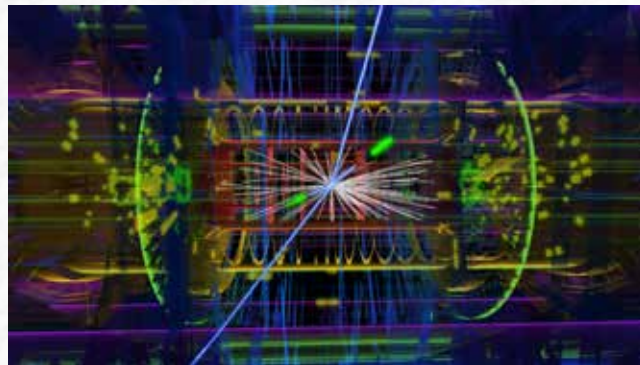


Kleine Teilchen, große Maschinen



Prof. Karl Jakobs
Physikalisches Institut
Universität Freiburg

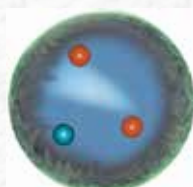
Motivation und Zielsetzung der Teilchenphysik



Einheitliche und umfassende
Beschreibung der

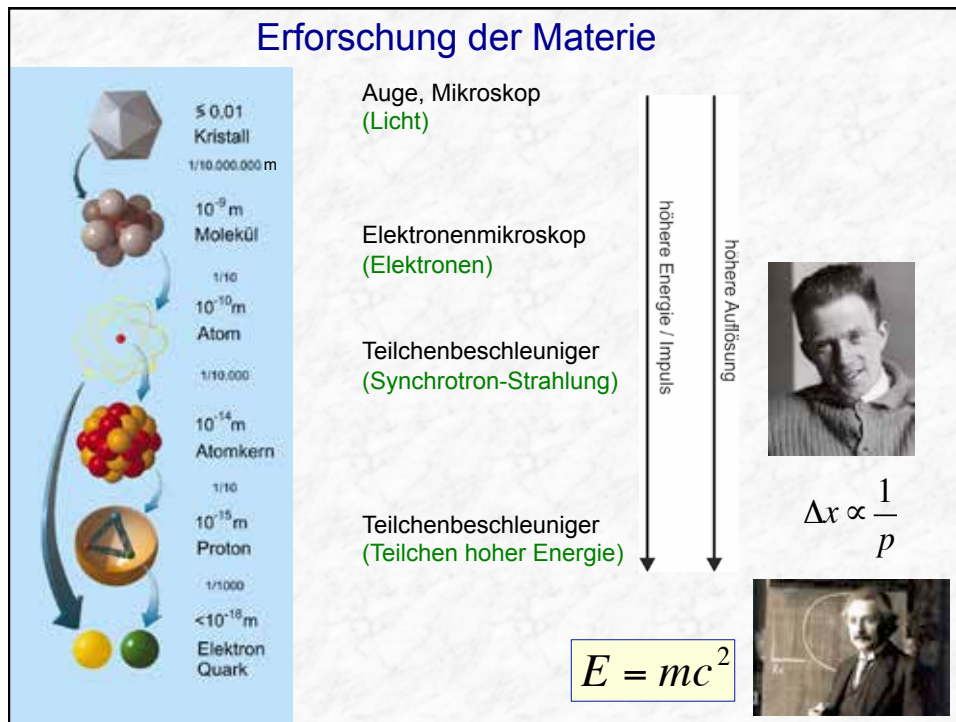
Materie und ihrer Wechselwirkungen

„Bausteine und Kräfte“



von kleinsten Abständen
(10^{-18} m)

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



Die Bausteine der Materie: Quarks und Leptonen

Quarks			Leptonen		
u	c	t	ν_e	ν_μ	ν_τ
d	s	b	e	μ	τ
1.	2.	3.	Familie		

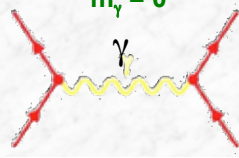
- Quarks und Leptonen scheinen punktförmig zu sein, Ausdehnung $< 10^{-18} \text{ m}$ (Elementarteilchen, Eigendrehimpuls halbzahlige (Spin $\frac{1}{2}$) = Fermionen)
- Die Masse der Quarks und Leptonen steigt mit der Familienzahl an
 $m_\mu \approx 200 m_e$ $m_\tau \approx 3500 m_e$

Das schwerste Elementarteilchen: das Top-Quark $m_t \approx 340.000 m_e \approx m_{\text{Gold-Atom}}$

Die fundamentalen Kräfte



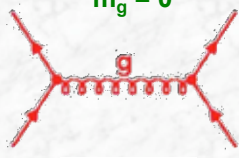
$m_\gamma = 0$



elektromagnetische Kraft



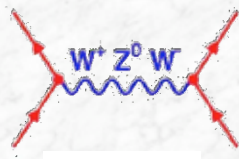
$m_g = 0$



starke Kraft



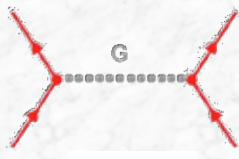
$m_{W^\pm, Z^0} \neq 0$



schwache Kraft



$m_G \neq 0$



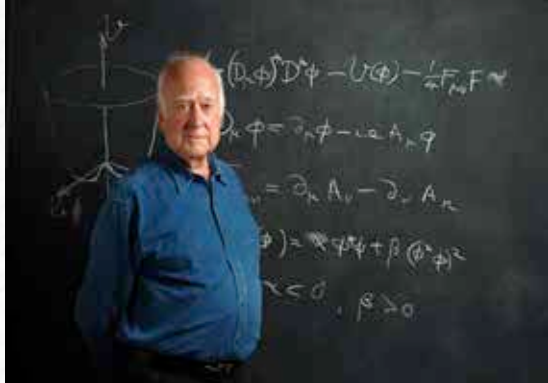
Gravitation

$m_W \approx 80.4 \text{ GeV}$
 $m_Z \approx 91.2 \text{ GeV}$

Austauschteilchen: **Photon (γ), Gluonen (g), W- und Z-Teilchen (Spin 1)**
 (Im Bild der Theorie (Quantenfeldtheorie): Wechselwirkung durch Austausch dieser Teilchen)

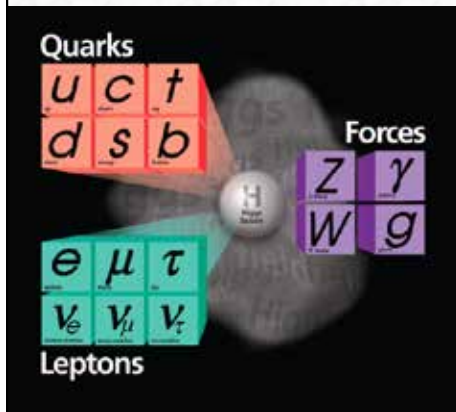
Problem: Masse der Austauschteilchen der schwachen Kraft
 Symmetrie der Theorie fordert masselose Austauschteilchen

Der Brout-Englert-Higgs Mechanismus

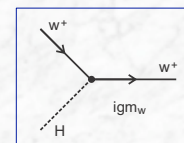


F. Englert and R. Brout. Phys. Rev. Lett. 13 (1964) 321;
 P.W. Higgs, Phys. Lett. 12 (1964) 132, Phys. Rev. Lett. 13 (1964) 508;
 G.S. Guralnik, C.R. Hagen, and T.W.B. Kibble. Phys. Rev. Lett. 13 (1964) 585.

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**



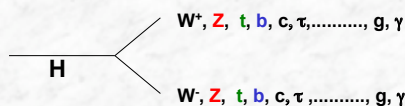
- Wechselwirkungsstärke mit dem Higgs-Feld ist proportional zur Masse der Teilchen
- Higgs-Boson zerfällt bevorzugt in die schwersten Teilchen
- Masse des Higgs-Bosons wird nicht vorhergesagt, jedoch $m_H < 1000 \text{ GeV}$

Zerfälle des Higgs-Teilchens

Zerfallsraten in die verschiedenen Teilchen können berechnet werden:



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



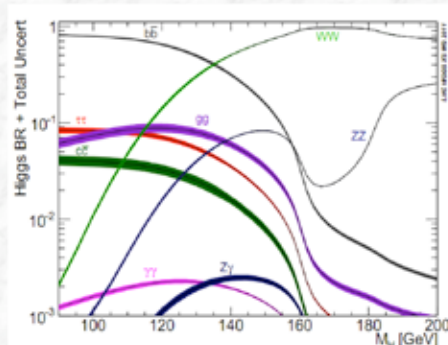
$$\Gamma(H \rightarrow f\bar{f}) = N_c \frac{G_F}{4\sqrt{2}\pi} m_f^2 (M_H^2) M_H$$

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

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

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

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



Die Offenen Fragen



Wichtige offene Fragen der Physik

1. Masse

Was ist der Ursprung der Masse?

Ein Higgs-Teilchen existiert!

Entsprechen seine Eigenschaften den Vorhersagen der Standardtheorie



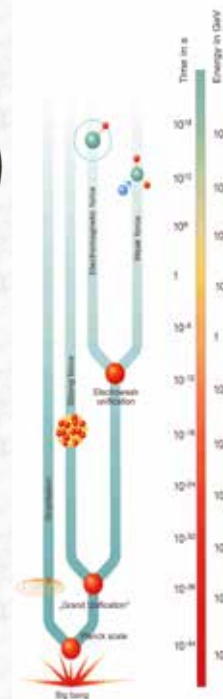
2. Vereinheitlichung

- 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?

4. Gibt es zusätzliche Raumdimensionen?





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"

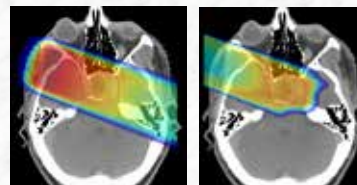
CERN heute

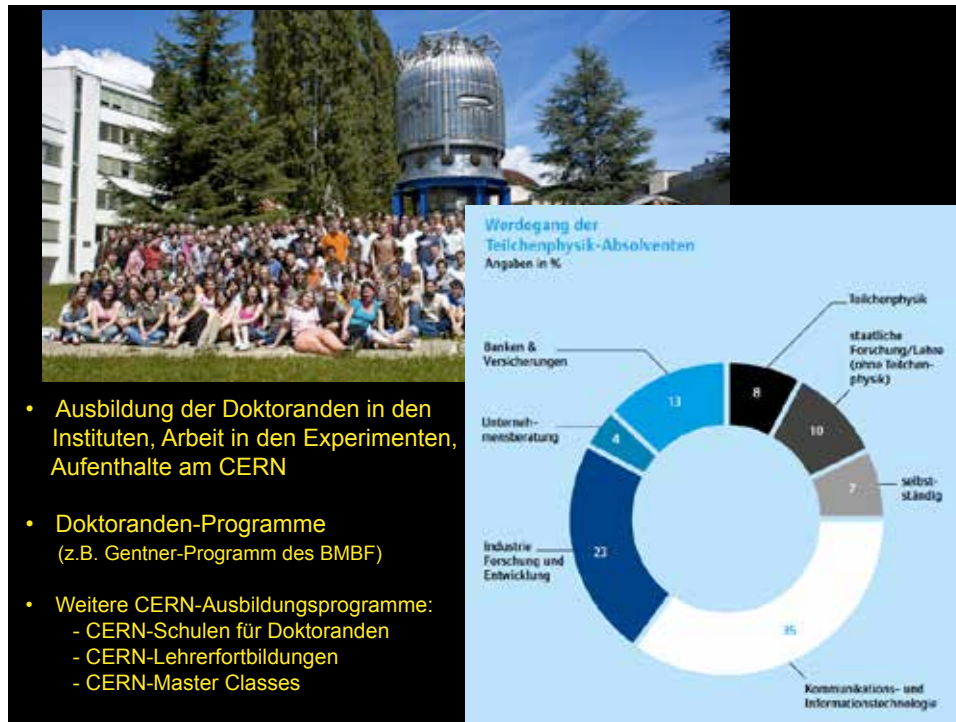
- 22 Mitgliedsländer
- 2500 festangestellte Mitarbeiter
(Wissenschaftler, Ingenieure, Techniker)
- 1800 weitere Mitarbeiter
- 13000 „CERN-Nutzer“
(Universitäten und Forschungsinstitute)
- Weltgrößte Forschungszentrum für
physikalische Grundlagenforschung
Etat (2017): ~1.100 Mio SF
- Weltweit leistungsfähigstes 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)





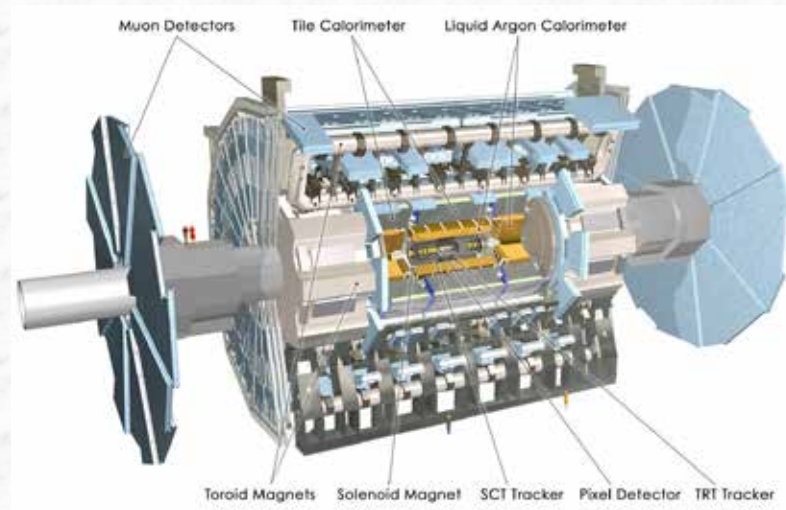
Ein Blick in den Beschleunigertunnel des LHC



Die Experimente

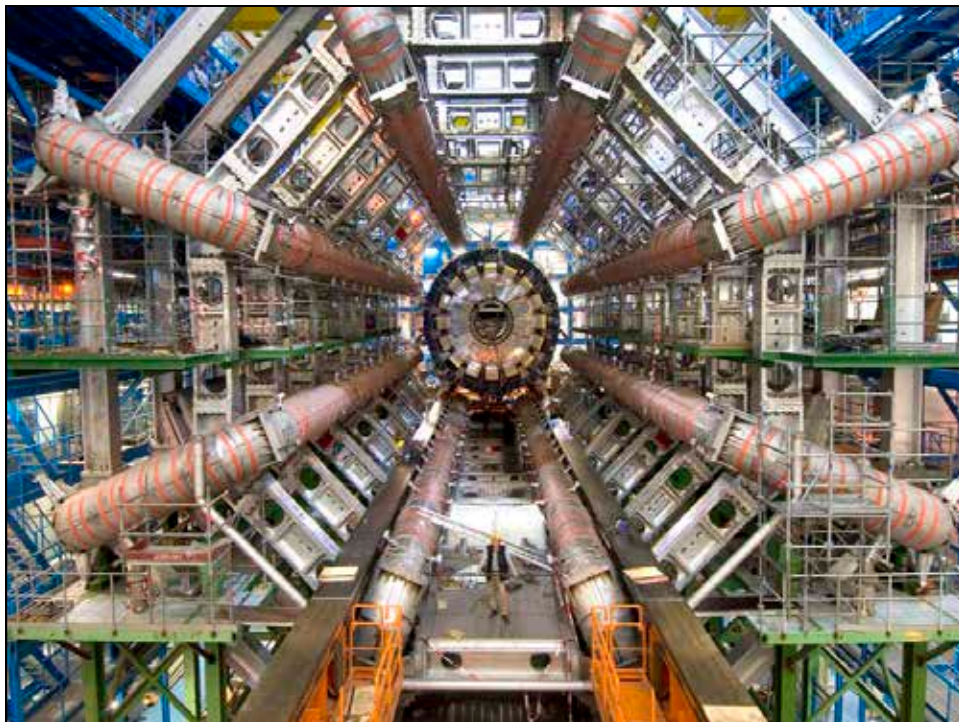


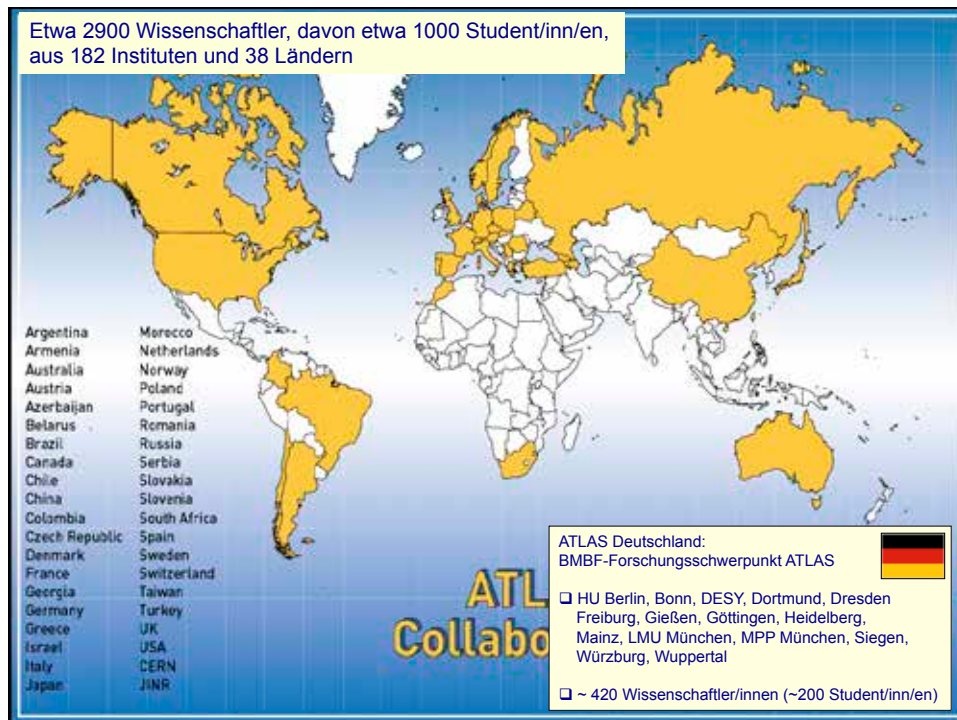
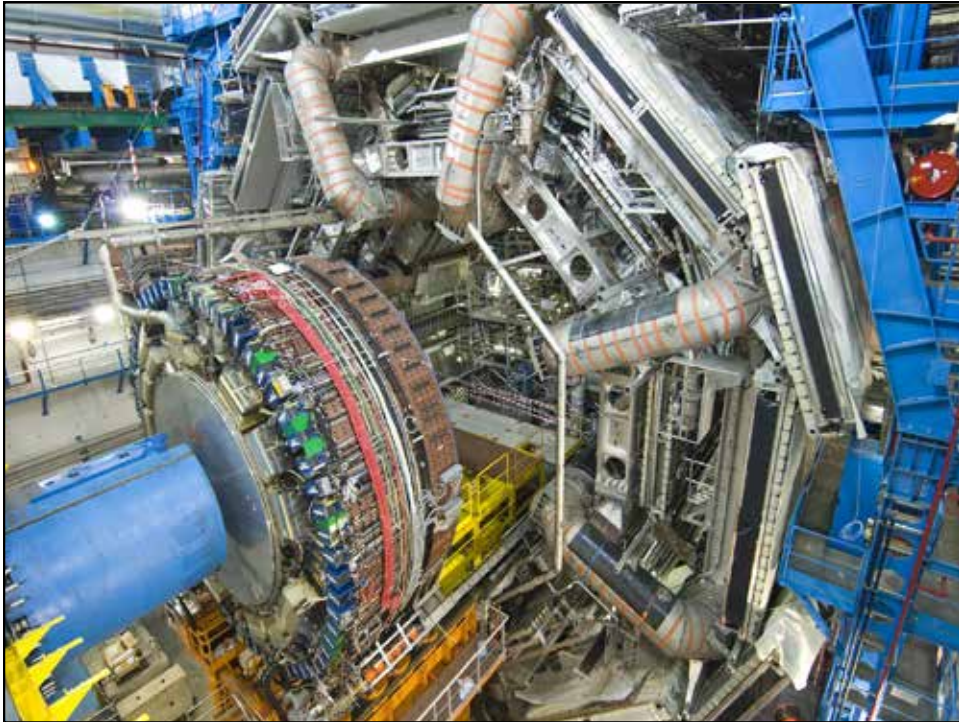
Das ATLAS-Experiment



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

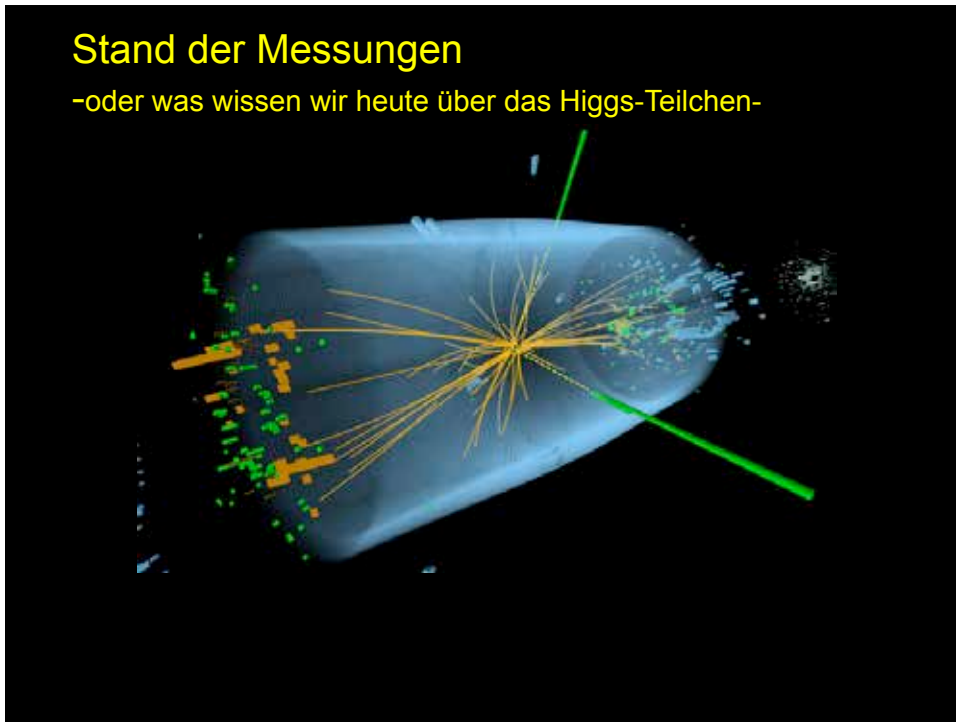
- ~200 Mio. Auslesekanäle, aufnahmebereit alle 25 ns
- 40 Mio. Ereignisse pro Sekunde
- 1000 Ereignisse pro Sekunde selektiert → Speichermedien



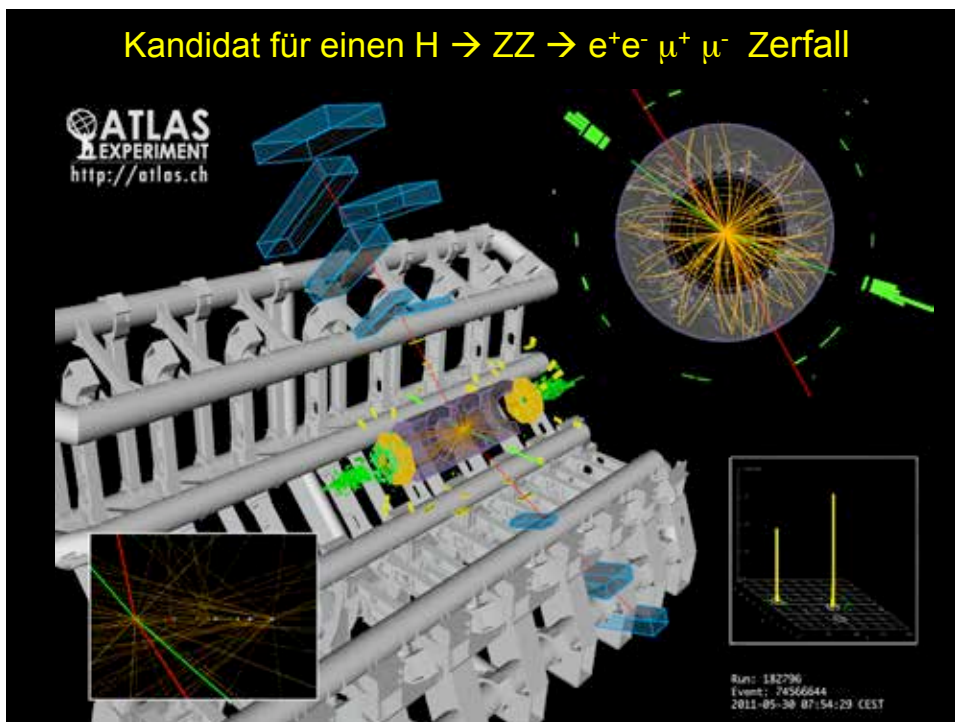


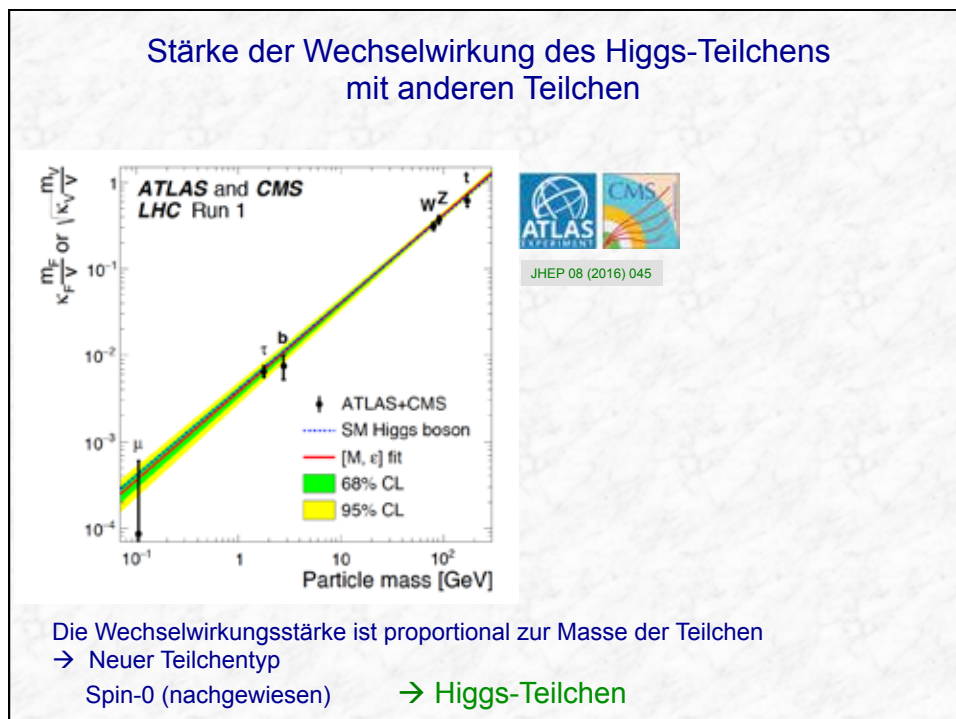
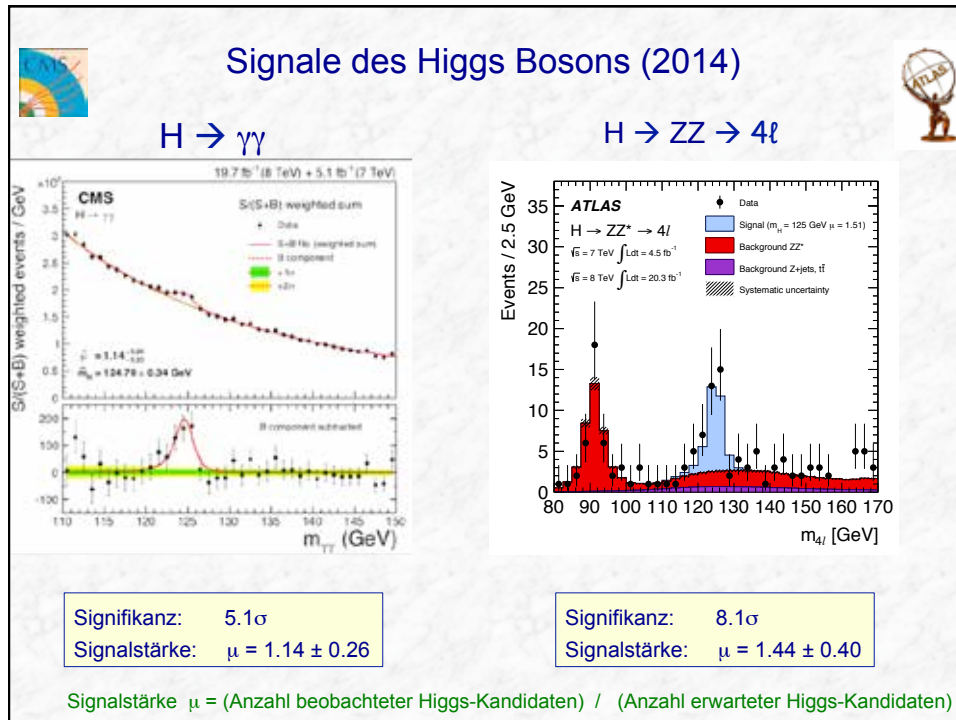
Stand der Messungen

-oder was wissen wir heute über das Higgs-Teilchen-



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



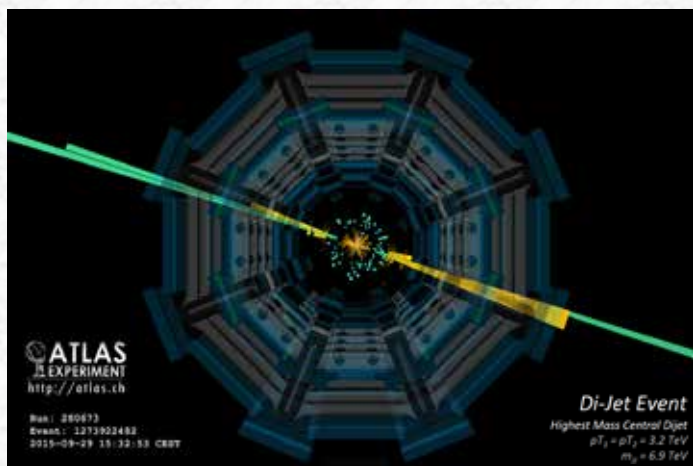


Wie geht es weiter am LHC?

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?



Momentan läuft am LHC eine neue Datennahmeperiode bei höherer Energie (8 TeV $\rightarrow$ 13 TeV)

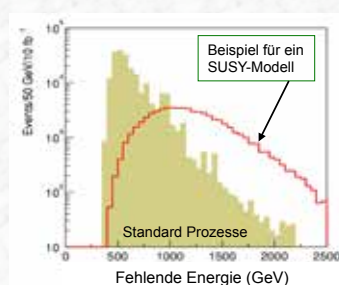
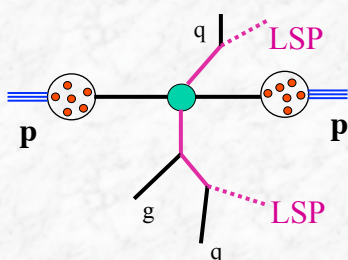


Eine harte Kollision von Konstituenten der Protonen bei einer Energie von 13 TeV, aufgezeichnet vom ATLAS-Experiment

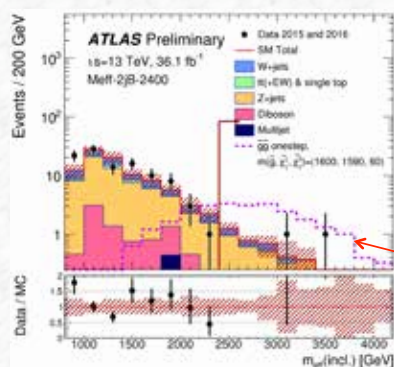
Die Suche nach Supersymmetrie am LHC

- 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)



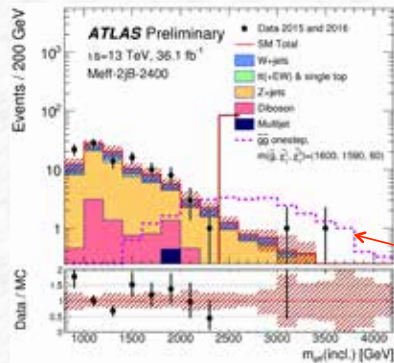
Der erste Blick in die neuen Daten (2015-2016)



SUSY Beitrag sollte hier auftauchen

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

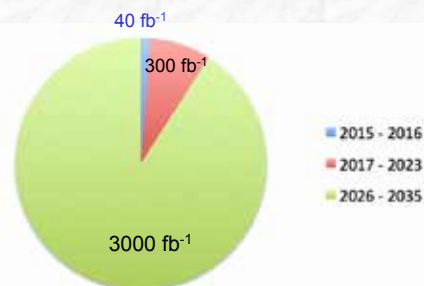
Der erste Blick in die neuen Daten (2015-2016)



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