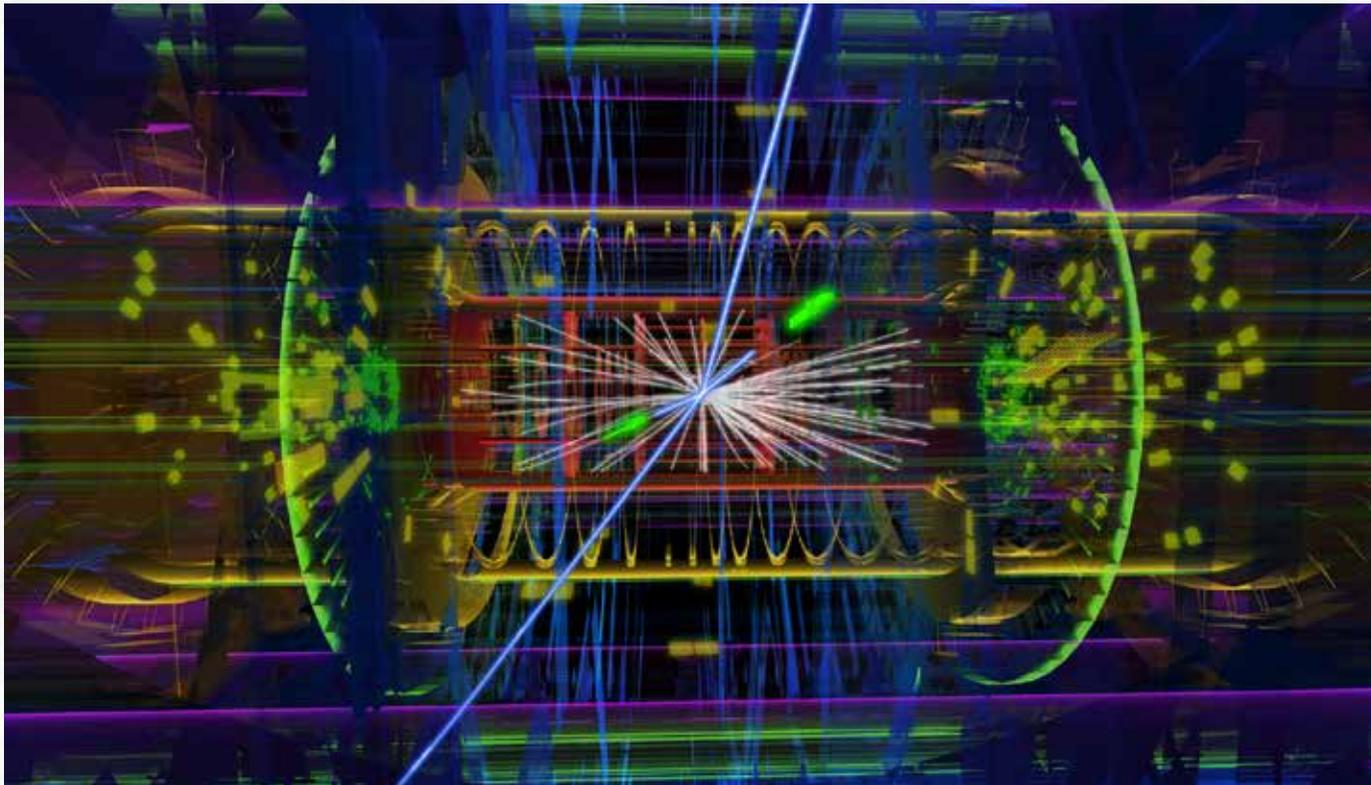
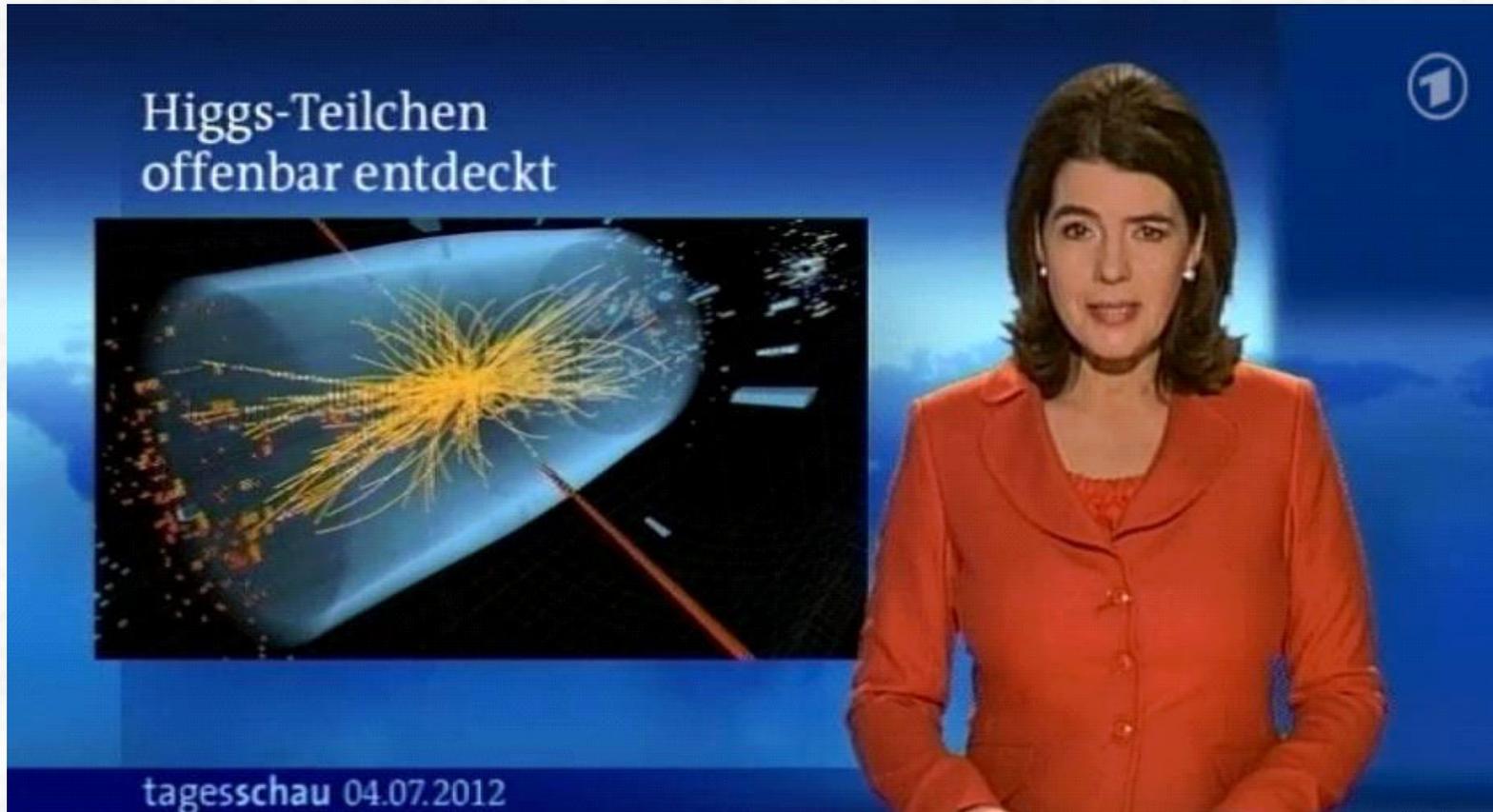


# *Die Entdeckung des Higgs-Teilchens am CERN*



Prof. Karl Jakobs  
Physikalisches Institut  
Universität Freiburg

4. Juli 2012





From the editorial:

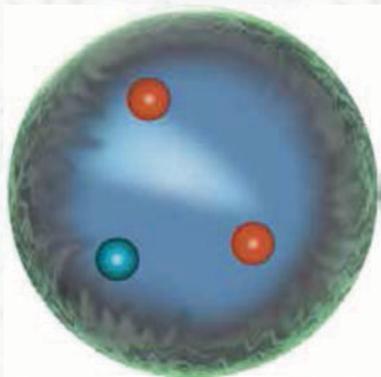
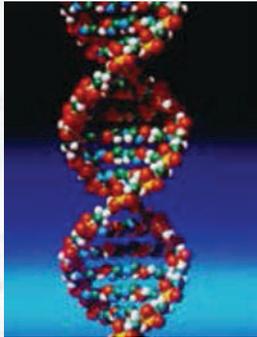
*“The top Breakthrough of the Year – the discovery of the Higgs boson – was an unusually easy choice, representing both a triumph of the human intellect and the culmination of decades of work by many thousands of physicists and engineers.”*



## 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.”*

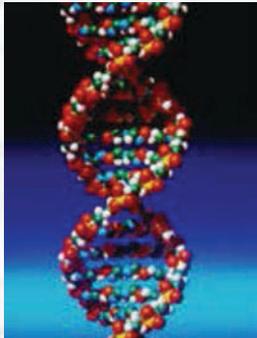
# Motivation und Zielsetzung der Teilchenphysik



Beschreibung der Materie und der  
wirkenden Kräfte  
(Wechselwirkungen)

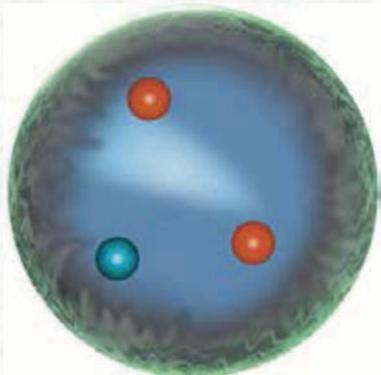


# Motivation und Zielsetzung der Teilchenphysik



Beschreibung der Materie  
und der wirkenden Kräfte  
(Wechselwirkungen)

„Bausteine und Kräfte“

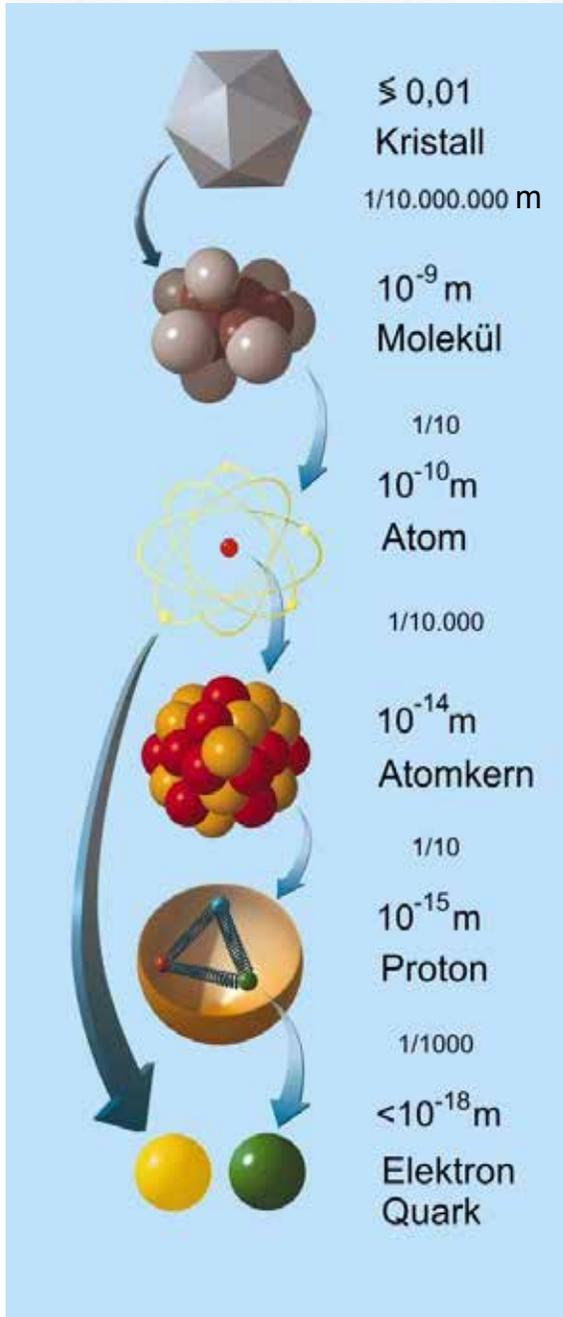


von kleinsten Abständen  
( $10^{-18}$  m)



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

# Erforschung der Materie



Auge, Mikroskop  
(Licht)

Elektronenmikroskop  
(Elektronen)

Teilchenbeschleuniger  
(Synchrotron-Strahlung)

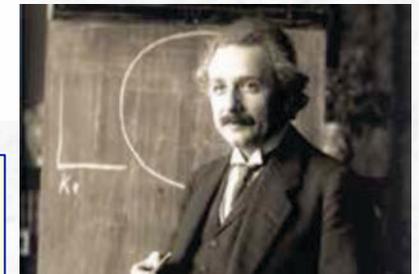
Teilchenbeschleuniger  
(Teilchen hoher Energie)

höhere Energie / Impuls

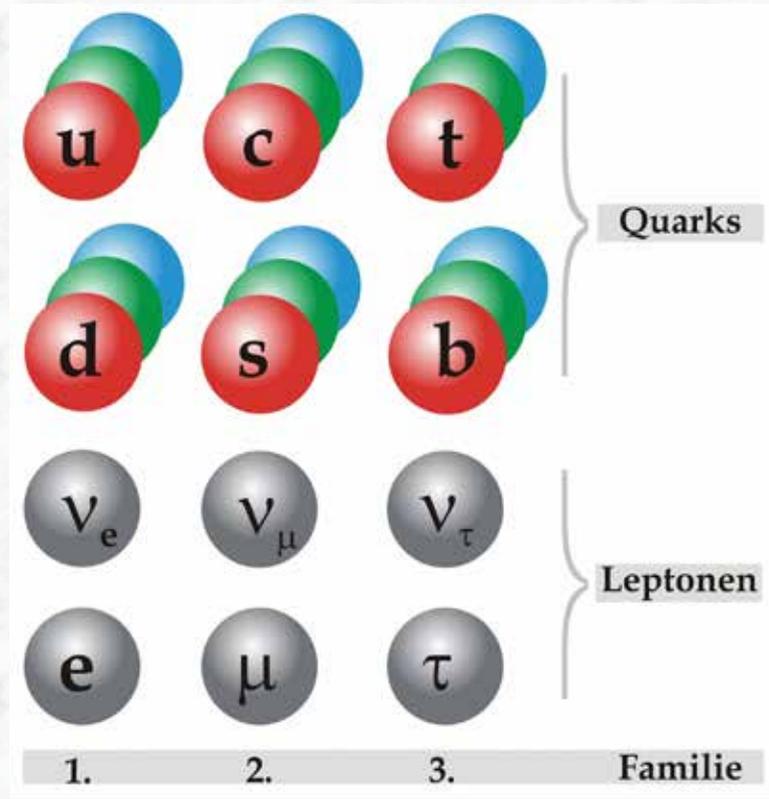
höhere Auflösung

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

$$E = mc^2$$



# Die Bausteine der Materie: Quarks und Leptonen



Massen:

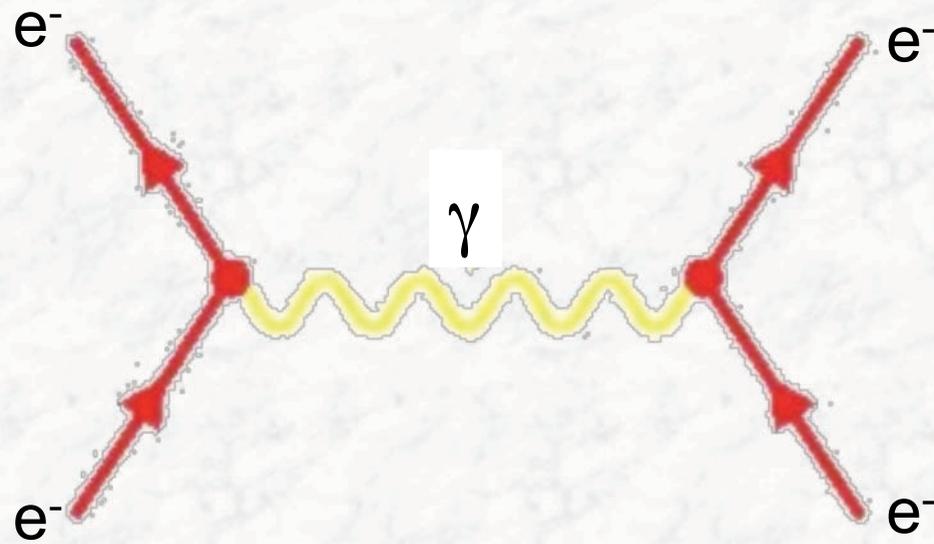
$$m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg} = 0,000511 \text{ GeV}/c^2$$

$$m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 0,938 \text{ GeV}/c^2$$

$$m_\mu \approx 200 m_e, \quad m_\tau \approx 3.500 m_e$$

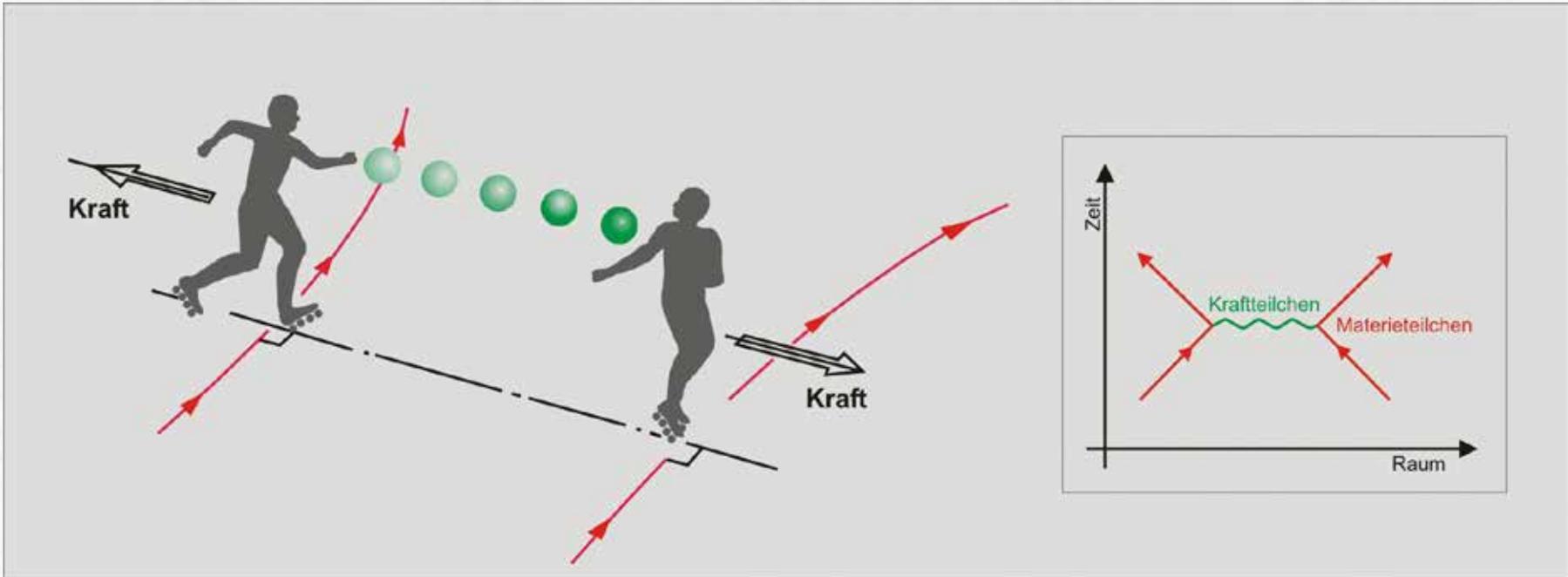
$$m_t \approx 340.000 m_e \approx m_{\text{Gold-Atom}}$$

- Elementare Bausteine: Quarks und Leptonen „punktförmig“ (Ausdehnung  $< 10^{-18} \text{ m}$ )
- Die Masse der Quarks und Leptonen steigt mit der Familienzahl an

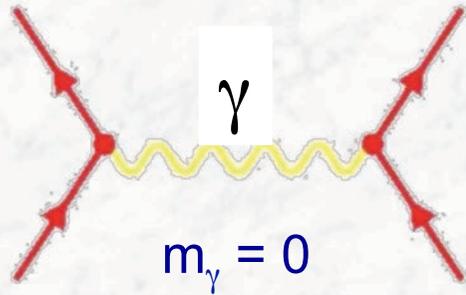


## Die elektromagnetische Kraft

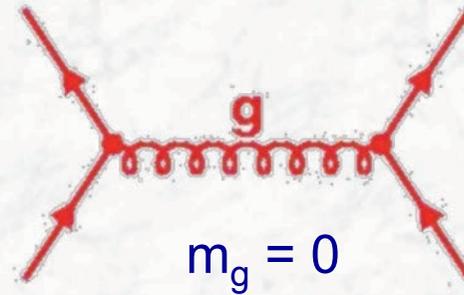
Masse:  $m_\gamma = 0$



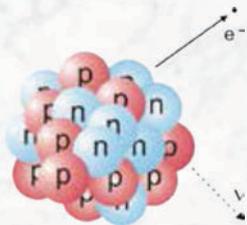
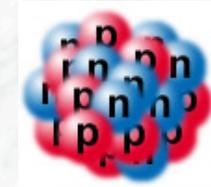
# Die fundamentalen Kräfte



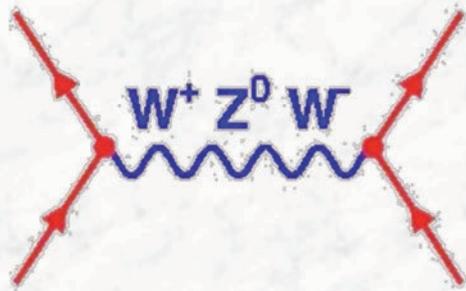
elektromagnetische Kraft



starke Kraft

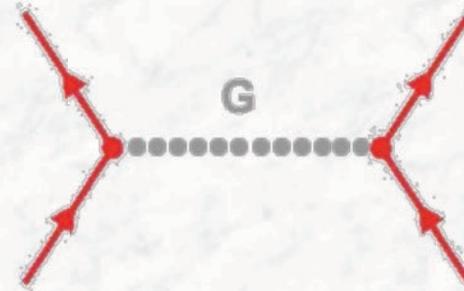


$\beta$ -Zerfall

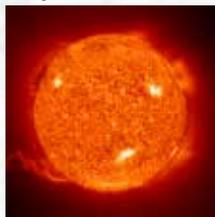


schwache Kraft

$$m_W \approx 80.4 \text{ GeV}/c^2$$
$$m_Z \approx 91.2 \text{ GeV}/c^2$$



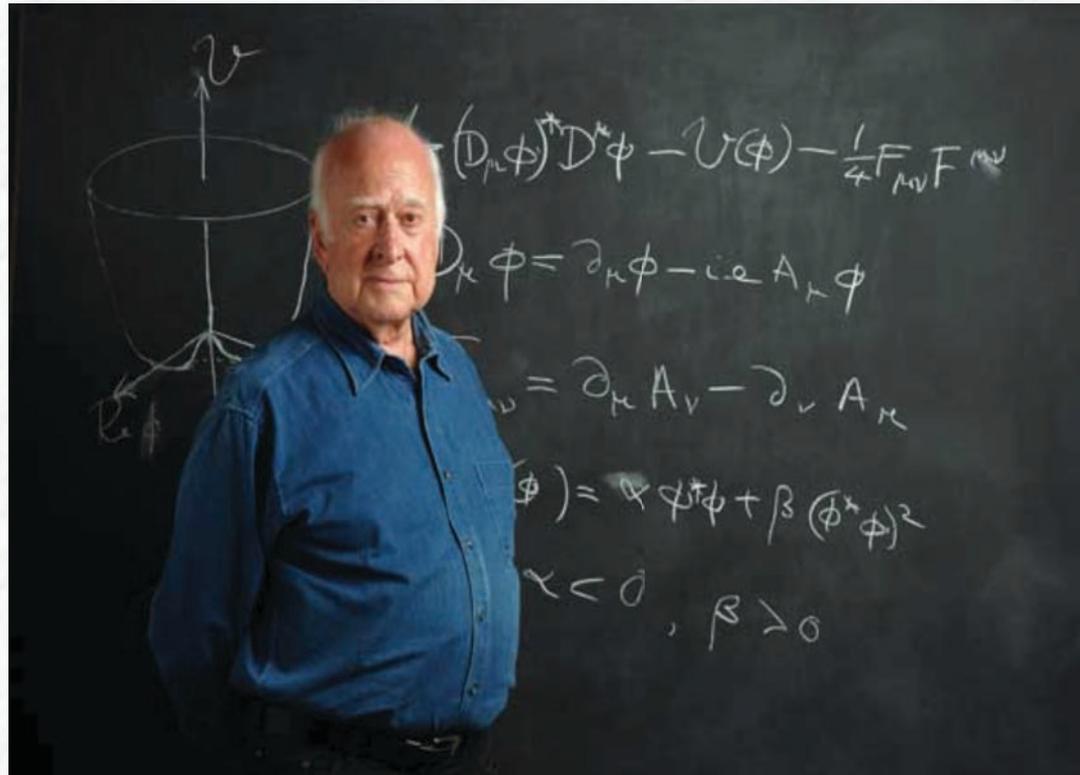
Gravitation



Theoretische Beschreibung: Quantenfeldtheorie  
Wechselwirkung durch Austausch von „Kraftteilchen“

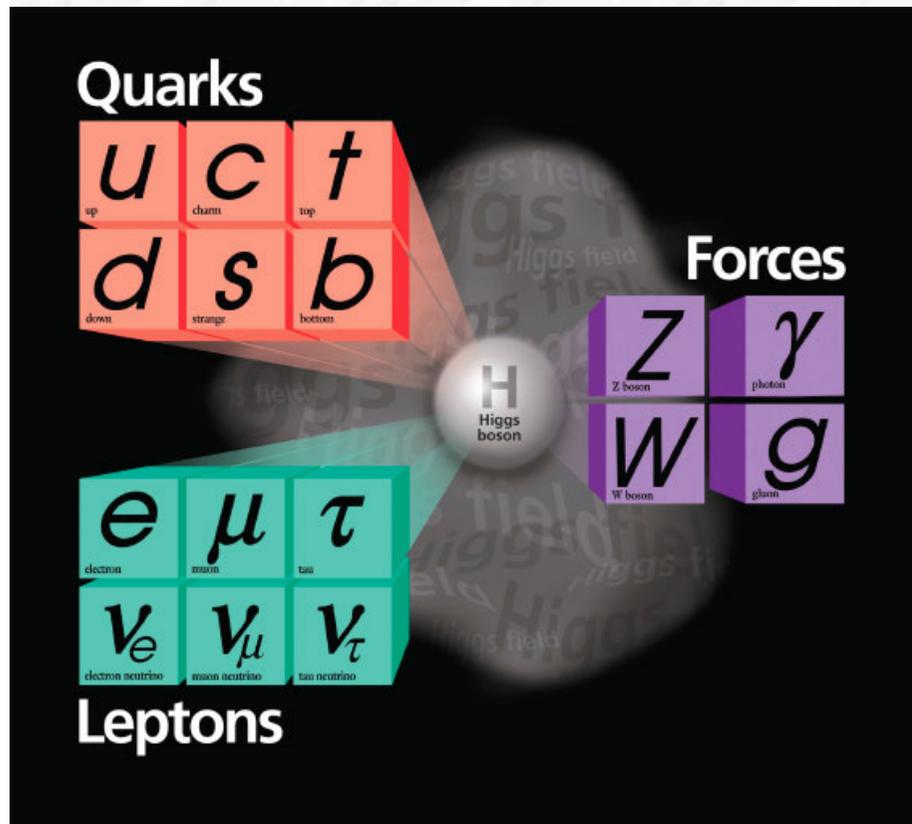
**Problem:** Austauschteilchen müssen masselos sein !

# 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

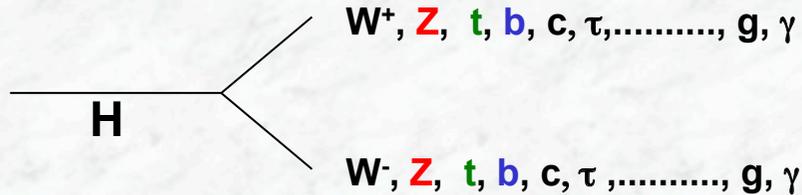


- Ein neues Feld (Higgs-Feld) wird postuliert, durchdringt das Vakuum
- Masse wird erzeugt durch Wechselwirkung der Teilchen mit diesem Feld
- Vorhersage: Neues Teilchen, das sog. **Higgs-Teilchen**

Seine Masse wird nicht vorhergesagt!

# Zerfälle des Higgs-Teilchens

Produktions- und Zerfallseigenschaften des Higgs-Teilchens sind bekannt, **sobald die Masse bekannt ist:**



Zerfallsraten hängen auch von der Masse der Zerfallsprodukte ab

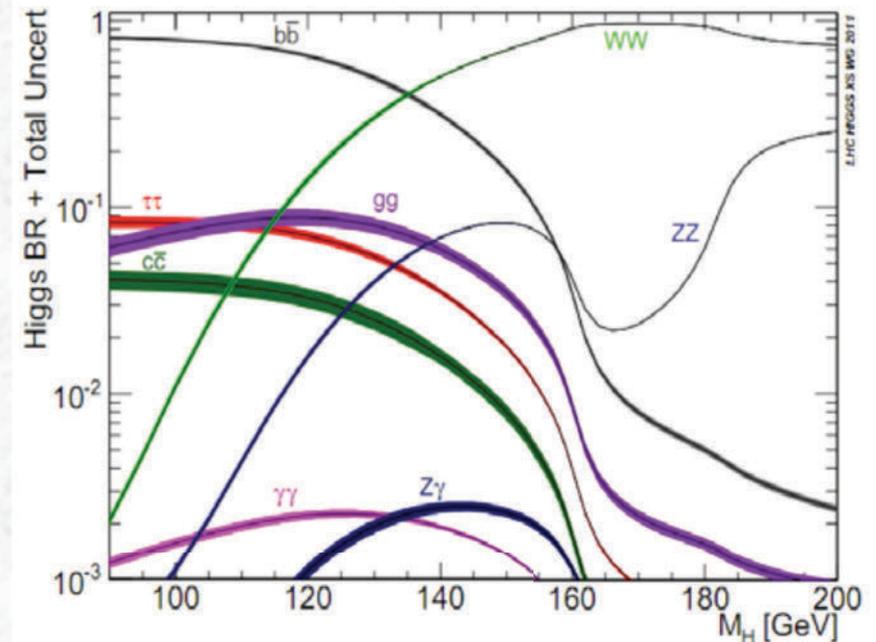
$$\Gamma(H \rightarrow f\bar{f}) = N_C \frac{G_F}{4\sqrt{2}\pi} m_f^2(M_H^2) M_H$$

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

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

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

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





# 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**

# 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"

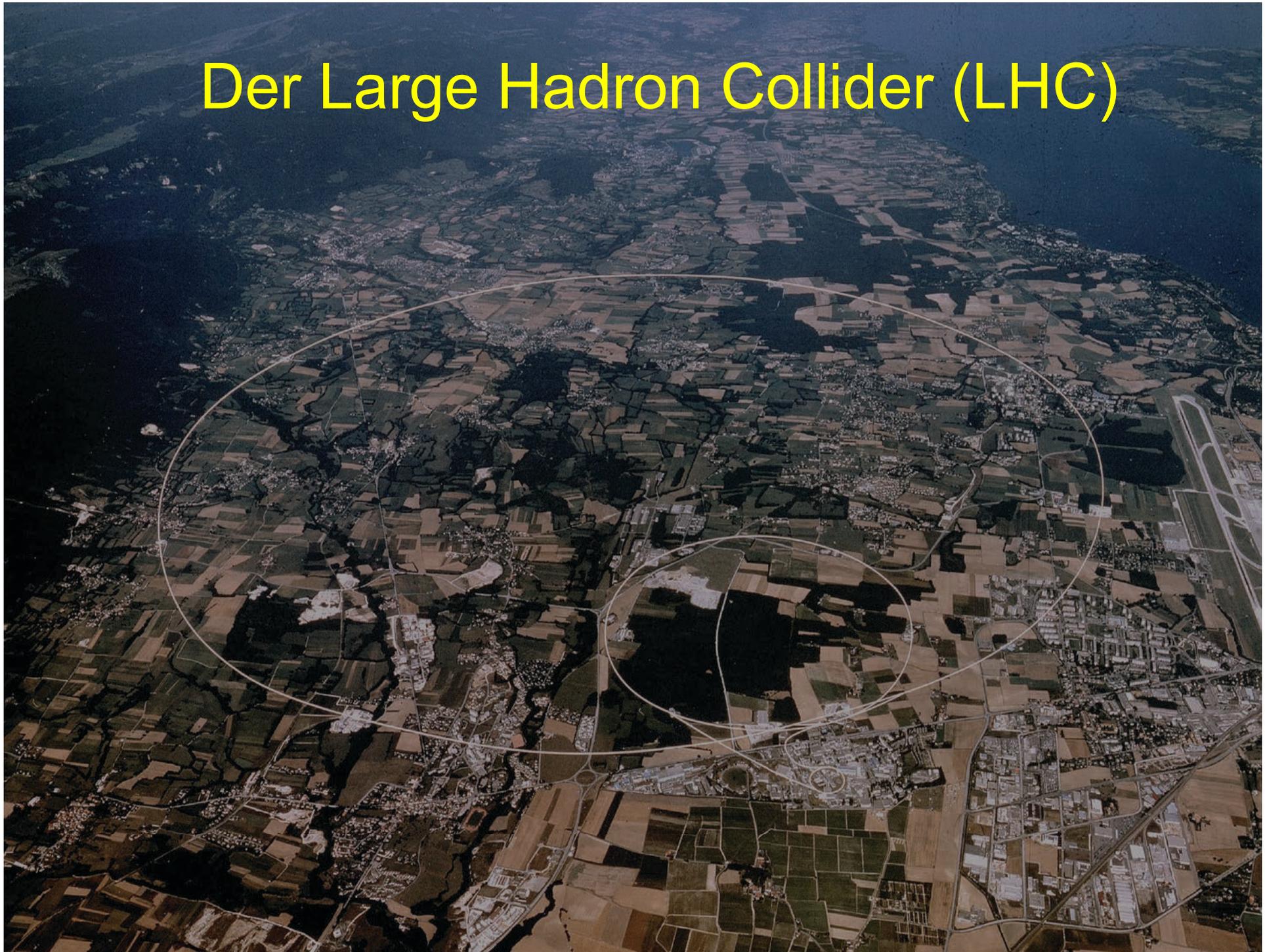


# CERN heute

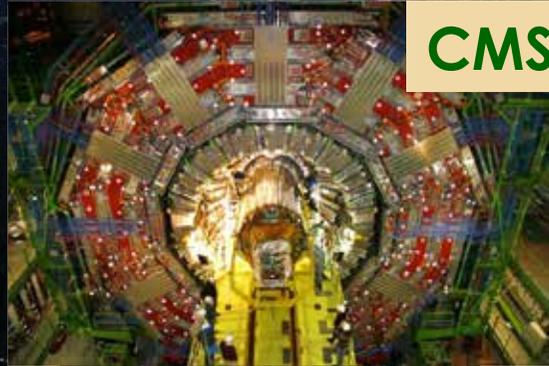
- 20 Mitgliedsländer
- 2500 festangestellte Mitarbeiter
- Weltgrößte Forschungszentrum für physikalische Grundlagenforschung  
Etat: ~1.000 MSF
- Weltweit leistungsfähigstes System von Teilchenbeschleunigern
- Forschungs- und Entwicklungszentrum für neue Technologien
- Ein bedeutendes Ausbildungszentrum



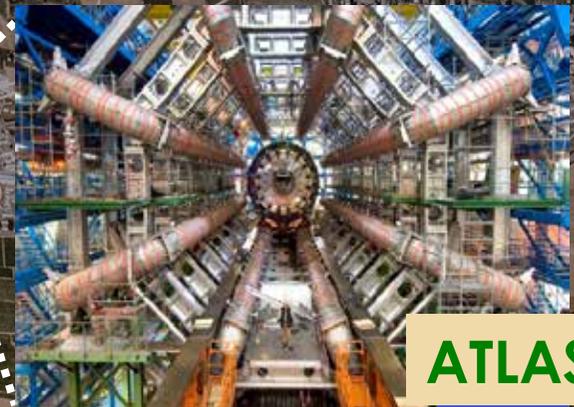
# Der Large Hadron Collider (LHC)



# Der Large Hadron Collider (LHC)



CMS



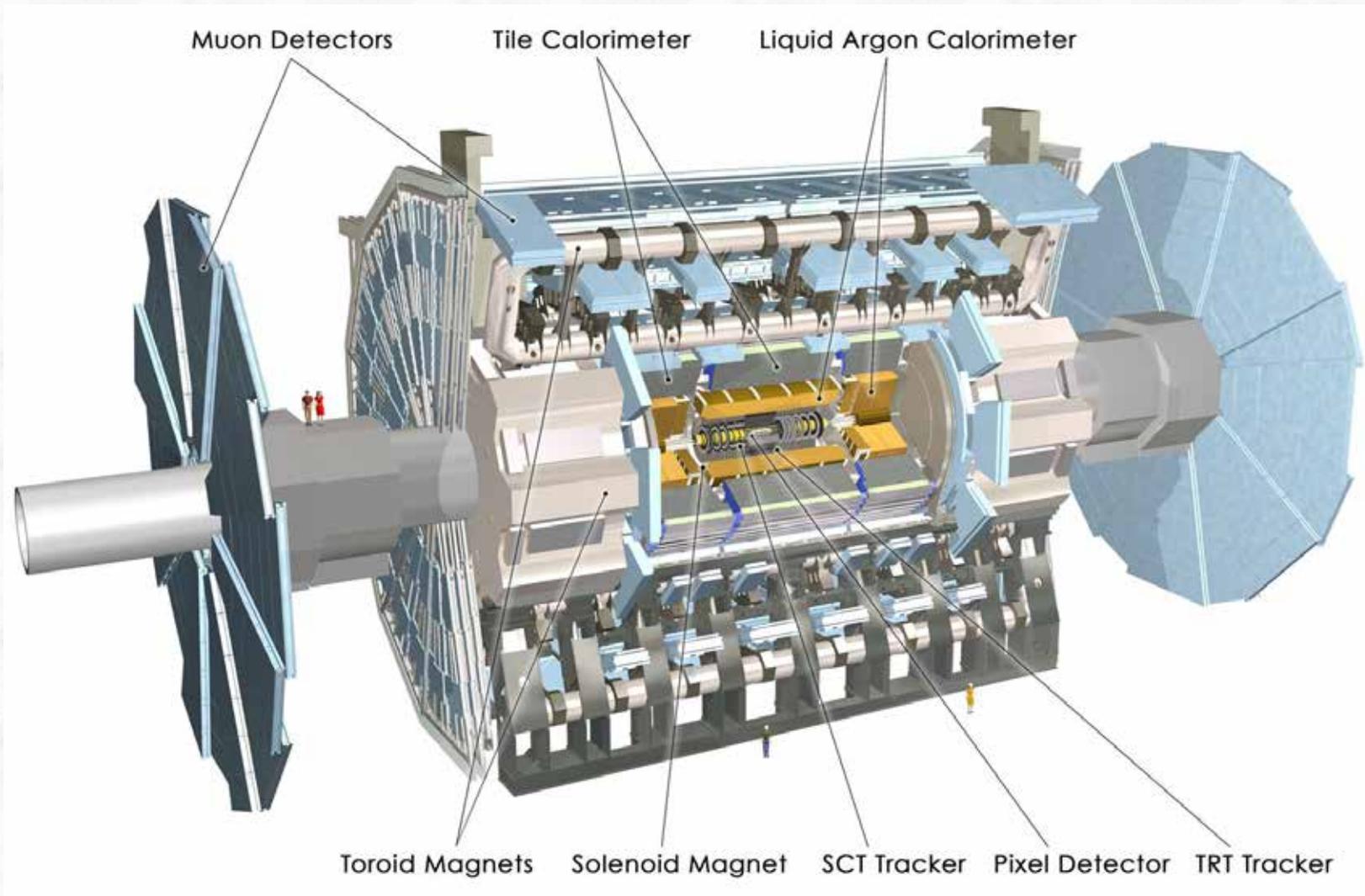
ATLAS

# Ein Blick in den Beschleunigertunnel



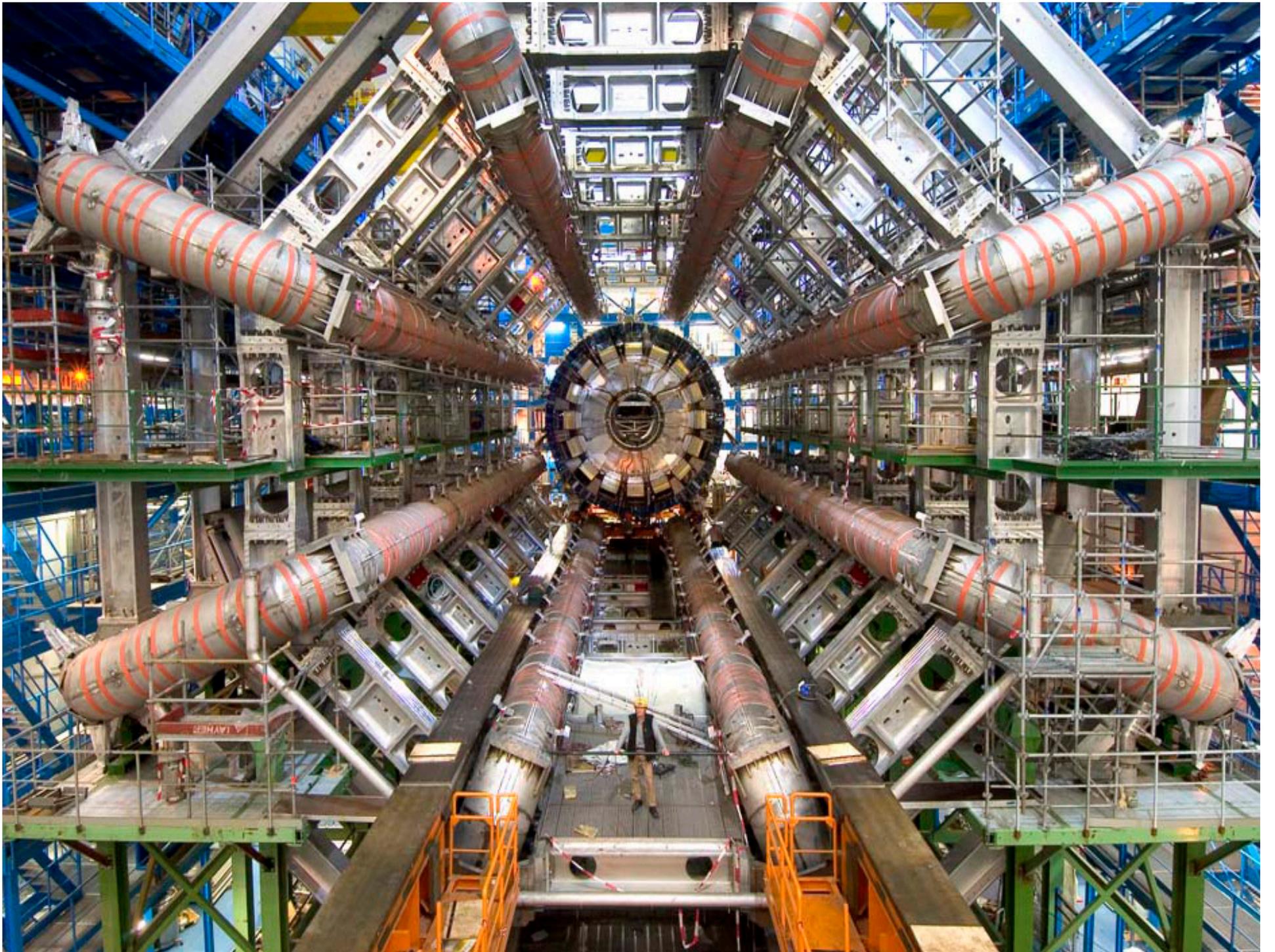
Inbetriebnahme 2008 / 2009  
nach ~15 Jahren Entwicklungs- und Bauzeit

# Das ATLAS-Experiment

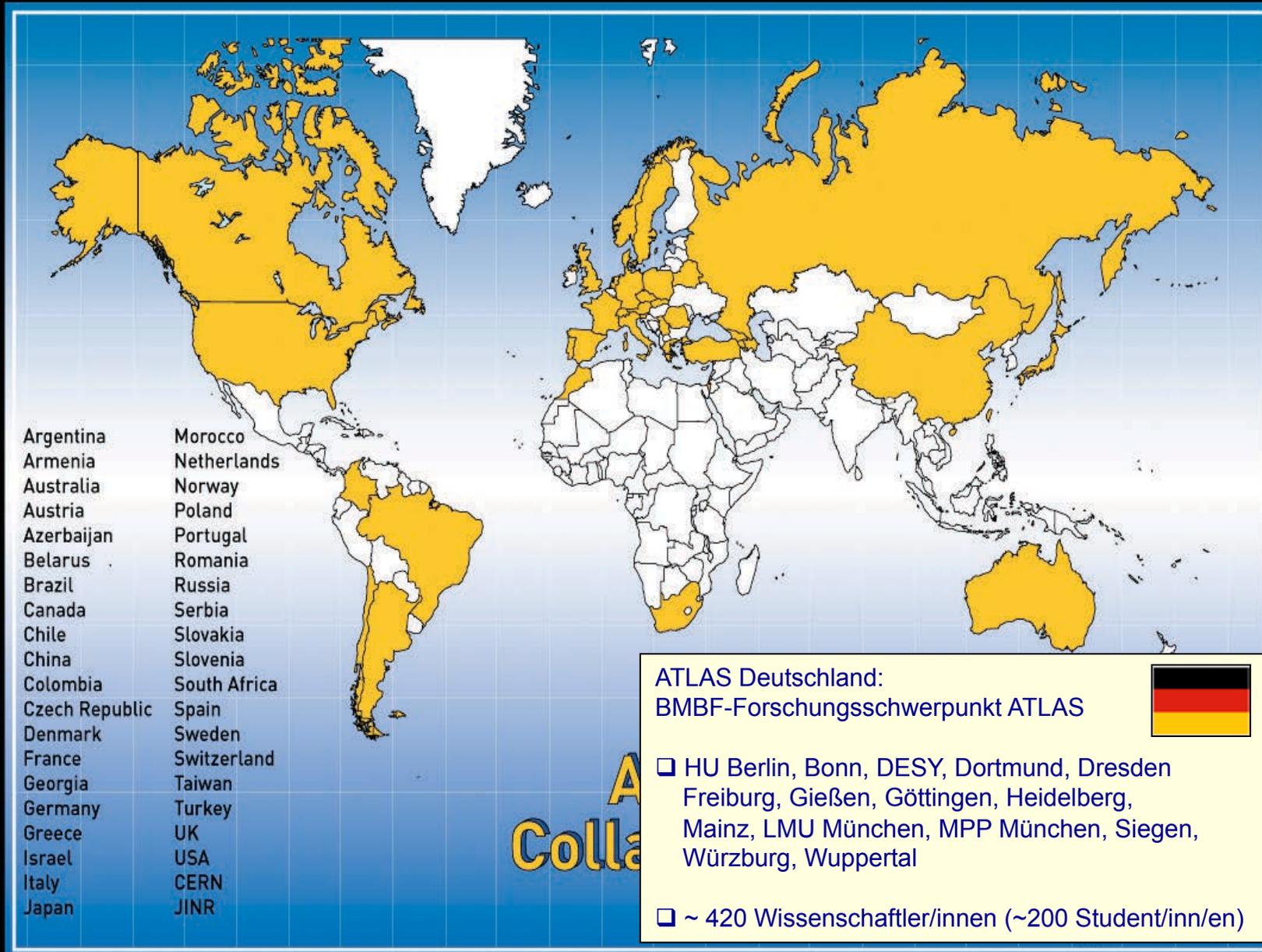


Durchmesser: 25 m  
Gesamtlänge: 46 m  
Gesamtgewicht: 7000 t

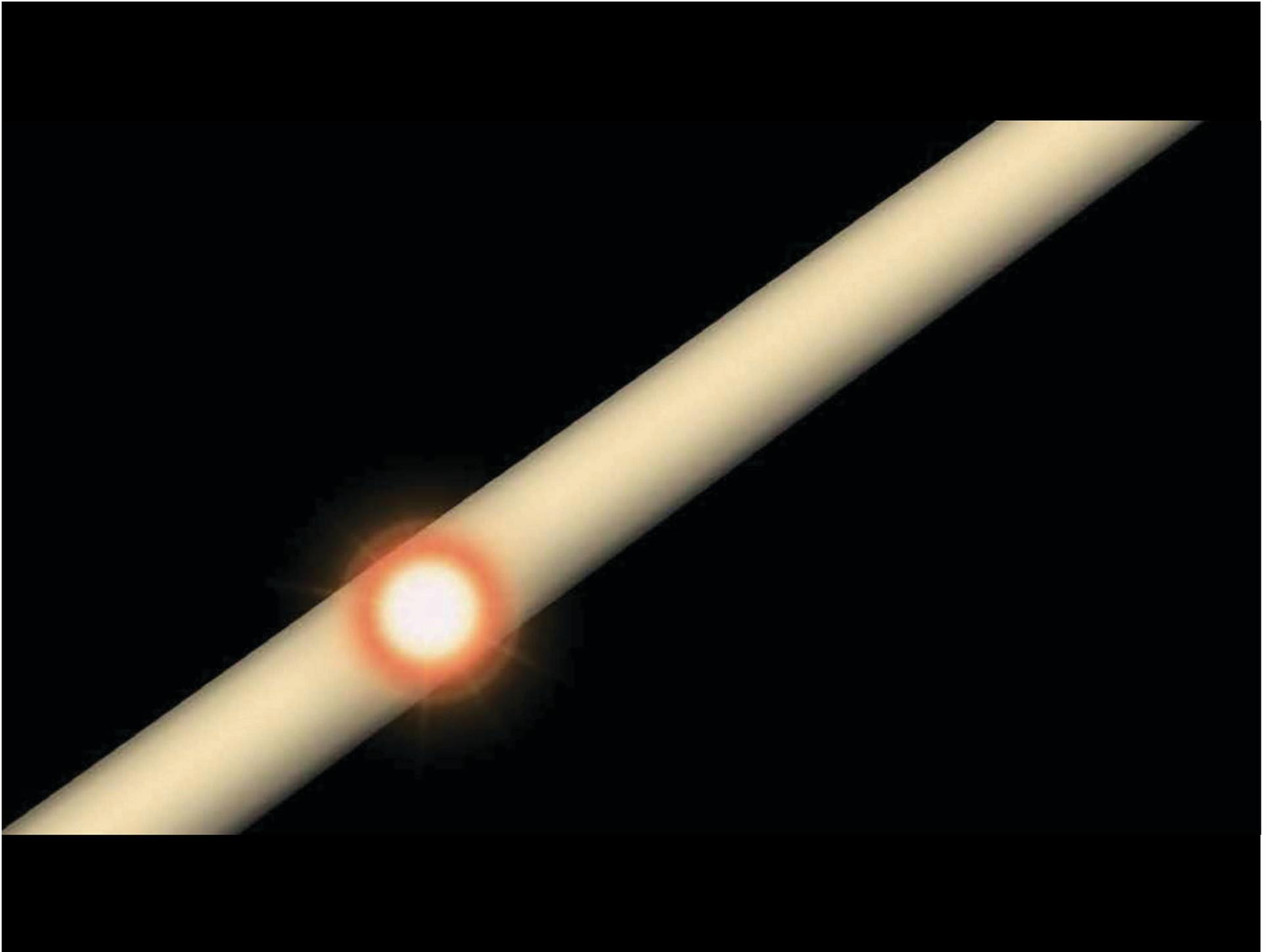
Etwa 200 Mio. Auslesekanäle,  
aufnahmebereit alle 25 ns  
(40 Mio. mal pro Sekunde)







Etwa 3000 Wissenschaftler, davon etwa 1000 Student/inn/en,  
 aus 177 Instituten und 38 Ländern



## Am 30. März 2010: erste Kollisionen bei den höchsten Energien (7 TeV )

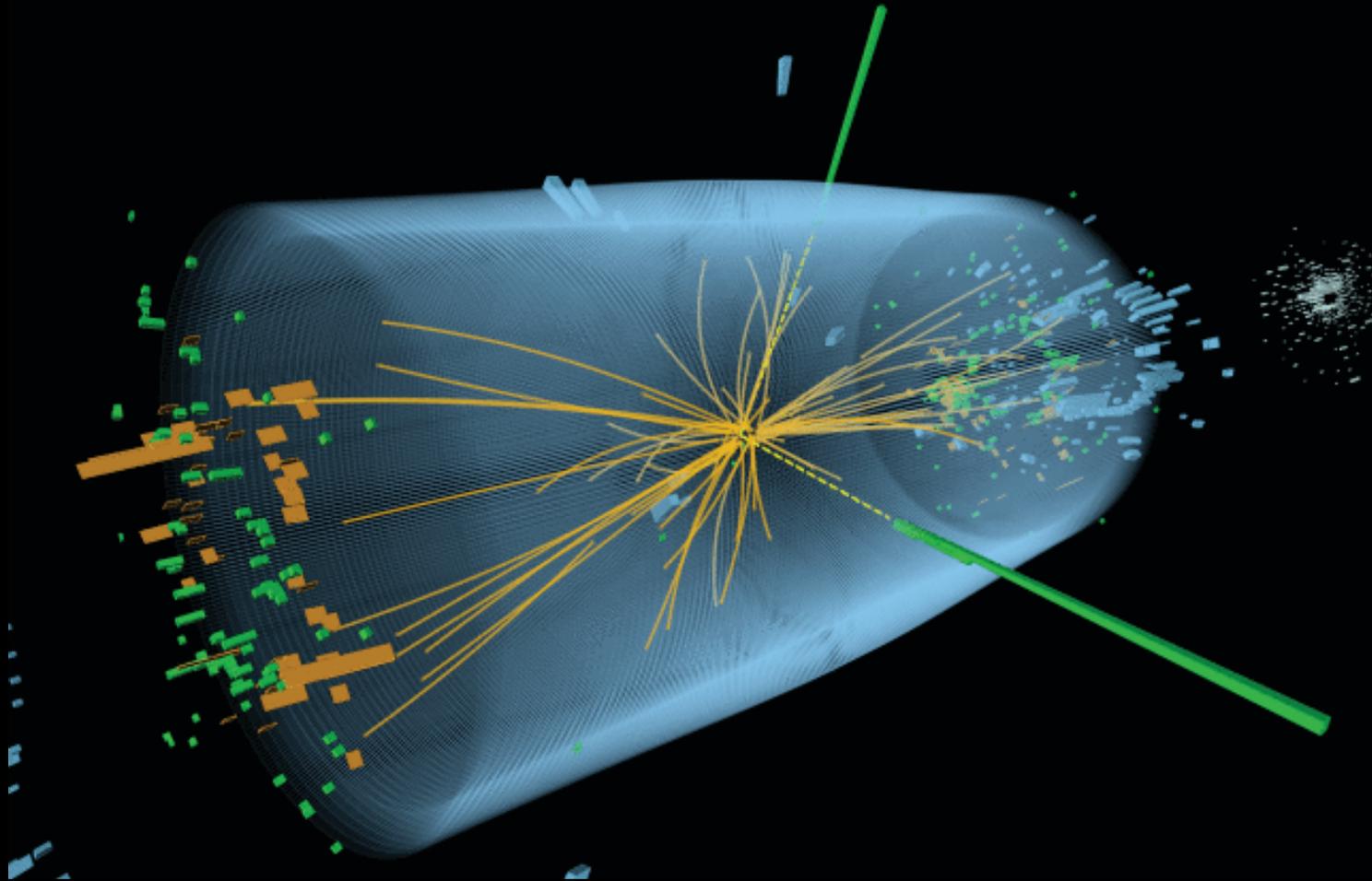


Bis Ende 2012:

>  $10^{15}$  Proton-Proton Kollisionen

$\sim 10^{10}$  Kollisionen aufgezeichnet

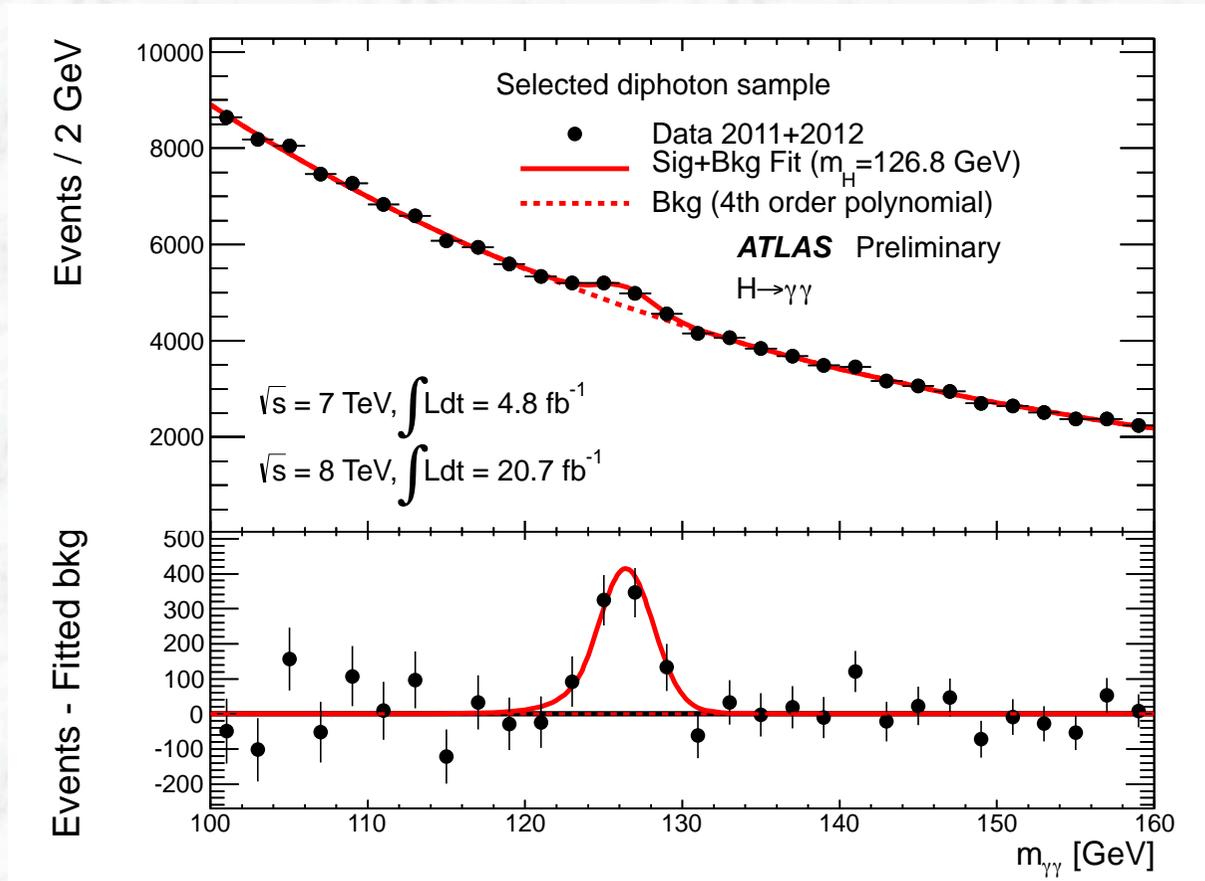
# Signale des Higgs-Bosons



Erwartete Anzahl von Zerfällen in den Daten:  
 $m_H = 125 \text{ GeV}$

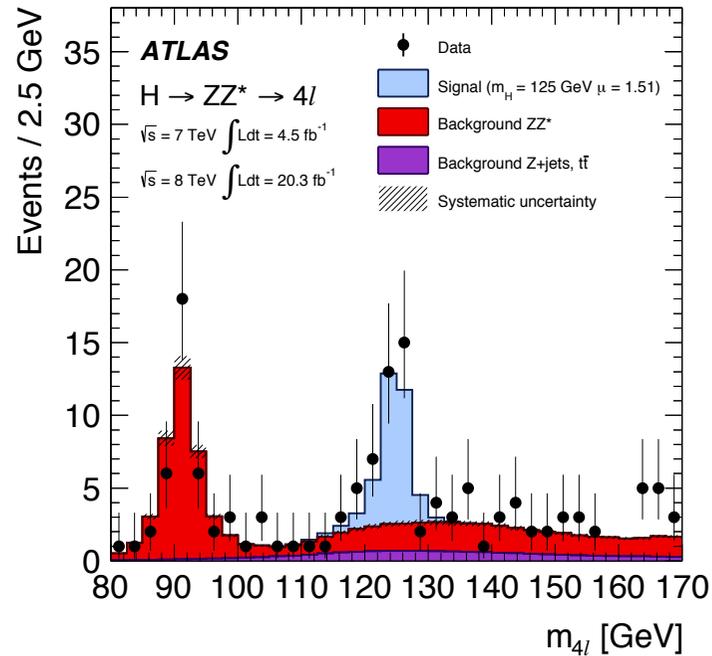
- $\sim 950 \text{ H} \rightarrow \gamma\gamma$
- $\sim 60 \text{ H} \rightarrow ZZ \rightarrow 4 \ell$
- $\sim 9000 \text{ H} \rightarrow WW \rightarrow \ell\nu \ell\nu$

# Ergebnis der Suche nach dem $H \rightarrow \gamma\gamma$ Zerfall

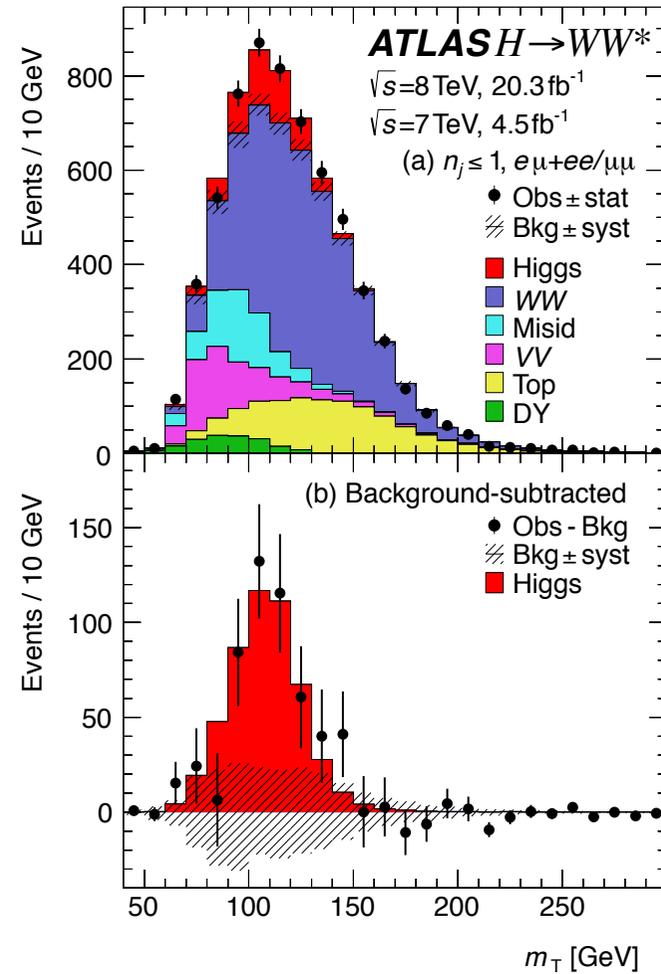


# Ergebnis der Suche nach weiteren Zerfällen

$$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell$$



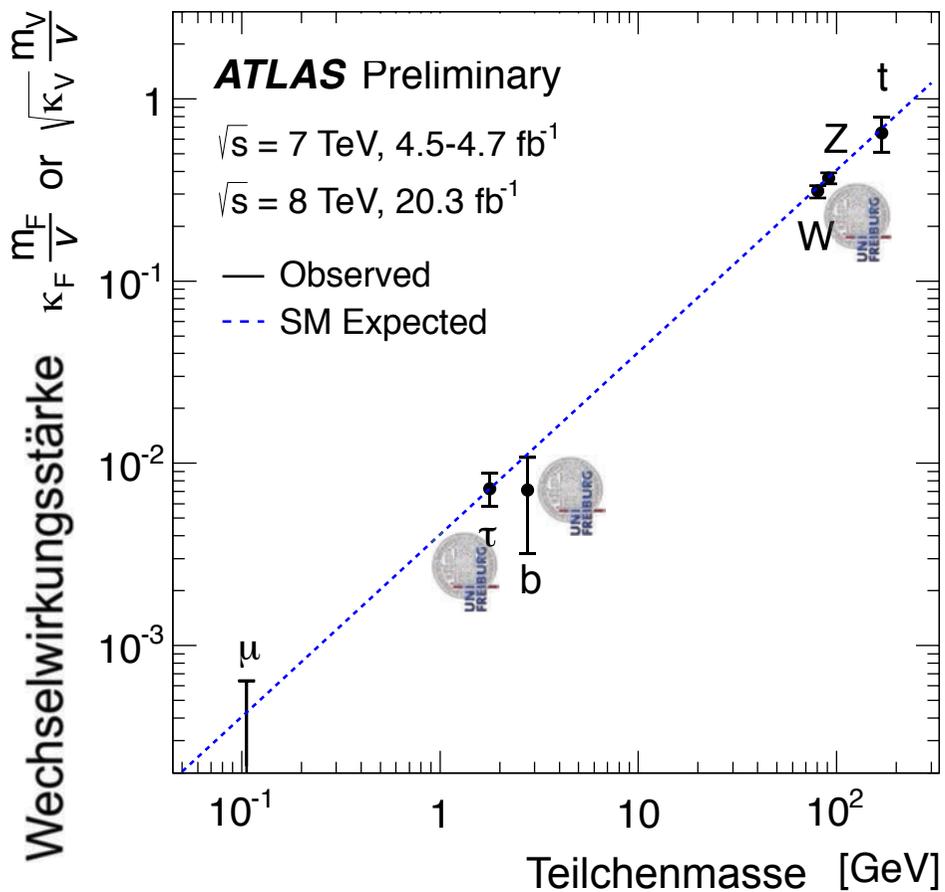
$$H \rightarrow WW \rightarrow \ell\nu \ell\nu$$



# Ist es das Higgs-Teilchen ?

Zahl der beobachteten Ereignisse in den verschiedenen Zerfällen

→ Wechselwirkungsstärke des neuen Teilchens mit den bekannten Teilchen



Higgs-Teilchen:

→ linearer Zusammenhang zwischen Teilchenmasse und Wechselwirkungsstärke

# Relevanz für die Gesellschaft

- Ein großartiges Ergebnis der Grundlagenforschung

## **Erkenntnisgewinn, kulturelle Leistung**

Grundlagenforschung ist die Basis der modernen Zivilisation und des technologischen Fortschritts

- Direkte Anwendungen momentan nicht absehbar

„Ähnliche“ Beispiele aus früheren Zeiten:

- Elektromagnetismus im 19. Jahrhundert
- Quantenphänomene zu Beginn des 20. Jahrhunderts
- .....

- Teilchenphysik, und damit auch die Higgs-Suche, hat wichtige Technologieentwicklungen angestoßen

# Anwendungen mit Bezug zur Teilchenphysik

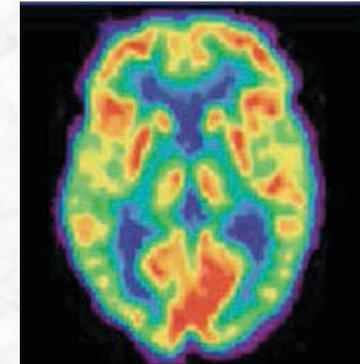
- World Wide Web (CERN)
- GRID (Cloud)-Computing
- Von der Entwicklung von Beschleunigern und Detektoren profitieren Industrie, Medizin und andere Wissenschaftszweige

Beispiele: - Positronen-Emissions-Tomographen  
( $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ )

- Beschleuniger für Strahlentherapie

- Beschleuniger in der Industrie

- Transfer von Analysemethoden in Unternehmen (IT-Unternehmen, High-Tech-Unternehmen, Versicherungen,.....)

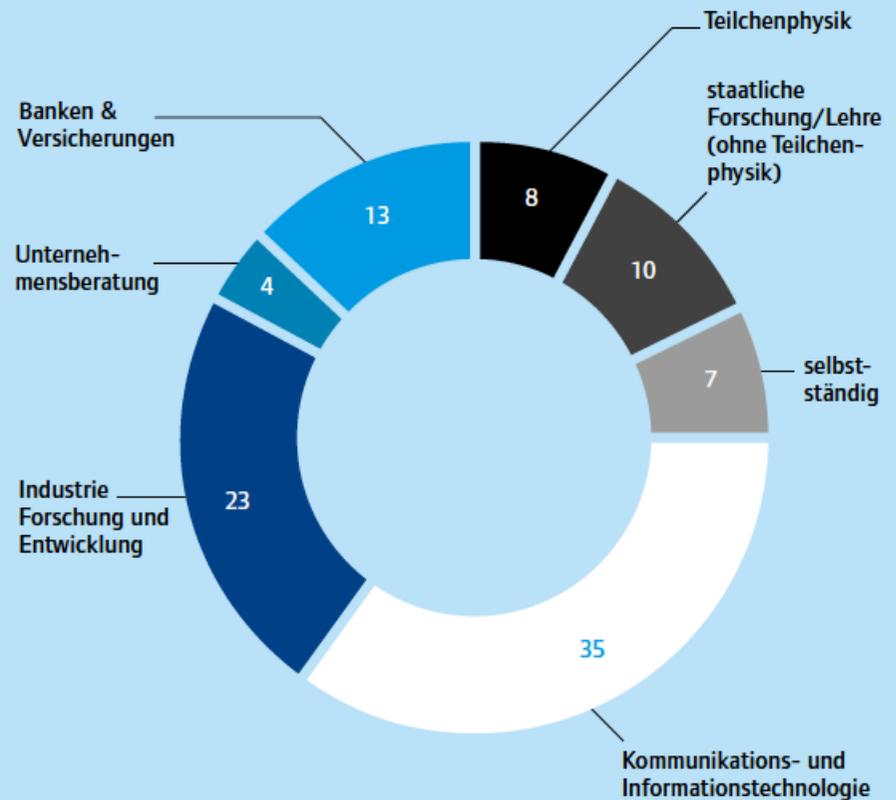


# Relevanz für die Gesellschaft

- Ausbildung von Studierenden in einem internationalen und hochkompetitiven Umfeld



Werdegang der  
Teilchenphysik-Absolventen  
Angaben in %

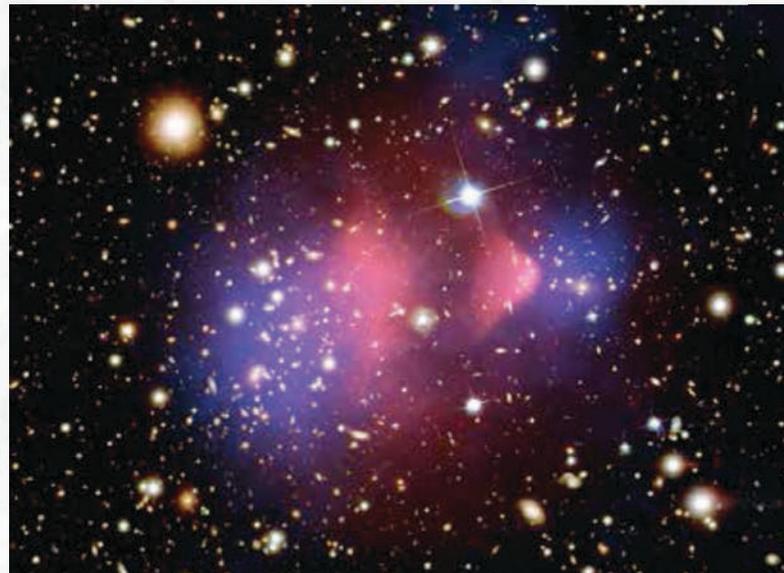
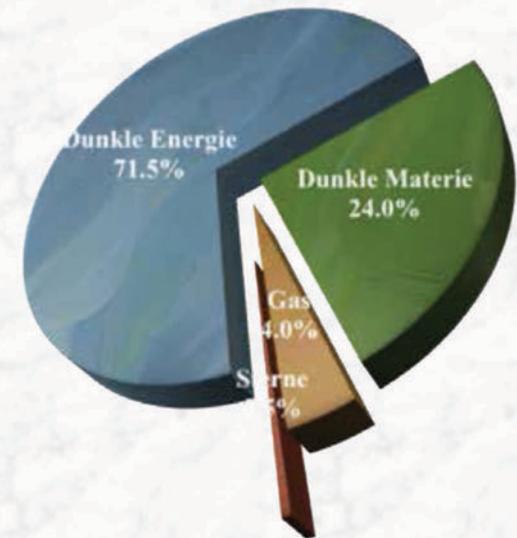


# Wie geht es weiter am LHC?

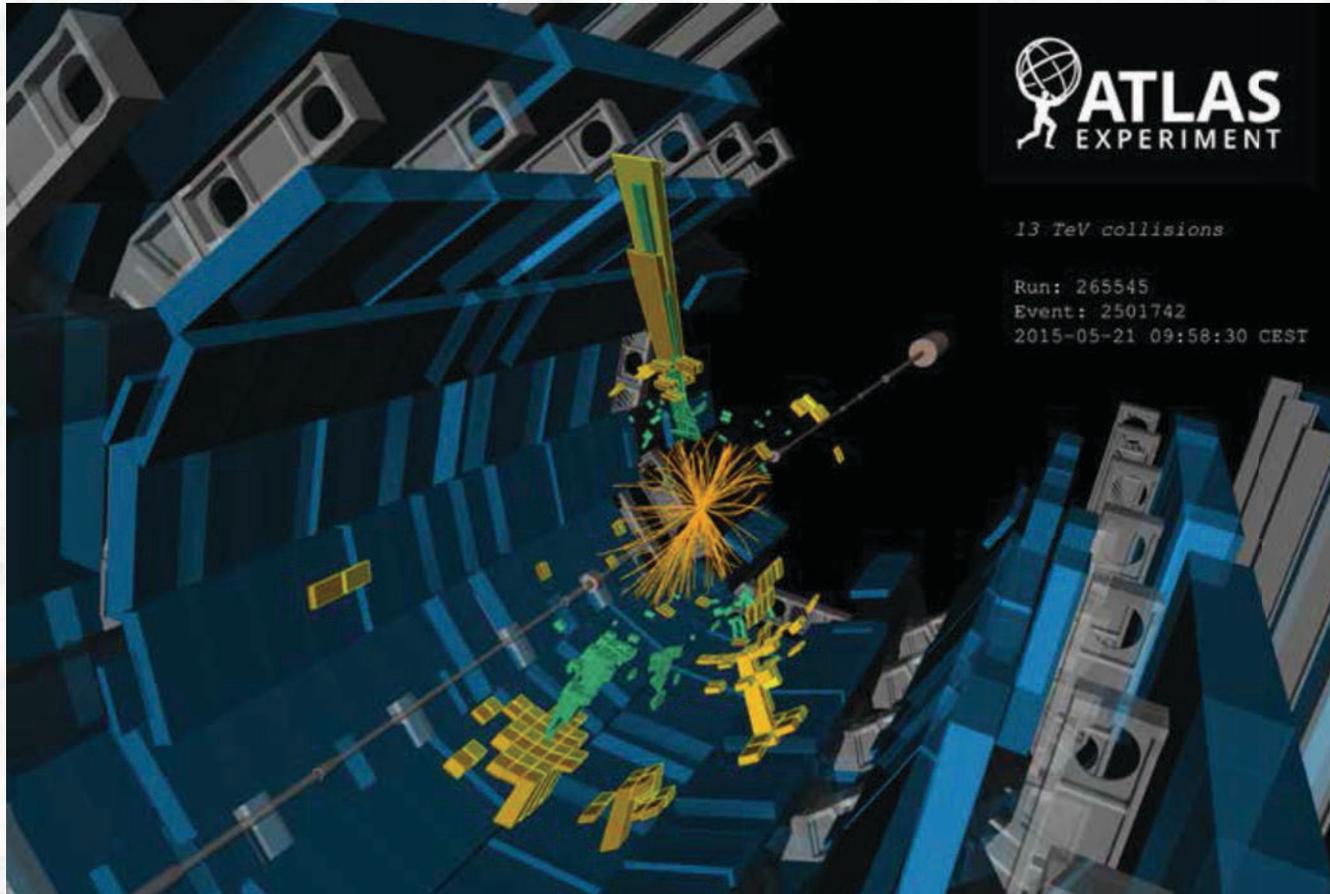
1. Präzise Untersuchung des Higgs-Teilchens

2. Gibt es neue Materieformen

Stellen diese die Dunkle Materie im Universum dar?

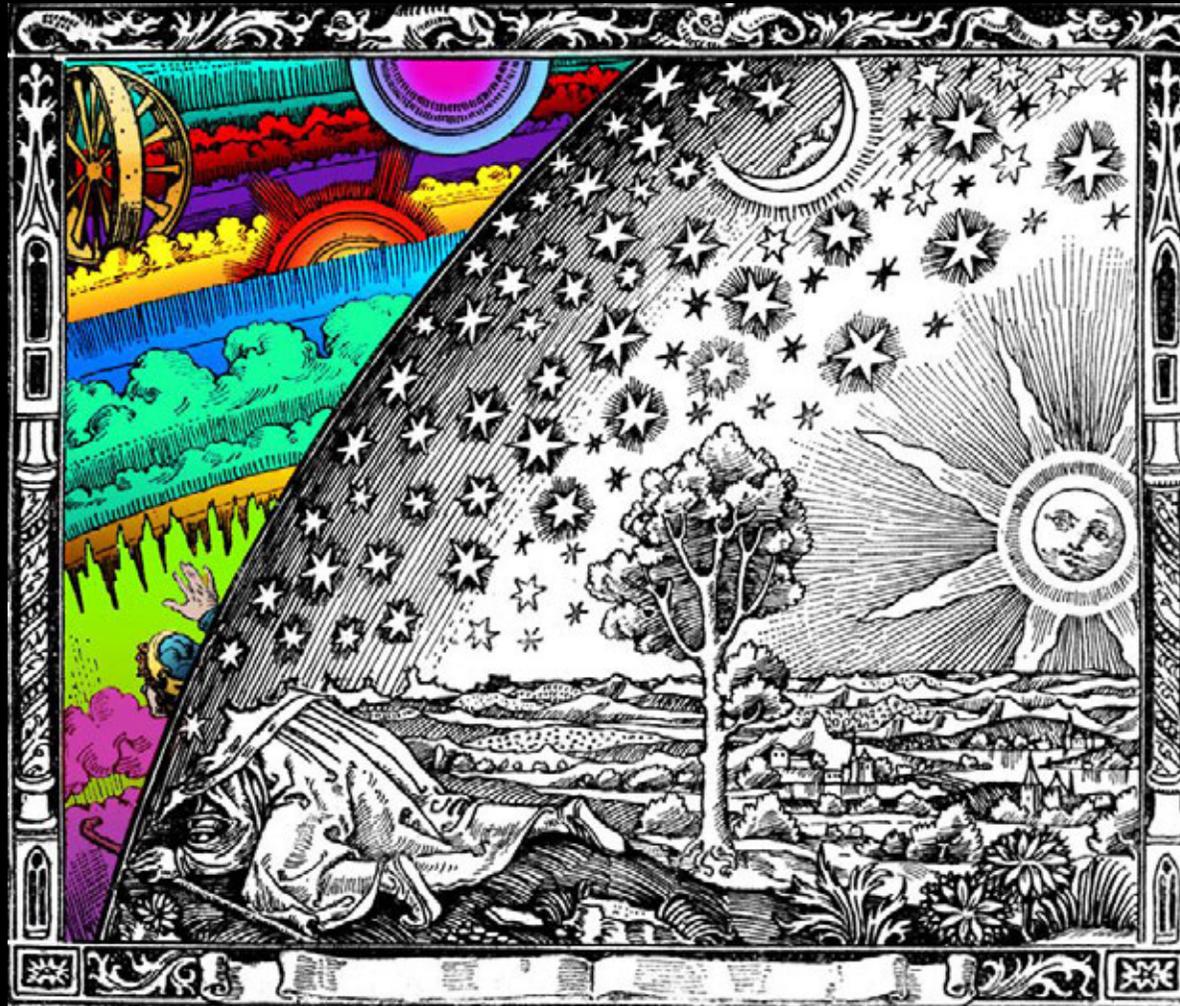


Am LHC hat eine neue Datennahmeperiode bei höherer Energie begonnen (8 TeV  $\rightarrow$  13 TeV)



Eine der ersten Proton-Proton-Kollisionen bei 13 TeV, aufgezeichnet vom ATLAS-Experiment am 21. Mai 2015

# Aufbruch in physikalisches Neuland



**Backup slides**

# Die Bausteine der Materie: Quarks und Leptonen

Elektrische  
Ladung Q:

Quarks



+2/3 e



-1/3 e

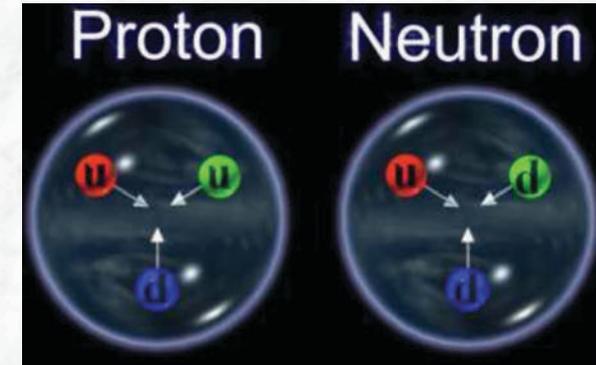
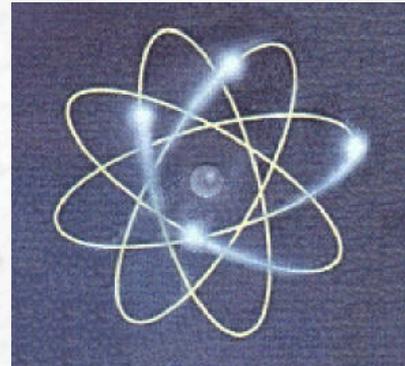
Leptonen



0



-1 e



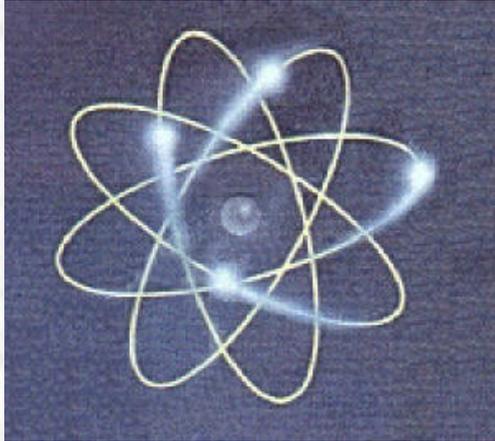
Materie, die uns umgibt, besteht aus diesen Bausteinen

Massen:

$$m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg} = 0,000511 \text{ GeV}/c^2$$

$$m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 0,938 \text{ GeV}/c^2$$

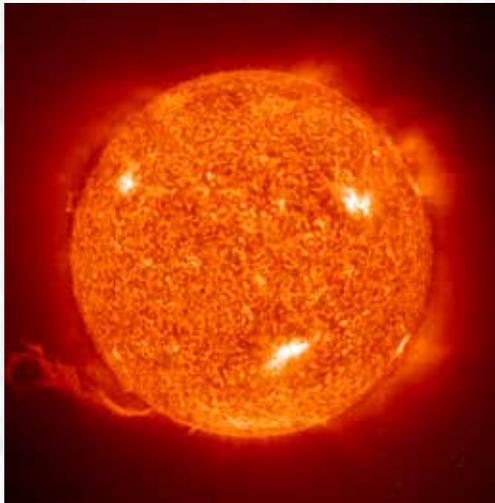
# Bedeutung der Massen der Elementarteilchen



Masse von Elektronen und Protonen

→ Längenskala unserer Welt

$m_e = 0$  → keine Atombindung



Keine/kleine Masse des W-Austauschteilchens

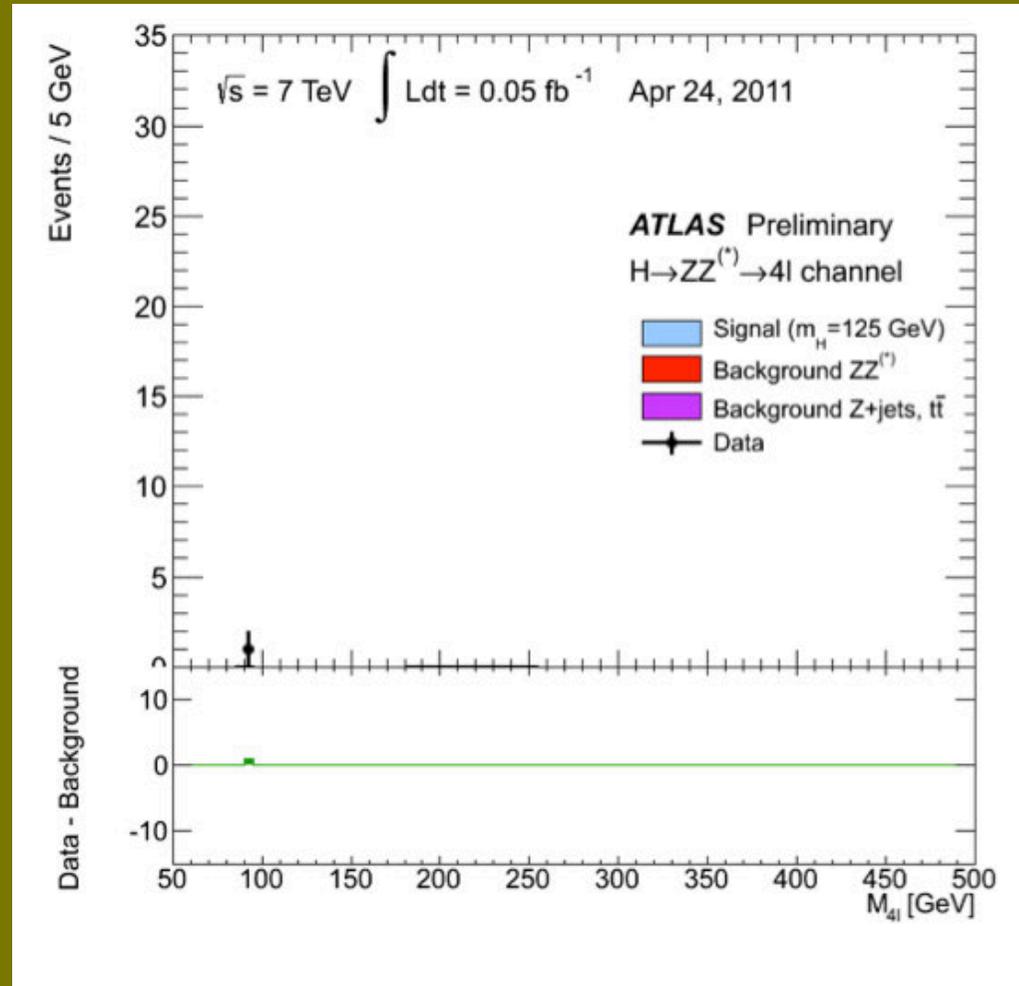
→ Kürzere Brennzeit der Sonne,  
andere Temperaturverhältnisse

→ Keine Menschen / kein Leben auf der Erde

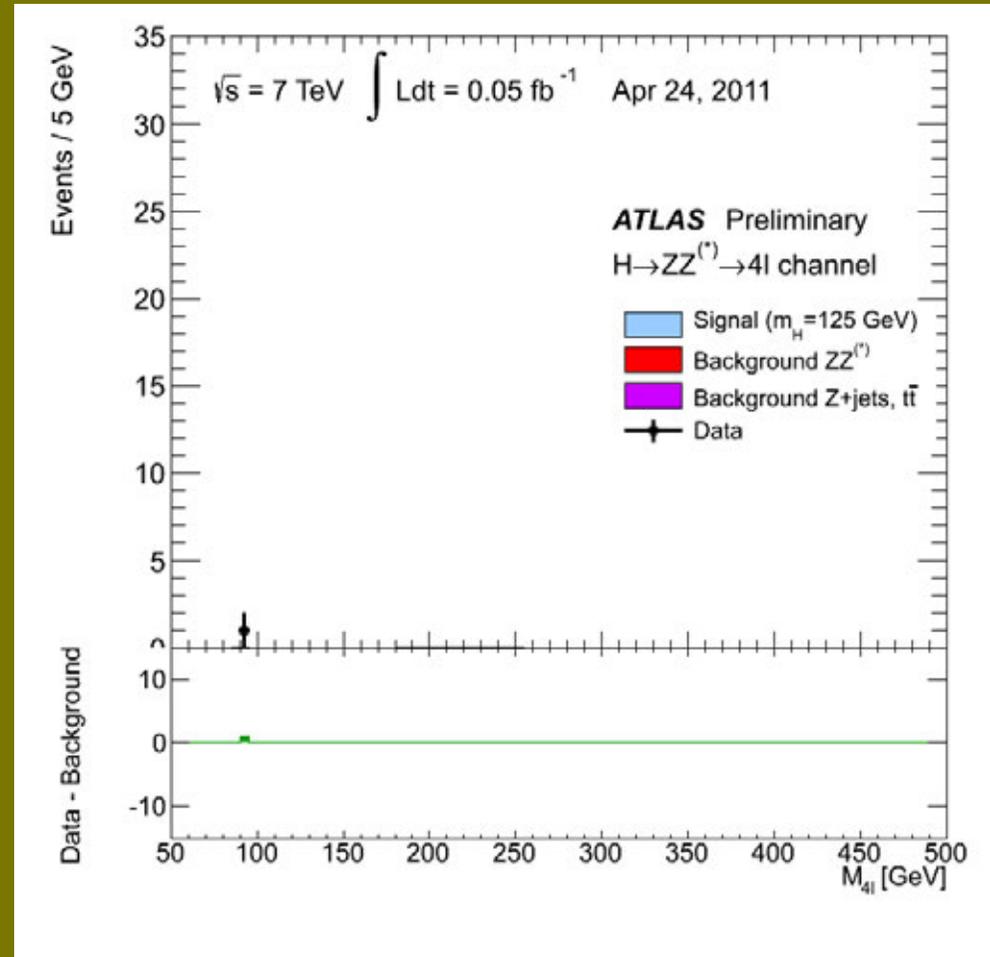
# Zeitliche Entwicklung des H $\rightarrow$ ZZ $\rightarrow$ 4l Signals



# Zeitliche Entwicklung des $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ Signals



# Zeitliche Entwicklung des $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ Signals



# Warum existieren wir überhaupt?

- Materie und Antimaterie sollten sich nach dem Urknall vernichtet haben
- Vermutlich wurde dies durch eine winzige Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie verhindert (CP-Verletzung: „Unwucht der Welt“)



10.000.000.001

**Materie**

10.000.000.000

**Antimaterie**

- CP-Verletzung ist etabliert, aber Ursprung und Stärke sind nicht verstanden; gekoppelt an das Familienproblem (Drei Familien von Teilchen)

Diese Forschung wurde unterstützt durch:

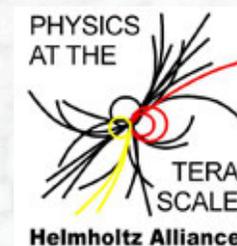
BMBF



DFG



Helmholtz-Gemeinschaft



Universität Freiburg  
und  
Land Baden-Württemberg

