

Współczesna fizyka cząstek elementarnych i jądra atomowego



Marcin Konecki

Uniwersytet Warszawski, Wydział Fizyki

(marcin.konecki@fuw.edu.pl)

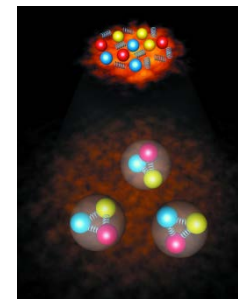
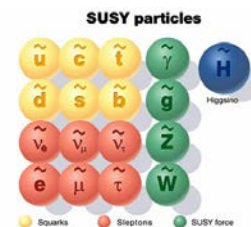
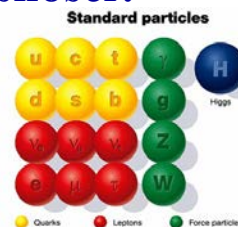


Eksperymenty ATLAS i CMS – odkrycie czastki Higgsa

W prezentacji wykorzystano publiczne materiały edukacyjne i naukowe laboratorium CERN <http://education.web.cern.ch>, eksperymentu CMS <http://cms.web.cern.ch>, i Particle Data Group of Lawrence Berkeley National Laboratory <http://pdg.web.cern.ch/pdg/particleleadventure>, (polska wersja: <http://www.ifj.edu.pl/przygoda>). Zapraszam do odwiedzenia powyższych stron dla samodzielnych studiów!

Pytania do LHC

- Skąd się biorą masy cząstek?
- Czy istnieje bozon Higgsa? 😊 → Ile? Własności?
- Czy istnieją cząstki „supersymetryczne”?
- Gdzie i czym jest niewidoczna część Wszechświata?
(„ciemna materia” i „ciemna energia”)
- Czy istnieją „skryte” wymiary przestrzeni?
- Gdzie podziła się antymateria?
- Jak formował się wczesny Wszechświat? Jakie są własności kwarków w stanie swobodnym?
(Czym jest „plazma kwarkowo-gluonowa”?)
- ...



Model Standardowy a cząstka Higgsa - krótkie przypomnienie

Podstawowe cegiełki: kwarki i leptony

Kwarki górne (u) i dolne (d) tworzą protony i neutrony. Razem z elektronem (e) są podstawowymi składnikami materii.

Kwarki nie występują w stanie swobodnym, mają niecałkowite ładunki elektryczne.

Kolejne pary (pokolenia) kwarków: powabny (c), dziwny (s), szczytowy (t), denny/piękny (b).

Cieęższe odpowiedniki elektronu to mion (μ) i taon (τ). Towarzyszą im odpowiednie neutrina ($\nu_e \nu_\mu \nu_\tau$)

kwarki

leptony

$2.4 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ u up	$1.27 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ c charm	$171.2 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ t top
$4.8 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	$104 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	$4.2 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom
$<2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_e electron neutrino	$<0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ muon neutrino	$<15.5 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ tau neutrino
$0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ e electron	$105.7 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ μ muon	$1.777 \text{ GeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ τ tau

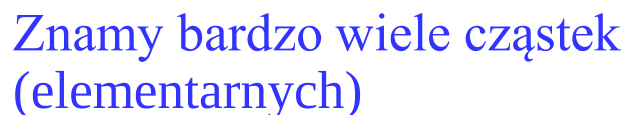
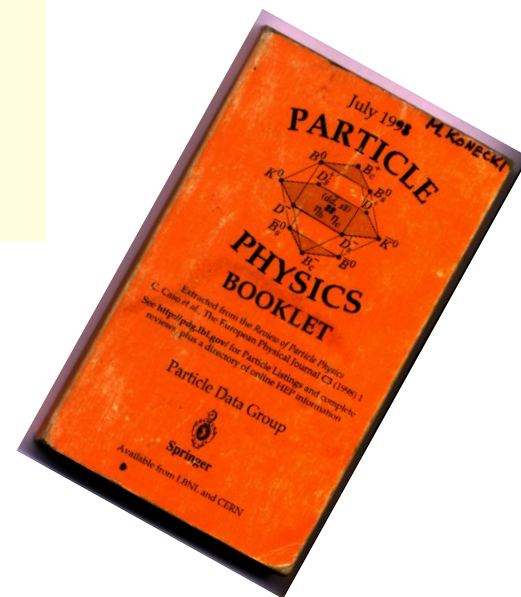
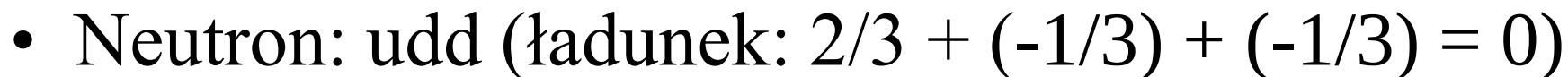
masa

ładunek el.

spin

-4-

- Proton: uud (ładunek: $2/3 + 2/3 + (-1/3) = +1$)



Uwaga: Anty-cząski składają się z anty-kwarków, np.: $\bar{u} \bar{d} \bar{d}$

 $\bar{u}dd$

-5-

Z czego składają się cząstki?

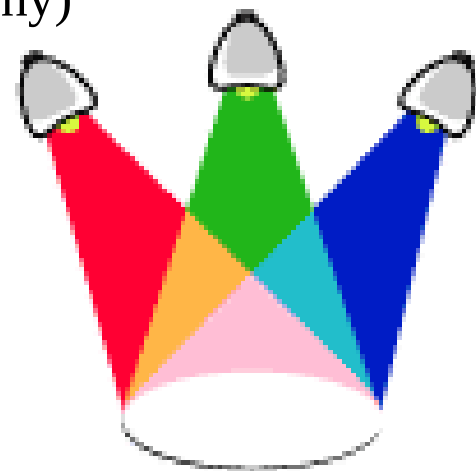
Kwarki mają kolor (ładunek kolorowy – nazwa cechy)

RGB,

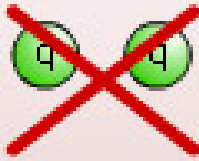
Antykwarki – antykolor

Obserwowane cząstki muszą być kolorowo obojętne – „białe”.

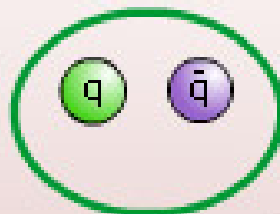
Cząstki tworzone są przez pary kwark-antykwark lub przez 3 kwarki bądź antykwarki



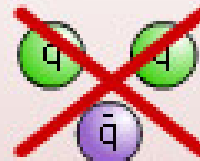
quark



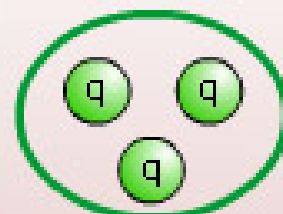
quark, quark



quark, antiquark



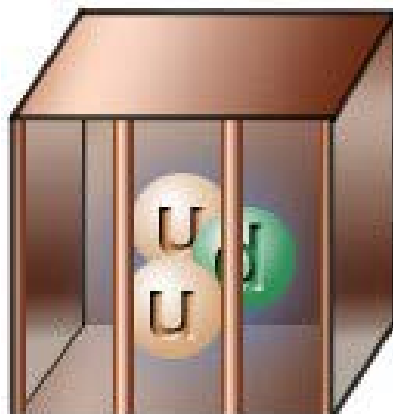
quark, quark,
antiquark



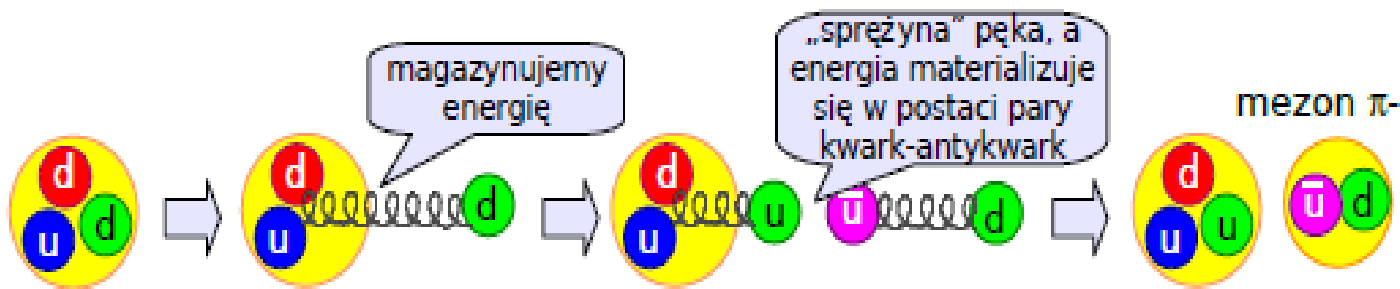
quark, quark,
quark

Z czego składają się cząstki?

Fundamentalne kwarki nie występują w stanie swobodnym, są „zamknięte” w cząstce elementarnej

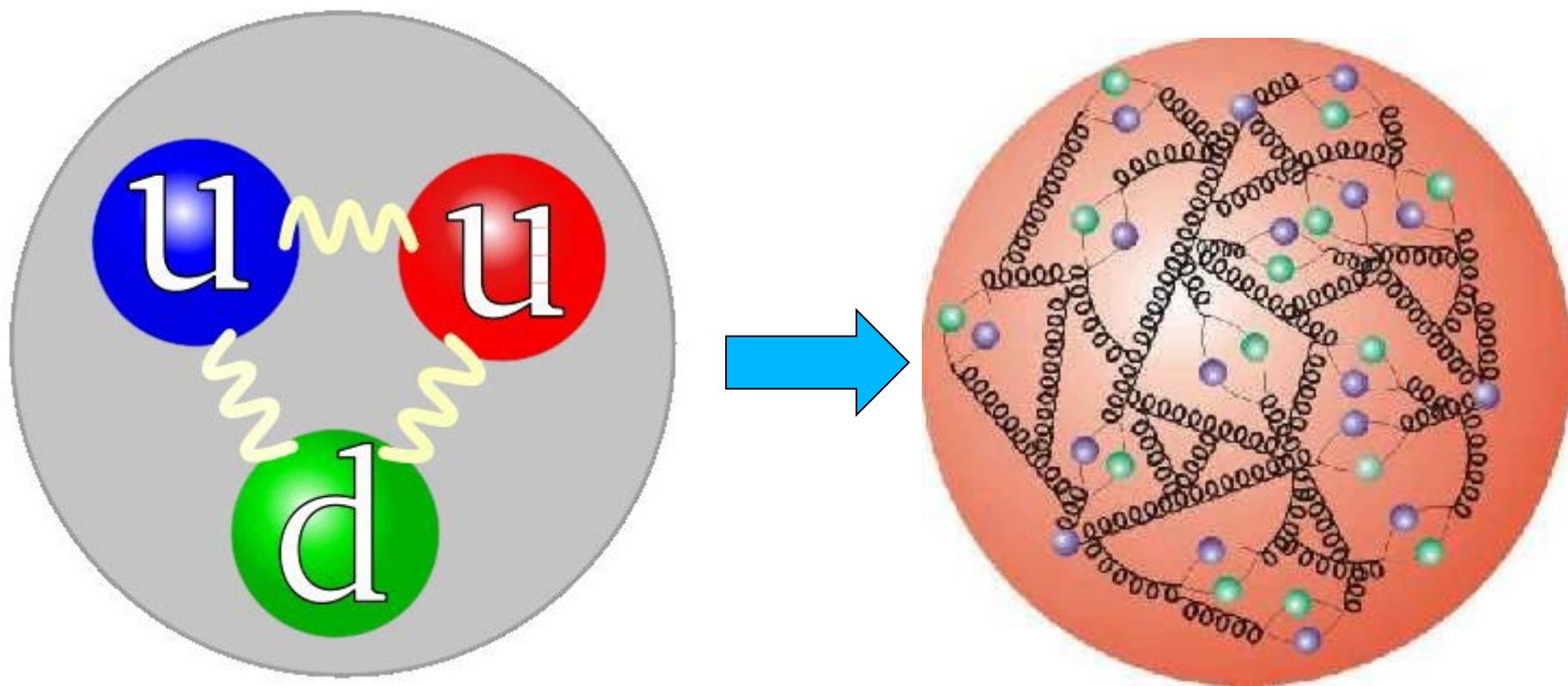


Próba wyrwania kwarka z np. neutronu prowadzi do powstania pary kwark-antykwarek



Budowa Protonu

Badanie składników protonów ukazuje ich złożoną strukturę.....



Oddziaływania

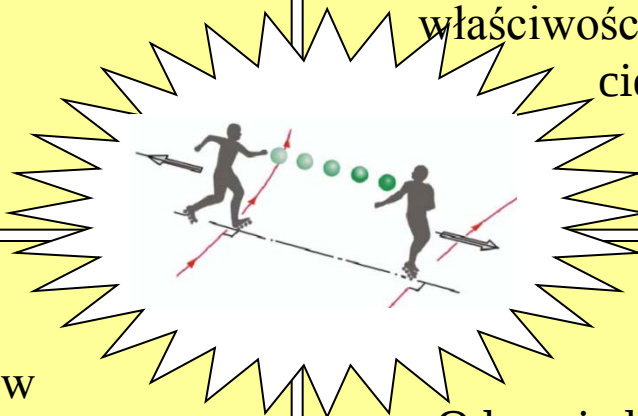
GRAWITACYJNE

Grawitacja powoduje, że jabłko spada na Ziemię a w skali astronomicznej łączy materię w planetach, gwiazdach, galaktykach



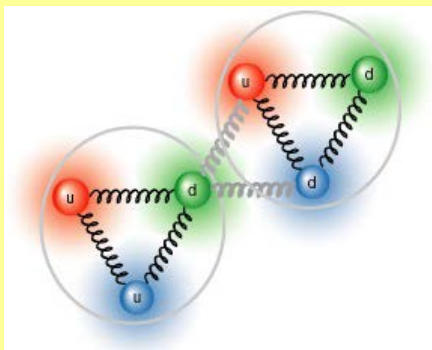
ELEKTROMAGNETYCZNE

Elektromagnetyzm łączy elektrony z jądrami w atomach, cząsteczki, jest odpowiedzialny za właściwości ciał stałych, cieczy i gazów



SILNE

Łączy kwarki w hadronach (m.in. protonach i neutronach) oraz protony i neutrony w jądra, pokonując odpychanie elektryczne między protonami

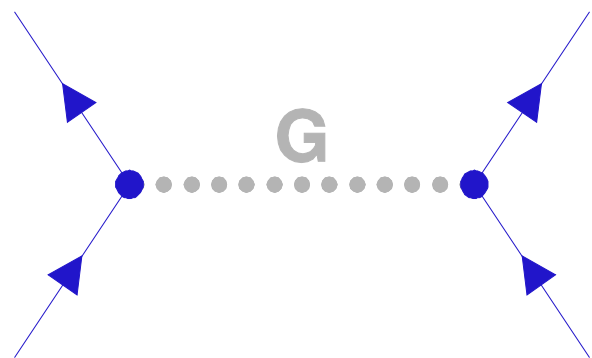


SŁABE

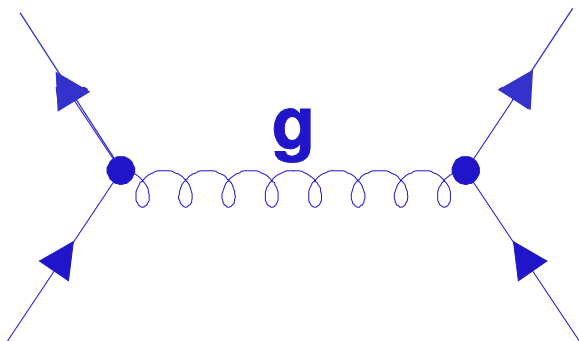
Odpowiada za promieniotwórczość naturalną. Odgrywa istotną rolę w oddziaływaniach jądrowych produkcji energii słonecznej



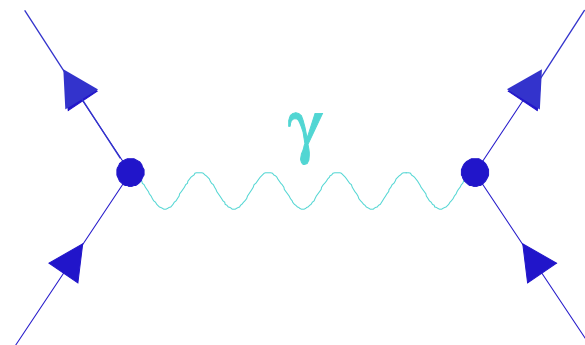
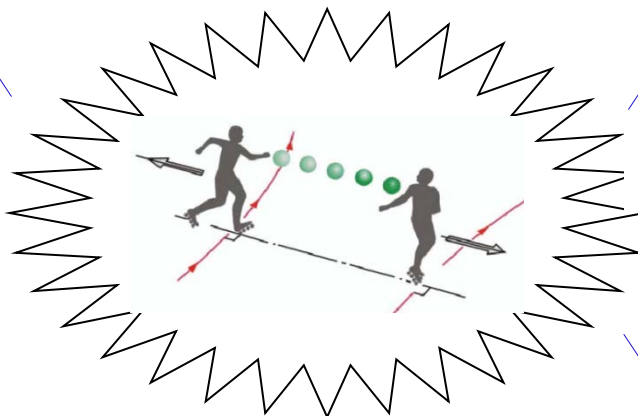
Oddziaływania - przekaz



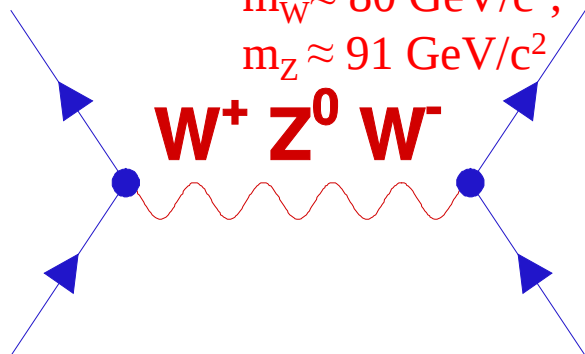
grawitacyjne



silne



elektromagnetyczne



$m_W \approx 80 \text{ GeV}/c^2$,
 $m_Z \approx 91 \text{ GeV}/c^2$

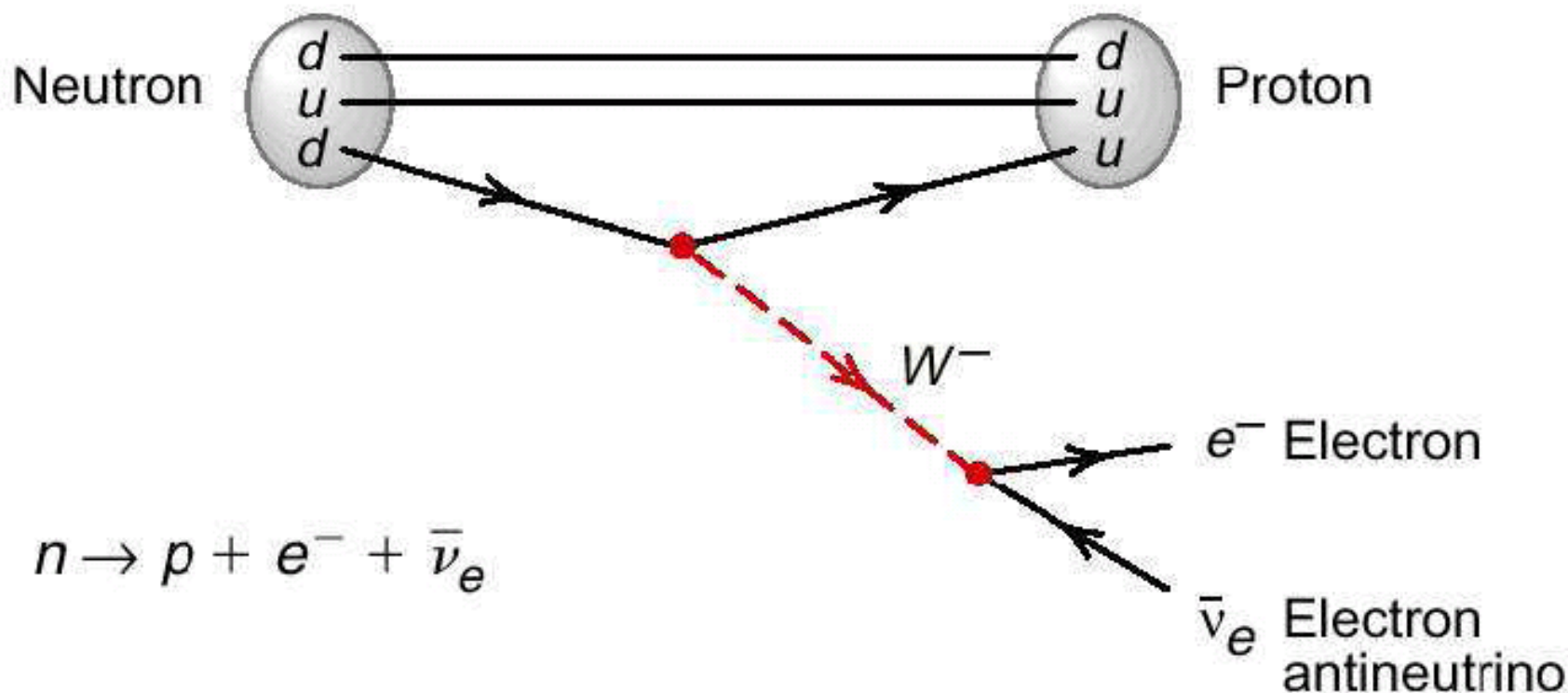
$W^+ Z^0 W^-$

słabe

Przykład: rozpad neutronu

Stan początkowy

Stan końcowy

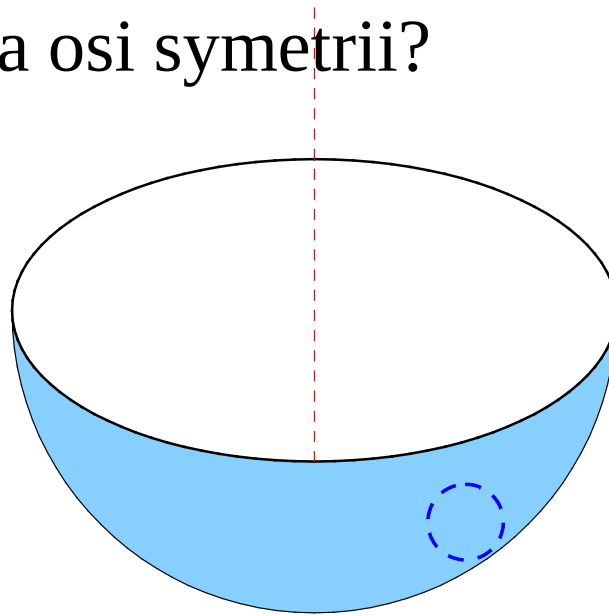
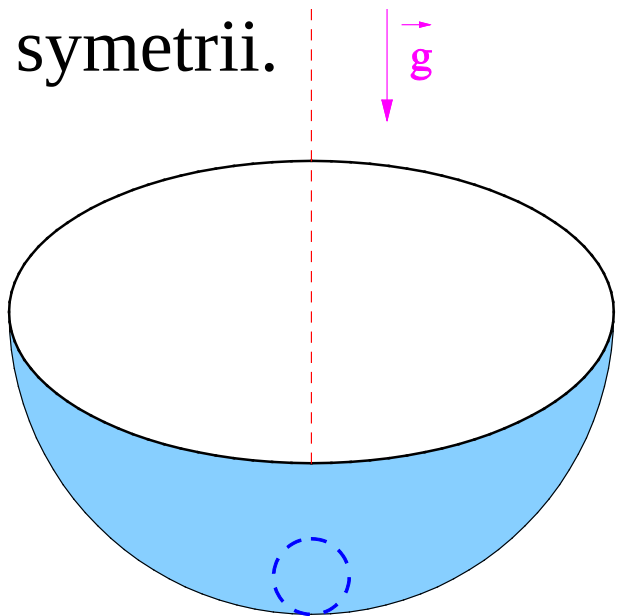


- Ilościowy opis oddziaływań w Modelu Standardowym przy użyciu formalizmu kwantowej teorii pola, oparty jest na założeniu pewnych szczególnych symetrii (tzw. symetrii cechowania) obowiązujących w świecie cząstek.
- Z symetrii cechowania wynika, że wszystkie nośniki oddziaływań powinny być bezmasowe. Jednak doświadczenie pokazuje, że bozony W i Z mają niezerową masę ...
- Jak pogodzić wymóg symetrii z obserwacją doświadczenia?

Problem masy (analogia klasyczna)

Rozważmy kulkę w osiowo-symetrycznej czaszy, w jednorodnym polu grawitacyjnym

- Oczekujemy, że położenie równowagi znajduje się na osi symetrii.
- Co jednak gdy doświadczenie wykazuje, że kulka nie znajduje się na osi symetrii?

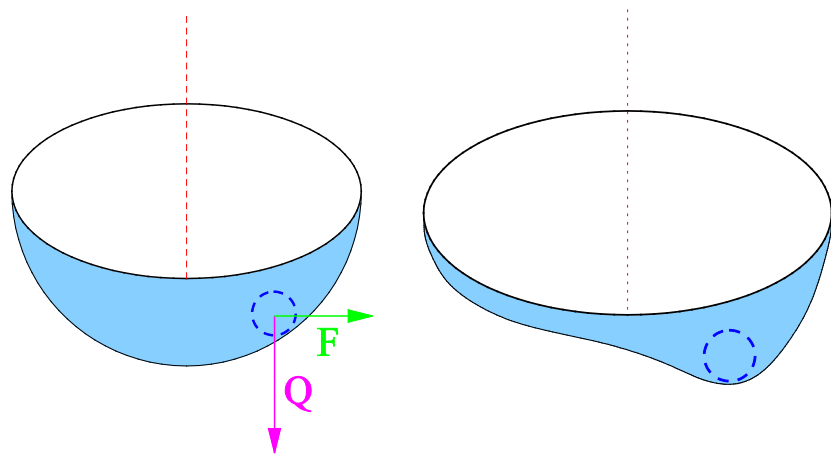


Problem masy (analogia cd.)

na kulkę działa dodatkowa siła,
skierowana pod kątem do osi?

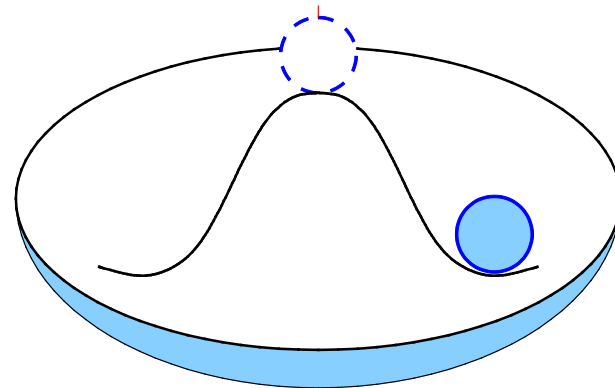
czasza nie ma symetrii osiowej?

W obu tych przypadkach musimy
przyznać, że nasza symetria jest
“złamana” (nie obowiązuje)

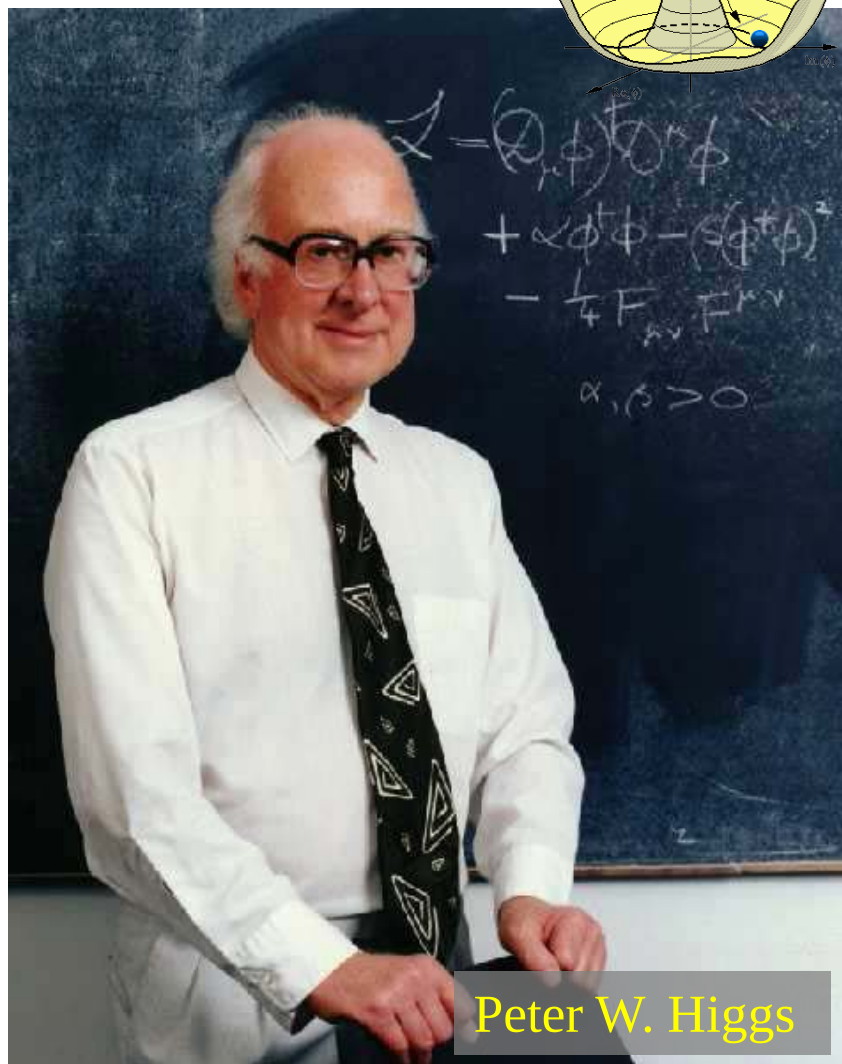
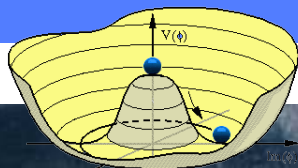


Czasza zachowuje symetrię osiową ale
położenie na osi nie jest stanem
równowagi trwałej - kulka stacza się
wybierając jedno z wielu możliwych
położenie równowagi

**Stoczenie się kulki powoduje
spontaniczne złamanie symetrii**



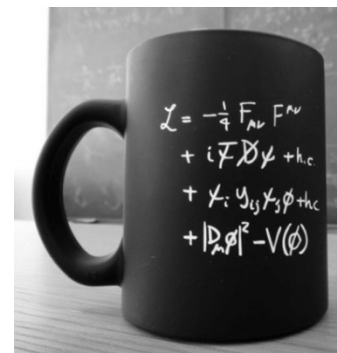
Spontaniczne łamanie symetrii



Peter W. Higgs

Na możliwość nadania mas nośnikom oddziaływań poprzez spontaniczne łamanie symetrii elektroslabej wskazano ponad pięćdziesiąt lat temu (1964) . **Brout, Englert, Guralnik, Hagen, Higgs, Kibble**

Mechanizm spontanicznego łamania symetrii, zwany także mechanizmem Higgsa, jest podstawą współczesnej teorii oddziaływań elektroslabych. Jego konsekwencją jest istnienie nowej cząstki – bozonu Higgsa.



$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\ & + i \bar{\psi} \not{D} \psi + h.c. \\ & + \bar{\chi}_i \gamma_{ij} \chi_j + h.c. \\ & + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi) \end{aligned}$$

Oddziaływanie z polem Higgsa - masy



Wyobraźmy sobie salę bankietową przypadkowo wypełnioną gośćmi (pole Higgsa)



Nagle pojawia się znakomity naukowiec (bozon cechowania), który zwraca powszechną uwagę



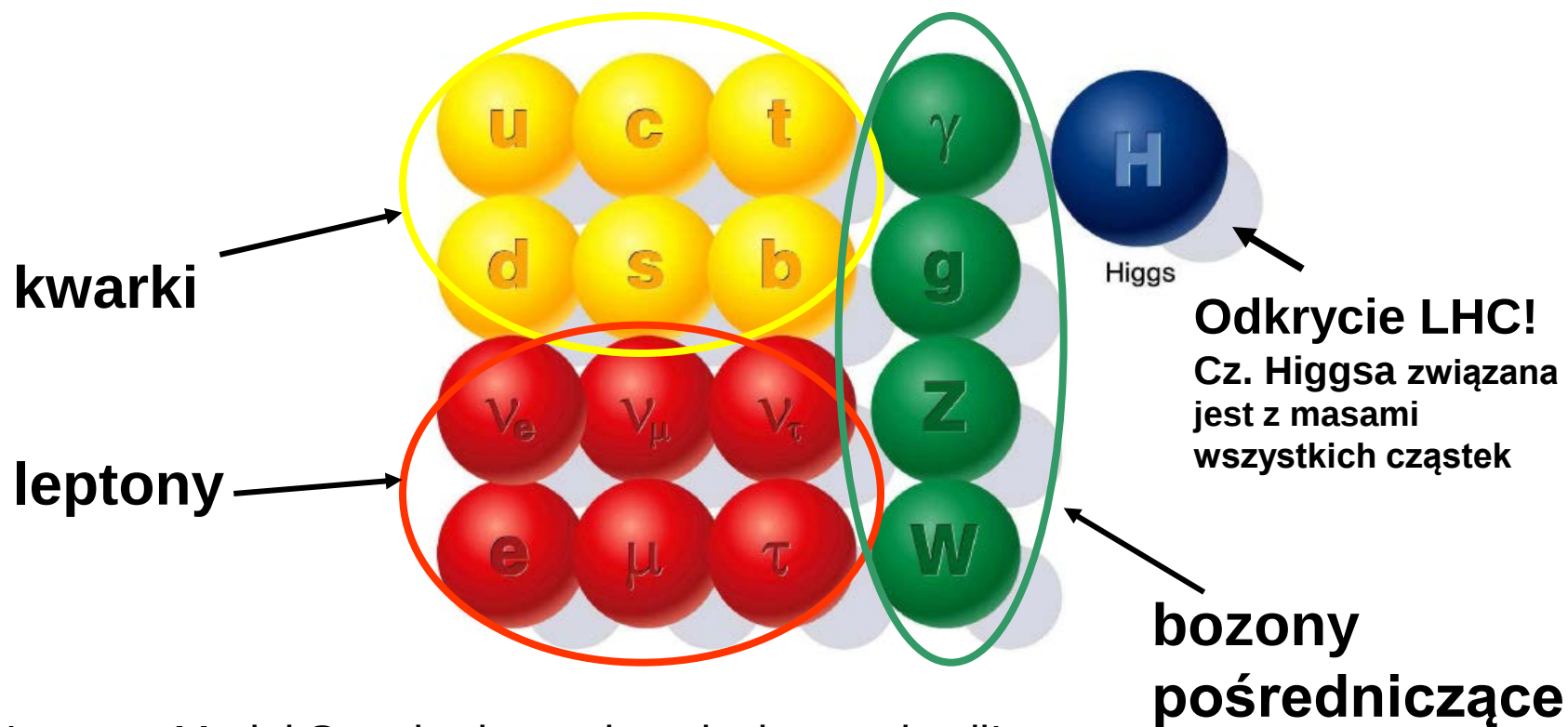
Ludzie cisnący się wokół naukowca (oddziaływanie z polem) utrudniają mu poruszanie się (nadają masę)



Goście na bankiecie mogą też spontanicznie tworzyć zagęszczenia (bozon Higgsa)

Cząstki w Modelu Standardowym

Model Standardowy – podstawowa teoria cząstek elementarnych.
Doskonale zgadza się z pomiarami doświadczalnymi.



Uwaga – Model Standardowy nie opisuje grawitacji!

Lagrangian Modelu Standardowego

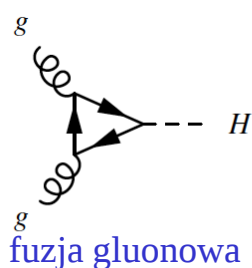
$$\begin{aligned} & -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e + \frac{1}{2}ig_s^2 (\bar{q}_i^\sigma \gamma^\mu q_j^\sigma) g_\mu^a + \bar{G}^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu \bar{G}^a G^b g_\mu^c - \\ & \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2}\partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{2c_w^2} M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \frac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - \frac{1}{2}m_h^2 H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - \\ & M^2 \phi^+ \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \frac{1}{2c_w^2} M^2 \phi^0 \phi^0 + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h - igc_w [\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - \\ & W_\nu^+ W_\mu^-) - Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) - s_w [\partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - \\ & A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^+ W_\nu^- + \\ & g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\mu^+ Z_\nu^0 W_\nu^- - Z_\nu^0 W_\mu^+ Z_\mu^0 W_\nu^-) - A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\ & W_\nu^+ W_\mu^-) - 2A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-] - \frac{1}{4}(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + \\ & 4H^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2] - gM W_\mu^+ W_\mu^- \\ & \frac{1}{2}g[W_\mu^+ (H \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) - W_\mu^- (H \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu H) + \\ & W_\mu^- \phi^+] + ig s_w M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{4}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- [H^2 + (\phi^0)^2 + 2 \\ & W_\mu^- \phi^+] - \frac{1}{2}ig^2 \frac{s_w^2}{c_w^2} Z_\mu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - \\ & g^2 \frac{s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - \\ & ig s_w A_\mu [-(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu e^\lambda) + \frac{2}{3}(\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) - \frac{2}{3}(\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda) + \\ & (1 - \gamma^5)u_j^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}\gamma^5)\nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\kappa C_{\lambda\kappa}^\dagger \gamma^\mu \\ & i\phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda) + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- [m_d^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 + \gamma^5)u_j^\kappa) - \\ & m_u^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \gamma^5)u_j^\kappa) - \frac{ig}{2} \frac{m_d^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{d}_j^\lambda \gamma^5 d_j^\lambda) + \bar{X}^+ (\partial^2 - \\ & M^2)X^+ + \bar{X}^- (\partial^2 - M^2)X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ X^0 + \partial_\mu \bar{X}^- X^0 + \\ & \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + igc_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \partial_\mu X^0 \bar{X}^-) + \\ & ig s_w A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \partial_\mu \bar{X}^- X^-) - \frac{1}{2}gM [\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \\ & \bar{X}^- X^0 \phi^-] + \frac{1}{2c_w} igM [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + igM s_w [\bar{X}^0 X^- \phi^+ \\ & + \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \frac{1}{2}igM [\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\ & + i\bar{\psi} \not{D} \psi + h.c. \\ & + \chi_i y_{ij} \chi_j \phi + h.c. \\ & + \frac{1}{2} \partial_\mu \phi / \partial^\mu \phi - V(\phi) \end{aligned}$$

Higgs @ LHC – stan przed odkryciem

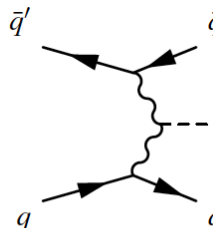
produkcja i kanały rozpadu cz. Higgsa

7 TeV



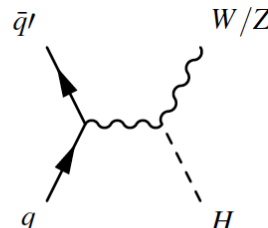
fuzja gluonowa

(a) $gg \rightarrow H$

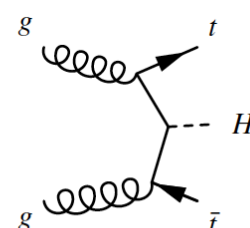


produkcja stowarzyszona z qq' , W/Z , $t\bar{t}$

(b) VBF



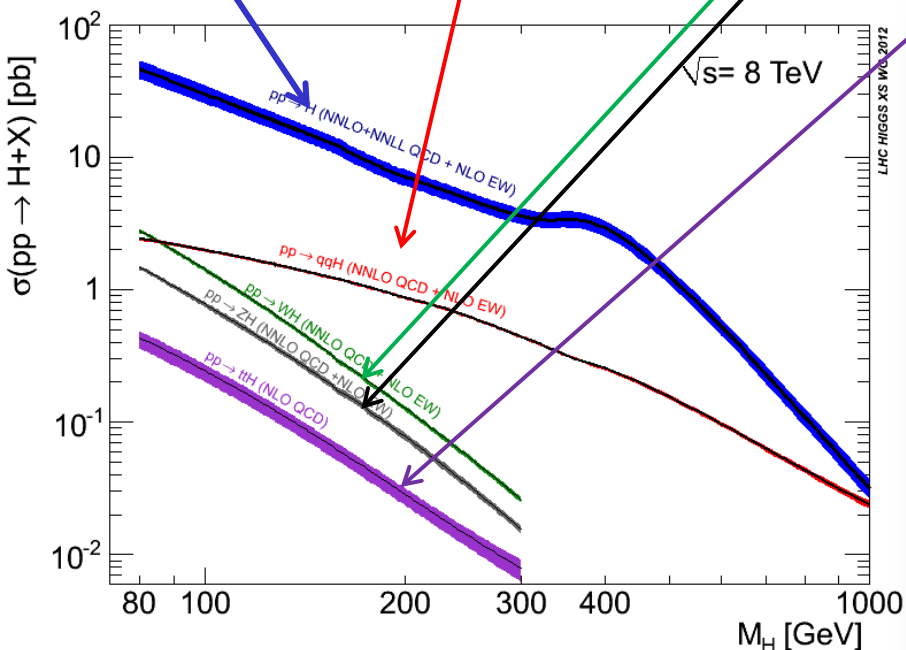
(c) VH



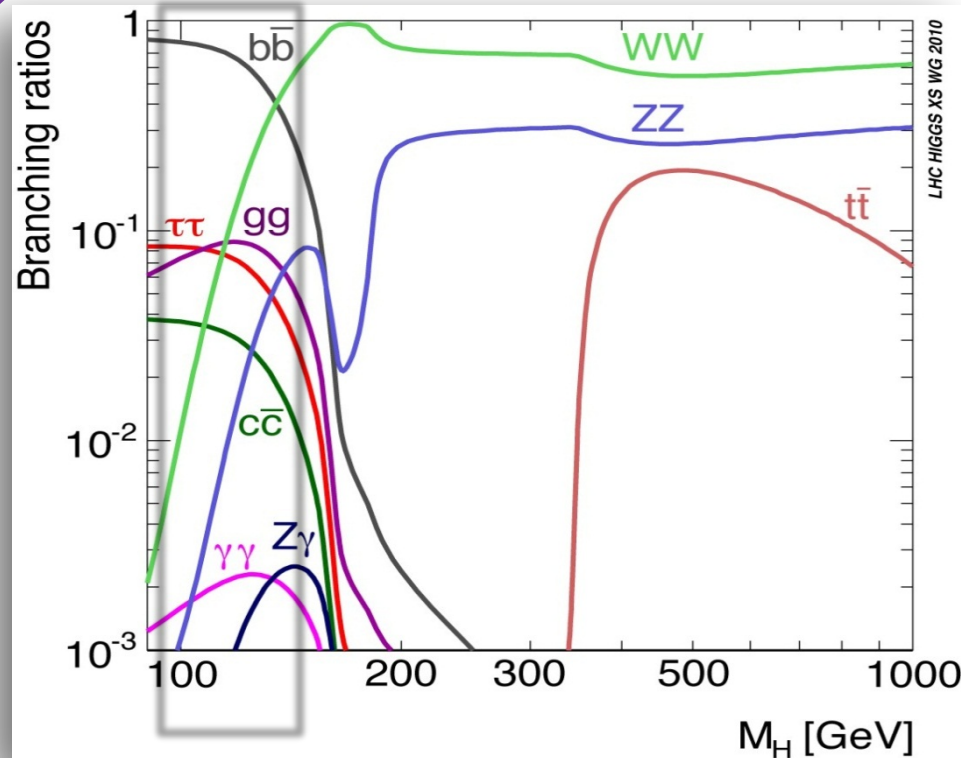
(d) $t\bar{t}H$

Events expected to be produced with $L=1 \text{ fb}^{-1}$

m_H , GeV	$WW \rightarrow l\nu l\nu$	$ZZ \rightarrow 4l$	$\gamma\gamma$
120	127	1.5	43
150	390	4.6	16
300	89	3.8	0.04



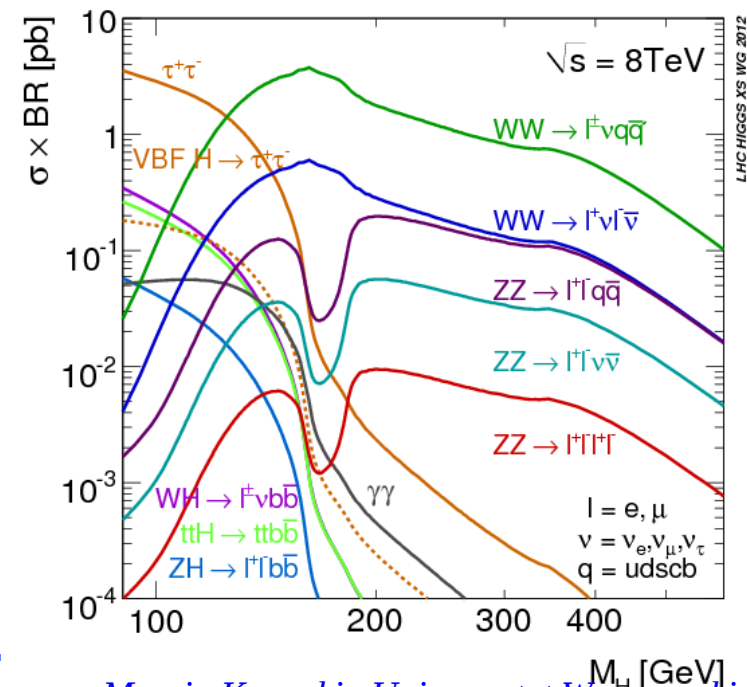
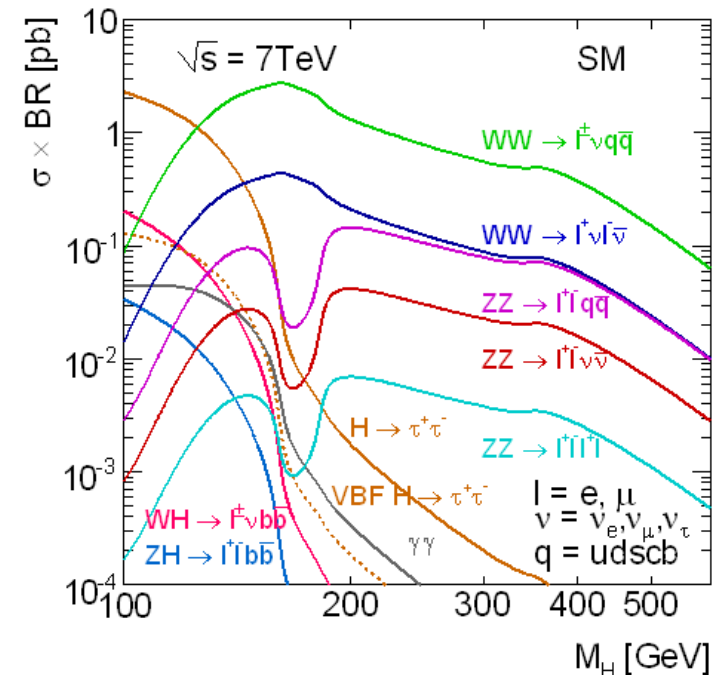
dominuje mechanizm fuzji gluonowej, jednak pozostałe kanały produkcji są istotne ze względu na możliwości dodatkowych cięć



Poszukiwania cząstki Higgsa – preferowane kanały

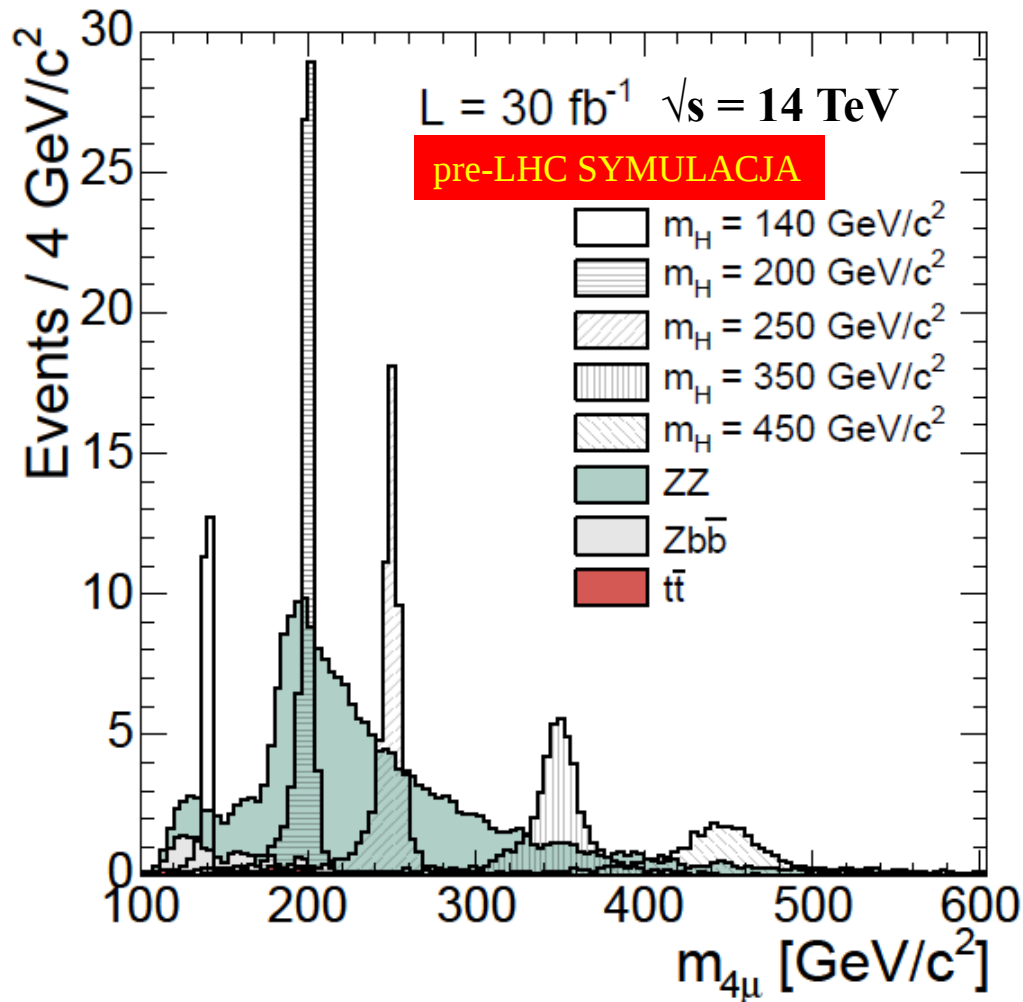
Przed uruchomieniem LHC potrafiliśmy przewidzieć mechanizmy produkcji oraz kanały rozpadu cząstki Higgsa. Nie znaleźliśmy jednak jej masy...

- $H \rightarrow \gamma\gamma$: „złoty kanał”
- rzadki kanał lecz najlepszy dla małych mas
- $H \rightarrow ZZ(*)$
→ $4l$ ($4e, 2e2\mu, 4\mu$) – „złoty kanał”
- szczególnie średnie i duże masy, mała liczba przypadków
→ $2l2\nu$: duże masy
→ $2lbb$: duże masy
- $H \rightarrow WW(*)$
→ $2l2\nu$: pośredni obszar mas
→ $lvqq$: duża liczba przypadków, duże masy
- $H \rightarrow \tau\tau$: rzadki, małe masy, dobry stosunek sygnał/tło
- $H \rightarrow bb\text{-bar}$
- produkcja stowarzyszona ttH, WH, ZH
- ważny dla studiów własności higgsa.



Jak odkryć higgsa – idea: analiza masy niezmienniczej (podstawowy sposób)

przykład $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$ („złoty kanał”)



1) W układzie w którym
cz. Higgosa spoczywa:

$$\mathbf{p}=0, E=m_H c^2$$

2) Na mocy zachowania
energii i pędu
produkty rozpadu:

$$\sum \mathbf{p}_i = 0, \sum E_i = m_H c^2$$

3) Niezmiennik tr. Loentza:

$$(\sum E'_i)^2 - (\sum c \mathbf{p}'_i)^2 = \text{invariant} = (m_H c^2)^2$$

Dzięki masie niezmienniczej
„widzimy” odkrywającą
cząstkę. Tradycyjnie
znaczoność: $s/\sqrt{(s+b)}$

LHC i eksperyment CMS

CERN i LHC

LHC = Large Hadron Collider (Wielki Zderzacz Hadronów)

• Ośrodek CERN

(Europejskie Laboratorium Fizyki Cząstek), Genewa
CERN powstał w 1954 r.,
Polska w CERN od 1991.

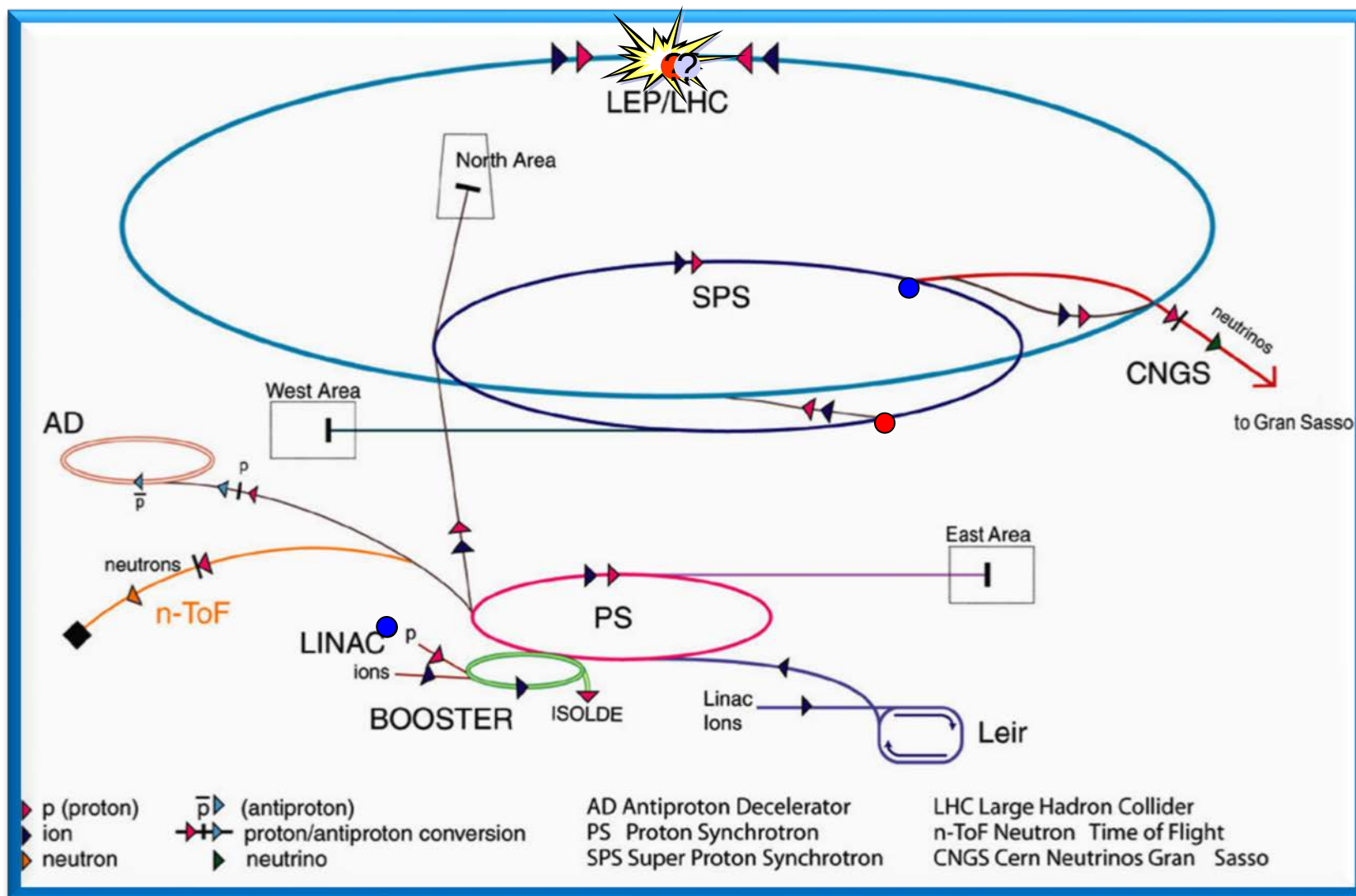


- Obwód 27km, na granicy F-CH, 100m pod ziemią
- Docelowo zderzenia p-p:
 $E = 7\text{TeV} + 7\text{TeV} = 14\text{TeV}$
($2 \cdot 10^{-6}\text{J}$, $v = 99.9999991\%c$)
- Pole magnetyczne w dipolach o indukcji: 8.3T (nadprzewodnictwo w $-271,1^\circ\text{C}$)
- ~ 2800 paczek, 10^{11} p/paczka. (rozmiar poprzeczny $\sim 15\mu\text{m}$)
- przecięcia wiązek co 25ns w 4 miejscach
- 4 Duże eksperymenty w tym CMS i ATLAS
- Ostatnie ogniwo kompleksu akceleratorów...



LHC działało (2010-2012) z ok. połową docelowej energii

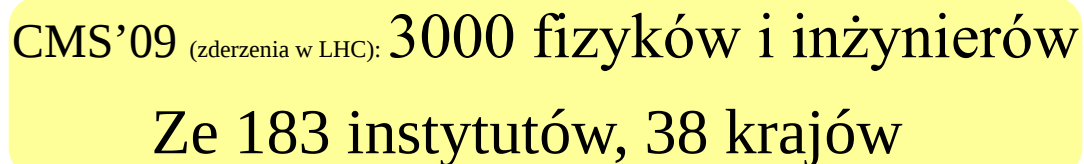
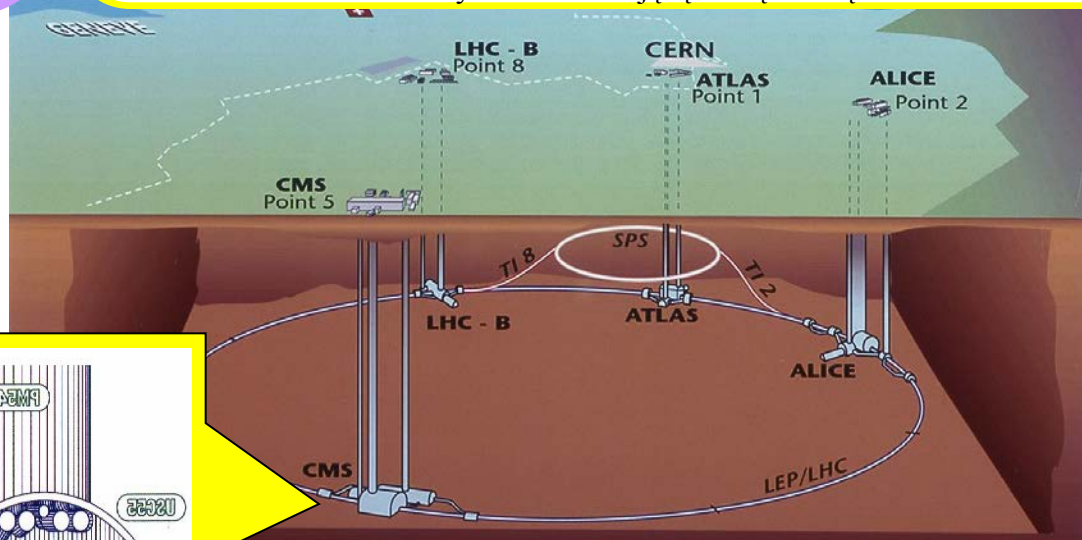
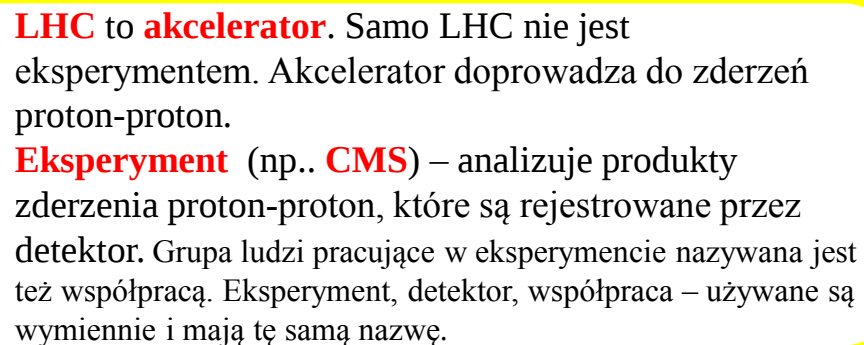
Wielki Zderzacz Hadronów



W tunelu LHC...



1992 (nazwa, LOI).
Warszawa w CMS od początku!



CMS = Compact Muon Solenoid



42 państwa, 182 instytuty, ~3500 naukowców i inżynierów (włączając 900 studentów)

TRIGGER, DATA ACQUISITION & OFFLINE COMPUTING

Austria, Brazil, CERN, Finland, France, Greece,
Hungary, Ireland, Italy, Korea, Lithuania, New Zealand,
Poland, Portugal, Switzerland, UK, USA

krzemowy detektor śladowy

Austria, Belgium, CERN, Finland, France, Germany,
Italy, Mexico, New Zealand, Switzerland, UK, USA

jednorodny kalorymetr elektromagnetyczny (ECAL)

Belarus, CERN, China, Croatia, Cyprus, France, Italy,
Portugal, Russia, Serbia, Switzerland, UK, USA

PRESHOWER

Armenia, CERN, Greece,
India, Russia, Taiwan

jarzmo magnesu

solenoid

All countries in CMS contribute
to Magnet financing

próbkujący kalorymetr hadronowy (HCAL)

Barrel: Bulgaria, India, USA
Endcap: Belarus, Bulgaria, Georgia, Russia,
Ukraine, Uzbekistan
HO: India

FEET

Pakistan China

FORWARD CALORIMETER

Hungary, Iran, Russia, Turkey, USA

komory mionowe (DT/CSC/RPC)

Barrel: Austria, Bulgaria, CERN, China,
Germany, Hungary, Italy, Spain
Endcap: Belarus, Bulgaria, China, Colombia,
Egypt, Korea, Pakistan, Russia, USA

Total weight : 14000 tonnes

Overall diameter : 15.0 m

Overall length : 28.7 m

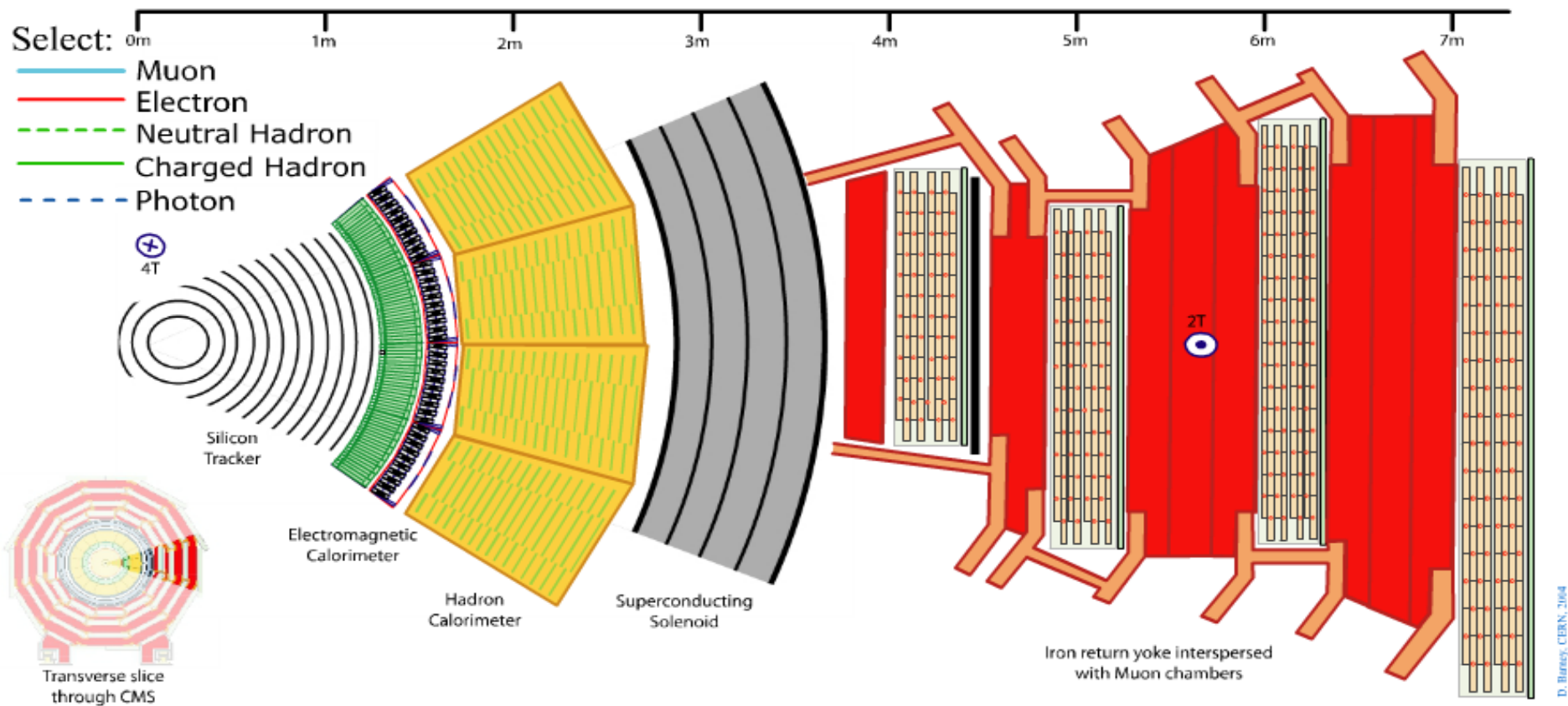
Magnetic field : 3.8 T

Popularne cząstki

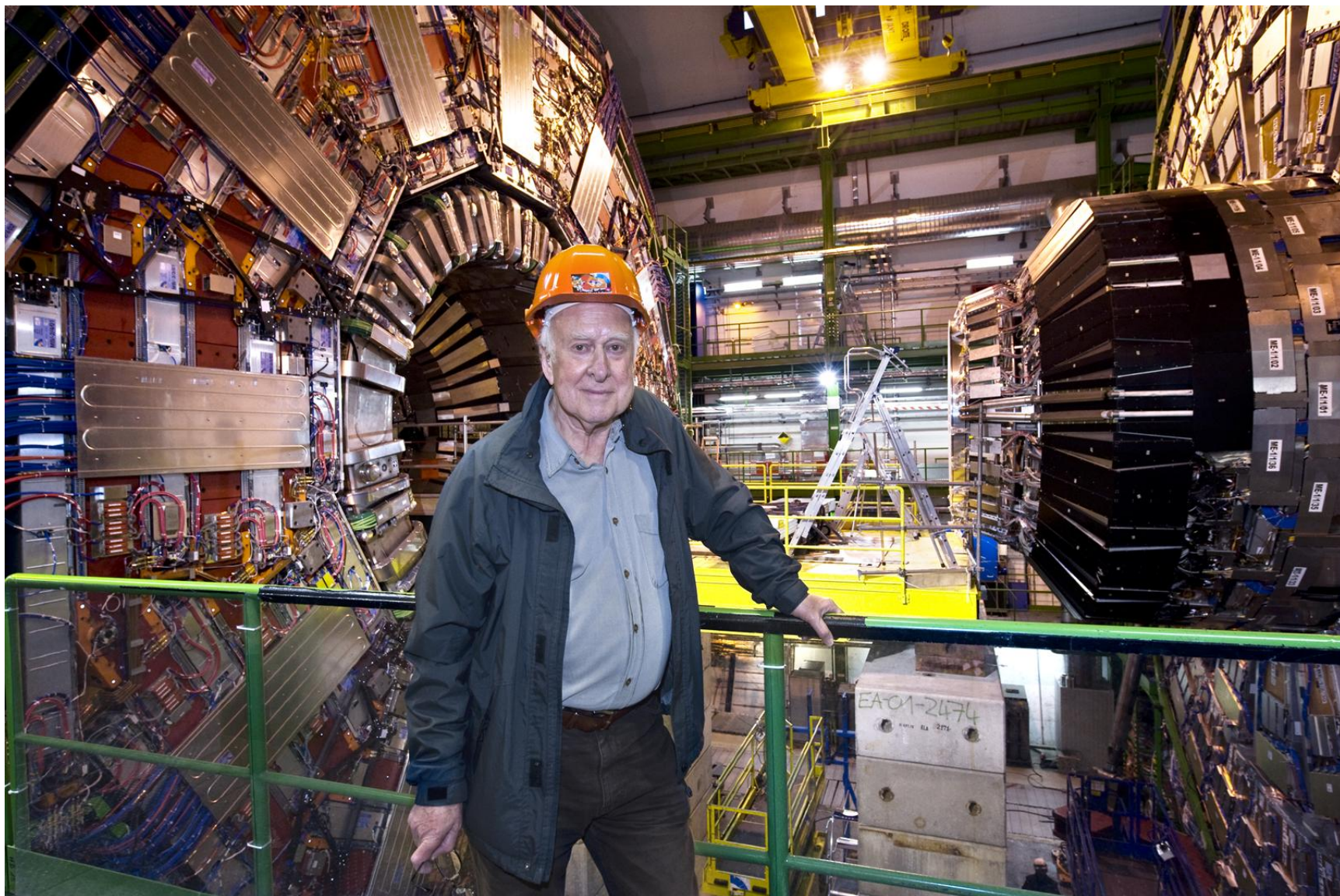
- Najczęściej spotykane cząstki to: proton, neutron, pion (naładowany, neutralny), foton, elektron, mion, neutrino. Ich różny sposób oddziaływania z materią wykorzystuje się później przy budowie detektorów.



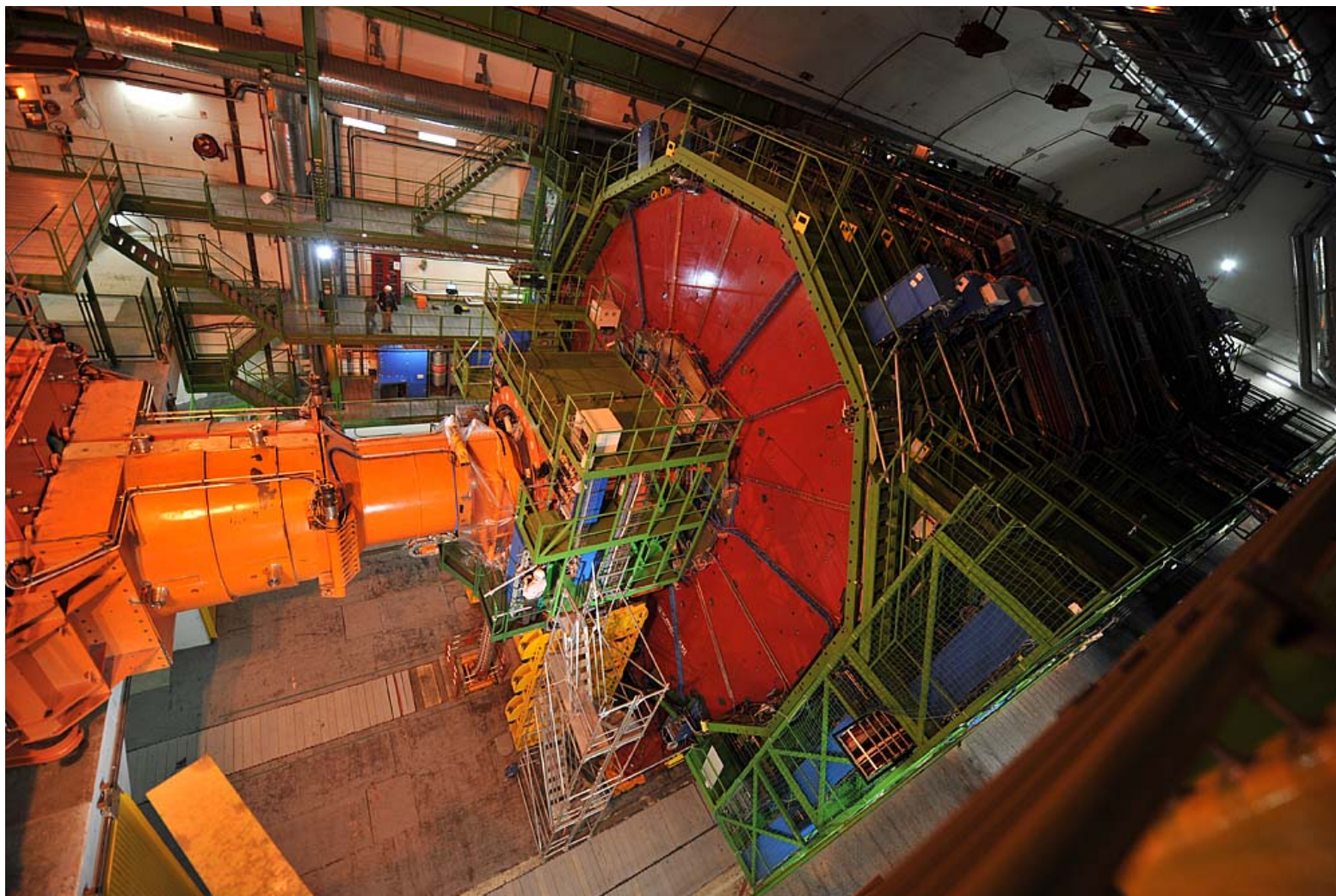
Detektor CMS – przejście cząstki przez detektor



Wizyta Petera Higgs'a w CMS



Detektor zamknięty (09.2008)



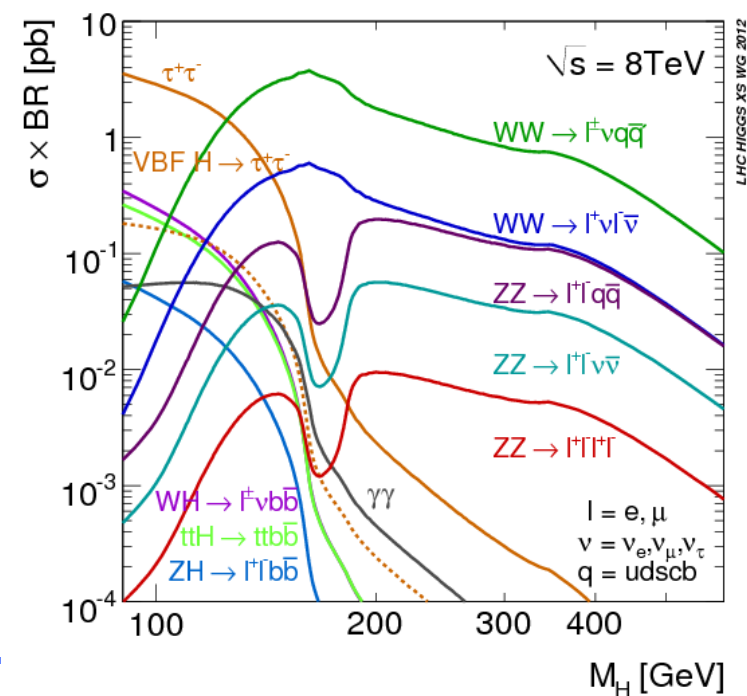
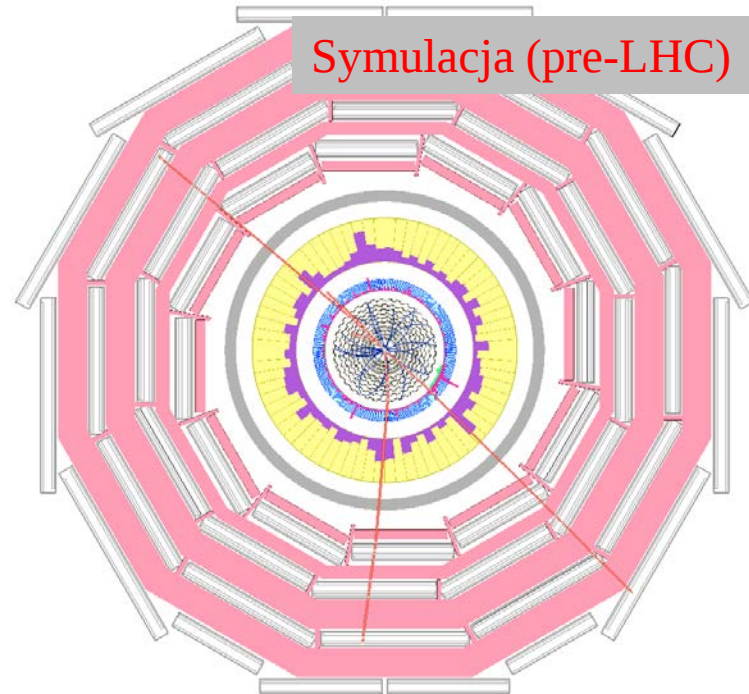
Przykład: Co jest potrzebne aby
odkryć $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$?

Złoty kanał $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$

$$H \rightarrow Z^0 Z^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$$

- Dominuje produkcja niestowarzyszonego bozonu Higgsa ($gg \rightarrow H$, wkład od $qq \rightarrow qqH$ ok. 10%)
- Powyżej m_H ok. 180 GeV cz. Higgsa rozpada się głównie na pary WW, ZZ. Jednak nawet dla $m_H \geq 120 \text{ GeV}$ (ZZ*) możliwość obserwacji sygnału
- Czysty sygnał (niewielkie tło) ze względu na
 - dużą liczbę mionów w stanie końcowym
 - duży pęd mionów
 - wszystkie miony z PV
 - izolacja minowa (ze względu na nie-hadronowy rozpad H i Z, wspomagany dodatkowo brakiem stowarzyszonych cząstek w produkcji H)

Symulacja (pre-LHC)



CMS

Compact Muon Solenoid

Cele przy projektowaniu CMS:

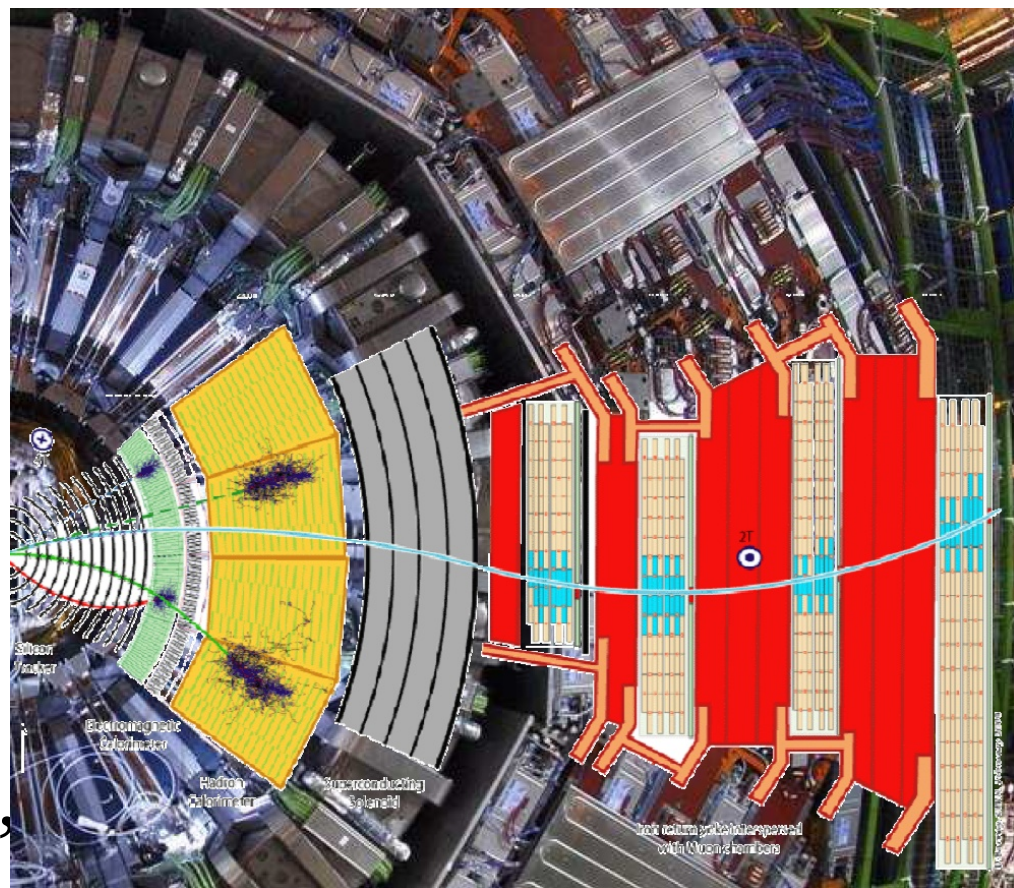
1. Bardzo dobry i niezawodny system mionowy
2. Najlepszy możliwy ECAL kompatybilny z 1)
3. Najwyższej jakości detektor śladowy, wspierający 1) and 2)
4. Detektor realistyczny finansowo

-Trzy typy det. mionowych $|\eta| < 2.4$

-4T solenoid, dł. 13m, śr. 6m

-Wysokiej rozdzielczości detektor śladowy w oparciu o technologię krzemową

„Spektrometr mionowy”

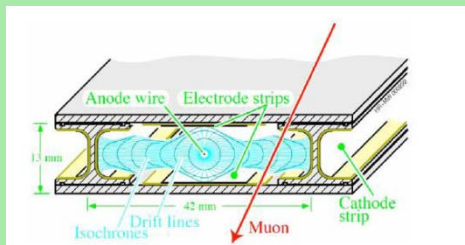


$$\eta = -\ln \tan(\theta/2)$$

Detektory mionowe CMS

DT

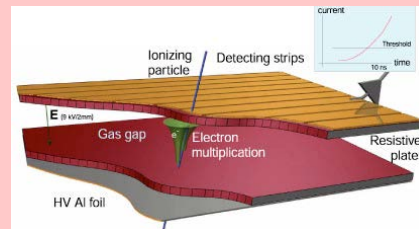
(Drift Tubes)



długi czas dryfu (380ns) – tylko niskie częstotliwości, granulacja 4.2cm
rozdzielczość (komora) $r\phi:100\ \mu\text{m}$, $r\theta:150\ \mu\text{m}$
8 ϕ +4 θ pomiary w statcji (tylko ϕ in MB4)

RPC

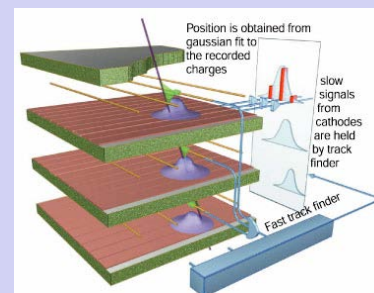
(Resistive Plate Chambers)



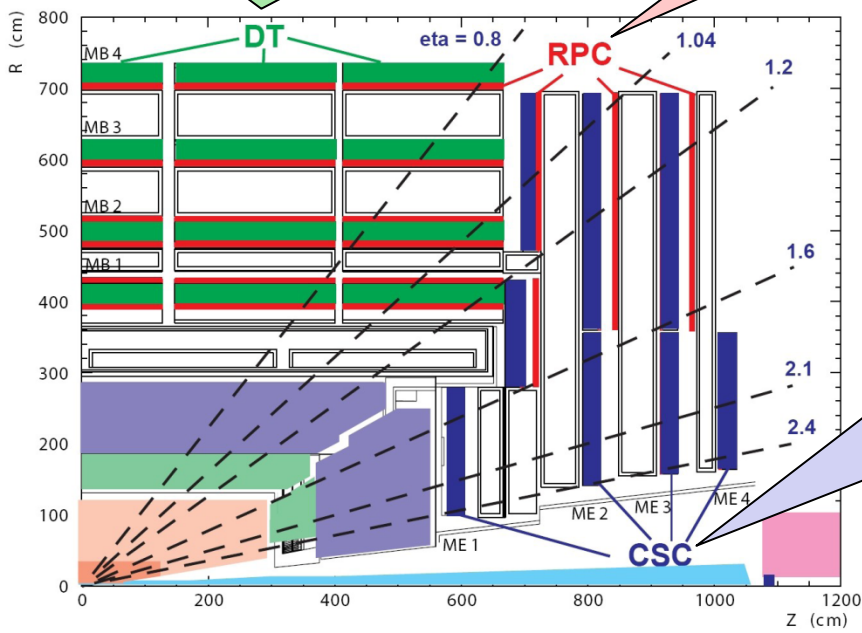
Szybkie det. gazowe ($\sim 2\text{ns}$), ded. do L1
Efektywność $>95\%$ @ 1KHz
Niski szum ($<5\text{Hz/cm}^2$),
tylko pomiar Φ (szer. pasków 0.5-4cm)

CSC

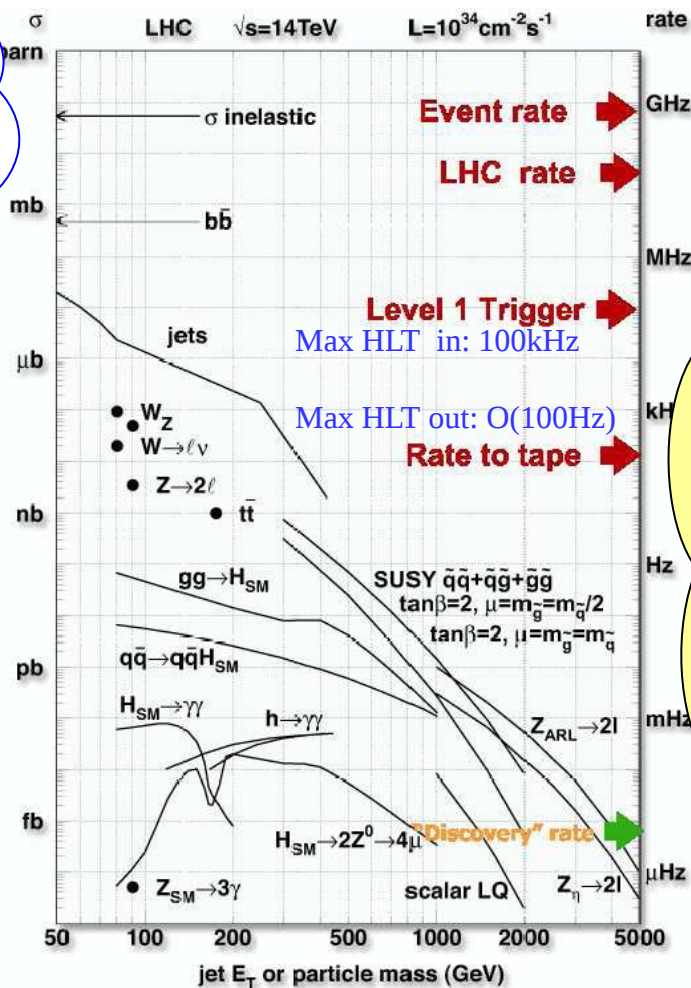
(Cathode Strip Chambers)



szybkie
praca w wysokiej częstotliwości zliczeń,
gęsto upakowane druty (rozd. $R75\text{-}150\ \mu\text{m}$)
i paski 6.7-16mm (rozd. Φ ok. $150\ \mu\text{m}$)

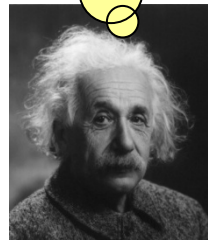


Potrzebny jest system wyzwalania (tryger)

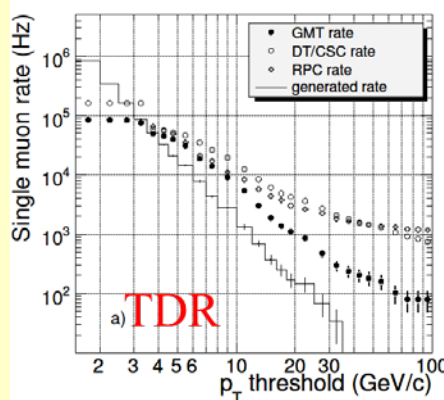


Przypadki zaakceptowane przez pierwszy stopień systemu wyzwalania (dedykowany, programowalny hardware) kierowane są do zespołu procesorów CPU, gdzie podejmowana jest ostateczna decyzja trygera wyższego stopnia (HLT) o odrzuceniu lub zapamiętaniu przypadku.

W LHC przypadki które chcemy znaleźć mogą zachodzić raz na 10^{12} zderzeń p-p



Rekonstrukcja mionów w CMS



Algorytmy implementowane w logice dedykowanego hardware
Kombinacja danych z mionowych detektorów L1 (DT,CSC,RPC)

**The Level-1
Trigger (L1)**

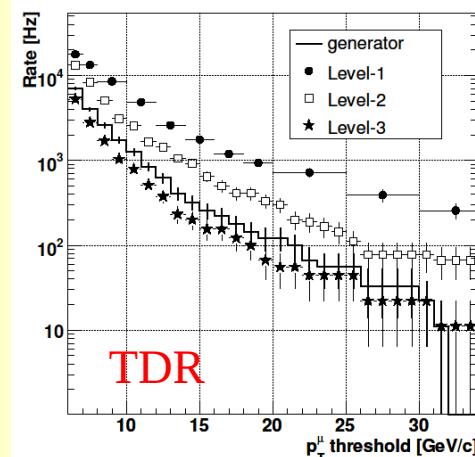
**The High-
Level Trigger
(HLT)**

Rekonstrukcja w czasie rzeczywistym (Online) przypadków zaakceptowanych przez L1; farma komputerowa w PT5

Level-2: (pełna rozdzielczość det. mionowych)

Local Reconstruction + L2 Stand-Alone Muon (m. samodzielne)

Level-3: Dodanie informacji z detektora śladowego (Global Muon)



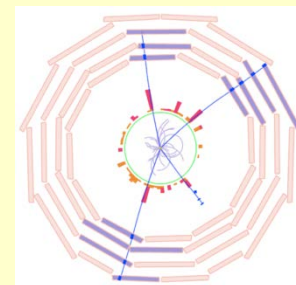
Offline Reconstruction

(przyp. zaakceptowane przez HLT)

Standalone Muons: Rekonstrukcja wszystkich torów (w ramach syst. mionowego)

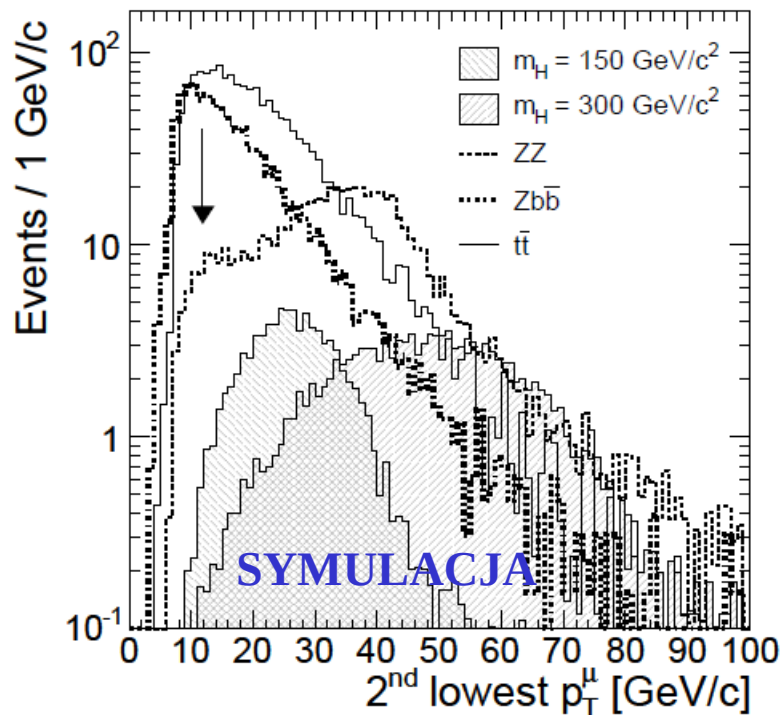
Global Muons: Standalone+det. Śladowy (traker)

(są jeszcze tory zrekonstruowane przez det. śladowy, rozpoznane jako miony)

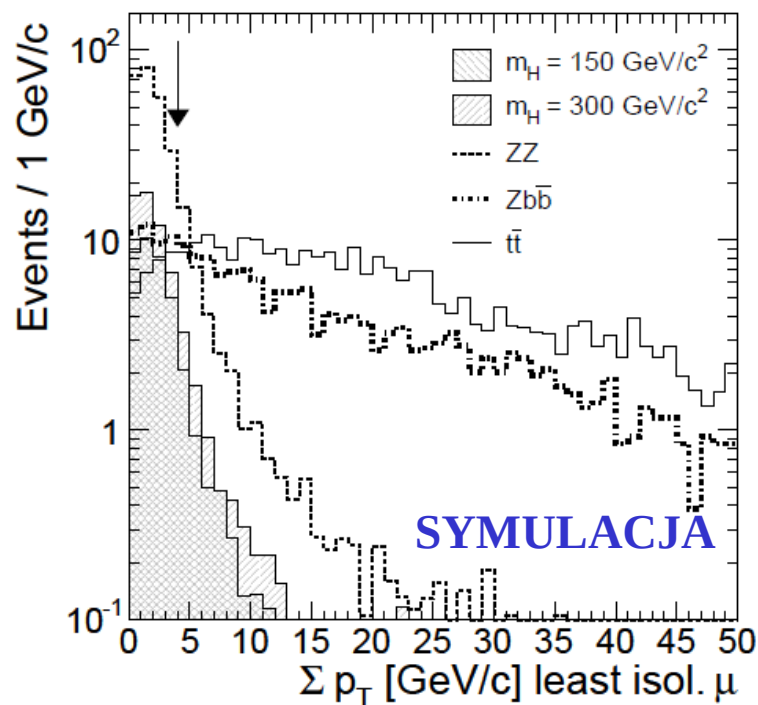


Jak znaleźć $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$ podstawowe cięcia doświadczalne

Cięcie na pędzie poprzecznym

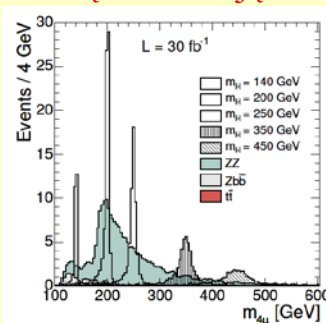


Cięcie izolacyjne



Cięcie izolacyjne – na podstawie pomiaru aktywności $\Sigma E_T, \Sigma p_T$ w stożku $\Delta R = \sqrt{(\Delta\eta^2 + \Delta\phi^2)}$ dokoła mionu.

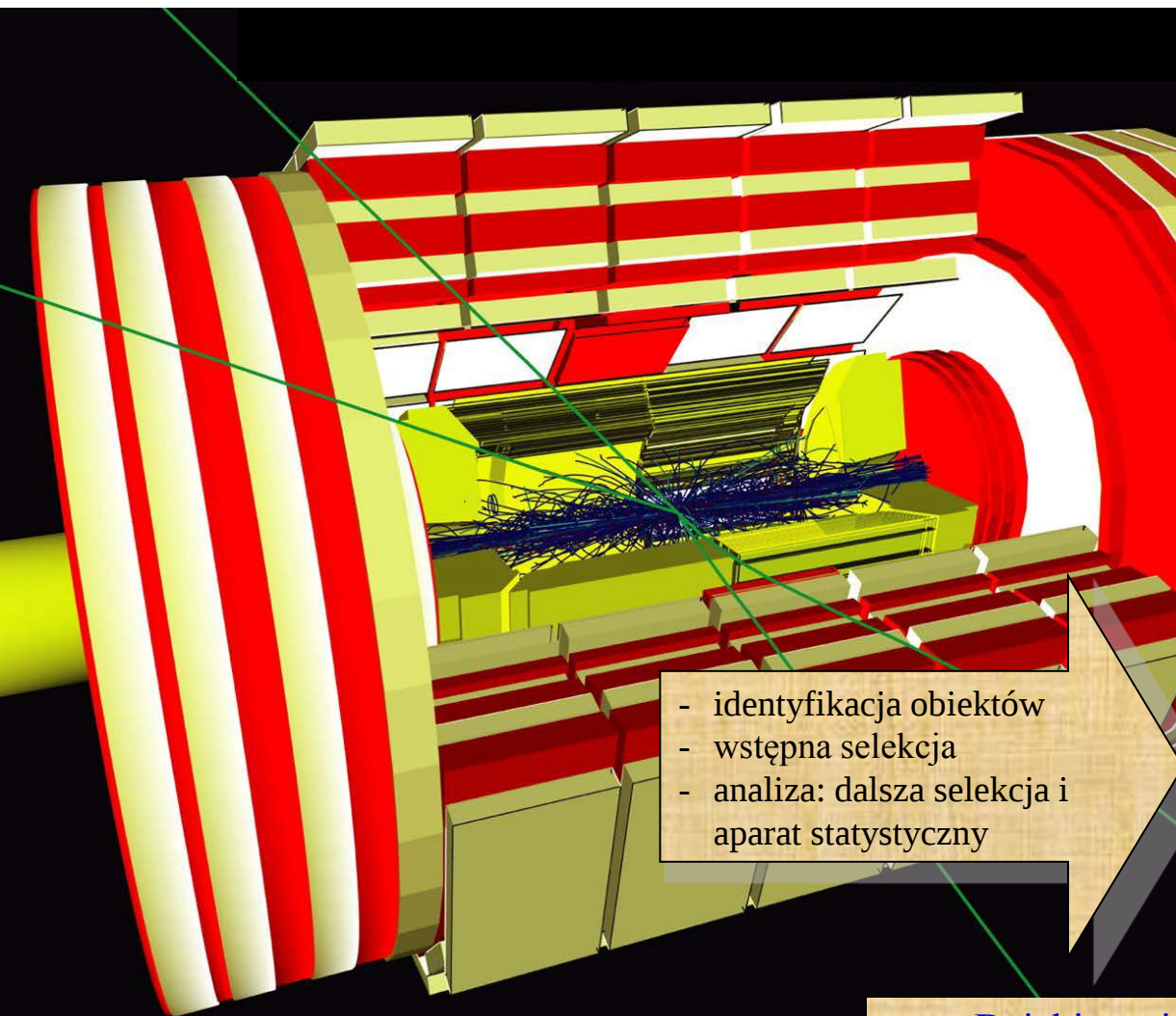
Cząstki pochodzące z rozpadów obiektów ciężkich mają duży pęd (są wysokoenergetyczne, „twarde”). Inne cięcia: wymaganie zgodności masy niezmienniczej par(y) mionów z masą Z, dopasowanie wspólnego wierzchołka, korelacje kątowe, parametr zbliżenia



Wiele cząstek pochodzi z hadronizacji twardych kwarków z początkowego oddziaływania. Kierunek cząstek pochodzących z tego samego partonu jest zbliżony – cząstki są w jetach (dżetach, strugach).

Miony pochodzące z rozpadu Higgsa nie są produkowane w jetach (są izolowane). Typowe dla produktów rozpadu ciężkich obiektów

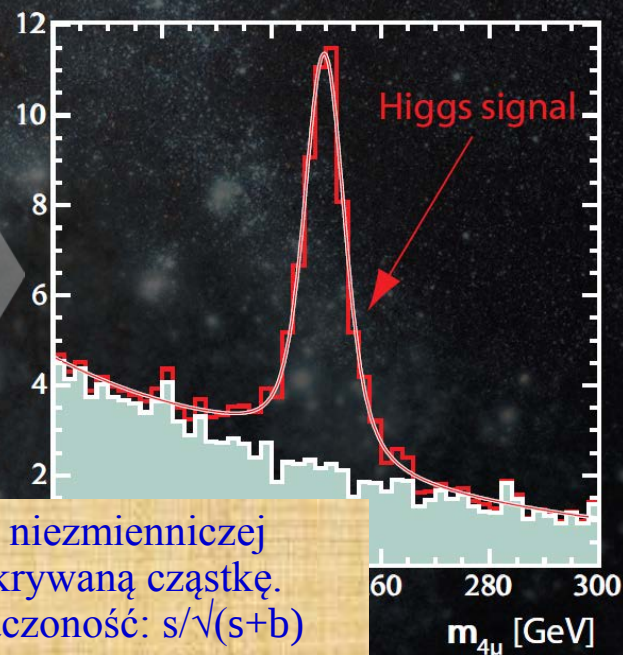
Jak znaleźć: $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$



- 1) W układzie w którym cz. Higgsa spoczywa:
 $\mathbf{p}=0, E=m_H c^2$
- 2) Na mocy zachowania energii i pędu produkty rozpadu:
 $\sum \mathbf{p}_i=0, \sum E_i=m_H c^2$
- 3) Niezmiennik tr. Loentza:
 $(\sum E'_i)^2 - (\sum c\mathbf{p}'_i)^2 = \text{invariant} = (m_H c^2)^2$

- identyfikacja obiektów
- wstępna selekcja
- analiza: dalsza selekcja i aparat statystyczny

Symulacja bozonu Higgsa o masie 250 GeV rozpadającego się na 4 miony



SYMULACJA

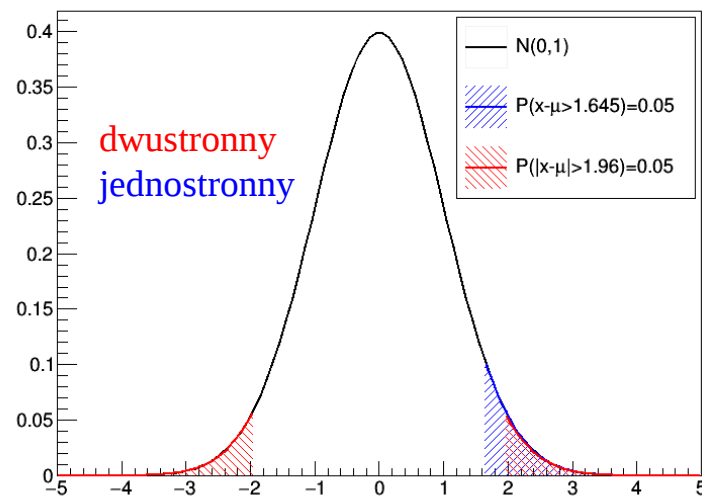
Dzięki masie niezmienniczej „widzimy” odkrywającą cząstkę.
Tradycyjnieznaczoność: $s/\sqrt{(s+b)}$

testowanie hipotez -idea



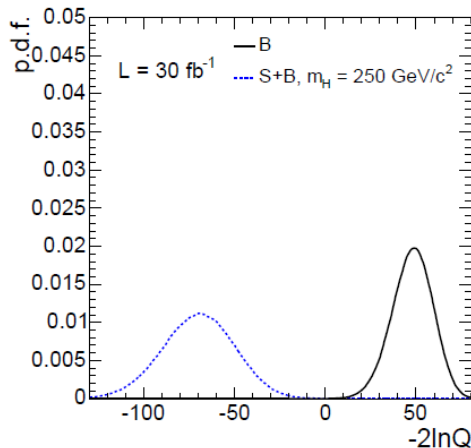
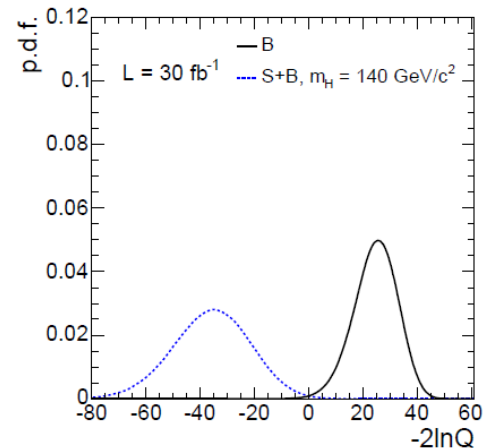
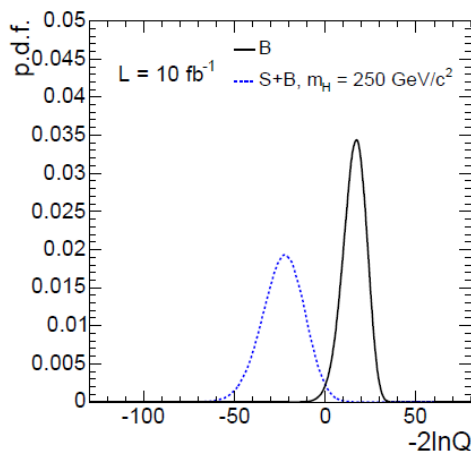
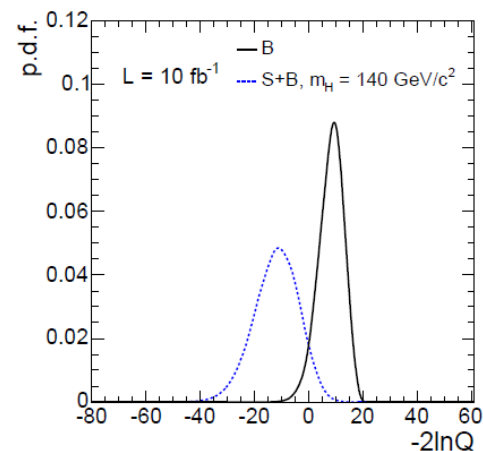
- Definiujemy **hipotezę zerową H_0** oraz **hipotezę alternatywną H_1** . Hipotezy H_1 i H_0 wykluczają się (i mogą być przeciwstawne). Prawdziwość hipotezy H_0 poddajemy próbie
- Testem hipotezy zerowej H_0 przeciwko hipotezie alternatywnej H_1** nazywamy statystykę (**statystykę testową**), której wartości pozwalają zdecydować o odrzuceniu H_0 .
- Wyznaczamy **obszar krytyczny** – zakres parametrów statystyki świadczących przeciwko hipotezie zerowej. Zbiór wartości testu, przy którym H_0 jest odrzucana to obszar krytyczny (obszar odrzucenia)
- Weryfikujemy H_0 . Wynik:
hipotezę H_0 należy odrzucić/hipotezy H_0 nie można odrzucić.
Odrzucenie hipotezy zerowej oznacza przyjęcie (przeciwstawnej) hipotezy alternatywnej. brak podstaw do odrzucenia H_0 nie świadczy to o prawdziwości ani o fałszywości H_0 .

Statystyka – dowolna funkcja zmiennych losowych stanowiących próbę, nie zawierająca nieznanymi parametrów



testowanie hipotez w oparciu o funkcje największej wiarygodności (idea)

Funkcja gęstości prawdopodobieństwa to unorm. rozkład $-2\ln Q$
dla dużej liczby pseudo-eksperymentów wykonanych na
symulowanych danych zawierających sygnał+tło lub tylko tło

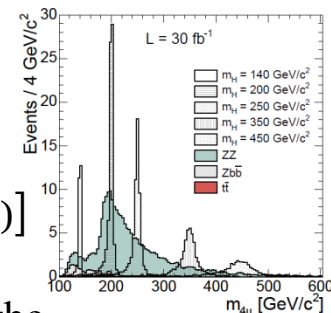


Statystyczna metoda (log-likelihood),
polegająca na analizie log. dwóch
funkcji prawdopodobieństw: pojawienia
się danych w przypadku sygnału+tło
oraz tylko tło.

$$Q = \frac{L_{S+B}}{L_B}$$

Funkcja testowa:

$$-2 \ln Q(m_H) = 2 \sum_{i=1}^N [s_i - n_i \ln(1 + s_i / b_i)]$$



$i=1, N$ numeruje oczekiwaną liczbę
przypadków sygnału, tła oraz zrekonstruowane
przypadki w pewnym przedziale analizowanym
(np. masy niezmi.) .
Porównanie wyniku eksperymentu (pojedyncza
wartość $-2\ln Q$ dla testowanej wartości m_H) z
przewidywaniami hipotez „sygnał+tło” oraz „tylko
tło” pozwala na wnioskowanie z jakim
prawdopodobieństwem znaleźliśmy (lub nie) cz.
Higgsa o danej masie.

testowanie hipotezy higgosa w LHC (skrót)

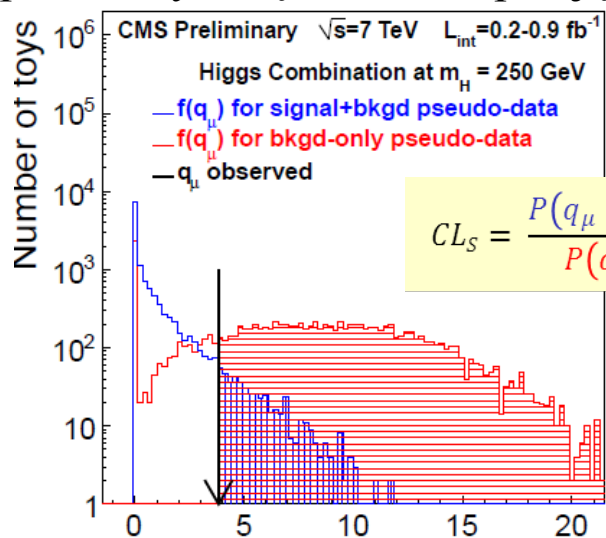
Funkcje testowe używane przez ATLAS i CMS:

$$q_\mu = -2 \ln \frac{L(\text{data}|\mu, \hat{\theta}_\mu)}{L(\text{data}|\hat{\mu}, \hat{\theta})}$$

$$q_0 = -2 \ln \frac{L(\text{data}|0, \hat{\theta}_0)}{L(\text{data}|\hat{\mu}, \hat{\theta})}$$

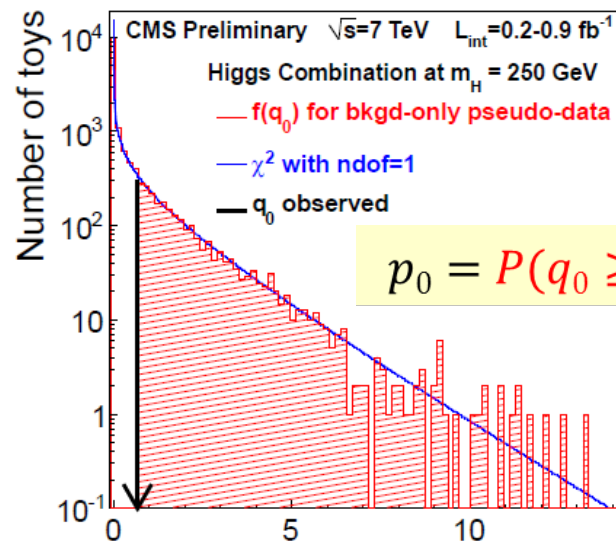
μ – wzmacnienie sygnału ($\sigma/\sigma_{\text{SM}}$),

θ – parametry uciążliwości, opisujące nieprecyzyjną znajomość warunków (eff, L, ...)



$$CL_S = \frac{P(q_\mu \geq q_\mu^{obs} | \mu s + b)}{P(q_\mu \geq q_\mu^{obs} | b)}$$

Test Statistic q_μ ($\mu=2$)



$$p_0 = P(q_0 \geq q_0^{obs})$$

Test Statistic q_0

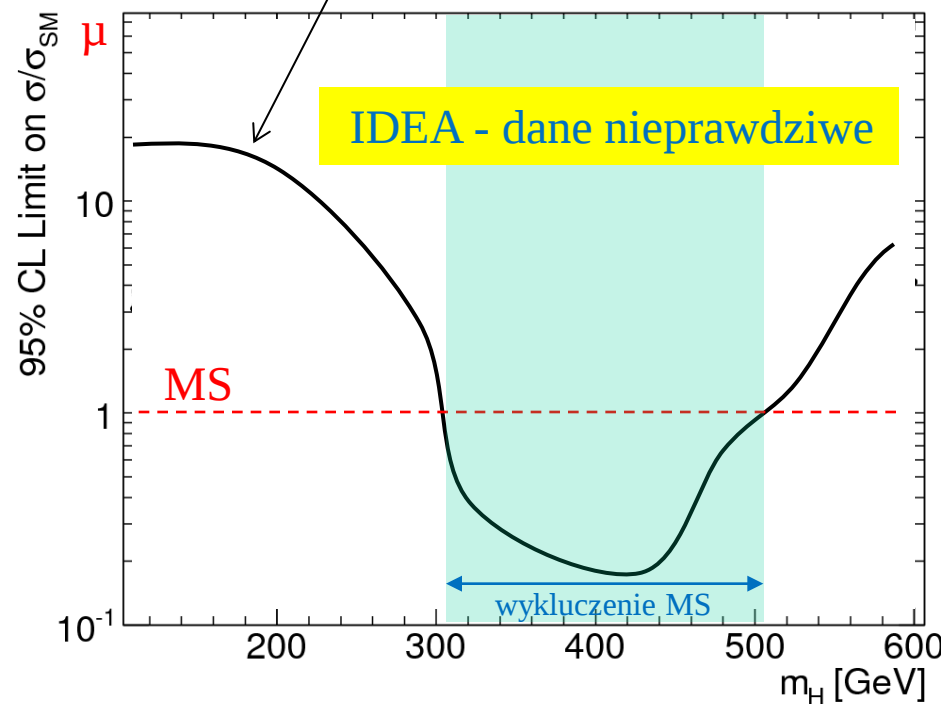
Hipotezę (μ -sygnał+tło) wykluczamy na poziomie α (0.95) gdy $CL_S < 1-\alpha$. W praktyce badamy μ dla którego $CL_S = 0.05$

Małe p_0 (p-value) świadczy o niezgodności danych z hipotezą tylko-tło (nadwyżka przypadków).

Uwaga – patrząc na wiele punktów prawdopodobieństwo znalezienia fluktuacji wzrasta (efekt LEE-look elsewhere effect) – konieczna korekta znaczości.

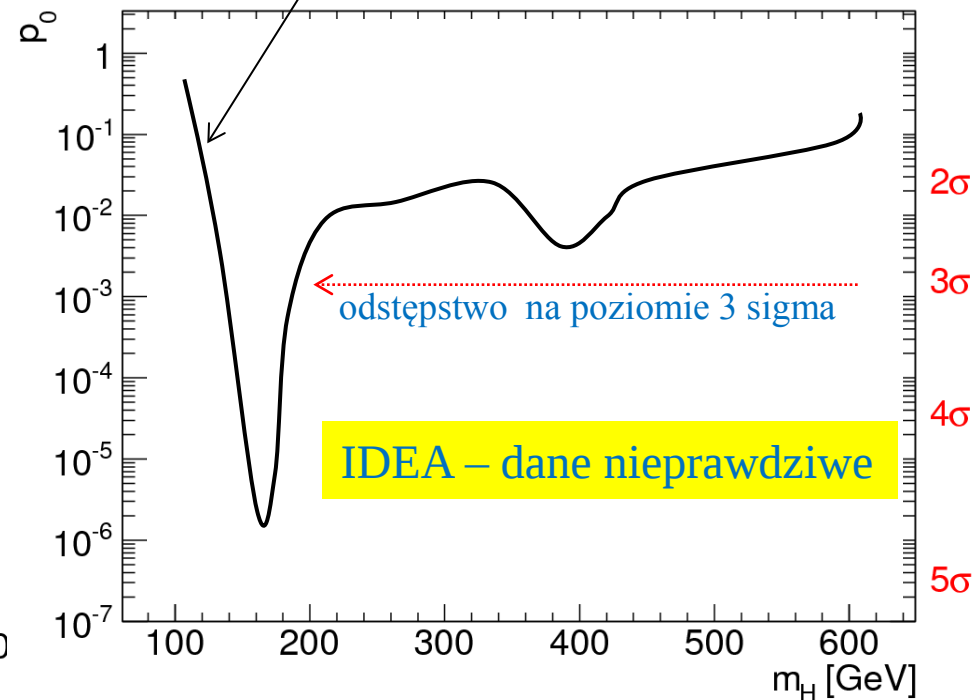
LHC - typy wykresów wykluczenia i odkrycia

wzmocnienie sygnału dla którego
wykluczamy hipotezę $\mu \cdot \text{sygnał} + \text{tło}$
na poziomie ufności 95%



wykres wykluczenia

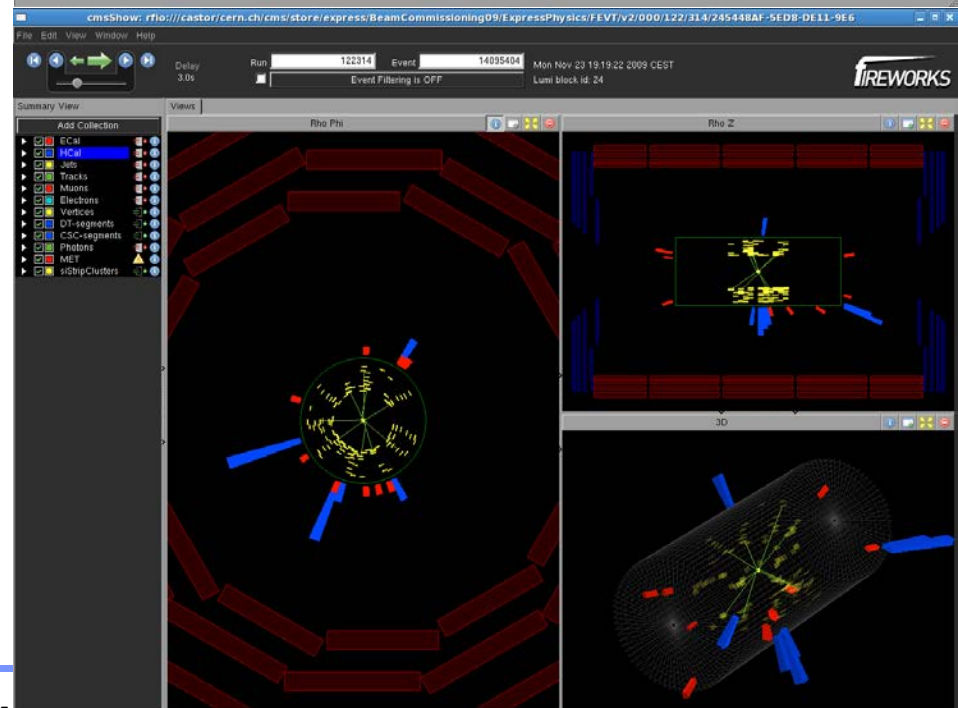
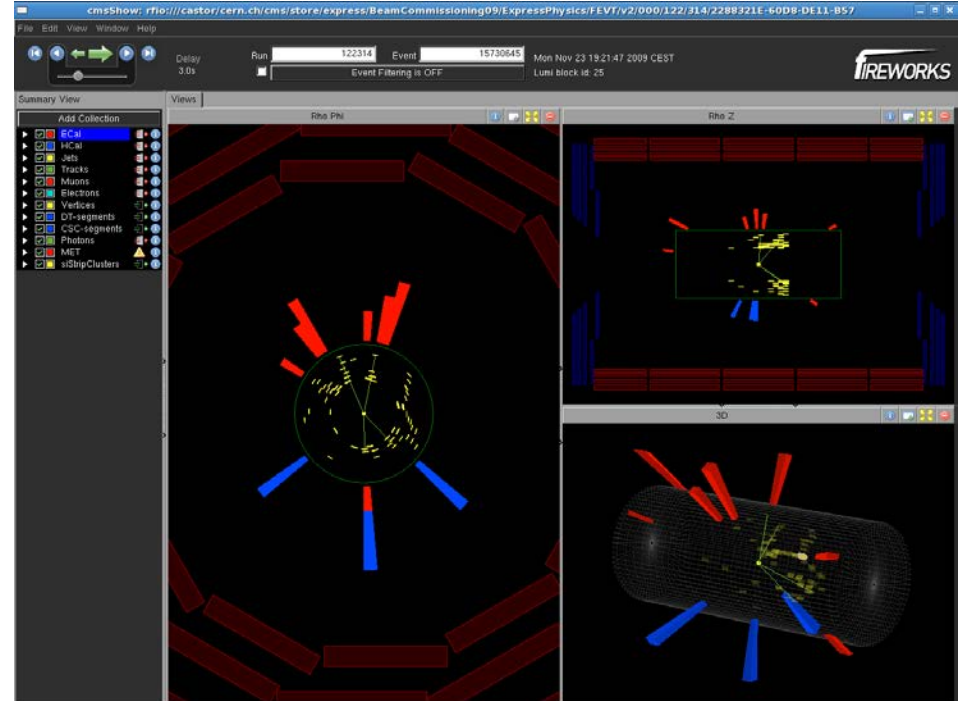
położenie w rozkładzie
prawdopodobieństwa dla tła



wykres odkrywczy
(uwaga: niezgodność z hipotezą
tylko-tło może pochodzić z błędów
szacowania tła)

działanie CMS w Run-1 (2010-2012)

Jesień 2009 – zderzenia w LHC



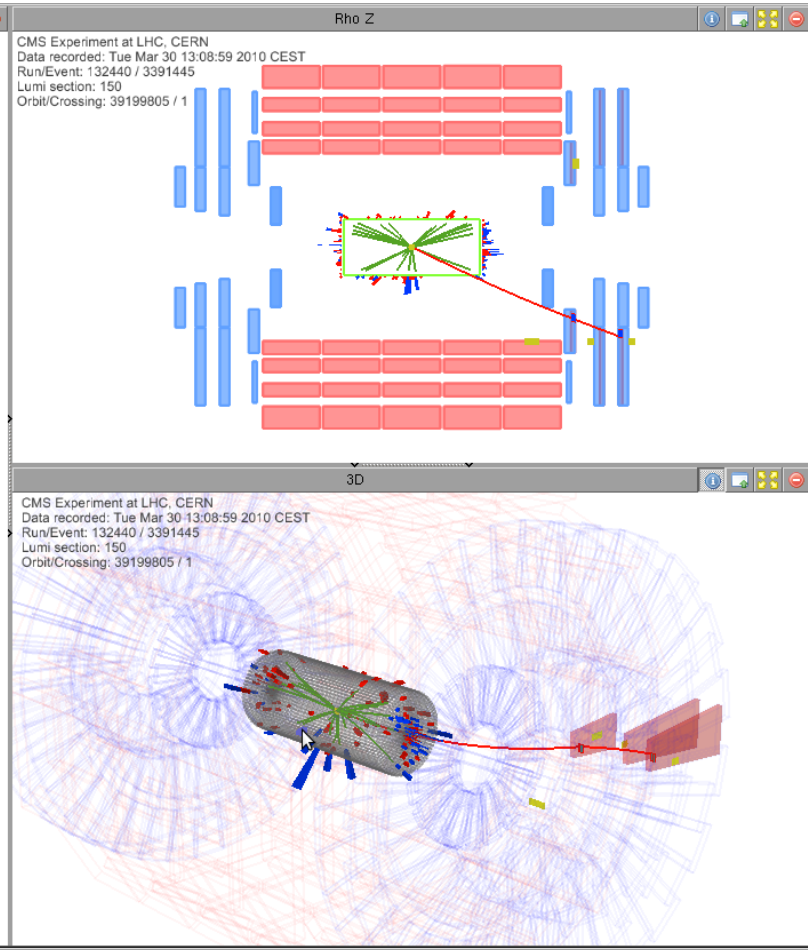
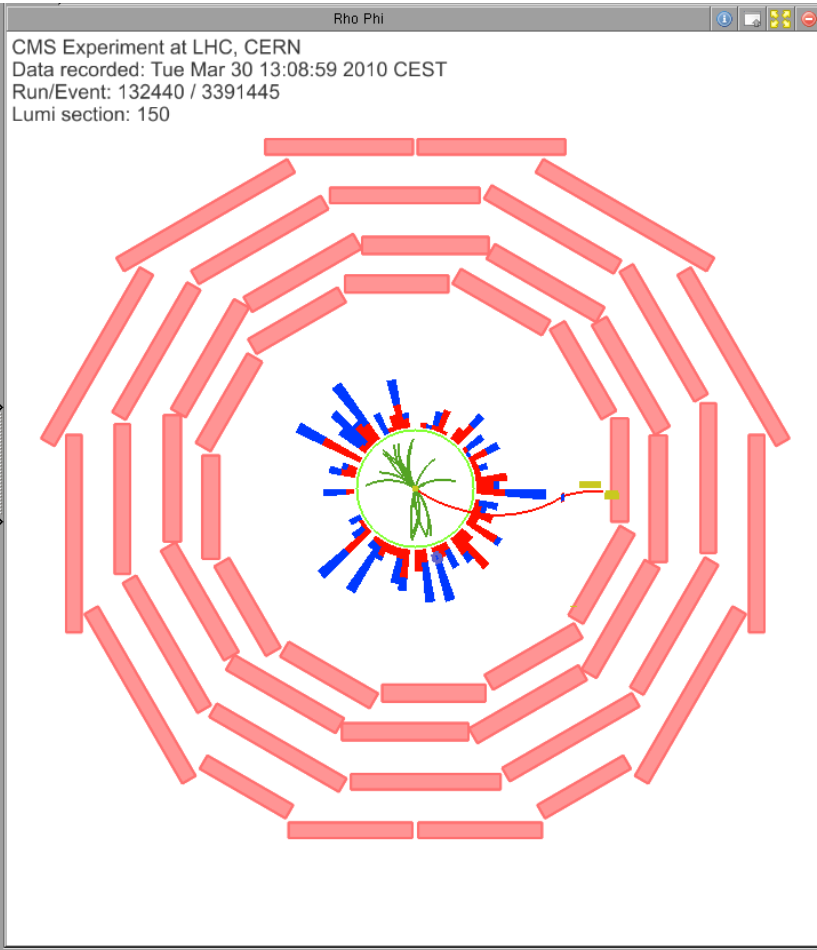
Odkrycie Higgsa dla UO, 13 marca 2018

Add Collection

- ☒ ECal
- ☒ HCal
- ☒ Jets
- ☒ Tracks
- ☒ Muons

	pt	eta	phi
☒ Muon 0	3.1	1.5	-0.6

- ☒ Electrons
- ☒ Vertices
- ☒ DT-segments
- ☒ CSC-segments
- ☒ Photons
- ☒ MET
- ☒ rpcRecHits
- ☒ rpcRecHit 0
- ☒ rpcRecHit 1
- ☒ rpcRecHit 2
- ☒ rpcRecHit 3
- ☒ cscSegments
- ☒ cscSegment 0
- ☒ cscSegment 1
- ☒ csc2DRecHits



$$\sqrt{s} = 7\text{-}8 \text{ TeV:}$$

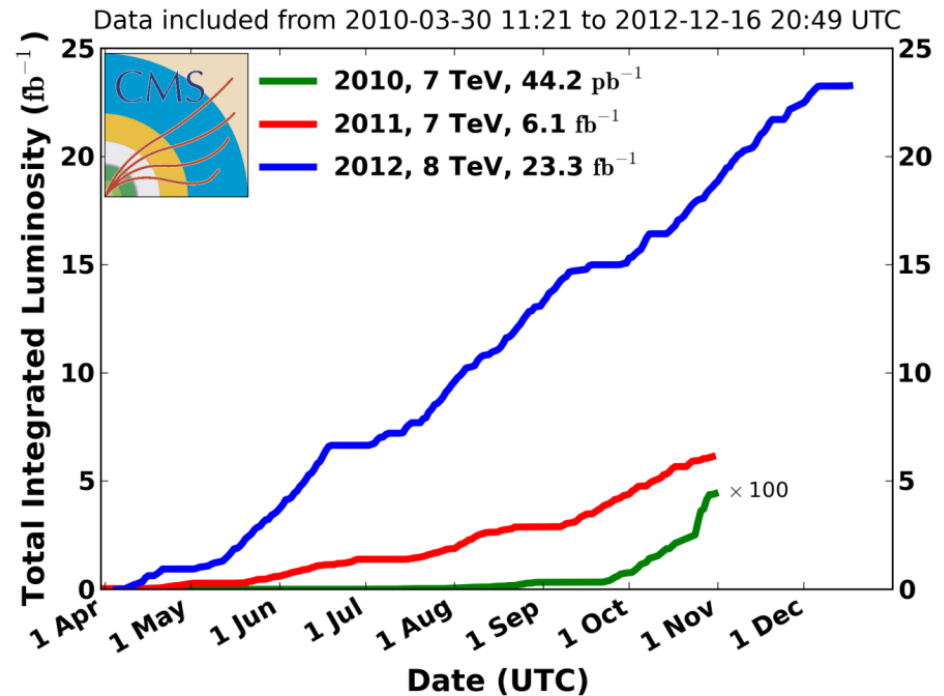
zwiększanie świetlności LHC

Run 1: 2010, 2011, 2012, 2013

Świetlność L jest globalnym parametrem opisującym geometrie i intensywności przecinających się wiązek

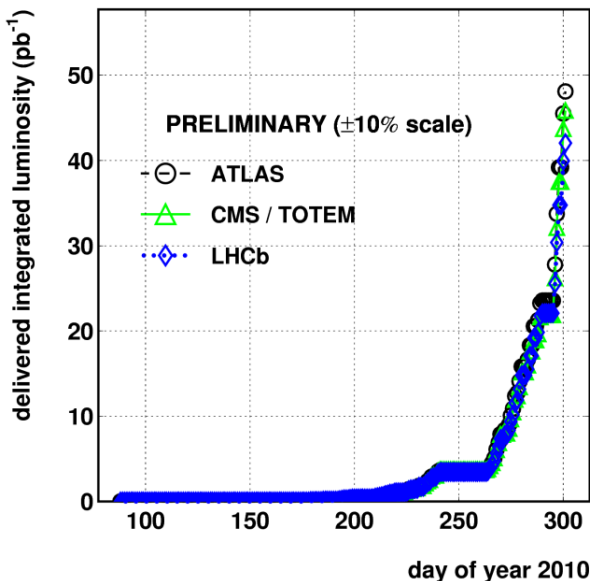
$$N = \sigma \cdot \int L \cdot dt$$

CMS Integrated Luminosity, pp

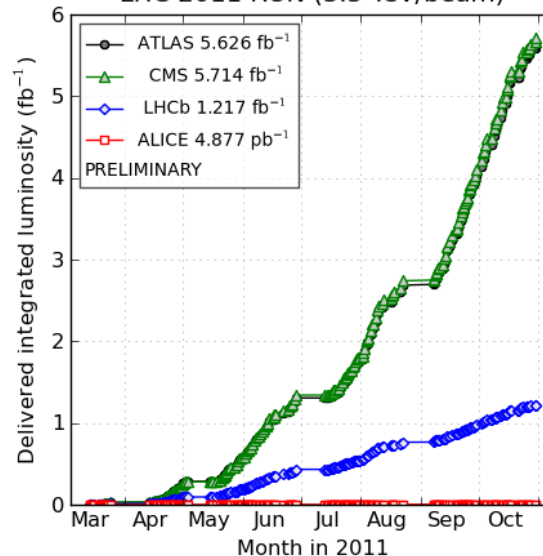


2010/10/29 15.16

LHC 2010 RUN (3.5 TeV/beam)

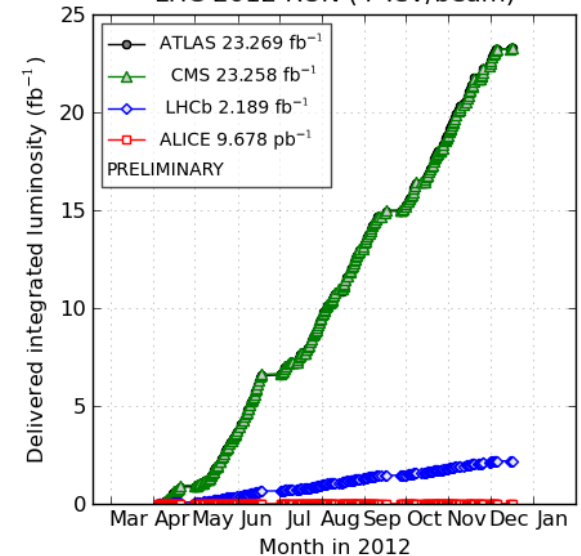


LHC 2011 RUN (3.5 TeV/beam)



(generated 2011-12-01 19:35 including fill 2267)

LHC 2012 RUN (4 TeV/beam)

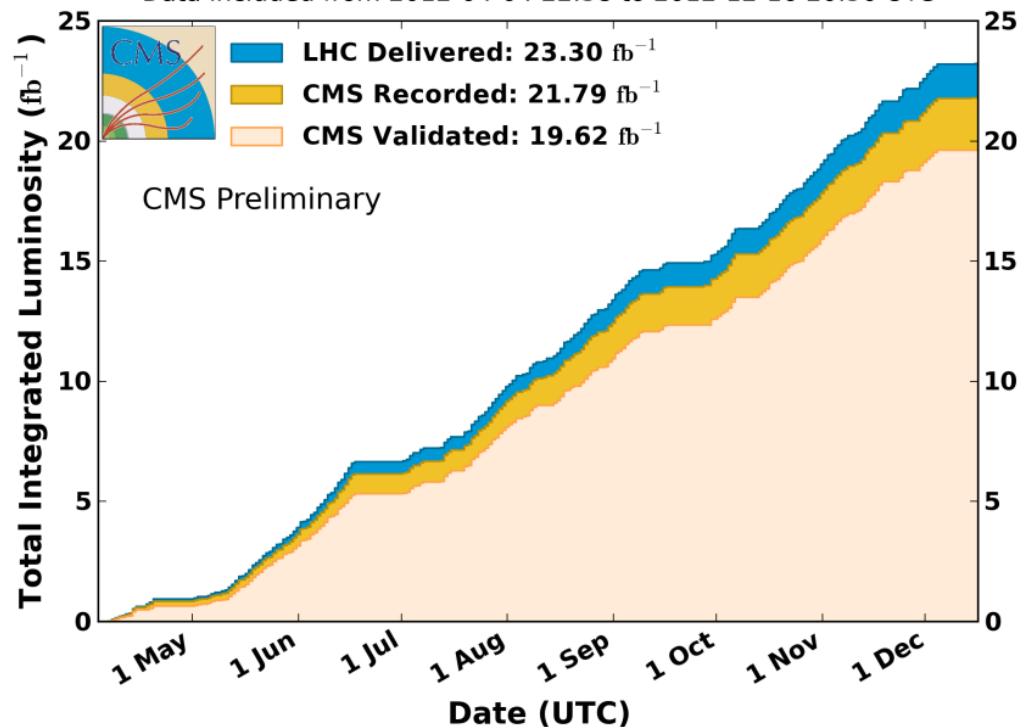


(generated 2012-12-17 08:25 including fill 3453)

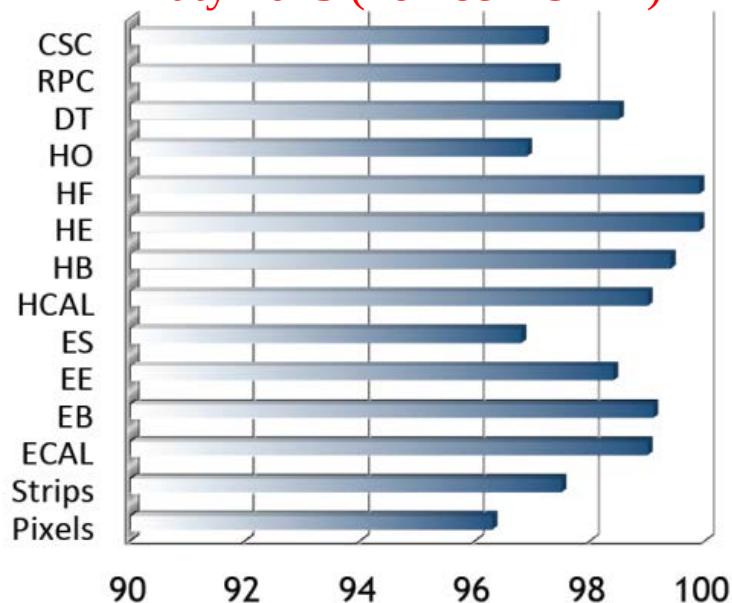
Run-1: CMS działało dobrze dobrze

CMS Integrated Luminosity, pp, 2012, $\sqrt{s} = 8$ TeV

Data included from 2012-04-04 22:38 to 2012-12-16 20:50 UTC



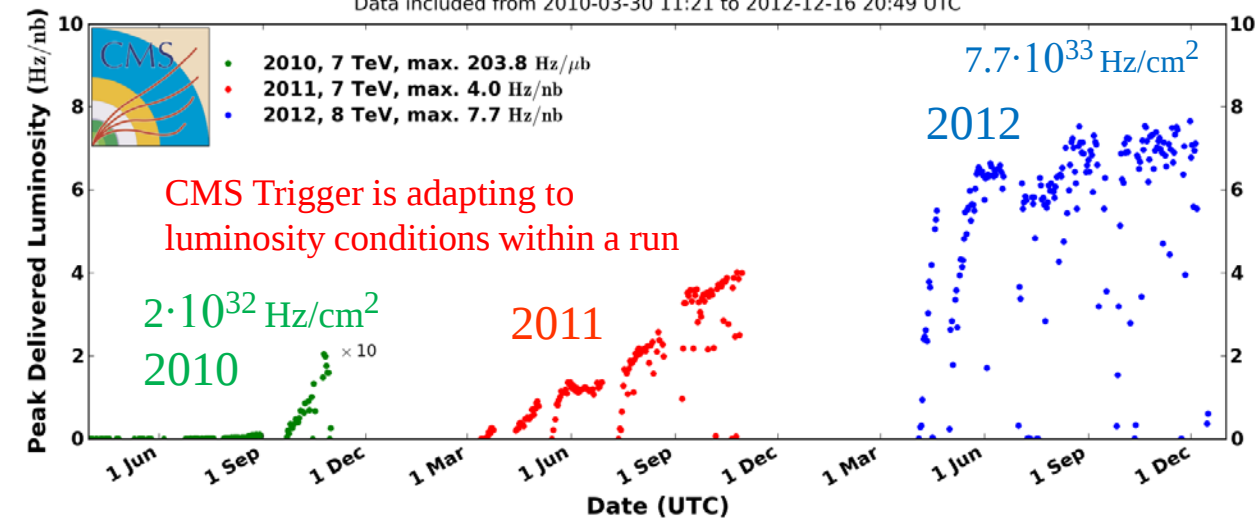
Procent działających kanałów w podsystemach.
Luty 2013 (koniec RUN-1)



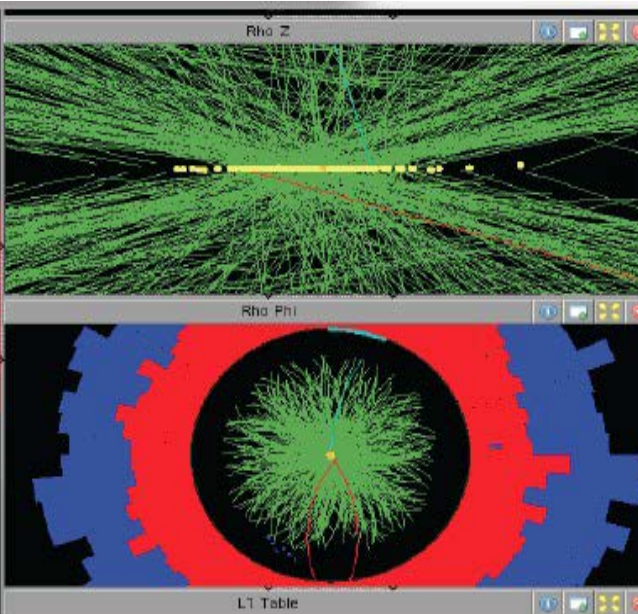
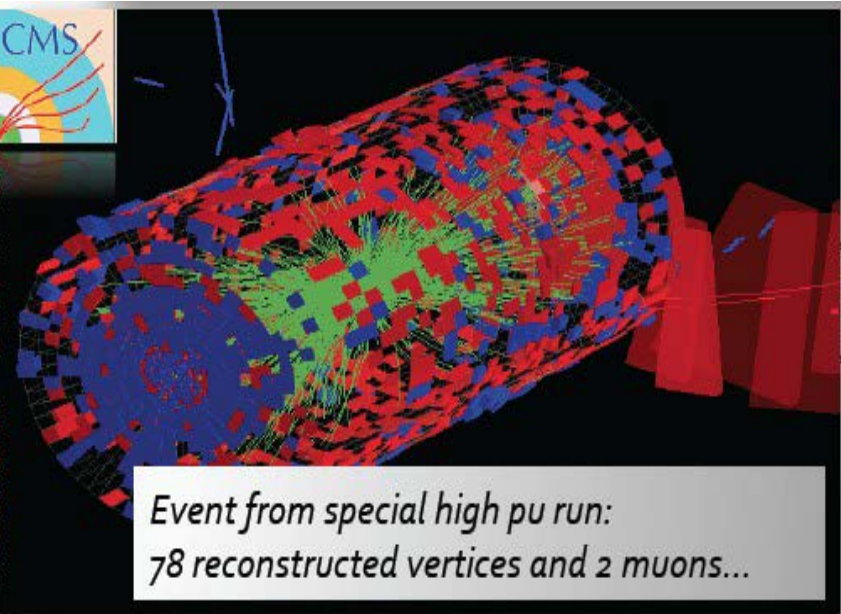
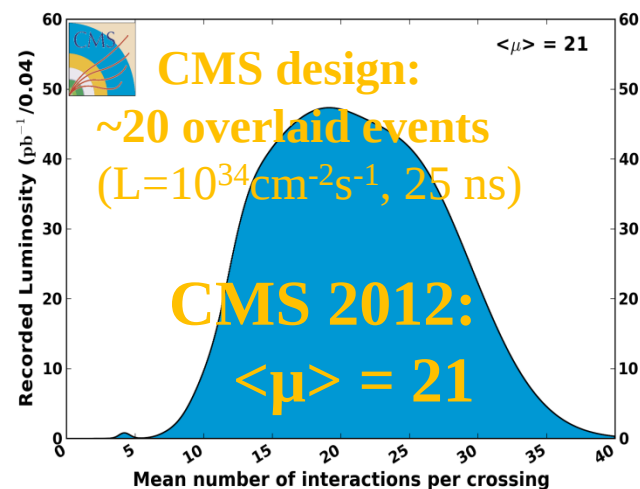
światłość chwilowa

CMS Peak Luminosity Per Day, pp

Data included from 2010-03-30 11:21 to 2012-12-16 20:49 UTC



CMS Average Pileup, pp, 2012, $\sqrt{s} = 8$ TeV



2010:

rapid luminosity increase (5 orders of magnitude).
Peak lumi av. pileup: 3.5

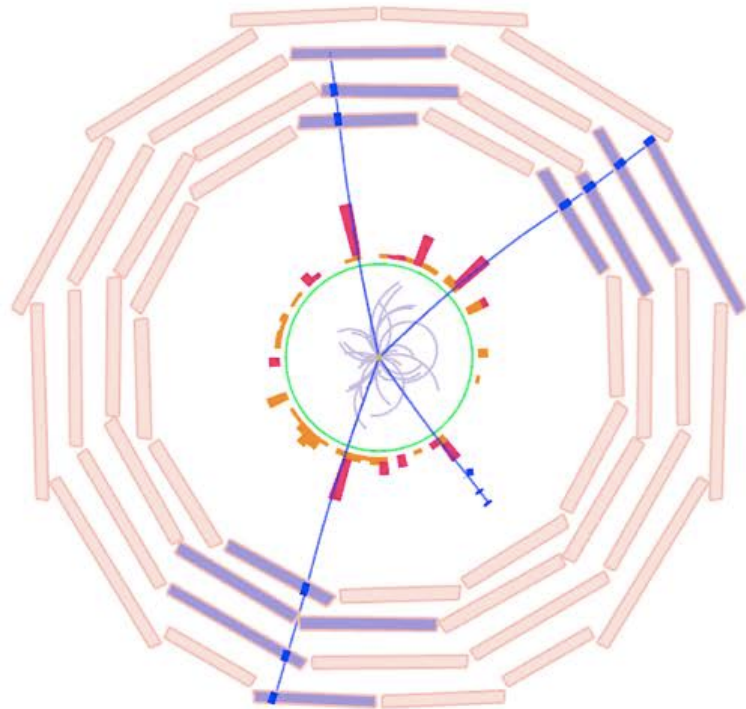
2011:

instantaneous luminosity reached 40% of the nominal LHC luminosity.
Peak lumi. av. pileup: 18.6

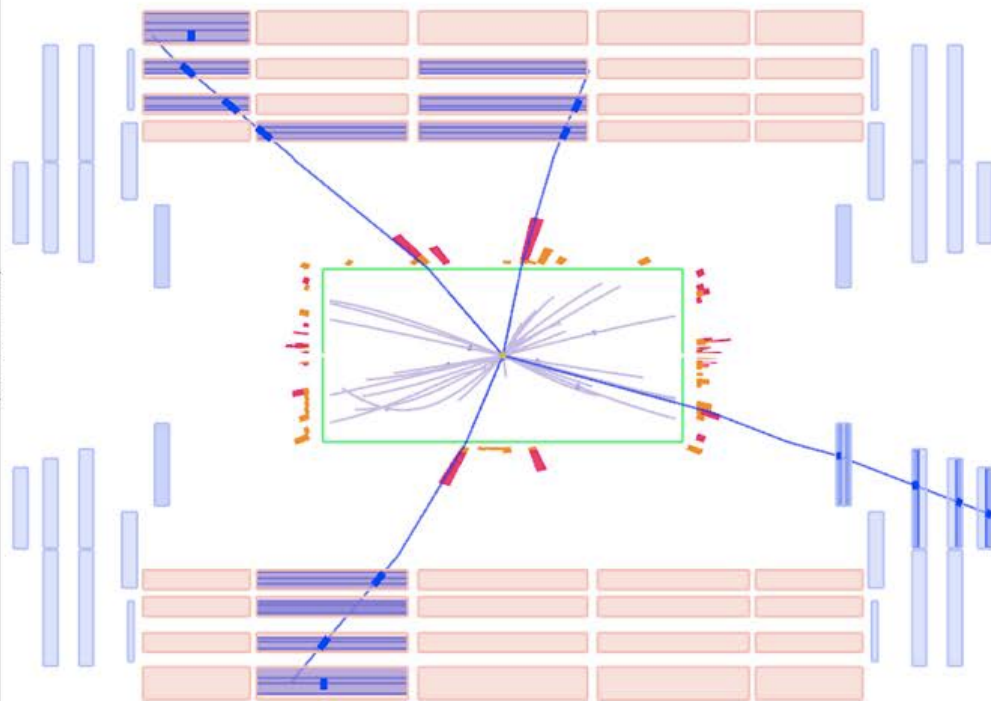
2012:

LHC reached 77% of the nominal luminosity. Pileup reaches experiment design.
Peak lumi. av. pileup: 34.5

Wczesny przypadek $ZZ \rightarrow 4\mu$ (dane 2010)



Run 146511 ev. 504867308,
(24.09.2010 godz. 02:29)



Invariant Masses

$\mu_0 + \mu_1$: 92.15 GeV (total(Z) p_T 26.5 GeV, ϕ -3.03),
 $\mu_2 + \mu_3$: 92.24 GeV (total(Z) p_T 29.4 GeV, ϕ +.06),
 $\mu_0 + \mu_2$: 70.12 GeV (total p_T 27 GeV),
 $\mu_3 + \mu_1$: 83.1 GeV (total p_T 26.1 GeV).

Invariant Mass of 4μ : 201 GeV



CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2011-Jun-21 02:24:29.299380 GMT(04:24:29 CEST)

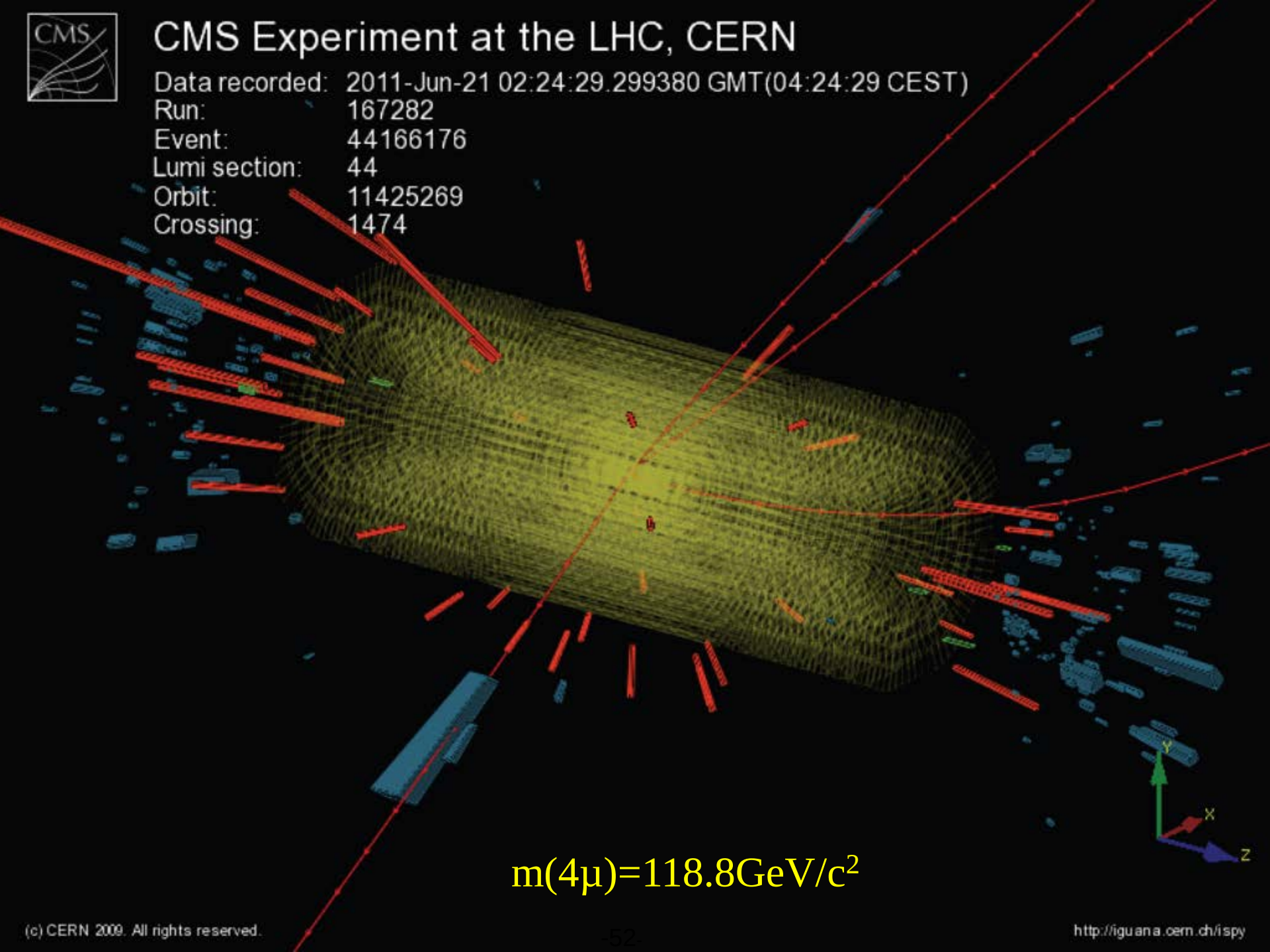
Run: 167282

Event: 44166176

Lumi section: 44

Orbit: 11425269

Crossing: 1474



$$m(4\mu)=118.8\text{GeV}/c^2$$

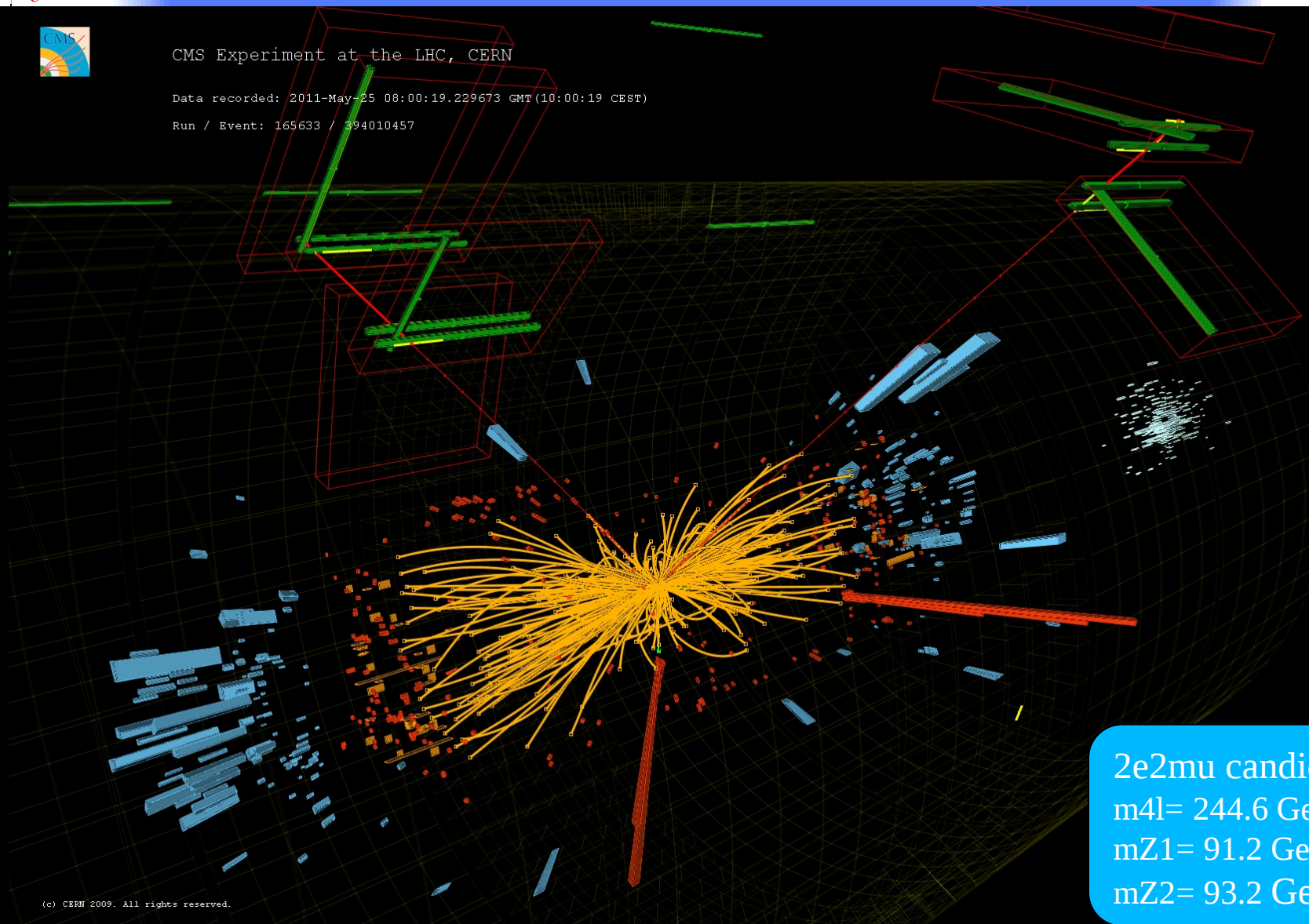
(kandydat) $ZZ \rightarrow 2e2\mu$



CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2011-May-25 08:00:19.229673 GMT (10:00:19 CEST)

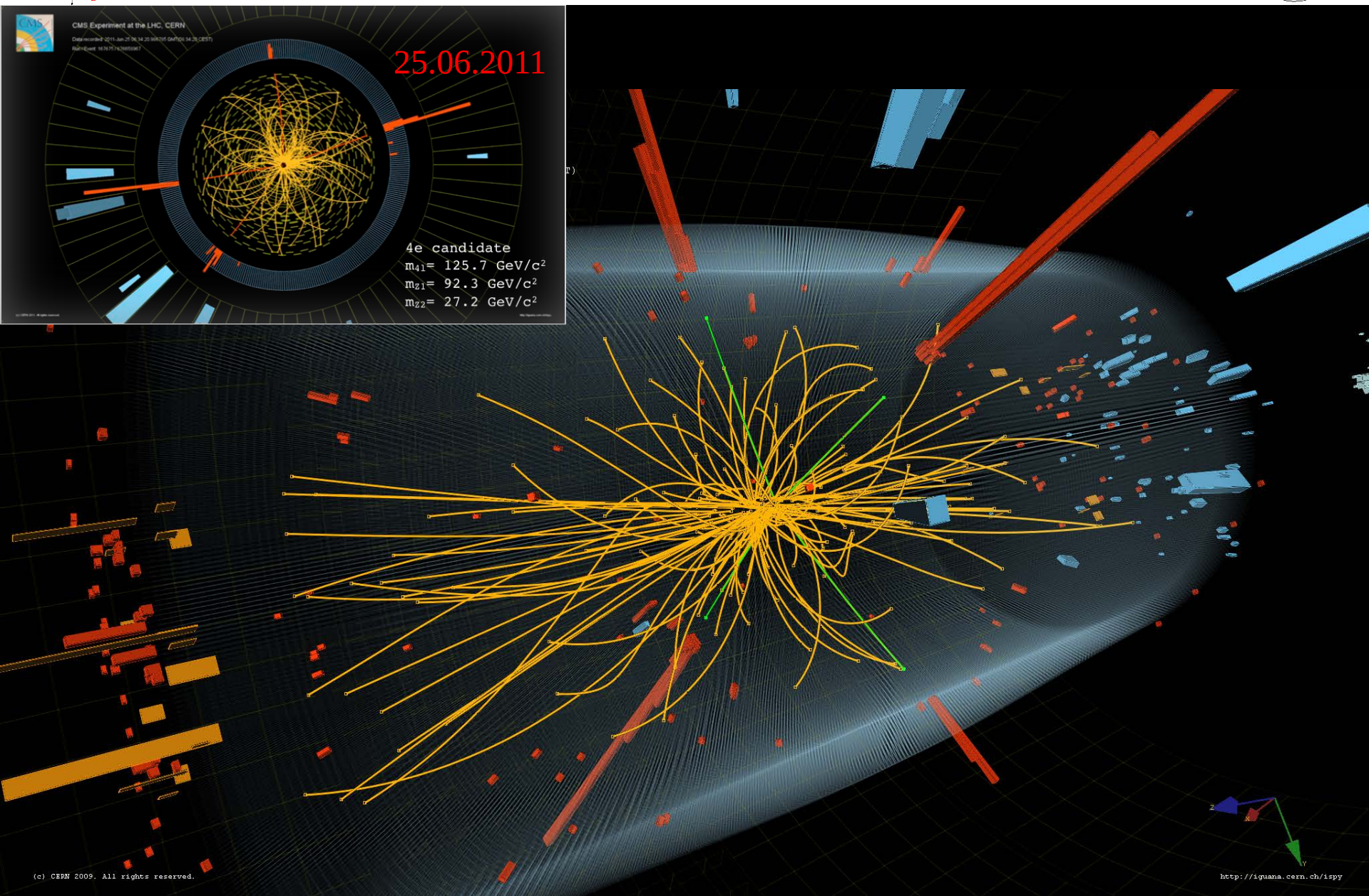
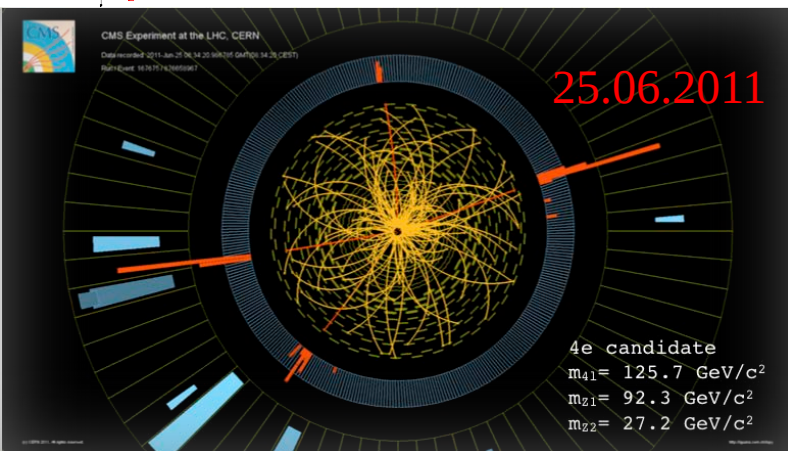
Run / Event: 165633 / 394010457



2e2mu candidate:
 $m_{4l} = 244.6 \text{ GeV}/c^2$
 $m_{Z1} = 91.2 \text{ GeV}/c^2$
 $m_{Z2} = 93.2 \text{ GeV}/c^2$

(c) CERN 2009. All rights reserved.

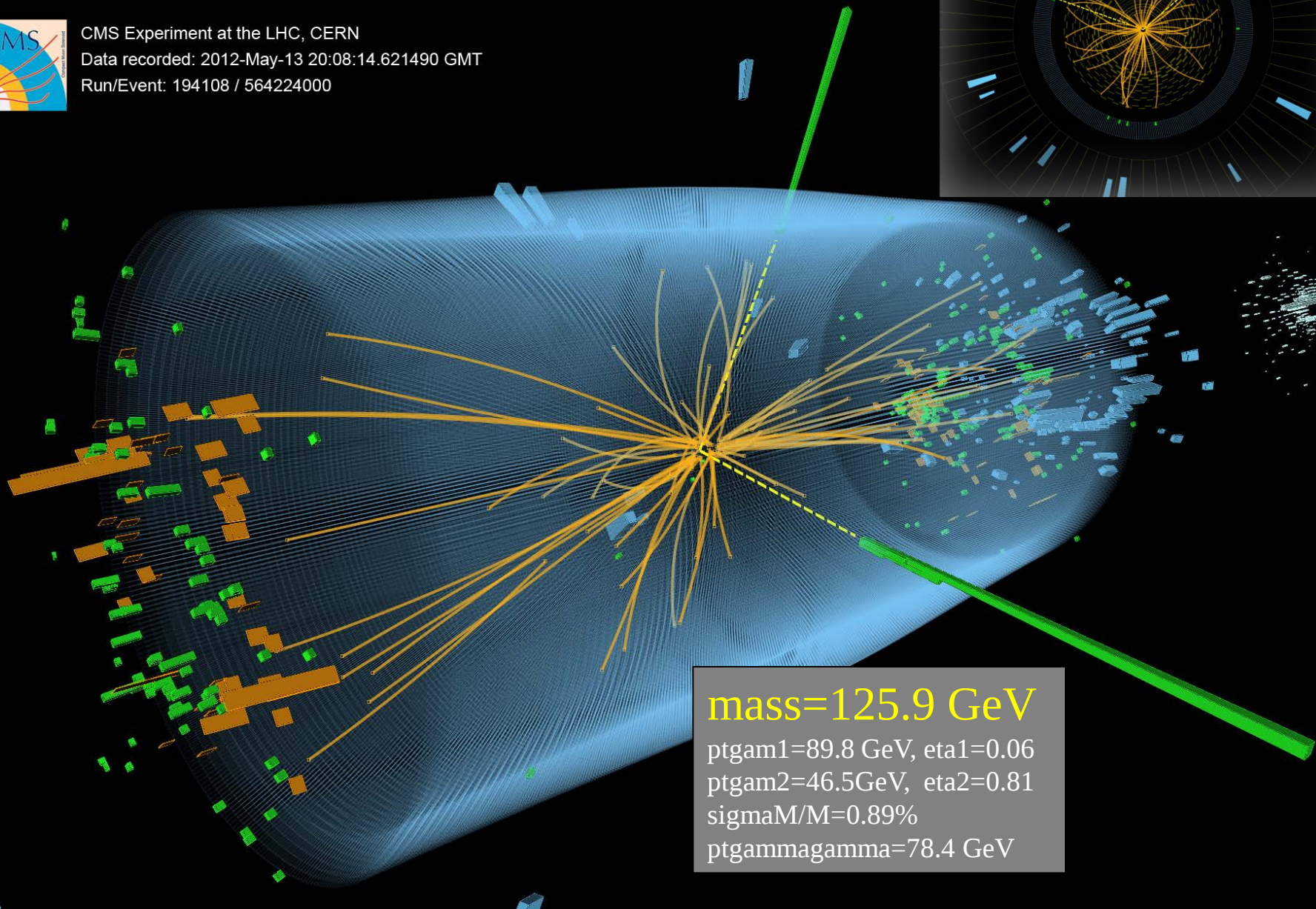
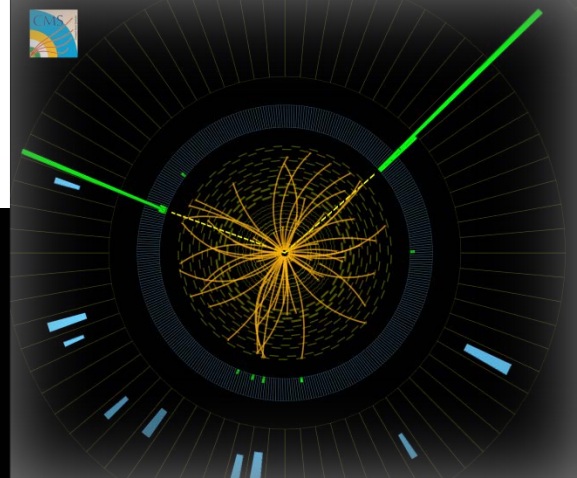
$ZZ \rightarrow 4e$



Kandydat na $H \rightarrow \gamma\gamma$



CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2012-May-13 20:08:14.621490 GMT
Run/Event: 194108 / 564224000



mass=125.9 GeV

ptgam1=89.8 GeV, eta1=0.06

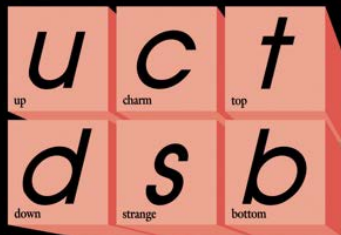
ptgam2=46.5 GeV, eta2=0.81

sigmaM/M=0.89%

ptgammagamma=78.4 GeV

ODKRYCIE CZĄSTKI HIGGSA – NAJWAŻNIEJSZY (OBECNIE) WYNIK LHC

Quarks



Forces



Leptons

H
Higgs
boson

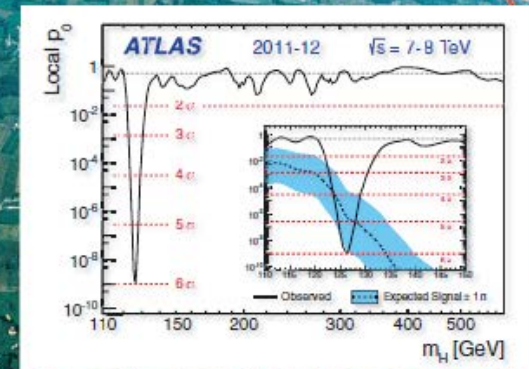
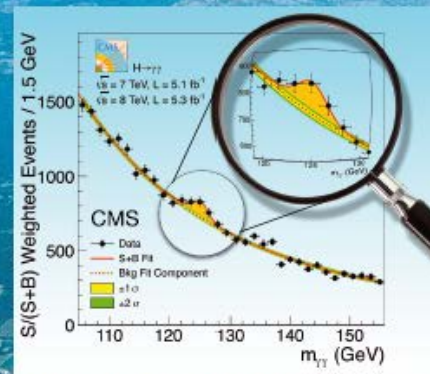
Ogłoszenie obserwacji
nowej cząstki, - bozonu Higgsa
4.07.2012

zobacz też: <http://cms.fuw.edu.pl/>



Published:
Physics Letters B 716,
17 Sep. 2012

First observations of a new particle
in the search for the Standard
Model Higgs boson at the LHC

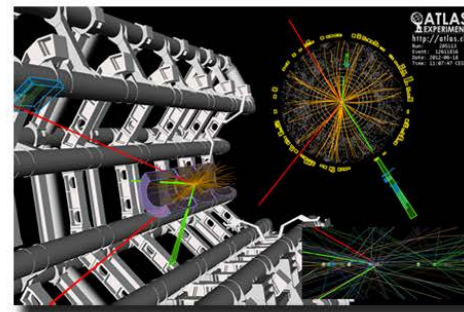
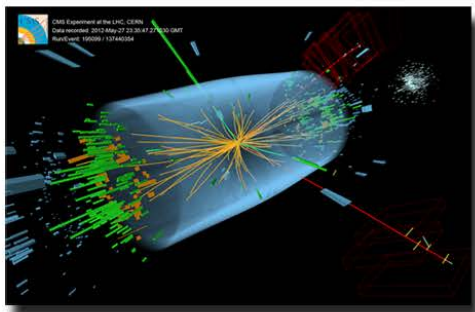


www.elsevier.com/locate/physletb

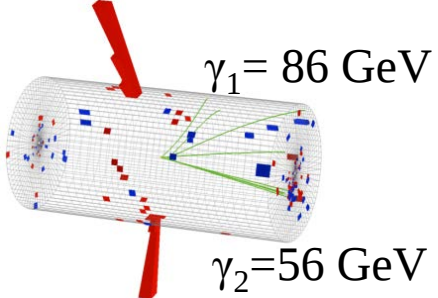
Nagroda Nobla 2013



Nagroda przyznana F. Englertowi i P. Higgsowi “za teoretyczne odkrycie mechanizmu, który poszerza naszą wiedzę o pochodzeniu mas cząstek elementarnych, i który został niedawno potwierdzony przez odkrycie postulowanej cząstki dokonane przez eksperymenty ATLAS i CMS działające w CERN-ie przy Wielkim Zderzaczu Hadronów (LHC)”

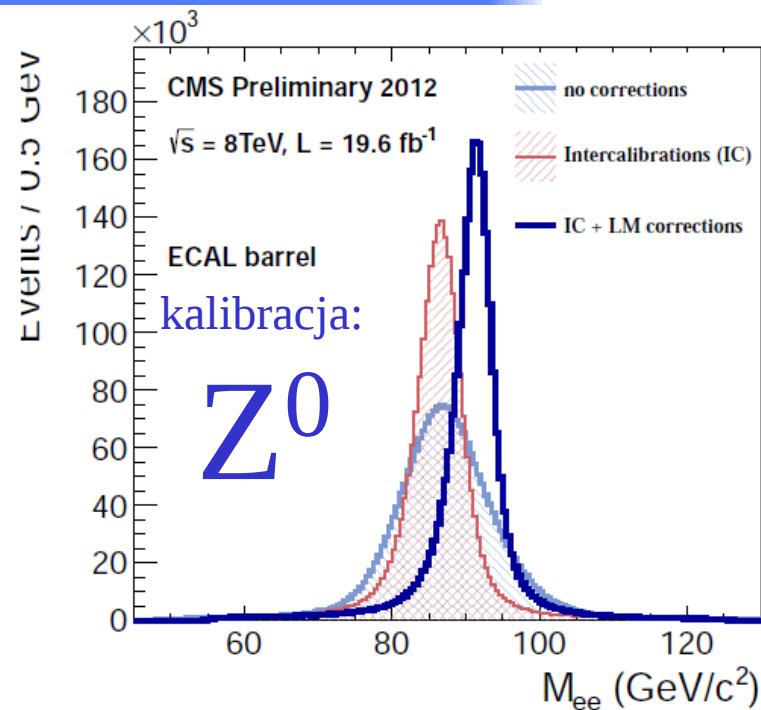


cz. Higgsa w CMS (Run-1)

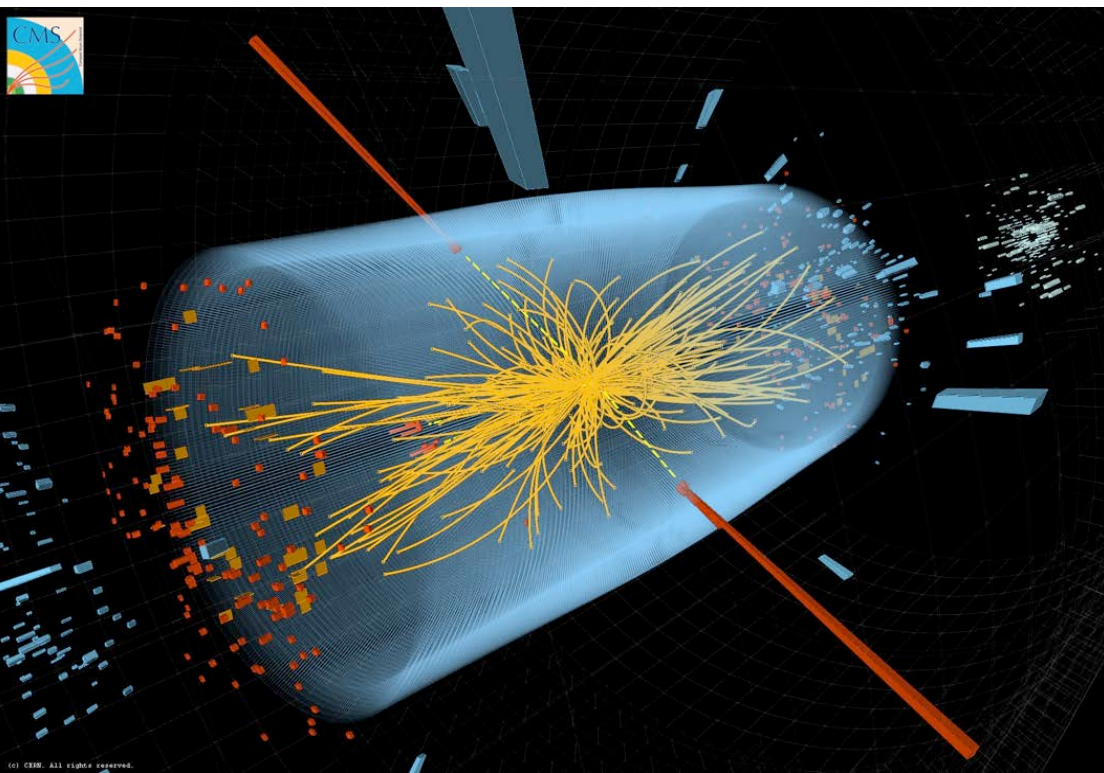


małe masy: kanał $H \rightarrow \gamma\gamma$

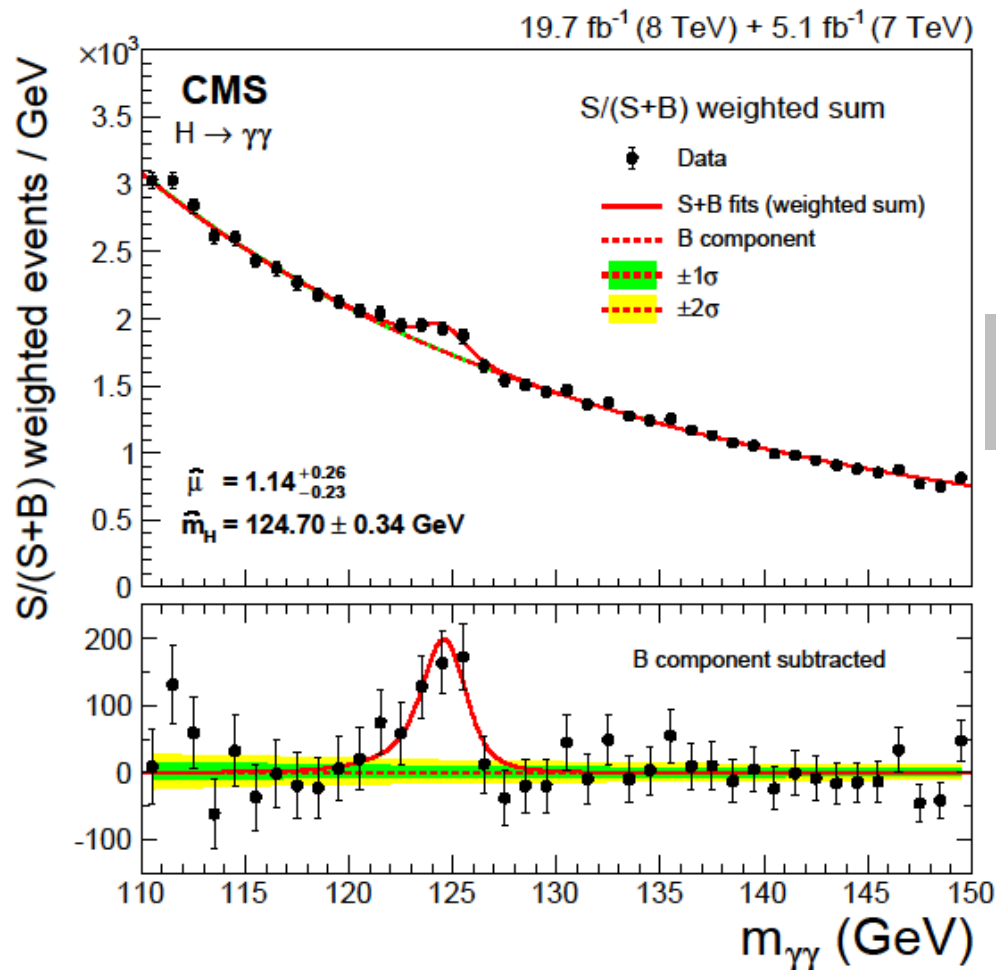
prosta sygnatura: dwa wysokoenergetyczne,
izolowane fotony ($p_T \text{ min} \sim 40 \text{ GeV}/c$),
oczekiwany wąski pik sygnału lecz duże tło
tło nieredukowalne $pp \rightarrow \gamma\gamma X$, redukowalne: $pp \rightarrow \gamma j X$
główne tło od dżetów z wiodącym π^0



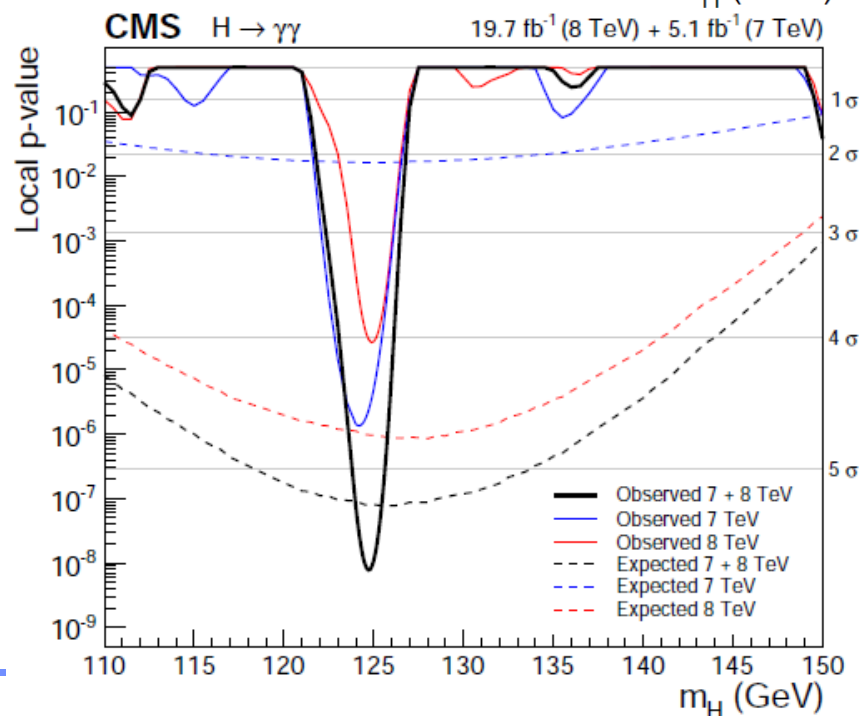
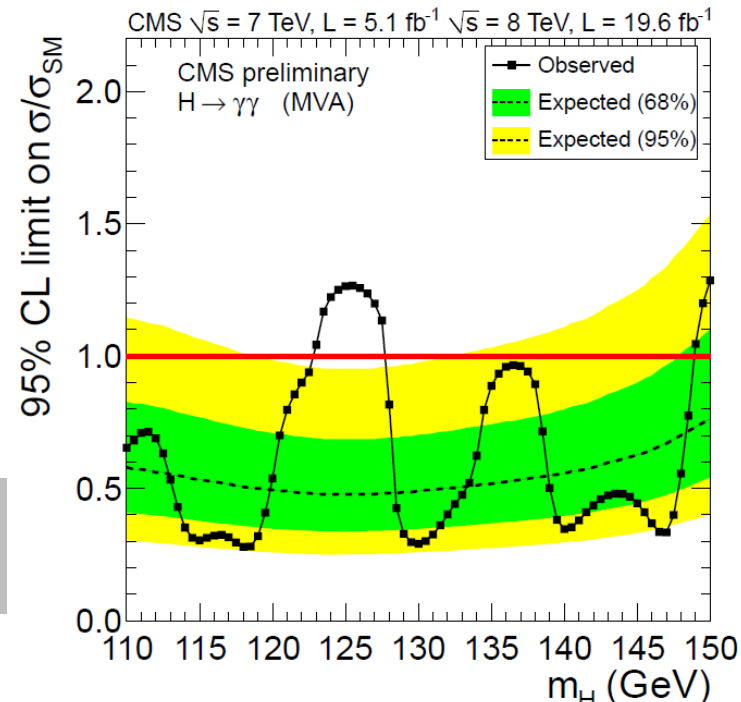
Właściwa kalibracja kalorymetru elektromagnetycznego jest jednym z kluczowych wymagań dla odkrycia higgsa w kanale dwufotonowym.



kanal $H \rightarrow \gamma\gamma$



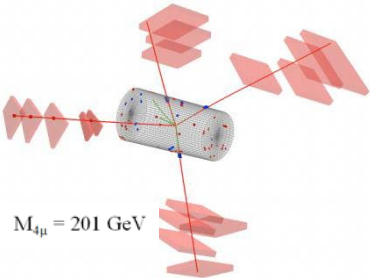
siła sygnału
(MVA) μ :
 $1.14^{+0.26}_{-0.23}$



CMS: Nadmiar przypadków w okolicy

$m_{\gamma\gamma} \approx 125 \text{ GeV}/c^2$ na poziomie **5.7σ**

$m_H = 124.70 \pm 0.31(\text{stat.}) \pm 0.15(\text{syst.})$



małe i duże masy: kanał $H \rightarrow ZZ(*) \rightarrow 4l$

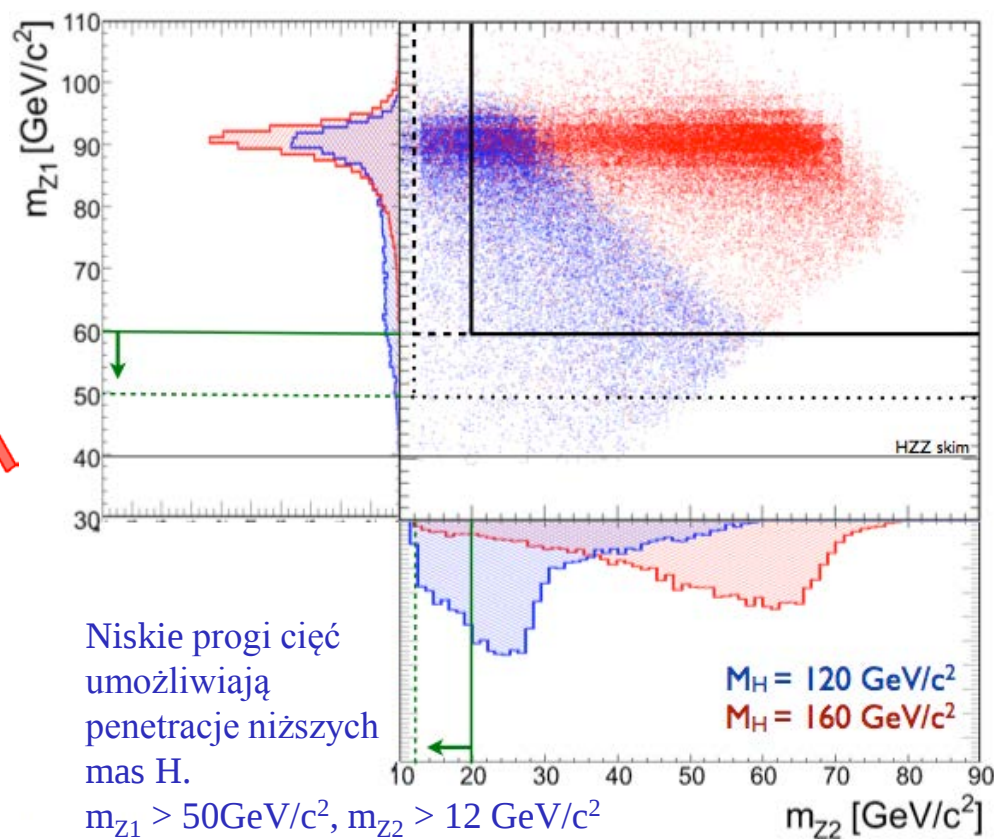
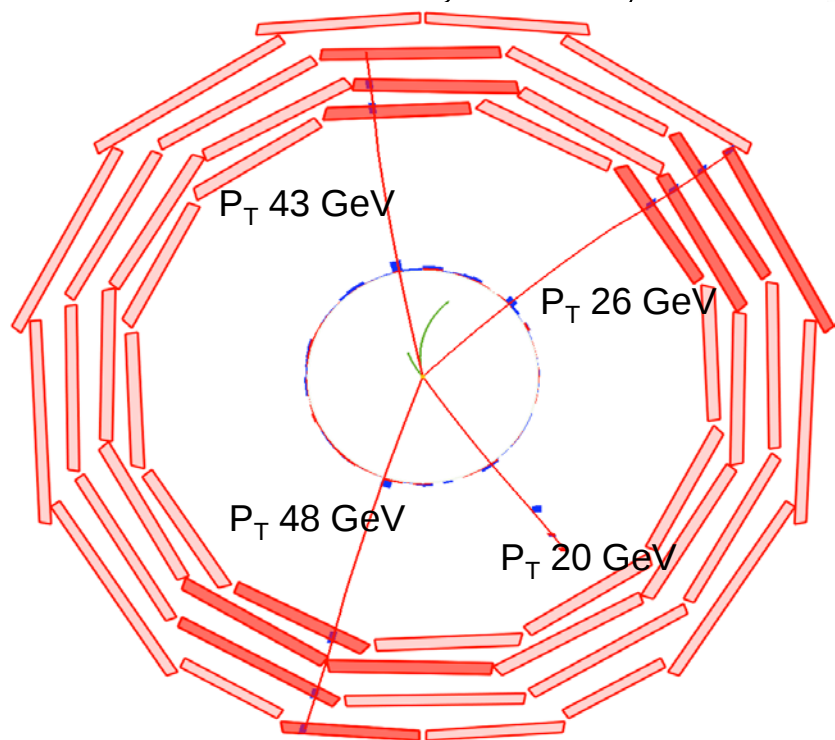
„złoty kanał” – stosunkowo małe tło lecz też oczekiwana niewielka liczba przypadków

sygnatura: 4 wysokoenergetyczne leptonów ($2e+2\mu, 4\mu, 4e$),

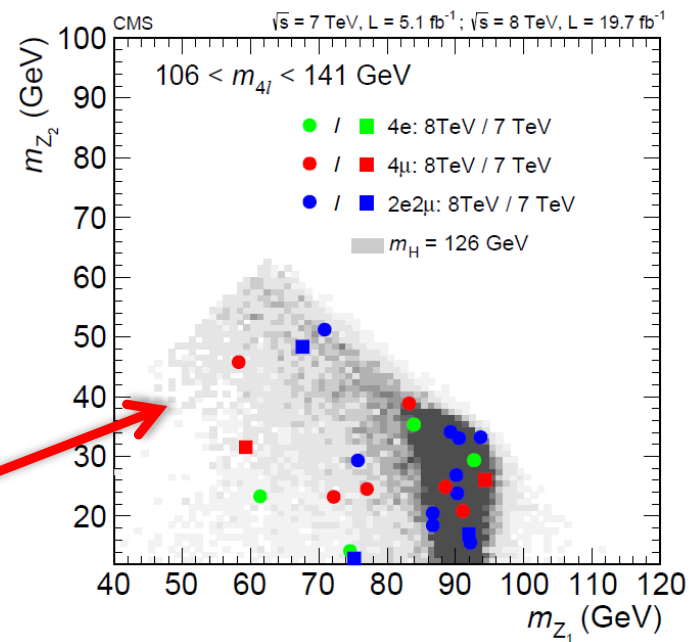
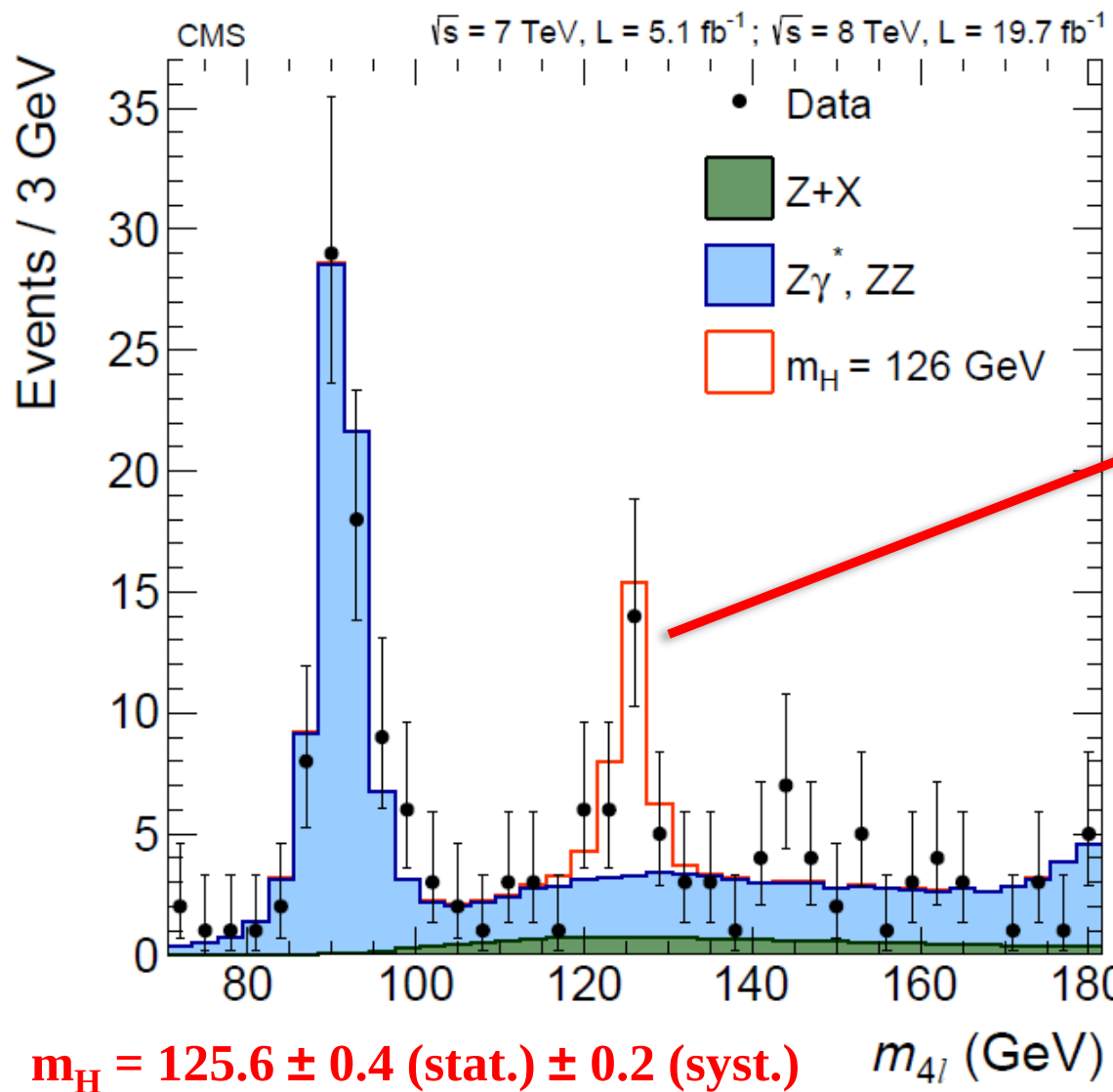
zgodność z Z, izolacja leptonów

tło nieredukowalne – produkcja $ZZ(*)$,

tło redukowalne: $t\bar{t}$, Z+dżety



kanał $H \rightarrow ZZ(*) \rightarrow 4\ell$



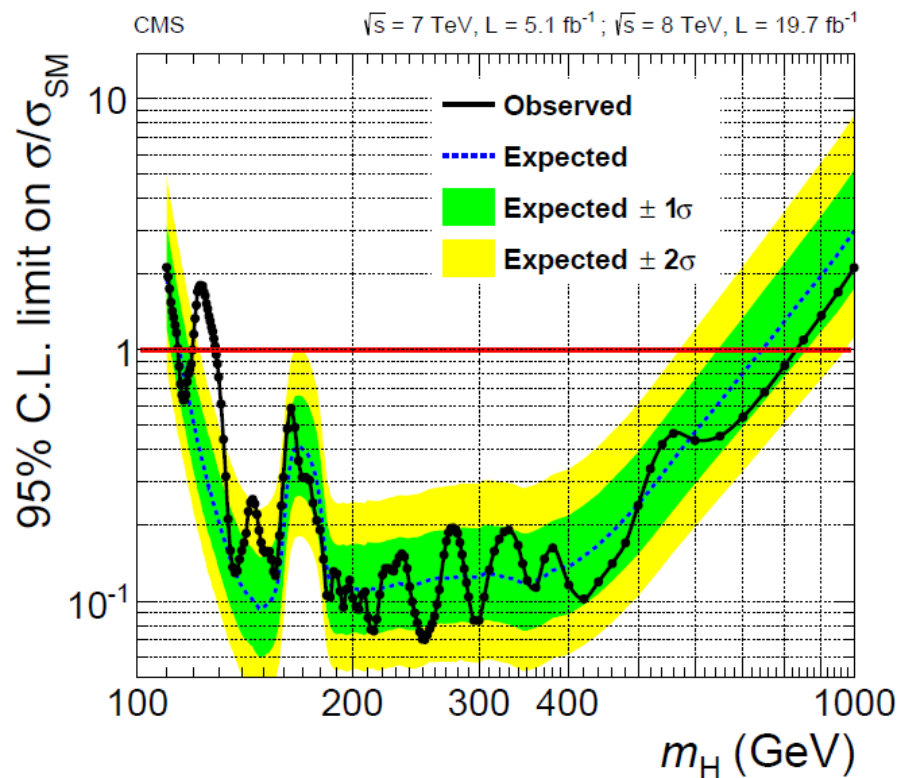
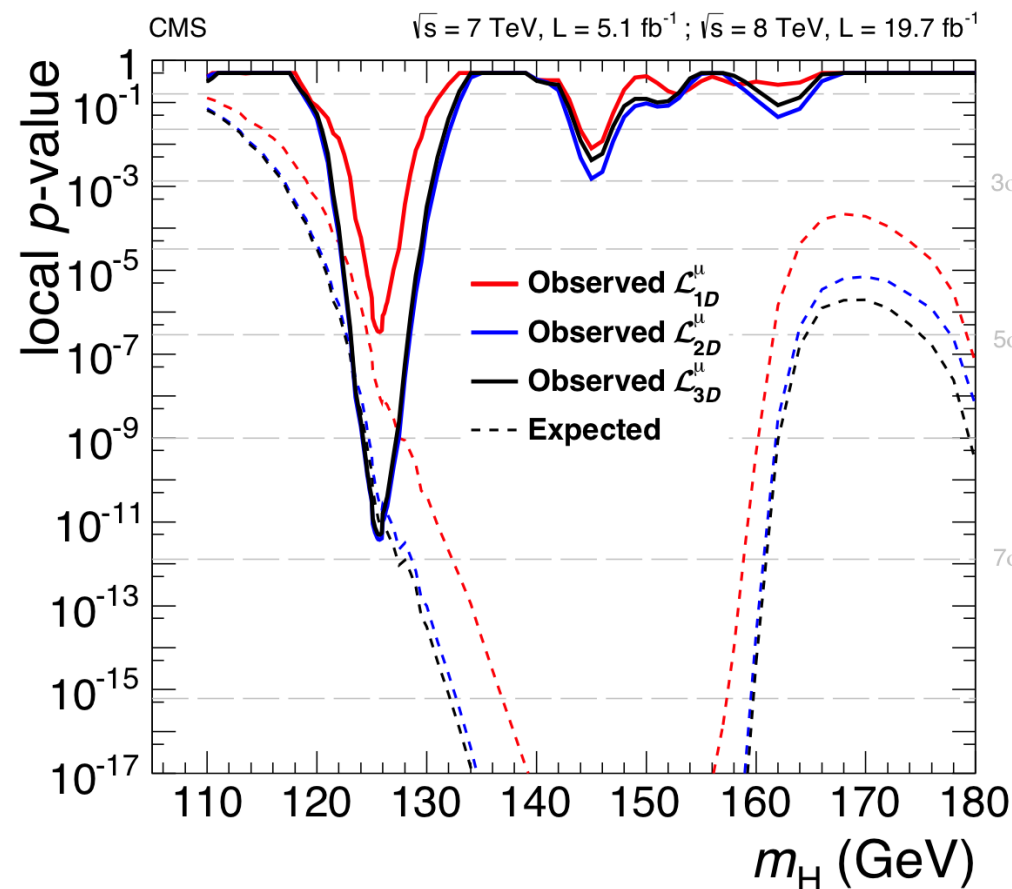
- Łatwo widoczne maksimum przy $126 \text{ GeV}/c^2$.
- Rozkłady mas m_{z_1} vs m_{z_2} wokół maksimum $121 < m_{4\ell} < 130.5 \text{ GeV}/c^2$ zgodne z oczekiwaniami.

Channel	4e	2e2μ	4μ	4ℓ
ZZ background	1.1 ± 0.1	3.2 ± 0.2	2.5 ± 0.2	6.8 ± 0.3
Z + X background	0.8 ± 0.2	1.3 ± 0.3	0.4 ± 0.2	2.6 ± 0.4
All backgrounds	1.9 ± 0.2	4.6 ± 0.4	2.9 ± 0.2	9.4 ± 0.5
$m_H = 125 \text{ GeV}$	3.0 ± 0.4	7.9 ± 1.0	6.4 ± 0.7	17.3 ± 1.3
$m_H = 126 \text{ GeV}$	3.4 ± 0.5	9.0 ± 1.1	7.2 ± 0.8	19.6 ± 1.5
Observed	4	13	8	25

kanal $H \rightarrow ZZ(*) \rightarrow 4l$

- Znaczoność sygnału:
 6.8σ (oczekiwanie 6.7σ)

- Obszar wykluczenia:

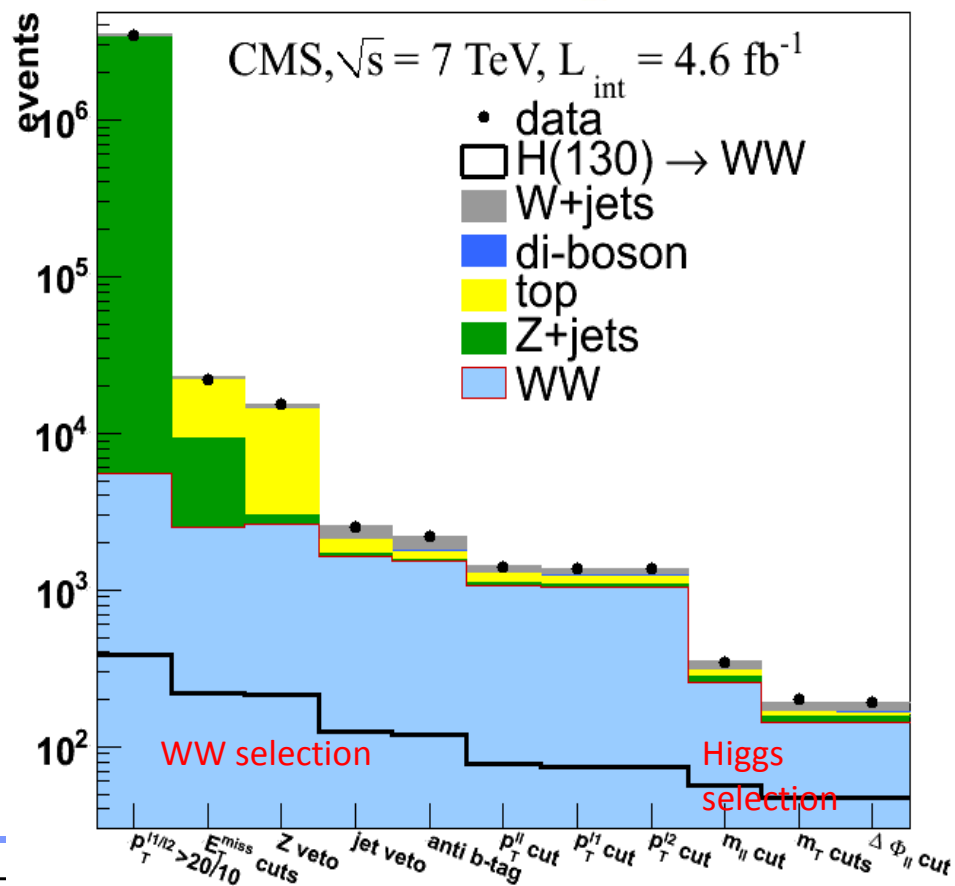
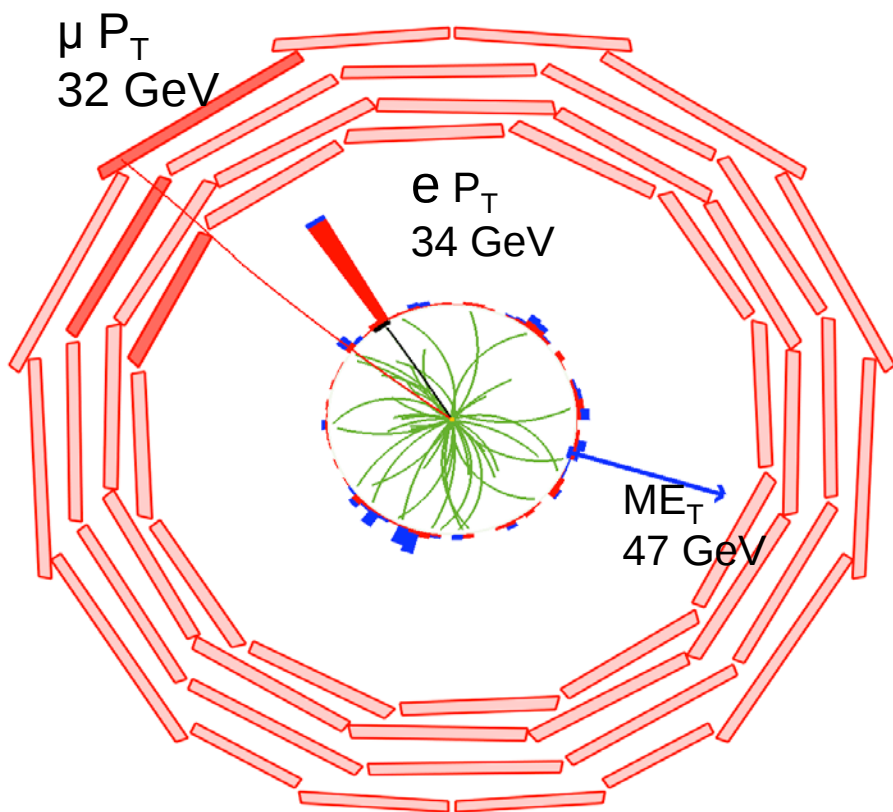
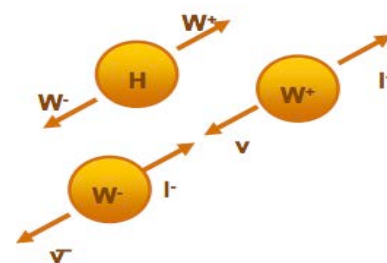


średnie masy: $H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow 2l2\nu$

Ze względu na uciekające neutrino – brak szczytów w widmie masy niezmienniczej (eksperyment licznikowy)

Sygnatura: dwa izolowane, przeciwnie naładowane leptony (mały kąt) brakująca energia,

Duża liczba przypadków ale i tło – **wyzwanie doświadczalne** (duża liczba cięć)

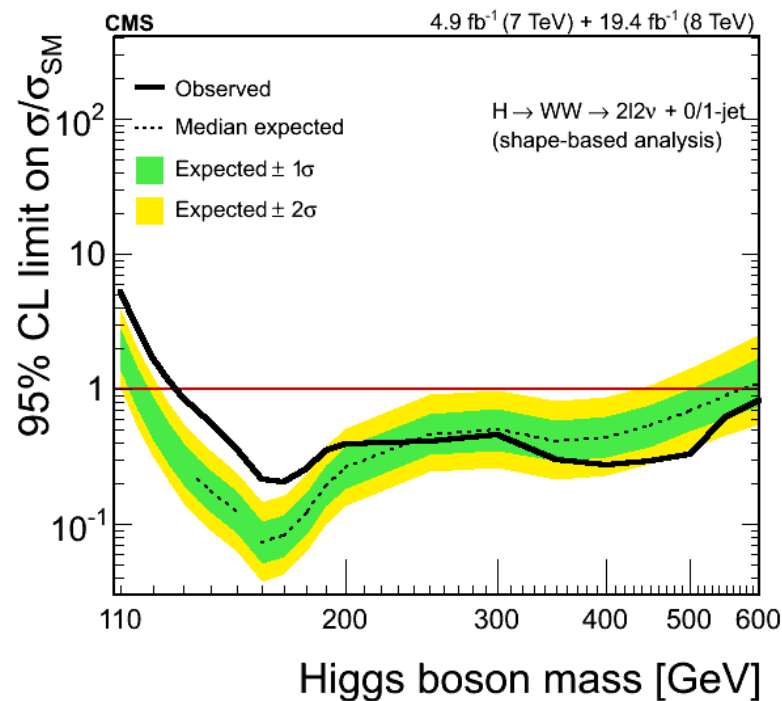
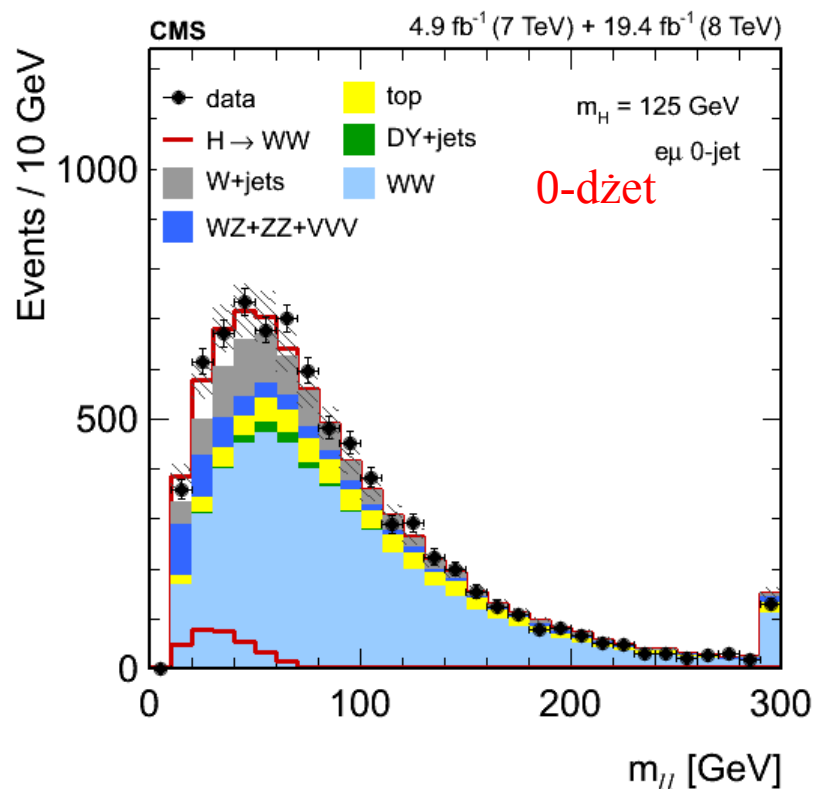


kanal $H \rightarrow WW(*) \rightarrow 2l2\nu$

Rozkłady w M_T lub M_{ll}

$$m_T = \sqrt{(E_T^{\ell\ell} + E_T^{\text{miss}})^2 - (\mathbf{P}_T^{\ell\ell} + \mathbf{P}_T^{\text{miss}})^2}$$

Szacowanie tła z danych (szczególnie ważne dla eksperymentów licznikowych),
przykład: zdefiniować region kontrolny bogaty w tło danego typu; ekstrapolacja do obszaru
sygnału używając profilów z MC ($N_{\text{data}}^{\text{SR}} = \alpha \cdot N_{\text{data}}^{\text{CR}}$, gdzie $\alpha = N_{\text{MC}}^{\text{SR}} / N_{\text{MC}}^{\text{CR}}$)

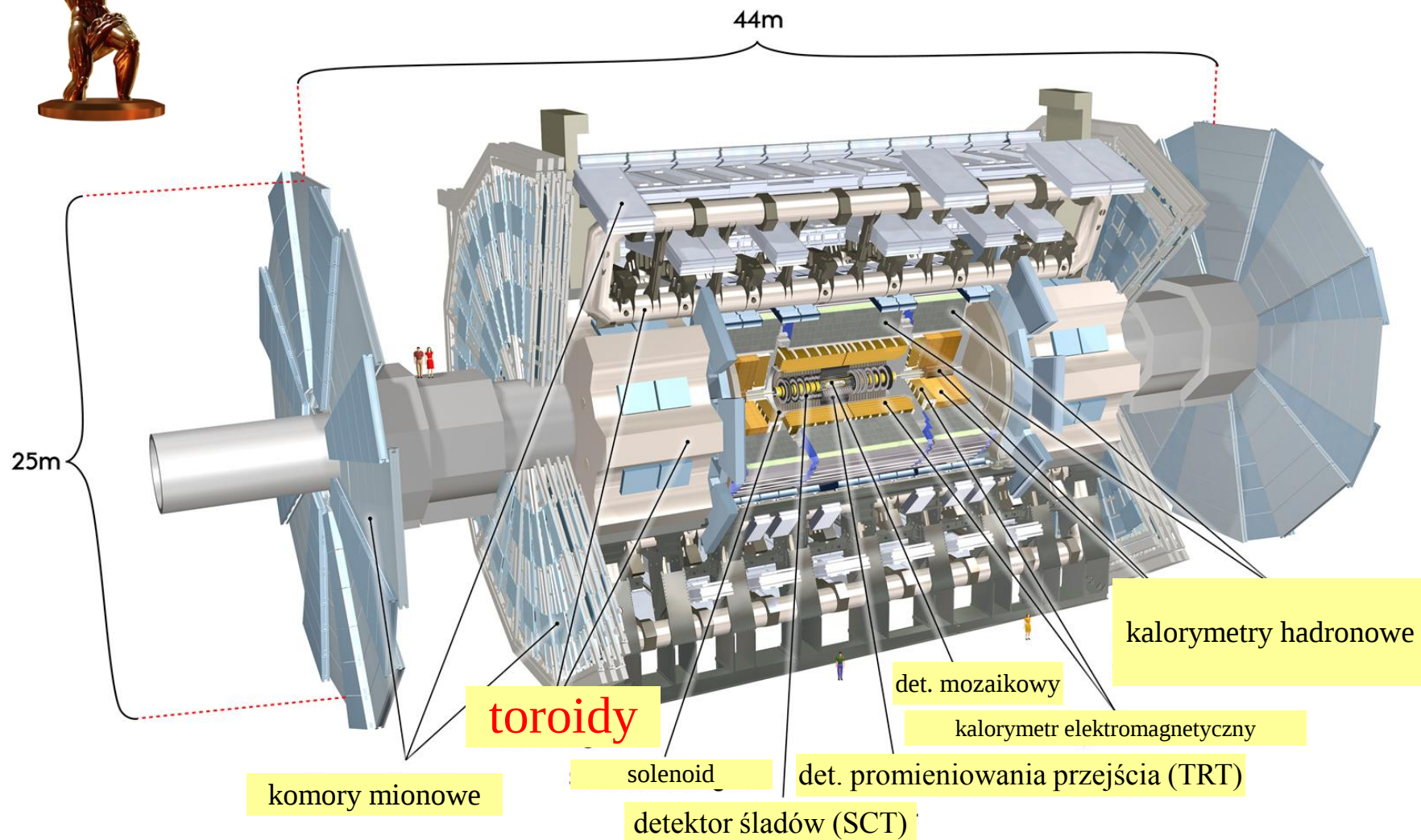


4.3 sigma excess seen (5.8 expected)
Very wide excess due to low mass resolution

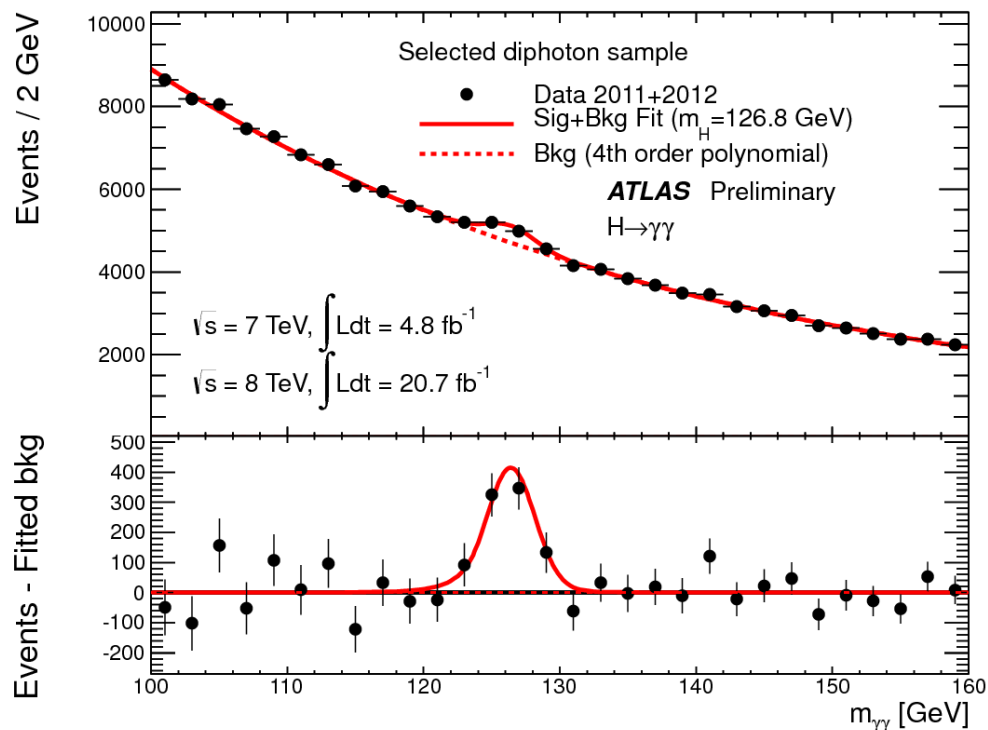
cz. Higgsa w ATLAS (Run-1)



ATLAS = A Toroidal LHC ApparatuS



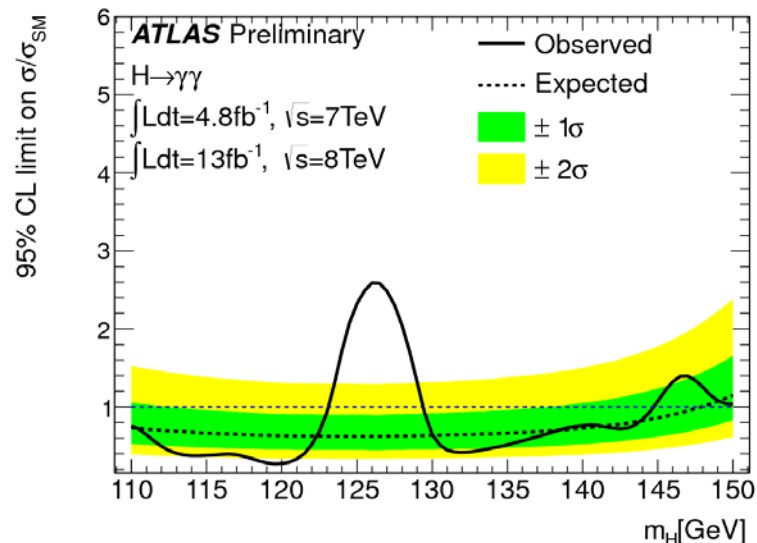
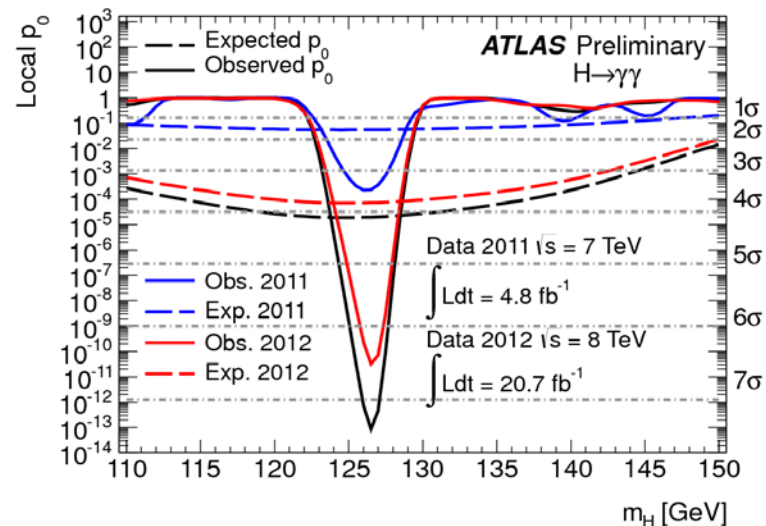
ATLAS: kanał $H \rightarrow \gamma\gamma$



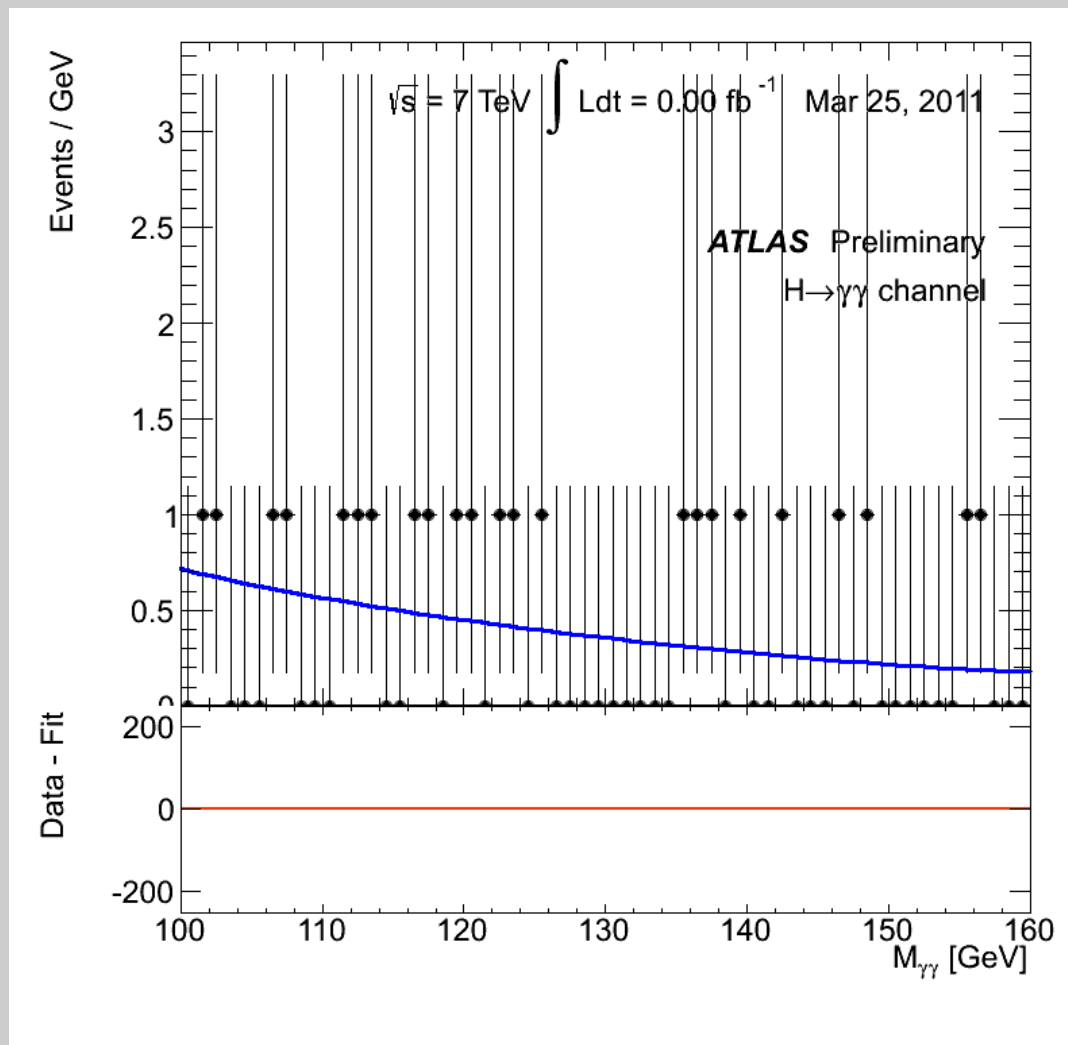
Zgodność z hipotezą tylko tło:

Nadwyżka przy $m_H = 126$ GeV

Zaobserwowana nadwyżka przypadków odpowiada to 7.4σ ,
przy oczekiwanych 4.1

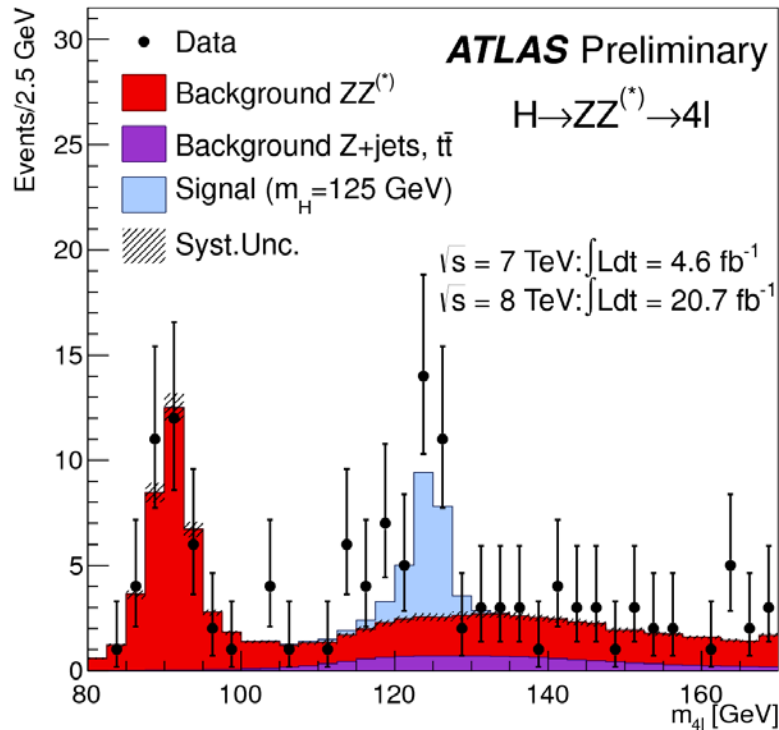


Widmo masy - statystyka



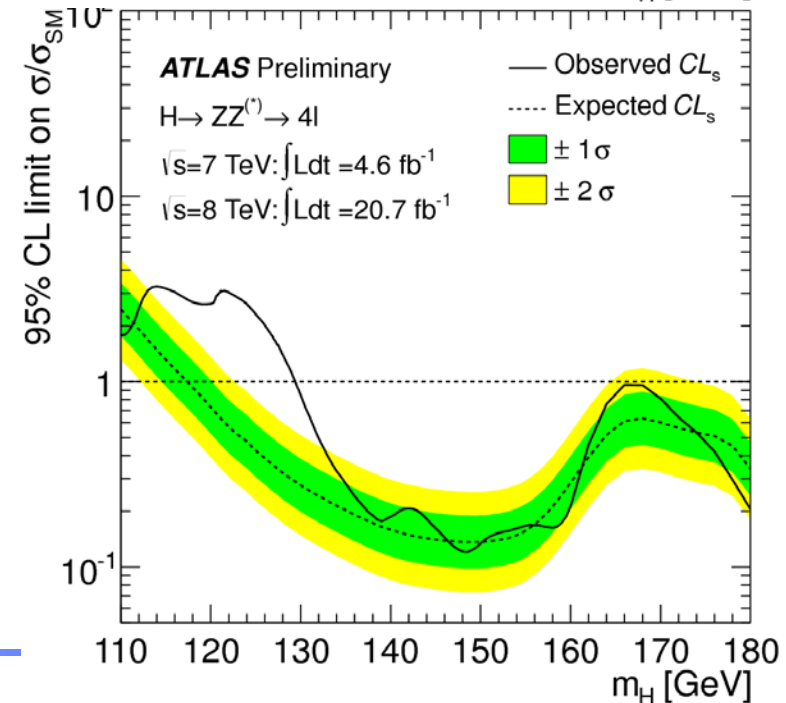
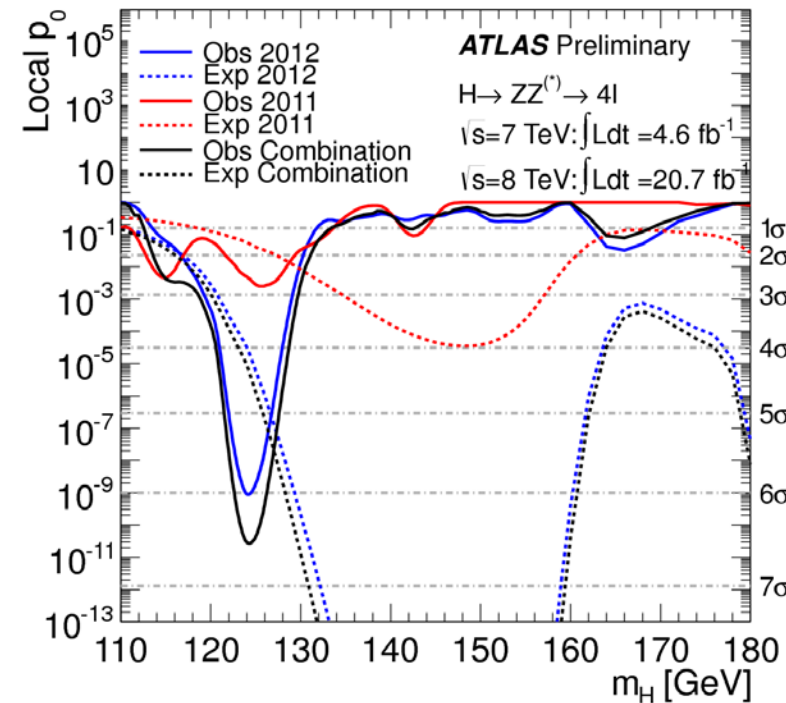
$$\text{ATLAS: } m_H = (126.02 \pm 0.43_{\text{stat}} \pm 0.27_{\text{syst}}) \text{ GeV}/c^2$$

ATLAS: kanał $H \rightarrow ZZ(*) \rightarrow 4l$



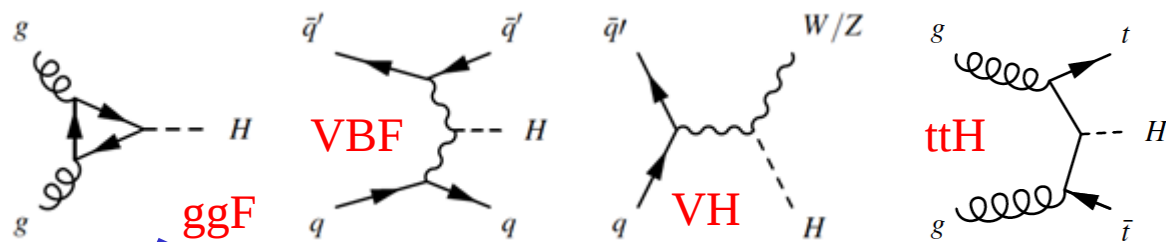
Nadwyżka

$$m_H = (124.51 \pm 0.42_{\text{stat}} \pm 0.17_{\text{syst}}) \text{ GeV}/c^2$$

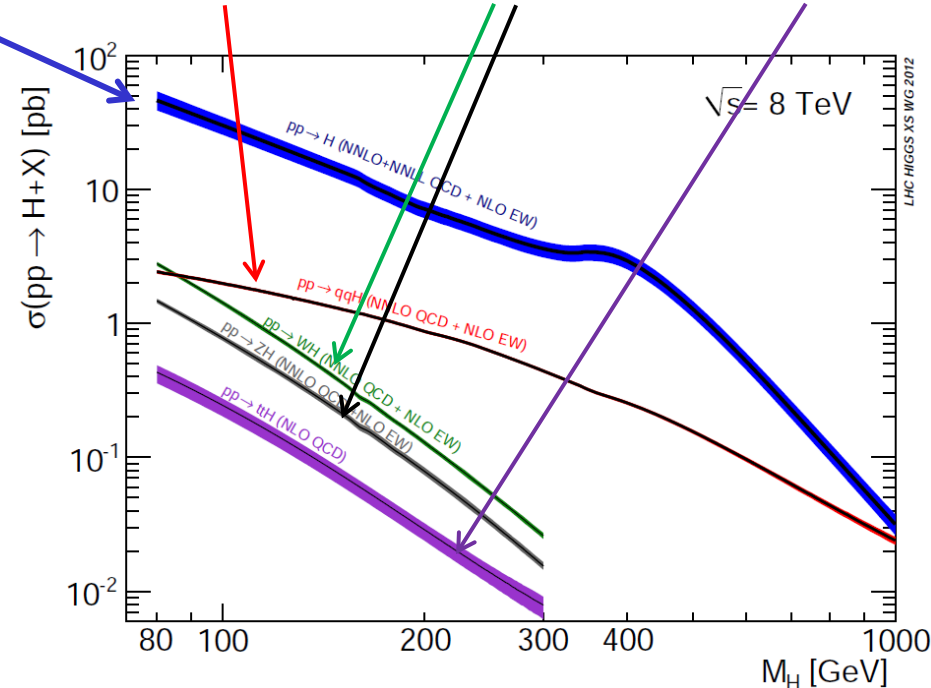


Podsumowanie Run-1:

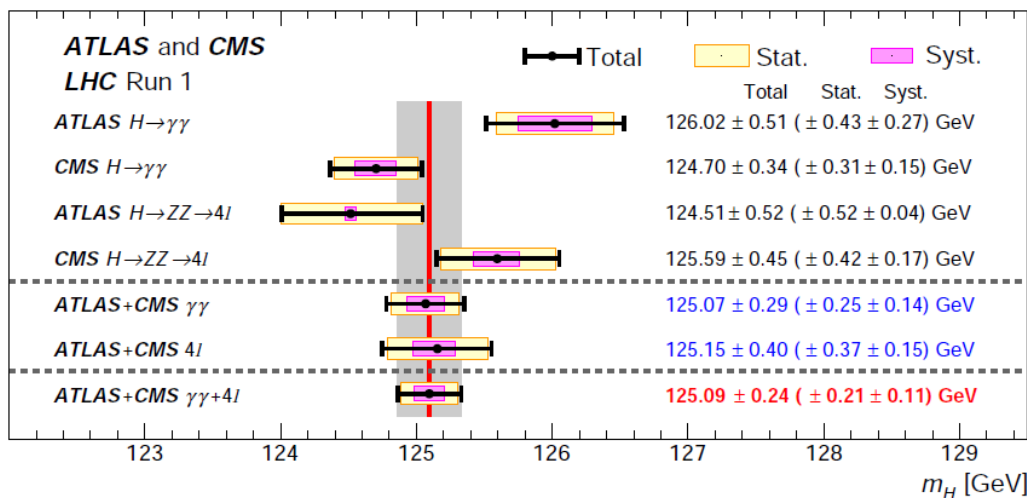
Co po odkryciu cząstki Higgsa?



channel	production	Signif. (exp.)
$H \rightarrow ZZ$	ggF, VBF	6.8σ (6.7σ)
$H \rightarrow \gamma\gamma$	ggF, VBF	5.7σ (5.2σ)
$H \rightarrow WW$	ggF, VBF	4.3σ (5.8σ)
$H \rightarrow \tau\tau$	ggF, VBF, VH	3.2σ (3.7σ)
$H \rightarrow bb$	VH, VBF	2.6σ (2.7σ)



Mass (CMS+ATLAS) PRL 114, 191803 (2015):
 $m_H = 125.09 \pm 0.24$ (i.e. $\pm 0.21_{\text{stat}} \pm 0.11_{\text{svst}}$) GeV



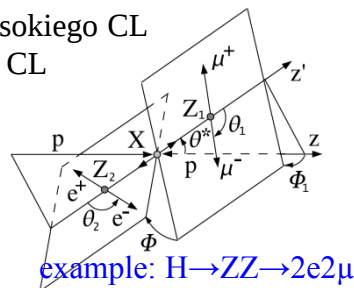
Czy odkryta cząstka H(125) jest tą z Modelu Standardowego czy tylko tak wygląda?

- testy zgodności z MS
- poszukiwania Higgs'ów spoza MS.

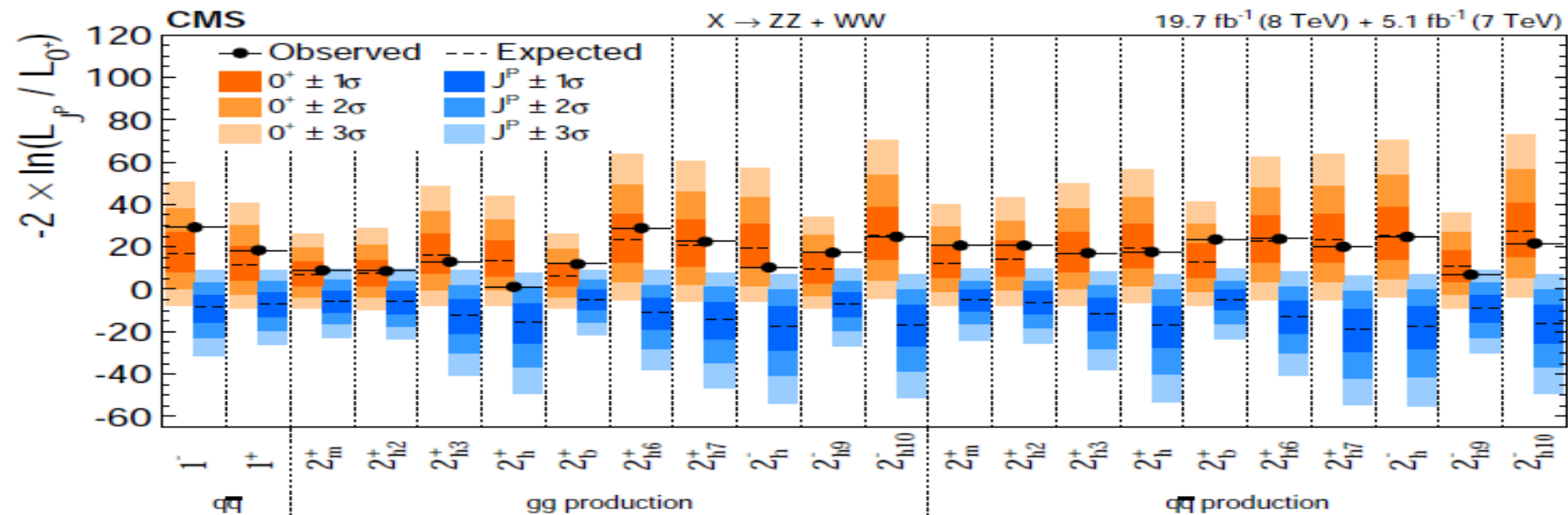
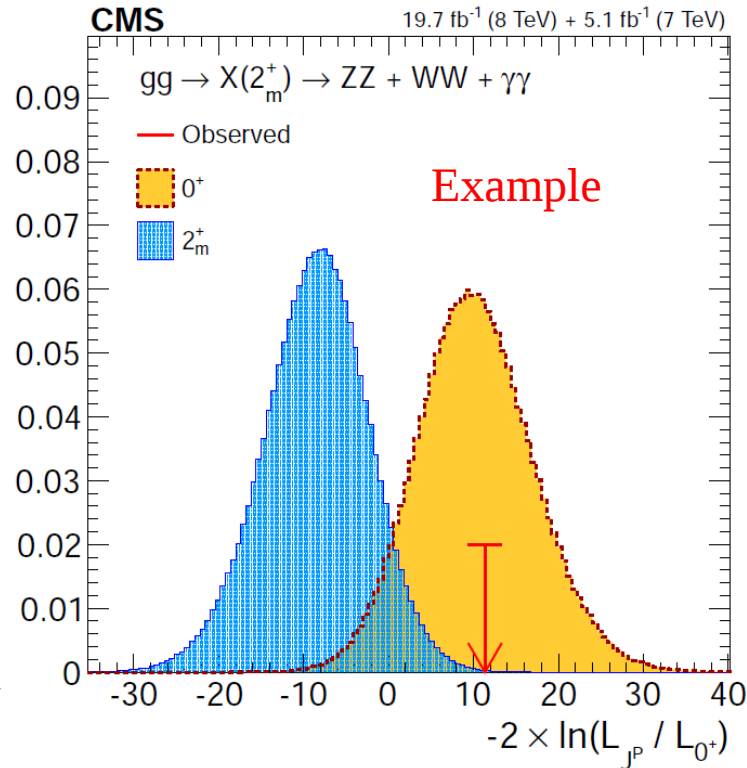
Spin i Parzystość

PRD 92 (2015) 012004

- Hipoteza testowa J^P (nazywana H_0) jest badana przeciw hipotezie alternatywnej 0^+
- pseudoscalar 0^- , vector 1^- , pseudovector 1^+ wykluczone $> 99\%$ CL
- mieszaną parzystościową spin-1 wykluczona dla wysokiego CL
wszystkie testowane modele $2^\pm$ wykluczone z $> 98\%$ CL
- Wszystkie obserwacje zgodne z hipotezą CP-parzystego skalaru $J^P=0^+$ (tak jak SM przewiduje dla H)



Pseudoexperiments



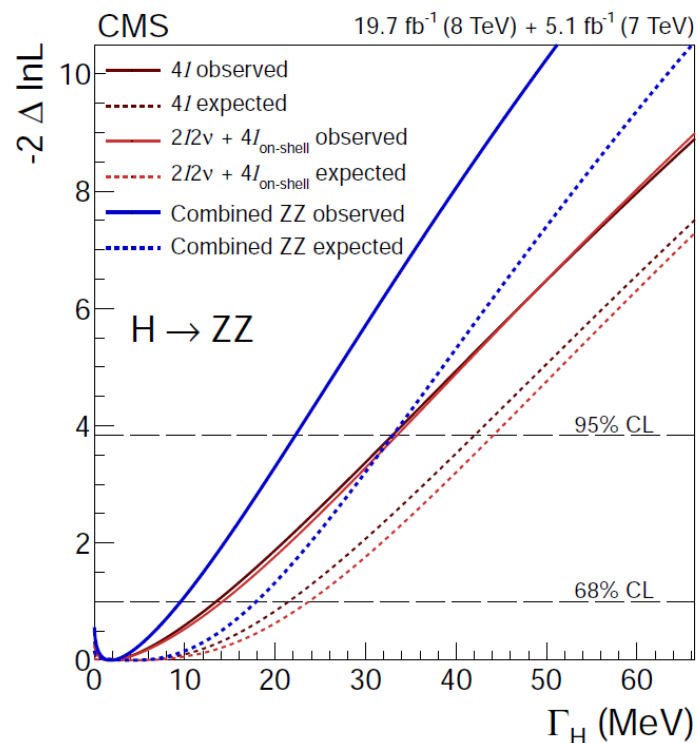
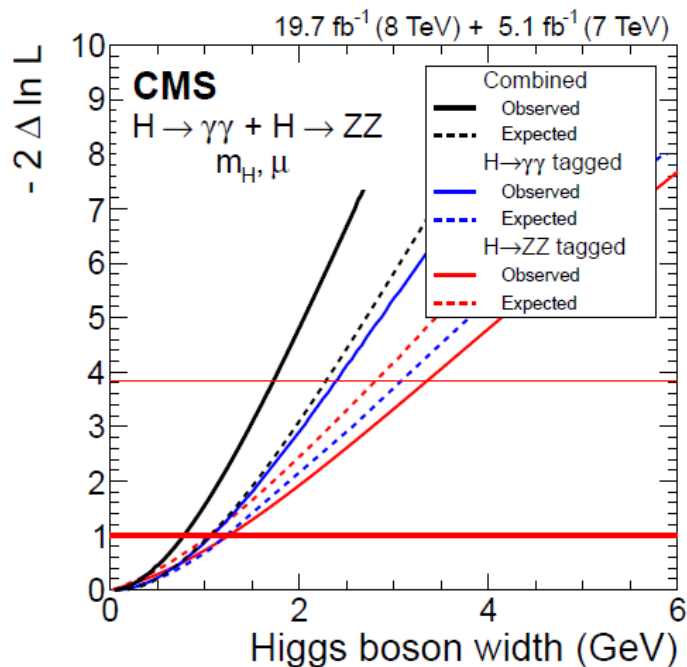
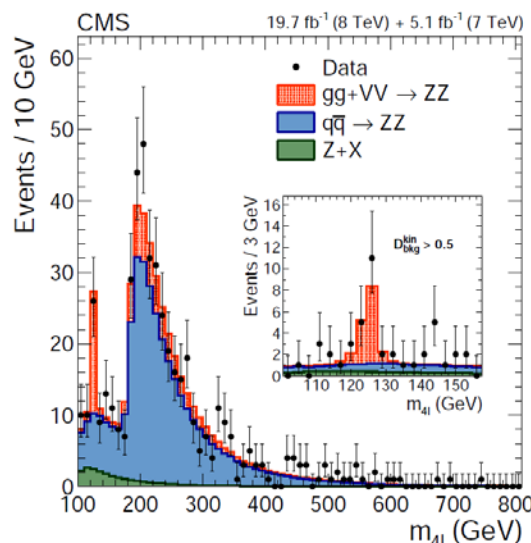
Szerokość cz. Higgsa

Eur. Phys. J. C 75 (2015) 212

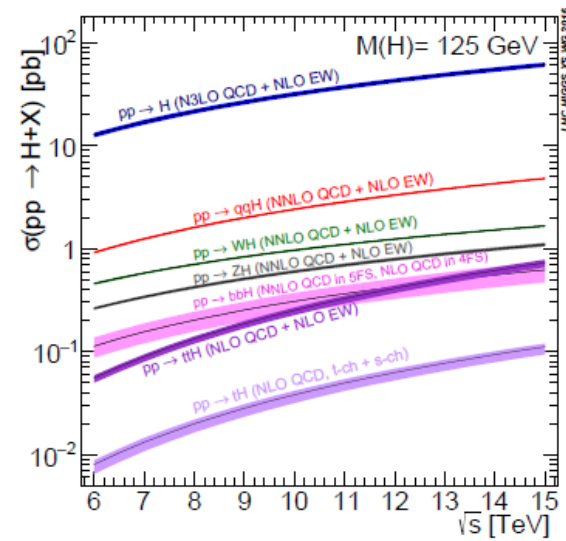
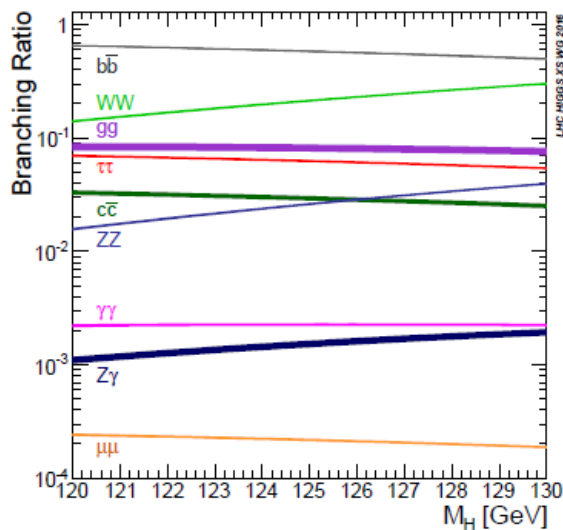
Phys.Rev.D89 (1014) 092007

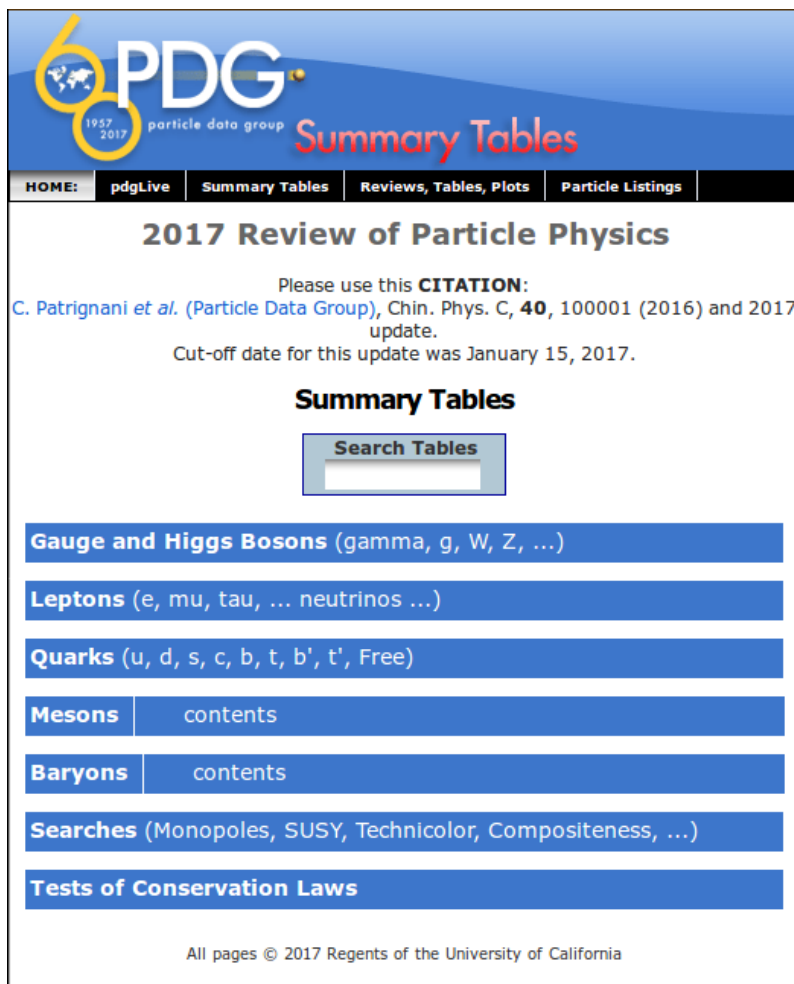
- Przewidywania SM: $m_H \sim 125 \text{ GeV} \rightarrow \Gamma_{\text{SM}} \sim 4 \text{ MeV}$.
- Dalece niedostępne dla rozdzielczości doświadczalnych
- Bezpośredni pomiar bardzo pożądany dla weryfikacji przewidywań teoretycznych
- Bezpośrednie pomiary krzywej Breit-Wignera (95%CL):
 $\gamma\gamma$: $\Gamma_H < 2.4 \text{ (3.1exp) GeV}$
 ZZ : $\Gamma_H < 3.4 \text{ (2.8exp) GeV}$
- metoda: badanie przypadków w okolicy $2m_Z$:

$$\frac{d\sigma_{gg \rightarrow H \rightarrow ZZ}}{dm_{ZZ}^2} \sim \frac{g_{ggH}^2 g_{HZZ}^2}{(m_{ZZ}^2 - m_H^2)^2 + m_H^2 \Gamma_H^2}$$
oczekiwany efekt: $\sim 8\%$
- wynik $m_{4l} > 220 \text{ GeV}$:
obserwacja 223 ev .
oczekiwania $215.6 \pm 9.5 \text{ exp}$.
- pomiar pośredni:
 $\Gamma_H < 22 \text{ MeV 95\%CL}$
(SM: $\sim 4 \text{ MeV}$)



Stan na dziś (2018)





PDG particle data group **Summary Tables**

HOME: [pdgLive](#) [Summary Tables](#) [Reviews, Tables, Plots](#) [Particle Listings](#)

2017 Review of Particle Physics

Please use this **CITATION**:
C. Patrignani *et al.* (Particle Data Group), Chin. Phys. C, **40**, 100001 (2016) and 2017 update.
Cut-off date for this update was January 15, 2017.

Summary Tables

[Search Tables](#)

- Gauge and Higgs Bosons** (gamma, g, W, Z, ...)
- Leptons** (e, mu, tau, ... neutrinos ...)
- Quarks** (u, d, s, c, b, t, b', t', Free)
- Mesons** contents
- Baryons** contents
- Searches** (Monopoles, SUSY, Technicolor, Compositeness, ...)
- Tests of Conservation Laws**

All pages © 2017 Regents of the University of California

<http://pdg.lbl.gov/>

H^0

$J = 0$

Mass $m = 125.09 \pm 0.24$ GeV

Full width $\Gamma < 0.013$ GeV, CL = 95%

H^0 Signal Strengths in Different Channels

See Listings for the latest unpublished results.

Combined Final States = 1.10 ± 0.11

$W W^* = 1.08^{+0.18}_{-0.16}$

$Z Z^* = 1.29^{+0.26}_{-0.23}$

$\gamma\gamma = 1.16 \pm 0.18$

$b\bar{b} = 0.82 \pm 0.30$ (S = 1.1)

$\mu^+\mu^- = 0.1 \pm 2.5$

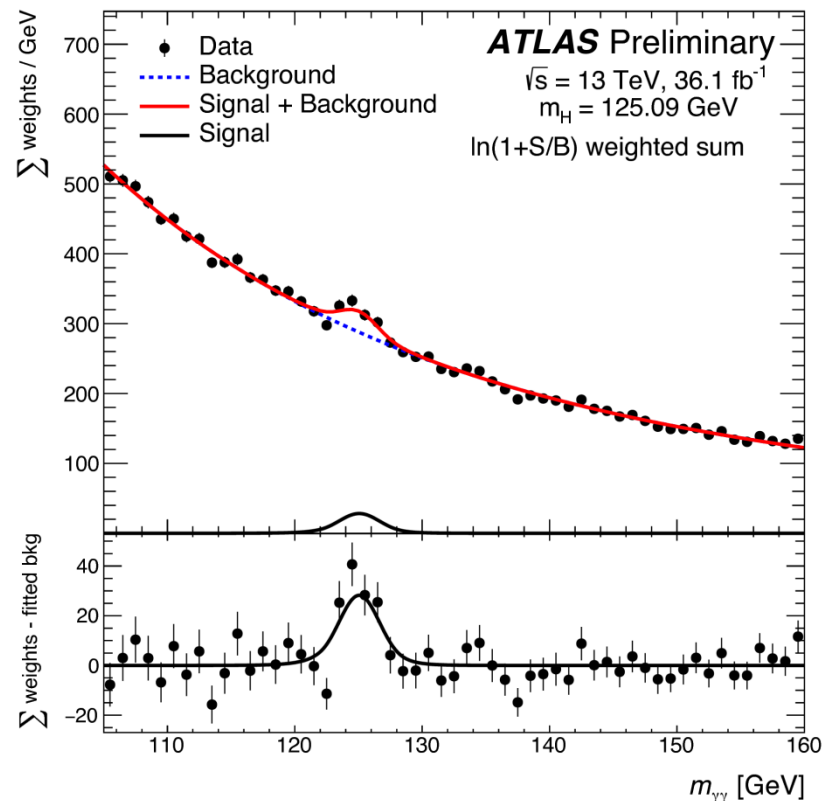
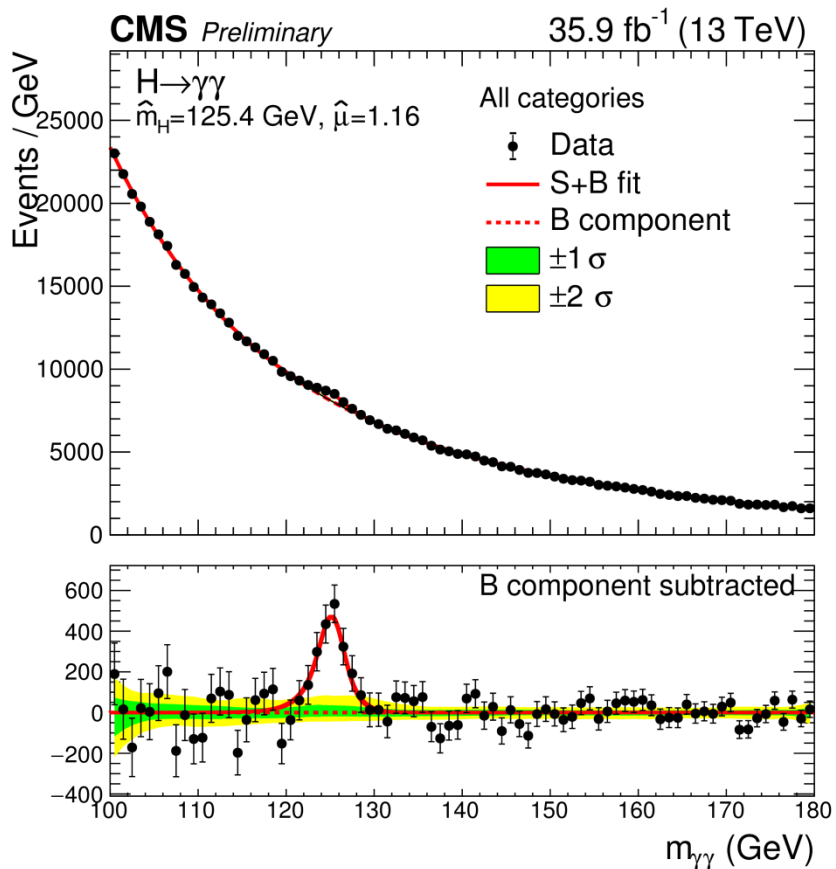
$\tau^+\tau^- = 1.12 \pm 0.23$

$Z\gamma < 9.5$, CL = 95%

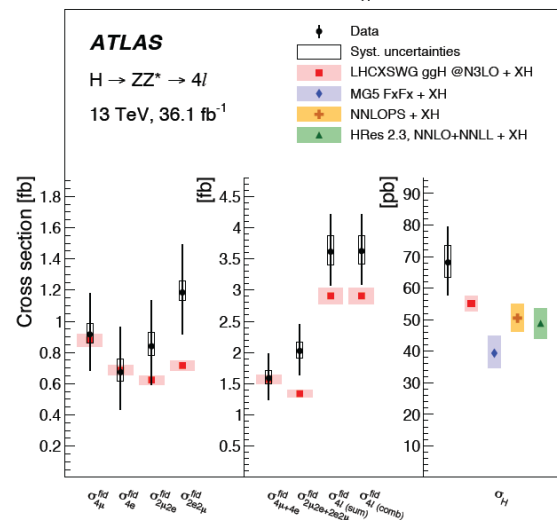
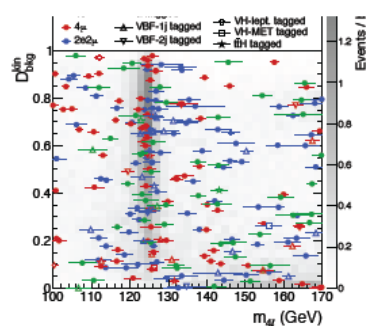
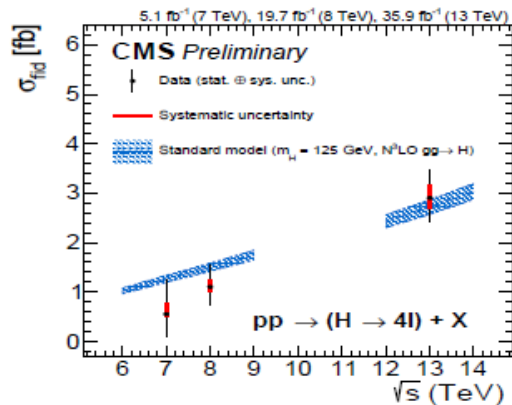
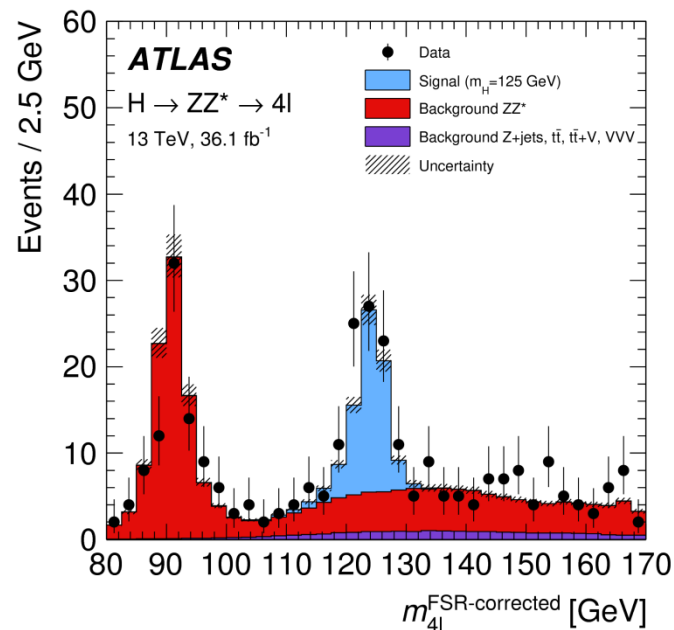
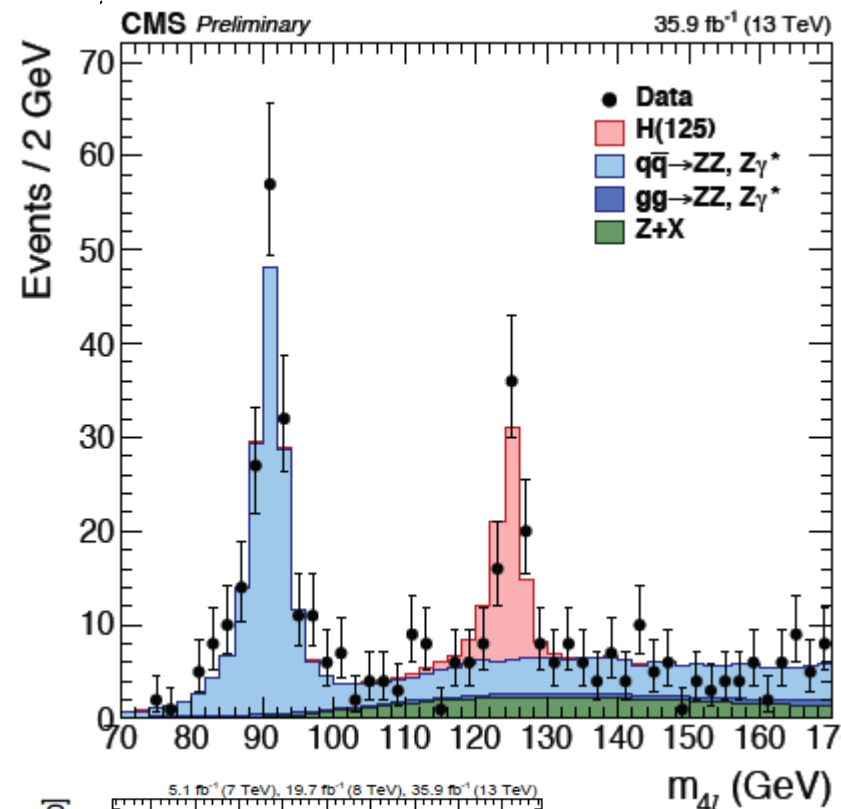
$t\bar{t}H^0$ Production = $2.3^{+0.7}_{-0.6}$

pełne wydanie: Chin. Phys. C, 40 100001(2016)

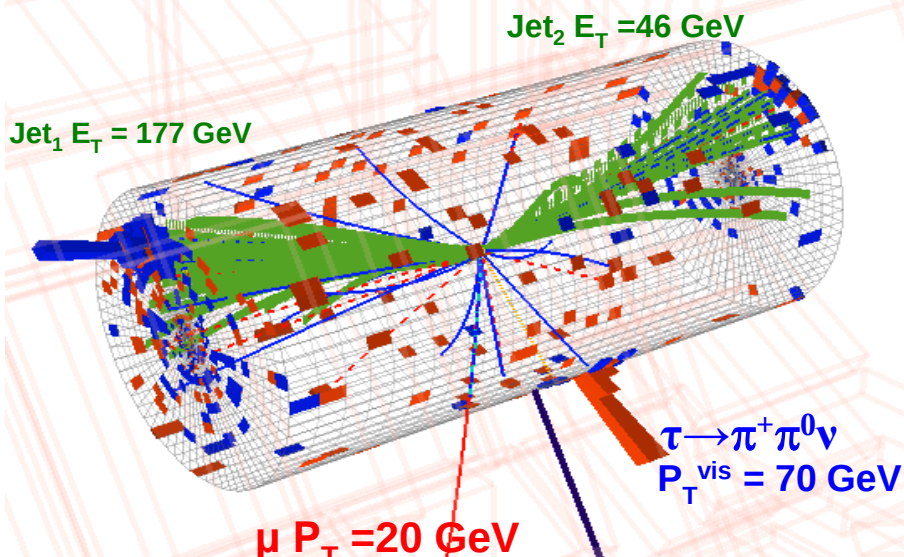
kanal $H \rightarrow \gamma\gamma$



kanal $H \rightarrow ZZ(*) \rightarrow 4l$



Inne/trudne kanały: $\tau\tau, bb, (\mu\mu)$



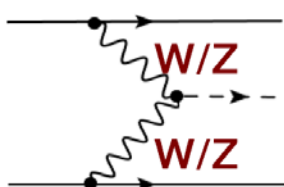
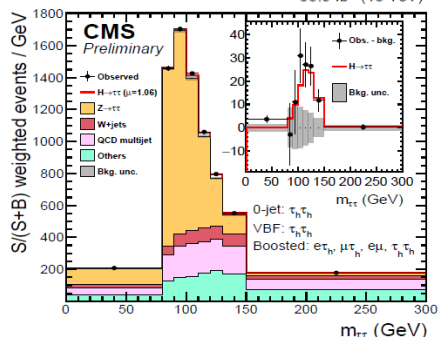
μ $P_T = 20$ GeV

Missing $E_T = 97$ GeV

Visible Mass($\tau\tau$) = 75 GeV

Mass (jj) = 580 GeV

$\Delta\eta(jj) = 3.5$

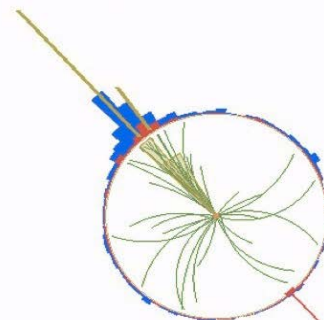


SM-VBF
 ≥ 2 jets > 30 GeV
 $\Delta\eta > 4$, $M_{jj} > 400$ GeV
No additional jets with $P_T > 30$ in the rapidity gap

bJet1
 p_T 151.4,
 η 0.814,
 ϕ 2.299

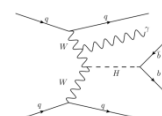
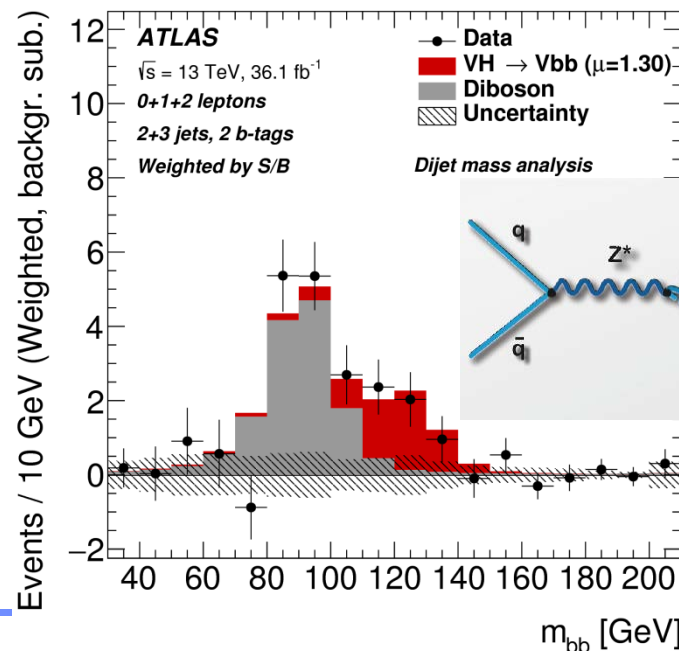
bjet2
 p_T 47.3,
 η 1.783,
 ϕ 2.189

$\rho - \phi$ view



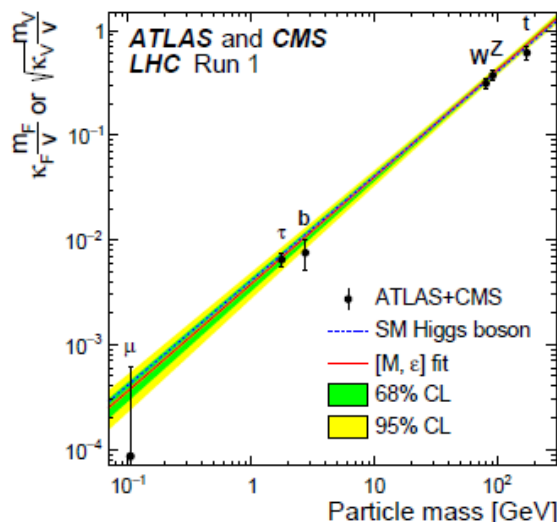
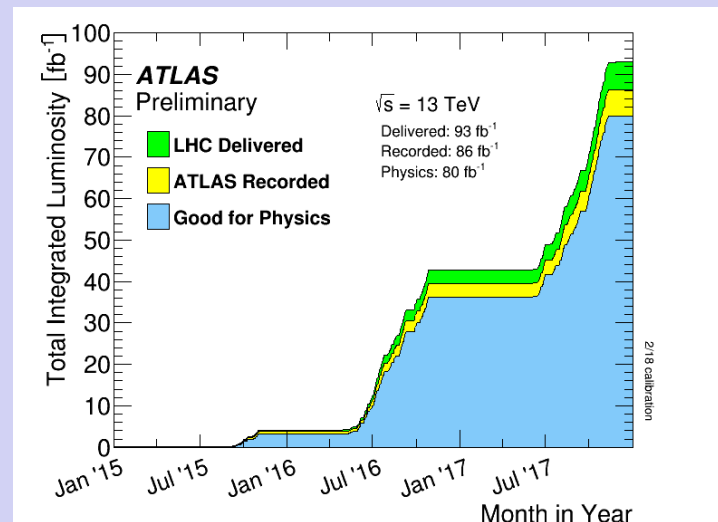
bb:
 m 104.78
 p_T 225.93
 $\Delta\phi$ (bb, MET)

MET
 e_T 197.6
 ϕ -0.78

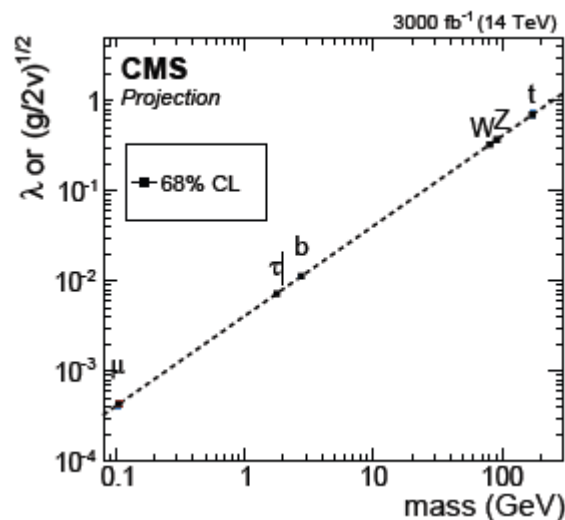


i co dalej?

- Run-1: 2010-2013
 $\sqrt{s}=7$ i 8 TeV,
 $\int L dt = 5$ i 25 fb^{-1} $\Delta t^{\text{BX}}=50 \text{ ns}$
- Run-2: 2015-2018
Run-3: 2020-2022
 $\sqrt{s}=13 \text{ TeV}$, $\Delta t^{\text{BX}}=25 \text{ ns}$,
 $\int L dt = 300 \text{ fb}^{-1}$,
- Po 2023 (Phase-2)
HI LHC: 3000 fb^{-1}



cel
(precyzja pomiarów cz. Higgsa)



Zakończenie

A czy „zwykłemu człowiekowi” to się przyda?

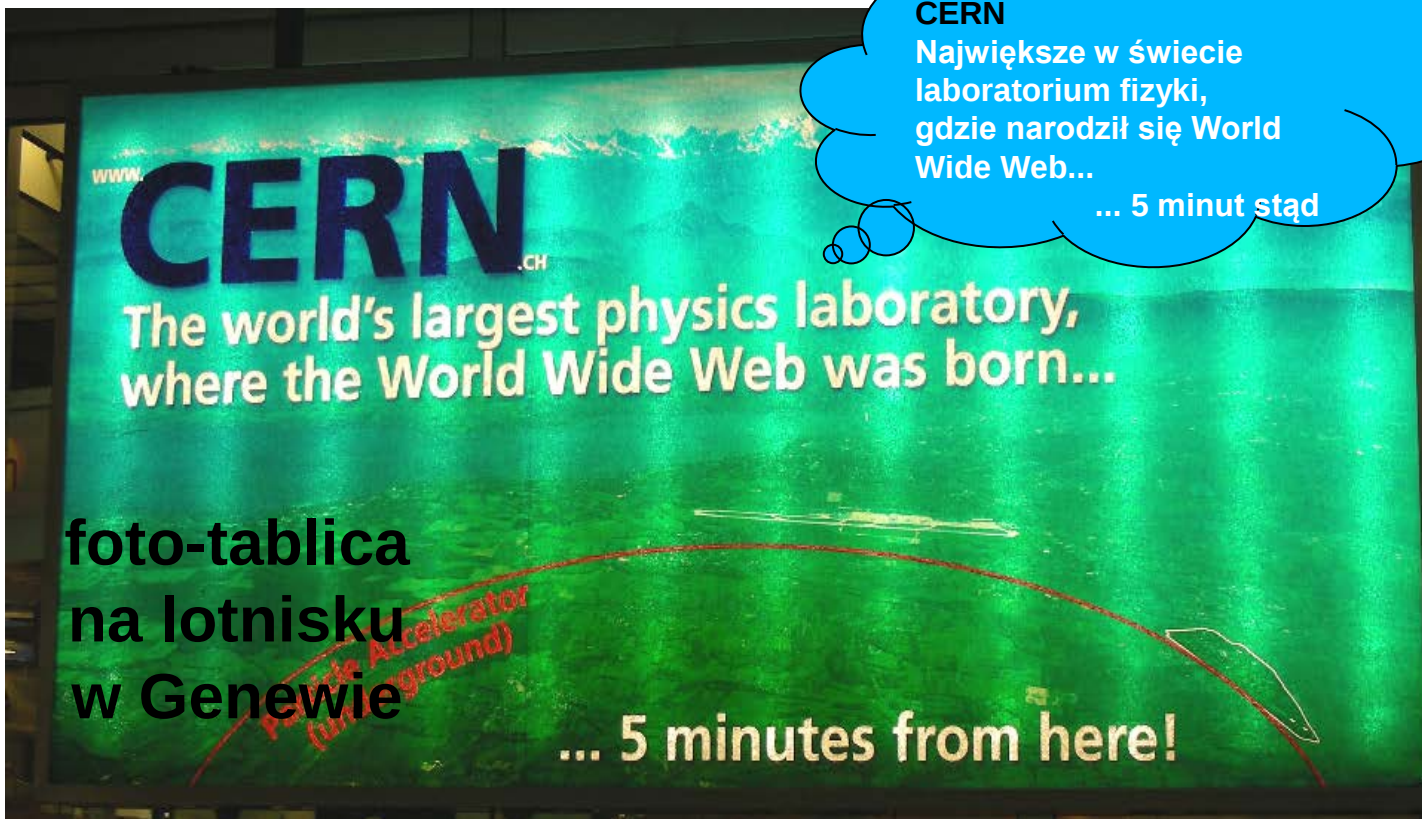
Nowe materiały,
Nowe technologie,
Nowe urz. pomiarowe,
Zastos. w medycynie,
Zastos. w komunikacji,
Zastos. w energetyce,
Zastos. w ochr. Środ.

...

- nie biznes,
- nie przemysł,
- nie polityka...

...

FIZYKA !



**Stworzyła potrzebę i znalazła rozwiązanie,
z którego korzysta teraz cały świat !!!**

Zapraszamy....



Przewiduje się, że LHC
będzie działało jeszcze przez
kilkanaście lat.

**Mamy nadzieję na
wiele niespodzianek.**

Dziękuję za uwagę!