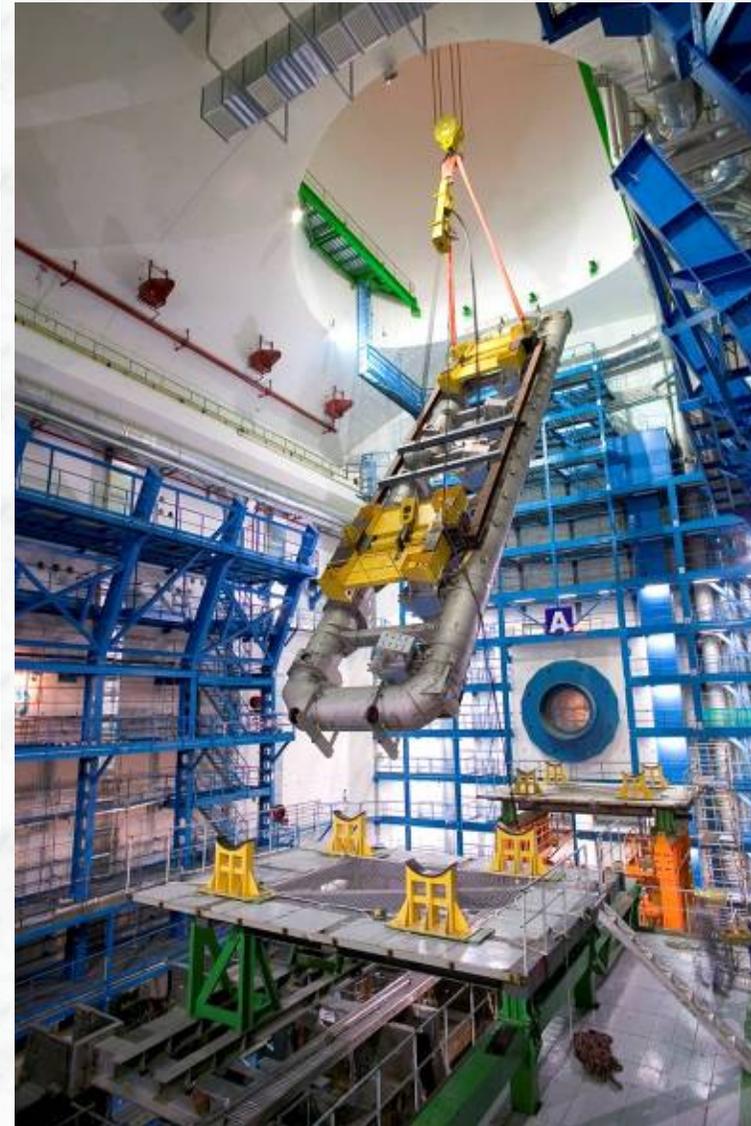
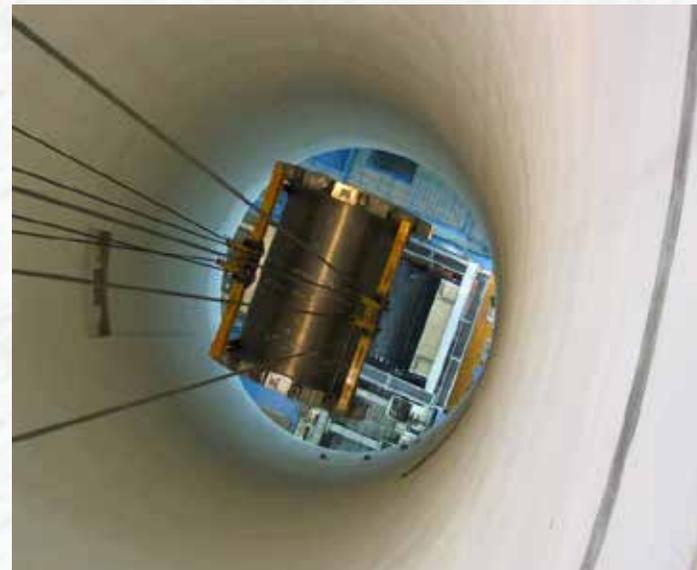


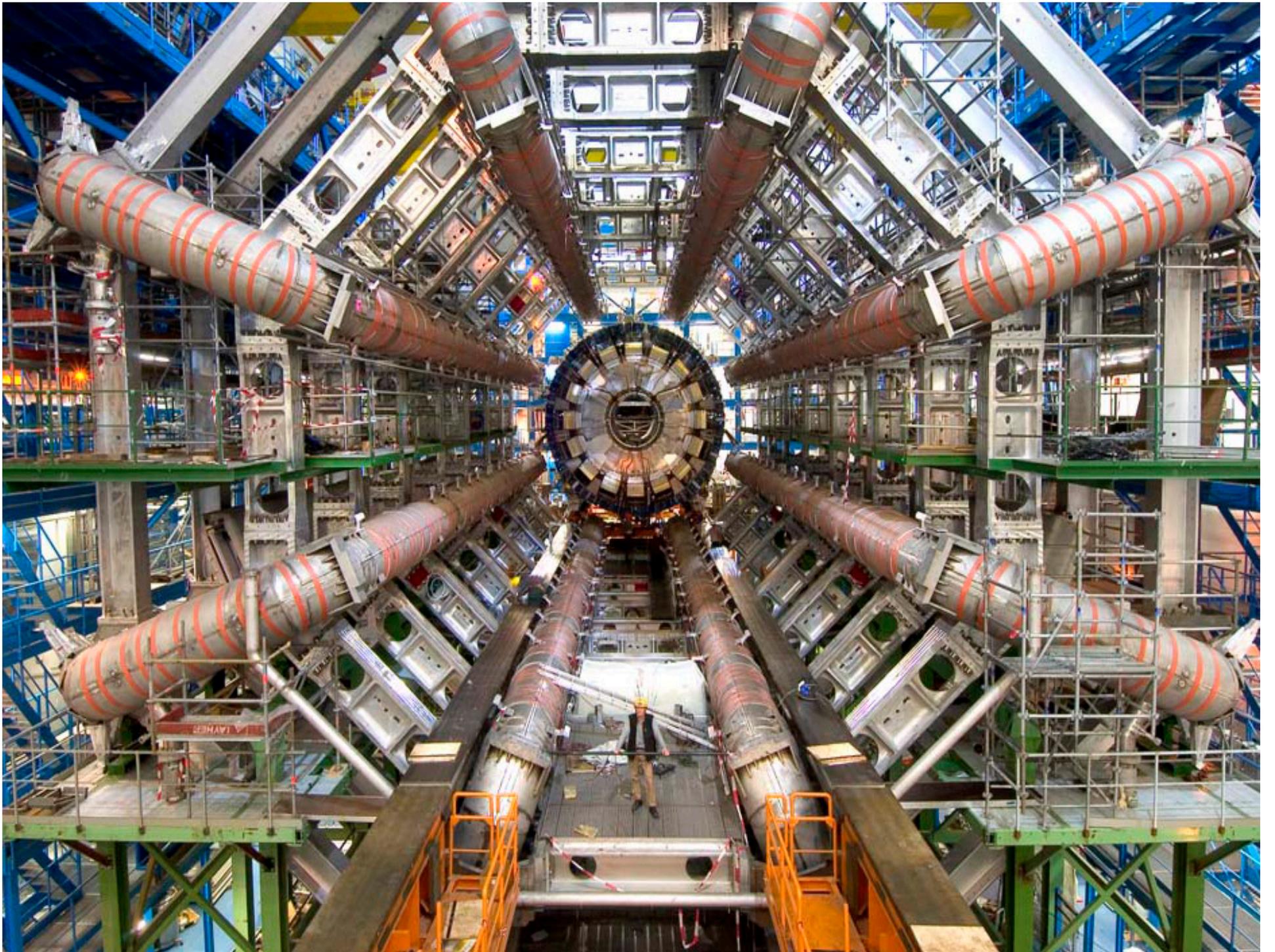
Etwa 3000 Wissenschaftler, davon etwa 1000 Studenten,
aus 174 Instituten und 38 Ländern

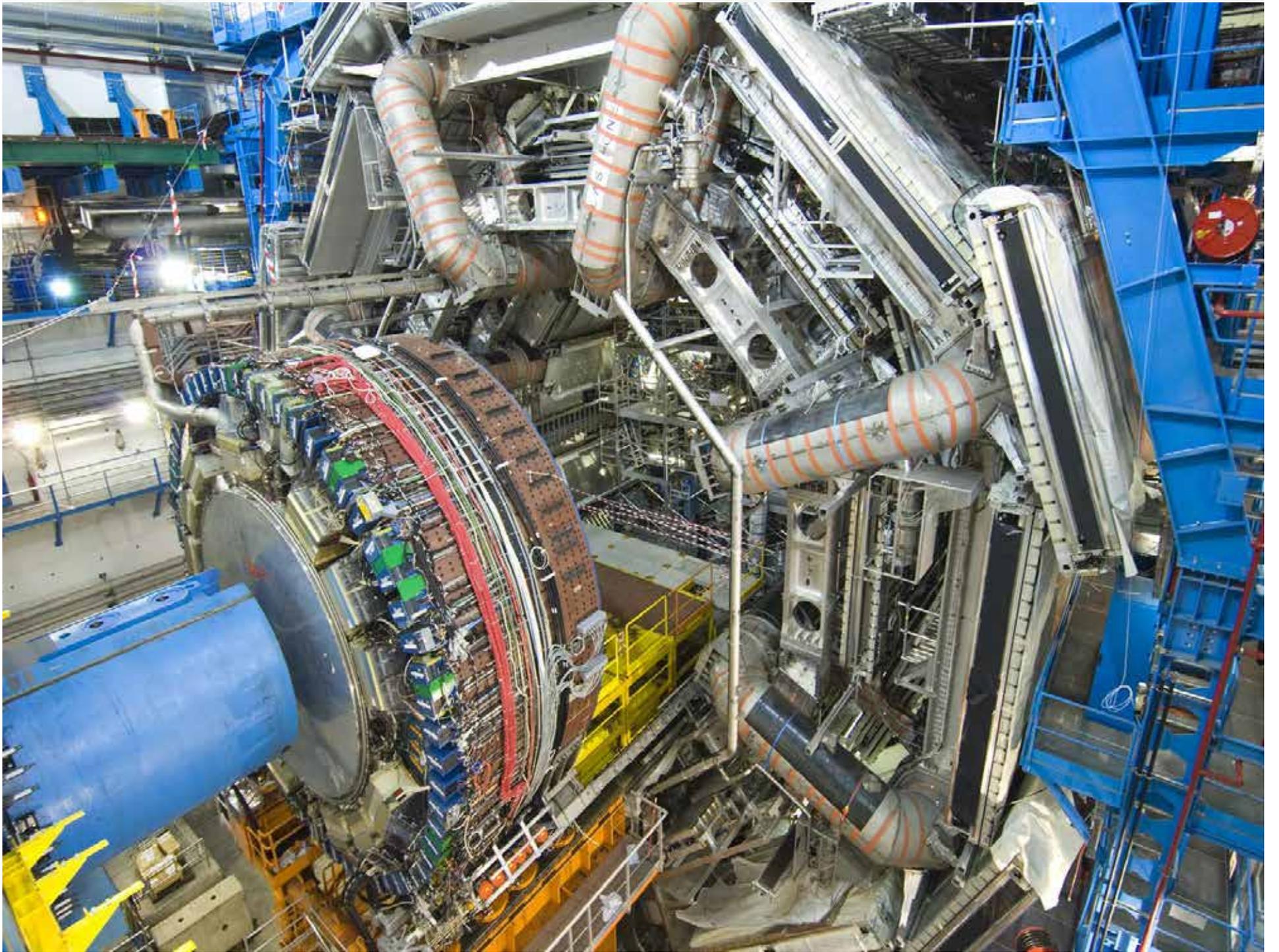
ATLAS-Detektorkonstruktion und Installation



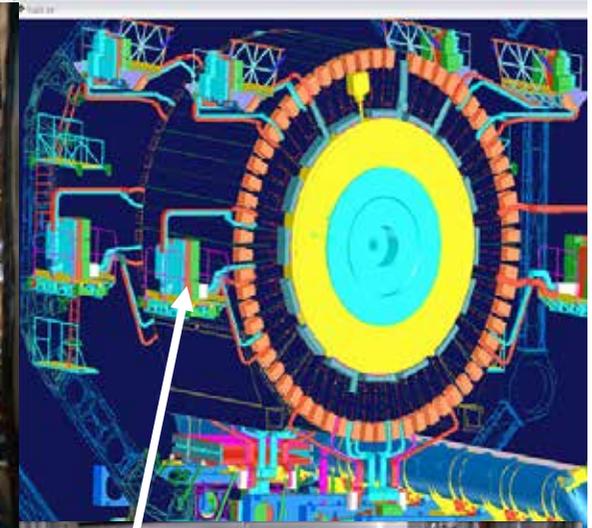
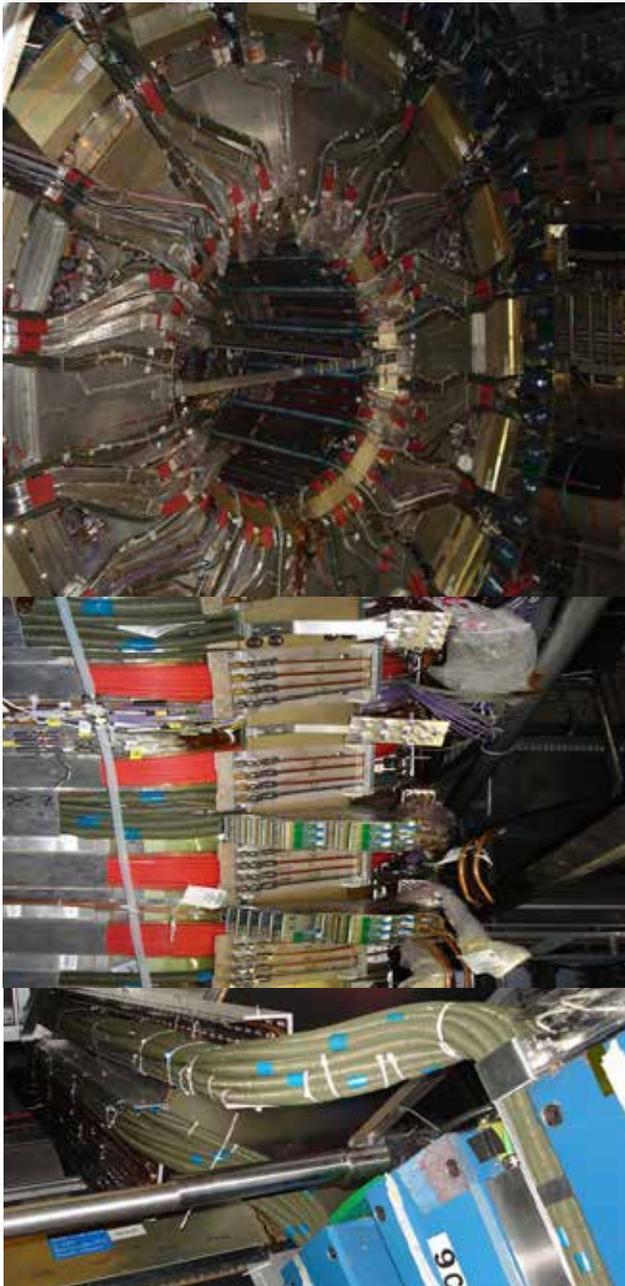
ATLAS-Detektorinstallation (2006)







Installation von Kabeln / Versorgungsleitungen



Beispiel:

Spurdetektor im zentralen Bereich

*~ 800 Personenmonate während
18 Monaten (45 Personen täglich)*

~ 12900 Kabelbündel

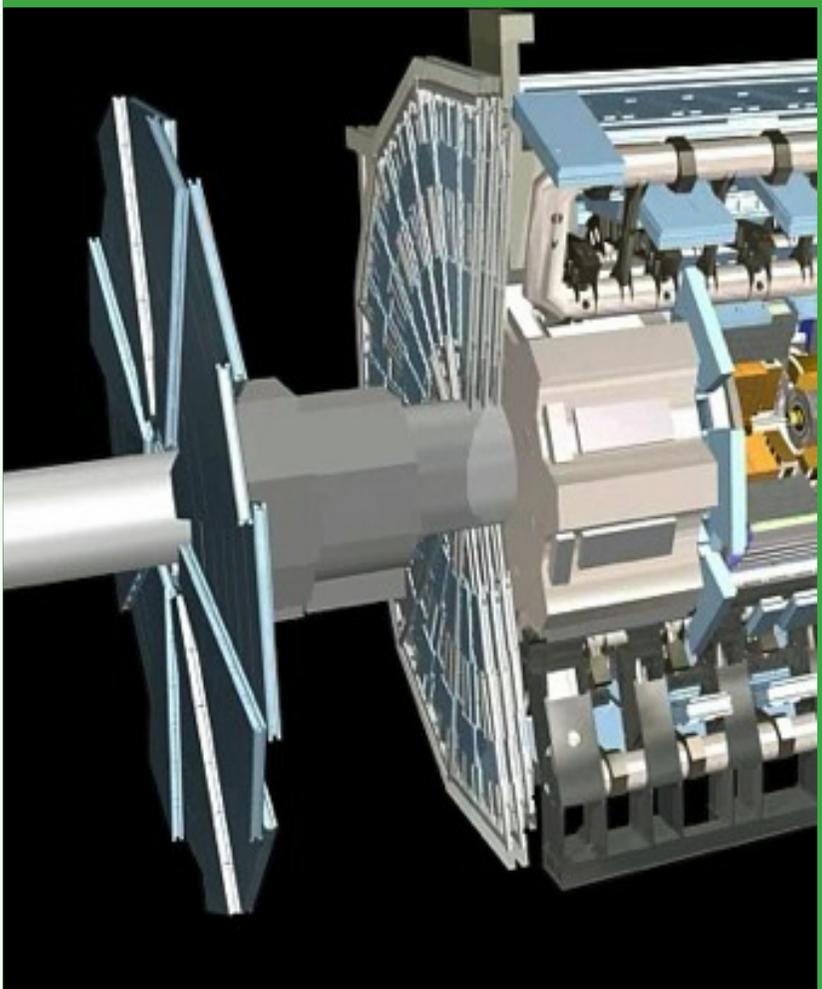
~ 30100 weitere Kabel

~ 2800 Kühl- und Gasleitungen

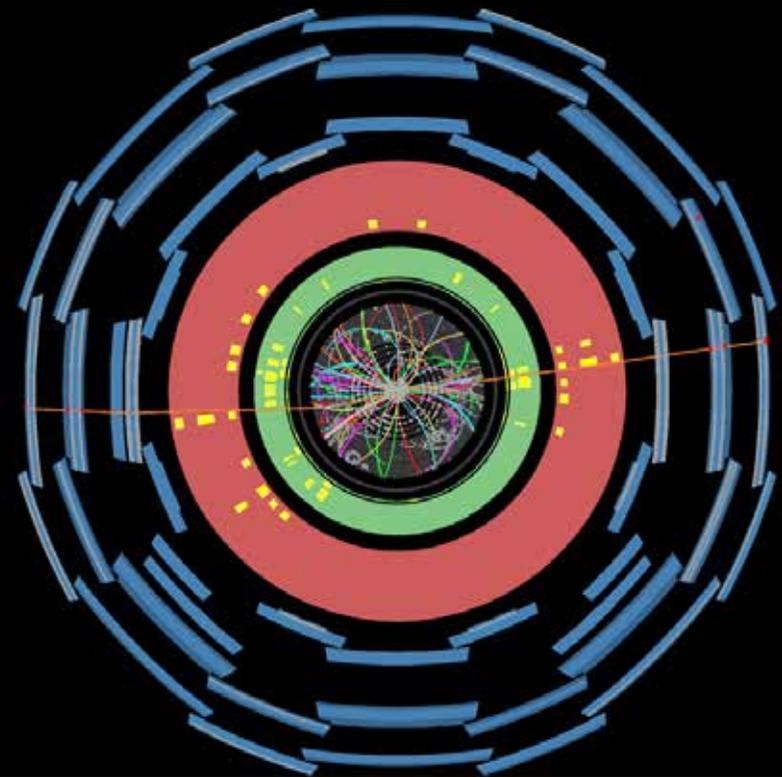
Alle getestet und qualifiziert

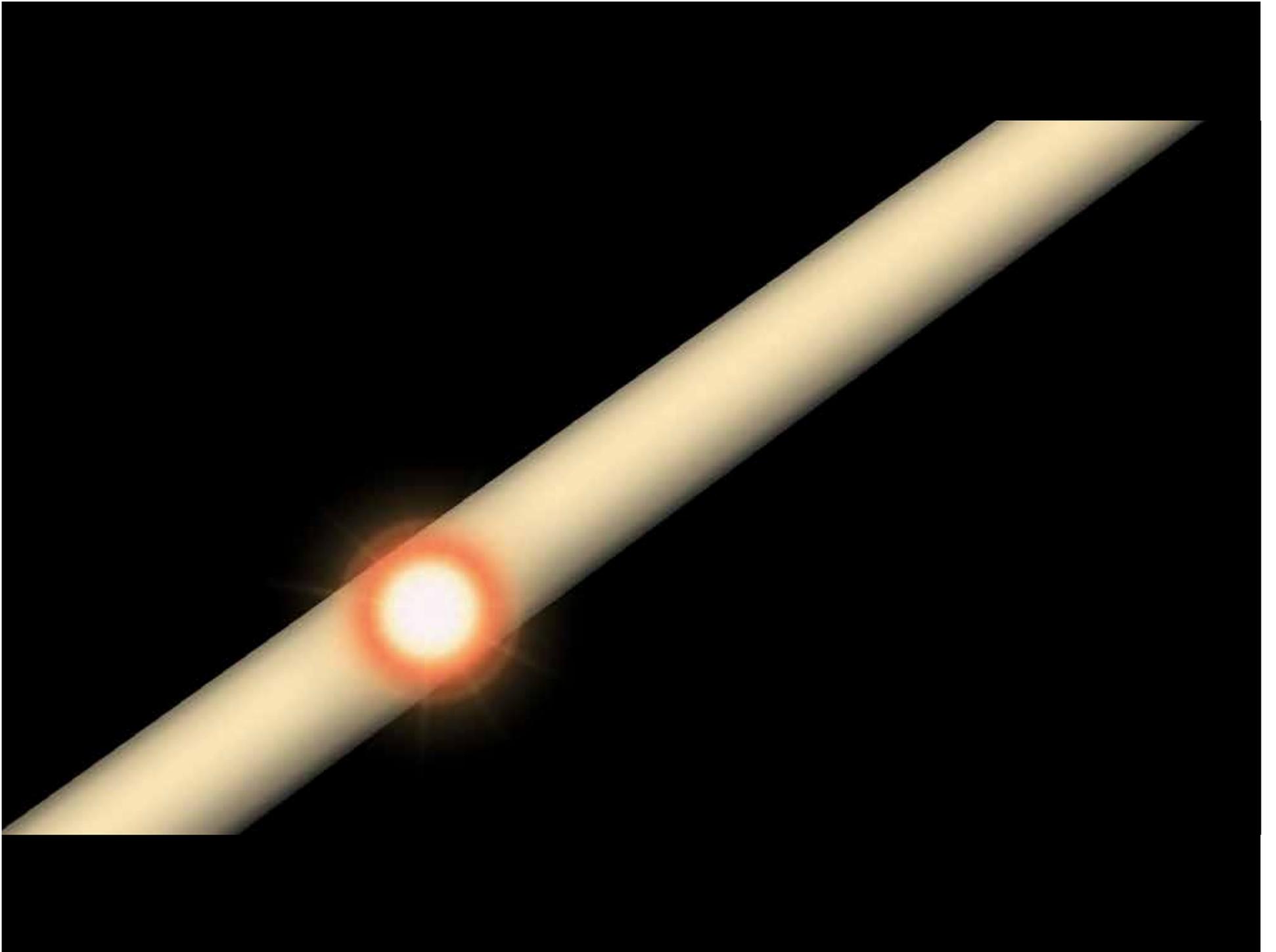


Myon-Detektorsystem
im Vorwärtsbereich

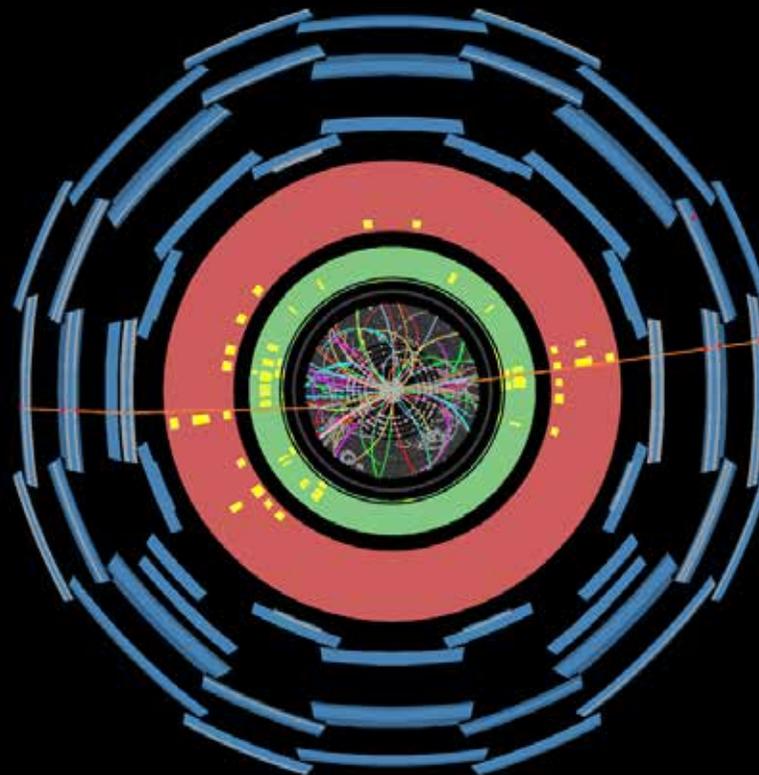


Seit 30. März 2010: Kollisionen bei den bislang höchsten erreichten Energien (7 TeV (2010/11) / 8 TeV (2012))





Seit 30. März 2010: Kollisionen bei den bislang
höchsten erreichten Energien (7 TeV (2010/11) / 8 TeV (2012))



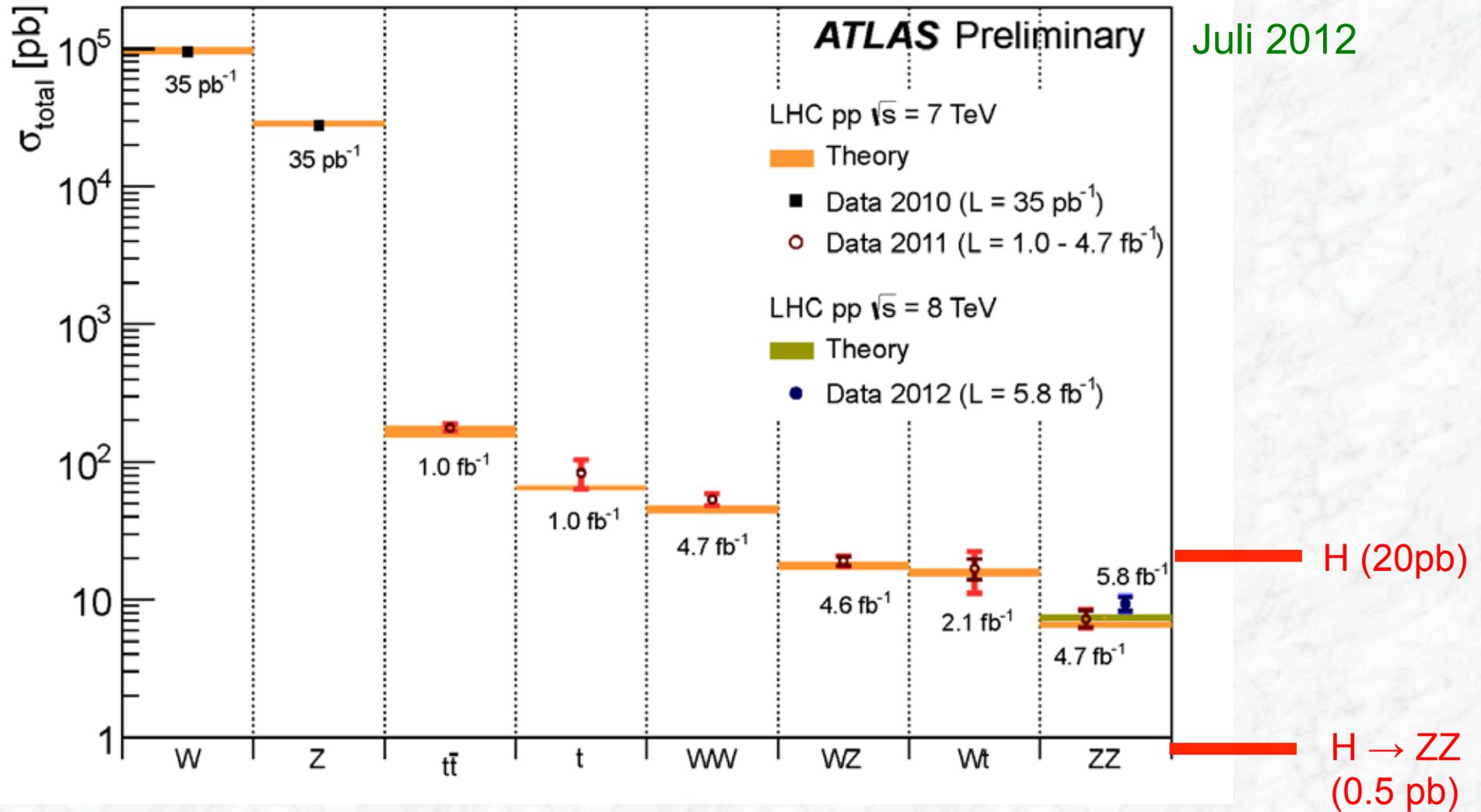
Bis Ende 2012:

> 10^{15} Proton-Proton Kollisionen

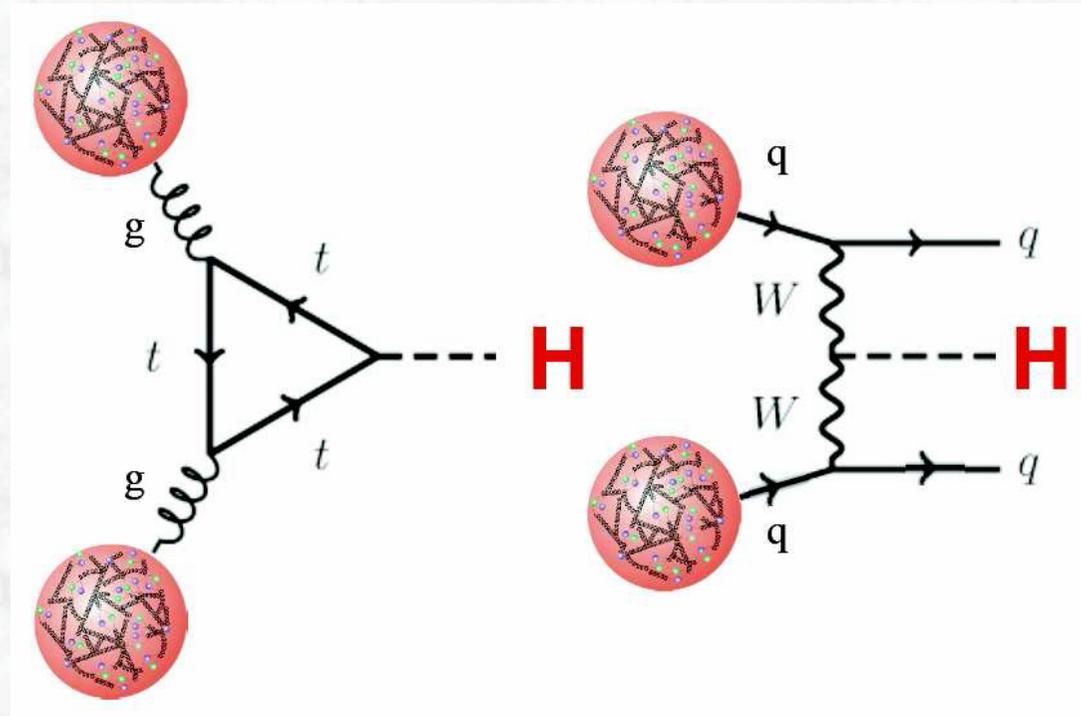
$\sim 10^{10}$ Kollisionen aufgezeichnet

$25 \cdot 10^6$ Z \rightarrow $\mu\mu$ Zerfälle registriert

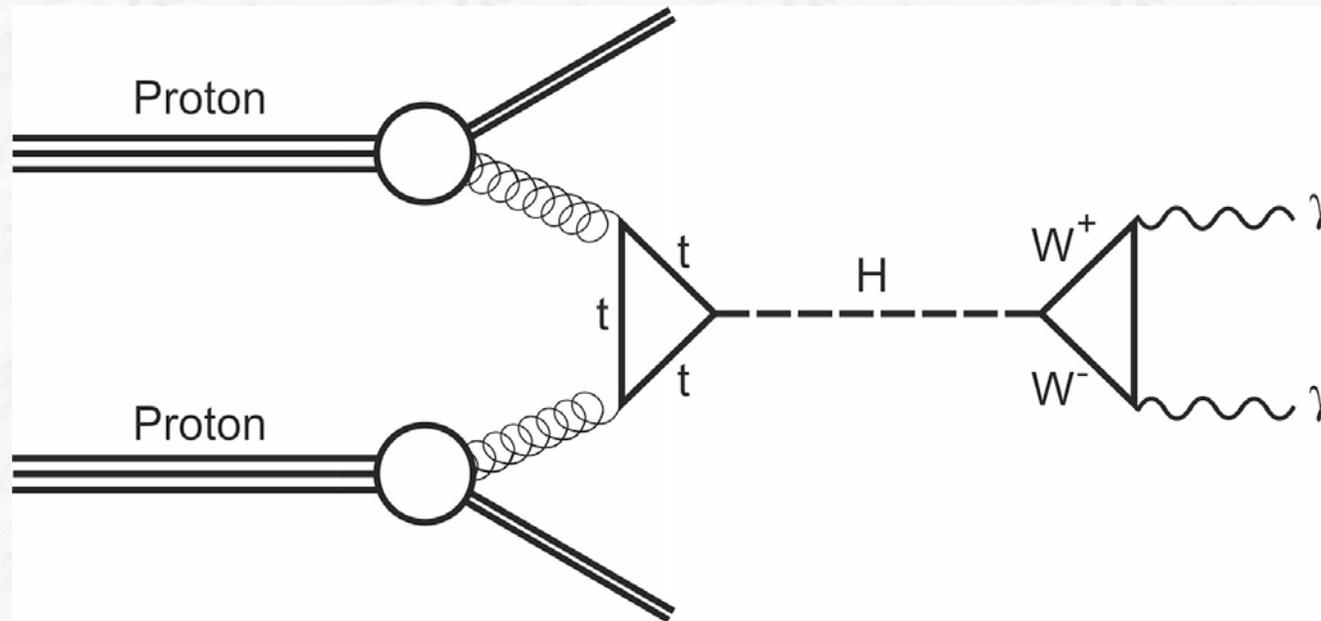
Vermessung der bekannten Standardmodellprozesse



Wie produziert man ein Higgs-Teilchen im LHC?



Wie produziert man ein Higgs-Teilchen im LHC?

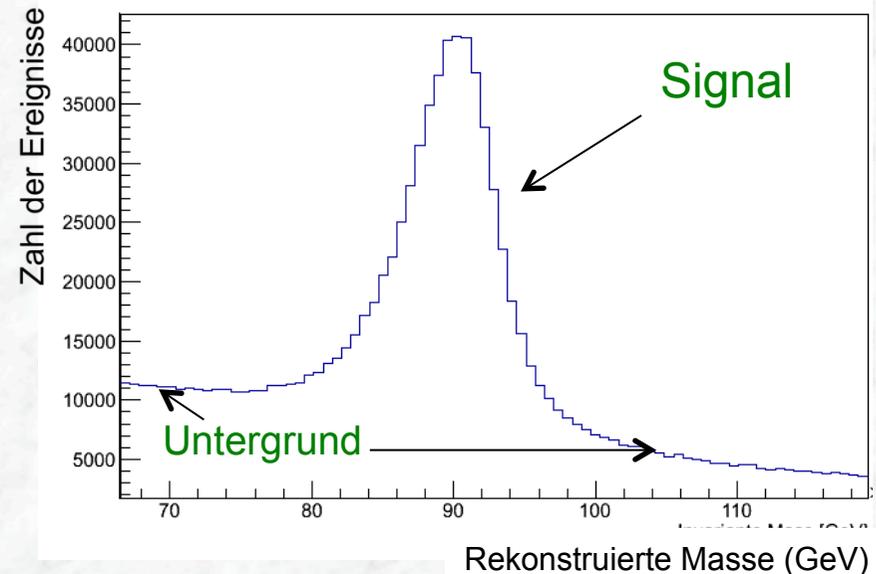
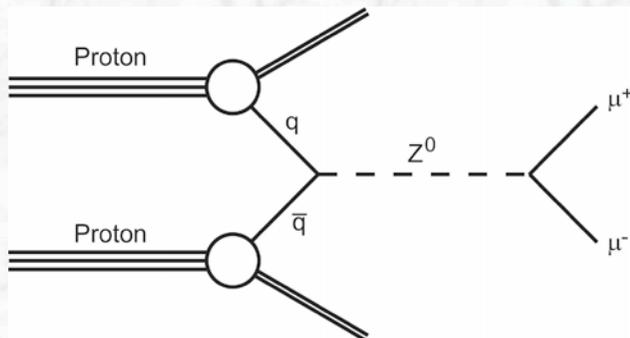


- Der wichtigste Prozess (Gluon-Fusion) ist nur über Quanteneffekte möglich
- Das Higgs-Teilchen wird aus masselosen Gluonen produziert und z.B. über Zerfälle in masselose Photonen nachgewiesen, über Zwischenzustände massiver, virtueller Teilchen

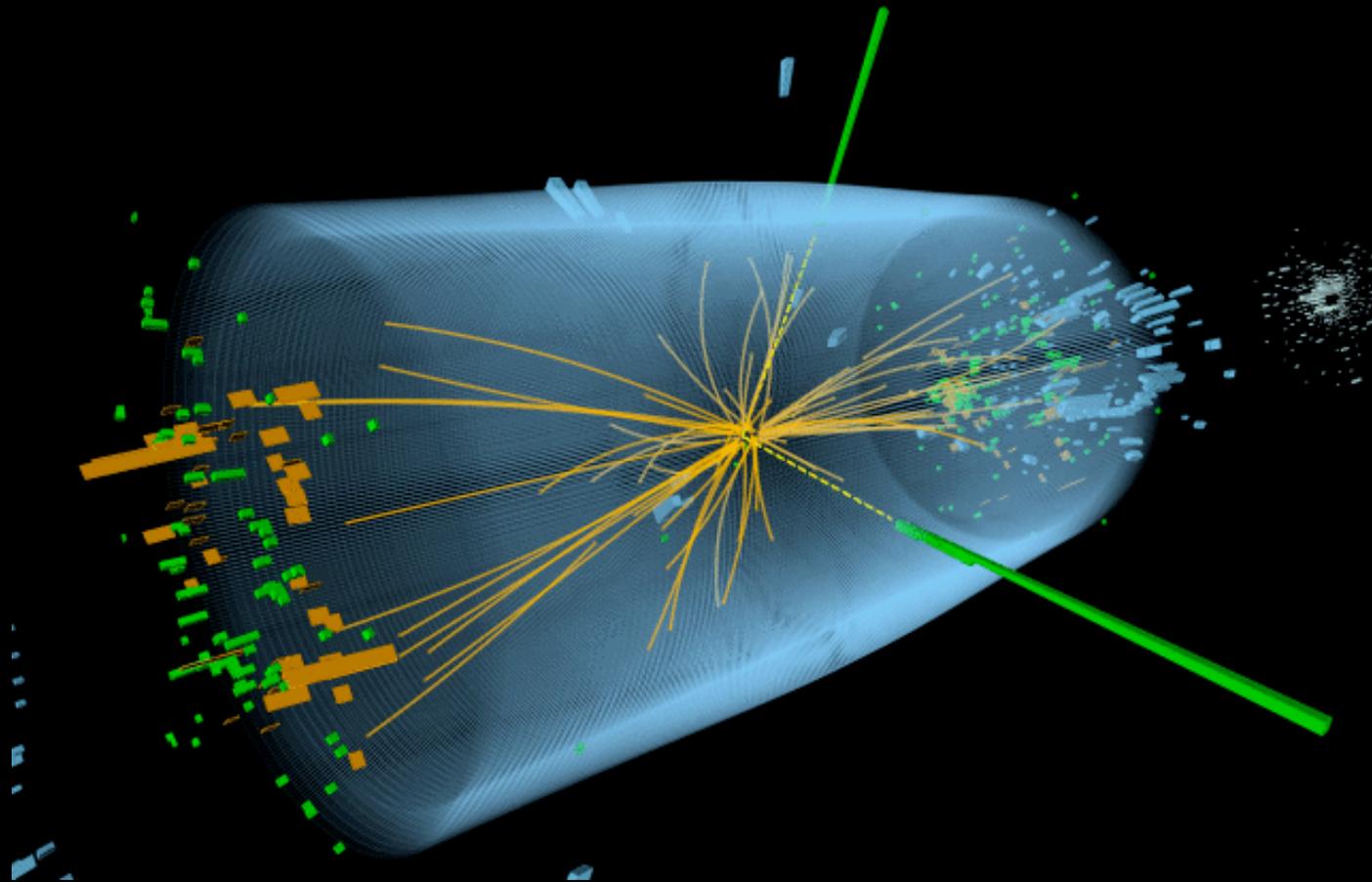


Wie rekonstruiert man kurzlebige, schwere Teilchen?

- Suche nach charakteristischen Zerfallsprodukten
z.B. nach Leptonen oder Photonen (stabile Zerfallsprodukte)
- Vermessung der Impulse / Energien der Teilchen
(Magnetfeld im zentralen Bereich, Myon-Detektor)
- Aus den Impulsen / Energien der Teilchen kann die Masse des Mutterteilchens rekonstruiert werden
- Beispiel: $Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$



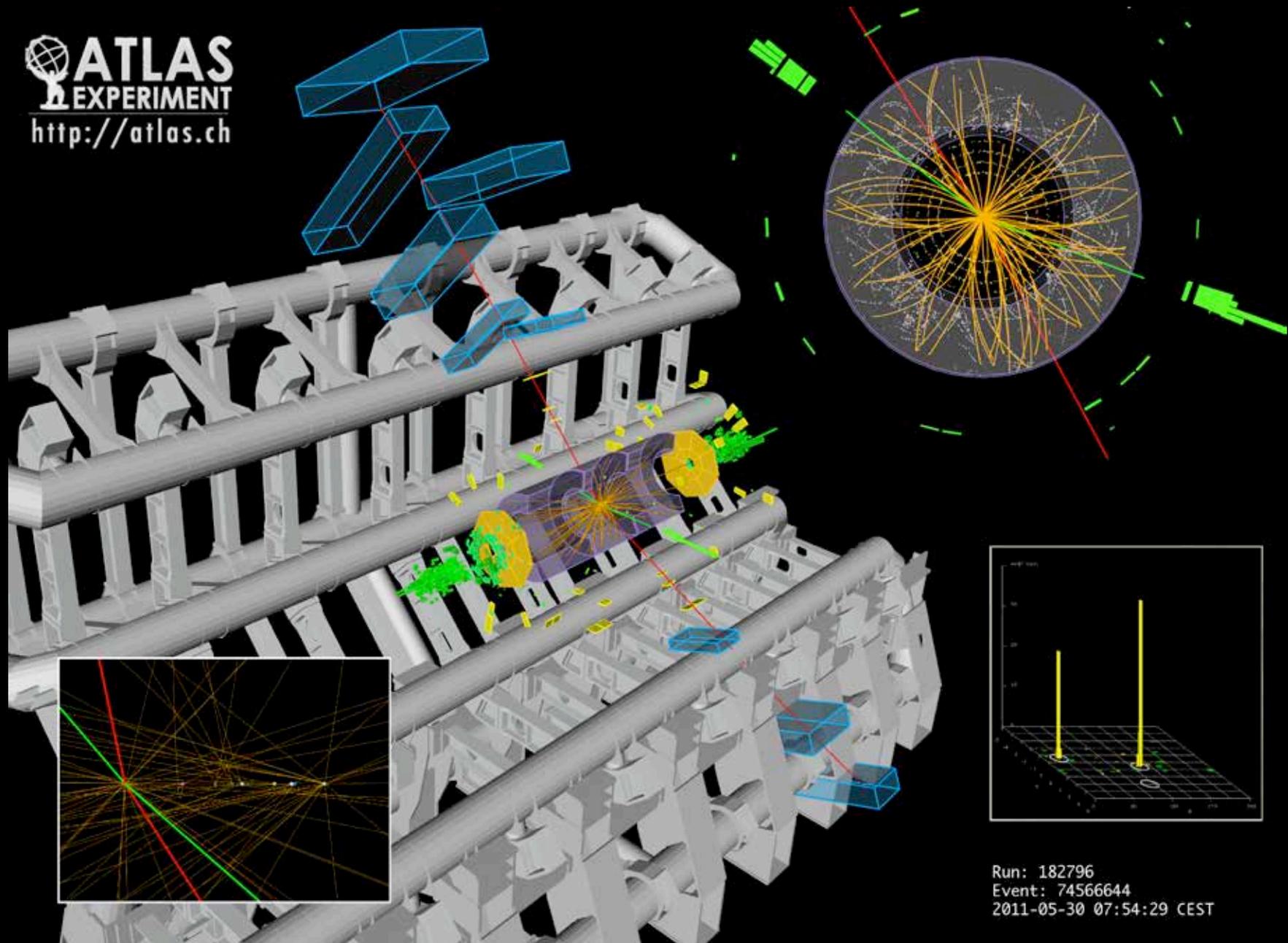
Entdeckung des Higgs-Teilchens



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

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

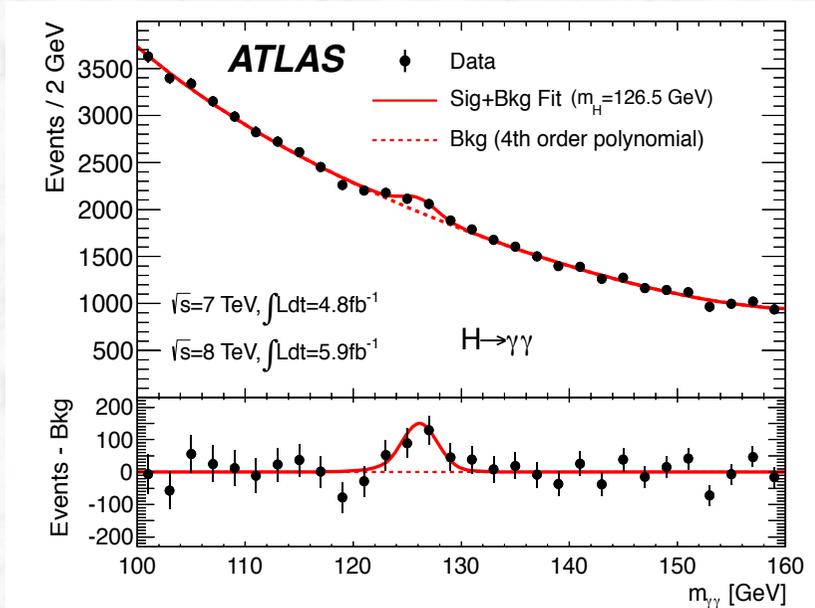
 **ATLAS**
EXPERIMENT
<http://atlas.ch>



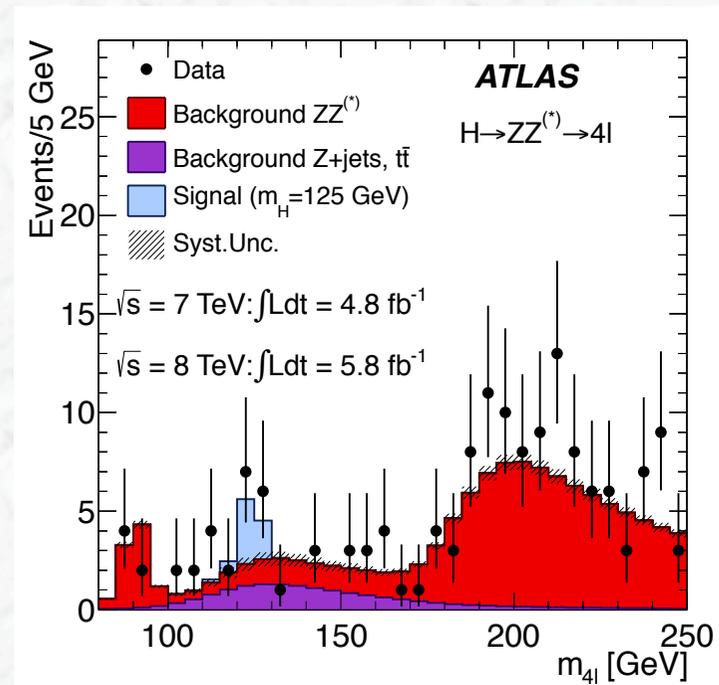
Ergebnis der Suche nach dem Higgs-Teilchen im ATLAS-Experiment (Juli 2012)



$H \rightarrow \gamma\gamma$



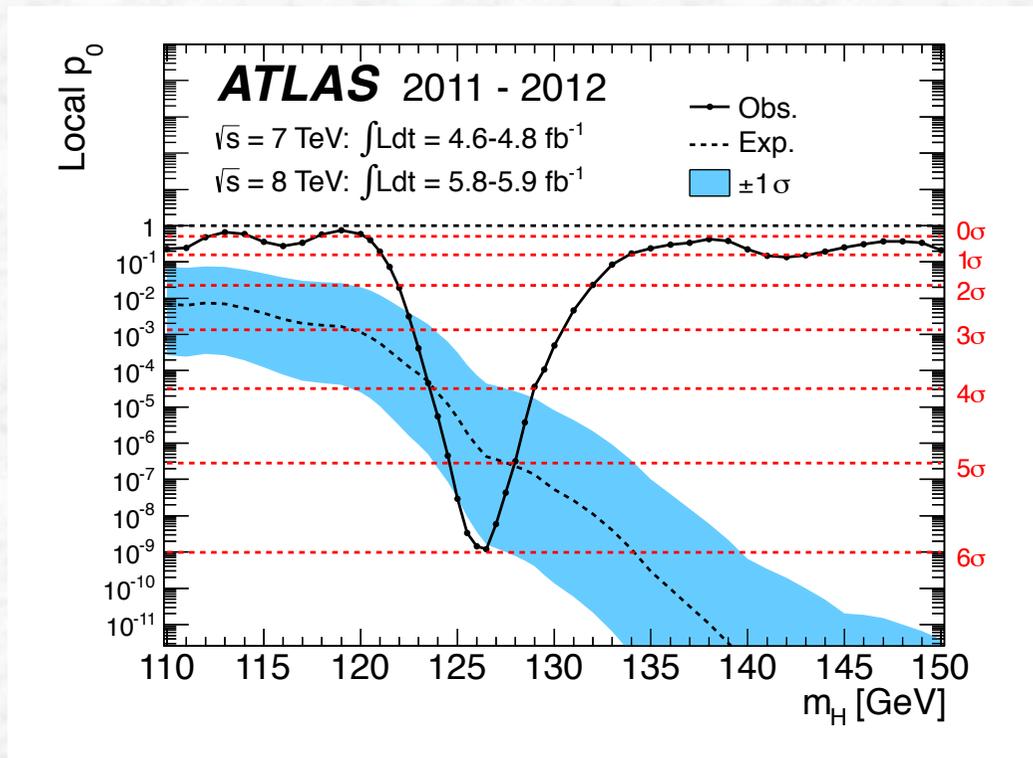
$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell$



Signifikanz des Signals ?

Handelt es sich um eine Entdeckung?

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



Signifikanz in Standardabweichungen einer Gaußverteilung:

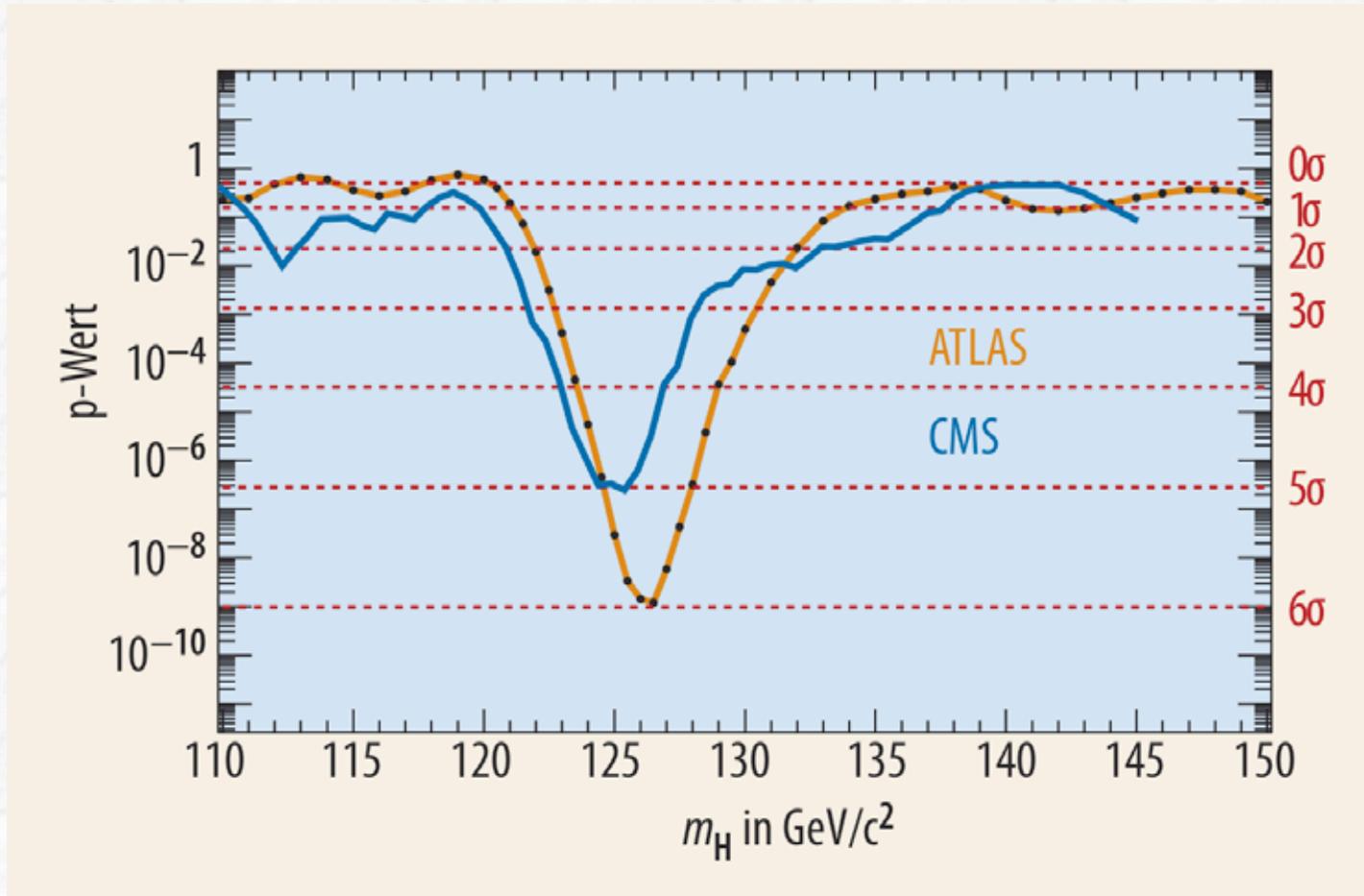
6 σ

**Konvention: > 5 σ
→ Entdeckung**

Wahrscheinlichkeit für Untergrundfluktuation: $10^{-9} = 1 : 1\,000\,000\,000$

→ Entdeckung eines „Higgs-ähnlichen Teilchens“ (neutral, Spin ganzzahlig = Boson)

Signifikanz des Signals ?

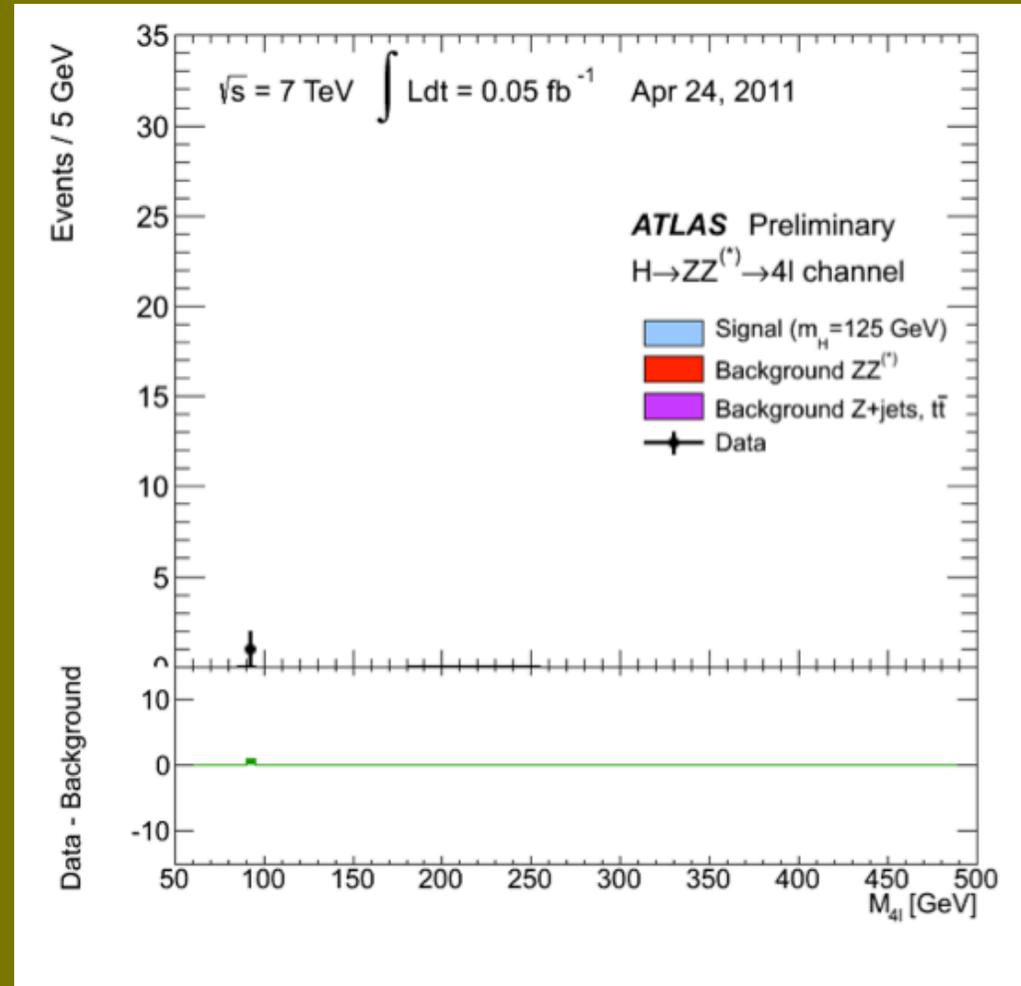


Ergebnisse der beiden Experimente (ATLAS und CMS)

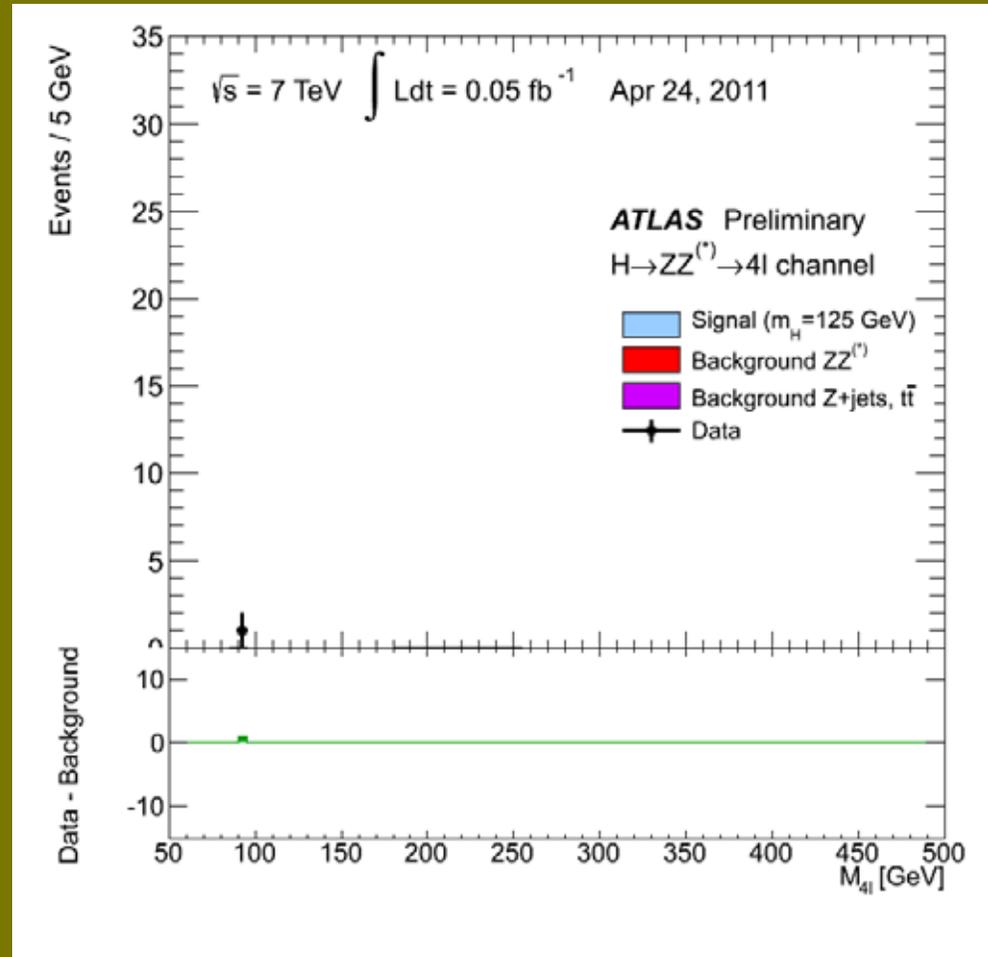
Zeitliche Entwicklung des H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l Signals



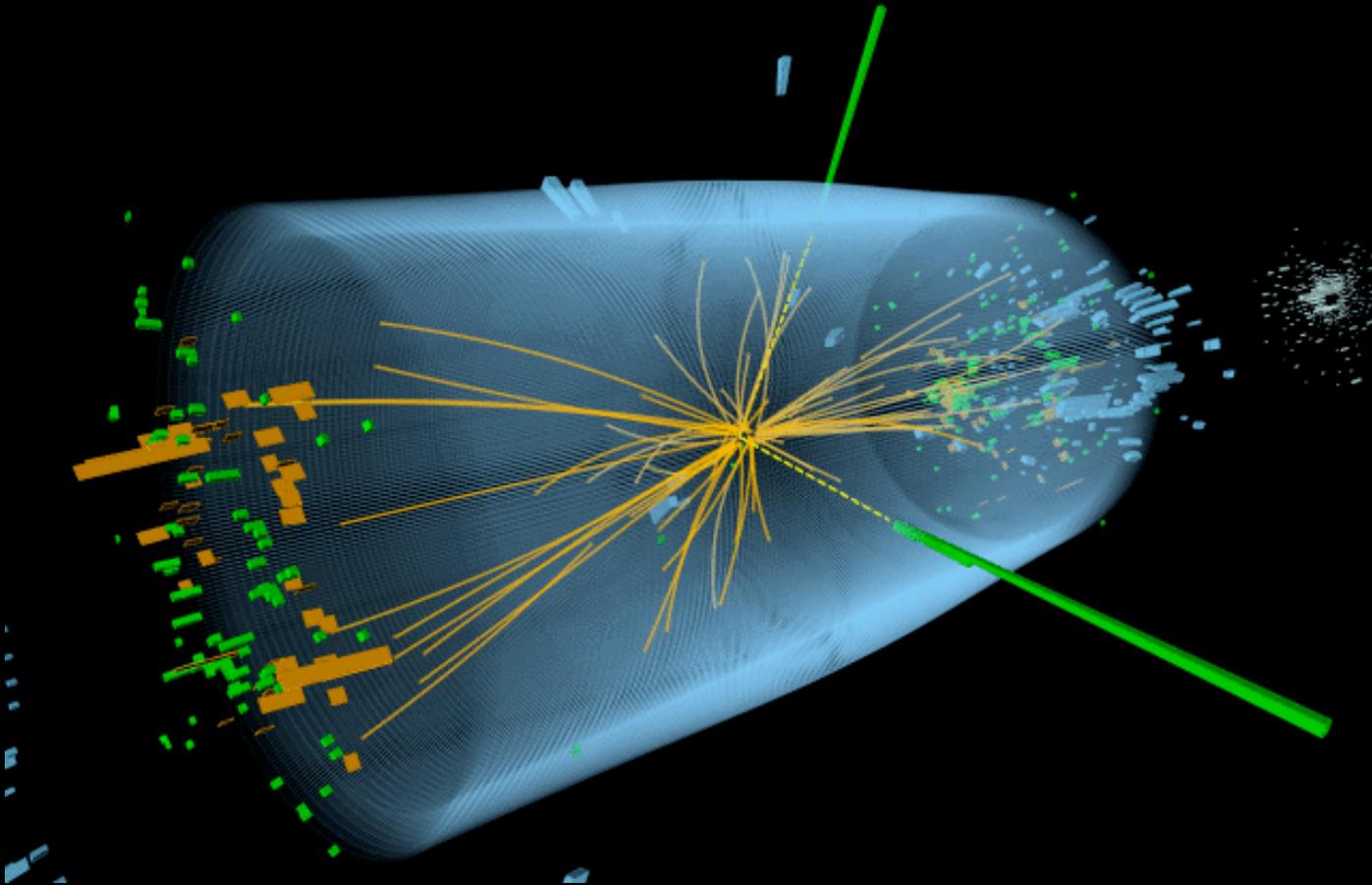
Zeitliche Entwicklung des $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ Signals



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



Stand der Messungen (kompletter Datensatz)



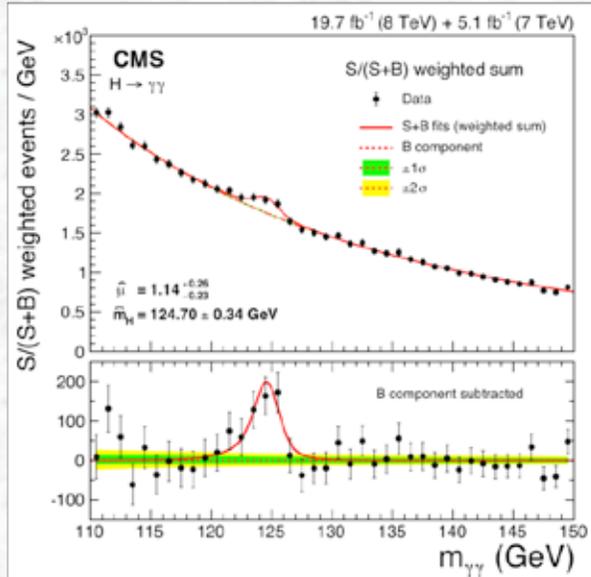
Erwartete Anzahl von Zerfällen in den Daten:
 $m_H = 125 \text{ GeV}$

- ~ 950 $H \rightarrow \gamma\gamma$
- ~ 60 $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 \ell$
- ~ 9000 $H \rightarrow WW \rightarrow \ell\nu \ell\nu$

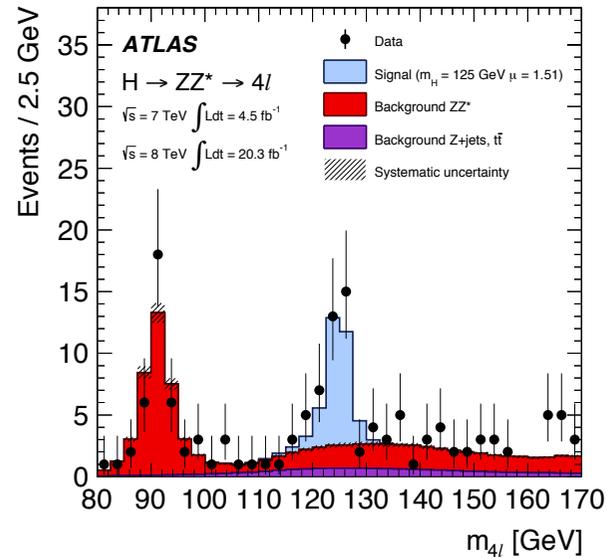
Signale des Higgs Bosons (2014)



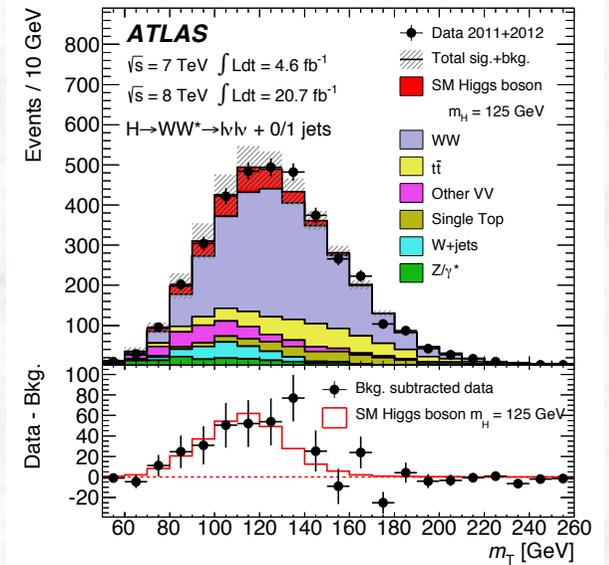
$$H \rightarrow \gamma\gamma$$



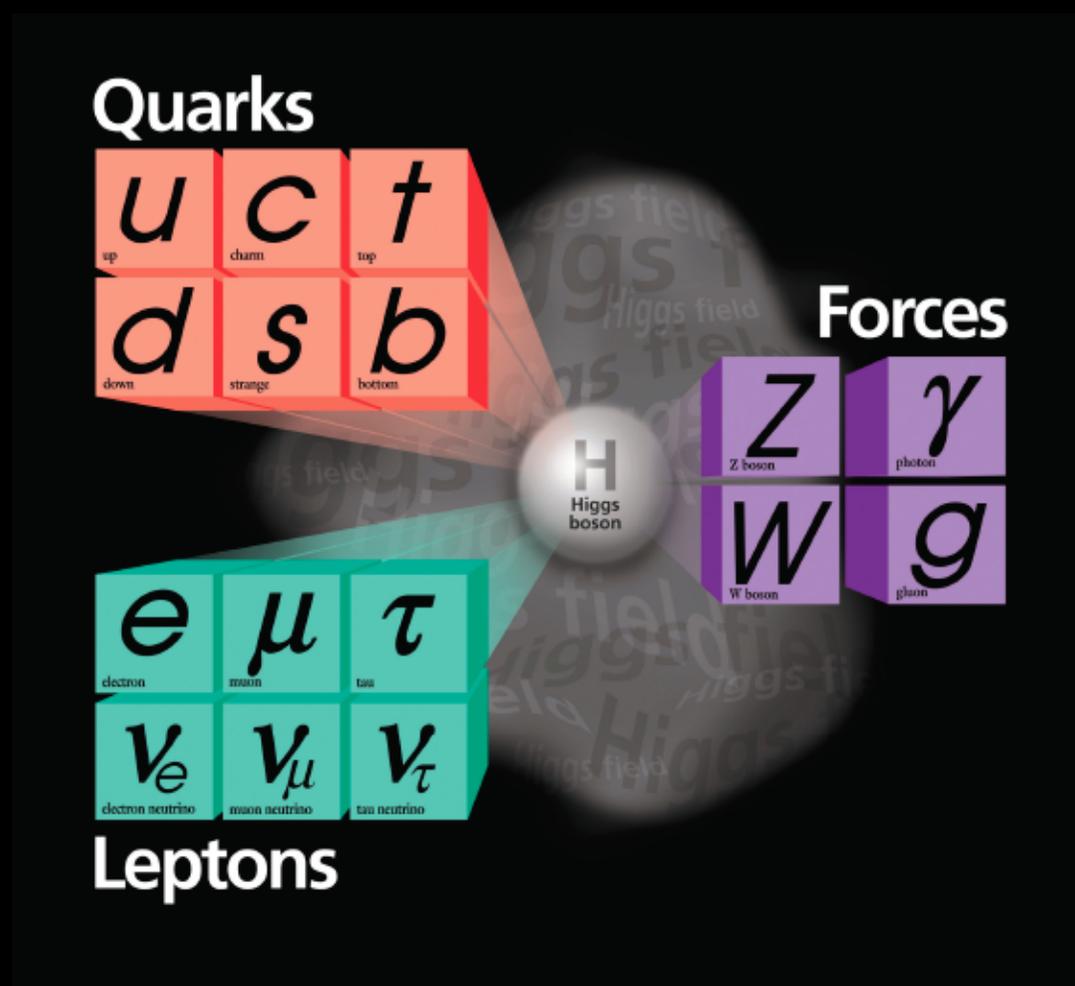
$$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell$$



$$H \rightarrow WW \rightarrow 2\ell 2\nu$$



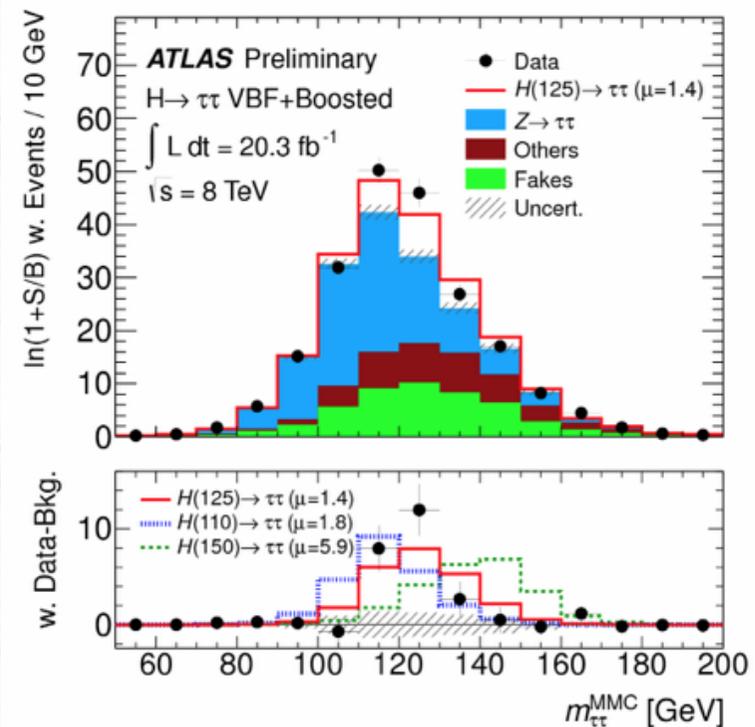
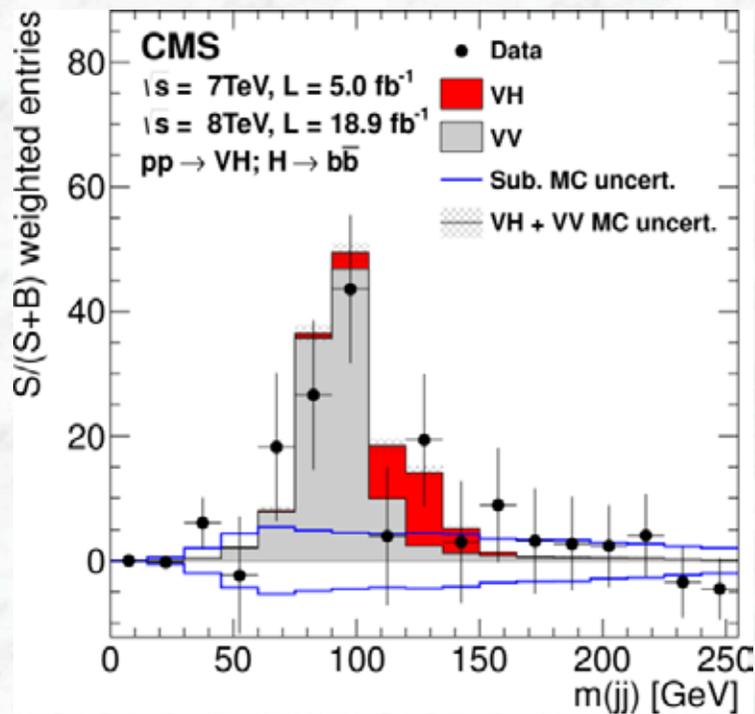
Wechselwirkt das Higgs-Teilchen auch mit Quarks und Leptonen?



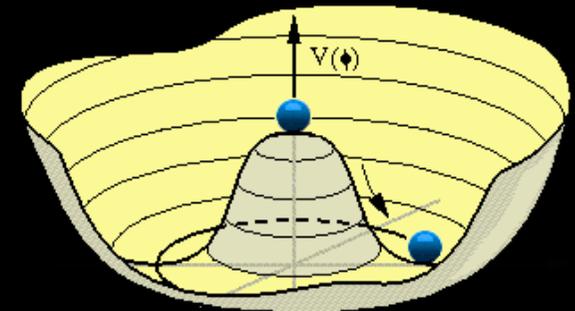
Suche nach $H \rightarrow \tau\tau$ und $H \rightarrow bb$ Zerfällen

2014: Evidenz für Higgs-Boson Zerfälle in Fermionen

- Komplexe Analyse (schlechte Signal-zu-Untergrund-Verhältnisse)
- Erst in diesem Jahr (2014) abgeschlossen



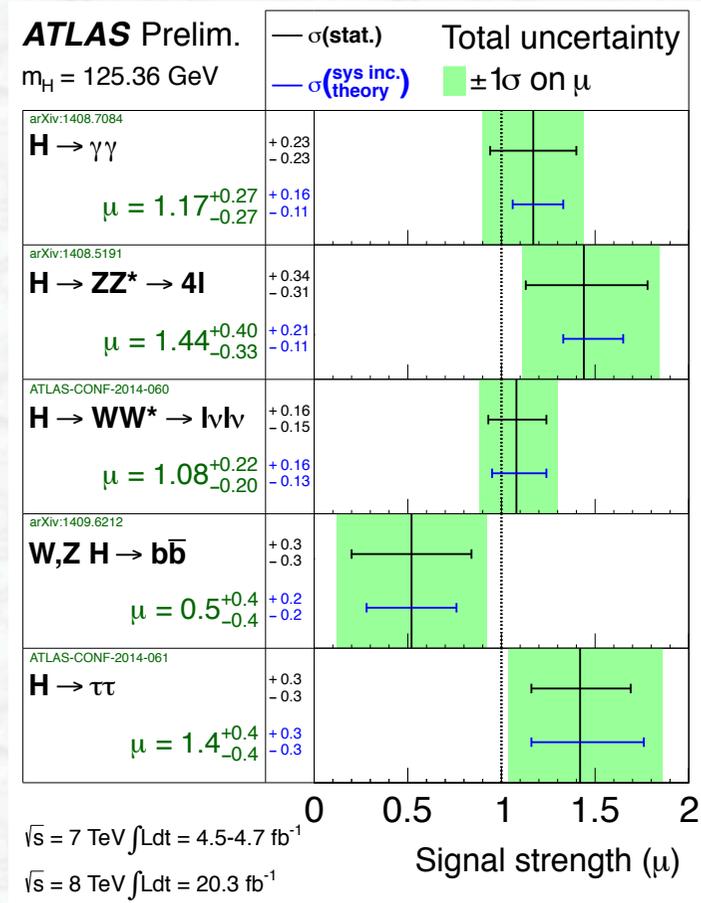
Ist das entdeckte Teilchen das Higgs-Boson des Standardmodells?



- Produktionsraten
 - Wechselwirkungsstärke mit Bosonen und Fermionen
- Eigendrehimpuls (Spin)

Stärke des Signals in den verschiedenen Zerfällen

Stärke des Signals, d.h. die Zahl der beobachteten Ereignisse verglichen mit den Erwartungen



$$m_H = 125.36 \pm 0.41 \text{ GeV}$$

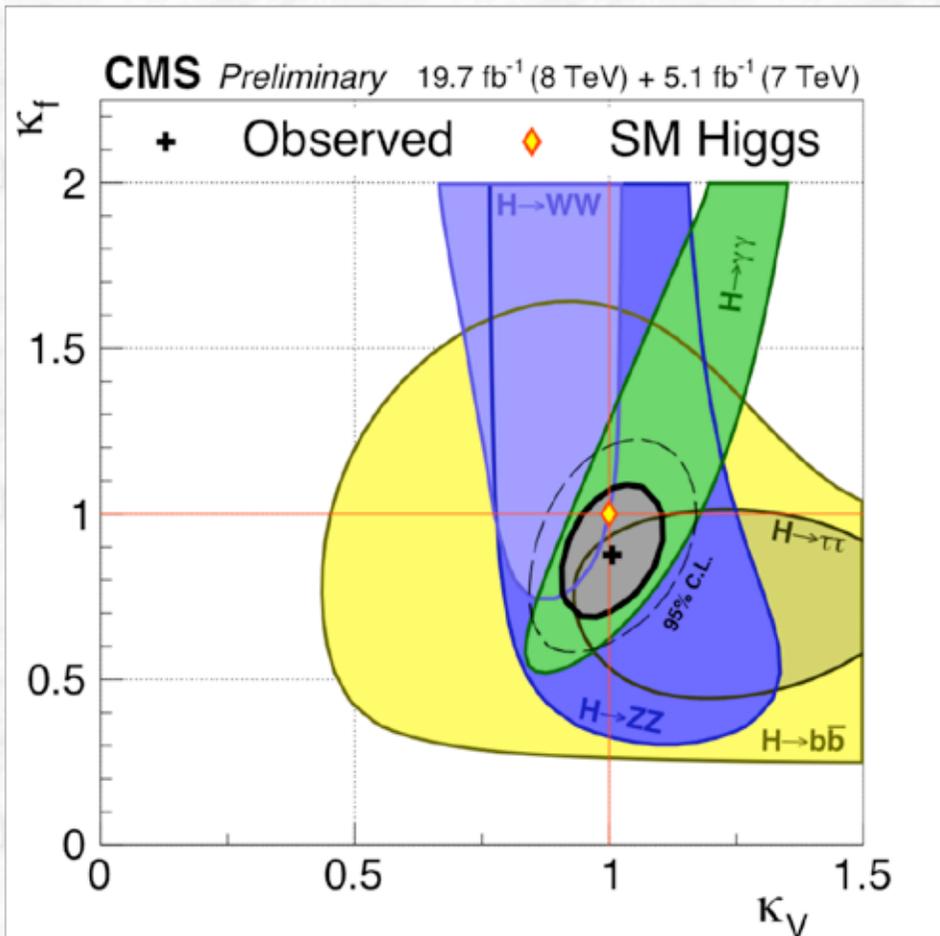
Erwartung:

$\mu = 1$ für das Higgs-Teilchen des Standardmodells

$\mu = 0$ kein Higgs-Teilchen

Daten sind konsistent mit der Hypothese des Higgs-Teilchens des Standardmodells

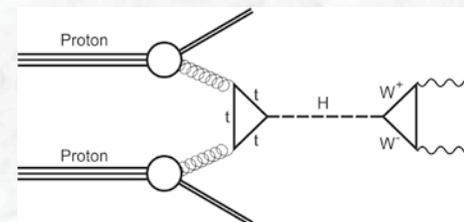
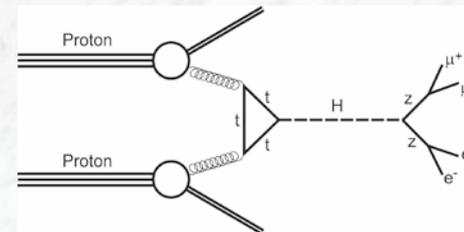
Wechselwirkung mit Bosonen und Fermionen -normiert auf die Standardmodellerwartungen-



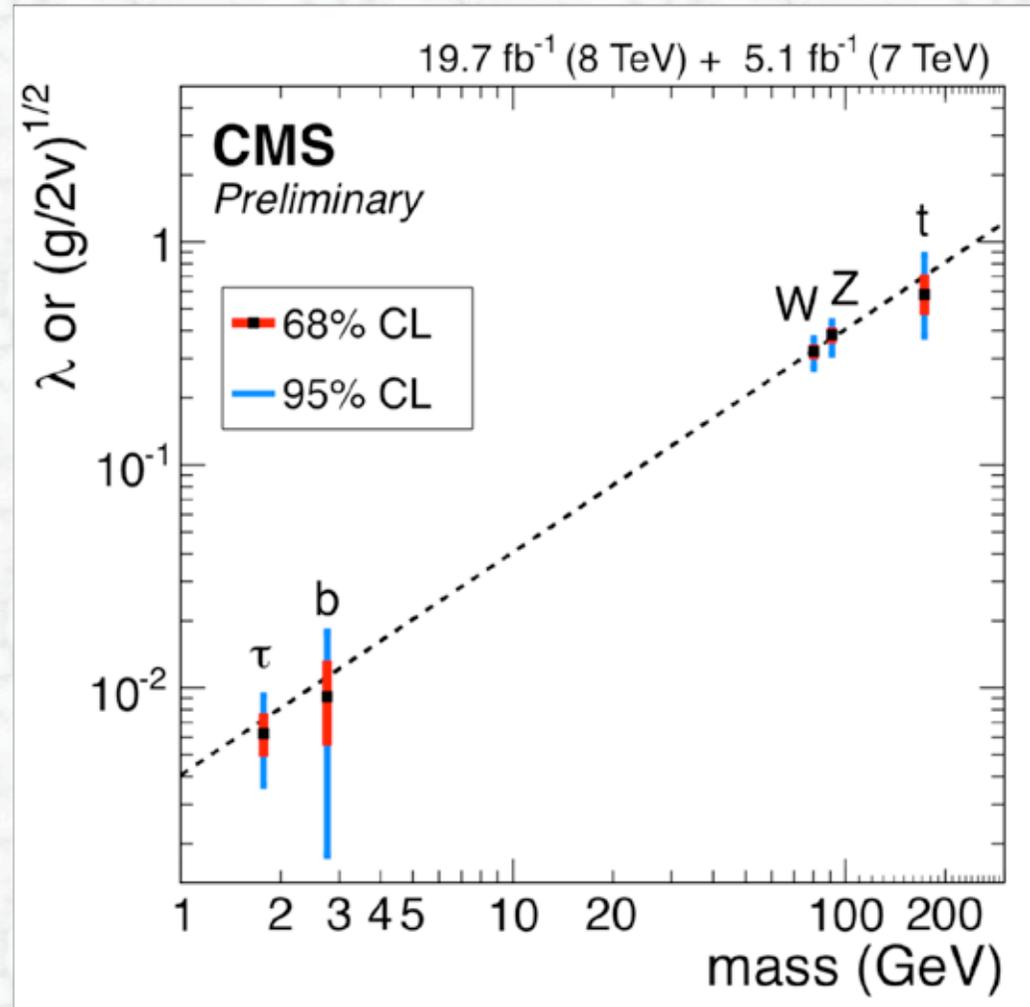
Standardmodell:

$$\kappa_f = 1.0$$

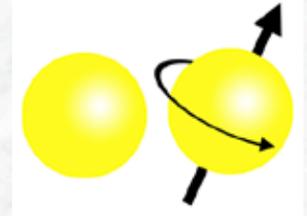
$$\kappa_V = 1.0$$



Wechselwirkungsstärke proportional zur Masse?



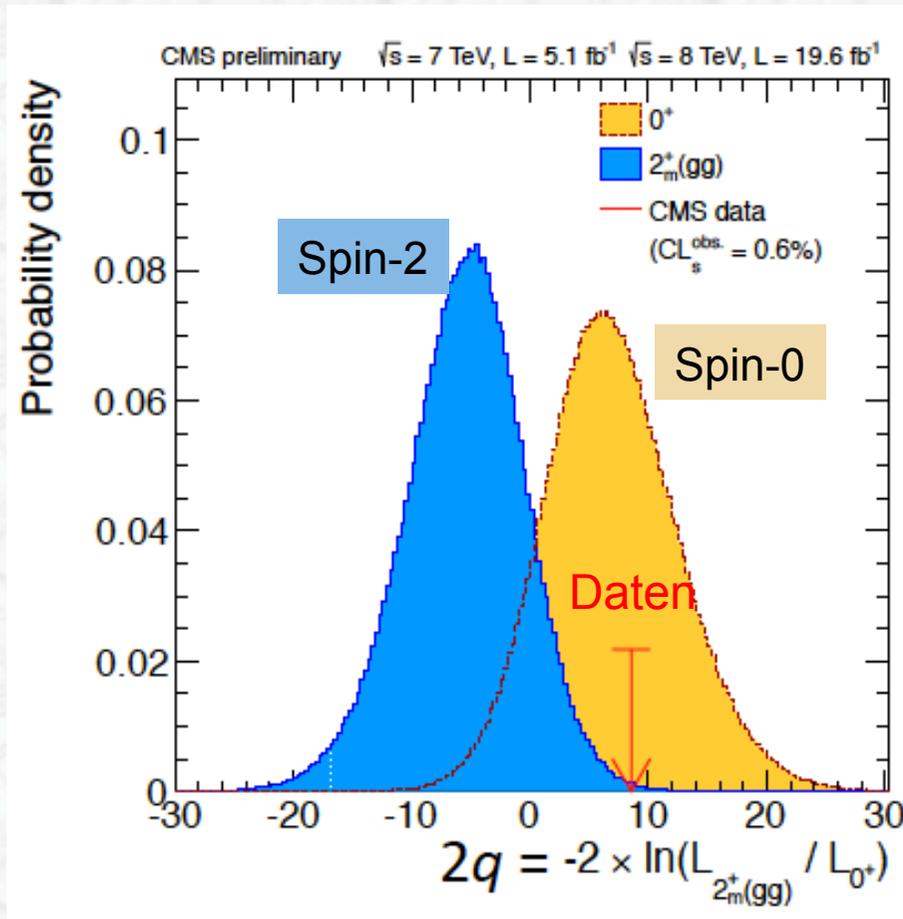
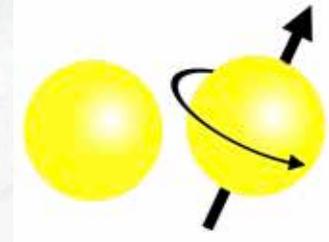
Eigendrehimpuls (Spin)



Wolfgang Pauli und Niels Bohr bei der wissenschaftlichen Untersuchung der Kreiselbewegung (1952, anlässlich der Eröffnung des Instituts für Theoretische Physik in Lund / Schweden)

- Standardmodel Higgs-Boson: $J^{CP} = 0^+$
→ Strategie: Hypothesentests, Verwerfung anderer Hypothesen ($0^-, 1^-, 1^+, 2^-, 2^+$)
- Relevante Information in Winkelverteilungen der Zerfallsprodukte

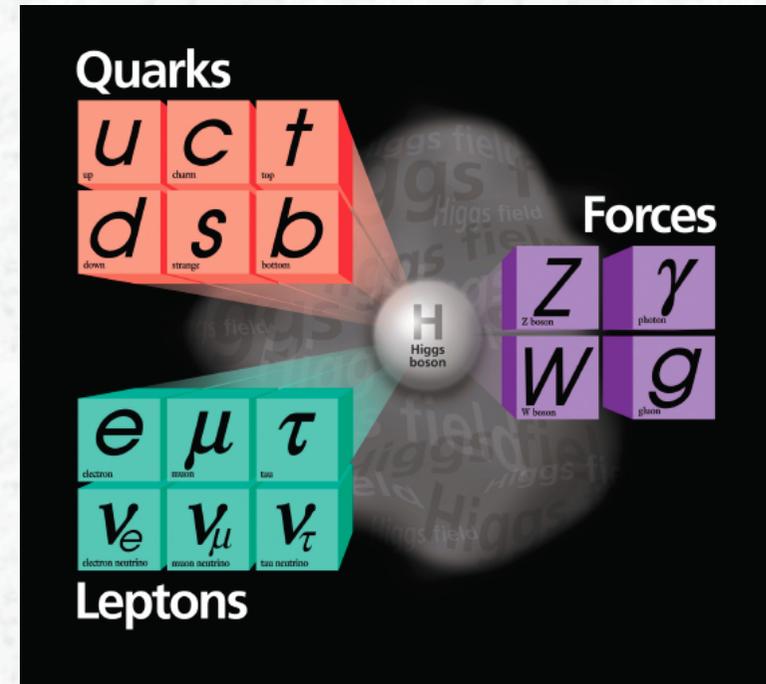
Eigendrehimpuls (Spin)



Daten favorisieren sehr stark die vom Higgs-Modell vorhergesagte Spin-0 Hypothese
(Alternativen können mit Wahrscheinlichkeiten von >99% ausgeschlossen werden)

Ein Meilenstein für die Physik

- Mit dem Higgs-Teilchen wurde das erste “elementare” Teilchen mit Eigendrehimpuls (Spin) Null nachgewiesen

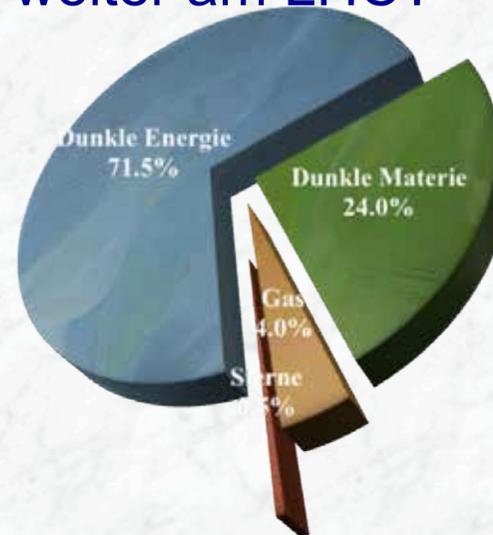


- Nachweis des Higgs-Teilchens bestätigt die Hypothese des Higgs-Feldes, das dem Vakuum “Struktur” und damit den elementaren Teilchen Masse verleiht.

Wichtige offene Fragen der Physik -oder wie geht es weiter am LHC?-

1. Masse

Was ist der Ursprung der Masse?
Existiert das Higgs Teilchen?



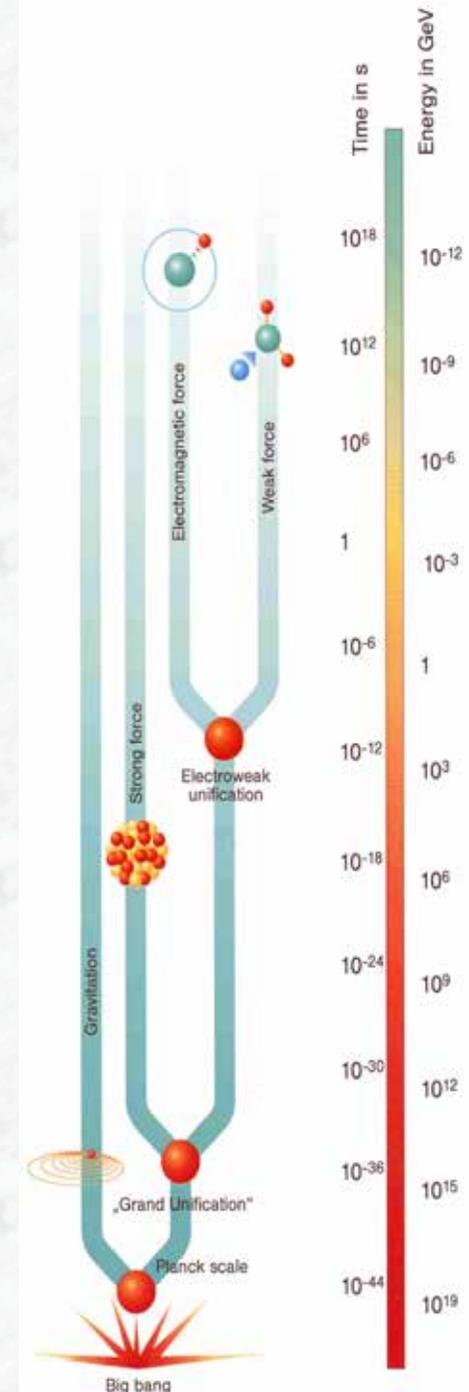
2. Vereinheitlichung

- 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?



Zusammenfassung

- Mit der Inbetriebnahme des LHC hat für die Teilchenphysik eine neue Ära begonnen
- Projekt hoher Komplexität (Beschleuniger, Experimente) wurde über eine Zeitskala von 20 Jahren in internationaler Zusammenarbeit realisiert
- Leistungsfähigkeit des Beschleuniger und der Experimente ist hervorragend (besser als erwartet / geplant)
- Sensationelle Physik-Ergebnisse nach einem Betrieb von nur drei Jahren; Höhepunkt: Entdeckung des Higgs-Teilchens
- Wir hoffen, dass dies nur der Anfang einer langen Entdeckungsreise ist

Neue Datennahme bei höherer Energie (13 TeV) ab Mai 2015

→ Präzise Vermessung des Higgs-Teilchens

→ Direkte Suche nach neuen Teilchen / neuer Physik
