

TEILCHENPHYSIK FÜR FORTGESCHRITTENE

Wie geht es weiter?

Träume und Aufgaben der Teilchenphysiker

Caren Hagner
Achim Geiser



Universität Hamburg, IExpPh
Sommersemester 2009

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 und Aufgaben 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?

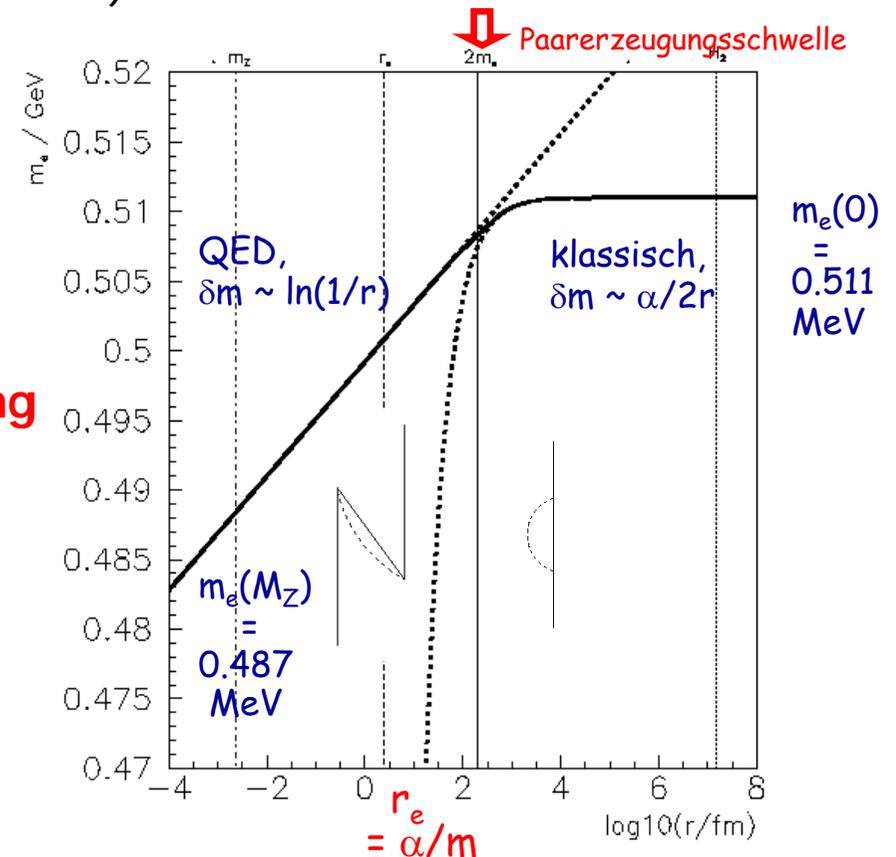
- Das elektromagnetische Feld des Elektrons trägt signifikant zu seiner Masse bei -> **Elektron muss massiv sein** (wie jedes geladene Teilchen).

- 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 $m_e \rightarrow 0$

-> 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)

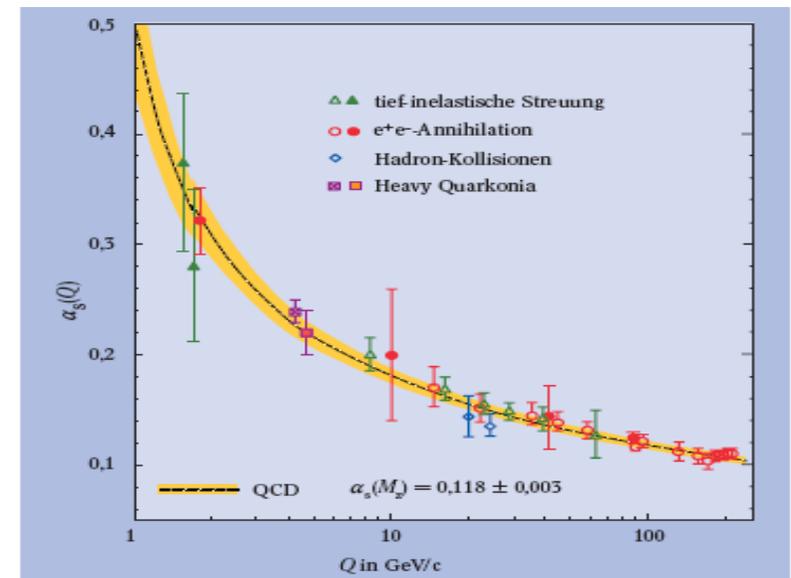
und Confinement (=> keine freien Quarks)

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

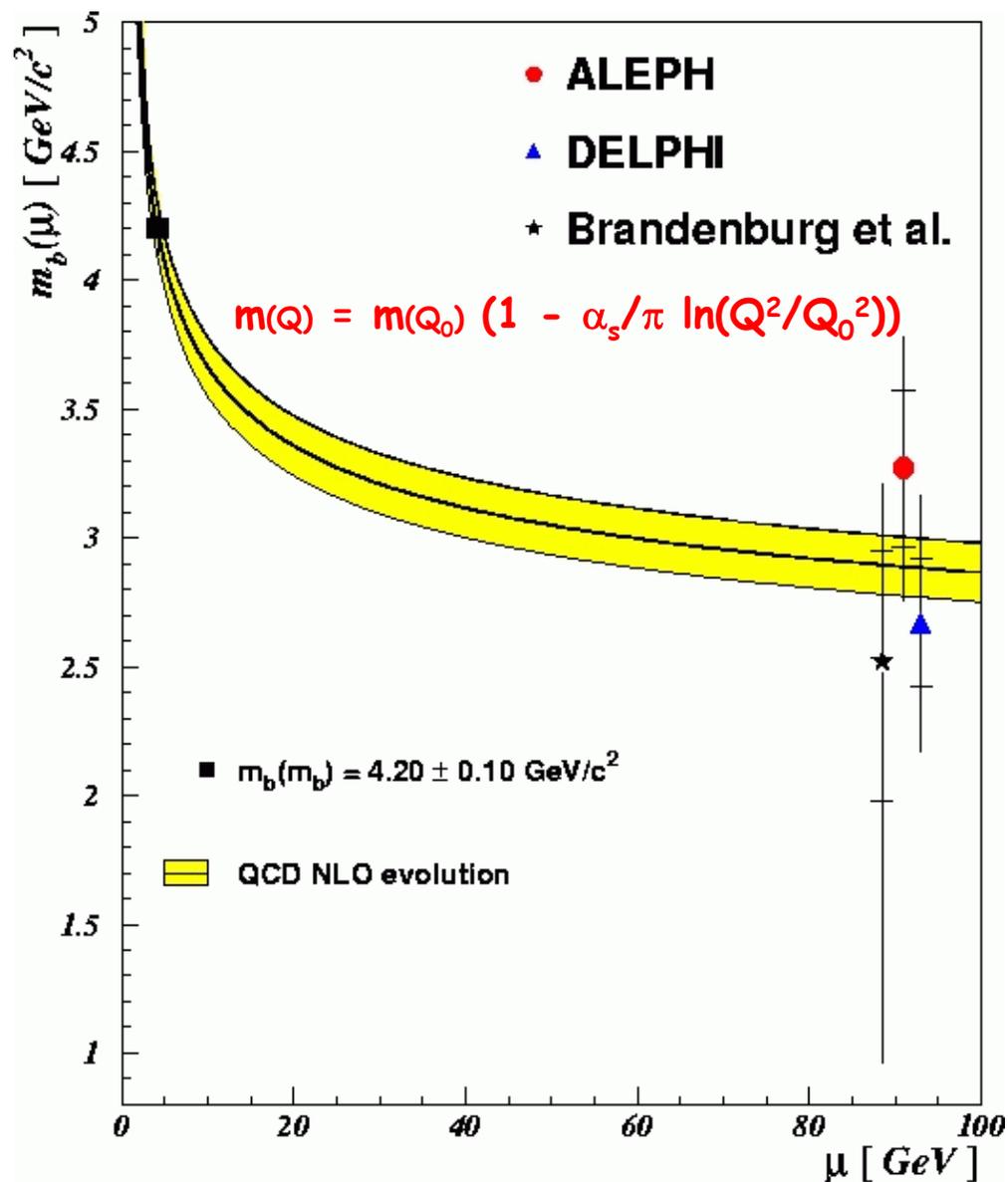
(Farbe, Entdeckung des Charm-Quarks (1974), der Gluonen (1979))

theoretisch (fast) vollständig in sich abgeschlossen

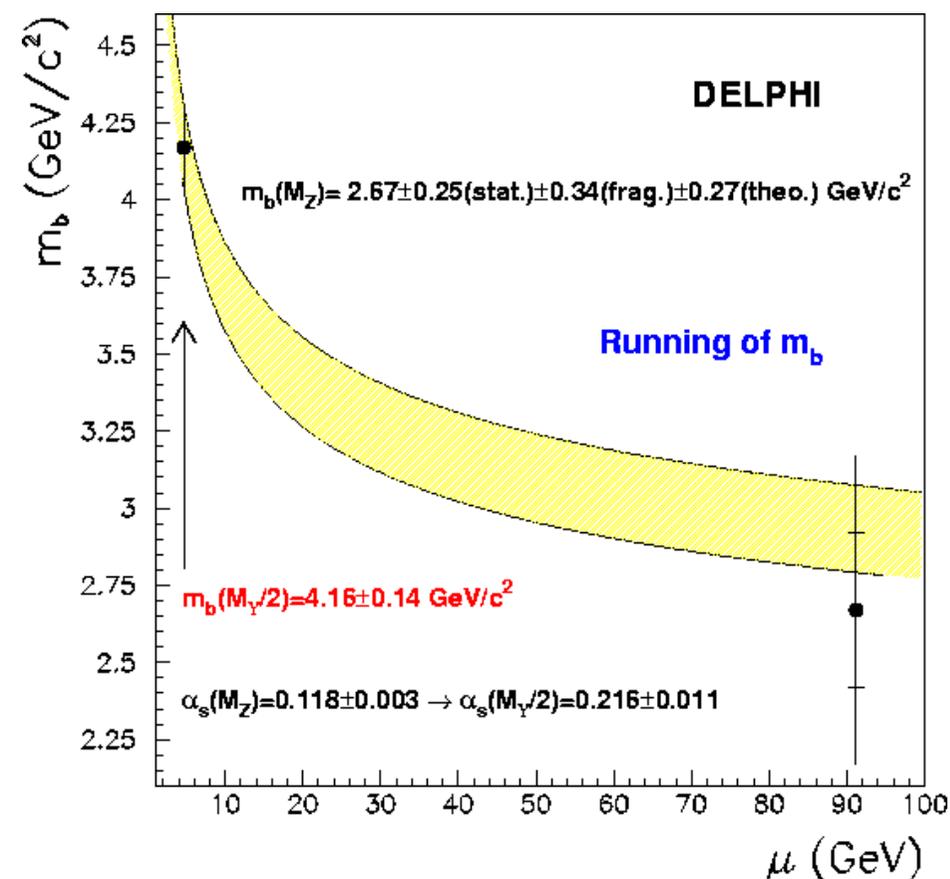
aber **Schönheitsfehler**: Störungsrechnung kompliziert und nicht sehr genau, nichtperturbative Rechnungen (Gittereichtheorie) sehr schwierig, **starkes CP-Problem**, Quark-Massen nicht erklärt (Renormierung)



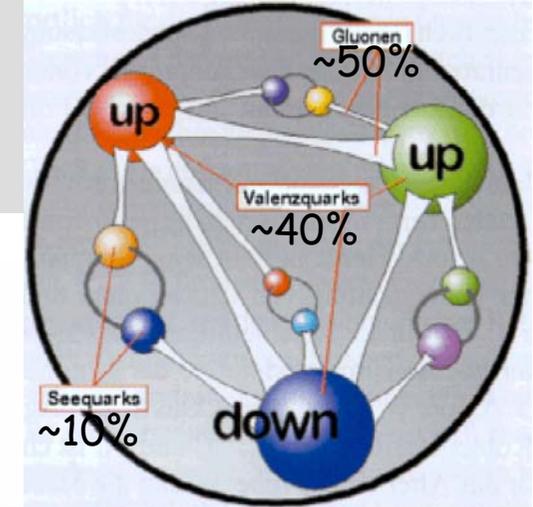
Die laufende b-Quark-Masse



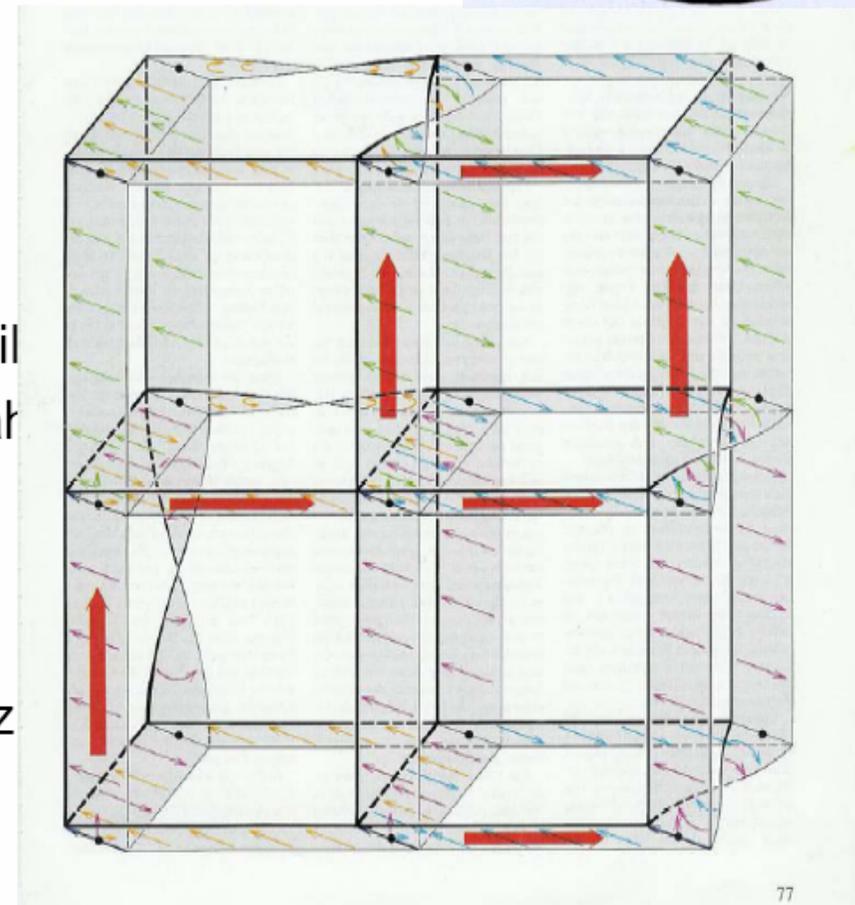
LEP: $Z \rightarrow bb + \text{Gluonen}$,
 Messung des Phasenraums/
 Winkelverteilungen



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

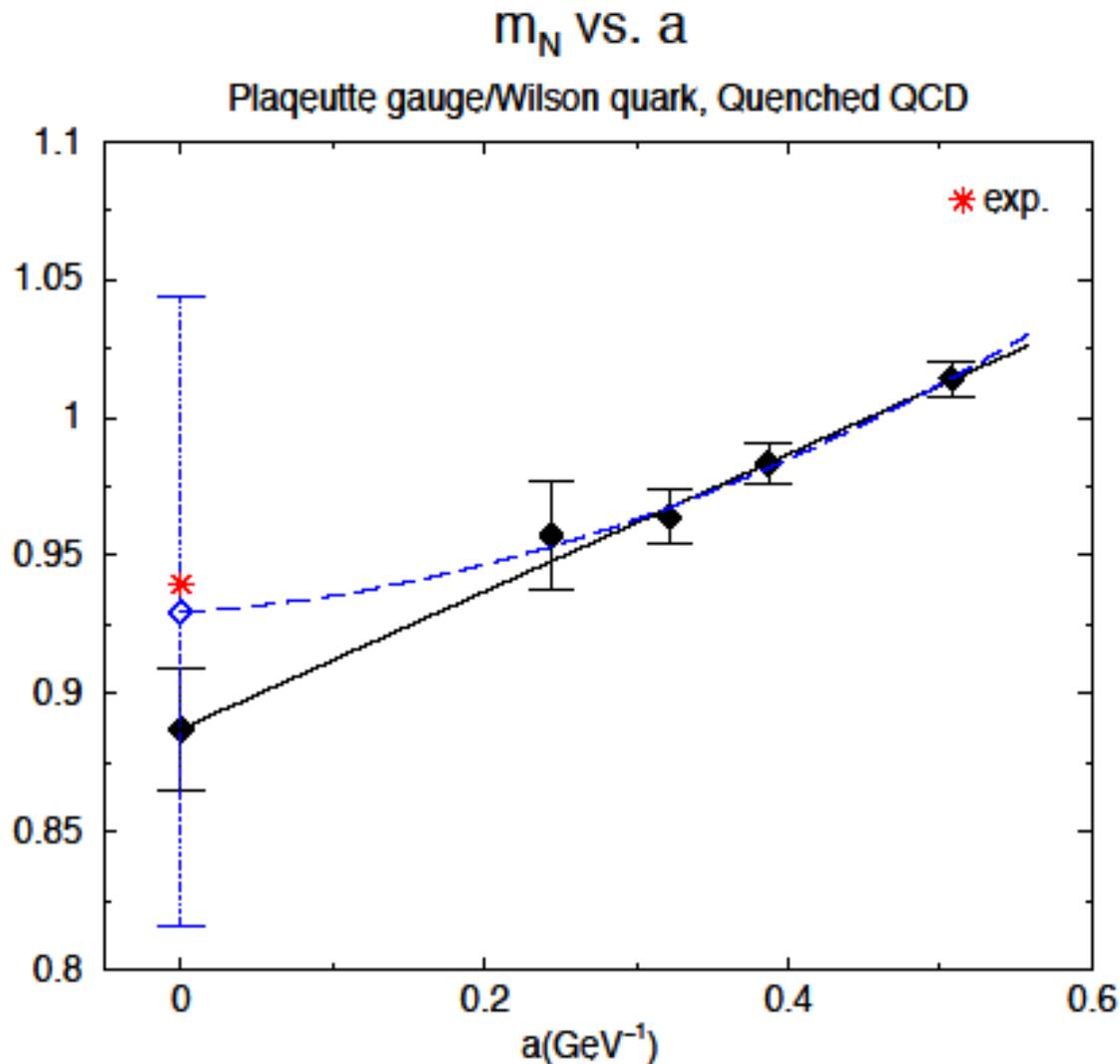
aus der Gittereichtheorie.
Näherung: nur Gluonen und
masselose Valenz-Quarks!

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!**



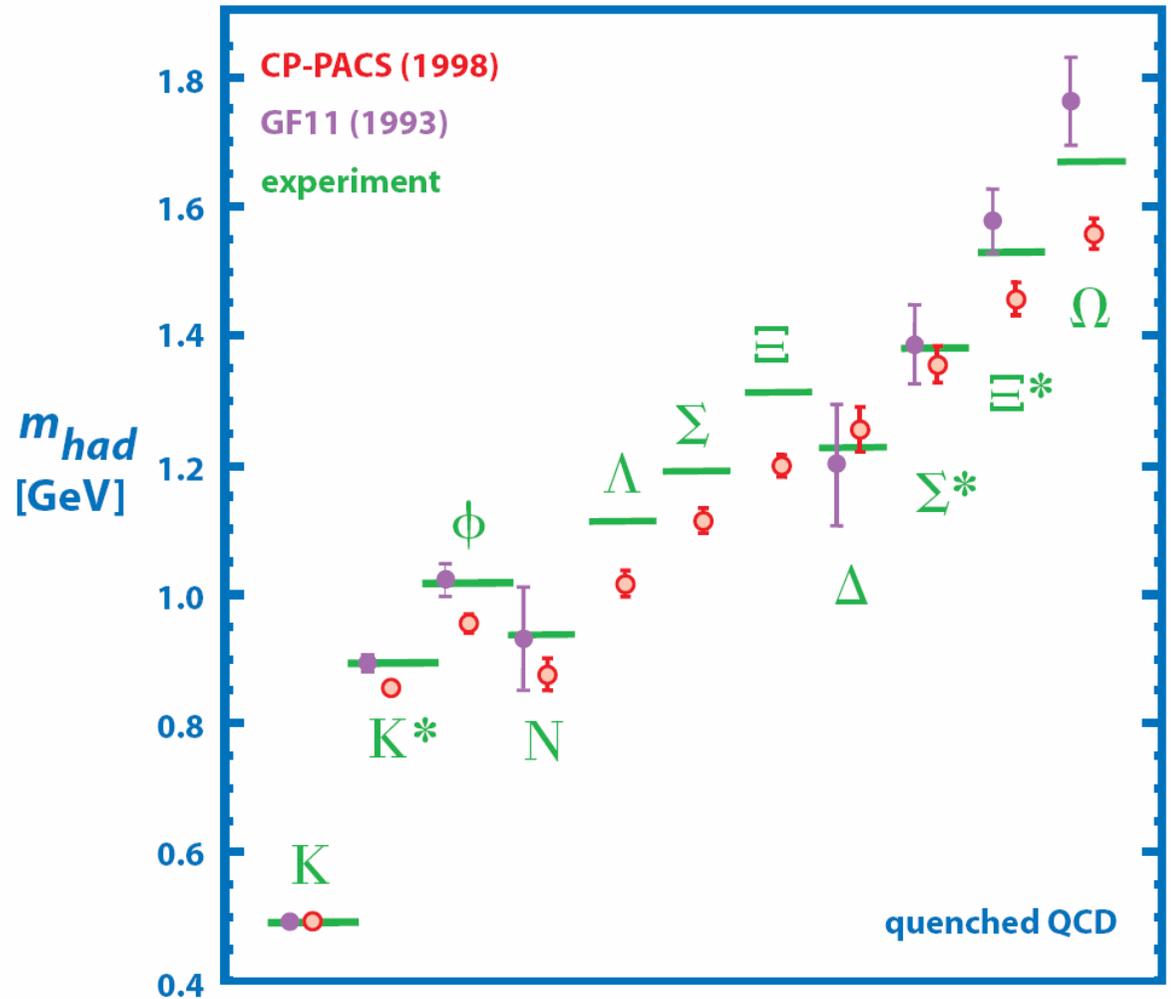
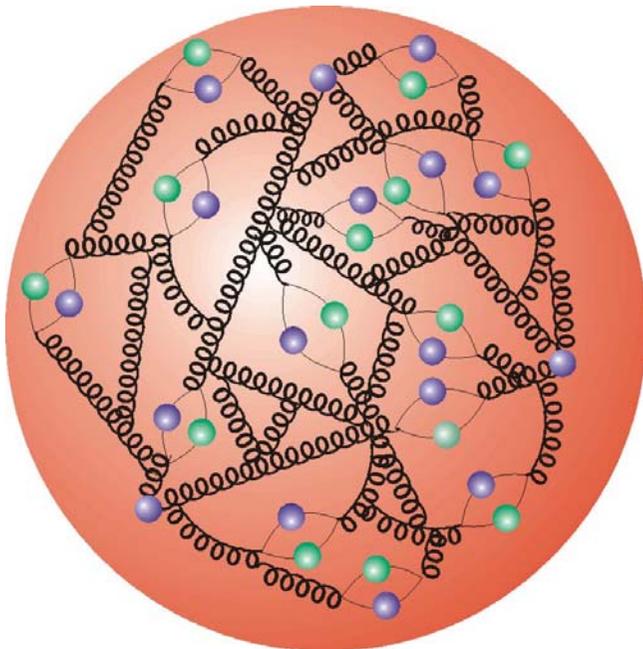
Lattice spacing

Das Proton: Quarks und Gluonen

Gitter-Eich-Theorie:

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

Verständnis des QCD-Vakuums?



© 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 α_s oder Λ_{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. β -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 ~ 100 GeV

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

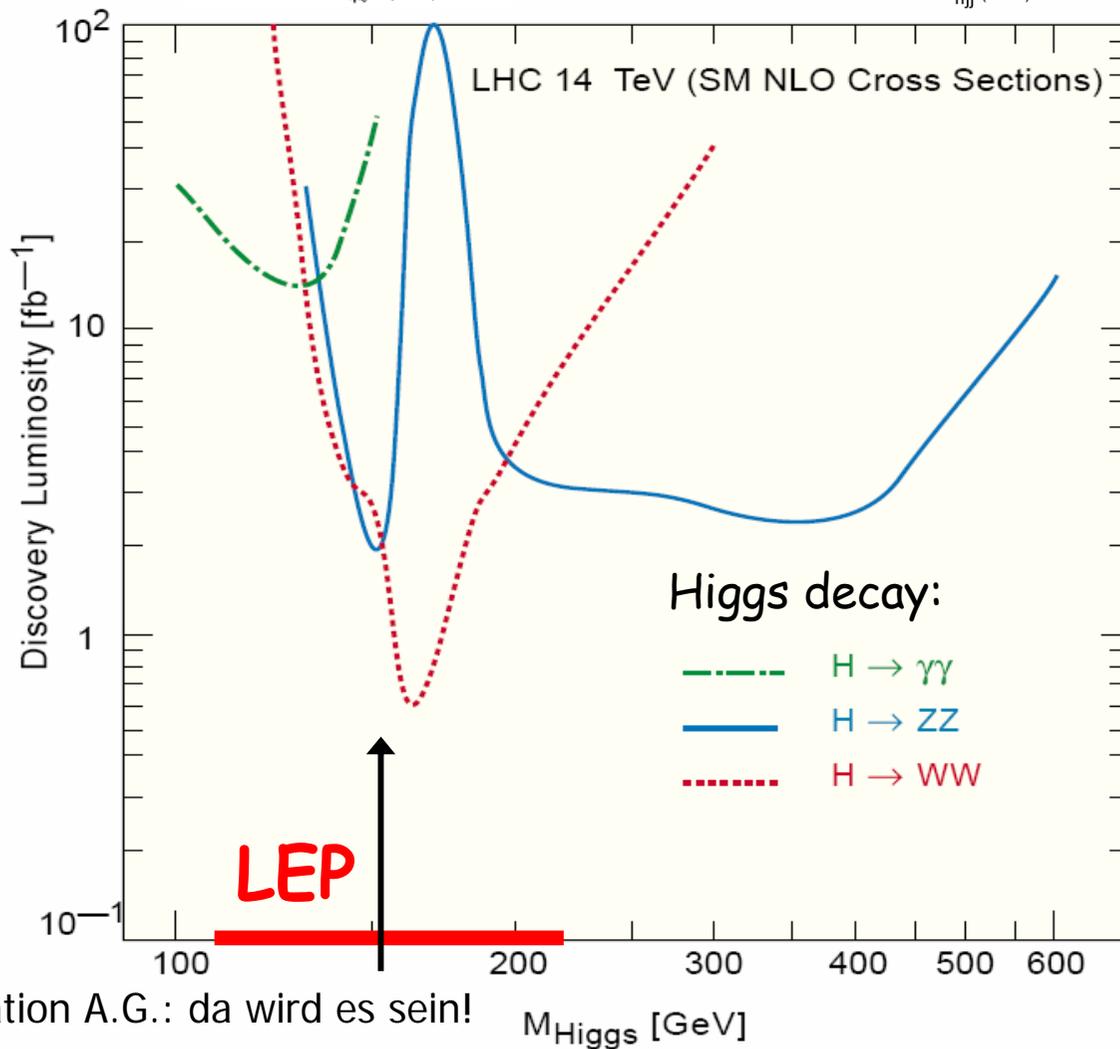
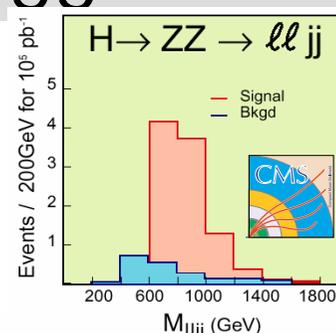
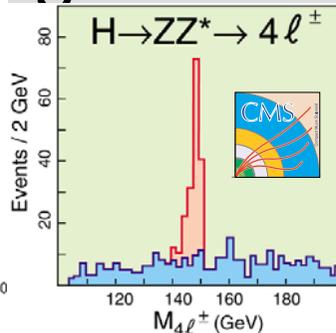
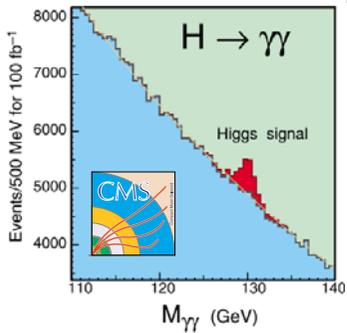
(neutrale Ströme, 197x, Entdeckung von **W, Z**, 1983)

theoretisch (fast) vollständig in sich abgeschlossen

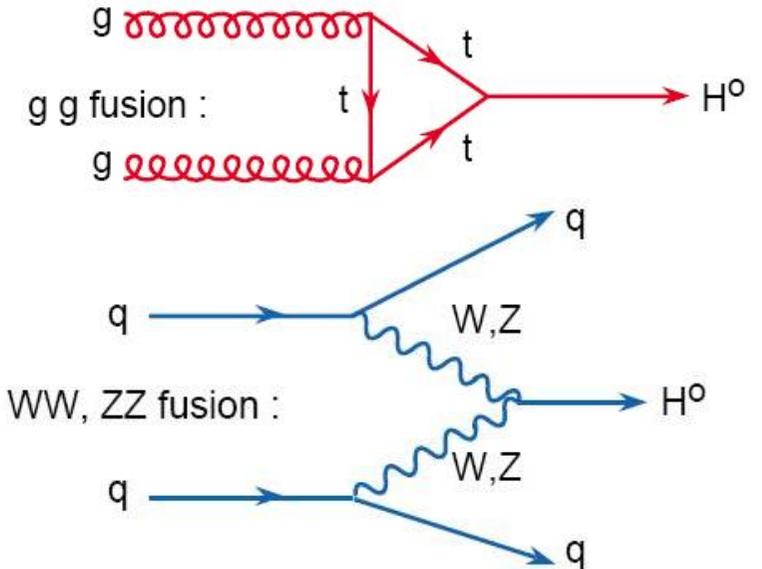
aber **Schönheitsfehler**: Higgs-Teilchen noch nicht gefunden,

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

Die Jagd nach dem Higgs am LHC



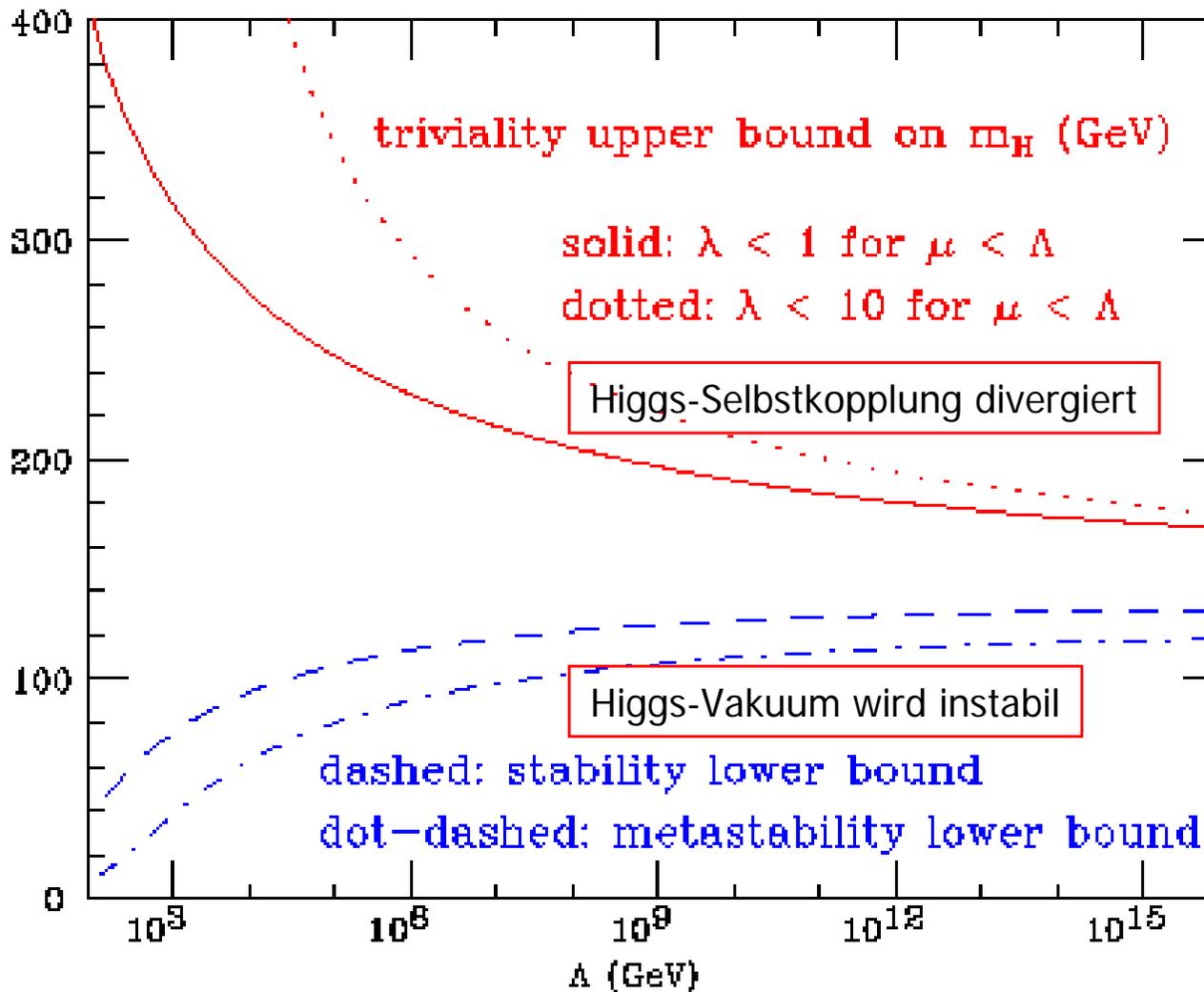
Higgs-Produktion:



Je nach Masse könnte Higgs bereits innerhalb des ersten Jahres 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,

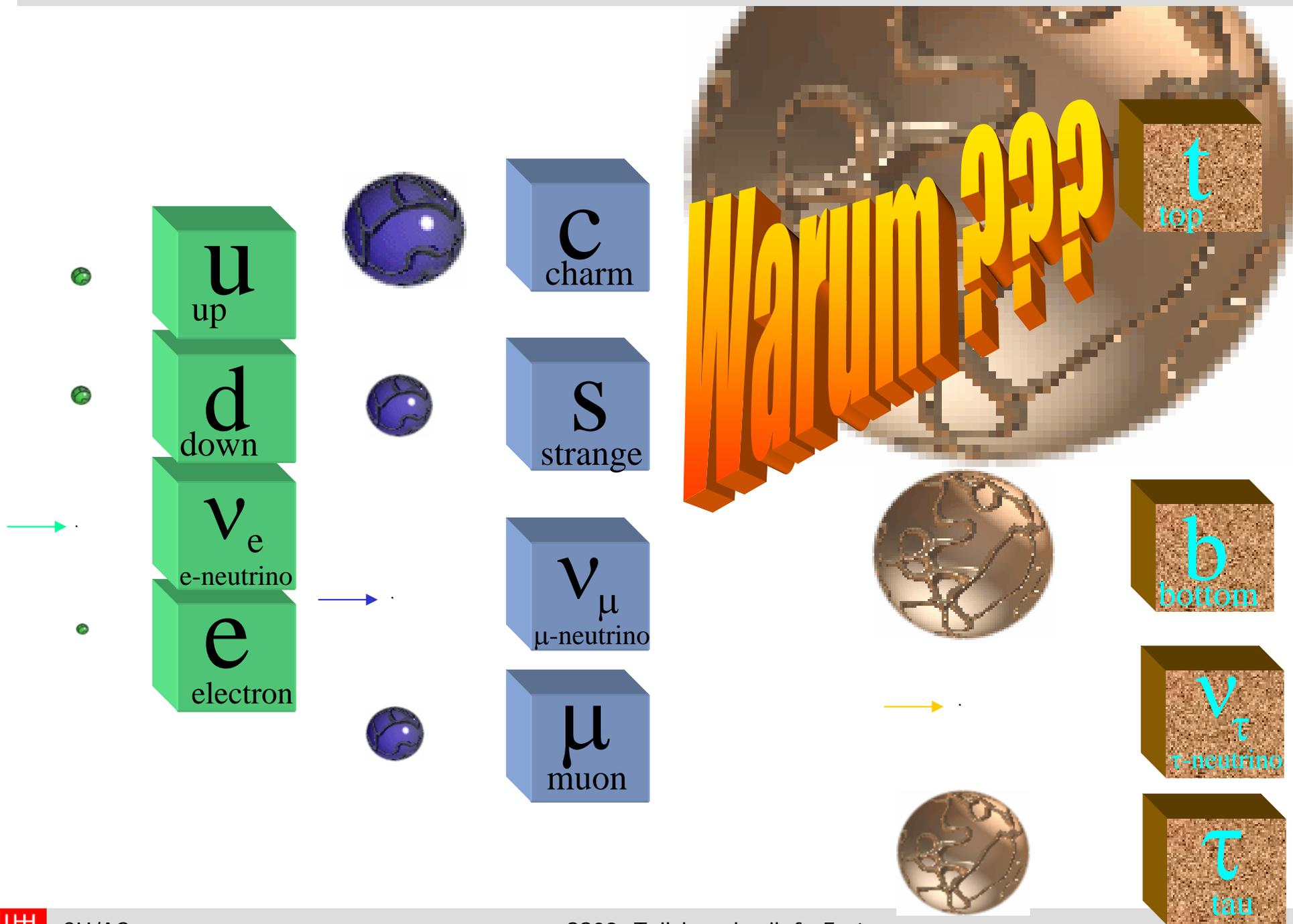
=> **neue Physik:**

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:

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

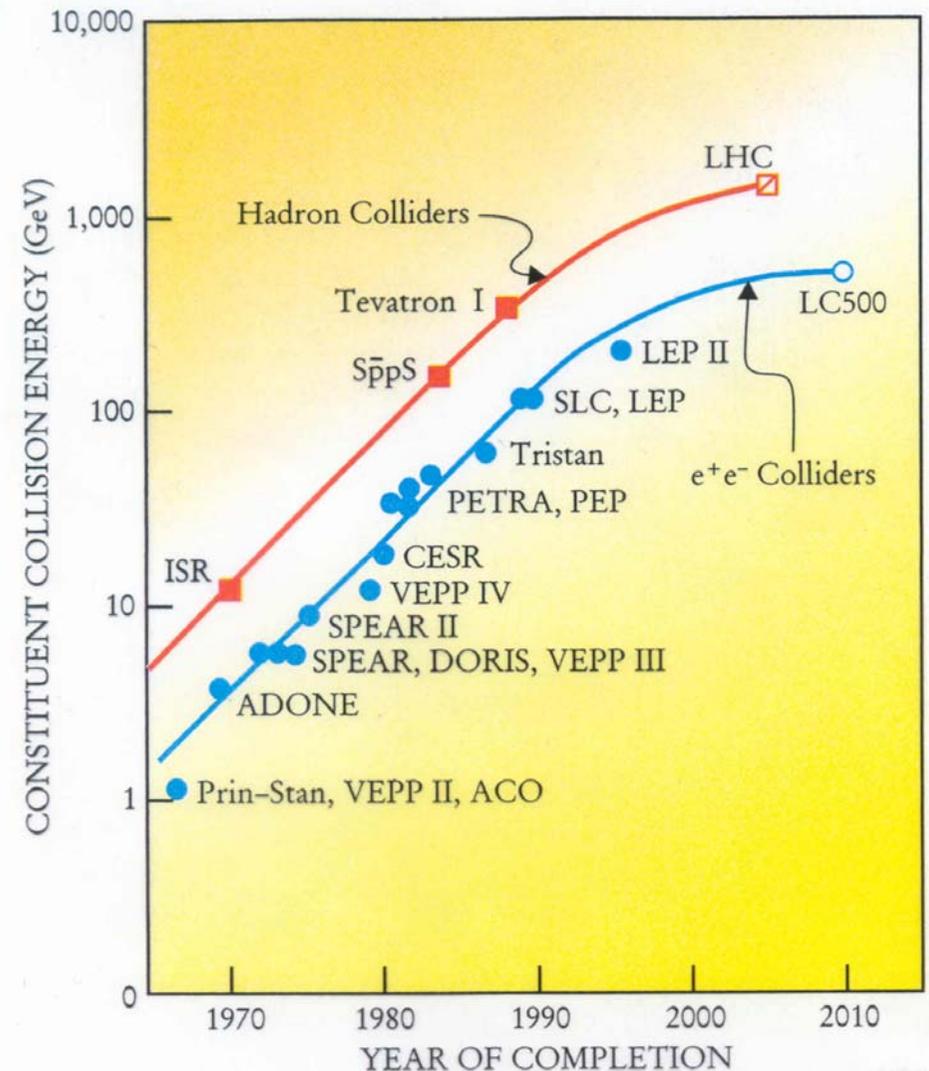
"nackte"
renormierte Masse

=> 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!

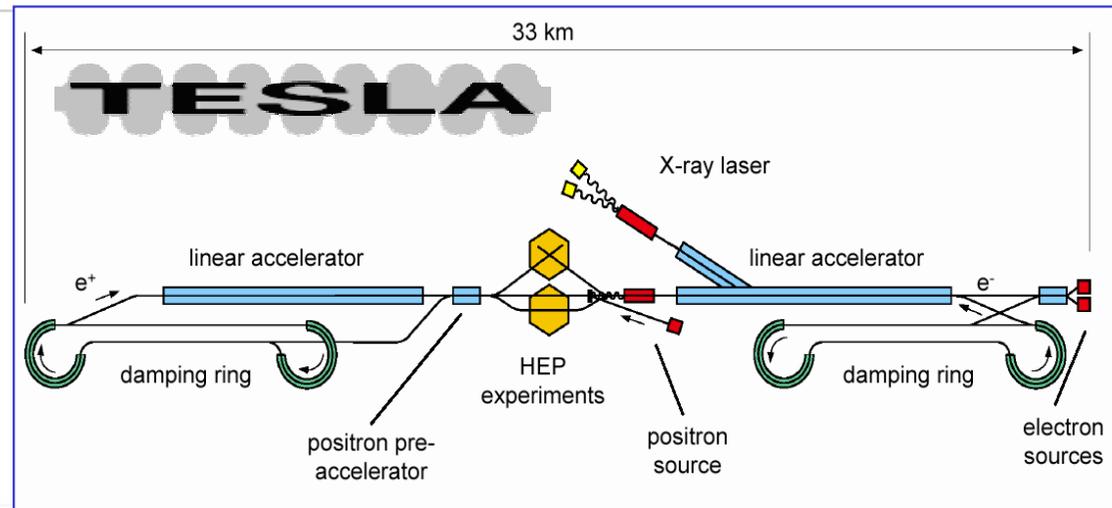
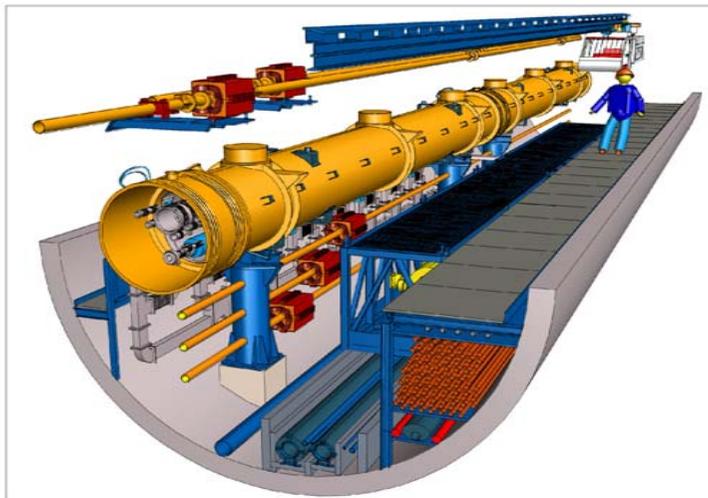
Warum brauchen wir einen e+e- Linear-Collider?

- 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, -> ≥ 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)?

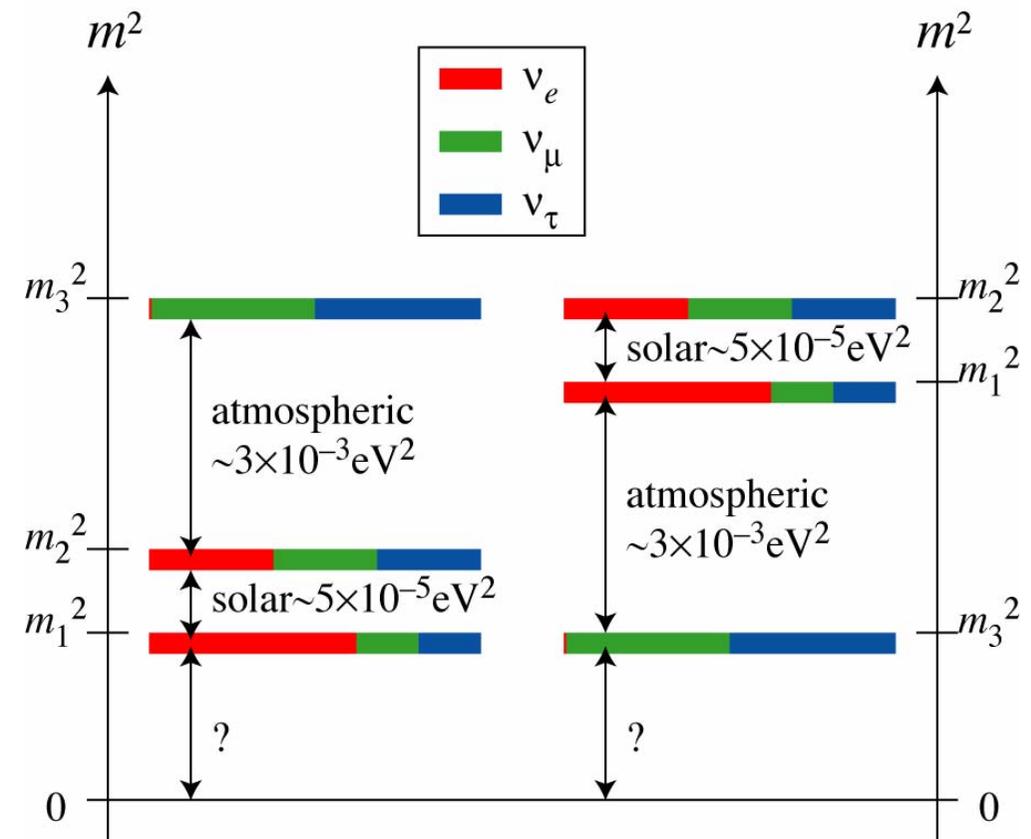
- Falls LHC Higgs findet
wird ILC die Higgs-Eigenschaften klären
- Falls LHC Higgs NICHT findet
-> Problem mit Standard-Modell, nur ILC kann
klären wieso (Präzisionsmessungen)
- Falls LHC SuperSYmmetrie findet
wird ILC die Eigenschaften der SUSY-Teilchen klären, und hoffentlich
viele weitere finden/auseinanderhalten
- 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.: zuversichtlich, da keine konkurrenzfähige Alternative

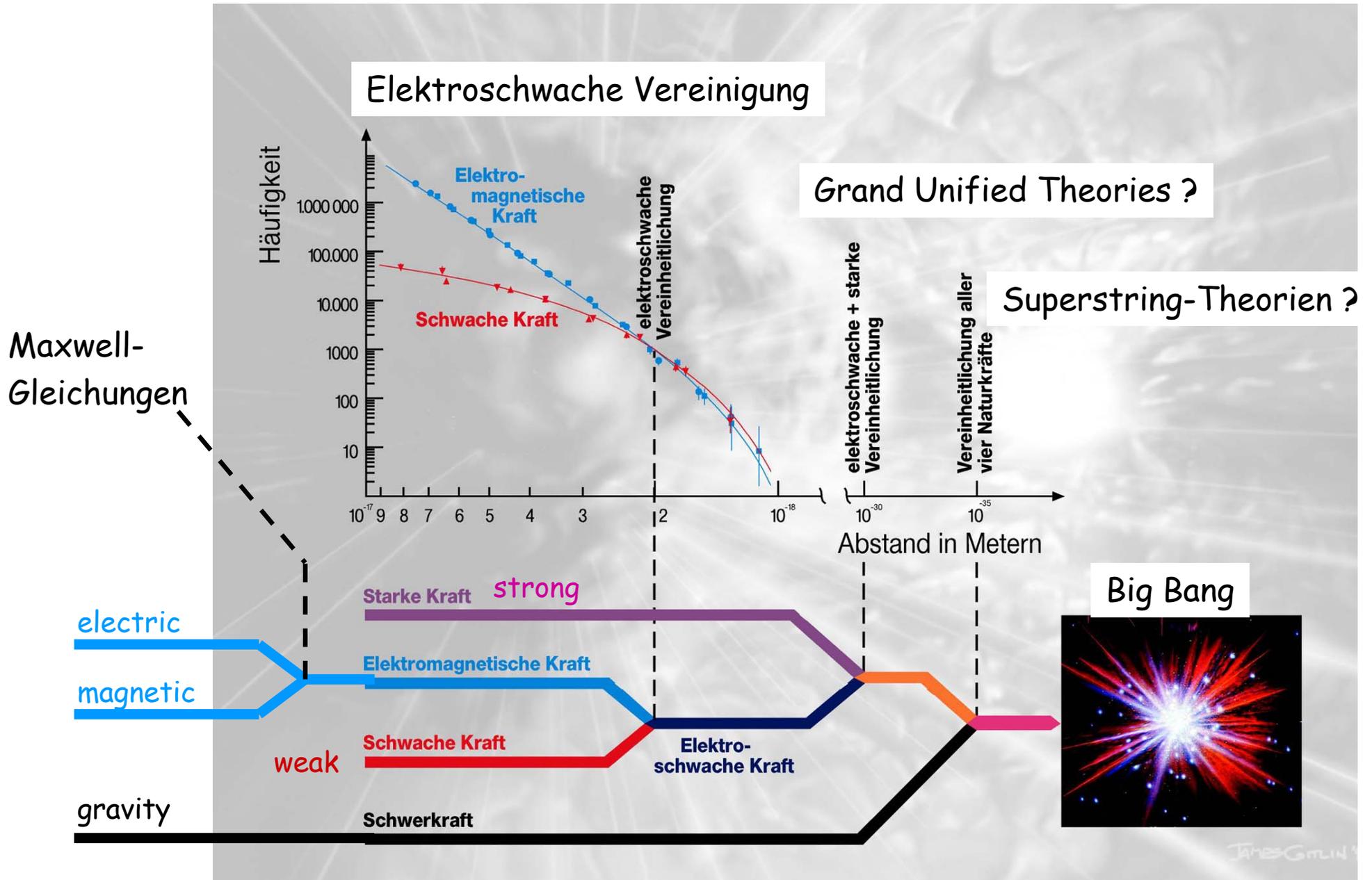
Können Neutrinos helfen?

- 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- β -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)xU(1)
Standardmodell-Struktur nicht zufällig!

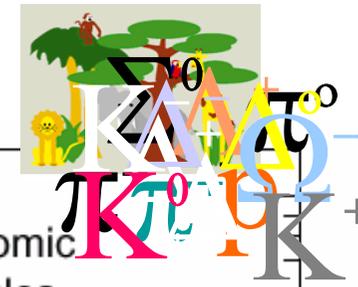
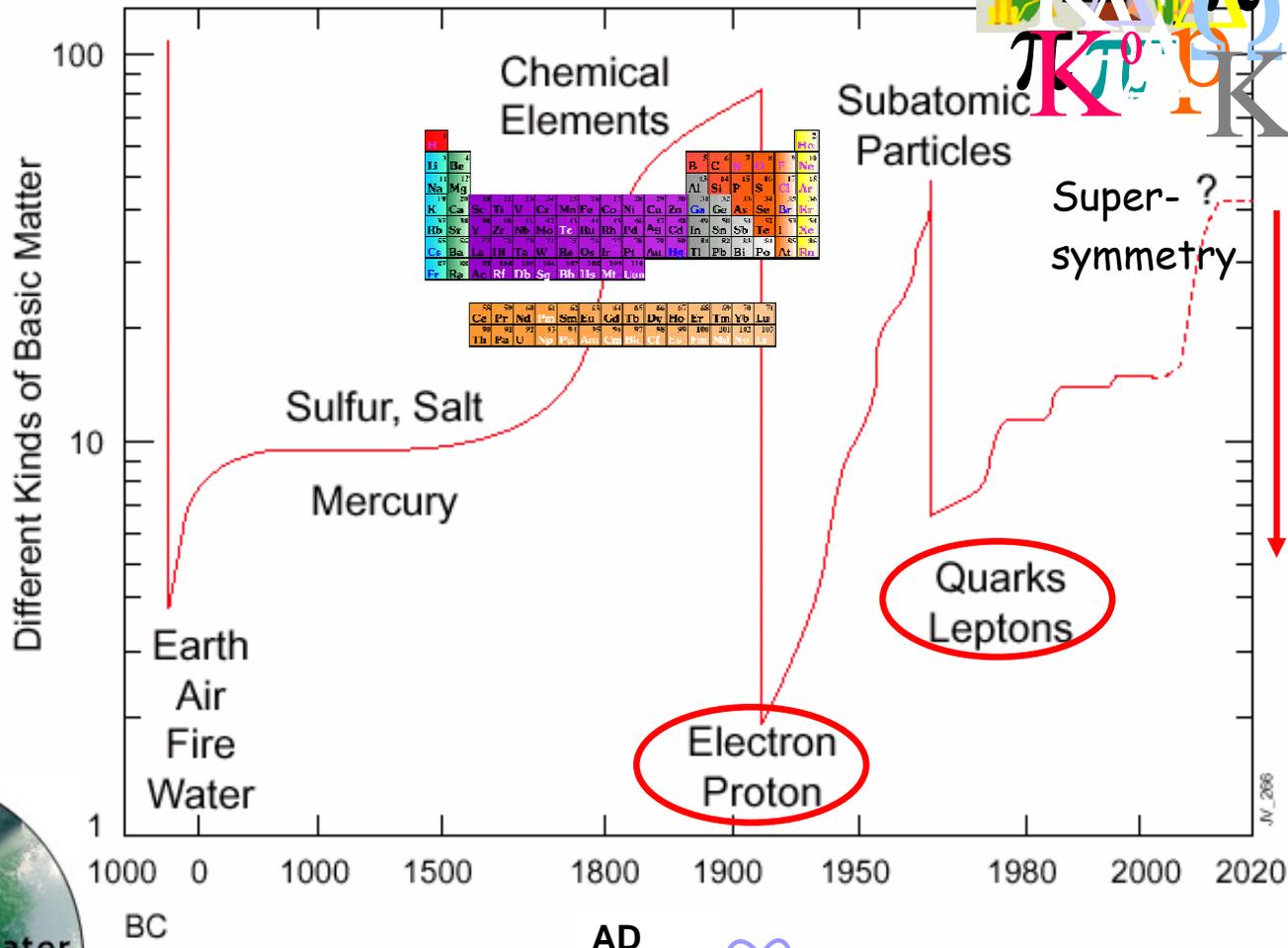
Warum 3 Familien?

keine Ahnung ...

(Auch nicht in Erweiterungen des Standardmodells)

History of basic building blocks of matter

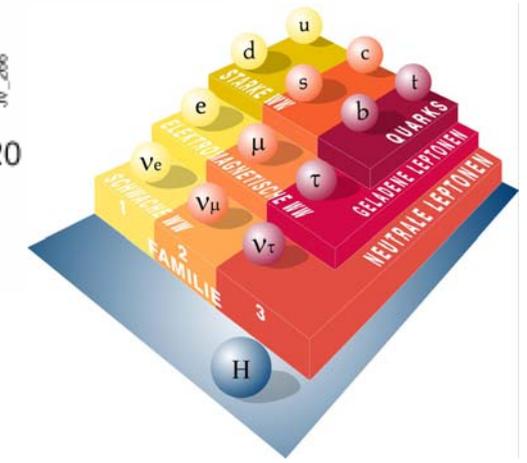
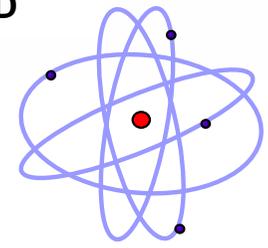
motivation:
find
smallest
possible
number



**Quark and
Lepton
substructure??**



(c) Andy Brice 1998



Einschub: Diplom- und Doktorarbeiten

- z.B. **Diplom mit echten Daten von HERA/ZEUS**
(Datennahme bis Sommer 2007, Datenanalyse bis 2014)
+ **Doktorarbeit mit Daten von LHC/CMS**
(Physikdaten ab 2009/10)

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-Vorbereitungen

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!

