

Das Higgs-Teilchen

Unsichtbares sichtbar und
Unmögliches möglich machen



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

Ein Meilenstein in der Physik?

Berlin, 18 März 2014
Felicitas Pauss / ETH Zurich

2013 Nobelpreis in Physik

an François Englert & Peter Higgs

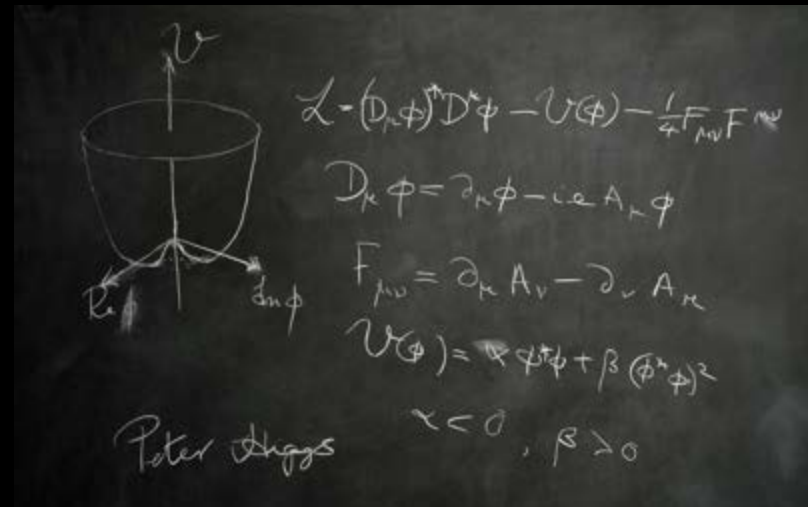


„Für die theoretische Entdeckung eines Mechanismus, der zu unserem Verständnis des Ursprungs der Masse subatomarer Teilchen beiträgt, und der kürzlich durch die Entdeckung des vorhergesagten Elementarteilchens durch die ATLAS und CMS Experimente am Large Hadron Collider des CERN bestätigt wurde“



François Englert

Peter Higgs





4. Juli 2012: CERN Experimente weisen ein Teilchen nach - im Einklang mit dem lange gesuchten Higgs-Boson "



de Higgs
été comme

Frankfurter Allgemeine Wissen

HOME MULTIMEDIA THEMEN BLOGS ARCHIV MEIN FAZ
Politik Wirtschaft Finanzen Feuilleton Gesellschaft Sport Lebensstil Technik & Motor

Home > Wissen > Physik & Chemie > Erfolg bei Suche nach Higgs-Teilchen: „Eine wissenschaftliche Sensation“

04.07.2012 · Wissenschaftler im Teilchenforschungszentrum Cern in Genf glauben, das jahrzehntlang gesuchte Higgs-Teilchen gefunden zu haben. Montaglang war im weltgrößten Teilchenbeschleuniger danach gefahndet worden – jetzt liegen die bahnbrechenden Ergebnisse vor.

VON MAHRFRED LINDINGER

Artikel Bilder (5) Lesermeinungen (113)

Selten waren die Erwartungen am europäischen Forschungszentrum Cern bei Genf, dem Mekka der Teilchenphysik, so groß wie an diesem Mittwoch morgen. Alle drängten in den großen Hörsaal und wollten dem Seminar beiwohnen, zu dem der Generaldirektor des Cern, Rolf-Dieter Heuer, eingeladen hatte. Im Hörsaal saßen viele Veteranen des Cern, darunter Peter Higgs, der eigens aus Edinburgh angereist war. Der



Die Grafik einer Proton-Proton-Kollision im Experiment stellt die zu erwartenden charakteristischen zweier hochenergetischer Photonen beim Zerfall des Higgs-Bosons, des sogenannten Gottesteilchens, dar.

Deutsche Physikalische Gesellschaft Φ DPG

PHYSIK konkret

Nr. 12
Juli 2012

Das Higgs-Teilchen und der Ursprung der Masse

„Der experimentelle Nachweis des Higgs-Teilchens zeigt, dass die schwierigsten Probleme nur dann gelöst werden können, wenn es eine weltweite Zusammenarbeit ohne politische Zwänge und Vorgaben gibt.“

Johanna Stachel, Präsidentin der Deutschen Physikalischen Gesellschaft

Warum ist das Higgs-Teilchen so wichtig?
In den letzten Jahrzehnten hat die Physik ein überaus erfolgreiches Modell für die Bausteine der Welt und die Kräfte zwischen ihnen geschaffen. Dieses Modell hat aber eine Schwachstelle: Kräfte dürfen hier nur von masselosen Austauschteilchen wie dem Photon übertragen werden. Allerdings zeigte sich, dass sich die Austauschteilchen der schwachen Kraft, die W- und Z-Bosonen, nicht daran halten: Sie besitzen eine bisher unerklärt große Masse. Um keinen Widerspruch mit dem Modell zu erhalten, muss es also etwas geben, das diesen Teilchen Masse verleiht. Dazu führten Peter Higgs und andere Physiker (i) 1964 das Higgs-Feld ein, welches im gesamten Universum gleichermaßen vorhanden ist. Die ursprünglich masselosen Austauschteilchen interagieren mit dem Higgs-Feld und erlangen so ihre Masse. Das Higgs-Feld ist nicht direkt messbar, aber durch seine Existenz muss es mindestens ein weiteres Elementarteilchen geben, das Higgs-Teilchen (ii). Dieses Teilchen ist elektrisch neutral und zerfällt sehr schnell. Aus früheren Experimenten wissen wir bereits, dass seine Masse mehr als 120mal der Protonmasse sein müsste. Higgs-Teilchen sind der letzte fehlende Baustein des Modells: Ihre Entdeckung ist zwingend nötig, wenn das Modell die Natur beschreiben soll. Andererseits, zieht man diesen Baustein heraus, bricht das gesamte Gebäude zusammen.

Diamond refuses to take blame for rate fix

Jornal de Notícias

EL PAÍS

hallada la partícula clave para la comprensión del universo

Eine neue Ära in der Grundlagenforschung



CMS

Seit März 2010 Erforschung eines neuen Energie-Bereichs
in p-p und Pb-Pb Kollisionen



4 Juli 2012:

~ 4 Milliarden Ereignisse aufgezeichnet (keiner Bruchteil aller pp Kollisionen);

→ erwarte ~ 200 Higgs Ereignisse (im Massenbereich des erwarteten Signals, Ende 2011)

Ist es gelungen, die RICHTIGE Stecknadel zu finden?



Unmögliches möglich machen

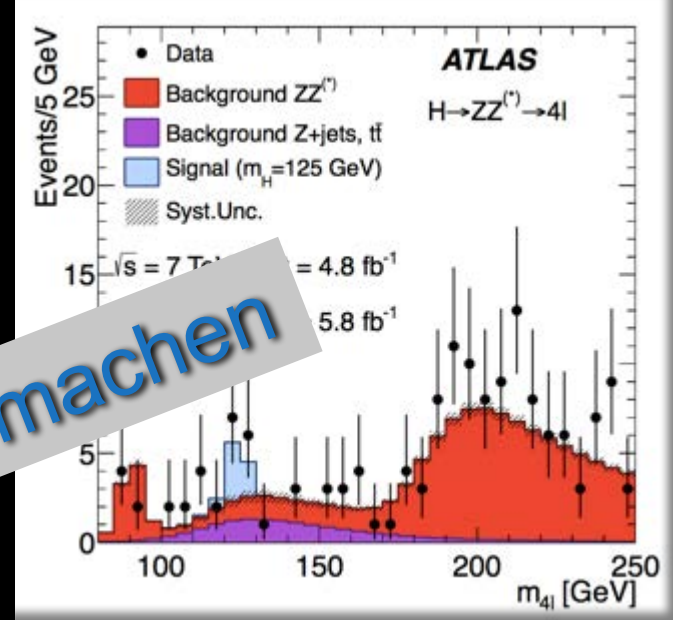
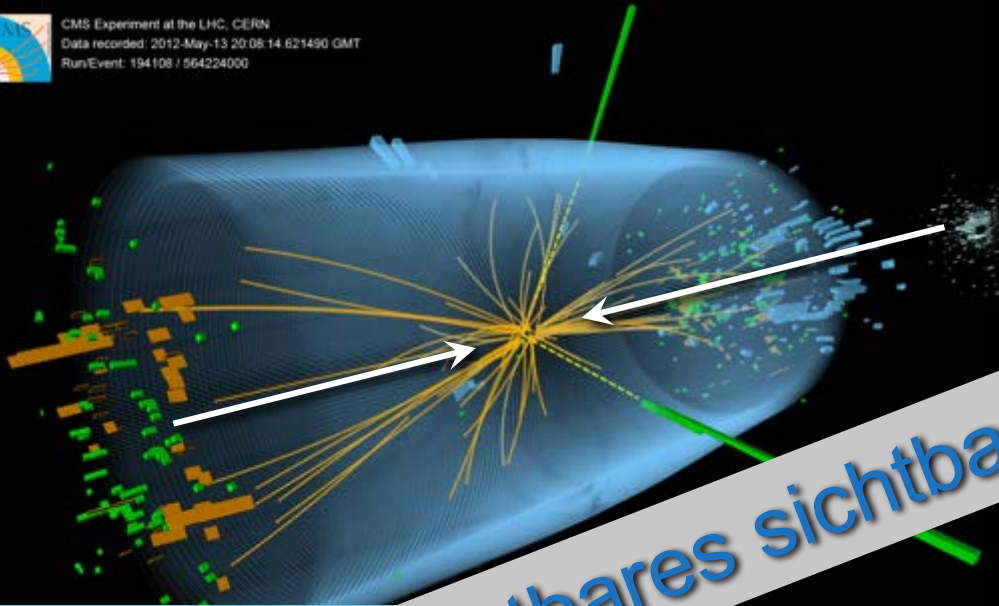
- 8MB → digitales Bild
- 1GB → DVD Film
- 1TB → jährlich weltweite Buchproduktion
- >25PB → jährlicher LHC Datenoutput
- Ende vom Run (Feb 2013): 100 PB gespeicherter Daten



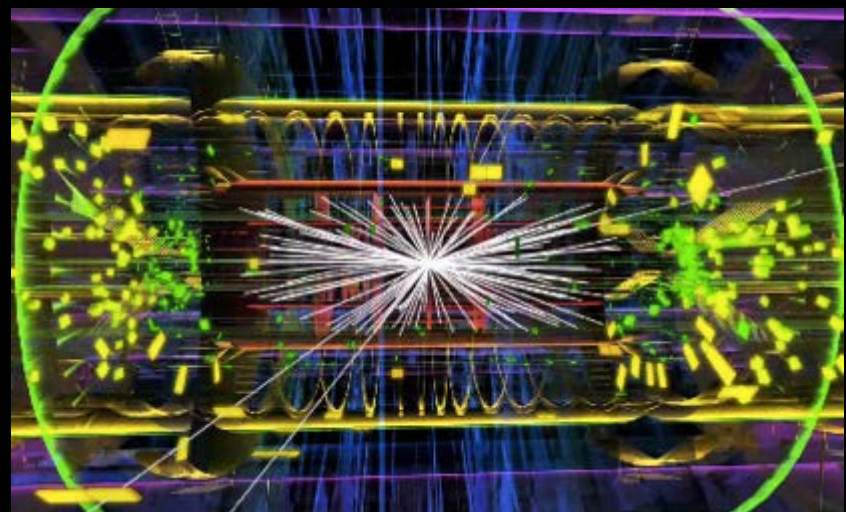
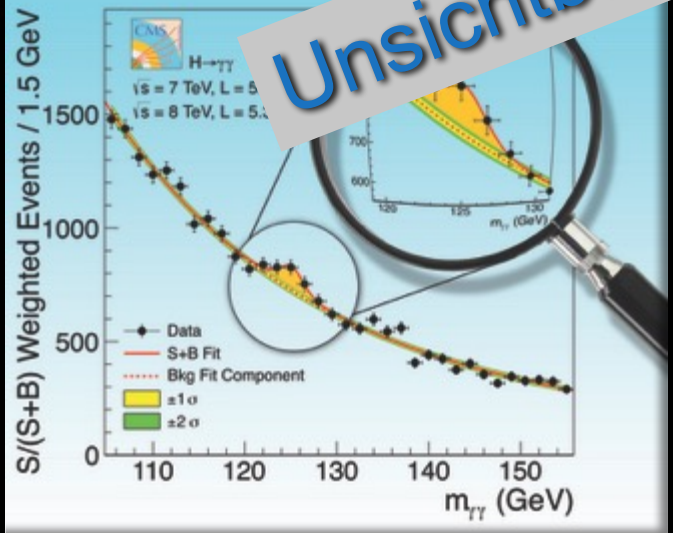
4. Juli 2012: CERN Experimente weisen ein Teilchen nach - im Einklang mit dem lange gesuchten Higgs-Boson "



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

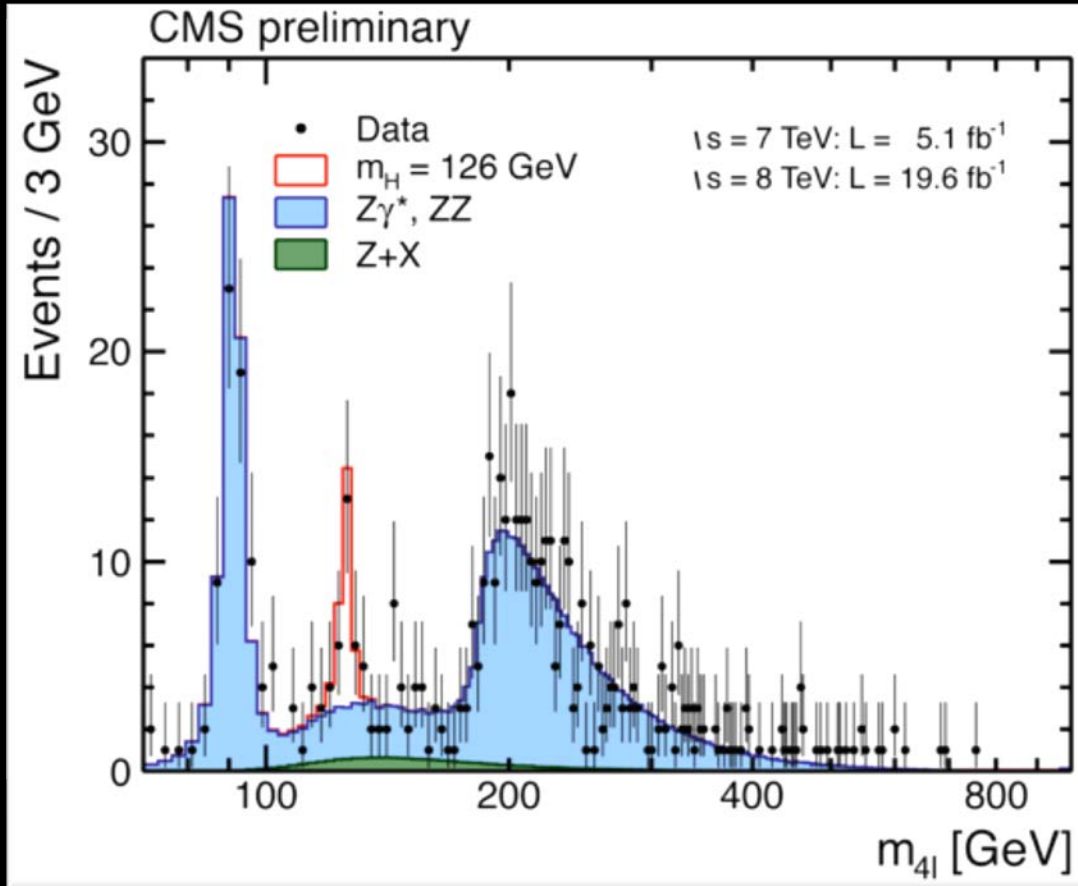


Unsichtbares sichtbar machen



CMS Animation: $H \rightarrow 4$ Leptonen;

Daten welche bis Dez 2012 auf genommen wurden



$m_H \sim 125$ GeV
 $m_H \sim 10^{-25}$ kg
 $T_H \sim 10^{-22}$ s



4. Juli 2012: CERN Experimente weisen ein Teilchen nach - im Einklang mit dem lange gesuchten Higgs-Boson "



Newton:
Gewicht **proportional** zur Masse



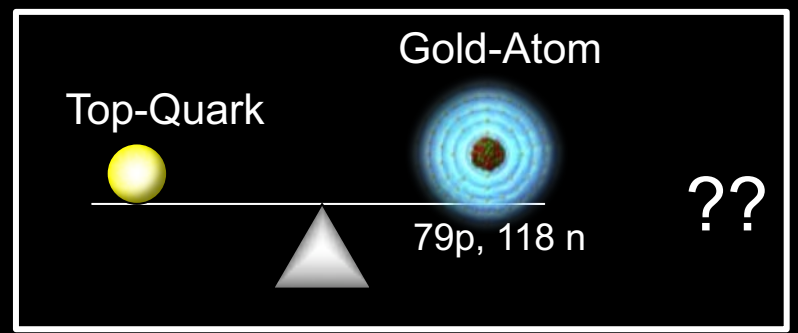
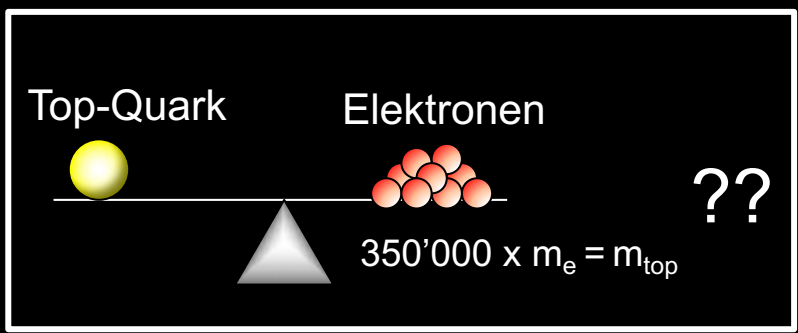
Einstein:
Energie **Zusammenhang mit Masse**



Keine Erklärung für Ursprung der Masse



Woher kommt die Masse? Higgs Mechanismus?



HIGGS FIELD

HIGGS FIELD

HIGGS FIELD

HIGGS FIELD

HIGGS FIELD

HIGGS FIELD

HIGGS FIELD

HIGGS FIELD

HIGGS FIELD

HIGGS FIELD

HIGGS FIELD

HIGGS FIELD

HIGGS FIELD

HIGGS FIELD

HIGGS FIELD

HIGGS FIELD

HIGGS FIELD

HIGGS FIELD

HIGGS FIELD

HIGGS FIELD

HIGGS FIELD

HIGGS FIELD

HIGGS FIELD

HIGGS FIELD

HIGGS FIELD

HIGGS FIELD

HIGGS FIELD

HIGGS FIELD

HIGGS FIELD

HIGGS FIELD

HIGGS FIELD

HIGGS FIELD

HIGGS FIELD

HIGGS FIELD

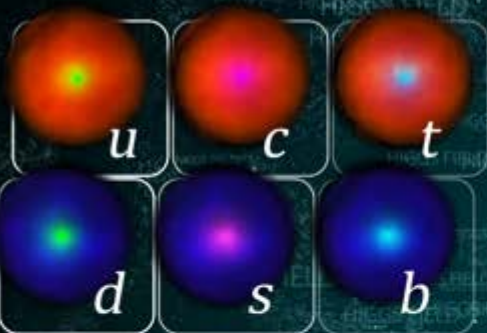
HIGGS FIELD

HIGGS FIELD

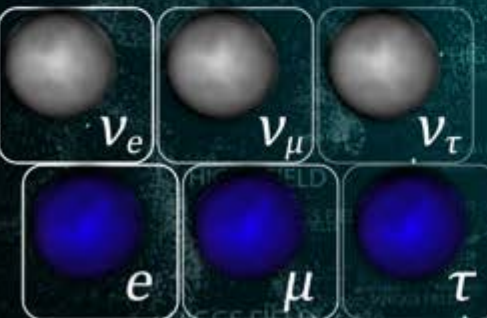
HIGGS FIELD

HIGGS FIELD

Quarks

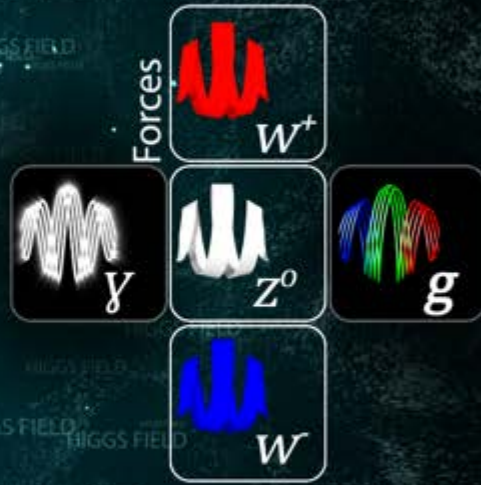


Leptons



Higgs boson

Forces



Standard Model Lagrangian (including neutrino mass terms)

From *An Introduction to the Standard Model of Particle Physics, 2nd Edition*,

W.N. Cottingham and D.A. Greenwood, Cambridge University Press, Cambridge, 2007,

Extracted by J.A. Shifflett, updated from Particle Data Group tables at pdg.lbl.gov, 25 Aug 2013.

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} = & -\frac{1}{4}B_{\mu\nu}B^{\mu\nu} - \frac{1}{8}\text{tr}(\mathbf{W}_{\mu\nu}\mathbf{W}^{\mu\nu}) - \frac{1}{2}\text{tr}(\mathbf{G}_{\mu\nu}\mathbf{G}^{\mu\nu}) && \text{(U(1), SU(2) and SU(3) gauge terms)} \\
 & +(\bar{\nu}_L, \bar{e}_L)\tilde{\sigma}^\mu iD_\mu \begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix} + \bar{e}_R\sigma^\mu iD_\mu e_R + \bar{\nu}_R\sigma^\mu iD_\mu\nu_R + (\text{h.c.}) && \text{(lepton dynamical term)} \\
 & -\frac{\sqrt{2}}{v} \left[(\bar{\nu}_L, \bar{e}_L)\phi M^e e_R + \bar{e}_R\bar{M}^e\bar{\phi} \begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix} \right] && \text{(electron, muon, tauon mass term)} \\
 & -\frac{\sqrt{2}}{v} \left[(-\bar{e}_L, \bar{\nu}_L)\phi^* M^\nu\nu_R + \bar{\nu}_R\bar{M}^\nu\phi^T \begin{pmatrix} -e_L \\ \nu_L \end{pmatrix} \right] && \text{(neutrino mass term)} \\
 & +(\bar{u}_L, \bar{d}_L)\tilde{\sigma}^\mu iD_\mu \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix} + \bar{u}_R\sigma^\mu iD_\mu u_R + \bar{d}_R\sigma^\mu iD_\mu d_R + (\text{h.c.}) && \text{(quark dynamical term)} \\
 & -\frac{\sqrt{2}}{v} \left[(\bar{u}_L, \bar{d}_L)\phi M^d d_R + \bar{d}_R\bar{M}^d\bar{\phi} \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix} \right] && \text{(down, strange, bottom mass term)} \\
 & -\frac{\sqrt{2}}{v} \left[(-\bar{d}_L, \bar{u}_L)\phi^* M^u u_R + \bar{u}_R\bar{M}^u\phi^T \begin{pmatrix} -d_L \\ u_L \end{pmatrix} \right] && \text{(up, charmed, top mass term)} \\
 & +\overline{(D_\mu\phi)}D^\mu\phi - m_h^2[\bar{\phi}\phi - v^2/2]^2/2v^2. && \text{(Higgs dynamical and mass term)}
 \end{aligned}$$

2013 Nobelpreis in Physik

an François Englert & Peter Higgs



„Für die theoretische Entdeckung eines Mechanismus, der zu unserem Verständnis des Ursprungs der Masse subatomaren Teilchen beiträgt, und der kürzlich durch die Entdeckung des vorhergesagten Elementarteilchens durch die ATLAS und CMS Experimente am Large Hadron Collider des CERN bestätigt wurde“

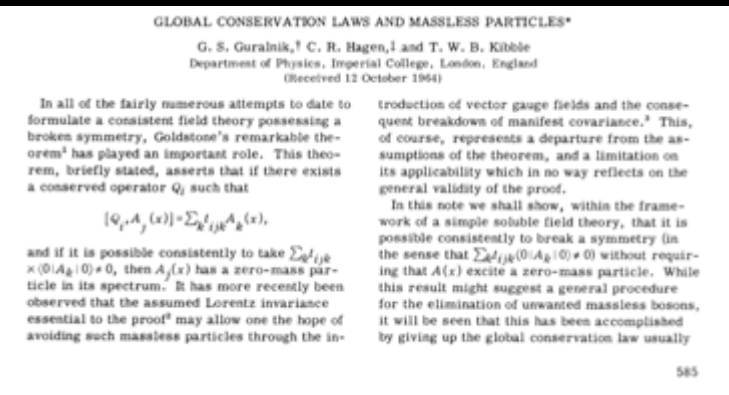
Was waren die Herausforderungen auf dem Wege zur Entdeckung des Higgs-Bosons?

..... in 1964 3 wichtige Publikationen

F. Englert, R. Brout, Juni 1964



Analogie zur Supraleitung, Anderson 1963
P. Higgs, August 1964



G. Guralnik, T. Kibble, C. Hagen, Oktober 1964

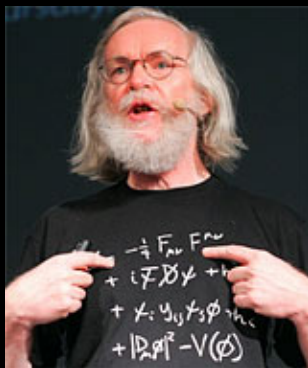


..... Mitte der 1970er Jahre

erste umfassende phänomenologische Untersuchung von Higgs Produktion und Zerfall

J. Ellis, M.K. Gaillard und D.V. Nanopoulos:
A Phenomenological Profile of the Higgs Boson
(Nucl Phys B106 (1976)292)

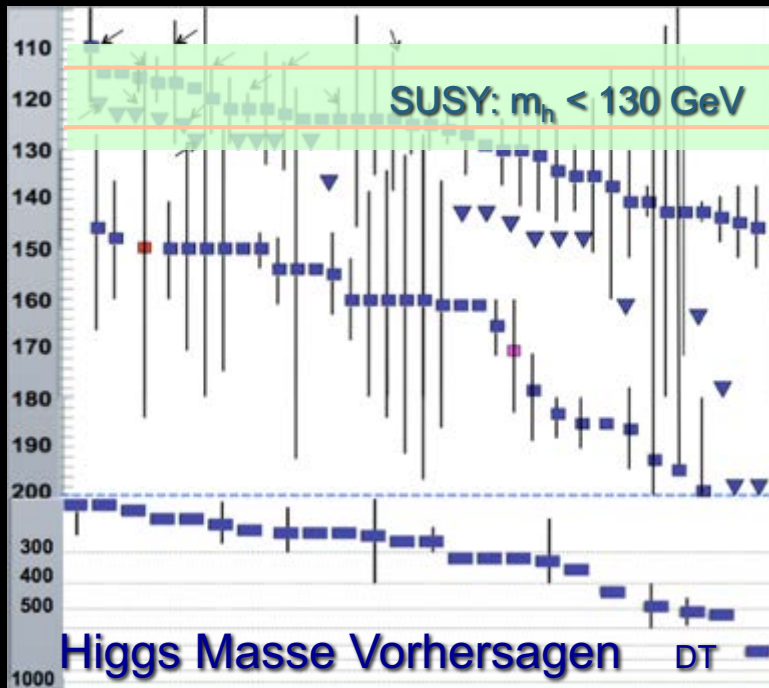
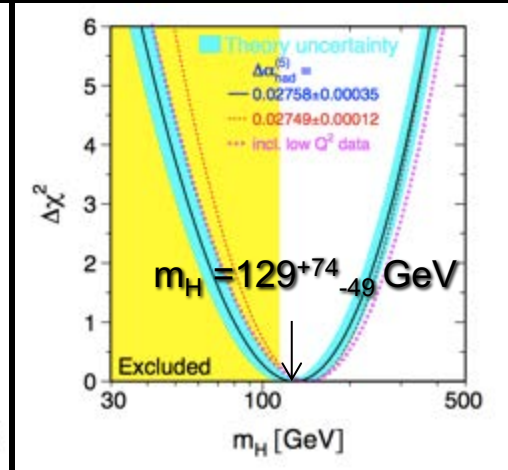
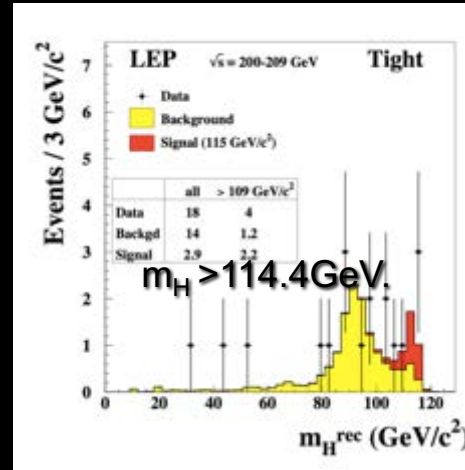
We should perhaps finish with an apology and a caution. We apologize to experimentalists for having no idea what is the mass of the Higgs boson, unlike the case with charm [3,4] and for not being sure of its couplings to other particles, except that they are probably all very small. For these reasons we do not want to encourage big experimental searches for the Higgs boson, but we do feel that people performing experiments vulnerable to the Higgs boson should know how it may turn up.



Theoret. Vorhersagen und experim. Suche nach Higgs-Boson



Suche nach dem Higgs am LEP



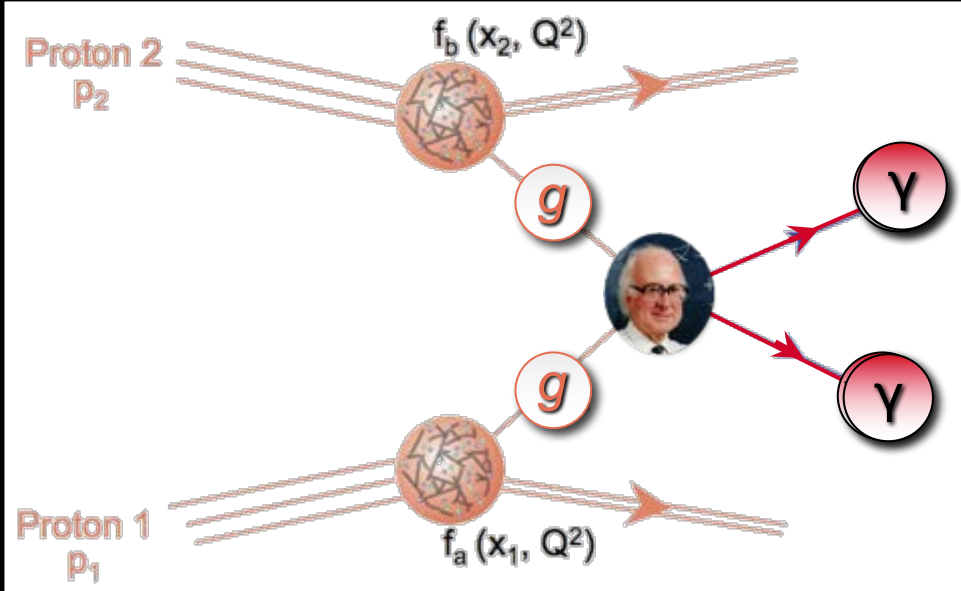
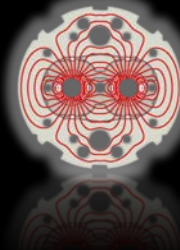
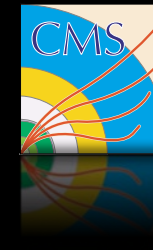
→ LEP Limit: $m_H > 114.4 \text{ GeV}$

→ LHC: $m_H = 125 \text{ GeV}$

100 zusätzliche SL Kavitäten am LEP
 → $E_{\text{CM}} = 220 \text{ GeV} \rightarrow m_H \sim 129 \text{ GeV}$

z.B.: T. Schucker, arXiv:0708.3344[hep-ph]

SM Higgs Produktion und Zerfall



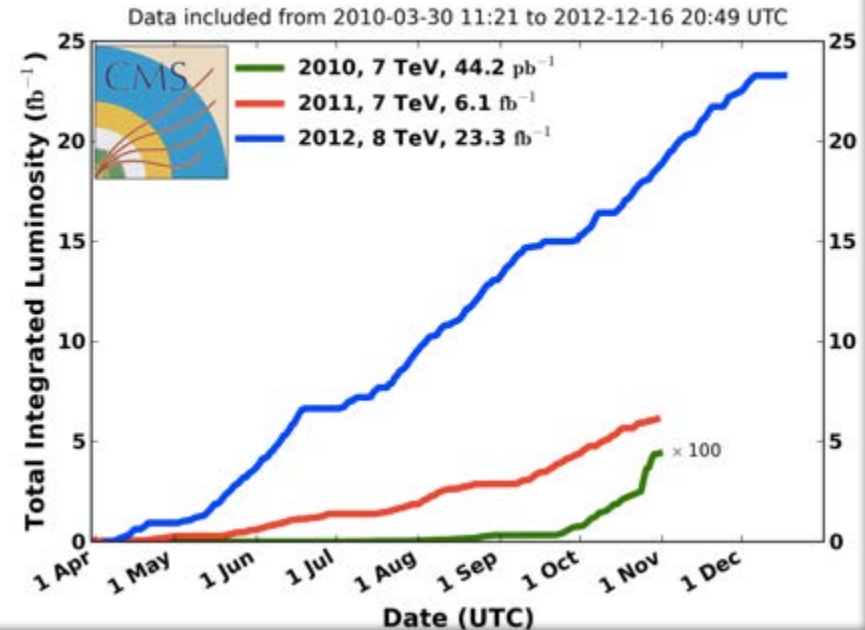
Dezember 2011 (run @ 7 TeV: $\sim 5 \text{ fb}^{-1}$)

ATLAS und CMS sehen "Hinweise" im 120 - 130 GeV Massenbereich

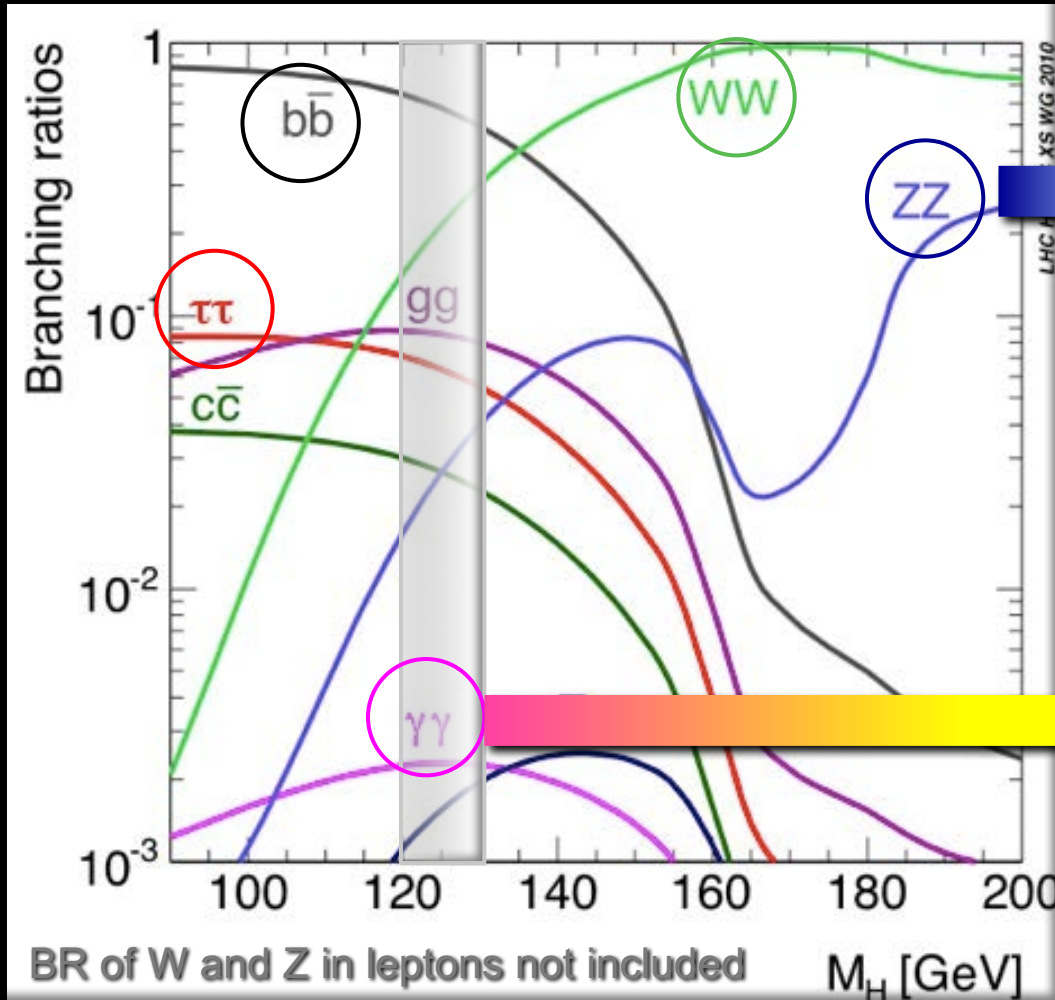
2012 run @ 8 TeV:
Dezember 2012: $\sim 25 \text{ fb}^{-1}$



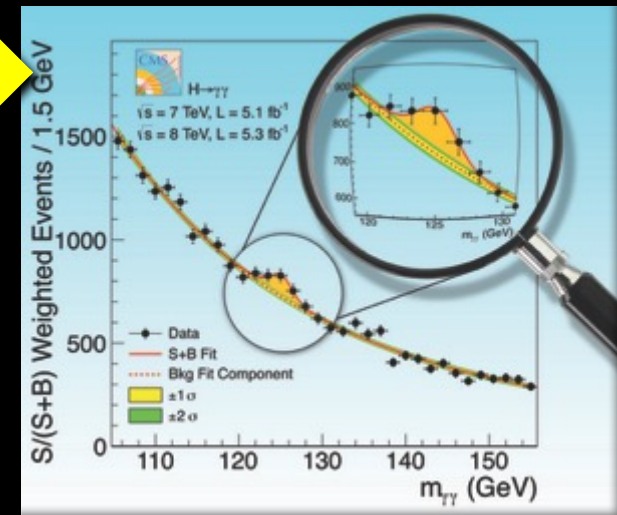
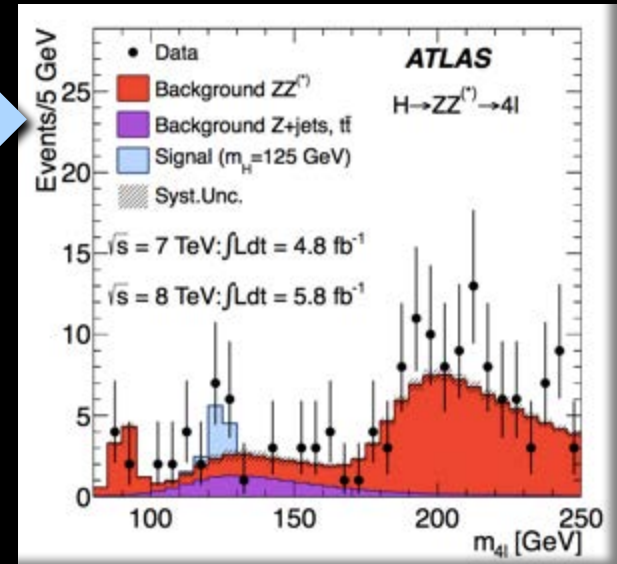
CMS Integrated Luminosity, pp



“Offener” Massenbereich nach den 2011 Daten

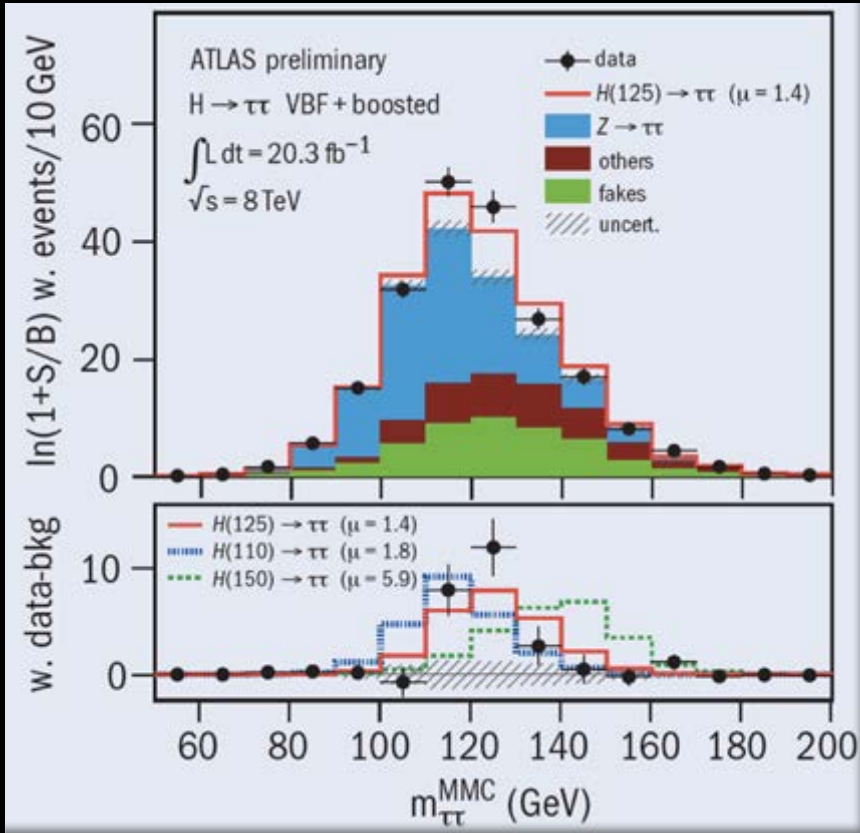


4 Juli 2012: Entdeckung

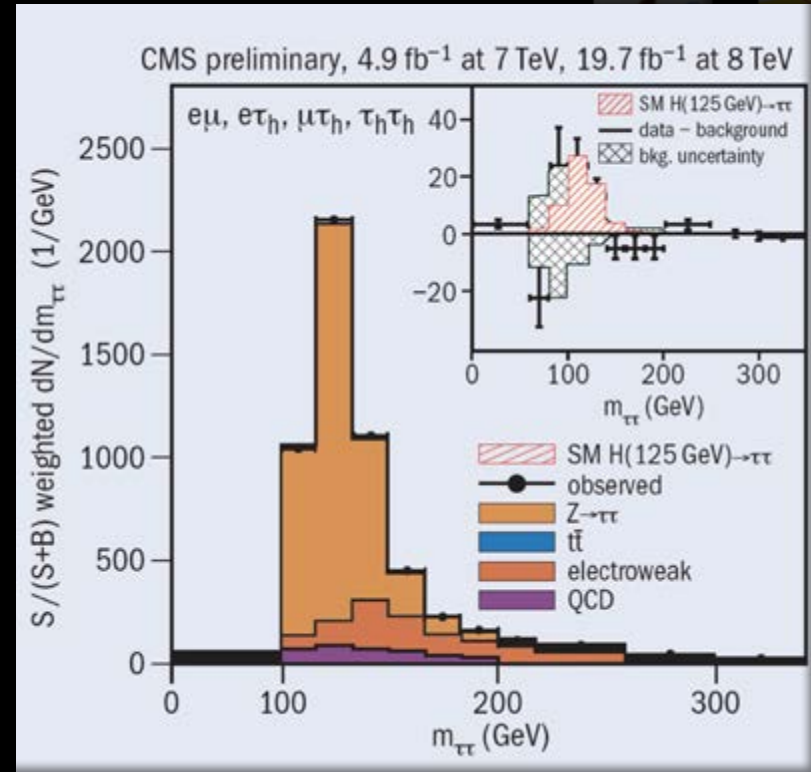


Ein Higgs $\rightarrow 4e$ produziert in 10^{13} pp Kollisionen

Higgs: Beispiele Resultate (alle Daten)



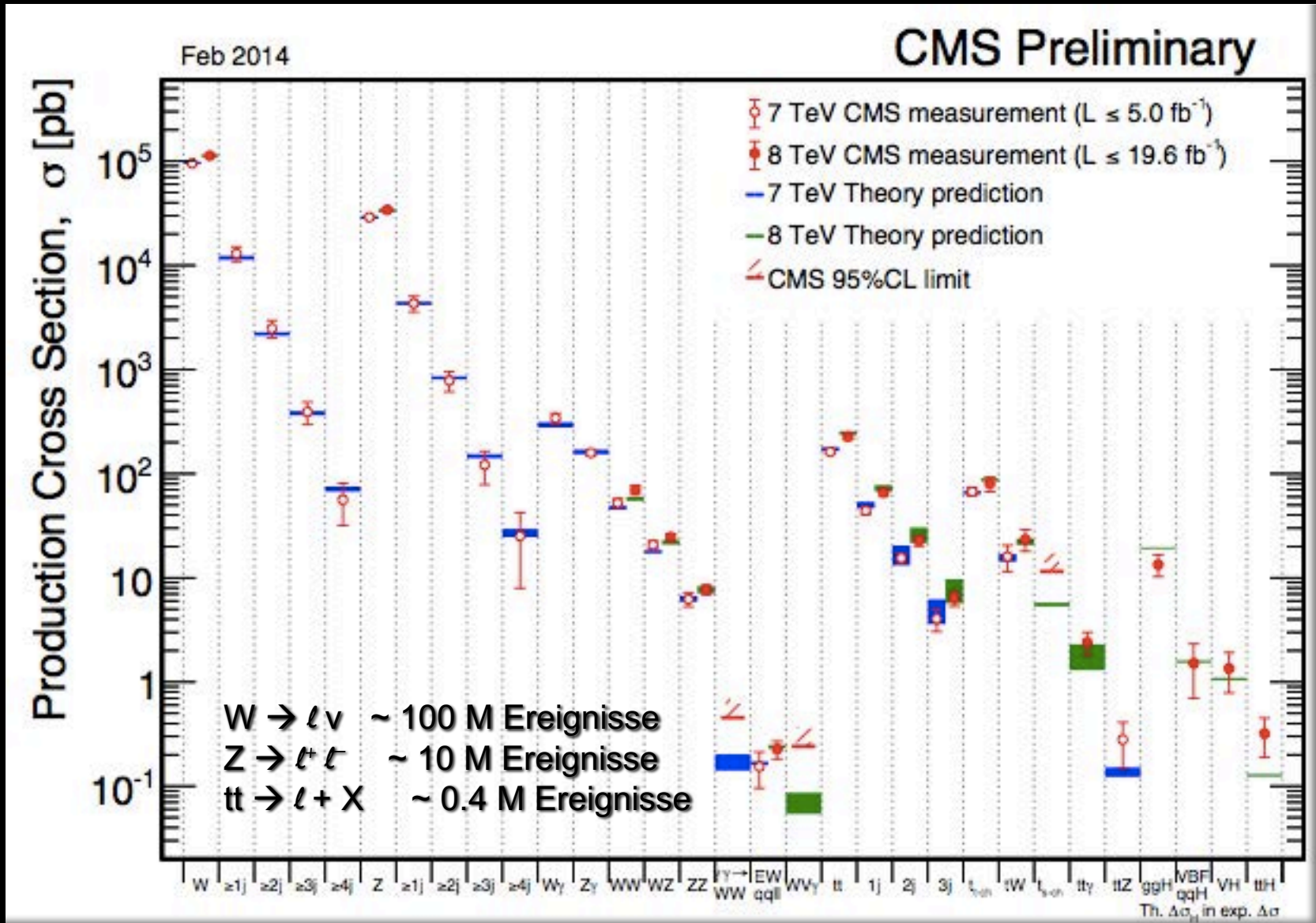
4.1 σ observed
 3.2 σ expected



3.4 σ observed

m_H (ATLAS) = $125.5 \pm 0.2 \pm 0.6$ GeV
 m_H (CMS) = $125.7 \pm 0.3 \pm 0.3$ GeV
 Spin = 0 bevorzugt von beiden Experimenten

Grosser wissenschaftlicher Output vom Run1@LHC



2013 Nobelpreis in Physik

an François Englert & Peter Higgs



„Für die theoretische Entdeckung eines Mechanismus, der zu unserem Verständnis des Ursprungs der Masse subatomaren Teilchen beiträgt, und der kürzlich durch die Entdeckung des vorhergesagten Elementarteilchens durch die ATLAS und CMS Experimente am Large Hadron Collider des CERN bestätigt wurde“

Was waren die experimentellen Herausforderungen?

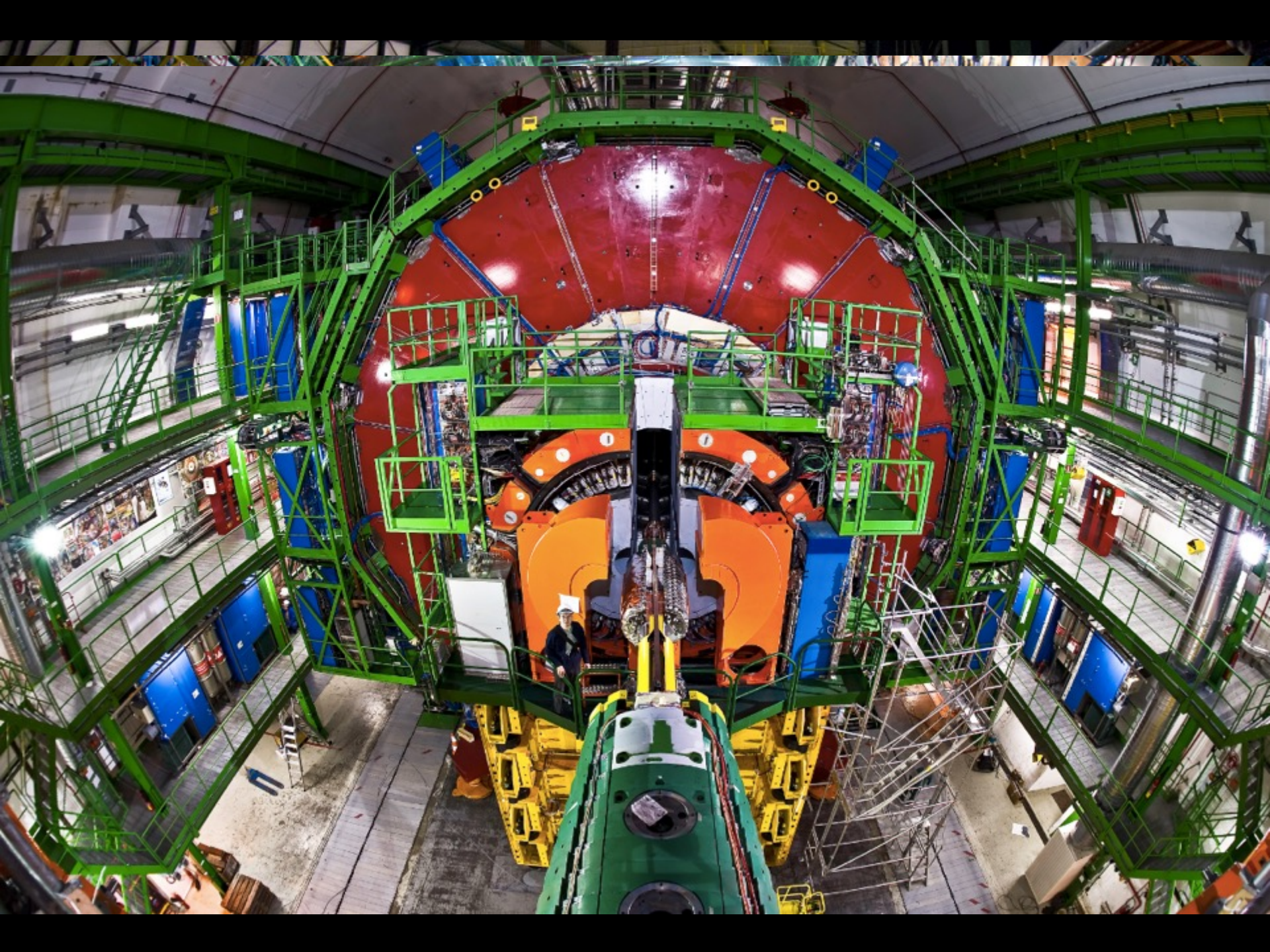
- Hohe Anforderungen an Experimente
- Meisterwerke der Technologie

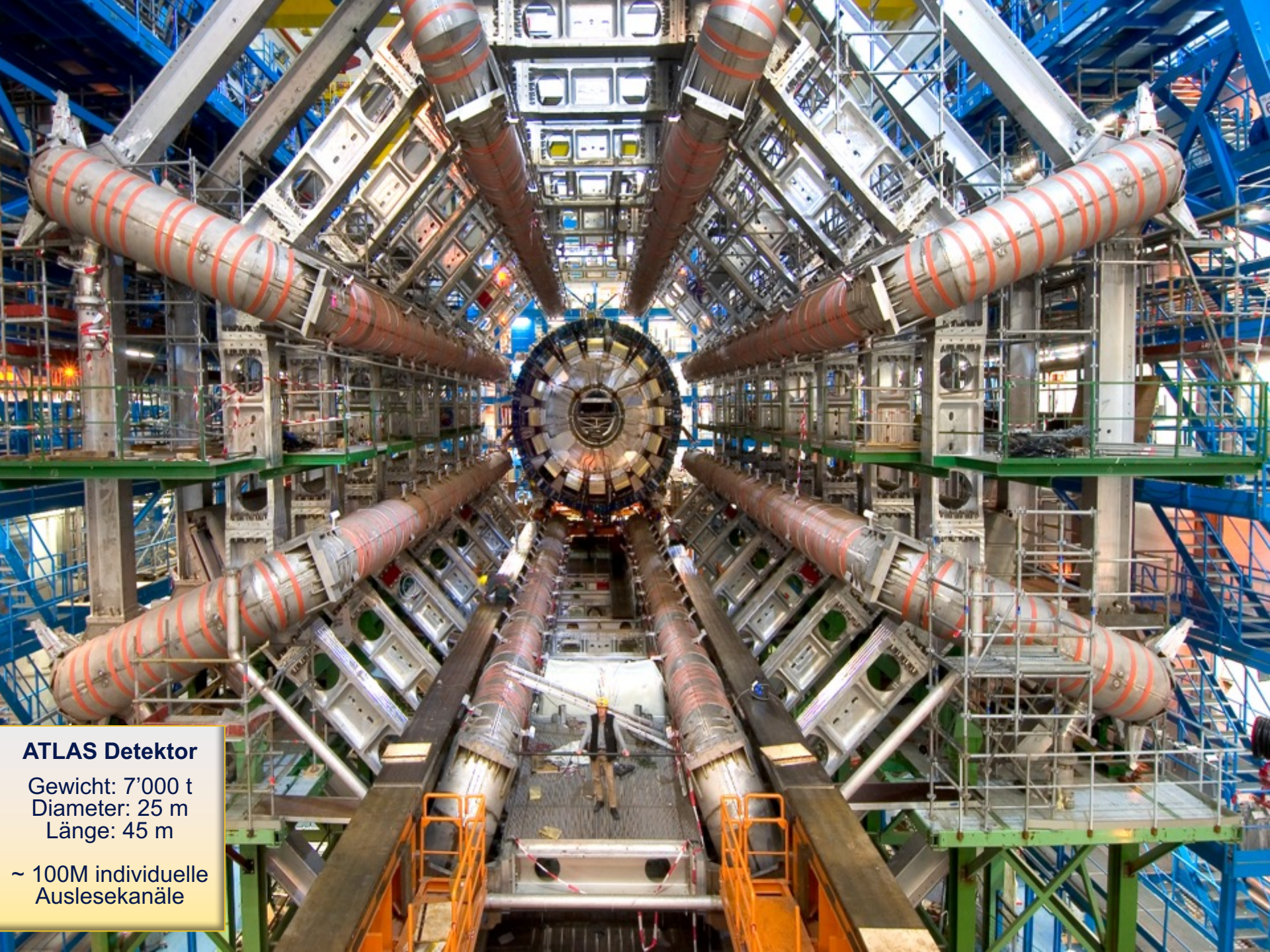
Gigantische digitale Kamera

CMS Detektor
Gewicht: 12'500 t
Diameter: 15 m
Länge: 21.6 m
Magnetfeld: 4 T

~ 100M individuelle Auslesekanäle







ATLAS Detektor

Gewicht: 7'000 t
Diameter: 25 m
Länge: 45 m

~ 100M individuelle
Auslesekanäle



Unmögliches möglich machen



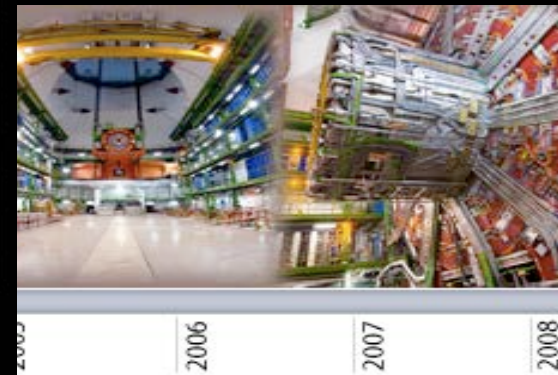
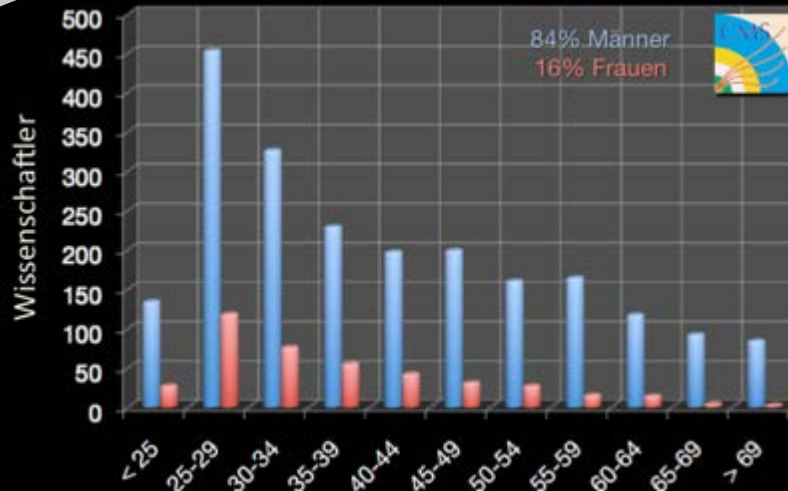
Globales Wissenschaftliches Projekt



Unmögliches möglich machen

CMS Kollaboration
~4000 Mitarbeiter
~40 Nationen
~180 Institute

ATLAS
Collaboration



Bemerkung: "Big" vs "Small" Science

Die "**Magie der Wissenschaft**" wird in der Regel im Zusammenhang gebracht mit

- ❖ einer genialen Idee **einer einzelnen Person** welche unser Verständnis der Natur revolutioniert
- ❖ Wissenschaftler führen aussergewöhnliche Experimente in der **Abgeschiedenheit ihres Labors** durch

ein Widerspruch zu Big Science?

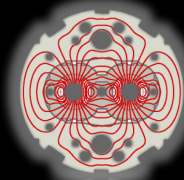
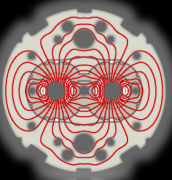
- ❑ Die Methoden haben sich geändert - nicht die Neugier (Leidenschaft), die Wissenschaftler antreibt
- ❑ Beide Methoden (grosse und kleine Projekte) sind für den Fortschritt in der Wissenschaft notwendig (erweitern unserer fundamentalen Erkenntnisse)



“The highlight of a remarkable year 2012”



... ein historischer Meilenstein - aber es ist erst der Anfang.....



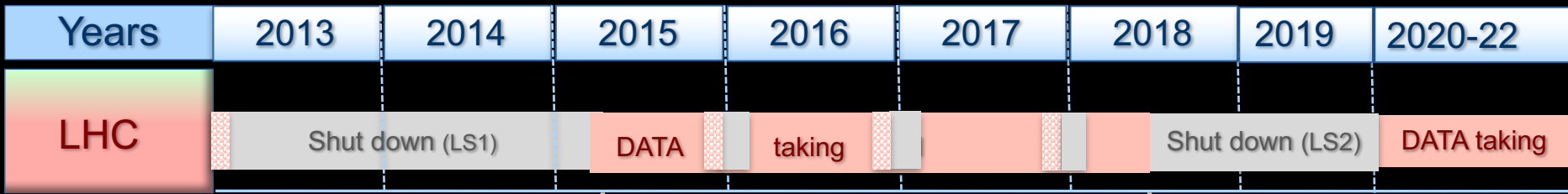
LHC – nächsten Schritte: 2013 – 2021

..... Gegenwärtiger Zeitplan.....

Heute: 25fb⁻¹ /Experiment

~300fb⁻¹

~500fb⁻¹



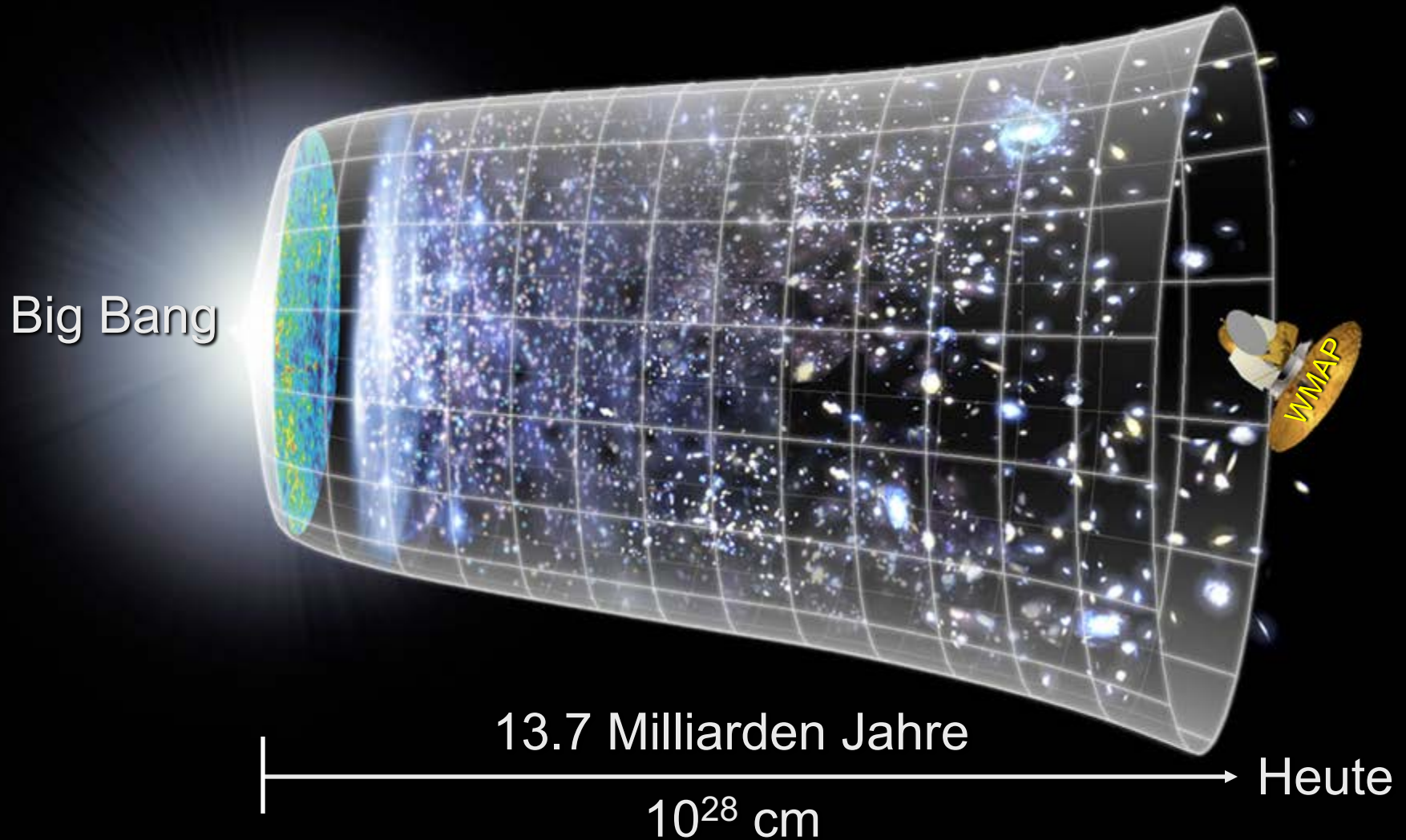
Starten Sie im Jahr 2015 mit einer im Wesentlichen neuen Maschine!
 Datennahme bis Q2 2018
 Start mit ~ 13 TeV → 14 TeV

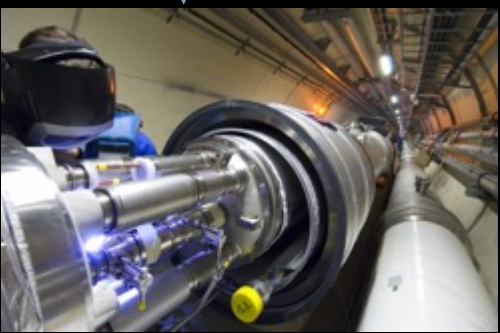
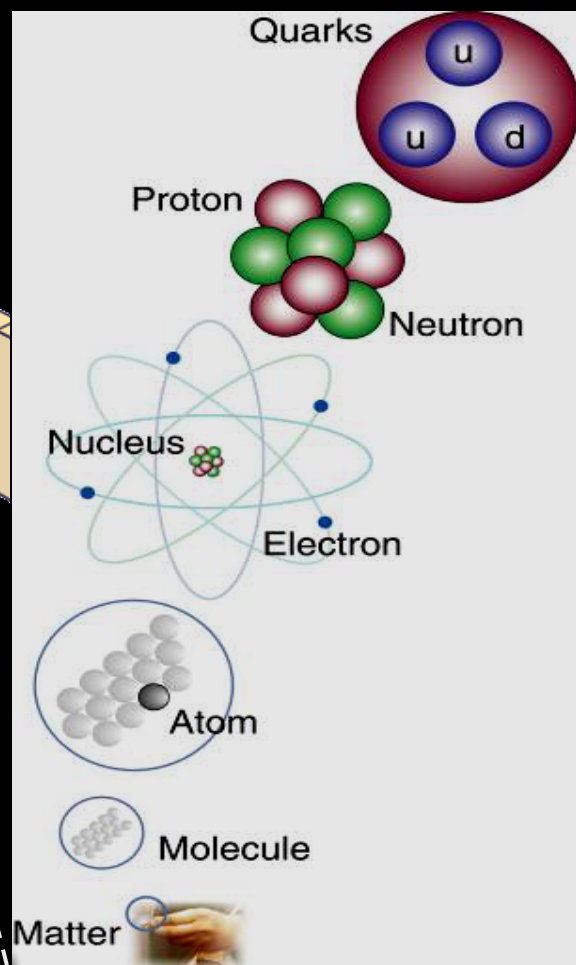
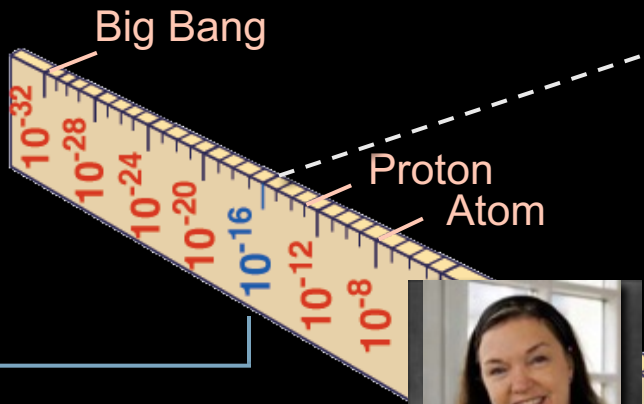
Ende eines jeden Jahres: Schwerionen

Konsolidierung für LHC-Betrieb bei E_{cm} ~ 14 TeV
 Upgrades / Konsolidierung der LHC-Experimente
 LS1: 13.2.2013 – Q2 2015

Nach 2024:
 HI-LHC?
 HE-LHC?
 100TeV?

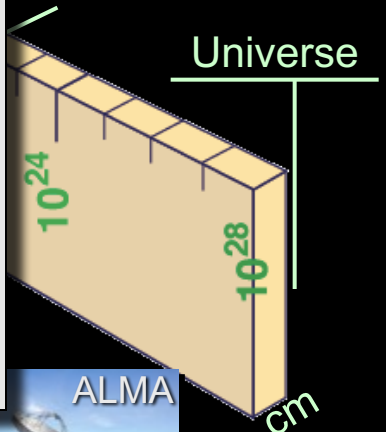
Die nächste wissenschaftliche Herausforderung:
die ersten Augenblicke unseres Universums nach dem Urknall zu verstehen





LHC

Radius of Galaxies

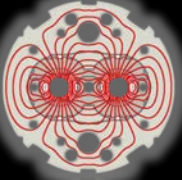


Super-Mikroskop

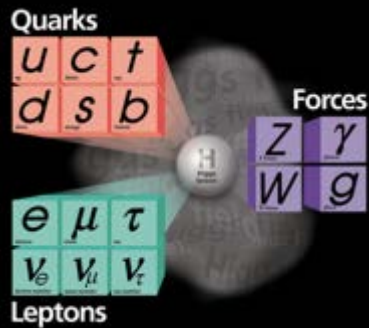


Studium der Physik Gesetze der ersten Augenblicke nach dem Big Bang
 → zunehmende Symbiose zwischen Teilchenphysik, Astrophysik und Kosmologie





Das Studium der LHC-Daten wird es uns ermöglichen, einige der „grossen Fragen“ Physik zu beantworten



Haben wir **DAS Higgs-Teilchen** entdeckt, welches für die Masse der Teilchen verantwortlich ist?

Werden wir den Grund finden, warum **Antimaterie und Materie** sich nicht gegenseitig völlig vernichtet hat?



Finden wir die Teilchen, aus denen die geheimnisvolle **"dunkle Materie"** in unserem Universum besteht?



*Das Leben muss nicht leicht sein,
wenn es nur inhaltsreich ist.*

Lise Meitner.



**Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit!**

SUISSE
FRANCE

CMS

LHCb

ATLAS

CERN Meyrin

CERN Prévessin

7 km

ALICE

LHC 27 km