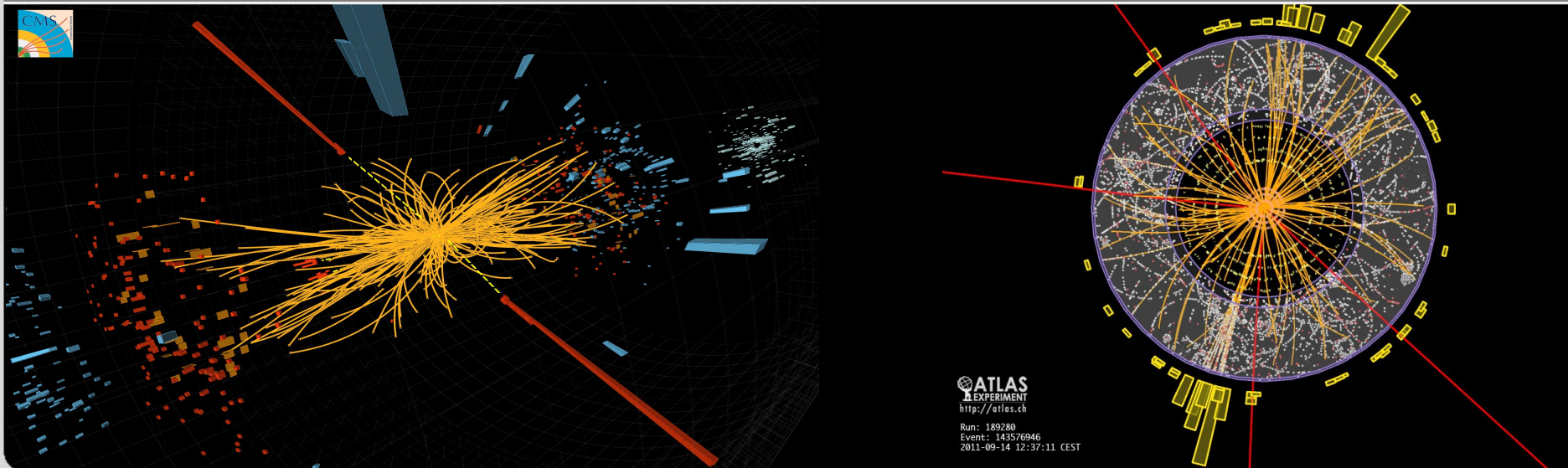


Higgs Boson Physik – Einführung

Günter Quast, Alexei Raspereza

Vorlesung
19.4.2012

Institut für Experimentelle Kernphysik

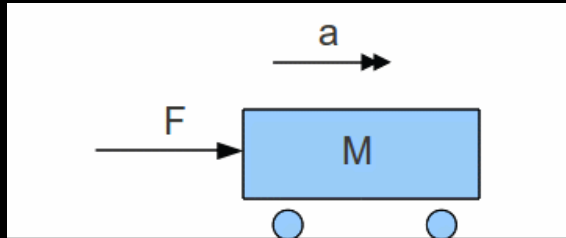


Concepts of Mass

Topic of our lectures closely related to notion of mass

Let us recall concepts of mass

Classical mechanics



measure of inertia

Special Relativity

Energy $\Leftrightarrow$ Mass

$$E = mc^2$$

Lorentz invariant

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

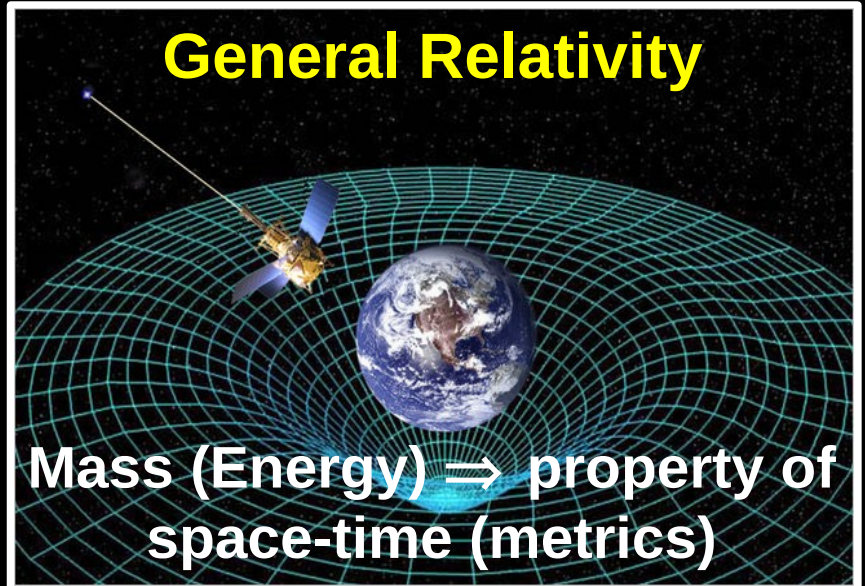
Classical Gravity

$$F = G_N \frac{mM}{r^2}$$

active gravitational mass $\Rightarrow$
intensity of generated gravitational field

passive gravitational mass $\Rightarrow$ strength of
object's interaction with gravitational
field

General Relativity



Concepts of Mass

Quantum Theory & Elementary Particle Physics

mass $\Rightarrow$ intrinsic property of elementary particles

manifests itself as difference between particle
quantum frequency and wave length

defines dynamics of interactions between particles

Formal Definition in Quantum Field Theory

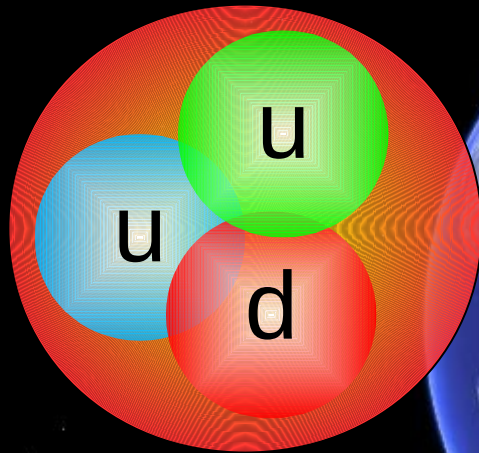
Eigenvalue² of particle (Energy,Momentum)² operator

$$(\hat{E}^2 - \hat{p}^2)|\Psi\rangle = m^2|\Psi\rangle$$

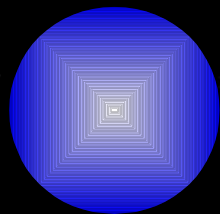
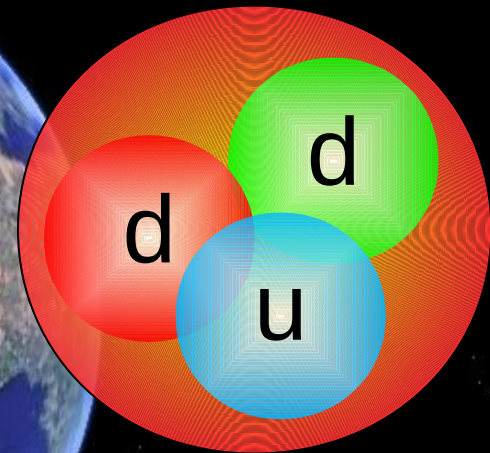
This concept of mass is subject of our lectures!

Woraus besteht die Welt ?

Proton



Neutron



Elektron



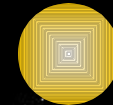
Teilchen des Standardmodells der Teilchenphysik



Elektron



Myon



Tauon



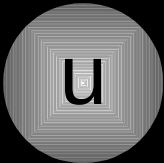
e-Neutrino



μ -Neutrino



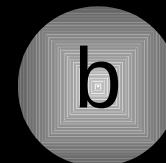
τ -Neutrino



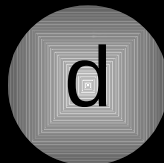
up-Quark



strange-Quark



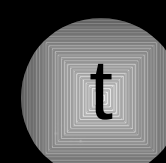
bottom-Quark



down-Quark



charm-Quark



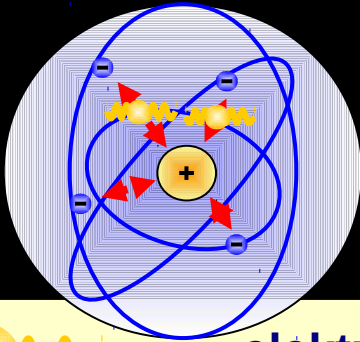
top-Quark

Zu jedem Teilchen existiert ein Anti-Teilchen

Quarks & Leptonen der 2. und 3. Familie sind nicht stabil !

Top entdeckt 1995
 τ -Neutrino 2000

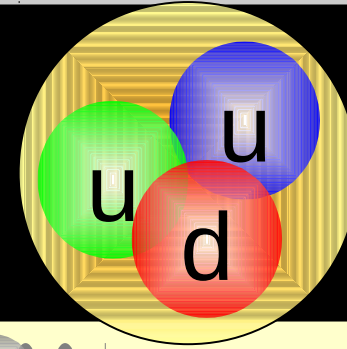
„Kraftteilchen“ sind zuständig für Wechselwirkungen



Photon

elektromagnetisch

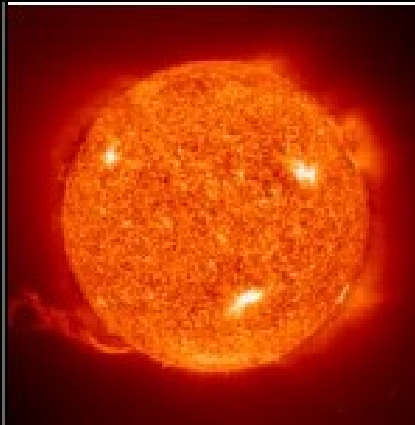
Atom, Molekül, Festkörper,
alle „mechanischen“ Kräfte



8 Gluonen

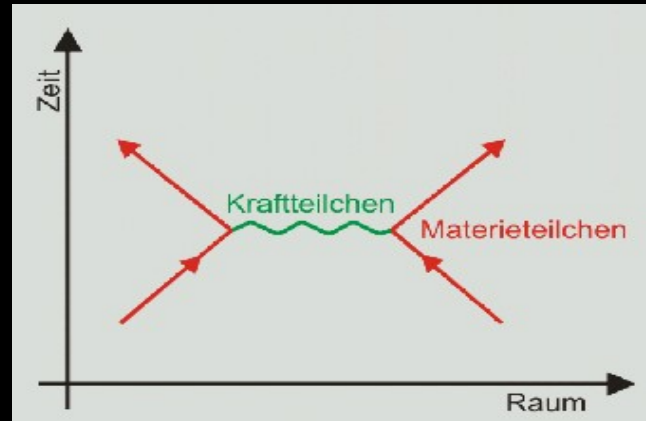
Starke (Kern-)Kraft

hält Kerne und
Quarks zusammen



W – & Z – Bosonen Schwache (Kern-)Kraft

Kern-Zerfälle und -Fusion



Graviton

Gravitation

Keine Quanten-
Theorie der
Schwerkraft

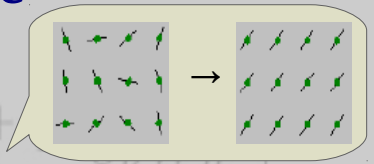
Das Standard-Modell der Teilchenphysik

konsistente theoretische Beschreibung der fundamentalen Teilchen und der Kräfte zwischen ihnen **AUSNAHME: Gravitation !**

beruht auf grundlegenden Symmetrien – elegant und schön !

Grundlagen in den frühen 70er Jahren – und bis heute
alle Präzisionstests bestanden !

Teilchenmassen durch spontane Symmetriebrechung
„Higgs-Mechanismus“



zugehöriges „Higgs-Teilchen“ bisher nicht beobachtet !

viele weitere offene Fragen (Gravitation, dunkle Materie & Energie, ...)
erfordern allerdings auch

„neue Physik“ jenseits des Standardmodells

(nicht Thema dieser Vorlesungen ...)

Offene Fragen für den LHC

Woraus besteht das Universum ?

QCD

Was geschah beim Urknall ?

W' ?

$\tilde{q}, \tilde{\ell}$

Woraus besteht die „Dunkle Materie“?

LSP?

Gibt es Super-Symmetrie?

Woher kommt die Masse?

Top

Z

Warum gibt es überhaupt (noch) Materie?

W

Woraus haben sich Protonen gebildet ?

?

B_s

Was ist „Dunkle Energie“?

t' ?

? Ursprung der Teilchenmassen ?

Warum ist die Ruhemasse so wichtig ?

Elektron ($m_e = 511 \text{ KeV}/c^2$)

$$m_e = 0$$

→ **keine Atome**

$$m_e = 20 \text{ KeV}/c^2$$

→ Atome viel größer, Menschen ~45 m groß

$$m_e = 1500 \text{ KeV}/c^2$$

→ Prozess $p + e^- \rightarrow n + \nu$ möglich, **d.h. kein Wasserstoff**



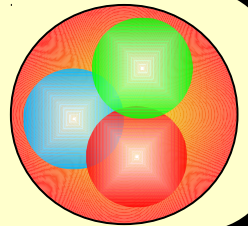
Quarks

$$m_q = 0$$

→ Proton-Zerfall möglich, **kein Wasserstoff**

oder d leichter als u

ganz anderes Universum !



W-Boson ($m_W = 80,4 \text{ GeV}/c^2$)

$$m_W = 0$$

→ Atome haben schwache Ladung & stoßen sich ab,

d.h. keine kondensierte Materie

$$m_W \text{ klein}$$

→ Fusionsrate in Sternen viel schneller, unsere Sonne wäre kälter und längst erloschen

kein höheres Leben auf der Erde



Die ursprünglichen Ideen

F. Englert and R. Brout,

Broken symmetry and the mass of gauge vector mesons,
Phys. Rev. Lett. 13 (1964) 321-323.

P. W. Higgs,

Broken symmetries, massless particles and gauge fields,
Phys. Lett. 12 (1964) 132-133.

P. W. Higgs,

Broken symmetries and the masses of gauge bosons,
Phys. Rev. Lett. 13 (1964) 508-509.

G. Guralnik, C. Hagen, and T. Kibble,

Global conservation laws and massless particles,
Phys. Rev. Lett. 13 (1964) 585-587.

P. W. Higgs,

Spontaneous symmetry breakdown without massless bosons,
Phys. Rev. 145 (1966) 1156-1163.

T. Kibble,

Symmetry breaking in non-Abelian gauge theories,
Phys. Rev. 155 (1967) 1554-1561.

1967: „Higgs-Mechanismus“

als Teil des „Glashow-Salam-Weinberg-Modells“

Teilchenmassen im Standard-Modell

Standardmodell basiert auf „lokaler Eichsymmetrie“

Elektrodynamik vollständig aus diesem Postulat herleitbar

→ Modell für schwache und starke Wechselwirkungen

vereinfacht:

Elektrodynamik: elektrische Ladung

schwache WW: zwei schwache Ladungen (schwacher Isospin $\uparrow \downarrow$)

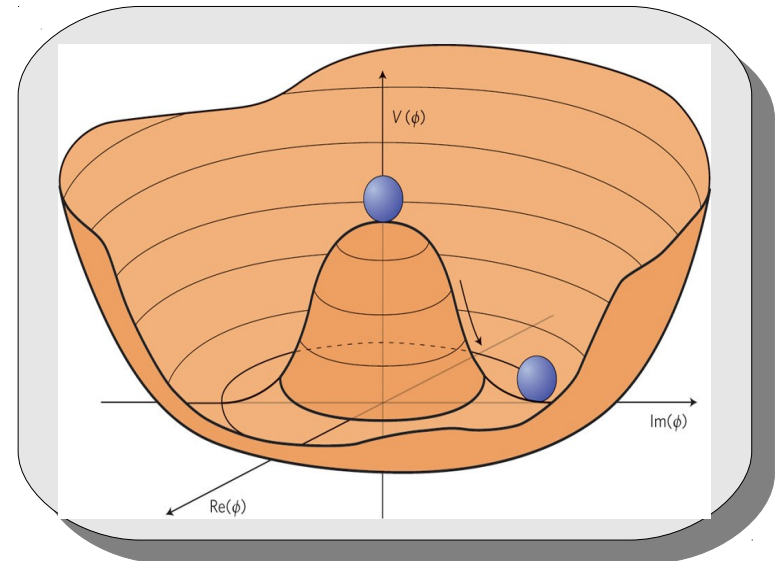
starke WW: drei (Farb-) Ladungen (r g b)

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

Problem:

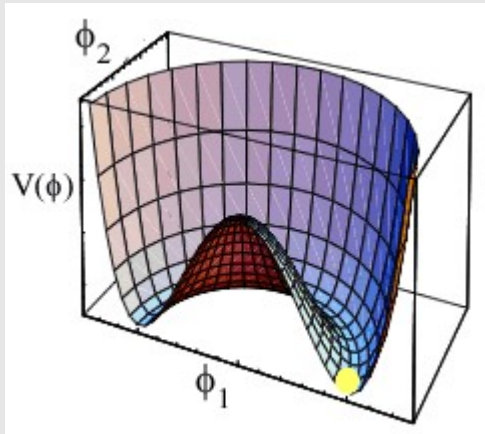
Austauschteilchen der schwachen WW haben Masse, kann nicht „von Hand“ eingebaut werden, da Eichsymmetrie zerstört würde

theoretische Abhilfe: Einführung eines skalaren, (komplexwertigen) Feldes, dessen Grundzustand die Symmetrie bricht – „Higgs Potential“



Masse im Standardmodell - Der Higgs-Mechanismus

Einführung eines skalaren SU(2)-Doublets mit symmetriebrechendem Potential



- drei davon entsprechen masselosen Anregungen, führen dank $U(1) \times SU(2)$ – Eichinvarianz zu **Massentermen für W^+ , W^- und Z**
- vierter Freiheitsgrad bedingt neues, massives Teilchen, das **Higgs-Boson**

Massen der Fermionen können ebenfalls über die Wechselwirkung mit dem Higgs-Feld erzeugt werden.



Wechselwirkungen mit dem „Higgs-Feld“
„erzeugen“ Teilchenmasse

Anregungen des Higgs-Feldes manifestieren
sich als Higgs-Teilchen

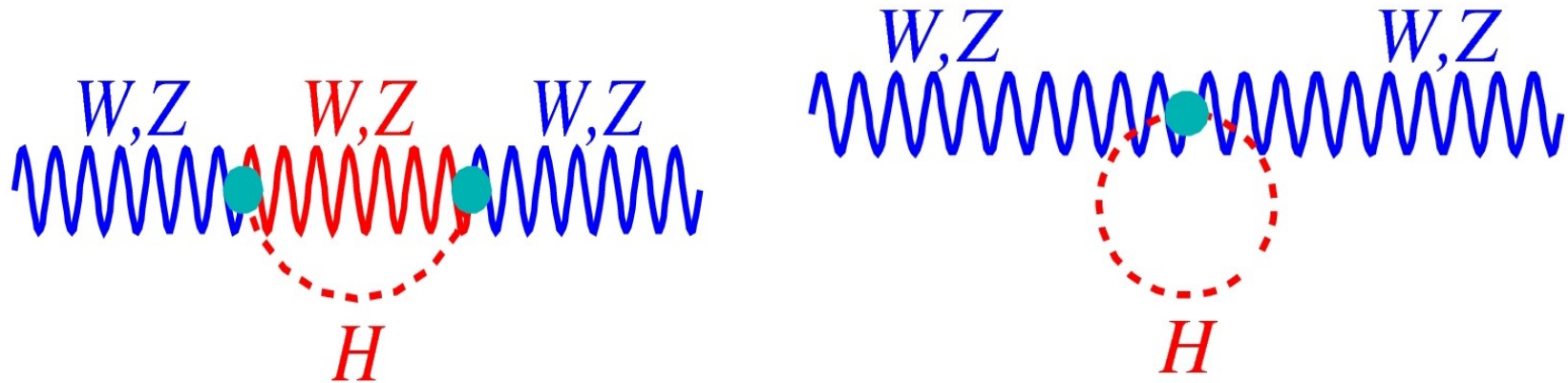
Higgs-Boson kann in Teilchenkollisionen
erzeugt und durch seine Zerfälle
nachgewiesen werden



Higgs im Standardmodell

Im Standardmodell wissen wir „alles“ über das Higgs, **außer seiner Masse**, d.h. Kopplungen an Eichbosonen und Fermionen liegen fest.

In Schleifendiagrammen beeinflusst das Higgs-Boson alle übrigen Prozesse



Observable hängen von Kopplungen, Fermion-Massen und der Higgs-Masse ab:

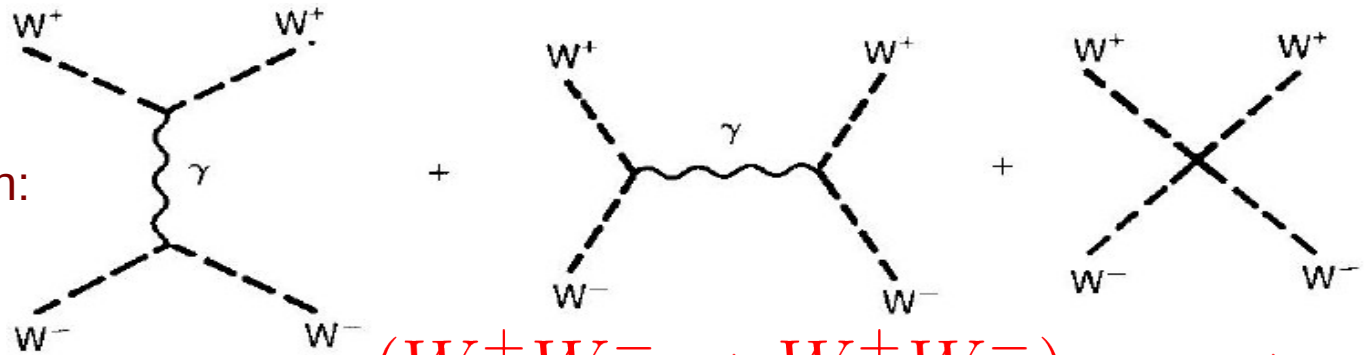
$$O = O(\alpha_{em}, G_F, M_Z, M_W, M_H, M_{\text{top}}, m_{f_i}, V_{CKM})$$

Wenn alles andere bekannt ist, geben Präzisionsmessungen Informationen über die **Higgs-Masse** (im Detail ein anderer Vortrag ...)

Higgs im Standardmodell

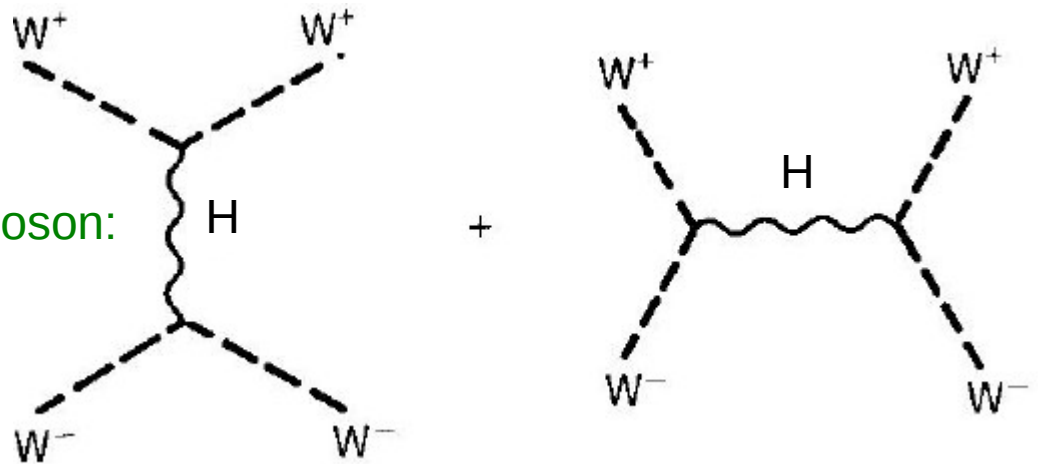
Higgs-Boson verhindert Divergenzen in der Theorie

Ohne Higgs-Boson:



$$\sigma(W^+W^- \rightarrow W^+W^-) \propto s \rightarrow \infty$$

zusätzliche Diagramme mit Higgs-Boson:



Wirkungsquerschnitt für WW -Streuung bleibt endlich

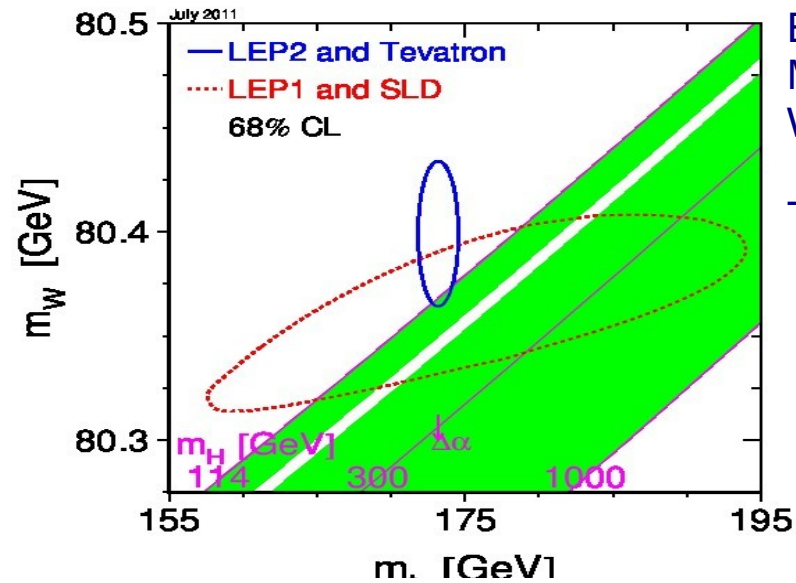
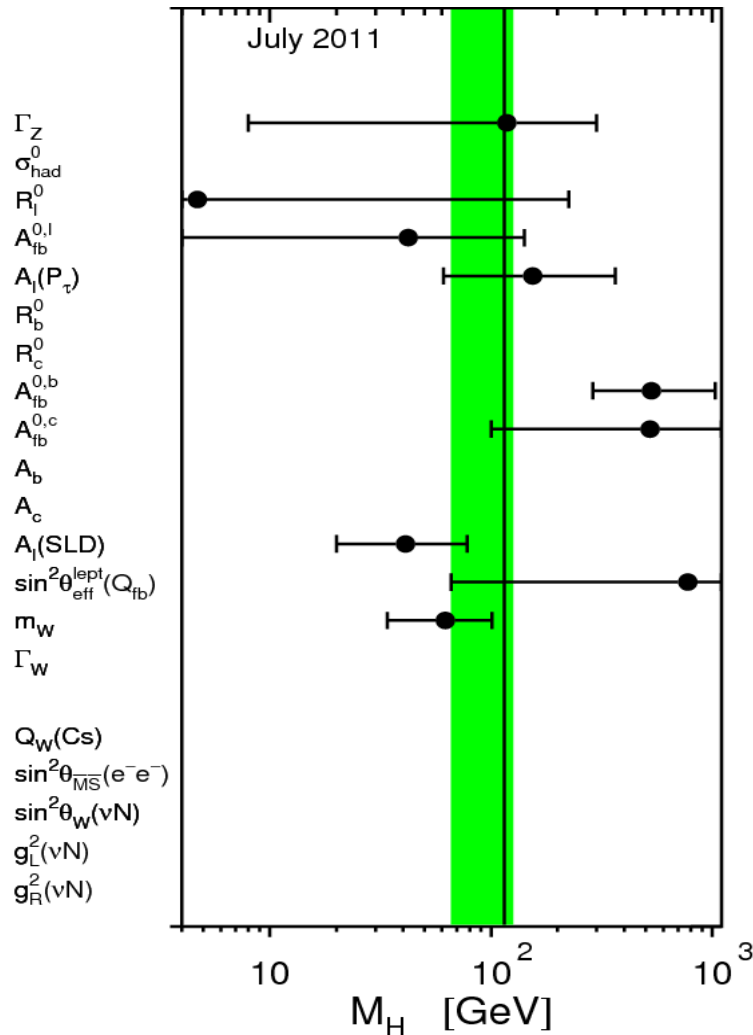
Higgs-Boson darf nicht zu schwer sein: $< \text{ca. } 1 \text{ TeV}/c^2$

Experimentelle Resultate vor dem LHC

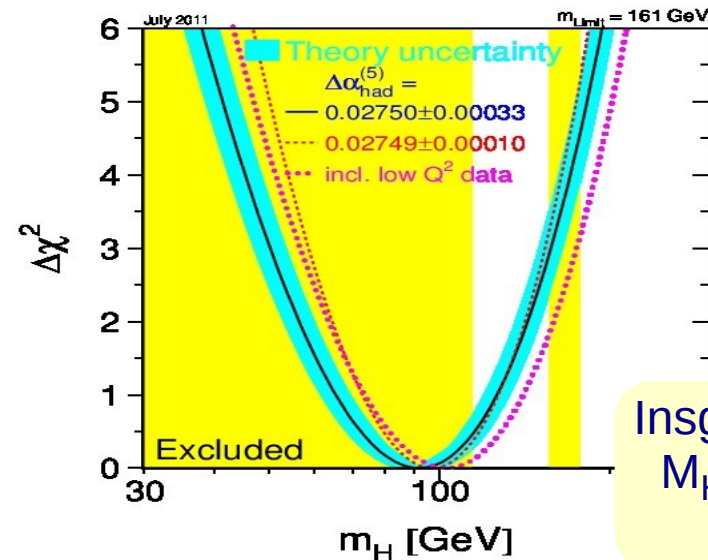
Bekanntes zum Higgs

(wenn das SM richtig ist !)

Präzisionsmessungen schränken
erlaubten Bereich für M_H ein:



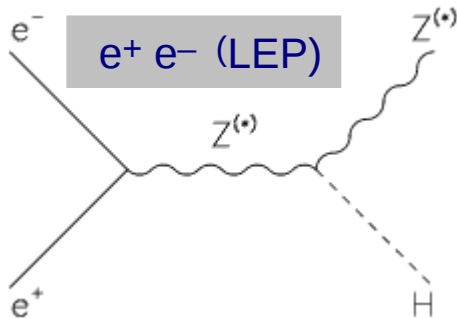
Beispiel:
Massen
W-Boson
&
TopQuark



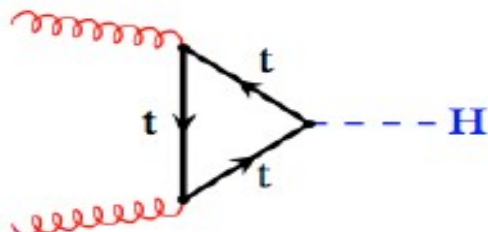
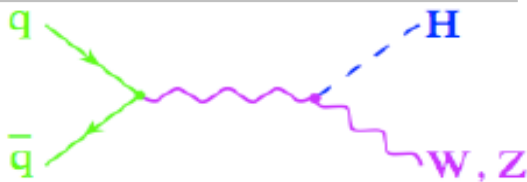
Insgesamt:
 $M_H < 161 \text{ GeV}/c^2$
(95% CL)

Direkte Suche nach dem Higgs-Boson

Higgs-Produktionsmechanismen:



relevant for $p\bar{p}$ (Tevatron)



dominant in $p\bar{p}$ (Tevatron)
and pp (LHC)

Higgs-Zerfall in schwerstmögliche Teilchen, abhängig von M_H :

- leichtes Higgs: $bb, \tau^+\tau^-$
- mittelschweres Higgs: W^+W^-, ZZ
- sehr schweres Higgs: tt, W^+W^-, ZZ

danach kann man suchen!

Allerdings:

alle diese Prozesse auch auf
andere Art, ohne Higgs, möglich

→ Suche nach Higgs-artigen Signaturen
bei **großem Untergrund** !

1990 - 2000 : Direkte Higgs-Suche bei LEP

Kanäle: $e^+e^- \rightarrow ZH$, $H \rightarrow b\bar{b}$

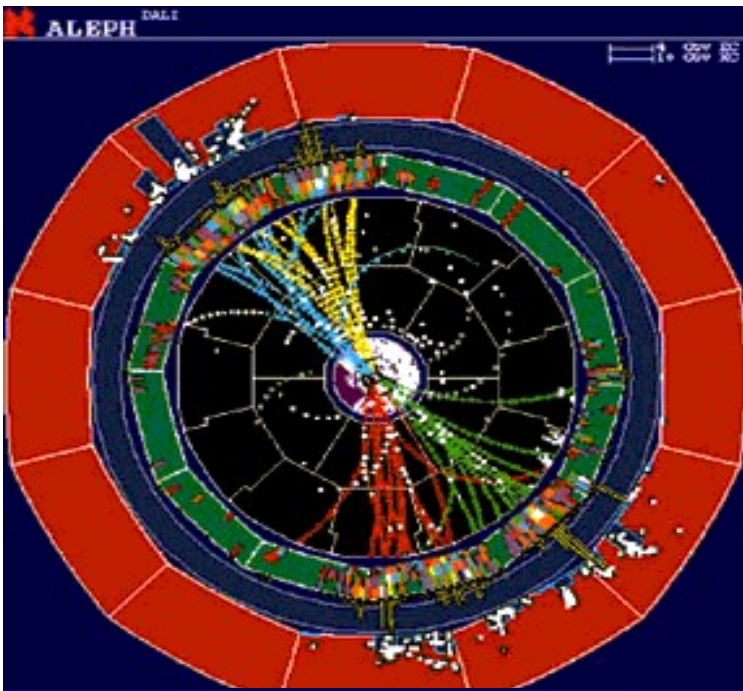
Signaturen:

$b\bar{b}q\bar{q}$ ($\sim 64\%$)

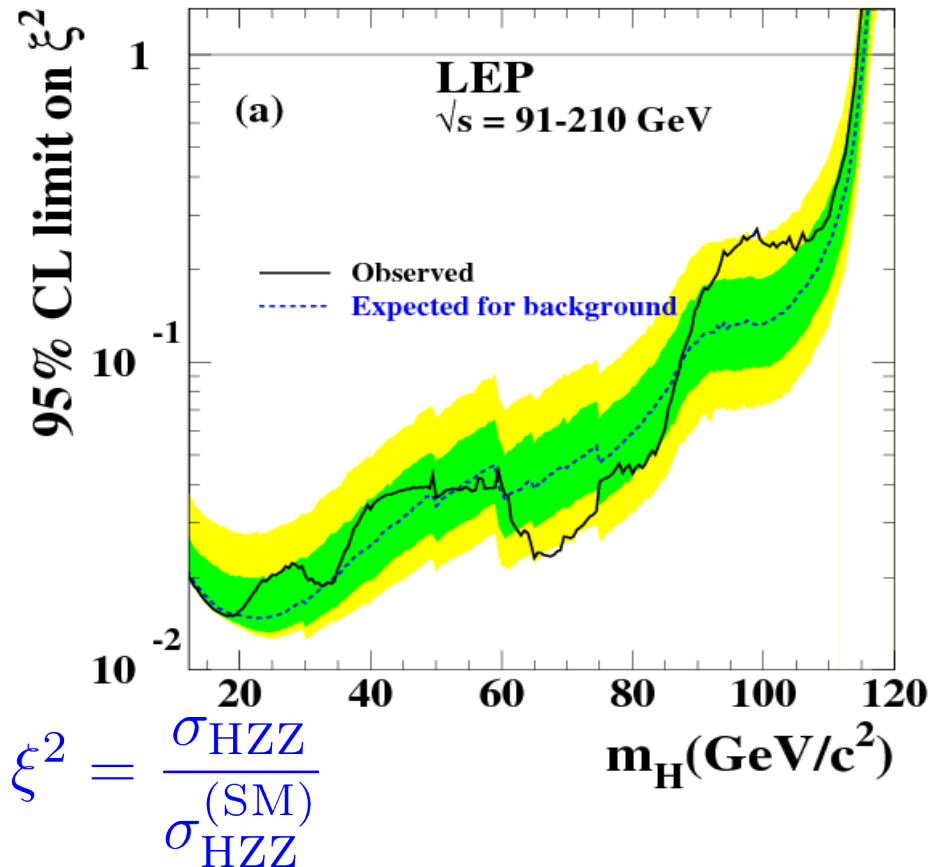
$H\nu\bar{\nu}$ ($\sim 20\%$)

$H\ell^+\ell^-$ (i.e. e^+e^- , $\mu^+\mu^-$) ($\sim 7\%$)

$H\tau^+\tau^-$, $\tau^+\tau^-q\bar{q}$ ($\sim 9\%$)



Higgs-Kandidat bei LEP (ALPEH)
mit 4 Jets, 2 davon als b-Jets identifiziert



Ausschluss

erwartet: $M_H > 115.3\text{ GeV}/c^2$

beobachtet: $M_H > 114.4\text{ GeV}/c^2$

Aleph, Dephi, L3, OPAL, Daten bis 2000, publ. 25.4.2003

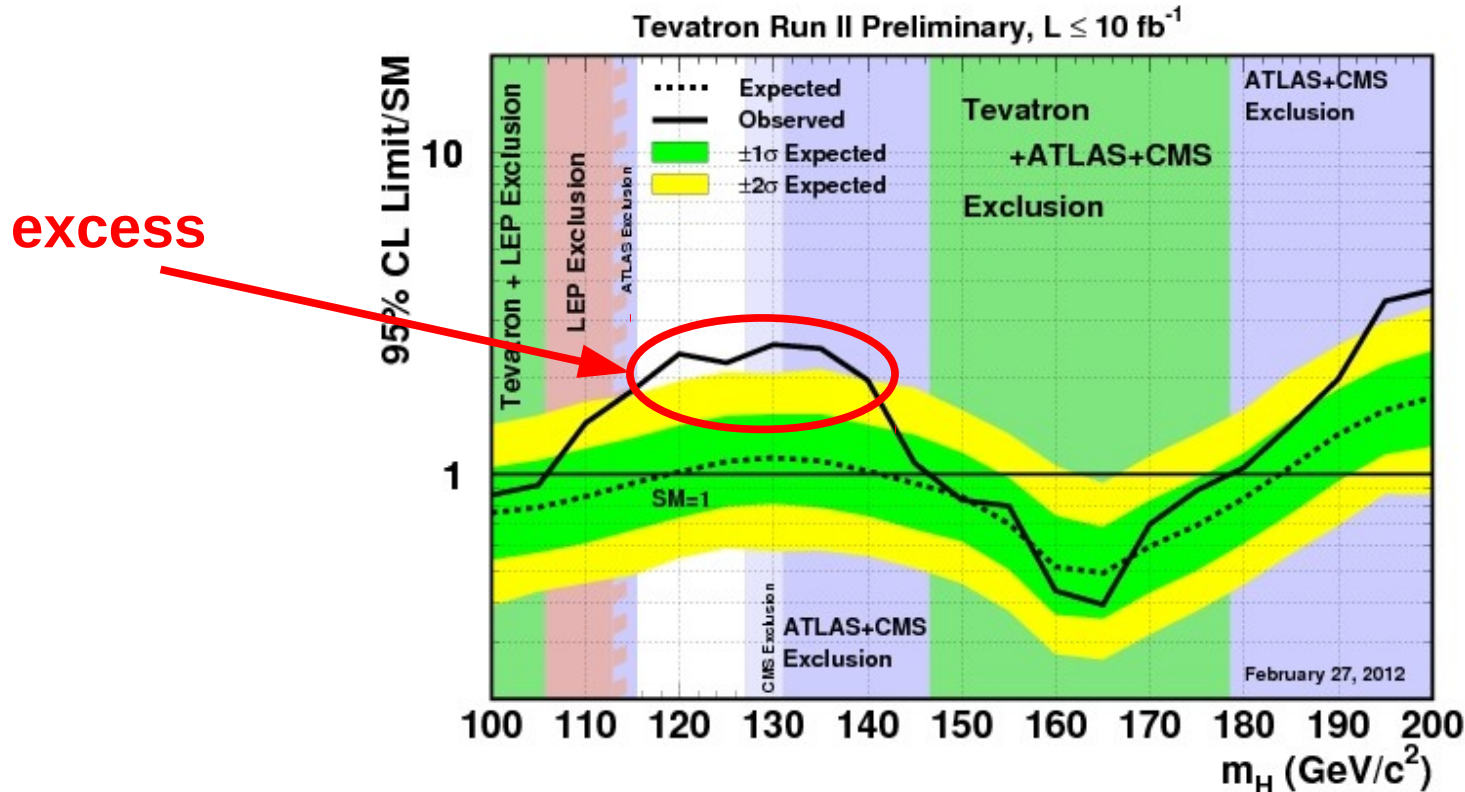
2000-2011: Higgs-Suche in pp-Kollisionen am Tevatron

dominanter Produktionskanal: $pp \rightarrow W, Z + H$ (Gluon-Fusion & VBF berücksichtigt)

dominante Zerfallskanäle: $M_H < 135 \text{ GeV}/c^2$: $H \rightarrow b\bar{b}$ (auch $\tau^+\tau^-$, $\gamma\gamma$)

$M_H > 135 \text{ GeV}/c^2$: $H \rightarrow W^+W^-$ (auch ZZ)

Winter 2012 Kombination (bis zum 10 fb^{-1})



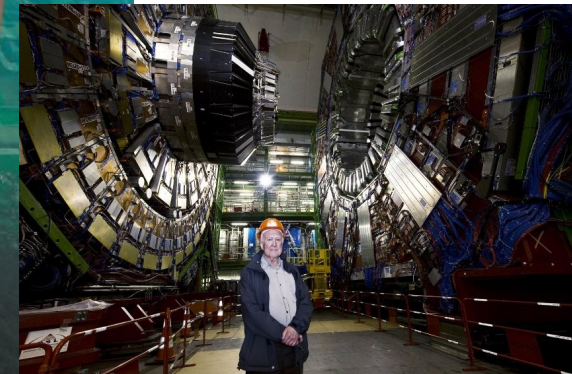
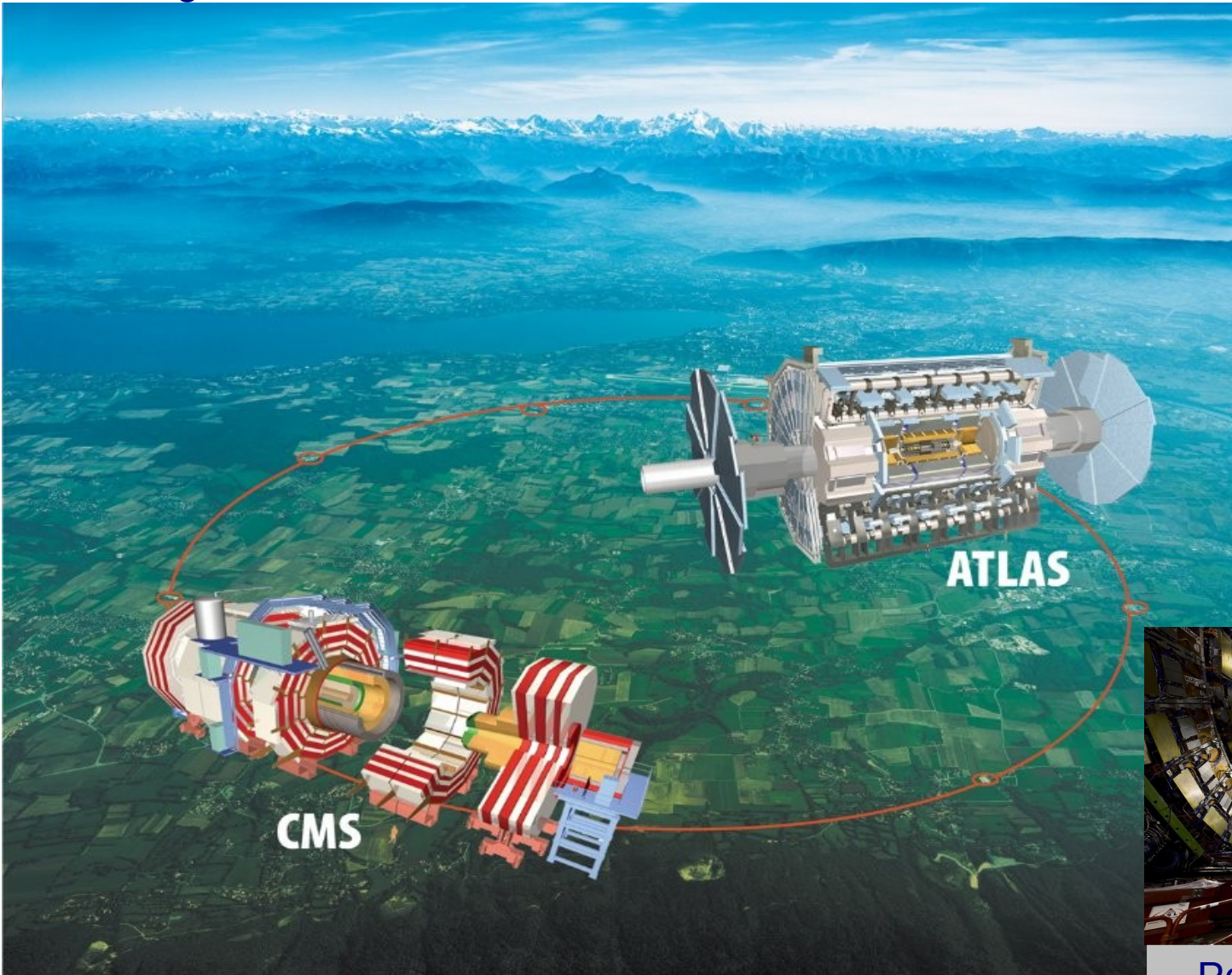
Erwartet : $100 < M_H < 119 \text{ GeV}/c^2$ und $141 < M_H < 184 \text{ GeV}/c^2$

Beobachtet : $100 < M_H < 106 \text{ GeV}/c^2$ und $147 < M_H < 179 \text{ GeV}/c^2$

Der Large Hadron Collider (LHC) und die Experimente

Der Large Hadron Collider (LHC) und die Experimente

LHC-Ring bei Genf mit den Universaldetektoren ATLAS und CMS



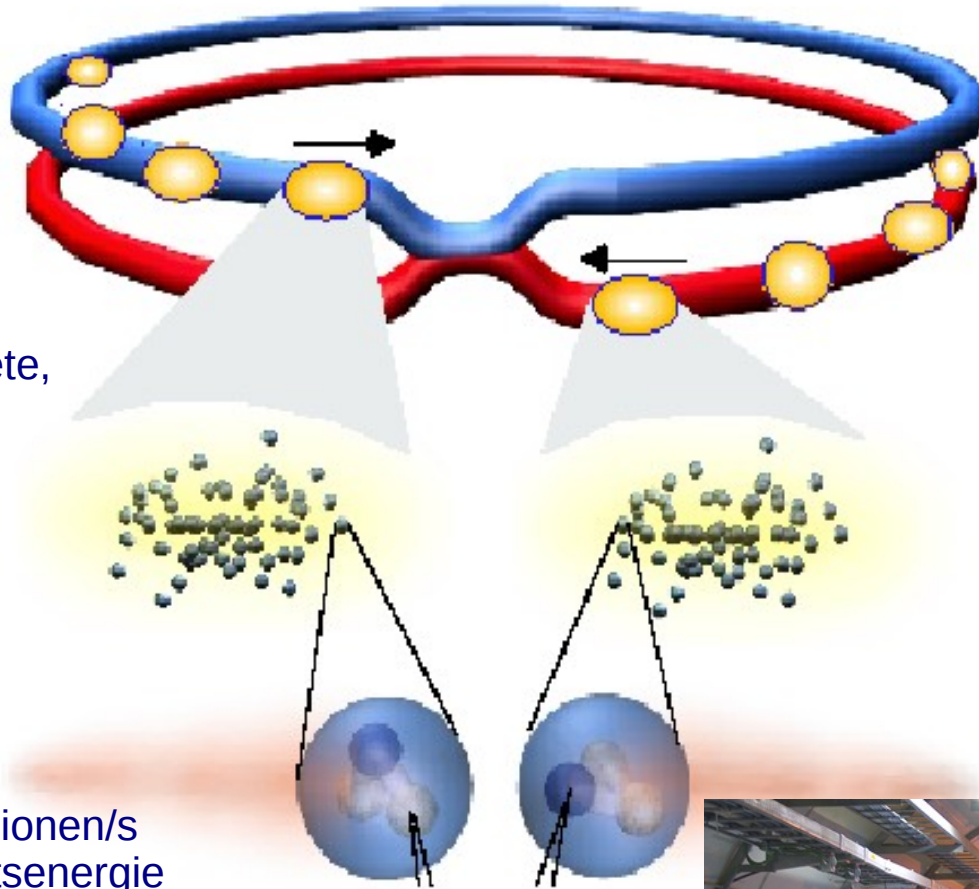
Peter Higgs @ CMS

Der LHC

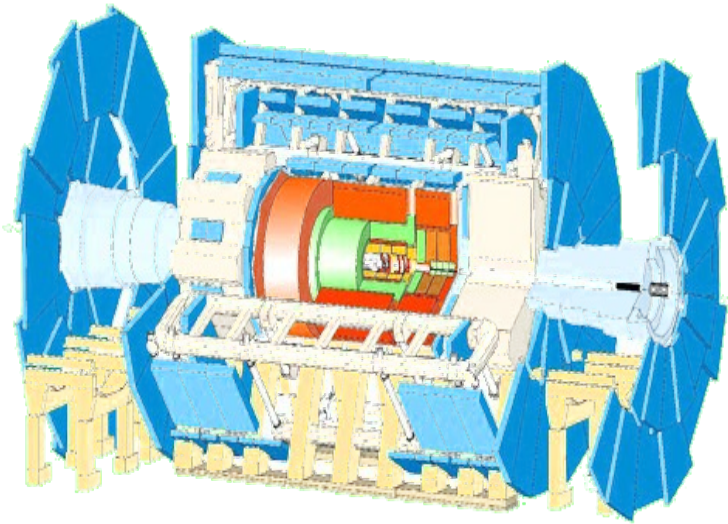
2 Ringe mit insg. 1232
supraleitenden Dipolen
und 858 Quadrupolen,
26,7 km Umfang

max. 2808 Proton-Pakete,
40 MHz Kollisionsrate,
 $\sim 10^{11}$ Protonen/Paket,

~ 500 Millionen pp-Kollisionen/s
bei 7 TeV Schwerpunktsenergie



Kurzer Steckbrief ATLAS



People

3000 Wissenschaftler (davon ca. 1000 Doktoranden) aus 38 Ländern (174 Institutionen)

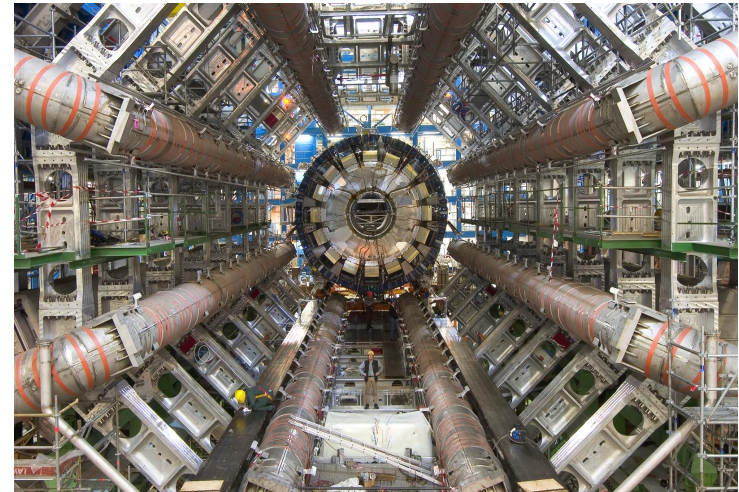
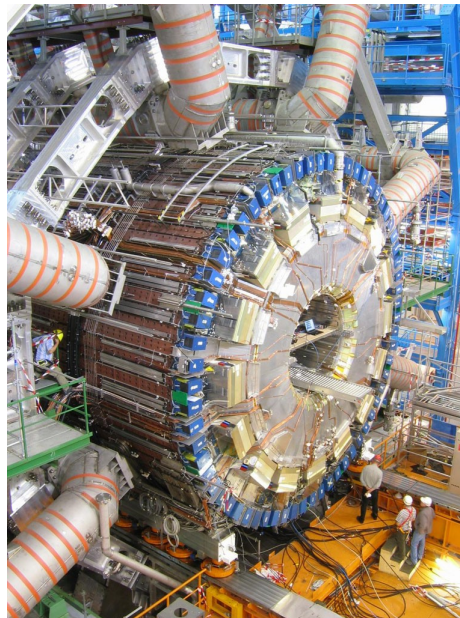
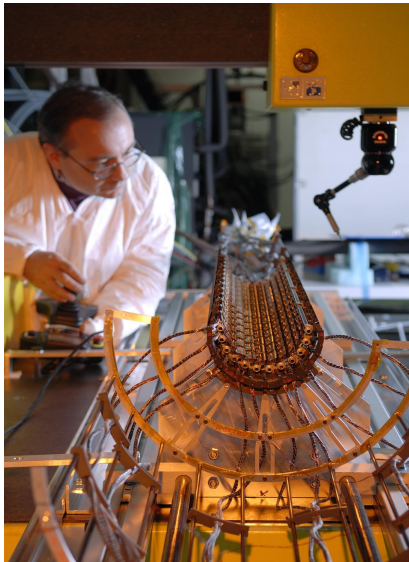
Detektor:

Vielzweckdetektor,
Durchmesser 25 m, Länge 46 m, Gewicht 7000 t

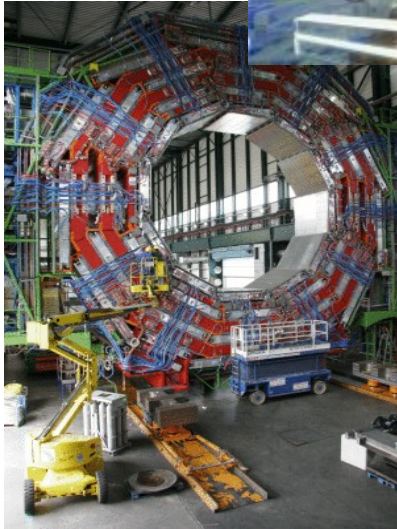
Wichtige Eigenschaften:

- Innendetektor Pixel, Si-Streifen, TRT
- Flüssig-Argon-Kalorimeter
- supraleitender Solenoid-Magnet, 2 T
- aufwändiges Myon-System mit großen Toroidmagneten außen

...



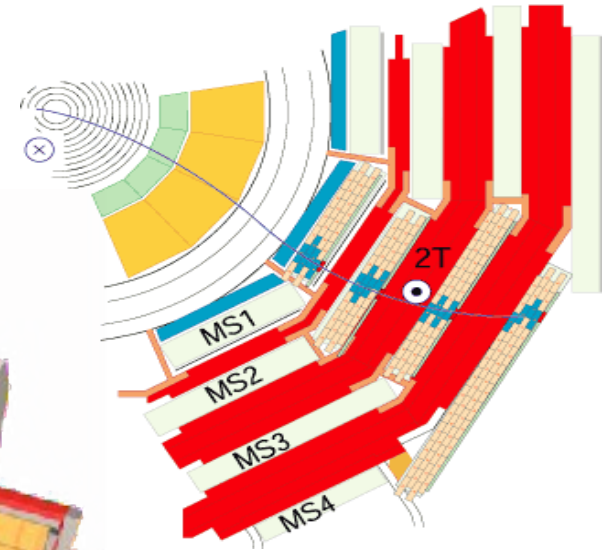
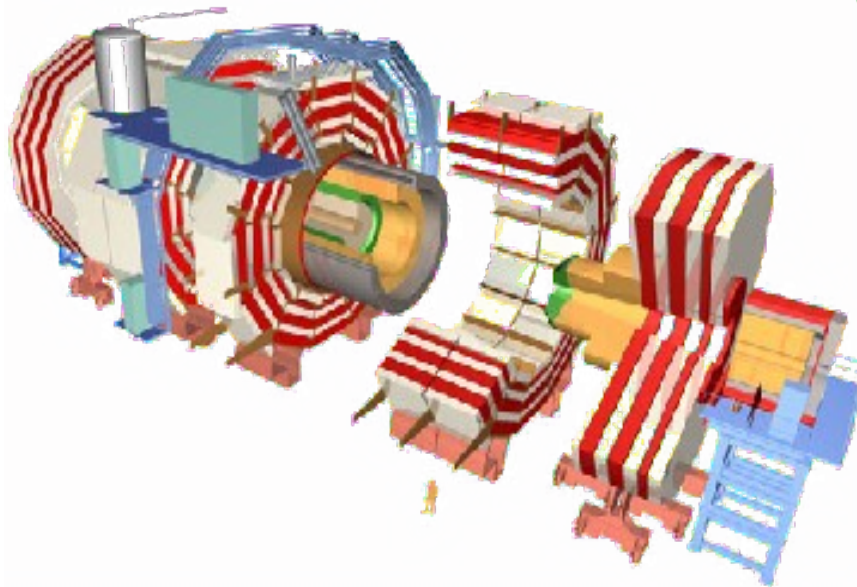
Kurzer Steckbrief CMS



Vielzweckdetektor,
Durchmesser 15 m, Länge 21 m, Gewicht 12500 t

Wichtige Eigenschaften:

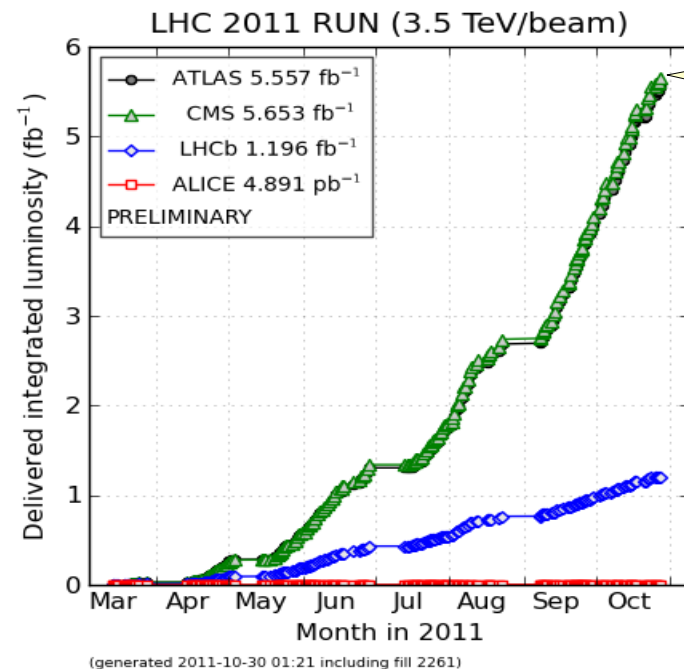
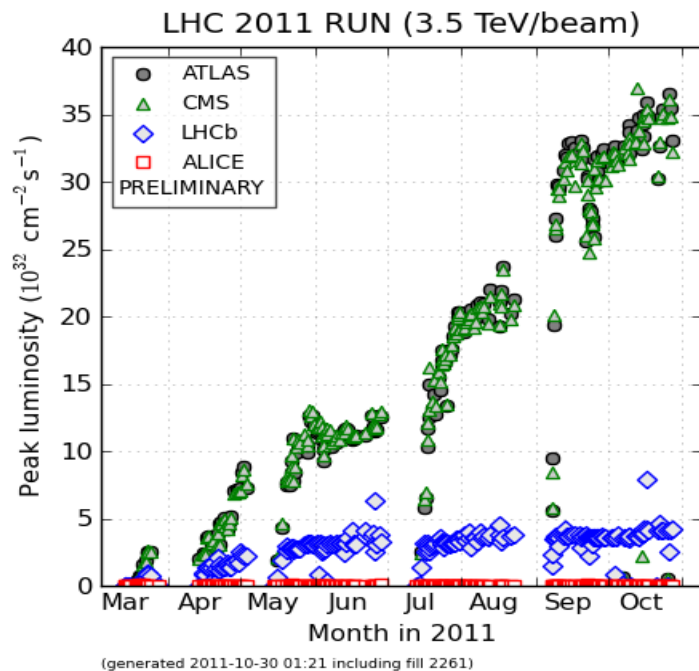
- Innendetektor Pixel, 210m² Si-Streifen
- EM-Kalorimeter 80'000 Kristalle aus Bleiwolframat
- Hadron-Kalorimeter aus Messing-Szintillator
- supraleitender Solenoid-Magnet, 3.8 T
- Myon-System im Magnetjoch



LHC Datennahme 2011

Die Rekorde:

- Spitzenluminosität $3.65 \cdot 10^{33} / \text{cm}^2 / \text{sec}$
 - max. int. Lum. in einer Füllung: 122/pb
 - max. int. Lum. In einer Woche: 584/pb
 - längste Füllung: 26 h
 - beste Woche: 107 h Strahlzeit (64%)
 - kürzester Trun-around: 2h 7min
- insg. 1364 h Strahlzeit 2012



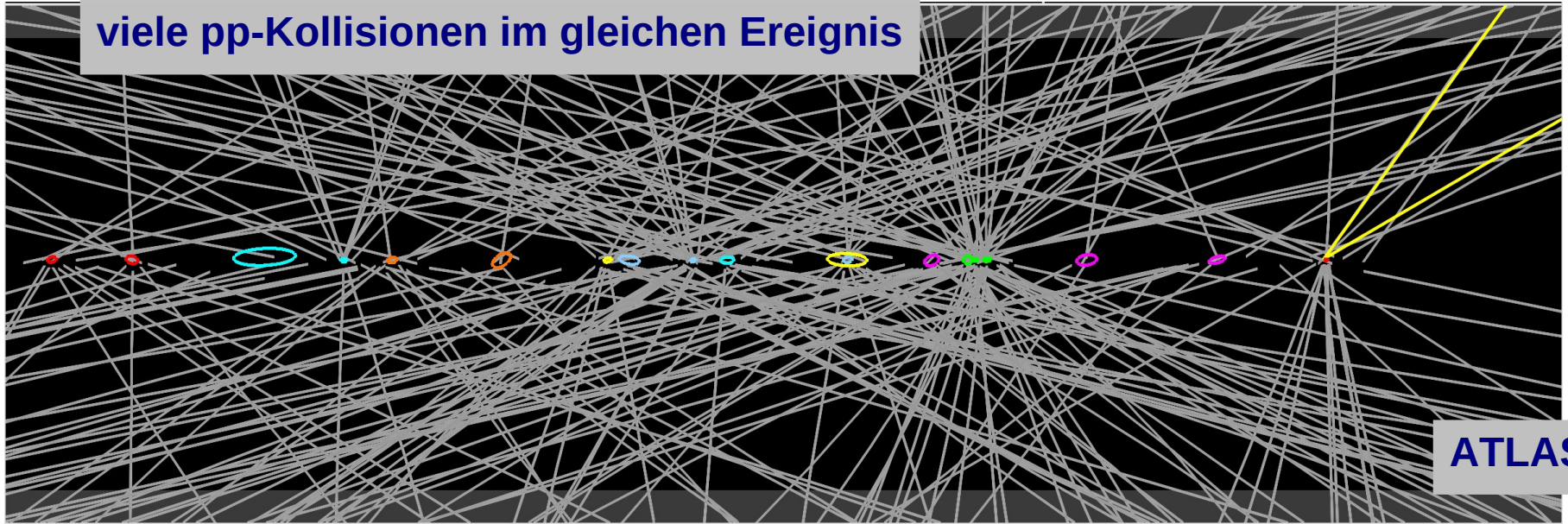
350 Billionen
pp-Kollisionen

Ein phantastisches Jahr -100 mal mehr Daten als im Jahr 2010 !

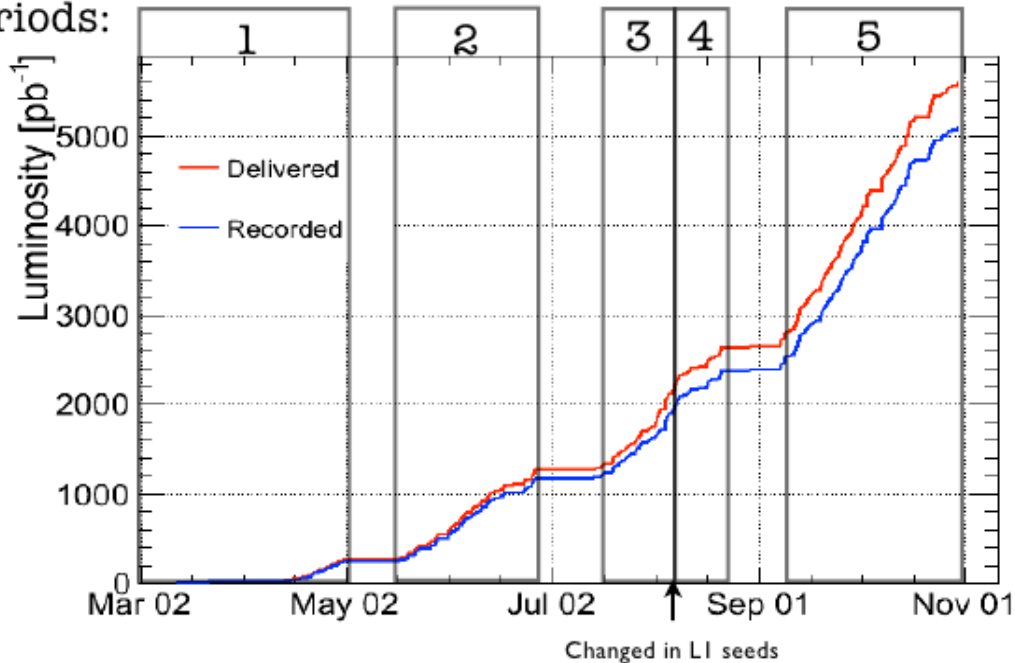
~30'000 TB Daten vom CERN exportiert

Pile-up - eine handhabbare Komplikation

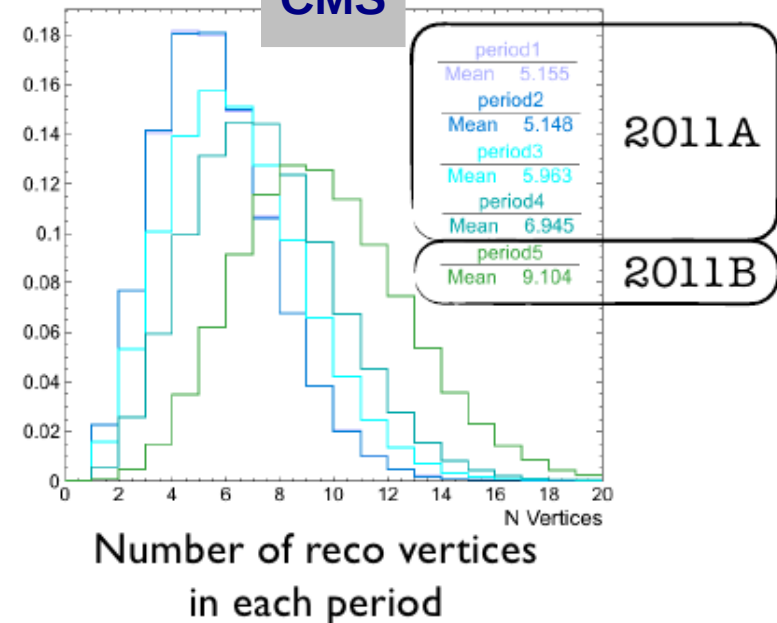
viele pp-Kollisionen im gleichen Ereignis



Periods:

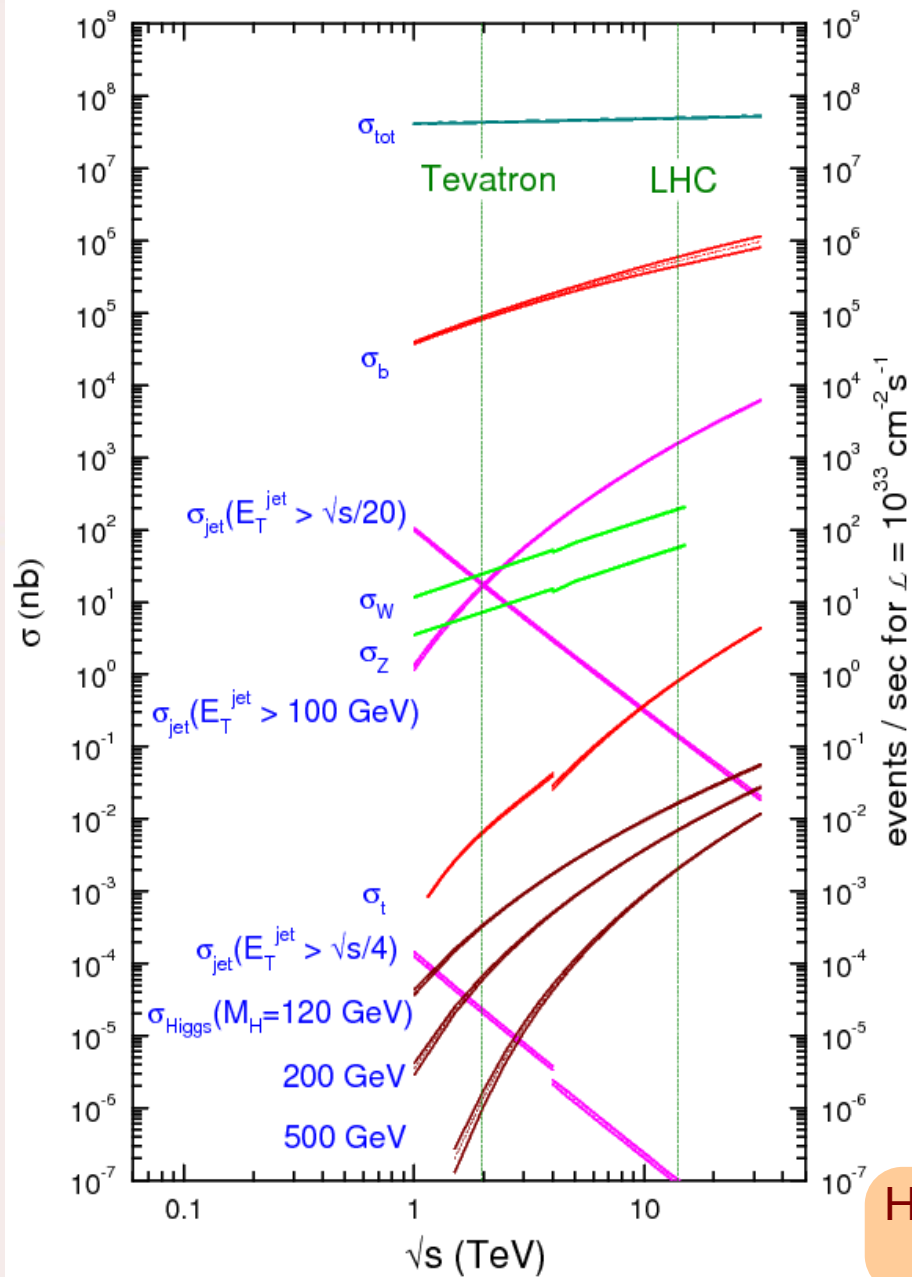
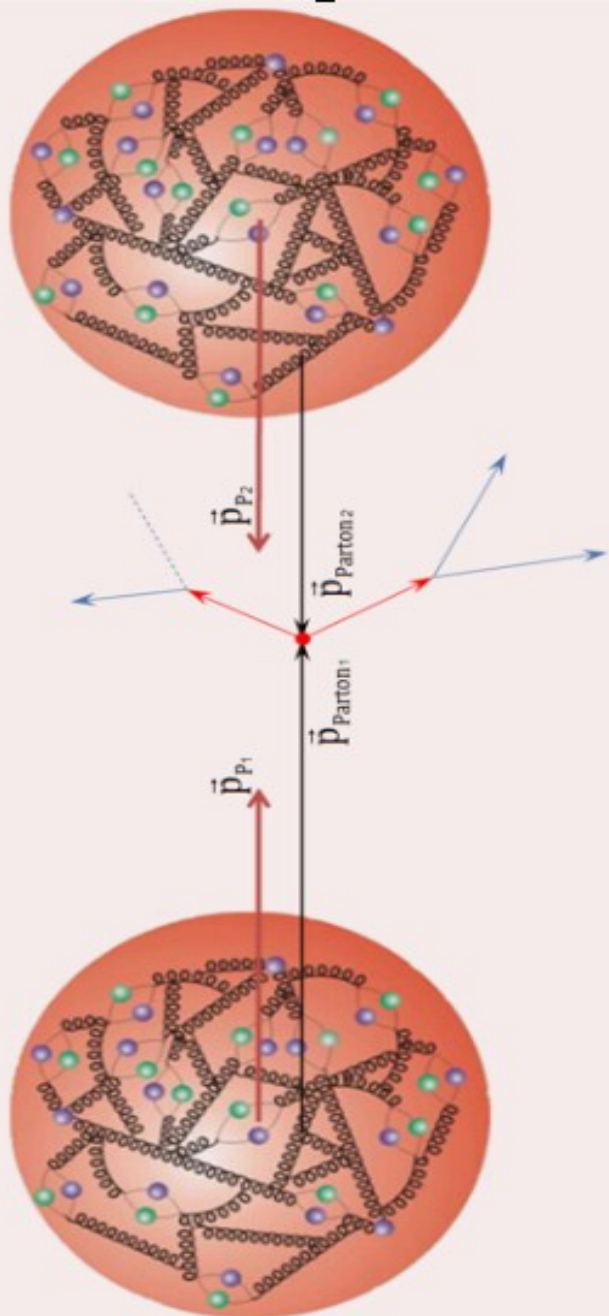


CMS



Higgs-Suche am LHC

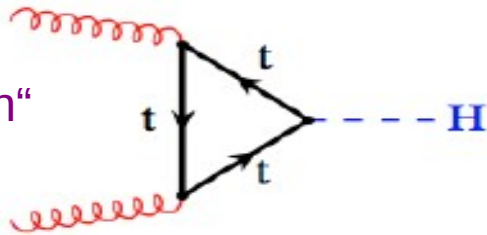
pp- Prozesse im Standardmodell



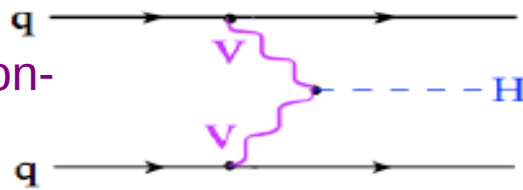
Higgs-Ereignisse
sind **selten** !

Higgs-Produktion am LHC

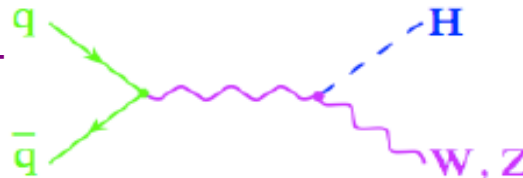
„Gluon-Fusion“



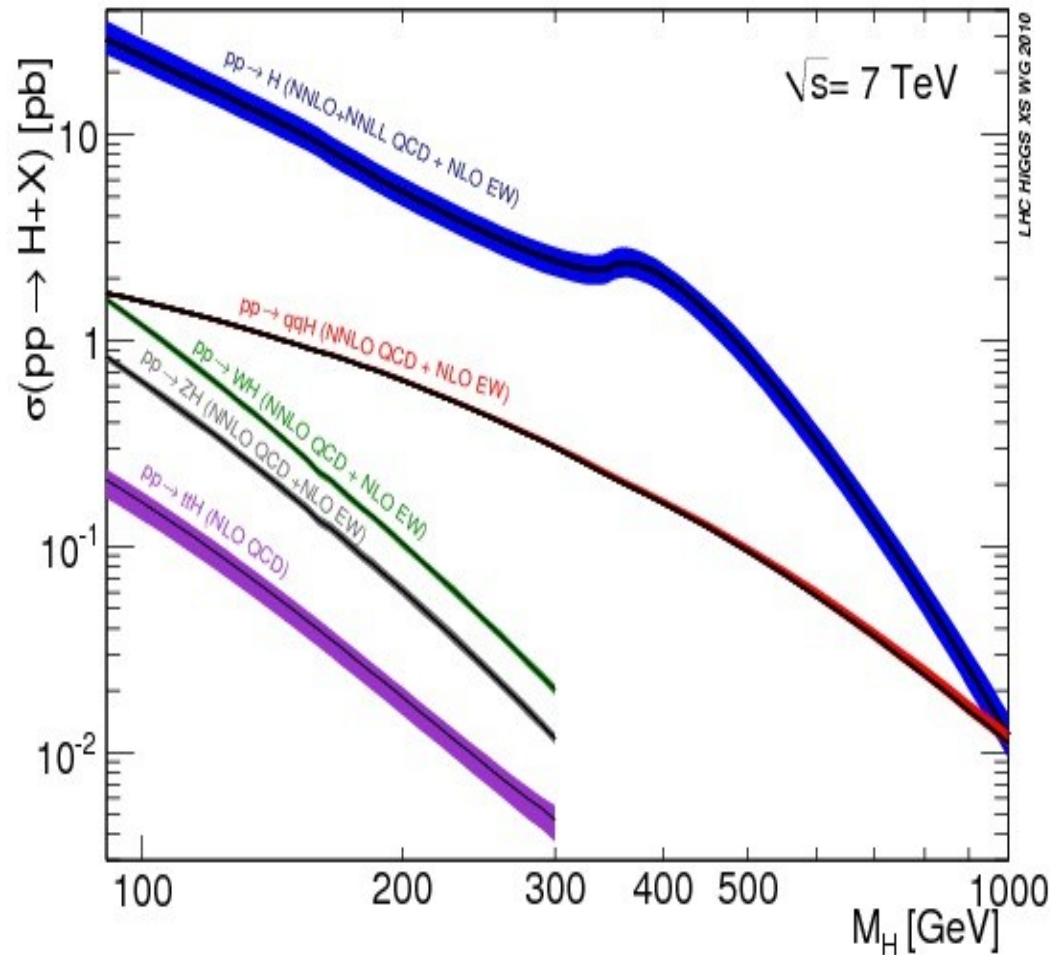
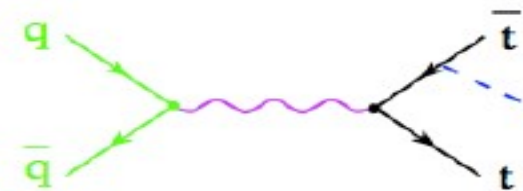
„Vektor-Boson-Fusion“



„Vektorboson-Abstrahlung“



„tt assoziierte Produktion“



Higgs-Zerfälle

Wirkungsquerschnitt * Verzweigungsverhältnis

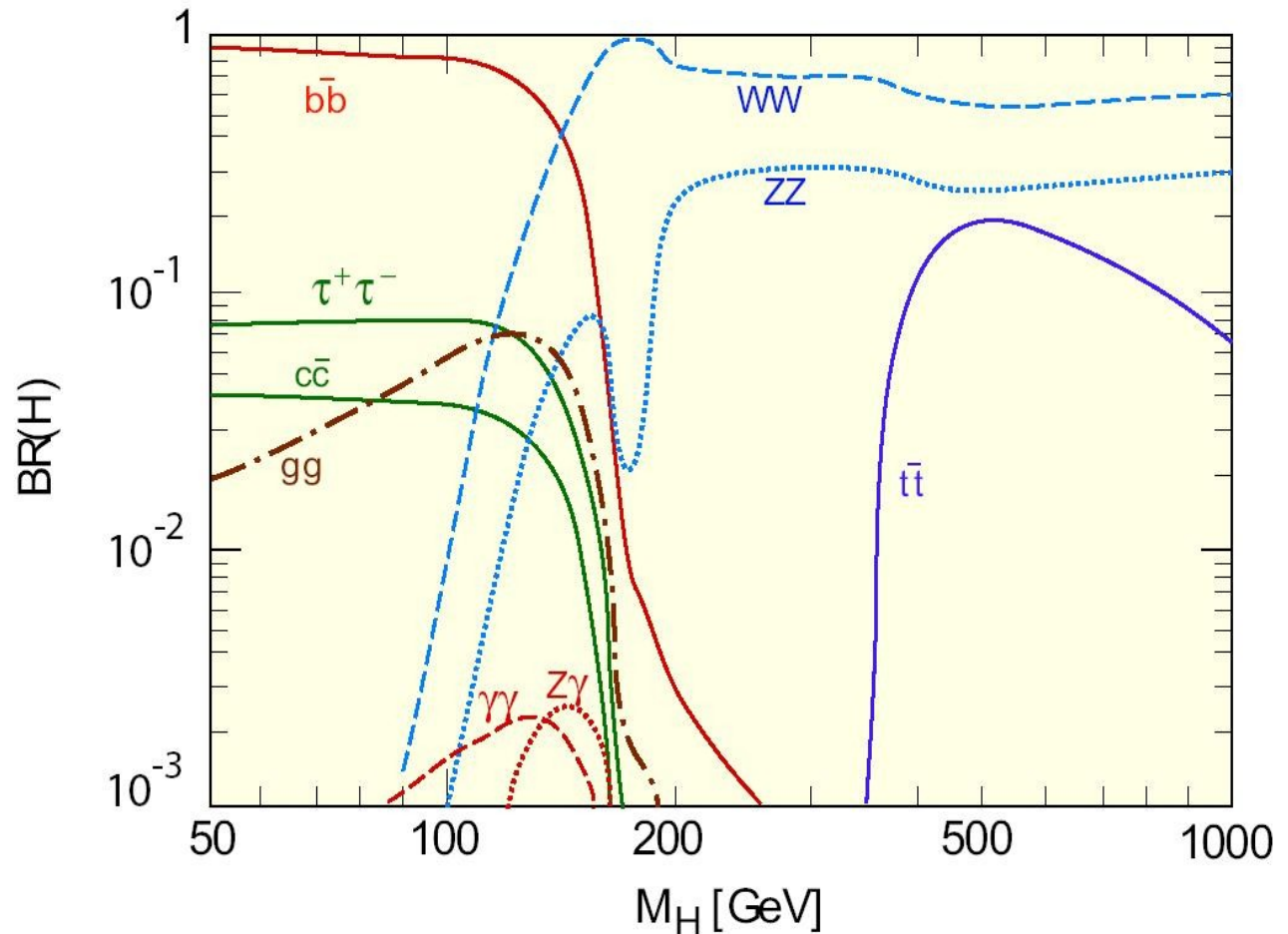
bestimmt Zahl der
Ereignisse im
Detektor

Bei hohen Massen:

- WW
- ZZ
- tt

Bei niedrigen Massen:

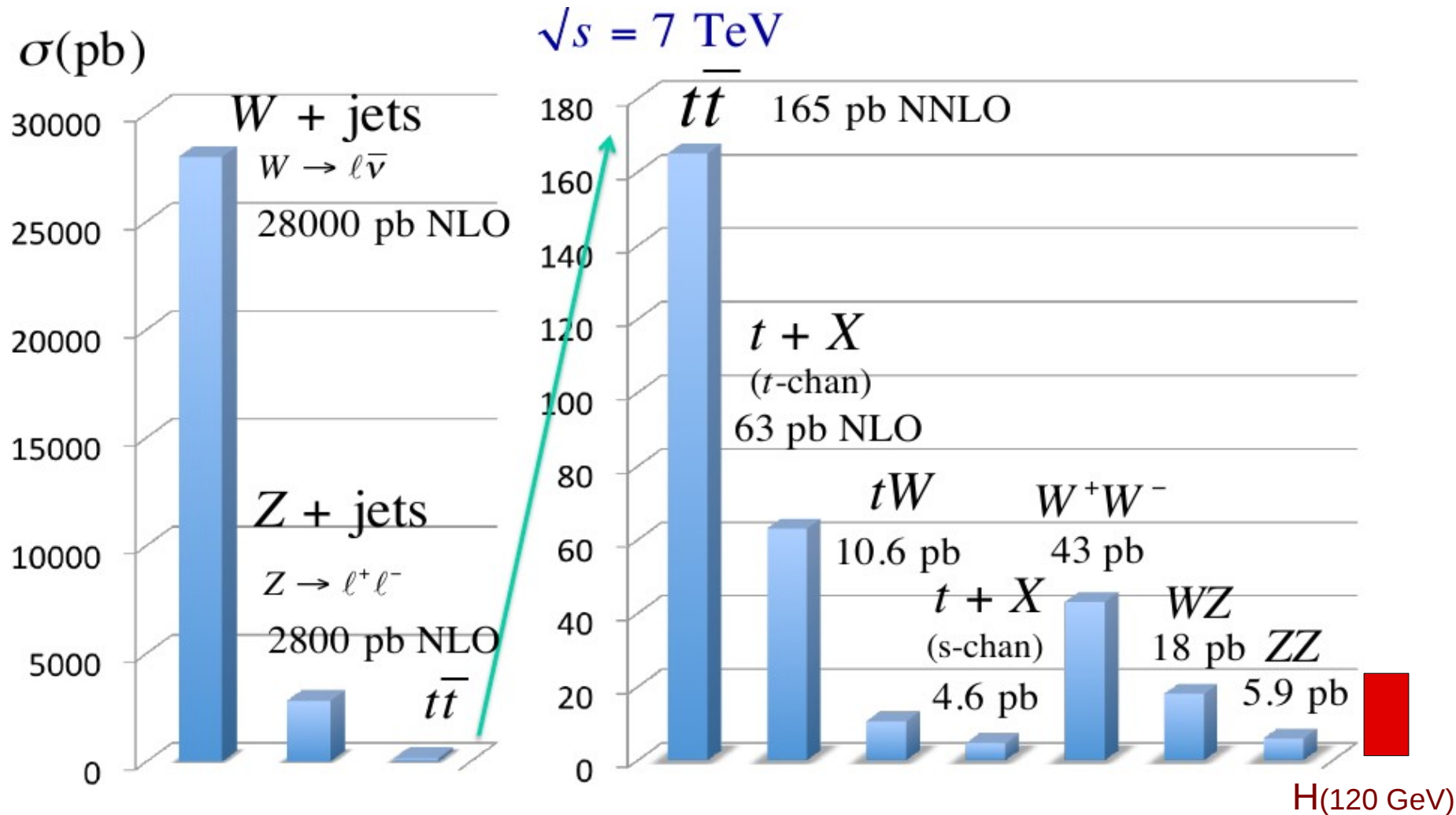
- bb (schwer kanal,
QCD untergrund)
- tau tau
- gamma gamma



dies ist aber noch nicht die ganze Wahrheit . . .

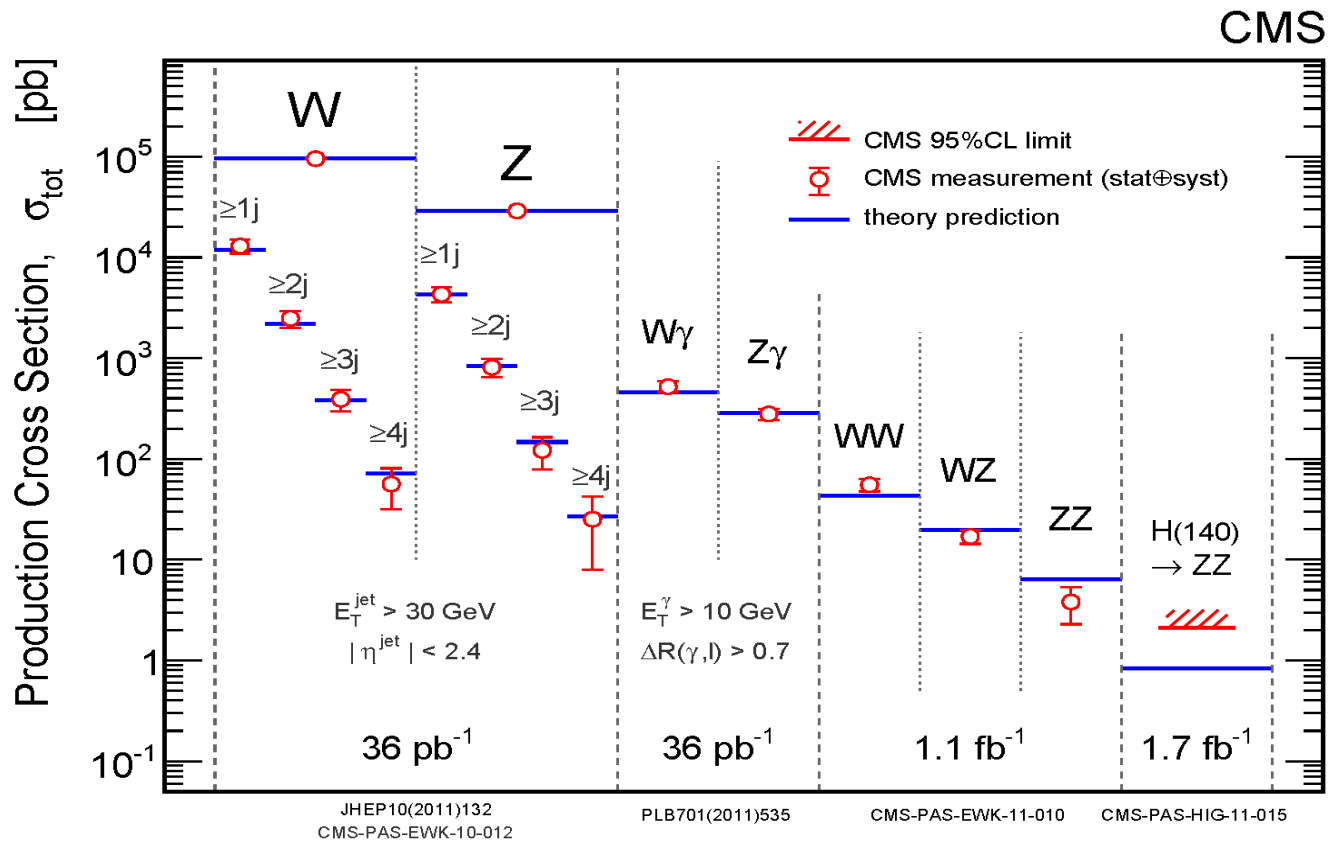
Untergrund zum Higgs

Produktionsrate anderer Prozesse ist z.T. um Zehnerpotenzen größer als die für das Higgs



Higgs-Signal muss vom Untergrund trennbar sein
→ ändert die Bedeutung der einzelnen Zerfallskanäle.

Prozesse im Standard-Modell



~ 30 M $W \rightarrow \mu\nu, e\nu$

~ 3 M $Z \rightarrow \mu\mu, ee$

~ 60000 top-Paar-

Ereignisse selektiert in ~ 5 fb^{-1}

Faktor ~ 2 (W, Z) bis 10 (top)

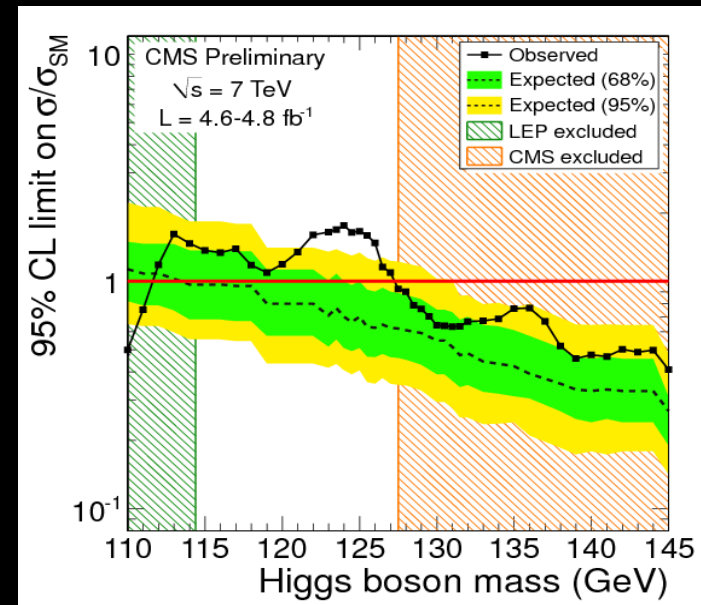
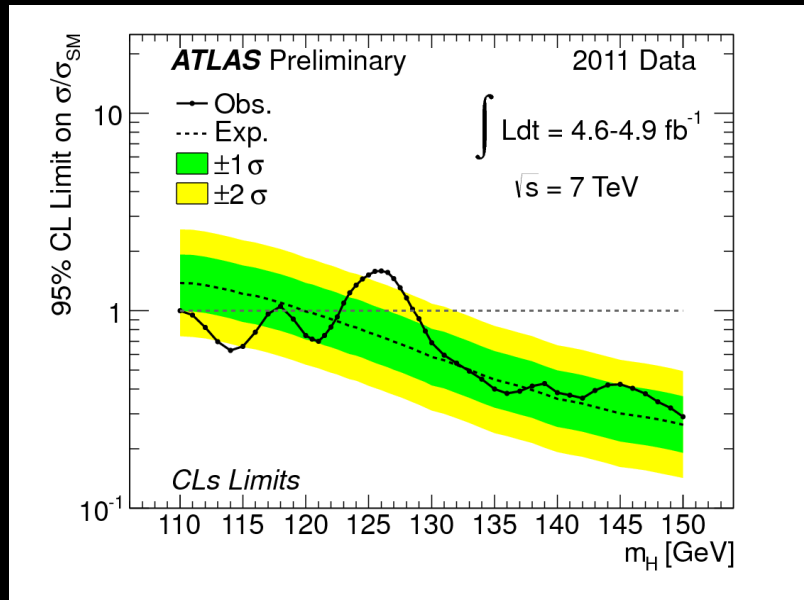
mehr als CDF und D0

**Gute Übereinstimmung mit Erwartungen:
Kennen Untergrund für (Higgs-) Suchen gut !**

Resultate der LHC-Experimente (Kurze Zusammenfassung)

Higgs Search Results from LHC : 2011 Data

Both ATLAS and CMS experiments analyzed $\sim 5 \text{ fb}^{-1}$



Experiments nearly excluded SM Higgs boson in the mass range $128 < m_H < 600 \text{ GeV}/c^2$ at 95% C.L.

expected 95% C.L. exclusion in the absence of SM Higgs

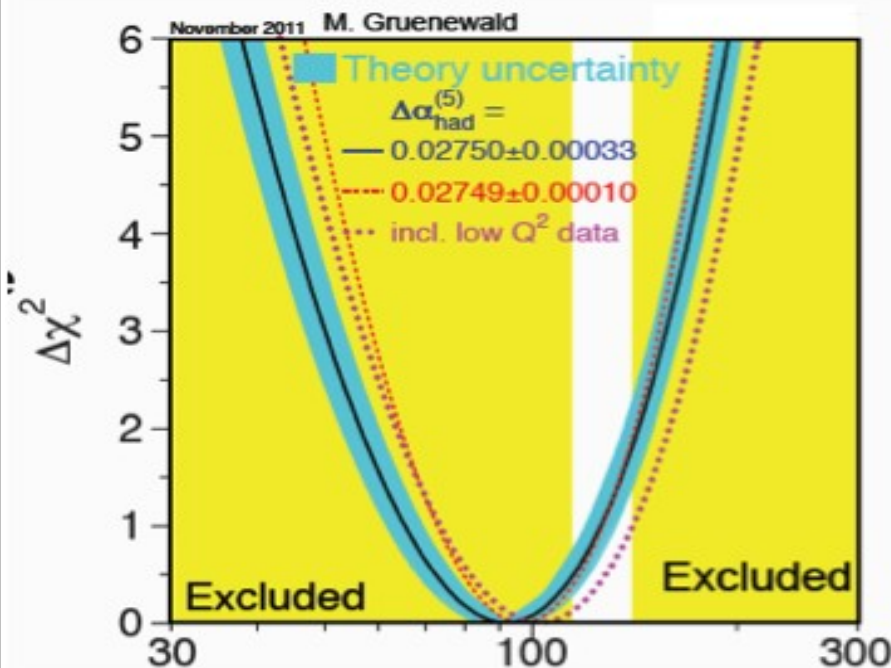
ATLAS : $120 < m_H < 555 \text{ GeV}/c^2$; CMS : $115 < m_H < 543 \text{ GeV}/c^2$

Both experiments observe excess ($>2\sigma$ local significance) in data compared to background expectation around probed Higgs mass hypothesis $m_H \approx 125 \text{ GeV}/c^2$

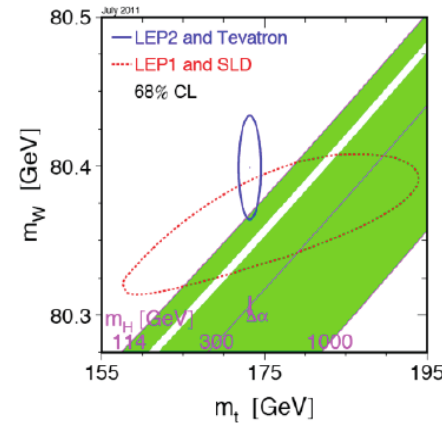
Standardmodell und Erwartungen 2012

Gesundheitszustand des Standardmodells ... ?

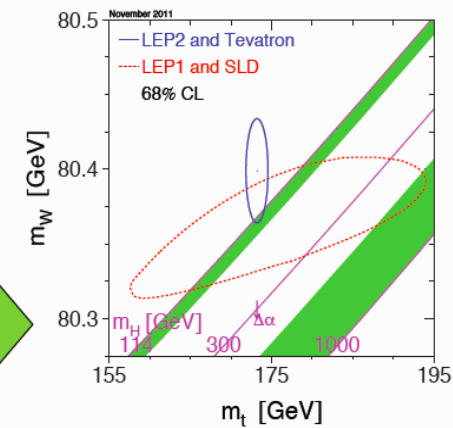
Elektroschwache Fits vom Sommer 2011 mit aktuellen Higgs-Grenzen



Impact of the new limits on the green band



With $< 2.3 \text{ fb}^{-1}$ from LHC



Wenn es ein Standard-Model-Higgsboson gibt, ist es leicht
Konsistent mit indirekter Bestimmung der Higgs-Masse aus Präzisionsmessungen
Ob der am LHC von ATLAS und CMS beobachtete Überschuss

- eine **Fluktuation des Untergrunds (?)**
 - oder das **Higgs-Boson (?)** ist,
- wird die nächste Datennahemperiode zeigen !**

... ist besser denn je !

Erwartungen für 2012

Extrapolation der Leistungsfähigkeit der Maschine von 2011 → 2012:

- können 15/fb an integrierter Luminosität erwarten ($3 \times L_{2011}$)
- Schwerpunktsenergie 8 TeV (statt 7), ca. 30% höhere Higgs-Produktionsrate
→ Sensitivität auf Higgs-Boson steigt von $\sim 3\sigma$ auf $>5\sigma$!
experimentelle Herausforderung: **noch mehr Pile-Up**

Die Frage nach der Existenz des (SM-)Higgs-Bosons wird definitiv 2012 beantwortet

Das Higgs zu finden, wäre ein Triumph,
es auszuschließen, eine Revolution !

Auf ein spannendes Jahr 2012 !!!

Wenn wir „das Higgs“ finden: Die Frage,
ob es sich um das Higgs-Boson des minimalen Standardmodells handelt,
wird uns noch länger beschäftigen !

Organizational Issues

Schedule of lectures

- April 19th : Introduction and Organization
- April 26th : Standard Model of Electroweak Interactions (recap)
- May 3rd : Higgs Mechanism (I)
- May 10th : Higgs Mechanism (II, Higgs sector in extended models)
Exercise 1)
- May 24th : Computation of physics processes
- May 31st : Higgs in loops, indirect experimental constraints and theoretical constraints on Higgs boson
Exercise 2)
- June 14th : Experimental techniques and data analysis
- June 21st : MC Generators
- June 28th : Past direct searches for Higgs Boson : **Student seminars**
Exercise 3)
- July 5th : Higgs at LHC (I) : **Student seminars**
- July 12th : Higgs at LHC (II) : **Student seminars**
Exercise 4)
- July 19th : Brand new Higgs results from LHC

Organizational Issues

- **Student seminars**

- **June 28th** : Past direct searches for Higgs bosons at LEP and Tevatron
- **July 5th** : Searches for Higgs boson with CMS and ATLAS (channel-by channel review)

- **Exercises**

- **May 10th** : Higgs mechanism in QED with massive photon
- **May 24th** : Higgs partial width into charged leptons
- **June 21st** : Learning Pythia8 MC generator
- **July 12th** : Analysis of $H \rightarrow WW \rightarrow 2\ell 2\nu$ final state with CMS Monte Carlo samples

Literature

- **J. Gunion, H. Haber, G. Kane, S. Dawson: „The Higgs Hunter's Guide“ (Addison Wesley, 1990)**
- **M. Sher: „Electroweak Higgs potentials and vacuum stability“ (Phys.Rep. 179 (1989) 273-418)**
- **S. Dawson: „Introduction to electroweak symmetry breaking“ (hep-ph/9901280)**
- **M. Carena, H. Haber: „Higgs boson theory and phenomenology“ (hep-ph/0208209)**
- **D. Rainwater: „Searching for the Higgs boson“ (hep-ph/0702124)**