

Kerne und Teilchen

Moderne Physik III

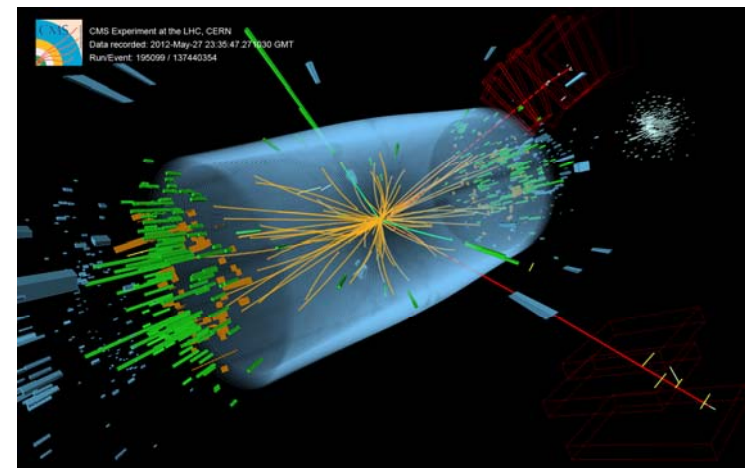
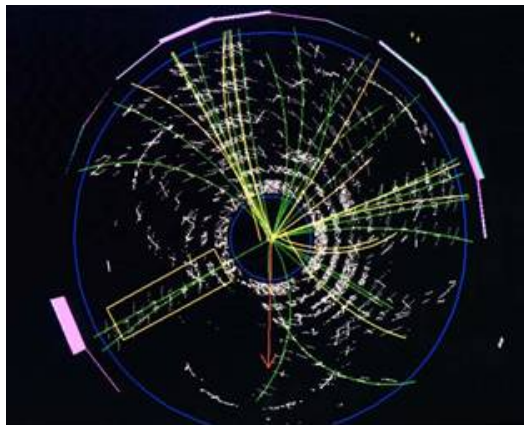
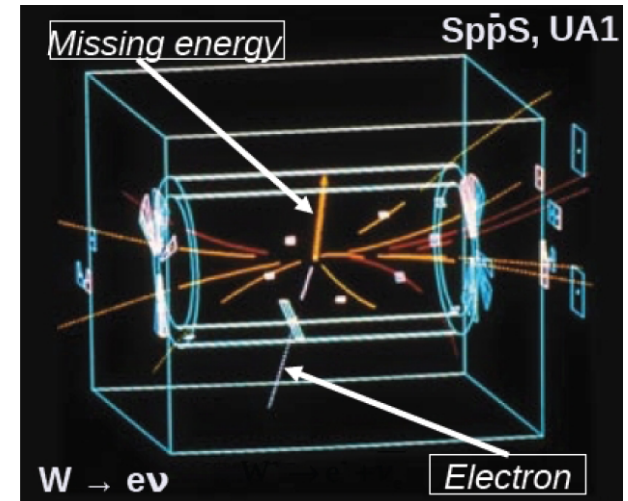
Vorlesung # 24

8. Moderne Elementarteilchen-Physik

8.3 Fundamentale Entdeckungen:

W/Z-Bosonen, Top-Quarks, Higgs-Bosonen

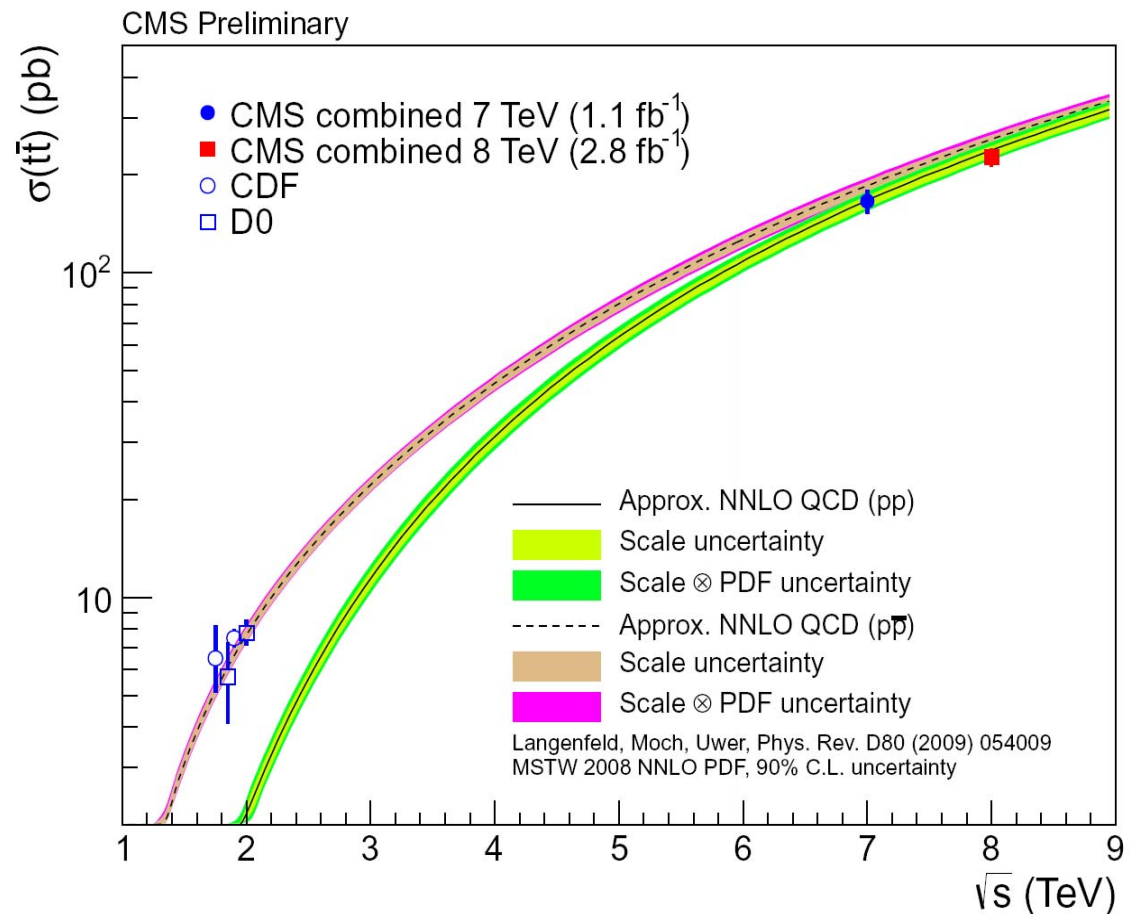
9. Zusammenfassung, Ausblick



Zu: b) Entdeckung der Top-Quarks

Top-Antitop-Wirkungsquerschnitte

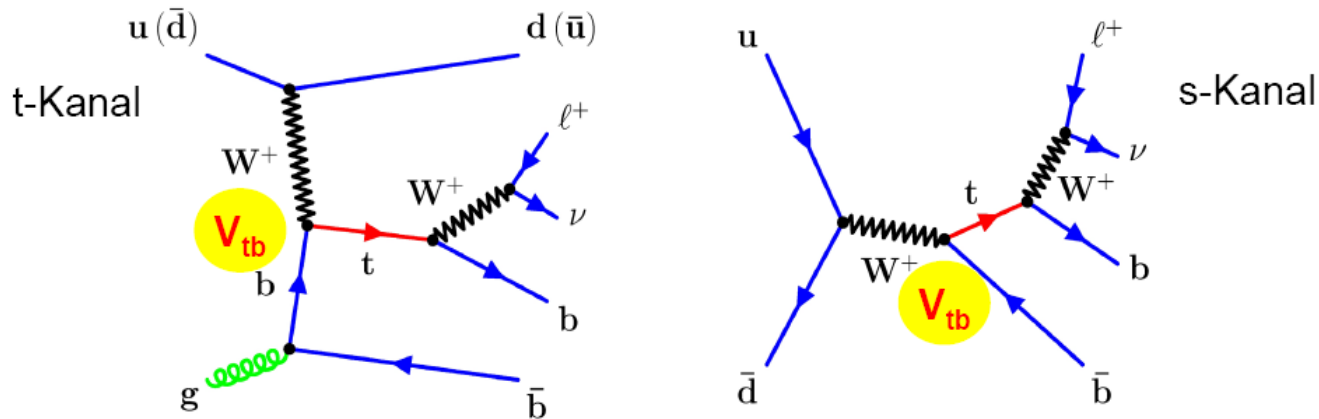
- Theorie der Top-Paarproduktion 2011:
 - NLO + Verbesserungen (z. B. „approx. NNLO“):
 - $\approx 10\%$ Theorie-Unsicherheit
- Vergleich Tevatron-LHC:
 - Wirkungsquerschnitt am LHC: mehr als $20\times$ Tevatron
 - LHC-Energien: ähnliche Wirkungsquerschnitte für $p\bar{p}$ und pp (dominiert durch Gluonen im Proton)



Einzeltop-Suche

- Elektroschwache Einzel-Top-Produktion (engl.: „single top”)
- Direkte Messung des CKM-Matrixelements V_{tb} , $\rightarrow$ CKM unitär? 4. Familie?
- Standardmodell (V–A): 100% linkshändig polarisierte Tops
- Produktionskanäle: s-Kanal, t-Kanal (dominant), assoziierte Wt -Produktion

Top-Quark-Produktion mittels der schwachen Wechselwirkung



Experimentelle Signatur: ein geladenes Lepton + fehlende transversale Energie
+ 2 energetische Jets

Theoretisch vorhergesagte Wirkungsquerschnitte bei $\sqrt{s} = 1.96$ TeV

Interesse: CKM-Element V_{tb}

direkt gemessen

Verhältnis bekannt

$$\begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$

Direkte Messung nur über Einzel-Top-Quark-Produktion

nur indirekt bekannt

Gelten die Unitaritätsrelationen? z.B.:

$$V_{ub}^2 + V_{cb}^2 + V_{tb}^2 = 1$$

Könnte die CKM-Matrix so aussehen?

$$\begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} & V_{uX}? \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} & V_{cX}? \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} & V_{tX}? \\ V_{Yd}? & V_{Ys}? & V_{Yt}? & V_{YX}? \end{pmatrix}$$

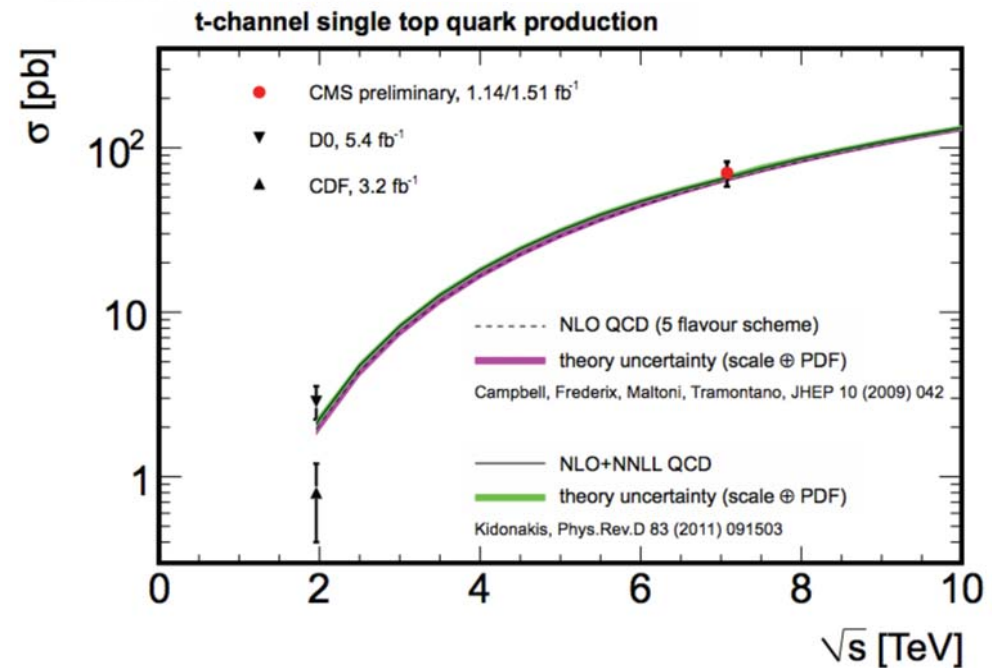
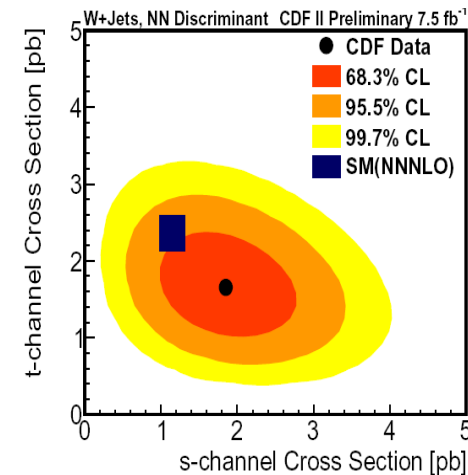
Ein sehr kleiner Wirkungsquerschnitt für Einzeltopquarkproduktion könnte einen Hinweis liefern.

■ Erste Einzel-Top-Beobachtung: Tevatron 2009

- t-Kanal und s-Kanal
- Wirkungsquerschnitt ca. 50% von $t\bar{t}$, aber viel größerer Untergrund
→ sehr aufwändige Analyse
- Gute Übereinstimmung mit Standardmodell

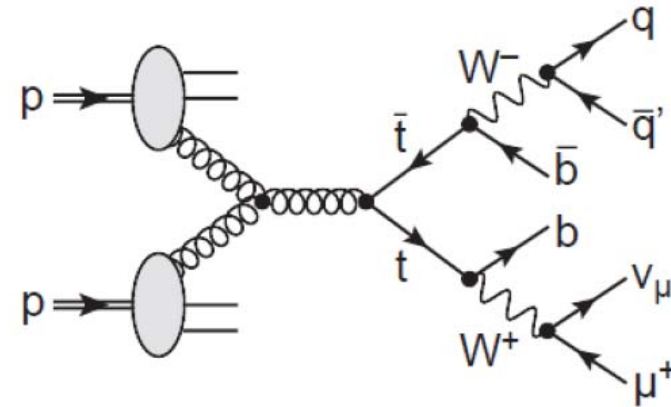
■ LHC: **einfachere** Analyse durch größere Wirkungsquerschnitte

- t-Kanal bereits genau vermessen
- 2011: Wt-Kanal „in Reichweite“
(CMS: Signifikanz noch unter 3σ)

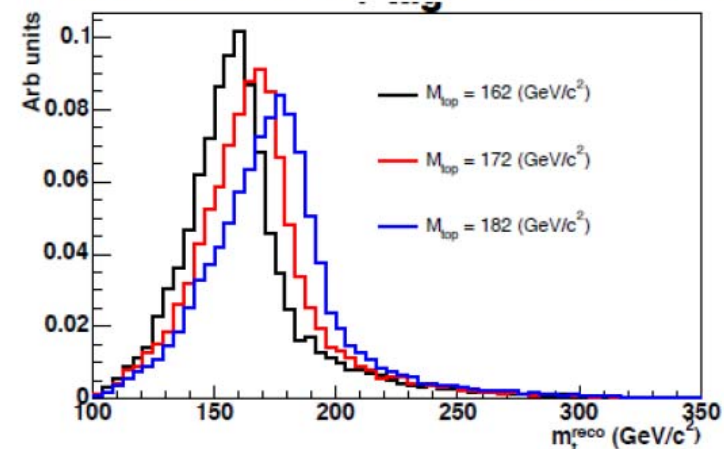


Eigenschaften des Top-Quarks: Masse

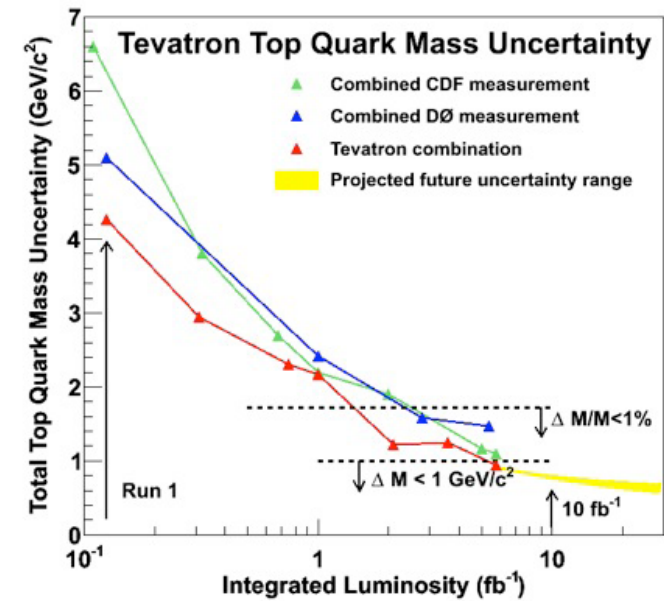
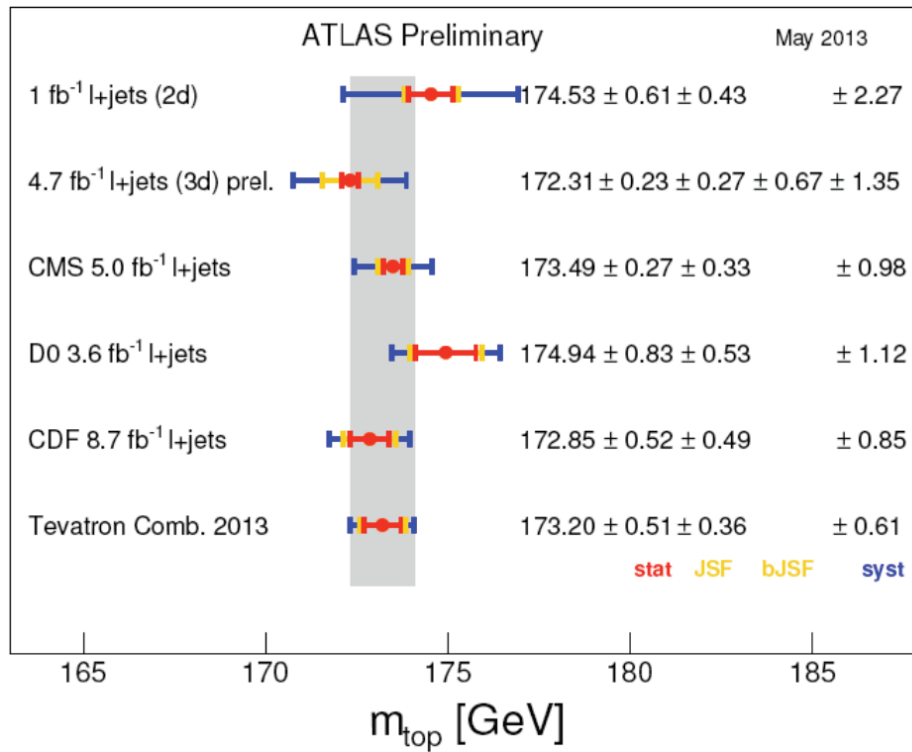
- Direkte Messung der Top-Masse benutzt Ereignis-Kinematik
- Lepton+Jets: Kinematik überbestimmt
 - Eine Unbekannte: Neutrino- p_z
 - Mögliche Zwangsbedingungen: leptonische W-Masse, $m_t = m_{\bar{t}}$
- Kombinatorik: Zuordnung der Jets zu Partonen (4 Jets $\rightarrow$ 24 Möglichkeiten) $\rightarrow$ „beste“ Kombination auswählen
- Messmethoden an Tevatron und LHC
 - Anpassung von Schablonen (wie bei W-Masse, Top-Wirkungsquerschnitt)
 - Matrixelement-Methode



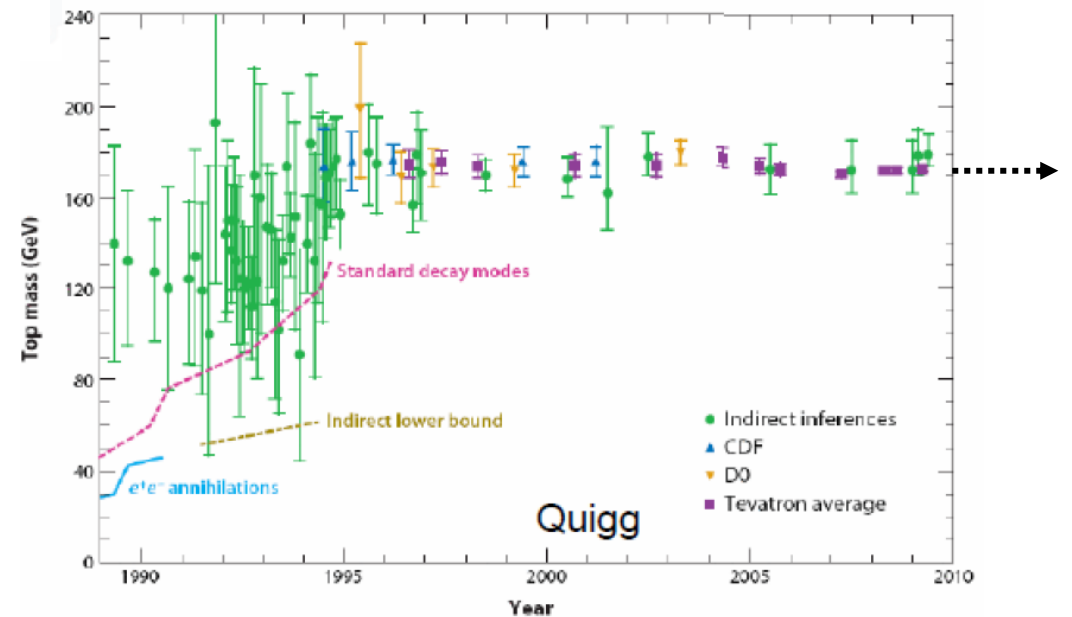
Schablonen für drei Top-Massen



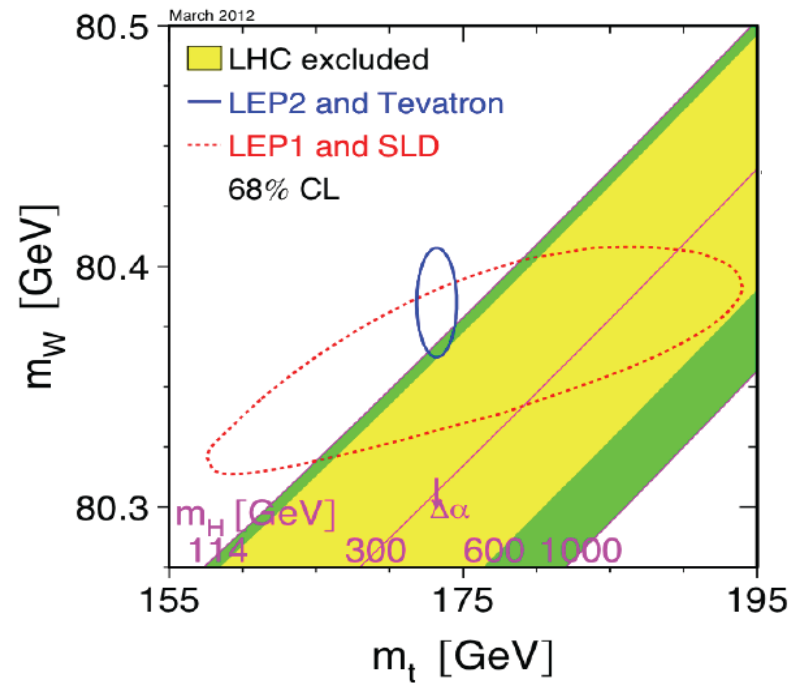
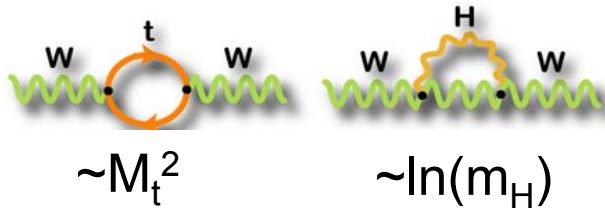
[http://www-cdf.fnal.gov/physics/new/top/2010/mass/TMT_p28_public/]



- Bislang hat das Tevatron die höchste Präzision erzielt.
- Der LHC wird schon mit den 2012 Daten nachziehen.



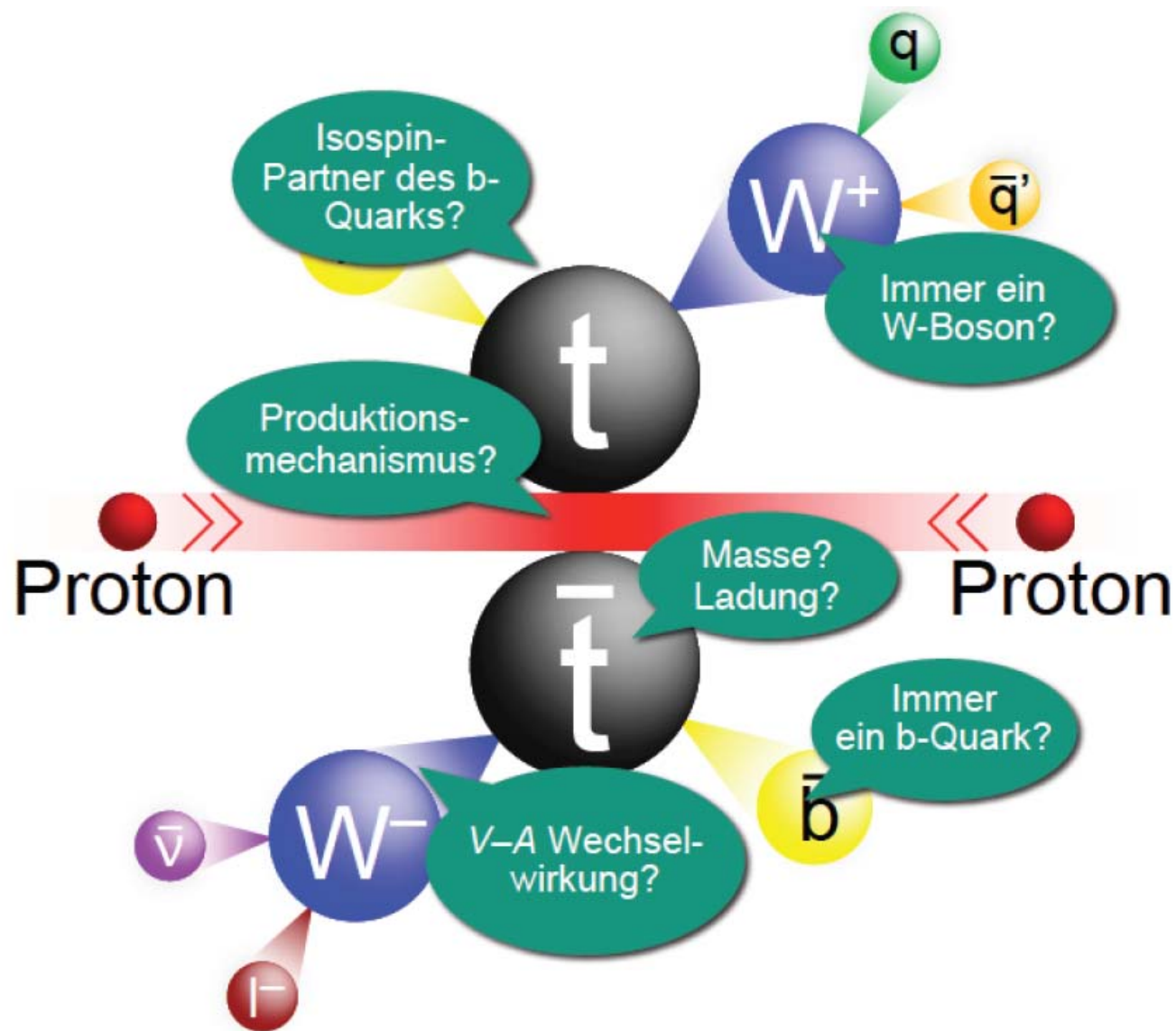
Zusammenhang zw. M_w , M_t , M_H



2011: Erwartung aus EWK Daten :

$$M_H = 90^{+36}_{-27} \text{ GeV}$$

$$M_H < 152 \text{ GeV @ 95 \% CL}$$

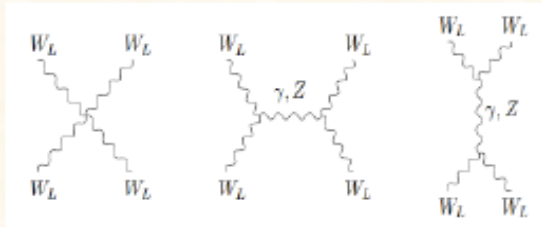


Weitere Info zum Top: <http://www-ekp.physik.uni-karlsruhe.de/~mullerth/TOP-SEMINAR12>

c) Entdeckung des Higgs-Bosons

Unitarität bei der W-Boson-Streuung

Scattering of longitudinally polarized W bosons

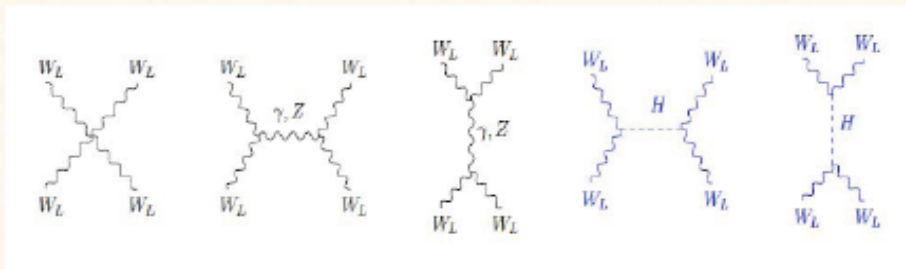


$$-iM(W^+W^- \rightarrow W^+W^-) \sim \frac{s}{m_W^2}$$

for $s \rightarrow \infty$

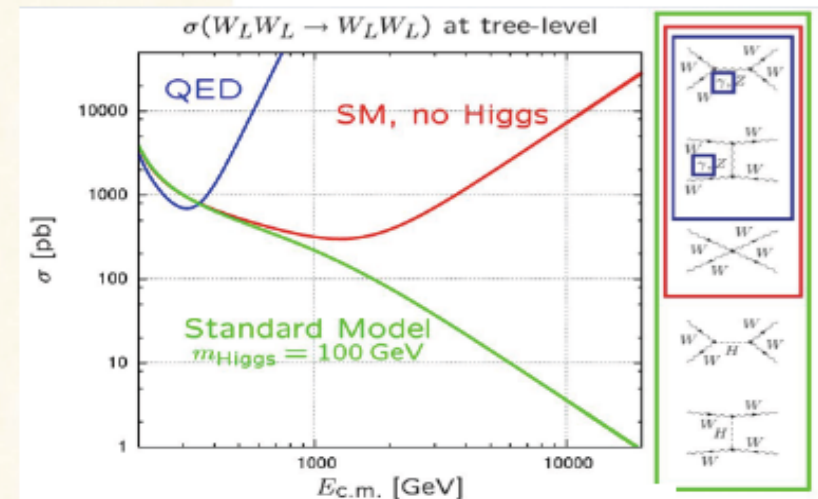
$$M_H < 1 \text{ TeV}$$

Higgs boson guarantees unitarity (if its mass is $< \sim 1 \text{ TeV}$)



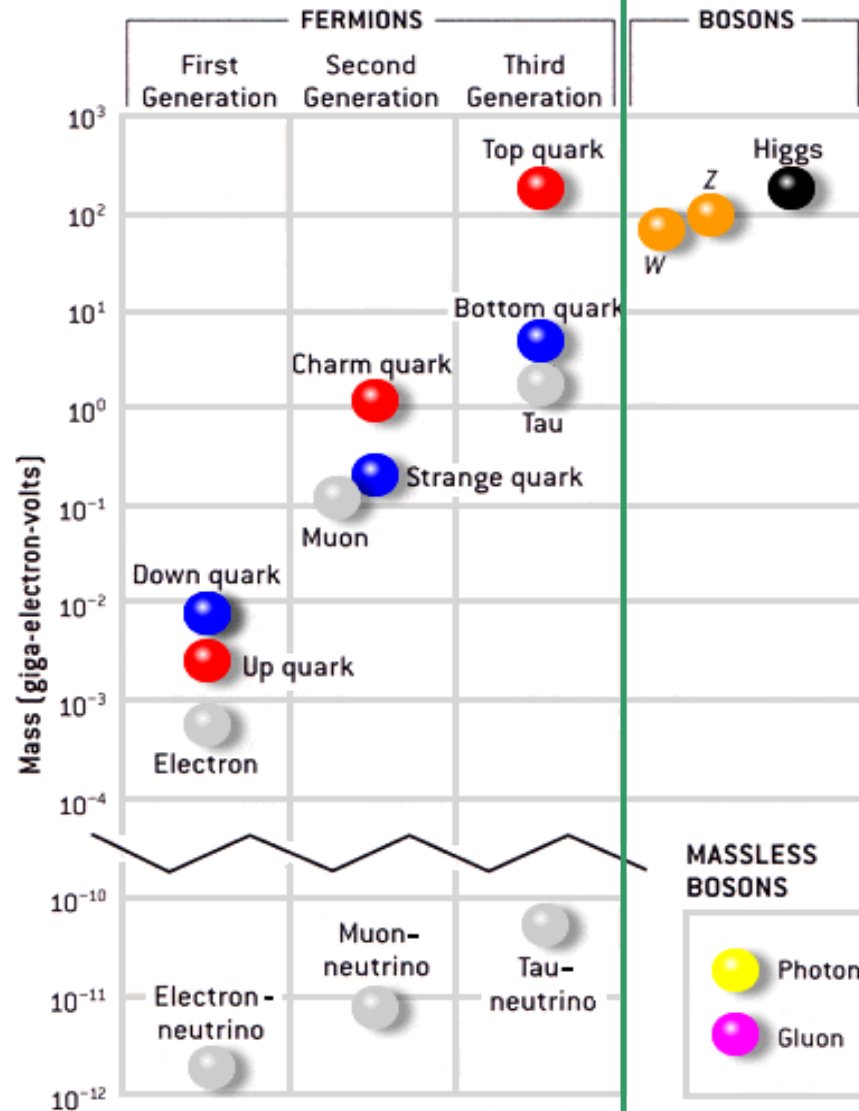
$$-iM(W^+W^- \rightarrow W^+W^-) \sim m_H^2$$

for $s \rightarrow \infty$



C. Englert

Teilchenmassen



Theorie:

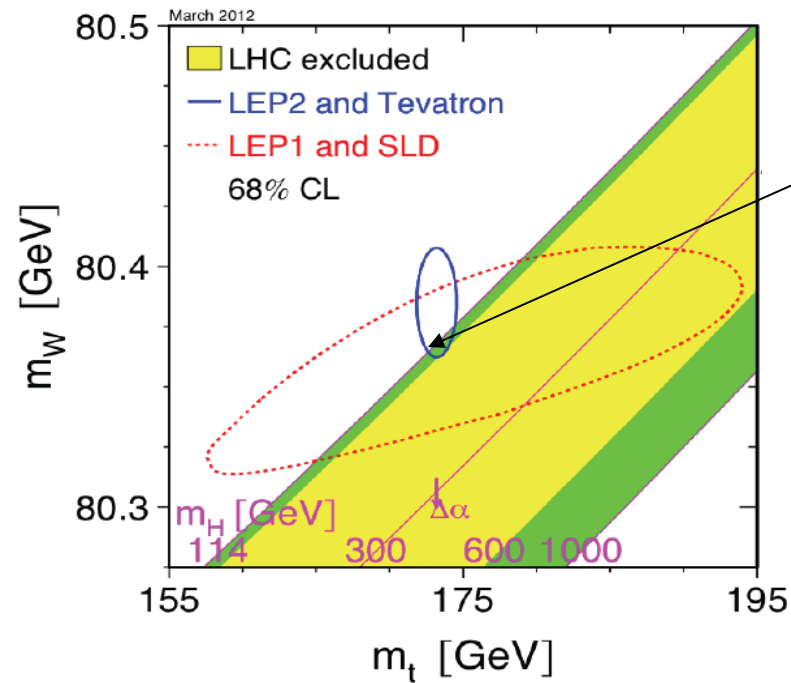
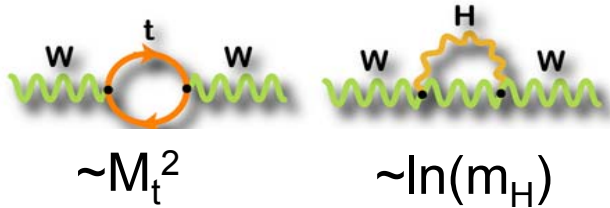
Alle Elementarteilchen sind masselos. Die Messungen widersprechen dem aber.

Zur Auflösung des Widerspruchs:
Einführung eines weiteren Feldes,
dessen Bosonen den Teilchen
Masse verleihen:
Das Higgs-Feld



R. Brout,
F. Englert,
P. Higgs
G. Gounnik
C. Hagen
T. Kibble

Vorhersage von M_H



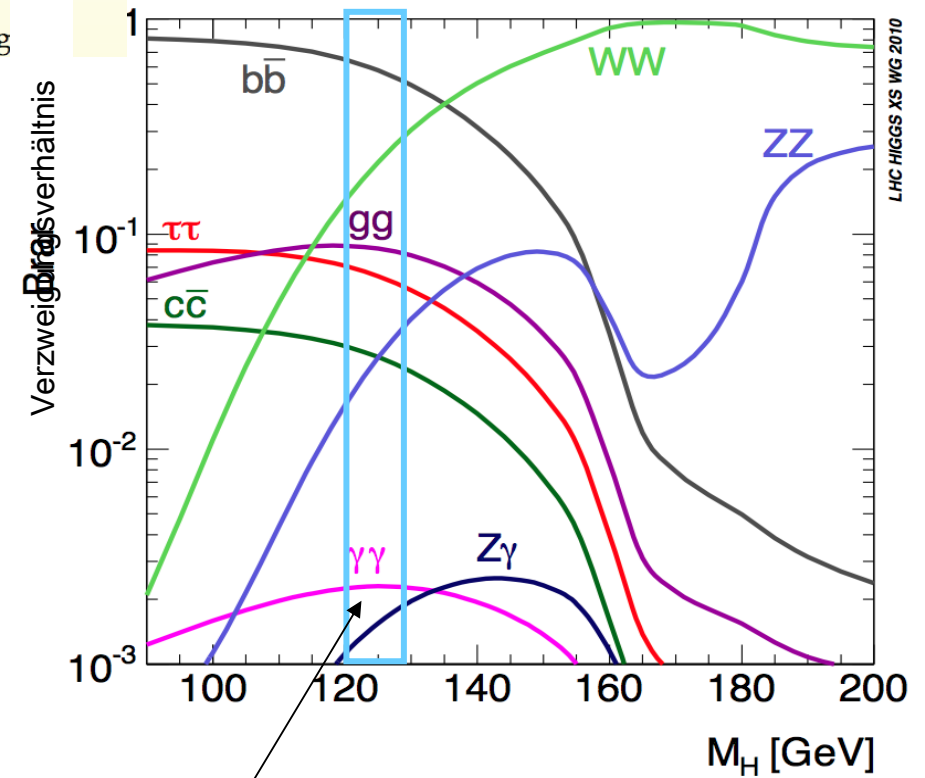
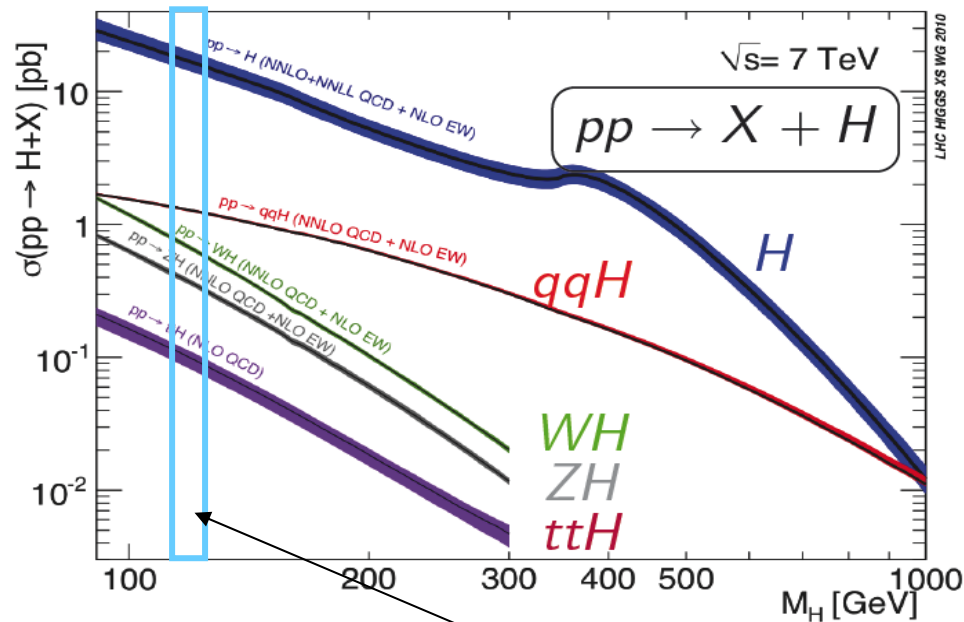
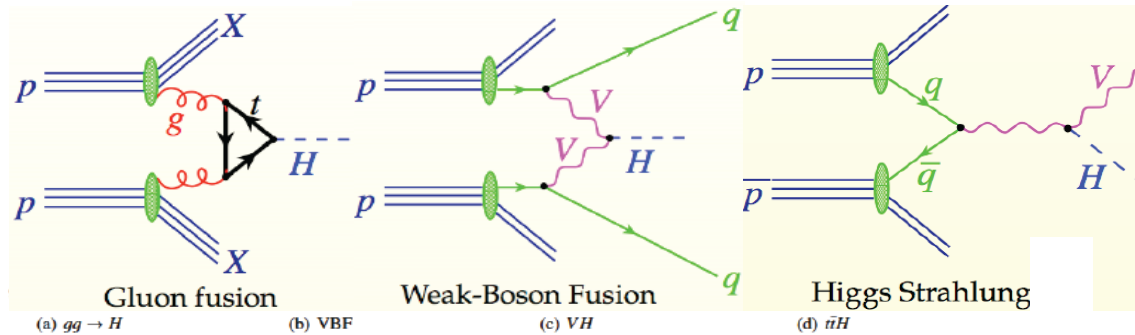
Dort müssen wir suchen!

Erwartung aus EWK Daten :

$$M_H = 90^{+36}_{-27} \text{ GeV}$$

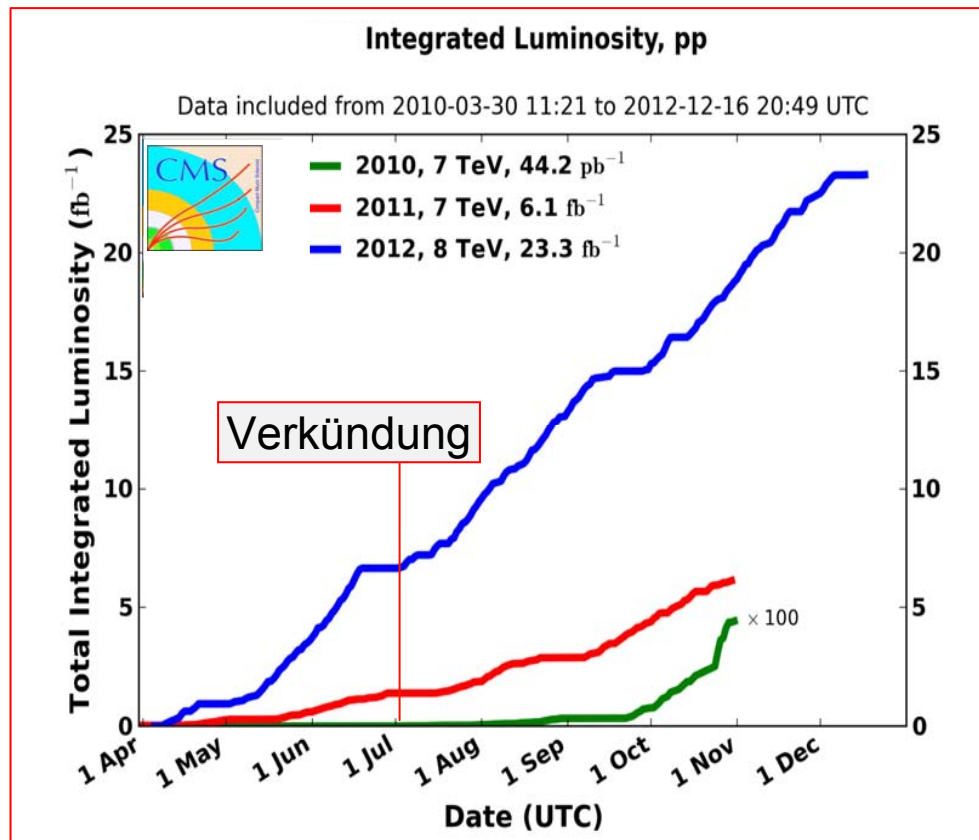
$$M_H < 152 \text{ GeV @ 95 \% CL}$$

Erzeugung und Zerfall des Higgs



Interessanter Bereich

Daten am LHC 2011, 2012



ATLAS and CMS each collected
5 fb⁻¹@ 7TeV and 20 fb⁻¹@ 8TeV

Results shown here based on 5 fb⁻¹ data
at 7TeV and up to 20 fb⁻¹ of data at 8TeV

Taken with 50 ns bunch spacing and
typically 20 interactions/bunch crossing

Max. instantaneous luminosity
7.5 10³³/cm²s

Until end 2012:

~ 2.5 10¹⁵ pp collisions

~10¹⁰ pp collisions recorded

25 · 10⁶ Z → μμ decays produced

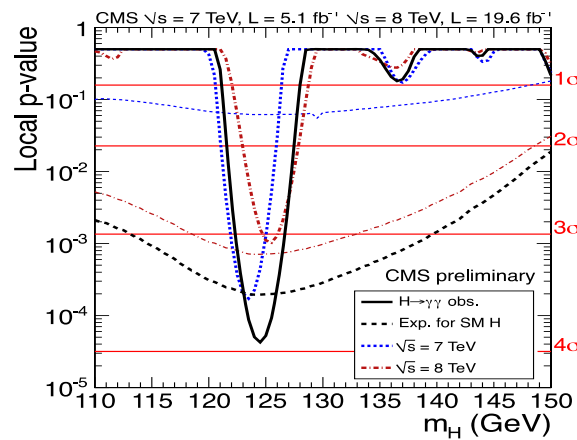
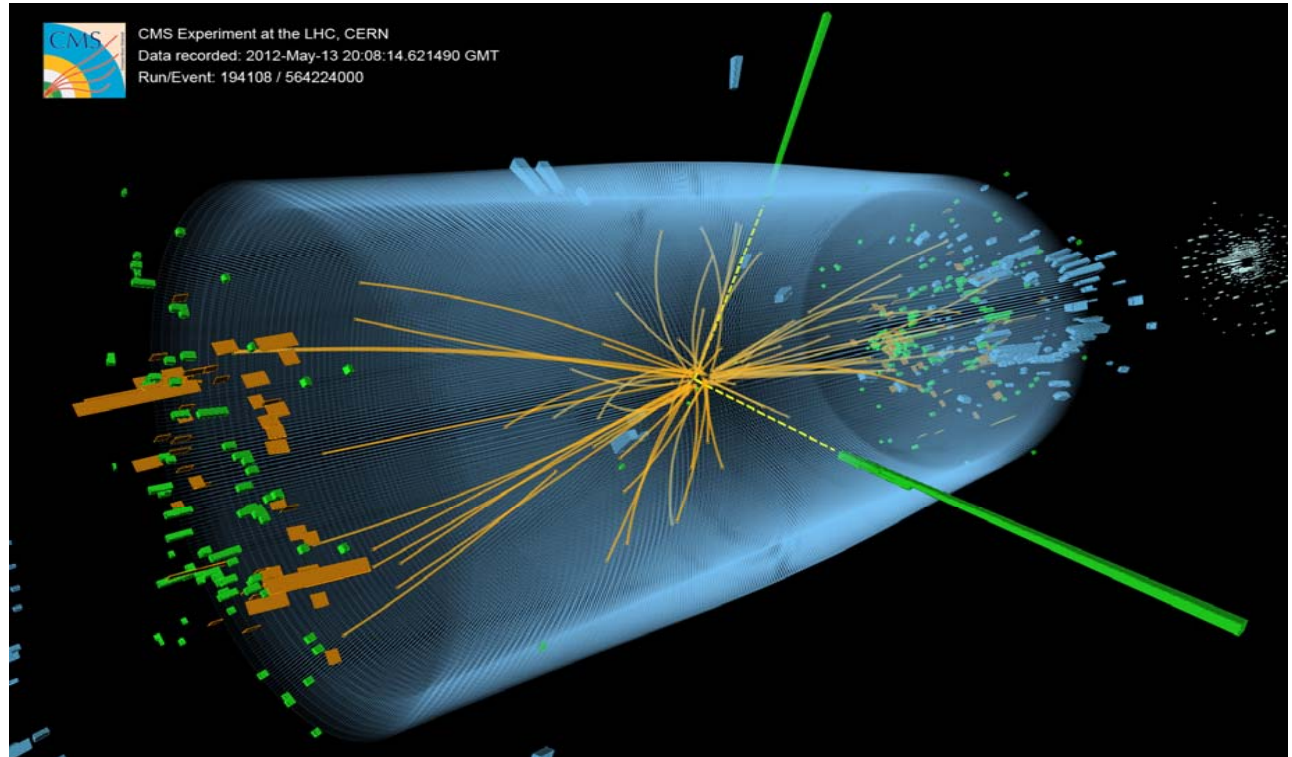
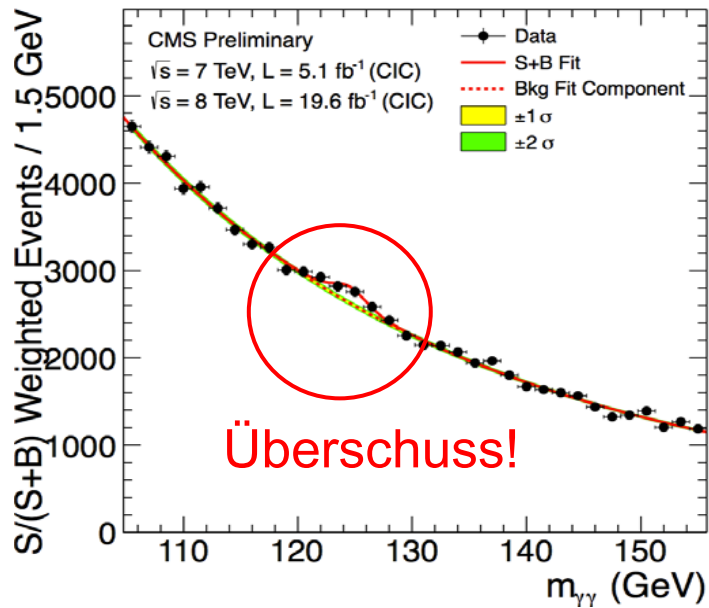
Expected number of H decays in data:

~ 1000 H → γγ

~ 50 H → ZZ → 4 ℓ

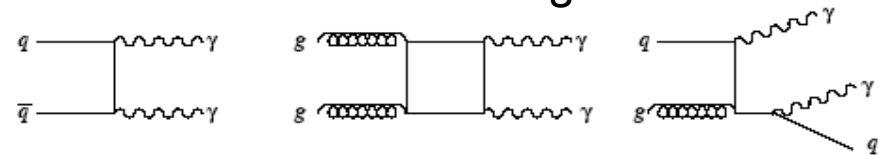
~ 5000 H → WW → ℓν ℓν

Kandidaten für $pp \rightarrow X + H; H \rightarrow \gamma\gamma$

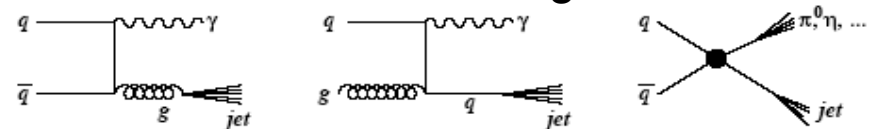


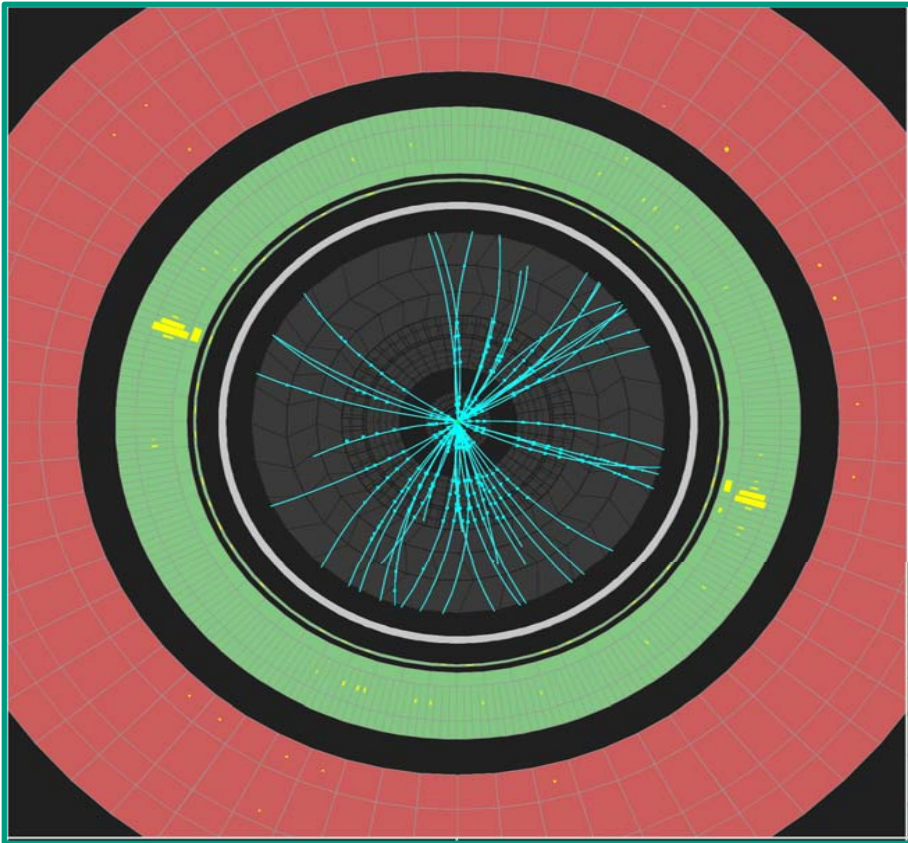
Statistische
Signifikanz
des Signals

Irreduzibler Untergrund



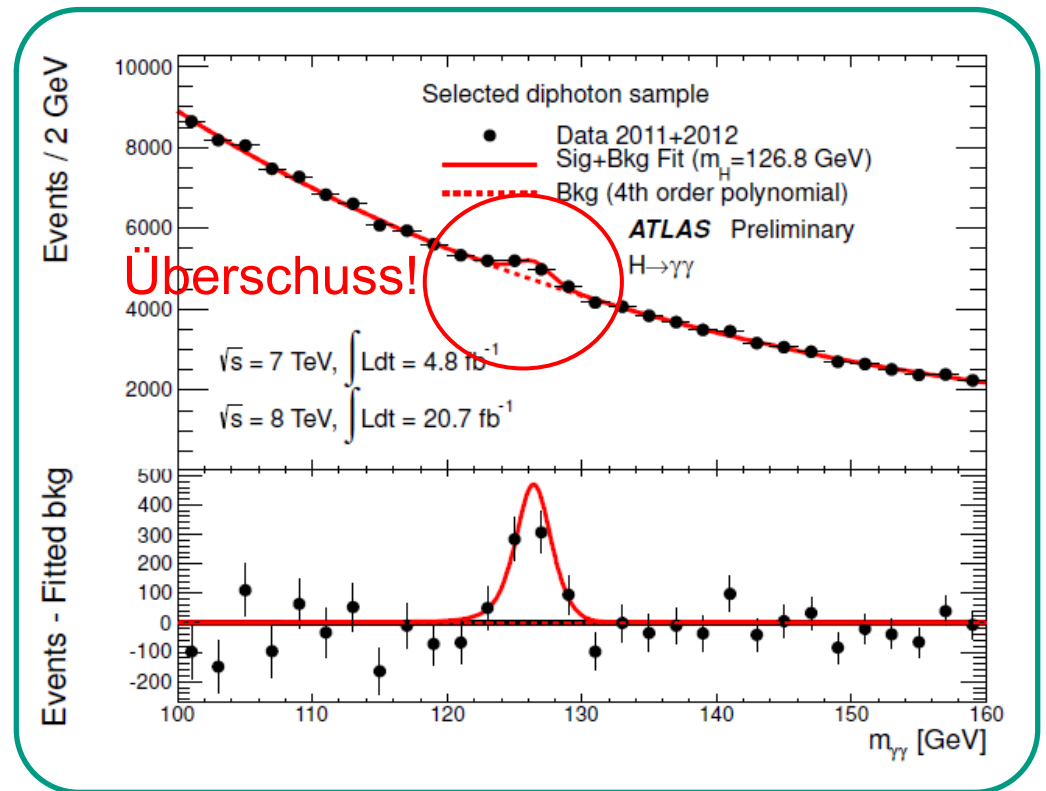
Reduzibler Untergrund

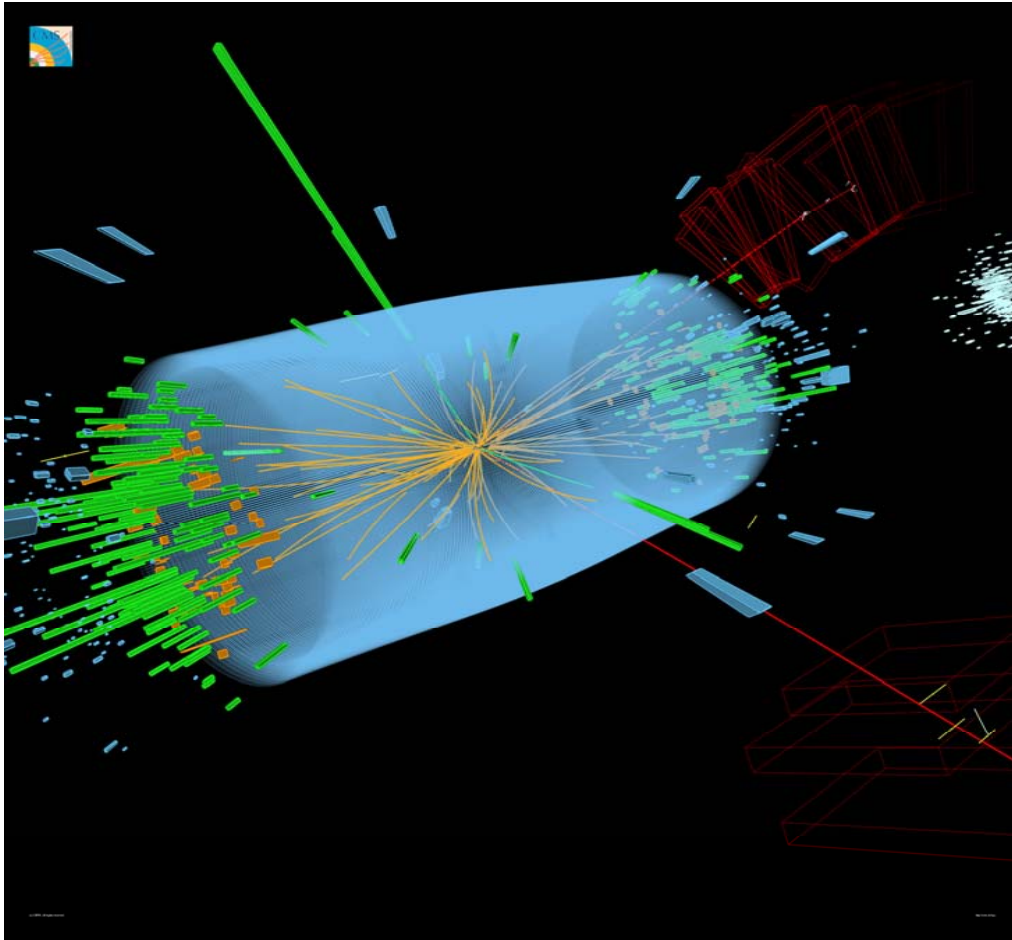




ATLAS: Kandidaten für
 $pp \rightarrow X + H; H \rightarrow \gamma\gamma$

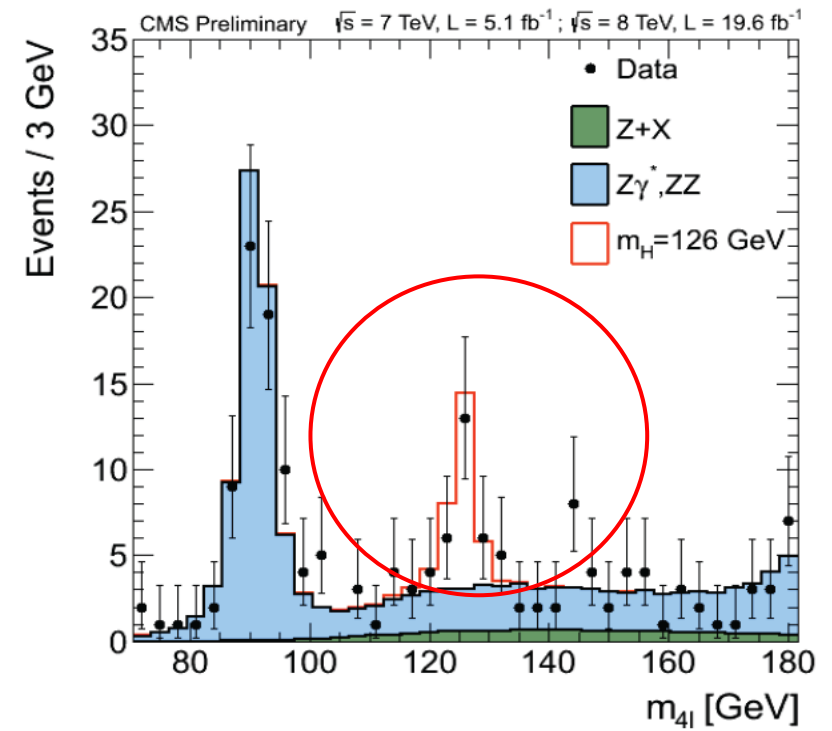
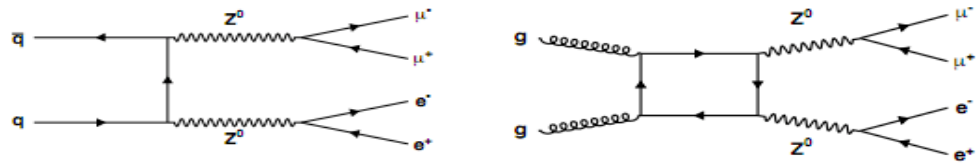
Zahl der Ereignisse mit
 $H \rightarrow \gamma\gamma$ - Kandidaten

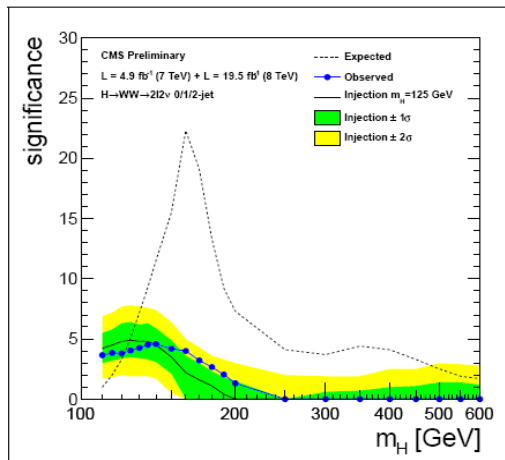
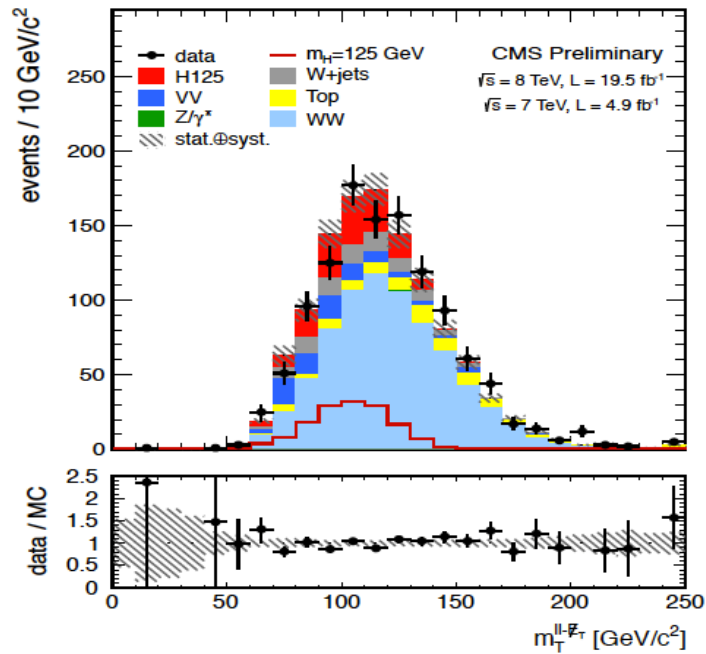




Kandidaten für
 $pp \rightarrow X + H; H \rightarrow ZZ^*,$
 $Z \rightarrow e^- e^+$
 $Z^* \rightarrow \mu^- \mu^+$

Irreduzibler Untergrund



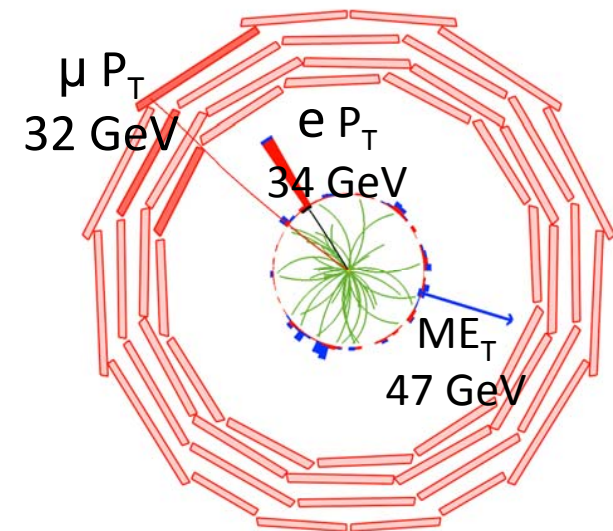


► $\sim 4.0(5.1) \sigma$ observed (expected)
significance at $m_H \sim 125$ GeV

Kandidaten für
 $pp \rightarrow X + H; H \rightarrow WW^*$,

$W \rightarrow e^- \nu$

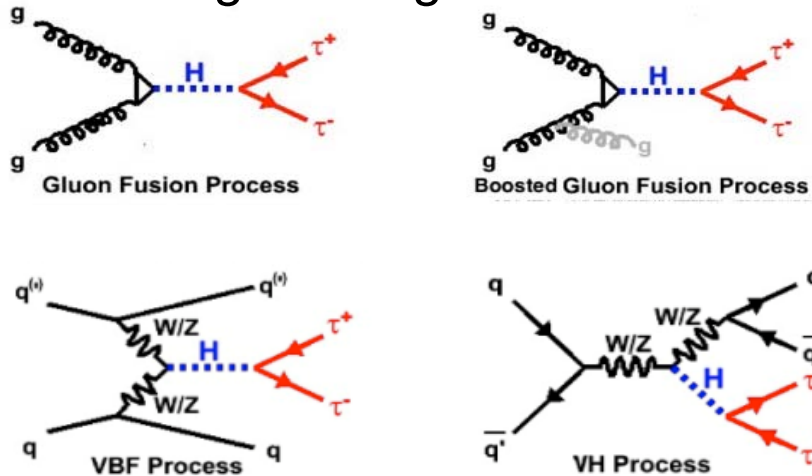
$W^* \rightarrow \mu^+ \nu$



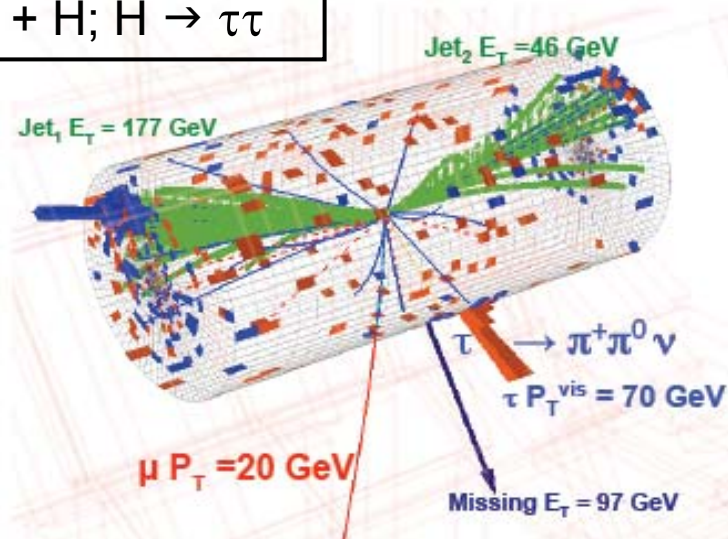
Signifikanz des Signals 4σ

Higgs $\rightarrow \tau^+ \tau^-$

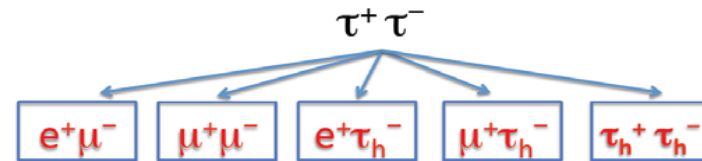
Ereigniskategorien



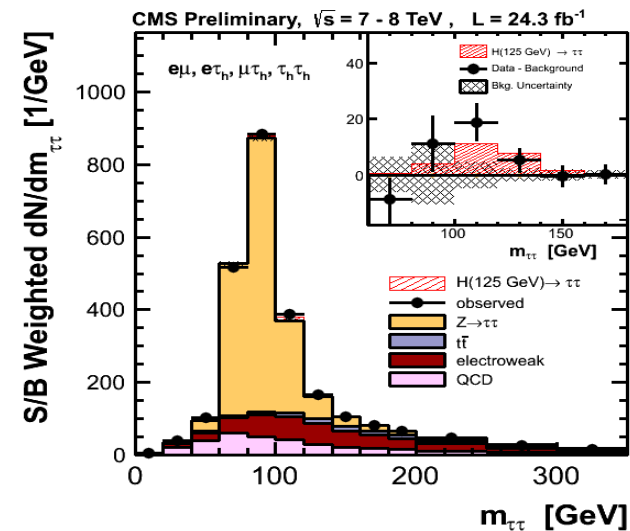
Kandidat für
 $pp \rightarrow X + H; H \rightarrow \tau\tau$



Zerfallskanäle

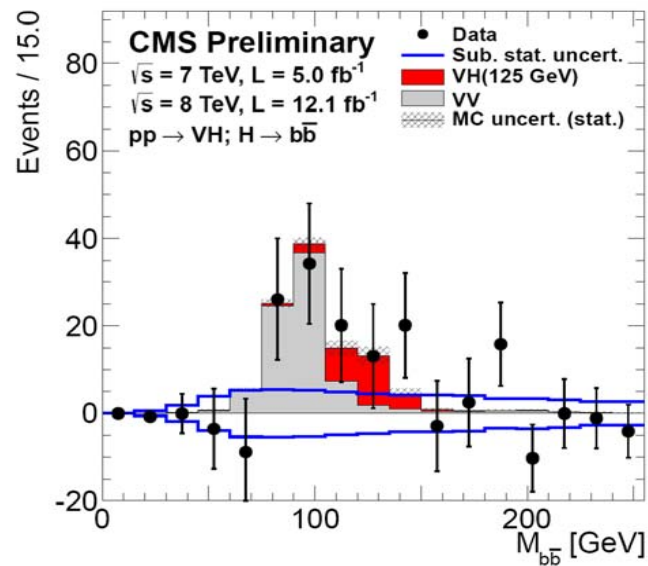
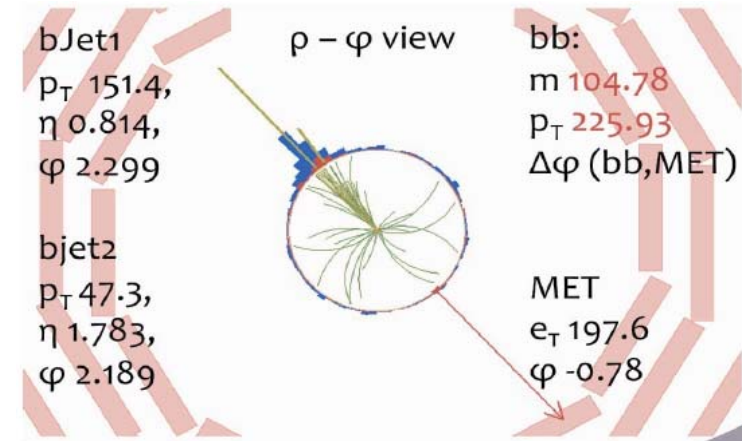
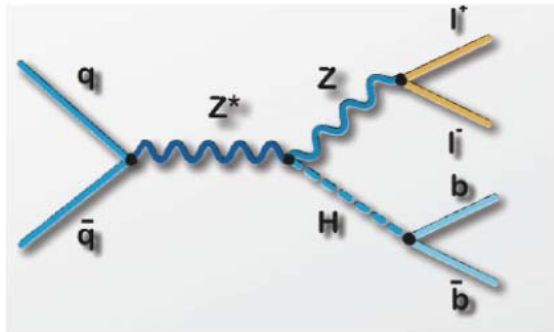


Zahl der Ereignisse mit
 $H \rightarrow \tau\tau$ - Kandidaten

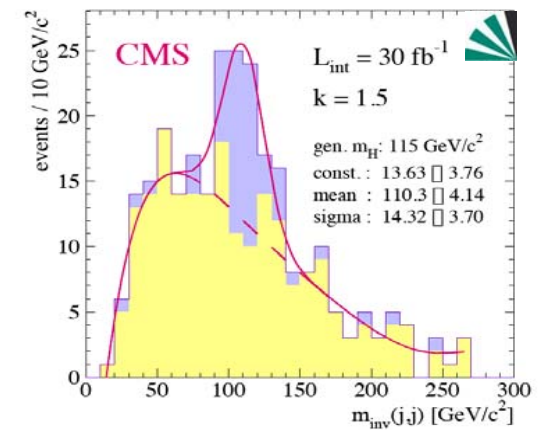
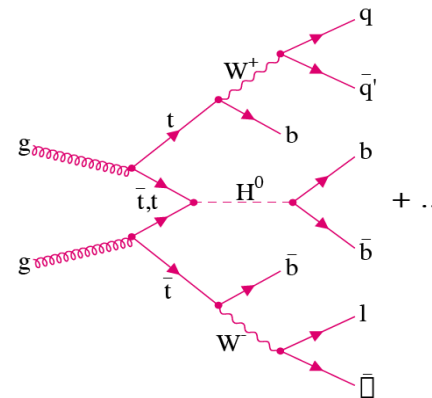


Erste Evidenz für
 Youkawa-Kopplungen ($2,9 \sigma$)

Suche nach abgestrahlten Higgs $\rightarrow b\bar{b}$

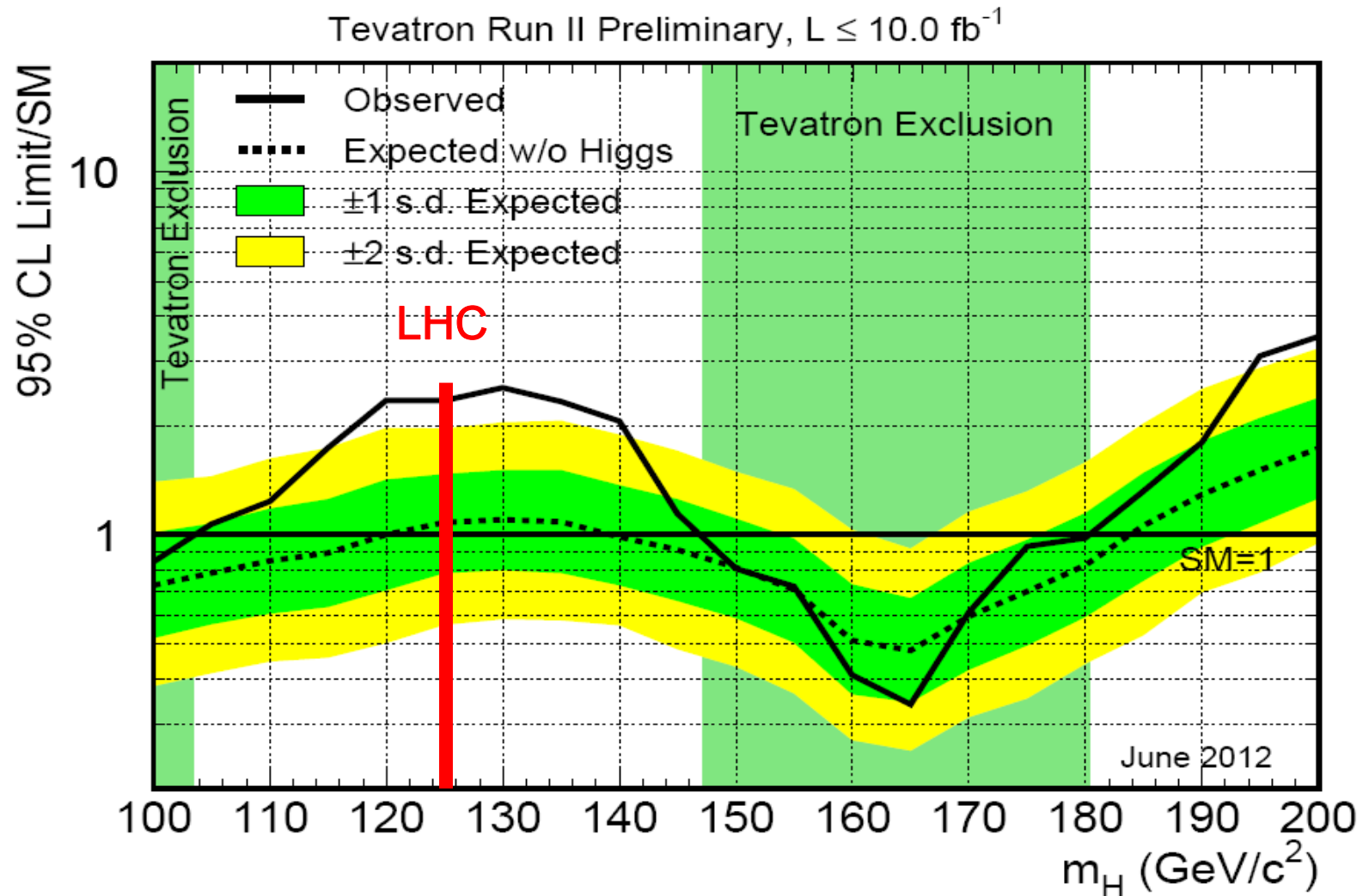


Suche nach $t\bar{t} + H \rightarrow b\bar{b}$



IEKP-KA/2001-23
CMS NOTE 2001/054

Higgs-Bosonsuche am Tevatron

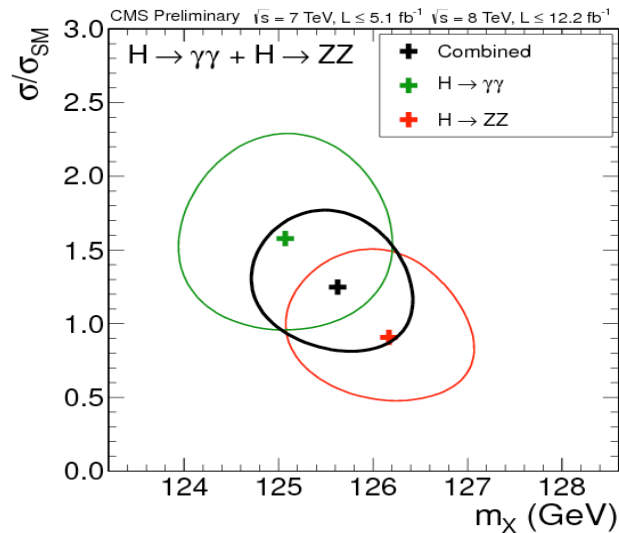


Tevatron-Daten: Kopplungen an Fermionen Voraussetzung für Überschuss

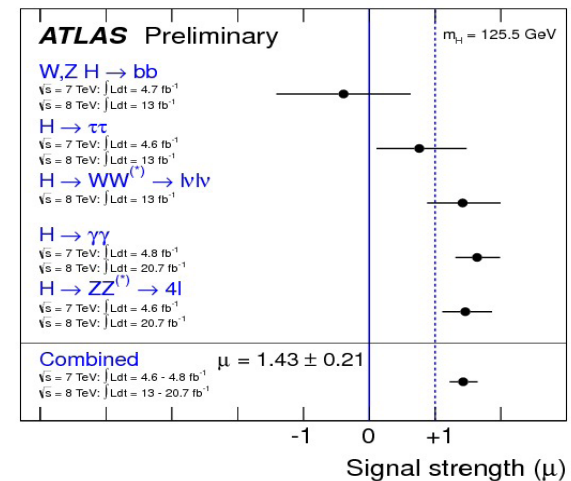
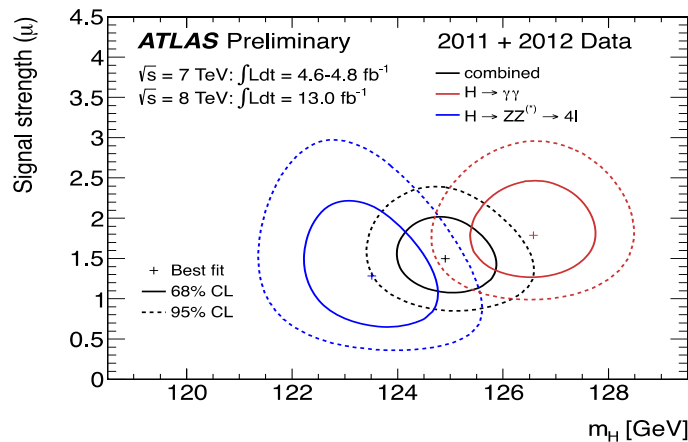
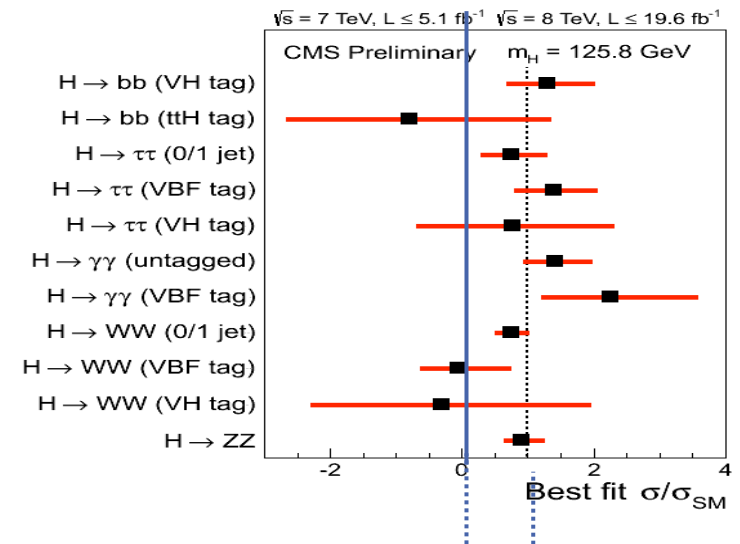
Allerdings: Resultate nicht sehr vertrauenswürdig !

Eigenschaften der beobachteten Higgs-Kandidaten

MASSEN



REL. SIGNALSTÄRKEN



Massen, Signalstärken und auch andere Eigenschaften
(Spin, Parität) stimmen mit der Theorie überein

Weitere Messungen

👤 mass

👤 spin and parity (J^P)

👤 CP (even, odd, or admixture?)

👤 couplings to vector bosons: is this boson related to EWSB, and how much does it contribute to restoring unitarity in $W_L W_L$ scattering

👤 couplings to fermions

- is Yukawa interaction at work?

- contribution to restoring unitarity?

👤 couplings proportional to mass ?

👤 is there only one such state, or more?

👤 elementary or composite?

👤 self-interaction

👤 decay to two photons: cannot be spin 1 (Landau-Yang theorem)

👤 J^P : currently tested at the LHC, using angular correlations in ZZ^* , WW^* and $\gamma\gamma$

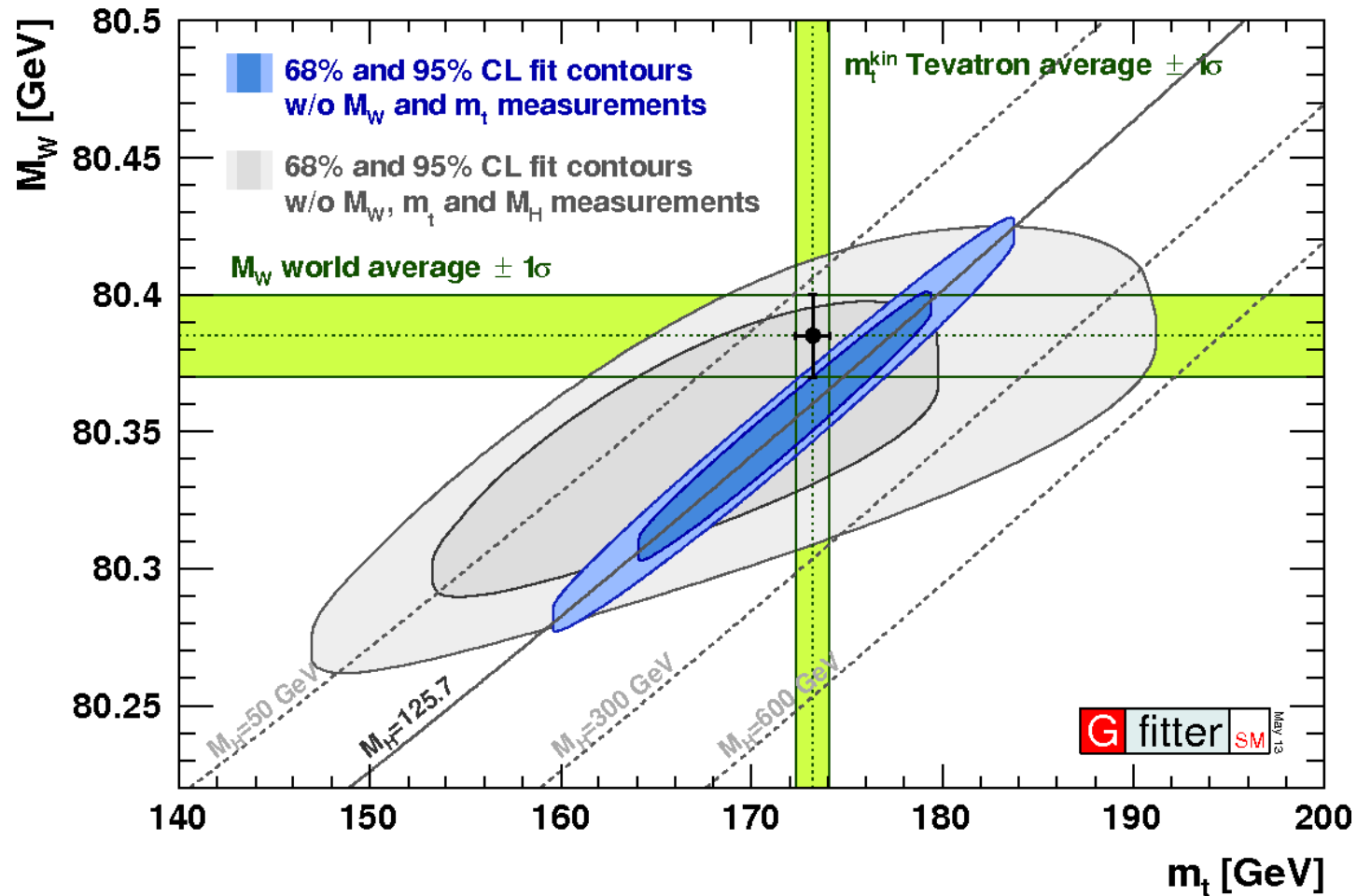
👤 J^P : by end of 8 TeV run, assuming a total of 35/fb per exp: **$\sim 4 \sigma$ separation of 0^+ vs 0^- and 0^+ vs 2^+**

👤 **CP**: somewhat more tricky, basic question of possible mixture of CP-even and CP-odd

👤 If focus at LHC stays on WW^* , ZZ^* and VBF: limited sensitivity to distinguish pure CP-even state from admixture of CP-even and CP-odd components

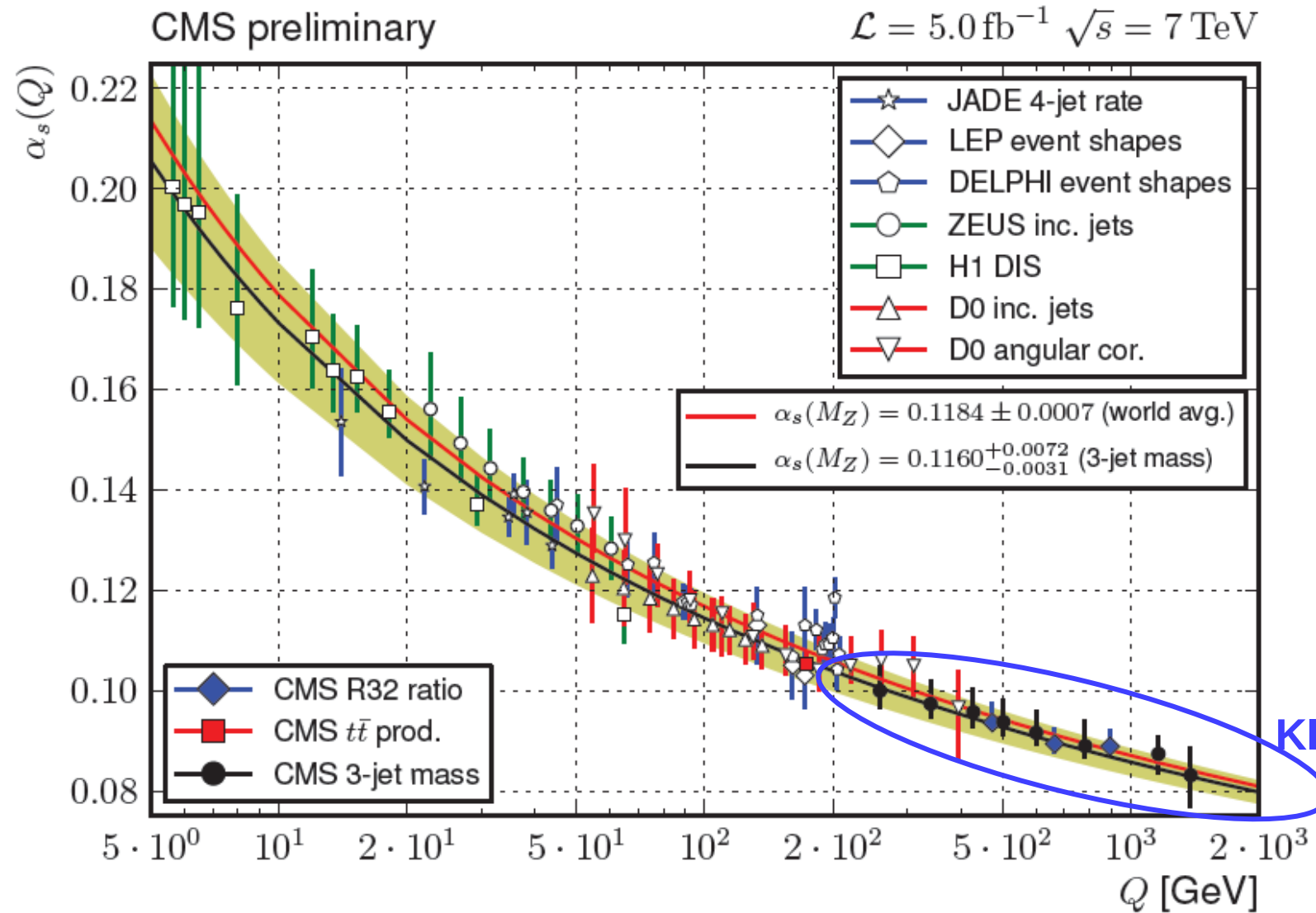
👤 Linear collider: threshold behaviour of $e^+e^- \rightarrow t\bar{t}H$ gives precision measurement of CP mixing.

Zusammenhang zw. M_W , M_t , M_H



Alle Messungen sind konsistent

Das Laufen von α_s



Bislang ist das Standardmodell intakt bis 1,5 TeV !

9. Zusammenfassung und Ausblick

UNSER BILD DER FUNDAMENTALEN TEILCHEN UND KRÄFTE WIRD VON DEM STANDARDMODELL BESCHRIEBEN:

Materieteilchen				Austauschteilchen	
	1st gen.	2nd gen.	3rd gen.		
Q U A R K	 <i>u</i> <i>up</i>	 <i>c</i> <i>charm</i>	 <i>t</i> <i>top</i>	Strong Force  <i>Gluon</i>	
	 <i>d</i> <i>down</i>	 <i>s</i> <i>strange</i>	 <i>b</i> <i>bottom</i>	Electro-Magnetic Force  <i>photon</i>	
L E P T O N	 <i>ν_e</i> <i>e neutrino</i>	 <i>ν_μ</i> <i>μ neutrino</i>	 <i>ν_τ</i> <i>τ neutrino</i>	Weak Force  <i>W⁺ bosons</i>	
	 <i>e</i> <i>electron</i>	 <i>μ</i> <i>muon</i>	 <i>τ</i> <i>tau</i>		
				 <i>Z boson</i>	
				 <i>Higgs</i>	
					
					
				...	

OFFENE FRAGEN:

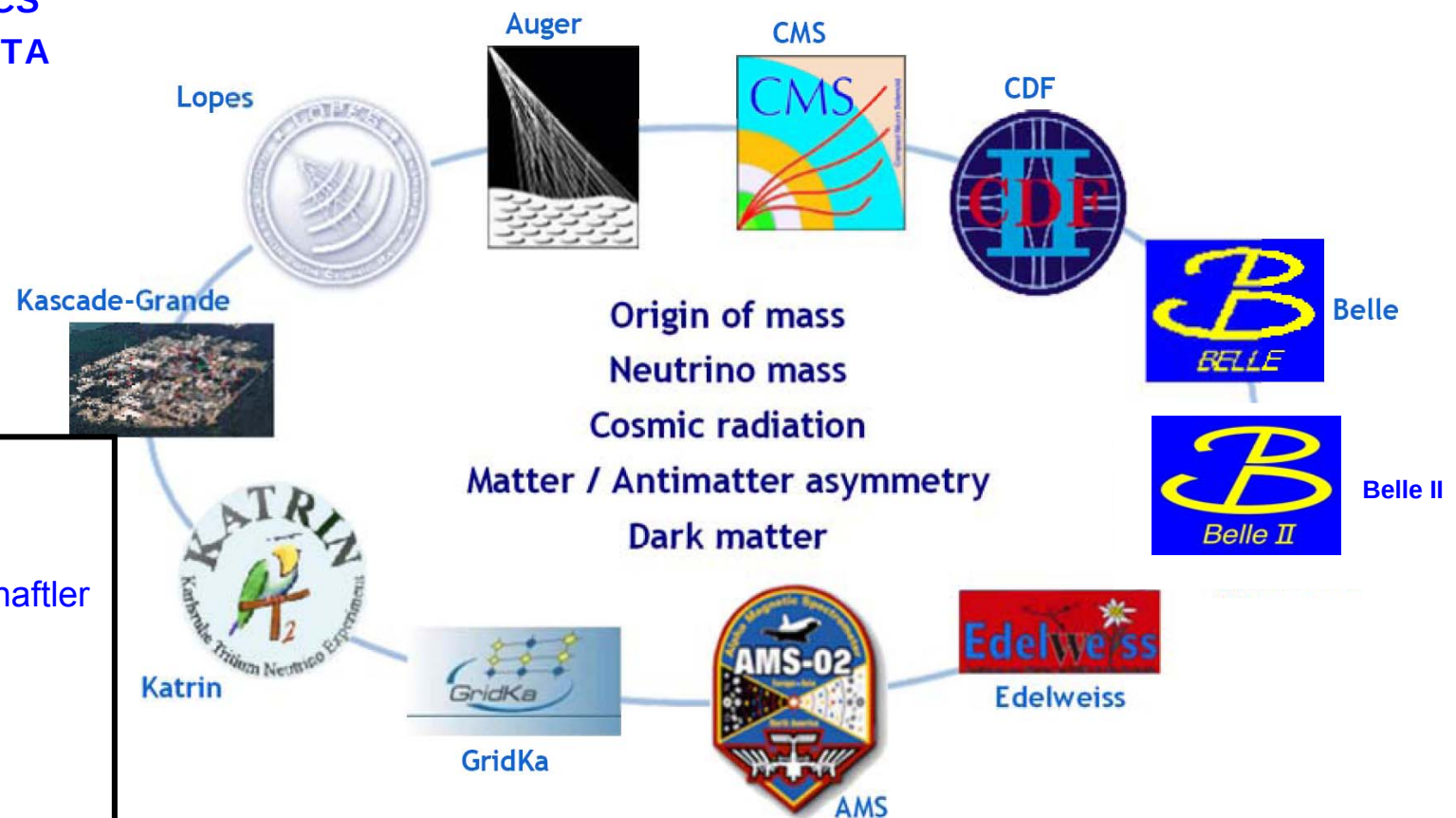
- WIE ERKLÄRT SICH DIE VIELFALT DER TEILCHEN UND KRÄFTE ?
- WIESO GIBT ES NUR MATERIE IM HEUTIGEN UNIVERSUM ?
- GIBT ES EINE VEREINHEITLICHE WECHSELWIRKUNG ?
- DUNKLE MATERIE UND DUNKLE ENERGIE IM UNIVERSUM

Das wollen wir am IEKP erforschen

Institut für Experimentelle Kernphysik

Elementarteilchen- & Astroteilchenphysik

- Gegründet 1960
- Sitz am KIT CN, CS
- Mitglied von KCETA und KSETA



Mitarbeiter/inn/en

7 Professoren
10 Leitende Wissenschaftler
30 Wissenschaftler
50 Doktoranden
40 Diplomanden
4 Administration
6 Techniker
10 Werkstattangehörige

Campus Süd:

AMS, Belle, Belle II, CDF, CMS

Physikhochhaus 9.OG – Elementarteilchenphysik

Telefon: 0721 / 608-43521



Campus Nord:

AUGER, CMS, Edelweiss, KASCADE-Grande/Lopes, KATRIN

Gebäude 401/402 – Astroteilchenphysik

Telefon: 0721 / 608-23546

– Elementarteilchenphysik

Telefon: 0721 / 608-25969



Homepage: www.ekp.kit.edu

www.kceta.kit.edu

EKP – Professorengalerie



G. Drexlin
KATRIN



J. Blümer
AUGER, KATRIN,
Edelweiss



Th. Müller
CMS, CDF,
Belle II



W. de Boer
CMS, AMS-2



G. Quast
CMS, GRID



U. Husemann
CMS

+ *M. Weber* (IPE)



M. Feindt
CDF, Belle,
Belle II

Forschung am IEKP

Elementarteilchenphysik

*Müller, de Boer,
Feindt, Husemann, Quast*

Astroteilchenphysik

Blümer, Drexlin,

**Zentrale Fragestellung:
Was geschah beim Urknall?
Woraus besteht das heutige Universum?**

10^{22}

- EeV: **höchste Energien** (AUGER)
- PeV: **Massenkomposition CR** (KASCADE-Grande, Lopes)
- TeV: **Nachweis des Higgs-Bosons** (CMS, CDF)
Suche nach Supersymmetrie und neuen Teilchen
Eigenschaften des Top-Quarks
- GeV: **Suche nach Dunkler Materie** (AMS-02, Edelweiss)
Präzisionsphysik (Belle, Belle II)
- meV: **Messung der Neutrinomasse** (KATRIN)





**Endlich Semesterferien!
(Vorlesungsfreie Zeit)**