

Eine kleine Reise durch die Welt der Teilchen

Jennifer Girrbach

Institute for Advanced Study (TUM-IAS)



Think big – Großgeräte in der Physik
Symposium des BADW Forums Technologie

19. April 2013

Fundamentale Frage

Was ist drin?



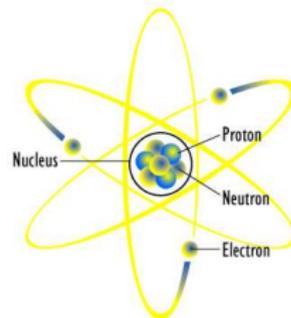
Fundamentale Frage

Was ist drin?



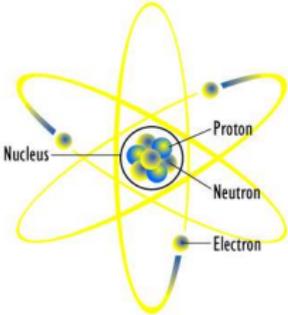
Fundamentale Frage

Was ist drin?



Fundamentale Frage

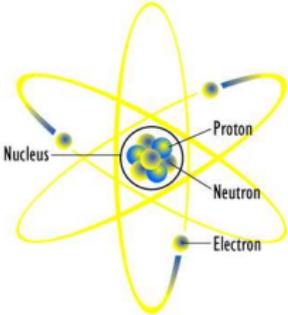
Was ist drin?



Proton

Fundamentale Frage

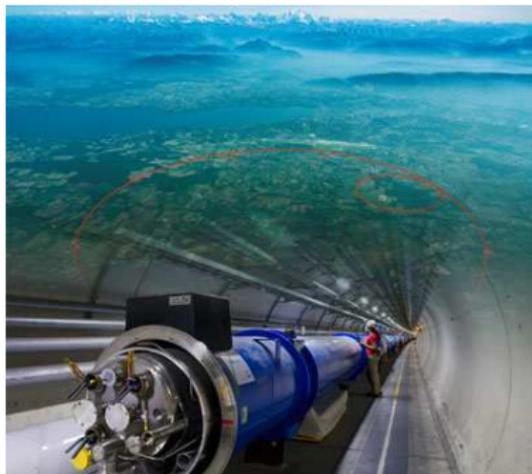
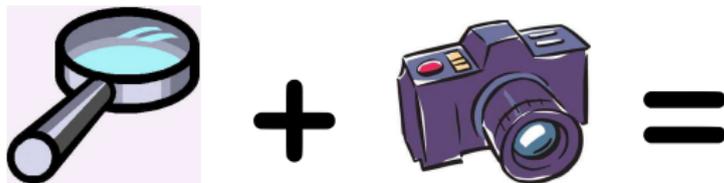
Was ist drin?



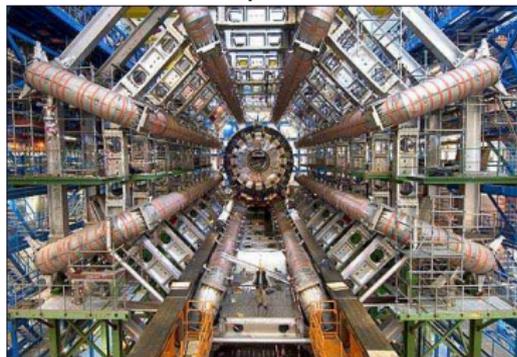
2 Up-Quarks; 1 Down-Quark

Proton

Teure Mikroskope für Teilchenphysiker

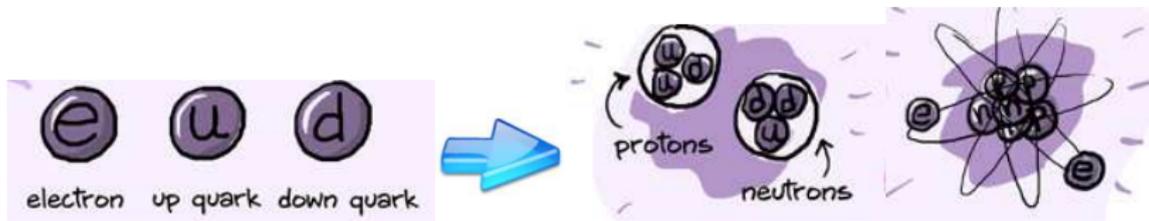


90 Megapixel Kamera;
40 Mio. Bilder pro Sekunde



Teilchenbeschleuniger und Detektor

Bausteine "normaler" Materie: e, u, d



Muster & Struktur \Rightarrow Periodensystem der Elemente

YOU TAKE ALL THE ELEMENTS AND ORGANIZE THEM BY THEIR CHARACTERISTICS...

AND THEY FALL INTO CATEGORIES...

H																			He					
Li	Be																		B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg																		Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr							
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe							
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn							
Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Uut	Fl	Uup	Lv	Uus	Uuo							

Problem:

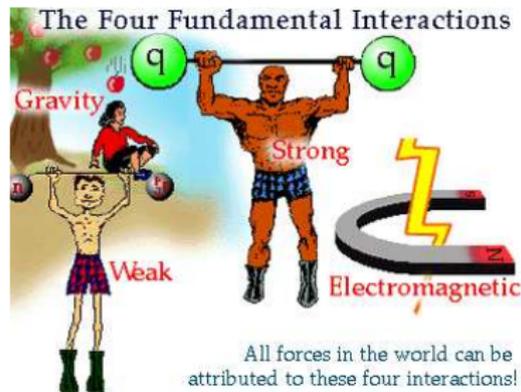
Noch mehr Teilchen wurden entdeckt:

- μ , τ , ν_e , ν_μ , ν_τ
- c, s, t, b

Warum? Gibt es noch mehr?

Die vier Grundkräfte der Natur

- 1 **Gravitation:** Anziehung von Massen;
 $G_N = 0.00000000000000000000000000000001$
- 2 **Schwache Kraft:** z.B. radioaktiver Zerfall; schwache Lad.; $G_F = 0.00001$
- 3 **Elektromagnetismus (QED):**
Anziehung/Abstoßung von elektrischen Ladungen; $\alpha_e = 0.001$
- 4 **Starke Kraft (QCD):** Anziehung von Proton/Neutron im Kern ("Farbladung"); $\alpha_s = 0.1$



- Kräfte/Wechselwirkungen: Austausch von einem (Eich-) Teilchen: Photon γ , W^\pm , Z^0 Boson, Gluon g

Das Standardmodell der Teilchenphysik (SM)

	I	FERMIONS II	III	BOSONS	
QUARKS	 u UP QUARK	 c CHARM QUARK	 t TOP QUARK	 γ PHOTON	FORCE CARRIERS
 d DOWN QUARK	 s STRANGE QUARK	 b BOTTOM QUARK	 g GLUON		
LEPTONS	 ν_e ELECTRON-NEUTRINO	 ν_μ MUON-NEUTRINO	 ν_τ TAU-NEUTRINO	 Z Z BOSON	
 e^- ELECTRON	 μ MUON	 τ TAU	 W W BOSON		



- “Periodensystem” der Teilchenphysik
- SM beschreibt Eigenschaften der Elementarteilchen und 3 der 4 Naturkräfte
- Teilchen sortiert nach ihren Eigenschaften
- äußerst erfolgreiche Theorie
- 3 Generationen von Teilchen

Das Standardmodell der Teilchenphysik (SM)



- “Periodensystem” der Teilchenphysik
- SM beschreibt Eigenschaften der Elementarteilchen und 3 der 4 Naturkräfte
- Teilchen sortiert nach ihren Eigenschaften
- äußerst erfolgreiche Theorie
- 3 Generationen von Teilchen

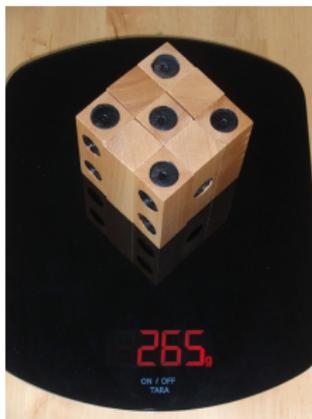
Das Standardmodell der Teilchenphysik (SM)



$$\mathcal{L}_{SM} =$$

$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{4} W_{\mu\nu}^a W^{\mu\nu a} - \frac{1}{4} B_{\mu\nu} B^{\mu\nu} - \frac{1}{4} G_{\mu\nu}^a G^{\mu\nu a} \\
 & + \bar{L} \gamma^\mu \left(i \partial_\mu + g_2 \frac{\sigma^a}{2} W_\mu^a + g_1 Y B_\mu \right) L \\
 & + \bar{l}_R \gamma^\mu \left(i \partial_\mu + g_1 Y B_\mu \right) l_R \\
 & + \bar{Q} \gamma^\mu \left(i \partial_\mu + g_s \frac{\lambda^a}{2} G_\mu^a + g_2 \frac{\sigma^a}{2} W_\mu^a + g_1 Y B_\mu \right) Q \\
 & + \bar{d}_R \gamma^\mu \left(i \partial_\mu + g_s \frac{\lambda^a}{2} G_\mu^a + g_1 Y B_\mu \right) d_R \\
 & + \bar{u}_R \gamma^\mu \left(i \partial_\mu + g_s \frac{\lambda^a}{2} G_\mu^a + g_1 Y B_\mu \right) u_R \\
 & + \left| \left(i \partial_\mu + g_2 \frac{\sigma^a}{2} W_\mu^a + g_1 Y B_\mu \right) \Phi \right|^2 \\
 & + \mu^2 \Phi^\dagger \Phi + \lambda (\Phi^\dagger \Phi)^2 \\
 & - \bar{L} Y_l \Phi l_R - \bar{Q} Y_d \Phi d_R - \bar{Q} Y_u \Phi^c u_R + h.c.
 \end{aligned}$$

QCD Effekt in den Tiefen des Protons



QCD Effekt in den Tiefen des Protons



bleibt natürlich gleich schwer

QCD Effekt in den Tiefen des Protons



bleibt natürlich gleich schwer



Das Proton

QCD Effekt in den Tiefen des Protons



bleibt natürlich gleich schwer



Das Proton



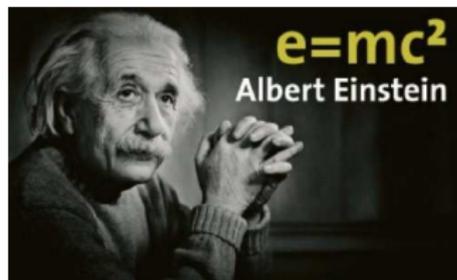
Bauteile: 3 Quarks

?!?

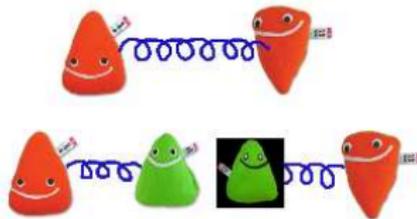
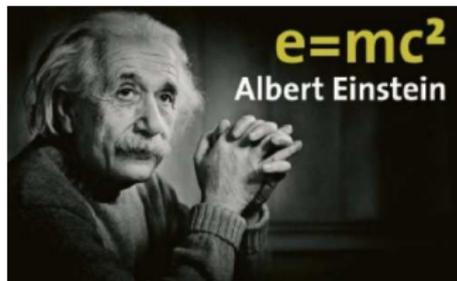
Proton ist 100 Mal schwerer als seine Bausteine! Warum???

Higgs ist **nicht** verantwortlich für Differenz!

Masse-Energie-Äquivalenz $E = mc^2$

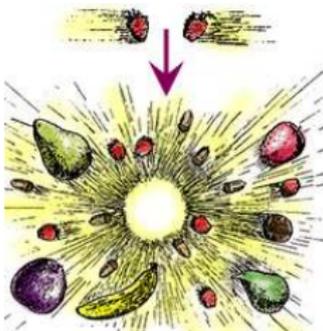


Masse-Energie-Äquivalenz $E = mc^2$

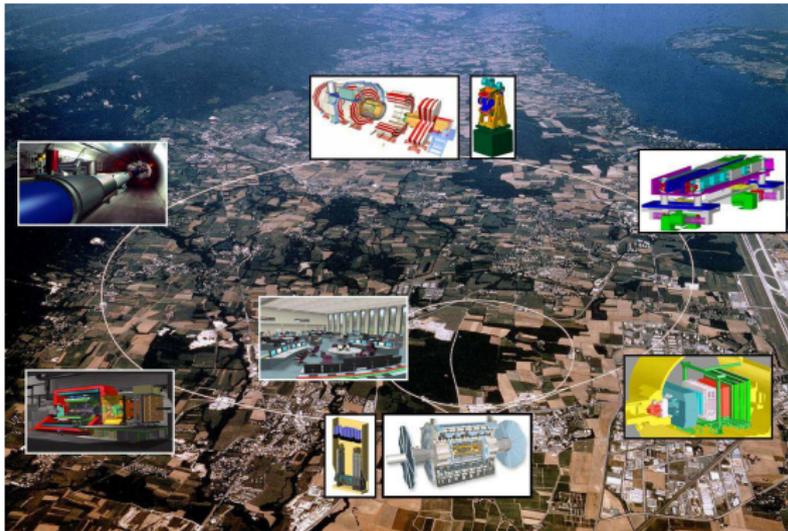


QCD:
Asymptotische
Freiheit (No-
bel Preis 04)
& Confinement

- Masse in Energie umwandeln: Atomkraftwerk, Sonne
- Energie in Masse umwandeln: Teilchenbeschleuniger



Der Large Hadron Collider (LHC) am CERN in Genf



Materie erzeugen, die man nicht hat: $E = mc^2$

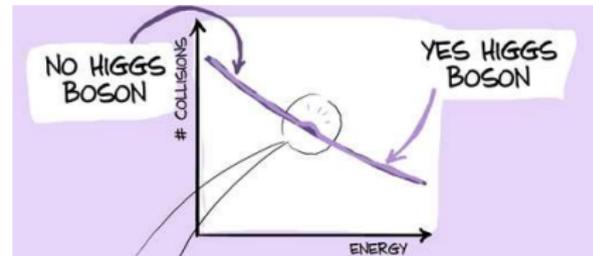
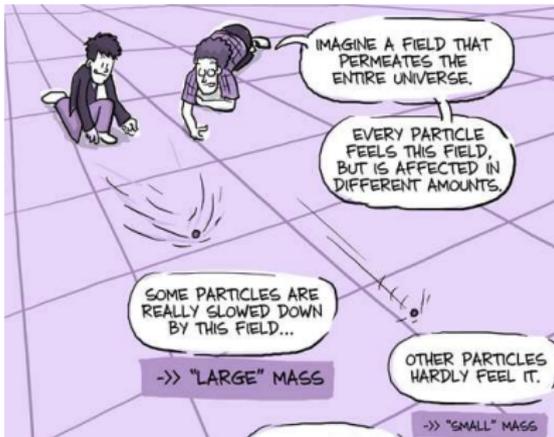


- Umfang: 27 km, ca. 100 m unter der Erde
- 4 große Experimente: ATLAS, CMS, ALICE, LHCb

Warum brauchen wir das Higgs?

MASSE

- Elementarteilchen sind punktförmig, ohne Substruktur, ohne Volumen. Wie können sie Masse haben?
- Mechanismus: Spontane Symmetriebrechung (Nobelpreis 2008)



- Um "kein Higgs" von "Higgs" unterscheiden zu können braucht man sehr viele Daten!

Higgs-Such-Strategie

Theoretiker:



„Das Higgs hat eine Produktionsquerschnitt von 60 picobarn“ \Rightarrow

Das Higgs zeigt
sich voll selten

Higgs-Such-Strategie

Theoretiker:



„Das Higgs hat eine Produktionsquerschnitt von 60 picobarn“ \Rightarrow

Das Higgs zeigt sich voll selten

Experimentalphysiker:



„Wir brauchen einen Teilchenbeschleuniger mit einer Luminosität von $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ “ \Rightarrow

Wir werfen einfach genügend Protonen aufeinander

Higgs-Such-Strategie

Theoretiker:



„Das Higgs hat eine Produktionsquerschnitt von 60 picobarn“ \Rightarrow

Das Higgs zeigt sich voll selten

Problem:
64 TB (100.000 CDs)
Daten pro Sekunden



\Rightarrow **Trigger-System**

Experimentalphysiker:

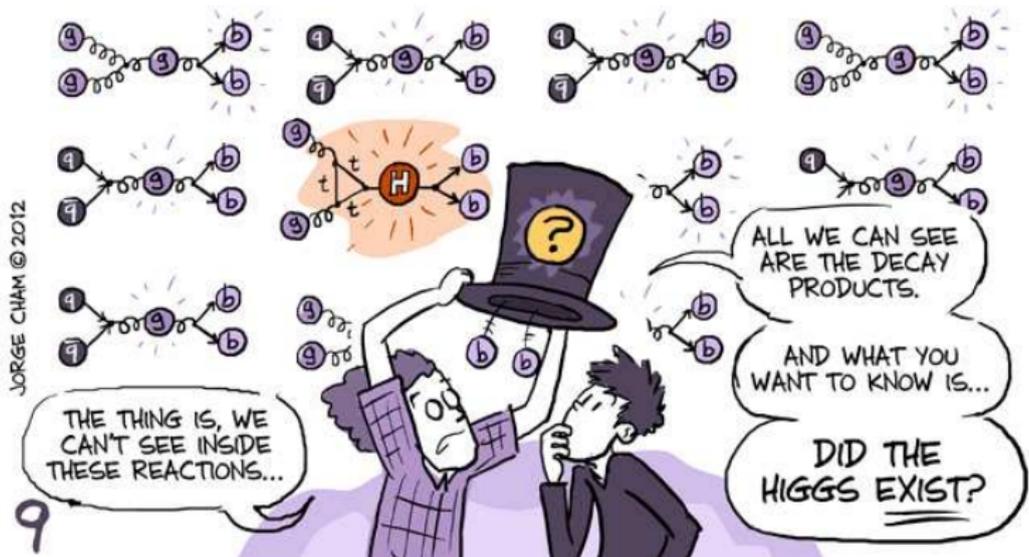


„Wir brauchen einen Teilchenbeschleuniger mit einer Luminosität von $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ “ \Rightarrow

Wir werfen einfach genügend Protonen aufeinander

Beispiel: $H \rightarrow b\bar{b}$

- Problem: Wir sehen nur Zerfallsprodukte!
- $b\bar{b}$ wird viel öfter ohne Higgs produziert (1:1000000) \rightarrow sehr viel Hintergrund



War's das?

Higgs Boson wurde entdeckt!

Peter Higgs: *"For me it's really an incredible thing that it happened in my lifetime."*



Und jetzt?

Das fehlende Puzzlestück

Stand Juli 2012



(Bilder: minutephysics channel)

Aktuell: Nur SM?



Hinweise auf mehr?



Probleme des SMs

Es gibt noch viele offene Fragen, die das SM nicht erklären kann:

- 1 Warum sind die Naturkräfte so unterschiedlich stark?
- 2 Warum sind Atome elektrisch neutral?
- 3 Woraus besteht Dunkle Materie?
- 4 Warum sind die Neutrino-Massen so klein?
- 5 Warum gibt es viel mehr Materie als Antimaterie?
- 6 Warum gibt es drei Teilchen-Generationen?

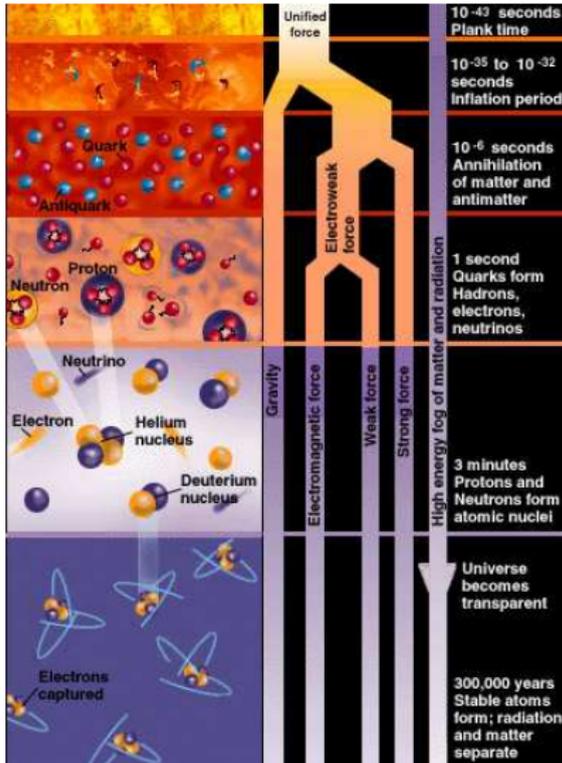


“Neue Physik”

Das SM hat einen begrenzten Gültigkeitsbereich und muss bei höheren Energien erweitert werden

GUT (Grand Unified Theory), Supersymmetrie, Links-Rechts-Modelle, Extra-Dimensionen, 4. Generation, Technicolour, Little Higgs Modelle, ...

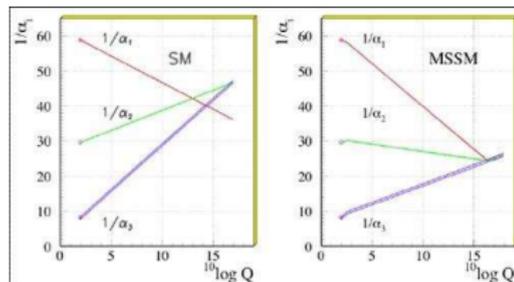
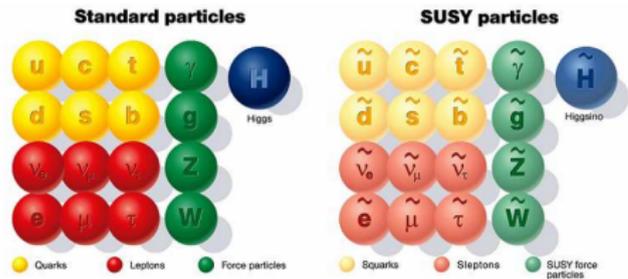
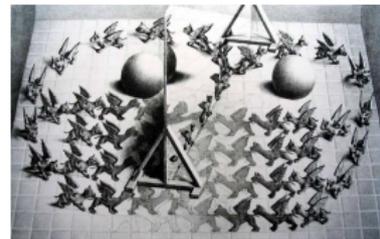
Große Vereinheitlichte Theorien (GUT)



- Vereinigung der Kräfte zu einer Urkraft
- Elektromagnetismus → Magnetismus und Elektrizität ✓
- Problem: Proton instabil
- hohe Energie $\hat{=}$ frühe Zeiten im Universum
- neue schwere Eichbosonen (bisher noch nicht gefunden)

Supersymmetrie

- Zusätzliche Symmetrie zwischen Bosonen und Fermionen
- Vereinigung der Kräfte möglich
- Kann Dunkle Materie erklären
- löst wichtige theoretische Probleme



Aber bisher immer noch keine experimentelle Hinweise

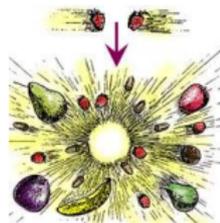
Strategien zur Suche nach Neuer Physik (NP)

Strategien zur Suche nach Neuer Physik (NP)

- Hohe Energien: direkte Produktion von neuen Teilchen

Collider Physik

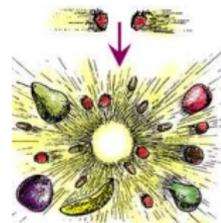
LHC: bis zu $5 \cdot 10^{-20}$ m



Strategien zur Suche nach Neuer Physik (NP)

- Hohe Energien: direkte Produktion von neuen Teilchen

Collider Physik



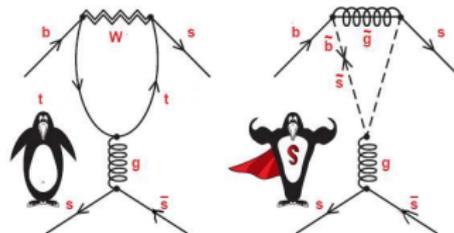
LHC: bis zu $5 \cdot 10^{-20}$ m

- Hohe Präzision (Exp. & Th.): indirekter Nachweis
Quantenfluktuationen von neuen Teilchen messbar

Flavour Physik

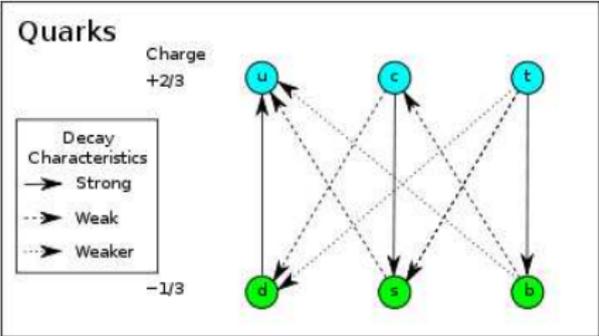


LHCb, SuperKEKB,
SuperB, NA62: bis zu 10^{-21} m



Und jetzt mit Geschmack

Flavourphysik beschäftigt sich mit den Übergängen zwischen verschiedenen Sorten (Flavour) von Fermionen



- Quark Mischung: CKM Matrix (Nobelpreis 2008)

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

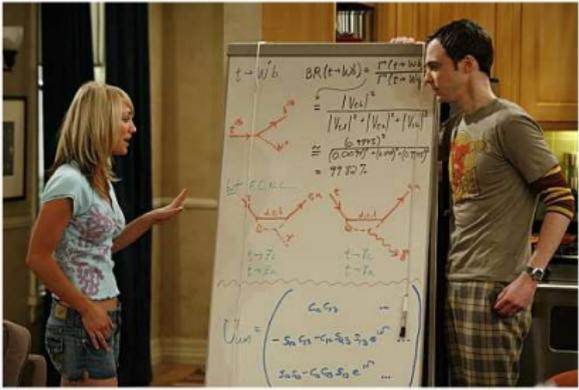
$$= \begin{pmatrix} \bullet & \cdot & \cdot \\ \cdot & \bullet & \cdot \\ \cdot & \cdot & \bullet \end{pmatrix}$$

$$\approx \begin{pmatrix} \bullet & \bullet & \cdot \\ \bullet & \bullet & \bullet \\ \bullet & \bullet & \bullet \end{pmatrix}$$

- Neutrino Oszillationen: PMNS matrix $U_{PMNS} \approx$

Und jetzt mit Geschmack

Flavourphysik beschäftigt sich mit den Übergängen zwischen verschiedenen Sorten (Flavour) von Fermionen



- Quark Mischung: CKM Matrix (Nobelpreis 2008)

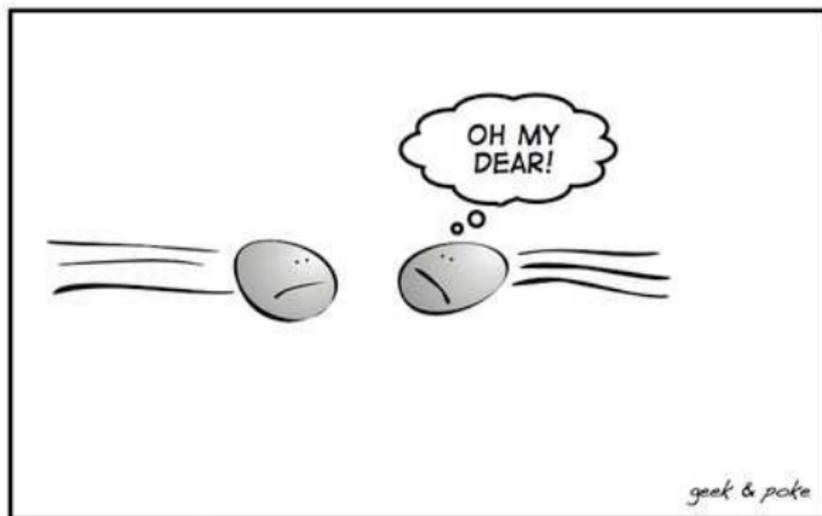
$$V_{\text{CKM}} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} \bullet & \cdot & \cdot \\ \cdot & \bullet & \cdot \\ \cdot & \cdot & \bullet \end{pmatrix}$$

$$\approx \begin{pmatrix} \bullet & \bullet & \cdot \\ \cdot & \bullet & \bullet \\ \cdot & \bullet & \bullet \end{pmatrix}$$

- Neutrino Oszillationen: PMNS matrix $U_{\text{PMNS}} \approx$

Es bleibt spannend!



LATELY INSIDE THE LHC:
2 PROTONS 0.00000000000000000001 SEC BEFORE THE COLLISION