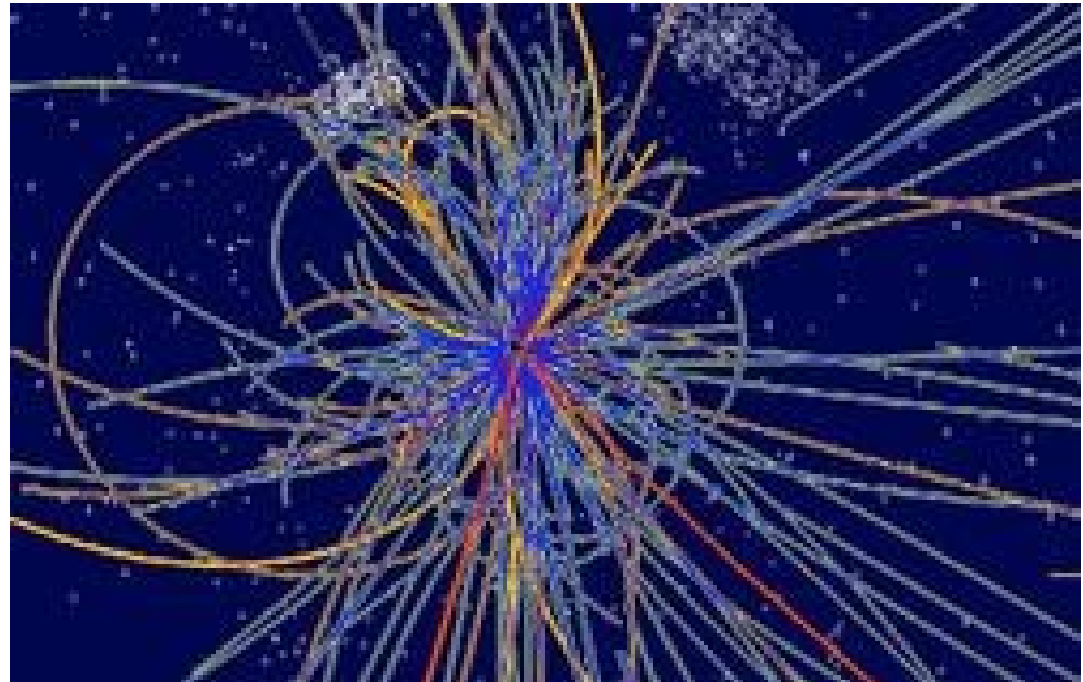


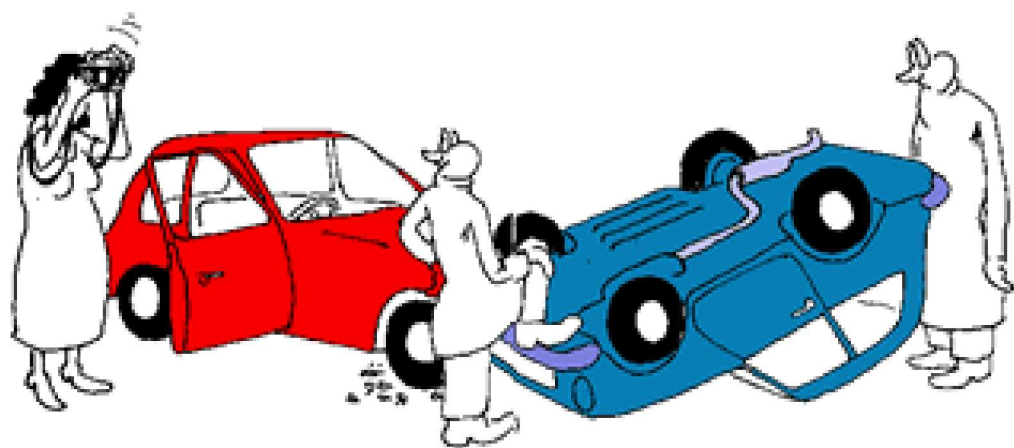
Einführung in die Teilchenphysik
Masterclass 2024
Katharina Müller

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 über die Natur und das Universum?
- Offene Fragen



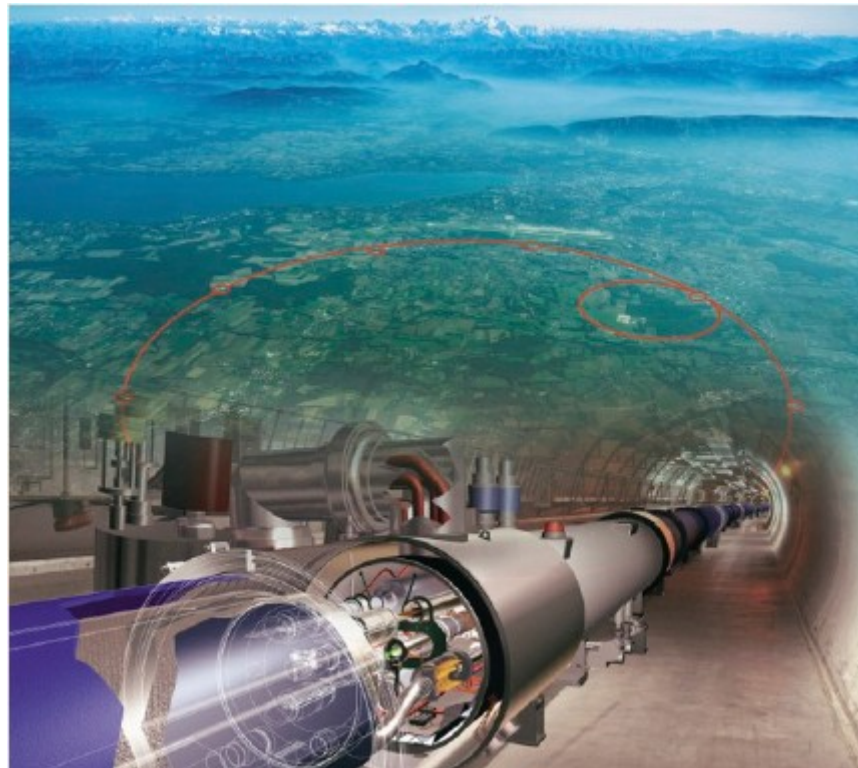
<http://www.weltmaschine.de>



Large Hadron Collider, LHC am CERN

LHC beschleunigt Protonen auf nahezu Lichtgeschwindigkeit

→ Kollisionen in 4 Kollisionspunkten



Was sind die fundamentalen Teilchen und Kräfte?



Was ist Teilchenphysik

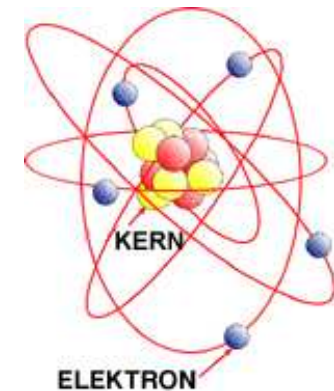
was sind die fundamentalen Bausteine und Kräfte in der Natur?
was hält die Welt im Innersten zusammen?

- Energie immer grösser
- Beschleuniger und Detektoren werden immer grösser

Grundlagenforschung → keine unmittelbaren Anwendungen

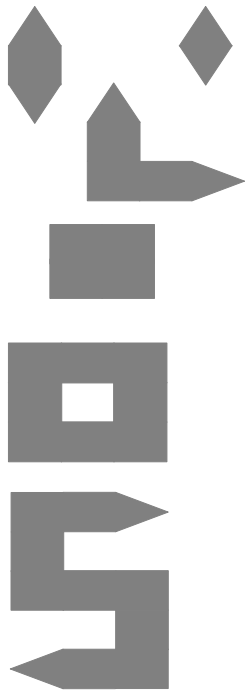
Aber: wir arbeiten an der Front von Wissenschaft, Computing und Entwicklung:

- sehr grosse Datenmengen
- neue Materialien
- neue Techniken



Grundbausteine

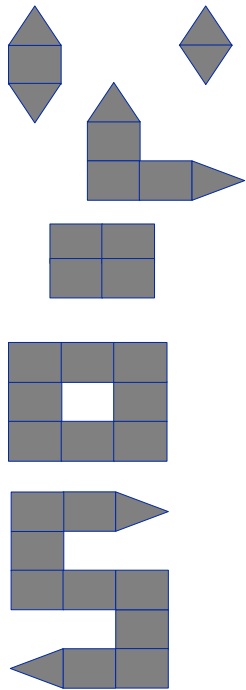
beobachtet



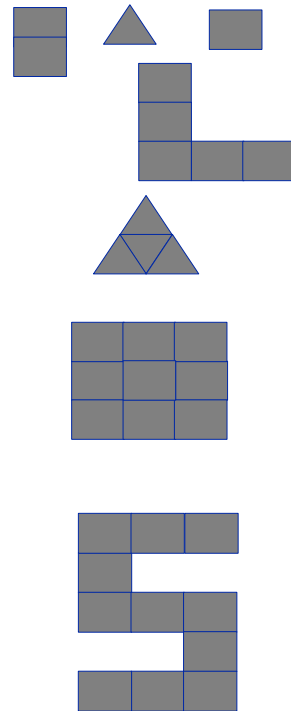
1) Aus was für Grundbausteinen werden die Figuren zusammengesetzt ?

(Nicht-)Beobachtung von Prozessen

beobachtet



nicht beobachtet



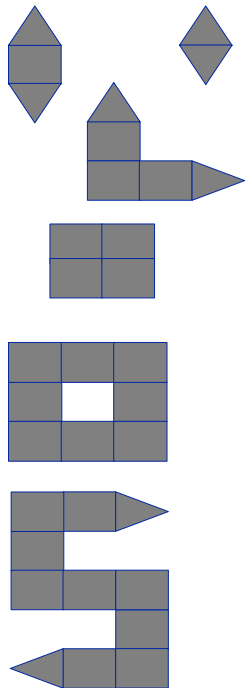
1) Aus was für Grundbausteinen werden die Figuren zusammengesetzt ?



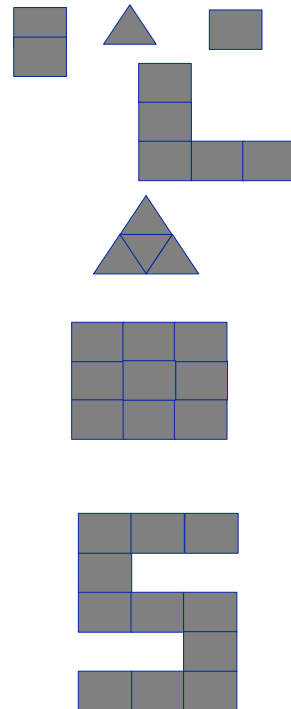
2) Was für Regeln gelten beim Zusammenfügen?

(Nicht-)Beobachtung von Prozessen

beobachtet



nicht beobachtet



1) Aus was für Grundbausteinen werden die Figuren zusammengesetzt ?



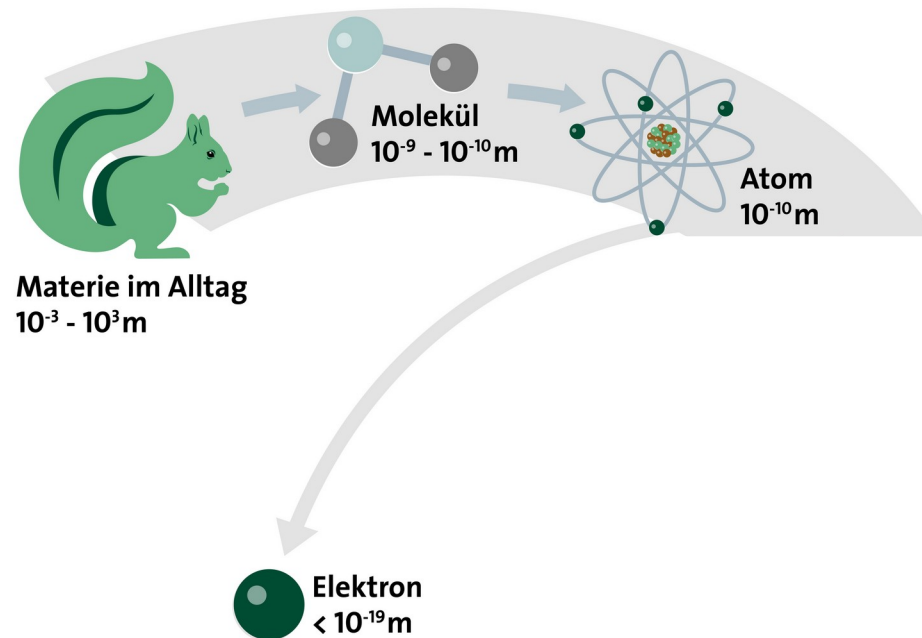
2) Was für Regeln gelten beim Zusammenfügen?
Dreiecke: eine Verbindung
Quadrate: zwei Verbindungen

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!

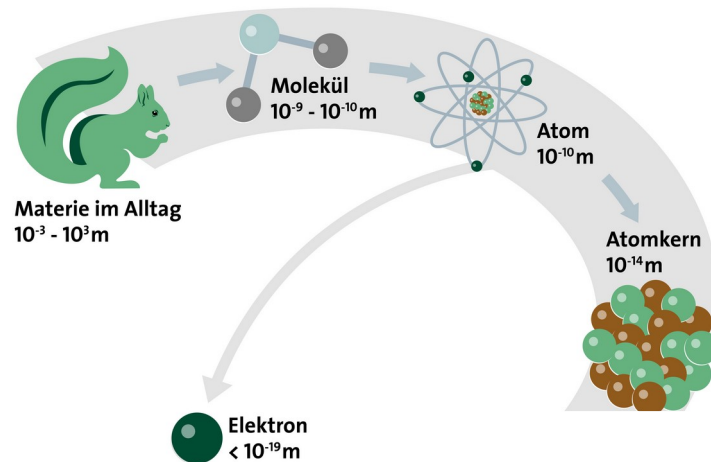
Woraus besteht die Materie?



Aus was besteht das Elektron?

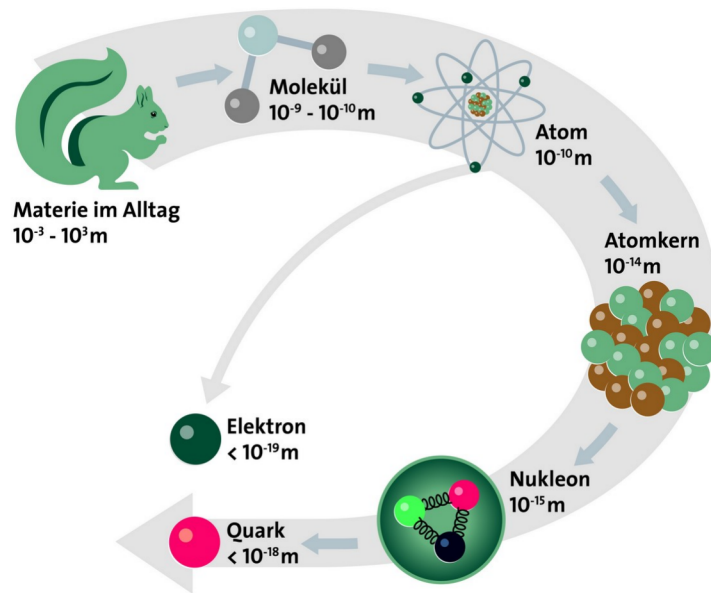
- haben keine Ausdehnung $R < 10^{-19}$ m
- haben keine Struktur
- sind stabil

→ Elektronen sind punktförmig



Das Elektron ist ein Grundbaustein

Woraus bestehen Protonen und Neutronen?



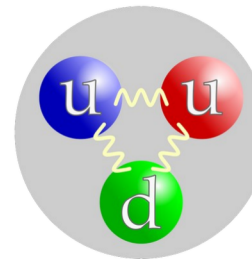
Quarks sind
Grundbausteine

Proton, Neutron

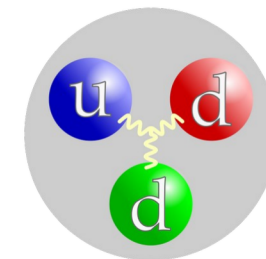
1 fm = 10⁻¹⁵ m
= 0,000 000 000 001 mm

Proton: 2 up-Quarks, 1 down-Quark
Neutron: 1 up-Quark, 2 down-Quarks

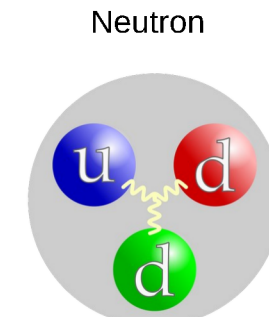
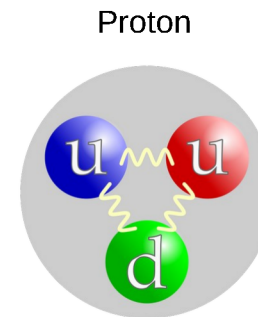
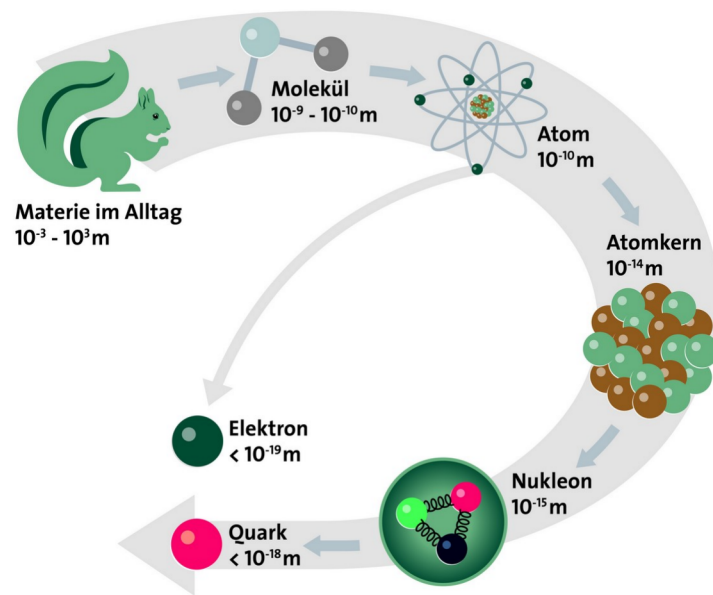
Proton



Neutron



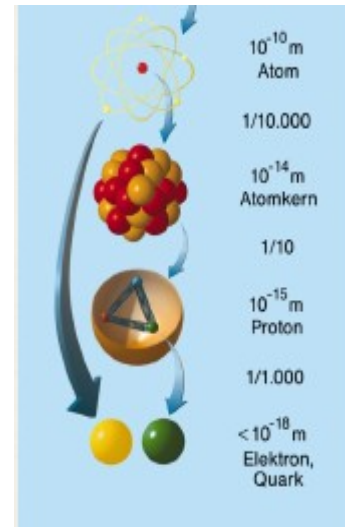
Protonen und Neutronen bestehen aus Quarks



- **Quarks:** sind punktförmig $< 10^{-18} \text{ m}$
- Quarks tragen Drittelladungen up: $+2/3$, down $-1/3$
- **es gibt sie in drei Zuständen – Farben**
- Quarks kommen nie alleine vor!

Größenordnungen

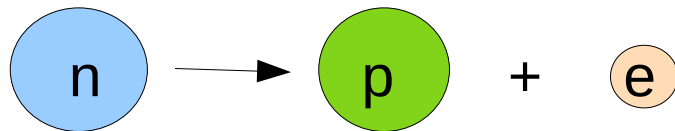
Atom	10^{-10} m
Atomkern	10^{-14} m
Proton	10^{-15} m
Quark	$<10^{-18}$ m
Elektron	$<10^{-19}$ m



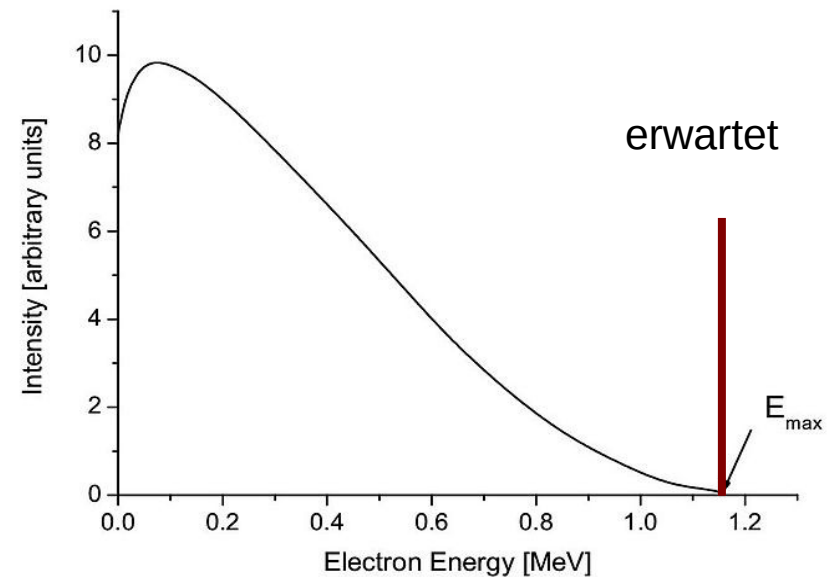
Atom == Mond Quark == Orange

Etwas fehlt ...

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



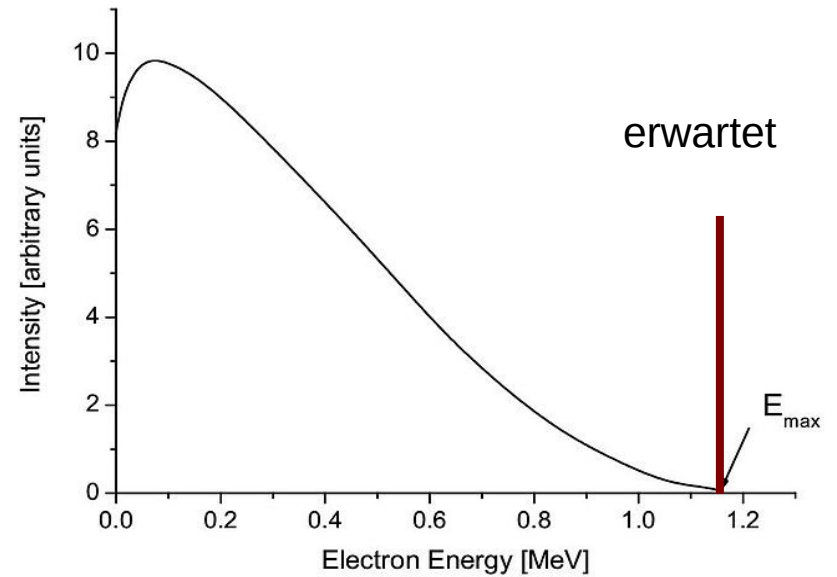
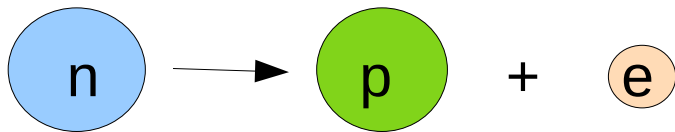
Energieerhaltung, $E=mc^2$



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



Etwas fe

Original - Photocopy of Dec. 4 1933
Abschrift/15.12.56 PM

Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der
Gauvereins-Tagung zu Tübingen.

Abschrift

Physikalisches Institut
der Eidg. Technischen Hochschule
Zürich

Zürich, 4. Dez. 1930
Gloriastrasse

Brief vom 4. Dezember 1930 an Tagung
in Tübingen

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Überbringer dieser Zeilen, den ich huldvollst anzuhören bitte, Ihnen des näheren auseinandersetzen wird, bin ich angesichts der "falschen" Statistik der N- und Li-6 Kerne, sowie des kontinuierlichen beta-Spektrums auf **einen verzweifelten Ausweg** verfallen um den "Wechselsatz" (1) der Statistik und den Energiesatz zu retten.

Nämlich die Möglichkeit, es **könnten elektrisch neutrale Teilchen, die ich Neutronen** nennen will, in den Kernen existieren, welche den Spin $1/2$ haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und sich von Lichtquanten außerdem noch dadurch unterscheiden, dass sie nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die **Masse der Neutronen könnte von der gleichen Grössenordnung wie die Elektronenmasse sein** und jedenfalls nicht grösser als 0,01 Protonenmassen. Das kontinuierliche beta-Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim beta-Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert wird, derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron konstant ist.

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Überbringer dieser Zeilen, den ich huldvollst anzuhören bitte, Ihnen des näheren auseinandersetzen wird, bin ich angesichts der "falschen" Statistik der N- und Li-6 Kerne, sowie des kontinuierlichen beta-Spektrums auf einen verzweifelten Ausweg verfallen um den "Wechselsatz" (1) der Statistik und den Energiesatz zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren, welche den Spin $1/2$ haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und sich von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie

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."

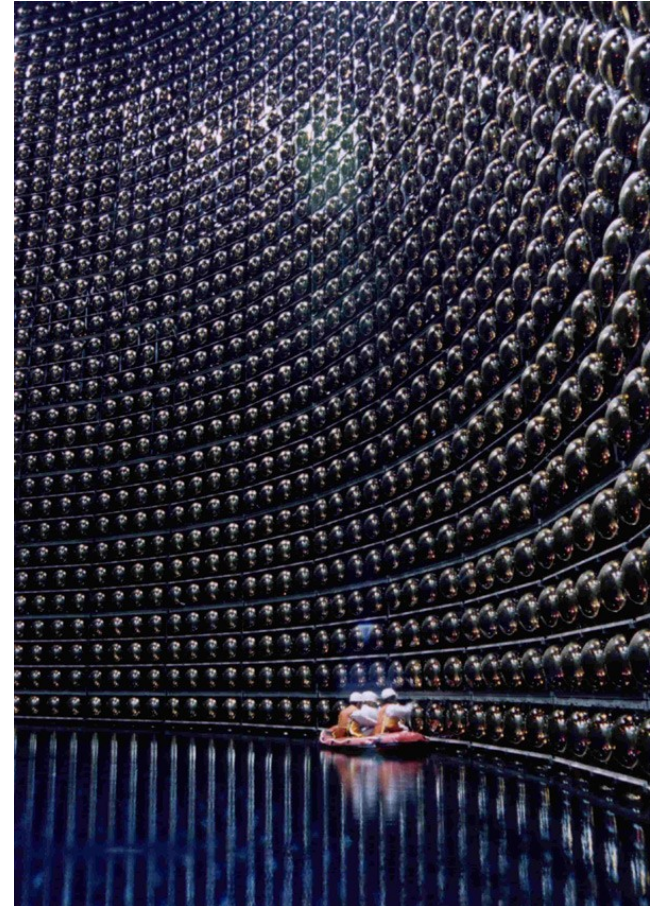
Entdeckung des Neutrinos

Nachweis 1956:

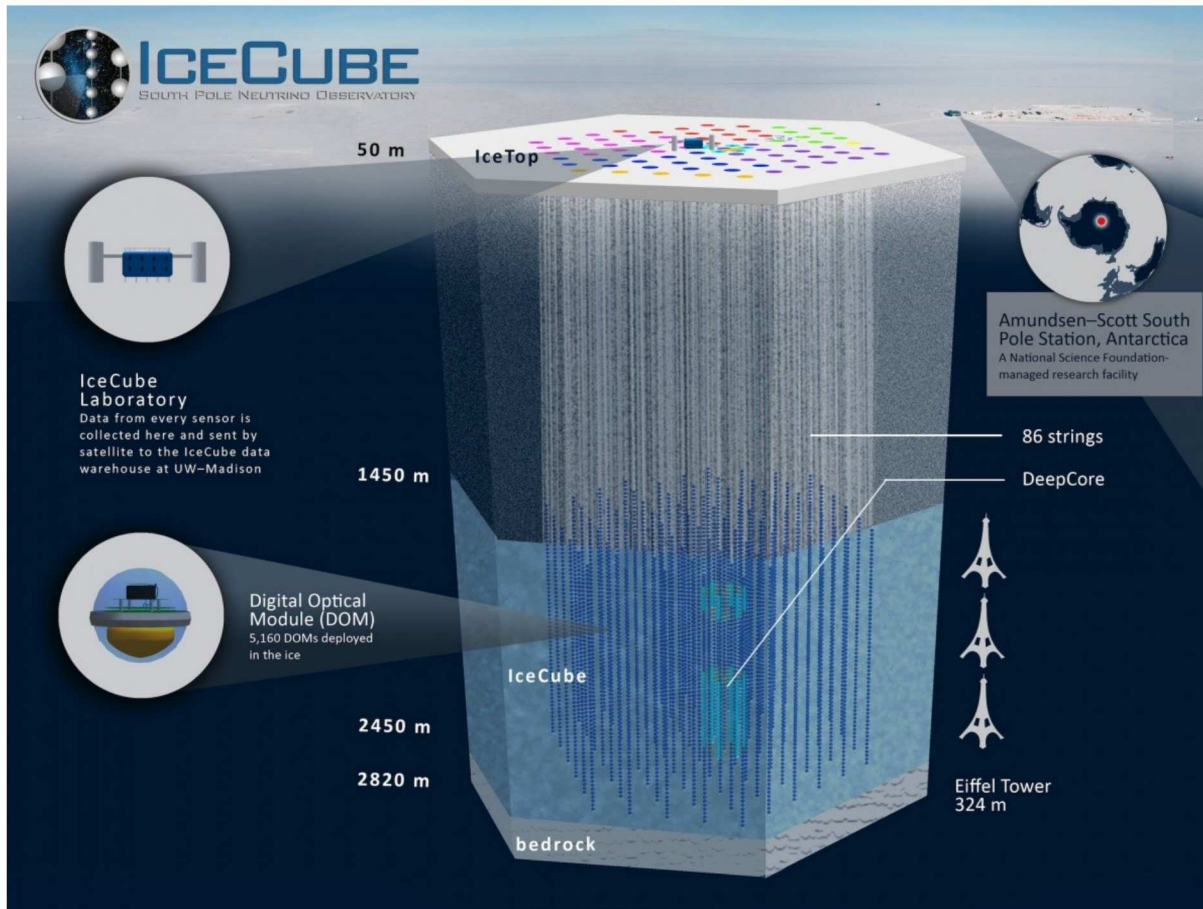
Neutrino + Proton \rightarrow Positron + Neutron

Neutrinodektoren

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



Ice-Cube Experiment am Südpol

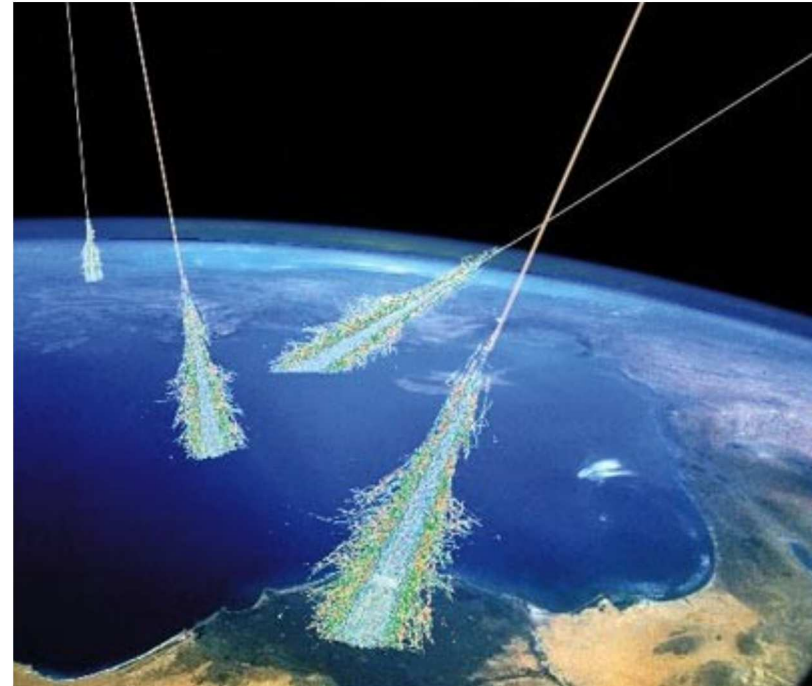


Weitere Teilchen: Muon, schwere Quarks ...

1936 “Kopie” des Elektrons

→ gleiche Eigenschaften wie das Elektron
aber 200 mal schwerer

Lebensdauer 2 Mikrosekunden



Weitere Teilchen: Muon, schwere Quarks ...

1936 “Kopie” des Elektrons

→ gleiche Eigenschaften wie das Elektron
aber 200 mal schwerer

Lebensdauer 2 Mikrosekunden

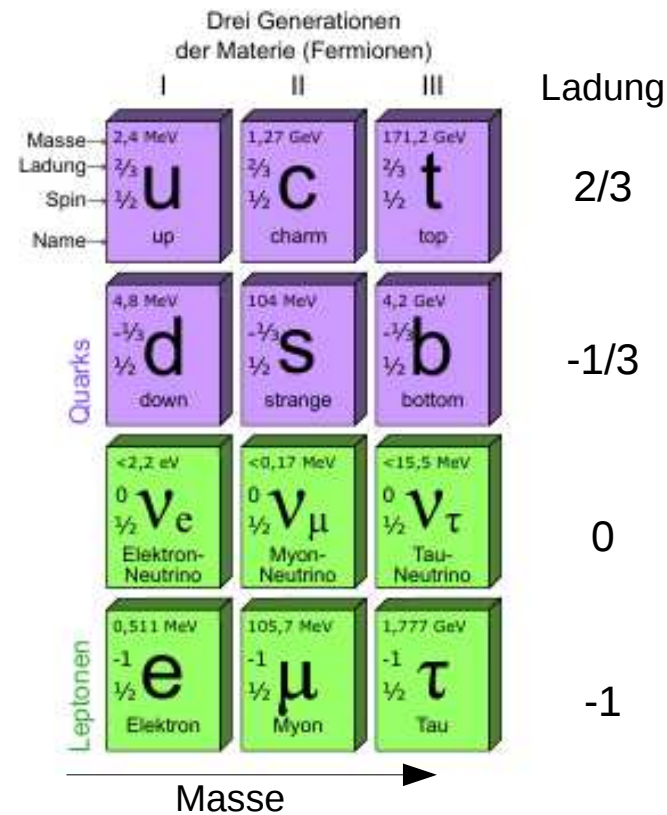
1974 strange Quark

1974 charm Quark

1975 Tau

1977 bottom Quark

1995 top Quark



Antimaterie

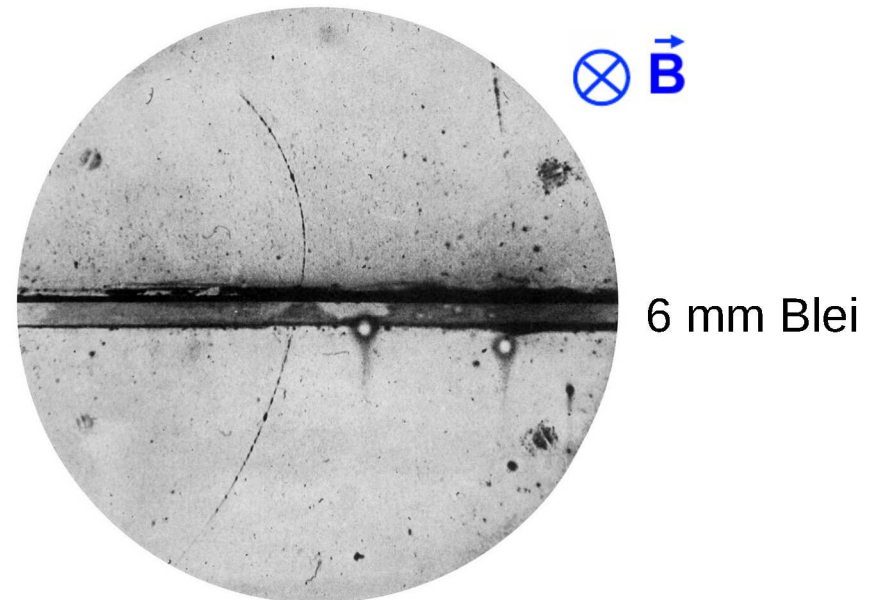
1928 Paul Dirac: $(i\hat{\partial} - m)\psi = 0$, Energie des Elektrons $E = \pm \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}$
zu jedem Teilchen gibt es ein Antiteilchen mit gleicher Masse aber
umgekehrter Ladung (ladungsähnliche Quantenzahlen)

→ Anzahl Elementarteilchen verdoppelt

1932: Nachweis vom Anti-Elektron = Positron



Carl David Anderson
Nobelpreis 1936



Kräfte

Kräfte

Gravitation



Elektromagnetische Wechselwirkung



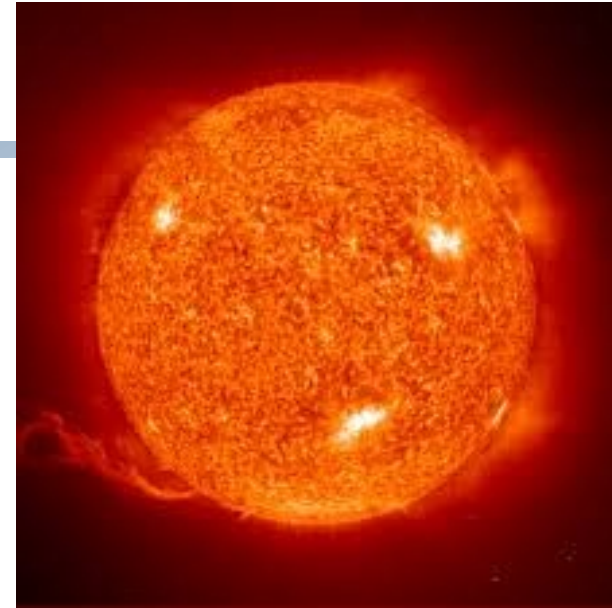
Kräfte

Schwache Wechselwirkung

- Fusion
Neutron Zerfall
- Umwandlung von Teilchen:
zB up \rightarrow down +W
- Reichweite: klein ($\sim 10^{-18}\text{m}$), $<$ Protonradius

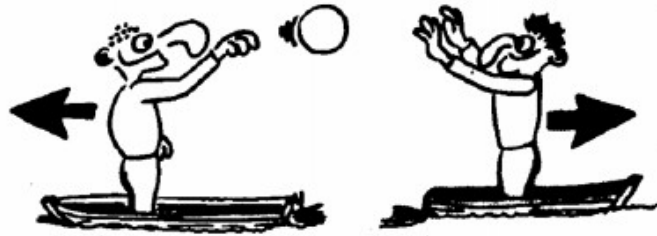
Starke Wechselwirkung

- zwischen den Quarks
- hält Proton und Neutron zusammen,
Bindungsenergie Atomkerne
- Reichweite: $\sim 10^{-15}\text{m}$ = Protonradius
nimmt mit dem Abstand zu



Wechselwirkung: Austausch von Bosonen

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



Wechselwirkung	Botenteilchen	Reichweite
Elektromagnetische	Photon (γ)	∞
Schwache	W^+ , W^- , Z	10^{-25}m
Starke	Gluon (g)	10^{-15}m

Die Botenteilchen der schwachen Kraft sind schwer,
W, Z: 90 mal Protonmasse

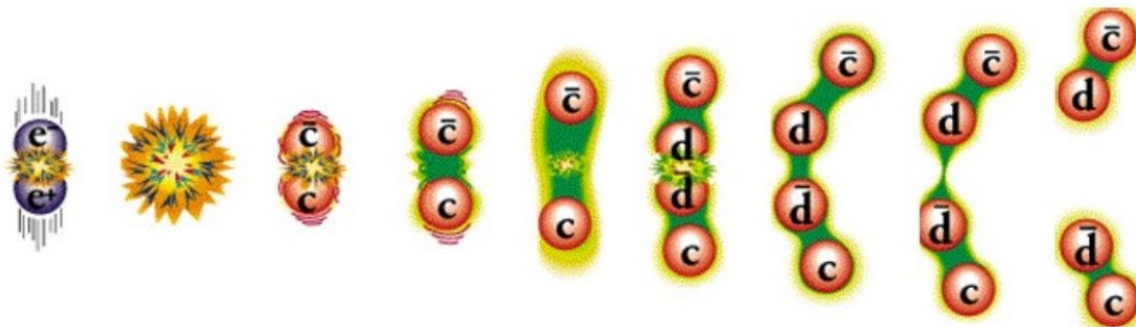
→ schwache Kraft ist extrem schwach

Farbladung/Starke Wechselwirkung

- Quarks kommen in drei Farbzuständen vor rot, grün, blau
- Antiquarks: Antifarbe
- Nur zwischen Teilchen mit Farbe (Quarks) wirkt die starke Kraft
- Sie ist stärker, je weiter die Teilchen auseinander sind

starke Kraft nimmt zu, wenn sich Teilchen entfernen

- Quarks kommen nur in gebundenen, farbneutralen (weissen) Zuständen vor
- ein freies Quark wurde noch nie beobachtet



Quarks – nie alleine!

Farbneutrale (weisse) Zustände

Mesonen:

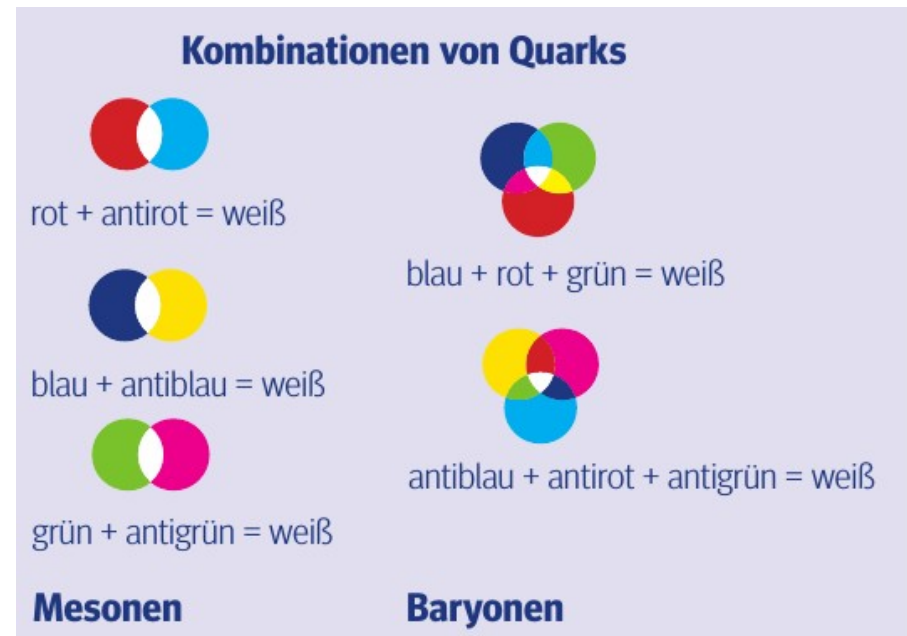
Quark-Antiquarkpaar
Pion, Kaon ... ca 200
instabil

Baryonen:

3 (Anti)quarks
Proton, Neutron, ... ca 150

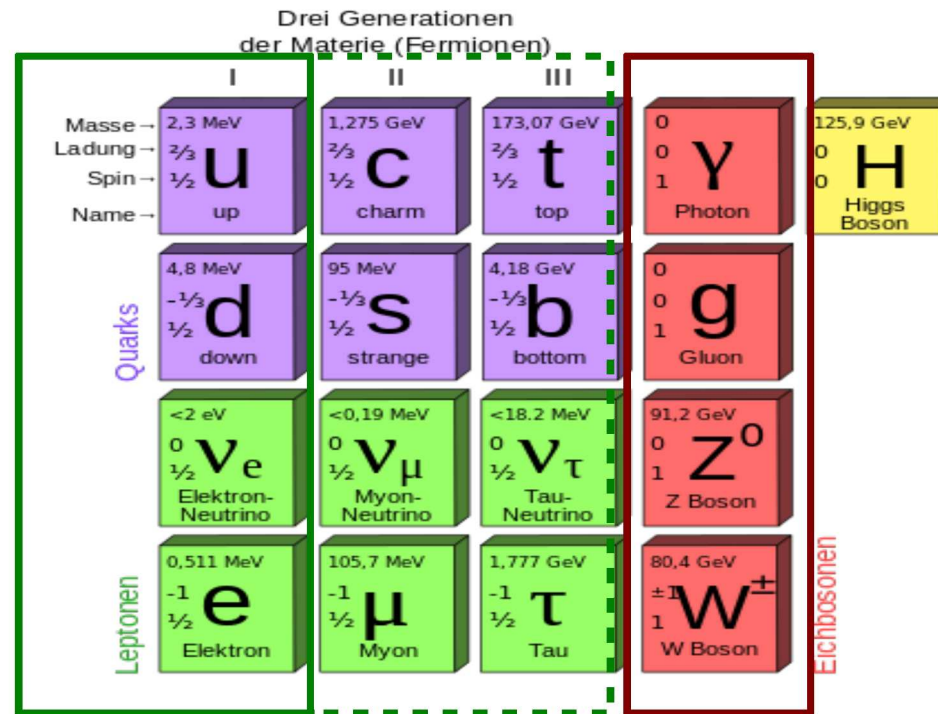
Bezeichnung Antiquark: \bar{q}

Heute: es gibt auch instabile exotisch Zustände mit
2 Quarks und 2 Antiquarks (Tetraquarks) oder vier Quarks + 1 Antiquark (Pentaquarks)



Das Standardmodell

Zusammenfassung Standardmodell

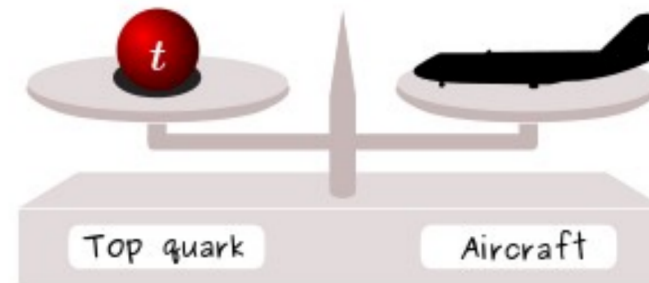
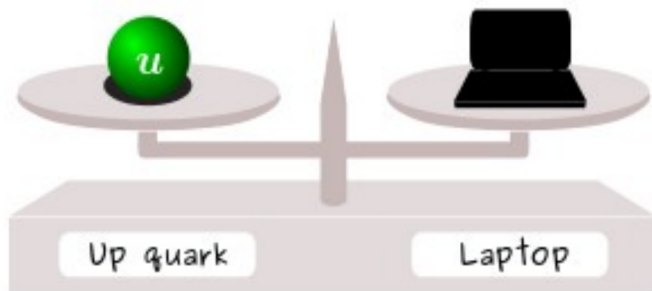
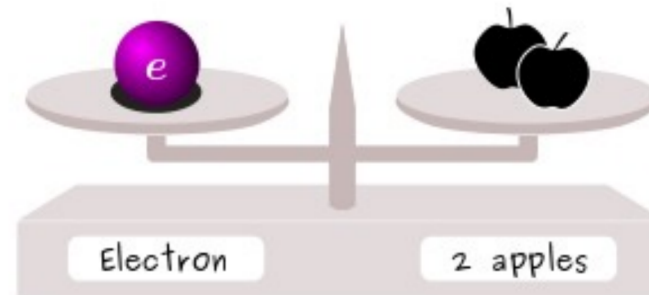
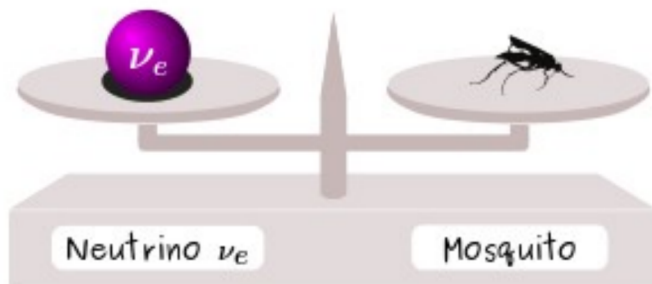


normale Materie

Wechselwirkung, Kraftteilchen

Masse der Elementarteilchen

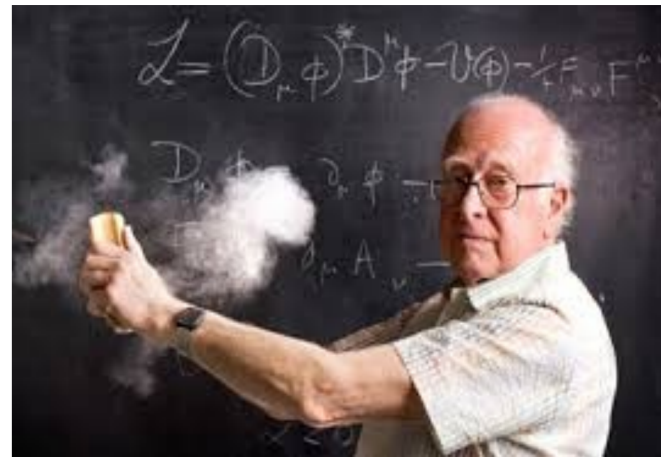
Masse wird nicht vorhergesagt → experimentelle Bestimmung



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

Das Problem mit der Masse

Masse des Teilchens ist ein Maß für den Widerstand, welches es bei seiner Bewegung durch das Higgs Feld erfährt



Video

1964-2012: Jagd nach dem Higgs

2012 wurde es von CMS und ATLAS nachgewiesen

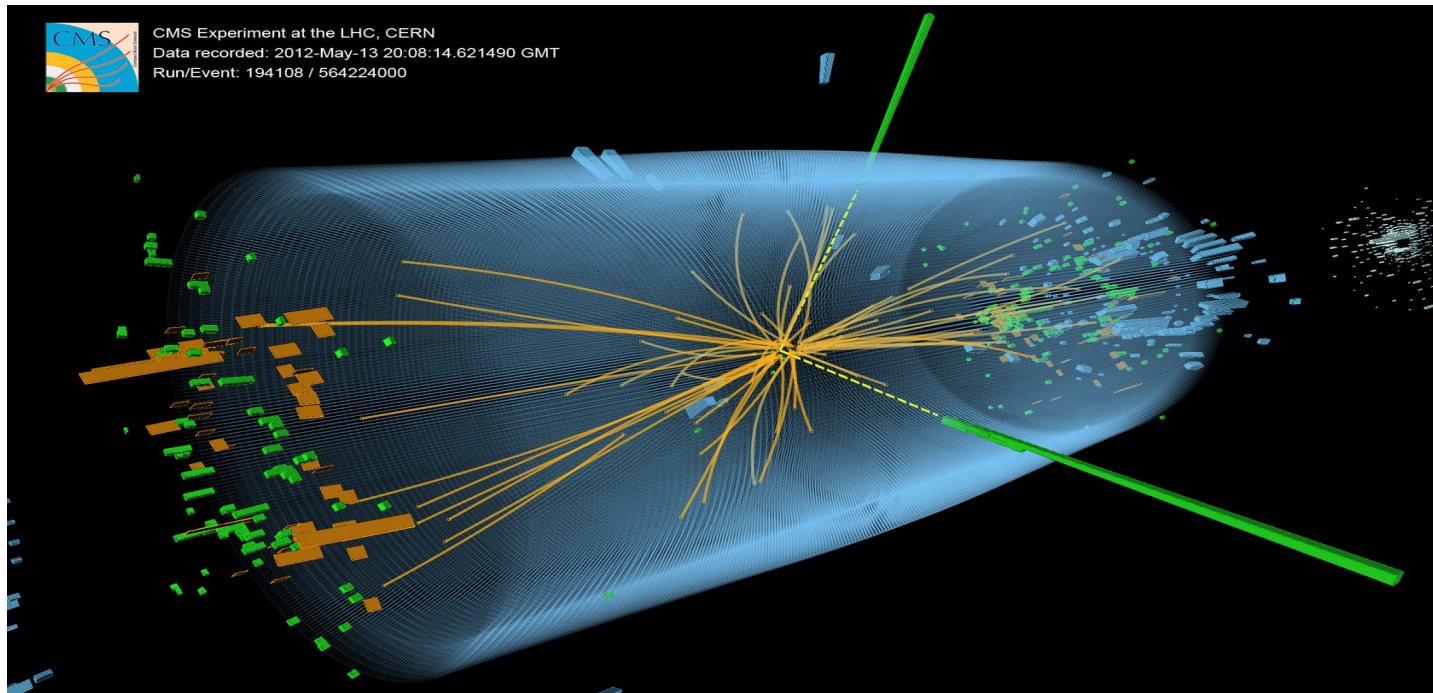
2013 Nobelpreis für die theoretische Vorhersage (P. Higgs, F. Englert)

Das Higgs-Boson (Link)



Higgs Boson

Kandidat Ereignis für Higgs → 2 Photonen
→ rekonstruiere Higgs Masse aus Energie-Impulserhaltung



Das Standardmodell - mathematisch

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} = & -\frac{1}{4}\mathbf{W}_{\mu\nu}\mathbf{W}^{\mu\nu} - \frac{1}{4}\mathbf{B}_{\mu\nu}\mathbf{B}^{\mu\nu} - \frac{1}{4}\mathbf{G}_{\mu\nu}\mathbf{G}^{\mu\nu} \\
 & + \bar{L}\gamma^\mu(i\partial_\mu - \frac{1}{2}g\tau\mathbf{W}_\mu - \frac{1}{2}g'Y B_\mu)L \\
 & + \bar{R}\gamma^\mu(i\partial_\mu - \frac{1}{2}g'Y B_\mu)R \\
 & + |(i\partial_\mu - \frac{1}{2}g\tau\mathbf{W}_\mu - \frac{1}{2}g'Y B_\mu)\phi|^2 - V(\phi) \\
 & - (g_1\bar{L}\phi R + g_2\bar{L}\tilde{\phi}R + \text{herm.conj.}) \\
 & + \frac{1}{2}g_s(\bar{\Psi}_q^j\gamma^\mu\lambda_{jk}^a\Psi_q^k)G_\mu^a
 \end{aligned}$$

kompakte Schreibweise!

Die Lagrangedichte beschreibt, welche Teilchen es gibt und wie sie sich verhalten

$\Delta\alpha_{had}^{(5)}(m_Z)$	0.02761	\pm	0.00036
$m_Z[GeV]$	91.1875	\pm	0.00021
$\Gamma_Z[GeV]$	2.4952	\pm	0.00023
$\sigma_{had}^0[nb]$	41.540	\pm	0.037
R_t	20.767	\pm	0.025
$A_{fb}^{0,t}$	0.01714	\pm	0.00095
$A_t(P_\tau)$	0.1465	\pm	0.0033
R_b	0.21646	\pm	0.00065
R_c	0.1719	\pm	0.0031
$A_{fb}^{0,b}$	0.0990	\pm	0.0017
$A_{fb}^{0,c}$	0.0685	\pm	0.0034
A_b	0.922	\pm	0.020
A_c	0.670	\pm	0.026
$A_t(SLD)$	0.1513	\pm	0.0021
$\sin^2\theta_{eff}^{lept}(Q_{fb})$	0.2324	\pm	0.0012
$m_W[GeV]$	80.450	\pm	0.039
$m_t[GeV]$	174.3	\pm	5.1
$\sin^2\theta_W(\nu N)$	0.2255	\pm	0.0021
$Q_W(Cs)$	-72.50	\pm	0.70

- 1: starke Wechselwirkung
- 2: elektroschwache WW
W, Z und Higgs Boson
- 3: elektroschwache WW
Quarks, Neutrinos
Elektronen
- 4: Korrekturen
- 5: Higgs

$$\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}{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^\sigma \gamma^\mu q_j^\sigma) g_\mu^a + \bar{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_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^2} 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 - 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_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
& W_\nu^- \partial_\nu 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^- + \\
& \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^+ W_\nu^- + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\mu^+ Z_\nu^0 W_\nu^- - Z_\mu^0 Z_\nu^0 W_\mu^+ W_\nu^-) + \\
& g^2 s_w^2 (A_\mu W_\mu^+ A_\nu W_\nu^- - A_\mu A_\nu W_\mu^+ W_\nu^-) + 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^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 H - \frac{1}{2}i g [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) - i g \frac{s_w}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \\
& i g s_w M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - i g \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + \\
& i g s_w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \frac{1}{4}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- [H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-] - \\
& \frac{1}{4}g^2 \frac{1}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^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}i g^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}i g^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_\mu \phi^+ \phi^- - \bar{e}^\lambda (\gamma \partial + m_e^\lambda) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda \gamma \partial \nu^\lambda - \bar{u}_j^\lambda (\gamma \partial + m_u^\lambda) u_j^\lambda - \\
& \bar{d}_j^\lambda (\gamma \partial + m_d^\lambda) d_j^\lambda + i g 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{i g}{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{i g}{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\kappa} d_j^\kappa)] + \frac{i g}{2\sqrt{2}} W_\mu^- [(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\kappa C_{\lambda\kappa}^\dagger \gamma^\mu (1 + \\
& \gamma^5) u_j^\lambda)] + \frac{i g}{2\sqrt{2}} \frac{m_\lambda^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_\lambda^2}{M} [H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + i \phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda)] + \frac{i g}{2M\sqrt{2}} \phi^+ [-m_d^\kappa (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) d_j^\kappa) + \\
& m_u^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) d_j^\kappa)] + \frac{i g}{2M\sqrt{2}} \phi^- [m_d^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^\kappa) - m_u^\kappa (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \\
& \gamma^5) u_j^\kappa) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} H (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} H (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{i g}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \\
& \frac{i g}{2} \frac{m_\lambda^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 + i g c_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + i g s_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \\
& \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + i g c_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + i g s_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \\
& \partial_\mu \bar{Y} X^+) + i g c_w Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \partial_\mu \bar{X}^- X^-) + i g s_w A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \\
& \partial_\mu \bar{X}^- X^-) - \frac{1}{2}g M [\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} i g M [\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \bar{X}^- X^0 \phi^-] + \frac{1}{2c_w} i g M [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \\
& i g M [\bar{\nu}^0 \nu^- \phi^+ + \bar{\nu}^0 \nu^+ \phi^-] + \frac{1}{2} i g M [\bar{\nu}^+ \nu^+ \phi^0 - \bar{\nu}^- \nu^- \phi^0]
\end{aligned}$$

Das Standardmodell

Beschreibt
Elementarteilchen
Elementare Kräfte (ohne Gravitation)

Extrem gut getestet
zum Beispiel: magnetisches Moment vom Muon

Gemessen 2.00233184122(82)

Theorie 2.00233183620(86)

Drei Generationen
der Materie (Fermionen)

	I	II	III		
Masse	2,3 MeV	1,275 GeV	173,07 GeV	0	125,9 GeV
Ladung	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
Spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
Name	u up	c charm	t top	γ Photon	H Higgs Boson
	4,8 MeV	95 MeV	4,18 GeV	0	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
Quarks	d down	s strange	b bottom	g Gluon	
	<2 eV	<0,19 MeV	<18,2 MeV	91,2 GeV	
	0	0	0	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	ν_e Elektron- Neutrino	ν_μ Myon- Neutrino	ν_τ Tau- Neutrino	Z⁰ Z Boson	
	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV	80,4 GeV	
	-1	-1	-1	±1	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
Leptonen	e Elektron	μ Myon	τ Tau	W[±] W Boson	Eichbosonen

Das Standardmodell - Fragen

Wir suchen nach

- warum drei Familien?
- Erklärung der Struktur
- Zusammenhang der Kräfte
- gibt es noch mehr Teilchen?
- warum gibt es weniger Antimaterie als Materie?
Asymmetrie: 1/1 Milliarde

Ist das Standardmodell unvollständig?

- Was ist mit der Gravitation?
- Kann man die drei (elektromagnetisch, schwach, stark) Kräfte vereinheitlichen?
- Dunkle Materie?
- 18 freie Parameter, die nicht von der Theorie festgelegt werden

Drei Generationen
der Materie (Fermionen)

	I	II	III		
Masse	2,3 MeV	1,275 GeV	173,07 GeV	0	125,9 GeV
Ladung	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
Spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
Name	u up	c charm	t top	γ Photon	H Higgs Boson
	4,8 MeV	95 MeV	4,18 GeV	0	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
Quarks	d down	s strange	b bottom	g Gluon	
	<2 eV	<0,19 MeV	<18,2 MeV	91,2 GeV	
	0	0	0	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	ν_e Elektron- Neutrino	ν_μ Myon- Neutrino	ν_τ Tau- Neutrino	Z⁰ Z Boson	
	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV	80,4 GeV	
	-1	-1	-1	± 1	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
Leptonen	e Elektron	μ Myon	τ Tau	W[±] W Boson	Eichbosonen

Antimaterie

Teilchen und sein Antiteilchen können sich vernichten:

$$E = mc^2$$

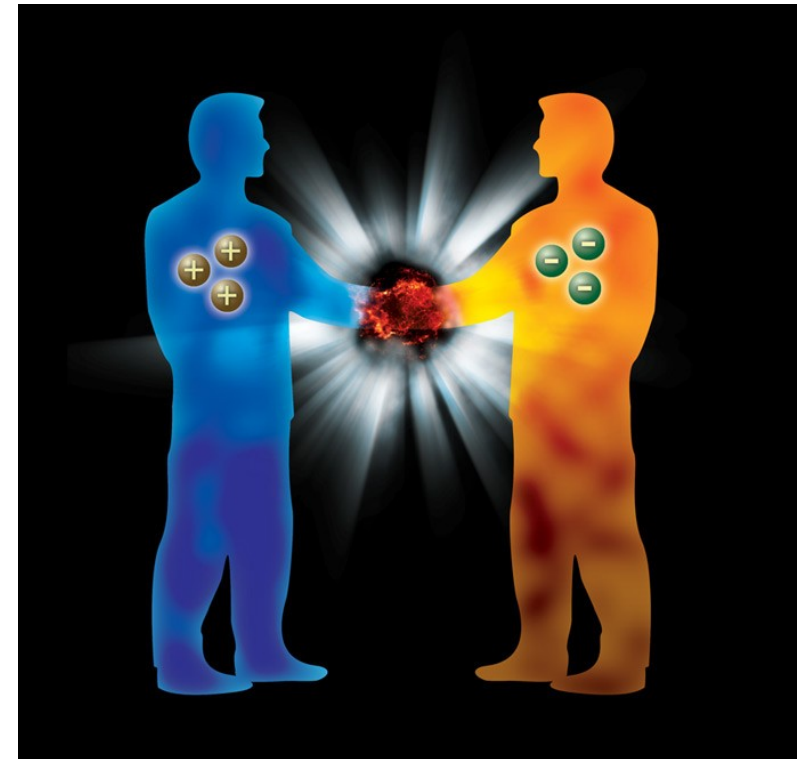
Urknall:

aus Energie entstand Materie und Antimaterie

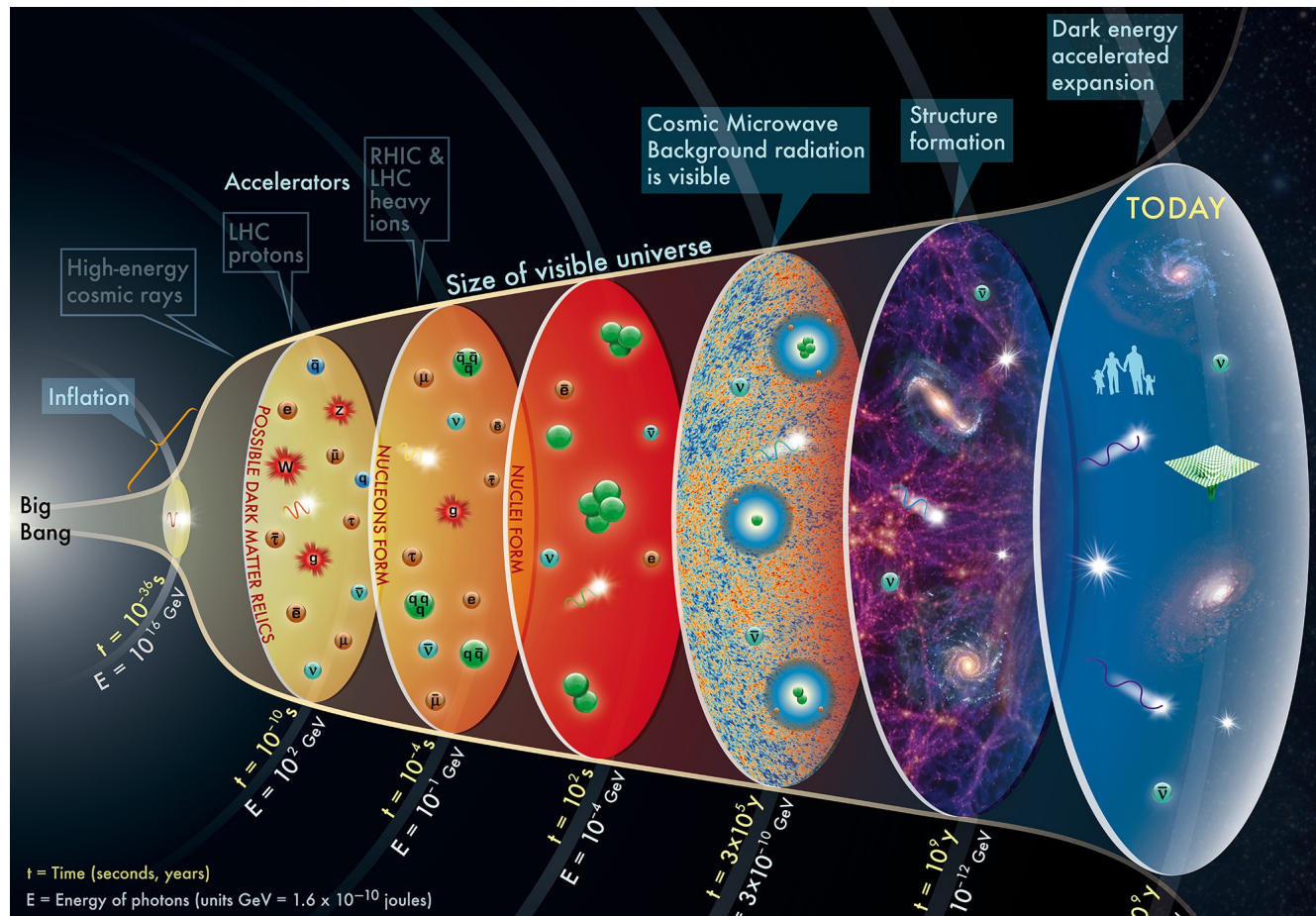
Sekunden später verschwand die ganze Antimaterie

1 Materieteilchen auf 1 Milliarde Antiteilchen blieb übrig

Warum?



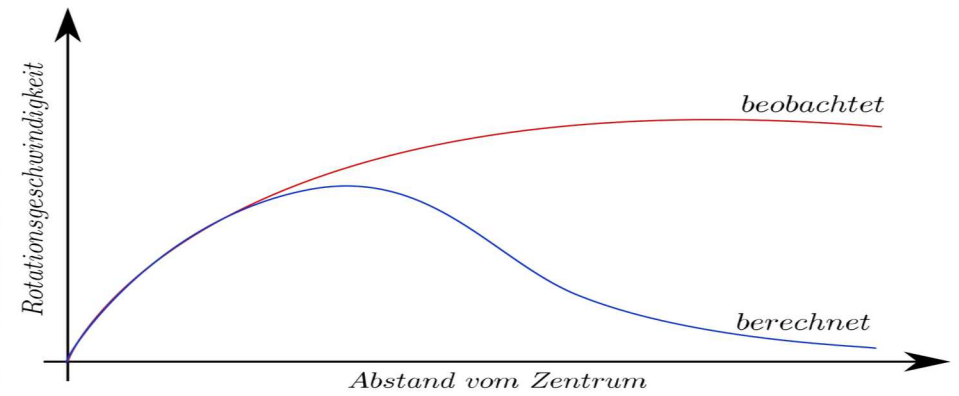
Geschichte des Universums



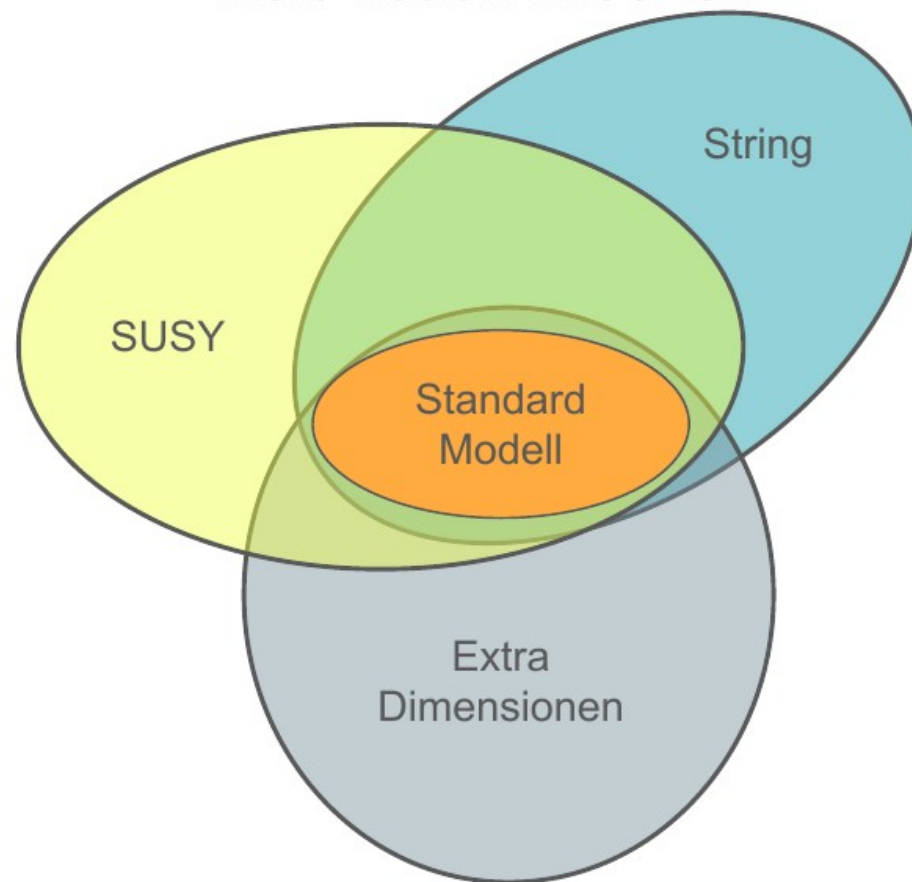
Etwas fehlt – Dunkle Materie



<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=36216331>



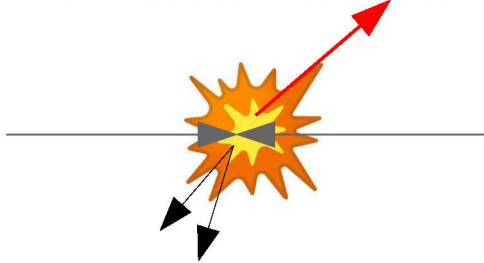
Neue Theorien



Suche nach neuen Teilchen

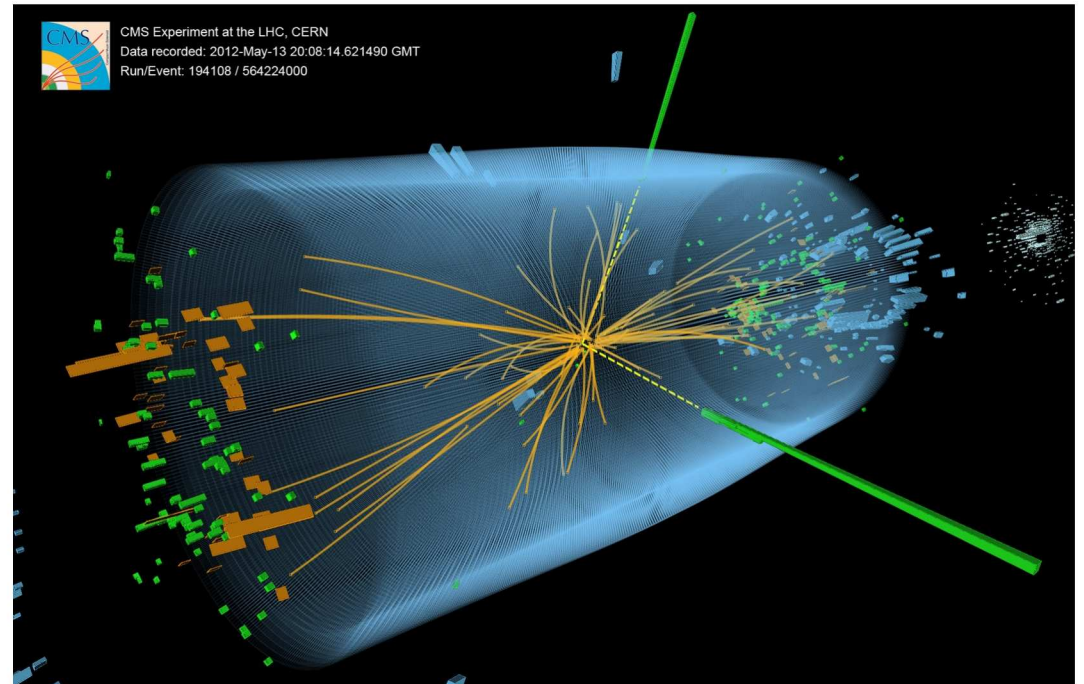
Direkte Suche

Nach neuen Teilchen, die bei der Kollision entstehen



$$E=mc^2$$

Beschränkt durch die verfügbare Energie



Suche nach neuen Teilchen

Indirekte Suche

Abweichungen von Messungen und theoretischen Vorhersagen



Sensitivität für sehr massive Teilchen
→ Präzisionsmessungen an seltenen Zerfällen

Heisenbergsche Unschärferelation
 $\Delta E \cdot \Delta t > h/(4\pi)$

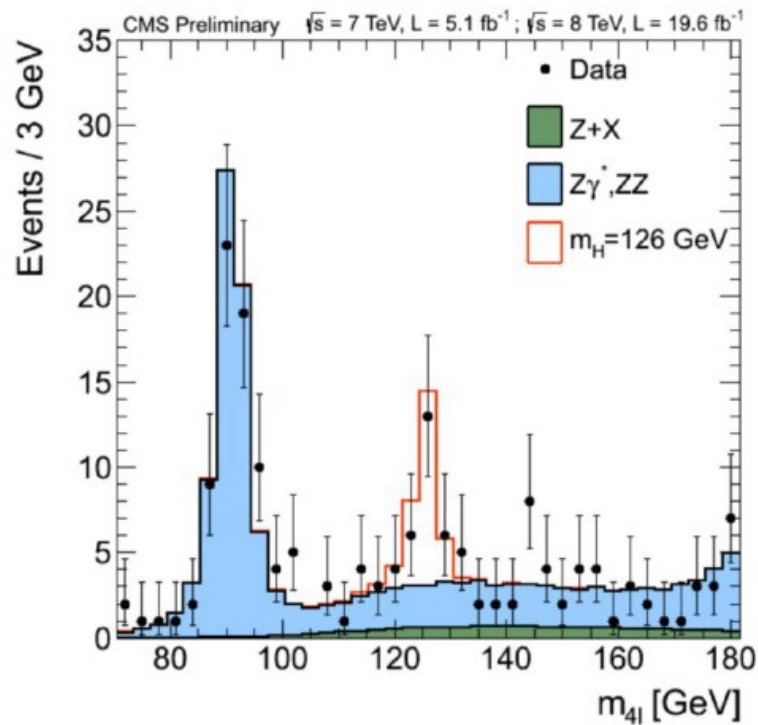
$$h = 6.6 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$



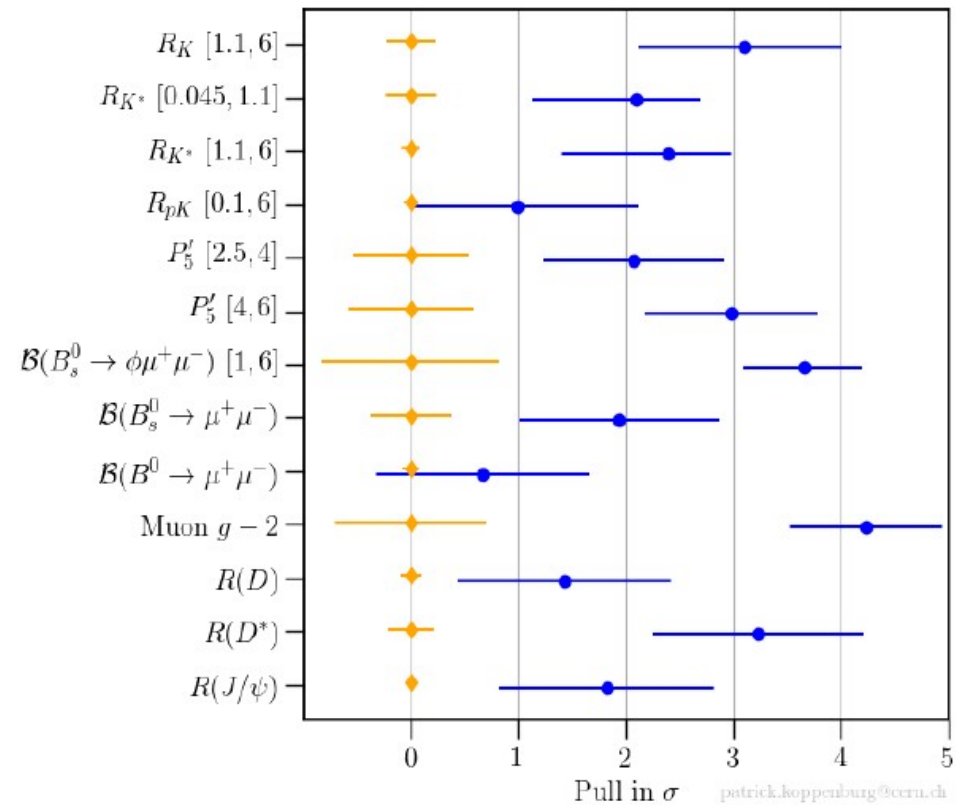
1846: Planet Neptun vorhergesagt aufgrund Berechnungen der Bahn des Uranus (Le Verrier)

Suche nach neuen Teilchen

Direkt (neue Teilchen)



Indirekt (stimmt irgend etwas nicht?)

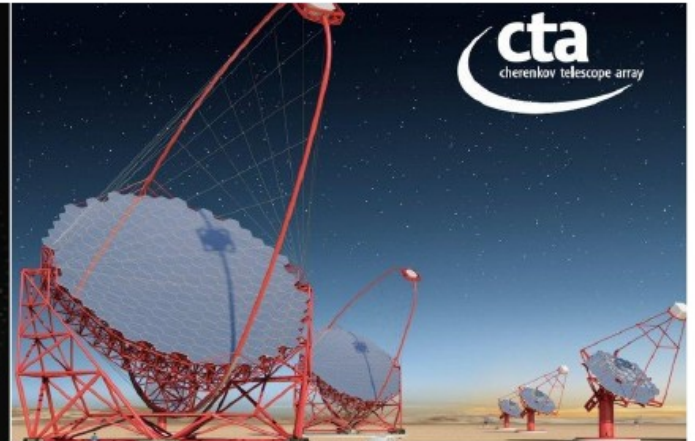
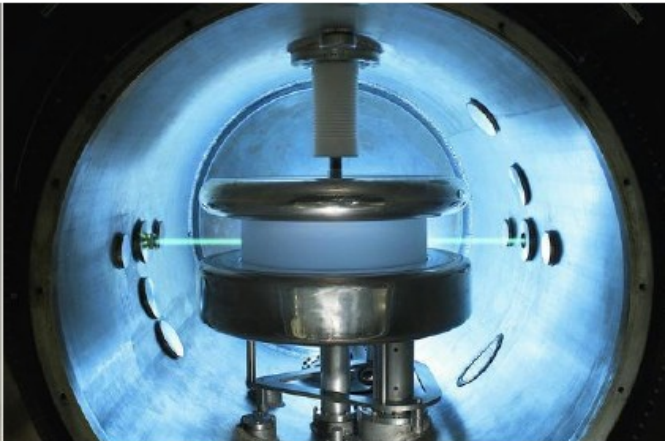


Suche nach neuen Teilchen

Hohe Energien (~ 13 TeV)

Hohe Intensitäten
(Präzision, \sim MeV)

Kosmische Strahlung

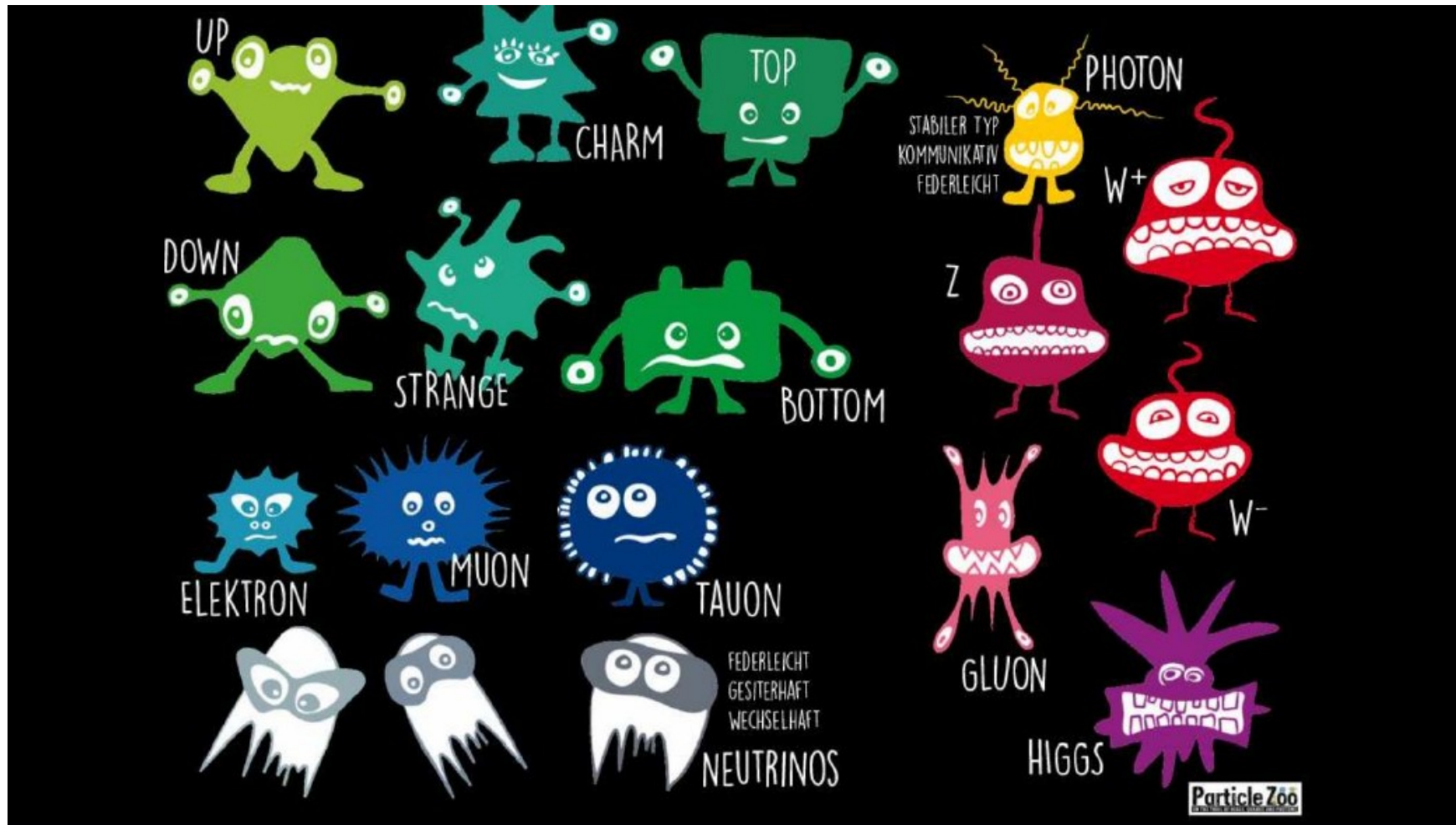


CERN: **Beschleuniger**
neue Teilchen?
(nächster Vortrag)

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

CTA Teleskop
Cherenkov Telescope Array
Teilchen kosmischen Ursprungs

Fragen?



Teilchenmassen – Was wäre wenn sie anders wären?

Vier Szenarien:

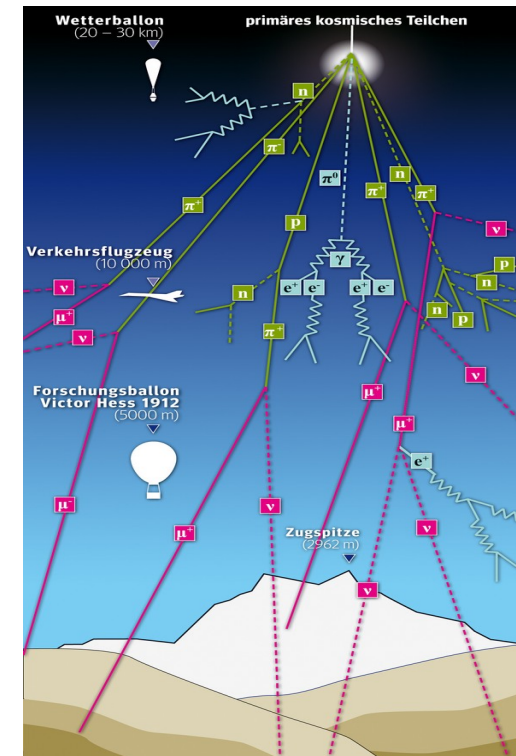
- 1) Teilchenmassen wie wir sie kennen
- 2) W Masse kleiner
- 3) leichteres Down Quark
- 4) leichtere Elektronen

<https://www.youtube.com/watch?v=p5cPg62z8xs>

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



DESY - *physik.begreifen* - Einführung kosmische Teilchen
physik-begreifen-zeuthen.desy.de