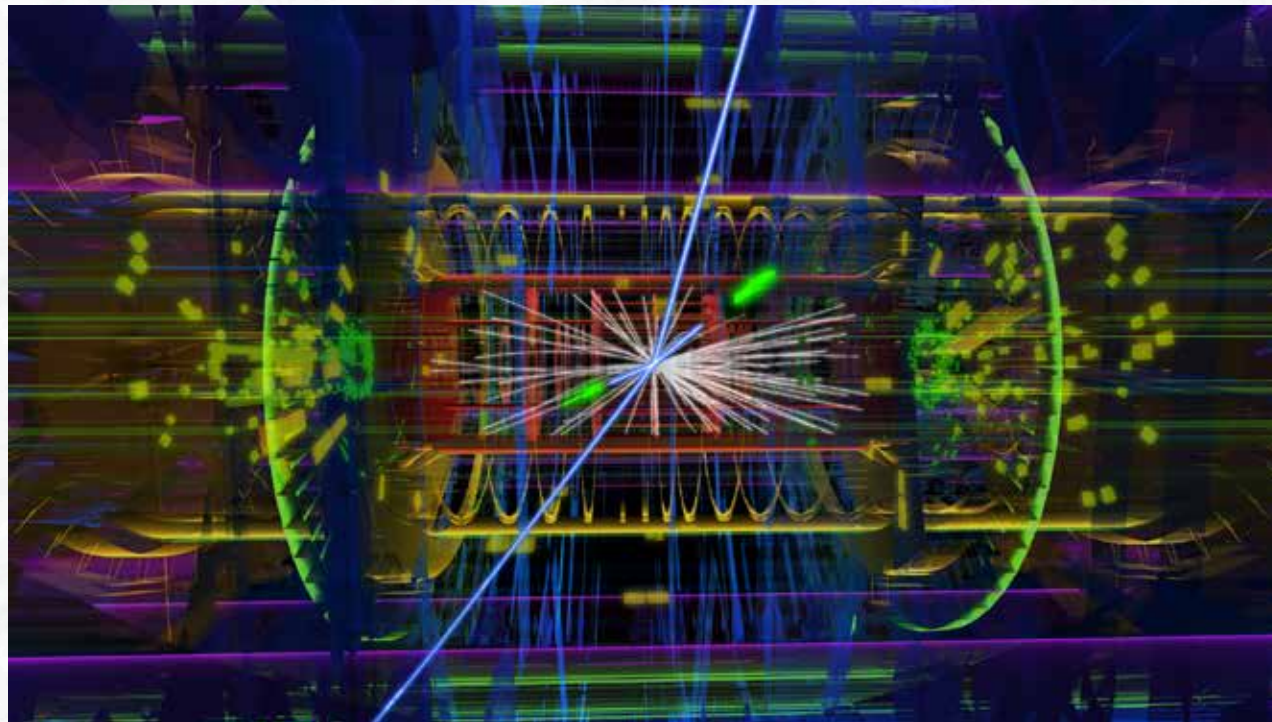


***Von der Entdeckung des Higgs-Teilchens zur
Suche nach Dunkler Materie
-Neues zur Forschung am CERN-***



Prof. Karl Jakobs
Physikalisches Institut
Universität Freiburg

Von der Entdeckung des Higgs-Teilchens zur Suche nach Dunkler Materie -Neues zur Forschung am LHC-

- Teilchenphysik, das Higgs-Teilchen und Dunkle Materie
- Die Entdeckung des Higgs-Teilchens
Was wissen wir heute über seine Eigenschaften?
- Suche nach neuen Phänomenen bei höherer Energie
Wo stehen wir heute und wie geht es weiter?



4. Juli 2012





From the editorial:

“The top Breakthrough of the Year – the discovery of the Higgs boson – was an unusually easy choice, representing both a triumph of the human intellect and the culmination of decades of work by many thousands of physicists and engineers.”



Nobel-Preis für Physik 2013: François Englert und Peter Higgs

“ ... for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of sub-atomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN’s Large Hadron Collider.”

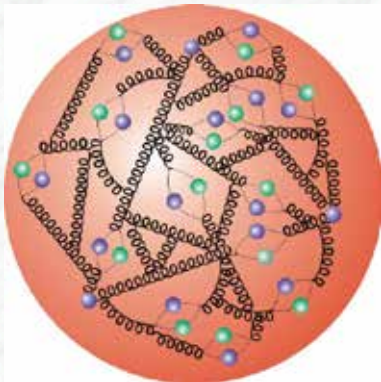
Motivation und Zielsetzung der Teilchenphysik



Einheitliche und umfassende
Beschreibung der

Materie und ihrer Wechselwirkungen

„Bausteine und Kräfte“

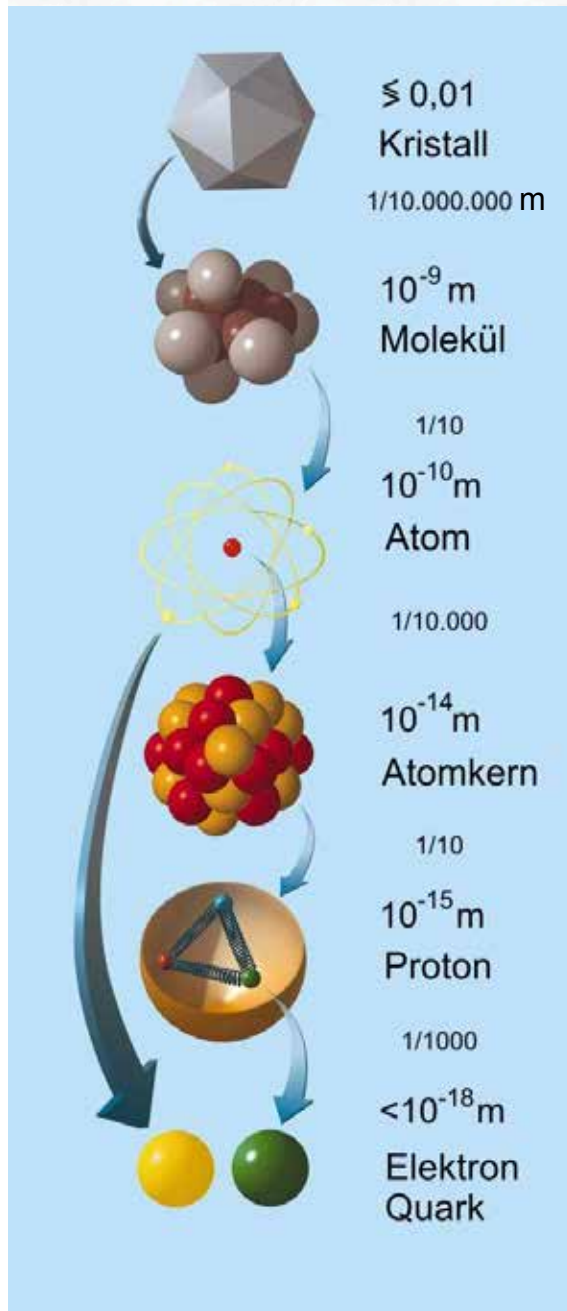


von kleinsten Abständen
(10^{-18} m)



bis zu kosmischen
Dimensionen (10^{25} m)

Erforschung der Materie



Auge, Mikroskop
(Licht)

Elektronenmikroskop
(Elektronen)

Teilchenbeschleuniger
(Synchrotron-Strahlung)

Teilchenbeschleuniger
(Teilchen hoher Energie)

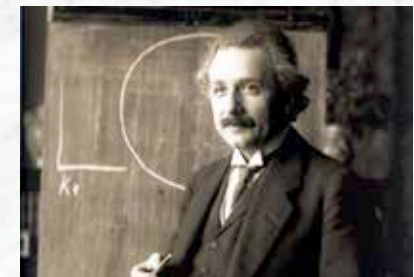
höhere Energie / Impuls

höhere Auflösung



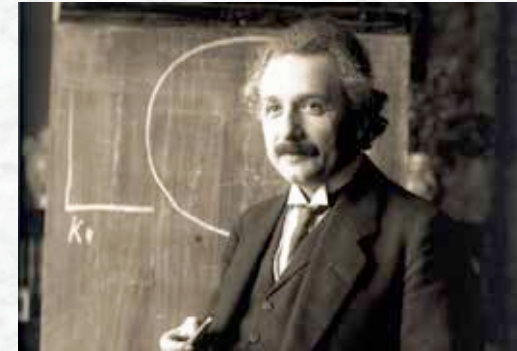
$$\Delta x \propto \frac{1}{p}$$

$$E = mc^2$$

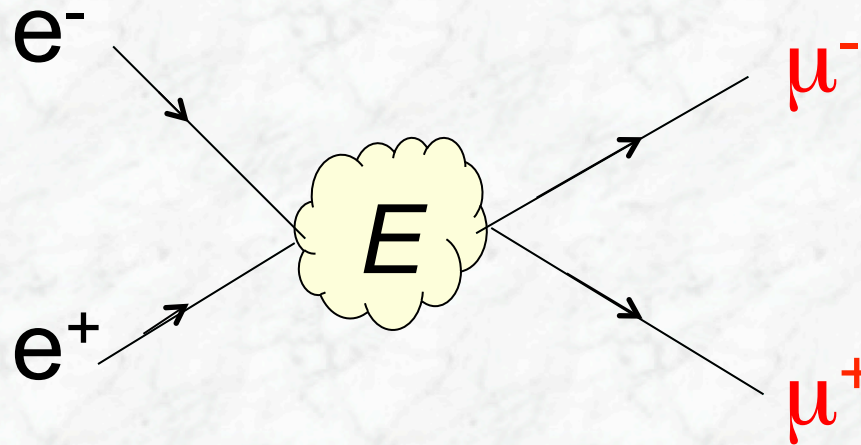


Neue Teilchen aus hohen Energien?

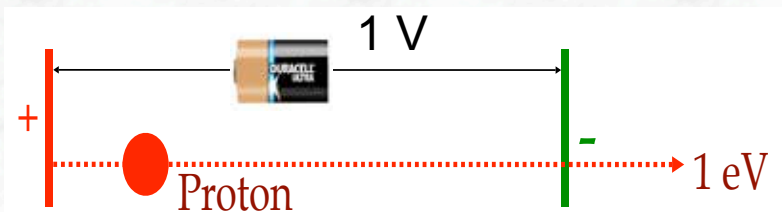
$$E = mc^2$$



bekannte
Teilchen



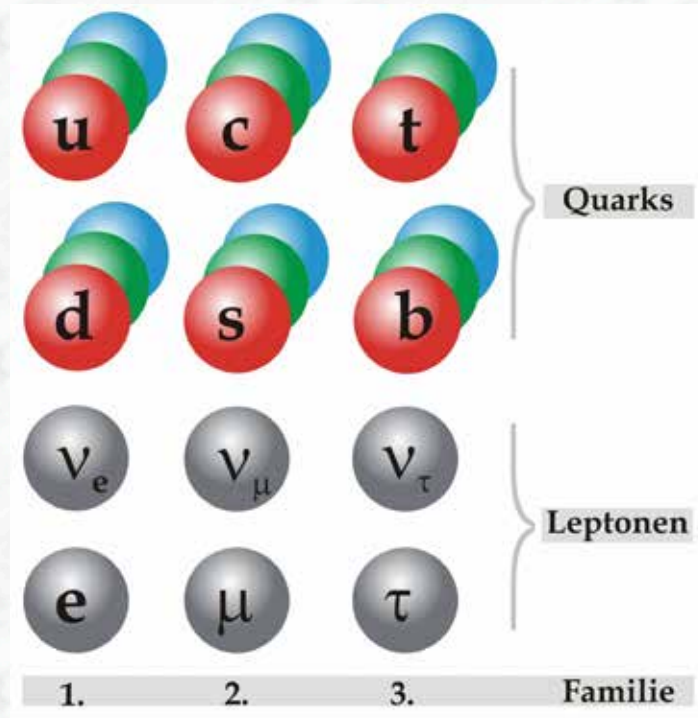
neue
Teilchen



$m_{\text{Elektron}} = 511 \text{ keV} = 511\,000 \text{ eV}$
 $m_{\text{Proton}} = 938 \text{ MeV} = 938\,000\,000 \text{ eV}$
üblicherweise wird $c=1$ gesetzt

$E_{\text{LHC}} = 8 \text{ TeV} = 8\,000\,000\,000\,000 \text{ eV}$
 $13 \text{ TeV} = 13\,000\,000\,000\,000 \text{ eV}$
(seit Juni 2015)

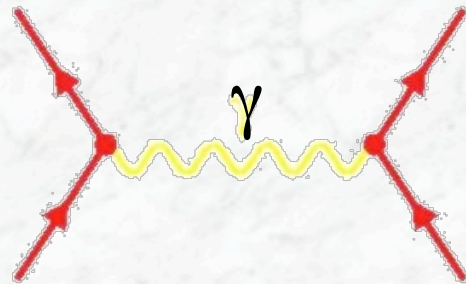
Die Bausteine der Materie: Quarks und Leptonen



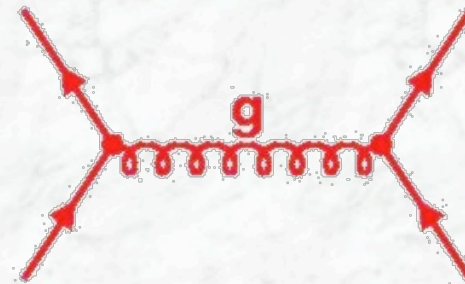
- Quarks und Leptonen scheinen punktförmig zu sein, Ausdehnung $< 10^{-18}$ m (Elementarteilchen, Eigendrehimpuls halbzahlig (Spin $\frac{1}{2}$) = Fermionen)
- Die Masse der Quarks und Leptonen steigt mit der Familienzahl an
 $m_\mu \approx 200 m_e$ $m_\tau \approx 3500 m_e$

Das schwerste Elementarteilchen: das Top-Quark $m_t \approx 340\,000 m_e \approx m_{\text{Gold-Atom}}$

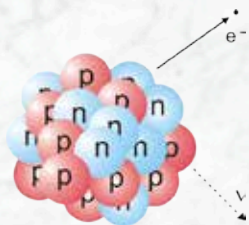
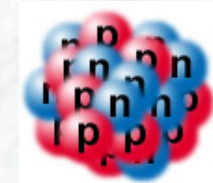
Die fundamentalen Kräfte



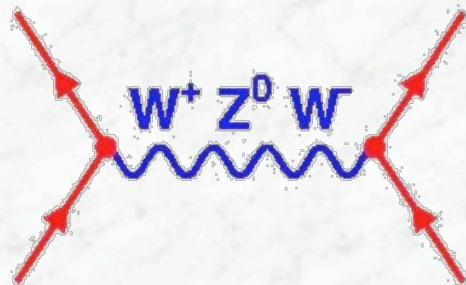
elektromagnetische Kraft



starke Kraft



β -Zerfall



schwache Kraft

$$m_W \approx 80.4 \text{ GeV}$$

$$m_Z \approx 91.2 \text{ GeV}$$



Gravitation



Theoretische Beschreibung: Quantenfeldtheorie

Wechselwirkung durch Austausch von „Kraftteilchen“

Austauschteilchen:

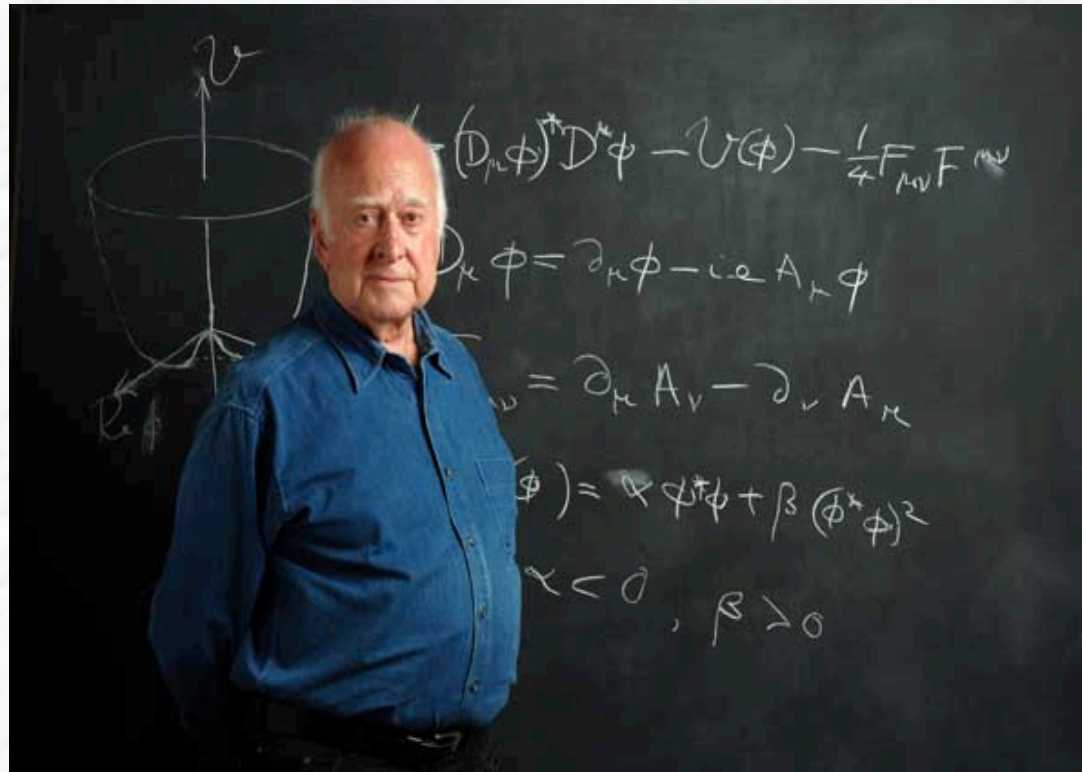
Photon (γ), Gluonen (g), W- und Z-Teilchen

(Eigendrehimpuls ganzzahlig (Spin-1) = Bosonen)

Problem:

Austauschteilchen müssen masselos sein !

Der Brout-Englert-Higgs Mechanismus



F. Englert and R. Brout. Phys. Rev. Lett. 13 (1964) 321;
P.W. Higgs, Phys. Lett. 12 (1964) 132, Phys. Rev. Lett. 13 (1964) 508;
G.S. Guralnik, C.R. Hagen, and T.W.B. Kibble. Phys. Rev. Lett. 13 (1964) 585.

Der Brout-Englert-Higgs Mechanismus



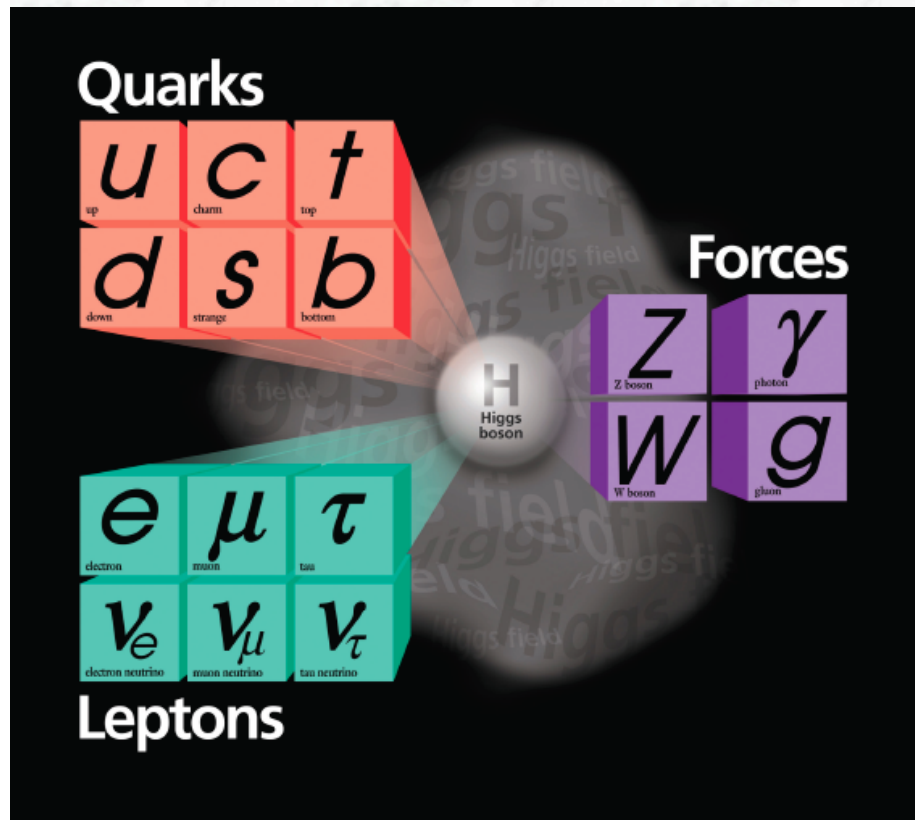
R. Brout (1964)



P. Higgs (1964)

F. Englert and R. Brout. Phys. Rev. Lett. 13 (1964) 321;
P.W. Higgs, Phys. Lett. 12 (1964) 132, Phys. Rev. Lett. 13 (1964) 508;
G.S. Guralnik, C.R. Hagen, and T.W.B. Kibble. Phys. Rev. Lett. 13 (1964) 585.

Der Brout-Englert-Higgs-Mechanismus



- Ein neues Feld (Higgs-Feld) wird postuliert, durchdringt das Vakuum
- Masse wird erzeugt durch Wechselwirkung der Teilchen mit diesem Feld
- Vorhersage: Neues Teilchen, das sog. **Higgs-Teilchen**



Der Higgs Mechanismus, eine Analogie:

Prof. D. Miller
UC London



Higgs-Hintergrundfeld
erfüllt den Raum



Ein **Teilchen**
im Higgs-Feld...

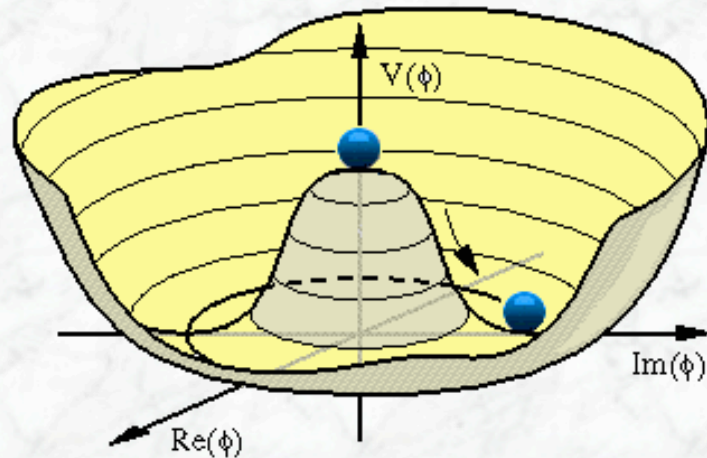


... Widerstand gegen
Bewegung ...

Trägheit ↔ **Masse**

Der Brout-Englert-Higgs Mechanismus

Für
Experten

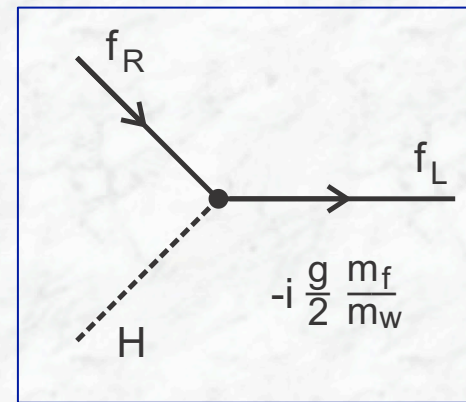
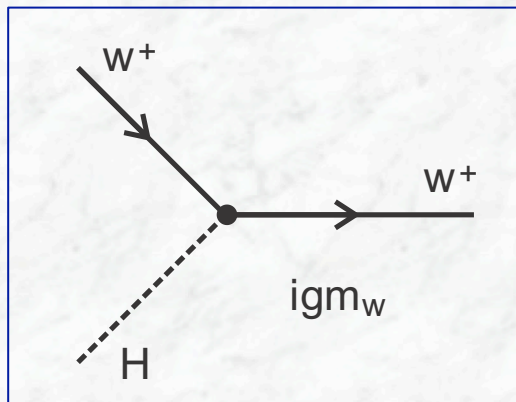


Komplexes skalares (Spin 0) Feld ϕ mit Potential:

$$V(\phi) = \mu^2 (\phi^* \phi) + \lambda (\phi^* \phi)^2$$

Für $\lambda > 0$, $\mu^2 < 0$:

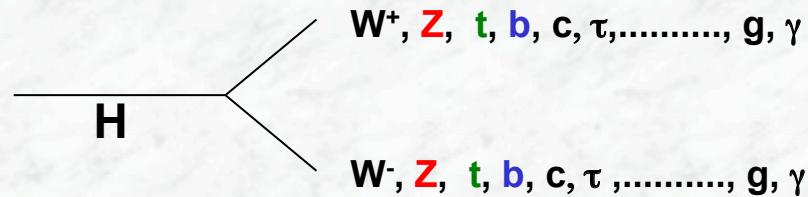
“Spontane Symmetriebrechung”



- Wechselwirkungsstärke mit dem Higgs-Feld ist proportional zur Masse der Teilchen
- Higgs-Boson zerfällt bevorzugt in die schwersten Teilchen
- Masse des Higgs-Bosons wird nicht vorhergesagt, jedoch $m_H < 1000 \text{ GeV}$

Zerfälle des Higgs-Teilchens

Zerfallsraten in die verschiedenen Teilchen können berechnet werden:



Lebensdauer: $\sim 10^{-22}$ s

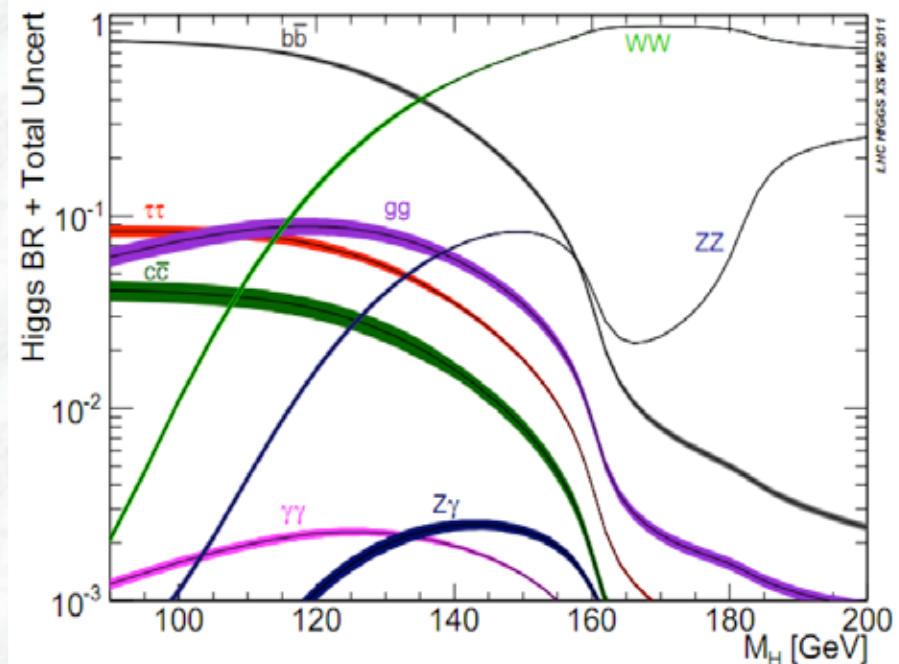
$$\Gamma(H \rightarrow f\bar{f}) = N_c \frac{G_F}{4\sqrt{2}\pi} m_f^2(M_H^2) M_H$$

$$\Gamma(H \rightarrow VV) = \delta_V \frac{G_F}{16\sqrt{2}\pi} M_H^3 (1 - 4x + 12x^2) \beta_V$$

where: $\delta_Z = 1$, $\delta_W = 2$, $x = M_V^2 / M_H^2$, $\beta = \text{velocity}$

$$\Gamma(H \rightarrow gg) = \frac{G_F \alpha_a^2(M_H^2)}{36\sqrt{2}\pi^3} M_H^3 \left[1 + \left(\frac{95}{4} - \frac{7N_f}{6} \right) \frac{\alpha_a}{\pi} \right]$$

$$\Gamma(H \rightarrow \gamma\gamma) = \frac{G_F \alpha_a^2}{128\sqrt{2}\pi^3} M_H^3 \left[\frac{4}{3} N_c e_t^2 - 7 \right]^2$$



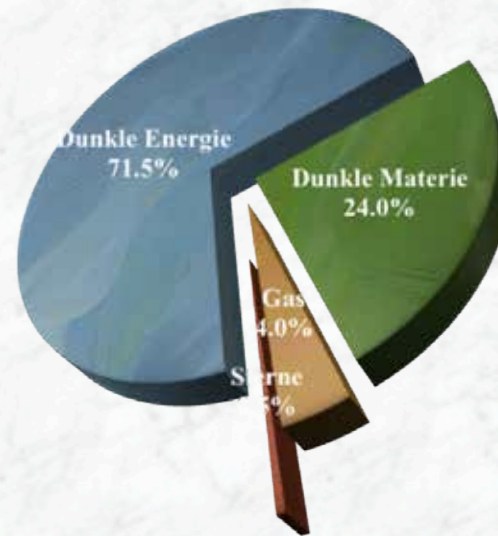
Die Offenen Fragen



Wichtige offene Fragen der Physik

1. Masse

Was ist der Ursprung der Masse?
Existiert das Higgs Teilchen?



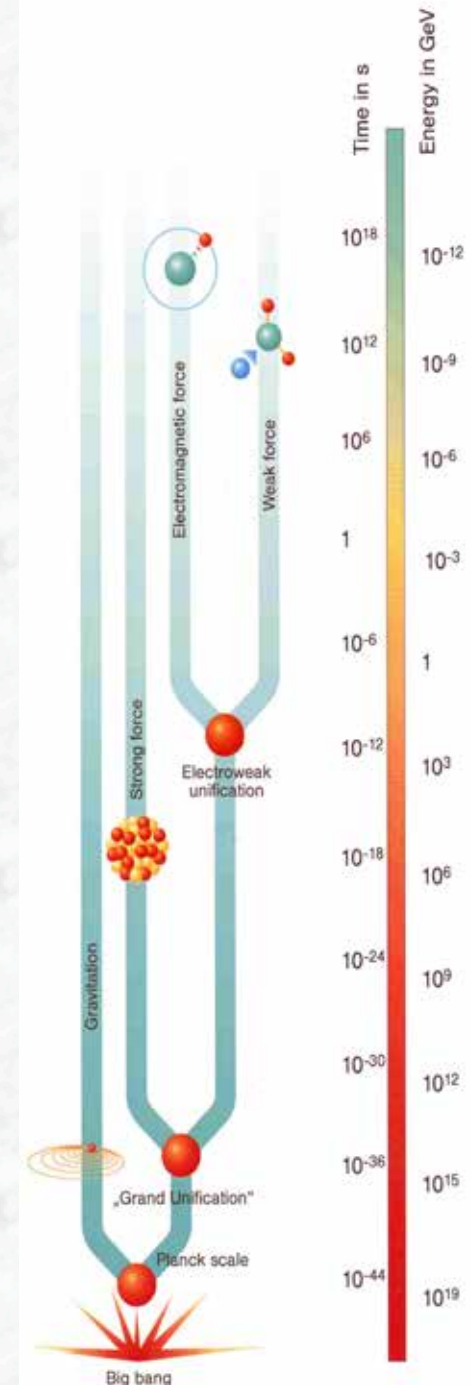
2. Vereinheitlichung

- Können die Wechselwirkungen vereinheitlicht werden?
- Gibt es neue Materiezustände, z.B. in Form von supersymmetrischen Teilchen? Stellen diese die Dunkle Materie im Universum dar?

3. Generationenproblem

- Warum gibt es drei Familien von Teilchen?
- Was ist die Ursache der Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie?

4. Gibt es zusätzliche Raumdimensionen?



Was verbirgt sich hinter der Dunklen Materie?

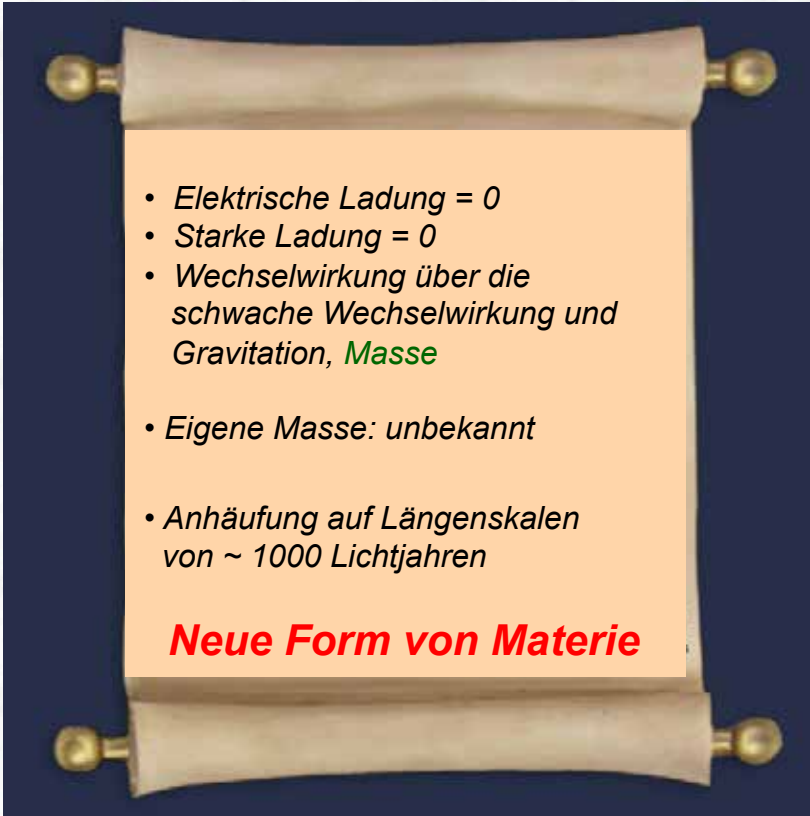
1. Astrophysikalische Kandidaten?

- Nichteuchtende Materie ?
(Braune Zwerge, Weiße Zwerge, Neutronensterne, Schwarze Löcher)

Beiträge sind zu gering !

2. Elementarteilchen?

- Neutrinos?
(zu geringe Masse, Strukturbildung im Universum kann nicht erklärt werden)
- **WIMPs?**
(Weakly interacting massive particles)
-

- 
- Elektrische Ladung = 0
 - Starke Ladung = 0
 - Wechselwirkung über die schwache Wechselwirkung und Gravitation, **Masse**
 - Eigene Masse: unbekannt
 - Anhäufung auf Längenskalen von ~ 1000 Lichtjahren

Neue Form von Materie

Theoretische Modelle
zur Erweiterung der
Standardtheorie



CERN

Ein Musterbeispiel europäischer Kooperation



Das Europäische Forschungszentrum für Elementarteilchenphysik CERN in Genf

- Zielsetzung:
Schaffung einer leistungs- und konkurrenzfähigen Infrastruktur für die zivile, naturwissenschaftliche Grundlagenforschung in Europa

- 1952: Gründung des "Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire"

Belgien, Dänemark, Deutschland (West), Frankreich, Griechenland, Großbritannien, Italien, Jugoslawien, Niederlande, Norwegen, Schweden, Schweiz

- Inkrafttreten der Konvention am 29. September 1954:
Gründung der "Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire"

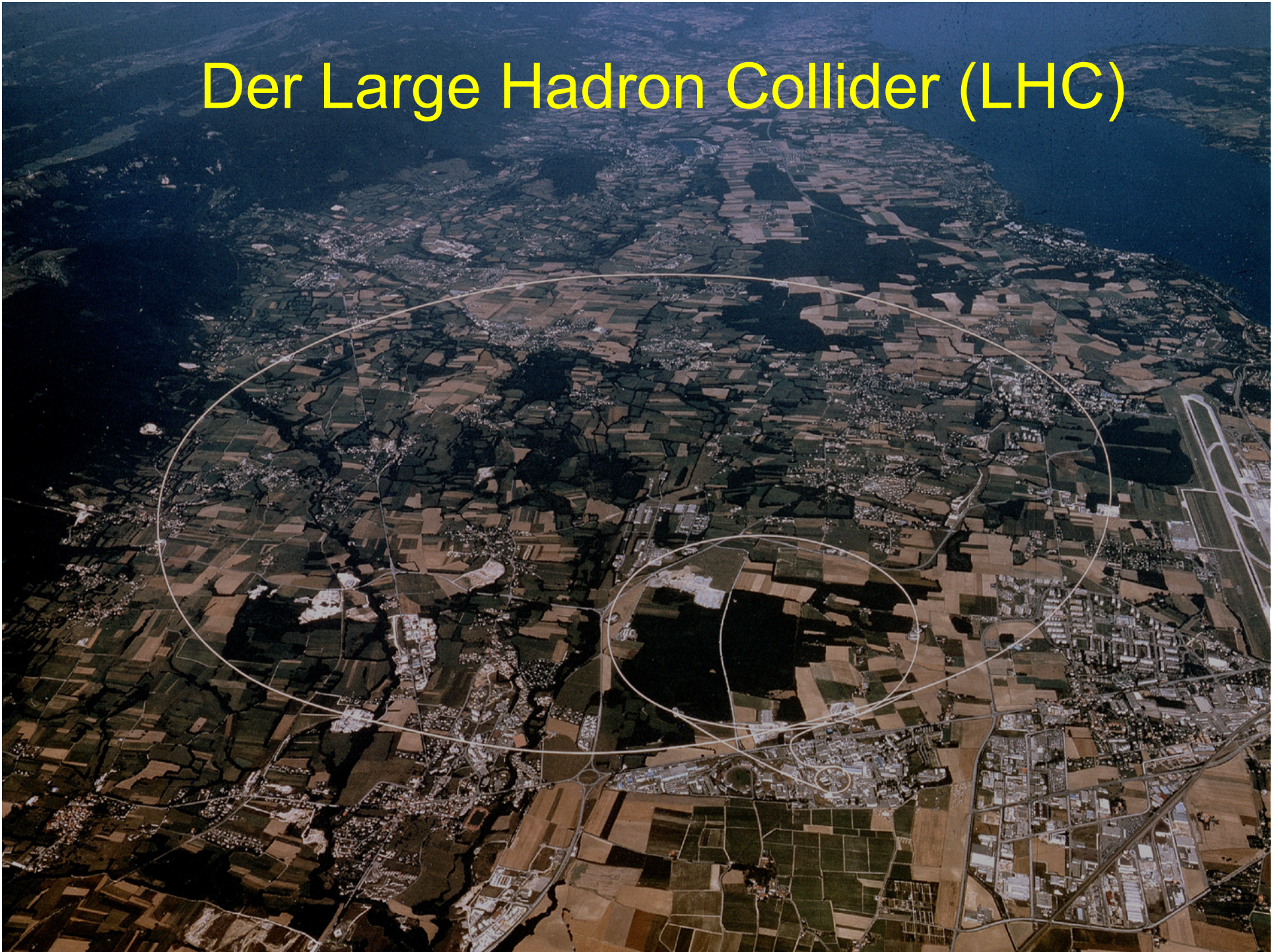


CERN heute

- 21 Mitgliedsländer
- 2500 festangestellte Mitarbeiter
- Weltgrößte Forschungszentrum für physikalische Grundlagenforschung
Etat: ~1.000 MSF
- Weltweit leistungsfähigstes System von Teilchenbeschleunigern
- Forschungs- und Entwicklungszentrum für neue Technologien
- Ein bedeutendes Ausbildungszentrum



Der Large Hadron Collider (LHC)



Ein Blick in den Beschleunigertunnel des LHC



Inbetriebnahme 2008 / 2009
nach ~15 Jahren Entwicklungs- und Bauzeit

Der Large Hadron Collider (LHC)



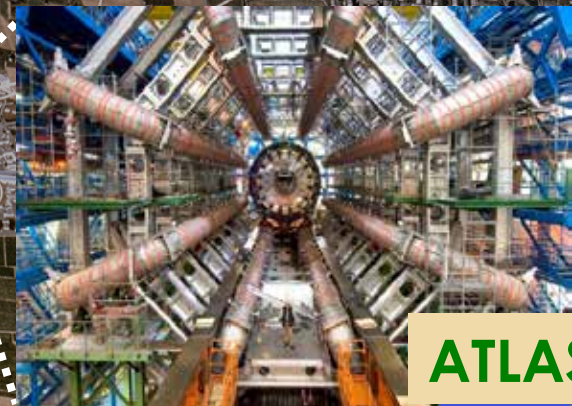
CMS



LHCb

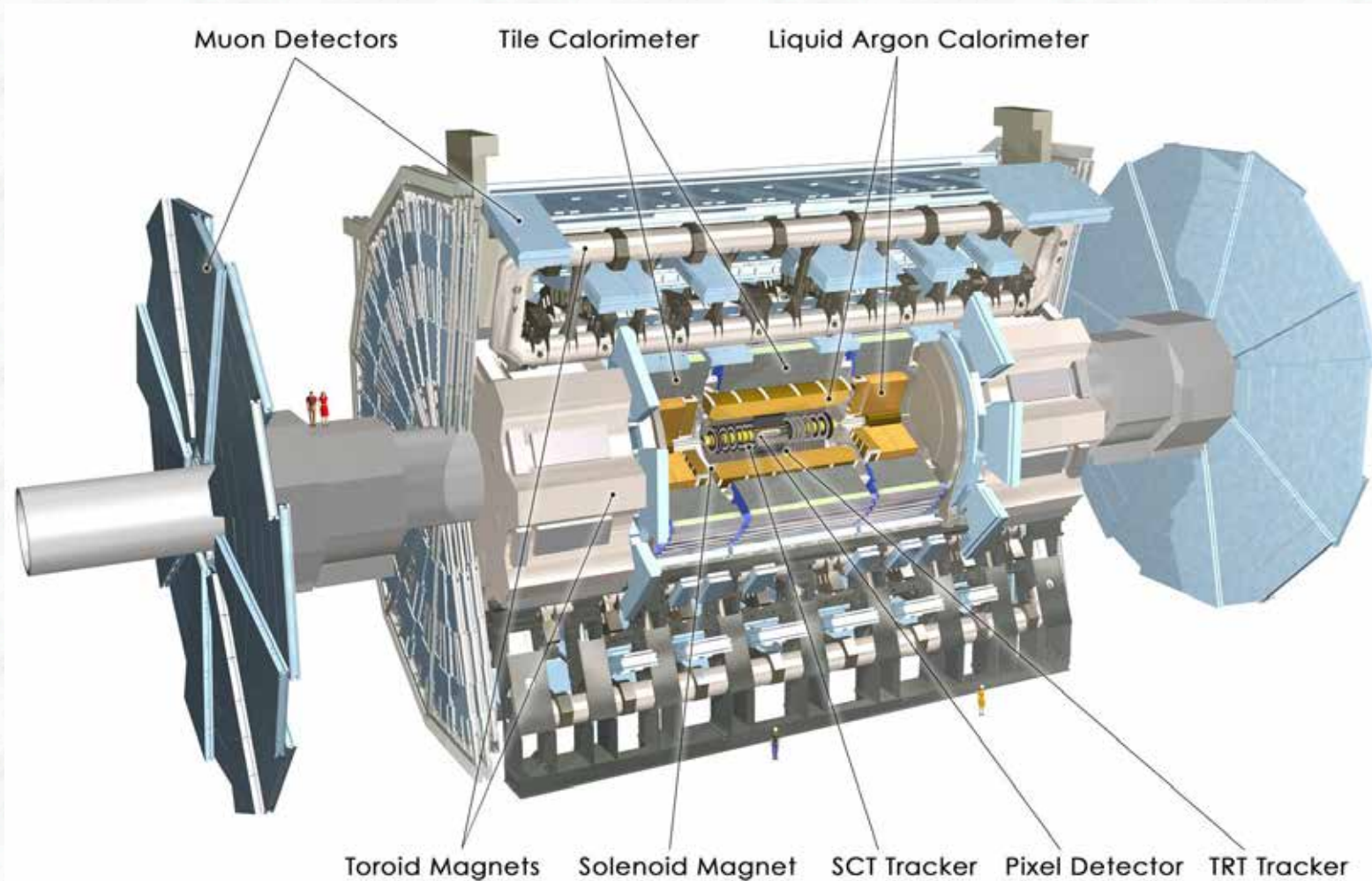


ALICE



ATLAS

Das ATLAS-Experiment



Durchmesser: 25 m
Gesamtlänge: 46 m
Gesamtgewicht: 7000 t

- ~200 Mio. Auslesekanäle, aufnahmebereit alle 25 ns
- 40 Mio. Ereignisse pro Sekunde
- 400 Ereignisse pro Sekunde selektiert → Speichermedien