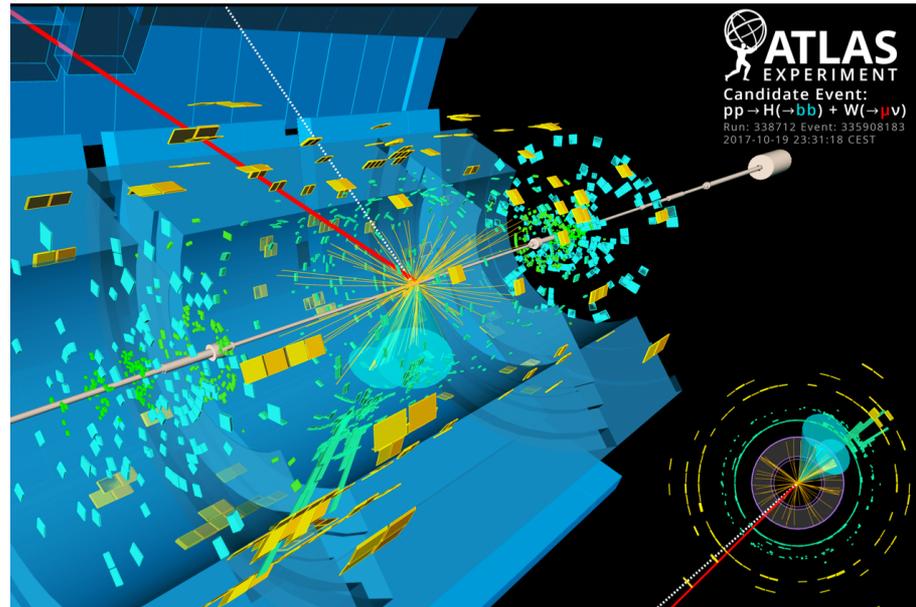
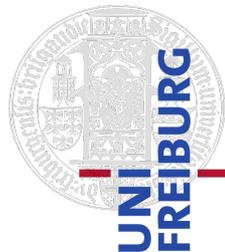


CERN und die Suche nach den kleinsten Bausteinen der Materie



Prof. Dr. Karl Jakobs
Experimentelle Teilchenphysik
Universität Freiburg

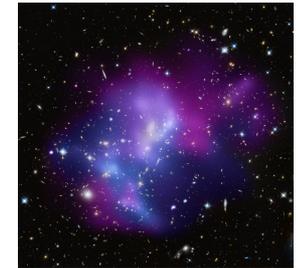
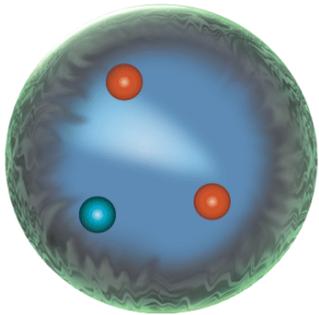


Motivation und Zielsetzung der Teilchenphysik



Beschreibung der Materie und der
wirkenden Kräfte
(Wechselwirkungen)

„Bausteine und Kräfte“

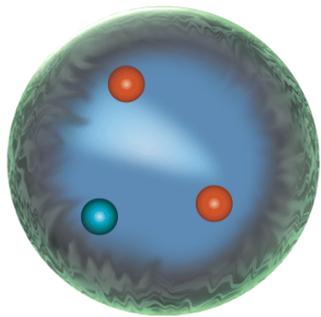


Motivation und Zielsetzung der Teilchenphysik

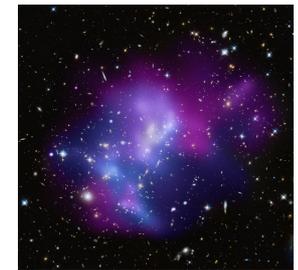


Beschreibung der Materie und der
wirkenden Kräfte
(Wechselwirkungen)

„Bausteine und Kräfte“

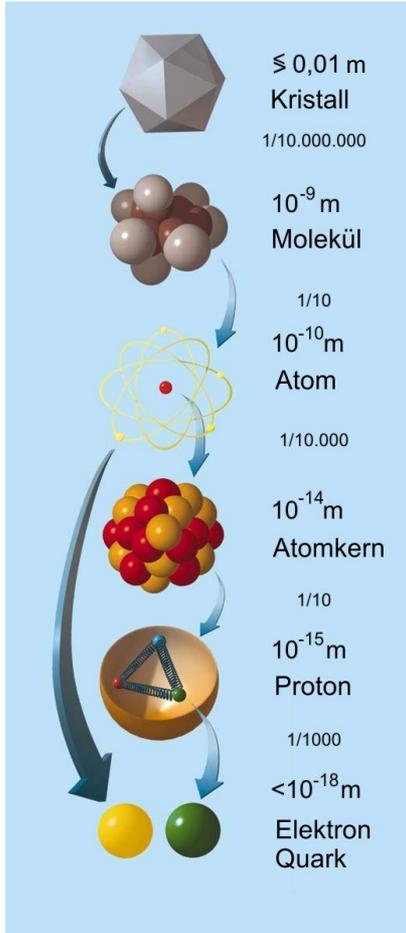


von kleinsten Abständen
(10^{-18} m)



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

Erforschung der Materie



Auge, Mikroskop
(Licht)

Elektronenmikroskop
(Elektronen)

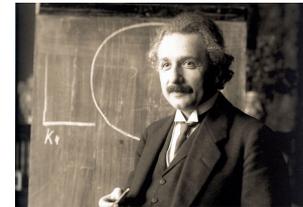
Teilchenbeschleuniger
(Synchrotron-Strahlung)

Teilchenbeschleuniger
(Teilchen hoher Energie)



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

$$E = mc^2$$



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"





For the German Federal Republic

Pour la République Fédérale
d'Allemagne

K. Reinhard

subject to ratification

For the Kingdom of Belgium

Pour le Royaume de Belgique

J. H. ...

sous réserve de ratification

For the Kingdom of Denmark

Pour le Royaume de Danemark

B. ...

sous réserve de ratification

23.12.53

For the French Republic

Pour la République Française

Alexandre Parodi
René ...

sous réserve de ratification

For the Kingdom of Greece

Pour le Royaume de Grèce

N. K. ...
sous réserve de ratification

For Italy

Pour l'Italie

...

For the Kingdom of Norway

Pour le Royaume de Norvège

Subject to ratification
31/12/1953.
...

For the Kingdom of the Netherlands

Pour le Royaume des Pays-Bas

...

subject to 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

Bochet ...

subject to ratification

For the Kingdom of Sweden

Pour le Royaume de Suède

Josef Waller
Torsten Gustafson
Subject to ratification

For the Confederation of Switzerland

Pour la Confédération Suisse

J. ...
sous réserve de ratification

For the Federal People's Republic
of Yugoslavia

Pour la République Fédérative
Socialiste de Yougoslavie

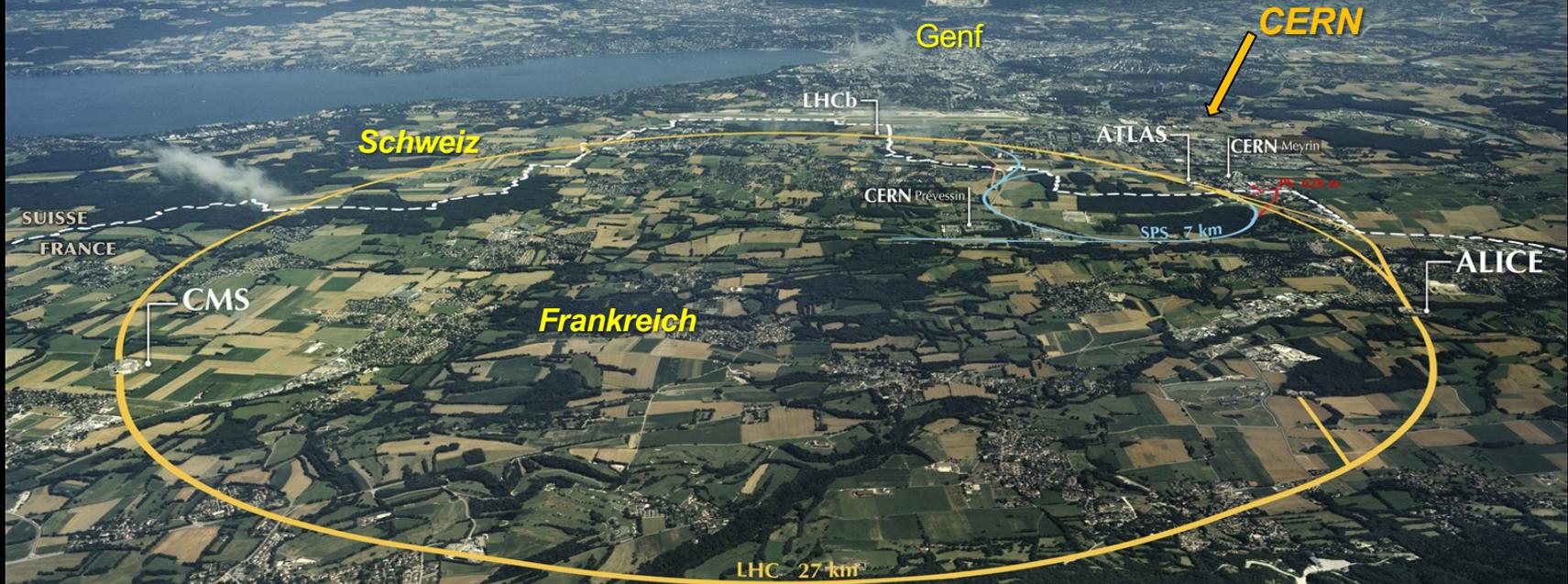
CERN heute:

- CERN ist das weltweit führende Labor für Teilchenphysik
 - Physikalische Grundlagenforschung, Technologie und Innovation, Ausbildung –
+ Internationale Zusammenarbeit (Kollaboration)
- 23 Mitgliedsstaaten
 - Finanzierung entsprechend des Bruttonettoprodukts,
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

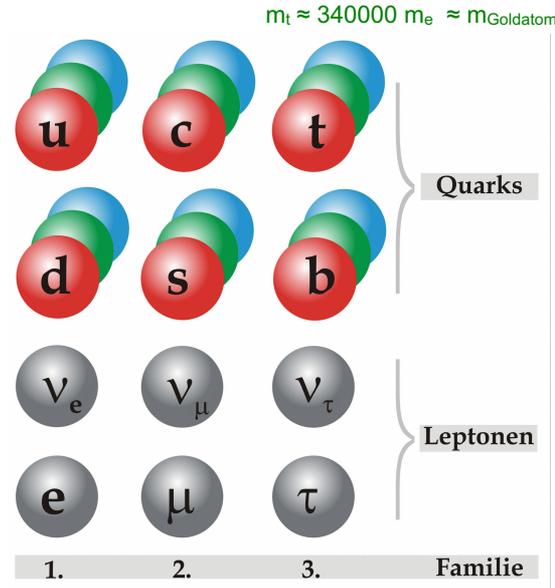


CERN

Das Europäische Forschungszentrum für Elementarteilchenphysik
- Ein Musterbeispiel für Kooperation in der Wissenschaft -

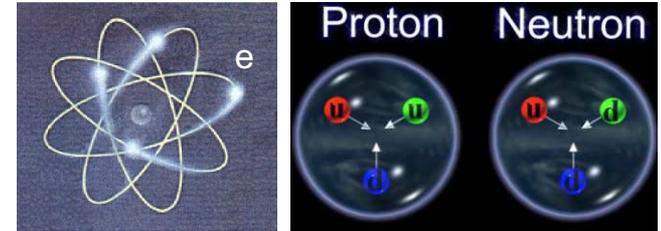


Die Bausteine der Materie: Quarks und Leptonen

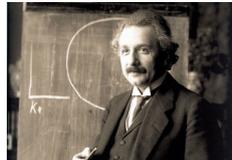


- Elementare Bausteine: Quarks und Leptonen; „punktförmig“ (Ausdehnung $< 10^{-18}$ m)
 - Drei Familien von Materieteilchen; Die Masse der Quarks und Leptonen steigt mit der Familienzahl an
- Myon (μ) und Tau-Lepton (τ) sind schwere Kopien des Elektrons

Warum drei Familien?



Materie, die uns umgibt: Bausteine der 1. Familie

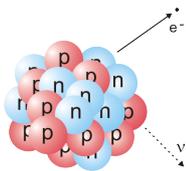
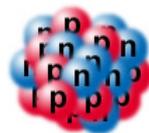
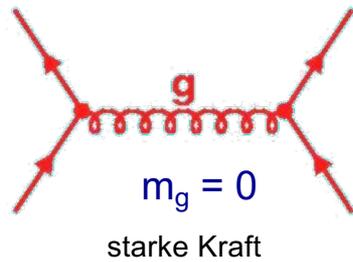
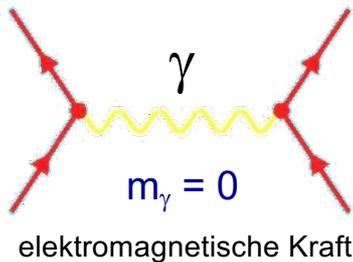


$$E = mc^2$$

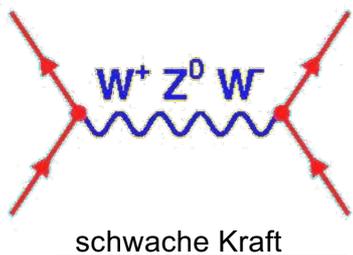
$$m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg} = 0,000511 \text{ GeV}/c^2$$

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

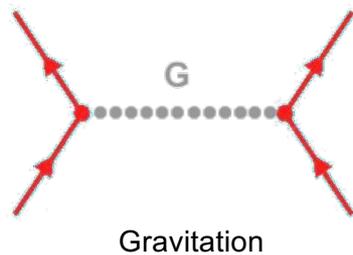
Die fundamentalen Kräfte



β -Zerfall



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

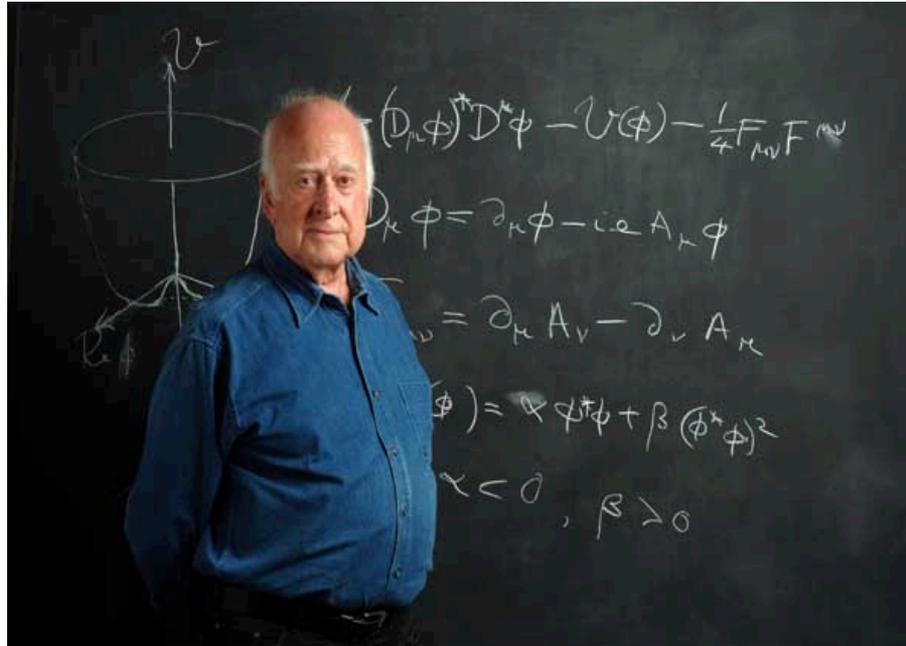


Theoretische Beschreibung: Wechselwirkung durch Austausch von „Kraftteilchen“
Quantenfeldtheorie

Problem (Theorie):

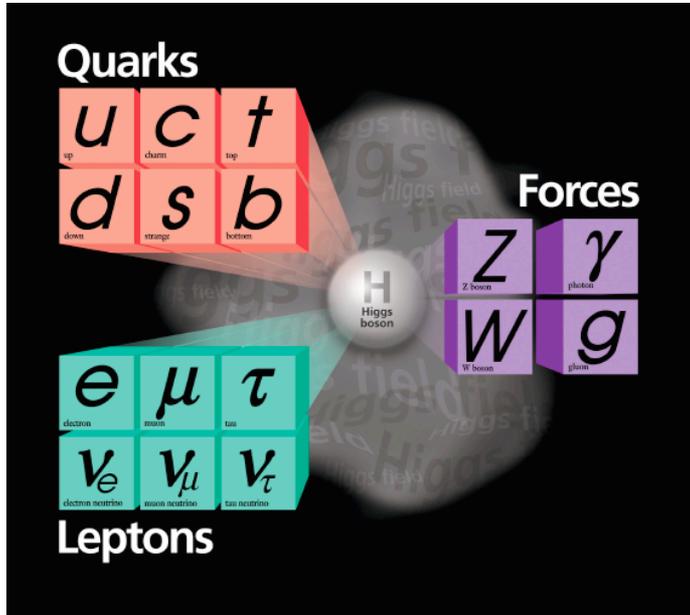
Austauschteilchen müssen masselos sein!

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:

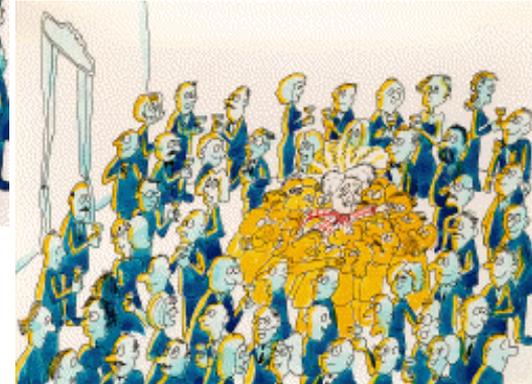
Prof. D. Miller
UC London



Higgs-Hintergrundfeld
erfüllt den Raum



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



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

4. Juli 2012

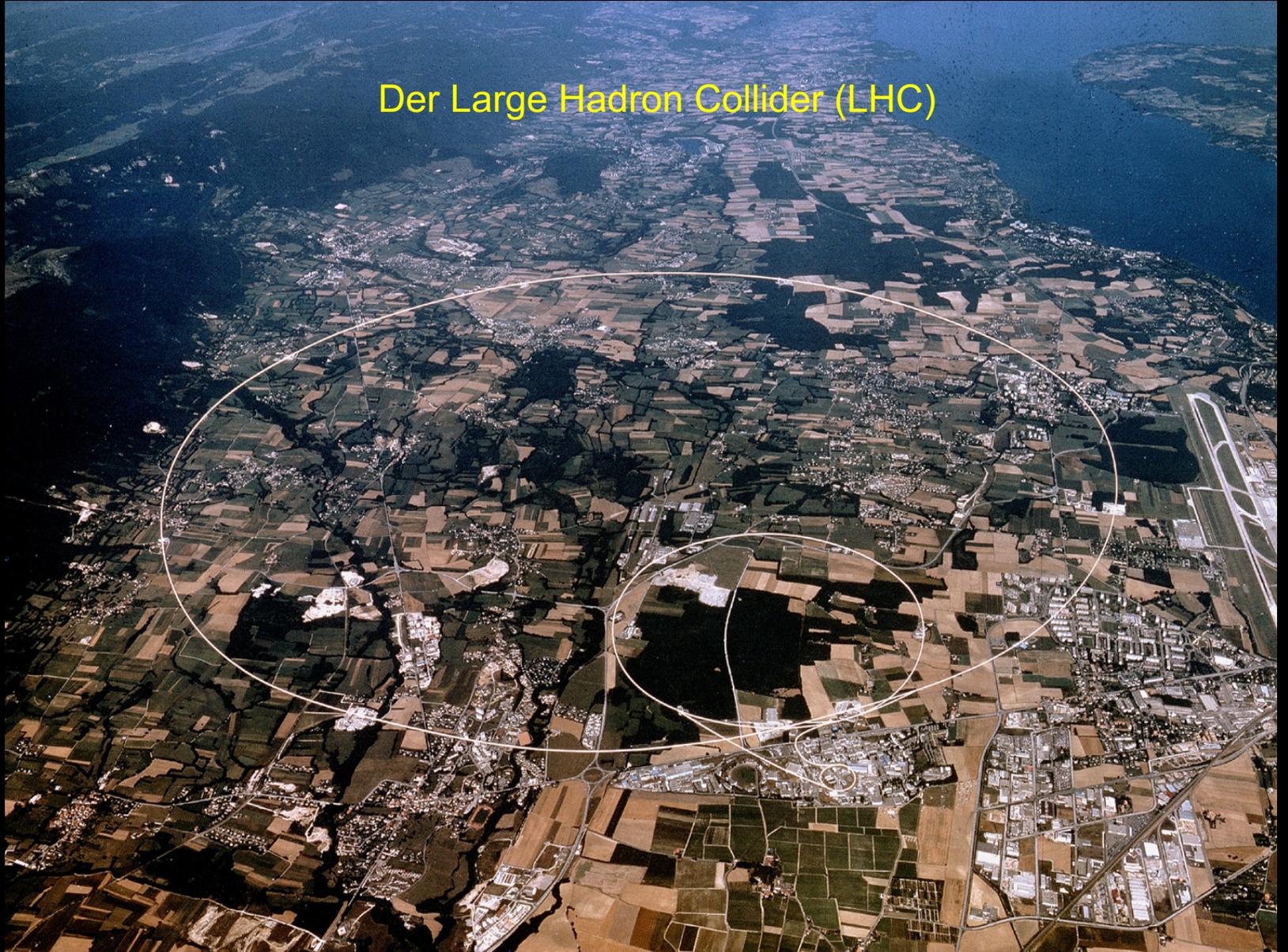


Nobel-Preis für Physik 2013: François Englert und Peter Higgs

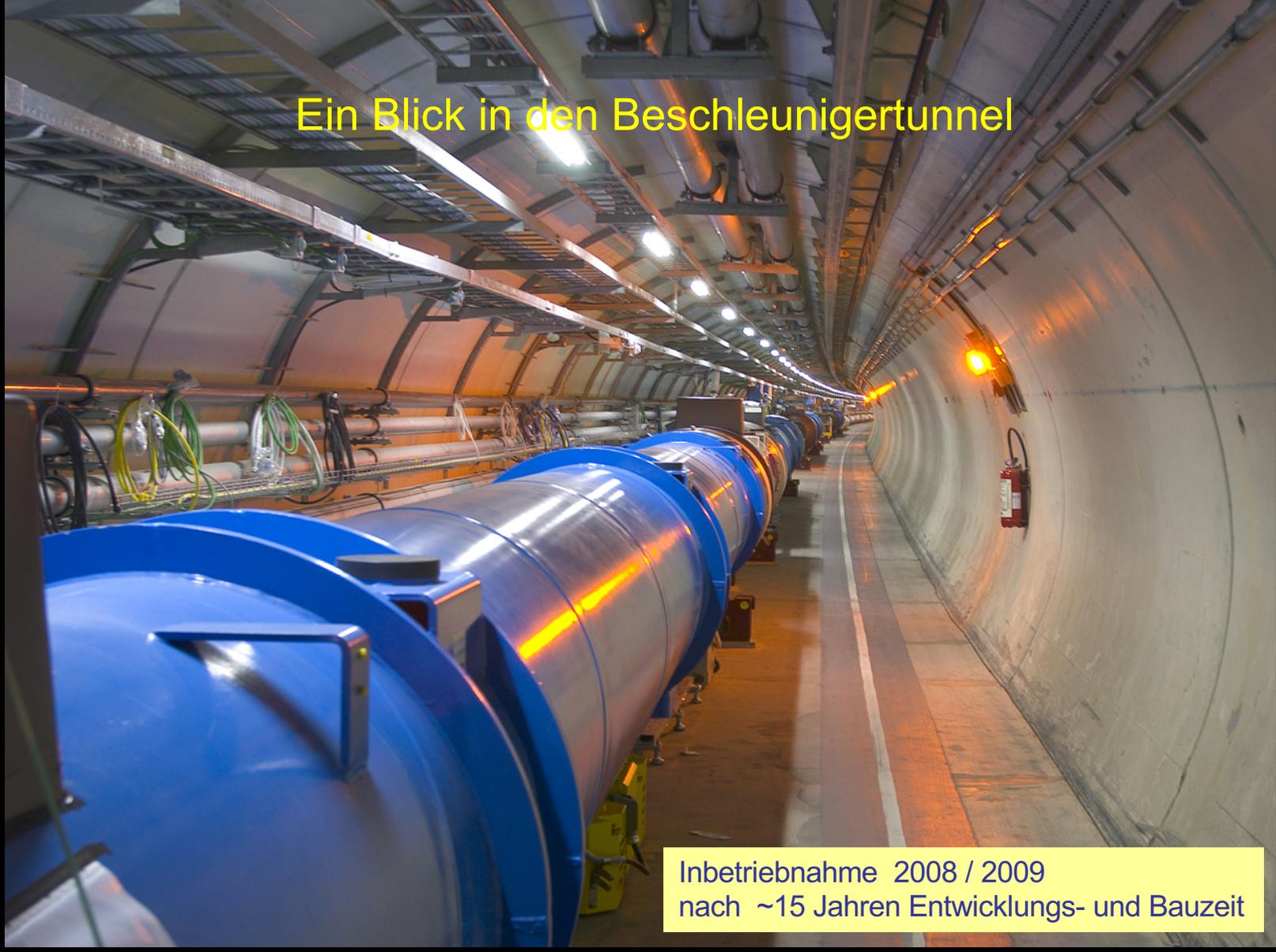
“ ... for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of sub-atomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN’s Large Hadron Collider.”



Der Large Hadron Collider (LHC)

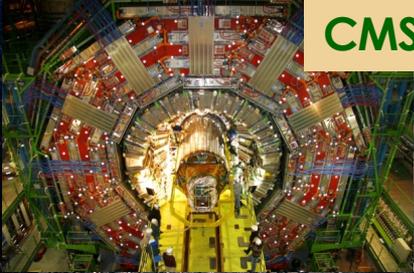


Ein Blick in den Beschleunigertunnel

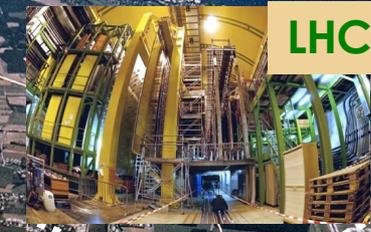


Inbetriebnahme 2008 / 2009
nach ~15 Jahren Entwicklungs- und Bauzeit

Der Large Hadron Collider (LHC)



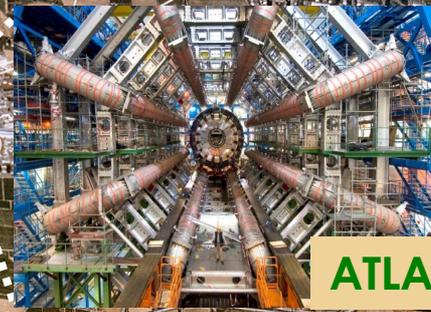
CMS



LHCb

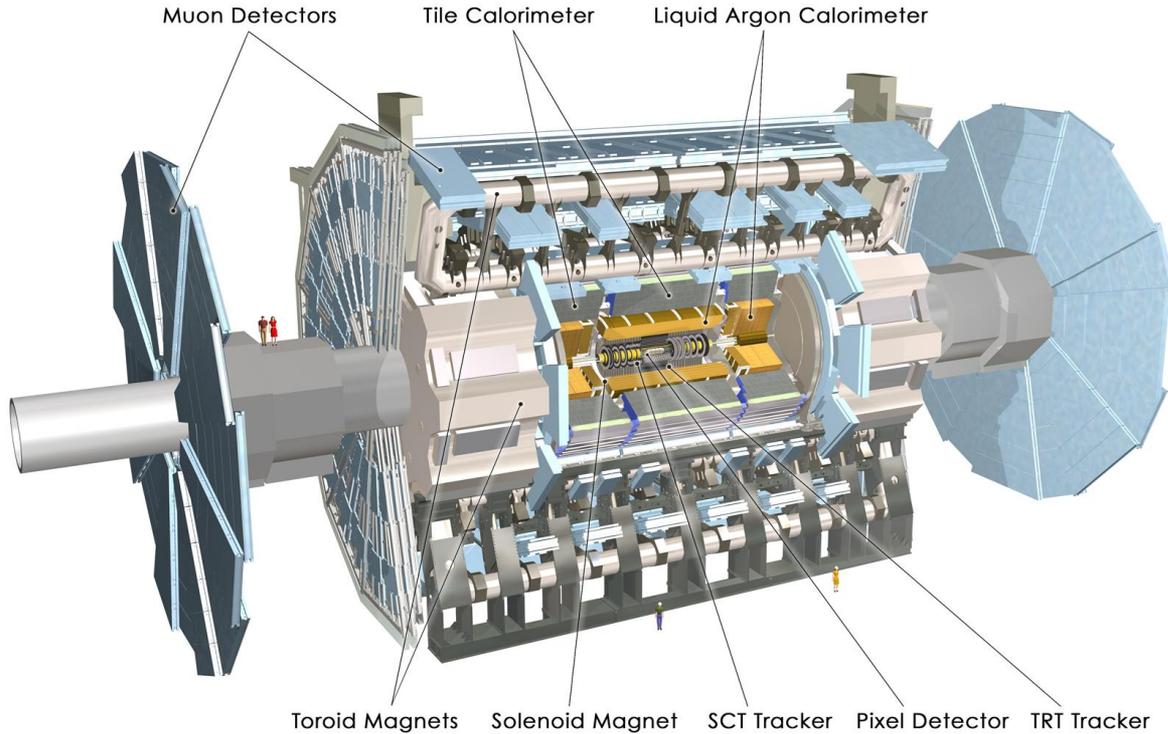


ALICE



ATLAS

Das ATLAS-Experiment



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

~120 Mio. Auslesekanäle
40 Mio. Ereignisse pro Sekunde (aufnahmebereit alle 25 ns)
1000 Ereignisse pro Sekunde selektiert → Speichermedien

Status: June 2022



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

ATLAS Collaboration

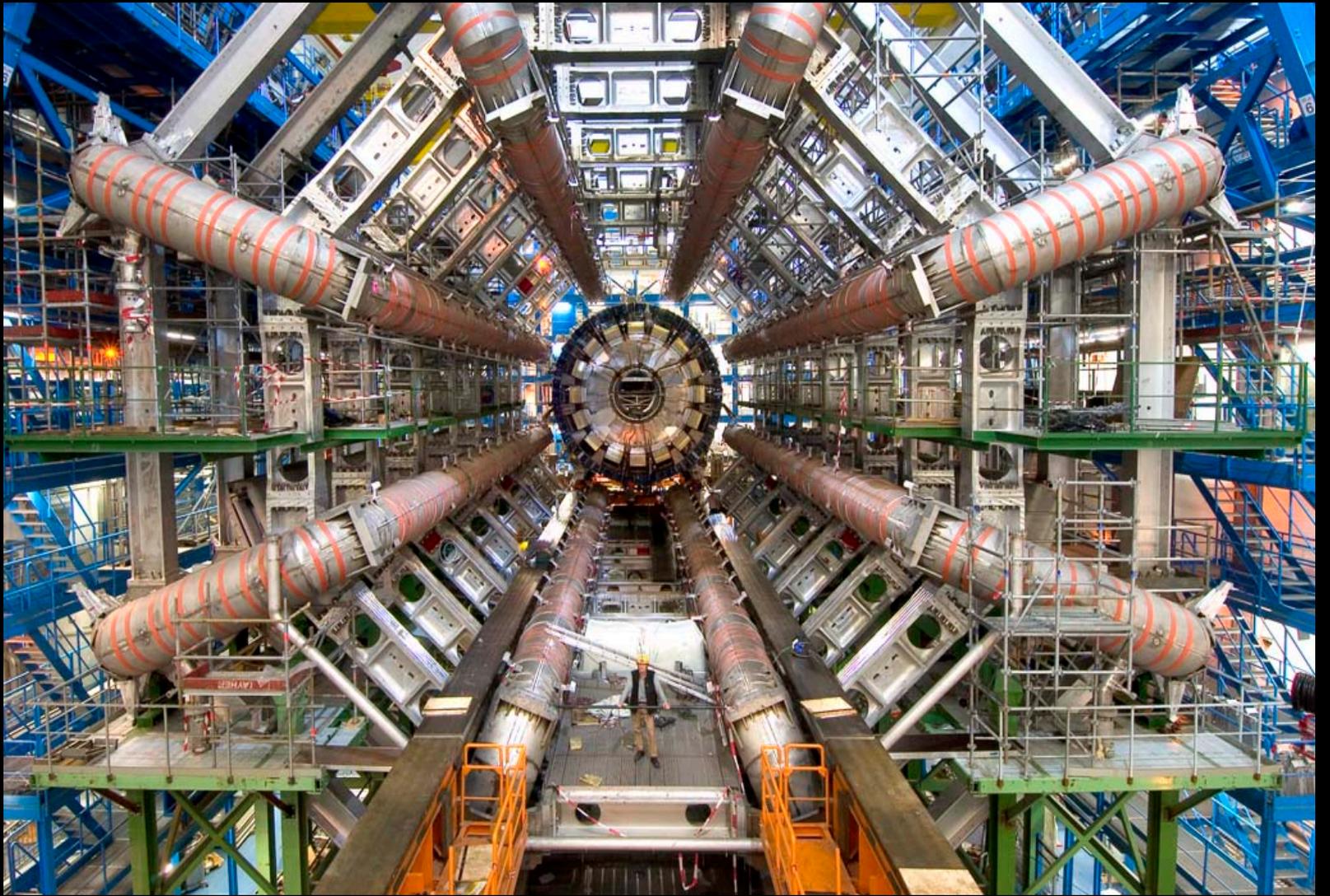
181 institutions (244 institutes) from 42 countries

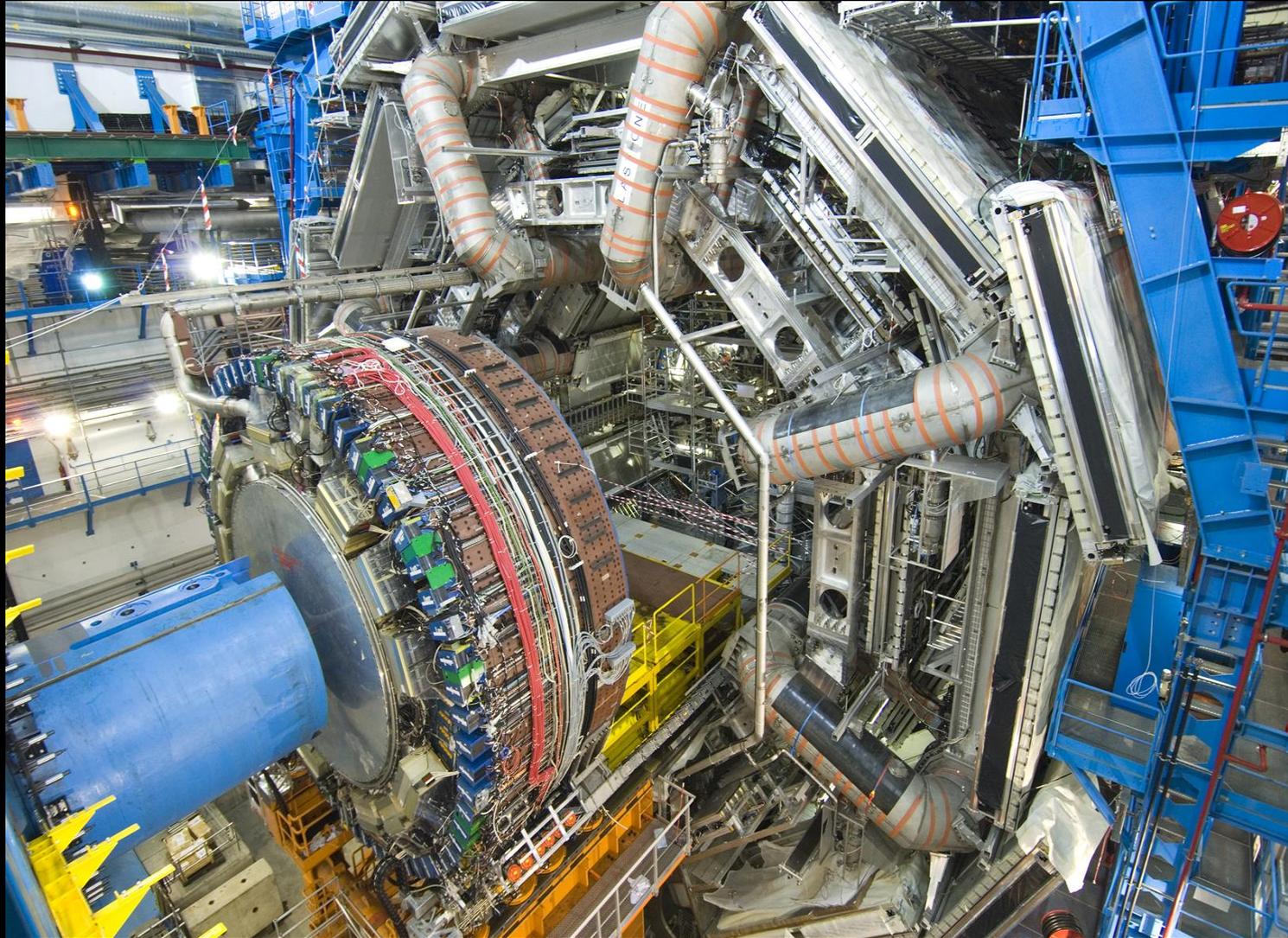


ATLAS Deutschland:
BMBF-Forschungsschwerpunkt ATLAS

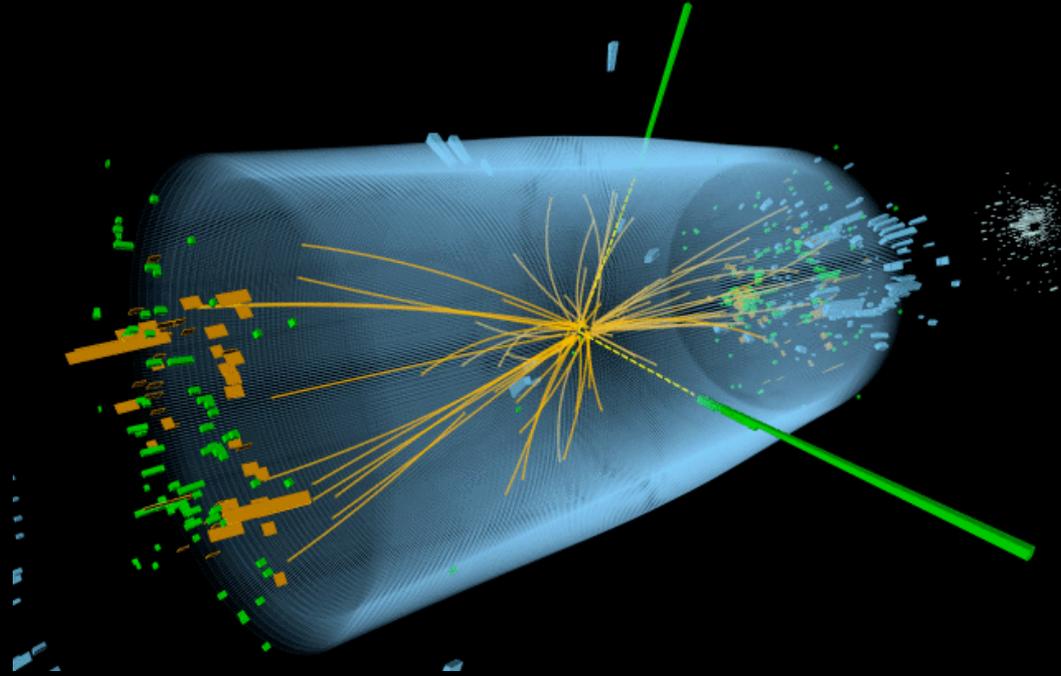
- HU Berlin, Bonn, DESY, Dortmund, Dresden
Freiburg, Gießen, Göttingen, Heidelberg,
Mainz, LMU München, MPP München, Siegen,
Würzburg, Wuppertal
- ~ 420 Wissenschaftler/innen
(inkl. ~200 Student/inn/en)

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





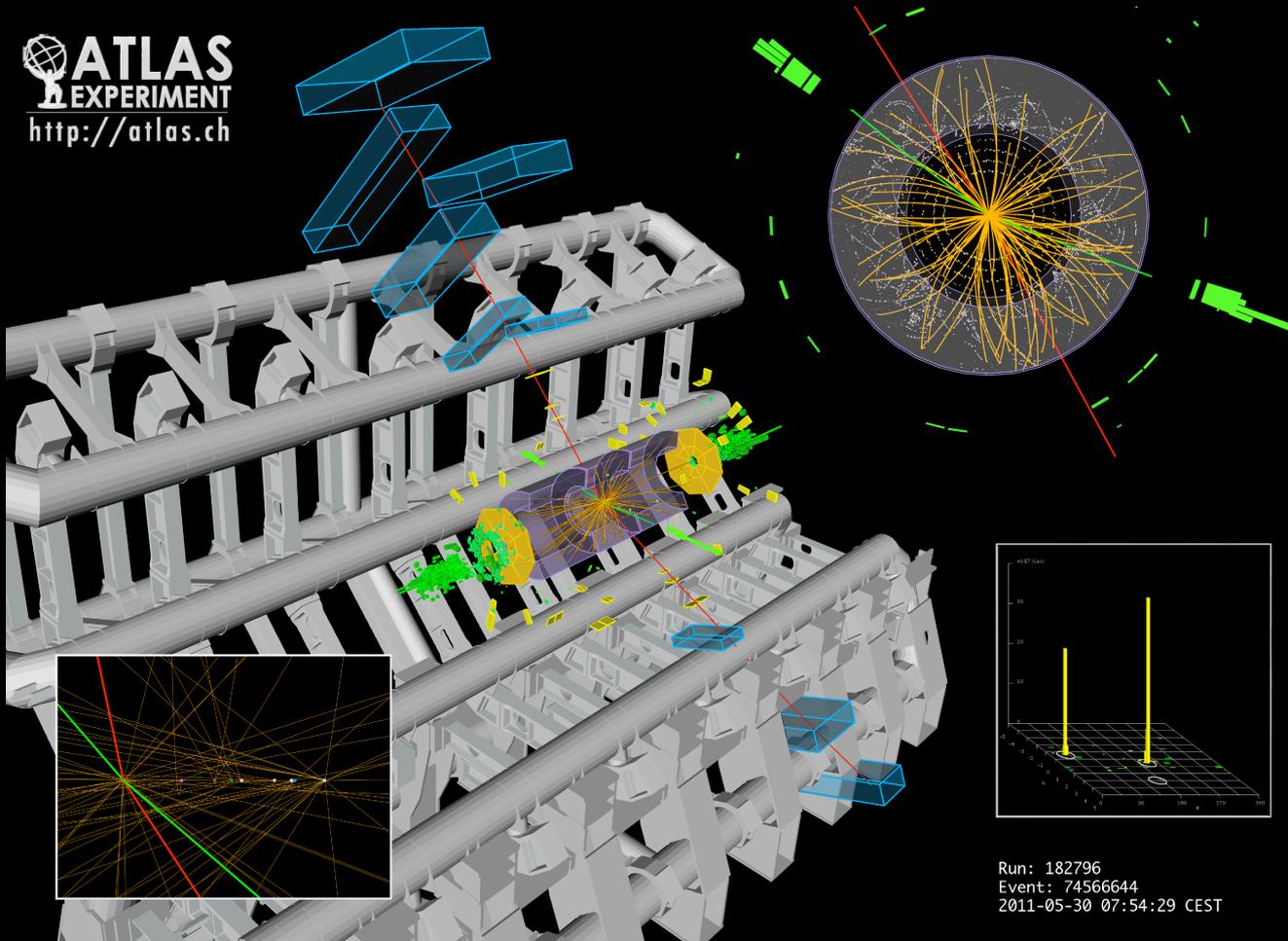
Entdeckung des Higgs-Teilchens



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

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

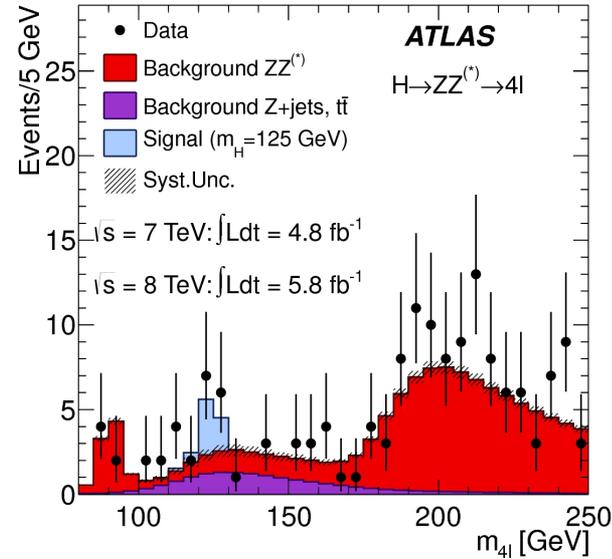
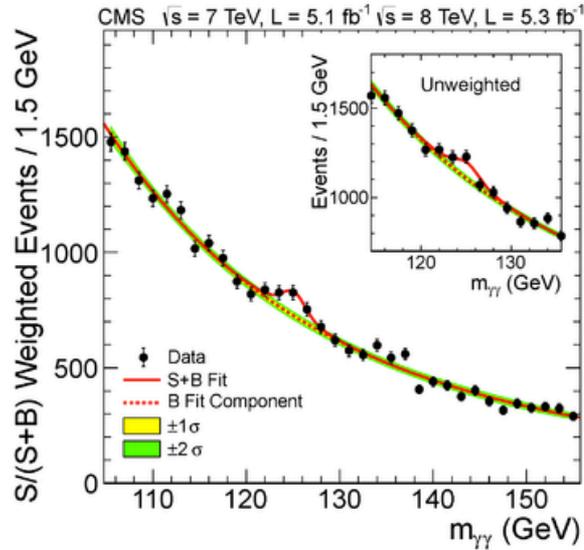

ATLAS
EXPERIMENT
<http://atlas.ch>



Signale des Higgs-Teilchens (2012)

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

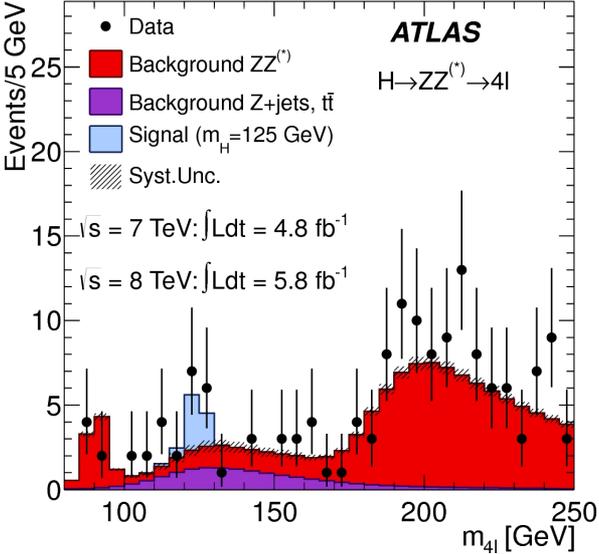
$$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell$$



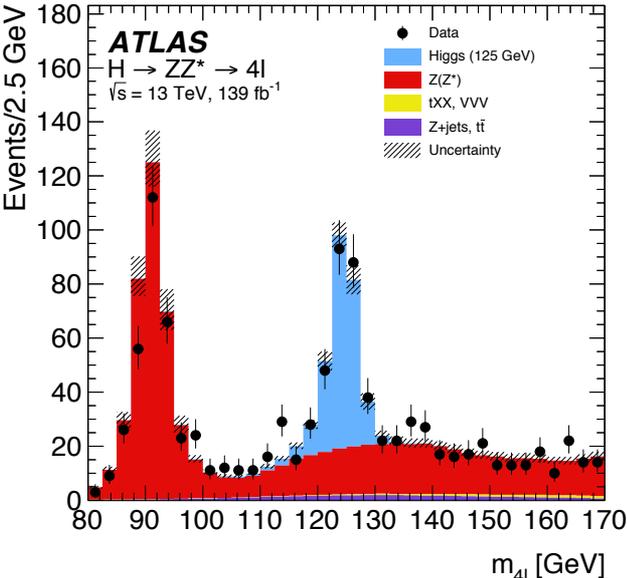
http://www.scholarpedia.org/article/The_Higgs_Boson_discovery

Fortschritt während der letzten 10 Jahre

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

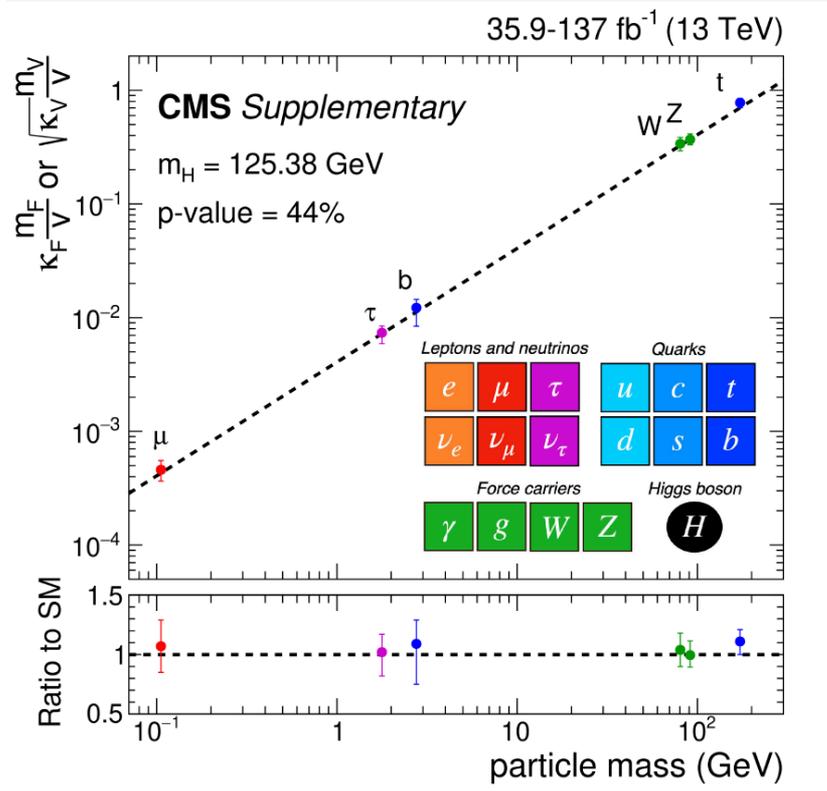


2012



2022

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



Die Wechselwirkungsstärke ist proportional zur Masse der Teilchen

→ Neuer Teilchentyp

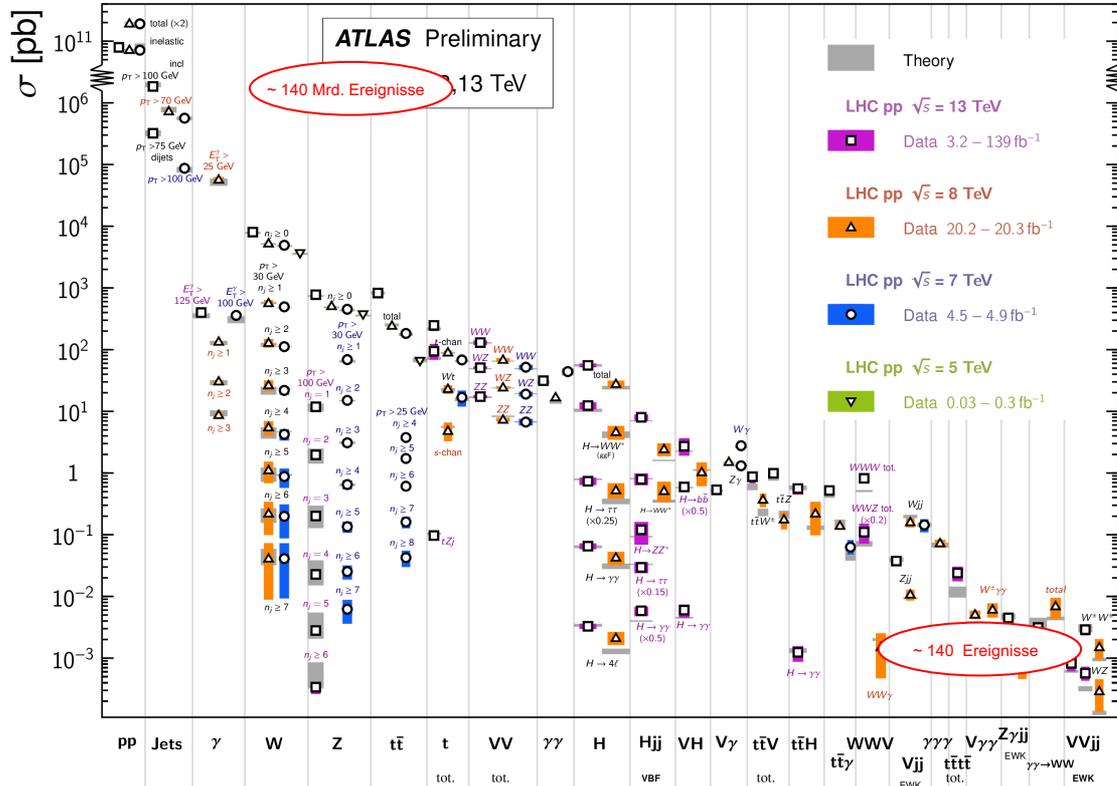
zusätzlich: Spin-0 nachgewiesen

→ Higgs-Teilchen

Präzisionstests der Standardtheorie am LHC

Standard Model Production Cross Section Measurements

Status: February 2022

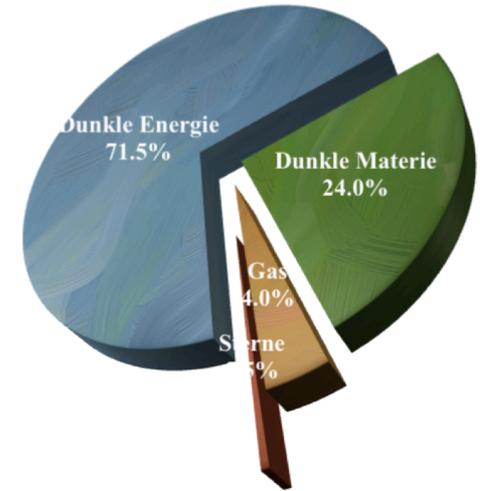


*Exzellente Bestätigung der Standardtheorie
(Quantenfeldtheorie)*

Wie geht es weiter am LHC?

1. Präzise Untersuchung des Higgs-Teilchens
 - Zeigen sich Abweichungen bei höherer Messgenauigkeit?
 - Gibt es noch weitere Higgs-Teilchen?
2. Gibt es neue Materieformen

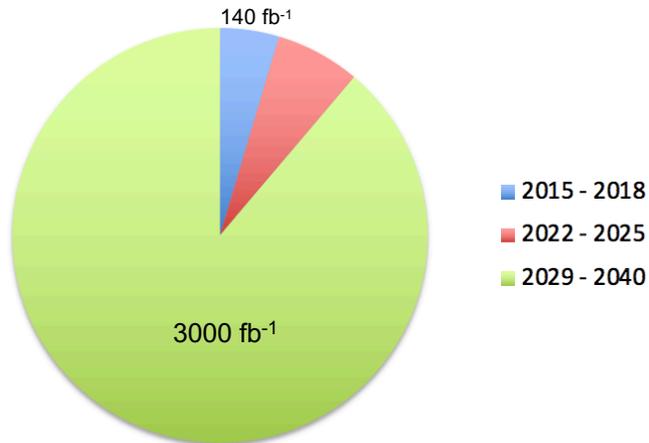
Stellen diese die Dunkle Materie im Universum dar?



Wie geht es weiter am LHC?

- Datennahme wird bis etwa 2040 fortgesetzt;
Ab 2029 mit deutlich verbesserter Leistungsfähigkeit der Detektoren und des Beschleunigers
(höhere Strahlintensität)

→ Volle Leistungsfähigkeit der LHC-Infrastruktur wird ausgenutzt
- Bislang erst etwa 5% der zu erwartenden Datenmenge analysiert



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
-

- 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

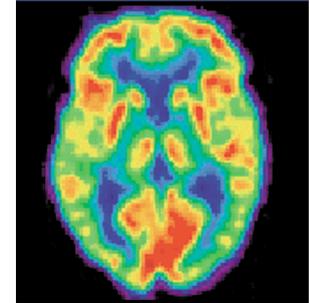
- World Wide Web (CERN)
- GRID (Cloud)-Computing
- Von der Entwicklung von Beschleunigern und Detektoren profitieren Industrie, Medizin und andere Wissenschaftszweige

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,)

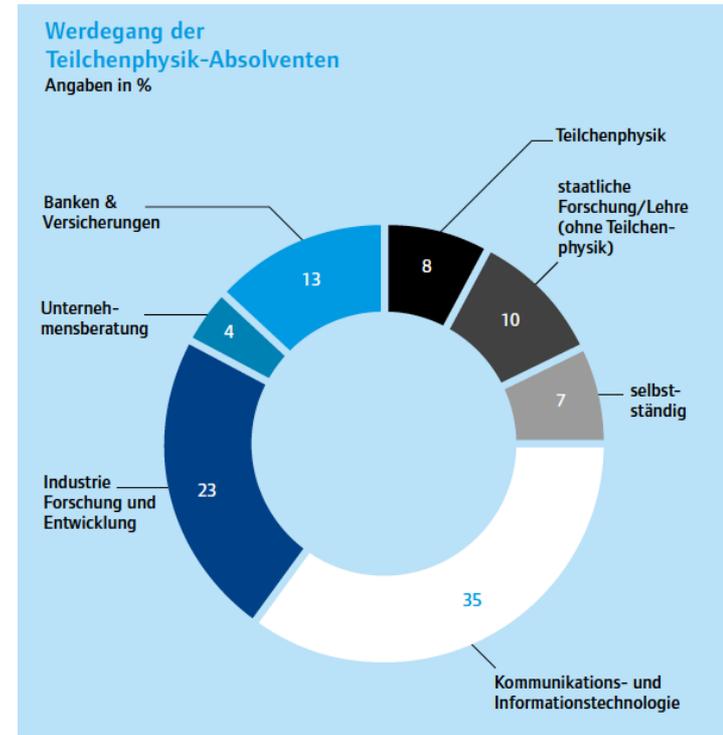
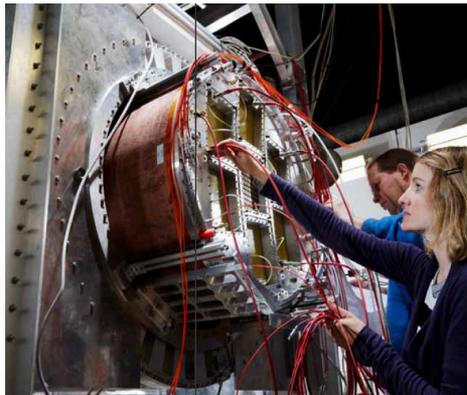


Spin-offs: vom World Wide Web...

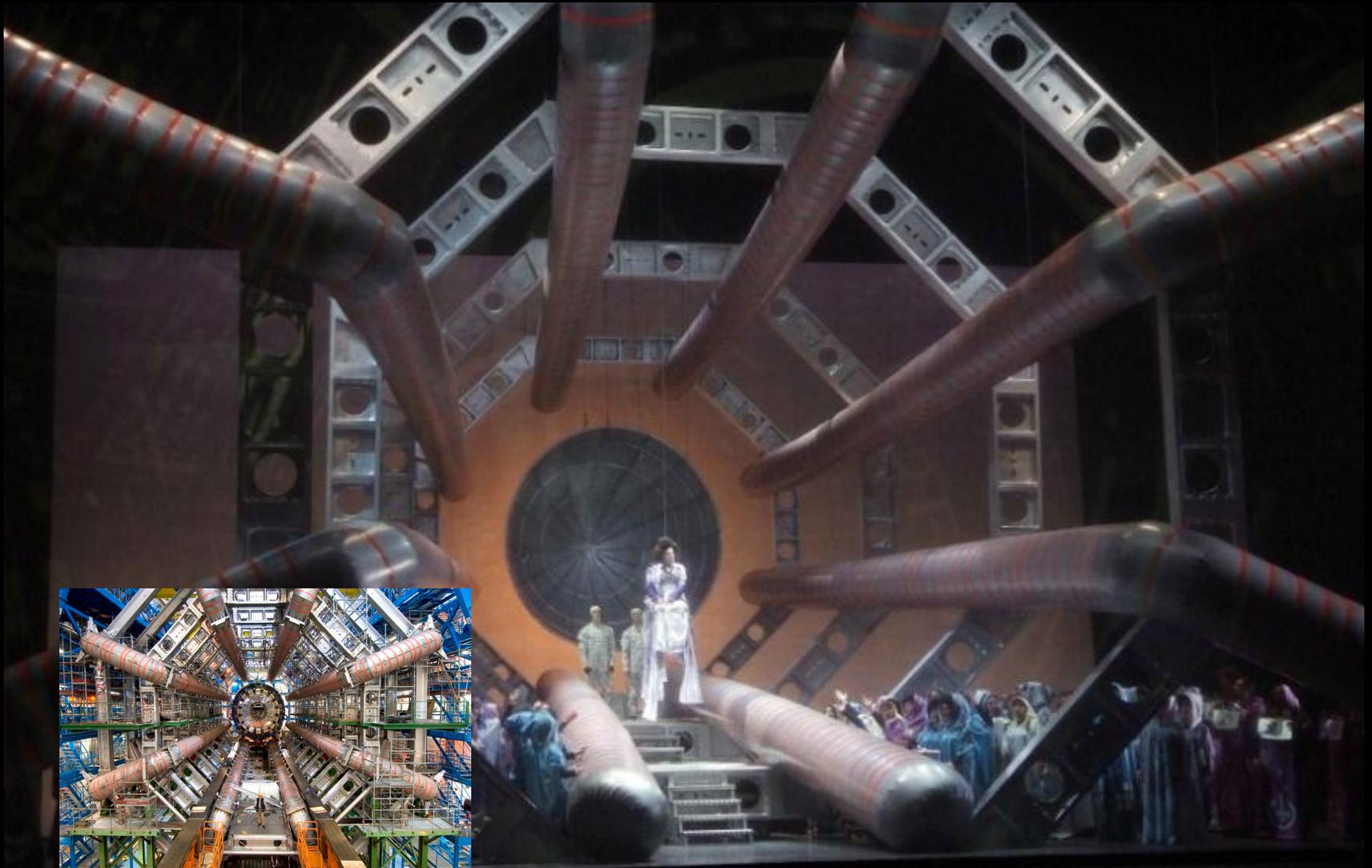


Relevanz für die Gesellschaft

Ausbildung von Studierenden in einem internationalen und hochkompetitiven Umfeld



Bühnenbild "Les Troyens" in Valencia, Oktober 2009



Kontrolle des Fortschritts

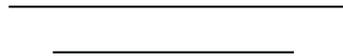


Zusammenfassung

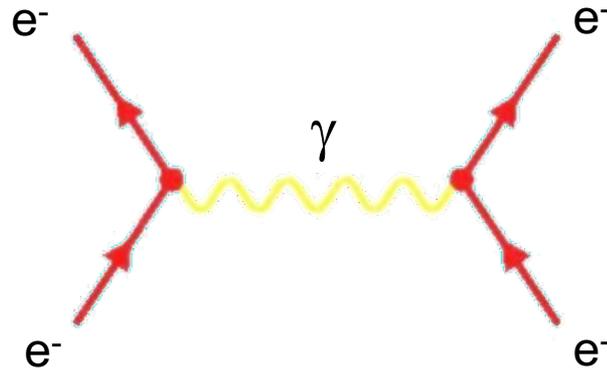
- CERN ist ein Musterbeispiel europäischer / weltweiter Kooperation in der Wissenschaft; Exzellente Forschung in internationaler Zusammenarbeit
- Das LHC-Projekt ist das weltweit größte Wissenschaftsprojekt (Komplexität, Ressourcen, Management & Soziologie, ...)
- Die Leistungsfähigkeit des Beschleunigers (CERN) und der Experimente sind hervorragend
- Interessante Physik-Ergebnisse
Höhepunkt: Entdeckung des Higgs-Teilchens und Vermessung seiner Eigenschaften
- Momentan läuft der Beschleuniger bei der hohen Energie von 13,6 TeV

Wir stehen erst am Anfang einer langen Datennahmeperiode;

Der LHC hat das Potential für weitere richtungsweisende Entdeckungen



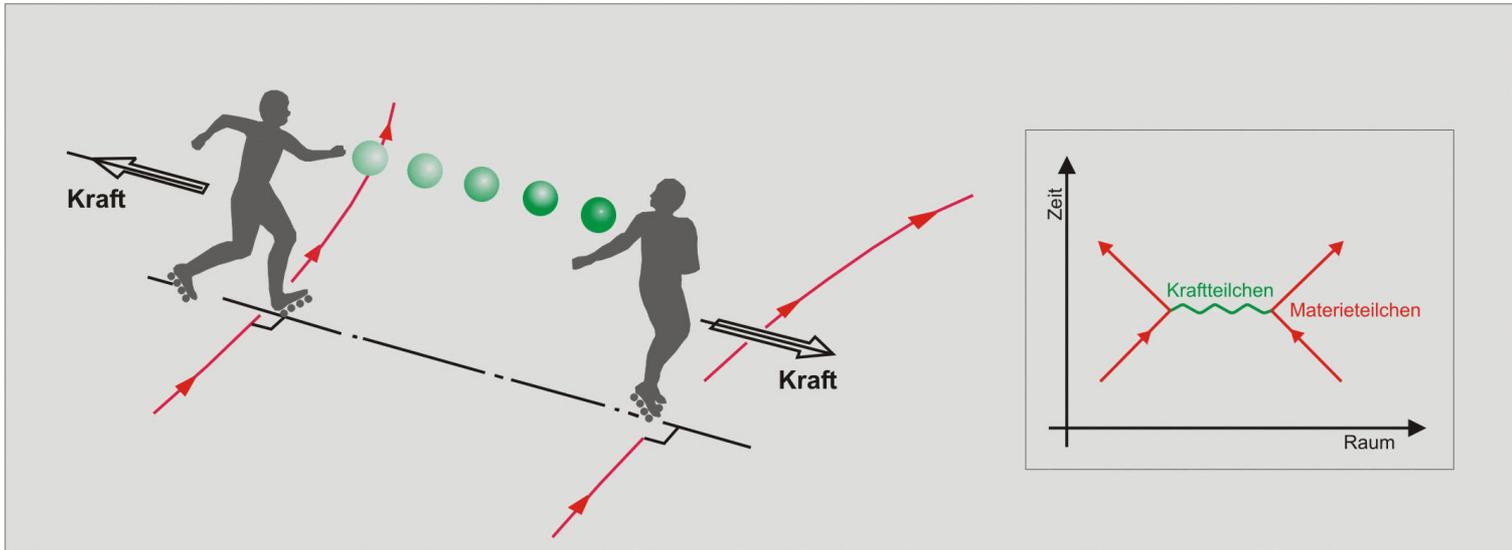
Backup Slides



Die elektromagnetische Kraft

Vermittelt durch Austausch eines Photons (Lichtteilchen)

Masse: $m_\gamma = 0$



Dunkle Materie

Vielfältige Evidenz für Dunkle Materie: (Nachweis über Gravitation)

- Rotationsgeschwindigkeiten äußerer Sterne in Galaxien
- Strukturbildung im Universum, Galaxienhaufen
- Gravitationslinseneffekte
- Wechselwirkung zwischen Galaxien



F. Zwicky



V. Rubin

