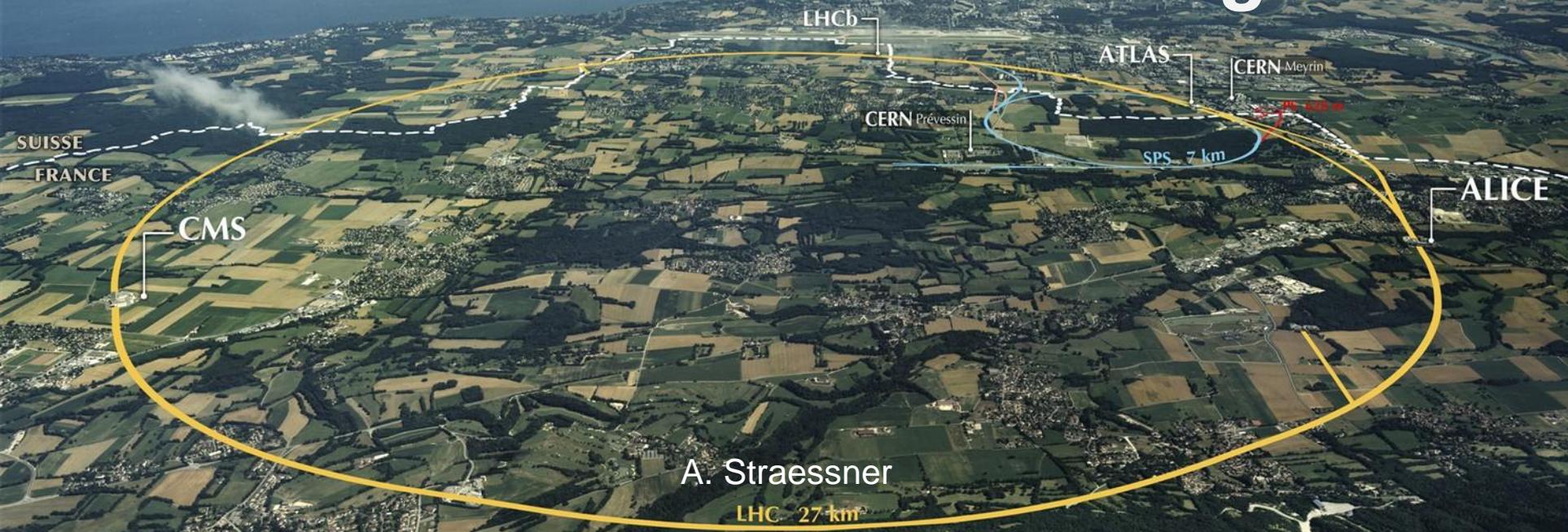


Das Higgs-Boson: Sind alle Rätsel gelöst? Neues vom Teilchenbeschleuniger LHC



A. Straessner

LHC 27 km



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN

DPG Frühjahrstagung
6. März 2013



PHYSICS
AT THE
TERA
SCALE
Heinholz Alliance

FSP 101

ATLAS

GRADUIERTEN
KOLLEG
Masse-Spektrum-Symmetrie

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

HIGGS BOSON

H



The **HIGGS BOSON** is the theoretical particle of the Higgs mechanism, which physicists believe will reveal how all matter in the universe gets its mass. Many scientists hope that the Large Hadron Collider in Geneva, Switzerland, which collides particles at 99.99% the speed of light, will detect the elusive Higgs Boson

\$10.49 PLUS SHIPPING



Wool felt, fleece with gravel fill for maximum mass.

GLUON PHOTON NEUTRINO TACHYON ELECTRON UP QUARK DOWN QUARK TAU NEUTRINO MUON UP Q
NEUTRON DOWN QUARK TAU GLUON **HIGGS BOSON** NEUTRINO TACHYON ELECTRON UP QUARK DOWN
NEUTRINO MUON UP QUARK PROTON NEUTRON DOWN QUARK TAU GLUON PHOTON NEUTRINO TACHY
The **PARTICLE ZOO**
UP QUARK PROTON NEUTRON DOWN QUARK TAU GLUON PHOTON NEUTRINO TACHYON ELECTRON UP
DOWN QUARK TAU GLUON PHOTON NEUTRINO TACHYON ELECTRON UP QUARK DOWN QUARK TAU NEU
UP QUARK PROTON NEUTRON DOWN QUARK TAU GLUON PHOTON NEUTRINO TACHYON ELECTRON UP

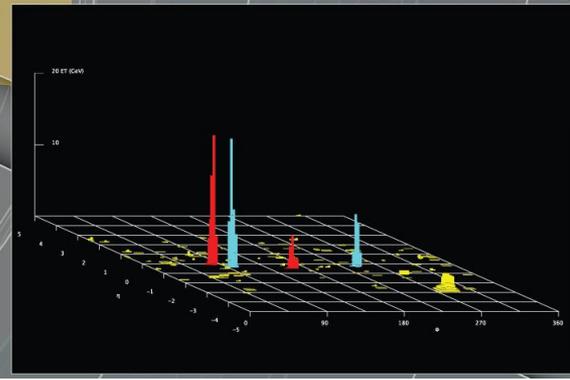
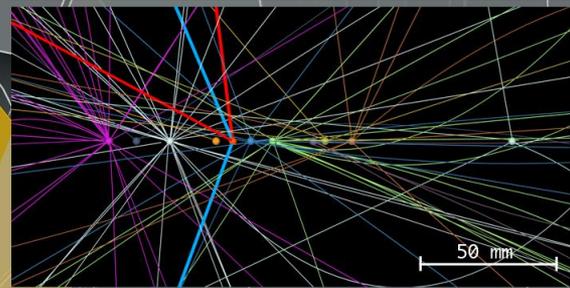
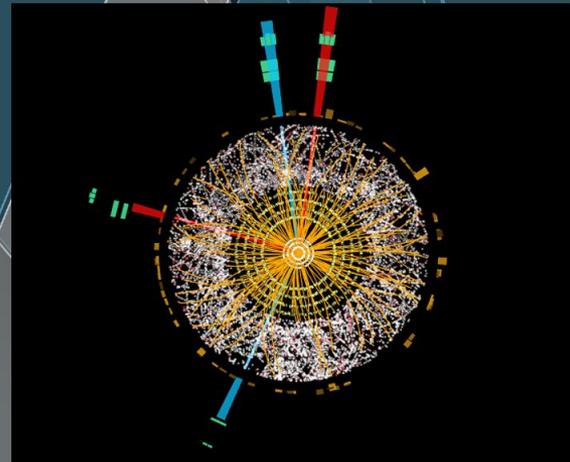
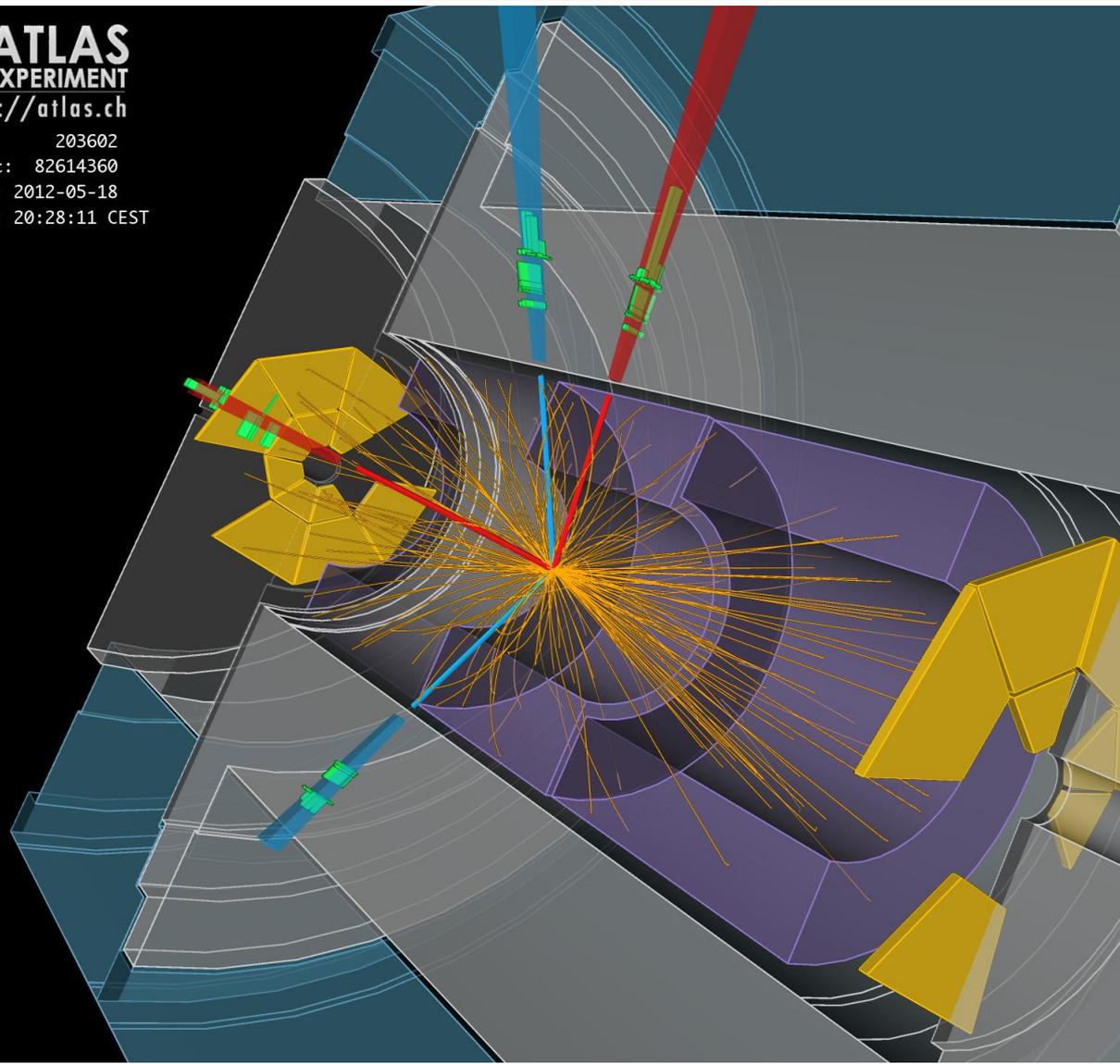
Das Higgs-Boson



ATLAS
EXPERIMENT

<http://atlas.ch>

Run: 203602
Event: 82614360
Date: 2012-05-18
Time: 20:28:11 CEST



(genauer gesagt: ein Higgs-Boson-Kandidat)



Das Higgs-Feld verleiht allen Elementarteilchen eine Masse.

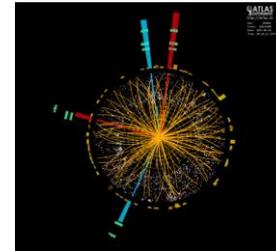
Wie kann man das verstehen?



- Was ist Masse?



- Masse in der Welt der Elementarteilchen



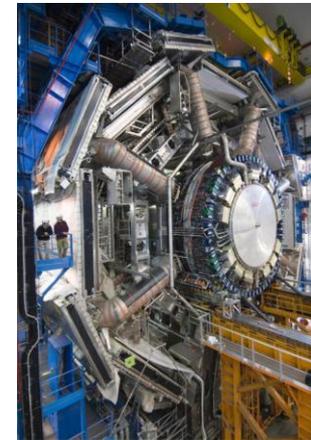
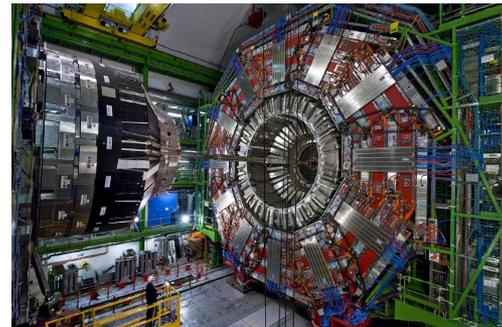
- Die Idee von Peter Higgs & Co



- Suche nach dem Higgs-Boson am Large Hadron Collider

- Ist das Higgs-Boson entdeckt?

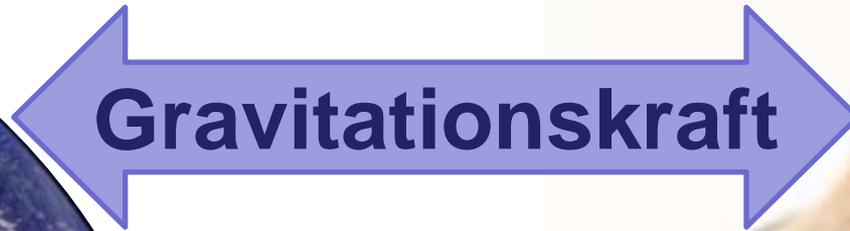
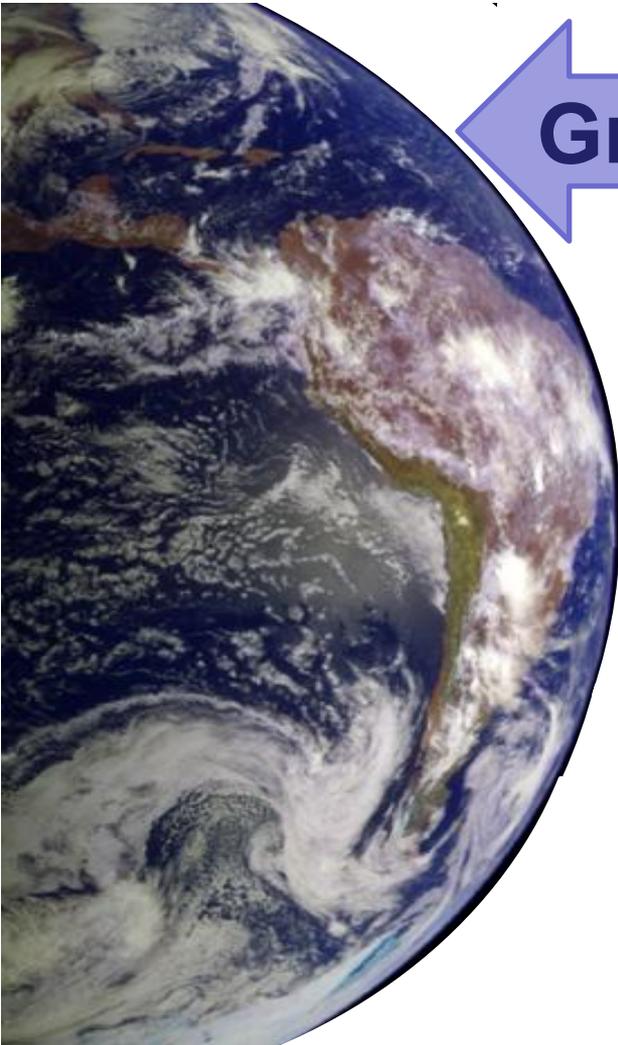
- Sind alle Rätsel gelöst?



- Gewicht auf der Waage:



- Gewicht auf der Waage durch Anziehungskraft zwischen Erde und Mensch



- Gewicht auf der Waage durch Anziehungskraft zwischen Erde und Mensch



Masse der Erde

x



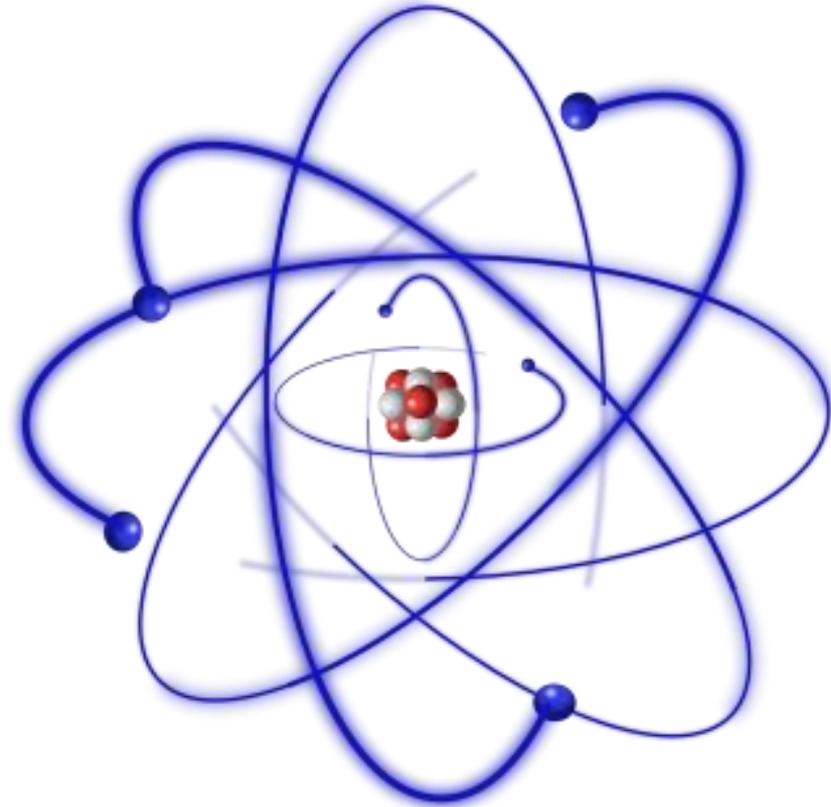
Masse des Menschen

Gravitationskraft

- Materie ist aus Atomen aufgebaut:

Atomhülle:
Elektronen

Massenanteil etwa 0.001%



Atomkern:
Protonen und Neutronen

Massenanteil etwa 99.999%

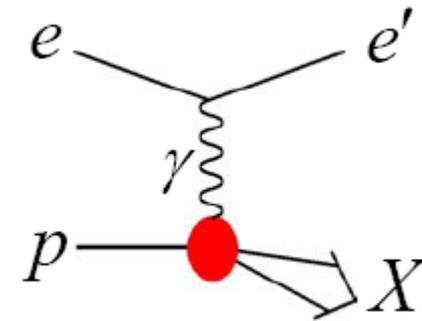
Innere Struktur der Protonen



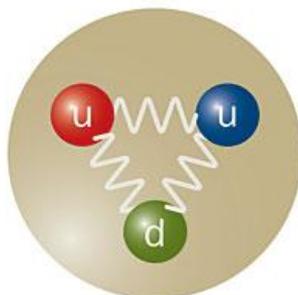
Das Elektron ist ein Elementarteilchen
→ keine innere Struktur

Und das Proton?

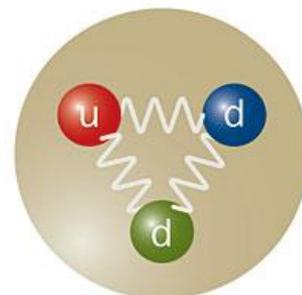
Beschuss von Protonen mit Elektronen:



Friedman, Kendall, Taylor 1969: punktförmige Objekte im Proton



Proton



Neutron

“up” und “down” Quarks

QUARKS

 <p>UP QUARK A teeny little point inside the proton and neutron, it is friends forever with the down quark.</p>	 <p>CHARM QUARK A charming second generation quark.</p>	 <p>TOP QUARK This heavyweight champion doesn't live long enough to make friends with anyone.</p>
 <p>DOWN QUARK A tiny little point inside the proton and neutron, it is friends forever with the up quark.</p>	 <p>STRANGE QUARK What's so strange about this second generation quark?</p>	 <p>BOTTOM QUARK This third generation quark is puttin' on the pounds.</p>

LEPTONS

 <p>ELECTRON-NEUTRINO This minuscule bandit is so light, he is practically massless.</p>	 <p>MUON-NEUTRINO Like the other 2 neutrinos, he's got an identity crisis from oscillation.</p>	 <p>TAU-NEUTRINO He's a tau now, but what type of neutrino will he be next?</p>
 <p>ELECTRON A familiar friend, this negatively charged, busy lil' guy likes to bond.</p>	 <p>MUON A "heavy electron" who lives fast and dies young.</p>	 <p>TAU A "heavy muon" who could stand to lose a little weight.</p>

3 Familien von Quark-Paaren

3 Familien von Leptonen

Elektron und seine schweren und leichten Partner

(c) Particle Zoo



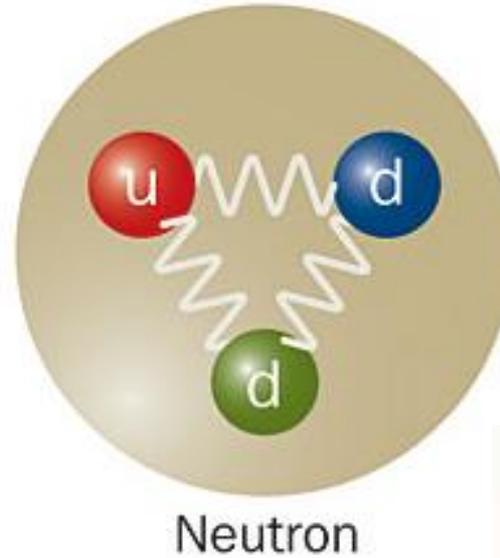
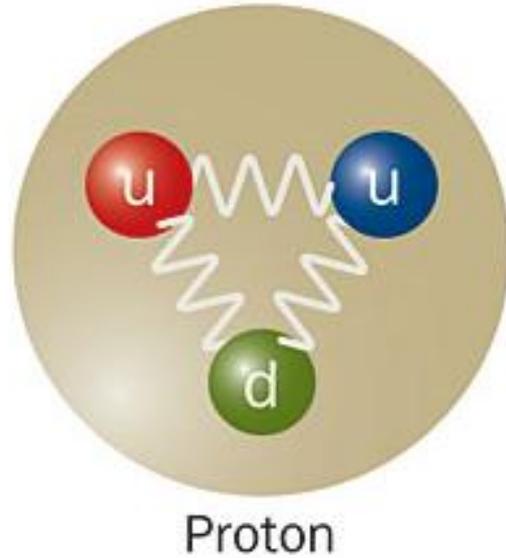
Top Quark:
so schwer wie
180 Protonen oder
1 Gold-Atom



Protonen und Neutronen



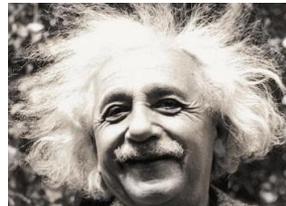
- Protonen und Neutronen bestehen aus den leichtesten Quarks und werden von der Starken Kraft zusammengehalten:



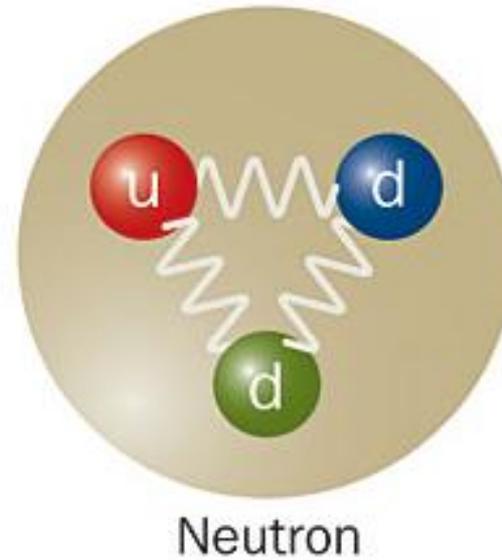
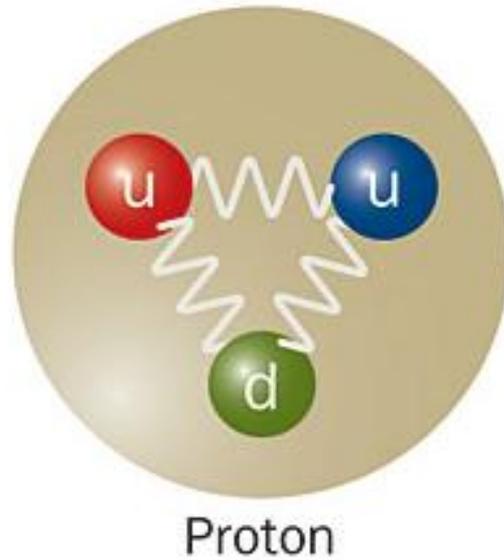
Massenanteil der elementaren Quarks ~5%

95% der Masse aus der Bindungsenergie des Starken Kraftfeldes

$$E = mc^2$$

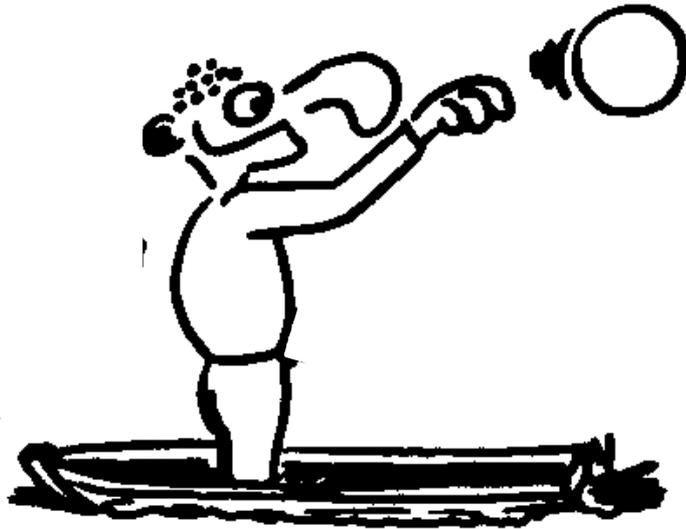


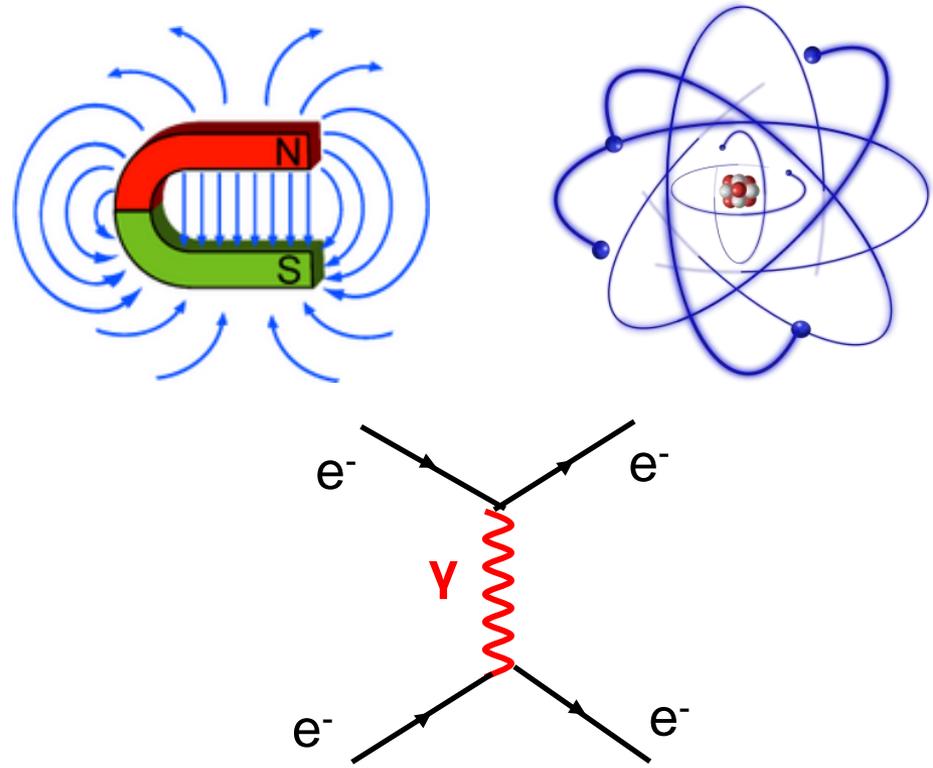
- Masse von makroskopischen Objekten ist also zu 95% geklärt



Wie erhalten aber die Elementarteilchen ihre Masse?

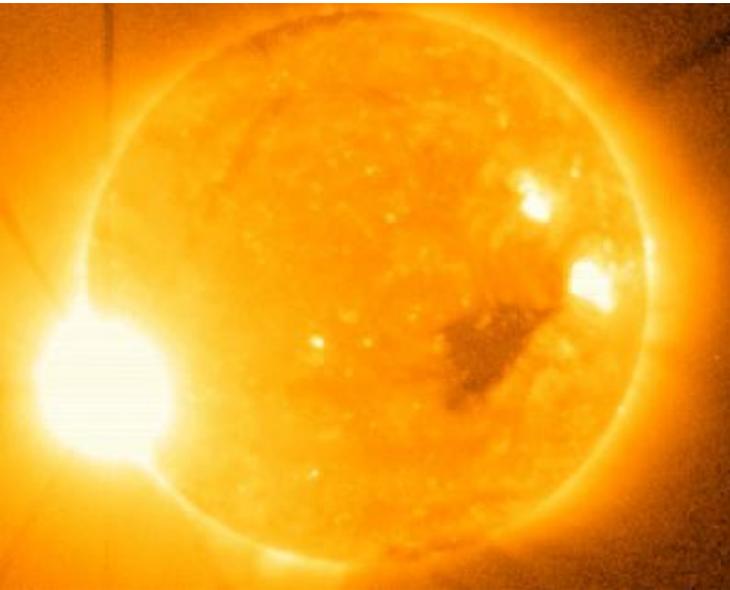
Kraft wird übermittelt durch Austausch von Botenteilchen



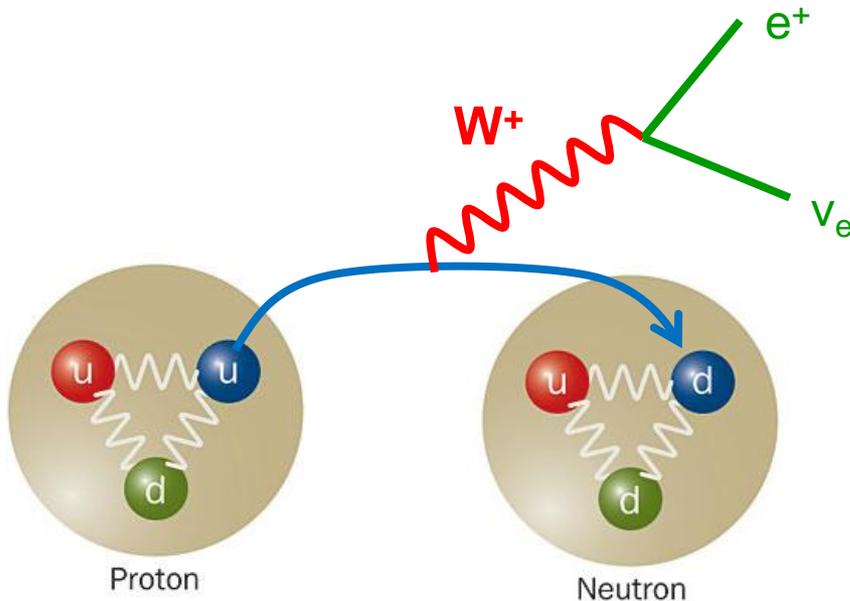
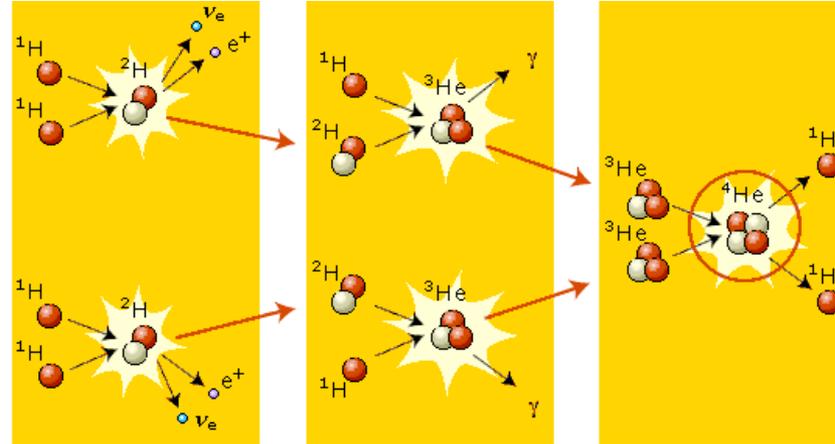


- Ladung: $+n$ oder $-n$
- Botenteilchen: Photon
- **Photon hat keine Masse**
→ **hat Lichtgeschwindigkeit**

Schwache Kraft



- Schwache Kraft ist verantwortlich für solare Fusionsprozesse:

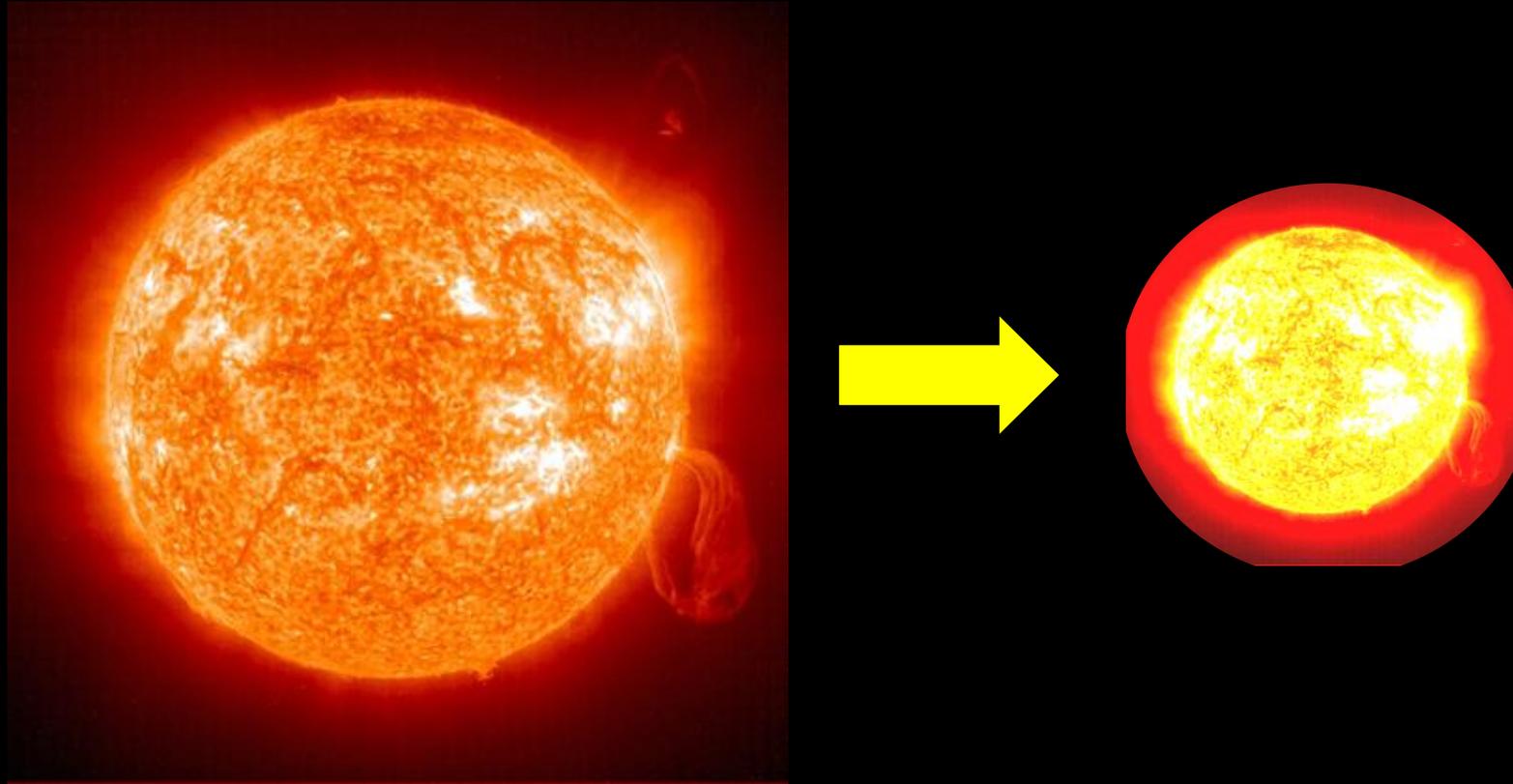


- schwache Ladung
- W^\pm und Z Bosonen sind die Botenteilchen der schwachen Kraft
- W^\pm und Z-Bosonen haben Masse
→ immer langsamer als Lichtgeschwindigkeit

Warum sind Teilchenmassen wichtig?



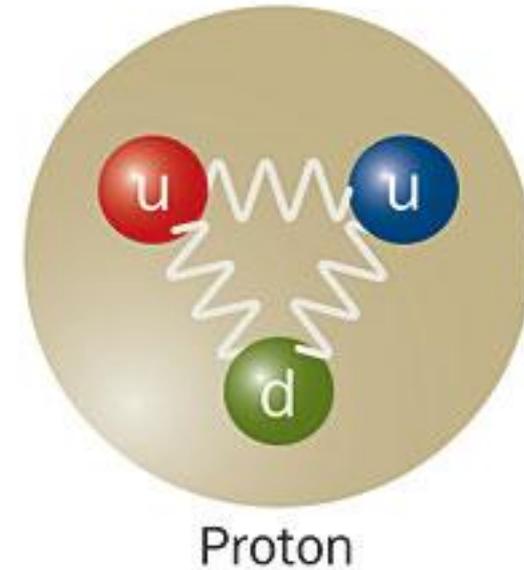
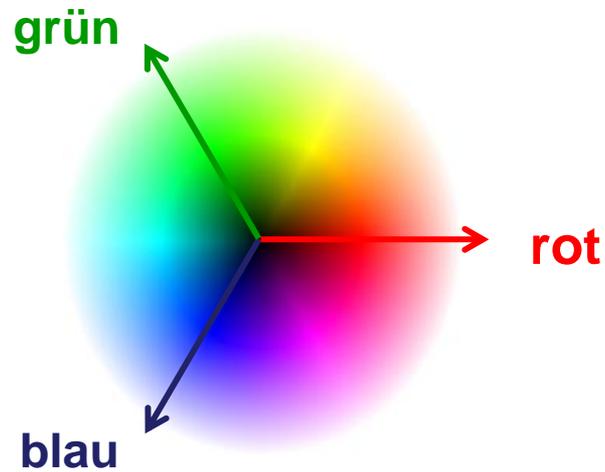
- Was geschieht, wenn das W -Boson schwerer wäre?
 - **Geschwindigkeit von Kernreaktionen ändert sich**



- **Sonne wird kleiner und heller**
- **Temperatur der Sonne wird höher**

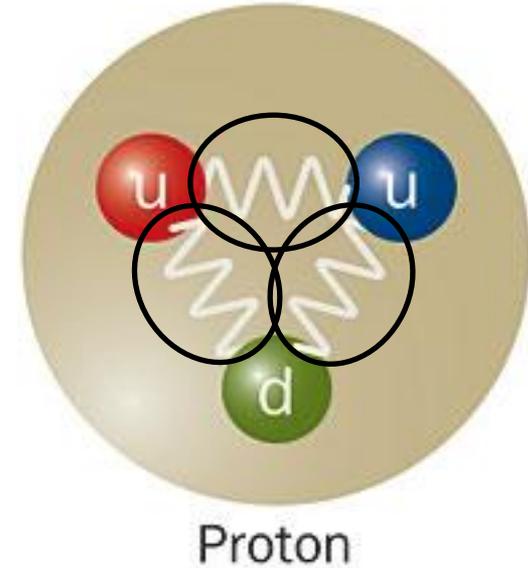
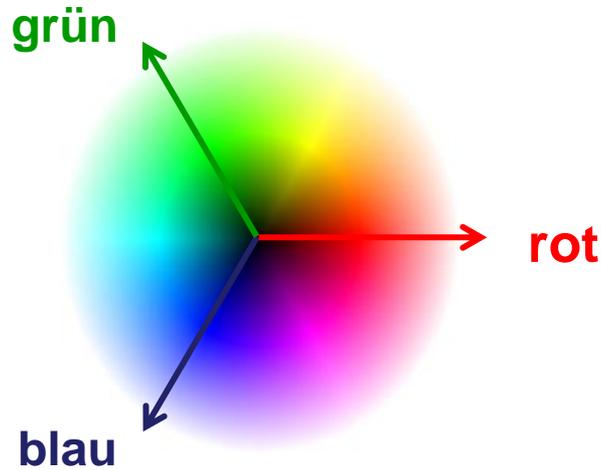
Cahn, Rev. Mod. Phys. 68, 951–959 (1996)

- Bindet Quarks im Proton und Neutron
- Quarks tragen “Farbladung”



- Farbmischung muss “weiss” sein → 3 Quarks in jedem Proton und Neutron

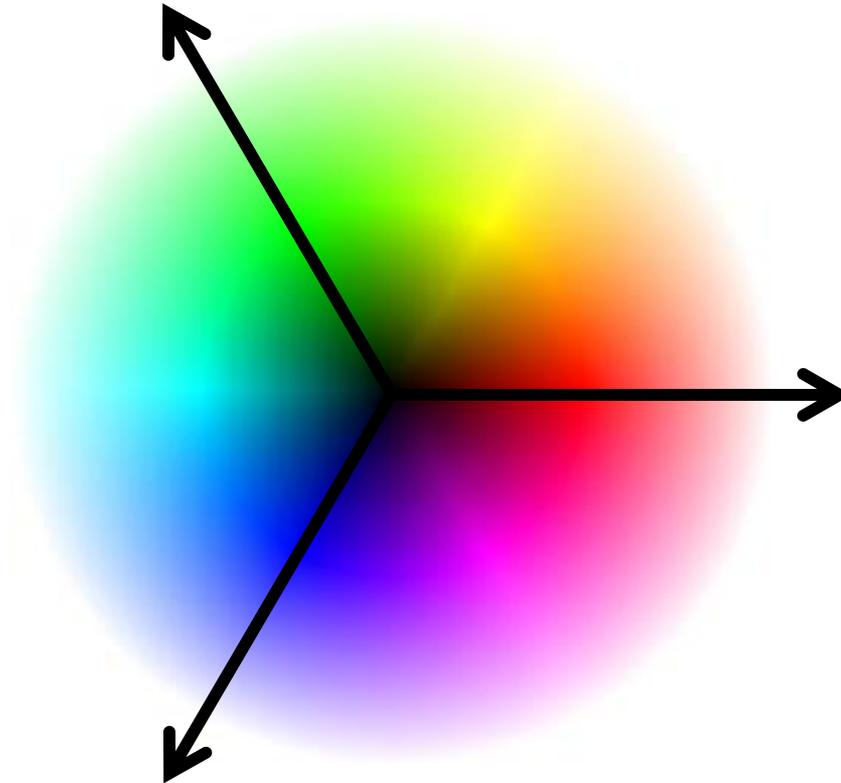
- Bindet Quarks im Proton und Neutron
- Quarks tragen “Farbladung”



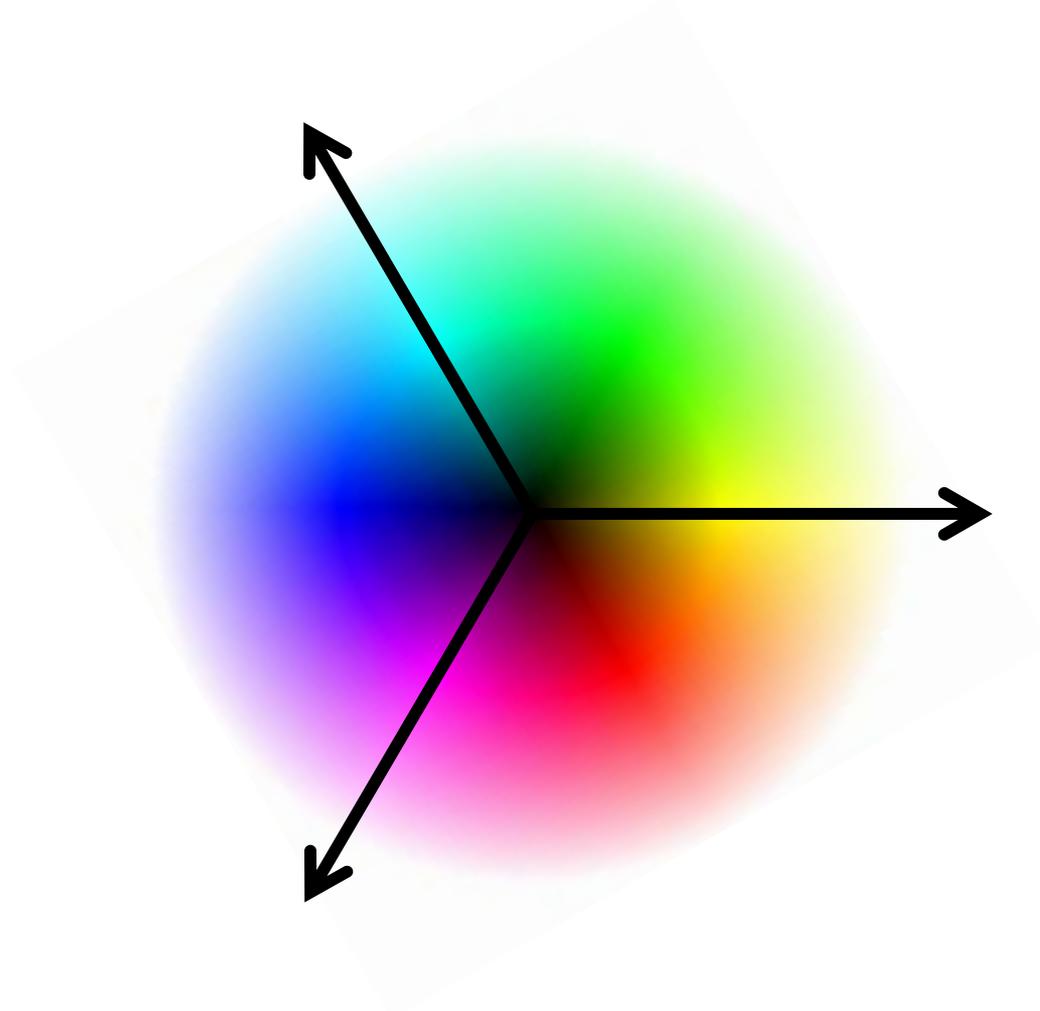
- Farbmischung muss “weiss” sein → 3 Quarks in jedem Proton und Neutron
- Botenteilchen: Gluonen
- **Gluonen sind masselos**



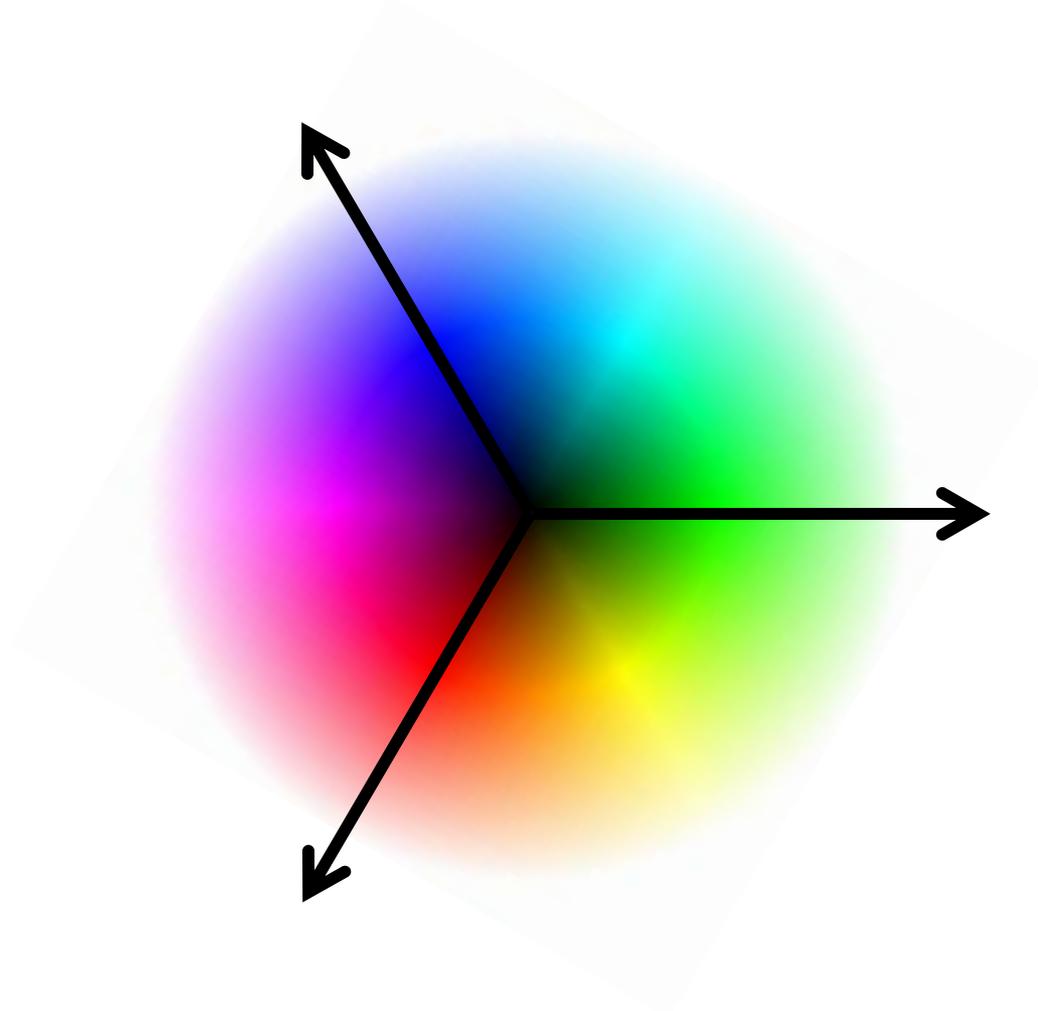
- Farbkraft ist gleich stark, egal wie der Farbkreis gedreht wird



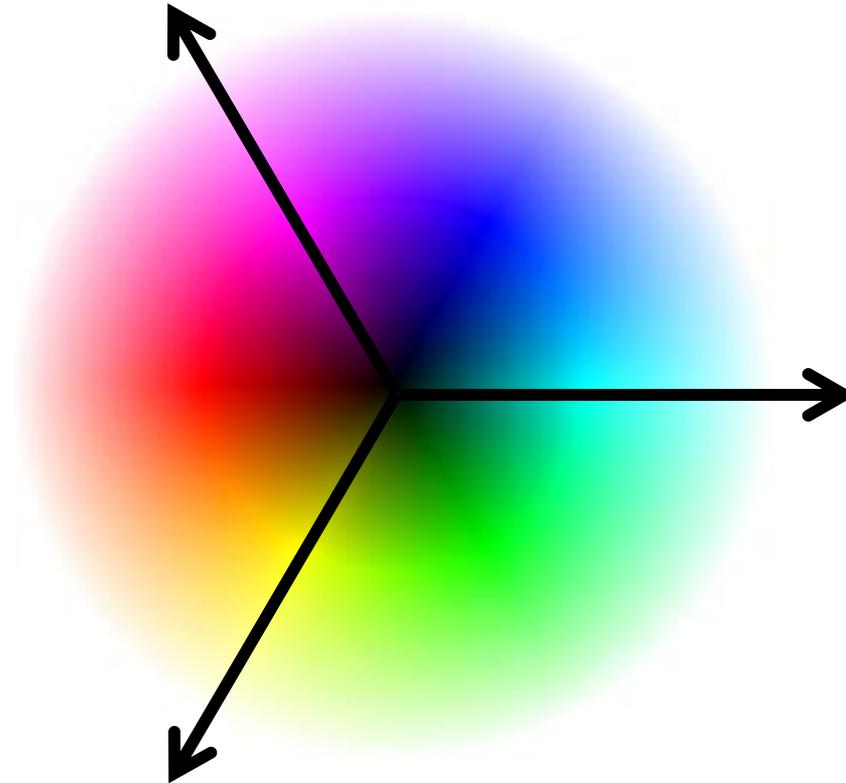
- Farbkraft ist gleich stark, egal wie der Farbkreis gedreht wird



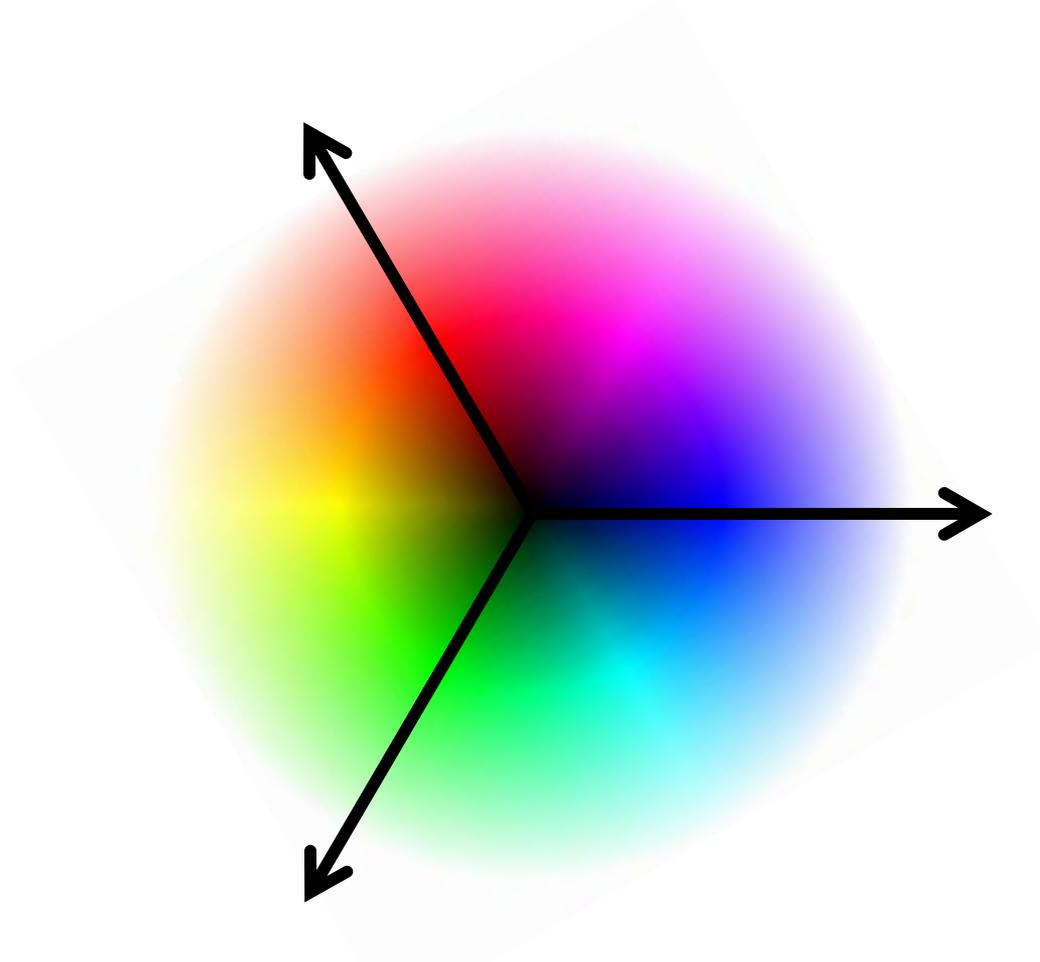
- Farbkraft ist gleich stark, egal wie der Farbkreis gedreht wird



- Farbkraft ist gleich stark, egal wie der Farbkreis gedreht wird

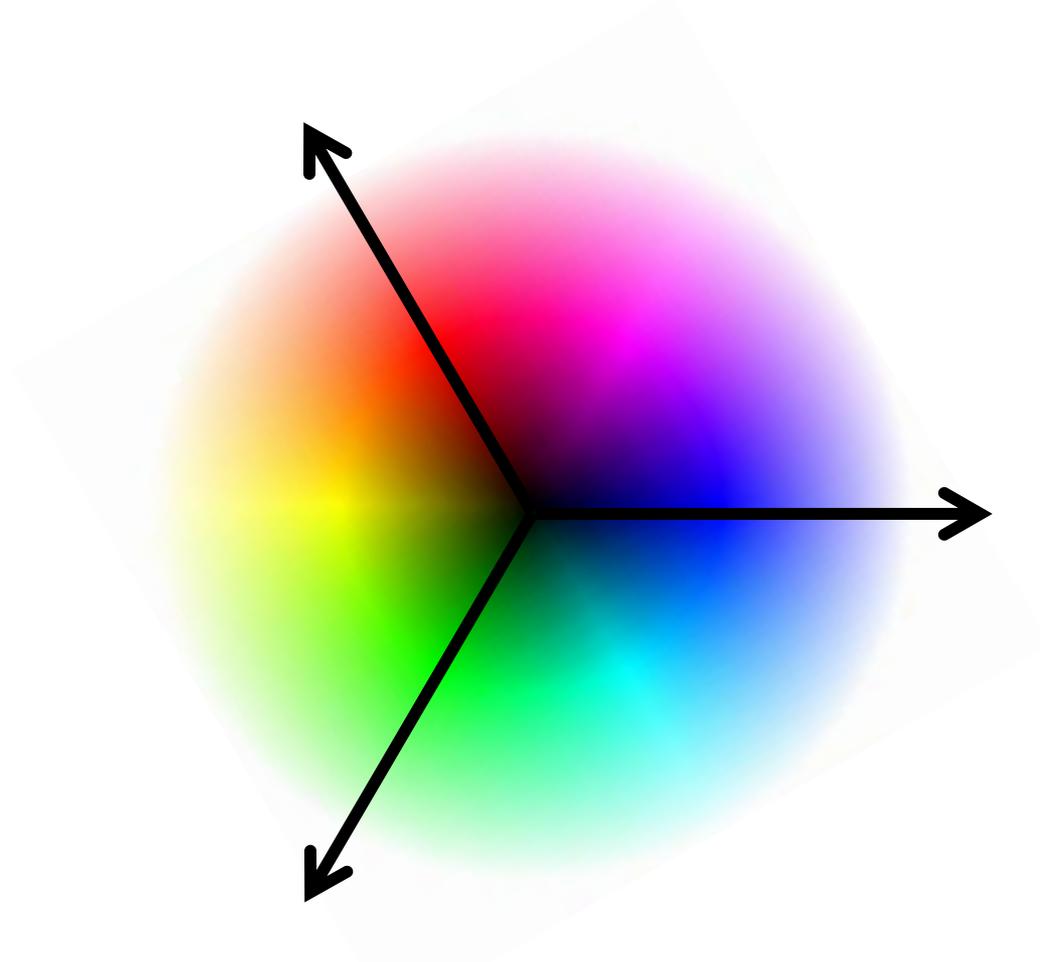


- Farbkraft ist gleich stark, egal wie der Farbkreis gedreht wird



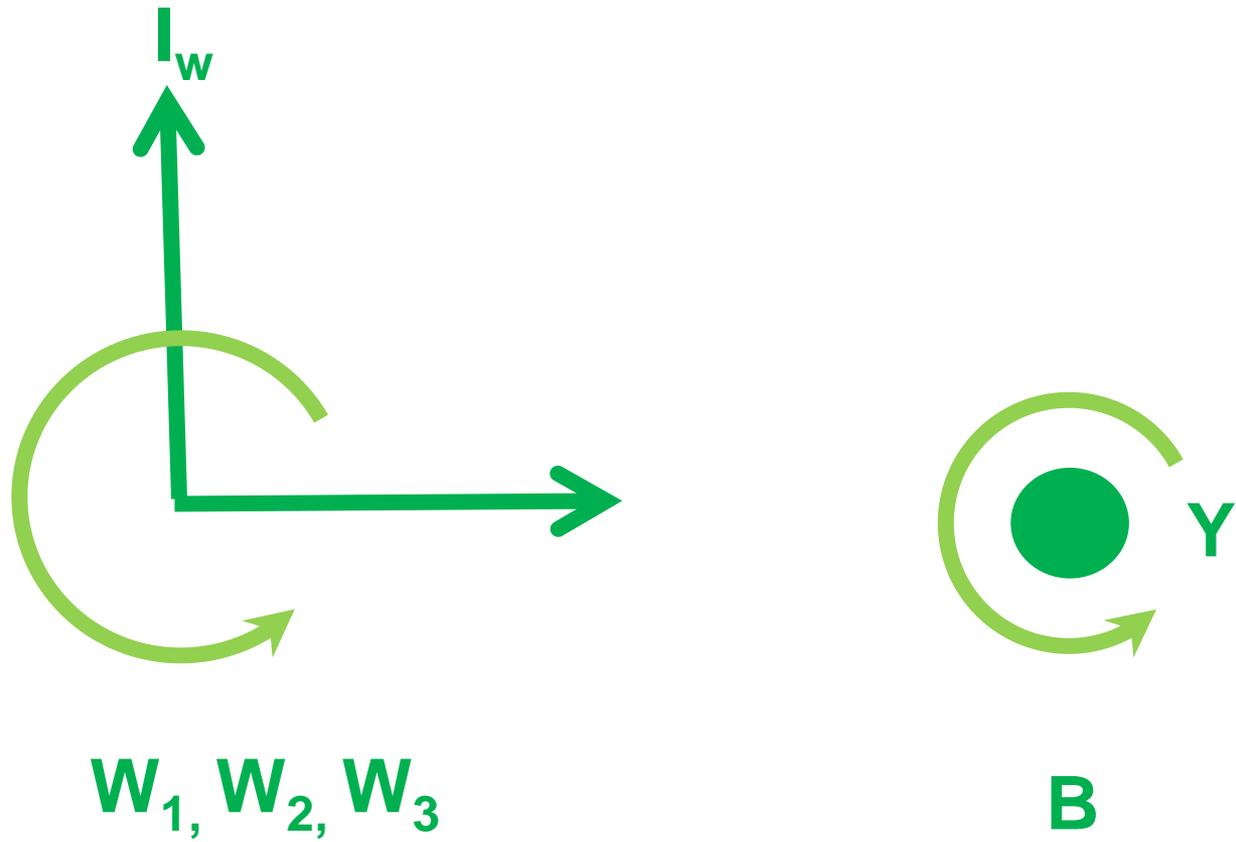
- Symmetrie ist ein fundamentales Konzept in der Natur:
Eigenschaften der Starken Kraft sind ableitbar aus Symmetrieprinzip

- Farbkraft ist gleich stark, egal wie der Farbkreis gedreht wird



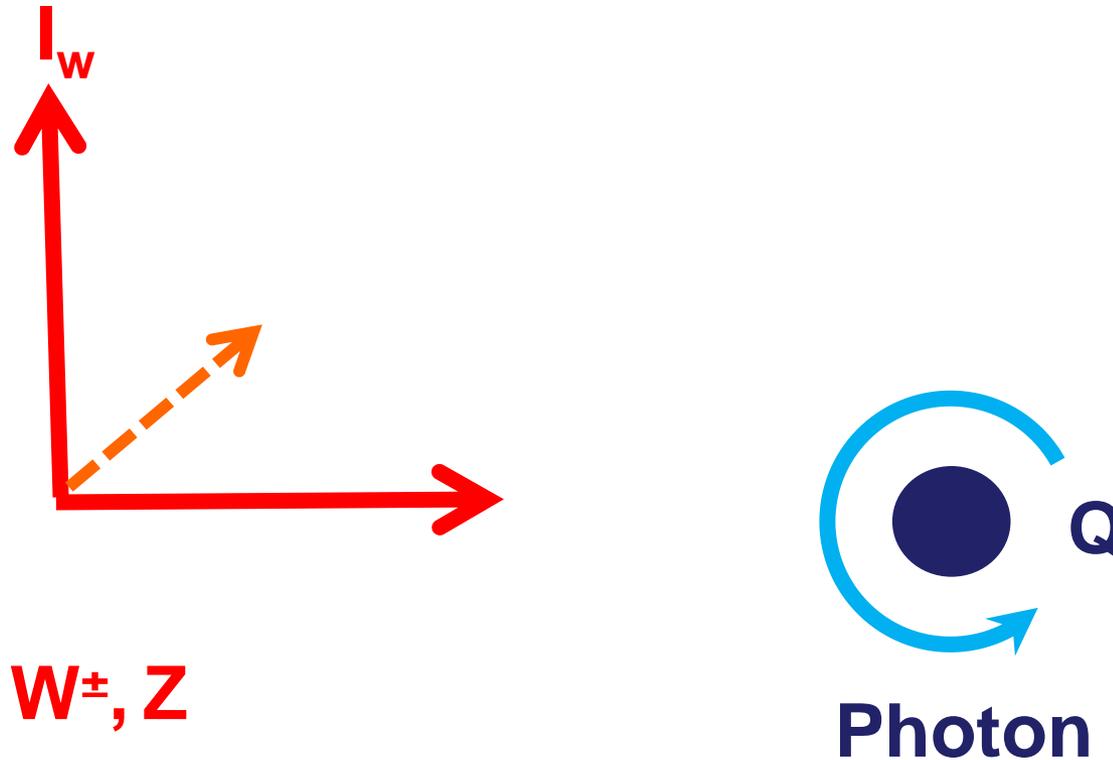
- Symmetrie ist ein fundamentales Konzept in der Natur:
Symmetrieprinzip funktioniert gut, wenn die Austauscheteilchen masselos sind

- Austauschbosonen der Schwachen Kraft sind **bei sehr hohen Energien** ebenfalls symmetrisch:



- **Bedingung: Die Austauschbosonen dürfen keine Masse haben !**

- Experimentelle Beobachtung: W^\pm -Bosonen und Z-Boson haben eine Masse !



- Symmetrie ist nicht mehr vollständig vorhanden
- Dynamische Erklärung:

Spontane Symmetriebrechung

Entdecker im Bereich Teilchenphysik: Yoichiro Nambu



NP 2008



Die Theorie ist symmetrisch

masselose Teilchen



Der Zustand niedrigster Energie ist nicht symmetrisch

Teilchen mit Masse

- Higgs, Englert, Brout, Kibble, Hagen, Guralnik 1964:

Das Higgs-Feld erlaubt spontane Symmetriebrechung

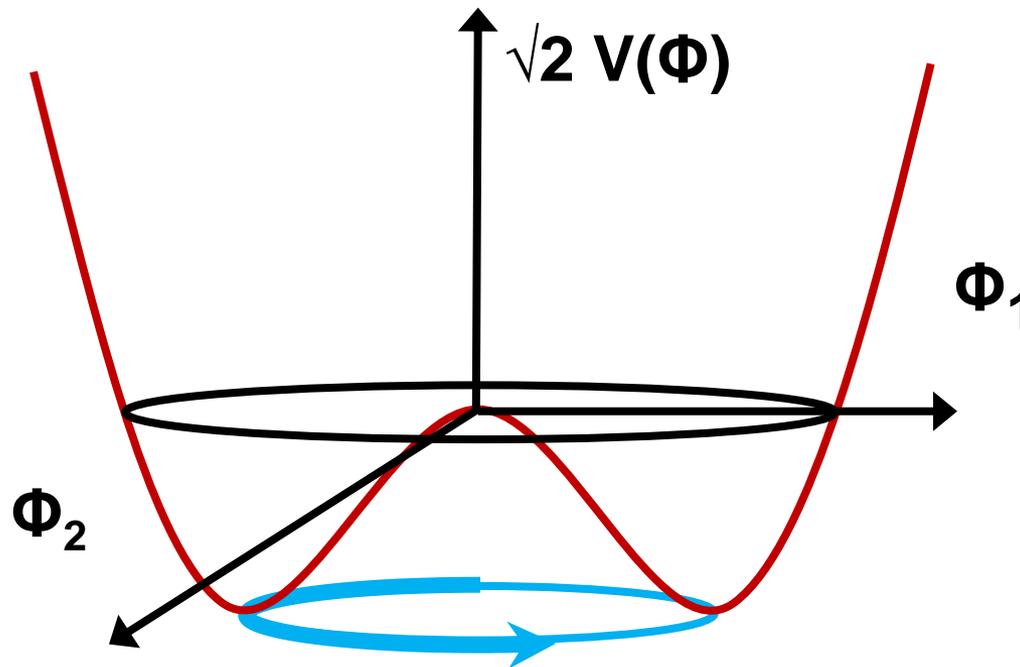
$$L = -\frac{1}{2}(\nabla\varphi_1)^2 - \frac{1}{2}(\nabla\varphi_2)^2 - V(\varphi_1^2 + \varphi_2^2) - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}$$

BROKEN SYMMETRIES AND THE MASSES OF GAUGE BOSONS

Peter W. Higgs

Tait Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Edinburgh, Scotland

(Received 31 August 1964)



- Alle Teilchen wechselwirken mit dem symmetrischen Higgsfeld

- Higgs, Englert, Brout, Kibble, Hagen, Guralnik 1964:

Das Higgs-Feld erlaubt spontane Symmetriebrechung

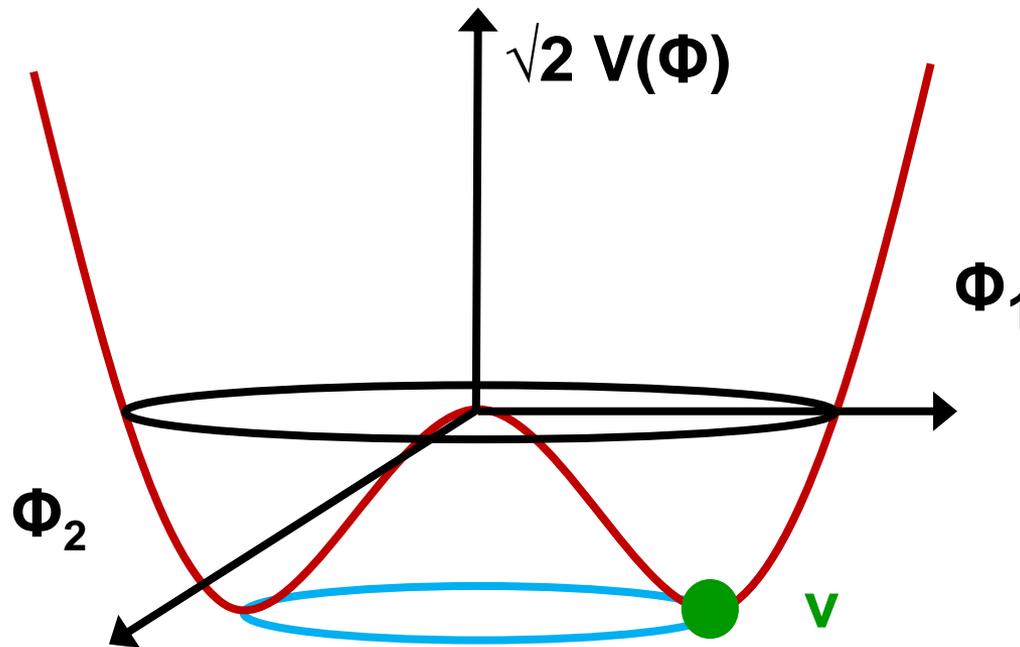
$$L = -\frac{1}{2}(\nabla\varphi_1)^2 - \frac{1}{2}(\nabla\varphi_2)^2 - V(\varphi_1^2 + \varphi_2^2) - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}$$

BROKEN SYMMETRIES AND THE MASSES OF GAUGE BOSONS

Peter W. Higgs

Tait Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Edinburgh, Scotland

(Received 31 August 1964)



- Massen der Elementarteilchen sind proportional zum Wert v des Higgsfeldes am Punkt niedrigster Energie \rightarrow Symmetrie ist gebrochen
- Massen der Austauschbosonen W^\pm und Z lassen sich aus v berechnen

- Higgs, Englert, Brout, Kibble, Hagen, Guralnik 1964:

Das Higgs-Feld erlaubt spontane Symmetriebrechung

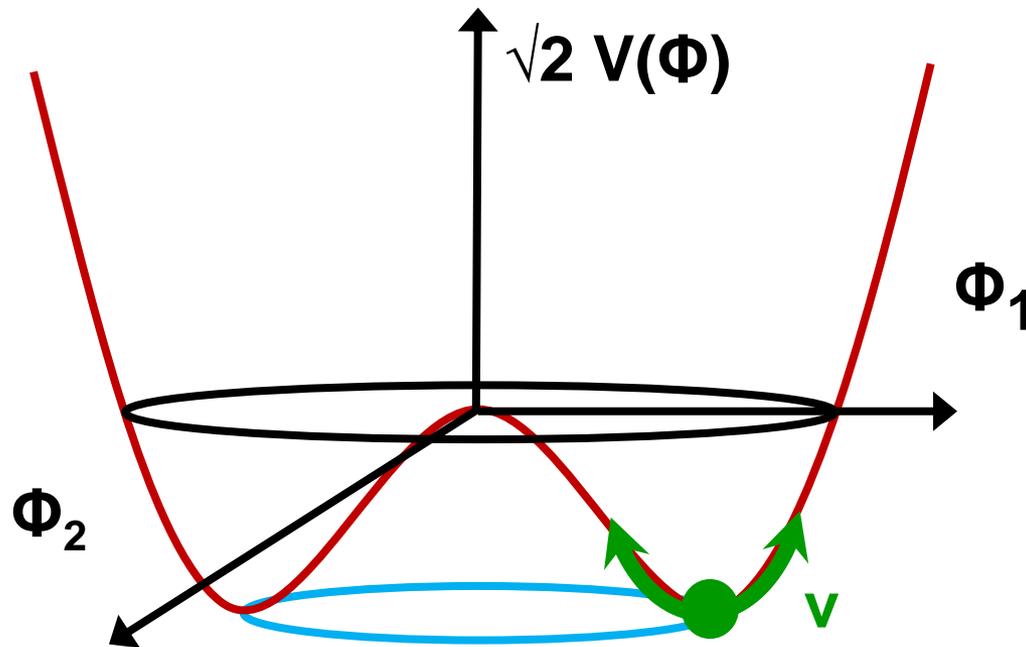
$$L = -\frac{1}{2}(\nabla\phi_1)^2 - \frac{1}{2}(\nabla\phi_2)^2 - V(\phi_1^2 + \phi_2^2) - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}$$

BROKEN SYMMETRIES AND THE MASSES OF GAUGE BOSONS

Peter W. Higgs

Tait Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Edinburgh, Scotland

(Received 31 August 1964)



- Anregungen des Zustands niedrigster Energie → **Higgs-Boson**

Das Higgs-Feld

- Higgs, Englert, Brout, Kibble, Hagen, Guralnik 1964:

Das Higgs-Feld erlaubt spontane Symmetriebrechung

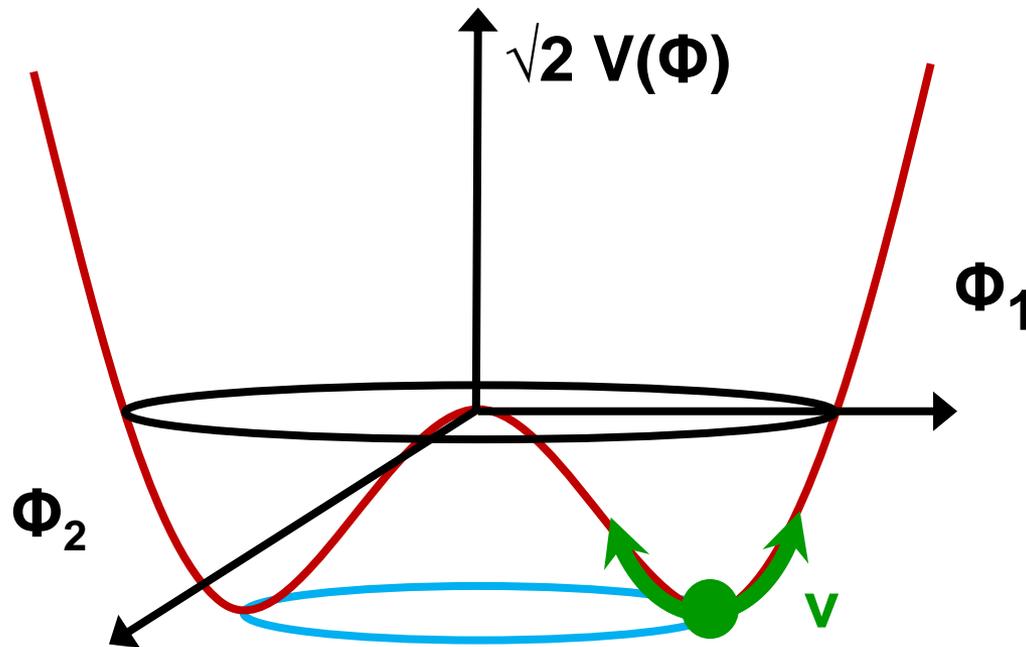
$$L = -\frac{1}{2}(\nabla\phi_1)^2 - \frac{1}{2}(\nabla\phi_2)^2 - V(\phi_1^2 + \phi_2^2) - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}$$

BROKEN SYMMETRIES AND THE MASSES OF GAUGE BOSONS

Peter W. Higgs

Tait Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Edinburgh, Scotland

(Received 31 August 1964)



Entdeckung des Higgs-Bosons → Nachweis des Higgs-Feldes
 Der letzte Baustein im Standardmodell der Teilchenphysik?

Das Higgs-Feld



Leichtes Teilchen



Schweres Teilchen



Das Higgs-Boson = Schweres Teilchen



Streuung von Higgs-Boson mit leichtem Teilchen

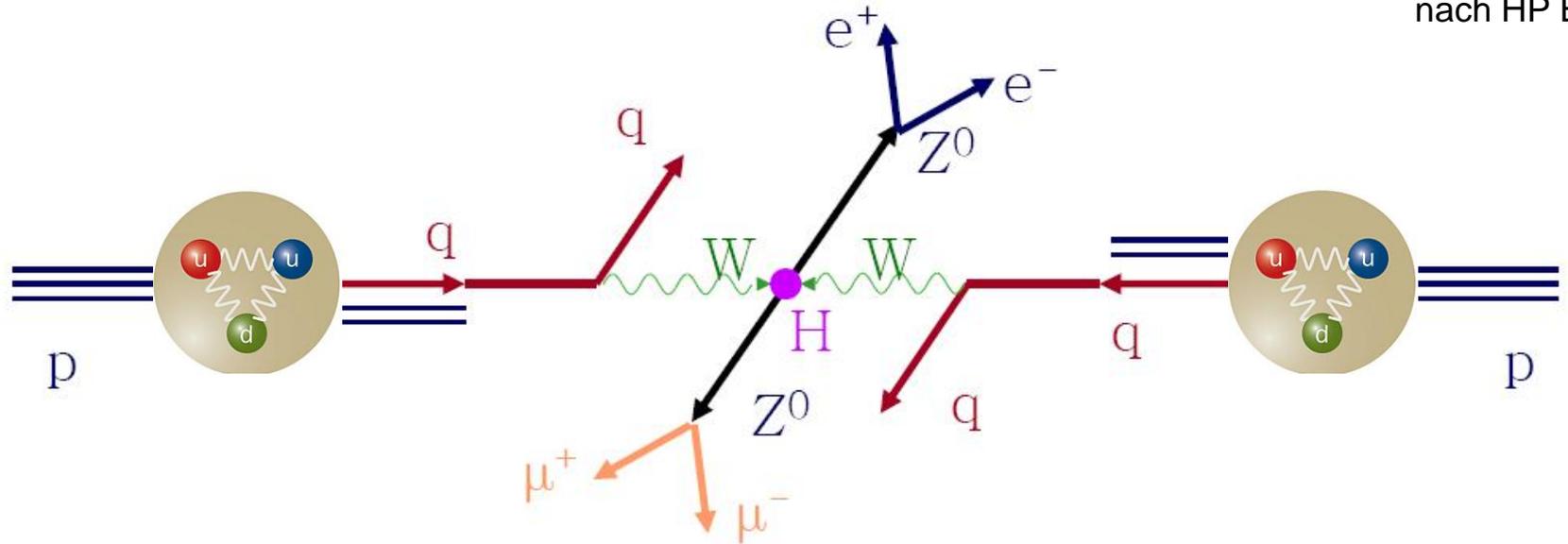


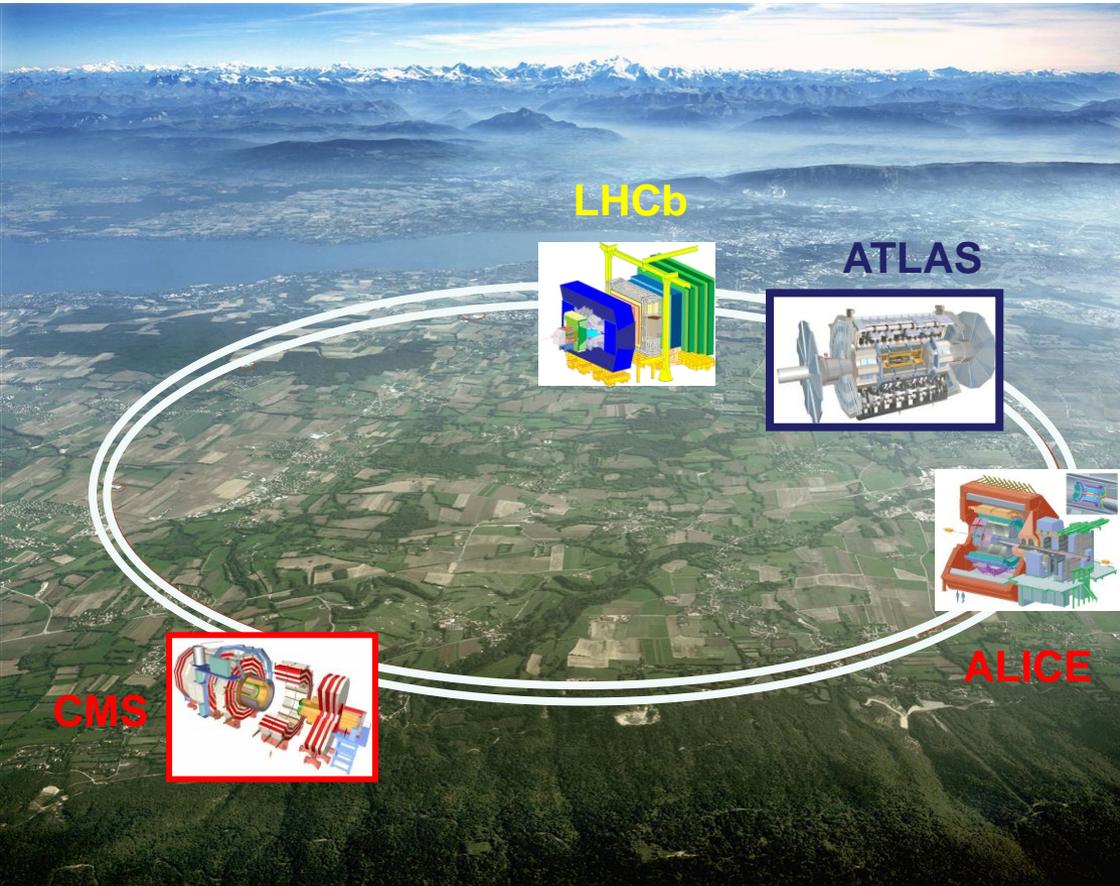


Die Erzeugung von Higgs-Bosonen



nach HP Beck





LHC:

26.7 km Umfang
Tunnel in 50-100 m Tiefe

4 Teilchendetektoren

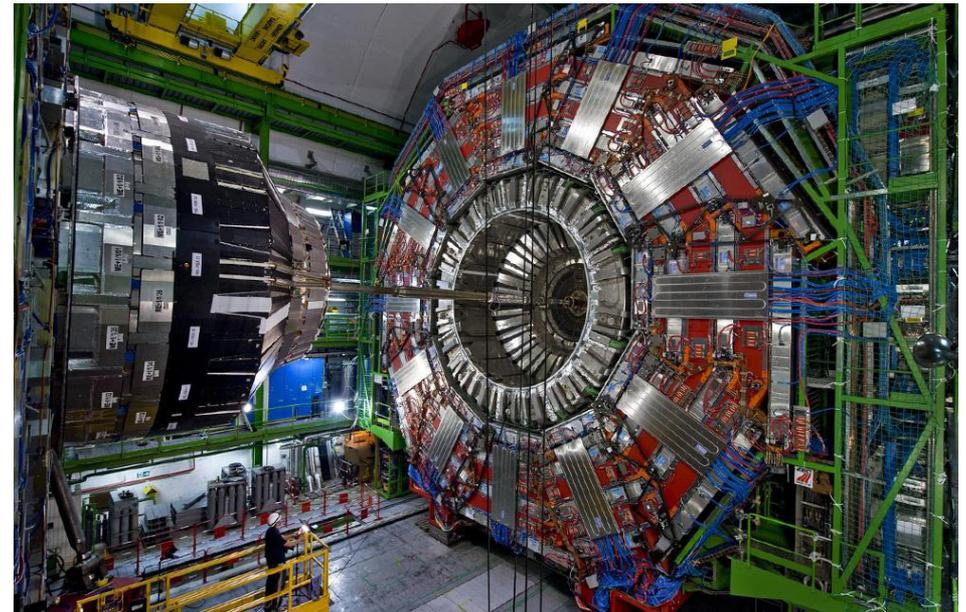
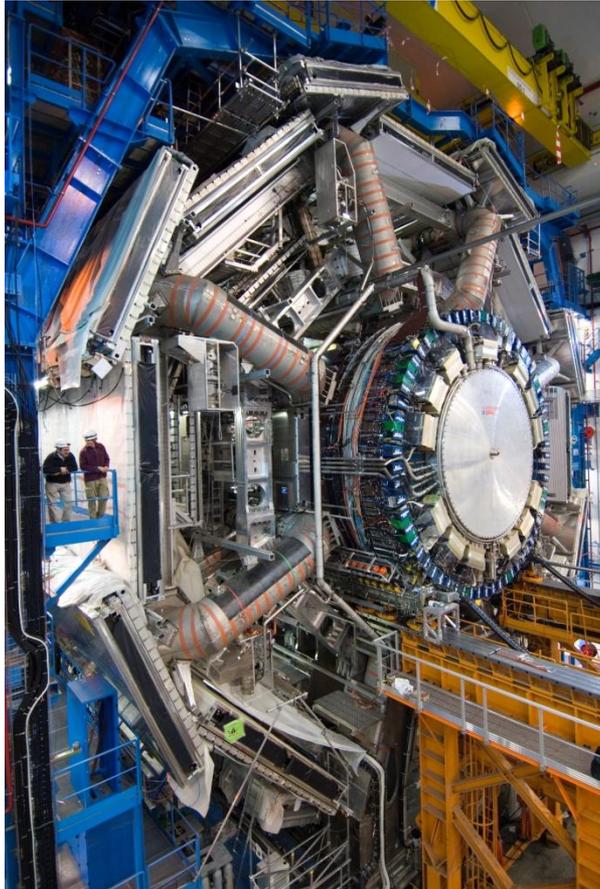
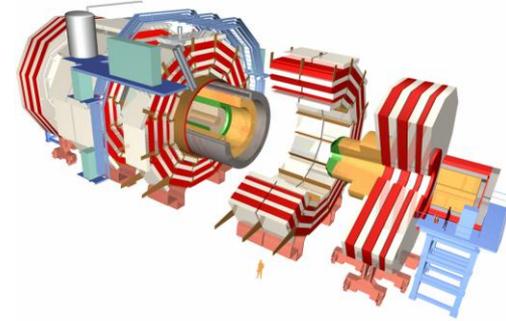
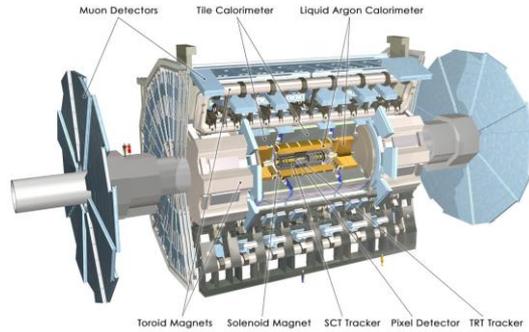
Protonen mit 99.9999991%
der Lichtgeschwindigkeit
→ 11250 Umläufe
pro Sekunde



- 1400 Teilchen-Pakete mit je 10^{11} Protonen pro Strahl
- alle 50 ns eine Strahl-Kreuzung mit bis zu 40 Proton-Proton-Stößen
- Kollisionsenergie entspricht 8500 x Protonmasse

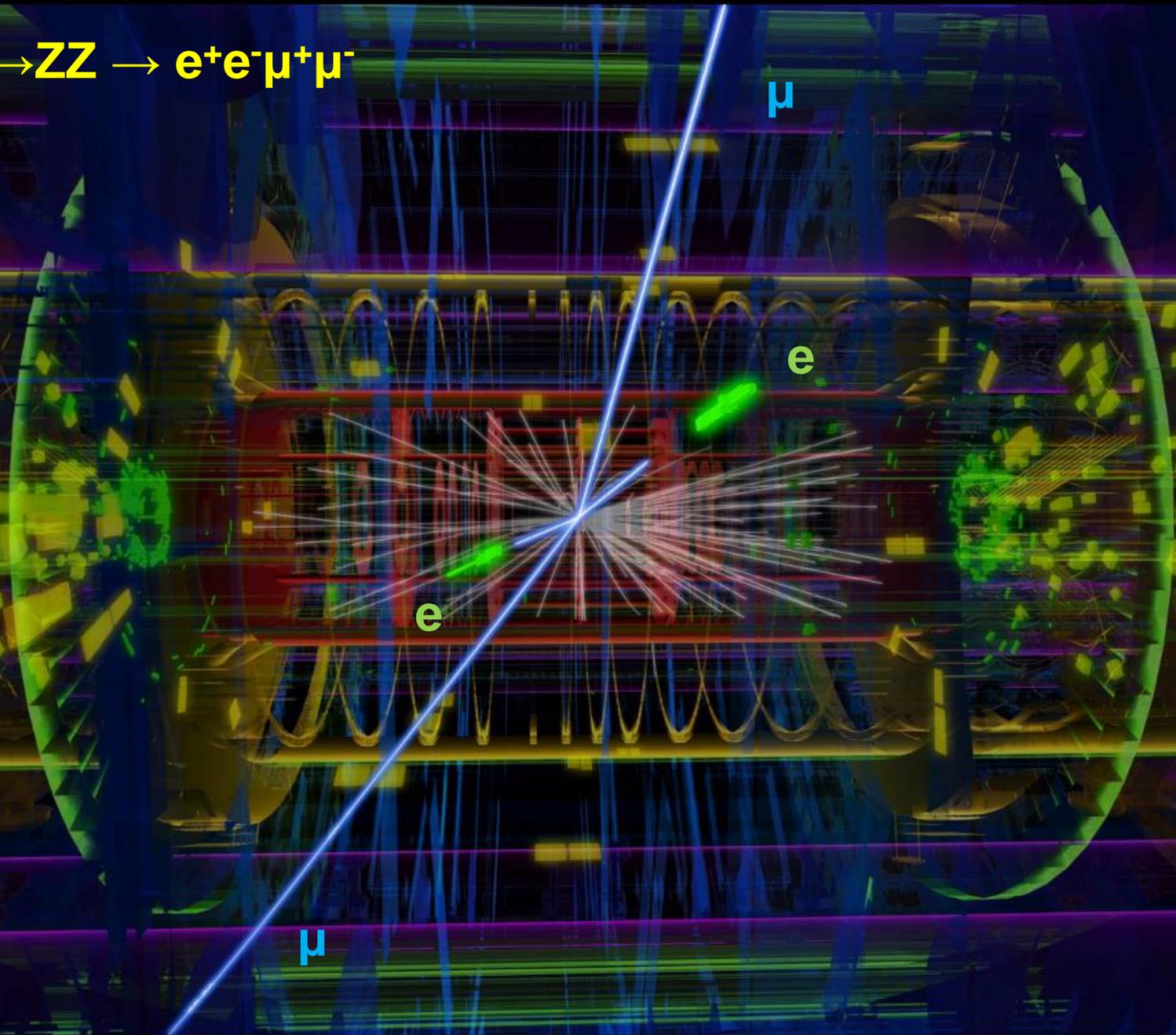


- 1232 supraleitende Dipolmagnete (15 m, 35 t):
 - gekühlt auf 1.9 Kelvin (-271 °C)
 - max. Magnetfeldstärke: 8.35 T (170.000 x Erdmagnetfeld)
- 120 t supra-fluides Helium
- gespeicherte Energie: 11 GJ
- Stromverbrauch 120 MW bei max. Magnetfeld



- weltweite Kollaborationen
- jeweils 3000 Physiker aus 170 Ländern
- 18 deutsche Universitäten und Forschungsinstitute sind beteiligt

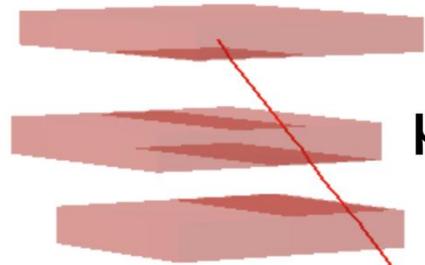
$$H \rightarrow ZZ \rightarrow e^+e^-\mu^+\mu^-$$



Higgs-Boson-Zerfall in 2 instabile Z-Bosonen



$$H \rightarrow ZZ \rightarrow e^+e^-\mu^+\mu^-$$

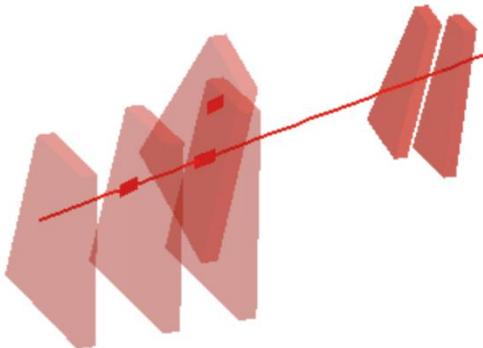


$\mu^+(Z_1) p_T : 43 \text{ GeV}$

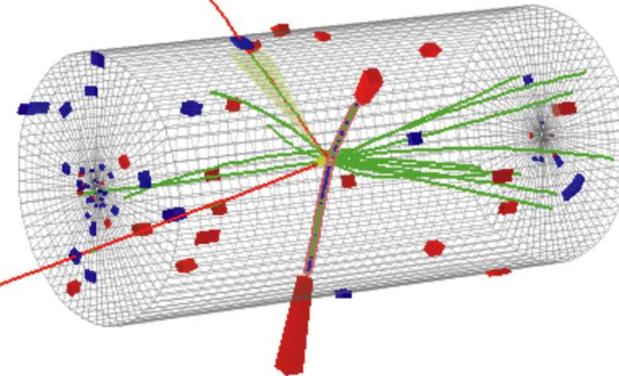
8 TeV DATA

4-lepton Mass : 126.9 GeV

$\mu^-(Z_1) p_T : 24 \text{ GeV}$



$e^-(Z_2) p_T : 10 \text{ GeV}$



$e^+(Z_2) p_T : 21 \text{ GeV}$

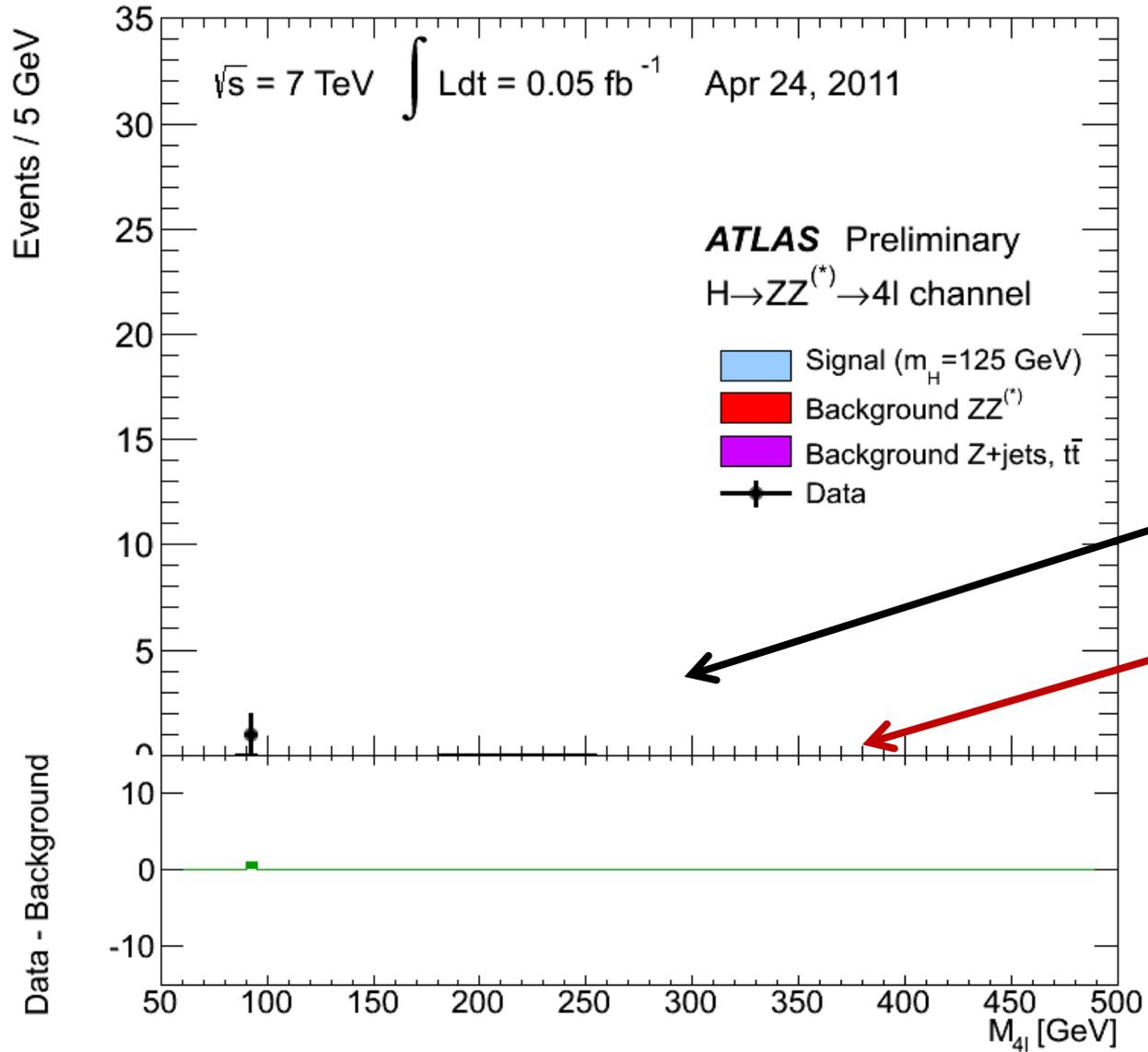
CMS Experiment at LHC, CERN
 Data recorded: Mon May 28 01:35:47 2012 CEST
 Run/Event: 195099 / 137440354
 Lumi section: 115



4-lepton Mass : 126.9 GeV \longrightarrow Masse eines Higgs-Kandidaten



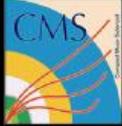
Higgs-Boson-Zerfall in 2 instabile Z-Bosonen



Daten mit Messfehlern

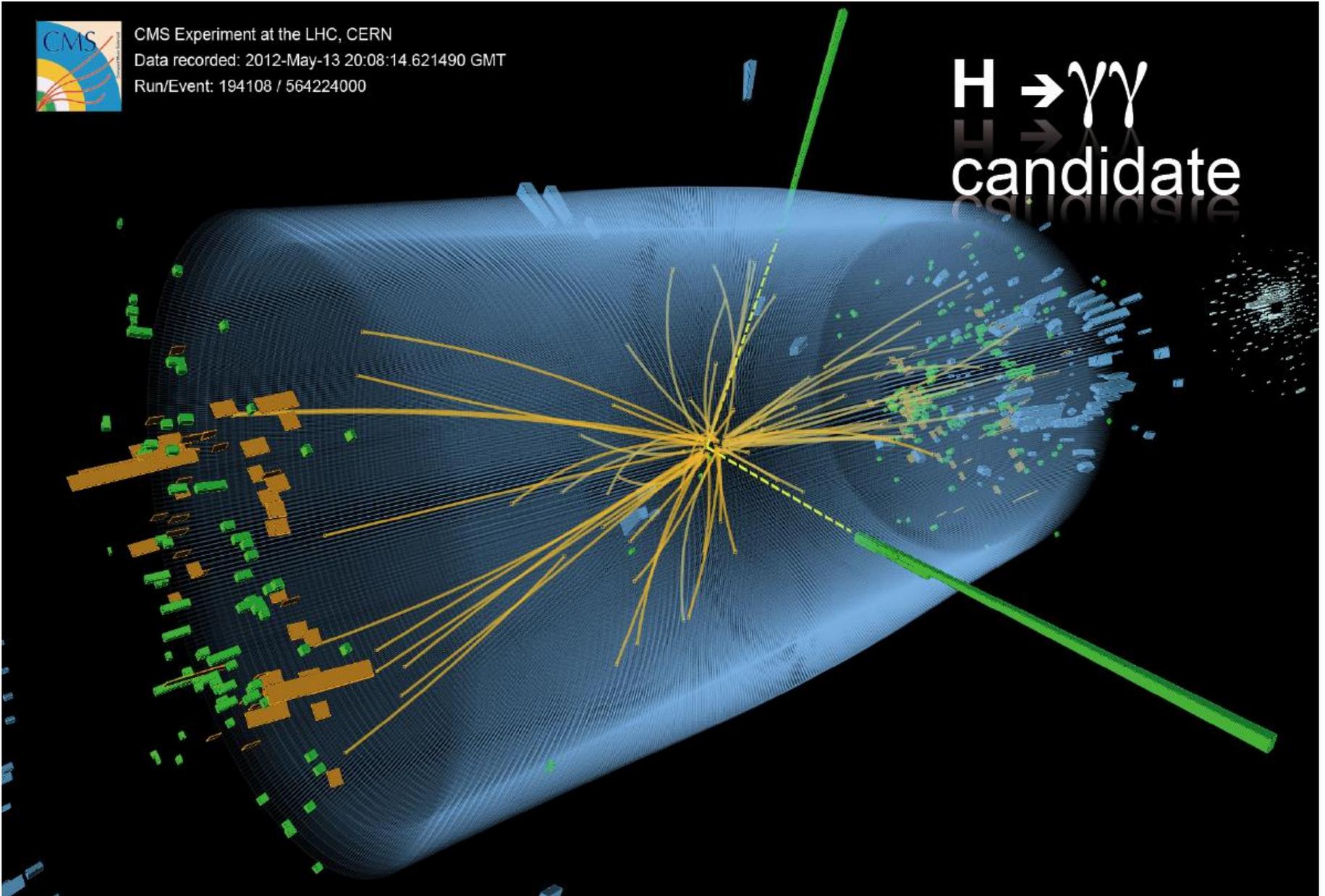
Untergrund

Higgs-Boson-Zerfall in 2 Photonen



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

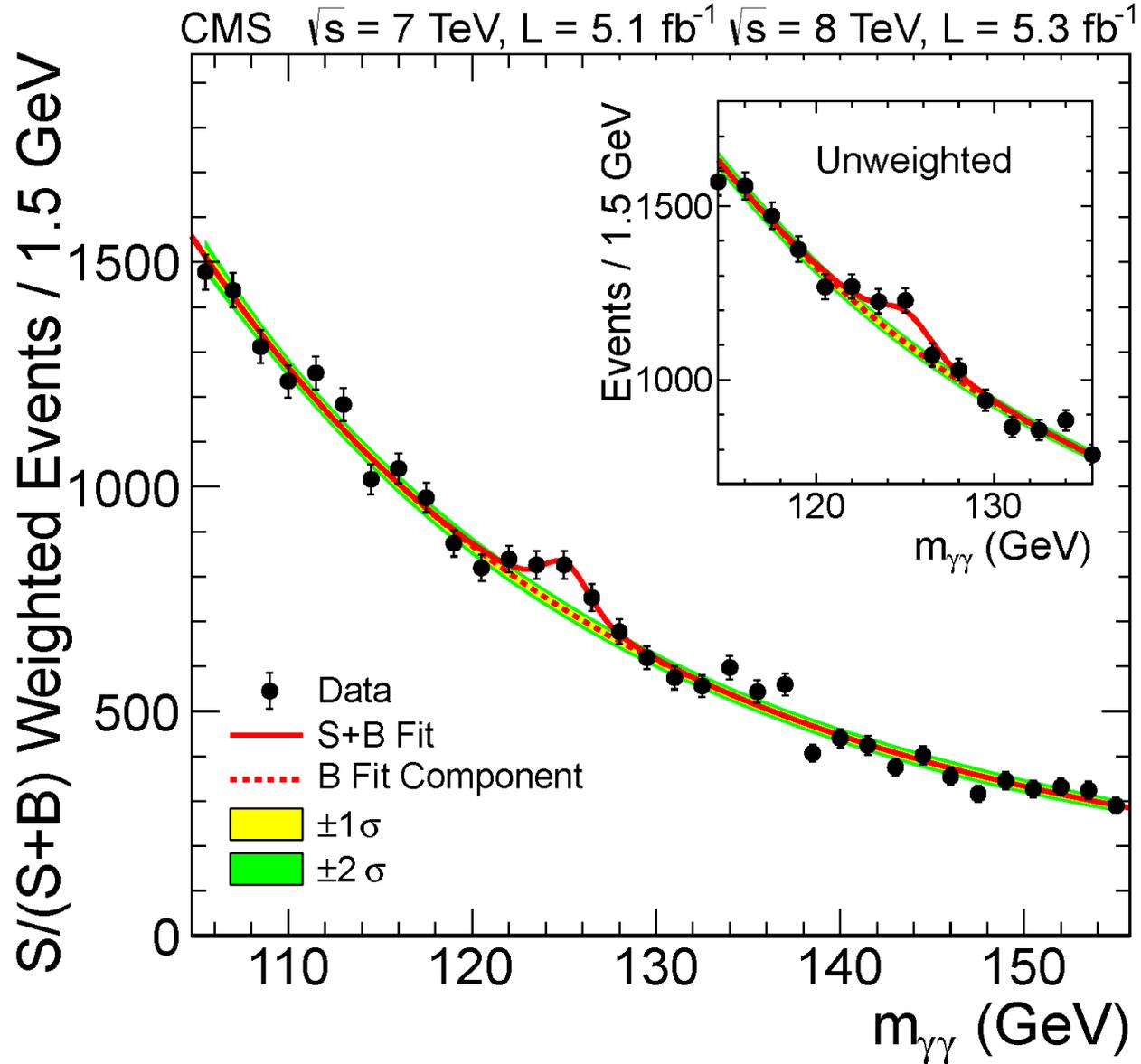
$H \rightarrow \gamma\gamma$
candidate



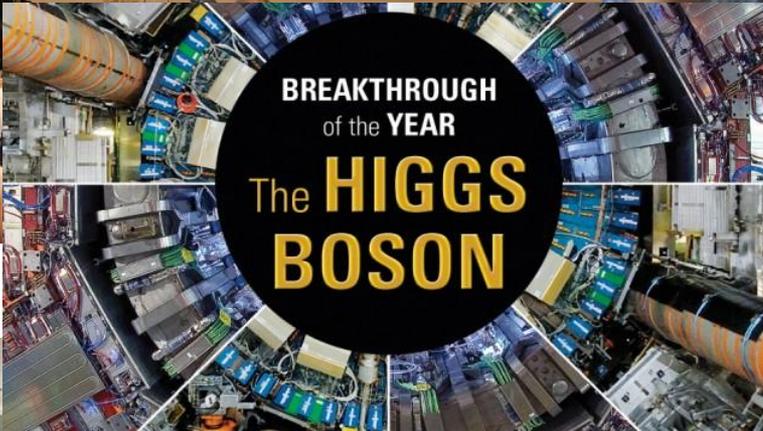
Higgs-Boson-Zerfall in 2 Photonen



CMS-HIG-12-028



4. Juli 2012: Neues Boson am LHC entdeckt



Das Higgs-Boson: Sind alle Rätsel gelöst?



**“I certainly had no idea it would happen in my lifetime at the beginning,
more than 40 years ago.**

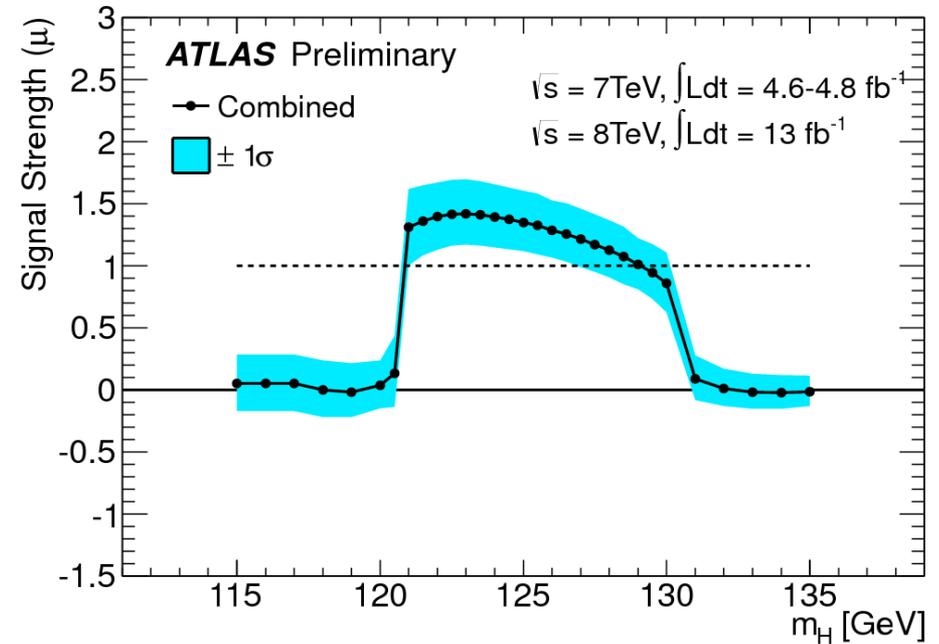
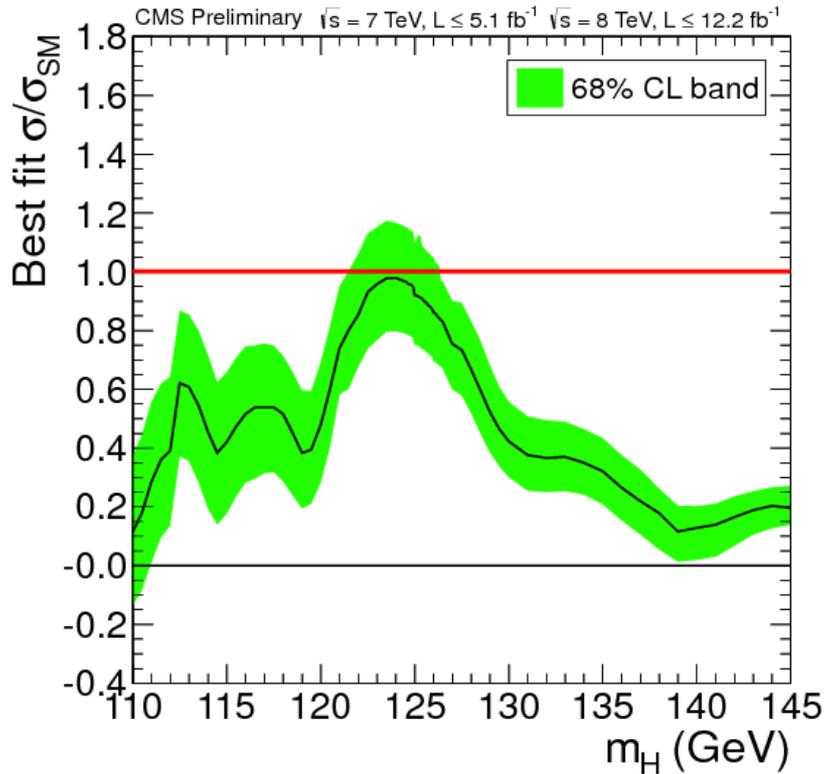
**I think it shows amazing dedication by the young people involved
with these colossal collaborations to persist in this way,
on what is a really very difficult task.
I congratulate them.”**

Peter Higgs, 4.Juli 2012

Werden genug Higgs-Zerfälle beobachtet?

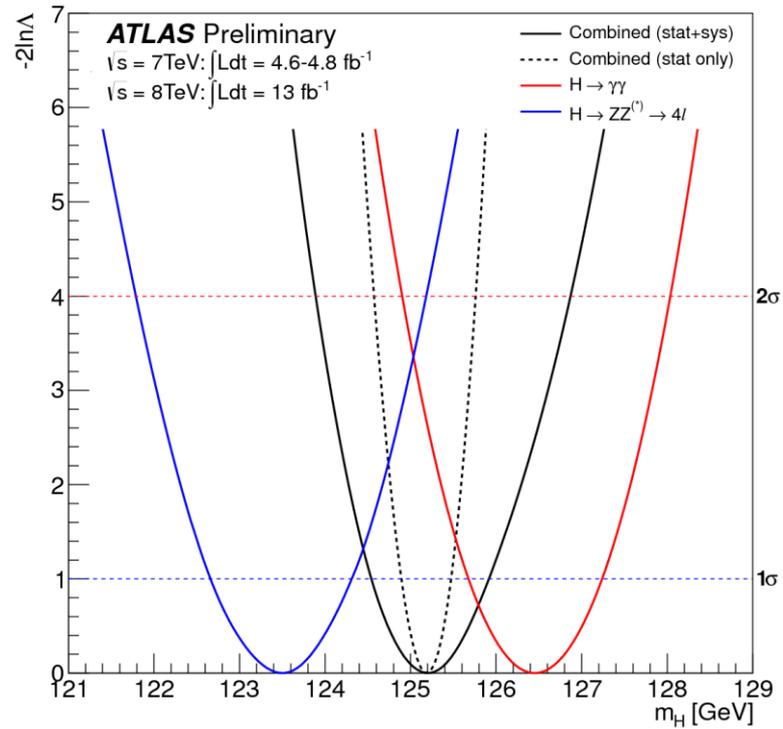
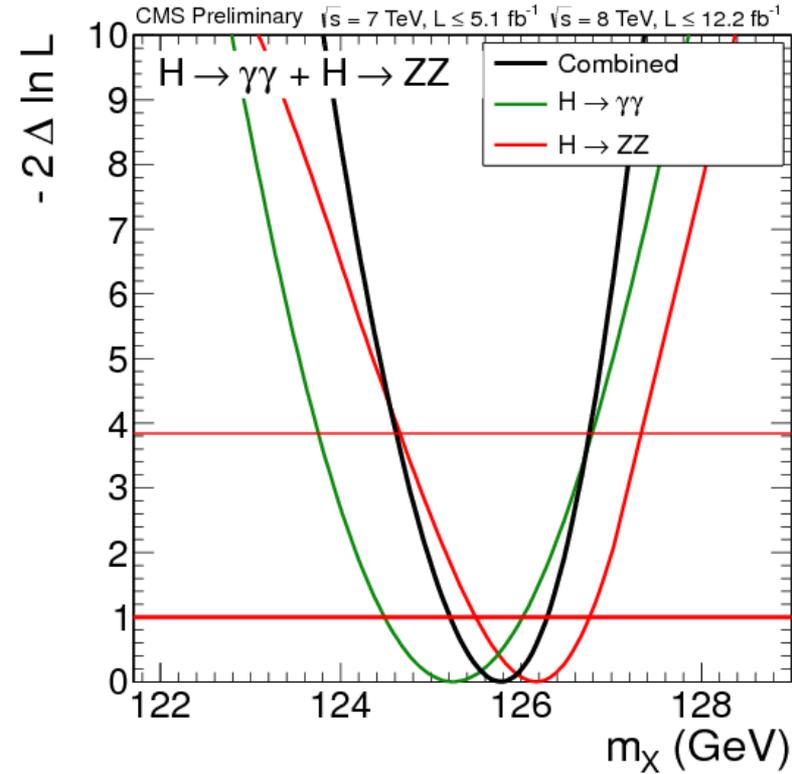


1 = Erwartung des Standardmodells
0 = keine Higgs-Bosonen beobachtet



CMS-HIG-12-045
ATLAS-CONF-2012-170

Wie schwer ist das Higgs-Boson?



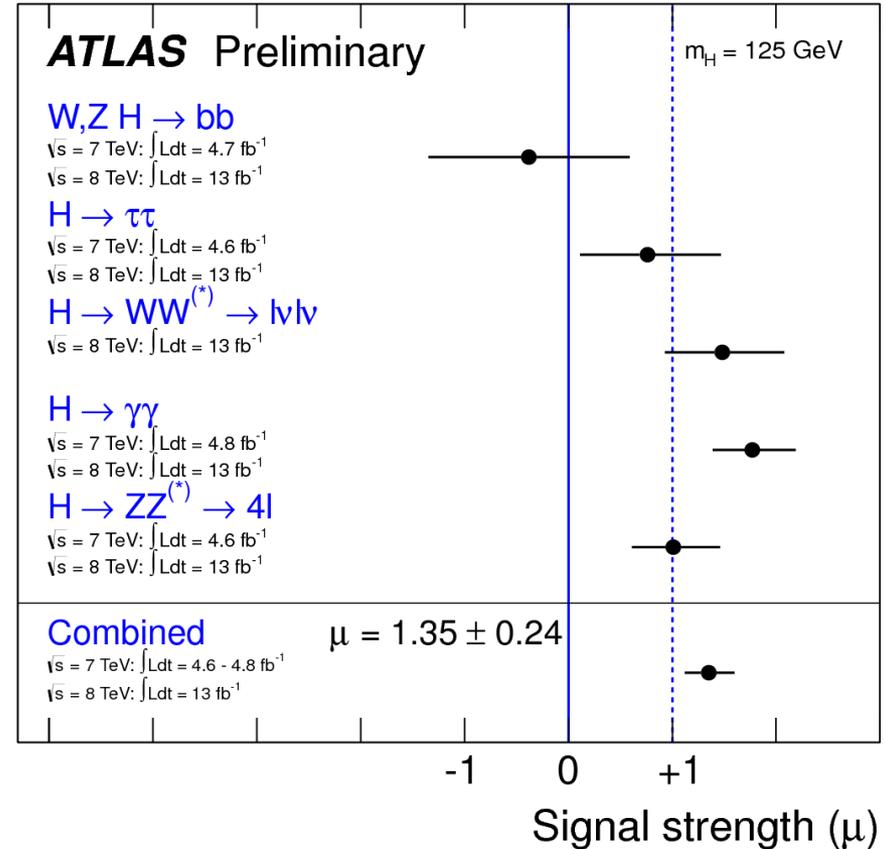
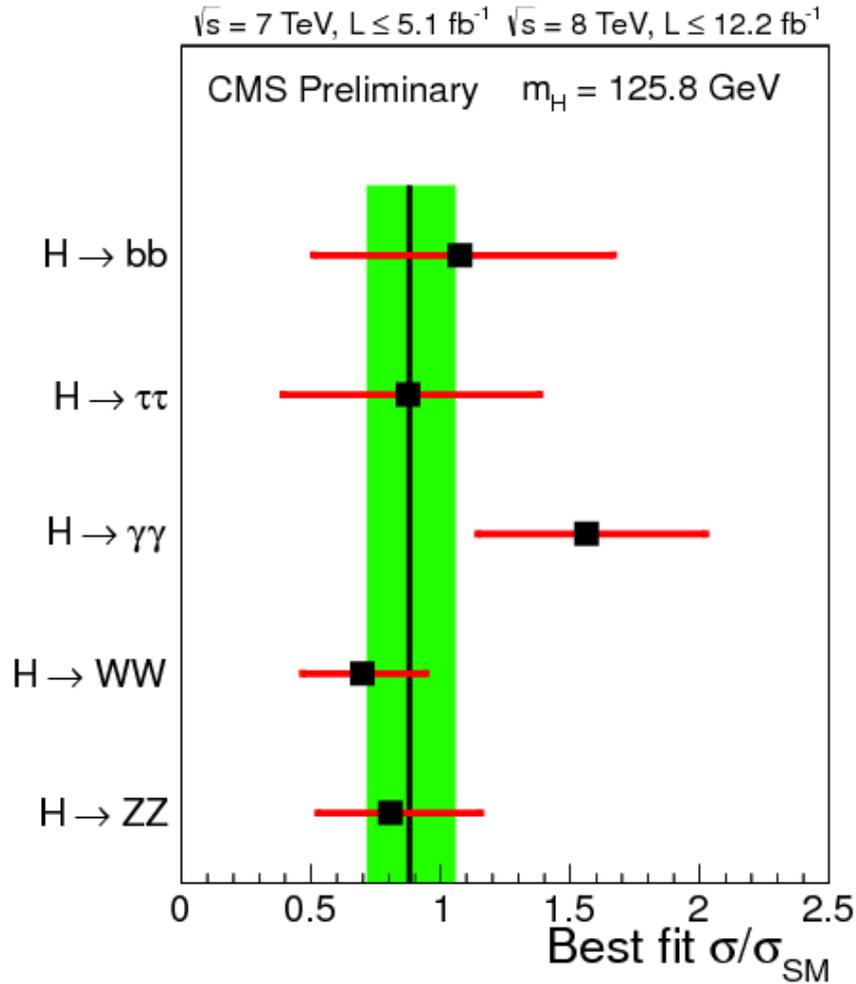
CMS: $m_x = 125.8 \pm 0.4 \text{ (stat)} \pm 0.4 \text{ (syst)} \text{ GeV}$

ATLAS: $m_H = 125.2 \pm 0.3 \text{ (stat)} \pm 0.6 \text{ (syst)} \text{ GeV}$

- etwa 130 mal so schwer wie ein Proton
- leichter als ein Top-Quark

CMS-HIG-12-045
ATLAS-CONF-2012-170

Werden alle Higgs-Zerfälle beobachtet?

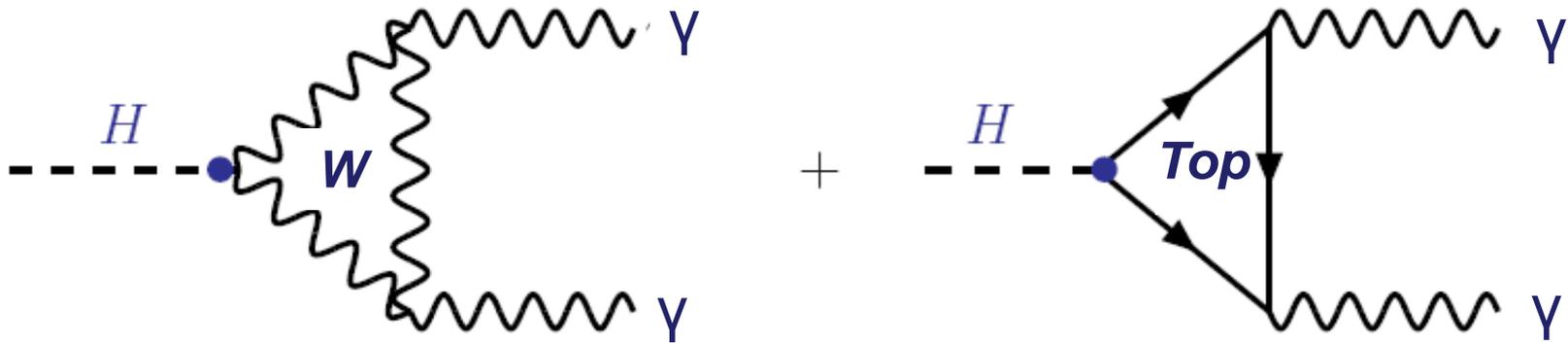


CMS-HIG-12-045
ATLAS-CONF-2012-170

- Wichtige Eigenschaft des Higgs-Bosons:

Wechselwirkungsstärke sollte proportional zur Masse der Teilchen sein!

- Photon ist masselos, aber



- Zusammenspiel von Wechselwirkung von Higgs-Boson mit schweren W -Bosonen und Top-Quarks wird überprüft
- Sind hier eventuell weitere, unbekannte Teilchen am Zerfall beteiligt?

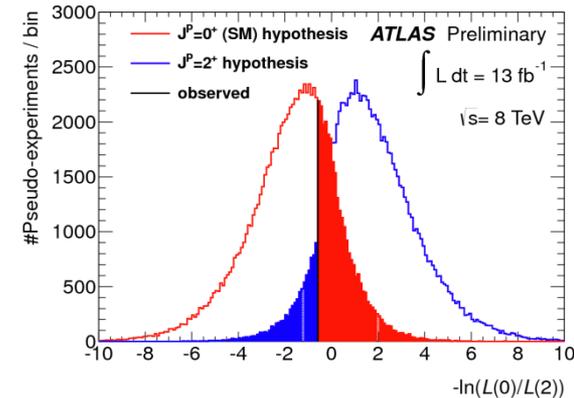
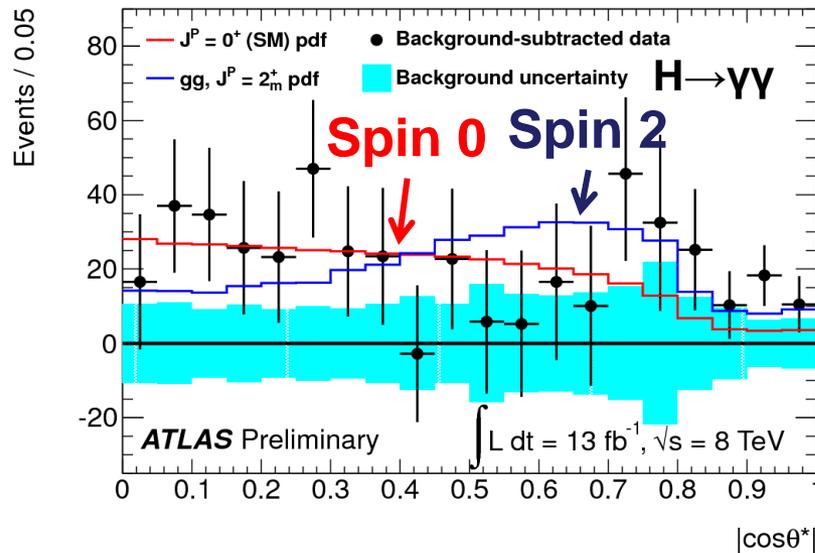
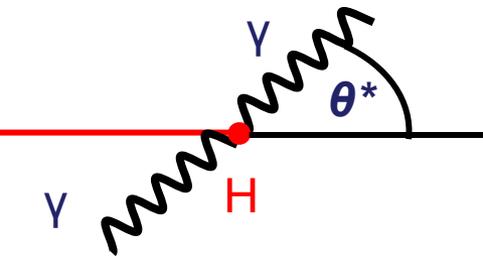


Spin = innerer quantenmechanischer Drehimpuls



- Alle anderen Elementarteilchen tragen einen solchen Drehimpuls
- Das Higgs-Boson sollte keinen inneren Drehimpuls haben: Spin 0

→ Struktur des Vakuums ohne Vorzugsrichtung



ATLAS-CONF-2012-168
ATLAS-CONF-2012-169
F. Hubaut, Moriond EW 2013

Phys. Rev. Lett. 110,
081803 (2013)

Messungen von $H \rightarrow \gamma\gamma$ und $H \rightarrow ZZ$ bevorzugen Spin 0

- Spin 1 ausgeschlossen, da $H \rightarrow \gamma\gamma$ beobachtet
- Unterscheidung von Spin 0 und Spin 2 muss aus weiteren Messdaten ermittelt werden

- Hat auch bei genauerer Messung das neue Teilchen die erwarteten Eigenschaften des Higgs-Bosons des Standardmodells?
- Wechselwirken Higgs-Bosonen mit sich selbst?
- Ist es ein elementares Teilchen oder aus anderen Teilchen aufgebaut?
→ **Weitere Messungen am LHC**
- Gilt das Standardmodell in dieser Form dann auch noch bei sehr hohen Energien?

→ **Entwicklung und Lebensdauer des Universums**

Schlagzeilen | Hilfe | RSS | Newsletter | Mobil | Wetter | TV-Programm

SPIEGEL ONLINE WISSENSCHAFT

NACHRICHTEN VIDEO THEMEN FORUM ENGLISH DER SPIEGEL SPIEGEL TV ABO SHOP

Home Politik Wirtschaft Panorama Sport Kultur Netzwelt Wissenschaft Gesundheit einestages Karriere Uni Schule Reise Auto

Nachrichten > Wissenschaft > Natur > Higgs-Boson > Higgs-Boson: Physiker halten Universum für instabil [Login](#) | [Registrierung](#)

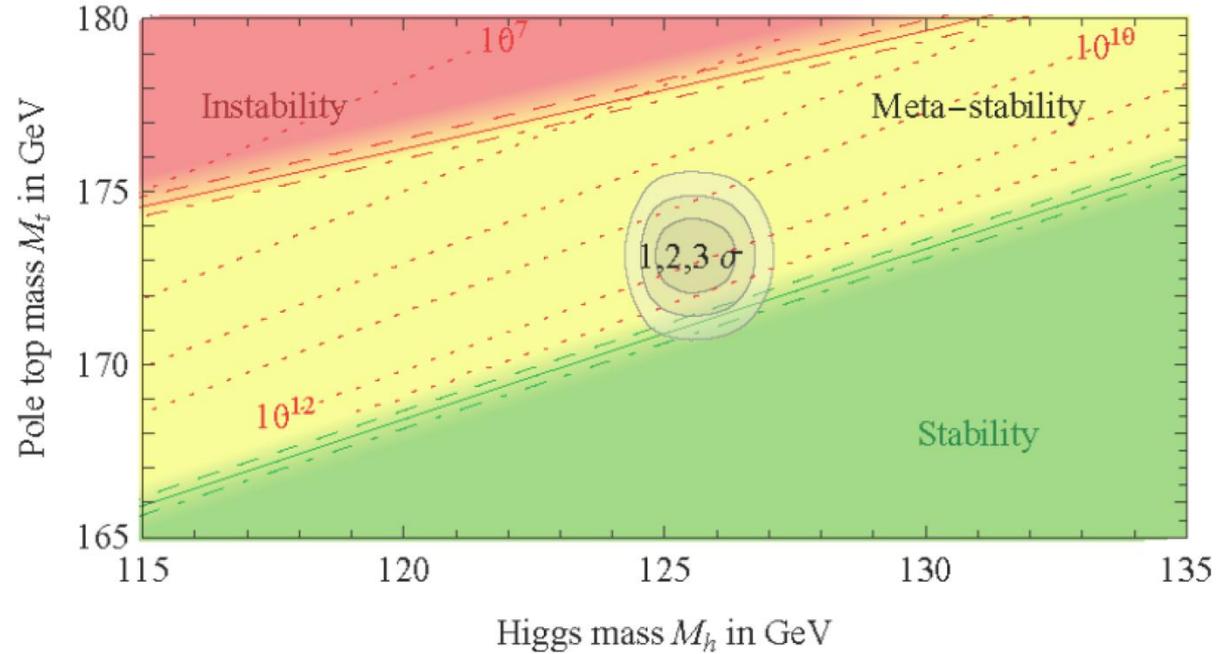
Higgs-Boson-Erkenntnisse: Physiker halten Universum für instabil

Von *Holger Dambeck*

Ist der Fund des Higgs-Bosons eine schlechte Nachricht für unser Universum? Physik-Theoretiker glauben, dass die Masse des Teilchens in einem Bereich liegt, der dem Kosmos ein Verfallsdatum gibt. Ein baldiges Ende ist jedoch unwahrscheinlich.



- Masse von Higgs-Boson und Top-Quark bestimmen die Stabilität:



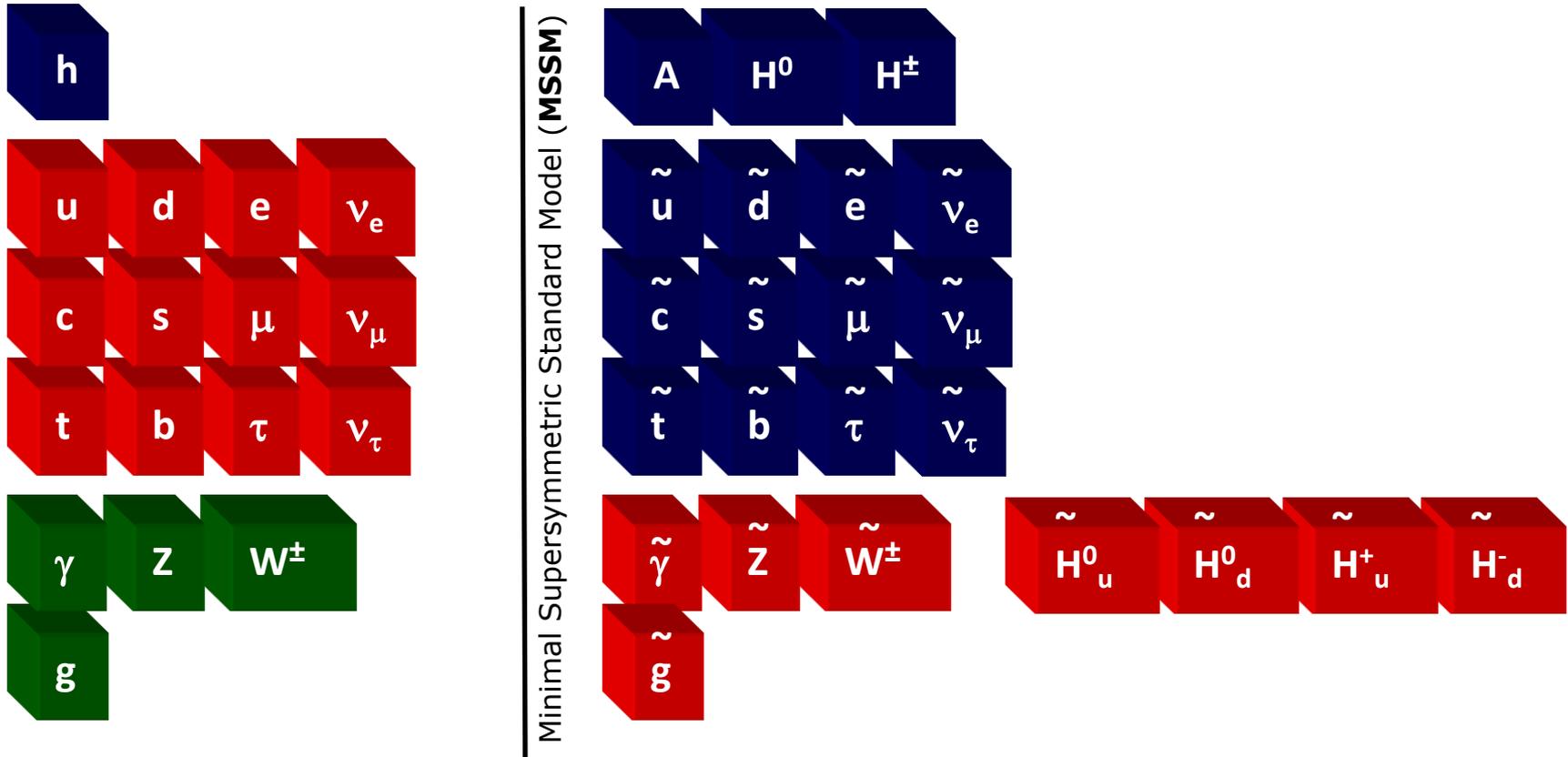
- metastabiler Zustand hat Lebensdauern von $>10^{100}$ Jahren



Gibt es weitere Higgs-Bosonen?



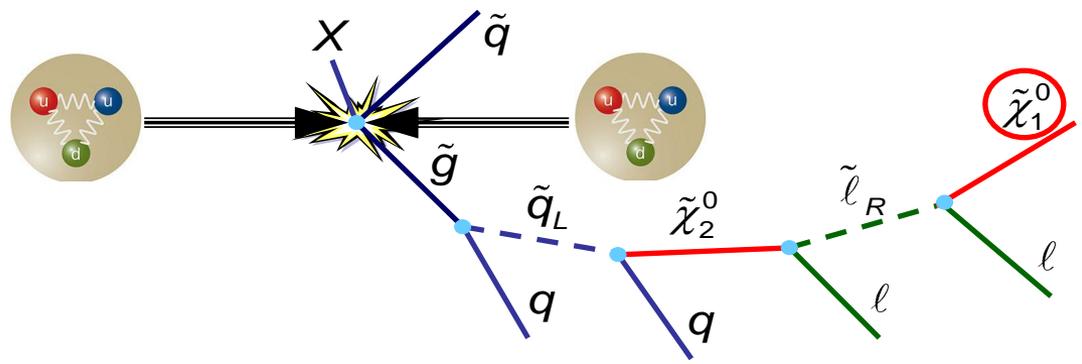
- Supersymmetrie: jedes Teilchen hat einen neuen Partner
 - mindestens 5 Higgs-Bosonen
 - löst einige der fundamentalen Theorie-Probleme des Standardmodells



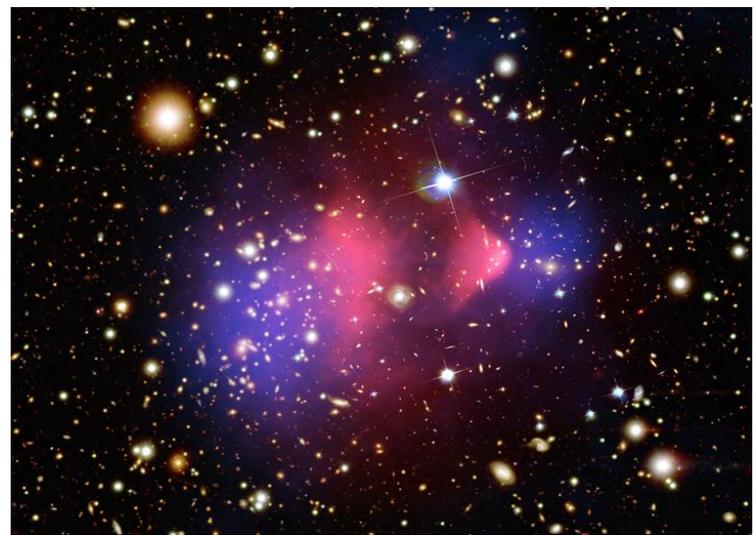
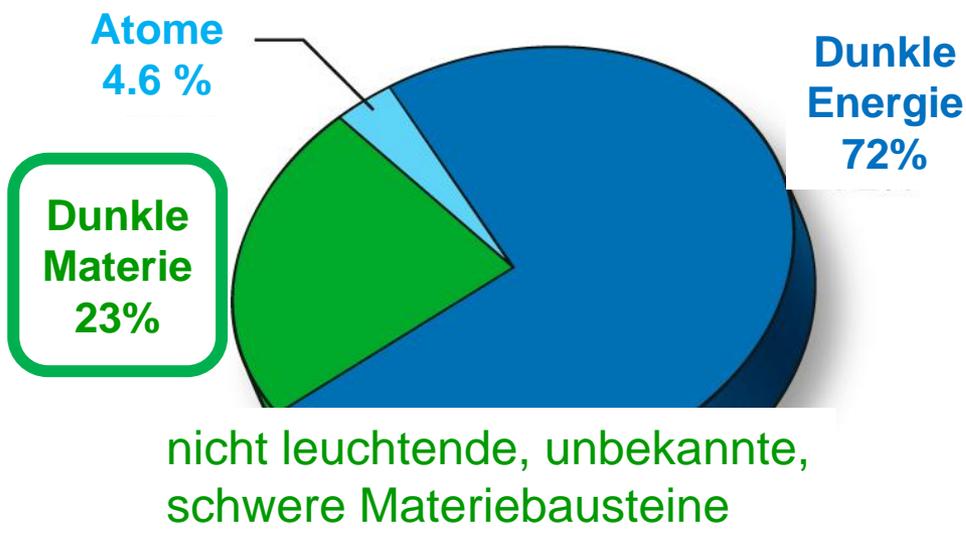
Animation nach Till Eifert

- hat auch Konsequenzen für die Kosmologie

Suche nach supersymmetrischen Teilchen

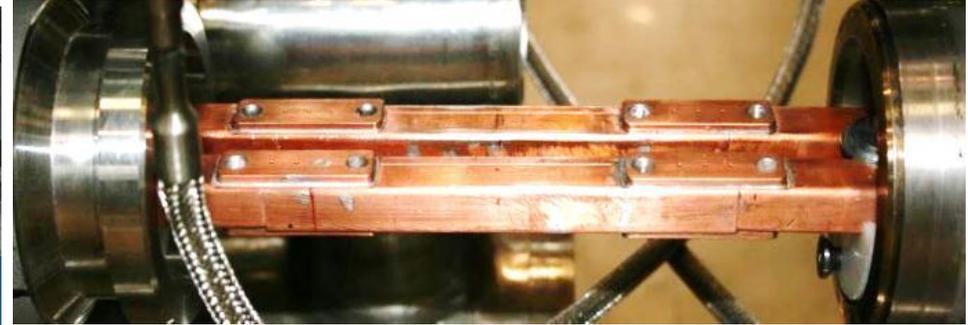


leichtestes supersymmetrisches Teilchen entkommt
 → fehlende Energie im Detektor



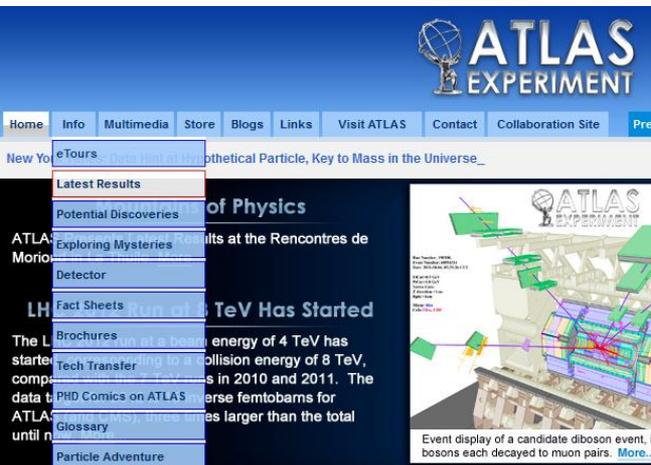
- Teilchenphysik und Kosmologie sind eng verbunden
- Allerdings noch kein Hinweis auf supersymmetrische Teilchen am LHC

- LHC wird repariert, um Energie zu verdoppeln auf 13 TeV



- Reparaturliste:
 - 1500 Magnetkabelverbindungen
 - 612 Helium-Druckventile
 - 15 komplette Dipolmagnete
 - 4 Quadrupolmagnete

- Datennahme wird 2015 wieder aufgenommen mit höherer Strahlintensität
- Ziele:
 - Weitere Messungen zur Untersuchung des Higgs-Bosons und der elektro-schwachen Symmetriebrechung
 - Höhere Energie vergrößert das Potenzial zur Entdeckung neuer Teilchen und Phänomene



- Ein **Higgs-Boson** wurde am LHC entdeckt
- Es stimmt in vielen Eigenschaften mit dem Higgs-Boson des Standardmodells überein, wird aber noch weiter vermessen
→ Hinweise auf **Neue Physik?**
- Das Higgs-Boson erbringt lange gesuchten Nachweis des Higgs-Feldes, welches die **Massen der Elementarteilchen** erklären kann
- Es bleiben **noch viele spannende Fragen**, die mit dem **LHC-Beschleuniger** und seinen Detektoren untersucht werden können
- Weitere Informationen unter:
 - atlas.ch
 - cms.web.cern.ch
 - iktp.tu-dresden.de