

Symmetrien, Higgs-Teilchen und der Ursprung der Masse

2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

François Englert
Peter W. Higgs

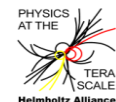


© © The Nobel Foundation, Photo: Lovisa Engblom.

A. Straessner




16. Oktober 2013



2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

François Englert Peter W. Higgs



© © The Nobel Foundation, Photo: Lovisa Engblom.



François Englert and Peter Higgs
Photo: © CERN

2013 Nobel Prize in Physics

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"*

► [Press release](#)



Announcement of the 2013 Nobel Prize in Physics

Watch Professor Staffan Normark, Permanent Secretary of the Royal Swedish Academy of Sciences, announce the 2013 Physics Prize.

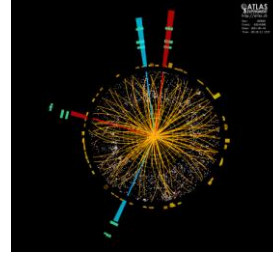
► [Here at last!](#) - Popular information about the 2013 Physics Prize

Announcements of the 2013 Nobel Prizes

- Physiology or Medicine:
Announced Monday 7 October
- Physics:
Announced Tuesday 8 October
- Chemistry:
Wednesday 9 October, 11:45 a.m. CET at the earliest
- Literature:
Thursday 10 October 1.00 p.m. CET
- Peace:
Friday 11 October, 11:00 a.m. CET
- Economic Sciences:
Monday 14 October, 1:00 p.m. CET at the earliest

► [Full schedule](#)

- Was ist Masse?



- Masse in der Welt der Elementarteilchen

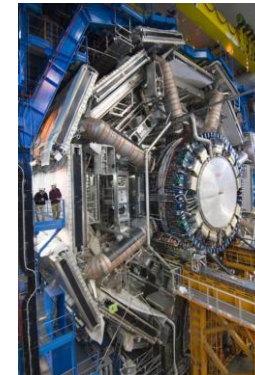
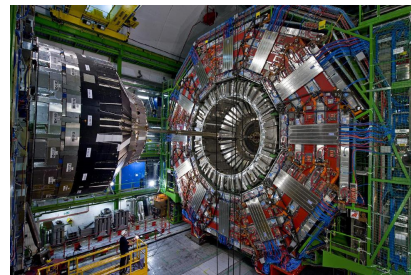


- Die Idee von Peter Higgs, François Englert und Robert Brout(†)



- Entdeckung eines Higgs-Bosons am Lärge Hadron Collider

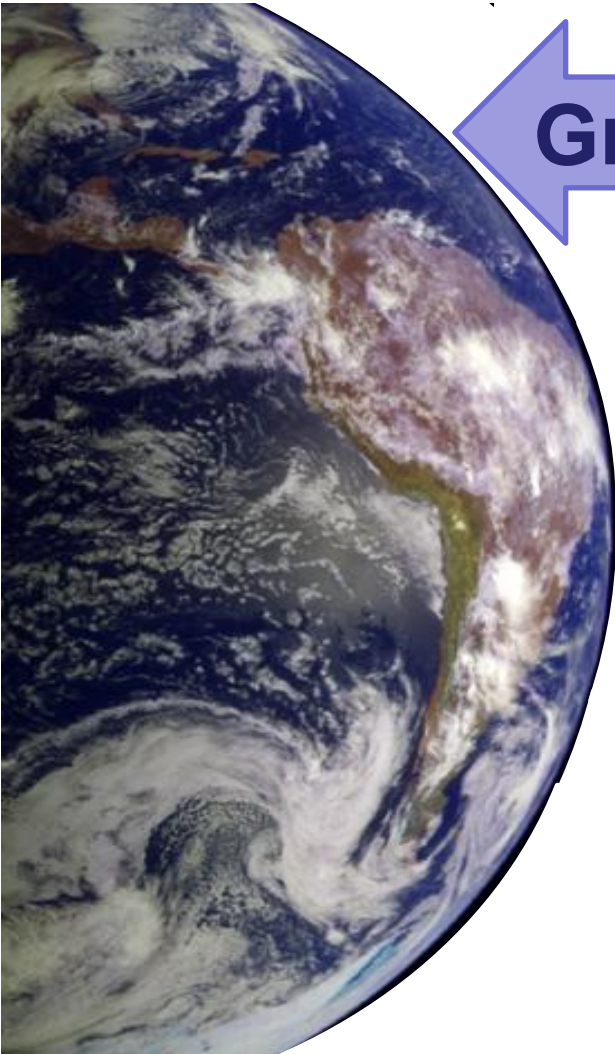
- Sind alle Rätsel gelöst?



- Gewicht auf der Waage:



- Gewicht auf der Waage durch Anziehungskraft zwischen Erde und Mensch



Gravitationskraft



Masse und Gravitation

- Gewicht auf der Waage durch Anziehungskraft zwischen Erde und Mensch

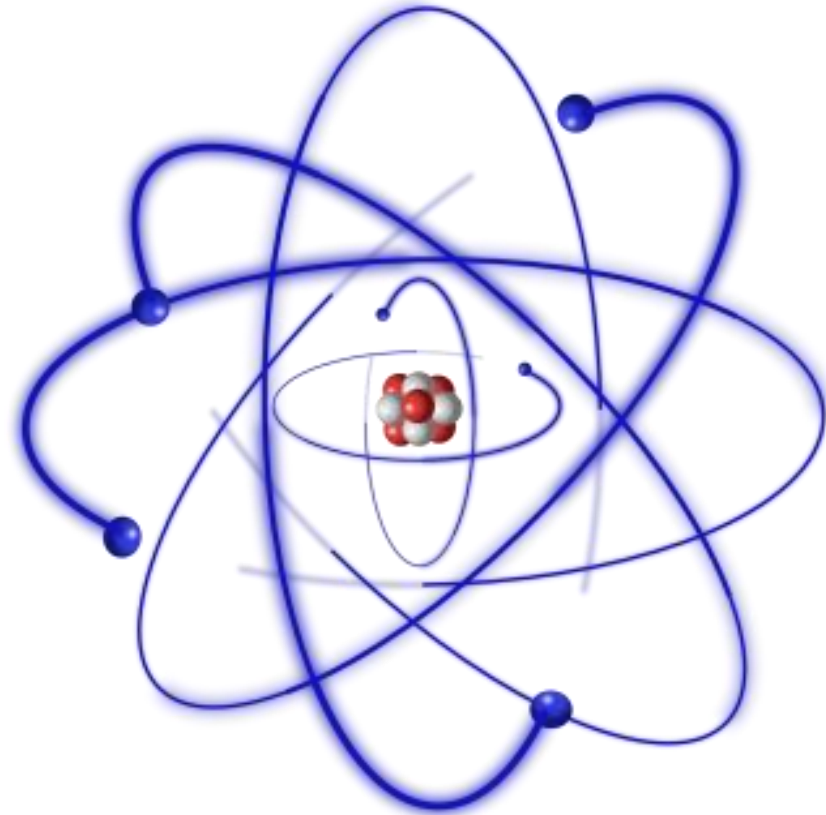


Masse der Erde x Masse des Menschen

- Materie ist aus Atomen aufgebaut:

Atomhülle:
Elektronen

Massenanteil etwa 0.001%



Atomkern:
Protonen und Neutronen

Massenanteil etwa 99.999%

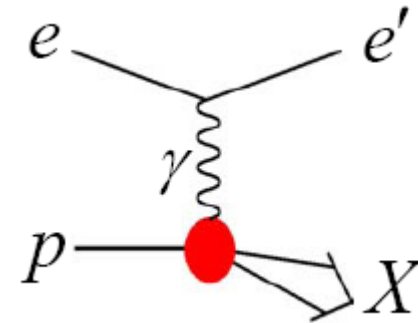
Innere Struktur der Protonen



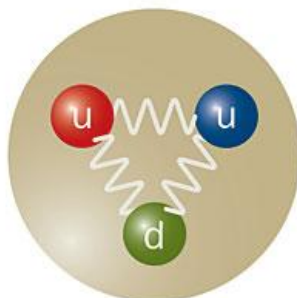
Das Elektron ist ein Elementarteilchen
→ keine innere Struktur

Und das Proton?

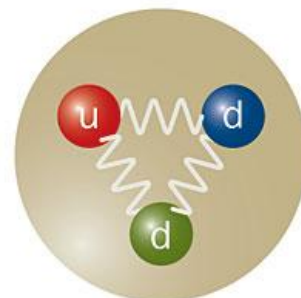
Beschuss von Protonen mit Elektronen:



Friedman, Kendall, Taylor 1969: punktförmige Objekte im Proton



Proton



Neutron

“up” und “down” Quarks

(c) Particle Zoo

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

Alle abgebildeten Elementarteilchen haben eine Masse!



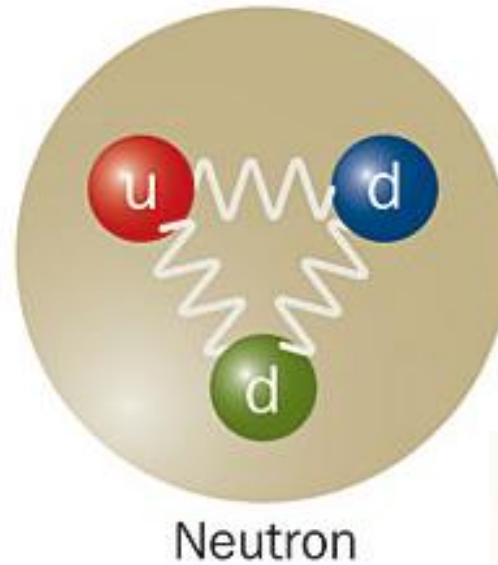
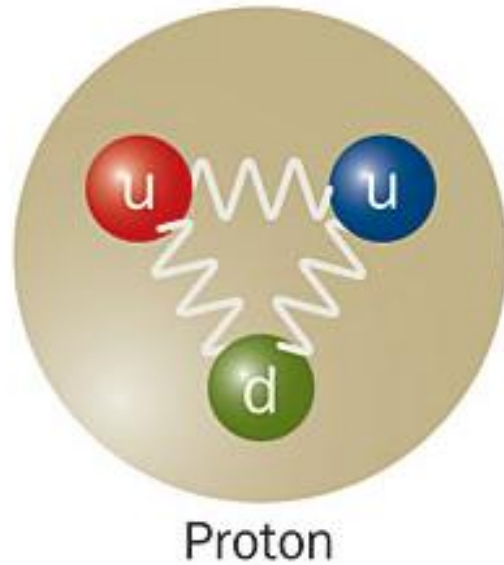
Top Quark:
so schwer wie
180 Protonen oder
1 Gold-Atom



Protonen und Neutronen



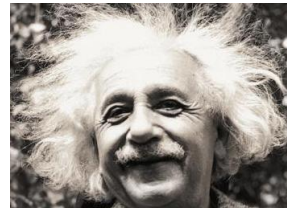
- Protonen und Neutronen bestehen aus den leichtesten Quarks und werden von der Starken Kraft zusammengehalten:



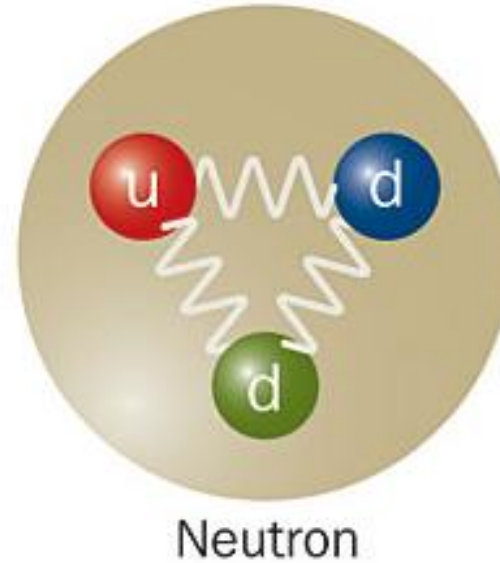
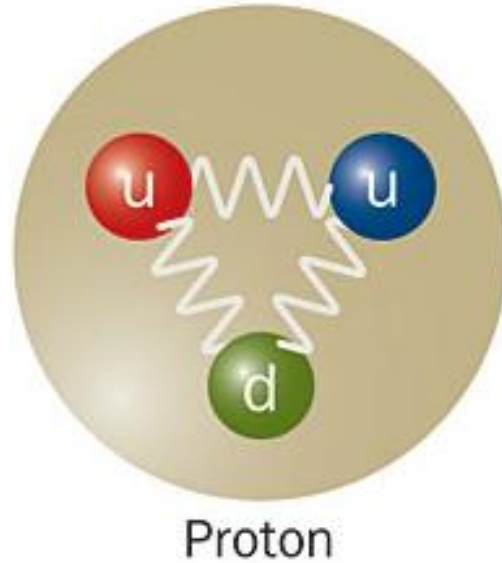
Massenanteil der elementaren Quarks ~5%

95% der Masse aus der Bindungsenergie des Starken Kraftfeldes

$$E = mc^2$$

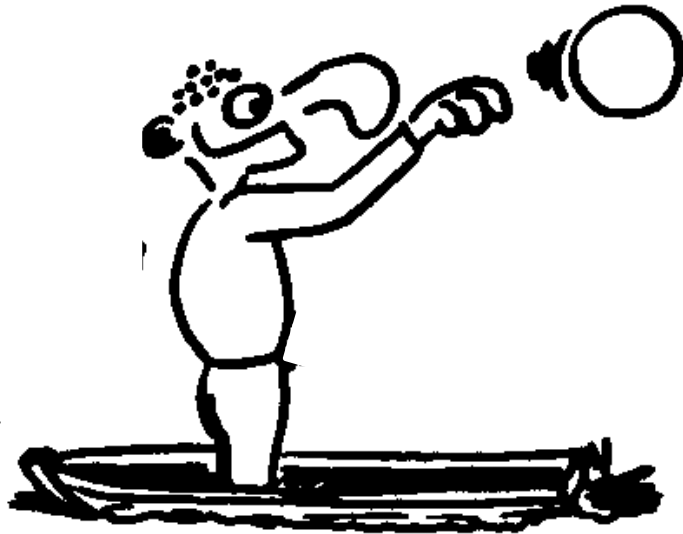


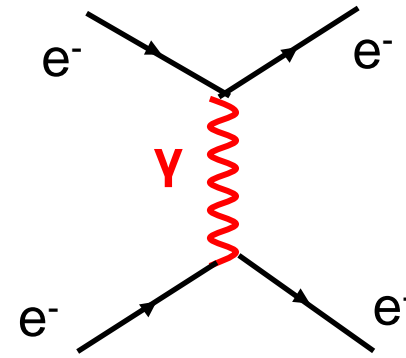
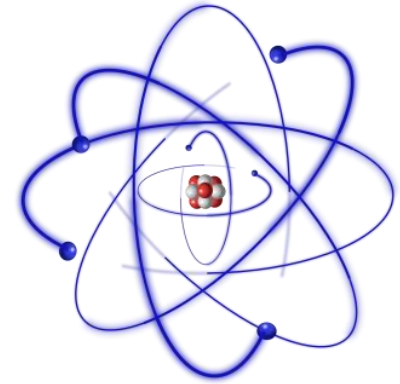
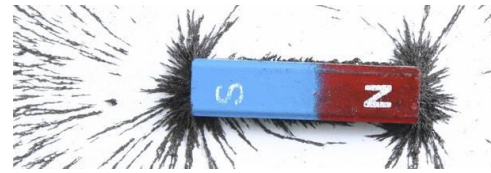
- Masse von makroskopischen Objekten ist also zu 95% geklärt



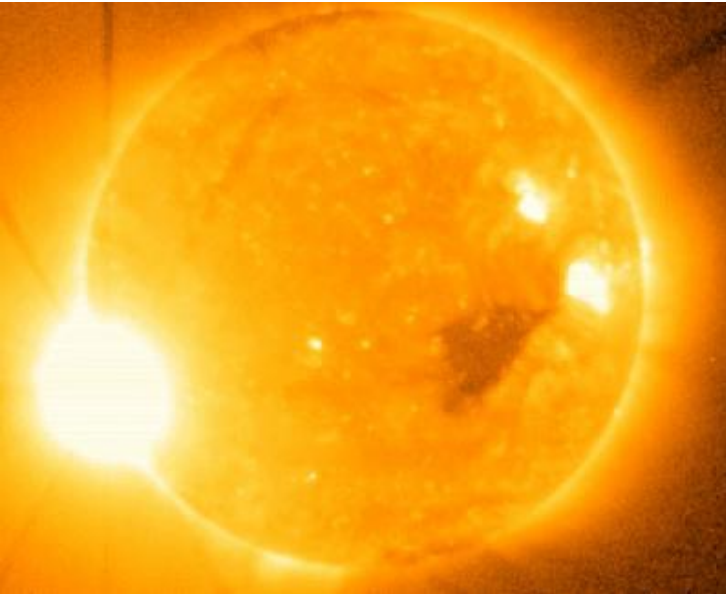
Wie erhalten aber die Elementarteilchen ihre Masse?

Kraft wird übermittelt durch Austausch von Botenteilchen

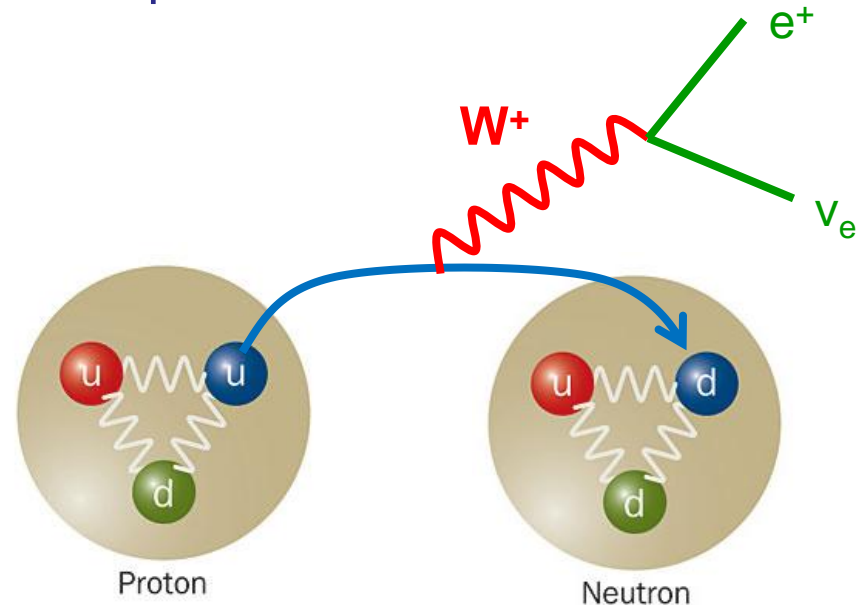




- Ladung: $+n$ oder $-n$
- Botenteilchen: Photon
- **Photon hat keine Masse**
→ **hat Lichtgeschwindigkeit**



- Schwache Kraft ist verantwortlich für solare Fusionsprozesse

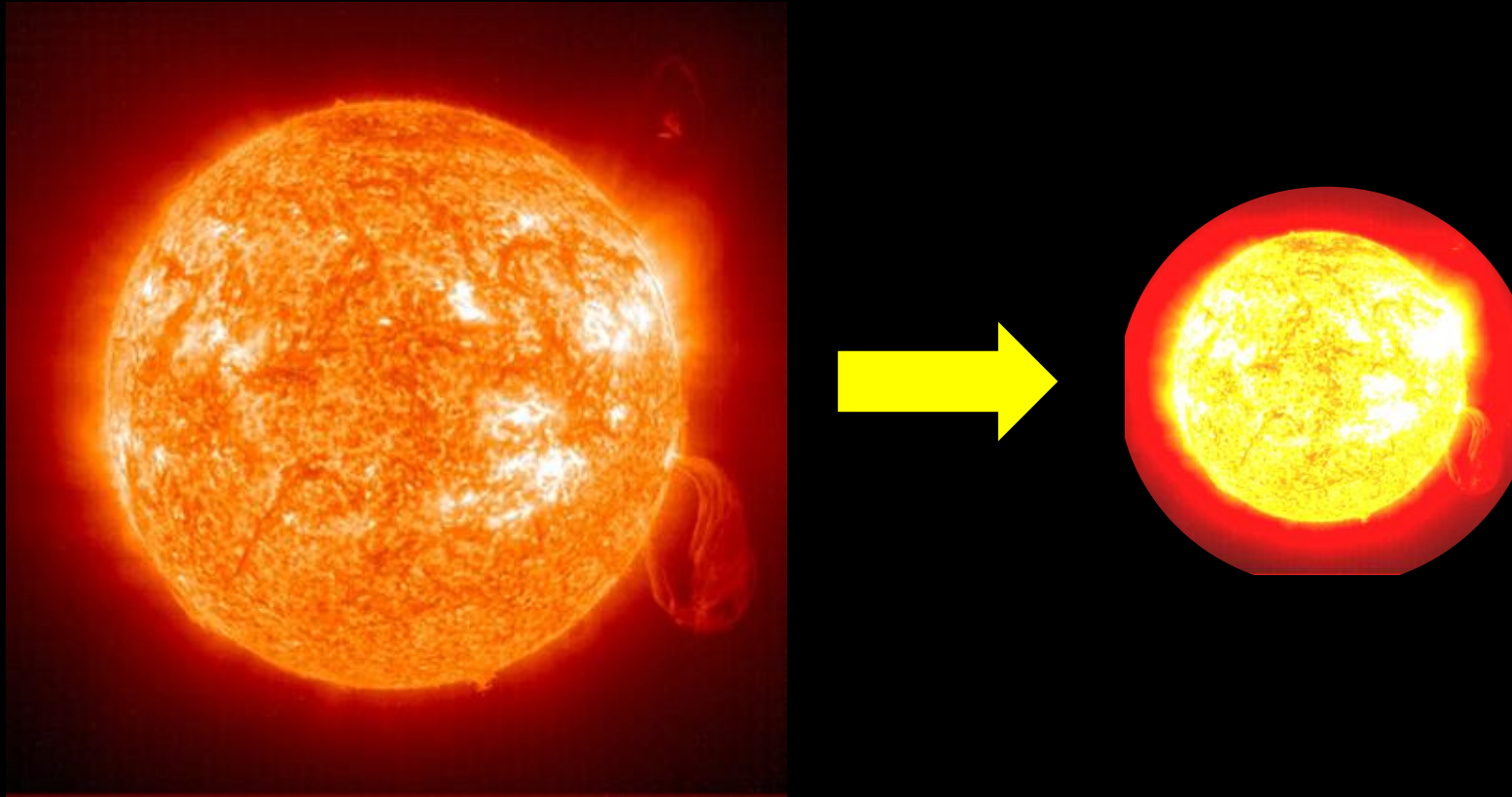


- schwache Ladung
- W^\pm und Z-Bosonen sind die Botenteilchen der schwachen Kraft
- W^\pm und Z-Bosonen haben Masse
- immer langsamer als Lichtgeschwindigkeit

Warum sind Teilchenmassen wichtig?



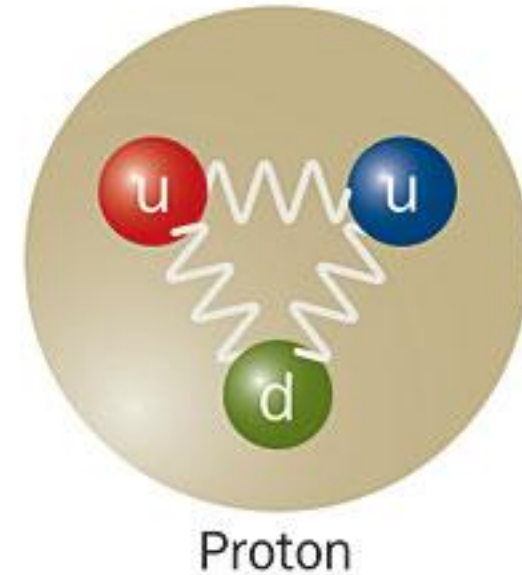
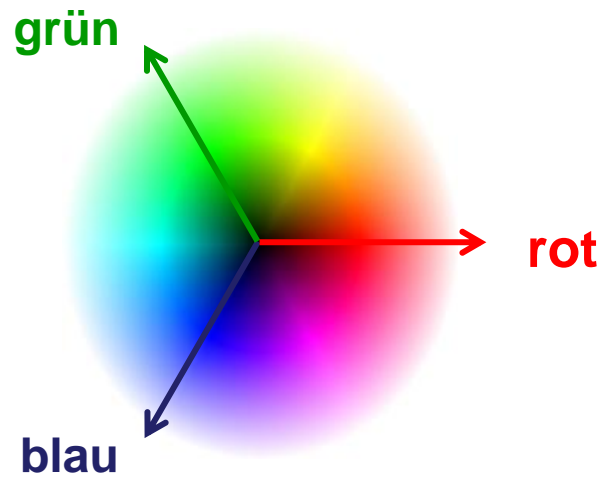
- Was geschieht, wenn das W -Boson schwerer wäre?
 - Geschwindigkeit von Kernreaktionen ändert sich



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

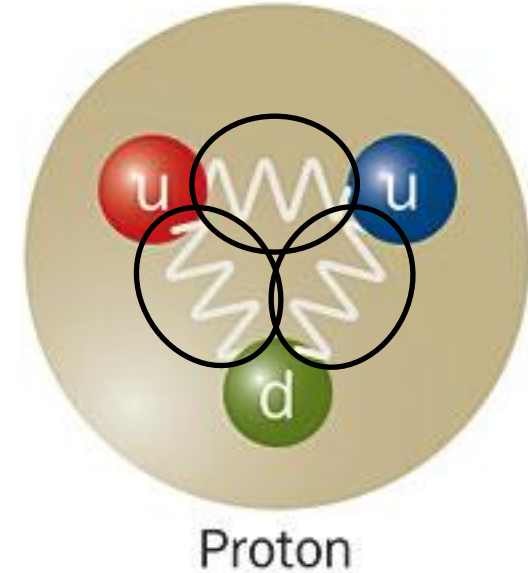
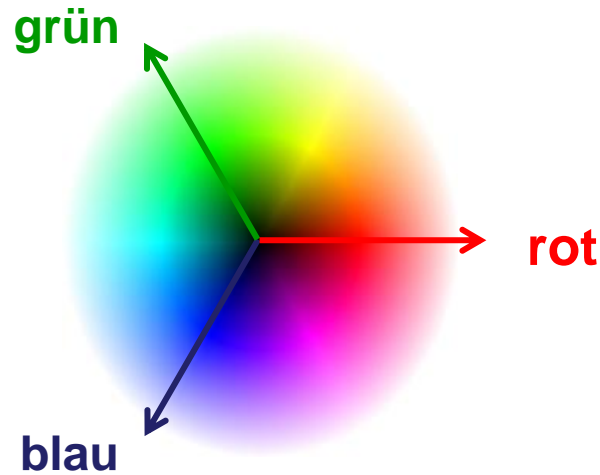
Cahn, Rev. Mod. Phys. 68, 951–959 (1996)

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



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

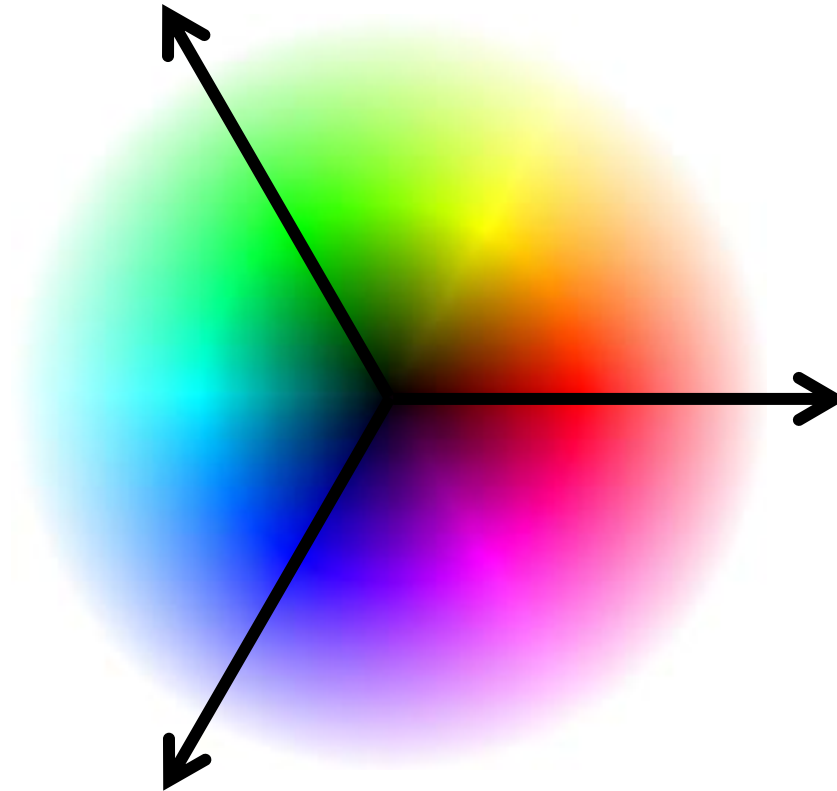
- Bindet Quarks im Proton und Neutron
- Quarks tragen “Farbladung”



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



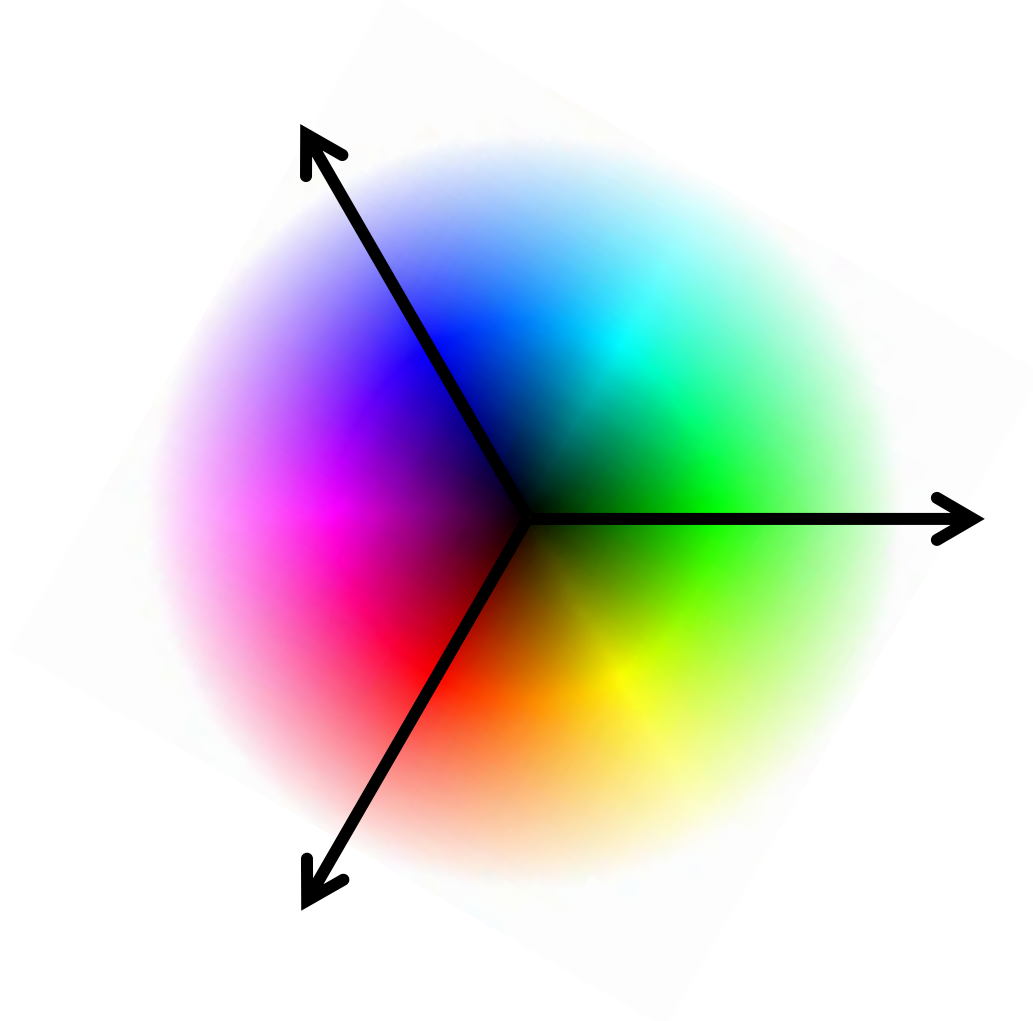
- Farbkraft ist gleich stark, egal wie der Farbkreis gedreht wird



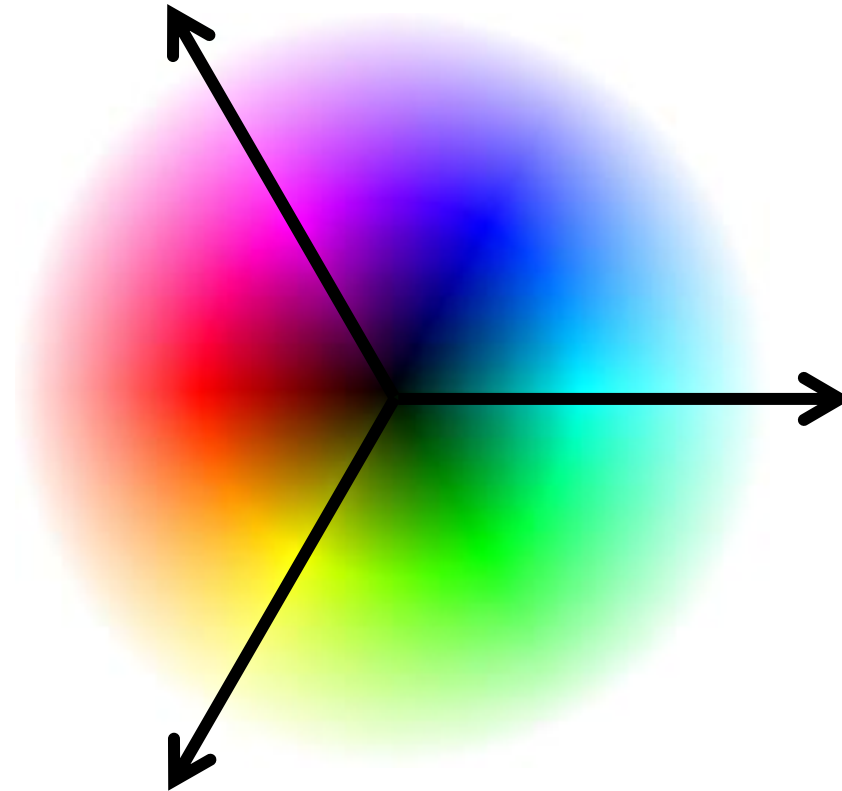
- Farbkraft ist gleich stark, egal wie der Farbkreis gedreht wird



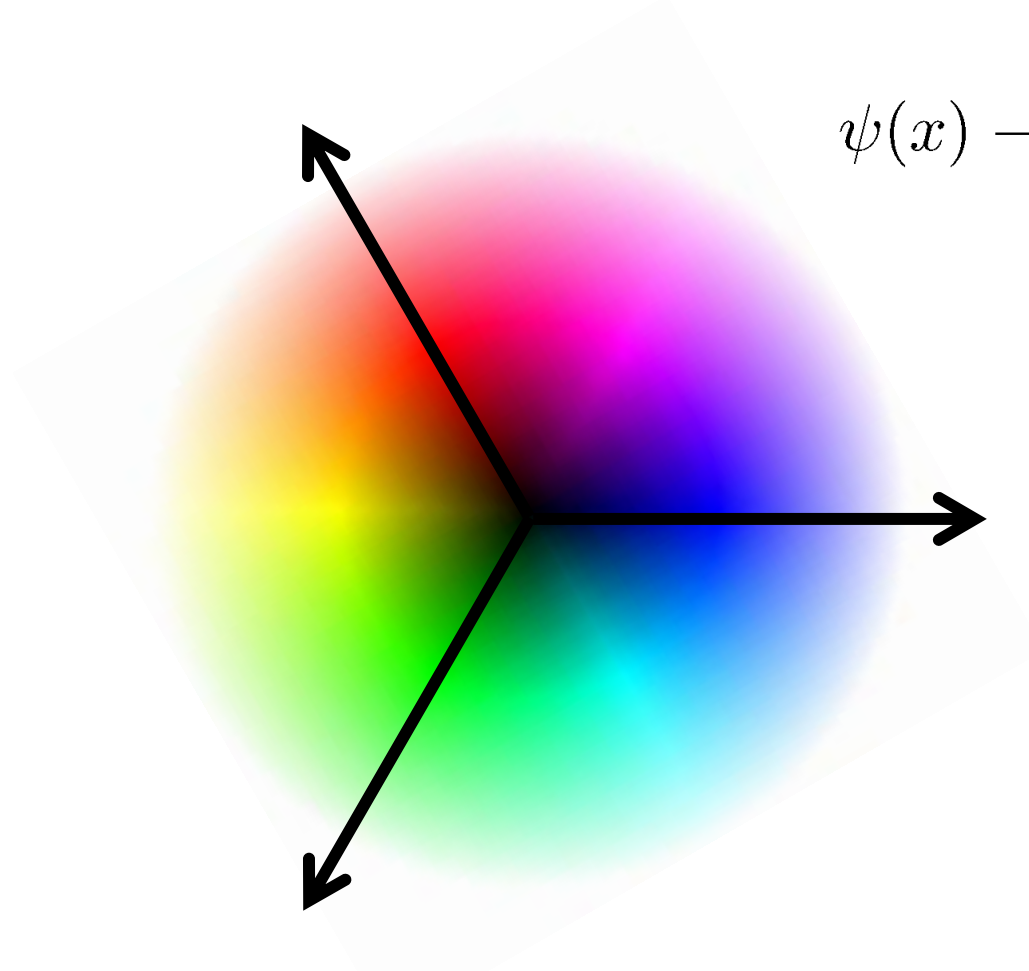
- Farbkraft ist gleich stark, egal wie der Farbkreis gedreht wird



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



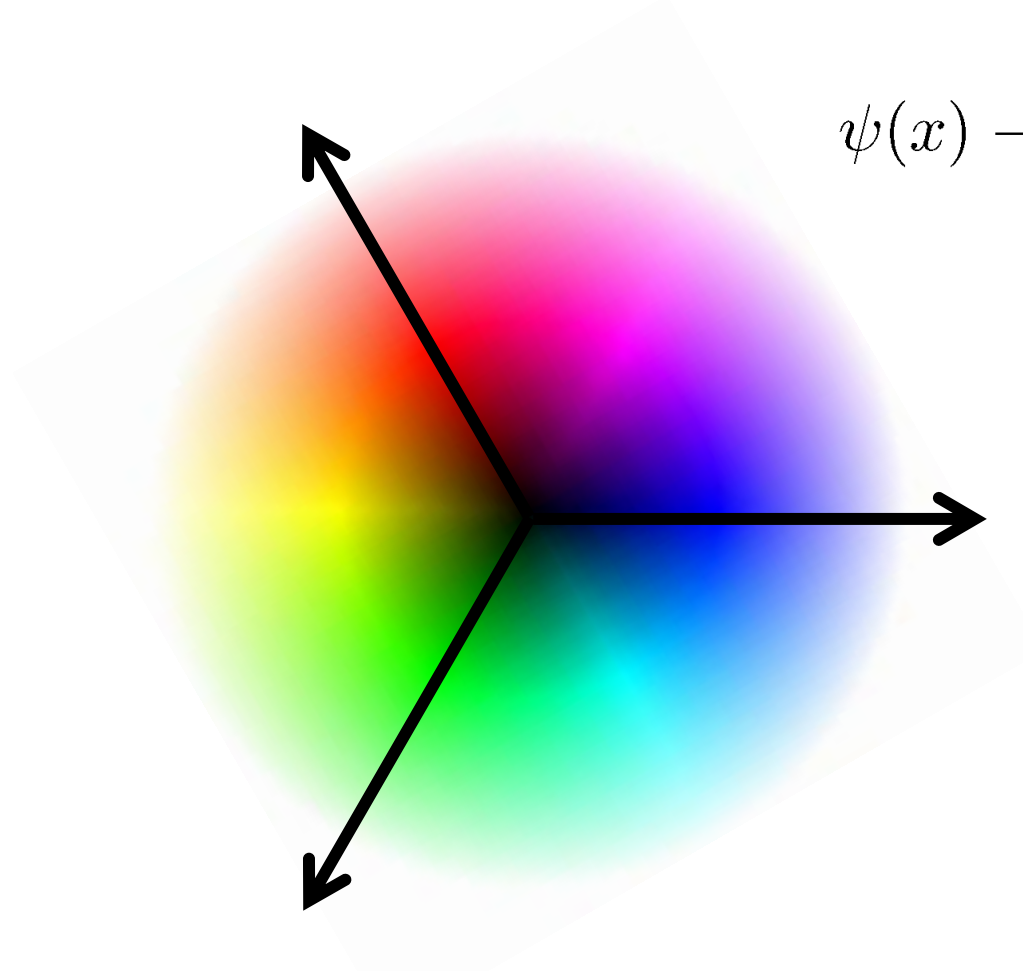
- Farbkraft ist gleich stark, egal wie der Farbkreis gedreht wird



$$\psi(x) \rightarrow \psi(x) e^{i\alpha(x)T}$$

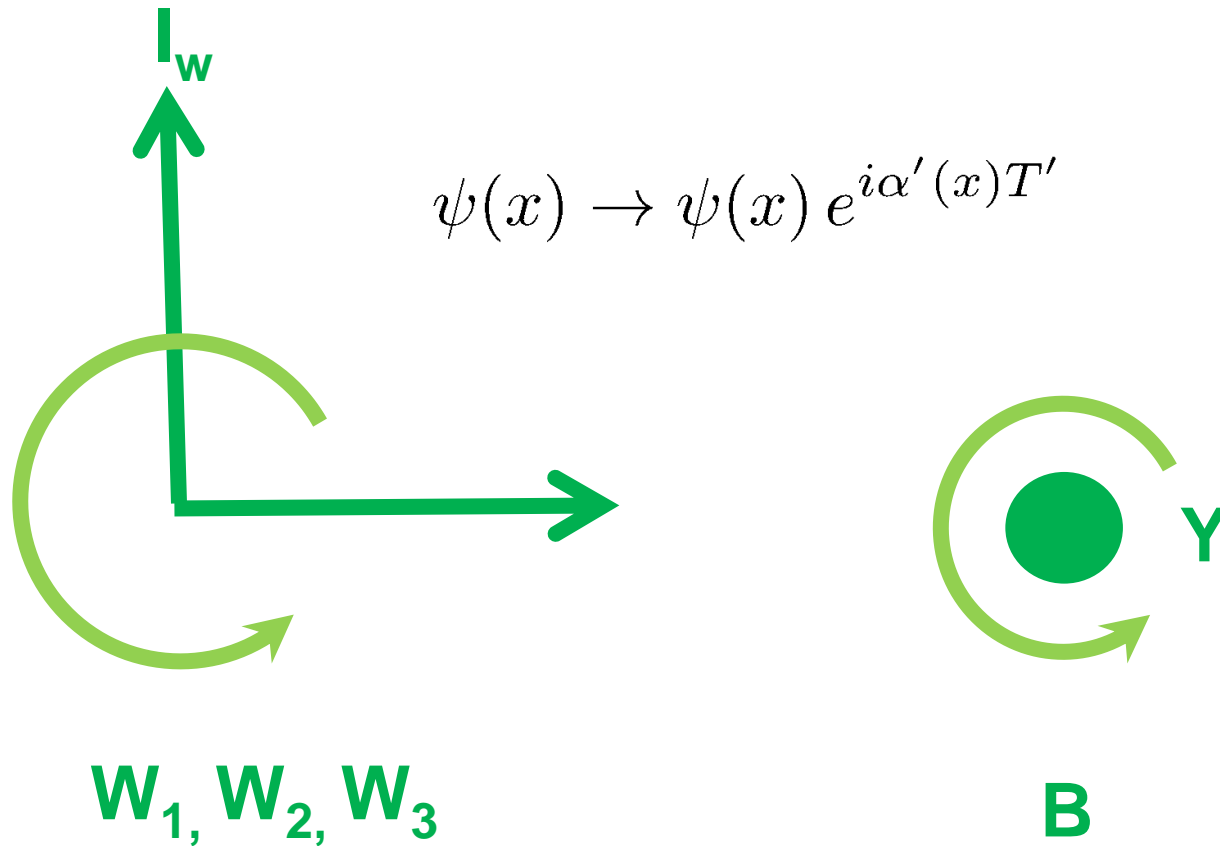
- Symmetrie ist ein fundamentales Konzept in der Natur:
Eigenschaften der Starken Kraft sind ableitbar aus Symmetrieprinzip

- 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

- Die elektro-schwache Kraft ist bei hohen Energien ebenfalls symmetrisch:



- Bedingung: Die Austauschbosonen dürfen keine Masse haben !

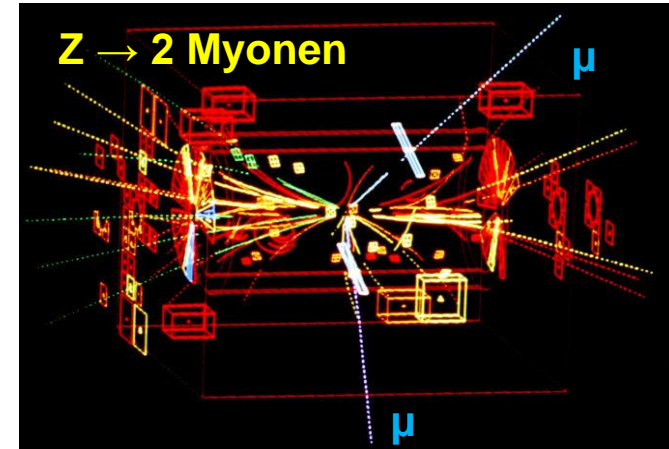
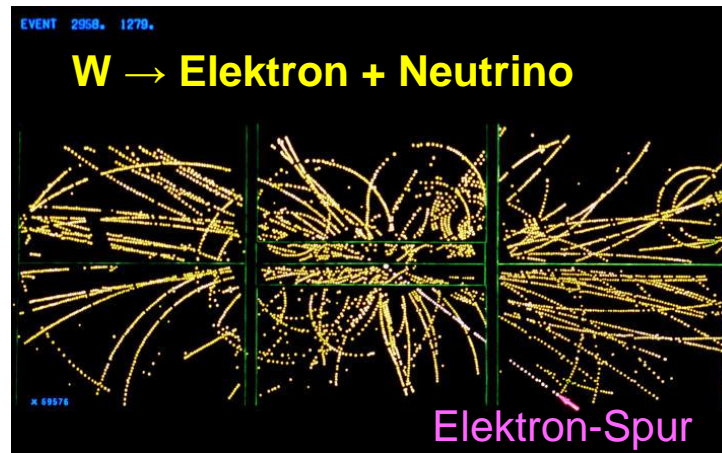
Austauschbosonen W^\pm und Z

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

$$m_W \approx 86 \times m_{\text{Proton}} \quad m_Z \approx 97 \times m_{\text{Proton}}$$

→ kurze Reichweite und relative “Schwäche” der schwachen Kraft

- Entdeckung der W - und Z -Bosonen am CERN erst 1983:

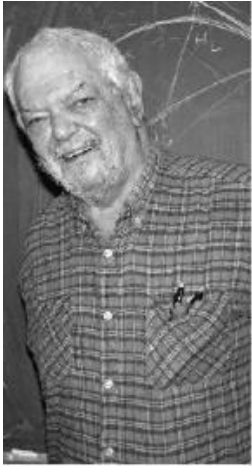


- Theoretische Folgerung: Symmetrie ist nicht mehr vollständig vorhanden
→ **Symmetriebrechung**

Eine ausgezeichnete Idee



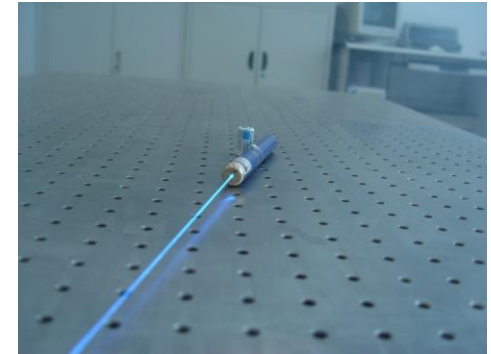
- François Englert, Robert Brout(†) und Peter Higgs schlagen 1964 vor:



Das Higgs-Feld verleiht den Austauscheteilchen der schwachen Wechselwirkung eine Masse nach “spontaner” Symmetriebrechung (Brout-Englert-Higgs-Mechanismus)

Ein neues Teilchen wird vorhergesagt: das massive Higgs-Boson

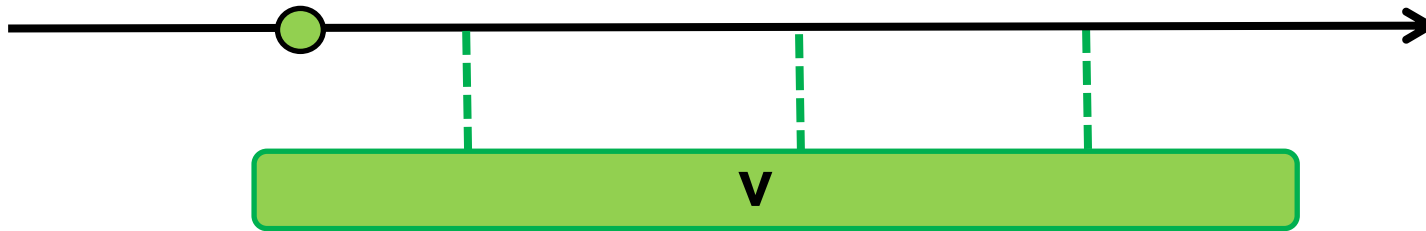
P.W. Higgs, Phys. Lett. 12 (1964) 132; Phys. Rev. Lett. 13 (1964) 508; Phys. Rev. 145 (1966) 1156;
F. Englert, R. Brout, Phys. Rev. Lett. 13 (1964) 321;



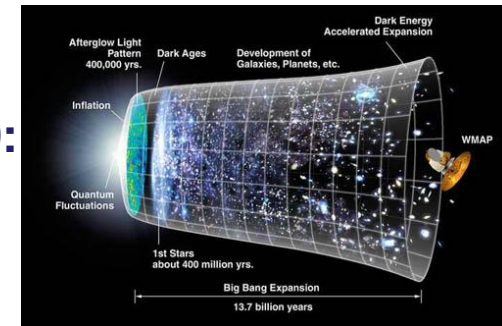
- Teilchen **ohne Masse** kann sich mit **Lichtgeschwindigkeit** fortbewegen:

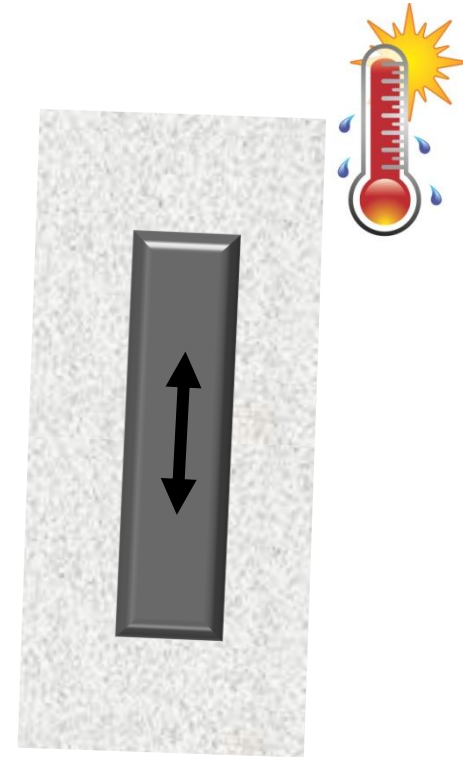
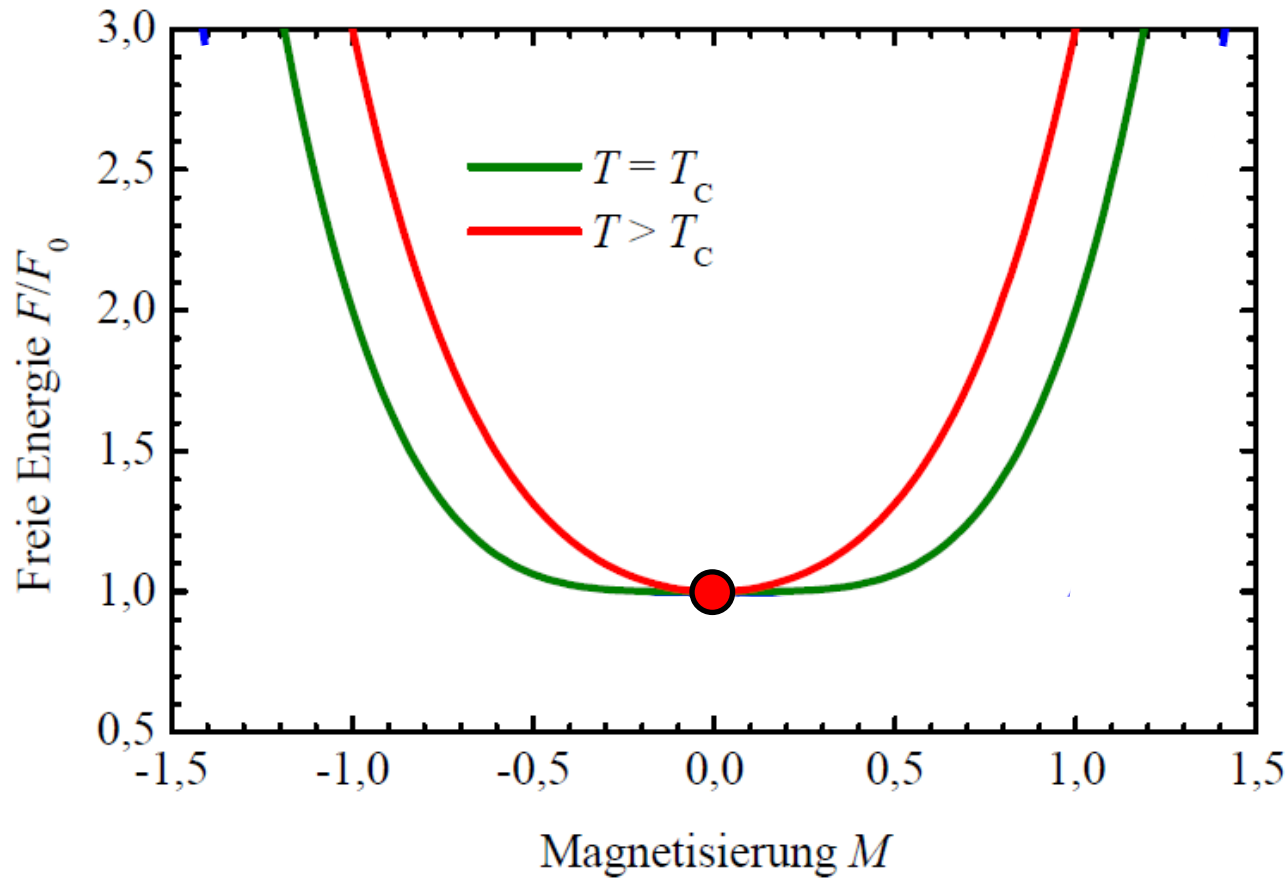


- Teilchen **mit Masse** wechselwirkt mit Higgs-Feld: es kann **nie Lichtgeschwindigkeit** erreichen



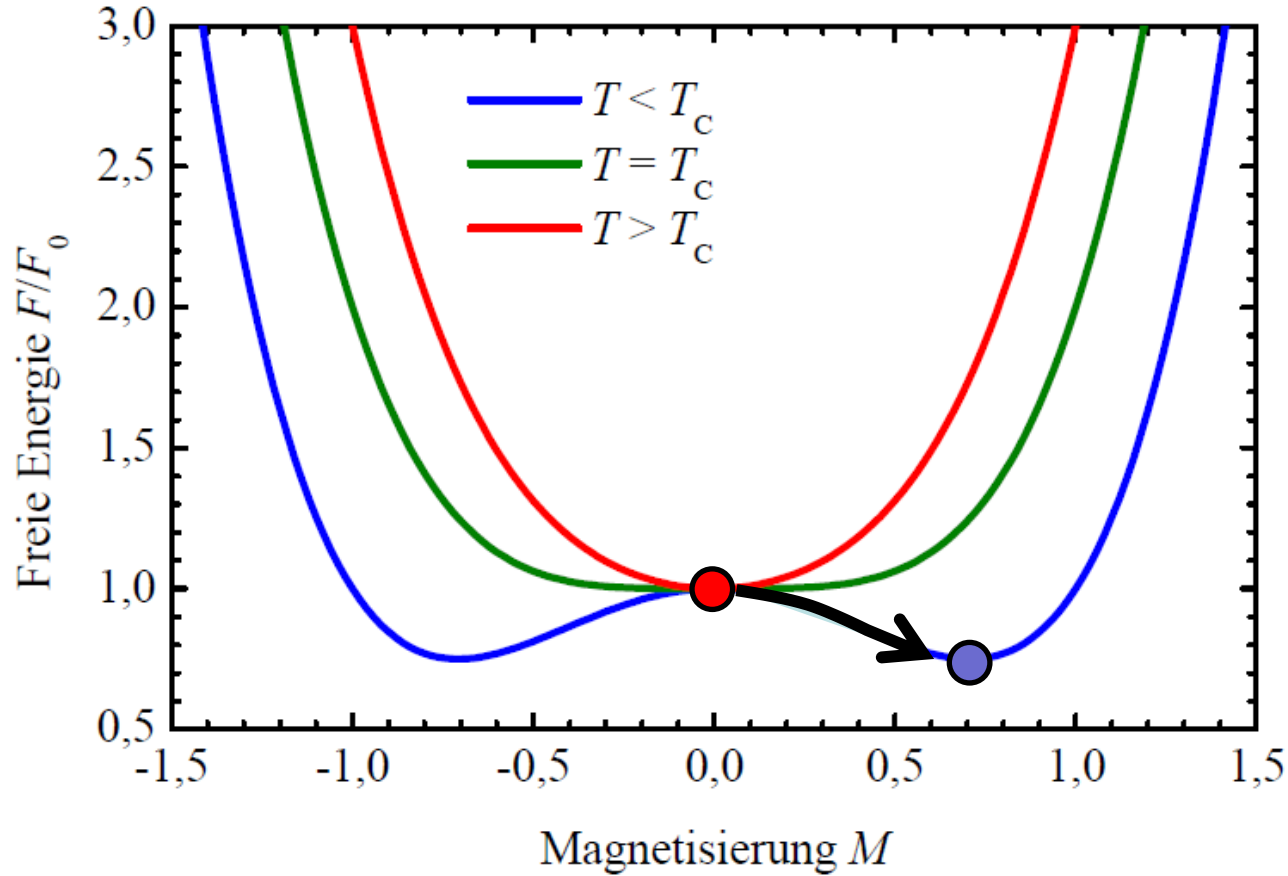
- **Masse aller Teilchen proportional zum Wert des Higgs-Feldes im Vakuum (v)**
- Eigenschaft des Higgs-Feldes:
bei extrem hohen Temperaturen verschwindet der Vakuumerwartungswert: $v = 0$
 → zu Beginn der Entwicklung des Universums
 sind alle Elementarteilchen masselos
nach kurzer Zeit sinkt die Temperatur und v wird ungleich 0:
 → Elementarteilchen erhalten Masse
 → das Higgs-Boson entsteht als Anregung des Higgs-Feldes





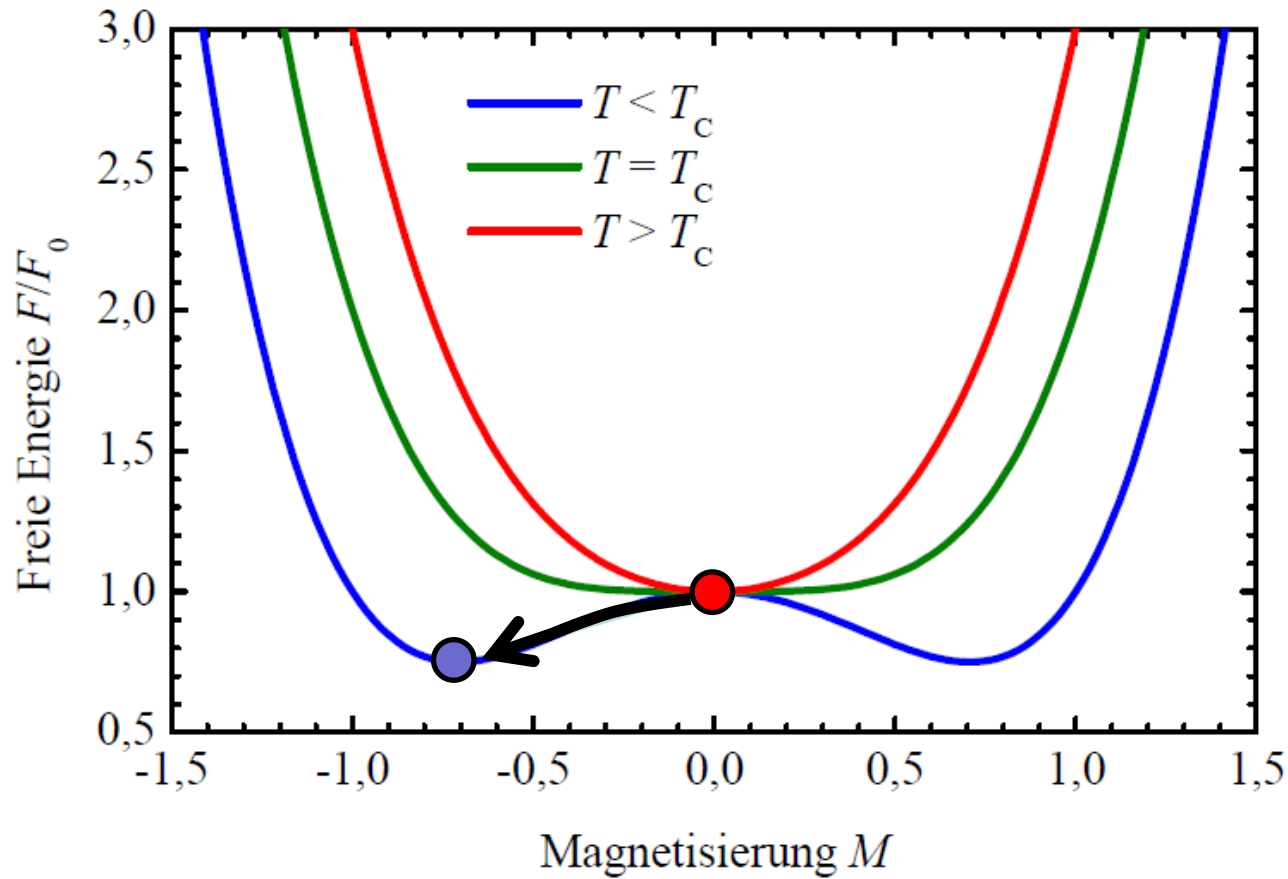
- hohe Temperatur $T \geq T_{\text{Curie}}$: Zustand niedrigster Energie hat keine Magnetisierung: $M=0$
 → **Symmetrie = keine Richtung ist bevorzugt**

Analogie zum Ferromagnetismus



- niedrige Temperatur $T < T_{\text{Curie}}$: Zustand niedrigster Energie mit Magnetisierung $M > 0$ oder $M < 0 \rightarrow$ **Symmetrie gebrochen**

Analogie zum Ferromagnetismus



- niedrige Temperatur $T < T_{\text{Curie}}$: Zustand niedrigster Energie mit Magnetisierung $M > 0$ oder $M < 0 \rightarrow$ **Symmetrie gebrochen**

Das Higgs-Feld bewirkt spontane Symmetriebrechung

$$L = -\frac{1}{2}(\nabla\varphi_1)^2 - \frac{1}{2}(\nabla\varphi_2)^2$$

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

mit $\nabla_\mu \varphi_2 = \partial_\mu \varphi_2 + eA_\mu \varphi_1, \dots$

BROKEN SYMMETRIES AND THE MASSES OF GAUGE BOSONS

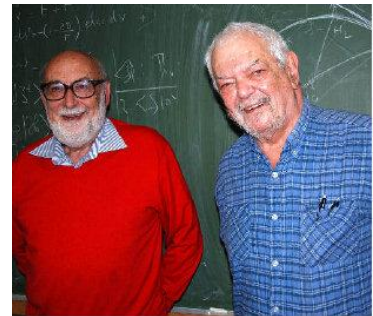
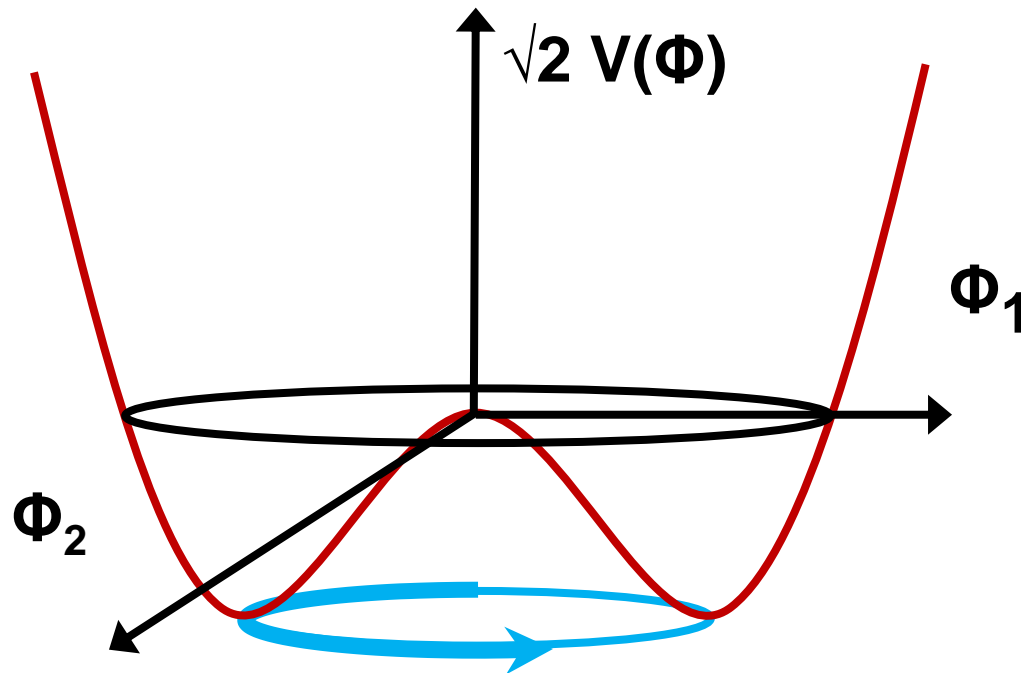
Peter W. Higgs

Tait Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Edinburgh, Scotland
(Received 31 August 1964)

BROKEN SYMMETRY AND THE MASS OF GAUGE VECTOR MESONS*

F. Englert and R. Brout

Faculté des Sciences, Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgium
(Received 26 June 1964)



- Alle Teilchen wechselwirken mit dem symmetrischen Higgsfeld

Das Higgs-Feld bewirkt spontane Symmetriebrechung

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

mit $\nabla_\mu\varphi_2 = \partial_\mu\varphi_2 + eA_\mu\varphi_1, \dots$

BROKEN SYMMETRIES AND THE MASSES OF GAUGE BOSONS

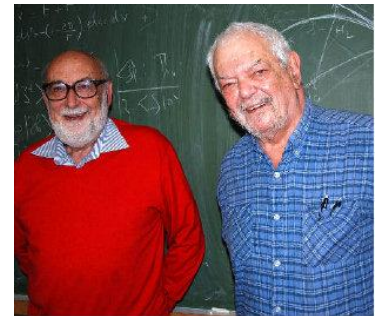
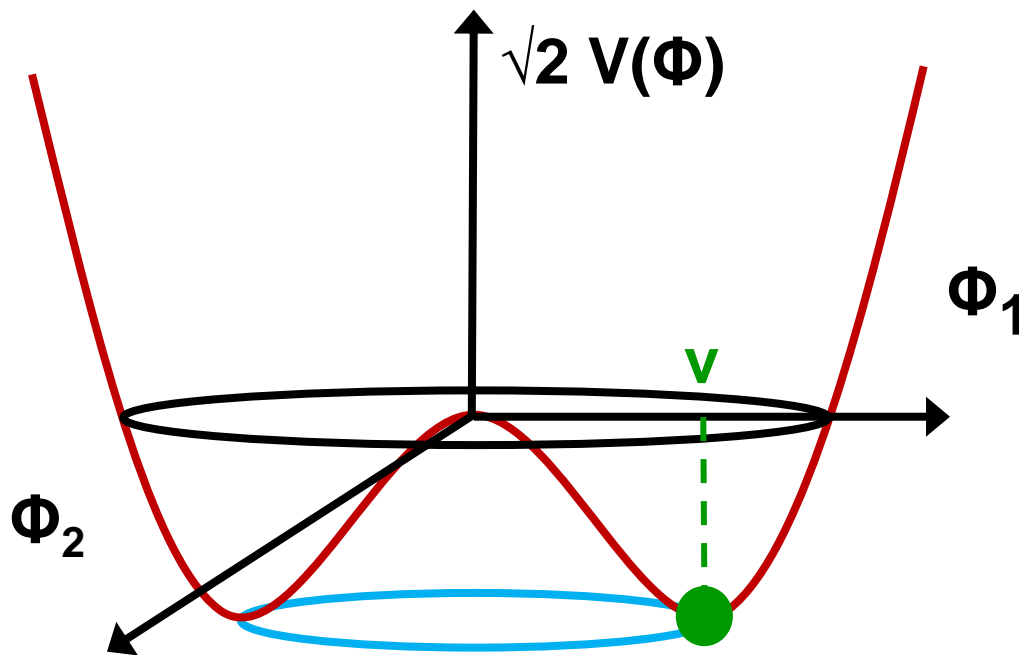
Peter W. Higgs

Tait Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Edinburgh, Scotland
(Received 31 August 1964)

BROKEN SYMMETRY AND THE MASS OF GAUGE VECTOR MESONS*

F. Englert and R. Brout

Faculté des Sciences, Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgium
(Received 26 June 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

Das Higgs-Feld bewirkt spontane Symmetriebrechung

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

mit $\nabla_\mu\varphi_2 = \partial_\mu\varphi_2 + eA_\mu\varphi_1, \dots$

BROKEN SYMMETRIES AND THE MASSES OF GAUGE BOSONS

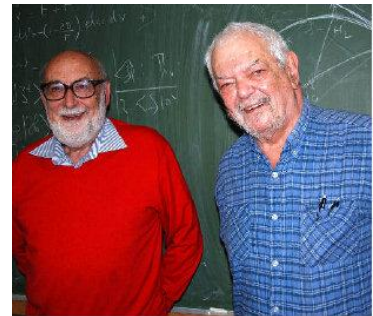
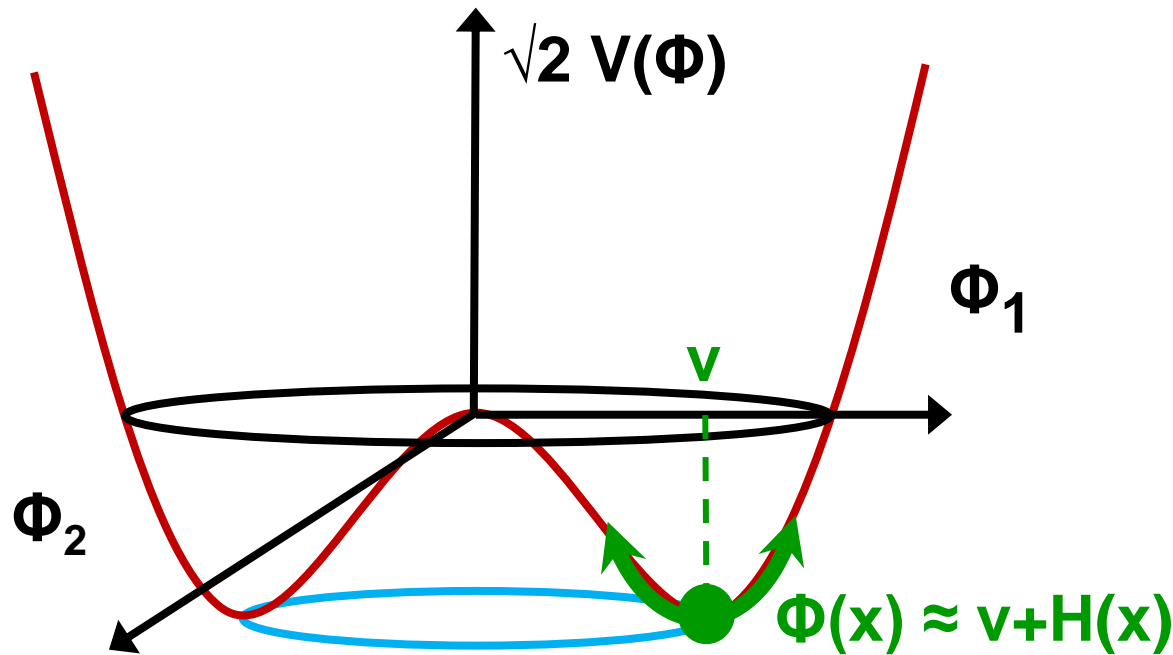
Peter W. Higgs

Tait Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Edinburgh, Scotland
(Received 31 August 1964)

BROKEN SYMMETRY AND THE MASS OF GAUGE VECTOR MESONS*

F. Englert and R. Brout

Faculté des Sciences, Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgium
(Received 26 June 1964)



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

(Nambu, Goldstone: zusätzliches Boson ohne Masse)

Das Higgs-Feld bewirkt spontane Symmetriebrechung

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

mit $\nabla_\mu\varphi_2 = \partial_\mu\varphi_2 + eA_\mu\varphi_1, \dots$

BROKEN SYMMETRIES AND THE MASSES OF GAUGE BOSONS

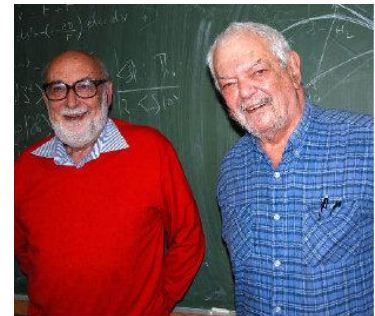
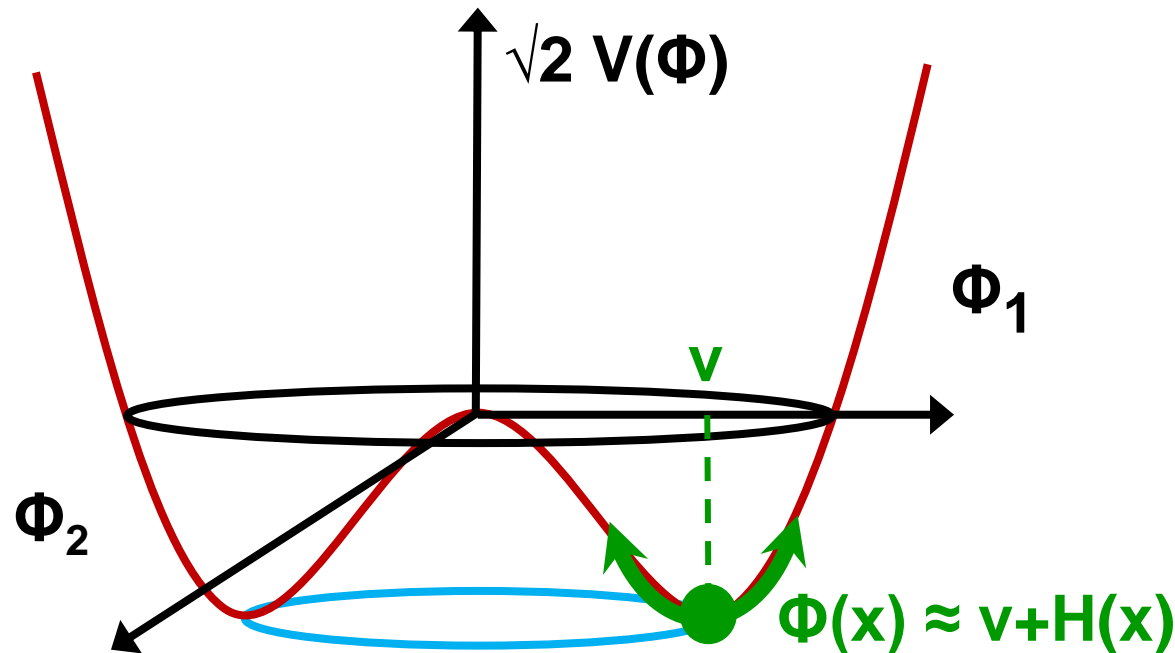
Peter W. Higgs

Tait Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Edinburgh, Scotland
(Received 31 August 1964)

BROKEN SYMMETRY AND THE MASS OF GAUGE VECTOR MESONS*

F. Englert and R. Brout

Faculté des Sciences, Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgium
(Received 26 June 1964)



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



Theorie der **Supraleitung**
Bardeen/Cooper/Schrieffer



NP 1972

Quantenelektrodynamik
Feynman/Schwinger/Tomonaga



NP 1965

Spontane Symmetriebrechung in der starken Wechselwirkung

Theorie massiver Protonen, Neutronen, masseloses Nambu-Goldstone-Boson



Nambu



NP 2008

Spontane Symmetriebrechung in der schwachen Wechselwirkung
Theorie massiver Wechselwirkungsteilchen, massives Higgs-Boson



Englert/Higgs



NP 2013

Standardmodell der elektro-schwachen Wechselwirkung



Glashow/Salam/Weinberg



NP 1979

Renormierung des Standardmodells

Berechenbarkeit bis zu höchsten Energien



'tHooft/Veltmann



NP 1999

Das Higgs-Feld



Leichtes Teilchen



Schweres Teilchen



Das Higgs-Boson = Schweres Teilchen



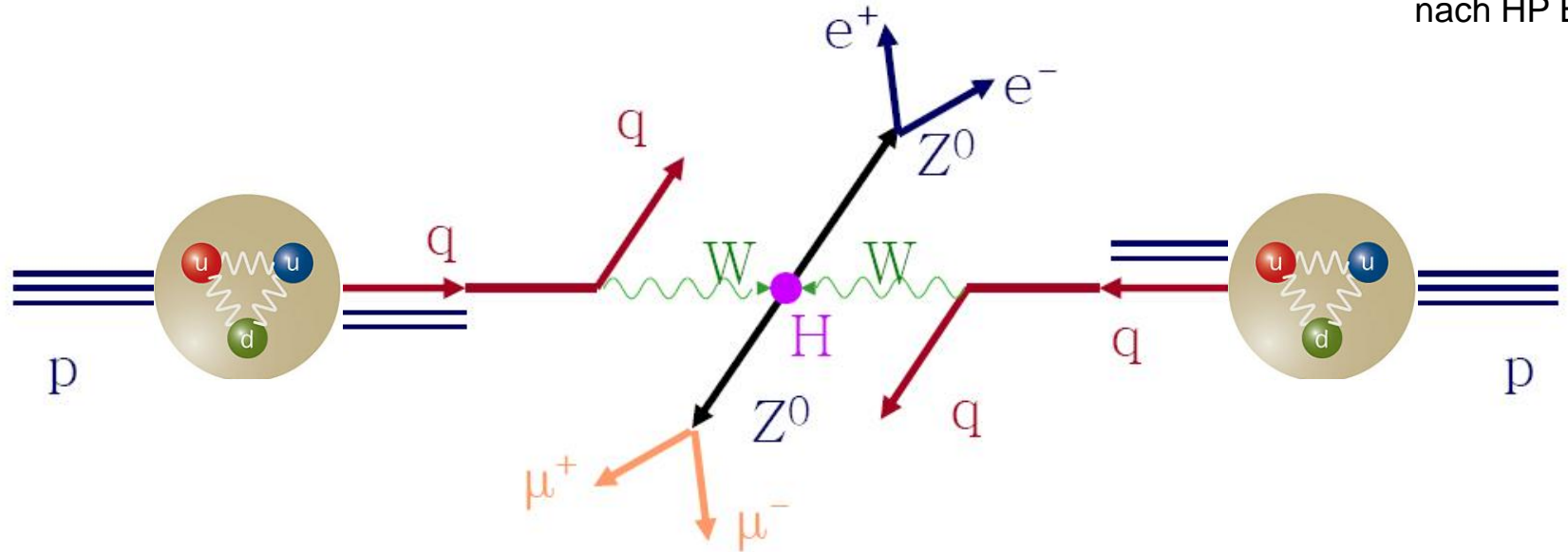
Streuung von Higgs-Boson mit leichtem Teilchen

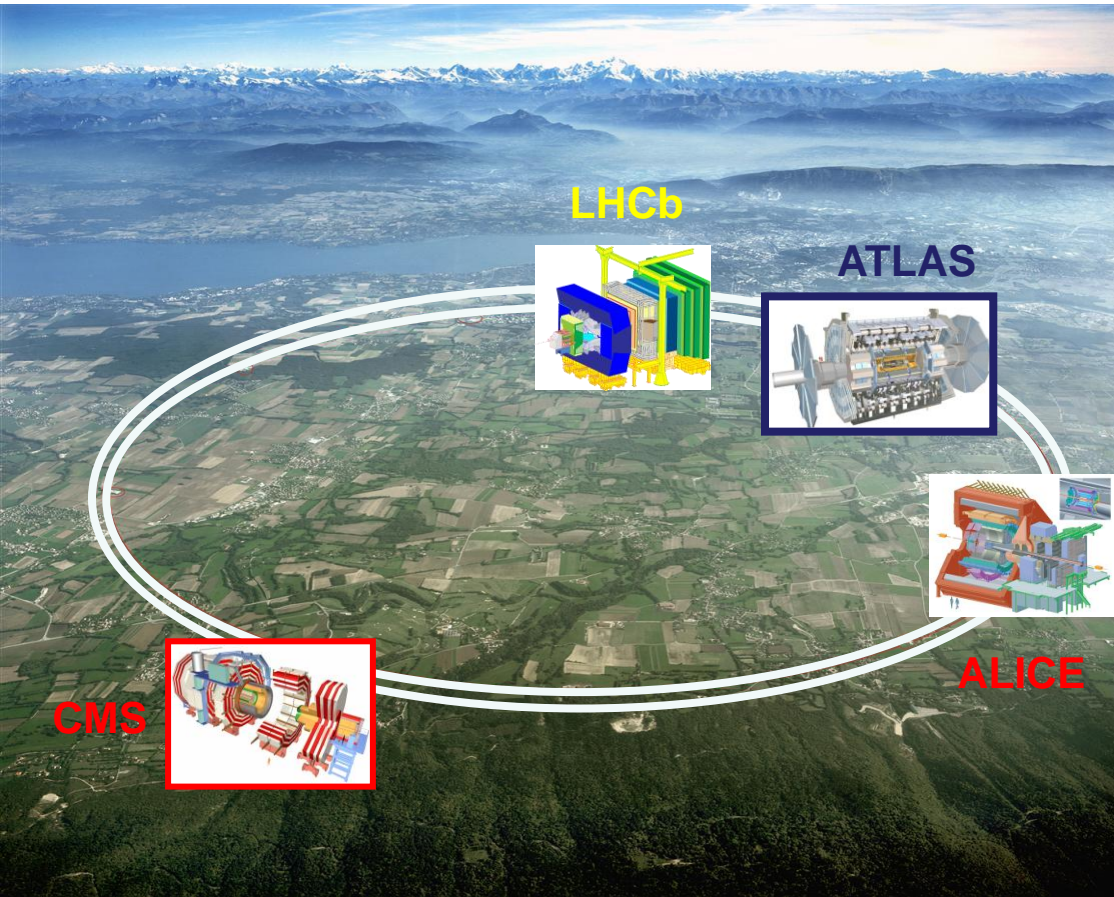




Die Erzeugung von Higgs-Bosonen

nach HP Beck





LHC:

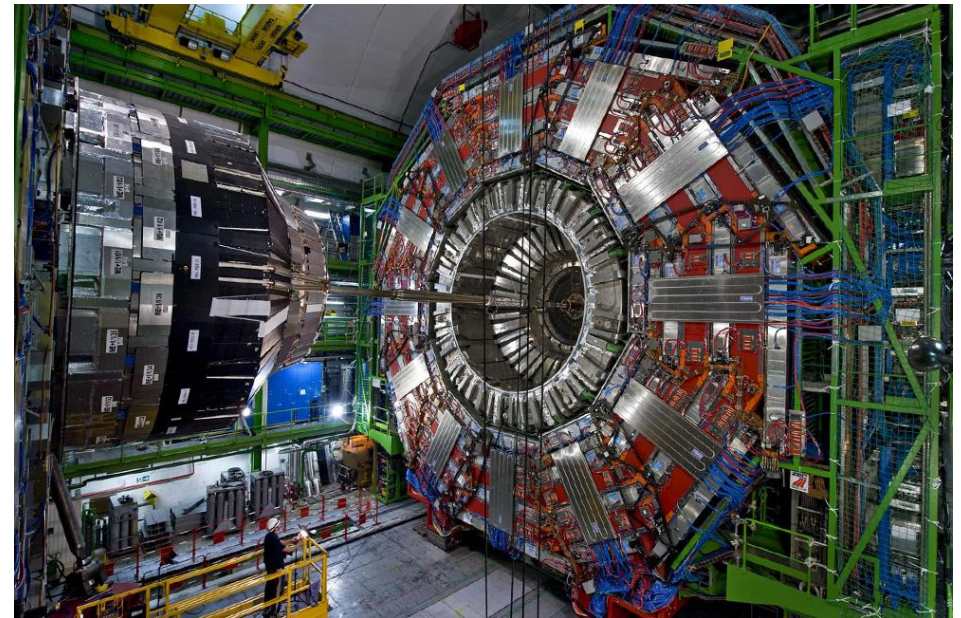
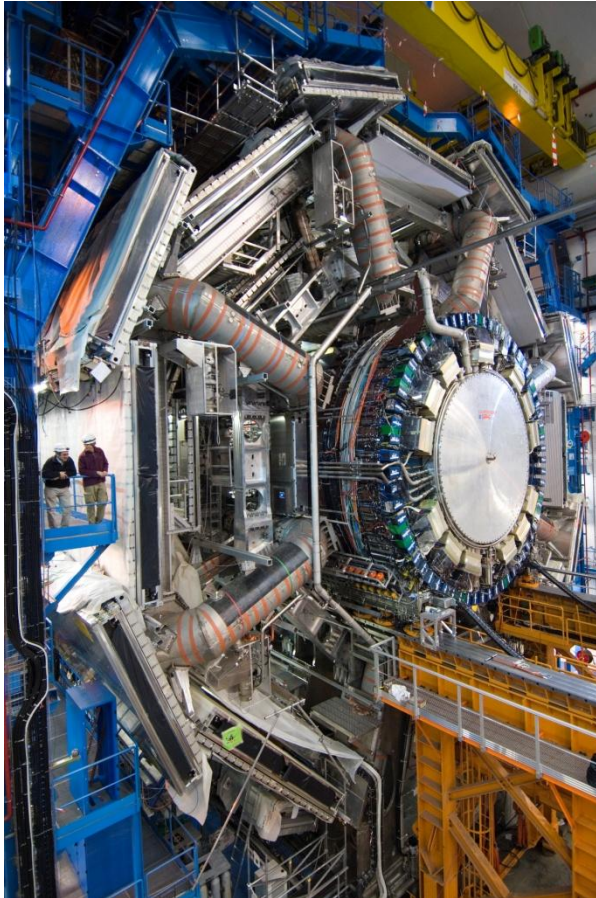
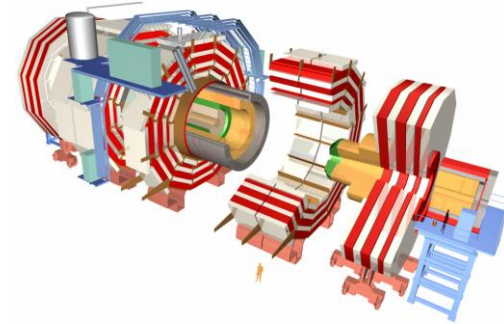
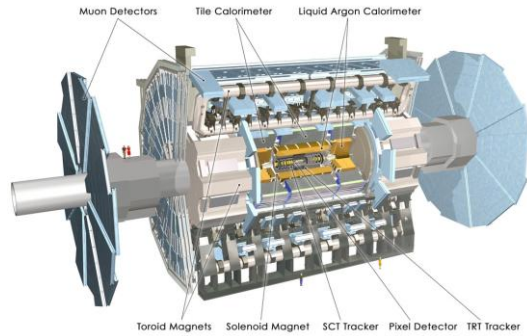
26.7 km Umfang
Tunnel in 50-100 m Tiefe

4 Teilchendetektoren

Protonen mit 99.9999991%
der Lichtgeschwindigkeit
→ 11250 Umläufe pro Sekunde

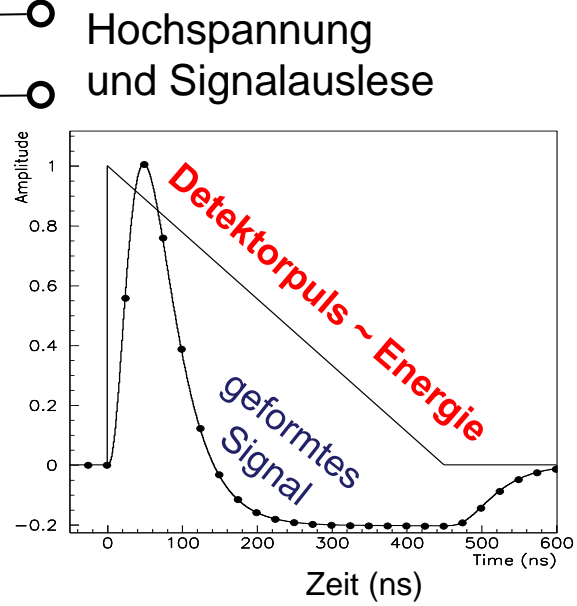
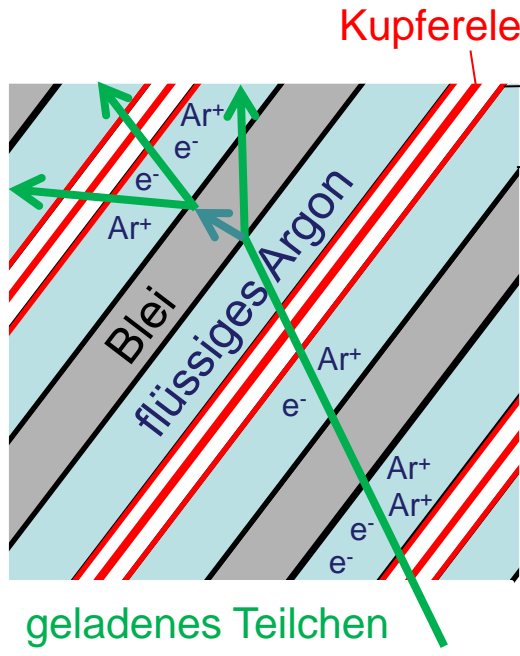
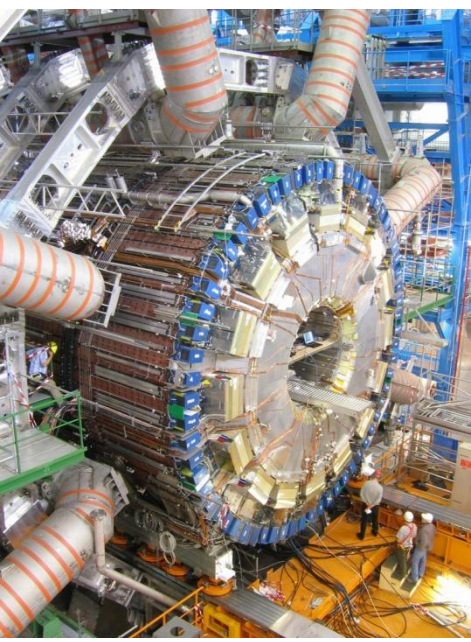
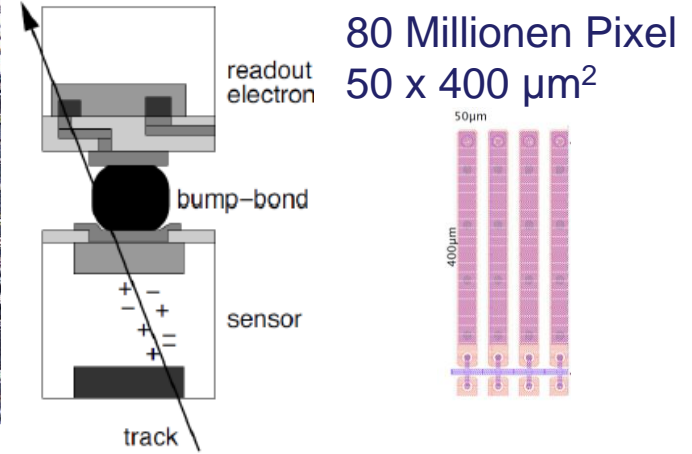
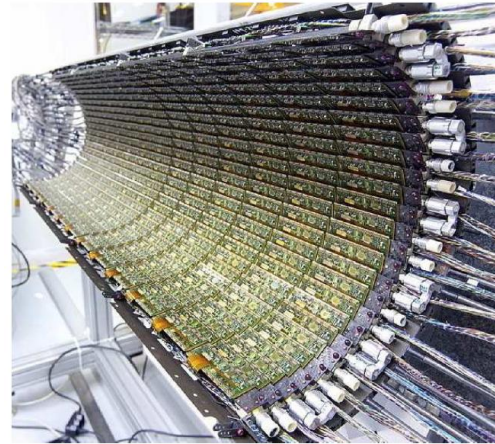



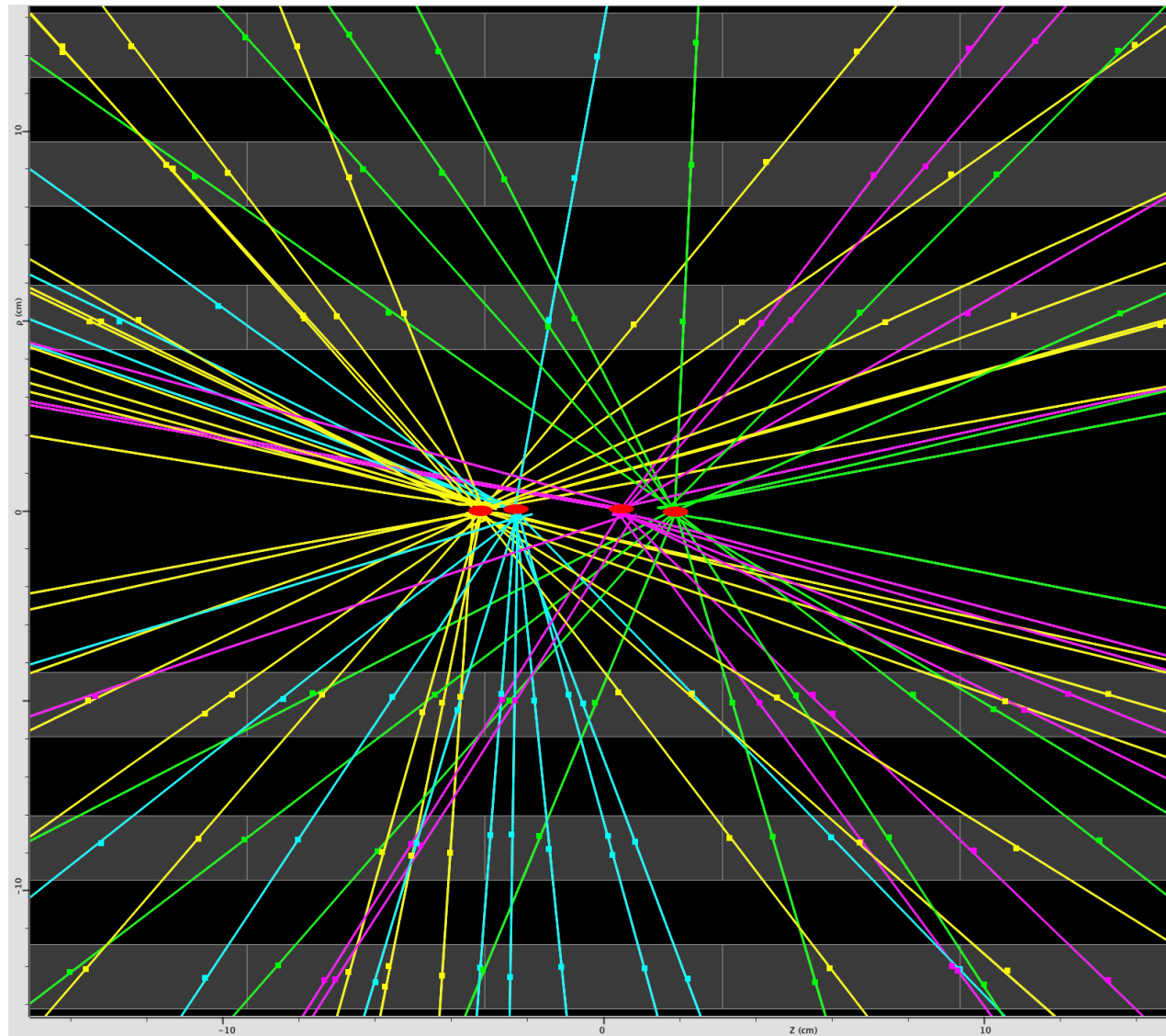
- 1400 Teilchen-Pakete mit je 10^{11} Protonen pro Strahl
- alle 50 ns eine Strahl-Kreuzung mit bis zu 40 Proton-Proton-Stößen
- Kollisionsenergie entspricht 8500 x Protonmasse



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

ATLAS Detektor-Komponenten

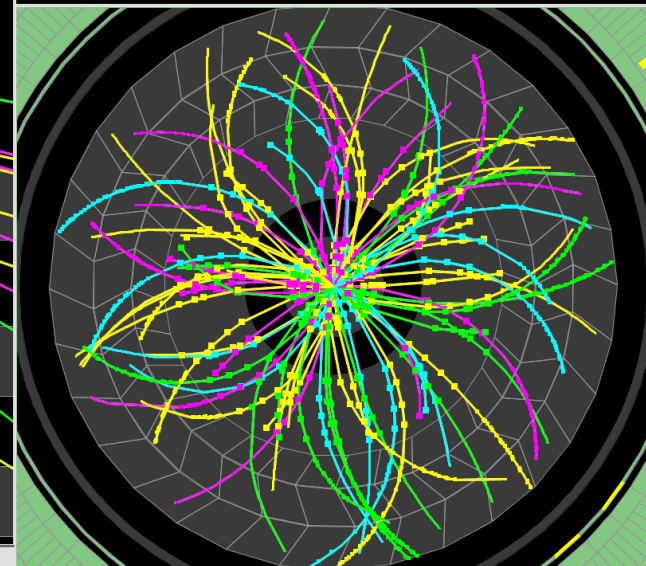




ATLAS EXPERIMENT

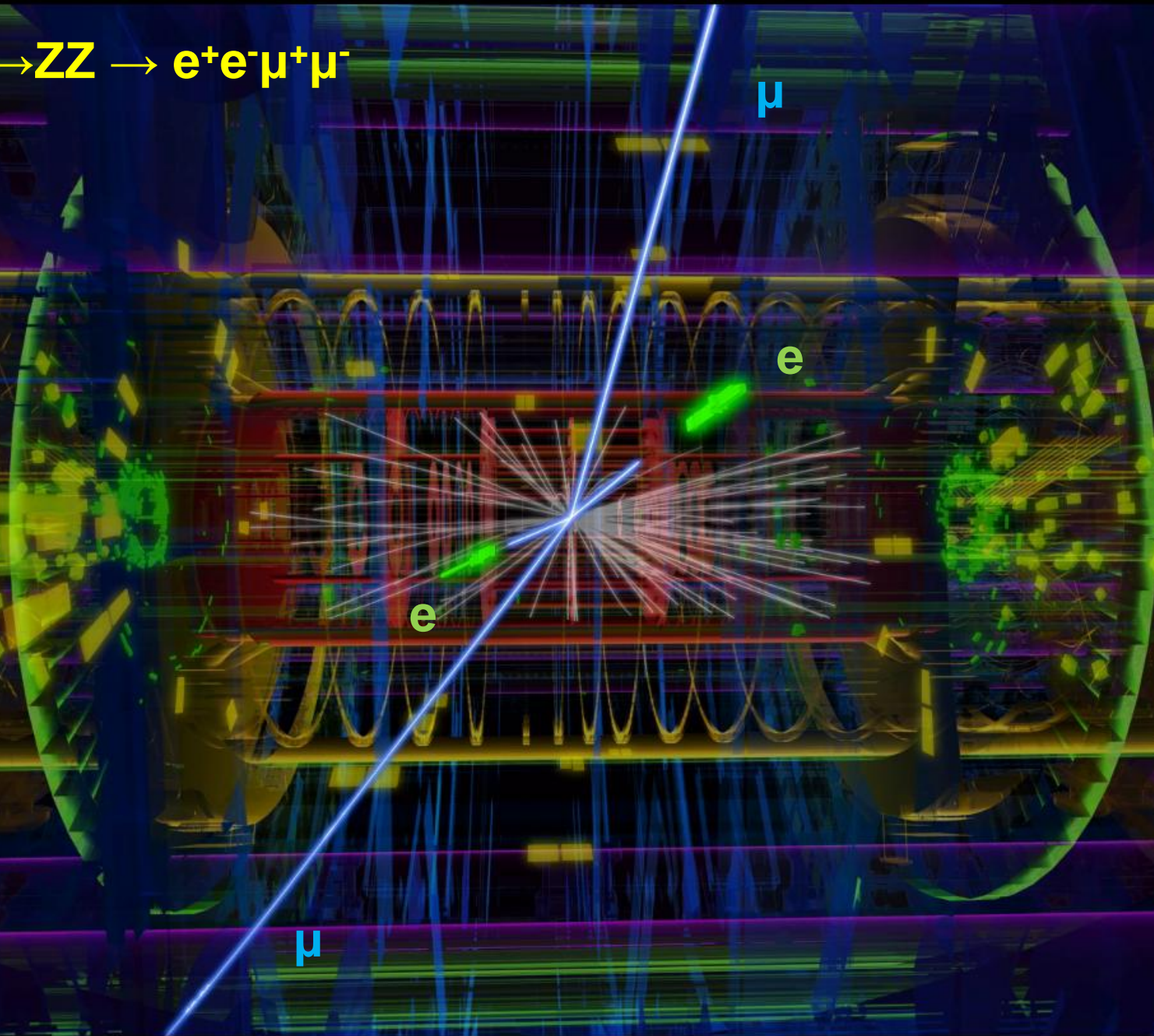
Run Number: 153565, Event Number: 4487360
Date: 2010-04-24 04:18:53 CEST

**Event with 4 Pileup Vertices
in 7 TeV Collisions**

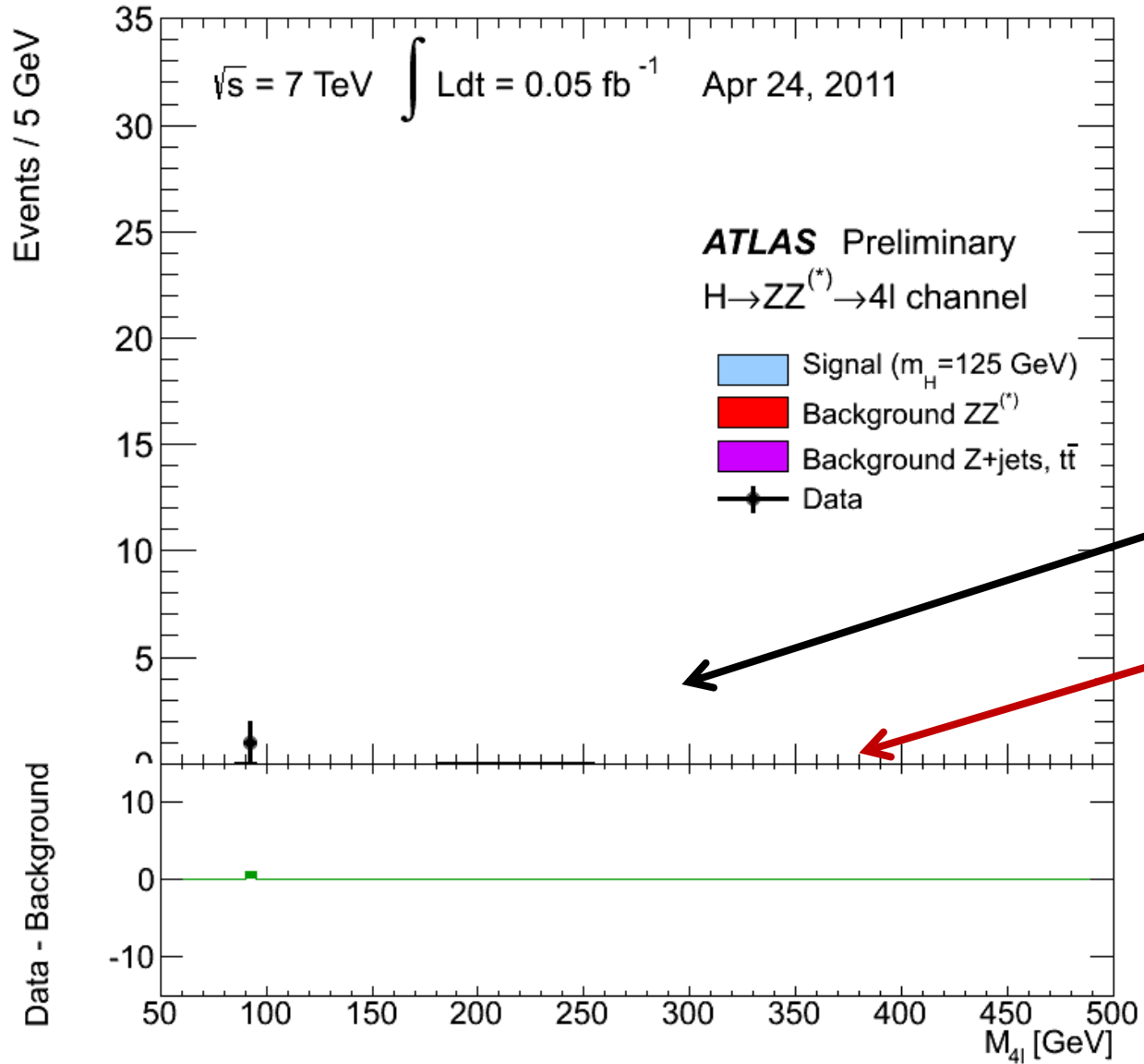


- aus der Spurkrümmung kann der Impuls der Teilchen bestimmt werden

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



Higgs-Boson-Zerfall in 2 instabile Z-Bosonen



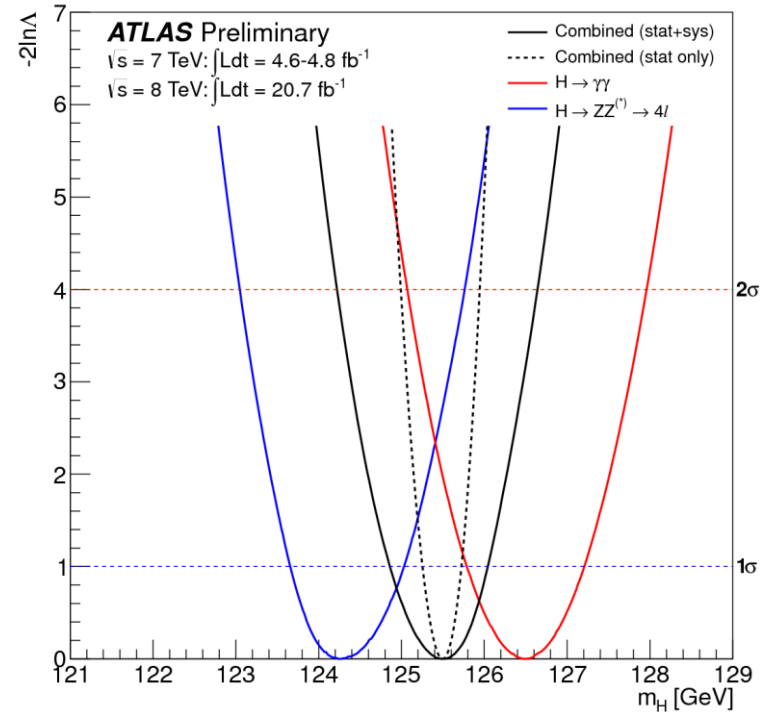
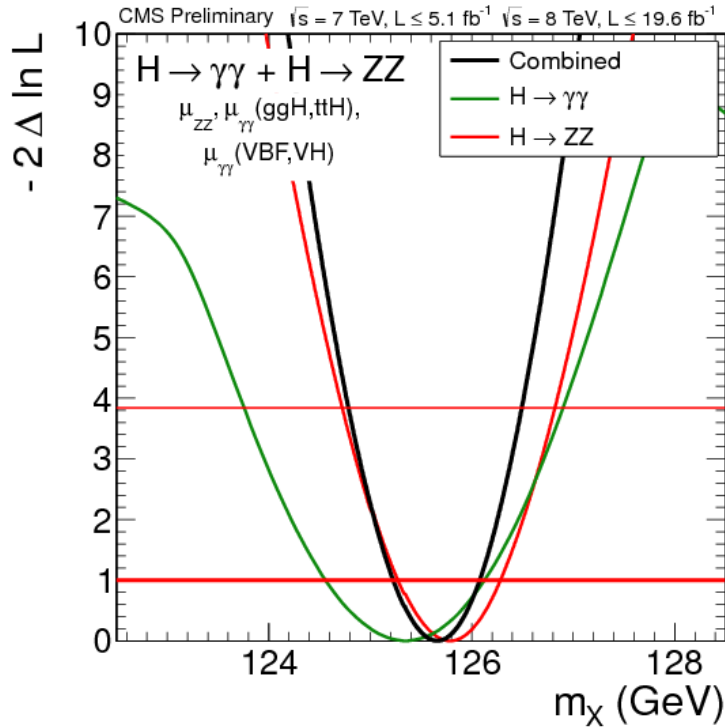
Daten mit Messfehlern

Untergrund

4. Juli 2012: Neues Boson am LHC entdeckt



Wie schwer ist das Higgs-Boson?



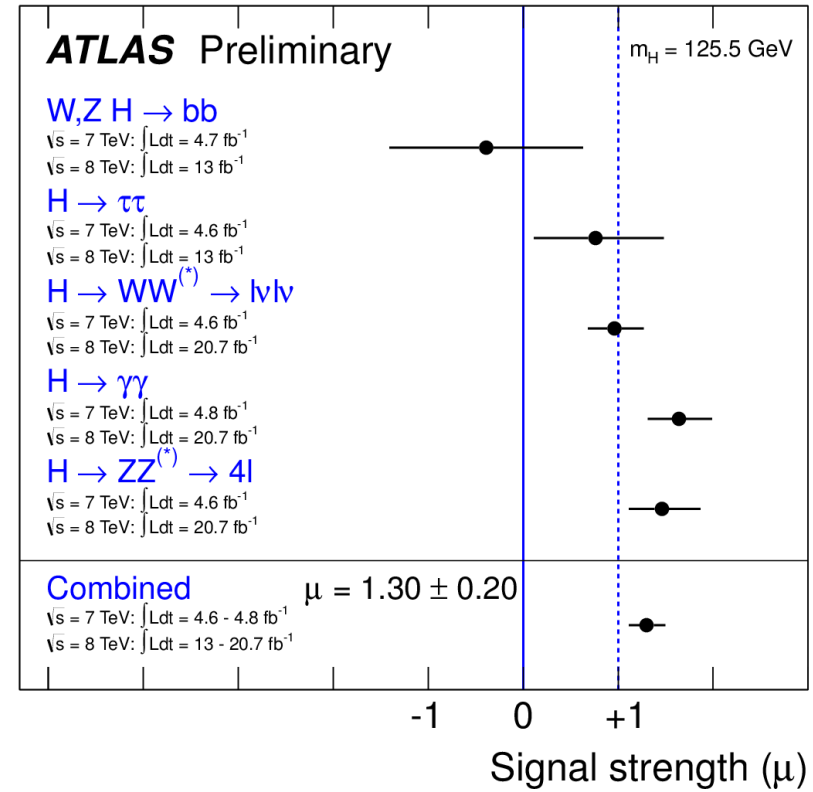
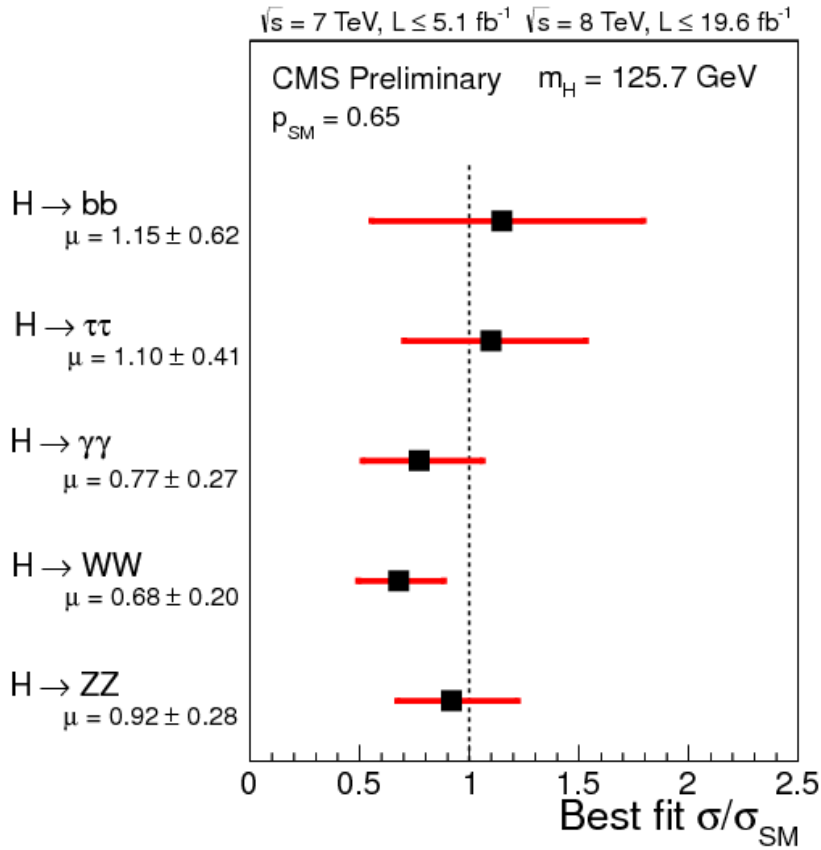
CMS: $m_\chi = 125.7 \pm 0.3 \text{ (stat)} \pm 0.3 \text{ (syst)} \text{ GeV}$

ATLAS: $m_H = 125.5 \pm 0.2 \text{ (stat)} \pm 0.6 \text{ (syst)} \text{ GeV}$

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

CMS-PAS-HIG-13-005
 ATLAS-CONF-2013-014

Werden alle Higgs-Zerfälle beobachtet?



CMS-PAS-HIG-13-005
 ATLAS-CONF-2013-034

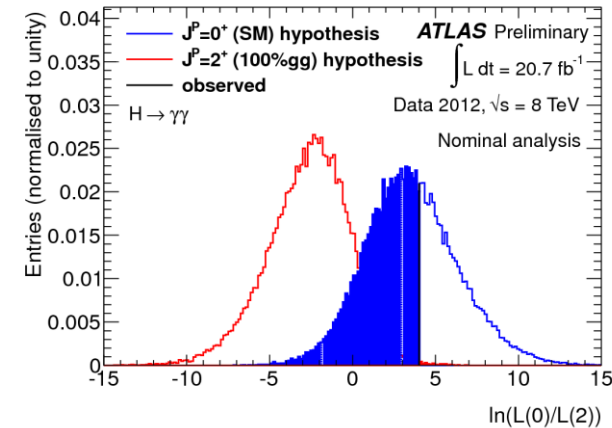
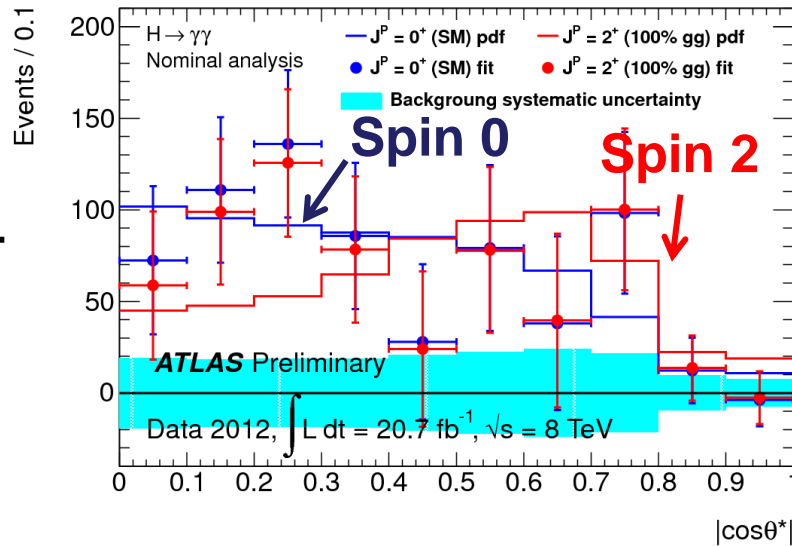
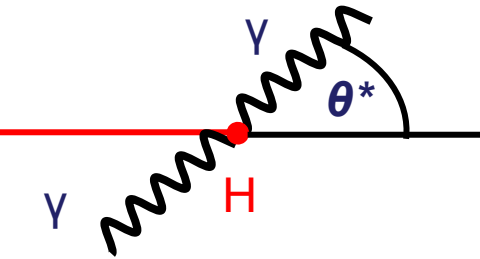
- Wichtige vorhergesagte Eigenschaft des Higgs-Bosons:
Wechselwirkungstärke sollte proportional zur Masse der Teilchen sein!



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-2013-029
ATLAS-CONF-2013-040

- Messungen von $H \rightarrow \gamma\gamma$, $H \rightarrow ZZ$ und $H \rightarrow WW$ bevorzugen Spin 0
- Spin 1 ausgeschlossen, da $H \rightarrow \gamma\gamma$ beobachtet

P. Higgs und F. Englert treffen sich zum ersten Mal am 4. Juli 2012



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

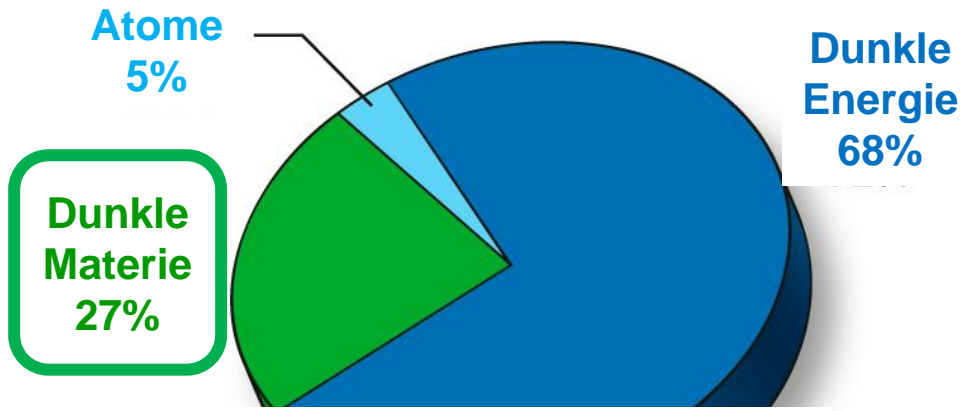
“I think it shows amazing dedication by the young people involved with these colossal collaborations to persist in this way, on what is a really very difficult task. I congratulate them.”

Peter Higgs, 4.Juli 2012

- 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 auch noch bei sehr hohen Energien?
→ **Entwicklung und Zusammensetzung des Universums**

Planck XVI 2013



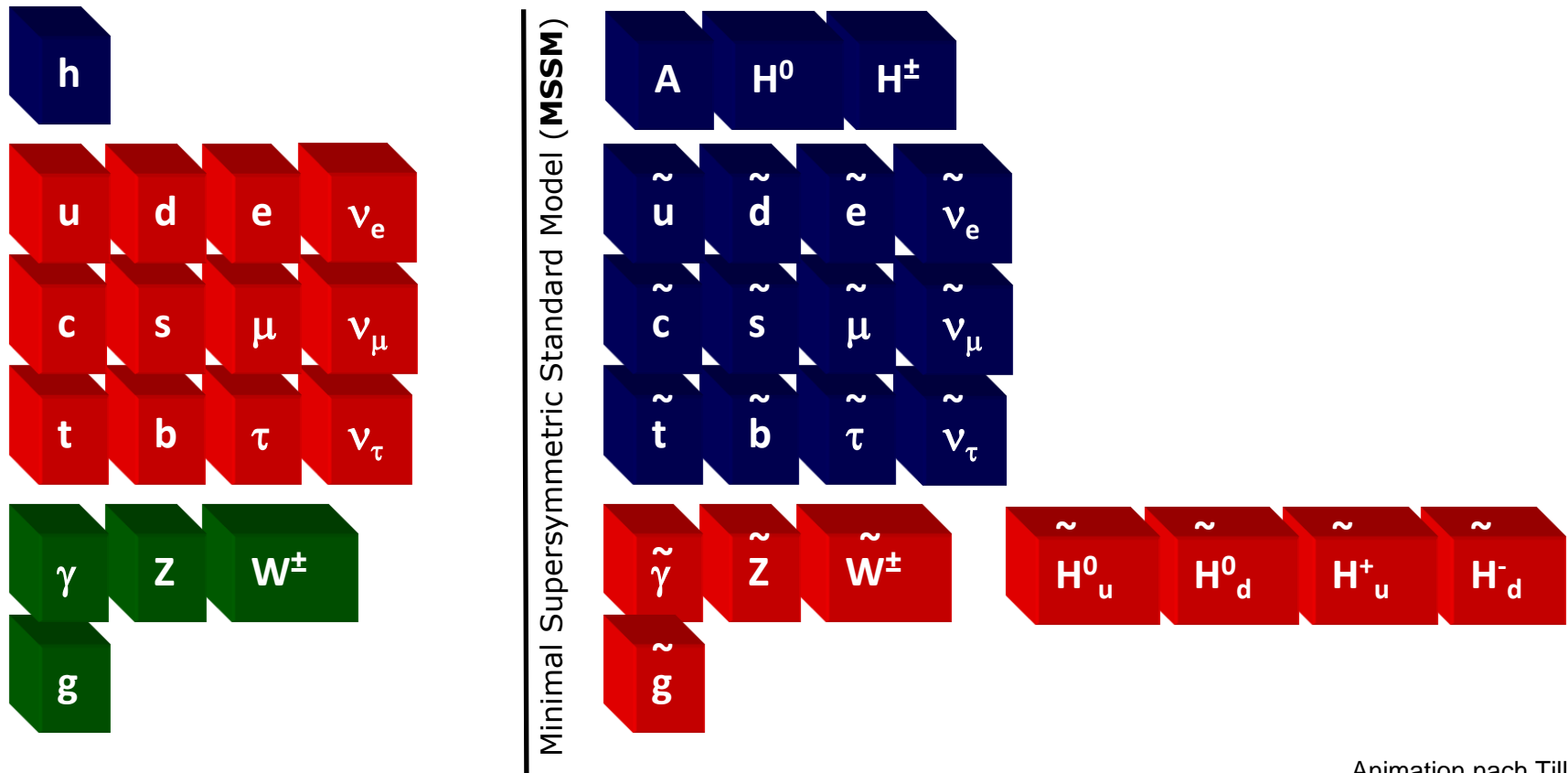
nicht leuchtende, unbekannte, schwere Materiebausteine



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

- Ein supersymmetrisches, schwach wechselwirkendes, aber schweres Teilchen könnte Dunkle Materie erklären

- Weitere Messungen zur Untersuchung des Higgs-Bosons und der elektroschwachen Symmetriebrechung sind nötig:
 - Higgs-Mechanismus kann Massenwerte von W, Z und Photon vorhersagen, er liefert aber keine Vorhersage der Massenwerte der Quarks und Leptonen
→ Finden sich experimentelle Hinweise für eine Erklärung?
 - Erhalten Neutrinos Masse durch den Higgs-Mechanismus oder sind es sogenannte Majorana-Teilchen?
- Neue Messungen am LHC bei höherer Energie und Untersuchung von extrem seltenen Kernzerfällen



- Theorie von P. Higgs, F. Englert und R. Brout:
 - Massen der Elementarteilchen entstehen durch Wechselwirkung mit dem Higgs-Feld nach spontaner Symmetriebrechung
 - ein neues Teilchen wird vorausgesagt: das Higgs-Boson
- Die Entdeckung eines Higgs-Bosons am LHC erbringt den lange gesuchten Nachweis des Higgs-Feldes und den **Nobelpreis 2013 für Peter Higgs und François Englert**
- Es bleiben noch viele spannende Fragen, die mit dem LHC-Beschleuniger und anderen Experimenten der Teilchenphysik untersucht werden
- Weitere Informationen unter:
 - nobelprize.org
 - atlas.ch
 - cms.web.cern.ch
 - iktp.tu-dresden.de

