

Einführung in die Teilchenphysik

Masterclass 2016

Simon Corrodi

Aufeinanderschiessen



X 0.119

Theorie

Was wird geschehen?

Loch? Explosion?

Vergleichen

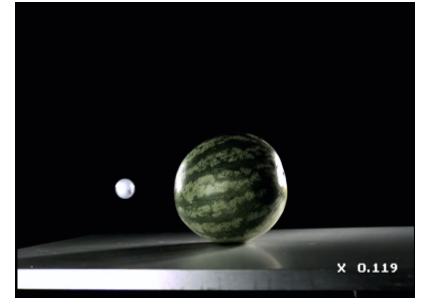
X 3.328

Übersicht

- Aufeinanderschiessen: Beschleuniger (nächste Präsentation)
 - Theorie: Das Standard Modell
 - Vergleichen: Detektoren (nächste Präsentation)
-
- Wie gut ist die gezeigte Analogie?
 - Worum geht es heute?
 - Ok. Und jetzt?

Aufeinanderschiessen

- Was? Teilchen....
- Wie? (nächster Vortrag)

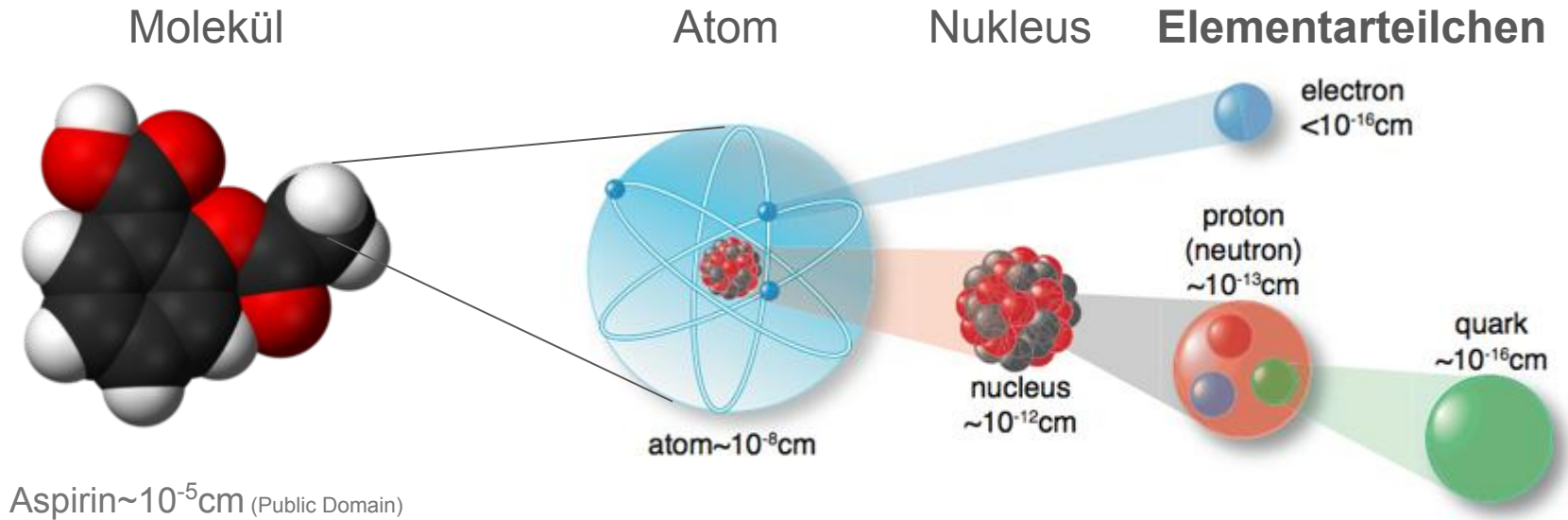


Theorie

Das Standard Modell

Woraus besteht Materie?

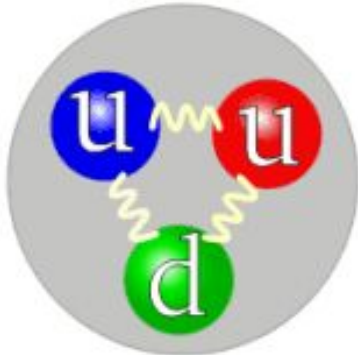
- ca. 600 v. Chr.: 4 Elemente
- heute?



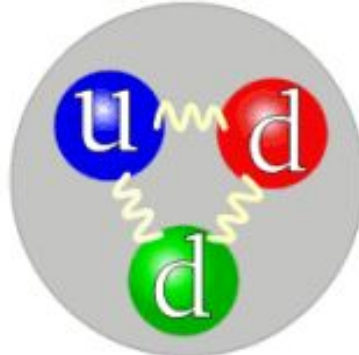
Woraus besteht Materie?

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

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



Proton



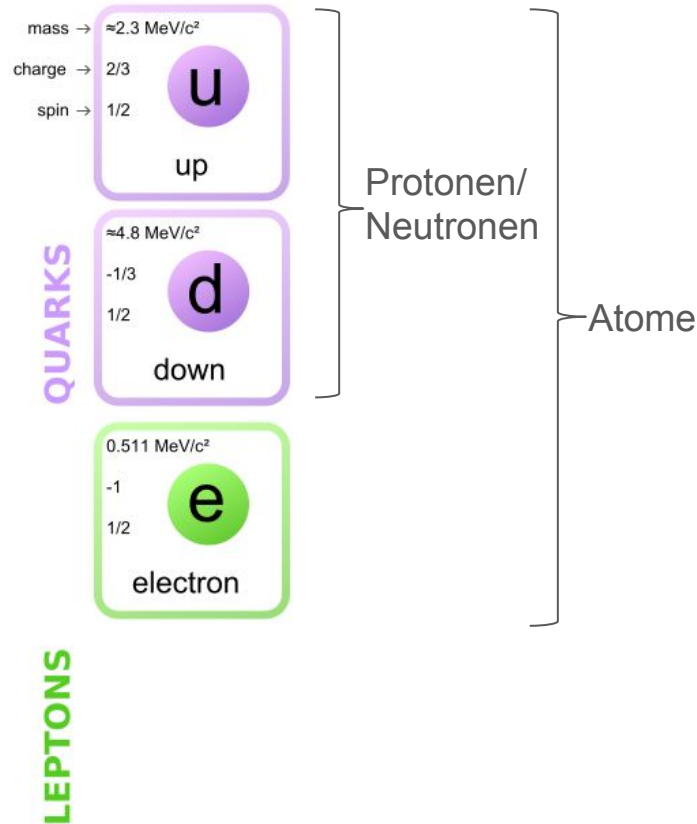
Neutron

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

Quarks

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

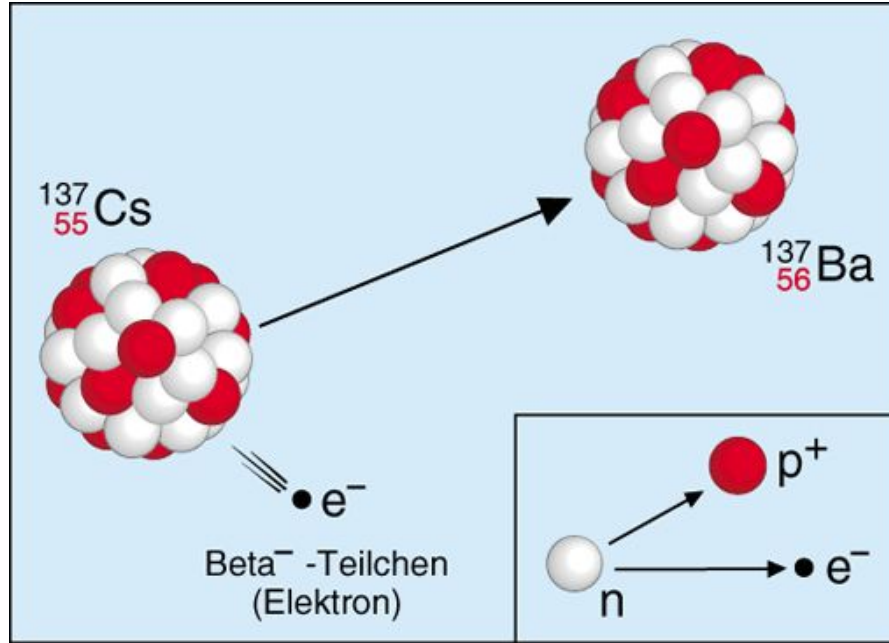
Standard Modell: Teilchen I



Bemerkung

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

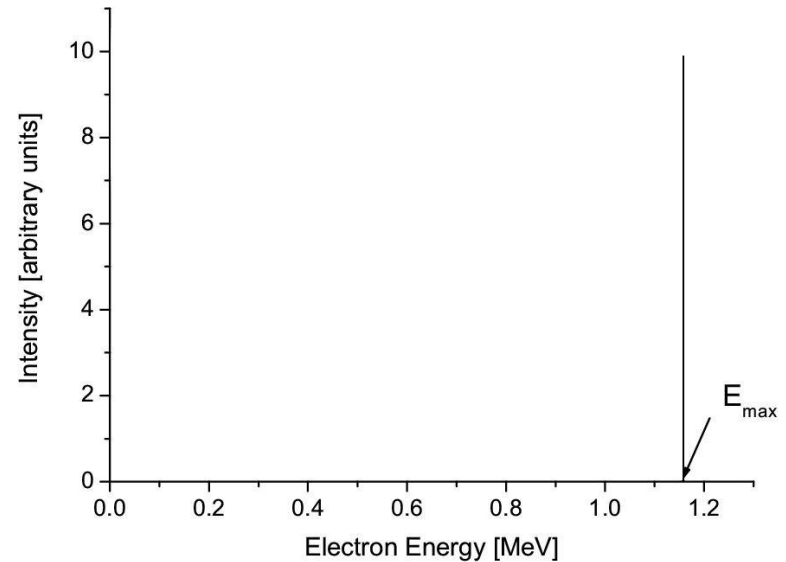
β^- -Zerfall



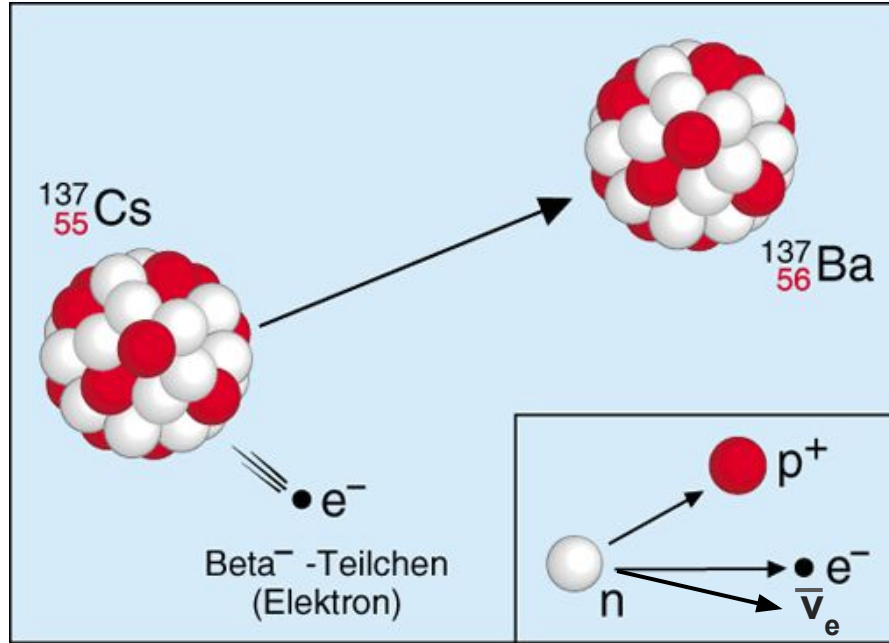
Neutron \rightarrow Proton + Elektron

$$E_{\text{kin}} = m_{\text{Cs}} - (m_{\text{Ba}} + m_e): \text{constnat}$$

2 Teilchen, Impulserhaltung: **“back-to-back”**



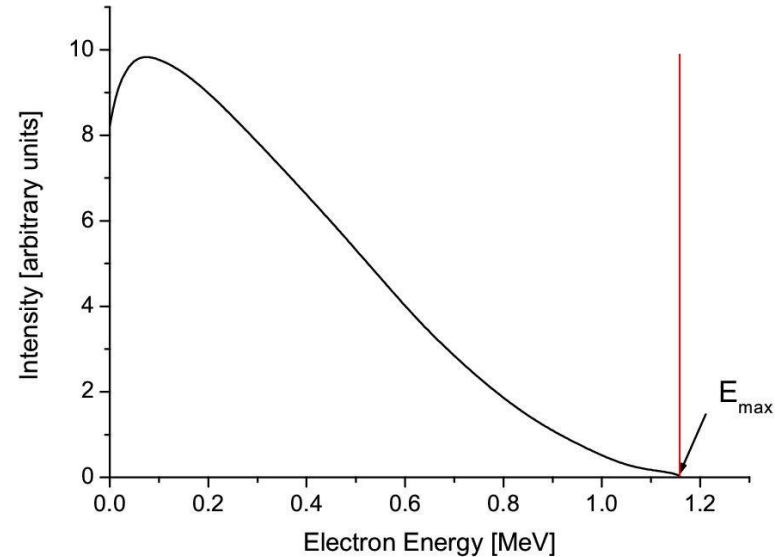
β^- -Zerfall



Neutron \rightarrow Proton + Elektron
+ *Neutrino*

$$E_{\text{kin}} = m_{\text{Cs}} - (m_{\text{Ba}} + m_e): \text{constnat}$$

2 Teilchen, Impulserhaltung: **“back-to-back”**



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

Standard Modell: Familien

mass →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$
charge →	$2/3$	$2/3$	$2/3$
spin →	$1/2$	$1/2$	$1/2$
	u up	c charm	t top
QUARKS	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$
	$1/2$	$1/2$	$1/2$
	d down	s strange	b 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 electron	μ muon	τ tau
LEPTONS	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$
	0	0	0
	$1/2$	$1/2$	$1/2$
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino

Frage:

Wieso sehen wir fast ausschliesslich u, d (Protonen, Neutronen) und e (Elektronen)?

Antwort:

- a) Neutrino kaum Interaktion
- b) Nicht stabil, Zerfall

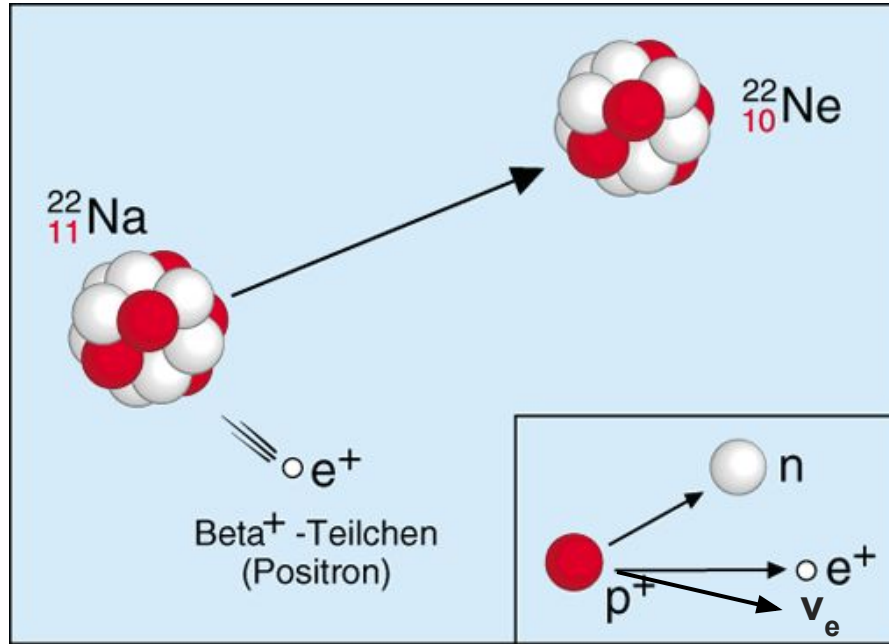
Frage:

Wieso gibt es 3 "Familien"?

Antwort:

???

β^+ -Zerfall

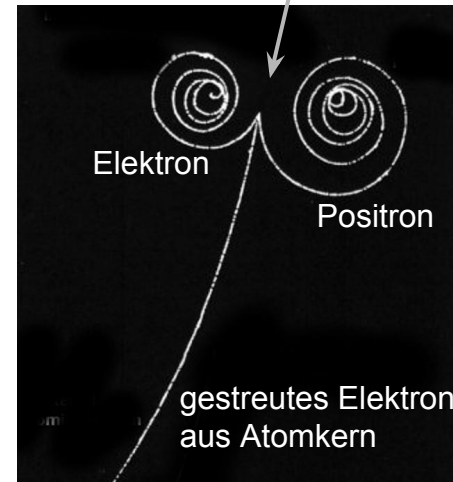


**Proton \rightarrow Neutron + *Positron*
+ Neutrino**

Positron (e^+) = Anti-Elektron (\bar{e}^-)

Lorentzkraft: $F_L = qv \times E$

Kosmische Strahlung



Blasenkammer e^+/e^- Paar

Standard Modell: Anti-Teilchen

mass →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$
charge →	$2/3$	$2/3$	$2/3$
spin →	$1/2$	$1/2$	$1/2$
	u	c	t
	up	charm	top
QUARKS	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$
	$1/2$	$1/2$	$1/2$
	d	s	b
	down	strange	bottom
LEPTONS	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$
	-1	-1	-1
	$1/2$	$1/2$	$1/2$
	e	μ	τ
	electron	muon	tau
	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$
	0	0	0
	$1/2$	$1/2$	$1/2$
	ν_e	ν_μ	ν_τ
	electron neutrino	muon neutrino	tau neutrino

mass →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$
charge →	$-2/3$	$-2/3$	$-2/3$
spin →	$1/2$	$1/2$	$1/2$
	ū	c̄	t̄
	up	charm	top
QUARKS	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$
	$1/3$	$1/3$	$1/3$
	$1/2$	$1/2$	$1/2$
	d̄	s̄	b̄
	down	strange	bottom
LEPTONS	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$
	1	1	1
	$1/2$	$1/2$	$1/2$
	ē	μ̄	τ̄
	electron	muon	tau
	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$
	0	0	0
	$1/2$	$1/2$	$1/2$
	ν̄_e	ν̄_μ	ν̄_τ
	electron neutrino	muon neutrino	tau neutrino

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

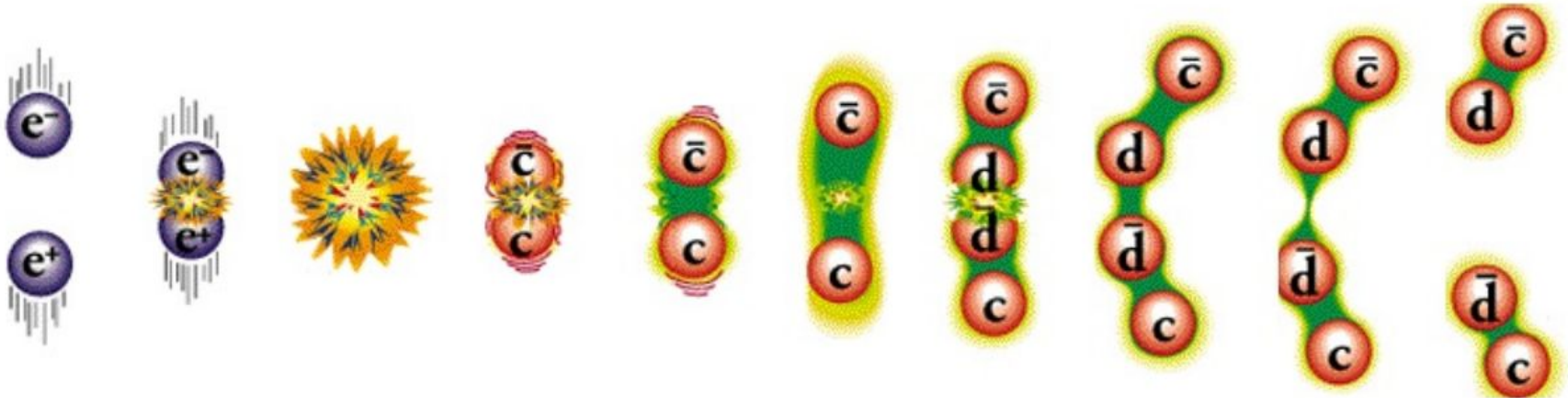
Starke Wechselwirkung

“bekannte Kräfte” (Elektromagnetisch, Gravitation)

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

Starke Wechselwirkung

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



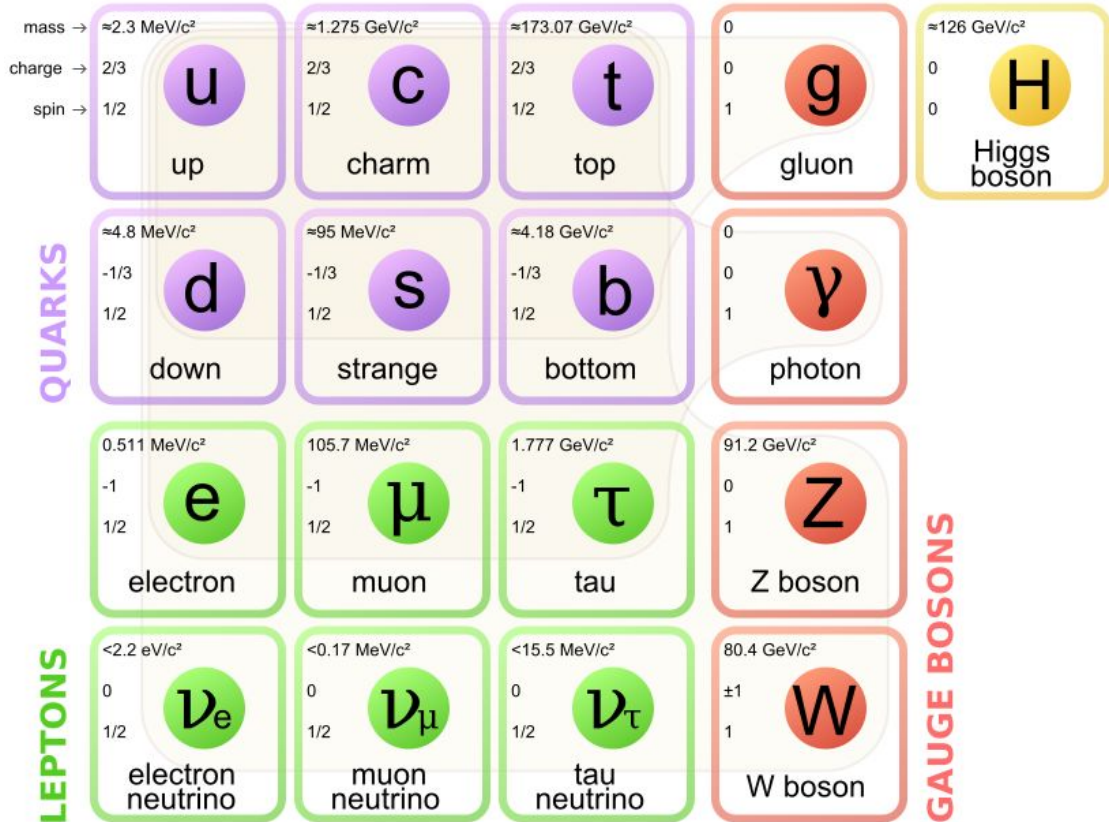
Grund weshalb es keine freien Quarks gibt

“Botenteilchen”: Bosonen

Wechselwirkungen werden durch “Botenteilchen” (Bosonen) vermittelt.

Wechselwirkung	Teilchen (Boson)	Ladung	Relative Stärke
Elektromagnetisch	Photon (γ)	<i>elektisch</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}

Standard Modell Teilchen



$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\ & + i\bar{\psi} \not{D} \psi + \text{h.c.} \\ & + \chi_i Y_{ij} \chi_j \phi + \text{h.c.} \\ & + |D_m \phi|^2 - V(\phi)\end{aligned}$$

Theory: Das Standard Modell

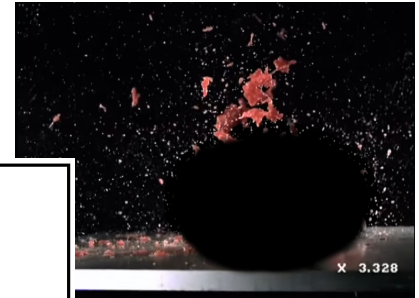
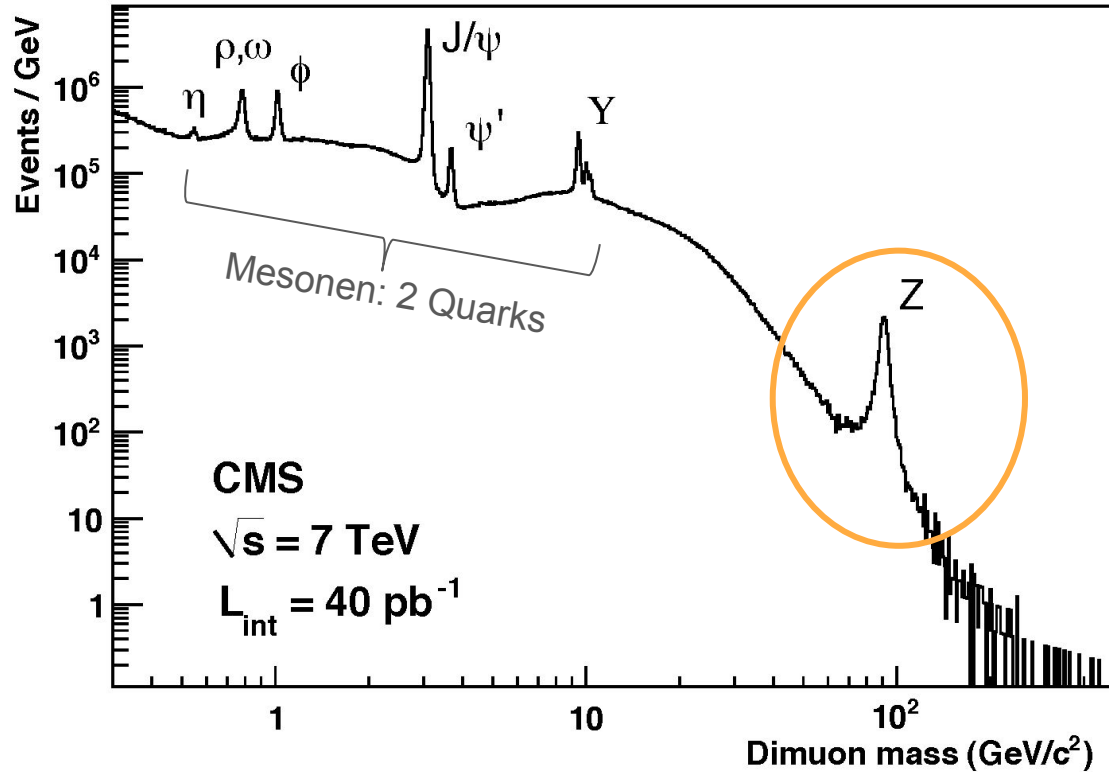
- Elementarteilchen
- Wechselwirkungen (ausser Gravitation)
- 26 freie Parameter (z.B. m_{Higgs} , m_Z)

- kompatibel mit der speziellen Relativitätstheorie
- sehr gut getestet: Bsp g_{Elektron}
 - Gemessen: $g_{\text{Elektron}} = -2.00231930436182(52)$
 - Theorie: $g_{\text{Elektron}} = -2.0023193048(8)$

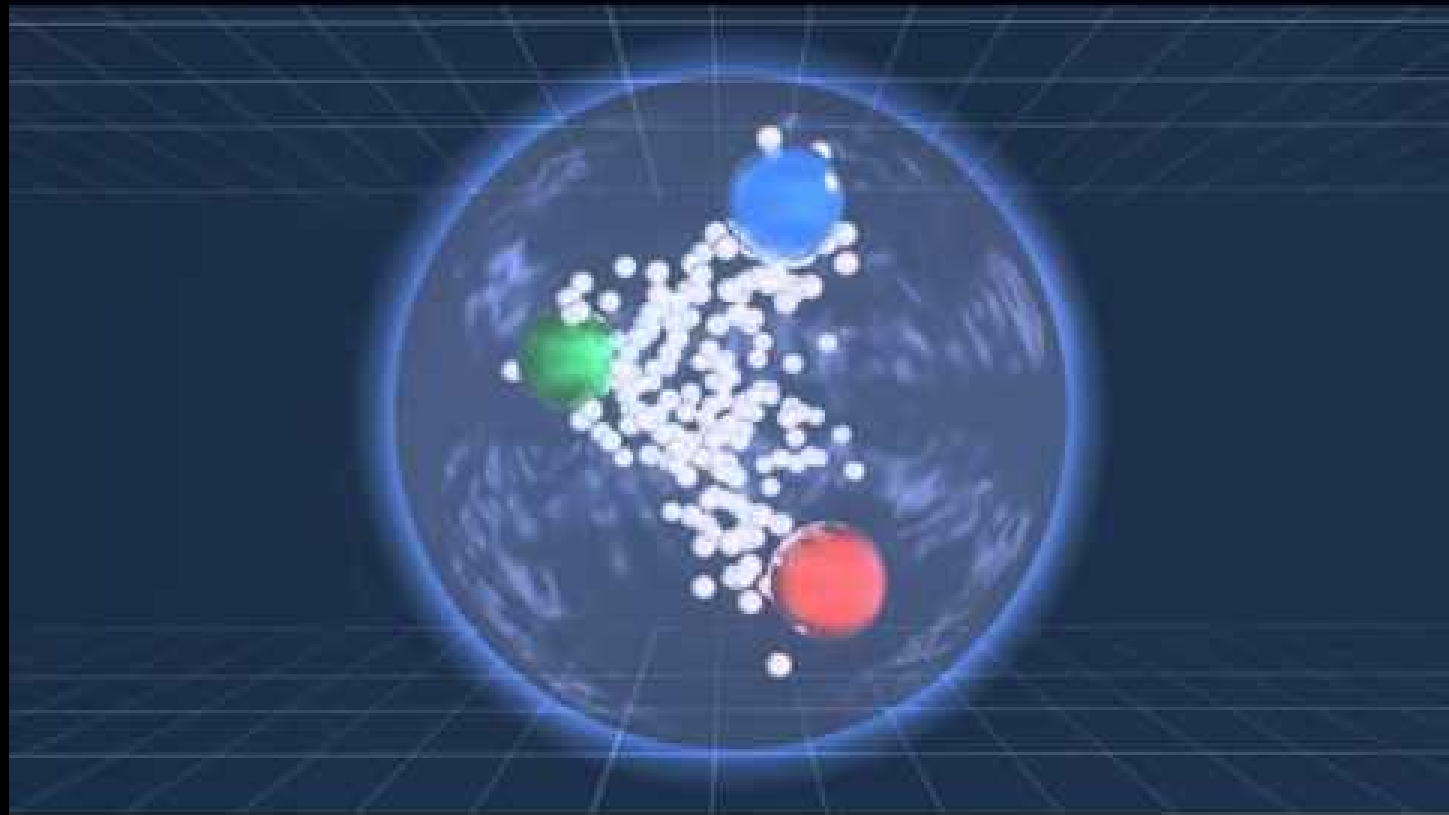
Theorie



Vergleichen



Wie gut ist die
“Golfball - Melonen” Analogie?



Wie gut ist die Analogie?

Golfball <-> Melone

ganze Objekte kollidieren

Melone wird "zerrissen", die Teile werden verteilt

relativ langsam

Proton <-> Proton

einzelne Quarks kollidieren

Quark/Anti-Quark erzeugen ein neues Objekt

Energy <-> Masse

$$\text{Einstein: } E^2 = (mc^2)^2 + (pc)^2$$

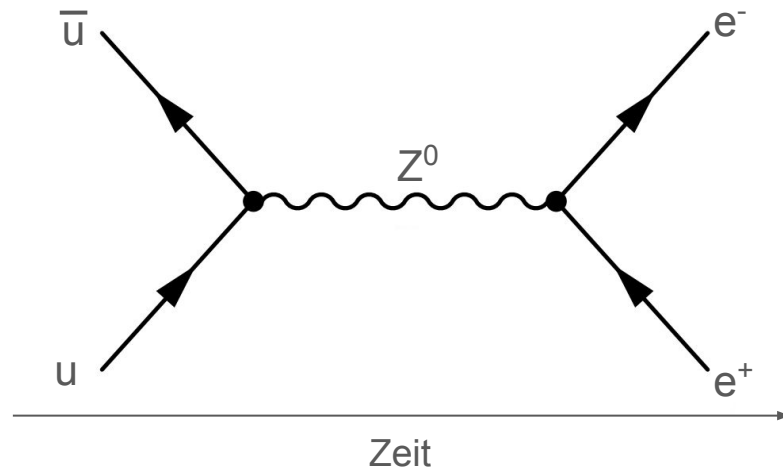
(m: Masse, p: Impuls, c: Lichtgeschwindigkeit)

sehr schnell -> viel Energie für neue Teilchen

Heute:
W- und Z-Bosonen
Standard Modell Test

Heute: W- und Z-Bosonen

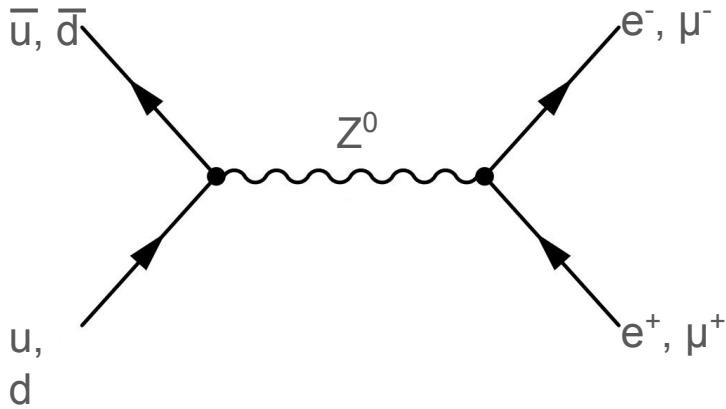
was kann passieren? was schauen wir uns an? was können wir testen?



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

Z^0 -Boson \rightarrow 2 Leptonen

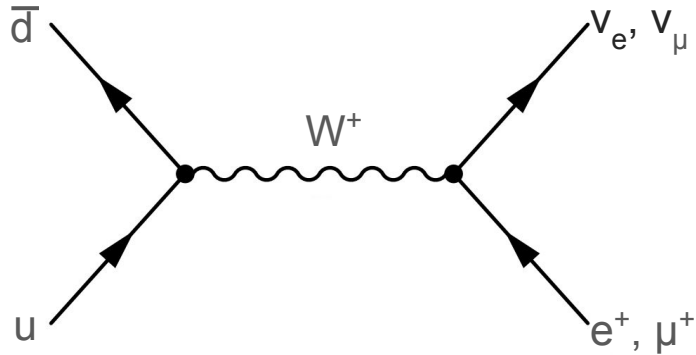
Z^0 zerfällt sofort: im Detektor sehen wir Leptonen (e/μ)



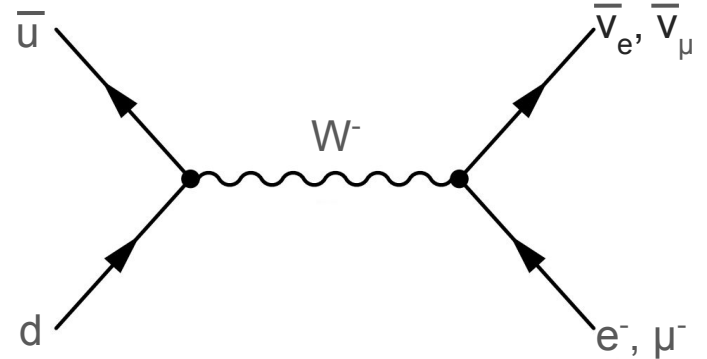
- Quark + Anti-Quark: Ladung 0
- Z^0 : Ladung 0
- e^+/e^- oder μ^+/μ^- : Ladung 0

$W^{-/+}$ -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:

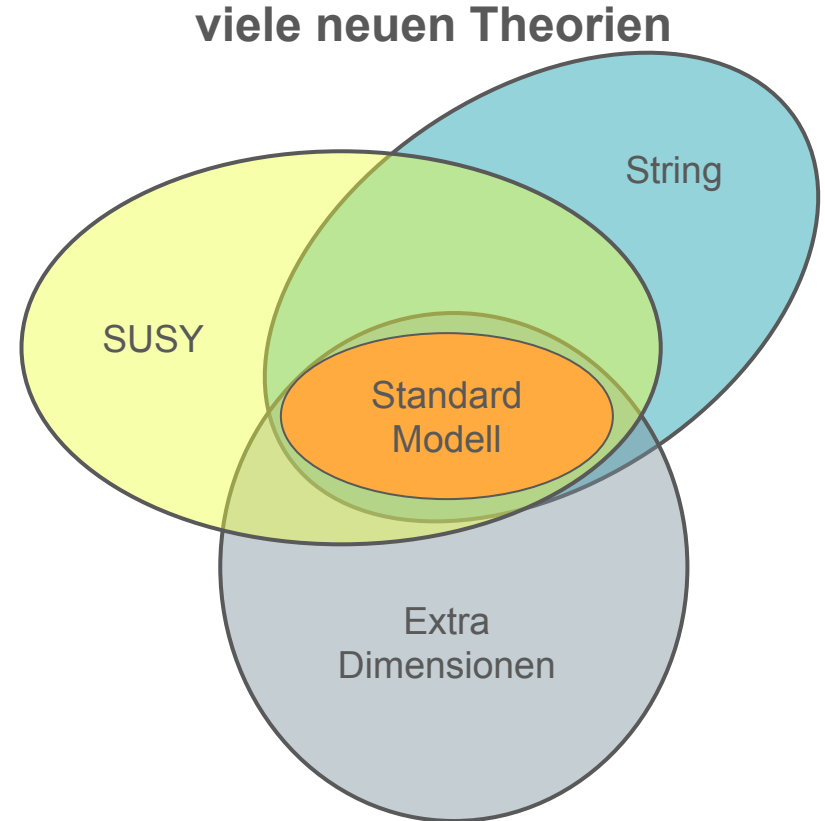
- Masse Z^0

Ok. Und jetzt?

Ok. Und jetzt?

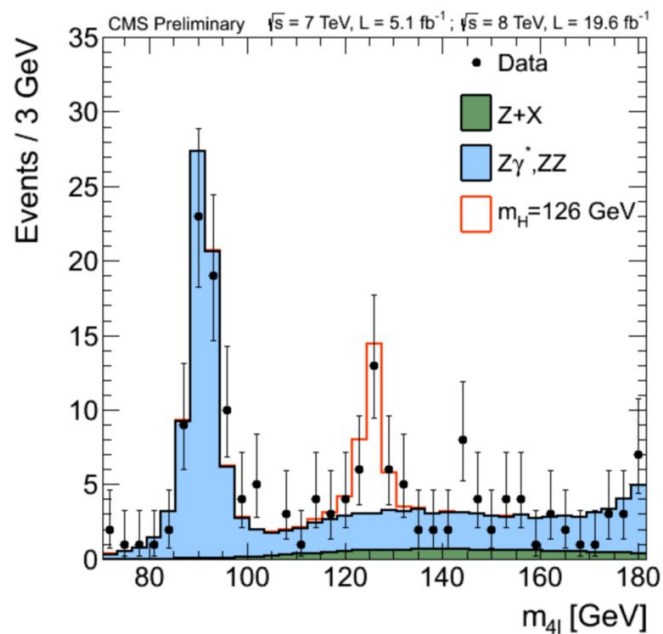
Fragen

- wie passt **Gravitation** ins Bild?
- wieso 26 freie Parameter?
- wieso sind diese so verschieden? (Naturalness)
- wieso 3 Familien?
- wieso gibt es mehr **Materie als Anti-Materie**?
- wieso dehnt sich das Universum aus?
- was ist **dunkle Materie**?
- was ist dunkle Energie?
- wie viele Dimensionen gibt es?
- wieso ist "**fine-tuning**" notwendig?

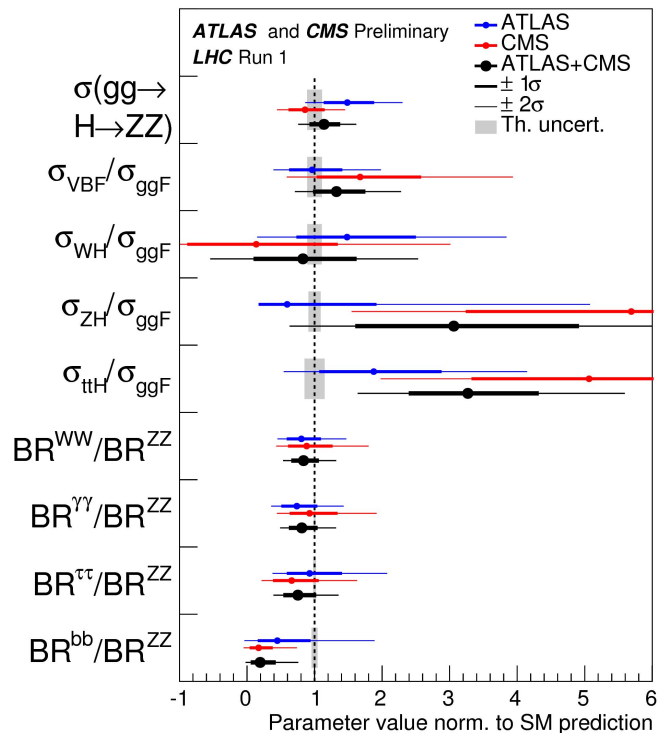


Ok. Und jetzt?

Direkt (neue Teilchen)



Indirekt (stimmt irgend etwas nicht?)

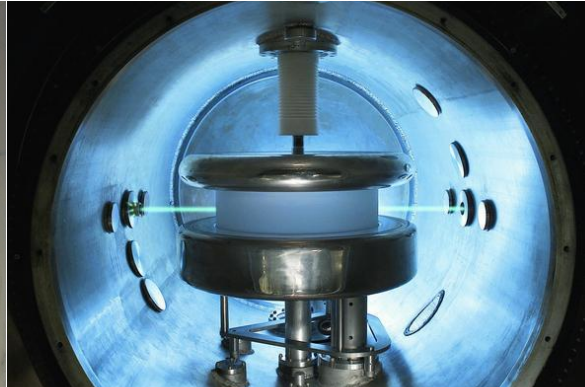
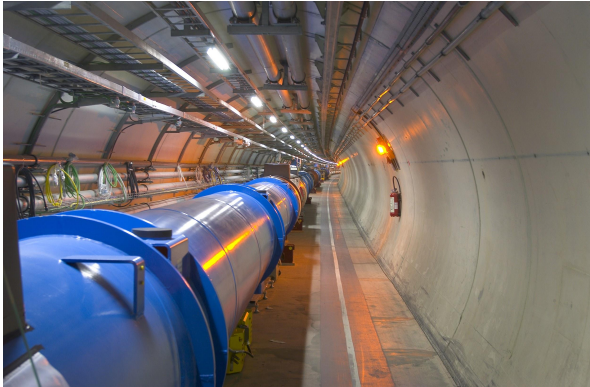


Ok. Und jetzt?

Hohe Energien (~ 13 TeV)

Hohe Intensitäten
(Präzision, \sim MeV)

Kosmisch 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

Fragen?

Bildnachweis

Golfball - Melone: <https://youtu.be/fogo9NQ1g6A>

CERN Tunnel: <http://lh-machine-outreach.web.cern.ch/lhc-machine-outreach/images/cern-photos/CE0085M.jpg>

Molekül: http://www.pharma-select.net/s/cc_images/cache_2421886599.png (public domain)

Atom Grössen: <http://www.ipp.phys.ethz.ch/outreach/particle-physics--a-brief-review.html>

Standard Modell: https://en.wikipedia.org/wiki/Standard_Model#/media/File:Standard_Model_of_Elementary_Particles.svg

Quarks: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/92/Quark_structure_proton.svg/2000px-Quark_structure_proton.svg.png

Radioactive Decays: <https://www.euronuclear.org>

Standard Modell Wandtafel: https://cds.cern.ch/record/1561145/files/Formula_image.jpg

Dimuon Spektrum: https://inspirehep.net/record/872180/files/denterria_dimuon_mass_spectrum_cms2010.png

Z-Produktion Video: www.cern.ch

Higgs Peak: http://sse.royalsociety.org/summer13/media/18946/cms-data_800.png

Standard Modell Testes: https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/CONFNOTES/ATLAS-CONF-2015-044/fig_07.png

nEDM: http://www.ipp.phys.ethz.ch/research/nedm-at-psi/_jcr_content/par/fullwidthimage/image.imageformat.lightbox.537890934.png

CTA: <https://www.mpg.de/7861567/zoom.jpg>



X 1.916