

# TEILCHENPHYSIK FÜR FORTGESCHRITTENE

Wie geht es weiter?

Träume des Dozenten und der Teilchenphysiker

**Olaf Behnke**  
**Achim Geiser**



Universität Hamburg, IExpPh  
Sommersemester 2010

# ÜBERBLICK

1. Die quantenmechanische Beschreibung von Elektronen
2. Feynman-Regeln und –Diagramme
3. Lagrange-Formalismus und Eichprinzip
4. QED
5. Starke Wechselwirkung und QCD
6. Schwache Wechselwirkung, elektro-schwache Vereinigung und der Higgs-Mechanismus
7. Der Higgs-Mechanismus
8. Mischung von Quarks und Leptonen
9. Diesseits und Jenseits des Standardmodells
10. **Wie geht es weiter? Träume des Dozenten und der Teilchenphysiker**

# kurze Geschichte der Teilchenphysik: QED

## Quantenmechanik + Relativitätstheorie

- => Dirac-Gleichung, Klein-Gordon-Gleichung
- => Existenz von **Antiteilchen** (Positron, 1932)

## Lagrangeformalismus + Eichinvarianz

- => Verknüpfung von  
Teilchenwellenfunktionen=Materiefeldern      und  
Eichfeldern=Kraftfeldern
- => **QED**, bis heute **experimentell phantastisch bestätigt!**  
(Lamb-shift, 1947)  
theoretisch vollständig in sich abgeschlossen
- => **Modell auch für andere Wechselwirkungen**

aber **Schönheitsfehler**: Notwendigkeit der **Renormierung!**  
Kopplungs"konstante" und Elektronmasse

# Die Elektronenmasse: Was wissen wir?

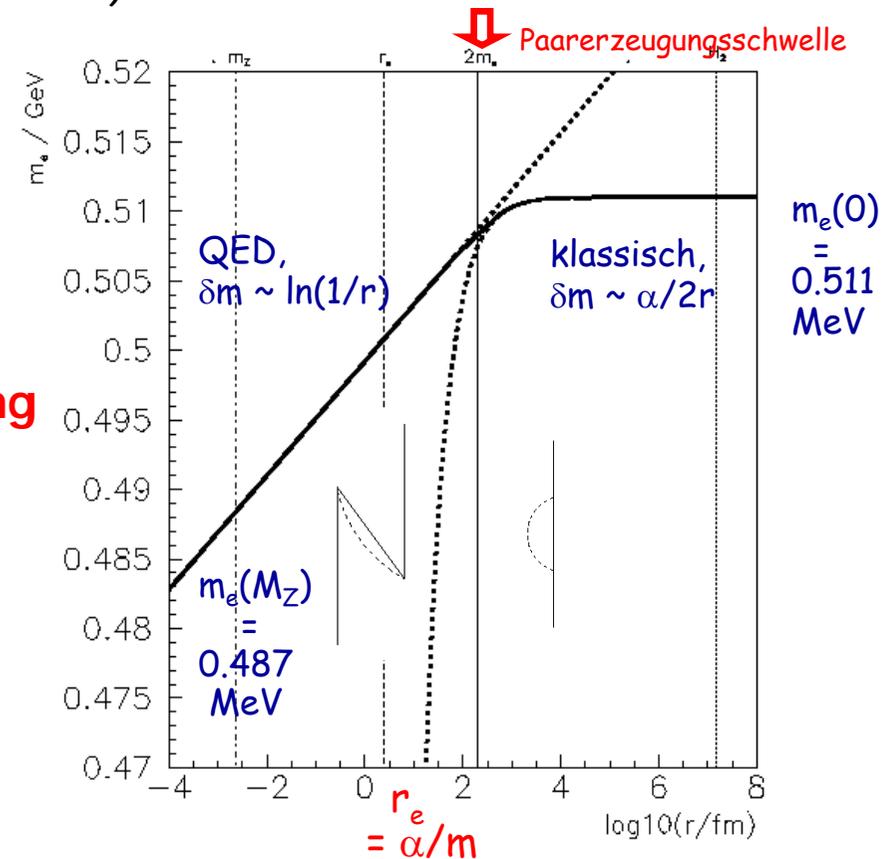
- Das elektromagnetische Feld des Elektrons trägt signifikant zu seiner Masse bei -> **Elektron muss massiv sein** (wie jedes geladene Teilchen).

- Elektron = elementares (punktförmiges) Teilchen  
-> **klassisch divergiert die Feldenergie wie  $1/r$**  ("klassischer Elektronenradius")

- QED:** bei Abständen  $< 1/2m_e$  sorgen Vakuumfluktuationen (Elektron-Positron-Paarherzeugung) für **effektive "Versmierung" 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.**  
Gemessener Wert wird "von Hand" eingesetzt.

- $1/m_e$  ist **Untergrenze auf Lokalisierbarkeit** des Elektrons



**unbefriedigend!**

# Elektronenmasse und e/m Kopplung: 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

Vakuumschwankungen (Ladungsverschm.)

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

**QED:**

$$\text{laufende e/m Kopplungskonstante: } \alpha(Q^2) = \frac{\alpha(Q_0^2)}{1 - \alpha/3\pi \ln(Q^2/Q_0^2)}$$

$\alpha(0) \sim \alpha(2m_e)$  endlich

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

$\alpha(0) \rightarrow 0$  für  $m_e \rightarrow 0$  (formal)

**-> Atome würden nicht zusammenhalten!**

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

Kommentar A.G.: mein Traum!

# kurze Geschichte der Teilchenphysik: QCD

starke Kernkräfte, Yukawa Modell (Pion-Austausch)

nur wenig Vorhersagekraft, nicht renormierbar

Entdeckung der Existenz von Quarks als Konstituenten der Hadronen

(Quarks als Ursprung der Flavoursymmetrien (1964),

Partonen im Proton (1970))

Entdeckung der Farbfreiheitsgrade

=> **Quantenchromodynamik:**

nicht-abelsche SU(3)-Eichtheorie

Vorhersage von asymptotischer Freiheit

(=> Störungstheorie)

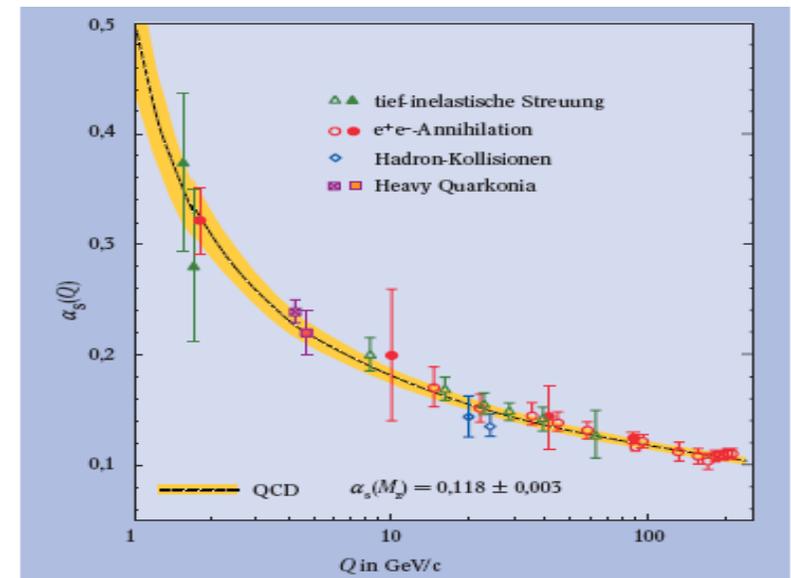
und Confinement (=> keine freien Quarks)

- bis heute **experimentell sehr gut bestätigt!**

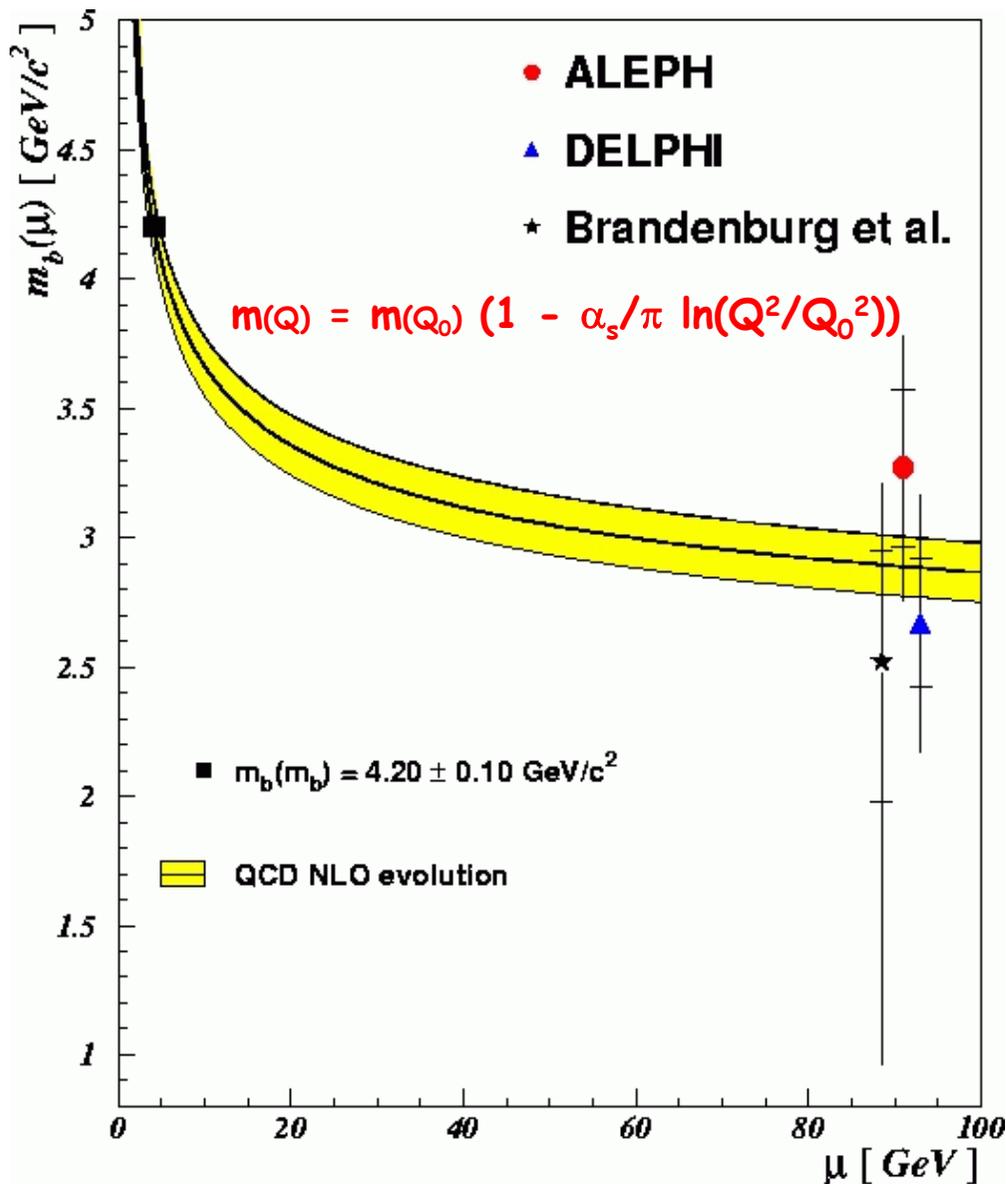
(Farbe, Entdeckung des Charm-Quarks (1974), der Gluonen (1979))

theoretisch (fast) vollständig in sich abgeschlossen

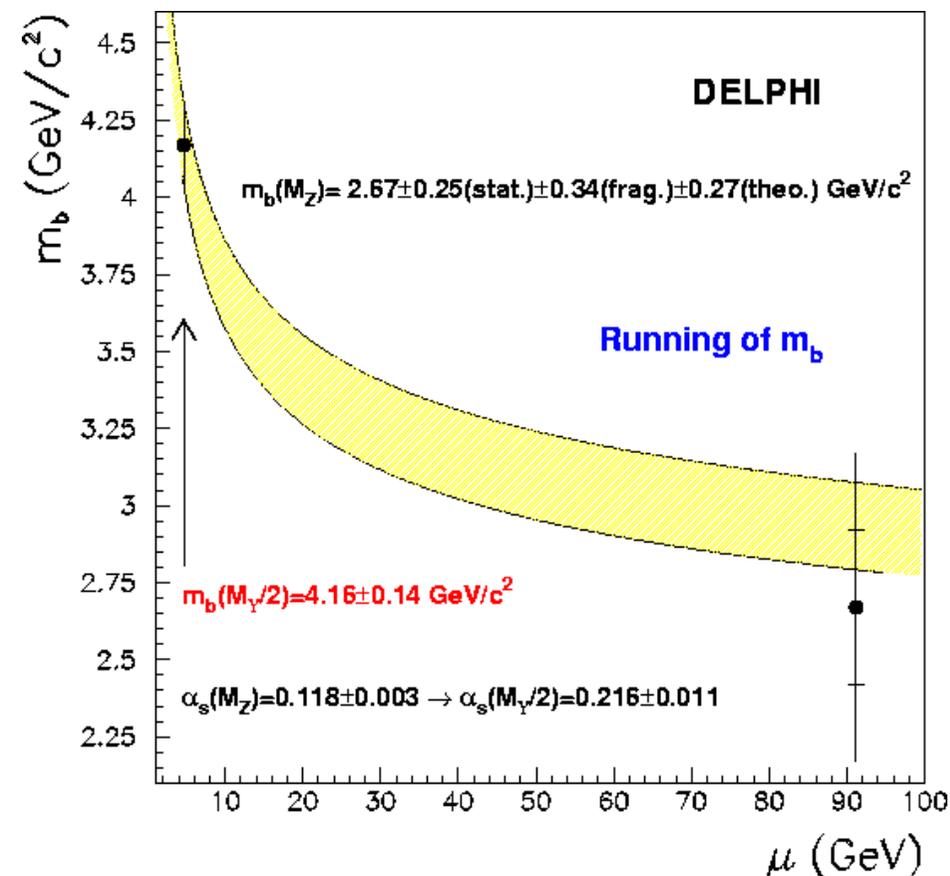
aber **Schönheitsfehler**: Störungsrechnung kompliziert und nicht sehr genau, nichtperturbative Rechnungen (Gittereichtheorie) sehr schwierig, **starkes CP-Problem**, Quark-Massen nicht erklärt (Renormierung)



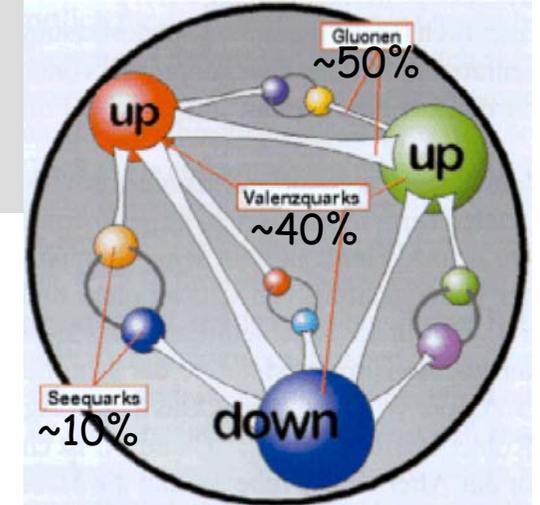
# Die laufende b-Quark-Masse



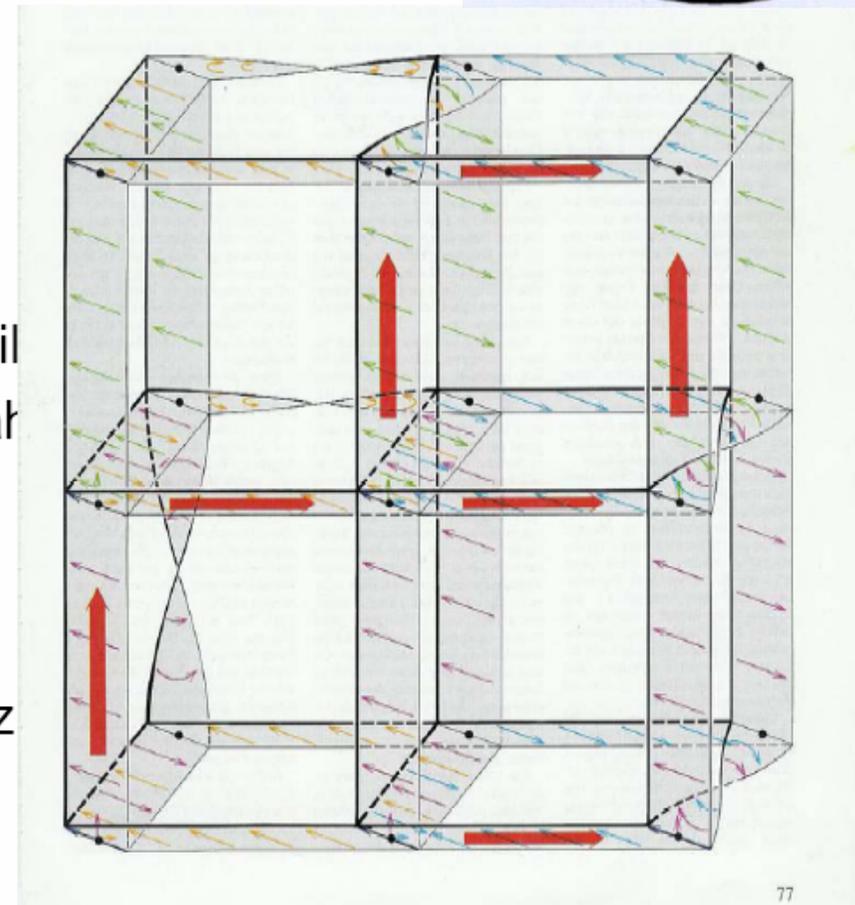
LEP:  $Z \rightarrow b\bar{b} + \text{Gluonen}$ ,  
Messung des Phasenraums/  
Winkelverteilungen



# Gittereichtheorie



- QCD quantisierte Feldtheorie
- Pfadintegral über alle Quark- und Gluonfeldkongurationen
- Im Allgemeinen nicht analytisch lösbar
- Raum-Zeit wird in diskretes Gitter aufgeteilt
- Zahl der Freiheitsgrade auf endliche Anzahl beschränkt
- Quarks sitzen auf Kreuzungspunkten
- Gluonen auf den Verbindungslinien
- Maschen verkleinern führt zur Konvergenz gegen Kontinuum
- Numerische Verfahren möglich: Monte Carlo Simulation



# Die Nukleon-Masse

## 12. Continuum extrapolation

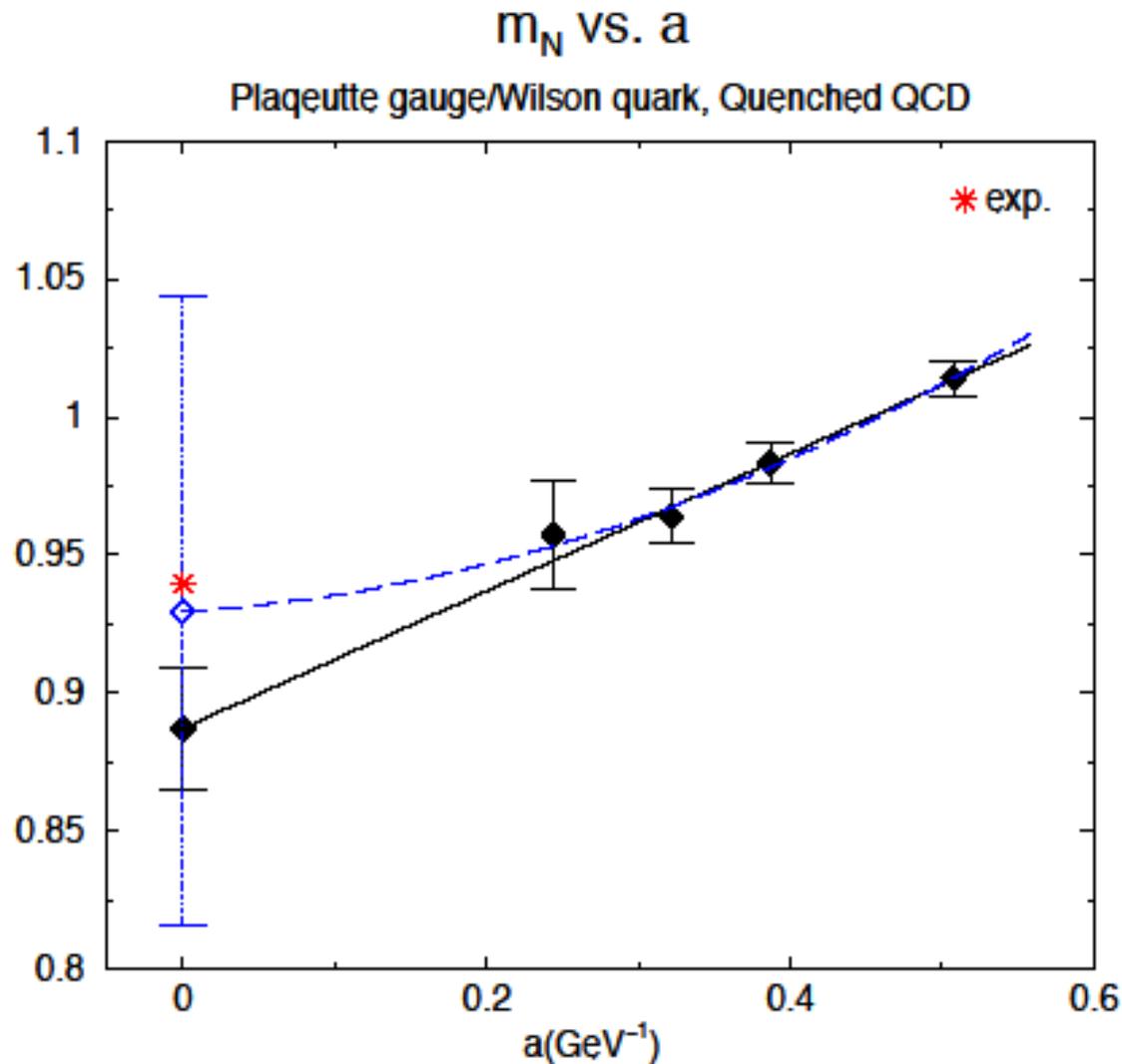
aus der Gittereichtheorie.  
Näherung: nur Gluonen und  
masselose Valenz-Quarks!

zwei Parametrisierungen:

$$m_N(a) = m_N(0) + C_1 a$$

$$m_N(a) = m_N + C_1 a^2 + C_2 a^2$$

**Masse aus masselosen  
Konstituenten!**



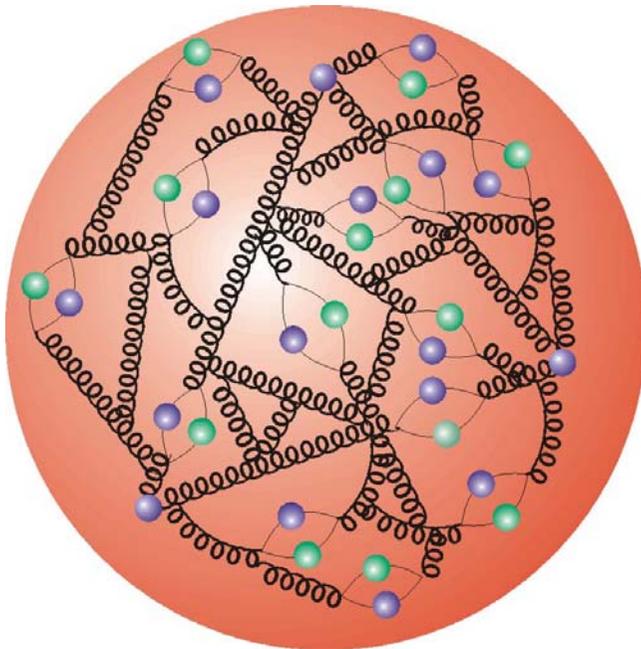
Lattice spacing

# Das Proton: Quarks und Gluonen

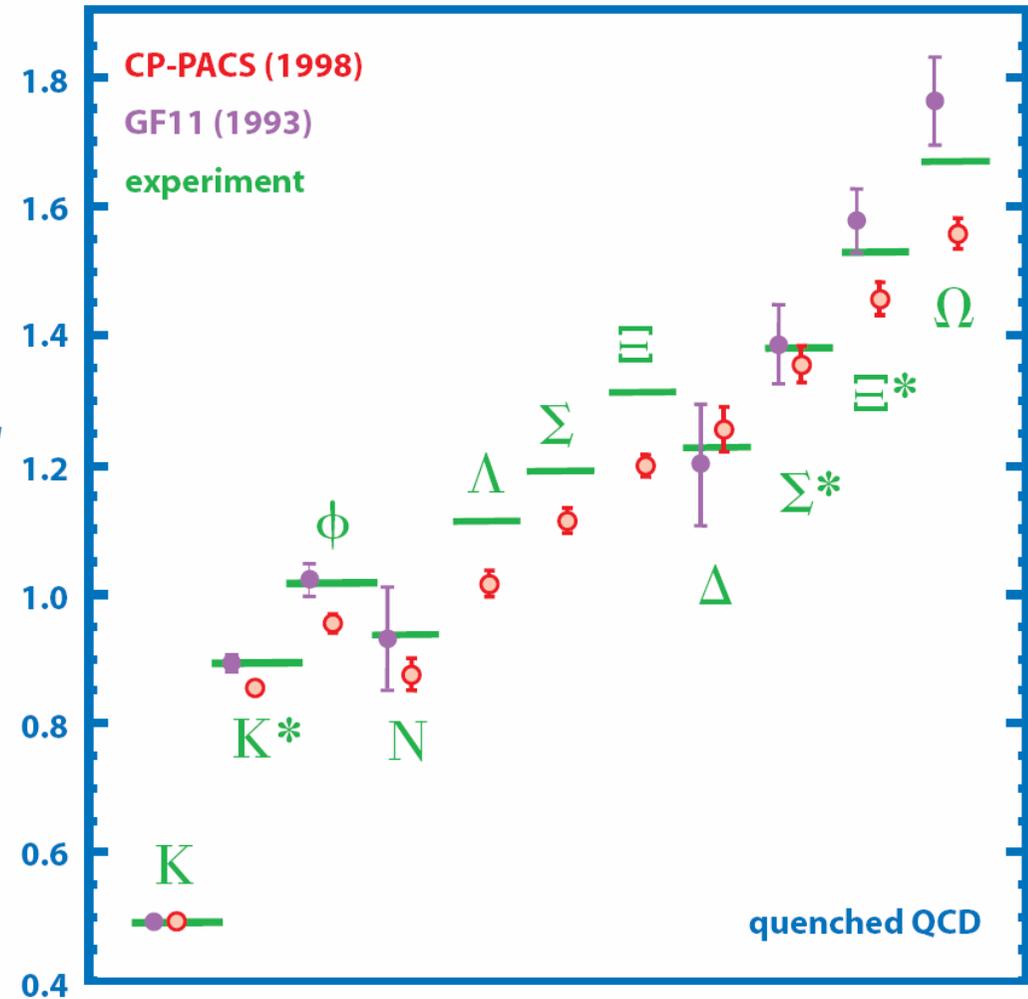
Gitter-Eich-Theorie:

- masselose Gluonen
- (fast) masselose Quarks
- sonst (fast) nichts

Verständnis des QCD-Vakuums?



$m_{had}$   
[GeV]



© Center for Computational Physics, University of Tsukuba

# Fazit zur Proton-Masse:

- 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).
- $\sim 90\%$  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:  $\sim 10\%$  (Gittereichtheorie)

# Neueste Entwicklung:

- **Formulierung der QCD als Stringtheorie?**  
(Gluonen als Strings zwischen Quarks)  
Erste Erfolge, aber noch in den Kinderschuhen
- weiterhin ungelöst: **starkes CP-Problem:**  
warum ist starke WW CP-erhaltend?  
-> Suche nach Axionen  
("fast masselose Higgs-artige Teilchen")  
**bisher erfolglos**
- Suche nach **QCD-Instantonen**

Kommentar A.G.: QCD bleibt spannend!

# kurze Geschichte der Teilchenphysik: schwache Wechselwirkung

## Fermi-Theorie: 4-Fermion-Wechselwirkung

=> bei niedrigen Energien phänomenologisch erfolgreich (z.B.  $\beta$ -Zerfall)

=> Existenz von **Neutrinos** (Pauli, 1930; Reines&Cowan, 1956)

aber: **verletzt Unitarität** bei großen Energien ( $ff \rightarrow ff$ ), nicht eichinvariant

=> Glashow-Modell: **W**-Austausch (wie Photon in QED)

aber: **verletzt immer noch Unitarität** ( $WW \rightarrow WW$ ), nicht eichinvariant

=> addiere **Z**, **Glashow-Salam-Weinberg-Modell** (GSW):

$SU(2)_L \times U(1)$  – Eichtheorie

aber: **W, Z und Fermionen masselos, Massenterme verletzen Eichinvarianz und Unitarität** => **GSW-Theorie mit Higgs**

elektroschwache Vereinheitlichung bei  $\sim 100$  GeV

=> bis heute **experimentell sehr gut bestätigt!**

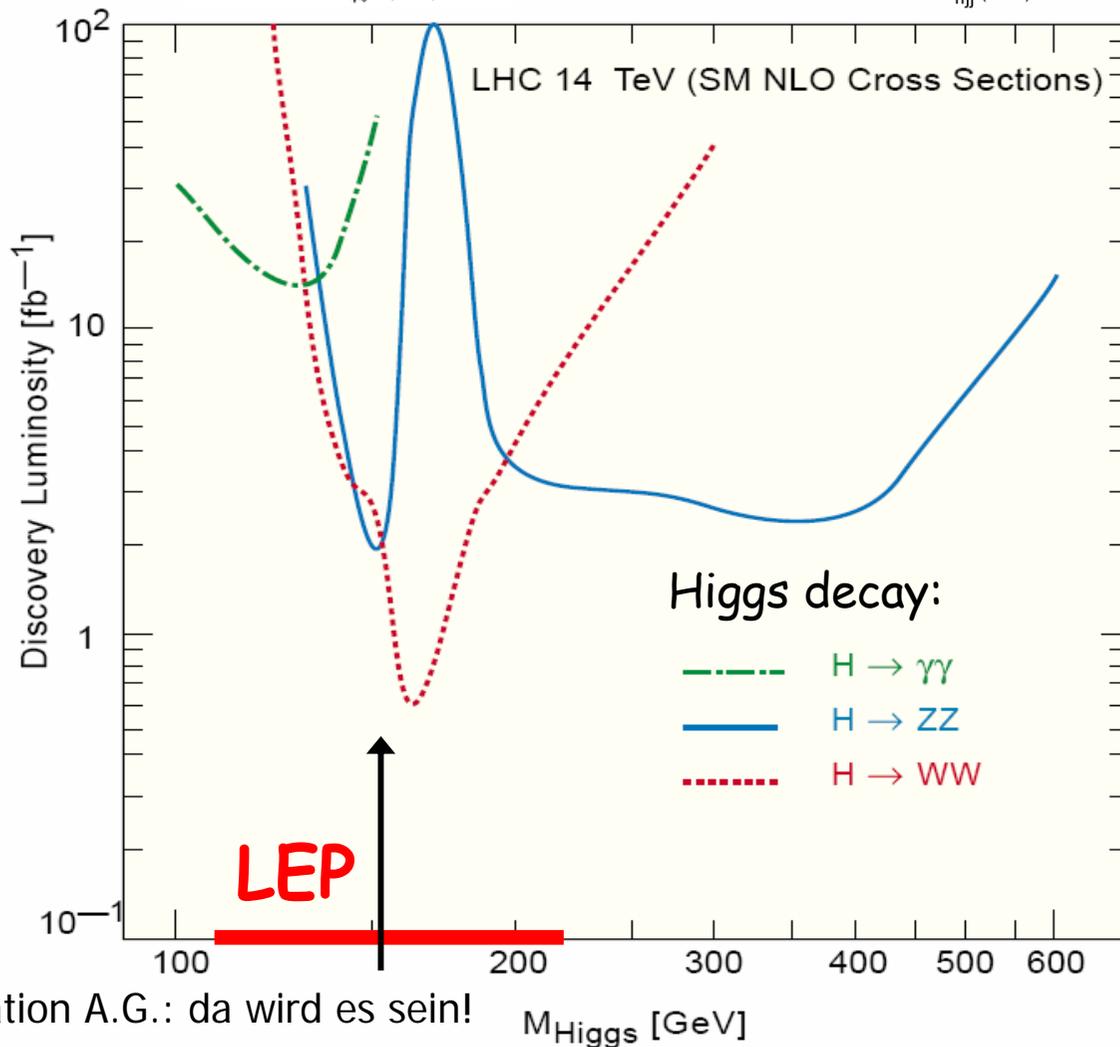
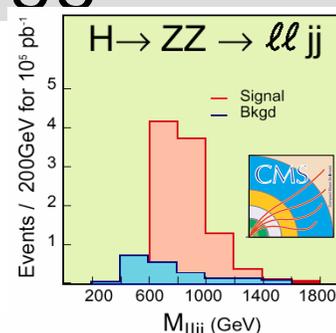
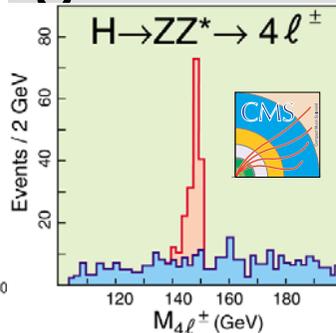
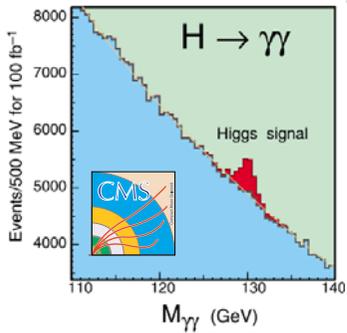
(neutrale Ströme, 197x, Entdeckung von W, Z, 1983)

theoretisch (fast) vollständig in sich abgeschlossen

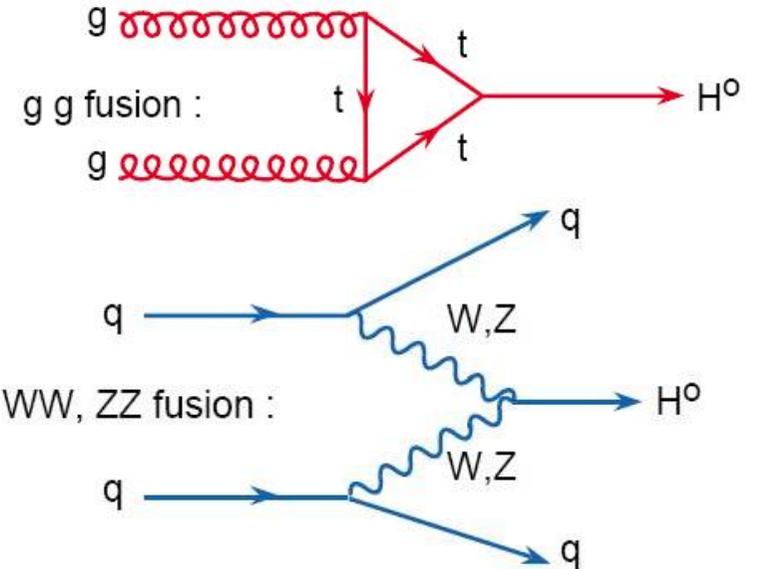
aber **Schönheitsfehler**: Higgs-Teilchen noch nicht gefunden,

$SU(2)$  und  $U(1)$  nicht "wirklich" vereinheitlicht, **Hierarchieproblem**

# Die Jagd nach dem Higgs am LHC



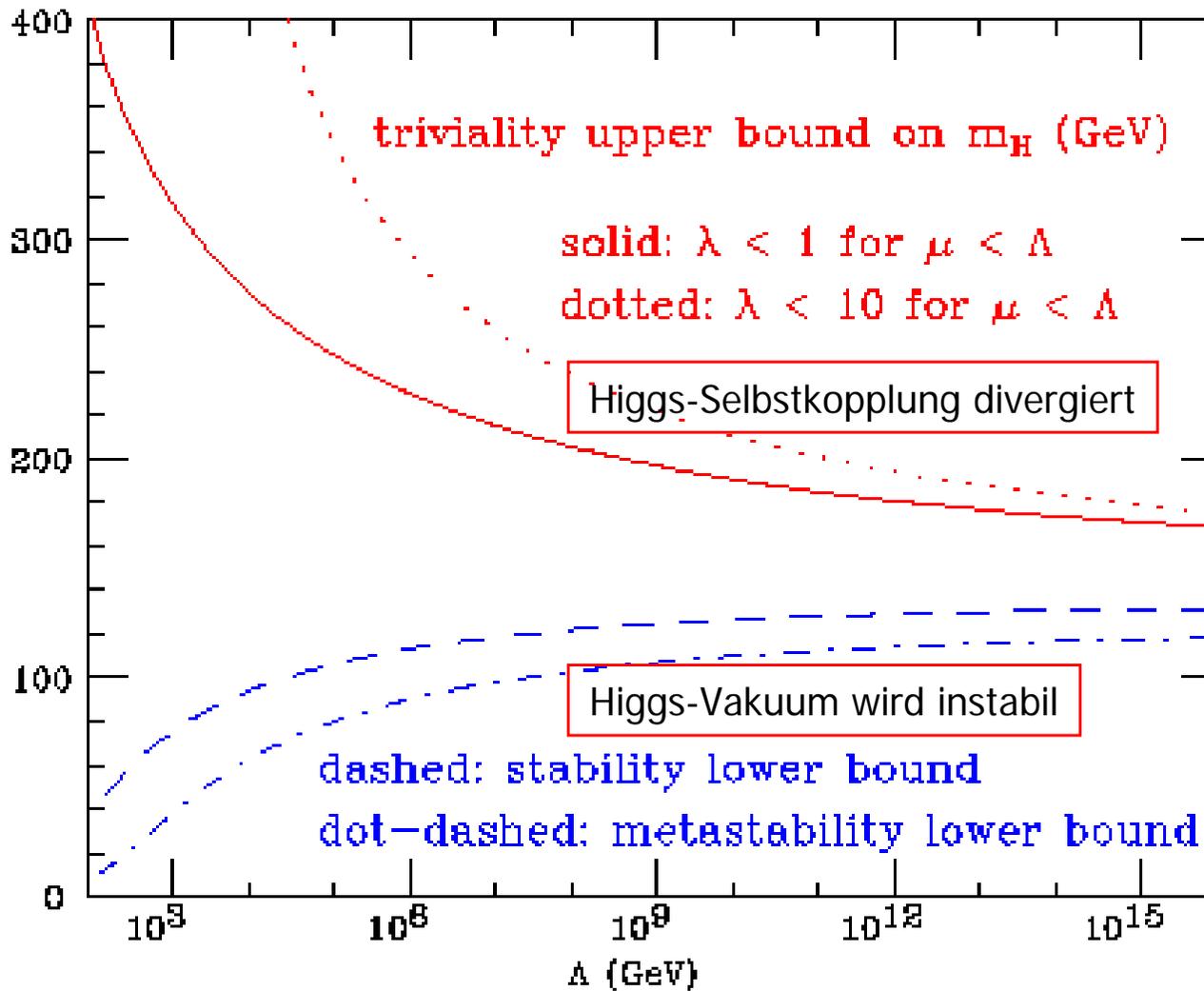
## Higgs-Produktion:



Je nach Masse könnte Higgs bereits innerhalb der ersten Jahre der LHC-Physik-Datennahme gefunden werden!

Spekulation A.G.: da wird es sein!

# Das Hierarchie-Problem



$m_H \sim 130-170$  GeV

=>

Standard-Modell  
kann bis zu sehr  
hohen Energien  
funktionieren



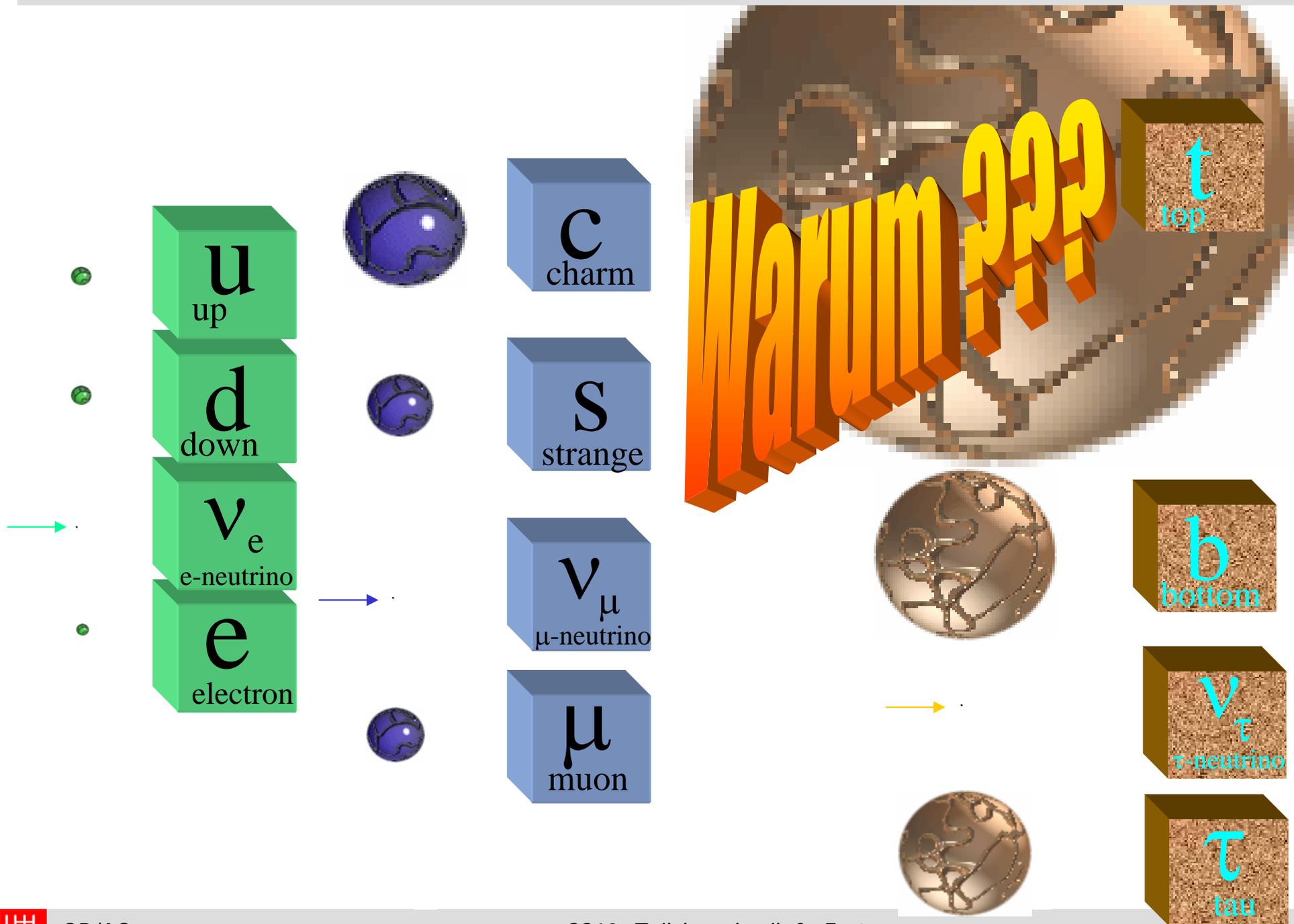
sonst nicht,

=> **neue Physik:**

SUSY,  
extra Dimensionen,  
compositeness, ...

Tipp A.G.: Standard-Modell wird siegen, aber noch spannender falls nicht!

# Das Massenrätzel



# Die top-Quark-Masse

- top-Quark ist schwerstes bekanntes  
"elementares" Teilchen

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

- Lebensdauer  $\ll \Lambda_{\text{QCD}}$   
=> t zerfällt, bevor es fragmentiert

$$t \rightarrow W + b$$

=> einziges Quark, dessen Masse direkt messbar ist

"physikalische" Masse:

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

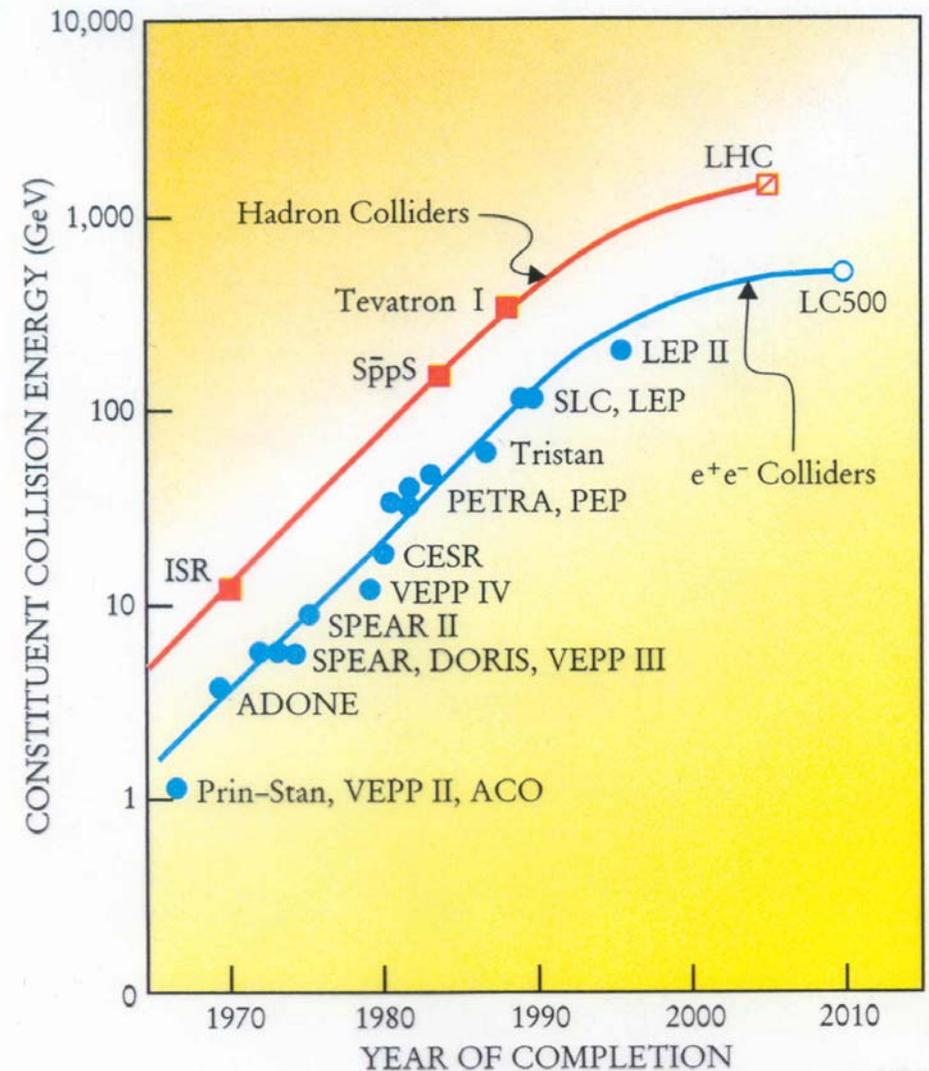
"nackte"  
renormierte Masse

=> untersuche top-Eigenschaften am LHC

- 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!

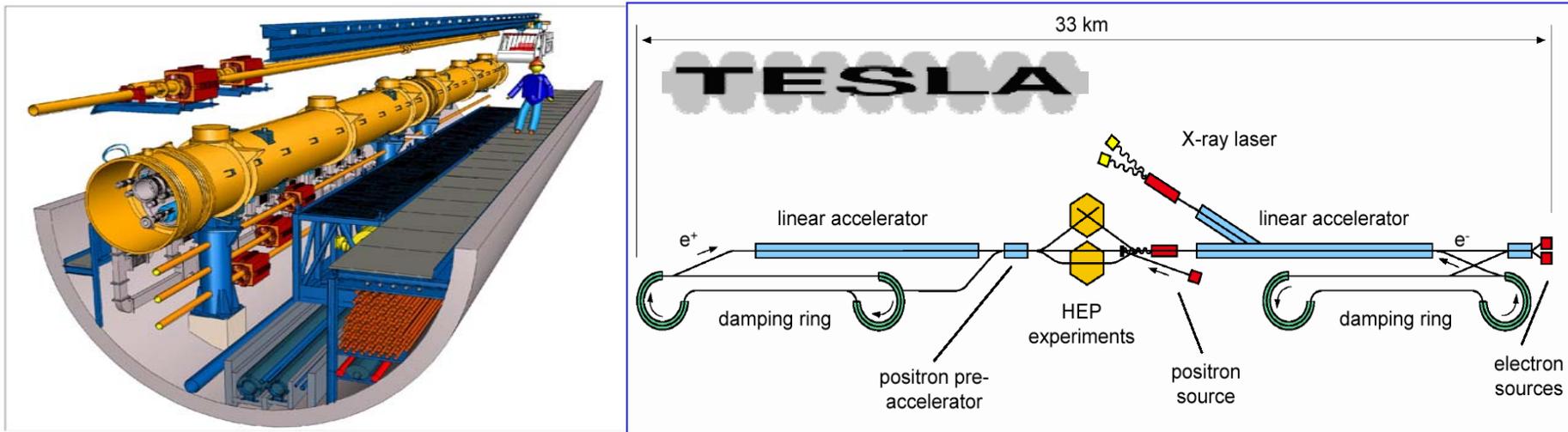
# Warum brauchen wir einen e+e- Linear-Collider?

- Hadron (Proton) and Elektron-Speicherringe haben sich immer hervorragend ergänzt:
- Hadron-Collider:  
Entdeckungen bei höchsten Energien
- Elektron-Collider:  
Entdeckungen und Präzisionsmessungen
- neuestes Beispiel:  
Tevatron/LEP (top)



# Warum brauchen wir einen e+e- Linear-Collider?

- um LHC zu ergänzen, ->  $\geq 500$  GeV Schwerpunktsenergie
- kreisförmige Speicherringe haben Ende der technischen Möglichkeiten erreicht (Energieverlust durch Bremsstrahlung)
- => lineare Collider!
- TESLA-Projekt bei DESY: (TDR 2001) ... zu früh



# Warum/was ist ILC (International Linear Collider)?

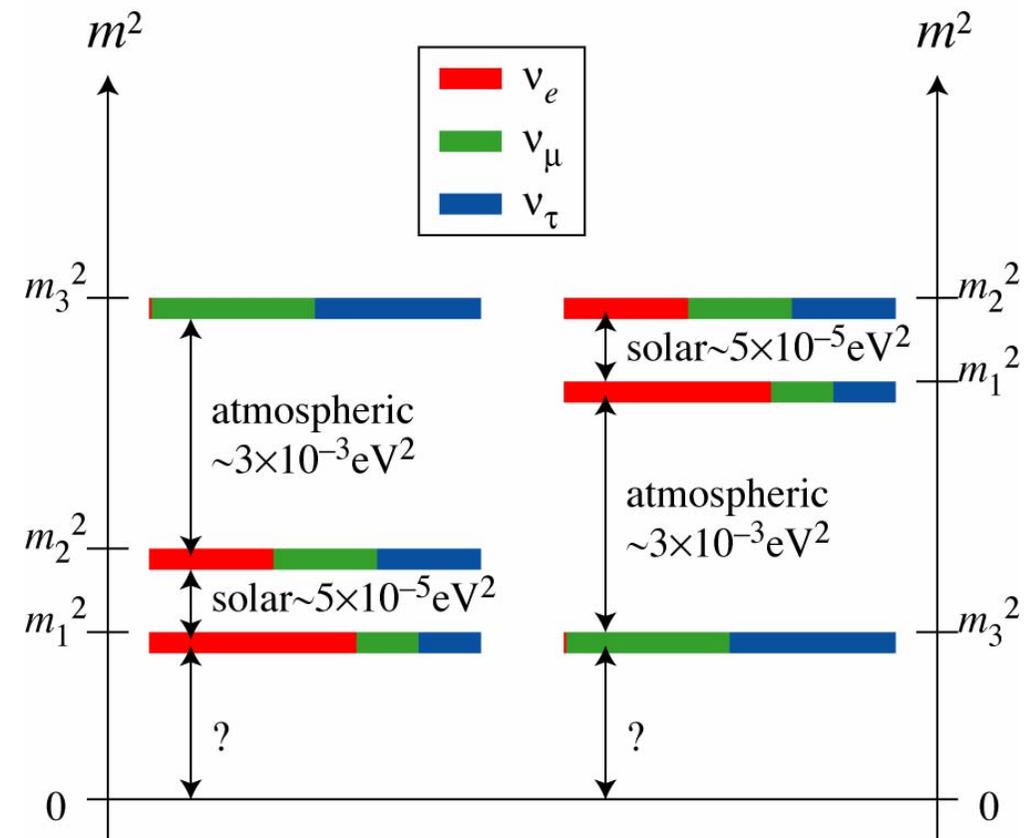
- Falls LHC Higgs findet  
wird ILC die Higgs-Eigenschaften klären
- Falls LHC Higgs NICHT findet  
-> Problem mit Standard-Modell, nur ILC kann  
klären wieso (Präzisionsmessungen)
- Falls LHC SuperSYmmetrie findet  
wird ILC die Eigenschaften der SUSY-Teilchen klären, und hoffentlich  
viele weitere finden/auseinanderhalten
- Falls LHC SuperSYmmetrie nicht findet  
könnte ILC trotzdem indirekte Hinweise liefern (Präzisionsmessungen)
- + mögliche ander unerwartete Entdeckungen ...  
Compositeness, Extra Dimensionen,  
indirecte Effekte von Superstrings, ...

Entscheidung zum Bau hoffentlich ~ 2013

Kommentar A.G.: kurzfristig schwierig,  
langfristig zuversichtlich, da keine konkurrenzfähige Alternative

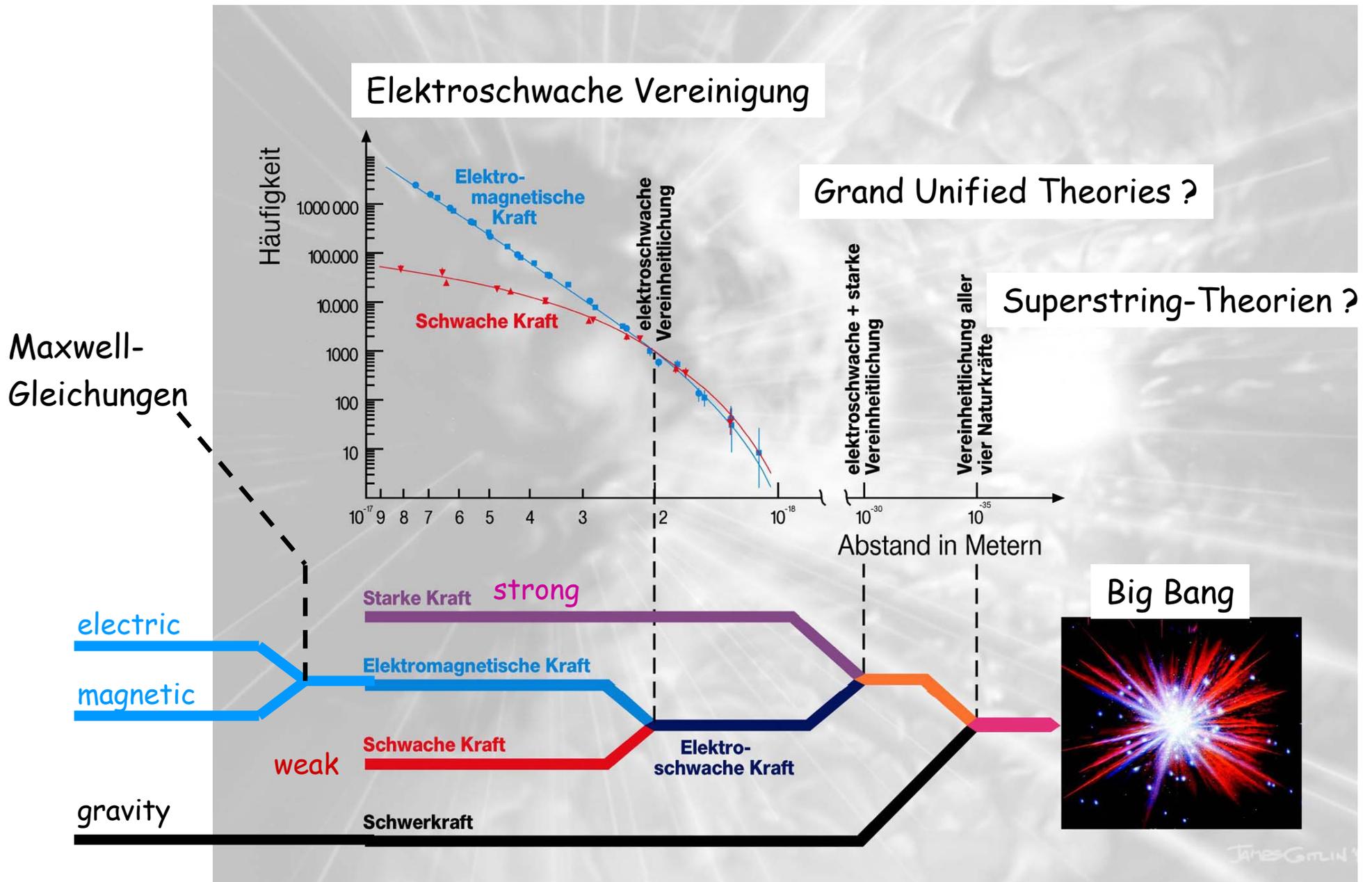
# Können Neutrinos helfen?

- CP-Verletzung im Lepton-Sektor?
- Neutrino-Massen-Hierarchie?  
=> neue, grosse Neutrino-Detektoren + stärkere Neutrinostrahlen, Neutrino-Factory!



- Dirac- oder Majorananeutrinos?  
(ist das Neutrino sein eigenes Antiteilchen?)  
=> Doppel- $\beta$ -Zerfalls-Experimente

# Das Streben nach Vereinheitlichung der Kräfte



# Warum $1/3$ Ladung der Quarks?

- mögliche Erklärung:  
Dreiecks-Anomalien im Standardmodell  
=>  $N_c \times \sum Q_q$  muss ganzzahlig sein  
3 Farben => Drittelzahlige Ladung  
=> Beziehung zwischen  $SU(3)$  und  $SU(2) \times U(1)$   
Standardmodell-Struktur nicht zufällig!

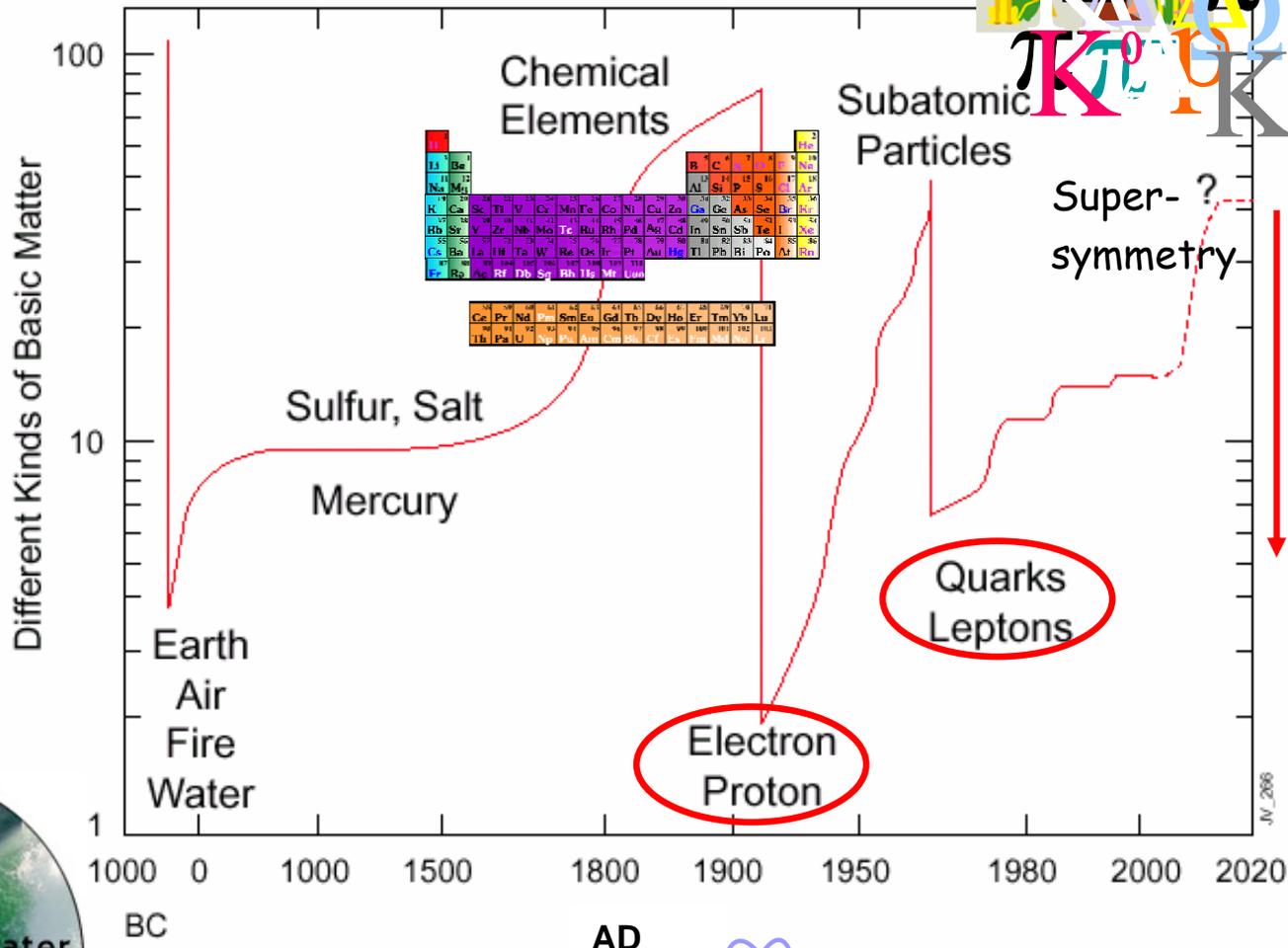
## Warum 3 Familien?

keine Ahnung ...

(Auch nicht in Erweiterungen des Standardmodells)

# History of basic building blocks of matter

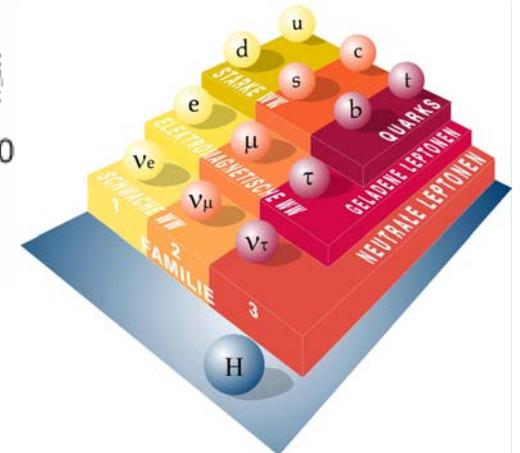
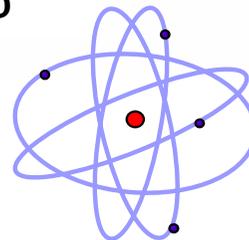
motivation:  
find  
smallest  
possible  
number



**Quark and  
Lepton  
substructure??**



(c) Andy Brice 1998



# Einschub: Diplom- und Doktorarbeiten

- z.B. **Bachelor/Master/Diplom mit verfügbaren Daten von HERA/ZEUS**  
(Datennahme bis Sommer 2007, Datenanalyse bis 2014)  
+ **Doktorarbeit mit Daten von LHC/CMS**  
(Physikdaten ab Frühjahr 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
- Top-Produktion bei LHC
- Suche nach H -> WW, H->ZZ\*, Standardmodell-Higgs, ja oder nein?
- damit verbundene mehr technische Themen, z.B.
  - Myonrekonstruktion
  - Zerfallslängenrekonstruktion (Mikrovertex-Detektor)
  - Physik-Trigger-Studien

# Schlussfazit

- Standardmodell funktioniert hervorragend, aber viele  
 Ingredienzien, z.B. Ursprung der Masse, noch nicht wirklich  
 verstanden => noch viel zu tun!
- Messungen am LHC und hoffentlich bald auch ILC werden  
 zeigen, ob und wie das Standardmodell erweitert werden  
 muss. Grosse Revolution in der Teilchenphysik könnte kurz  
 bevor stehen!  
 (SUSY, extra Dimensionen, Compositeness, ...)
- Es bleibt so oder so spannend!
- Bleiben Sie dran!

# Teilchenphysik macht Spass!

