

Otkriće Higgs bozona

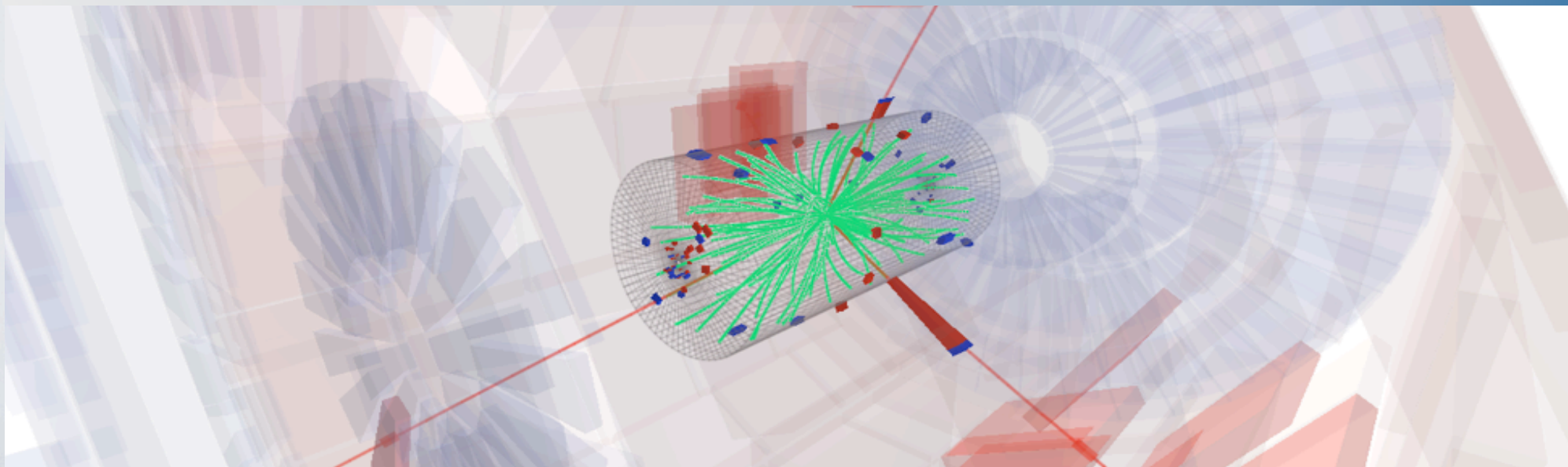
IPPOG Masterclasses program u Srbiji

Fizički fakultet u Beogradu

Predrag Milenović

Institut za fiziku visokih energija i astrofiziku, Univerzitet u Floridi

Institut za nuklearne nauke “Vinča”, Beograd



Standardni Model i Veliki Hadronski Sudarač

- Fizika elementarnih čestica danas

$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}^a F^{a\mu\nu} + i\bar{\psi}D\psi \\ & + \psi_i \lambda_{ij} \psi_j h + h.c. \\ & + |D_\mu h|^2 - V(h)\end{aligned}$$

provereno, izvanredna preciznost

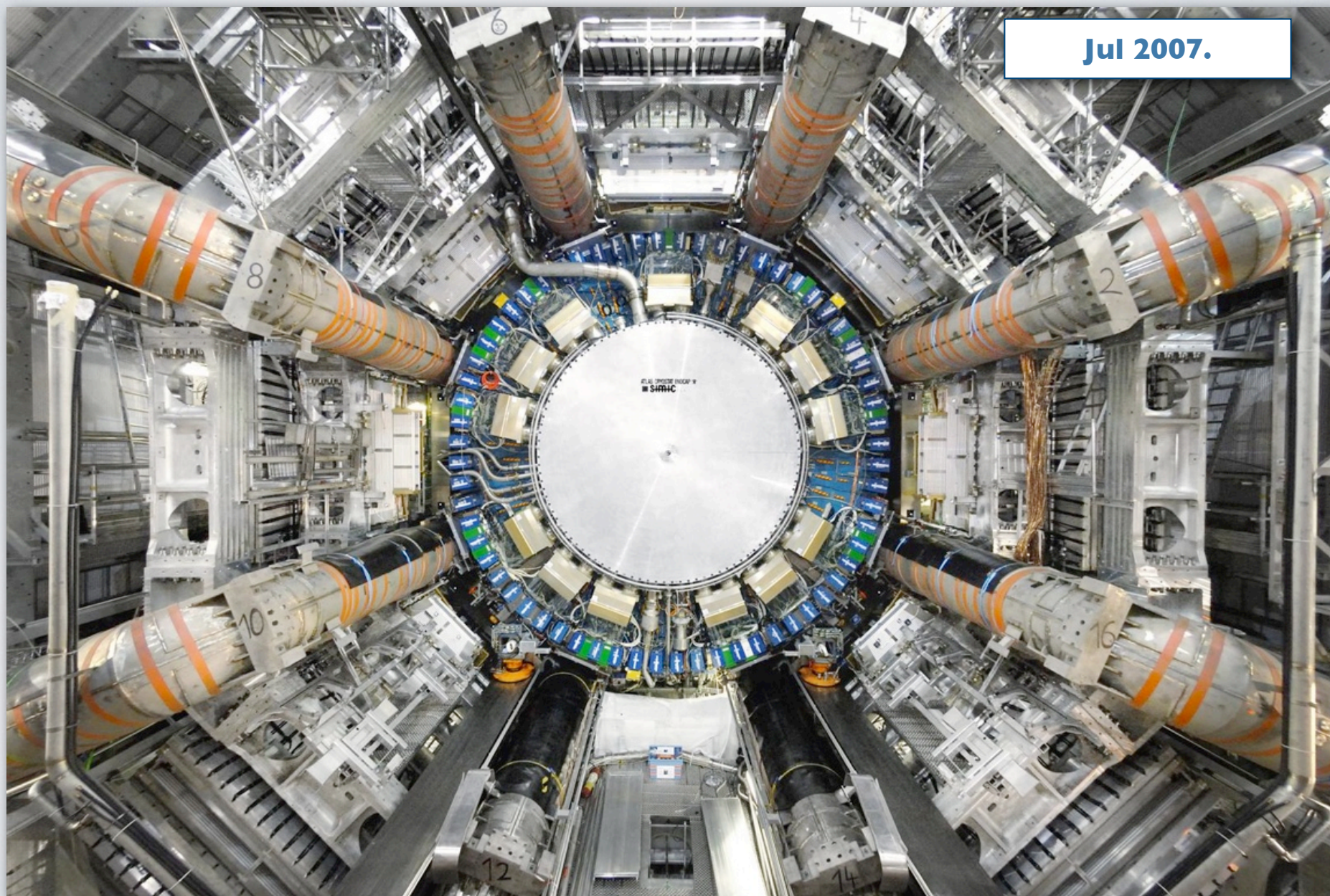
značajan razvoj poslednjih godina

obavijeno misterijom... do sada...

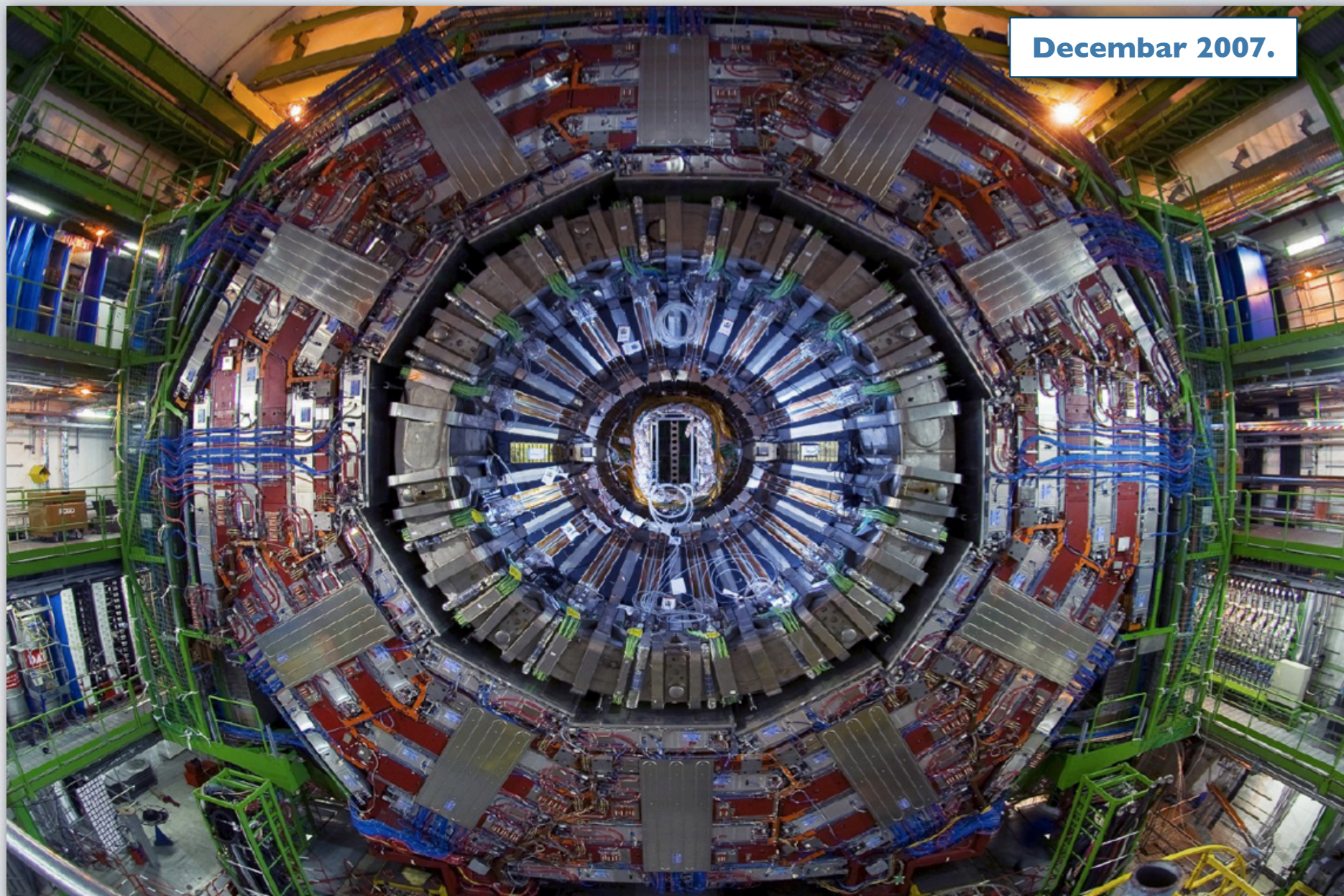
- Testiranje Standardnog modela i otvorena fundamentalna pitanja
Prioritet: Narušenje elektroslabe simetrije i Higgs-ov mehanizam



ATLAS i ...

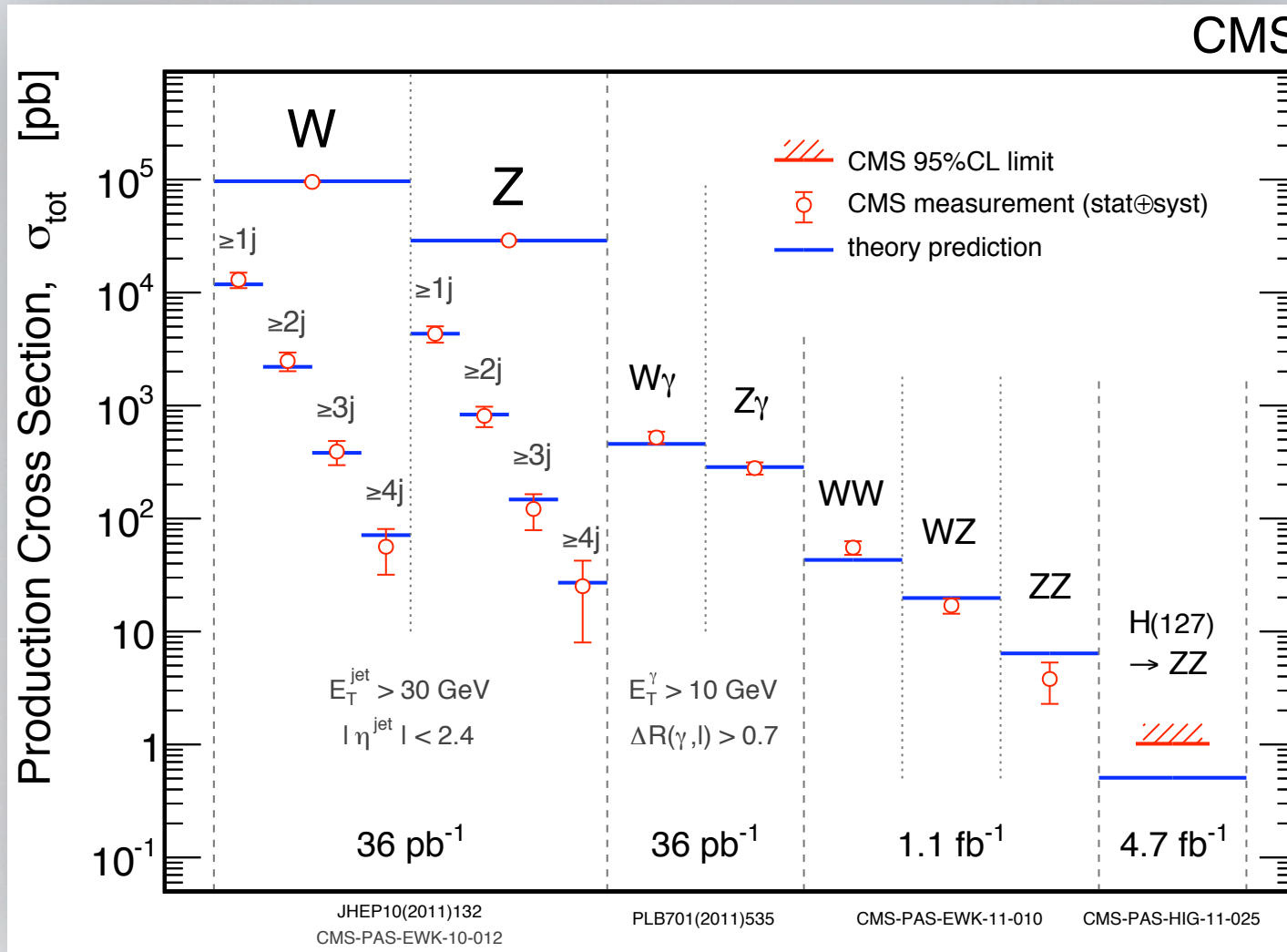


... CMS u punom sjaju ...



Decembar 2007.

Testiranje teorije elektroslabih interakcija

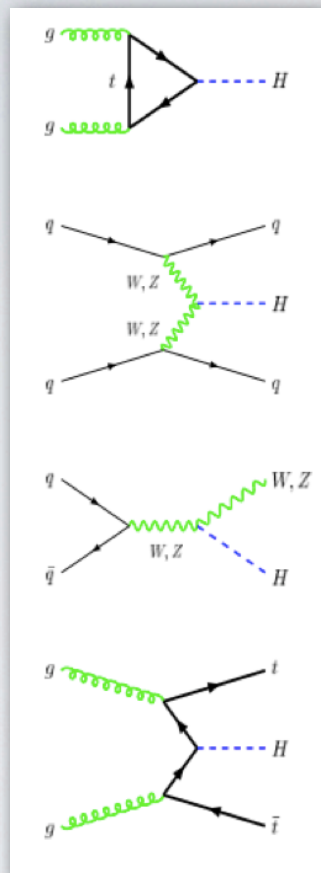


Neverovatan uspeh Standardnog modela!!!

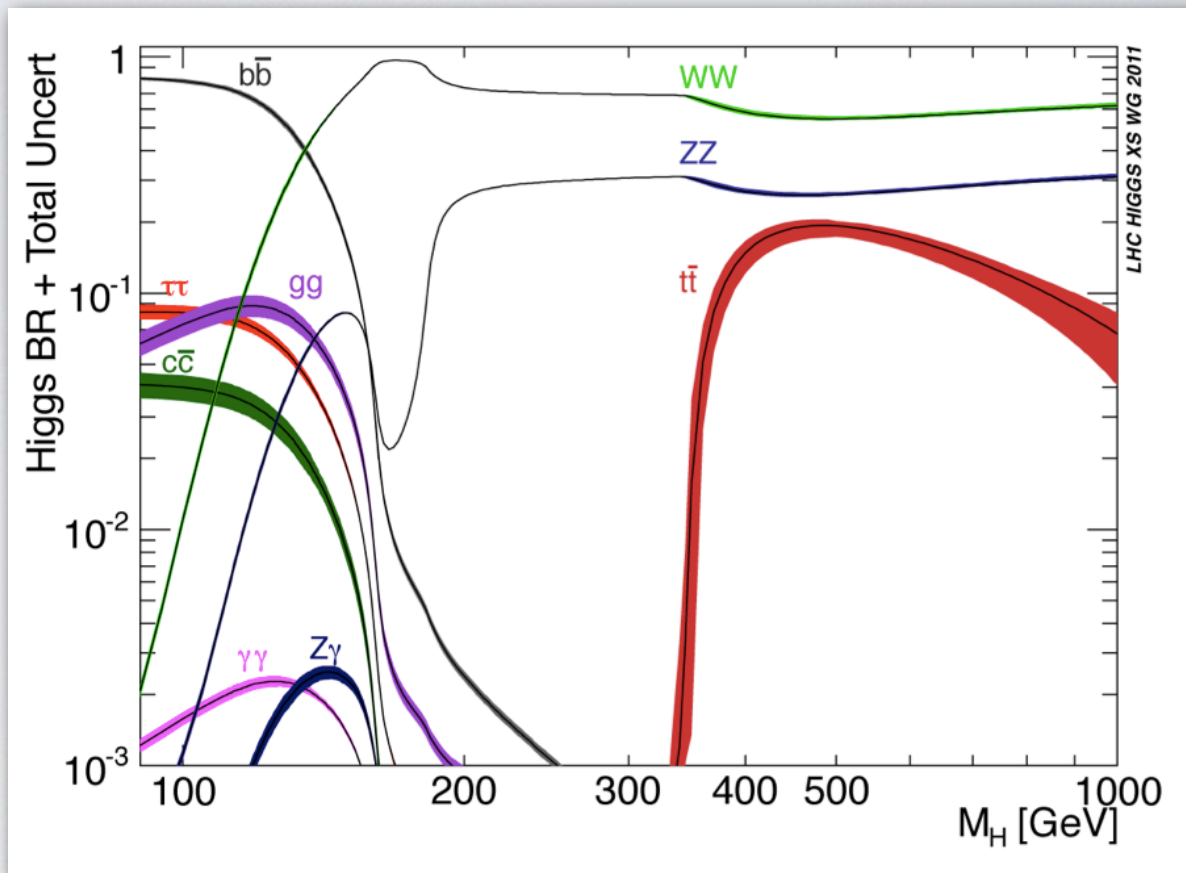
(posledica investiranog ogromnog teorijskog i eksperimentalnog rada)

Produkcija Higgs bozona i načini raspada

Produkcija



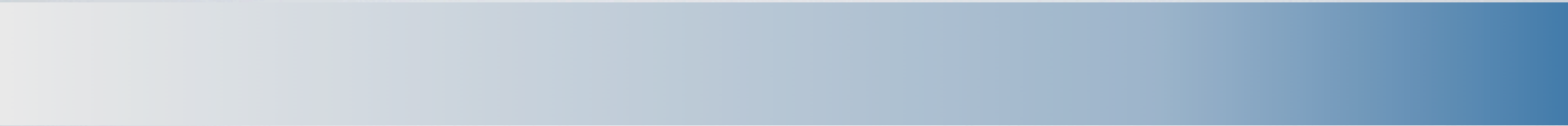
Načini raspada i njihove verovatnoće



Glavni kandidati sa detekciju Higgs-a:

Male mase: **$H \rightarrow \gamma\gamma$** , **$H \rightarrow ZZ$**

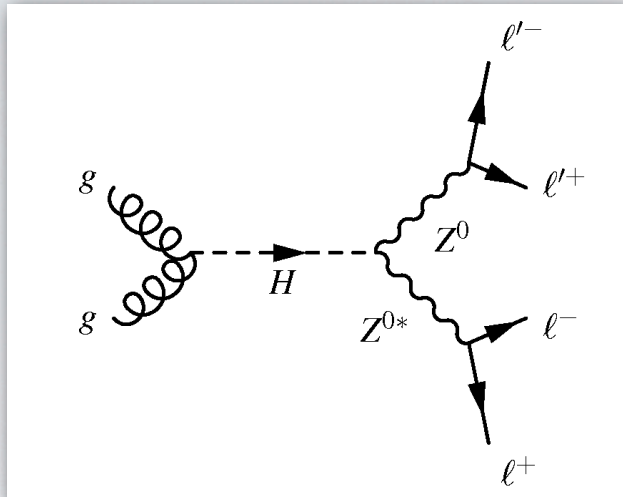
Srednje i visoke mase: **$H \rightarrow WW$** , **$H \rightarrow ZZ$**


$$\mathbf{H} \rightarrow \mathbf{ZZ} \rightarrow 4\mathbf{l}$$

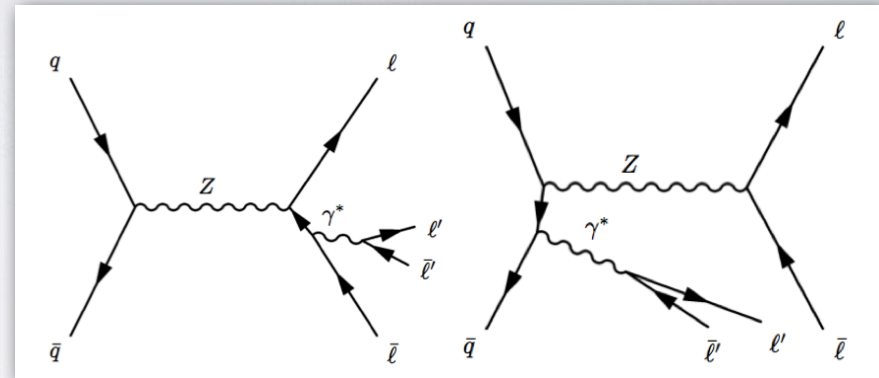
$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$

- Zlatan kanal - lako prepoznatljiv zapis u detektoru
➡ profitira zbog izvanredne rezolucije detektora

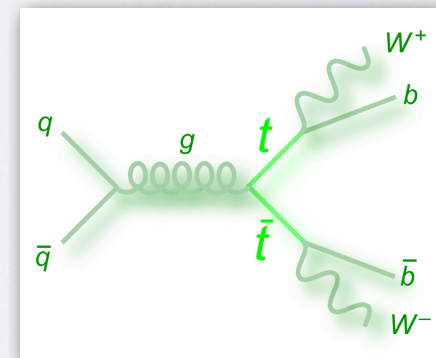
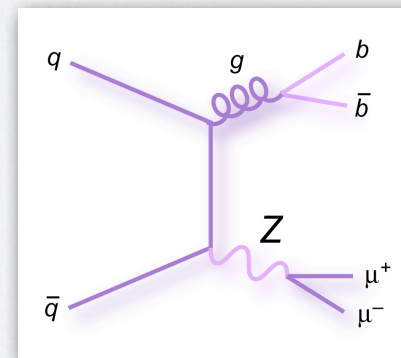
proces $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$



“nerazlučivi” procesi



“razlučivi” procesi (instrumentalni šum)

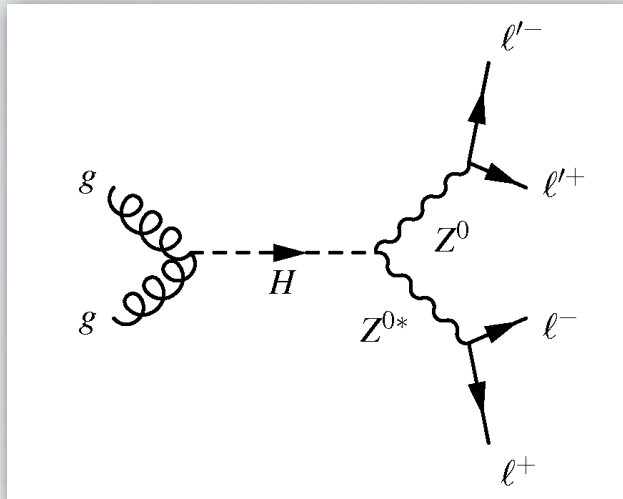


- Bitni aspekti analize
 - Precizna rekonstrukcija leptonu
 - Precizna procena šuma
 - Optimalno iskorišćenje kinematičke informacije

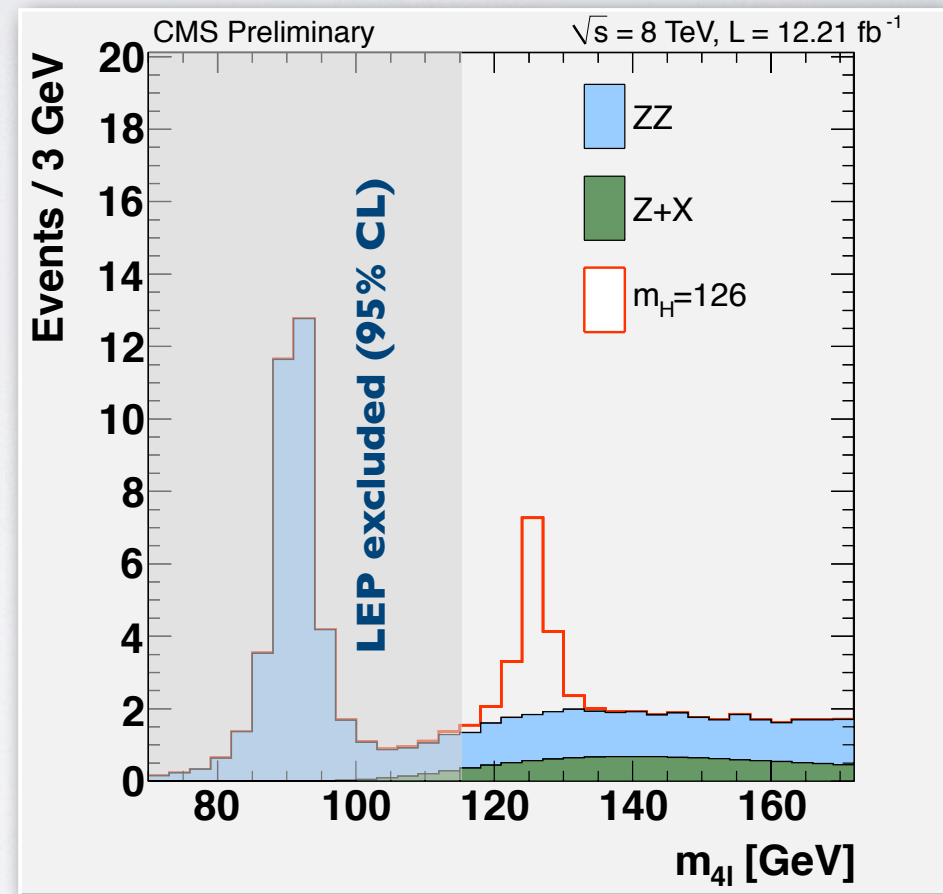
$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$

- Zlatan kanal - lako prepoznatljiv zapis u detektoru
➡ profitira zbog izvanredne rezolucije detektora

proces $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$



Uska rezonanca u spektru mase 4 leptona

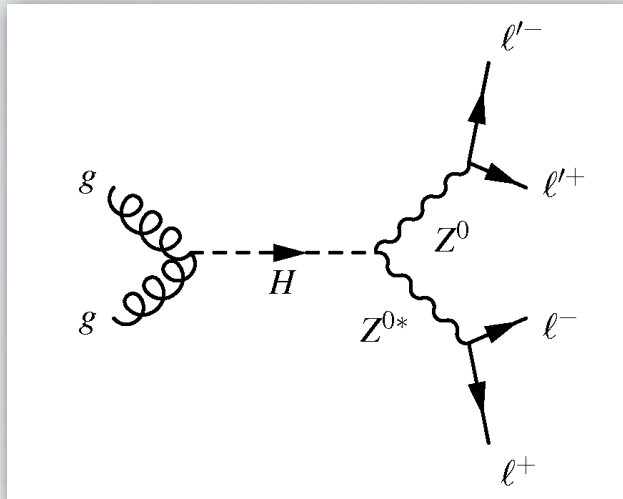


- Bitni aspekti analize
 - Precizna rekonstrukcija leptonu
 - Precizna procena šuma
 - Optimalno iskorišćenje kinematičke informacije

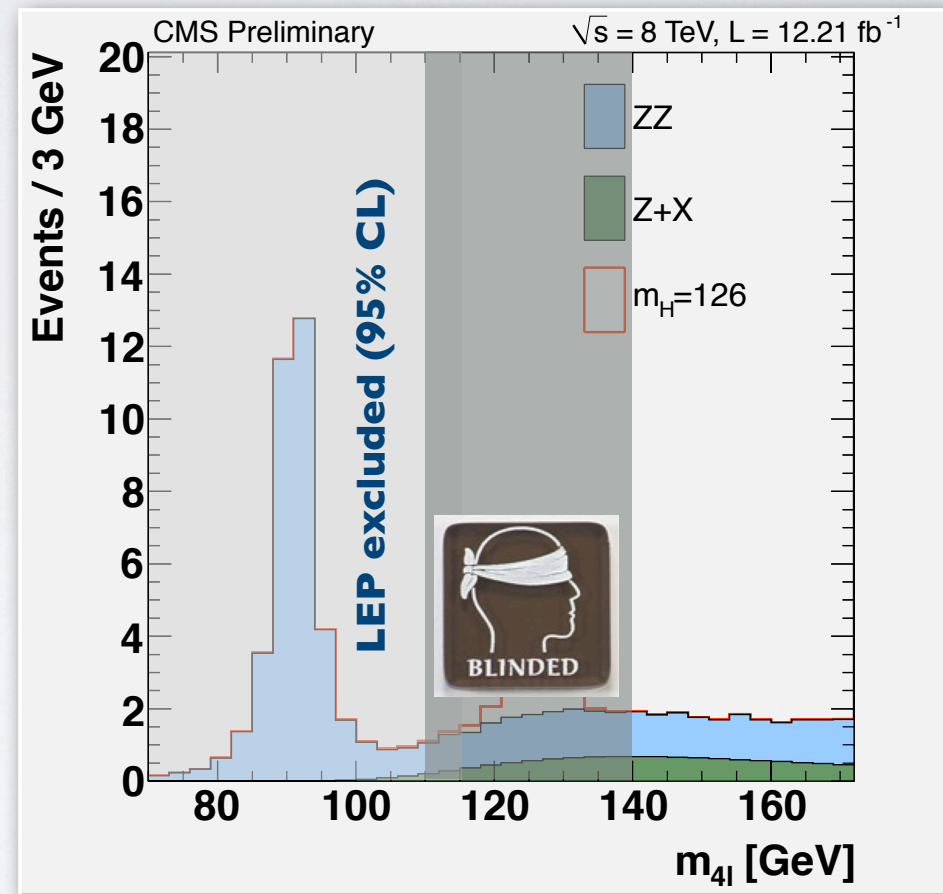
$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$

- Zlatan kanal - lako prepoznatljiv zapis u detektoru
➡ profitira zbog izvanredne rezolucije detektora

proces $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$

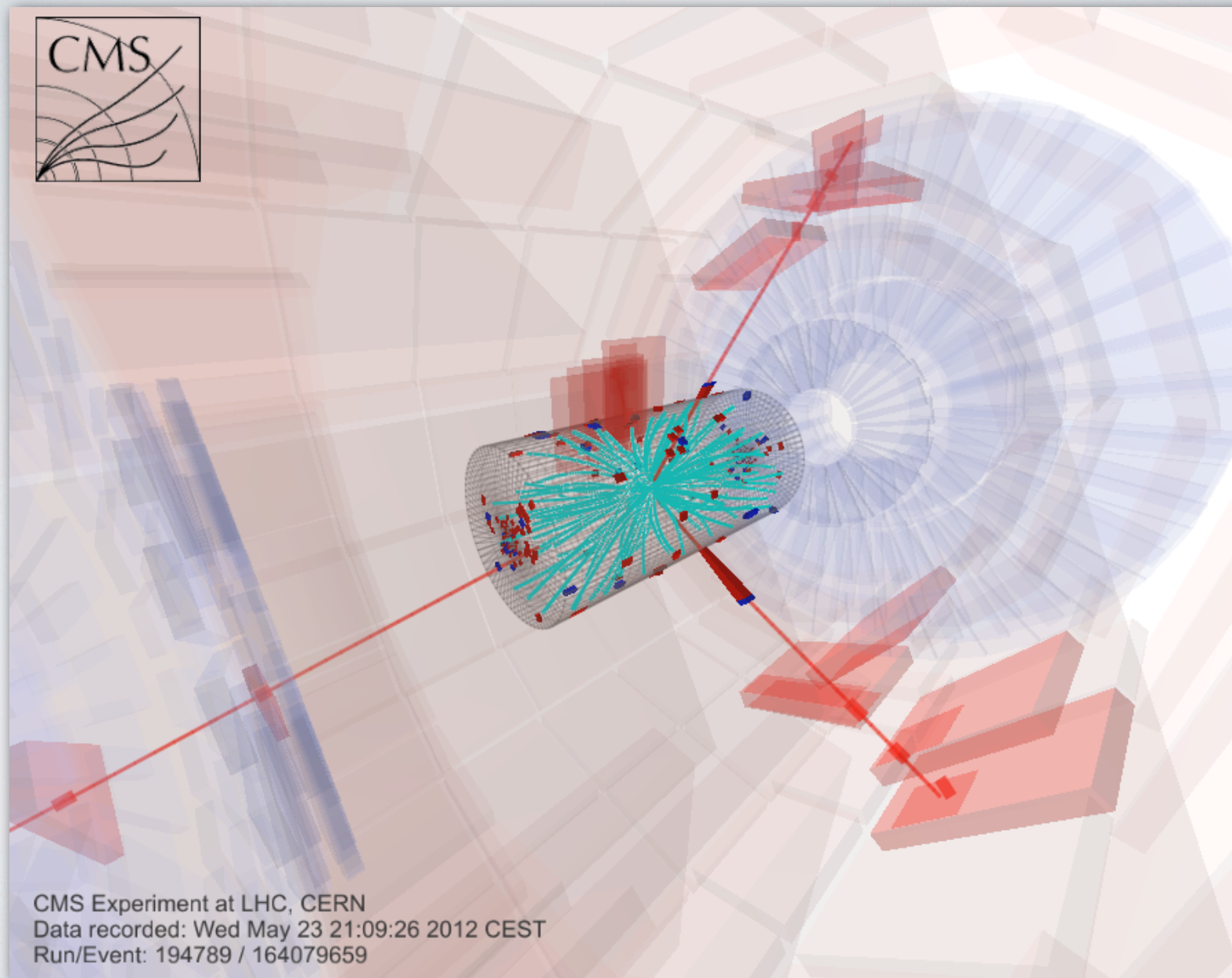


Uska rezonanca u spektru mase 4 leptona

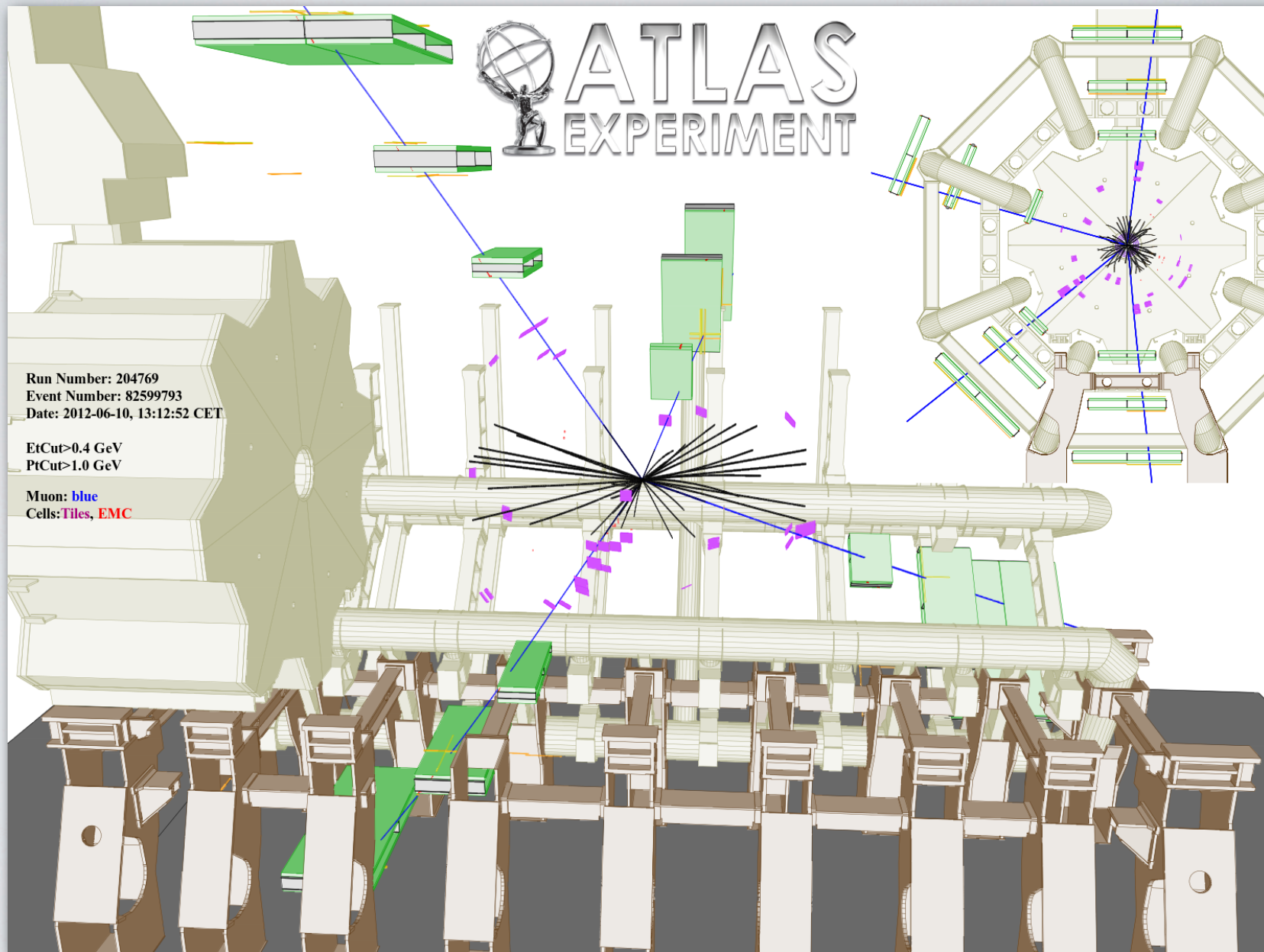


- Bitni aspekti analize
 - Precizna rekonstrukcija leptonu
 - Precizna procena šuma
 - Optimalno iskorišćenje kinematičke informacije

$$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$$



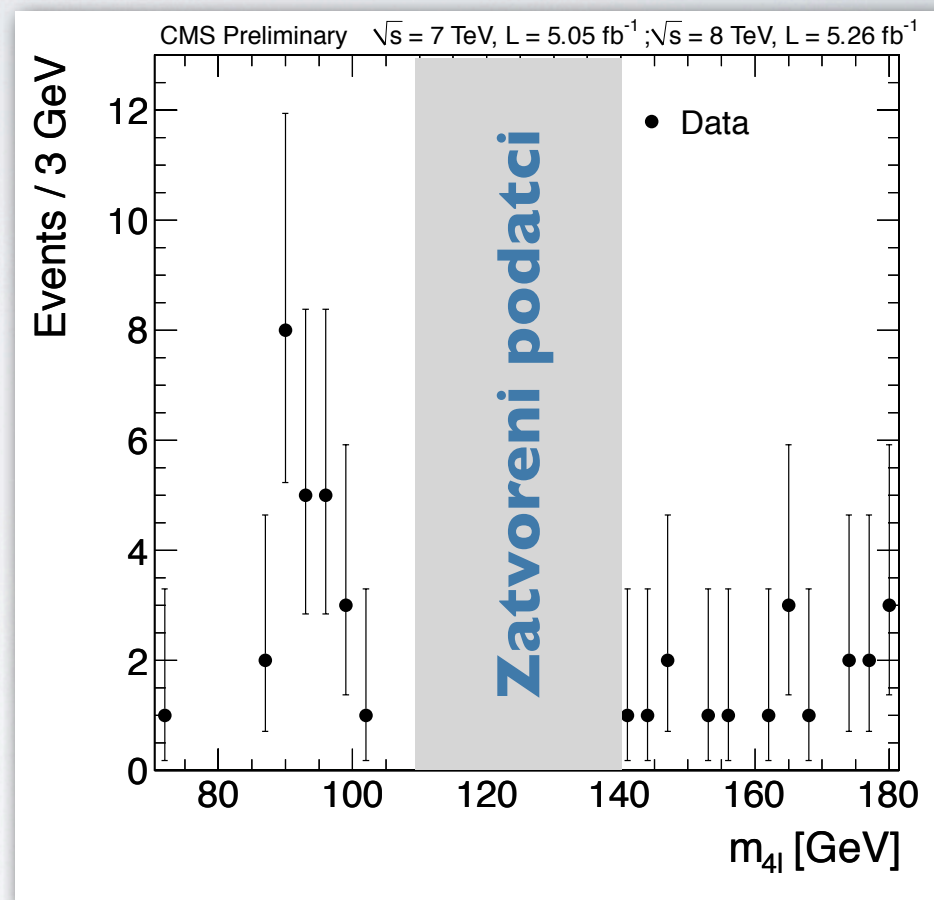
$$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$$



Rezultati - otkriće (jul 2012)

Region niskih masa

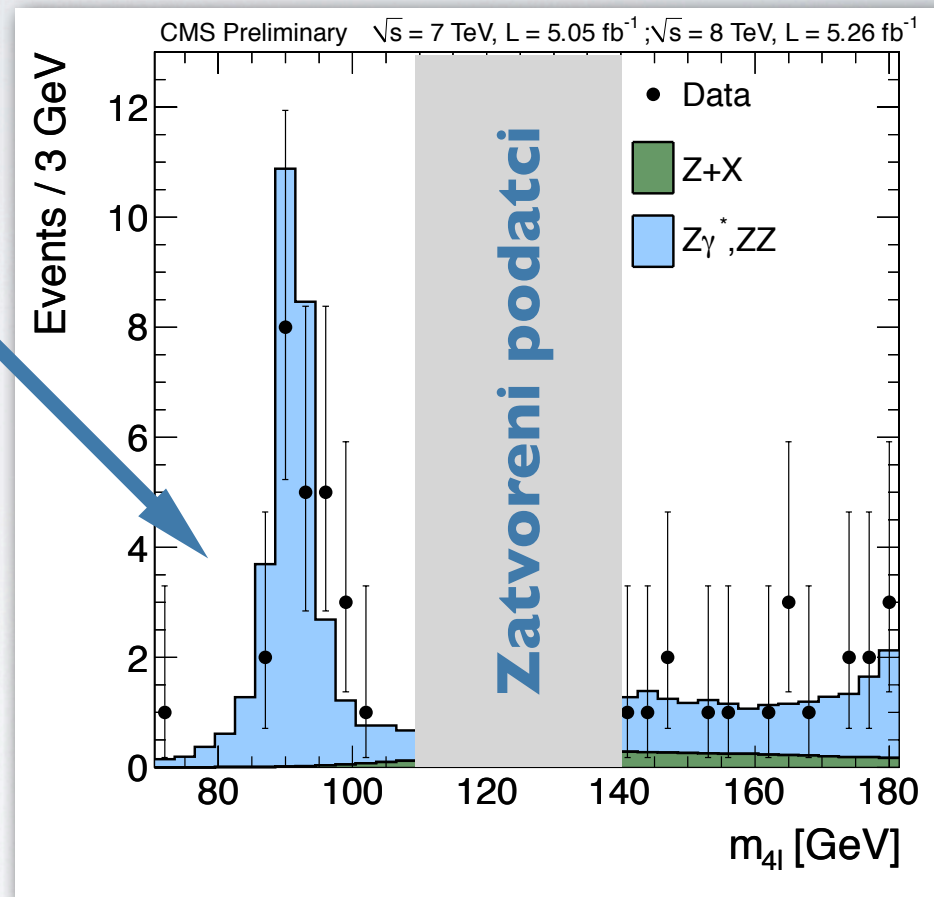
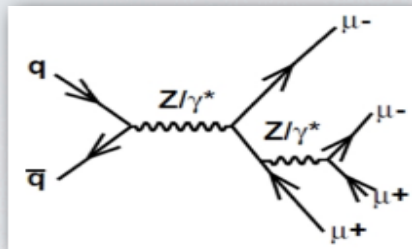
- Izmereni podatci
- **Zatvoreni**



Rezultati - otkriće (jul 2012)

Region niskih masa

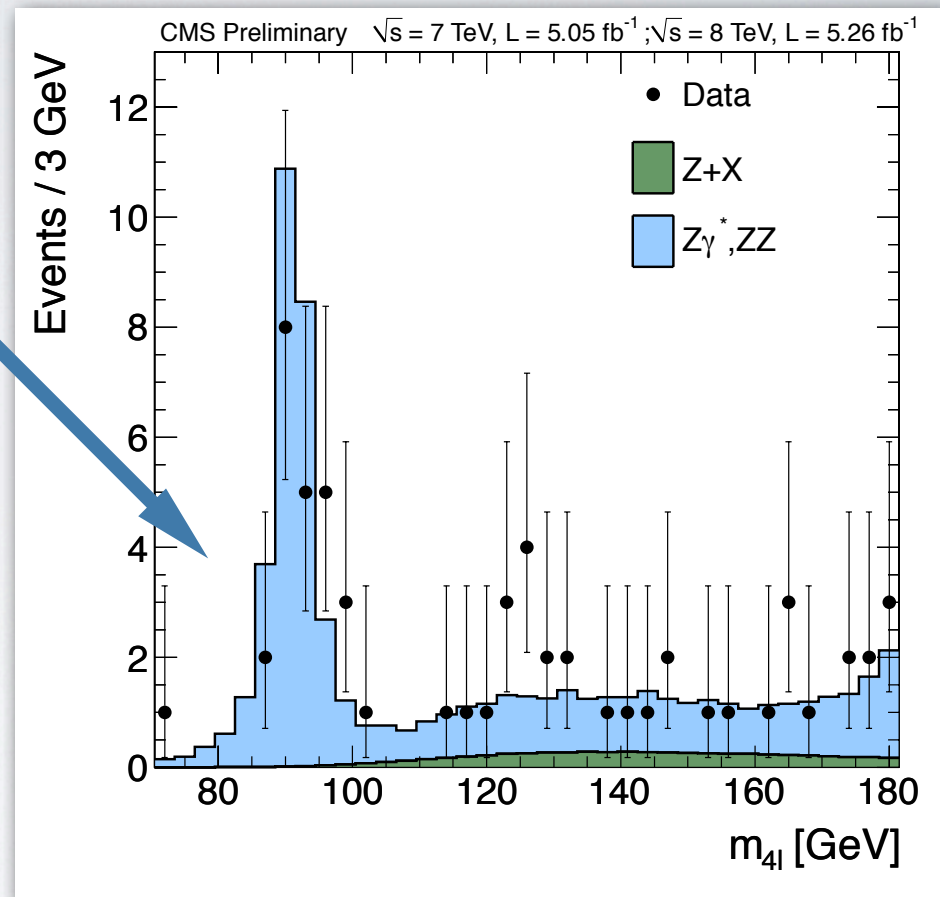
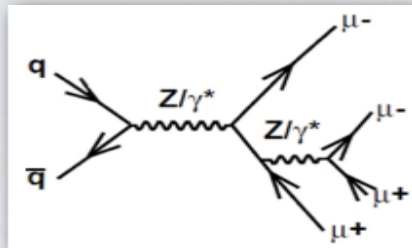
- Izmereni podatci
- Zatvoreni**
- Procenjeni pozadinski događaji



Rezultati - otkriće (jul 2012)

Region niskih masa

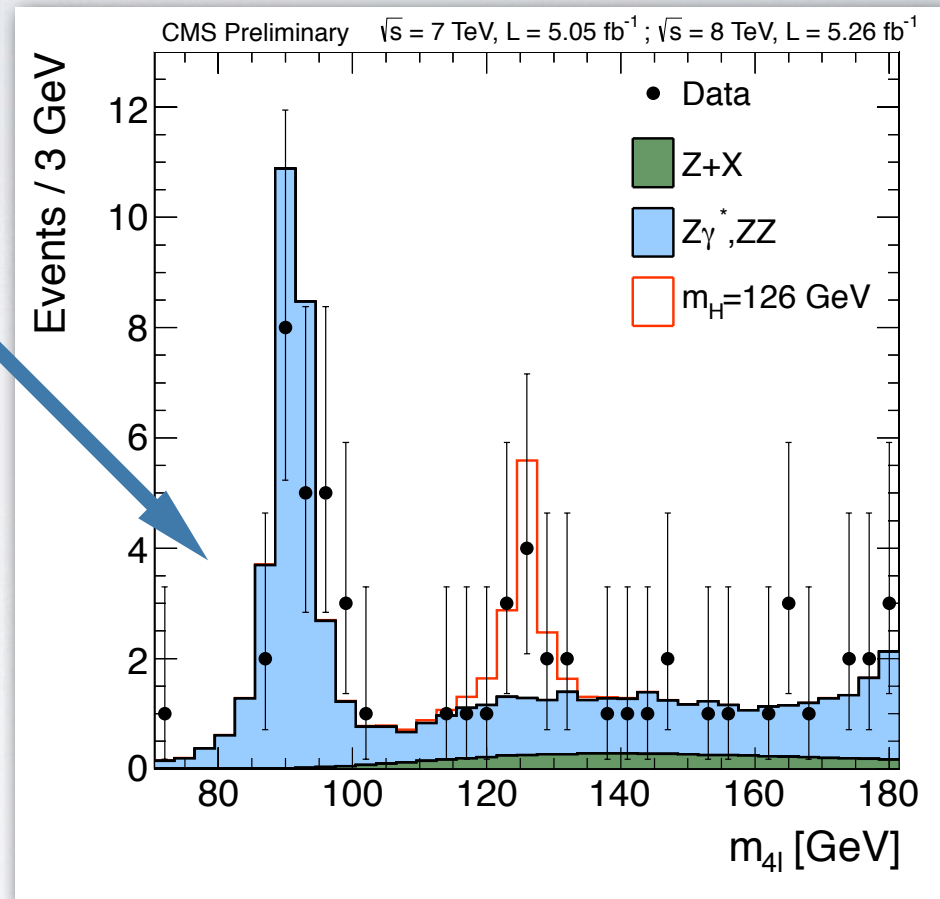
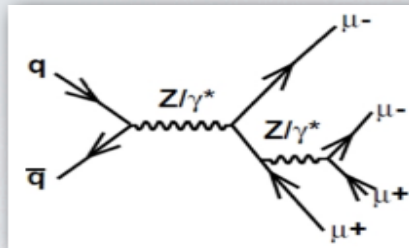
- Izmereni podatci
- **Otvoreni**
- Procenjeni pozadinski događaji



Rezultati - otkriće (jul 2012)

Region niskih masa

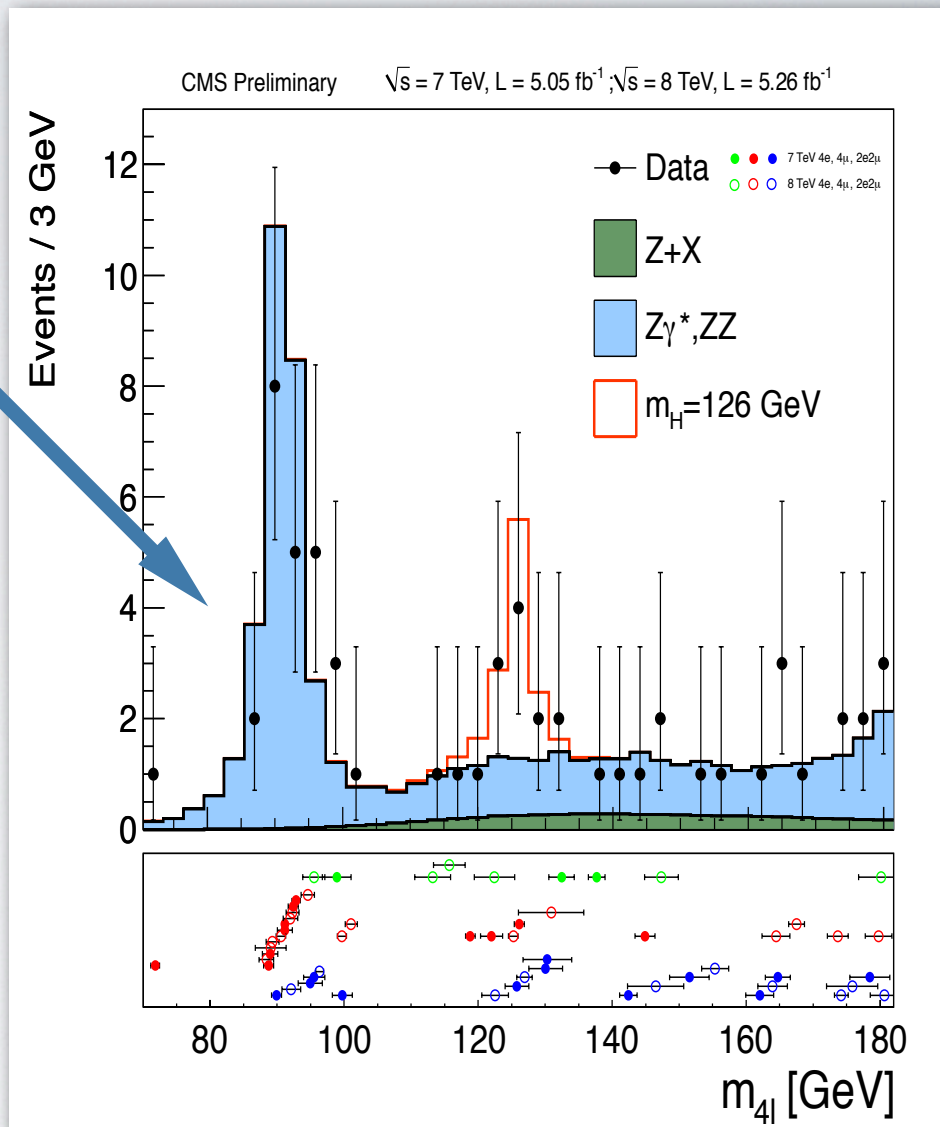
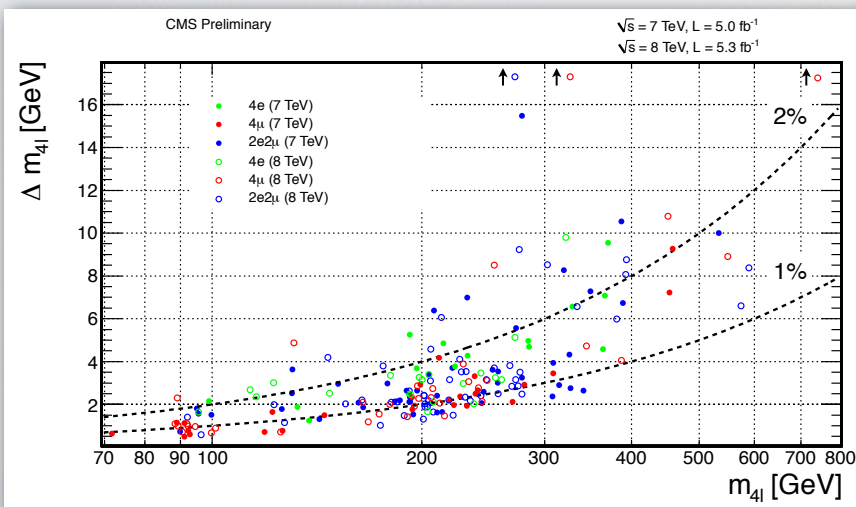
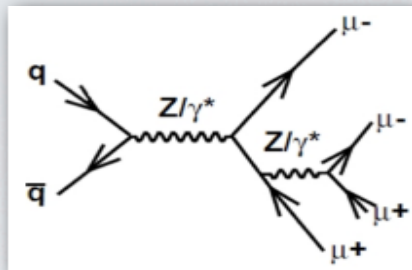
- Izmereni podatci
- **Otvoreni**
- Procenjeni pozadinski događaji
- Očekivan signal na $m_H = 126 \text{ GeV}$



Rezultati - otkriće (jul 2012)

Region niskih masa

- Izmereni podatci
- Otvoreni**
- Procenjeni pozadiski događaji
- Očekivan signal na $m_H = 126 \text{ GeV}$
- Preciznost merenja mase

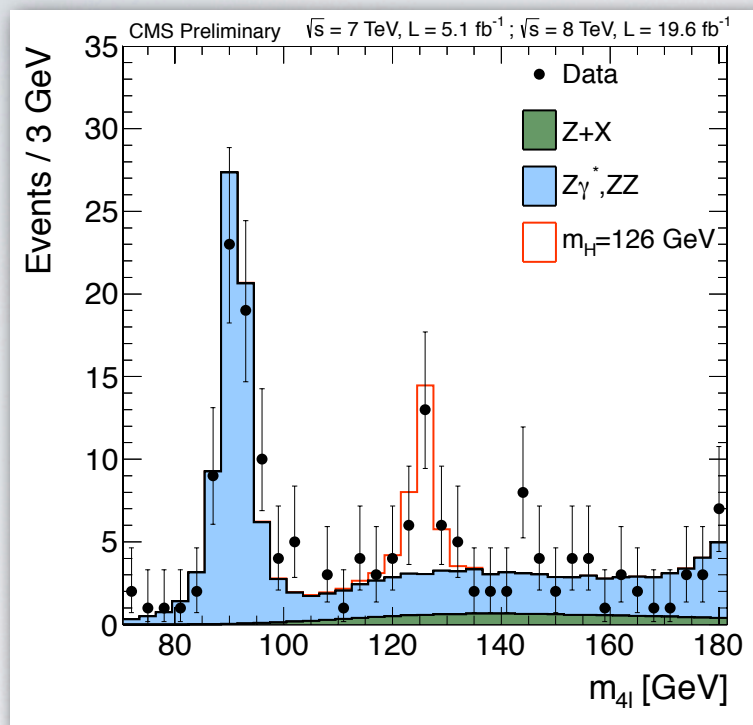


“Noć otvaranja” (jun 2012)

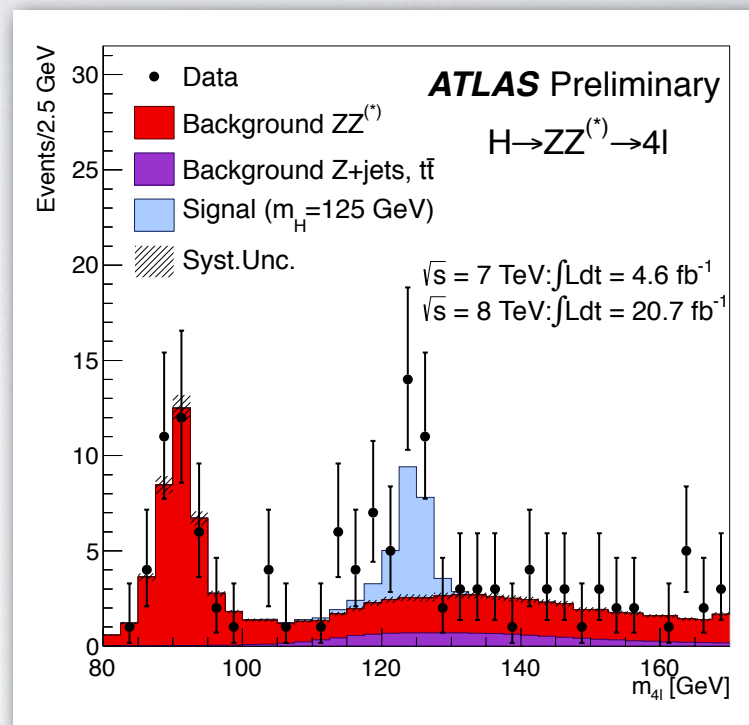


Maseni spektar ($H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$)

CMS



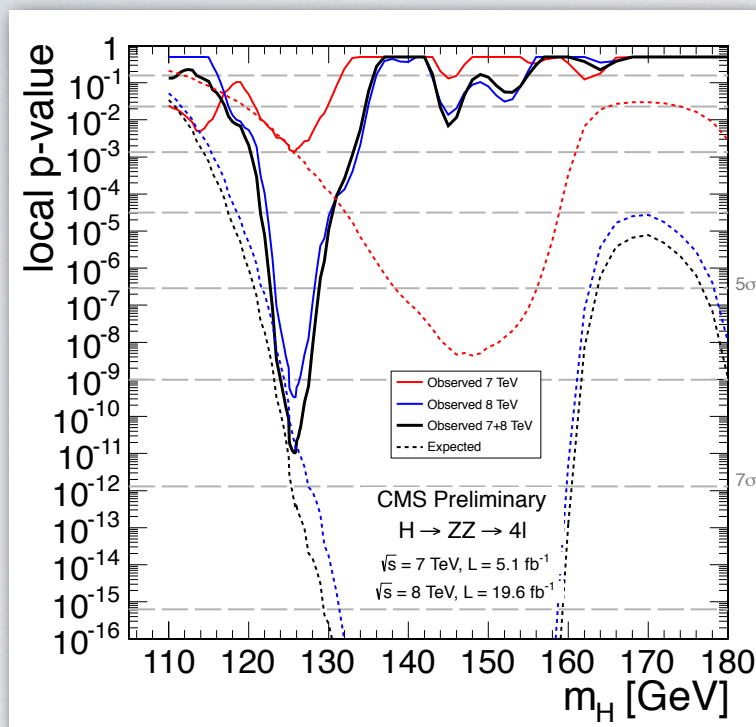
ATLAS



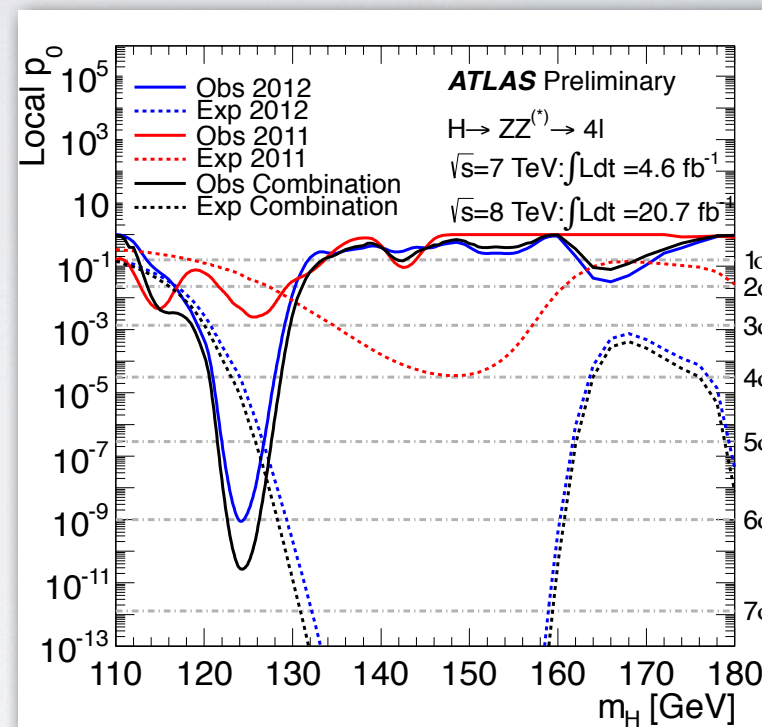
Registrovan višak događaja oko 125/126 GeV
u skladu sa očekivanjima za Higgs boson Standardnog Modela!

Višak događaja ($H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$)

CMS - region niskih masa



ATLAS

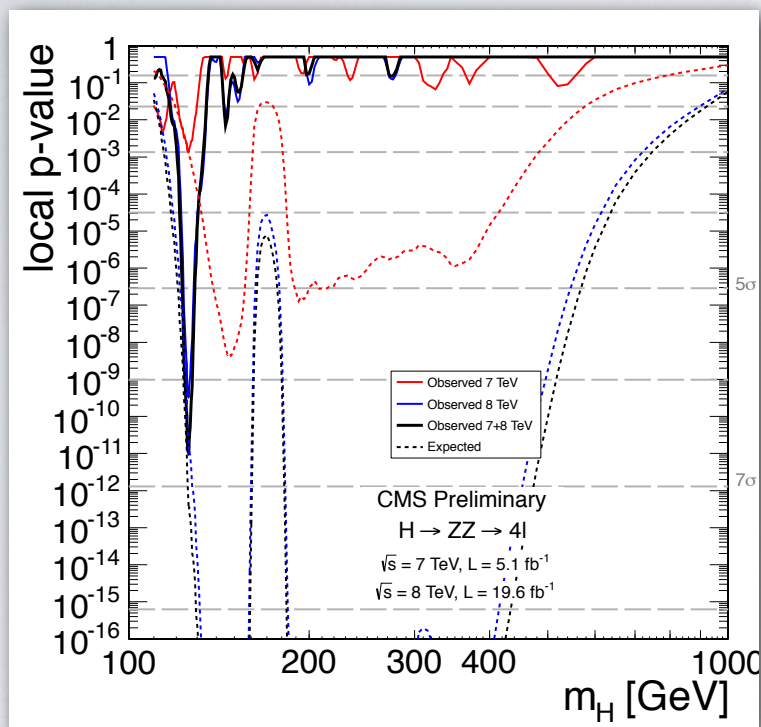


Očekivana statistička značajnost oko 124.3 GeV: **$\sim 7.1\sigma$ ($\sim 6.5\sigma$)**

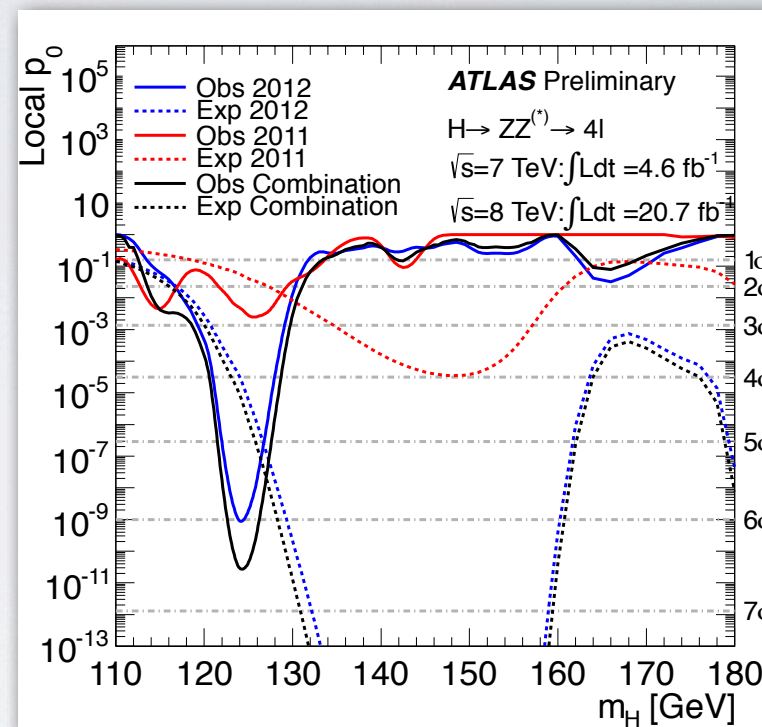
Izmerena statistička značajnost oko 125.8 GeV: **$\sim 6.5\sigma$ ($\sim 6.1\sigma$)**

Višak događaja ($H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$)

CMS - region visokih masa



ATLAS



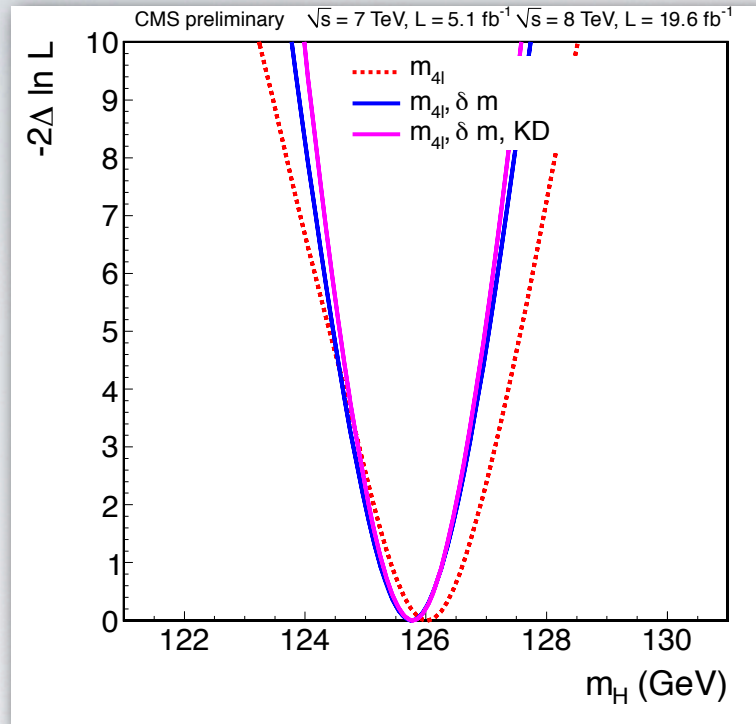
Očekivana statistička značajnost oko 124.3 GeV: **$\sim 7.1\sigma$ ($\sim 6.5\sigma$)**

Izmerena statistička značajnost oko 125.8 GeV: **$\sim 6.5\sigma$ ($\sim 6.1\sigma$)**

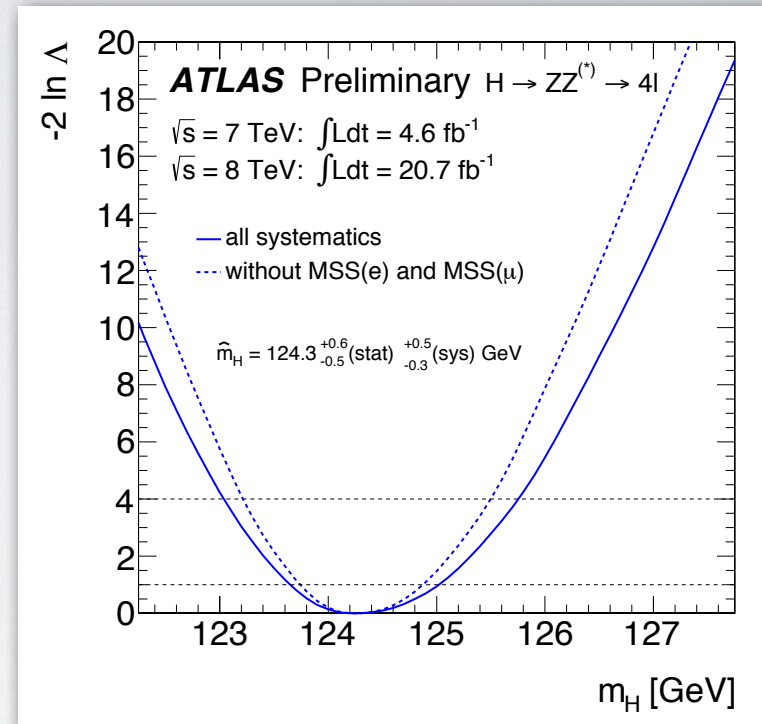
odbačena hipoteza o SM Higgs bozonu: [130, 827] GeV

Masa otkrivenog bozona ($H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$)

CMS



ATLAS



Statistička “likelihood” analiza kompletnog seta podataka



Najverovatnija vrednost mase novog bozona:

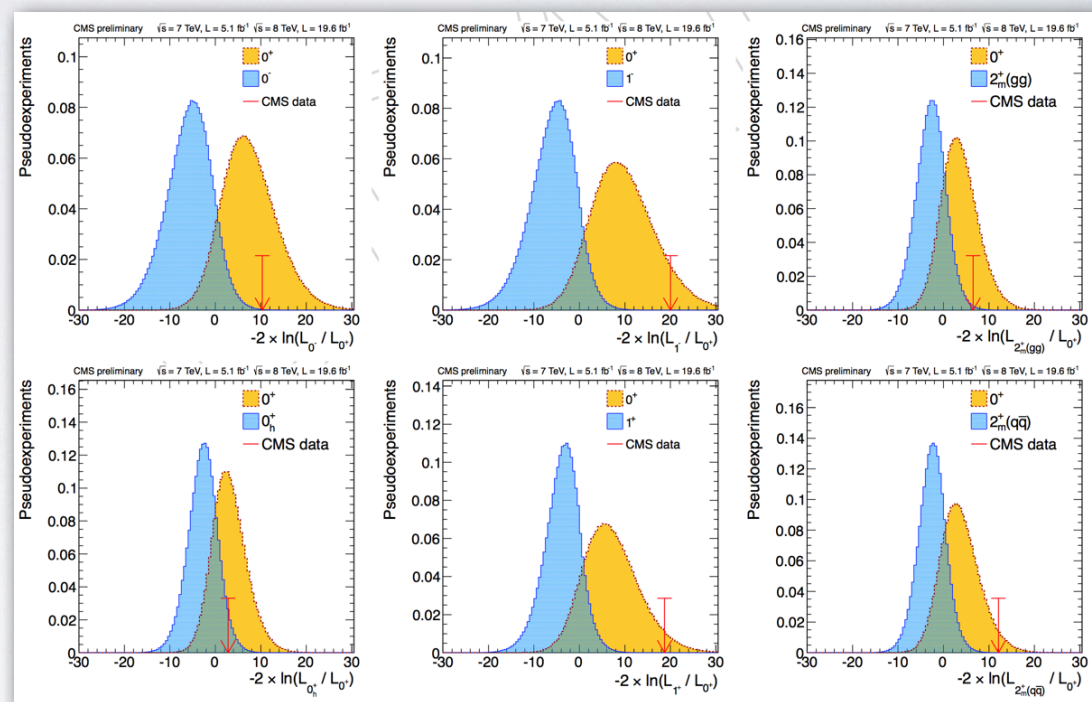
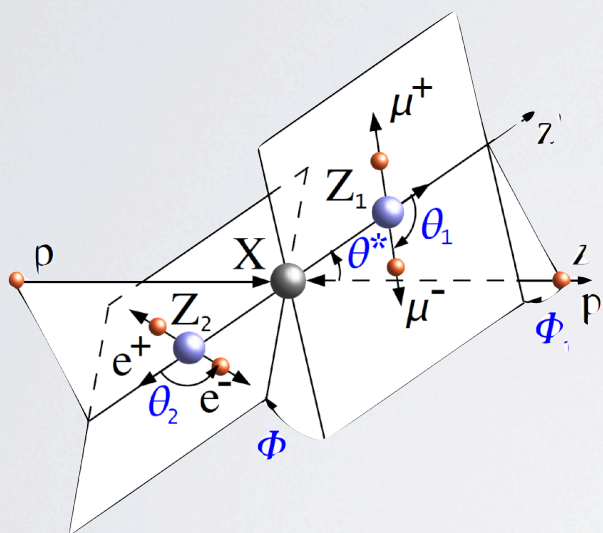
CMS: $m_{4l} = 125.8 \pm 0.5_{\text{stat}} \pm 0.2_{\text{syst}} \text{ GeV}$

jačina signala u odnosu na SM: $\mu = 0.91 \pm 0.30$

ATLAS: $m_{4l} = 124.3 \pm 0.6_{\text{stat}} \pm 0.5_{\text{syst}} \text{ GeV}$

Spin otkrivenog bozona ($H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$)

- **M**atrix **E**lement **L**ikelihood **A**nalysis (MELA):
 - Kinematika raspada opisana sa 5 uglova i 2 mase
 - Značajna diskriminacija izmađu signala različitog spina i-ili parnosti



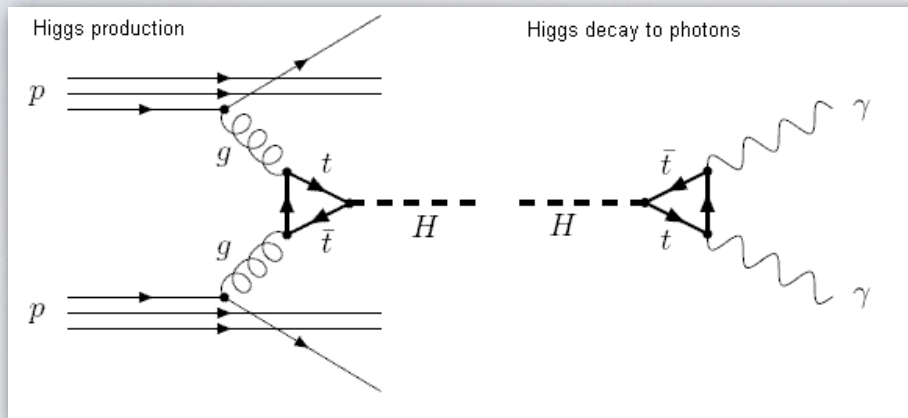
- Svi testirani alternativni modeli za spin i parnost novog bozona odbačeni sa statističkom značajnošću 95% CL

H → YY

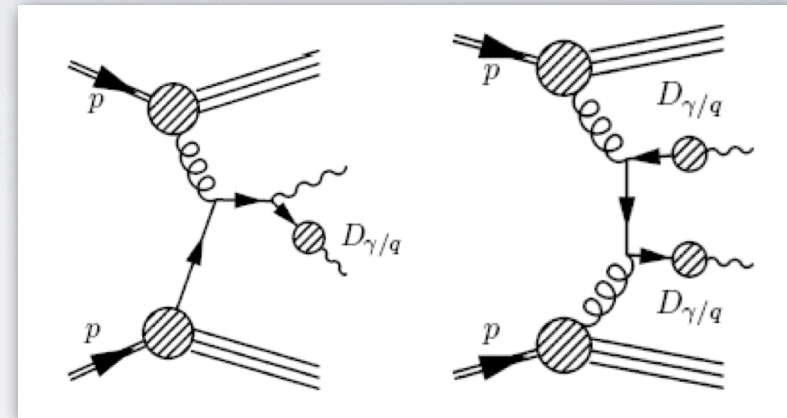
$H \rightarrow \gamma\gamma$

- Veoma mala verovatnoća za raspad $H \rightarrow \gamma\gamma$, ali ipak jedan od najosetljivijih kanala u regionu niskih masa

proces $H \rightarrow \gamma\gamma$

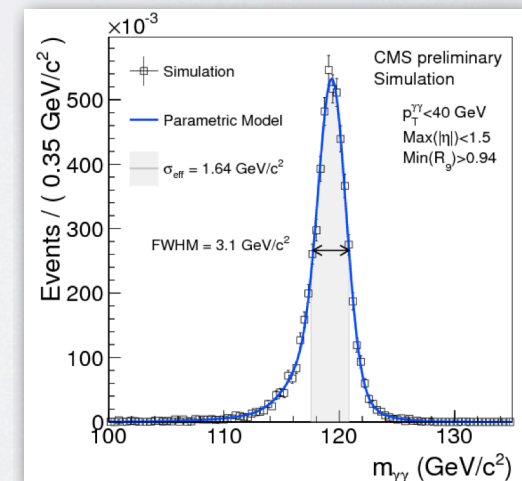


pozadinski procesi (šum)

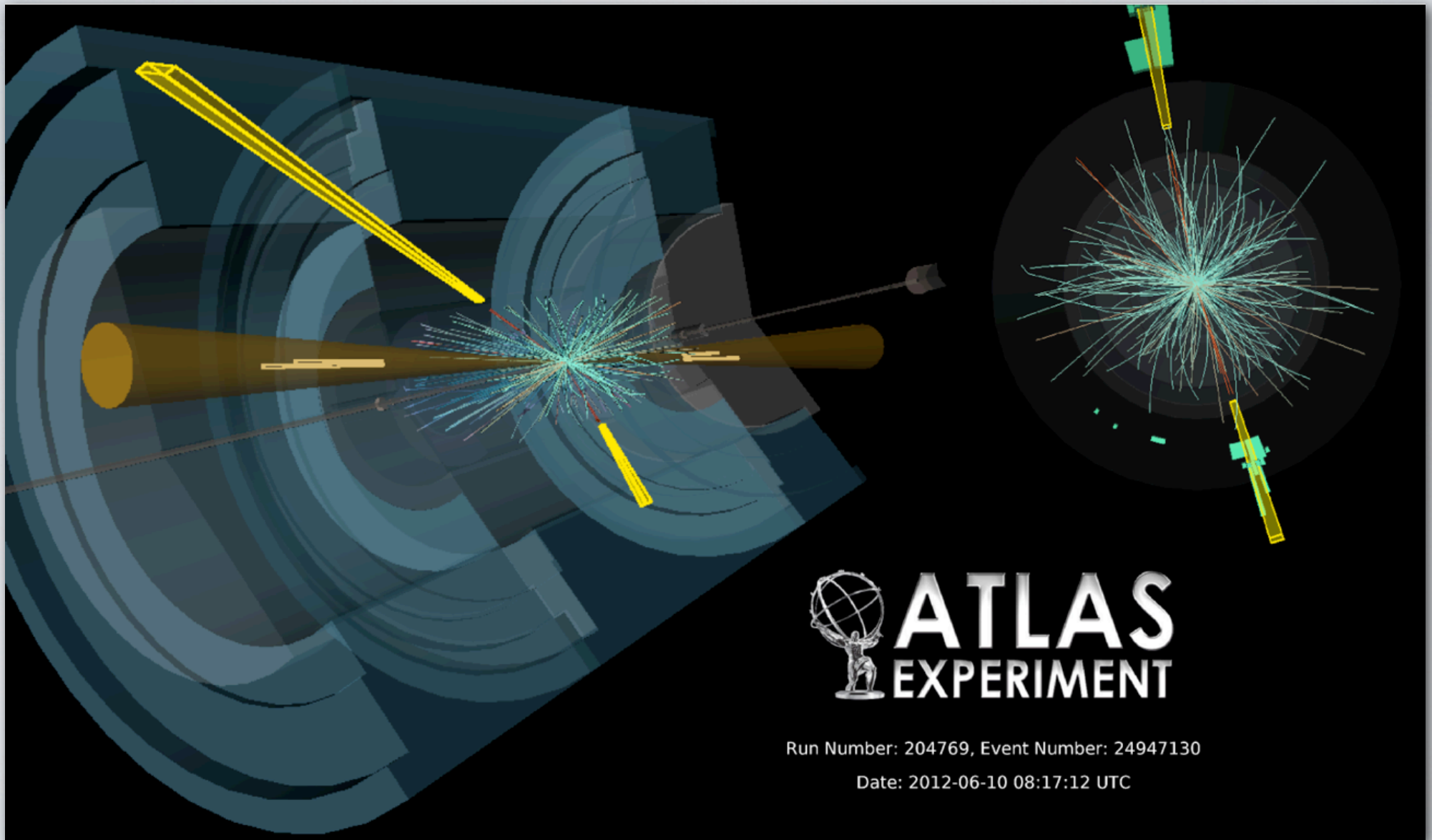


- Vrlo jednostavan “zapis” u detektoru:
 - dva izolovana fotona sa velikim trans. impulsom
 - rezonanca u masenom spektru dva fotona
- Potencijal za detekciju direktno zavisi od rezolucije:

➡ Krucijalna uloga elektromagnetskih kalorimetara



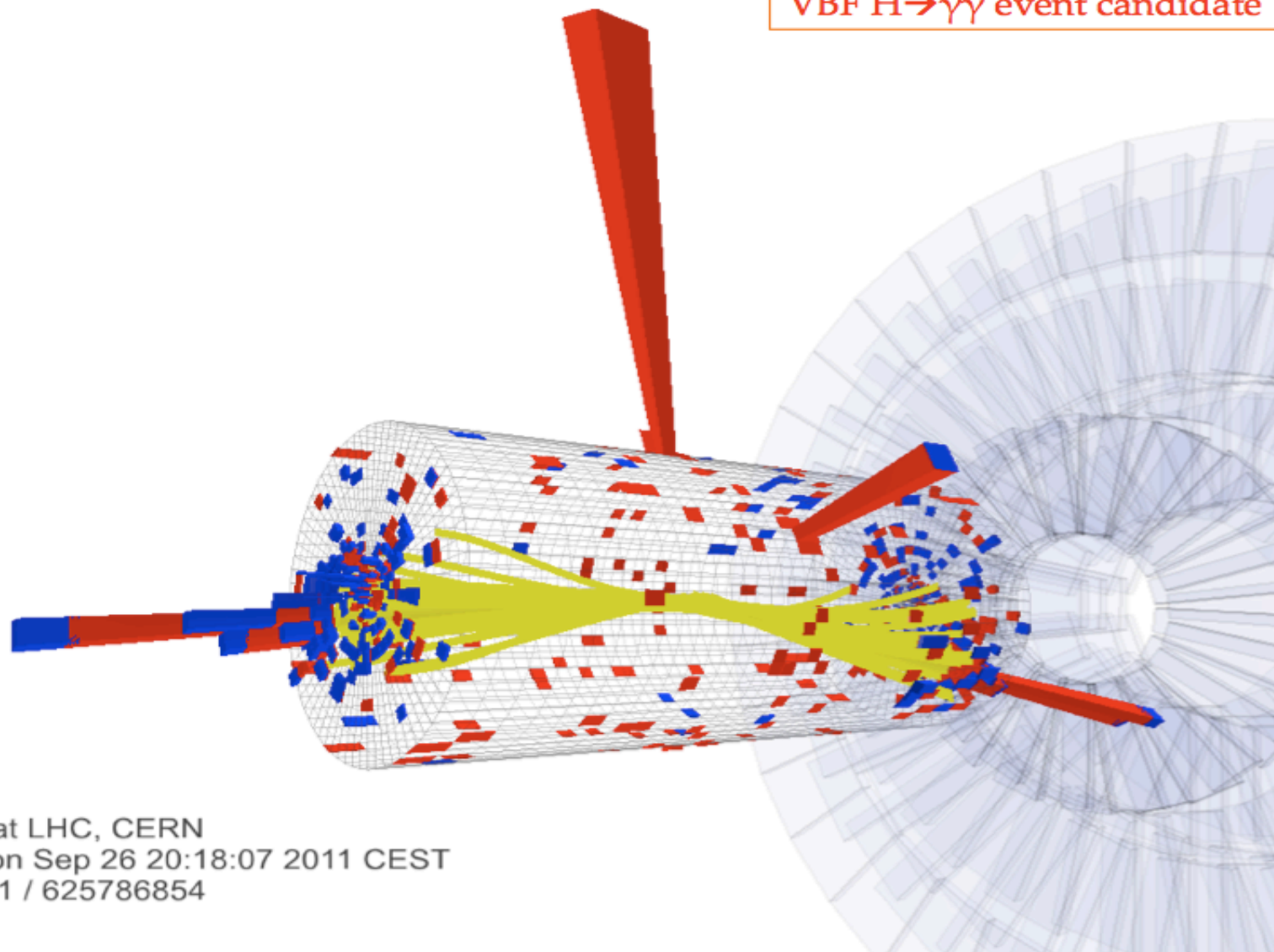
$$H \rightarrow \gamma\gamma$$



$$H \rightarrow \gamma\gamma$$



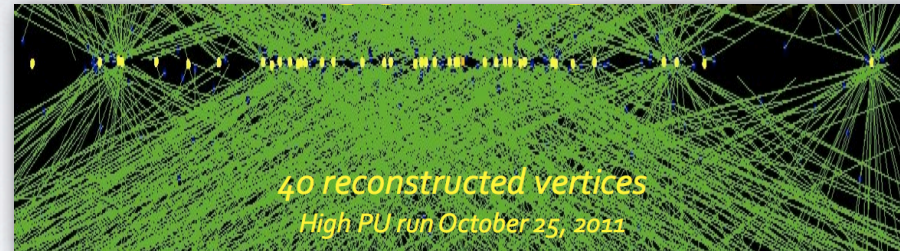
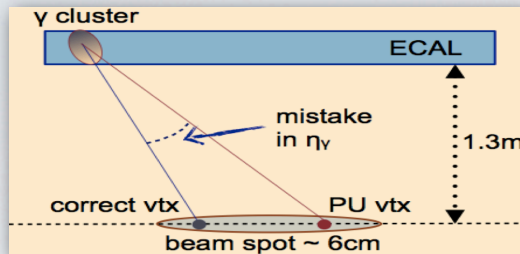
VBF $H \rightarrow \gamma\gamma$ event candidate



CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Mon Sep 26 20:18:07 2011 CEST
Run/Event: 177201 / 625786854
Lumi section: 450

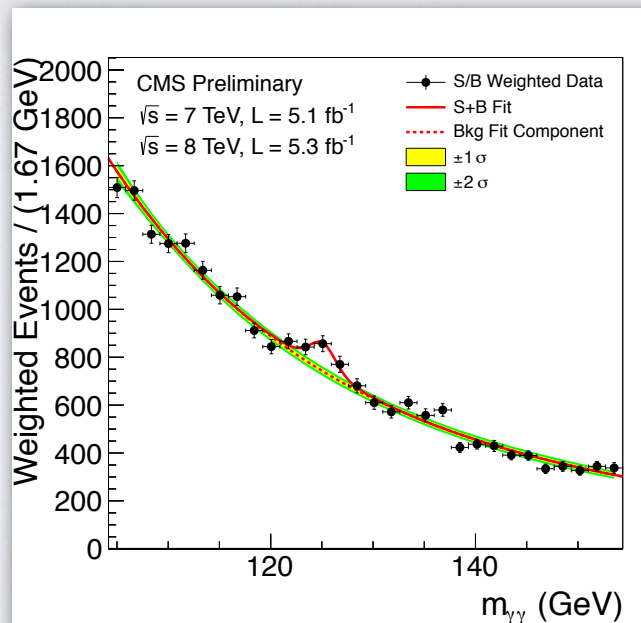
$H \rightarrow \gamma\gamma$

- Rezolucija mase $M_{\gamma\gamma}$ direktno zavisna od rekonstrukcije verteksa sudara

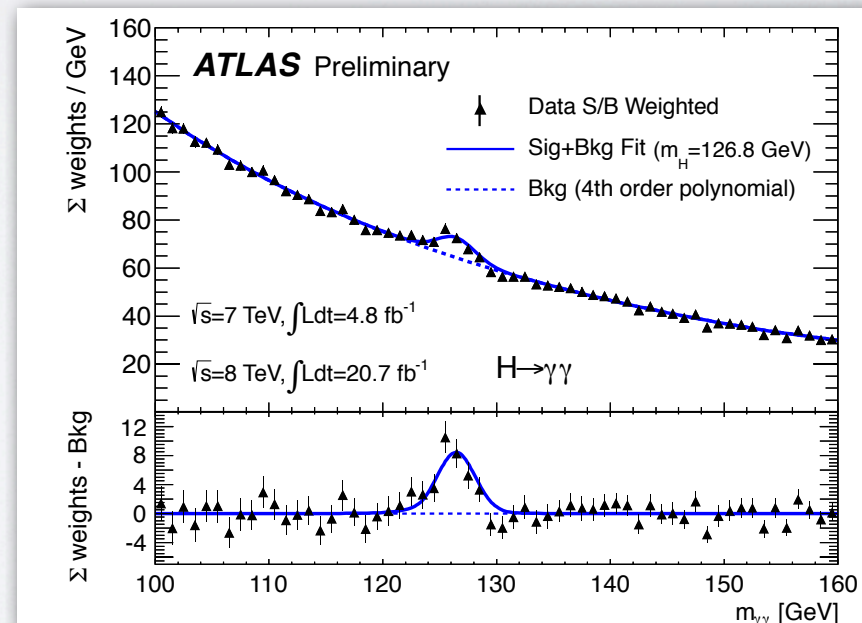


- Događaji su analizirani po odgovarajućim kategorijama
 $M_{\gamma\gamma}$ je fitovana istovremeno u svim kategorijama (polinom n^{th} reda za šum)

CMS

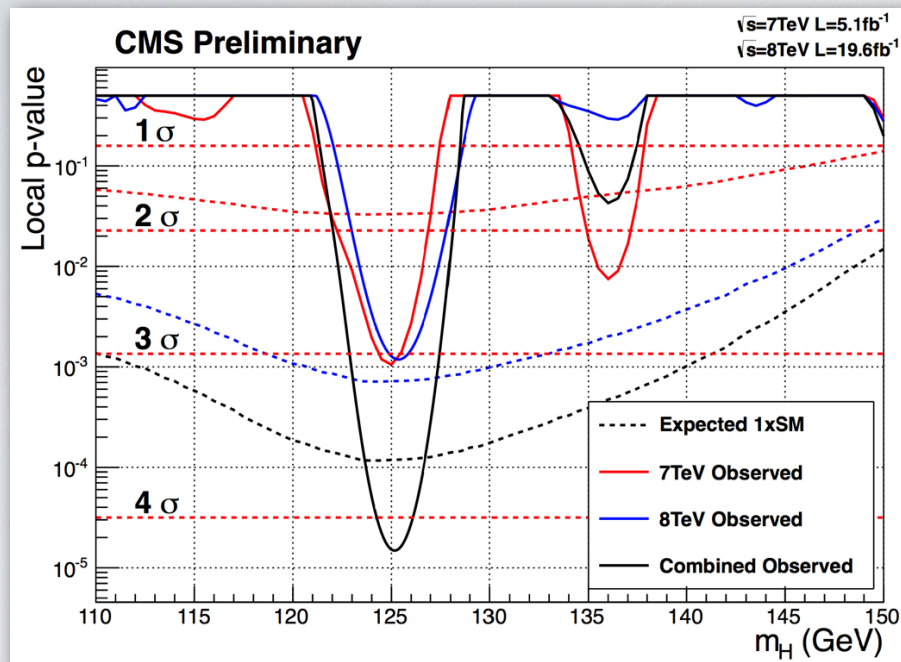


ATLAS

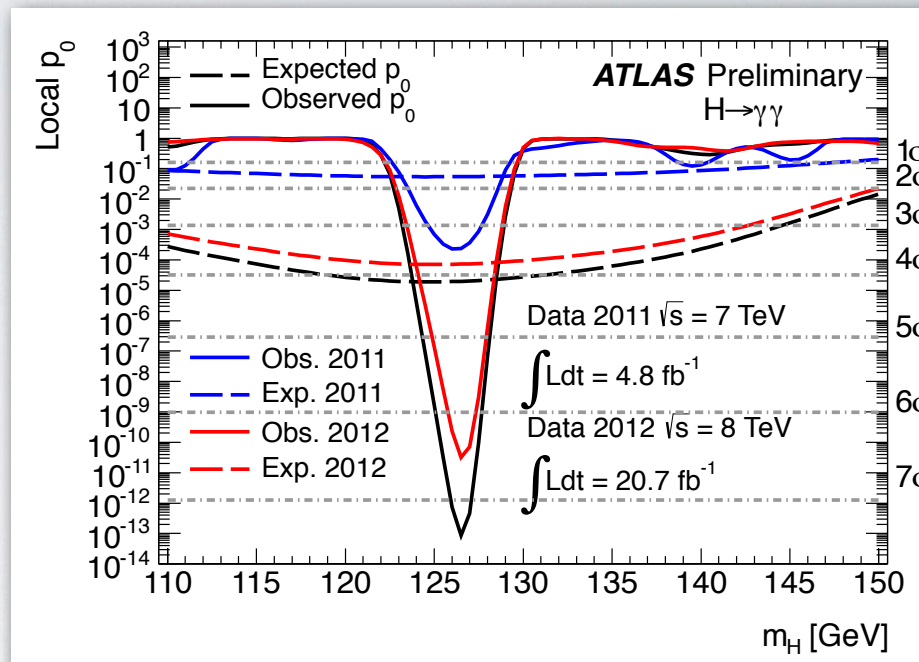


Višak događaja ($H \rightarrow \gamma\gamma$)

CMS - region niskih masa

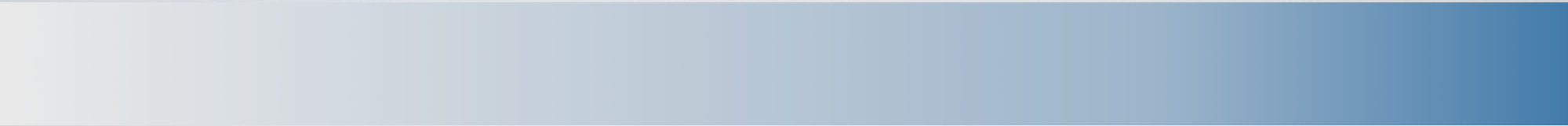


ATLAS



Očekivana statistička značajnost oko 125 GeV: **$\sim 4\sigma$ ($\sim 4\sigma$)**

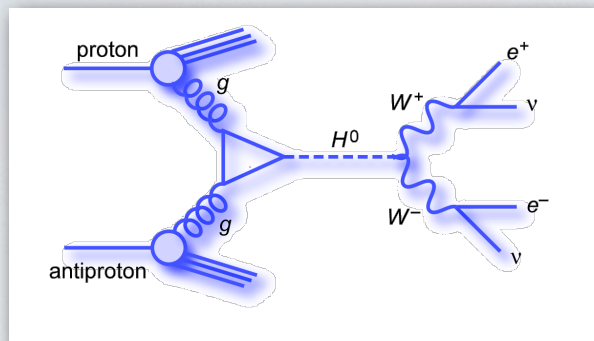
Izmerena statistička značajnost oko 126 GeV: **$\sim 4\sigma$ ($\sim 7\sigma$)**


$$\mathbf{H} \rightarrow \mathbf{WW} \rightarrow \mathbf{l\nu l\nu}$$

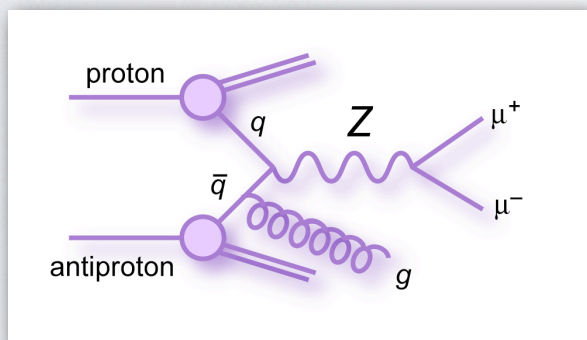
$H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$

- Kanal sa odličnim performansama u širokom spektru mogućih masa bozona

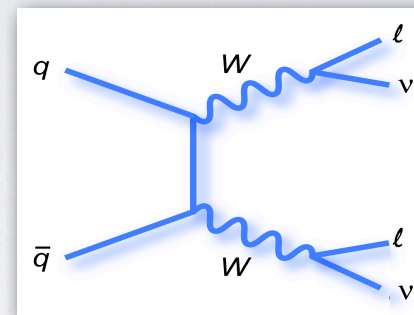
proces $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$



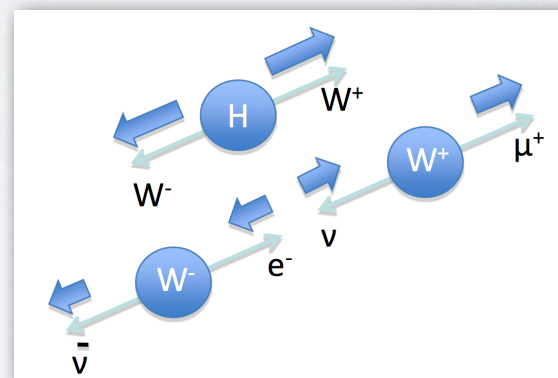
“razlučivi” procesi (instrumentalni šum)



“nerazlučivi” procesi



parovi W bozona iz raspada Higgs bozona
imaju drugačije kinematičke osobine:

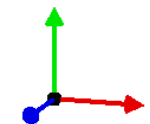
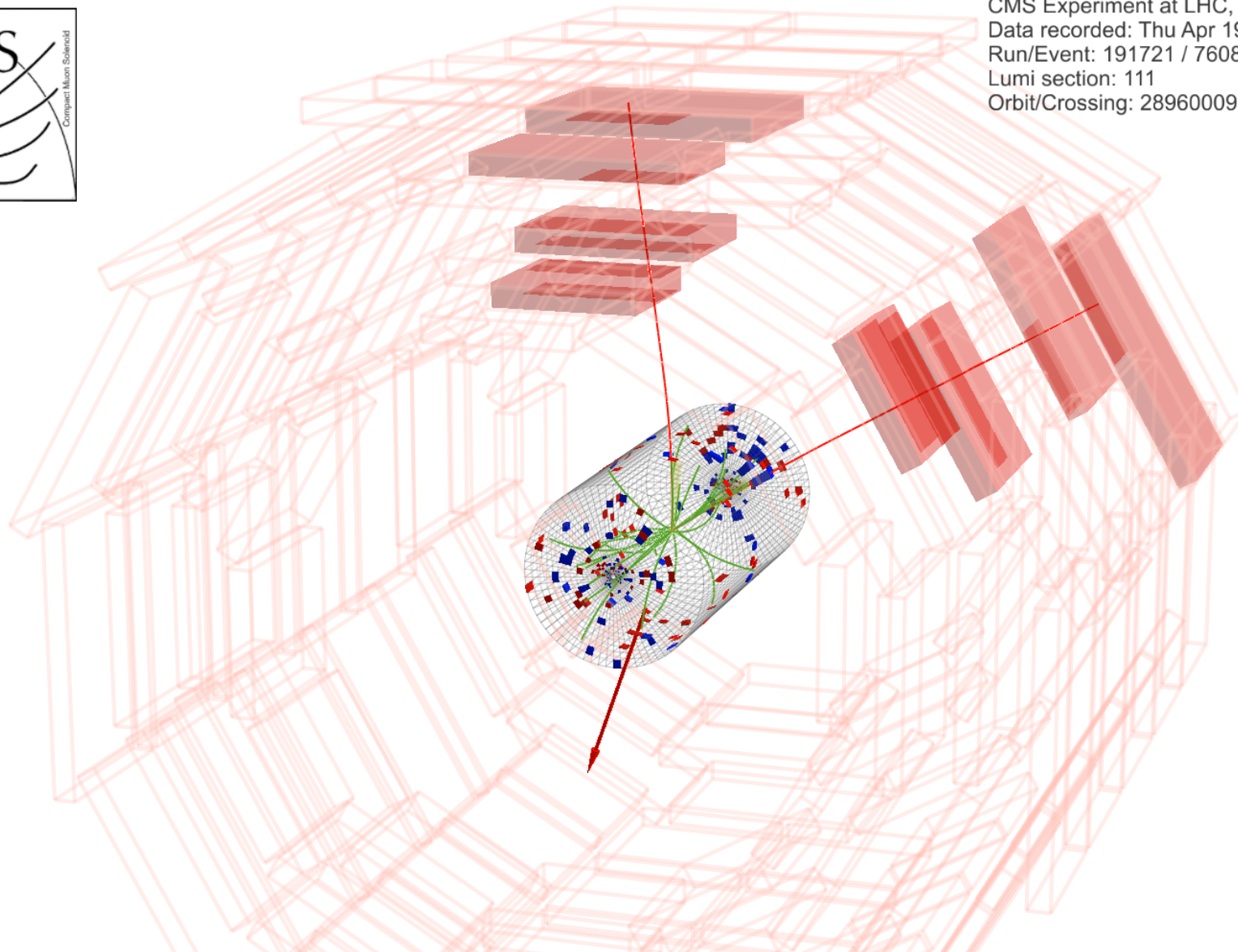


**Korelacija između spina dva W bozona
uzrokuje mali ugao između dva finalna leptoni!**

$H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$



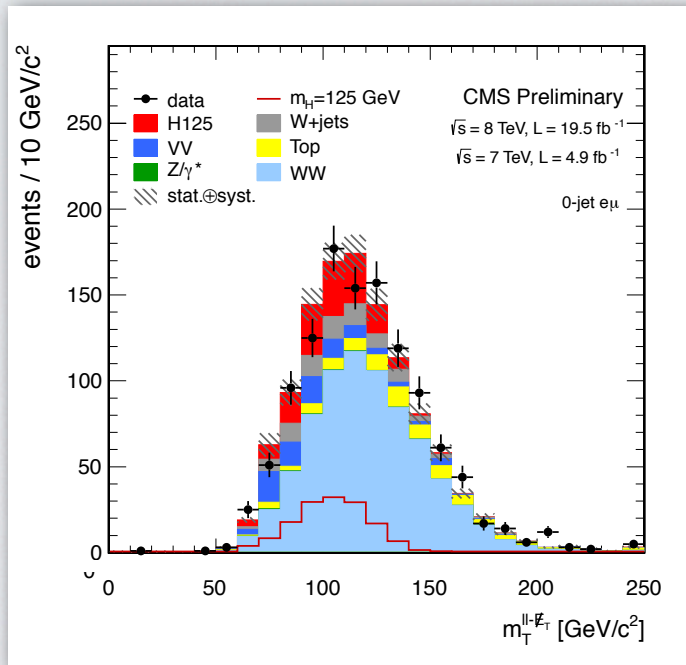
CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Thu Apr 19 09:14:14 2012 CEST
Run/Event: 191721 / 76089774
Lumi section: 111
Orbit/Crossing: 28960009 / 815



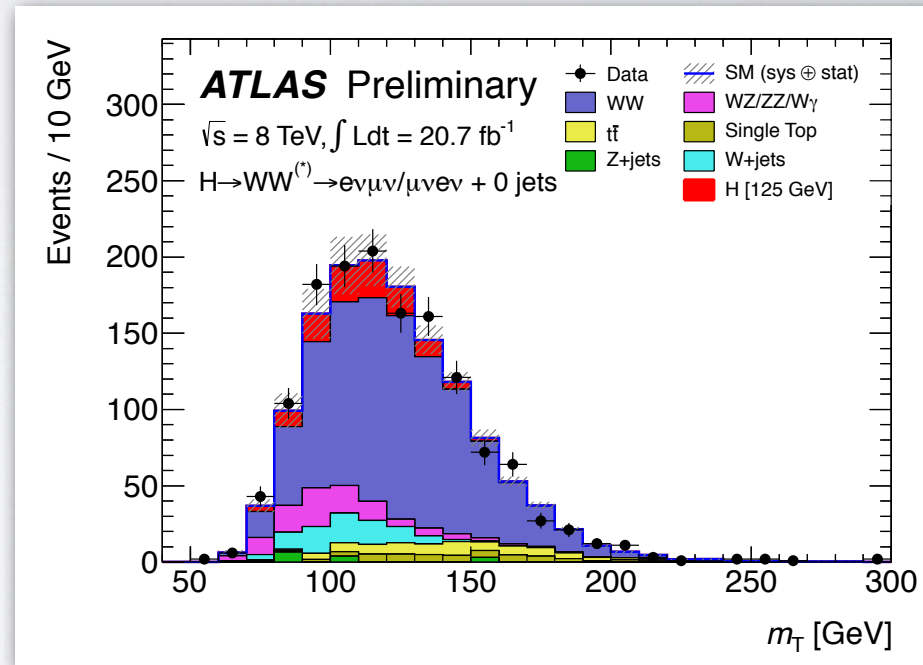
$H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$

- Lako prepoznatljiv “zapis” u detektoru:
 - 2 izolovana leptona sa velikim trans. impulsom i malim uglom između njih
 - velik “nedostajući” impuls u transverzalnoj ravni
- Nema uske rezonance u masenom spektru
 ekstrakcija signala na osnovu odbroja događaja

CMS



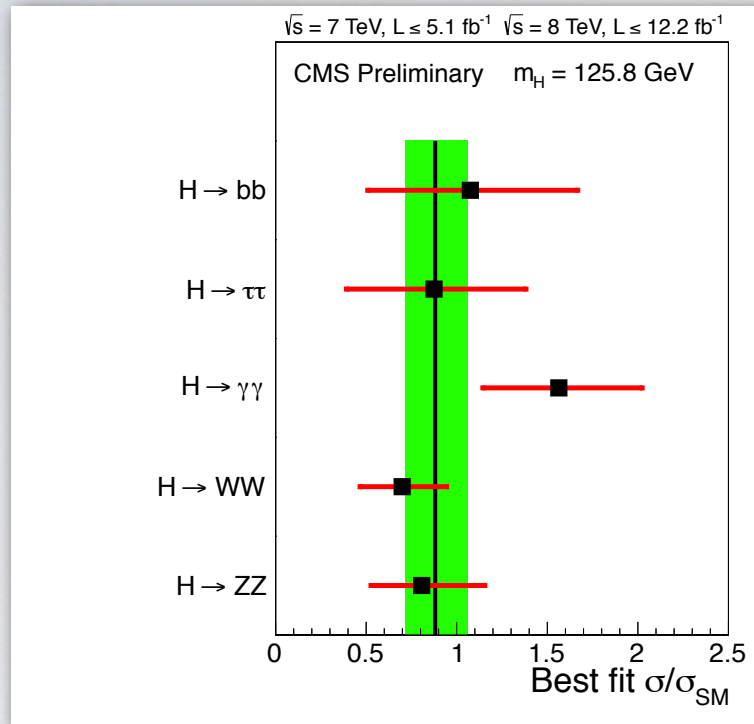
ATLAS



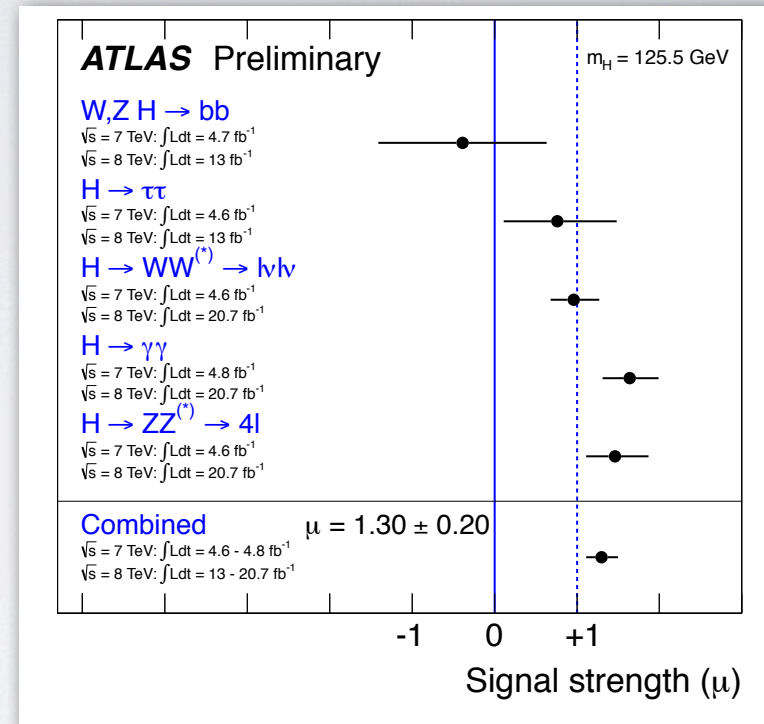
- Posebna optimizacija za svaku vrednost potencijalne mase Higgs bozona

Kombinovani rezultati

CMS - region niskih masa



ATLAS



➡ Registrovani signal u svim kanalima je u skladu sa predviđanjima SM (još uvek velika statistička neodređenost)

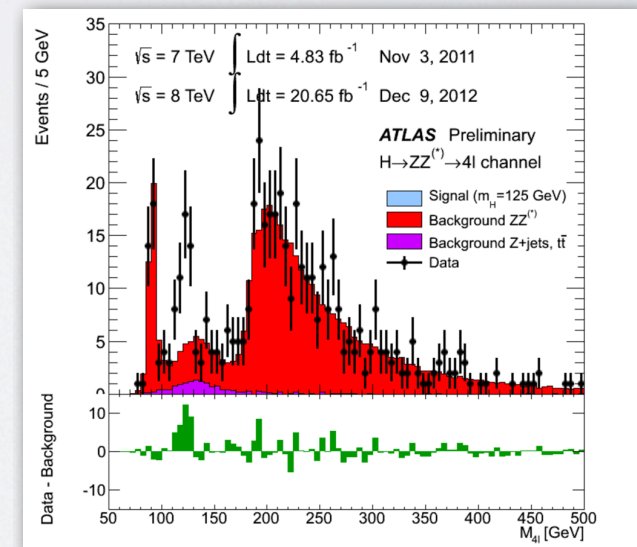
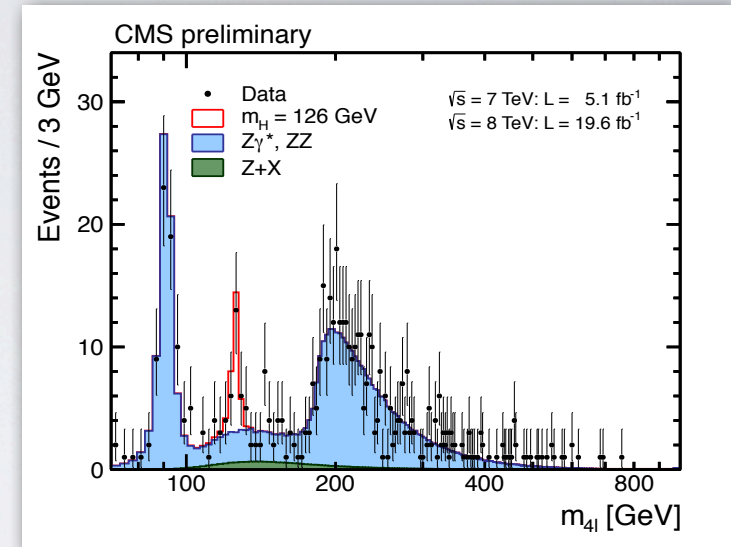
CMS: jačina signala = $\mu = 0.88 \pm 0.21$

ATLAS: jačina signala = $\mu = 1.30 \pm 0.19$

Zaključak

- LHC eksperimenti su postigli **impresivne rezultate** u rekordno kratkom periodu!
- Analiza događaja u mnogim kanalima
 - $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$, $H \rightarrow \gamma\gamma$, $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$**
- Anatomija registrovanih događaja
 - Statistički značajan višak događaja oko 125 GeV
 - Dodatni signal odbačen u regionu 130 - 827 GeV
- Registrovani signal je u skladu sa predviđanjima SM
 - Masa bosona: **125.8 ± 0.5 GeV (CMS)**
 125.5 ± 0.6 GeV (ATLAS)
 - Spin i parnost bosona: **0^+**
- Uzbudljiva vremena su ispred nas (nova otkrića?)

➡ **Studenti pridružite nam se!**



Zaključak

- LHC eksperimenti su postigli **impresivne rezultate** u rekordno kratkom periodu!
- Analiza događaja u mnogim kanalima
 - $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$, $H \rightarrow \gamma\gamma$, $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$**
- Anatomija registrovanih događaja
 - Statistički značajan višak događaja oko 125 GeV
 - Dodatni signal odbačen u regionu 130 - 827 GeV
- Registrovani signal je u skladu sa predviđanjima SM
 - Masa bosona: **125.8 ± 0.5 GeV (CMS)**
 125.5 ± 0.6 GeV (ATLAS)
 - Spin i parnost bosona: **0^+**
- Uzbudljiva vremena su ispred nas (nova otkrića?)

➡ Studenti pridružite nam se!

