



Das verflixte Higgs

Am 4. Juli 2012 gaben Physiker am Europäischen Labor für Teilchenphysik (CERN) bekannt, sie hätten vermutlich das Higgs-Teilchen gefunden. Jenes verflixte Elementarteilchen, das 1964 vom schottischen Physiker Peter Higgs vorausgesagt und nun nach knapp 50 Jahren schliesslich entdeckt wurde.

Warum aber ist dieses Higgs-Teilchen so wichtig? Weil das Teilchen und das zugehörige Higgs-Feld für unsere Welt und den ganzen Kosmos von grundlegender Bedeutung sind. Das Higgs-Feld, welches das ganze Universum durchdringt, sorgt nämlich dafür, dass Elementarteilchen Masse haben. Hätten Teilchen keine Masse, wäre alle Materie im Universum ungebremst mit Lichtgeschwindigkeit unterwegs.

François Englert und Peter Higgs haben über ihre wichtigen Arbeiten von 1964 zur Klärung wieso Elementarteilchen eine Masse haben den 2013 Physiknobelpreis erhalten. Ohne experimentelle Bestätigung ihrer Arbeiten durch die erfolgte Entdeckung des Higgs-Teilchens, hätte dieser Preis nicht an sie vergeben werden können.

In diesem Vortrag wird erklärt, was es mit dieser Entdeckung auf sich hat, die eine alte Menschheitsfrage aufgreift, was die Welt im Innersten zusammenhält.

Das verflixte Higgs

<http://www.teilchenphysik.ch>
<http://www.teilchenwelt.de>

enthalten weitere Informationen

sowie
Posters, Broschüren

und, natürlich auch:

<http://www.facebook.com/VerflixtesHiggs>

<http://www.youtube.com/user/verflixteshiggs>

<https://plus.google.com/u/0/109328334276292364669/posts>

<https://twitter.com/VerflixtesHiggs>

Lehrerbroschüre

für
Plakatserie



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement des Innern EDI
Staatssekretariat für Bildung und Forschung SBF

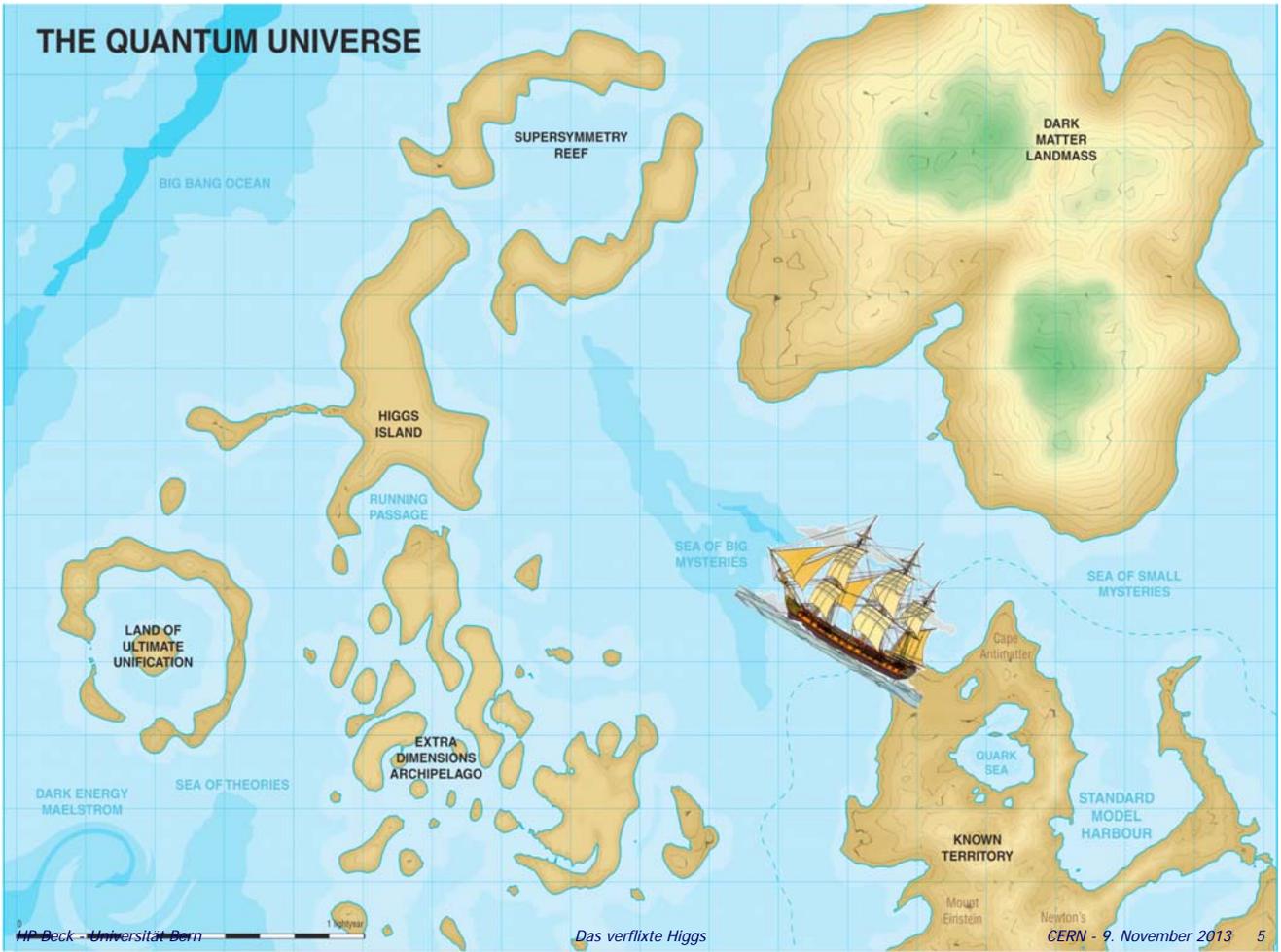
Wieso ist das Higgs wichtig ?

Grundlagenforschung ermöglicht neue Wege zu beschreiten

- ermöglicht die Welt, das Universum, das Leben, und somit uns als Menschheit besser zu verstehen.
- Es geht um nicht weniger als:
 - wer sind wir?
 - woher kommen wir?
 - wohin gehen wir?
- Erkenntnisse führen immer zu neuen Anwendungen
 - technologische Spin-Offs

If [19th century] physicists had limited themselves to work of obvious practical importance, they would have been studying the behavior of steam boilers.

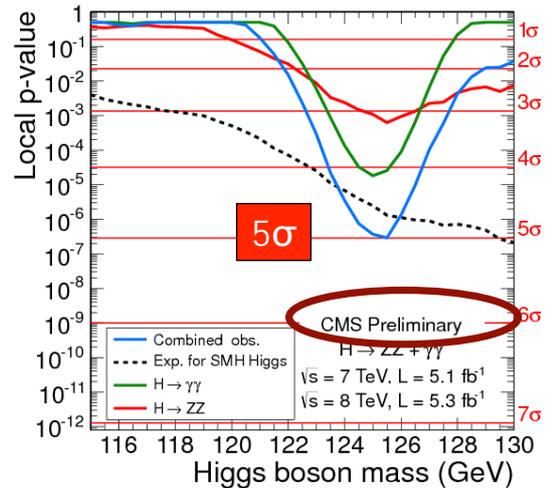
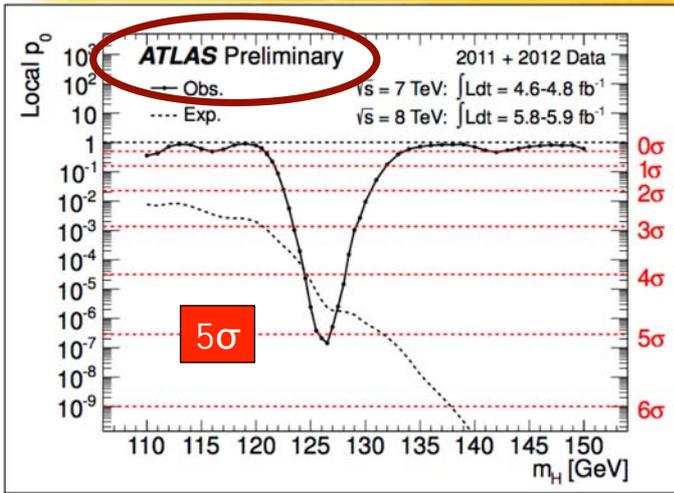
Steven Weinberg, "Why the Higgs Boson Matters"
NYT, 13. July 2012



CERN – 4^{ter} Juli 2012



Ein neues Teilchen – das das Higgs-Teilchen sein könnte



Die beiden CERN-Experimente ATLAS+CMS berichten am 4. Juli 2012 am CERN, dass sie mit hoher Wahrscheinlichkeit (d.h. 5 sigma) ein neues Teilchen im Massenbereich von 125-126 GeV entdeckt hätten, welches das Higgs-Teilchen sein könnte.

The New York Times
 Wednesday, July 4, 2012 Last Update: 8:23 AM ET

Discovery of New Particle Could Redefine Physical World
 By DENNIS OVERBYE
 54 minutes ago
 The discovery by physicists at CERN's Large Hadron Collider, if confirmed, would lead to a new understanding of how the universe works.

Physicists find new particle, but is it the Higgs?
 LHC data confirm discovery, but not identity, of Higgs-like entity.
 Matthew Chalmers
 02 July 2012 | Corrected: 03 July 2012 | Updated: 04 July 2012

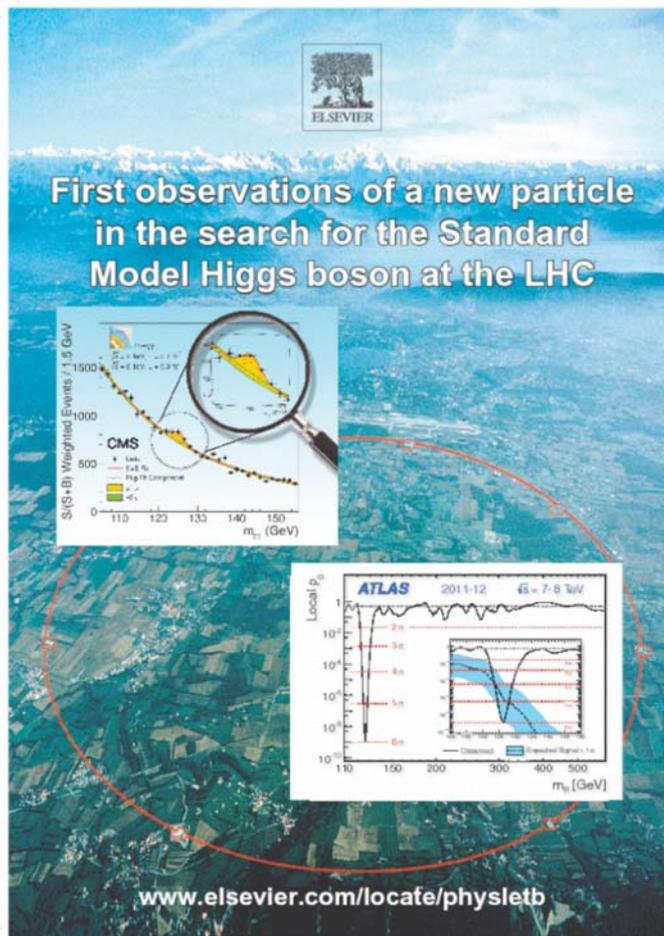
Physicists in Europe will present evidence of an entirely new particle on Wednesday, *Nature* has learned. But more data will be needed to officially confirm whether it is indeed the long-awaited Higgs boson — the particle thought to be behind the mass of all the others.

Even as rumours fly in the popular media, physicists have begun quietly cheering at CERN, the European particle-physics lab near Geneva in Switzerland. "Without a doubt, we have a discovery," says one member of the team working on the ATLAS experiment, who wished to remain anonymous. "It is pure elation!"

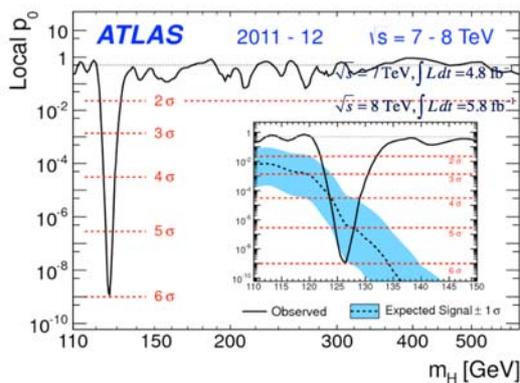
For nearly half a century, physicists have predicted the existence of a particle that helps to endow others with mass. Named after the theorist who first proposed its existence, the Higgs boson is a basic building block of the universe, which appears to be the boson imagined and named half a century ago by theoretical physicist Peter Higgs.

"We have reached a milestone in our understanding of nature," CERN director general Rolf Heuer told a gathering of scientists and the world's media near Geneva on Wednesday.

The ATLAS detector (above) and its rival CMS have both seen a clear signal of a new, Higgs-like particle.
 CLAUDIA MARCELLON/CERN

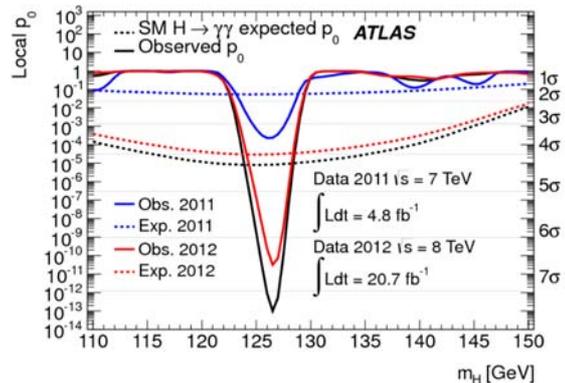


Seit Juli 2012 wurden die Daten mehr als verdoppelt



Phys. Lett. B 716 (2012) 1-29
Eingereicht am 31. Juli 2012

~11 fb⁻¹



Phys. Lett. B – in peer review
Eingereicht am 4. Juli 2013

~25 fb⁻¹

Ganz klar, bei ca. 125 GeV wurde ein neues Teilchen entdeckt, welches allem Anschein nach ein Higgs Boson ist !

und ein Nobelpreis....



The Nobel Prize in Physics 2013
François Englert, Peter Higgs

The Nobel Prize in Physics 2013

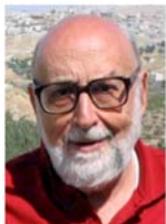


Photo: Pnicolet via Wikimedia Commons

François Englert

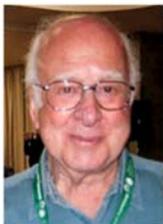
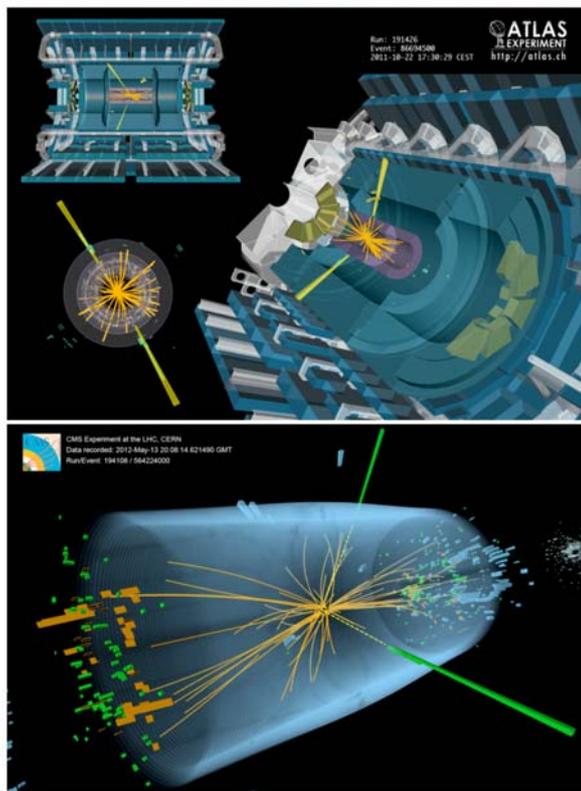


Photo: G-M Greuel via Wikimedia Commons

Peter W. Higgs

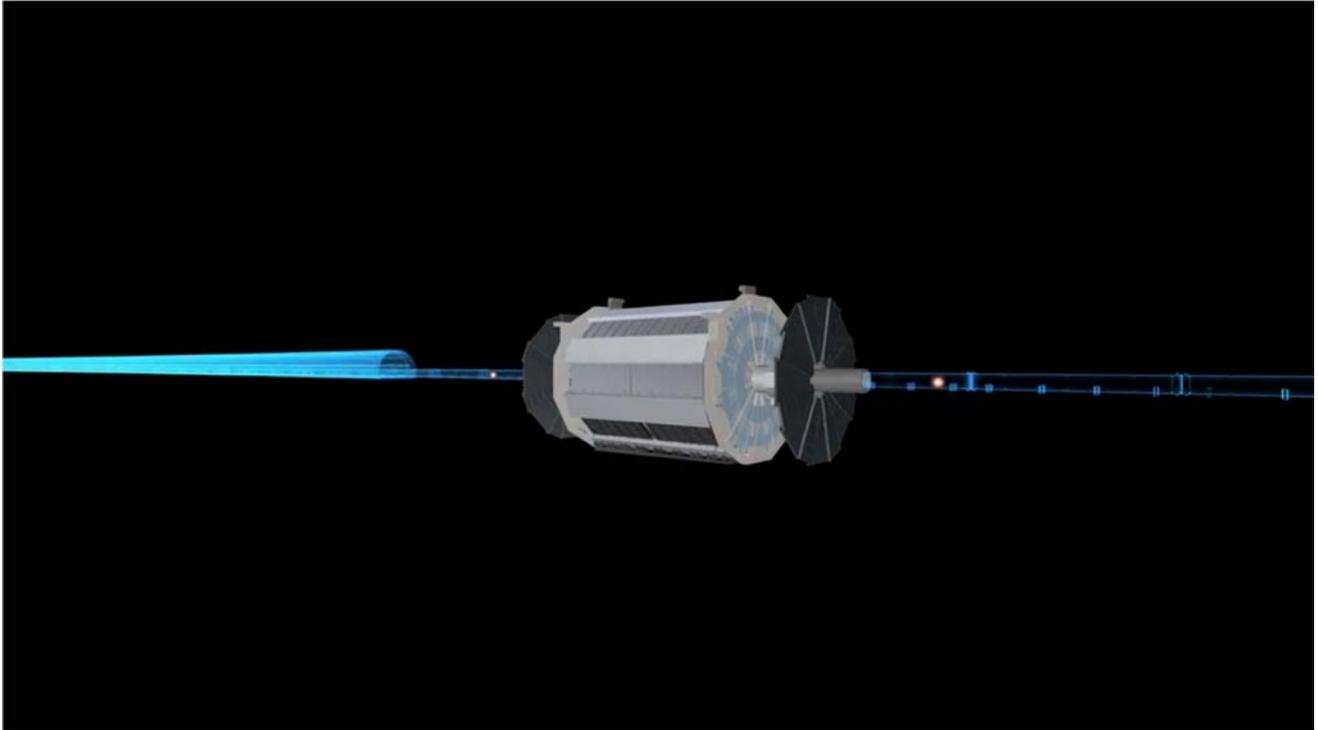
The Nobel Prize in Physics 2013 was awarded jointly to François Englert and Peter W. Higgs *“for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN’s Large Hadron Collider”*



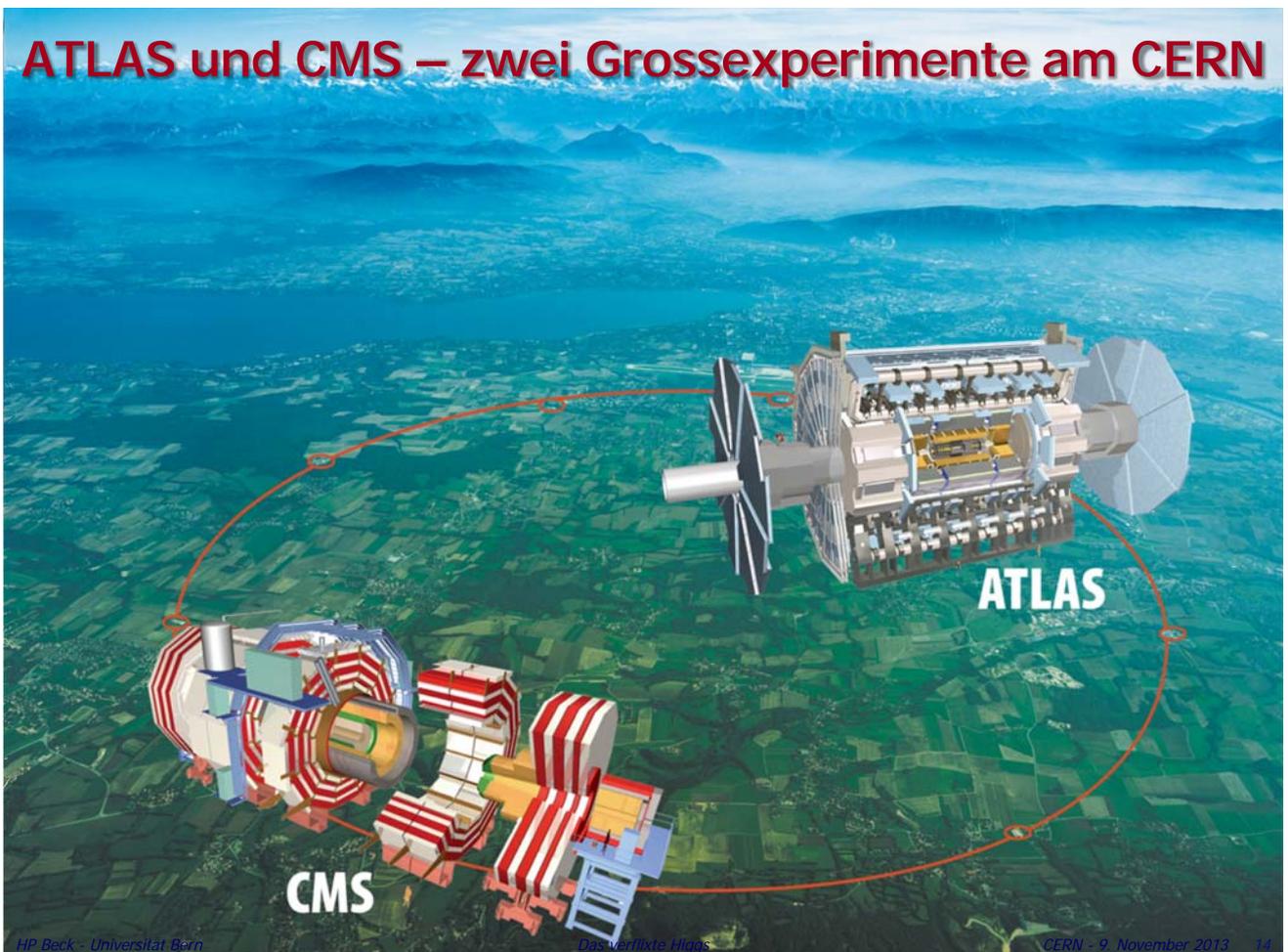
Der Large Hadron Collider – LHC am CERN bei Genf



Eine Proton-Proton Kollision – ist dies ein Higgs?



ATLAS und CMS – zwei Grosseperimente am CERN



...es gibt noch zwei weitere Experimente am LHC



HP Beck - Universität Bern

Das verflixte Higgs

CERN - 9. November 2013 13

Woraus besteht die Welt & Woraus bestehen wir?

was ist da drin?



Nachdenken alleine hilft nicht weiter...

Demokrit (460–371 v.Chr.):
Materie besteht aus unteilbaren, kleinen Bausteinen

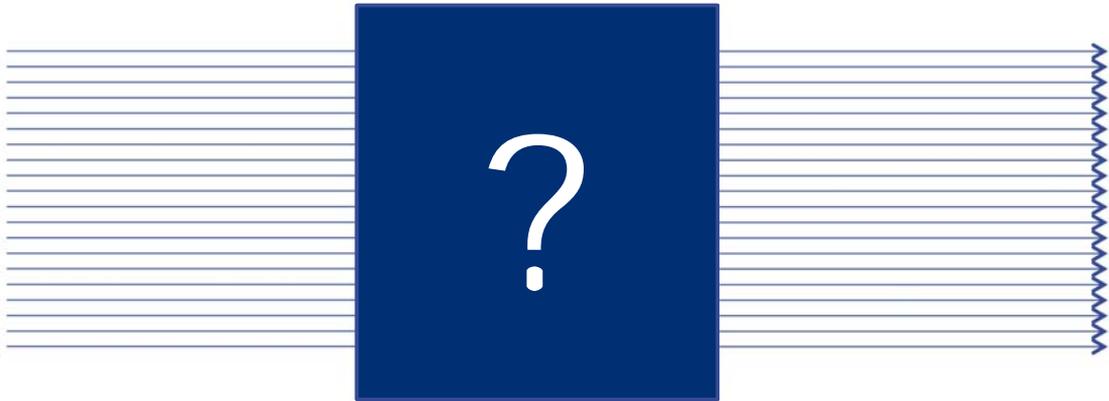
Platon (ca 428–348 v.Chr.):

Es braucht Experimente!

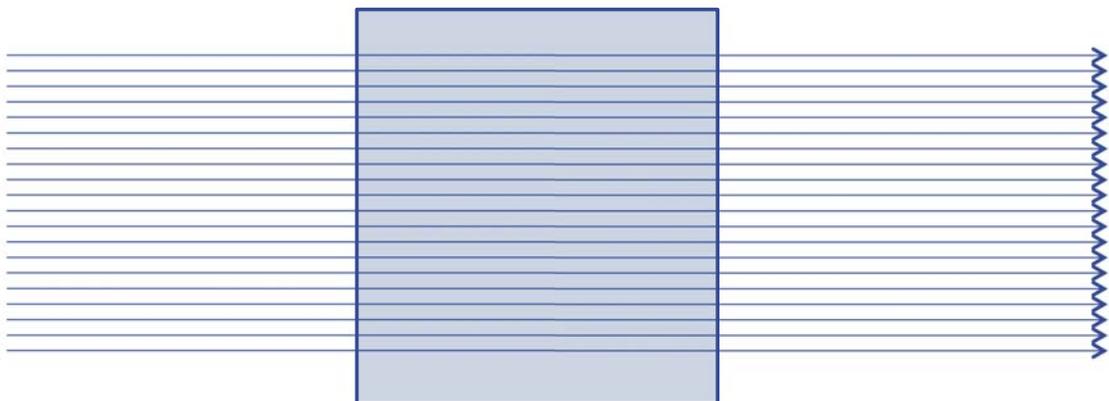
Aristoteles (384–322 v.Chr.):
Raum ist kontinuierlich mit Materie gefüllt



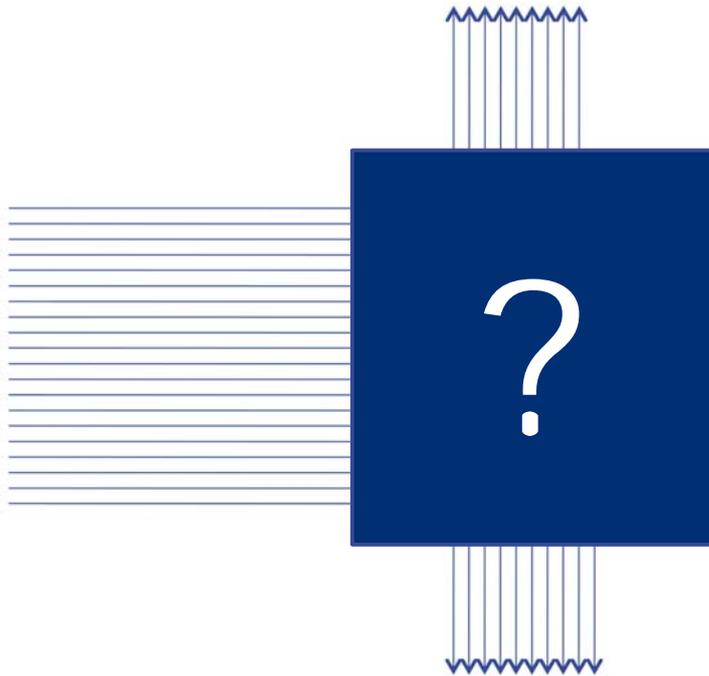
Streuexperimente



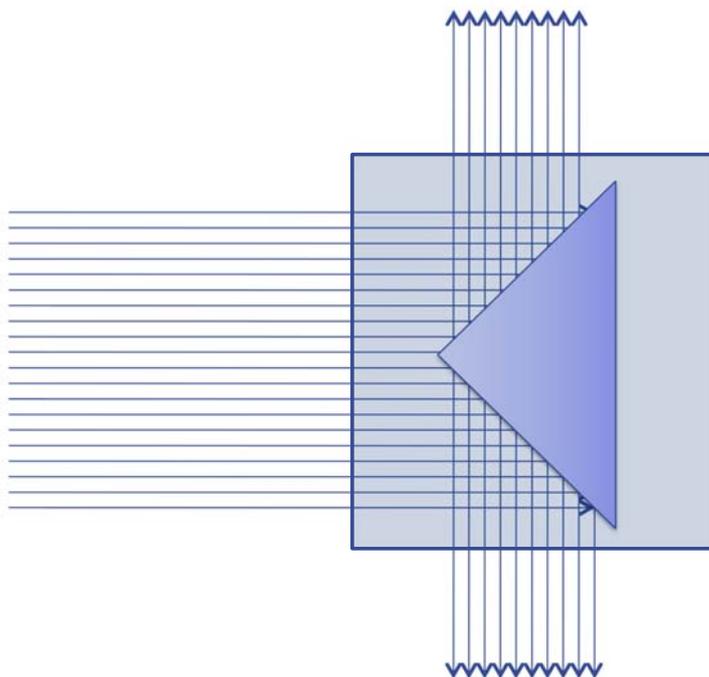
Streuexperimente



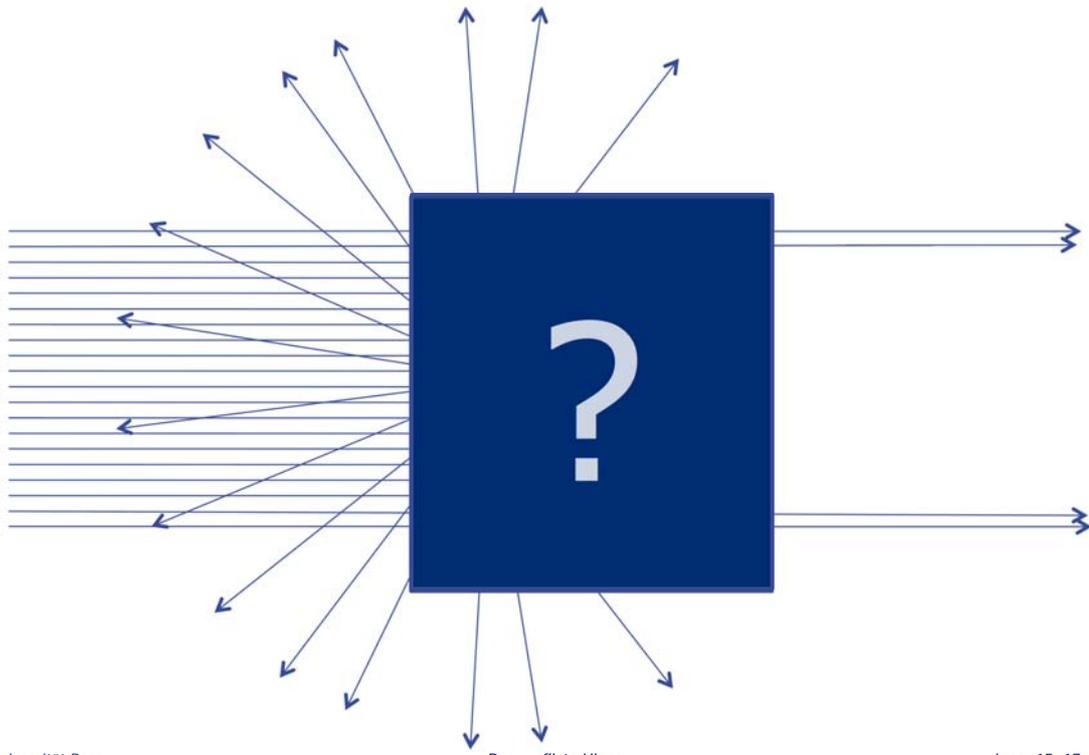
Streuexperimente



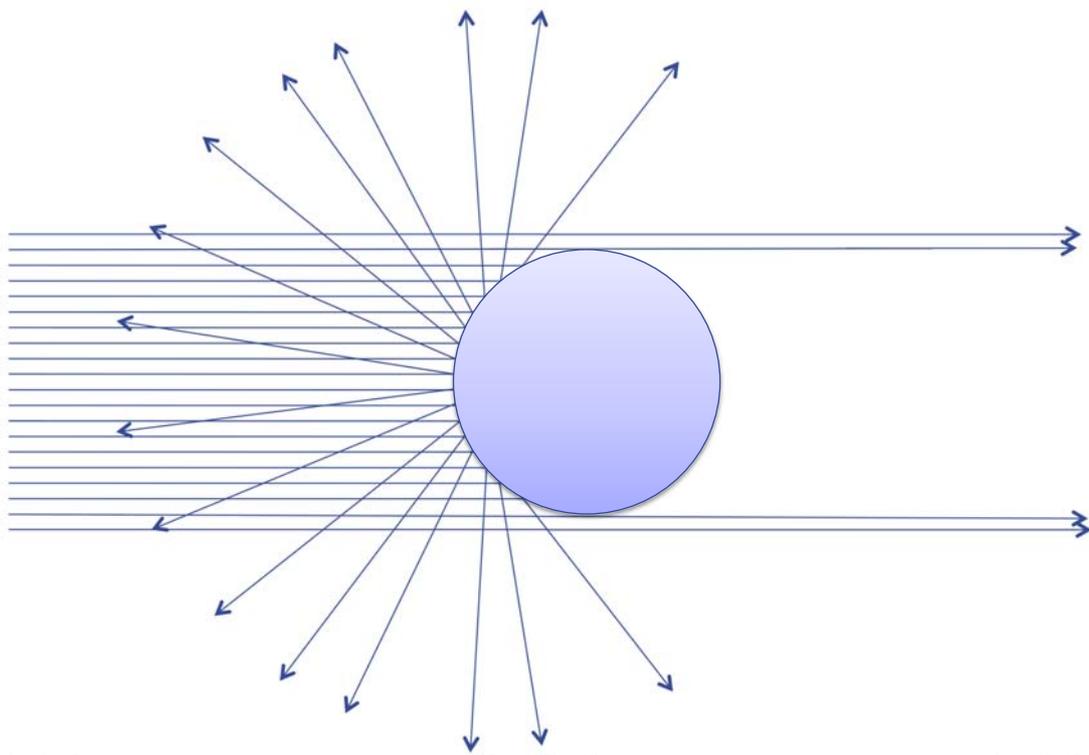
Streuexperimente



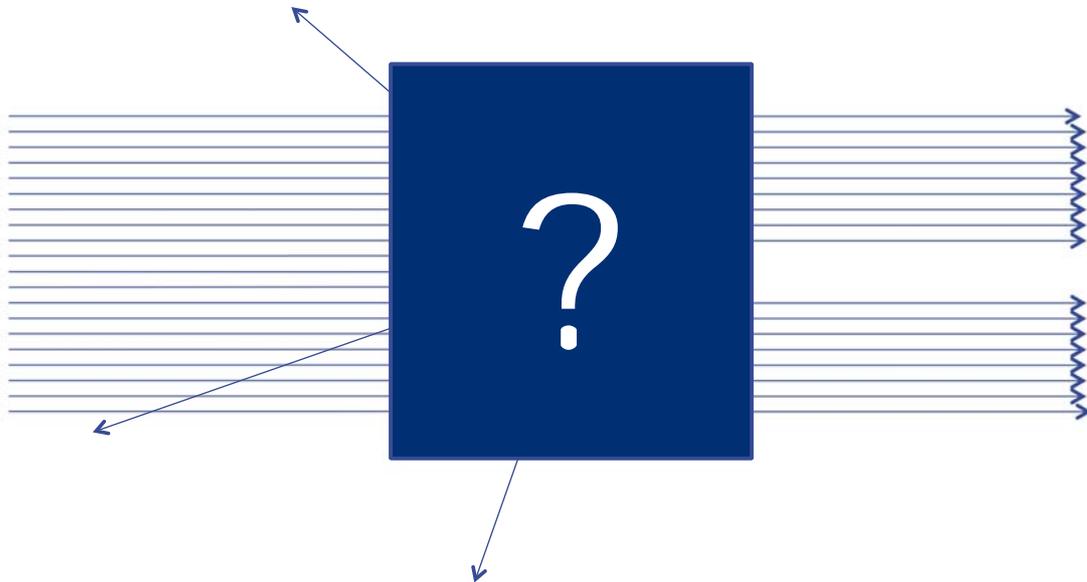
Streuexperimente



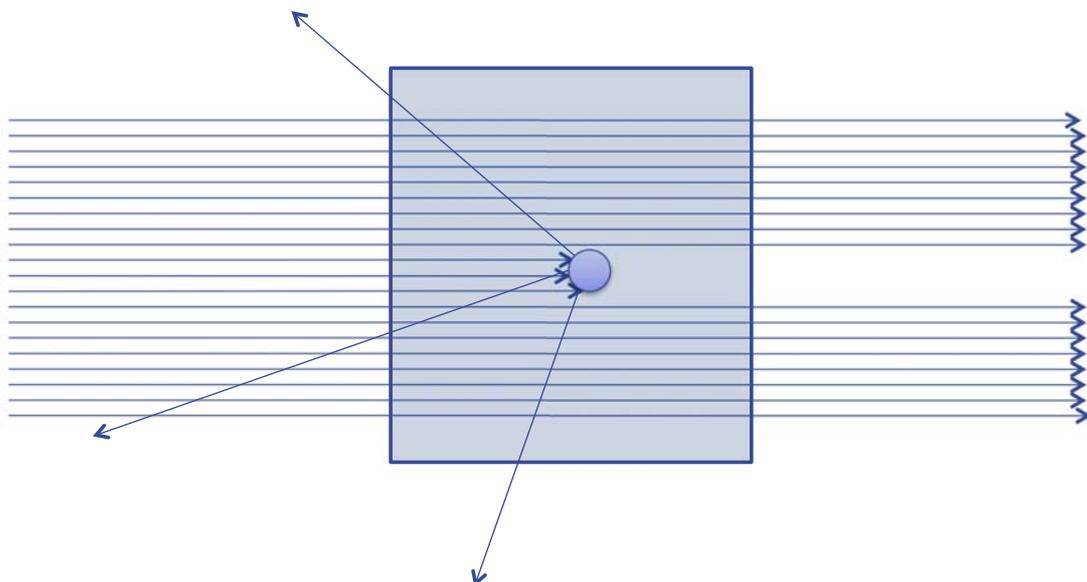
Streuexperimente



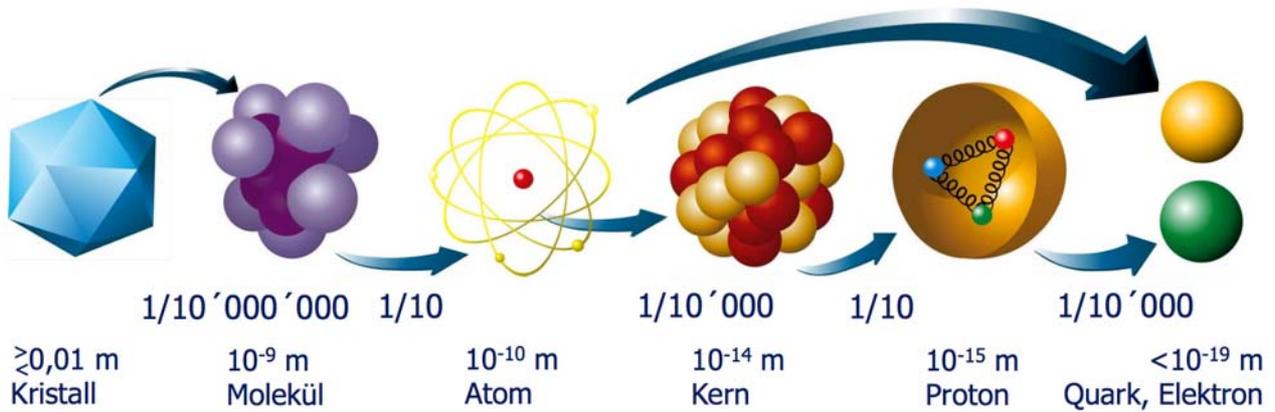
Streuexperimente



Streuexperimente



Mit Teilchenbeschleunigern kann man die Struktur der Materie erforschen

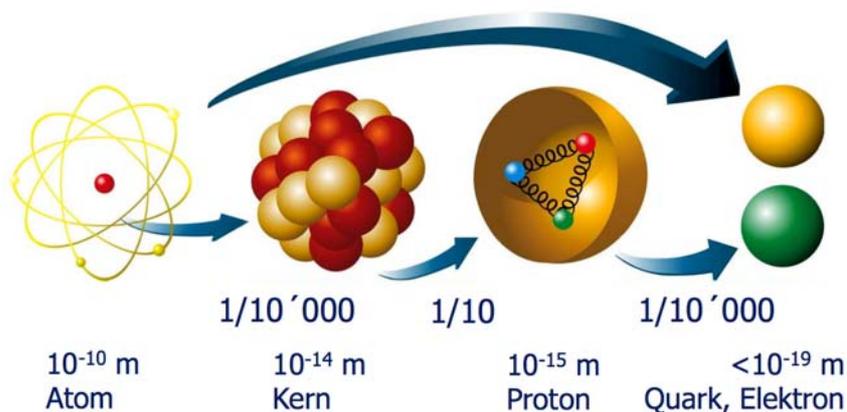


Stecknadelkopf:
 10^{-3} m = 0,001 m

Elektron, Quark:
 $< 10^{-19}$ m = 0,000'000'000'000'000'000'1 m

Punktförmig ?

Mit Teilchenbeschleunigern kann man die Struktur der Materie erforschen



Zum Vergleich:

Sei ein **Atomradius 1000 km** \approx Distanz von Bern nach Kopenhagen, oder $3\times$ zur ISS in 350 km Höhe

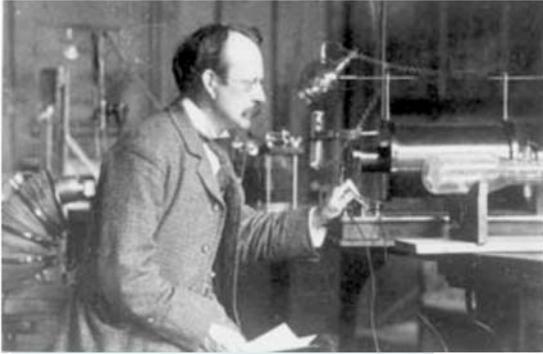
Kernradius: 10^6 m $\div 10^4 = 10^2$ m \leftarrow Jentower (144m – ohne Antenne)

Protonradius: 10^2 m $\div 10 = 10$ m \leftarrow so gross wie ein Klassenzimmer

Quarks und Elektronen sind kleiner als: 10 m $\div 10^4 < 1$ mm \leftarrow so gross wie ein Stecknadelkopf

So eine Auflösung hat nur der LHC

Über 100 Jahre Teilchenphysik



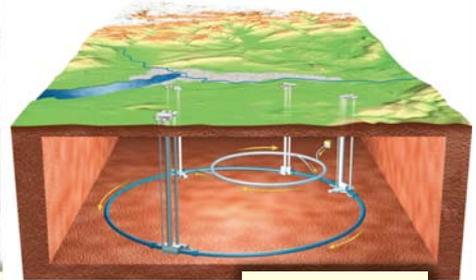
1897 Elektronenbeschleuniger
Kathodenstrahl (so wie alte Fernseher funktionieren)
J.J. Thomson



1930 Erster ringförmiger Beschleuniger

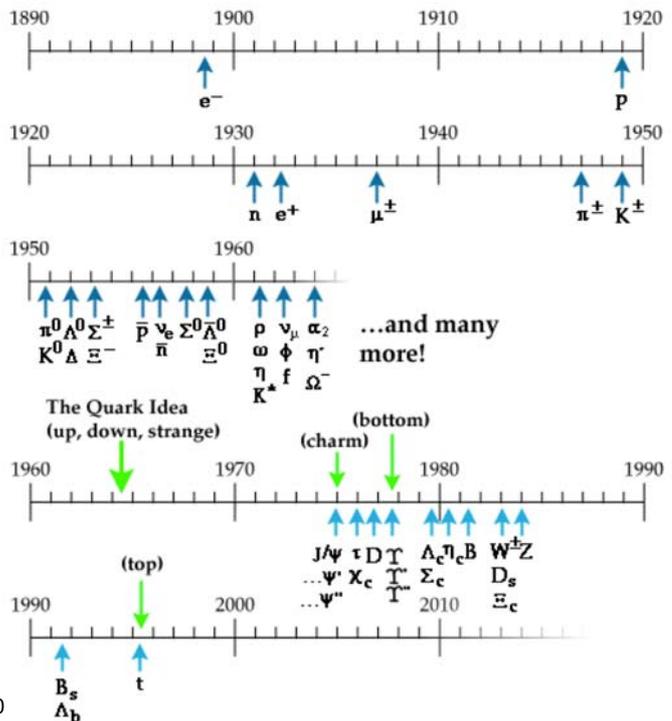
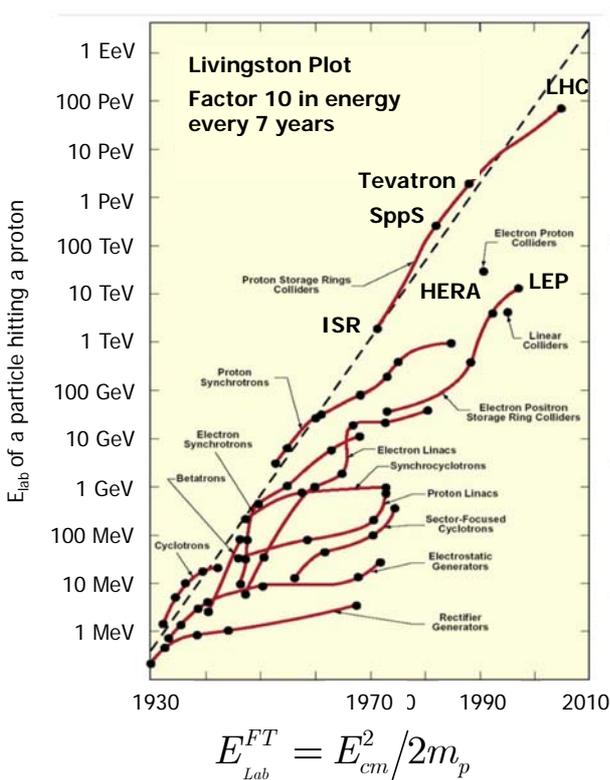


1940



Heute: LHC

Seit über 100 Jahren werde Teilchen beschleunigt



Teilchen, Kräfte, Struktur der Materie,
Big Bang, und, und, und,...

Das Standard Modell der Teilchenphysik

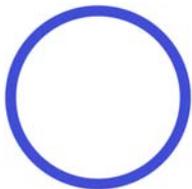
Symmetrien
Relativitätstheorie
Quantenmechanik

Leptons

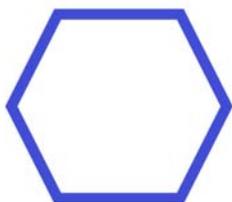
CERN - 9. November 2013 29

Symmetrien

Eine Symmetrie ist dann vorhanden, wenn sich ein System nicht ändert unter einer **Spiegelung**, oder **Drehung**, oder einer **sonstigen Transformation** (Veränderung).



Einen Kreis kann um seinen Mittelpunkt um einen beliebigen Winkel gedreht werden, und keiner kann erkennen, ob diese Drehung durchgeführt wurde, oder eben nicht!



Ein Sechseck kann man um seinen Mittelpunkt drehen, und man erkennt sofort, dass es gedreht wurde....

Ausser der Drehwinkel ist gerade 60° , 120° , 180° , 240° , 300° , 360°

Symmetrien

Symmetrien spielen eine äusserst wichtige Rolle in der Physik.
Emmy Noether hatte dies schon 1918 erkannt!



Emmy Noether
1882 – 1935

Jeder **Symmetrie-Invarianz** steht eine **Erhaltungsgrösse** gegenüber!

Ein Experiment soll unabhängig davon **wann** es durchgeführt wird, das selbe Resultat ergeben → **Zeitinvarianz**

Aus der **Zeitinvarianz** folgt, dass **Energie** erhalten ist.

Ein Experiment soll unabhängig davon **wo** es ausgeführt wird, das selbe Resultat ergeben → **Translationsinvarianz**

Aus der **Translationsinvarianz** folgt, dass **Impuls** erhalten ist.

Ein Experiment soll unabhängig seiner **Ausrichtung** im Raum, das selbe Resultat ergeben → **Rotationsinvarianz**

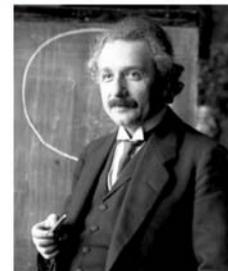
Aus der **Rotationsinvarianz** folgt, dass **Drehimpuls** erhalten ist.

Relativitätstheorie

Albert Einstein (1905)

Die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ist immer die selbe, egal ob sich die Lichtquelle bewegt oder nicht.

Lichtgeschwindigkeit $c = 299\,792\,458$ m/s (exakt!)



Albert Einstein
1879 – 1955

Dies hat fundamentale Konsequenzen

Nichts kann die Lichtgeschwindigkeit übertreffen.

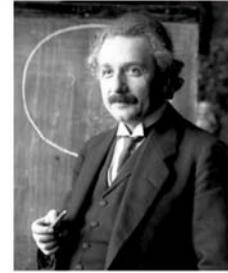
Masselose Teilchen bewegen sich exakt mit der **Lichtgeschwindigkeit**

Teilchen, die eine **Masse** haben, bewegen sich **langsamer** als die Lichtgeschwindigkeit.

Relativitätstheorie – $E=mc^2$

$$E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$$

Energie E , Masse m , und Impuls p eines Teilchens sind eng miteinander durch die Lichtgeschwindigkeit c verknüpft.



Albert Einstein
1879 – 1955

Für ein **ruhendes Teilchen** ist sein Impuls $p = 0$ und es gilt:

$$E = mc^2$$

Energie ist gleich Masse mal Lichtgeschwindigkeit im Quadrat ist also ein Spezialfall einer allgemeineren Aussage!

und Quantenmechanik

$$E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$$

Dies ist eine quadratische Gleichung!

Quadratische Gleichungen haben im Allgemeinen zwei Lösungen!

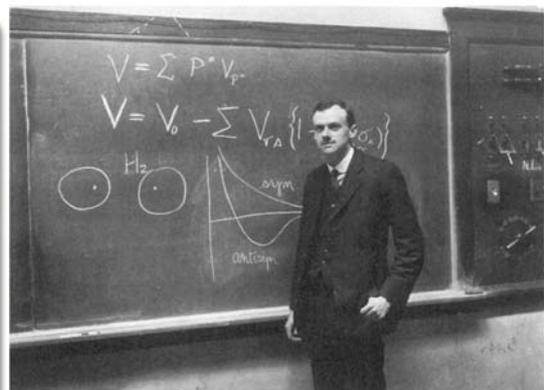
Dirac 1928:

Will man ein **Elektron mathematisch beschreiben** geht dies nur, wenn es neben dem Elektron auch ein **Anti-Elektron** gibt!

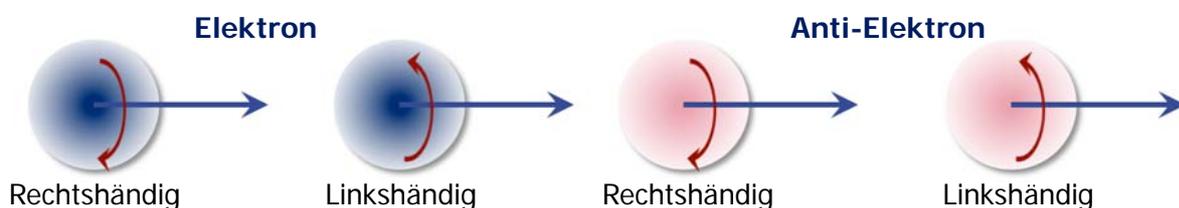
Zwei Lösungen der obigen Gleichung!

Zusätzlich haben Elektronen einen **intrinsicen Eigendrehimpuls** – den **Spin**.

Dies ergibt vier Zustände:

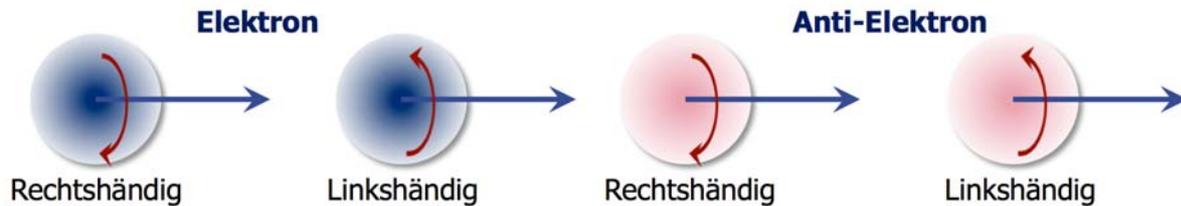


Paul Adrien Maurice Dirac
1902 – 1984



welches sind die bestimmenden Symmetrien

in der Natur?
wo kommen die Kräfte her, die zwischen den Teilchen wirken?



$U(1)$ ist eine **Symmetrieoperation**, die eine **Elektronenfunktion** um einen beliebigen **Phasenwinkel** φ dreht, und dabei das **Elektron invariant lässt** (d.h. das Elektron dreht nicht).

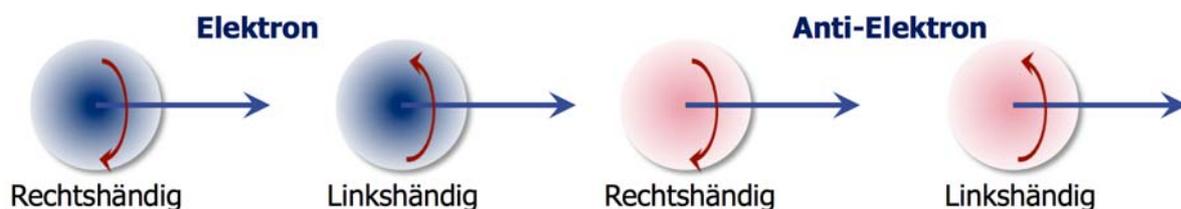
$$f'_{Elektron}(x,t) = f_{Elektron}(x,t) \cdot e^{i\varphi(x,t)} \quad f \text{ und } f' \text{ beschreiben das selbe Elektron !}$$

Der Phasenwinkel soll sich sogar verändern dürfen, je nachdem an welchem Ort oder zu welcher Zeit man diesen auf die gesamte Elektronenfunktion anwendet: Phasenwinkel $\varphi(x,t)$

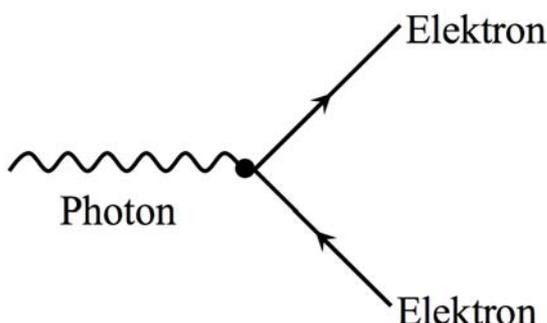
Wir haben erst einmal keine Ahnung, ob dies eine **vernünftige Symmetrie** ist...

Was allerdings folgt ist bahnbrechend!

$U(1) \rightarrow$ Ladungserhaltung und Photonen



Aus der **Bedingung**, dass $U(1)$ eine **gute Symmetrie** sein soll folgt, dass **Elektronen eine Ladung haben**, und dass es ein **Photon** geben muss, welches an die **Ladung** des Elektrons koppelt!



Damit ist die gesamte **Elektrizitätslehre** inklusive **Maxwellgleichungen** definiert!

Über 100 Jahre Arbeit wichtiger Physiker (Ampère, Volta, Ohm, Faraday,..., Maxwell) wurde auf eine fundamentale Symmetrie zurückgeführt!

Radioaktivität und das Leuchten der Sonne

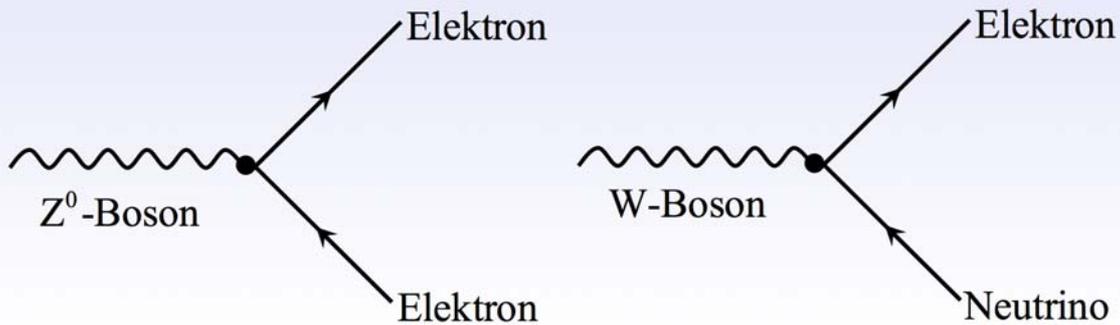
Radioaktivität und das **Leuchten der Sonne** sind im Standard Modell enthalten!

Um dies zu verstehen, brauchen wir weitere Eigenschaften:

Wir müssen die richtigen Symmetrien finden!

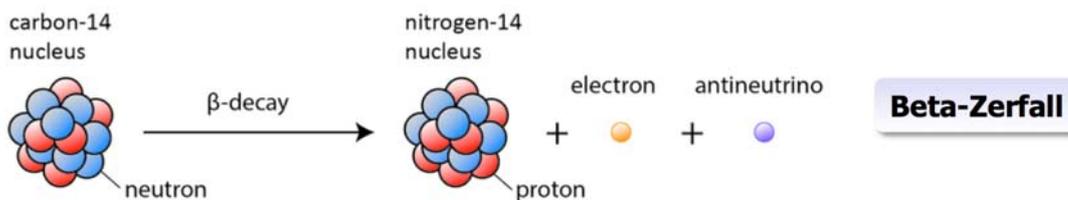
SU(2) ist eine Symmetrieeoperation, die eine Elektronenfunktion zusammen mit einer Neutrinfunktion um drei beliebige Phasenwinkel dreht – ohne dass sich dabei ein linkshändiges Elektron+Neutrino-Paar ändert.

Dies ergibt drei neue Teilchen: Die **W⁺**, **W⁻** und **Z⁰** Bosonen samt ihren Wechselwirkungen!

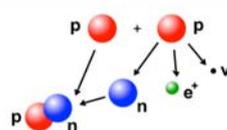
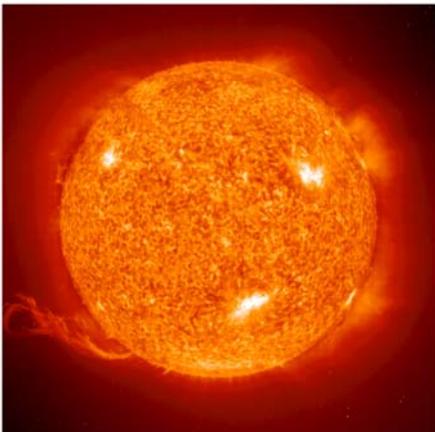


Damit ist die **schwache Kraft** definiert.

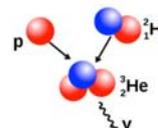
Radioaktivität und das Leuchten der Sonne



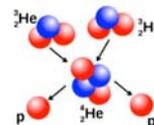
Wasserstoffbrennen in der Sonne



Proton-Proton Fusion zu Deuterium plus Anti-Elektron plus Neutrino

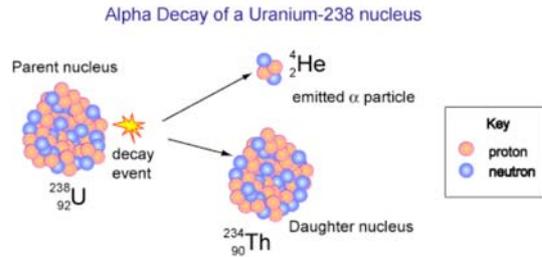
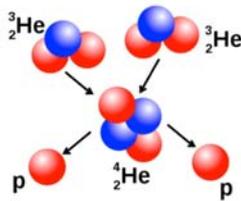


Proton-Deuterium Fusion zu Helium-3



Helium-3-Helium-3 Fusion zu Helium-4 plus zwei Protonen

Kernreaktionen und noch mehr zur Radioaktivität



SU(3) ist eine Symmetrieoperation, die jeweils drei Quarkfunktionen zusammen um acht beliebige Phasenwinkel dreht und dabei die drei Quarks invariant lässt.

Dies ergibt acht neue Teilchen: Die **Gluonen** welche Atomkerne zusammenhalten!

Damit ist die **starke Kraft** definiert.

Sämtliche Vorgänge der **elektromagnetischen**, der **schwachen** und der **starken** Wechselwirkungen sind somit verstanden und können prinzipiell berechnet werden.

Manche Berechnungen sind schwierig und brauchen grosse Rechenleistung – trotzdem sind sie prinzipiell durchführbar – **und im Experiment überprüfbar.**

z. T. mit extremster Genauigkeit, bis auf 12 Stellen nach dem Komma genau!

Das Standard Model der Teilchenphysik

Quarks

u up	c charm	t top
d down	s strange	b bottom

Kräfte

Z Z boson	γ photon
W W boson	g gluon

e electron	μ muon	τ tau
ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino

Leptonen

$$\text{SU}(3) \times \text{SU}(2) \times \text{U}(1)$$

Quarks



Bohr Atom – 1913

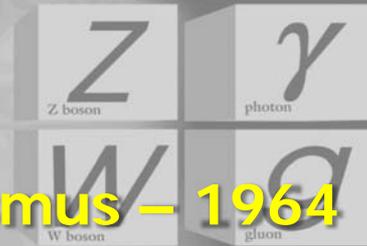
Higgs (BEH) Mechanismus – 1964

Higgs Boson – 2012



Leptonen

Kräfte



$$SU(3) \times SU(2) \times U(1)$$

Ein riesiger Erfolg der Physik ?

noch nicht – es gibt da noch ein Problem.....

Das **Standard Model** baut auf **Quantenmechanik** und **Relativitätstheorie** auf. Mit **wenigen Symmetrien** – die man erst finden musste – kann die ganze Welt erklärt werden.

ABER – es fehlt die **Gravitation** in dieser Beschreibung. Trotz grosser Bemühungen ist dies bisher noch nicht geglückt. Gravitation wird im Rahmen der **allgemeinen Relativitätstheorie** sehr gut beschrieben.

ABER – **alle Teilchen sind zwingend masselos**
– dies verlangen die Symmetrien $U(1) \times SU(2)$

Wir wissen natürlich, dass Teilchen Masse haben
– etwas fehlt.



Peter Higgs, und weitere Physiker hatten 1964 eine Idee...

Berühmte Arbeiten von 1964 ...

Broken Symmetry and the Mass of Gauge Vector Mesons

F. Englert and **R. Brout**

Phys. Rev. Lett. **13**, 321-323 (1964)

Received 26 June 1964; published in the issue dated 31 August 1964

Broken Symmetries, Massless Particles and Gauge Fields

Peter W. Higgs

Phys. Lett. **12**, 132-133 (1964)

Received 27 July 1964; published in the issue dated 15 September 1964

Broken Symmetries and the Masses of Gauge Bosons

Peter W. Higgs

Phys. Rev. Lett. **13**, 508-509 (1964)

Received 31 August 1964; published in the issue dated 19 October 1964

Global Conservation Laws and Massless Particles

G. S. Guralnik, **C. R. Hagen**, and **T. W. Kibble**

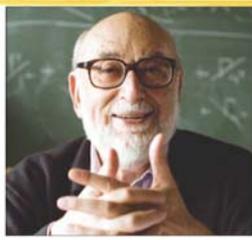
Phys. Rev. Lett. **13**, 585-587 (1964)

Received 12 October 1964; published in the issue dated 16 November 1964

Und gewonne Preise



Robert Brout
* 1928 , New York
† 4. May 2011,
Brussels



François Englert
* 6. November
1932 , Belgium



Peter Higgs
* 29. May 1929 in
Bristol, England



Gerald Guralnik
* 17. September
1936
Cedar Falls, Iowa



Carl Richard Hagen
* 2. February
1937 , Chicago



Thomas Kibble
* 23. December 1932
Madras, British India

Wolf Prize 2004

Robert Brout, François Englert, and Peter Higgs:

"for pioneering work that has led to the insight of mass generation, whenever a local gauge symmetry is realized asymmetrically in the world of sub-atomic particles."

Sakurai Prize 2010

Gerald Guralnik, C. R. Hagen, Tom Kibble, Robert Brout, François Englert, and Peter Higgs:

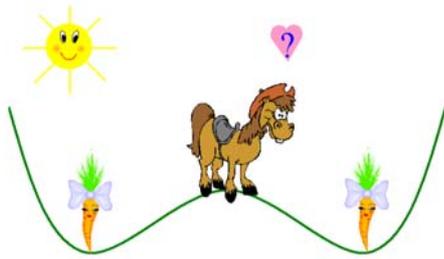
"For elucidation of the properties of spontaneous symmetry breaking in four-dimensional relativistic gauge theory and of the mechanism for the consistent generation of vector boson masses."

Nobel Prize 2013

François Englert, and Peter Higgs:

"For the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN's Large Hadron Collider".

Spontane Symmetriebrechung



Pferd und **Karotten** bilden zusammen ein **vollständig symmetrisches System** in seinem Anfangszustand.

Solange sich das Pferd nicht für eine der beiden Karotten entscheidet ist die **Symmetrie erhalten**.

Selbstverständlich ist das Pferd lieber bei einer Karotte, die **Symmetrie** ist dann **spontan gebrochen**.

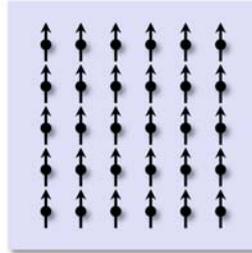
Ein alltägliches Beispiel spontaner Symmetriebrechung ist z. Bsp. ein Ferromagnet:



Bei einem **Ferromagneten** sind am Anfang, bei hoher Temperatur, keine ausgezeichneten Richtungen ausgezeichnet.

Absolut symmetrischer Zustand

HP Beck - Universität Bern



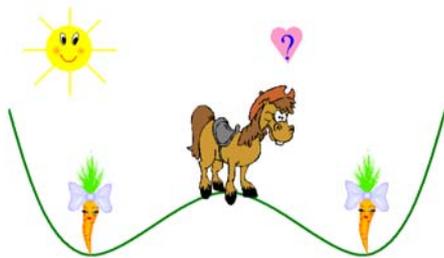
Wird der Ferromagnet abgekühlt (Zimmertemperatur reicht!) stellt man fest, dass alle Spins in eine Richtung zeigen.

Spontan gebrochene Symmetrie

Das verflixte Higgs

CERN - 9. November 2013 45

Spontane Symmetriebrechung



Der **tiefste Punkt** (Karotte) **ist tiefer als** der Punkt im **Ursprung** (Pferd)!

Der **Ursprung** (Pferd) ist nicht der **Vakuumszustand**.

Im tiefsten Punkt ist das **Vakuum nicht leer...**!

Dies war gerade die Idee von Higgs,
Brout, Englert, Kibble, Hagen, und Guralnik

Der Higgs-Mechanismus

- ✓ Das Vakuum ist **nicht leer!**
- ✓ Das Vakuum ist angefüllt mit einem neutralen, skalaren Feld, dem **Higgs Feld.**
- ✓ Wenn Teilchen sich durch den Raum bewegen, spüren sie das Higgs-Feld, und werden so gebremst.
- ✓ Die eigentlich masselosen Teilchen verhalten sich also, als ob sie eine Masse hätten.
 - ✓ **Masse ist also ein Effekt und nicht eine intrinsische Eigenschaft.**
- ✓ Verschiedene Teilchen spüren das Higgs-Feld verschieden stark.
 - ✓ **Ein Myon ist entsprechend schwerer als ein Elektron.**
- ✓ Das Higgs-Feld kann man anregen
 - ✓ **solche Anregungen sind gerade das Higgs-Teilchen.**



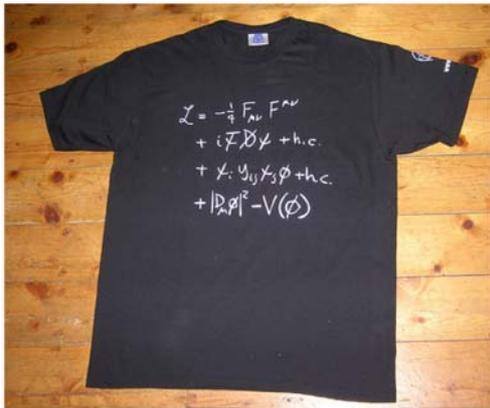
Luft – ein Analogiemodell

- ✓ Ein analoges Modell – nicht ganz perfekt, aber immerhin – ist Luft!
 - ✓ Luft spürt man normalerweise nicht um uns herum.
- ✓ Der uns umgebende Raum ist angefüllt mit Luft ohne dass man irgendwelche Eigenschaften davon wahrnimmt.
 - ✓ Luft ist durchsichtig, und wir spüren auch nicht das Gewicht der Luft, die auf uns drückt.
- ✓ Wenn man sich durch die Luft hindurch bewegt, spürt man einen Widerstand.
 - ✓ **man wird dadurch abgebremst und scheinbar massiver.**
- ✓ Wenn man sich sehr schnell durch Luft hindurch bewegt, ist der Luftstrom nicht mehr laminar
 - ✓ **es entstehen Turbulenzen**
- ✓ Diese Turbulenzen (= **Wirbelzöpfe**) entsprechen dem **Higgs-Teilchen.**
- ✓ Die Existenz des Higgs-Teilchens ist ein Beweis zur Existenz des Higgs-Felds.
 - ✓ Das Vakuum ist tatsächlich nicht leer!



Das Standard Modell

Ein Meilenstein auf dem Weg zu einem fundamentalen Verständnis des Universums



Etwas komplizierter als zBsp $E=mc^2$.

Liefert eine **exakte**, und **überprüfbare** Beschreibung aller Messdaten je gemachter Experimente (ausser... Gravitation).

Diese Formel basiert auf **Symmetrien**, der **Quantenmechanik**, der **Relativitätstheorie** und den Elementarteilchen.

Riesiger Erfolg im Verständnis der Natur!

Erste Zeile: die fundamentalen Kräfte (elektro-magnetisch, stark, schwach)

Zweite Zeile: wie die Kräfte auf Teilchen (Quarks und Leptonen) wirken.

Dritte Zeile: wie Quarks und Leptonen durch das Higgs-Teilchen Masse erhalten.

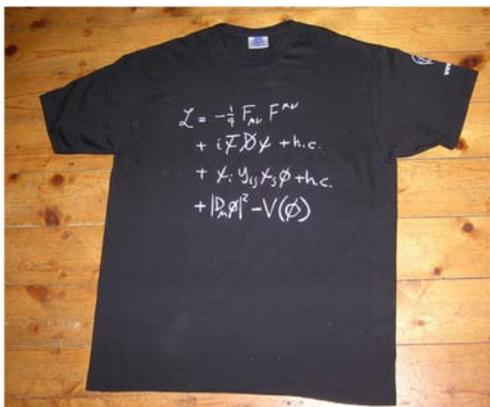
Vierte Zeile: wie **Bosonen Masse** erhalten und das Higgs-Vakuum

Elektro-magnetische, starke und schwache Kraft **OK**. Gravitation (mikroskopisch) noch **unklar**.

Diese Formel beinhaltet ein **neues Teilchen** ! Das **Higgs Teilchen** → gibt es dies wirklich ?

Das Standard Modell

Ein Meilenstein auf dem Weg zu einem fundamentalen Verständnis des Universums



Alle Terme
ausgeschrieben...

$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{2}\partial_\mu g_\nu^a \partial_\mu g_\nu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a \partial_\mu g_\nu^b g_\nu^c - \frac{1}{2}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\nu^b g_\nu^c g_\nu^d g_\nu^e + \\
 & \frac{1}{2}ig^2(\bar{q}_i^a \gamma^\mu q_j^a)g_\mu^a + G^a \partial^\mu G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu G^a G^b G^c g_\mu^c - \partial_\mu W_\nu^+ \partial_\mu W_\nu^- - \\
 & M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2}\partial_\mu Z_\nu^0 \partial_\mu Z_\nu^0 - \frac{1}{2}M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \frac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - \\
 & \frac{1}{2}m_h^2 H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - M^2 \phi^+ \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \frac{1}{2}M^2 \phi^0 \phi^0 - \beta_h \frac{(2M^2)}{v} \\
 & H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) + \frac{2M^2}{v} \alpha_h - ig_{cw} [\partial_\mu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\mu^- - \\
 & W_\mu^+ W_\mu^-) - Z_\mu^0 (W_\mu^+ \partial_\mu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\mu W_\mu^+) + Z_\mu^0 (W_\mu^+ \partial_\mu W_\mu^- - \\
 & W_\mu^- \partial_\mu W_\mu^+) - ig_{sw} [\partial_\mu A_\mu (W_\mu^+ W_\mu^- - W_\mu^- W_\mu^+) - A_\mu (W_\mu^+ \partial_\mu W_\mu^- - \\
 & W_\mu^- \partial_\mu W_\mu^+) + A_\mu (W_\mu^+ \partial_\mu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\mu W_\mu^+)] - \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\mu^+ W_\mu^- + \\
 & \frac{1}{2}g^2 W_\mu^- W_\mu^- W_\mu^+ + g^2 Z_\mu^0 (Z_\mu^0 W_\mu^+ Z_\mu^0 W_\mu^- - Z_\mu^0 Z_\mu^0 W_\mu^+ W_\mu^-) + \\
 & g^2 s_w^2 (A_\mu W_\mu^+ A_\mu W_\mu^- - A_\mu A_\mu W_\mu^+ W_\mu^-) + g^2 s_w c_w [A_\mu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\mu^- - \\
 & W_\mu^- W_\mu^+) - 2A_\mu Z_\mu^0 W_\mu^+ W_\mu^-] - g\alpha [H^2 + H\phi^0 \phi^0 + 2H\phi^+ \phi^-] - \\
 & \frac{1}{8}g^2 \alpha_h [H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2] - \\
 & gM W_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2}g \frac{M^2}{v} Z_\mu^0 Z_\mu^0 H - \frac{1}{2}ig [W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - \\
 & W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0)] + \frac{1}{2}ig [W_\mu^+ (H \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) - W_\mu^- (H \partial_\mu \phi^+ - \\
 & \phi^+ \partial_\mu H)] + \frac{1}{2}g \frac{1}{c_w} (Z_\mu^0 (H \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) - ig \frac{2M^2}{v} Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \\
 & ig_{sw} M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - ig \frac{1-2s_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + \\
 & ig_{sw} A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \frac{1}{4}g^2 W_\mu^+ W_\mu^+ [H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-] - \\
 & \frac{1}{4}g^2 \frac{1}{c_w} Z_\mu^0 Z_\mu^0 [H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-] - \frac{1}{2}g^2 s_w^2 Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
 & W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2}ig^2 s_w^2 Z_\mu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}g^2 s_w c_w A_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
 & W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 c_w (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - \\
 & g^2 s_w^2 A_\mu A_\mu \phi^+ \phi^- - e^3 (\gamma \partial + m_e^2) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda \gamma \partial \nu^\lambda - \bar{u}_j^\lambda (\gamma \partial + m_u^2) u_j^\lambda - \bar{d}_j^\lambda (\gamma \partial + \\
 & m_d^2) d_j^\lambda + ig_{sw} A_\mu [-(e^\lambda \gamma e^\lambda) + \frac{2}{3}(\bar{u}_j^\lambda \gamma u_j^\lambda) - \frac{1}{3}(\bar{d}_j^\lambda \gamma d_j^\lambda)] + \frac{ig}{c_w} Z_\mu^0 [(\bar{\nu}^\lambda \gamma \nu^\lambda (1 + \\
 & \gamma^5) \nu^\lambda) + (e^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{4}{3}s_w^2 - 1 - \gamma^5) u_j^\lambda) + \\
 & (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{2}{3}s_w^2 - \gamma^5) d_j^\lambda)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ [(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \\
 & \gamma^5) C_{\lambda\mu} d_j^\lambda)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- [(e^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\mu}^\dagger \gamma^\mu (1 + \gamma^5) u_j^\lambda)] + \\
 & \frac{ig}{2\sqrt{2}} \frac{m_h^2}{M} [-\phi^+ (1 - \gamma^5) e^\lambda + \phi^- (e^\lambda (1 + \gamma^5) \nu^\lambda)] - \frac{g}{2} \frac{m_h^2}{M} [H (e^\lambda e^\lambda) + \\
 & i\phi^0 (e^\lambda \gamma^5 e^\lambda)] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ [-m_u^2 (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\mu}^\dagger (1 - \gamma^5) d_j^\lambda) + m_d^2 (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\mu}^\dagger (1 + \\
 & \gamma^5) d_j^\lambda)] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- [m_d^2 (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\mu}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^\lambda) - m_u^2 (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\mu}^\dagger (1 - \gamma^5) u_j^\lambda)] - \\
 & \frac{g}{2} \frac{m_h^2}{M} H (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_h^2}{M} H (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{ig}{2M} \phi^0 (\bar{\nu}^\lambda \gamma^5 \nu^\lambda) - \frac{ig}{2M} \phi^0 (\bar{d}_j^\lambda \gamma^5 d_j^\lambda) + \\
 & \bar{X}^\dagger (\partial^2 - M^2) X^\dagger + \bar{X}^\dagger (\partial^2 - M^2) X^\dagger + X^\dagger (\partial^2 - \frac{M^2}{c_w^2}) X^\dagger + \bar{Y} \partial^2 Y + \\
 & ig_{cw} W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X} X^\dagger - \partial_\mu X^\dagger X) + ig_{sw} W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X} X^\dagger - \partial_\mu X^\dagger X) + \\
 & ig_{cw} W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X} X^\dagger - \partial_\mu X^\dagger X) + ig_{sw} W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X} X^\dagger - \partial_\mu X^\dagger X) + \\
 & ig_{cw} Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X} X^\dagger - \partial_\mu X^\dagger X) + ig_{sw} A_\mu (\partial_\mu \bar{X} X^\dagger - \partial_\mu X^\dagger X) - \\
 & \frac{1}{2}gM [\bar{X} X^\dagger H + \bar{X} X^\dagger H + \frac{1}{c_w} \bar{X} X^\dagger X^\dagger H] + \frac{1-2s_w^2}{2c_w} igM [\bar{X} X^\dagger \phi^- + \\
 & \bar{X} X^\dagger \phi^-] + \frac{1}{2}igM [\bar{X} X^\dagger \phi^- + \bar{X} X^\dagger \phi^-] + igM s_w [\bar{X} X^\dagger \phi^- + \\
 & \bar{X} X^\dagger \phi^-] + \frac{1}{2}igM [\bar{X} X^\dagger \phi^0 - \bar{X} X^\dagger \phi^0]
 \end{aligned}$$

Erste Zeile: die fundamentalen Kräfte (elektro-magnetisch, stark, schwach)

Zweite Zeile: wie die Kräfte auf Teilchen (Quarks und Leptonen) wirken.

Dritte Zeile: wie Quarks und Leptonen durch das Higgs-Teilchen Masse erhalten.

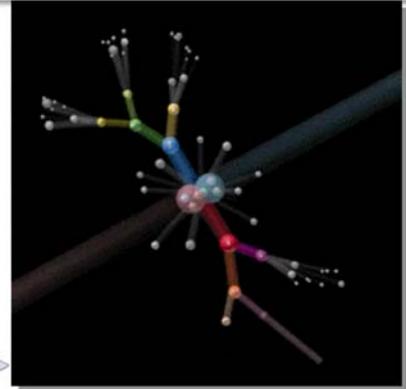
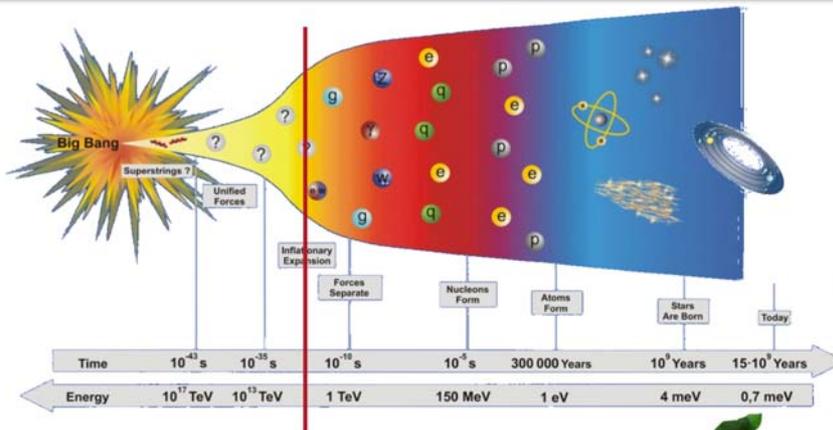
Vierte Zeile: wie **Bosonen Masse** erhalten und das Higgs-Vakuum

Das Universum

Wir kennen die Elementarteilchen, ihre Eigenschaften und Wechselwirkungen,
 ⇒ das **Standardmodell der Teilchenphysik**

damit kennen wir das Rezept um das Universum aufzubauen...

- Es besteht aus **Elementarteilchen**
- Es fand seinen Anfang im **Big Bang** vor **13.7 Milliarden Jahren**
- Wir können ein Bild der **Evolution** aufzeichnen – angefangen mit dem Big Bang
- Durch **Experimente** kann dieses Bild **überprüft** werden



LHC 14 TeV $\triangleq 10^{-12}$ s ca. Apfelgross



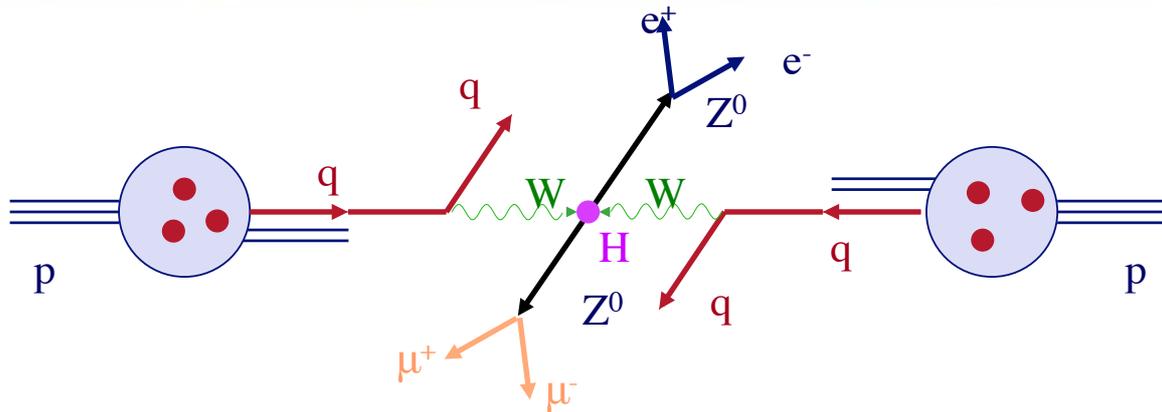
Was sind die Eigenschaften dieses seltsam anmutenden Higgs-Felds?

Das einzige was wir tun können ist die Anregung des Higgs-Felds zu messen.

Wir müssen das Higgs-Teilchen erzeugen und vermessen

Wie geht sowas?

Higgs Produktion in Proton-Proton Kollisionen

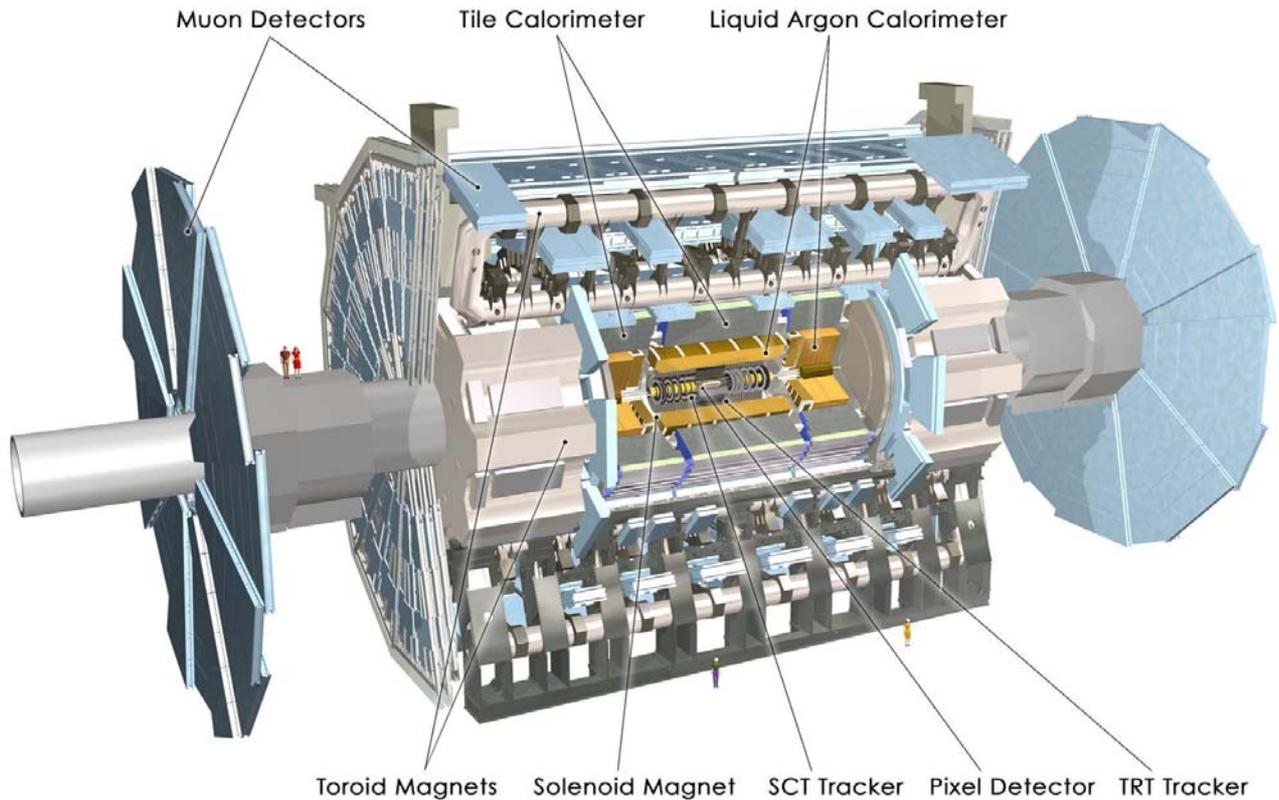


Genug Theorie !

Das ATLAS Experiment am LHC

- Theorien
- auf die Waagschale legen
 - überprüfen, vermessen, oder verwerfen
 - &
 - das völlig unerwartete nicht übersehen

Der ATLAS Detektor

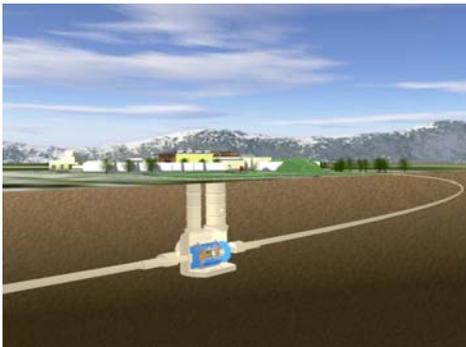


HP Beck - Universität Bern

Das verflixte Higgs

CERN - 9. November 2013 55

Der ATLAS Detektor



ATLAS erscheint klein im LHC



ATLAS ist so gross wie ein 5-stöckiges Gebäude

Länge: ~ 44 m
Höhe: ~ 25 m
Gewicht: ~ 7000 Tonnen (zum Vergleich: Eiffelturm in Paris: 10'000 Tonnen)
 ~ 10⁸ elektronische Auslesekanäle
 ~ 3000 km Kabel

HP Beck - Universität Bern

Das verflixte Higgs

CERN - 9. November 2013 56

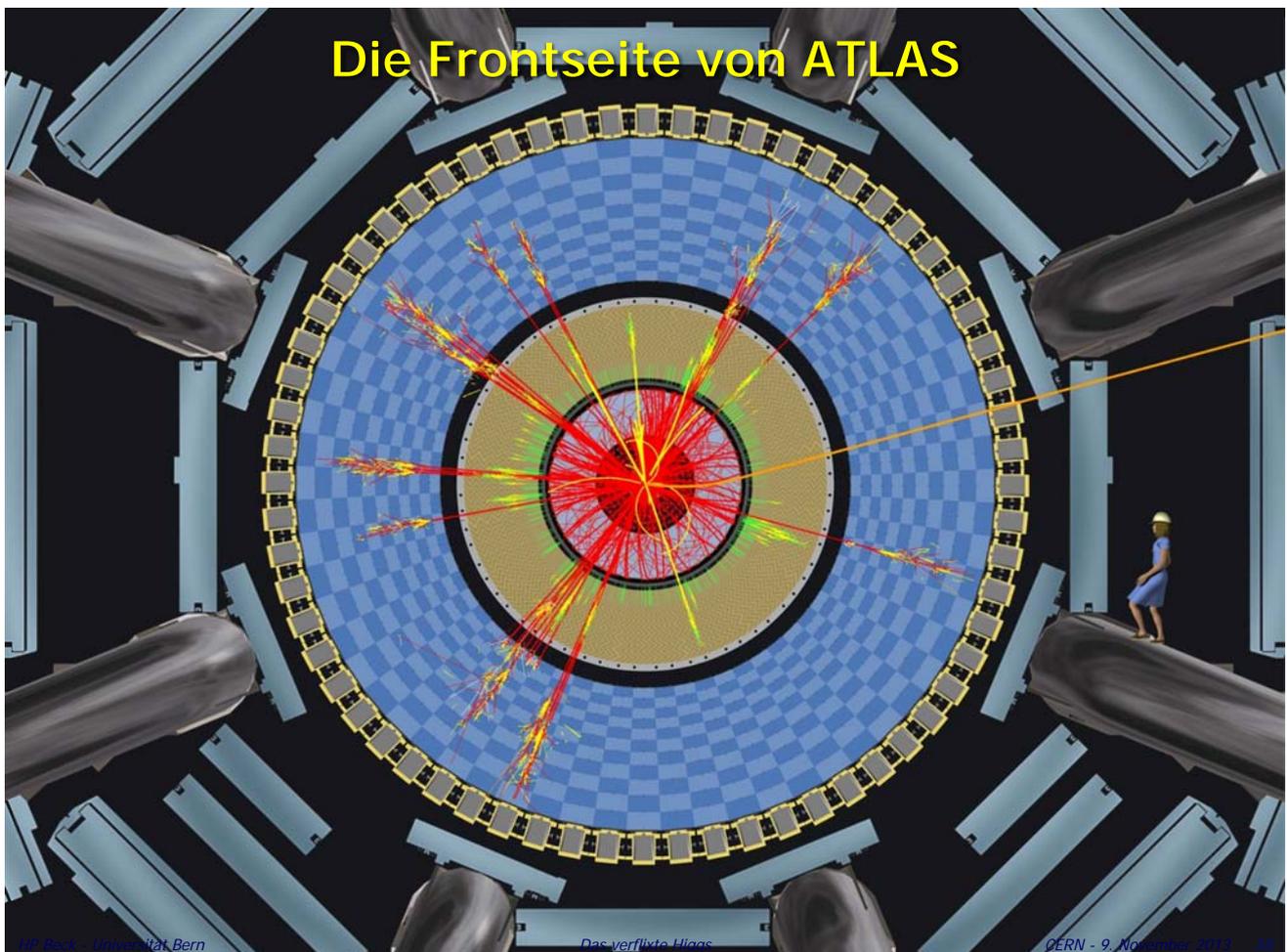
ATLAS Collaboration

38 Länder
179 Institutionen
2923 Autoren in aktuellem Higgs Papier

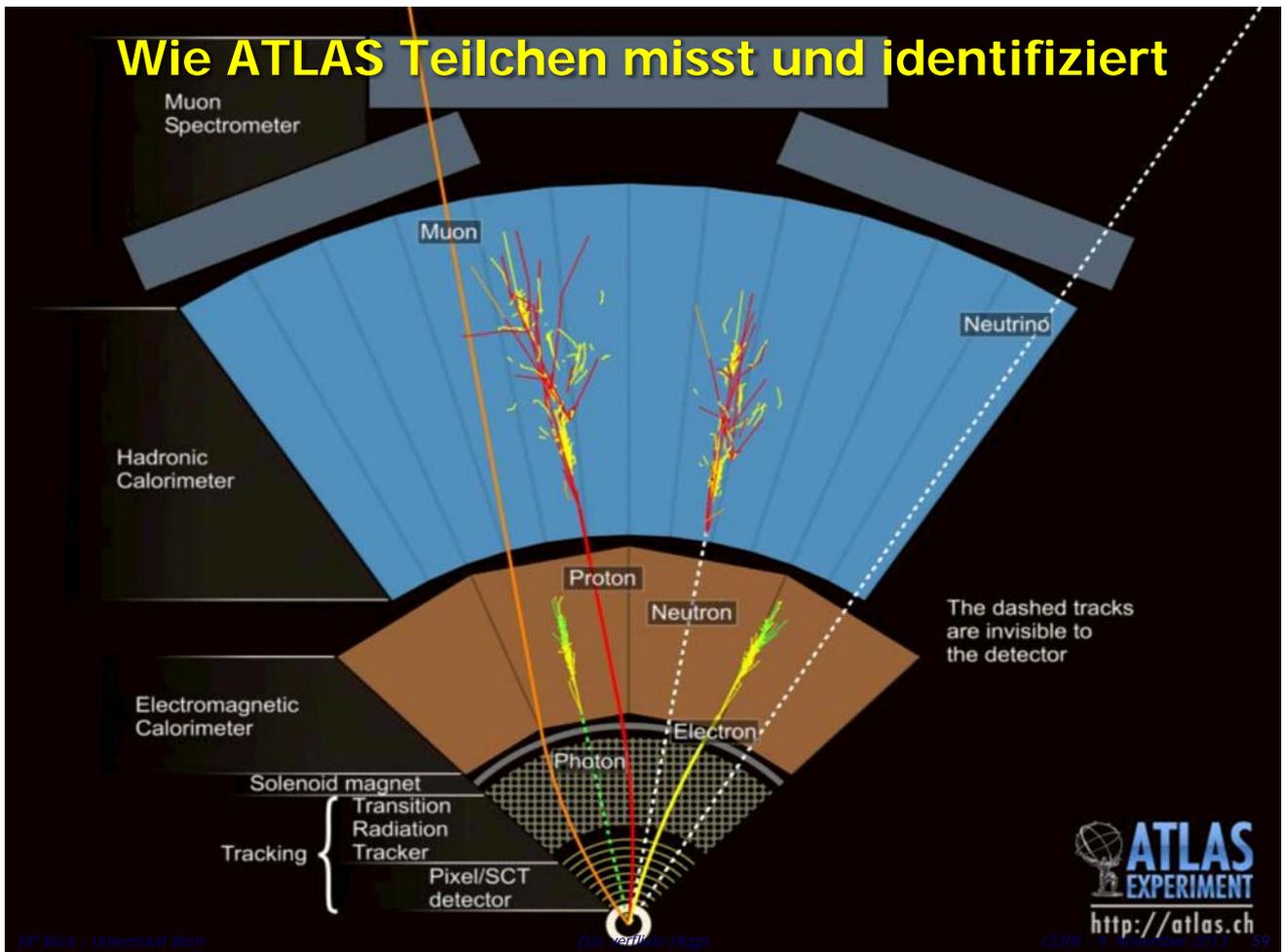


Albany, Alberta, NIKHEF Amsterdam, Ankara, LAPP Ancey, Argonne NL, Arizona, UT Arlington, Athens, NTU Athens, Baku, IFAE Barcelona, Belgrade, Bergen, Berkeley LBL and UC, HU Berlin, **Bern**, Birmingham, UAN Bogota, Bologna, Bonn, Boston, Brandeis, Bratislava/SAS Kosice, Brookhaven NL, Buenos Aires, Bucharest, Cambridge, Carleton, Casablanca/Rabat, CERN, Chinese Cluster, Chicago, Chile, Clermont-Ferrand, Columbia, NBI Copenhagen, Cosenza, AGH UST Cracow, IFJ PAN Cracow, DESY, Dortmund, TU Dresden, JINR Dubna, Duke, Frascati, Freiburg, **Geneva**, Genoa, Giessen, Glasgow, Göttingen, LPSC Grenoble, Technion Haifa, Hampton, Harvard, Heidelberg, Hiroshima, Hiroshima IT, Indiana, Innsbruck, Iowa SU, Irvine UC, Istanbul Bogazici, KEK, Kobe, Kyoto, Kyoto UE, Lancaster, UN La Plata, Lecce, Lisbon LIP, Liverpool, Ljubljana, QMW London, RHBNC London, UC London, Lund, UA Madrid, Mainz, Manchester, Mannheim, CPPM Marseille, Massachusetts, MIT, Melbourne, Michigan, Michigan SU, Milano, Minsk NAS, Minsk NCPHEP, Montreal, McGill Montreal, FIAN Moscow, ITEP Moscow, MEPhI Moscow, MSU Moscow, Munich LMU, MPI Munich, Nagasaki IAS, Nagoya, Naples, New Mexico, New York, Nijmegen, BINP Novosibirsk, Ohio SU, Okayama, Oklahoma, Oklahoma SU, Oregon, LAL Orsay, Osaka, Oslo, Oxford, Paris VI and VII, Pavia, Pennsylvania, Pisa, Pittsburgh, CAS Prague, CU Prague, TU Prague, IHEP Protvino, Regina, Ritsumeikan, UFRJ Rio de Janeiro, Rome I, Rome II, Rome III, Rutherford Appleton Laboratory, DAPNIA Saclay, Santa Cruz UC, Sheffield, Shinshu, Siegen, Simon Fraser Burnaby, SLAC, Southern Methodist Dallas, NPI Petersburg, Stockholm, KTH Stockholm, Stony Brook, Sydney, AS Taipei, Tbilisi, Tel Aviv, Thessaloniki, Tokyo ICEPP, Tokyo MU, Toronto, TRIUMF, Tsukuba, Tufts, Udine/ICTP, Uppsala, Urbana UI, Valencia, UBC Vancouver, Victoria, Washington, Weizmann Rehovot, FH Wiener Neustadt, Wisconsin, Wuppertal, Yale, Yerevan

HP Beck - Universität Bern



Wie ATLAS Teilchen misst und identifiziert



ATLAS Installation (2003 – 2008)



ATLAS – nicht nur kleine Teilchen...

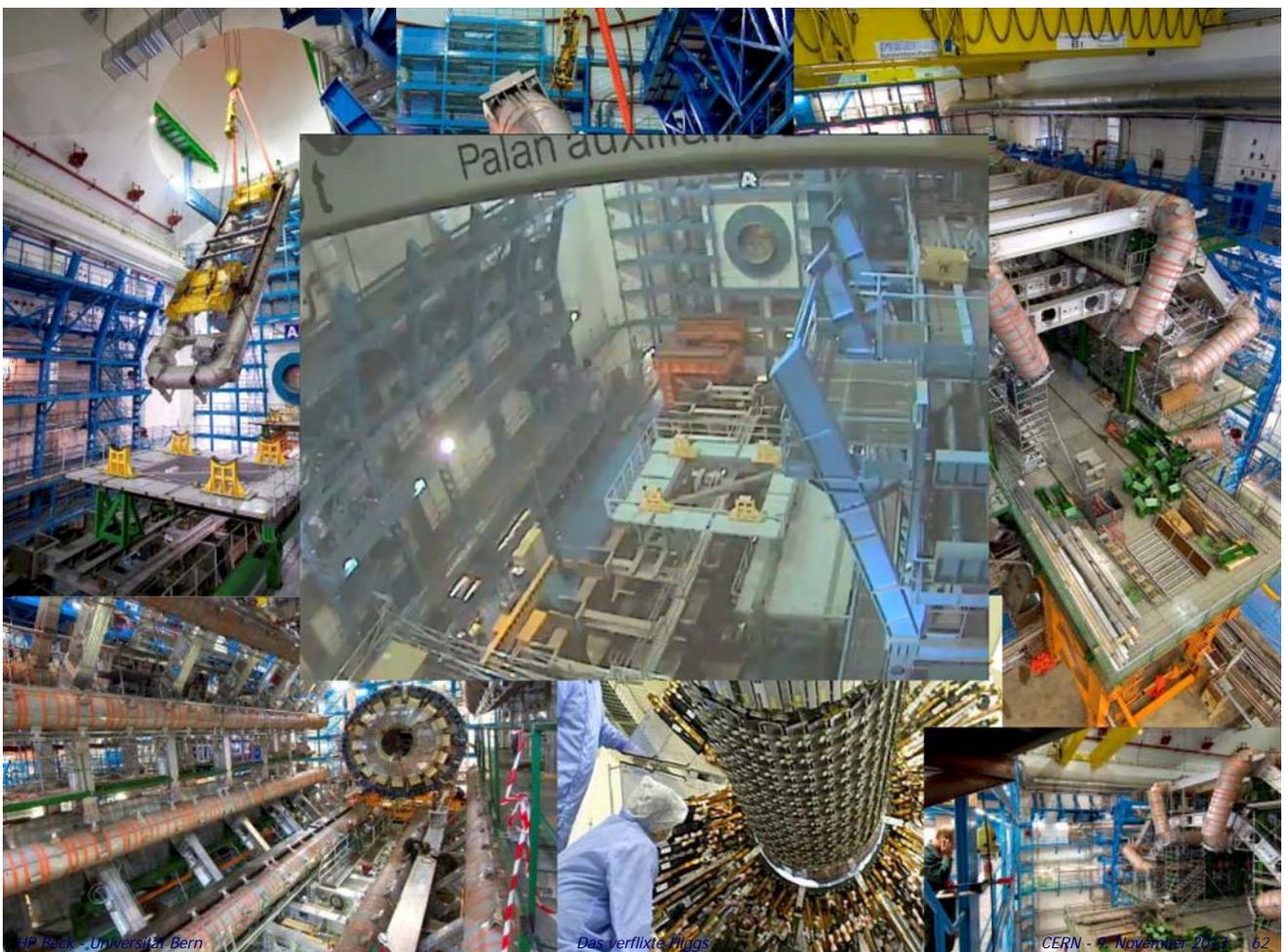


HP Beck - Universität Bern



Das verflixte Higgs

CERN - 9. November 2013 61

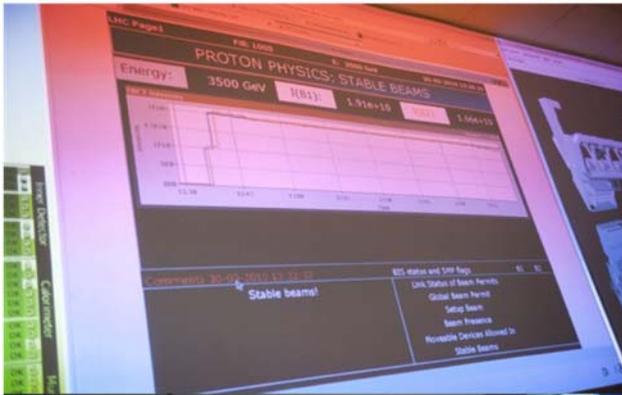


HP Beck - Universität Bern

Das verflixte Higgs

CERN - 9. November 2013 62

und es funktioniert tatsächlich !



HP Beck - Universität Bern

Das verflixte Higgs

22.-26. Juli 2013 63

... ein Higgs Kandidat in ATLAS: $H \rightarrow 2e+2\mu$

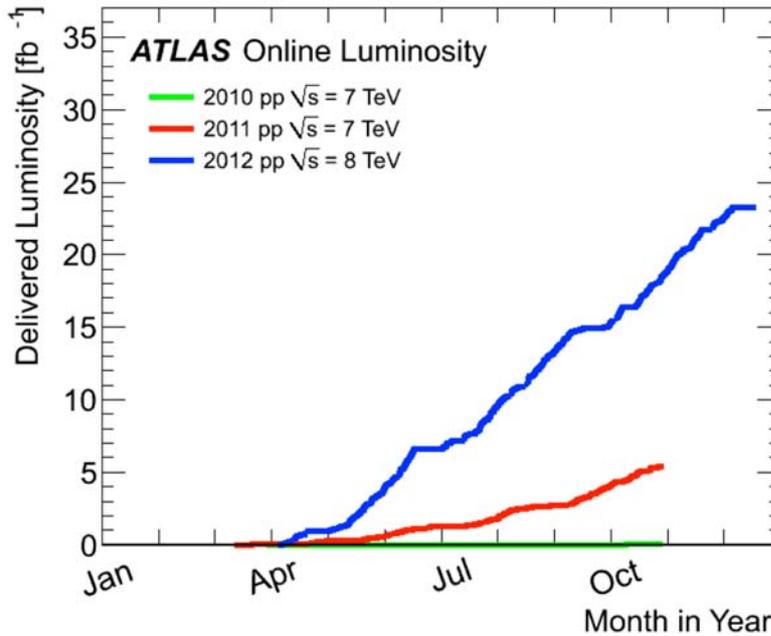
ATLAS
EXPERIMENT
<http://atlas.ch>
Run: 205113
Event: 12611816
Date: 2012-06-18
Time: 11:07:47 CEST

HP Beck - Universität Bern

Das verflixte Higgs

CERN - 9. November 2013 64

Integrierte Luminosität seit März 2010



2012:
23.3 fb^{-1}
at 8 TeV

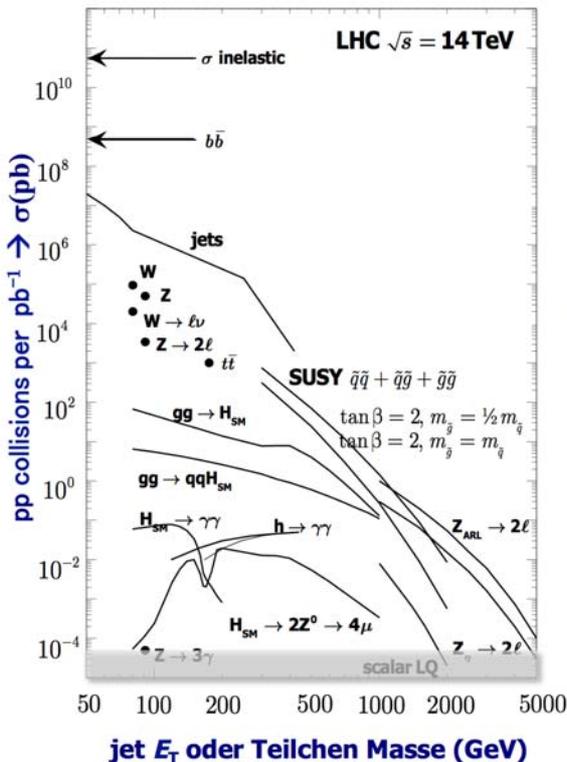
2011
5.6 fb^{-1}
at 7 TeV

2010
0.05 fb^{-1}
at 7 TeV

Der LHC steigert kontinuierlich die Kollisionsrate
Insgesamt erhielt ATLAS 28.9 fb^{-1} in 2011+2012
ATLAS erzielt eine Effizienz von ca. 94% für die Datennahme, and ca. 90%
davon sind gut genug um Physik Analysen zu betreiben:
→ 25 fb^{-1} gute Physik

Was sind den 25 fb^{-1} ?

Integrierte Luminosität ist eine inverse Fläche, mit der Anzahl Kollisionen gemessen werden.



← $25 \times 7 \times 10^{13} = 1750$ Mia. pp Kollisionen

← $25 \times 2 \times 10^{11} = 5$ Mia. b-bar

← $25 \times 10^8 = 2.5$ Mia. W-Bosonen

← $25 \times 2 \times 10^7 = 500$ Mio. Z-Bosonen

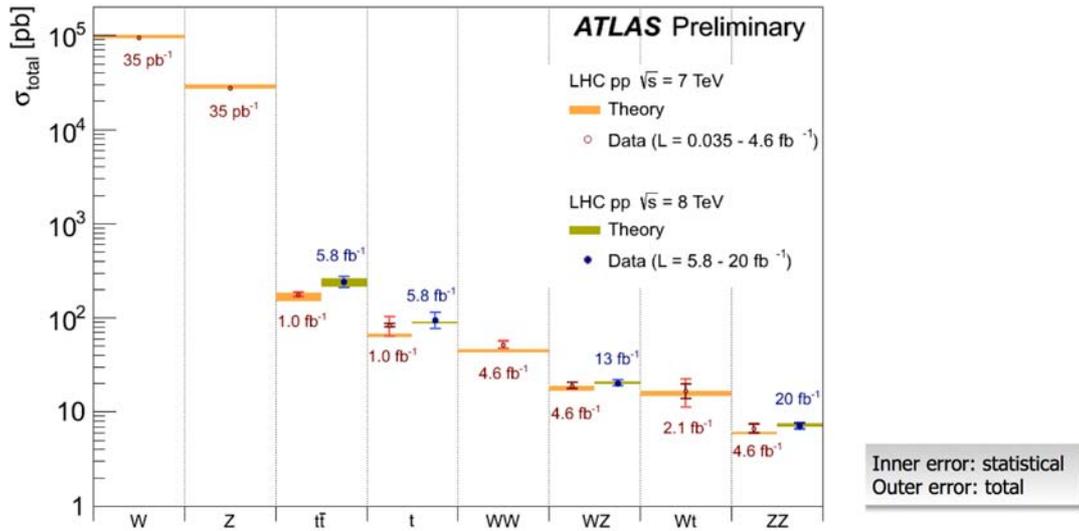
← $25 \times 2 \times 10^4 = 500'000$ Higgs Bosons

← $25 \times 10^2 = 2500$ $H \rightarrow \gamma\gamma$

← $25 \times 10^1 = 250$ $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell$

← Weniger als ein Ereignis

Das Standard Modell funktioniert gut bei $\sqrt{s} = 8$ TeV



- Über 250 Publikationen: Messungen von Standard Modell Prozessen und Suche nach neuer Physik.
- Wichtig als eigenständige Resultate sowie auch fundamental für eine erfolgreiche Higgs Suche.

Desperately searching Higgs

Looking for a signal in a overwhelming background

1 $H \rightarrow b\bar{b}$ in 10^8 $b\bar{b}$ events : impossible

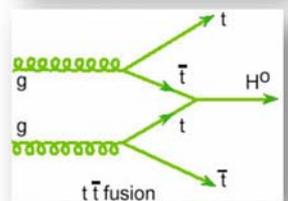
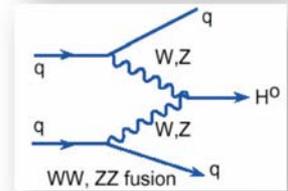
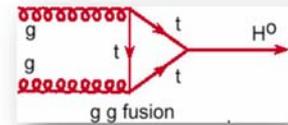
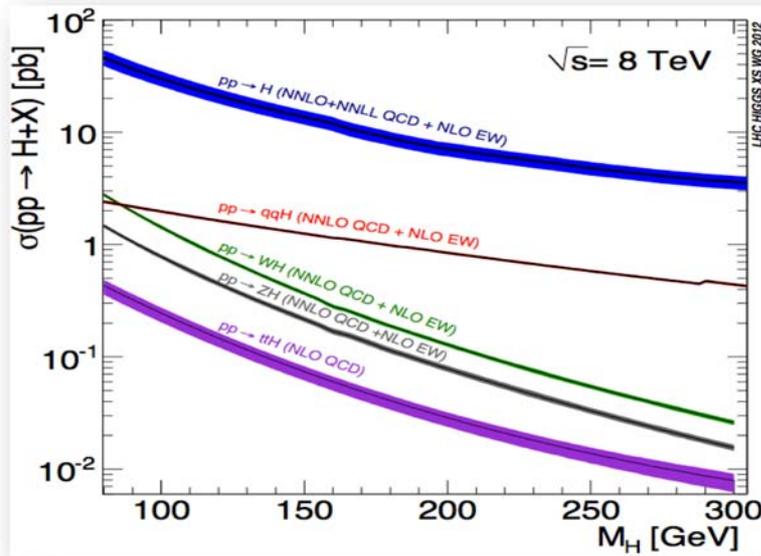
$H \rightarrow \gamma\gamma$ and $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell$: rare but clean signatures

HP Beck - Universität Bern

Das verflixte Higgs

CERN - 9. November 2013 68

Higgs-Teilchen erzeugen



Das **Standard Modell** sagt exakt vorher welche Teilchen mit welcher Stärke ans Higgs koppeln – dies ist ausgezeichnet!

Aberdings sagt uns das Standard Modell nicht wie schwer das Higgs-Teilchen selbst ist. Entsprechend werden alle Berechnungen als Funktion der **unbekannten Higgs-Masse m_H** parametrisiert.

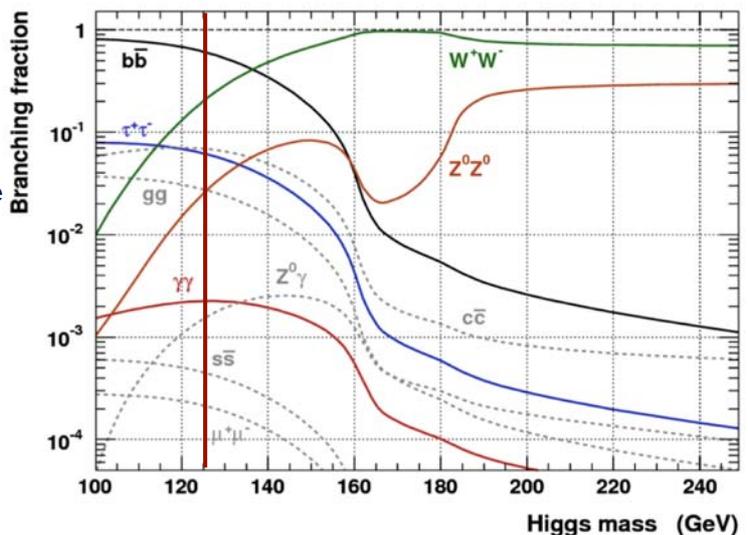
Higgs Teilchen zerfallen schnell

Das Higgs-Teilchen zerfällt äusserst schnell.

Seine **Lebensdauer** ist $\tau \approx 10^{-24} \text{ s}$ bei einer Masse von **125 GeV** (und noch kürzer falls es schwerer sein sollte).

Ein Higgs Teilchen von **125 GeV** Masse zerfällt in

b-Quarks:	57%
tau-Leptonen:	6.3%
Myonen:	0.022%
c-Quarks:	2.9%
Gluonen:	8.6%
Photonen:	0.23%
Z ⁰ +Photon:	0.15%
WW:	21.5%
ZZ:	2.64%



<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/LHCPhysics/CERNYellowReportPageBR2>

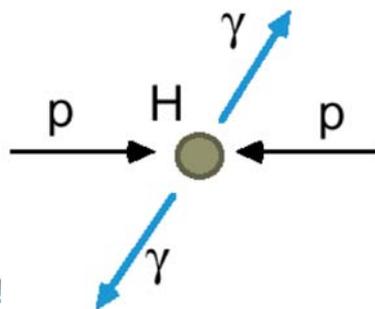
Allerdings gibt es in Proton-Proton Kollisionen sehr viele b-Quarks, c-Quarks und Gluonen, so dass nur gerade $H \rightarrow \gamma\gamma$, $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ und $H \rightarrow WW \rightarrow 2l2\nu$ geeignet sind, das Higgs zu finden.

Selbstverständlich wird in allen Kanälen geforscht!

Higgs-Zerfälle in zwei Photonen: $H \rightarrow \gamma\gamma$

$\sigma \times BR \sim 50 \text{ fb}$ $m_H \sim 126 \text{ GeV}$

σ Wirkungsquerschnitt $pp \rightarrow H$ 20000 fb
 BR Verzweigungsverhältnis $H \rightarrow \gamma\gamma$ 0.23%



$N = 25 \text{ fb}^{-1} \times 50 \text{ fb} = 1250$ Ereignisse in 25 fb^{-1}
 – nicht alle kann man messen !

Einfache Topology: zwei isolierte Photonen mit hohem transversal Impuls

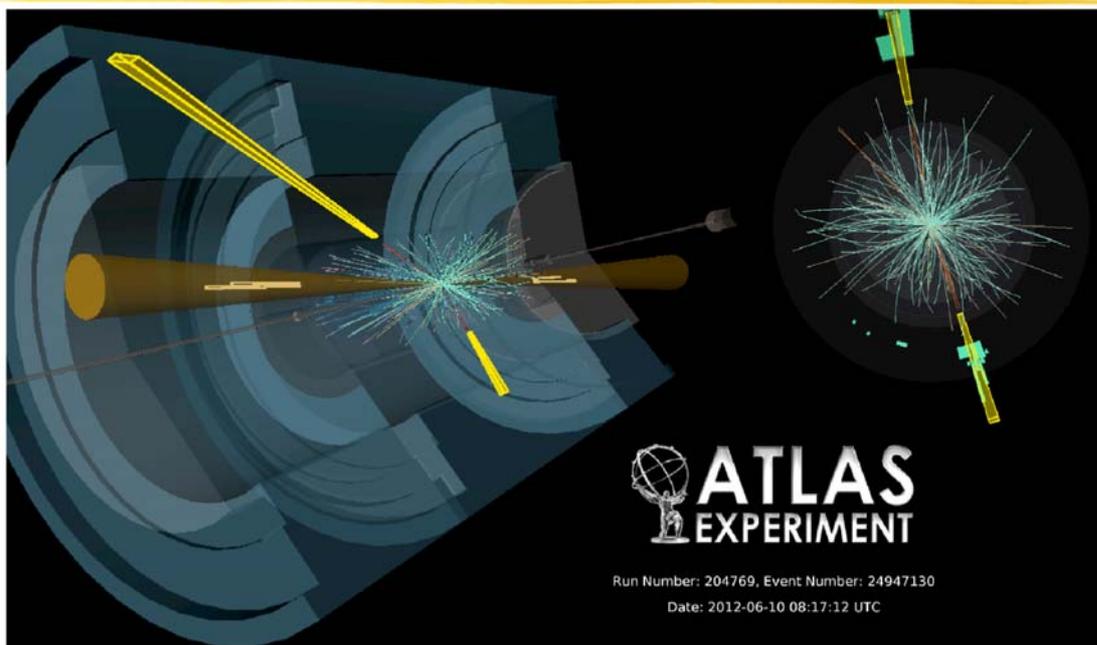
$$E_T(\gamma_1, \gamma_2) > 40, 30 \text{ GeV}$$

Untergrund: $\gamma\gamma$ Kontinuum (irreduzibel)

Wir erwarten so in 25 fb^{-1} ($m_H \sim 126 \text{ GeV}$) nach allen Selektionsschnitten:

- ~ **355 Signal Ereignisse** ($\sim 37.5\%$ der tatsächlichen $pp \rightarrow H \rightarrow \gamma\gamma$)
- ~ **13280 Untergrund Ereignisse** (Im Massen relevanten Bereich)
- **Signal / Untergrund $\sim 3\%$**

$H \rightarrow \gamma\gamma$ Kandidat



Photon 1 : $E_T = 80.1 \text{ GeV}$ und $\eta = 1.01$.

Photon 2 : $E_T = 36.2 \text{ GeV}$ und $\eta = -0.17$.

Invariante Masse der beiden Photonen : 126.9 GeV.

mit ca. 3% Wahrscheinlichkeit ist dies ein Higgs-Ereignis.

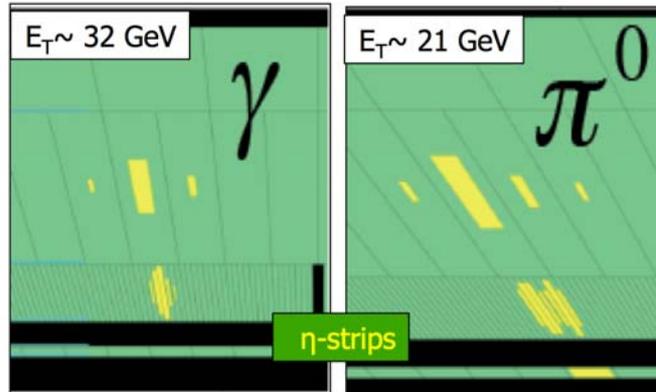
Fundamentale experimentelle Aspekte

Exzellente $\gamma\gamma$ Massen Auflösung für ein deutliches (schmale Breite) Signal über dem Untergrund

Exzellente γ Identifikation um γj and jj Untergrund zu unterdrücken. Wobei j ein Jet bedeutet in dem neutrale Pionen zerfallen: jet j $\rightarrow \pi^0 \rightarrow$ unechte γ

(Wirkungsquerschnitt dafür ist ein Faktor 10^4 - 10^7 grösser als einfacher $\gamma\gamma$ Untergrund)

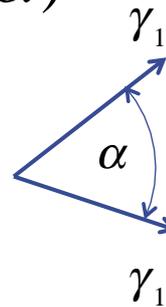
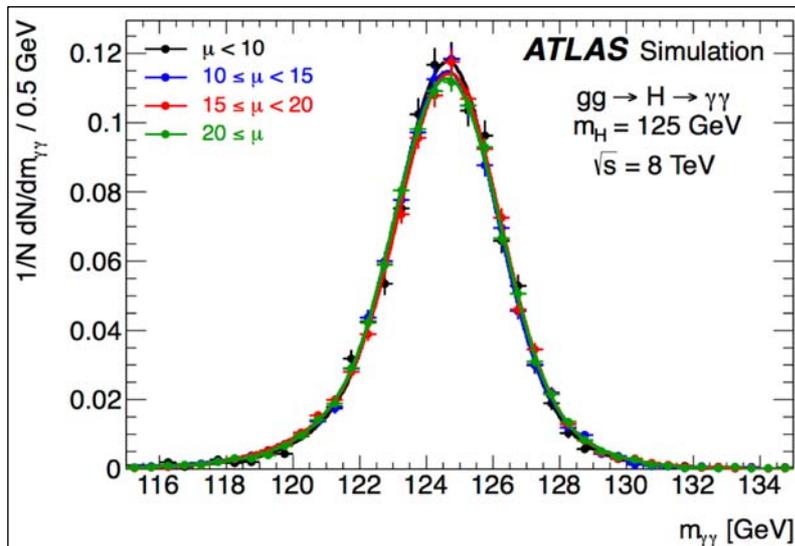
Elektromagnetischer Schauer eines direkten (prompt) Photon und $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$



Photon Selektionseffizienz: ~ 85 - 90%
Jet Unterdrückung: $\sim 10^4$

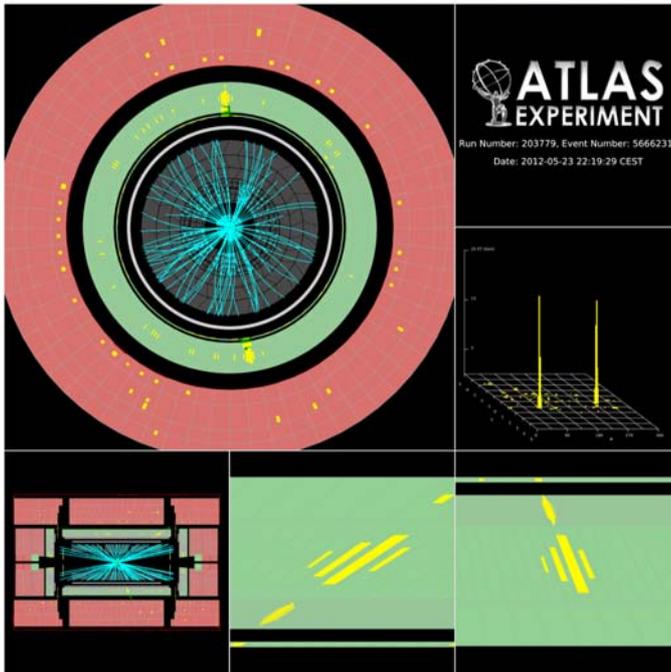
$\gamma\gamma$ Invariante Masse

$$m_{\gamma\gamma}^2 = 2E_{\gamma_1} E_{\gamma_2} (1 - \cos \alpha)$$



Massen Auflösung : **1.77 GeV**

H → $\gamma\gamma$ Kandidat

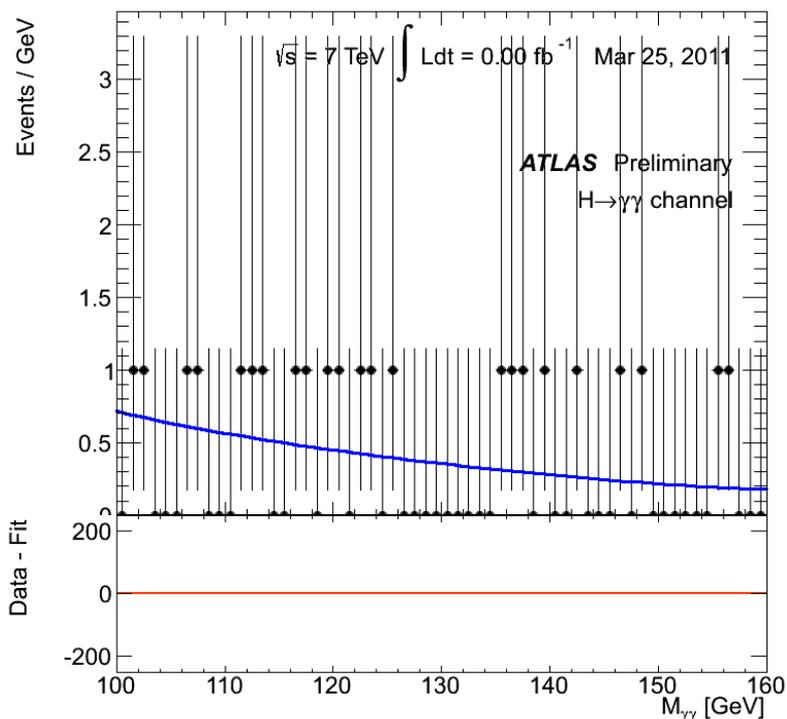


Event number: 56662314
Run 203779
at $\sqrt{s} = 8$ TeV

23 May 2012
22:19:29 CEST

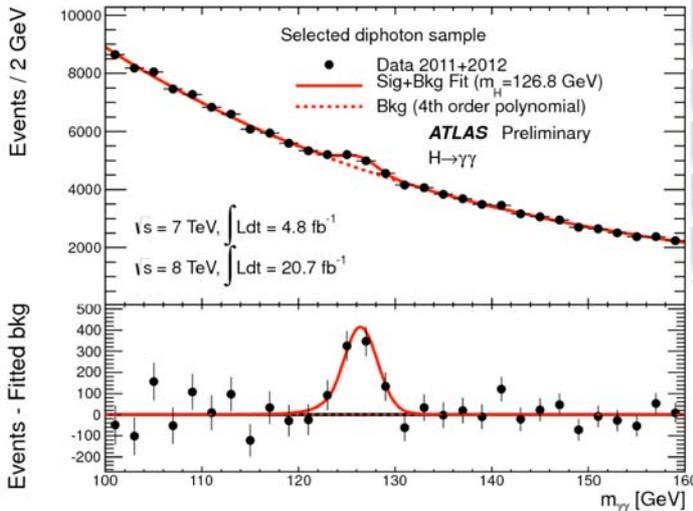
Photon 1 : $E_T = 62.2$ GeV and $\eta = 0.39$.
Photon 2 has $E_T = 55.5$ GeV and $\eta = 1.18$.
Invariante Masse : 126.9 GeV.

Drei Jahre Datennahme: $H \rightarrow \gamma\gamma$



Drei Jahre Datennahme am LHC – 2010 vernachlässigbar
2011 4.8 fb⁻¹ @ 7TeV 2012 20.7 fb⁻¹ @ 8 TeV

Total 2011+2012 : 118893 $\gamma\gamma$ events



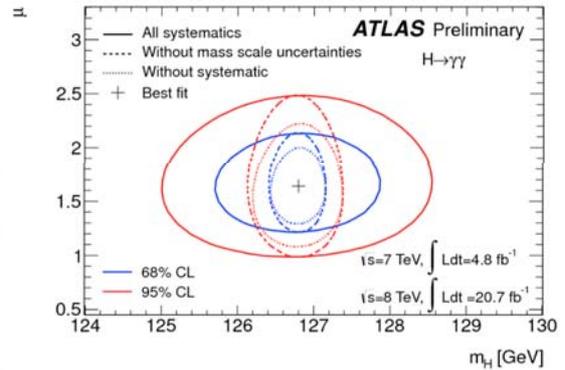
Ereignisse in 90% Massenfenster um $m_{\gamma\gamma} = 126.5$ GeV herum

Beobachtet	14025
Erwartet (Fit des Untergrunds)	13280
Erwartet (Signal)	355.5
Gemessen	745

p_0 -value 7.4σ (exp. 4.1σ) at $m_{\gamma\gamma} = 126.5$ GeV

best fit $m_H = 126.8 \pm 0.2(\text{stat}) \pm 0.7(\text{syst})$ GeV

signal strength $\mu = 1.65^{+0.24}_{-0.24}(\text{stat})^{+0.25}_{-0.18}(\text{syst})$



Higgs-Zerfälle in vier Leptonen : $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow llll$

$\sigma \times \text{BR} \sim 2.3 \text{ fb } m_H \sim 126 \text{ GeV}$

σ Wirkungsquerschnitt $pp \rightarrow H$ 20000 fb
 BR Verzweigungsverhältnis $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow llll$ 0.0114%

$N = 25 \text{ fb}^{-1} \times 2.3 \text{ fb} = 57$ Ereignisse in 25 fb^{-1}
 – nicht alle kann man messen !

Eine winzige Rate, aber:

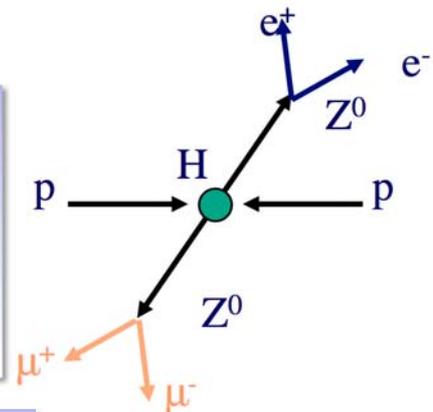
Vollständige Rekonstruktion des Higgs ist möglich
relativ eindeutig: Signal / Untergrund ~ 1

Signal: 4 Leptonen

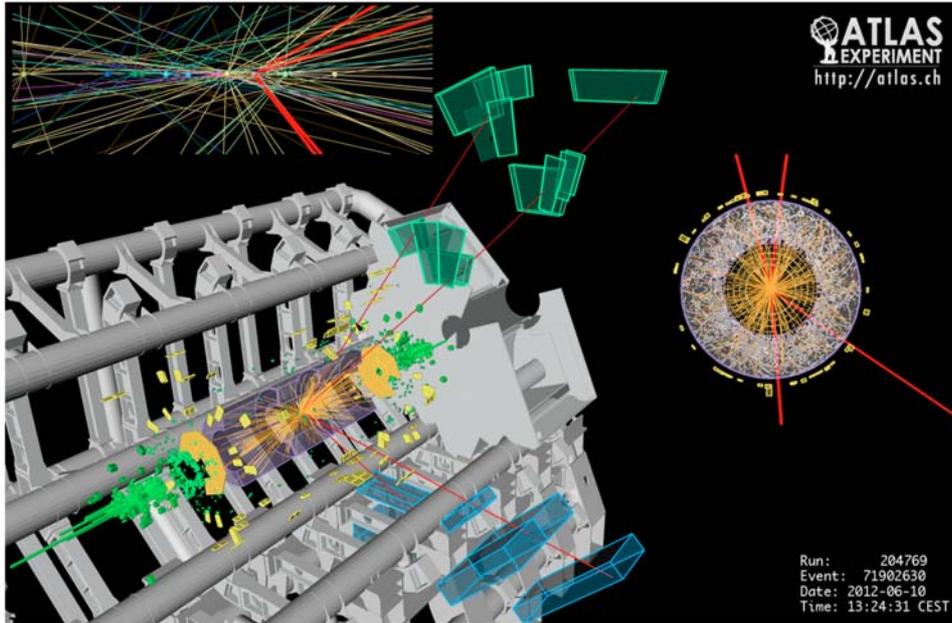
$p_T^{1,2,3,4} > 20, 15, 10, 7-6$ (e- μ) GeV;
 $50 < m_{12} < 106$ GeV;
 $m_{34} > 12.5-50$ GeV (vs m_{4l})

Untergrund:

$ZZ^{(*)}$: irreduzibel
 $Zbb, Z+\text{jets}, tt$ wobei Leptonen durch b-jets und q-jets $\rightarrow l$
 (reduzibel) isolation und
 Impaktparameter Schnitte auf die Leptonen



H \rightarrow ZZ(*) \rightarrow 4 μ Kandidat



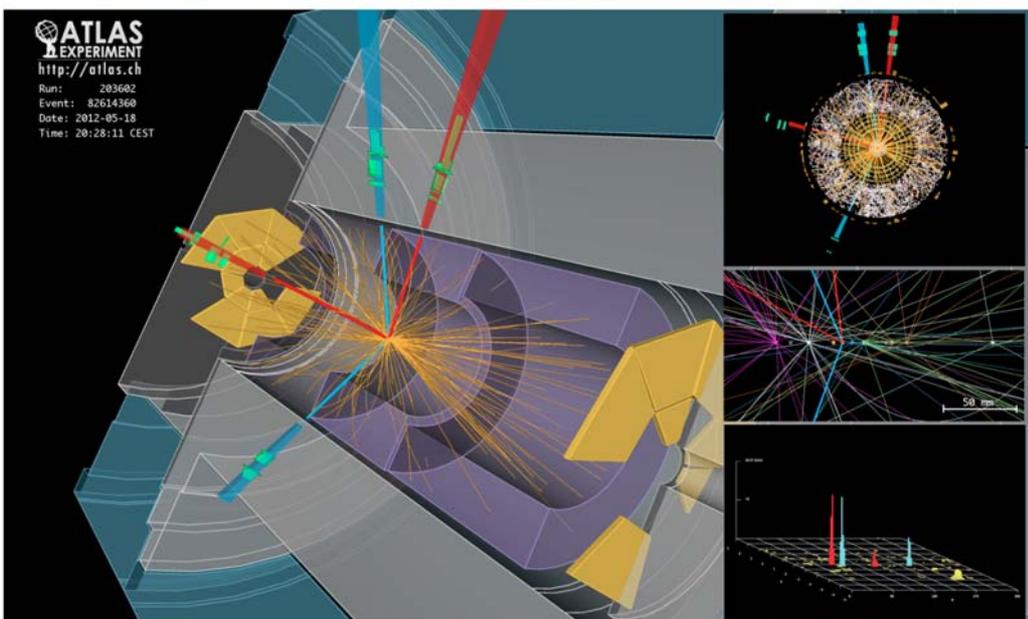
15 Vertice

$m_{4\ell} = 125.1$ GeV. $m_{12} = 86.3$ GeV, $m_{34} = 31.6$ GeV
 μ_1 : $p_T = 36.1$ GeV, $\eta = 1.29$, $\phi = 1.33$
 μ_2 : $p_T = 47.5$ GeV, $\eta = 0.69$, $\phi = -1.65$
 μ_3 : $p_T = 26.4$ GeV, $\eta = 0.47$, $\phi = -2.51$
 μ_4 : $p_T = 71.7$ GeV, $\eta = 1.85$, $\phi = 1.65$

Event number: 71902630
Run 204769
at $\sqrt{s} = 8$ TeV

10 June 2012
13:24:31 CEST

H \rightarrow ZZ(*) \rightarrow 4e Kandidat



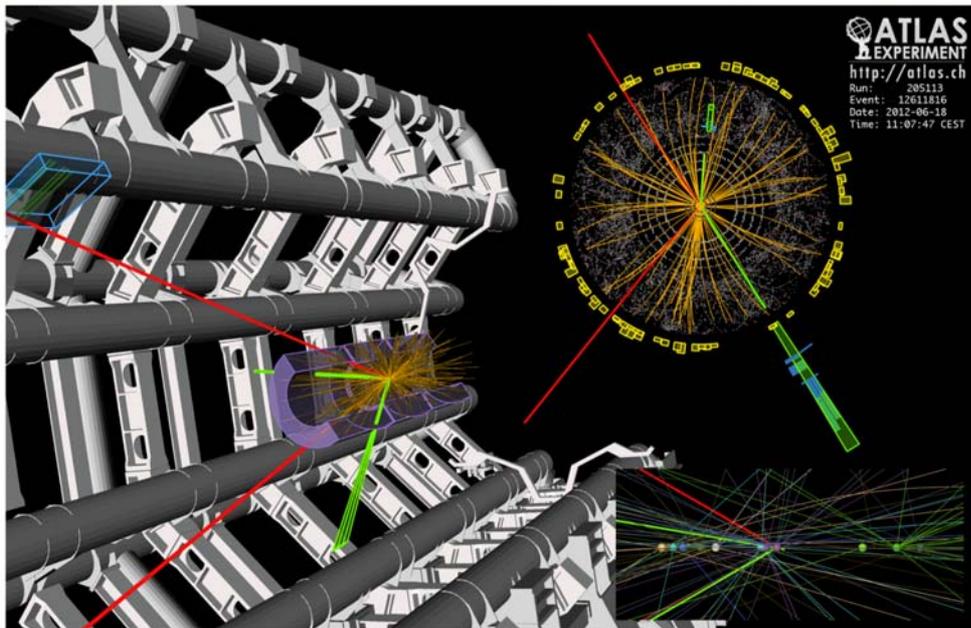
12 Vertice

$m_{4\ell} = 124.6$ GeV. $m_{12} = 70.6$ GeV, $m_{34} = 44.7$ GeV
 e_1 : $p_T = 24.9$ GeV, $\eta = -0.33$, $\phi = 1.98$
 e_2 : $p_T = 53.9$ GeV, $\eta = -0.40$, $\phi = 1.69$
 e_3 : $p_T = 61.9$ GeV, $\eta = -0.12$, $\phi = 1.45$
 e_4 : $p_T = 17.8$ GeV, $\eta = -0.51$, $\phi = 2.84$

Event number: 82614360
Run 203602
at $\sqrt{s} = 8$ TeV

18 May 2012
20:28:11 CEST

H → ZZ(*) → 2e2μ Kandidat



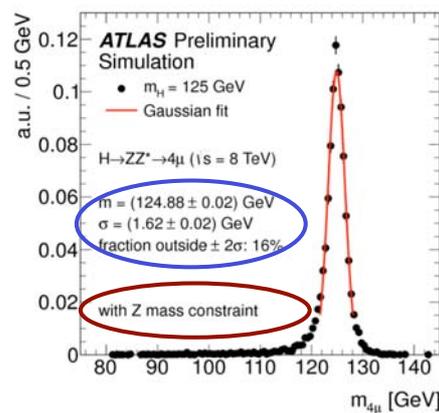
12 Vertice

$m_{4\ell} = 123.9$ GeV. $m_{12} = 87.9$ GeV, $m_{34} = 19.6$ GeV
 $e_1: p_T = 18.7$ GeV, $\eta = -2.45$, $\phi = 1.68$
 $e_2: p_T = 75.96$ GeV, $\eta = -1.16$, $\phi = -2.13$
 $\mu_3: p_T = 19.6$ GeV, $\eta = -1.14$, $\phi = -0.87$
 $\mu_4: p_T = 7.9$ GeV, $\eta = -1.13$, $\phi = 0.94$

Event number: 12611816
 Run 205113
 at $\sqrt{s} = 8$ TeV

18 June 2012
 11:07:47 CEST

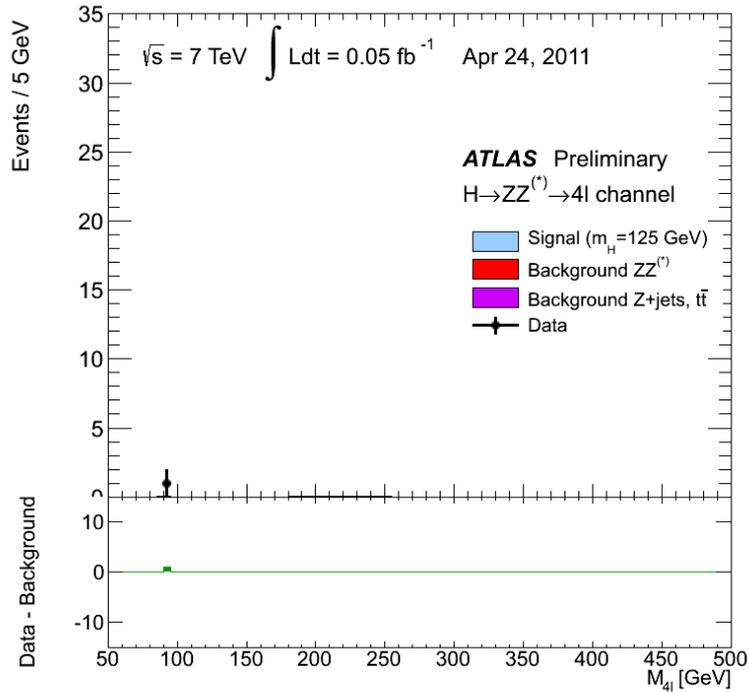
$m_{\ell\ell\ell\ell}$ invariante Masse



Peak at 124.5 GeV below injected m_H of 125 GeV
 due to FSR, ionization losses. This shift is considered in the mass measurements

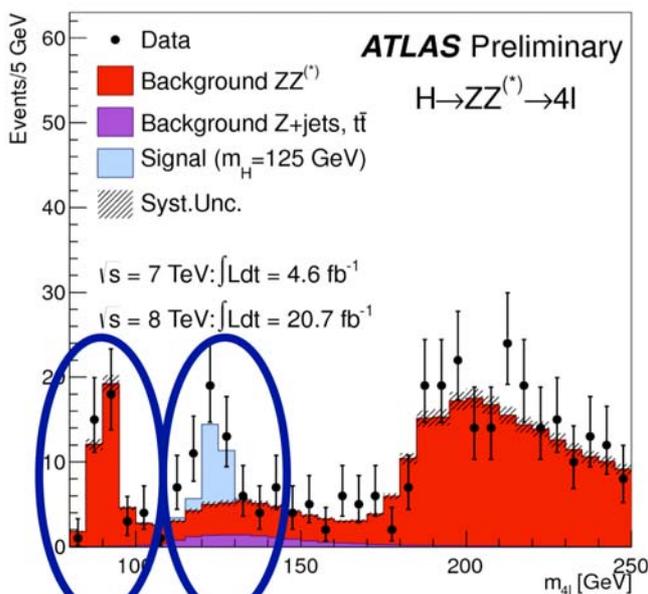
Leptonen Kanäle	$m_{\ell\ell\ell\ell}$ Massen Auflösung
4μ	1.62±0.02 GeV
2μ2e	1.90±0.02 GeV
4e	2.40±0.04 GeV

drei Jahre Datennahme: $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$



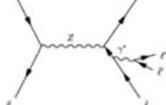
Drei Jahre Datennahme am LHC – 2010 vernachlässigbar
 2011 4.6 fb^{-1} @ 7TeV 2012 20.7 fb^{-1} @ 8 TeV

Total 2011+2012 : 32 $4l$ Ereignisse



$Z \rightarrow 4l$

$H \rightarrow 4l$



Ereignisse in $125 \pm 5 \text{ GeV}$

Erwarteter Untergrund 11.1 ± 1.0

Erwartetes Signal
 bei $m_H = 125 \text{ GeV}$ 15.9 ± 2.1

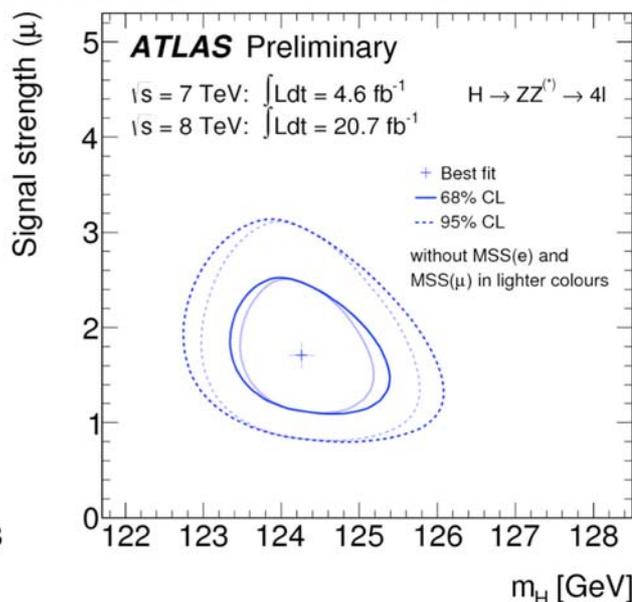
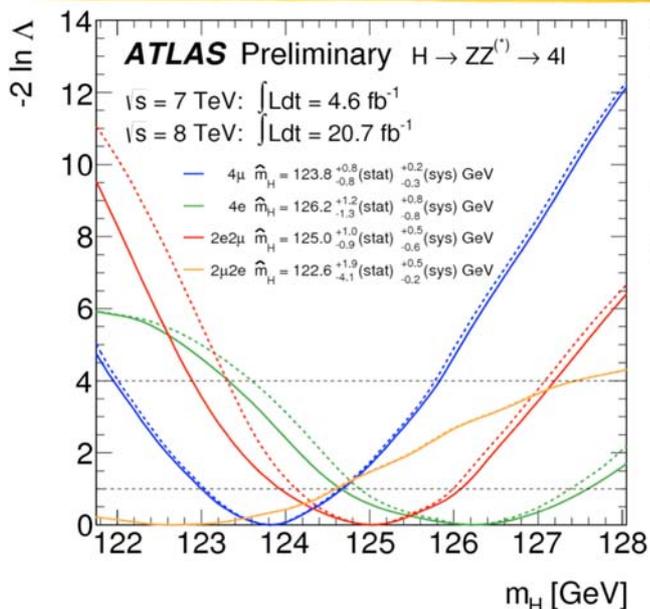
Beobachtet in den Daten 32

	4μ	$2e2\mu$	$4e$
--	--------	----------	------

Daten	13	13	6
-------	----	----	---

S/B	1.9	1.3	1.1
-----	-----	-----	-----

H → 4ℓ Masse und Signalstärke



$m_{4\ell}$ mass measurement dominated by $m_{4\mu}$ channel.

m_{4e} and $m_{2\mu 2e}$ still statistically limited

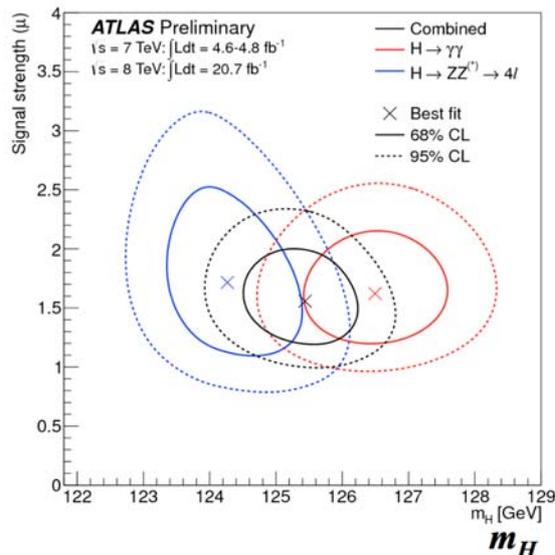
p_0 -value 6.6σ (exp. 4.4σ) at $m_{\gamma\gamma} = 124.3 \text{ GeV}$

best fit $m_H = 124.3^{+0.6}_{-0.5} \text{ (stat)}^{+0.5}_{-0.3} \text{ (syst)} \text{ GeV}$

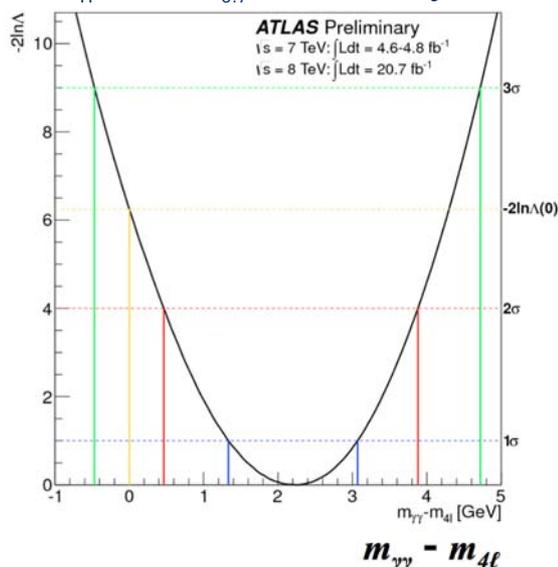
signal strength $\mu_{(m_H=124.3 \text{ GeV})} = 1.7^{+0.5}_{-0.4}$

signal strength $\mu_{(m_H=125 \text{ GeV})} = 1.5 \pm 0.4$

Massen-Kombination $m_{\gamma\gamma}$ and $m_{4\ell}$



$\Delta m_H = 2.3^{+0.6}_{-0.7} \text{ (stat)} \pm 0.6 \text{ (syst)} \text{ GeV}$



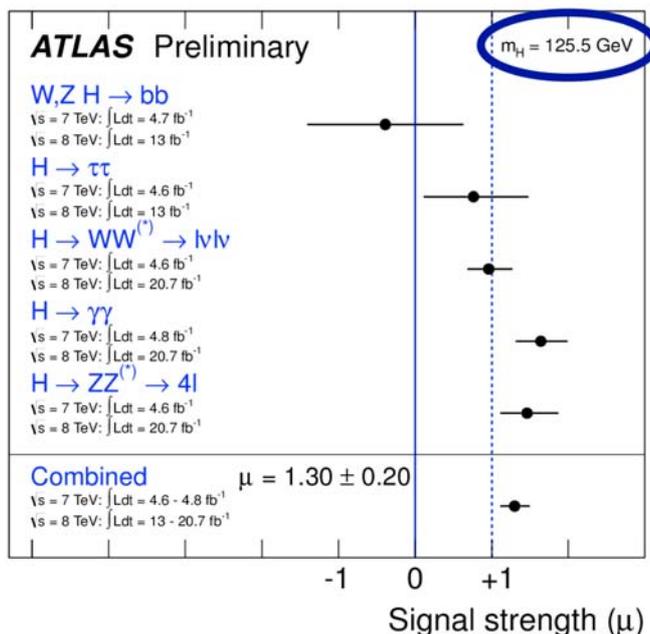
Combined mass measurement
 $m_H = 125.5 \pm 0.2 \text{ (stat)} \pm 0.6 \text{ (syst)} \text{ GeV}$

Compatibility with zero mass difference is 2.4 sigma: $\Delta m_H = 2.3 \pm 0.7 \text{ (stat)} \pm 0.6 \text{ (syst)} \text{ GeV}$

Taking mass scale systematic uncertainties and their correlations into account the compatibility of the two measurements is at the 1.5% (2.4σ level)

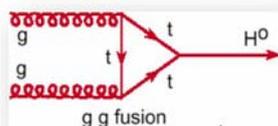
With an alternative treatment of systematic uncertainties (EM scale systematics to rectangular pdf) this increases to 8% (1.4σ level)

Signal-Stärke bei noch mehr Kanälen

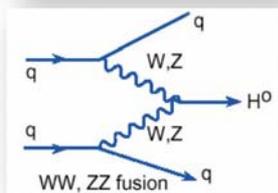


30% zu viele Higgs Ereignisse gegenüber der Standard Modell Erwartung (1.5σ) scheint völlig kompatibel mit der Erwartung !

Dies scheint tatsächlich ein Higgs zu sein



Higgs weil: $H \rightarrow ZZ \rightarrow llll$, $H \rightarrow \gamma\gamma$, $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$ und weitere Zerfallskanäle (noch wenig Aussagekräftig) $H \rightarrow \tau\tau$, etc.



Es ist ein Boson: Weil es in zwei Photonen zerfällt

Es ist neutral

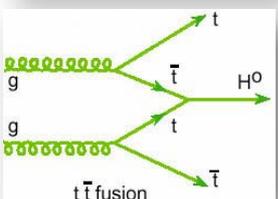
Es entsteht und zerfällt mit ca. der erwarteten Raten

Es koppelt an Fermionen und an Bosonen mit ca. der erwarteten Stärke



Wir haben auch den Spin schon gemessen:

Von allen getesteten Spin-Hypothesen 0^+ , 0^- , 1^+ , 1^- , 2^+ gewinnt immer **0^+** .



Was gibt es denn nun noch zu tun...?

**Verbesserung der bisherigen Messungsergebnisse (kleinere Fehler!)
Masse, Kopplungskonstanten, Spin und Parität
→ dazu braucht es mehr Daten**

Messen von $H \rightarrow \tau\tau$ und $H \rightarrow bb$

Sowie in seltenen Kanälen z.B. $H \rightarrow Z\gamma$, $H \rightarrow \mu\mu$

Nach weiteren Higgs-Teilchen Ausschau halten

bei höheren Massenskalen bis 1 (wenige) TeV
geladene, neutrale CP-gerade/ungerade Higgse

Messen der Higgs Selbstkopplung λ

Nur so kann das Higgspotential gemessen werden
Das bedeutet Ereignis bei denen zwei Higgse zusammen entstehen!

Dies braucht Daten!

LHC upgrade für 13-13.5 TeV Kollisionen mit $10^{35}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (2013+2014)

**Bisher haben wir 25fb^{-1} an Daten gesammelt. Ziel ist 3000fb^{-1} bis 2030(?).
D.h. wir haben in noch nicht einmal 1% der noch zu sammelnden Daten schon ein Higgs gefunden – da könnte (hoffentlich!) noch viel drin sein**

Was wäre wenn

es kein Higgs-Feld und somit kein Higgs-Teilchen gäbe ?

**Alle Elementarteilchen wären masselos
und würden entsprechend mit Lichtgeschwindigkeit durchs Universum fliegen**

**Sie würden immer mit
Lichtgeschwindigkeit
voneinander weg
fliegen.**

**Protonen und Neutronen
wären trotzdem massiv.
Die Bindungsenergie
in den Quark- und
Gluonfelder macht den
Löwenanteil ihrer Masse
aus. Protonen könnten aber
keine Elektronen binden,
da diese mit Licht-
geschwindigkeit sich nicht von Protonen einfangen lassen.**



Es gäbe so

Keine Atome, keine Sterne, keine Planeten, kein Leben !

Das verflixte Higgs

<http://www.teilchenphysik.ch>
<http://www.teilchenwelt.de/>

enthalten weitere Informationen

sowie
Posters, Broschüren

und, natürlich auch:

[http://www.facebook.com/
VerflixtesHiggs](http://www.facebook.com/VerflixtesHiggs)

[http://www.youtube.com/user/
verflixteshiggs](http://www.youtube.com/user/verflixteshiggs)

[https://plus.google.com/u/0/
109328334276292364669/posts](https://plus.google.com/u/0/109328334276292364669/posts)

<https://twitter.com/VerflixtesHiggs>

Lehrerbroschüre

für
Plakatserie



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement des Innern EDI
Staatssekretariat für Bildung und Forschung SBF

Wieso ist das Higgs wichtig ?

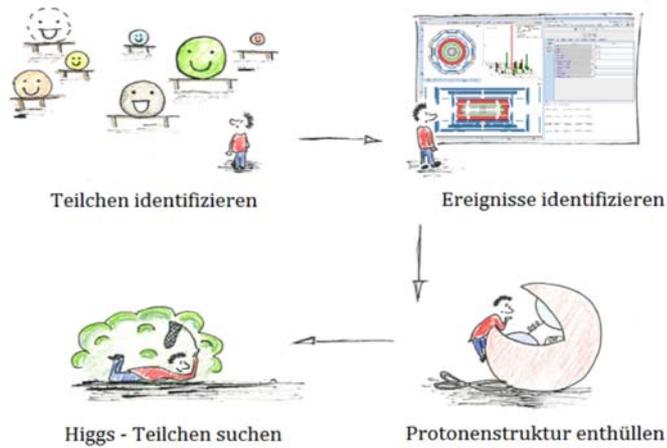
Grundlagenforschung ermöglicht neue Wege zu beschreiten

- ermöglicht die Welt, das Universum, das Leben, und somit uns als Menschheit besser zu verstehen.
- Es geht um nicht weniger als:
 - wer sind wir?
 - woher kommen wir?
 - wohin gehen wir?
- Erkenntnisse führen immer zu neuen Anwendungen
 - technologische Spin-Offs

If [19th century] physicists had limited themselves to work of obvious practical importance, they would have been studying the behavior of steam boilers.

Steven Weinberg, "Why the Higgs Boson Matters"
NYT, 13. July 2012

Physics Masterclass – Kollisionen analysieren



10'000 Schüler hatten im Frühjahr 2013 die Gelegenheit einen Tag in die Welt der Teilchenphysik einzutauchen.

2014 findet wieder eine internationale Masterclass in Teilchenphysik statt
12. März – 12. April 2014 in einer Uni in Ihrer Nähe.

Informationen und Anmeldung unter <http://physicsmasterclasses.org>