



Einführung in die Teilchenphysik

Masterclass 2022

Marc Huwiler

Mit Folien von Simon Corrodi, Katharina Müller und Izaak Neutelings... Danke!

Teilchenphysik

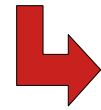
Um was geht's?

Wie?

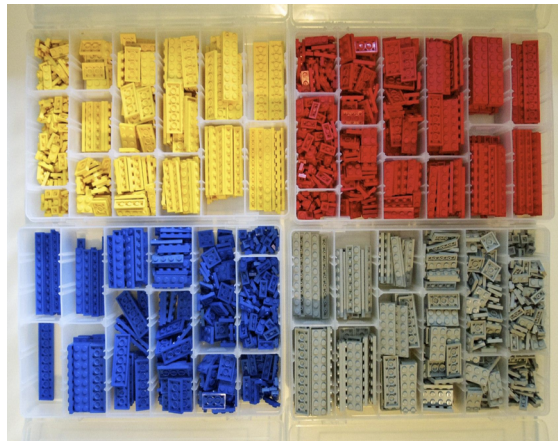
Wieso?

Um was geht's?

Teilchen-physik



Es geht um die Teilchen die unsere Welt, das Universum und alles was wir kennen konstituieren

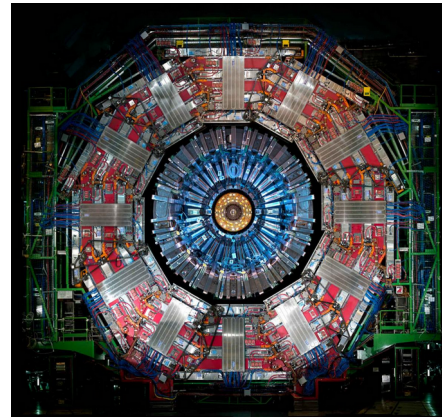
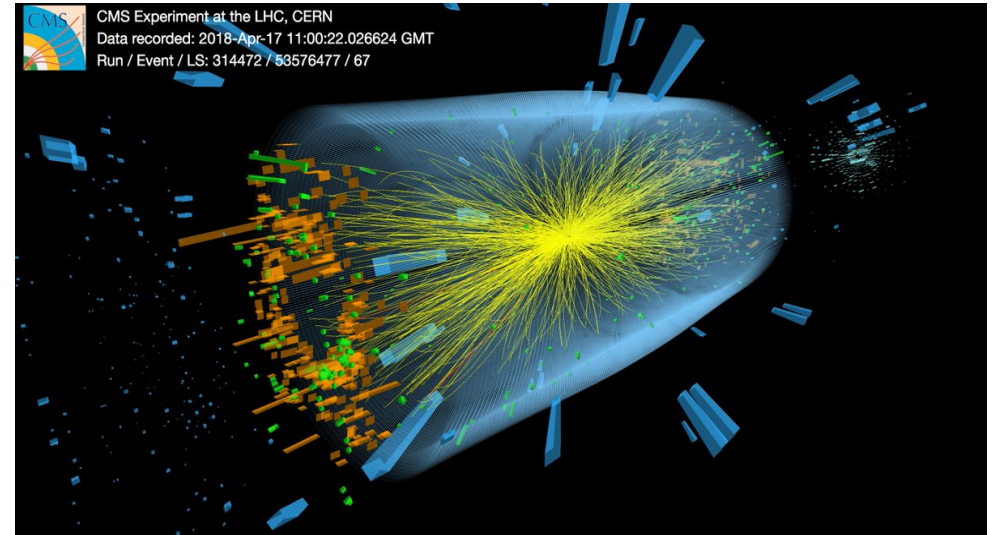


Was sind die fundamentalen Teilchen und Kräfte?



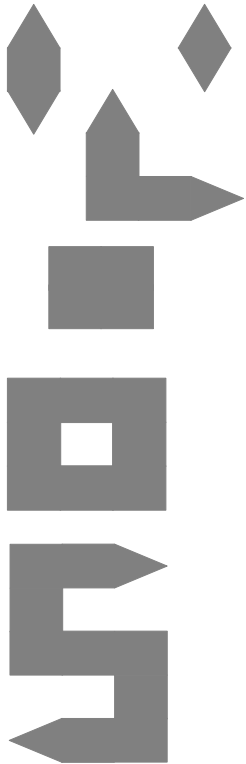
Einführung in die Teilchenphysik

- Was sind die kleinsten Teilchen?
- Wie können wir sie messen?
- Wie funktioniert ein Beschleuniger?
- Wie sehen Ereignisse aus, die am CERN gemessen werden?
- Was lernen wir dabei über die Natur und das Universum?
- Was gibt es noch zu Entdecken?



Grundbausteine

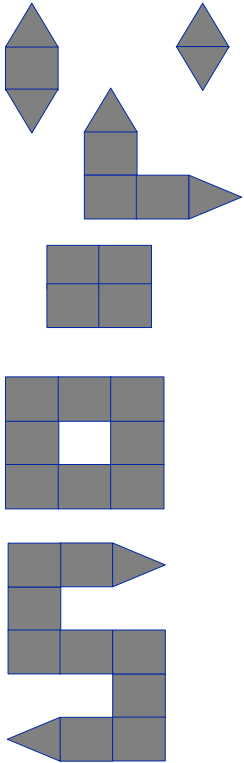
beobachtet



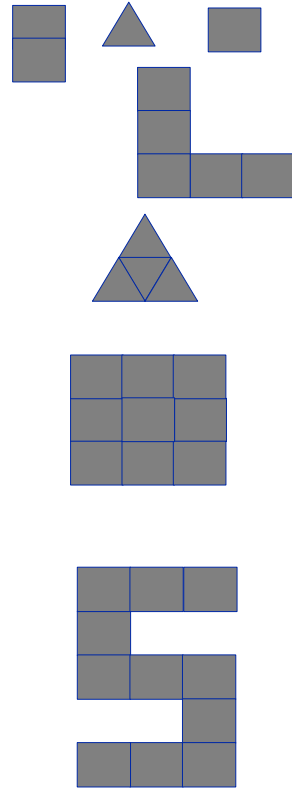
1) Aus was für Grundbausteinen werden die Figuren zusammengesetzt ?

Regeln

beobachtet



nicht beobachtet



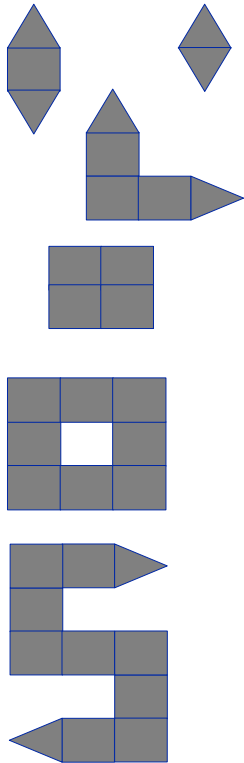
1) Aus was für Grundbausteinen werden die Figuren zusammengesetzt ?



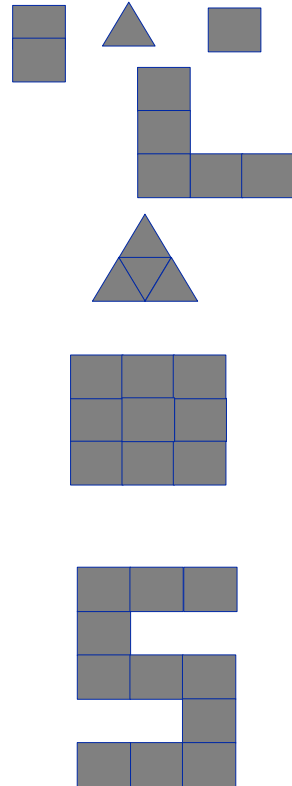
2) Was für Regeln gelten beim Zusammenfügen?

(Nicht-)Beobachtung von Prozessen

beobachtet



nicht beobachtet



1) Aus was für Grundbausteinen werden die Figuren zusammengesetzt ?



2) Was für Regeln gelten beim Zusammenfügen?

Dreiecke: eine Verbindung

Quadrate: zwei Verbindungen

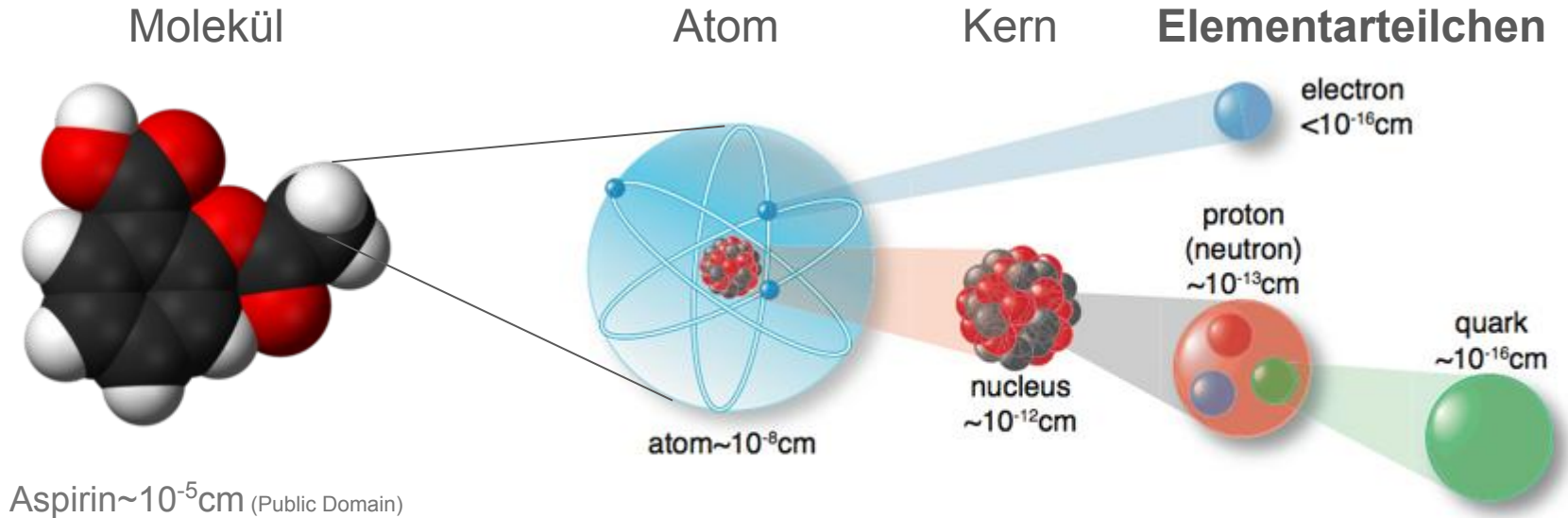
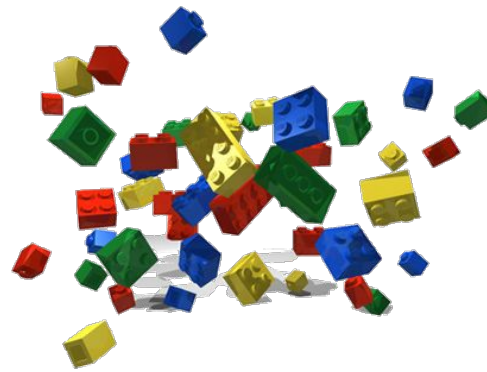
3) ist die Lösung eindeutig?

Wenn nicht – nach was für Formen müsste man suchen, um verschiedene Hypothesen zu überprüfen?

Wichtig: es braucht auch das Wissen über die Formen, die nicht vorkommen!

Woraus besteht Materie?

- ca. 600 v. Chr.: 4 Elemente
- heute?



Größenordnungen

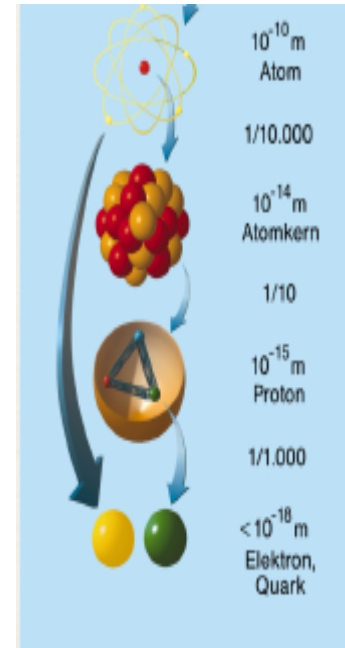
Atom 10^{-10} m

Atomkern 10^{-14} m

Proton 10^{-15} m

Quark $<10^{-18}$ m

Elektron $<10^{-19}$ m



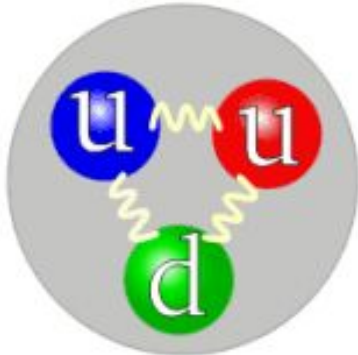
Atom == Mond

Quark == Orange

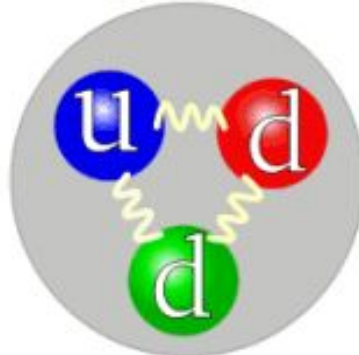
Woraus besteht Materie?

Frage: wie sieht man $<10^{-16}\text{cm}$?

Antwort: de Broglie: $E \sim 1/\lambda$; hohe Energien



Proton



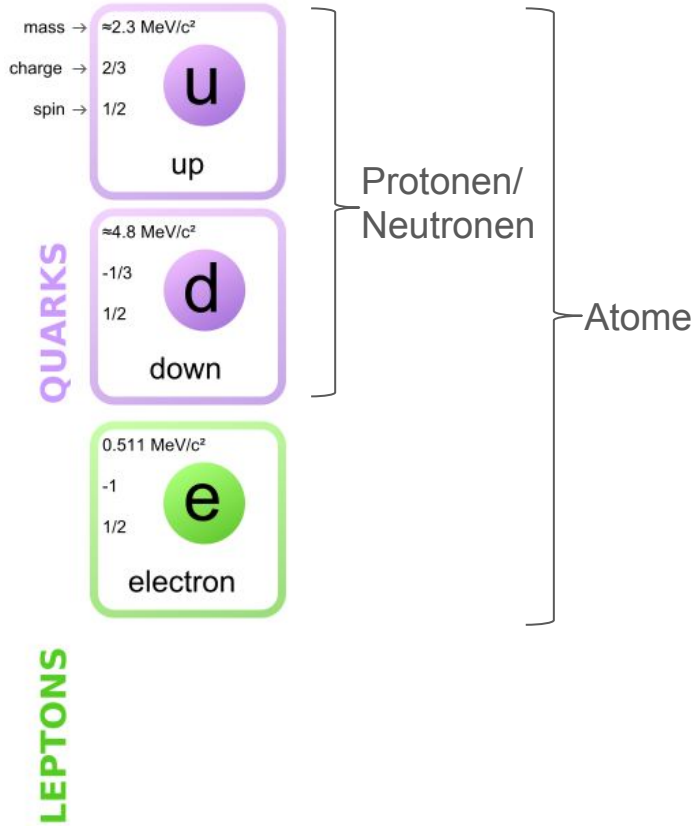
Neutron

Quark composition of a proton and a neutron (diagrams from *Wikipedia*)

Quarks

- Elementarteilchen
- Ladung:
 - up: $+2/3e$
 - down: $-1/3e$
- 3 "Farben"
- nie "alleine"

Standard Modell: Teilchen I

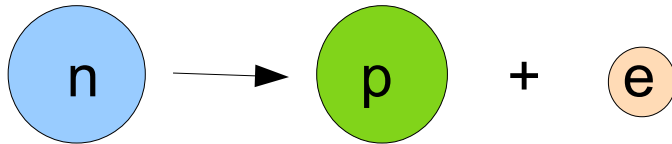


Bemerkung

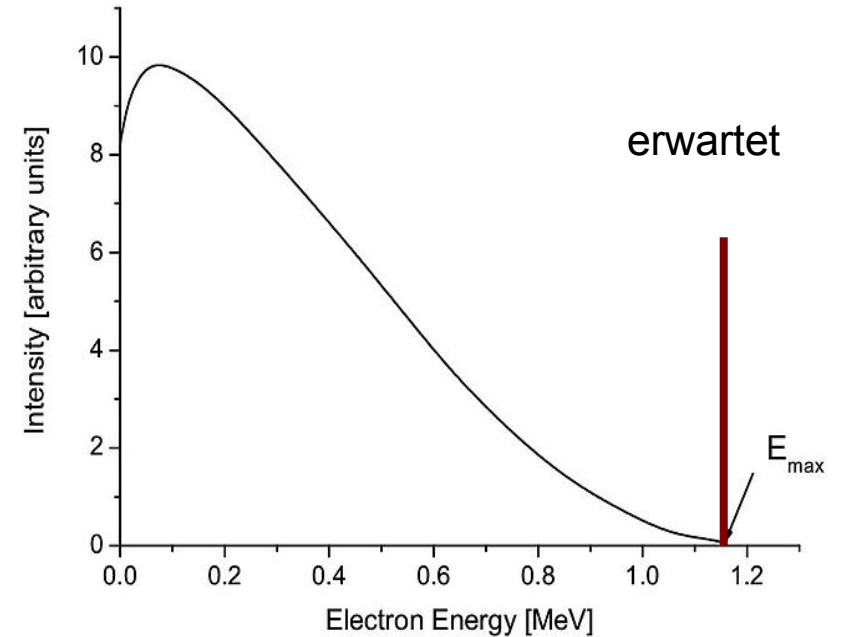
$$1 \text{ MeV}/c^2 = 1.78 \times 10^{-30} \text{ kg}$$

Etwas fehlt ...

freies Neutron zerfällt $n \rightarrow p + e$ (β -Zerfall)
Lebensdauer 15 Minuten



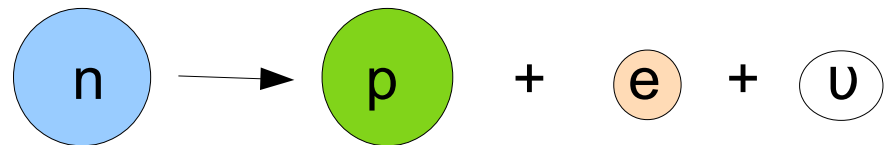
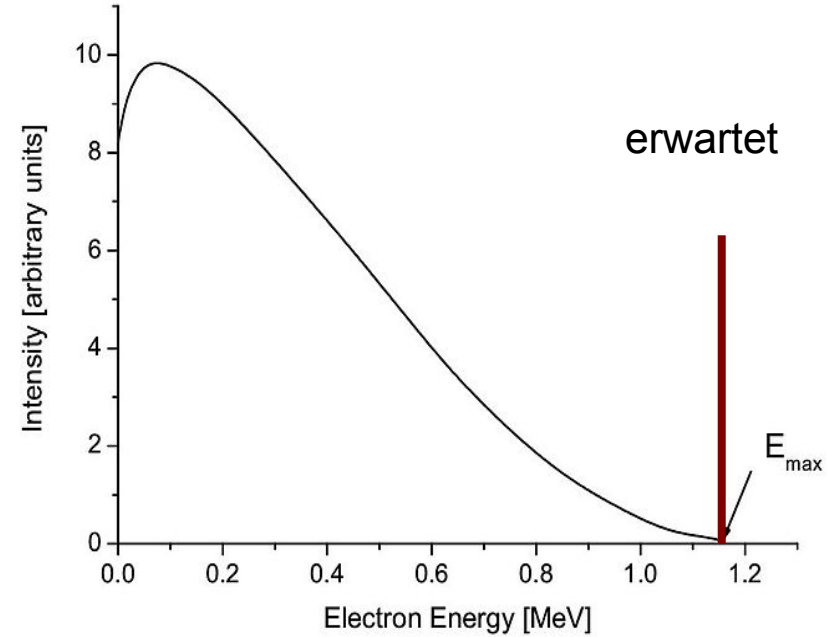
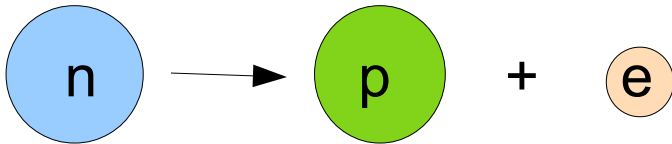
Energieerhaltung, $E=mc^2$



Lizenziert unter CC-BY-SA 4.0
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Beta_spectrum_of_RaE.jpg

Etwas fehlt ... das Neutrino

freies Neutron zerfällt $n \rightarrow p + e$ (β -Zerfall)
Lebensdauer 15 Minuten



⇒ Das Neutrino ist ein Grundbaustein aber nicht Teil der Atome

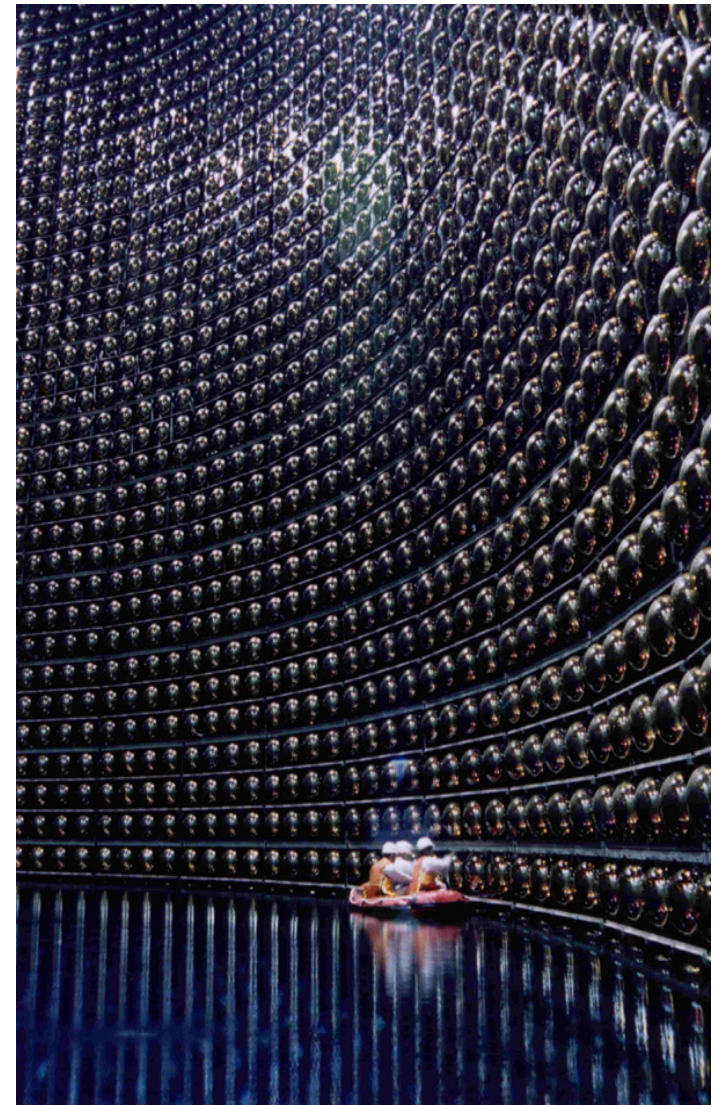
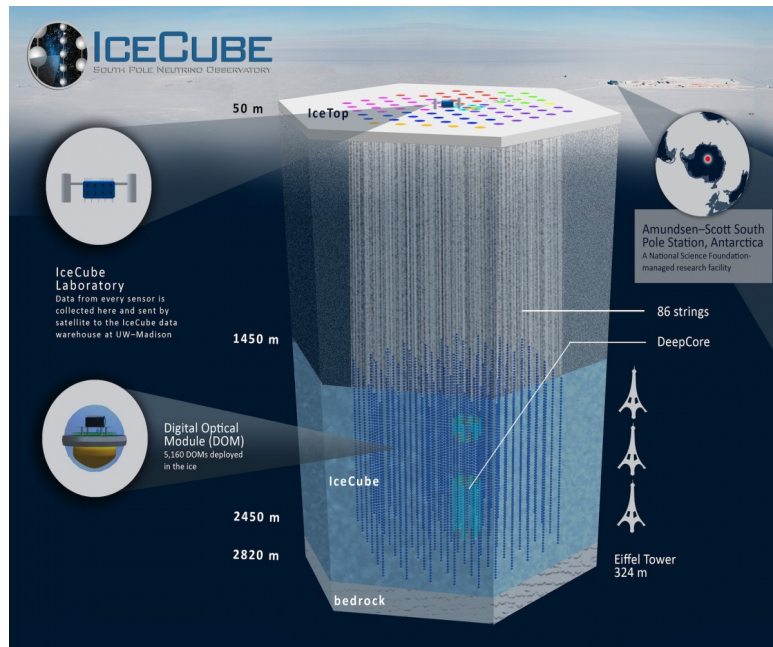
Entdeckung des Neutrinos

Nachweis 1956:

Neutrino + Proton \rightarrow Positron + Neutron

Neutrinodektoren

- sehr gross
- gut abgeschirmt: Bergwerk, Meer, Eis
- Rate: ein paar tausend Ereignisse pro Jahr



Neutrinos

Neutrinos sind sehr häufig!

10^{14} Neutrinos von der Sonne pro Sekunde durch unseren Körper

30 Millionen Neutrinos vom Urknall

10^{10} Neutrinos pro Sekunde pro cm^2

Wir merken davon nichts, unsere Materie ist fast durchsichtig für Neutrinos

Neutrinos sind die häufigsten Elementarteilchen 10^{89} !

→ pro Elektron, Proton oder Neutron gibt es 1 Milliarde Neutrinos!



"ONE HUNDRED MILLION NEUTRINOS ARE PASSING THROUGH OUR BODIES EVERY SECOND AND WE'RE WORRIED ABOUT THE PRICE OF COFFEE."

Standard Modell: Neutrinos

mass → $\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$
charge → $2/3$
spin → $1/2$

u

up

QUARKS

mass → $\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$
charge → $-1/3$
spin → $1/2$

d

down

mass → $0.511 \text{ MeV}/c^2$
charge → -1
spin → $1/2$

e

electron

LEPTONS

mass → $< 2.2 \text{ eV}/c^2$
charge → 0
spin → $1/2$

ν_e

electron neutrino

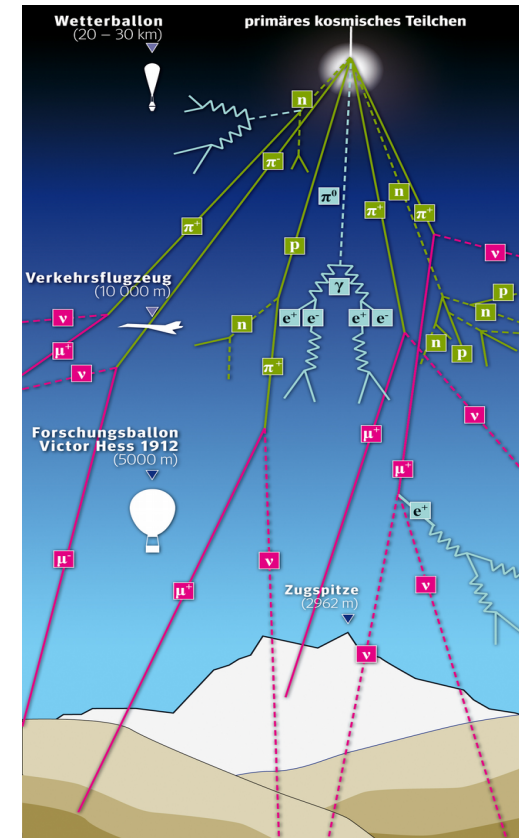
Neutrino

- Elementarteilchen
- Ladung: 0
- Masse: sehr klein
nicht 0

Kosmische Höhenstrahlung

Teilchen aus dem All

- 1912 entdeckt von Frank Hess
- Quelle: Sonne, Milchstrasse, Galaxien
- ca 1000 Teilchen pro m^2 und Sekunde
- Wechselwirkung mit Gasmolekülen: Teilchenschauer mit Sekundärteilchen
→ neue Teilchen können erzeugt werden
zB Muon, Kaon, Pion ...
- zum Teil extrem energiereich 10 Millionen mal höher als am LHC



Wie?

Der LHC (Large Hadron Collider) am CERN

Protons werden auf *Enorme Energien* beschleunigt

⇒ 6.5 [TeV]

6 x "9"
99.9999991% der
Lichtgeschwindigkeit

Energie in der Kollision: 13 TeV (13.8 TeV von 2021 an)

Zirkularbeschleuniger mit **27km** Umfang, ~100m unter dem Erdboden, in Genf

Zwei Protonenstrahlen verlaufen in Gegenrichtung, und prallen aufeinander an 4 Punkten, wo die grossen Experimente sich befinden



⇒ Mehr Infos in der nächsten Präsentation (mit Pascal!)



Enorme Energien

Ein Auto

=> 200 [km/h] (= 55.55 [m/s])



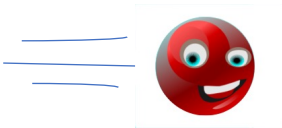
1 [t] (= 1000 [kg])

Kinetische Energie: $E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} \cdot 1000 \cdot 55.55^2 = \underline{1\,543\,209.88}$ [J]

Massenenergie: $E_M = mc^2 = 1000 \cdot 299\,792\,458 \approx \underline{299\,792\,458\,000}$ [J]

Verhältnis: $r = \frac{E_{\text{kin}}}{E_M} = \underline{0.00000515}$

Ein Proton im LHC



Kinetische Energie: $E_{\text{kin}} = m\gamma v^2 = mc^2(\gamma-1) \approx 6'500$ [GeV]

Massenenergie: $E_M = mc^2 \approx 1$ [GeV]

Verhältnis: $r = \frac{E_{\text{kin}}}{E_M} = \underline{6'500}$

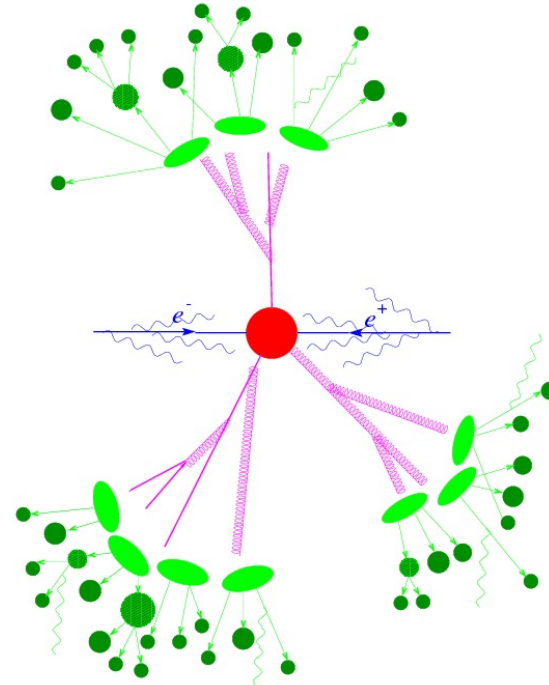
Relativität: Materie – Energie Äquivalenz

$$E = mc^2 \quad (\text{Konsequenz der Speziellen Relativitätstheorie})$$

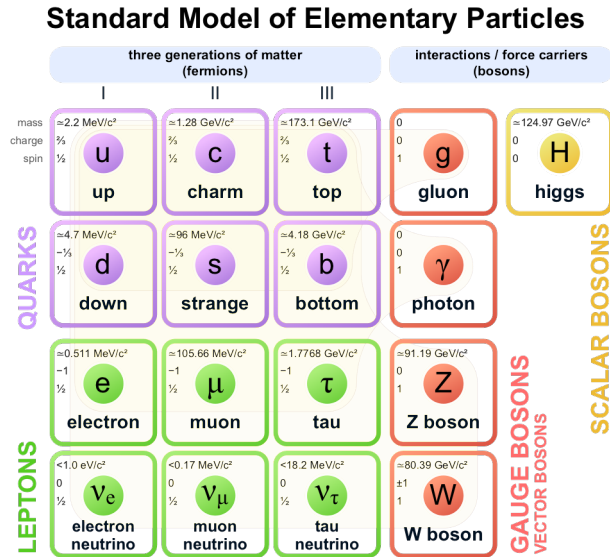
⇒ **Energie** kann in **Materie** umgewandelt werden, und umgekehrt!

Neue Teilchen entstehen in den Kollisionen!

⇒ **Sogar Teilchen die *Schwerer* sind, als die die zusammengeprallt sind!**



Die Teilchen des Standard Models



Quarks findet man nicht alleine

Sie kommen immer gruppiert vor:

in 2: Mesonen (1 Quark und 1 Antiquark)

in 3: Baryonen (3 (Anti-)Quarks)

in 4: Tetraquarks (2 Quarks und 2 Antiquarks)

in 5: Pentaquarks (4 Quarks und 1 Antiquark, oder umgekehrt)

in ... ?

⇒ Es gibt also möglicherweise 2 C^5_3 Baryonen, und 2 C^5_2 Mesonen ...

Antimaterie

1926 postuliert von Paul Dirac:

zu jedem Teilchen gibt es ein Antiteilchen mit gleicher Masse aber umgekehrter Ladung (ladungsähnliche Quantenzahlen)

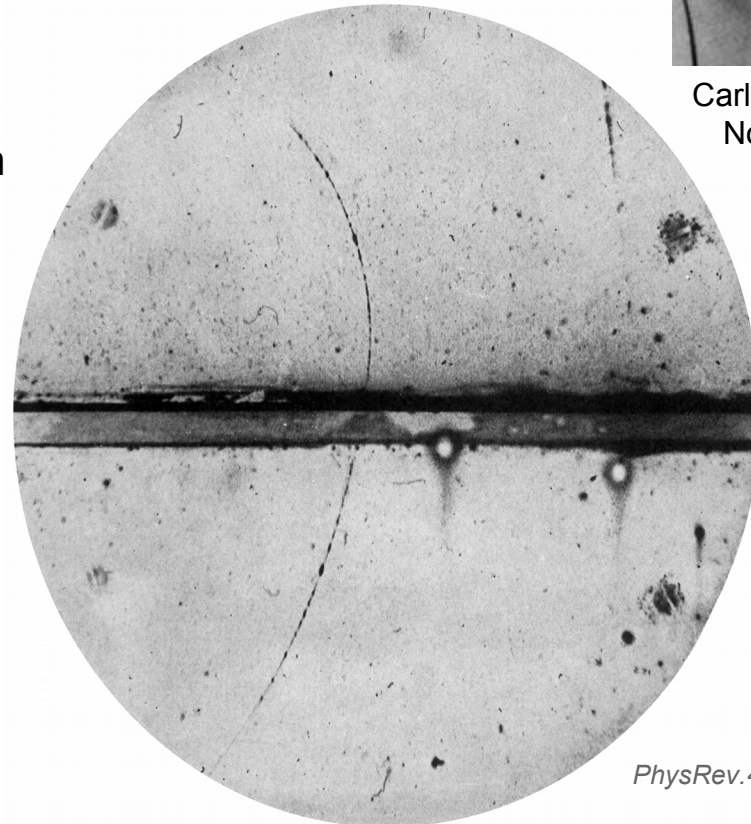
→ Anzahl Elementarteilchen verdoppelt

1932: Nachweis vom Anti-Elektron = Positron

$$\left(\frac{E}{c}\right)^2 - p^2 = (mc)^2$$
$$\left(\frac{E}{c} - \vec{\sigma} \cdot \vec{p}\right) \left(\frac{E}{c} + \vec{\sigma} \cdot \vec{p}\right) = (mc)^2$$
$$\left(i\hbar \frac{\partial}{\partial x_0} + i\hbar \vec{\sigma} \cdot \vec{\nabla}\right) \left(i\hbar \frac{\partial}{\partial x_0} - i\hbar \vec{\sigma} \cdot \vec{\nabla}\right) \phi = (mc)^2 \phi$$



Carl David Anderson
Nobelpreis 1936



Antimaterie

Zu jedem **Materienteilchen** gibt es ein **Antiteilchen** gleicher Masse, mit umgekehrten Ladungen (Quantenzahlen)

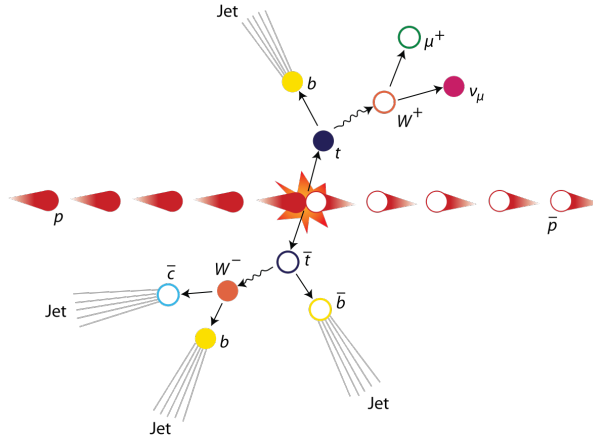
Man bezeichnet als **Antimaterie** die Antiteilchen der Teilchen die häufiger vorkommen im Universum

Standard Model of Elementary Particles

	three generations of matter (elementary fermions)			three generations of antimatter (elementary antifermions)			interactions / force carriers (elementary bosons)	
	I	II	III	I	II	III		
mass	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	0	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
	u up	c charm	t top	\bar{u} antiup	\bar{c} anticharm	\bar{t} antitop	g gluon	H higgs
	d down	s strange	b bottom	\bar{d} antidown	\bar{s} antistrange	\bar{b} antibottom	γ photon	
	e electron	μ muon	τ tau	e^+ positron	$\bar{\mu}$ antimuon	$\bar{\tau}$ antitau	Z Z^0 boson	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	$\bar{\nu}_e$ electron antineutrino	$\bar{\nu}_\mu$ muon antineutrino	$\bar{\nu}_\tau$ tau antineutrino	W^+ W^+ boson	W^- W^- boson

QUARKS (left side of the quark section)
LEPTONS (left side of the lepton section)
GAUGE BOSONS VECTOR BOSONS (right side, red text)
SCALAR BOSONS (right side, yellow text)

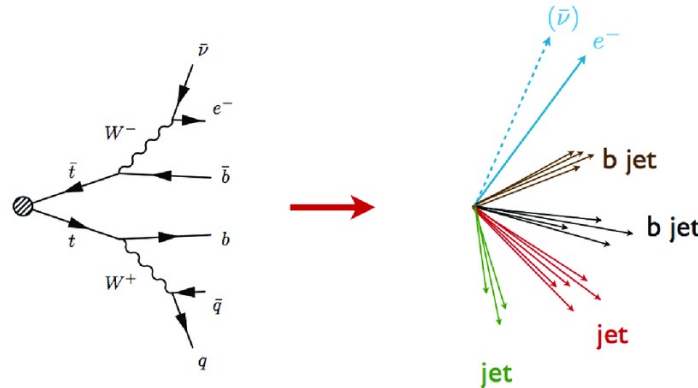
Beispiel: $t\bar{t}$ Produktion und Zerfall des t Quarks



t DECAY MODES	Fraction (Γ_i/Γ)	Confidence level	P (MeV/c)
$t \rightarrow Wq (q = b, s, d)$			—
$t \rightarrow Wb$			—
$t \rightarrow e\nu_e b$	(13.3±0.6) %		—
$t \rightarrow \mu\nu_\mu b$	(13.4±0.6) %		—
$t \rightarrow \tau\nu_\tau b$	(7.1±0.6) %		—
$t \rightarrow q\bar{q}b$	(66.5±1.4) %		—

$\Delta T = 1$ weak neutral current (TI) modes

$t \rightarrow Zq (q=u,c)$	TI	[c] < 5	$\times 10^{-4}$	95%	—
$t \rightarrow Hu$	TI	< 1.9	$\times 10^{-3}$	95%	—
$t \rightarrow Hc$	TI	< 1.6	$\times 10^{-3}$	95%	—
$t \rightarrow \ell^+ \bar{q}q' (q=d,s,b; q'=u,c)$	TI	< 1.6	$\times 10^{-3}$	95%	—



Andere Beispiele

B[±] DECAY MODES	Fraction (Γ _i /Γ)	Scale factor/ Confidence level(MeV/c)	<i>ρ</i>
Semileptonic and leptonic modes			
$\ell^+ \nu_\ell X$	[a] (10.99 ± 0.28) %	—	—
$e^+ \nu_e X_C$	(10.8 ± 0.4) %	—	—
$D^0 \ell^+ \nu_\ell X$	(9.7 ± 0.7) %	—	—
$D^0 \ell^+ \nu_\ell$	[a] (2.35 ± 0.09) %	2310	—
$D_s^- X$	(1.10 ± 0.40) %	—	—
$A_c^+ X$	(2.1 ± 0.9) %	—	—
$\bar{A}_c^- X$	(2.8 ± 1.1) %	—	—
$\bar{c} X$	(97 ± 4) %	—	—
$c X$	(23.4 ± 2.2) %	—	—
$c/\bar{c} X$	(120 ± 6) %	—	—
D, D*, or D_s modes			
$\bar{D}^0 \pi^+$	(4.68 ± 0.13) × 10 ⁻³	2308	—
$D_{CP(+1)} \pi^+$	[b] (2.05 ± 0.18) × 10 ⁻³	—	—
$D_{CP(-1)} \pi^+$	[b] (2.0 ± 0.4) × 10 ⁻³	—	—
$\bar{D}^0 \rho^+$	(1.34 ± 0.18) %	2237	—
$\bar{D}^0 K^+$	(3.63 ± 0.12) × 10 ⁻⁴	2281	—
$D_{CP(+1)} K^+$	[b] (1.80 ± 0.07) × 10 ⁻⁴	—	—
$D_{CP(-1)} K^+$	[b] (1.96 ± 0.18) × 10 ⁻⁴	—	—
$D^0 K^+$	(3.57 ± 0.35) × 10 ⁻⁶	2281	—
$[K^- \pi^+]_D K^+$	[c] < 2.8 × 10 ⁻⁷	CL=90%	—
$[K^+ \pi^-]_D K^+$	[c] < 1.5 × 10 ⁻⁵	CL=90%	—
$[K^+ \pi^- \pi^0]_D K^+$	seen	—	—
$[K^+ \pi^- \pi^0]_D K^+$	seen	—	—
$[K^- \pi^+ \pi^-]_D K^+$	seen	—	—
$[K^- \pi^+ \pi^- \pi^0]_D K^+$	seen	—	—
$[K^- \pi^+ \pi^-]_D \pi^+$	[c] (6.3 ± 1.1) × 10 ⁻⁷	—	—
$[K^+ \pi^-]_D \pi^+$	(1.78 ± 0.32) × 10 ⁻⁴	—	—
$[K^- \pi^+ \pi^0]_D \pi^+$	seen	—	—
$[K^+ \pi^- \pi^0]_D \pi^+$	seen	—	—
$[K^- \pi^+ \pi^+ \pi^-]_D \pi^+$	seen	—	—
$[K^+ \pi^- \pi^+ \pi^-]_D \pi^+$	seen	—	—
$[\pi^+ \pi^- \pi^0]_D K^-$	(4.6 ± 0.9) × 10 ⁻⁶	—	—
$[K_S^0 K^+ \pi^-]_D K^+$	seen	—	—
$[K_S^0 K^- \pi^+]_D K^+$	seen	—	—
$[K^*(892)^+ K^-]_D K^+$	seen	—	—
$[K_S^0 K^- \pi^+]_D \pi^+$	seen	—	—
$[K^*(892)^+ K^-]_D \pi^+$	seen	—	—
$[K_S^0 K^+ \pi^-]_D \pi^+$	seen	—	—
$[K^*(892)^- K^+]_D \pi^+$	seen	—	—
$\bar{D}^0 K^*(892)^+$	(5.3 ± 0.4) × 10 ⁻⁴	2213	—
$D_{CP(-1)} K^*(892)^+$	[b] (2.7 ± 0.8) × 10 ⁻⁴	—	—
$D_{CP(+1)} K^*(892)^+$	[b] (6.2 ± 0.7) × 10 ⁻⁴	—	—
$D^0 K^*(892)^+$	(3.1 ± 1.6) × 10 ⁻⁶	2213	—
$\bar{D}^0 K^+ \pi^-$	(5.2 ± 2.1) × 10 ⁻⁴	2237	—

$\bar{D}^0 \tau^+ \nu_\tau$	(7.7 ± 2.5) × 10 ⁻³	1911	—
$\bar{D}^*(2007)^0 \ell^+ \nu_\ell$	[a] (5.66 ± 0.22) %	2258	—
$\bar{D}^*(2007)^0 \tau^+ \nu_\tau$	(1.88 ± 0.20) %	1839	—
$D^- \pi^+ \ell^+ \nu_\ell$	(4.4 ± 0.4) × 10 ⁻³	2306	—
$\bar{D}_0^0(2420)^0 \ell^+ \nu_\ell, \bar{D}_0^0 \rightarrow$	(2.5 ± 0.5) × 10 ⁻³	—	—
$\bar{D}_2^0(2460)^0 \ell^+ \nu_\ell, \bar{D}_2^0 \rightarrow$	(1.53 ± 0.16) × 10 ⁻³	2065	—
$D^- \pi^+$	—	—	—
$D^{(*)} \pi^+ \ell^+ \nu_\ell (n \geq 1)$	(1.86 ± 0.26) %	—	—
$D^{(*)} \pi^+ \ell^+ \nu_\ell$	(6.0 ± 0.4) × 10 ⁻³	2254	—
$\bar{D}_1^-(2420)^0 \ell^+ \nu_\ell, \bar{D}_1^0 \rightarrow$	(3.03 ± 0.20) × 10 ⁻³	2084	—
$\bar{D}_1^-(2430)^0 \ell^+ \nu_\ell, \bar{D}_1^0 \rightarrow$	(2.7 ± 0.6) × 10 ⁻³	—	—
$\bar{D}_2^-(2460)^0 \ell^+ \nu_\ell, \bar{D}_2^0 \rightarrow$	(1.01 ± 0.24) × 10 ⁻³	S=2.0 2065	—
$\bar{D}_2^0 \rightarrow D^{*-} \pi^+$	—	—	—
$\bar{D}_2^0 \pi^+ \pi^- \ell^+ \nu_\ell$	(1.7 ± 0.4) × 10 ⁻³	2301	—
$\bar{D}_0^0 \pi^+ \pi^- \ell^+ \nu_\ell$	(8 ± 5) × 10 ⁻⁴	2248	—
$D_s^{(*)} K^+ \ell^+ \nu_\ell$	(6.1 ± 1.0) × 10 ⁻⁴	—	—
$D_s^- K^+ \ell^+ \nu_\ell$	(3.0 ± 1.4) × 10 ⁻⁴	2242	—
$D_s^+ K^+ \ell^+ \nu_\ell$	(2.9 ± 1.9) × 10 ⁻⁴	2185	—
$\pi^0 \ell^+ \nu_\ell$	(7.80 ± 0.27) × 10 ⁻⁵	2638	—
$\eta \ell^+ \nu_\ell$	(3.9 ± 0.5) × 10 ⁻⁵	2611	—
$\eta' \ell^+ \nu_\ell$	(2.3 ± 0.8) × 10 ⁻⁵	2553	—
$\omega \ell^+ \nu_\ell$	[a] (1.19 ± 0.09) × 10 ⁻⁴	2582	—
$\rho^0 \ell^+ \nu_\ell$	[a] (1.58 ± 0.11) × 10 ⁻⁴	2583	—
$\rho \bar{\rho} \ell^+ \nu_\ell$	(5.8 ± 2.6) × 10 ⁻⁶	2467	—
$\rho \bar{\rho} \mu^+ \nu_\mu$	< 8.5 × 10 ⁻⁶	CL=90% 2446	—
$\rho \bar{\rho} e^+ \nu_e$	(8.2 ± 4.0) × 10 ⁻⁶	2467	—
$e^+ \nu_e$	< 9.8 × 10 ⁻⁷	CL=90% 2640	—
$\mu^+ \nu_\mu$	2.90 × 10 ⁻⁰⁷ to 1.07 × 10 ⁻⁰⁶	CL=90% 2639	—
$\tau^+ \nu_\tau$	(1.09 ± 0.24) × 10 ⁻⁴	S=1.2 2341	—
$\ell^+ \nu_\ell \gamma$	< 3.0 × 10 ⁻⁶	CL=90% 2640	—
$e^+ \nu_e \gamma$	< 4.3 × 10 ⁻⁶	CL=90% 2640	—
$\mu^+ \nu_\mu \gamma$	< 3.4 × 10 ⁻⁶	CL=90% 2639	—

Inclusive modes

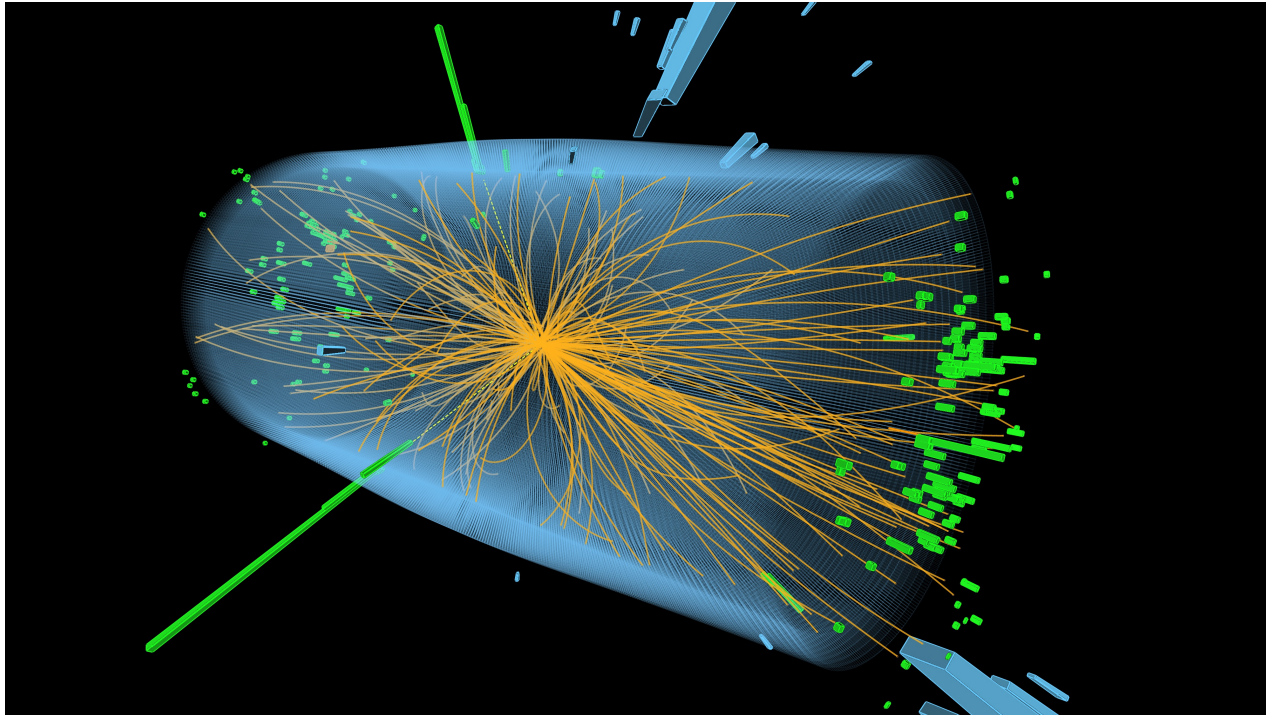
$D^0 X$	(8.6 ± 0.7) %	—	—
$\bar{D}^0 X$	(79 ± 4) %	—	—
$D^+ X$	(2.5 ± 0.5) %	—	—
$D^- X$	(9.9 ± 1.2) %	—	—
$D_s^+ X$	(7.9 ± 1.3) %	—	—

$\bar{D}^0 K^+ \bar{K}^0$	(5.5 ± 1.6) × 10 ⁻⁴	2189	—
$\bar{D}^0 K^+ \bar{K}^*(892)^0$	(7.5 ± 1.7) × 10 ⁻⁴	2072	—
$\bar{D}^0 \pi^+ \pi^+ \pi^-$	(5.6 ± 2.1) × 10 ⁻³	S=3.6 2289	—
$\bar{D}^0 \pi^+ \pi^+ \pi^-$ nonresonant	(5 ± 4) × 10 ⁻³	2289	—
$\bar{D}^0 \omega \rho^0$	(4.2 ± 3.0) × 10 ⁻³	2208	—
$\bar{D}^0 a_1(1260)^+$	(4 ± 4) × 10 ⁻³	2123	—
$\bar{D}^0 \omega \pi^+$	(4.1 ± 0.9) × 10 ⁻³	2206	—
$D^{(*)}(2010)^- \pi^+ \pi^+$	(1.35 ± 0.22) × 10 ⁻³	2247	—
$D^{(*)}(2010)^- K^+ \pi^+$	(8.2 ± 1.4) × 10 ⁻⁵	2206	—
$\bar{D}_1^-(2420)^0 \pi^+, \bar{D}_1^0 \rightarrow$	(5.2 ± 2.2) × 10 ⁻⁴	2081	—
$D^{(*)}(2010)^- \pi^+$	—	—	—
$D^- \pi^+ \pi^+$	(1.07 ± 0.05) × 10 ⁻³	2299	—
$D^- K^+ \pi^+$	(7.7 ± 0.5) × 10 ⁻⁵	2260	—
$D_1^+(2300)^0 K^+, D_1^0 \rightarrow$	(6.1 ± 2.4) × 10 ⁻⁶	—	—
$D_2^-(2460)^0 K^+, D_2^0 \rightarrow$	(2.32 ± 0.23) × 10 ⁻⁵	—	—
$D_1^-(2760)^0 K^+, D_1^0 \rightarrow$	(3.6 ± 1.2) × 10 ⁻⁶	—	—
$D^+ K^0$	< 2.9 × 10 ⁻⁶	CL=90% 2278	—
$D^+ K^+ \pi^-$	(5.6 ± 1.1) × 10 ⁻⁶	2260	—
$D_2^+(2460)^0 K^+, D_2^0 \rightarrow$	< 6.3 × 10 ⁻⁷	CL=90% —	—
$D^+ K^+ \pi^0$	< 4.9 × 10 ⁻⁷	CL=90% 2211	—
$D^+ K^+ \pi^0$	< 1.4 × 10 ⁻⁶	CL=90% 2211	—
$\bar{D}^*(2007)^0 \pi^+$	(4.90 ± 0.17) × 10 ⁻³	2256	—
$\bar{D}_{CP(+1)}^0 \pi^+$	[d] (2.7 ± 0.6) × 10 ⁻³	—	—
$\bar{D}_{CP(-1)}^0 \pi^+$	[d] (2.4 ± 0.9) × 10 ⁻³	—	—
$\bar{D}^*(2007)^0 \omega \pi^+$	(4.5 ± 1.2) × 10 ⁻³	2149	—
$\bar{D}^*(2007)^0 \rho^+$	(9.8 ± 1.7) × 10 ⁻³	2181	—
$\bar{D}^*(2007)^0 K^+$	(3.97 ± 0.31) × 10 ⁻⁴	2227	—
$\bar{D}_0^0(K^+ \pi^+)$	[d] (2.60 ± 0.33) × 10 ⁻⁴	—	—
$\bar{D}_{CP(-1)}^0 K^+$	[d] (2.19 ± 0.30) × 10 ⁻⁴	—	—
$D^*(2007)^0 K^+$	(7.8 ± 2.2) × 10 ⁻⁶	2227	—
$\bar{D}^*(2007)^0 K^*(892)^+$	(8.1 ± 1.4) × 10 ⁻⁴	2156	—
$\bar{D}^*(2007)^0 K^+ \bar{K}^0$	< 1.06 × 10 ⁻³	CL=90% 2132	—
$\bar{D}^*(2007)^0 K^+ \bar{K}^*(892)^0$	(1.5 ± 0.4) × 10 ⁻³	2009	—
$\bar{D}^*(2007)^0 \pi^+ \pi^+ \pi^-$	(1.03 ± 0.12) %	2236	—
$\bar{D}^*(2007)^0 a_1(1260)^+$	(1.9 ± 0.5) %	2063	—
$\bar{D}^*(2007)^0 \pi^- \pi^+ \pi^+ \pi^0$	(1.8 ± 0.4) %	2219	—
$\bar{D}^0 3\pi^+ 2\pi^-$	(5.7 ± 1.2) × 10 ⁻³	2196	—
$D^*(2010)^+ \pi^0$	< 3.6 × 10 ⁻⁶	2255	—

•••

Ein CMS Event

Ein **Event** besteht aus den Spuren, die alle in einer Kollision entstandenen Teilchen im Detektor hinterlassen, und wird gespeichert (falls es genügend interessant ist)



Mögliches $H \rightarrow \gamma\gamma$ event

Wie interagieren Teilchen?

Wie interagieren Teilchen? Kräfte

Gravitation (Schwerkraft)

Planetenbahnen, Gewichtskraft

- nur positiv
- Reichweite: ∞

Elektromagnetische Kraft

Licht, Elektrizität, Magnetismus,
Elektronen um den Kern -> Chemie

- positiv/negativ
- Reichweite: ∞

Schwache Wechselwirkung

Beta-Zerfall, Fusion (Sonne),

Leptonen \leftrightarrow Quarks

- Reichweite: klein ($\sim 10^{-16}$ cm)

Starke Wechselwirkung

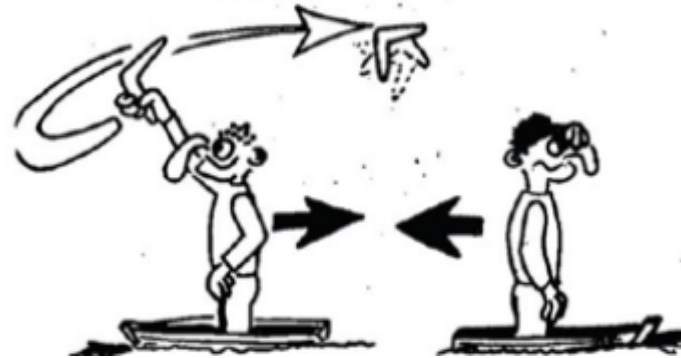
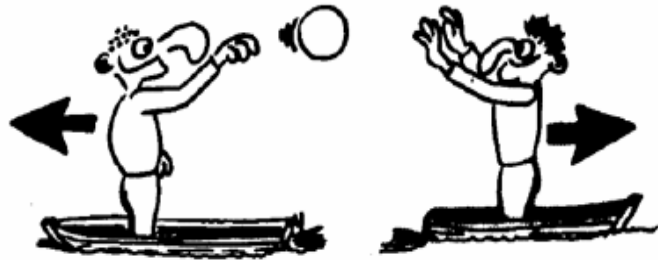
Zusammenhalt der Protonen/Neutronen,

Quarks \leftrightarrow Quarks

- Reichweite: speziell

Wechselwirkung: Austausch von Bosonen

Zu jeder Kraft gehört ein oder mehrere Austauscheteilchen = Boson (Botenteilchen)



Wechselwirkung	“Ladung“	Boson	rel. Stärke	Reichweite
Elektromagn.	elektrisch	Photon (γ)	10^{-2}	∞
Schwache	schwache	W^+ , W^- , Z	10^{-15}	10^{-25}m
Starke	Farbladung	Gluon (g)	1	10^{-15}m
Gravitation	Masse	Graviton?	10^{-38}	∞

Die Botenteilchen der schwachen Kraft sind schwer, W, Z: 90 mal Protonmasse
 → schwache Kraft ist extrem schwach

“Botenteilchen”: Bosonen

Wechselwirkungen werden durch “Botenteilchen” (Bosonen) vermittelt.

Wechselwirkung	Teilchen (Boson)	Ladung	Relative Stärke
Elektromagnetisch	Photon (γ)	<i>elektrisch</i>	10^{-2}
Schwach	W^+ , W^- , Z^0	<i>“schwach”</i>	10^{-15}
Stark	Gluon (g)	<i>Farbe</i>	1
Gravitation	Graviton?	<i>Masse</i>	10^{-41}

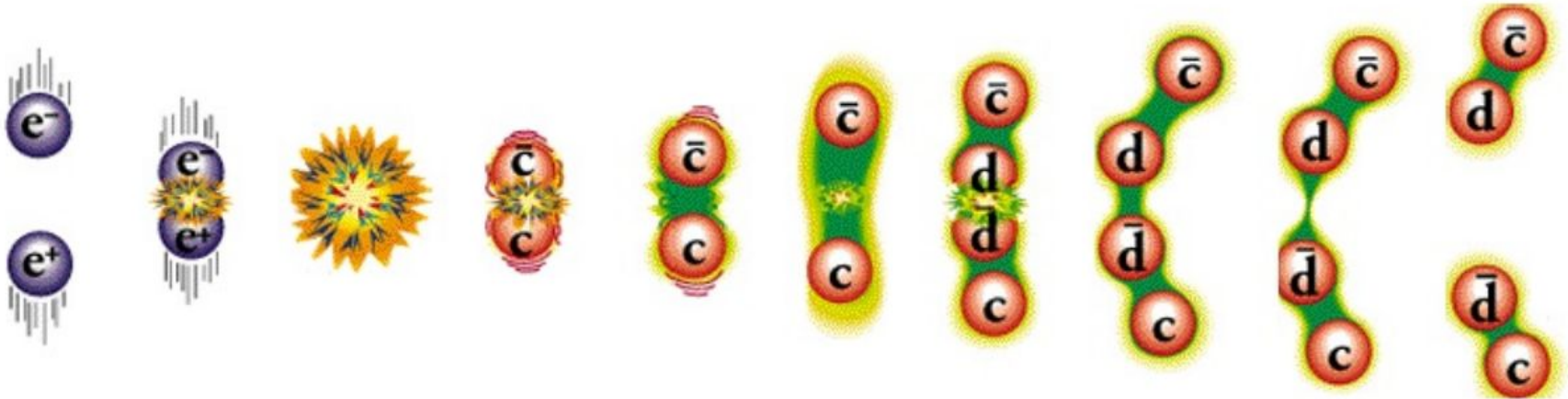
Starke Wechselwirkung

“bekannte Kräfte” (Elektromagnetisch, Gravitation)

$$F \sim 1/r^2$$

Starke Wechselwirkung

stärker je weiter die Teilchen auseinander, Vorstellung: Gummi-Band



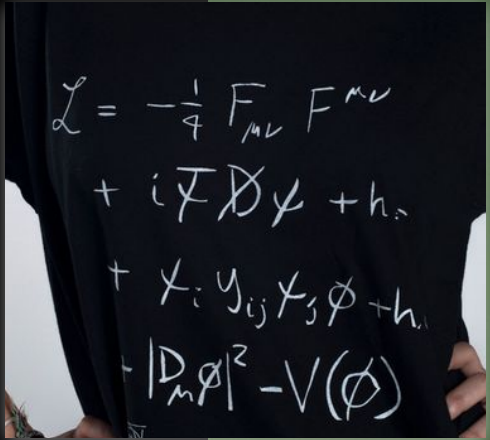
Grund weshalb es keine freien Quarks gibt

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$

$$+ i\bar{\psi} \not{D} \psi + \text{h.c.}$$

$$+ \chi_i y_{ij} \chi_j \phi + \text{h.c.}$$

$$+ |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$


$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$

$$+ i\bar{\psi} \not{D} \psi + \text{h.c.}$$

$$+ \chi_i y_{ij} \chi_j \phi + \text{h.c.}$$

$$+ |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$



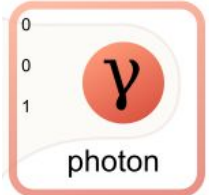
mass:	$+2.3 \text{ MeV}/c^2$	$+1.275 \text{ GeV}/c^2$	$+173.0 \text{ GeV}/c^2$
charge:	2/3	2/3	2/3
spin:	1/2	1/2	1/2
	u	c	t
	up	charm	top
QUARKS			
	$+4.8 \text{ MeV}/c^2$	$+95 \text{ MeV}/c^2$	$+4.18 \text{ GeV}/c^2$
	-1/3	-1/3	-1/3
	1/2	1/2	1/2
	d	s	b
	down	strange	bottom
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$
	-1	-1	-1
	1/2	1/2	1/2
	e	\mu	\tau
	electron	muon	tau
LEPTONS			
	<math>$+0.2 \text{ MeV}/c^2$</math>	$+0.17 \text{ MeV}/c^2$	$+1.5 \text{ MeV}/c^2$
	0	0	0
	1/2	1/2	1/2
	\nu_e	\nu_\mu	\nu_\tau
	electron neutrino	muon neutrino	tau neutrino

Elektroschwache Wechselwirkung



$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^b g_\mu^c g_\nu^a - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e + \\
 & \frac{1}{2}i g_s^2 (\bar{q}_i^a \gamma^\mu q_j^a) g_\mu^a + G^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu \bar{G}^a G^b g_\mu^c - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
 & \frac{1}{2}M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2}\partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{2c_w^2} M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \frac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - \\
 & \frac{1}{2}m_h^2 H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - M^2 \phi^+ \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \frac{1}{2c_w} M \phi^0 \phi^0 - \beta_h \left[\frac{2M^2}{g^2} + \right. \\
 & \left. \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right] + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h - igc_w [\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
 & W_\nu^+ W_\mu^-) - Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
 & W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+) - ig s_w [\partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
 & W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+) + A_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)] - \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\nu^+ W_\mu^- + \\
 & \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^+ W_\nu^- + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\nu^+ Z_\nu^0 W_\mu^- - Z_\mu^0 Z_\nu^0 W_\mu^+ W_\nu^-) + \\
 & g^2 s_w^2 (A_\mu W_\nu^+ A_\nu W_\mu^- - A_\mu A_\nu W_\nu^+ W_\mu^-) + g^2 s_w c_w [A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
 & W_\nu^+ W_\mu^-) - 2A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-] - g\alpha [H^3 + H \phi^0 \phi^0 + 2H \phi^+ \phi^-] - \\
 & \frac{1}{8}g^2 \alpha_h [H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2] - \\
 & g M W_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2}g \frac{M}{c_w} Z_\mu^0 Z_\mu^0 H - \frac{1}{2}ig [W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - \\
 & W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0)] + \frac{1}{2}g [W_\mu^+ (H \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) - W_\mu^- (H \partial_\mu \phi^+ - \\
 & \phi^+ \partial_\mu H)] + \frac{1}{2}g \frac{1}{c_w} (Z_\mu^0 (H \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) - ig \frac{s_w^2}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \\
 & ig s_w M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - ig \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + \\
 & ig s_w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \frac{1}{4}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- [H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-] - \\
 & \frac{1}{4}g^2 \frac{1}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\nu^0 [H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-] - \frac{1}{2}g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
 & W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2}ig^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
 & W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - \\
 & g^1 s_w^2 A_\mu A_\nu \phi^+ \phi^- - \bar{e}^\lambda (\gamma \partial + m_e) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda \gamma \partial \nu^\lambda - \bar{u}_j^\lambda (\gamma \partial + m_u) u_j^\lambda - \\
 & d_j^\lambda (\gamma \partial + m_d) d_j^\lambda + ig s_w A_\mu [-(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu e^\lambda) + \frac{2}{3}(\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) - \frac{1}{3}(\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda)] + \\
 & \frac{ig}{4c_w} Z_\mu^0 [(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{4}{3}s_w^2 - \\
 & 1 - \gamma^5) u_j^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 - \gamma^5) d_j^\lambda)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ [(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) e^\lambda) + \\
 & (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda k} d_k^\lambda) + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- [(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda k}^\dagger \gamma^\mu (1 + \\
 & \gamma^5) u_j^\lambda)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} \frac{m_h^2}{M} [-\phi^+ (\bar{\nu}^\lambda (1 - \gamma^5) e^\lambda) + \phi^- (\bar{e}^\lambda (1 + \gamma^5) \nu^\lambda)] - \\
 & \frac{g}{2} \frac{m_h^2}{M} [H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + i\phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda)] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ [-m_h^2 (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda k} (1 - \gamma^5) d_k^\lambda) + \\
 & m_h^2 (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda k} (1 + \gamma^5) d_k^\lambda) + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- [m_h^2 (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda k}^\dagger (1 + \gamma^5) u_k^\lambda) - m_h^2 (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda k}^\dagger (1 - \\
 & \gamma^5) u_k^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_h^2}{M} H (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_h^2}{M} H (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_h^2}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \\
 & \frac{ig}{2} \frac{m_h^2}{M} \phi^0 (\bar{d}_j^\lambda \gamma^5 d_j^\lambda) + \bar{X}^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + \bar{X}^- (\partial^2 - M^2) X^- + \bar{X}^0 (\partial^2 - \\
 & \frac{M^2}{c_w^2}) X^0 + \bar{Y} \partial^2 Y + igc_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + ig s_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + igc_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + ig s_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \\
 & \partial_\mu \bar{Y} X^+) + igc_w Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \partial_\mu \bar{X}^- X^-) + ig s_w A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^- X^-) - \frac{1}{2}gM [\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{c_w^2} \bar{X}^0 X^0 H] + \\
 & \frac{1-2c_w^2}{2c_w} igM [\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \bar{X}^- X^0 \phi^-] + \frac{1}{c_w} igM [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \\
 & igM s_w [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \frac{1}{2}igM [\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0]
 \end{aligned}$$

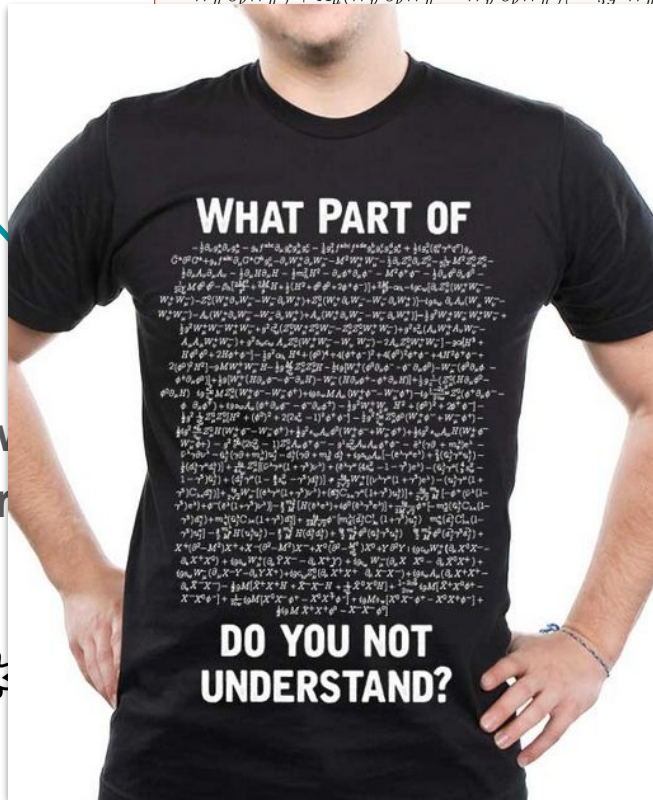
Starke Wechselwirkung



<http://www.symmetrymagazine.org/article/the-deconstructed-standard-model-equation>



mass	$\sim 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$+1.275 \text{ GeV}/c^2$	$+173.07 \text{ GeV}/c^2$
charge	2/3	2/3	2/3
spin	1/2	1/2	1/2
	u	c	t
	up	charm	top
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$
	$-1/2$	$-1/2$	$-1/2$
	d	s	b
	down	strange	bottom
QUARKS			
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$
	1	1	1
	0	0	0
	e	μ	τ
	electron	muon	tau
	$-2/3$	$-1/3$	$-1/3$
	0	0	0
	ν_e	ν_μ	ν_τ
	electron neutrino	muon neutrino	tau neutrino
LEPTONS			



Elektroschwache Wechselwirkung

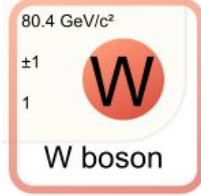
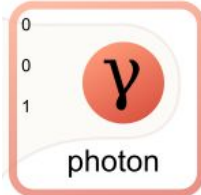


$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{2} \partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{2} g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^a g_\nu^b g_\mu^c g_\nu^d g_\mu^e \\
 & \frac{1}{2} i g_s^2 (\bar{q}_i^\alpha \gamma^\mu q_j^\alpha) g_\mu^a + G^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu \bar{G}^a G^b g_\mu^c - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- \\
 & M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2} \partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{2c_w^2} M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \frac{1}{2} \partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - \frac{1}{2} \partial_\mu H \partial_\mu H \\
 & \frac{1}{2} m_\nu^2 H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - M^2 \phi^+ \phi^- - \frac{1}{2} \partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \frac{1}{2c_w} M \phi^0 \phi^0 - \beta_h \left[\frac{2M^2}{g^2} + \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2} (H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right] + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h - i g c_w [\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\mu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\mu W_\mu^+)] - i g s_w [\partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+) + A_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)] - \frac{1}{2} g^2 W_\mu^+ W_\mu^- W_\nu^+ W_\nu^- +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & W_\nu^+ W_\nu^- + \frac{1}{2} (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) H \phi^+ \phi^- - 2(\phi^0)^2 H^2 - \phi^- \partial_\mu \phi^0 - W_\mu^- (H \partial_\mu \phi^+ - \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \phi^- \partial_\mu \phi^+ + Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- + \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^-) + \partial_\nu m_\nu^2 u_j^\dagger + \frac{1}{2} (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{1}{3} s_w^2 - \mu (1 + \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda c}^\dagger \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) - (1 - \gamma^5) d_j^c) + m_\nu^2 (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda c}^\dagger (1 - \gamma^5) u_j^\dagger) - \bar{u}_j^\lambda \gamma^\nu \delta u_j^\lambda - X^- + X^0 (\partial^2 - \partial_\mu \bar{Y} X^- - \partial_\mu \bar{X}^- Y - \partial_\mu \bar{X}^+ X^- + X^0 H) +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{1-2c_w}{2c_w} i g M [X^+ X^0 \phi^+ - X^- X^0 \phi^-] + \frac{1}{2c_w} i g M [X^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \\
 & i g M s_w [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \frac{1}{2} i g M [\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0]
 \end{aligned}$$

Starke Wechselwirkung



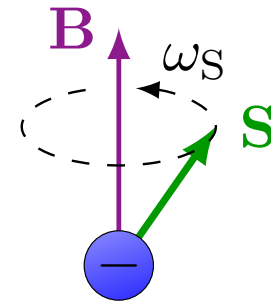
<http://www.symmetrymagazine.org/article/the-deconstructed-standard-model-equation>

Theory: Das Standard Modell

- Elementarteilchen
 - Wechselwirkungen (ausser Gravitation)
 - 26 freie Parameter (z.B. m_{Higgs} , m_Z)
-
- kompatibel mit der speziellen Relativitätstheorie
 - sehr gut getestet: Bsp g_{Elektron}
 - Gemessen: $g_{\text{Elektron}} = -2.00231930436182(52)$
 - Theorie: $g_{\text{Elektron}} = -2.0023193048(8)$

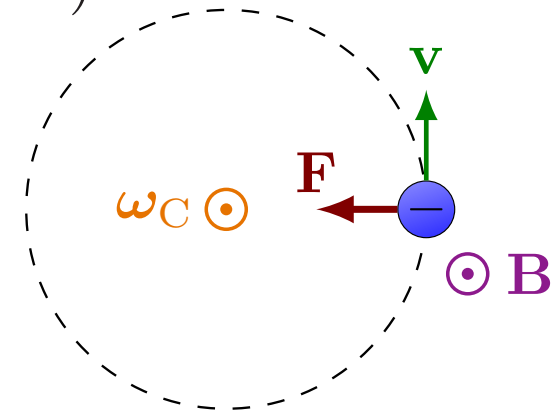
How to measure $g - 2$?

Larmor precession $\omega_S = g \frac{e}{2m} B$



anomalous frequency $\omega_a = \omega_S - \omega_C \sim O(10^{-3})$

cyclotron oscillation $\omega_C = \frac{e}{m} B$

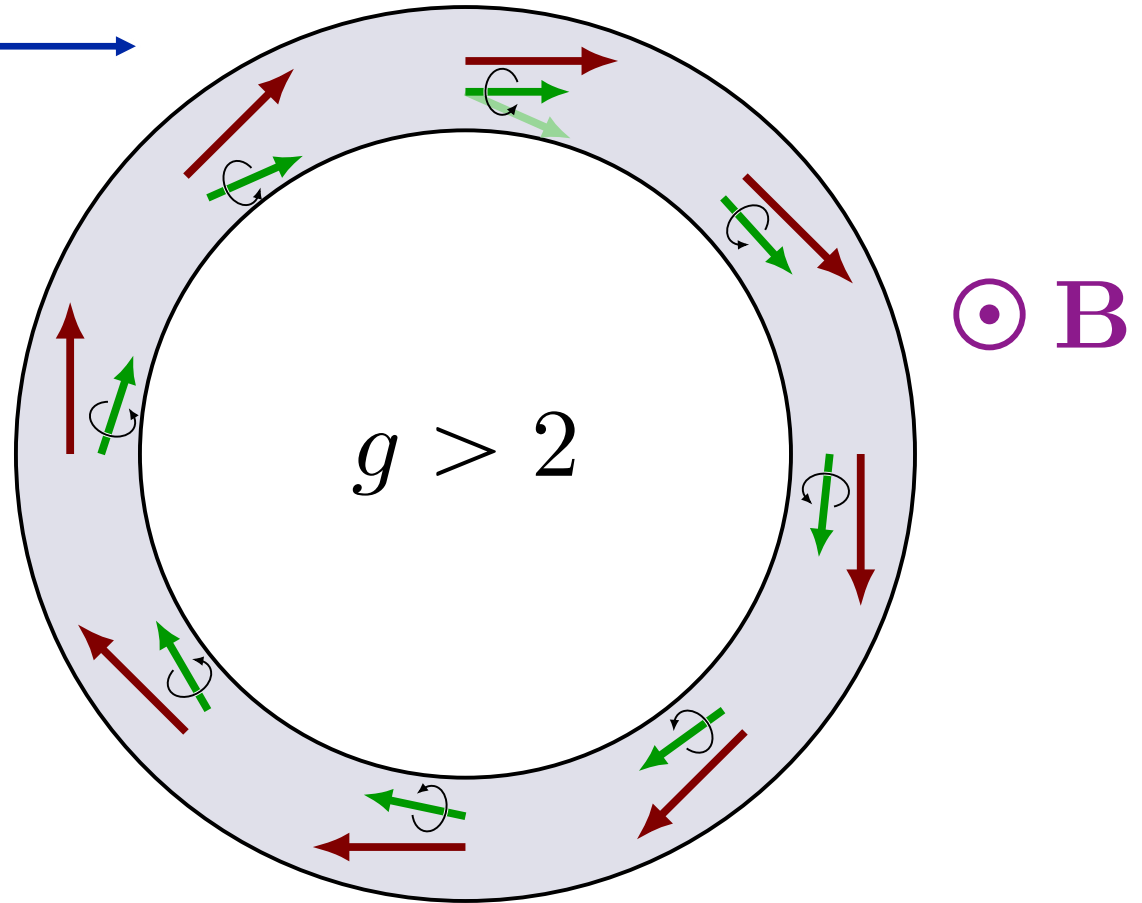


$$\Rightarrow \frac{g}{2} = \frac{\omega_S}{\omega_C} = 1 + \frac{\omega_a}{\omega_C} \text{ by measuring } \omega_a/\omega_C$$

Muon $g - 2$ main idea

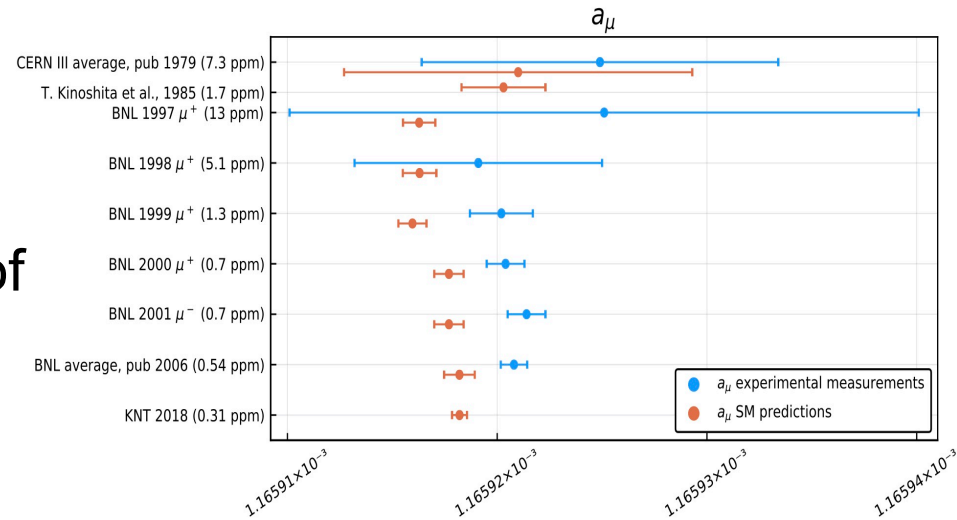
polarized μ^+ beam \longrightarrow

$$\begin{aligned}\omega_a &= \omega_S - \omega_C \\ &= \frac{g - 2}{2} \frac{e}{m_\mu} B\end{aligned}$$

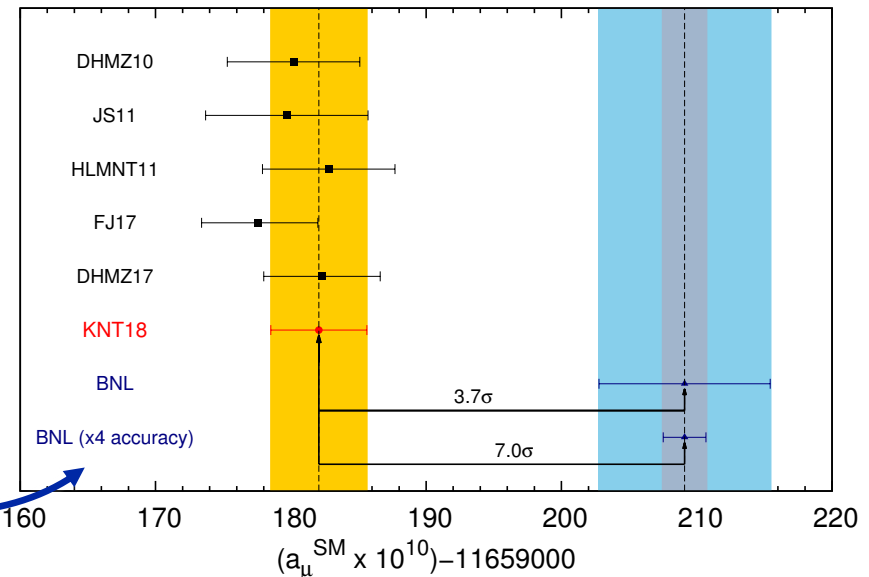


Muon g – 2

- muon lifetime $\sim 2.2 \mu\text{s}$
 \Rightarrow use storage rings instead of Penning traps
- **1961**: CERN $\sim 0.2\%$
- **1962–1968**: CERN ~ 270 ppm
- **1974–1976**: CERN ~ 10 ppm
- **1997–1999**: BNL ~ 1.3 ppm
- **2000–2001**: BNL ~ 0.54 ppm
- **2018–2020**: FNAL ~ 0.14 ppm



Marco Incagli, EPS-HEP-2019



<https://arxiv.org/pdf/1802.02995.pdf>

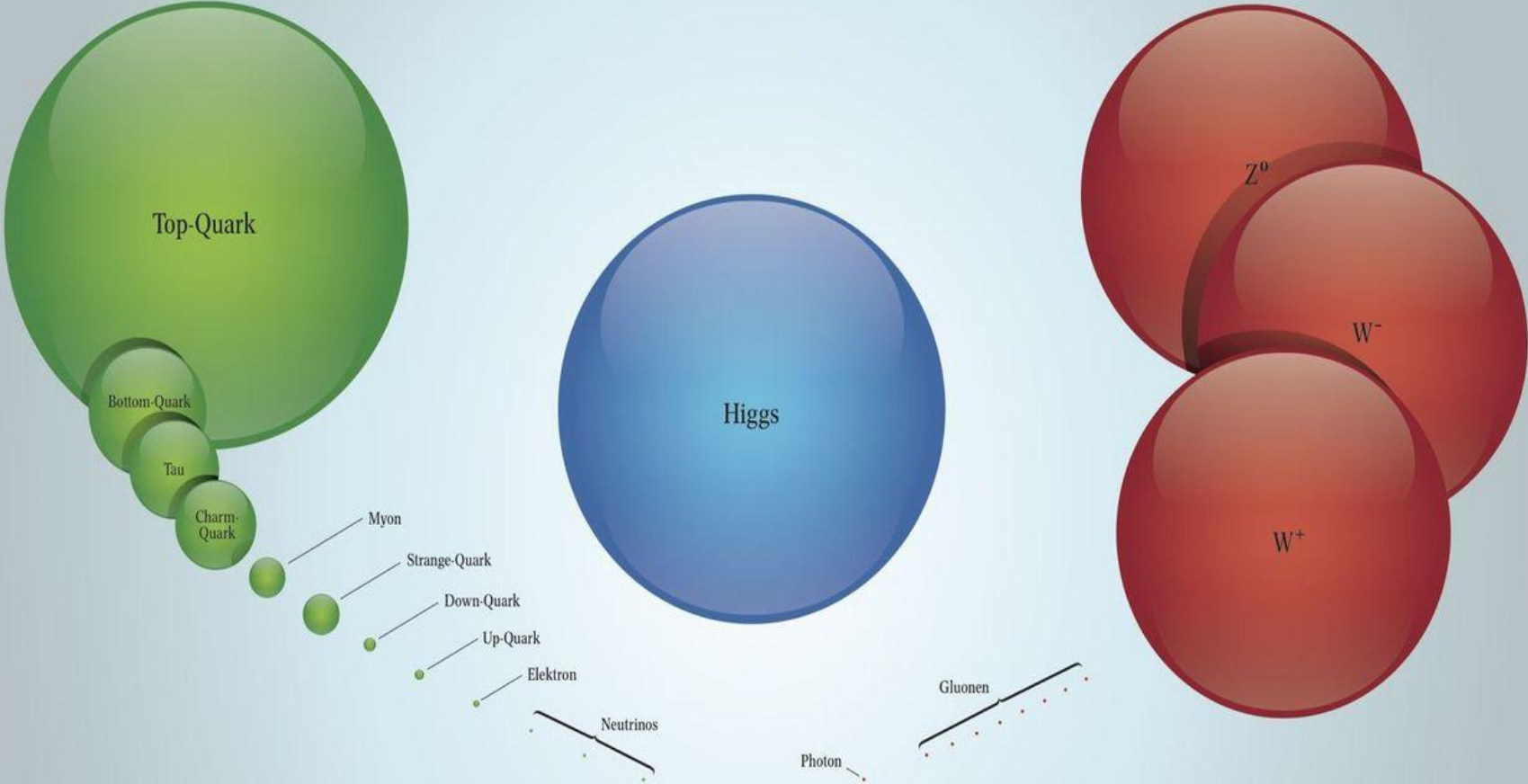
Masse der Elementarteilchen

Masse wird nicht vorhergesagt → experimentelle Bestimmung



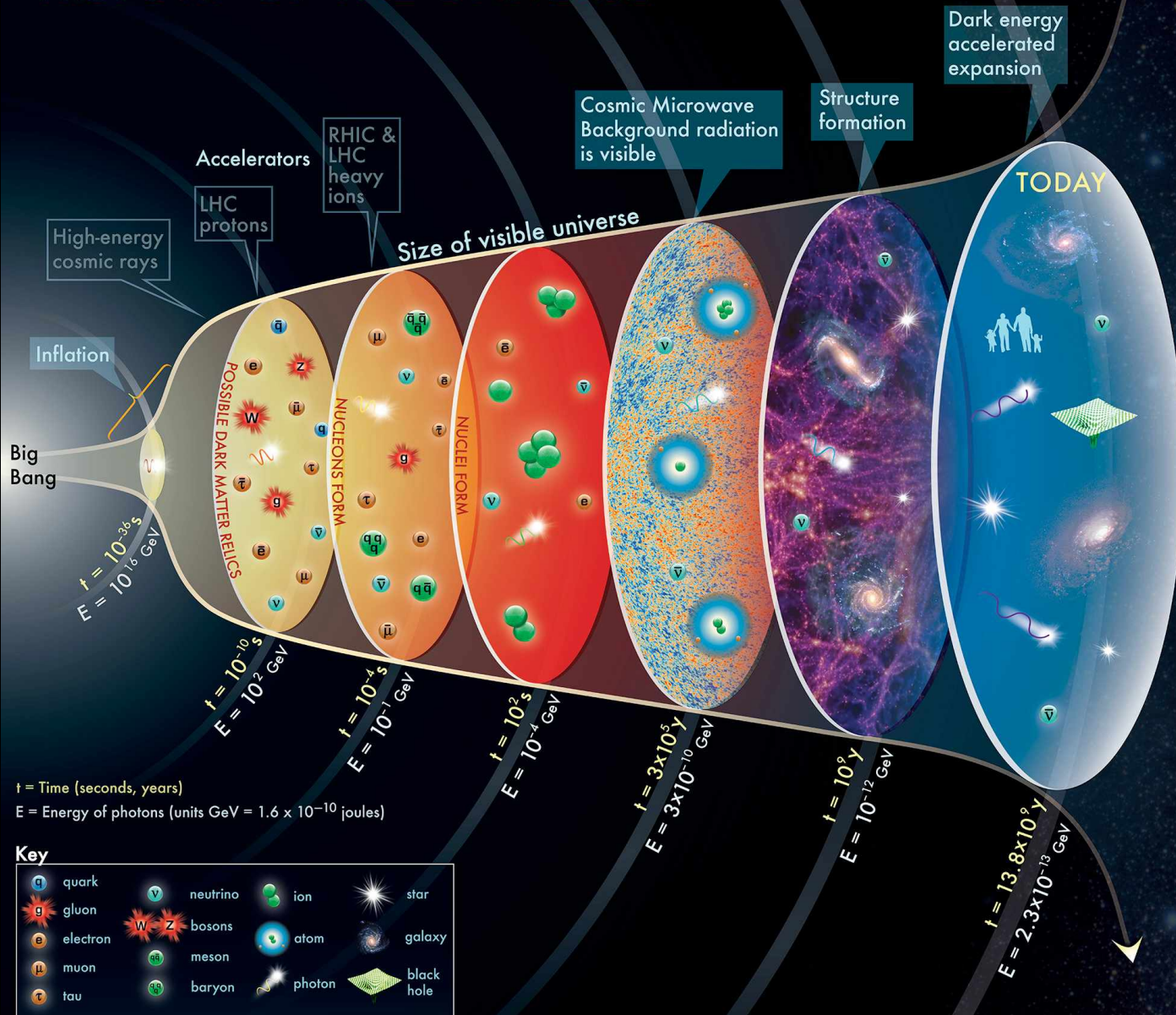
http://davidc.web.cern.ch/davidc/gfx/mass_comparison.png

Masse der Elementarteilchen



Wieso ist es interessant?

HISTORY OF THE UNIVERSE



The concept for the above figure originated in a 1986 paper by Michael Turner.

Antimaterie

Teilchen und sein Antiteilchen können sich vernichten:

$$E = mc^2$$

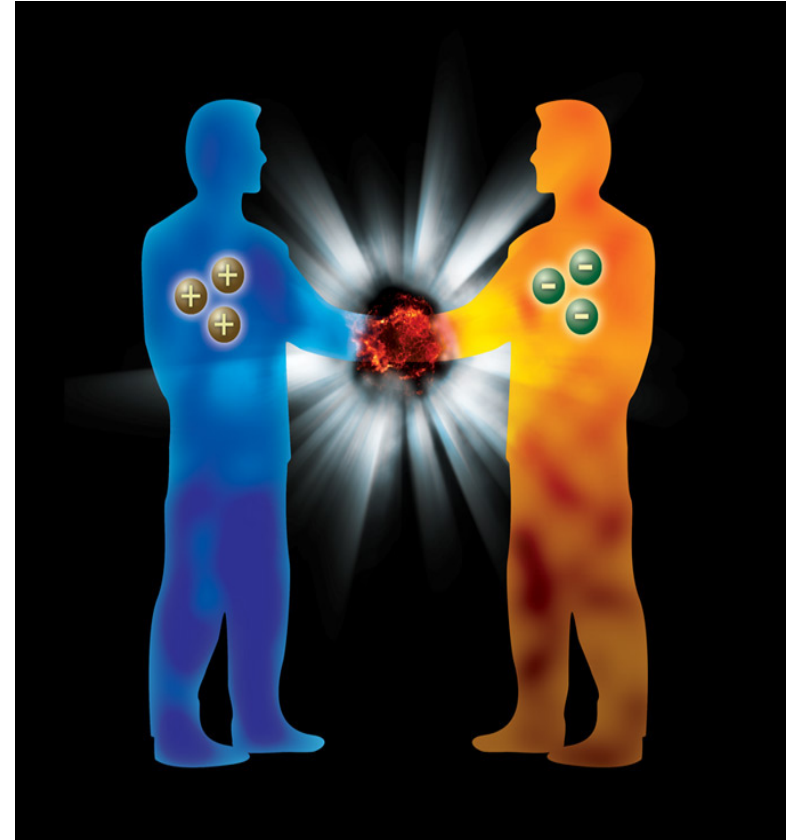
Urknall:

aus Energie entstand Materie und Antimaterie

Sekunden später verschwand die ganze Antimaterie

1 Materieteilchen auf 1 Milliarde Antiteilchen blieb übrig

Warum?



Dunkle Materie

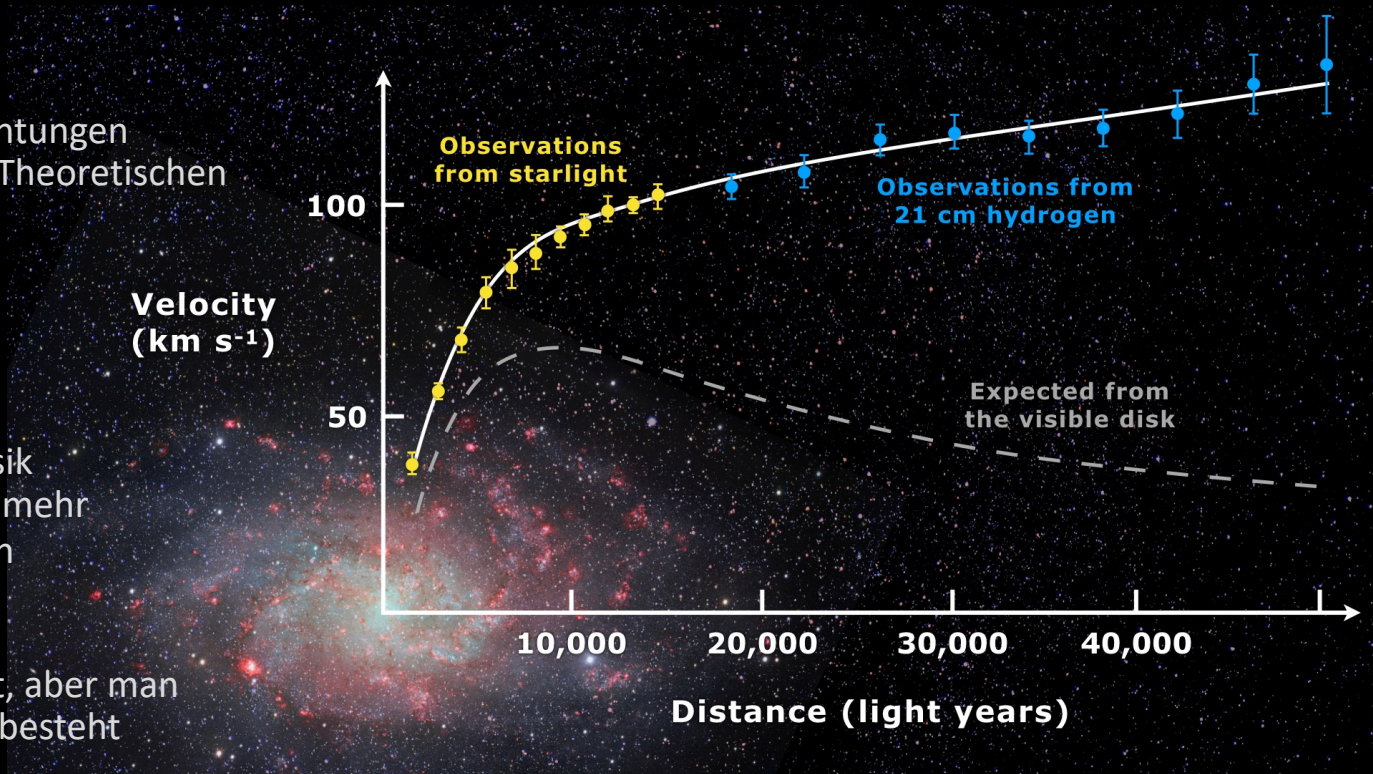
Problem:

Astronomische Beobachtungen entsprechen nicht den Theoretischen Erwartungen

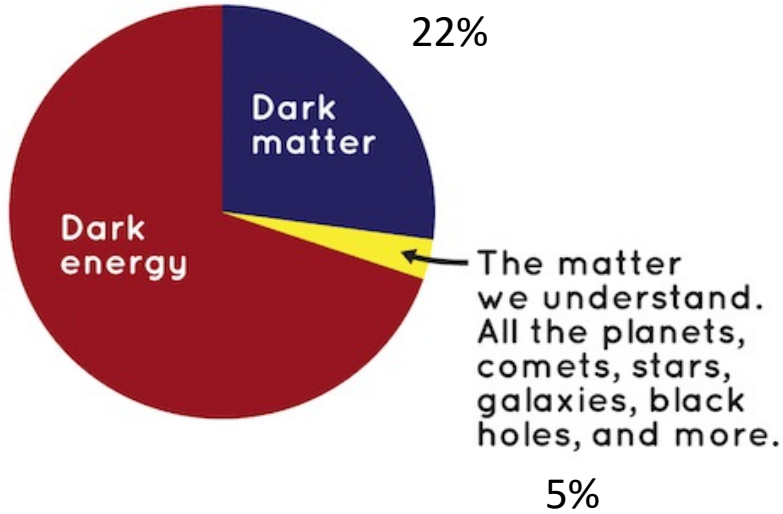
Mögliche Erklärungen:

A) Die Gesetze der Physik (Gravitation) sind nicht mehr korrekt auf sehr grossen Distanzen

B) Diese Masse existiert, aber man weiss nicht aus was sie besteht



Dunkle Materie



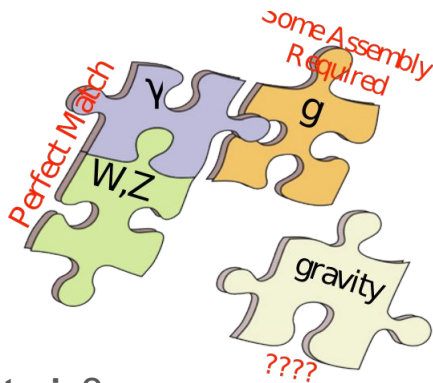
Standard Model of Elementary Particles

	three generations of matter (elementary fermions)			three generations of antimatter (elementary antifermions)			interactions / force carriers (elementary bosons)	
	I	II	III	I	II	III		
mass	=2.2 MeV/c ²	=1.28 GeV/c ²	=173.1 GeV/c ²	=2.2 MeV/c ²	=1.28 GeV/c ²	=173.1 GeV/c ²	0	=124.97 GeV/c ²
charge	2/3	2/3	2/3	-2/3	-2/3	-2/3	0	0
spin	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1	0
	u up	c charm	t top	ū antiup	c̄ anticharm	t̄ antitop	g gluon	H higgs
	d down	s strange	b bottom	d̄ antidown	s̄ antistrange	b̄ antibottom	γ photon	
	e electron	μ muon	τ tau	e⁺ positron	μ̄ antimuon	τ̄ antitau	Z⁰ Z ⁰ boson	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	ν̄_e electron antineutrino	ν̄_μ muon antineutrino	ν̄_τ tau antineutrino	W⁺ W ⁺ boson	
							W⁻ W ⁻ boson	

QUARKS (rows 1-3)
LEPTONS (rows 4-6)
GAUGE BOSONS VECTOR BOSONS (row 7)
SCALAR BOSONS (row 8)

⇒ Es gibt noch viel, das wir nicht verstehen

Ok. Und jetzt?

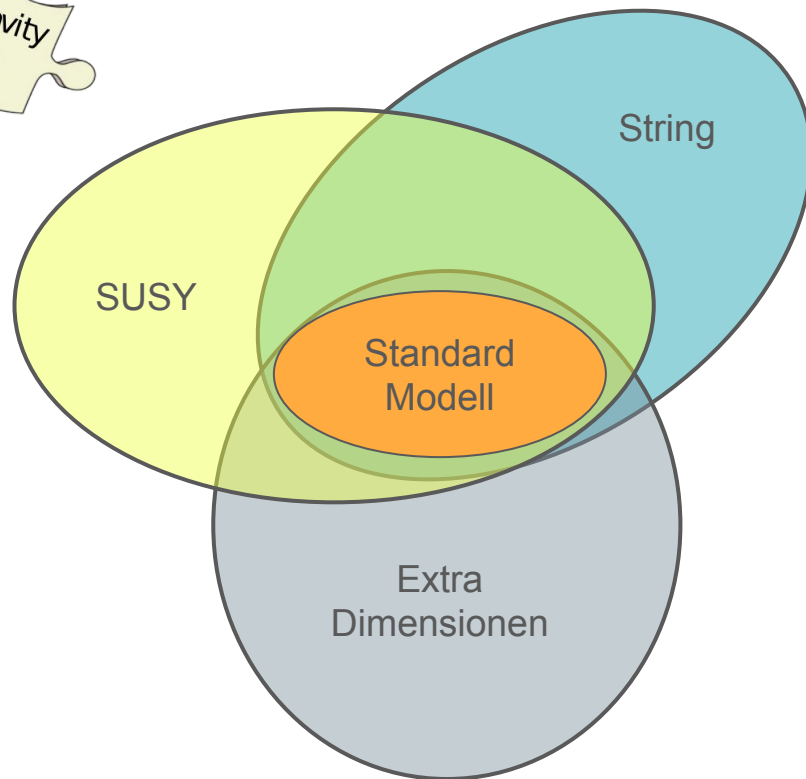


Fragen

- wie passt **Gravitation** ins Bild?
- wieso gibt es mehr **Materie als Anti-Materie**?
- wieso dehnt sich das Universum aus?
- was ist **dunkle Materie**?
- was ist dunkle Energie?

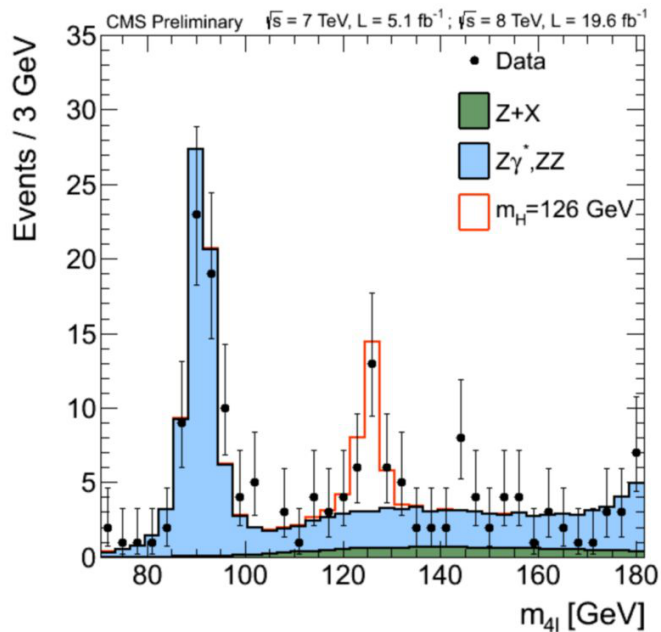
- wieso 26 freie Parameter?
- wieso sind diese so verschieden? (Naturalness)
- wieso 3 Familien?
- wieso ist "**fine-tuning**" notwendig?

viele neuen Theorien

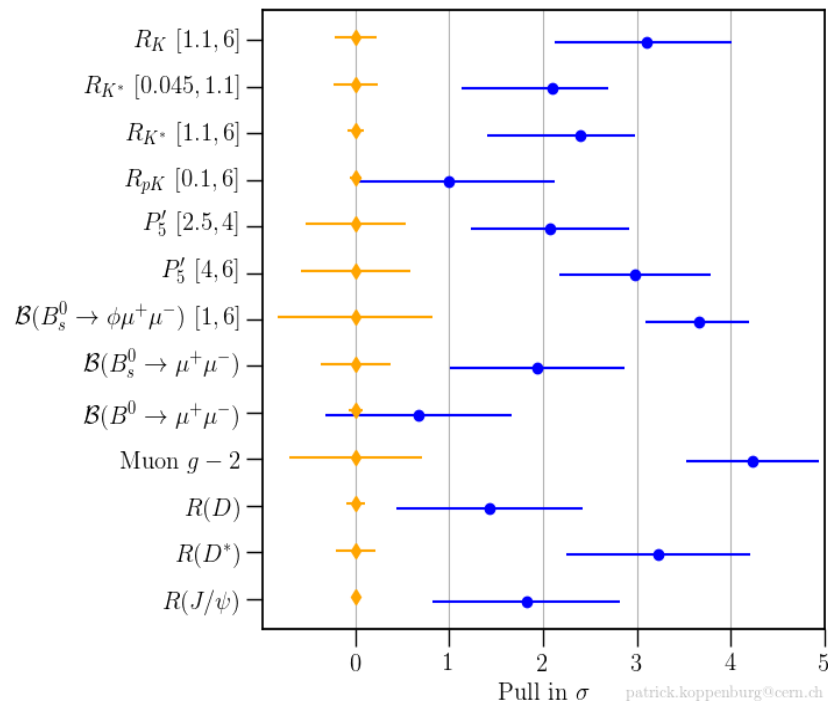


Ok. und jetzt?

Direkt (neue Teilchen)



Indirekt (stimmt irgend etwas nicht?)

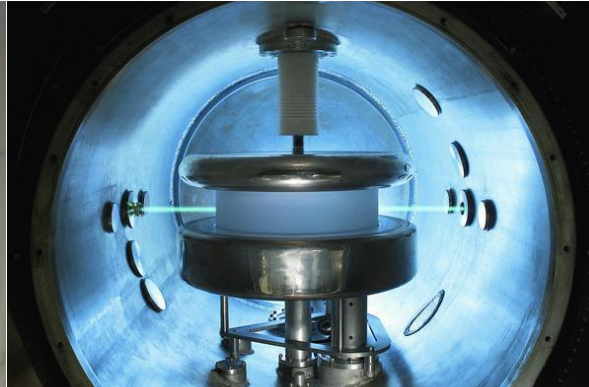


Ok. Und jetzt?

Hohe Energien (~ 13 TeV)

Hohe Intensitäten
(Präzision, \sim MeV)

Kosmische Strahlung



CERN: **Beschleuniger**
neue Teilchen?
(nächster Vortrag)

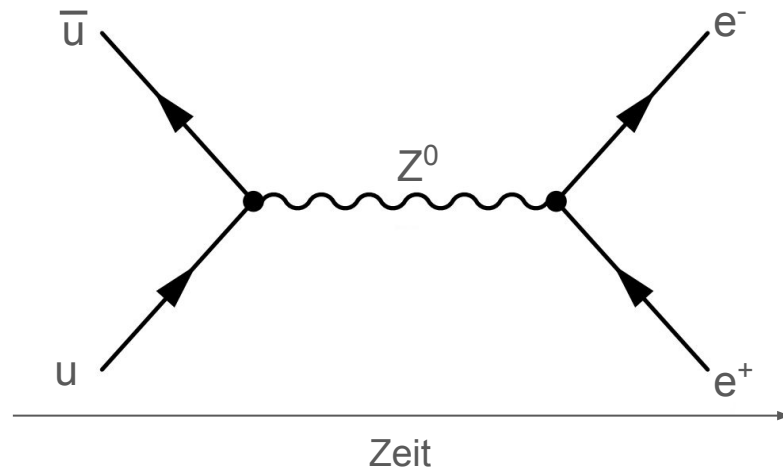
nEDM (PSI, Villigen)
stimmt was nicht?
elektrische Dipolmoment des Neutrons

CTA Teleskop
Cherenkov Telescope Array
Teilchen kosmischen Ursprungs

Heute:
W- und Z-Bosonen
Standard Modell Test

Heute: W- und Z-Bosonen

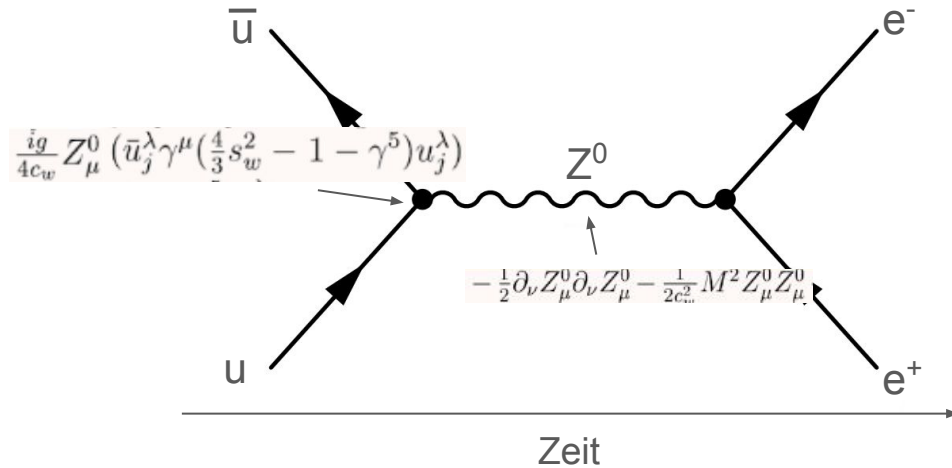
was kann passieren? was schauen wir uns an? was können wir testen?



- “von Links nach Rechts”
- Quark + Anti-Quark $\rightarrow Z^0$
- Z^0 zerfällt sofort in e^+/e^-

Heute: W- und Z-Bosonen

was kann passieren? was schauen wir uns an? was können wir testen?



- “von Links nach Rechts”
- Quark + Anti-Quark $\rightarrow Z^0$
- Z^0 zerfällt sofort in e^+/e^-
- Welche dieser Diagramme es gibt folgt aus dem “Lagrangian”

Starke Wechselwirkung

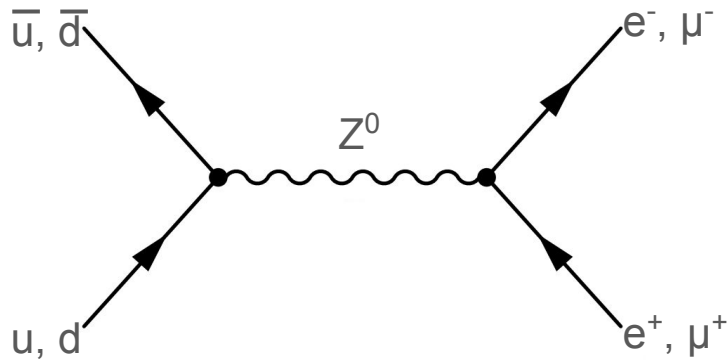
Elektroschwache Wechselwirkung

Higgs boson

<http://www.symmetrymagazine.org/article/the-structured-standard-model-equation>

Z^0 -Boson \rightarrow 2 Leptonen

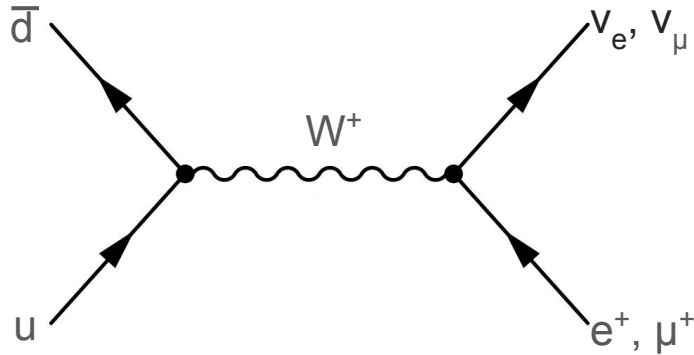
Z^0 zerfällt sofort: im Detektor sehen wir Leptonen (e/μ)



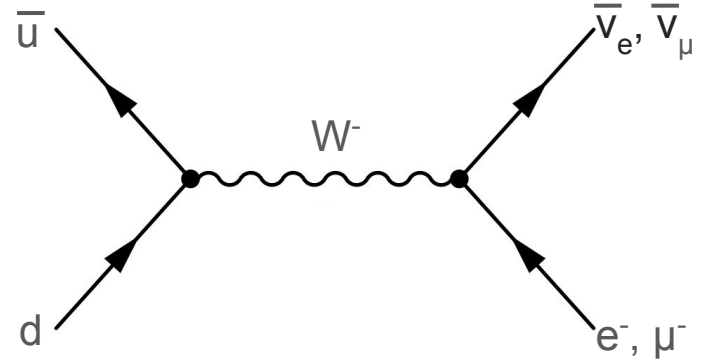
- Quark + Anti-Quark: Ladung 0
- Z^0 : Ladung 0
- e^+/e^- oder μ^+/μ^- : Ladung 0

$W^{-/+}$ -Boson \rightarrow 1 Lepton

$W^{+/-}$ zerfallen sofort, Neutrinos sind "unsichtbar" für den Detektor
im Detektor sehen wir Leptonen (e/μ)



- Up($2/3$) + Anti-Down($1/3$): Ladung +
- W^+ : Ladung +
- e^+/ν_e oder μ^+/ν_μ : Ladung +



- Down($-1/3$) + Anti-Up($-2/3$): Ladung -
- W^- : Ladung -
- $e^-/\bar{\nu}_e$ oder $\mu^-/\bar{\nu}_\mu$: Ladung -

Heute: Was testen/messen wir?

Standard Modell Vorhersagen:

- Verhältnis von Zerfällen nach e und μ (W^- und Z -Bosonen)
- Verhältnis von produzierten W^+ und W^-
- Verhältnis von produzierten Z^0 und $W^{+/-}$

Freier Parameter im Standard Modell:

- Masse Z^0

Fragen?



UP



CHARM



TOP



PHOTON

STABILER TYP
KOMMUNIKATIV
FEDERLEICHT

W⁺



DOWN



STRANGE



BOTTOM



Z



W⁻



ELEKTRON



MUON



TAUON



GLUON



FEDERLEICHT
GESITERHAFT
WECHSELHAFT
NEUTRINOS



HIGGS

Das Higgs-Boson (Link)

