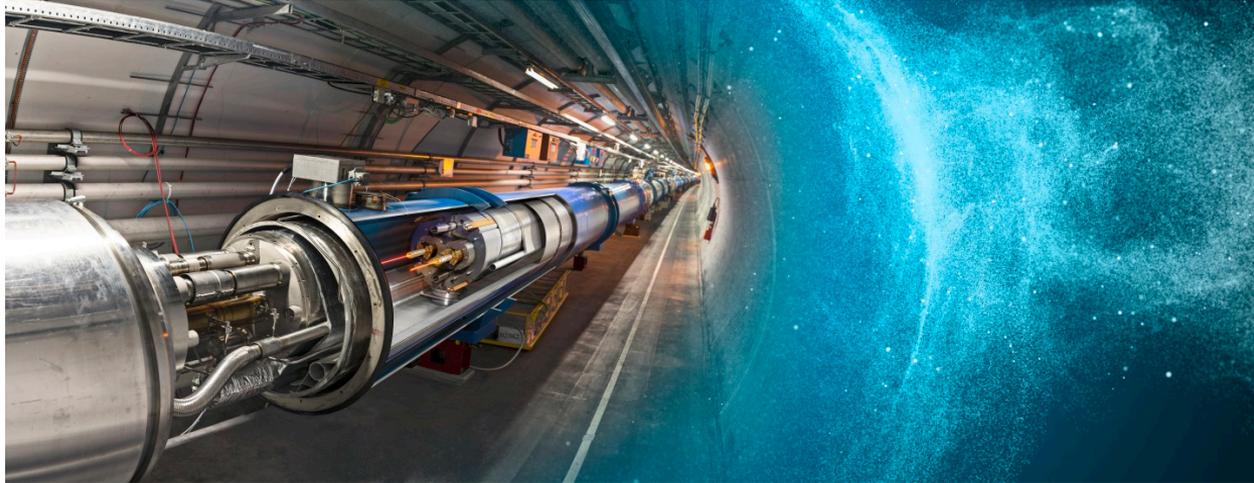


# *CERN: Das Labor, die Fragen, faszinierende Experimente*



Prof. Karl Jakobs

Physikalisches Institut, Universität Freiburg  
CERN, 16. Mai 2025



universität freiburg

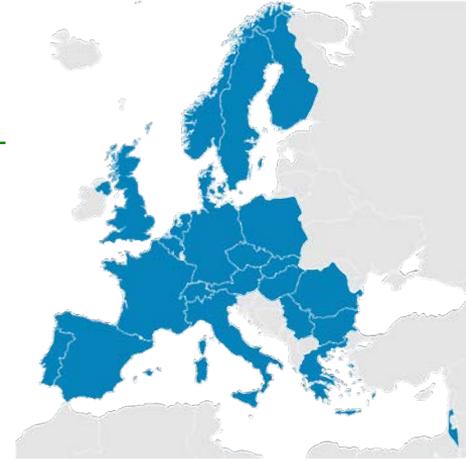
# Das Europäische Forschungszentrum für Teilchenphysik CERN in Genf

- 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“

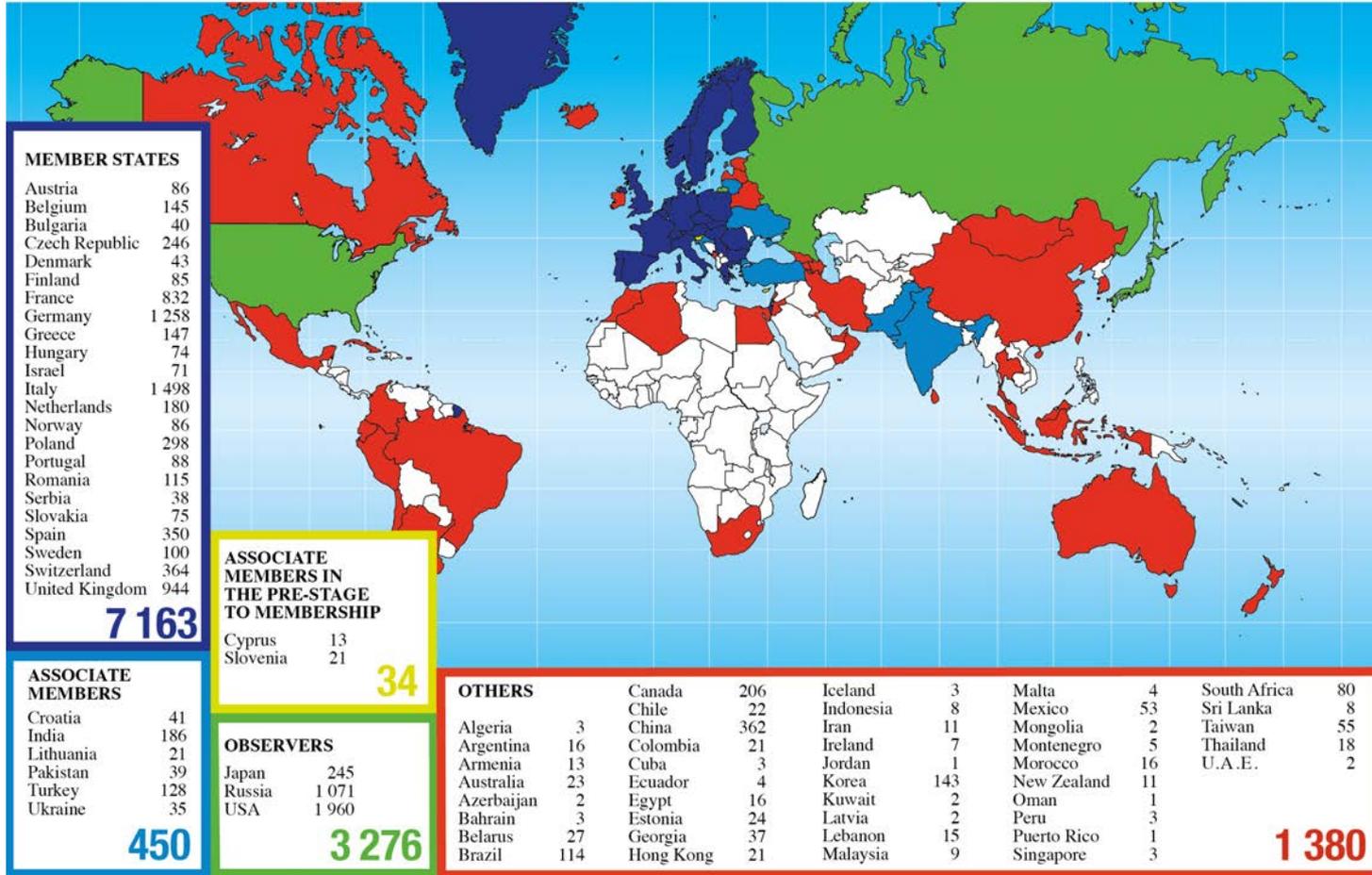


# CERN heute:

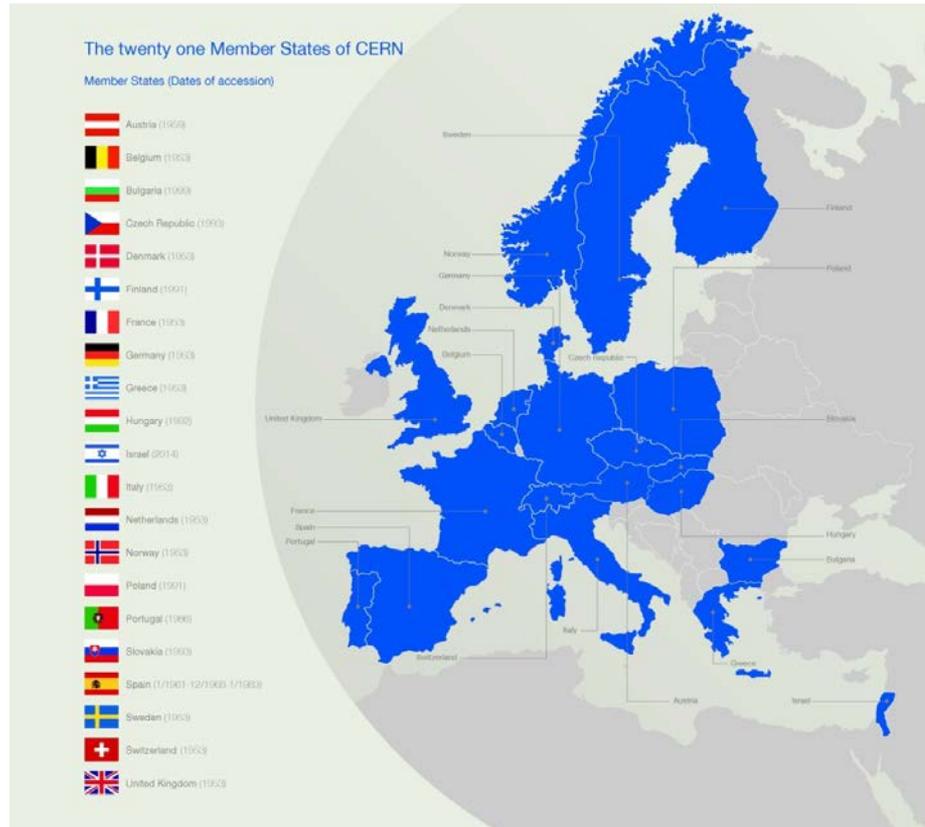
- CERN ist das weltweit führende Labor für Teilchenphysik
  - Physikalische Grundlagenforschung, Technologie und Innovation, Ausbildung –  
+ Internationale Zusammenarbeit (Kollaboration)
- 24 Mitgliedsstaaten
  - Finanzierung entsprechend des Bruttonationalprodukts,  
Budget 1.2 Mrd CHF / Jahr
- 9 Assoziierte Staaten
- 6 Staaten / Organisationen mit Beobachterstatus
- Offen für **weltweite Zusammenarbeit**  
~ 17'000 („CERN-Nutzer“ + CERN-Angestellte)
- Betrieb des größten und leistungsfähigsten Teilchenbeschleunigers,  
reichhaltiges Physikprogramm



# Distribution of All CERN Users by Location of Institute on 27 January 2020



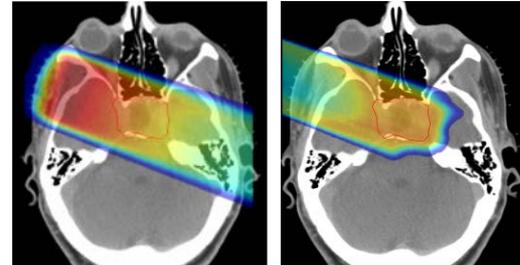
# CERN Budget 2018: 1247 MSF



Country	Contribution [%]
Austria	2.22
Belgium	2.77
Bulgaria	0.28
Czech Republic	1.07
Denmark	1.77
Finland	1.43
France	15.57
<b>Germany</b>	<b>20.29</b>
Greece	1.79
Hungary	0.68
Italy	11.78
Netherlands	4.61
Norway	2.50
Poland	2.72
Portugal	1.23
Slovak Republic	0.51
Spain	8.53
Sweden	2.55
Switzerland	3.19
United Kingdom	14.51

# CERN heute

- Weltweit leistungsfähigstes System von Teilchenbeschleunigern
- Forschungs- und Entwicklungszentrum für neue Technologien
- Ein bedeutendes Ausbildungszentrum



# Ein Blick ins CERN-Gelände







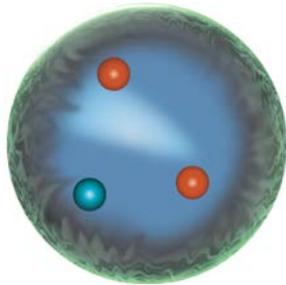


# Motivation und Zielsetzung der Teilchenphysik



Beschreibung der Materie  
und der wirkenden Kräfte  
(Wechselwirkungen)

„Bausteine und Kräfte“

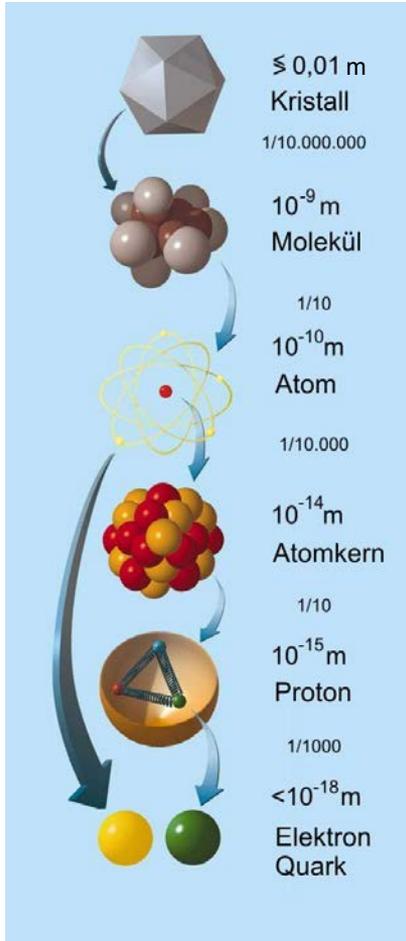


von kleinsten  
Abständen ( $10^{-18}$  m)



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

# Erforschung der Materie



Auge, Mikroskop  
(Licht)

Elektronenmikroskop  
(Elektronen)

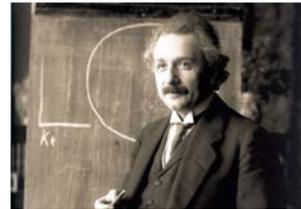
Teilchenbeschleuniger  
(Synchrotron-Strahlung)

Teilchenbeschleuniger  
(Teilchen hoher Energie)



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

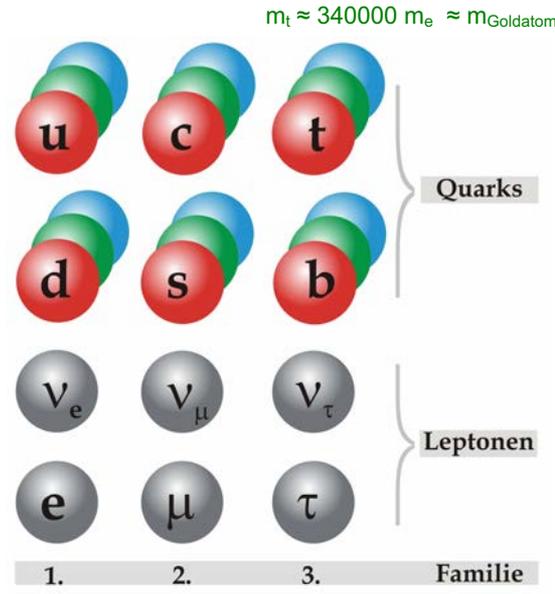
$$E = mc^2$$



# Wo stehen wir heute ?



# Die Bausteine der Materie: Quarks und Leptonen



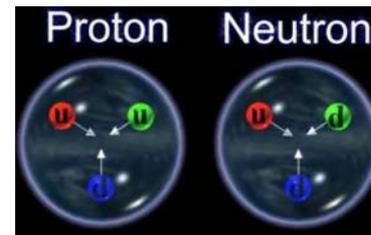
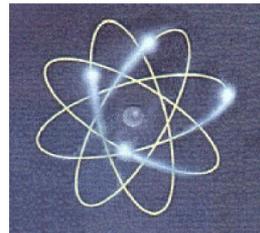
$m_\mu \approx 200 m_e$   $m_\tau \approx 3500 m_e$

- Elementare Bausteine: Quarks und Leptonen; „punktförmig“ (Ausdehnung  $< 10^{-18}$  m), Spin  $1/2 \hbar$

- Drei Familien von Materieteilchen;  
Die Masse der Quarks und Leptonen steigt mit der Familienzahl an

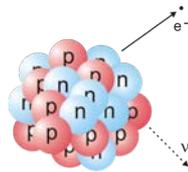
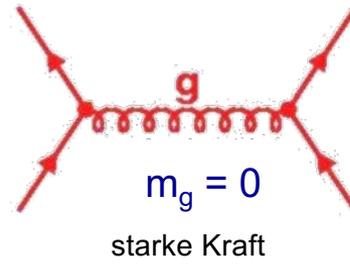
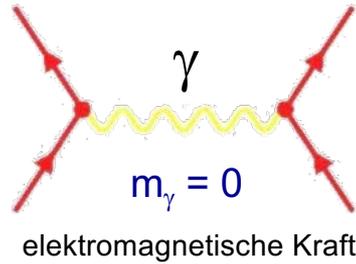
Myon ( $\mu$ ) und Tau-Lepton ( $\tau$ ) sind schwere Kopien des Elektrons

Warum drei Familien?

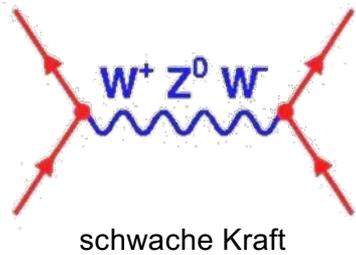


Materie, die uns umgibt: Bausteine der 1. Familie

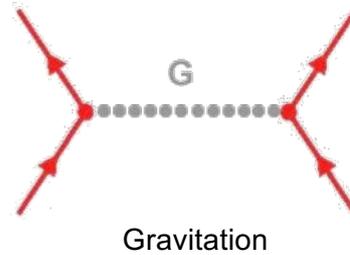
# Die fundamentalen Kräfte



$\beta$ -Zerfall



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

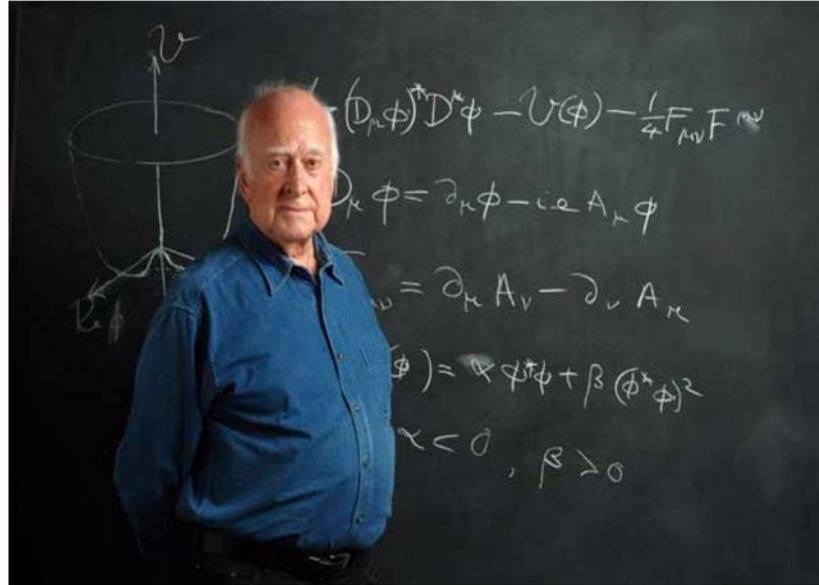


Theoretische Beschreibung: Wechselwirkung durch Austausch von „Kraftteilchen“ (Spin  $1\hbar$ );  
Quantenfeldtheorie

**Problem (Theorie):**

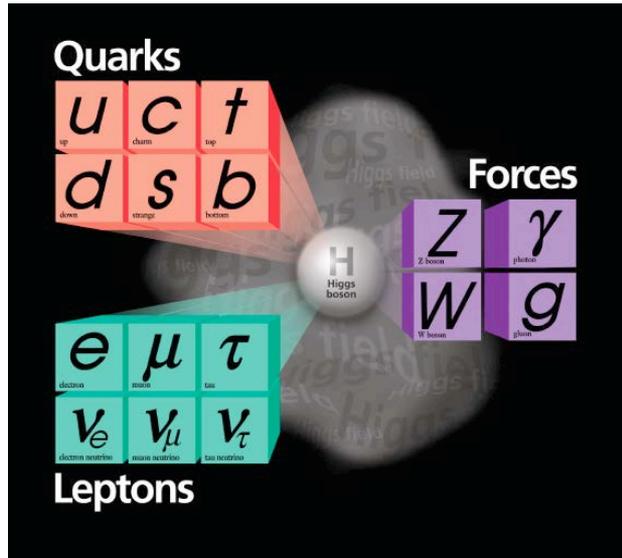
**Austauschteilchen müssen masselos sein!**

# 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

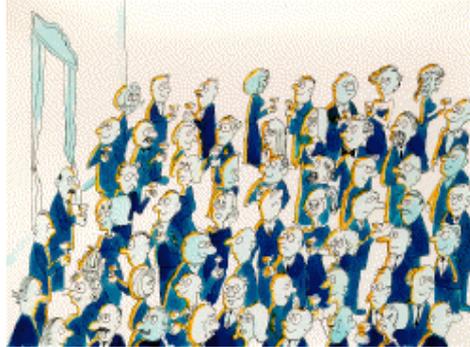


- Postulat eines neuen Feldes (Higgs-Feld), das den ganzen Raum durchdringt (auch Vakuum)
- Masse elementarer Teilchen wird durch Wechselwirkung der Teilchen mit diesem Feld erzeugt
- Vorhersage: Neues Teilchen, das sog. **Higgs-Teilchen**

Seine Masse wird nicht vorhergesagt!

# Der Higgs Mechanismus, eine Analogie:

Prof. D. Miller  
UC London



Higgs-Hintergrundfeld  
erfüllt den Raum



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



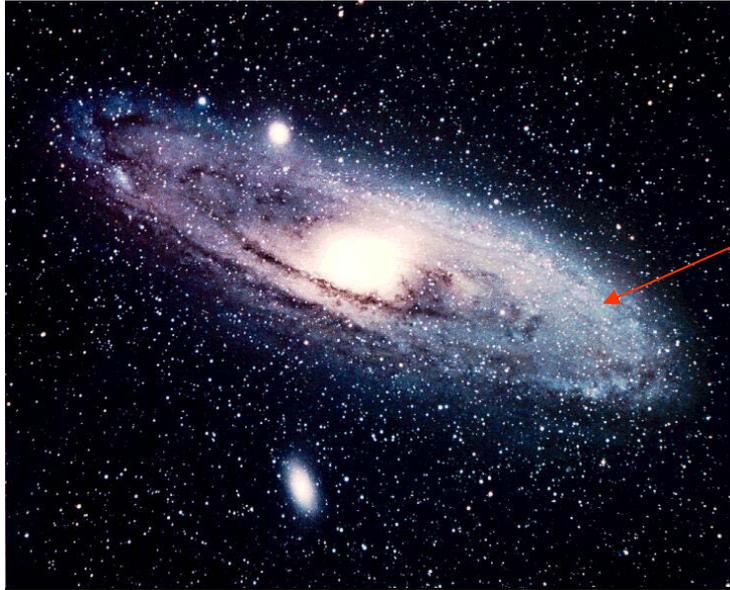
... Widerstand gegen  
Bewegung ...  
**Trägheit ↔ Masse**

# Die offenen Fragen



- **Masse**  
Das Higgs-Teilchen existiert!  
Hat es die vorhergesagten Eigenschaften?
- Neue Formen von Materie?
- Warum existieren wir überhaupt?  
(Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie)
- Zusätzliche Raumdimensionen?

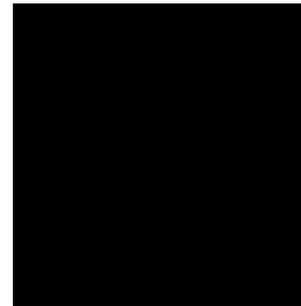
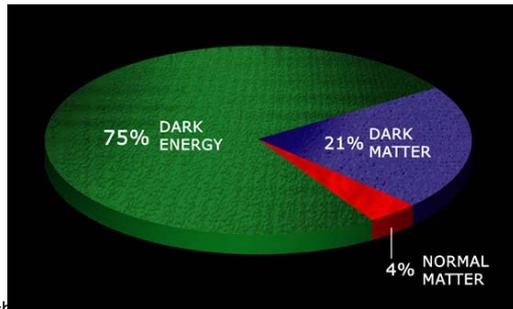
# Neue Formen von Materie?



Wir sind hier

umgeben von ....

- Masse  
(Planeten, Sterne, ...,  
Wasserstoff-Gas)
- **Dunkler Materie**
- **Dunkler Energie**



# 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 (3 Familien von Teilchen)

Theoretische Modelle  
zur Erweiterung der  
Standardtheorie



# Der Large Hadron Collider (LHC)

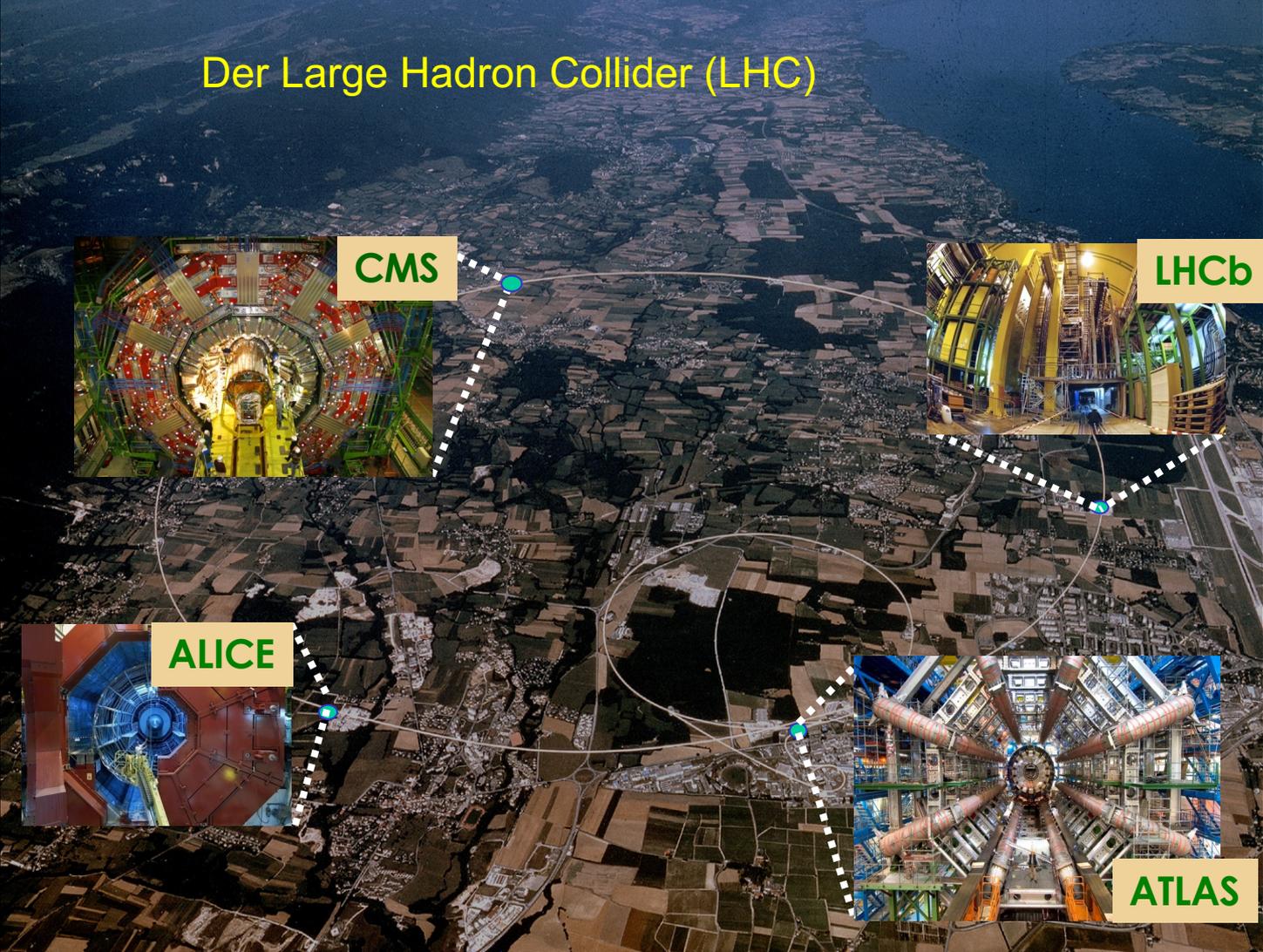


# Ein Blick in den Beschleunigertunnel



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

# Der Large Hadron Collider (LHC)



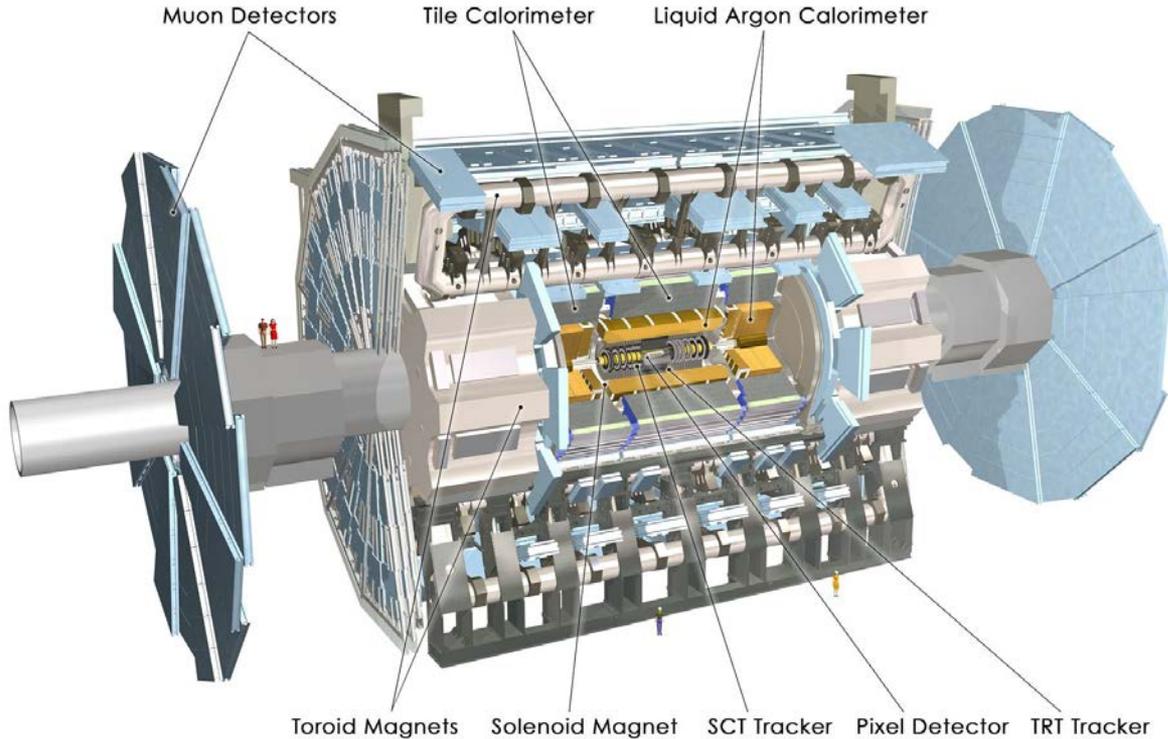
CMS

LHCb

ALICE

ATLAS

# Das ATLAS-Experiment



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

~120 Mio. Auslesekanäle  
40 Mio. Ereignisse pro Sekunde (aufnahmebereit alle 25 ns)  
1500 Ereignisse pro Sekunde selektiert → Speichermedien



- |                |              |
|----------------|--------------|
| Argentina      | Netherlands  |
| Armenia        | Norway       |
| Australia      | Palestine    |
| Austria        | Philippines  |
| Azerbaijan     | Poland       |
| Belarus        | Portugal     |
| Brazil         | Romania      |
| Canada         | Russia       |
| Chile          | Serbia       |
| China          | Slovakia     |
| Colombia       | Slovenia     |
| Czech Republic | South Africa |
| Denmark        | Spain        |
| France         | Sweden       |
| Georgia        | Switzerland  |
| Germany        | Taiwan       |
| Greece         | Türkiye      |
| Israel         | UAE          |
| Italy          | UK           |
| Japan          | USA          |
| Mongolia       | CERN         |
| Morocco        | JINR         |

# ATLAS Collaboration

181 institutions (244 institutes) from 42 countries

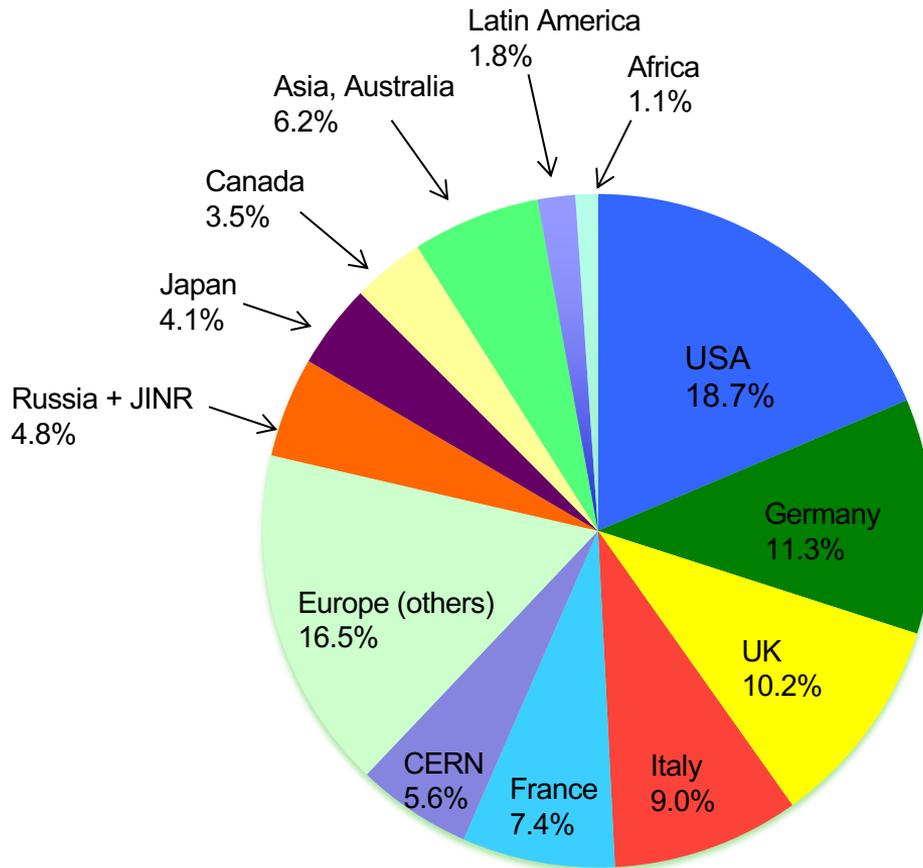


ATLAS Deutschland:  
BMBF-Forschungsschwerpunkt ATLAS



- HU Berlin, Bonn, DESY, Dortmund, Dresden  
Freiburg, Gießen, Göttingen, Heidelberg,  
Mainz, LMU München, MPP München, Siegen,  
Würzburg, Wuppertal
- ~ 420 Wissenschaftler/innen  
(inkl. ~200 Student/inn/en)

Etwa 3000 Wissenschaftler/innen, davon etwa 1000 Student/inn/en,  
aus 244 Instituten und 42 Ländern

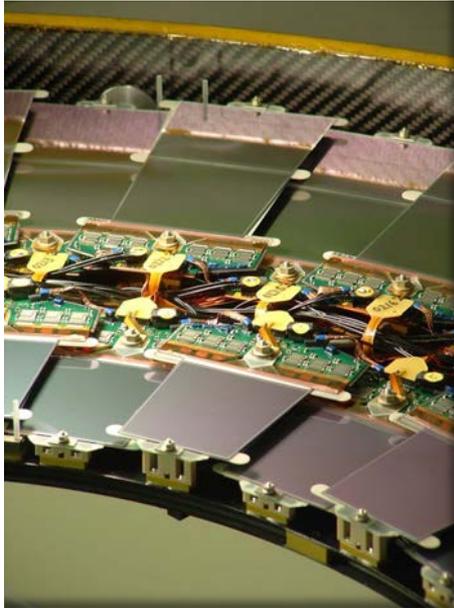


USA	18,7%
Germany	11,3%
UK	10,2%
Italy	9,0%
France	7,4%
CERN	5,6%
Japan	4,1%
Canada	3,5%
Russia+ JINR	4,8%
Spain	2,6%
China	2,6%
Czech Republic	2,1%
Sweden	1,6%
Israel	1,6%
Poland	1,6%
Switzerland	1,3%
Netherlands	1,3%
Europe (others)	6,0%
Asia (others) + Australia	2,0%
Latin America	1,8%
Africa	1,1%

Fractions according to PhD physicists  
(M&O share, ~ 20 Mio CHF / year)

# Das ATLAS-Experiment

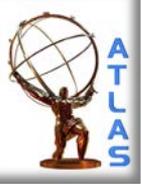
- Ressourcen kommen aus den Instituten, zu einem großen Teil über Drittmittel vom Bund (BMBF)
- Detektorkomponenten werden an Instituten gebaut;  
(Konzept der „*deliverables*“, Verantwortung beim Univ. Professor)



Bau von Siliziumstreifendetektoren in Freiburg (2005) zur Vermessung der Spurpunkte (→ Impuls) von elektrisch geladenen Teilchen

# Freiburger Beiträge zum ATLAS-Experiment

(eine der größten Gruppen der Kollaboration)



3 Professoren  
20 Wissenschaftler (Dr.)

25 Doktorand/inn/en  
(10/25 aus dem Ausland)  
14 Master-Student/inn/en



Silizium-Spurdetektoren  
Prof. Jakobs

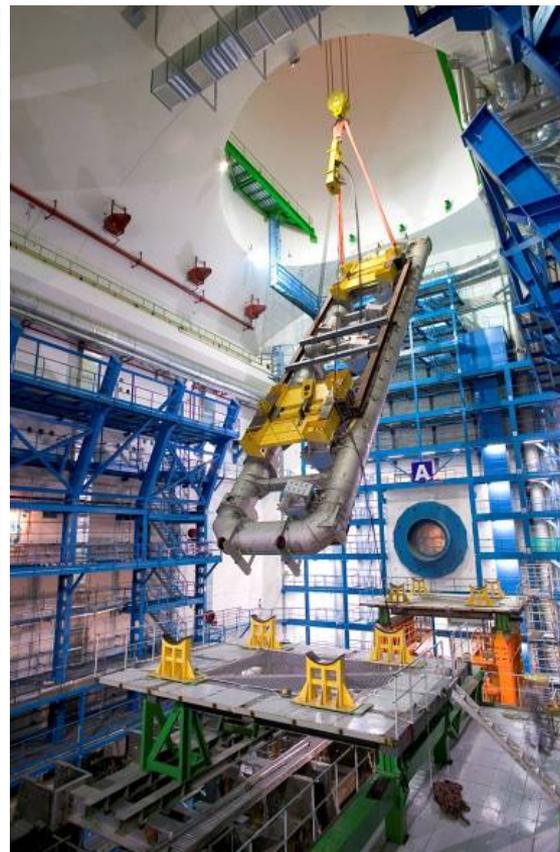


Myon-Detektoren  
Prof. Herten

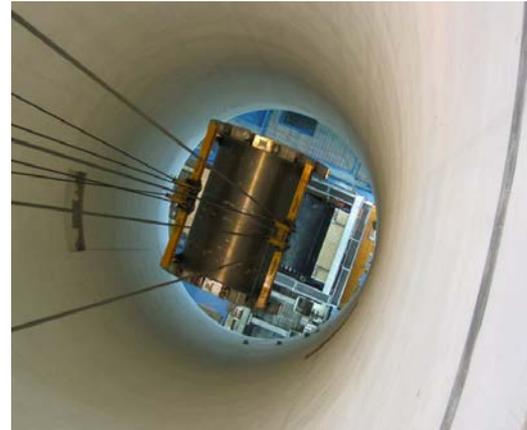


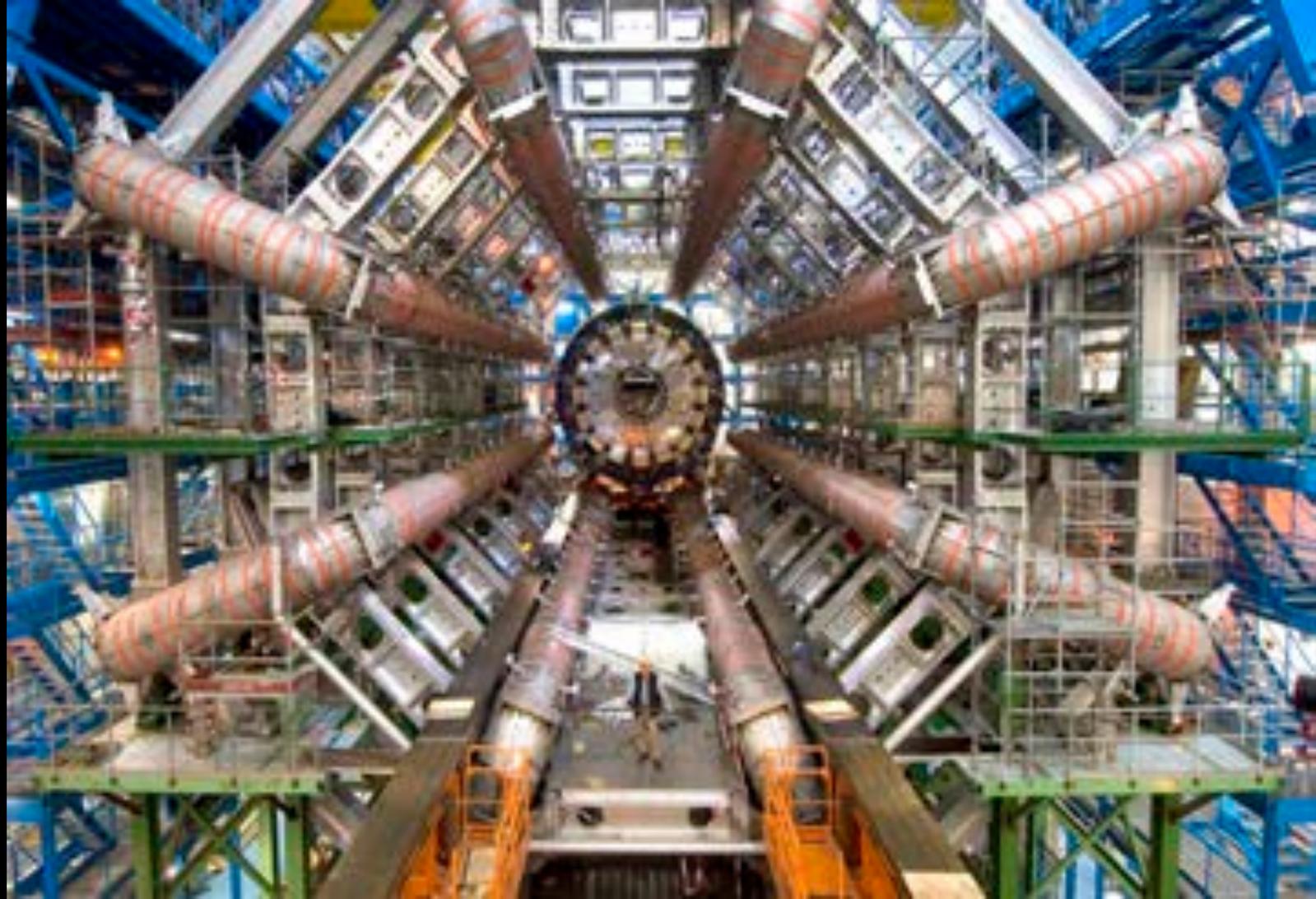
GRID-Rechenzentrum  
Prof. Schumacher

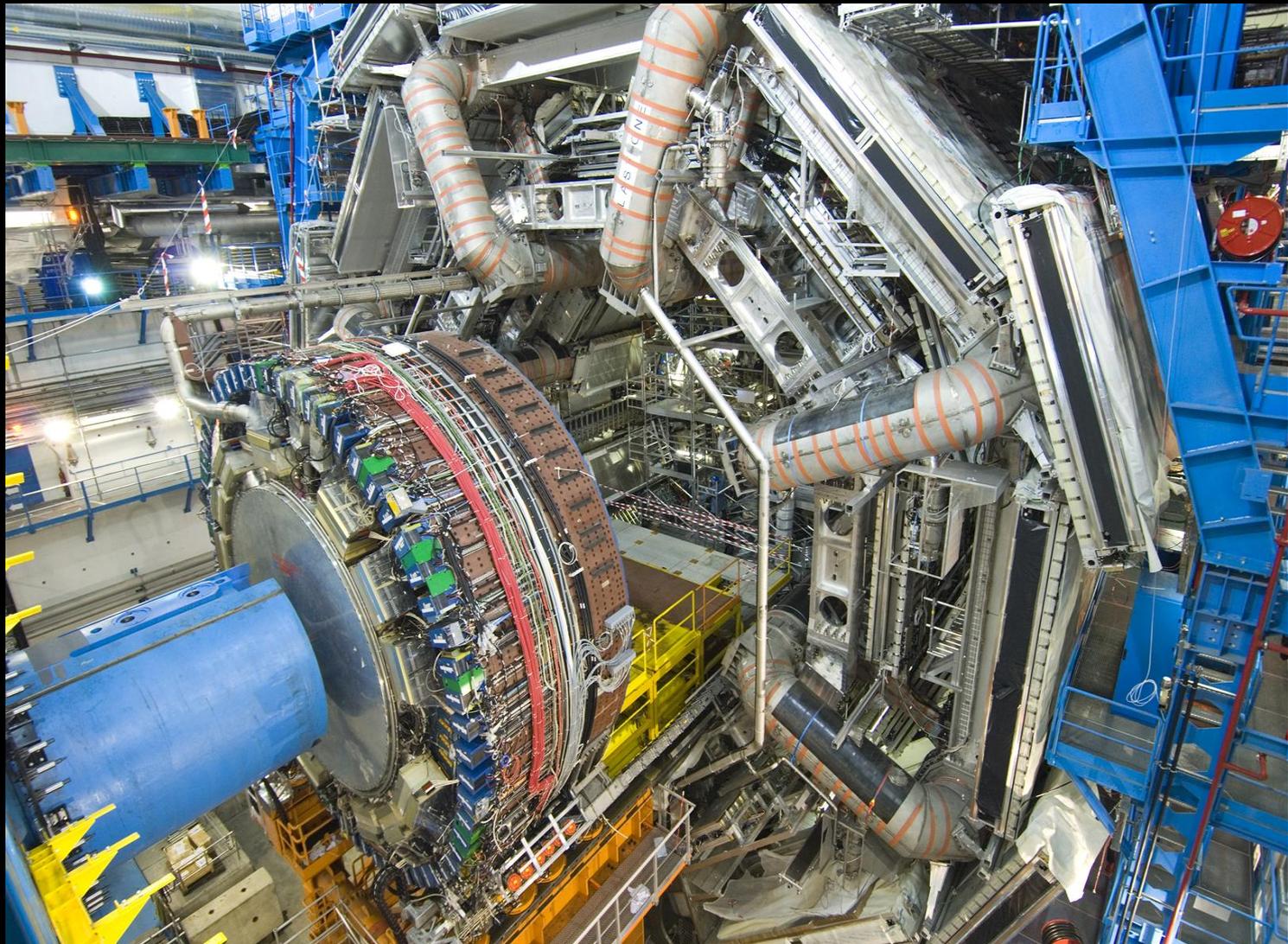
# ATLAS-Detektorkonstruktion und Installation



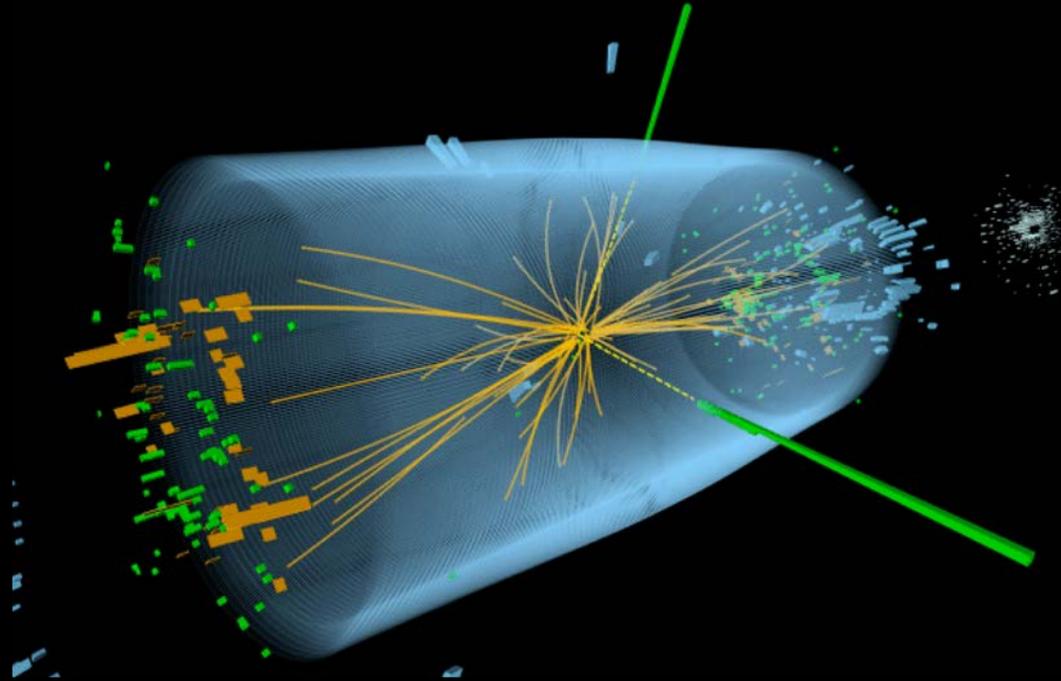
# ATLAS-Detektorinstallation (2006)







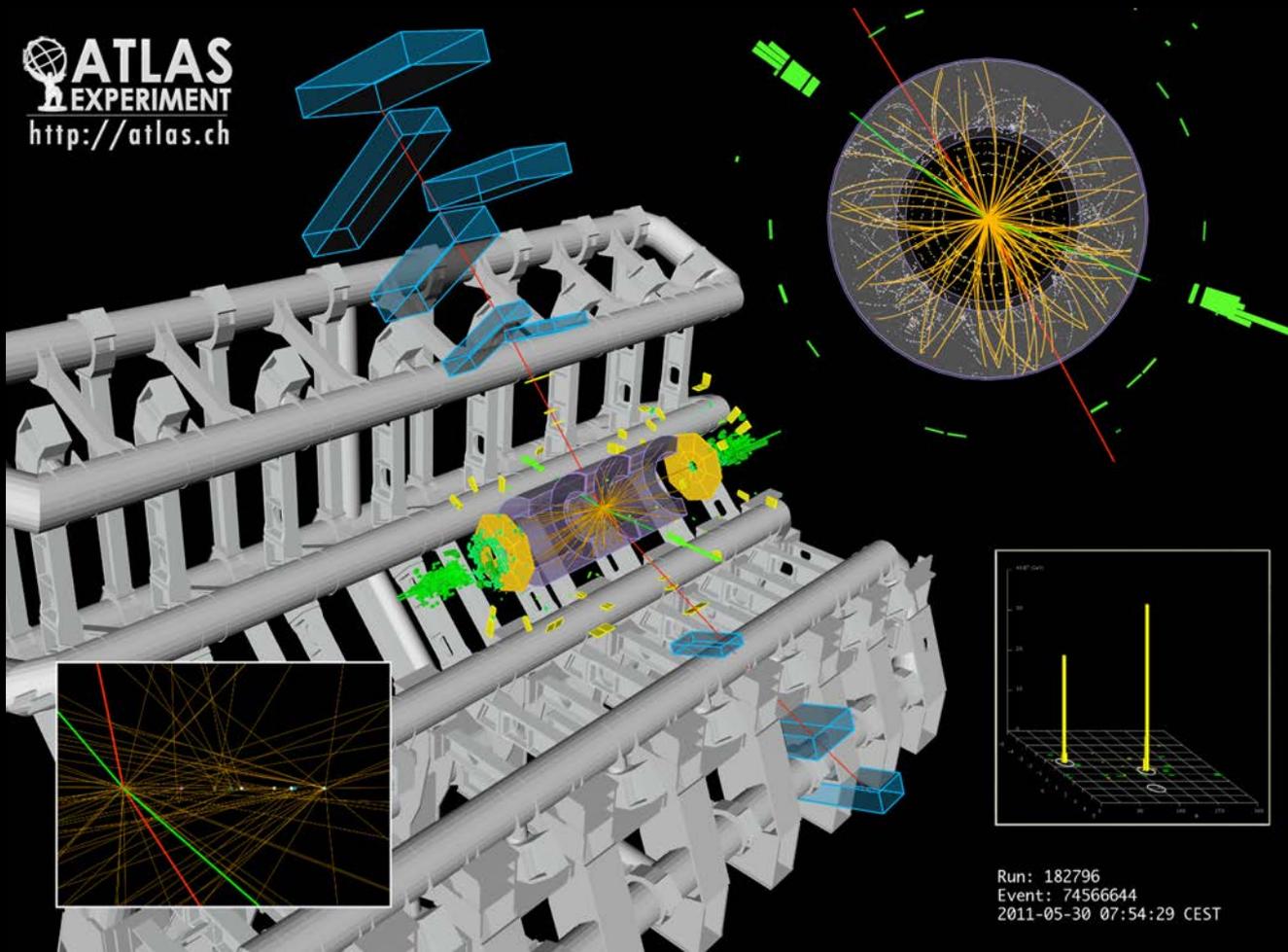
# Entdeckung des Higgs-Teilchens



Ein Kandidat für einen Zerfall  $H \rightarrow \gamma\gamma$

# Kandidat für einen Zerfall $H \rightarrow ZZ \rightarrow e^+e^- \mu^+\mu^-$

  
ATLAS  
EXPERIMENT  
<http://atlas.ch>



Run: 182796  
Event: 74566644  
2011-05-30 07:54:29 CEST

4. Juli 2012



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

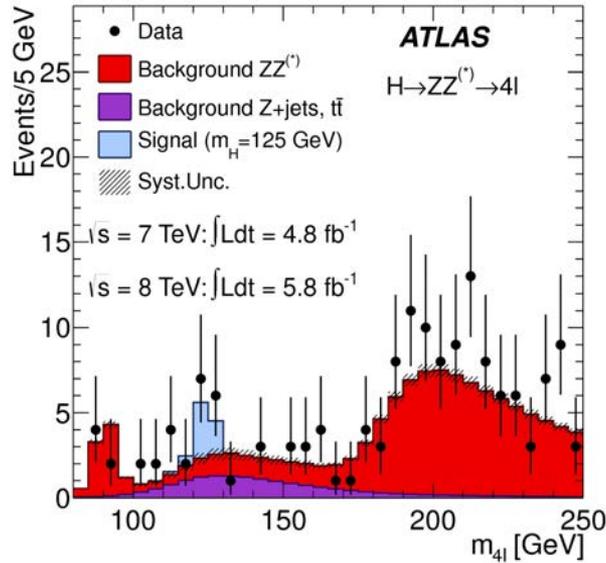
*"... for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of sub-atomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN's Large Hadron Collider."*



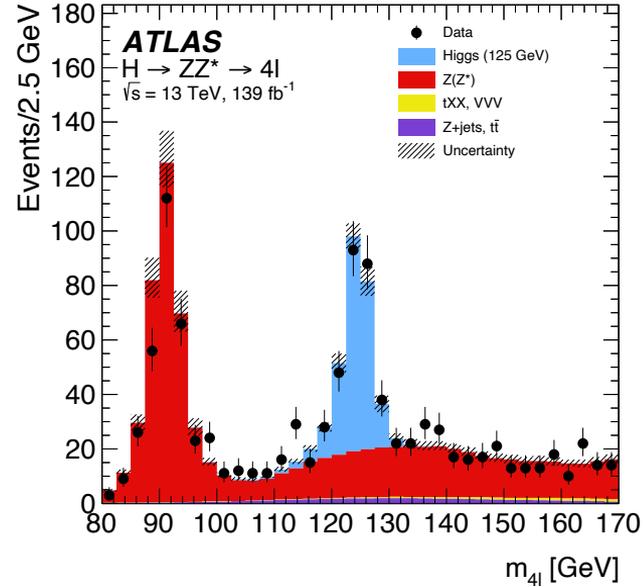
# Signale des Higgs-Teilchens

Fortschritt während der letzten 10 Jahre

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

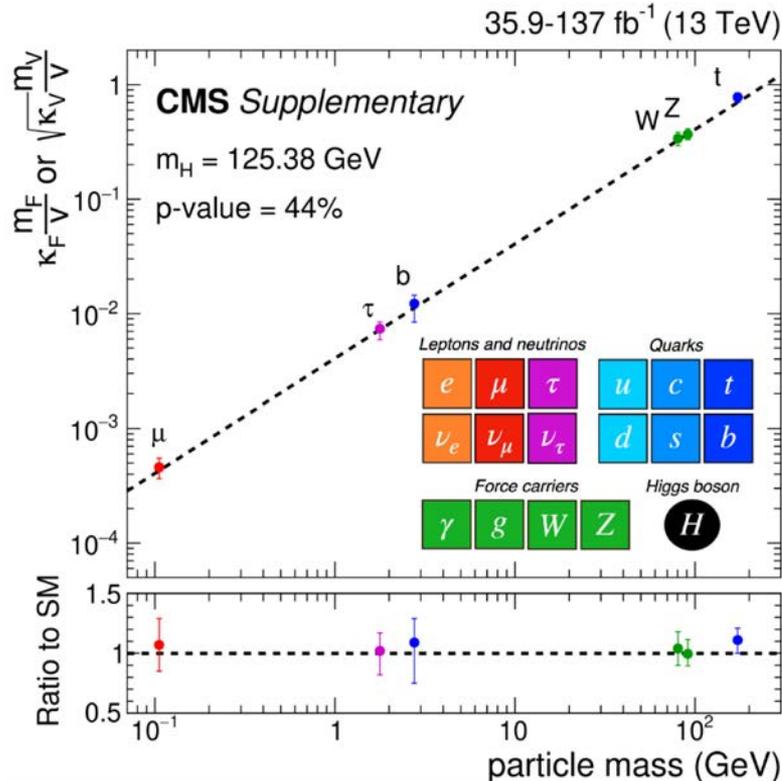


2012



2022

# Stärke der Wechselwirkung des Higgs-Teilchens mit anderen Teilchen mit anderen Teilchen



Die Wechselwirkungsstärke ist proportional zur Masse der Teilchen

→ Neuer Teilchentyp

zusätzlich: Spin-0 nachgewiesen

→ Higgs-Teilchen

# Kontrolle des Fortschritts



# Relevanz für die Gesellschaft

- 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
  - .....
- Die Teilchenphysik, und damit auch die Higgs-Suche, hat wichtige Technologieentwicklungen angestoßen
  - Ausbildung von Studierenden in einem internationalen und hochkompetitiven Umfeld



# Anwendungen, angestoßen aus der Teilchenphysik

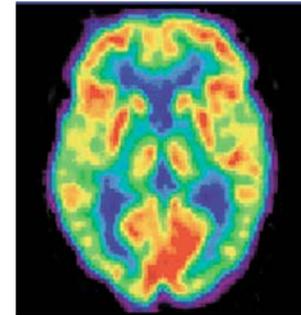
- World Wide Web (CERN)
- GRID (Cloud)-Computing
- Von der Entwicklung von Beschleunigern und Detektoren profitieren Industrie, Medizin und andere Wissenschaftszweige

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

- Beschleuniger für Strahlentherapie

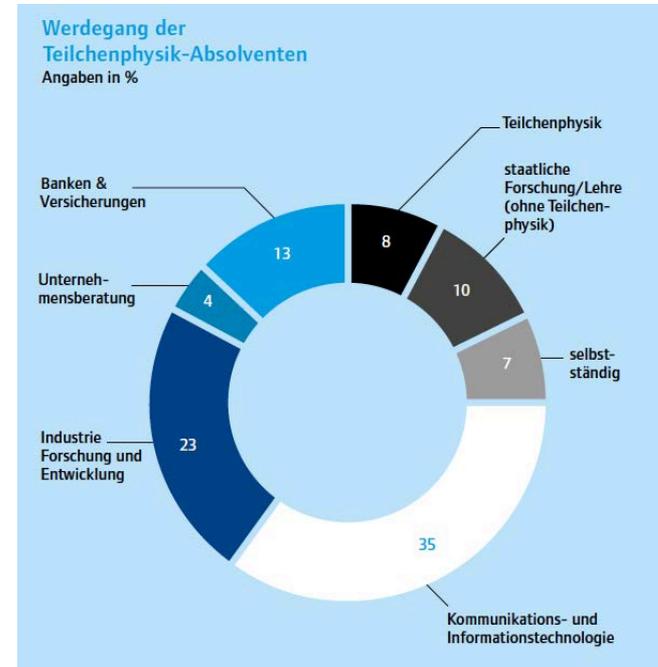
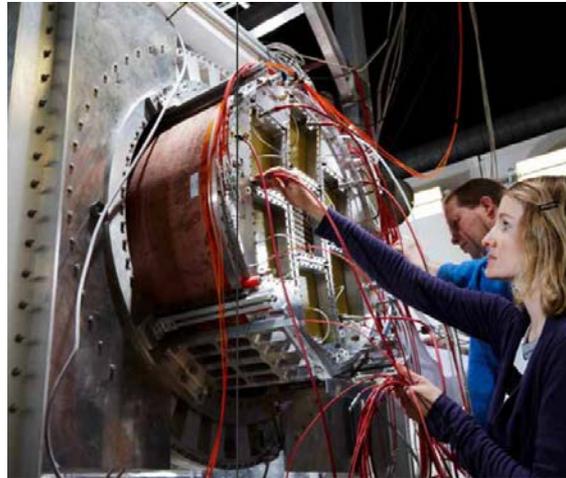
- Beschleuniger in der Industrie  
(z.B. Bearbeitung von Oberflächen)

- Transfer von Analysemethoden in Unternehmen  
(IT-Unternehmen, High-Tech-Unternehmen, Versicherungen, ....)
- Maschinelles Lernen / KI-Methoden werden bei uns schon seit mehr als 20 Jahren benutzt

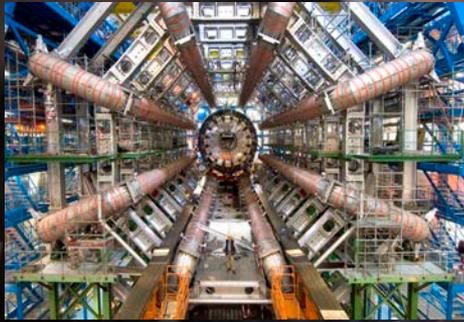
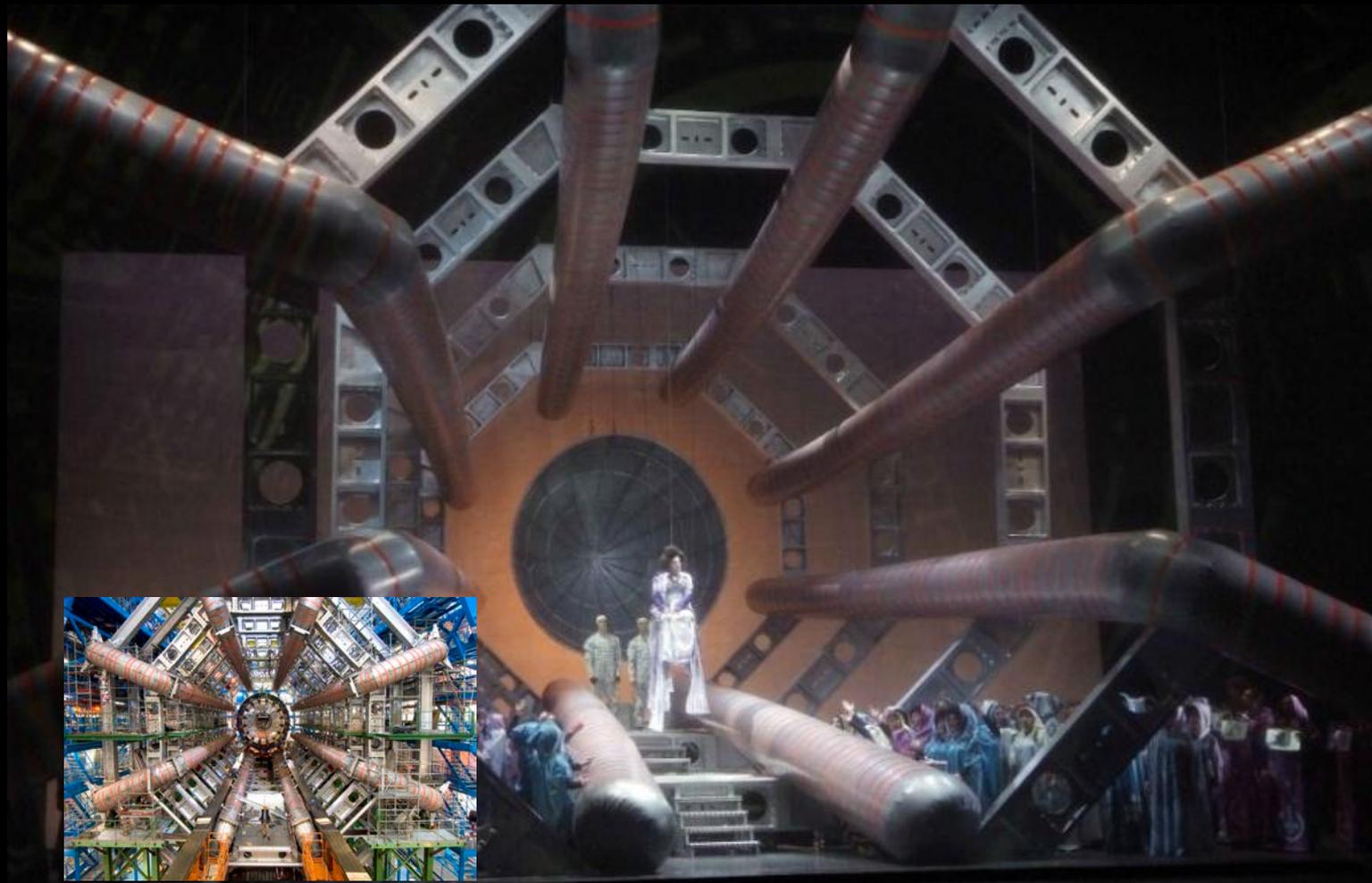


# Relevanz für die Gesellschaft

Ausbildung von Studierenden in einem internationalen und hochkompetitiven Umfeld

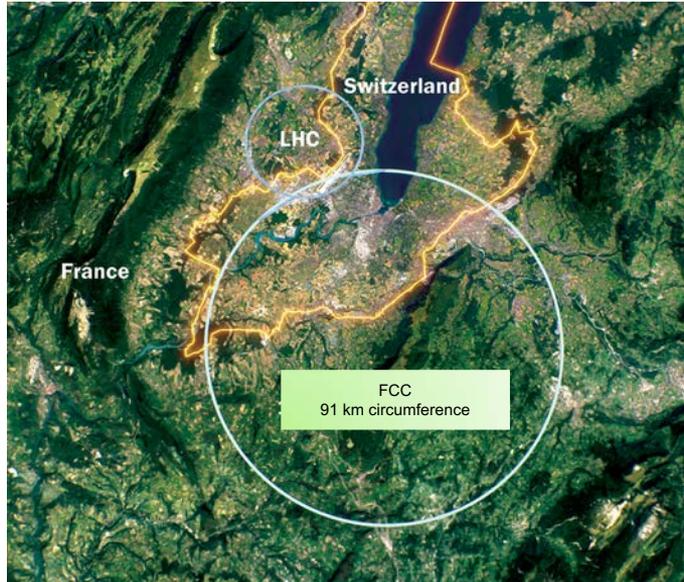


Bühnenbild "Les Troyens" in Valencia, Oktober 2009



# *Backup Slides*

# Zukunftspläne: Future Circular Collider (FCC)



- ca. 91 km Umfang
- Kollisionen von Elektronen + Positronen (um 2045)  
später: Proton + Proton



- Diskussionen in der europäischen (weltweiten) Gemeinschaft der Teilchenphysiker haben begonnen
- Entscheidung (Geldgeber) voraussichtlich in 2027/28