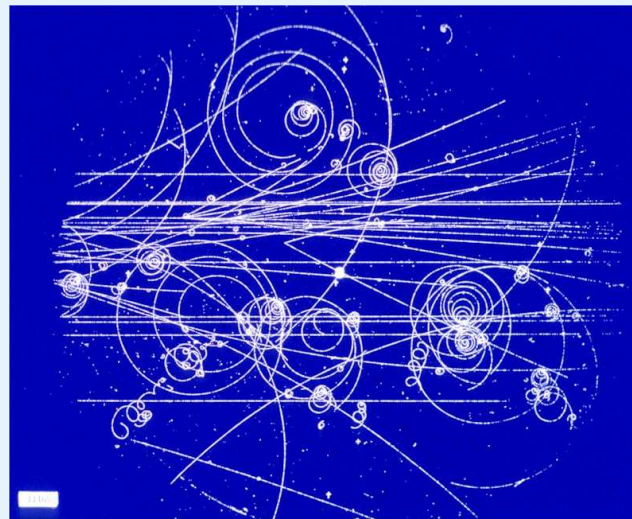


Das Standardmodell der Teilchenphysik



PD Dr . Alexander J. Lenz
15. Februar 2007



Standardmodelle I

Unser Standard Modell hat nichts mit diesen Standard Modellen zu tun !





Standardmodelle (=SM) II

Dass ich erkenne was die Welt im Innersten zusammenhält

Teilchenphysik:

- Atomphysik
 - Kernphysik
 - Elementarteilchen
- Teilchenbeschleuniger
Das **SM der Teilchenphysik**

Astrophysik:

- Sterne
 - Kosmologie
 - Moderne Astronomie,...
- Das SM der Sonne
Das SM der Kosmologie

Astroteilchenphysik:

- Nukleosynthese
- Neutrino-physik
- Dunkle Materie
- Kosmologie,...



Inhalt

- Welche “fundamentalen” Teilchen gibt es?
 - ◆ Quarks
 - ◆ Leptonen
- Welche “fundamentalen” Kräfte gibt es?
 - ◆ Elektromagnetische Kraft
 - ◆ Starke Wechselwirkung
 - ◆ Schwache Wechselwirkung
- Wie kam man zu diesem Wissen?
 - ◆ Teilchenbeschleuniger
- Das **Standardmodell der Teilchenphysik**
 - ◆ Eichtheorien, QED, QCD,...
- Was kommt jenseits vom Standardmodell
 - ◆ Gravitation, SUSY, Strings,...

Dimensionen:

Natürliche Einheiten:

$$\hbar = 1, c = 1$$

Einheit der Masse:

$$1 \text{ eV} \equiv 1.8 \cdot 10^{-36} \text{ kg}$$

Elementarteilchen:

$$r < 10^{-18} \text{ m}$$

Notation:

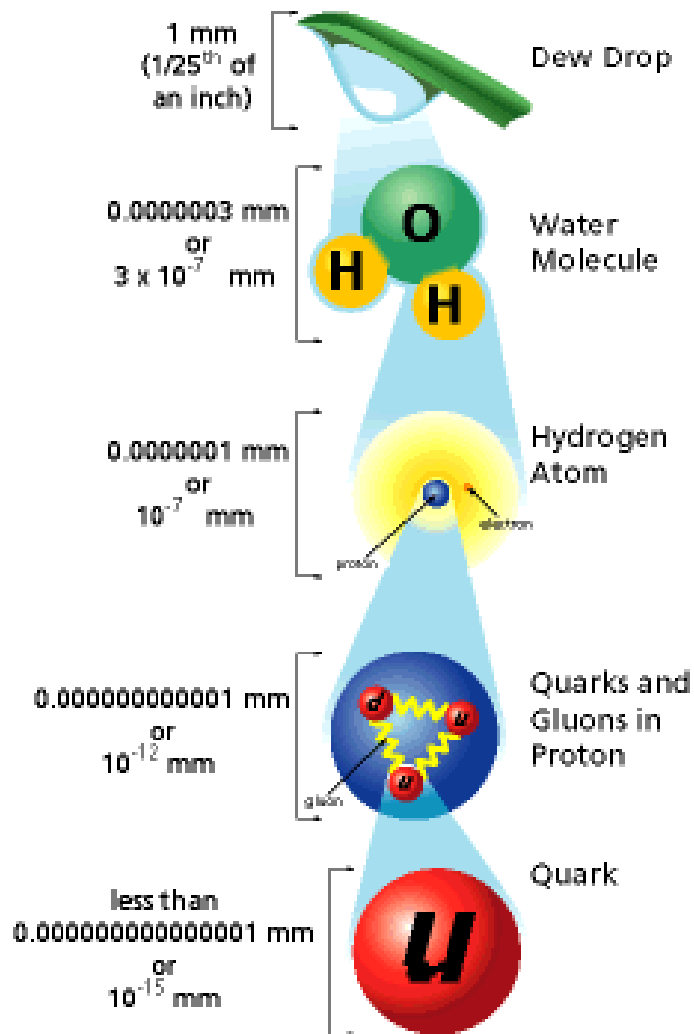
WW = Wechselwirkung

SM = Standardmodell

em = elektromagnetisch



Aufbau der Materie



- Atom = Atomkern + Elektronenhülle
atomos = unteilbar
- Kern = Protonen + Neutronen = Nukleonen
protos = das erste
- Nukleon = Quark + Quark + Quark
James Joyce - Finnegans Wake
Proton: $M = 938 \text{ MeV} \approx 1.7 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$, $Q = +1$
 - ◆ $P = \text{Up} + \text{Up} + \text{Down} + (q\bar{q} + \text{Gluonen})$
 - Up: $M = 1.5 \dots 3 \text{ MeV}$, $Q = +2/3$
 - Down: $M = 3 \dots 7 \text{ MeV}$, $Q = -1/3$

Elementare Bausteine:

- Quarks: Up, Down, ...
- Leptonen: Elektron, ...
leptos = leicht



Das Standardmodell der Teilchenphysik I

- Elektromagnetische WW: Licht, Chemie, Elektronik, ...
- Starke WW: Bindung von Kernen und Nukleonen
- Schwache WW: Radioaktiver Zerfall, Brennen der Sonne

Stark : Em : Schwach = 1 : 1/137 : 10^{-6}

Theoretischer Rahmen: Das Standardmodell der Teilchenphysik
1967: Glashow, Salam, Weinberg; NP 1979

Materie

Kräfte

Massenerzeugung



Das Standardmodell der Teilchenphysik II

Materie (Spin 1/2, Fermionen)

Quarks (alle WW)

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} q = +2/3 \\ q = -1/3 \end{pmatrix}$$

Leptonen (schwache und Em WW)

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} q = 0 \\ q = -1 \end{pmatrix}$$

Kräfte (Spin 1, Bosonen)

WW		M	R
Em	Photon γ	0	∞
Stark	Gluon g	0	$10^{-15}m$
Schwach	W^\pm, Z^0	100GeV	$10^{-18}m$

Proton $\equiv |uud\rangle, m_P = 1\text{GeV}$

$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

Massenerzeugung: Higgsteilchen h : (Spin 0, Boson), noch nicht entdeckt:

$$M_h > 115 \text{ GeV}$$



Die Entdeckung der Teilchen I

- 1896: Radioaktivität, **Bequerel** (1903);
- 1897: **Elektron** e^- , **Thomson** (1906);
- 1905: **Photon** γ , **Planck** (1918), **Einstein** (1921)
- 1911: Streuung von α -Teilchen an Goldkernen, **Rutherford**(1908, Chemie)
- 1919: **Proton** p
- 1930: **Vorhersage des Neutrinos** ν_e , **Pauli** (1945)
- 1932: **Neutron** n , **Chadwick** (1935)
- 1937: **Myon** μ in kosmischer Strahlung, **Neddermayer, Anderson**
- 1946: **Pion** in Höhenstrahlung, **Powell et al.**
- 1951: **Kaonen (strange)** in Höhenstrahlung, **Rochester et al.**
- 53-57: Elektron-Proton-Streuung, **Hofstadter**(1958)
- 1956: **Elektron-Neutrino** ν_e , **Cowan, Reines** (1995)
- 1962: **Myon-Neutrino** ν_μ am BNL, **Lederman, Schwartz, Steinberger** (1988)



Die Entdeckung der Teilchen II

- 1964: Quarks, Gell-Mann, Zweig (1969)
- 1967: Standardmodell der Teilchenphysik, Glashow, Salam, Weinberg (1979)
- 1968: u,d-Quarks am SLAC, Friedman, Kendall, Taylor (1990) Bjorken, Feynman,...
- 1974: Charm-Quark J/Ψ am SLAC & BNL, Richter, Ting (1976)
- 1976: Tau τ am SLAC (3. Familie!), Perl (1995)
- 1977: Bottom-Quark Υ am Fermilab, Ledermann
- 1979: Gluon g am DESY
- 1983: W-, Z-Bosonen am CERN, Rubia, van der Meer (1984)
- 1995: Top-Quark am Fermilab
- 2000: Tau-Neutrino ν_τ am Fermilab
- 1970: Hinweise auf Neutrinooszillationen, Davies (2002)



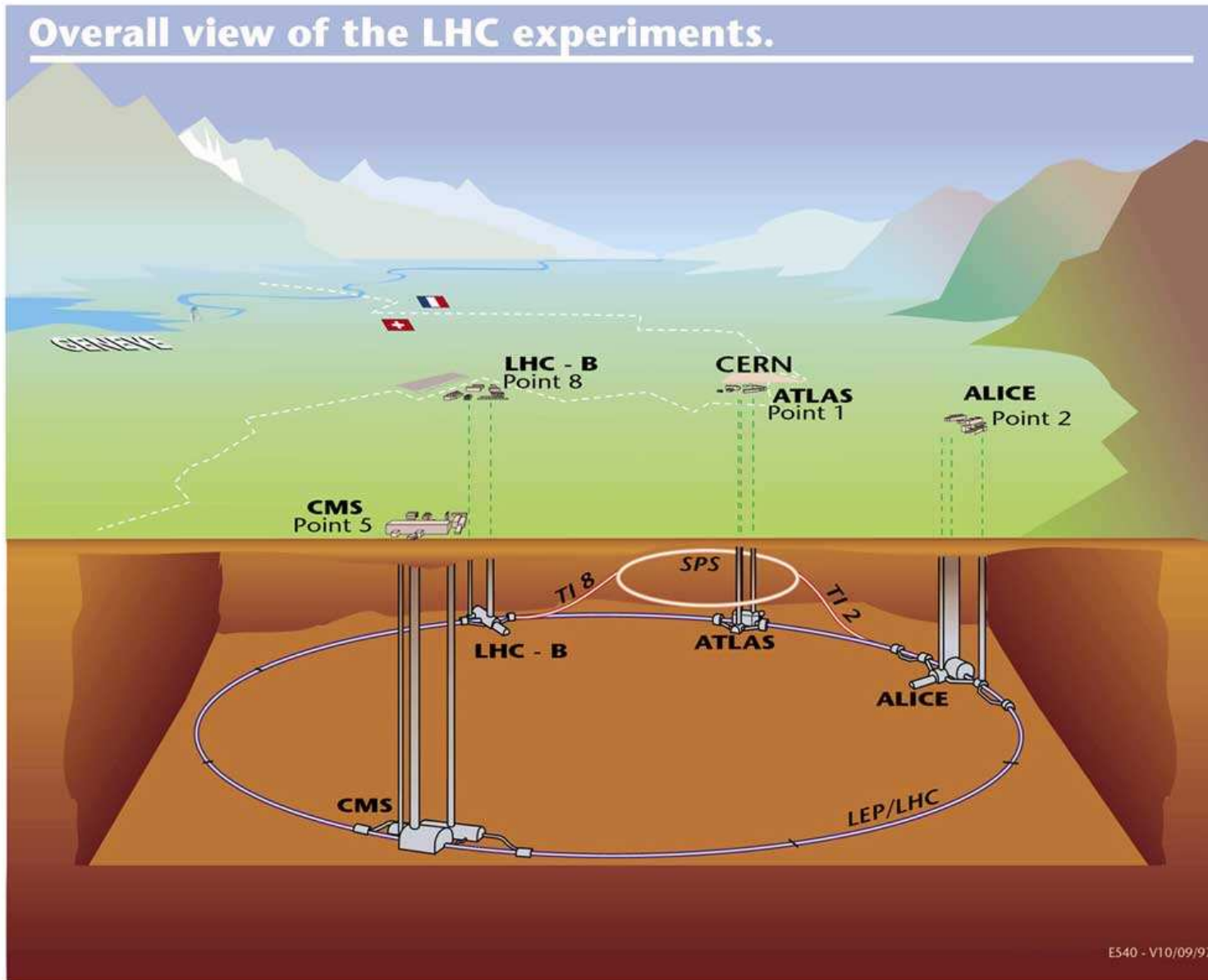
Teilchenbeschleuniger I: CERN bei Genf





Teilchenbeschleuniger II

Large Hadron Collider





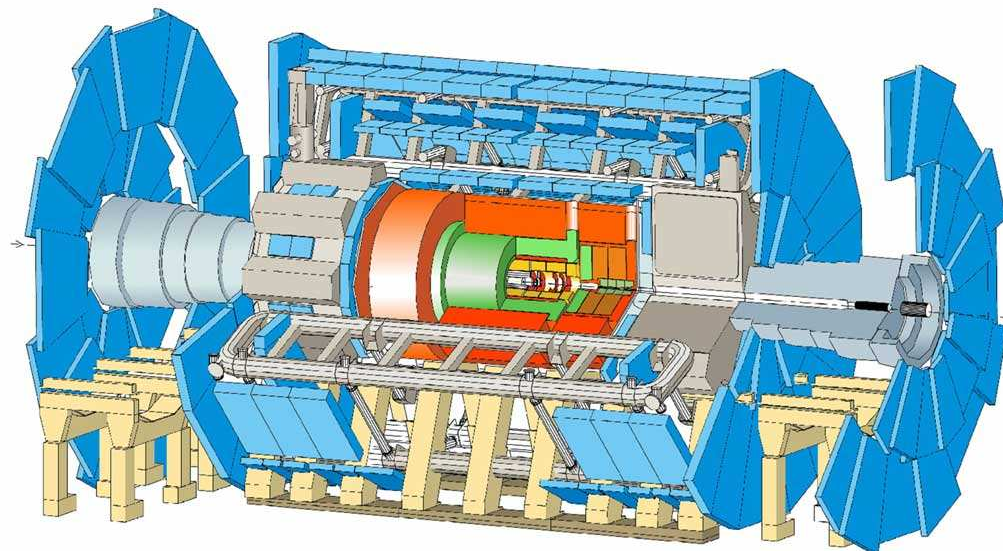
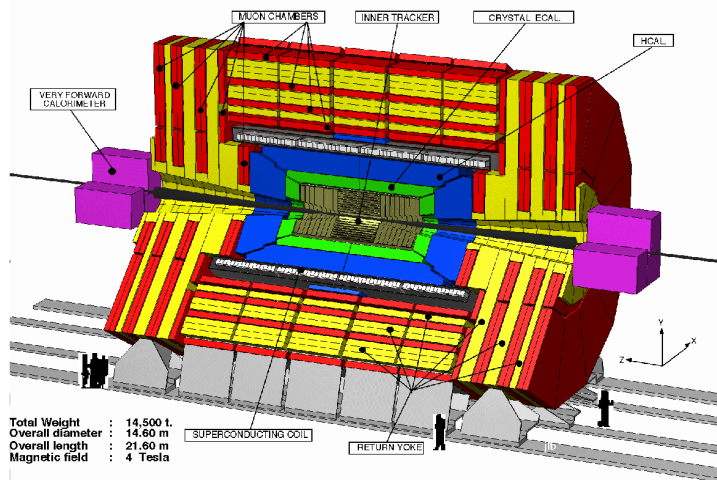
Teilchenbeschleuniger III

- Beschleunigung geladener Teilchen (z.B. p , e^-) durch elektrische Felder
Bsp.: LHC 7 TeV Protonen (7000 fache Ruhemasse!)
- Ablenkung auf Kreisbahn, damit Beschleunigungselemente mehrfach durchlaufen werden können \Rightarrow Synchrotronstrahlung; Bsp.: LEP 30 MW Verlust!
- Frontaler Zusammenstoß

$$m_{new} = \sqrt{(p_1 + p_2)^2} = \sqrt{2} \sqrt{m_p^2 + E_1 E_2 + \vec{p}_1 \vec{p}_2} \approx 2E_1 E_2$$

- Nachweis der Reaktionsprodukte in Detektoren

A Compact Solenoidal Detector for LHC





Teilchenbeschleuniger IV

Technische Daten des LHC

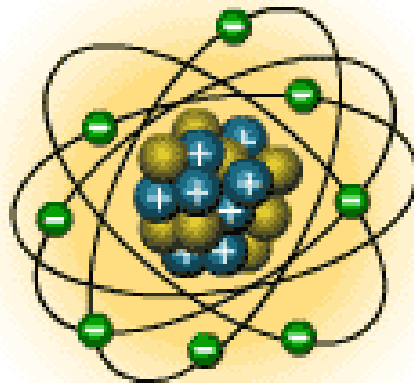
- Umfang: 27 km, in 50 - 150 m Tiefe
- $T = 2 \text{ K}$, supraleitende Magnete, bis zu 8 Tesla $\equiv 10GJ \equiv 2200t \text{ TNT}$
- 10^9 Kollisionen pro Sekunde
- 15 Petabyte = 15 000 Terabyte pro Jahr (20km hoher CD Stapel)
- CMS: 14 500 t, 22 m lang, 15m Durchmesser
- Atlas: 7 000 t, 45 m lang, 25m Durchmesser
- 7000 Physiker aus 80 Nationen
- Start: November 2007





Die EM WW

- Photonen koppeln an elektrisch geladene Materie
 - ◆ Elektronen kreisen um Atomkerne (Chemie, Atomphysik,...)
 - ◆ An Teilchenbeschleunigern gibt es Reaktionen, wie
$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma^* \rightarrow \mu^+ + \mu^-$$
- ?Ist $e^+ + e^- \rightarrow \gamma^* \rightarrow \nu + \bar{\nu}$ möglich?
- Theoretische Beschreibung: Quantenelektrodynamik
1948 Feynman, Tomonaga, Schwinger (NP 1965)

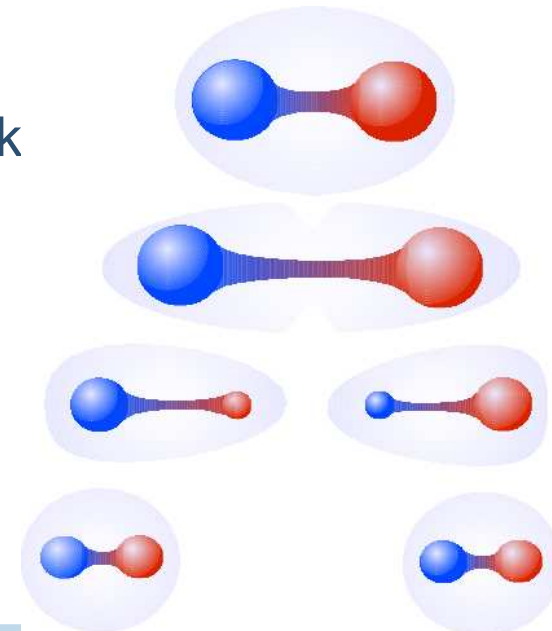


Atom B



Die starke WW

- Gluonen koppeln an Quarks
- Bindet 3 Quarks zu Baryonen
z.B. $p = uud$
- Bindet 1 Quark und 1 Antiquark zu einem Meson
z.B. $\pi^+ = u\bar{d}$, $B^+ = b\bar{d}$
- Confinement: Es gibt keine freien Quarks oder Gluonen in der Natur!
Nur Baryonen oder Mesonen
- ?Ist $e^+ + e^- \rightarrow g \rightarrow u + \bar{u}$ möglich?
- Theoretische Beschreibung: Quantenchromodynamik
1973 Gross, Politzer, Wilzcek (NP 2004)





Die schwache WW

■ Radioaktiver Zerfall

$$n \rightarrow p + W^- \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

$$d \rightarrow u + W^- \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$$

■ Neutrinoophysik

- ◆ Das Neutrino nimmt nur an der schwachen WW teil!
- ◆ Vorhersage 1930 Pauli
- ◆ Nachweis 1956 Cowan, Reines (NP 1995)
- ◆ Neutrinooszillationen $\Rightarrow m_\nu \neq 0$ (NP 2002)

■ 1956 **Paritätsverletzung** (Lee, Yang (NP 1957), Wu)

■ Sakharov: **CP Verletzung** notwendig für die Existenz von Materie

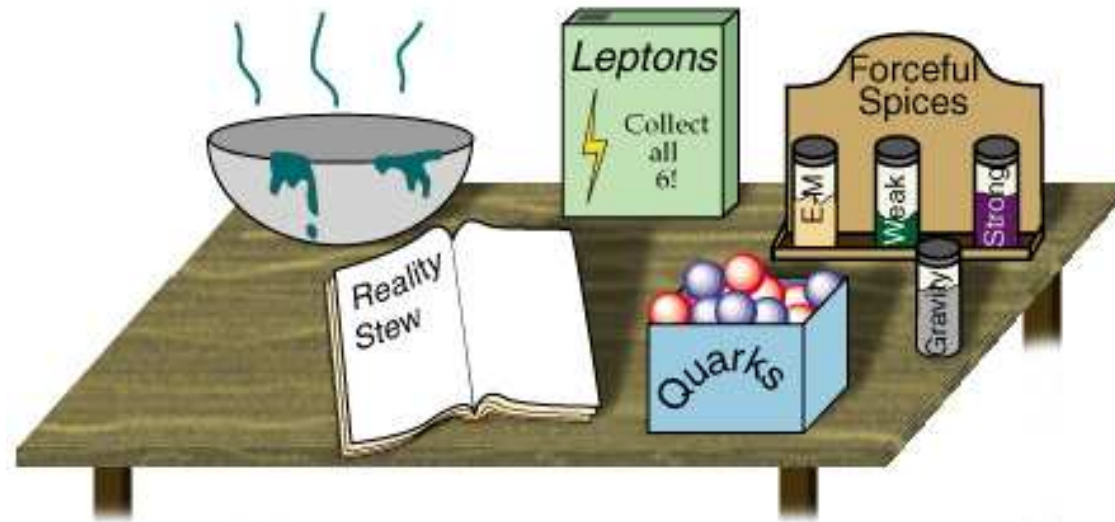
- ◆ 1964 bei Kaonen ($s\bar{d}$); Christenson, Cronin, Fitch, Turlay (NP 1980)
- ◆ 2000 bei B-Mesonen ($b\bar{d}$); B-Fabriken (Belle -KEK; BaBar - SLAC)

■ Theoretische Beschreibung: Quantenflavordynamik 1967 Glashow, Salam, Weinberg (NP 1979)



Das Standardmodell der Teilchenphysik II

- Quantenchromodynamik
- Quantenelektrodynamik
- Quantenflavordynamik



ABER

Theorie: $M_Z = 0 = m_q = m_l \leftrightarrow$ Experiment: $m_Z \approx 91\text{GeV}, m_q \neq 0 \neq m_l$



* Im Bann der Eichsymmetrie I

Die Maxwell Gleichungen (Photonen) (3. Sem.)

$$\begin{aligned}\vec{\nabla} \cdot \vec{E} &= 4\pi\rho \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{B} &= 0 \\ \vec{\nabla} \times \vec{E} &= -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \vec{\nabla} \times \vec{B} &= +\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \vec{j}\end{aligned}$$

\Leftrightarrow

$$\begin{aligned}\mathcal{L} &= -\frac{1}{4} F^{\mu\nu} F_{\mu\nu} \\ F^{\mu\nu} &:= \partial^\mu A^\nu - \partial^\nu A^\mu \\ \vec{E} &:= -\vec{\nabla} A^0 - \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \\ \vec{B} &:= \vec{\nabla} \times \vec{A}\end{aligned}$$

Die Dirac Gleichung (Elektronen) (5. Sem.)

$$(i \not{\partial} - m)\Psi = 0$$

\Leftrightarrow

$$\mathcal{L} = \bar{\Psi}(i \not{\partial} - m)\Psi$$

Quantenelektrodynamik (≥ 5 . Sem.)

$$\mathcal{L} = \bar{\Psi}(i \not{D} - m)\Psi - \frac{1}{4} F^{\mu\nu} F_{\mu\nu}$$

mit $\not{V} := V^\mu \gamma_\mu$ und $D^\mu = \partial^\mu - igA^\mu$



* Im Bann der Eichsymmetrie II

Eichtheorien: A^μ ist nicht eindeutig festgelegt

$$A^\mu \rightarrow A^\mu - \partial^\mu \Lambda$$

$$\Psi \rightarrow e^{iq\Lambda} \Psi$$

$$\Lambda = \Lambda(\vec{x}, t)$$



\mathcal{L}_{QED} verändert sich nicht

Auf den Kopf gestellt:

- U(1) Eichsymmetrie Ψ
- Lorentzinvarianz

 $\Rightarrow \mathcal{L}_{QED}$

Alle bekannten fundamentalen Theorien der Natur basieren auf diesem Prinzip

Verallgemeinere die abelsche U(1) Symmetrie zu einer nicht-abelschen SU(N) Sym.

- SU(2) : Schwache WW
- SU(3) : Starke WW

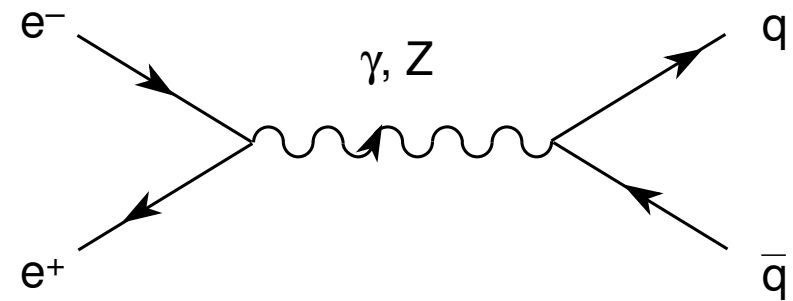
1954: Yang, Mills

Was macht Eichtheorien so attraktiv?

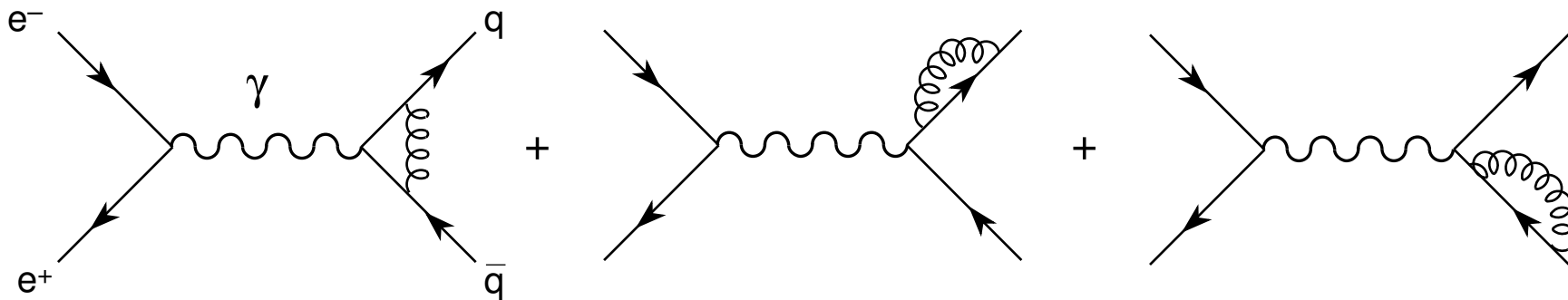


* Crash-Kurs in Quantenfeldtheorie I

Der Prozess $e^+ + e^- \rightarrow q + \bar{q}$ wird durch folgendes Feynmandiagramm dargestellt. Nach den Feynmanregeln entspricht jedem graphischen Element ein mathematischer Ausdruck \Rightarrow Wirkungsquerschnitt, ...



Werden Quanteneffekte berücksichtigt, so erhält man zusätzliche **virtuelle** Beiträge



Die Feynmanregeln ergeben für die virtuellen Beiträge Ausdrücke, die wie

$$\int \frac{d^4 k}{(2\pi)^4} \frac{k^\mu k^\nu}{[(k+q)^2 - m_1^2][k^2 - m_2^2] k^2} \text{ die im allgemeinen divergieren!}$$



* Crash-Kurs in Quantenfeldtheorie II

Renormalization for pedestrians:

Ändere die Dimensionalität der Raumzeit von **4 nach $D = 4 - 2\epsilon$** !
⇒ Divergente Integrale können wie folgt ausgedrückt werden

$$\int \frac{d^4 k}{(2\pi)^4} \dots \stackrel{4 \rightarrow D}{=} a \left[\frac{1}{\epsilon} + const. + \mathcal{O}(\epsilon) + \dots \right]$$

Eine Theorie ist **renormierbar**, wenn sich in physikalischen Größen alle Pole in ϵ wegheben.

1971: t'Hooft, Veltman; NP 1999: **Eichtheorien sind renormierbar!!!**

Mit diesem Prozedere: ⇒ QED ist die “exakteste” Theorie in der Physik

$$\begin{aligned} \frac{g - 2}{2} \text{ Theory} &= (1159652201 \pm 27) \cdot 10^{-12} \\ \frac{g - 2}{2} \text{ Exp} &= (1159652187 \pm 4) \cdot 10^{-12} \end{aligned}$$



* Crash-Kurs in Quantenfeldtheorie II

Renormierung \Rightarrow die Kopplungskonstante wird skalenabhängig

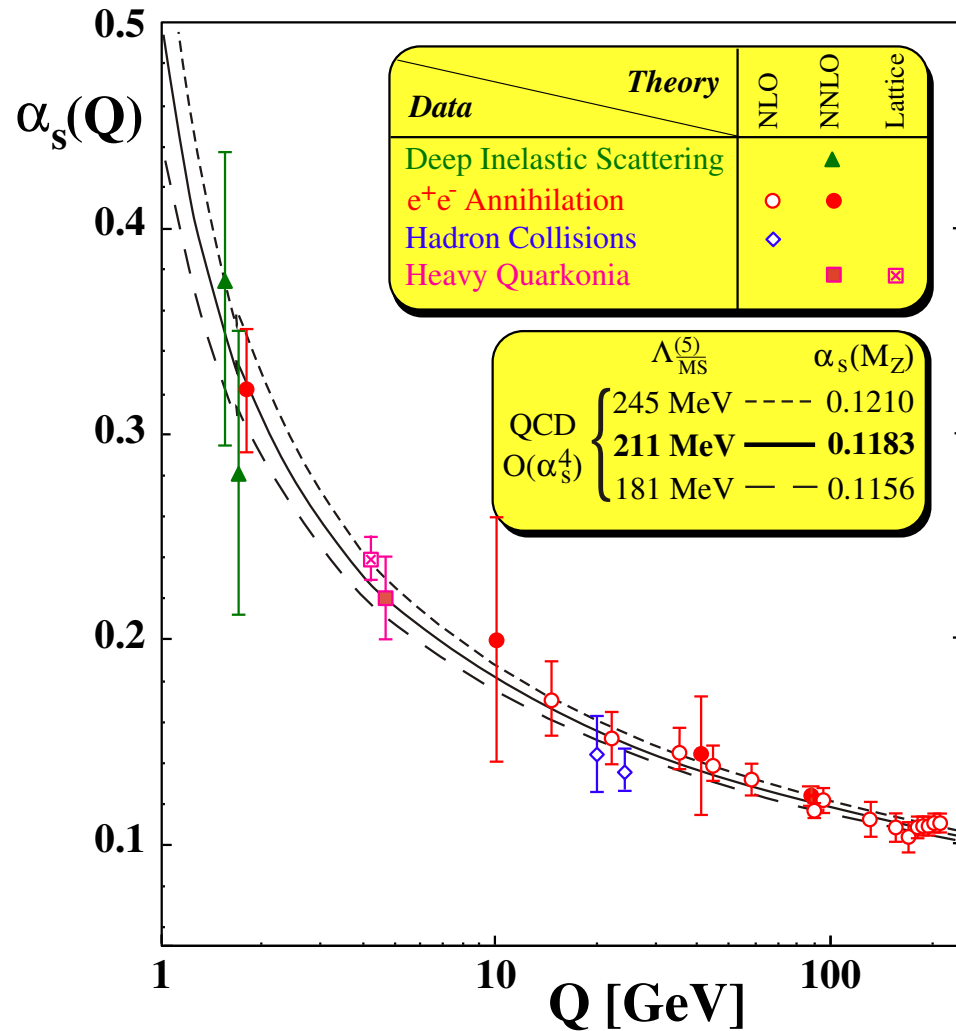
$$\alpha_s = \frac{4\pi}{\beta_0 \text{Log} \left[\frac{\mu^2}{\Lambda^2} \right]}$$

β_0 aus Theorie, Λ aus Experiment.

\Rightarrow große Skala \equiv kleine Kopplung

Asymptotische Freiheit

\Rightarrow für kleine Energien: Störungstheorie



Ann.: starke WW \equiv SU(3), qualitativ sehr unterschiedlich zu U(1)

1973: Gross, Politzer, Wilzeck; NP 2004



* Das Standardmodell der Teilchenphysik IV

Benutze Yang-Mills Theorien zur Beschreibung der Natur

$$\mathcal{L}_{SM} = \mathcal{L}_{QED}^{U(1)} + \mathcal{L}_{Weak}^{SU(2)} + \mathcal{L}_{QCD}^{SU(3)}$$

Aber: Eichsymmetrie verbietet Massen der schwachen Eichbosonen und der Fermionen!



Higgsmechanismus:

Massen erlaubt \leftrightarrow hypothetisches Teilchen wird postuliert

$$\mathcal{L}_{SM} = \mathcal{L}^{U(1) \times SU(2)} + \mathcal{L}_{Higgs} + \mathcal{L}_{QCD}^{SU(3)}$$

Der elektroschwache Sektor des SM wurde bei hohen Energien (LEP, CERN) mit einer Genauigkeit im Promillebereich getestet und bestätigt (2-loop)
Hierbei **muss** das Higgsteilchen als virtuelles Teilchen berücksichtigt werden.



* Das Standardmodell der Teilchenphysik V

Werden Fermionmassen mit dem Higgsmechanismus erzeugt, so findet man

- die neutrale schwache WW ändert den Flavor nicht (Z^0):

$$\mathcal{L}^{U(1) \times SU(2)} = \dots \cdot \begin{pmatrix} u \\ c \\ t \end{pmatrix}^\dagger \gamma_\mu \mathbb{1} \begin{pmatrix} u \\ c \\ t \end{pmatrix} + \dots \cdot \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}^\dagger \gamma_\mu \mathbb{1} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix} + \dots$$

- die geladene schwache WW ändert den Flavor und die Familie! (W^\pm)

$$\mathcal{L}^{U(1) \times SU(2)} = \dots \cdot \begin{pmatrix} u \\ c \\ t \end{pmatrix}^\dagger \gamma_\mu V_{CKM} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix} + \dots$$

Die **Cabibbo-Kobayashi-Maskawa** Matrix beschreibt die Stärke der geladenen schwachen WW und ist per Konstruktion unitär.

$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$



* Das Standardmodell der Teilchenphysik VI

V_{CKM} ist unitär

- 2 Familien: 1 reeller Parameter 1963: Cabibbo
- 3 Familien: 3 reelle, 1 imaginärer Parameter 1973: Kobayashi, Maskawa
imaginäre Kopplung \Leftrightarrow CP Verletzung (C: Ladung \rightarrow - Ladung, P: $\vec{x} \rightarrow -\vec{x}$)

1964: Christenson, Cronin, Fitch, Turlay; NP 1980: kleiner CP verletzender Effekt im $K=(s\bar{d})$ -system

1999-... : B-Fabriken (Belle, BaBar): CP Verletzung im $B=(b\bar{d})$ -system



Baryonenasymmetrie im Universum: Fast keine Antimaterie im Universum

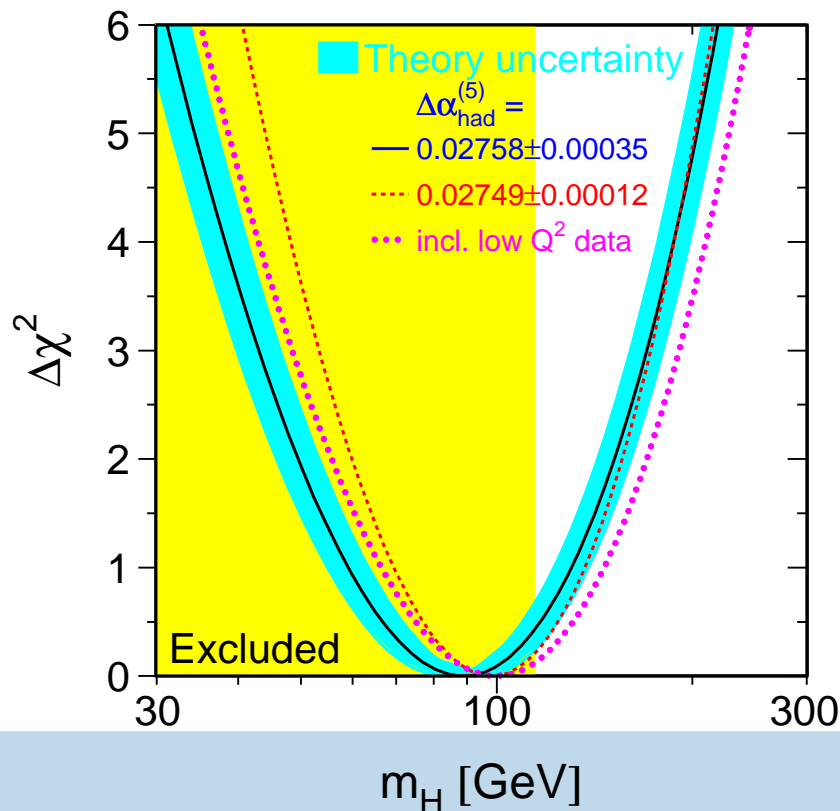
1967: Sakharov Theorem: Eine Baryonenasymmetrie kann erzeugt werden, wenn die Naturgesetze CP verletzen

\Rightarrow b und t sind scheinbar notwendig für unsere Existenz



Higgsmechanismus kurzgefasst

- Eichsymmetrie wichtig um der Quantenfeldtheorie Sinn zu geben
- Fermionmassen und Eichbosonmassen verletzen die Eichsymmetrie
Idee: **Higgsmechanismus**
- + Eichsymmetrie bleibt trotz Massen erhalten
- + CP Verletzung wird im Standardmodell eingebaut und experimentel bestätigt!
- Es wird adhoc ein neues Teilchen eingeführt, das noch nicht entdeckt wurde





Zusammenfassung

Das SM enthält 25 (+3) **Parameter**

- 3 Kopplungen: g_1, g_2, g_3
- 12 Fermionmassen $m_e, m_\mu, m_\tau, m_{\nu_e}, m_{\nu_\mu}, m_{\nu_\tau}, m_u, m_d, m_s, m_c, m_b, m_t$
- 2 Parameter vom Higgspotential
- 8 (or 10) Mischungsparameter (CKM-Matrix und MNS-Matrix)

Trotz seines enormen Erfolges lässt das SM viele Fragen unbeantwortet

- Woher kommen die Werte der Parameter?
- Wo steckt die restliche CP-Verletzung?
- Wo ist die Gravitation?
- Dunkle Materie
- Warum gibt es drei Familien? ...

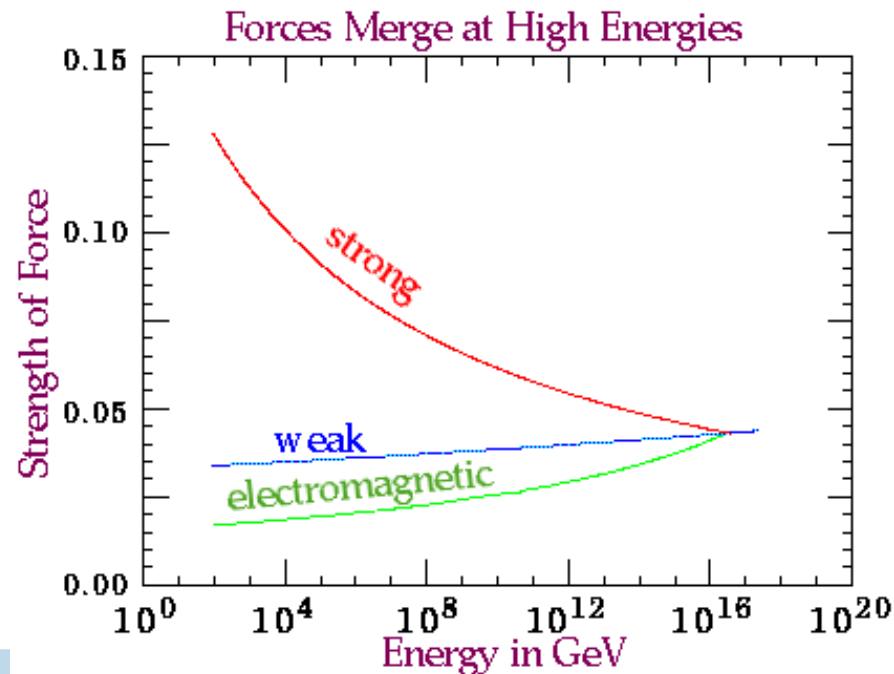
⇒ **Neue Physik?**



To do list

- Standardmodellparameterbestimmung
 - ◆ B-Physik: Bestimmung der **CKM-Matrix**
 - ◆ Neutrino-physik: Bestimmung der **MNS-Matrix** und von m_ν
 - ◆ Gibt es das **Higgsteilchen**? LHC
 - ◆ **ABER: Die interessante Physik ist oft durch QCD Effekte überdeckt**
QCD nur näherungsweise lösbar:
Störungstheorie, Summenregeln, Gitter,...

- Suche nach neuer Physik
 - ◆ LHC
 - ◆ Supersymmetrie
 - ◆ Große Vereinheitlichung
 - ◆ Superstringtheorien



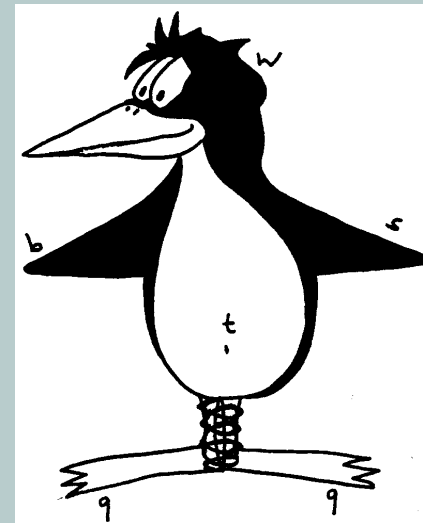
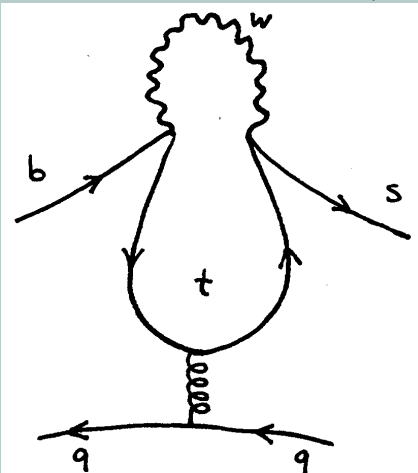


Flavor Physics I: Motivation

The physics of the b-quark is one of the most active field in high energy physics

- The **CKM-Parameters** appearing in decays of **b-hadrons** are among the least well known: $V_{cb}, V_{ub}, V_{tb}, V_{ts}, V_{td}$

- **New physics** effects might be large in **loop induced b-decays** \equiv decays forbidden at tree level, e.g. “penguin decays”



Vainshtein, Zakharov, Shifman, 1975

- **CP violation** effects are expected to be large in the b-system



Flavor Physics II: b-hadrons

Due to strong IA the b-quark lives in the following b-hadrons

B- Mesons:

$$B^+ = (\bar{b}u)$$

$$B_d = (\bar{b}d)$$

$$B_s = (\bar{b}s)$$

$$B_c^+ = (\bar{b}c)$$

$$B^- = (b\bar{u})$$

$$\bar{B}_d = (b\bar{d})$$

$$\bar{B}_s = (b\bar{s})$$

$$B_c^- = (b\bar{c})$$

$$5.2790(5) \text{ GeV}$$

$$5.2794(5) \text{ GeV}$$

$$5.3696(24) \text{ GeV}$$

$$6.4(4) \text{ GeV}$$

$$1.671(18) \text{ ps}$$

$$1.536(14) \text{ ps}$$

$$1.461(57) \text{ ps}$$

$$0.46(18) \text{ ps}$$

b- Baryons:

$$\Lambda_b = (udb)$$

$$\Xi_b^0 = (usb)$$

$$\Xi_b^- = (dsb)$$

$$5.624(9) \text{ GeV}$$

$$??? \text{ GeV}$$

$$??? \text{ GeV}$$

$$1.229(80) \text{ ps}$$

$$??? \text{ ps}$$

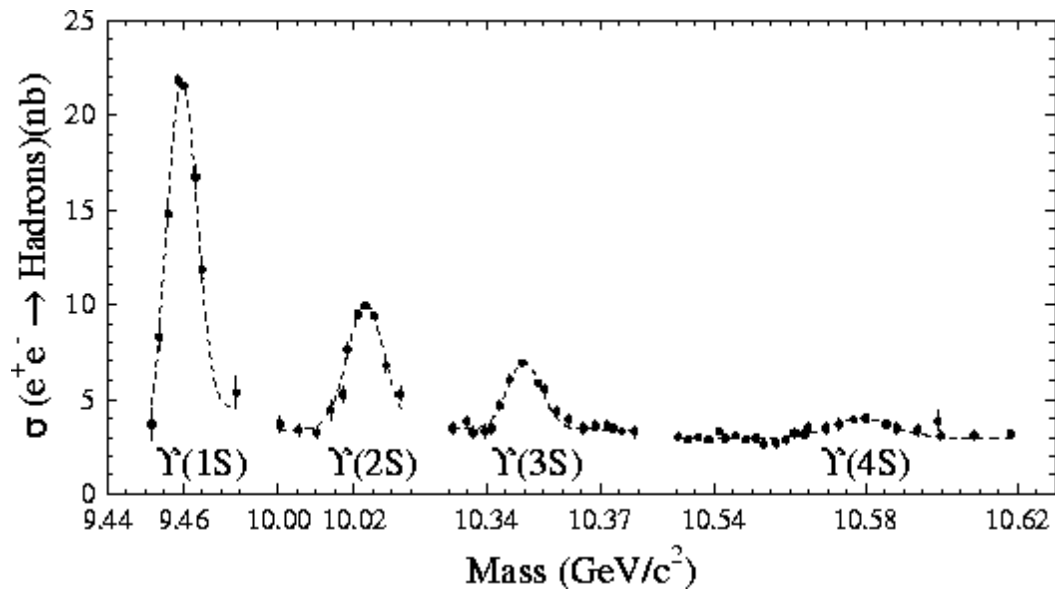
$$??? \text{ ps}$$



Flavor Physics II: B factories

Build an accelerator to create as much b-hadrons as possible
 $e^+ - e^-$ -collider: low background \Rightarrow precision measurements

$$e^+ - e^- \rightarrow \Upsilon (= b\bar{b} \text{ - resonances}) \rightarrow B + \bar{B}$$



$$2m_{B^{\pm,0}} \approx 10559 \text{ MeV} \Rightarrow (4s) \text{ resonance i.e. no } B_s, B_c$$

$$\tau_B \approx 10^{-12} \text{ s} \Rightarrow \text{asymmetric machine}$$

$p - p$ -collider: large cross sections, B_s, B_c, Λ_b accessible



Flavor Physics IV: B factories

machine	location	particles energy	Exp.	size	luminosity [$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$]
LEP '89 - '01	CERN Genf, CH	$e^+ + e^-$ 105 GeV	ALEPH, DELPHI OPAL, ZEUS	U: 27 km	10^{32}
TEVATRON '87 -	FERMILAB Chicago, USA	$p + \bar{p}$ 1 TeV	CDF D 0	U: 6.3 km	$5 \cdot 10^{31}$
CESR '79 -	CLEO Cornell, USA	$e^+ + e^-$ 6 GeV		U: 0.8 km	$1.3 \cdot 10^{33}$
PEP-II '99 -	SLAC Stanford USA	$e^+ + e^-$ $e^+ : 3.1\text{GeV}$ $e^- : 9\text{ GeV}$	BaBar	U: 2.2 km	$0.92 \cdot 10^{34}$ (Peak) 244fb^{-1}
KEKB '99 -	KEK Japan	$e^+ + e^-$ $e^+ : 3.5\text{ GeV}$ $e^- : 8\text{ GeV}$	Belle	U: 0.8 km	$1.93 \cdot 10^{34}$ (Peak) 310fb^{-1}

$$\# \text{ of events} = \int \mathcal{L} dt \cdot \sigma$$

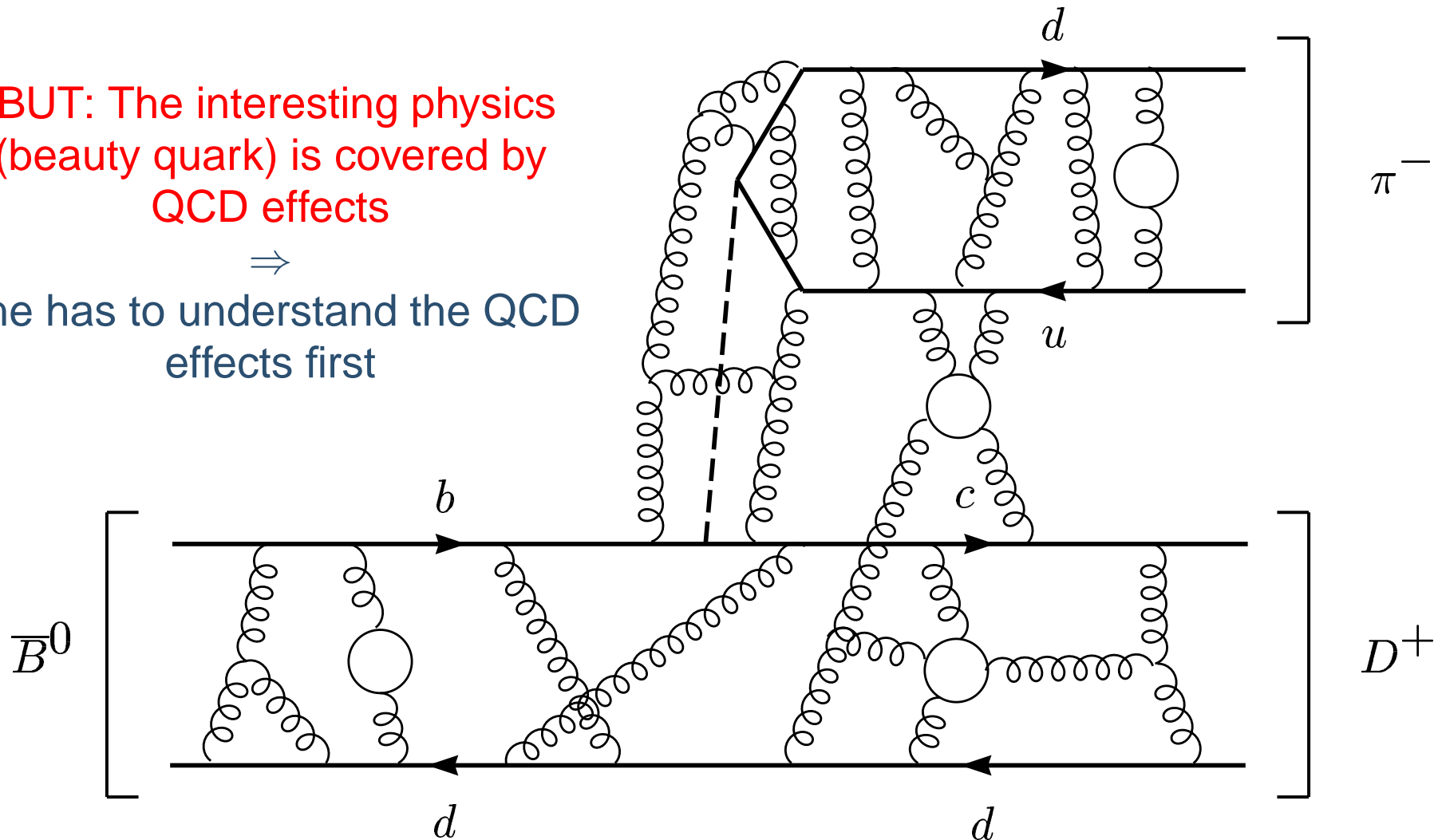


Theory of b-decays I: The beast

BUT: The interesting physics (beauty quark) is covered by QCD effects



one has to understand the QCD effects first



If the Beauty is heavy, the Beast can be beaten



Theory of b-decays II: \mathcal{H}_{eff}

In b-decays three different scales arise

Mass of the W-Boson

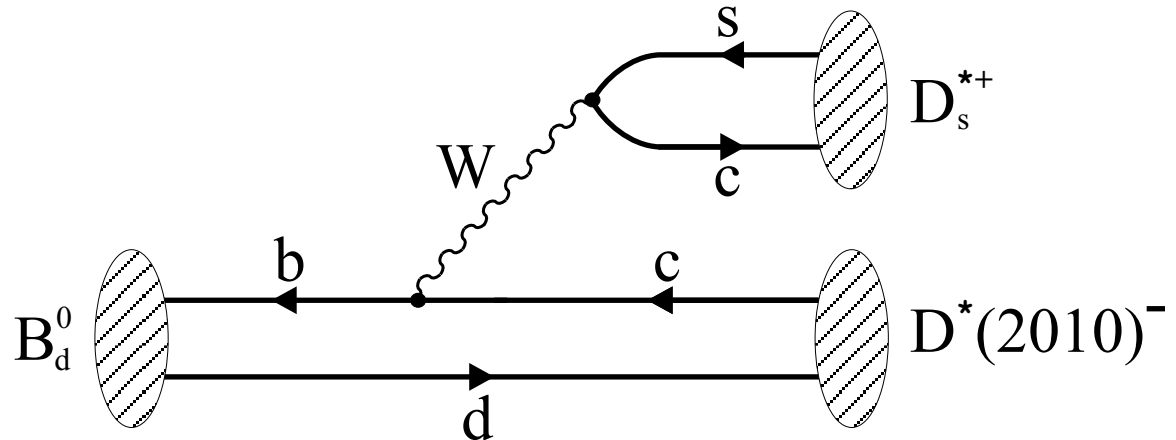
$$M_W \approx 80 \text{ GeV}$$

Mass of the b-hadron

$$\mathcal{O}(M_B) \approx 5 \text{ GeV}$$

Binding energy of QCD

$$\Lambda \approx 1 \text{ GeV}$$



Big logarithms arise $\alpha_s \ln \left(\frac{m_b^2}{M_W^2} \right) \approx 6\alpha_s \rightarrow$ perturbation theory valid?

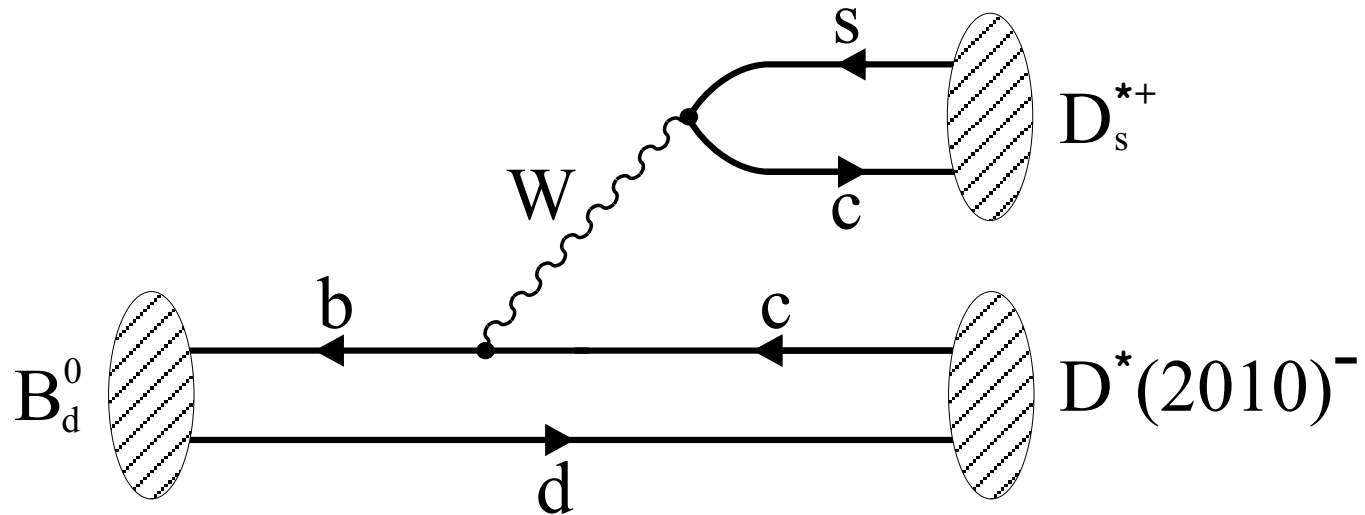
Use this hierarchy to integrate out heavy particles à la *Fermi-Theory of Weak Interaction*
Resulting **Operator Product Expansion** allows to separate
Long-distance and **Short-distance** Physics

$$\mathcal{H}_{eff} = \frac{G_F}{\sqrt{2}} \left[\sum_{q=u,c} V_c^q (C_1 Q_1^q + C_2 Q_2^q) - V_p \sum_{j=3}^6 C_j Q_j \right]$$



Theory of b-decays III: Inclusive decays

This Hamiltonian can be used to calculate inclusive and exclusive decays



Exclusive modes: (exp.: +, theory: -)

$$\begin{aligned}
 B_d^0 &\rightarrow D^{*(2010)-} D_s^{*+} \\
 &\rightarrow D^- D_s^{*+} \\
 &\rightarrow D^{*(2010)-} D_s^+ \\
 &\rightarrow D^- D_s^+
 \end{aligned}$$

Inclusive mode: (exp.: -, theory: +)

$$\bar{b} \rightarrow \bar{c} c \bar{s}$$

We calculate lifetimes and use the fact that b is heavy!



Fight the beast to find the beauty

The physics of beauty is currently one of the hot topics in high energy physics
(LHC starts in 2007+x)

Experiments are now able to make precision measurements
(Super-B, BTeV, LHCb)

To fulfill the desired physics program
parameters of the SM
new physics
CP-violation
QCD effects have to be understood in detail



The Nobel Prizes in Particle Physics

- 2006 John C. Mather, George F. Smoot : Anisotropies in the cosmic microwave background
- 2004 David J. Gross, H. David Politzer, Frank Wilczek : Asymptotic Freedom
- 2002 Raymond Davis Jr., Masatoshi Koshiba, Riccardo Giacconi : Neutrino Oscillations
- 1999 Gerardus 't Hooft, Martinus J.G. Veltman : Renormalization of Gauge Theories
- 1995 Martin L. Perl, Frederick Reines : τ and ν_e
- 1992 Georges Charpak : particle detectors, multiwire proportional chamber
- 1990 Jerome I. Friedman, Henry W. Kendall, Richard E. Taylor : DIS \rightarrow Quark model
- 1989 Hans Dehmelt, Norman Ramsey, Wolfgang Paul : anomalous magnetic moment of the electron
- 1988 Leon M. Lederman, Melvin Schwartz, Jack Steinberger : ν_τ
- 1984 Carlo Rubbia, Simon van der Meer : W and Z
- 1980 James Cronin, Val Fitch : CP violation
- 1979 Sheldon Glashow, Abdus Salam, Steven Weinberg : The standard model
- 1976 Burton Richter, Samuel C.C. Ting : Charm
- 1969 Murray Gell-Mann : Quark model
- 1968 Luis Alvarez : bubble chamber and data analysis
- 1965 Sin-Itiro Tomonaga, Julian Schwinger, Richard P. Feynman : QED
- 1963 Eugene Wigner, Maria Goeppert-Mayer, J. Hans D. Jensen : Symmetries
- 1961 Robert Hofstadter, Rudolf Mössbauer : e- p Scattering
- 1960 Donald A. Glaser : invention of the bubble chamber
- 1959 Emilio Segrè, Owen Chamberlain : Antiproton
- 1957 Chen Ning Yang, Tsung-Dao Lee : P violation
- 1955 Willis E. Lamb, Polykarp Kusch : Precisions tests of e
- 1954 Max Born, Walther Bothe : Coincidence method



The Nobel Prizes in Particle Physics

- 1951 John Cockcroft, Ernest T.S. Walton Accelerator
- 1950 Cecil Powell Photographic detectors -> mesons
- 1949 Hideki Yukawa Prediction of pi
- 1945 Wolfgang Pauli Fermions
- 1943 Otto Stern Magnetic moment of the proton
- 1939 Ernest Lawrence Cyclotrone
- 1936 Victor F. Hess, Carl D. Anderson Cosmic radiation Positron
- 1935 James Chadwick neutron
- 1933 Erwin Schrödinger, Paul A.M. Dirac QM, Prediction of positron
- 1932 Werner Heisenberg QM
- 1929 Louis de Broglie Wave picture of e
- 1927 Arthur H. Compton, C.T.R. Wilson Particle picture of e, Nebelkammer
- 1923 Robert A. Millikan Charge of e
- 1922 Niels Bohr Structure of atoms
- 1921 Albert Einstein Theory of the photoeffect
- 1918 Max Planck QM
- 1901 Wilhelm Conrad Röntgen xrays