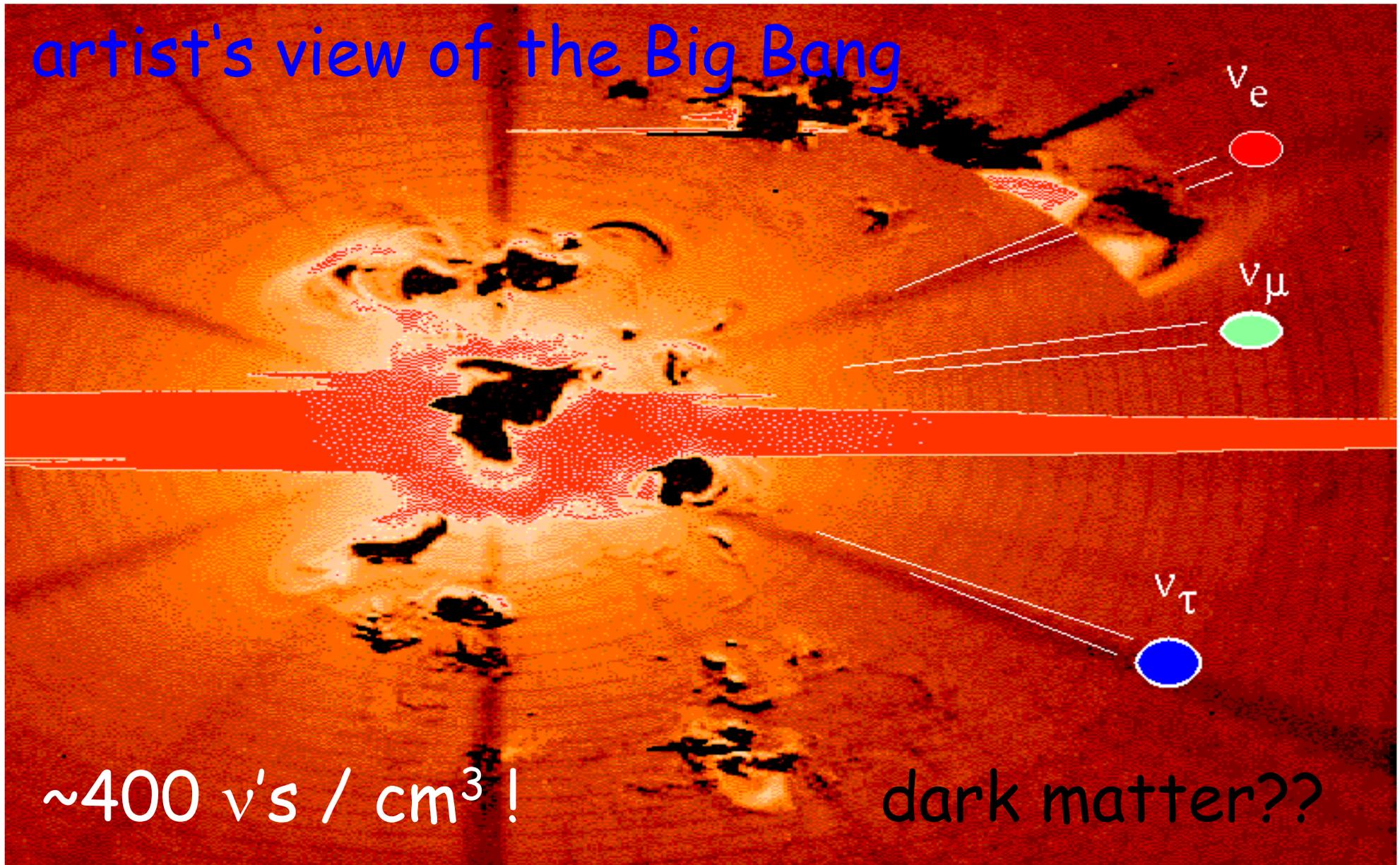


Higgs production:



depending on mass,
Higgs might be found
within first year of
LHC physics operation!

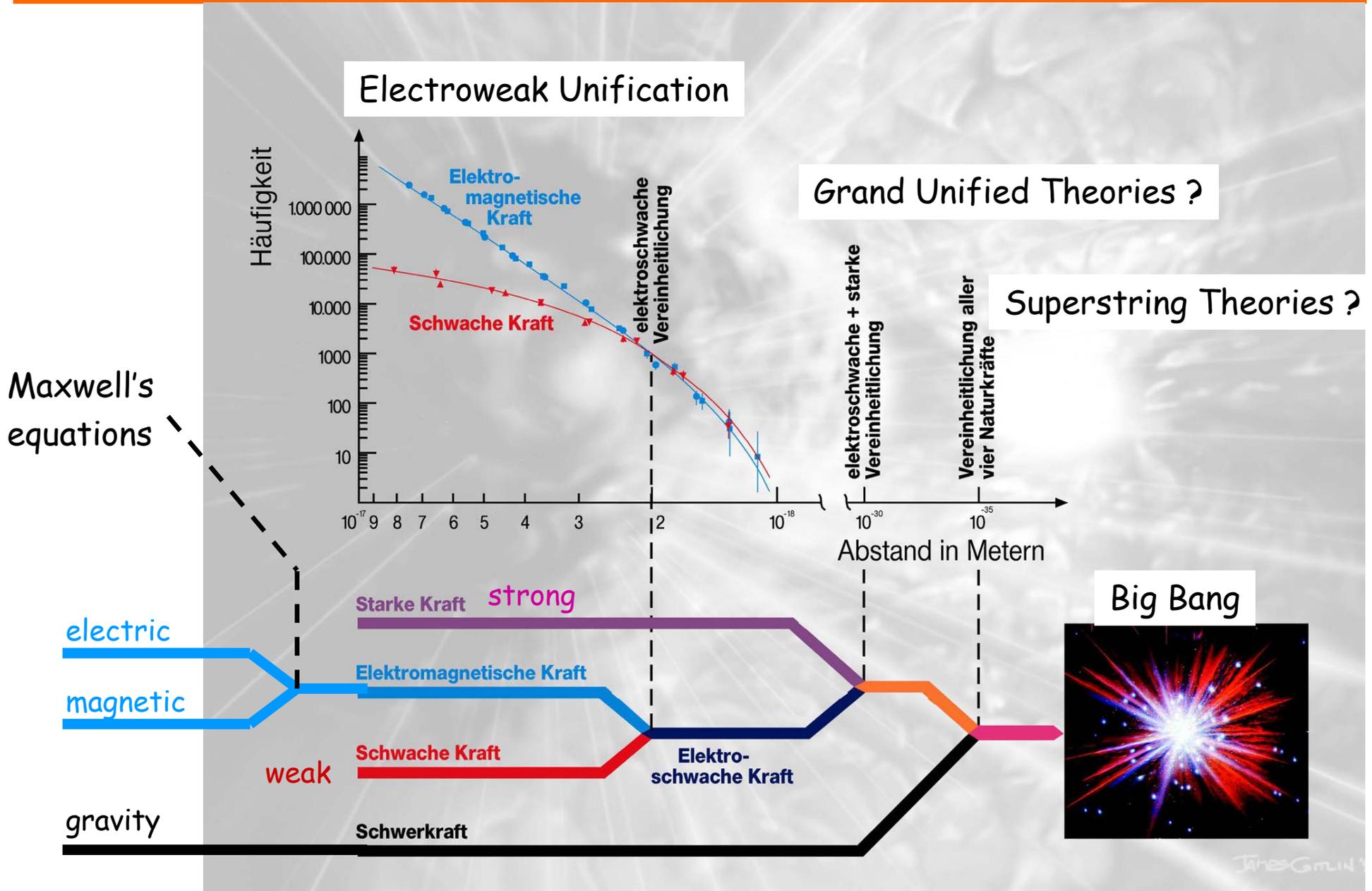
Neutrinos in Cosmology



Masse in der Kosmologie

- **Materie-Antimaterie-Asymmetrie:**
benötigt mehr *CP*-Verletzung, als Standardmodell liefern kann
- **Beobachtung: Der Raum expandiert beschleunigt**
Erklärung:
benötigt unbekannte dunkle Materie, z.B. *WIMPS*
aus Supersymmetrie
und "dunkle Energie", z.B. kosmologische Konstante
- -> Das Standardmodell ist noch nicht vollständig!

The Quest for Unification of Forces



Schlussfazit

- Ursprung der Masse ist noch nicht wirklich verstanden
- Es bleibt spannend!
(Neutrinos, LHC, Kosmologie)
- Bleiben Sie dran!

Diplom- und Doktorarbeiten

■ z.B. **Diplom mit echten Daten von HERA**

(Datennahme bis Sommer 2007, Datenanalyse bis 2014)

+ evtl. **Doktorarbeit mit Daten von LHC**

(Physikdaten ab 2010)

Fragestellungen, z.B.

- wie passt ein b-Quark in ein Proton?
- Vergleich b-Produktion bei HERA mit t-Produktion bei LHC, QCD?
- Nachweis von QCD-Instantonen -> Verletzung von B und L im Standardmodell -> Materie-Antimaterie-Asymmetrie im Universum
- Suche nach H -> WW, ZZ*
- damit verbundene mehr technische Themen, z.B.
 - Myonrekonstruktion
 - Zerfallslängenrekonstruktion (Mikrovertex-Detektor)
 - Physik-Trigger-Vorbereitungen