



Diese Veranstaltung wird aufgezeichnet und als Medien-Cast über KIT - ILIAS bereit gestellt

Nur zur KIT-internen vorlesungsbegleitenden Nutzung, Weitergabe & anderweitige Verwendung ist untersagt

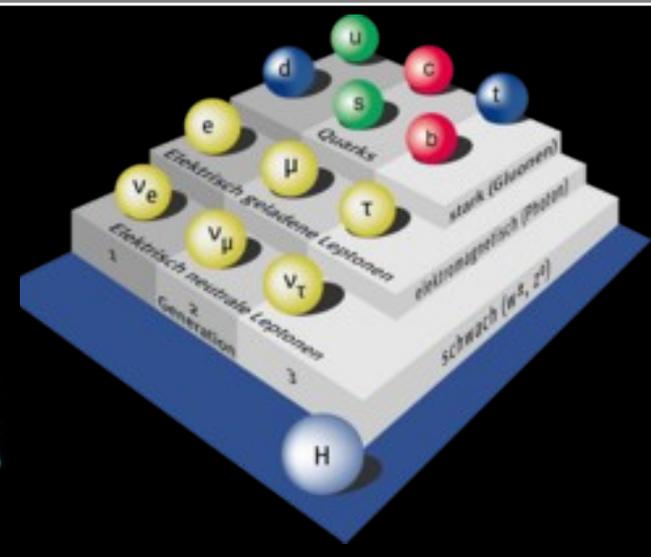
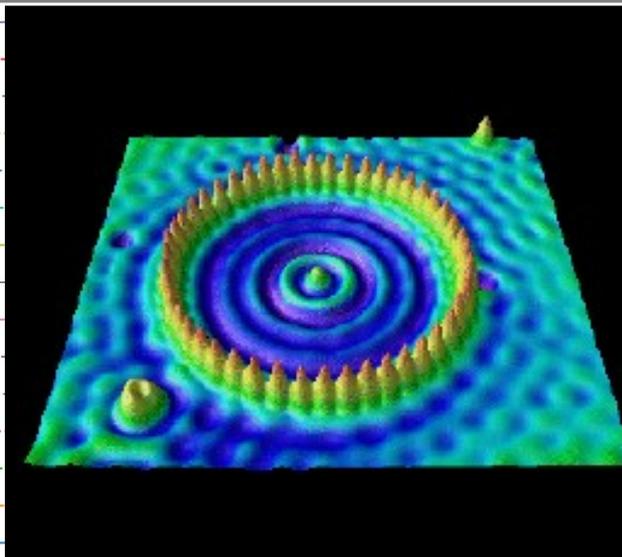
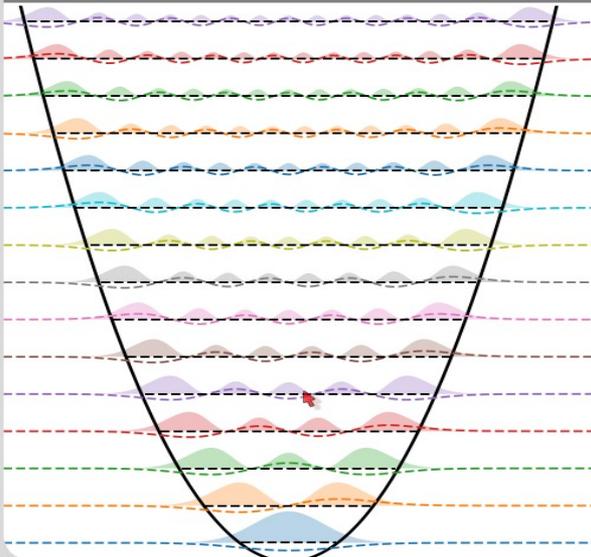
# Vorlesung 26 **Moderne Physik (L)**

## Die Jagd nach dem Higgs-Boson

**Günter Quast**

Fakultät für Physik  
Institut für Experimentelle Teilchenphysik

SS '20



Von den **vier fundamentalen Kräften** der Natur

- Schwerkraft, elektromagnetische Kraft, sowie schwache und starke Kernkraft, sind im Mikrokosmos nur drei relevant:

- **die elektromagnetische Wechselwirkung**

- unendliche Reichweite
- das masselose Photon als Austauschteilchen koppelt Teilchen mit elektrischer Ladung

- **die schwache Wechselwirkung**

- kürzeste Reichweite aller Kräfte ( $\sim 10^{-18}$  m)
- drei sehr schwere Austauschteilchen,  $W^+$ ,  $W^-$  - und Z-Boson, koppeln an Teilchen mit schwacher Ladung I, repräsentiert durch den schwachen Isospin;
- alle Fermionen tragen schwache Ladungen mit  $I_3 = +\frac{1}{2}$  oder  $I_3 = -\frac{1}{2}$
- die Austauschteilchen tragen ebenfalls schwache Ladung  $I = 1$  und koppeln damit aneinander
- die schwache Wechselwirkung ist die einzige, die ...
  - ... die Parität (P, Spiegelsymmetrie) und die CP-Symmetrie (Paritätstransformation und Teilchen-Antiteilchen-Austausch) nicht erhält
  - ... die Änderung des Teilchentyps ermöglicht (Abstrahlung eines W-Bosons ändert elektrische Ladung um  $+1e$  oder  $-1e$ )
  - ... Übergänge zwischen Teilchen unterschiedlicher Generationen ermöglicht; gegenüber Übergängen innerhalb einer Teilchengeneration sind diese unterdrückt
- die schwache Wechselwirkung ist bei hohen Energien mit der elektromagnetischen Wechselwirkung zur „elektroschwachen Wechselwirkung“ vereinigt
- die Massen der W- und Z-Bosonen werden durch Einführung eines zusätzlichen Feldes erzeugt (Brout-Englert-Higgs-Mechanismus);

- **die starke Wechselwirkung**

- acht masselose Gluonen als Austauscheteilchen koppeln an Quarks mit einer von drei Farb-Ladungen („rot“, „grün“, „blau“)
- Gluonen tragen selbst Farbladungen (Farb-Antifarb-Kombination); die Farbladung eines Quarks ändert sich bei Austausch von Gluonen mit verschiedenen Farbkombinationen
- die große Stärke der Wechselwirkung und die Selbstkopplung der Gluonen führen zu einer mit der Entfernung zwischen zwei Quarks linear ansteigenden, anziehenden Kraft; aus der Feldenergie entstehen weitere Quark-Antiquark-Paare, die die Farbladungen der ursprünglichen Quarks abschirmen.
  - bei Abständen  $> \sim 1$  fm werden nur farb-ungeladene Hadronen beobachtet (Quark-Einschluss oder „**Confinement**“)
- wegen des Confinements manifestieren sich Quarks und Gluonen im Detektor als Bündel („Jets“) aus farblosen Hadronen
- im Proton führt häufiger Gluonaustausch und die Quark-Gluon-Wechselwirkung zur kurzzeitigen Erzeugung von Quark-Anti-Quarkpaaren („Seequarks“), mit denen in Streuexperimenten Wechselwirkungen ebenso wie mit den „Valenz-Quarks“ stattfinden können
  - die Quantenzahlen von Hadronen werden von den Valenzquarks bestimmt (z.B. uud beim Proton); in Streuexperimenten werden sehr häufig Wechselwirkungen mit Gluonen und Seequarks beobachtet

# Inhaltsübersicht VL Moderne Physik

- 1) Einführung
- 2) Wiederholung wichtiger Konzepte der klassischen Physik
- 3) Spezielle Relativitätstheorie
- 4) Schlüsselexperimente und Grundlagen der Quantenphysik
- 5) Die Schrödingergleichung
- 6) Anwendungen der Schrödingergleichung
- 7) Das Wasserstoff-Atom
- 8) Atome mit mehreren Elektronen
- 9) Wechselwirkung von Licht und Materie
- 10) Grundlagen der Festkörperphysik
- 11) Kernphysik
- 12) Teilchenphysik
- 13) Astrophysik und Kosmologie

Als ein Beispiel für die Vorgehensweise und Methodik in der Teilchenphysik wollen wir die **Entdeckung des Higgs-Bosons** besprechen.

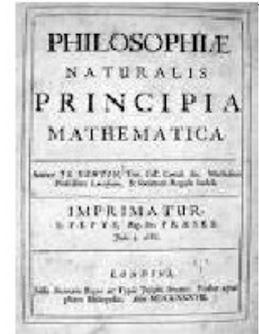
Es gäbe auch andere „Geschichten“, die es Wert sind, erzählt zu werden

- Entdeckung des Top-Quarks
- Messung der CP-Verletzung
- Messung der Neutrino-Masse
- Entdeckung der Neutrino-Oszillationen
- Suche nach „dunkler Materie“
- Entdeckung der Gravitationswellen
- ...

Einige dieser Themen werden im „**Hauptseminar für Lehramt**“ im kommenden Wintersemester angeboten.

$$F = m \cdot a$$

Newtons „träge Masse“  
(2. Newton'sches Axiom)



$$F = G \cdot \frac{m \cdot M}{r^2}$$

Newtons  
„schwere Masse“



$$E = m \cdot c^2$$

Einsteins Masse-Energie-Äquivalenz

$$= m_0 \cdot \gamma \cdot c^2$$

$m_0$  : „Ruhemasse“

$m_0 c^2$ : „Ruheenergie“

$E$  : Ruheenergie + kinetische Energie

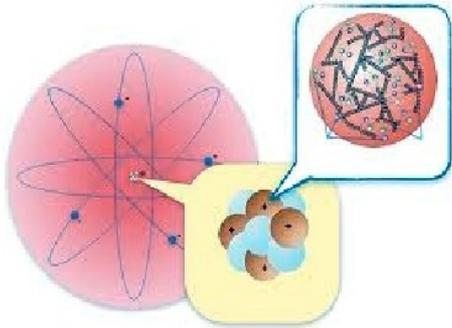
Anmerkung: Teilchen durch Ruhemasse charakterisiert;  
Teilchenphysiker meinen mit „Masse“ immer die Ruhemasse



Masse im Alltag bestimmt durch  
Gesamtmasse der Atome



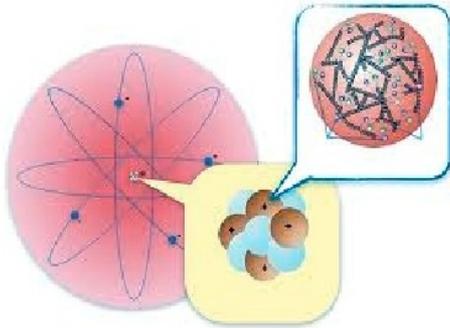
Masse im Alltag bestimmt durch  
Gesamtmasse der Atome



Atome sind zusammengesetzt  
→ Quantenbewegung der Bausteine



Masse im Alltag bestimmt durch  
Gesamtmasse der Atome



Atome sind zusammengesetzt  
→ Quantenbewegung der Bausteine

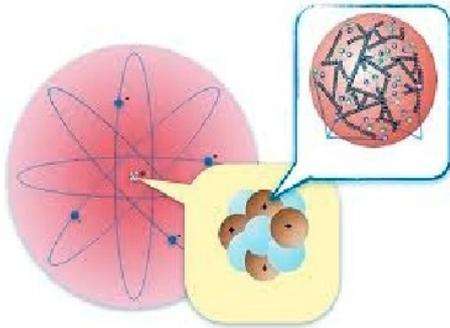
Masse von Atomen stammt nur zu  $\sim 1\%$  aus Ruhemasse der  
Elementarteilchen (Elektronen und Quarks)

Rest kommt aus der Quantenbewegung der in  
Protonen und Neutronen gebundenen Quarks, also dem

**Massenäquivalent von Bindungs- und Bewegungsenergie**



Masse im Alltag bestimmt durch  
Gesamtmasse der Atome



Atome sind zusammengesetzt  
→ Quantenbewegung der Bausteine

Masse von Atomen stammt nur zu  $\sim 1\%$  aus Ruhemasse der  
Elementarteilchen (Elektronen und Quarks)

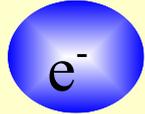
Rest kommt aus der Quantenbewegung der in  
Protonen und Neutronen gebundenen Quarks, also dem

**Massenäquivalent von Bindungs- und Bewegungsenergie**

Trotzdem ist **Ruhemasse der Elementarteilchen** extrem wichtig:



## Elektron ( $m_e=511 \text{ KeV}/c^2$ )



$$m_e = 0$$

→ **keine Atome**

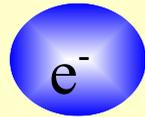
$$m_e = 20 \text{ keV}/c^2$$

→ Atome viel größer, Menschen  $\sim 45 \text{ m}$  groß

$$m_e = 1500 \text{ keV}/c^2$$

→ Prozess  $p+e^- \rightarrow n+\nu$  möglich, **d.h. kein Wasserstoff**

## Elektron ( $m_e=511 \text{ KeV}/c^2$ )



$m_e = 0$  → **keine Atome**

$m_e = 20 \text{ keV}/c^2$  → Atome viel größer, Menschen  $\sim 45 \text{ m}$  groß

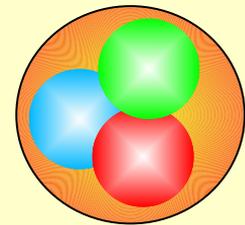
$m_e = 1500 \text{ keV}/c^2$  → Prozess  $p+e^- \rightarrow n+\nu$  möglich, **d.h. kein Wasserstoff**

## Quarks

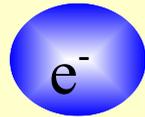
$m_q = 0$

oder d leichter als u

→ Proton-Zerfall möglich, **kein Wasserstoff**  
ganz anderes Universum !



## Elektron ( $m_e=511 \text{ KeV}/c^2$ )



$m_e=0$  → **keine Atome**

$m_e=20 \text{ keV}/c^2$  → Atome viel größer, Menschen  $\sim 45 \text{ m}$  groß

$m_e=1500 \text{ keV}/c^2$  → Prozess  $p+e^- \rightarrow n+\nu$  möglich, **d.h. kein Wasserstoff**

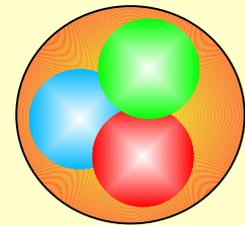
## Quarks

$m_q=0$

→ Proton-Zerfall möglich, **kein Wasserstoff**

oder d leichter als u

**ganz anderes Universum !**



## W-Boson ( $m_W=80,4 \text{ GeV}/c^2$ )



$m_W=0$  → Atome haben schwache Ladung & stoßen sich ab,

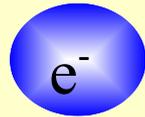
**d.h. keine kondensierte Materie**

$M_W$  klein → Fusionsrate in Sternen viel schneller, unsere Sonne

wäre kälter und längst erloschen

**kein höheres Leben auf der Erde**

## Elektron ( $m_e=511 \text{ KeV}/c^2$ )



$m_e=0$  → **keine Atome**

$m_e=20 \text{ keV}/c^2$  → Atome viel größer, Menschen  $\sim 45 \text{ m}$  groß

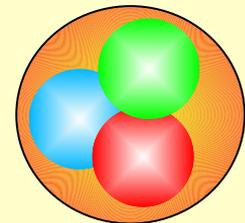
$m_e=1500 \text{ keV}/c^2$  → Prozess  $p+e^- \rightarrow n+\nu$  möglich, **d.h. kein Wasserstoff**

## Quarks

$m_q=0$

oder d leichter als u

→ Proton-Zerfall möglich, **kein Wasserstoff**  
ganz anderes Universum !



## W-Boson ( $m_W=80,4 \text{ GeV}/c^2$ )



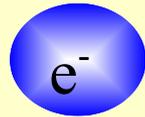
$m_W=0$  → Atome haben schwache Ladung & stoßen sich ab,

**d.h. keine kondensierte Materie**

$M_W$  klein → Fusionsrate in Sternen viel schneller, unsere Sonne  
wäre kälter und längst erloschen

**kein höheres Leben auf der Erde**

## Elektron ( $m_e=511 \text{ KeV}/c^2$ )



$m_e=0$  → **keine Atome**

$m_e=20 \text{ keV}/c^2$  → Atome viel größer, Menschen  $\sim 45 \text{ m}$  groß

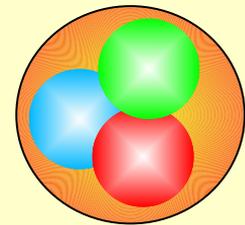
$m_e=1500 \text{ keV}/c^2$  → Prozess  $p+e^- \rightarrow n+\nu$  möglich, **d.h. kein Wasserstoff**

## Quarks

$m_q=0$

oder d leichter als u

→ Proton-Zerfall möglich, **kein Wasserstoff**  
ganz anderes Universum !



## W-Boson ( $m_W=80,4 \text{ GeV}/c^2$ )



$m_W=0$  → Atome haben schwache Ladung & stoßen sich ab,

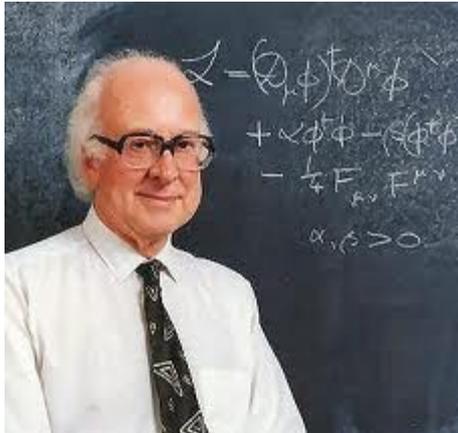
**d.h. keine kondensierte Materie**

$M_W$  klein → Fusionsrate in Sternen viel schneller, unsere Sonne  
wäre kälter und längst erloschen

**kein höheres Leben auf der Erde**

Im Standardmodell der Teilchenphysik wird die Masse über den  
**„Brout-Englert-Higgs-Mechanismus“**  
eingeführt.

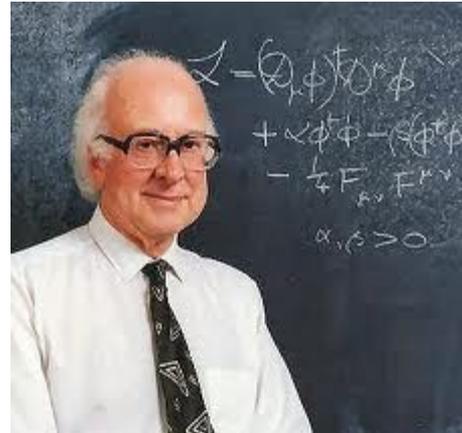
Teilchen erhalten Masse  
durch Wechselwirkung  
mit neuem Feld, dem  
**„Higgs-Feld“**



Symmetrien des Standardmodells werden erhalten

Im Standardmodell der Teilchenphysik wird die Masse über den  
**„Brout-Englert-Higgs-Mechanismus“**  
eingeführt.

Teilchen erhalten Masse  
durch Wechselwirkung  
mit neuem Feld, dem  
**„Higgs-Feld“**

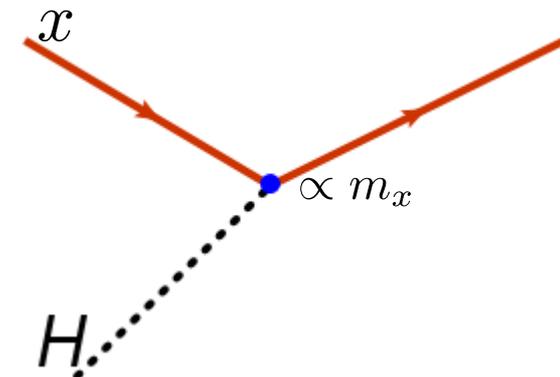


Symmetrien des Standardmodells werden erhalten

Wichtigster Beitrag von Peter Higgs:

**Vorhersage des Higgs-Teilchens**

**Stärke der Wechselwirkung mit dem  
Higgs-Teilchen hängt von Teilchenmasse ab.**



Veranschaulichung  
des  
Higgs-Mechanismus

Teilchenmasse als Wechselwirkung mit dem Higgs-Feld



Selbstwechselwirkung des Higgs-Feldes führt zu  
Masse des Higgs-Teilchens



**Gibt es den Higgs-Mechanismus und das Higgs-Teilchen ?**



# Teilchenmassen im Standardmodell

- Standardmodell basiert auf "lokaler Eichinvarianz"

Elektrodynamik kann vollständig aus diesem Prinzip hergeleitet werden !

→ Modell für schwache und starke Wechselwirkungen

vereinfacht:

el.-mag. Wechselwirkung:

eine elektrische Ladung

schwache Wechselwirkung:

zwei schwache Ladungen (schwacher Isospin  $\uparrow\downarrow$ )

starke Wechselwirkung:

drei (Farb-) Ladungen ( r  $\nearrow$  g  $\nwarrow$  b  $\downarrow$  )

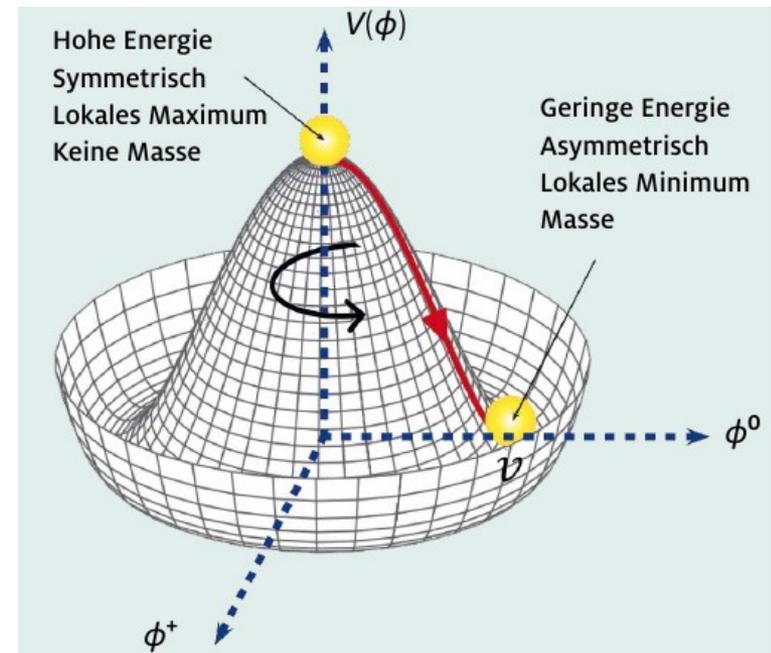
Symmetriegruppe  $U(1) \otimes SU(2)_L \otimes SU(3)$

- Problem:

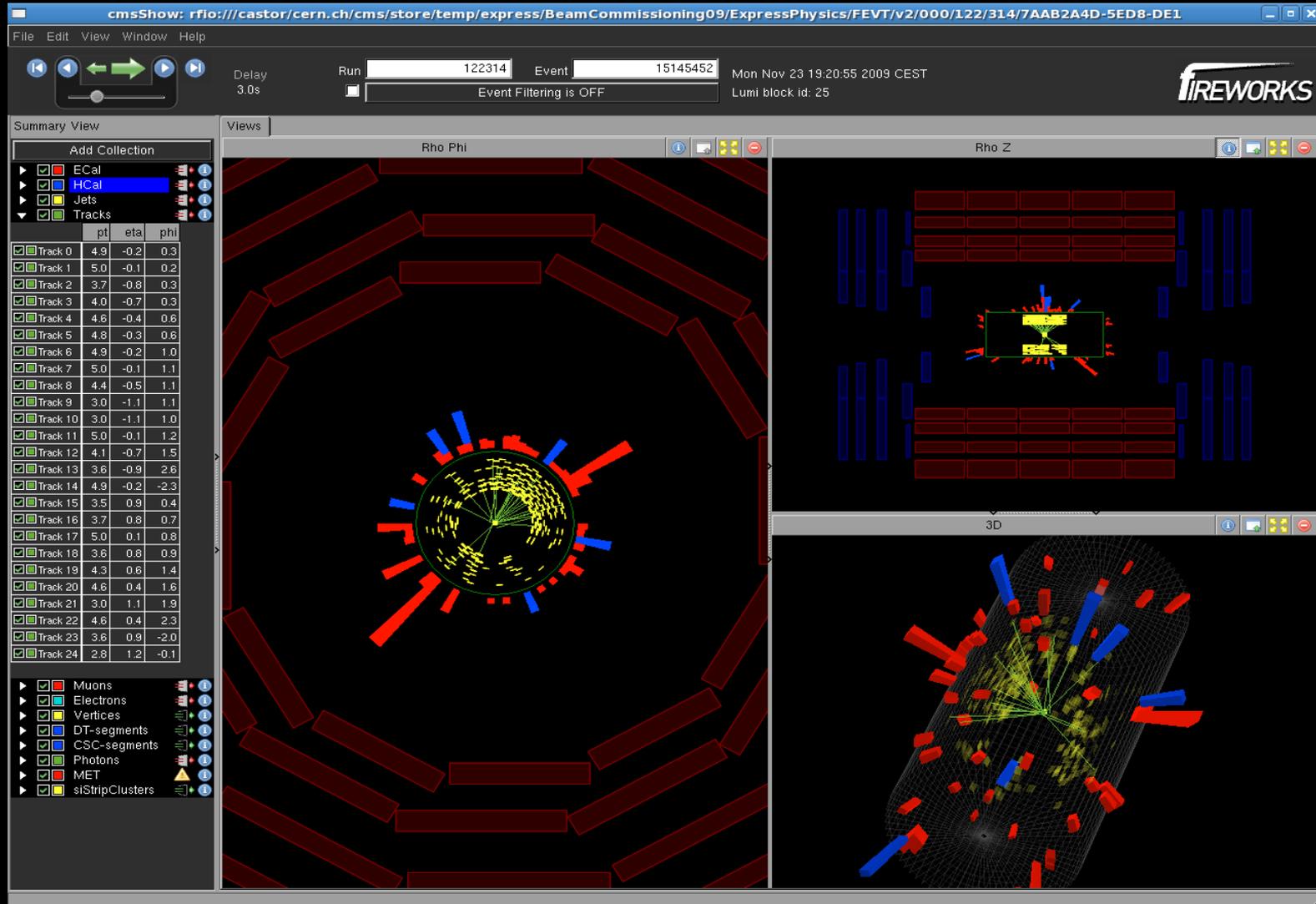
schwache Bosonen haben Masse,  
kann nicht „von Hand“ hinzugefügt werden,  
weil Eichsymmetrie zerstört würde

**Theoretische Lösung:** Einführung eines  
skalaren, (komplexwertigen) Feldes, dessen  
Grundzustand die Eichsymmetrie bricht

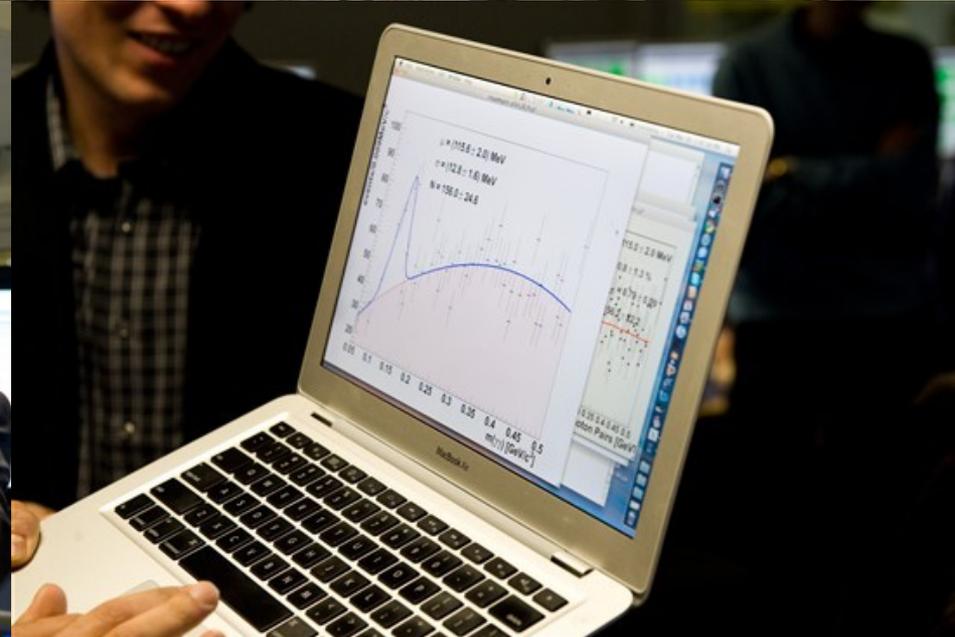
„Higgs-Potential“



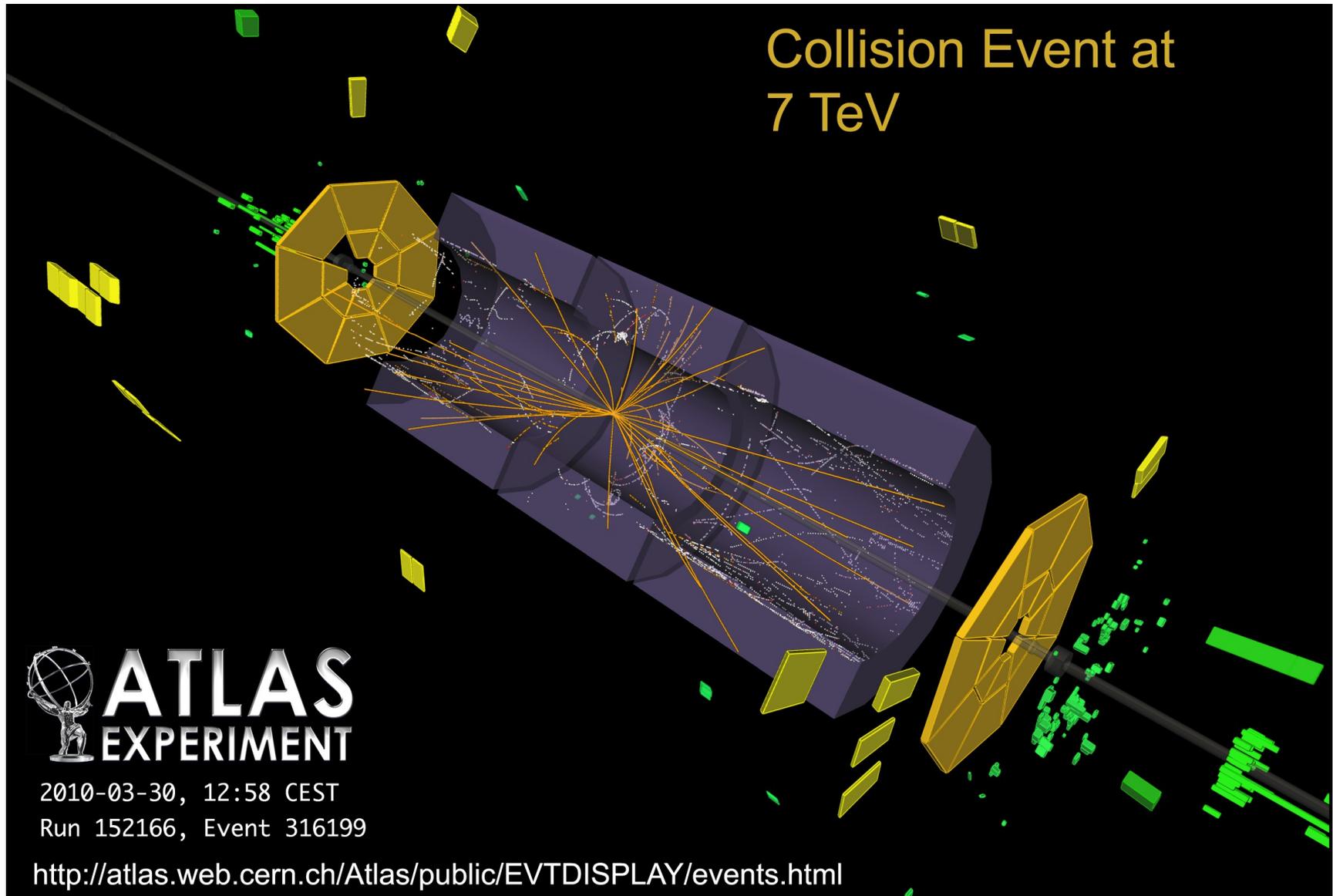
## Erstes Kollisionsereignis in CMS



Erste Kollision bei 7 TeV Schwerpunktsenergie

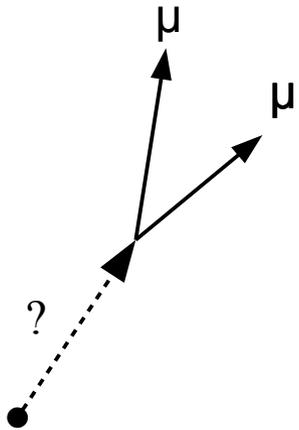


Alle freuen sich, der Anfang einer langen Datennahmeperiode ...

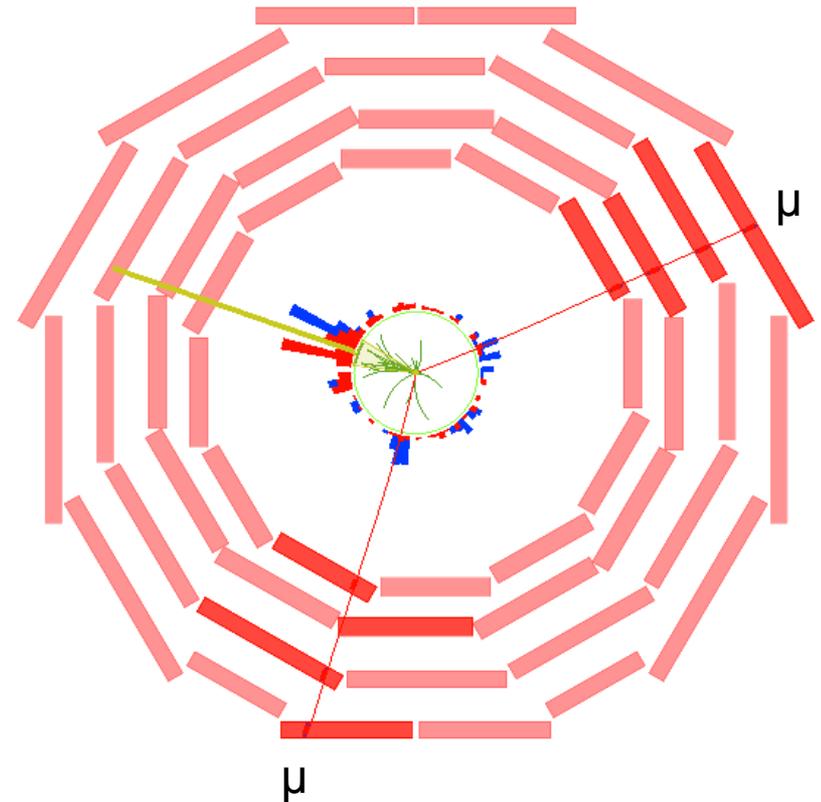
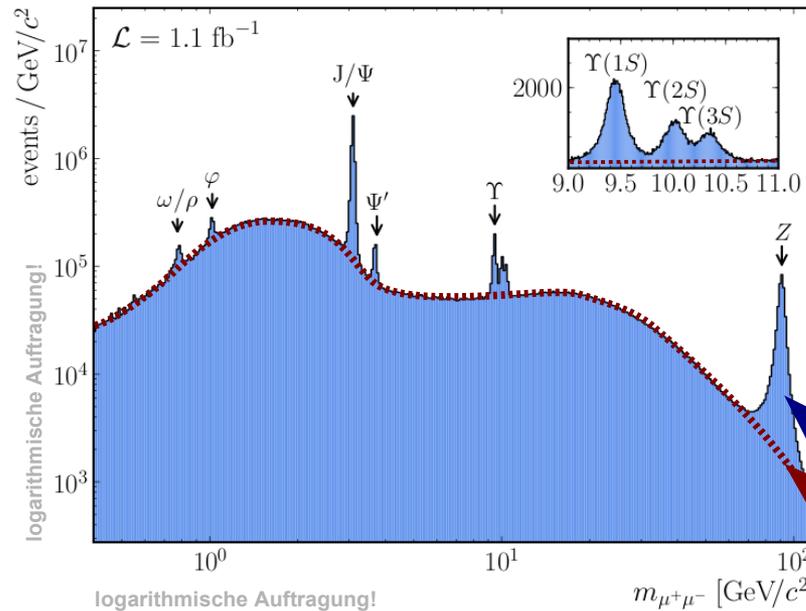


... wie auch alle anderen Experimente

# Die Analyse-Arbeit beginnt



- selektiere Ereignisse mit zwei Myonen
- rekonstruiere Masse des Mutterteilchens
- zähle die Ereignisse mit einer gewissen Masse



Teilchen, die in 2 Myonen zerfallen  
kombinatorischer Untergrund  
(zufällig zwei Myonen)

50 Jahre Teilchenphysik im Zeitraffer

# Wie sieht ein Higgs-Ereignis aus ?

- **Higgs-Bosonen sind extrem selten**  
entstehen nur in  $\sim 1$  von  $10'000'000'000$  pp-Kollisionen
- **Man muss sie erst finden,**  
denn es gibt Untergrund !
- **Theorie**  
sagt uns, womit wir rechnen müssen:



# Wie sieht ein Higgs-Ereignis aus ?

- **Higgs-Bosonen sind extrem selten**

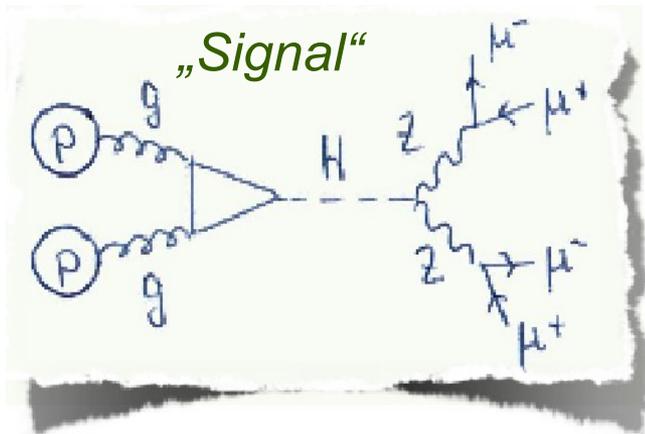
entstehen nur in  $\sim 1$  von 10'000'000'000 pp-Kollisionen

- **Man muss sie erst finden,**

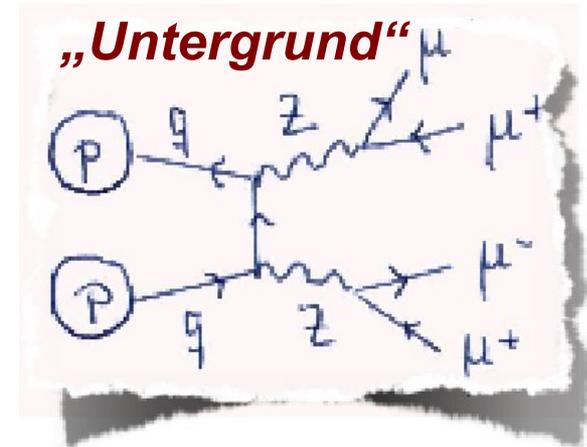
denn es gibt Untergrund !

- **Theorie**

sagt uns, womit wir rechnen müssen:



$pp \rightarrow H \rightarrow 4$  Myonen  
oder nur  
 $pp \rightarrow 4$  Myonen



# Wie sieht ein Higgs-Ereignis aus ?

- **Higgs-Bosonen sind extrem selten**

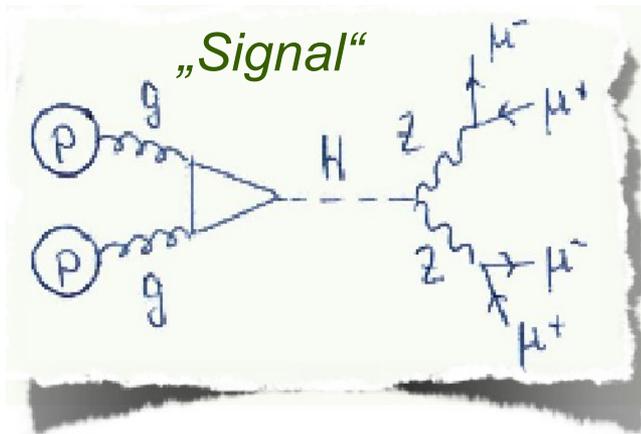
entstehen nur in  $\sim 1$  von  $10'000'000'000$  pp-Kollisionen

- **Man muss sie erst finden,**

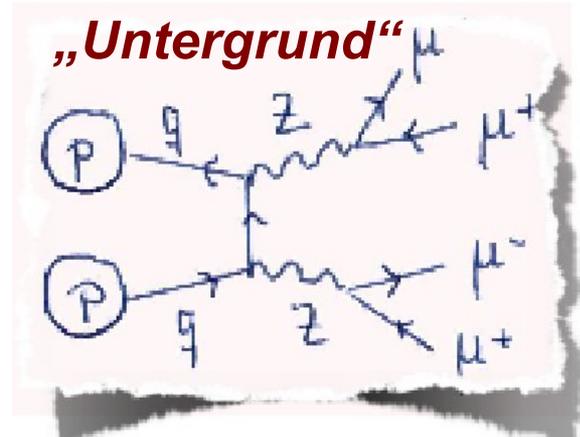
denn es gibt Untergrund !

- **Theorie**

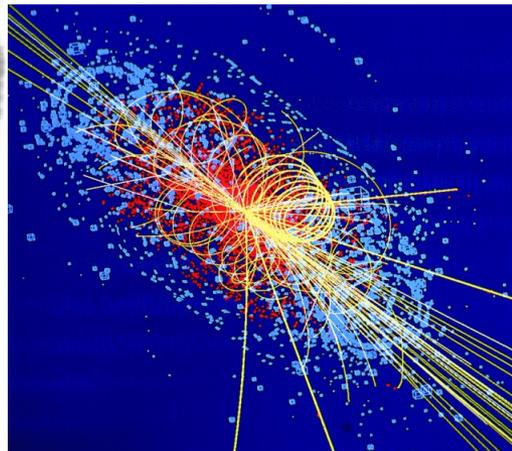
sagt uns, womit wir rechnen müssen:



$pp \rightarrow H \rightarrow 4$  Myonen  
oder nur  
 $pp \rightarrow 4$  Myonen



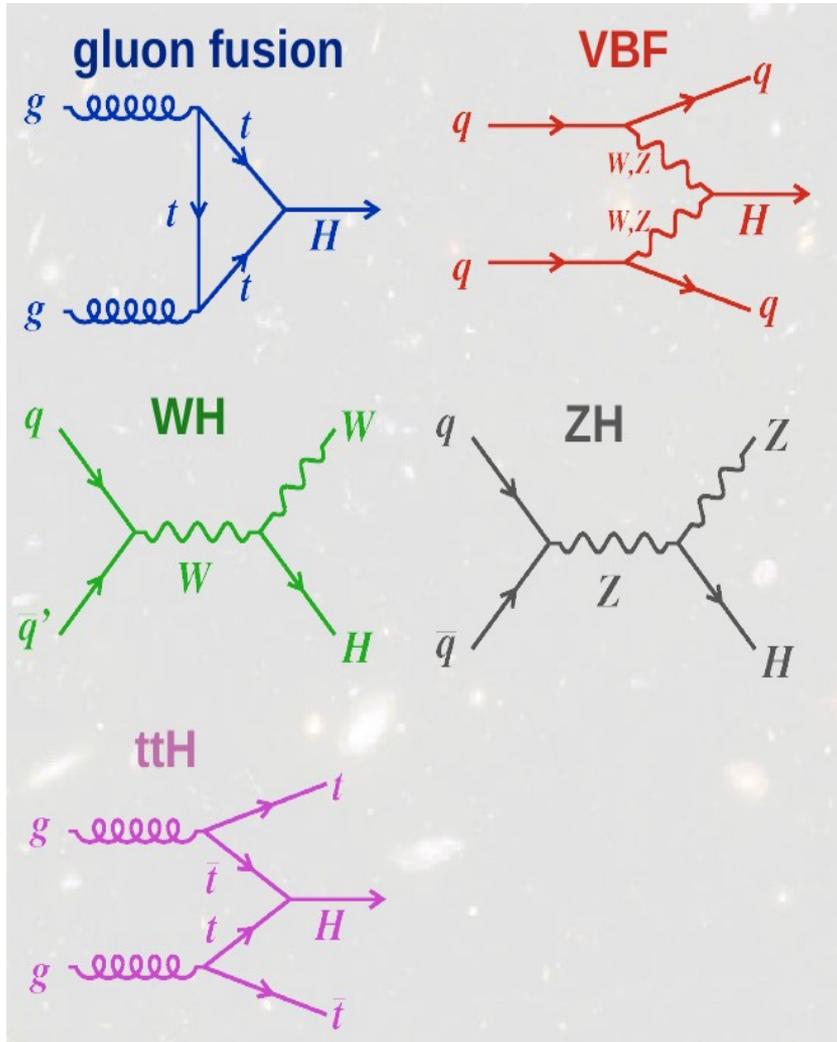
Im Detektor sehen wir 4 Myonen:



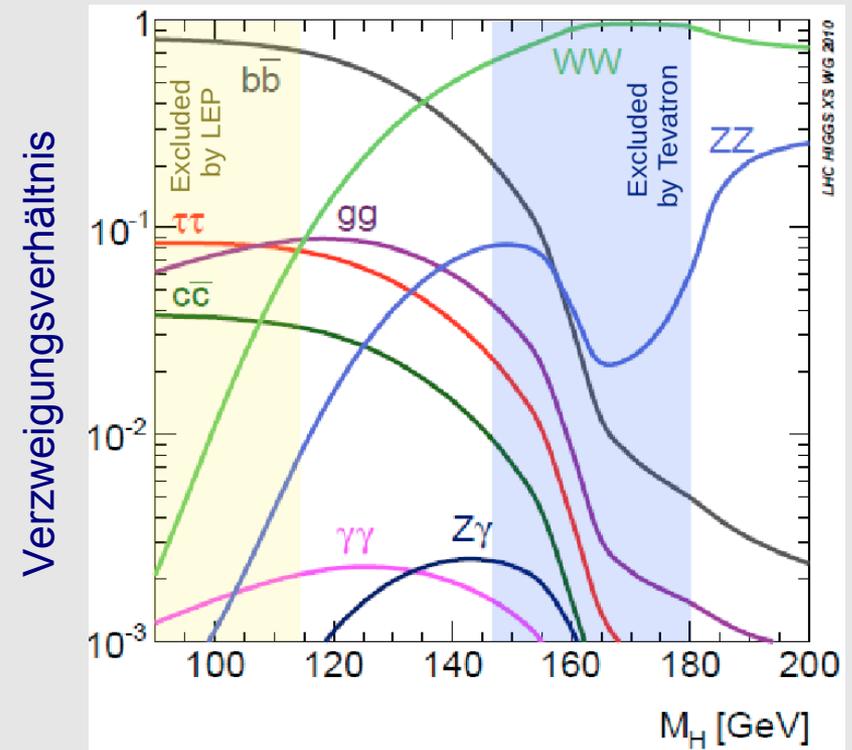
Simulation eines Higgs-Ereignisses im CMS-Detektor

Verschiedene Produktions- und

Zerfallskanäle



Higgs-Teilchen zerfällt bevorzugt in die schwerstmöglichen Teilchen, die leichter sind als es selbst:



$$H \rightarrow \tau^+\tau^-, b\bar{b}$$

$$H \rightarrow W^+W^-, ZZ$$

$$H \rightarrow t\bar{t}, \gamma\gamma$$

Quantenmechanik sagt Wahrscheinlichkeiten voraus !

Frage: sind Würfel gezinkt?

*Experiment:*

100 mal würfeln

*Simulation:*

viele Würfelspiele mit  
perfekten Würfeln



Quantenmechanik sagt Wahrscheinlichkeiten voraus !

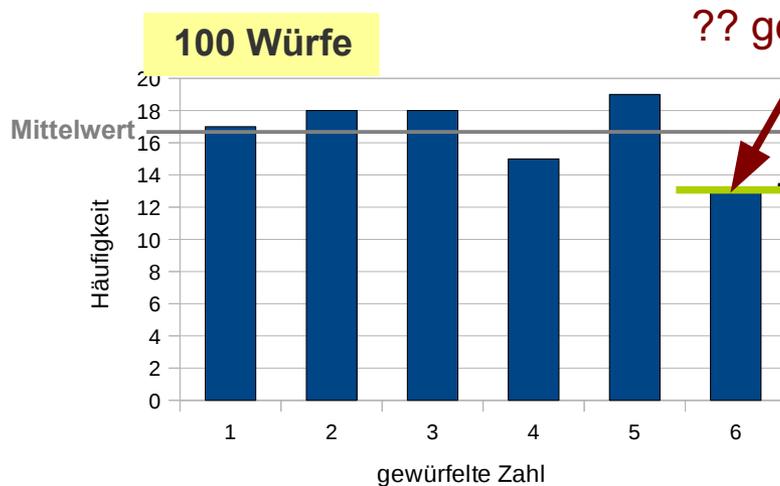
Frage: sind Würfel gezinkt?

*Experiment:*

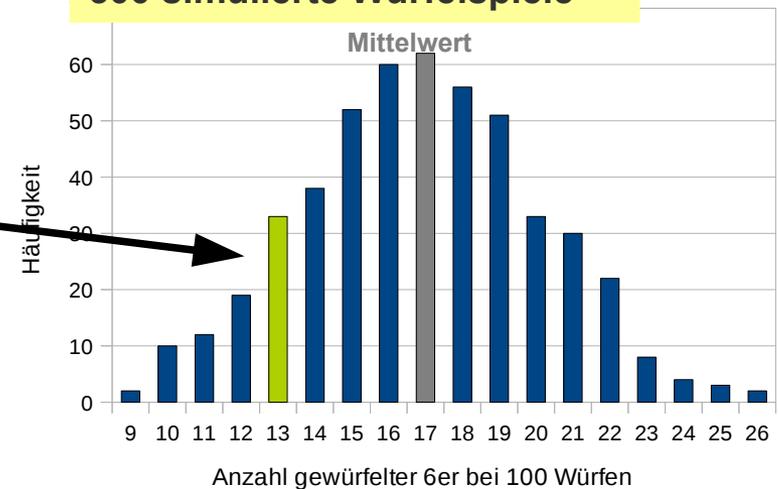
100 mal würfeln

*Simulation:*

viele Würfelspiele mit perfekten Würfeln



**500 simulierte Würfelspiele**



Quantenmechanik sagt Wahrscheinlichkeiten voraus !

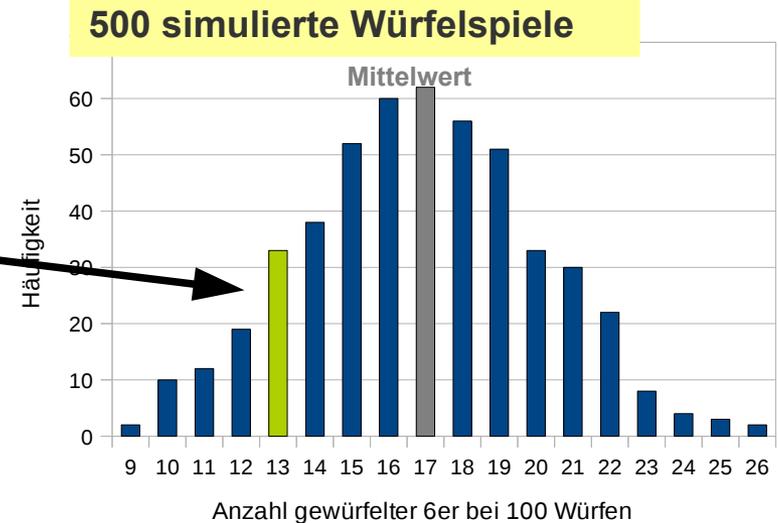
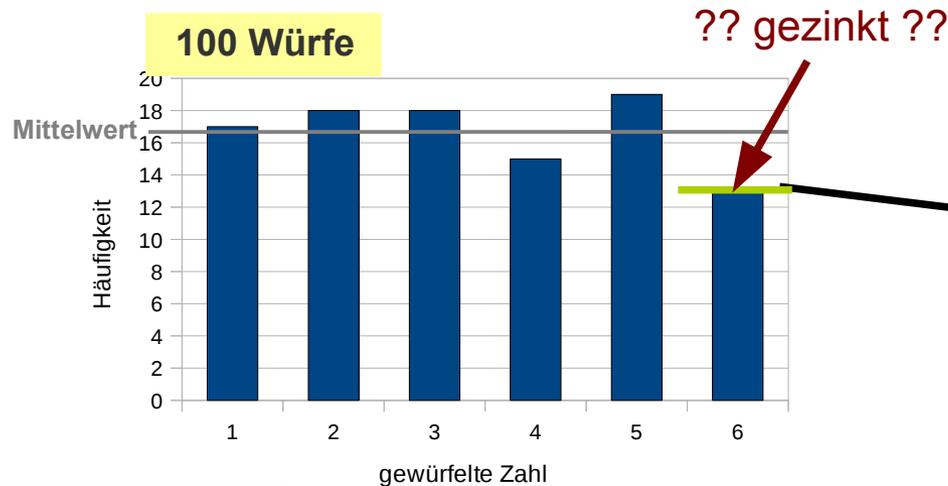
Frage: sind Würfel gezinkt?

*Experiment:*

100 mal würfeln

*Simulation:*

viele Würfelspiele mit perfekten Würfeln



**wohl nicht  
gezinkt !**

Quantenmechanik sagt Wahrscheinlichkeiten voraus !

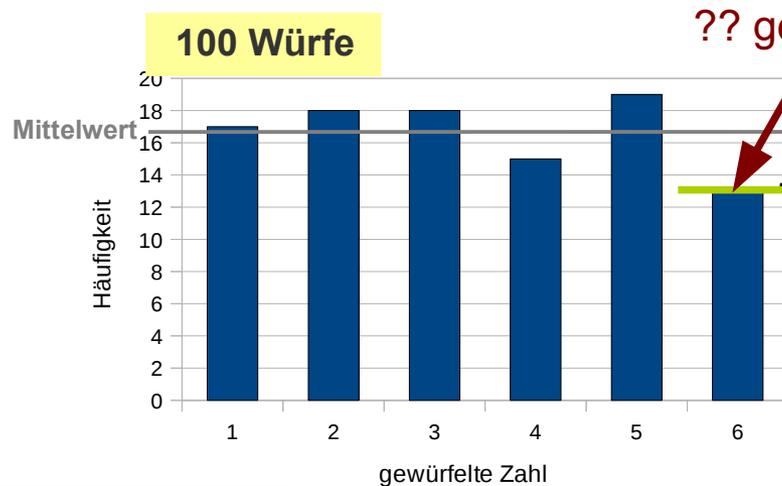
Frage: sind Würfel gezinkt?

*Experiment:*

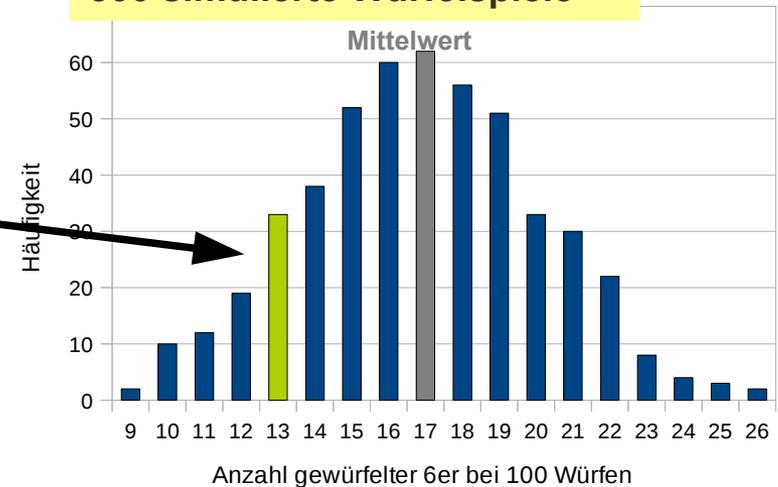
100 mal würfeln

*Simulation:*

viele Würfelspiele mit perfekten Würfeln



**500 simulierte Würfelspiele**



**wohl nicht  
gezinkt !**

**Übertragen auf die Higgs-Suche:**

Quantenmechanik sagt Wahrscheinlichkeiten voraus !

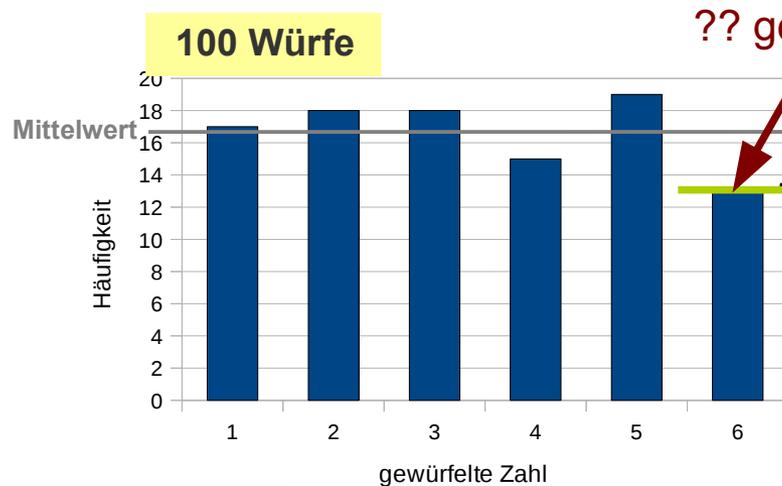
Frage: sind Würfel gezinkt?

*Experiment:*

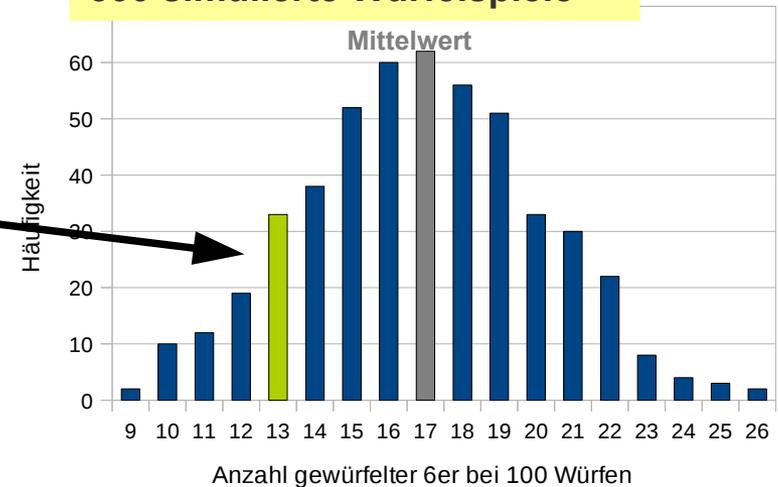
100 mal würfeln

*Simulation:*

viele Würfelspiele mit perfekten Würfeln



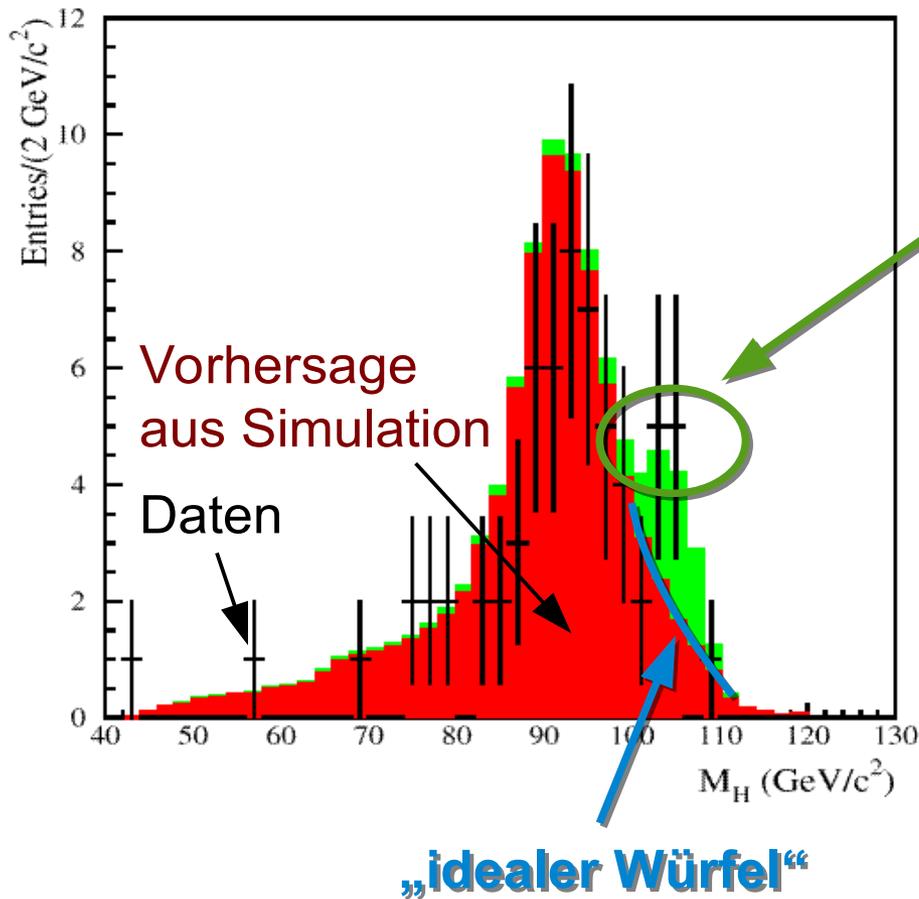
**500 simulierte Würfelspiele**



**wohl nicht  
gezinkt !**

**Übertragen auf die Higgs-Suche:**

statistisch signifikanter Überschuss an 6ern  
entspricht Entdeckung eines neuen Teilchens



„gezinkter Würfel“?

Was sehen wir?

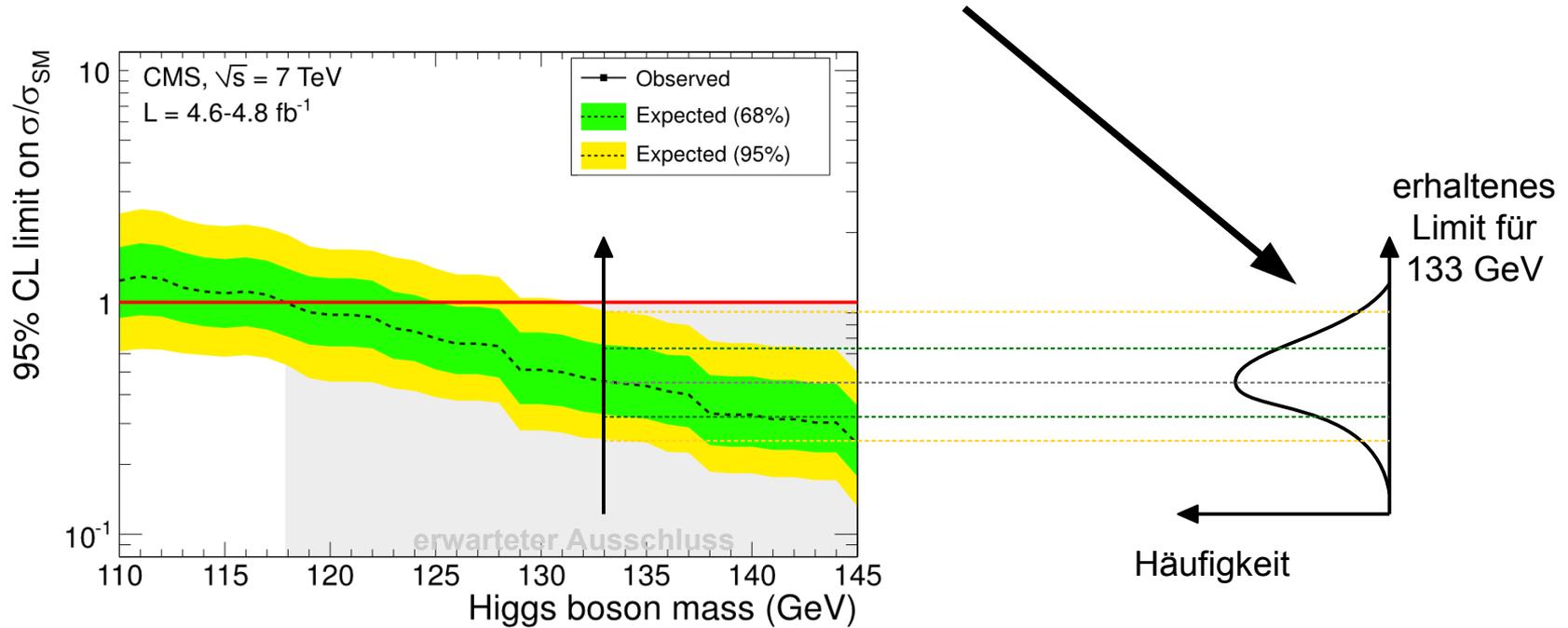
- Modell **mit** neuem Teilchen
- Modell **ohne** neues Teilchen

Womit sind die Daten verträglich?

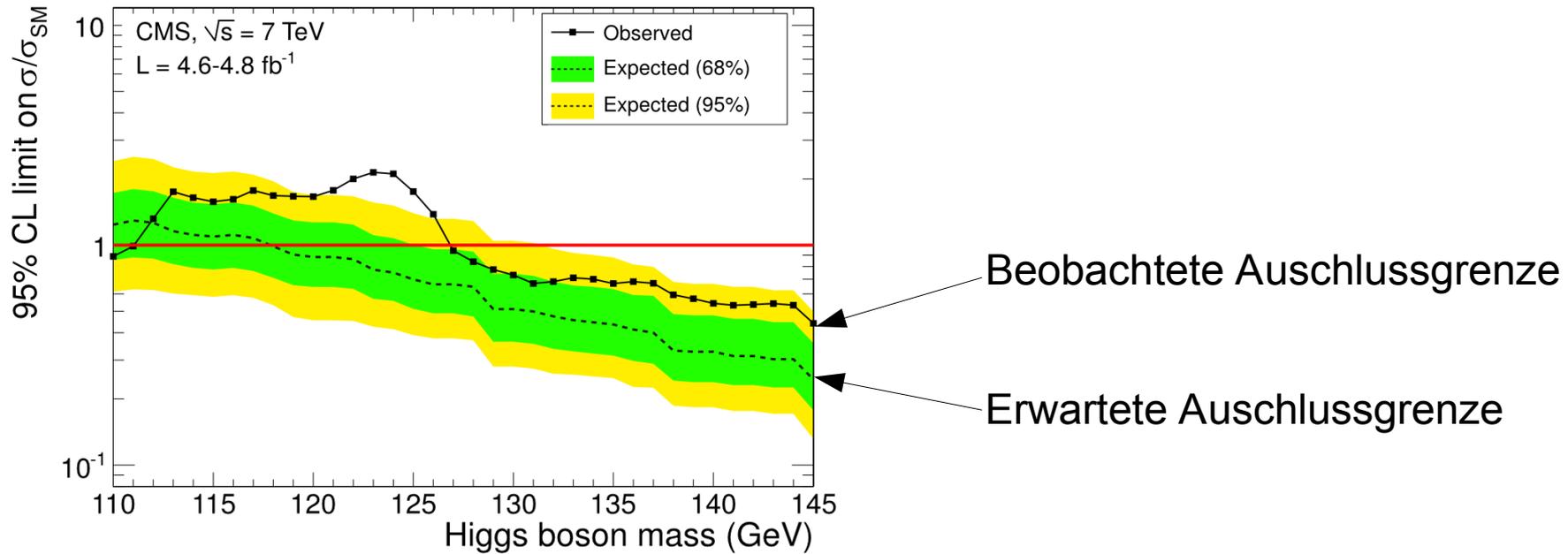
- Modell **mit** Higgs-Boson
- Modell **ohne** Higgs-Boson

→ **Wahrscheinlichkeitsaussagen mit Hilfe statistischer Methoden**

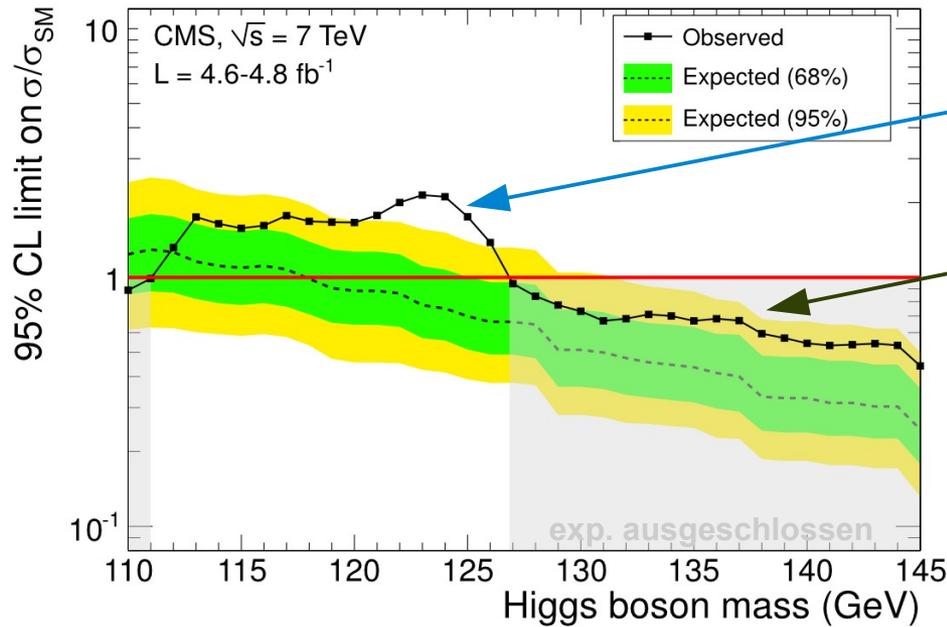
Simuliere die Messung für jede mögliche Higgs-Masse sehr häufig und trage die Häufigkeit der erhaltenen Grenzen auf



Berechne das Limit für die Beobachtung in Daten:



## Schlussfolgerungen



Überschuss bei einer Higgs-Masse von  $\sim 124$  GeV

ein Higgs-Boson mit einer Masse von mehr als 127 GeV kann mit 95% Vertrauensniveau ausgeschlossen werden

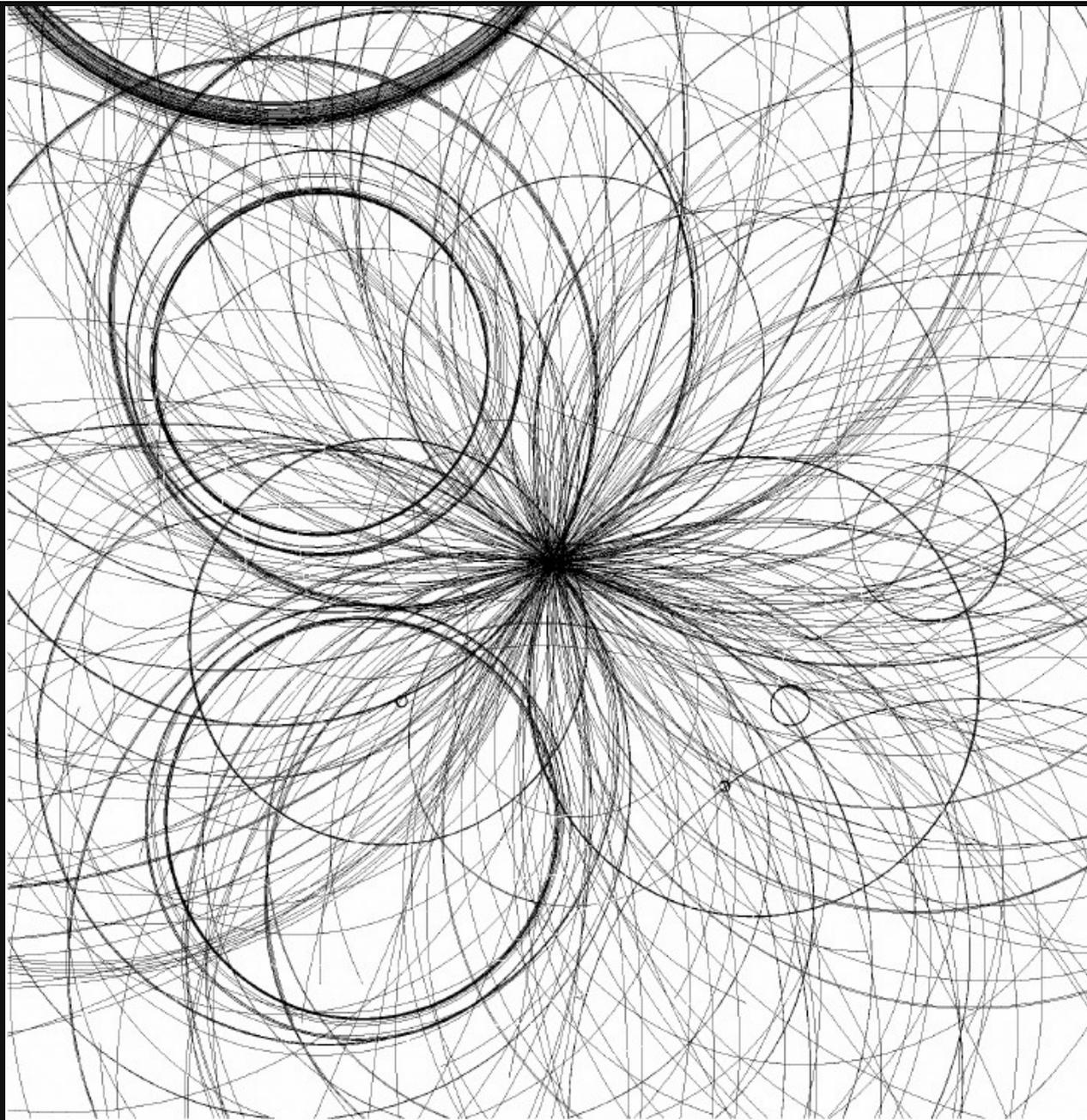
*Ergebnis der Higgs-Suche von CMS, Dez. 2011*

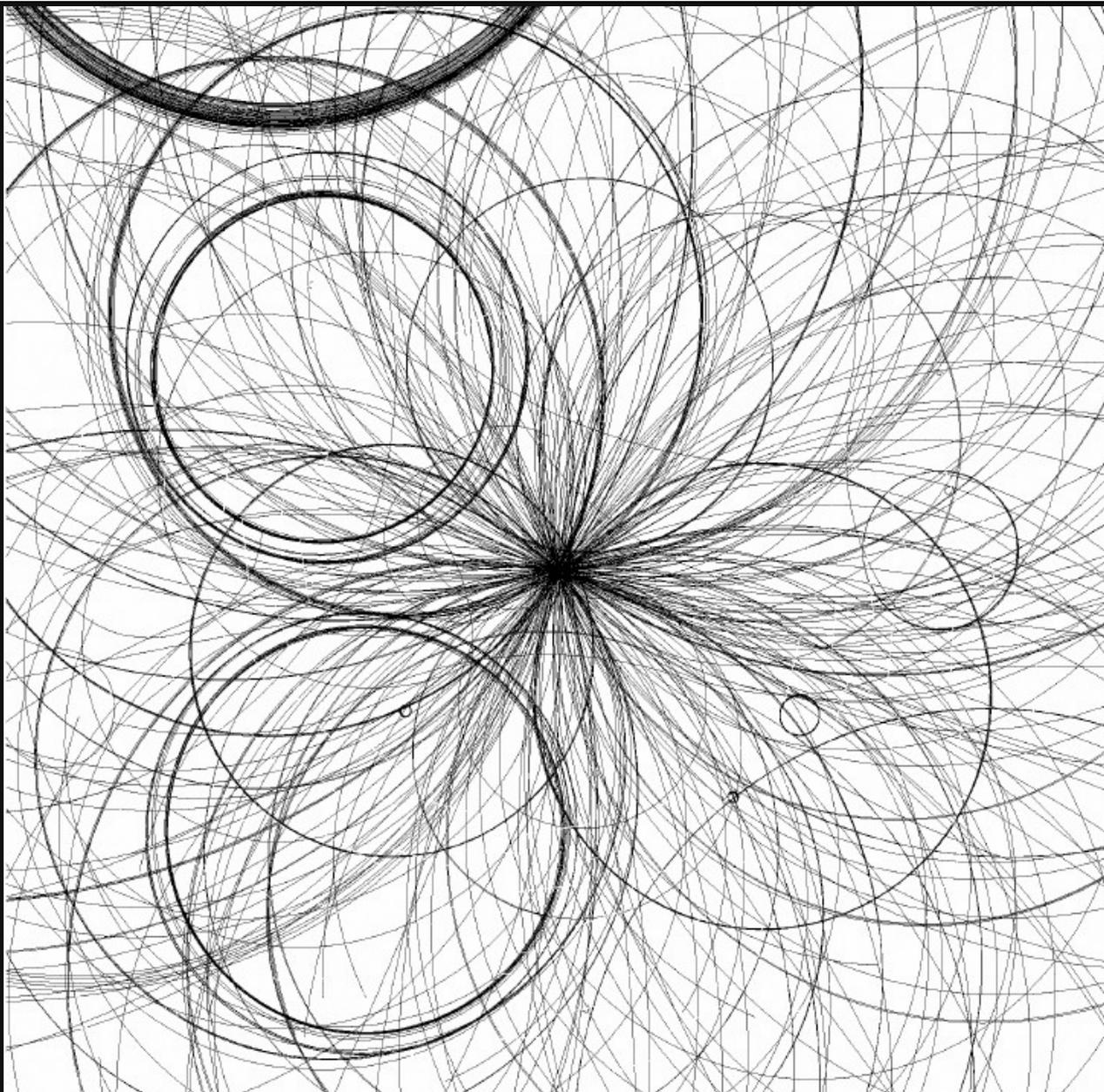
Pause

und Zeit für Fragen ?

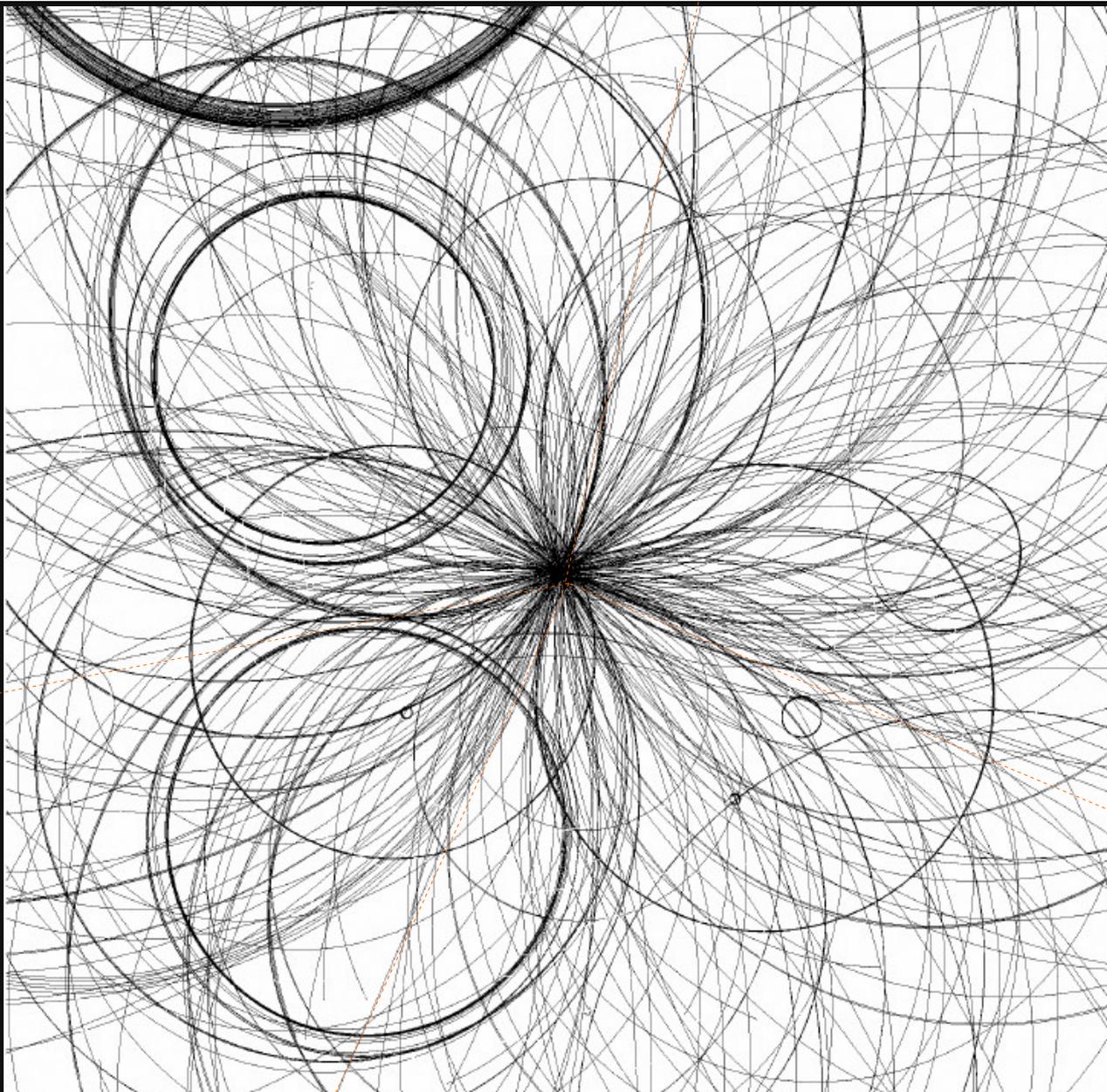
# Suchbild: Wo ist das Higgs-Boson ?

40



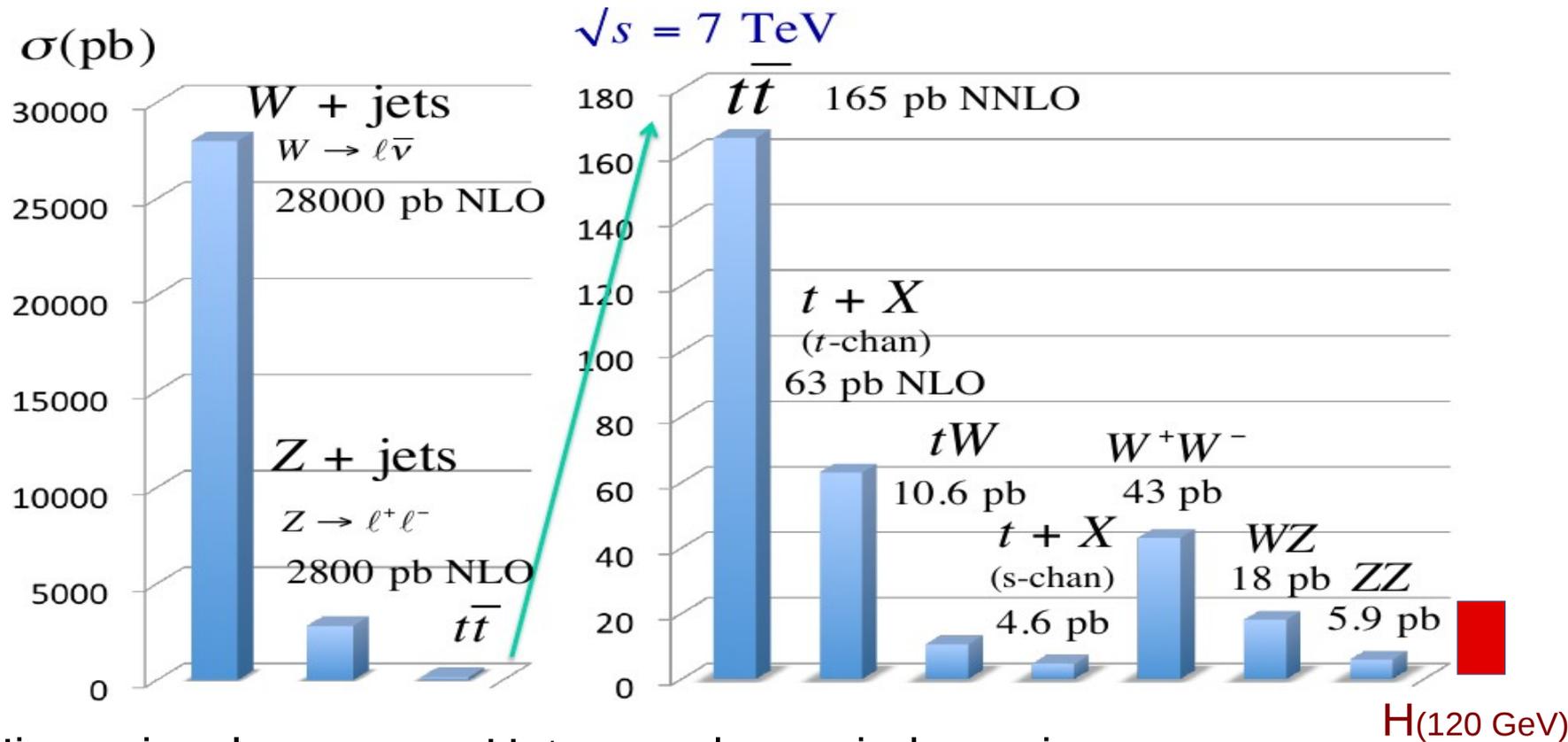


Tipp:  $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 \text{ Myonen}$  (vier gerade Spuren)



Tipp:  $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4$  Myonen (vier gerade Spuren)

Produktionsrate anderer Prozesse ist viel größer\_



Higgs-signal muss vom Untergrund separierbar sein

→ **Untergrund ändert die Wichtigkeit der Prozesse**

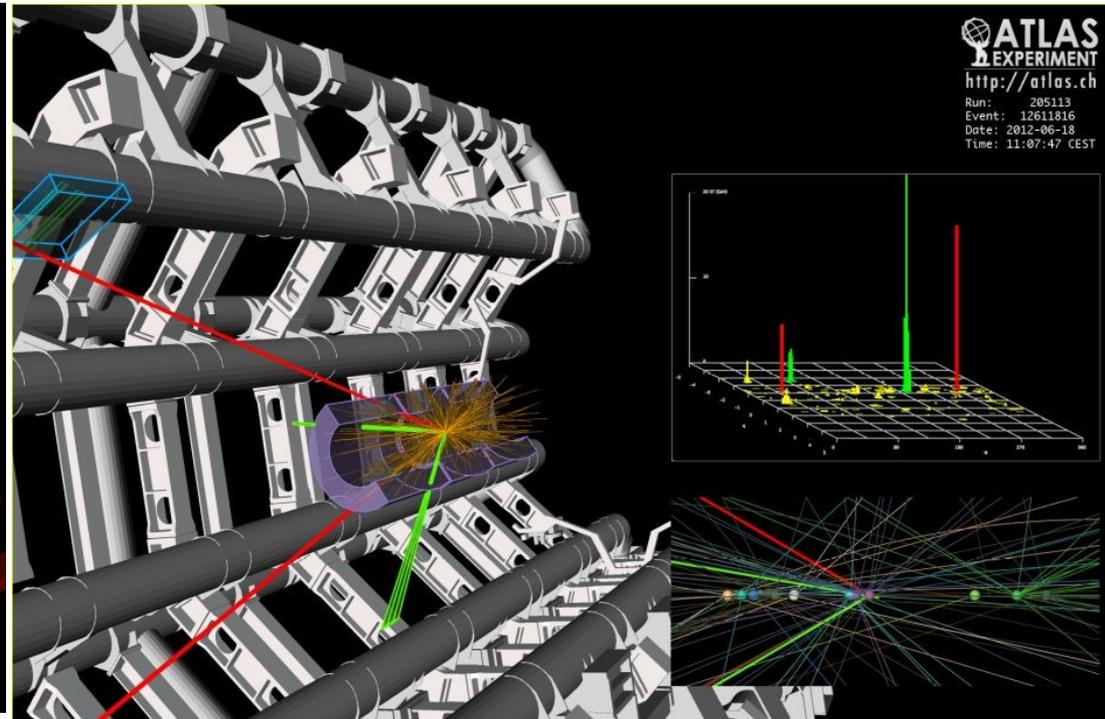
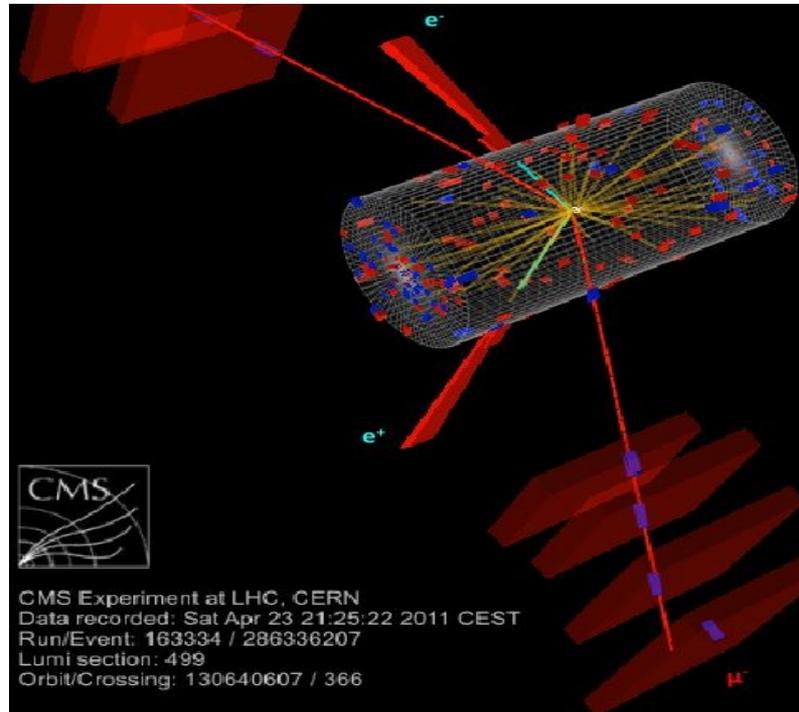
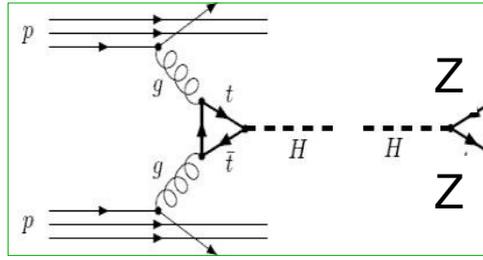
statistische Signifikanz spielt eine zentrale Rolle:

höhere Auflösung des Signals führt zu größerer Signifikanz

→ **Kanäle mit Jets und / oder „fehlender Energie“ ungünstig**



# $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4e, 4\mu, 2e2\mu$



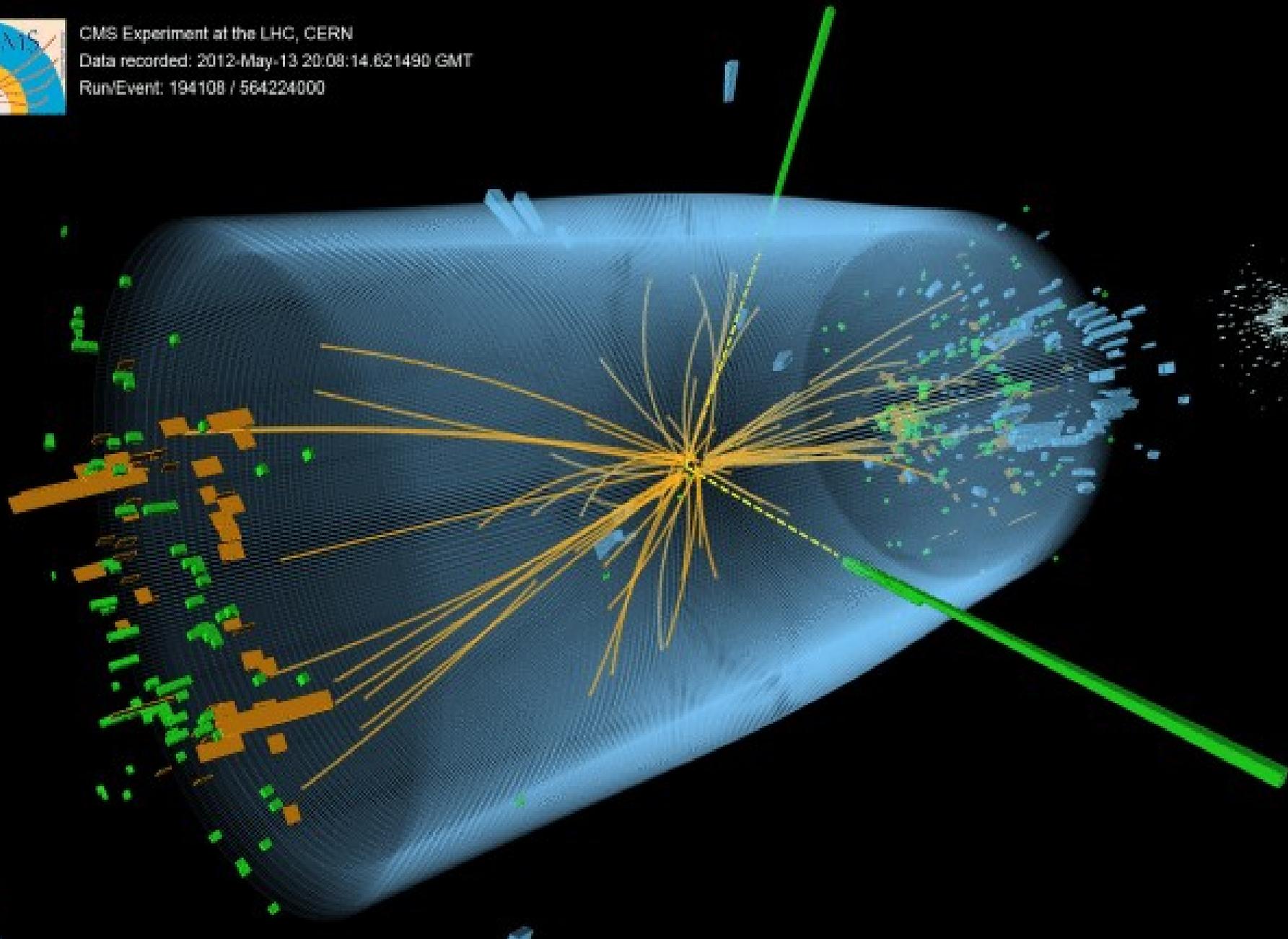
- Untergrund  $t\bar{t}$ ,  $Zb\bar{b}$ ,  $ZZ$
- **günstiges** ( $\sim 1$ ) Signal-zu-Untergrundverhältnis
- **Signal sehr klein bei niedriger H-Masse**



CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2012-May-13 20:08:14.621490 GMT

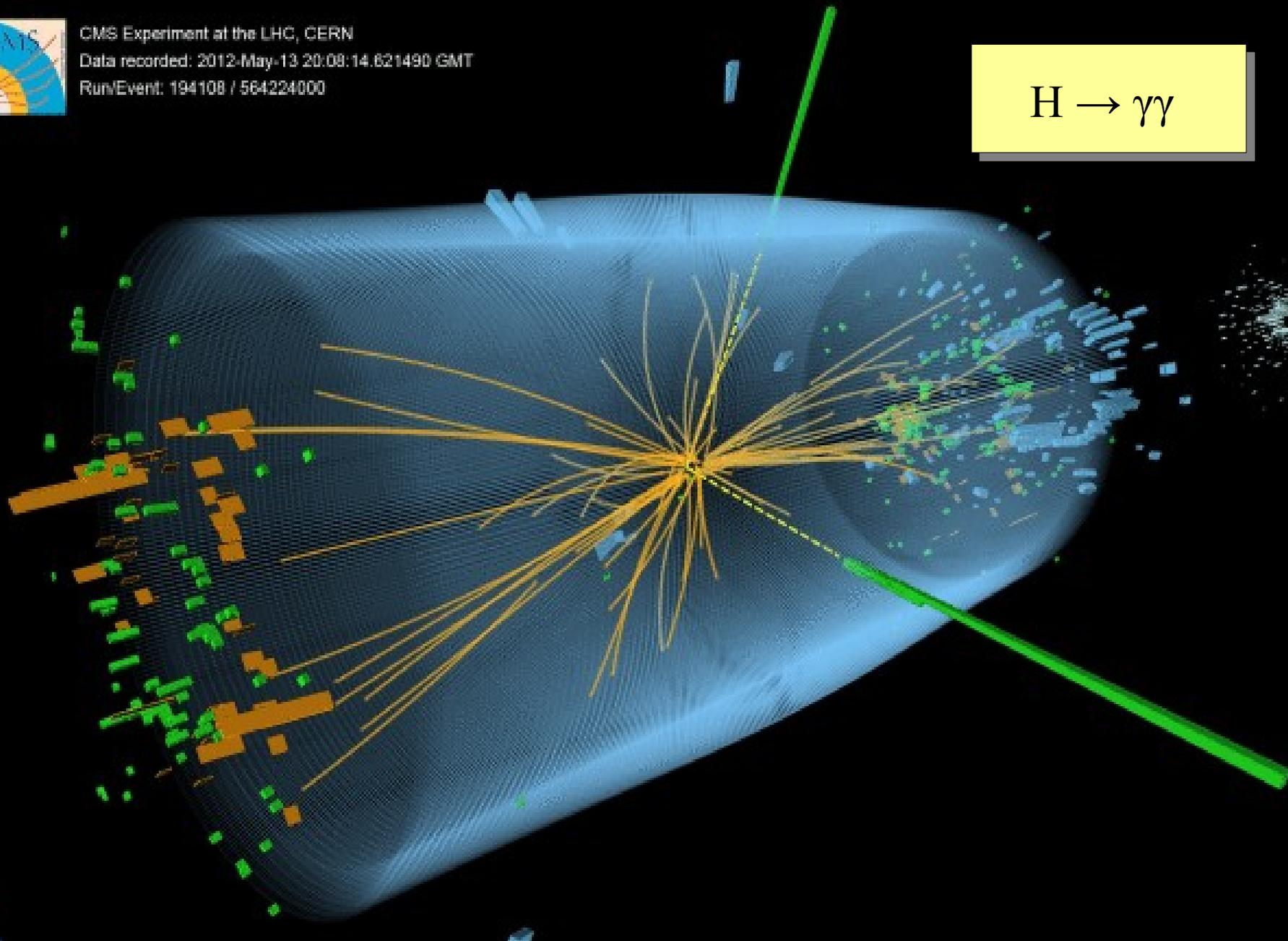
Run/Event: 194108 / 564224000





CMS Experiment at the LHC, CERN  
Data recorded: 2012-May-13 20:08:14.621490 GMT  
Run/Event: 194108 / 564224000

$H \rightarrow \gamma\gamma$



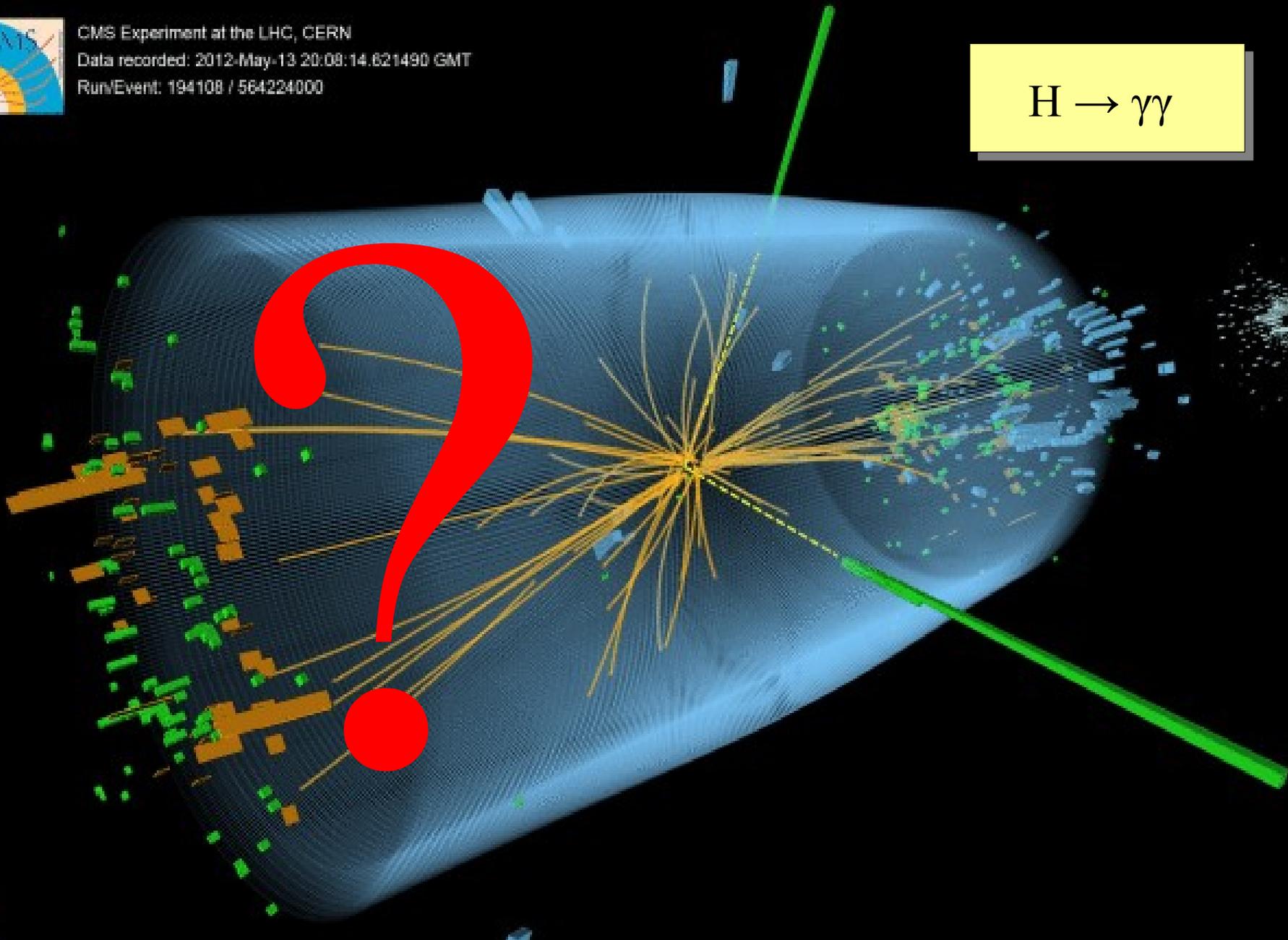


CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2012-May-13 20:09:14.621490 GMT

Run/Event: 194108 / 564224000

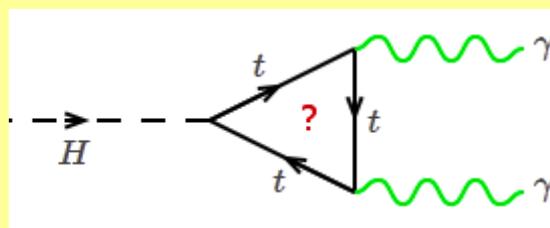
$H \rightarrow \gamma\gamma$



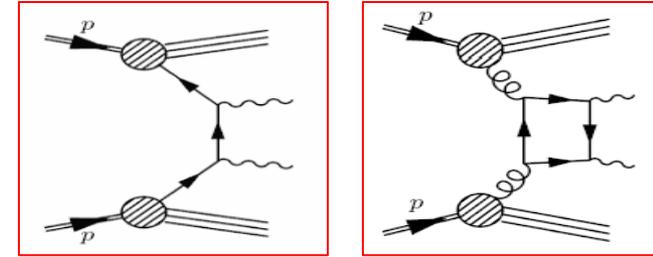
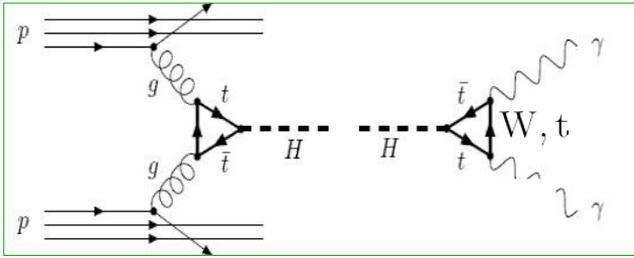


CMS Experiment at the LHC, CERN  
Data recorded: 2012-May-13 20:09:14.621490 GMT  
Run/Event: 194108 / 564224000

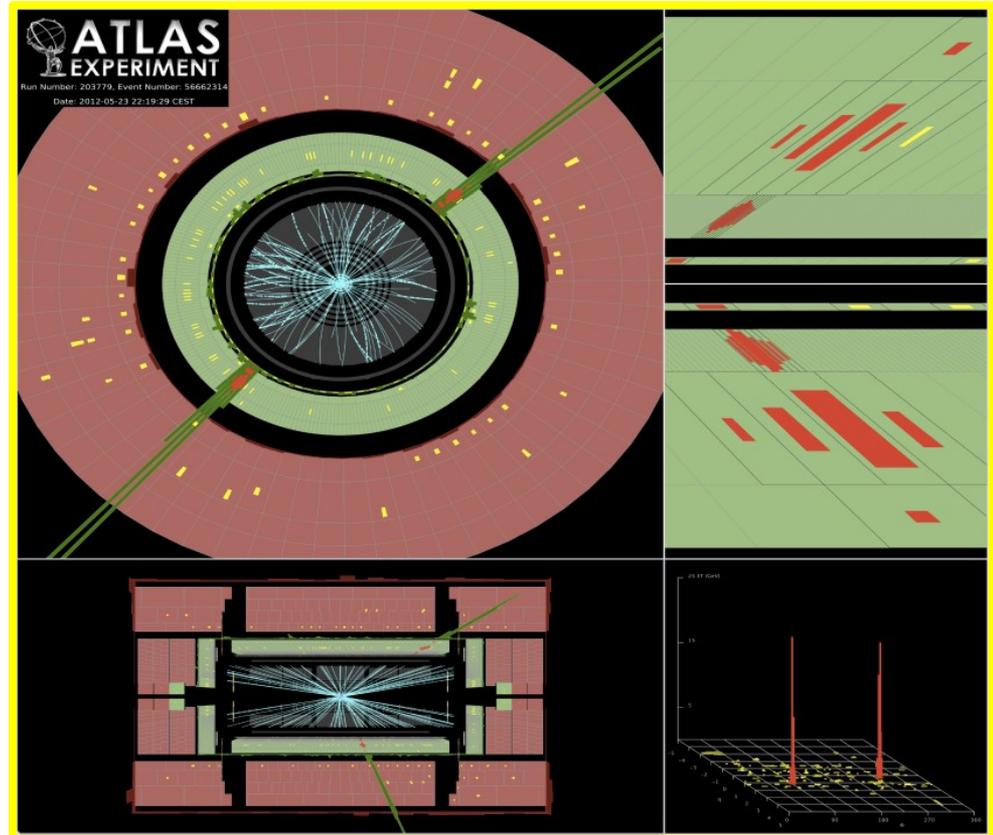
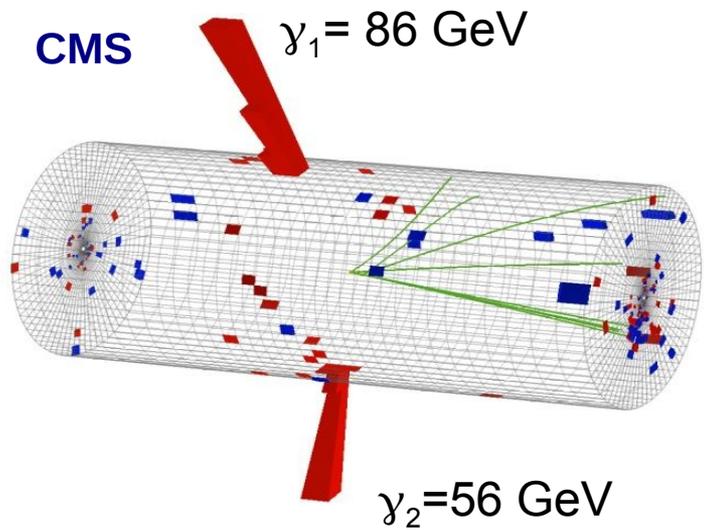
$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

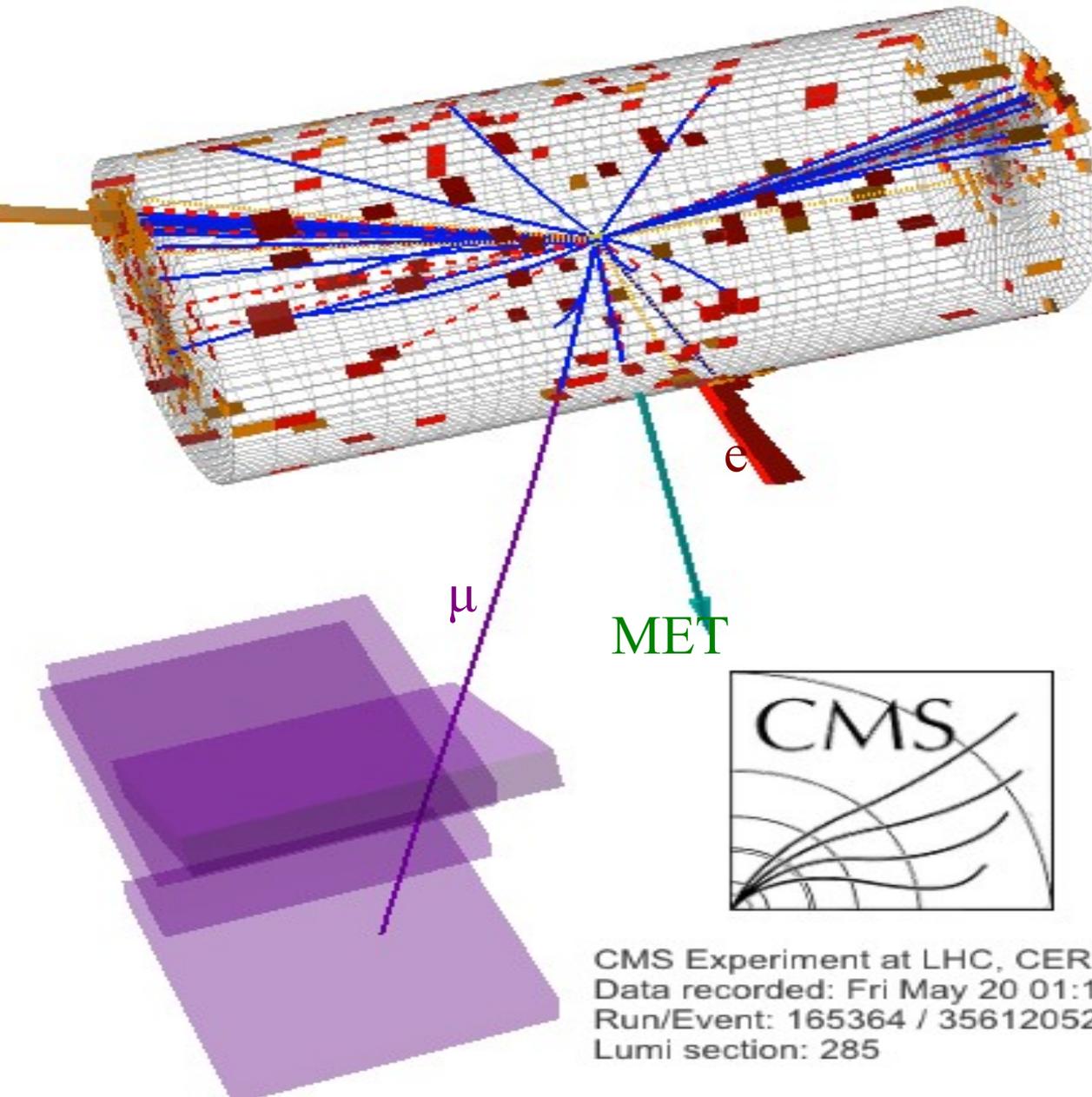


# Higgs-Suche im $\gamma\gamma$ -Kanal, – kleine H-Massen



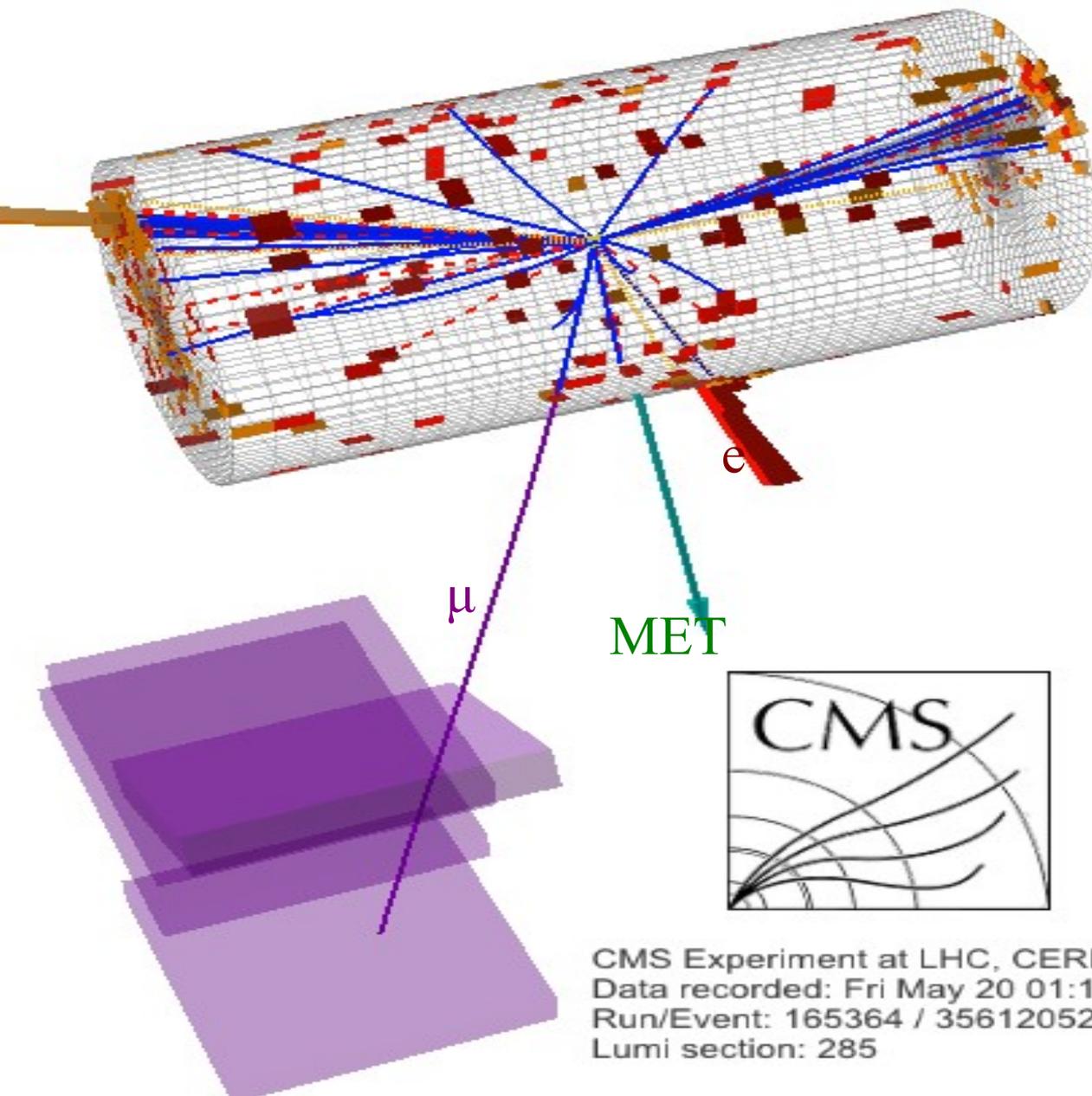
QCD-Untergrund





CMS Experiment at LHC, CERN  
Data recorded: Fri May 20 01:10:36 2011 CEST  
Run/Event: 165364 / 356120525  
Lumi section: 285

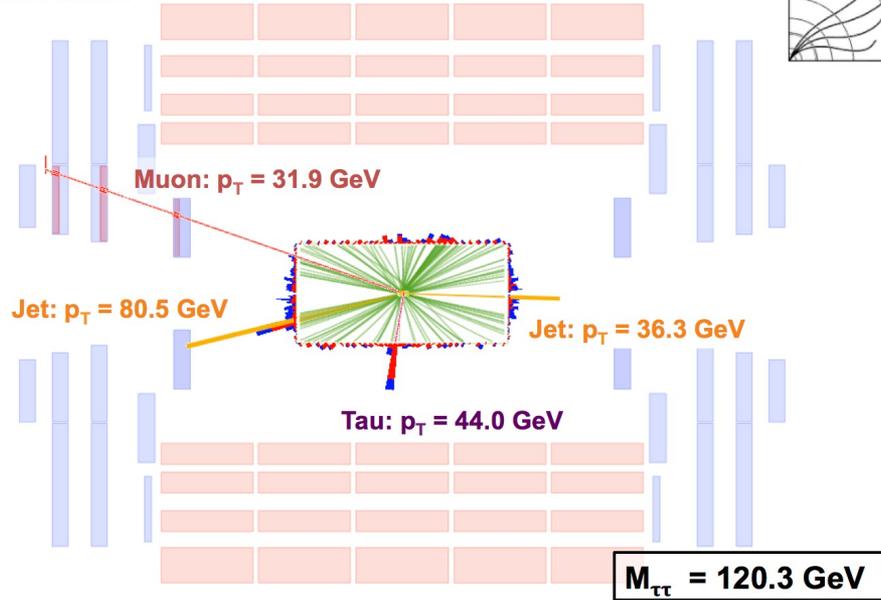
$$H \rightarrow \tau^+ \tau^-$$



CMS Experiment at LHC, CERN  
Data recorded: Fri May 20 01:10:36 2011 CEST  
Run/Event: 165364 / 356120525  
Lumi section: 285

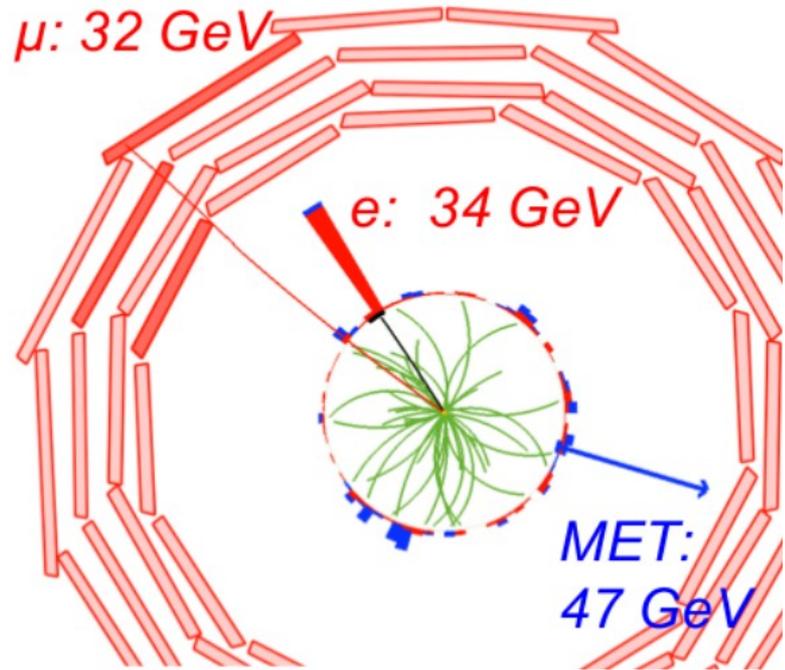
# Schwierigere Kanäle mit Neutrinos

CMS Experiment at LHC, CERN  
Data recorded: Sun Nov 25 00:15:46 2012 CEST  
Run/Event: 207898 / 97057018



$$pp \rightarrow 2 \text{jet} H, H \rightarrow \tau\tau,$$

$$\tau \rightarrow \mu\nu_\tau \mu_\tau, \tau \rightarrow 3 \text{had} + \mu_\tau$$

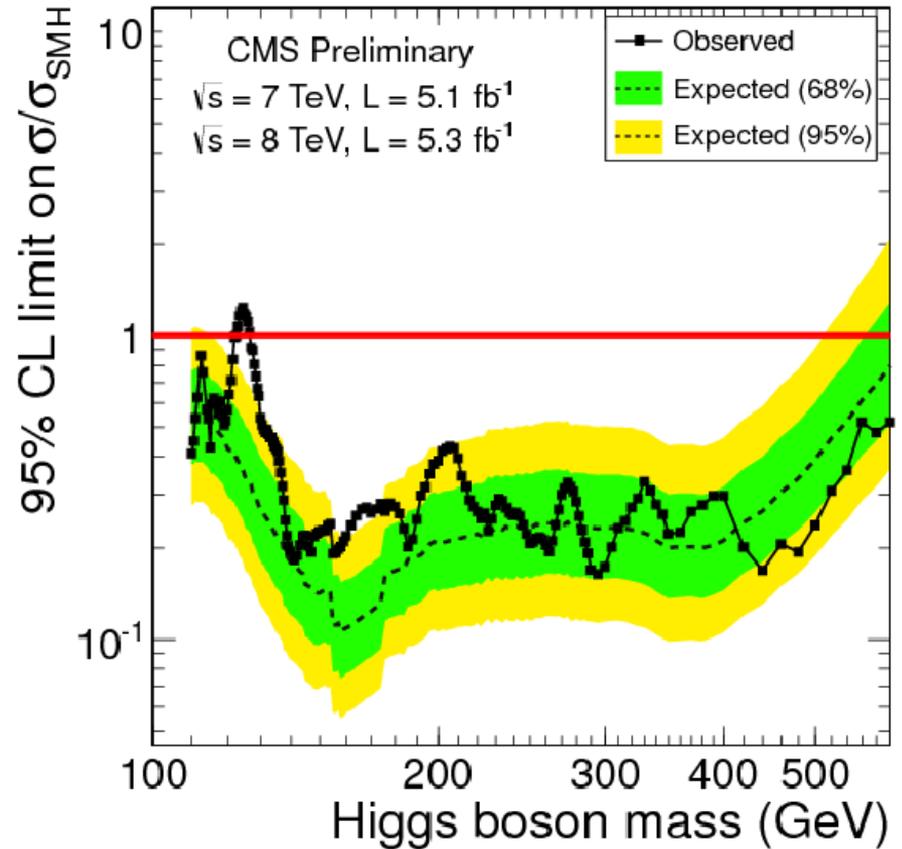
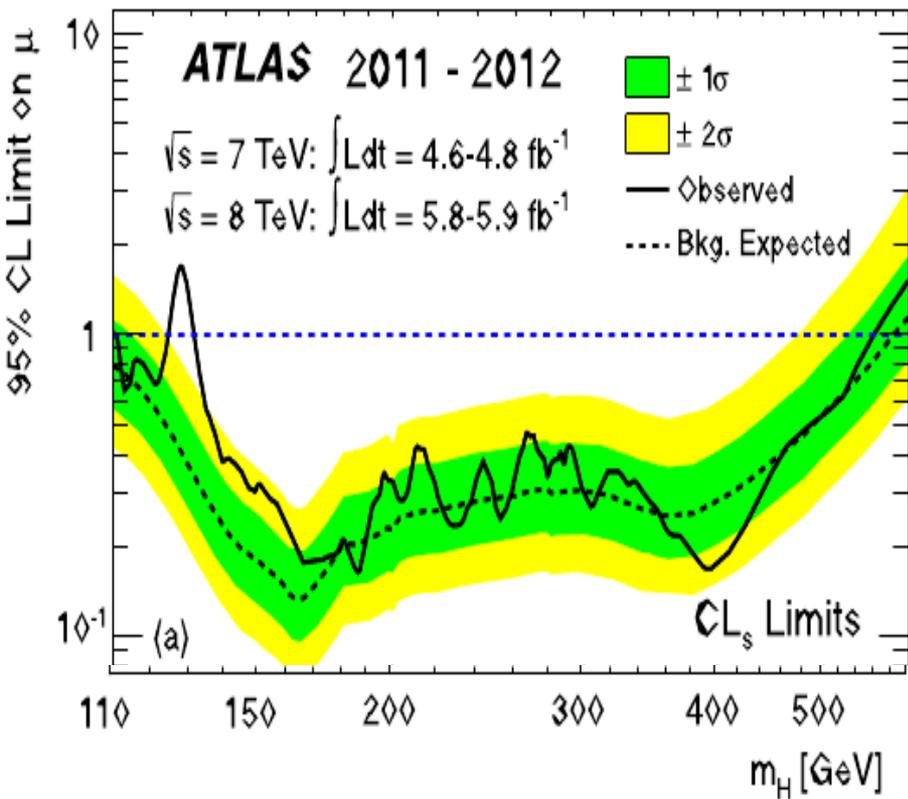


$$pp \rightarrow H, H \rightarrow W^+W^-,$$

$$W \rightarrow e\nu_e, W \rightarrow \mu\nu_\mu$$

Impuls der im Detektor nicht nachweisbaren Neutrinos teilweise aus „fehlender Energie“, d.h. der Summe aller Energiedepositionen im Detektor berechenbar

→ geringe Massenauflösung für das Higgs-Boson



**Ausschlussgrenzen (95% CL)**

**131–523 GeV/c<sup>2</sup>**

**128-600 GeV/c<sup>2</sup>**

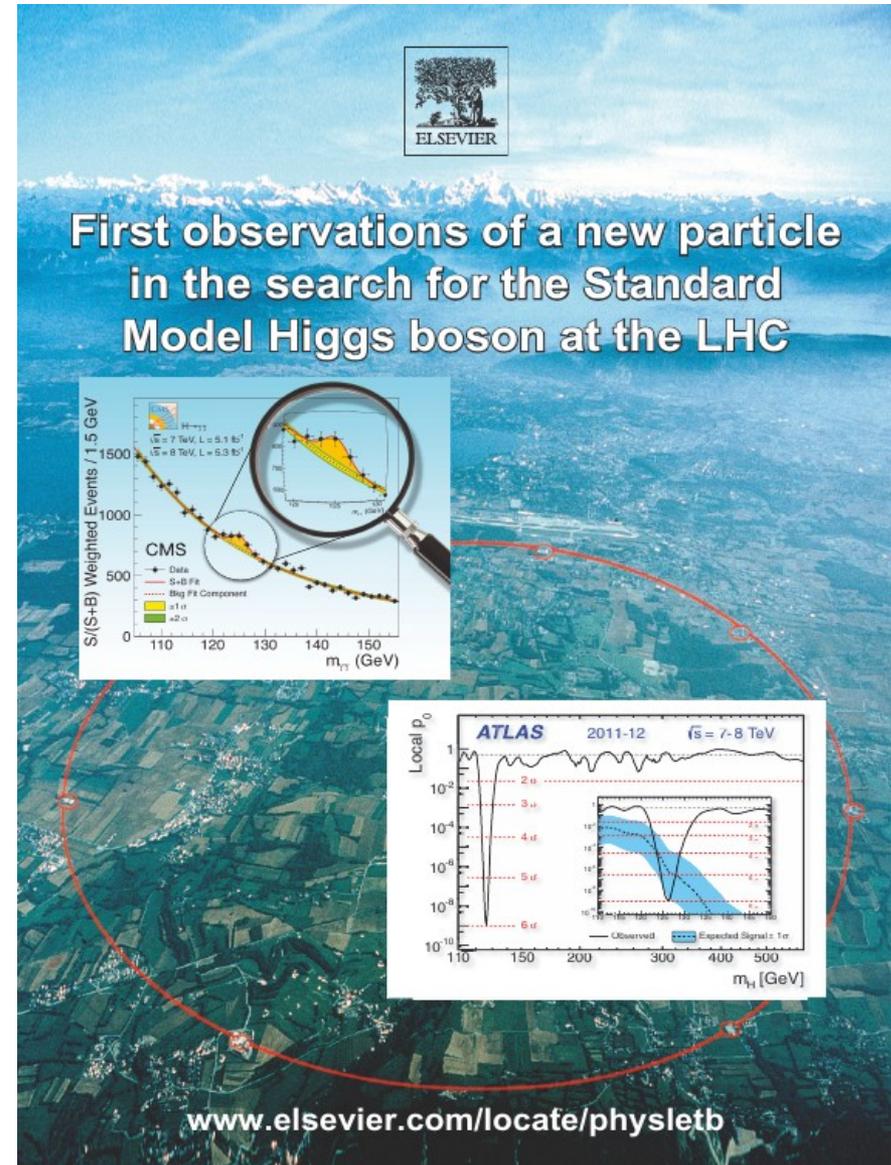
**!!! Kein Ausschluss bei  $m_H \sim 125 \text{ GeV}/c^2$  !!!**



Veröffentlichung der Entdeckung eines Higgs-artigen Teilchens im Sommer 2012, ATLAS & CMS

Signifikanter Überschuss in ATLAS und CMS in  $H \rightarrow ZZ$  und  $H \rightarrow \gamma\gamma$  (die sensitivsten Kanäle)

Noch keine signifikante Beobachtung in anderen Zerfallskanälen möglich





SCHOOL of PHYSICS and ASTRONOMY

The University of Edinburgh  
James Clerk Maxwell Building  
The King's Buildings  
Mayfield Road  
Edinburgh EH9 3JZ

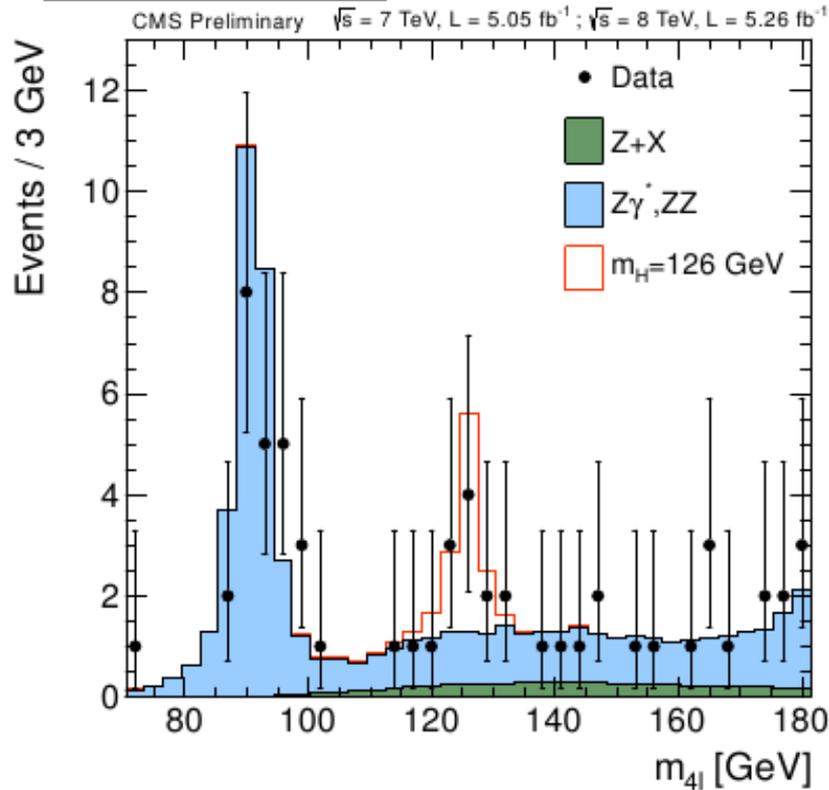
Telephone +44 (0)131 650 1000  
or direct dial +44 (0)131 650 5249  
Fax +44 (0)131 650 5902  
Email [info@ph.ed.ac.uk](mailto:info@ph.ed.ac.uk)  
[www.ph.ed.ac.uk](http://www.ph.ed.ac.uk)

Congratulations to both  
Atlas and CMS Collaborations  
and to the builders of the LHC  
on a magnificent achievement!

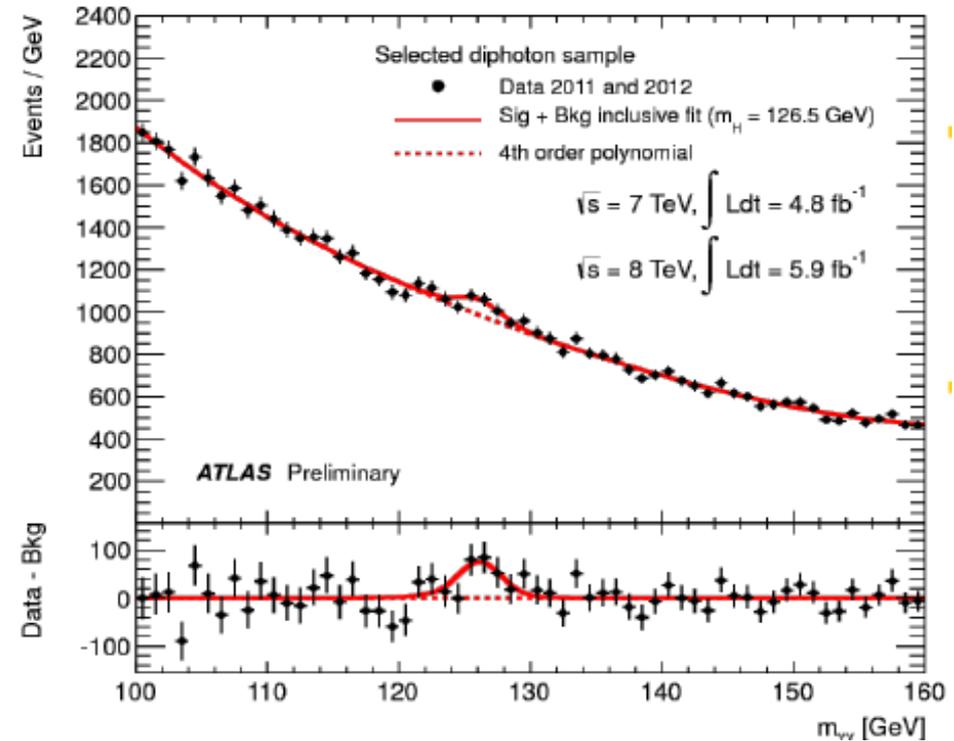
Peter Higgs

30 August 2012

$H \rightarrow ZZ$



$H \rightarrow \gamma\gamma$



**Ereignisüberschuss in ZZ und  $\gamma\gamma$  bei ATLAS und CMS**

**Nach mehr Datennahme und noch mehr Analysearbeit ...**

*Juli 2012*

*März 2013*

*Sommer 2013*

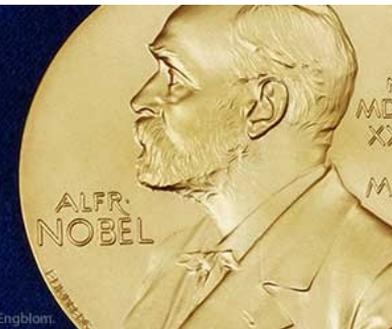
ein neues Boson → ein Higgs-artiges Boson → ein Higgs Boson

**war auch das Nobelpreiskomitee überzeugt:**

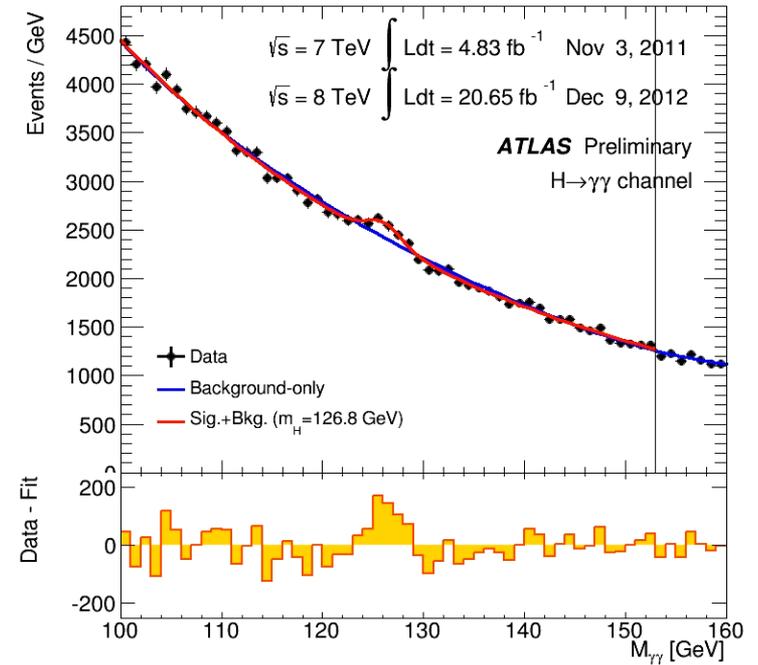
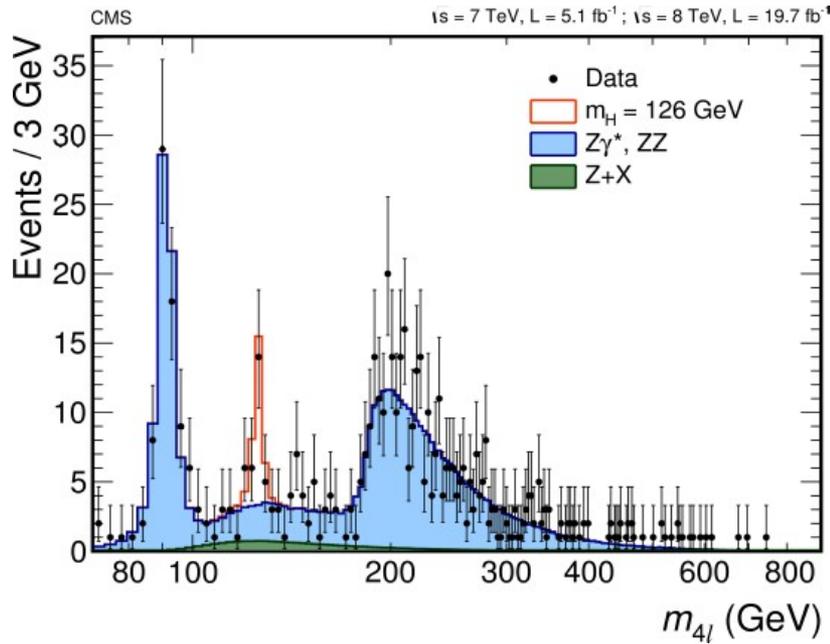


2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

**François Englert**  
**Peter W. Higgs**



© The Nobel Foundation, Photo: Lovisa Engblom.



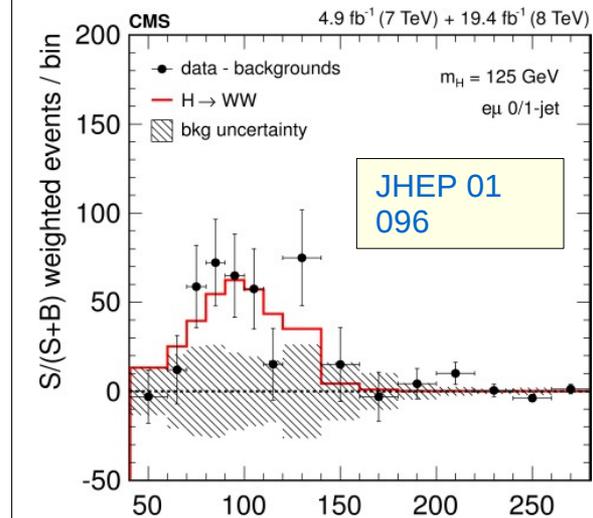
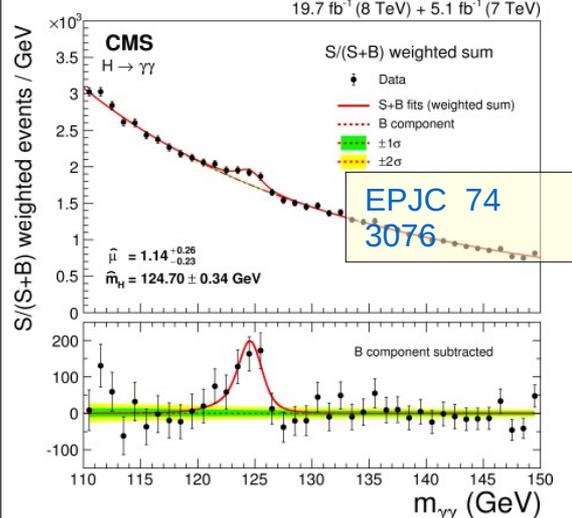
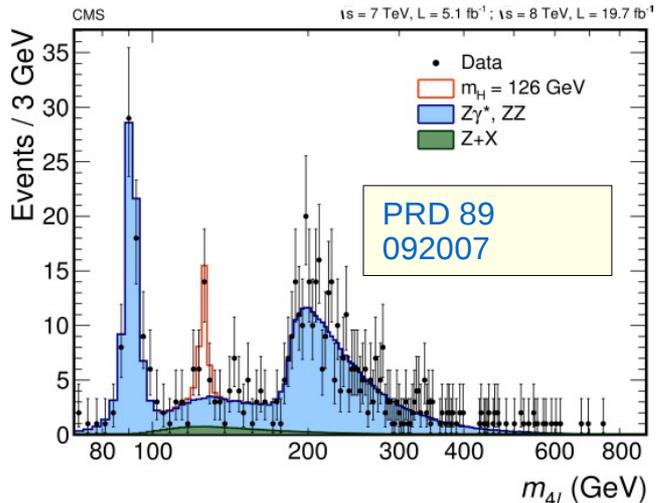
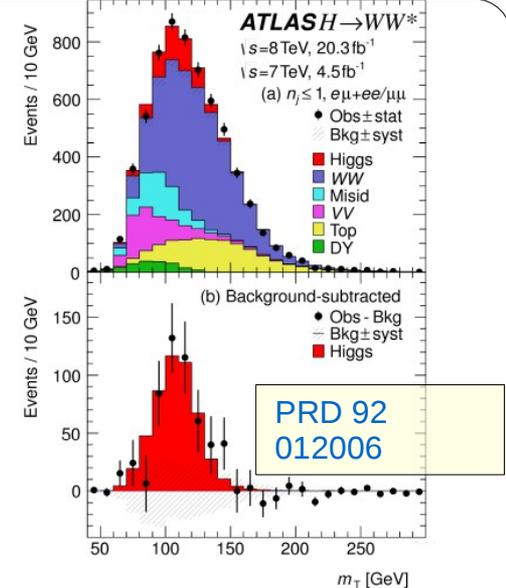
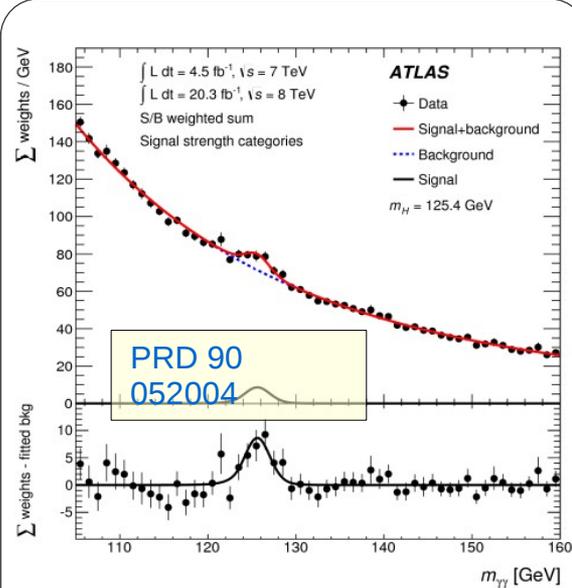
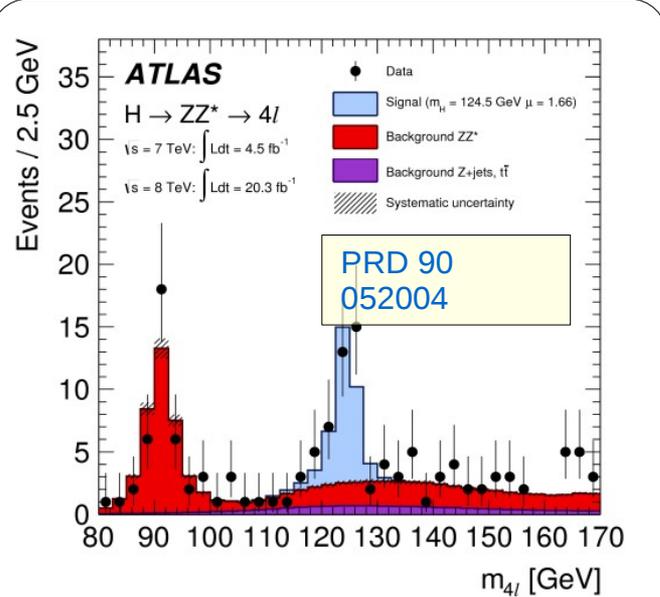
**Video:**  
**CMS-HZZ4l\_animated.mp4**



**Video:**  
**Hgg-FixedScale.mp4**

# Stand 2015: $H \rightarrow$ Bosonen

The original “discovery channels” - updated to full Run1 luminosity, final and published



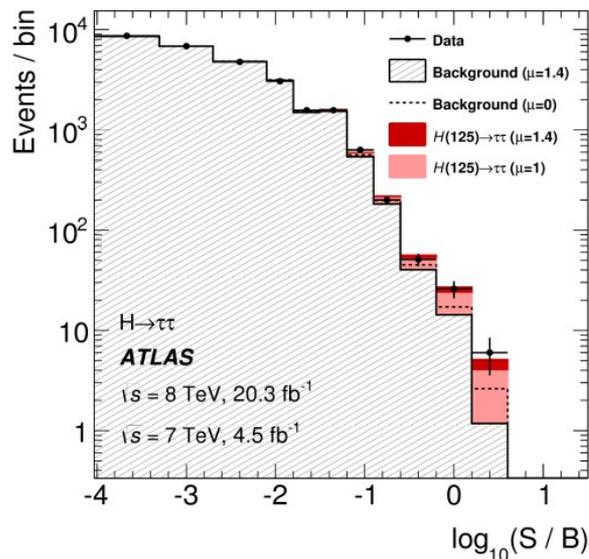
$H \rightarrow Z^{(*)}Z \rightarrow 4l$

$H \rightarrow \gamma\gamma$

$H \rightarrow W^{(*)}W \rightarrow l\nu l\nu$

# Stand 2015: H → Fermionen

## H → ττ

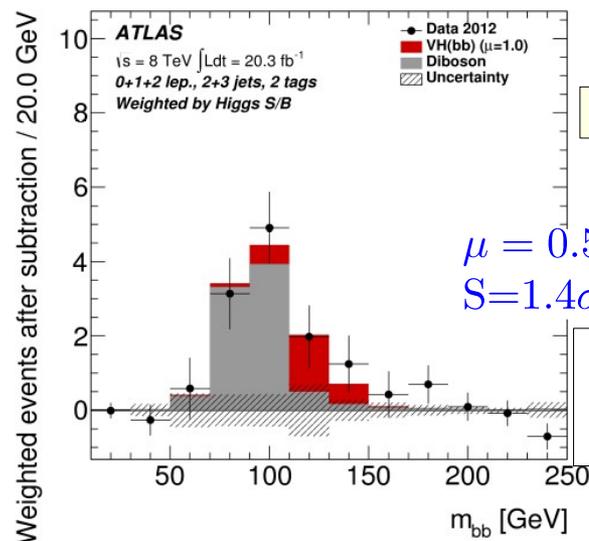


JHEP 04 117

$$\mu = 1.43^{+0.43}_{-0.37}$$

$$S = 4.5\sigma (3.4\sigma)$$

## VH/VBF, H → bb

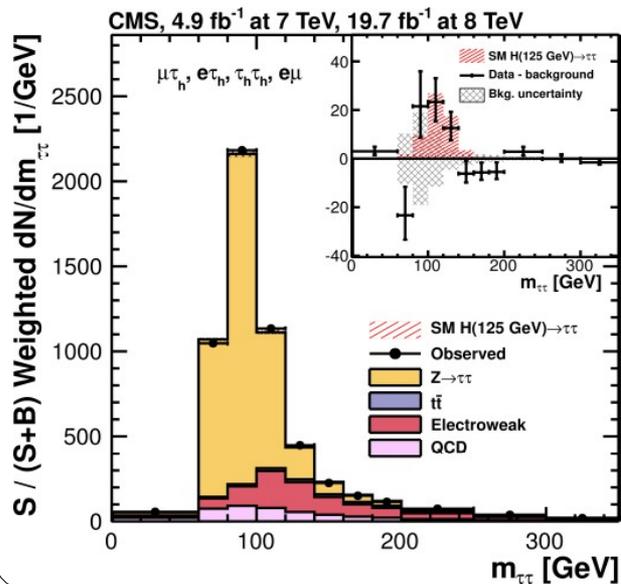


JHEP 01 069

$$\mu = 0.52 \pm .32 \pm .24$$

$$S = 1.4\sigma (2.6\sigma)$$

there is a deficit  
in 2011 data  
(not shown here)

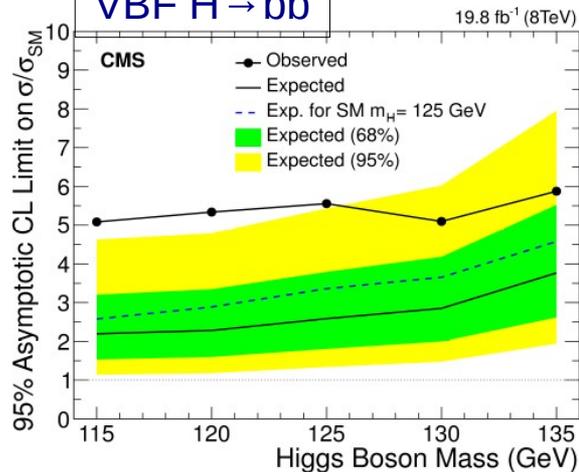


JHEP 05 104

$$\mu = 0.78 \pm .27$$

$$S = 3.2\sigma (3.7\sigma)$$

## VBF H → bb



PRD 92 032008

$$\mu = 2.8^{+1.6}_{-1.4}$$

$$S = 2.2\sigma (0.8\sigma)$$

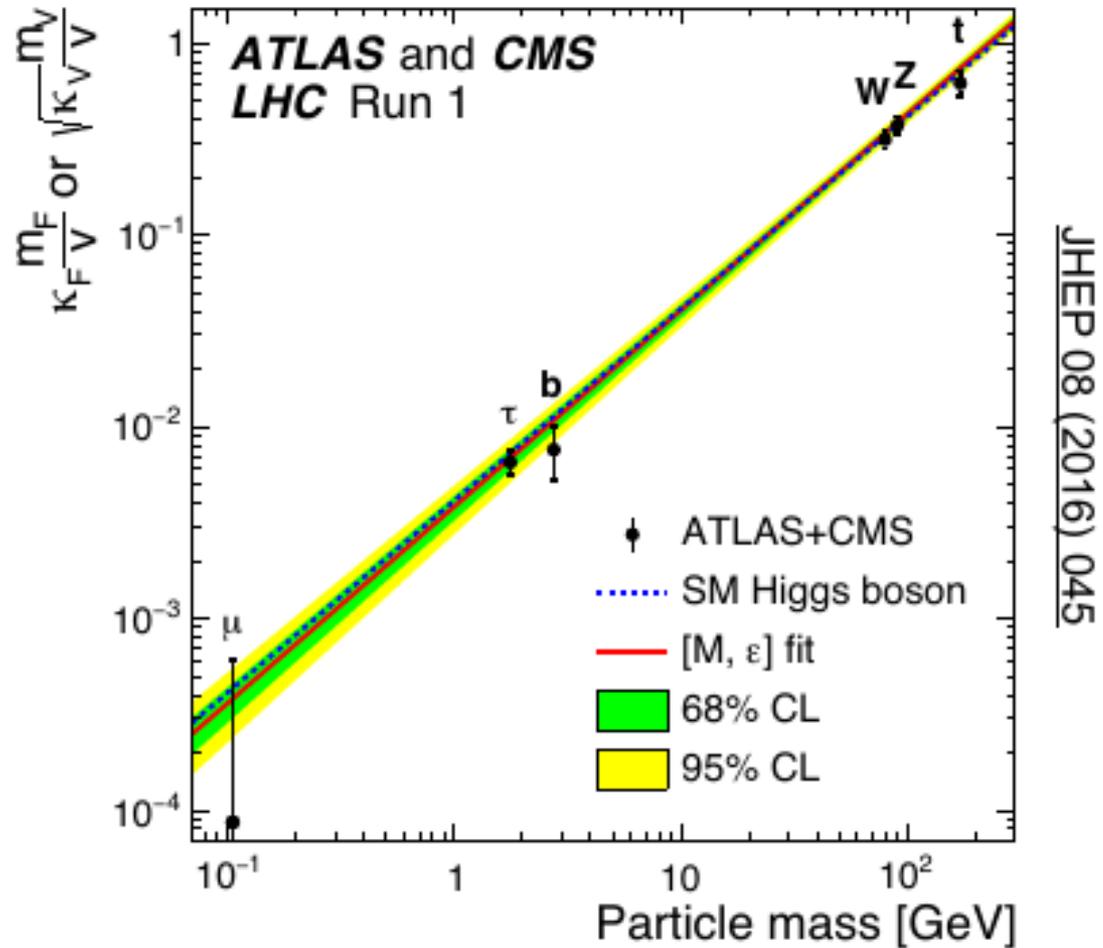
combined with  
VH(bb) from

PRD 89 012003

$$\mu = 1.0 \pm .4$$

$$S = 2.6\sigma (2.7\sigma)$$

Doppelt so viele pp-Kollisionen wie im Sommer '12 , **alle Daten analysiert**

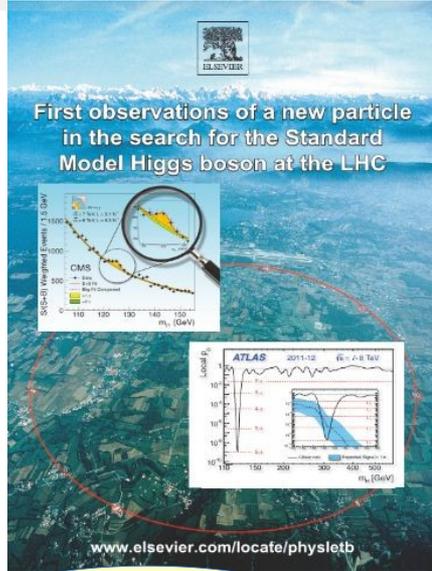


**Die Kopplungen des neuen Bosons wachsen mit der Teilchenmasse  
– wie für das Higgs-Boson erwartet!**

# Zusammenfassung: Higgs-Jagd @ LHC

Sommer '12 (  $\sim 10 \text{ fb}^{-1}$  )

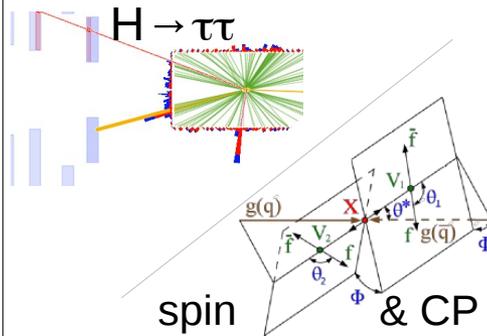
Bekanntgabe eines „neuen Teilchens“



*Neues Teilchen !*

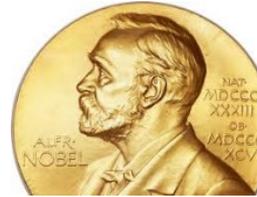
*Higgs-artig?*

in 2013 (  $\sim 20 \text{ fb}^{-1}$  )



*ein Higgs !*

Dez. 2013



Nobelpreis

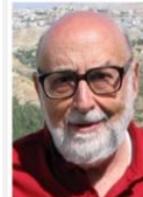


Photo: Pricoleit via Wikimedia Commons  
François Englert

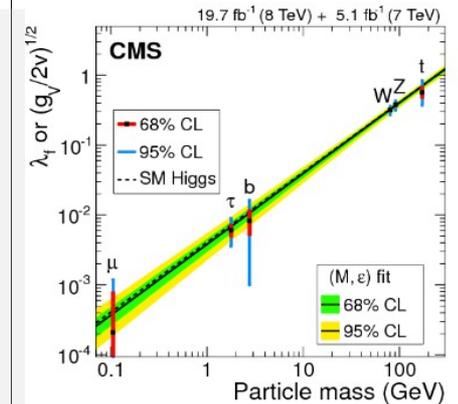


Photo: G-M Greuel via Wikimedia Commons  
Peter W. Higgs

(& EPS Prize + viele andere)

2014/15

verfeinerte Analysen & finale Veröffentlichungen

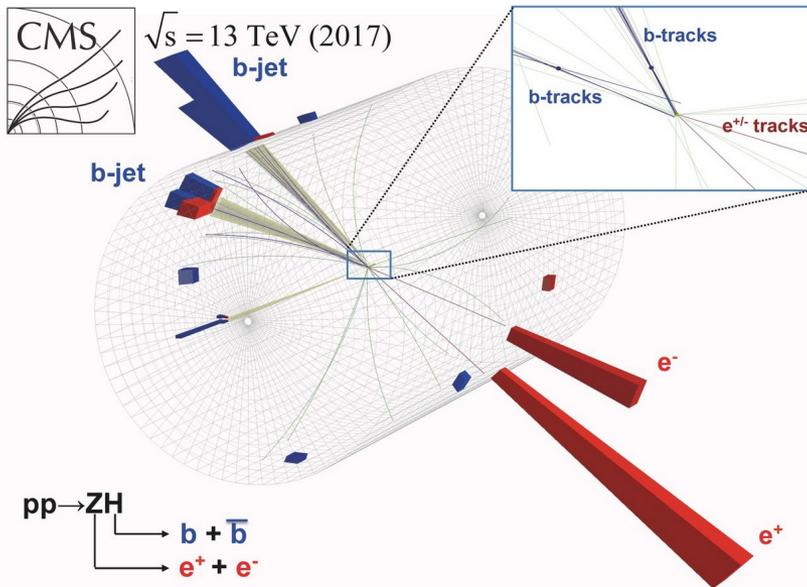
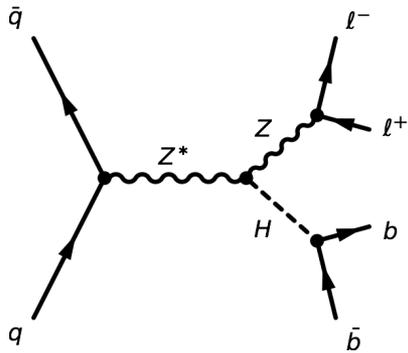


*DAS SM-Higgs ???*

**LHC Run 1:** pp-Kollisionen bei  $E_{\text{CM}} = 7$  und 8 TeV

- × Spitzenluminosität:  $7 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- × integrierte Luminosität:  $\sim 5 \text{ fb}^{-1}$  (2011@7 TeV)  $\sim (5+15) \text{ fb}^{-1}$  (2012@8 TeV)

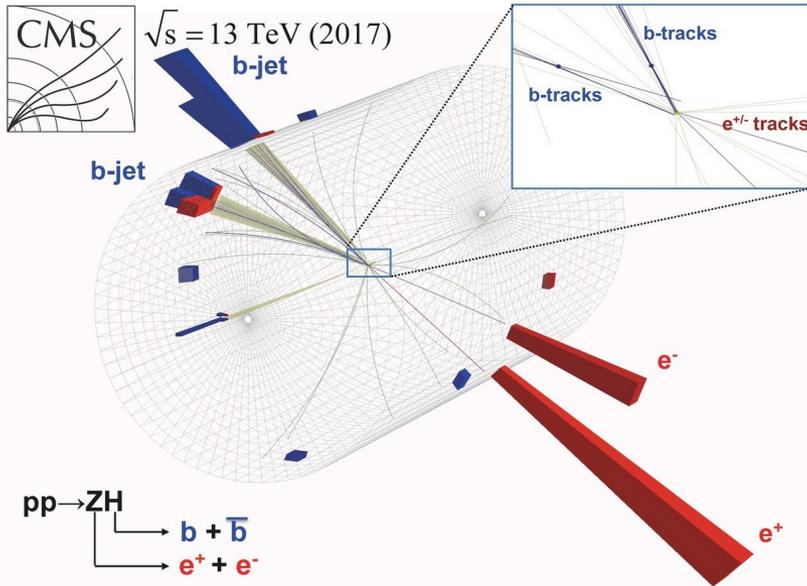
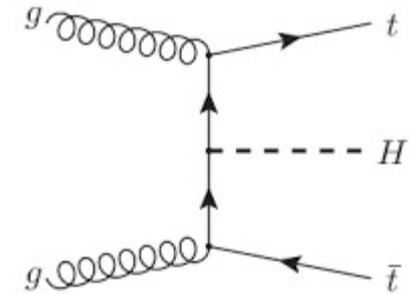
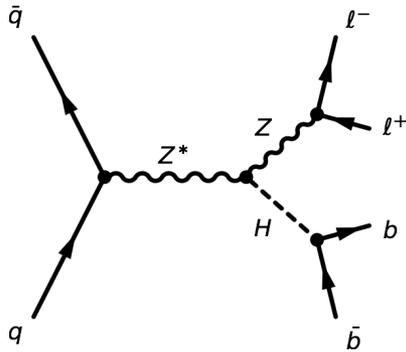
# aktuelle Highlights



Mit den Daten der Jahre 2015 – 2018 gelang im Jahr 2019

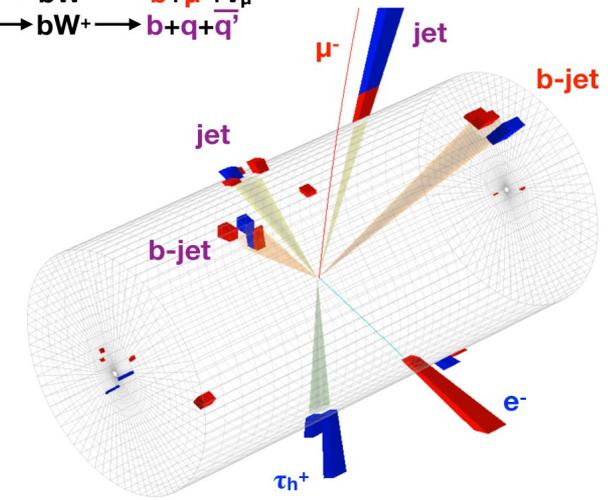
- der Nachweise der **Kopplung des Higgs-Bosons an b-Quarks**

# aktuelle Highlights



$pp \rightarrow t\bar{t}H$

$\tau^-\tau^+ \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\tau + \tau^+ + \bar{\nu}_\tau$   
 $\bar{b}W^- \rightarrow \bar{b} + \mu^- + \bar{\nu}_\mu$   
 $bW^+ \rightarrow b + q + \bar{q}'$



Mit den Daten der Jahre 2015 – 2018 gelang im Jahr 2019

- der Nachweise der **Kopplung des Higgs-Bosons an b-Quarks**
- der Nachweise für **assoziierte Produktion des Higgs-Bosons mit Top-Quarks**

# Ende Vorlesung 26

## Die Entdeckung eines Higgs-Bosons @ LHC ...

- ist das Ergebnis einer Unmenge an Arbeit von Ingenieure, theoretischen Physikern und Experimentalphysikern
- ist ein bemerkenswerter Triumph eines theoretischen Konzepts
- hilft das Konzept von „Masse“ im allgemeinen besser zu verstehen
- markiert den Beginn einer neue Ära in der Teilchenphysik



# Ende Vorlesung 26

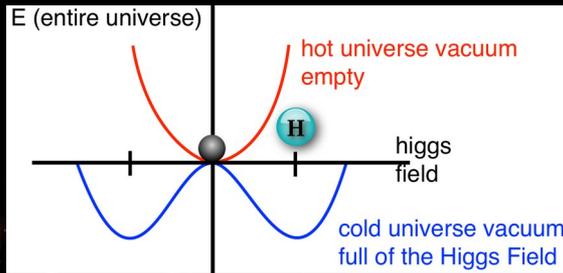
## Die Entdeckung eines Higgs-Bosons @ LHC ...

- ist das Ergebnis einer Unmenge an Arbeit von Ingenieure, theoretischen Physikern und Experimentalphysikern
- ist ein bemerkenswerter Triumph eines theoretischen Konzepts
- hilft das Konzept von „Masse“ im allgemeinen besser zu verstehen
- markiert den Beginn einer neue Ära in der Teilchenphysik

- **H(125)** ist (bisher) das einzige seiner Art
- Tests der Higgs-Kopplungen an SM-Teilchen zeigen (bisher) keine signifikanten Abweichungen
- **benötigen Präzisionsmessungen: der LHC und die Analysen laufen weiter!**
- Suche nach weiteren Higgs-artigen Teilchen wird fortgesetzt



# Ende Vorlesung 26



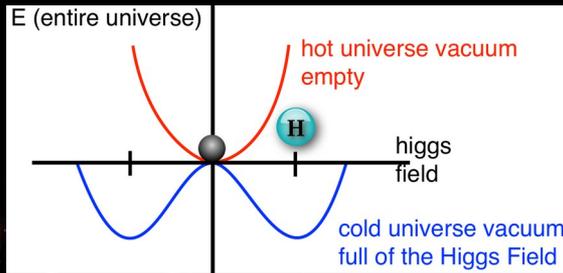
## Die Entdeckung eines Higgs-Bosons @ LHC ...

- ist das Ergebnis einer Unmenge an Arbeit von Ingenieure, theoretischen Physikern und Experimentalphysikern
- ist ein bemerkenswerter Triumph eines theoretischen Konzepts
- hilft das Konzept von „Masse“ im allgemeinen besser zu verstehen
- markiert den Beginn einer neue Ära in der Teilchenphysik

- **H(125)** ist (bisher) das einzige seiner Art
- Tests der Higgs-Kopplungen an SM-Teilchen zeigen (bisher) keine signifikanten Abweichungen
- **benötigen Präzisionsmessungen: der LHC und die Analysen laufen weiter!**
- Suche nach weiteren Higgs-artigen Teilchen wird fortgesetzt



# Ende Vorlesung 26



## Die Entdeckung eines Higgs-Bosons @ LHC ...

- ist das Ergebnis einer Unmenge an Arbeit von Ingenieure, theoretischen Physikern und Experimentalphysikern
- ist ein bemerkenswerter Triumph eines theoretischen Konzepts
- hilft das Konzept von „Masse“ im allgemeinen besser zu verstehen
- markiert den Beginn einer neue Ära in der Teilchenphysik

- **H(125)** ist (bisher) das einzige seiner Art
- Tests der Higgs-Kopplungen an SM-Teilchen zeigen (bisher) keine signifikanten Abweichungen
- **benötigen Präzisionsmessungen: der LHC und die Analysen laufen weiter!**
- Suche nach weiteren Higgs-artigen Teilchen wird fortgesetzt

**Was liegt jenseits des Sandardmodells ?**

