

Plan wystąpienia:

1. Wprowadzenie
2. Jak szukamy Higgsa - na przykładzie kanału $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$?
3. Poszukiwanie bozonu Higgsa w kanale $\tau\tau \rightarrow \mu\tau$ _{jet}
4. Właściwości nowej cząstki

Jak to działa: poszukiwanie bozonu Higgsa w eksperymencie CMS

Częste skróty:

LHC - Large Hadron Collider

CMS - Compact Muon

Solenoid

MC - Monte Carlo

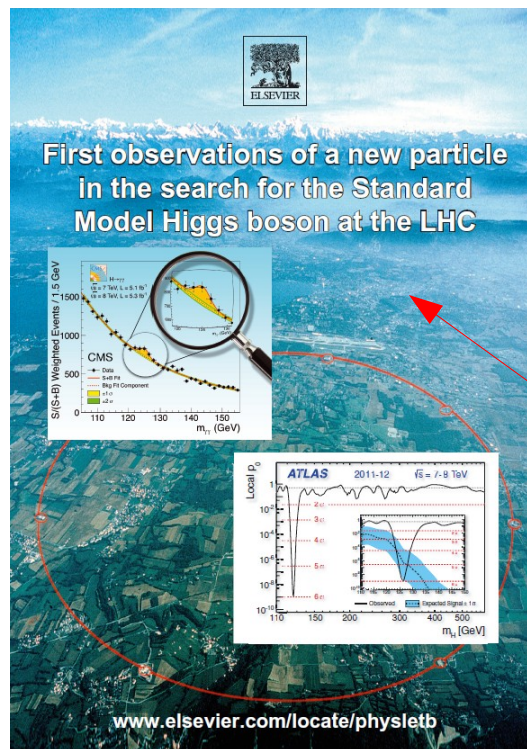
DY - Proces Drells-Yana

Tomasz Früboes



Model Standardowy

	Fermiony			Bozony		
Kwarki	$2.3 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ u górnymy	$1.27 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ c powabny	$173.5 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ t szczytowy	0 Y 1 foton	0 Z⁰ 1 bozon Z	
	$4.8 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d dolny	$95 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s dziwny	$4.2 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b spodni	0 g 1 gluon	$80.4 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1 bozon W	
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ e elektron	$105.7 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ μ mion	$1.777 \text{ GeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ τ taon	$7126 \text{ GeV}/c^2$ H⁰ 0 bozon Higgsa		
Leptony	$<2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_e neutrino elektronowe	$<170 \text{ keV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ neutrino mionowe	$<15.5 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ neutrino taonowe			
	I	II	III			



- Opisuje 3 z 4 znanych oddziaływań
 - Oddziaływania przez wymianę nośników oddziaływań (bozonów)
- Materia – fermiony (leptony i kwarki)
- **Problem:** obliczenia w ramach teorii (np. przekrojów czynnych) możliwe tylko dla **bezmasowych** nośników oddziaływań
- **Rozwiązanie:** mechanizm Higgsa nadaje masy nośnikom oddziaływań oraz fermionom
 - konsekwencją jest bozon Higgsa
 - odkryty w lipcu 2012
 - masa około 126 GeV
- **Kluczowa część Modelu Standardowego**



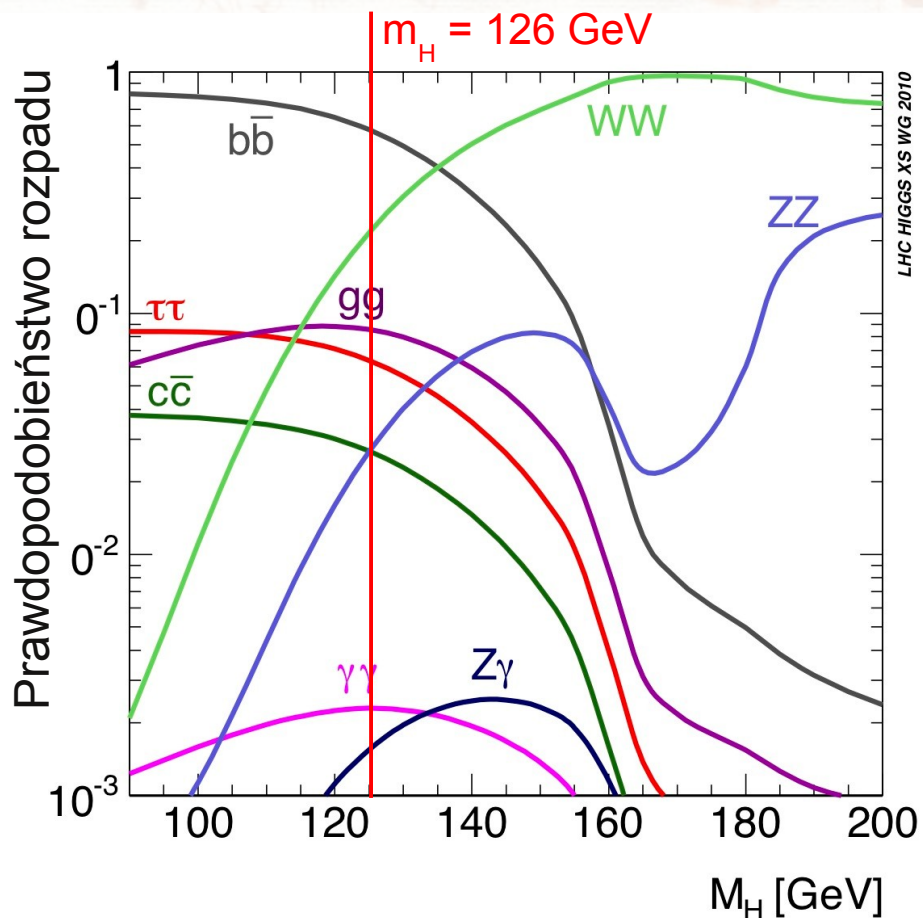
Status of the CMS SM Higgs Search

Joe Incandela
UCSB/CERN
July 4, 2012

CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Mon May 28 11:36:20 2012 CE51
Run: 34861, 350325
LHC sector: 05
CMS/proclog: 1000211 / 226



Bozon Higgsa



- Masa bozonu Higgsa jest wolnym parametrem Modelu Standardowego (wymaga pomiaru)
- Masa bozonu Higgsa określa jego częstość produkcji oraz kanały rozpadu
- Poszukiwania w różnych kanałach:

- Dobry pomiar masy:

- $H \rightarrow ZZ$ ($\rightarrow 4l$)
- $H \rightarrow \gamma\gamma$

Największa czułość, odkrycie 2012

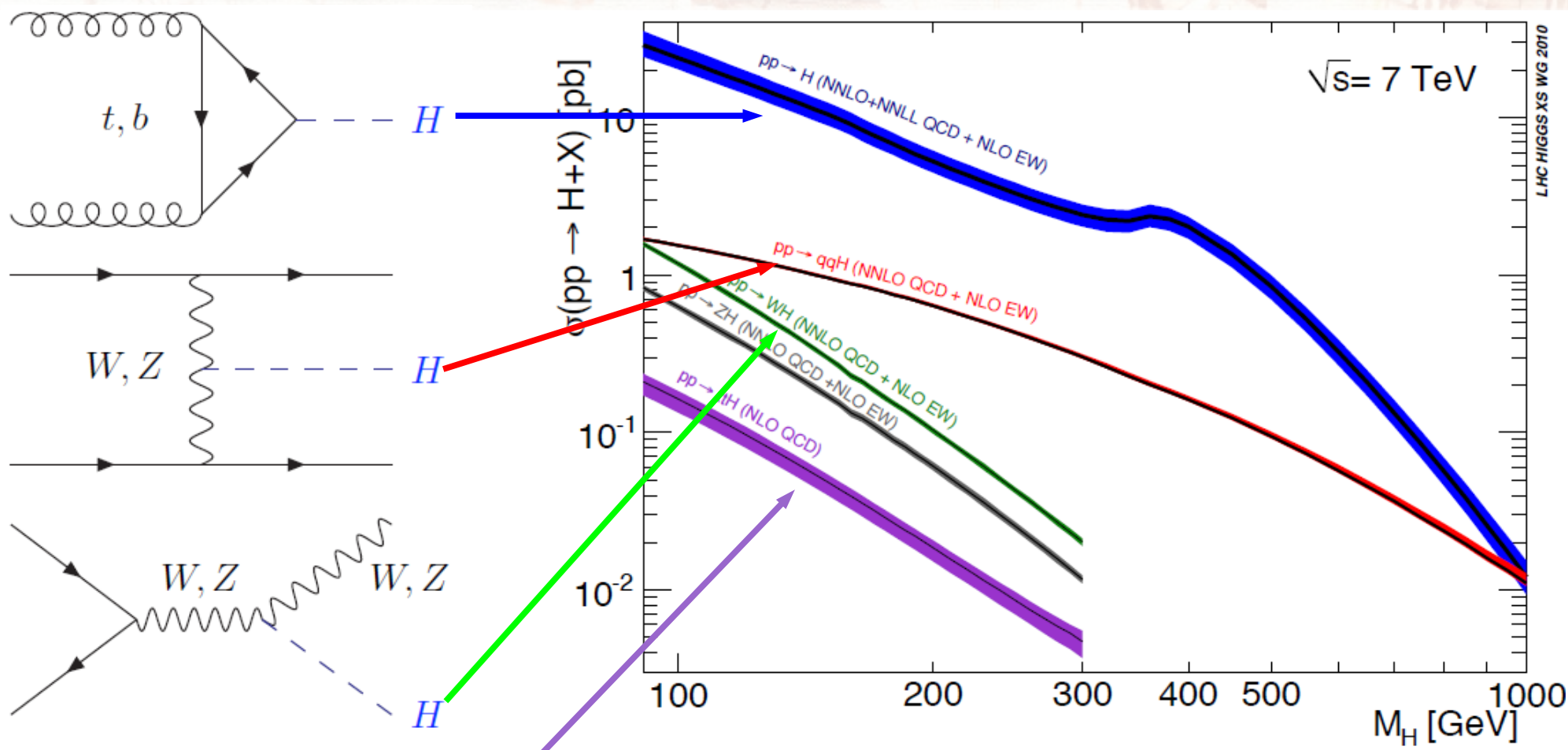
- Słaby pomiar masy:

- $H \rightarrow WW$ ($\rightarrow 2l2\nu$)
- **$H \rightarrow \tau\tau$**
- $H \rightarrow b\bar{b}$

Moja praca – kanał $H \rightarrow \tau\tau \rightarrow \mu\tau_{jet}$

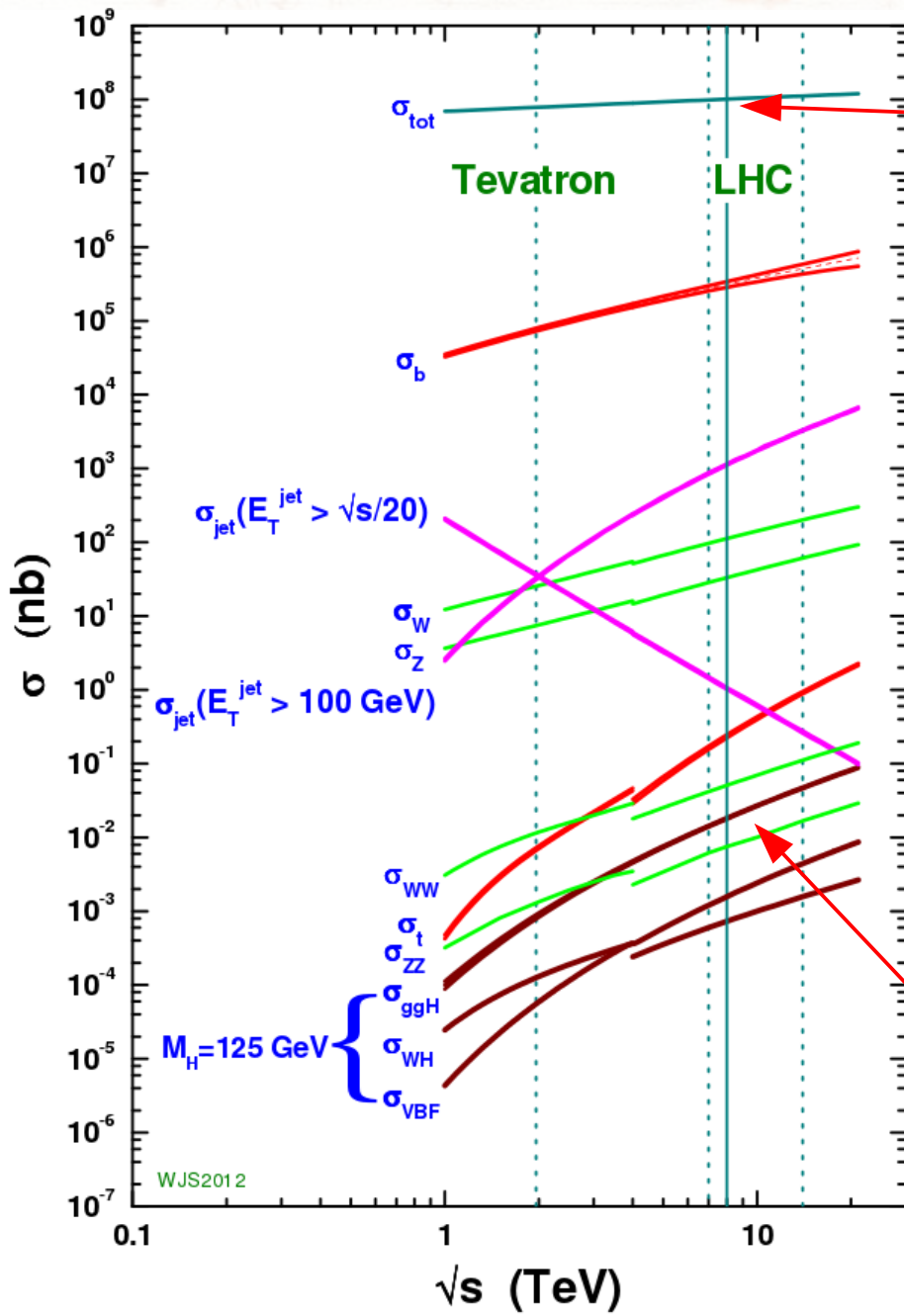
Wszystkie kanały ważne, pozwalają określić właściwości nowej cząstki. Np. czy Higgs sprzęga się do fermionów (kanały $\tau\tau$, $b\bar{b}$)?

Bozon Higgsa – kanały produkcji w LHC



- Częstość produkcji bozonu Higgsa zależy od jego masy
- Produkcja w różnych kanałach

Bozon Higgosa – częstość produkcji w LHC



~100 milionów oddziaływań pp na sekundę

Produkcja bozonu Higgosa ~10 rzędów wielkości mniejsza niż całkowita częstość zdarzeń. **Ogromne wyzwanie eksperymentalne!**

Produkcja bozonu Higgosa raz na kilkadziesiąt sekund

LHC



SUISSE
FRANCE

CMS

LHCb

CERN Prévessin

ATLAS

CERN Meyrin

SPS 7 km

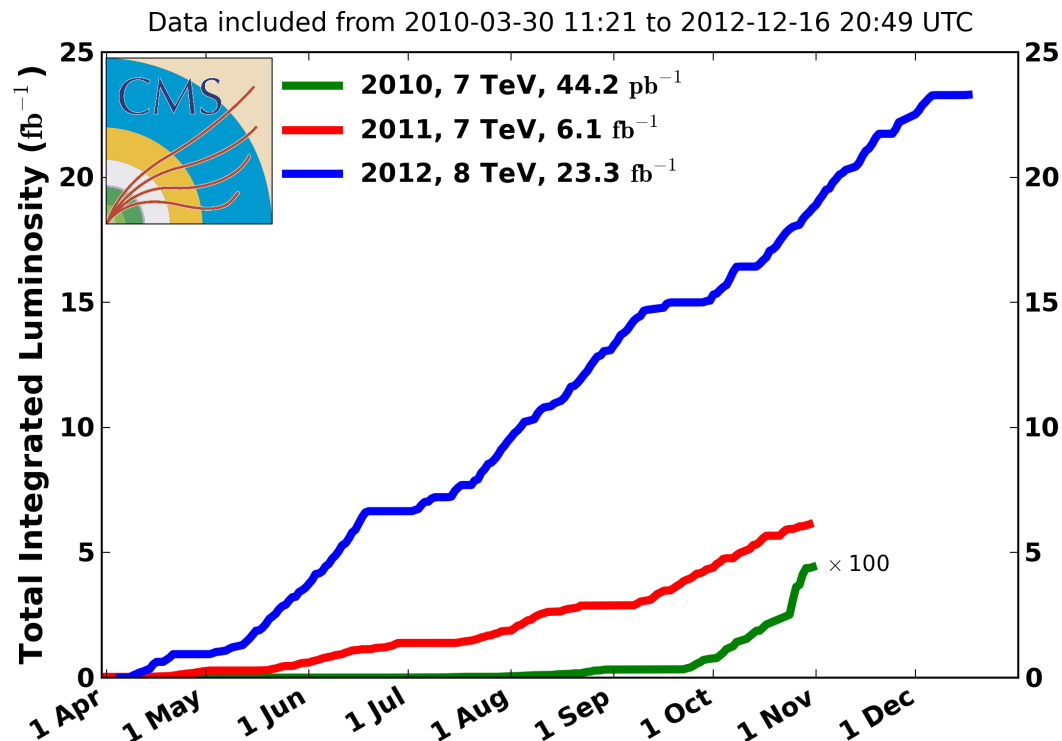
ALICE

LHC 27 km

LHC – zgromadzone dane

- W lutym 2013 LHC został wyłączony na około 2 lata
 - Ulepszenie do wyższych energii
- Dostępne dla analiz (CMS):
 - $\sim 20 \text{ fb}^{-1}$ @ 8TeV
 - $\sim 5 \text{ fb}^{-1}$ @ 7TeV

CMS Integrated Luminosity, pp



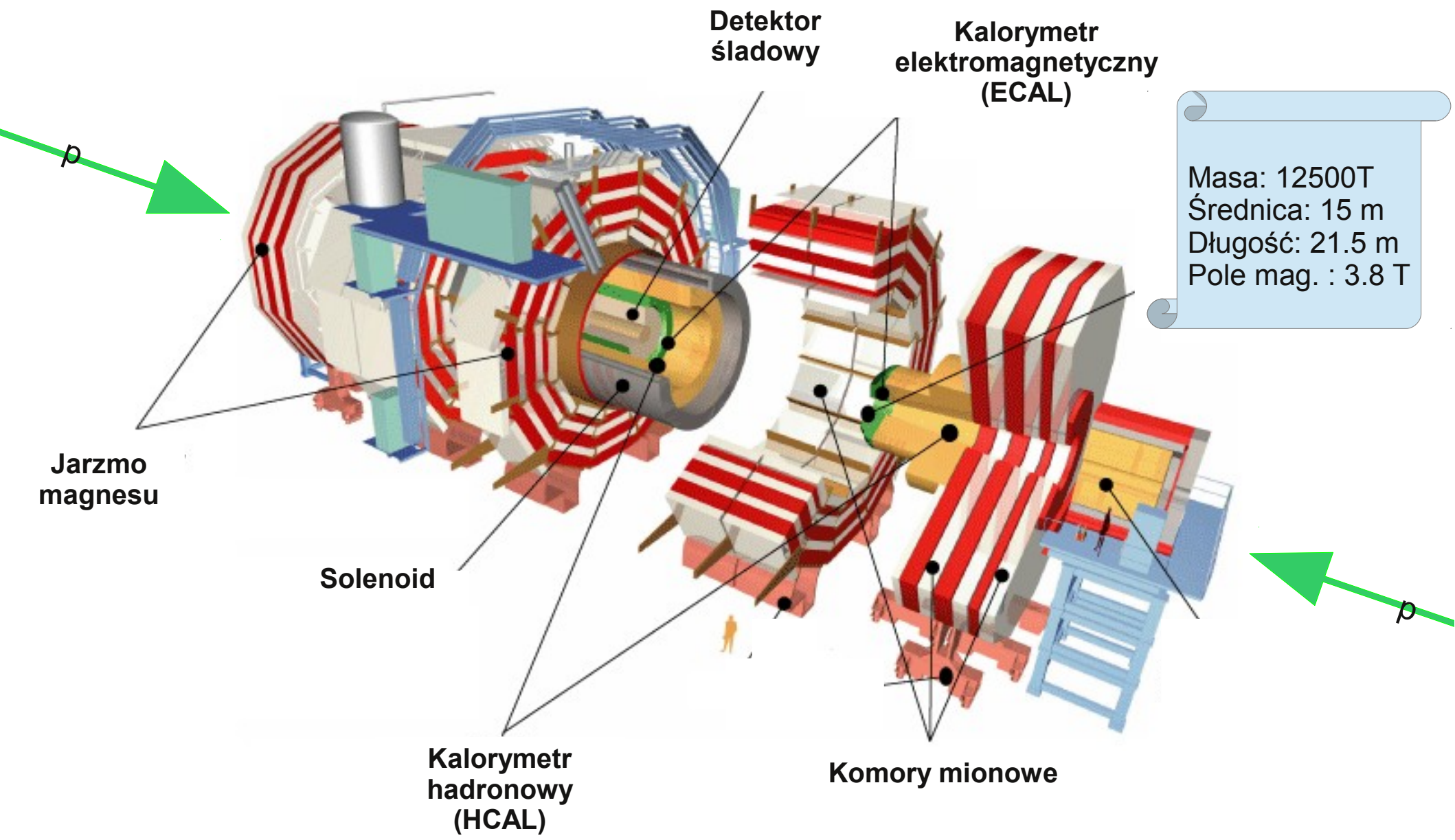
Comments (16-Feb-2013 08:25:13)

*** END OF RUN 1 ***

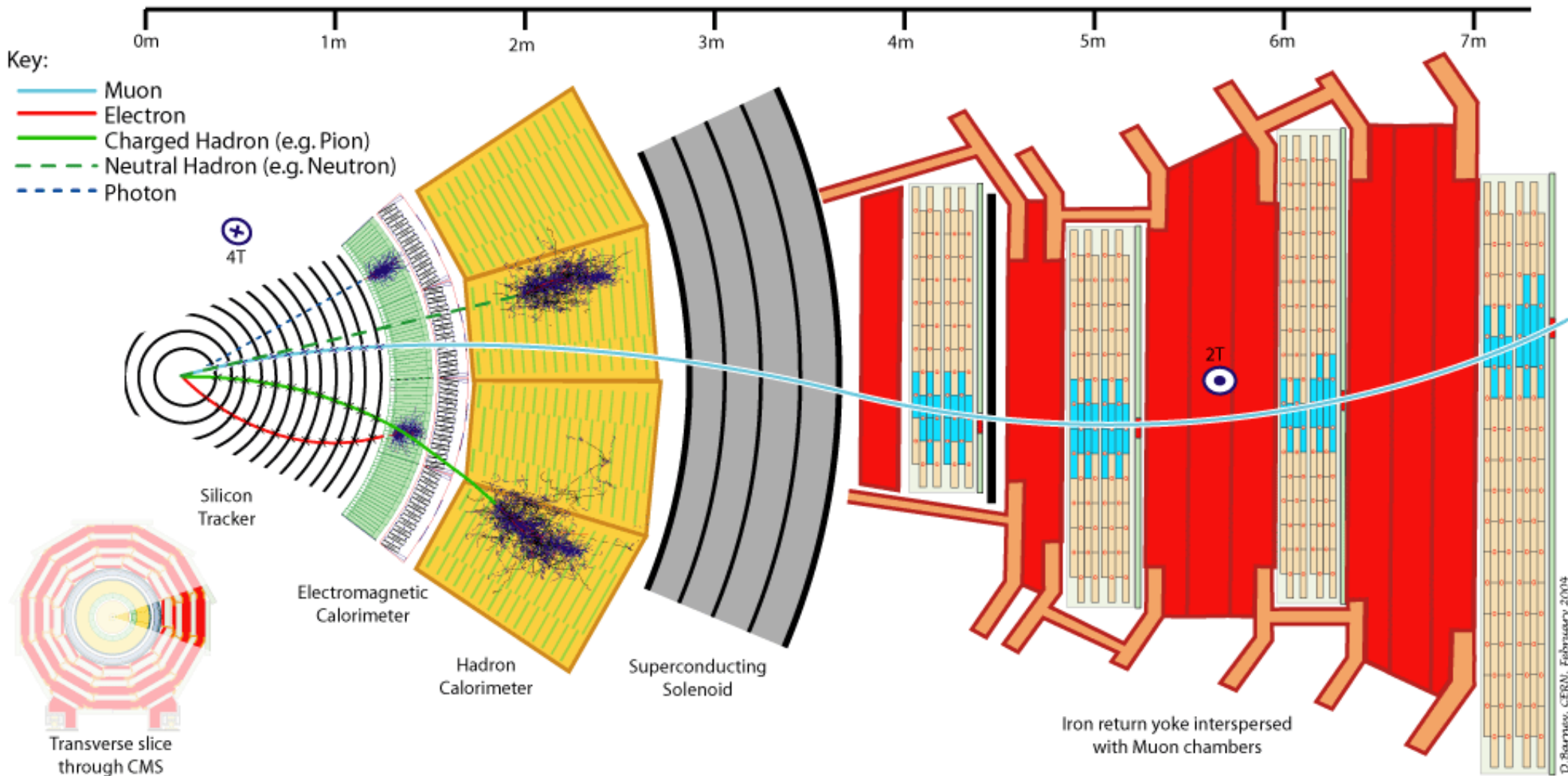
No beam for a while. Access required
time estimate: ~2 years

AFS: Single_36b_4_16_16_4bpi9inj

Compact Muon Solenoid



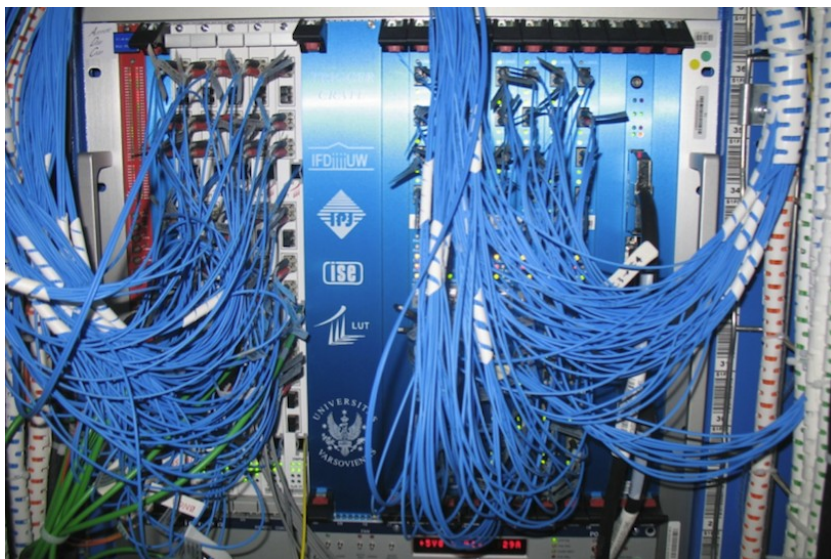
Compact Muon Solenoid (2)



System wyzwalania w CMS



- W LHC częstość zderzeń pp to $\sim 40\text{MHz}$
- W CMS do późniejszej analizy możemy wybrać $O(100)$ Hz przypadków
 - Wyboru (online) dokonuje system wyzwalania eksperymentu CMS
- Częścią systemu wyzwalania jest tryger na miony w oparciu o komory RPC (**R**esistive **P**late **C**hambers) zaprojektowany i zbudowany w Warszawie (UW+NCBJ+PW)

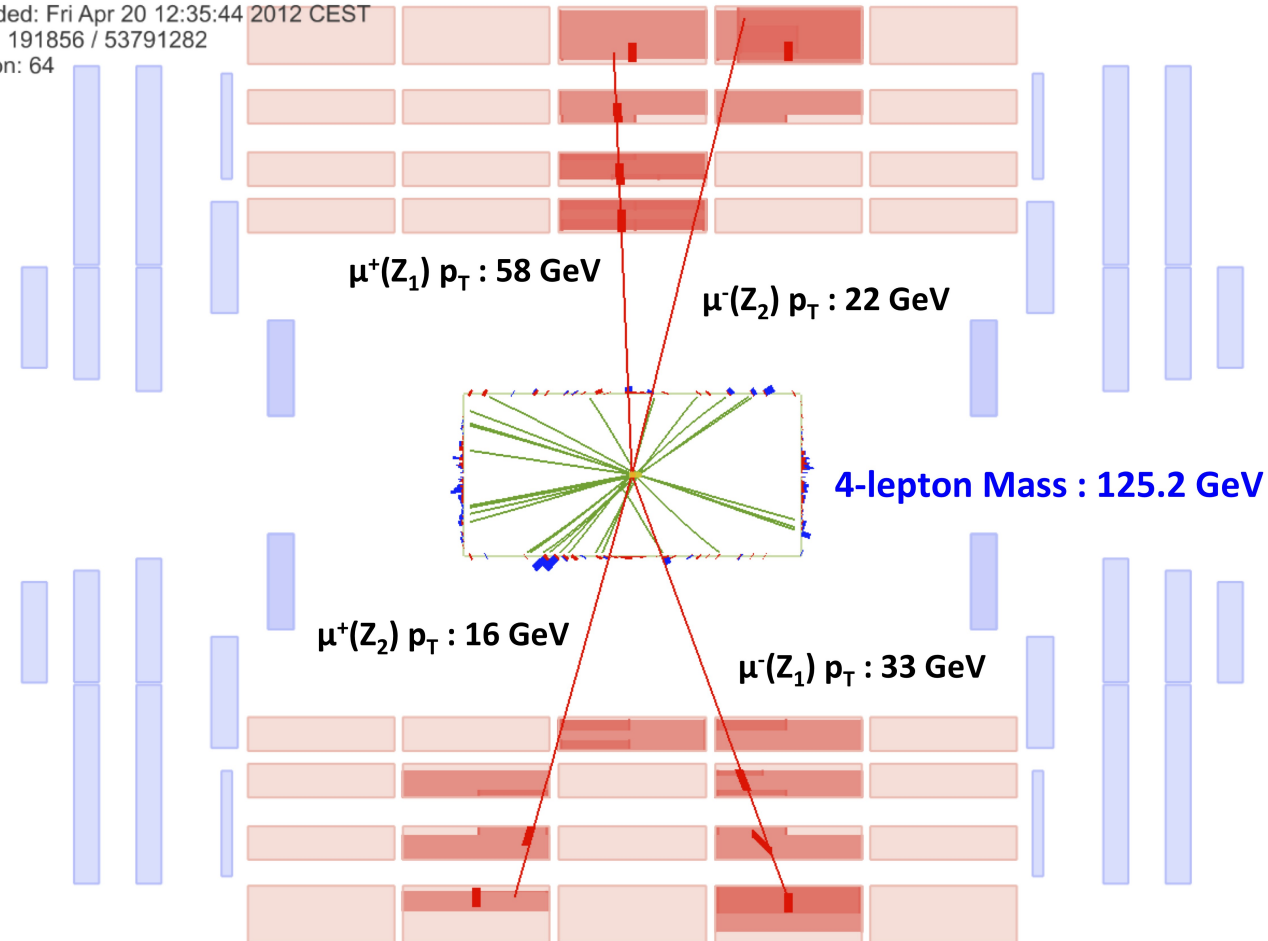


Bozon Higgsa – jak szukamy?

na przykładzie kanału $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell$

- Higgs jest cząstką niestabilną, niemal natychmiast rozpadającą się na lżejsze cząstki, np. $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$
- Detektor CMS mierzy produkty rozpadu (tutaj – 4 miony). Znając pędy zarejestrowanych cząstek wyznaczamy masę rozpadającej się cząstki (licząc masę niezmienniczą 4 leptonów)

CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Fri Apr 20 12:35:44 2012 CEST
Run/Event: 191856 / 53791282
Lumi section: 64

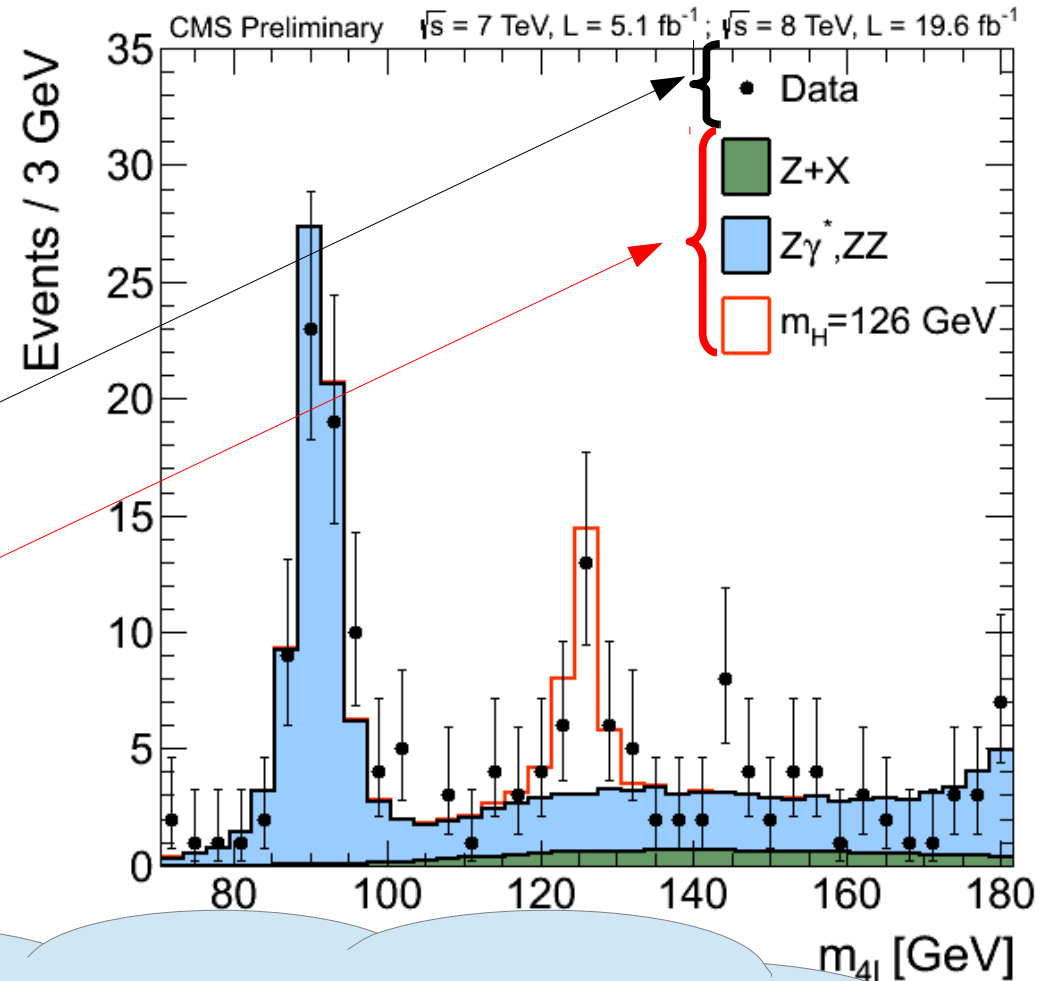


- W Modelu Standardowym są inne procesy o podobnej sygnaturze:
 - Stosujemy procedurę selekcyjną, aby poprawić stosunek liczby przypadków sygnałowych do tła

Bozon Higgsa – jak szukamy (2)?

na przykładzie kanału $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$

- Prezentacja (pośredniego) wyniku - porównanie rozkładów wybranej zmiennej dla
 - Danych
 - Oczekiwań dla tła i sygnału
- Tutaj – rozkład masy niezmienniczej 4 leptonów

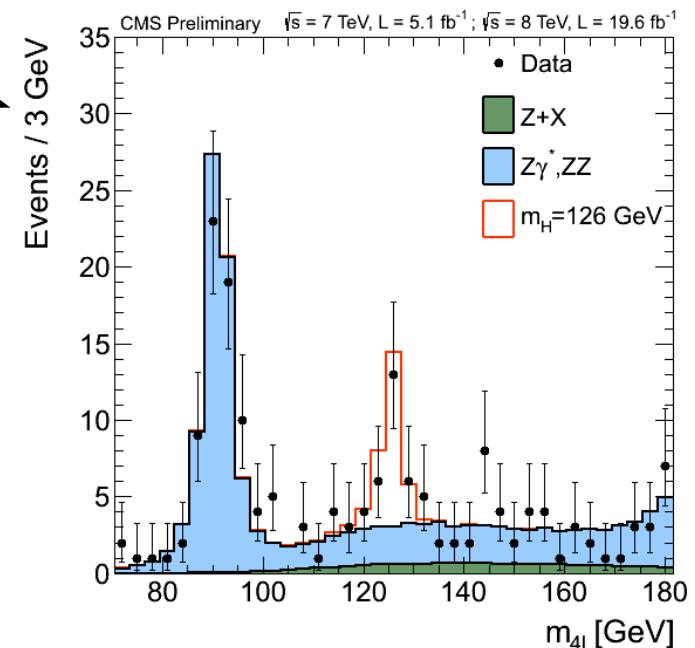
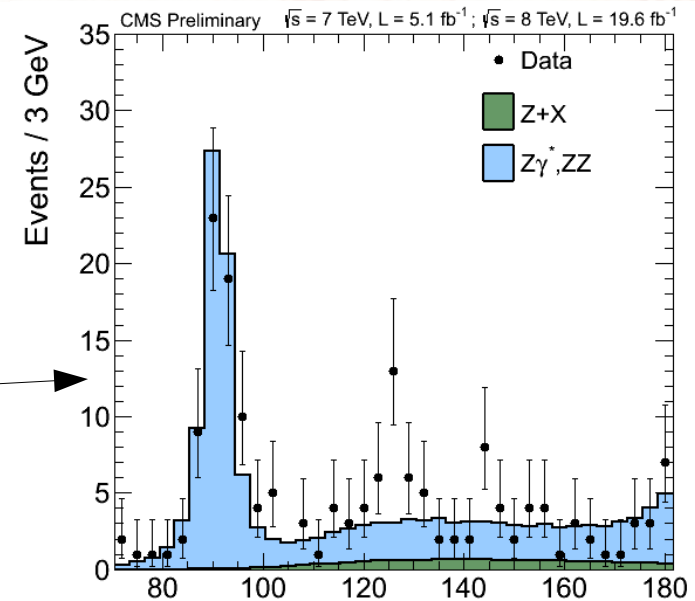


Poszukiwanie bozonu Higgsa
– czy widzimy spodziewaną nadwyżkę
(z produkcji bozonu Higgsa)
ponad oczekiwane tło

Wykluczenia

na przykładzie kanału $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$

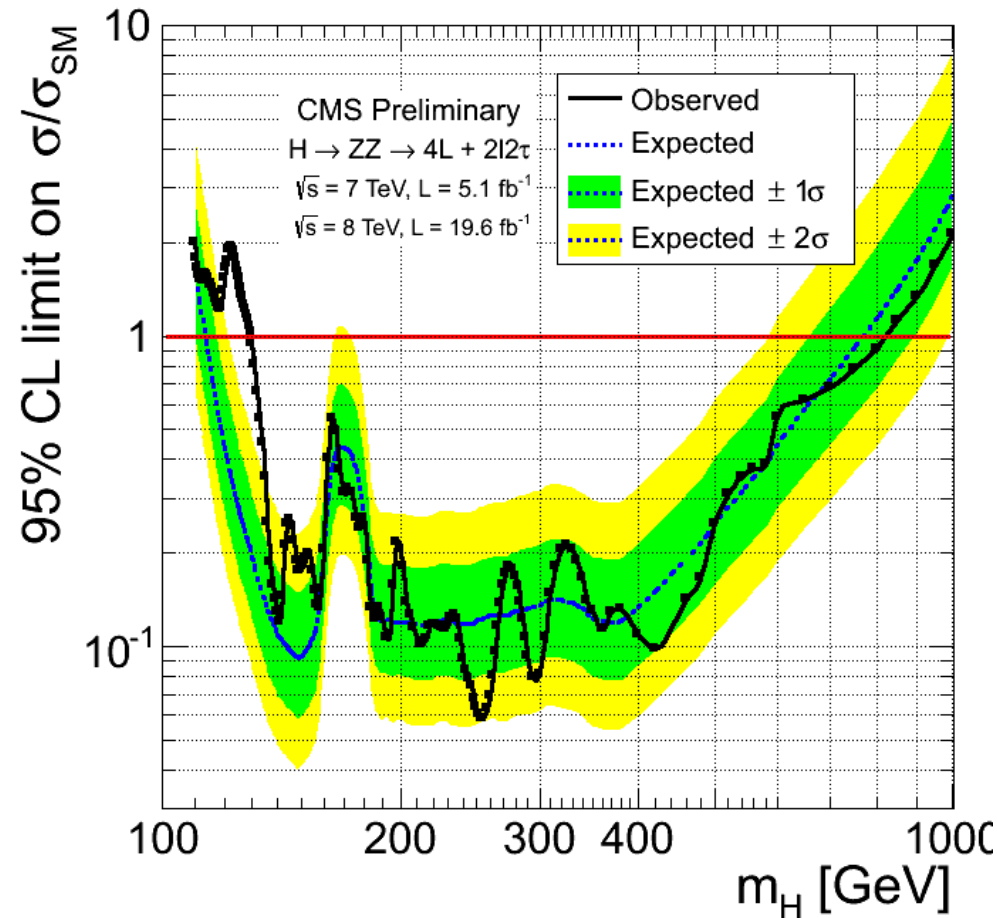
- Inne sformułowanie problemu – która z hipotez lepiej opisuje dane eksperymentalne:
 - Samo tło
 - Tło + sygnał ?
- Pytanie to zwykle formułujemy szerzej – dla jakich przekrojów czynnych na produkcje nowej cząstki powinniśmy coś zobaczyć?



Wyniki - wykluczenia

na przykładzie kanału $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$

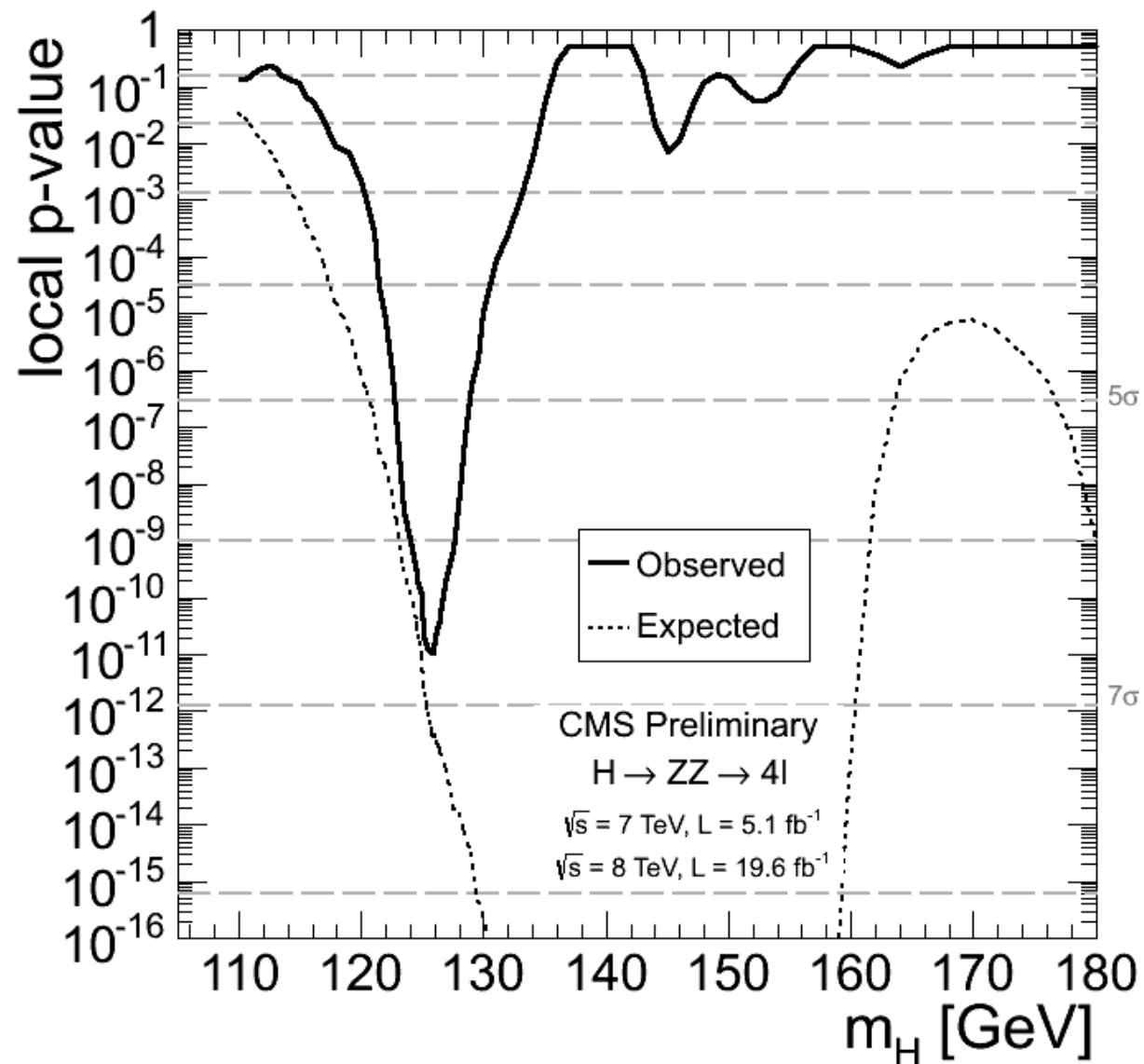
- Prezentacja wyniku - ograniczenie na wartość przekroju czynnego na produkcje bozonu Higgsa względem przewidywanej przez Model Standardowy
- Jeśli obserwowana krzywa schodzi poniżej 1 - dla danej masy wykluczamy Model Standardowy
- Zaznaczone wartości obserwowane, oczekiwane oraz zakres fluktuacji wartości oczekiwanych ($1\sigma, 2\sigma$)
- Zakres wykluczenia - 130~700 GeV



Wyniki - odkrycie

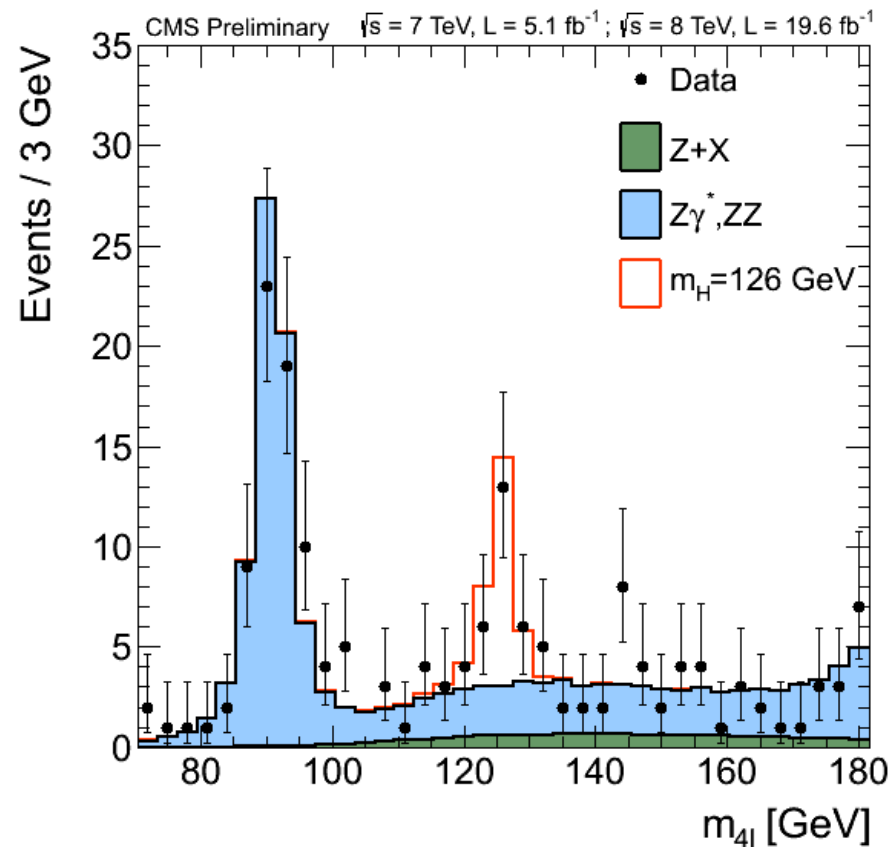
na przykładzie kanału $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$

Jakie jest
prawdopodobieństwo,
że w wyniku fluktuacji
tła otrzymamy
obserwowaną lub
większą nadwyżkę
przypadków?



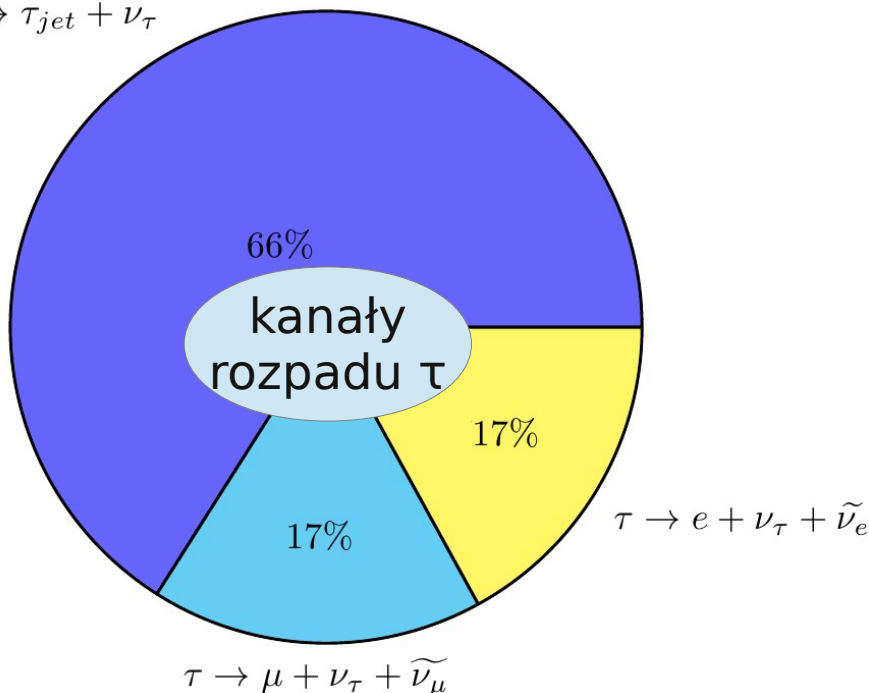
Szacowanie tła

- Szacowanie spodziewanej liczby przypadków tła i sygnału kluczowe dla poszukiwań
- Dwie możliwości szacowania oczekiwanej liczby przypadków
 - Z symulacji (**Monte Carlo, MC**)
 - Zależy od pomiaru świetlności i obliczeń przekroju czynnego
 - „Data driven” (ekstrapolacja z obszaru kontrolnego)
 - Unikamy części niepewności systematycznych (np. związanych z dokładnością pomiaru świetlności)

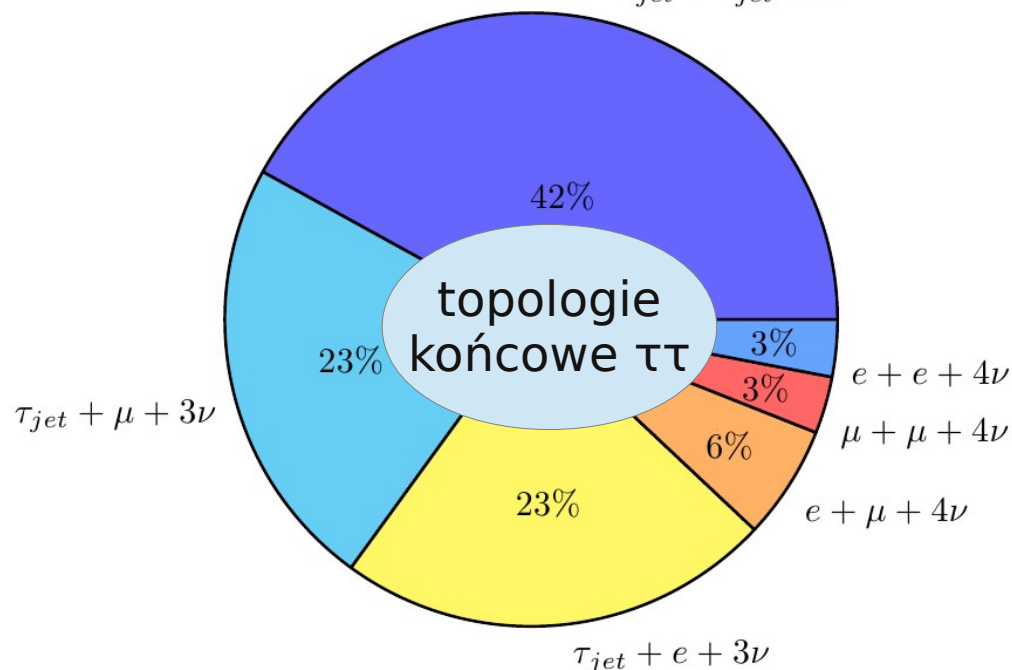


$H \rightarrow \tau\tau \rightarrow \mu\tau_{jet}$ - wprowadzenie

$$\tau \rightarrow \tau_{jet} + \nu_\tau$$



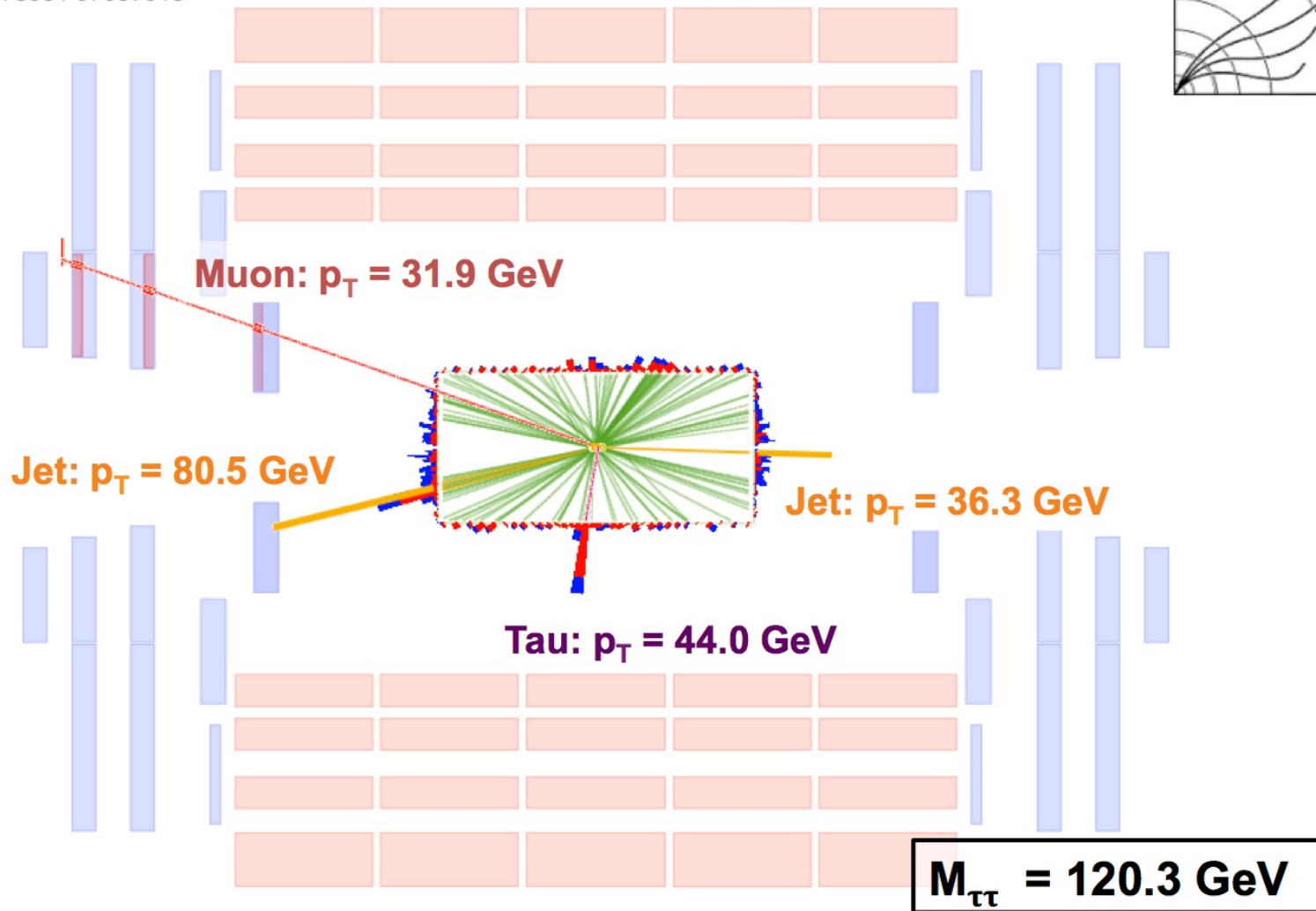
$$\tau_{jet} + \tau_{jet} + 2\nu$$



- Dla niskich mas BH (do ~ 150 GeV) kanał $H \rightarrow \tau\tau$ jest jednym z ważnych kanałów poszukiwań
- Lepton τ rozpada się niemal natychmiast ($t = 3 \times 10^{-13}$ s) na lżejsze cząstki:
 - 66% - hadronowo (produkowany dżet, τ_{jet})
 - 17% - na mion
 - 17% - na elektron
- W dalszej części prezentacji skupie się na stanie końcowym $\tau_{jet}\mu$:
 - Kanał trudniejszy od $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ ze względu na dżet w stanie końcowym
 - Niepełna rekonstrukcja masy (neutrina w stanie końcowym)
 - Oczekiwane znacznie większe tło

$$H \rightarrow \tau\tau \rightarrow \mu\tau_{\text{jet}}$$

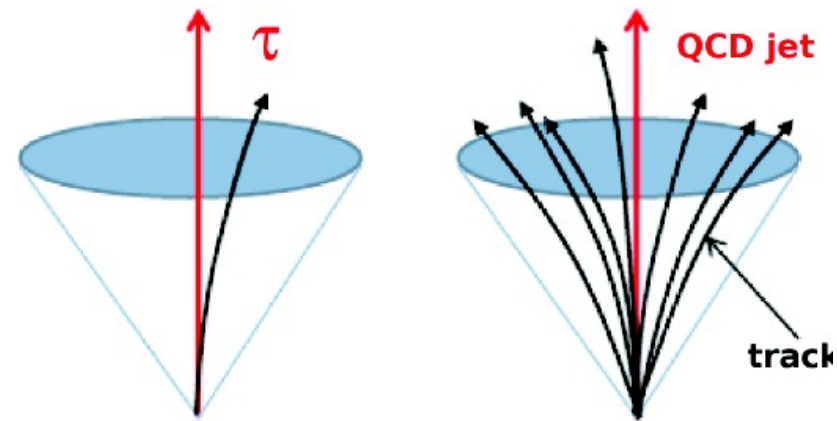
CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Sun Nov 25 00:15:46 2012 CEST
Run/Event: 207898 / 97057018



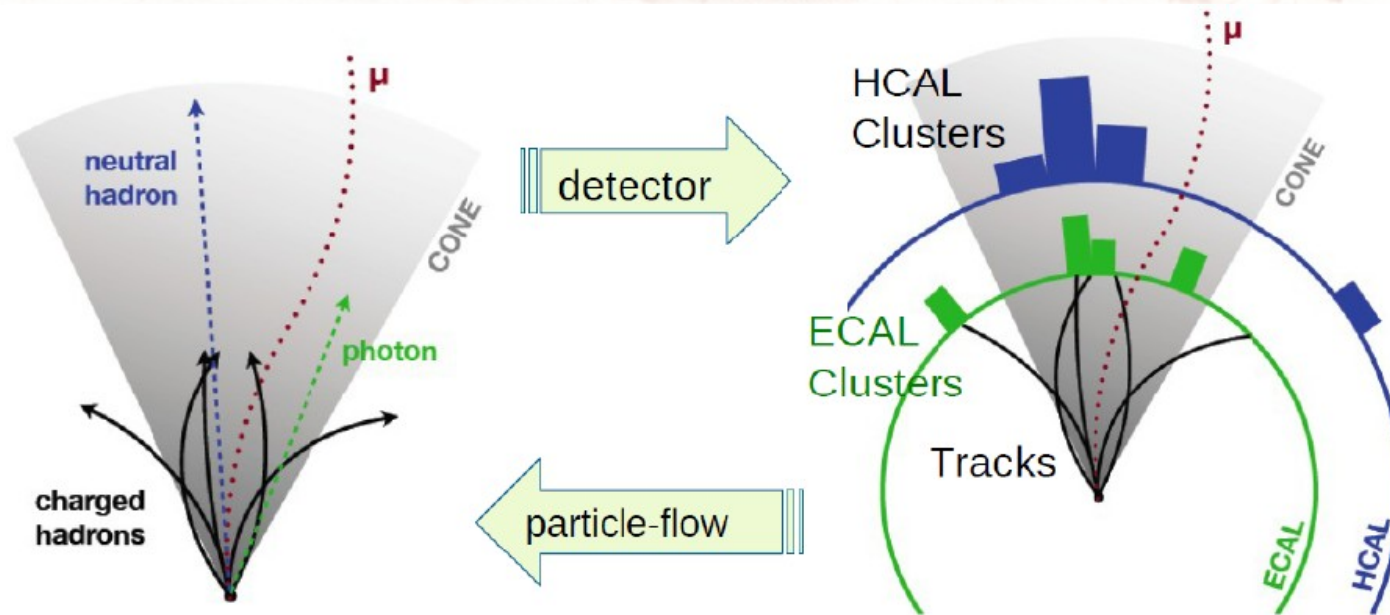
Identyfikacja hadronowych rozpadów τ

Decay mode	Resonance	Mass (MeV/c ²)	Branching ratio (%)
$\tau^- \rightarrow h^- \nu_\tau$			11.6
$\tau^- \rightarrow h^- \pi^0 \nu_\tau$	ρ^-	770	26.0
$\tau^- \rightarrow h^- \pi^0 \pi^0 \nu_\tau$	a_1^-	1200	10.8
$\tau^- \rightarrow h^- h^+ h^- \nu_\tau$	a_1^-	1200	9.8
$\tau^- \rightarrow h^- h^+ h^- \pi^0 \nu_\tau$			4.8
Other hadronic			1.7
Total hadronic			64.8

- Chcemy odróżnić hadronowe rozpady τ od dżetów QCD, elektronów, mionów i innych
- Rozpady τ - skolimowane dżety z 1 lub 3 śladami



Rekonstrukcja Particle Flow

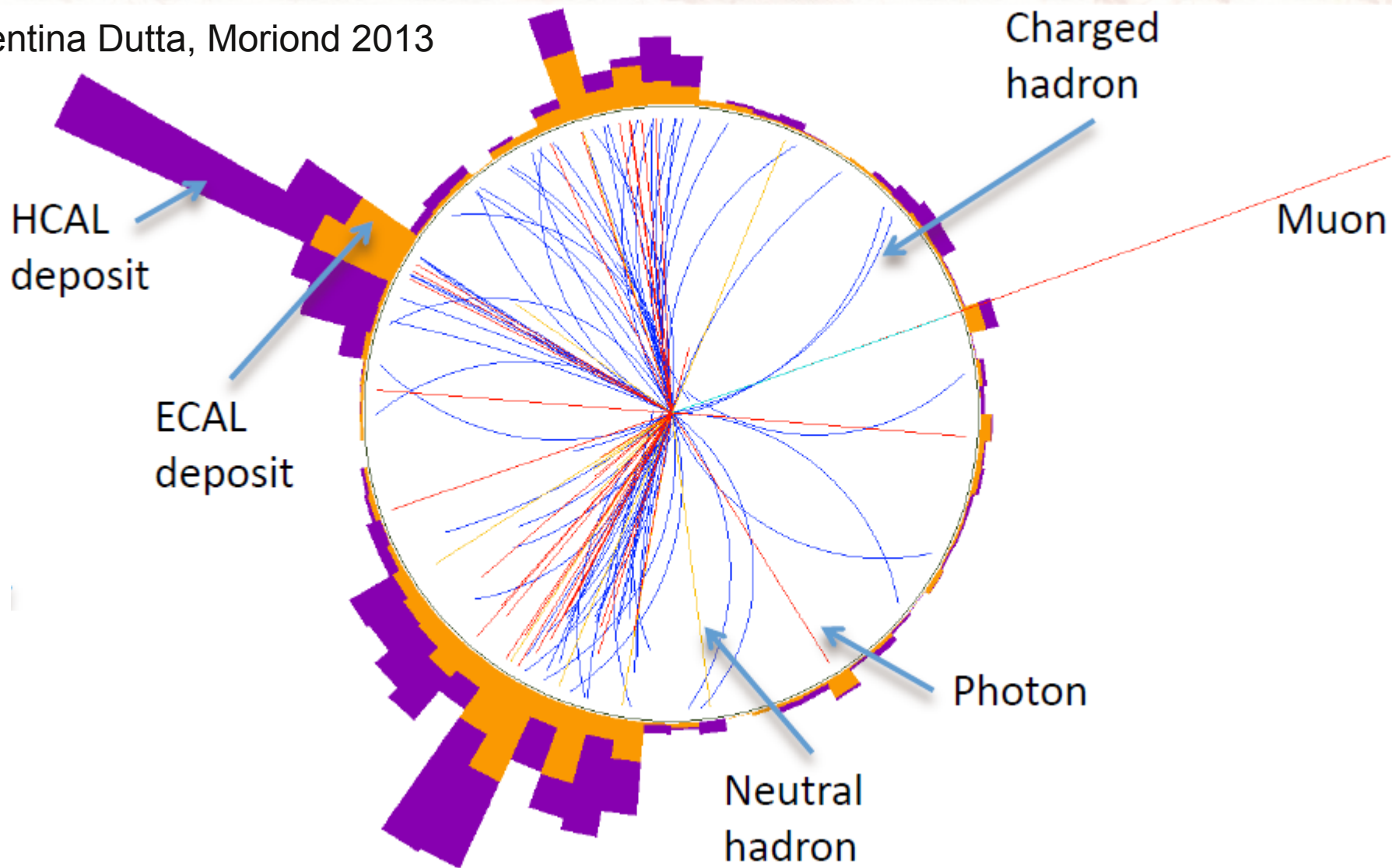


- Algorytm Particle Flow:

- Informacja ze wszystkich detektorów łączona aby zidentyfikować cząstki obecne w zderzeniu
- Cząstka sklasyfikowana jako h^{\pm} , h^0 , γ , μ , e
- Otrzymana lista cząstek jest punktem startowym dla algorytmów rekonstrukcji dżetów, MET, hadronowych rozpadów τ , ...

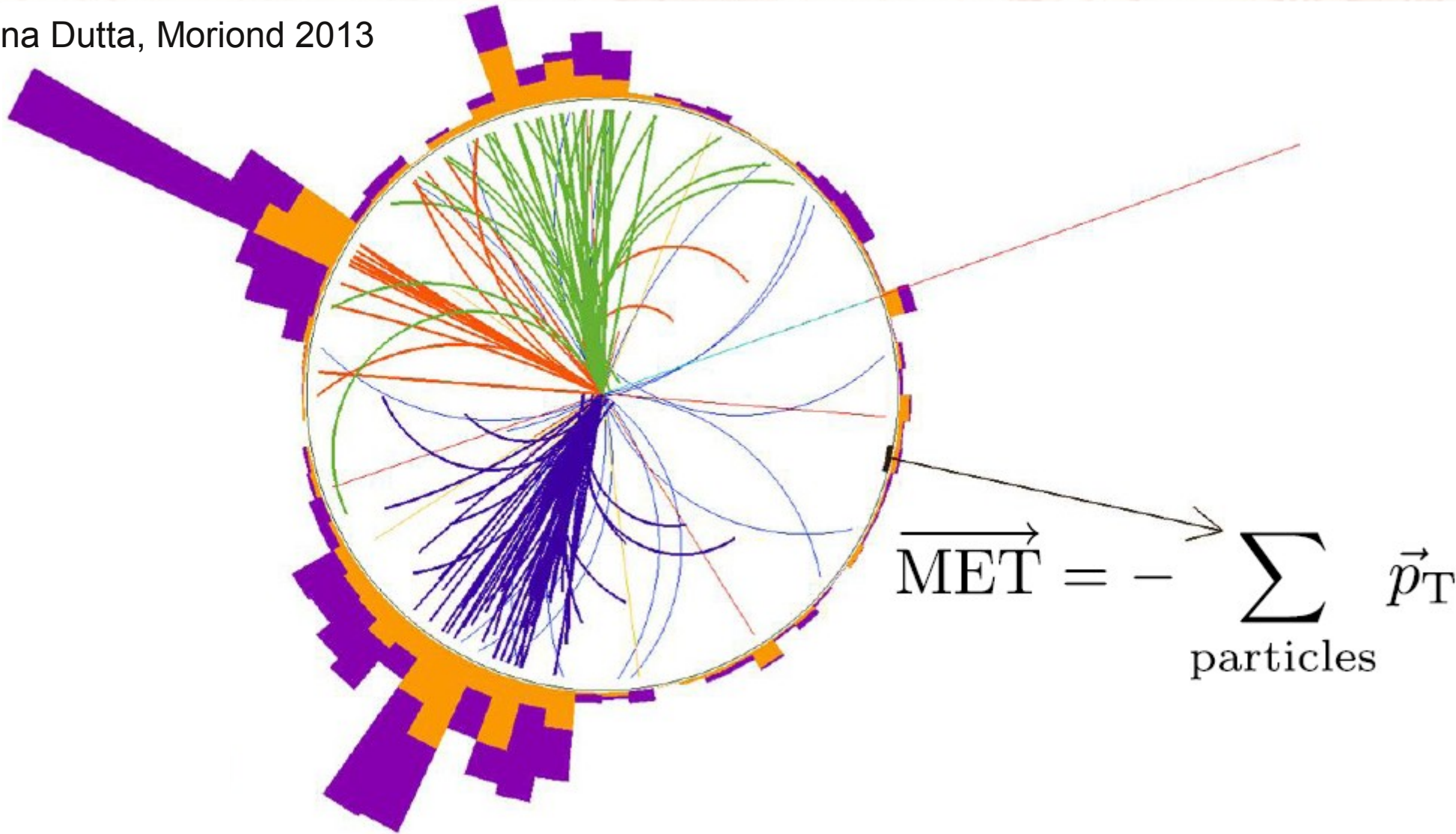
Rekonstrukcja Particle Flow

Valentina Dutta, Moriond 2013



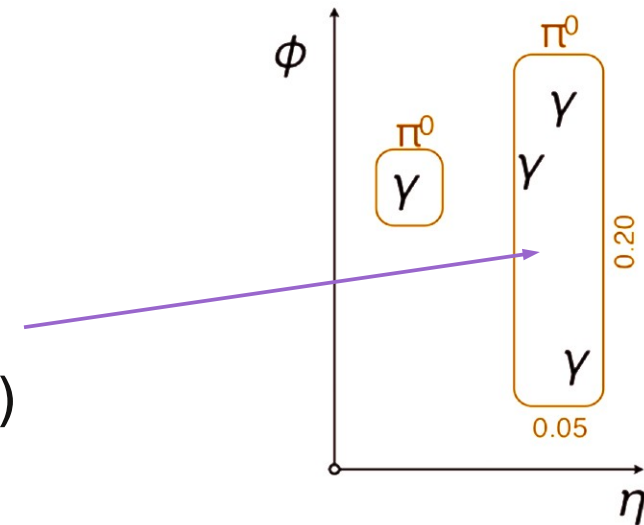
MET

Valentina Dutta, Moriond 2013



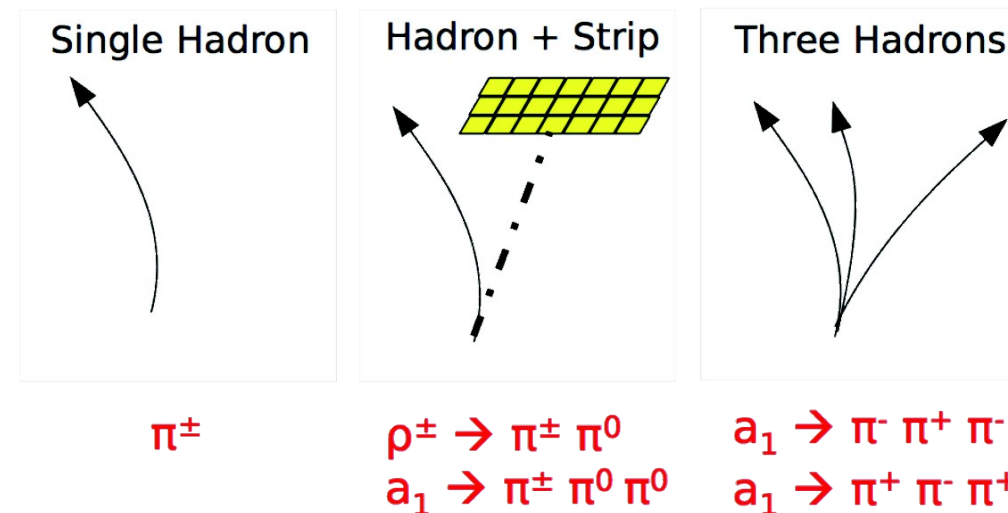
Algorytm Hadron Plus Strips (HPS)

- Fotony często konwertują do pary e^+e^- przed osiągnięciem ECALa
- Gięcie torów – odpowiedź w kalorymetrze wąska w η , szeroka w ϕ
- Elektrony i Fotony (zrekonstruowane wcześniej przez algorytm Particle Flow) łączone w „paski” („strips”)



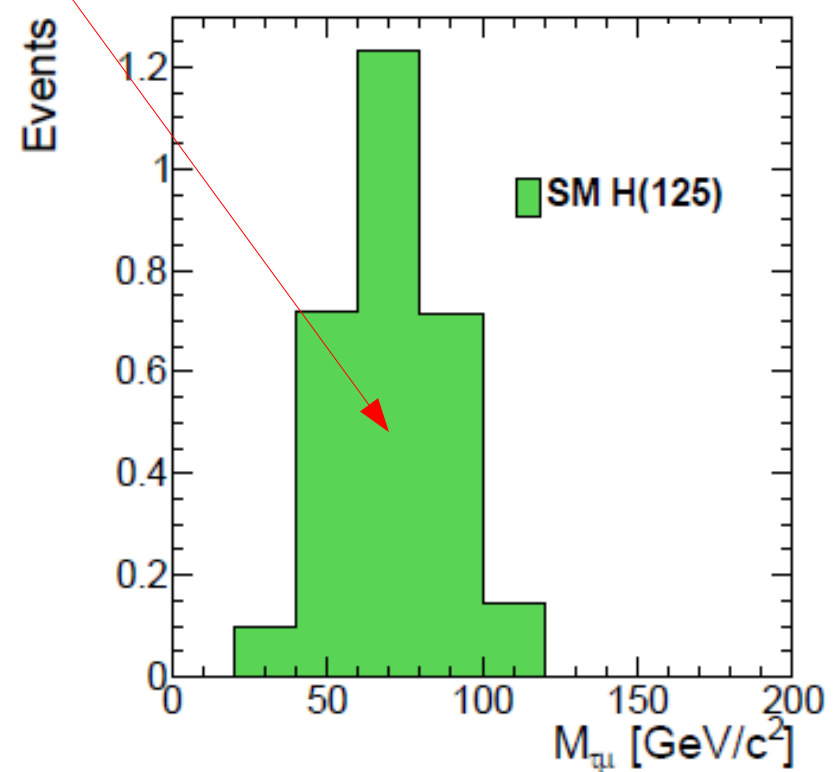
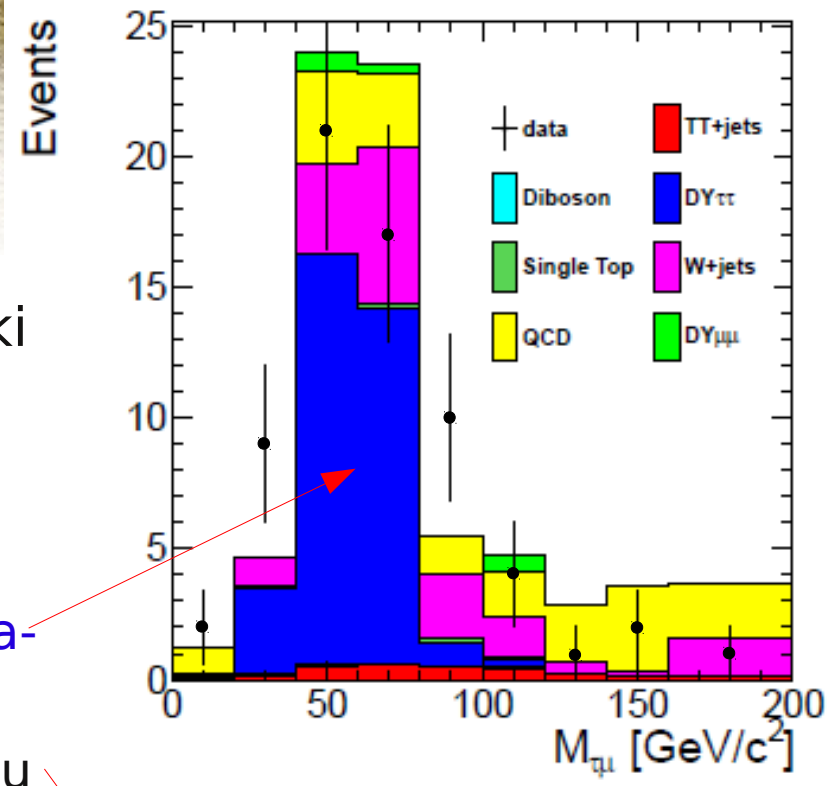
- Rekonstrukcja HPS:

- Zrekonstruowana tor i paski są łączone (bliskość w przestrzeni)
- Wymaganie masy niezmienniczej właściwej dla danego rezonansu

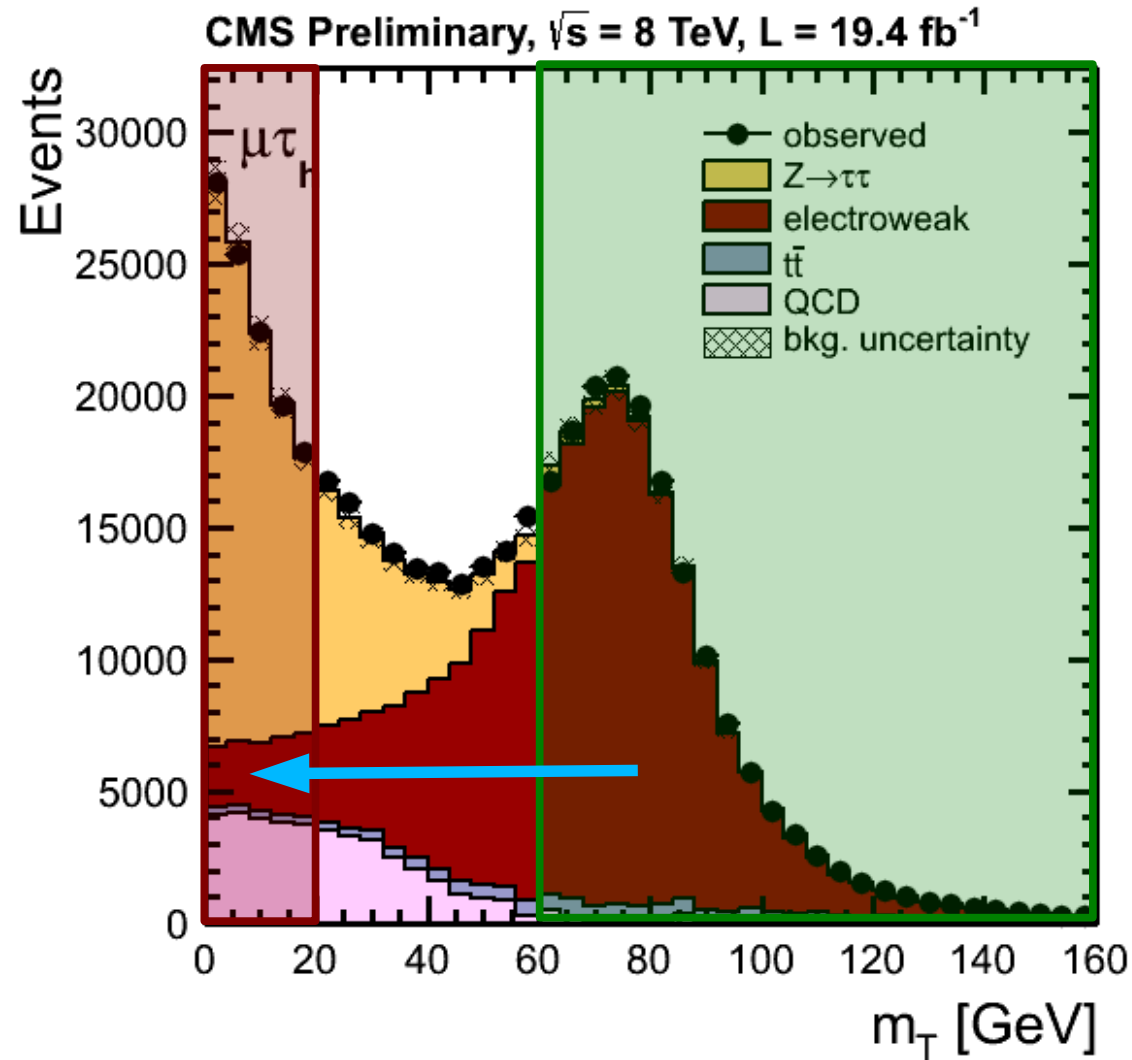


$H \rightarrow \tau\tau \rightarrow \mu\tau_{jet}$ - analiza

- Przedstawiona analiza dla mniejszej próbki danych LHC (5 fb^{-1} @ 7TeV)
- Oczekiwany rozkład przypadków po procedurze selekcyjnej
 - Główne, nieredukowalne tło - proces Drell-Yana (DY) w $\tau\tau$
 - Mała liczba przypadków z rozpadów bozonu Higgsa
- **Grupa Warszawska CMS zaangażowana jest w poszukiwania bozonu Higgsa w kanale $\tau\tau$. Główna działalność - opracowanie metod szacowanie tła**
 - Przykład - szacowanie tła DY $\tau\tau$ metodą osadzania (technika prawie w całości opracowana w ramach prac grupy)



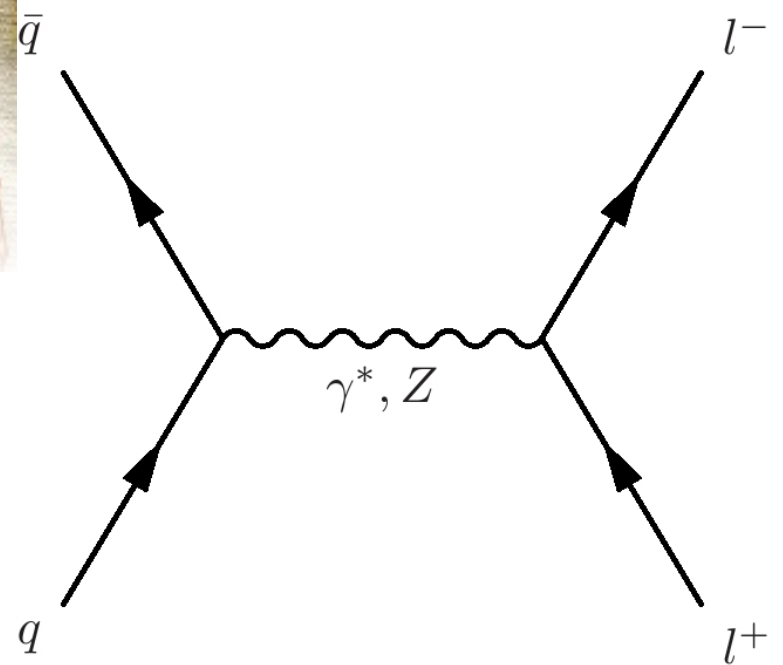
$H \rightarrow \tau\tau \rightarrow \mu\tau_{jet}$ - szacowanie tła



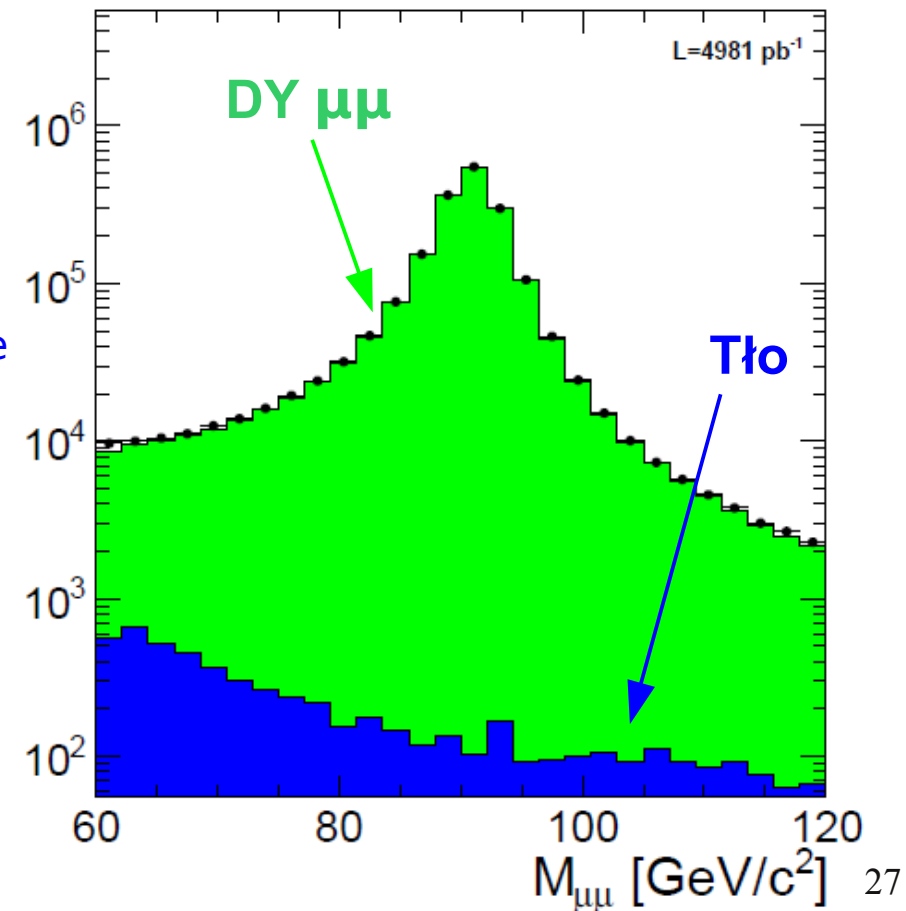
$$m_T = \sqrt{2p_T E_T^{\text{miss}} (1 - \cos(\Delta\phi))}$$

- Tło DY $\tau\tau$ szacowane techniką osadzania (o czym za chwile)
- Tło W - ekstrapolacja z obszaru kontrolnego (wysoka masa poprzeczna) do obszaru sygnałowego
- QCD - obszar kontrolny to przypadki gdzie mion i τ_{jet} mają ten sam znak
- Pozostałe kanały tła - szacowane z symulacji

Proces Drellia-Yana (DY)

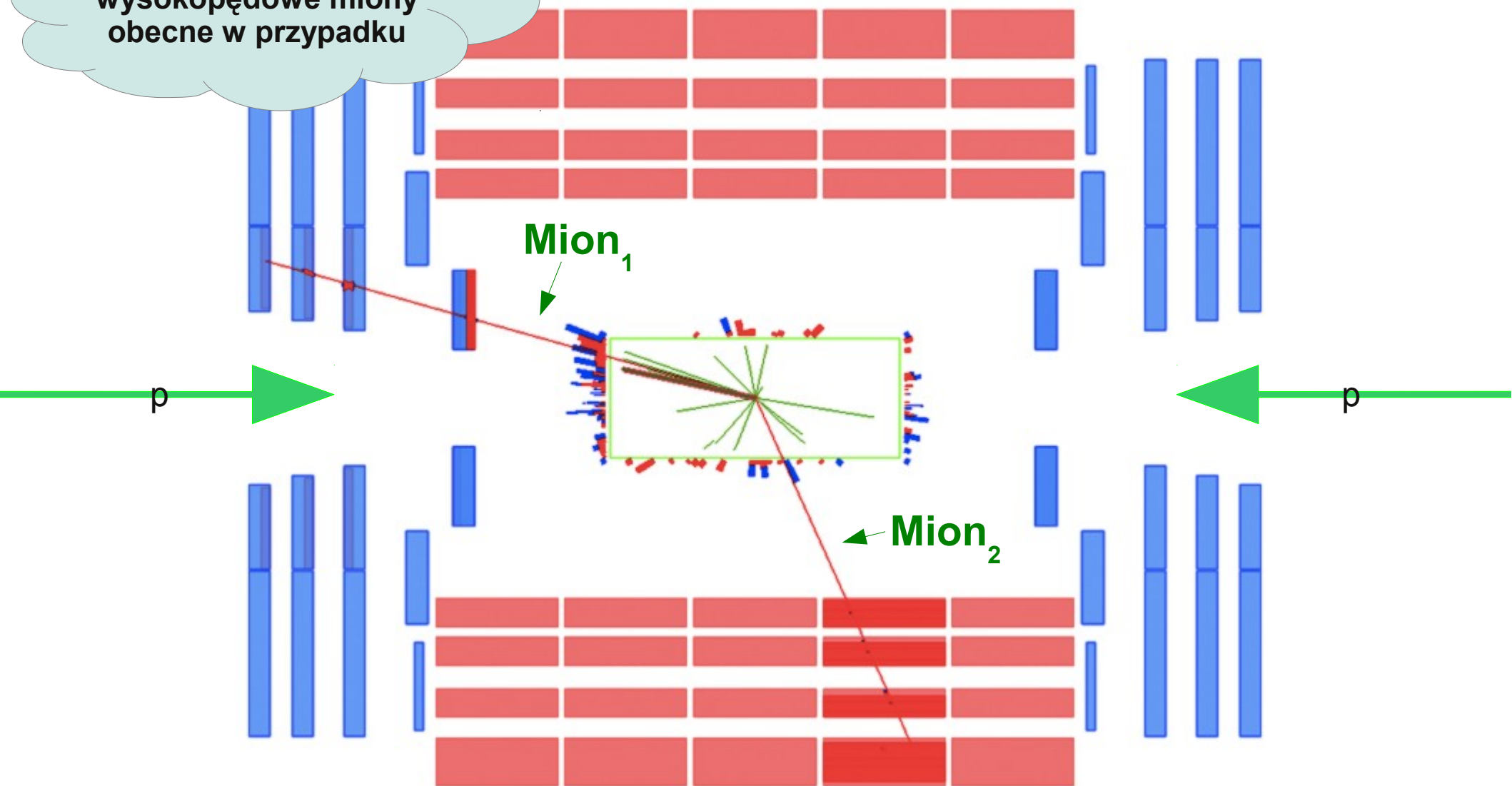


- Proces niemal identyczny dla wszystkich leptonów – równa częstość prod. dla e^+e^- , $\mu^+\mu^-$ i $\tau^+\tau^-$
- Przypadki DY $\mu\mu$ są łatwe w selekcji (dwa izolowane miony, niskie tło)
- Metoda szacowania tła DY $\tau\tau$: w zarejestrowanych przez detektor CMS przypadkach DY $\mu\mu$ miony zastępowane przez symulowane rozpady τ – **metoda osadzania (τ embedding)**:
 - Pędy τ określane na podstawie pędów mionów
 - Dopełnieniem metody jest procedura normalizacji, uwzględniająca m.in. efektywność selekcji DY $\mu\mu$
 - Otrzymane zdarzenia są w standardowym formacie CMSu (łatwe do użycia przez zwykłego użytkownika)
- **Tło DY $\tau\tau$ szacowane dzięki łatwym w selekcji przypadkom DY $\mu\mu$**
 - Unikamy też niektórych niepewności systematycznych (np. brak zależności od funkcji struktury protonu)



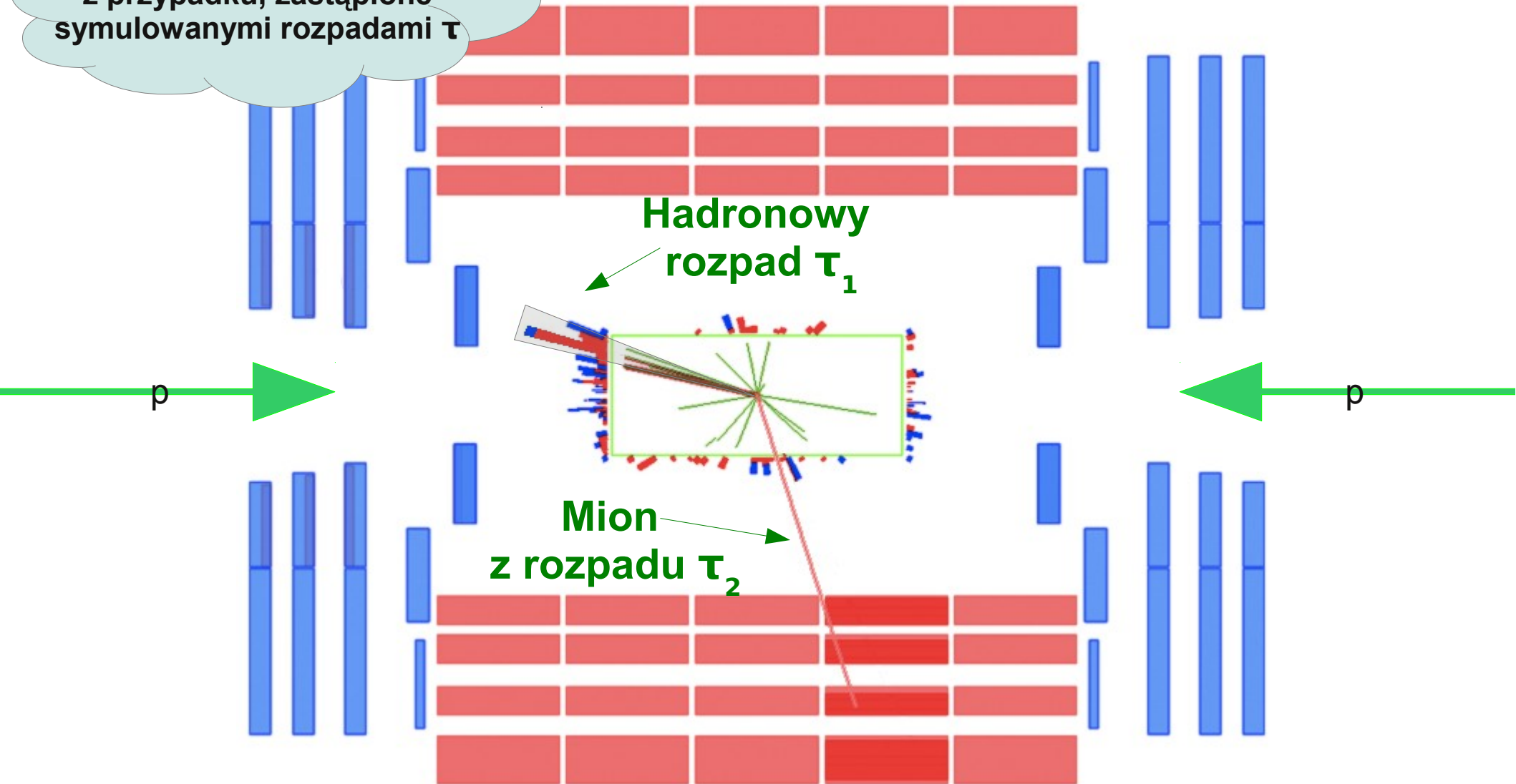
Przed osadzaniem - przypadek DY $\mu\mu$

Dwa izolowane
wysokopędowe miony
obecne w przypadku



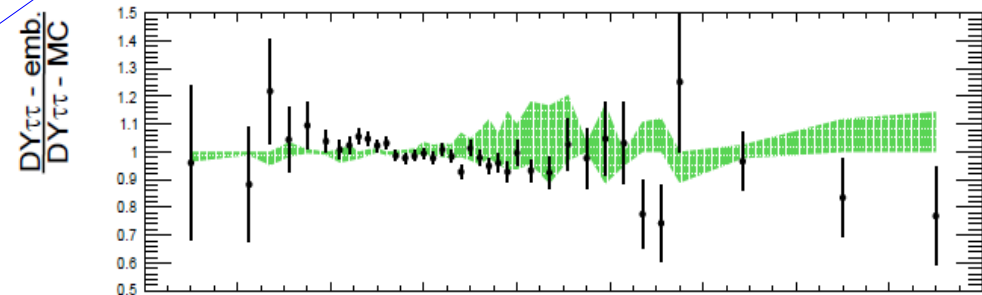
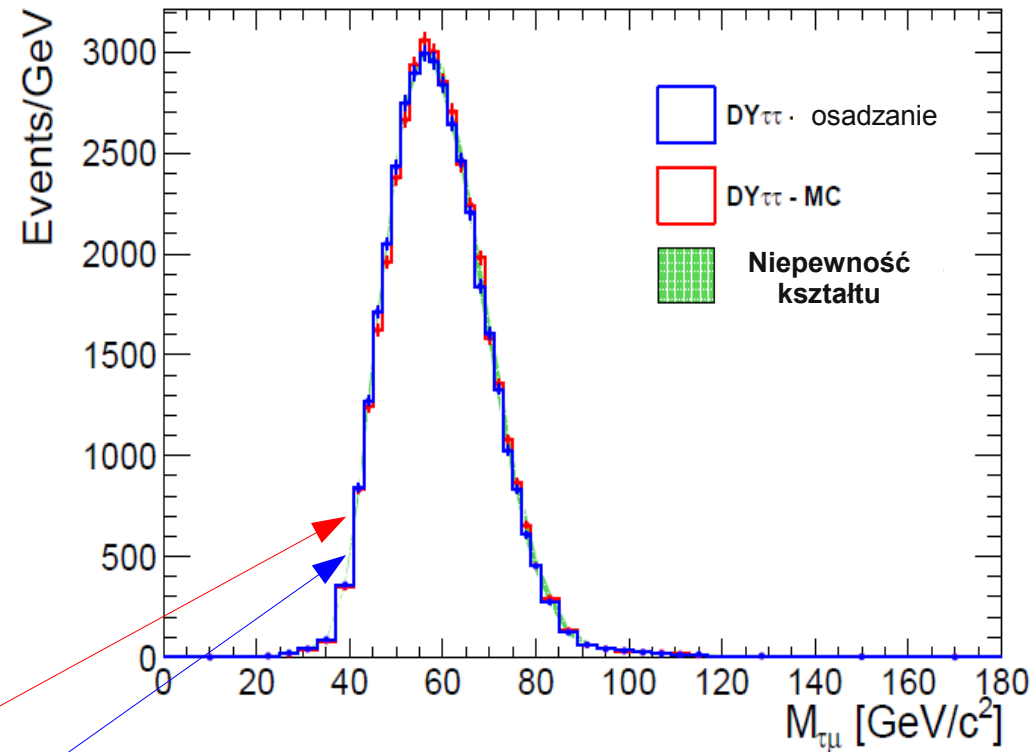
Po osadzeniu - przypadek DY $\tau\tau \rightarrow \mu\tau_{jet}$

Oryginalne miony usunięte z przypadku, zastąpione symulowanymi rozpadami τ



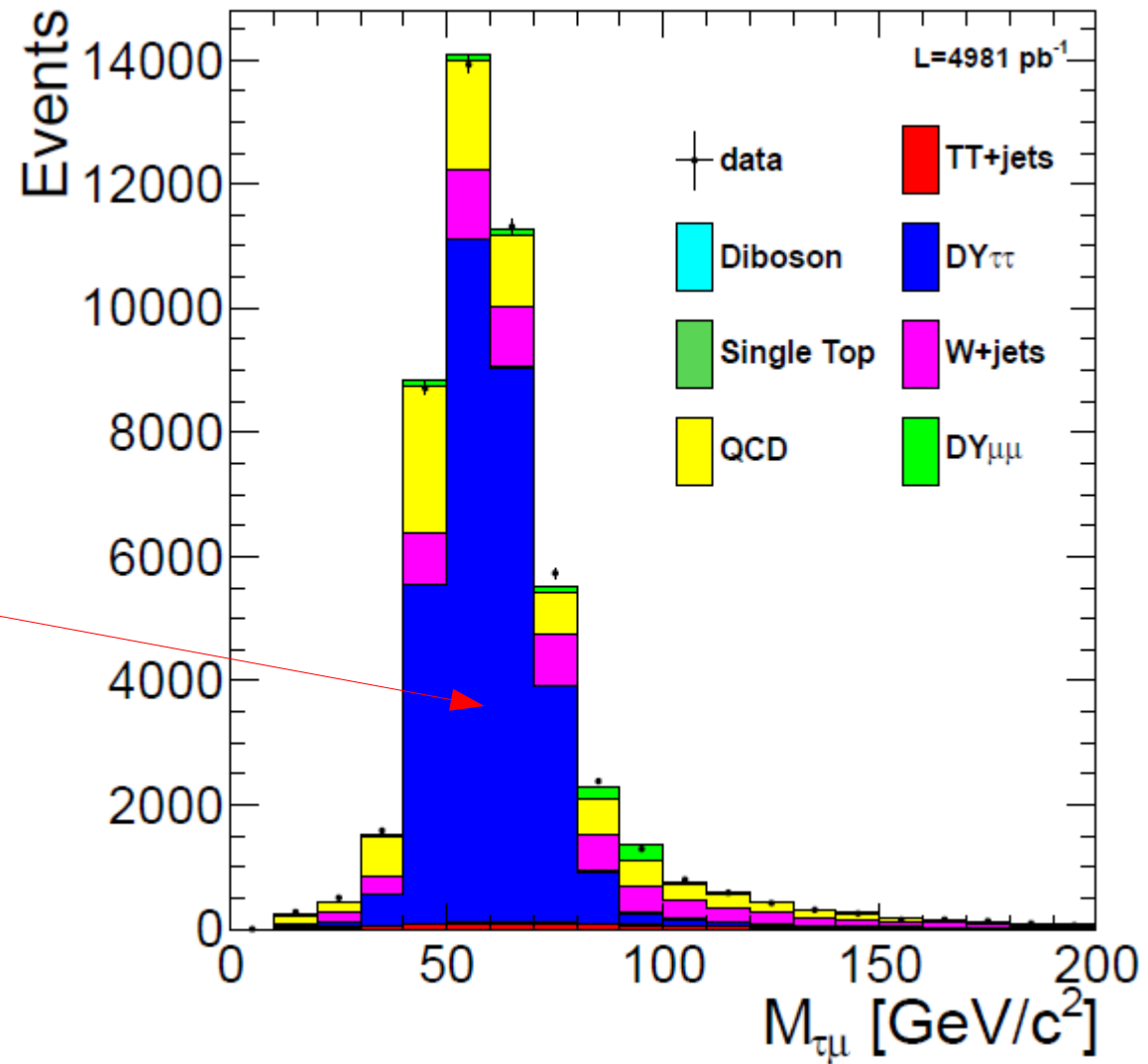
Krótko o systematyce

- Przy szacowaniu liczby przypadków tła musimy określić błąd tego szacowania - niepewność systematyczna
- Przykład dla szacowania z MC - świetlność znamy z określoną dokładnością
- Przykład dla osadzania: pędy mionów w DY $\mu\mu$ mierzone ze skończoną dokładnością.
 - Zwiększona niepewność pomiaru pędów w parze $\mu\tau_{jet}$ (uwzględniana w analizie)
- Sprawdzenie metody osadzania - porównanie rozkładów kluczowych zmiennych dla próbek:
 - **Symulowane DY $\tau\tau$**
 - **Symulowane DY $\mu\mu$ z zastosowaną procedurą osadzania**



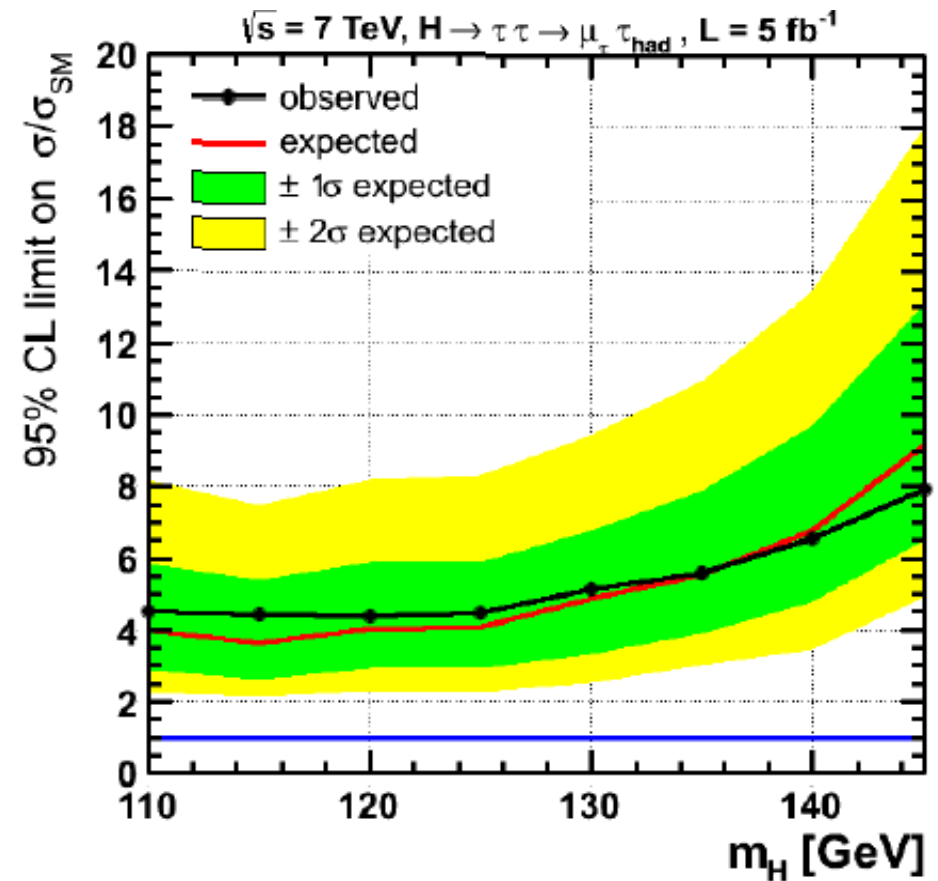
$H \rightarrow \tau\tau \rightarrow \mu\tau_{jet}$ - wyniki (1)

Wynik – dzięki metodzie osadzania dobrze odtwarzamy kształt i liczbę przypadków tła $DY \tau\tau$



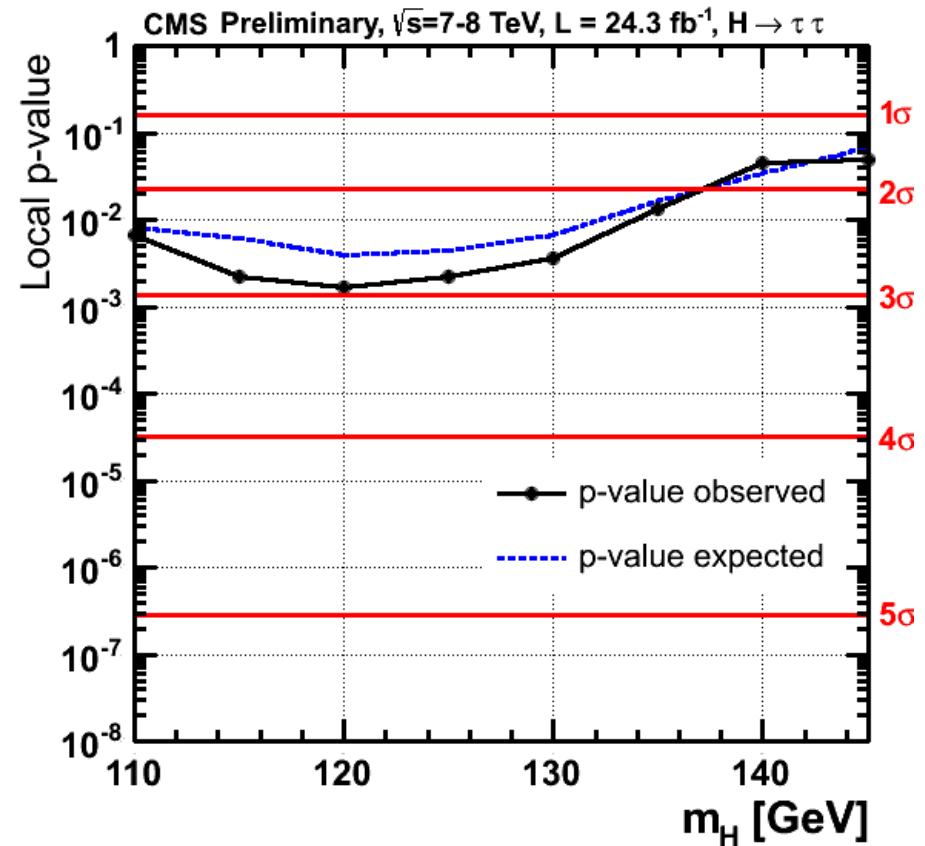
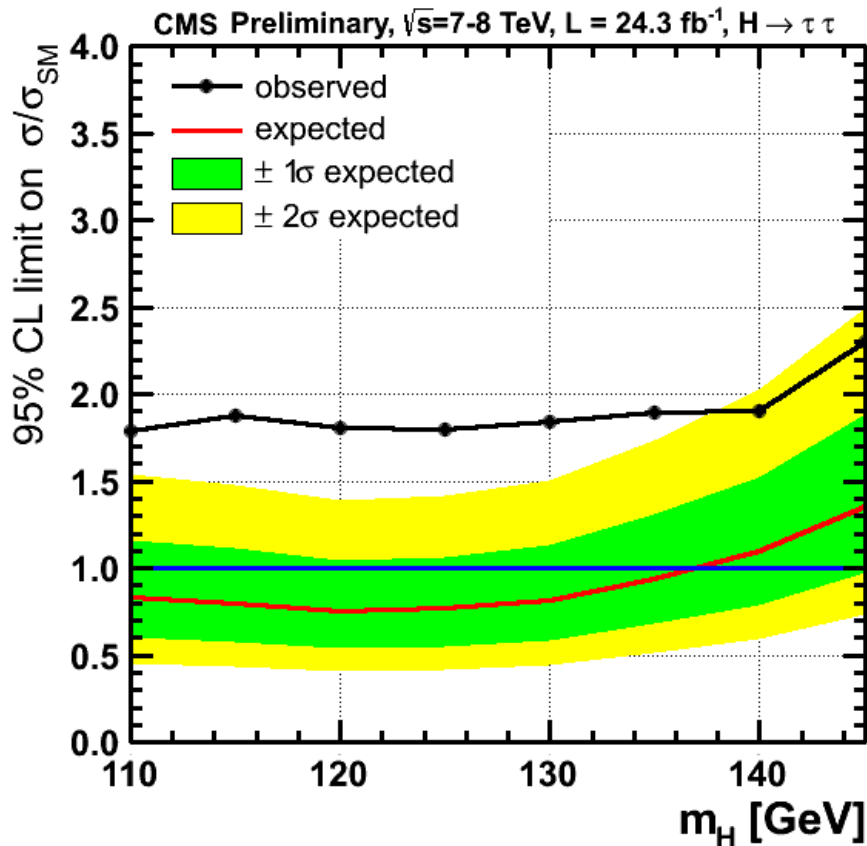
$H \rightarrow \tau\tau \rightarrow \mu\tau_{jet}$ - wyniki (2)

- Ostateczny test poprawności metody osadzania i zaproponowanej procedury normalizacji:
 - Uproszczona wersja analizy CMS, mniejsza statystyka danych 5 fb^{-1}
 - Wynik - ograniczenie na wartość przekroju czynnego na produkcje bozonu Higgsa względem przewidywanej przez Model Standardowy
- Dla użytej ilości danych przeprowadzona analiza nie dość czuła na produkcje bozonu Higgsa
 - Wykluczone przekroje czynne od 4 do 8 razy większe niż przewidywane przez MS



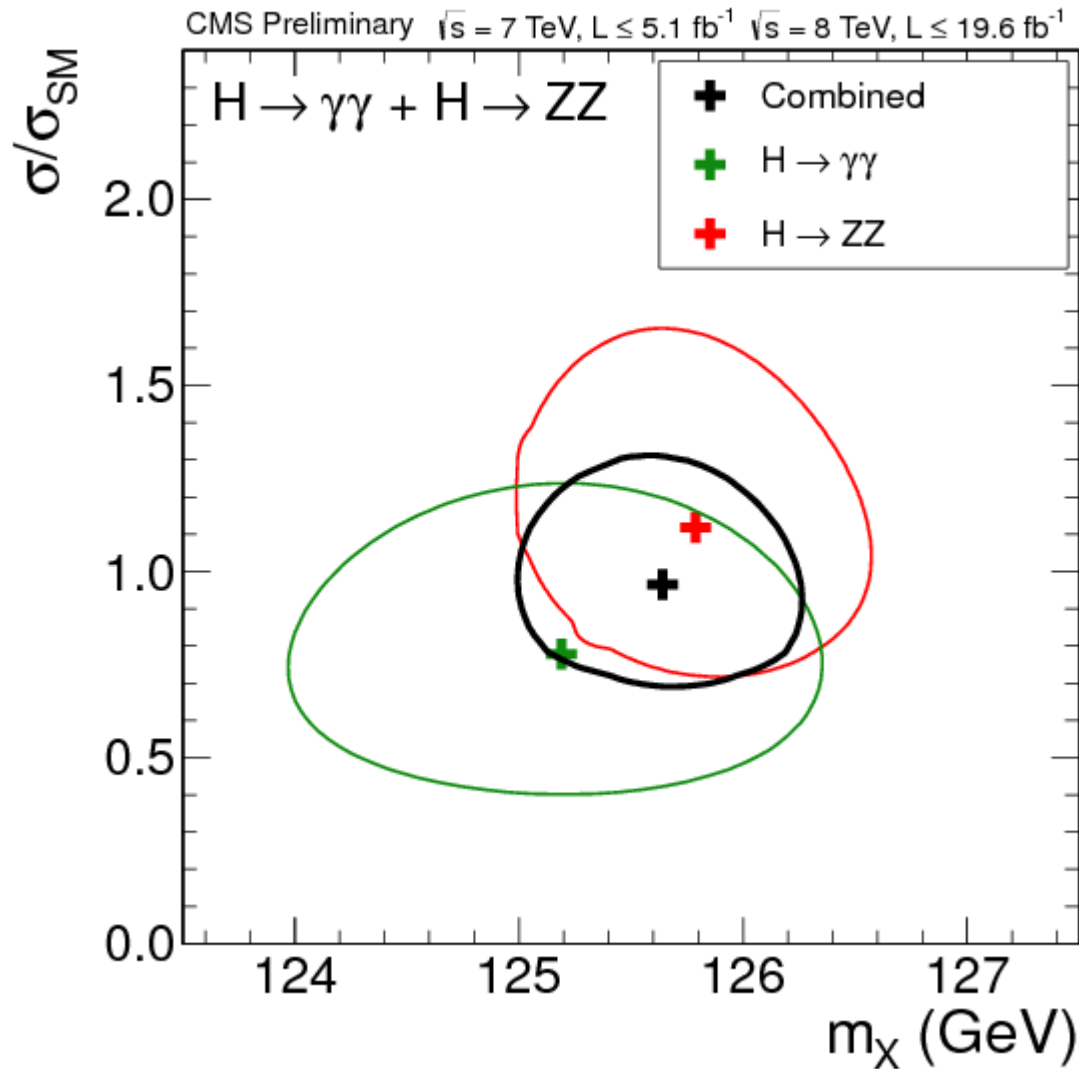
Ostatnie wyniki w $H \rightarrow \tau\tau$

Moriond 2013



- Większa statystyka, wszystkie topologie końcowe
- W kanale $\tau\tau$ zaczynamy widzieć sygnał!

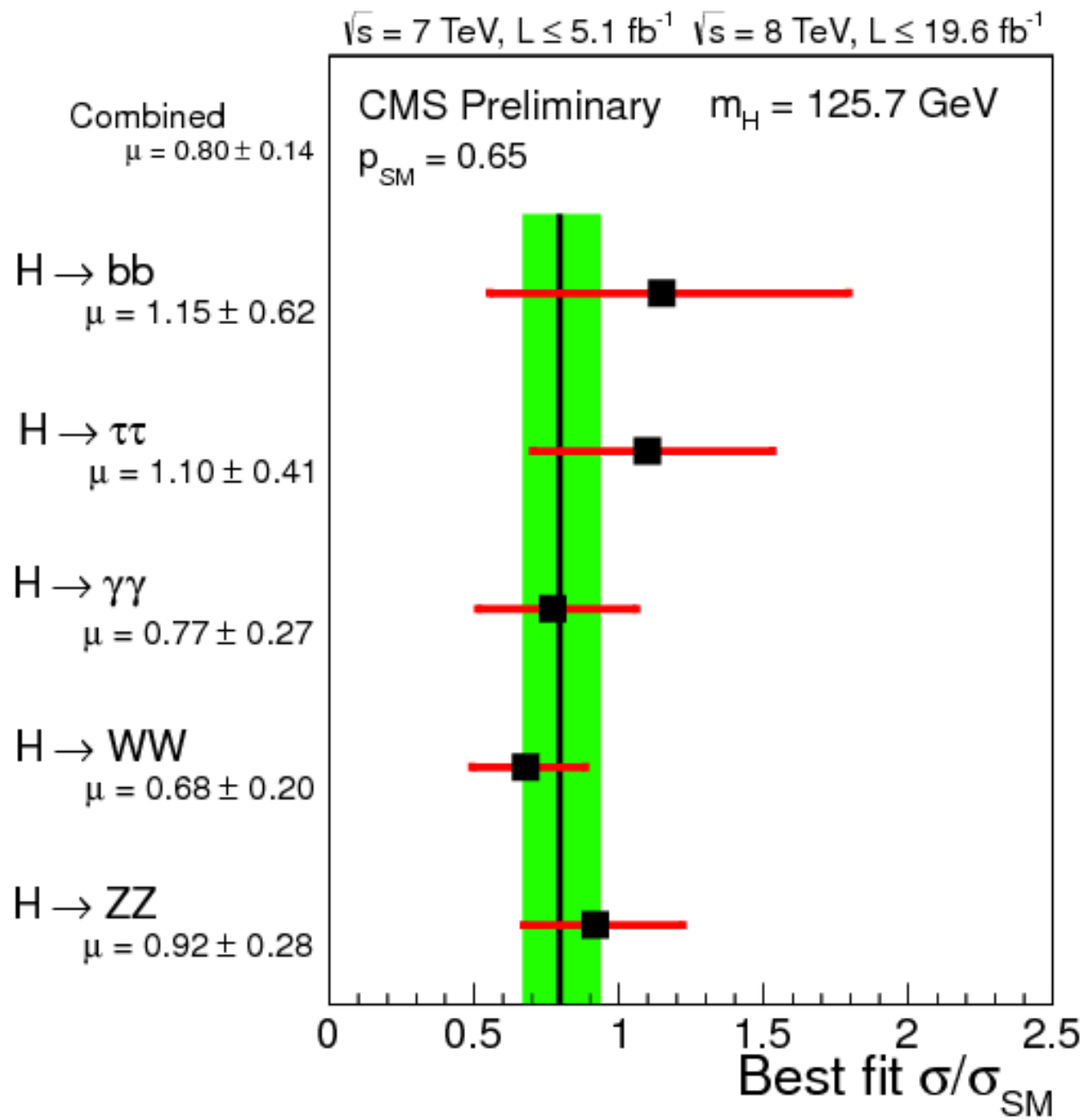
Co wiemy o nowej cząstce



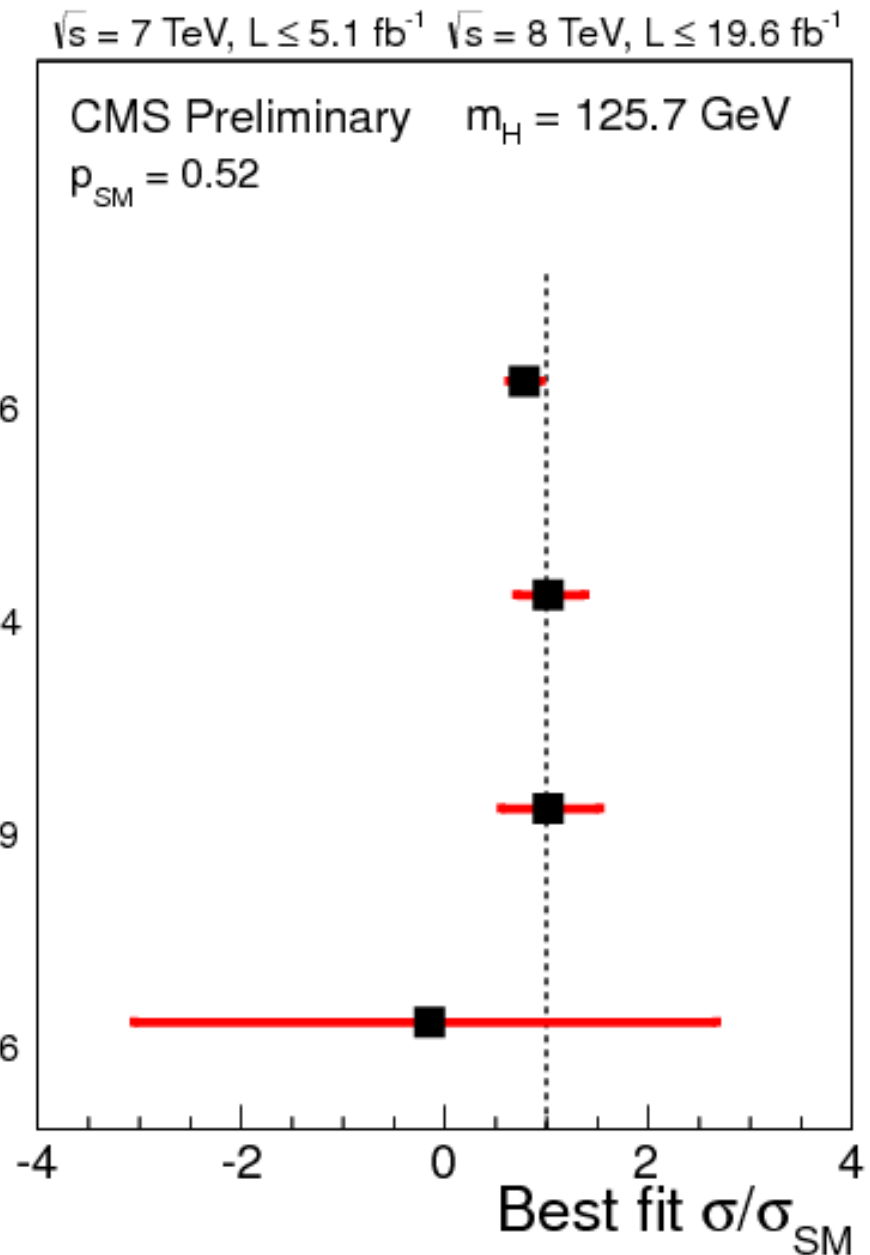
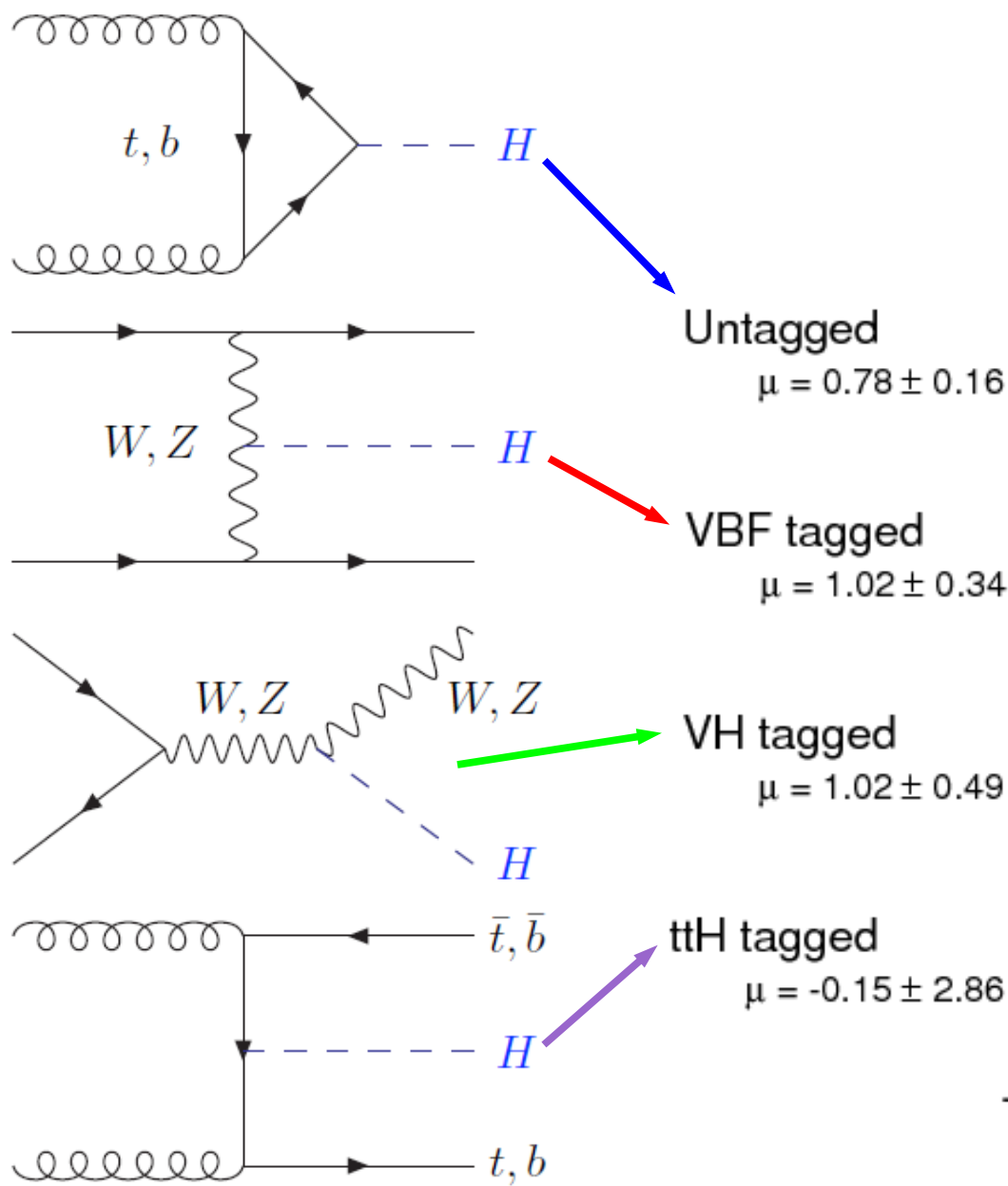
$m = 125.7 \pm 0.3 \text{ (stat.)} \pm 0.3 \text{ (syst.) GeV}$

- Czy nowa cząstka to bozon Higgsa?
- Interesujące własności:
 - Masa
 - Siła sprzężeń
 - Spin i parzystość

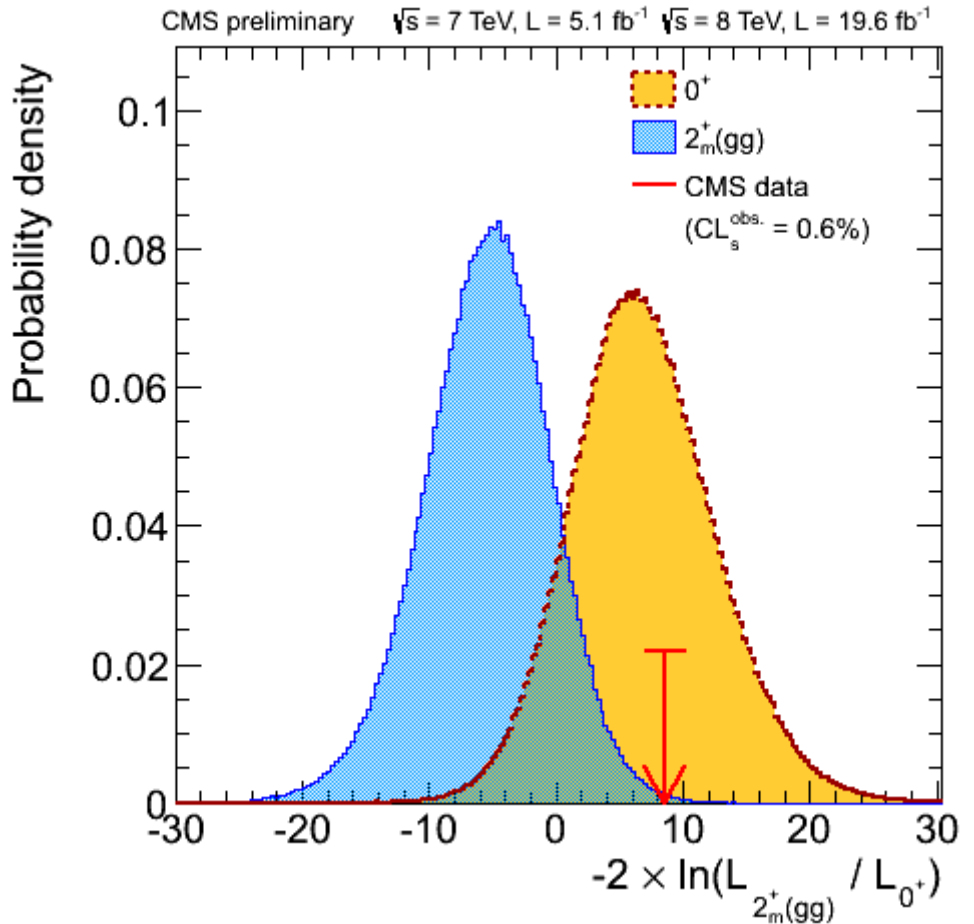
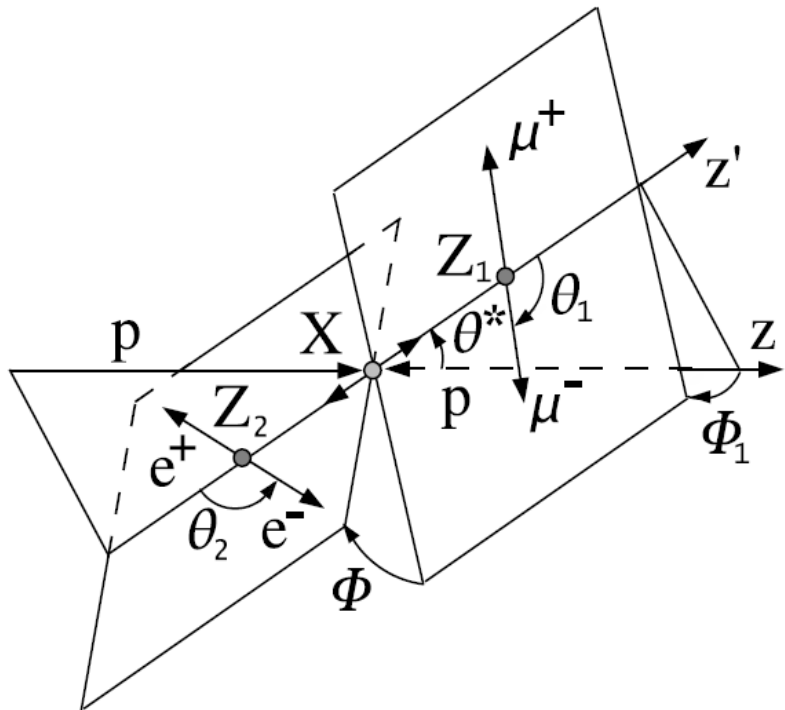
Siła sygnału vs kanał poszukiwań



Siła sygnału vs kanał produkcji



Spin



- Pomiar spinu i parzystości dzięki korelacjom kinematycznym w kanałach ZZ i WW
- Hipoteza 2^+ wykluczona na poziomie 0.6%

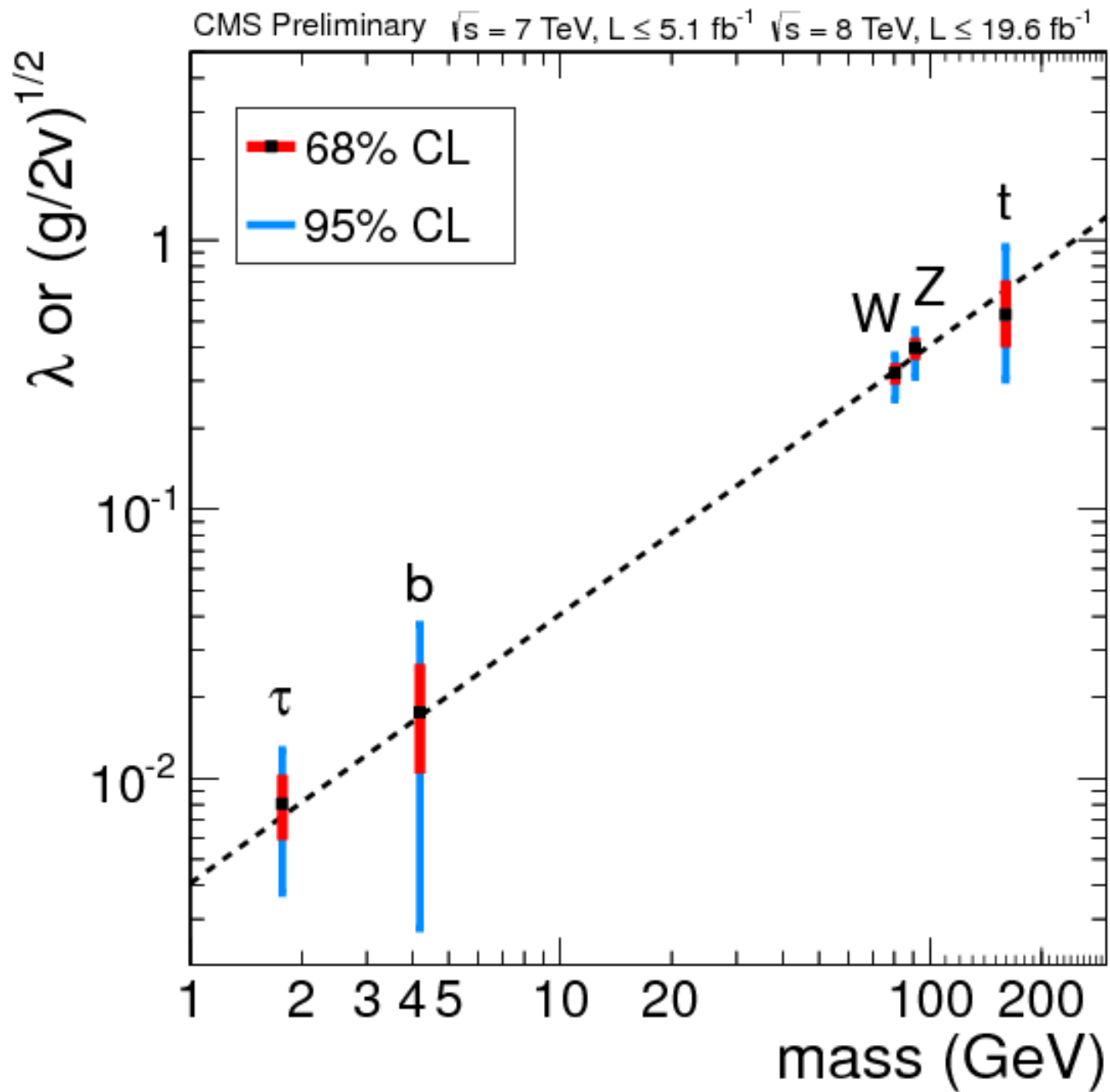


Nie tylko w fizyce...

Have you ever heard about the Higgs Boson blues
I'm goin' down to Geneva baby, gonna teach it to you

Nick Cave And The Bad Seeds,
„Higgs Boson Blues”

Zamiast podsumowania



Backup

Rekonstrukcja masy $\tau\tau$

