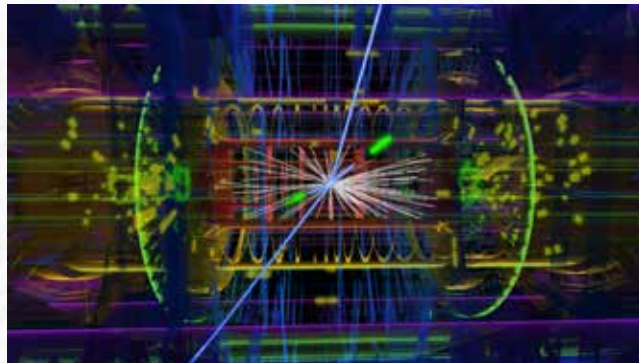


**Von der Entdeckung des Higgs-Teilchens
zur Suche nach Dunkler Materie
-Neues zur Forschung am CERN-**



Maria Laach, 07. 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.”

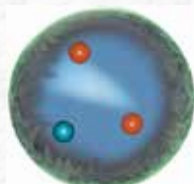
Motivation und Zielsetzung der Teilchenphysik



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

$\leq 0,01$ m Kristall
 $1/10.000.000$ m
 10^{-9} m Molekül
 $1/10$
 10^{-10} m Atom
 $1/10.000$
 10^{-14} m Atomkern
 $1/10$
 10^{-15} m Proton
 $1/1000$
 $<10^{-18}$ m Elektron
 Quark

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

bekannte Teilchen

e^-

e^+

$E = mc^2$

neue Teilchen

μ^-

μ^+

1 V

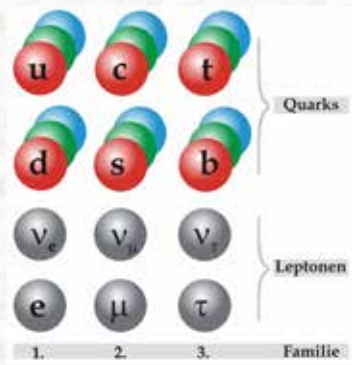
Proton

1 eV

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

$E_{\text{LHC}} = 13 \text{ TeV} = 13\,000\,000\,000\,000 \text{ eV}$

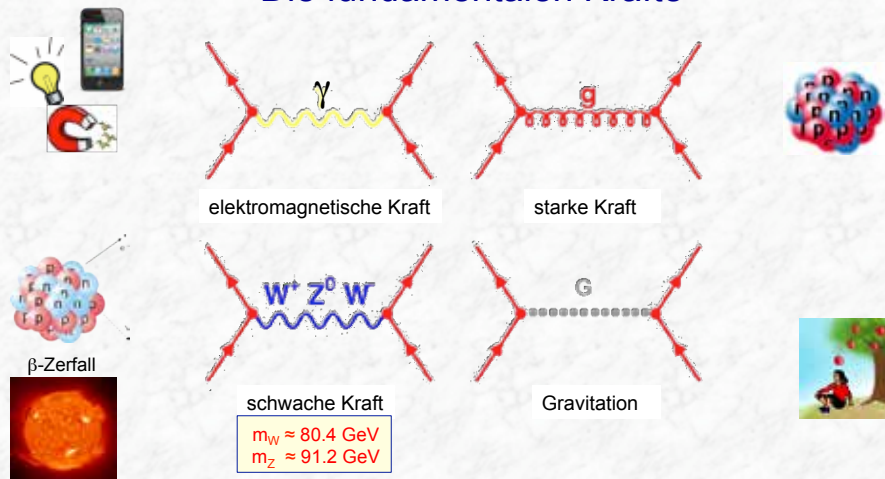
Die Bausteine der Materie: Quarks und Leptonen



- Quarks und Leptonen scheinen punktförmig zu sein, Ausdehnung $< 10^{-18}$ m (Elementarteilchen, Eigendrehimpuls halbzahlig (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 $m_t \approx 340\,000 m_e \approx m_{\text{Gold-Atom}}$

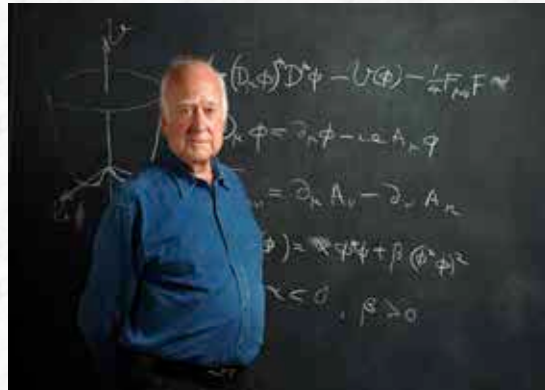
Die fundamentalen Kräfte



Theoretische Beschreibung: Wechselwirkung durch Austausch von „Kraftteilchen“
 Austauschteilchen: Photon (γ), Gluonen (g), W- und Z-Teilchen
 (Eigendrehimpuls ganzzahlig (Spin-1) = Bosonen)

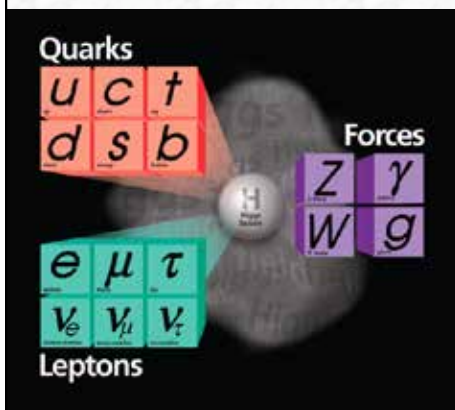
Problem: Austauschteilchen müssen masselos sein !

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



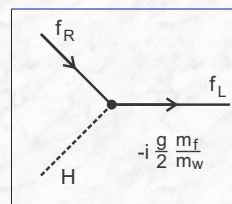
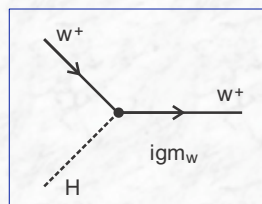
Ein **Teilchen**
im Higgs-Feld...



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

Der Brout-Englert-Higgs Mechanismus

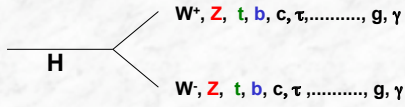
Für
Experten



- Wechselwirkungsstärke 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: $\sim 10^{-22}$ s

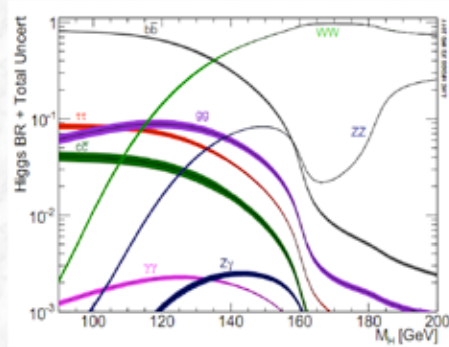
$$\Gamma(H \rightarrow \bar{f}f) = N_c \frac{G_F}{4\sqrt{2}\pi} m_f^2 (M_H^2) M_H$$

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

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

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

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



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



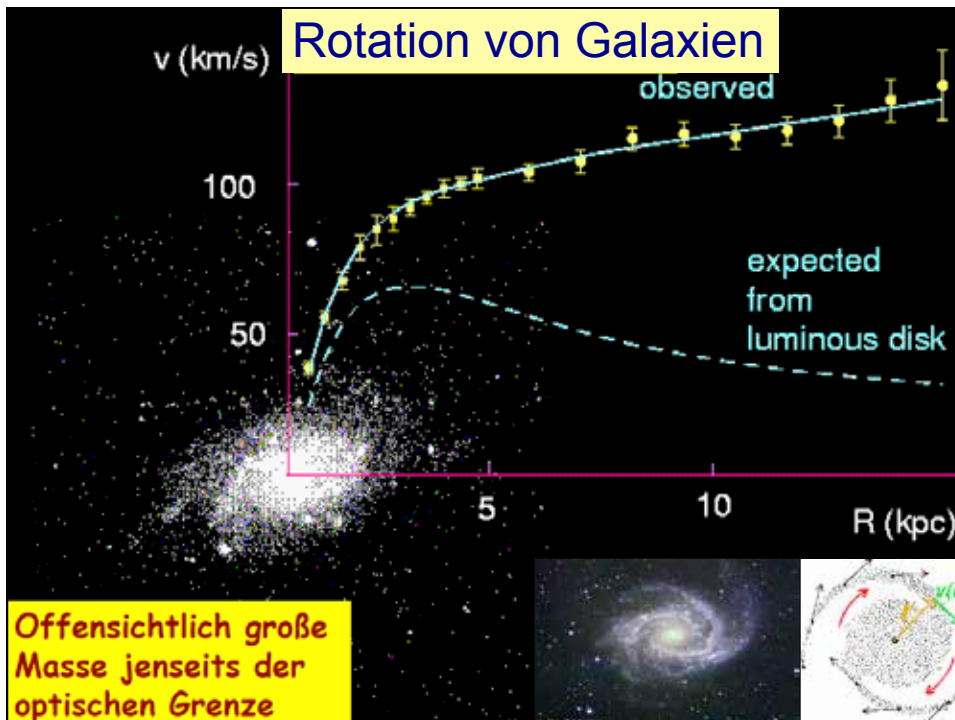
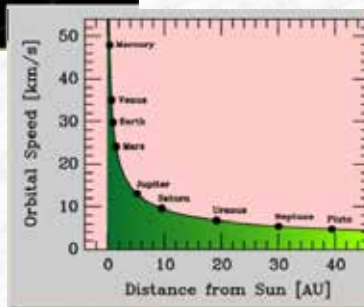
Beispiel: Rotationskurven

Zentripetalkraft = Gravitationskraft

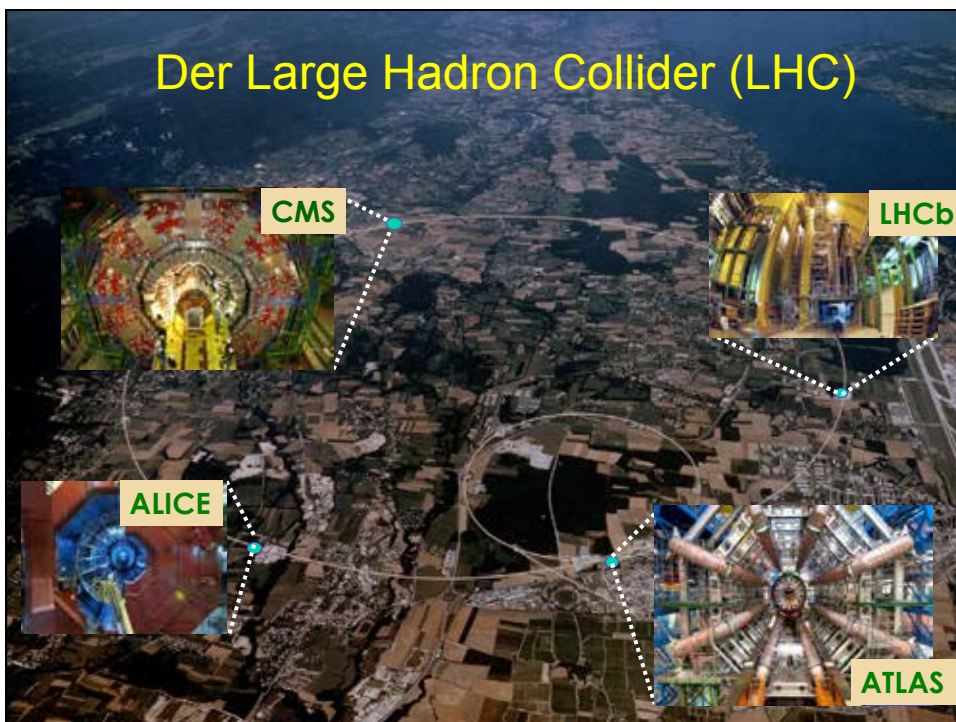
$$\frac{v^2}{R} = G_N \cdot \frac{M(R)}{R^2}$$

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

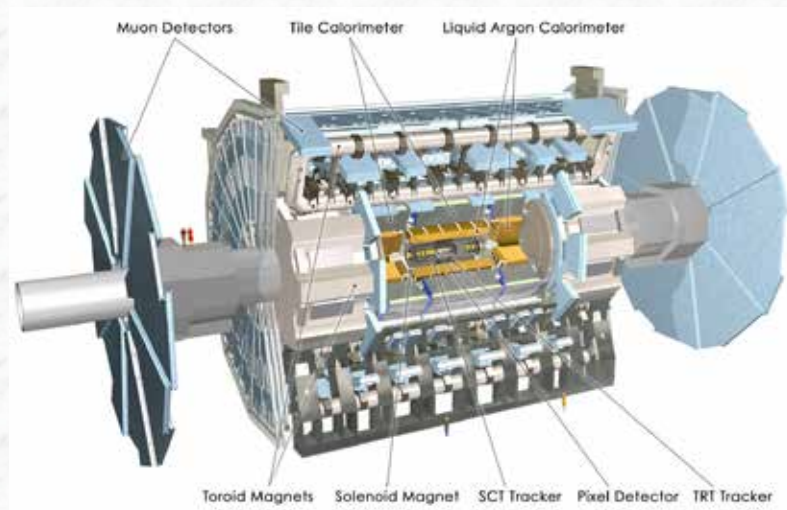
$v(r)$ ist ein Maß für die eingeschlossene Masse





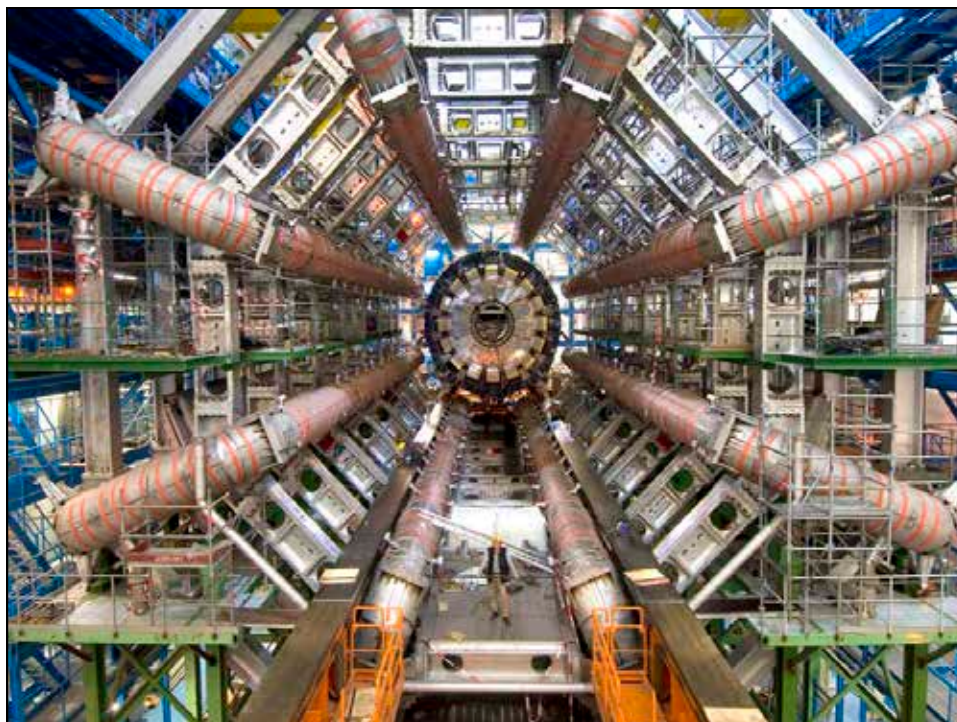


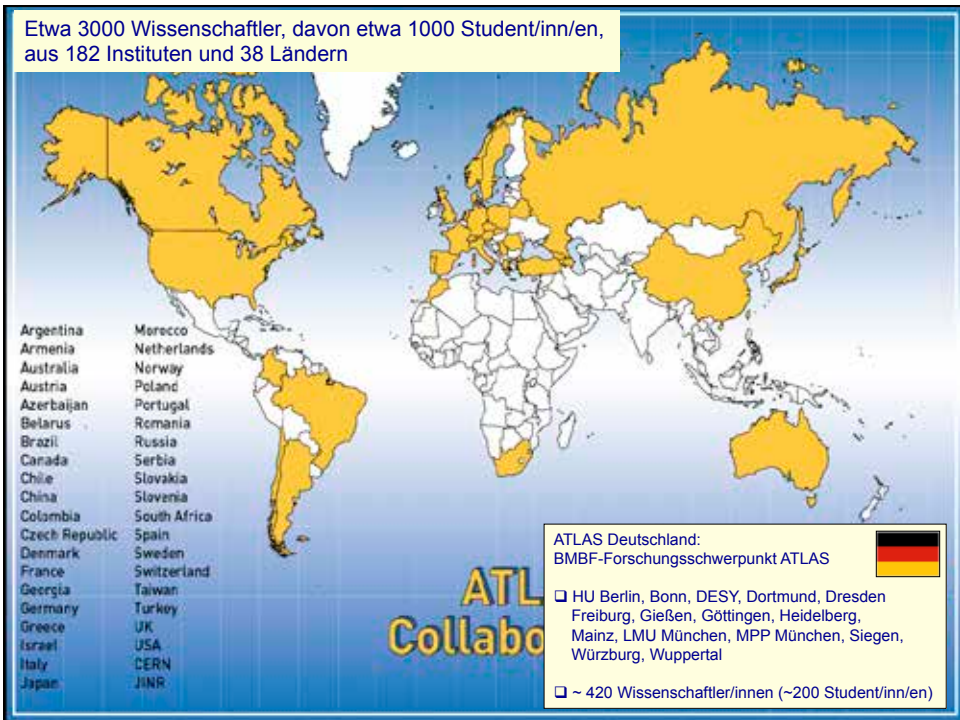
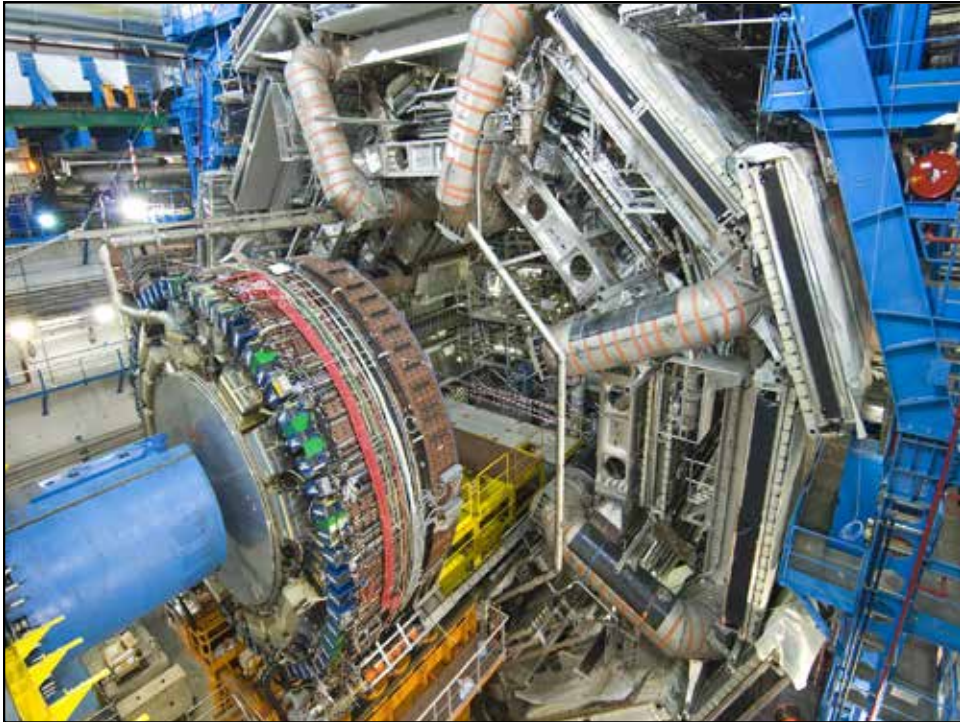
Das ATLAS-Experiment



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



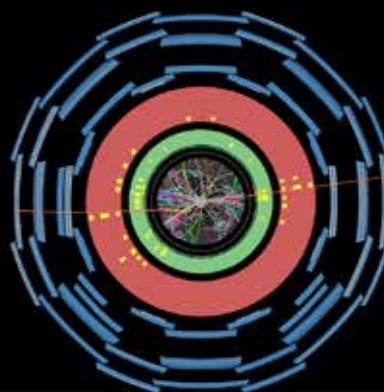


Datennahme bei höchsten Energien am LHC

Erste Kollisionen am 30. März 2010



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

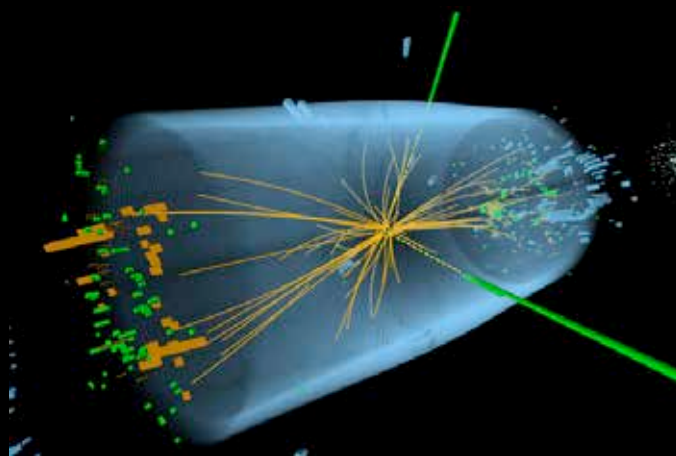


Bis Ende 2012:

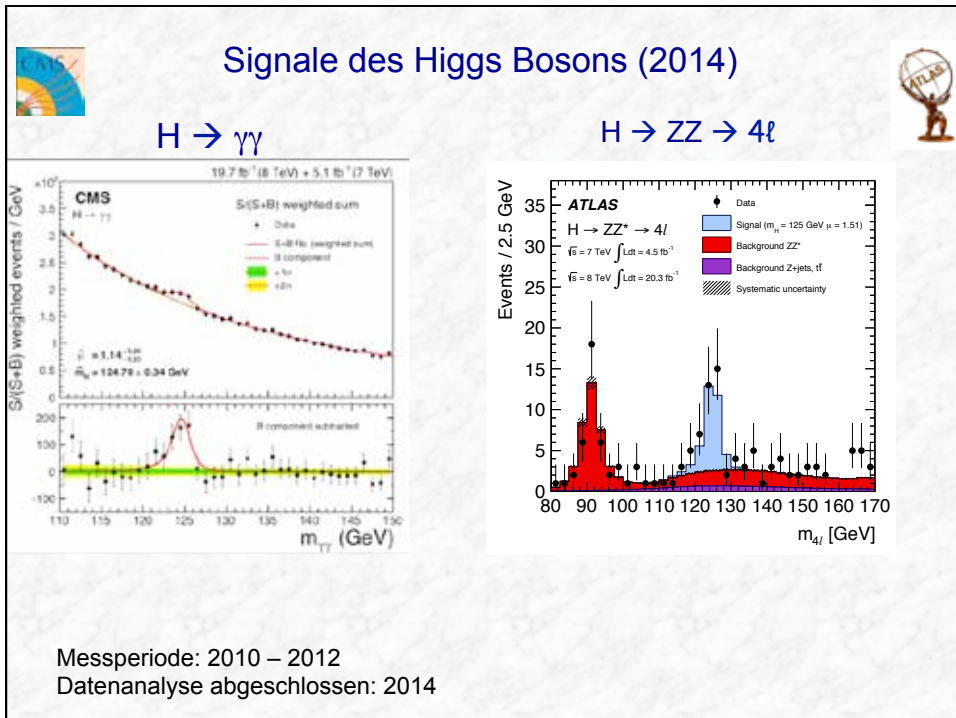
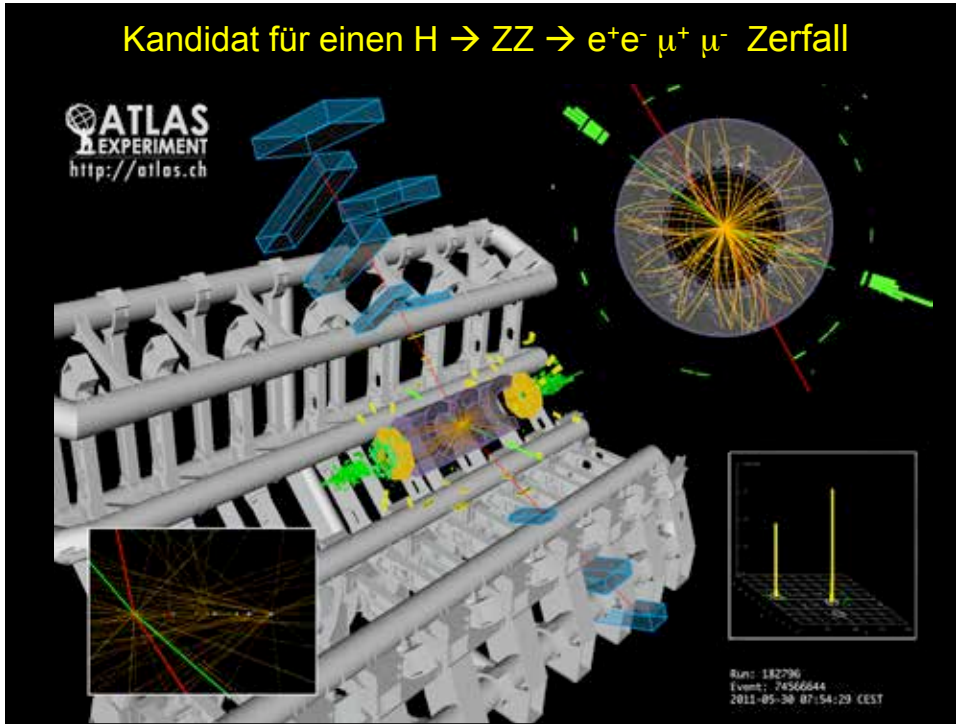
> 10^{15} Proton-Proton Kollisionen

$\sim 10^{10}$ Kollisionen aufgezeichnet

Entdeckung des Higgs-Teilchens



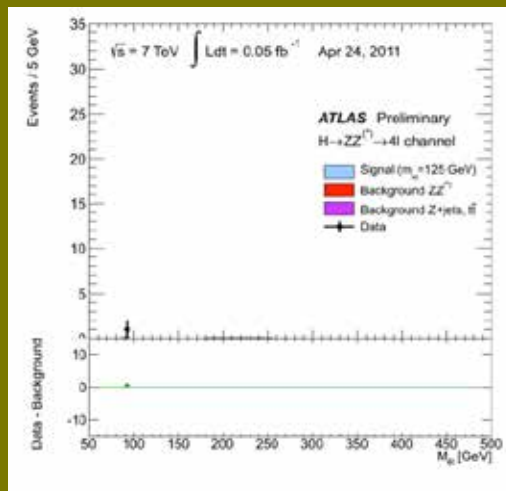
Ein Kandidat für einen $H \rightarrow \gamma\gamma$ Zerfall



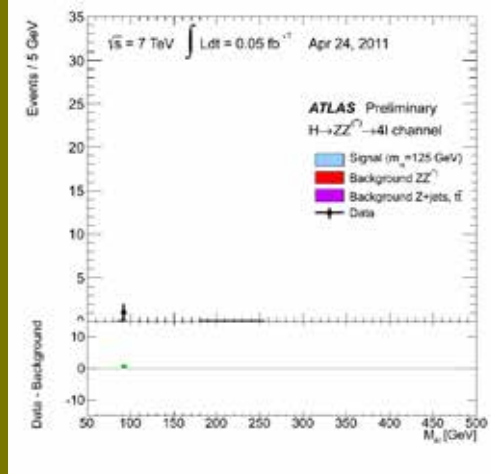
Zeitliche Entwicklung des $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ Signals



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



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



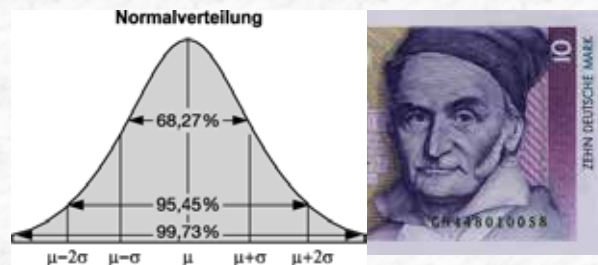
Signifikanz des Signals



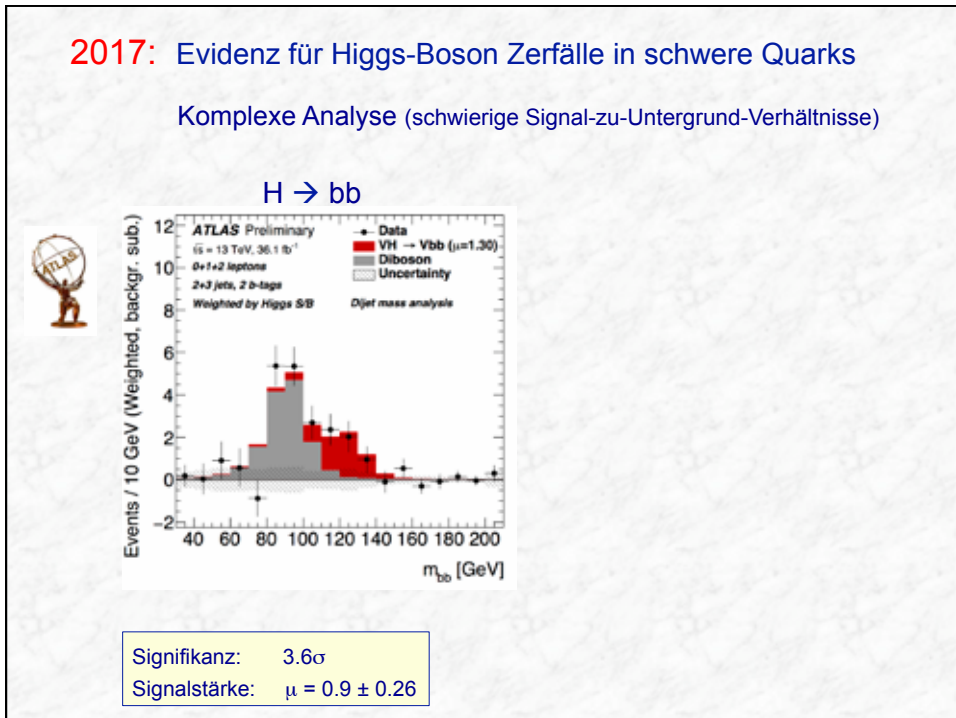
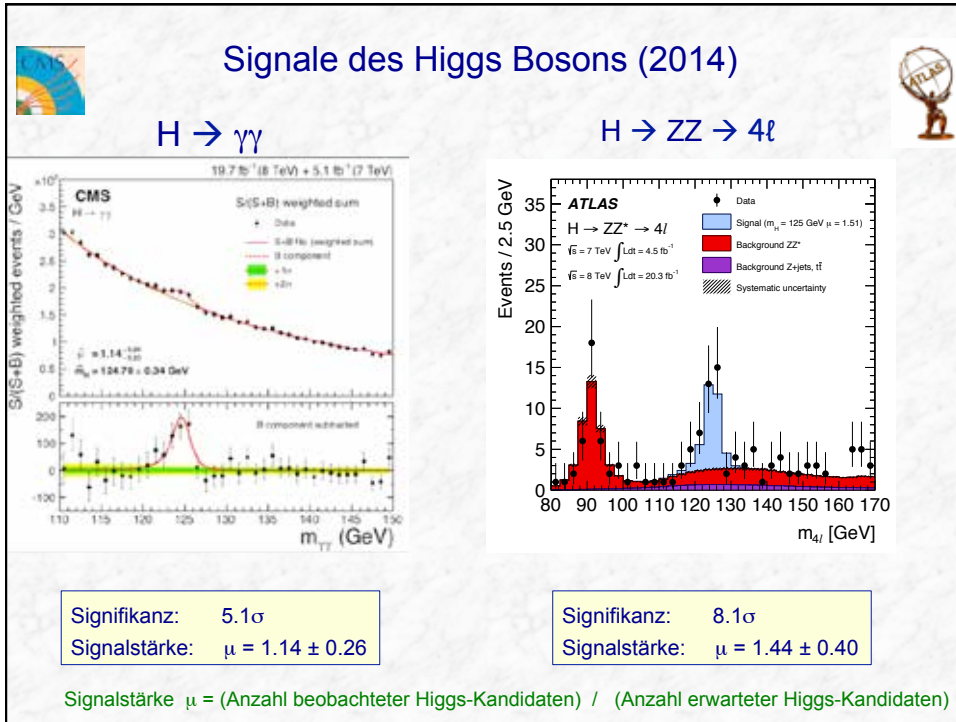
Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass die Signale durch Fluktuationen des Untergrunds vorgetäuscht werden?

Signifikanz in Standardabweichungen einer Gaußverteilung:

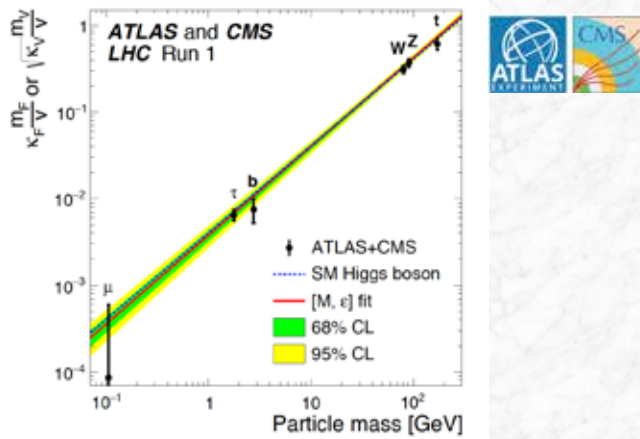
Konvention: $> 5\sigma$
 \rightarrow Entdeckung



5σ : Wahrscheinlichkeit für Untergrundfluktuation: $p = 2,8 \cdot 10^{-7} \approx 1 : 3\,600\,000$



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?

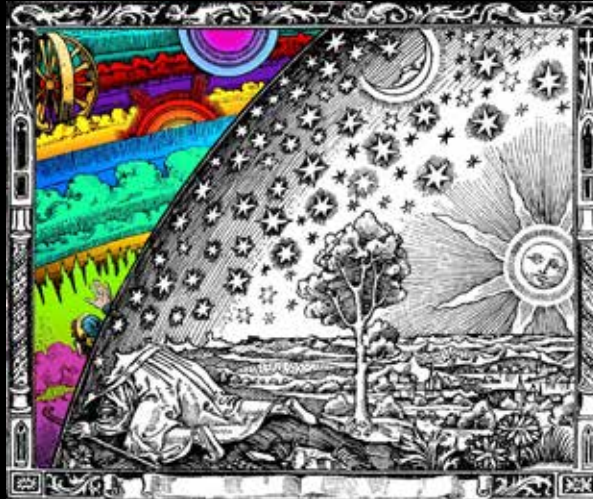
1. Präzise Untersuchung des Higgs-Teilchens
 - Zeigen sich Abweichungen bei höherer Messgenauigkeit?
 - Gibt es noch weitere Higgs-Teilchen?

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)



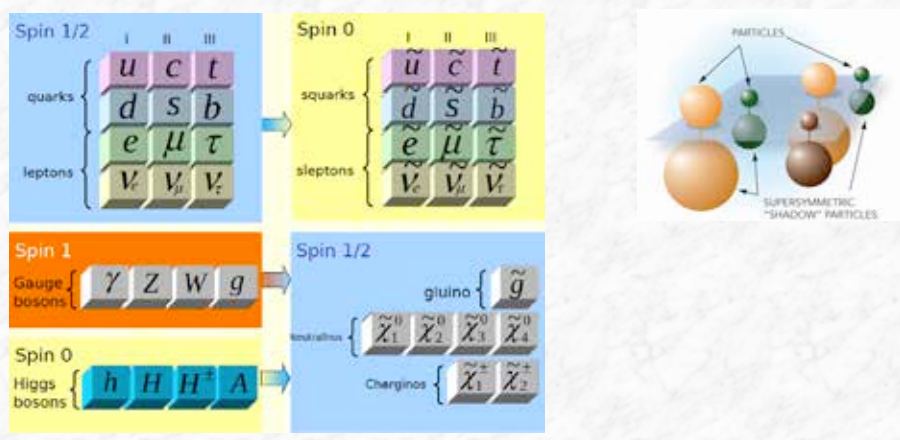
Aufbruch in physikalisches Neuland

Supersymmetrie (SUSY)

-Eine viel diskutierte Erweiterung der Standardtheorie-

Jedem Teilchen wird ein supersymmetrisches Partnerteilchen zugeordnet

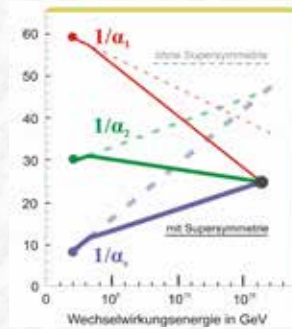
Symmetrie: Materieteilchen ↔ Austauscheteilchen



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"

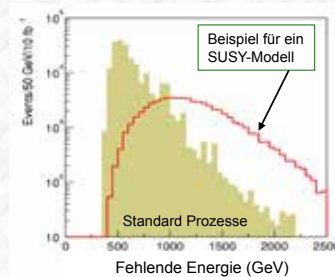
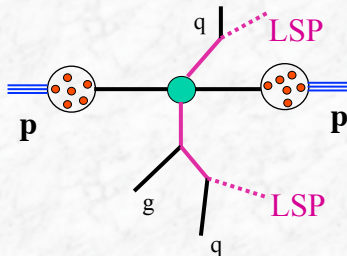


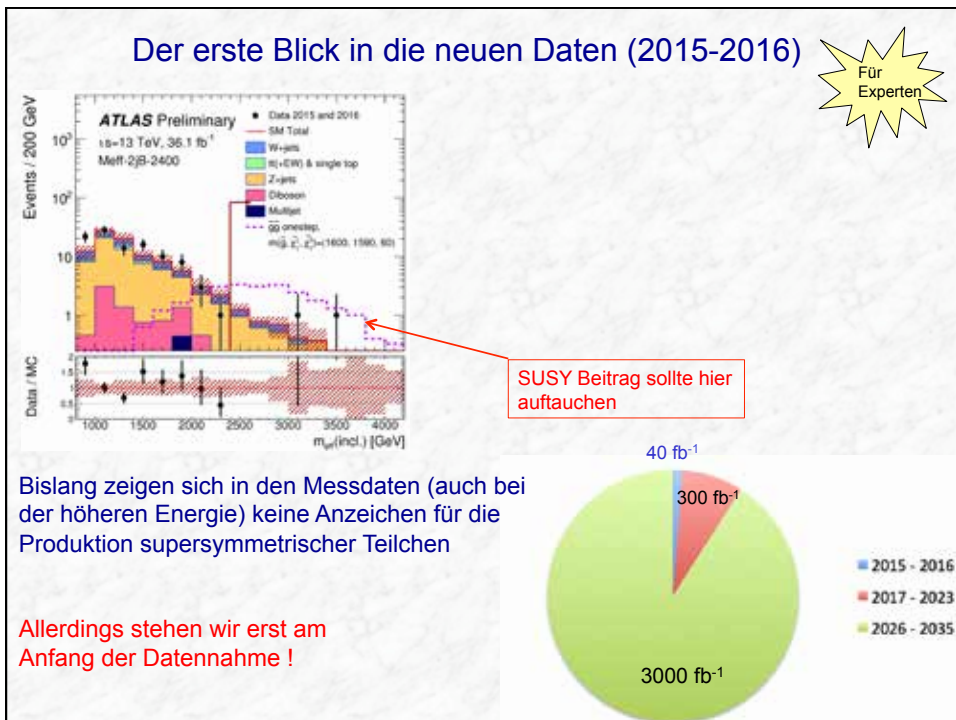
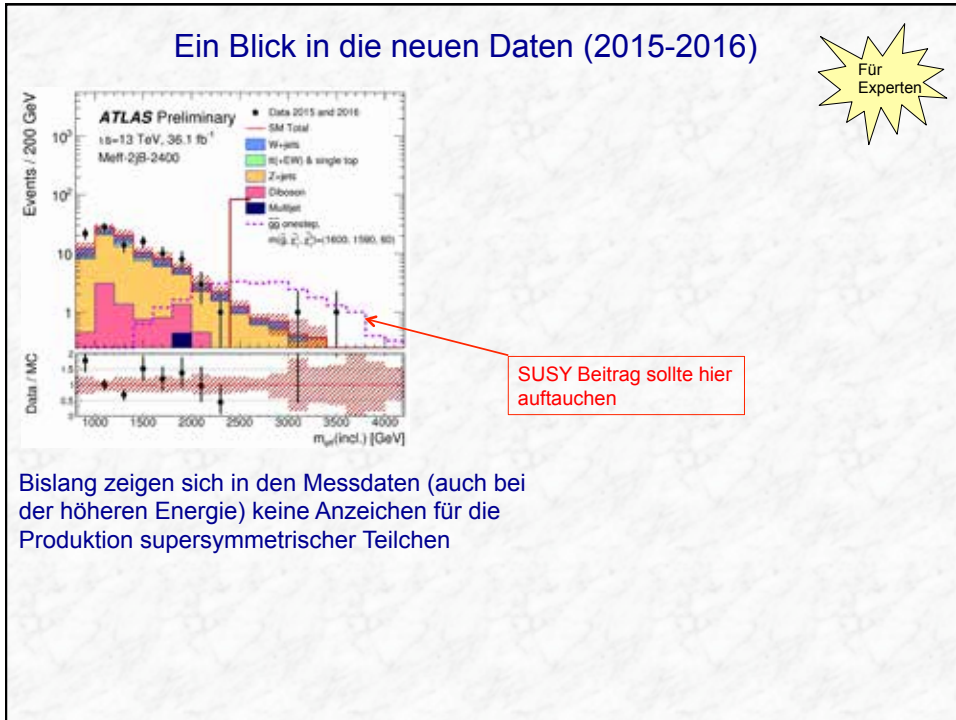
- Vereinheitlichung der Kräfte scheint in einer supersymmetrischen Theorie möglich zu sein

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)





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

