

Der Large Hadron Collider (LHC)



CMS



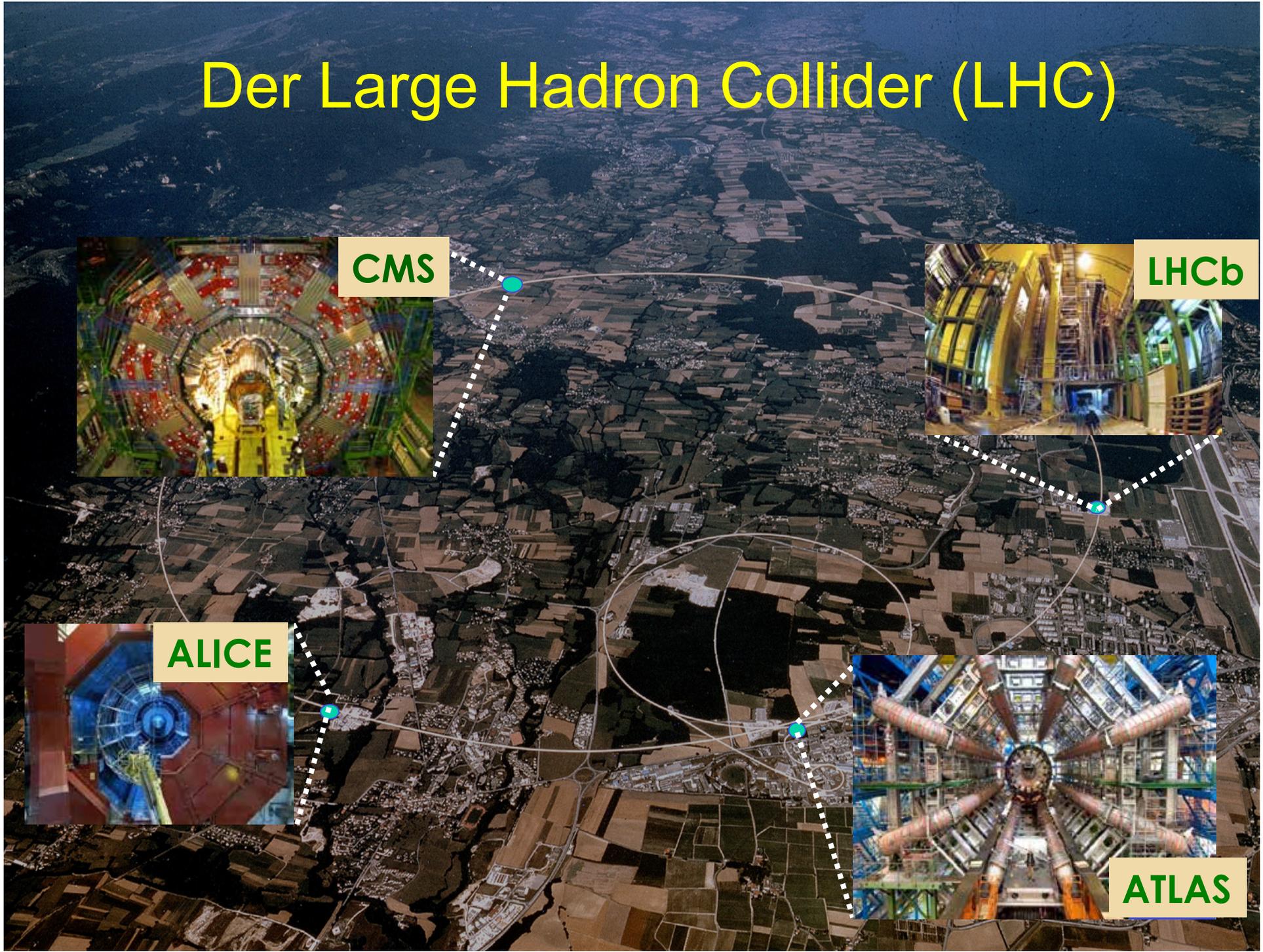
LHCb



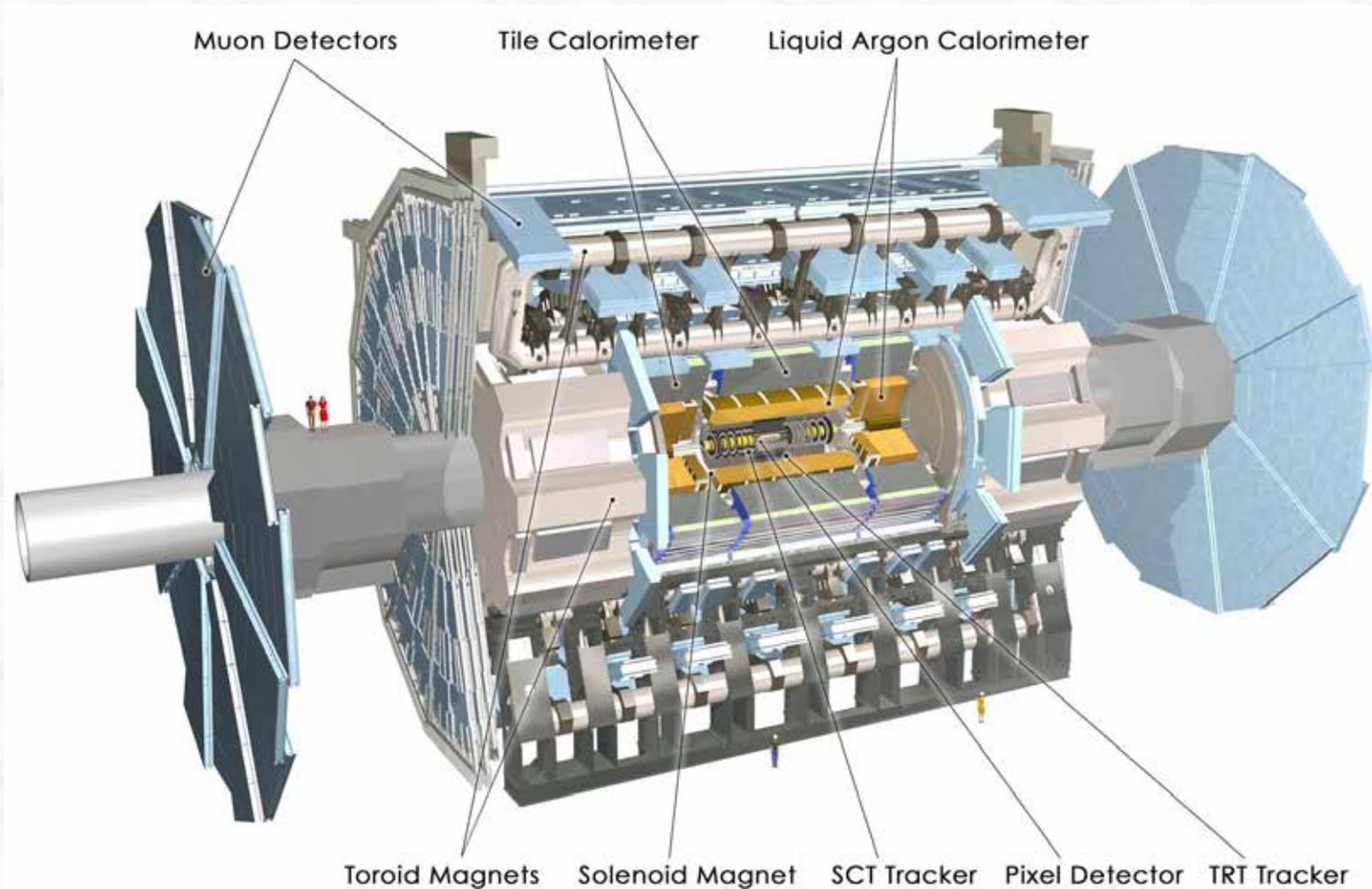
ALICE



ATLAS

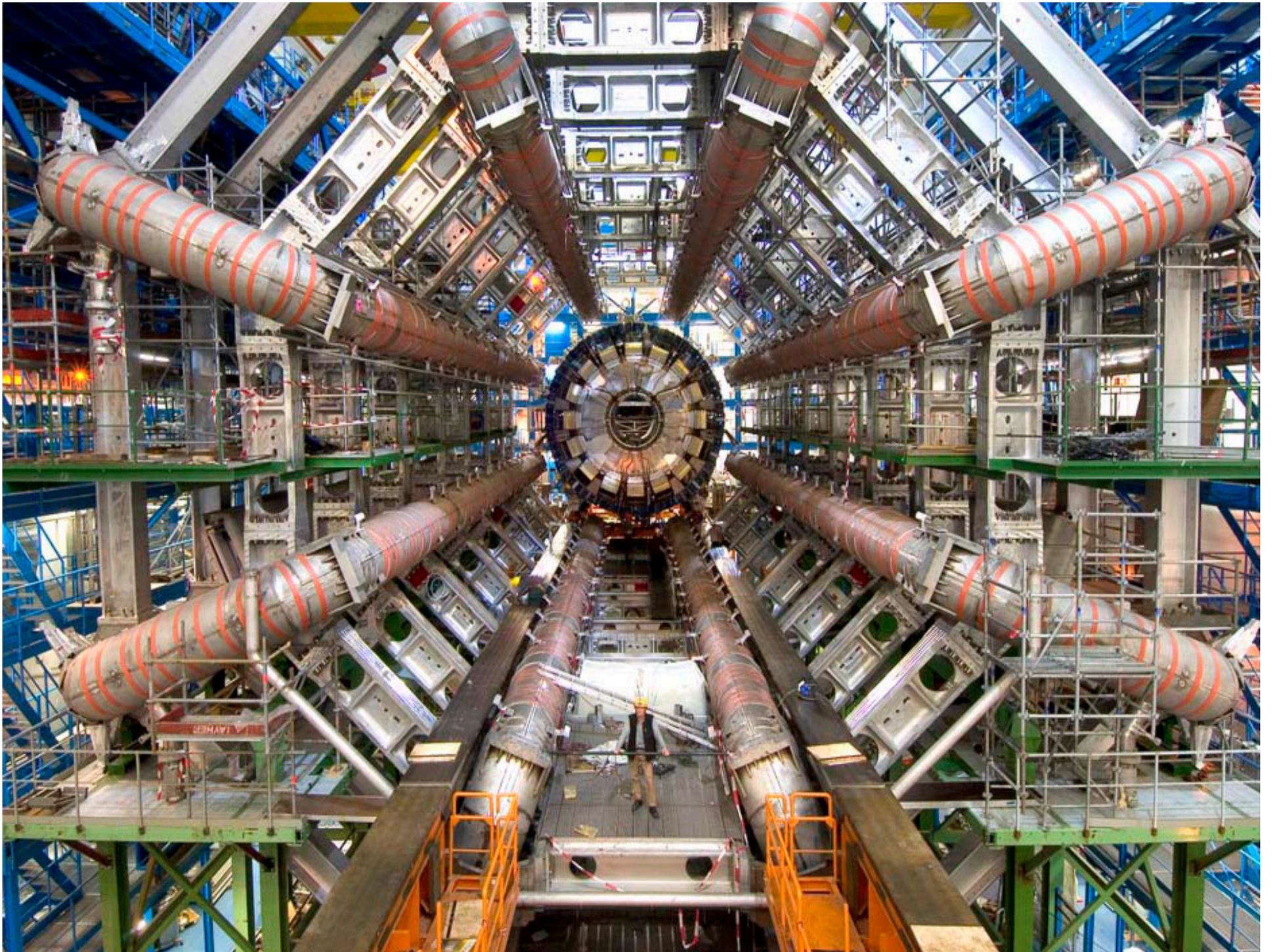


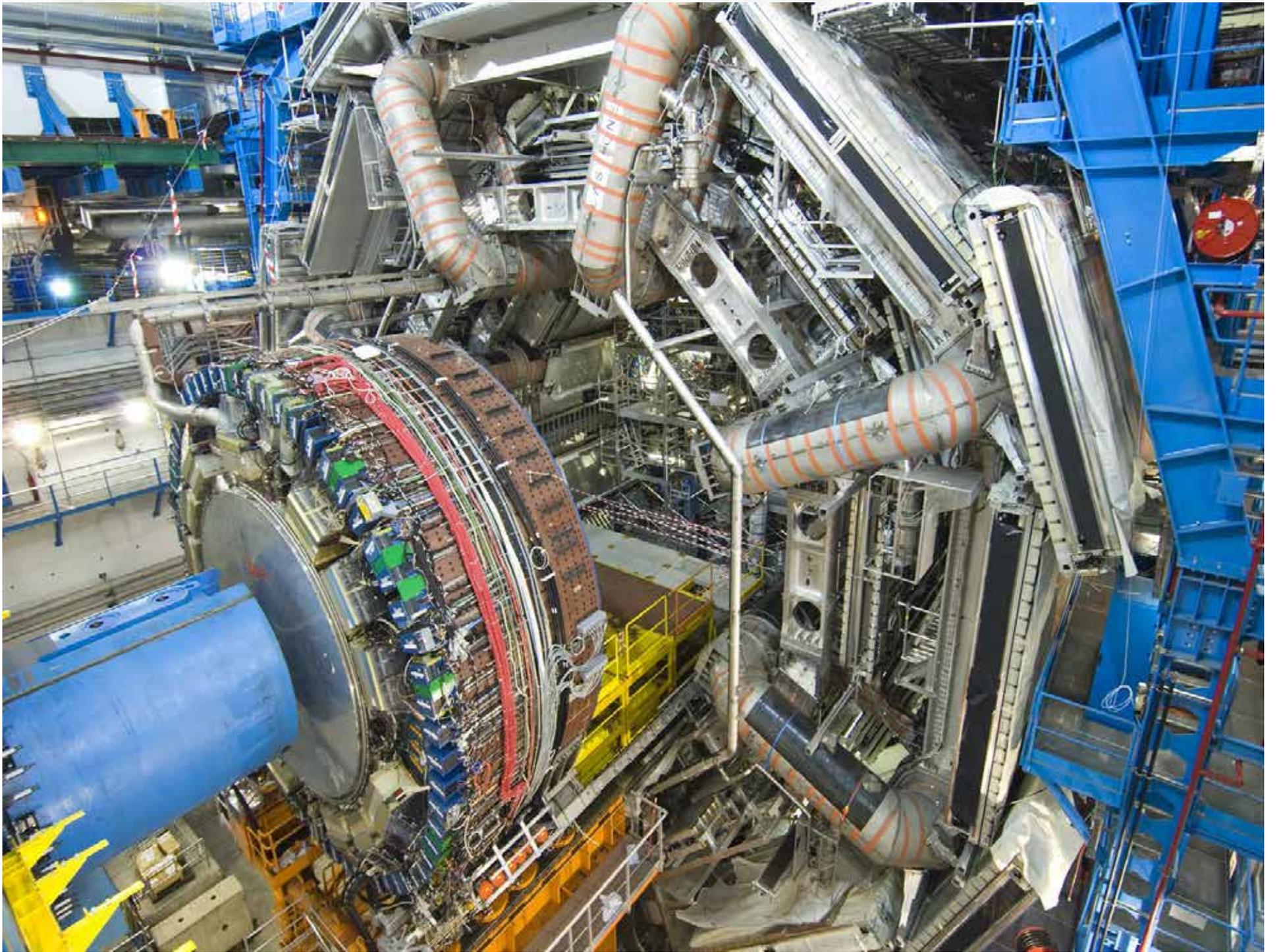
Das ATLAS-Experiment

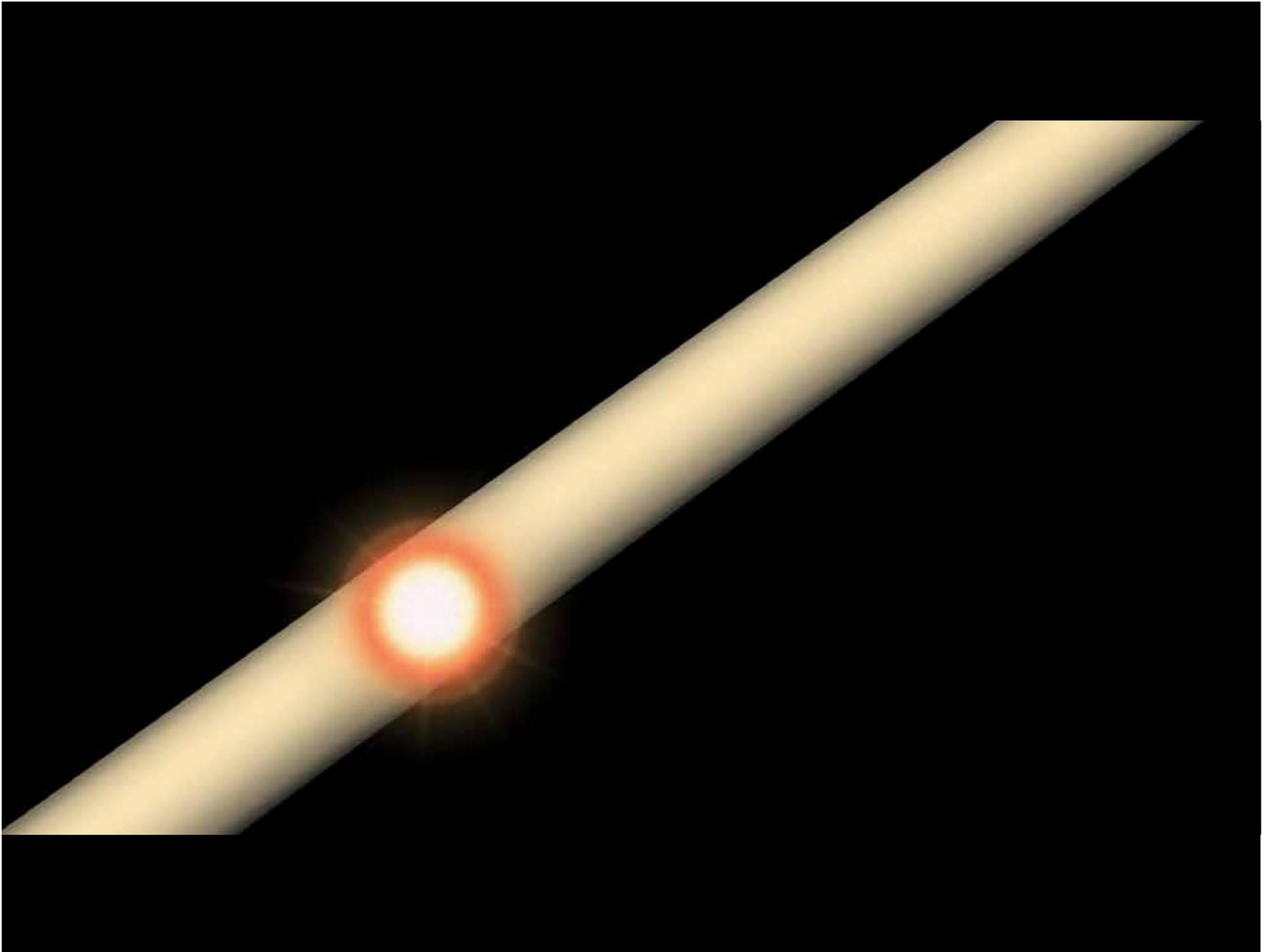


Durchmesser: 25 m
Gesamtlänge: 46 m
Gesamtgewicht: 7000 t

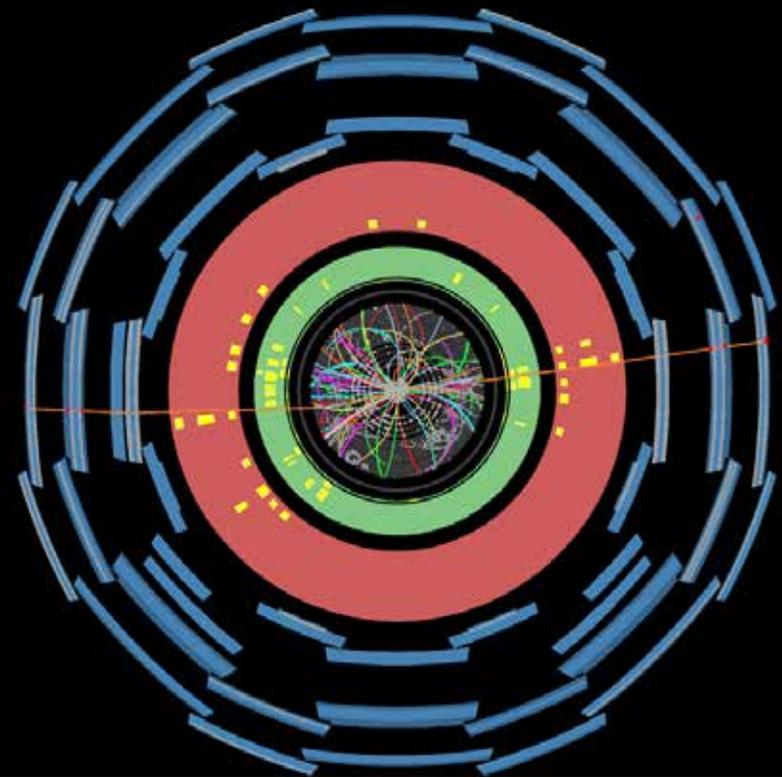
- ~200 Mio. Auslesekanäle, aufnahmebereit alle 25 ns
- 40 Mio. Ereignisse pro Sekunde
- 400 Ereignisse pro Sekunde selektiert → Speichermedien







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

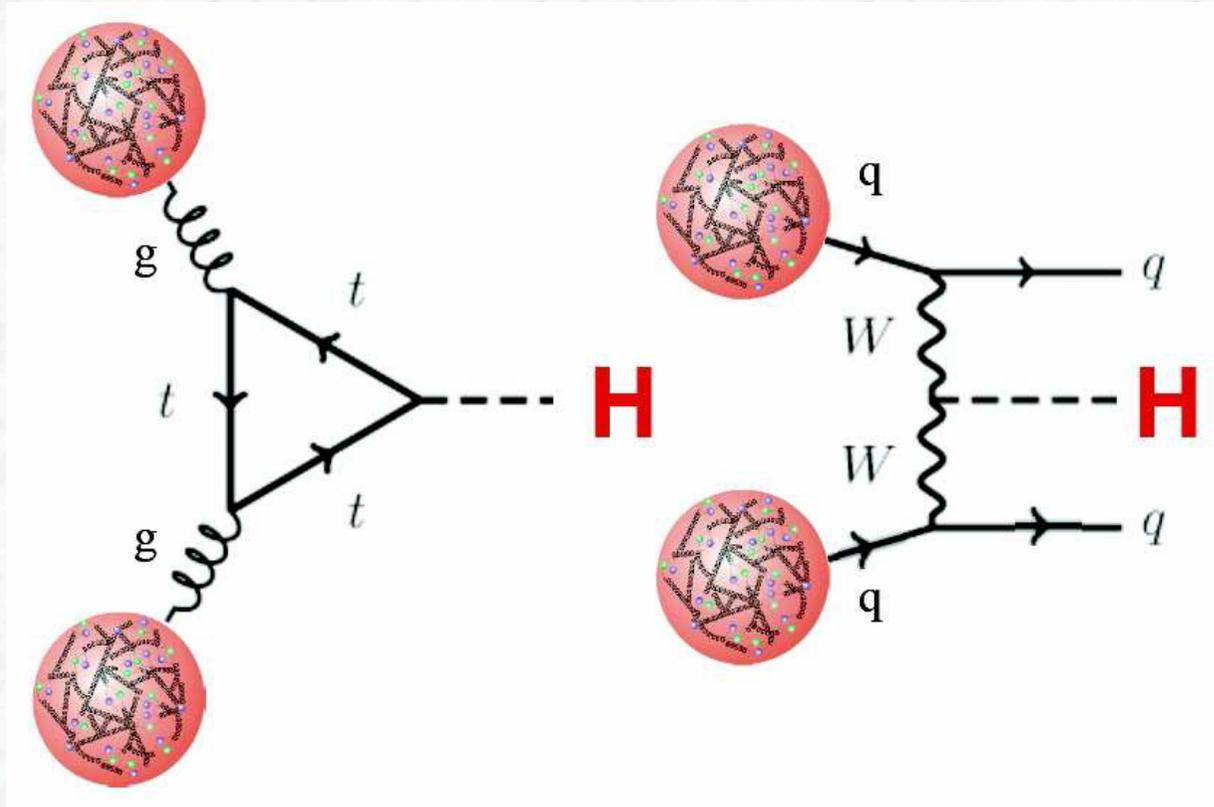


Bis Ende 2012:

> 10^{15} Proton-Proton Kollisionen

$\sim 10^{10}$ Kollisionen aufgezeichnet

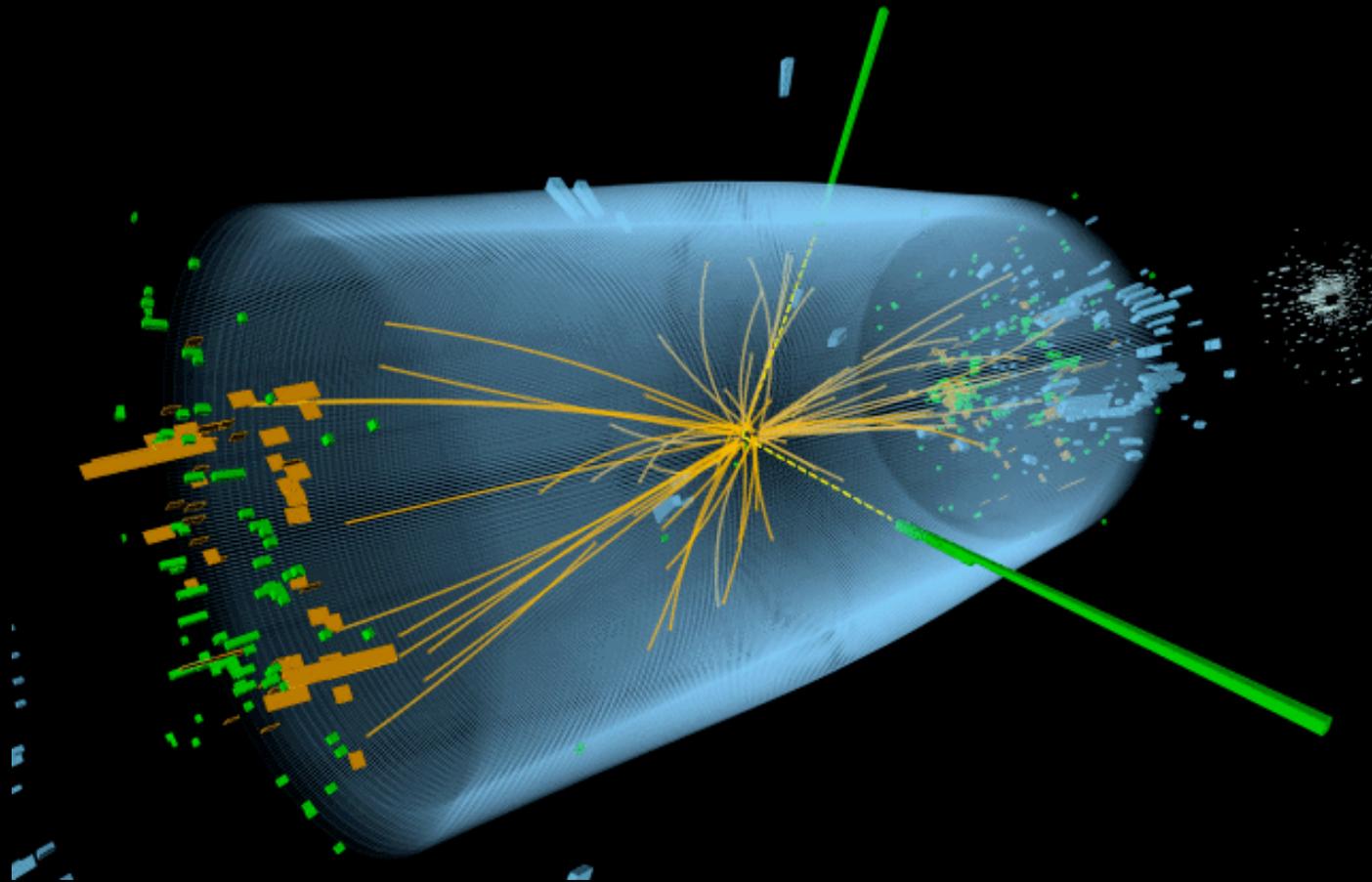
Wie produziert man ein Higgs-Teilchen im LHC?



Gluon-Fusion

(Vektor)Boson-Fusion

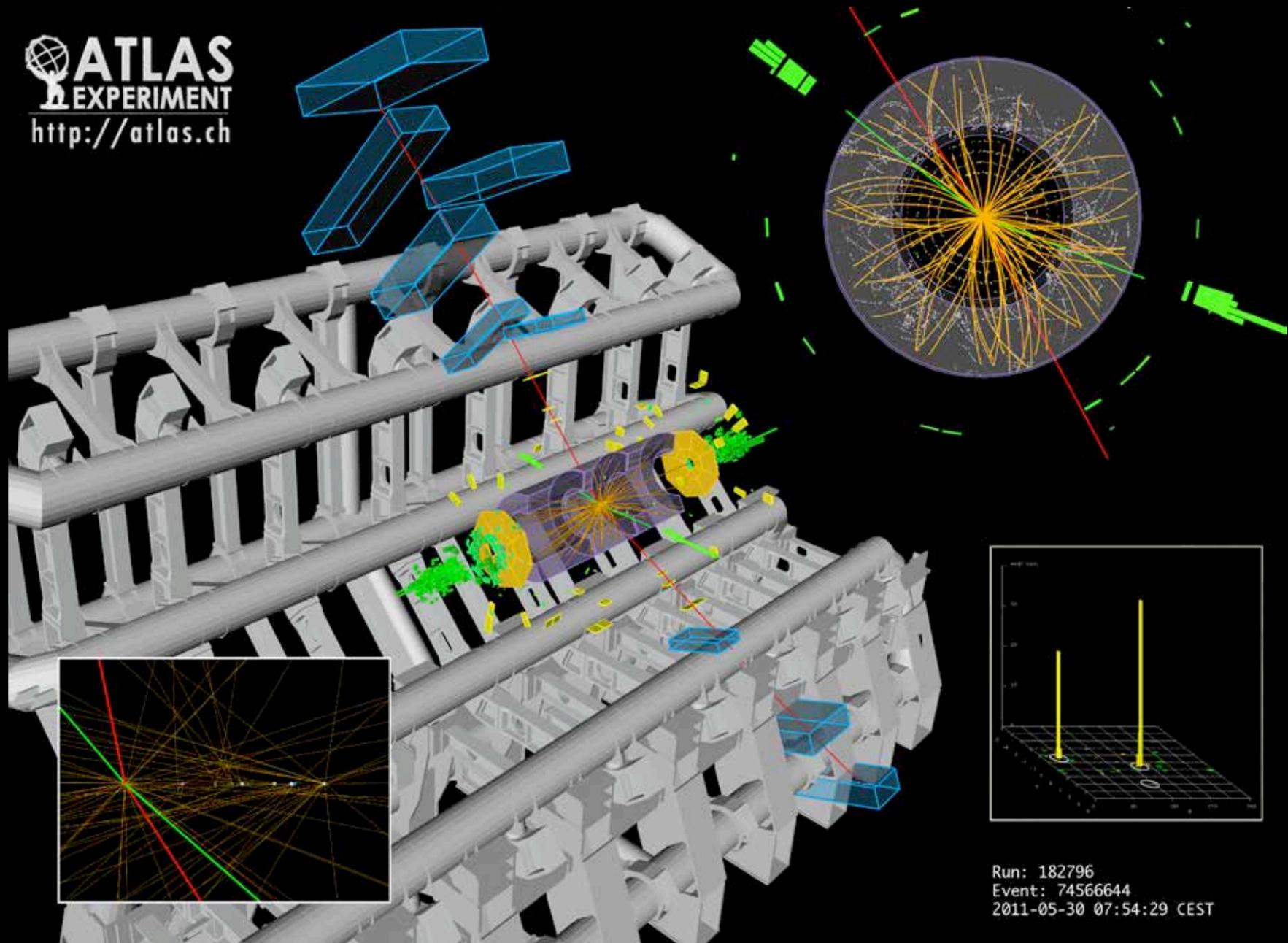
Entdeckung des Higgs-Teilchens



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

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

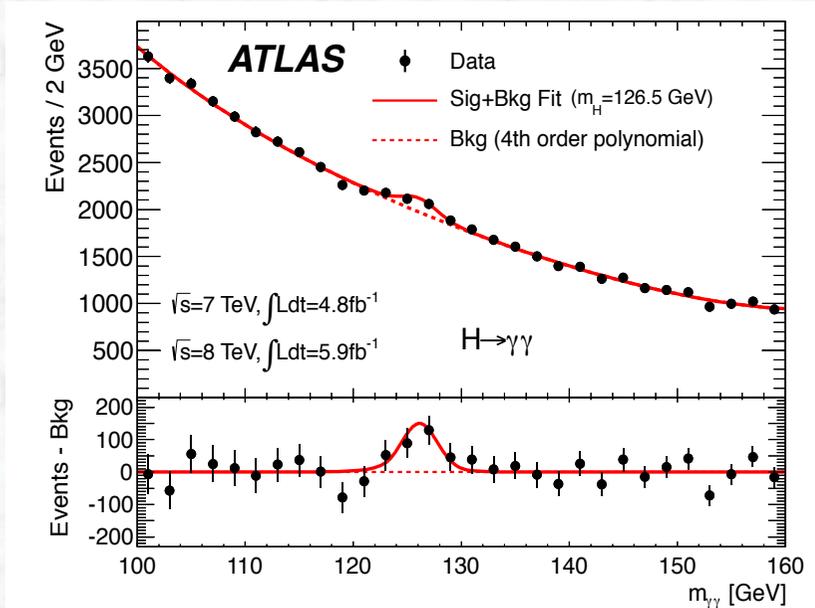
 **ATLAS**
EXPERIMENT
<http://atlas.ch>



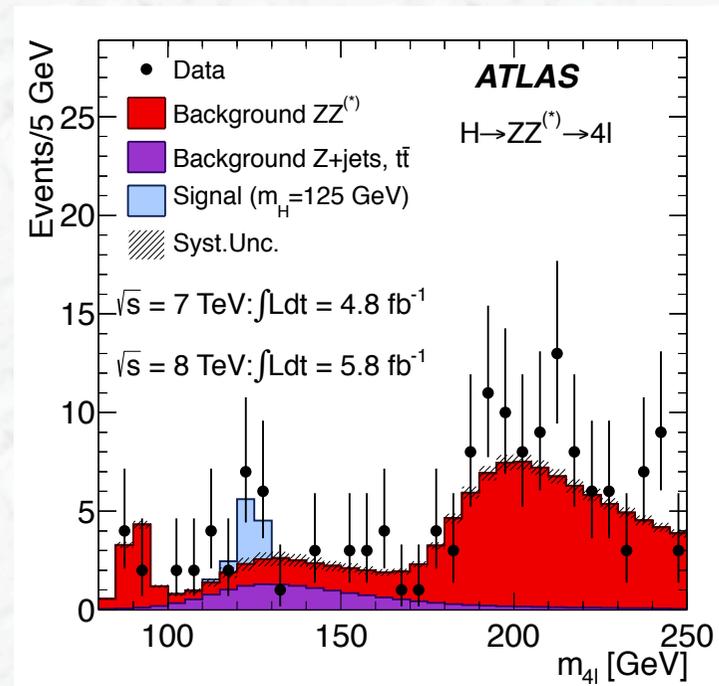


Ergebnis der Suche nach dem Higgs-Teilchen im ATLAS-Experiment (Juli 2012)

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$



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



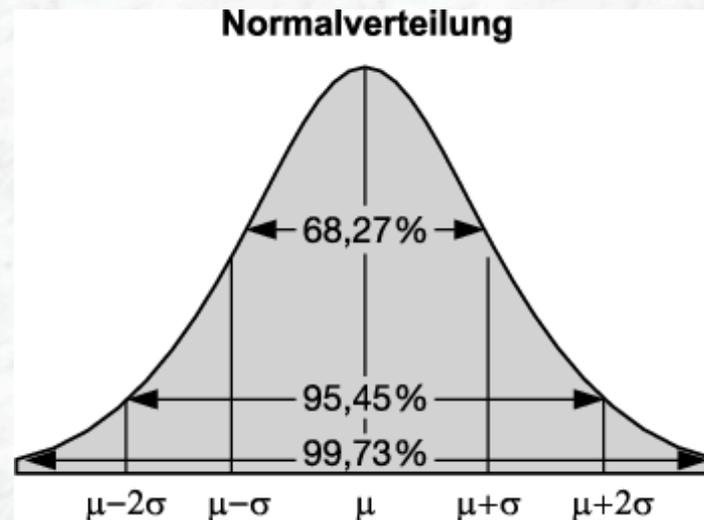
Signifikanz des Signals?

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:

Konvention: $> 5\sigma$
→ Entdeckung

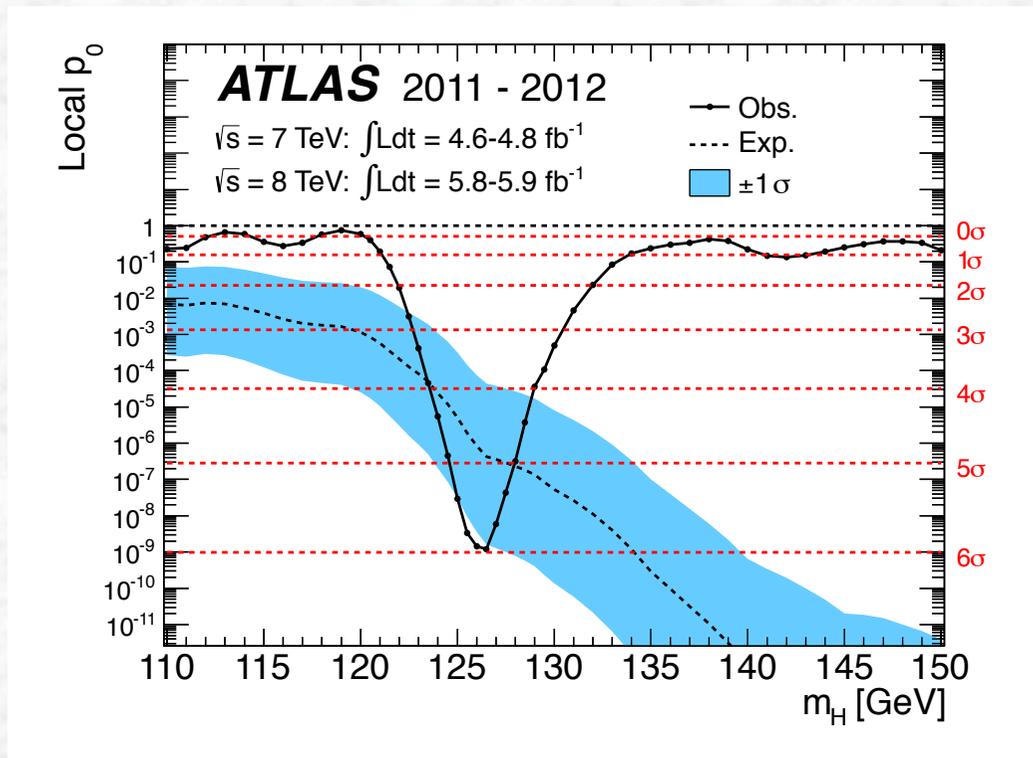


5σ : Wahrscheinlichkeit für Untergrundfluktuation: $p = 2,8 \cdot 10^{-7} \cong 1 : 3\,600\,000$

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:

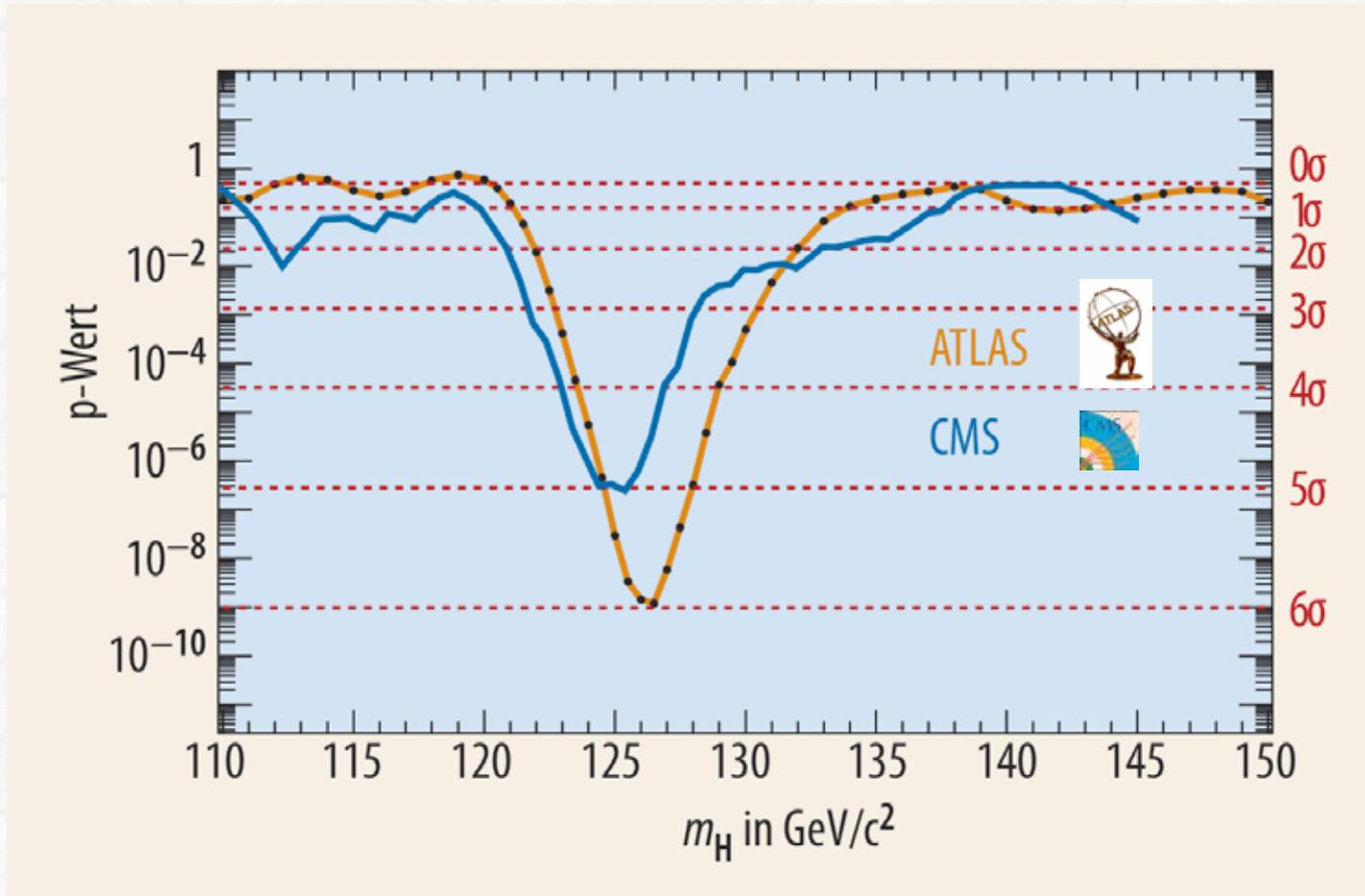
6 σ

**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?

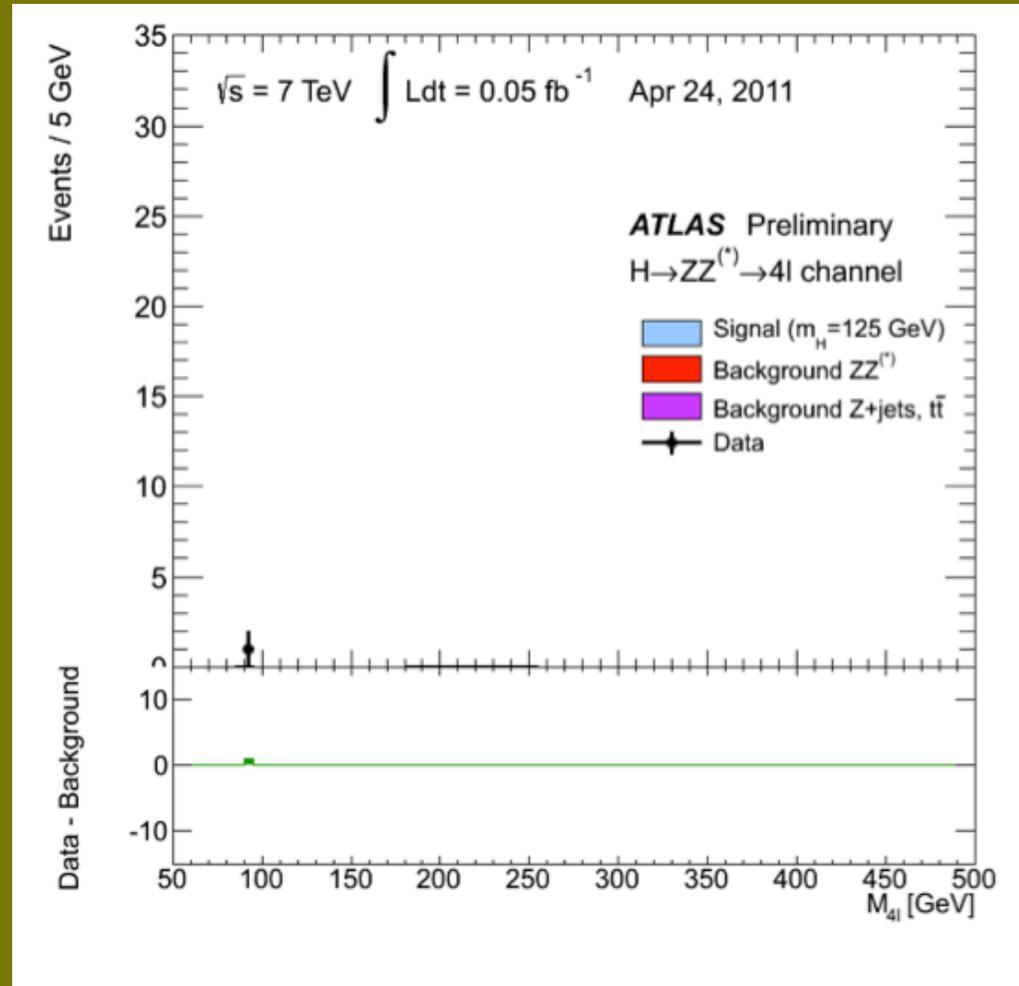


Ergebnisse der beiden Experimente (ATLAS und CMS)

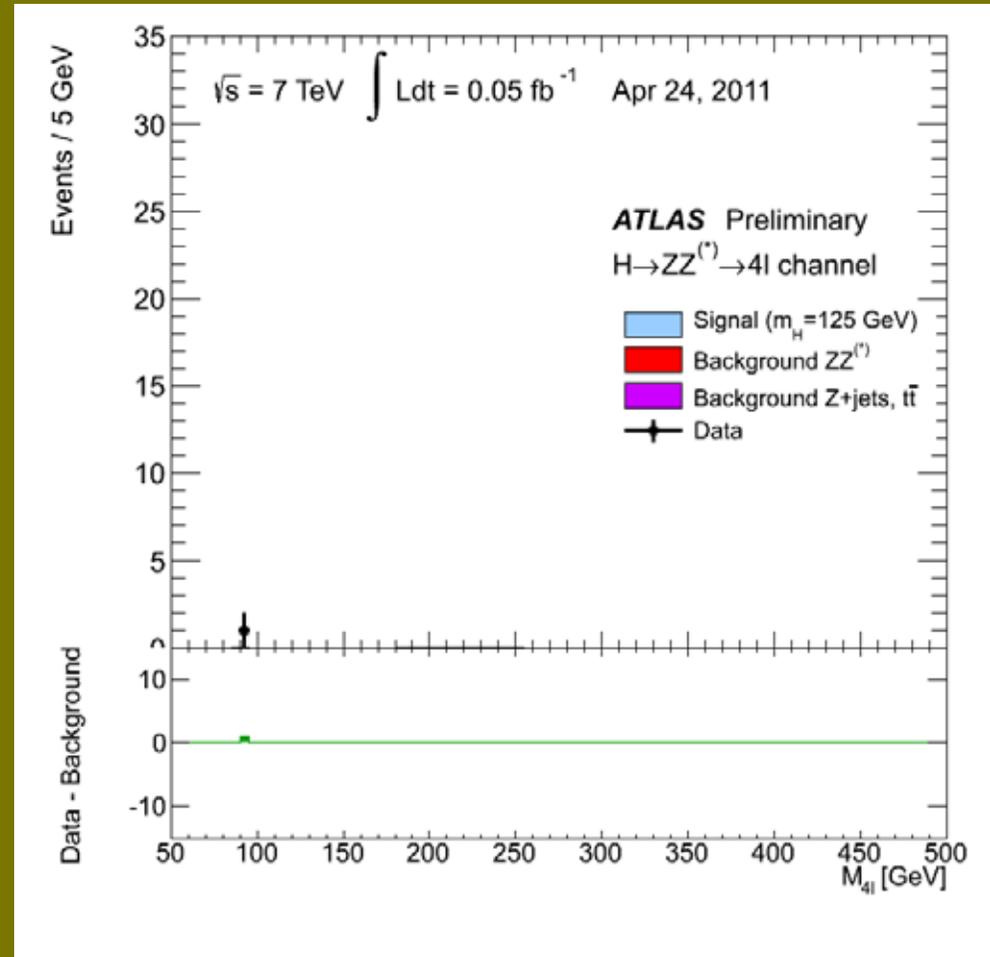
Zeitliche Entwicklung des H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l Signals



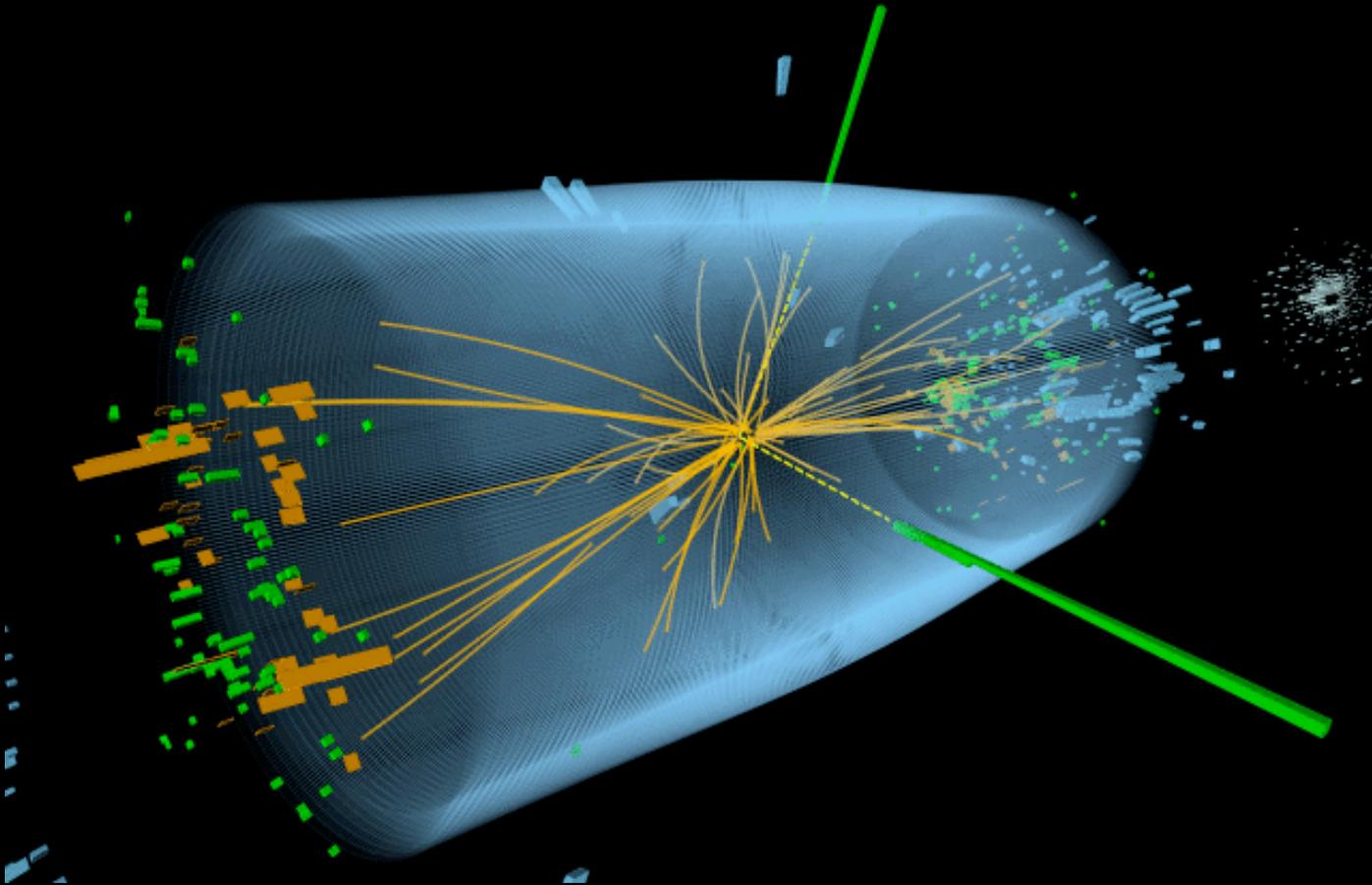
Zeitliche Entwicklung des $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ Signals



Zeitliche Entwicklung des $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell$ 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 $H \rightarrow WW \rightarrow \ell\nu \ell\nu$

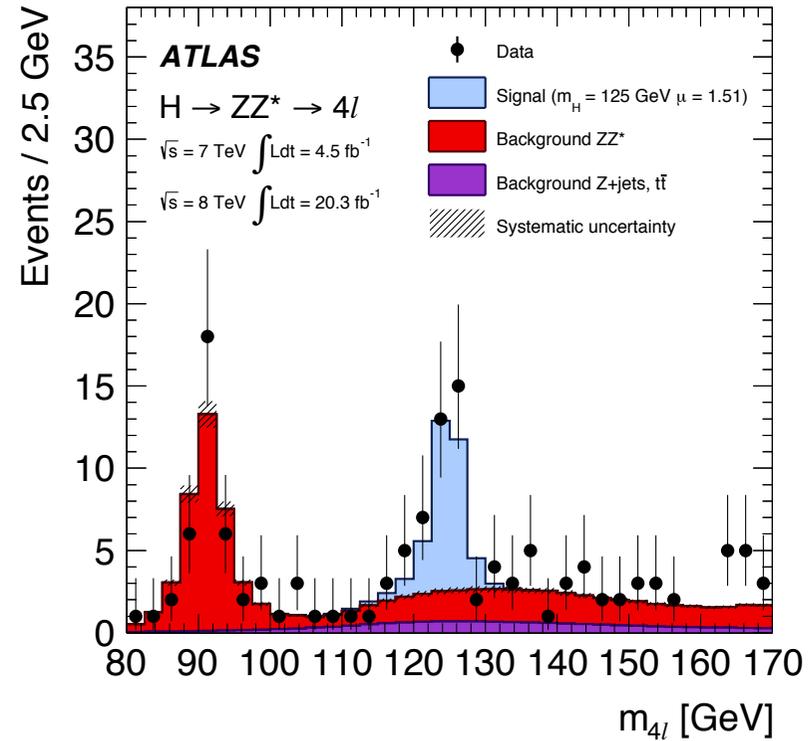
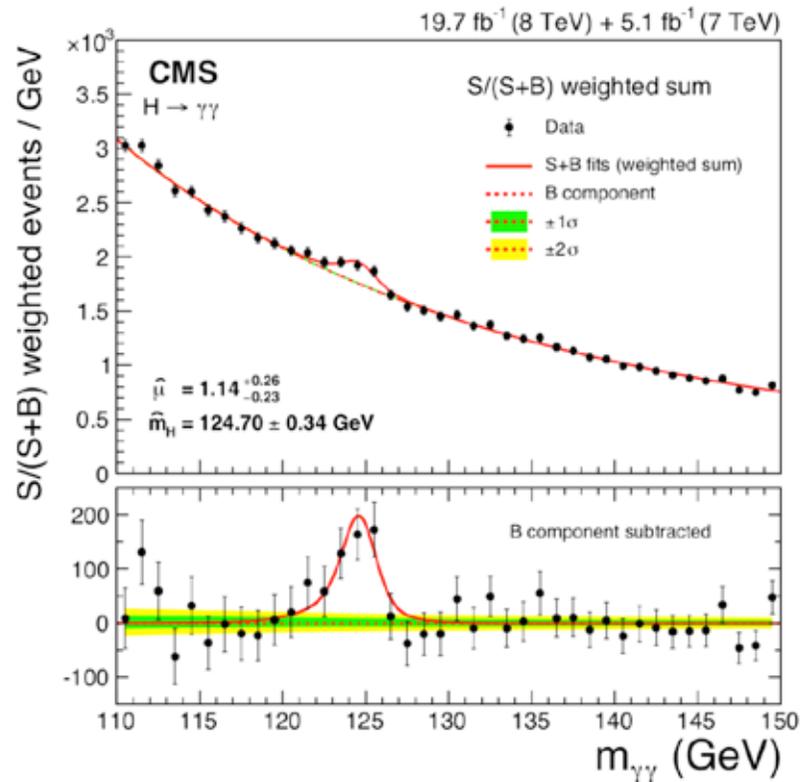


Signale des Higgs Bosons (2014)



$H \rightarrow \gamma\gamma$

$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell$



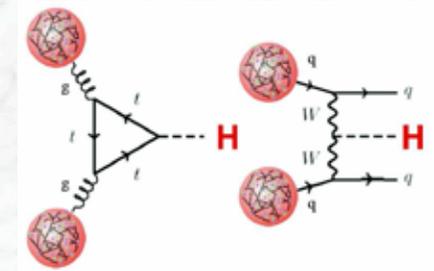
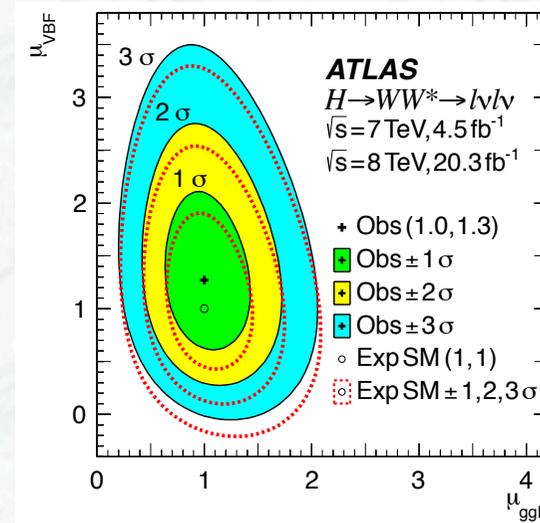
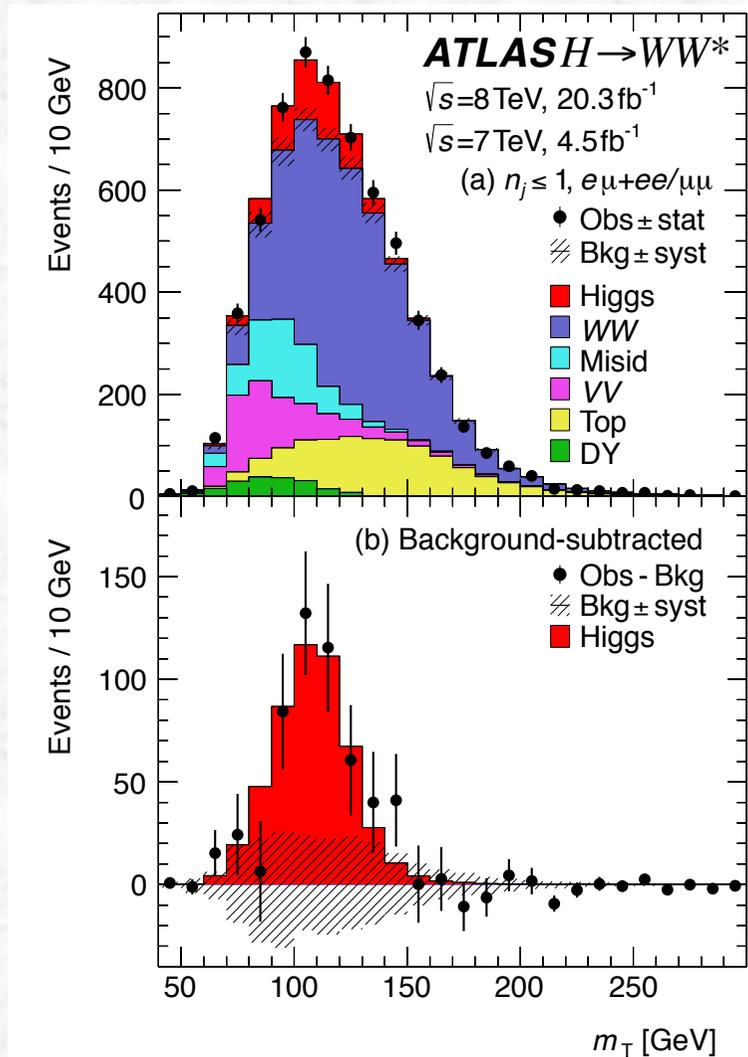
Signifikanz: 5.1σ
Signalstärke: $\mu = 1.14 \pm 0.26$

Signifikanz: 8.1σ
Signalstärke: $\mu = 1.44 \pm 0.40$

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

Signal im Zerfall $H \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu \ell\nu$

Für
Experten



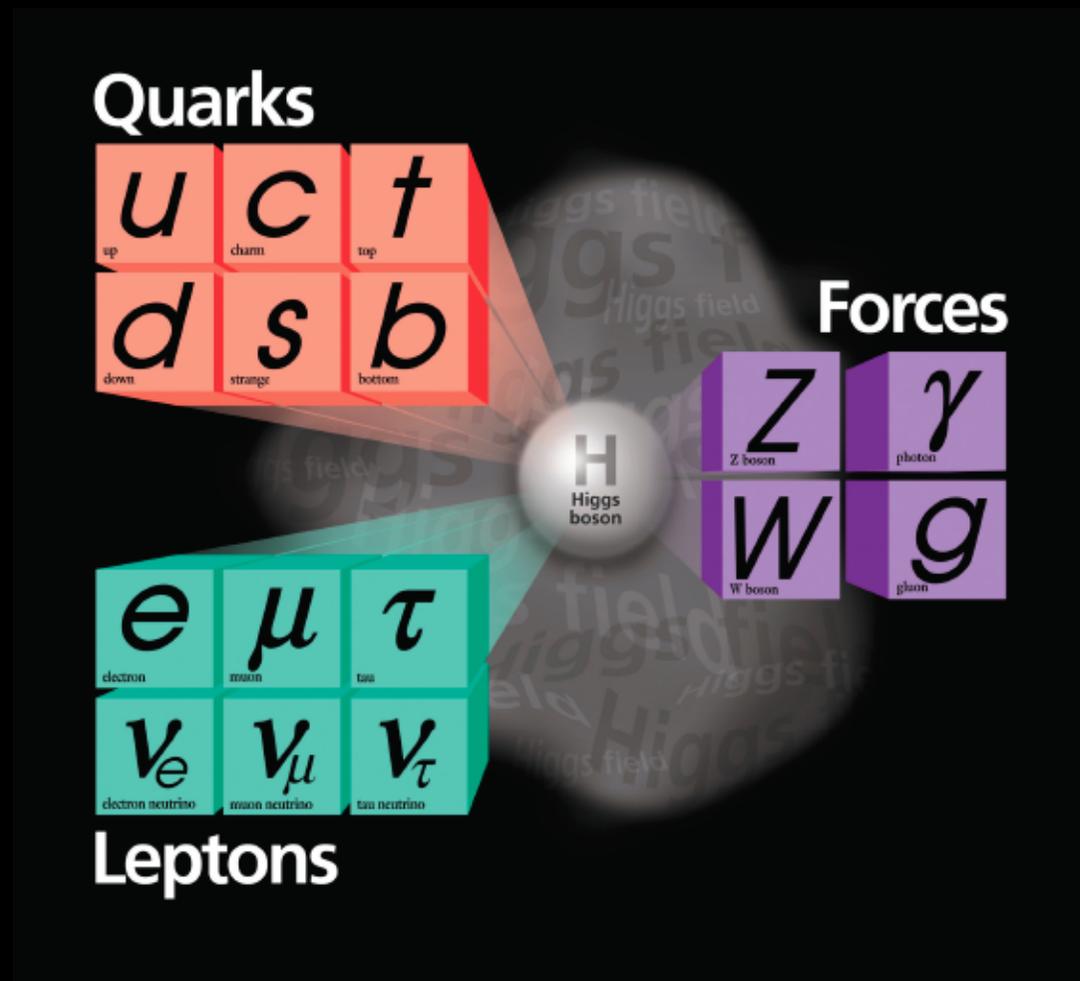
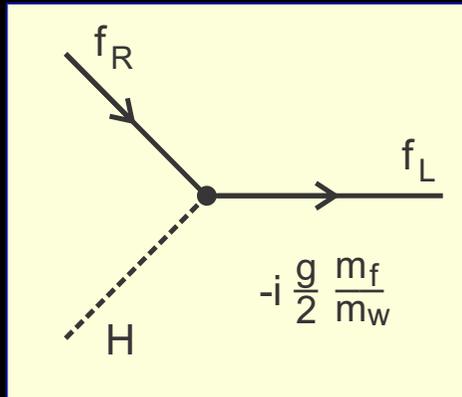
Signalstärken:

$$\text{ggF: } \mu = 1.02^{+0.29}_{-0.26}$$

$$\text{VBF: } \mu = 1.27^{+0.53}_{-0.45}$$

- Sehr signifikanter Überschuss auch in diesem Zerfallsmodus
- Nachweis der Produktion über beide Produktionsprozesse (Gluon-Fusion und (Vektor)Boson-Fusion (VBF))

Wechselwirkt das Higgs-Teilchen auch mit Quarks und Leptonen?

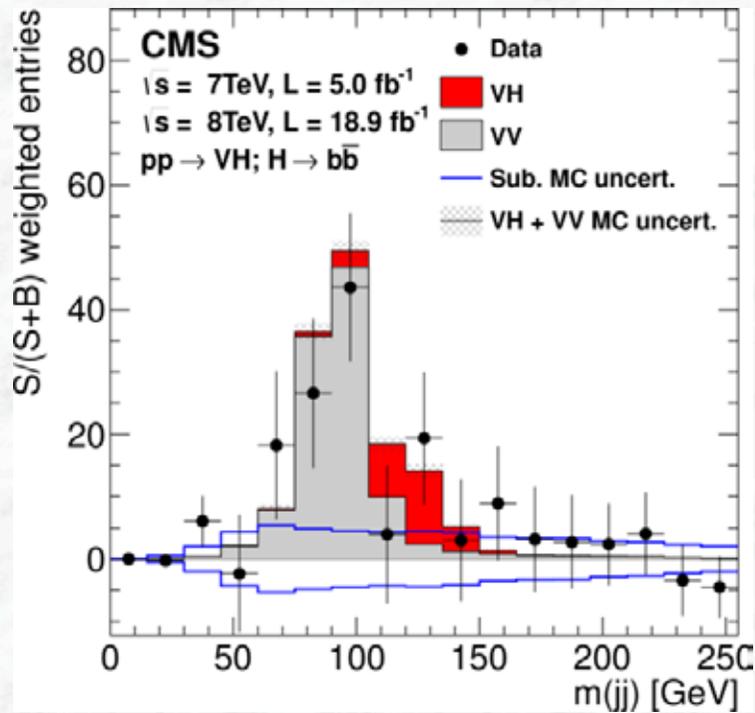


Suche nach $H \rightarrow \tau\tau$ und $H \rightarrow bb$ Zerfällen

2014: Evidenz für Higgs-Boson Zerfälle in Fermionen

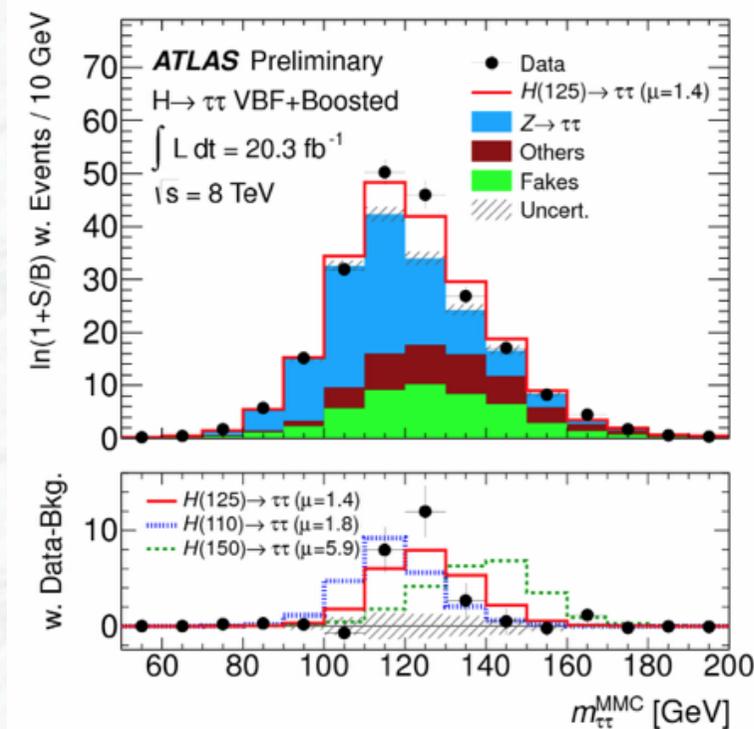
Komplexe Analyse (schlechte Signal-zu-Untergrund-Verhältnisse)

$H \rightarrow b\bar{b}$



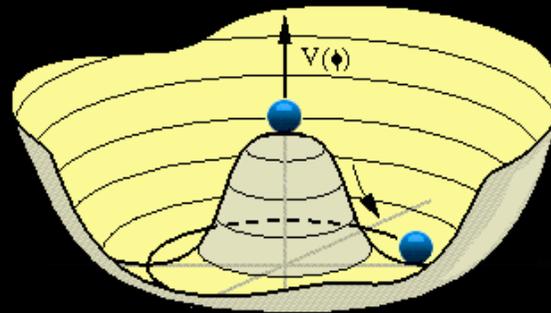
Signifikanz: 2.1σ
 Signalstärke: $\mu = 1.0 \pm 0.5$

$H \rightarrow \tau\tau$



Signifikanz: 4.5σ
 Signalstärke: $\mu = 1.43 \pm 0.42$

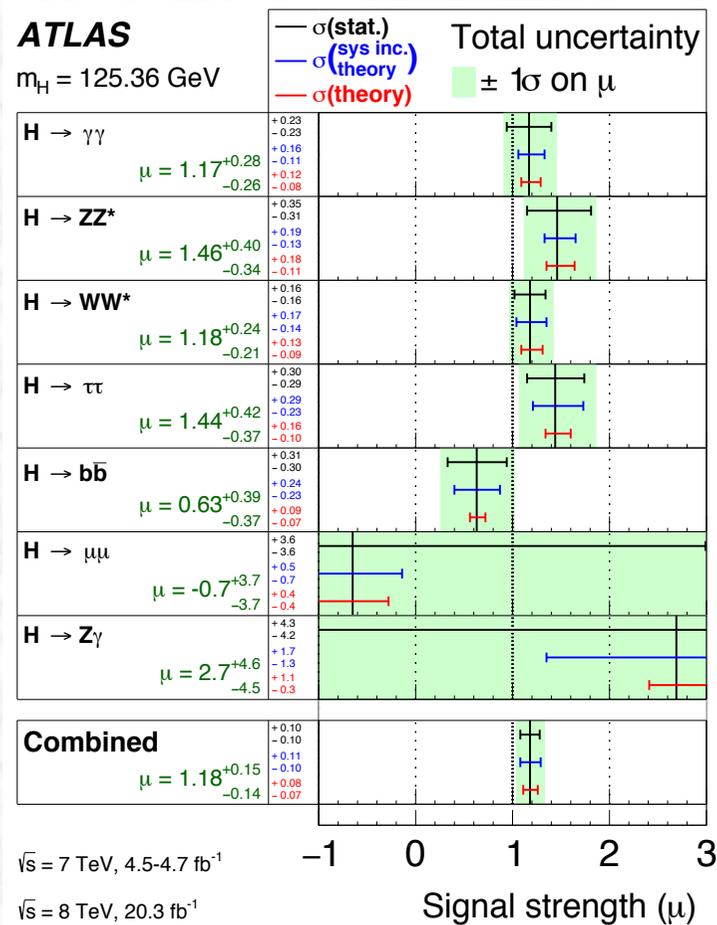
*Ist das entdeckte Teilchen das Higgs-Boson
der Standard-Theorie?*



*Was wissen wir heute
über seine Eigenschaften?*

Masse und Stärke des Signals

Stärke des Signals, d.h. die Zahl der beobachteten Ereignisse verglichen mit den Erwartungen ($\mu = 1$ Higgs-Teilchen der Standard-Theorie)



Masse:

ATLAS: $m_H = 125.36 \pm 0.41$ GeV

CMS: $m_H = 125.02 \pm 0.31$ GeV

 Kombination: $m_H = 125.09 \pm 0.24$ GeV

Signalstärken:

ATLAS: $\mu_{\text{ges}} = 1.18 \pm 0.15$

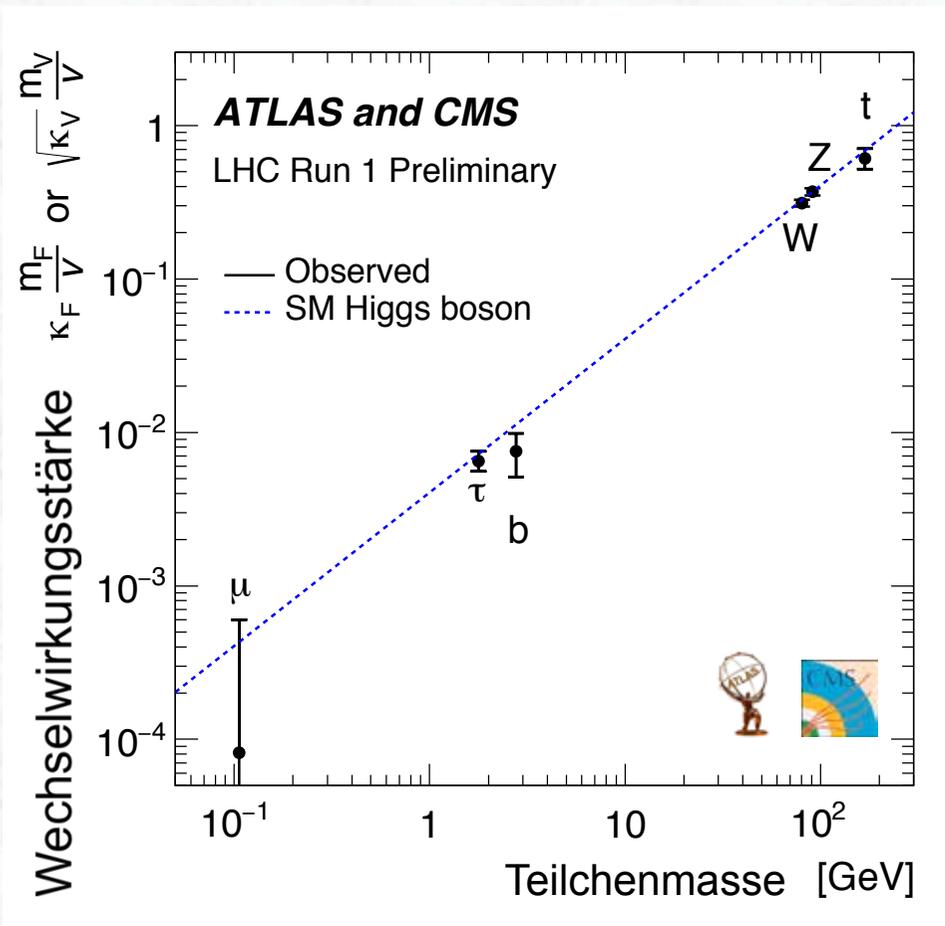
CMS: $\mu_{\text{ges}} = 1.00 \pm 0.14$

Daten sind konsistent mit der Hypothese des Higgs-Teilchens der Standard-Theorie

Ist es das Higgs-Teilchen?

Zahl der beobachteten Ereignisse in den verschiedenen Zerfällen

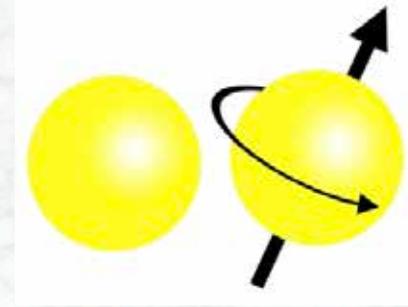
→ Wechselwirkungsstärke des neuen Teilchens mit den bekannten Teilchen



Higgs-Teilchen:

→ linearer Zusammenhang zwischen Teilchenmasse und Wechselwirkungsstärke

Eigendrehimpuls (Spin)

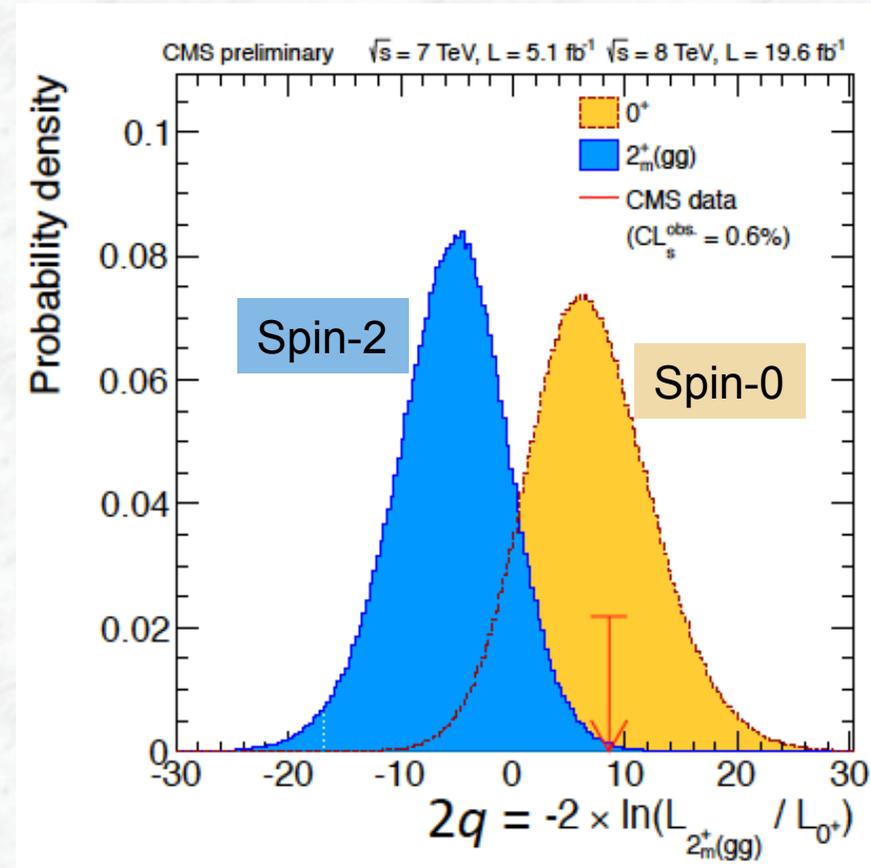


- Standardmodel Higgs-Boson: $J^{CP} = 0^+$

→ Strategie: Hypothesentests,

Verwerfung anderer Hypothesen
($0^-, 1^-, 1^+, 2^-, 2^+$)

- Relevante Information in Winkelverteilungen der Zerfallsprodukte



Die Daten favorisieren sehr stark die vom Higgs-Modell vorhergesagte Spin-0 Hypothese

(Alternativen können mit Wahrscheinlichkeiten von >99% ausgeschlossen werden)

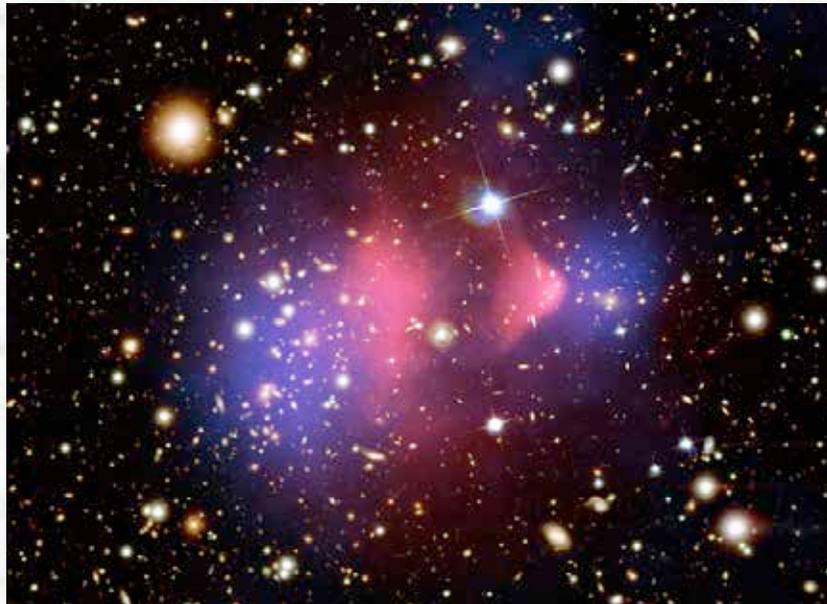
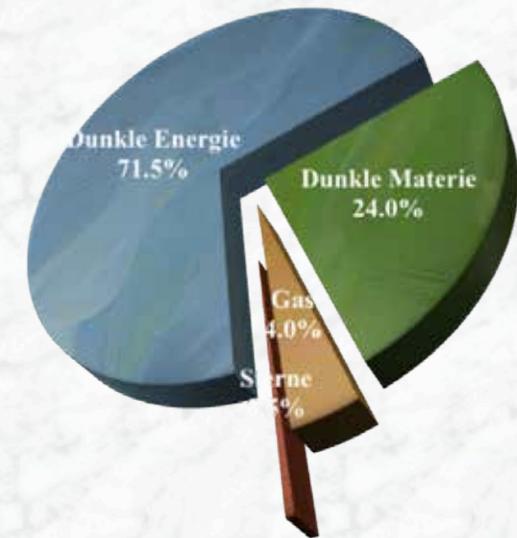
Wie geht es weiter am LHC?

1. Präzise Untersuchung des Higgs-Teilchens

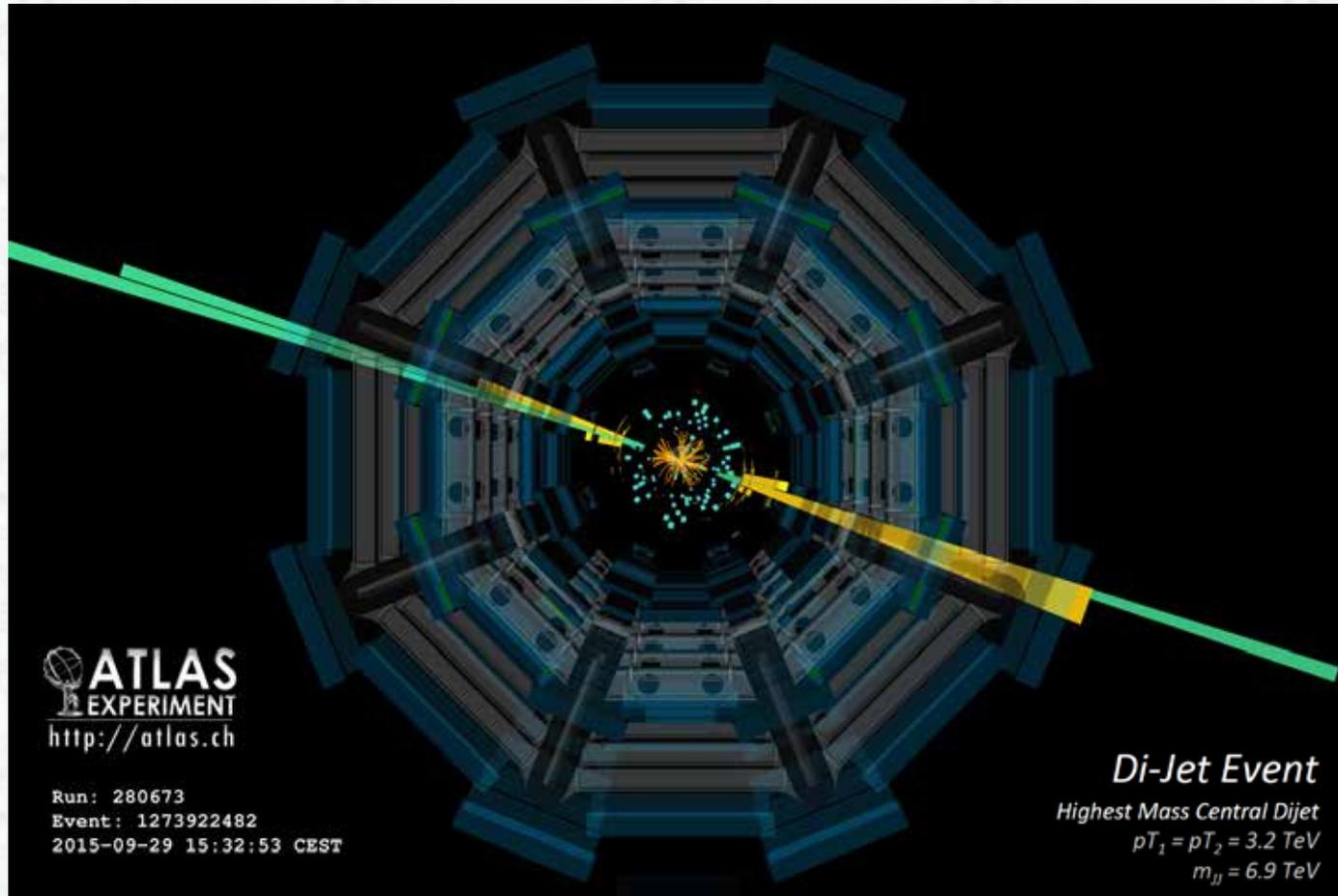
- Zeigen sich Abweichungen bei höherer Messgenauigkeit?
- Gibt es noch weitere Higgs-Bosonen?

2. Gibt es neue Materieformen

Stellen diese die Dunkle Materie im Universum dar?

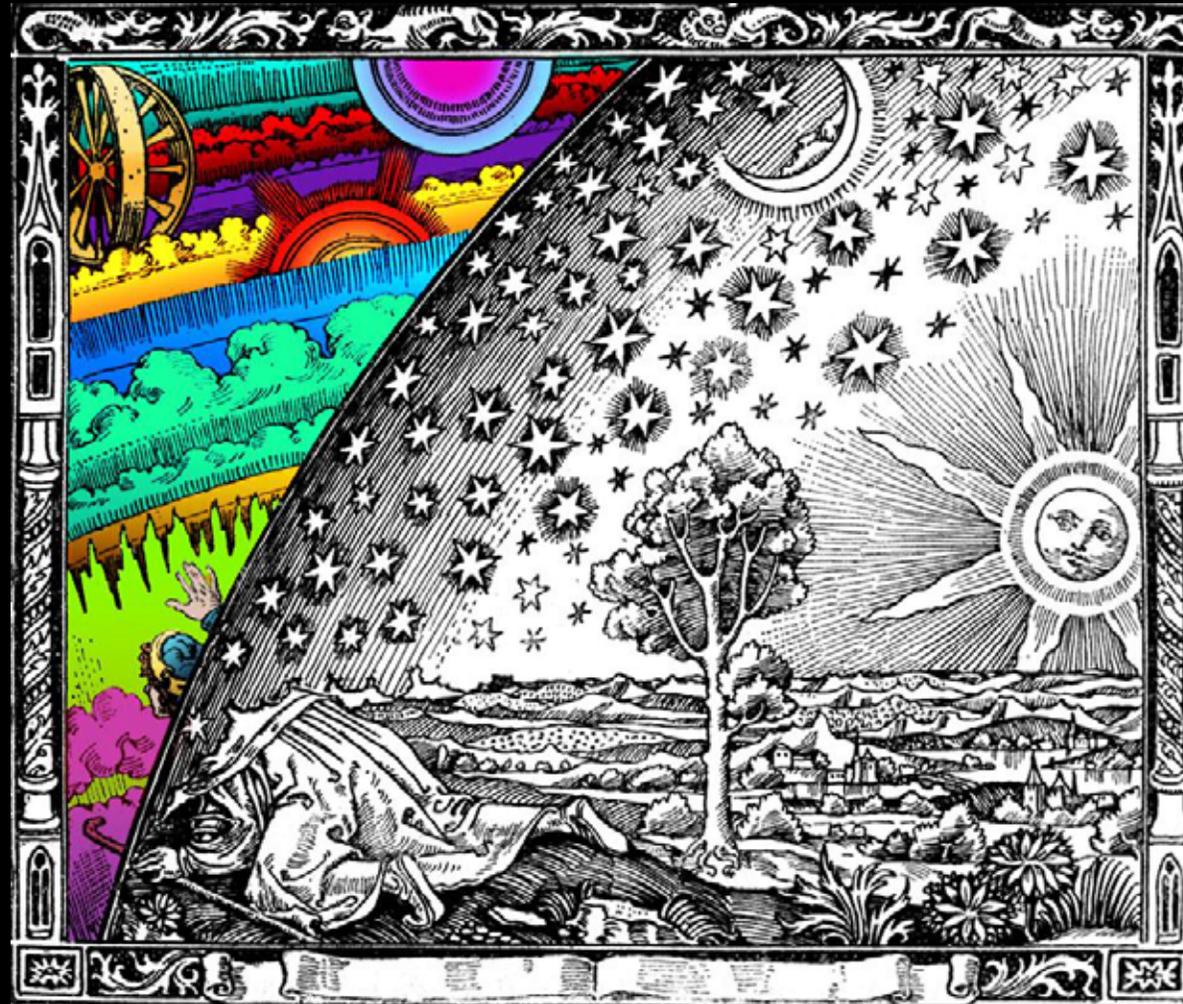


Am LHC hat im Juni 2015 eine neue Datennahmeperiode bei höherer Energie begonnen (8 TeV \rightarrow 13 TeV)



Eine harte Kollision von Konstituenten der Protonen bei einer Energie von 13 TeV, aufgezeichnet vom ATLAS-Experiment am 29. Sept. 2015

Aufbruch in physikalisches Neuland

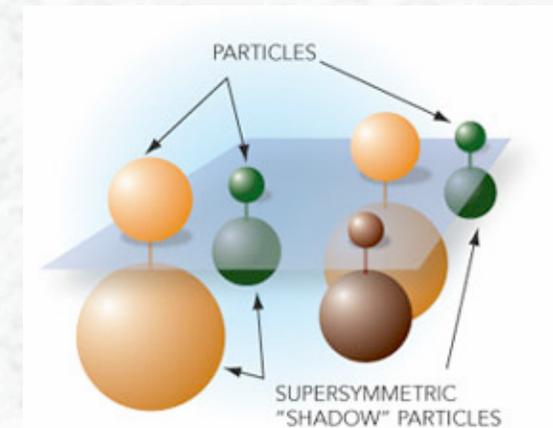
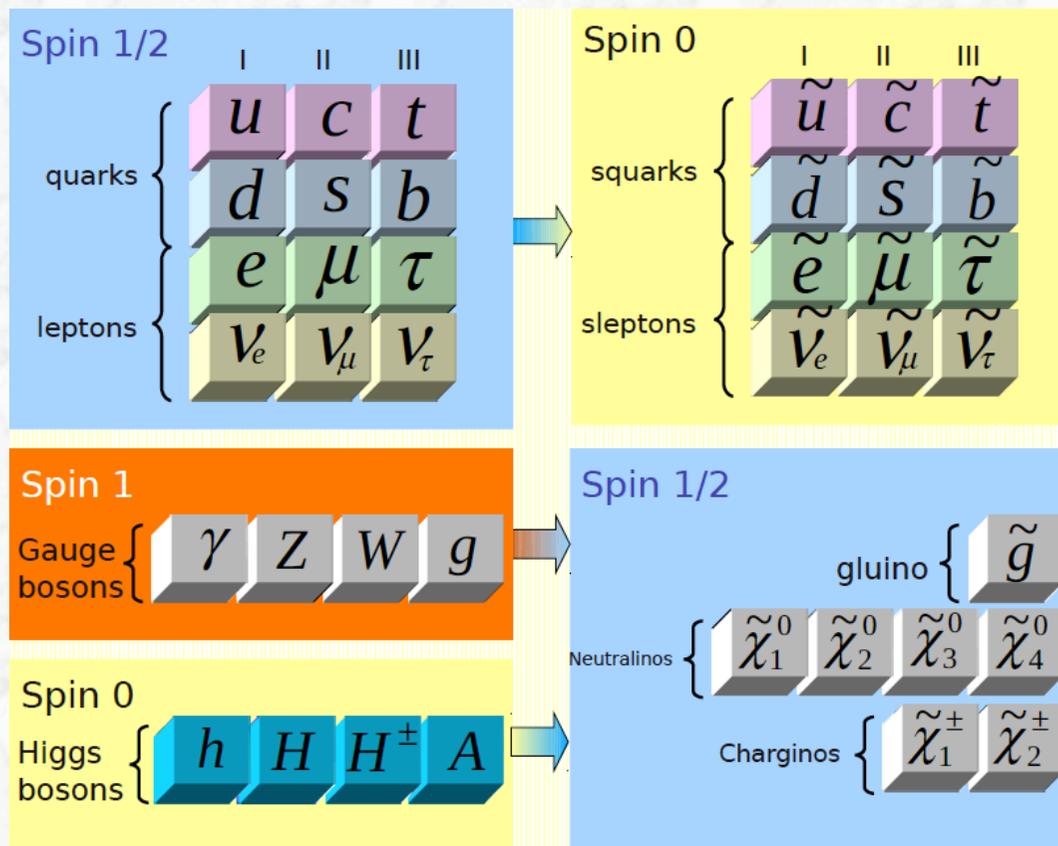


Supersymmetrie (SUSY)

-Eine viel diskutierte Erweiterung der Standardtheorie-

Jedem Teilchen wird ein supersymmetrisches Partnerteilchen zugeordnet

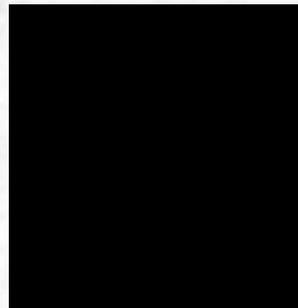
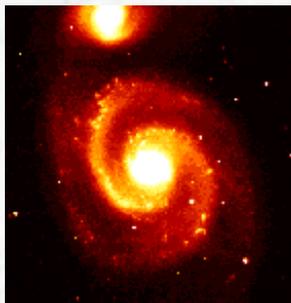
Symmetrie: Materieteilchen \leftrightarrow Austauscheteilchen



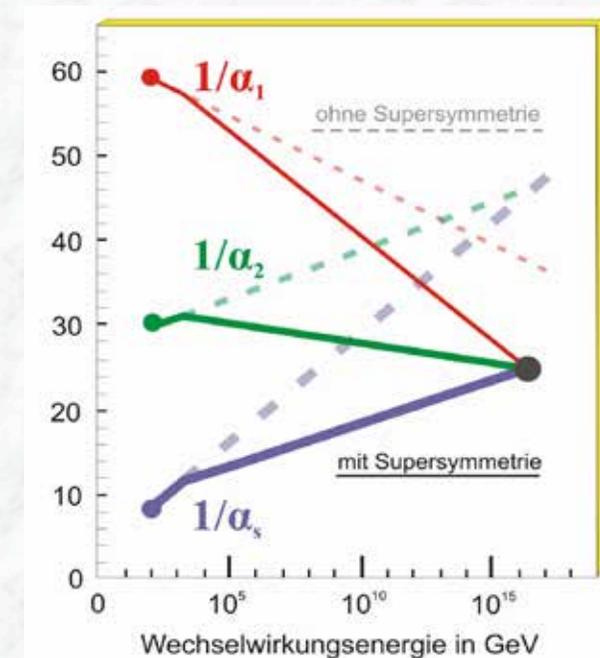
Motivation für Supersymmetrie

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

→ Kandidat für die “Dunkle Materie”



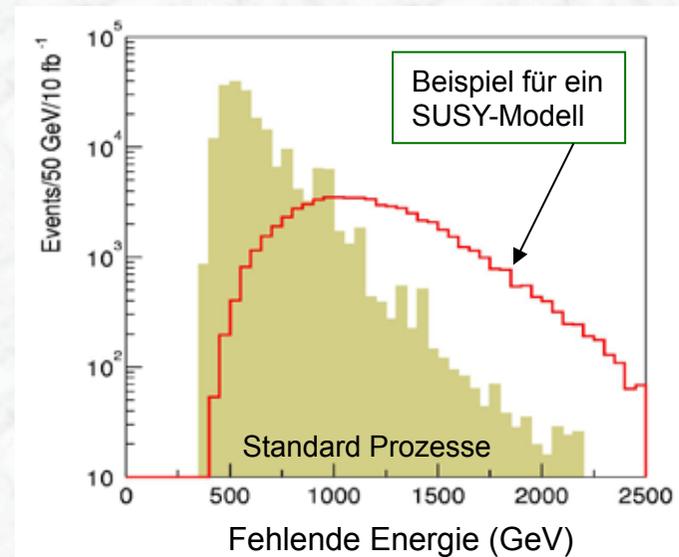
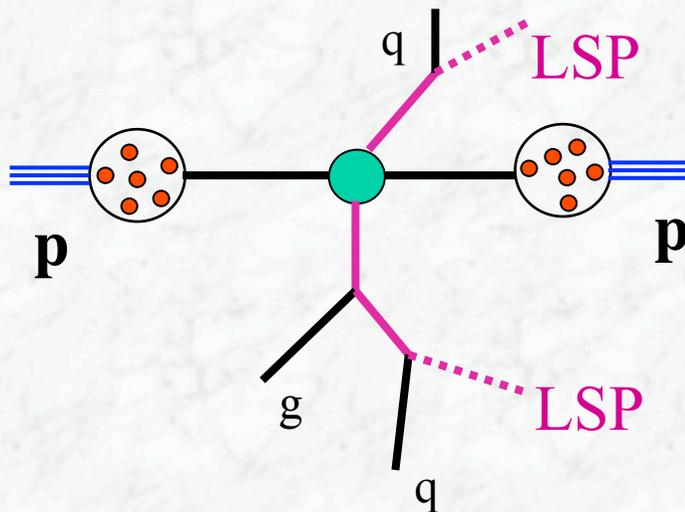
- Vereinheitlichung der Kräfte** scheint in einer supersymmetrischen Theorie möglich zu sein



Die Suche nach Supersymmetrie am LHC

- Die Partnerteilchen der Quarks und Gluonen, die sog. **Squarks** und **Glunos**, können am LHC in hohen Raten erzeugt werden
- Sie zerfallen in Kaskaden in das leichteste SUSY-Teilchen
- Dieses verlässt den Detektor ohne Wechselwirkung

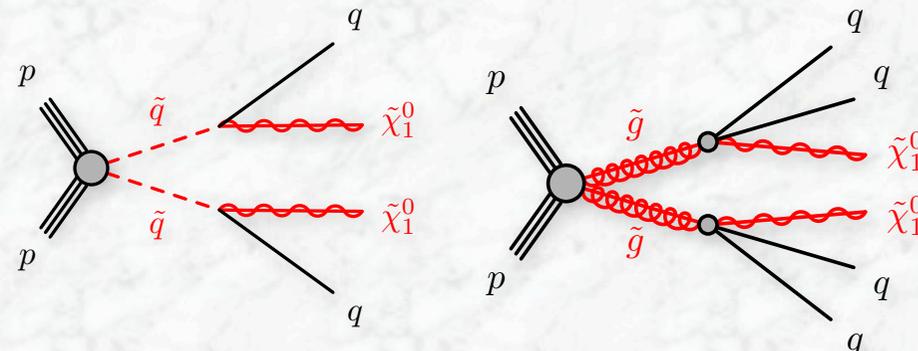
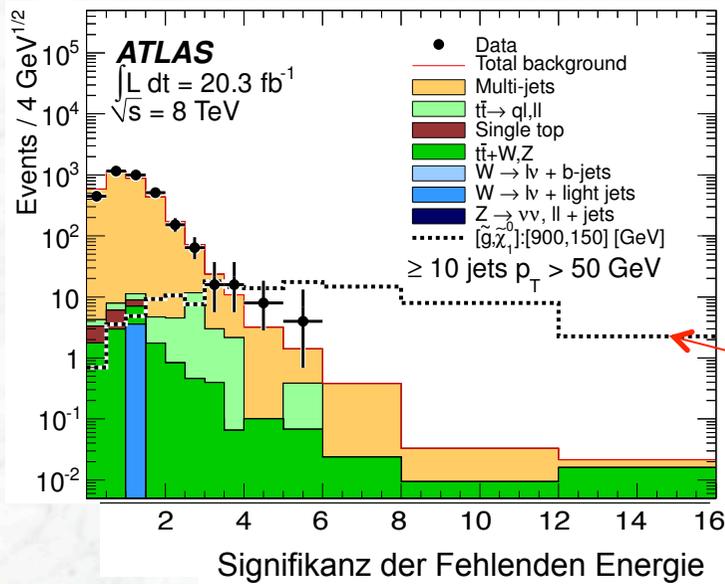
⇒ **Signatur: Fehlende Energie**
(senkrecht zur Strahlachse)



Ergebnisse zur Suche nach Supersymmetrie (2010 – 2012)



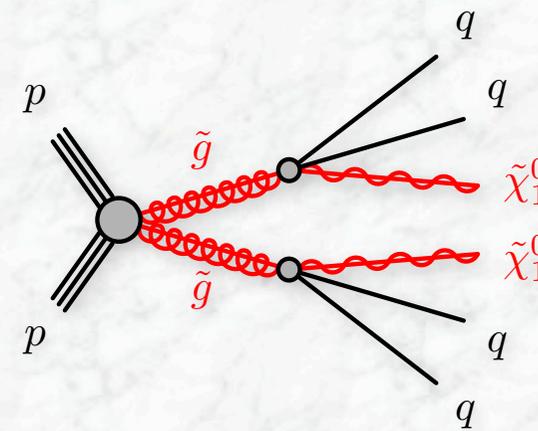
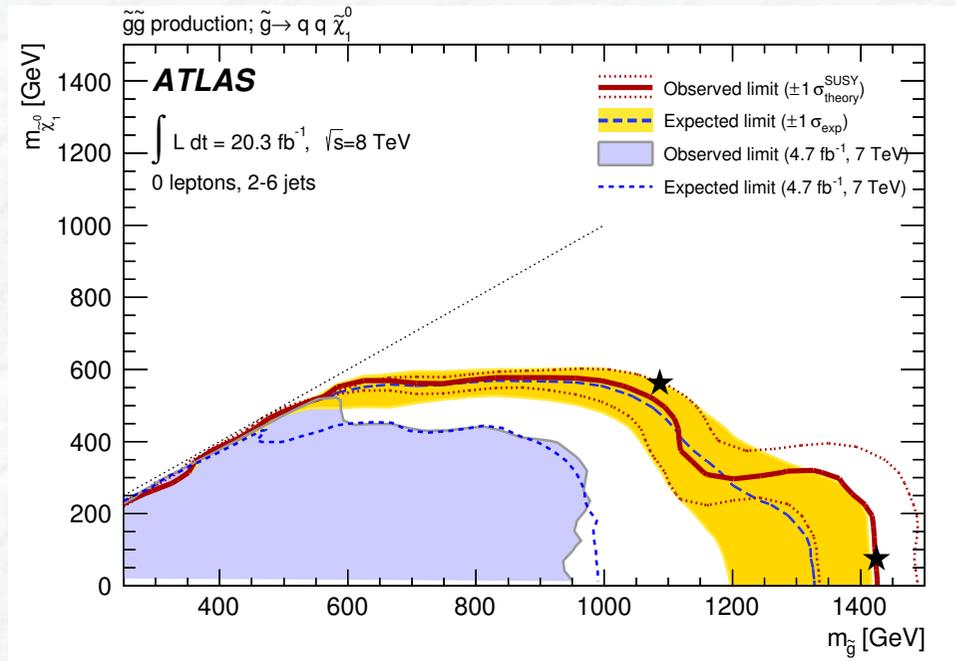
- Beispiel: Suche nach der Produktion von Squarks und Gluinos
- Daten stimmen mit den Erwartungen aus Prozessen der Standardtheorie gut überein



SUSY Beitrag sollte hier auftauchen

Ergebnisse zur Suche nach Supersymmetrie (2010 – 2012)

Kein Überschuss \rightarrow Ausschlussgrenzen auf die Massen der SUSY-Teilchen



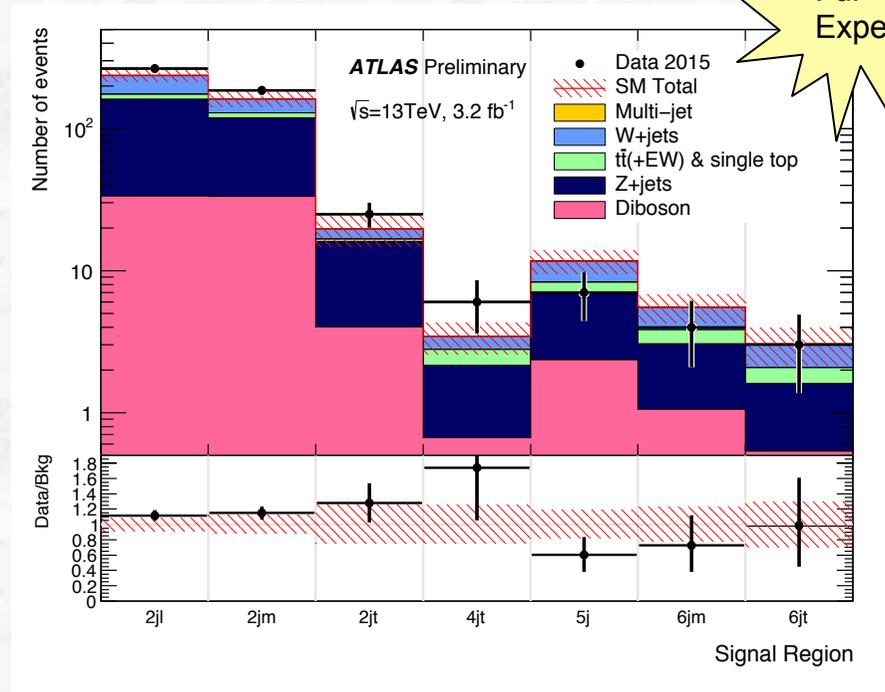
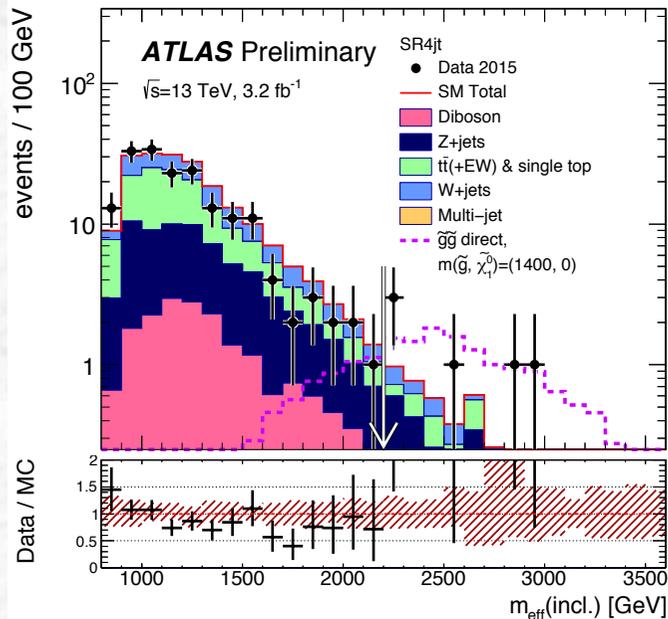
$m(\text{squark}), m(\text{gluino}) > 1.4 \text{ TeV}$ (95% CL)

für die Partnerteilchen der ersten beiden Generationen von Quarks und für leichte LSPs (χ^0)

Allerdings:

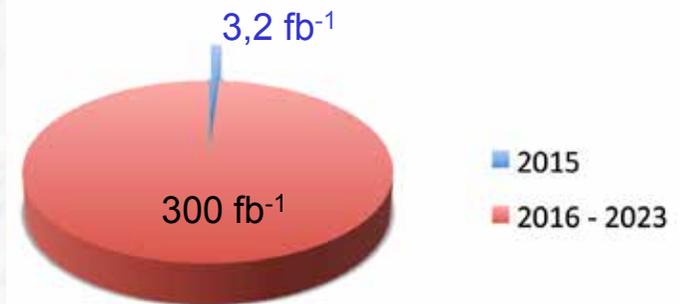
- Ausgeschlossener Massenbereich hängt von m_{χ^0} (LSP) ab
- Bislang nur einfache Zerfallskaskaden untersucht
- Schwächere Ausschlussgrenzen für Partnerteilchen der 3. Generation (Top-Partner)

Der erste Blick in die neuen Daten (2015)

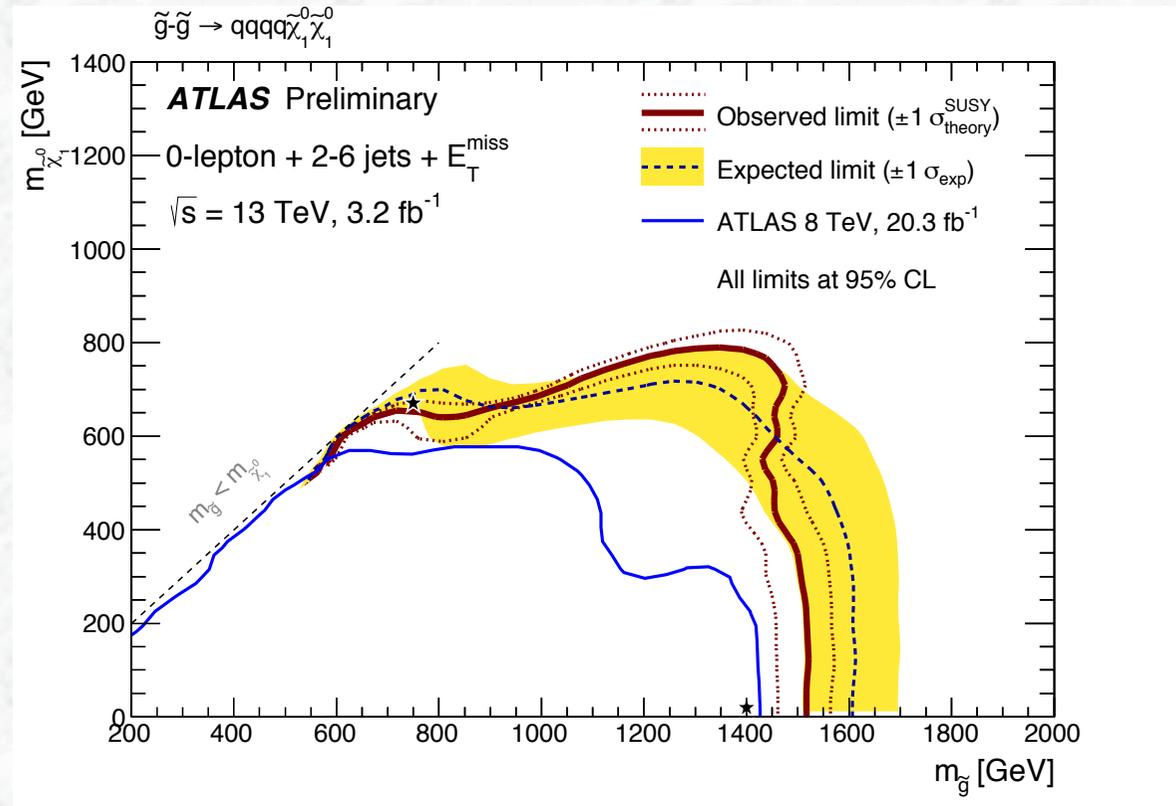


Auch in den neuen Daten (bei der höheren Energie) zeigen sich bislang keine Anzeichen für die Produktion supersymmetrischer Teilchen

Allerdings stehen wir erst am Anfang der Datennahme !



Erweiterte Ausschlussgrenzen (2015)



Bereits mit dem ersten Datensatz konnten die Ausschlussgrenzen weiter erhöht werden

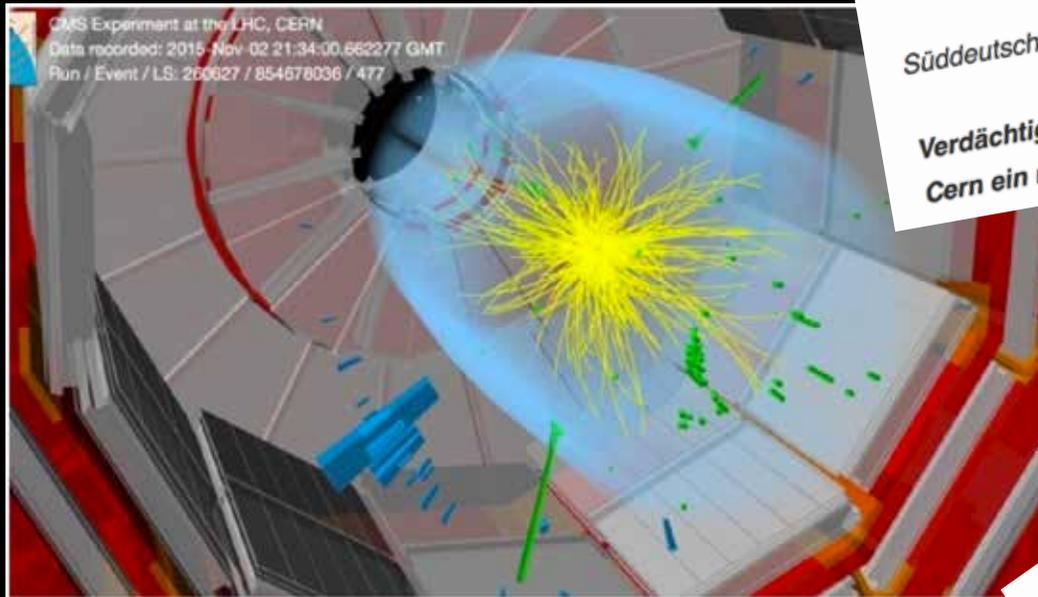
Glauino-Massen für leichte LSPs: 1.4 TeV → 1.6 TeV

Seltsames Teilchensignal

Wer hat das bestellt?

Am Forschungszentrum Cern zieht man Bilanz. Nichts ungewöhnliches ist dieses Jahr zu vermelden, außer einem unerwarteten schwachen Signal, das reichlich Stoff für Spekulationen bietet.

18.12.2015, von **MANFRED LINDINGER**



sueddeutsche.de

Teilchenphysik – Ein Cousin des Higgs-Teilchens?

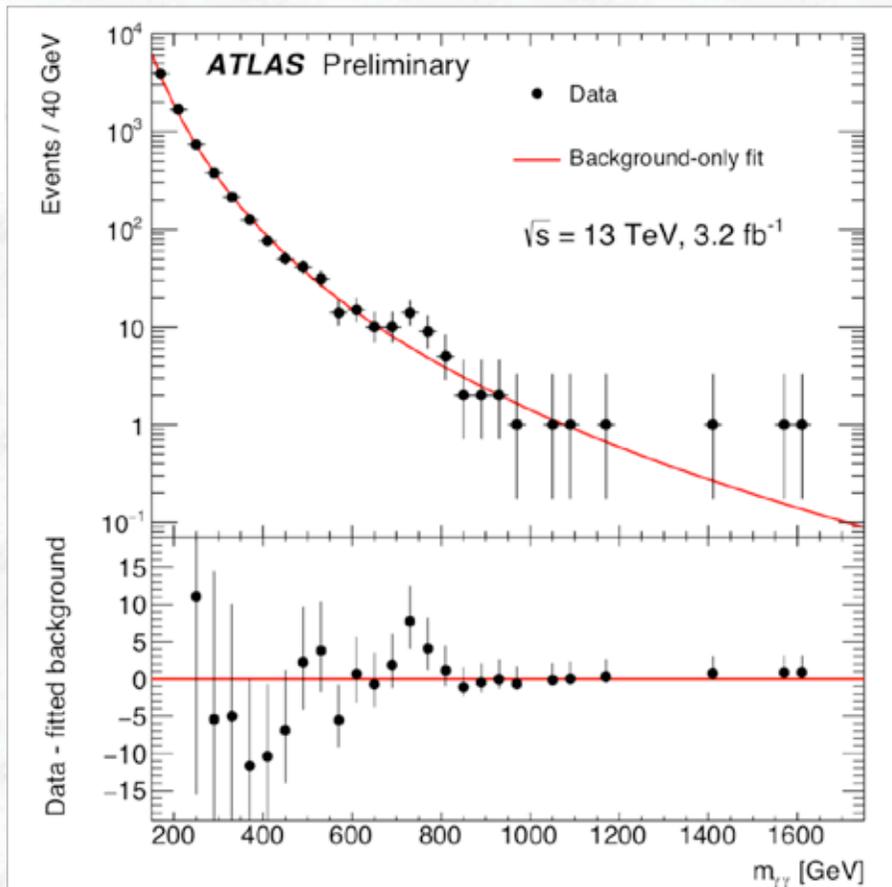
Süddeutsche.de GmbH, Munich, Germany

Verdächtiges Signal: Haben die Forscher am Kernforschungszentrum Cern ein neues Elementarteilchen entdeckt?

Auffällige "Beule" in der Messkurve

Suche nach weiteren Higgs-ähnlichen Teilchen

- Suche nach einem neuen Teilchen X im Zerfall $X \rightarrow \gamma\gamma$
- Datensatz von 2015 bei einer Energie von 13 TeV



Überschuss bei einer Masse von 750 GeV beobachtet

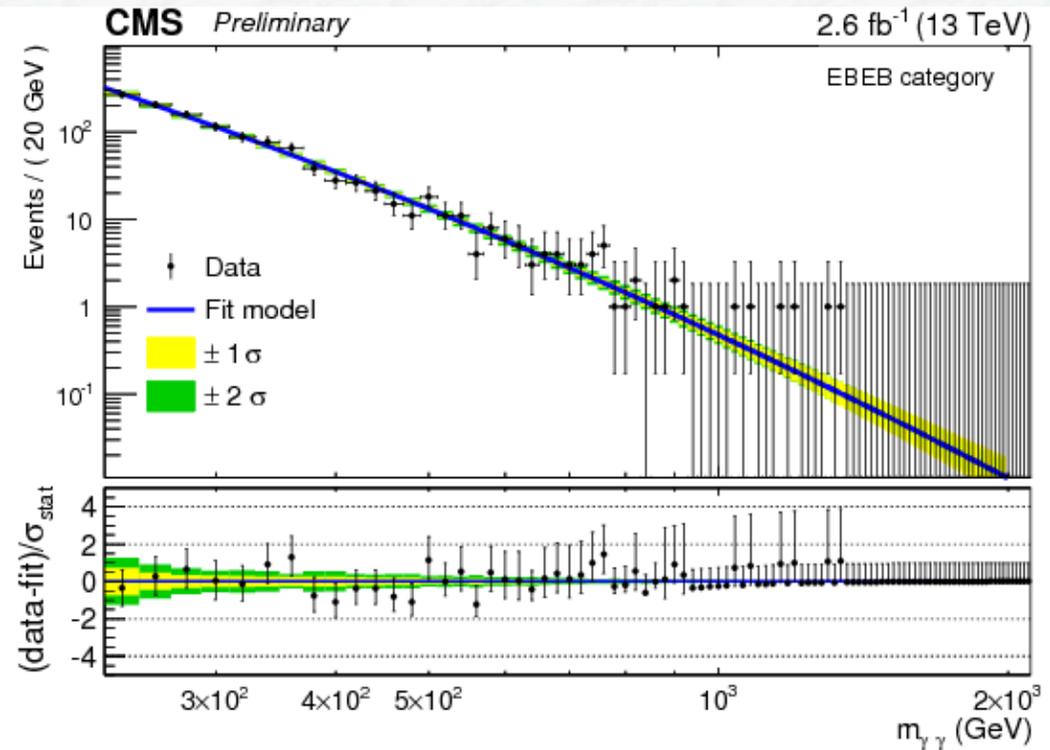
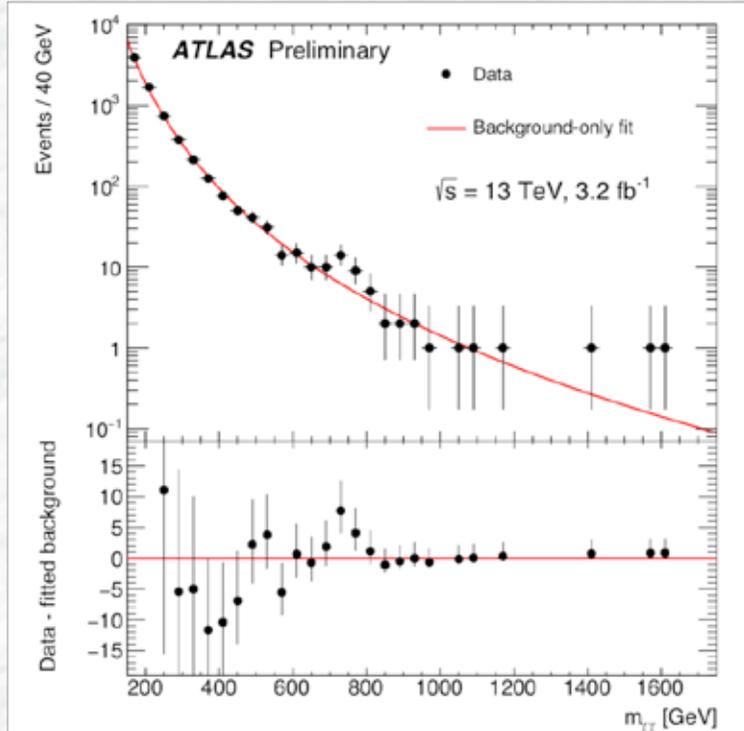
Anzeichen eines neuen Teilchens?

oder

Eine statistische Fluktuation?

Signifikanz: 2.0σ

Was sieht das andere Experiment? -ATLAS und CMS-



Signifikanz: 2.0 σ

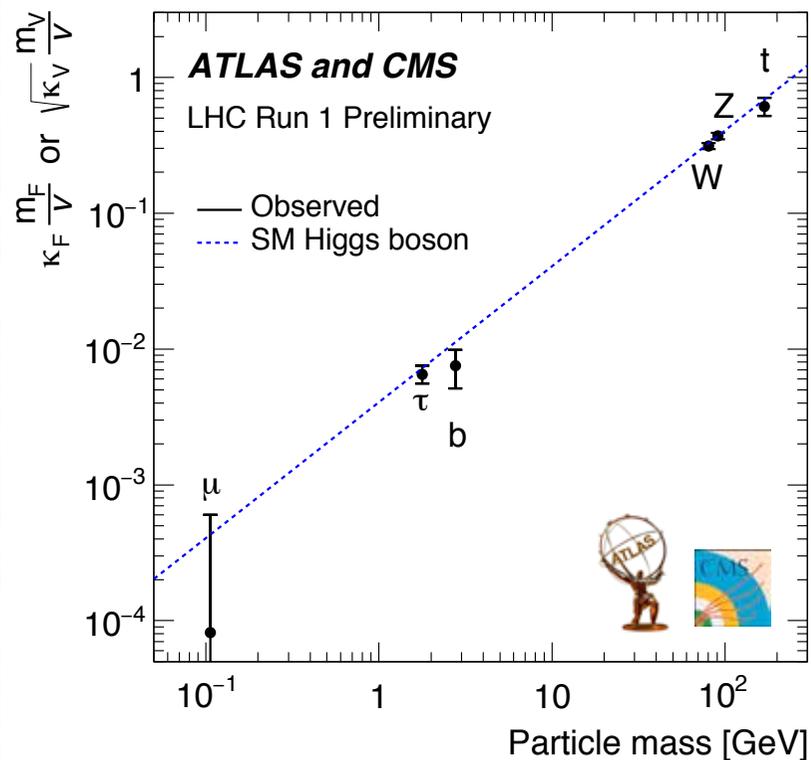
Signifikanz: 1.2 σ

→ Weitere Daten notwendig, um Klarheit zu erhalten (2016, ab April / Mai)

Zusammenfassung

- Mit der Inbetriebnahme des LHC hat für die Teilchenphysik eine neue Ära begonnen; Die Leistungsfähigkeit des Beschleuniger und der Experimente ist hervorragend.
- Sensationelle Physik-Ergebnisse nach einem Betrieb von nur drei Jahren;

Höhepunkt: Entdeckung des Higgs-Teilchens und Vermessung seiner Eigenschaften



→ als Higgs-Teilchen identifiziert

Zusammenfassung

- Seit Juni 2015 läuft der Beschleuniger bei der hohen Energie von 13 TeV
- Erste Daten zeigen interessante Ergebnisse:
 - Viele Messungen bestätigen die Vorhersagen der Standardtheorie
 - Weitere Einschränkungen für Neue Physik, aber auch interessante Anzeichen neuer Effekte
- Es bleibt spannend am LHC !!

Klarheit -und hoffentlich weitere richtungsweisende Entdeckungen-
werden die neuen Daten liefern

