QUANTENFELDTHEORIE, TOP – QUARKS und der NOBELPREIS 1999

J. Kühn, Karlsruhe

Fundamente

Relativitätstheorie

$$E \quad = \quad m \cdot c^2$$

Energie $\Leftrightarrow$ Materie

Quantenmechanik

$$[X, P] = i\,\hbar\,; \qquad E = \hbar\,\omega$$

gute Ortsauflösung $\hat{=}$ kleines ΔX $\Leftrightarrow$ Teilchen mit grossem Impuls

Dualismus: Welle $\Leftrightarrow$ Teilchen

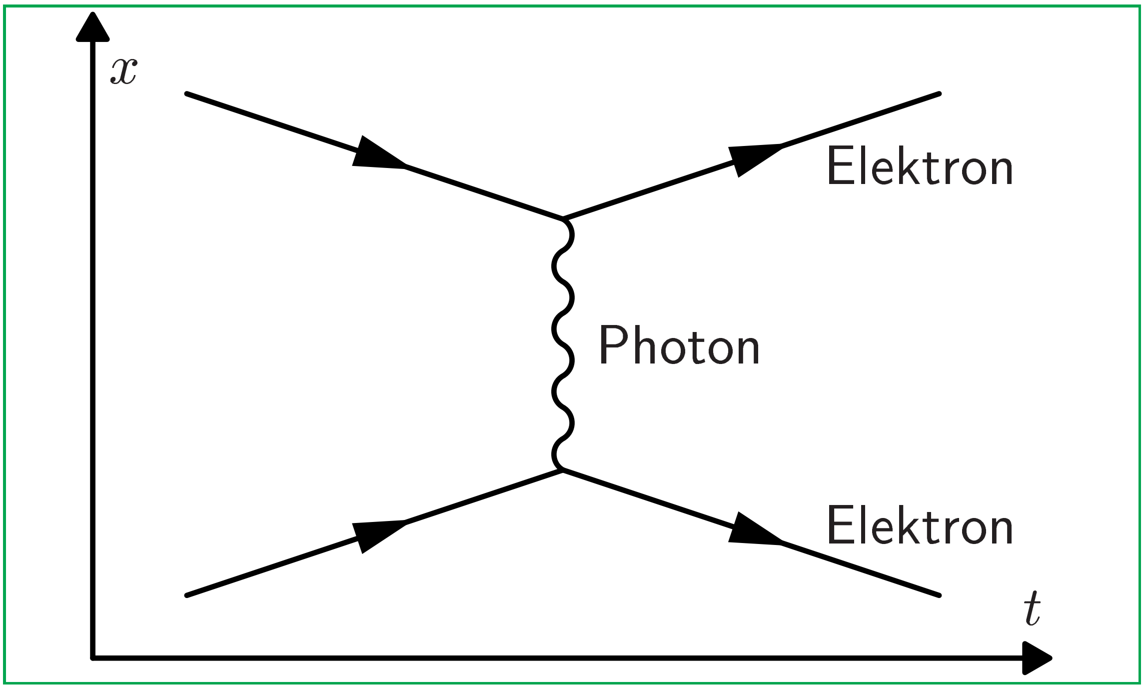
"innere" Symmetrien

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \ldots ; \begin{pmatrix} e \\ \nu \end{pmatrix}, \ldots ;$$

$$(W^+, W^-, Z^0)$$

Feynman–Diagramme

Elektromagnetische Wechselwirkung



Streuprozess: $e^- + e^- \rightarrow e^- + e^-$

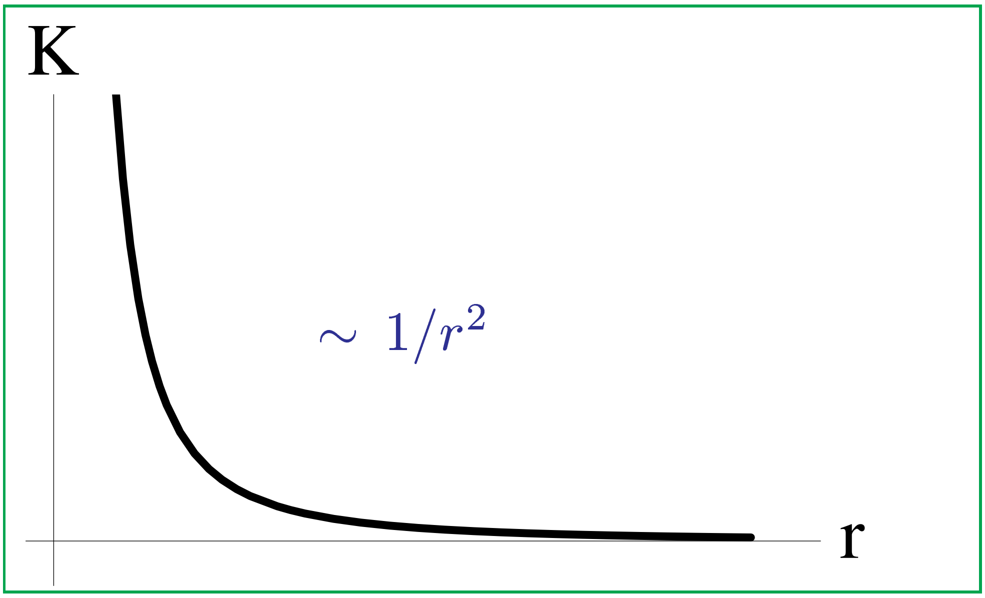
Austausch eines “virtuellen” Photons Bild kurzzeitig ist die Energieerhaltung verletzt:

$$\Delta t \quad \sim \quad \hbar/E$$

Prozess spielt sich ab bei Distanzen D bzw. Impulsübertrag p

$$D \quad \sim \quad \hbar/p$$

Kraft–Gesetz



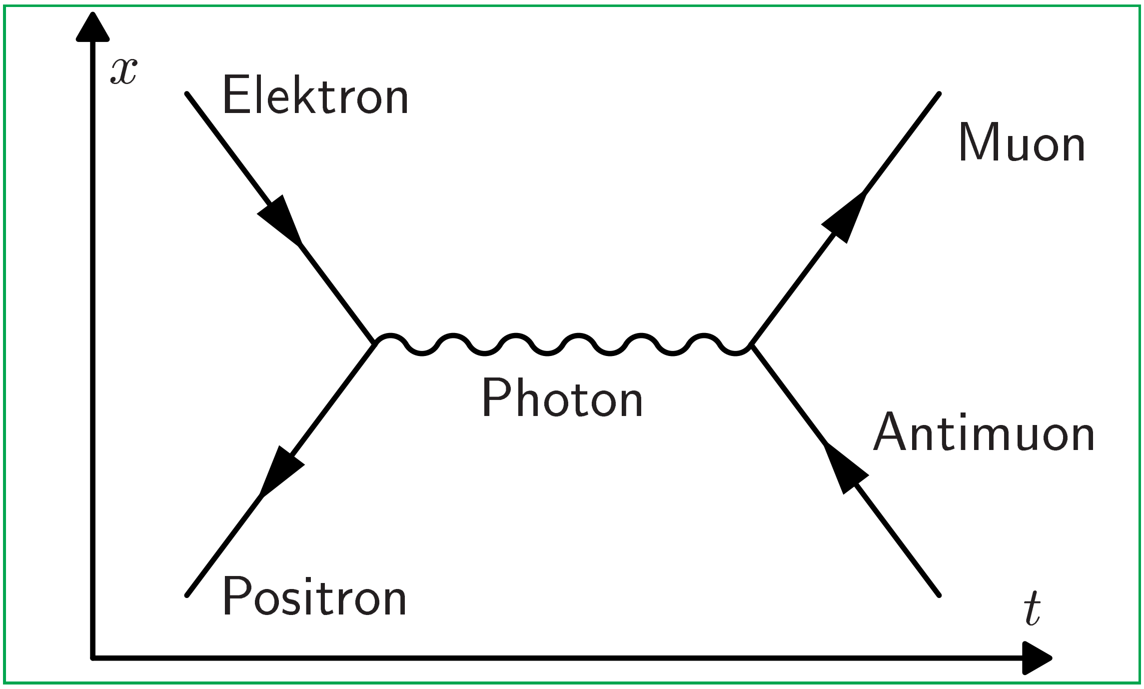
Relativitätstheorie:

$$
\begin{aligned}
E &= \pm\sqrt{(m\,c^2)^2 + p^2\,c^2} \\
  &= \pm\, m\,c^2 \qquad (\text{für } p = 0)
\end{aligned}
$$

Teilchen $\Leftrightarrow$ Antiteilchen (gleiche Masse)

$\Rightarrow$ Dirac: Positron

Beliebige Teilchen und Antiteilchen können im Labor erzeugt werden, wenn die Energie hoch genug ist.



$e^+\,e^- \rightarrow$ "virtuelles" Photon $\rightarrow \mu^+\,\mu^-$

reine Feldenergie

Muon $=$ schwerer Partner des Elektrons, $m_\mu \approx 200\,m_e$

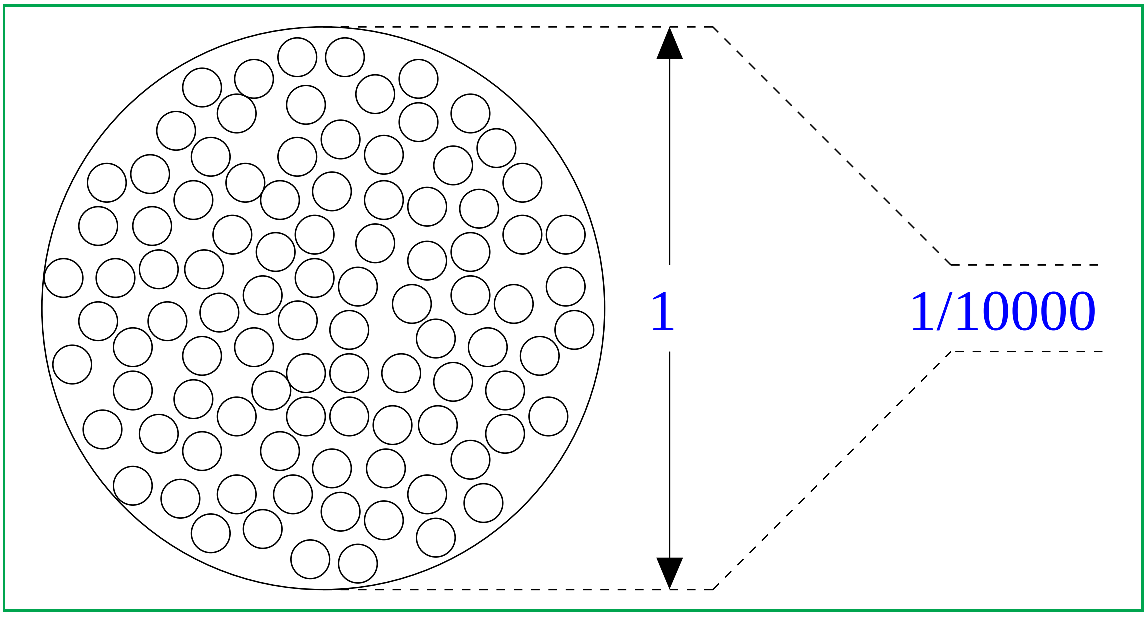
LEP:

Large Electron Positron Collider (Bild)

$$E \approx 200 \text{ GeV}$$

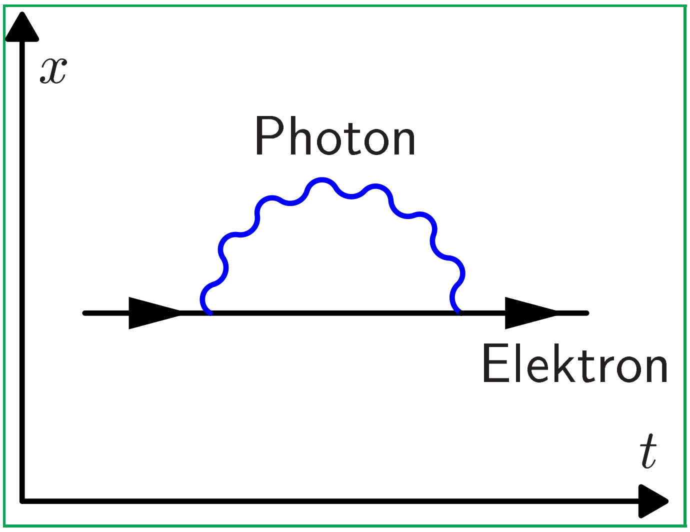
(Elektronen durchlaufen Potentialdifferenz von $2 \times 100\,000\,000\,000$ Volt)

Energie–Äquivalent eines Bleikerns

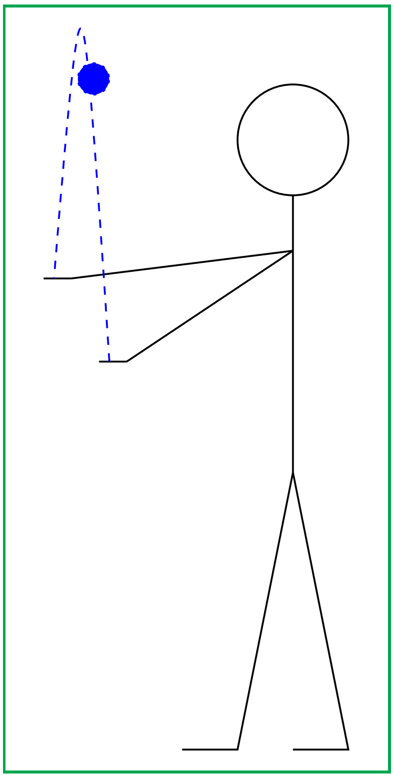


reine Feld–Energie, konzentriert in $\sim 10^{-3}$ fm

virtuelle Beiträge, Quantenfluktuationen:



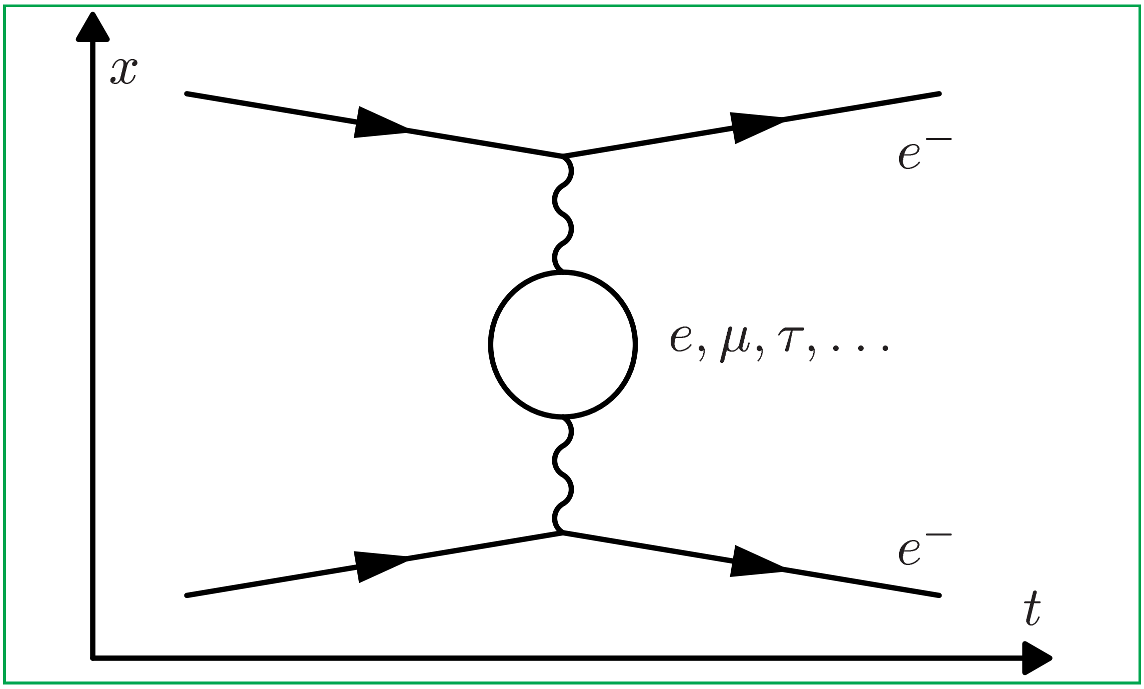
Photonenwolke



Beitrag zur Elektronmasse:

$$\underbrace{m}_{0.511\text{ MeV}} = \underbrace{(m_{\text{nackt}} + \infty)}_{\text{Renormierung}}$$

(Feynman, Schwinger, Tomanago 1948)



Polarisierbarkeit des Vakuums

$\Rightarrow$ geringfügige Modifikation des Coulombgesetzes

beobachtbar im Wasserstoffspektrum

starke Unterdrückung der schweren Quarks und Leptonen
($\leftrightarrow$ starke Verletzung der Energieerhaltung)

Feynman–Diagramme

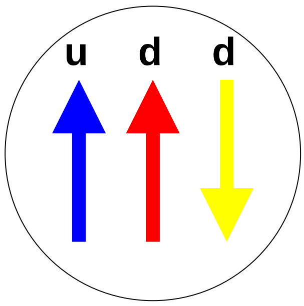
$\Rightarrow$ Stenografie für Rechenregeln

komplizierte Rechnungen

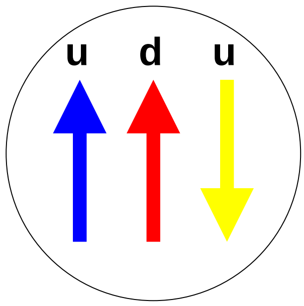
$\Rightarrow$ Computeralgebra (Veltman)

Schwache Wechselwirkung

Zerfall des Neutrons



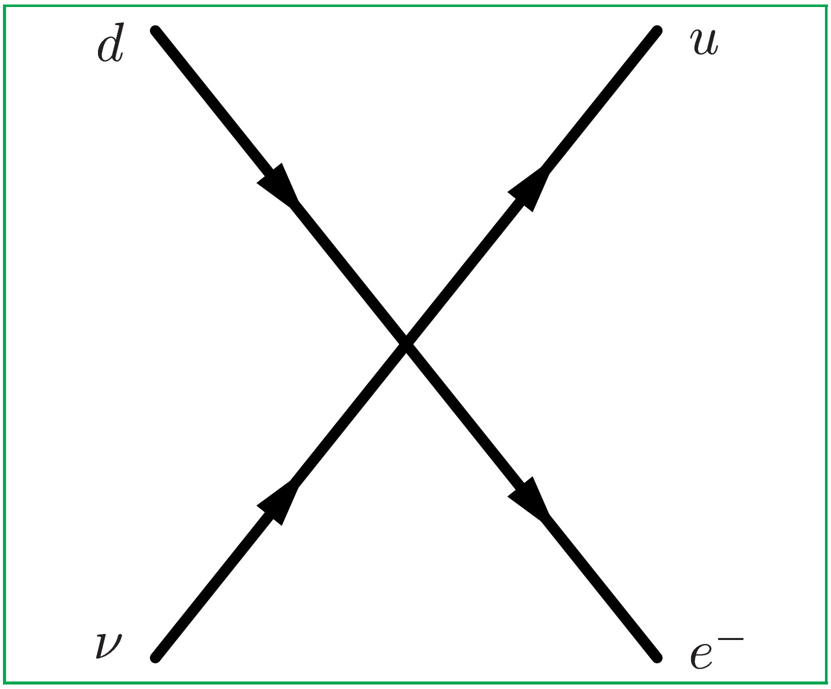
$\rightarrow$



$+ e^- + \bar{\nu}$

n $\qquad\qquad\qquad\qquad$ p

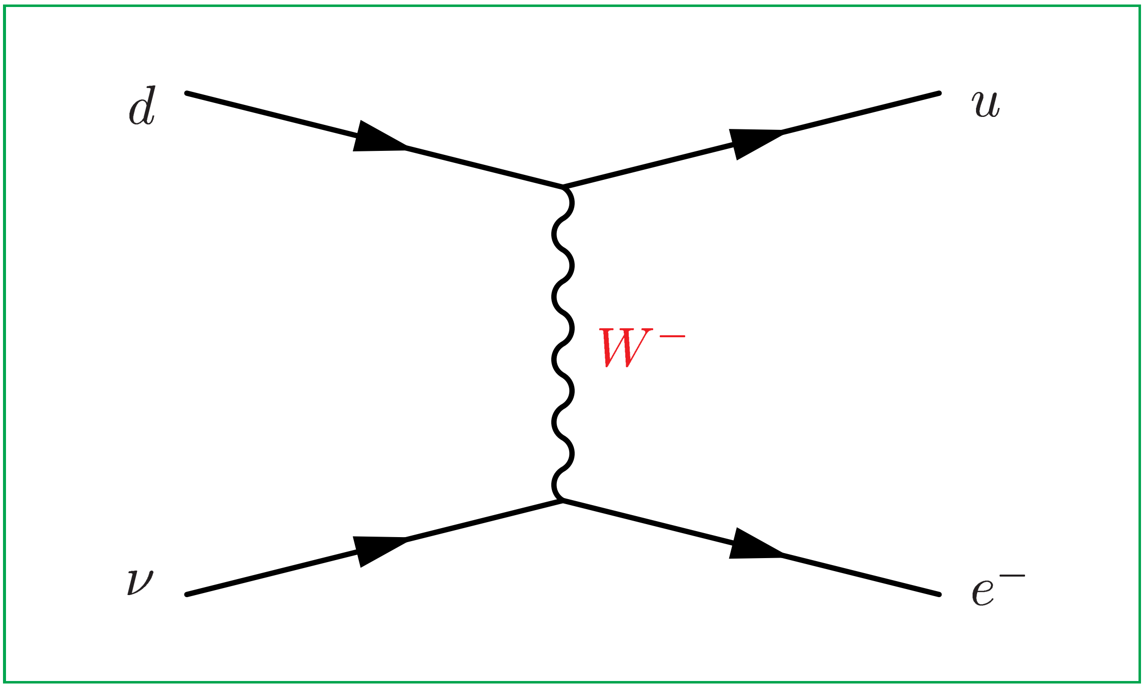
mikroskopisch:



Wechselwirkung von 4 Fermionen an einem Punkt

Vorhersage:
inakzeptables Verhalten von Streuquerschnitten bei hohen Energien

Spekulation:
Analogie zur Quantenelektrodynamik



massives, geladenes W–Boson

Reichweite der Wechselwirkung:

$$D \quad \sim \quad \frac{\hbar}{M_W \cdot c}$$

$(\approx \text{Protonradius}/1000)$

Problem:

Photon ($m_\gamma = 0$): 2 Polarisationen
(links–, rechtszirkular)

W–Bosonen ($M_W \neq 0$): 3 Polarisationen
($\hat{=}$ Drehimpuls 1)

Higgs–Mechanismus:
Kopplung des W–Bosons an ein "Higgs"–Feld mit Vakuum–Erwartungswert $v \neq 0$

$$\Rightarrow \; m_W = g \cdot v$$

Kopplungsstärke

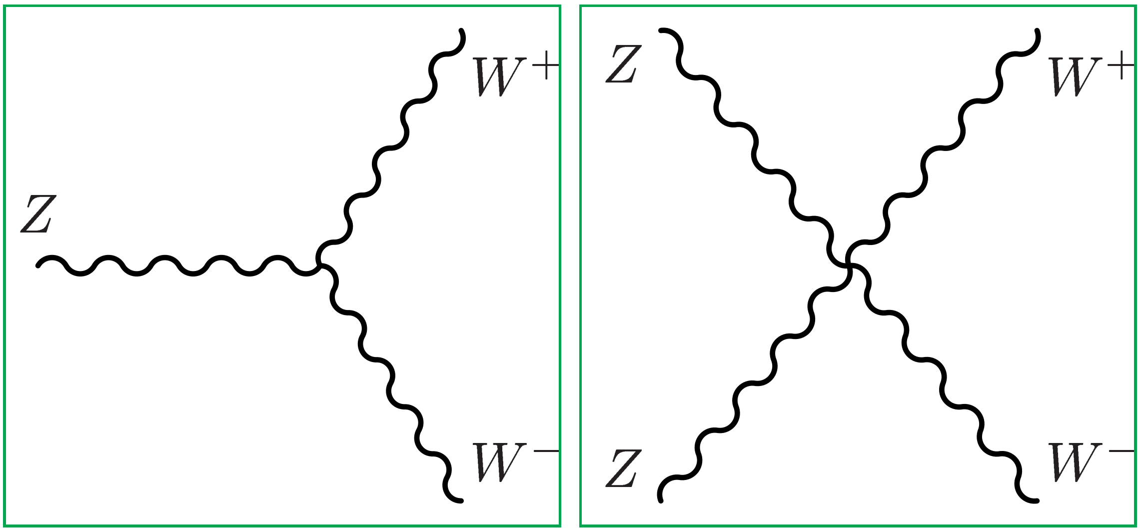
Anregung des Higgsfeldes
$\Rightarrow$ Teilchen: Higgsboson

$$m_H = ?$$

Neuer Aspekt:

3 massive Eichbosonen W^+, W^-, Z^0

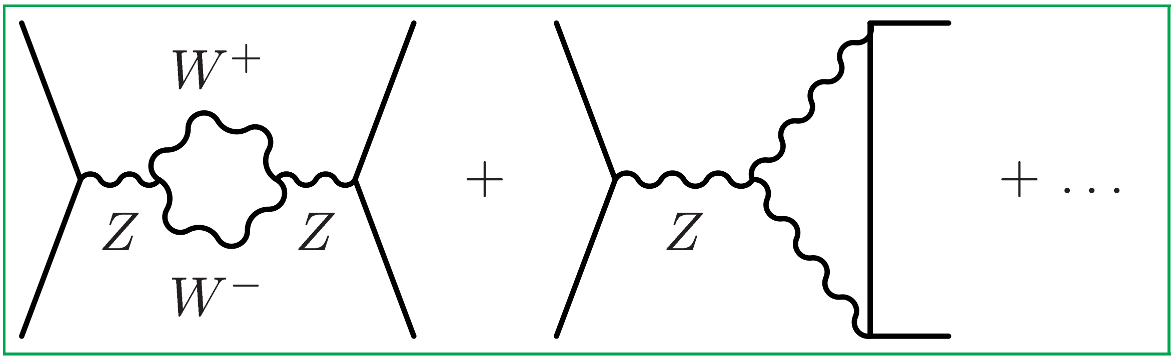
Es gibt "Selbstwechselwirkung"



die Träger der schwachen Kraft
tragen schwache Ladung (vgl. Photon: $Q_\gamma = 0$)

Symmetrie $\begin{pmatrix} W^+ \\ W^- \\ Z \end{pmatrix}$

Berechnung von Quantenfluktuationen



Divergenzen!

Regularisierung:

Rechne in $d = 4 - 2\,\varepsilon$ Dimensionen und betrachte $\lim_{\varepsilon \to 0}$

Analogie:

$$\frac{\sin(0)}{0} = \lim_{\varepsilon \to 0} \frac{\sin(\varepsilon)}{\varepsilon}$$

Renormierung:

absorbiere divergente Anteile in Normierungskonstanten (Masse, Kopplungsstärke)

Erweiterung dieses Konzepts von der Quantenelektrodynamik auf die schwache und die starke Wechselwirkung

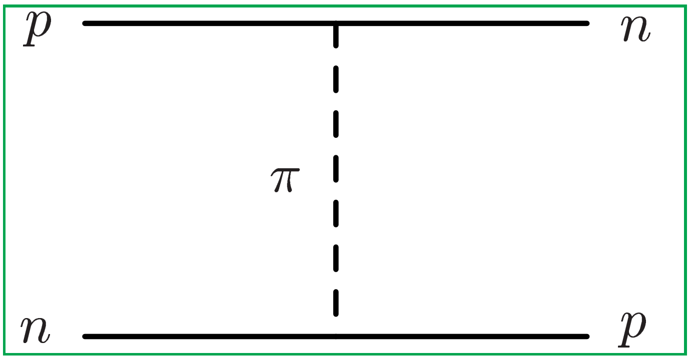
$\boxed{\text{t'Hooft / Veltmann}}$

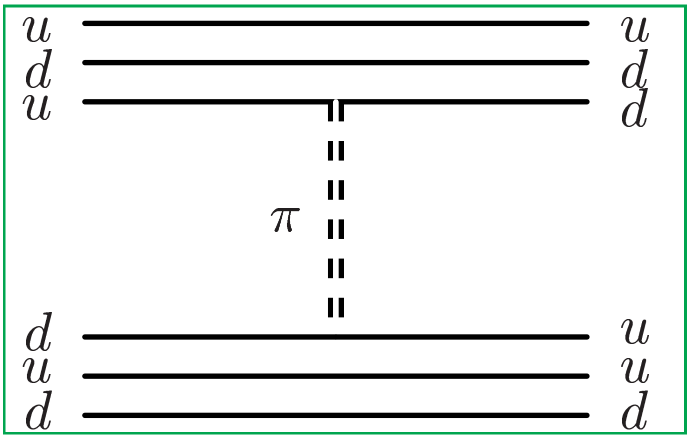
Nobelpreis 1999:

→ nichtabelsche Eichtheorien sind renormierbar

→ Verhalten der Kräfte bei kleinen/grossen Abständen

Starke Wechselwirkung

altes Bild: 

neues Bild: 

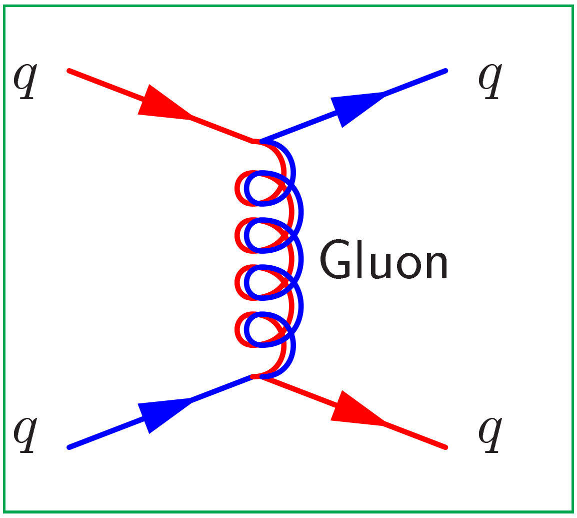
Quarks gibt es in 6 Flavors und 3 Farben:

$$
\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix},
$$

$$
\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix},
$$

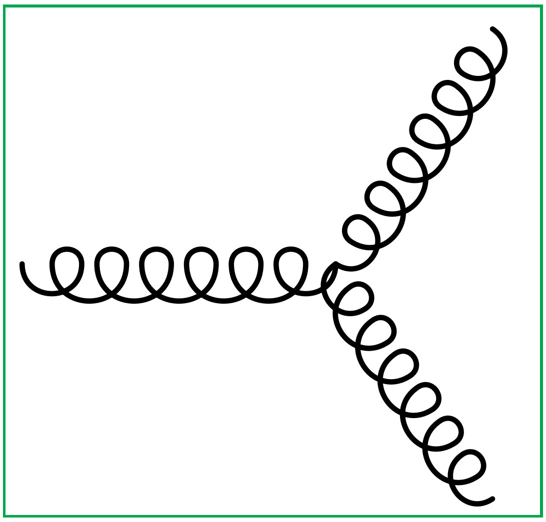
$$
\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}.
$$

starke Wechselwirkung

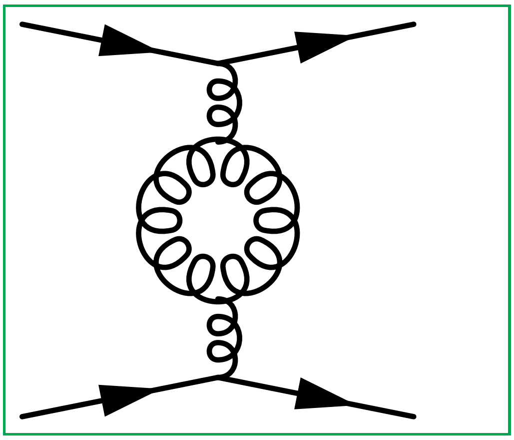


8 Gluonen:
$3 \times \bar{3} - 1 = 8$

Selbstwechselwirkung
der
Gluonen



Vakuum–Polarisation

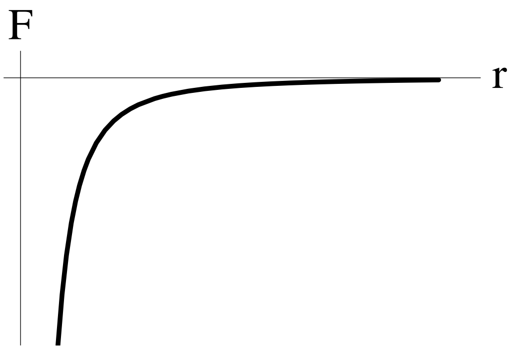


Verstärkung der Kraft bei grossen Abständen; Abschwächung bei kleinen Abständen

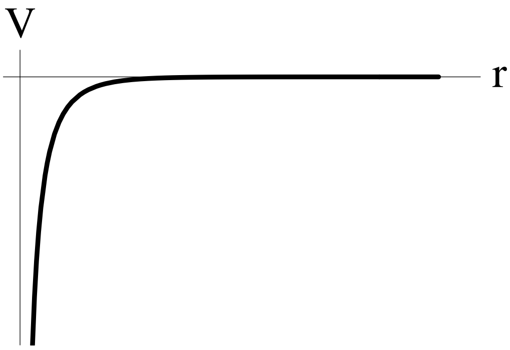
Potential	Kraft

$\sim\ -1/r\ +$ Korr.

QED



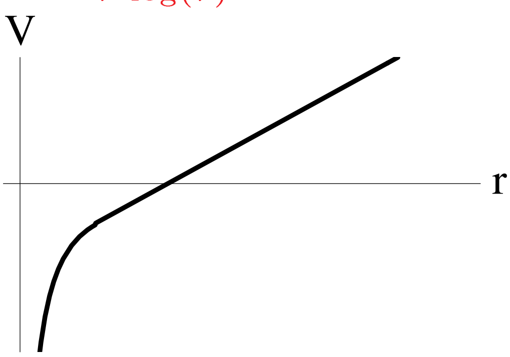
$\sim\ -e^{-m\cdot r}/r\ +$ Korr.



schwache

WW

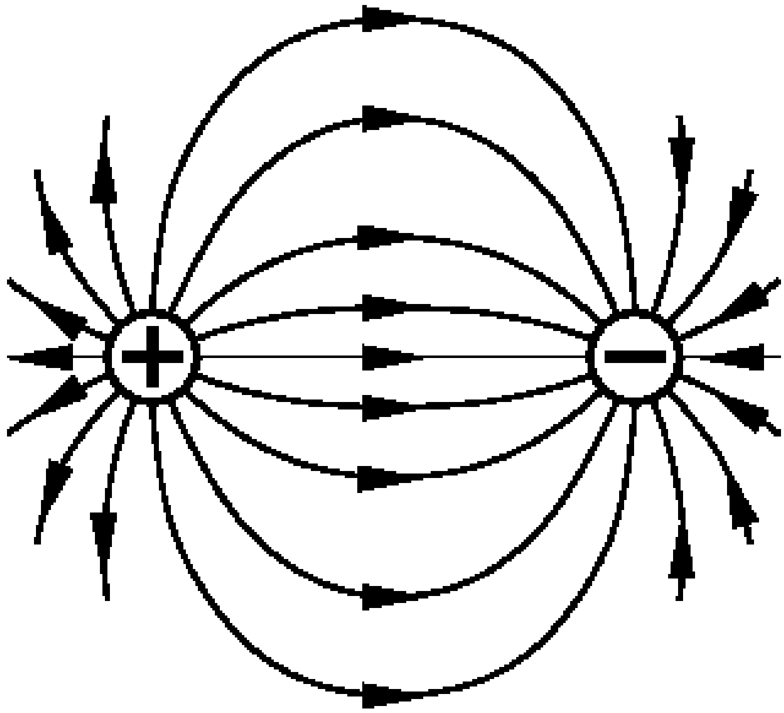
$\sim\ -\frac{1}{r\ \log(r)}\,|$ $\qquad \sim k\,r$



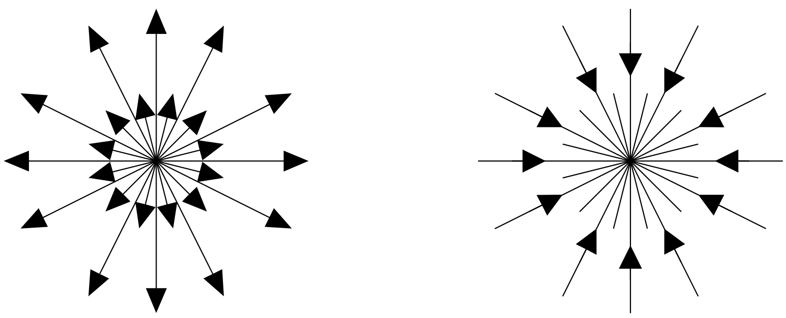
starke

WW

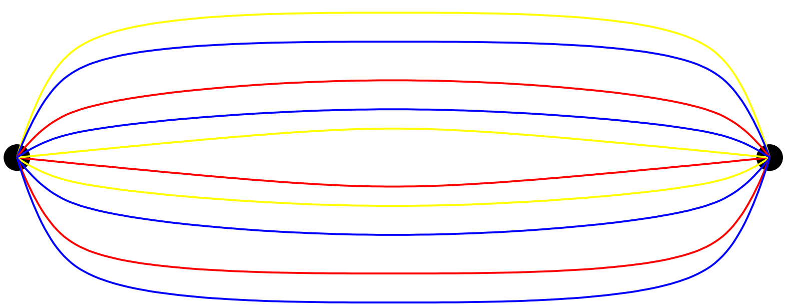
Feldkonfigurationen



QED



schwache WW



starke WW

Indirekte Evidenz für Top–Quarks

Historisches Analogon:

äussere Planeten: URANUS

(Herschel 1781 “zufällig”)

kleine (!) Abweichungen von der berechenten Sollbahn: NEPTUN

Adams (1845)	$\rightarrow$	Airy
		(“Royal Astronomer”)
Le Verrier (1846)	$\rightarrow$	Galle, d’Arrest
		Berlin: 23.09.1846

Vorhersage auf 1° genau!

$\Rightarrow$ fundamentale Entdeckung durch Verbindung
von Präzisionsmessung
mit Präzisionsrechnung

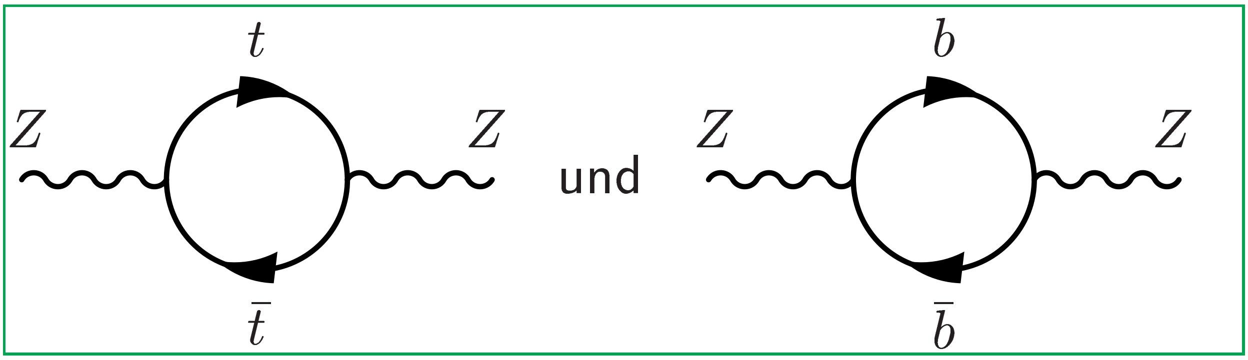
- neuer Planet
- Bestätigung der Theorie

1) Isospin des b–Quarks

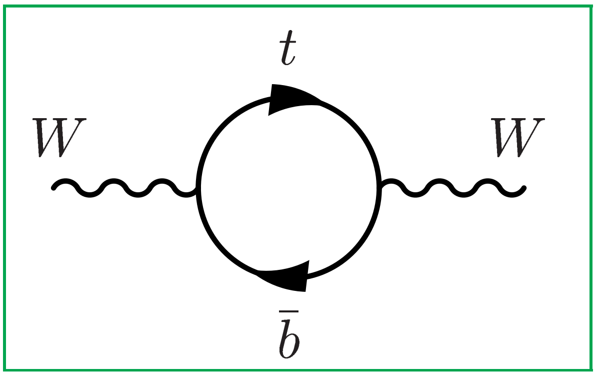
$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} ? \\ b \end{pmatrix}$$

$\Rightarrow$ das b–Quark sucht seinen Partner

Z koppelt an $b\bar{b}$– und $t\bar{t}$–Fluktuationen



W koppelt an $t\bar{b}$–Fluktuationen



$\Rightarrow$ relative Verschiebung der Massen, je größer der t–b–Massenunterschied

$\Rightarrow$ (Zer–) Störung der Symmetrie

$$\frac{m_W^2}{m_Z^2 \cos^2\Theta_W} = 1 + \delta_\rho$$

aus Kopplungskonst.	ohne Störung	Vakuum–Fluktuationen

(Veltman)

$$\begin{aligned}
\delta_\rho &= 3\frac{\sqrt{2}G_F}{16\pi^2}\cdot m_t^2 \\
&= 3\frac{\sqrt{2}}{16\pi^2}\cdot 1.16\,10^{-5}\,\mathrm{GeV}^{-2}\cdot(175\mathrm{GeV})^2 \\
&\approx 0.009
\end{aligned}$$

$\Rightarrow$ Präzisionsmessungen (LEP!)

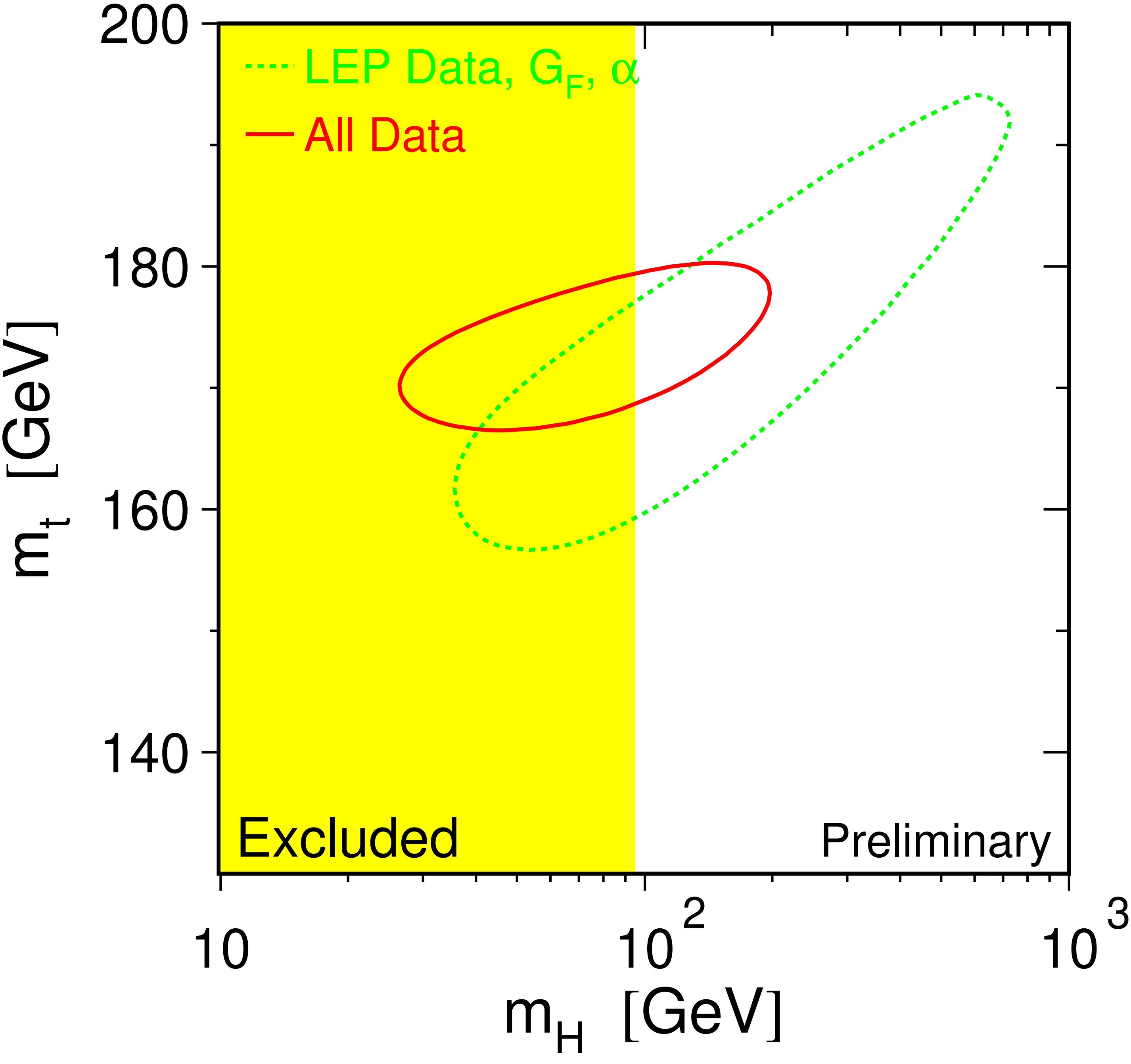
Einfluss auf:

M_W/M_Z

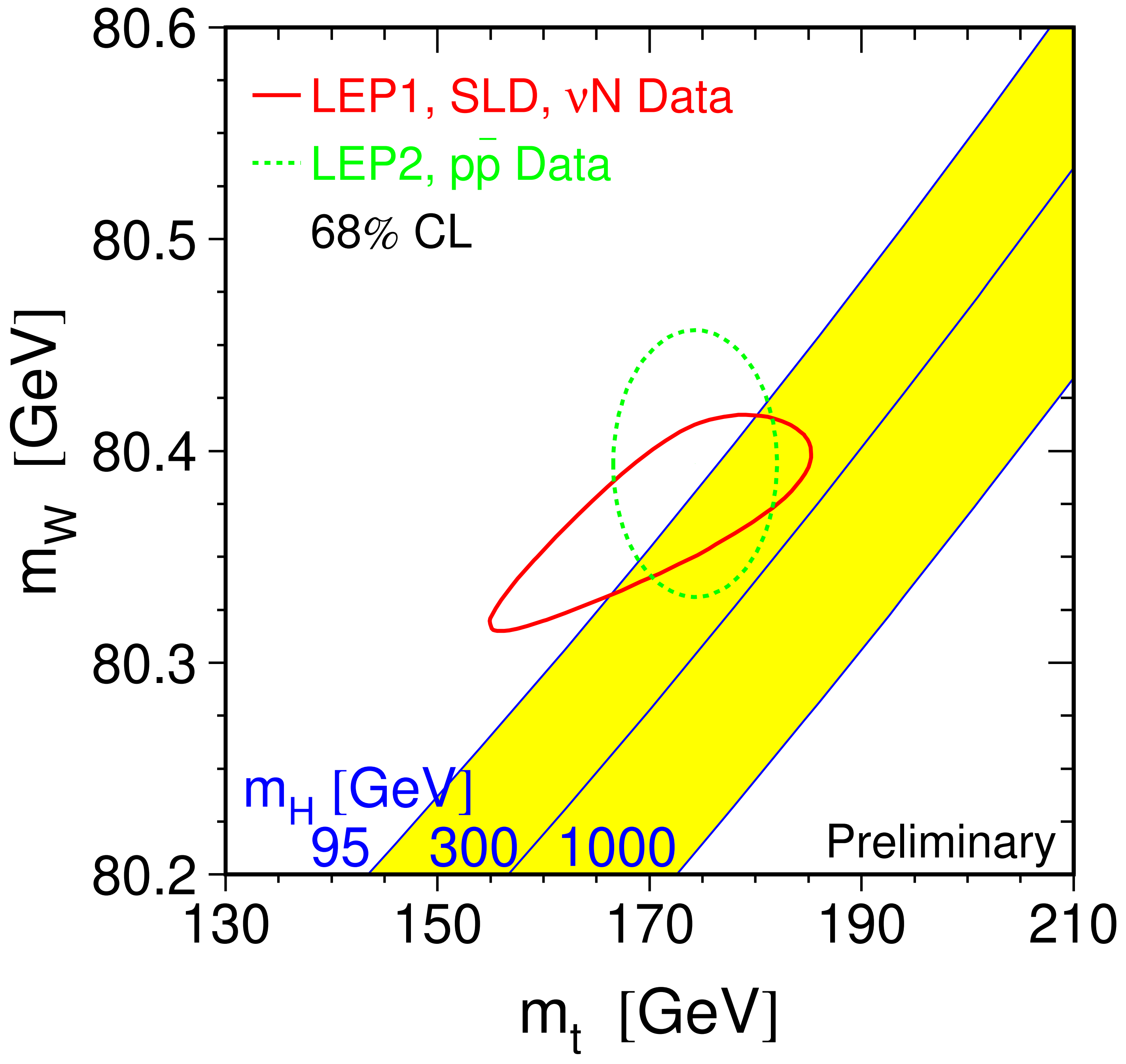
Muon–Lebensdauern

W, Z Zerfallsraten

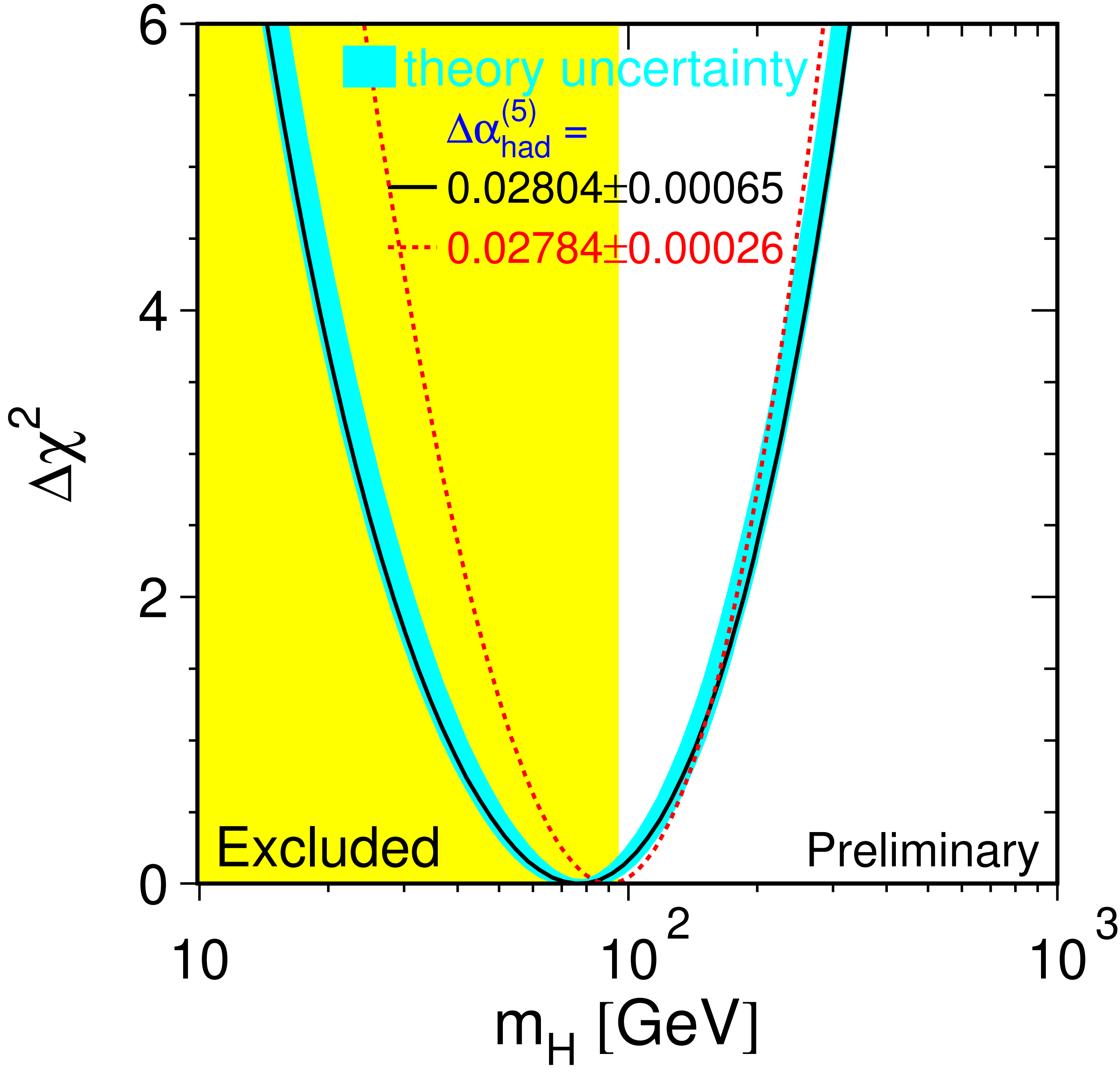
$\vdots$



200
180
160
140
m_t [GeV]
LEP Data, G_F, α
All Data
Excluded
Preliminary
10
10^2
10^3
m_H [GeV]



LEP1, SLD, νN Data
LEP2, pp̄ Data
68% CL
m_W [GeV]
80.6
80.5
80.4
80.3
80.2
m_H [GeV]
95
300
1000
Preliminary
130
150
170
190
210
m_t [GeV]



theory uncertainty
$\Delta\alpha^{(5)}_{had}$ =
0.02804±0.00065
0.02784±0.00026
Excluded
Preliminary
$\Delta\chi^2$
m_H [GeV]
0
2
4
6
10
10^2
10^3

kombiniertes Resultat:

indirekte Beobachtung (LEP, 1995)

$$\boxed{m_t = 176 \pm 10 \;{}^{+17}_{-19}\ \text{GeV}}$$

konsistent mit direkter Beobachtung (TEVATRON)

$$\boxed{m_t = 176 \pm 5\ \text{GeV}}$$

$\Rightarrow$ Evidenz für Quantenkorrekturen

Zusammenfassung

QUANTENMECHANIK

$+$ RELATIVITÄTSTHEORIE

$+$ SYMMETRIE

$\Rightarrow$ KONSISTENTE THEORIE
der schwachen $+$ elektromagnetischen und starken Wechselwirkung

QUANTENFLUKTUATIONEN

$\Rightarrow$ indirekte Informationen über
TOP QUARKS

offene Fragen:

$\star$ Higgs Boson?

$\star$ warum 3 Farben; Isospin?

$\star$ warum (e, μ, τ); (u, c, t); (d, s, b)
Pauli: "Who ordered the muon?"