

Tomasz Bołd

System filtracji przypadków eksperymentu ATLAS.



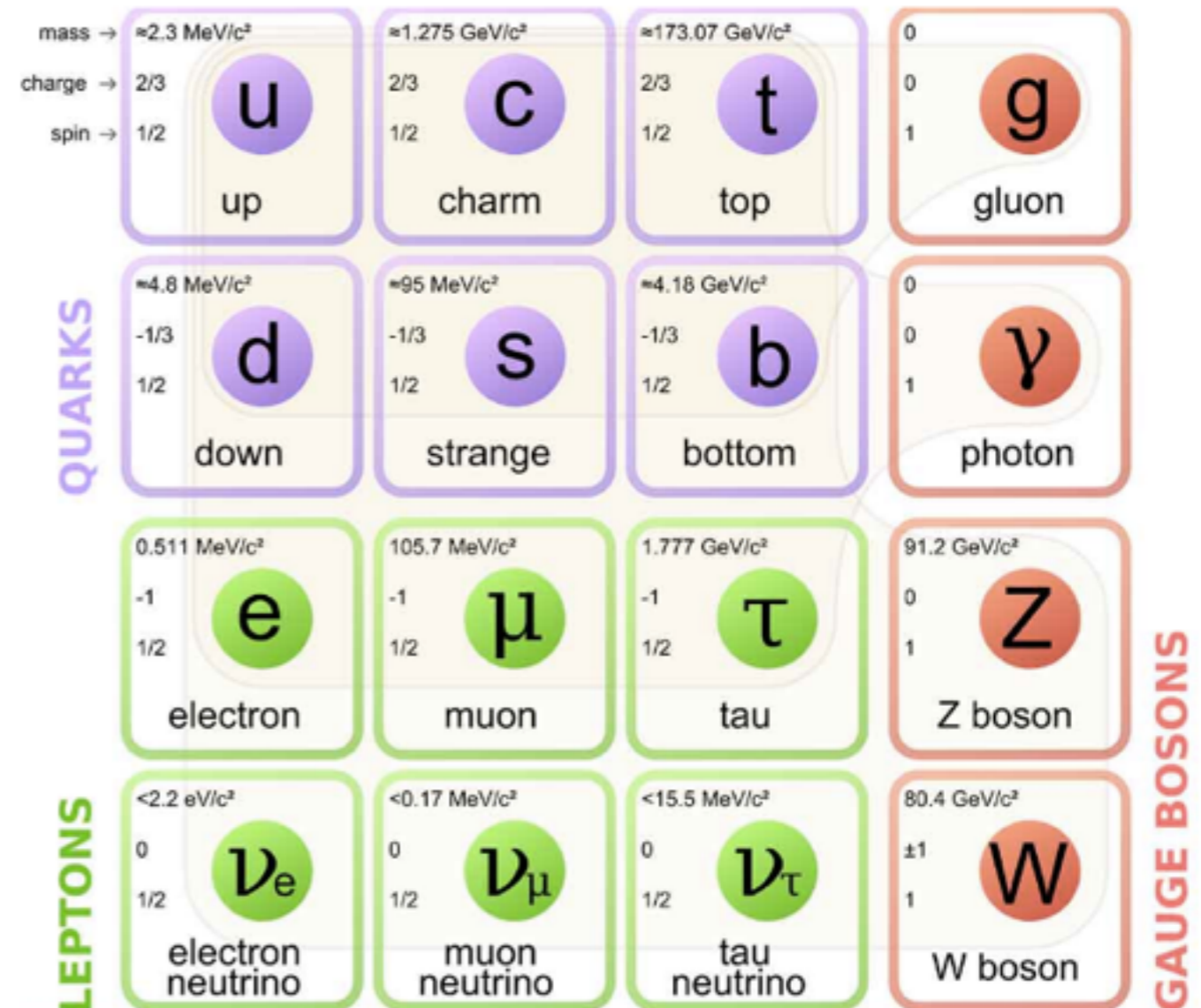
Czyli o szukaniu igły w stogu siana.

Plan

- Fizyka cząstek przed erą LHC
- Eksperymenty, unikalne wyzwania na zderzaczach hadronów i wyniki
- Filtracja w czasie rzeczywistym
- Wybrane przykłady
- Przyszłość systemu filtracji

Model standardowy (SM) przed LHC

- Kwarki i leptony
- Model oddziaływań
 - silne poprzez wymianę gluonów
 - elektroslabe z γ , W i Z jako nośniki oddziaływań
- W SM masy nadawane przez mechanizm Brouta-Englerta-Higgosa
 - Brak eksperymentalnego potwierdzenia



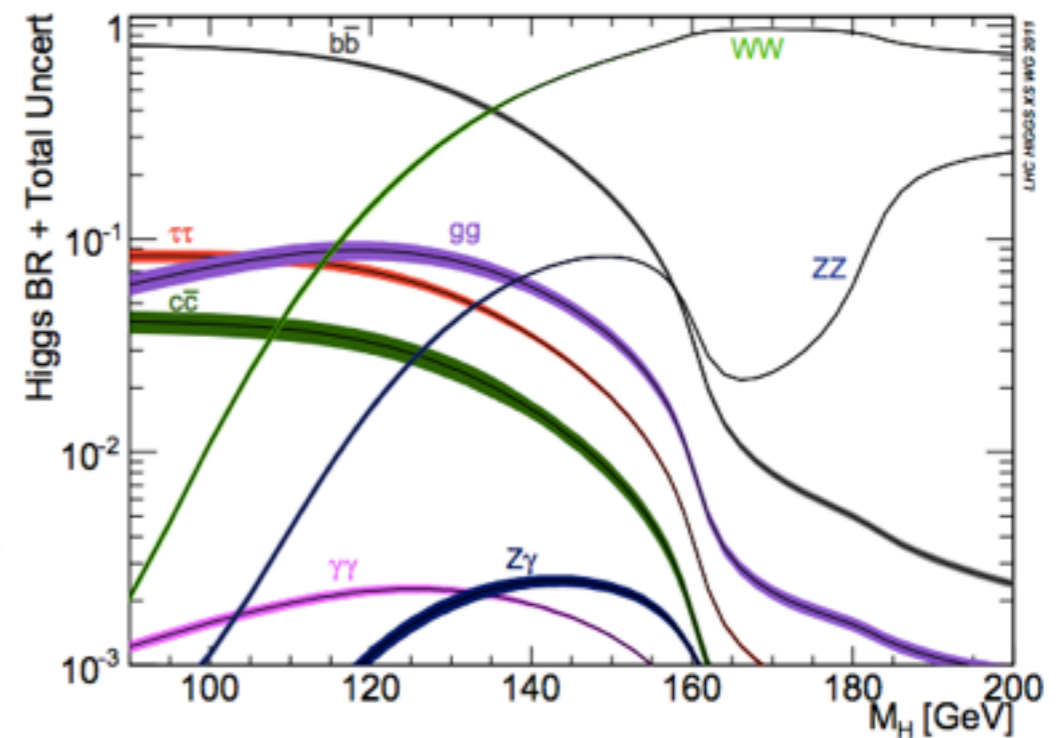
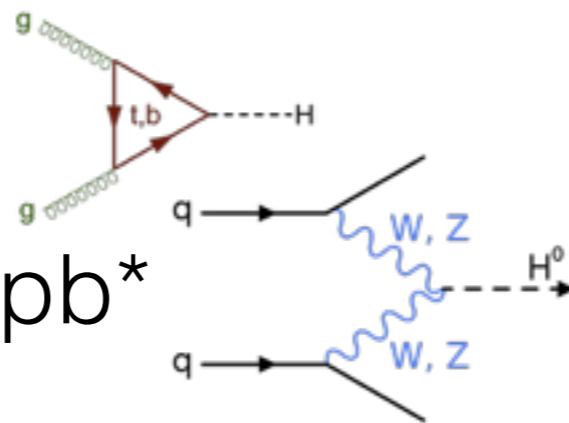
Produkcja i rozpad bozonu Higgsa

arxiv:1107.5909

Dominujące kanały produkcji:

$$gg \rightarrow H \sim 19\text{pb}^*$$

$$q\bar{q} \rightarrow (W|Z)H \sim 4\text{pb}^*$$



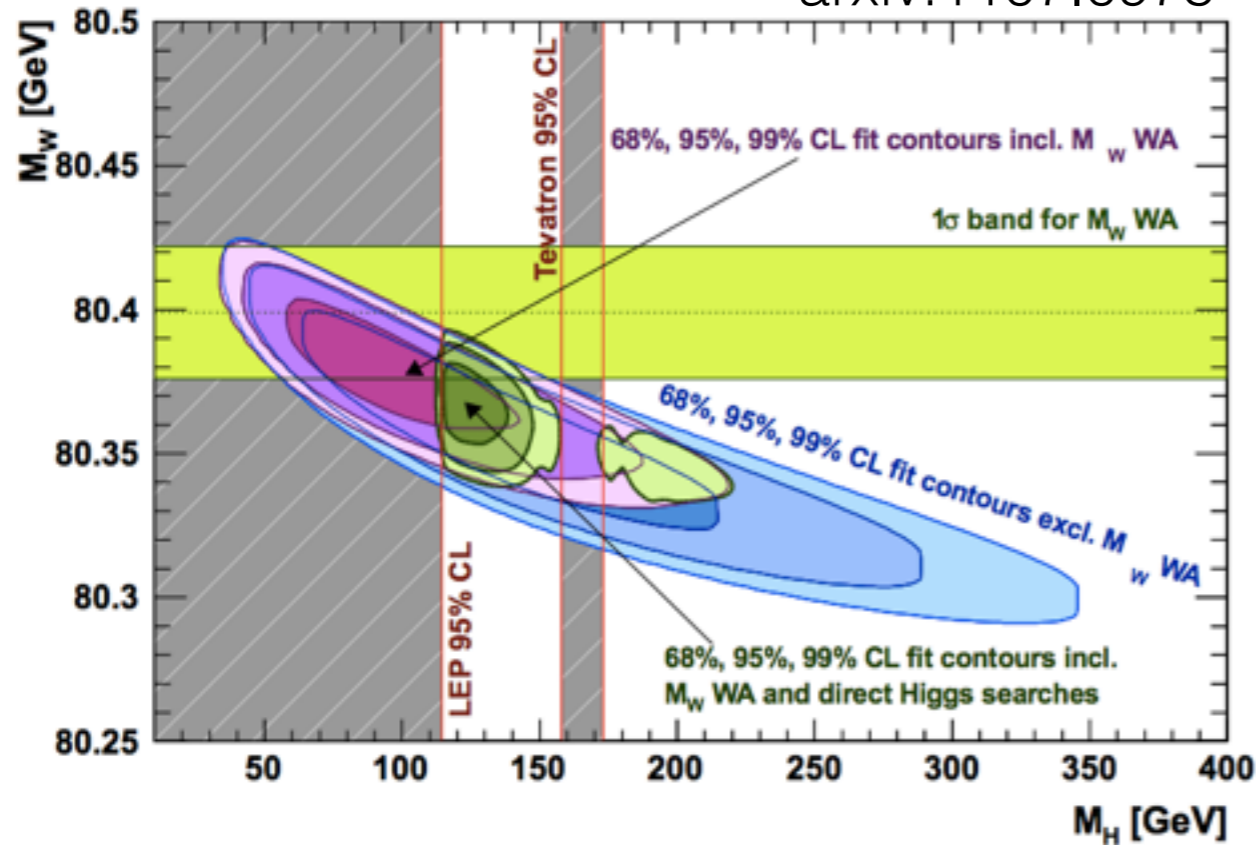
Różnorodne kanały rozpadu i produkcji w zależności od masy

Optymalny zderzacz hadronów i uniwersalne urządzenia detekcyjne

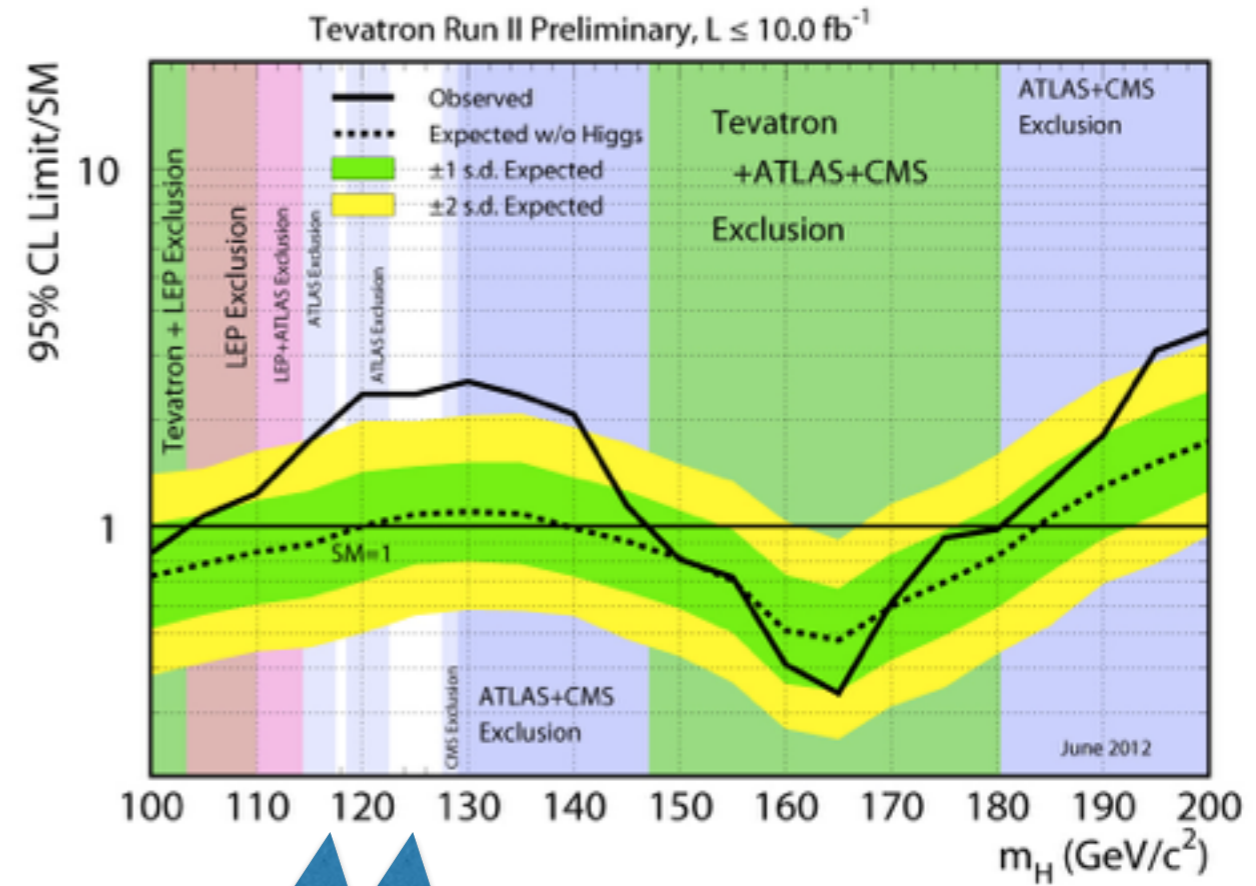
*SM dla masy $M_H=125\text{GeV}$, $E_{\text{CM}}=14\text{TeV}$

Przewidywania teoretyczne i ograniczenia eksperymentalne

arxiv:1107.0975



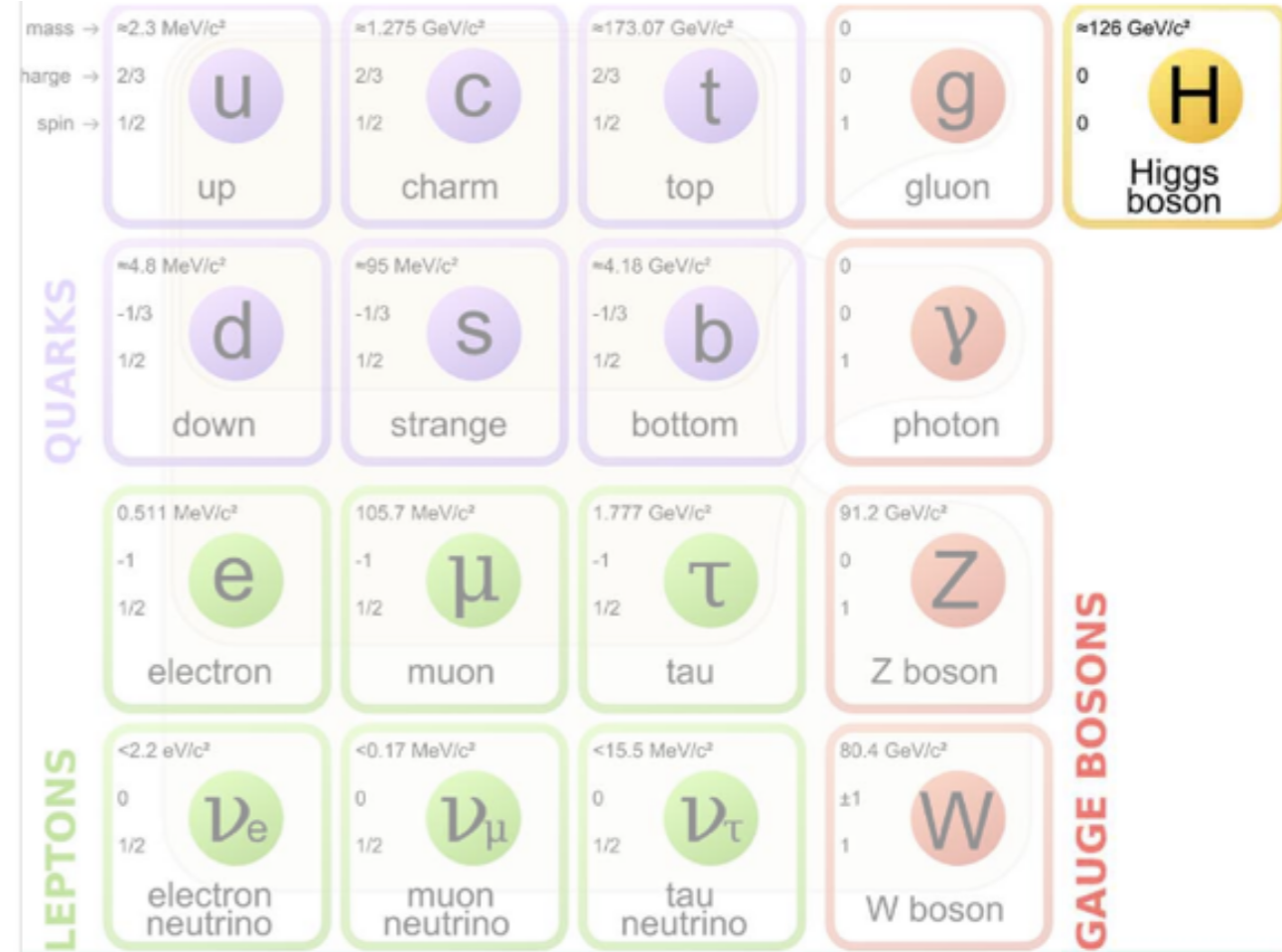
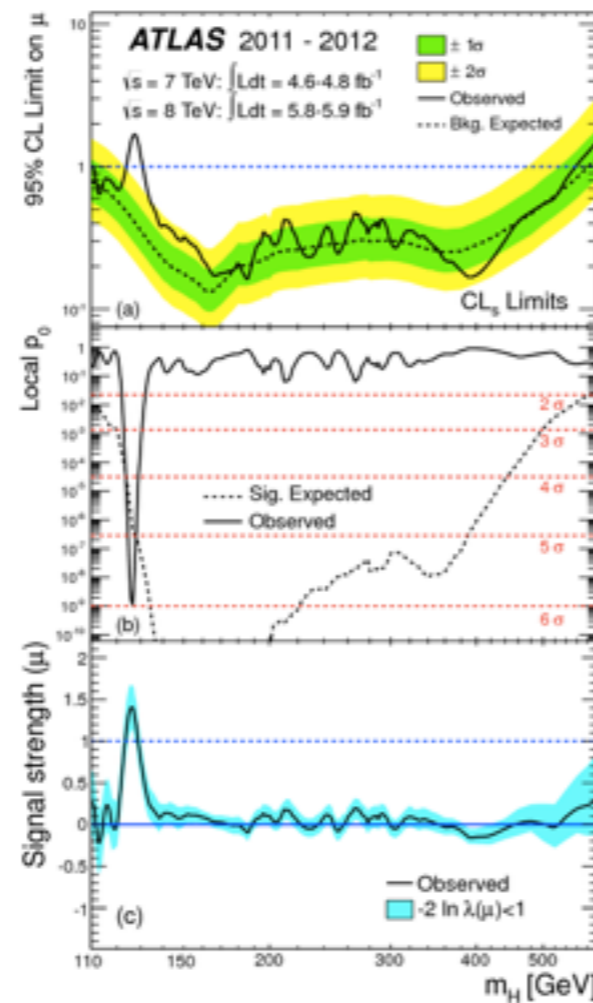
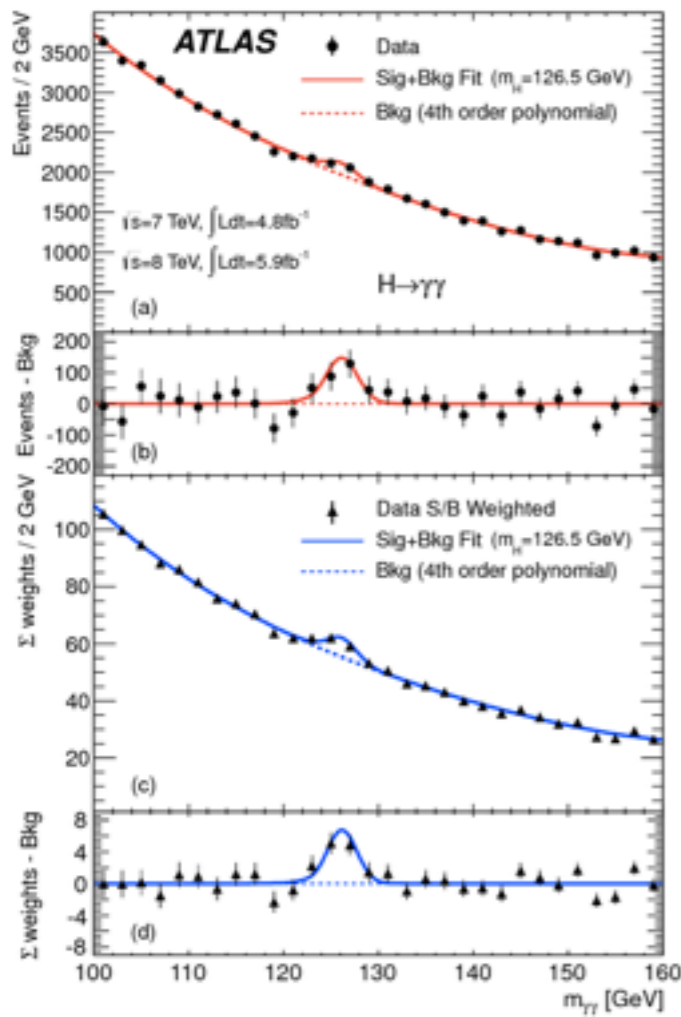
Dopasowanie wynikające z pomiarów elektrostałych
Global EW Fit 2011



Złożone wykluczenia:
2 lipca 2012

Odkrycie bozonu H

Phys. Lett. B 716 (2012) 1-29



Niezależny, zgodny wynik z pomiarem eksperymentu CMS. Kolejne, coraz bardziej precyzyjne pomiary potwierdzają naturę H.

Spin - Phys. Lett. B 726 (2013), pp. 120-144

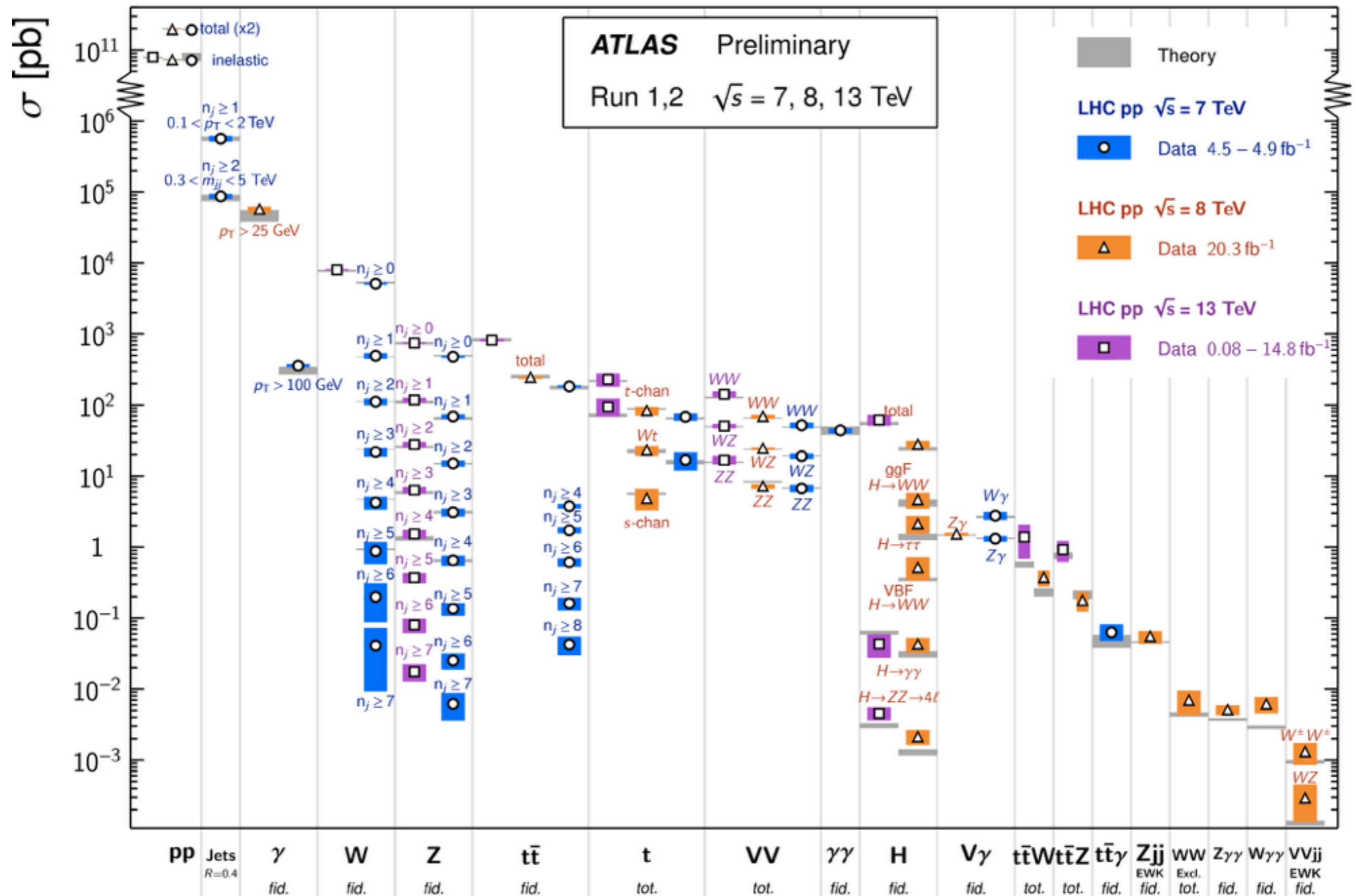
Sprężenia - Phys. Lett. B 726 (2013), pp. 88-119

Program fizyczny p - p eksperymentu ATLAS

- Bogaty program pomiarów poza bozonem H (~ 100)
 - precyzyjne pomiary Modelu Standardowego (~ 150)
 - fizyka kwarku top (~ 100)
 - fizyka hadronów z kwarkiem b/s (~ 30)
 - poszukiwanie nowych cząstek
 - super-symetrycznych (~ 100)
 - i egzotycznych (~ 100)

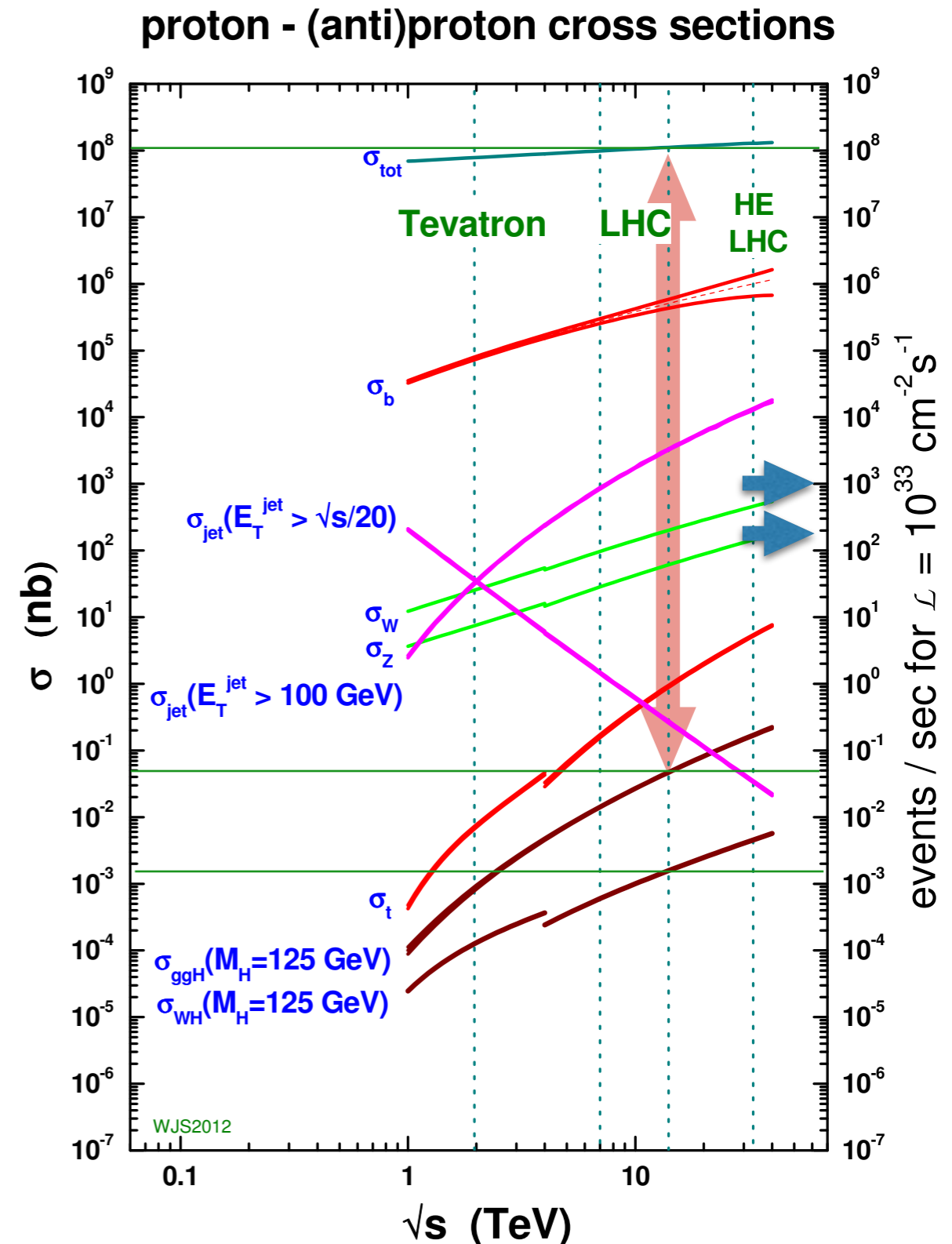
Standard Model Production Cross Section Measurements

Status: August 2016



Porównanie przekrojów czynnych

- Przypadek produkcji Higgsa (i innych rzadkich sygnatur) należy wydobyć ze strumienia 10^9 zderzeń*

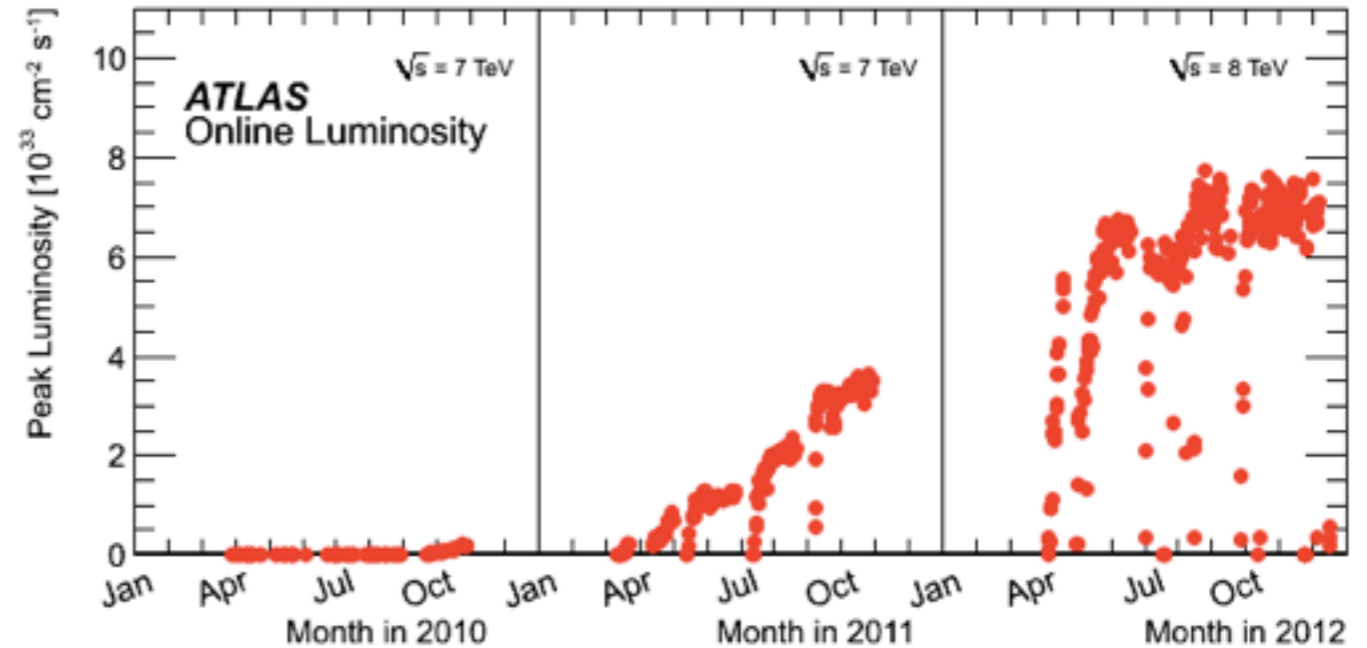


*To jest jak wybieranie jednego ziarna ryżu ze 150 ton

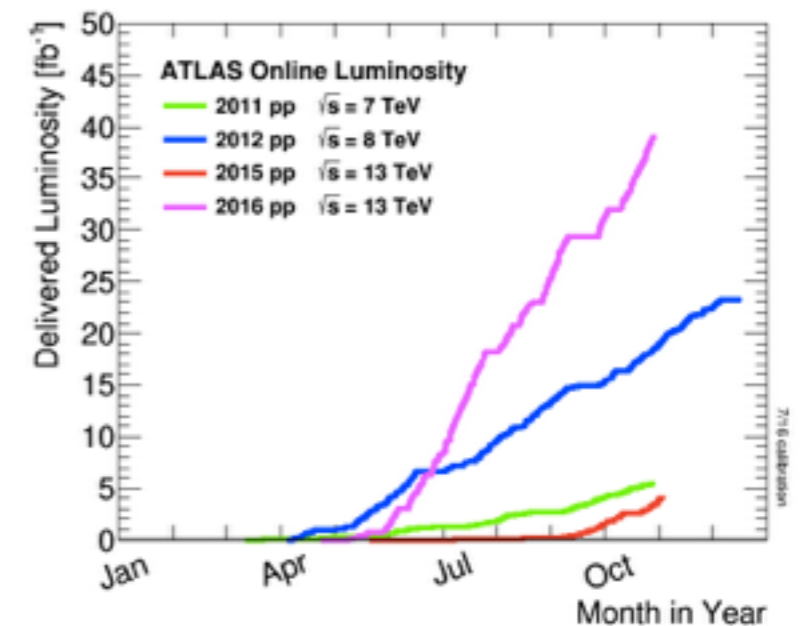
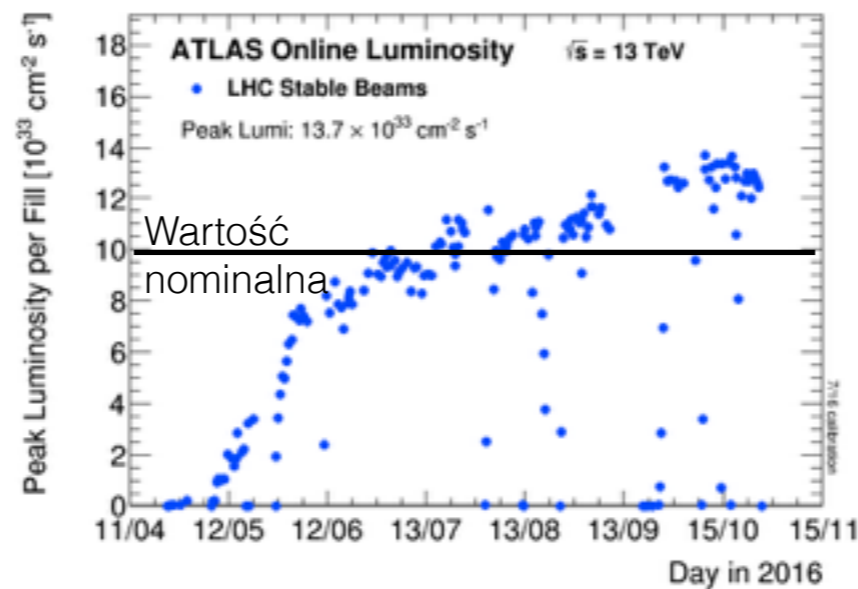
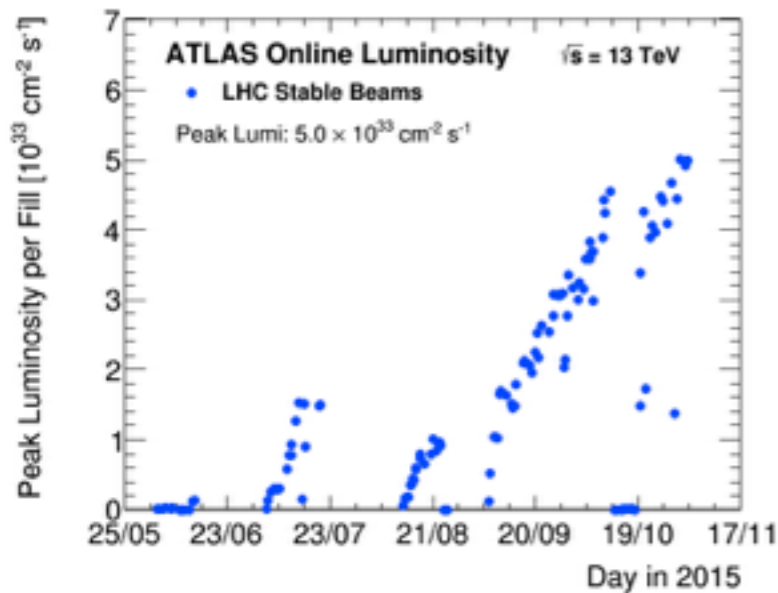
Świetlności na LHC

Z czasem, sprawność obsługi i szereg ulepszeń pozwalają na lepsze ogniskowanie wiązek na LHC → świetlność (chwilowa i całkowita) stopniowo rośnie

LHC Run 1

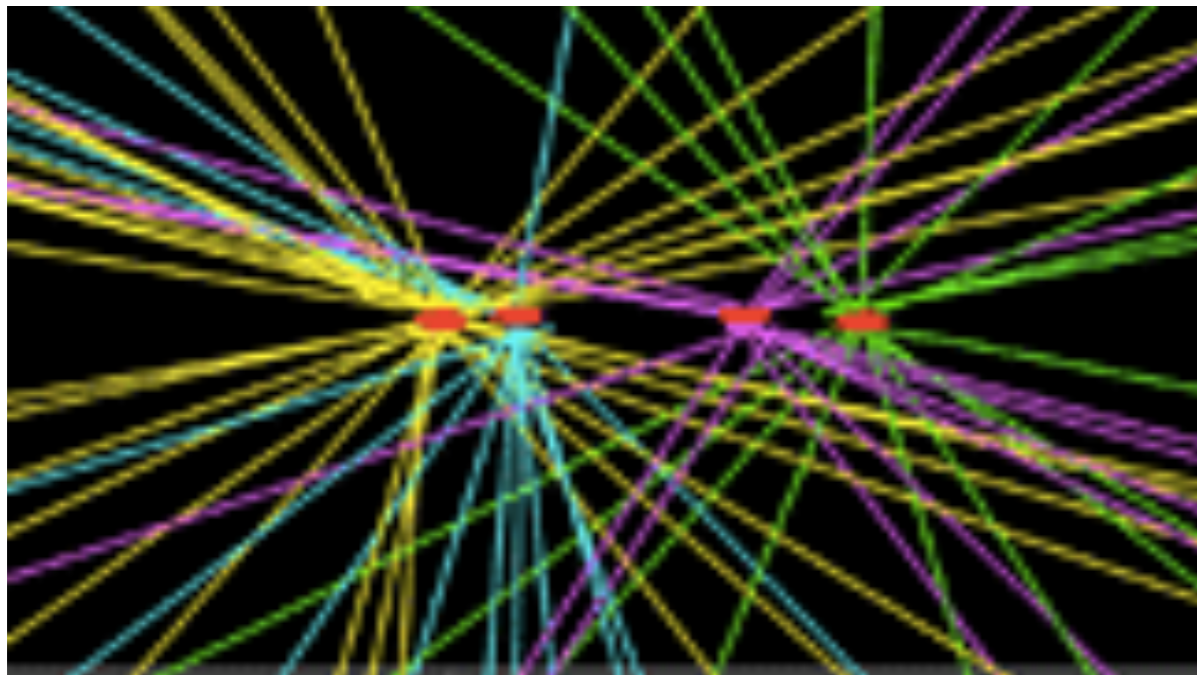


LHC Run 2

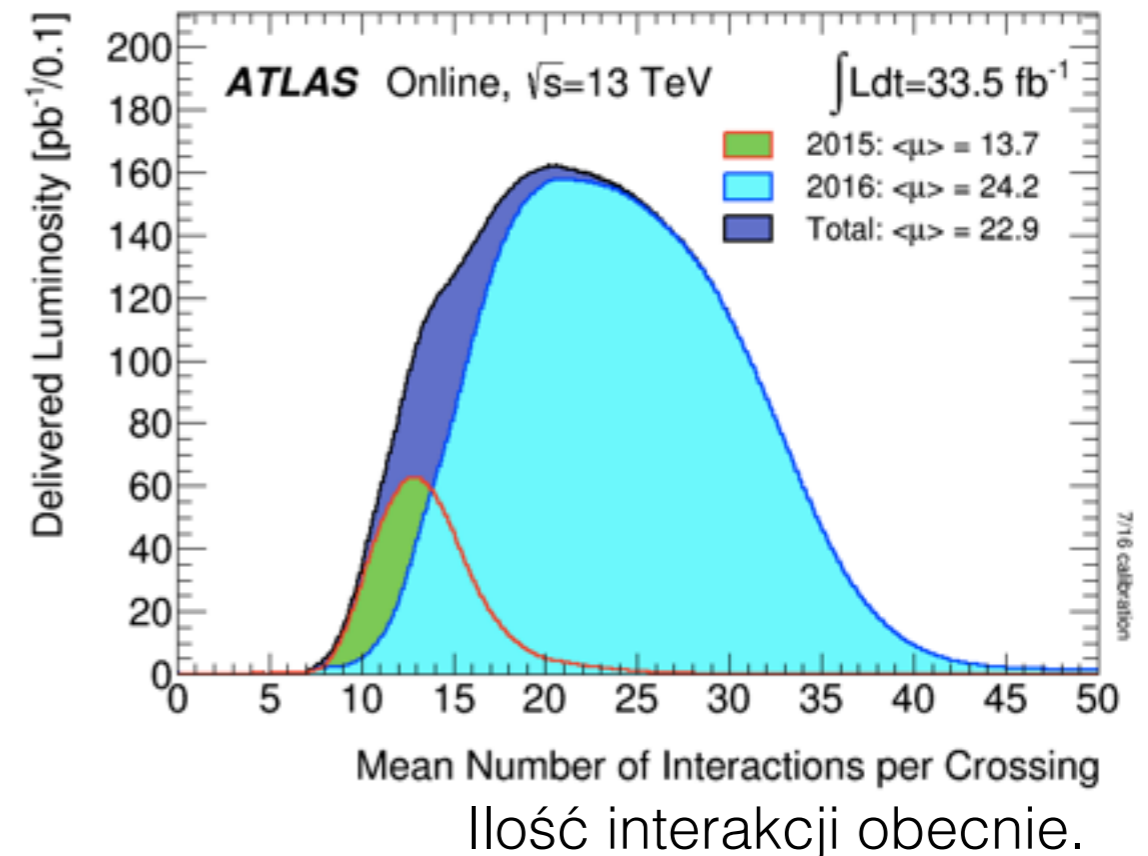


Wysoka świetlność - nakładanie zderzeń p - p (pile-up)

- Protony w LHC ułożone w pęczki —> podczas zderzenia pęczków dochodzi do zderzeń wielokrotnych. **Jedno** z nich **może** być **interesujące**.
- ~40M przecięć / sekundę



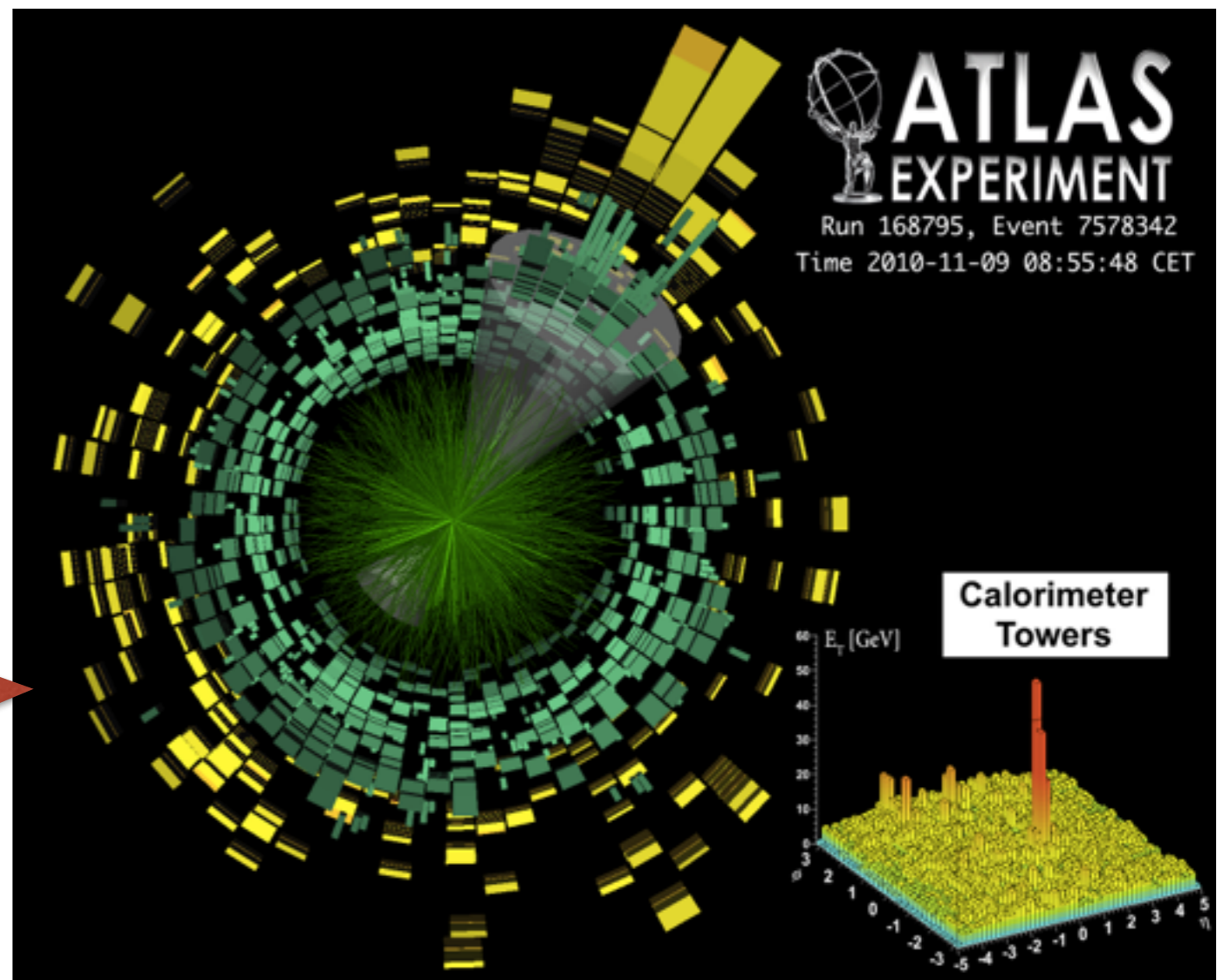
Cztery punkty interakcji podczas jednego przecięcia pęczków.



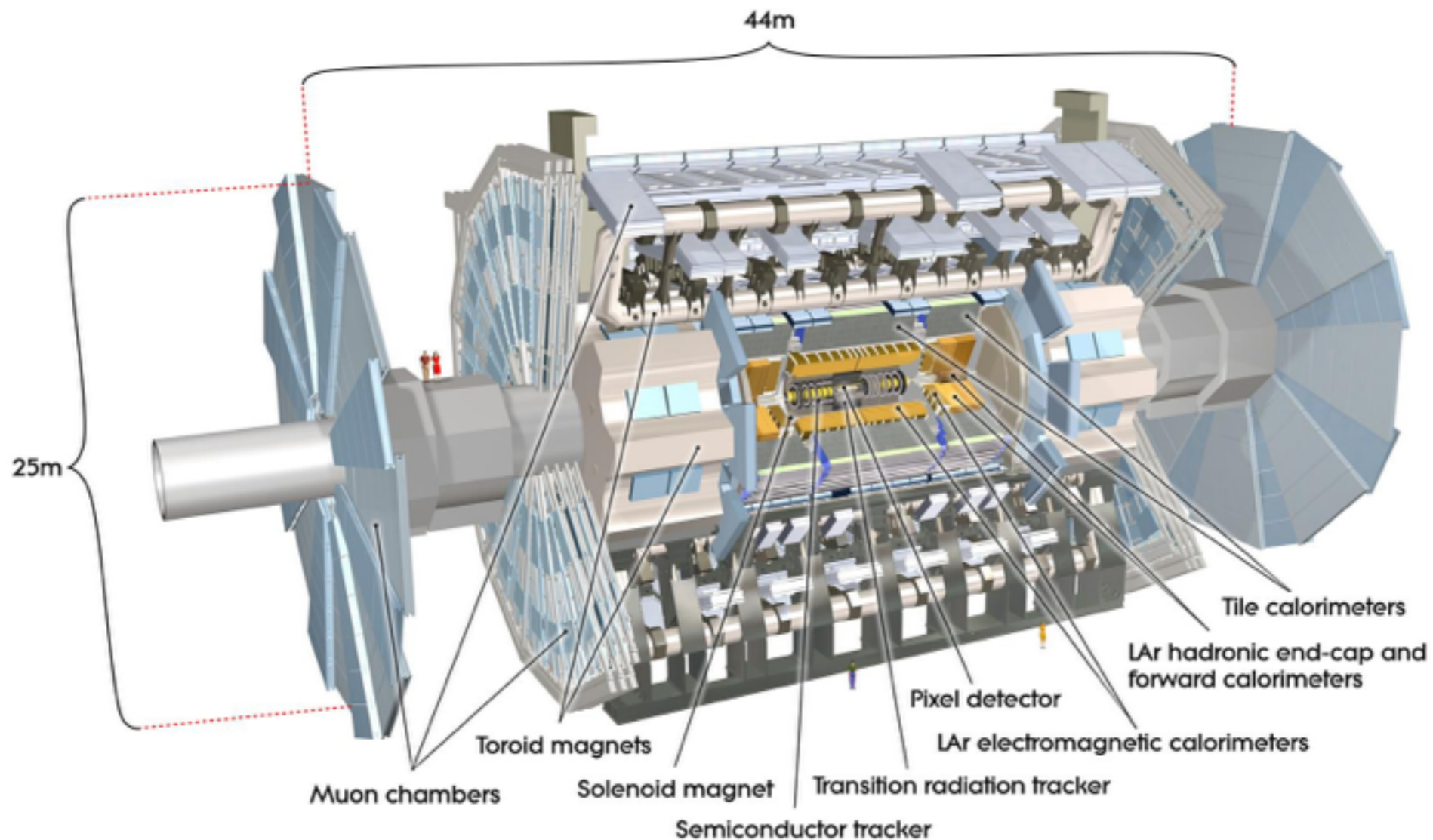
Program ciężkojonowy: *Pb-Pb* i *p-Pb*

- Zupełnie różne warunki eksperymentalne
 - Niska świetlność, zmienna centralność zderzeń → zmienna krotność i zajętość det.
- Pomiar różny od programu *p-p*
- Właściwości plazmy kwarkowo-gluonowej (QGP)
 - korelacje, interakcje z obiektami kolorowymi, elektrosłabymi
- Badanie modyfikacji funkcji struktury protonu związanego w jądrze
- Pomiar oddziaływań peryferycznych (np. $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$)

~30 📖

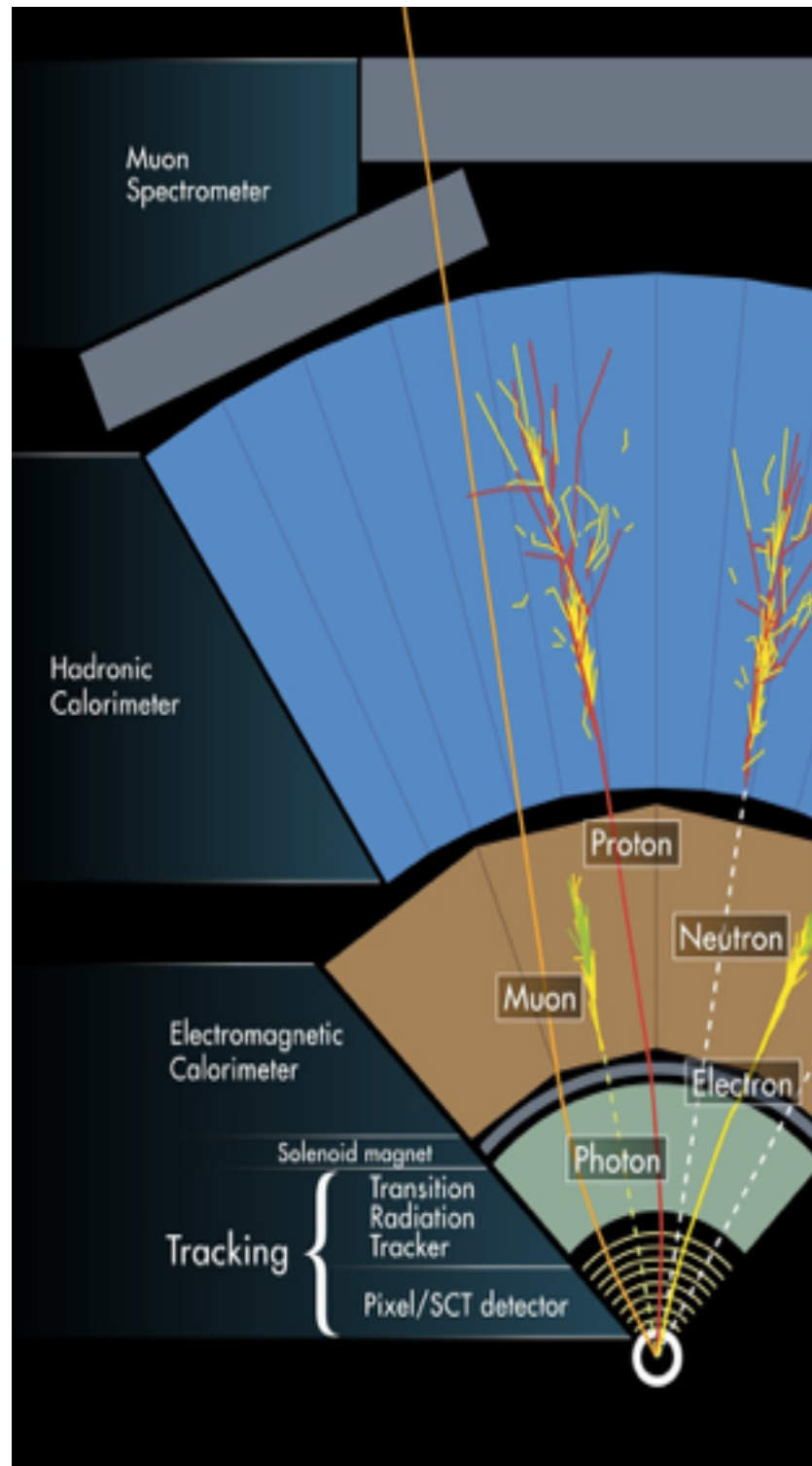


Budowa detektora i strumień danych



Detektory ATLAS posiadają $\sim 100\text{M}$ kanałów odczytu, odczytywane co 25ns, zakładając binarny odczyt $\rightarrow 4 \cdot 10^{15} \text{ b/s}$, **technologicznie nieosiągalne!**

Proces rejestracji produktów zderzenia



- $t_0=0$ zderzenie - 10^{-27} s produkty
- $t=t_0+0.1$ ns sygnał w pierwszej warstwie detektora śladów
- $t=t_0+3.5$ ns cząstka opuszcza detektor śladów TRT
- $t=t_0+5$ ns cząstka w kalorymetrze elektromagnetycznym
- $t=t_0+14$ ns - miony opuszczają kalorymetr hadronowy
- $t=t_0+30$ ns - miony opuszczają detektor
- uproszczone informacje przesyłane do pod-systemów wyzwalań
- jednocześnie przesyłane do buforów odczytu "na detektorach" w oczekiwaniu na decyzję o rejestracji
- $t=t_0+2.5$ μ s - decyzja o akceptacji - dane kopiowane do głębszych buforów systemu odczytu

Kolejne zderzenie

Kolejnych 100

t [ns]

0

25

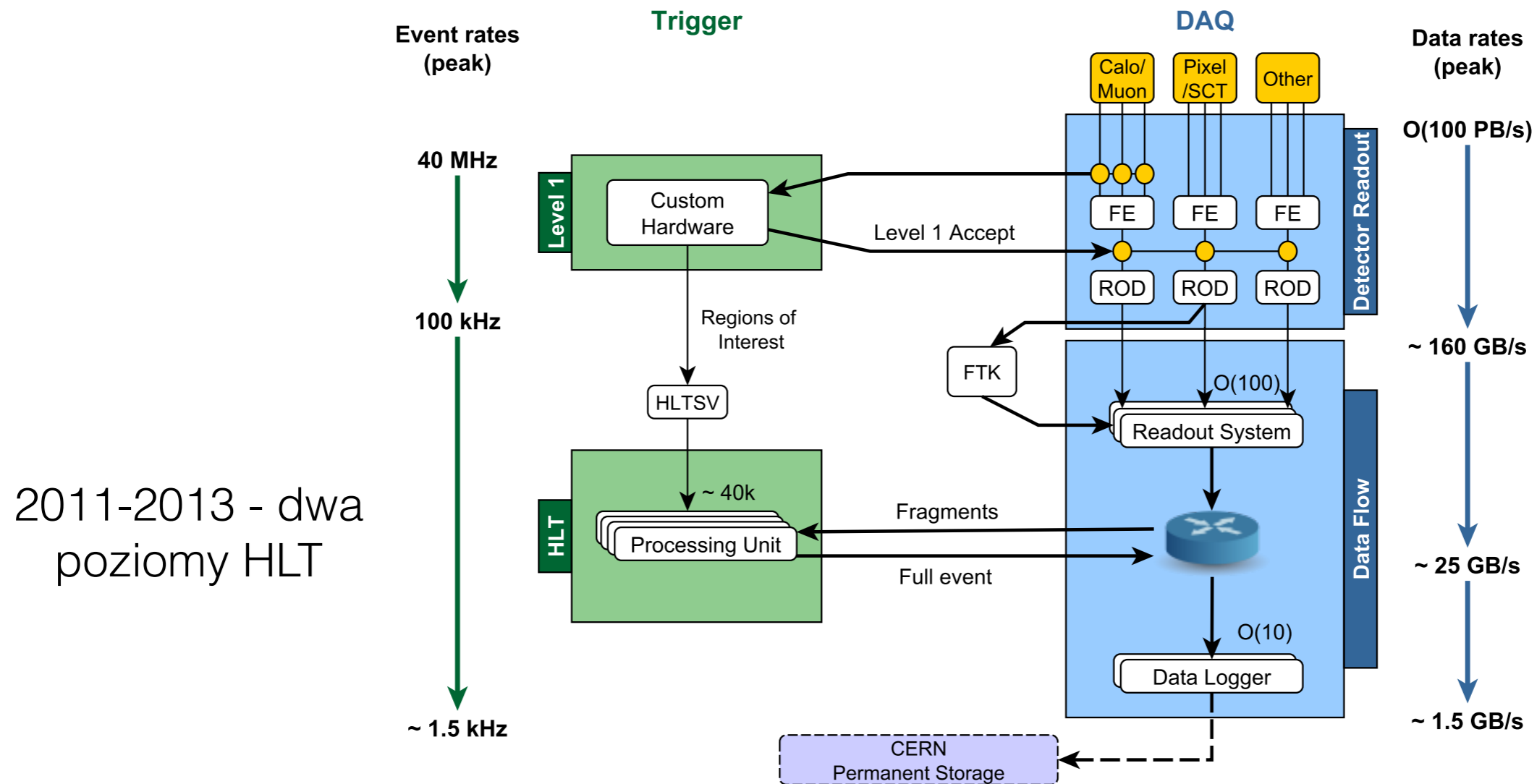
System filtracji online

- Pomiar obiektów $\sigma \approx \text{pb}$ \rightarrow efektywny system filtrowania z redukcją $\sim 10^5 - 10^7$

Elementarnym sposobem ograniczenie ilości danych jest zaniedbanie kanałów bez sygnału (zero-suppression) - **czynnik 5-10**

- Część systemu (L1) musi pracować z częstotnością LHC (40 MHz)
 - Dedykowana elektronika
- Precyzyjna filtracja (HLT) odbywa się na farmie komputerów
 - Dedykowane/szybkie algorytmy

System filtracji online

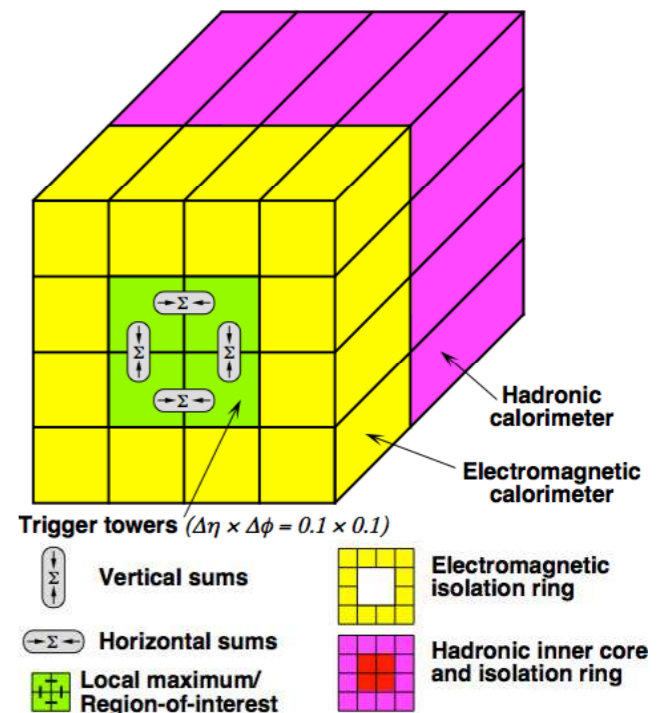
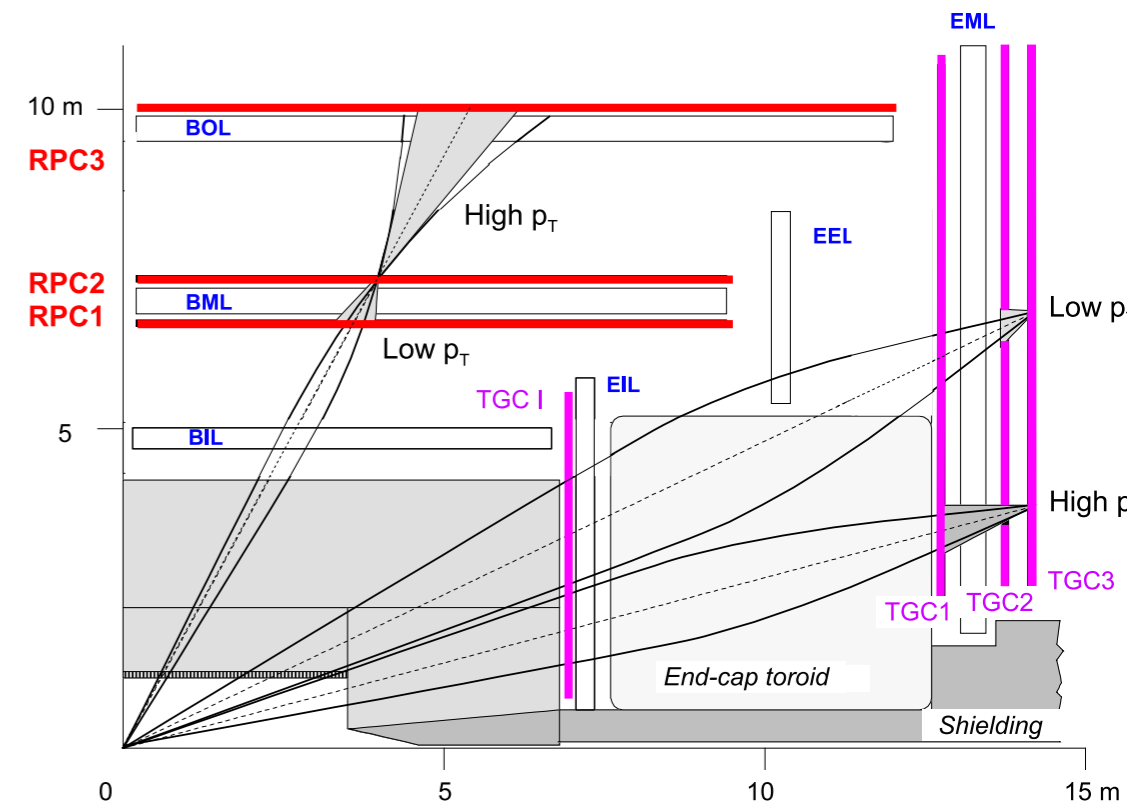


- Dane liczbowe typowe dla 2016

Część sprzętowa - L1

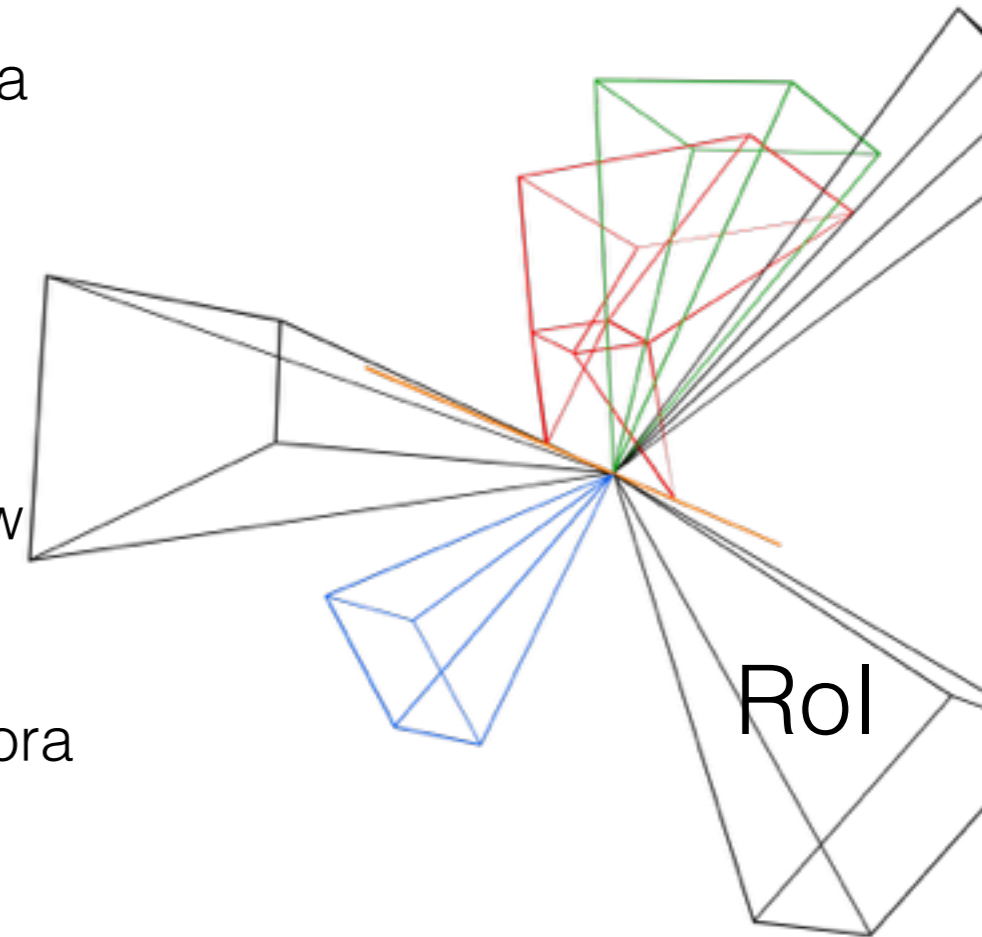
- Zgrubne sygnały detektorowe dostarczane do układów implementujących proste algorytmy
 - Koincydencje geometryczne \rightarrow miony
 - Wyszukiwanie maksimum metodą przesuwającego się okna \rightarrow depozyty kalorymetryczne
- Przepuszczane są przypadki spełniające jeden z 256(512) kryteriów logicznych
 - Dodatkowa informacja - charakterystyka rejonów aktywności (RoI)

Częstość redukowana do $\sim 100\text{kHz}$
 Decyzja wypracowana w $2.5\ \mu\text{s}$



Filtr wysokiego poziomu - HLT

- **W rejonach** zidentyfikowanych przez L1 wykonywana jest **rekonstrukcja obiektów fizycznych**
- Znaczne przyśpieszenie obliczeń w porównaniu do pełnej rekonstrukcji (złożony proces)
- Optymalizacja procesu odrzucania (99% przypadków jest odrzucanych)
- Wykorzystuje się typowo ok 2-5% informacji z detektora
 - Mniej kosztowny system odczytu
 - Tańsza sieć do transmisji danych
 - Mniejsza farma HLT



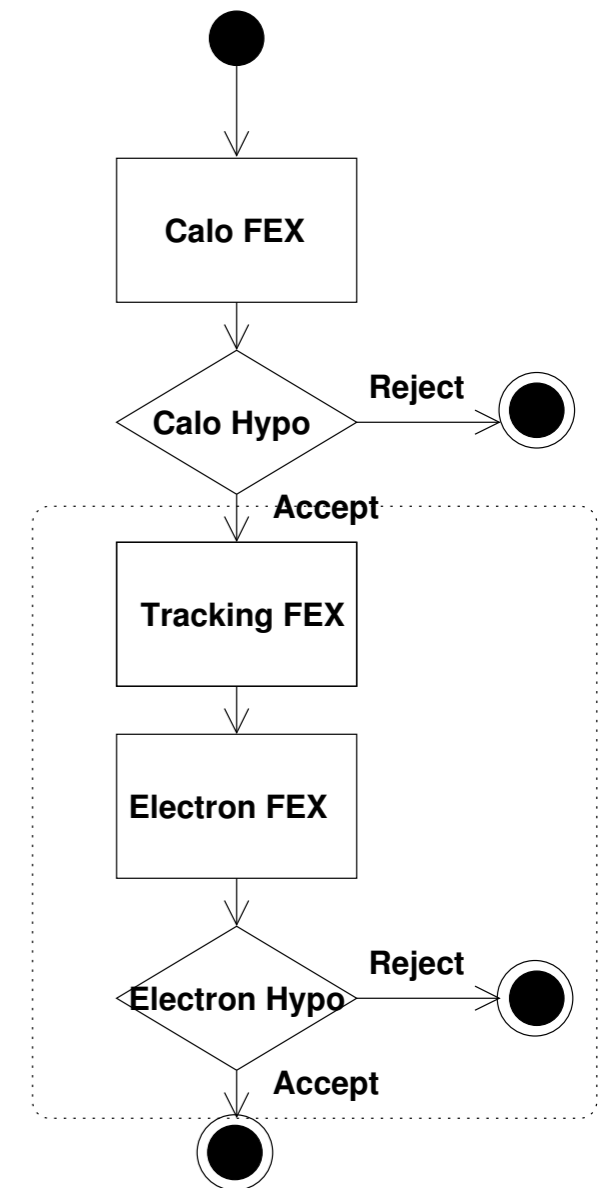
Oprogramowanie w c++
Kilkaset algorytmów

Częstość redukowana do $\sim 1\text{kHz}$
Decyzja wypracowana w 300 ms^*

Proces filtracji HLT w pigułce przykład elektronu

1. Rekonstrukcja klastra → parametry kaskady elektromagnetycznej
2. Sprawdzenie depozytu i kształtu kaskady ✘
3. Rekonstrukcja śladów w ID → ślady
4. Kombinacja śladów z kaskadą → elektrony
5. Weryfikacja hipotezy elektronu ✘

Następnie kroki 1-5 powtórzone przez precyzyjne algorytmy.

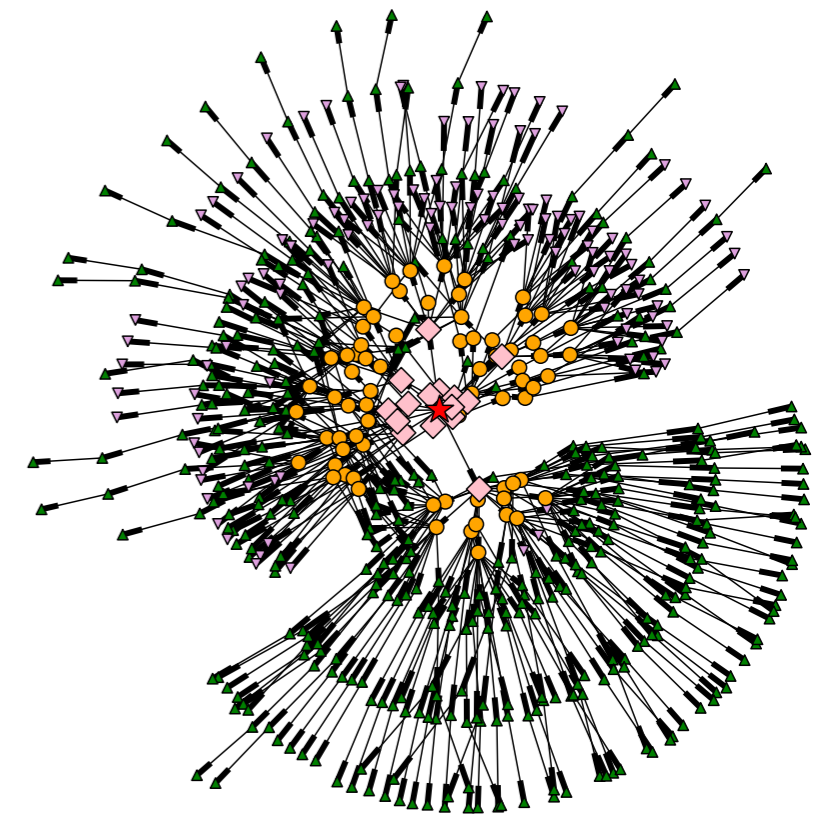


FEX - Feature Extraction algorithm
Hypo - Hypothesis verification algorithm

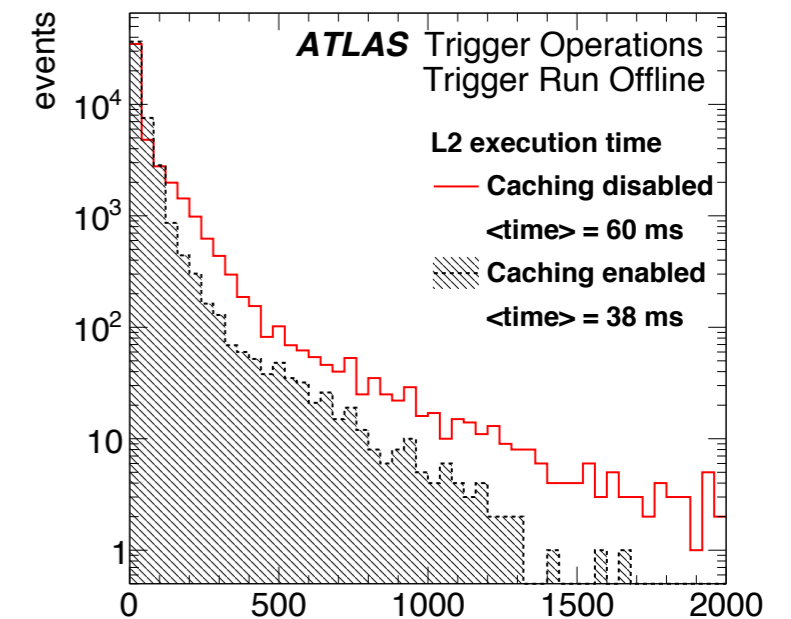
Sterowanie HLT

- Algorytm nadrzędny
 - Dekodowanie informacji L1
 - Sterowanie rekonstrukcji w rejonach zainteresowań w optymalny sposób
 - Podsumowanie decyzji
- Stosuje zaawansowane techniki programistyczne dla maksymalnej optymalizacji procesu
 - grafowe struktury danych
 - abstrakcje procesu decyzyjnego
 - eliminacja powtórzeń
 - odporność na błędy danych

Rekonstrukcja HLT ok 10-100 razy szybsza niż offline.

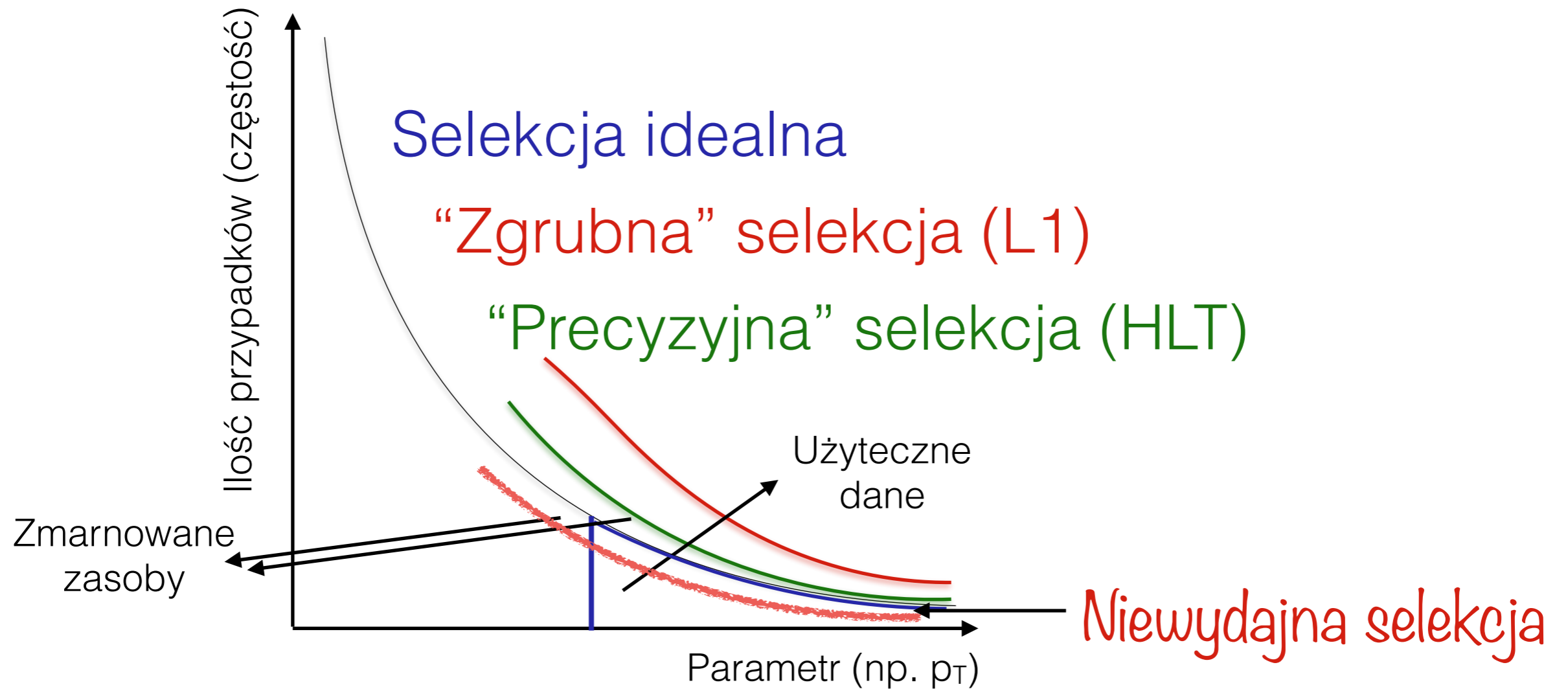


Wizualizacje struktury danych (graf skierowany - poli-drzewo) w procesie podejmowania decyzji:
różowe trójkąty - hipotezy odrzucone
zielone trójkąty - hipotezy potwierdzone



Czas przetwarzania przy zastosowaniu jednej z technik optymalizacyjnych

Idea stopniowej selekcji



Parametry systemu filtracji

- Niech a - oznacza akceptację przypadku,
 T - wystąpienie sygnału

$$P(a) = P(a|T)P(T) + P(a|\sim T)P(\sim T)$$

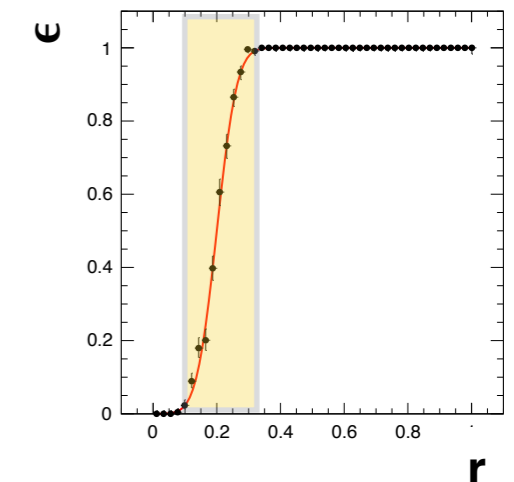
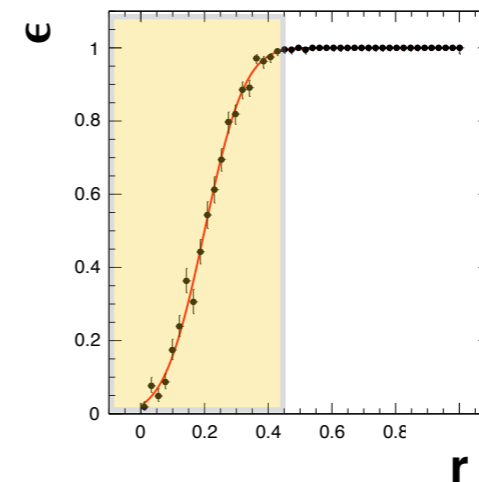
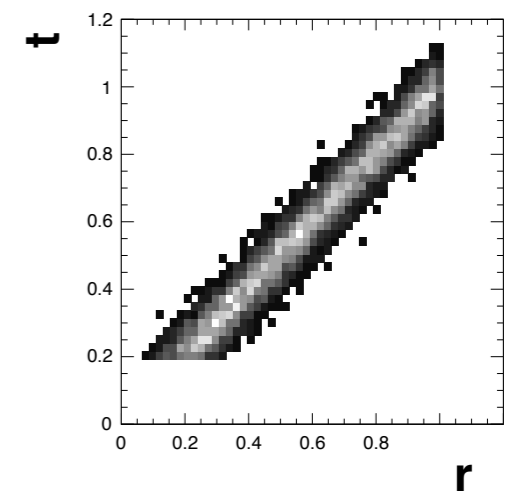
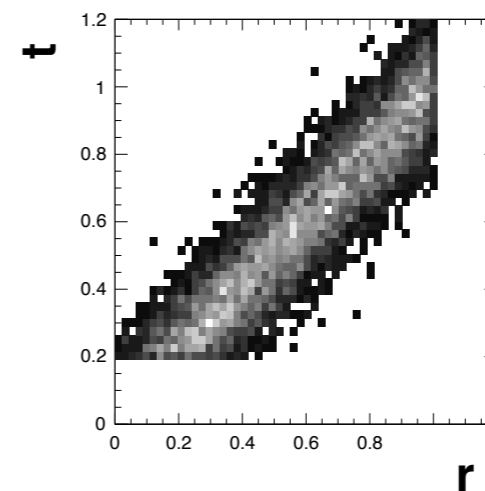
efektywność małe czystość duże

- Efektywność - $\epsilon \sim 1$
- Czystość - $P(a|\sim T) \ll 1$
 - Uwaga: $P(\sim T)$ wielokrotnie większe (zob. przekroje czynne)
 - W praktyce: jak największa efektywność i akceptowalna częstość całkowita

Selekcja w systemie wyzwalania bazuje na "uproszczonych" parametrach

Słaba korelacja

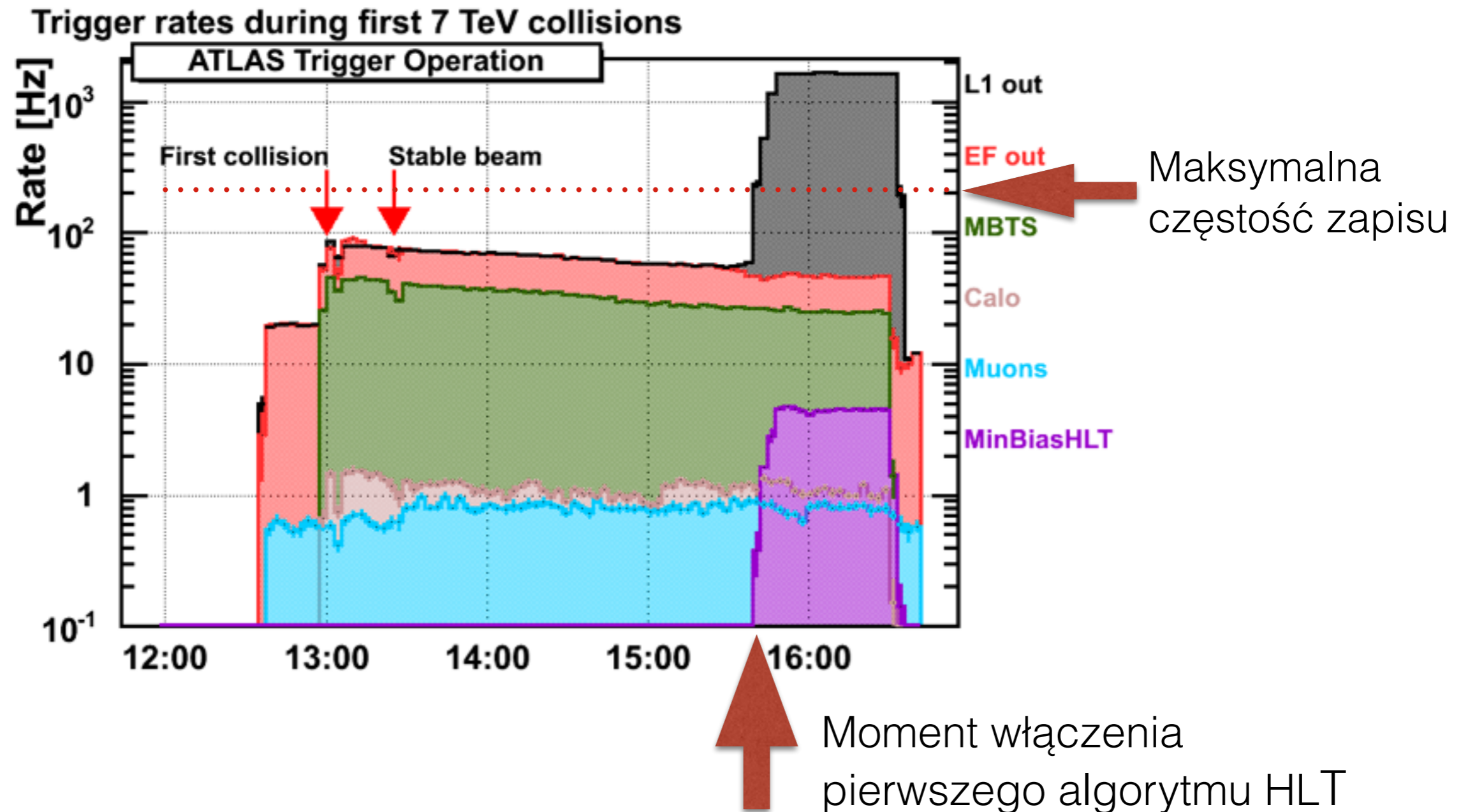
Dobra korelacja



Zakres pracy HLT

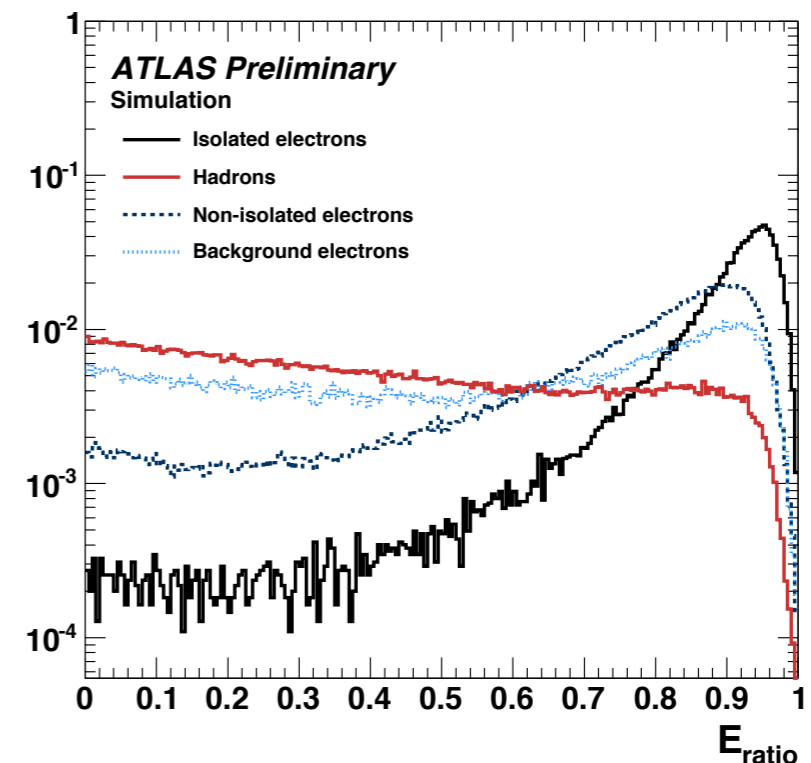
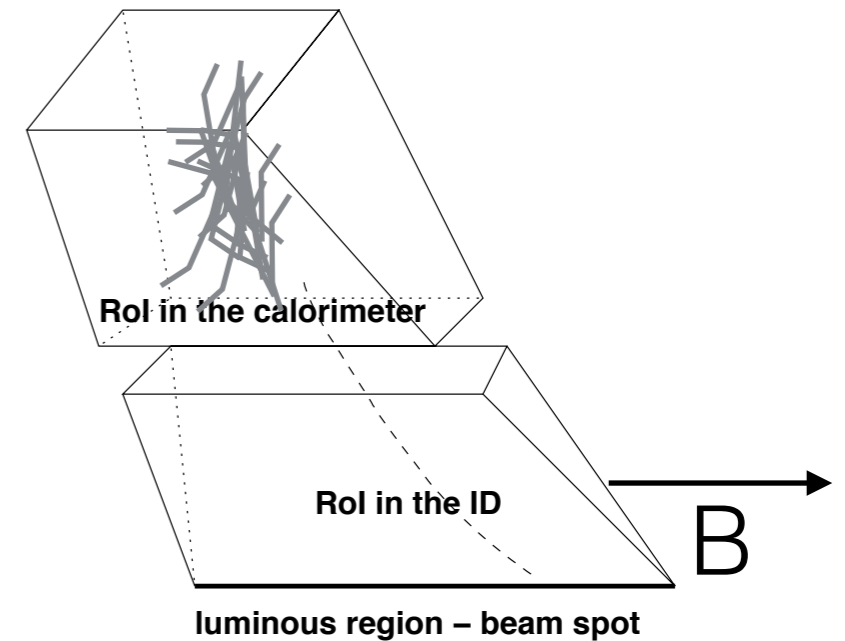
- Weryfikuje dla każdego przypadku ~2000 hipotez sygnału
- fotony, elektrony, miony, leptony tau, inkluzywne dżety hadronowe, oznaczone dżety z hadronizacji kwarku b, neutrina
 - i kombinacje powyższych
- w programie ciężko-jonowym dodatkowo: kategorie przypadków o wysokich krotnościach czy ultra-peryferycznych

Pierwsze włączenie HLT w 2010



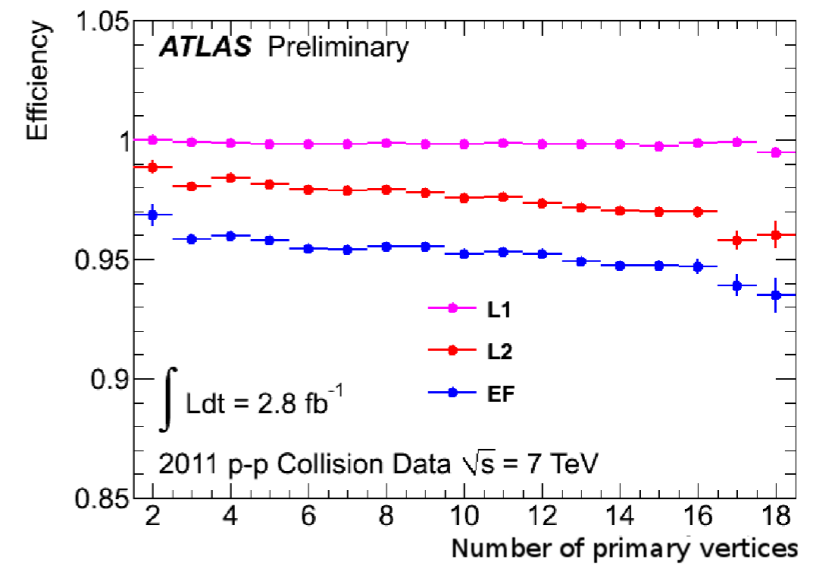
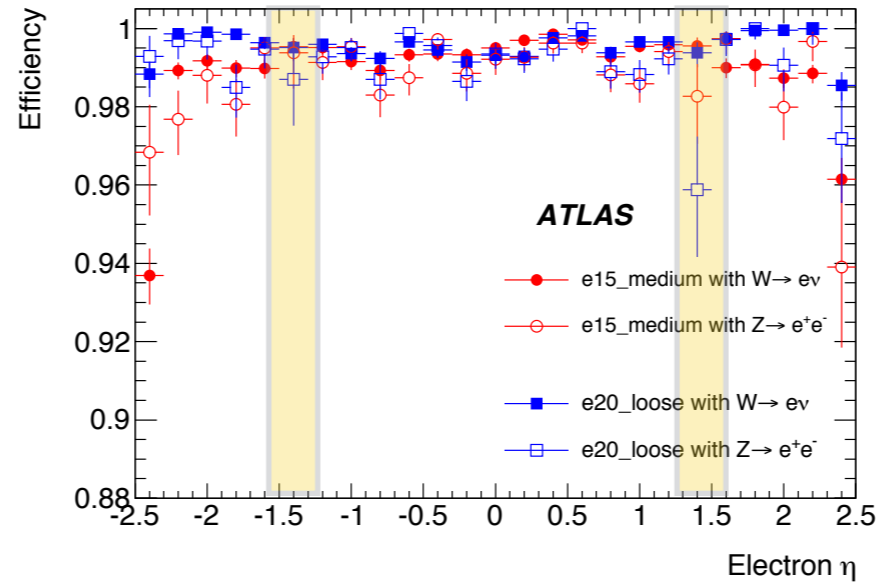
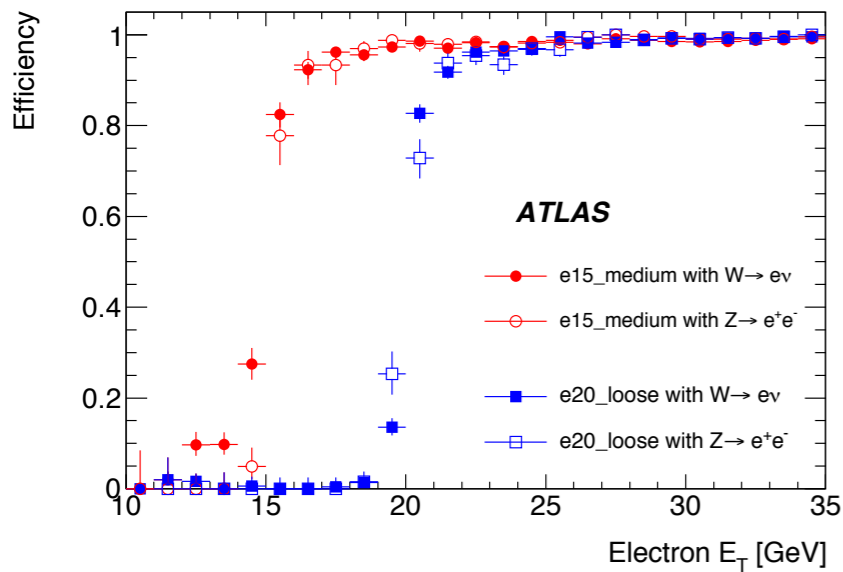
Filtr elektronowy

- Przypadki z rozpadem W/Z
- Wielostopniowa rekonstrukcja w RoI
- Klaster EM, dopasowany ślad
- ~10 zmiennych separujących od tła hadronowego



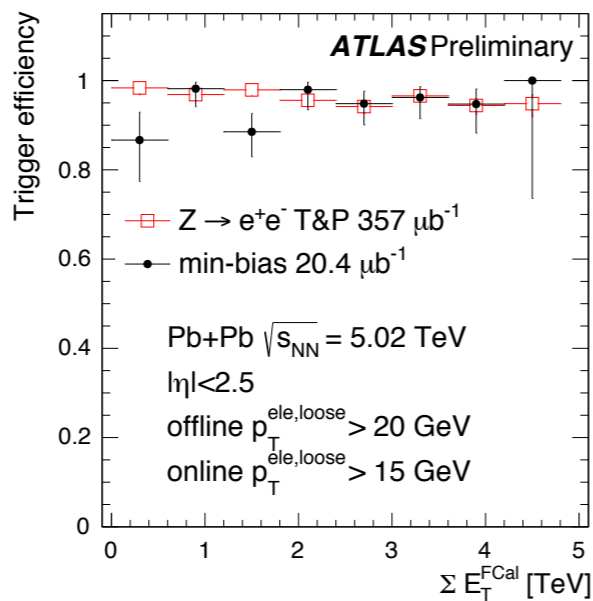
Filtr elektronowy c.d.

2011



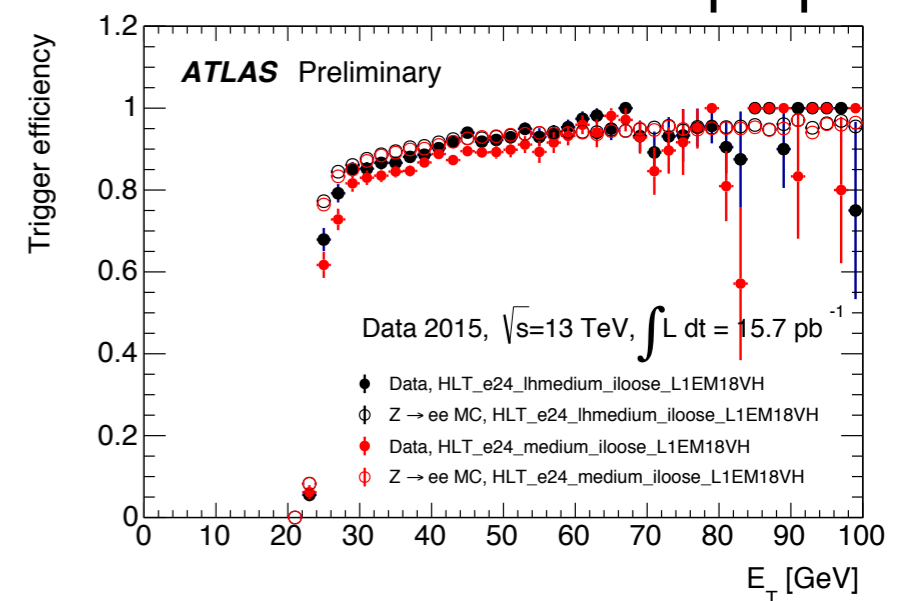
2015 Pb-Pb

Pb-Pb - średnie depozyty działają jak pile-up \rightarrow zmodyfikowane kształty kaskad, specjalne algorytmy korygujące aby utrzymać wydajność.



Przy wysokiej L znacznie podniesiony próg: 15 \rightarrow 24 GeV. Dodatkowa selekcja redukująca tło \rightarrow gorsza efektywność.

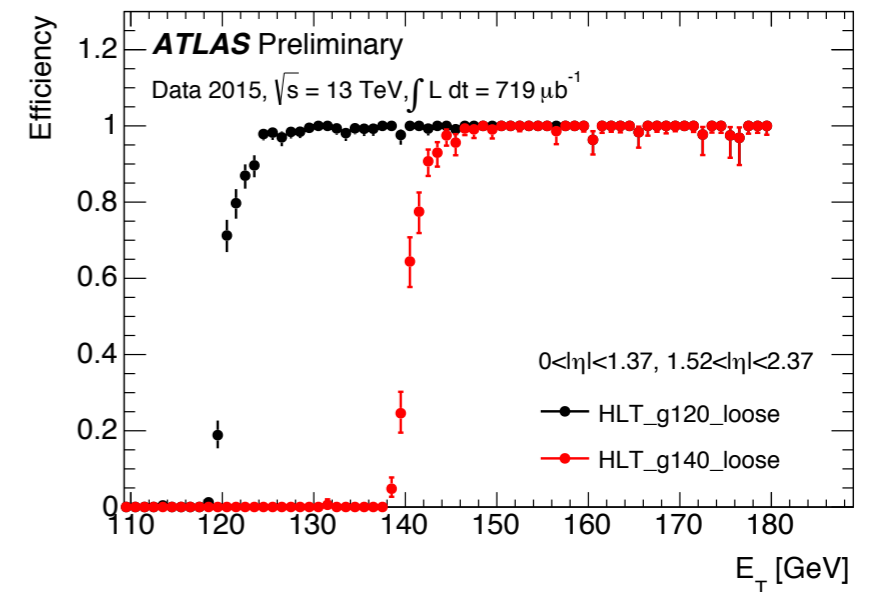
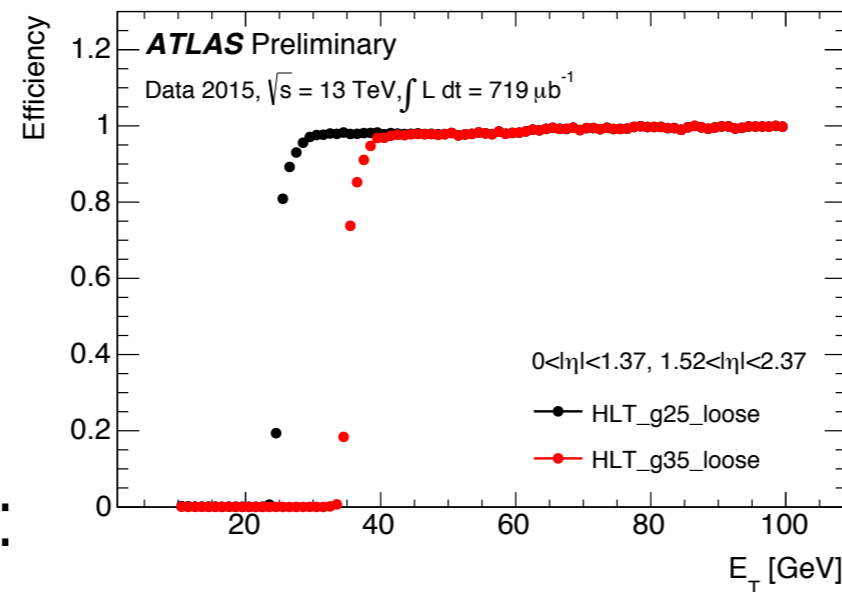
2015 p-p



Filtr fotonowy

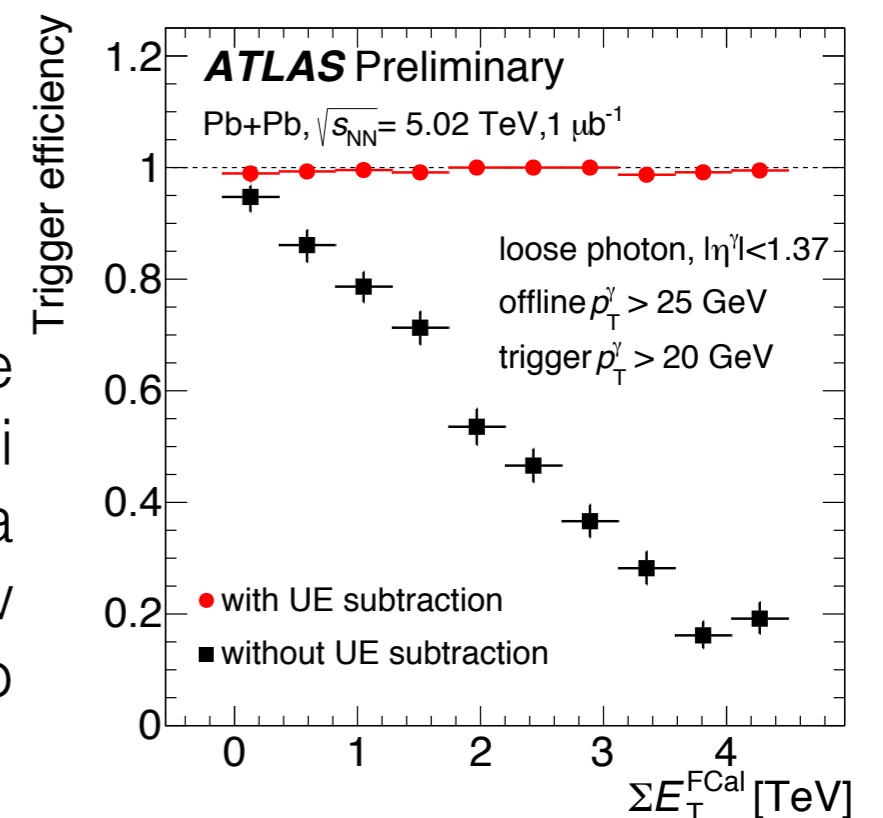
2015 p - p

- $\gamma\gamma$ - złoty kanał rozpadu H
- γ - SUSY
- Czysty proces kalibracyjny QCD:
 $q+g \rightarrow q+\gamma$
- W Pb-Pb, sonda nieczuła na QGP
- rekonstrukcja i identyfikacja podobnie jak dla elektronów - nie wykorzystuje się informacji o brakuącym śladzie



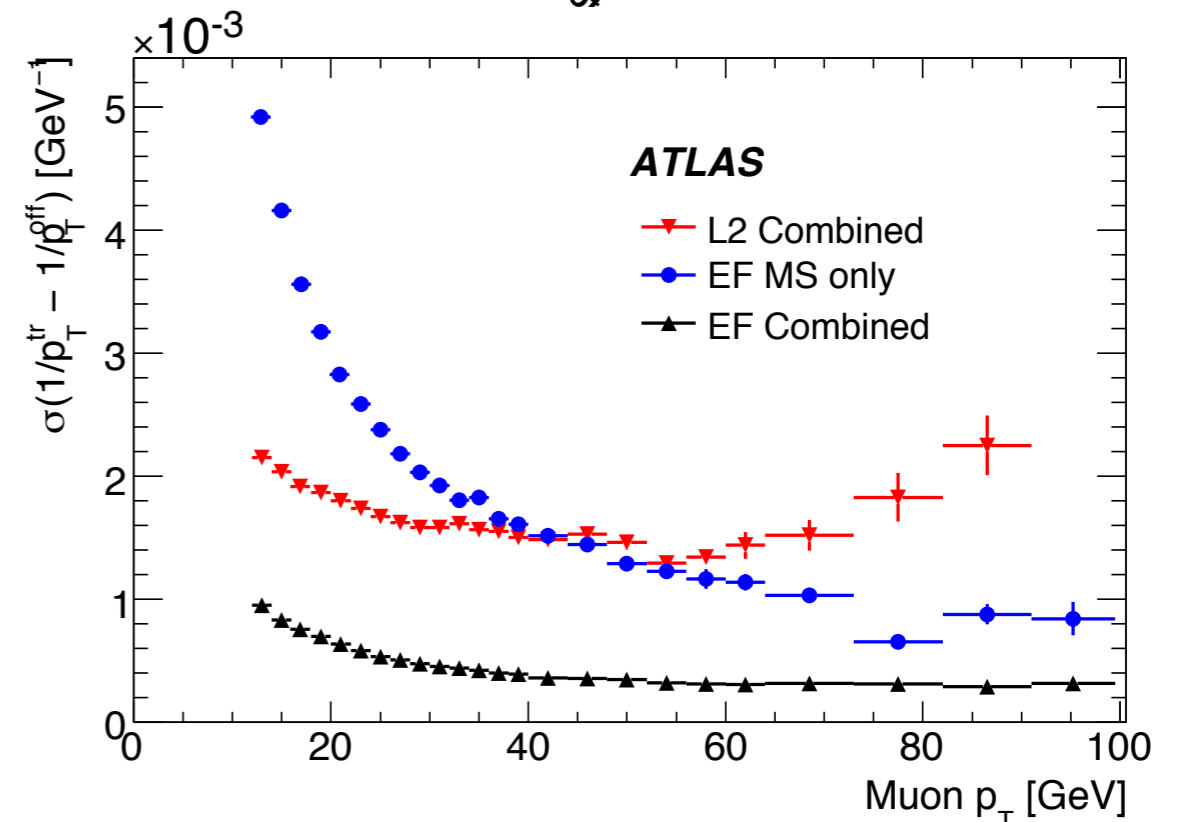
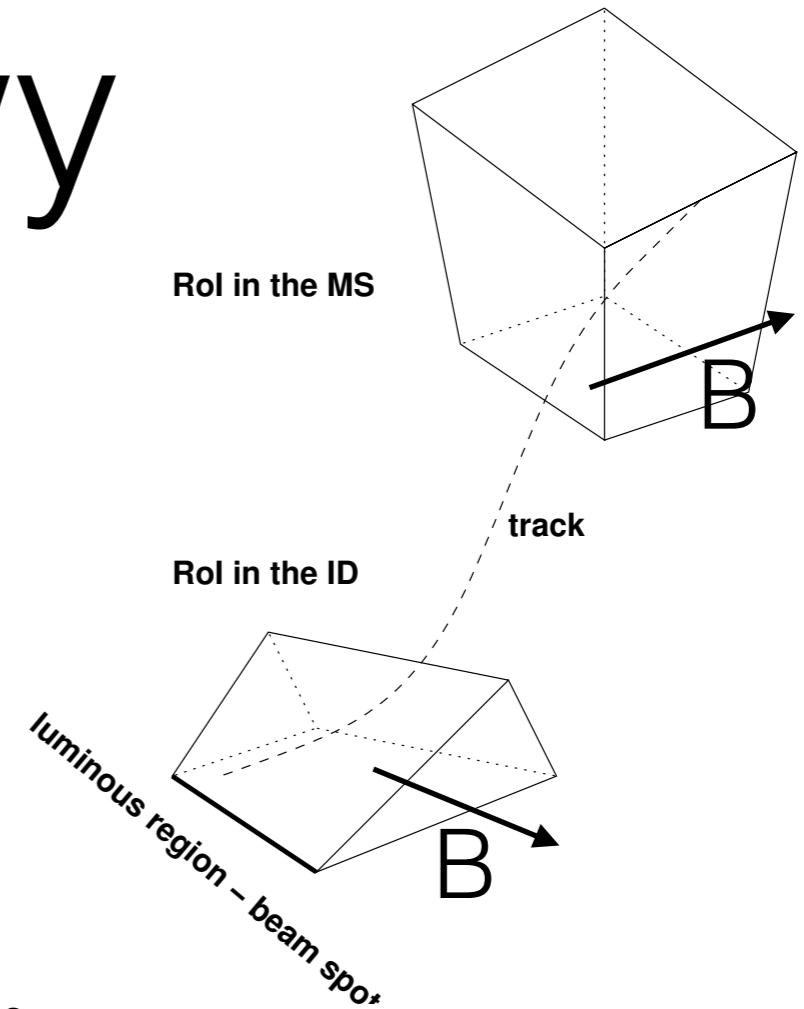
2015 Pb - Pb

Porównanie wydajności algorytmów dla p - p i Pb - Pb w danych Pb - Pb



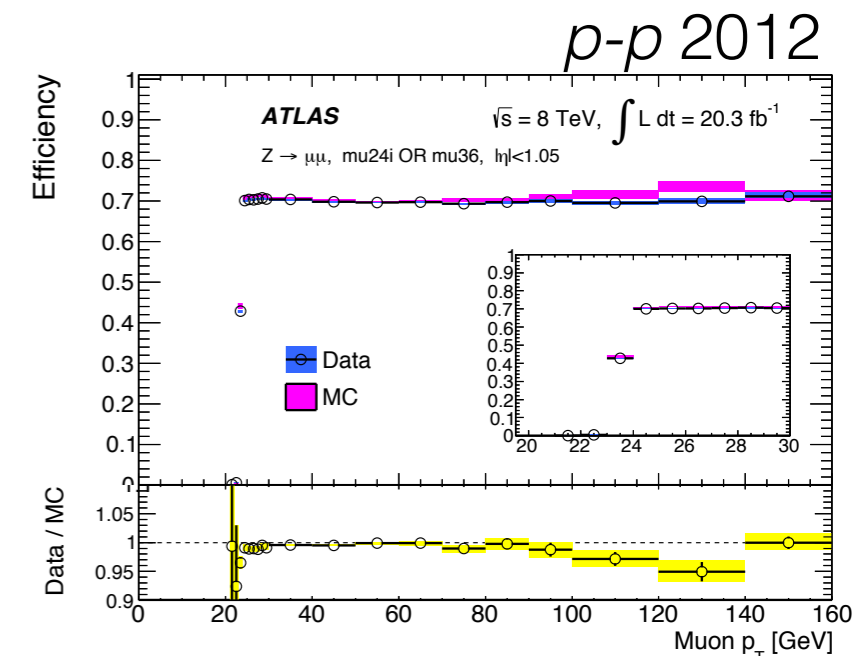
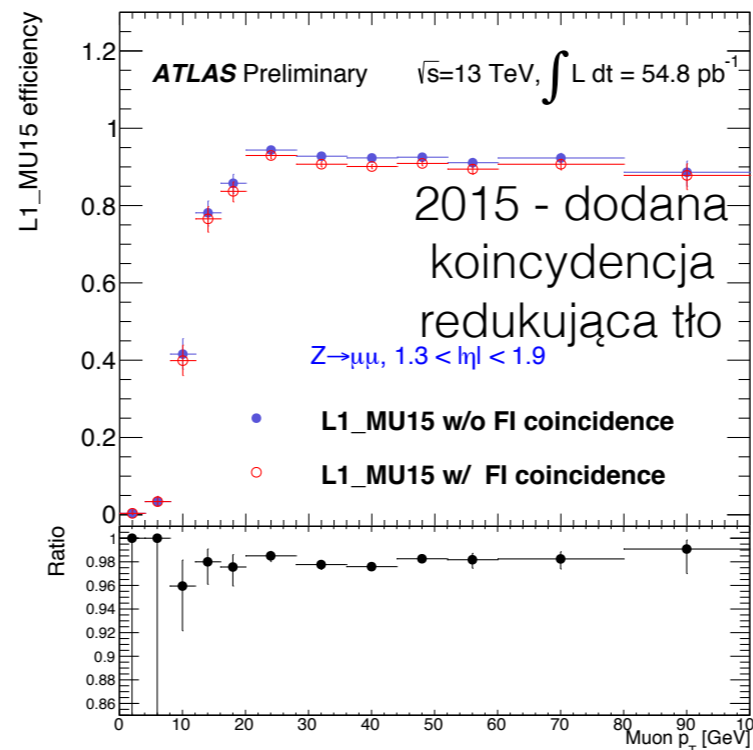
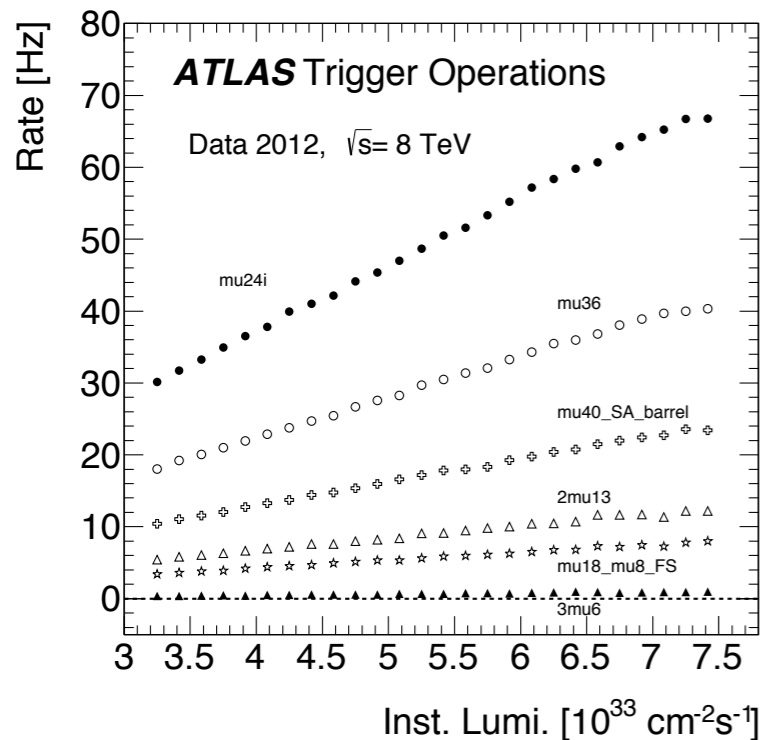
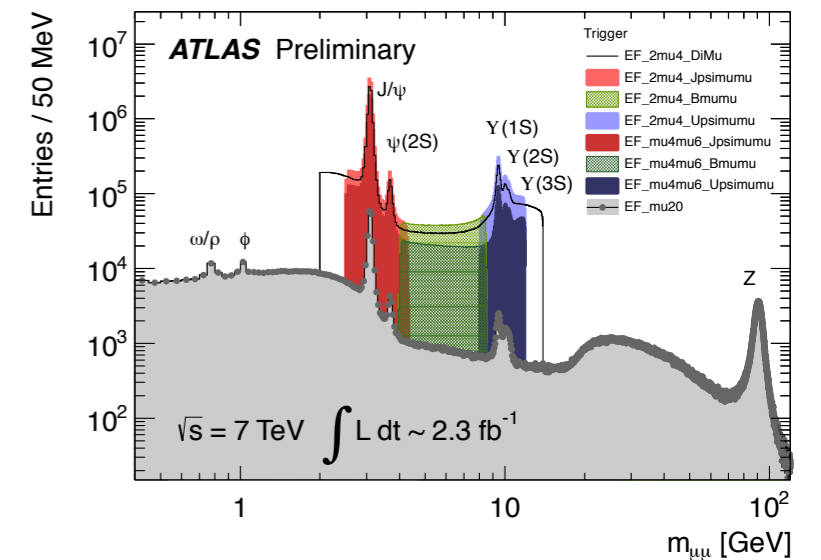
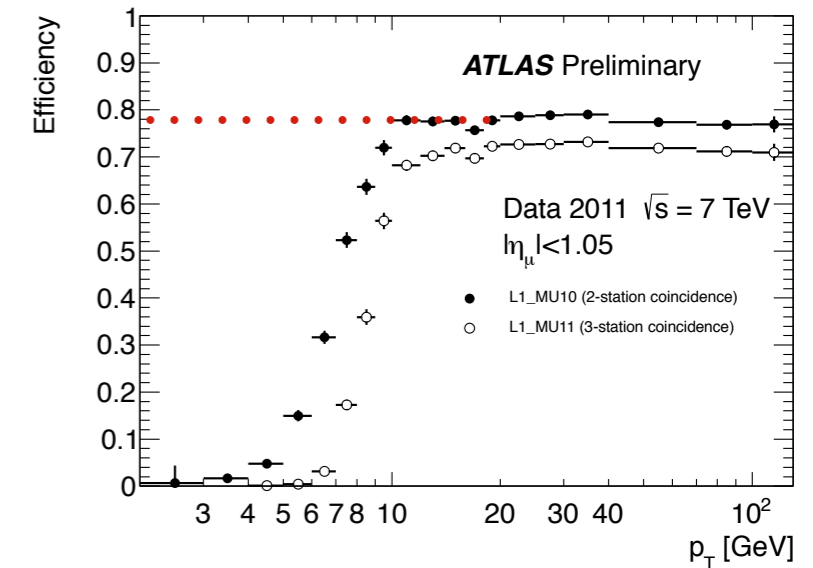
Filtr mionowy

- Rozpady W/Z, (pośrednio τ), b-jet, J/ Ψ , Υ , fizyka B
- rekonstrukcja śladu w systemie mionowym
- ekstrapolacja do detektora centralnego
- rozdzielczość pędu dla niskich i wysokich pędów, kombinacja estymacji z obu systemów



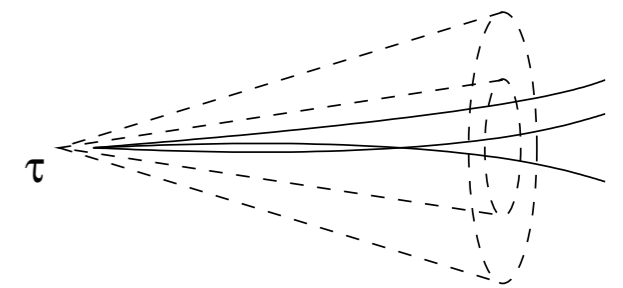
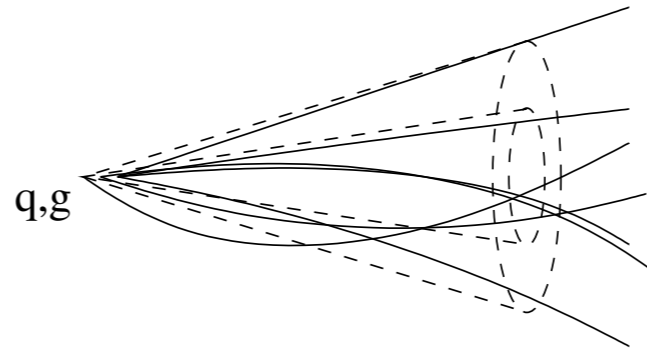
Filtr mionowy cd

- Inkluzywne filtry do $p_T > 15, 20$ GeV
- Sprzętowy filtr ma ograniczoną $\sim 80\%$ wydajność w części centralnej (ograniczenie konstrukcyjne) $\rightarrow \mu\mu$ mają ograniczoną wydajność (60%)
 - Drugi muon znajdujący poprzez rekonstrukcję wszystkich śladów (full-scan) w HLT
- Filtr niezależny od efektu pile-up

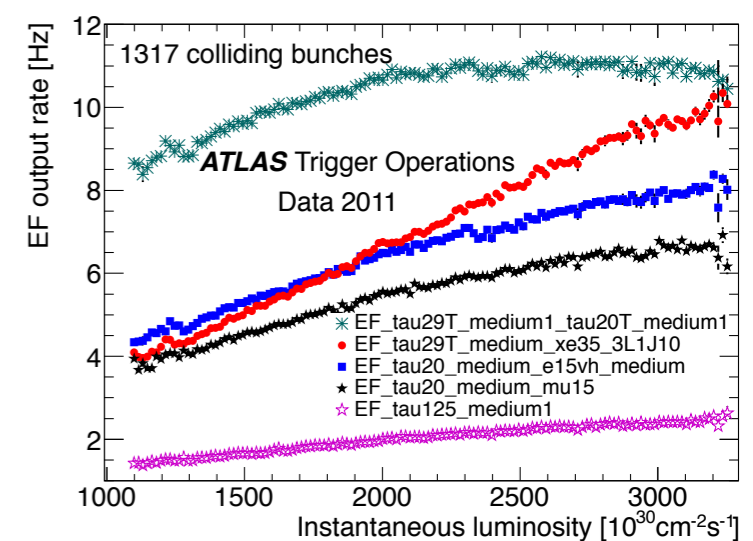
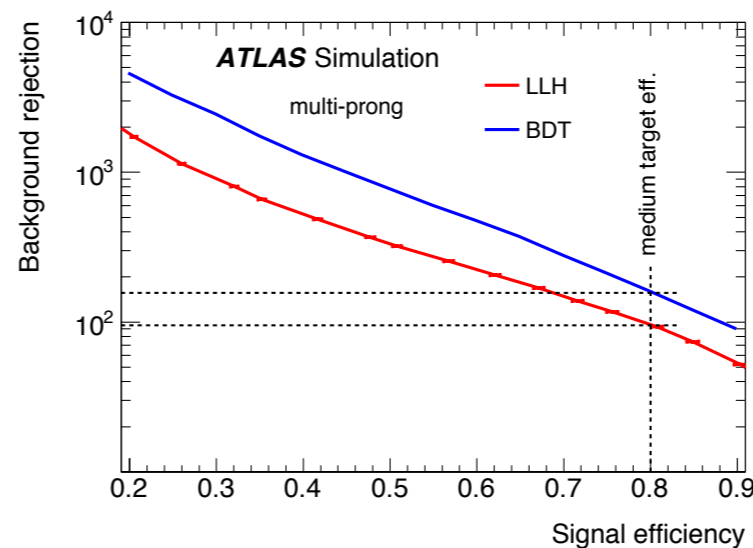
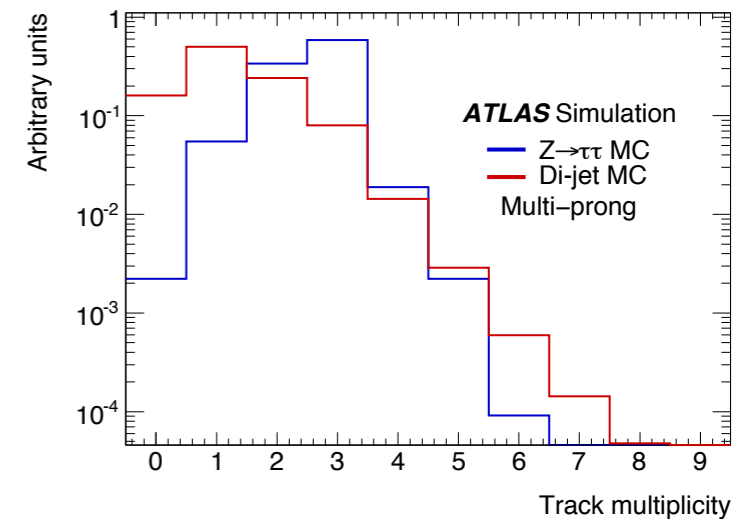
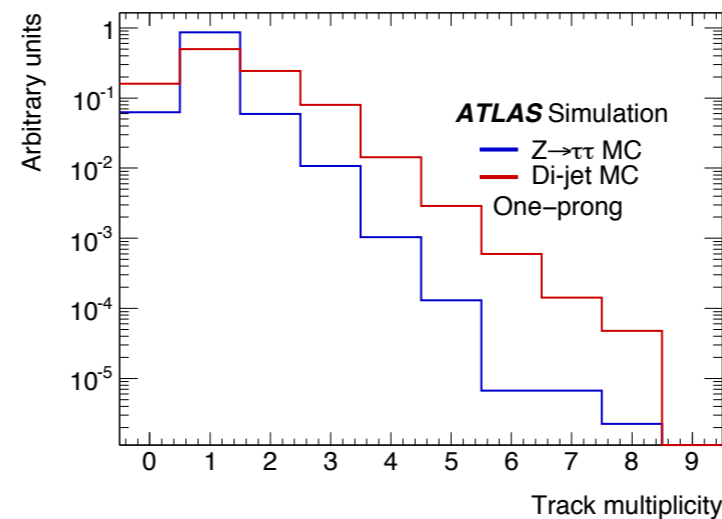


Filtr na hadrony τ

- Rozpady $W/Z, H \rightarrow \tau\tau$, BSM
- 65% rozpadów τ na piony (pozostałe z e i μ)



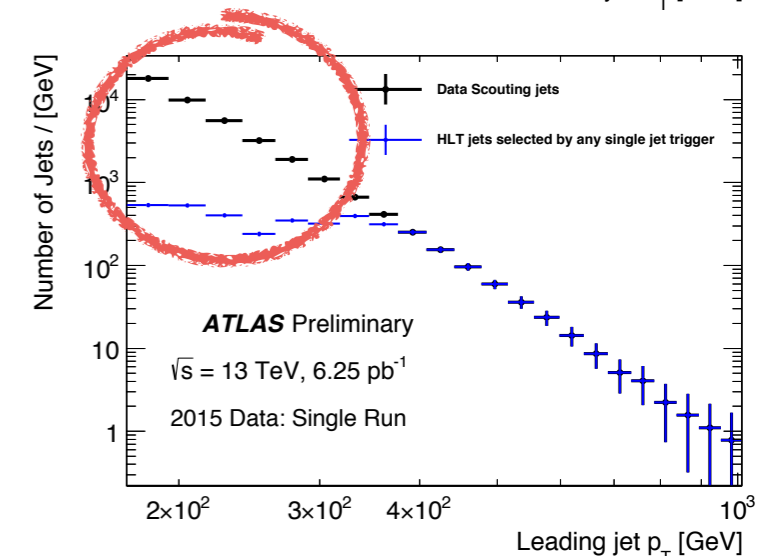
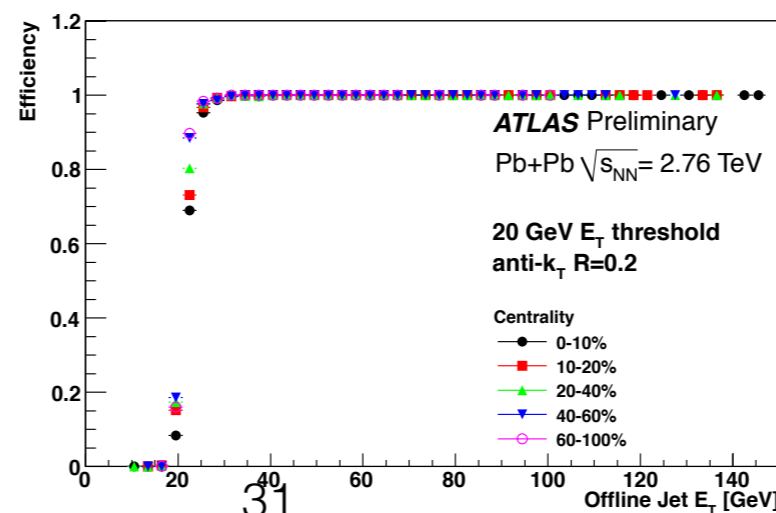
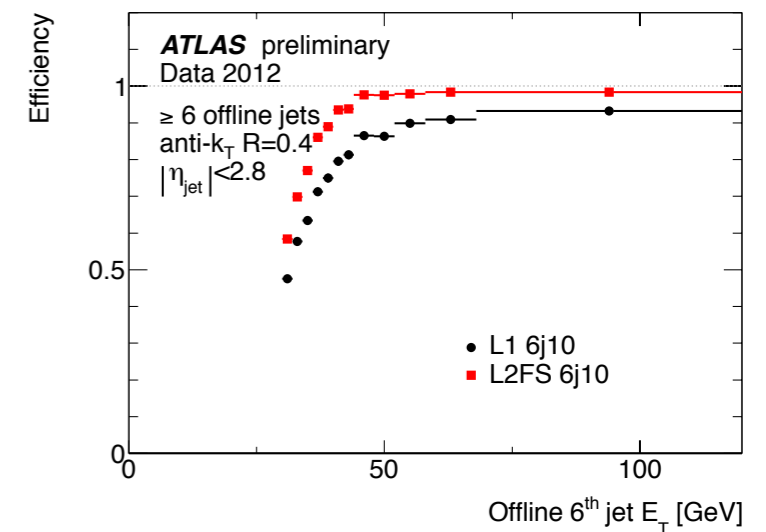
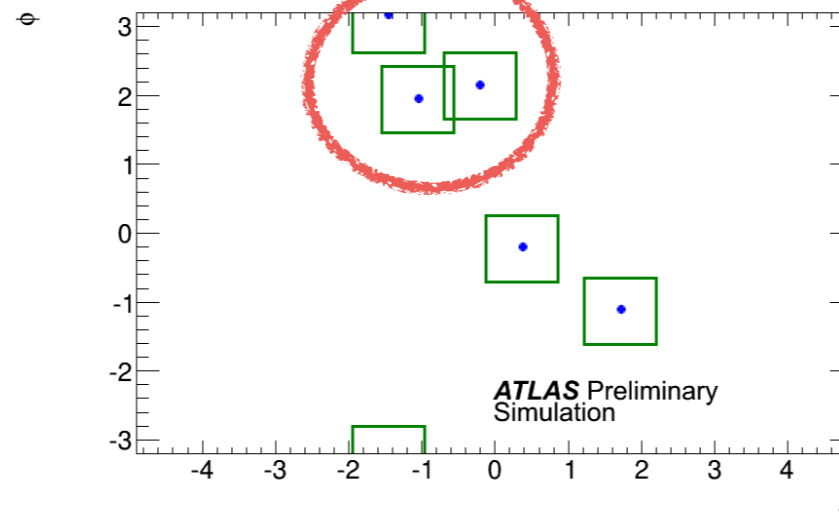
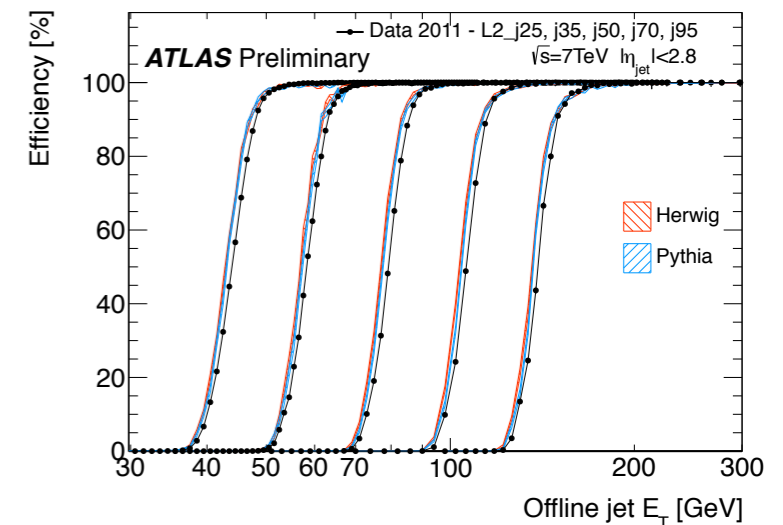
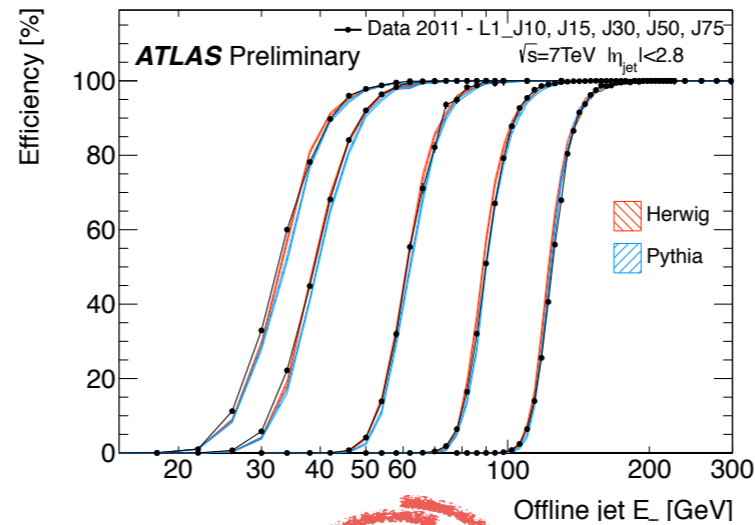
- sygnatura w detektorze - skolimowany klaster z 1 (1-prong) lub 3 śladami (3-prong)
- rekonstrukcja i identyfikacja klastra EM+HAD na podstawie kształtu kaskady
- rekonstrukcja śladów w relatywnie dużym obszarze - optymalizacja min. p_T , rekonstrukcja dwustopniowa
- ze względu na duże podobieństwo "dżetu" - τ z "dżetem" - qg , selekcja wykonywana za pomocą technik analizy wielowymiarowej (np. BDT)



Sygnatura nie "odporna" na efekt pile-up

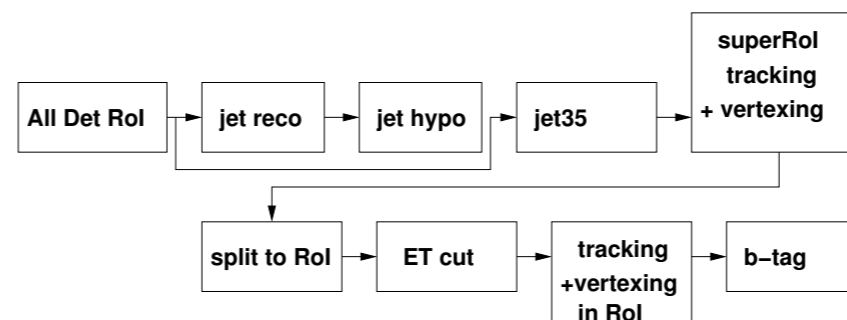
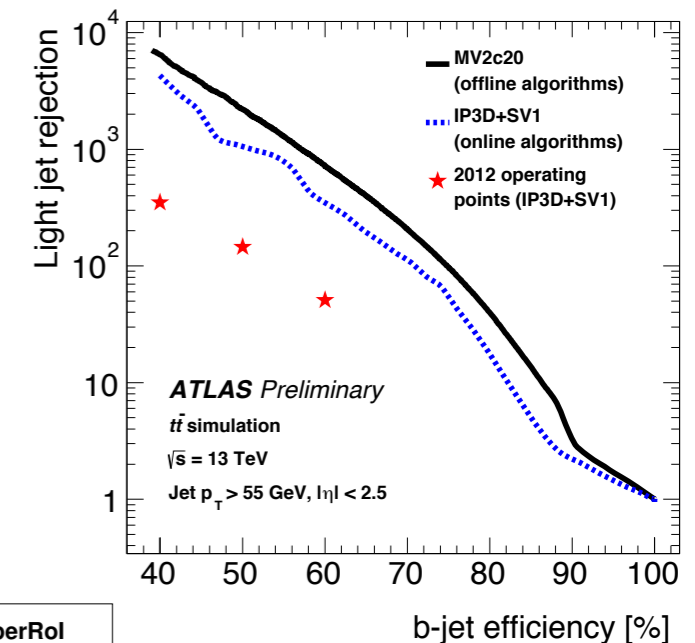
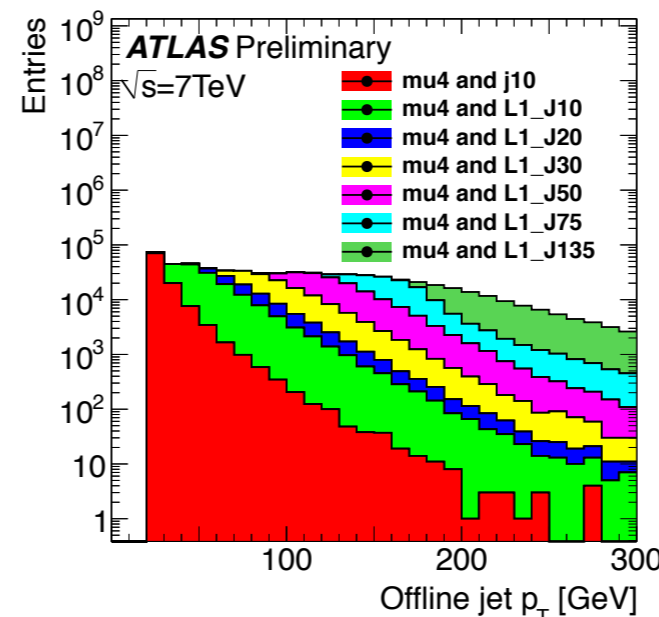
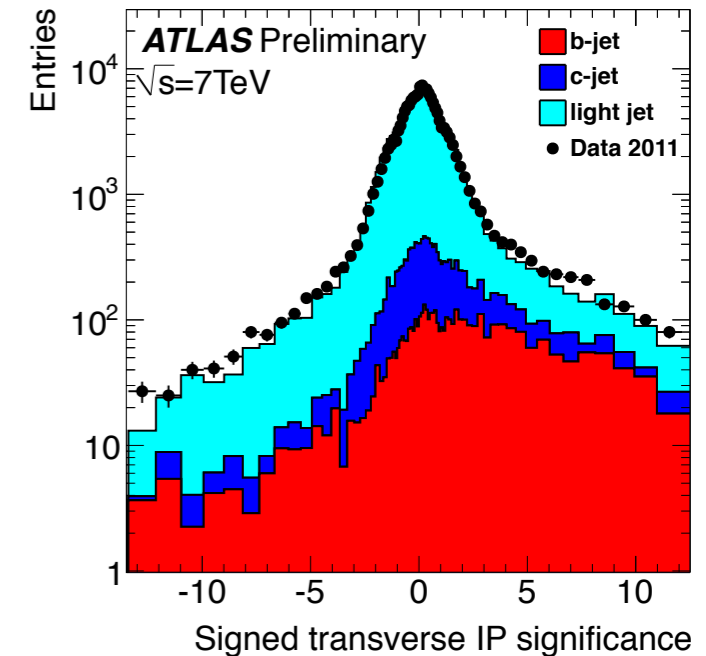
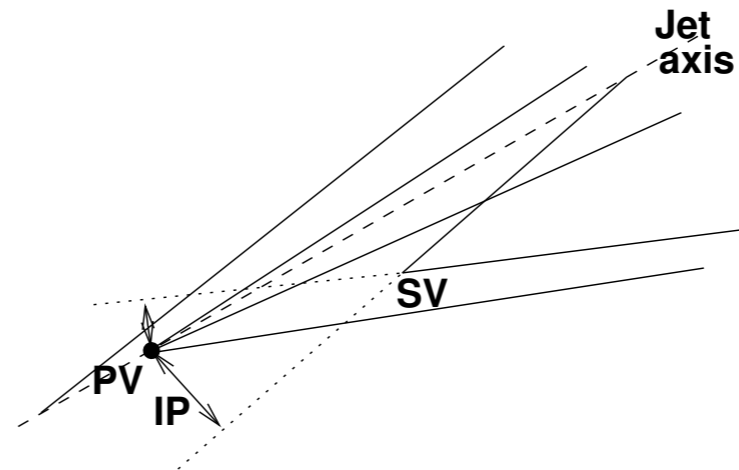
Filtr dżetów QCD

- Dane dla studiów QCD
- Filtr inkluzywny łatwy w implementacji
 - Bardzo wysoki próg 400 GeV w 2016
 - niższe E dżetu+inne sygnatury
- Bardziej złożone sygnatury: wiele dżetów, L1 - niewydajne z powodu ograniczonej granulacji → można to naprawić w HLT
- Dla Pb-Pb energia poprawiana podobnie jak dla fotonów
- Od 2015 dla dżetów wykonuje się “analizę” bez pełnych przypadków



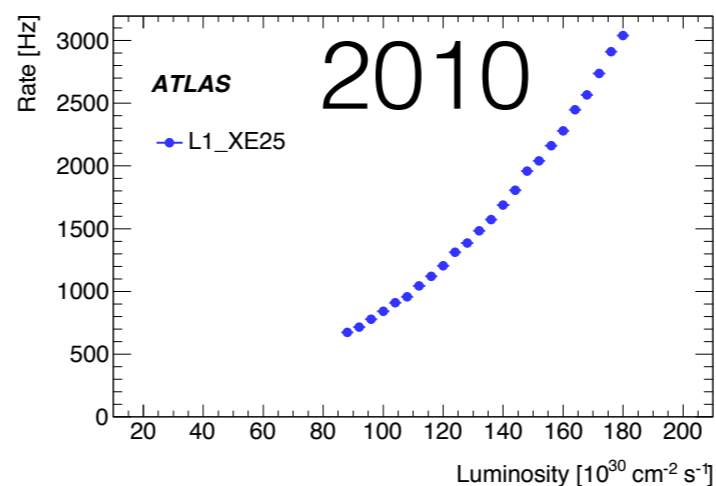
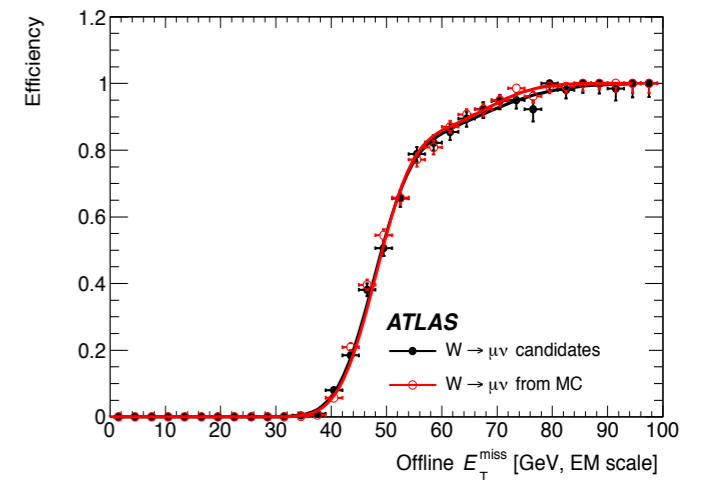
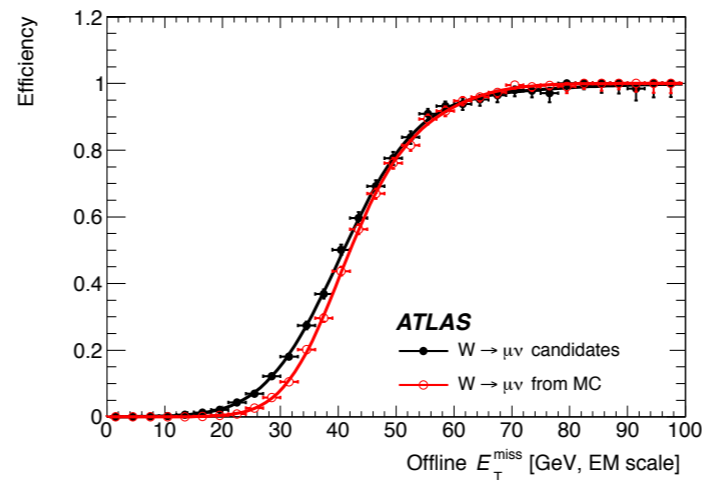
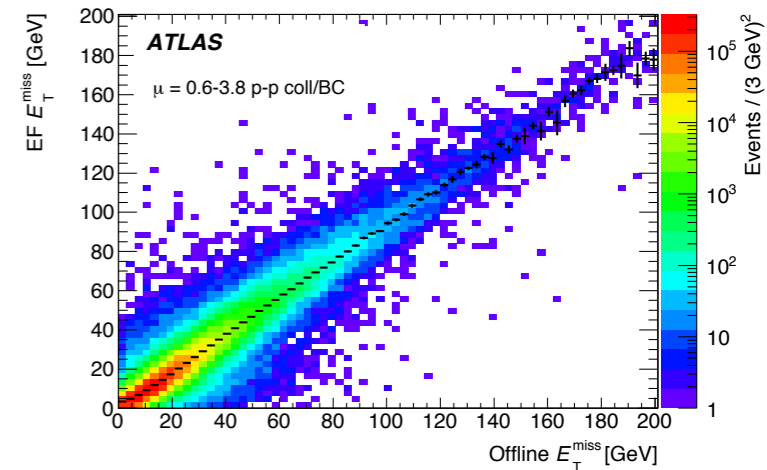
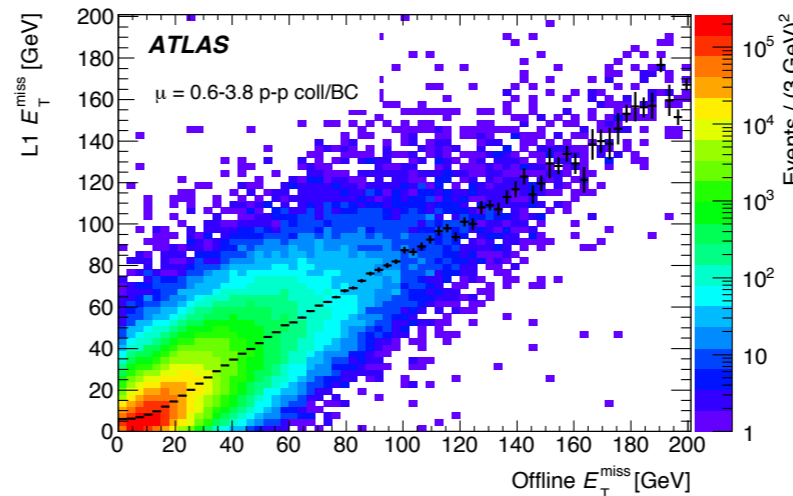
Filtr dżetów z kwarku b

- Rozpady t, HH->4b,...
- Po rekonstrukcji klastra złożony proces oznaczania “zapachu”
 - ślad będący mionem
 - dla celów kalibracyjnych
 - w pomiarach na danych Pb-Pb
 - ślady pochodzące z wtórnego wierzchołka
 - w przeciwieństwie do rekonstrukcji offline dokładna identyfikacja wierzchołka jest wyzwaniem obliczeniowym i logistycznym
- Duże podobieństwo z tłem -> techniki MVA



Filtr neutronowy

- Procesy EW, “nowa fizyka” np. WIMP
- Obserwacja: brakujący pęd transwersalny -> w systemie wyzwalania brakująca energia
- Bardzo niepożądana wrażliwość na efekt pile-up
 - Bezustanne prace and usprawnieniem
 - W przyszłości użyte będą ślady



Przebudowa systemu wyzwalania

- Po roku 2023 LHC → HL LHC
 - ECM ↗ L ↗ ⇒ częstość ↗, wzmożony efekt nakładania
 - Detektor ATLAS częściowo przebudowany w tym system wyzwalania
 - L1: 0.4 MHz (z 0.1 MHz obecnie), HLT: 10 kHz (z 1 kHz)
 - rozważana opcja L1: 1 MHz
 - Farma HLT nie może być powiększona (ograniczenie dostępnej mocy elektrycznej)
 - Wymagane będą jeszcze szybsze algorytmy (kombinatoryka), finalna selektywność jak po użyciu algorytmów “offline”
- Trwają prace nad przebudową sterowania HLT (do 2020), dalsze usprawnienia do 2027 -> projekt pochłonie ~250 FTE
 - Techniki MVA i głębokiego uczenia (Deep Learning)
 - Obliczenia wspomagane akceleratorami sprzętowymi (karty graficzne GPU, FPGA, systemy pamięci adresowanej zawartością - CAM)
 - Wielowątkowość, lepsze wykorzystanie nowoczesnych architektur procesorów
- 21-23 lutego 2017 - mini. konferencja **na naszym wydziale**

Bez przebudowy spada akceptancja dla wielu kanałów: spada zdolność pomiarowa eksperymentu

Podsumowanie

- Eksperyment fiz. wysokiej energii nie istnieje bez systemu wyzwalań. To tu zaczyna się fizyka!
- W ATLASie system złożony z części sprzętowej i programowej
- System sprawdzi(ł) się podczas zbierania danych 2010-2019
- Po modernizacji LHC wyższa świetność i energia. Jeszcze trudniejsze wyzwania dla systemu wyzwalań !
- Przebudowa systemu HLT w trakcie planowania