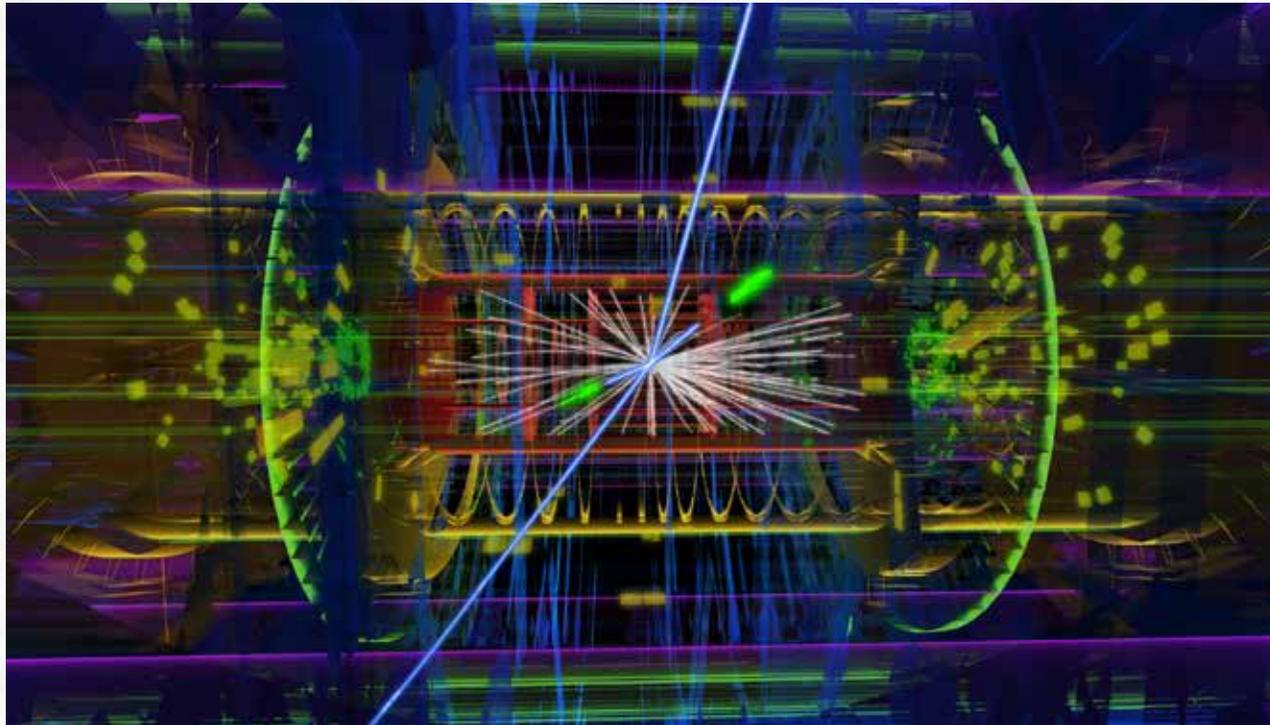


# *Die Entdeckung des Higgs-Teilchens am CERN*



Prof. Karl Jakobs  
Physikalisches Institut  
Universität Freiburg

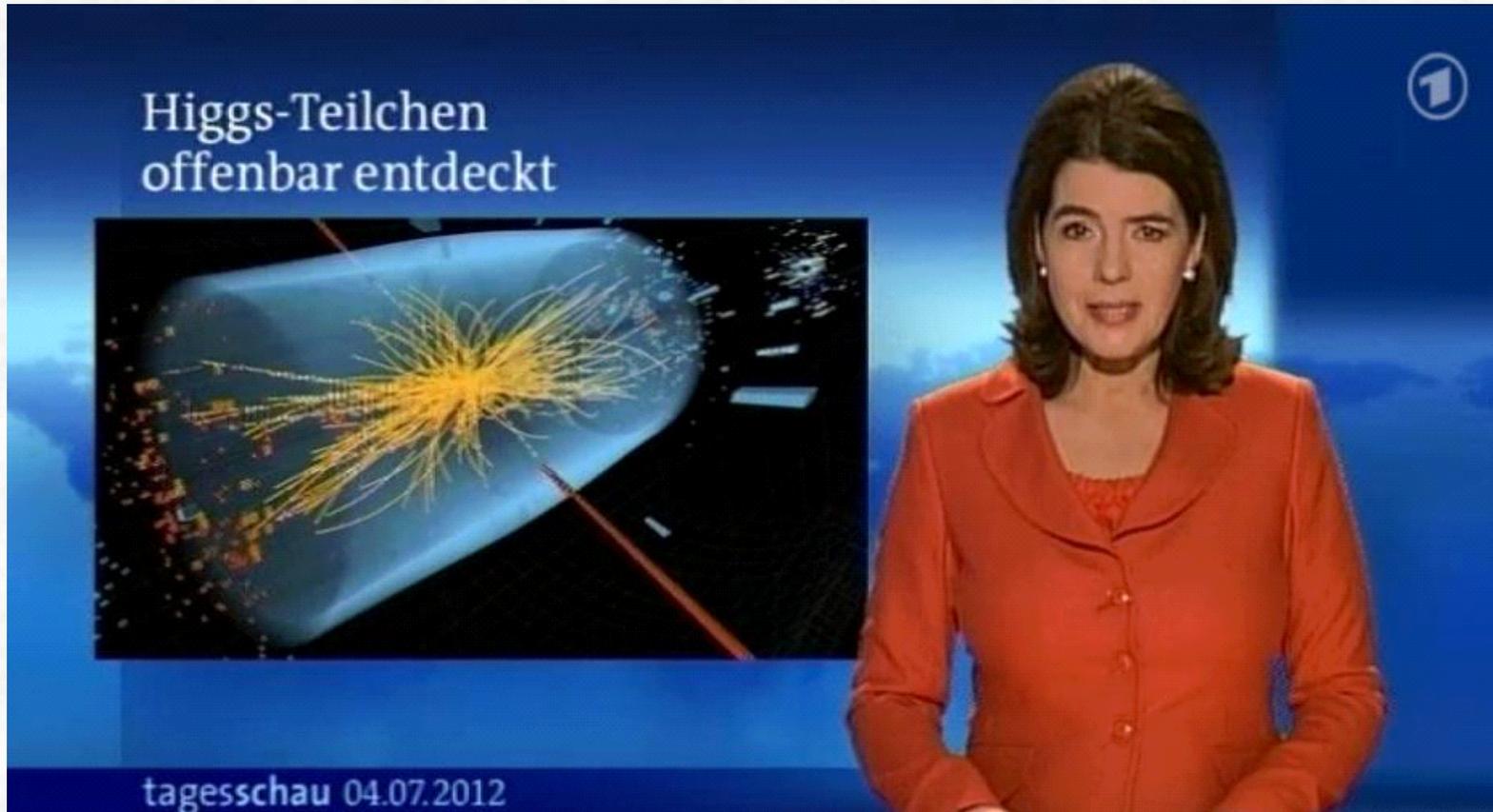
# ***Die Entdeckung des Higgs-Teilchens am CERN***

- Teilchenphysik und die Rolle des Higgs-Teilchens
- CERN und das LHC-Projekt
- Die Entdeckung des Higgs-Teilchens
- Wie geht es weiter am LHC?



Prof. Karl Jakobs  
Physikalisches Institut  
Universität Freiburg

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

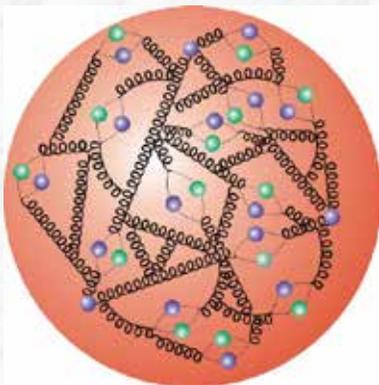
*“ ... for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of sub-atomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN’s Large Hadron Collider.”*

# Motivation und Zielsetzung der Teilchenphysik



Einheitliche und umfassende  
Beschreibung der

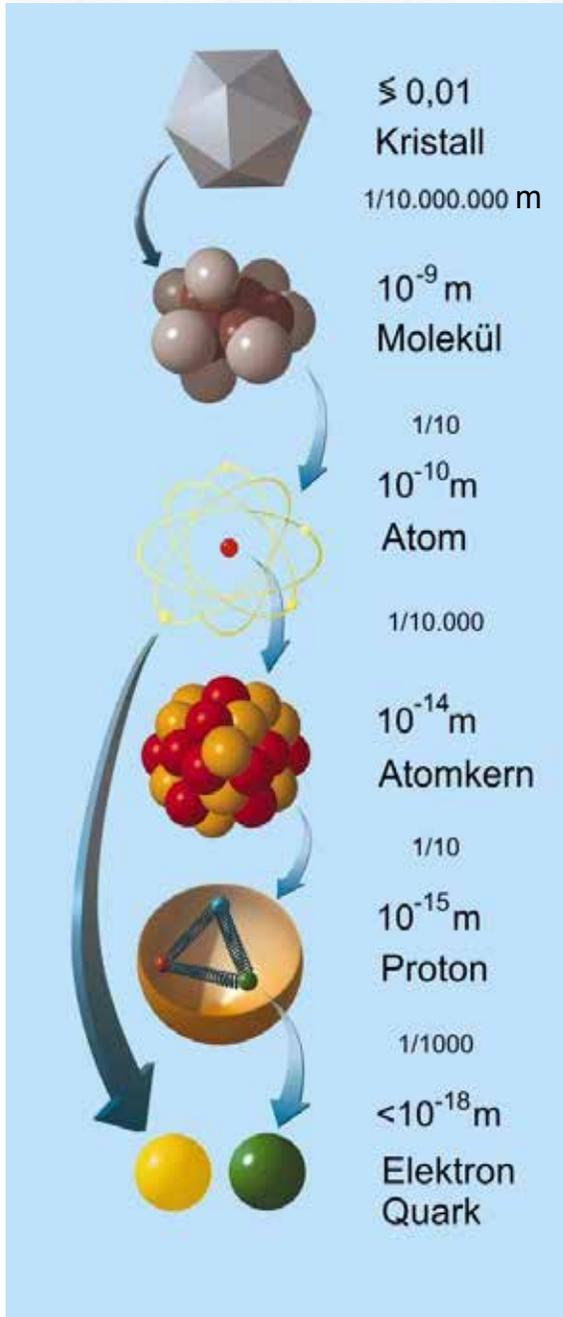
Materie und ihrer Wechselwirkungen



von kleinsten Abständen  
( $10^{-18}$  m)

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

# Erforschung der Materie



Auge, Mikroskop  
(Licht)

Elektronenmikroskop  
(Elektronen)

Teilchenbeschleuniger  
(Synchrotron-Strahlung)

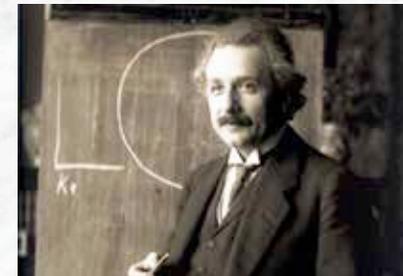
Teilchenbeschleuniger  
(Teilchen hoher Energie)

höhere Energie / Impuls

höhere Auflösung

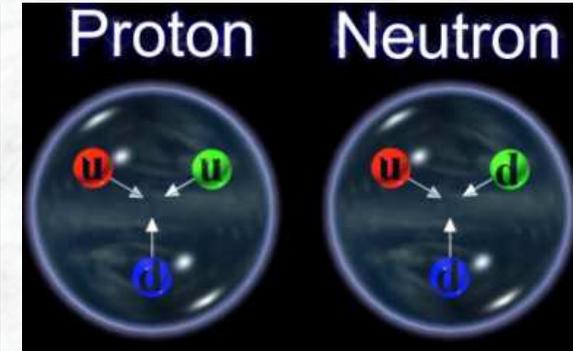
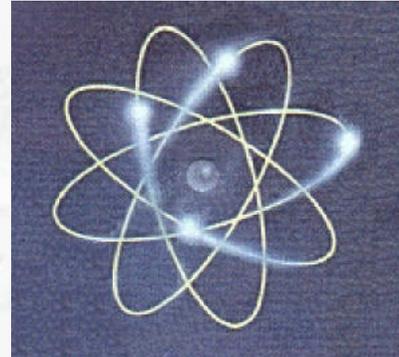
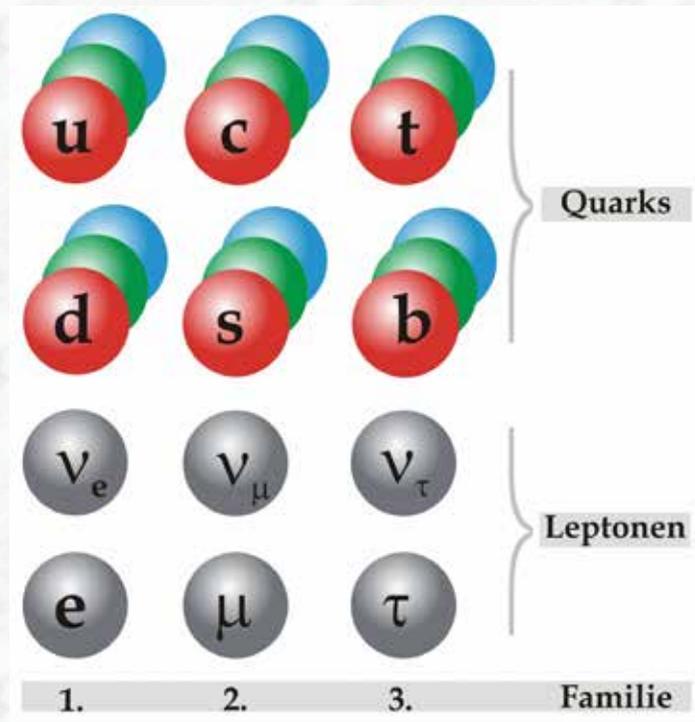


$$\Delta x \propto \frac{1}{p}$$



$$E = mc^2$$

# Die Bausteine der Materie: Quarks und Leptonen

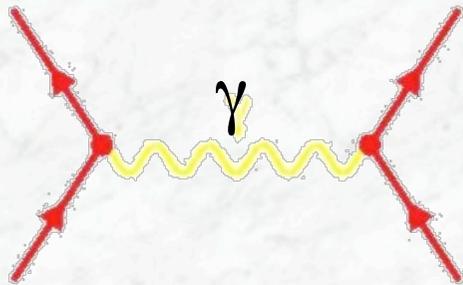


Materie, die uns umgibt: Bausteine der 1. Familie

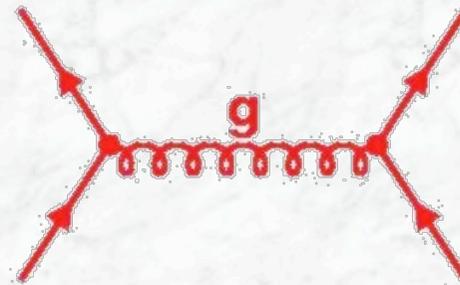
$m_p = 0.938 \text{ GeV} (\approx 1836 m_e)$   
(Konstituenten + Bindungsenergie)

- Quarks und Leptonen scheinen punktförmig zu sein, Ausdehnung  $< 10^{-18} \text{ m}$  (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    $m_t \approx 340\,000 m_e \approx m_{\text{Gold-Atom}}$

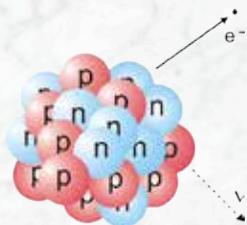
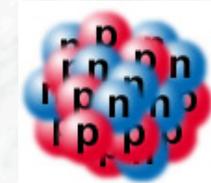
# Die fundamentalen Kräfte



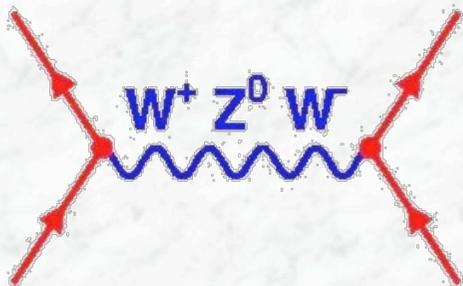
elektromagnetische Kraft



starke Kraft



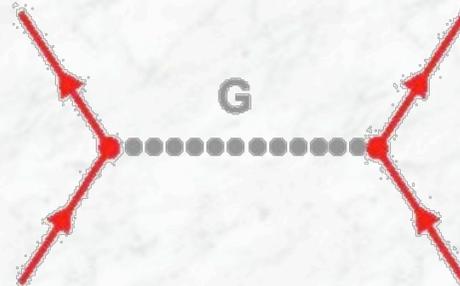
$\beta$ -Zerfall



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:

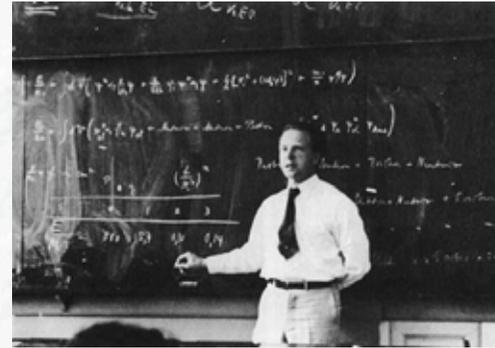
Photon ( $\gamma$ ), Gluonen ( $g$ ),  $W$ - und  $Z$ -Teilchen  
(Eigendrehimpuls ganzzahlig (Spin-1) = Bosonen)

**Problem:**

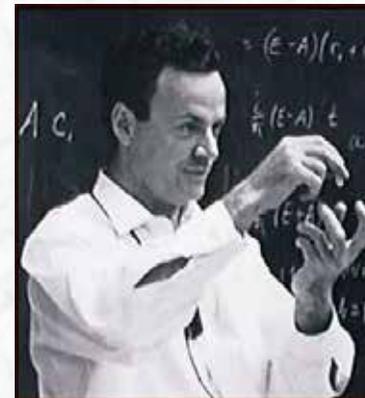
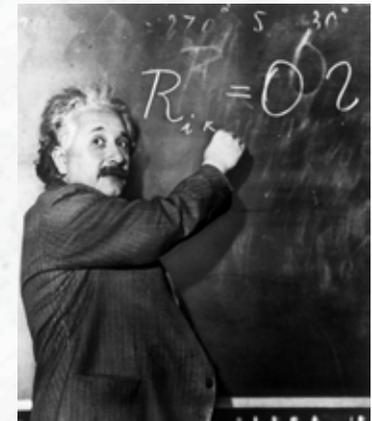
**Austauschteilchen müssen masselos sein !**

# Was lieben Physiker?

Quantentheorie



Relativitätstheorie



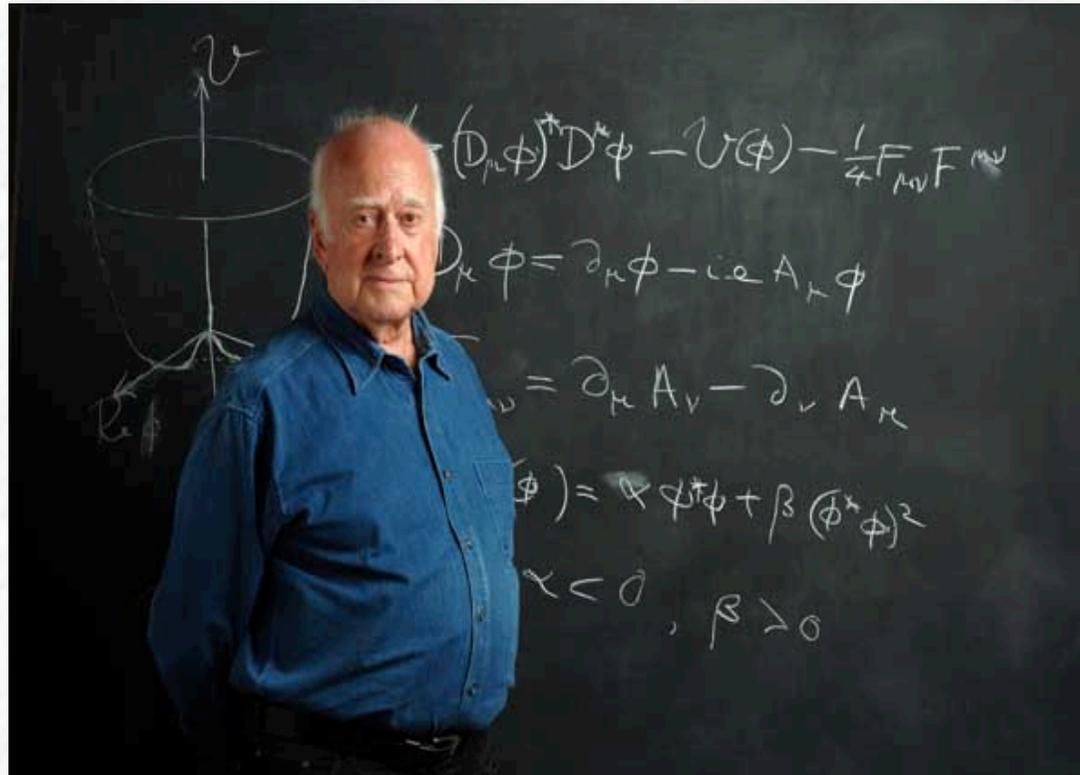
Vereinheitlichung



**Symmetrie**

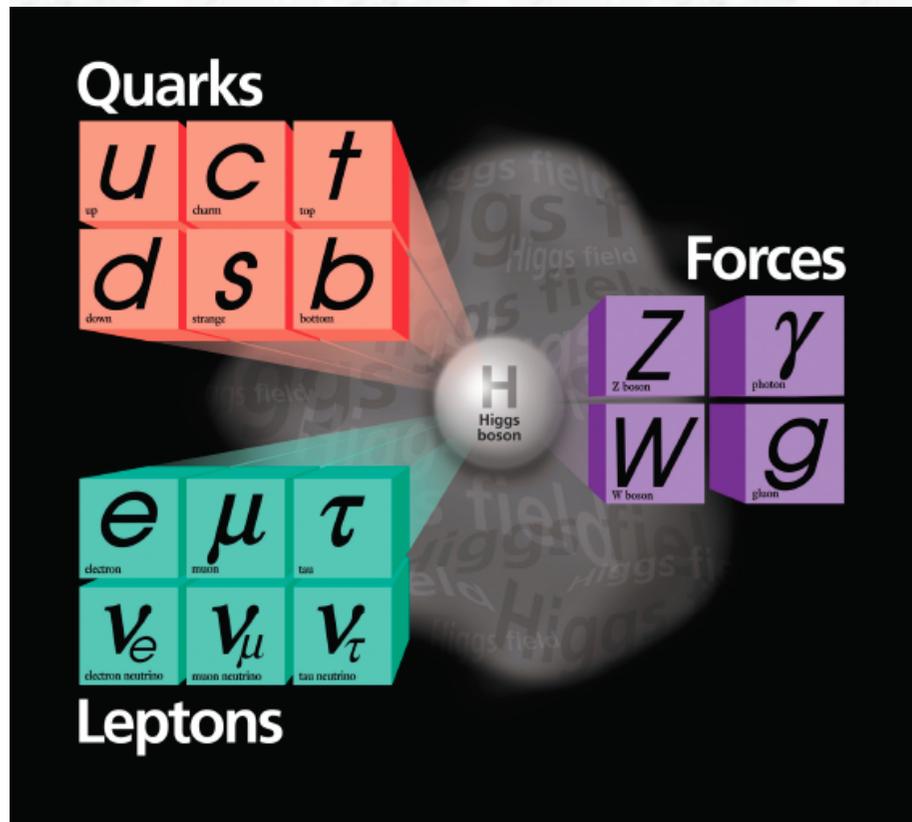


# Der Brout-Englert-Higgs Mechanismus

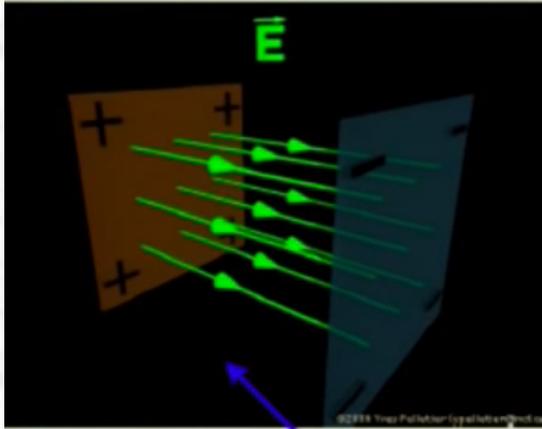


F. Englert and R. Brout. Phys. Rev. Lett. 13 (1964) 321;  
P.W. Higgs, Phys. Lett. 12 (1964) 132, Phys. Rev. Lett. 13 (1964) 508;  
G.S. Guralnik, C.R. Hagen, and T.W.B. Kibble. Phys. Rev. Lett. 13 (1964) 585.

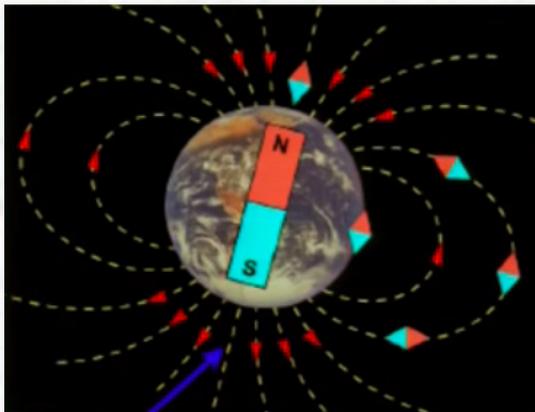
# Der Brout-Englert-Higgs-Mechanismus



- 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**



Higgs-Feld



Elektrische und  
magnetische Felder



Ein Teilchen im Higgs-Feld

# Prinzip der Massenerzeugung

## Leeres Vakuum

Alle Teilchen sind masselos und bewegen sich mit derselben Geschwindigkeit, der Lichtgeschwindigkeit.



## Higgs-Feld

Teilchen wechselwirken mit dem Higgs-Feld und bewegen sich langsamer. Sie erhalten effektiv eine Masse. Die Masse hängt von der Stärke der Wechselwirkung mit dem Higgs-Feld ab.



**Das Higgs-Teilchen:** Anregung des Higgs-Feldes



# Der Higgs Mechanismus, eine Analogie:

Prof. D. Miller  
UC London



Higgs-Hintergrundfeld  
erfüllt den Raum



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

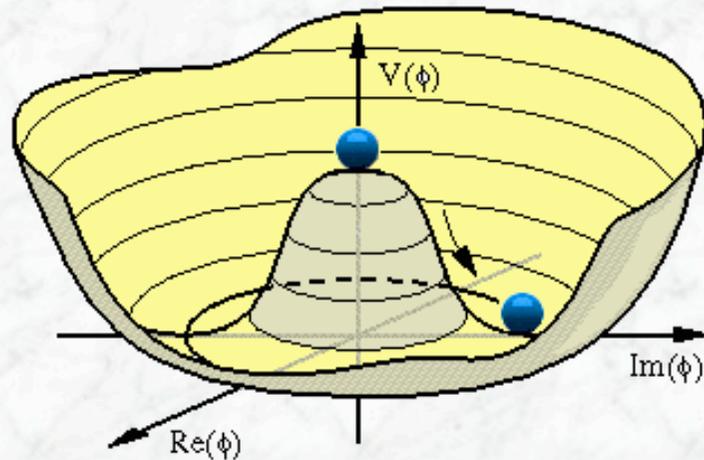


... Widerstand gegen  
Bewegung ...

**Trägheit** ↔ **Masse**

# Der Brout-Englert-Higgs Mechanismus

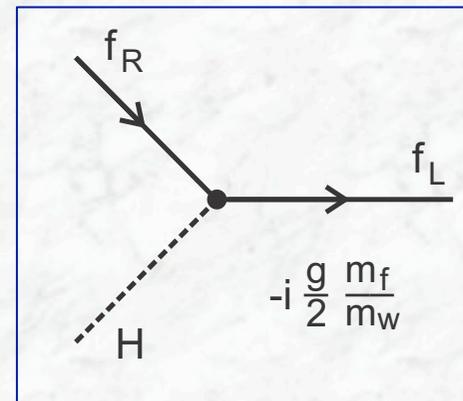
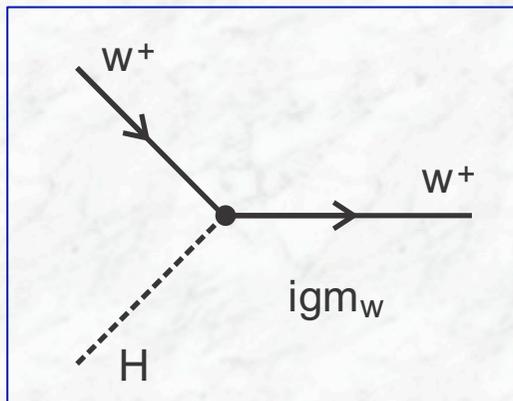
Für  
Experten



Komplexes skalares (Spin 0) Feld  $\phi$  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  $m_H < 1000 \text{ GeV}$

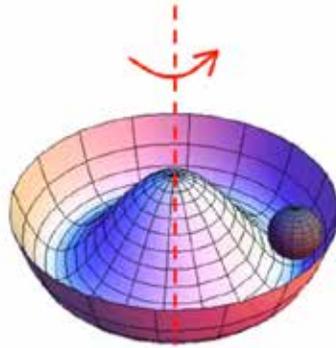
# Der Brout-Englert-Higgs Mechanismus

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F^{\mu\nu}F_{\mu\nu} - \frac{1}{4}B^{\mu\nu}B_{\mu\nu} - (D_\mu\phi)^\dagger D_\mu\phi - \frac{1}{2}\lambda(\phi^\dagger\phi - v^2)^2$$

$$+ i\bar{l}_L\gamma^\mu D_\mu l_L + i\bar{e}_R\gamma^\mu D_\mu e_R + i\bar{q}_L\gamma^\mu D_\mu q_L + i\bar{u}_R\gamma^\mu D_\mu u_R + i\bar{d}_R\gamma^\mu D_\mu d_R$$

$$- G_e\bar{l}_L\cdot\phi e_R - G_d\bar{q}_L\cdot\phi d_R - G_u\bar{q}_R\cdot\phi^c u_R + \text{h. c.}$$

The Higgs boson



A symmetry breaker



Nach Symmetriebrechung, Entwicklung um Grundzustand:

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2}\partial^\mu H\partial_\mu H - \frac{1}{2}m_H^2 H^2 - \frac{1}{2}v^{-1}m_H^2 H^3 - \frac{1}{8}v^{-2}m_H^2 H^4 - \frac{1}{4}F^{\mu\nu}F_{\mu\nu} - \frac{1}{4}Z^{\mu\nu}Z_{\mu\nu}$$

$$- (D^\mu W^\nu)^\dagger (D_\mu W_\nu) - (D^\mu W^\nu)^\dagger D_\nu W_\mu + iq(F^{\mu\nu} + \cot\theta_W Z^{\mu\nu})W_\mu W_\nu^\dagger$$

$$- \frac{q^2}{2\sin^2\theta_W}(W^\mu W_\mu^\dagger W^\nu W_\nu^\dagger - W^\mu W_\mu W^\nu W_\nu^\dagger) + (1 + v^{-1}H)^2(m_W^2 W^{\mu\dagger}W_\mu + \frac{1}{2}m_Z^2 Z^\mu Z_\mu)$$

$$+ \bar{e}(i\gamma^\mu\partial_\mu - (1 + v^{-1}H)m_e)e + \bar{\nu}(i\gamma^\mu\partial_\mu)v$$

$$+ \bar{u}(i\gamma^\mu\partial_\mu - (1 + v^{-1}H)m_u)u + \bar{d}(i\gamma^\mu\partial_\mu - (1 + v^{-1}H)m_d)d$$

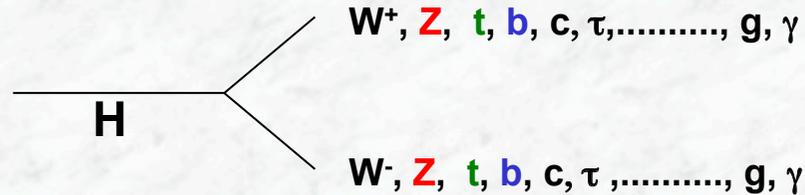
$$+ (-\bar{e}\gamma^\mu e + \frac{2}{3}\bar{u}\gamma^\mu u - \frac{1}{3}\bar{d}\gamma^\mu d)(qA_\mu - g\sin\theta_W \tan\theta_W Z_\mu)$$

$$+ \frac{g}{2\sqrt{2}}(\bar{\nu}\gamma^\mu(1 - \gamma^5)e + \bar{u}\gamma^\mu(1 - \gamma^5)d)W_\mu + \frac{g}{2\sqrt{2}}(\bar{e}\gamma^\mu(1 - \gamma^5)v + \bar{d}\gamma^\mu(1 - \gamma^5)u)W_\mu^\dagger$$

$$+ \frac{g}{4\cos\theta_W}(\bar{\nu}\gamma^\mu(1 - \gamma^5)v - \bar{e}\gamma^\mu(1 - \gamma^5)e + \bar{u}\gamma^\mu(1 - \gamma^5)u - \bar{d}\gamma^\mu(1 - \gamma^5)d)Z_\mu$$

# Zerfälle des Higgs-Teilchens

Zerfallsraten in die verschiedenen Teilchen können berechnet werden:



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

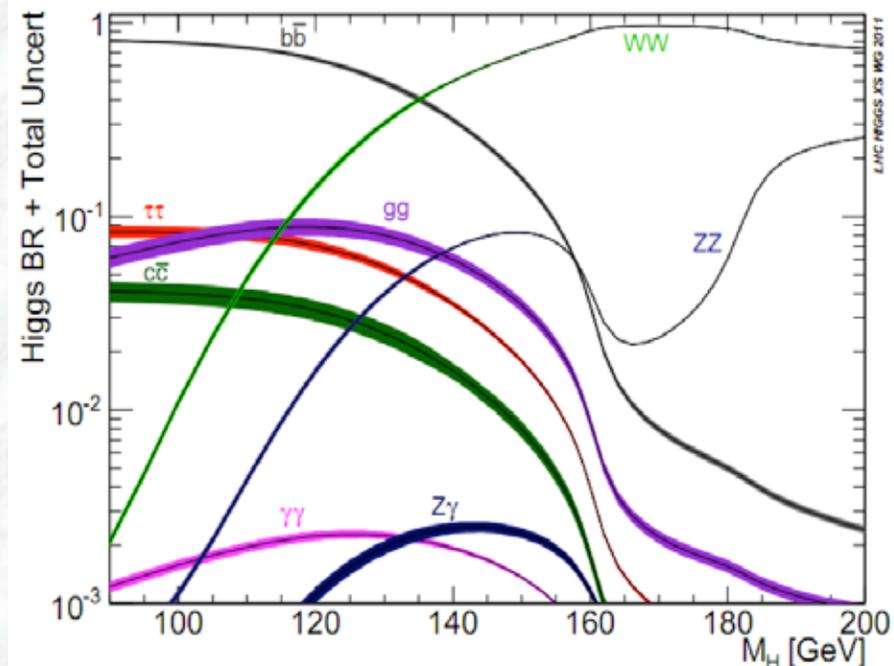
$$\Gamma(H \rightarrow f\bar{f}) = N_c \frac{G_F}{4\sqrt{2}\pi} m_f^2 (M_H^2) M_H$$

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

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

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

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



# CERN

Ein Musterbeispiel europäischer Kooperation



# Das Europäische Forschungszentrum für Elementarteilchenphysik CERN in Genf

- CERN entstand aus einer Vision weitsichtiger Wissenschaftler und Politiker im politischen Umfeld Nachkriegs-Europas
- Zielsetzungen:
  - Schaffung einer leistungs- und konkurrenzfähigen Infrastruktur für die zivile, naturwissenschaftliche Grundlagenforschung in Europa
  - Umkehr des "brain drain" der Vorkriegs- und Kriegsjahre von Europa in die USA
- 1952: Gründung des "Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire"
- Ab 1. Juli 1953: Unterzeichnung der CERN-Konvention durch die 12 Gründerstaaten:
  - Belgien, Dänemark, Deutschland, Frankreich, Griechenland, Großbritannien, Italien, Jugoslawien, Niederlande, Norwegen, Schweden, Schweiz
- Inkrafttreten der Konvention am 29. September 1954: Gründung der "Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire"
  - Erste Internationale Organisation nach dem 2. Weltkrieg mit Beteiligung Deutschlands

For the German Federal Republic

Pour



K. Adenauer  
subject to ratification

For the Kingdom of Norway

Pour le Royaume de Norvège

Subject to ratification  
5/12/53.  
E. M. M. M.

For the Kingdom of Belgium

Pour le Royaume de Belgique

J. H. H.  
sous réserve de ratification

For the Kingdom of the Netherlands

Pour le Royaume des Pays-Bas

H. W. W.  
subject to ratification

For the Kingdom of Denmark

Pour le Royaume de Danemark

B. O. O.  
sous réserve de ratification

For the United Kingdom of Great Britain  
and Northern Ireland

Pour le Royaume-Uni de la  
Grande-Bretagne et de  
l'Irlande du Nord

R. O. P.  
subject to ratification

23/12/53

For the French Republic

Pour la République Française

A. P. P.  
sous réserve de ratification  
A. P. P.

For the Kingdom of Sweden

Pour le Royaume de Suède

T. W. W.  
T. G. G.  
Subject to ratification

For the Kingdom of Greece

Pour le Royaume de Grèce

N. E. E.  
sous réserve de ratification

For the Confederation of Switzerland

Pour la Confédération Suisse

S. L. L.  
sous réserve de ratification

For Italy

Pour l'Italie

For the Federal People's Republic  
of Yugoslavia

Pour la République Fédérative  
Yougoslave de Yougoslavie

# CERN heute

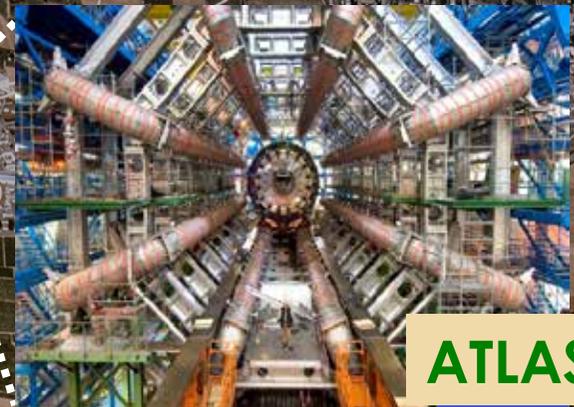
- 20 Mitgliedsländer
- 2500 festangestellte Mitarbeiter
- Weltgrößte Forschungszentrum für physikalische Grundlagenforschung  
Etat: ~1000 MSF
- Weltweit leistungsfähigstes System von Teilchenbeschleunigern
- Forschungs- und Entwicklungszentrum für neue Technologien
- Ein bedeutendes Ausbildungszentrum
- Global vernetztes wissenschaftliches Dienstleistungszentrum



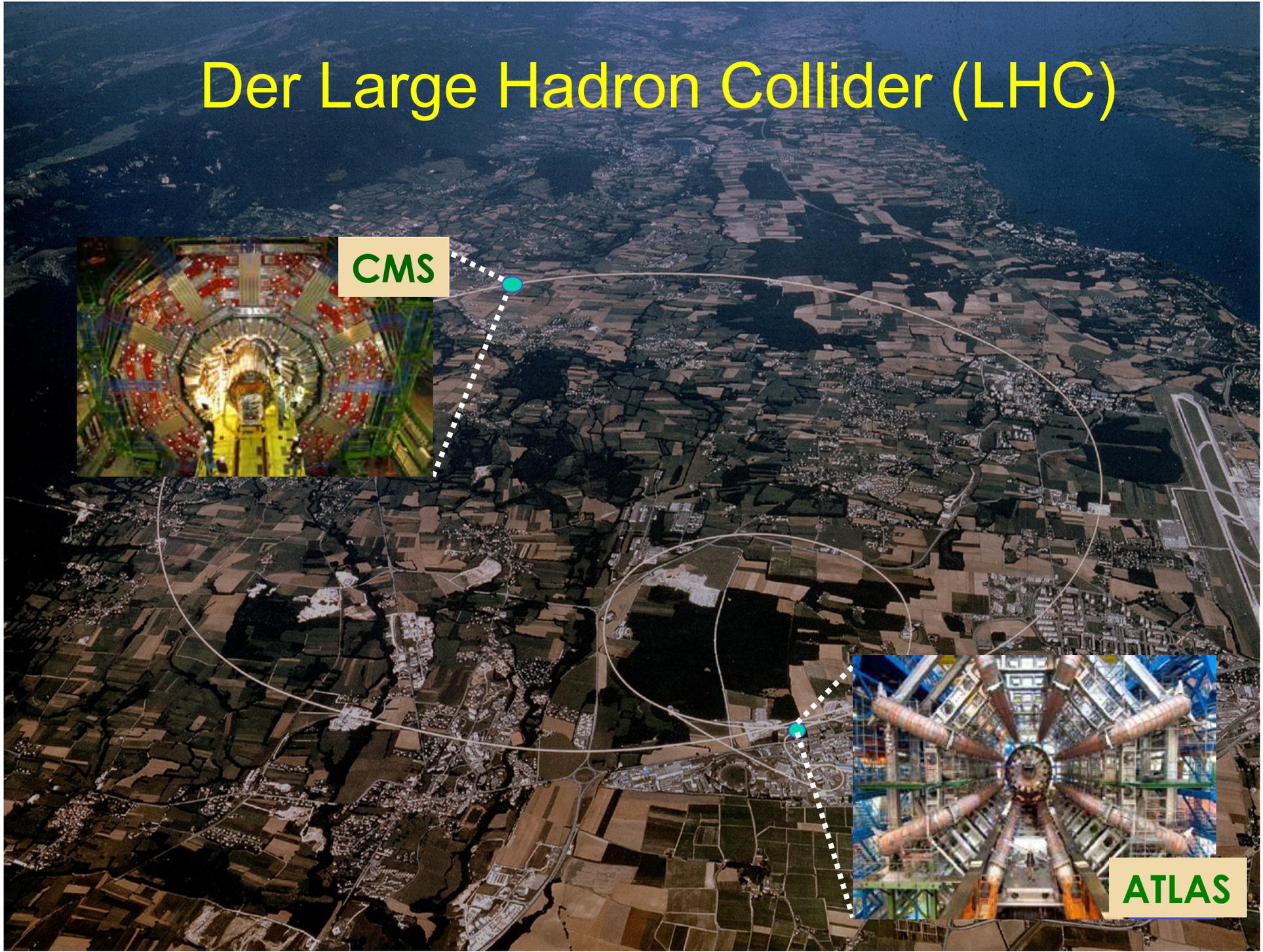
# Der Large Hadron Collider (LHC)



CMS



ATLAS

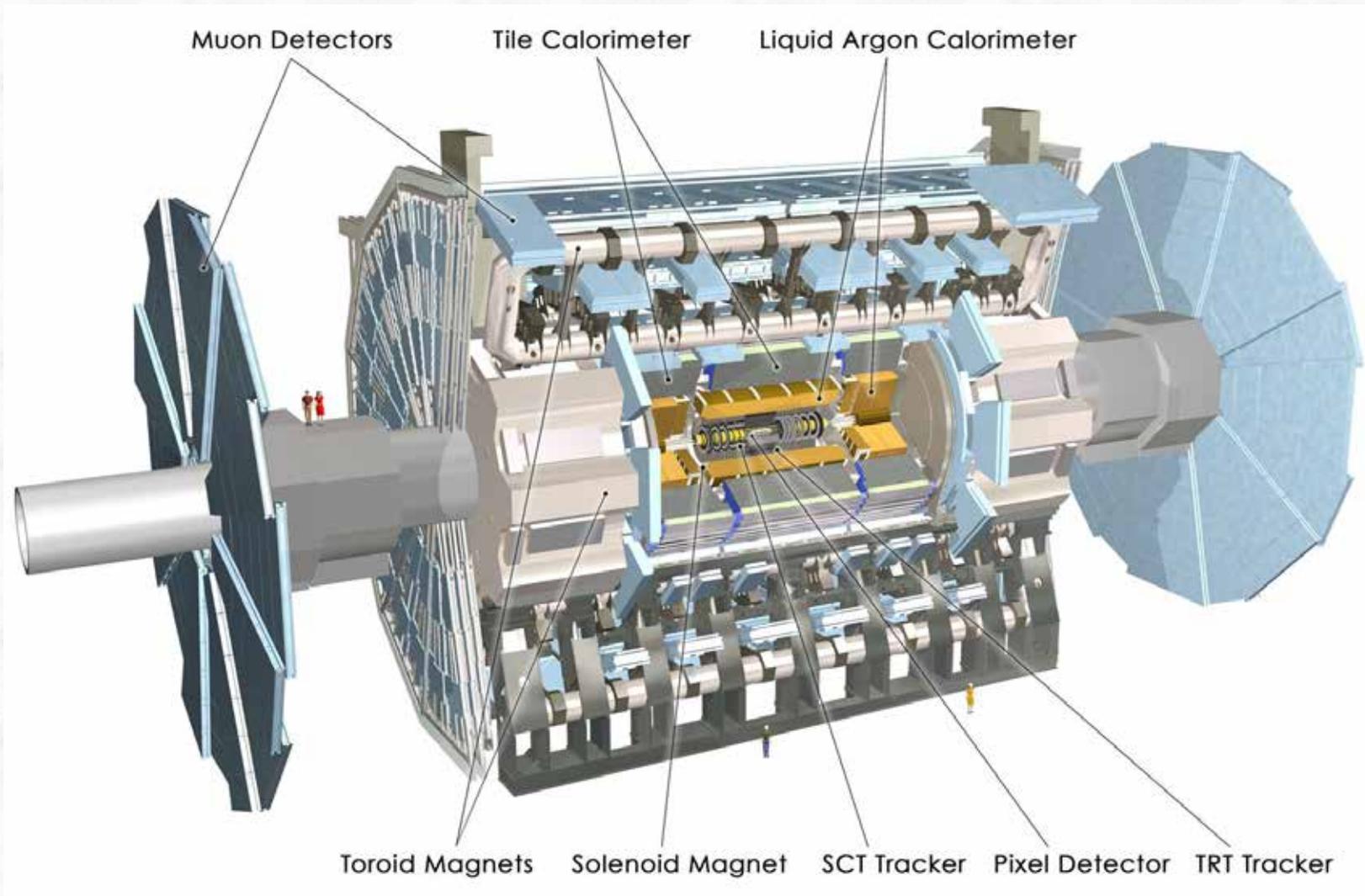


# Ein Blick in den Beschleunigertunnel des LHC



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

# Das ATLAS-Experiment



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

Etwa 200 Mio. Auslesekanäle,  
aufnahmebereit alle 25 ns  
(40 Mio. mal pro Sekunde)

## Der ATLAS Detektor im Vergleich ....

