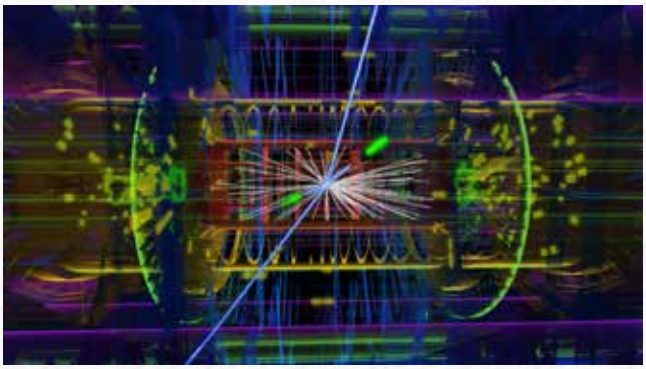
# *Von der Entdeckung des Higgs-Teilchens zur Suche nach Dunkler Materie -Neues zur Forschung am CERN-*



Alumni Freiburg, 22. Sept. 2017

Prof. Karl Jakobs
Physikalisches Institut
Universität Freiburg

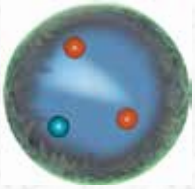
## *4. Juli 2012*

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."*

## Motivation und Zielsetzung der Teilchenphysik

Einheitliche und umfassende Beschreibung der



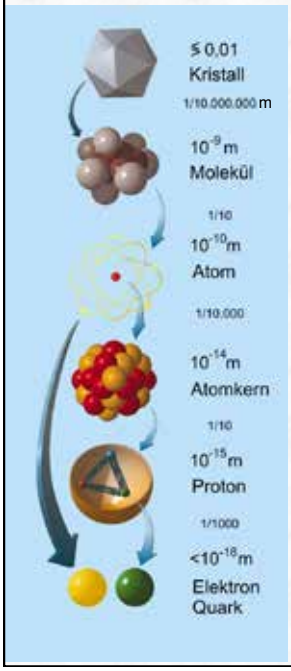
Materie und ihrer Wechselwirkungen

„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

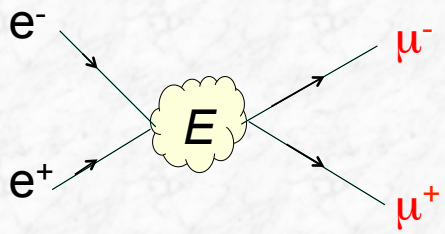
$$\Delta x \propto \frac{1}{p}$$

$$E = mc^2$$

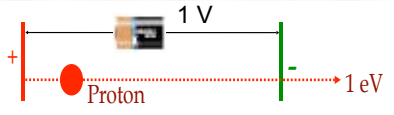
## Neue Teilchen aus hohen Energien

$$E = mc^2$$

bekannte Teilchen



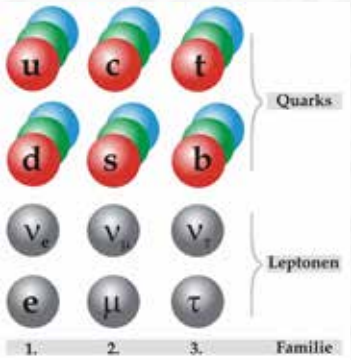

neue Teilchen




$m_{Eektron}$ = 511 keV = 511 000 eV/$c^2$
$m_{Proton}$ = 938 MeV = 938 000 000 eV/$c^2$
üblicherweise wird c=1 gesetzt

**$E_{LHC}$ = 13 TeV = 13 000 000 000 000 eV**

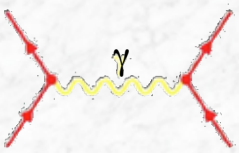
## Die Bausteine der Materie: Quarks und Leptonen



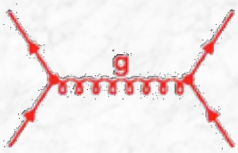

- Quarks und Leptonen scheinen punktförmig zu sein, Ausdehnung < $10^{-18}$ m (Elementarteilchen, Eigendrehimpuls halbzahlig (Spin ½) = Fermionen)
- Die Masse der Quarks und Leptonen steigt mit der Familienzahl an
  $m_\mu \approx 200\ m_e$ $m_\tau \approx 3500\ m_e$

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

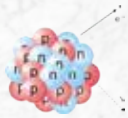
## Die fundamentalen Kräfte



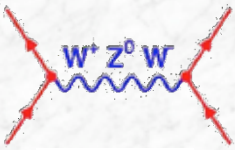

elektromagnetische Kraft




starke Kraft

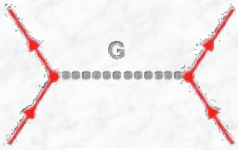


β-Zerfall




schwache Kraft

$m_W \approx 80.4$ GeV
$m_Z \approx 91.2$ GeV



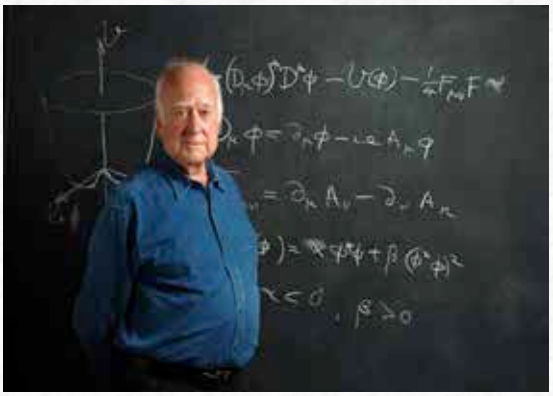

Gravitation

Theoretische Beschreibung: Wechselwirkung durch Austausch von „Kraftteilchen“

Austauschteilchen: Photon (γ), Gluonen (g), W- und Z-Teilchen
(Eigendrehimpuls ganzzahlig (Spin-1) = Bosonen)

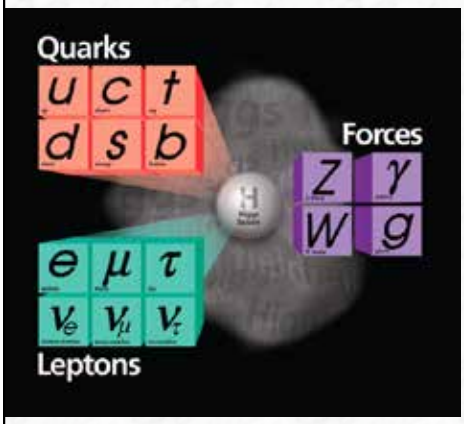
Problem: Austauschteilchen müssen masselos sein !

## 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




- 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

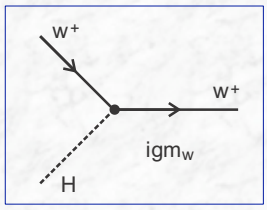
Higgs-Hintergrundfeld
erfüllt den Raum

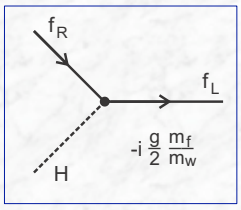
Ein Teilchen
im Higgs-Feld...

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

## Der Brout-Englert-Higgs Mechanismus

Für Experten



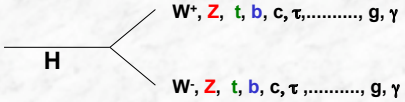




- Wechselwirkungsstärke der Teilchen mit dem Higgs-Feld ist proportional zu ihrer Masse
- Higgs-Boson zerfällt bevorzugt in die schwersten Teilchen
- Masse des Higgs-Bosons wird nicht vorhergesagt, jedoch $m_H < 1000$ GeV

## Zerfälle des Higgs-Teilchens

Zerfallsraten in die verschiedenen Teilchen können berechnet werden:

Für Experten




Lebensdauer: ~$10^{-22}$ s

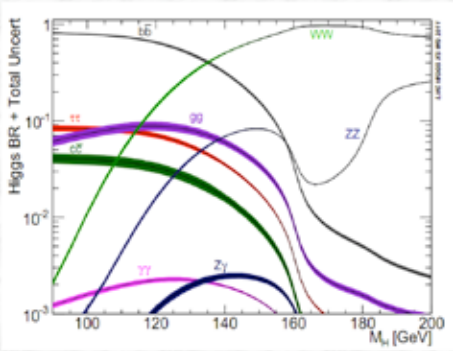
$$\Gamma(H \to f\bar{f}) = N_C \frac{G_F}{4\sqrt{2}\pi} m_f^2(M_H^2) M_H$$

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

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

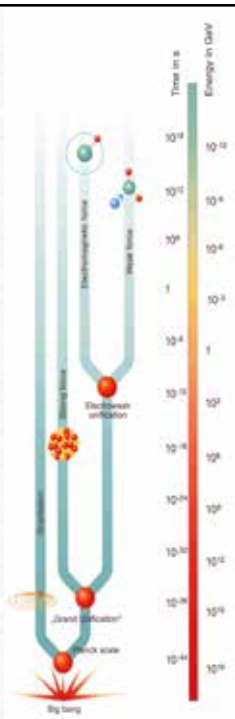
$$\Gamma(\mathrm{H} \to \mathrm{gg}) = \frac{G_F \alpha_a^2(M_H^2)}{36\sqrt{2}\pi^3} M_H^3 \left[1 + \left(\frac{95}{4} - \frac{7N_f}{6}\right)\frac{\alpha_a}{\pi}\right]$$

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




# *Die Offenen Fragen*

## Wichtige offene Fragen der Physik



**1. Masse**

Was ist der Ursprung der Masse?

Das Higgs-Teilchen existiert;
Hat es die vorhergesagten Eigenschaften ?

**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**

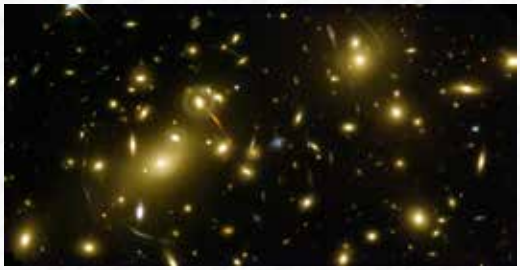
- Warum gibt es drei Familien von Teilchen?
- Was ist die Ursache der Asymmetrie zwischen
  Materie und Antimaterie?

## Dunkle Materie

Vielfältige Evidenz für Dunkle Materie: (Nachweis über Gravitation)

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

F. Zwicky 1898-1974



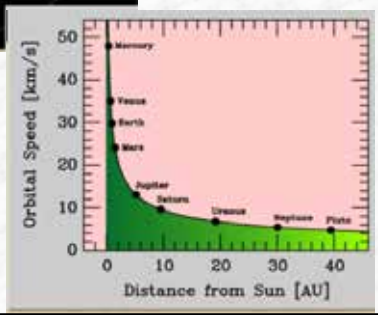
## Beispiel: Rotationskurven

Zentripetalkraft = Gravitationskraft

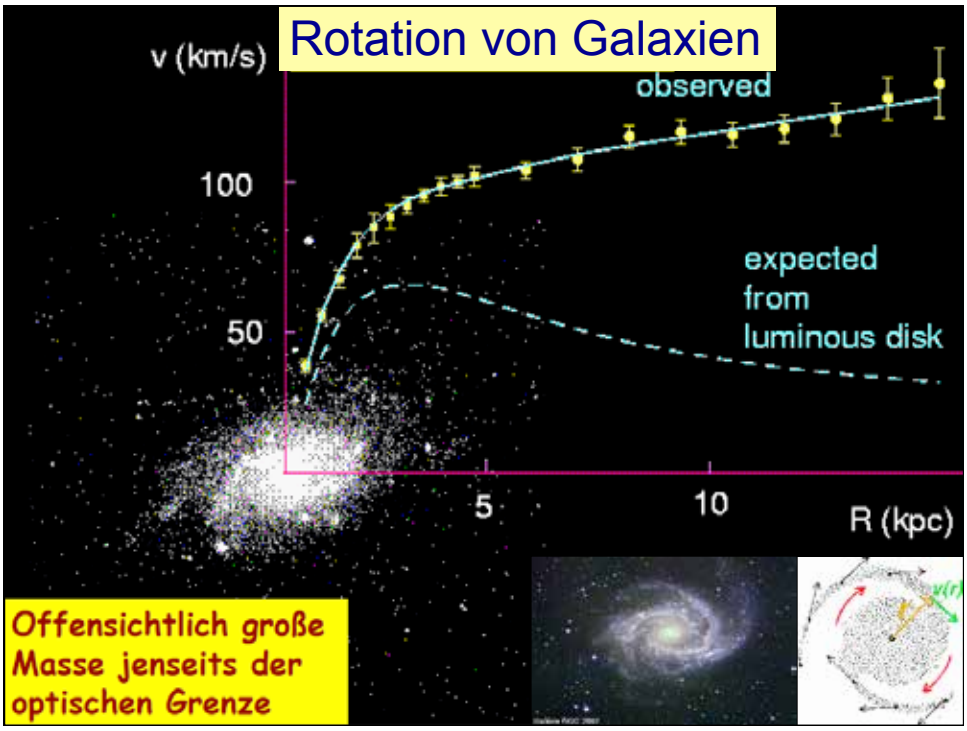
$$\frac{v^2}{R} = G_N \cdot \frac{M(R)}{R^2}$$

$$\Rightarrow \quad v \sim \frac{1}{\sqrt{R}}$$

v(r) ist ein Maß für die eingeschlossene Masse




## Rotation von Galaxien



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

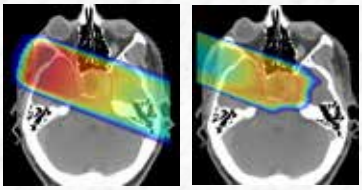
- Inkrafttreten der Konvention am 29. September 1954:
  Gründung der "Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire“

## CERN heute

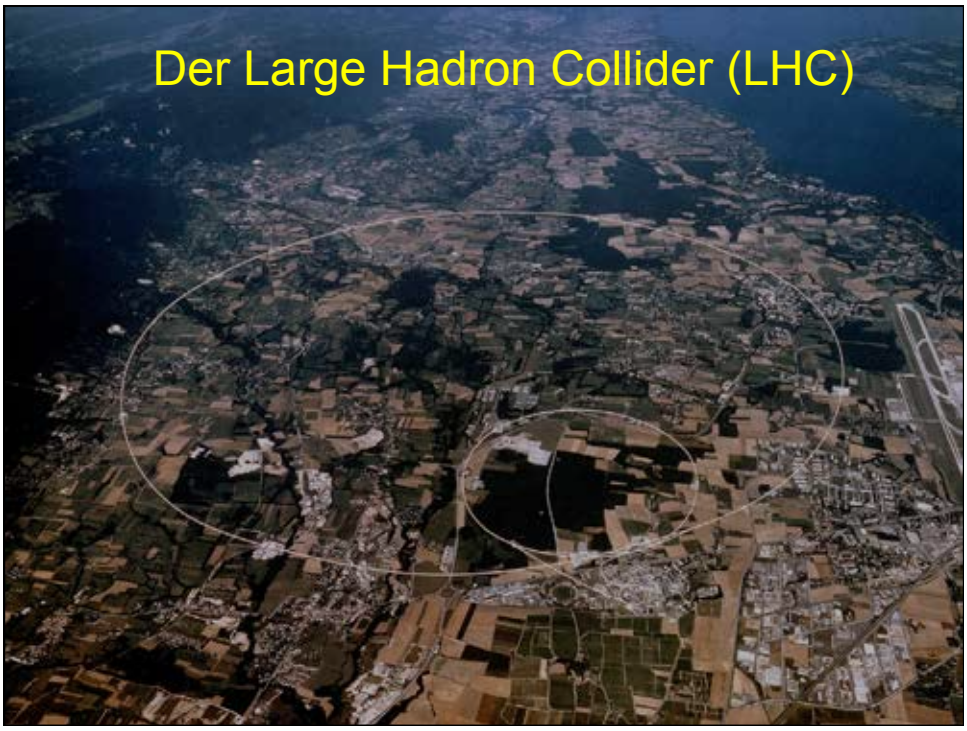
- 22 Mitgliedsländer
- 2500 festangestellte Mitarbeiter
  (Wissenschaftler, Ingenieure, Techniker)
- 1800 weitere Mitarbeiter
- 13000 „CERN-Nutzer“
  (Universitäten und Forschungsinstitute)
- Weltgrößte Forschungszentrum für physikalische Grundlagenforschung
  Etat (2017): ~1100 Mio SF
- Weltweit leistungsfähigstes System von Teilchenbeschleunigern

## CERN heute (cont.)

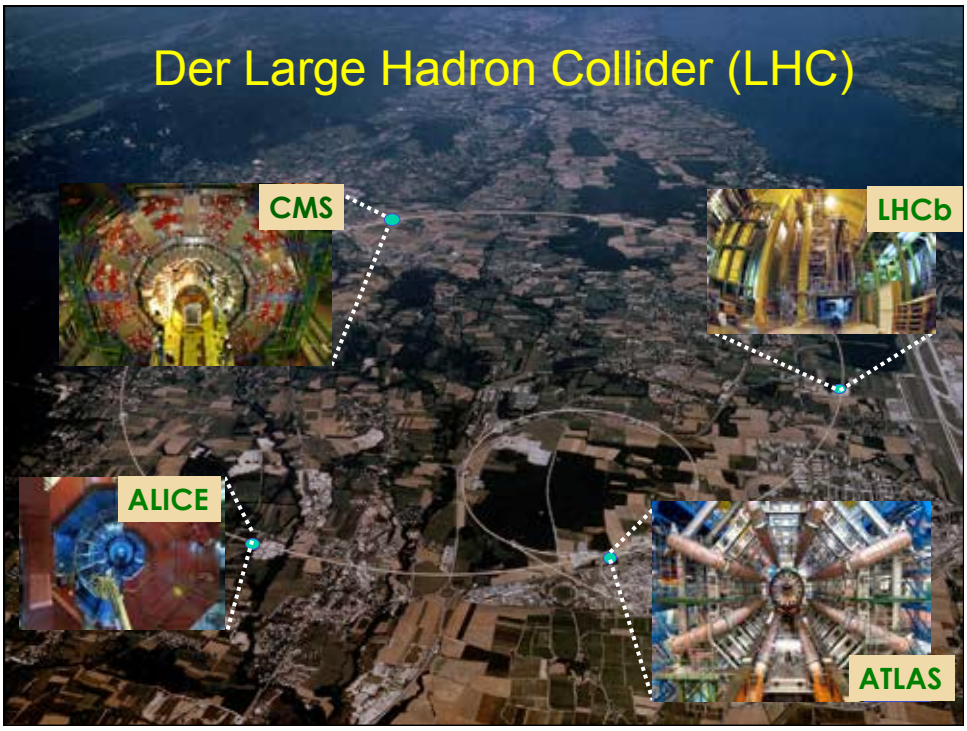
- Forschungs- und Entwicklungszentrum für innovative Technologien
  (Beschleuniger, Detektoren, Datenverarbeitung)



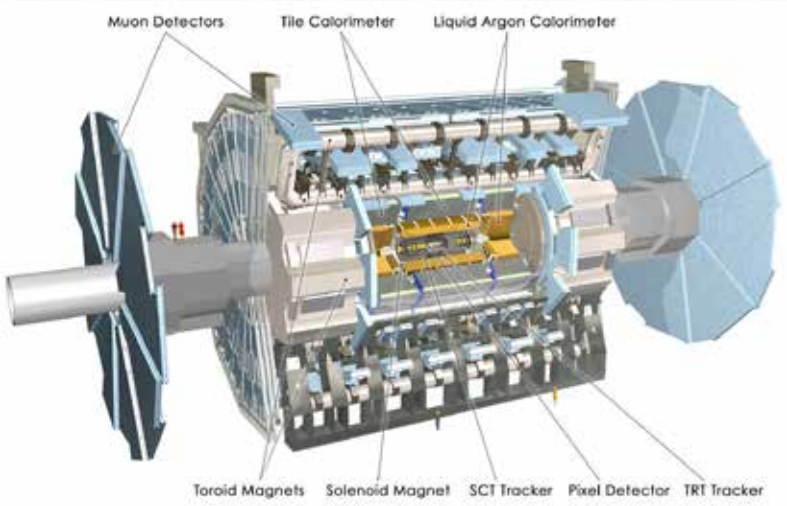
- Ein bedeutendes Ausbildungszentrum für unsere Doktoranden
  (in einem internationalen und hochkompetitiven Umfeld)



Ein Blick in den Beschleunigertunnel des LHC
Inbetriebnahme 2008 / 2009
nach ~15 Jahren Entwicklungs- und Bauzeit

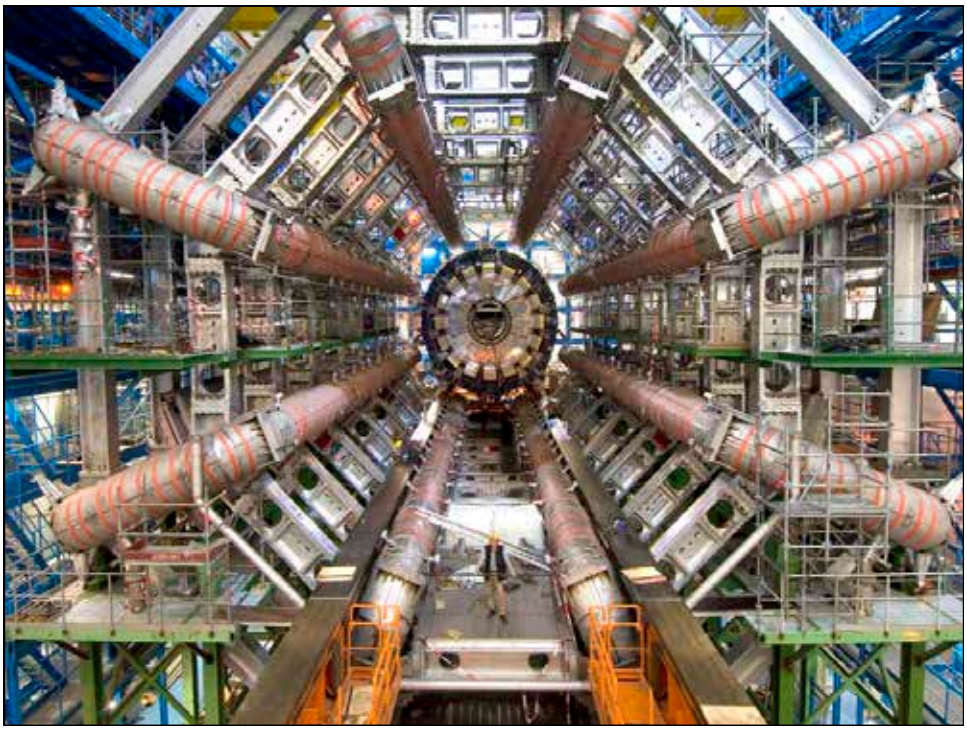

Der Large Hadron Collider (LHC)
CMS
LHCb
ALICE
ATLAS

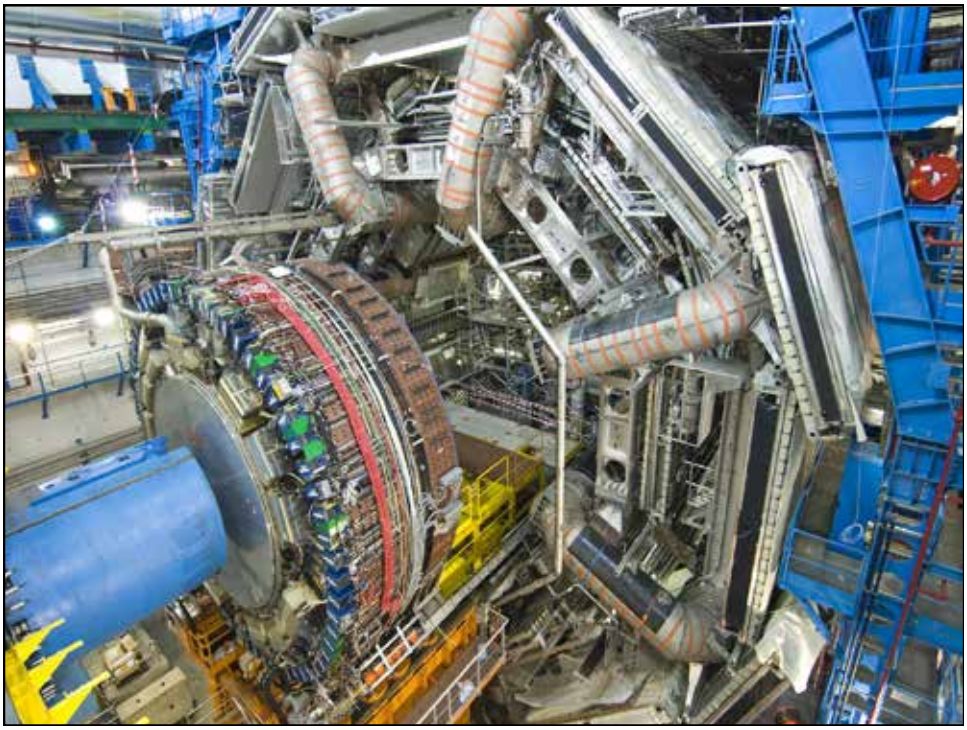
# Das ATLAS-Experiment

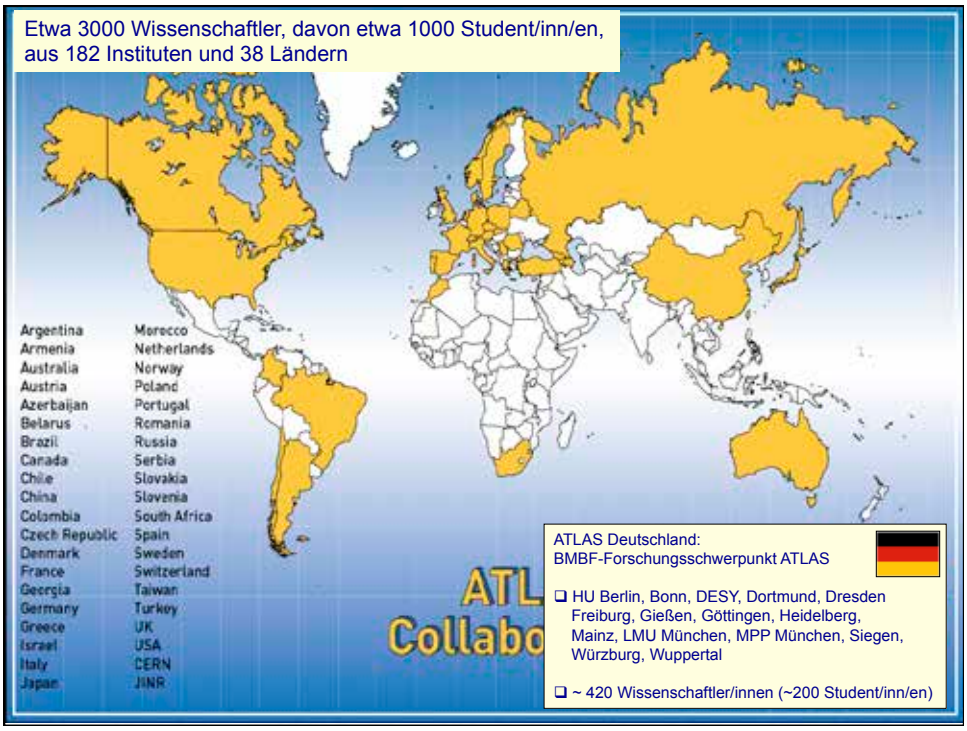



| | |
|---|---|
| Durchmesser: | 25 m |
| Gesamtlänge: | 46 m |
| Gesamtgewicht: | 7000 t |

- ~200 Mio. Auslesekanäle, aufnahmebereit alle 25 ns
- 40 Mio. Ereignisse pro Sekunde
- 1000 Ereignisse pro Sekunde selektiert → Speichermedien



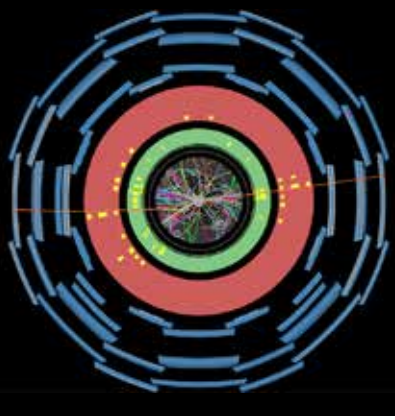



Etwa 3000 Wissenschaftler, davon etwa 1000 Student/inn/en,
aus 182 Instituten und 38 Ländern
Argentina
Armenia
Australia
Austria
Azerbaijan
Belarus
Brazil
Canada
Chile
China
Colombia
Czech Republic
Denmark
France
Georgia
Germany
Greece
Israel
Italy
Japan
Morocco
Netherlands
Norway
Poland
Portugal
Romania
Russia
Serbia
Slovakia
Slovenia
South Africa
Spain
Sweden
Switzerland
Taiwan
Turkey
UK
USA
CERN
JINR
ATL
Collabo
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 (~200 Student/inn/en)

## Datennahme bei höchsten Energien am LHC

Erste Kollisionen am 30. März 2010

2010/11: 7 TeV
2012: 8 TeV
seit 2015: 13 TeV

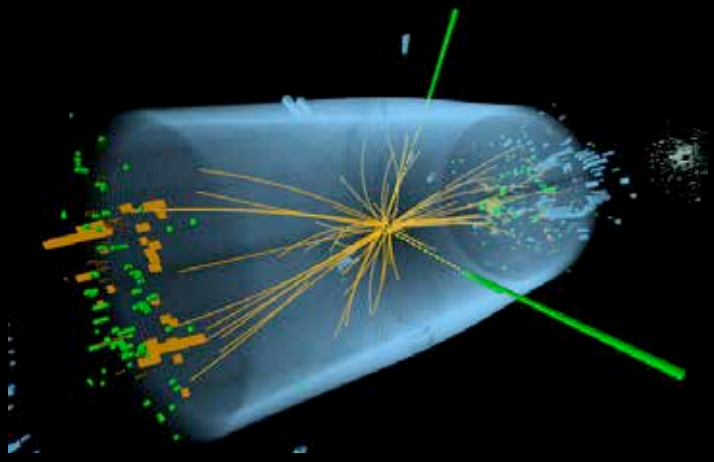


Bis Ende 2012:

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

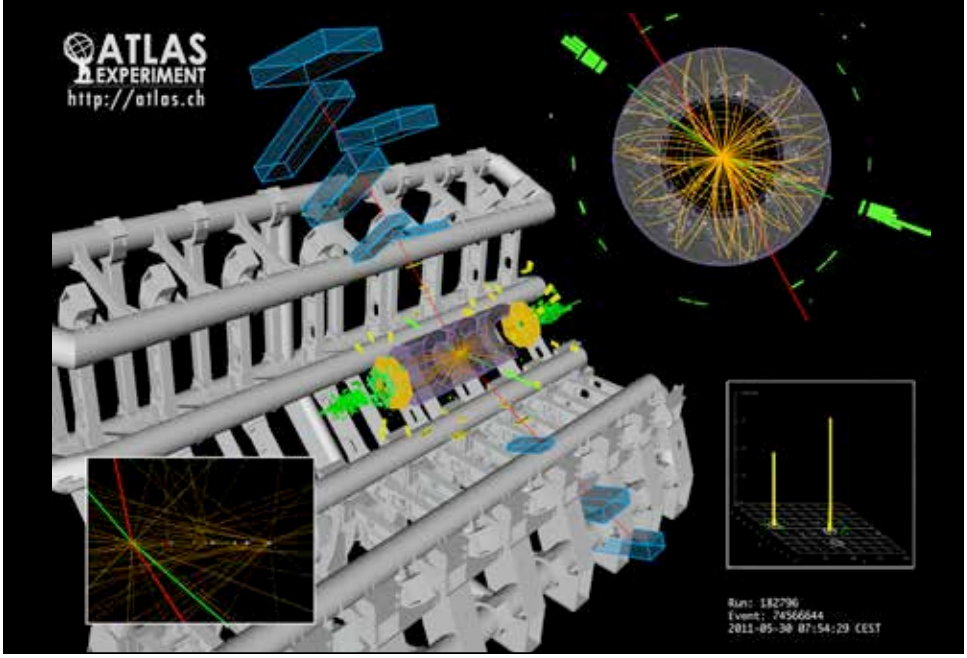
~$10^{10}$ Kollisionen aufgezeichnet

## Entdeckung des Higgs-Teilchens



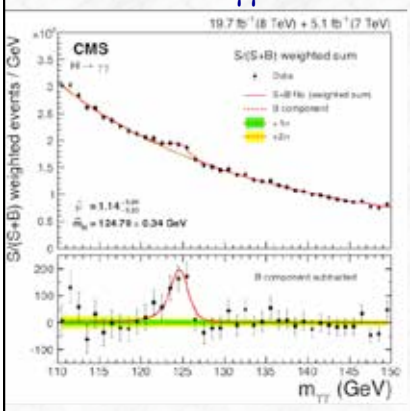
Ein Kandidat für einen H → $\gamma\gamma$ Zerfall

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



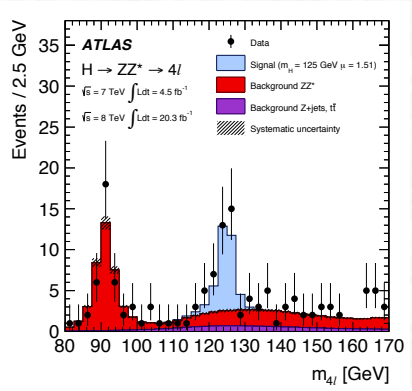

## Signale des Higgs Bosons (2014)

### H → γγ




Signalstärke: $\mu = 1.14 \pm 0.26$
W'keit für Untergrundfluktuation < $10^{-8}$

### H → ZZ → 4ℓ



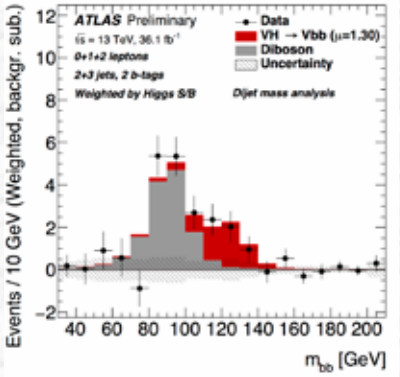

Signalstärke: $\mu = 1.44 \pm 0.40$
P(Untergrundflukt.) < $10^{-10}$

Signalstärke $\mu$ = (Anzahl beobachteter Higgs-Kandidaten) / (Anzahl erwarteter Higgs-Kandidaten)

## 2017: Evidenz für Higgs-Boson Zerfälle in schwere Quarks

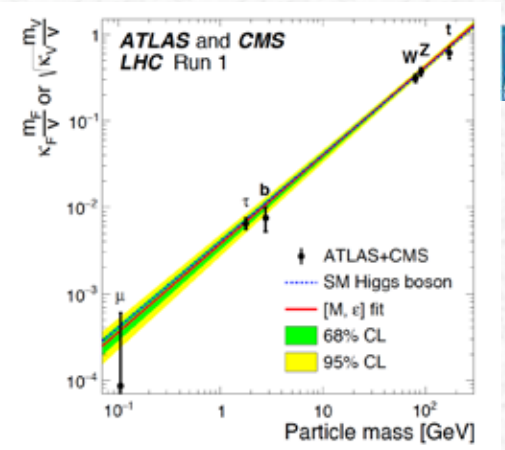
Komplexe Analyse (schwierige Signal-zu-Untergrund-Verhältnisse)

H → bb




Signalstärke: $\mu = 0.9 \pm 0.26$

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




Die Wechselwirkungsstärke ist proportional zur Masse der Teilchen
→ Neuer Teilchentyp
Spin-0 (nachgewiesen) → Higgs-Teilchen

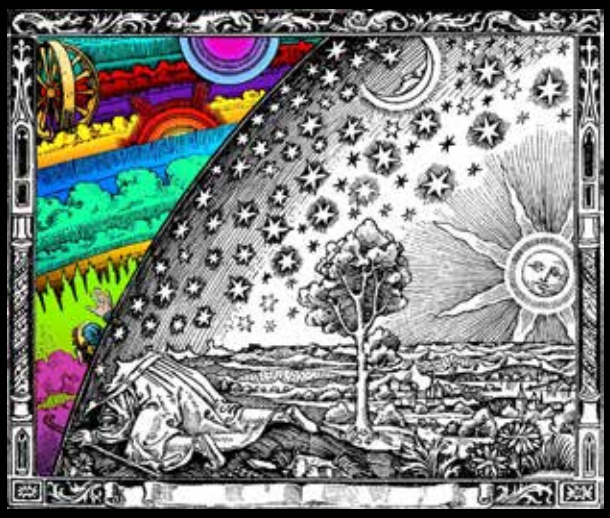
## Wie geht es weiter am LHC?

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?

Am LHC hat im Juni 2015 eine neue Datennahmeperiode
bei höherer Energie begonnen (8 TeV → 13 TeV)



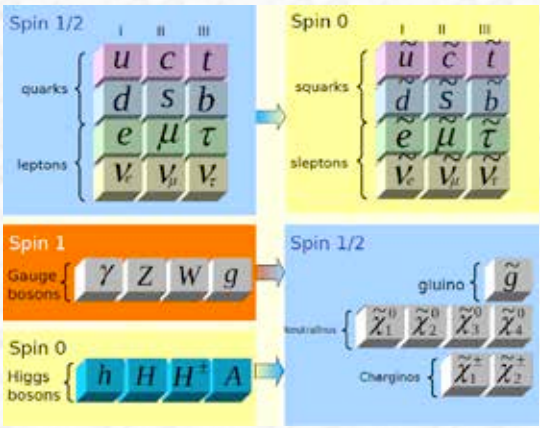
Aufbruch in physikalisches Neuland

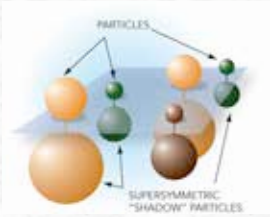
## Supersymmetrie (SUSY)

### -Eine viel diskutierte Erweiterung der Standardtheorie-

Jedem Teilchen wird ein supersymmetrisches Partnerteilchen zugeordnet

**Symmetrie:** Materieteilchen ↔ Austauschteilchen

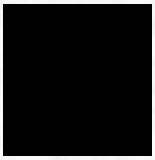


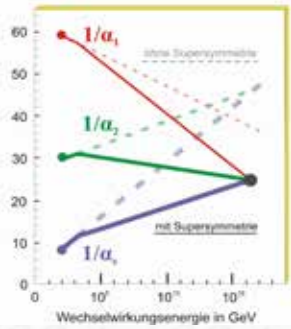




## Motivation für Supersymmetrie

- Supersymmetrische Teilchen zerfallen in vielen Modellen in das Leichteste SUSY Teilchen (LSP);
  Dieses ist stabil und wechselwirkt nur schwach

  → Kandidat für die "Dunkle Materie"



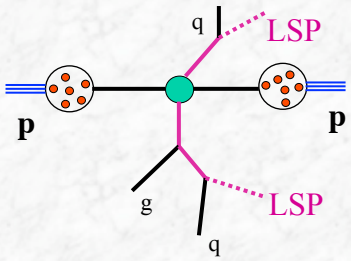


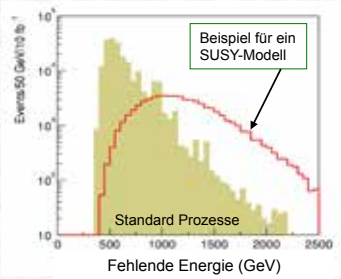

- Vereinheitlichung der Kräfte scheint in einer supersymmetrischen Theorie möglich zu sein

## Die Suche nach Supersymmetrie am LHC

- Supersymmetrische Teilchen, sofern sie existieren, können am LHC erzeugt werden
- Sie zerfallen in Kaskaden in das leichteste supersymmetrische Teilchen (LSP), das ein Kandidat für Dunkle Materie sein kann
- Dieses verlässt den Detektor ohne Wechselwirkung

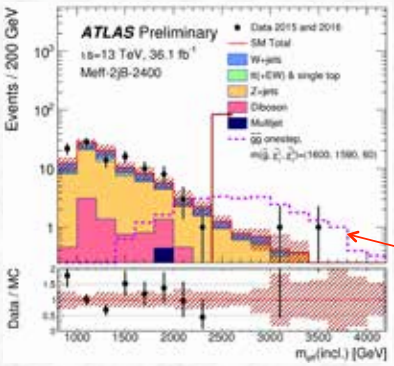
⇒ **Signatur: Fehlende Energie**
(senkrecht zur Strahlachse)




## Ein Blick in die neuen Daten (2015-2016)

Für Experten

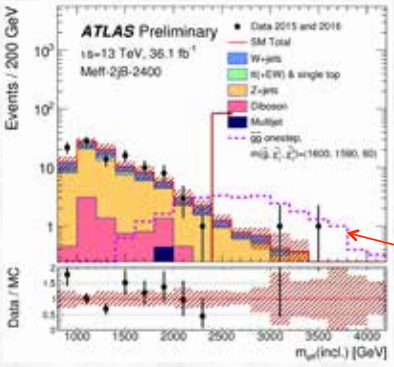



SUSY Beitrag sollte hier auftauchen

Bislang zeigen sich in den Messdaten (auch bei der höheren Energie) keine Anzeichen für die Produktion supersymmetrischer Teilchen

## Der erste Blick in die neuen Daten (2015-2016)

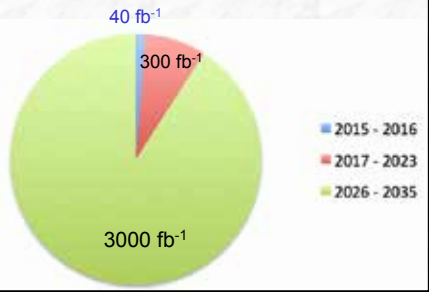
Für Experten




SUSY Beitrag sollte hier auftauchen

Bislang zeigen sich in den Messdaten (auch bei der höheren Energie) keine Anzeichen für die Produktion supersymmetrischer Teilchen

Allerdings stehen wir erst am Anfang der Datennahme !




## Zusammenfassung

- Mit der Inbetriebnahme des LHC hat für die Teilchenphysik eine neue Ära begonnen
- Die Leistungsfähigkeit des Beschleunigers (CERN) und der Experimente (internationale Kollaboration) sind hervorragend
- Forschung am CERN ist ein Musterbeispiel internationaler Zusammenarbeit
- Interessante Physik-Ergebnisse
  Höhepunkt: Entdeckung des Higgs-Teilchens und Vermessung seiner Eigenschaften
- Momentan läuft der Beschleuniger bei der hohen Energie von 13 TeV

Wir stehen erst am Anfang einer langen Datennahmeperiode;

Der LHC hat das Potential für weitere richtungsweisende Entdeckungen

Bühnenbild "Les Troyens" in Valencia, Oktober 2009