

Teil 1: Die Welt der kleinsten Teilchen

Basics

Motivation

Grundlegende Fragen:

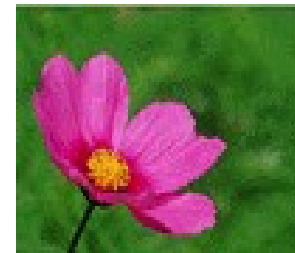
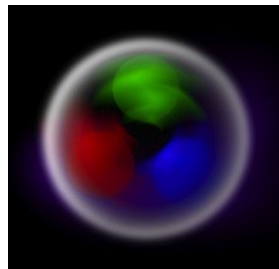
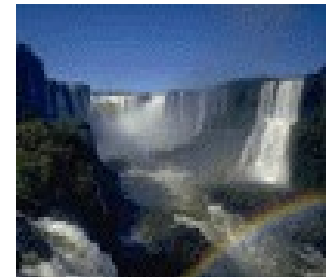
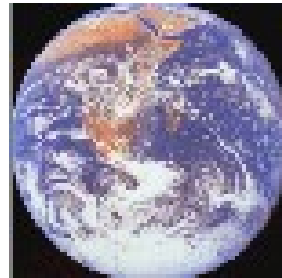
- Woraus besteht die Materie, die uns umgibt?
- Ist sie teilbar? Wenn ja, wie weit?
- Welche **Kräfte** wirken zwischen den **Bausteinen**?



Zielsetzung:

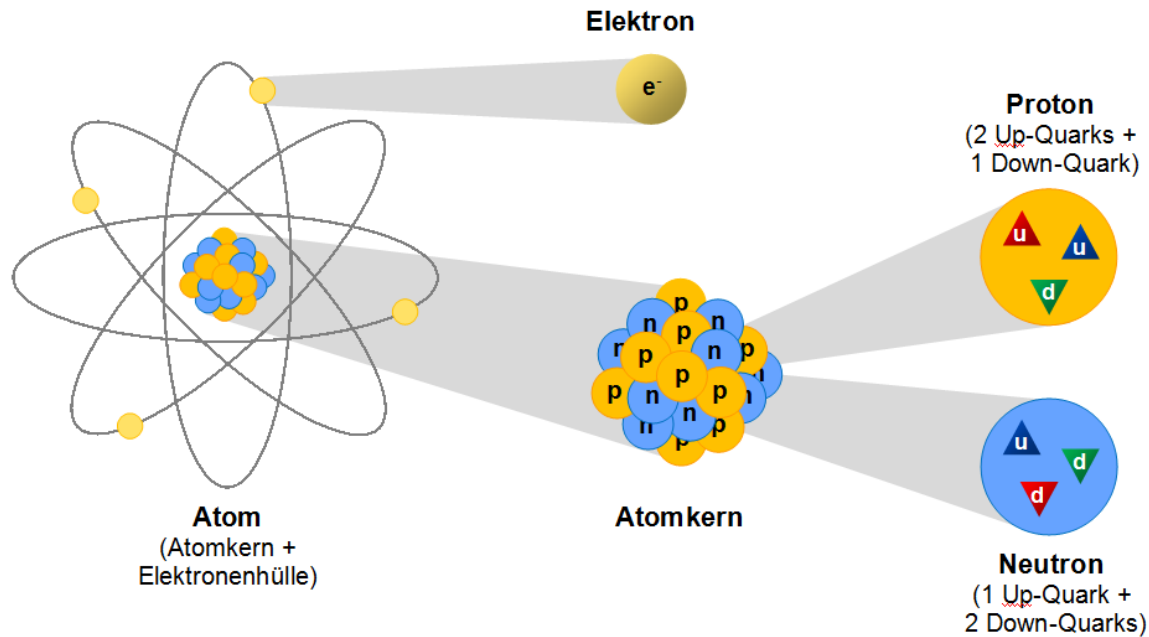
Einheitliche und umfassende Beschreibung der Materie und ihrer Wechselwirkungen

Von kleinsten Abständen bis zu kosmischen Dimensionen



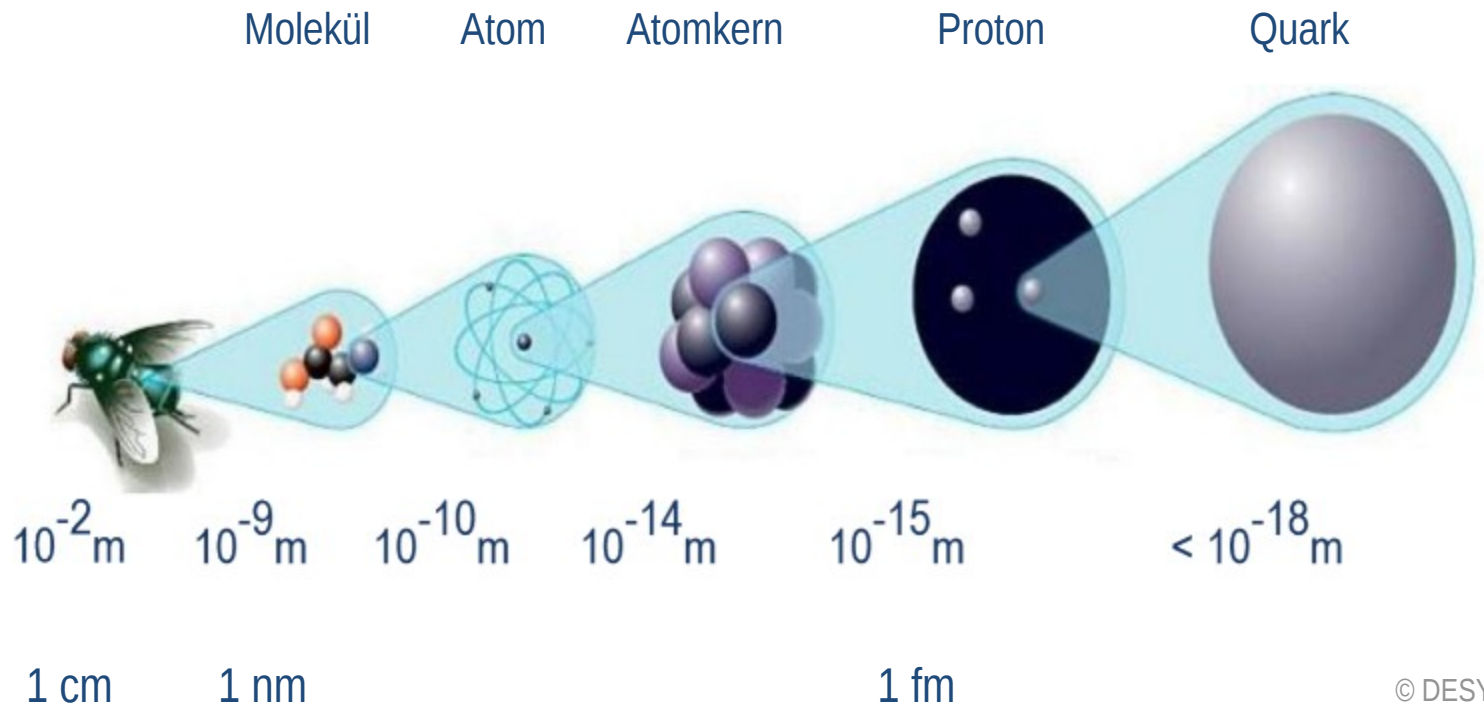
Woraus besteht die Welt?

- ▶ Alle Materie besteht letztlich aus **Elementarteilchen** – das sind Teilchen, die nicht aus noch kleineren Teilchen bestehen



- ▶ Die stabile Materie in unserem Universum besteht aus Elektronen, Up- und Down-Quarks

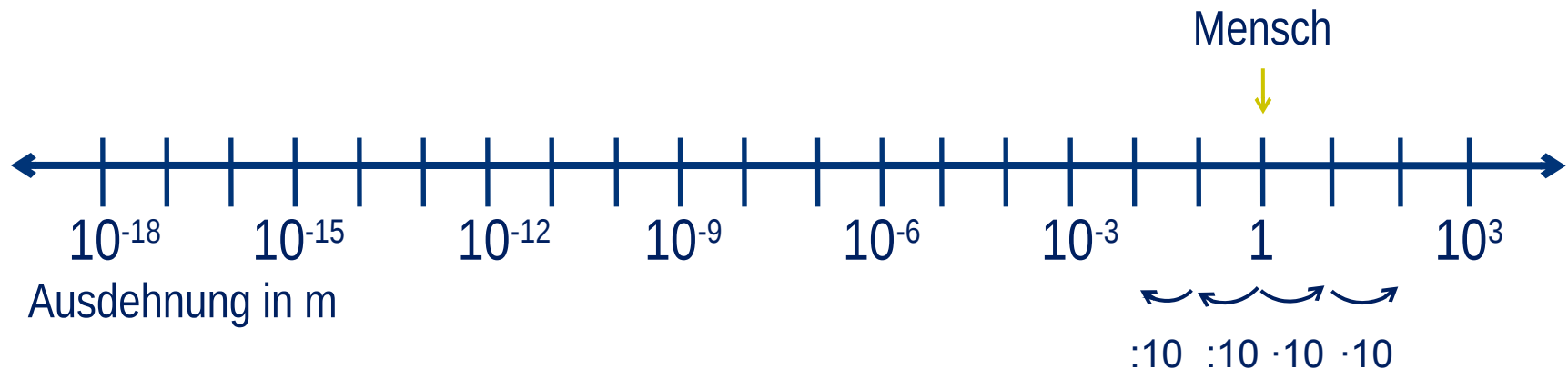
Größenordnungen in der Physik





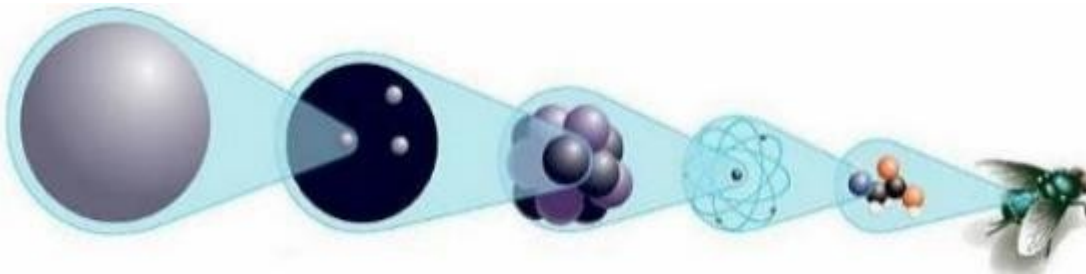
Wie klein sind Elementarteilchen?

- ▶ Ordnet die folgenden Begriffe auf der Längenskala ein!
 - Proton, Atom, Neutron, Mensch, Elektron, Zucker-Molekül, Fliege, Atomkern, Quarks, Fußballfeld

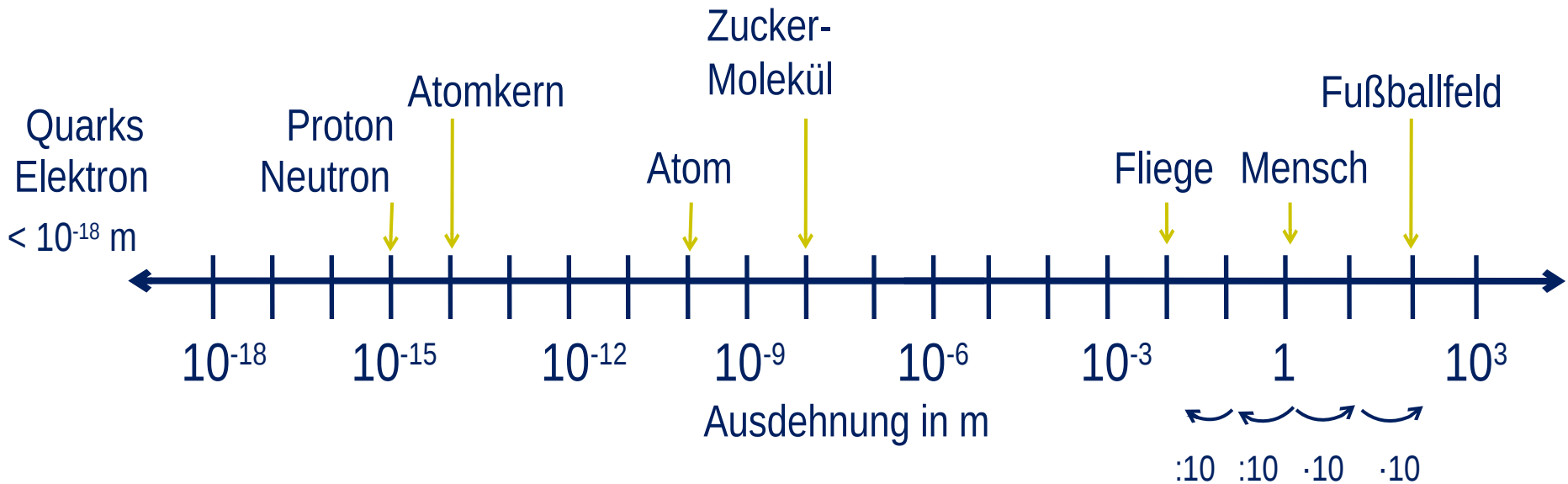




Wie klein sind Elementarteilchen?



© DESY





Elektronenvolt

▶ 1 eV ist die Energie, die ein Elektron gewinnt, wenn es eine Spannung von 1 Volt durchfliegt.

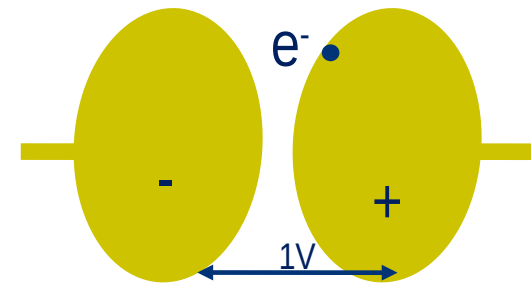
▶ 1 eV = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Joule

1 GeV = 10^9 eV

1 TeV = 10^{12} eV

▶ Beispiele:

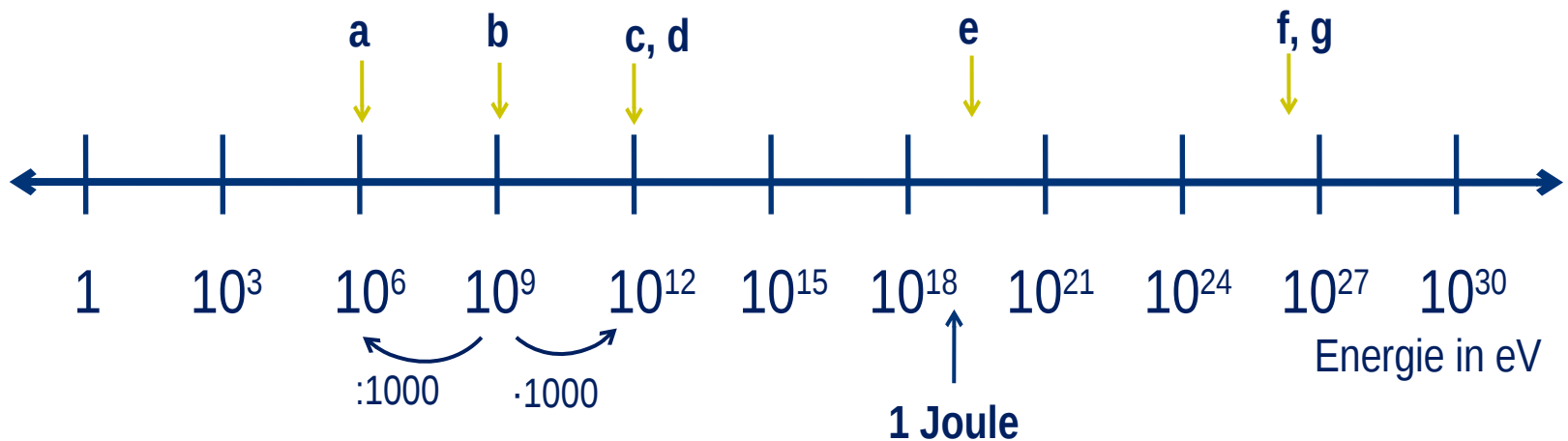
- 6,5 TeV: Bewegungsenergie eines Protons im LHC, \approx Bewegungsenergie einer Mücke
- Man kann auch Massen in eV/c^2 angeben! (wegen $E=mc^2$)
- 0,94 GeV/c^2 : Masse eines Protons



© Netzwerk Teilchenwelt

Vergleich von verschiedenen Energien

- a. Masse eines Elektrons
- b. Masse eines Protons
- c. Bewegungsenergie einer Mücke im Flug
- d. Bewegungsenergie eines Protons im LHC
- e. Bewegungsenergie eines Menschen (75 kg) beim Gehen
- f. Bewegungsenergie aller Protonen im LHC
- g. Bewegungsenergie eines ICE bei 150 km/h

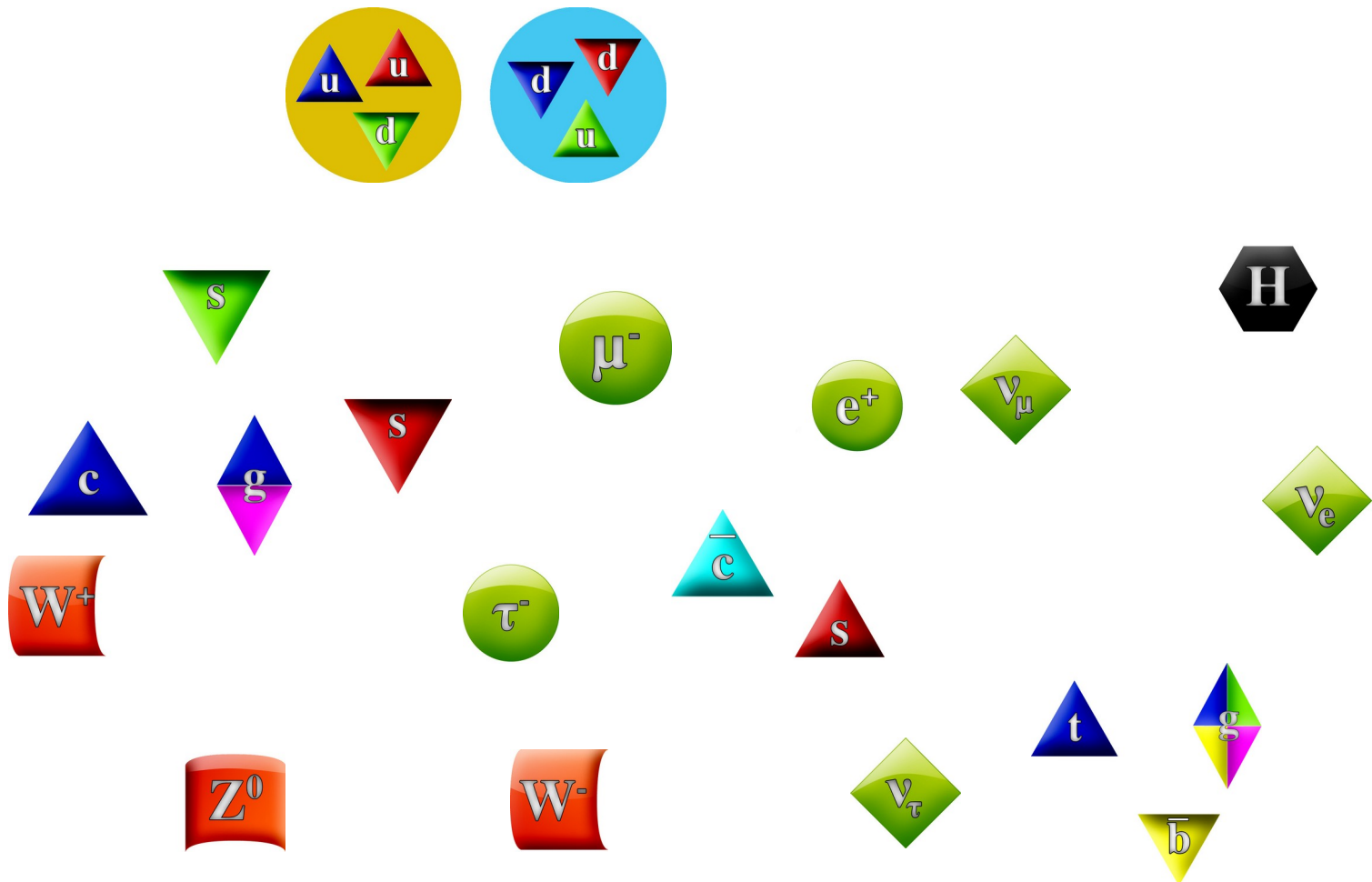


Teil 1: Die Welt der kleinsten Teilchen

Elementarteilchen



Noch mehr Elementarteilchen...?





Quarks

Es gibt 6 verschiedene Arten von Quarks (up, down, charm, strange, top, bottom)

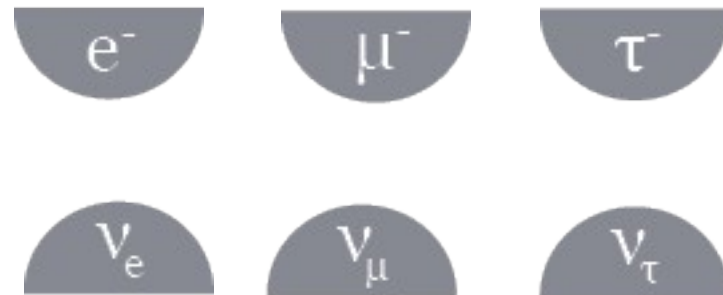
- ▶ Quarks besitzen eine **elektrische** Ladungszahl von $+2/3$ oder $-1/3$
- ▶ Quarks besitzen eine von drei **starken** Ladungen („Farbladungen“): rot, grün oder blau.
- ▶ Man findet Quarks nie einzeln sondern nur als „Hadronen“. Das sind Kombinationen von zwei oder drei Quarks und/oder Antiquarks





Leptonen

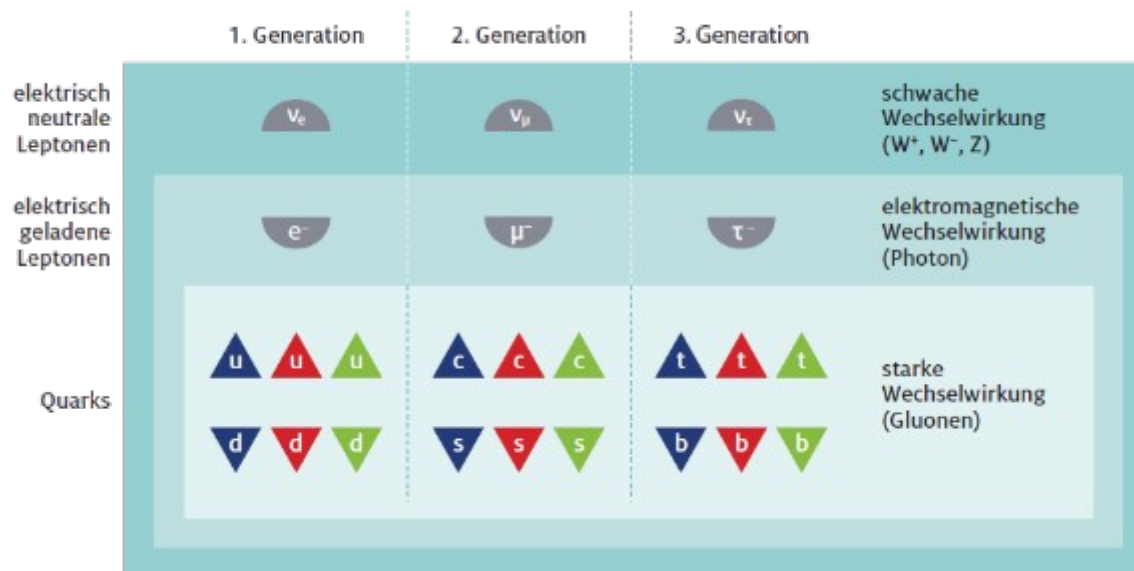
- ▶ Drei der Leptonen sind elektrisch negativ geladen: Elektron e^- , Myon μ^- und Tauon τ^- .
- ▶ Drei Leptonen besitzen keine elektrische Ladung. Sie heißen Neutrinos (ν) und sind sehr leicht.





Materieteilchen

- ▶ Stabile Materie in unserer Umgebung besteht nur aus Teilchen der ersten Generation: Elektronen, Up- und Down-Quarks.
- ▶ Von ihnen gibt es je zwei massereichere, instabile „Kopien“ mit gleichen Ladungen (2. und 3. Generation).

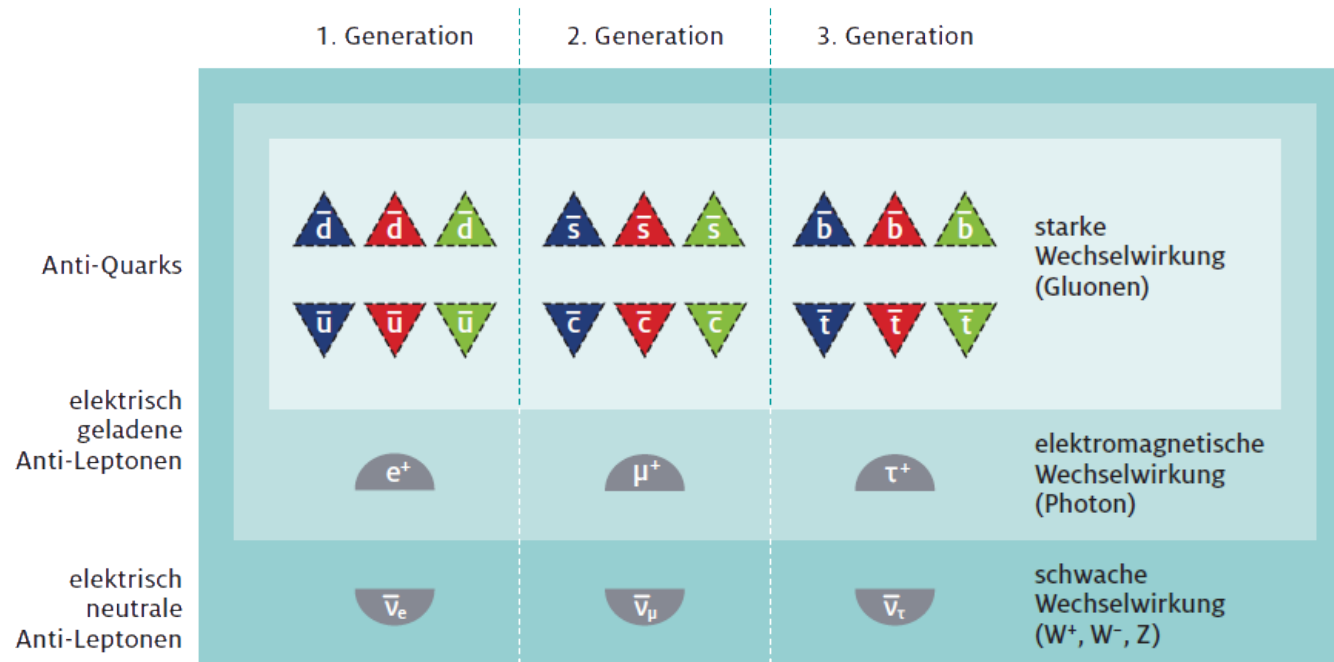


© Netzwerk Teilchenwelt



Anti-Materieteilchen

- ▶ Zu jeder Materieteilchensorte gibt es eine Anti-Teilchensorte mit gleicher Masse und entgegengesetzten Ladungen.

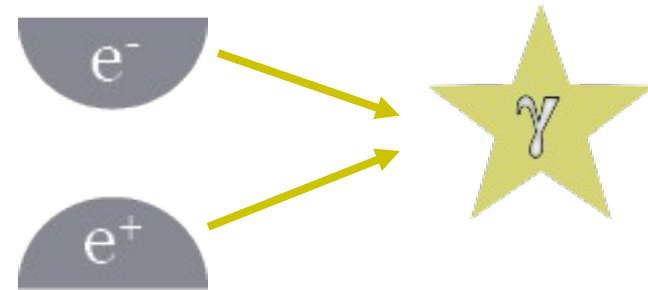


© Netzwerk Teilchenwelt

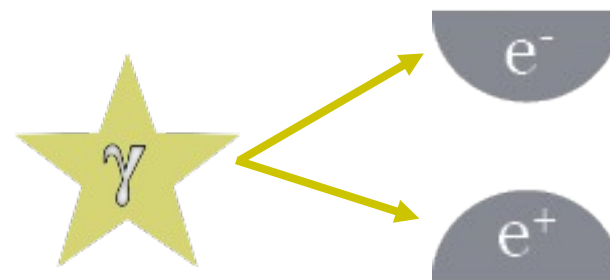


Anti-Materie

- ▶ Trifft ein Materieteilchen auf sein Anti-Teilchen, so „vernichten“ sie sich, d.h. aus der vorhandenen Energie entstehen Photonen (oder andere Austauscheteilchen):



- ▶ Umgekehrt kann aus Photonen ein Teilchen-Anti-Teilchen-Paar entstehen:



Teil 1: Die Welt der kleinsten Teilchen

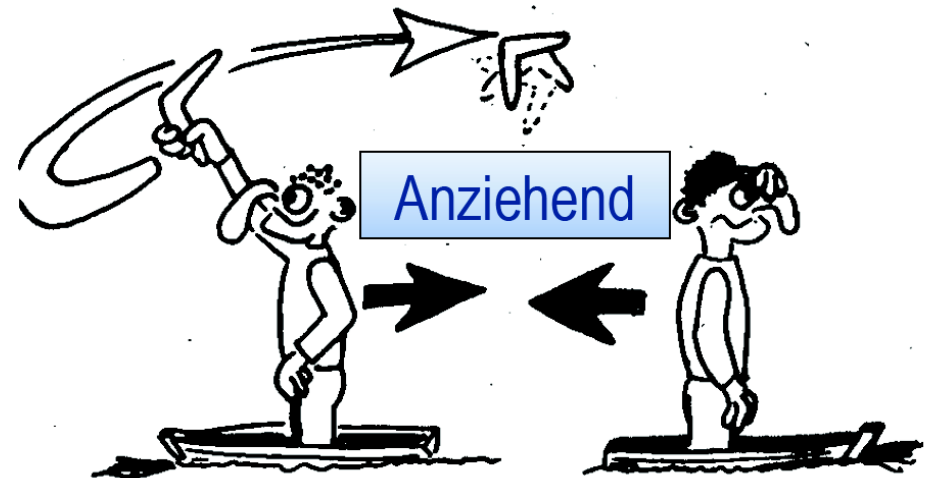
Wechselwirkungen



Wechselwirkungen

- ▶ Wenn Teilchen einander begegnen, wechselwirken sie: d.h. sie können sich gegenseitig anziehen oder abstoßen, Teilchen können erzeugt werden oder sich ineinander umwandeln, etc.
- ▶ Wechselwirkungen werden durch **Austauschteilchen** übertragen:

Abstoßend





Wechselwirkungen

- ▶ **Starke Wechselwirkung**
 - Anziehung zwischen Quarks, Zusammenhalt von Atomkernen
- ▶ **Elektromagnetische Wechselwirkung**
 - Elektromagnetische Wellen, Zusammenhalt von Atomen, Chemie, Magnetismus
- ▶ **Schwache Wechselwirkung**
 - Betaumwandlung, Kernfusion (Umwandlung von schweren Quarks in leichtere Quarks und von schweren Leptonen in leichtere Leptonen)
 - Wechselwirkung von Neutrinos mit anderen Teilchen
- ▶ **Gravitation**
 - Anziehung zwischen massenbehafteten Objekten: Schwerkraft, Umlauf der Planeten
 - **Spielt für Elementarteilchen keine Rolle; sehr schwach**





Wechselwirkungen

► Welche Wechselwirkung spielt die Hauptrolle?



- Jemand telefoniert mit dem Handy



- Ein Atomkern wandelt sich durch eine β -Umwandlung um



- Viele Atomkerne sind stabil, obwohl sich Protonen gegenseitig abstoßen



- Eine Kompassnadel richtet sich nach Norden aus



- Zwei Atome gehen eine chemische Bindung ein



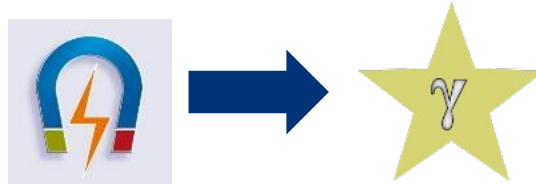
- Ein Glas fällt vom Tisch



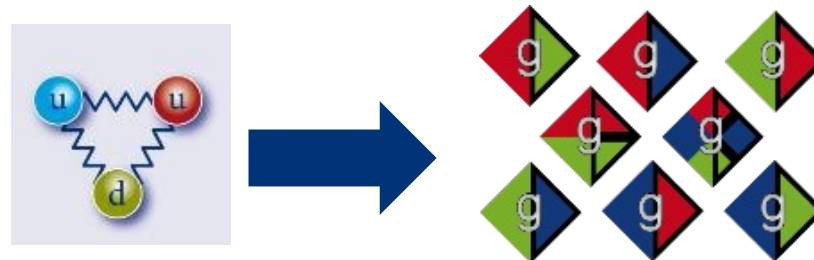
- Zwei Up-Quarks und ein Down-Quark bilden ein Proton; Quarks kommen nie einzeln vor

Wechselwirkung und Austauschteilchen

- ▶ Das **Photon** vermittelt die **elektromagnetische Wechselwirkung**



- ▶ Acht **Gluonen** vermitteln die **starke Wechselwirkung**

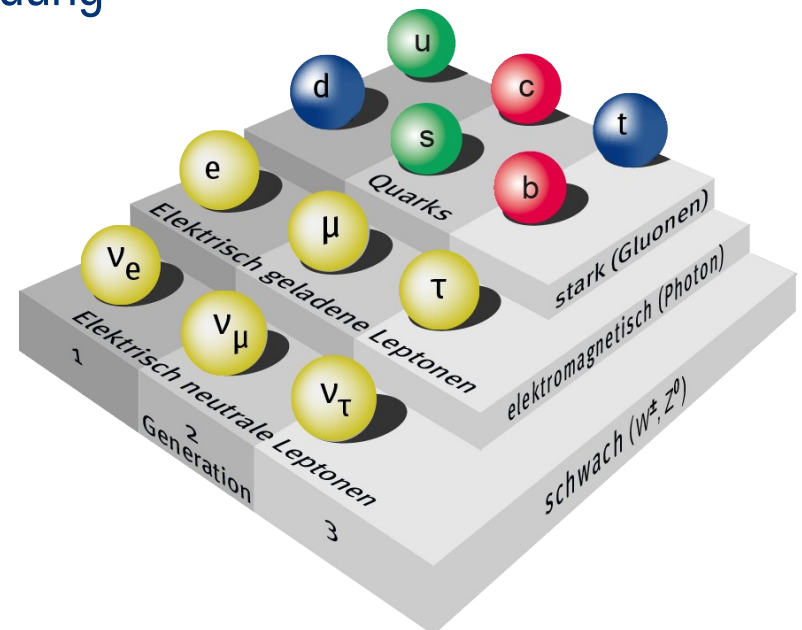


- ▶ Die massenreichen **W- und Z- Boson** vermitteln die **schwache Wechselwirkung**



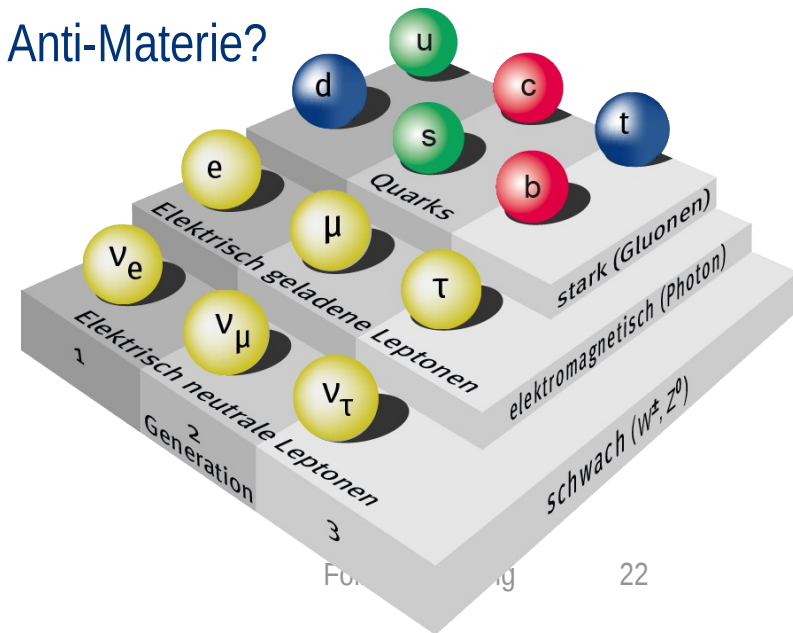
Ladungen und Wechselwirkungen

- ▶ Zu jeder Wechselwirkung gehört eine Ladung. Nur Teilchen mit der entsprechenden Ladung spüren die Wechselwirkung:
- ▶ Starke Wechselwirkung ↔ Starke Ladung (Quarks, Gluonen)
- ▶ Elektromagnetische Wechselwirkung ↔ Elektrische Ladung (Quarks, 3 Leptonen, W-Bosonen)
- ▶ Schwache Wechselwirkung ↔ Schwache Ladung (alle Materieteilchen, W/Z-Bosonen)



Das Standardmodell der Teilchenphysik

- ▶ ...beschreibt Elementarteilchen und ihre Wechselwirkungen
- ▶ ...ist durch viele Experimente bestätigt
- ▶ ...beschreibt trotzdem nur 5% des Universums
- ▶ ...und es gibt noch viele offene Fragen!
 - Gibt es noch mehr Elementarteilchen?
 - Wieso gibt es so viel mehr Materie als Anti-Materie?
 - Warum gibt es 3 Generationen?



Teil 1: Die Welt der kleinsten Teilchen

Das Higgs-Boson



Das Higgs-Teilchen

- ▶ Aus der Theorie bisher folgt: Elementarteilchen sind „an sich“ masselos.
 - Aber was würde geschehen, wenn Teilchen tatsächlich masselos wären?
 - Masselose Teilchen würden sich stets mit Lichtgeschwindigkeit bewegen; es gäbe keine feste Materie.
- ▶ Wie erhalten Teilchen ihre Masse?
 - Mögliche Erklärung: Teilchen wechselwirken mit dem **Higgs-Feld** und erhalten so Masse.
 - Schwingungen des Higgs-Feldes sollten als neues Elementarteilchen experimentell nachweisbar sein: Das Higgs-Boson.





Wie kann man sich den Higgs-Mechanismus vorstellen?

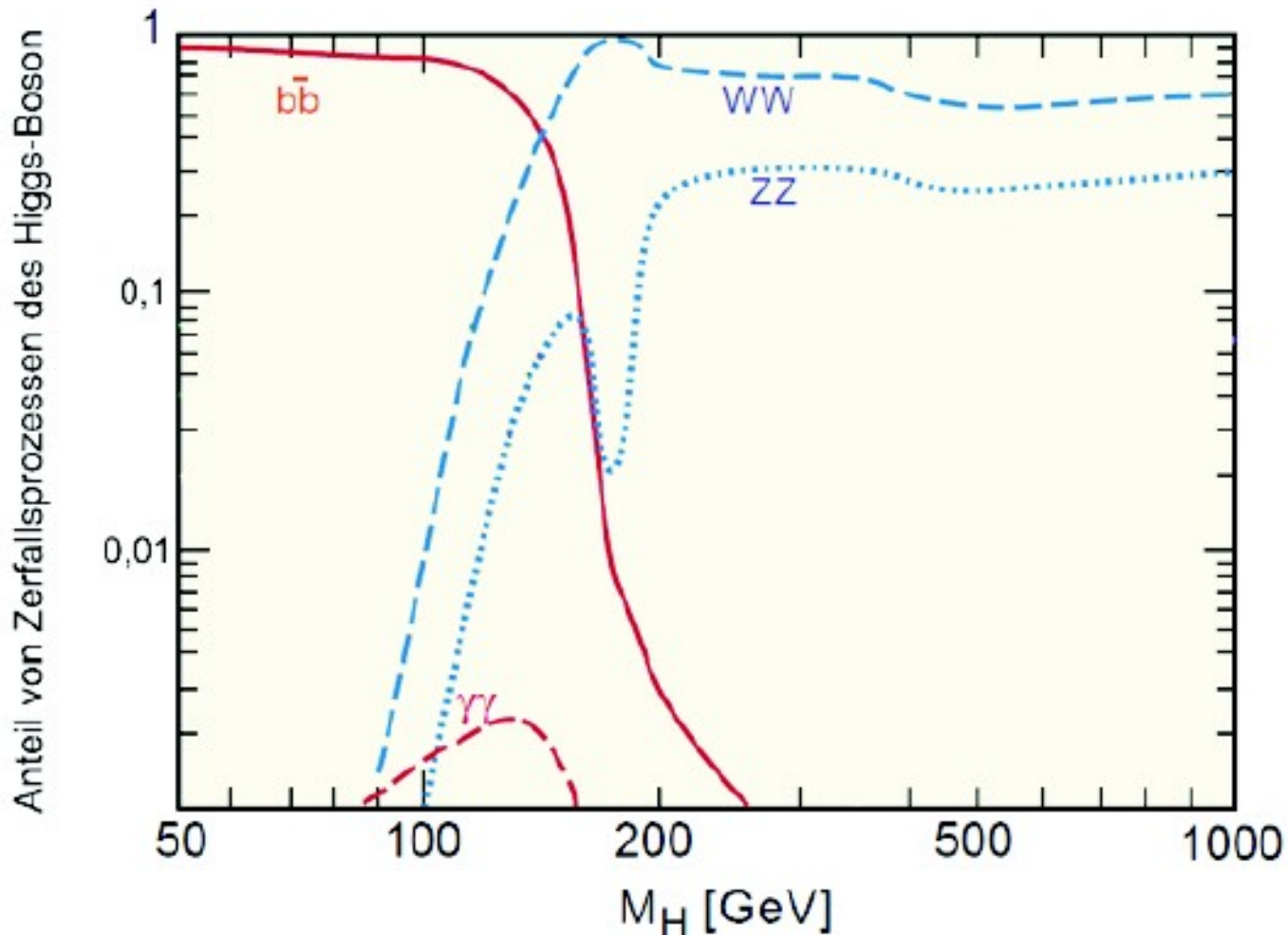
Frage: Was ist Masse?

Antwort: Die Stärke der Kopplung an das Higgsfeld.



Das Higgs Boson vor dem 4. Juli 2012

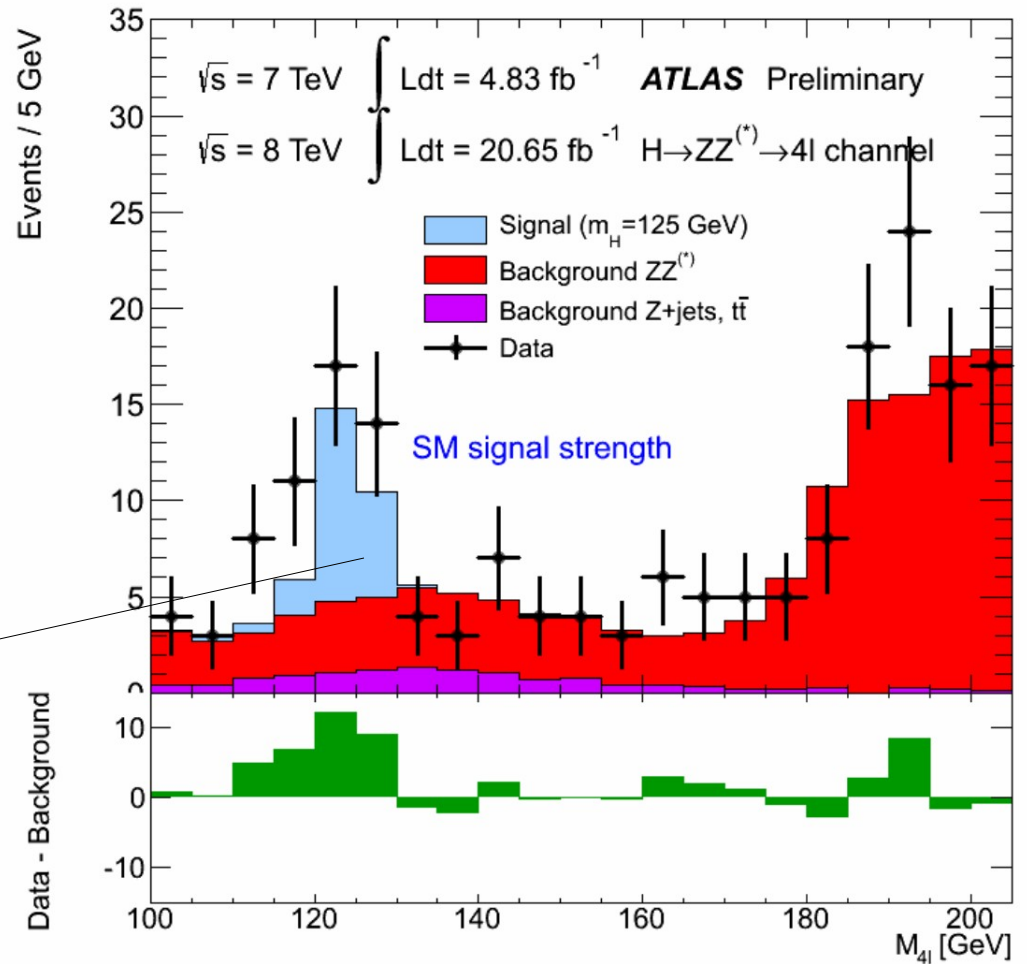
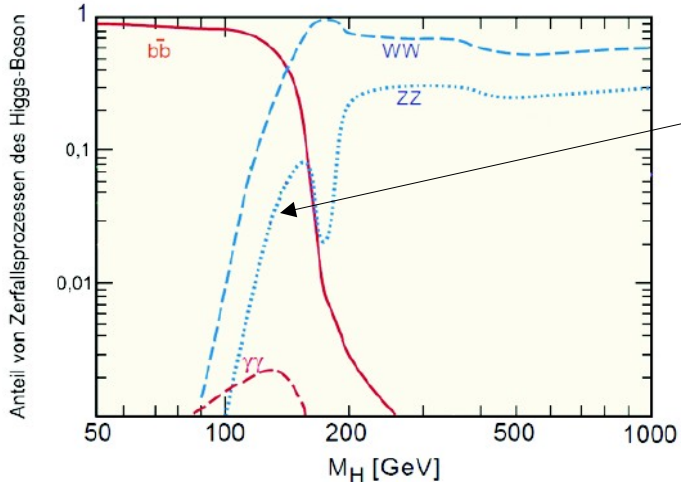
Wie zerfällt das Higgs-Boson?



Der 4. Juli 2012

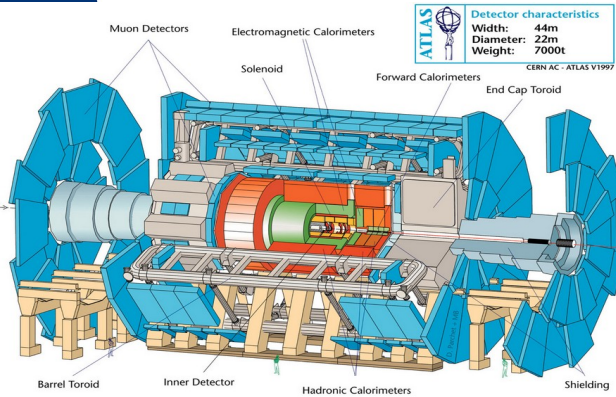


Entdeckung von $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$



Physikanalyse in einer Folie

Daten



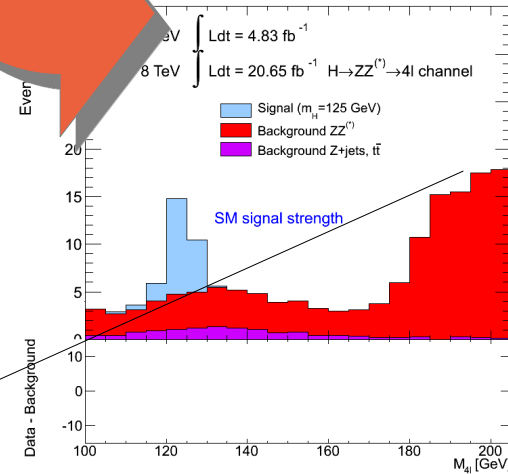
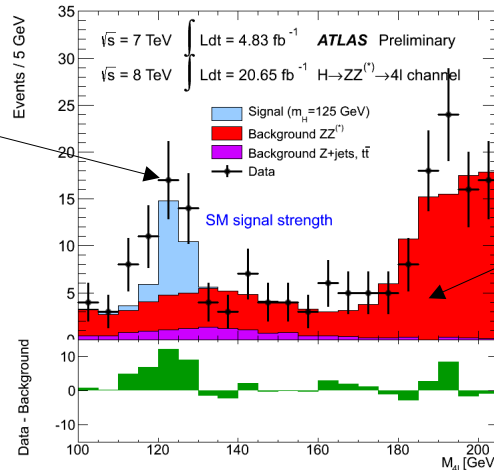
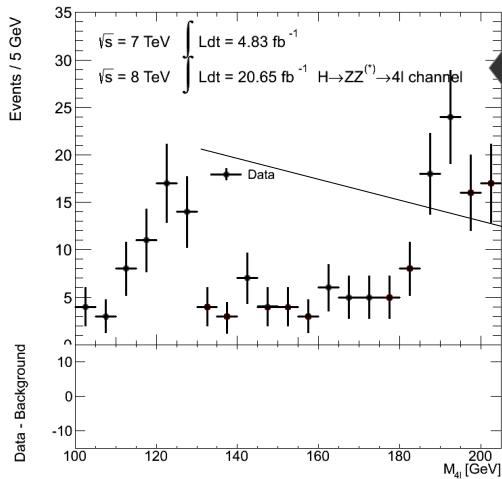
Detector characteristics
 Width: 44m
 Diameter: 22m
 Weight: 7000t
 CERN AC - ATLAS V1997



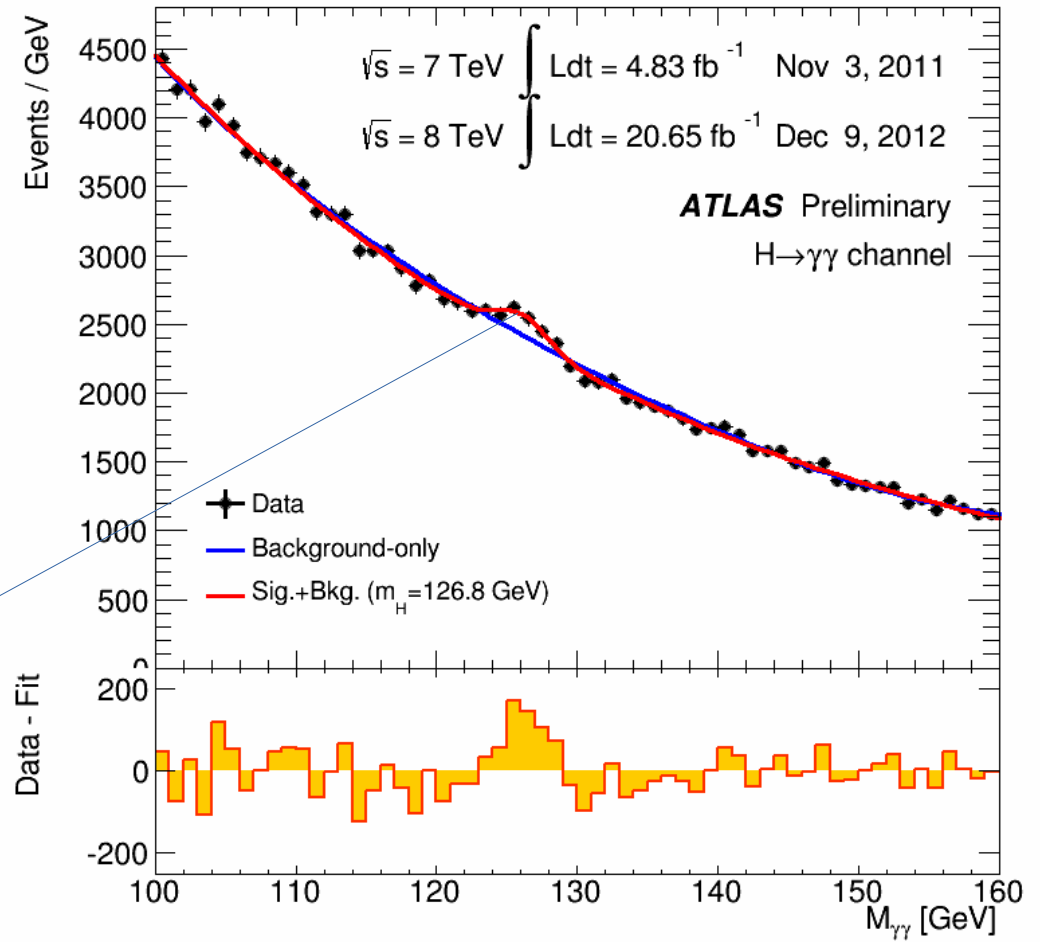
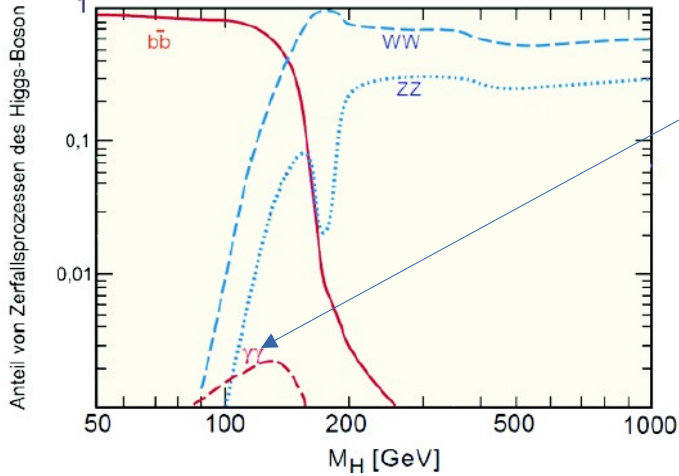
Simulation

$$P_{i \rightarrow f} = |\langle f | \hat{H}_I | i \rangle|^2$$

Rekonstruktion Datenanalyse



Entdeckung von $H \rightarrow \gamma\gamma$



Teil 2: Das CERN und der LHC

Die Welt der kleinsten Teilchen - Einführungsfilm



©CERN



Das CERN

(Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire)



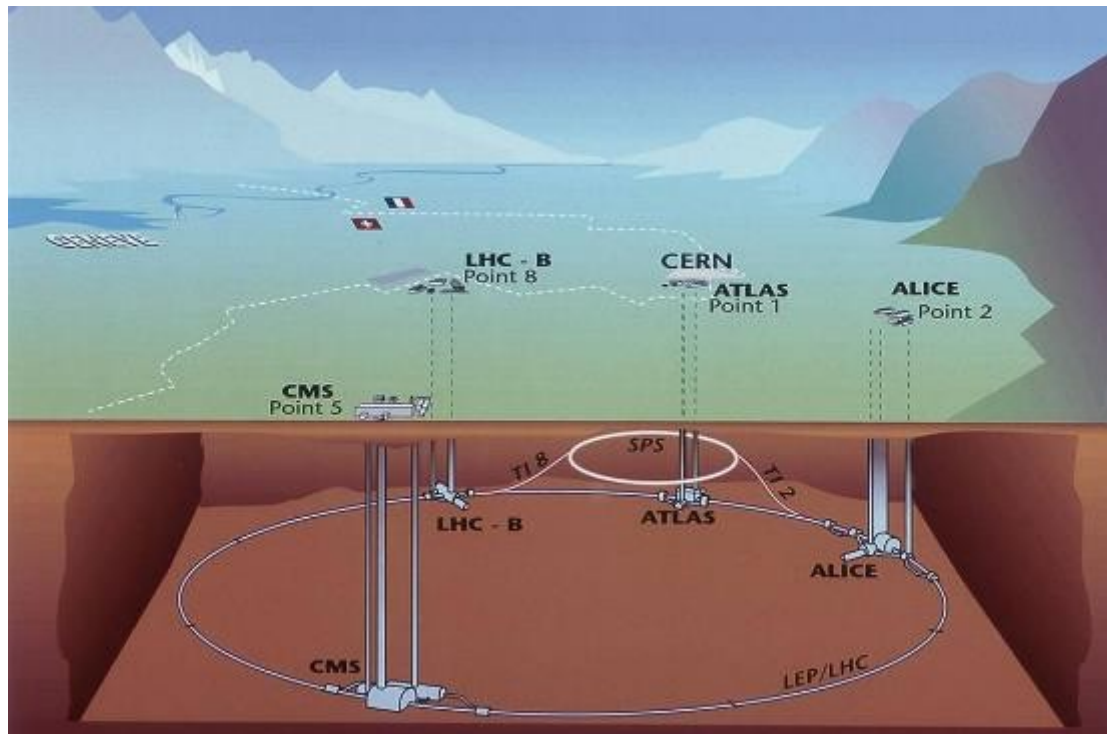
© CERN

- ▶ Das größte Teilchenphysik-Forschungszentrum der Welt
- ▶ im Grenzgebiet zwischen der Schweiz und Frankreich

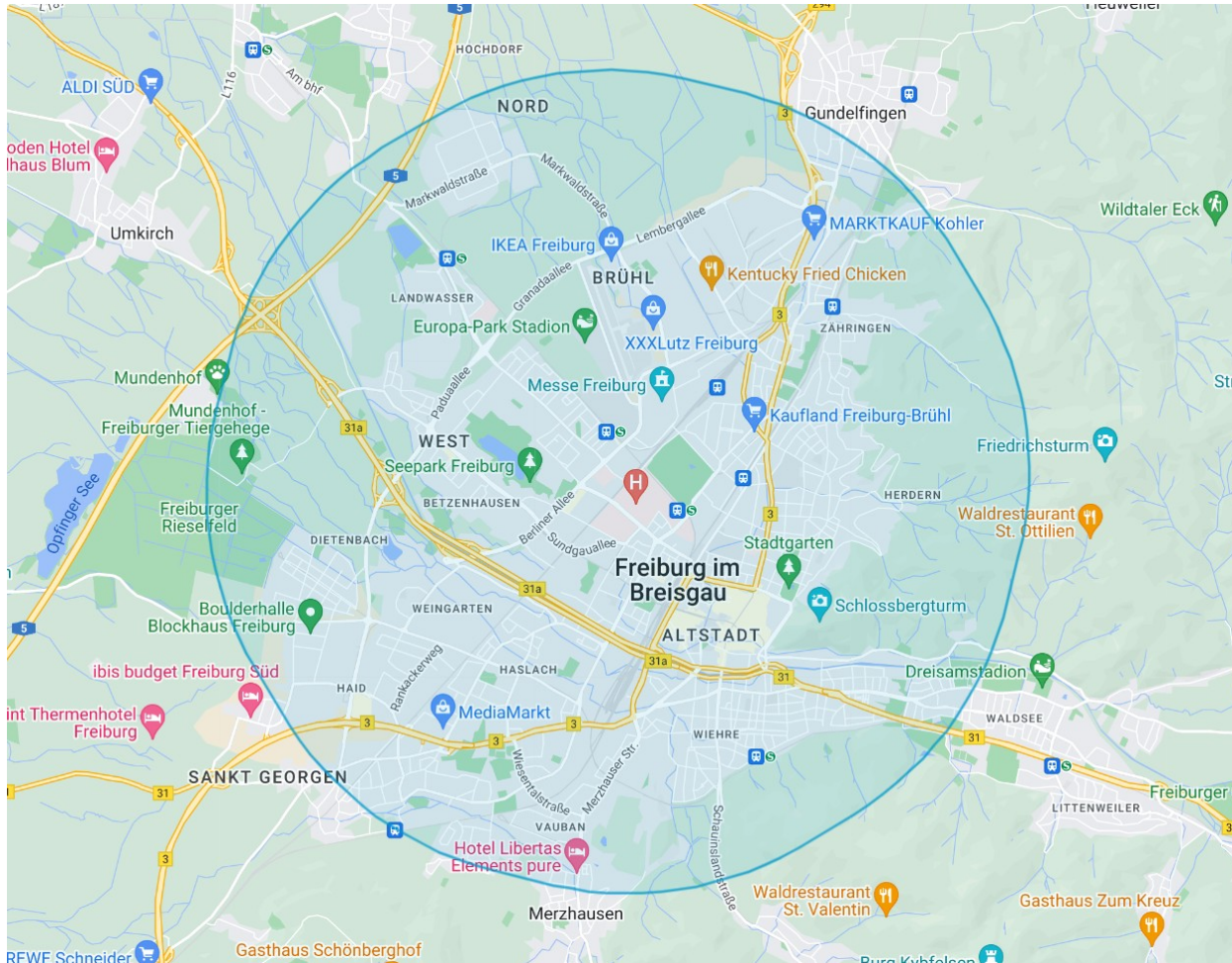


Der LHC (Large Hadron Collider)

© CERN



- ▶ Ein 27 km langer, ringförmiger Teilchenbeschleuniger
- ▶ ca. 100m unter der Erde
- ▶ 4 Teilchen-Detektoren: ATLAS, ALICE, CMS und LHC-b



<https://howlargeisthelhc.com/>

Large Hadron Collider (LHC)

Größenvergleich LHC und Freiburg

Wozu Teilchenbeschleuniger?

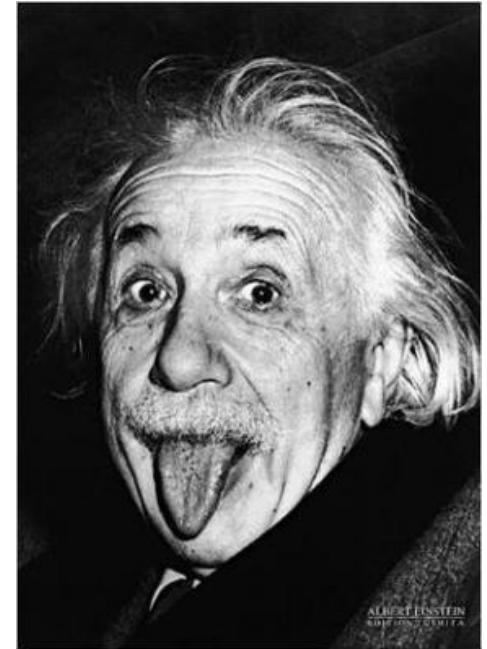
➤ Erzeugung massereicher Teilchen

Masse ist eine Form von Energie!

- Masse und andere Energieformen können sich ineinander umwandeln.

Beispiel:

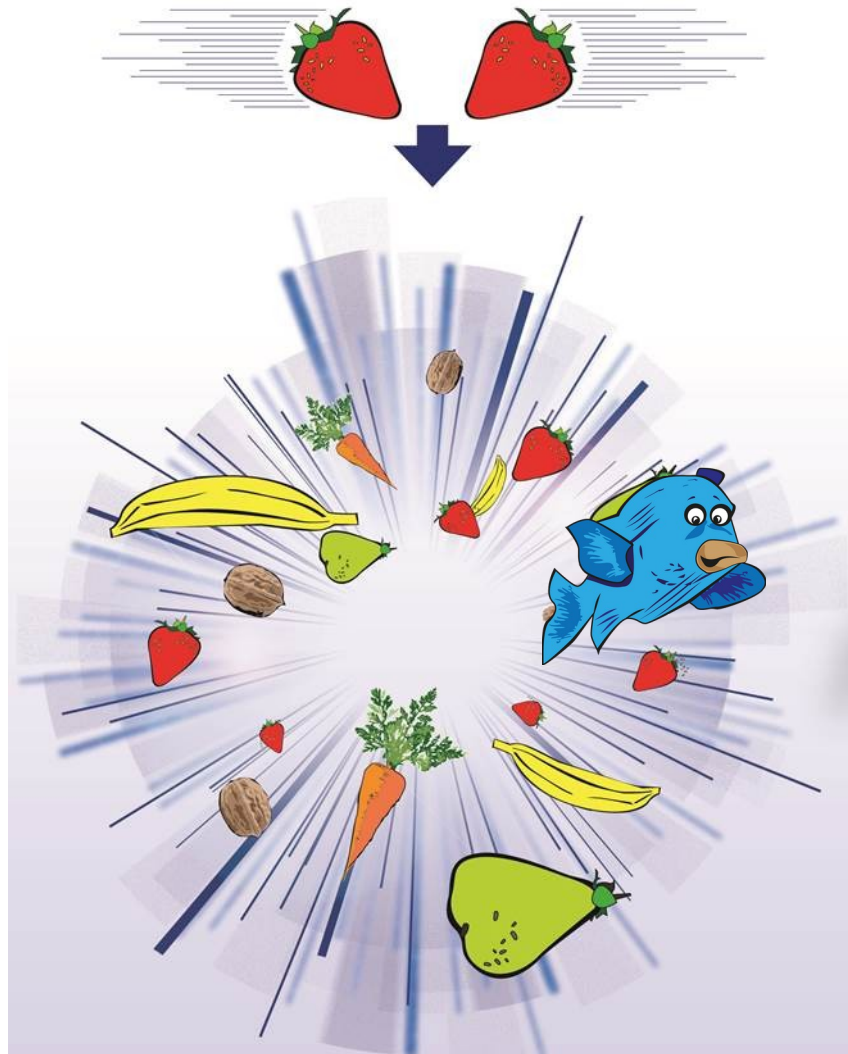
- Kernspaltung im Kraftwerk
(Masse → Wärme → elektrische Energie)
- Teilchenkollisionen!
(Bewegungsenergie → Masse)



$$E = mc^2$$

Wozu Teilchenbeschleuniger?

→ Erzeugung massereicher Teilchen

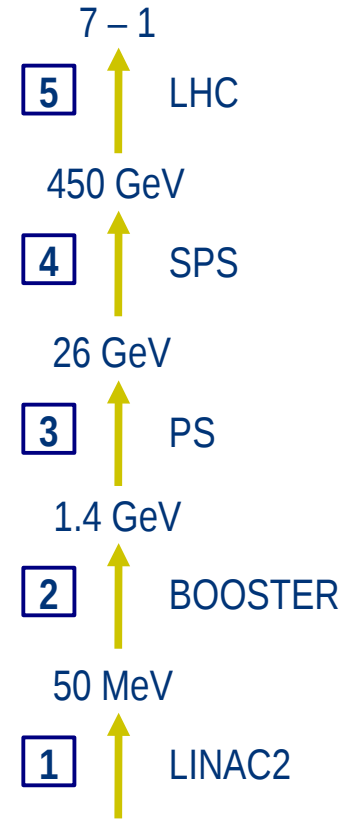
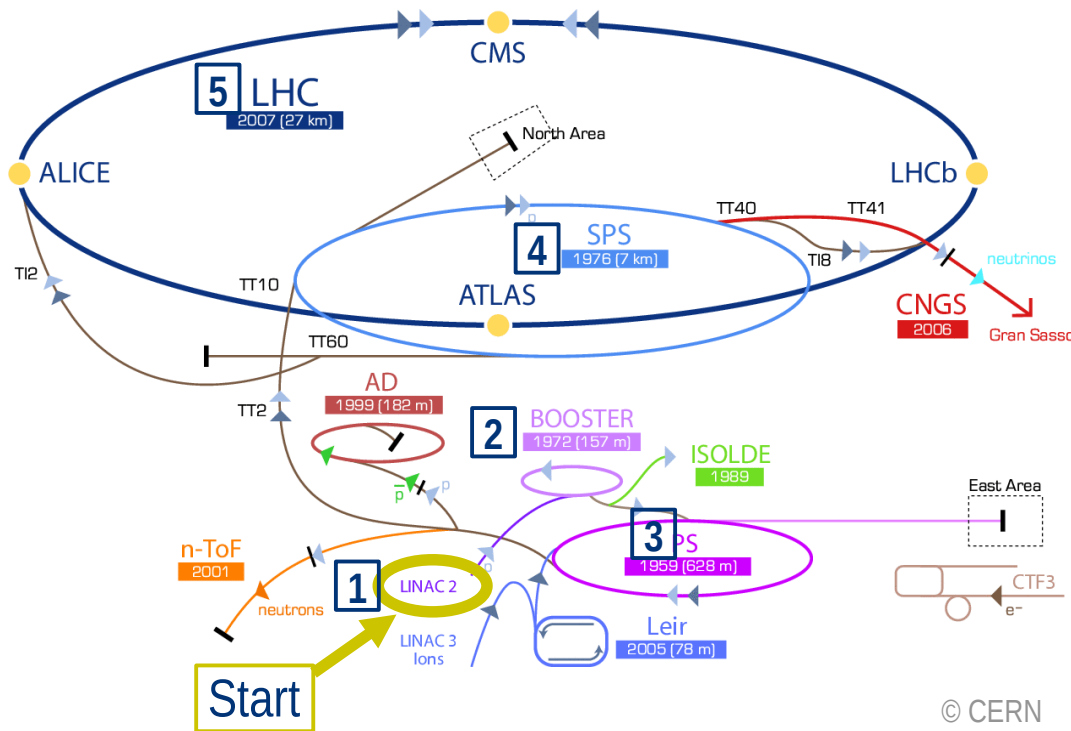


- Bei Teilchenkollisionen wandelt sich ein Teil der Bewegungsenergie in Masse um
- So werden **völlig neue Teilchen** erzeugt...
- ...diese waren vorher keine Teile der Protonen!
- Manchmal entstehen auch exotische Teilchen...!



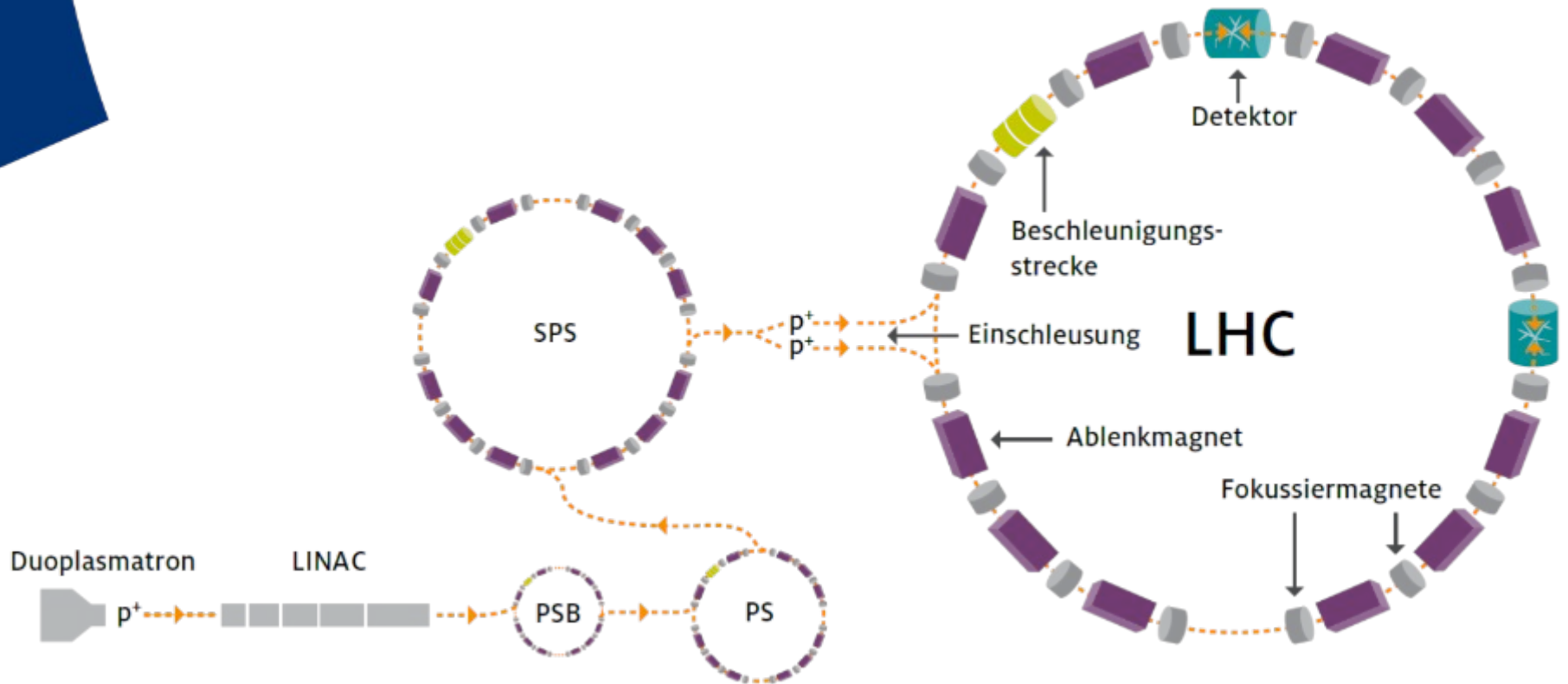
Gelände und Beschleuniger

Die CERN Teilchen-Beschleuniger:
mehr als 50 km Tunnel unter der Erde



© CERN

Die Beschleuniger am CERN



© Netzwerk Teilchenwelt



© CERN

Large Hadron Collider (LHC)

Ein Dipolmagnet wird in der Tunnel herab gelassen



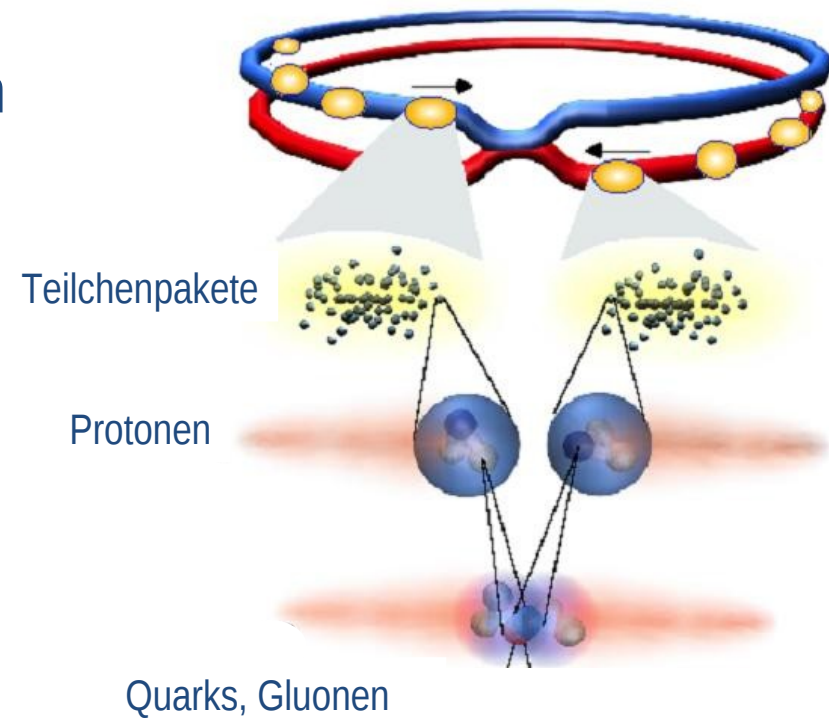
© CERN

Large Hadron Collider (LHC)

Dipole im Tunnel

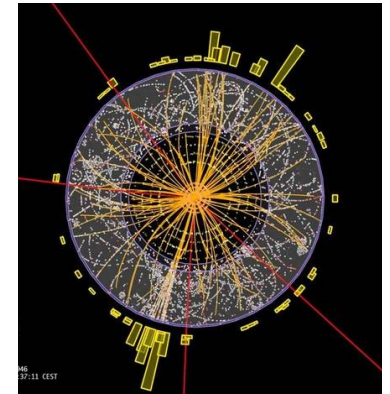
Teilchenkollisionen im LHC

- 2 gegenläufige Protonenstrahlen
 - ...mit je 1400 Teilchenpaketen
 - 100 Milliarden Protonen pro Paket
 - 20 Millionen Paket-Kreuzungen pro Sekunde...
 - ...mit je etwa 30 Proton-Proton-Kollisionen
- ➔ ca. 600 Millionen Kollisionen pro Sekunde!



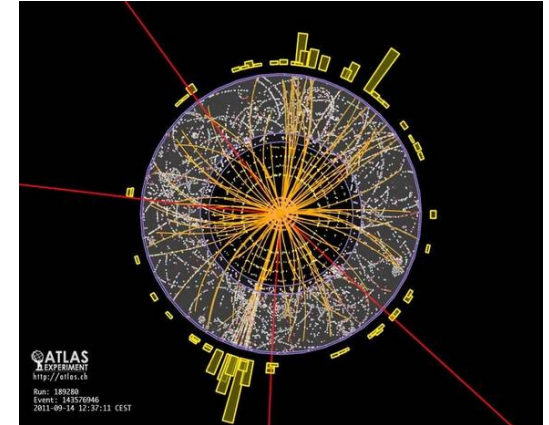
Teilchenkollisionen im LHC

- **600 Mio. Kollisionen pro Sekunde! Warum?**
 - „Interessante“ Teilchen entstehen sehr selten: ca. 1×10^{10} Kollisionen!
 - Welche Teilchen bei einer bestimmten Kollision entstehen, ist vom Zufall bestimmt
 - Man kann nur vorhersagen, wie häufig welche Teilchenkombinationen vorkommen werden
 - Vergleich der Messergebnisse mit Vorhersagen aus dem Standardmodell und anderen Theorien



Wohin mit so vielen Daten?

- 20 Mio. Protonenpaket-Kreuzungen pro Sekunde
- Detektoren weisen die entstandenen Teilchen nach
- einige MB pro Ereignis
...das wären mehrere Terabyte pro Sekunde!
 - Datenreduktion notwendig
 - "Trigger": automatische Auswahl interessanter Messdaten (Ereignisse)
 - etwa 1000 Ereignisse/s bleiben übrig
- Verteilung der Daten auf ca. 200 000 Rechner in 34 Ländern (LHC-Grid)
- etwa 15 Millionen Gigabyte (15 Petabyte) pro Jahr!
- Das entspricht ca. 12000 Handys mit 128 GB Speicherplatz



LHC Fun Facts

- ▶ Der LHC ist kälter als das Universum
 - Temperatur Dipolmagnete: 1.9 K
 - Kosmische Hintergrundstrahlung: 2.7 K
- ▶ Das Vakuum im LHC ist ähnlich dem im Weltall
 - Vakuum LHC: 1.013×10^{-10} mbar
 - Benötigte Entleerungs-Zeit: 2 Wochen
- ▶ Temperaturen höher als in der Sonne
 - Temperatur in einer Schwerionenkollision: 5.5×10^{12} K
 - Temperatur Sonne: 15×10^6 K



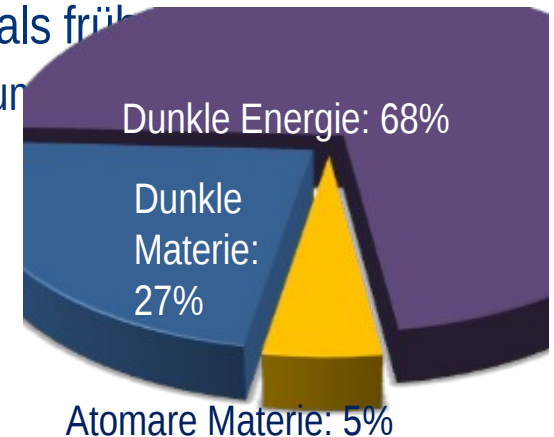
© CERN

Backup

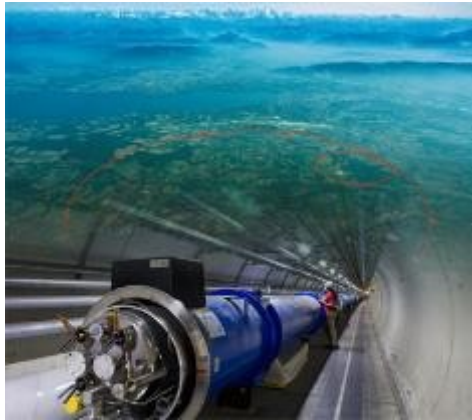


Was ist Dunkle Materie?

- ▶ Beobachtungen zeigen, dass es nicht nur atomare Materie geben kann:
 - Galaxien rotieren zu schnell: Viel mehr Materie wäre nötig!
 - Die Strukturen von Galaxienhaufen sind nur mit viel mehr Materie zu erklären.
 - Es muss eine bisher unbekannte Materieform geben: Dunkle Materie.
 - Das Universum dehnt sich heute schneller aus als früher.
 - Etwas beschleunigt die Ausdehnung des Universums: Dunkle Energie.
 - Der größte Teil des Universums besteht aus Dunkler Materie und Dunkler Energie!
 - Am CERN sucht man nach Teilchen, aus denen Dunkle Materie bestehen könnte.



Bedeutung der Teilchenphysik für das „große Bild“



© CERN

