

Die Masse, das Higgs und mehr ...

Die Entdeckung des Higgs-Bosons und seine Bedeutung für die Physik

Bert Schöneich
Technisches Seminar
Zeuthen, 2013



Gliederung

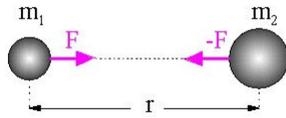
1. Das Schulwissen – eine Wiederholung
2. Masse und Materie
3. Das Standardmodell der Teilchenphysik
4. Der Higgs-Mechanismus und das Higgs-Teilchen
5. Schwierigkeiten bei der Suche
6. Der LHC – gebaut für das Higgs
7. Ereignisraten und Signaturen am LHC
8. Der Zerfallskanal Higgs $\rightarrow \gamma\gamma$
9. Resultat der Suche
10. Zusammenfassung
11. Ausblick – Dunkle Materie – Dunkle Energie
12. Literatur
13. Dank



Das Schulwissen – eine Wiederholung - 1

Masse und Gravitation - Newtons Gravitationsgesetz

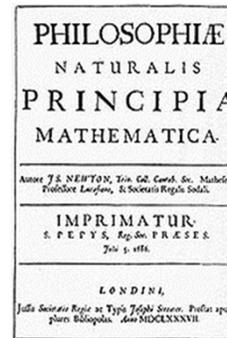
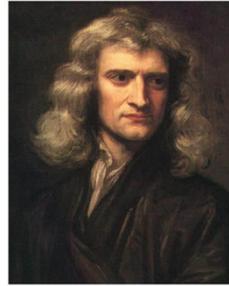
Jeder Massenpunkt zieht jeden anderen Massenpunkt mit einer Kraft an, die entlang der Verbindungslinie gerichtet ist. Der Betrag dieser Gravitationskraft (F) ist proportional zum Produkt der beiden Massen (m_1 , m_2) und umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstandes (r) der beiden Massen.



$$F_G = \gamma \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

$$\gamma = 6,673 \cdot 10^{-11} \frac{N \cdot m^2}{kg^2}$$

γ : Gravitationskonstante



Bert Schönreich | Die Masse, das Higgs und mehr ... | Zeuthen 2013 | Seite 3



Das Schulwissen – eine Wiederholung - 2

Masse und Trägheit - Zweites Newtonsches Gesetz

Die Änderung der Bewegung einer Masse ist der Einwirkung der bewegendenden Kraft proportional und geschieht nach der Richtung derjenigen geraden Linie, nach welcher jene Kraft wirkt.

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a}$$

F: Kraft
m: Masse
a: Beschleunigung



Bert Schönreich | Die Masse, das Higgs und mehr ... | Zeuthen 2013 | Seite 4



Das Schulwissen – eine Wiederholung - 3

Grundlegendes zur Masse

- **Trägheitsprinzip:**

Ein gleichförmig bewegter Körper behält seine gleichförmige Bewegung bei, sofern keine Kraft auf ihn ausgeübt wird.

- Ein ruhender Körper verharrt in Ruhe, solange keine Kraft auf ihn einwirkt.

- **Äquivalenzprinzip**

Träge und schwere Masse sind gleich groß.

- Messungen haben das mit sehr hoher Genauigkeit bestätigt.
- Es gibt in der klassischen Mechanik keine Erklärung dafür.



Masse und Materie - 1

Die Masse

1. Alle Materie hat eine Masse.
2. Es gilt der Erhaltungssatz der Masse.
(Masse kann nicht entstehen oder vergehen, nur umgewandelt werden. $E = m \cdot c^2$)
3. Die Masse eines Körpers ist die Summe der Massen seiner Bestandteile.
($m_k = m_1 + m_2$)
4. Maßeinheiten:
 1. Die gebräuchliche Maßeinheit der Masse ist das Kilogramm (kg).
 2. Im sub-atomaren Bereich wird die Masse in Elektronenvolt (eV) angegeben.
 - da gilt $E = m \cdot c^2$
 - z.B.: Elektron:
 - $m_e \approx 10^{-30} \text{ kg} = 0.5 \text{ MeV}/c^2$
 - umgangssprachlich: "Das Elektron hat eine Masse von 0,5 MeV."
 - Teilchenmassen:

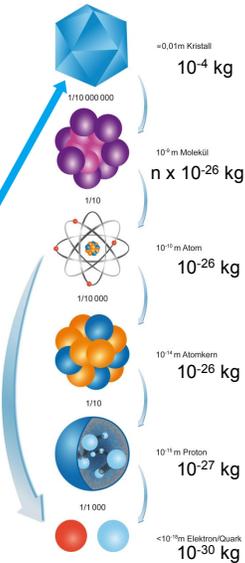
• Elektron:	0,5 MeV
• Proton:	1 GeV (938 MeV)
• Neutron:	1 GeV (940 MeV)
• up-Quark:	2,4 MeV
• down-Quark:	4,8 MeV



Masse und Materie - 2

Beispiele für Massen

Universum	10^{27} m 10^{53} kg
Milchstraße	10^{21} m 10^{41} kg
Sonne	10^9 m 10^{30} kg
Erde	10^7 m 10^{24} kg
Auto	10^1 m 10^3 kg
Apfel	10^{-1} m 10^{-1} kg



Bert Schöneich | Die Masse, das Higgs und mehr ... | Zeuthen 2013 | Seite 7



Das Standardmodell der Teilchenphysik - 1

Das Standardmodell der Teilchenphysik

ist eine Sammlung von Annahmen und Theorien, mit denen praktisch alle heute beobachtbaren materiellen Vorgänge korrekt beschrieben werden können.

3 Grundaussagen:

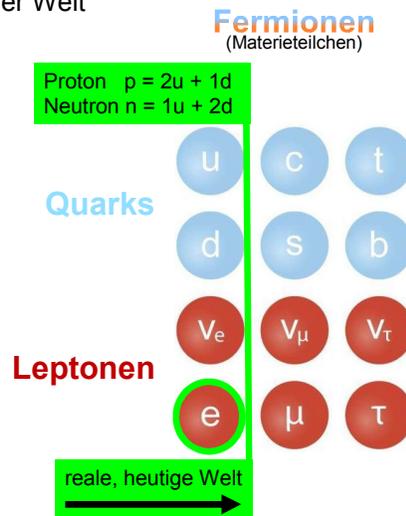
1. Materie besteht aus Quarks und Leptonen.
2. Diese Teilchen tragen Ladungen.
3. Kräfte und Umwandlungen zwischen den Teilchen sind durch Bindeteilchen zwischen den Ladungen darstellbar.

Bert Schöneich | Die Masse, das Higgs und mehr ... | Zeuthen 2013 | Seite 8



Das Standardmodell der Teilchenphysik - 2

Die Bausteine der Welt

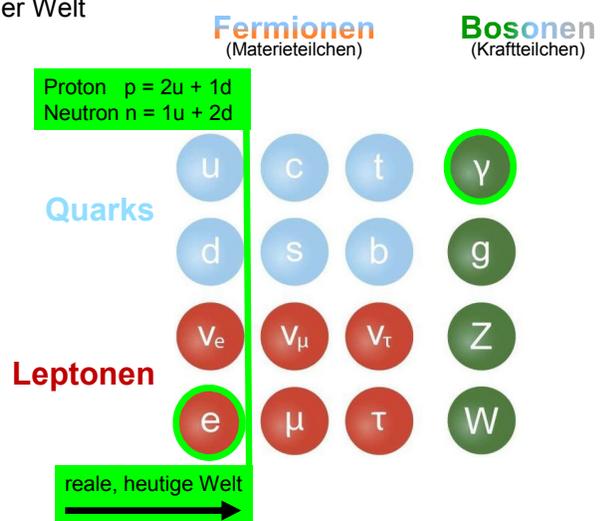


Bert Schönreich | Die Masse, das Higgs und mehr ... | Zeuthen 2013 | Seite 9



Das Standardmodell der Teilchenphysik - 2

Die Bausteine der Welt



Bert Schönreich | Die Masse, das Higgs und mehr ... | Zeuthen 2013 | Seite 10



Das Standardmodell der Teilchenphysik - 3



Das Standardmodell der Teilchenphysik - 4

Das Standardmodell der Teilchenphysik

ist eine Sammlung von Annahmen und Theorien, mit denen praktisch alle heute beobachtbaren materiellen Vorgänge korrekt beschrieben werden können.

3 Grundaussagen:

1. Materie besteht aus Quarks und Leptonen.
2. Diese Teilchen tragen (verallgemeinerte) Ladungen.
3. Kräfte und Umwandlungen zwischen den Teilchen sind durch Bindeteilchen zwischen den Ladungen darstellbar.

aber:



Das Standardmodell funktioniert nur dann, wenn angenommen wird, dass

Quarks und Leptonen keine Masse haben.

Das würde bedeuten, dass die Grundbestandteile der Materie keine Masse haben!



Das Standardmodell der Teilchenphysik - 4

Das Standardmodell der Teilchenphysik

ist eine Sammlung von Annahmen und Theorien, mit denen praktisch alle heute beobachtbaren materiellen Vorgänge korrekt beschrieben werden können.

3 Grundaussagen:

1. Materie besteht aus Quarks und Leptonen.
2. Diese Teilchen tragen (verallgemeinerte) Ladungen.
3. Kräfte und Umwandlungen zwischen den Teilchen sind durch Bindeteilchen zwischen den Ladungen darstellbar.

aber:

Das Standardmodell funktioniert nur dann, wenn angenommen wird, dass

Quarks und Leptonen keine Masse haben.

Das würde bedeuten, dass die Grundbestandteile der Materie keine Masse haben!

Bert Schöneich | Die Masse, das Higgs und mehr ... | Zeuthen 2013 | Seite 13



Der Higgs-Mechanismus und das Higgs-Teilchen - 1

Peter Higgs, englischer Physiker, 1964:

(Englert-Brout-Higgs-Guralnik-Hagen-Kibble-Mechanismus)

„Die an sich masselosen Teilchen gewinnen ihre Masse durch die Wechselwirkung mit einem Feld, welches im ganzen Universum allgegenwärtig ist.“

- Dieses Feld würde Masse und Gravitation erklären.
- Es wäre nicht direkt messbar.
- „Masse“ ist nicht mehr eine Eigenschaft eines Teilchens, sondern das Resultat seiner Wechselwirkung mit einem Feld.
- Existiert dieses Feld, muss es ein nachweisbares Teilchen geben, das „Higgs-Boson“, das zum Standardmodell dazu gehört.



Bert Schöneich | Die Masse, das Higgs und mehr ... | Zeuthen 2013 | Seite 14



Der Higgs-Mechanismus und das Higgs-Teilchen - 2



Das Higgs-Feld füllt das Vakuum, ein Teilchen bewegt sich in diesem Feld ...

Personen füllen einen Raum, ein VIP geht durch den Raum ...



das Higgs-Feld vermittelt dem Teilchen die Eigenschaft der Schwere.

die Personen scharren sich um den VIP, der es zunehmend „schwerer“ hat, voranzukommen.

Bert Schöneich | Die Masse, das Higgs und mehr ... | Zeuthen 2013 | Seite 16



Der Higgs-Mechanismus und das Higgs-Teilchen - 3



Das Higgs-Feld füllt das Vakuum. Das Feld wird angeregt...

Personen füllen einen Raum, ein Geräusch wird in den Raum gerufen ...



Es bildet sich ein Higgs-Teilchen.

Die Personen bilden eine Gruppe.

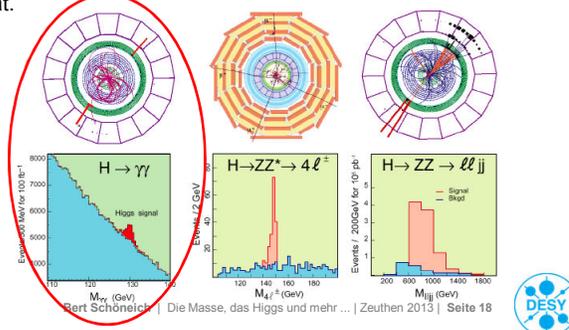
Bert Schöneich | Die Masse, das Higgs und mehr ... | Zeuthen 2013 | Seite 17



Schwierigkeiten bei der Suche

Schwierigkeiten bei der Suche nach dem Higgs

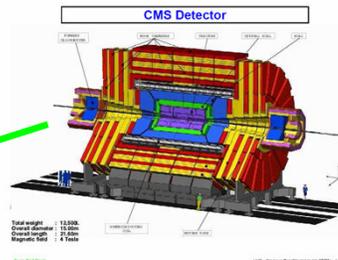
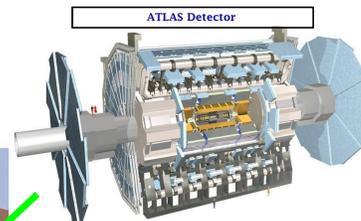
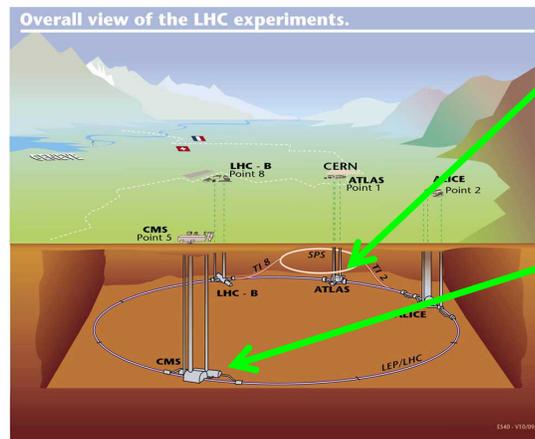
- Das Higgs-Feld ist nicht direkt messbar.
- Das Higgs-Teilchen (Higgs-Boson) hat nur eine sehr kurze Lebensdauer.
- Es ist selbst nicht nachweisbar, da es bereits innerhalb des Detektors zerfällt.
- Als Zerfallsprodukte entstehen z.B. Photonen, b- Quarks und W- oder Z-Bosonen.
- Nur aus der eindeutigen Signatur, aus dem eindeutigen Erscheinungsbild der Spuren der Zerfallsprodukte ist nachweisbar, dass ein Higgs-Teilchen entstanden war, das ein solches Teilchen existiert hat.



Der LHC – gebaut für das Higgs - 1

Der Large-Hadron-Collider (LHC) am CERN

4 Experimente:
ATLAS, CMS, ALICE, LHCb



s Higgs und mehr ... | Zeuthen 2013 | Seite 19



Der LHC – gebaut für das Higgs - 2

LHC – die wichtigsten Parameter

- Umfang: 26,659 km
- Magnete: supraleitend bei 1,9 K (Dipole und Quadrupole) bzw. 4,5 K
- Magnetfeld: max. 9 T
- Kollidierende Teilchen: Protonen und schwere Ionen
- Schwerpunktsenergie: 14 TeV für Protonen, 1150 TeV für Schwerionen
(erster Strahl: 10.9.2008, Sommer 2012: 8,0 TeV Schwerpunktsenergie erreicht)
- max. Luminosität: $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (Zahl der zu erwartenden Ereignisse)
- Kollisionsrate: max. 40 Millionen pro Sekunde

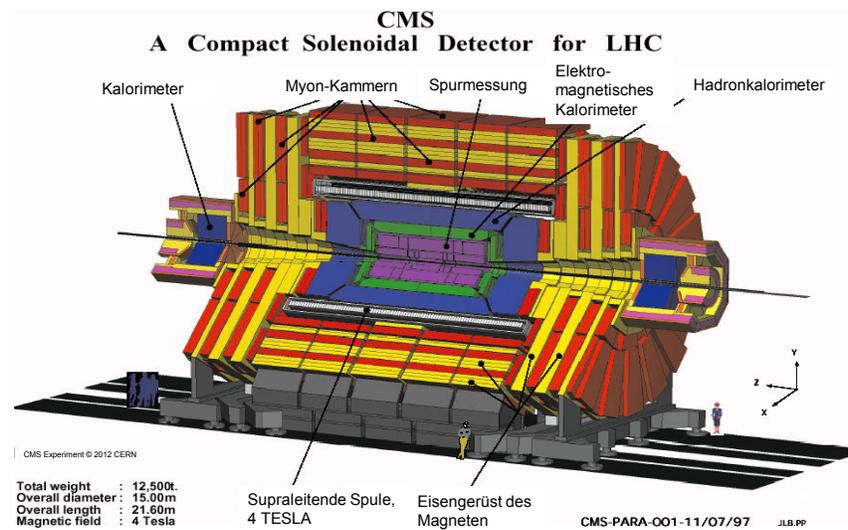
Experimente:

- ATLAS: Vielzweckdetektor für Proton-Proton-Kollisionen (Higgs-Suche)
- CMS: Vielzweckdetektor für Proton-Proton-Kollisionen (Higgs-Suche)
- ALICE: Vielzweckdetektor, optimiert für Kollisionen von Schwerionen
(Blei; Urzustand der Materie Sekunden nach dem Urknall)
- LHCb: Proton-Proton-Kollisionen
(Warum gibt es mehr Materie als Antimaterie?)

Bert Schöneich | Die Masse, das Higgs und mehr ... | Zeuthen 2013 | Seite 20



Der LHC – gebaut für das Higgs - 3

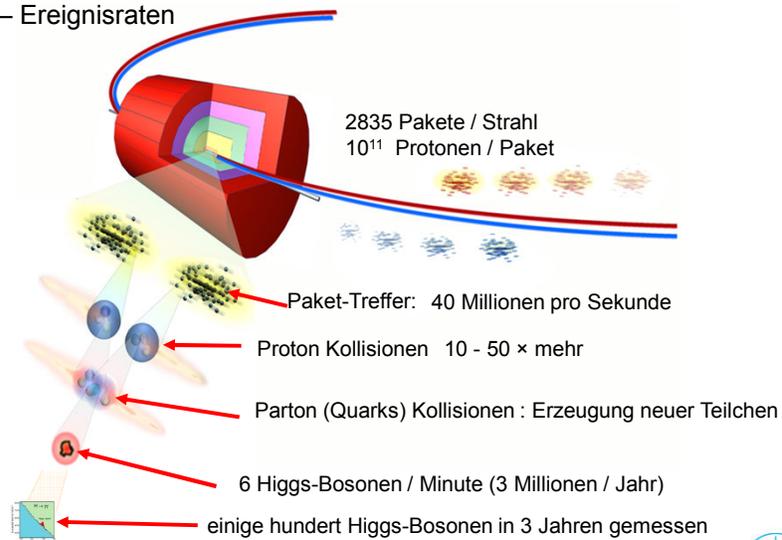


Bert Schöneich | Die Masse, das Higgs und mehr ... | Zeuthen 2013 | Seite 21



Ereignisraten und Signaturen am LHC - 1

LHC – Ereignisraten



Bert Schöneich | Die Masse, das Higgs und mehr ... | Zeuthen 2013 | Seite 22

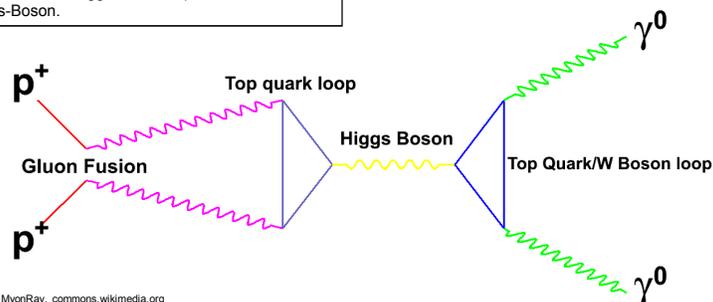


Ereignisraten und Signaturen am LHC - 2

Produktion, Zerfall und Nachweis eines Higgs am CERN

Produktion eines Higgs-Teilchens:
 Zwei Protonen stoßen aneinander, je ein Gluon von jedem Proton fusionieren zu einem Top-Quark, das koppelt an das Higgs-Feld und produziert so ein Higgs-Boson.

Zerfall eines Higgs-Teilchens:
 Das Higgs-Boson zerfällt sofort in zwei Photonen.



Quelle: MyonRay, commons.wikimedia.org

Nachweis eines Higgs-Teilchens:

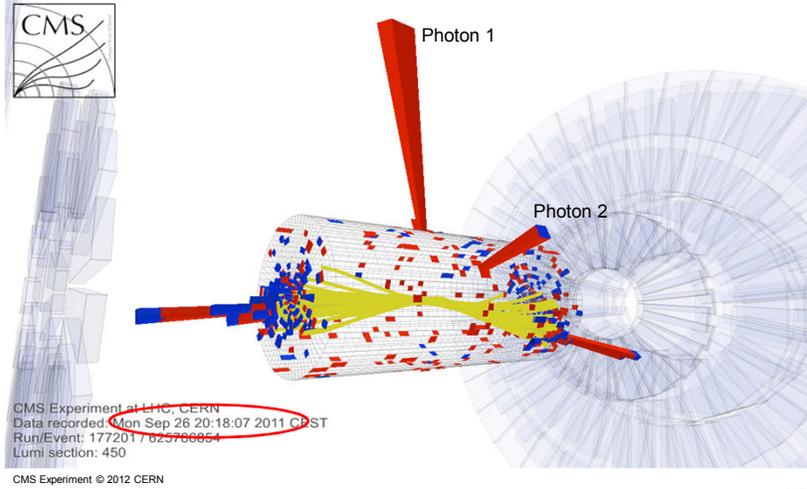
Nur die Photonen werden in den Detektoren des LHC nachgewiesen.
 Der Nachweis zweier derartiger Photonen ist ein eindeutiger Hinweis auf die vorherige Existenz eines Higgs-Teilchens. Das ist die Signatur (der Fingerabdruck) eines Higgs $\rightarrow \gamma\gamma$ -Zerfalls

Bert Schöneich | Die Masse, das Higgs und mehr ... | Zeuthen 2013 | Seite 23



Der Zerfallskanal Higgs $\rightarrow \gamma\gamma$ - 1

Higgs-Kandidat $H \rightarrow \gamma\gamma$

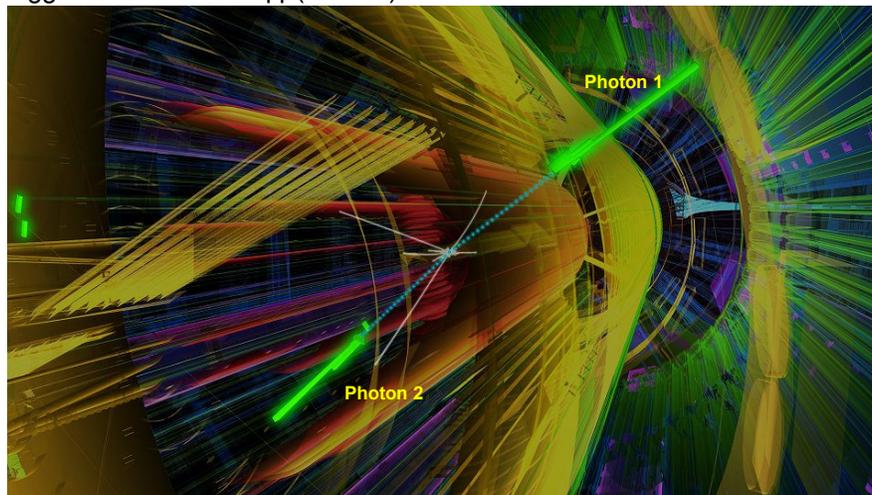


Bert Schöneich | Die Masse, das Higgs und mehr ... | Zeuthen 2013 | Seite 24



Der Zerfallskanal Higgs $\rightarrow \gamma\gamma$ - 2

Higgs-Kandidat $H \rightarrow \gamma\gamma$ (ATLAS)

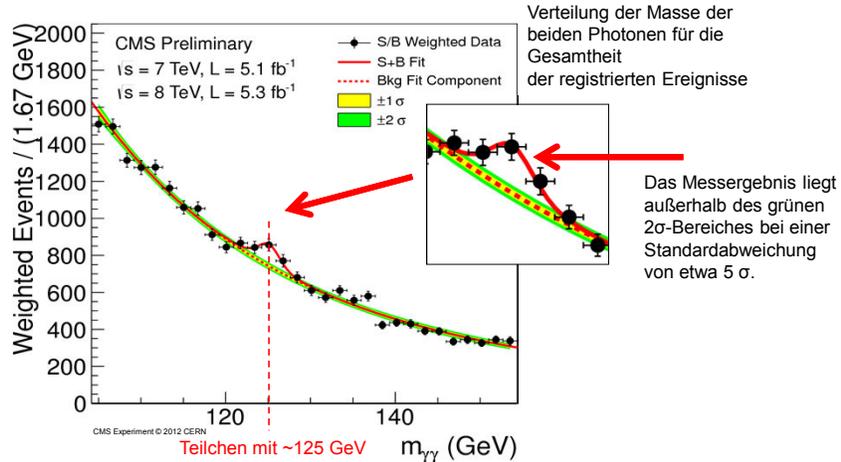


Bert Schöneich | Die Masse, das Higgs und mehr ... | Zeuthen 2013 | Seite 26



Resultat der Suche - 1

Resultat der Suche bei CMS



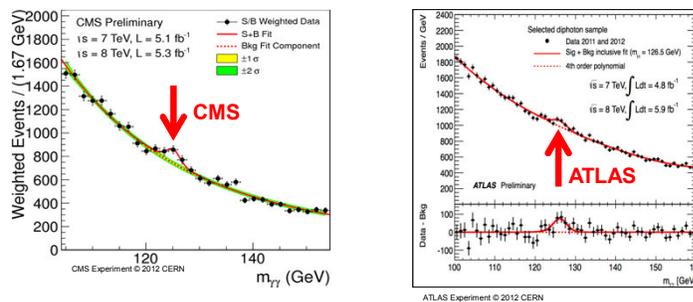
Bert Schöneich | Die Masse, das Higgs und mehr ... | Zeuthen 2013 | Seite 28



Resultat der Suche - 2

Resultat der Suche am CERN

1. Das Experiment ATLAS zeigt ebenfalls ein Signal bei ~ 125 GeV.
2. D.h., zwei Experimente zeigen unabhängig voneinander ein Signal bei 125 GeV.



3. Andere Zerfallskanäle zeigen ebenfalls Signale bei ~ 125 GeV Masse.
4. Die Statistik (Anzahl) der Ereignisse ist gut (hoch) genug, um einen Zufall auszuschließen.
 (Die Standardabweichung ist $\sim 5\sigma$. D.h., die Wahrscheinlichkeit, das ein Zufall oder ein Messfehler vorliegen, ist kleiner als 1:3.000.000.)

Bert Schöneich | Die Masse, das Higgs und mehr ... | Zeuthen 2013 | Seite 29



Zusammenfassung - 1

- Die Experimente ATLAS und CMS am CERN haben unabhängig voneinander ein neues Teilchen mit einer Masse von ~ 125 GeV entdeckt.
- Diese Entdeckung wurde am 4.7.2012 auf einer gemeinsamen Veranstaltung aller beteiligten Experimente im CERN bekanntgegeben.
- Die gemessenen Eigenschaften sind kompatibel mit dem vorhergesagten Higgs-Boson im Standardmodell der Teilchenphysik.
- Die Vermutung liegt nahe, dass dieses Teilchen ein Higgs-Boson ist.



© CERN/ATLAS/Gefly Peter Higgs gratuliert der Sprecherin des ATLAS-Experimentes, Fabiola Gianotti, nach der Präsentation der Ergebnisse von ATLAS am 4.7.2012

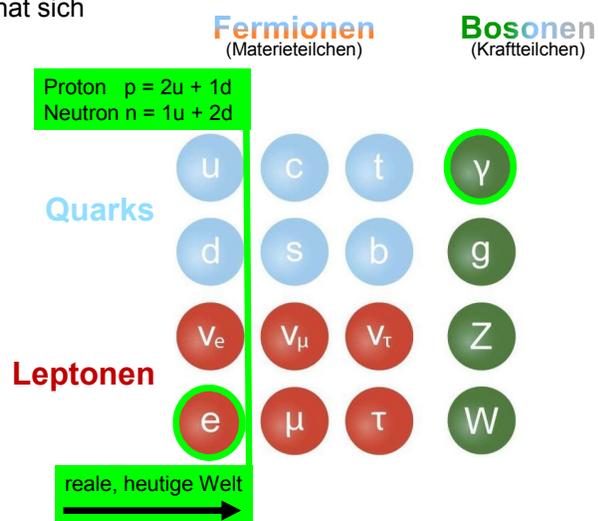
Die Physik ist auf dem Weg zum Verständnis der Schwerkraft ein großes Stück vorangekommen.

Bert Schöneich | Die Masse, das Higgs und mehr ... | Zeuthen 2013 | Seite 30



Zusammenfassung - 2

Unser Weltbild hat sich verändert

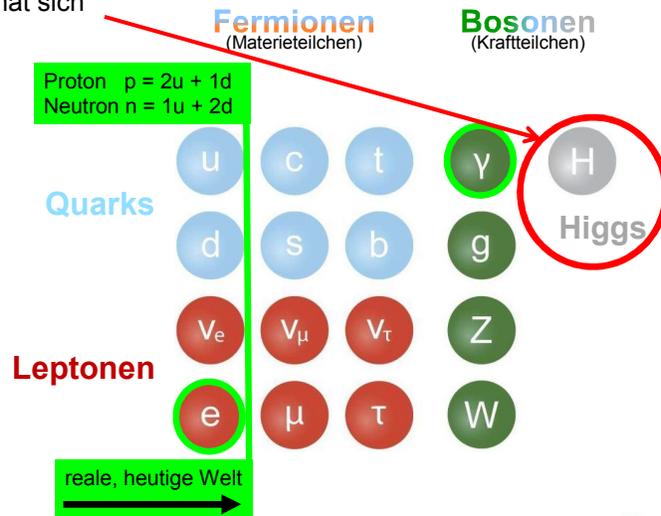


Bert Schöneich | Die Masse, das Higgs und mehr ... | Zeuthen 2013 | Seite 31



Zusammenfassung - 2

Unser Weltbild hat sich verändert



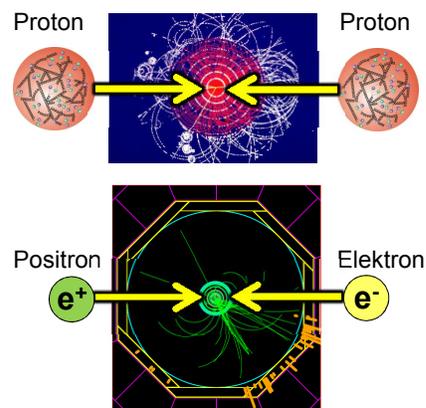
Bert Schöneich | Die Masse, das Higgs und mehr ... | Zeuthen 2013 | Seite 32



Zusammenfassung - 3

offene Fragen, bis dass das Higgs ein Higgs ist:

- Bestimmung weiterer Eigenschaften (Spin und Parität, Higgs-Potential)
- Bestimmung des Verhaltens beim Wechselwirken mit anderen Teilchen (Kopplungen an Fermionen und Bosonen)
- Die Ergebnisse von Proton-Proton-Kollisionen am LHC sind zu ungenau für eine exakte Vermessung des Higgs.
- Es entsteht zu viel Untergrund („Datenmüll“).
- Für exakte Messungen sind Positron-Elektron-Kollisionen notwendig.
- Dabei gibt es viel weniger, viel klarere Spuren.
- Nur ein neuer Beschleuniger, ein Linear-Collider kann Elektronen und Positronen derart beschleunigen, dass diese Messungen möglich sind.



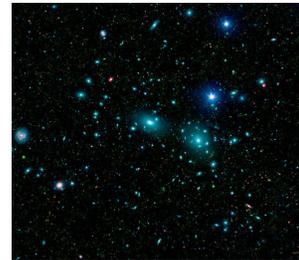
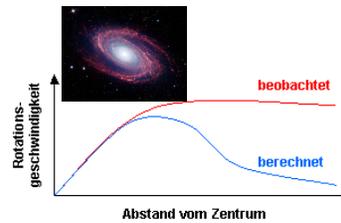
Bert Schöneich | Die Masse, das Higgs und mehr ... | Zeuthen 2013 | Seite 33



Ausblick – Dunkle Materie – Dunkle Energie - 1

Ein erstes Problem

- Sterne in den äußeren Bereichen einer Galaxie umkreisen den Kern der Galaxie mit einer deutlich höheren Geschwindigkeit, als es auf Grund der sichtbaren Masse der Galaxie zu erwarten ist.
- ...
- Der Schweizer Physiker und Astronom Fritz Zwicky stellte 1933 fest, dass der Coma-Galaxien-Haufen nicht durch die Gravitationswirkung seiner sichtbaren Bestandteile (im Wesentlichen der Sterne der Galaxien) allein zusammengehalten wird, dazu wäre das 400-fache der sichtbaren Masse notwendig.



Eine Hypothese:

Die fehlende Masse liegt in einer bisher noch unbekanntenen Form von Materie vor, die

Dunkle Materie

genannt wird.

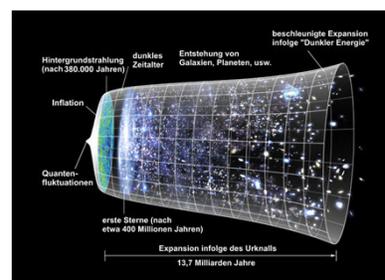
Bert Schöneich | Die Masse, das Higgs und mehr ... | Zeuthen 2013 | Seite 34



Ausblick – Dunkle Materie – Dunkle Energie - 2

Ein zweites Problem

- Das Universum expandiert. Das ist durch die Beobachtung der Rotverschiebung weit entfernter Galaxien nachgewiesen.
- Bisherige Modelle besagten, dass die Expansion aufgrund der Materie und der durch sie wirkenden Gravitationsanziehung verlangsamt wird.
- Messungen sollten diese Verlangsamung quantifizieren.
- Messungen an weit entfernten Galaxien ergaben aber eine Zunahme der Expansionsgeschwindigkeit.



Eine Hypothese:

Diese Zunahme der Expansion wird von einer bisher noch unbekanntenen Form von Energie angetrieben, die

Dunkle Energie

genannt wird.

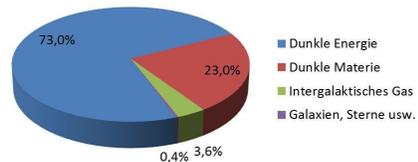
Bert Schöneich | Die Masse, das Higgs und mehr ... | Zeuthen 2013 | Seite 35



Ausblick – Dunkle Materie – Dunkle Energie - 3

Die Zahlen, die Fragen

- Dunkle Energie und Dunkle Materie machen nach heutigen Vorstellungen zusammen ca. 96% der Materie des Universums aus.
- 3,6% der Materie des Universums wird durch das Gas zwischen den Galaxien gebildet.
- Die Galaxien selbst mit den Sternen, den Planeten, den Menschen und ... machen nur 0,4% aus.



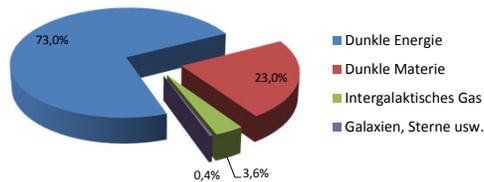
Bert Schöneich | Die Masse, das Higgs und mehr ... | Zeuthen 2013 | Seite 36



Ausblick – Dunkle Materie – Dunkle Energie - 4

Die Zahlen, die Fragen

- Dunkle Energie und Dunkle Materie machen nach heutigen Vorstellungen zusammen ca. 96% der Materie des Universums aus.
- 3,6% der Materie des Universums wird durch das Gas zwischen den Galaxien gebildet.
- Die Galaxien selbst mit den Sternen, den Planeten, den Menschen und ... machen nur 0,4% aus.



Warum?

Es gibt viel zu tun ...

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Bert Schöneich | Die Masse, das Higgs und mehr ... | Zeuthen 2013 | Seite 37



Literatur – Texte - 1

- Prof. Dr. Lohmann, Wolfgang „**Das Higgs Boson – ein besonderes Teilchen**“
Vortrag im DESY Zeuthen (August 2012)
- Bethke, Siegfried „**Der LHC nach Higgs: Die Suche bleibt spannend**“
Spektrum der Wissenschaft, Oktober 2012
- Riemann, Sabine „**Projekte für künftige Linearcollider**“
Vortrag im DESY Zeuthen (Oktober 2012)
- Behnke; Krüger; Moch „**Der tiefe Blick ins Proton**“
Physik Journal 11 (2012) Nr.2
- Garutti, Erika „**The way to future discoveries**“
Vortrag im DESY Hamburg
- Carena, Marcela „**The Higgs Boson Discovery and Implications for New Physics at the LHC**“
Vortrag DESY Zeuthen (November 2012)
- Musser, George „**Kann die Zeit enden?**“
Spektrum der Wissenschaft,
Dossier „Raum, Zeit, Materie“, 4/11

Bert Schöneich | Die Masse, das Higgs und mehr ... | Zeuthen 2013 | Seite 38



Literatur – Texte - 2

- Prof. Dr. Jochum, Josef „**Was ist Dunkle Materie?**“
www.drillingsraum.de
- Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF: „**Weltmaschine**“ (Broschüre, 2009)
- Fritsch, Harald „**Quarks**“ (Buch, 2006)
- MyonRay <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:HiggsDigamma.png>
- Pössel, Markus „**Kabine, Schwerkraft und Rakete: Das Äquivalenzprinzip**“
Einstein Online Band 4 (2010), 1111
- **Spektrum der Wissenschaft** (Oktober 2012)
- **Spektrum der Wissenschaft** (November 2012)
- **bild der wissenschaft** (11/2012)
- „**Parallelwelten**“
Spektrum der Wissenschaft HIGHLIGHTS (3/12)

Bert Schöneich | Die Masse, das Higgs und mehr ... | Zeuthen 2013 | Seite 39



Literatur - Webseiten

- www.weltmaschine.de (!)
- www.weltderphysik.de/lhc
- www.cern.ch
- lhc.web.cern.ch/lhc/
- www.atlas.ch
- www.desy.de/forschung/anlagen/lhc/index_ger.html
- www.quantenwelt.de
- www.elementarteilchen.info
- [DESY Zeuthen, Abteilung Experiment Support](#)
- [Wikipedia, deutsch](#)
- <http://www.youtube.com/watch?v=28X9czEROPs> (Higgs-Lied, gesungen vom Chor des CERN)
- <http://www.einstein-online.info> (Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik)



Dank

Dank an die Mitarbeiter des DESY Zeuthen
 Sabine Riemann, Wolfgang Lohmann, Wolfgang Lange und Stephan Wiesand
 für die vielen hilfreichen fachlichen Hinweise
 und
 Ulrike Behrens, Susann Niedworok und Manfred Biastoch
 für die Unterstützung bei der grafischen und technischen Gestaltung dieses Vortrages.

