

# DAS STANDARDMODELL DER TEILCHENPHYSIK

- \* Komponenten und Status 2009
- \* Der Weg zum neuen Standardmodell

Gudrun Hiller, Dortmund

# Einige häufige Akronyme

---

SM: Standardmodell

WW: Wechselwirkung(en)

QED: Quantenelektrodynamik (Quantentheorie des Elektromagnetismus)

QCD: Quantenchromodynamik (Quantentheorie der starken WW)

QFT: Quantenfeldtheorie

CP: Charge-conjugation Parity:

Ladungskonjugations+Parität(=Raumspiegelung)

LHC: Large Hadron Collider

EWK: Electroweak: Elektroschwach

SUSY: Supersymmetrie

# Auf der Suche nach Vereinfachung ..

---

Aristoteles (350 a.d.): Wasser, Feuer, Erde, Luft + Äther

Mendeleev (1869): Periodentabelle mit 66 Elementen

heute: > 100 Elemente

Elementarteilchenphysik: Elektron (1897), Proton (1919), Neutron (1932), Positron (1932), Myon (1937), Neutrino (1956), Quarks (1964), CP-Verletzung (1964), ...

Die Elementarteilchenphysik verfolgt eine Beschreibung aller mikroskopischer Naturvorgänge basierend auf wenigen "fundamentalen" Grundelementen, wie Bausteinen (E-Teilchen) und Prinzipien (Symmetrien).

Elementarteilchen = Teilchen ohne Substruktur

(E-Teilchen können zerfallen)

# Untersuchung des Mikrokosmos

---

Untersuche Protonen mit "Mikroskop" Licht der Wellenlänge  $\lambda$ .

Für  $\lambda \simeq d_{proton}$  wird das Proton vermessen.

(Größe des Protons  $d_{proton} \sim 1\text{fm} = 1\text{Femtometer} = 10^{-15}\text{m}$ ).

Für  $\lambda \ll d_{proton}$  wird seine Substruktur (Quarks, Gluonen) vermessen.

Wellenausbreitung:  $\lambda \cdot f = c$ .

( $c$ : Lichtausbreitungsgeschwindigkeit im Vakuum)

Quantenmechanik: Energie  $E \simeq \hbar\omega$ ;  $\omega = 2\pi f$

( $\hbar = h/(2\pi)$ : Plancksches Wirkungsquantum)

$$\lambda \propto 1/E$$

Elementarteilchenphysik=Hochenergiephysik

---

In der Hochenergiephysik wird mit natürlichen Einheiten gerechnet:

$$c = \hbar = 1.$$

Masse hat dann dieselbe Einheit wie Energie  $E = mc^2$ , Länge und Zeit dann die einer inversen Energie  $\ell = \hbar c/E$  bzw  $\tau = \hbar/E$ .

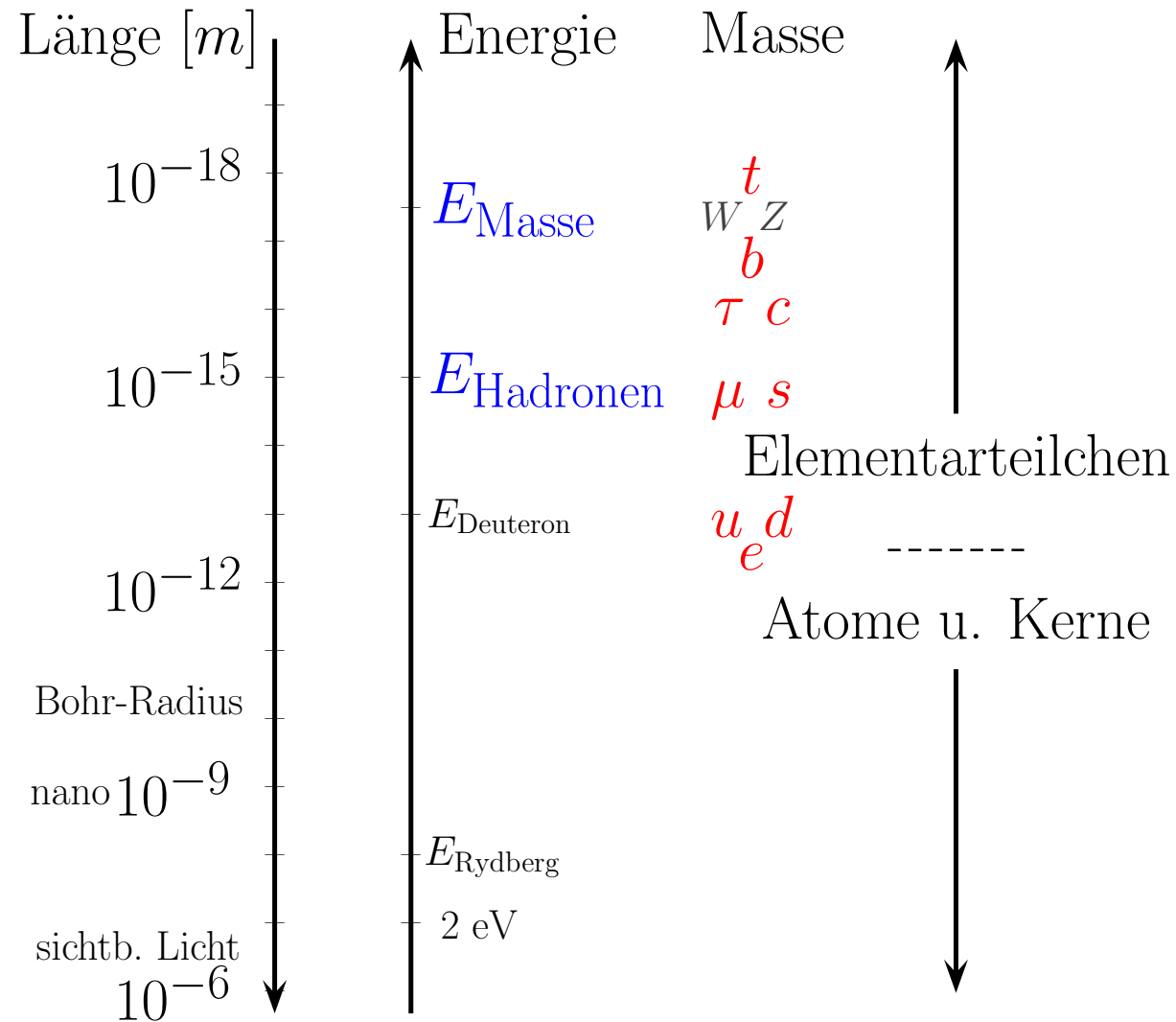
Die Grundeinheit ist Elektronenvolt eV. Das Proton wiegt dann etwa 1 GeV (Giga=  $10^9$ ).

Umrechnung:  $\hbar c (= 1) = 197 \text{ fm} \cdot \text{MeV}$ . (Mega=  $10^6$ )

Übersicht und Umrechnungen Einheiten; siehe zum Beispiel bei der Particle Data Group

<http://pdg.lbl.gov/2009/reviews/rpp2009-rev-phys-constants.pdf>

# Kleinste Abstände=höchste Energien



# Das Standardmodell der Teilchenphysik I

---

Zutaten: Quantenmechanik, Relativitätstheorie, Endlichkeit der Vorhersagen; Teilchenerzeugung und -vernichtung

## Renormierbare Quantenfeldtheorie im vierdimensionalen Minkowskiraum $(t, x, y, z)$

Fundamentale Freiheitsgrade (+ Antiteilchen):

- \* Materieteilchen: Quarks und Leptonen (Fermionen, Spin 1/2)
- \* Träger der fundamentalen Wechselwirkungen (stark, schwach, elektromagnetisch) (Bosonen, Spin 1)

Das Standardmodell ist eine genauestens überprüfte Naturbeschreibung bis etwa  $10^{-18}$  m, d.h., 100-200 GeV.



Die bekannten fundamentalen Materieteilchen (Quarks, Leptonen) gibt es in 3 Generationen, nach aufsteigender Masse:

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}; \quad \begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}$$

\* Quarks: 6 Flavors: up, down, strange, charm, beauty, top; Nehmen an allen Wechselwirkungen teil. Flavor- und Generationsänderung nur in schwacher WW. Bereich:  $m_{up} \sim 2 \text{ MeV}$  bis  $m_{top} = 172 \text{ GeV}$

\* Leptonen; nehmen an allen Wechselwirkungen teil ausser der starken WW. Bereich:  $\sqrt{\Delta m_{\nu 21}^2} \sim 9 \text{ meV}$  (milli!);  $m_\tau = 1.8 \text{ GeV}$

Generationsstruktur erlaubt neue Phänomene: Verletzung der CP-Symmetrie im Quarksektor bei mindestens 3 Generationen.

# CP-Symmetrie ist verletzt!

- 1964 Entdeckung in der Kaon-Mischung  $K_L \rightarrow \pi\pi$ .

Kaon=Bindungszustand mit strange Quarks.

- 1967 Sakharov: CP-Verletzung ist notwendig um den beobachteten Überschuss an Materie über Antimaterie im Universum zu erklären.

- 2001-heute in  $B\bar{B}$ -Mischung  $\bar{B}, B$ =Bindungszustand mit  $b$ -, Anti- $b$ -Quarks.



- 2004-heute in  $B$ -Zerfällen  $A_{CP}(B \rightarrow K^\pm \pi^\mp) = -0.098 \pm 0.011$   
"  $B \rightarrow K^+ \pi^-$  ist häufiger als  $\bar{B} \rightarrow K^- \pi^+$  "



## The Nobel Prize in Physics 2008

"for the discovery of the mechanism of spontaneous broken symmetry in subatomic physics"

"for the discovery of the origin of the broken symmetry which predicts the existence of at least three families of quarks in nature"



Photo: University of Chicago

**Yoichiro Nambu**

🕒 1/2 of the prize



Photo: KEK

**Makoto Kobayashi**

🕒 1/4 of the prize



Photo: Kyoto University

**Toshihide Maskawa**

🕒 1/4 of the prize

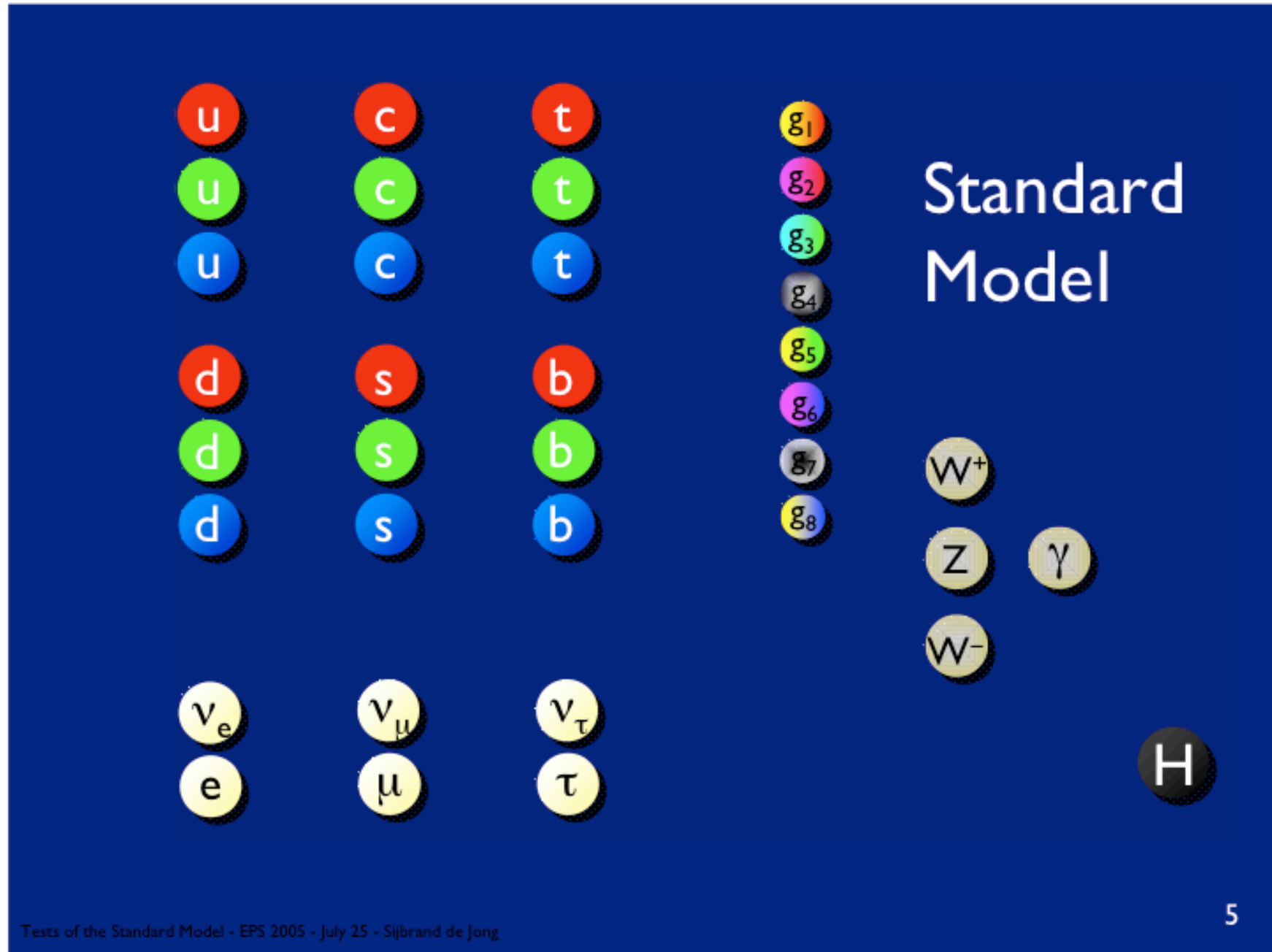
Kobayashi und Maskawa, Prog.Theor.Phys 49 (1973) 652

- \*Elektromagnetismus (QED): das Photon, masselos; koppelt an die elektrische Ladung, also alle Materieteilchen ausser den Neutrinos.
- \*Starke Wechselwirkung (QCD): Gluonen (8 Stck)., masselos; koppeln an die starke Ladung, also an sich selbst (!) und an die Quarks. Verantwortlich für die Bindung von Quarks und Gluonen zu Hadronen (z.B., Proton, Neutron, Pion,..)
- \*Schwache Wechselwirkung:  $W^\pm$ ,  $Z^0$  Bosonen, massiv, koppeln an die schwache Ladung, also an sich selbst und Materie ( $W$ 's nur an linkshändige Teilchen);  $m_W = 80 \text{ GeV}$ ,  $m_Z = 91 \text{ GeV}$ .

# Subatomares Periodensystem – Miniausschnitt

Particle	Symbol	Anti-particle	Makeup	rest mass MeV/c <sup>2</sup>	S	C	B	Lifetime	Decay Modes
<a href="#">Pion</a>	$\pi^+$	$\pi^-$	$u\bar{d}$	139.6	0	0	0	$2.60 \times 10^{-8}$	$\mu^+ \nu_\mu$
<a href="#">Pion</a>	$\pi^0$	Self	$\frac{u\bar{u} + d\bar{d}}{\sqrt{2}}$	135.0	0	0	0	$0.83 \times 10^{-16}$	$2\gamma$
<a href="#">Kaon</a>	$K^+$	$K^-$	$u\bar{s}$	493.7	+1	0	0	$1.24 \times 10^{-8}$	$\mu^+ \nu_\mu, \pi^+ \pi^0$
<a href="#">Kaon</a>	$K_S^0$	$K_S^0$	$1^*$	497.7	+1	0	0	$0.89 \times 10^{-10}$	$\pi^+ \pi^-, 2\pi^0$
<a href="#">Kaon</a>	$K_L^0$	$K_L^0$	$1^*$	497.7	+1	0	0	$5.2 \times 10^{-8}$	$\pi^+ e^- \bar{\nu}_e$
<a href="#">Eta</a>	$\eta^0$	Self	$2^*$	548.8	0	0	0	$< 10^{-18}$	$2\gamma, 3\mu$
<a href="#">Rho</a>	$\rho^+$	$\rho^-$	$u\bar{d}$	770	0	0	0	$0.4 \times 10^{-23}$	$\pi, \pi$
<a href="#">Phi</a>	$\phi$	Self	$s\bar{s}$	1020	0	0	0	$20 \times 10^{-23}$	$K^+ K^-, K^0 \bar{K}^0$
<a href="#">D</a>	$D^+$	$D^-$	$c\bar{d}$	1869.4	0	+1	0	$10.6 \times 10^{-13}$	$K^+ \pi^-, e^+ \pi^-$
<a href="#">D</a>	$D^0$	$\bar{D}^0$	$c\bar{u}$	1864.6	0	+1	0	$4.2 \times 10^{-13}$	$[K, \mu, e]^+ \pi^-$
<a href="#">D</a>	$D_S^+$	$D_S^-$	$c\bar{s}$	1969	+1	+1	0	$4.7 \times 10^{-13}$	$K^+ \pi^-$
<a href="#">J/Psi</a>	$J/\psi$	Self	$c\bar{c}$	3096.9	0	0	0	$0.8 \times 10^{-20}$	$e^+ e^-, \mu^+ \mu^-, \dots$
<a href="#">B</a>	$B^-$	$B^+$	$b\bar{u}$	5279	0	0	-1	$1.5 \times 10^{-12}$	$D^0 \pi^+$
<a href="#">B</a>	$B^0$	$\bar{B}^0$	$b\bar{d}$	5279	0	0	-1	$1.5 \times 10^{-12}$	$D^0 \pi^+$
<a href="#">Upsilon</a>	$Y$	Self	$b\bar{b}$	9460.4	0	0	0	$1.3 \times 10^{-20}$	$e^+ e^-, \mu^+ \mu^-, \dots$

# Fundamentale Bausteine & Wechselwirkungen



# Wechselwirkungen durch lokale Symmetrien

---

Wechselwirkungen werden im SM durch lokale(=ortsabhängige)<sup>†</sup> Symmetrien beschrieben. Derartige Theorien heissen Eichtheorien.

Beispiel QED: Die Grundgleichungen seien invariant, d.h., behalten ihre Form unter orts( $x$ )-abhängigen Drehungen mit Phase  $\alpha(x)$ :

$$\Psi_e(x) \rightarrow \Psi'_e(x) = e^{i\alpha(x)} \Psi_e(x) \quad \Psi_e^{(')} (x): \text{Elektronfeld}$$

$\Psi_e^*(x)\Psi_e(x) = \Psi_e'^*(x)\Psi_e'(x)$  ist invariant, Terme mit Ableitungen wie  $\Psi_e^*(x)(d\Psi_e(x)/dx)$  i.A. nicht! (Produktregel)

Die Forderung nach Forminvarianz unter Phasendrehungen sagt das Photon und die Struktur der elektromagnetischen WW vorher.

Die Menge aller eindimensionalen Phasendrehungen ist die unitäre Gruppe  $U(1)$ . Phasenfaktoren  $e^{i\alpha(x)}$  sind Elemente daraus.

<sup>†</sup>”Ort” heisst hier 4-dimensionale Raum-Zeit.

## Renormierbare Quantenfeldtheorie im vierdimensionalen Minkowskiraum + lokale Symmetrie

$$\underbrace{SU(3)}_{\text{starke WW}} \times \underbrace{SU(2) \times U(1)}_{\text{elektroschwache WW}}$$

$SU(N)$ : Menge der  $N$ -dimensionalen unitären Transformationen mit Determinante  $=+1$ . Eine Matrix  $V$  heisst unitär, falls  $V \cdot (V^T)^* = 1$

Anzahl der Wechselwirkungsträger:  $N^2 - 1$

$SU(3)$ : Eichtheorie der starken WW (QCD);  $N = 3$ : Anzahl der Farben; 8 Gluonen

Vorhersage: Alle Wechselwirkungsträger und Materieteilchen sind masselos. Dies ist im Widerspruch zur Beobachtung. Lösung  $\rightarrow$



Die Grundgleichungen sind nach wie vor forminvariant unter der sog. Eichgruppe, aber der Grundzustand, das Vakuum, ist es nicht! Dies nennt man spontane Symmetriebrechung.

## Renormierbare Quantenfeldtheorie im vierdimensionalen Minkowskiraum + lokale Symmetrie mit spontaner Symmetriebrechung

$$\underbrace{SU(3)}_{\text{starke WW}} \times \underbrace{SU(2) \times U(1)}_{\text{elektroschwache WW}} \rightarrow SU(3) \times U(1)_{em}$$

Der Grundzustand ist nur noch invariant unter der QCD und dem Elektromagnetismus.

Im Standardmodell ist dies durch das Postulat eines weiteren Teilchens realisiert, das Higgsboson.

# Massengeneration im SM: das Higgsboson

---

Das Higgsboson: Spin 0, es nimmt an der elektroschwachen WW teil.

Materie und  $W$ - und  $Z$ -Bosonen bekommen Masse durch Ankopplung an das Higgsboson.

Das Standardmodell sagt die Kopplungen des Higgsbosons vorher, aber nicht seine Masse.

Das Higgsboson ist nicht beobachtet, und Gegenstand intensiver Suchen.

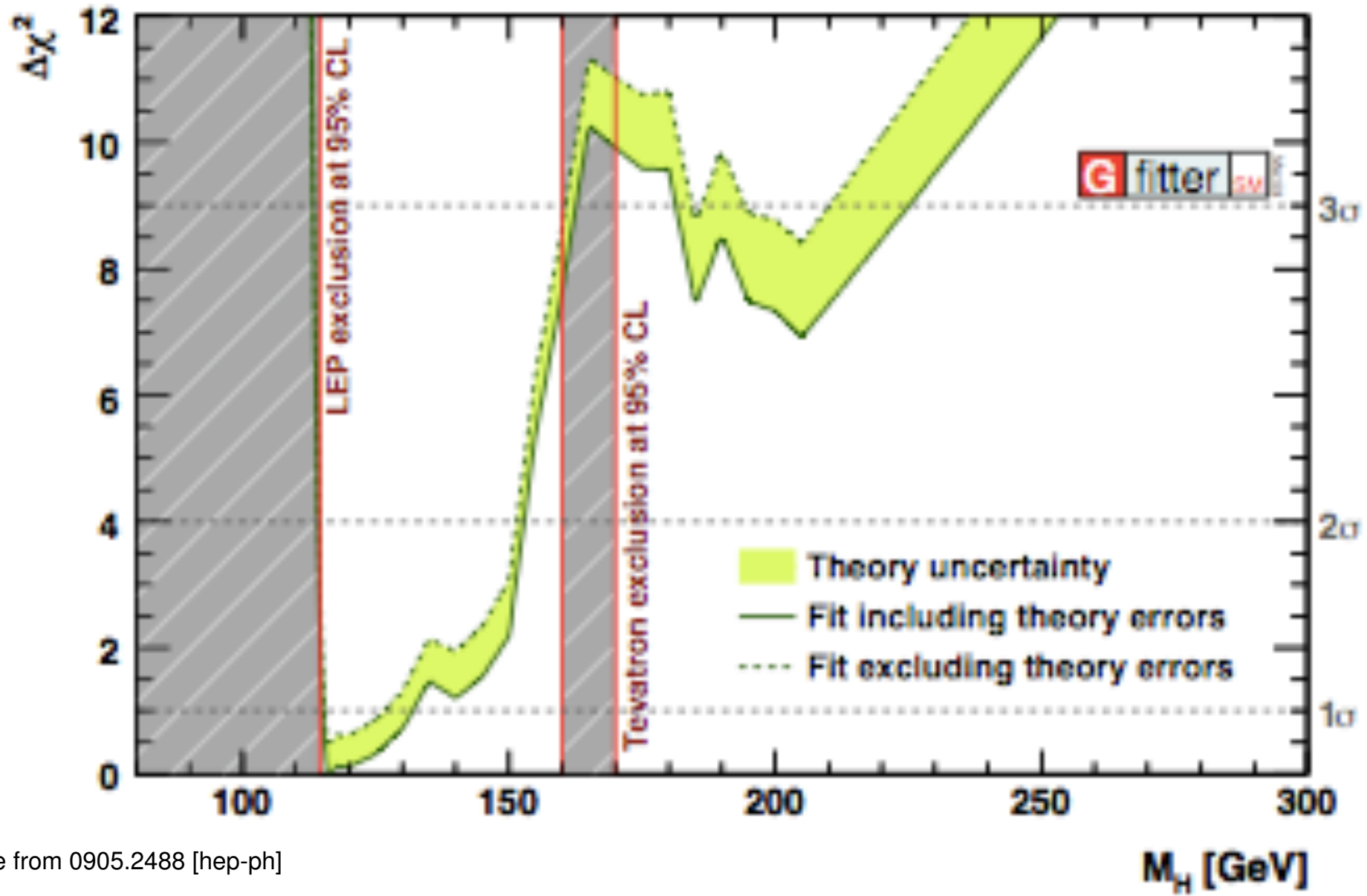


figure from 0905.2488 [hep-ph]

# Zusammenfassung: Standardmodell

---

Das heutige SM der Teilchenphysik ist eine Eichtheorie der starken und elektroschwachen WW mit 3 Generationen von Materiefeldern (Quarks und Leptonen).

Damit lassen sich im Prinzip alle Vorgänge durch insgesamt nur 18 Parameter beschreiben: 10=(6 Quarkmassen +4 Quarkmischung), 3 Leptonmassen, je 1 Kopplungskonstante pro WW,  $m_W$  und  $m_H$ . Das SM hat daher eine starke Vorhersagekraft.

Es ist eine sehr gut funktionierende Naturbeschreibung getestet bis etwa  $10^{-18}$  m, d.h., bis zur  $W$ -bosonmasse  $\sim 100$  GeV.

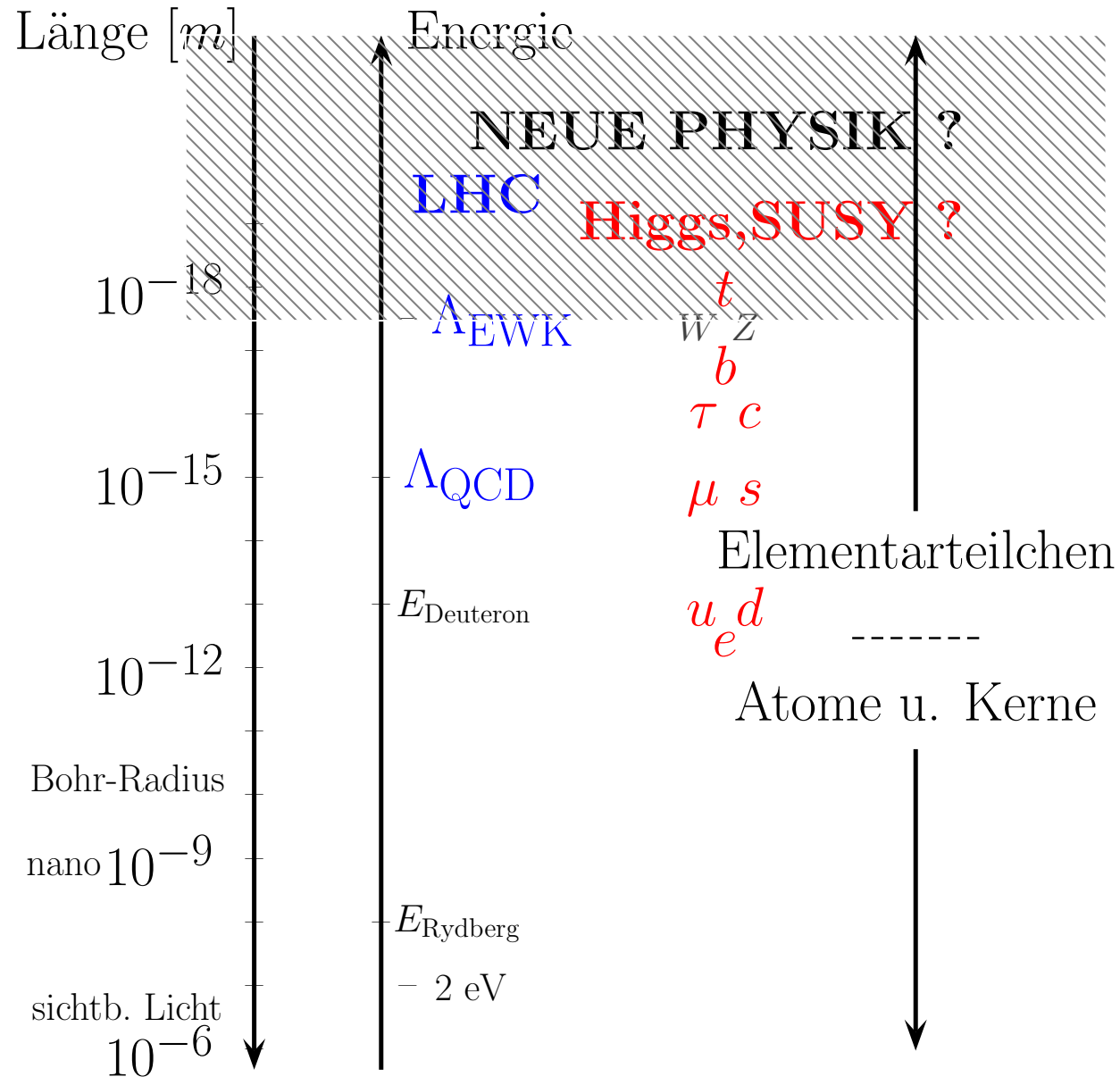
Das Higgsboson ist nicht gefunden.

Was sind die offenen Fragen – außer der Higgsmasse ?

- **Phänomene ausserhalb vom SM:** Gravitation, dunkle Energie, dunkle Materie  $\Omega_{DM} \simeq 22\%$ , Antimaterie zu Materieverhältnis im Universum  $1 : 10^{10}$ , Neutrinomassen
- **Unerklärt im SM:** Vereinigung der Kräfte, Massenspektrum der Quarks  $m_{up}/m_{top} \simeq 10^{-5}$
- **Konsistenzprobleme vom SM:** Warum ist die Higgsmasse nicht riesengroß durch Quantenkorrekturen?

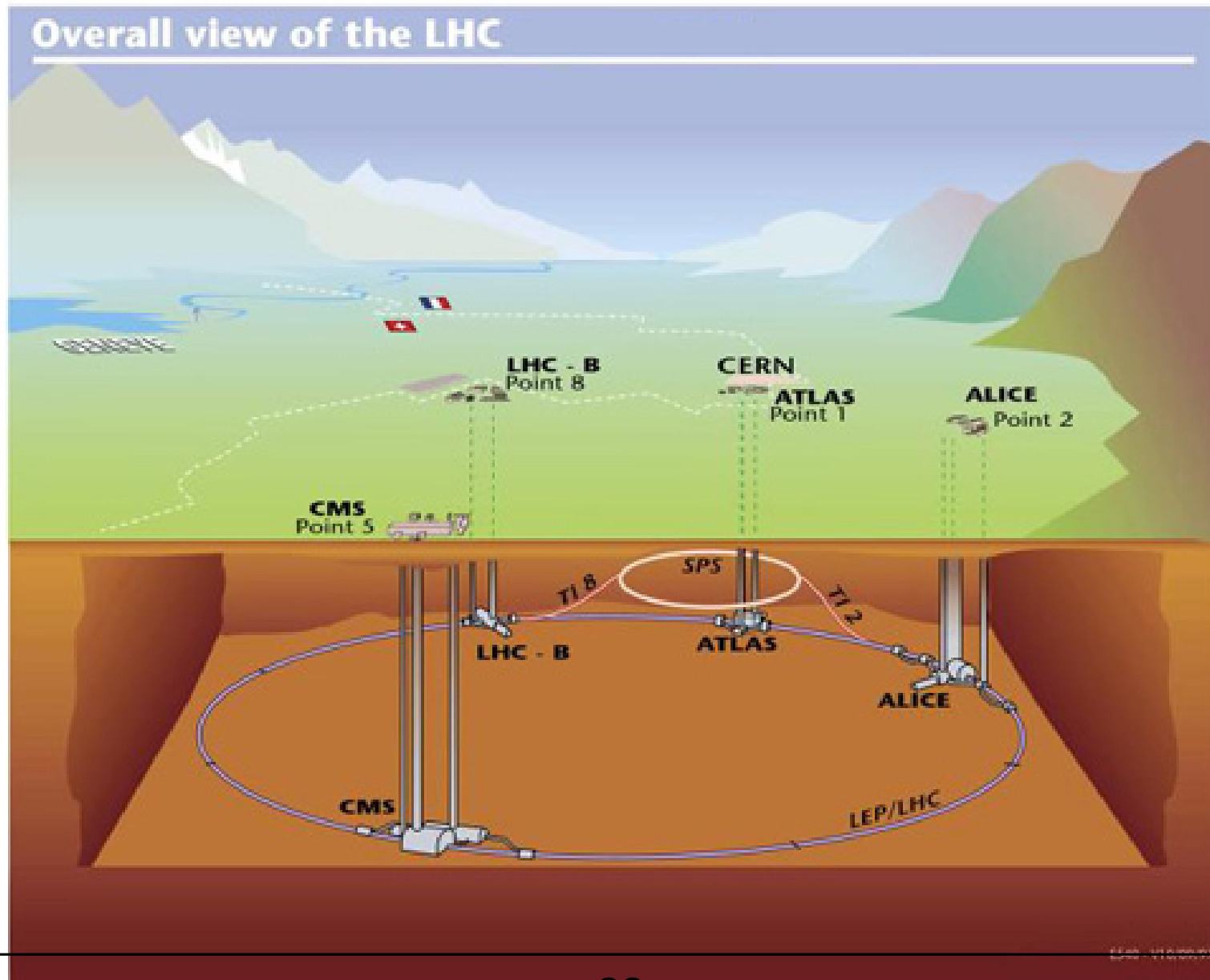
Trotz seines beeindruckenden Erfolges wird das SM als effektive Niederenergietheorie gesehen, welche bei der Skala elektroschwacher Massenerzeugung erweitert wird: Neue Physik!

# Physik bei höchsten Energien



pp-collisions with 7 TeV on 7 TeV

1 TeV = 1000  $m_{proton}$



# Was ist der aller kleinste Abstand ?

---

Klassische Gravitation nach Newton:

$G_N$ : Newtons Gravitationskonstante

$$V(r) = G_N \frac{m_1 m_2}{r}$$

**Plancklänge**  $10^{-35} m$

**Planckmasse**  $\Lambda = \sqrt{\hbar c / G_N} = 10^{19} \text{ GeV}$

Einheiten: Protonmasse  $\simeq 1 \text{ GeV}$ ;  $1000 \text{ GeV} = 1 \text{ TeV}$ ; Tera= $10^{12}$

Hier wird die Gravitation genauso stark wie die anderen Kräfte.



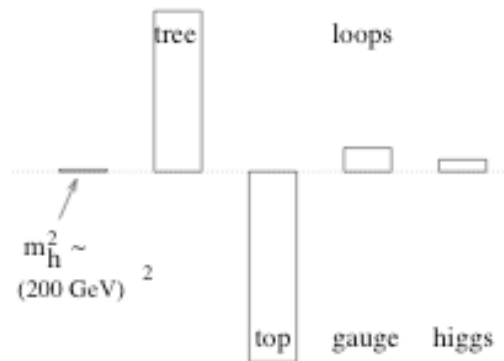
# Was passiert bei Energien $\geq \Lambda_{EWK} \sim E_{Masse}$ ?

---

- **Wo ist das Higgs ?**  $m_h < \mathcal{O}(200)$  GeV (Fits+direkte Suchen)
- **Standardmodell ist unnatürlich oberhalb von TeV-Energien**

Quantenkorrekturen zur Higgsmasse  $\delta m_h^2 \propto \Lambda^2 \gg \Lambda_{EWK}^2$  !

$m_h^2 = m_0^2 + \delta m_h^2$  extremstes Ausbalancieren nötig



- **Neue Physik bei  $\Lambda_{EWK}$  als Lösung:**  
Supersymmetrie, extra Raumdimensionen, neue WWs,...

- Das Standardmodell der Teilchenphysik ist eine überschaubare und gut funktionierende Beschreibung mikroskopischer Vorgänge bis hin zu Energien von  $\mathcal{O}(100)\text{GeV} \sim m_W$ .
- Die elektroschwache Skala bei TeV-Energien wird erstmalig am LHC genau untersucht werden. Dies ermöglicht viele offene Fragen und Probleme des SMs zu klären, und es besteht die aufregende Möglichkeit, neben dem Higgsboson neue Materie und/oder neue WVs, oder Symmetrien zu entdecken!
- Neben dem LHC gibt es eine Vielzahl weiterer Bereiche und Präzisionsexperimente, deren Befunde Richtungen zur Naturbeschreibung jenseits des SMs vorgeben können.