

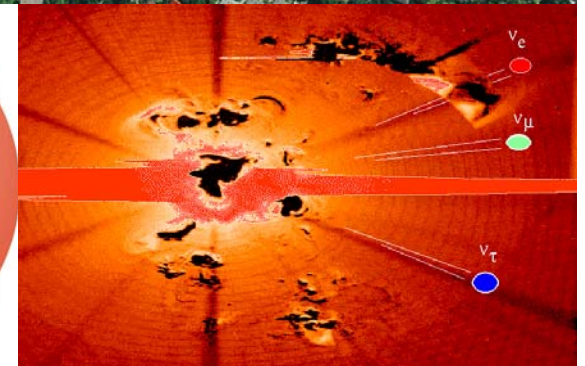
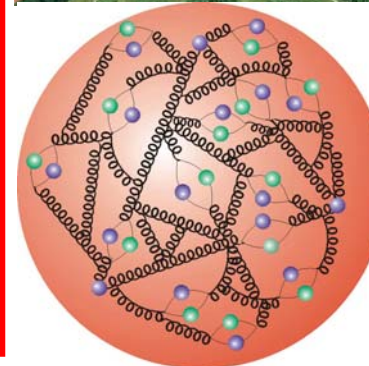
# Was bedeutet Masse?

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

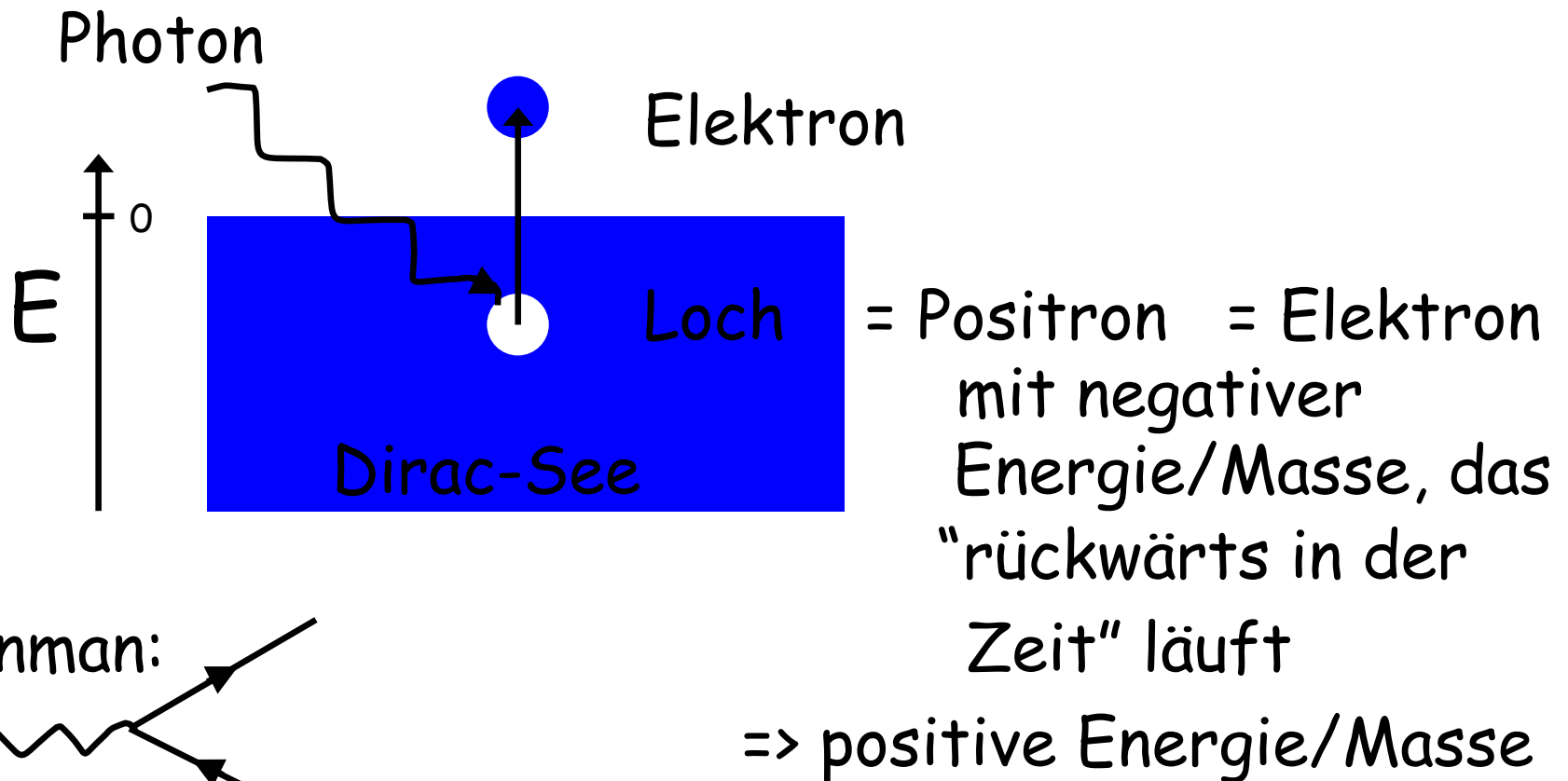
Masse = Energie, und Energie = Masse

- ⇒ 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 ( $\Delta m$  = 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 ( $\Delta m$  = 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  $Q \approx \Lambda_{\text{QCD}}$ :  $\alpha_s$  divergiert  $\rightarrow$  klassische Feldenergie divergiert

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

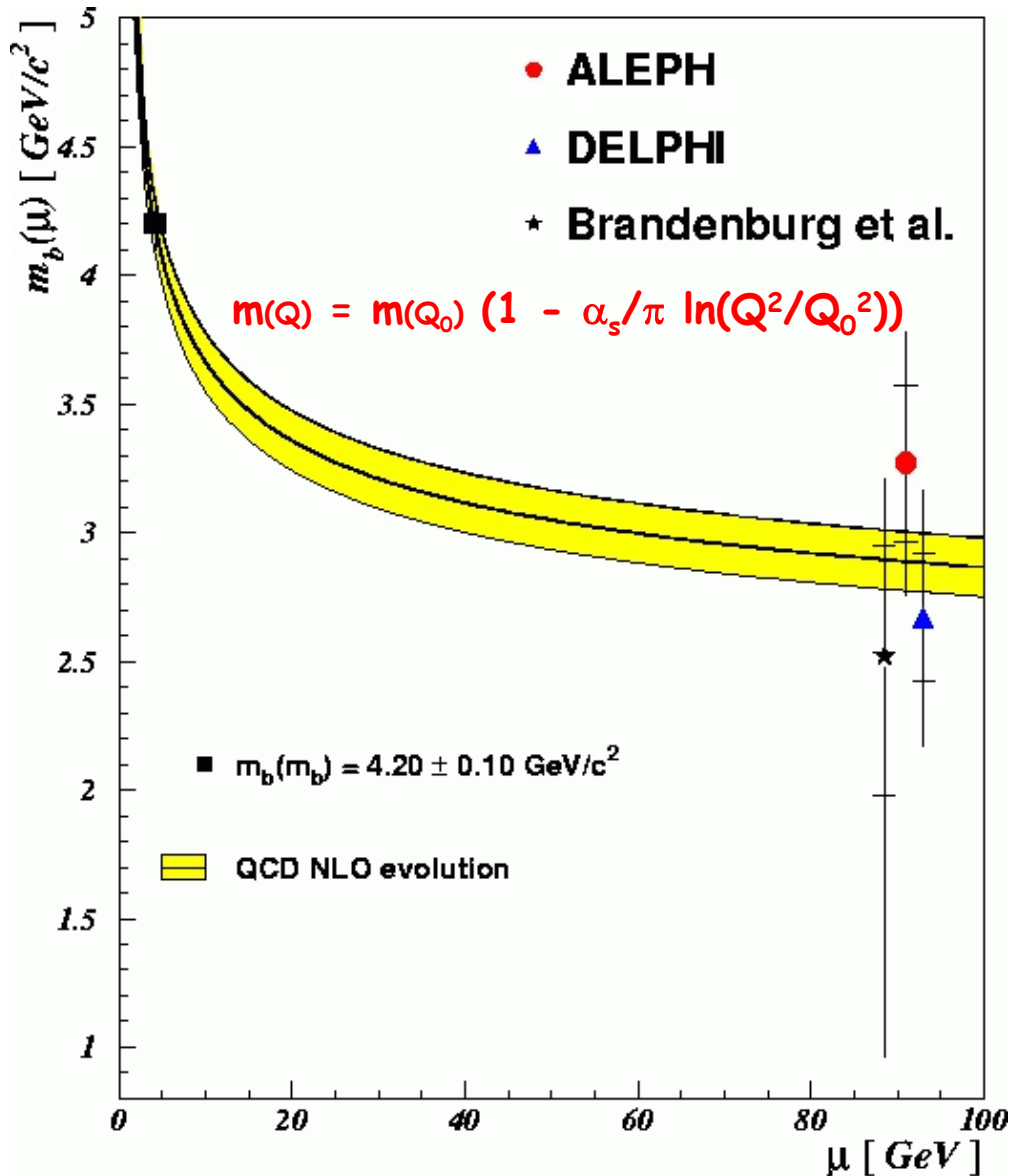
**effektive Masse  $m_u \sim 350 \text{ MeV} \sim \Lambda_{\text{QCD}}$**

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

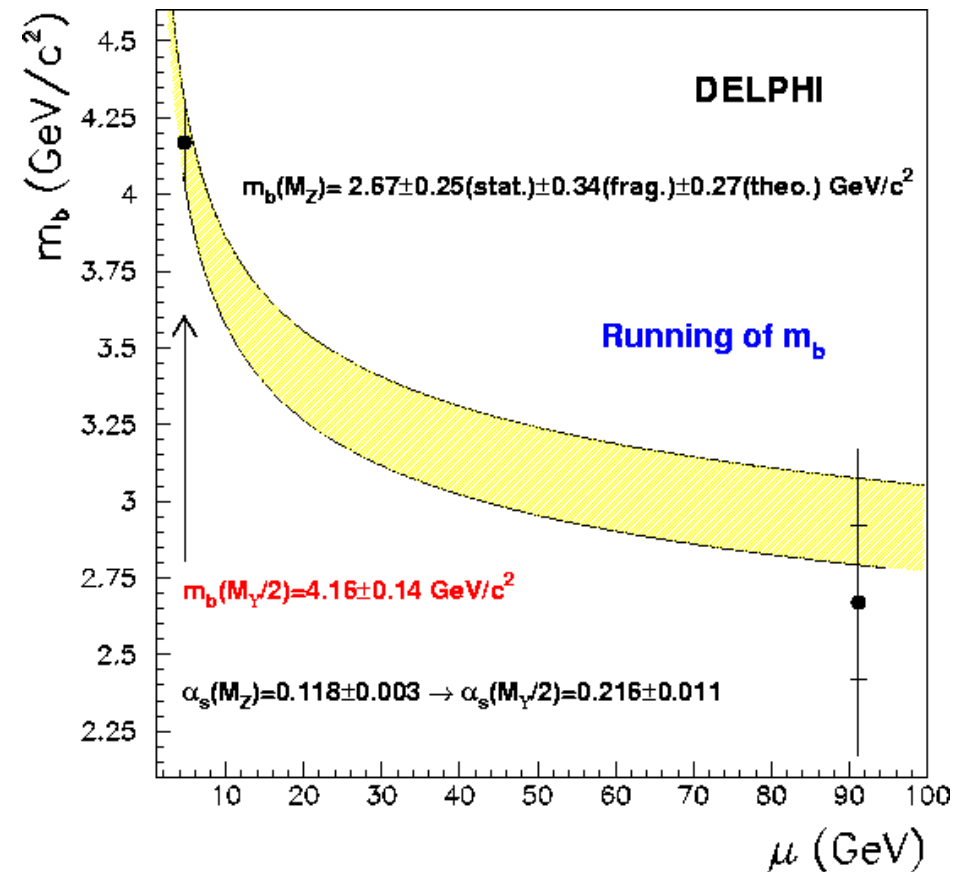
wie QED, nur mit zusätzlichem Faktor  $C_F=4/3$

**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 → bb + 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  $\alpha_s$  liefert charakteristische Energieskala  $\Lambda_{\text{QCD}}$
- 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  $\sim \Lambda_{\text{QCD}}$  ( $\sim 1$  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  $\alpha_s$  oder  $\Lambda_{\text{QCD}}$ ). 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

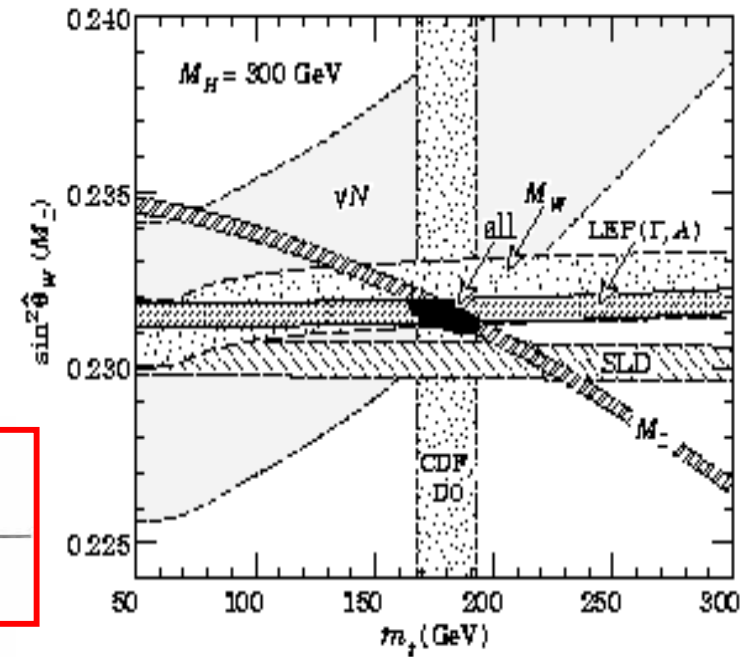
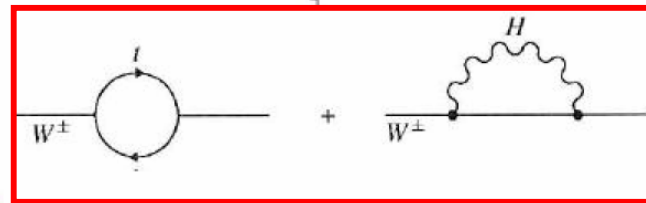
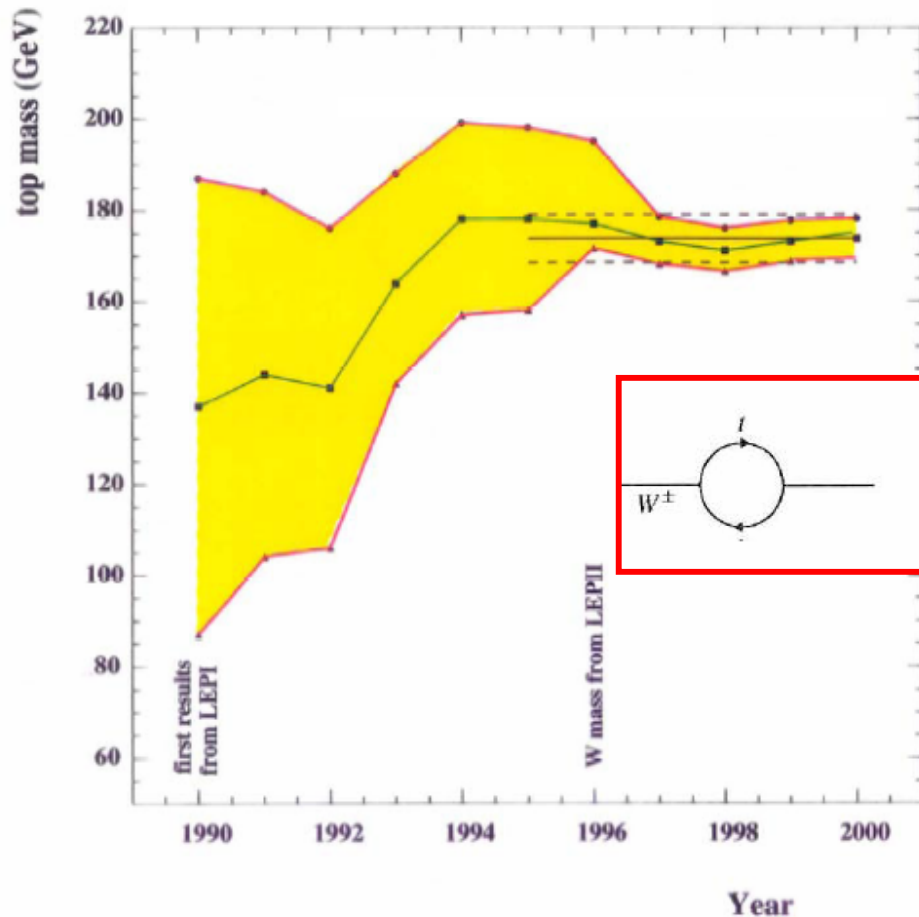
"physikalische" Masse:

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

"nackte"  
renormierte Masse

# Die Jagd nach dem top-Quark

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



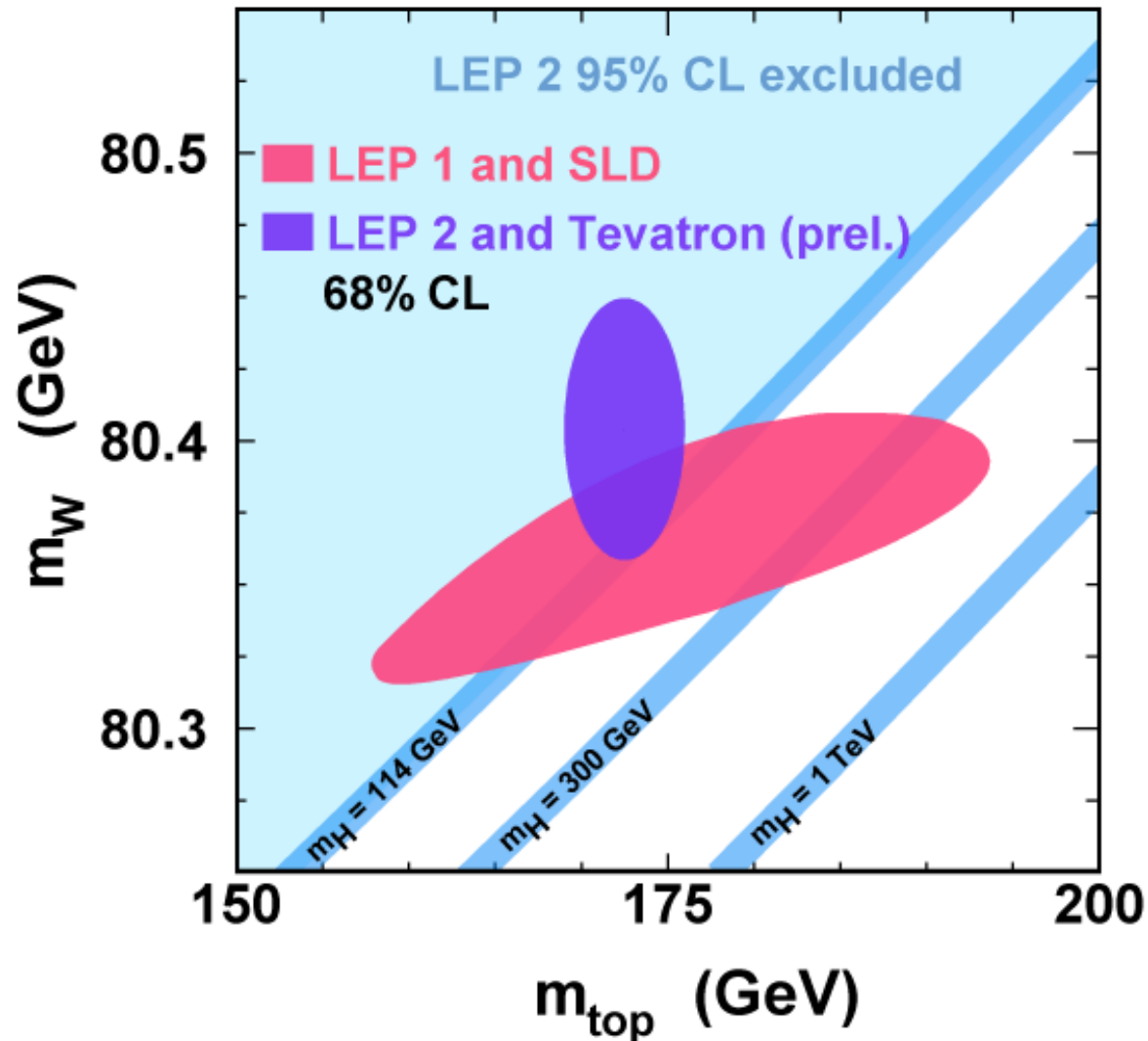
$$\propto \left(\frac{M_t}{M_W}\right)^2, \ln\left(\frac{M_h}{M_W}\right)$$

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

# 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

- $\Phi$  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

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

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

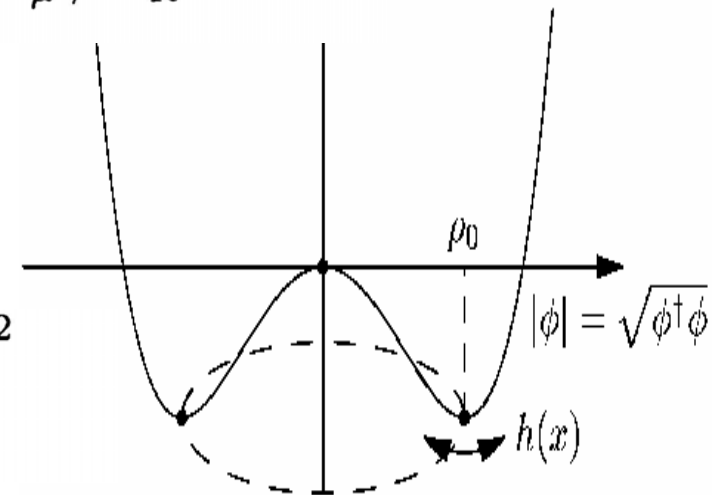
$$\langle \Phi \rangle_0 \equiv \langle 0 | \Phi | 0 \rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{v}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad \text{with } v = \left( -\frac{\mu^2}{\lambda} \right)^{1/2}$$

- 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

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



# Yukawa-Kopplungen

- Nutze Tatsache dass  $\phi$  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

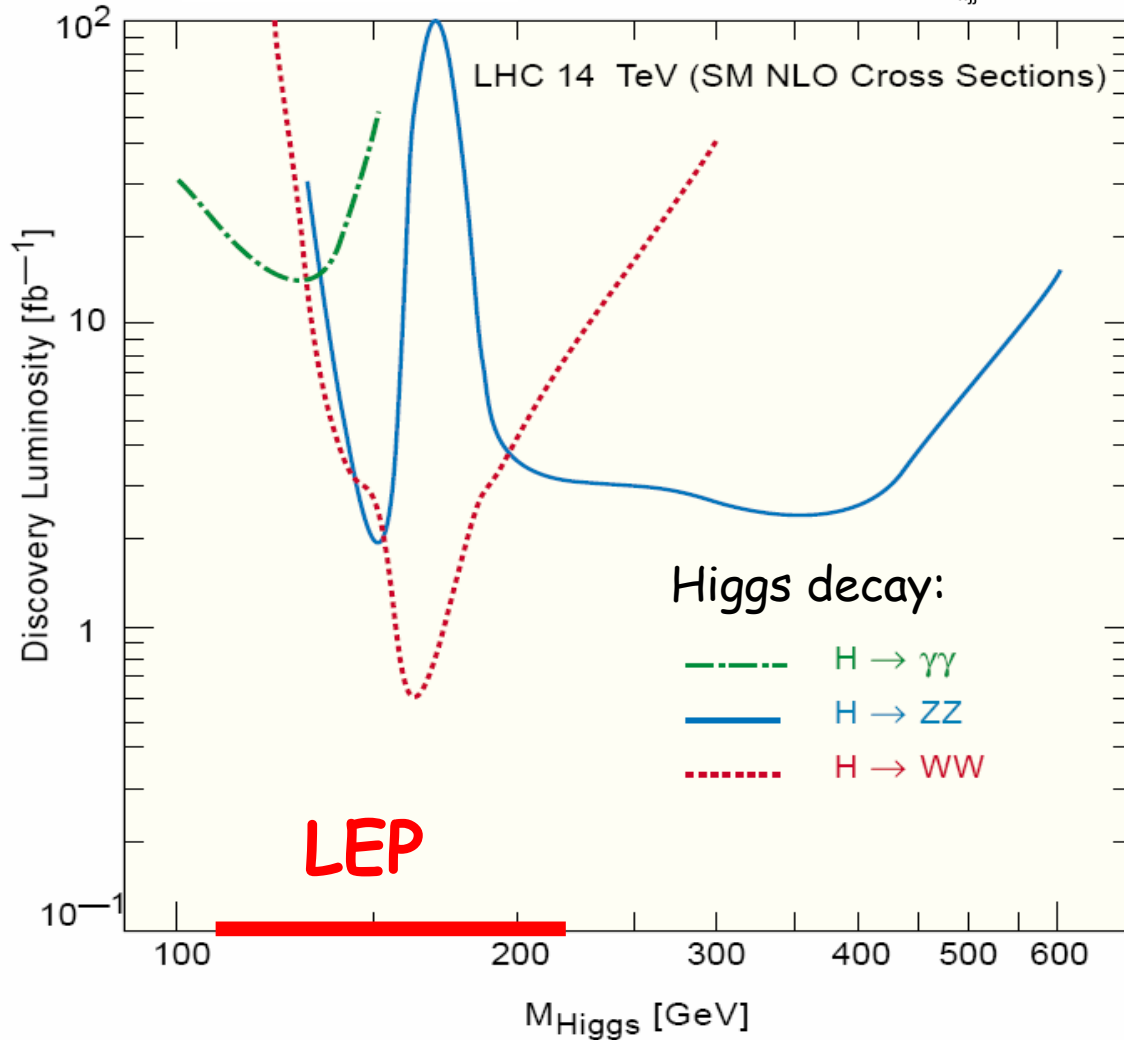
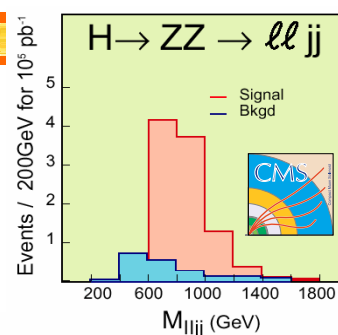
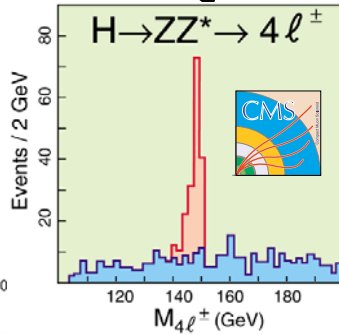
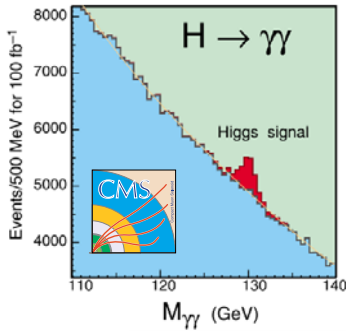
- $\lambda_i$  heissen Yukawa-Kopplungen,  
(müssen experimentell bestimmt werden)



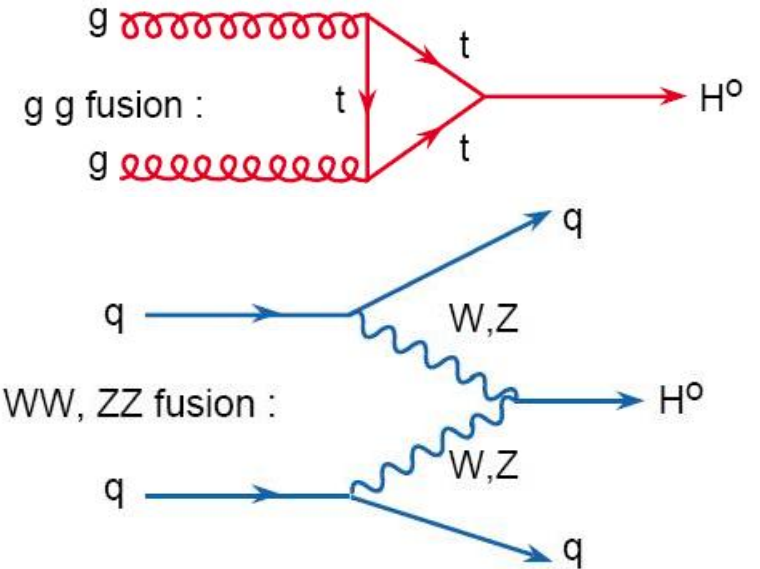
# Masse im Standardmodell: Zusammenfassung

- 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!

# Cosmology

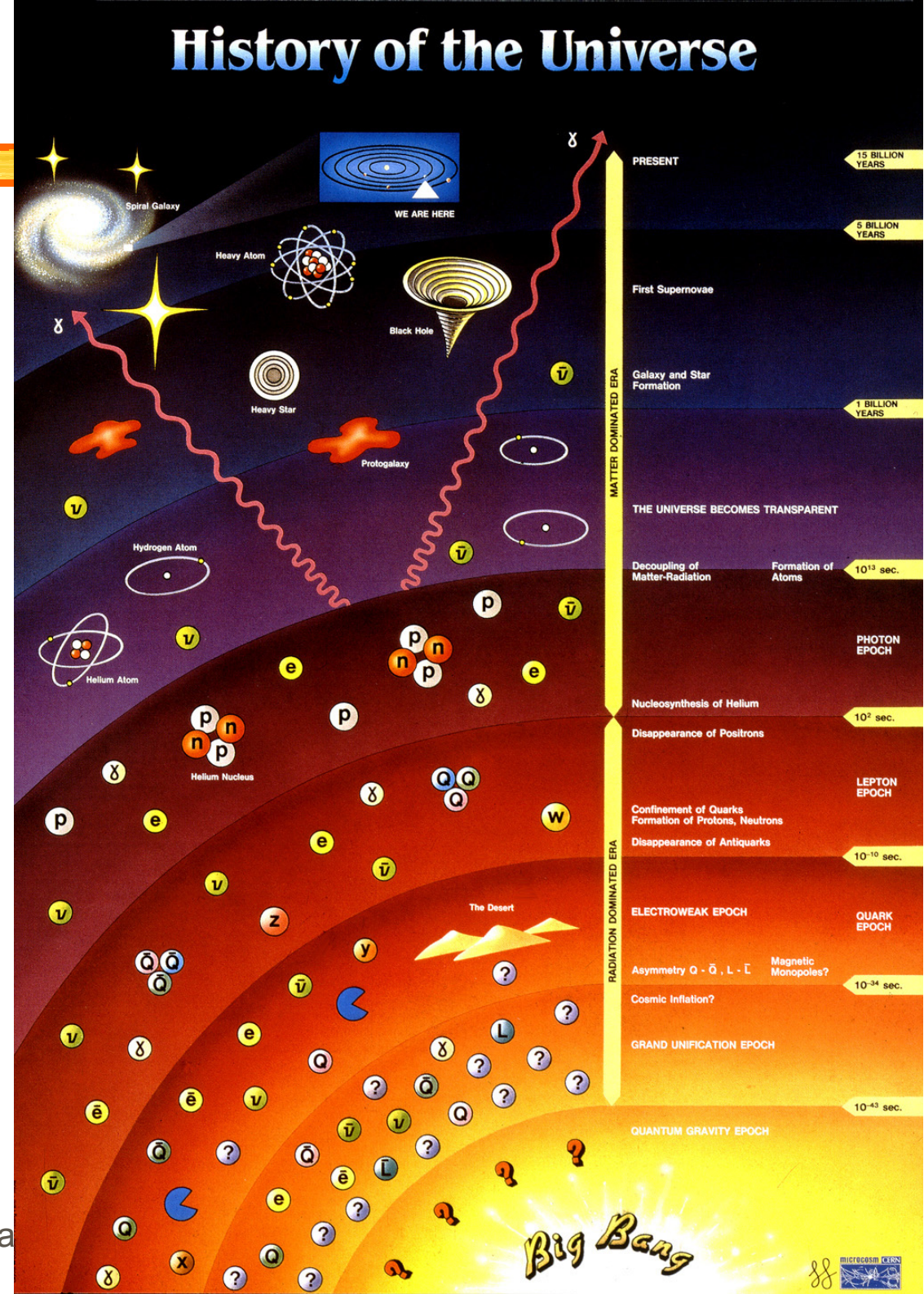
## Direct link between Particle Physics and Cosmology

increasing energy

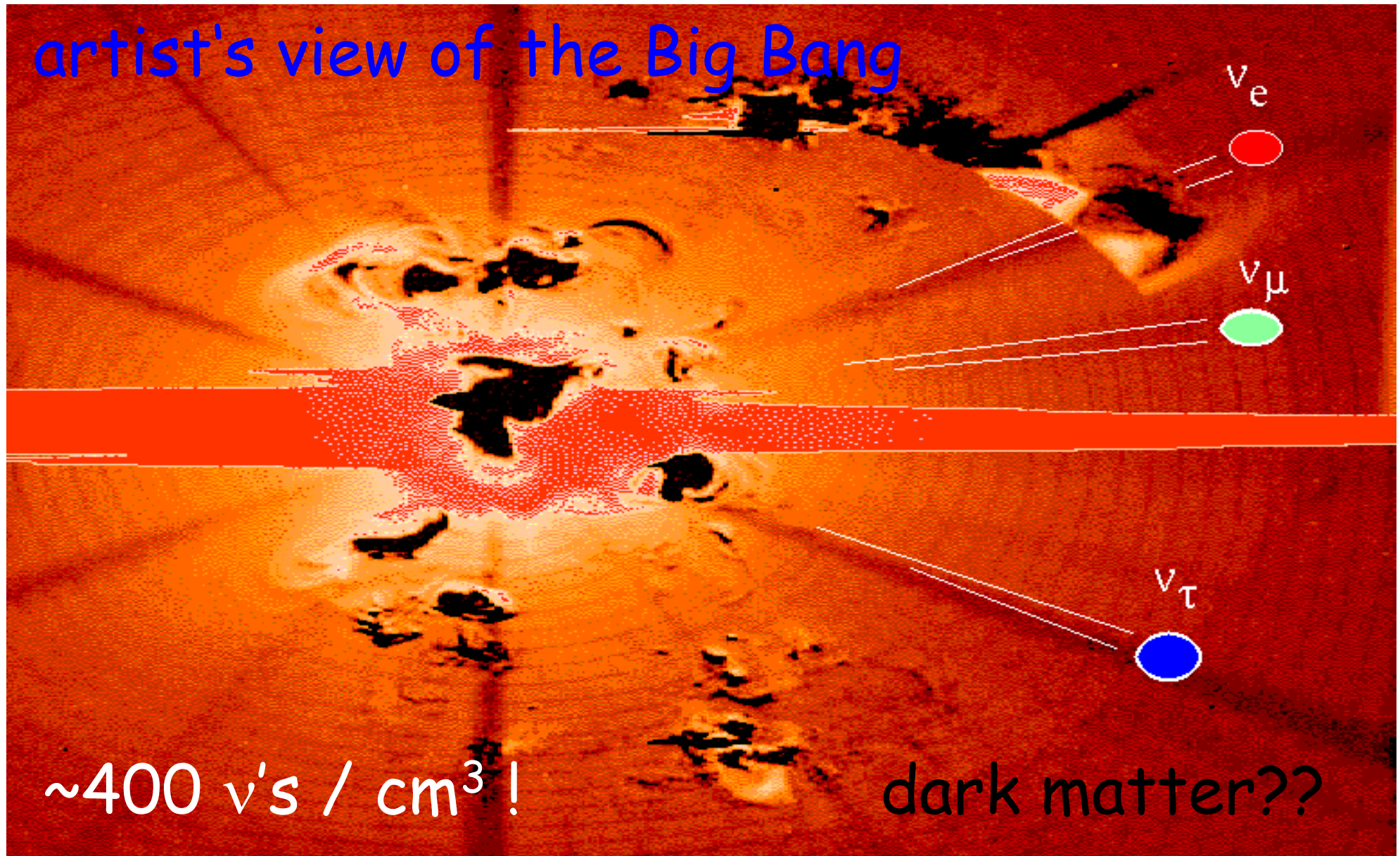
-> going further  
backwards in time  
in the universe

-> getting closer to  
the **Big Bang**

What do we know about the  
"Mass of the Universe"?



# Neutrinos in Cosmology

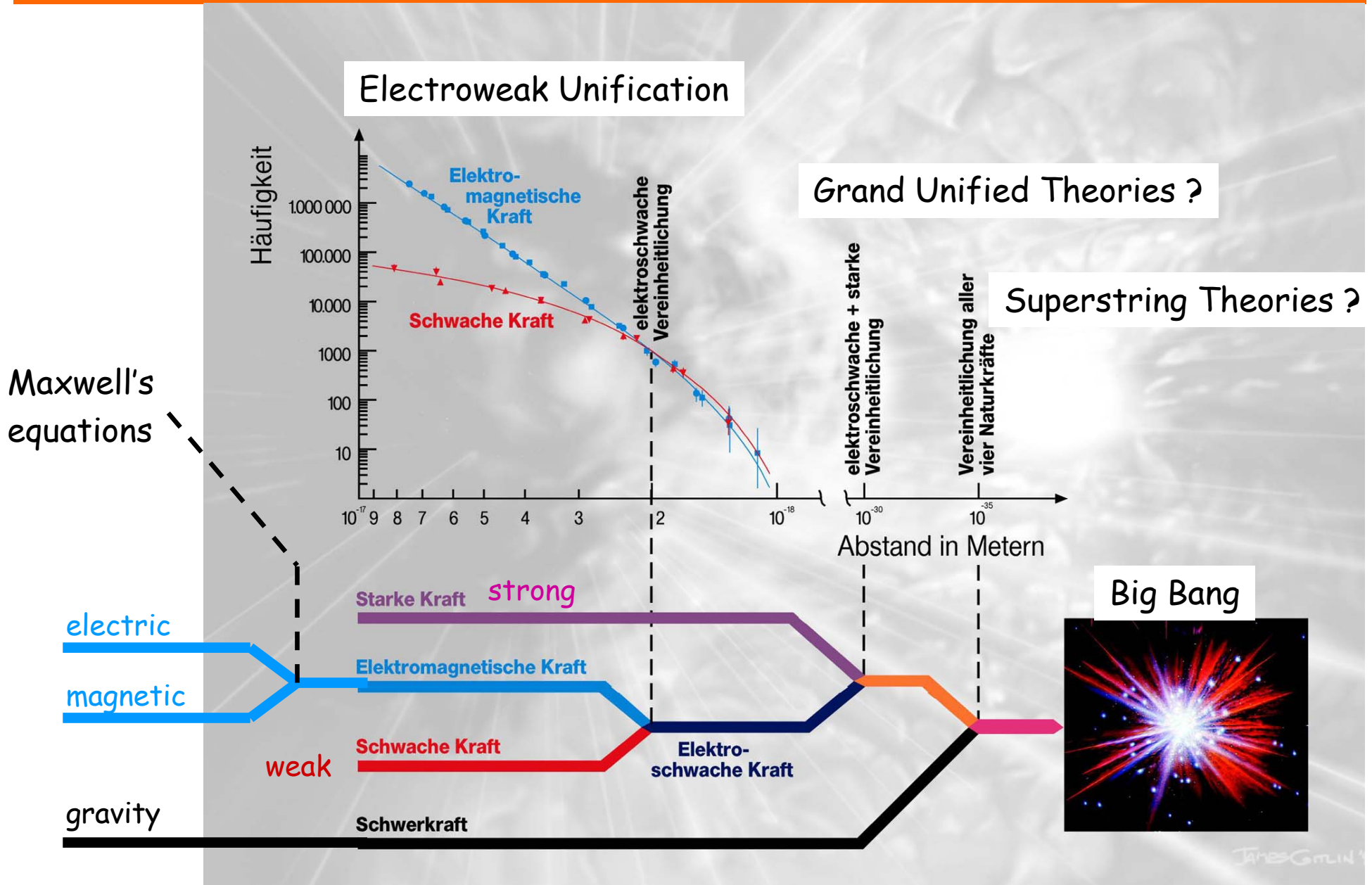


# Masse in der Kosmologie

---

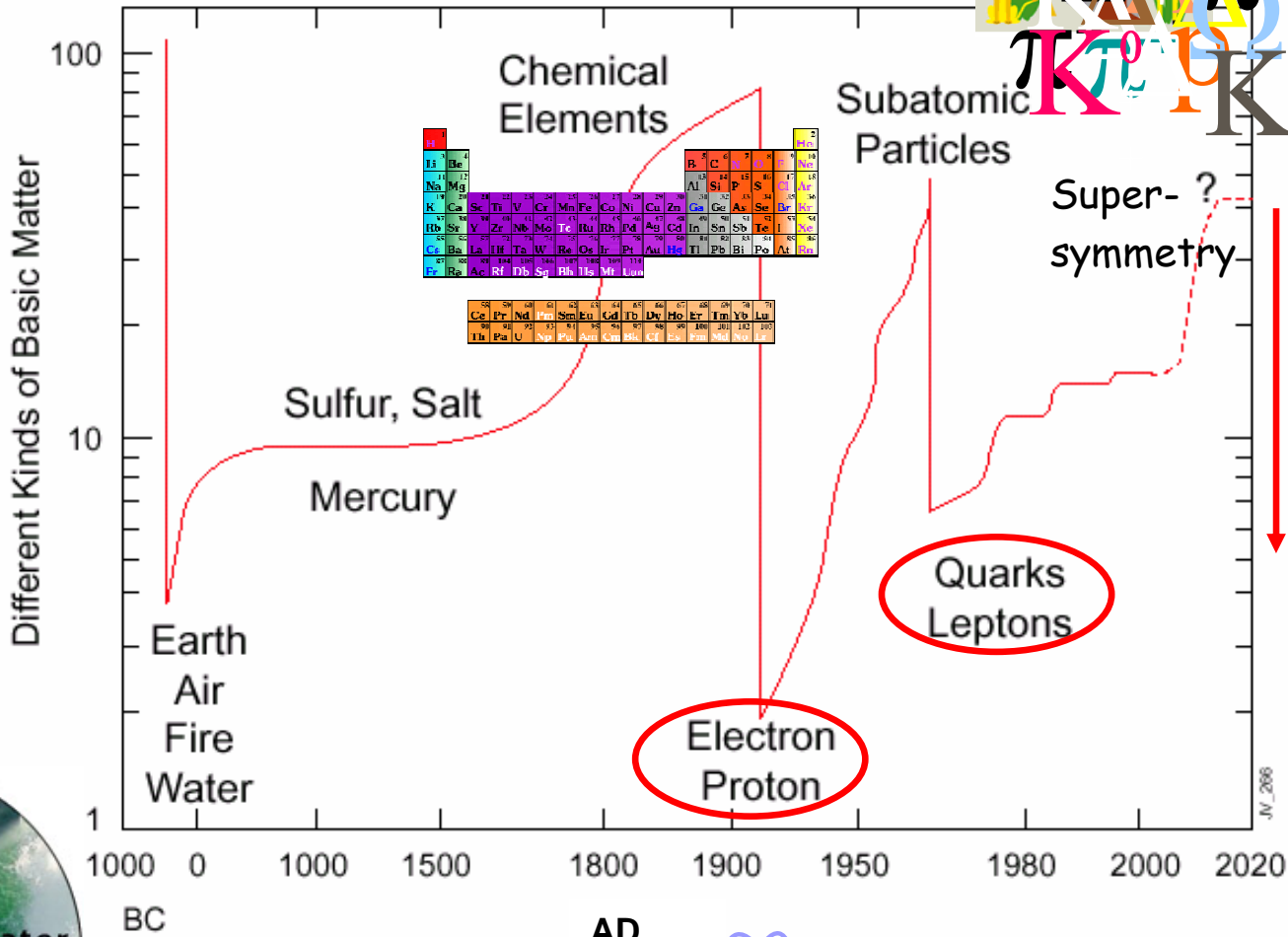
- **Materie-Antimaterie-Asymmetrie:**  
benötigt mehr *CP*-Verletzung, als Standardmodell liefern kann
- **Beobachtung: Der Raum expandiert beschleunigt**  
**Erklärung:**  
benötigt unbekannte dunkle Materie, z.B. *WIMPS*  
aus Supersymmetrie  
und "dunkle Energie", z.B. kosmologische Konstante
- ->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

# The Quest for Unification of Forces



# History of basic building blocks of matter

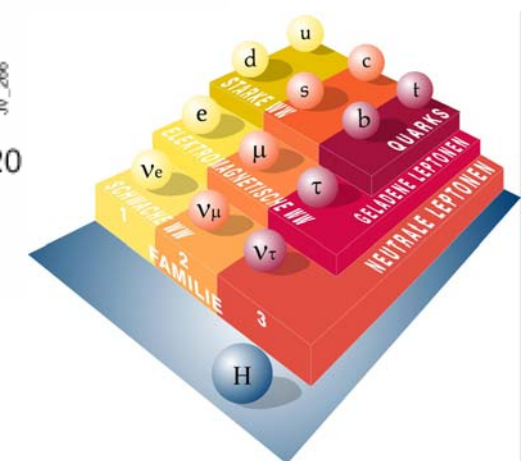
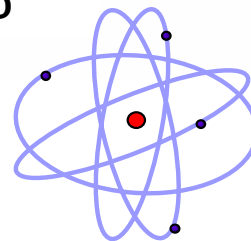
motivation:  
find  
smallest  
possible  
number



**Quark and  
Lepton  
substructure??**



(c) Andy Brice 1998



# 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