

Einführung in die moderne Teilchenphysik

Dr. Stefan Schael
Max-Planck Institut für Physik
Werner Heisenberg Institut
Föhringer Ring 6
D-80805 München

1. Das Standardmodell der Teilchenphysik
2. Teilchenbeschleuniger & Teilchendetektoren
3. Erhaltungssätze und Symmetrien
4. Die elektroschwache Wechselwirkung I & Neutrinos
5. Neutrinos & Die elektroschwache Wechselwirkung II
6. Die elektroschwache Wechselwirkung III
7. B-Physik I & die Entdeckung des Top Quark
8. B-Physik II & CP Verletzung
9. Das ATLAS Experiment
10. Grenzen des Standardmodells

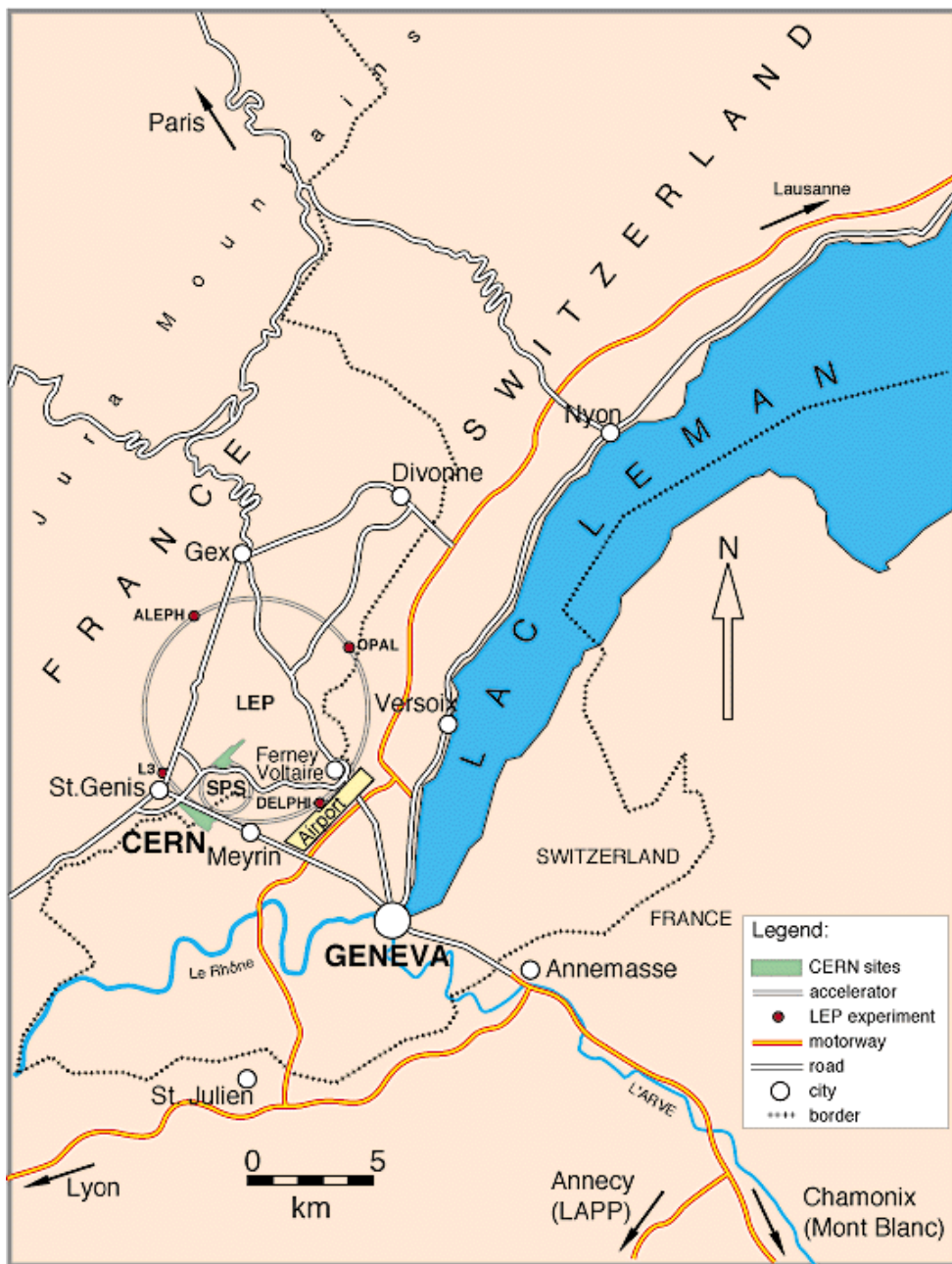
Literatur:

- H. Hilscher, “Elementare Teilchenphysik”, Vieweg,
- E. Lohrmann, “Hochenergiephysik”, Teubner,
- O. Nachtmann, “Elementarteilchenphysik”, Vieweg.

ftp:

[afmp02.mppmu.mpg.de:/pub/stefan/augsburg_ss98/](ftp://afmp02.mppmu.mpg.de:/pub/stefan/augsburg_ss98/)

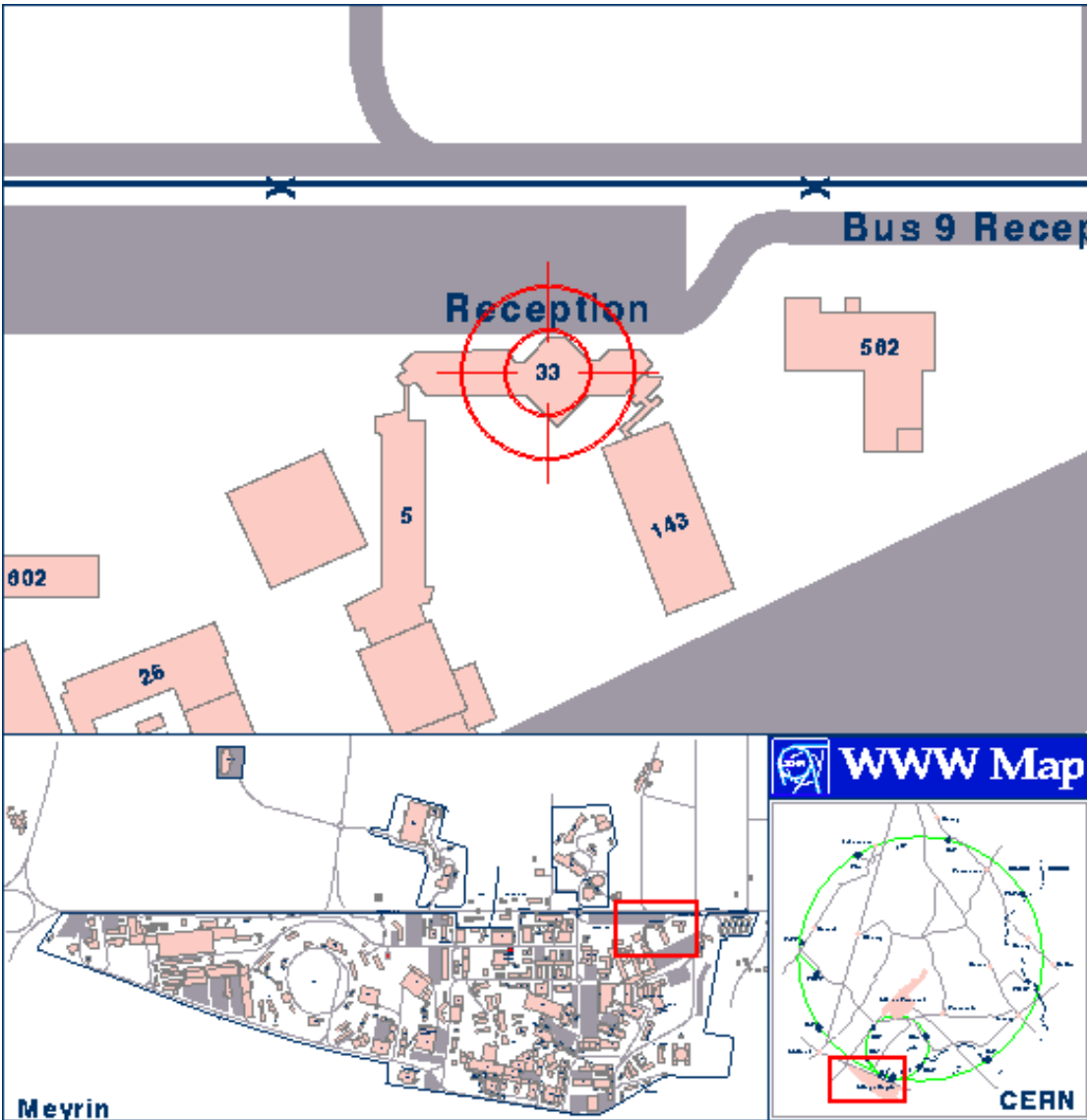
Wo ist CERN ?



Programm:

- CERN-Tour
- Mittagessen in der CERN Kantine
- Besichtigung des ALEPH Experiments und/oder
- Besichtigung der Testaufbauten für ATLAS

Treffen am CERN am 30.10.1998 um 8:30 Uhr, Bld. 33



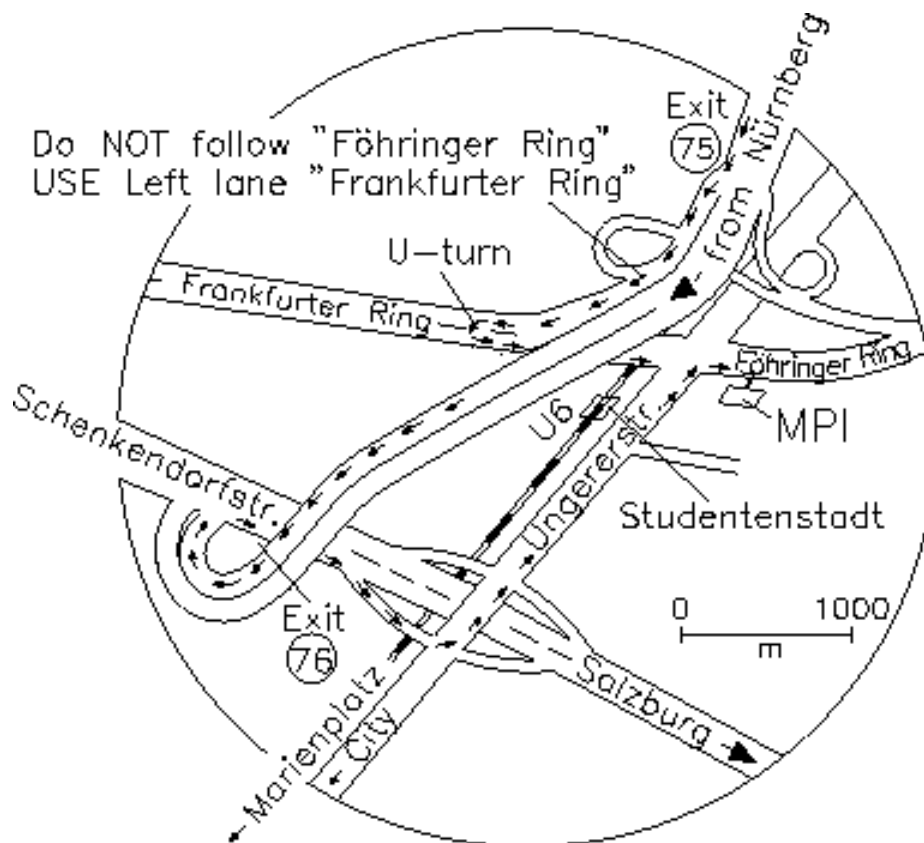
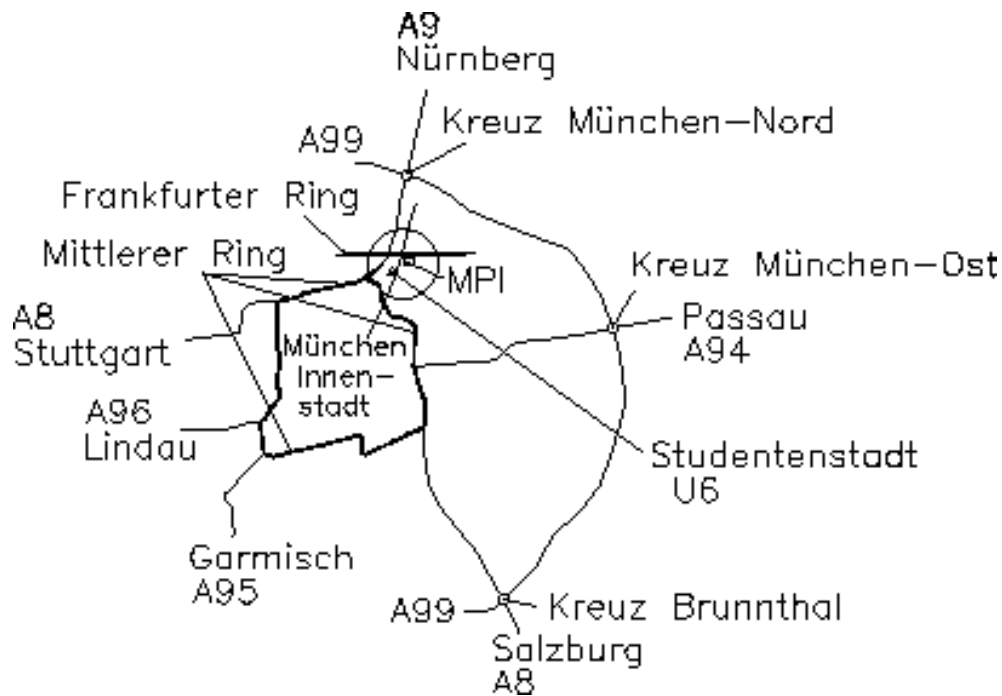
Bei Übernachtung am CERN:

Teilen Sie mir bitte rechtzeitig per E-mail mit, wann Sie am CERN eintreffen.

Weitere Informationen finden sich unter: <http://www.cern.ch>

- Die WWW-Technologie ist am CERN entwickelt worden.
- Leider hat CERN diese Technologie nicht vermarktet sondern verschenkt. Andernfalls könnte sich CERN heute zu einem großen Teil selbst finanzieren.

Das Max-Planck Institut für Physik veranstaltet am **17.10.1998** einen Tag der **Offenen Tür**. Informationen dazu finden sich unter <http://www.mppmu.mpg.de>



Die Grenzen des Standardmodells

Das Standardmodell ist eine lokale Eichtheorie basierend auf den Gruppen $U(1)$, $SU(2)$ und $SU(3)$.

Die Gruppen $U(1) \times SU(2)$ beschreiben die elektroschwache Wechselwirkung und die Gruppe $SU(3)$ die starke Wechselwirkung.

Die fundamentalen Fermionen sind:

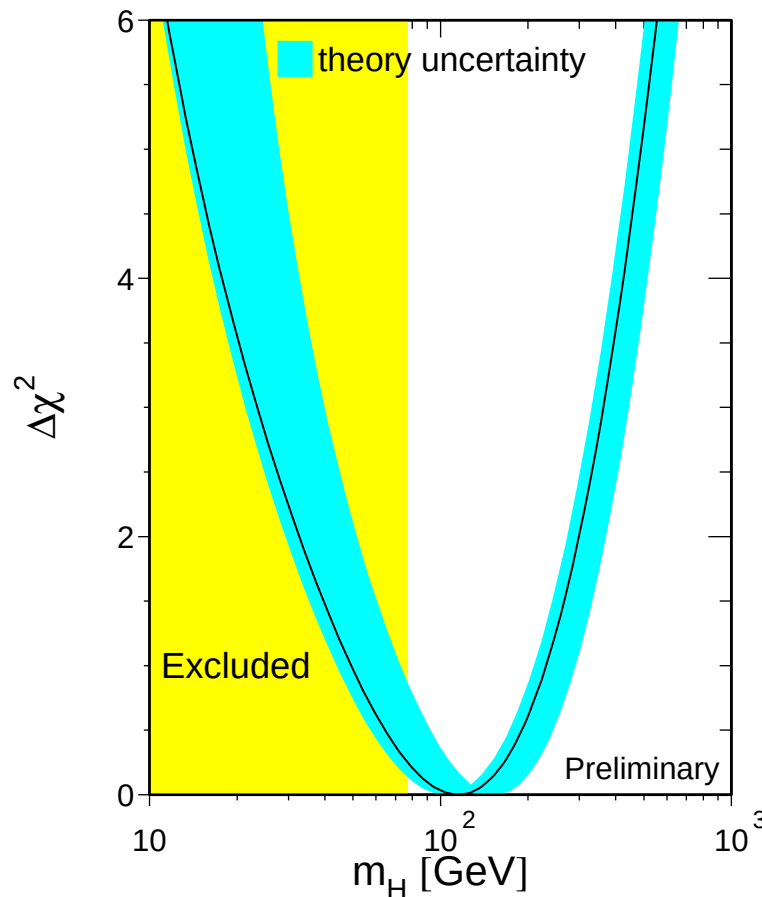
	Leptonen			
Generation	Name	Symbol	Masse [MeV]	elektr. Ladung
I	e-Neutrino	ν_e	$< 15 \cdot 10^{-6}$	0
	Elektron	e^-	0.511	-1
II	μ -Neutrino	ν_μ	< 0.17	0
	Müon	μ^-	105.7	-1
III	τ -Neutrino	ν_τ	< 24	0
	Tau	τ^-	1777	-1

	Quarks			
Generation	Name	Symbol	Masse [MeV]	elektr. Ladung
I	up	u	≈ 5	+2/3
	down	d	≈ 7	-1/3
II	charm	c	≈ 1500	+2/3
	strange	s	≈ 150	-1/3
III	top	t	≈ 180000	+2/3
	beauty	b	≈ 4500	-1/3

Die Träger der Wechselwirkung sind die Eichbosonen:

- Das Photon für die elektromagnetische Wechselwirkung,
- Das $W^{\pm}$ - und Z -Boson für die schwache Wechselwirkung und
- 8 Gluonen für die starke Wechselwirkung.

Um die Eichsymmetrie zu brechen, d.h. den $W^{\pm}$ - und Z -Bosonen eine Masse zu geben hat man den Higgs-Mechanismus eingeführt. Das zugehörige Higgs-Boson ist das einzige im Standardmodell vorhergesagte Teilchen, welches bis heute noch nicht experimentell nachgewiesen wurde.

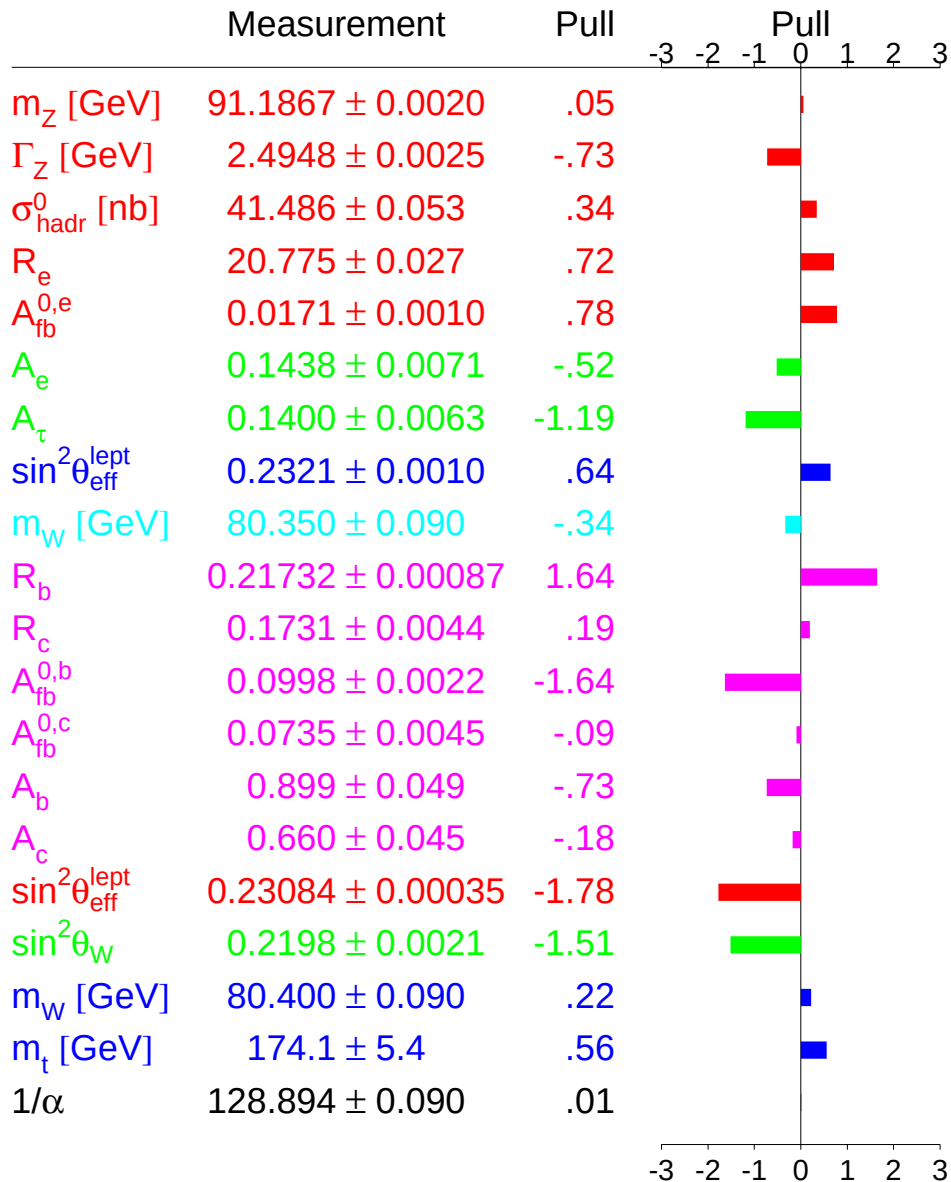


$$m_H = 115^{+116}_{-66} \text{ GeV} < 306 \text{ GeV at } 95\% \text{ CL.}$$

Experimentelle Tests

Die Ergebnisse der LEP-Experimente, von SLD, CDF und D0 haben das Standardmodell auf dem 0.1% Niveau getestet.

Moriond 1998



- Das Standard Modell ist sehr erfolgreich, d.h. von der QED abgesehen gibt es heute keine physikalische Theorie die besser experimentell überprüft ist.

Das Problem:

- Das Standard Modell ist sehr erfolgreich,
aber unschön !

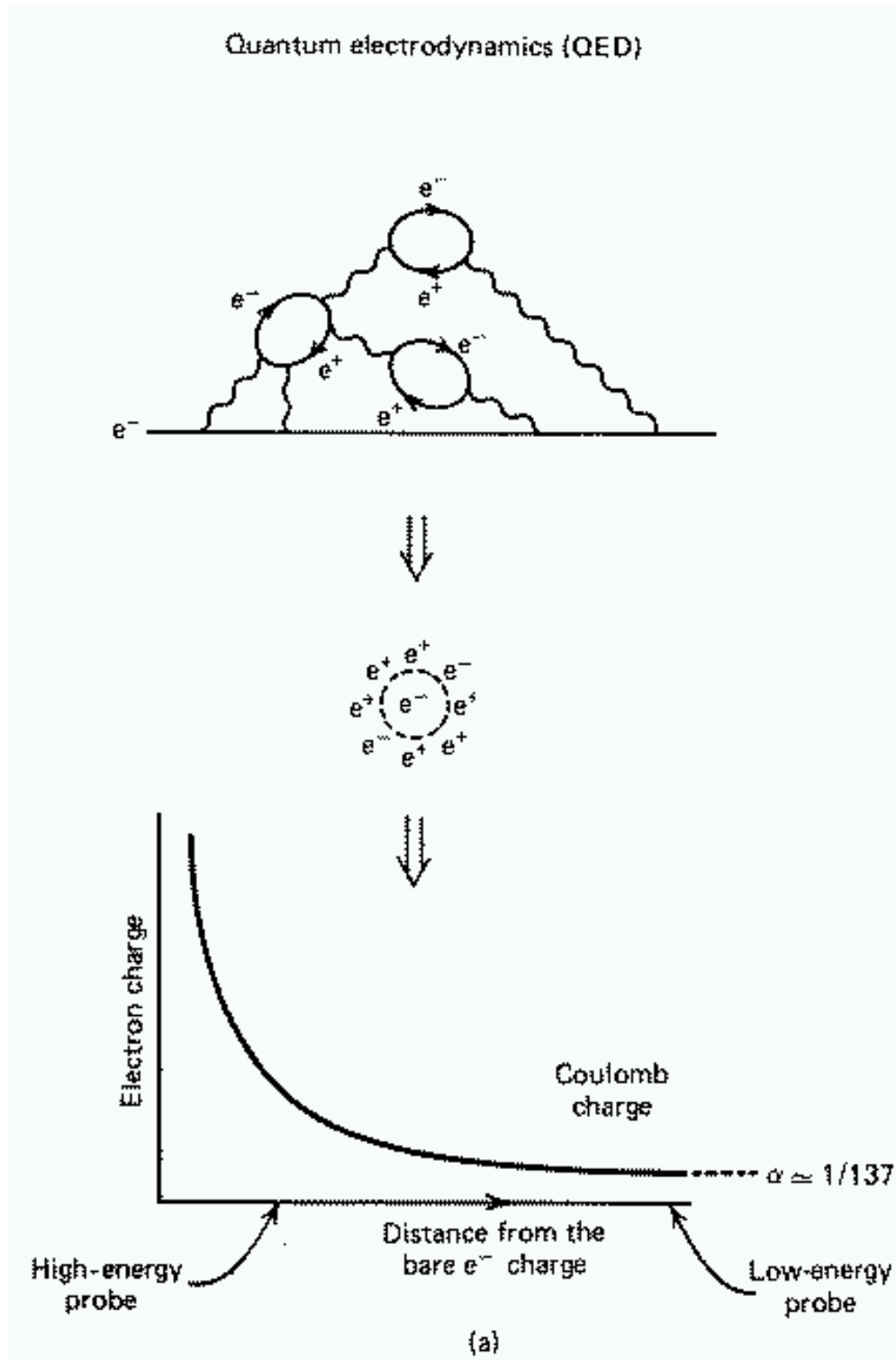
Wir haben mindestens 21 freie Parameter:

- 6 Quark Massen
- 6 Lepton Massen
- 1 Z Boson Masse
- 1 Higgs Masse
- 3 Kopplungskonstanten α , α_s und G_F
- 3 Quarkmischungswinkel, und 1 Phase (CKM-Matrix)

Einige offene Fragen:

- Warum haben Elektron und Proton die gleiche Ladung ?
- Warum gibt es 3 Generationen von Quarks und Leptonen ?
-
-
-
- Welche Möglichkeiten gibt es das Standardmodell
zu erweitern ?

Die Energieabhängigkeit der Kopplungskonstanten



Die Elektronladung hängt vom Abstand der Probe ab.
 Kleine Abstände $\Leftrightarrow$ hoher Impulsübertrag ($\Delta p \Delta x \geq \hbar$)

Die Kopplungskonstante der elektromagnetischen Wechselwirkung ist

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} = \frac{1}{137}$$

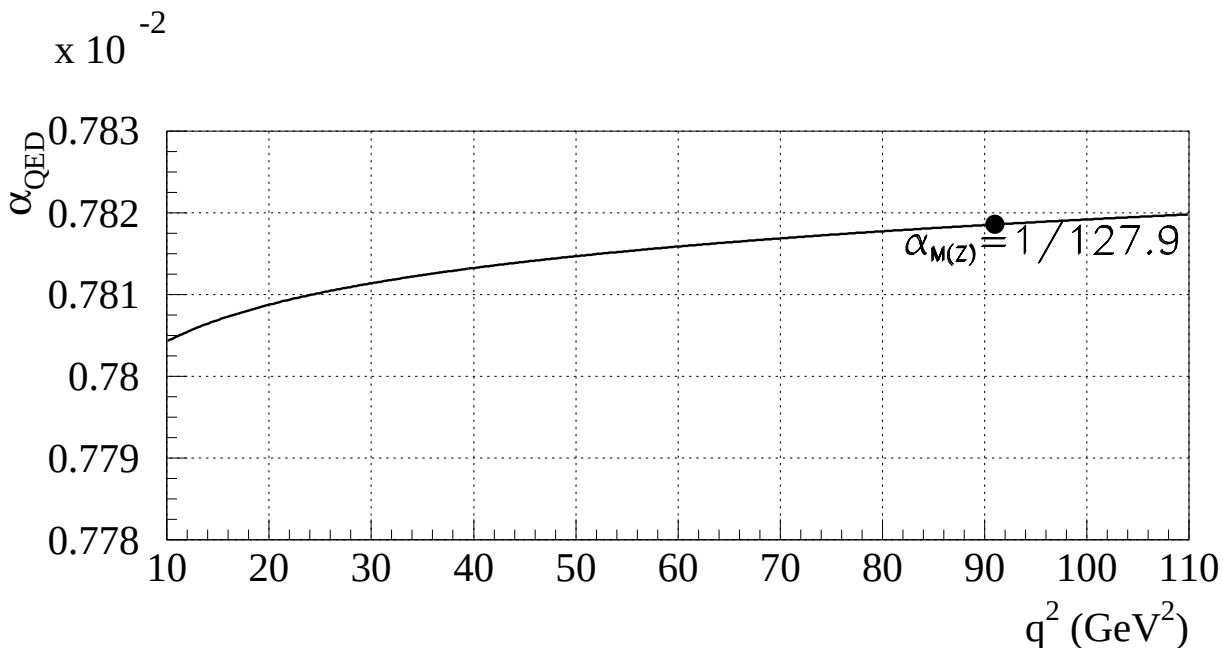
Wir haben gesehen, daß die Elektronladung vom Impulsübertrag q^2 abhängt:

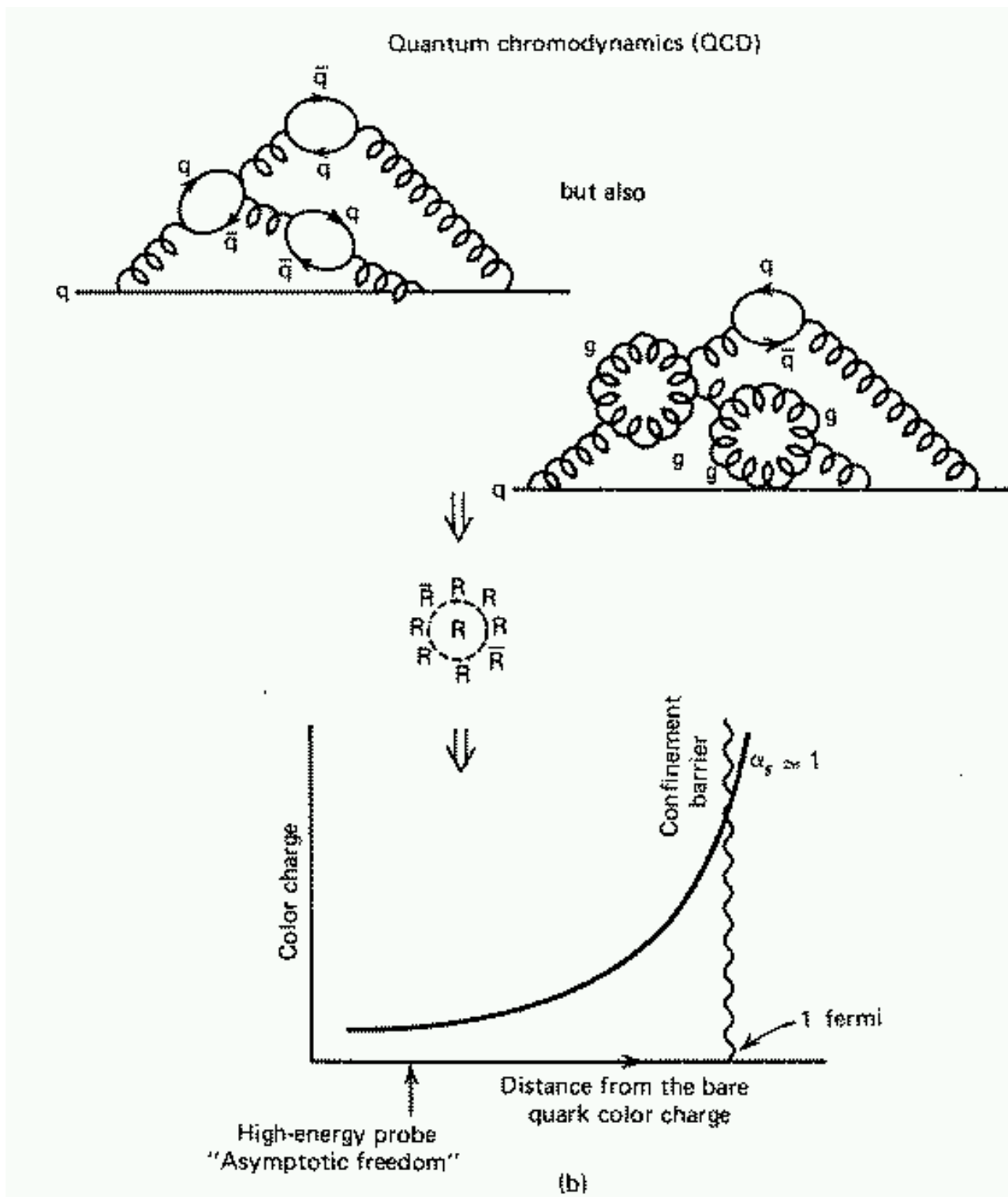
$$e^2(q^2) = e_0^2 \left(\frac{1}{1 - I(q^2)} \right)$$

d.h. $\alpha = \alpha(q^2)$:

$$\alpha(q^2) = \frac{\alpha(\mu^2)}{1 - \frac{\alpha(\mu^2)}{3\pi} \log \left(\frac{q^2}{\mu^2} \right)}$$

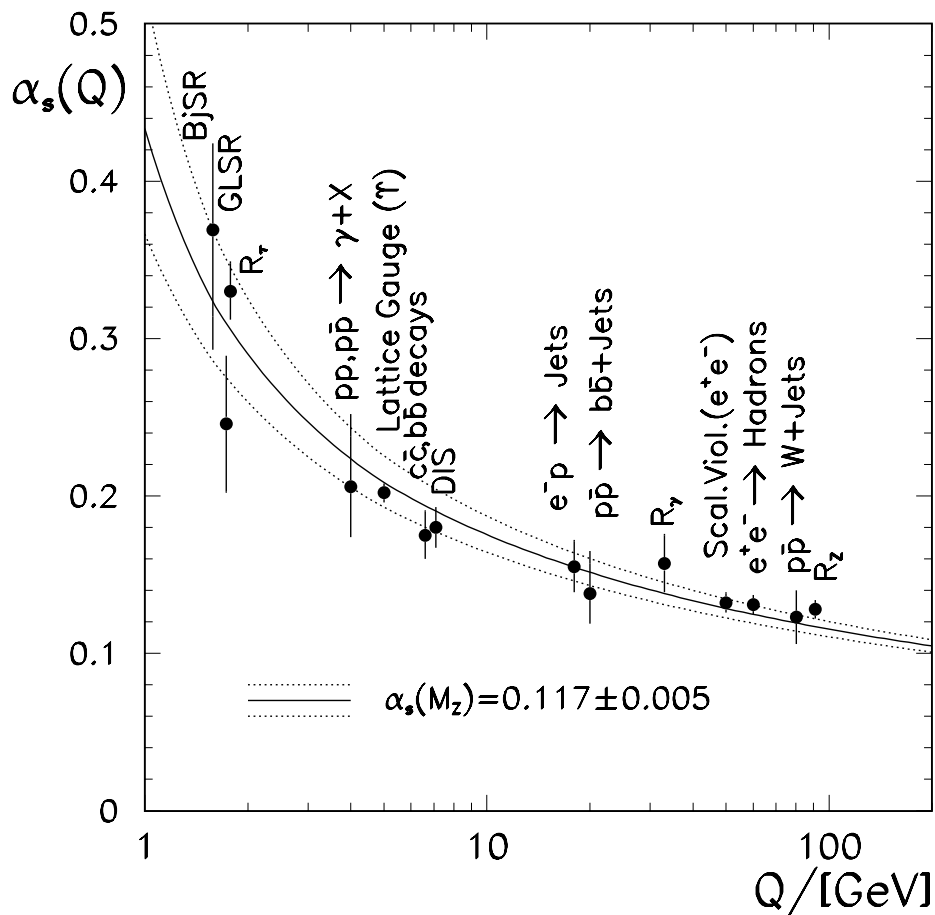
Wenn α bei einer definierten Skala μ^2 gemessen wurde, z.B. bei der Rutherford Streuung kann man $\alpha(q^2)$ bei einer anderen Skala (q^2) vorhersagen.



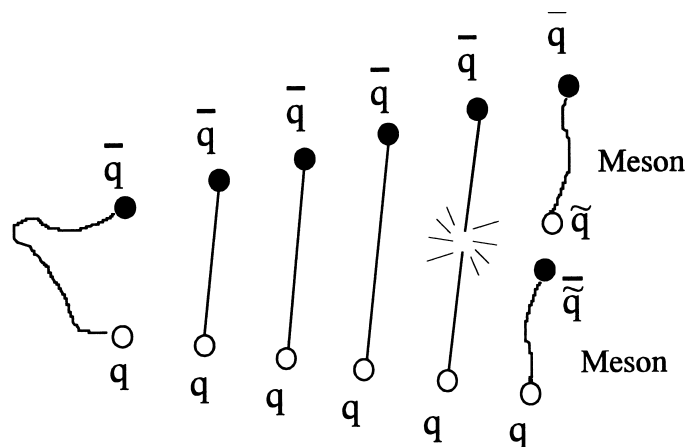


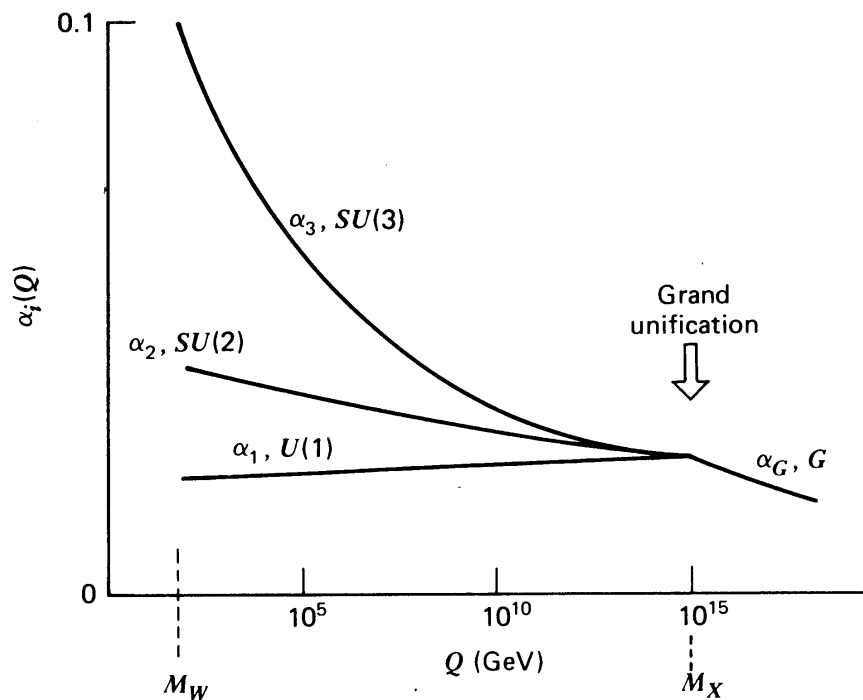
Die Farbladung wächst mit zunehmendem Abstand der Probe an.

Kleine Abstände $\Leftrightarrow$ hoher Impulsübertrag ($\Delta p \Delta x \geq \hbar$)



Für sehr kleine Abstände oder sehr hohe Energien können sich die Quarks frei bewegen ($\alpha_s \rightarrow 0$). Mit zunehmendem Abstand wächst die Energie die erforderlich ist, um ein Quark-Anti-Quark Paar zu trennen. Daher kann man keine einzelnen Quarks beobachten.

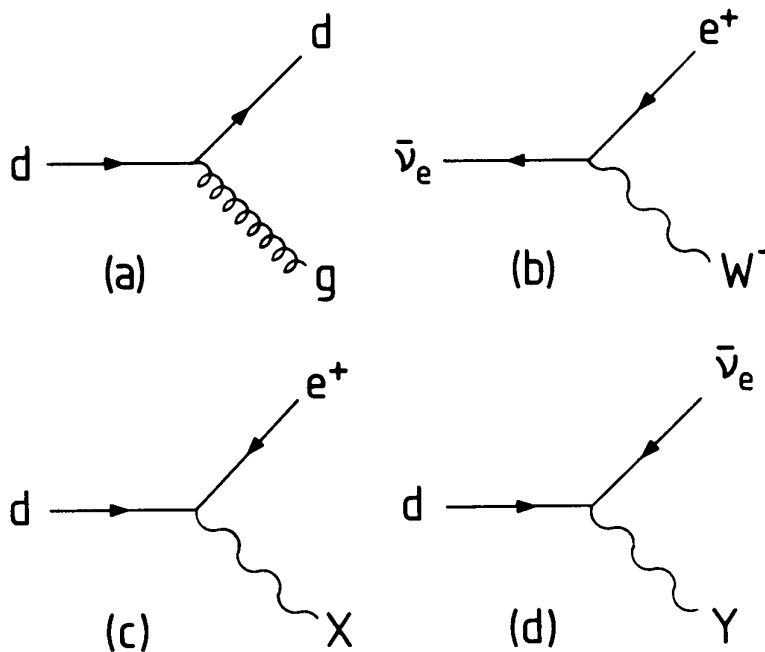




Kann man das Standardmodell in eine große vereinheitlichte Feldtheorie einbetten ?

Der erste Vorschlag dazu stammt von Georgi und Glashow aus dem Jahre 1974 mit der Eichgruppe SU(5):

$$(\mathbf{d}_r, \mathbf{d}_g, \mathbf{d}_b), (e^+, \bar{\nu}_e) \Rightarrow (\mathbf{d}_r, \mathbf{d}_g, \mathbf{d}_b, e^+, \bar{\nu}_e)$$



In diesem Modell sollte es zwei weitere Eichbosonen geben, X und Y mit den elektrischen Ladungen $-4/3$ und $-1/3$ und Massen von

$$M_X \approx M_Y \approx 10^{15} \text{ GeV}$$

Dieses Modell hatte folgende Vorzüge:

- Es erklärte warum die elektrische Ladung von Positron und Proton gleich sind. In dem $SU(5)$ -Modell mußte die Summe der Ladung in einer Familie Null sein.

$$(\textcolor{red}{d}_r, \textcolor{green}{d}_g, d_b, e^+, \bar{\nu}_e) \Rightarrow 3Q_d + e = 0 \Rightarrow Q_d = -\frac{1}{3}$$

d.h. die seltsame Ladung $-1/3$ für das d -Quark ist eine Konsequenz aus der Tatsache, daß es 3 Farbladungen gibt. Mit einer ähnlichen Argumentation findet man $Q_u = +2/3$ und damit

$$Q_p = 2Q_u + Q_d = e$$

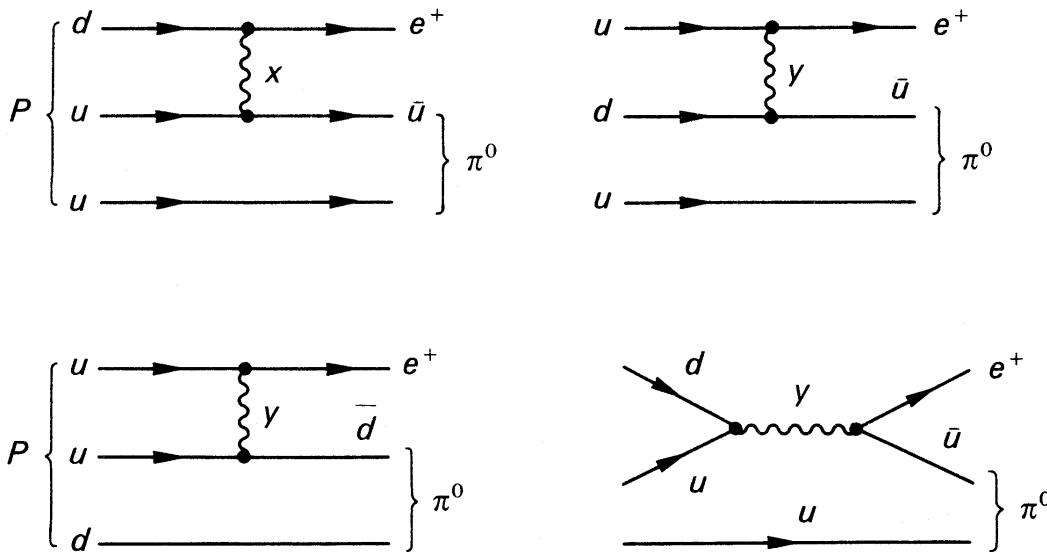
- Es sagte den Wert für den schwachen Mischungswinkel $\sin \Theta_W$ vorher. Bei der Skala $M_X = 10^{15} \text{ GeV}$ gibt es nur noch eine Kopplungskonstante α_G . Die drei Kopplungskonstanten α_1 , α_2 und α_3 lassen sich also durch M_X und α_G ausdrücken. Man erhält:

$$\sin^2 \Theta_W = 0.21 \pm 0.01$$

in guter Übereinstimmung mit dem gemessenen Wert von

$$\textcolor{red}{\sin^2 \Theta_W = 0.2231 \pm 0.0006}$$

- Es sagt den Zerfall des Protons voraus.



$$\tau_P = 10^{29} - 10^{30} \text{ Jahre}$$

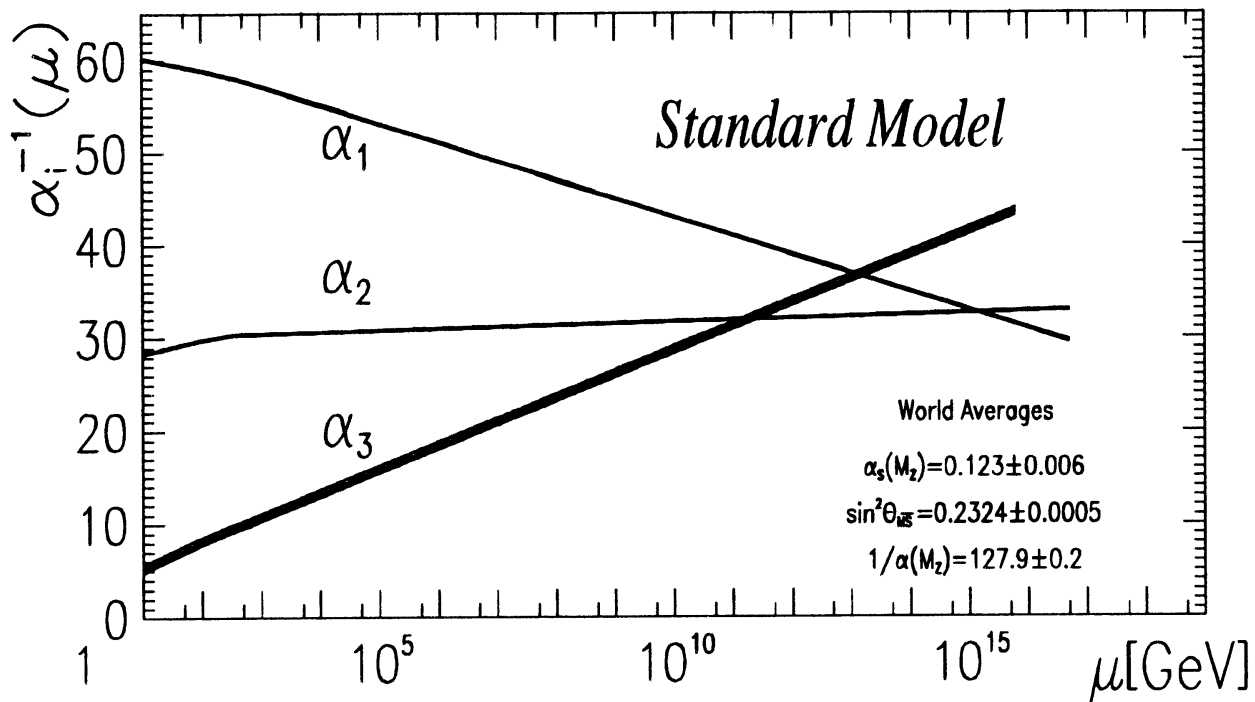
Die beste experimentelle Grenze stammt von dem IMB-Experiment. $17 \times 18 \times 23 \text{ m}^3$ Wassertank d.h. 7000 Tonnen werden mit 2000 Photomultipliern überwacht auf der Suche nach dem Zerfall:

$$p \rightarrow \pi^0 + e^+, \quad \pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$$

Die experimentelle Grenze beträgt:

$$\tau_p > 1 \times 10^{32} \text{ Jahre}$$

Die Extrapolation der Kopplungskonstanten



Die experimentellen Daten haben das $SU(5)$ -Modell von Georgi und Glashow aus dem Jahre 1974 somit ausgeschlossen.

Supersymmetrie

Zu jedem Elementarteilchen gibt es einen Superpartner, der die gleichen Eigenschaften hat, sich in seinem Spin jedoch unterscheidet. Zu den Spin- $\frac{1}{2}$ Fermionen wie Leptonen und Quarks gibt es Superpartner mit Spin-0 und zu den Bosonen mit Spin-1 wie dem Photon gibt es Superpartner mit Spin- $\frac{1}{2}$.

The particles of the standard model and their superpartners

Particle	Symbol	Spin	Superparticle	Symbol	Spin
Quark	q	1/2	Squark	$\tilde{q}$	0
Electron	e	1/2	Selectron	$\tilde{e}$	0
Muon	μ	1/2	Smuon	$\tilde{\mu}$	0
Tauon	τ	1/2	Stauon	$\tilde{\tau}$	0
W	W	1	Wino	$\tilde{W}$	1/2
Z	Z	1	Zino	$\tilde{Z}$	1/2
Photon	γ	1	Photino	$\tilde{\gamma}$	1/2
Gluon	g	1	Gluino	$\tilde{g}$	1/2
Higgs	H	0	Higgsino	$\tilde{H}$	1/2

Wenn Supersymmetrie exakt gelten würde, müßten die Superpartner auch die gleiche Masse haben. Dies ist augenscheinlich nicht der Fall, sonst hätten sie bereits entdeckt werden müssen.

Die Supersymmetrie ist also gebrochen, genauso wie die lokale Eichsymmetrie der elektroschwachen-Wechselwirkung.

Der Hauptvorteil von **SUSY** ist eine mathematisch wesentlich konsistentere und elegantere Formulierung des Standardmodells. Dies funktioniert solange

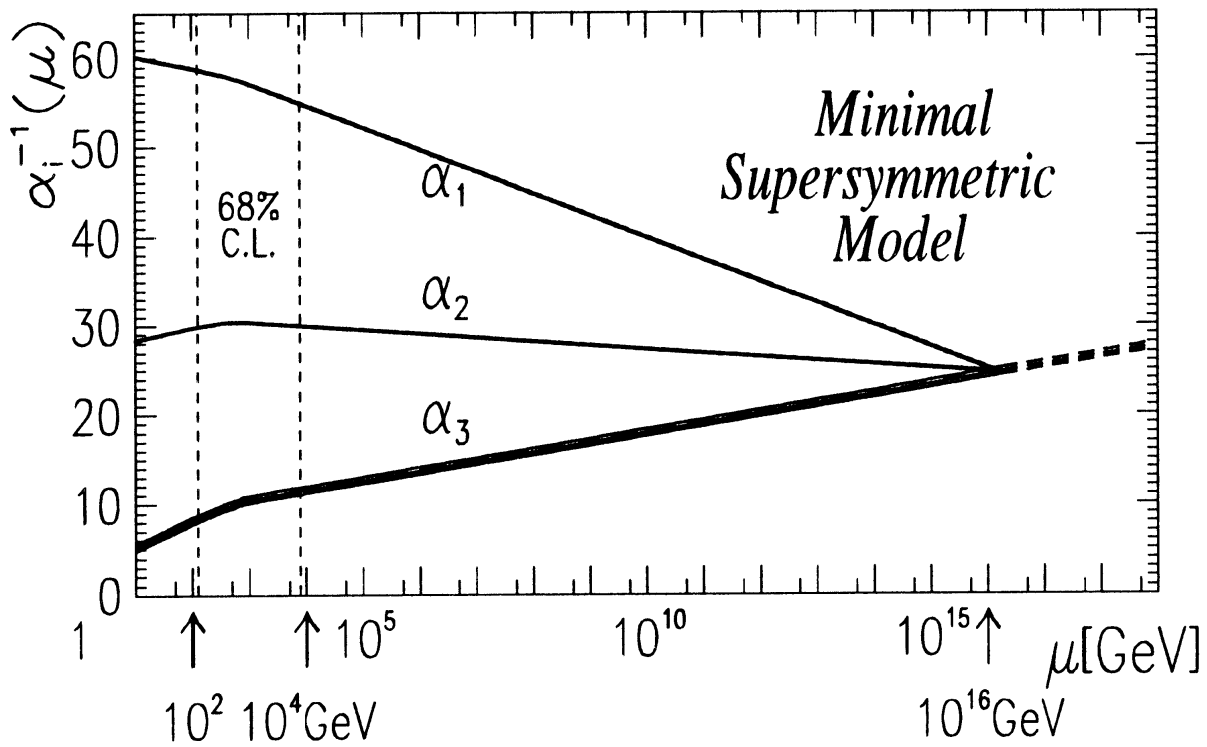
$$|M_F^2 - M_B^2| < 1 \text{ TeV}^2$$

d.h. es gibt die klare Vorhersage für SUSY-Teilchen in dem Energiebereich $100 - 1000 \text{ GeV}$. Dies ist der Energiebereich für den das ATLAS- und CMS-Experiment, d.h. die nächste Generation von Experimenten am CERN, ausgelegt sind.

Die besten experimentellen Grenzen stammen von LEP II:

$$M_{SUSY} > \approx 85 \text{ GeV} \approx E_{CMS}/2$$

Die geistigen Väter von Supersymmetrie waren J. Wess und B. Zumino mit einer 1974 veröffentlichten Arbeit (Phys. Lett. 49B, 52).



Man findet:

$$M_{SUSY} = 10^{3.4 \pm 0.9 \pm 0.4} \text{ GeV}$$

$$M_{GUT} = 10^{15.8 \pm 0.3 \pm 0.1} \text{ GeV}$$

$$\alpha_{GUT} = \frac{1}{26.3 \pm 1.9 \pm 1.0}$$

- $M_{GUT} = M_X \approx 10^{16} \text{ GeV}$ ist verträglich mit dem exp. Limit auf die Proton-Lebensdauer ($\tau_p \propto M_X^4$).
- SUSY-Modelle sagen den Wert von $\sin^2 \Theta_W$ richtig vorher.
- SUSY-Modelle bieten mathematisch ein konsistentes Konzept um Quanten-Feldtheorie und Relativitätstheorie zu vereinheitlichen.

SUSY-Modelle werden daher zur Zeit von den meisten Theoretikern als Erweiterung des Standardmodells favorisiert. Es gibt bis heute jedoch keinen experimentellen Hinweis auf SUSY.