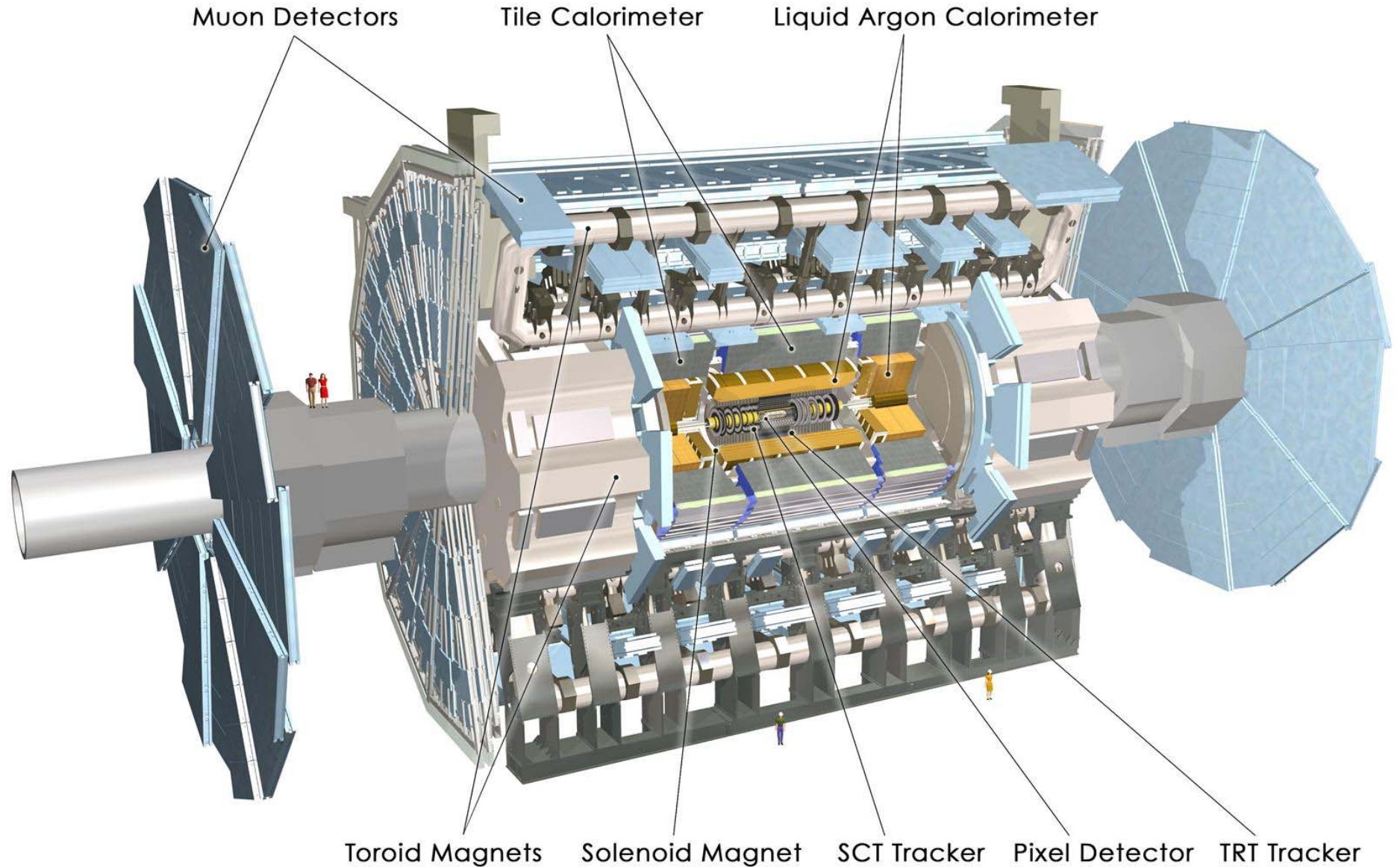
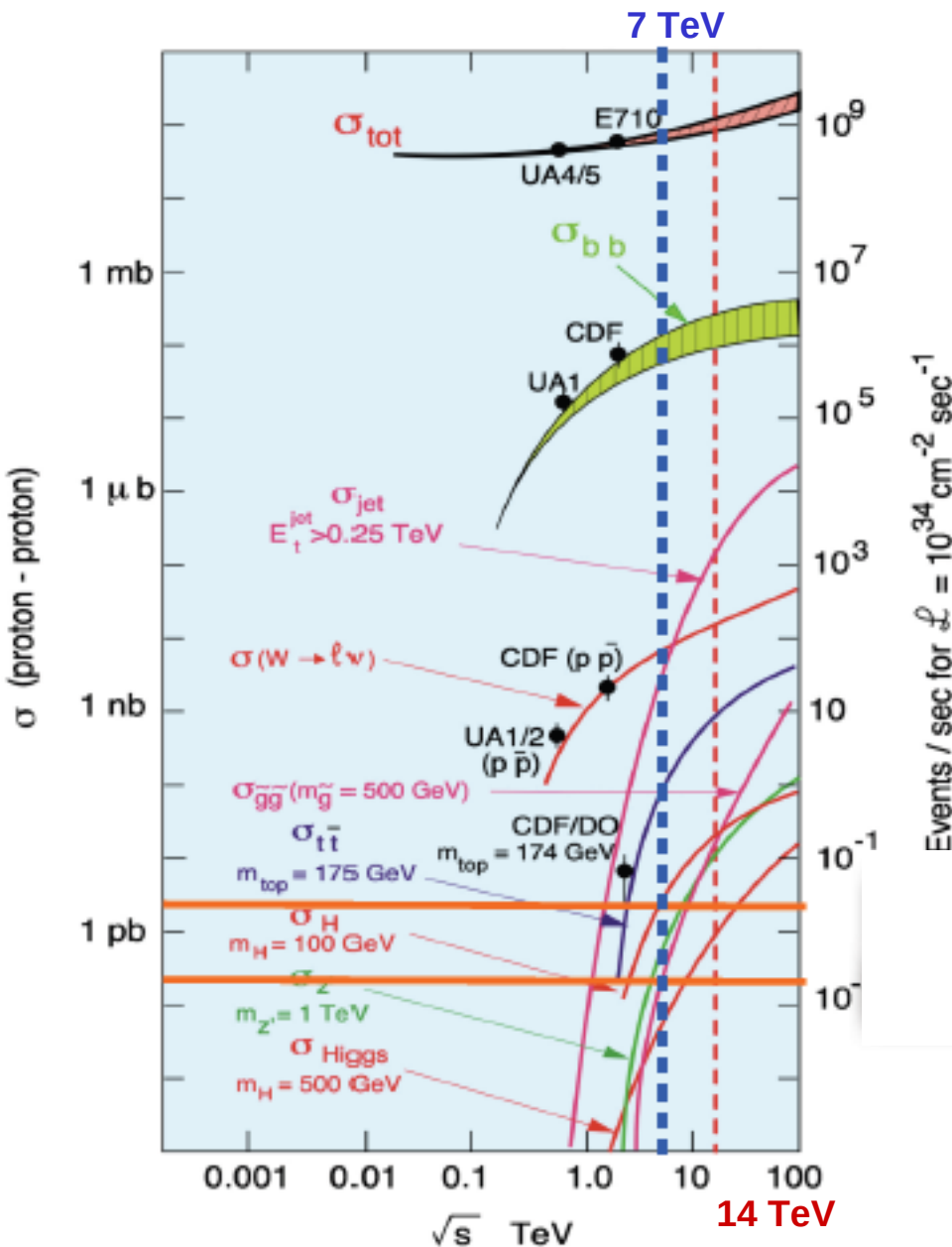


Physik am Large Hadron Collider



Der ATLAS-Detektor





Rates for $L=10^{32} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ @ 7 TeV

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

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

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

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

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

$N_{1,2}$ = 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:

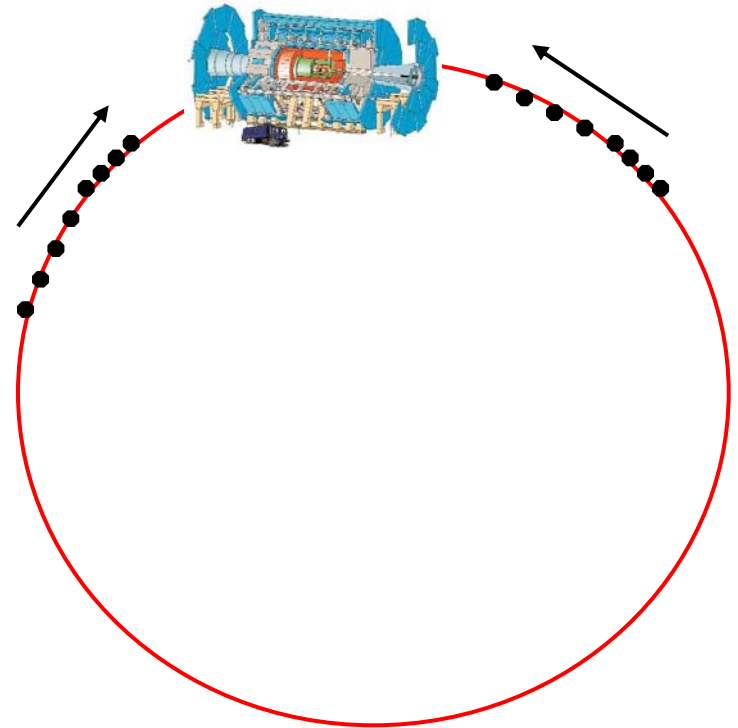
$1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ bei 14 TeV

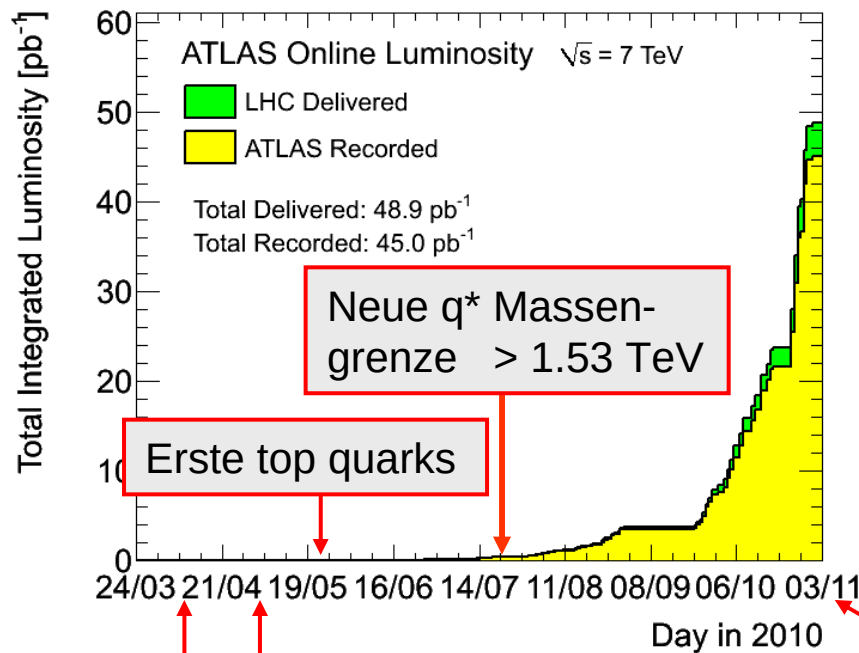
mit $n = 2835$ Proton-bunches/ Strahl

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

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

335 MJoule gespeicherte Strahlenergie





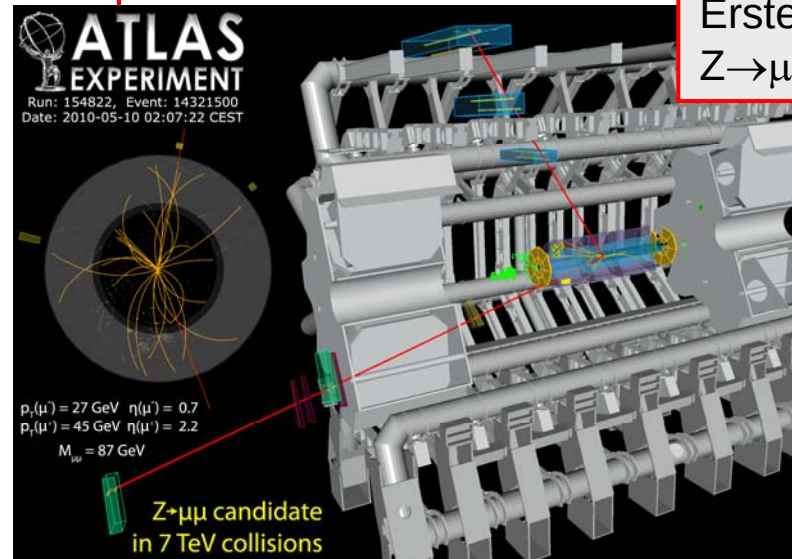
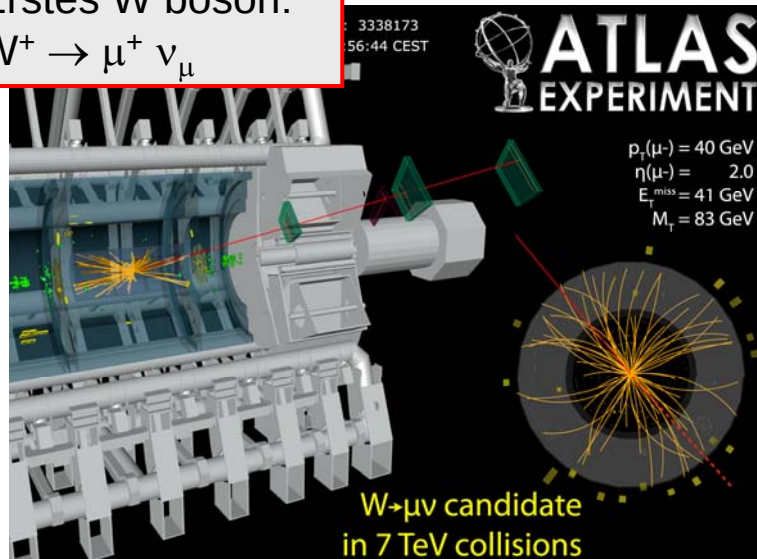
2010: Max. erreichte instantane Luminosität
 $2.1 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ bei 7 TeV

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

20 MJoule gespeicherte Strahlenergie

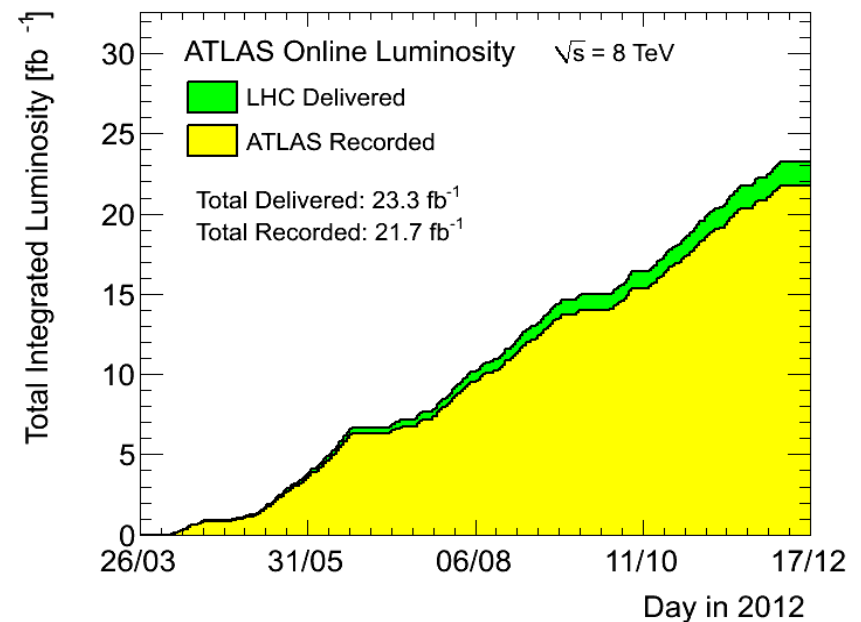
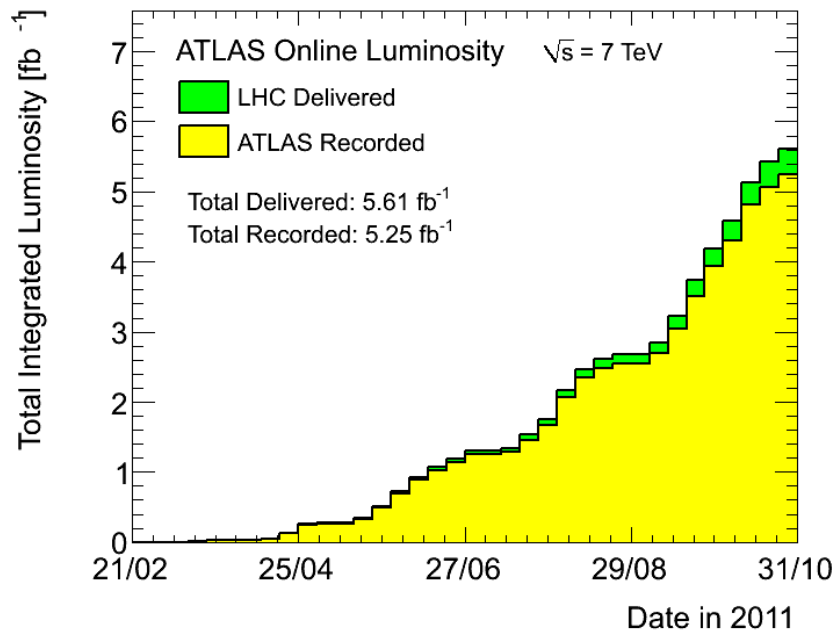
Erste WW, WZ, $W\gamma$, $Z\gamma$ Ereignisse

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



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

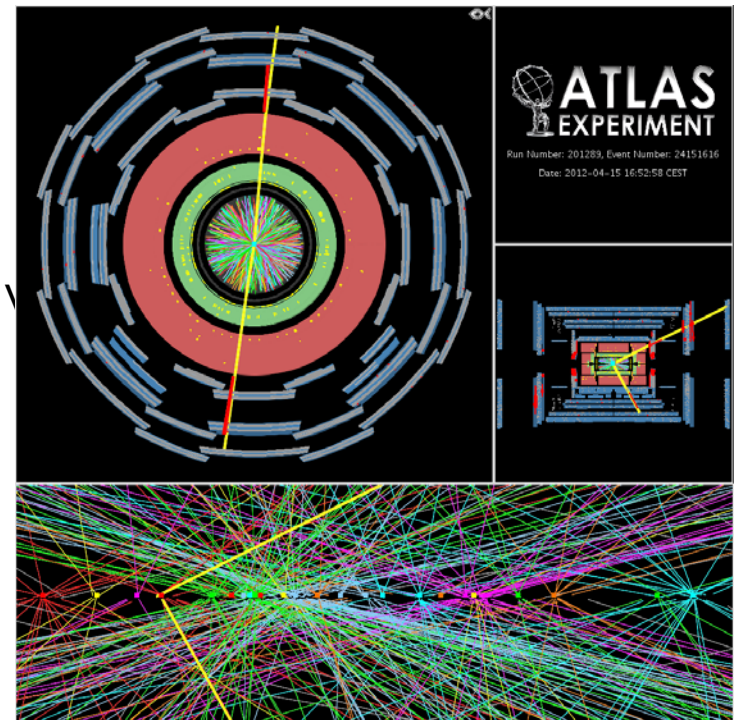
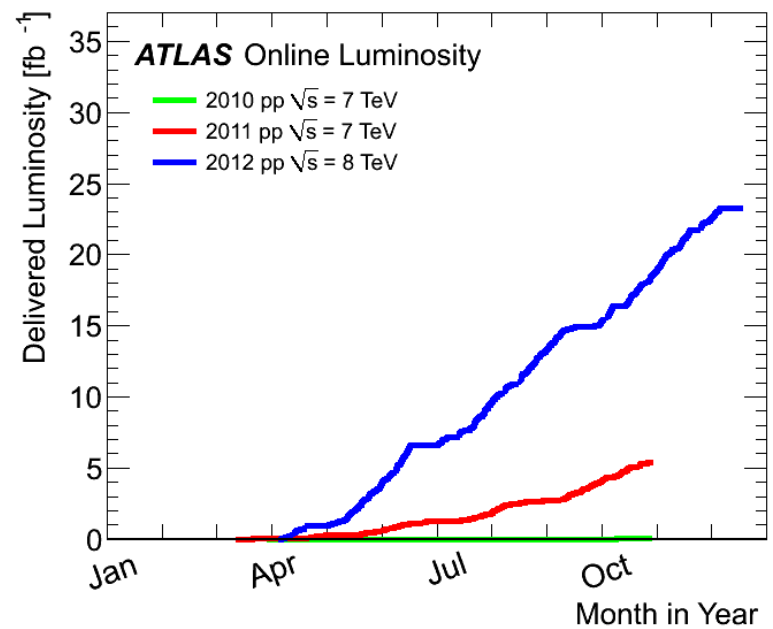
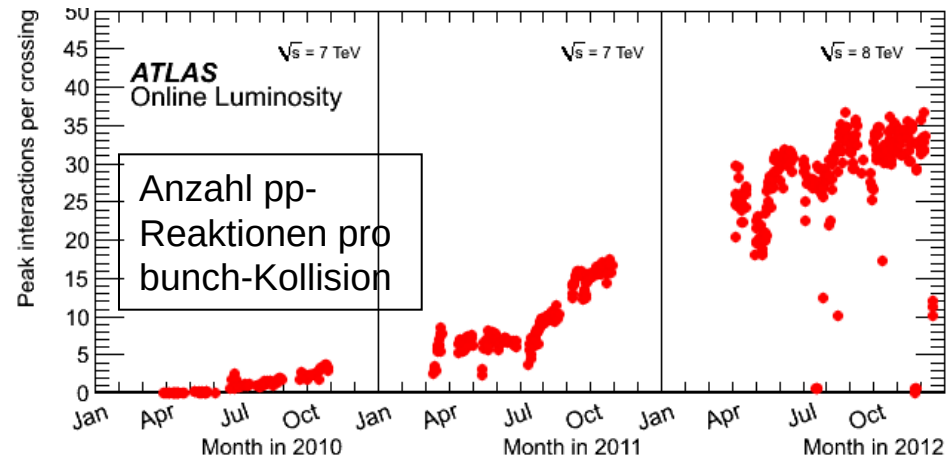
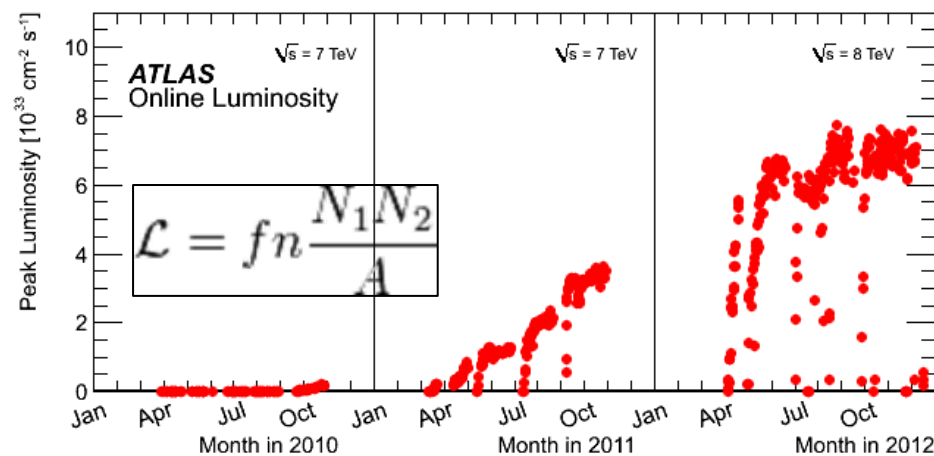
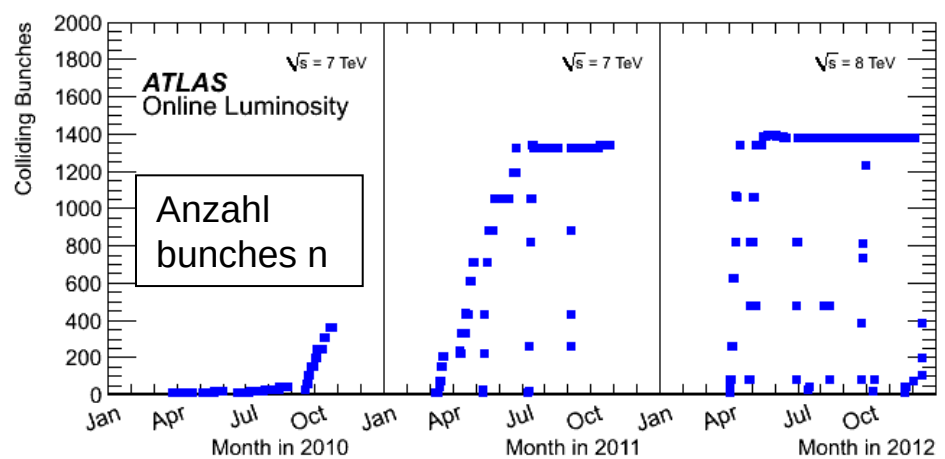
LHC 2011/2012



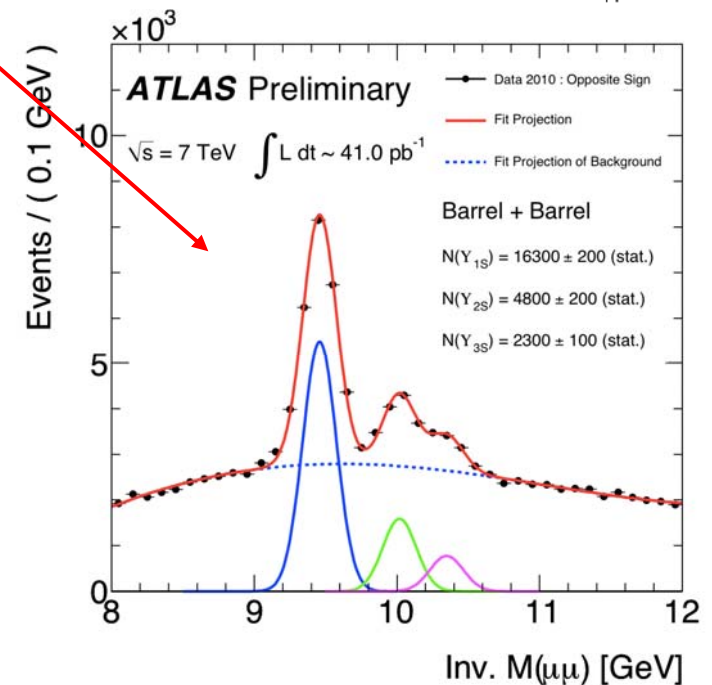
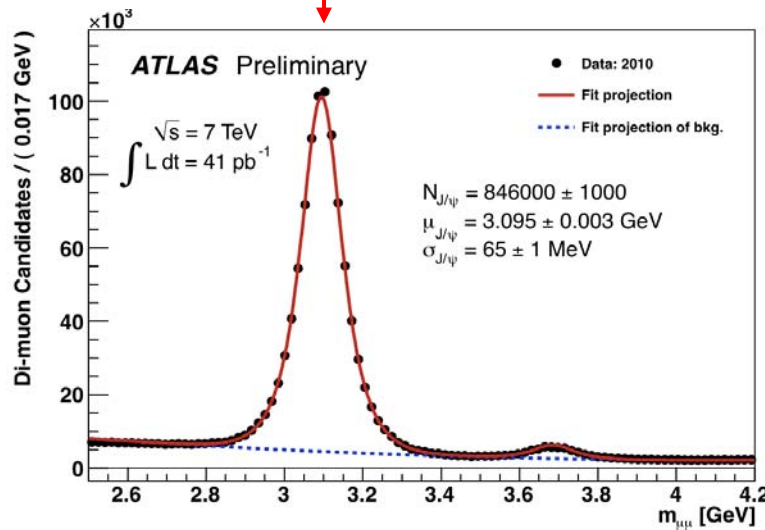
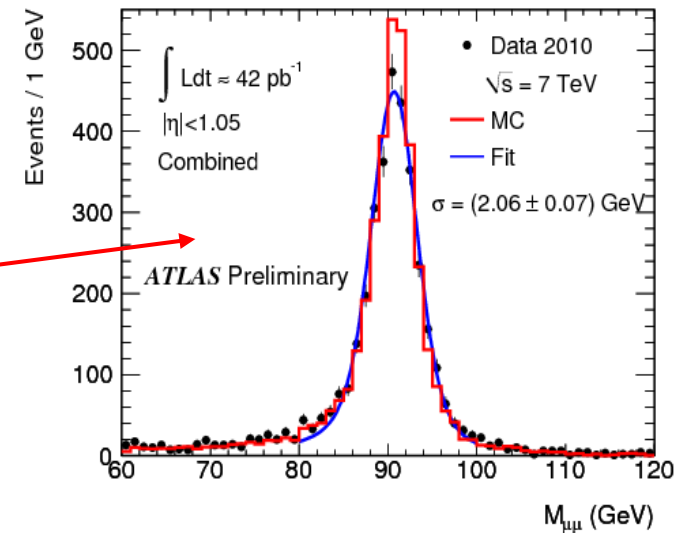
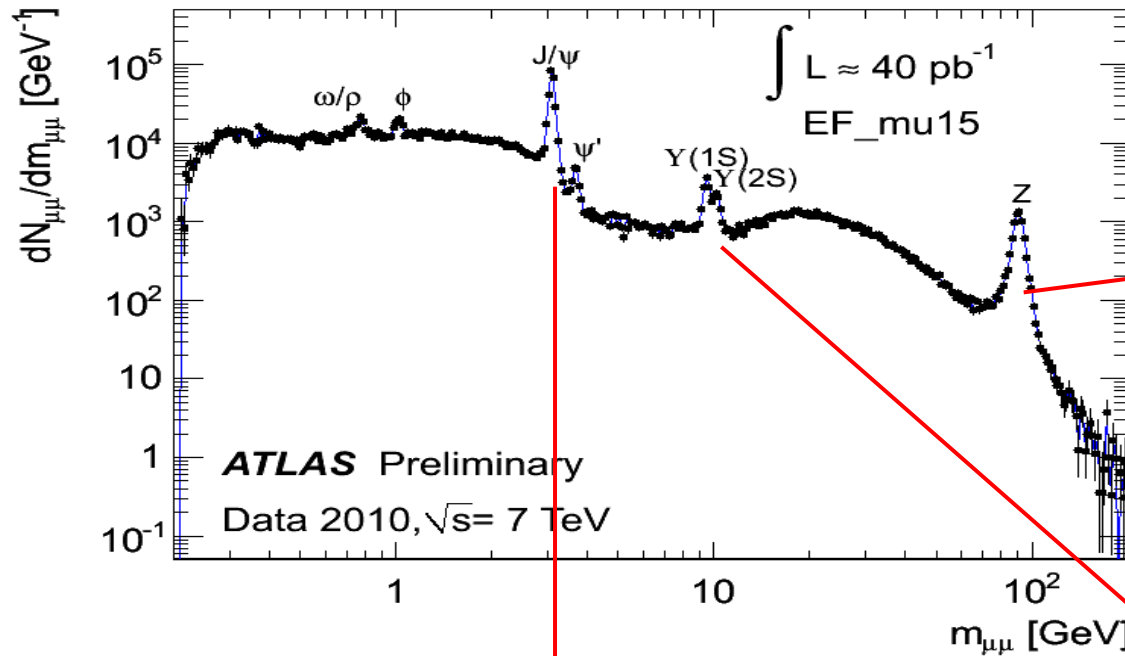
2011: Maximale erreichte Luminosität
 $3.7 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ bei 7 TeV
 mit $n = 1350$ Proton-bunches/ Strahl
 und $f = 20 \text{ MHz}$ Umlauffrequenz,
 $N_{1,2} = 1.2 \times 10^{11}$ Protonen/ bunch
 95 MJoule gespeicherte Strahlenergie

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 $f = 20 \text{ MHz}$ Umlauffrequenz,
 $N_{1,2} = 1.2 \times 10^{11}$ Protonen/ bunch
 115 MJoule gespeicherte Strahlenergie

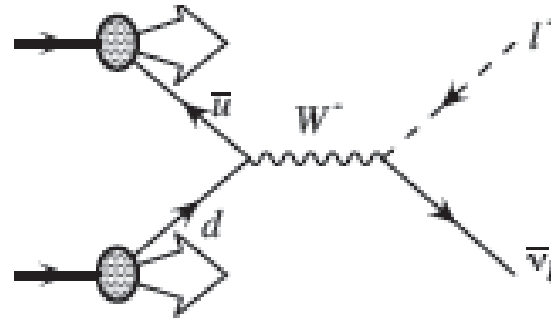
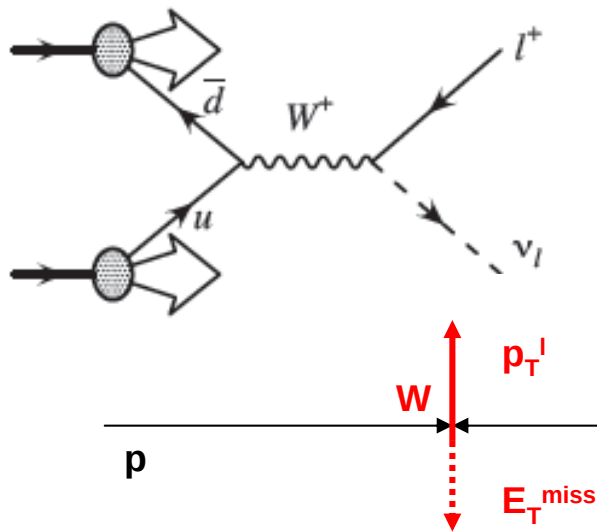
**Zunehmende Fokussierung: kleinerer Strahlquerschnitt A ,
 höhere Protodichte bei der Kollision der bunches.**



Wiederentdeckung des Standardmodells in 3 Monaten



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

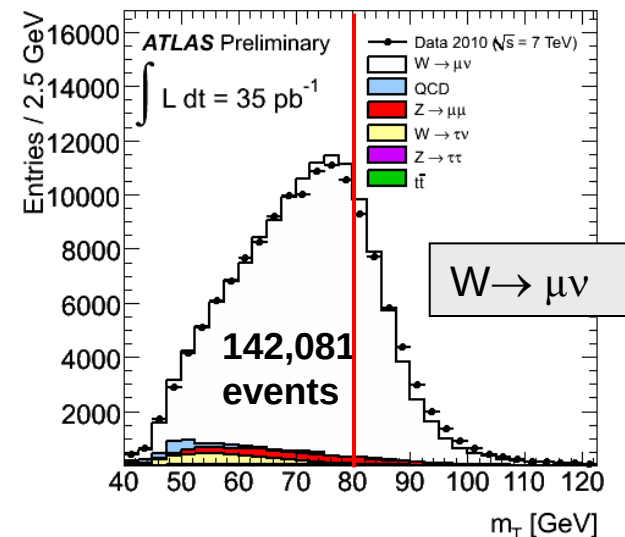
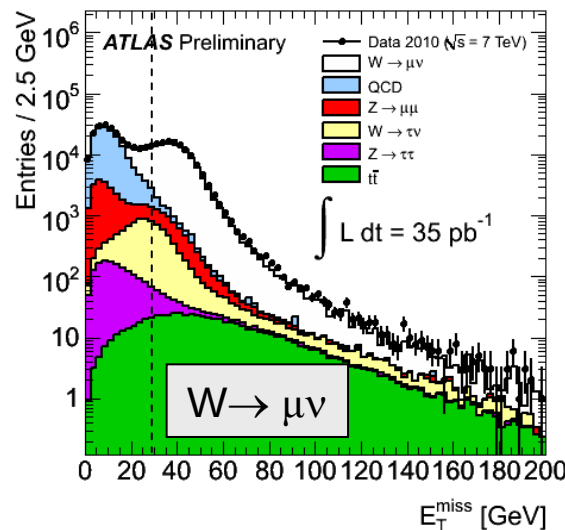
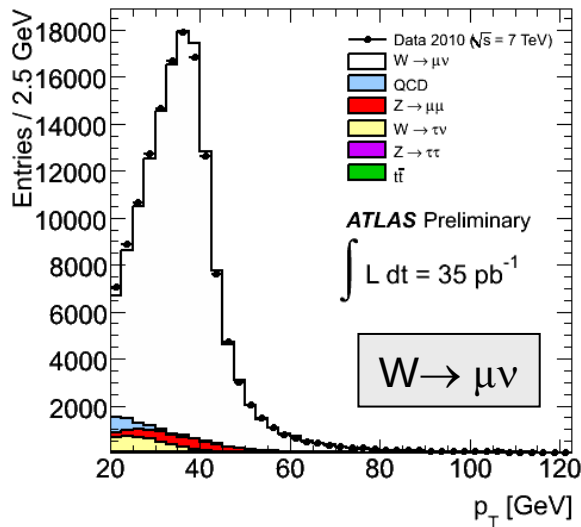


Geladenes Lepton mit
Transversalimpuls p_T^l

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}

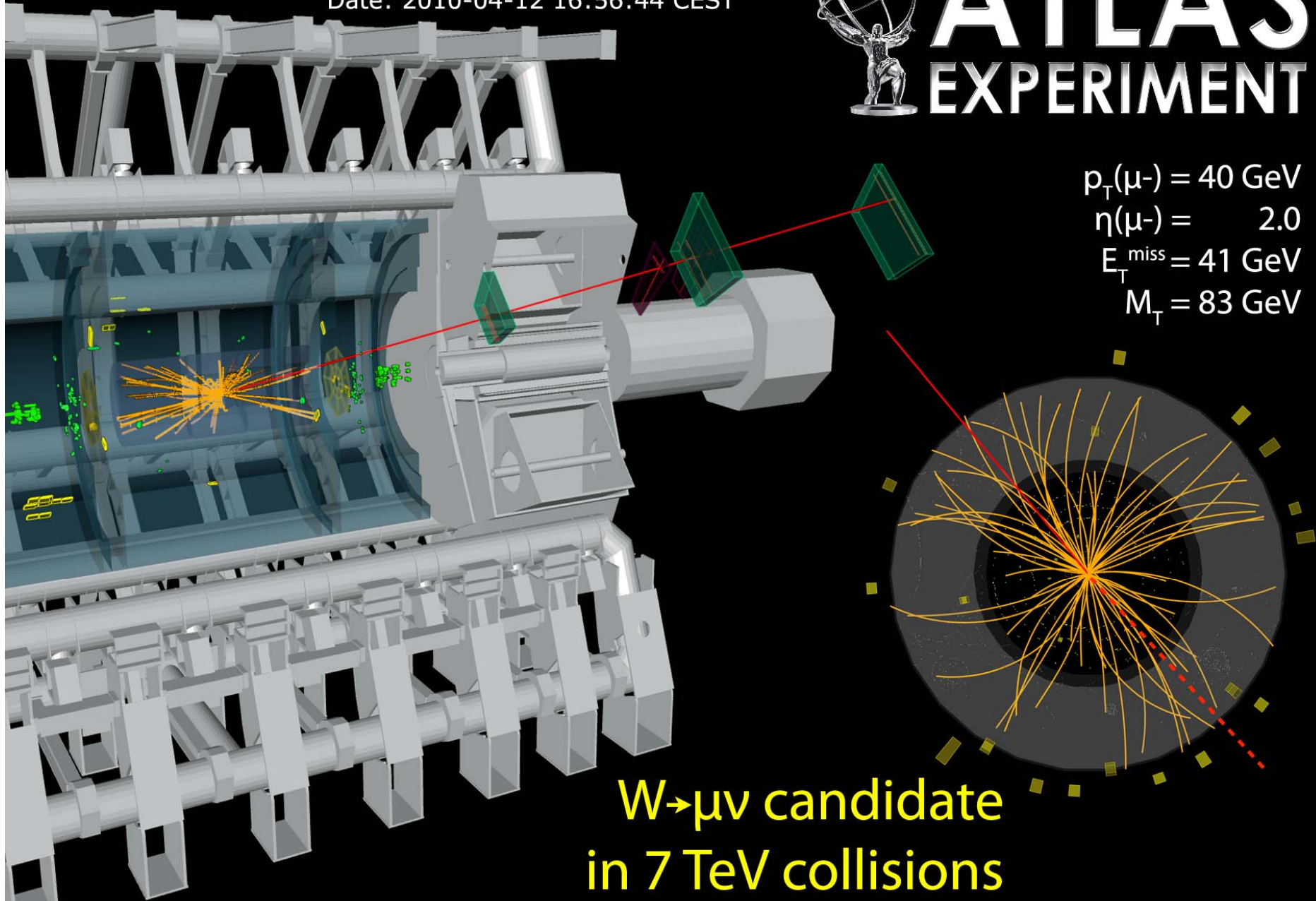


Run: 152845, Event: 3338173
Date: 2010-04-12 16:56:44 CEST



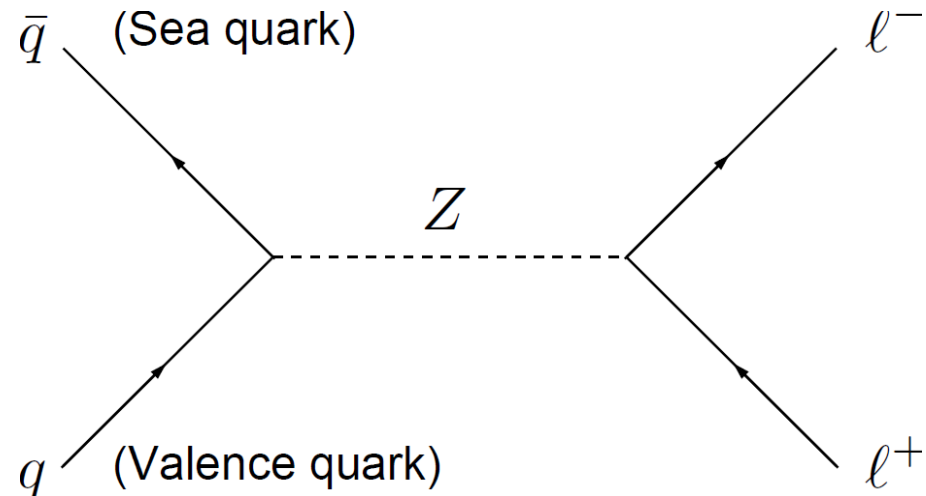
ATLAS EXPERIMENT

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

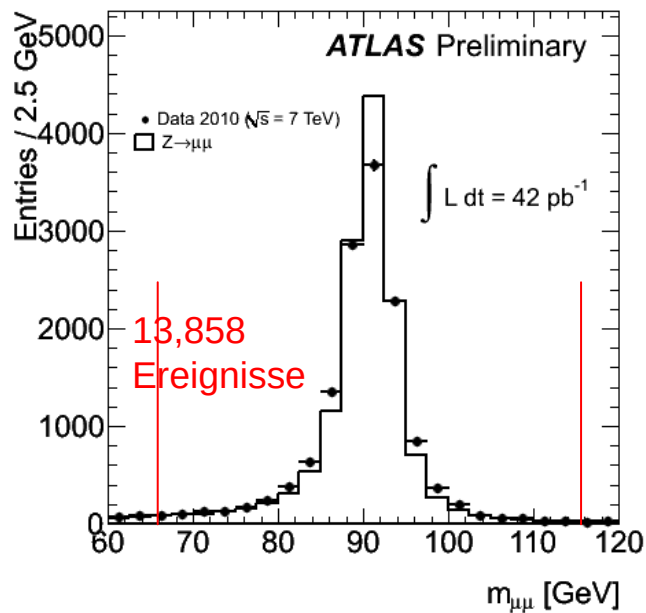


**W → μν candidate
in 7 TeV collisions**

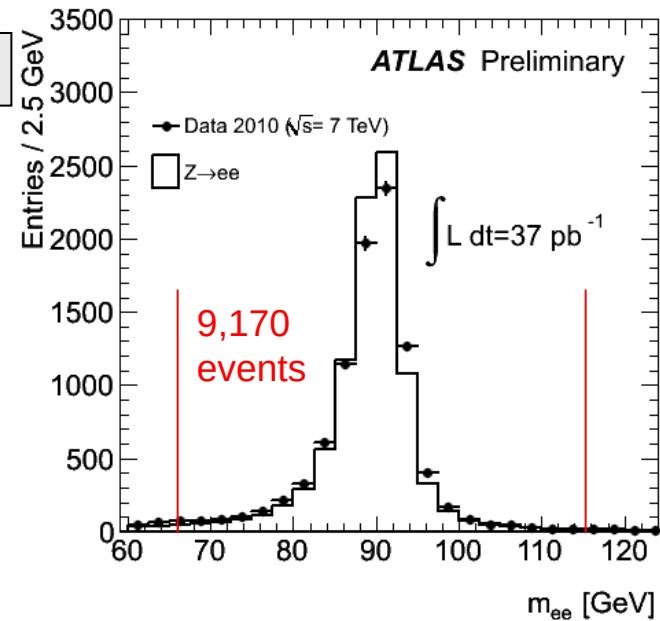
Nachweis der schwachen Eichbosonen: schon ab $L = 6.4 \text{ nb}^{-1}$



$Z \rightarrow \mu\mu$

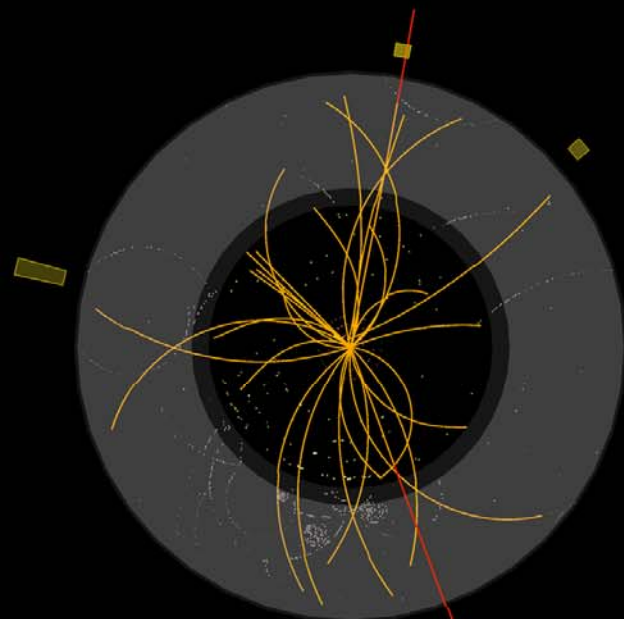


$Z \rightarrow ee$



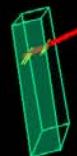
ATLAS EXPERIMENT

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

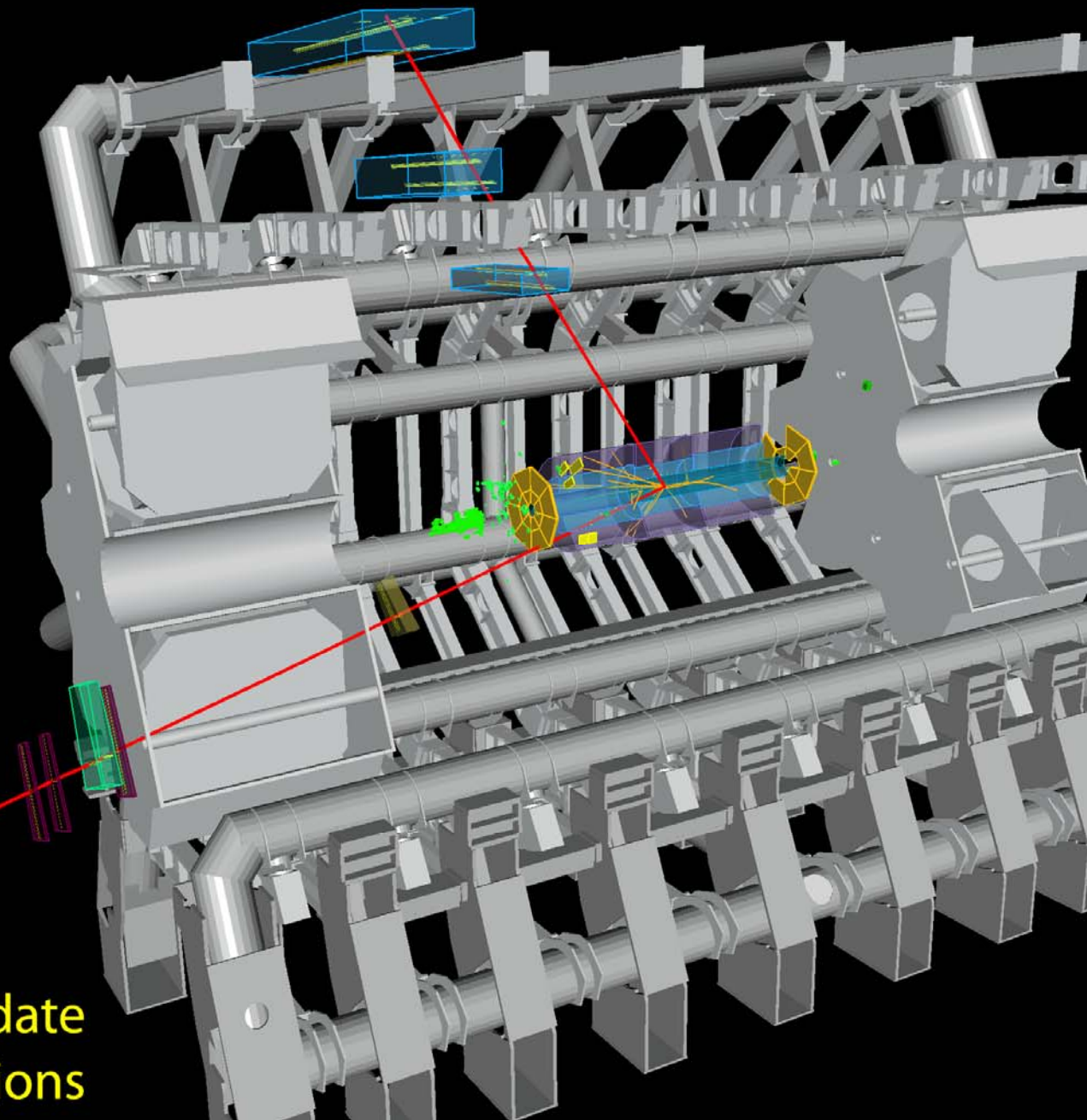


$$p_T(\mu^-) = 27 \text{ GeV} \quad \eta(\mu^-) = 0.7$$
$$p_T(\mu^+) = 45 \text{ GeV} \quad \eta(\mu^+) = 2.2$$

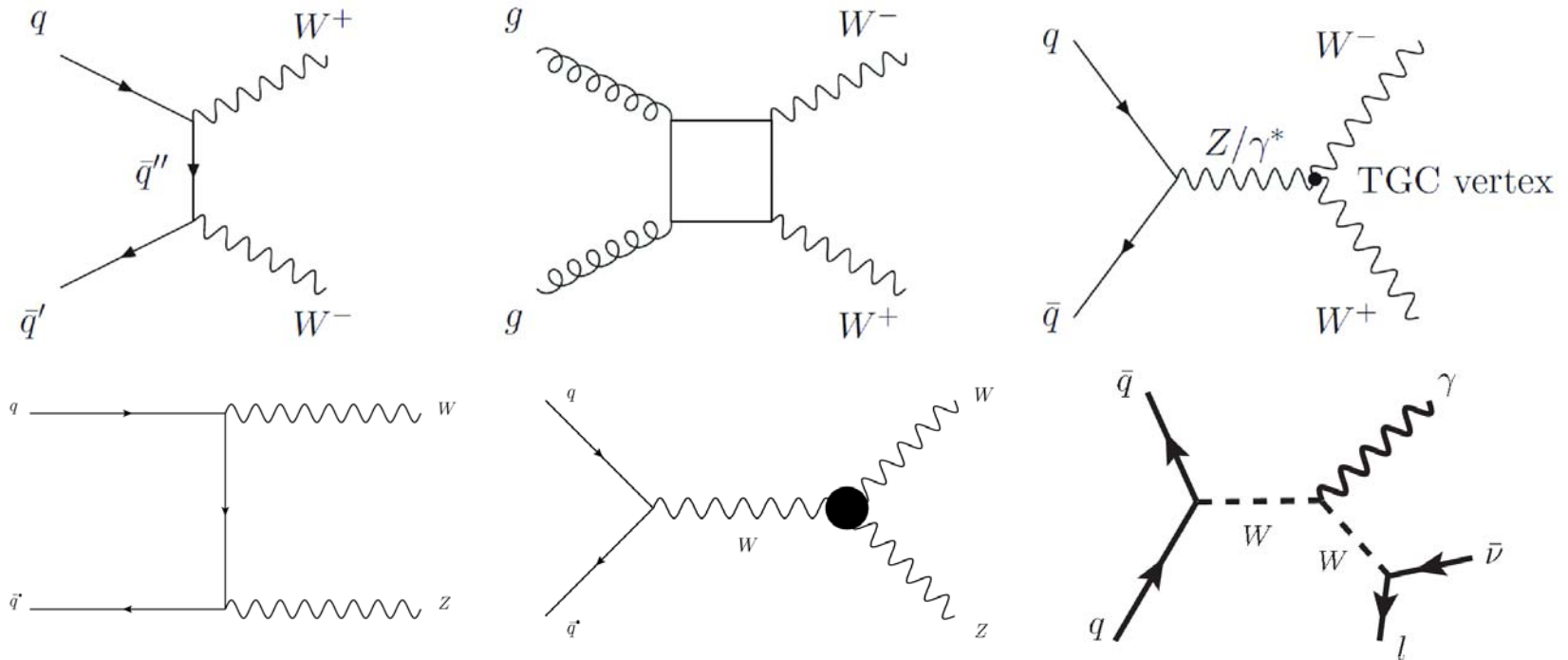
$$M_{\mu\mu} = 87 \text{ GeV}$$



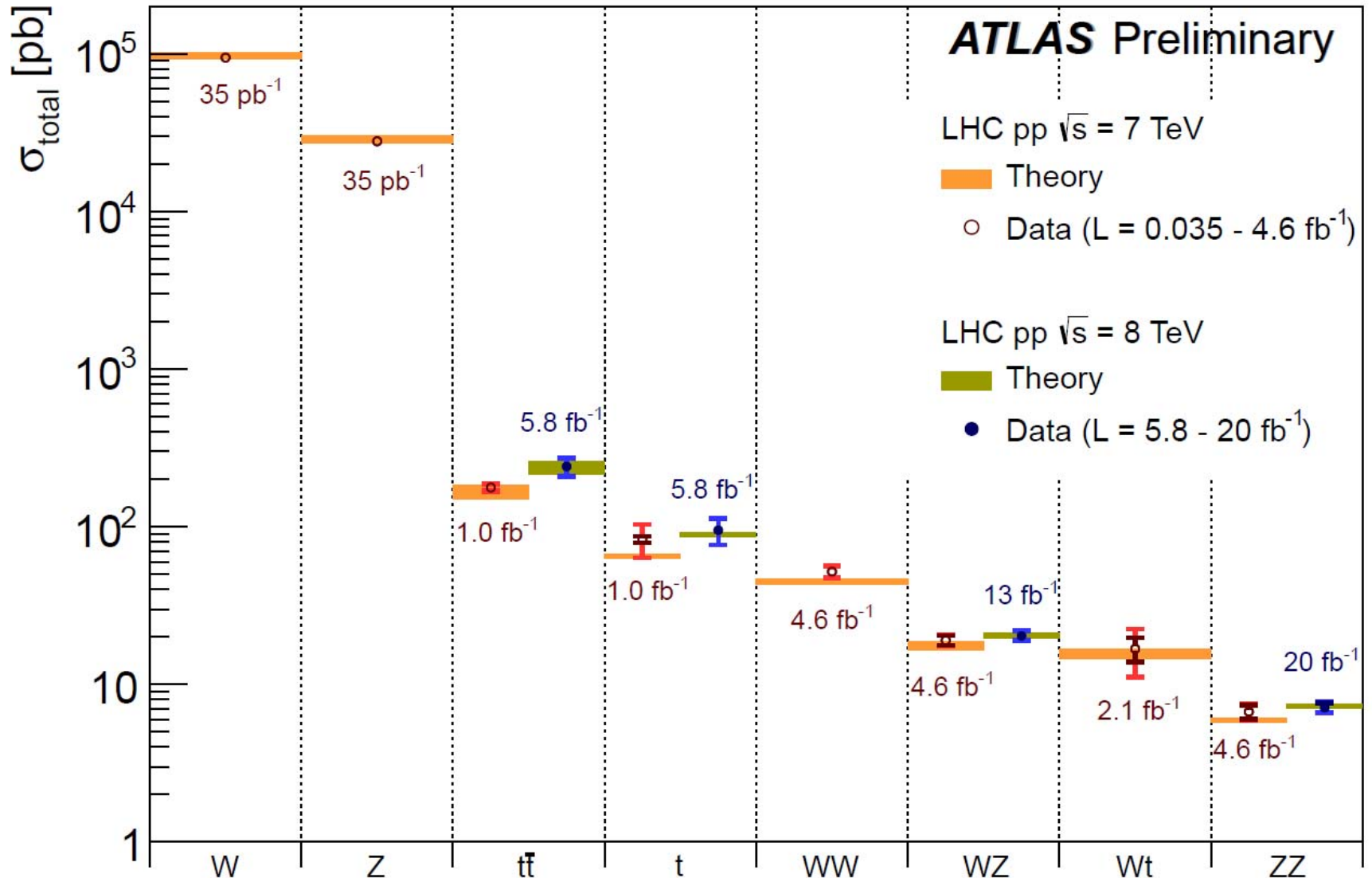
**$Z \rightarrow \mu\mu$ candidate
in 7 TeV collisions**



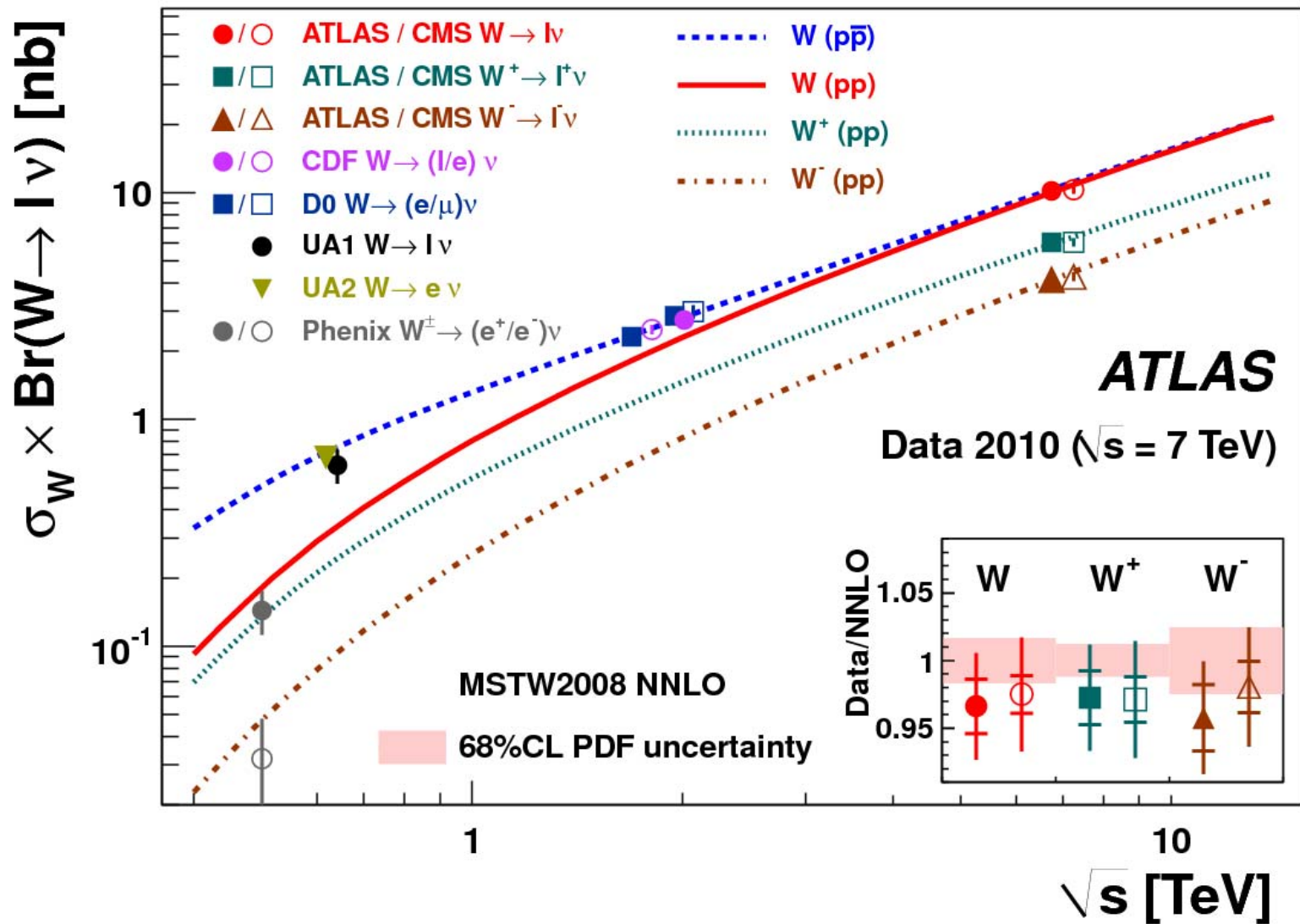
Paarproduktion von Eichbosonen



Das Standardmodell am LHC

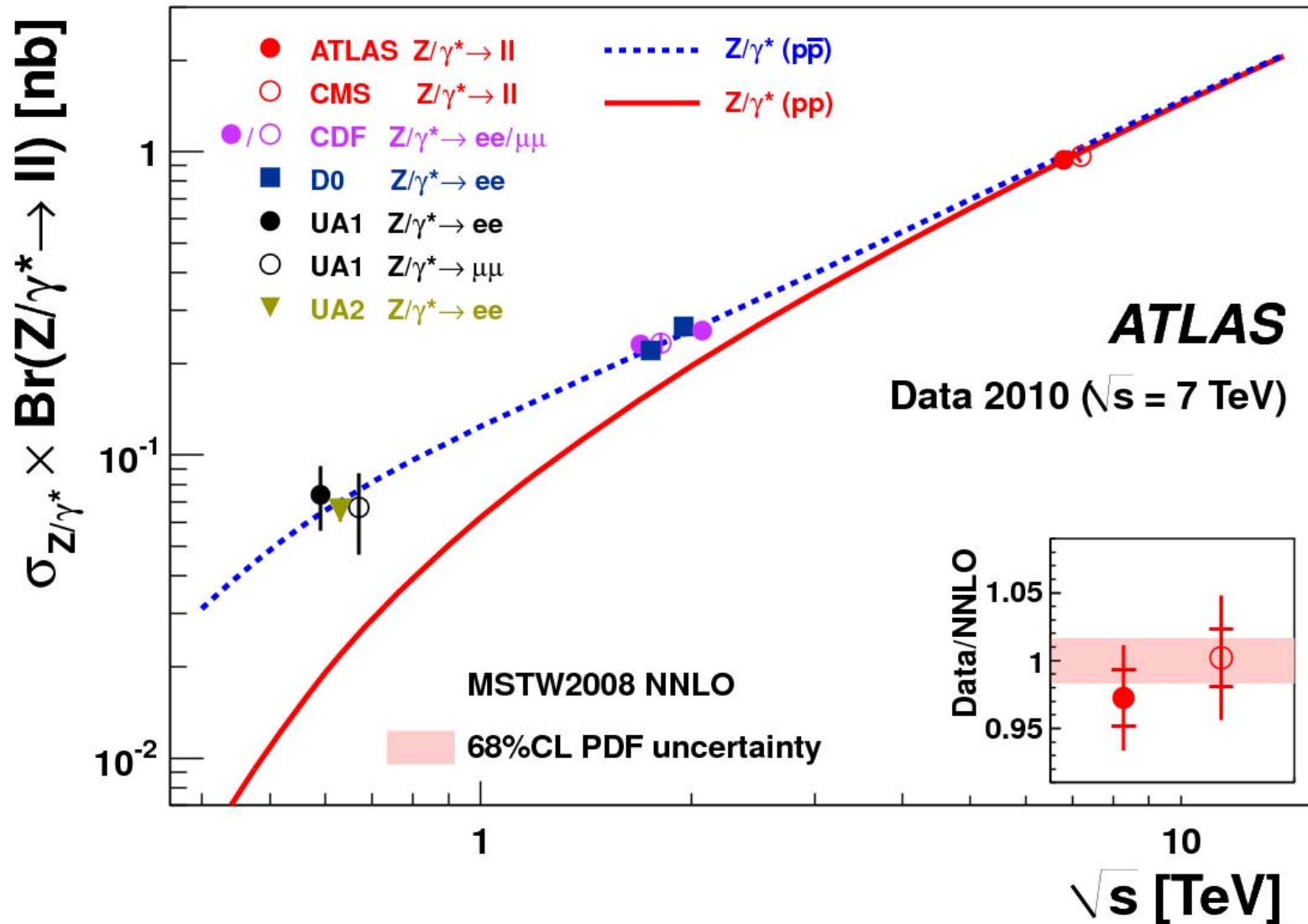


Wirkungsquerschnitte für W-Bosonproduktion



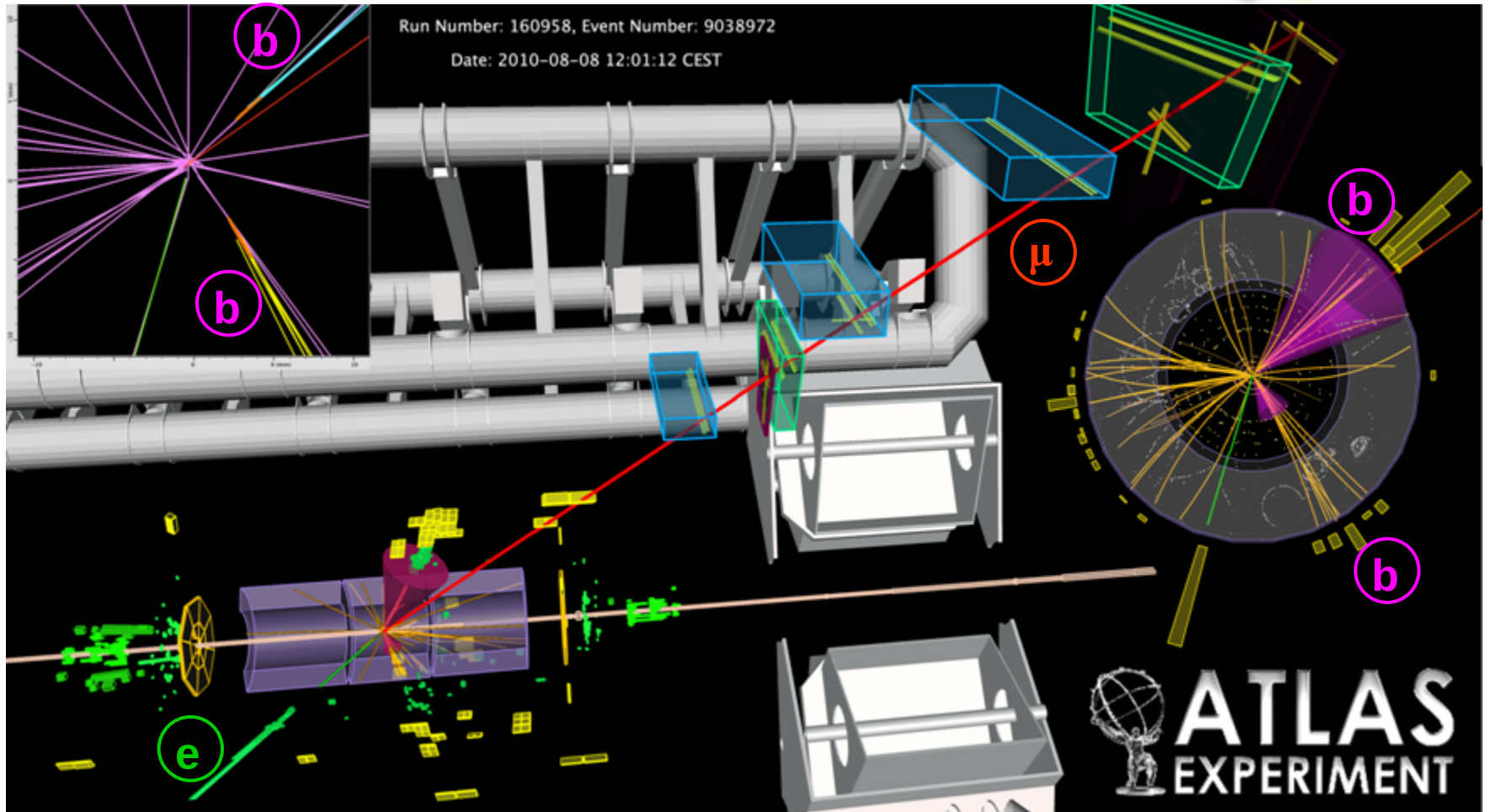
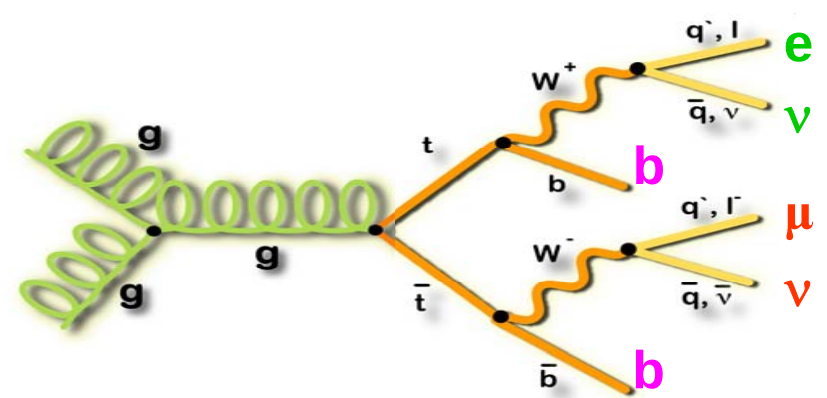
$W^+ W^-$ Ladungsasymmetrie

Wirkungsquerschnitte für Z-Bosonproduktion



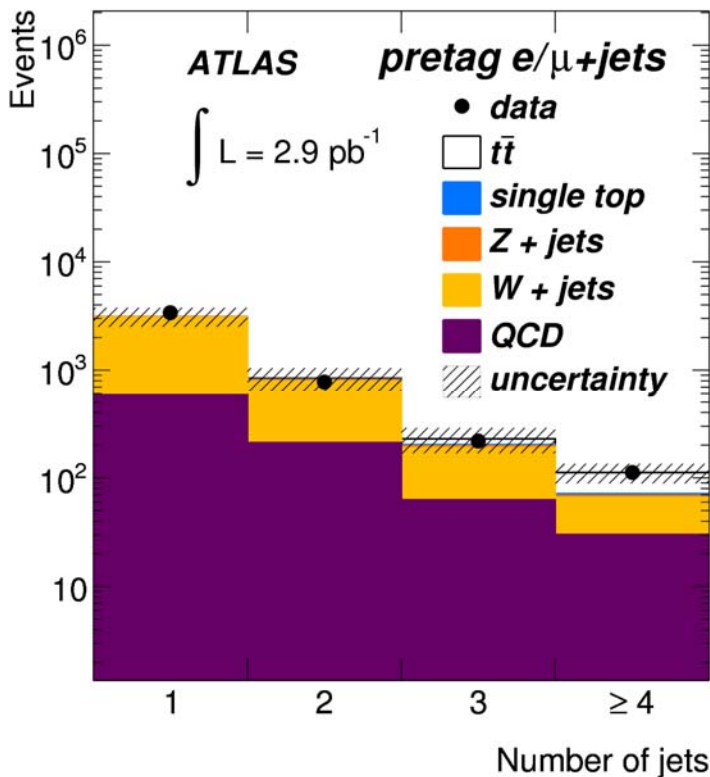
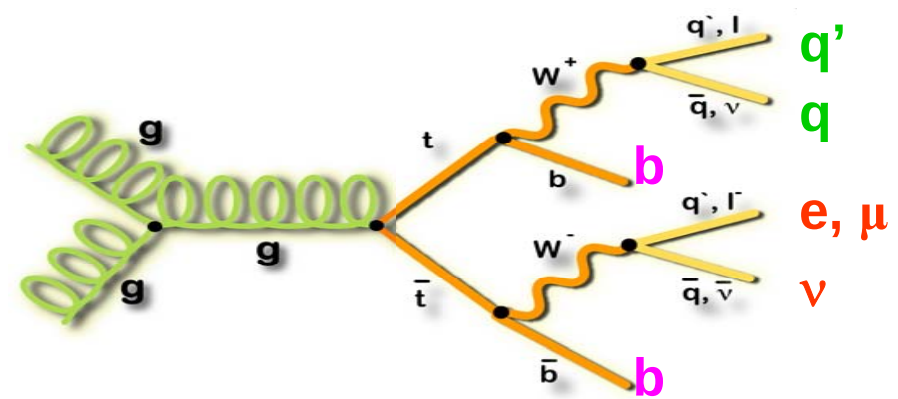
Top-Quark-Paarherzeugung

Erster top-Quark-Paarkandidat im Mai 2010

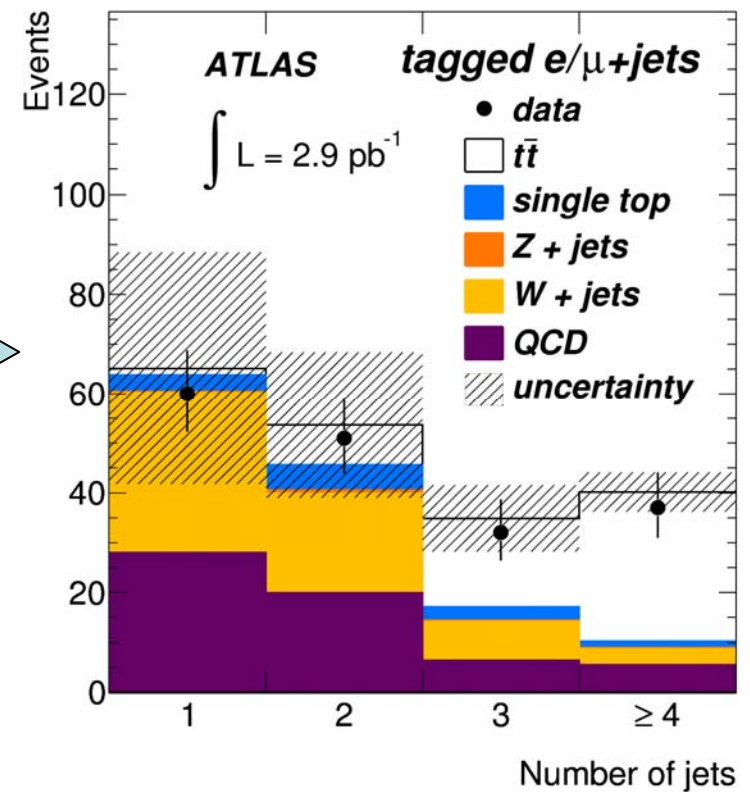


Top-Quark-Production

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

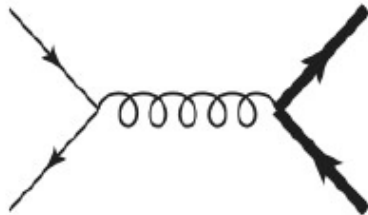


Zusätzlich
Identifikation der
b-Quarkjets
("b tagging")

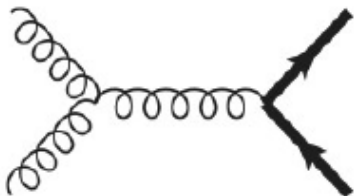
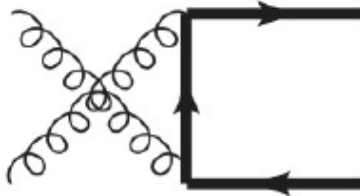
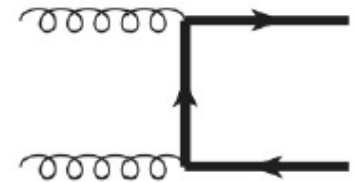


Wirkungsquerschnitt für Top-Quark-Paarherzeugung

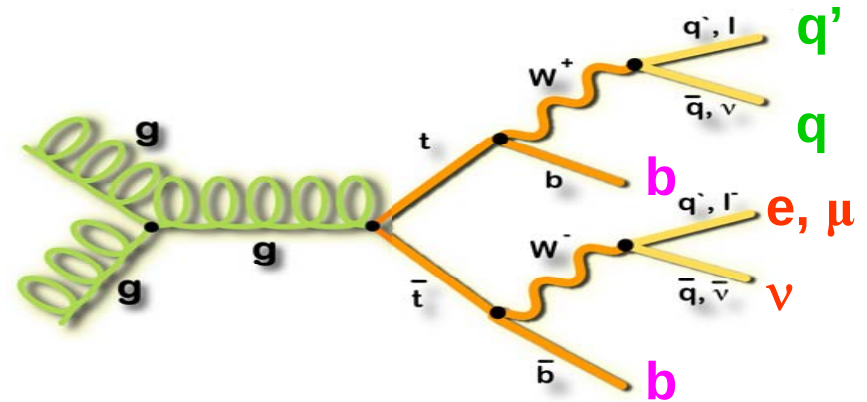
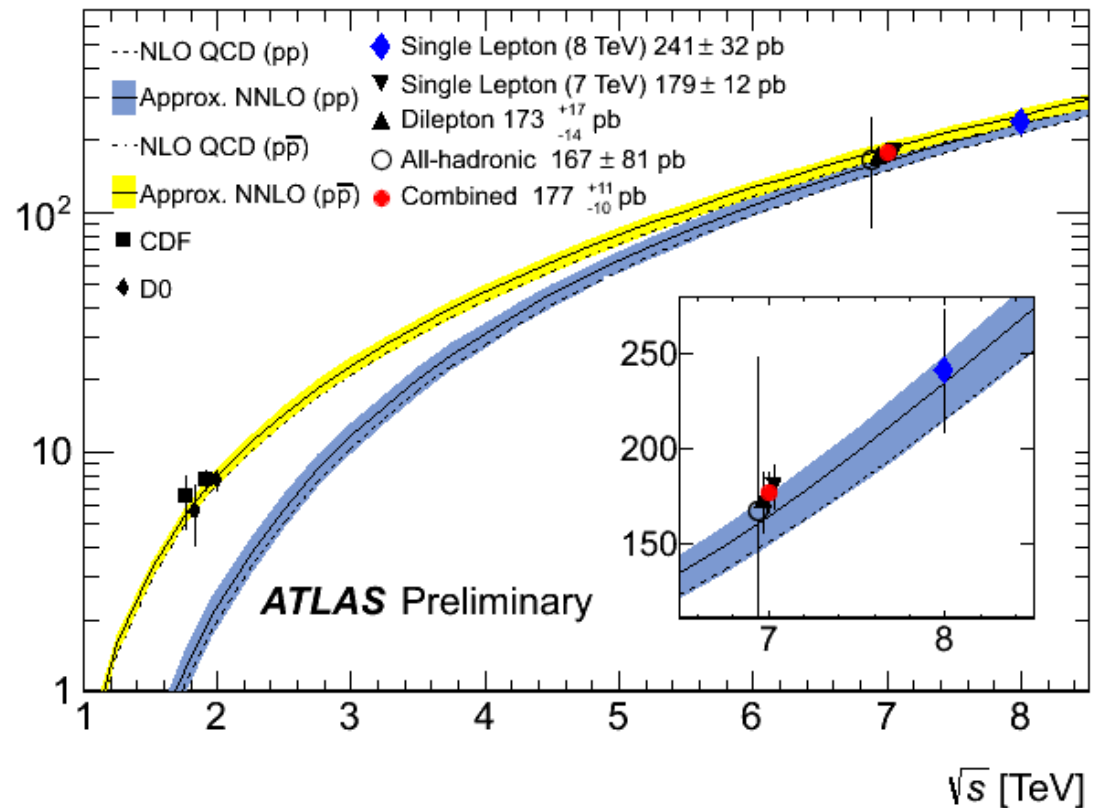
15%



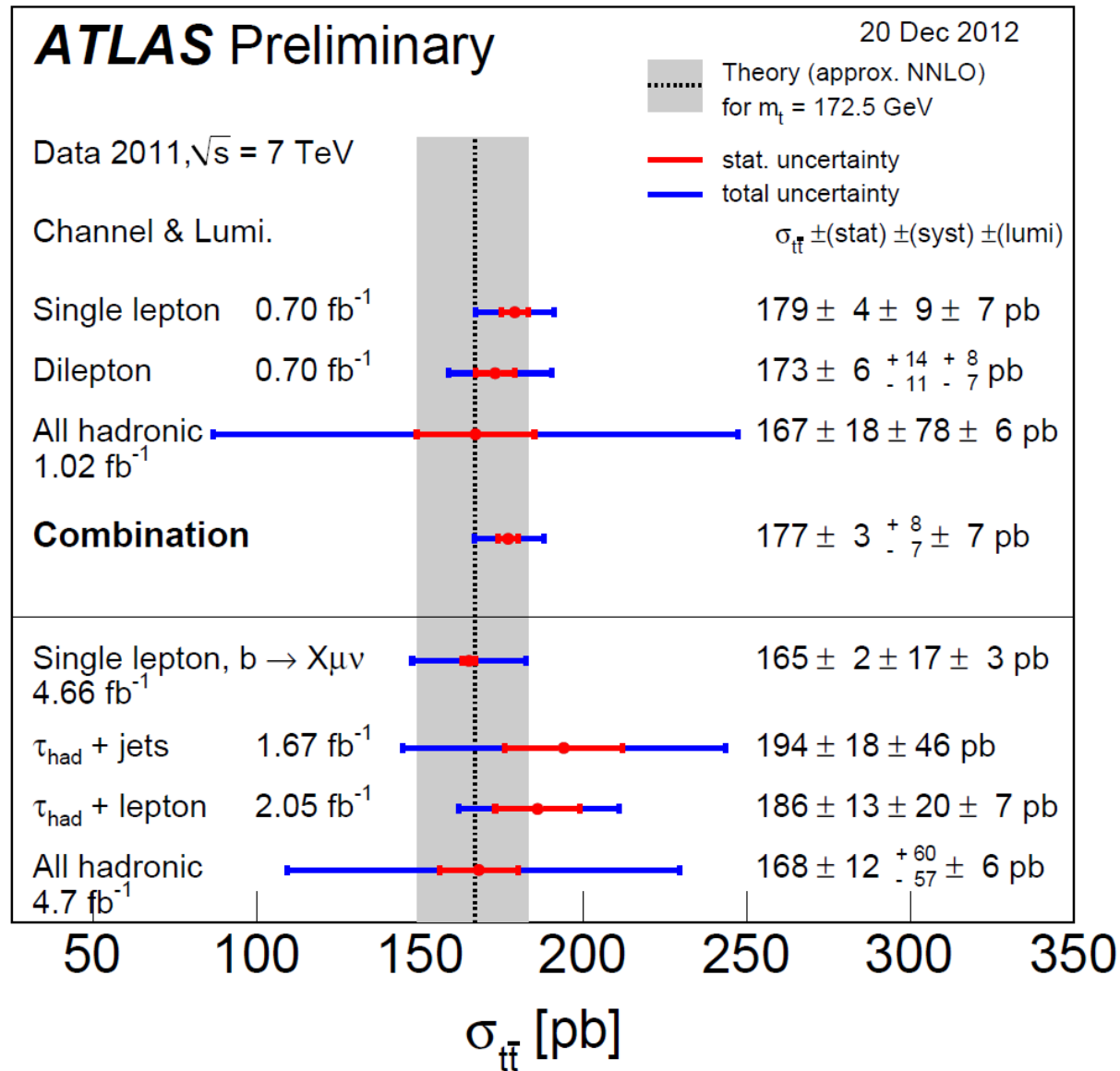
85%



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

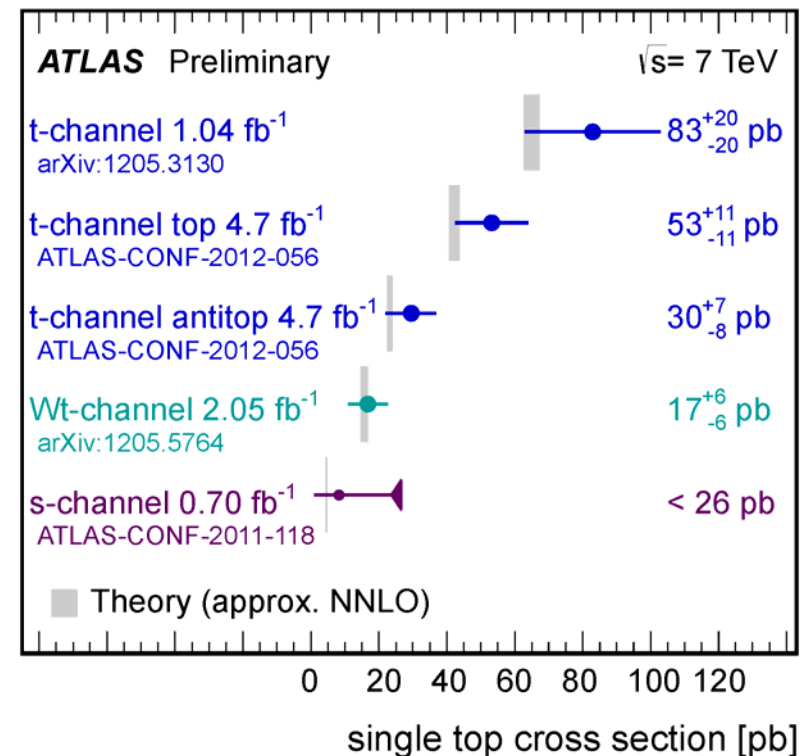
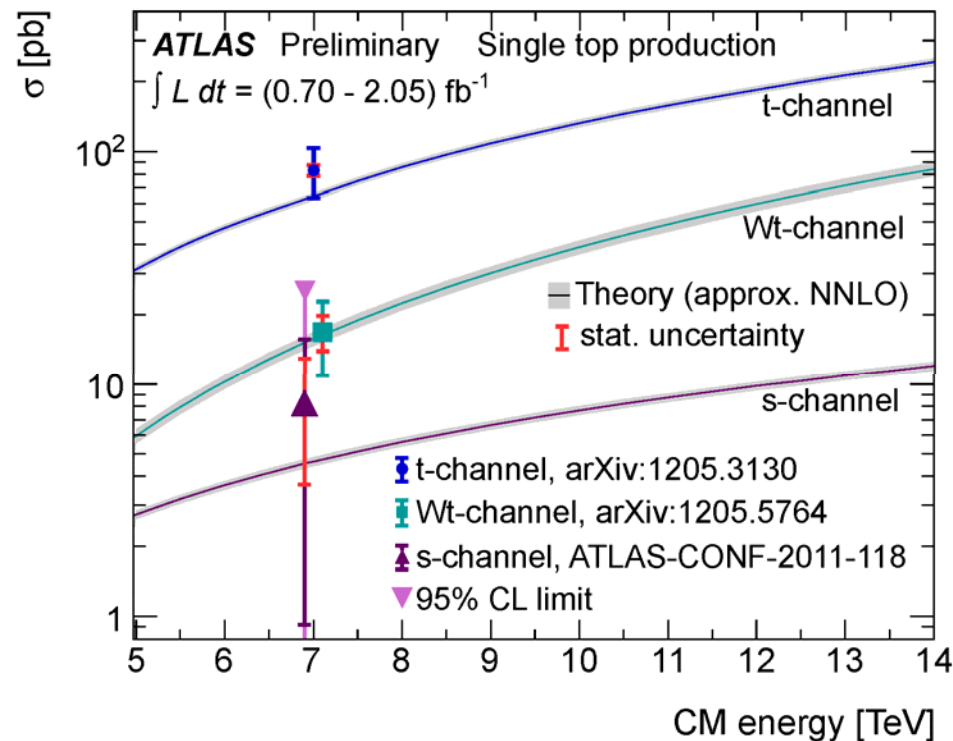
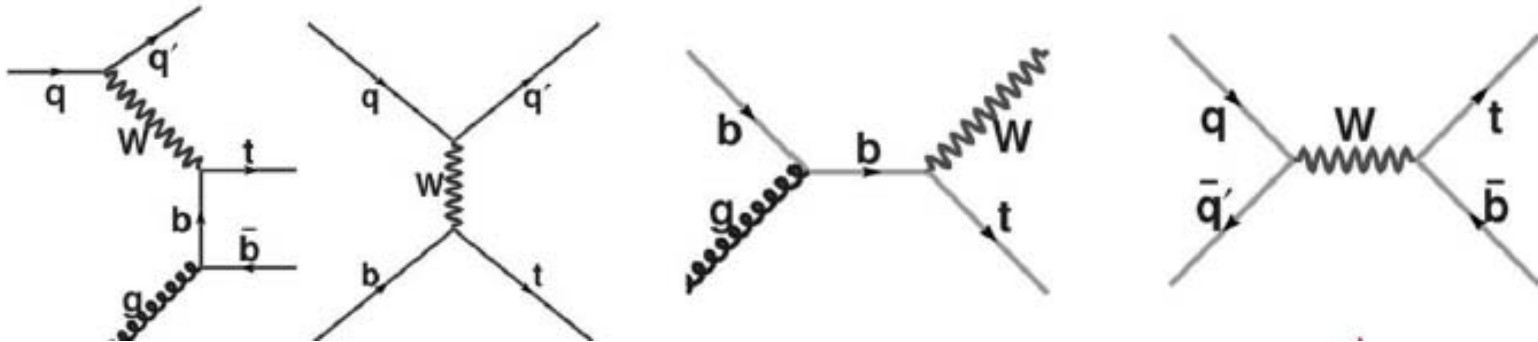


Wirkungsquerschnitt für Top-Quark-Paarherzeugung

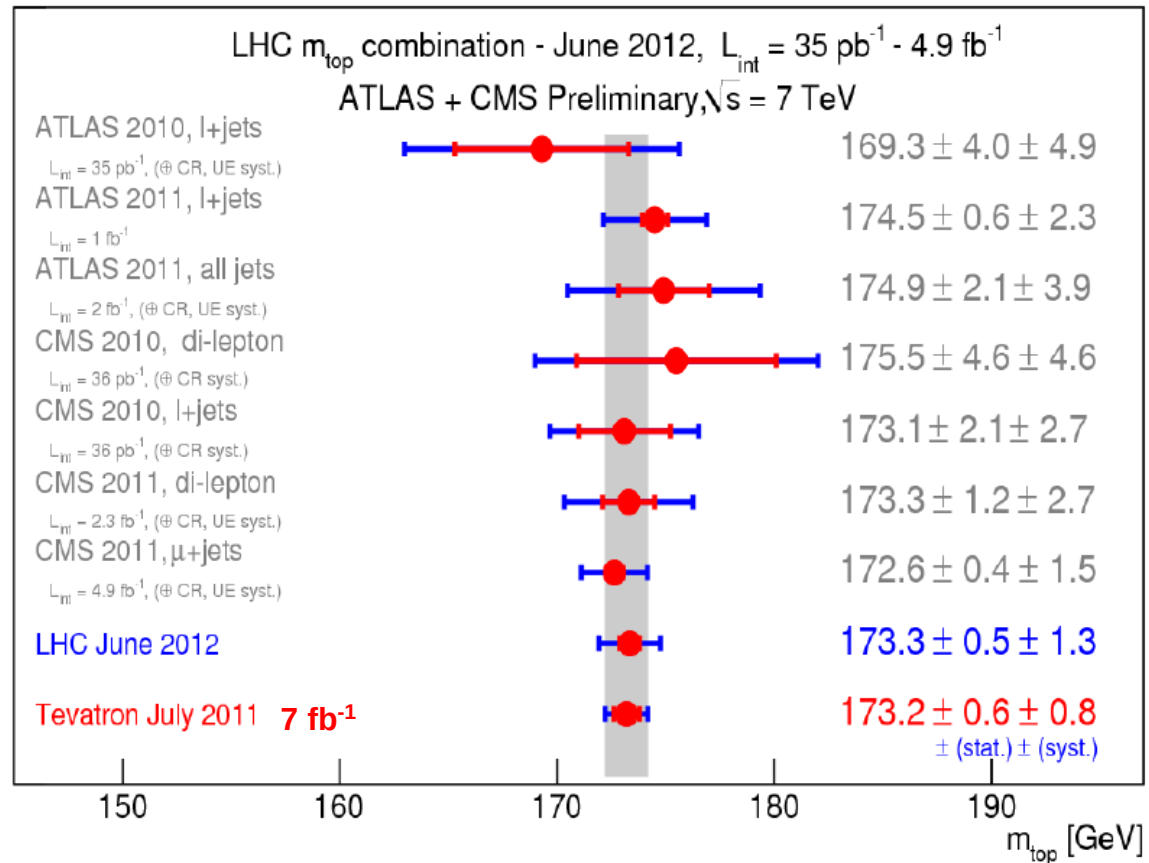
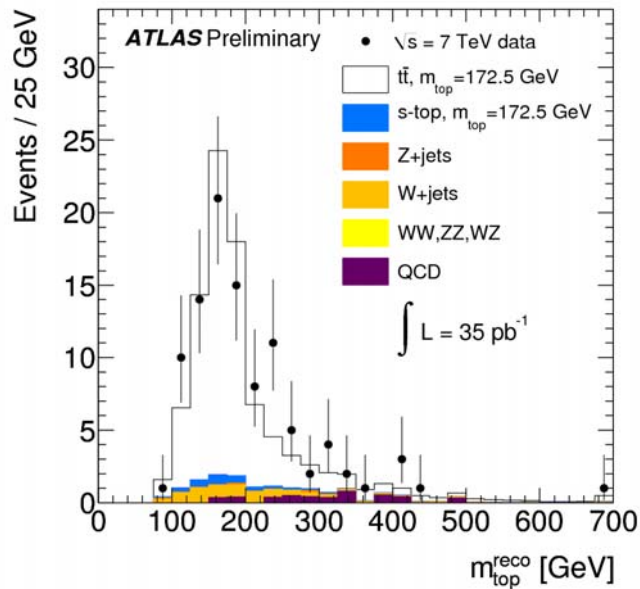
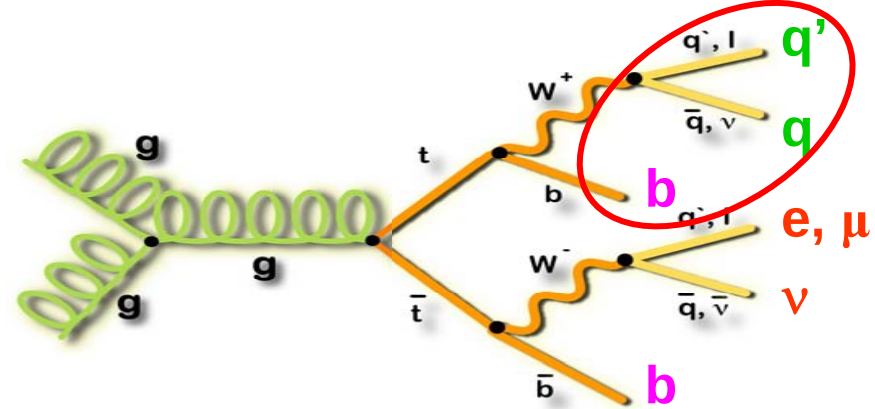


Wirkungsquerschnitt für die Erzeugung einzelner top-Quarks

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



Messung der top Quark-Masse



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 $< 1\text{-}3\text{ TeV}$
- 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).

Quarks	Gauge Bosons	Higgs Bosons	Gauginos	Squarks
u c t	γ	h^0	$\tilde{\chi}_1^0$ $\tilde{\chi}_1^\pm$	$\tilde{u}$ $\tilde{c}$ $\tilde{t}$
d s b	Z^0	H^0	$\tilde{\chi}_2^0$ $\tilde{\chi}_2^\pm$	$\tilde{d}$ $\tilde{s}$ $\tilde{b}$
Leptons	$W^\pm$	$H^\pm$	$\tilde{\chi}_3^0$	Sleptons
$e^\pm$ $\mu^\pm$ $\tau^\pm$	g	A^0	$\tilde{\chi}_4^0$ $\tilde{g}$	$\tilde{e}^\pm$ $\tilde{\mu}^\pm$ $\tilde{\tau}^\pm$
ν_e ν_μ ν_τ				$\tilde{\nu}_e$ $\tilde{\nu}_\mu$ $\tilde{\nu}_\tau$

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

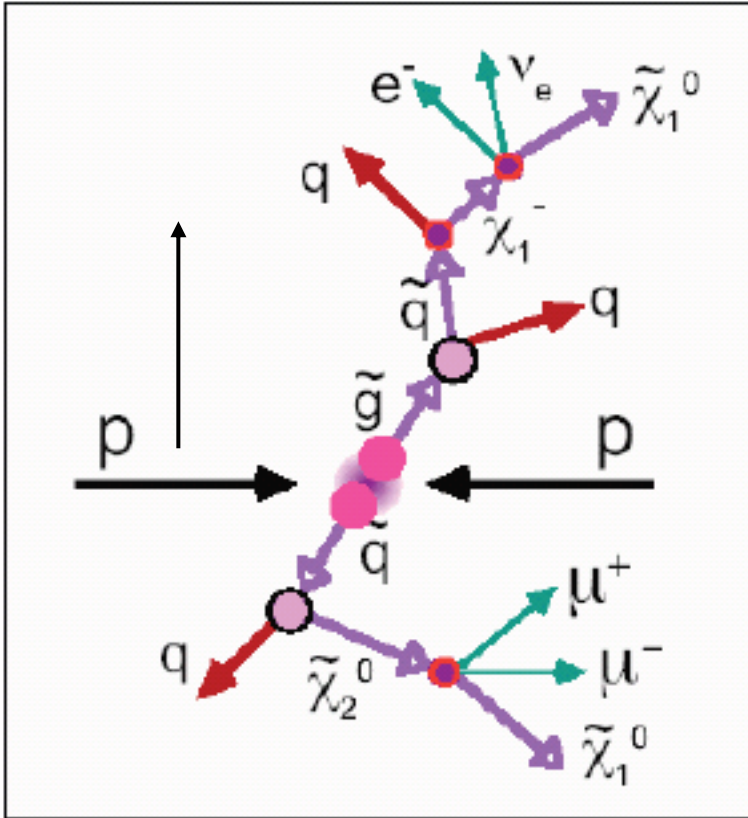
Die Details des Mechanismus sind unbekannt, was zu vielen (>100) freien Parametern führt, die Massen-vorhersagen unmöglich machen.

Suche nach Supersymmetrie

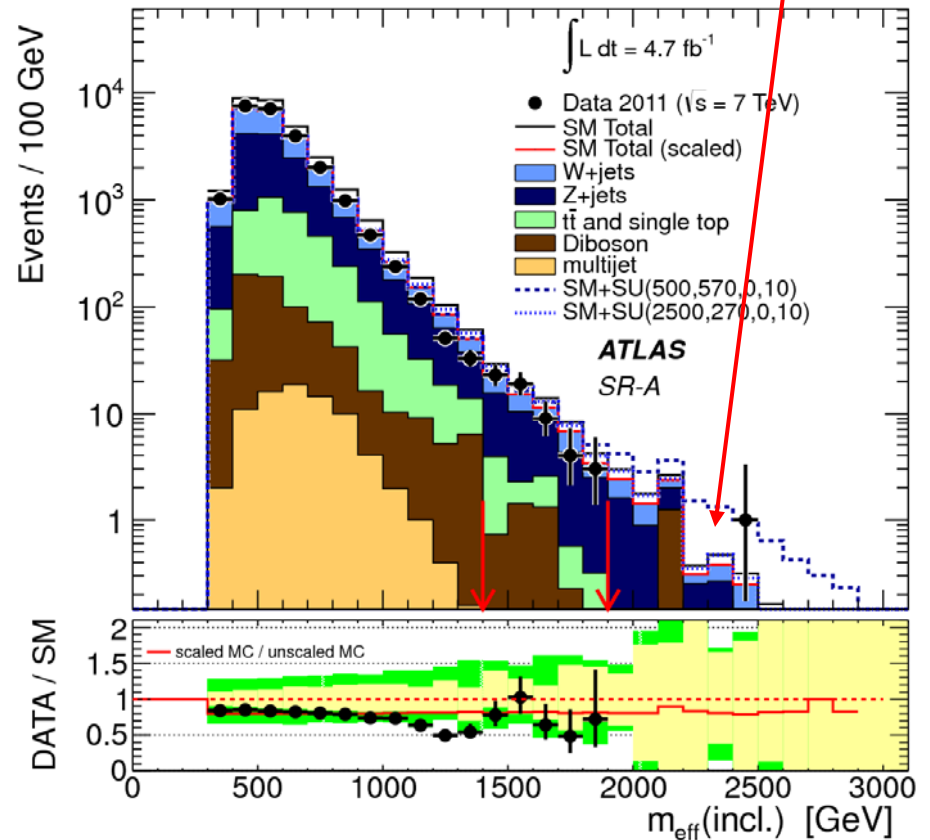
Suche nach Ereignissen mit $> 2 - 6$ Jets
und grosser fehlender Energie,
evtl. ausserdem mit Leptonen.

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

$$m_{\text{eff}} = E_T^{\text{miss}} + p_T^{\text{jets}}$$



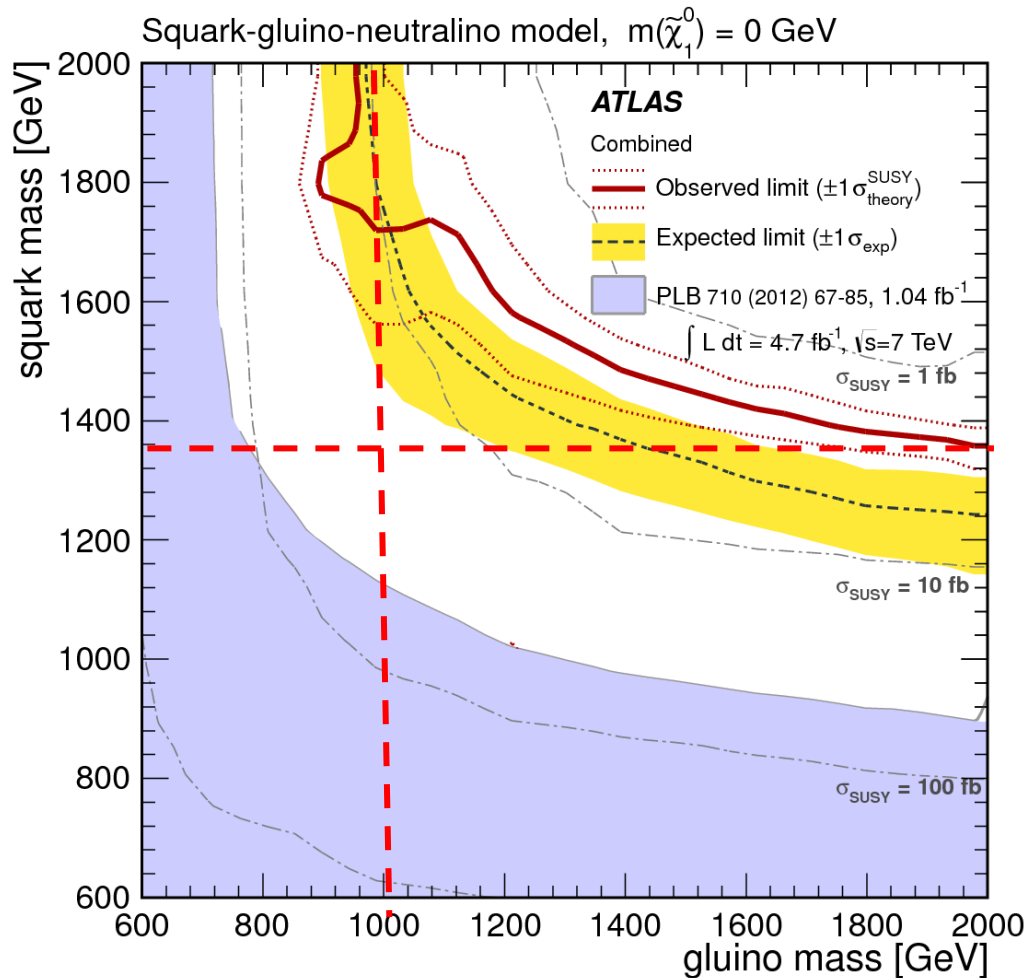
Ein Signal von Zerfällen supersymmetrischer Teilchen wird in dieser Gegend erwartet. Bisher wurden noch keine Anzeichen gefunden.



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.

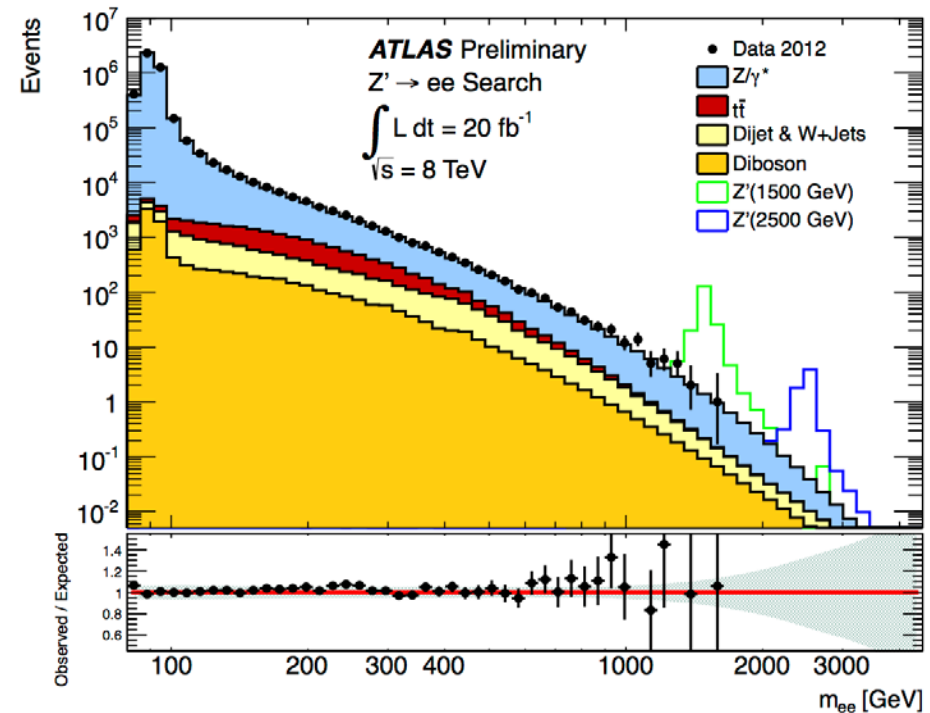
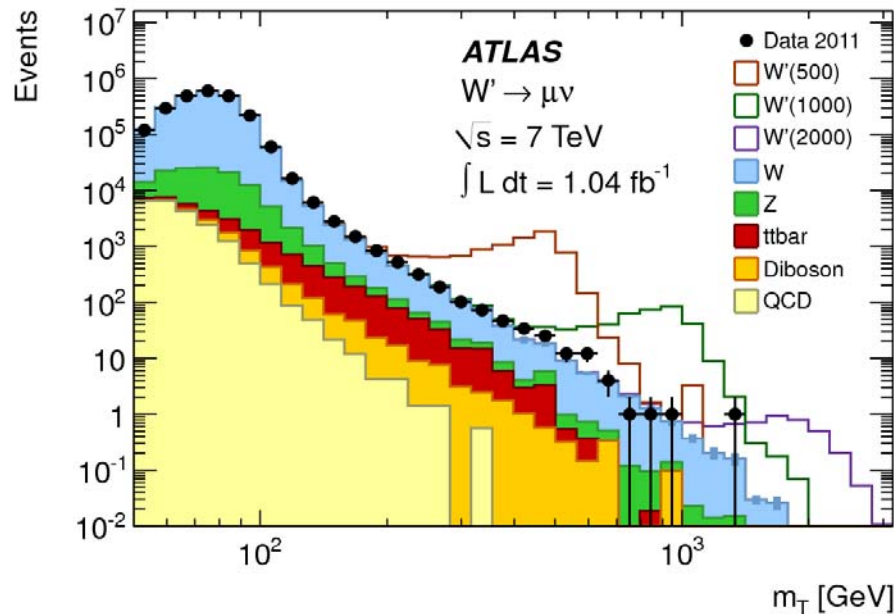
stop und slepton-Massen könnten evtl. leichter sein, wurden aber auch noch nicht gefunden.



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 .)



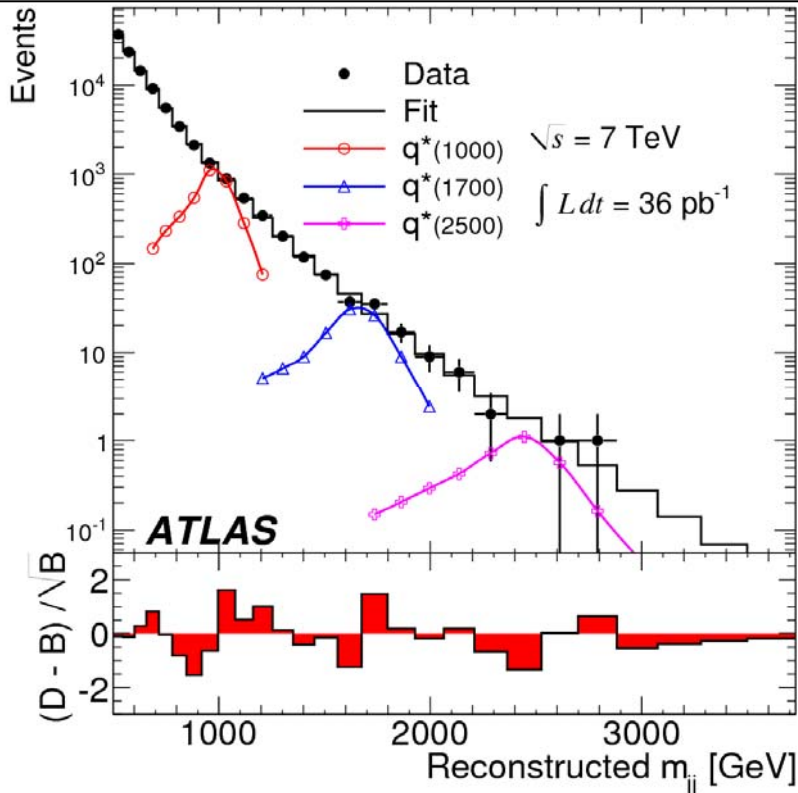
$M_{W'} > 2.15 \text{ TeV (95\% CL)}$

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

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

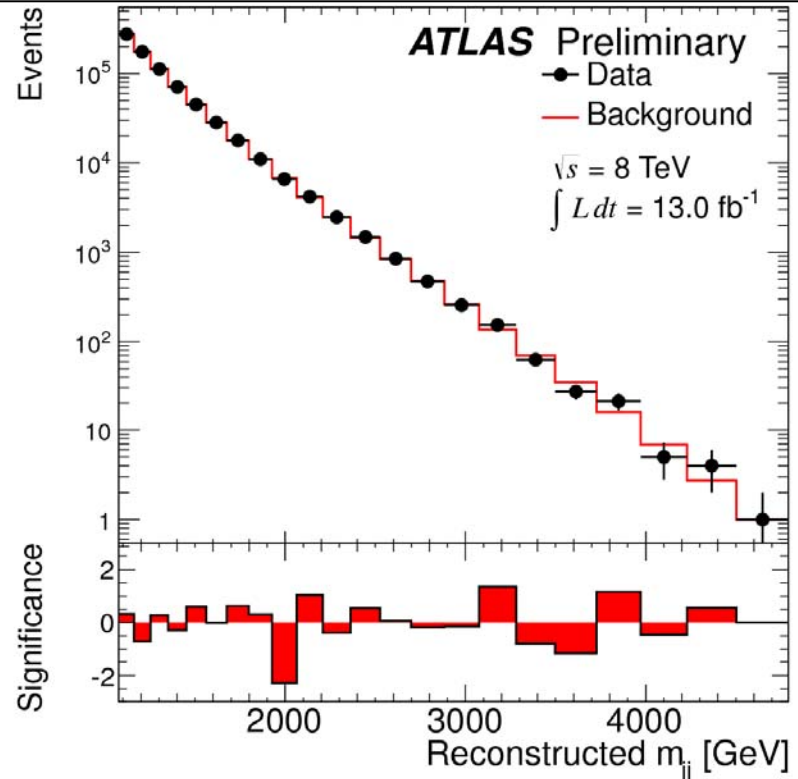
Substruktur der Quarks?

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

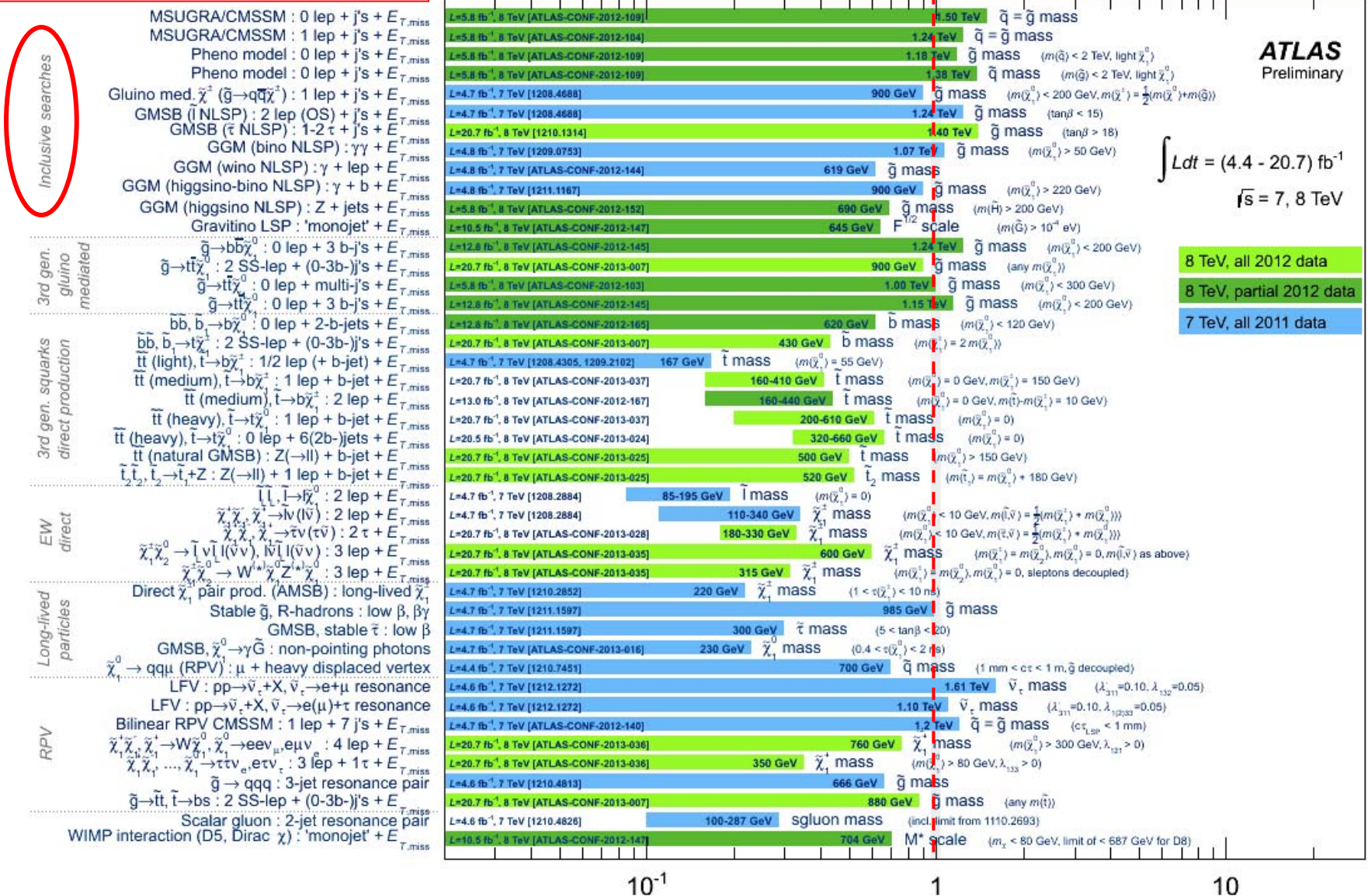


$\Lambda_c > 9.5 \text{ TeV} \text{ (95\% CL)}$

Energieskala der Substruktur

Suche nach SUSY am LHC

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

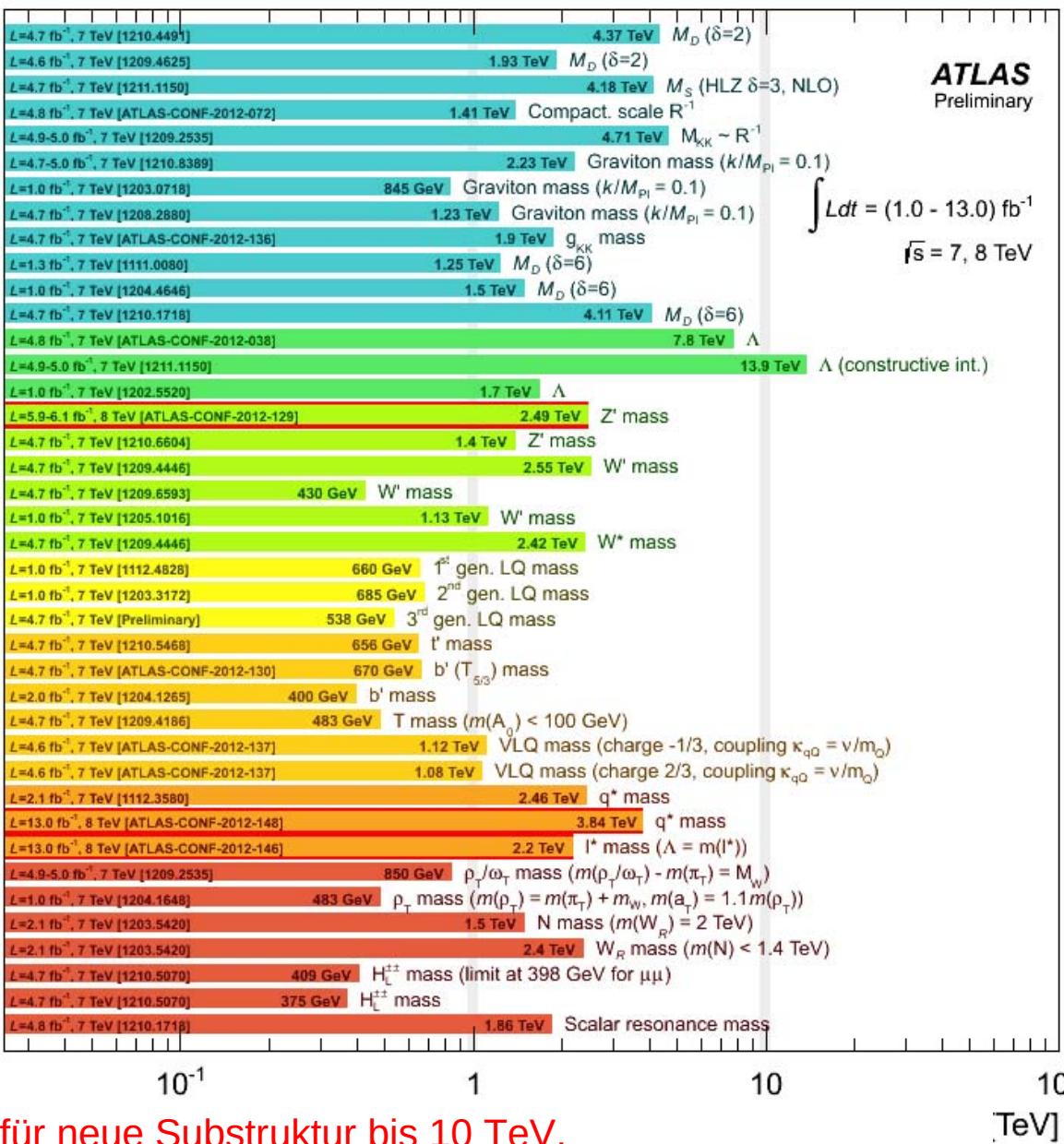


Erstmals direkte Erforschung der Energieskala um 1 TeV am LHC
 (Skala der elektroschwachen Symmetriebrechung und möglicher neuer Teilchen).

⇒V]

Suche nach Erweiterungen des SM am LHC (ausser SUSY)

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



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

Genaue Vermessung der Higgs-
Eigenschaften.