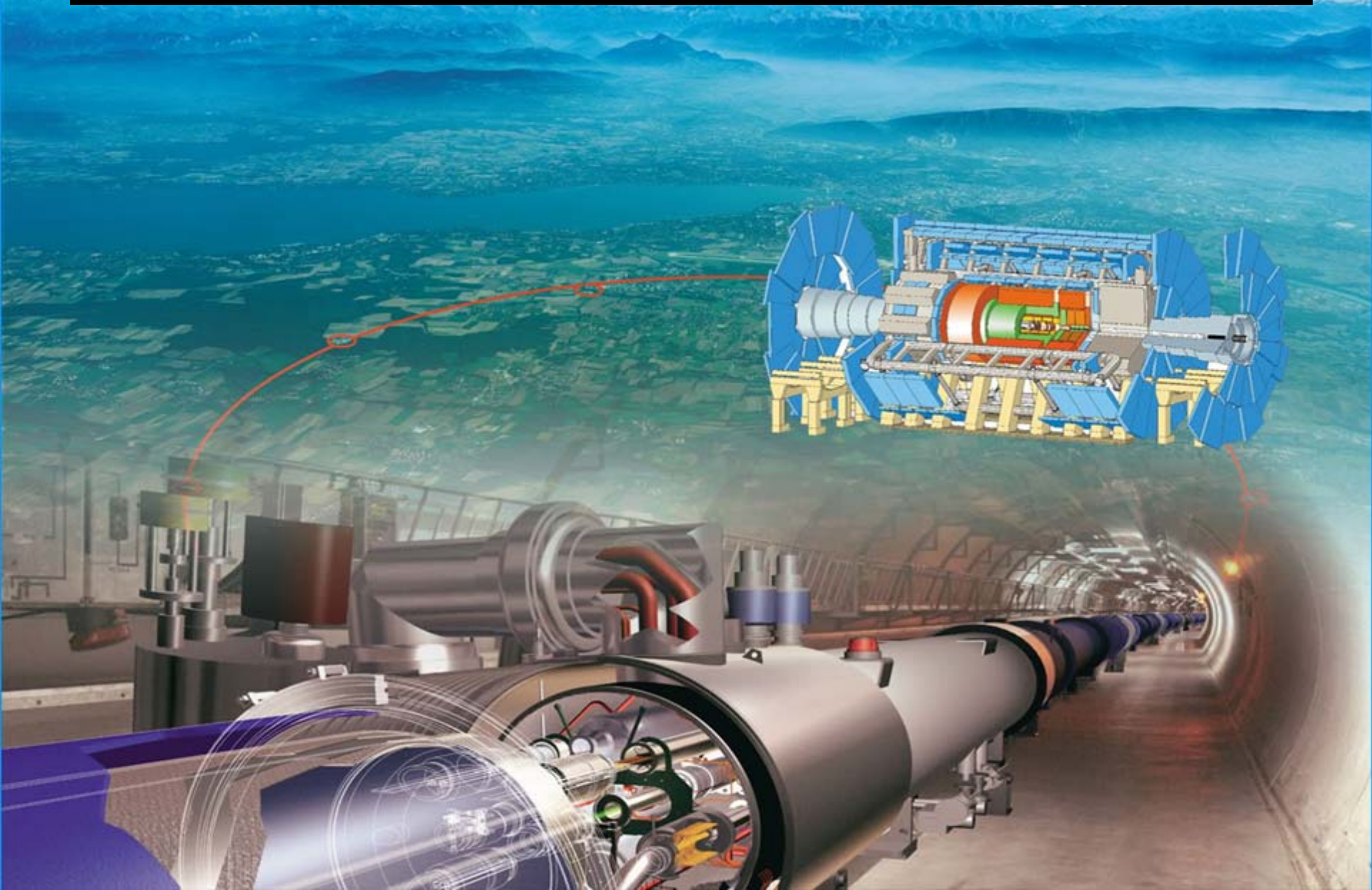
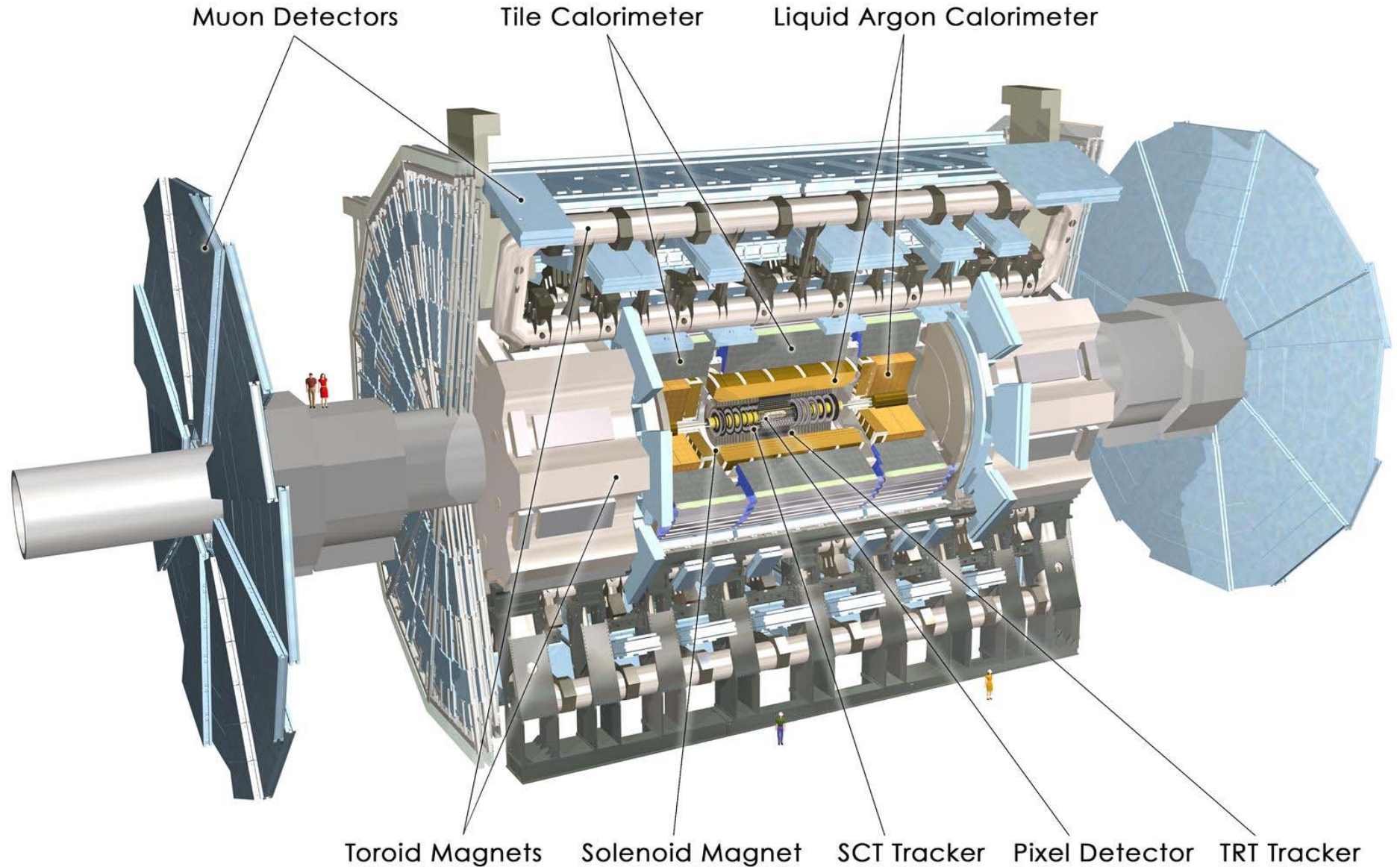


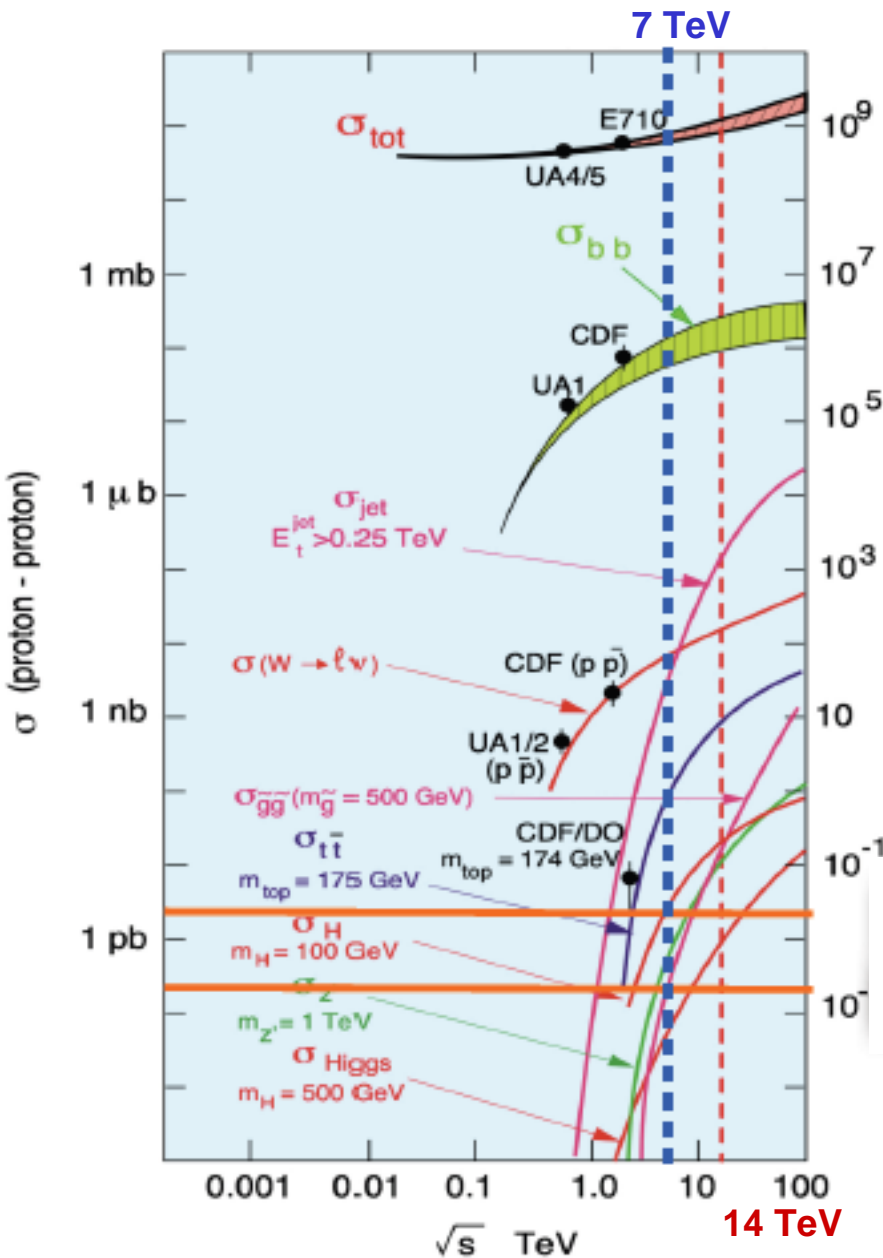
Physik am Large Hadron Collider



Der ATLAS-Detektor



inelastic pp collision	10^7 Hz
b-quark pair production	10^4 Hz
jet production, $E_T > 250 \text{ GeV}$	1 Hz
$W \rightarrow \ell \nu$	1 Hz
t-quark pair production	10^{-2} Hz
Z' ($m_{Z'} = 1 \text{ TeV}$)	10^{-4} Hz
Higgs ($m_H = 500 \text{ GeV}$)	10^{-5} Hz



Events / sec for $\mathcal{L} = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$

Wirkungsquerschnitte σ und Ereignisraten am LHC: $\frac{dN}{dt} = \mathcal{L}\sigma$

1 Higgs-Ereignis pro 10^{11} pp-Kollision.

\Rightarrow Hohe Luminosität des Beschleunigers: hohe Strahlintensität und starke Strahlfokussierung bei der Kollision

Instantane Luminosität $\mathcal{L} = fn \frac{N_1 N_2}{A}$

$N_{1,2}$ = Anzahl der Protonen/ bunch,
 n = Anzahl der bunches/ Strahl,
 f = Proton-Umlauffrequenz,
 A = Strahlquerschnitt bei der Kollision

Integrierte Luminosität L : $N = \sigma \int \mathcal{L} dt = \sigma \cdot L$

LHC-Start 2009

Erste Proton-Proton Kollisionen:

20. November 2009 bei 0.9 TeV

11. Dezember 2009 bei 2.36 TeV

30. März 2010 bei 7.0 TeV
Schwerpunktsenergie

$$\mathcal{L} = f n \frac{N_1 N_2}{A}$$

Maximale LHC Luminosität nach Design:

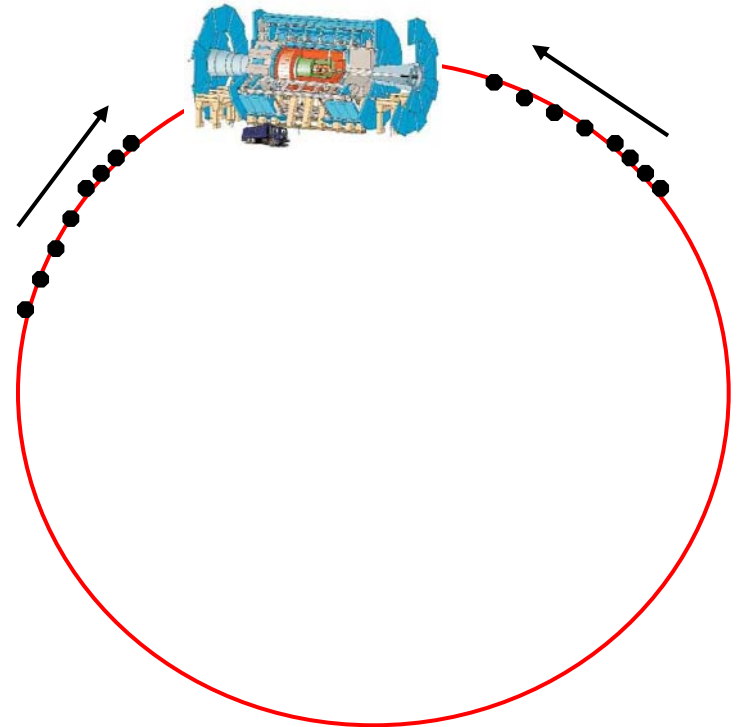
$1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ bei 14 TeV

mit $n = 2835$ Proton-bunches/ Strahl

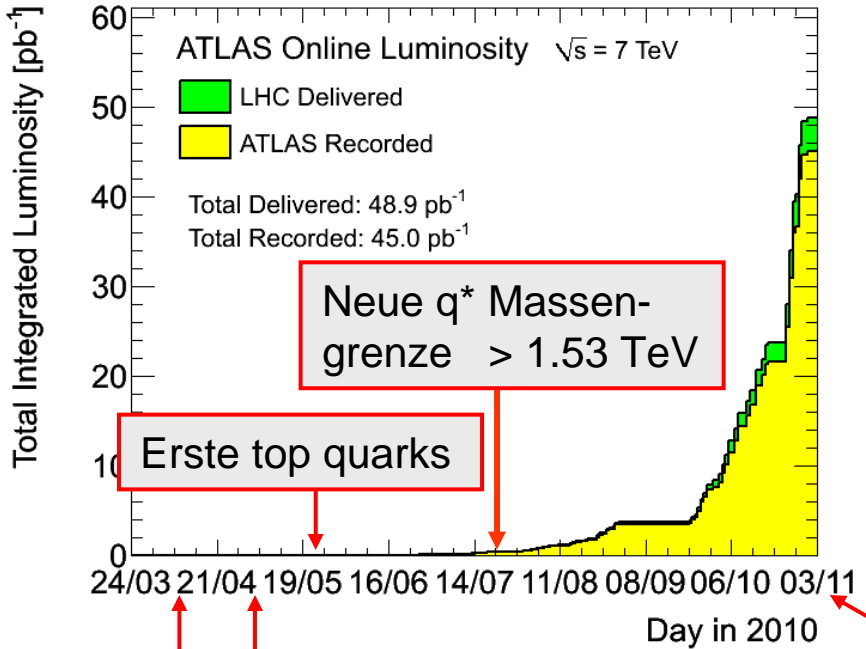
bei $f = 40 \text{ MHz}$ Umlauffrequenz,

$N_{1,2} = 10^{11}$ Protonen/ bunch

335 MJoule gespeicherte Strahlenergie



LHC 2010

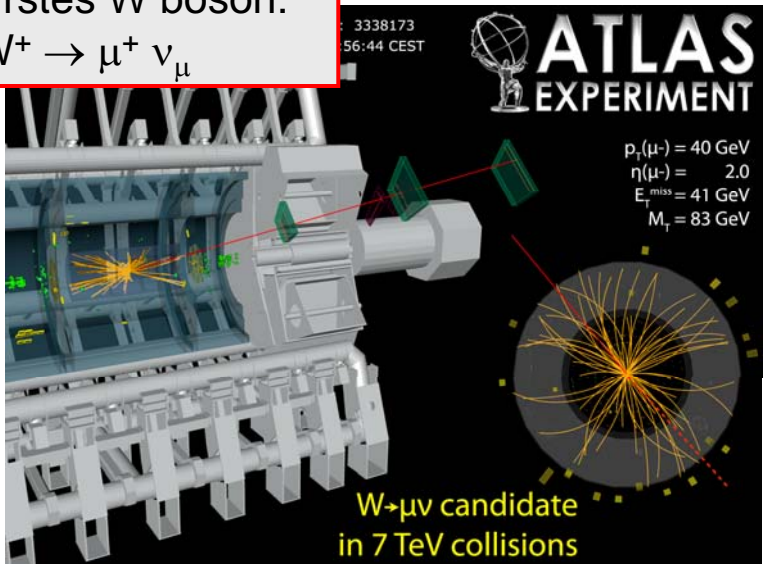


2010: Max. erreichte instantane Luminosität $2.1 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ bei 7 TeV

mit $n = 368$ Proton-bunches/ Strahl und $f = 6.7$ MHz Umlauffrequenz, $N_{1,2} = 10^{11}$ Protonen/ bunch

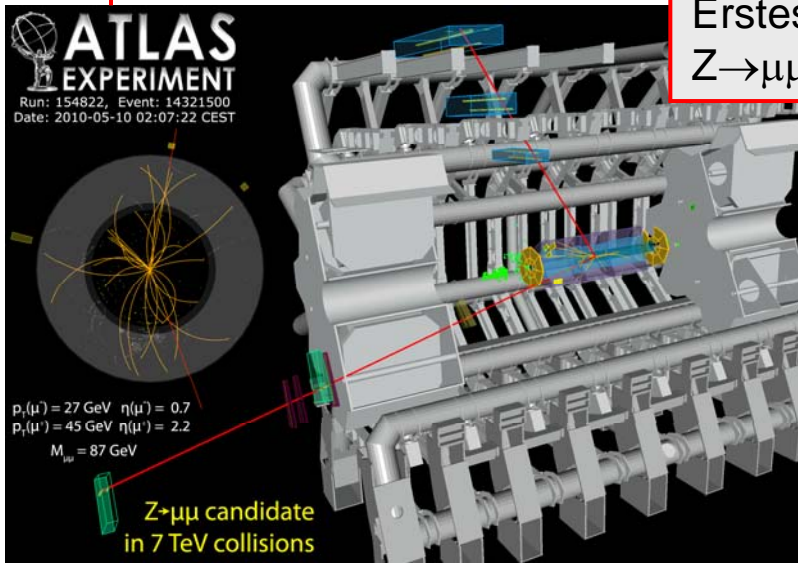
20 MJoule gespeicherte Strahlenergie

Erstes W boson:
 $W^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$

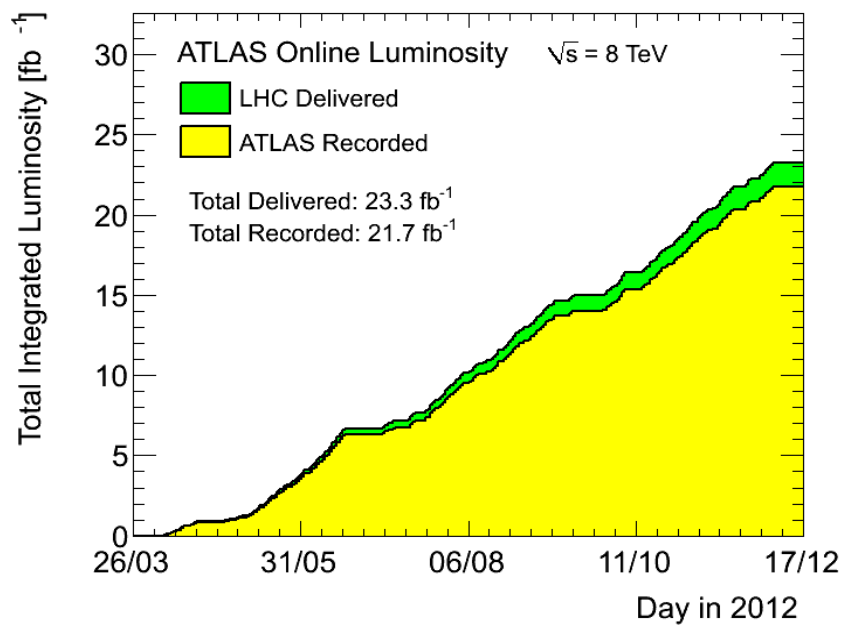
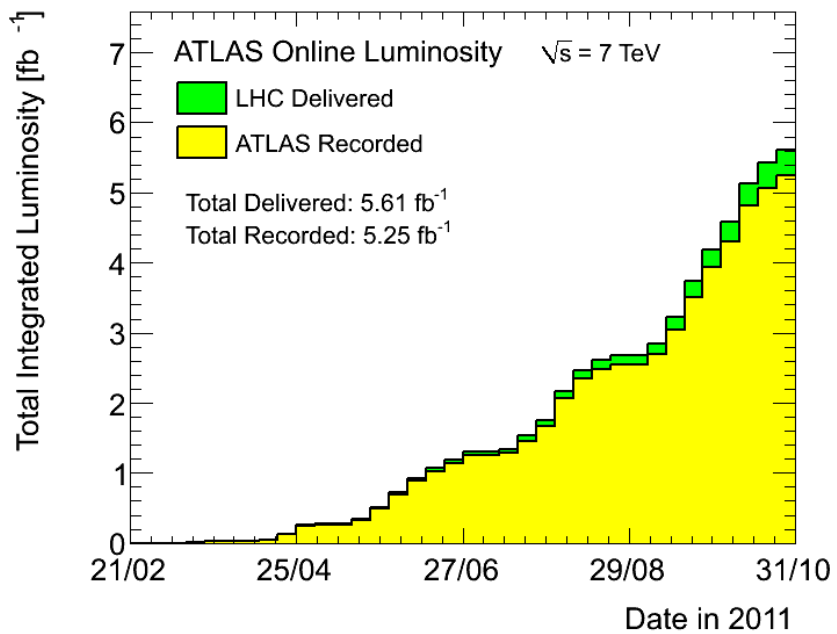


Erste WW, WZ, W γ , Z γ Ereignisse

Erstes Z boson:
 $Z \rightarrow \mu\mu$



LHC 2011/2012

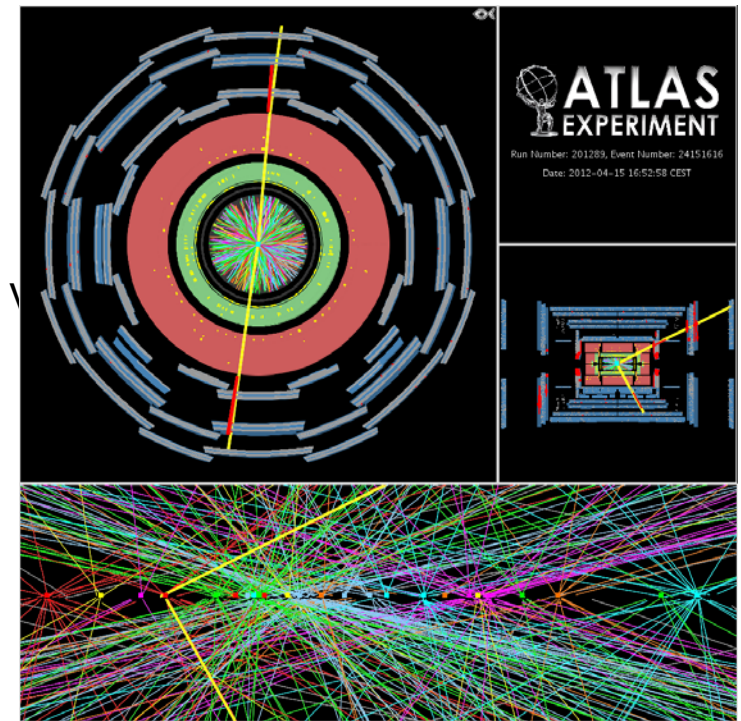
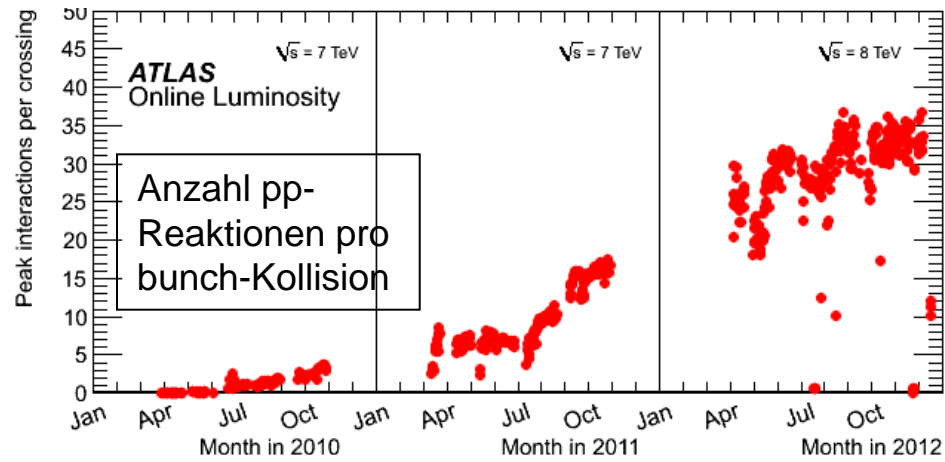
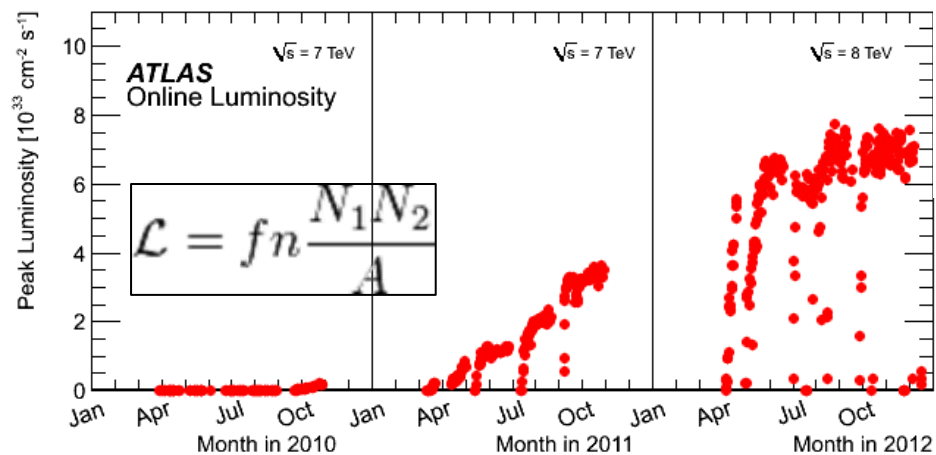
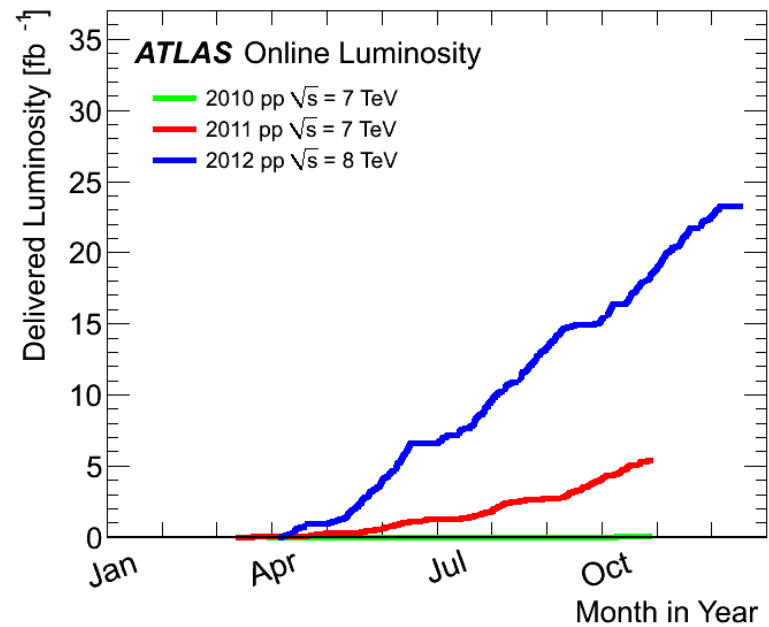
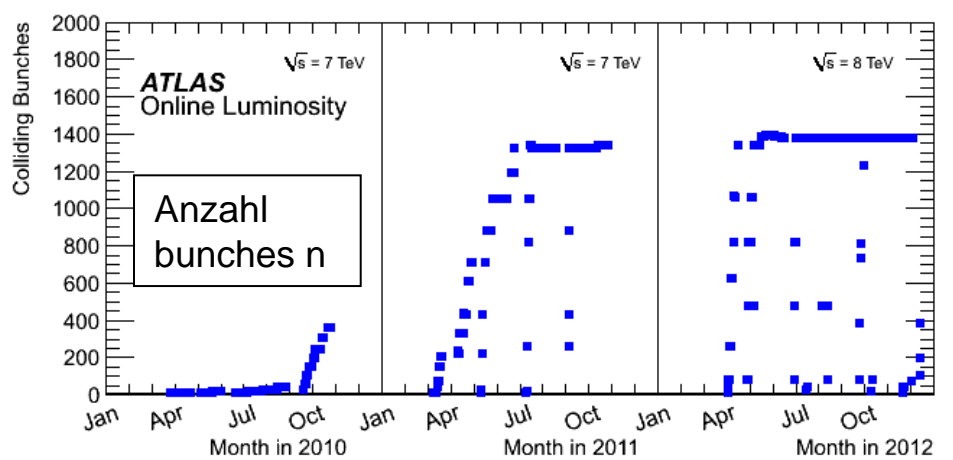


2011: Maximale erreichte Luminosität
 $3.7 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ bei 7 TeV
 mit $n = 1350$ Proton-bunches/ Strahl
 und $f = 20$ MHz Umlauffrequenz,
 $N_{1,2} = 1.2 \times 10^{11}$ Protonen/ bunch
 95 MJoule gespeicherte Strahlenergie

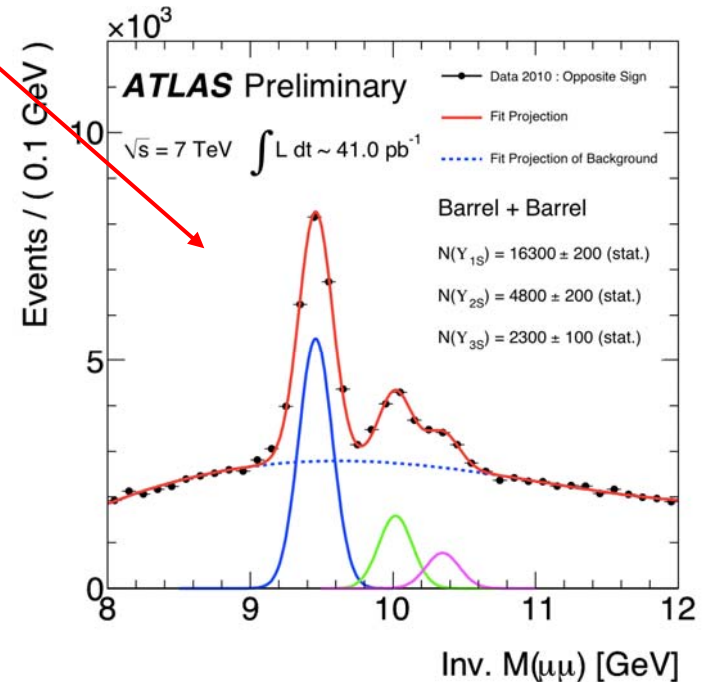
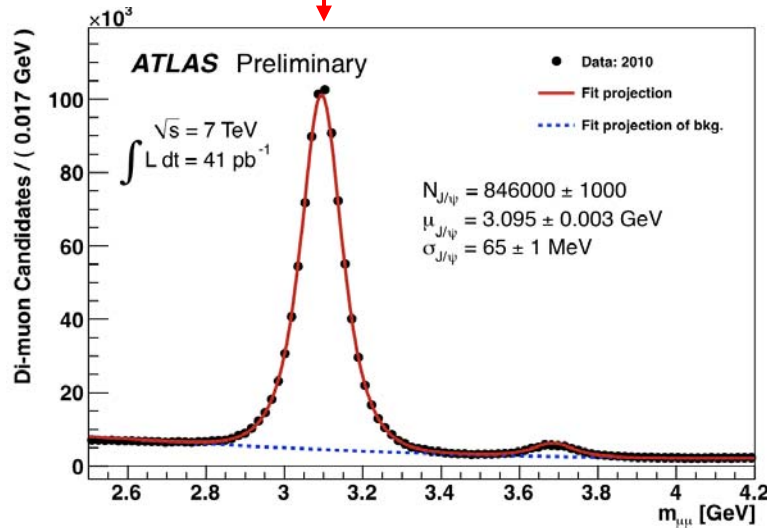
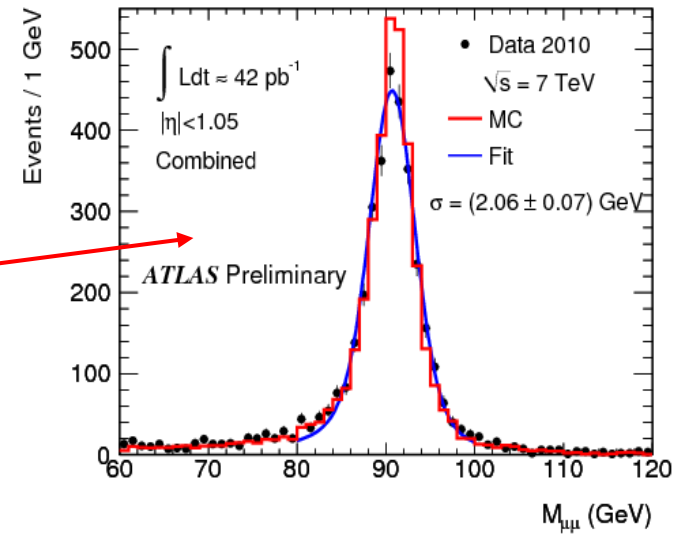
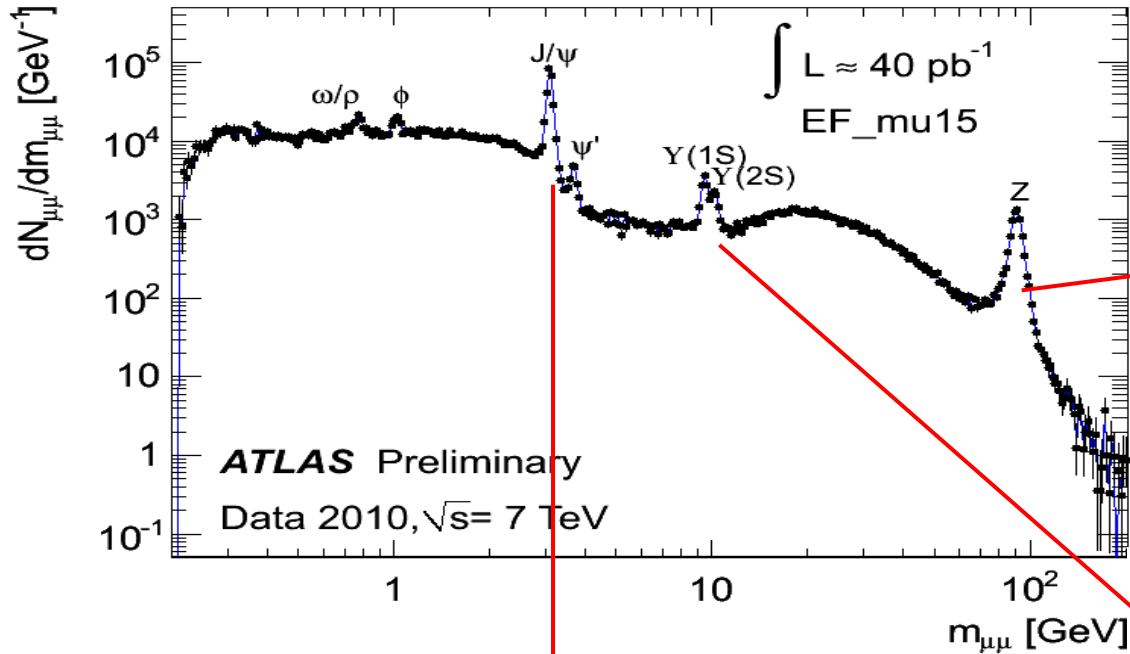
2012: Maximale erreichte Luminosität
 $7.7 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ bei 8 TeV
 mit $n = 1380$ Proton-bunches/ Strahl
 und $f = 20$ MHz Umlauffrequenz,
 $N_{1,2} = 1.2 \times 10^{11}$ Protonen/ bunch
 115 MJoule gespeicherte Strahlenergie



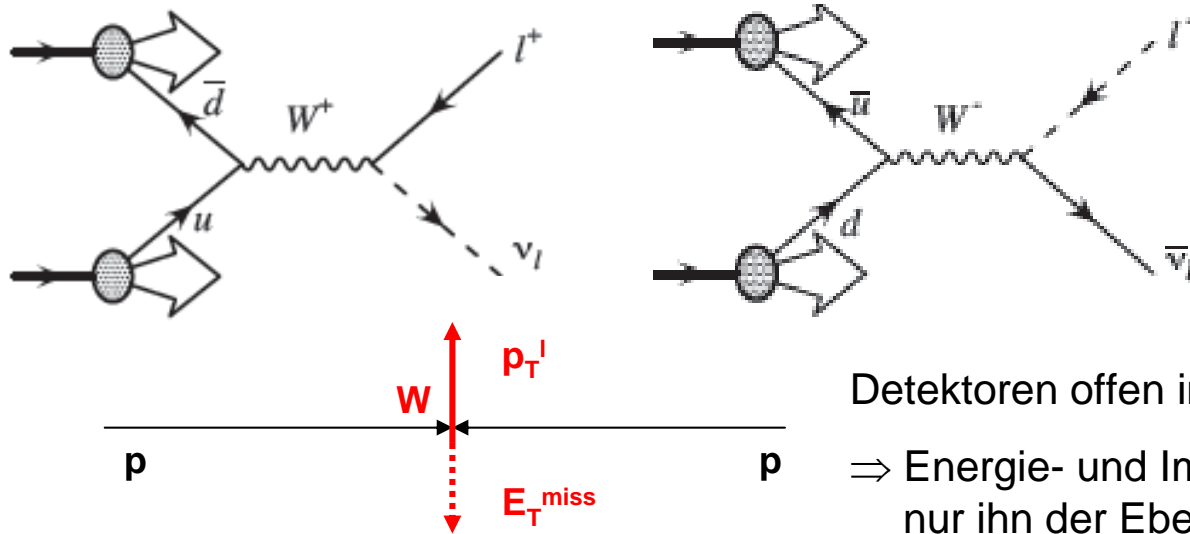
Zunehmende Fokussierung: kleinerer Strahlquerschnitt A, höhere Protodichte bei der Kollision der bunches.



Wiederentdeckung des Standardmodells in 3 Monaten



Nachweis der schwachen Eichbosonen: schon ab $L = 6.4 \text{ nb}^{-1}$

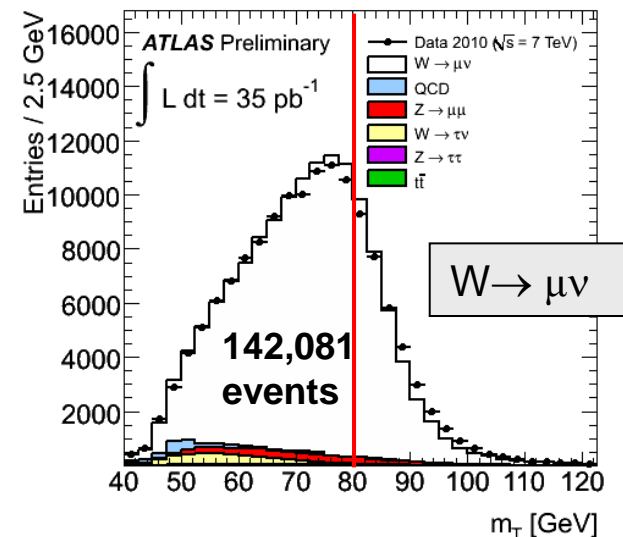
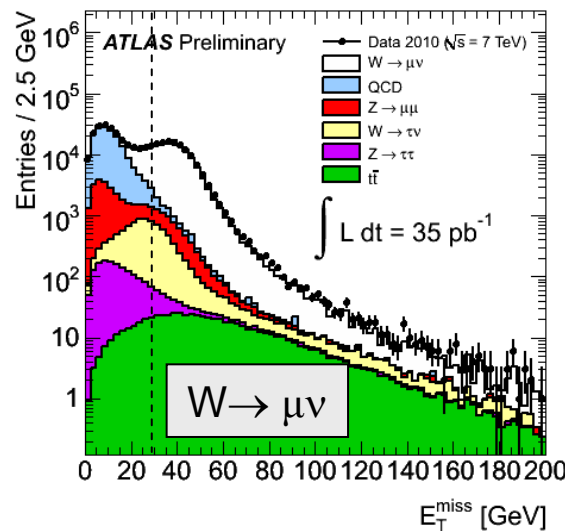
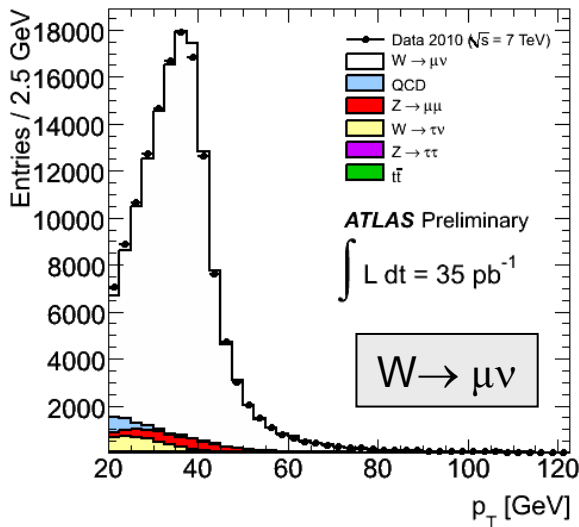


Geladenes Lepton mit
Transversalimpuls p_T^l

Neutrino: "fehlende"
transversale Energie E_T^{miss} ,
im Detektor nicht nachweisbar,
aus transversaler
Energieerhaltung rekonstruierbar

Detektoren offen in Strahlrohrrichtung

\Rightarrow Energie- und Impulsgleichgewicht
nur in der Ebene transversal zum Strahl,
nur "transversale" W-Masse m_T aus p_T^l und E_T^{miss}

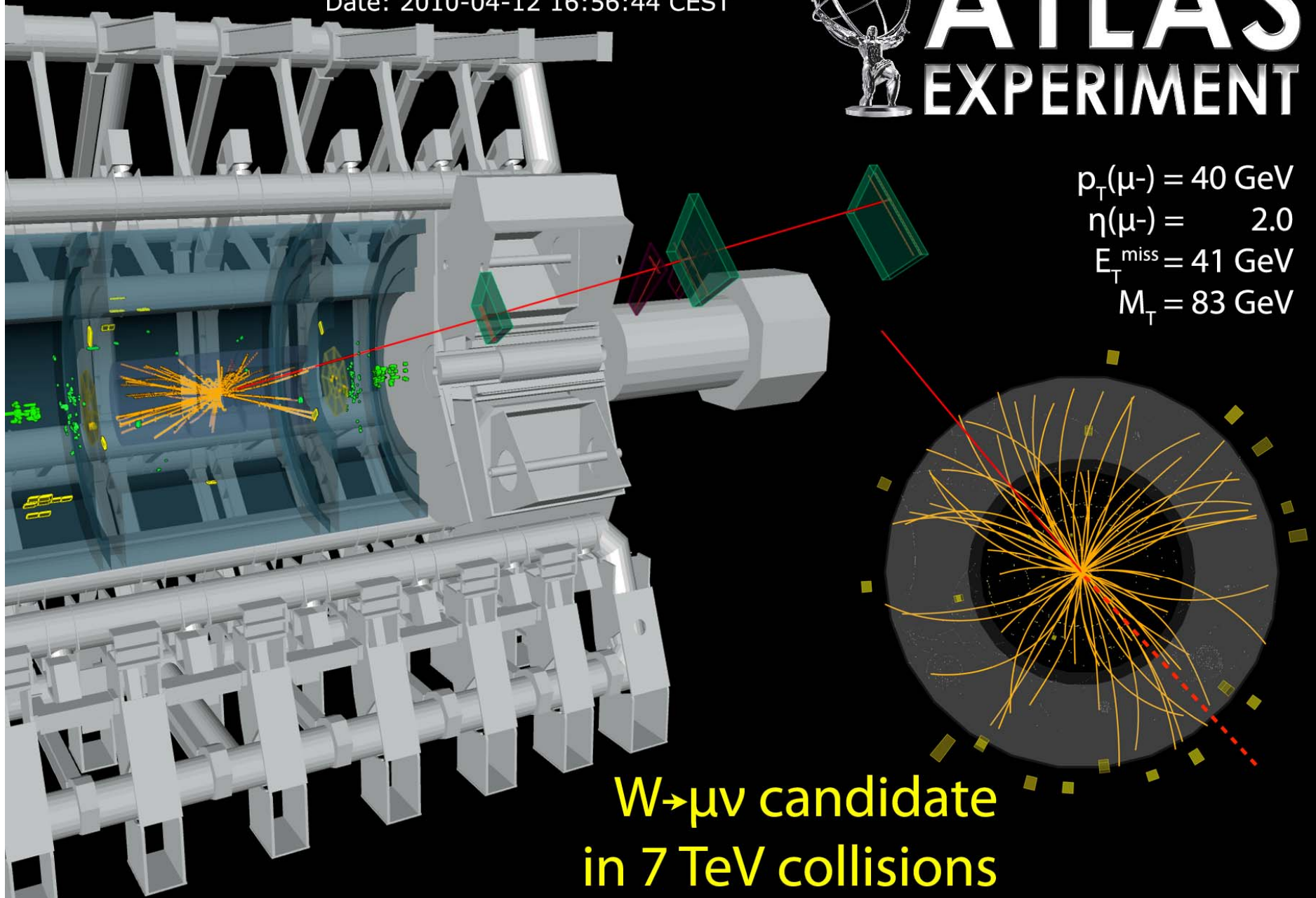


Run: 152845, Event: 3338173
Date: 2010-04-12 16:56:44 CEST



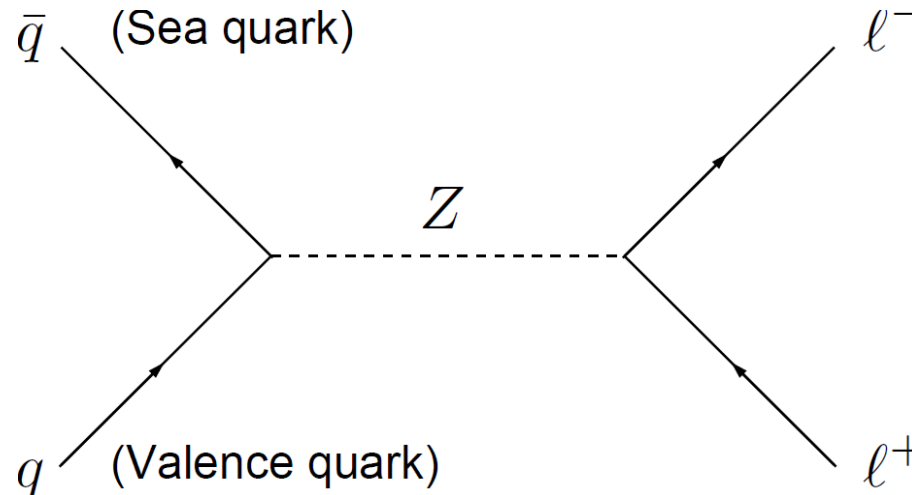
ATLAS EXPERIMENT

$p_T(\mu^-) = 40 \text{ GeV}$
 $\eta(\mu^-) = 2.0$
 $E_T^{\text{miss}} = 41 \text{ GeV}$
 $M_T = 83 \text{ GeV}$

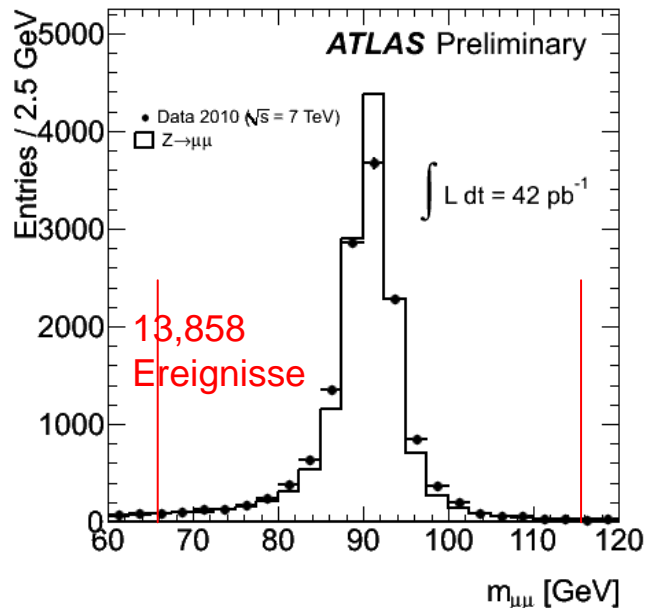


**$W \rightarrow \mu\nu$ candidate
in 7 TeV collisions**

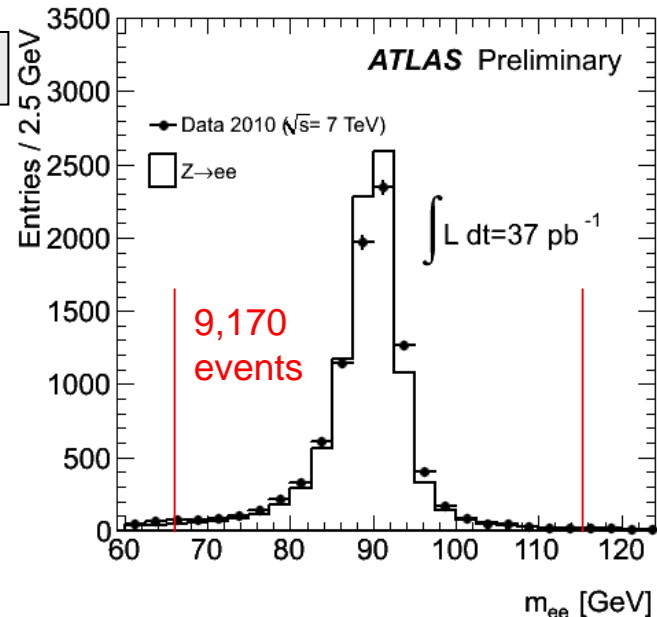
Nachweis der schwachen Eichbosonen: schon ab $L = 6.4 \text{ nb}^{-1}$



$Z \rightarrow \mu\mu$

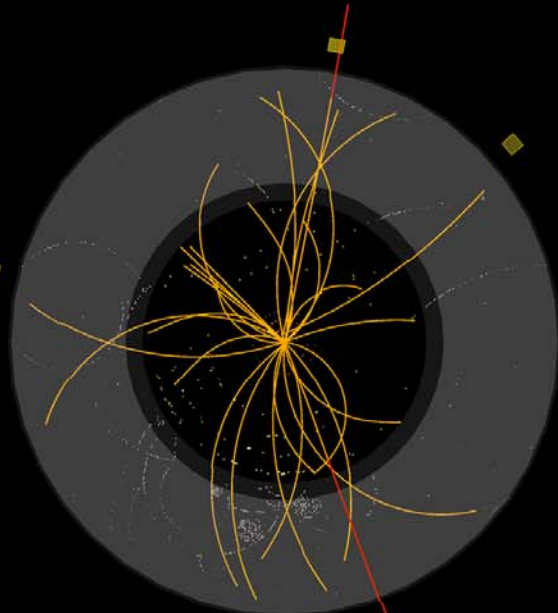
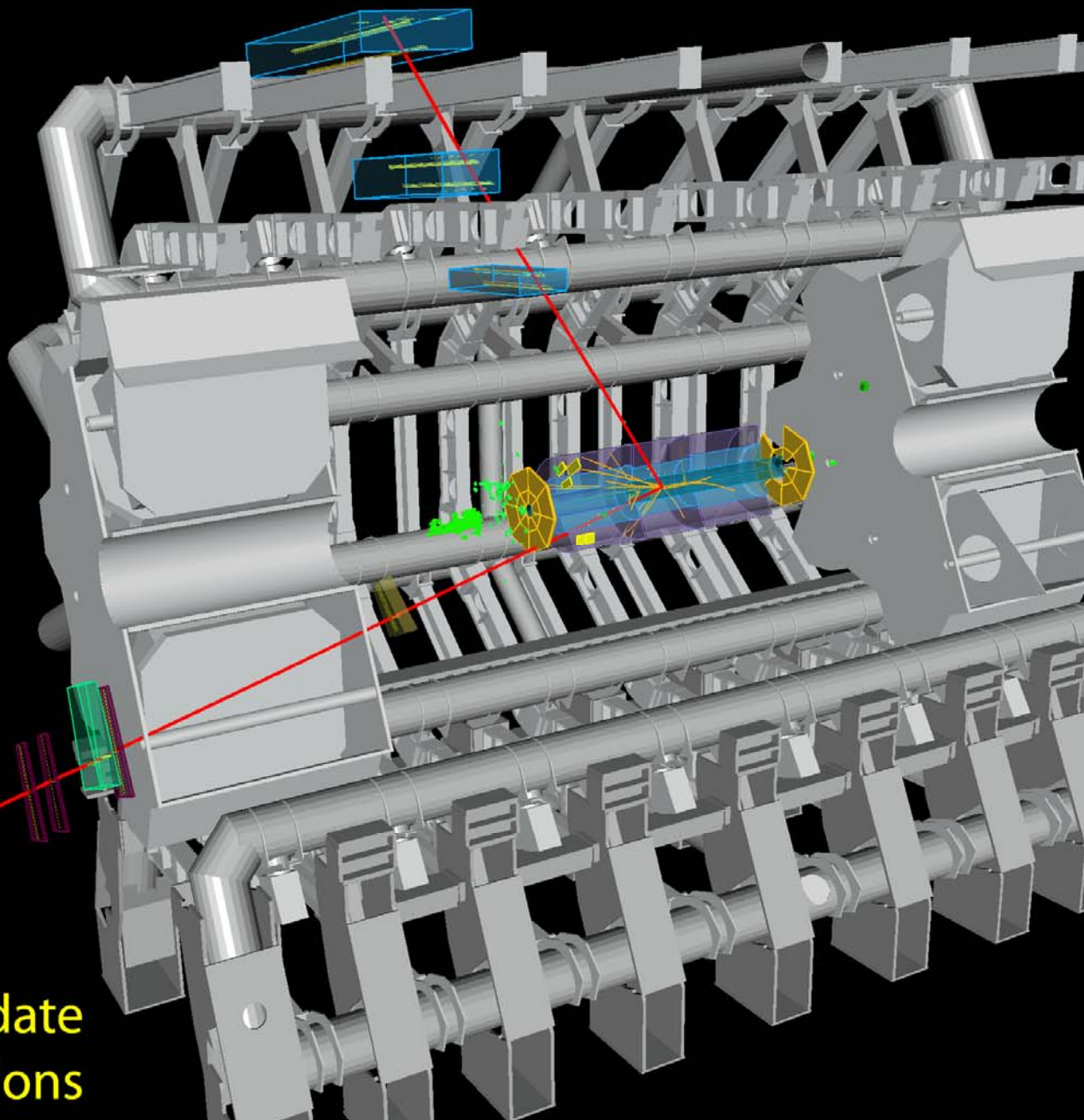


$Z \rightarrow ee$



ATLAS EXPERIMENT

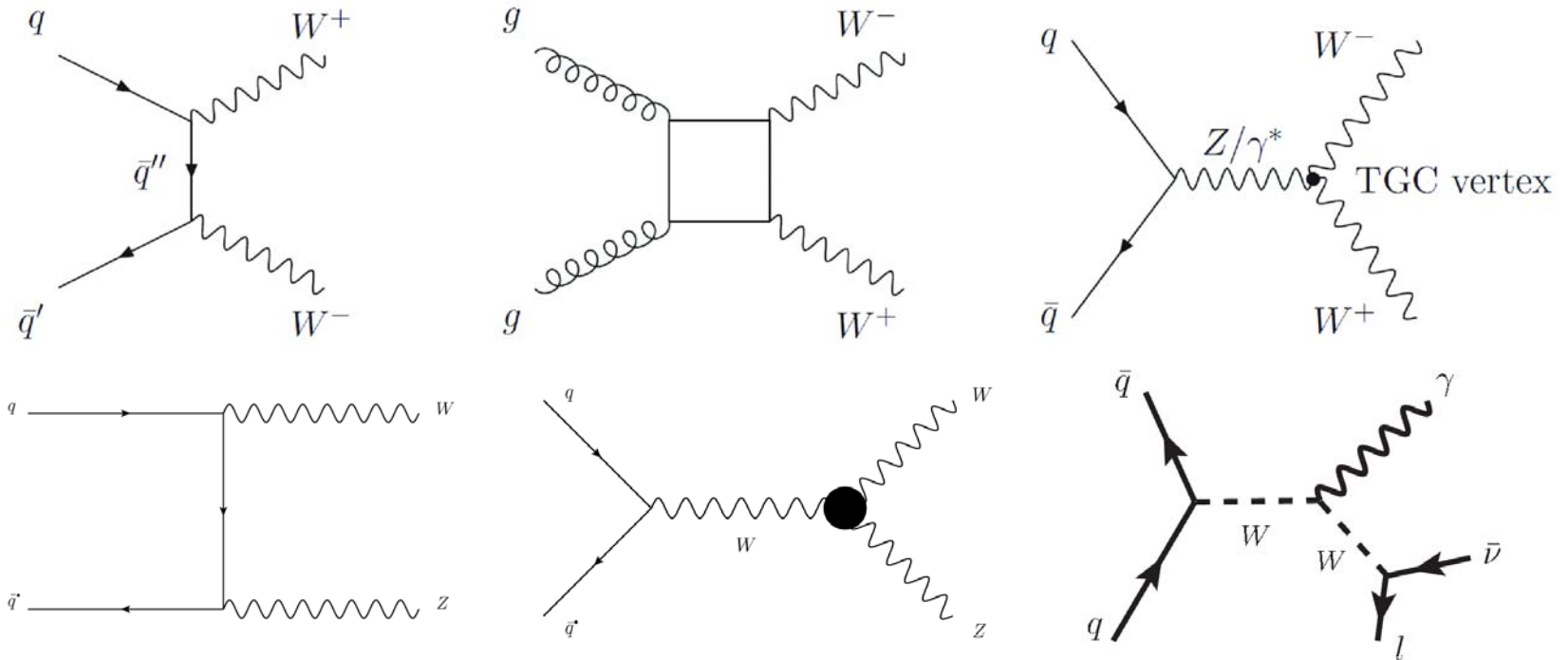
Run: 154822, Event: 14321500
Date: 2010-05-10 02:07:22 CEST



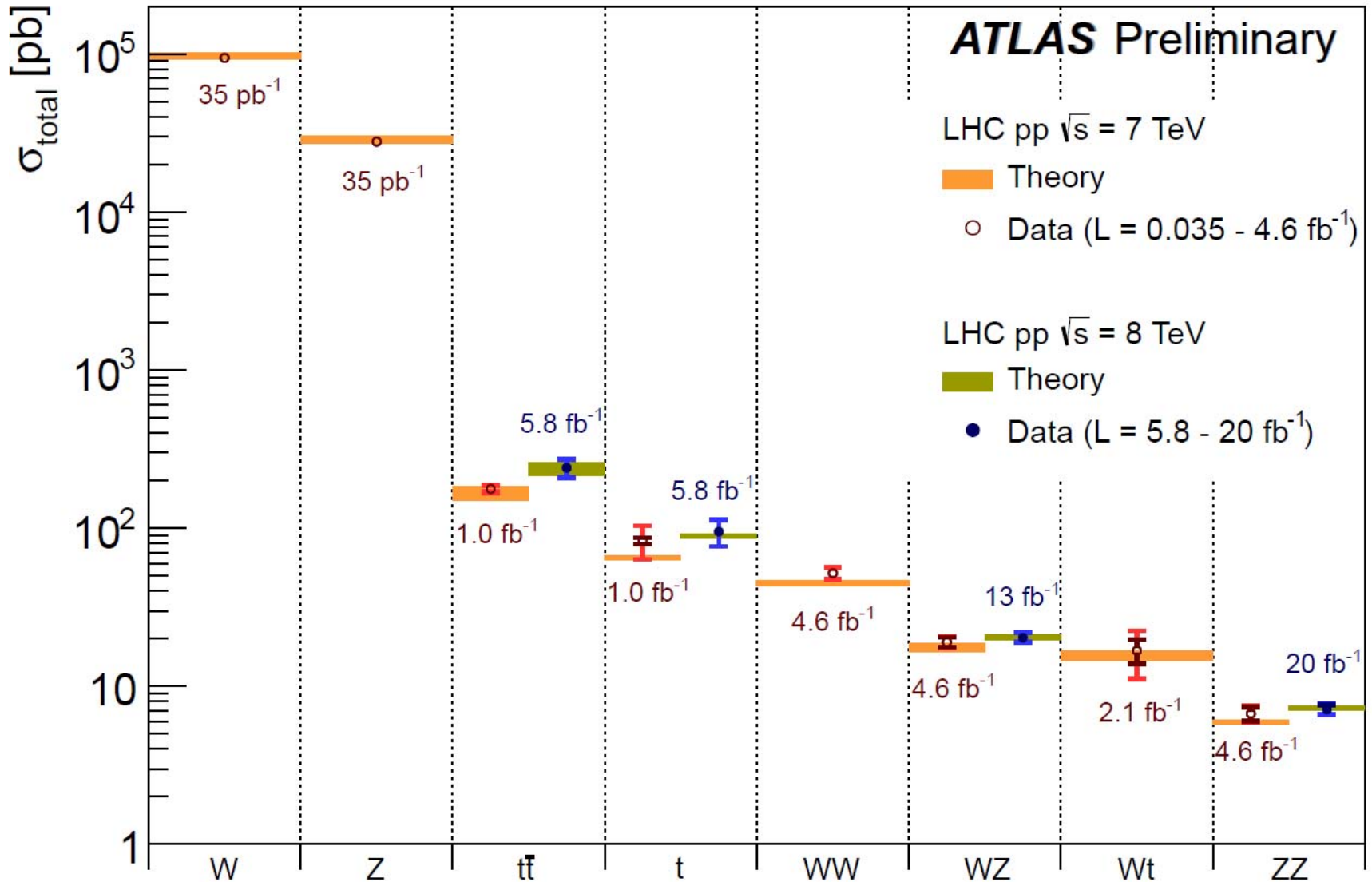
$p_T(\mu^-) = 27 \text{ GeV}$ $\eta(\mu^-) = 0.7$
 $p_T(\mu^+) = 45 \text{ GeV}$ $\eta(\mu^+) = 2.2$
 $M_{\mu\mu} = 87 \text{ GeV}$

**Z $\rightarrow\mu\mu$ candidate
in 7 TeV collisions**

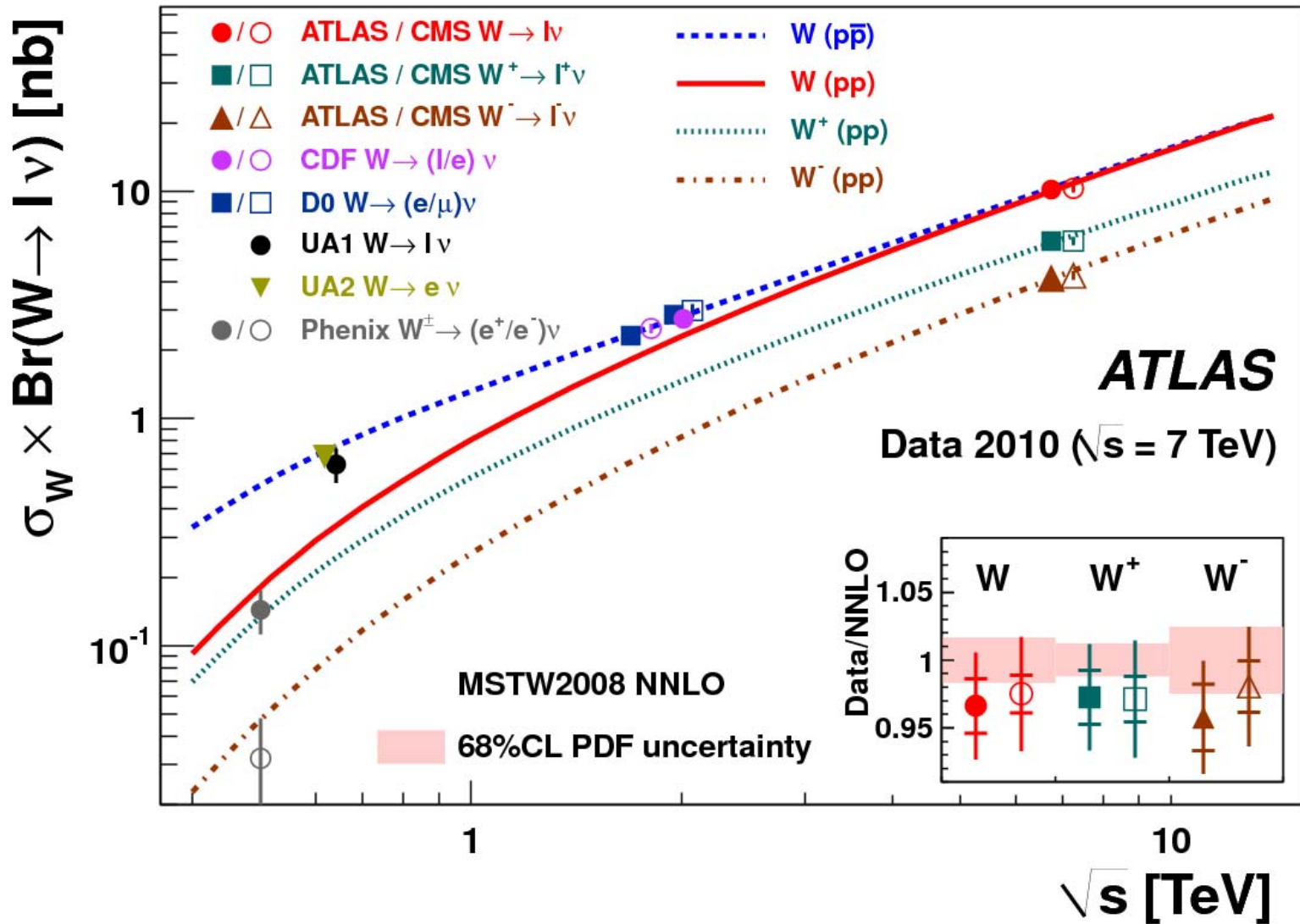
Paarproduktion von Eichbosonen



Das Standardmodell am LHC

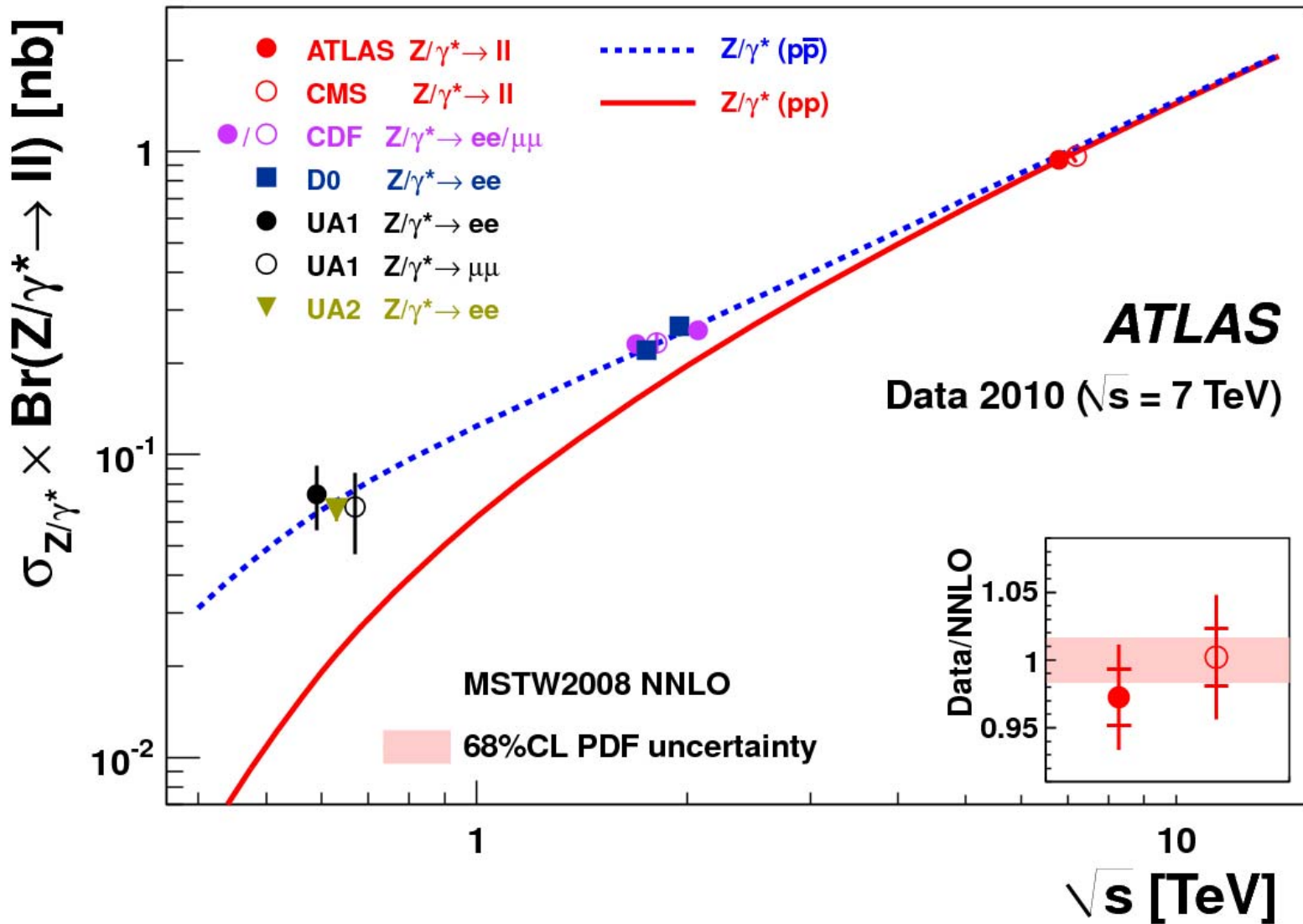


Wirkungsquerschnitte für W-Bosonproduktion



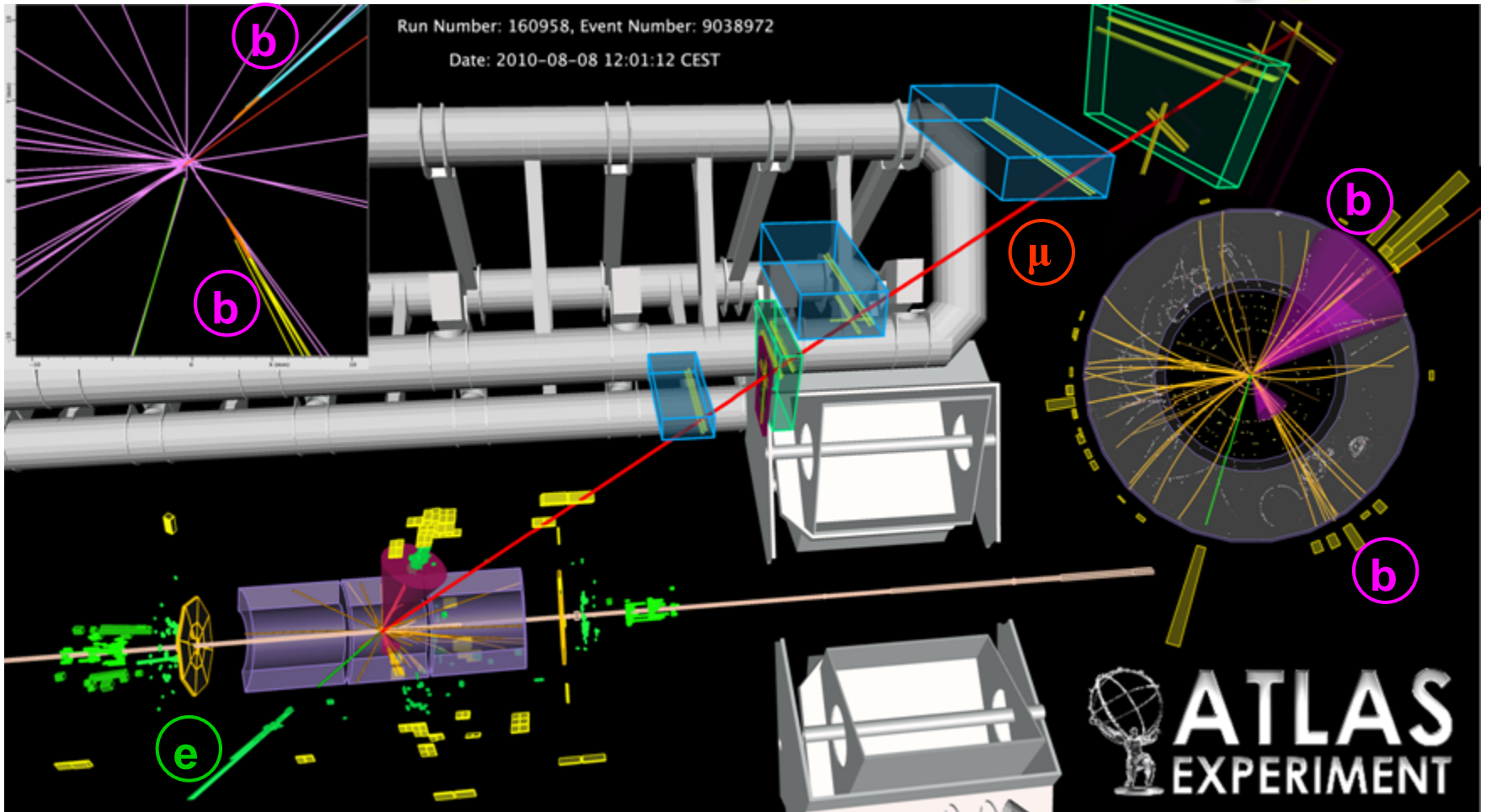
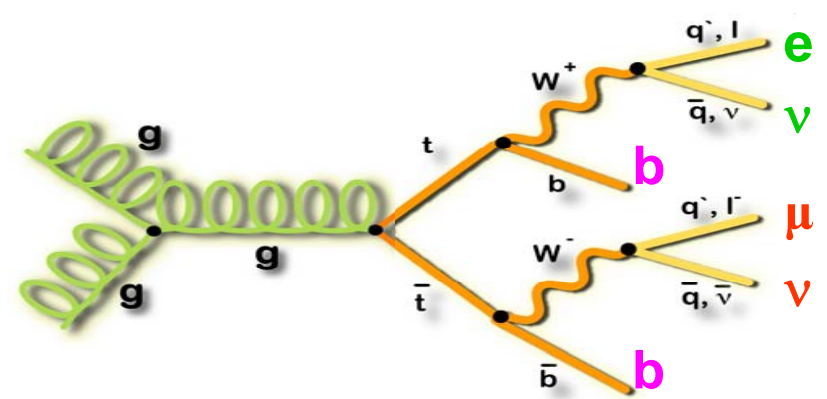
$W^+ W^-$ Ladungsasymmetrie

Wirkungsquerschnitte für Z-Bosonproduktion



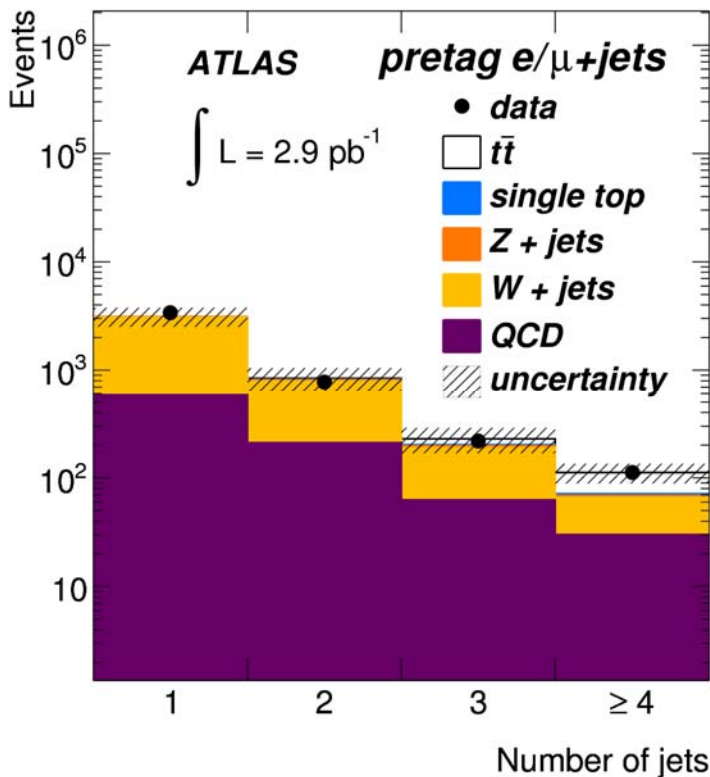
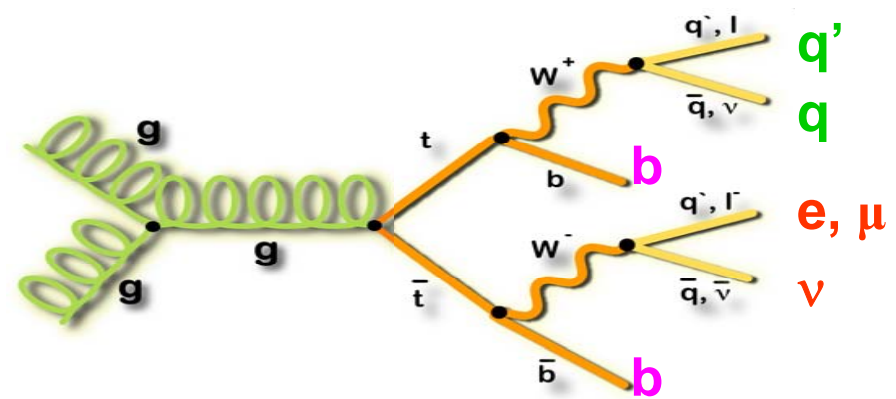
Top-Quark-Paarherzeugung

Erster top-Quark-Paarkandidat im Mai 2010

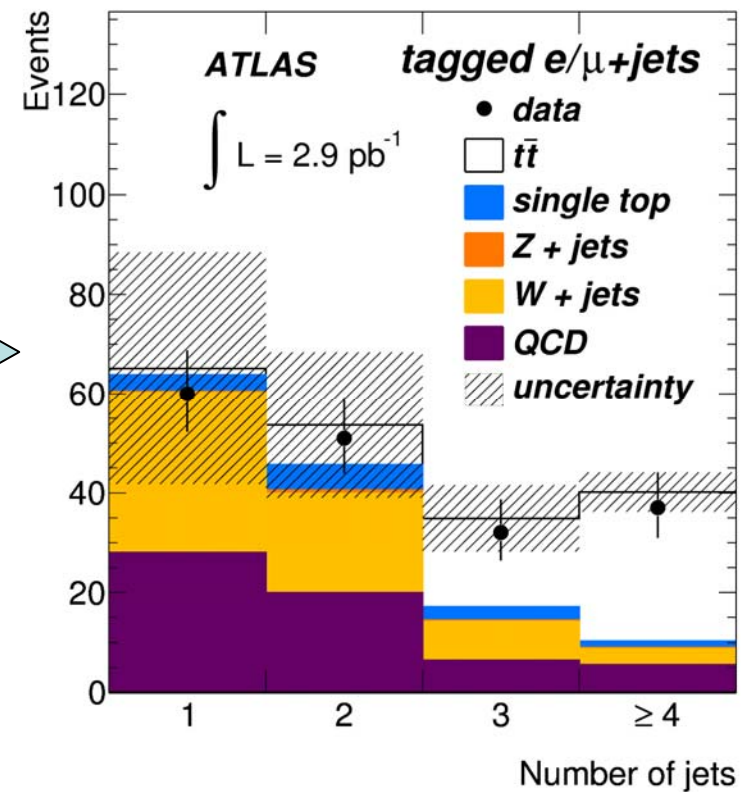


Top-Quark-Production

Such nach $t\bar{t}$ Ereignissen in Endzuständen mit 1 Lepton + Jets + fehlender Energie

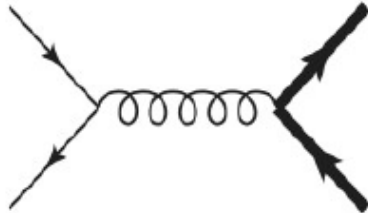


Zusätzlich Identifikation der b-Quarkjets ("b tagging")

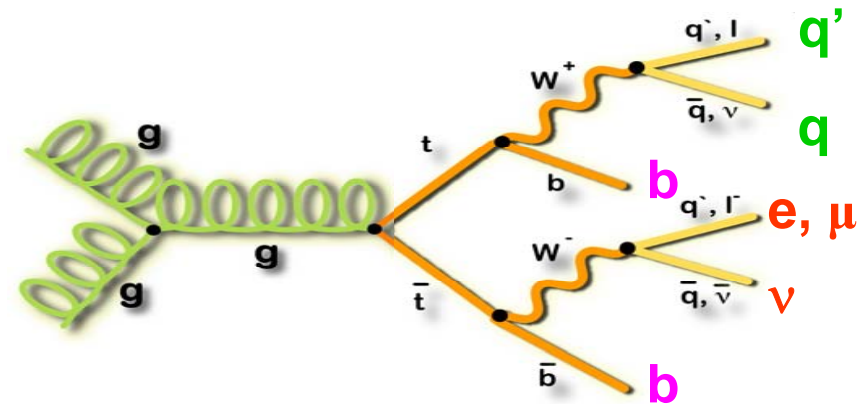
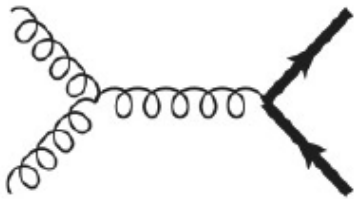
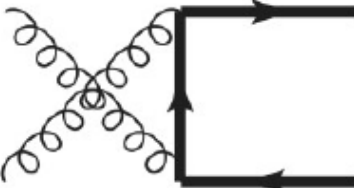
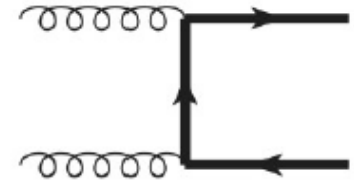


Wirkungsquerschnitt für Top-Quark-Paararerzeugung

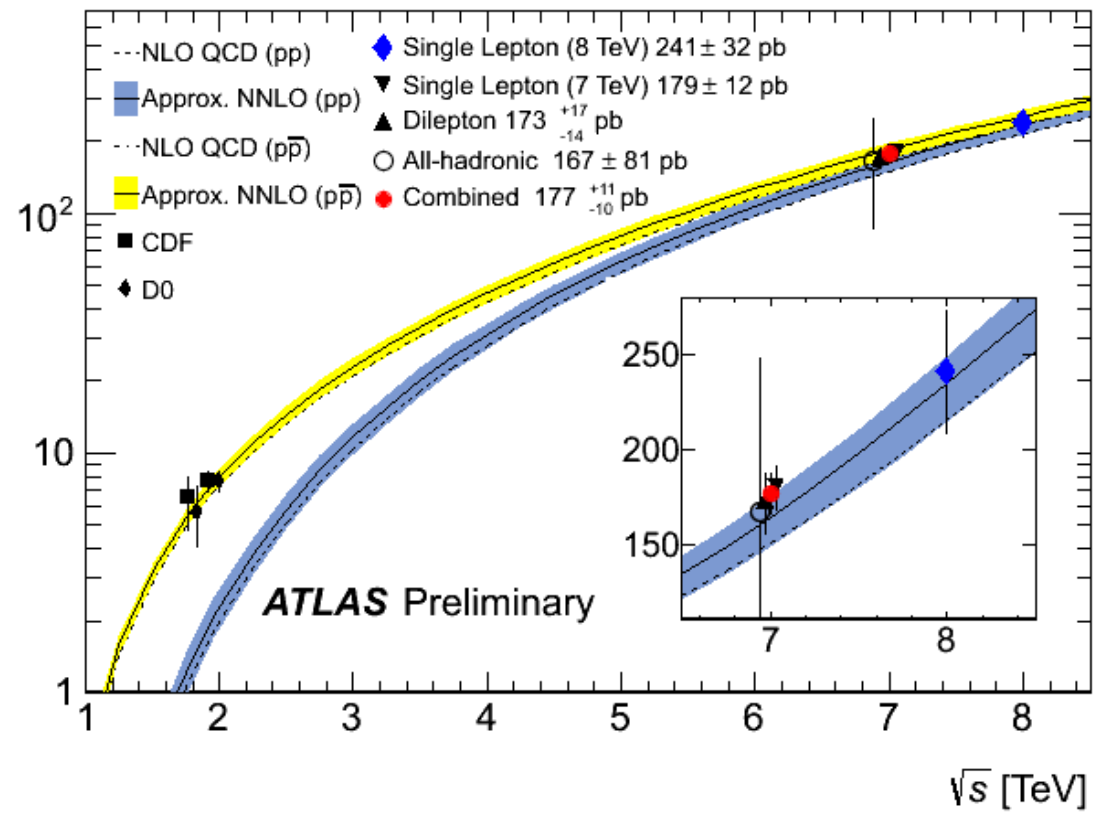
15%



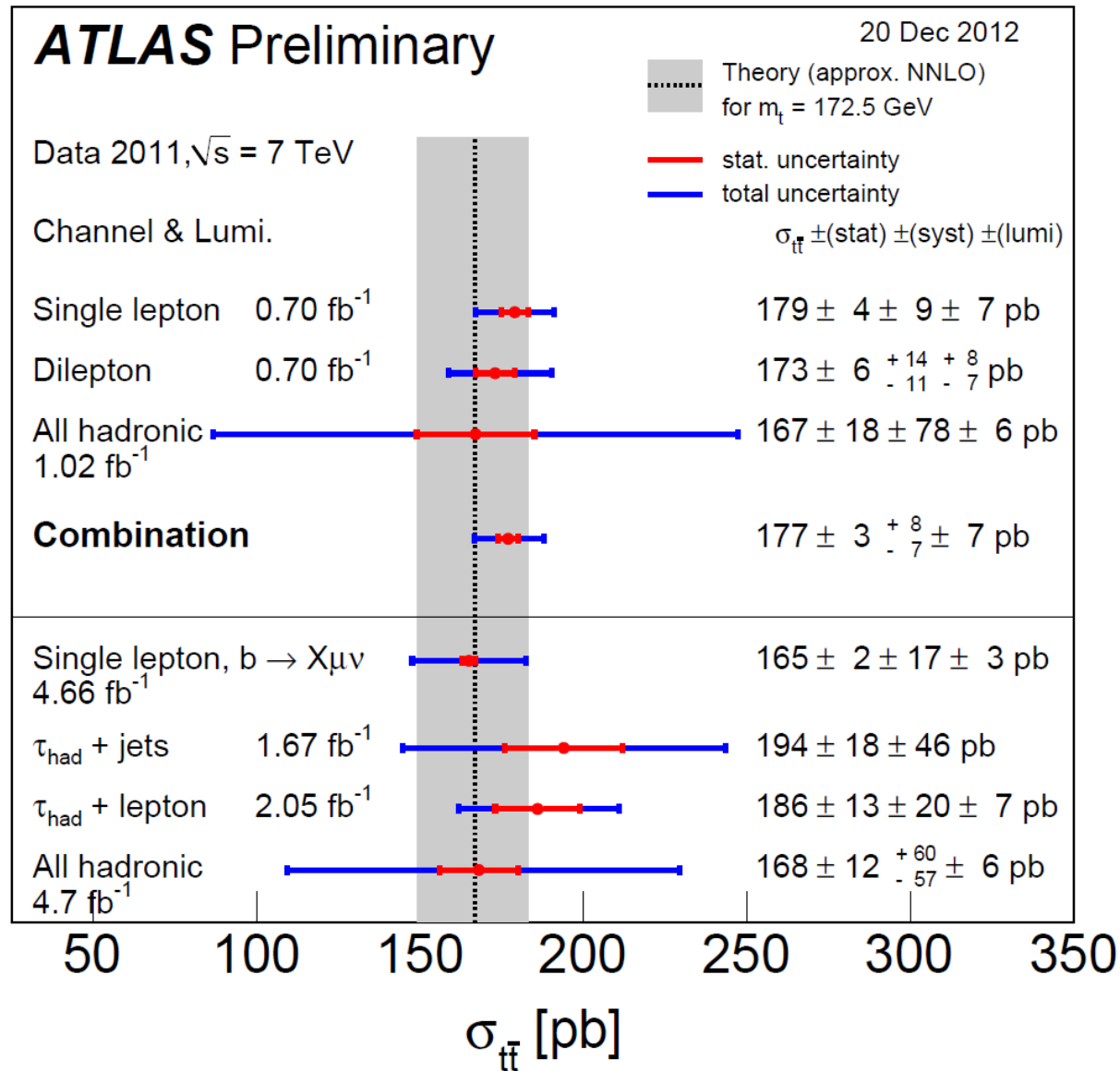
85%



$\sigma_{t\bar{t}}$ [pb]

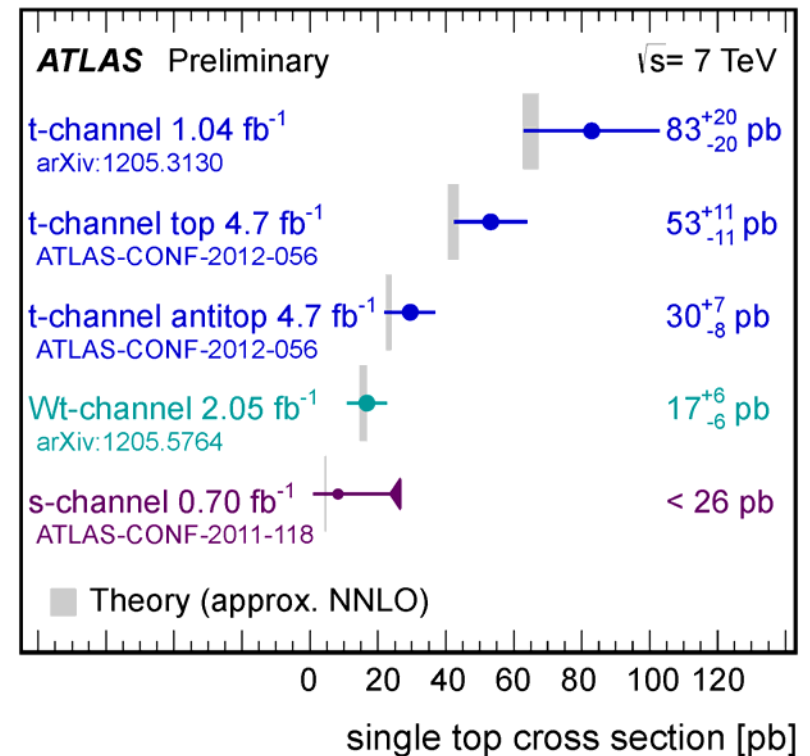
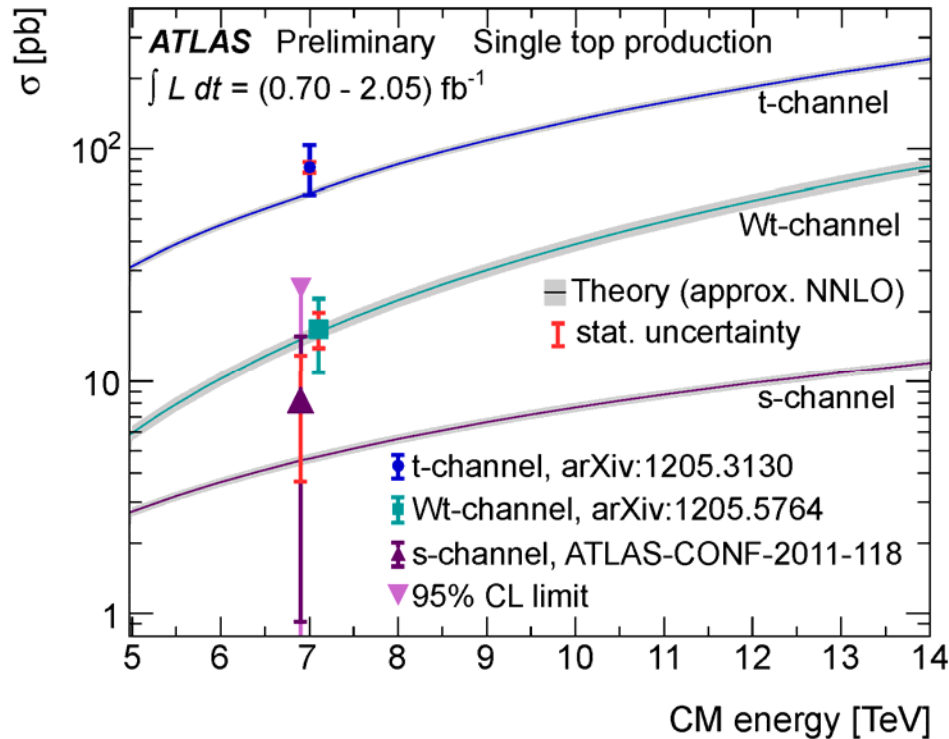
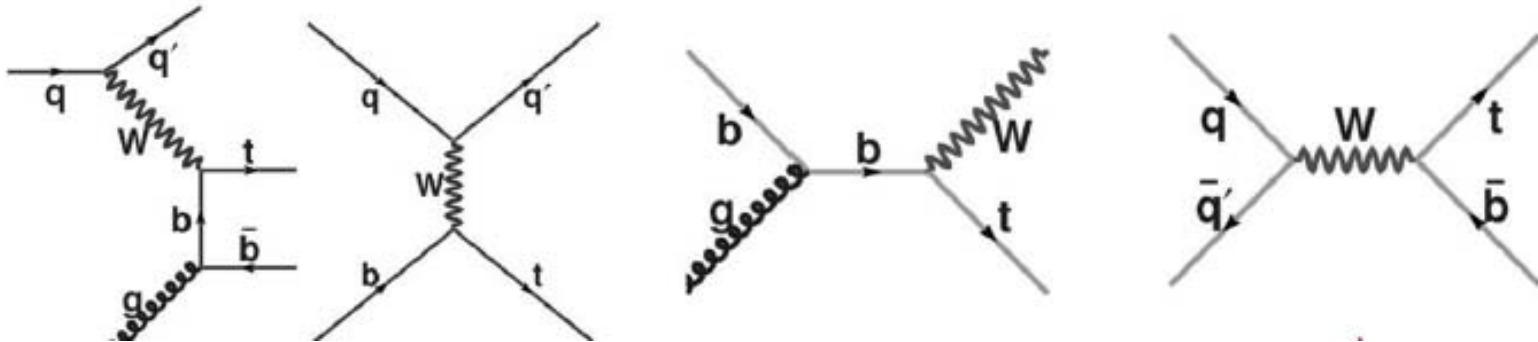


Wirkungsquerschnitt für Top-Quark-Paararerzeugung

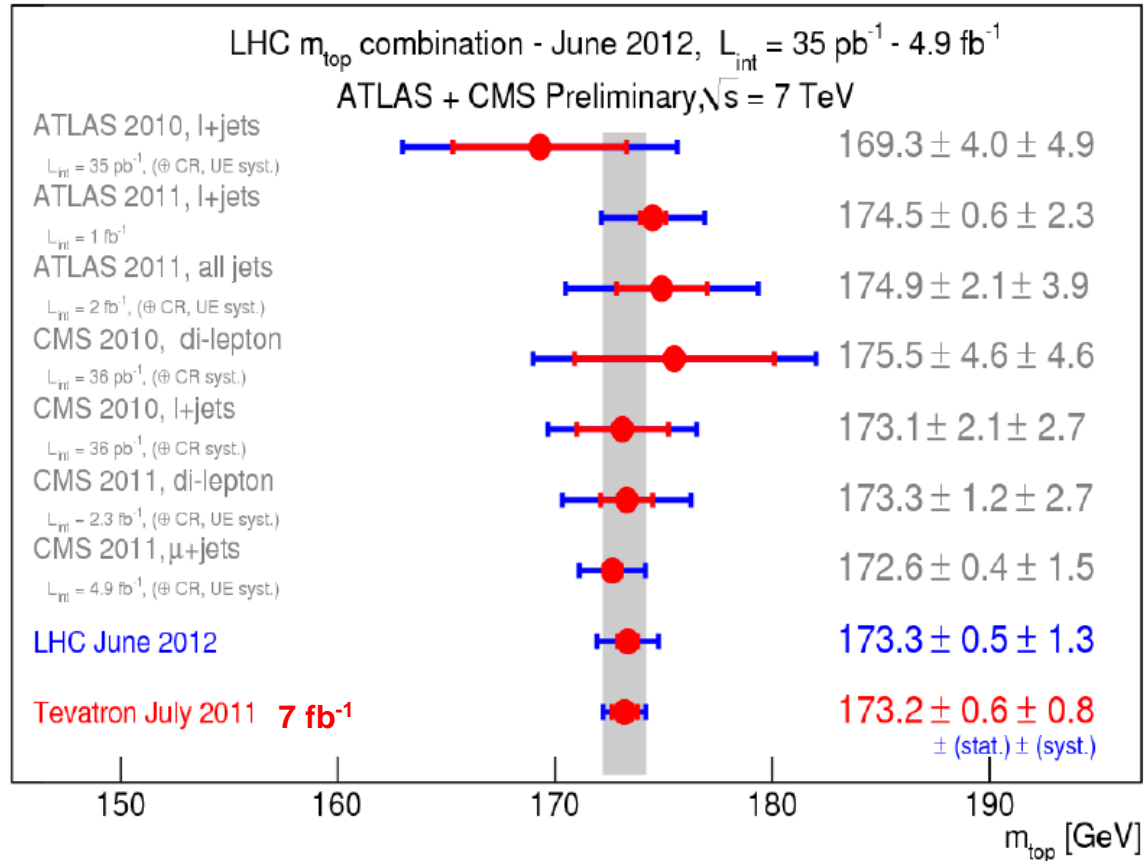
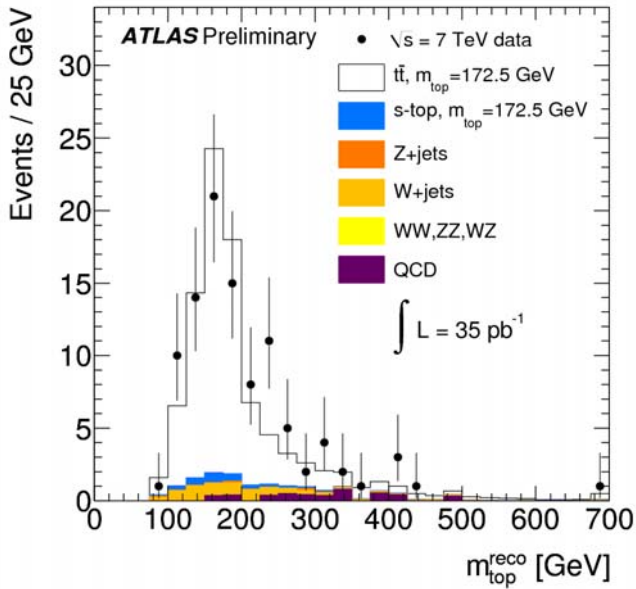
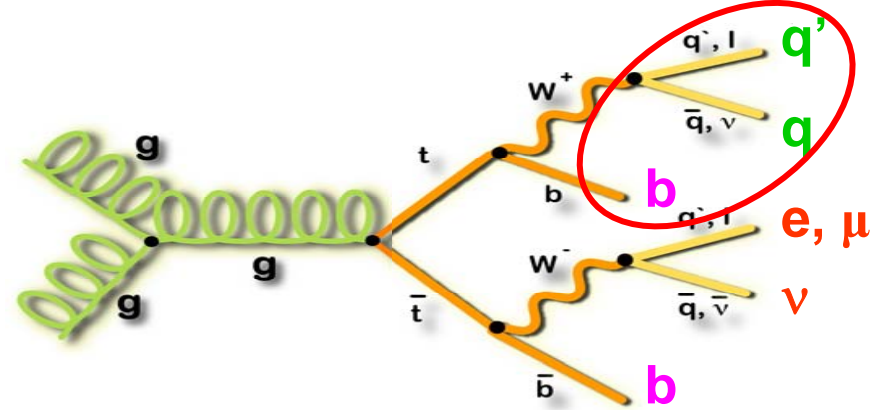


Wirkungsquerschnitt für die Erzeugung einzelner top-Quarks

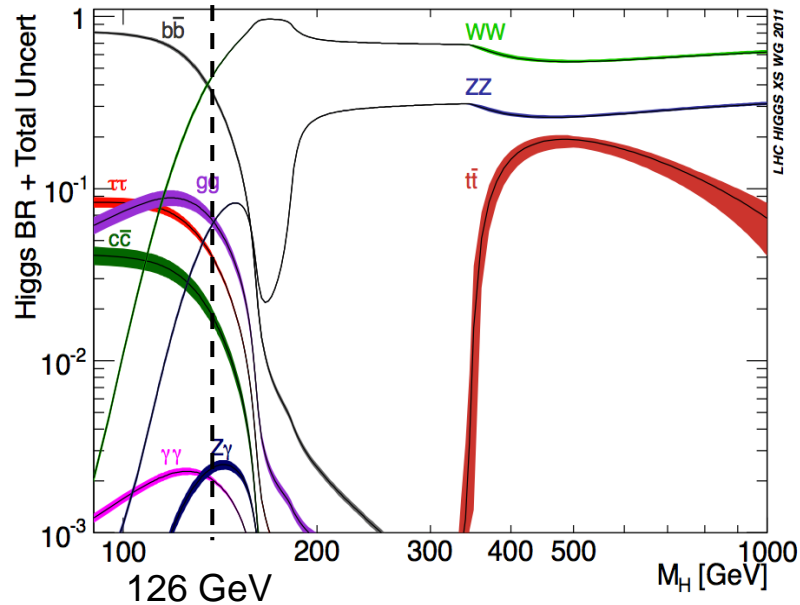
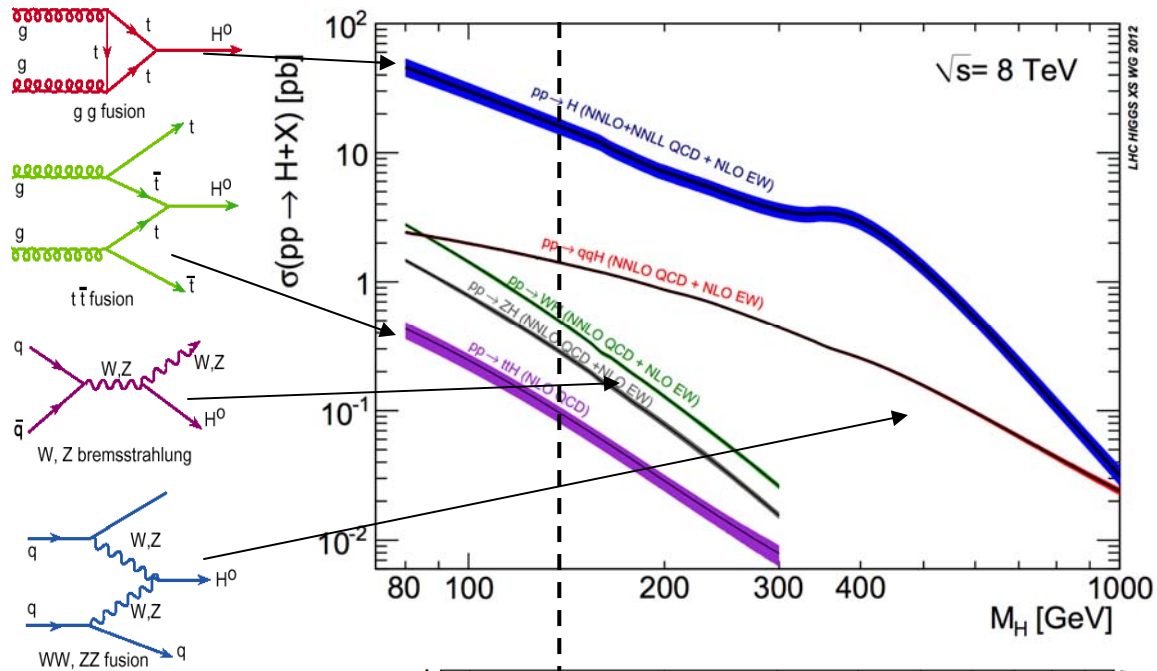
Seltener Prozess, der erst am LHC ("top-Quark-Fabrik") genauer studiert werden kann



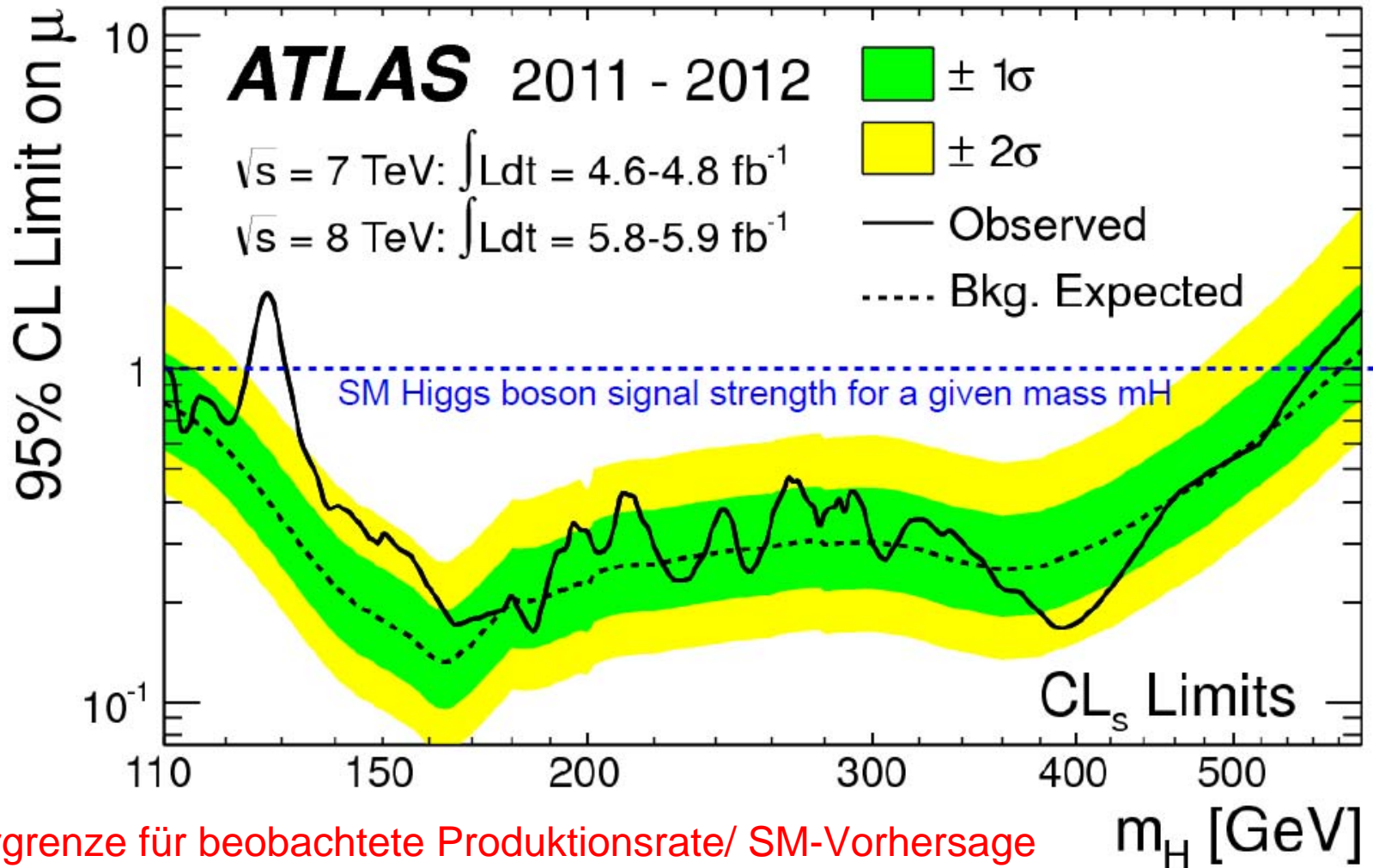
Messung der top Quark-Masse



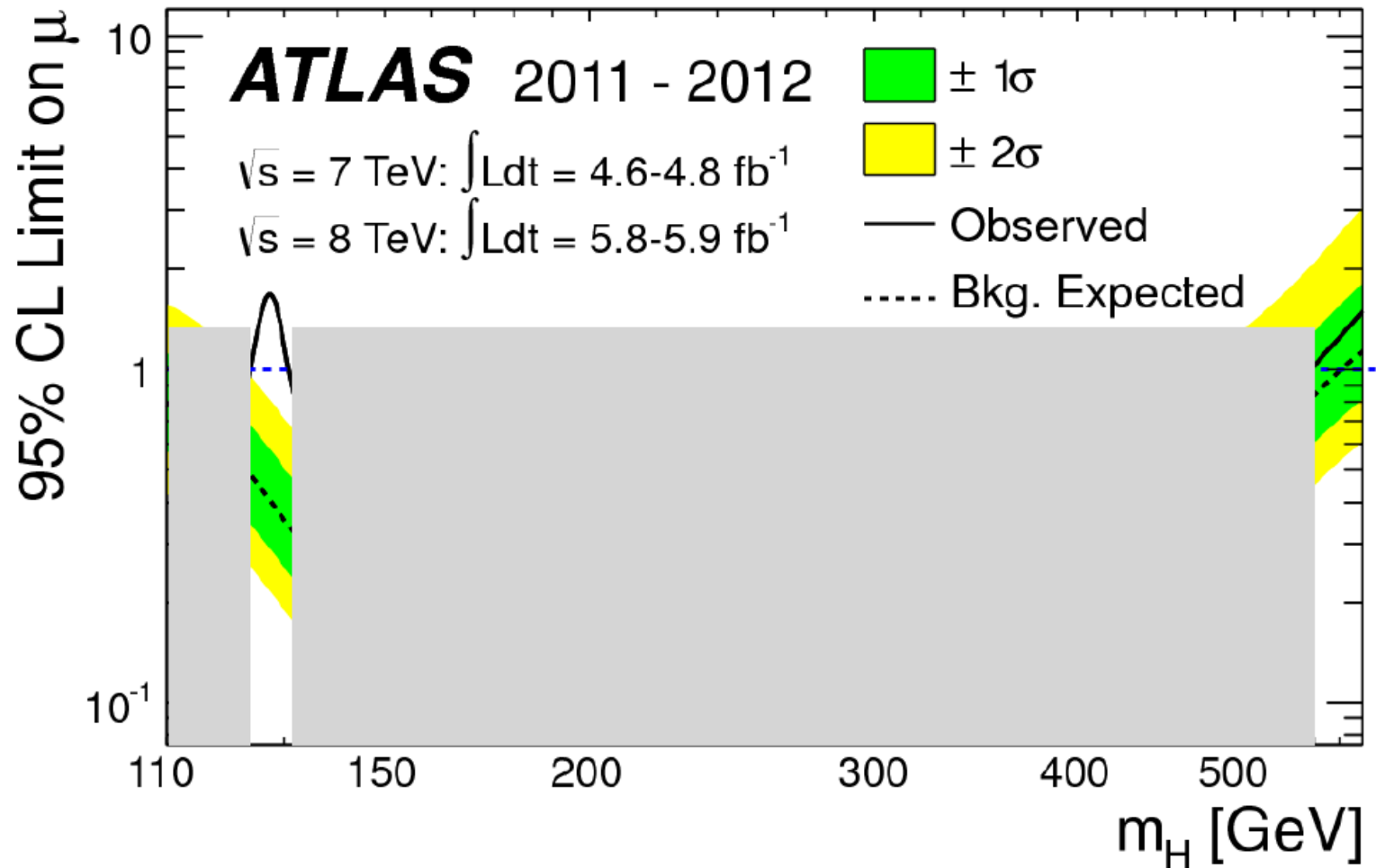
Higgs-Boson Produktion und Zerfall



Combined exclusion limits (July 2012)



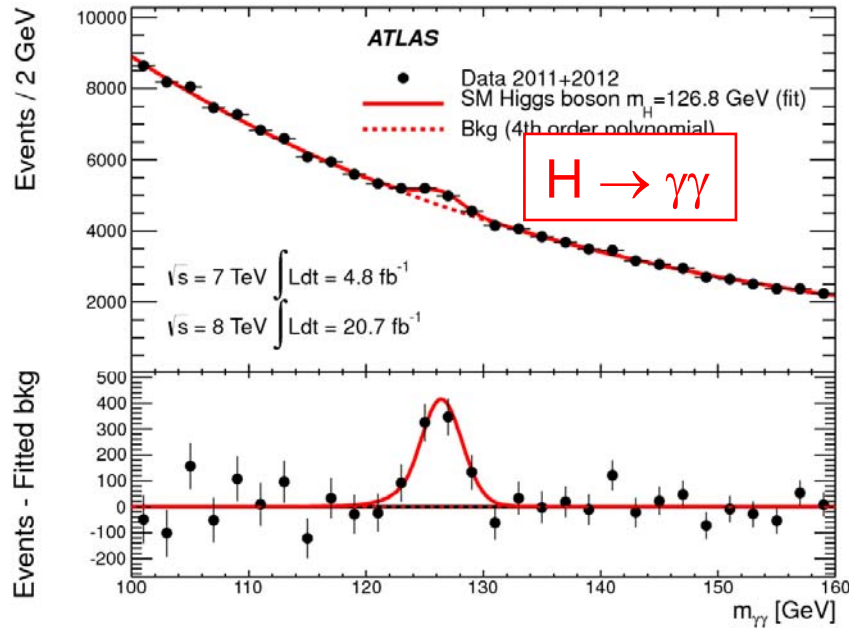
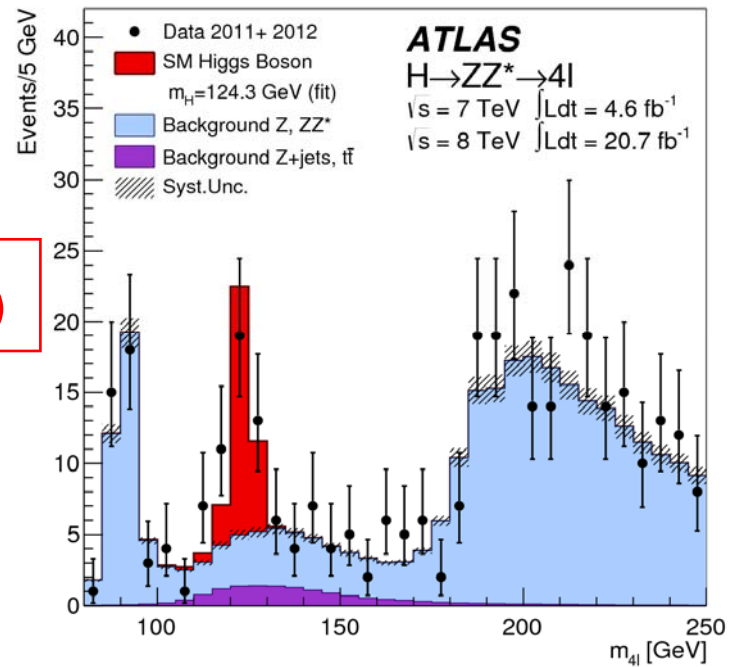
Combined exclusion limits (July 2012)



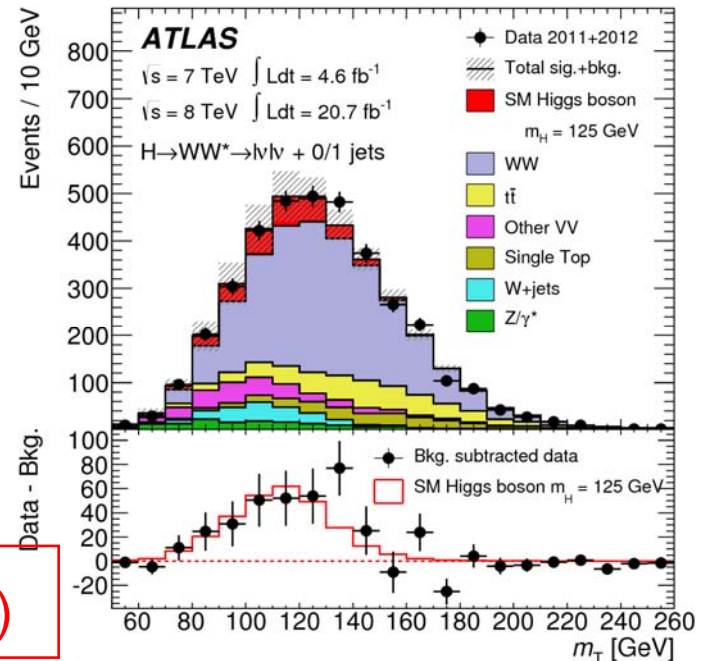
The existence of the Standard Model Higgs boson is **excluded with 95% confidence level** for almost all masses m_H from 110 GeV to 600 GeV, **except for $m_H \approx 120 - 130$ GeV where an excess of events is observed in few channels.**

Higgs-Boson-Signale - ATLAS

$$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow (l^+ l^-)(l^+ l^-)$$

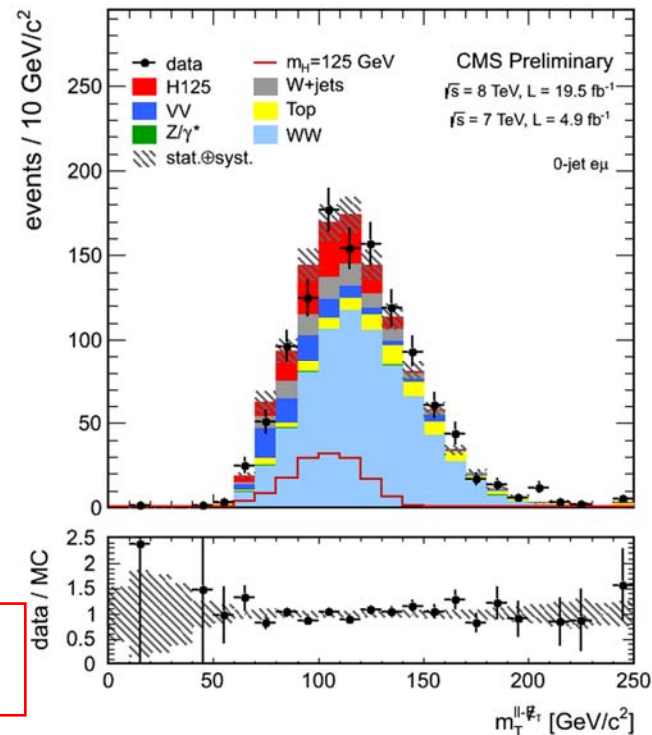
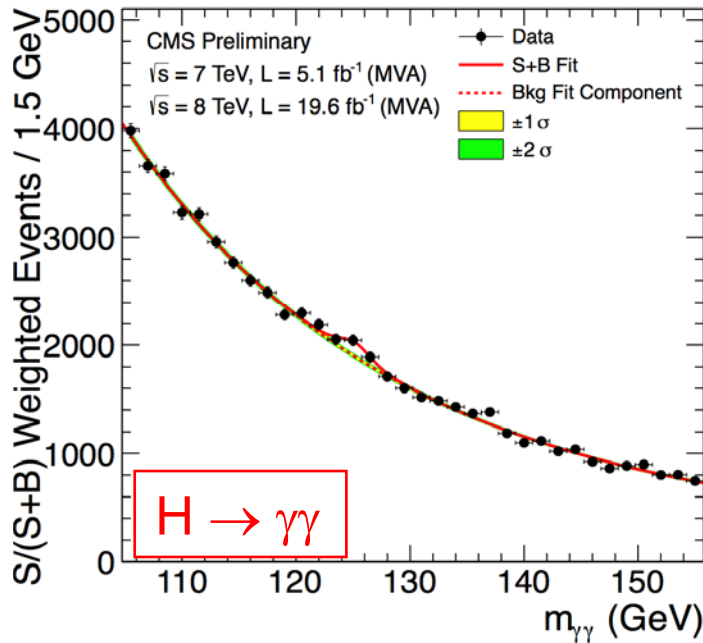
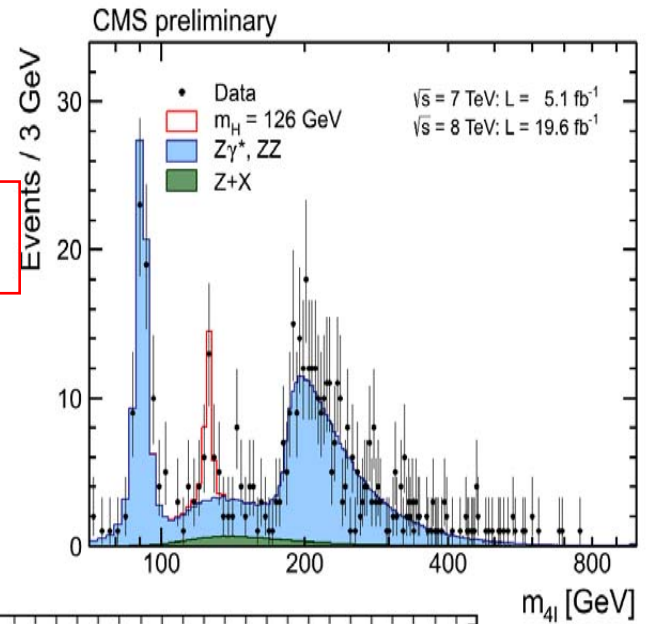


$$H \rightarrow WW^* \rightarrow (lv)(lv)$$



Higgs-Boson-Signale – CMS

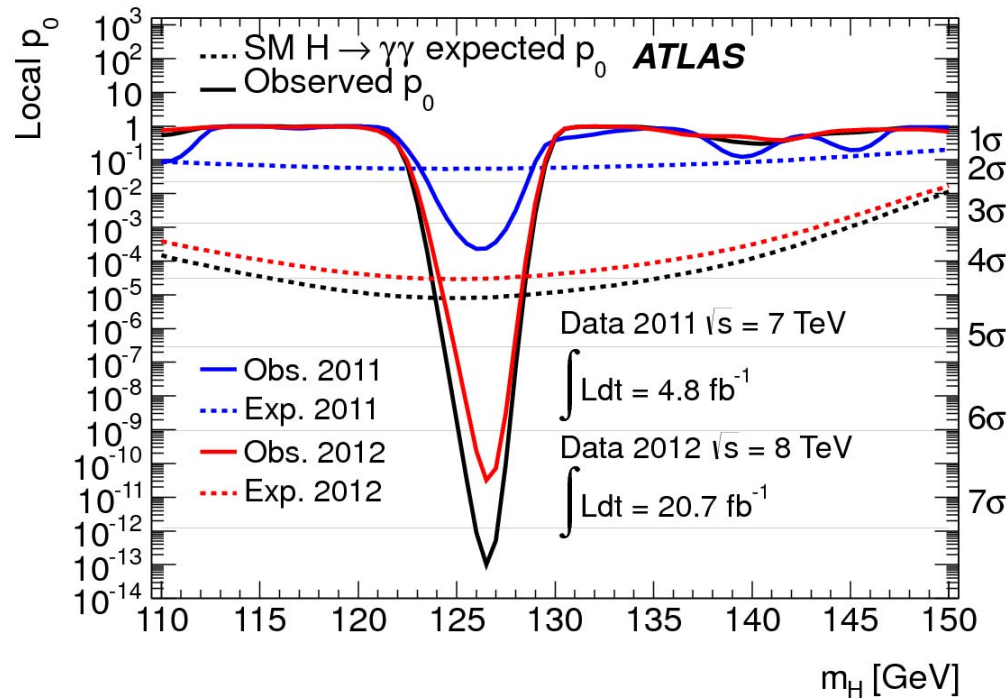
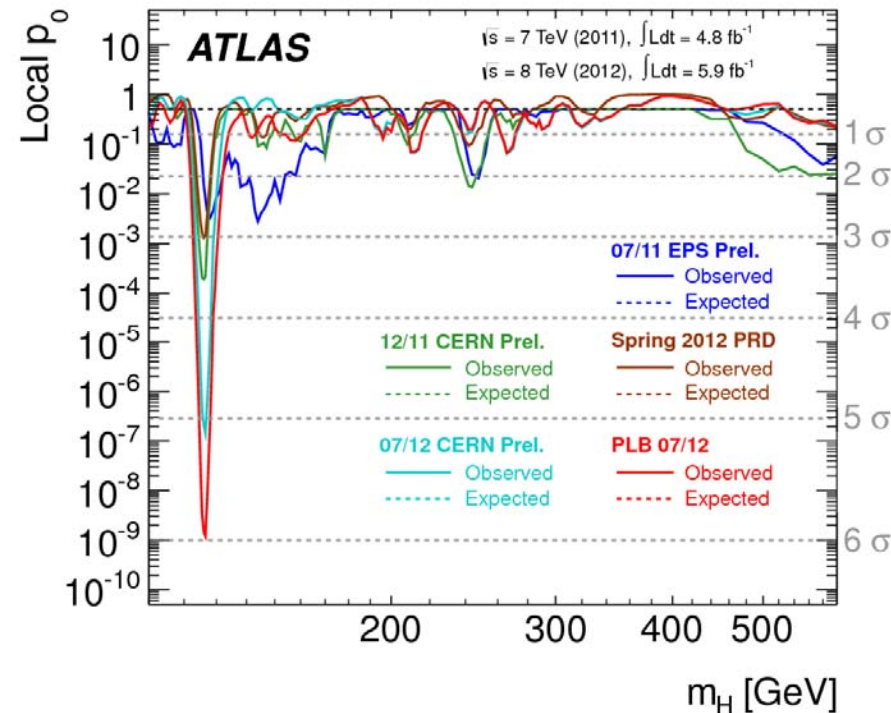
$$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow (l^+ l^-)(l^+ l^-)$$



$$H \rightarrow WW^* \rightarrow (lv)(lv)$$

Higgs-Boson-Signal

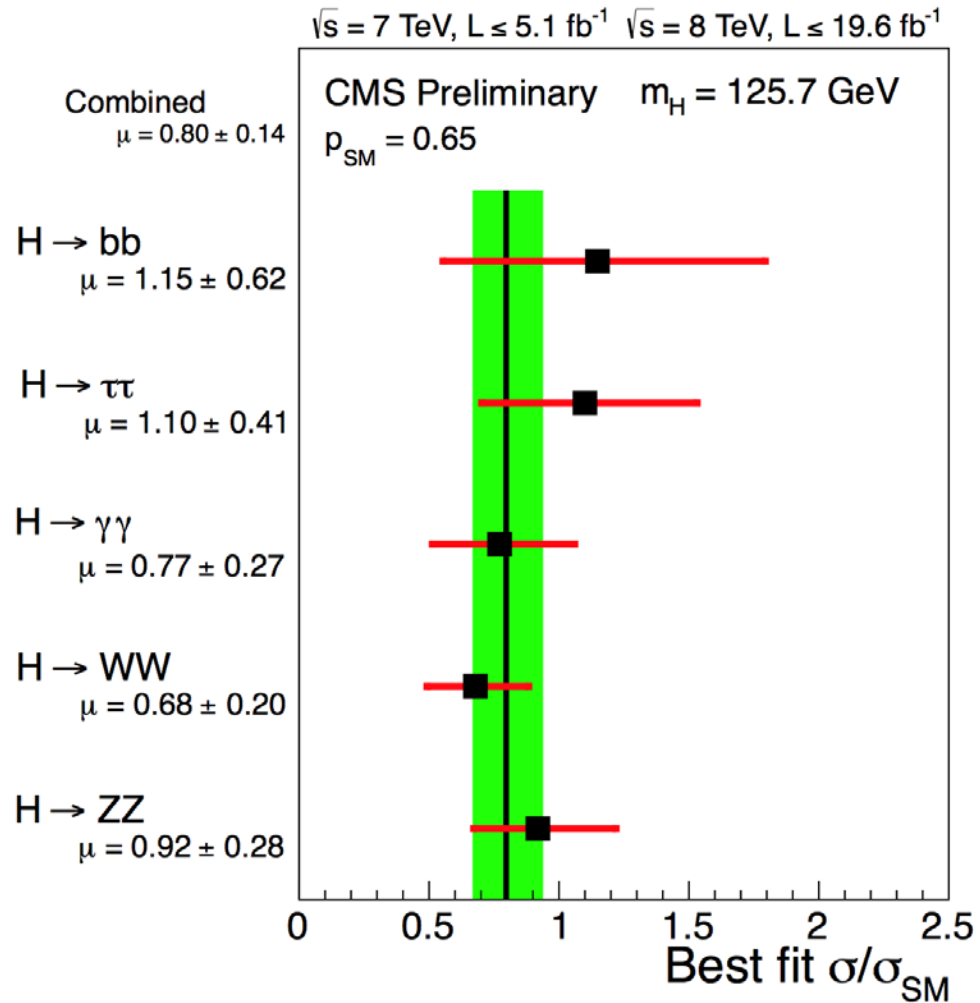
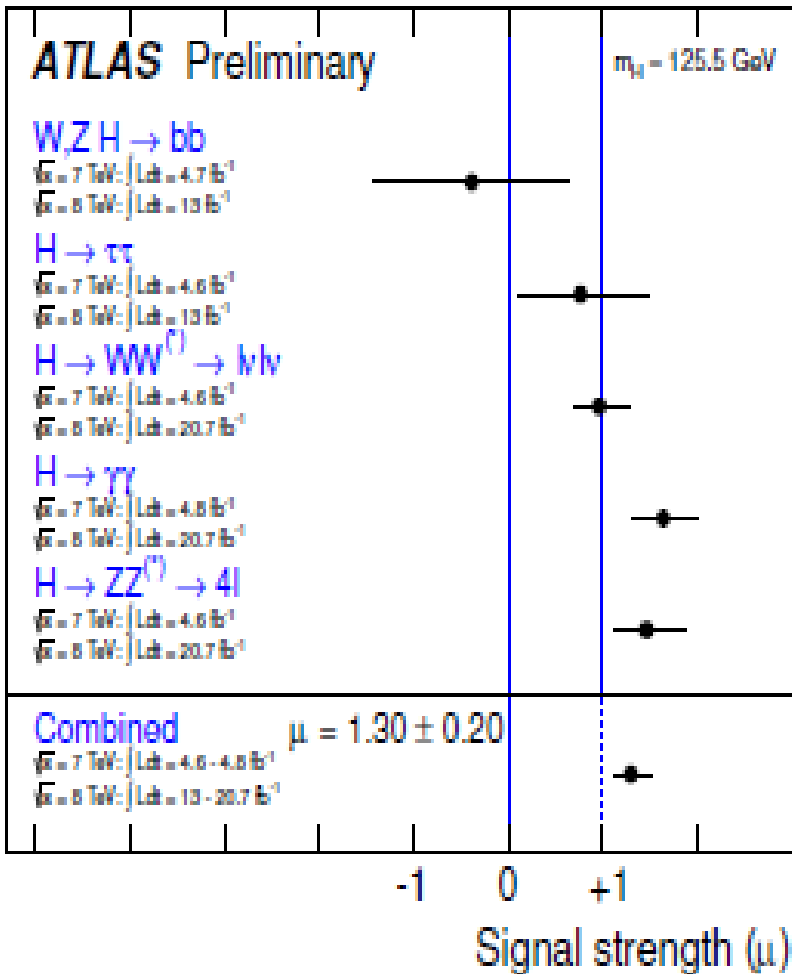
Wahrscheinlichkeit einer Untergrundfluktuation

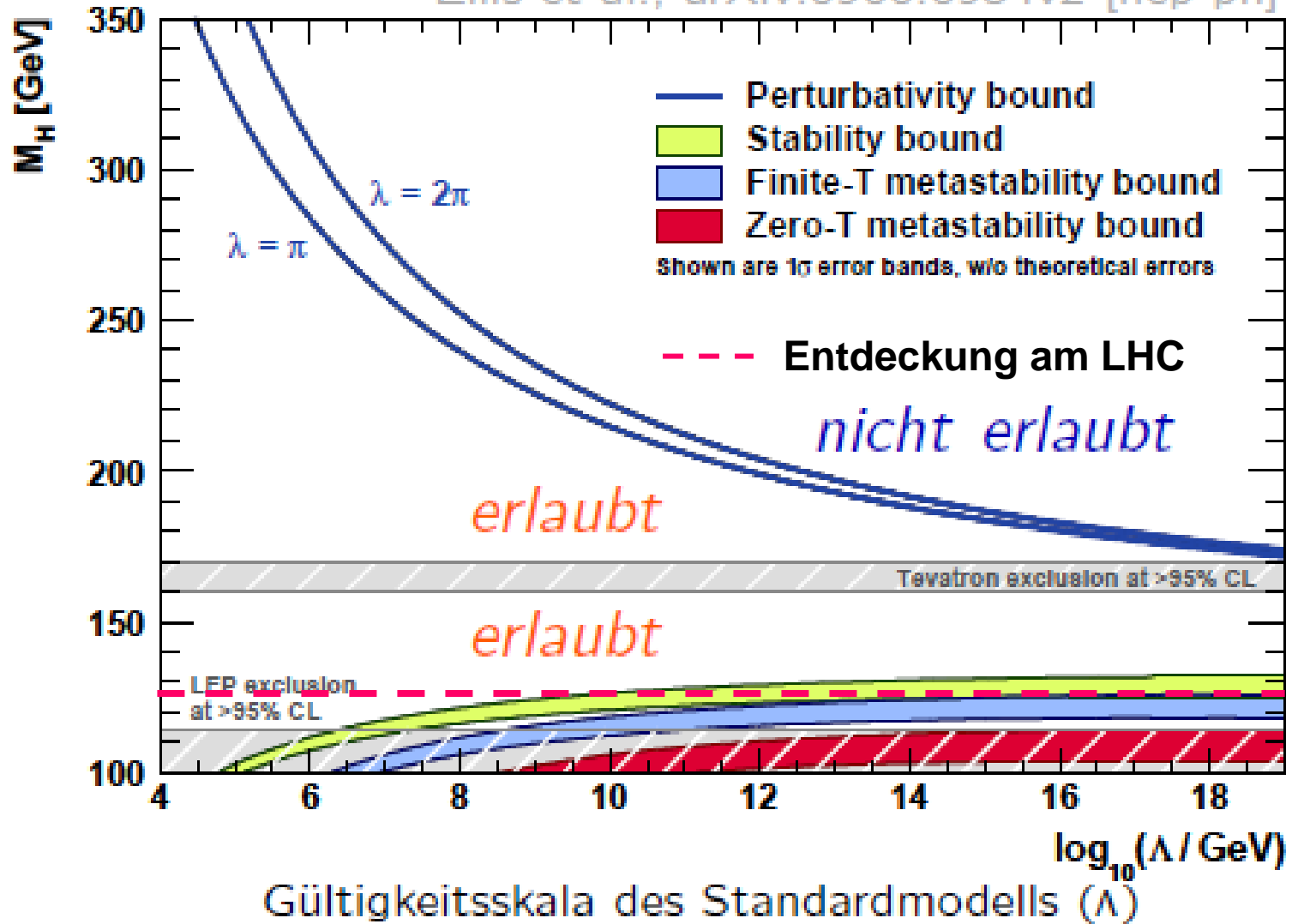


Entdeckung Juli 2012

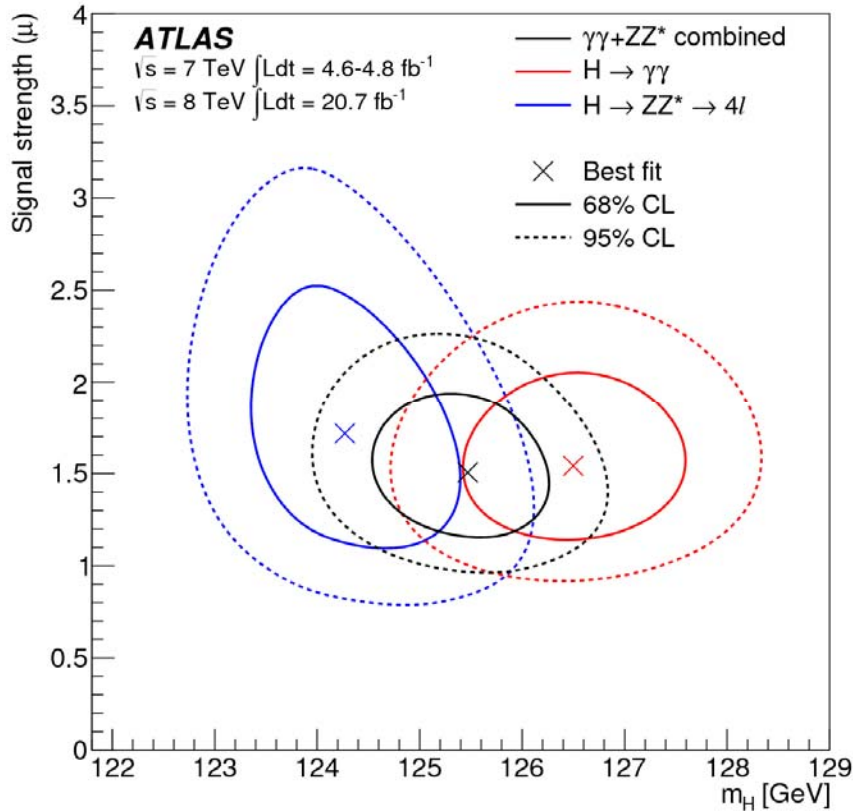
Endergebnis mit 7-8 TeV Daten April 2013

Higgs-Boson-Signalstärke



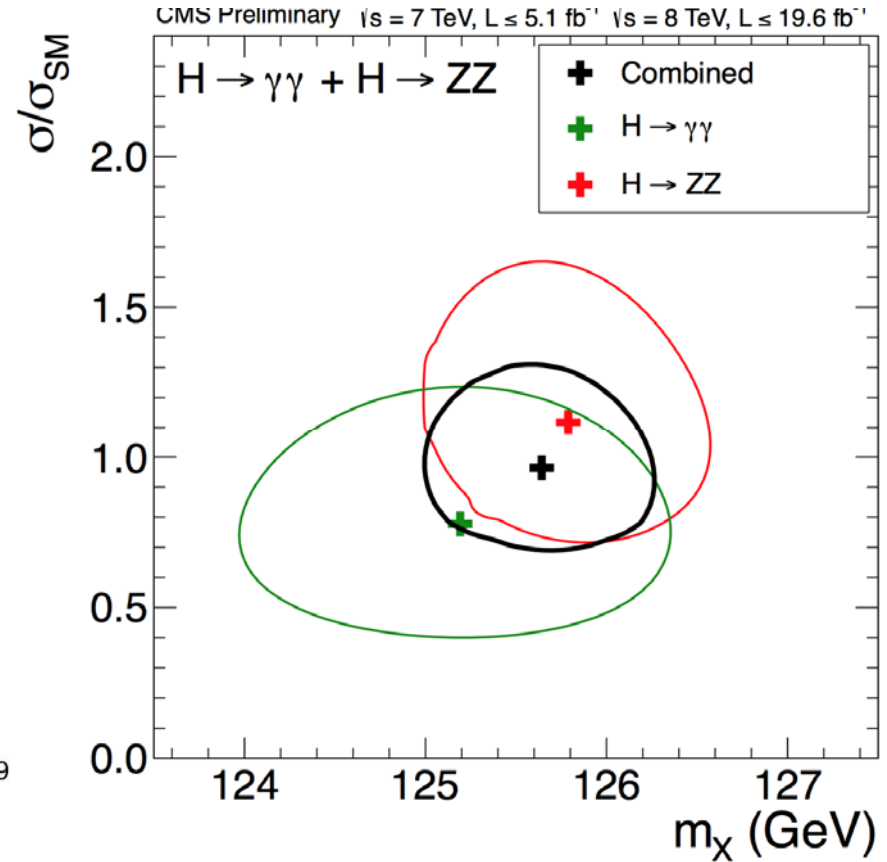


Higgs-Boson-Masse und Signalstärke



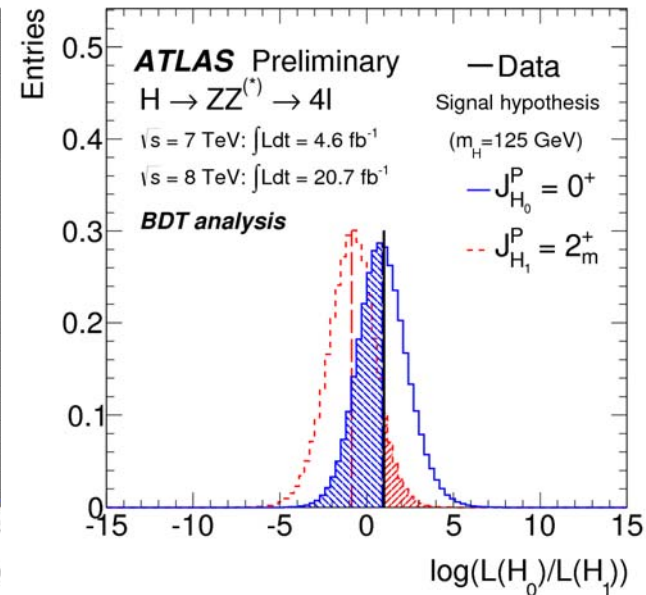
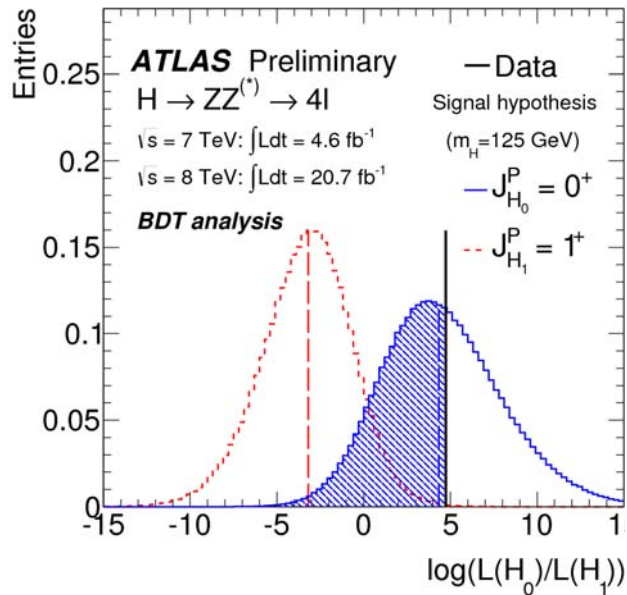
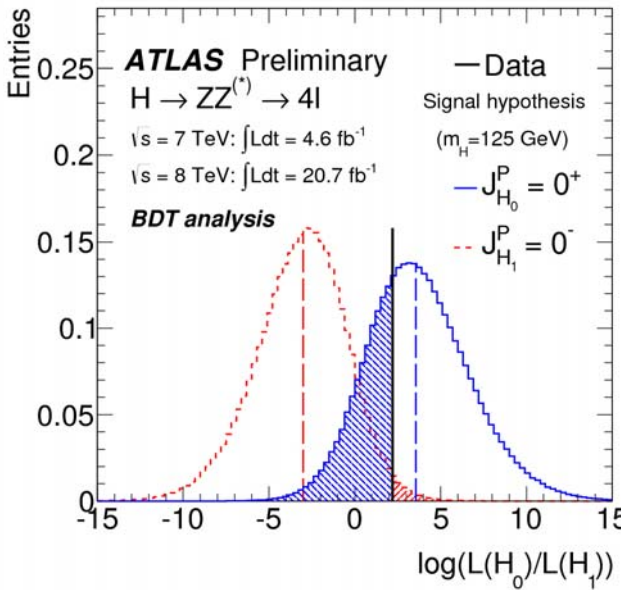
Präzisionsmessung:

$$m_H = 125.5 \pm 0.2^{(\text{stat})} \pm 0.5^{(\text{syst})} \text{ GeV}$$



$$m_H = 125.7 \pm 0.3^{(\text{stat})} \pm 0.3^{(\text{syst})} \text{ GeV}$$

Higgs-Boson-Spin und CP- Quantenzahl



Standardmodell: $\text{Spin}^{\text{CP}} = 0^+$.

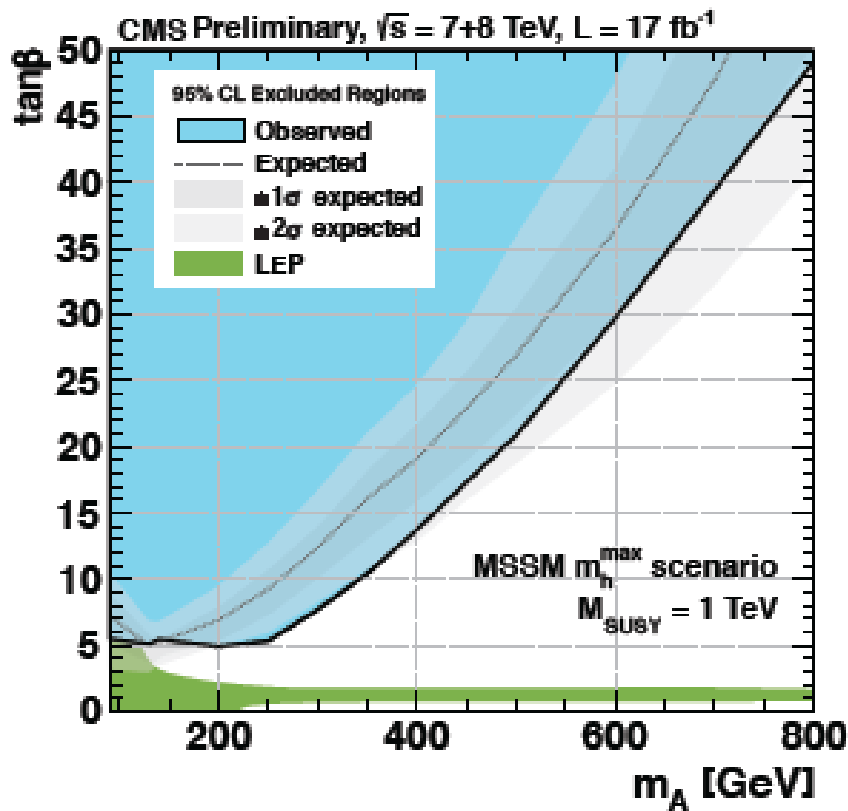
Isotrope Winkelverteilung von γ , W, Z im Higgs Ruhesystem für Spin 0.

Spin 1 verboten wegen $H \rightarrow \gamma\gamma$ Zerfall (Landau-Yang Theorem).

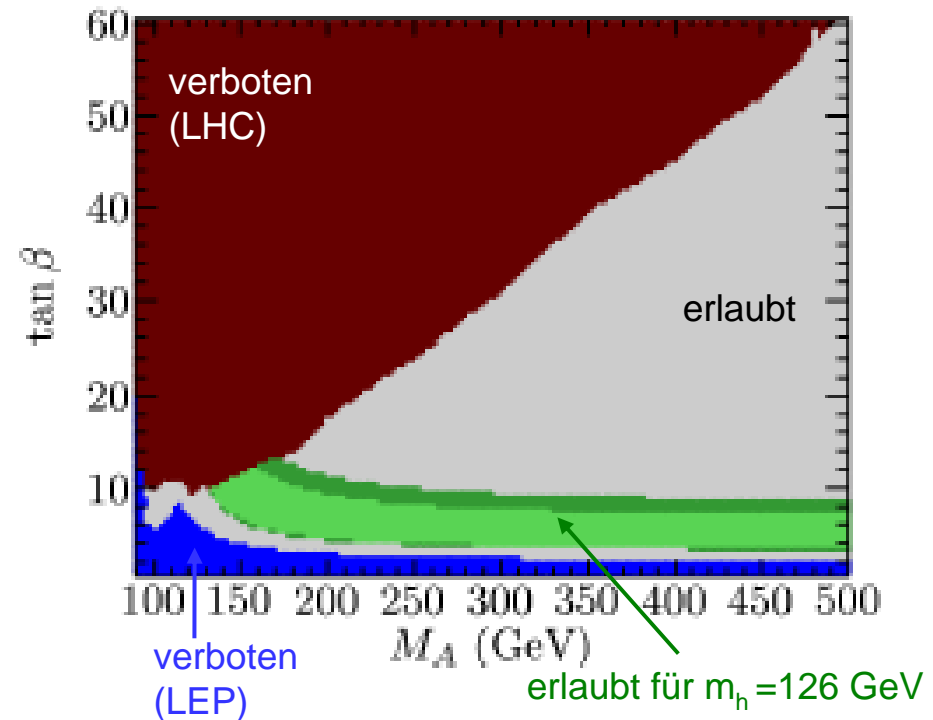
SUSY Higgs-Bosonen

Minimale supersymmetrische Erweiterung des Standardmodells (MSSM):
 3 neutrale Higgs-Bosonen h, H ($CP = +1$), A ($CP = -1$) und zwei geladene H^\pm .

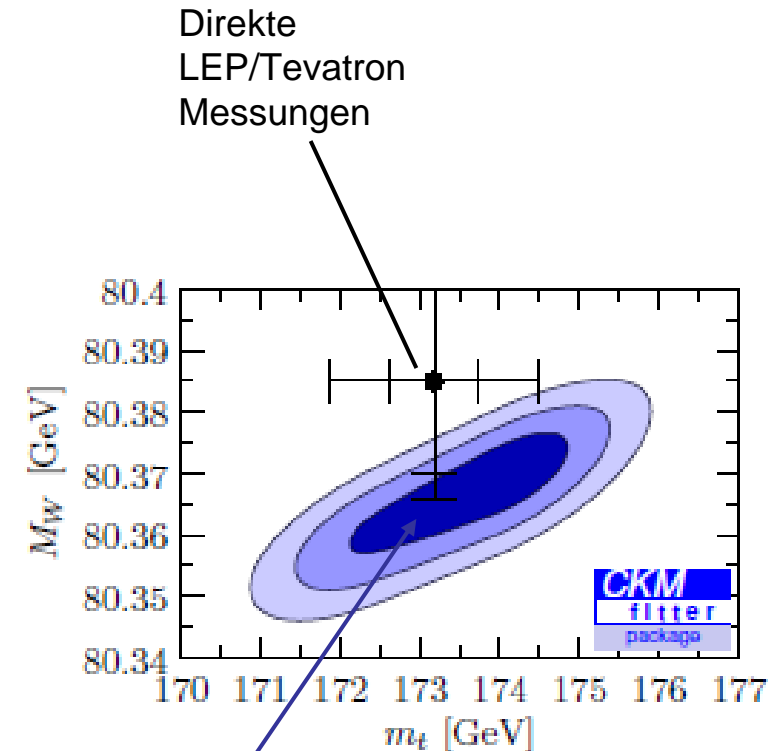
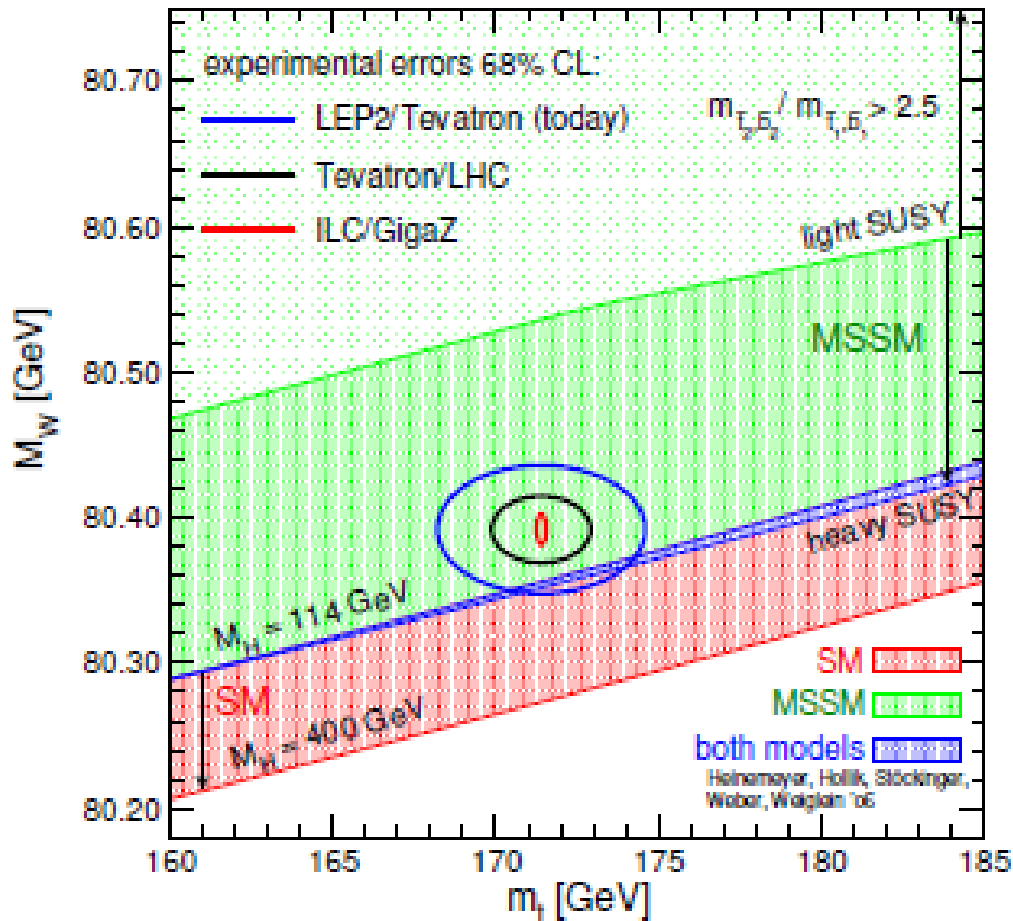
Zwei wesentliche Parameter in niedrigster Ordnung: M_A und $\tan \beta = v_{\text{up}} / v_{\text{down}}$.



Entdecktes Higgs-Boson = $h \rightarrow \tau\tau$



Interpretation der elektroschwachen Präzisionsmessungen im Standardmodell und im MSSM ($m_h < 130$ GeV):



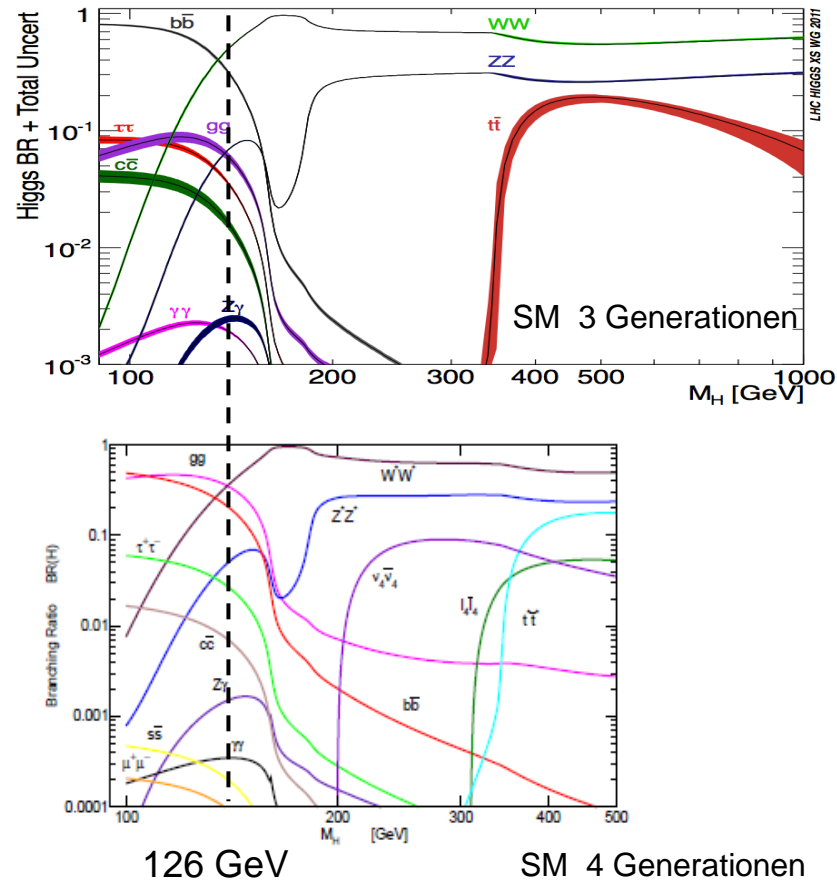
Standardmodell-Vorhersage von elektroschwachen Präzisionsmessungen und Messungen der Higgs-Produktions- und Zerfallsraten und der Higgs-Masse

Higgs und 4. Fermionengeneration (mit schweren Neutrinos)

LEP/Tevatron: $m(t') > 450 \text{ GeV}$, $m(b') > 361 \text{ GeV}$. $> 500 \text{ GeV}$ keine Störungstheorie mehr.

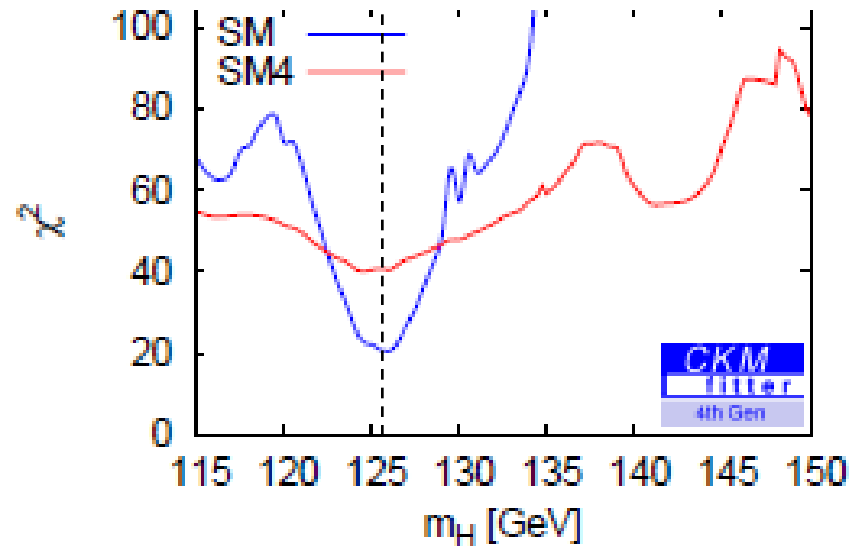
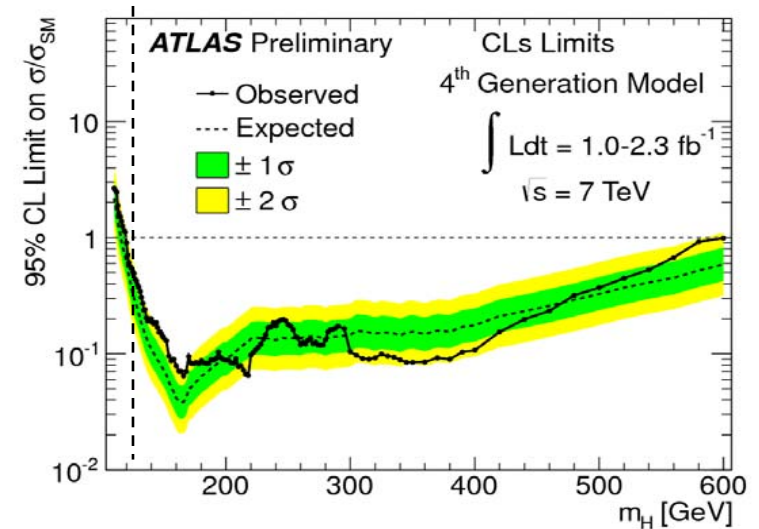
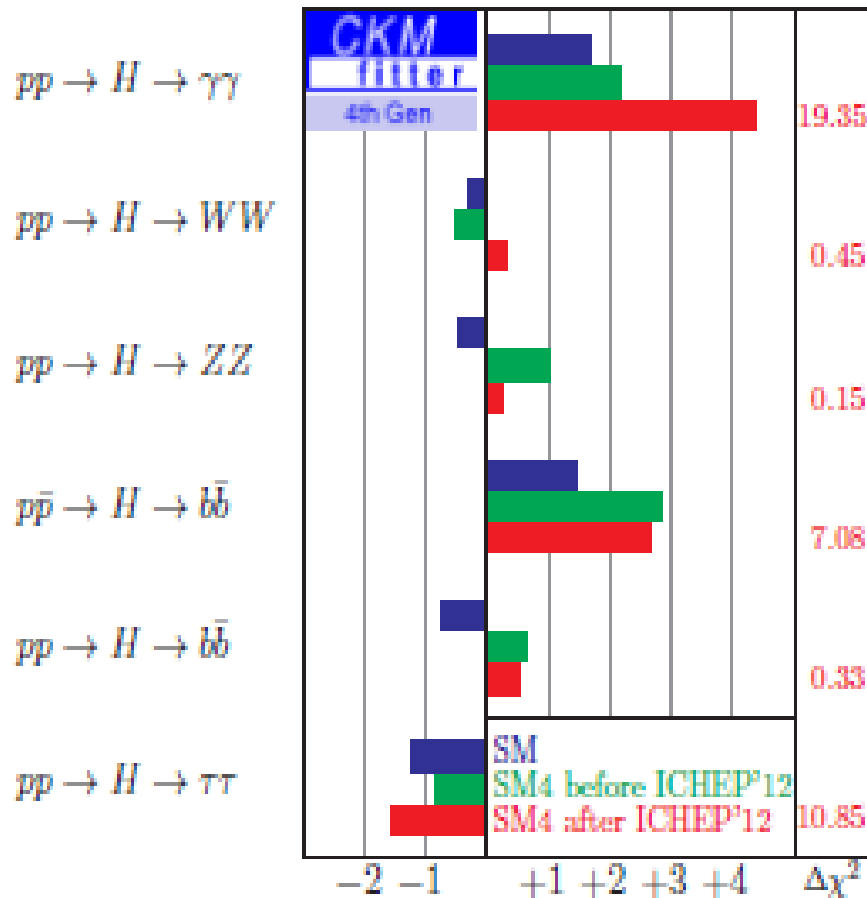
Starke Konsequenzen der zusätzlichen schweren Quarks (für Higgs-Produktions- und Zerfallsraten: Gluonfusionsproduktion **9 x verstärkt** durch 2 zusätzliche schwere Quark-loops, weitgehend unabhängig von der Masse.

Vergleich mit den Messungen:



Higgs und 4. Fermionengeneration (mit schweren Neutrinos)

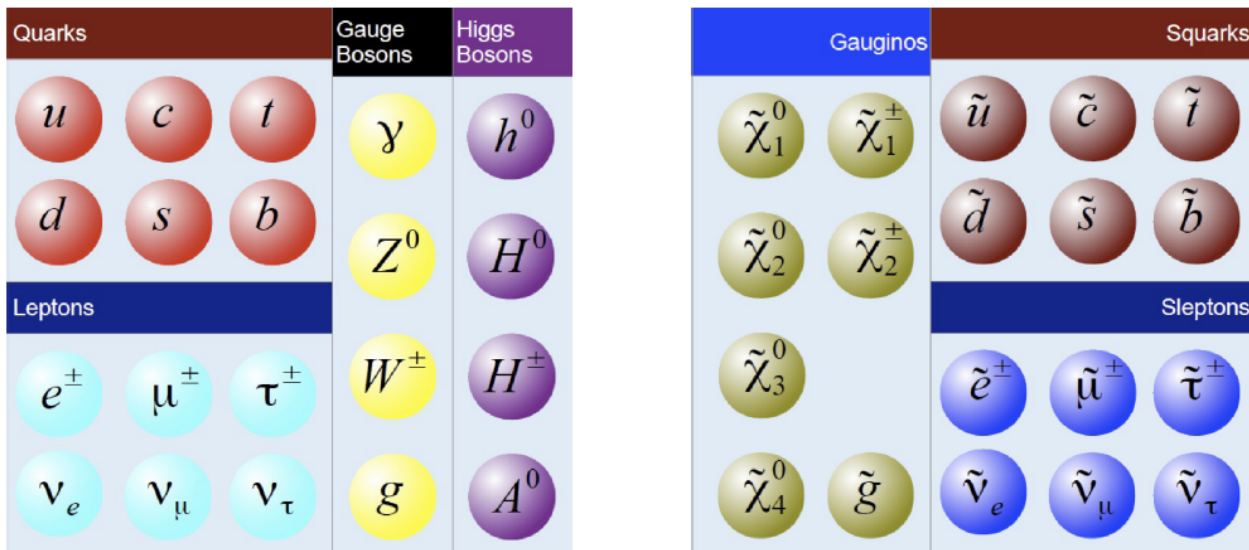
4. Generation ausgeschlossen:



Suche nach Supersymmetrie (SUSY)

Symmetrie zwischen Fermionen und Bosonen: max. Erweiterung der Raum-Zeit-Symmetrien

- Zu jedem Standard Modell-Teilchen ein **schwerer** Superpartner mit Unterschied $\frac{1}{2}$ im Spin.
Der leichteste Superpartner (neutral und stabil) ist bester Kandidat für Dunkle Materie.
- **Erklärung der kleinen Higgs-Bosonmasse** (im Vergleich zur Planck-Masse und zu den erlaubten Massenbereichen im Standard Modell), für Superpartnermassen $< 1-3$ TeV
- 3 neutrale und 2 geladene Higgs-Bosonen in der minimalen supersymmetrischen Erweiterung des Standard Modells (MSSM).
- Vorhersage der Vereinheitlichung der Eichkopplungskonstanten des SM, des Weinberg-Winkels, der spontanen Symmetriebrechung.
- Lokale Supersymmetrie beschreibt die Gravitation (Supergravitation, Superstrings).



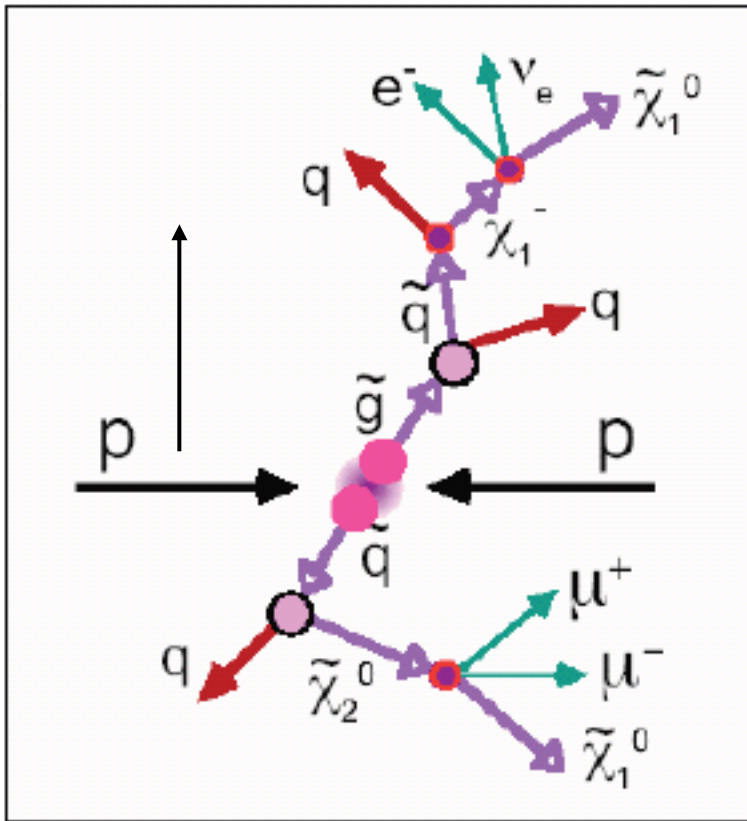
Supersymmetrie muss **spontan gebrochen** sein wegen der offensichtlich hohen Massen der noch nicht beobachteten SUSY-Teilchen.

Die Details des Mechanismus sind unbekannt, was zu vielen (>100) freien Parametern führt, die Massen-vorhersagen unmöglich machen.

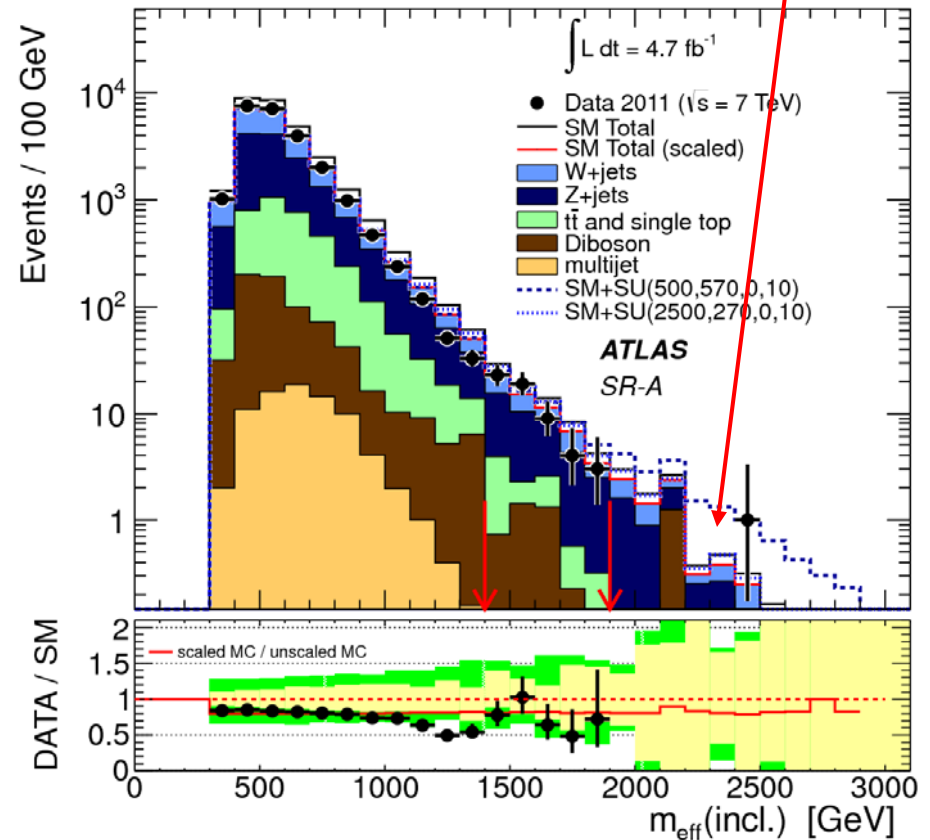
Suche nach Supersymmetrie

Suche nach Ereignissen mit $> 2 - 6$ Jets und grosser fehlender Energie, evtl. ausserdem mit Leptonen.

$$m_{\text{eff}} = E_{\text{T}}^{\text{miss}} + p_{\text{T}}^{\text{jets}}$$



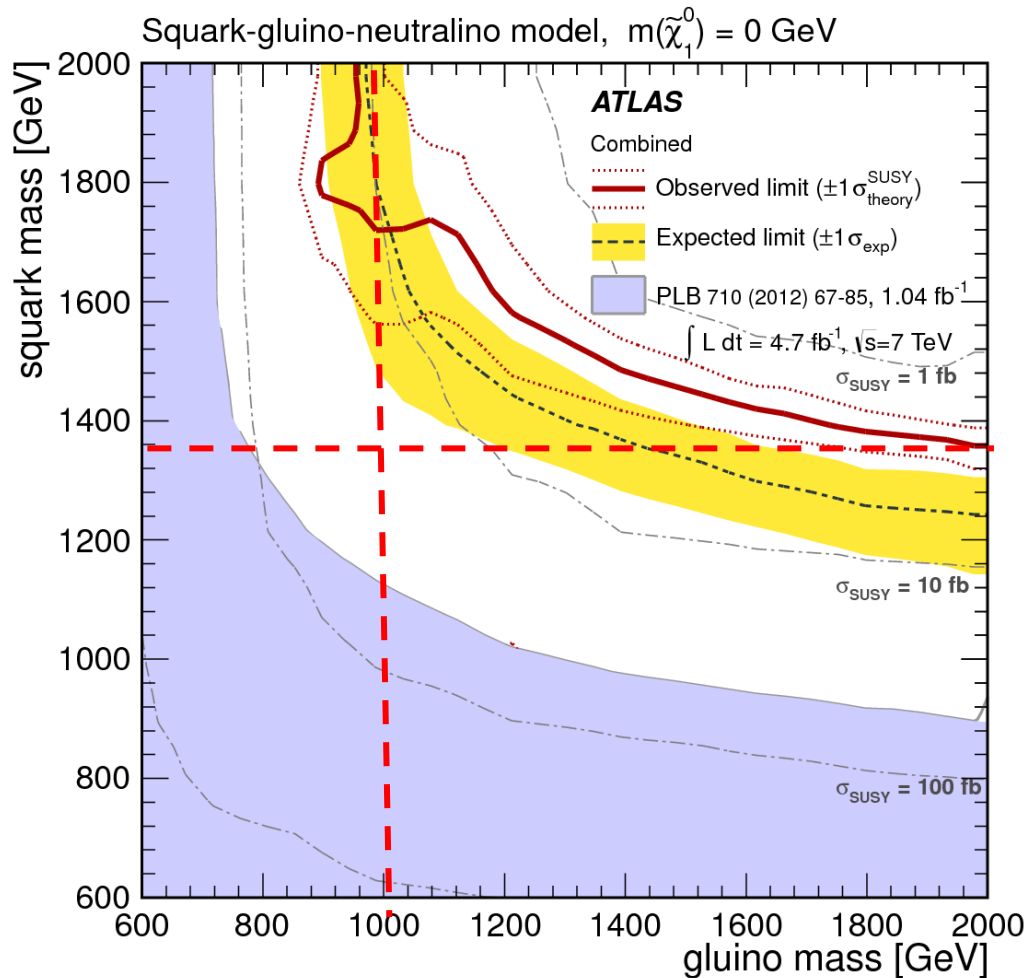
Ein Signal von Zerfällen supersymmetrischer Teilchen wird in dieser Gegend erwartet. Bisher wurden noch keine Anzeichen gefunden.



Suche nach Supersymmetrie

⇒ Massenausschlussgrenzen für die Superpartner von Quarks (squarks) und Gluonen (gluinos): LHC-Daten rücken squark- und gluino-Massen bereits in den Bereich > 1 TeV.

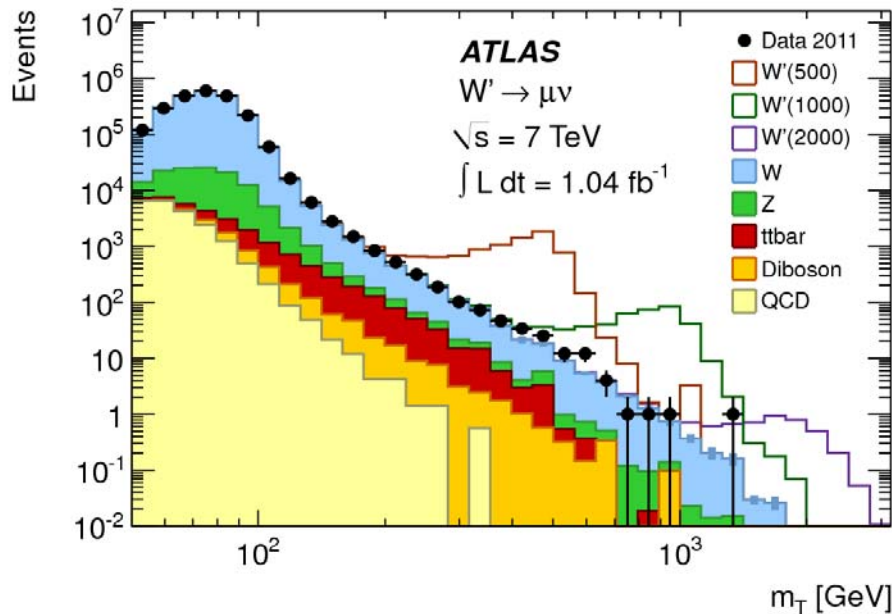
stop und slepton-Massen könnten evtl. leichter sein, wurden aber auch noch nicht gefunden.



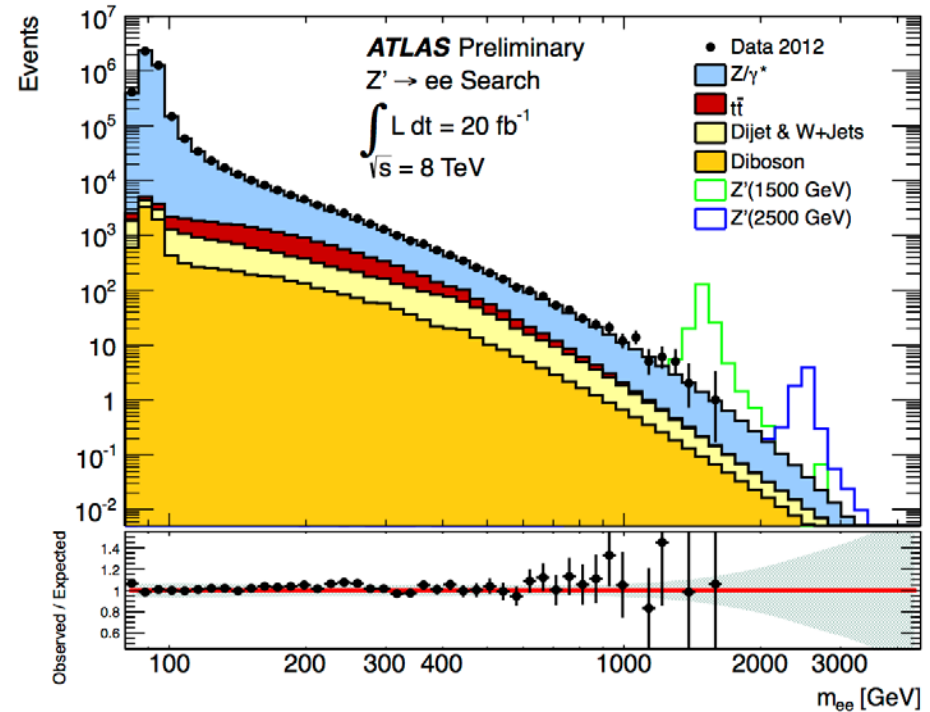
Suche nach neuen schweren Eichbosonen W' , Z'

Resonanzen in den Verteilung der invarianten Leptonpaarmassen
oder der transversalen $l\nu$ -Massen

(Annahme: gleiche Kopplungsstärken an SM Fermionen wie W und Z .)



$M_{W'} > 2.15 \text{ TeV (95\% CL)}$

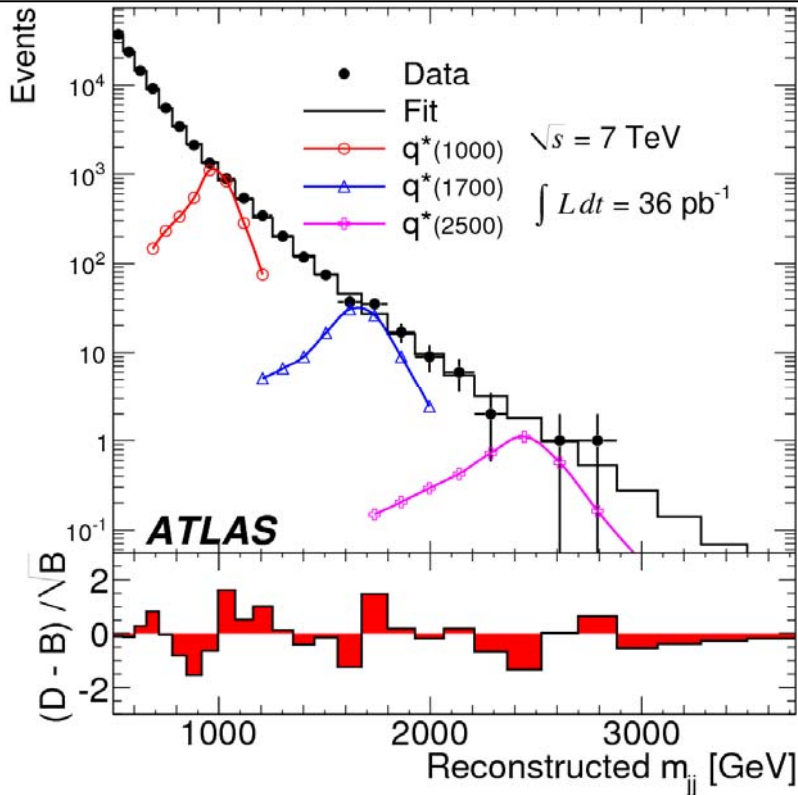


$M_{Z'} > 2.86 \text{ TeV (95\% CL)}$

(Tevatron Grenzen: $> 1 \text{ TeV}$)

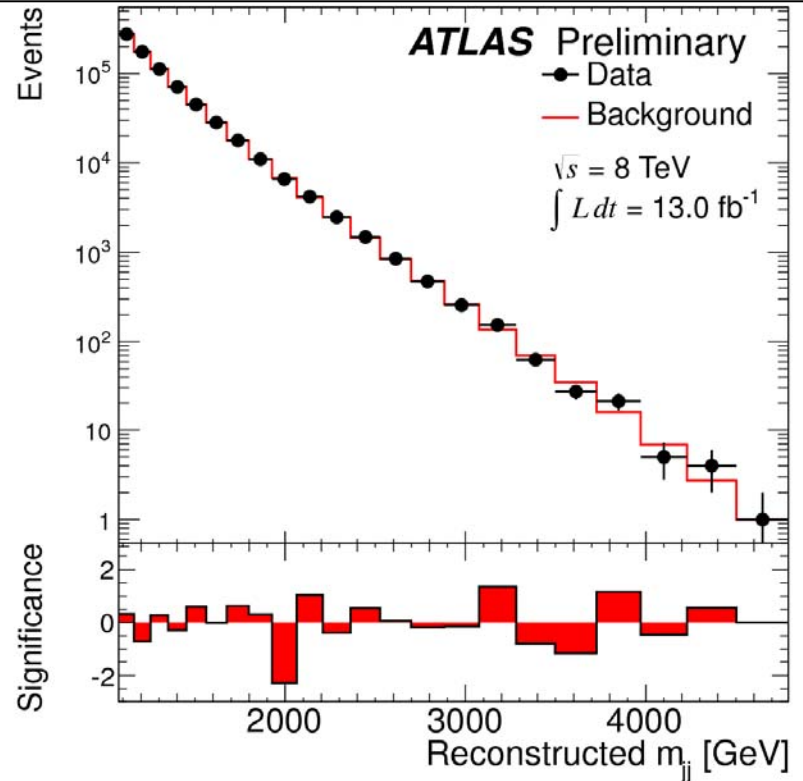
Substruktur der Quarks?

1. Angeregte Quark-Zustände $q^* \rightarrow q_1 q_2$
2. Neue effective $qq' \rightarrow qq'$ Wechselwirkung, Energieskala Λ_c der Substrukturwechselwirkung



$M_{q^*} > 3.8 \text{ TeV} \text{ (95\% CL)}$

Massengrenze für angeregt Quarks



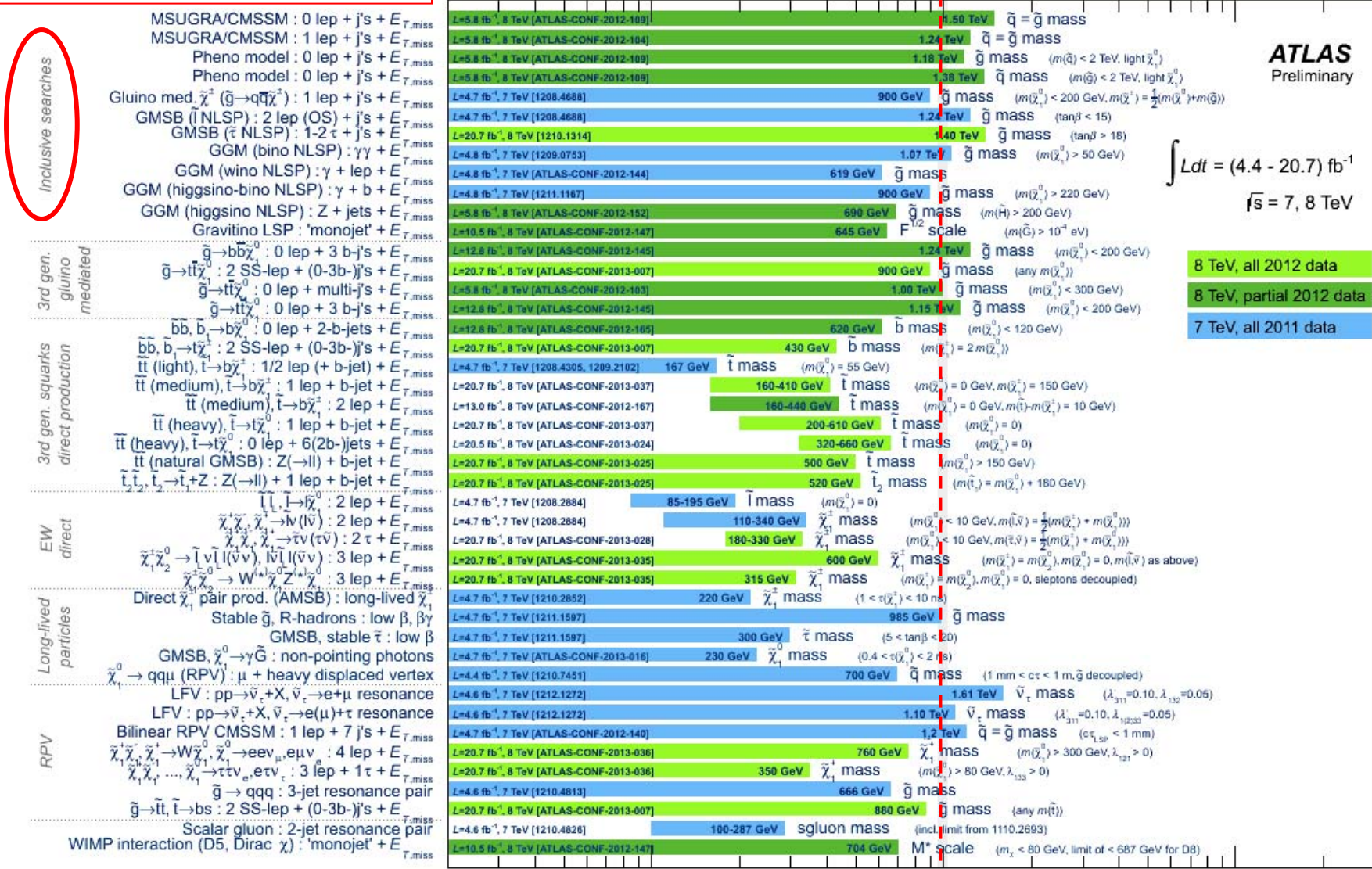
$\Lambda_c > 9.5 \text{ TeV} \text{ (95\% CL)}$

Energieskala der Substruktur

Suche nach SUSY am LHC

ATLAS SUSY Searches* - 95% CL Lower Limits (Status: March 26, 2013)

Inclusive searches



Erstmals direkte Erforschung der Energieskala um 1 TeV am LHC
(Skala der elektroschwachen Symmetriebrechung und möglicher neuer Teilchen).

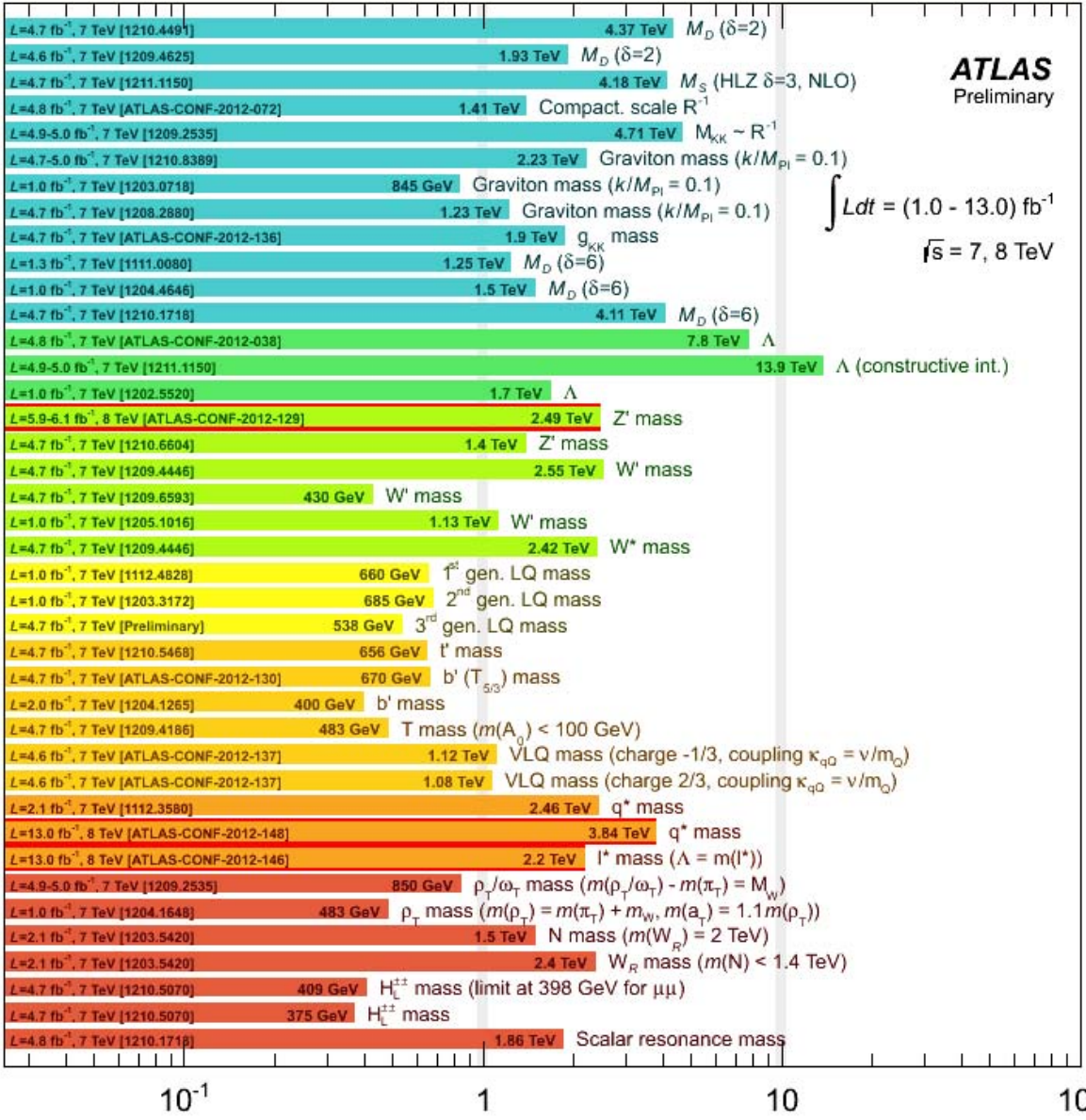
⇒V]

Suche nach Erweiterungen des SM am LHC (ausser SUSY)

ATLAS Exotics Searches* - 95% CL Lower Limits (Status: HCP 2012)

Extra dimensions
CI
V'

Large ED (ADD) : monojet + $E_{T,miss}$
 Large ED (ADD) : monophoton + $E_{T,miss}$
 Large ED (ADD) : diphoton & dilepton, $m_{\gamma\gamma} / \parallel$
 UED : diphoton + $E_{T,miss}$
 S^1/Z_2 ED : dilepton, m_{\parallel}
 RS1 : diphoton & dilepton, $m_{\gamma\gamma} / \parallel$
 RS1 : ZZ resonance, $m_{\parallel} / \parallel$
 RS1 : WW resonance, $m_{T,WIV}$
 RS $g_{KK} \rightarrow tt$ (BR=0.925) : $tt \rightarrow l+jets$, $m_{t,boosted}$
 ADD BH ($M_{TH}/M_D=3$) : SS dimuon, $N_{ch,part.}$
 ADD BH ($M_{TH}/M_D=3$) : leptons + jets, Σp_T
 Quantum black hole : dijet, $F(m_{\parallel})$
 qqqq contact interaction : $\tilde{\chi}(m_{\parallel})$
 qqll CI : ee & $\mu\mu$, m_{\parallel}
 uutt CI : SS dilepton + jets + $E_{T,miss}$
 Z' (SSM) : $m_{ee/\mu\mu}$
 Z' (SSM) : $m_{\tau\tau}$
 W' (SSM) : $m_{T,e\mu}$
 W' ($\rightarrow tq, g=1$) : m_{tq}
 W'_R ($\rightarrow tb, SSM$) : m_{tb}
 W^* : $m_{T,e\mu}$
 Scalar LQ pair ($\beta=1$) : kin. vars. in $e\mu jj, e\nu jj$
 Scalar LQ pair ($\beta=1$) : kin. vars. in $\mu\mu jj, \mu\nu jj$
 Scalar LQ pair ($\beta=1$) : kin. vars. in $\tau\tau jj, \tau\nu jj$
 4th generation : $t't' \rightarrow WbWb$
 4th generation : $b'b'(T_{5/3} T_{5/3}) \rightarrow WtWt$
 New quark b' : $b'b' \rightarrow Zb+X$, $m_{5/3}$
 Top partner : $TT \rightarrow tt + A_0 A_0$ (dilepton, M_{T2}^{Zb})
 Vector-like quark : CC, m_{Wq}
 Vector-like quark : NC, m_{Wq}
 Excited quarks : γ -jet resonance, $m_{\gamma jet}$
 Excited quarks : dijet resonance, m_{\parallel}
 Excited lepton : l - γ resonance, $m_{l\gamma}$
 Techni-hadrons (LSTC) : dilepton, $m_{ee/\mu\mu}$
 Techni-hadrons (LSTC) : WZ resonance ($vlll$), $m_{T,WZ}$
 Major. neutr. (LRSM, no mixing) : 2-lep + jets
 W_R (LRSM, no mixing) : 2-lep + jets
 H_{\pm}^{\pm} (DY prod., BR($H_{\pm}^{\pm} \rightarrow ll$)=1) : SS ee ($\mu\mu$), m_{\parallel}
 H_{\pm}^{\pm} (DY prod., BR($H_{\pm}^{\pm} \rightarrow e\mu$)=1) : SS $e\mu$, m_{\parallel}
 Color octet scalar : dijet resonance, m_{\parallel}



ATLAS Preliminary

$\int Ldt = (1.0 - 13.0) \text{ fb}^{-1}$
 $\sqrt{s} = 7, 8 \text{ TeV}$

Indirekte Ausschlussgrenzen z.B. für neue Substruktur bis 10 TeV.

TeV

Reparatur und Nachrüsten des LHC in 2013/14



Ab 2015 Datennahme bei 14 TeV
Design-Schwerpunktsenergie:

Neues Fenster für neue Physik
jenseits des Standard Modells.

Genauere Vermessung der Higgs-
Eigenschaften.