

Fizyka zderzeń relatywistycznych ciężkich jonów

- Wykład 0: LHC – okno na Mikroświat
- Wykład 1: AA: Motywacja, cele fizyczne, akceleratorzy, eksperymenty
- Wykład 2: Plazma kwarkowo-gluonowa
- Wykład 3: Geometria zderzenia, stan początkowy-gęstość energii, produkcja entropii
- Wykład 4: Ewolucja systemu – efekty kolektywne
- Wykład 5: Procesy z dużym przekazem pędu
- Wykład 6: Model saturacji. Kolorowy Kondensat Szklany.
- Wykład 7: Eksperyment PHOBOS przy akceleratorze RHIC
- Wykład 8: Korelacje HBT (doc. M. Kowalski)
- Wykład 9: **Fizyka ciężkich jonów w eksperymencie ATLAS (LHC)**
- Wykład 10: Eksperyment ALICE przy akceleratorze LHC (doc.M. Kowalski)

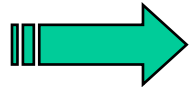
Plan

- RHIC – Odkrycia (przypomnienie)
 - Silnie sprzężona plazma kwarkowo-gluonowa ('idealna' ciecz)
 - Kolorowy Kondensat Szklany (CGC)
- Przewidywania dla zderzeń ciężkich jonów przy energii akceleratora LHC
- Detektor eksperymentu ATLAS
- Program fizyczny badania zderzeń jądro-jądro
 - Ogólne charakterystyki, Fizyka dżetów, fotony, stany związane kwark-antykwar, fizyka przy małych x
- Podsumowanie

Motywacja badań $A+A$

- badanie silnie oddziałującej materii przy ekstremalnych gęstościach energii
- testowanie przewidywań Chromodynamiki Kwantowej (QCD)

QCD



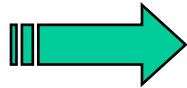
Uwięzienie

Siła $\rightarrow$ stałej, nawet dla $r \rightarrow$ nieskończoności!

$$V^{QCD} \sim -a/r + \sigma r$$

(Tylko jakościowe zrozumienie)

Asymptotyczna swoboda przy dużych gęstościach (mała α_s)



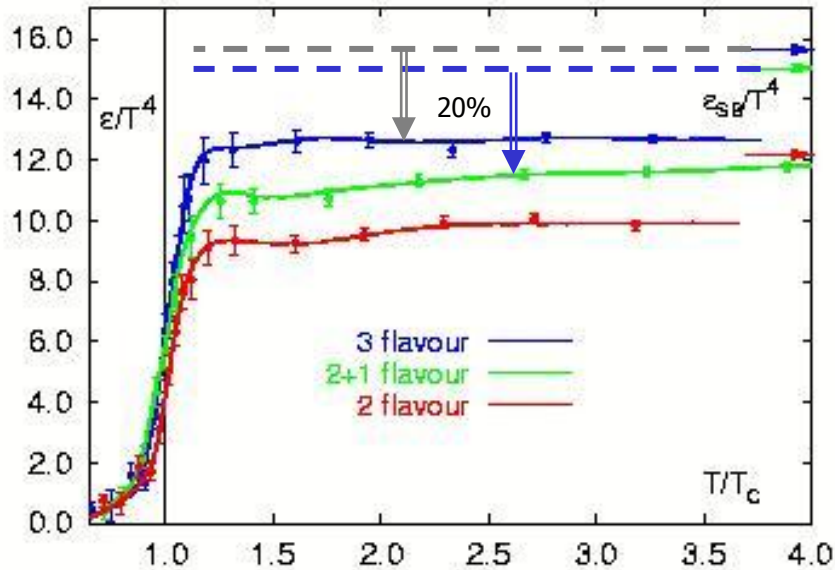
Symetria chiralna

Spontanicznie łamana w próżni QCD: $\langle qq \rangle_{vac} \neq 0$

Częściowo przywrócona przy dużych gęstościach energii

QCD: przewidywania dla zderzeń A+A

Rachunki QCD na sieciach:



- Gwałtowny wzrost gęstości energii, $\epsilon(T)$ przy temperaturze

$$T_{\text{crit}} = 191 \pm 8 \text{ MeV}$$

$$\epsilon_{\text{crit}} = 0.7 \pm 0.2 \text{ GeV/fm}^3$$

- Wzrost gęstości energii jest związany ze wzrostem liczby stopni swobody
- Materia istnieje w dwóch różnych fazach

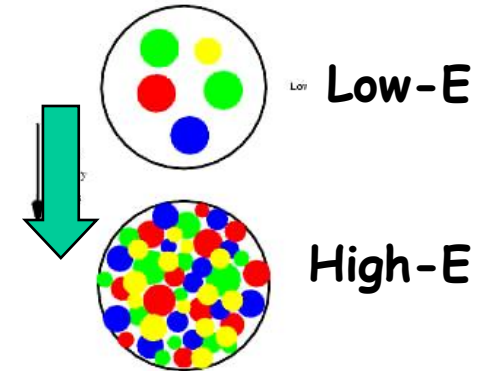
- Zmienne termodynamiczne osiągają 80% wartości charakterystycznej dla idealnego gazu nie oddziałujących cząstek (granica Stefan-Boltzmann'a).

*Kreacja nowego stanu materii,
tzw. Plazmy Kwarkowo-Gluonowej (QGP),
złożonego ze swobodnych kwarków i gluonów*

QCD: przewidywania dla zderzeń A+A

Kolorowy Kondensat Szklany (CGC):

Uniwersalna forma materii opisująca własności silnie oddziałujących cząstek o wysokich energiach. Własności te wynikają z pierwszych zasad QCD.



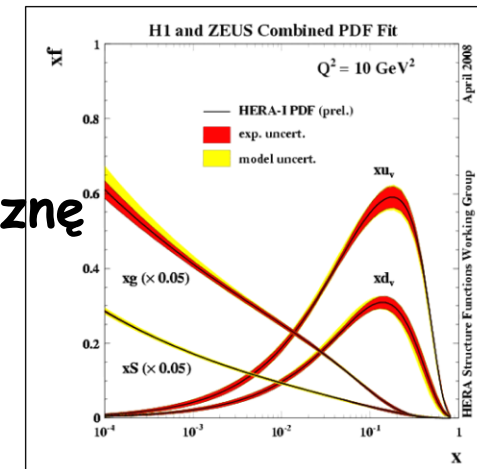
Saturation model:

- Gęstość gluonów rośnie szybko dla małych x :
 $xG(x) \sim x^{-\lambda}$ ($\lambda \sim 0.25$ z fitów do danych HERA)
- Gluony o rozmiarach π/Q^2 mogą się przekrywać w płaszczyźnie poprzecznej
- Przy skali saturacji gluony wypełniają całą płaszczyznę

$$N_g \frac{\pi}{Q_s^2} = \pi R_A^2$$

$$Q_s^2 = \alpha_s(Q_s^2) N_g(x, Q_s^2) A^{1/3}$$

- Poniżej skali saturacji Q_s^2 zachodzi fuzja gluonów
 $g+g \rightarrow g$



RHIC - Odkrycia

2004

- Silnie sprzężona plazma kwarkowo-gluonowa (sQGP) wykazująca kolektywne zachowanie podobne do idealnej cieczy
 - Znaczące efekty anizotropii azymutalnych
 - Tłumienie produkcji cząstek o dużych p_T
 - Dwu-cząstkowe korelacje w $\Delta\phi$
(tłumienie dżetów do tyłu, modyfikacja kształtu)
- Kolorowy Kondensat Szklany?
 - Słaby wzrost $dN/d\eta$ z energią dla Au+Au
 - Tłumienie produkcji cząstek o dużych p_T w d+Au dla dużych rapidity

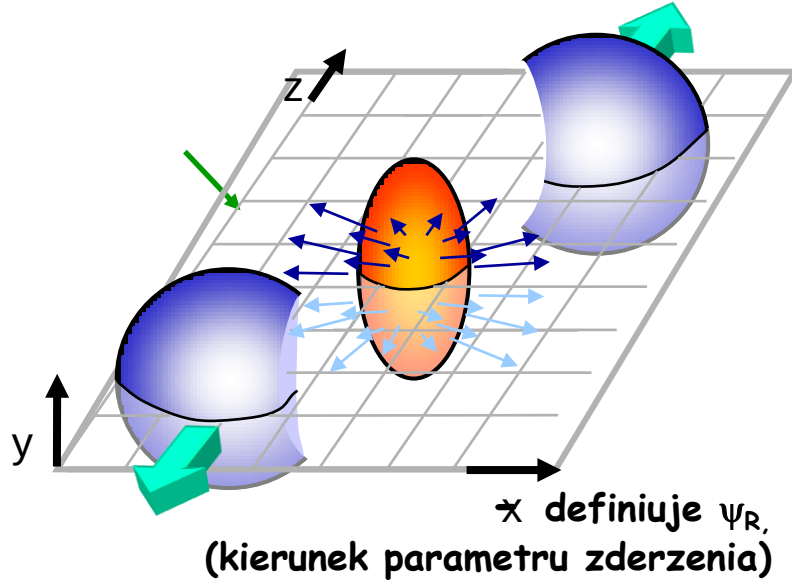
Centralne zderzenia Au+Au: Gęstość energii

- Maksymalna energia w $|y| \leq 1$ wyzwolona po ~ 1 fm/c (równowaga termodynamiczna)
(~ 90 stopni w stosunku do kierunku wiązki)
- Energia na jednostkę objętości $> 5 \text{ GeV/fm}^3$
 - konserwatywne dolne ograniczenie
 - znacznie przewyższa $\varepsilon_{\text{crit}}$ z rachunków QCD na sieciach

Uwaga: gęstość energii w nukleonie $\approx 0.5 \text{ GeV/fm}^3$
gęstość energii w jądrze $\approx 0.15 \text{ GeV/fm}^3$

Takiego systemu nie da się opisać za pomocą
hadronowych stopni swobody.

Zachowanie kolektywne: Wyptyw eliptyczny

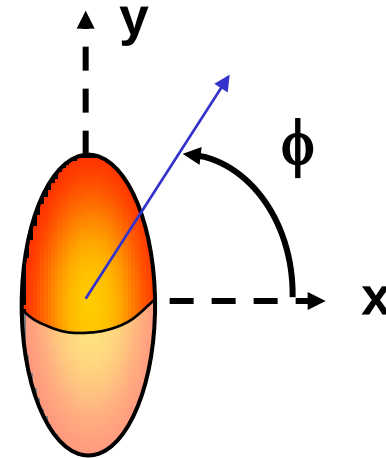


$$\frac{dN}{d(\phi - \psi_R)} = N_0 (1 + 2v_1 \cos(\phi - \psi_R) + 2v_2 \cos(2(\phi - \psi_R)) + \dots)$$

Eliptyczny wyptyw: v_2

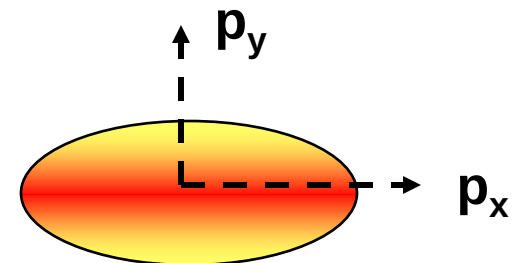
$$v_2 = \langle \cos 2(\phi - \psi_R) \rangle \equiv \left\langle \left(\frac{p_x}{p_T} \right)^2 - \left(\frac{p_y}{p_T} \right)^2 \right\rangle$$

Początkowa asymetria przestrzenna



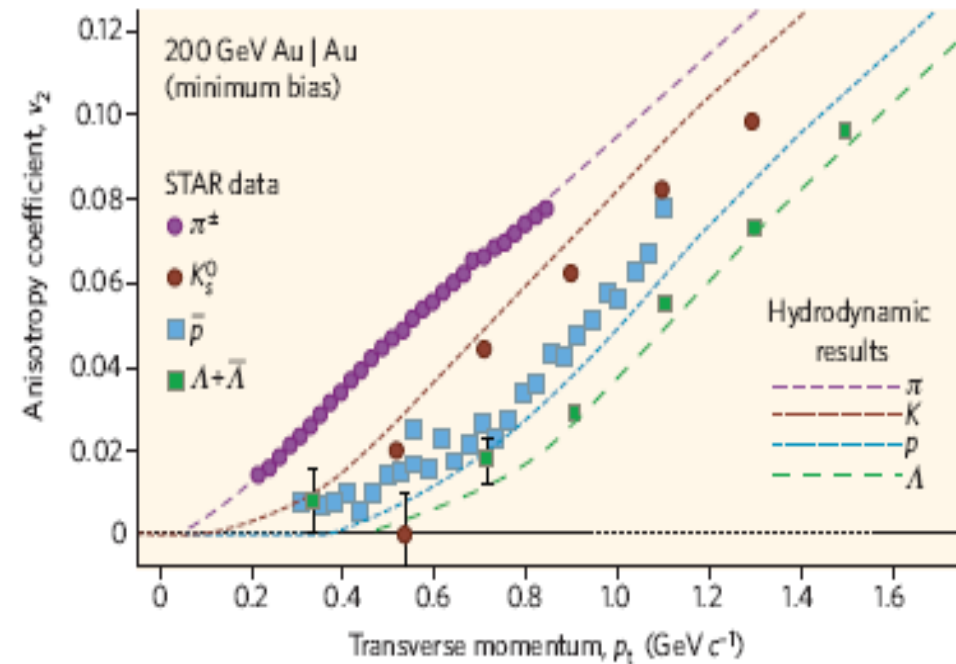
Wtórne rozproszenia

Końcowa anizotropia pędowa



Wyptyw eliptyczny

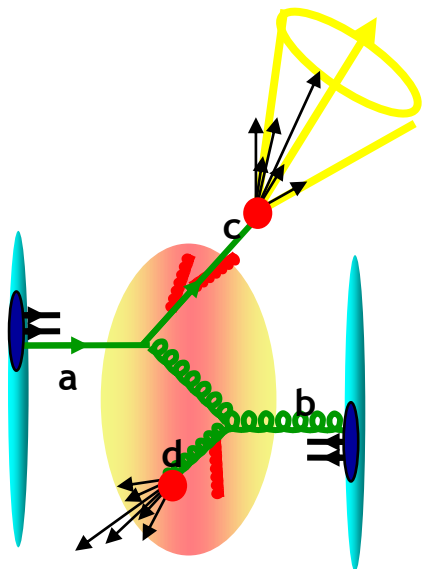
- Obserwujemy efekty azymutalnej anizotropii
- To bezpośrednio wskazuje na silne oddziaływania pomiędzy cz.
- Te oddziaływania muszą zachodzić bardzo wcześnie



Modele hydrodynamiczne
z założeniem idealnej
cieczy (lepkość=0), dobrze
opisują eliptyczny wyptyw
dla zderzeń Au+Au.
Po raz pierwszy przy
energiach akceleratora
RHIC!

Produkcja cząstek o dużych p_T

Twarde zderzenia w 'gorącej/gęstej materii QCD w zderzeniach A+A



Tłumienie produkcji cząstek o dużych p_T na skutek strat energii przez partony przechodzące przez gęsty kolorowy ośrodek
(J.D.Bjorken,1982)

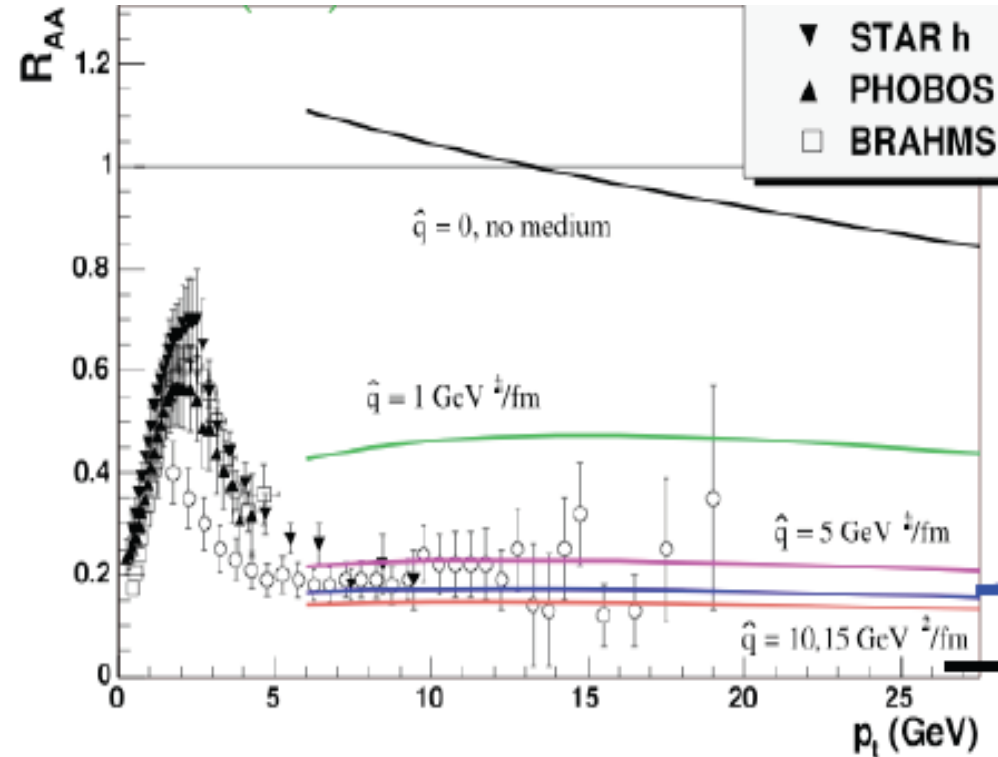
Dla procesów z dużym przekazem czteropędu obowiązuje faktoryzacja (pQCD) :
t.j. każde binarne zderzenie jest źródłem twardego rozproszenia.

Czynnik modyfikacji jądrowej:
'gęsta materia QCD'/'próżnia QCD'

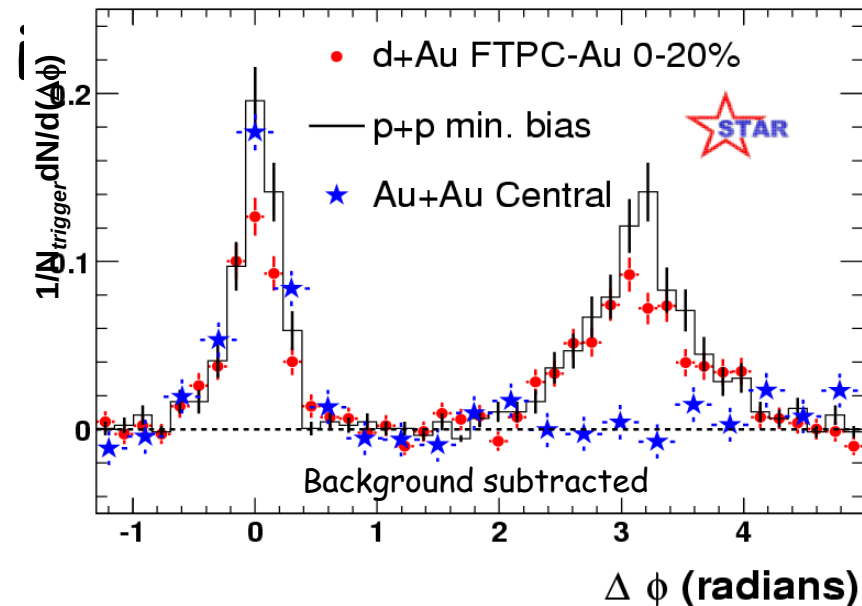
$$R_{AA} = \frac{d^2 N_{AA} / dp_T dy}{\langle N_{coll} \rangle d^2 N_{pp} / dp_T dy}$$

Tłumienie produkcji cząstek o dużych p_T

$R_{AA} \ll 1$



Zanikanie dżetu do tyłu

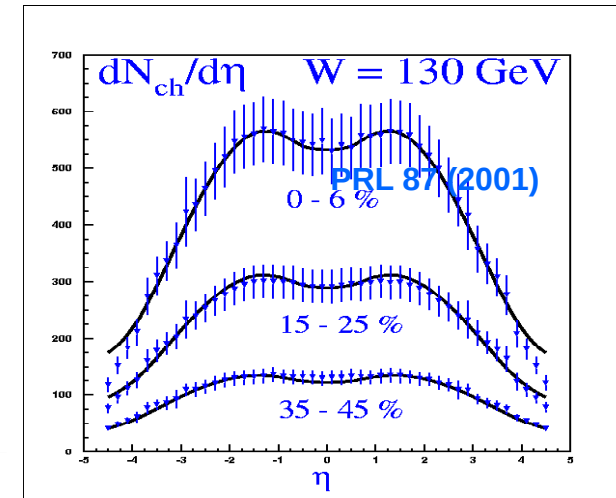
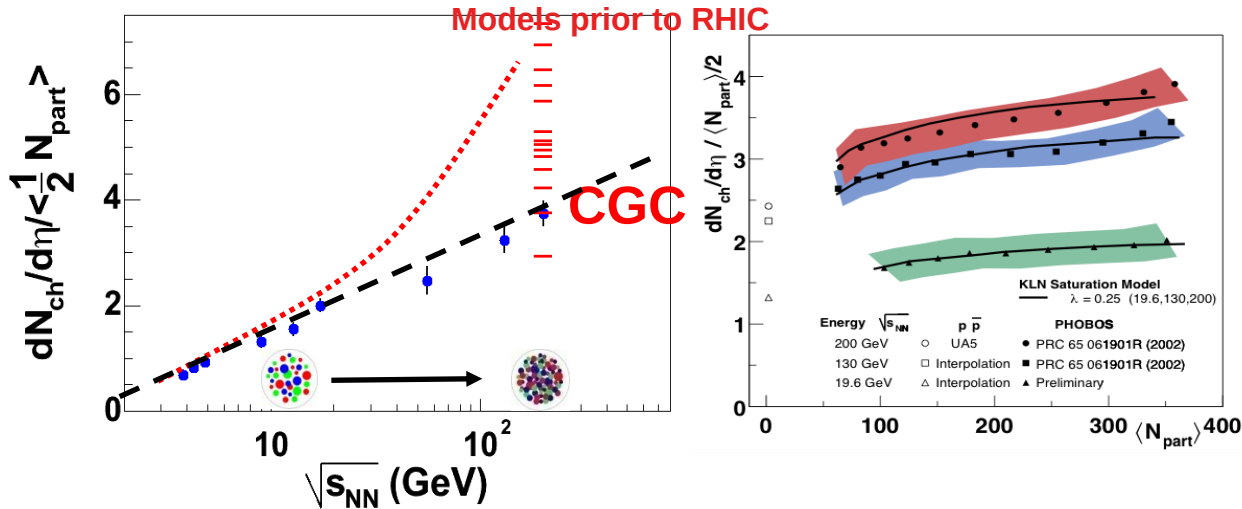


❖ Brak tłumienia w $y \approx 0$ w zderzeniach d+Au

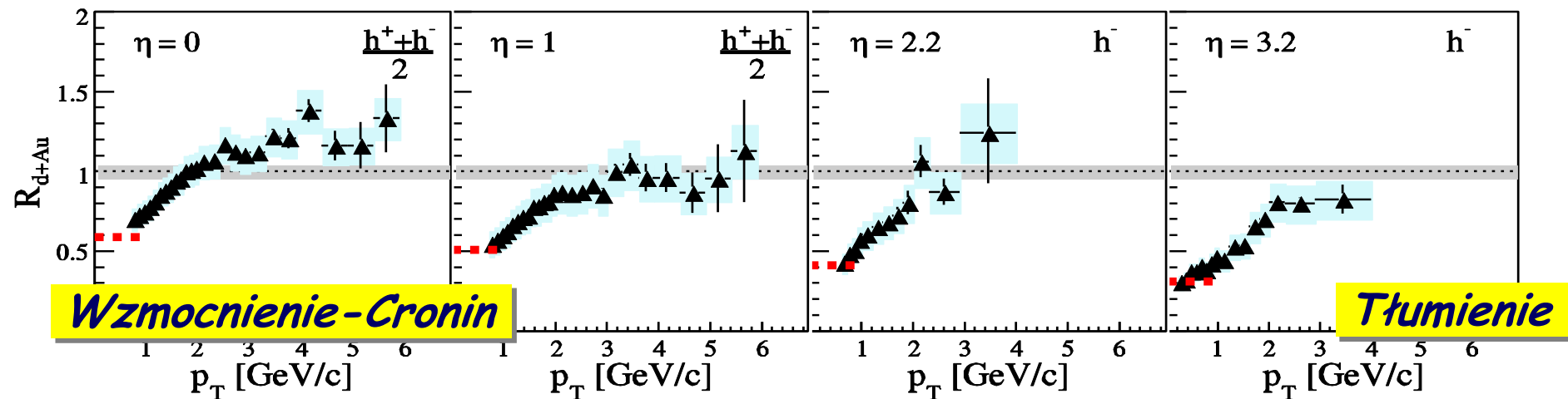
Bezpośrednia ewidencja, że gęsta materia oddziałuje silnie z partonami o dużych p_T !

RHIC: Ewidencja za CGC

- Saturacja w stanie początkowym wpływa na stan końcowy

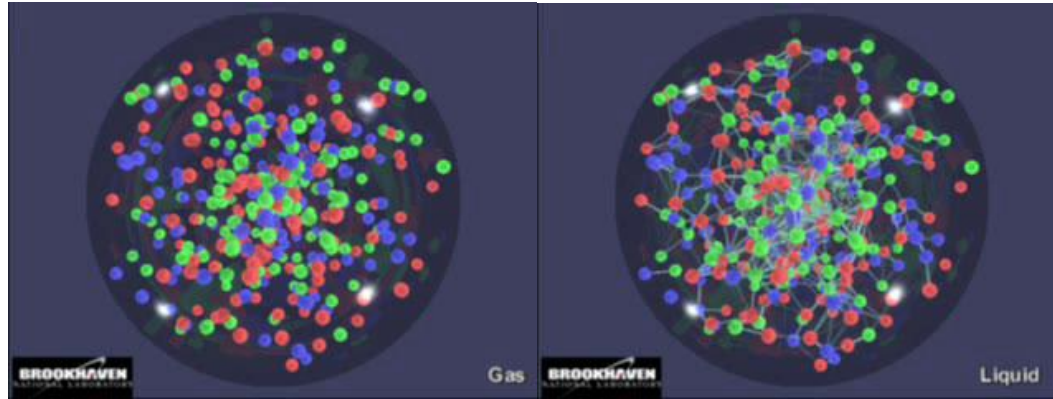


- Tłumienie produkcji cząstek o dużych p_T w d+Au dla $y=3$ ($\times \sim 10^{-3}$)



RHIC - Odkrycia

➤ Odkrycie nowego stanu materii:
silnie sprzężonej plazmy kwarkowo-gluonowej (sQGP).



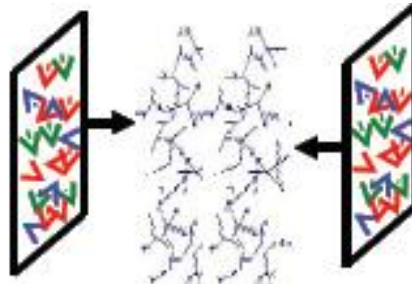
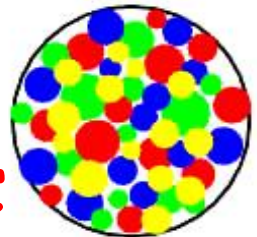
Oczekiwano
'gaz' →

Znaleziono
← 'ciecz'

Składniki tego nowego stanu (obiekty złożone, także kolorowe)??

➤ Ewidencja za Kolorowym Kondensatem Szklanym

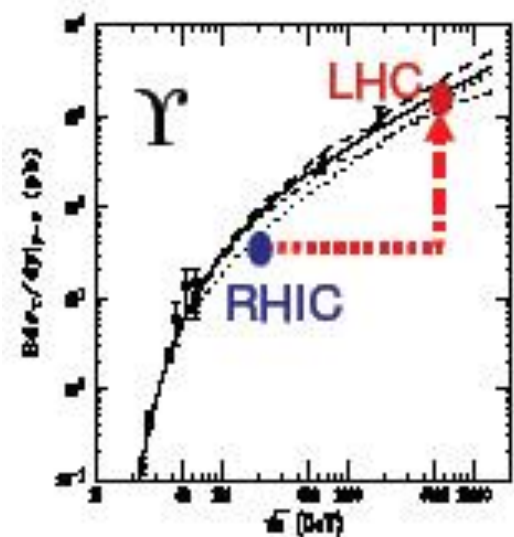
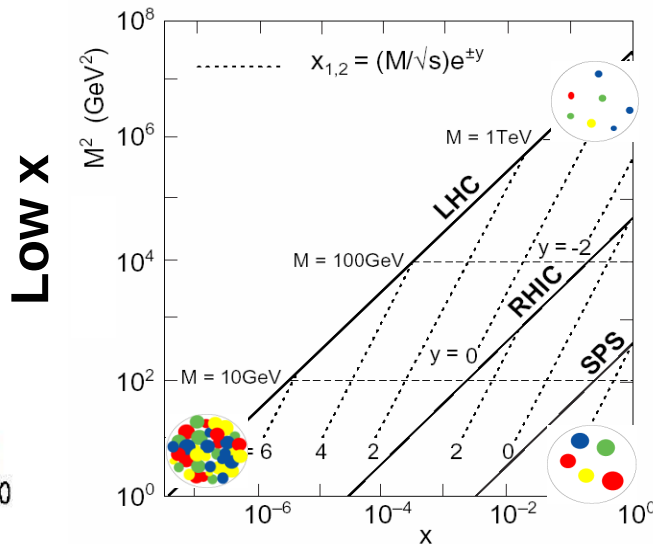
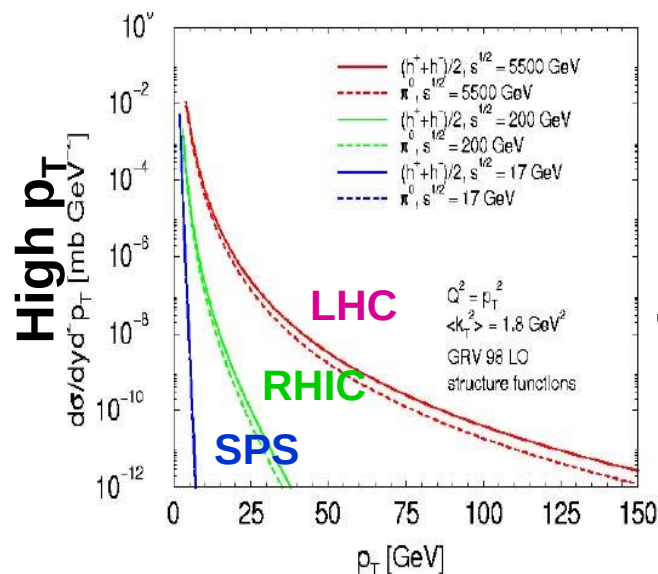
sQGP może się formować w zderzeniu dwóch CGC



RHIC → LHC

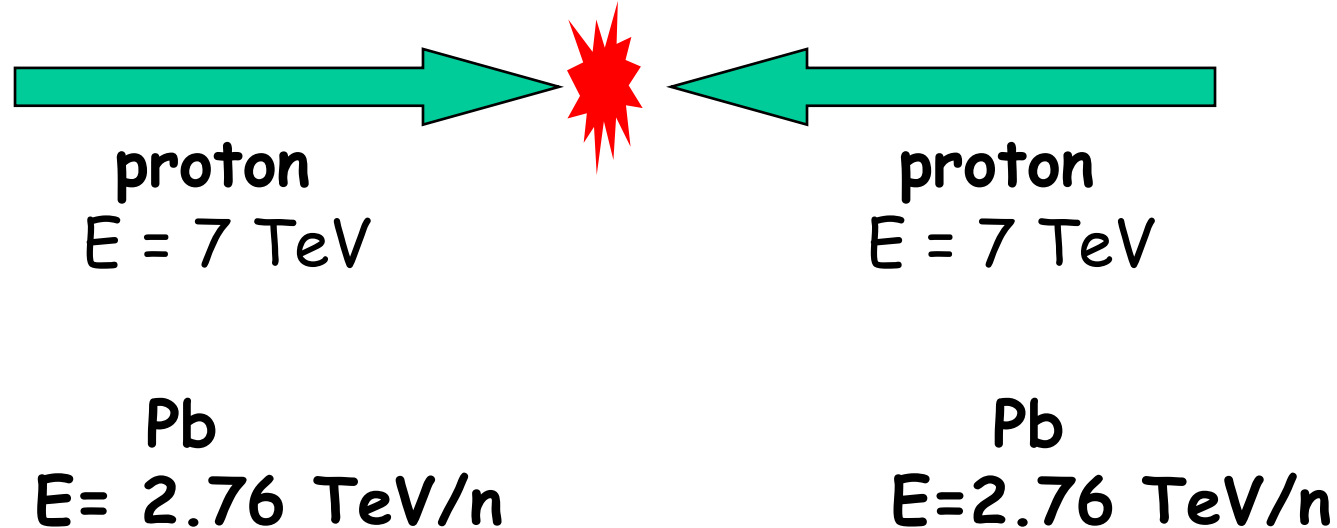
$\sqrt{s_{NN}}$: 200 GeV → 5,500 GeV

- Stan początkowy całkowicie w obszarze saturacji - CGC
- Początkowa gęstość energii ~5 razy wyższa
- Czas życia plazmy kwarkowo-gluonowej znacznie dłuższy
- Duże przekroje czynne na twarde procesy
- Obfita produkcja ciężkich kwarków (b,c)
- Po raz pierwszy dostępne słabo-oddziałujące sondy (Z^0 , $W^\pm$)

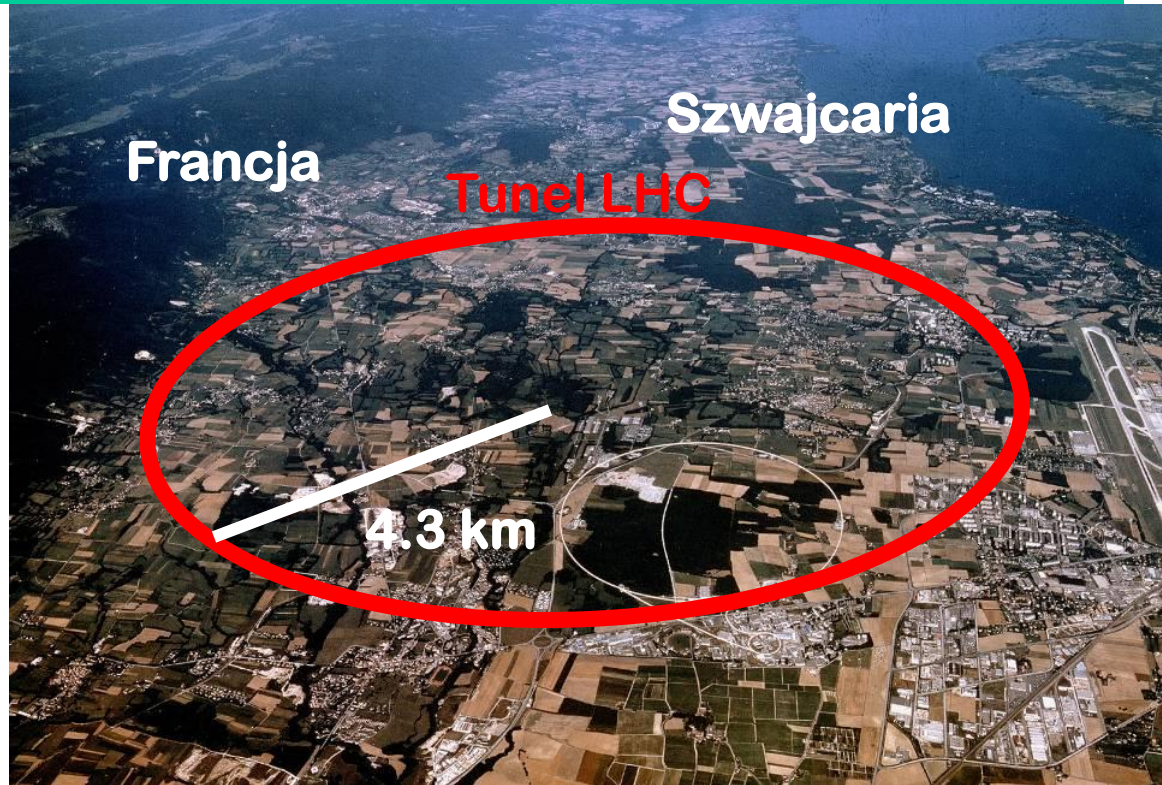


LHC – Wielki Zderzacz Hadronów

Gigantyczny akcelerator cząstek
w Europejskim Ośrodku Fizyki Cząstek – CERN
w pobliżu Genewy



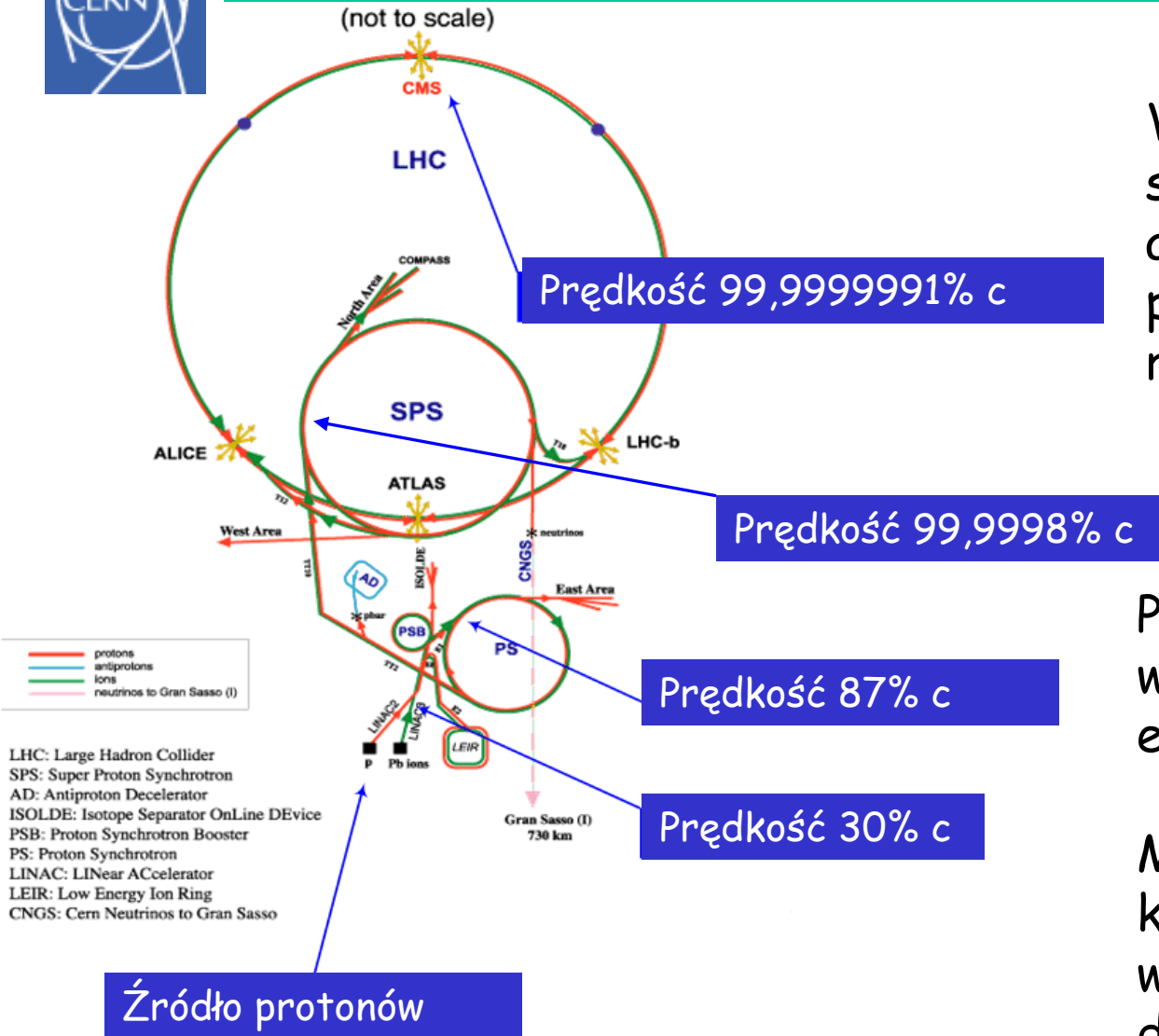
Wielki Zderzacz Hadronów: Usytuowanie geograficzne



Akcelerator umieszczony jest w tunelu o długości 27 km, znajdującym się ~100 m pod ziemią między Genewą i górami Jura.



CERN: Kompleks akceleratorów



Wiązki protonów są stopniowo przyspieszane, aż osiągną w LHC prędkość praktycznie równą prędkości światła.

Protony są przyspieszane w silnych polach elektrycznych.

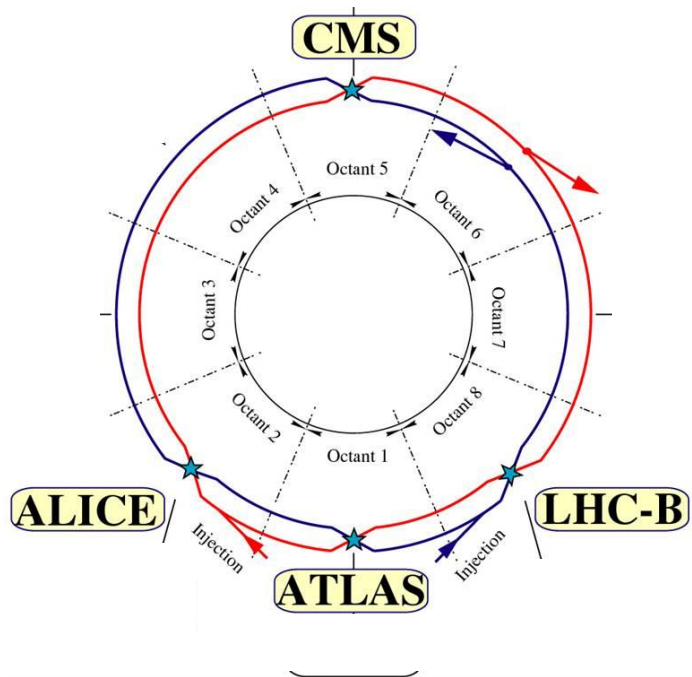
Magnesy ogniskujące i korekcyjne ogniskują wiązki cząstek, a magnesy dipolowe zakrzywiają tor cząstek.

LHC - Podstawowe parametry

Układ: Dwa nadprzewodzące pierścienie
+istniejący kompleks (PS/SPS) do wstępnej akceleracji.

Wiązki	Pb	→	p
Energia/wiązkę	2.76 TeV/A		7 TeV
Natężenie pęczków	7×10^7		10^{11}
Liczba pęczków	592		2808
Świetlność [$\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$]	1×10^{27}		10^{34}
Czas przecięcia pęczków	100 ns		25 ns
Magnesy nadprzewodzące (D-8.3T, Q-223T/m)		2338	
Obwód		26.7 km	
Koszt		3×10^3 M CHF	

Eksperymenty LHC



LHC-Eksperyment

ALICE

ATLAS

CMS(13kT) + TOTEM

LHC-B

Uczestnicy

~1300

~2500

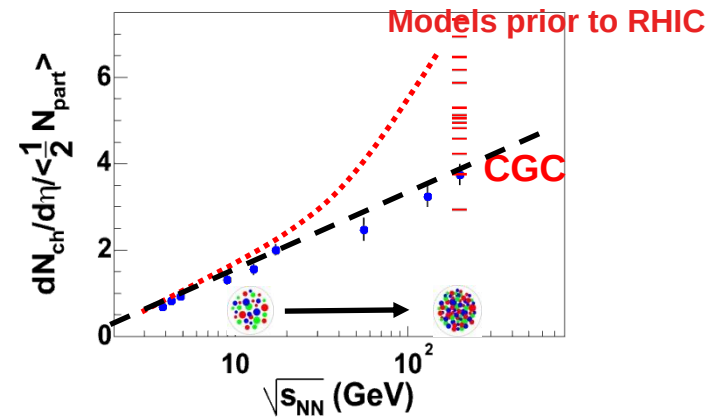
~2500

~ 600

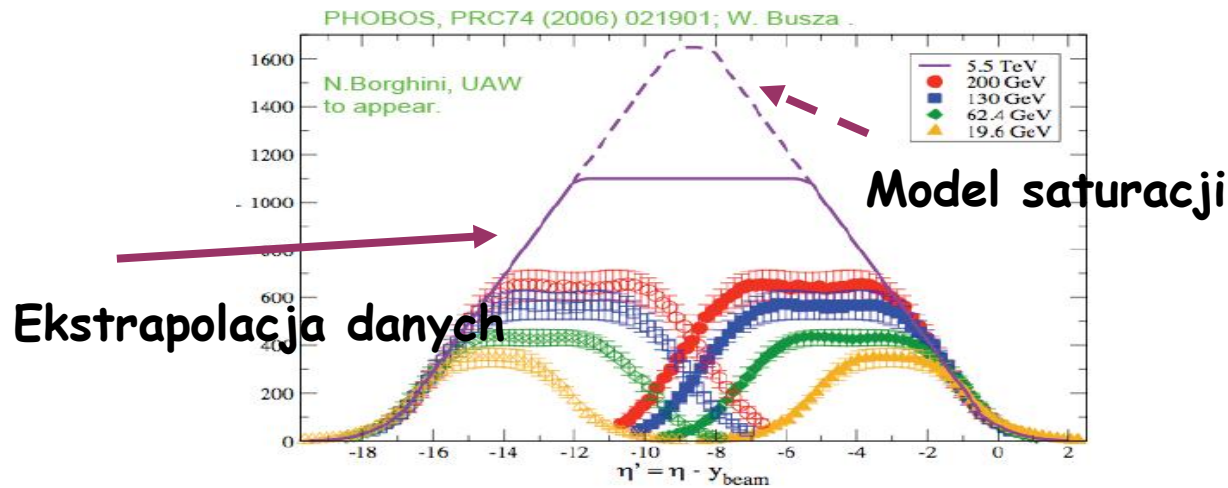
Ok. 7000 uczestników

LHC-Przewidywania: Produkcja cząstek

Przewidywania modelowe, ale....
lekcja z RHIC



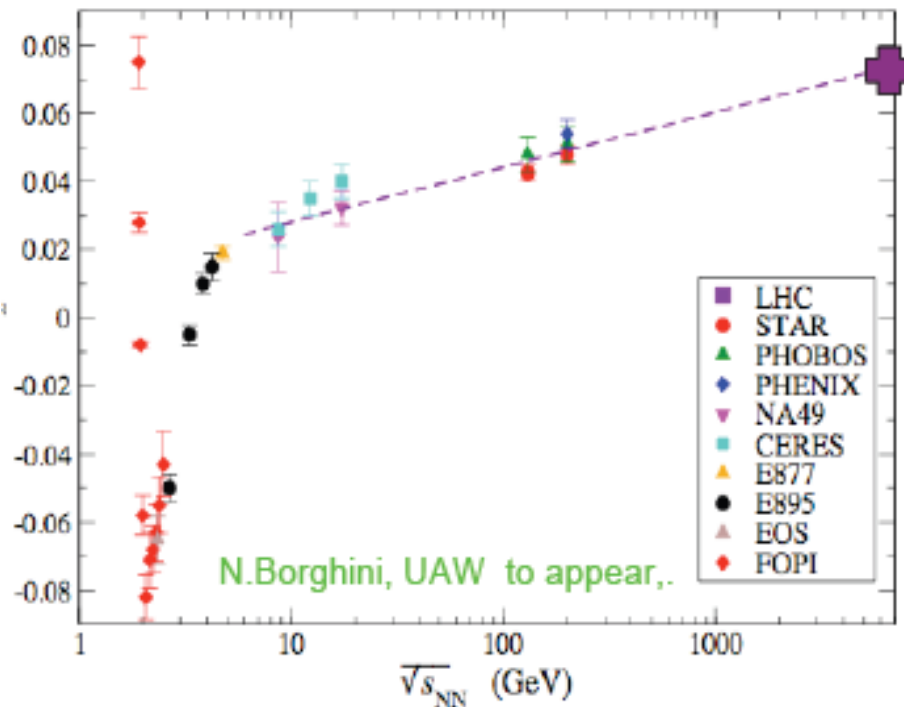
Systematyczne zachowania (generic trends) w danych przy niższych energiach ekstrapolowane do energii LHC:



LHC-Przewidywania: Wyptyw eliptyczny

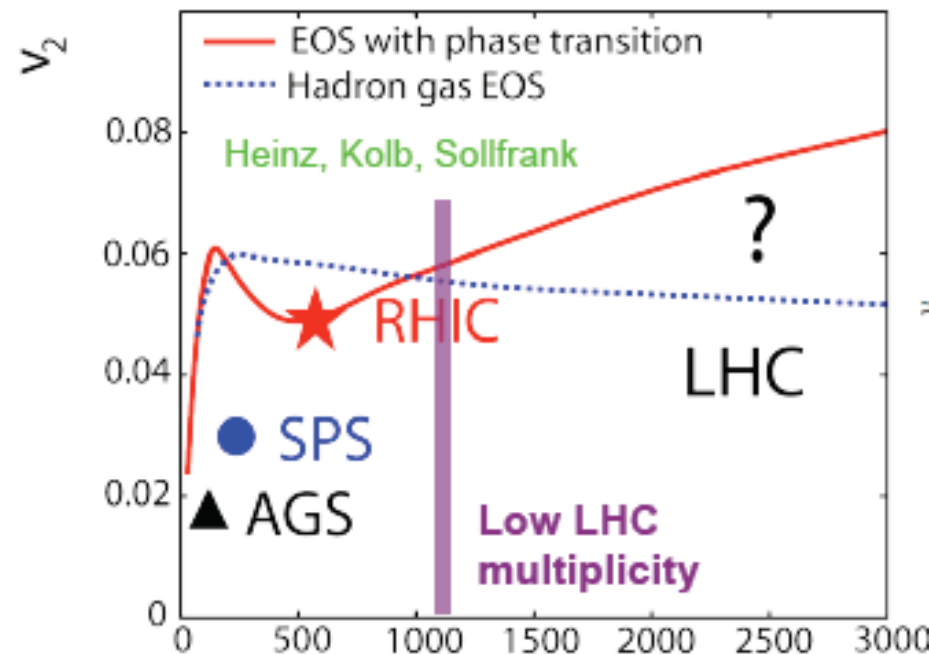
- Extrapolation of generic RHIC trend

$$v_2 \approx 0.075$$



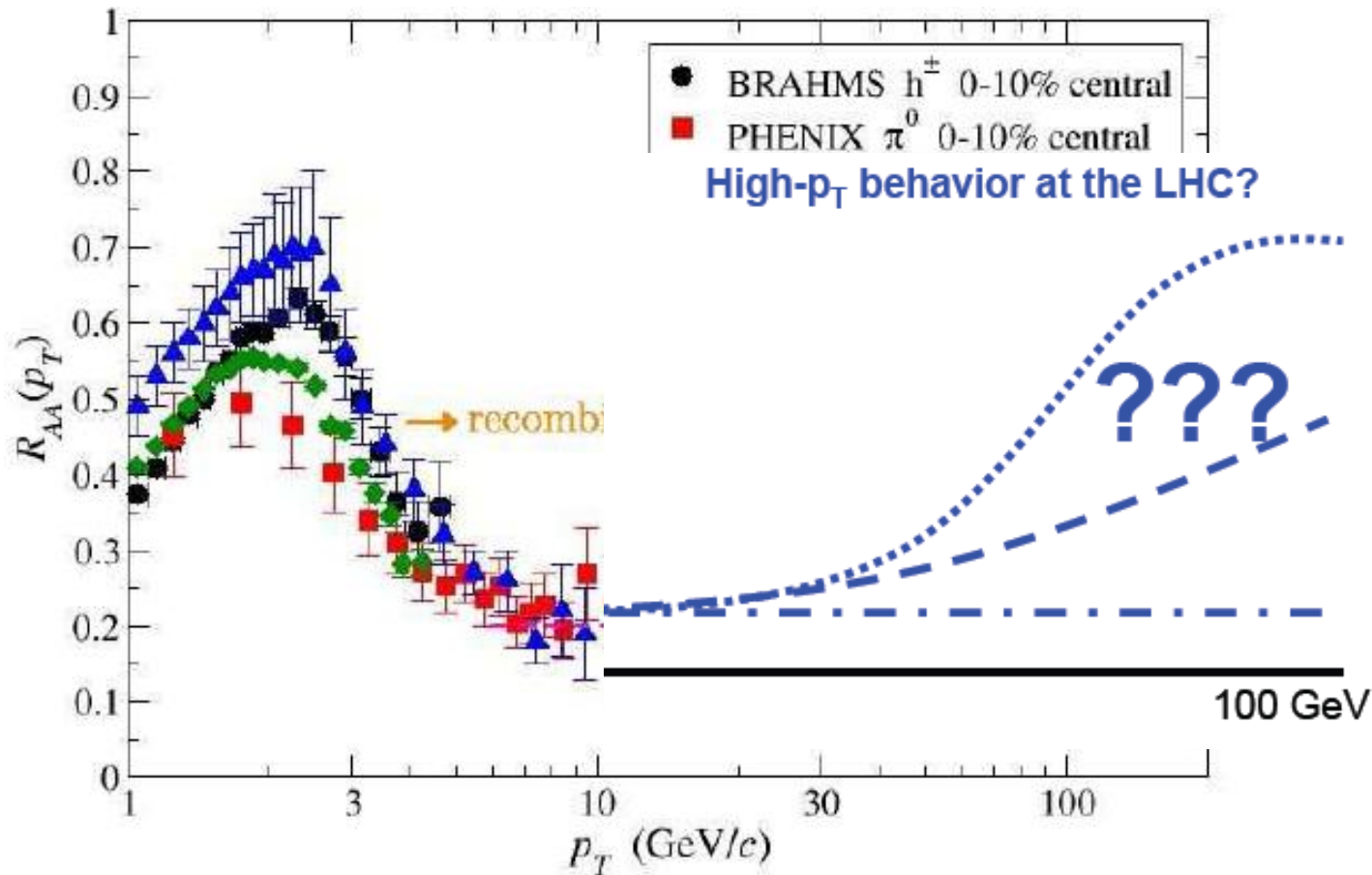
- Hydro prediction for low LHC multiplicity

$$v_2 \approx 0.055$$



Also consistent with Multiplicity
Teaney et al., nucl-th/0110037

LHC-Przewidywania: Tłumienie dużych p_T

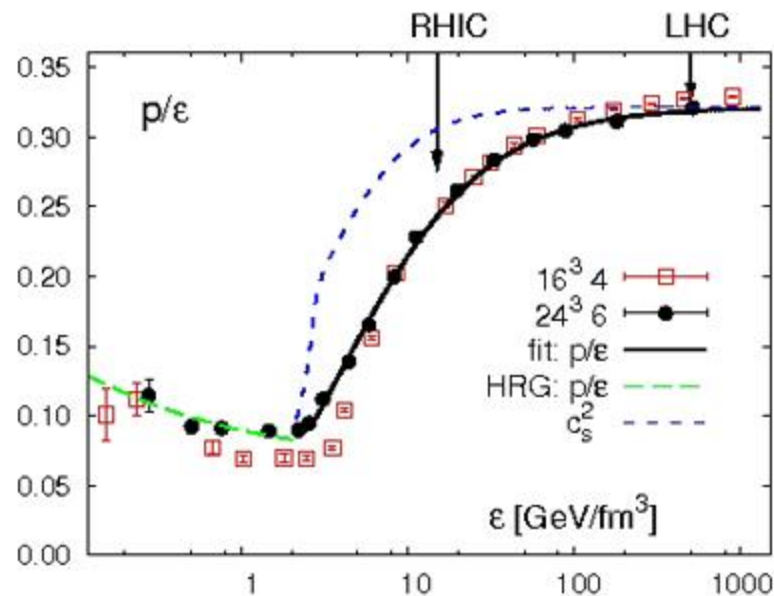


LHC-Przewidywania: Ciecz czy idealny gaz?

F. Karsch (2007):

Rachunki na sieciach wskazują, że stan idealnego gazu, gdzie gęstość energii = 3 x ciśnienie może być kreowany przy gęstościach energii przekraczających 100 GeV/fm^3 .

Takie gęstości energii mogą być produkowane w zderzeniach Pb+Pb przy LHC.



Perspektywy dla LHC

Teoria/Modele :

- ✓ Możliwość ilościowego badania termodynamicznych własności QCD!
- ✓ Procesy twarde: doskonałe do testowania QCD!

Eksperymenty:

- ✓ Muszą być przygotowane na 'niespodzianki'...

Eksperyment LHC

ALICE

ATLAS

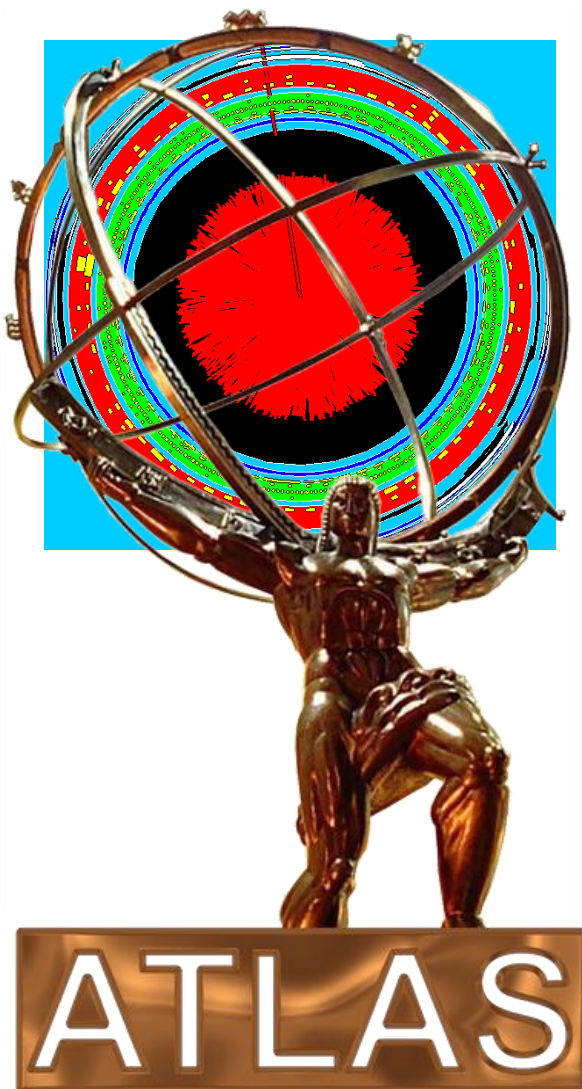
CMS

Uczestnicy

~1000

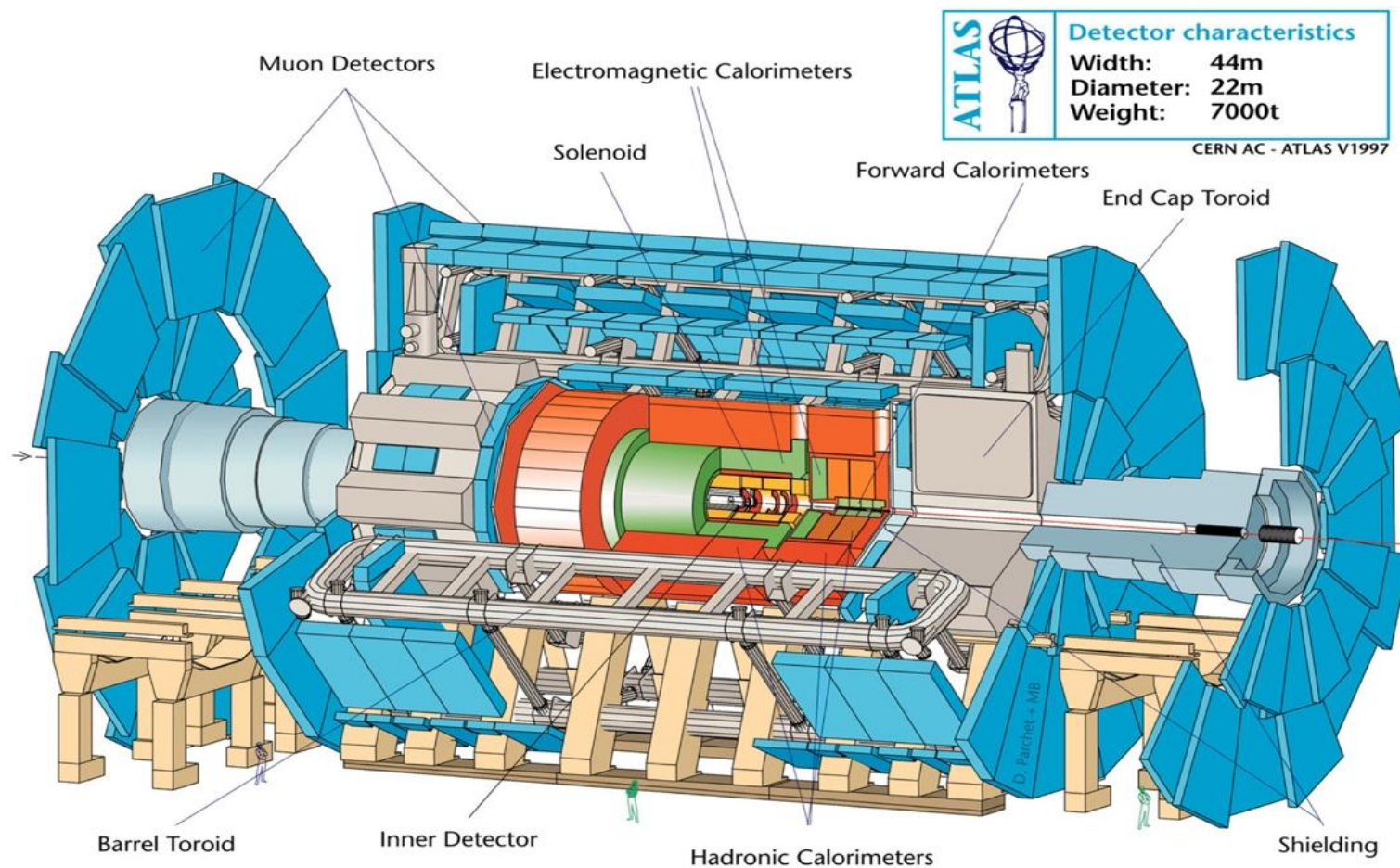
~2000

~2000



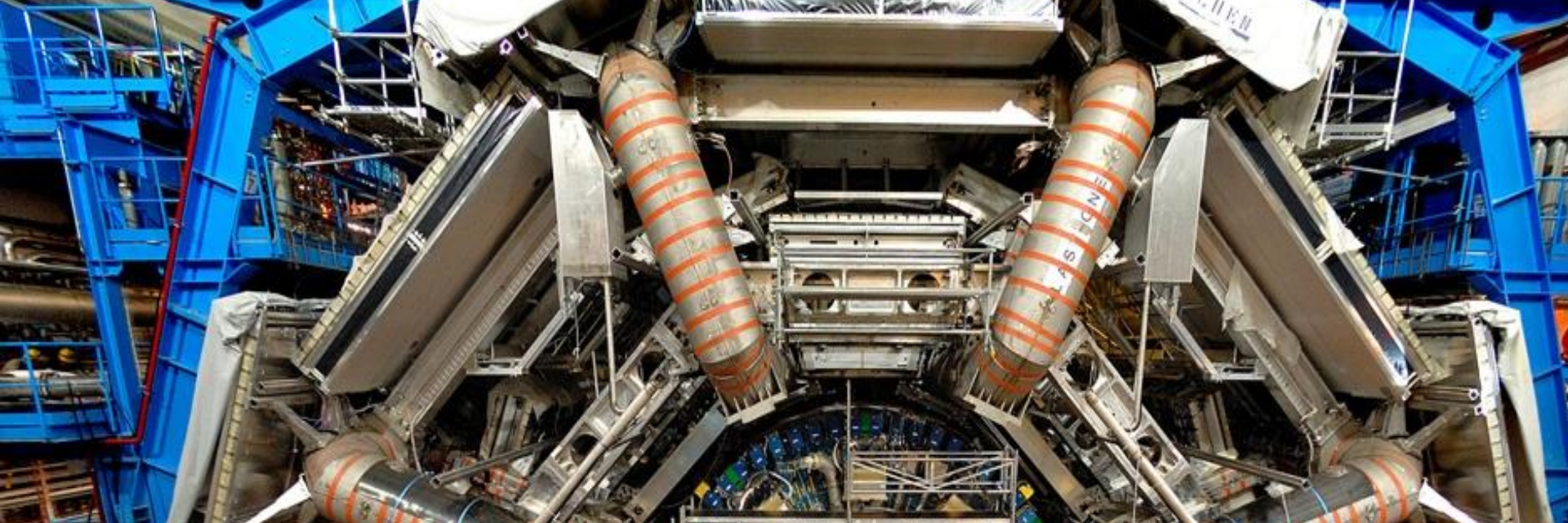
ATLAS

Doskonały detektor do badania dużych p_T

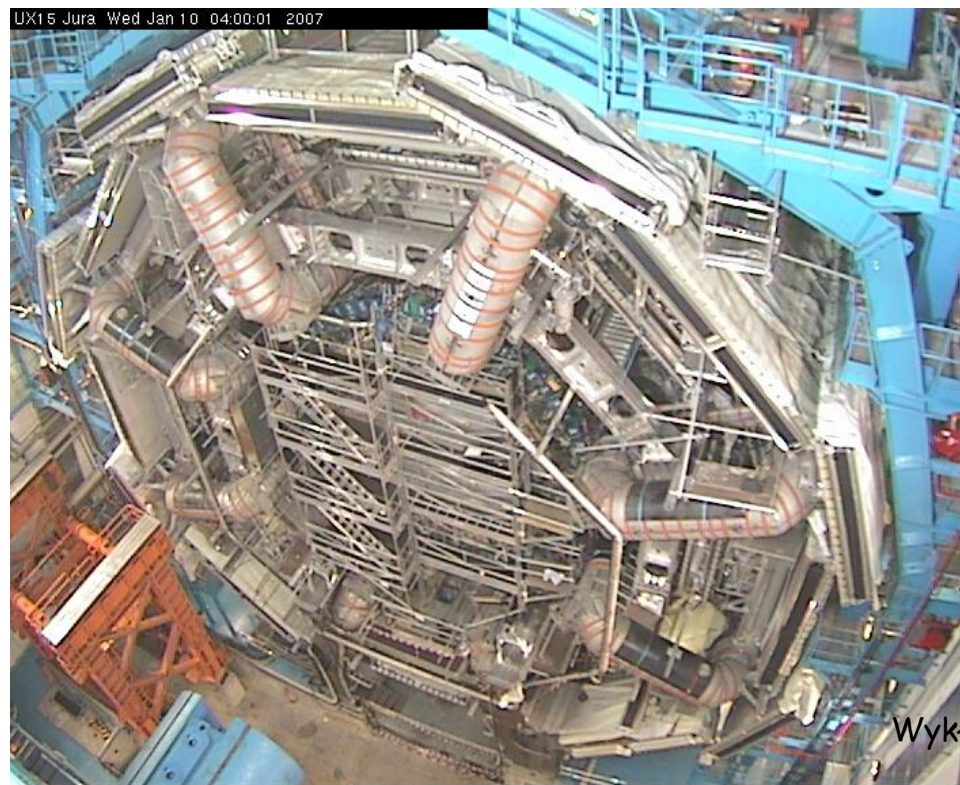


ATLAS@LHC

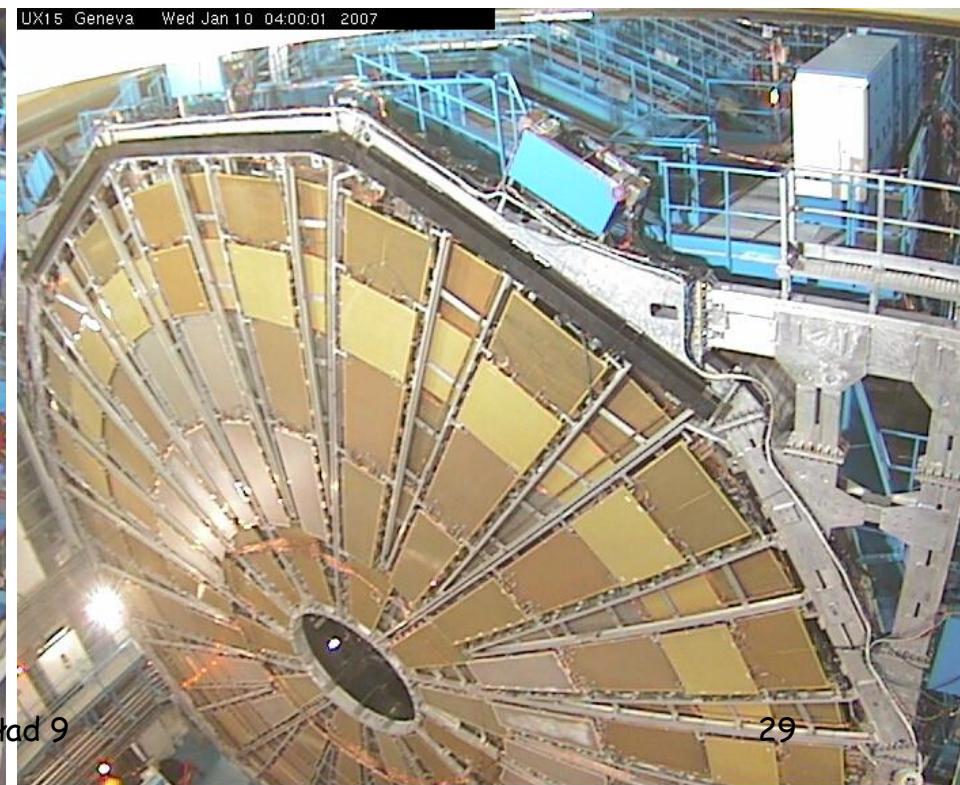
- Detektor gotowy do rejestracji danych
- We wrześniu 2008 rejestracja danych z pojedynczymi wiązkami z LHC, później rejestracja danych kosmicznych
- Program fizyczny LHC zakłada 4-tygodniowy seans z wiązkami ciężkich jonów rocznie
- Początkowo układ zderzenia to Pb+Pb przy 5.5 TeV/n, później także p+Pb i p+p
- Oczekujemy, że wiązki jonowe będą dostępne w 2009 r., a pierwszy seans fizyczny w 2009/2010



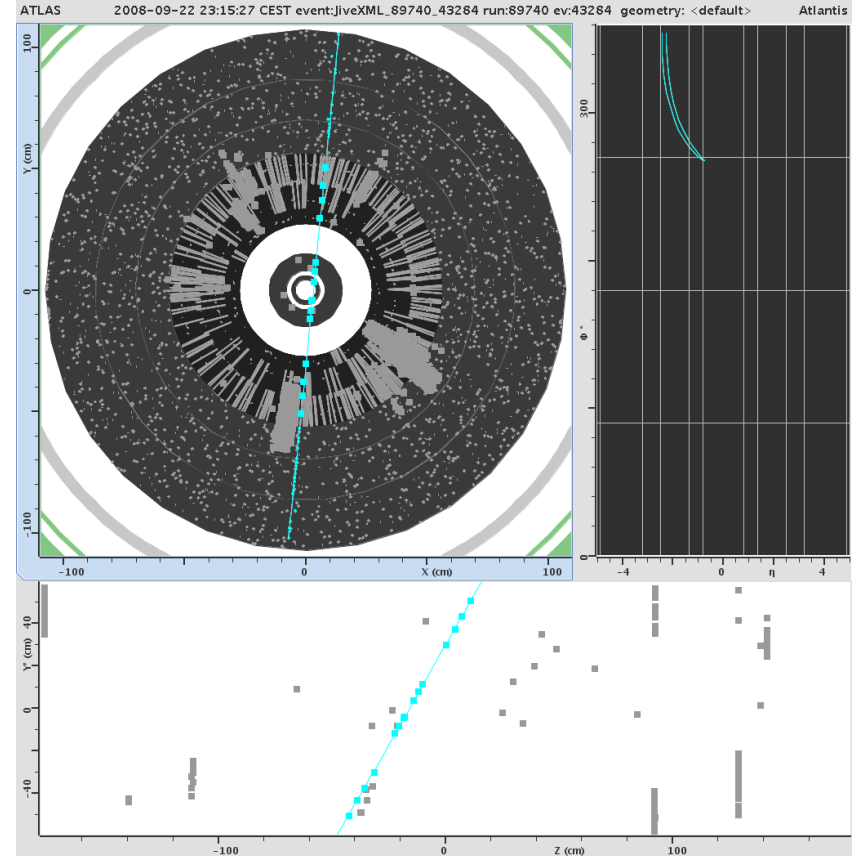
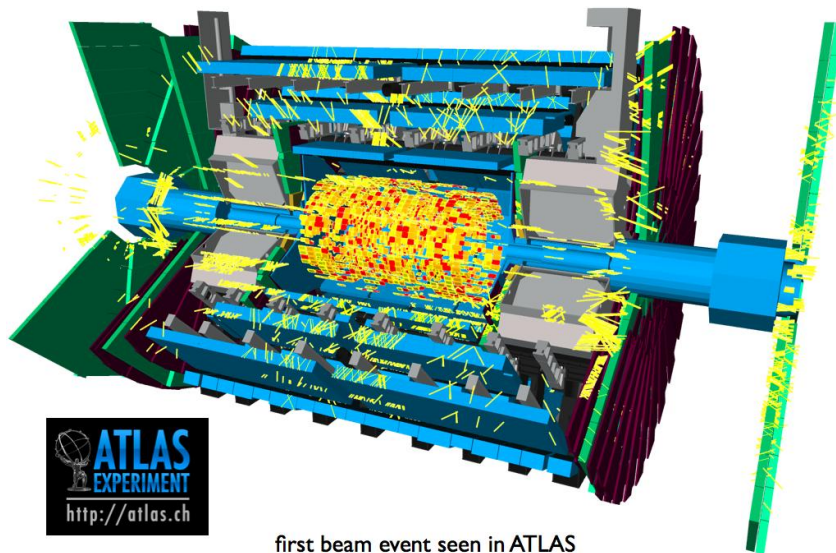
UX15 Jura Wed Jan 10 04:00:01 2007



UX15 Geneva Wed Jan 10 04:00:01 2007



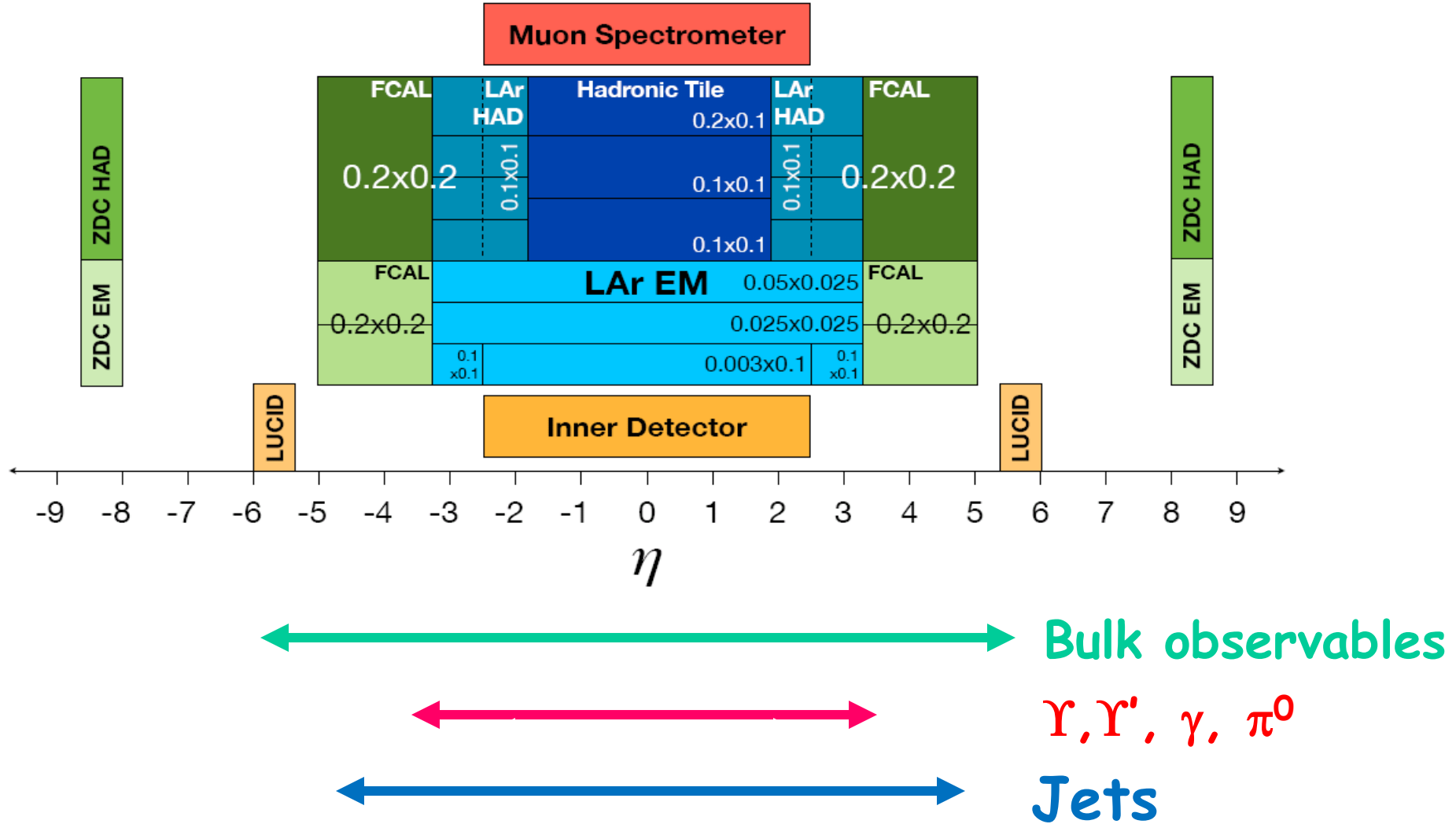
Eksperyment ATLAS: wrzesień 2008



'Beam-splash' przypadek
zarejestrowany w detektorze ATLAS

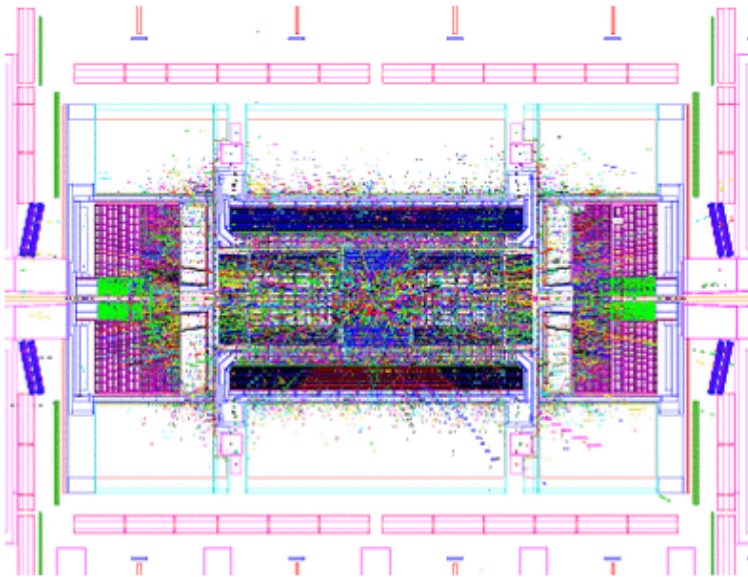
Cząstka promieniowania kosmicznego
zarejestrowana przez
Detektor Wewnętrzny ATLAS

Akceptancja detektora ATLAS



ATLAS jako detektor ciężkich jonów

Pojedyncze centralne zderzenie Pb+Pb: HIJING + GEANT3
 $b < 1\text{fm}$

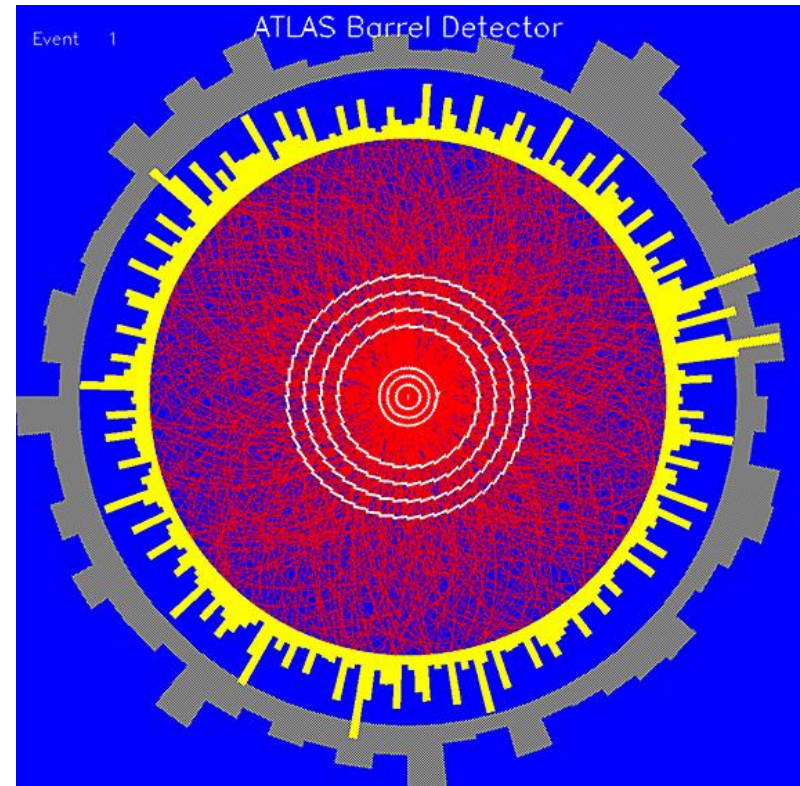


Zajętość detektora:

Pixels $< 2\%$

SCT $< 20\%$

Komory mionowe: 0.3 – 0.9 sygnałów/komora
($\ll$ pp przy $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)



$|\eta| \leq 0.5$

Globalne charakterystyki

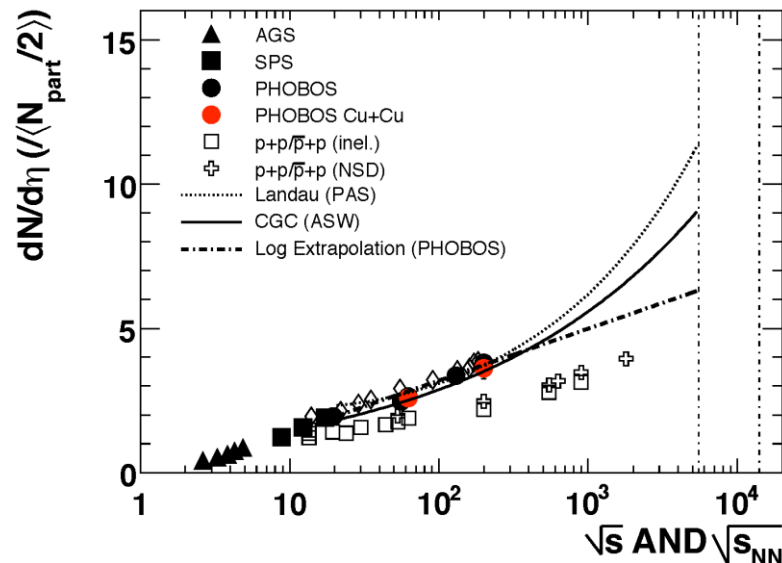
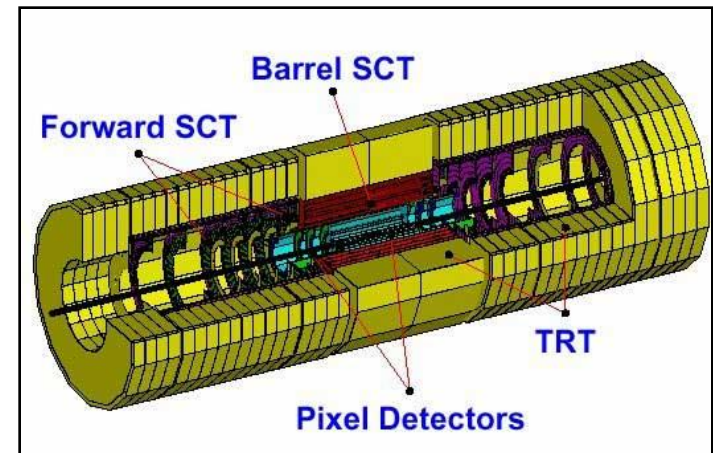
Pomiary 'day-one': $dN_{ch}/d\eta$, $dE_T/d\eta$, b , wpływ eliptyczny

- Ograniczenia dla modeli
- Niezbędne dla innych analiz
- Otrzymane w oparciu o małe próbki prostych pomiarów:

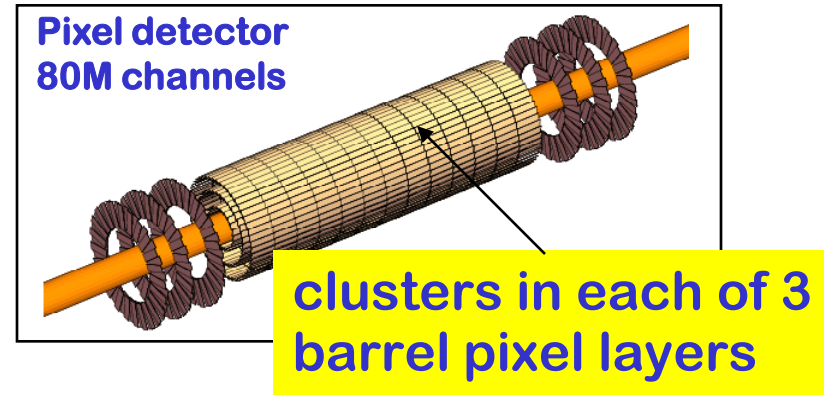
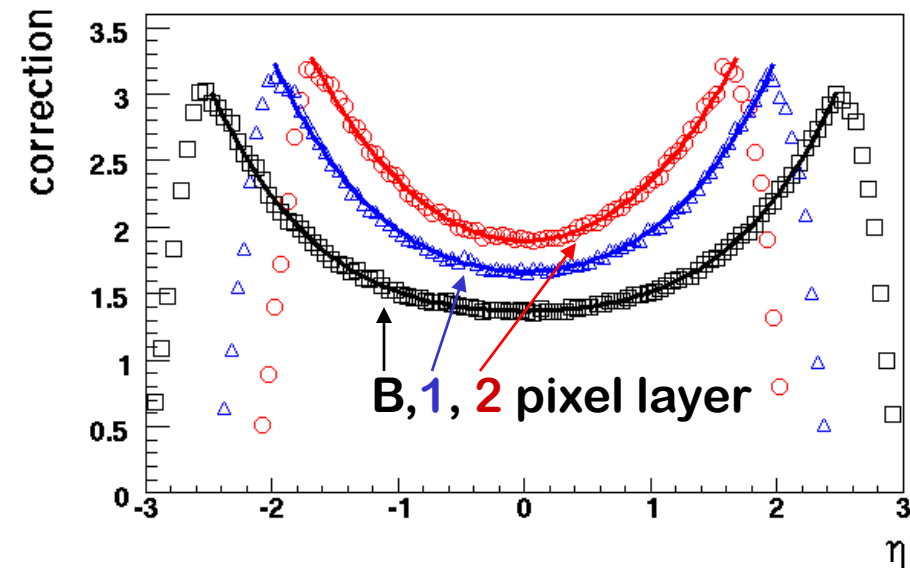
lokalizacja sygnałów (grup) w Det. Wewn.

lokalizacja i energia sygnałów w Kalorymetrach

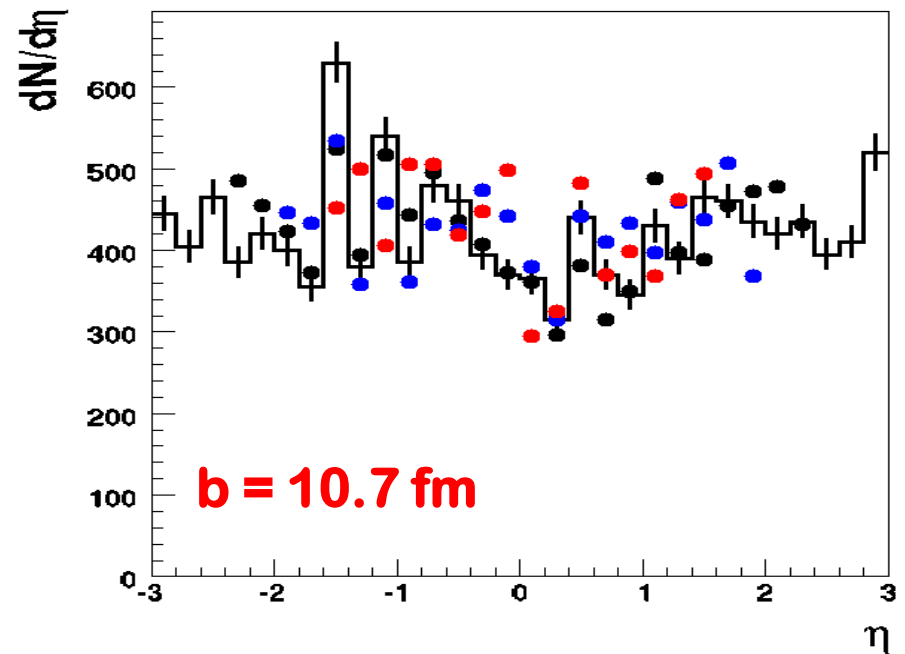
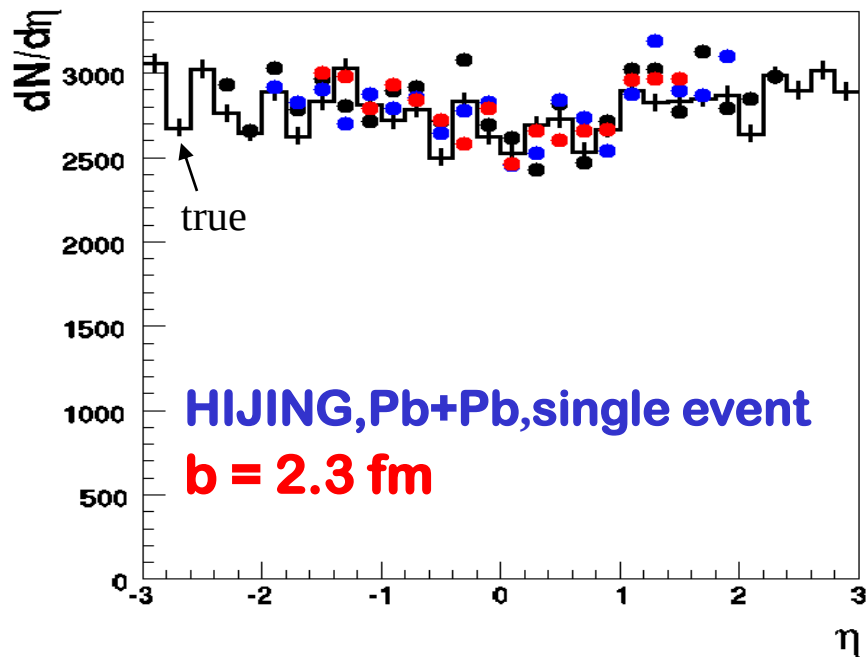
ATLAS: Detektor Wewnętrzny



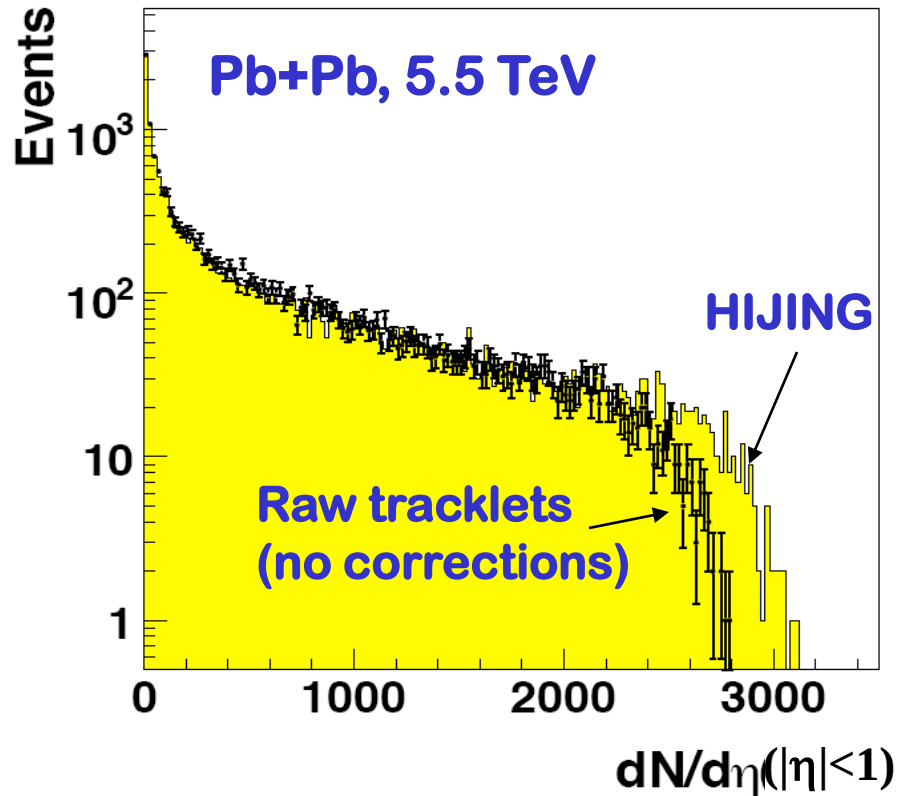
$dN_{ch}/d\eta$ - klastry pikselowe



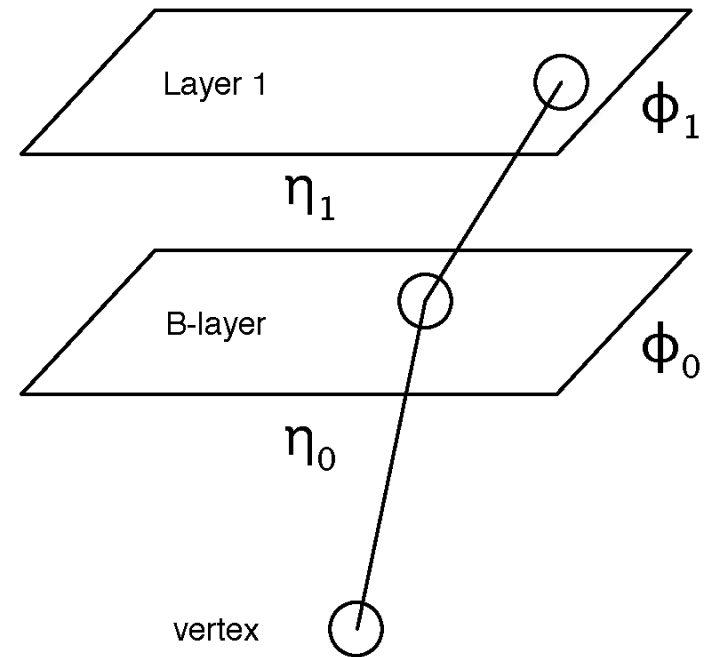
$$correction = \frac{\langle dN_{clus}/d\eta \rangle}{\langle dN_{ch}/d\eta \rangle}$$



$dN_{ch}/d\eta$ - 'Tracklets'



Tracklets: 3-punktowe ślady
Beczka pikseli: warstwa B, warstwa 1
+ wierzchołek oddz.



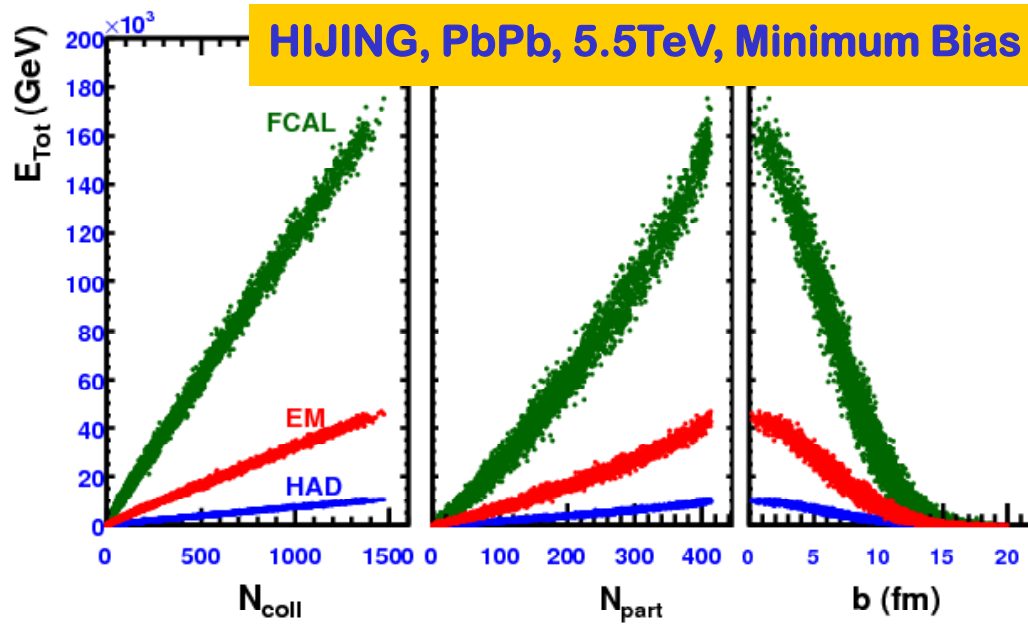
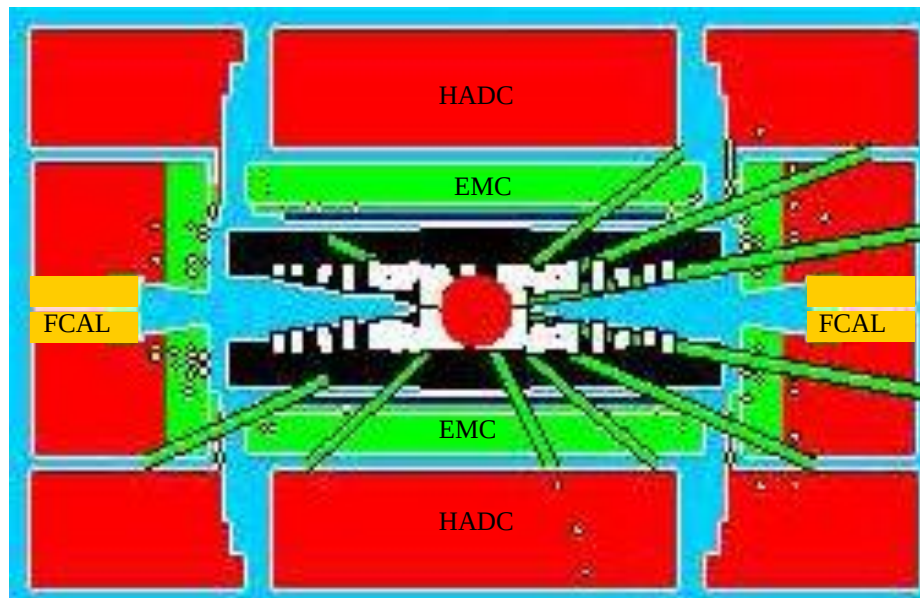
Centralność zderzenia

ATLAS - kalorymetry:

- Elektromagnetyczny (zielony)
- Hadronowy (czerwony)
- Przedni (pomarańczowy)

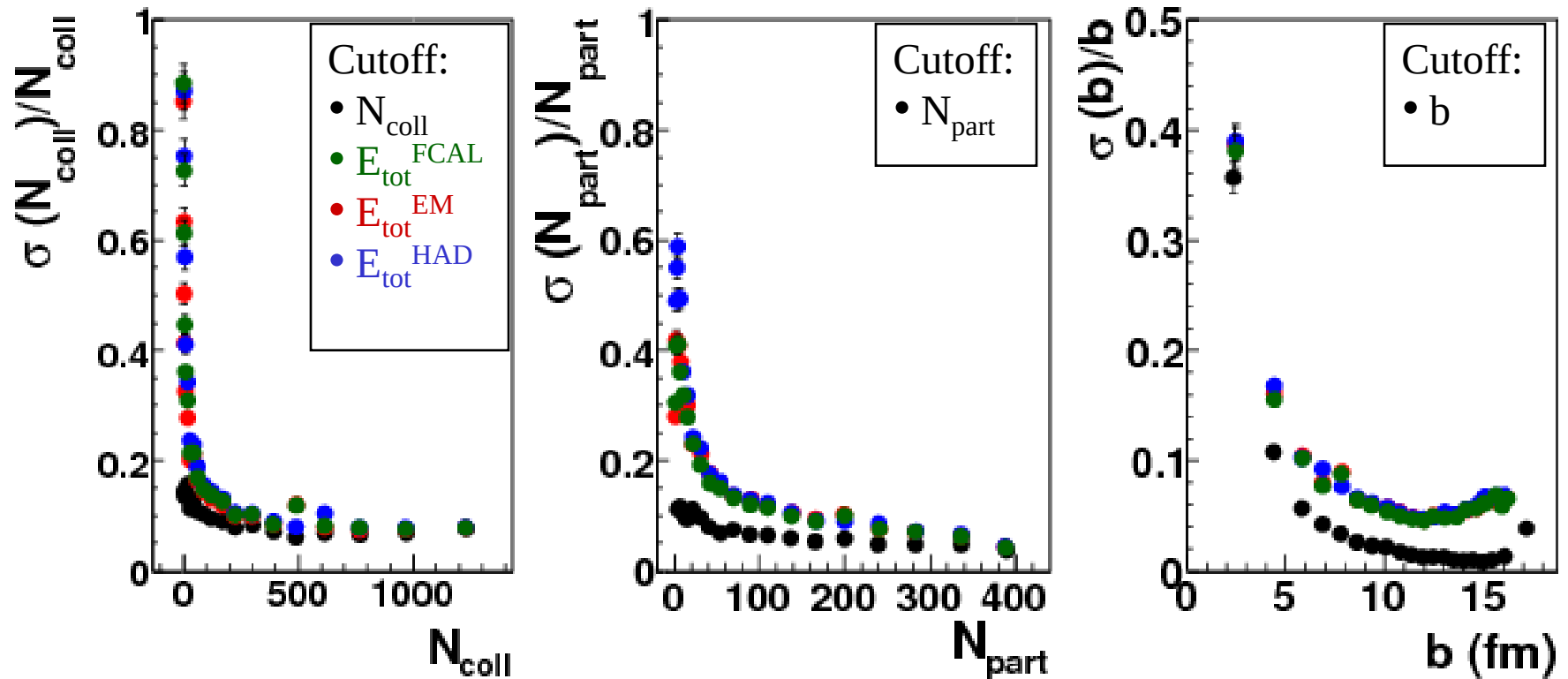
$$E_{\text{Tot}} = \sum_{\text{cells}} E_{\text{Tot}}$$

E_{tot} jest monotoniczną funkcją parametru centralności (N_{coll} , N_{part} , b)



Centralność zderzenia

HIJING, Pb+Pb, 5.5 TeV, Minimum Bias, 20 x 5% przedziałów centralności



ATLAS - możliwość precyzyjnego oszacowania centralności

Pomiary E_T w zderzeniach Pb+Pb

Metody rekonstrukcji E_T :

- **Klastry**

$$E_{T\text{Final}} = \Sigma E'_T(\text{cell}) \\ + \Sigma E_T \text{Muon} \\ + E_T \text{Cryo}$$

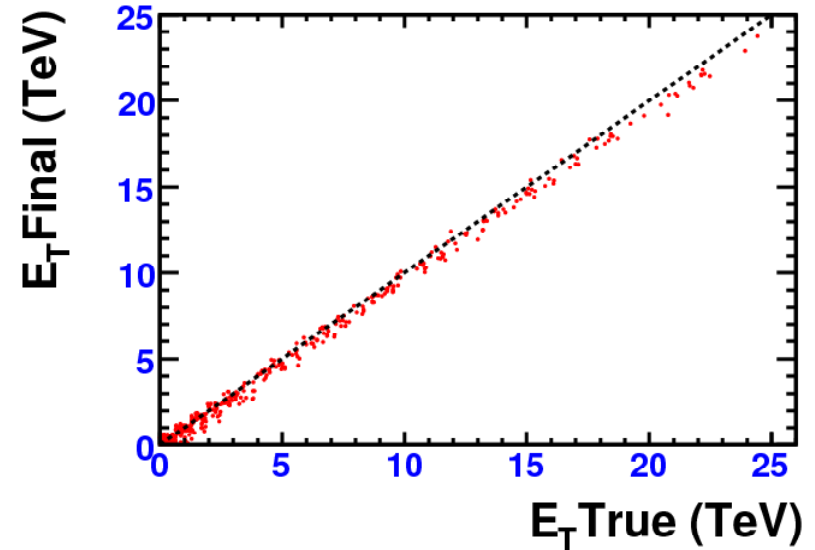
ATL-COM-PHYS-2008-07

- **Cele**

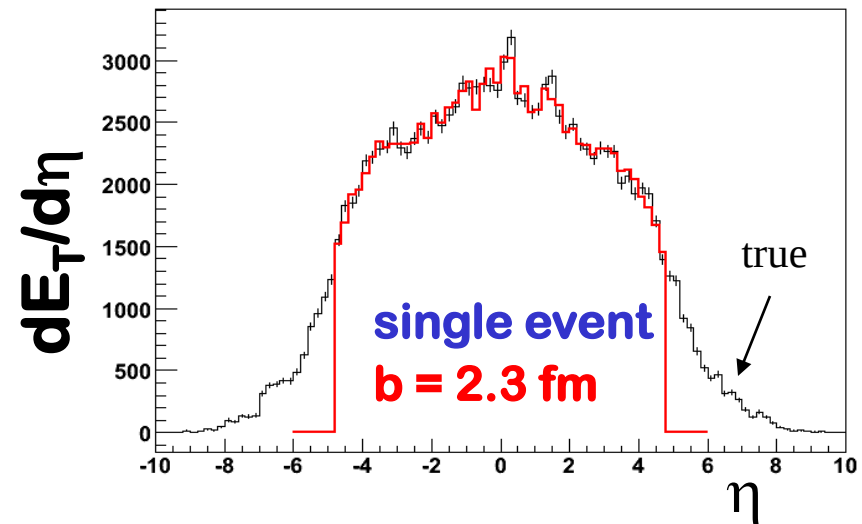
$$dE_T^{\text{cell}}/d\eta = \frac{1}{\Delta\eta} \sum_i E_{T,i}^{\text{cell}}(\eta, \varphi)$$
$$\text{correction} = \frac{\langle dE_T^{\text{MCtrue}}/d\eta \rangle}{\langle dE_T^{\text{cell}}/d\eta \rangle}$$

Dobra zgodność!

HIJING, Pb+Pb, 5.5 TeV, MinBias

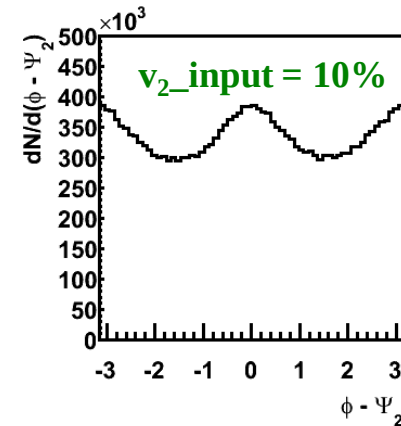
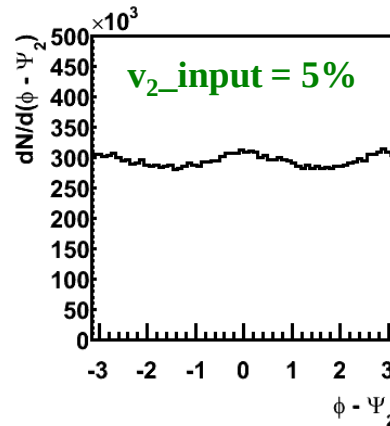
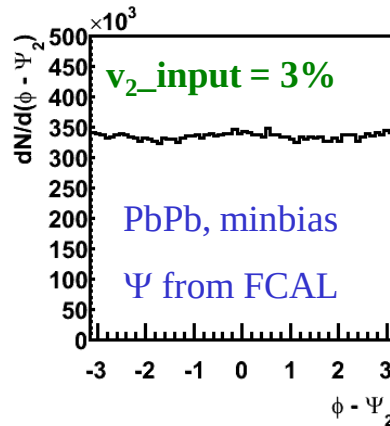


HIJING, Pb+Pb, 5.5 TeV



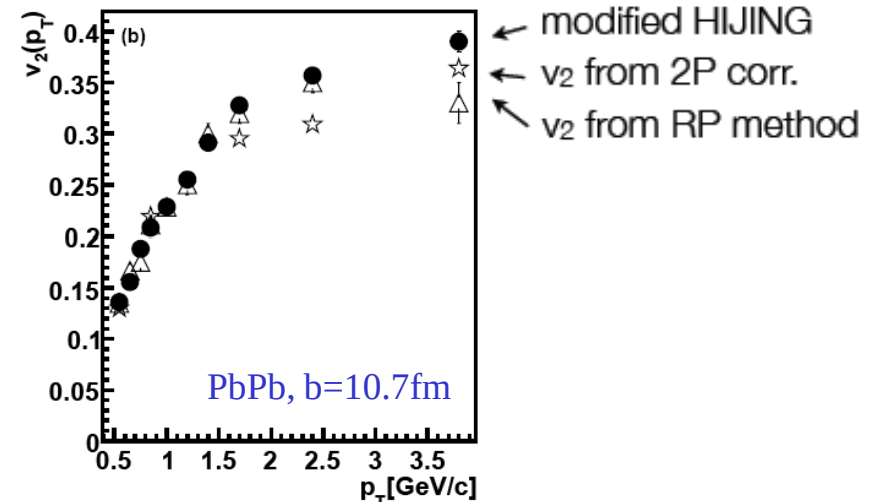
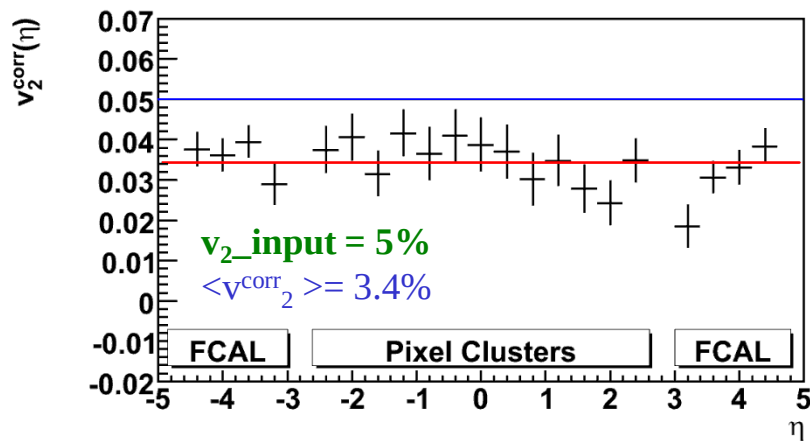
ATLAS - rekonstrukcja wyptywu eliptycznego

HIJING : symulacje z $v_2=0.03/0.05/0.1$



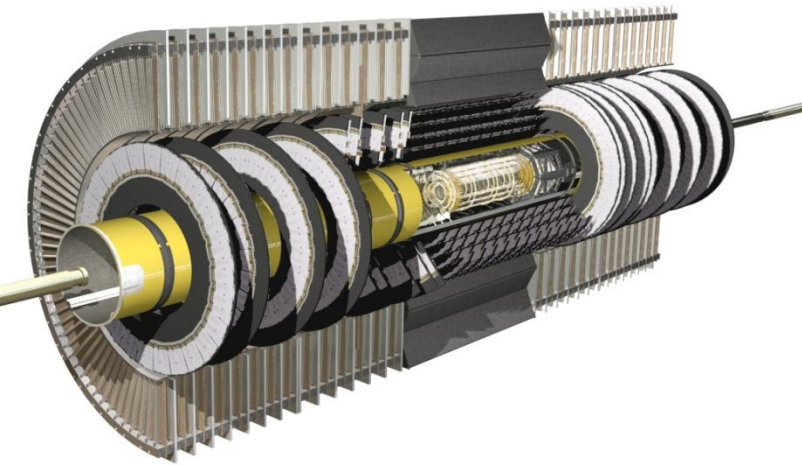
$v_2(\Psi)$ - klastry pikselowe i cele kalo.

$v_2(\Psi)$ - ślady



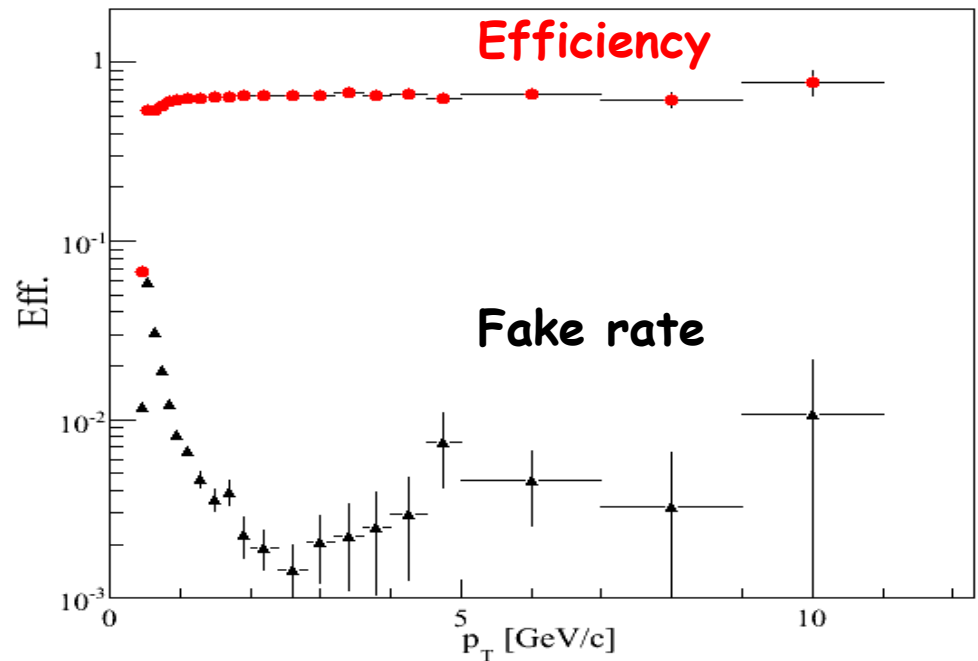
Rekonstrukcja śladów

detektory Pixel and SCT, TRT nie



3 warstwy pikseli
4 dwu-stronne warstwy pasków

Pb+Pb 5500 GeV/A, $b=2.3$ fm, $|\eta|<1$



Dla p_T : 1 - 10 GeV/c:

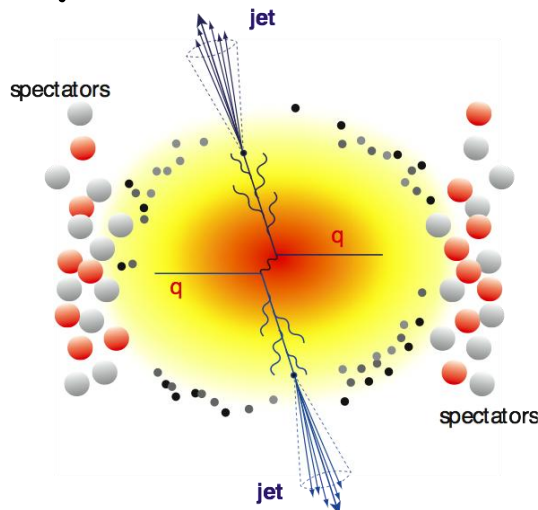
wydajność $\sim 70\%$, poziom fałszywych śladów $\sim 1\%$

Zdolność rozdzielcza pędu $\sim 3\%$ (2% - barrel, 4-5% end-caps)

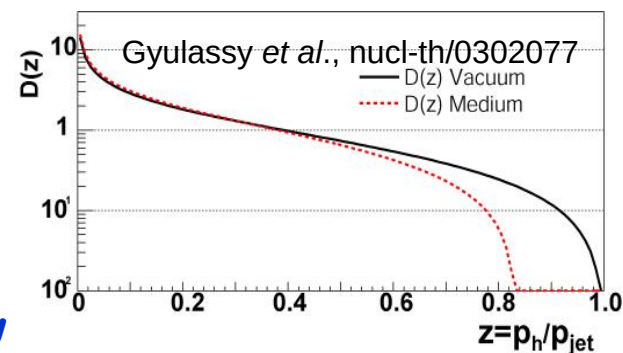
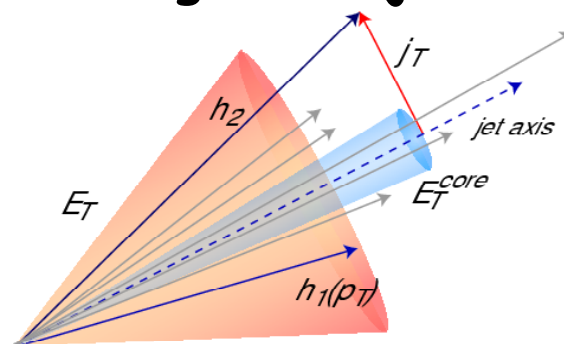
Badanie procesów z dużym p_T

Cel: wyznaczenie własności gęstego/gorącego ośrodka.

Wymrażanie dżetów (Jet quenching)



Modyfikacje funkcji fragmentacji dżetów



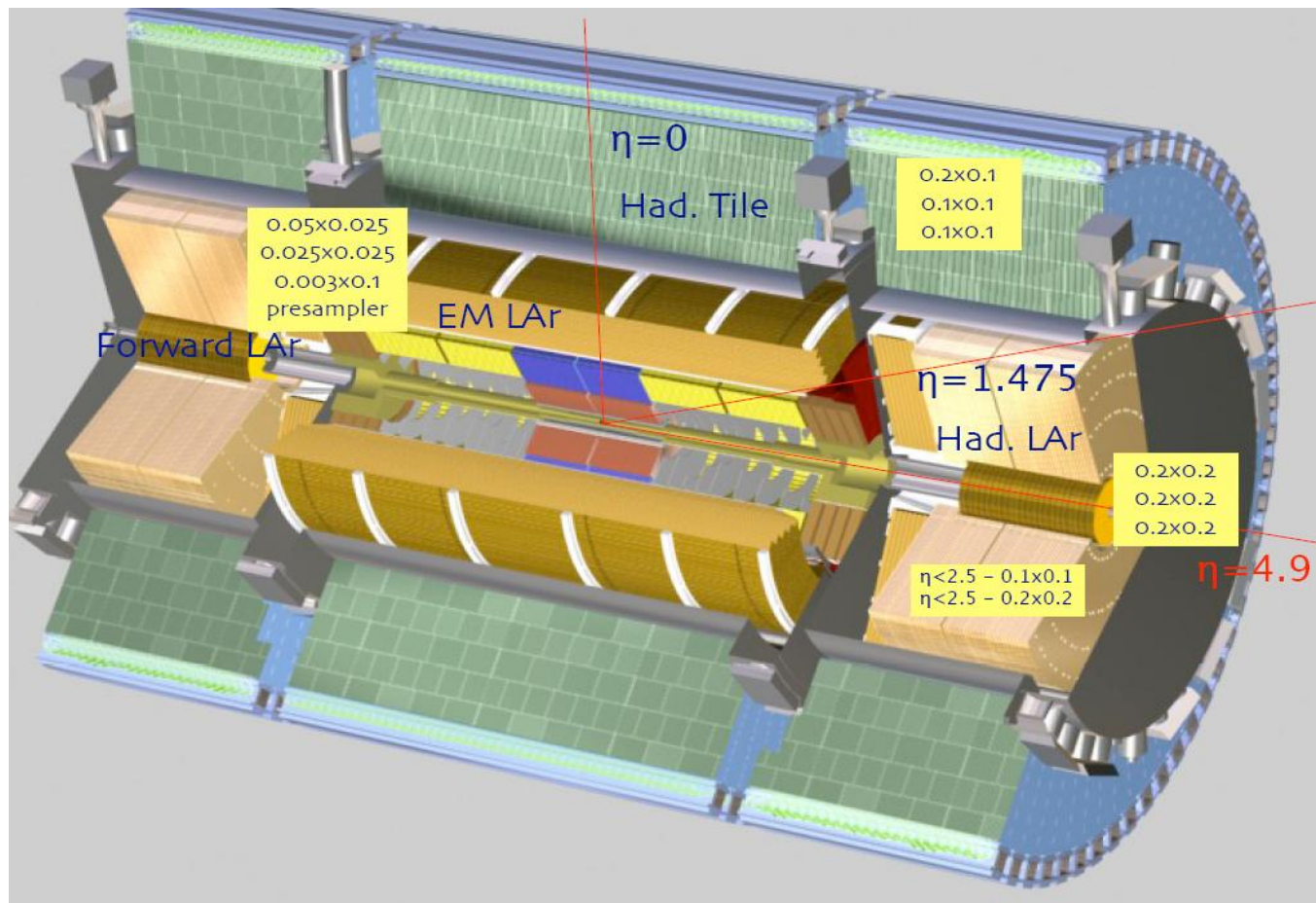
- Inkluzywne przekroje czynne na produkcję dżetów
- Funkcje fragmentacji przy użyciu śladów
- Bezpośrednie fotony
- Korelacje γ - dżet

ATLAS - badanie dżetów

ATLAS - wspaniały system kalorymetrów

Dobra segmentacja:
radialna i podłużna

Pokrycie:
pełny zakres w ϕ
 $|\eta| < 4.9$



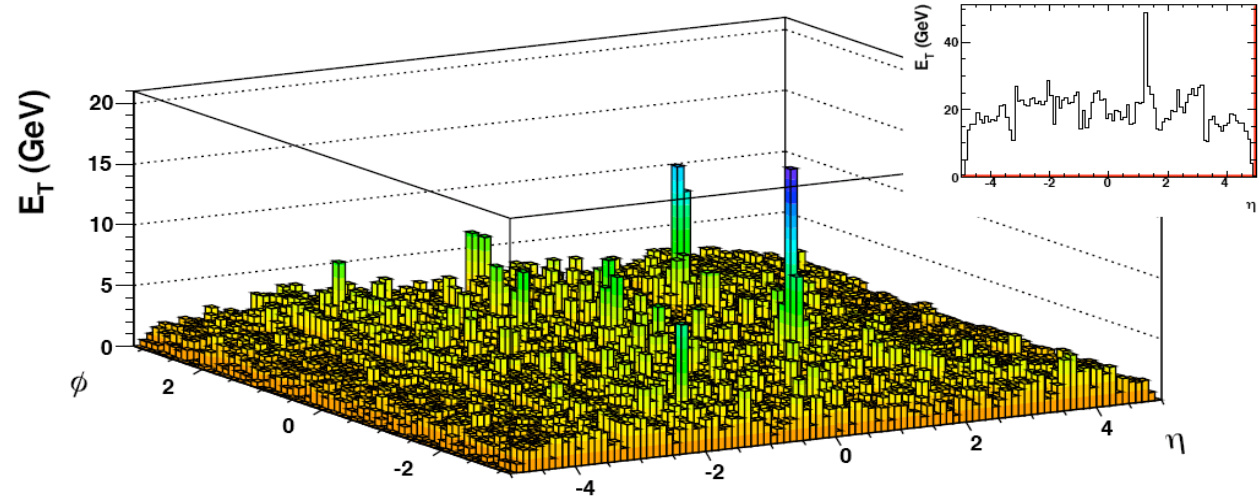
Rekonstrukcja dżetów - Cone Algorithm

Pythia: dwu-dżetowy
przypadek z $E_T \sim 70 \text{ GeV}$

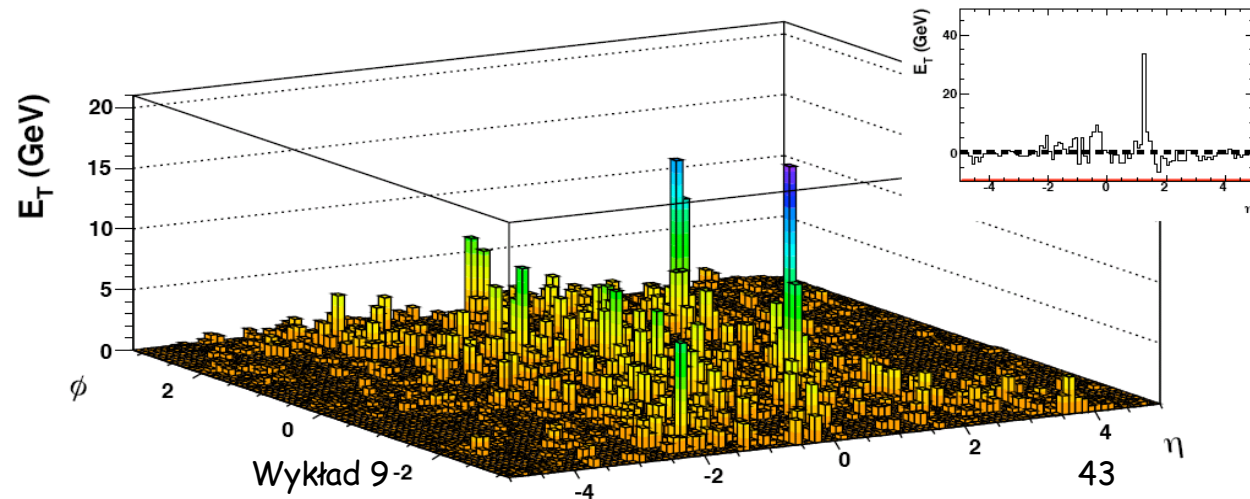
Zanurzony w centralny
przypadek HIJING
Pb+Pb, $b = 2 \text{ fm}$
 $dN_{ch}/d\eta = 2700$

ΣET w wieżach 0.1×0.1
EM + Had

Przed odjęciem tła

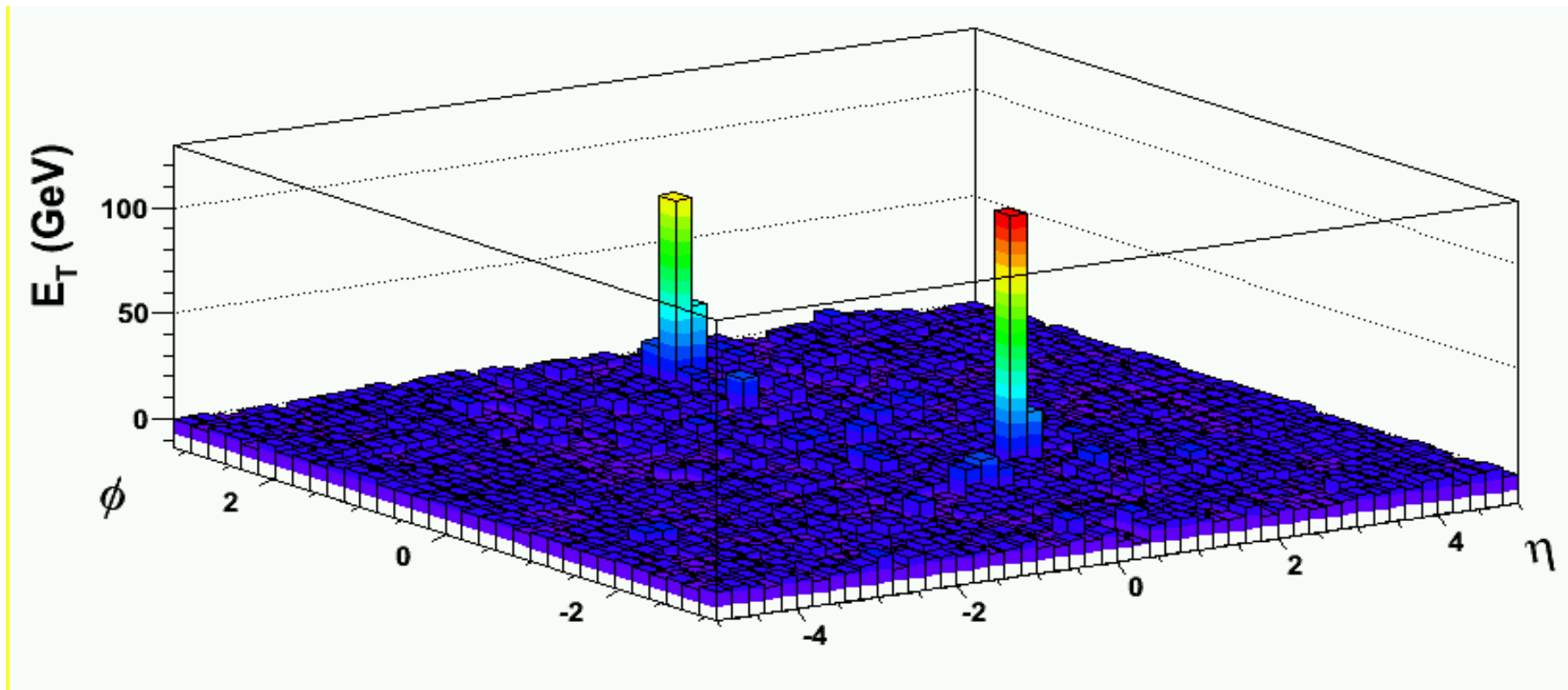


Po odjęciu tła



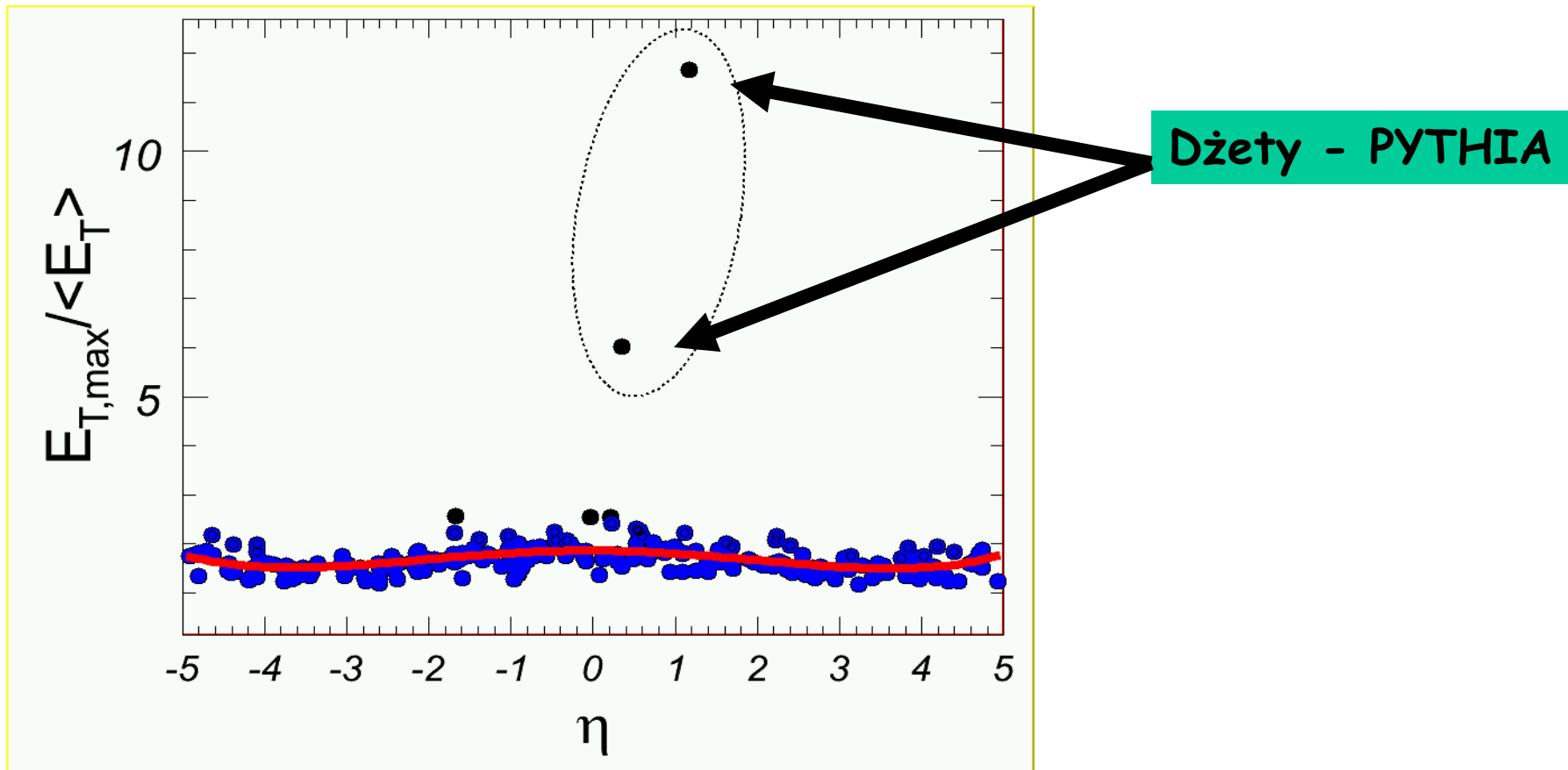
Rekonstrukcja dżetów - k_T Algorithm

- Zaczynamy od przypadku bez odjętego tła

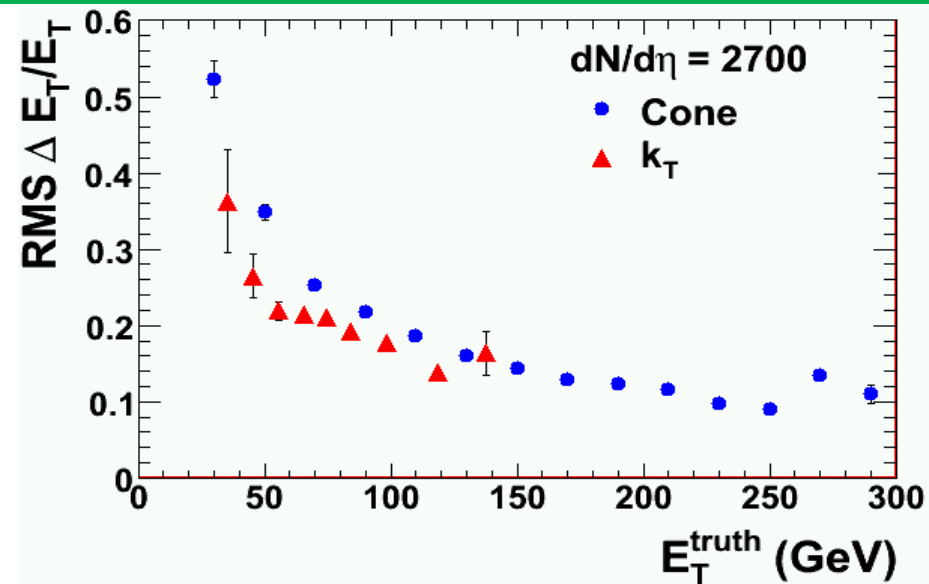
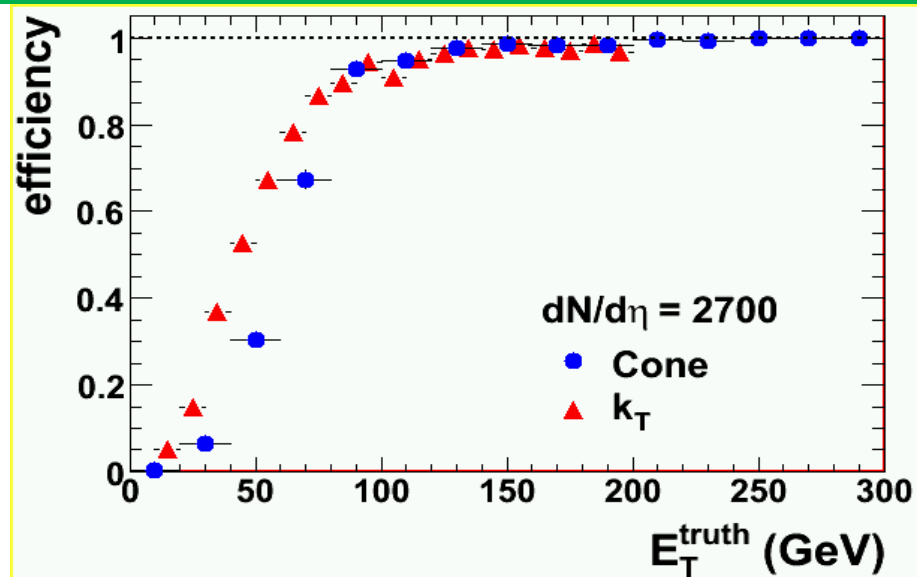


Rekonstrukcja dżetów - k_T Algorithm

- Zaczynamy od przypadku bez odjętego tła
- Stosujemy „fast k_T Algorithm”
- Używamy różnych zmiennych dyskryminujących dżety tła



Porównanie dwóch algorytmów

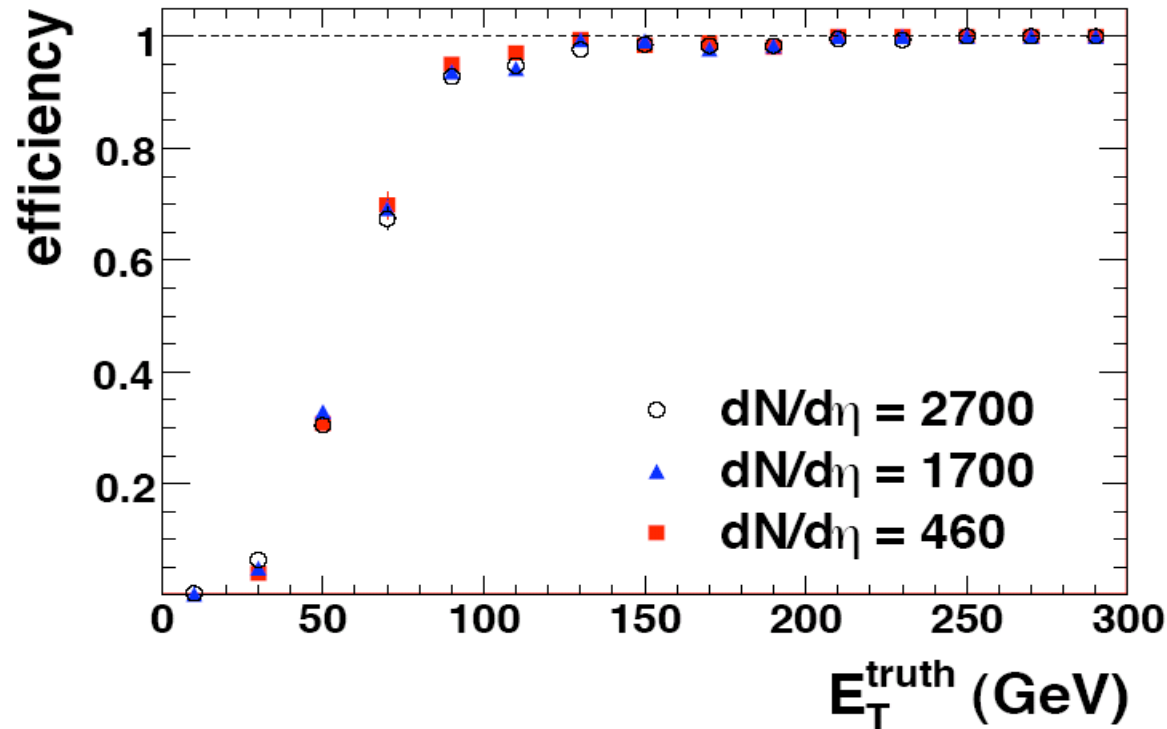


- Algorytm k_T

- Lepsza wydajność i energetyczna zdolność rozdzielcza
- Ale systematyczne przesunięcie skali energii, zależne od centralności zderzenia

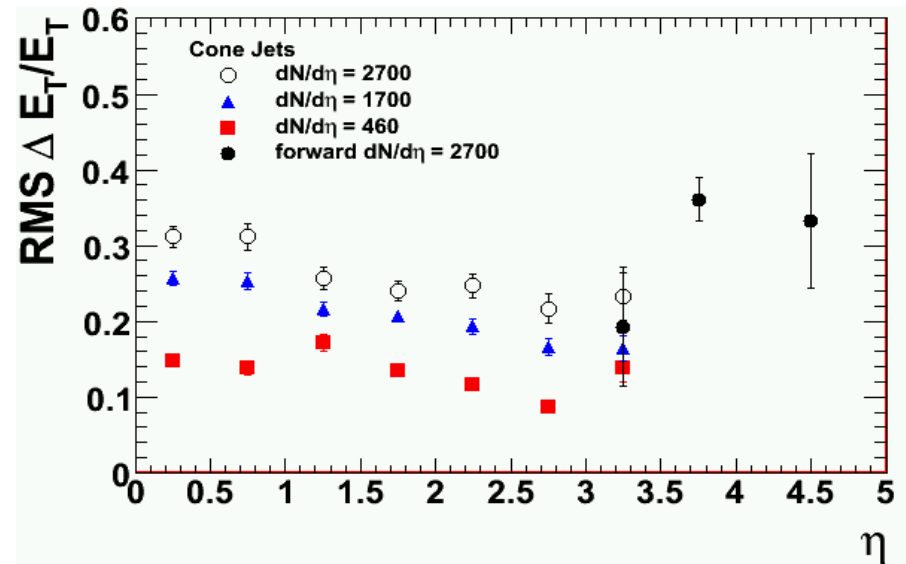
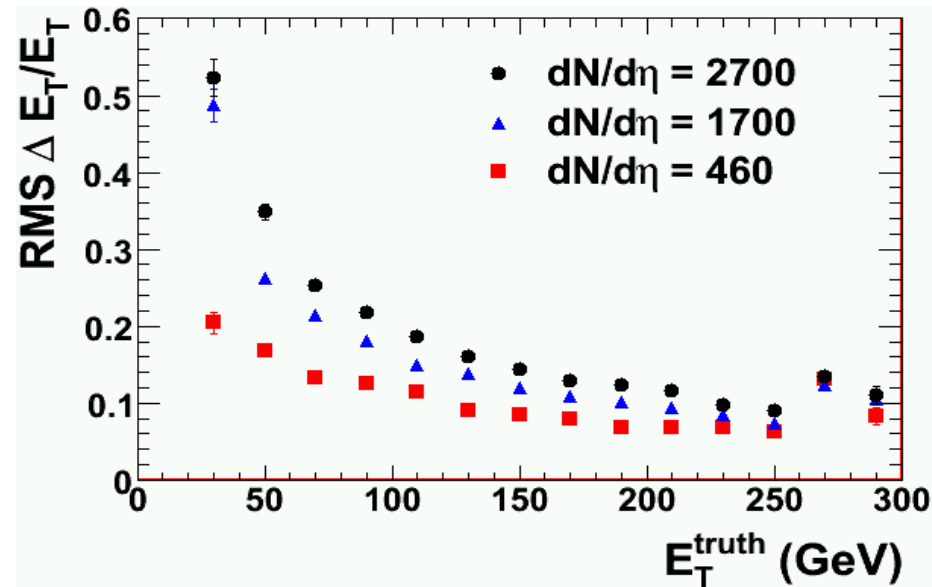
→ W dalszej części używamy 'cone algorithm'

Zależność wydajności od centralności



- Te same cięcia na odejmowanie tła
 - Wydajność nie zależy od centralności
- Kluczowe znaczenie dla badania tłumienia dżetów

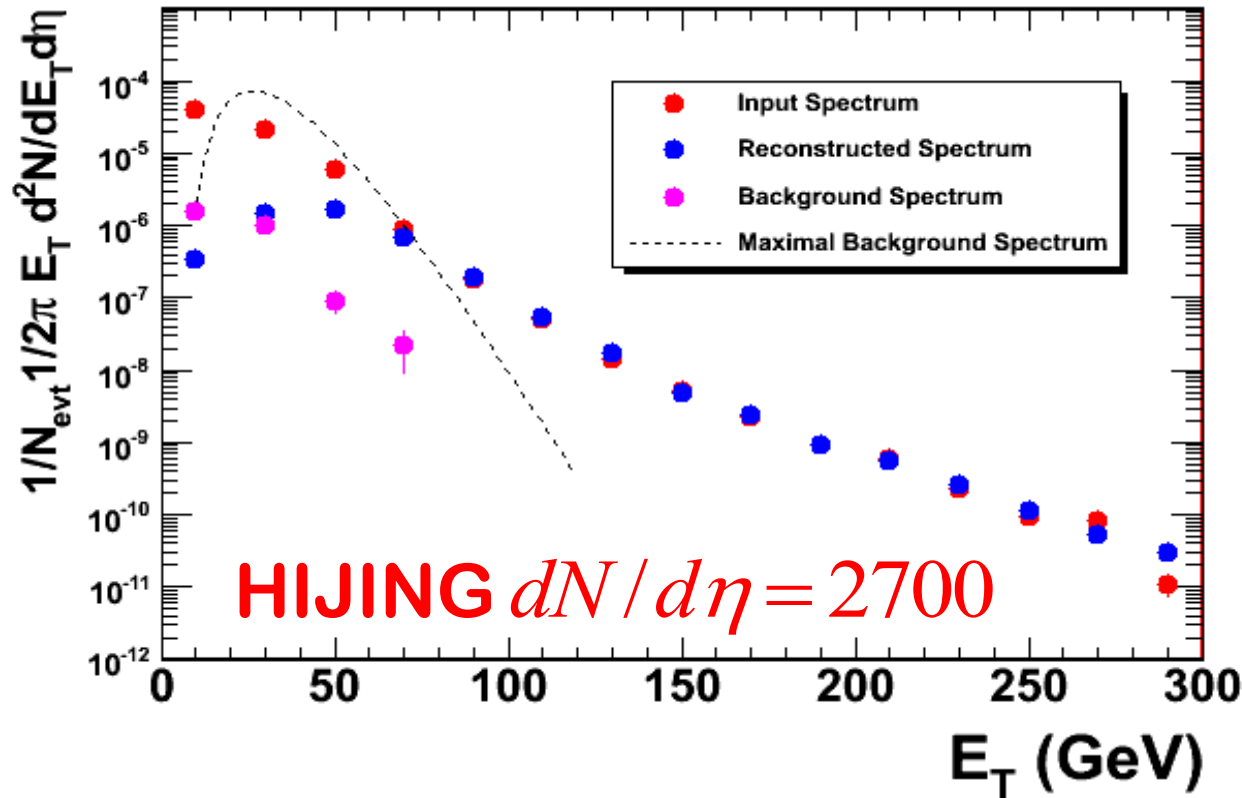
Energetyczna zdolność rozdzielcza



- $\text{RMS } \Delta E_T / E_T$

- Systematyczna zależność od centralności
- Trochę gorsza w okolicy $\eta = 0$
- Gorsza zdolność rozdzielcza dla dużych η ze względu na segmentację kalorymetrów przednich, ale ciągłe dzęty mogą być mierzone aż do $|\eta| = 5$.

Widmo dżetów

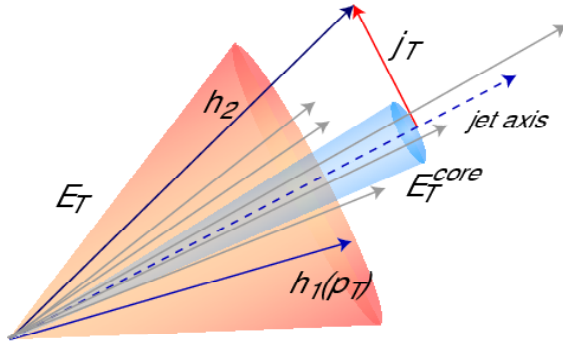


Dla 70 GeV dżetów w
 $b=2$ fm HIJING
przypadkach
($dN/d\eta = 2700$)

- $\varepsilon = 70\%$
- $B/(S+B) = 3\%$
- $\sigma(\Delta E_T/E_T) = 25\%$

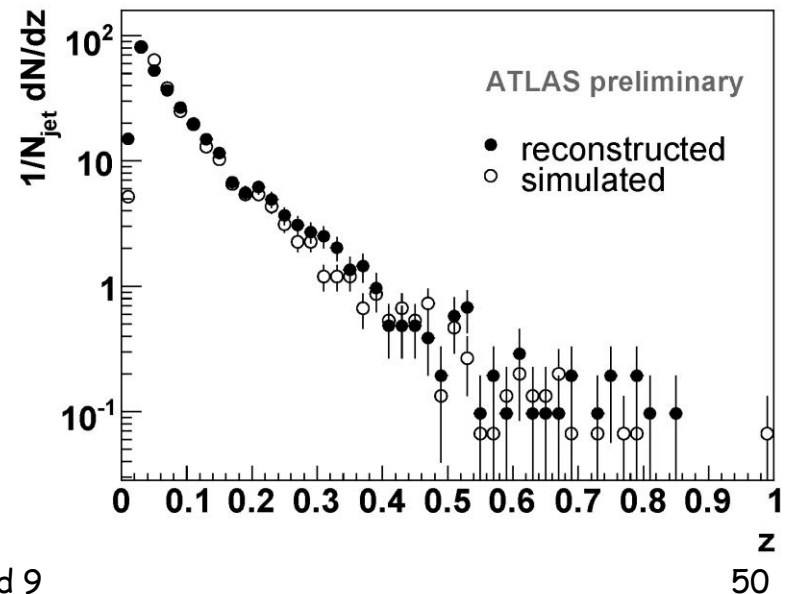
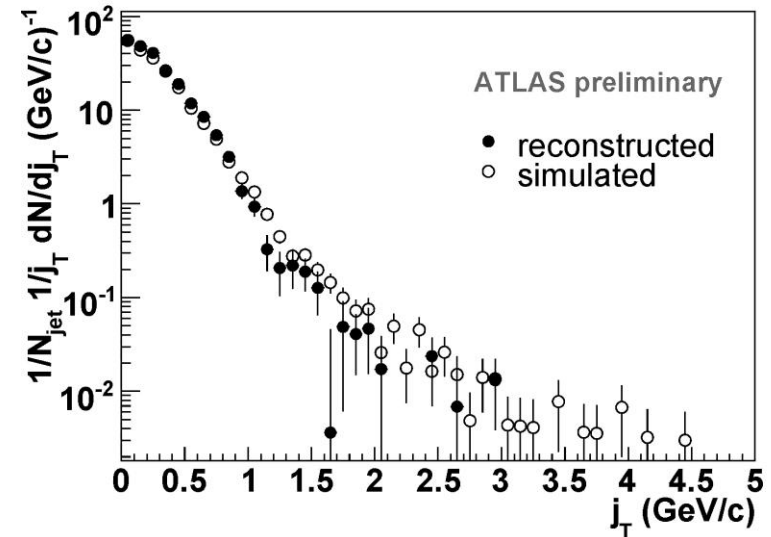
- Dobra reprodukcja widma wejściowego powyżej 70 GeV

Funkcje fragmentacji dżetów



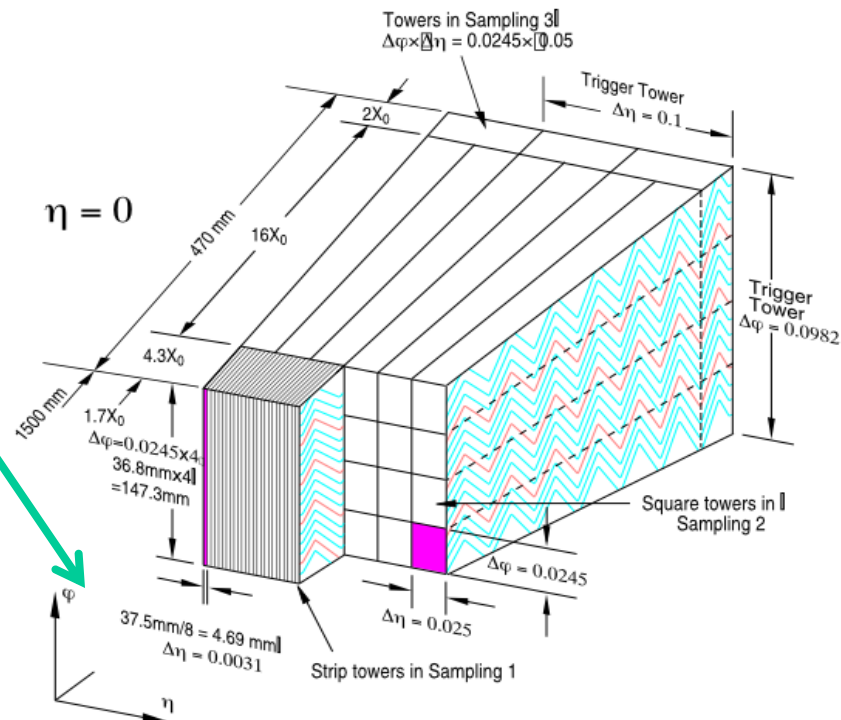
- Rozkłady j_T
- Funkcja fragmentacji $D(z)$
 $z = p_T(\text{ślad})/E_T(\text{dżet})$
- $p_T > 2 \text{ GeV}/c$, $|\eta| < 2.5$
- Jet $E_T^{\text{rec}} > 70 \text{ GeV}$

→ Odtwarza dobrze zarówno kształt jak i absolutne wartości dla j_T i $D(z)$

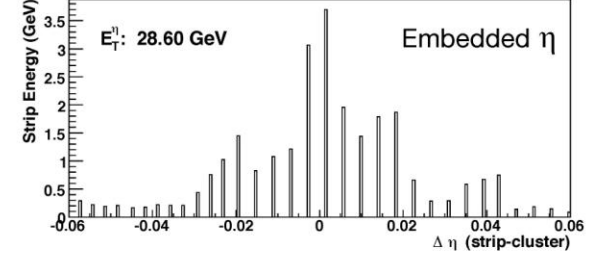
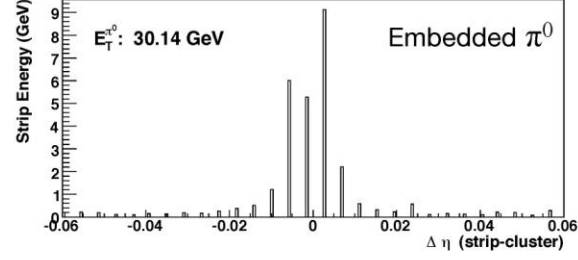
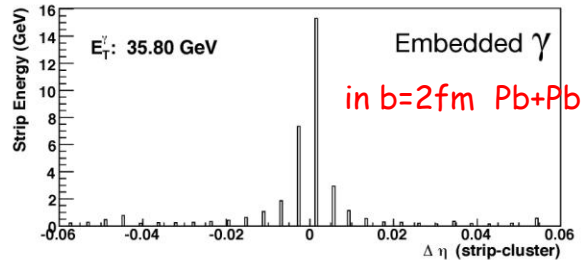
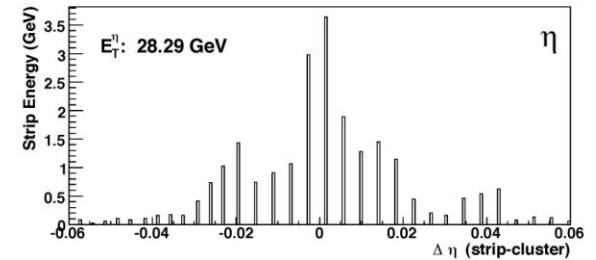
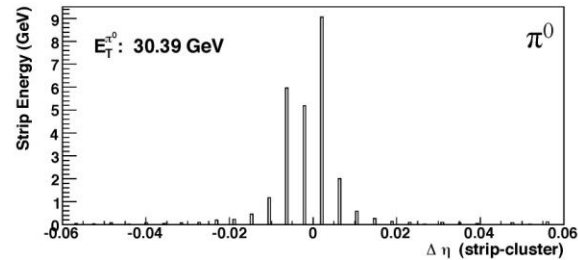
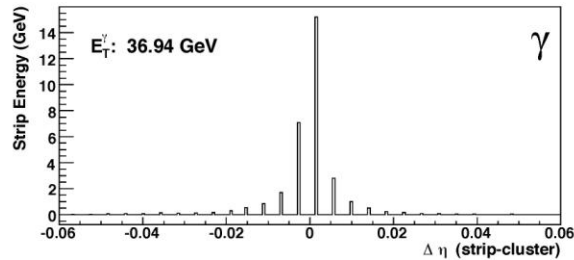


Identyfikacja fotonów

Segmentacja podłużna kalorymetru elektromagnetycznego

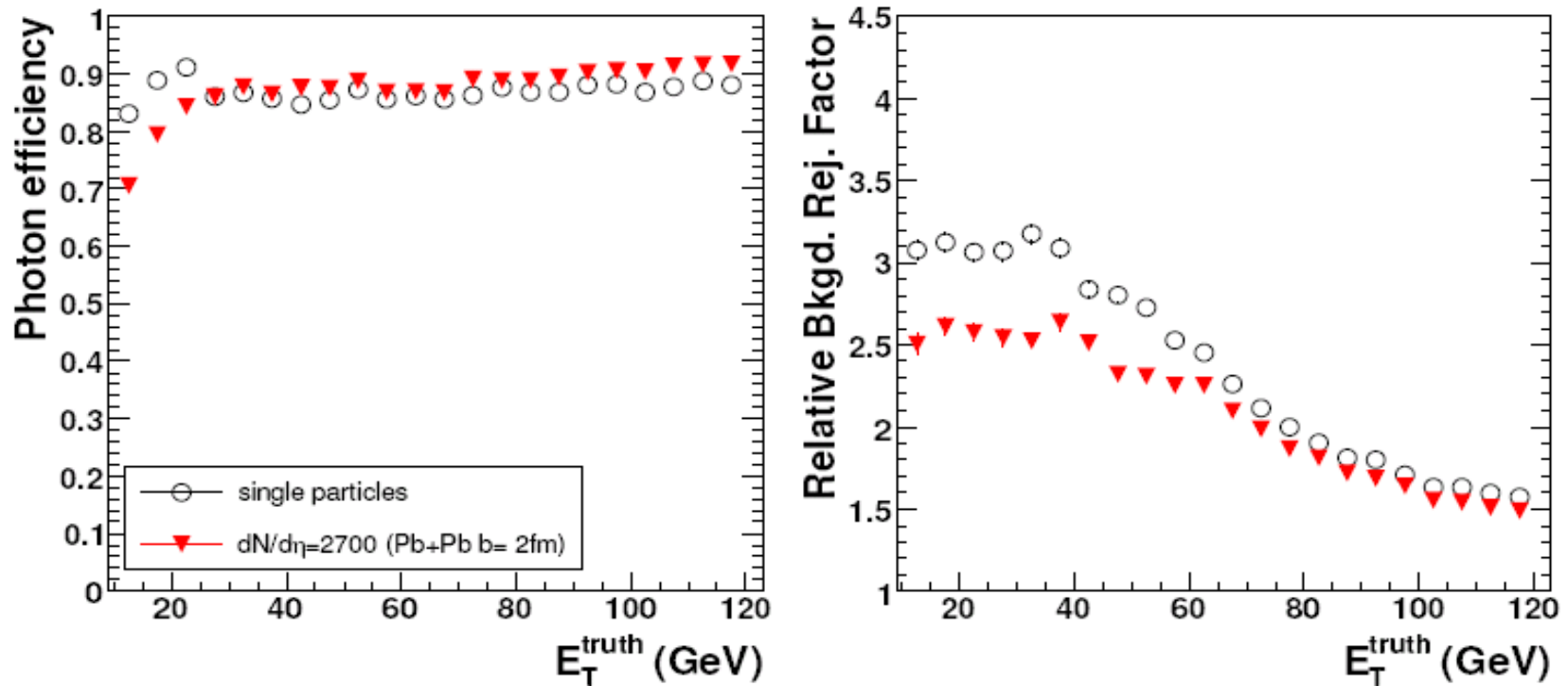


Identyfikacja fotonów



- Pierwsza EM warstwa ma bardzo małe tło
 - Typowo $< 50 \text{ MeV}$ dla $b=2 \text{ fm Pb+Pb}$ ($dN_{ch}/d\eta = 2700$)
- Wyraźne różnice w rozkładach E_T dla γ i π^0 , η
 - Węższy i bardziej wypikowany rozkład dla γ niż dla π^0 , czy η
 - Różnic tych nie zaciera tło Pb+Pb

Identyfikacja fotonów: cięcia 'na kształt'

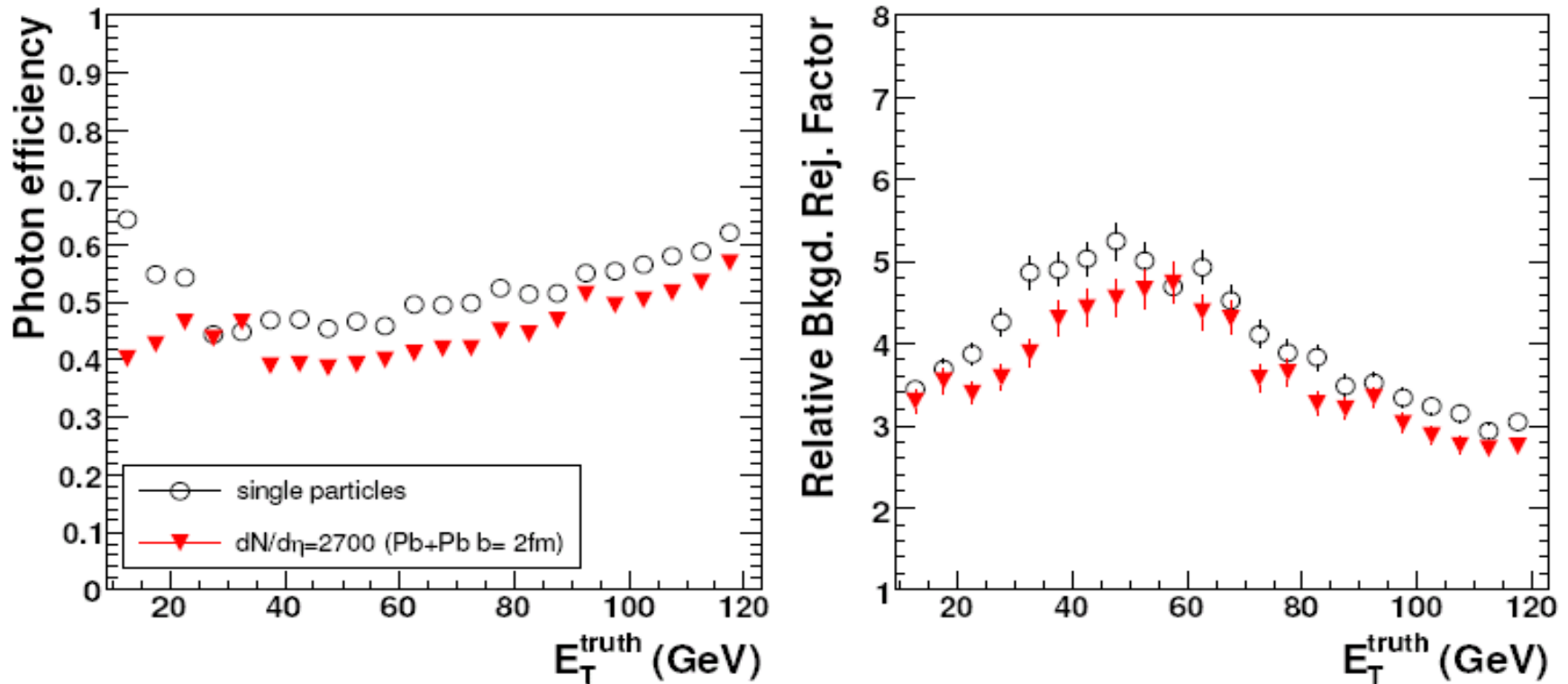


- Czynniki odrzucania = liczba fotonów/liczby neutralnych hadronów, względny X wydajność

→ Dobra wydajność, akceptowalne odrzucanie tła nawet powyżej 100 GeV

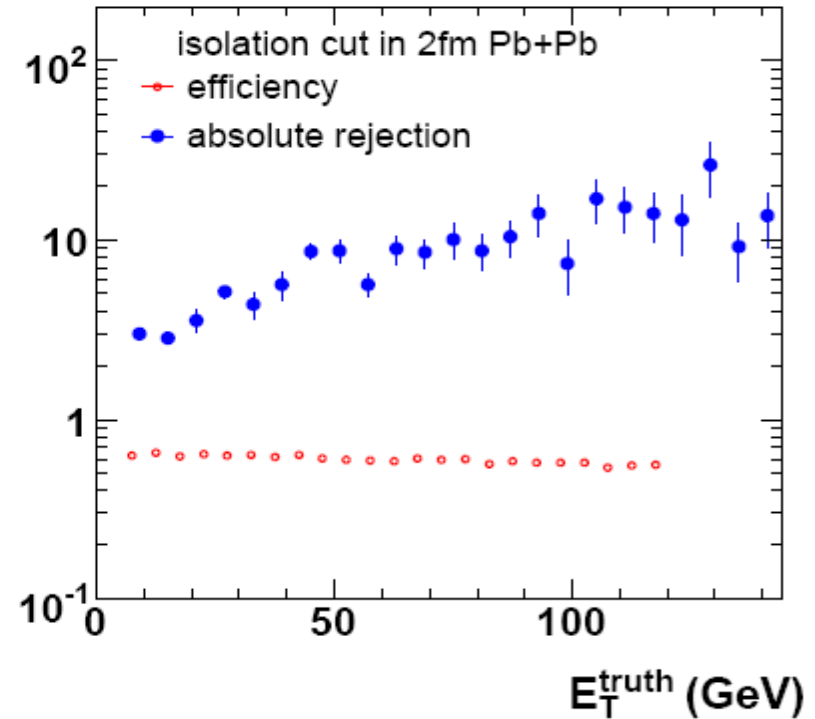
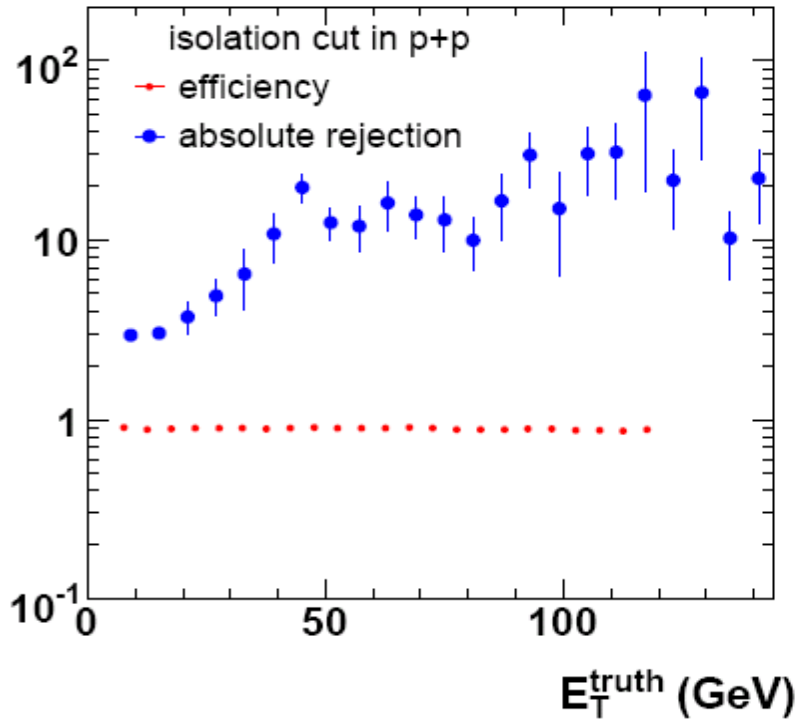
Identyfikacja fotonów: cięcia 'na kształt'

Bardziej restrykcyjne cięcia:



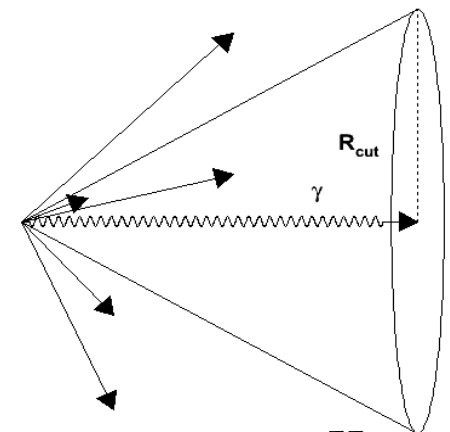
Lepsza eliminacja tła, kosztem pogorszenia wydajności o czynnik 2; wybór zależy od analizy

Identyfikacja fotonów: cięcia na izolację

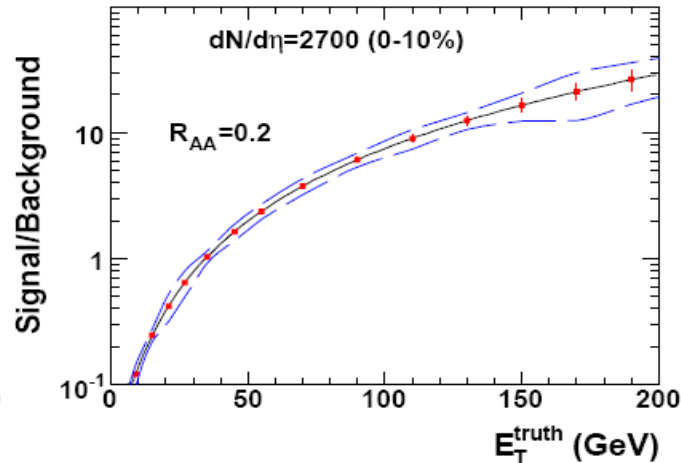
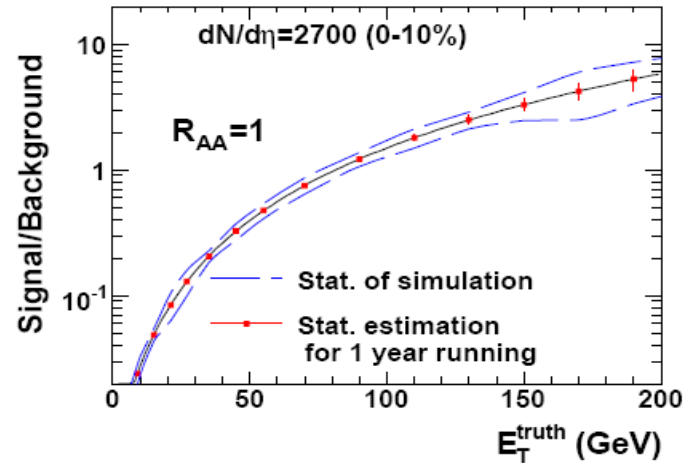


- Wewnątrz stożka o promieniu $R=0.2$
 - brak śladów z $p_T > \text{Cut}(E_\gamma)$.
 - $\Sigma E_T < \text{Cut}(\text{cent}, E_\gamma)$

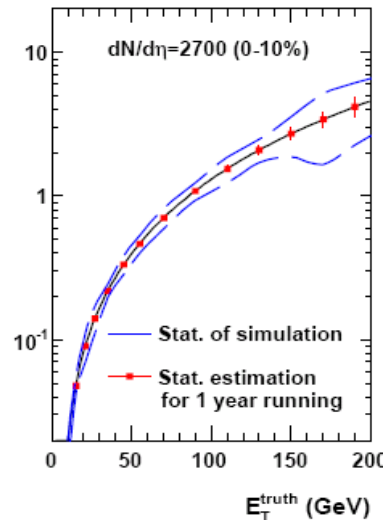
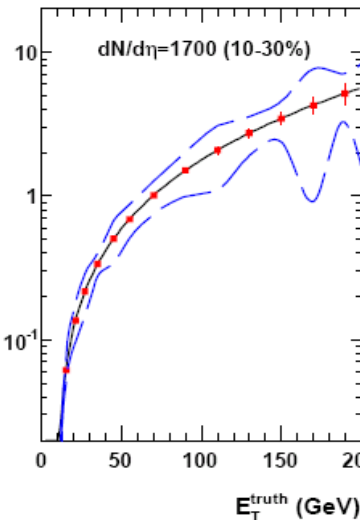
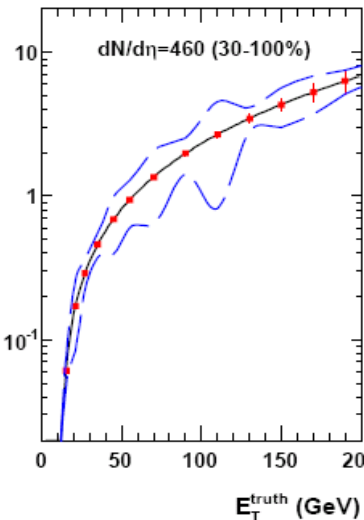
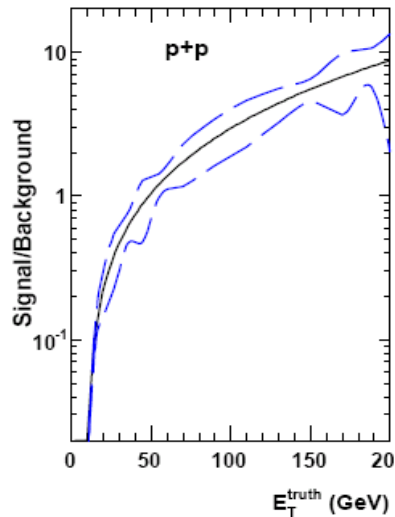
$$R = \sqrt{\Delta\eta^2 + \Delta\phi^2}$$



Bezpośrednie fotony: S/B

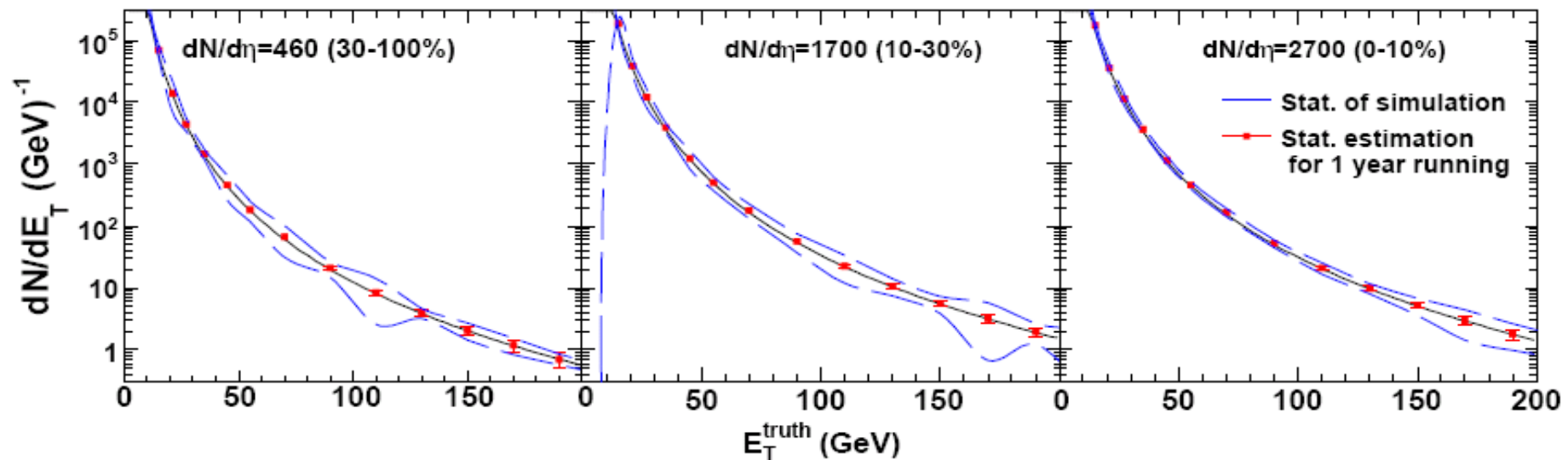


Zderzenia centralne



$R_{AA} = 1$
Dla
neutralnych
hadronów

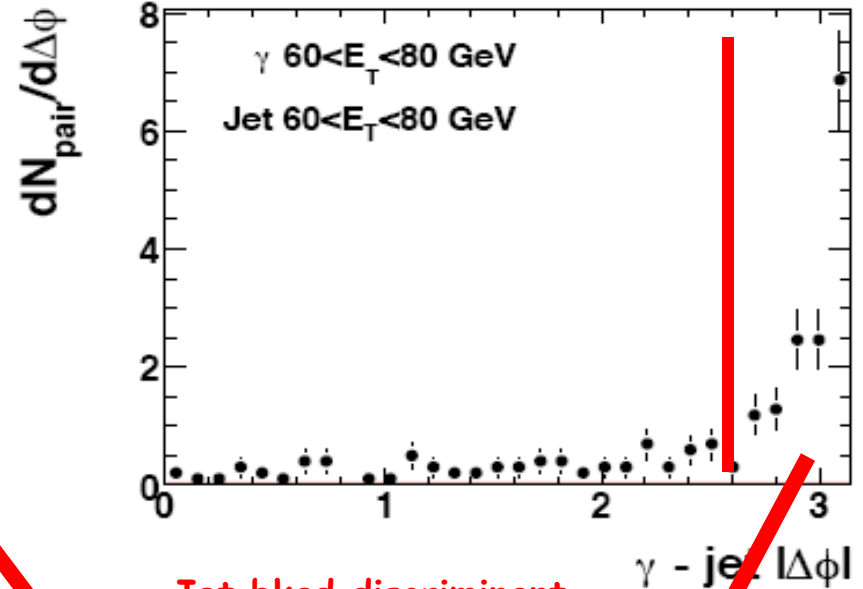
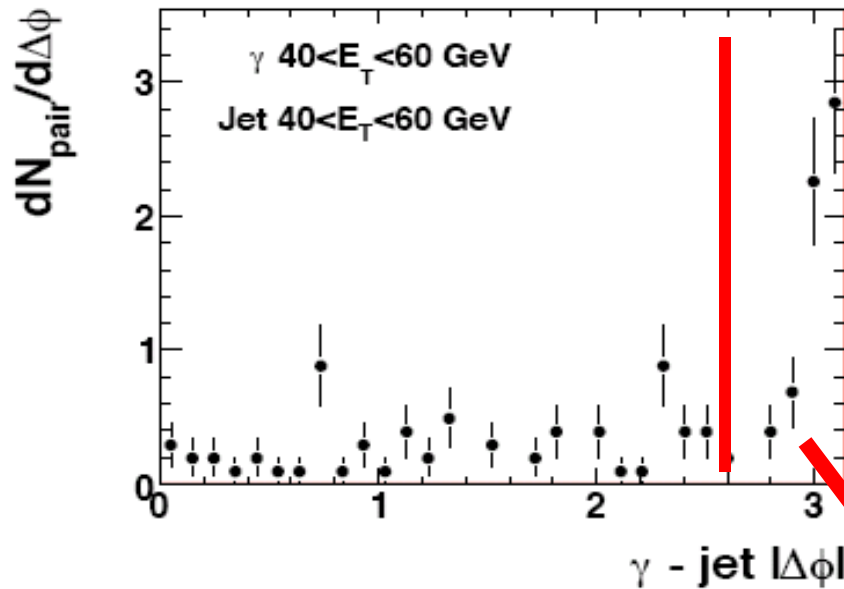
Widma bezpośrednich fotonów



- Demonstracja jak będzie wyglądało zmierzone widmo dla 0.5 nb⁻¹
- ($|\eta| < 2.4$)
- Dla neutralnych hadronów $R_{AA} = 1$ (najgorszy scenariusz)
- Dla tła z HIJING (najgorszy scenariusz?)

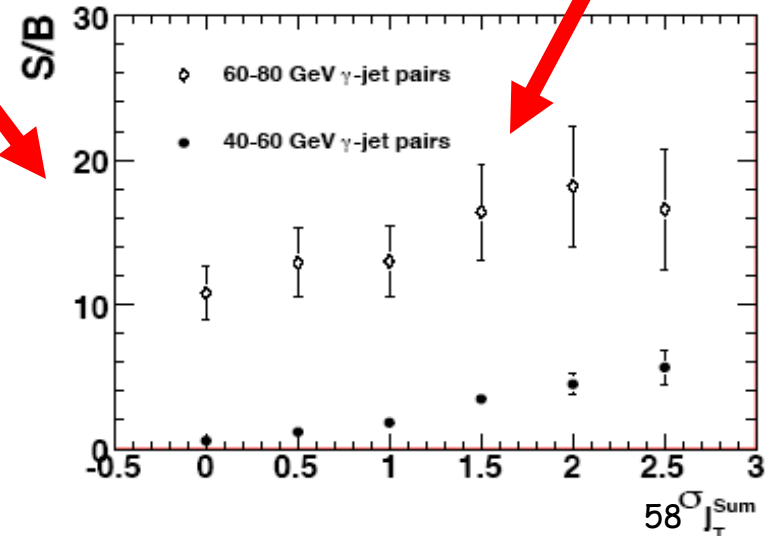
Korelacje γ -dżet

Centralne Pb+Pb (HIJING), $dN_{ch}/d\eta=2700$



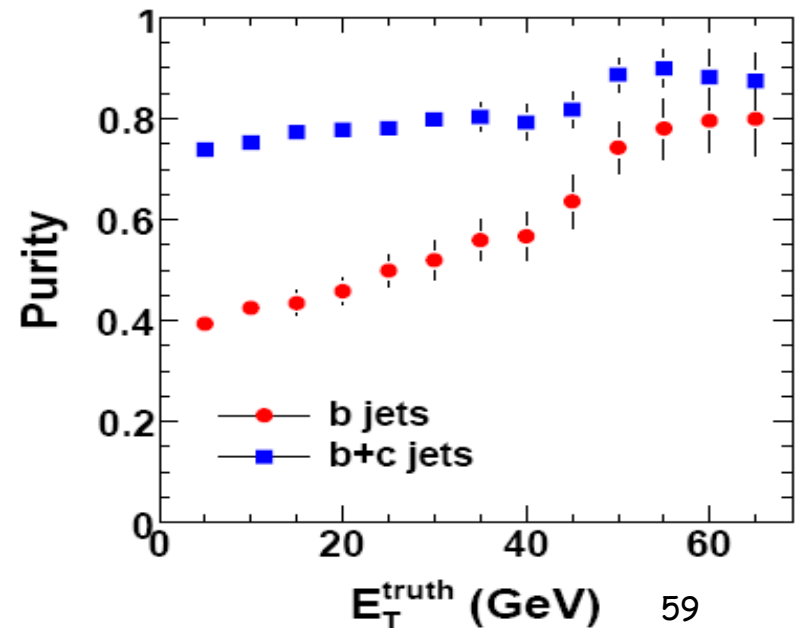
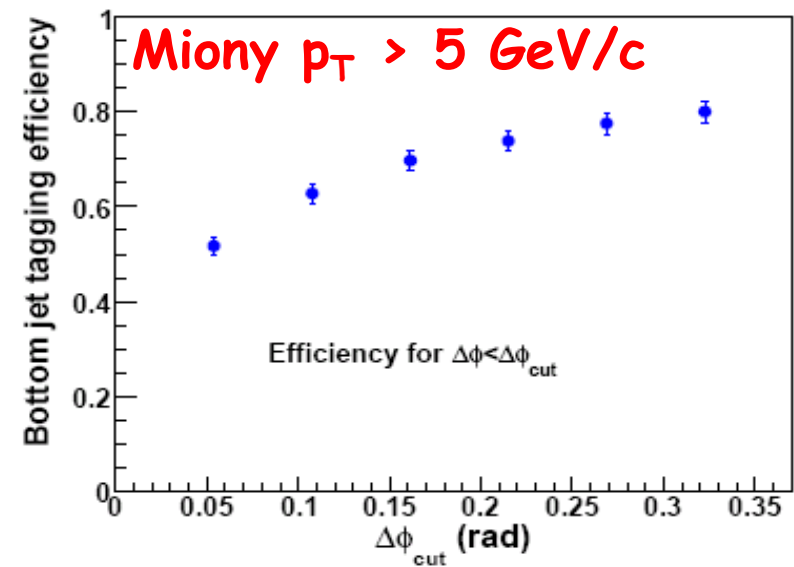
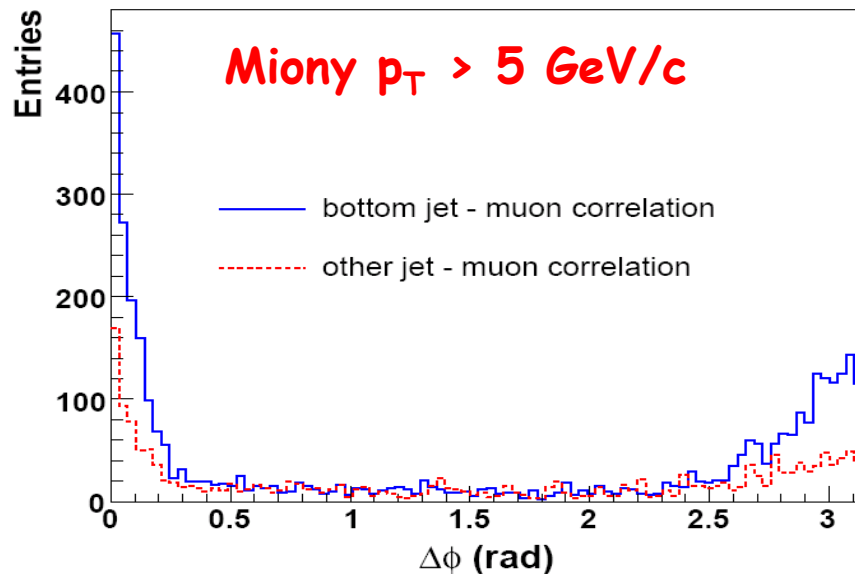
- Wyraźne korelacje przód-tył
- Możliwość pomiaru dżetów przy niższych E_T

Jet bkgd discriminant



Znakowanie dżetów od ciężkich kwarków

- Wykorzystujemy miony do znakowania dżetów związanych z rozpadami ciężkich kwarków
 - Dżet $E_T > 35 \text{ GeV}$
 - Kwarki c i b



Statystyki dżetów

Dla seansu 10^6 s z Pb+Pb i $L=4\times 10^{26} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
oczekujemy w $|\eta| < 2.5$:

E_T threshold	N_{jets}
50 GeV	3.0×10^7
100 GeV	1.5×10^6
150 GeV	1.9×10^5
200 GeV	4.4×10^4

A także: $\sim 10^6$ przypadków γ + dżet z $E_T > 50 \text{ GeV}$
 $\sim 500 Z^0(\mu\mu)$ + dżet z $E_T > 40 \text{ GeV}$

Produkcja stanów związanych kwark-antykwar

Cieniowanie ładunków kolorowych nie pozwala na tworzenie stanów J/ψ , Υ , χ gdy $T \rightarrow T_c$ dla przejścia fazowego QGP

(długość cieniowania kolorowego < promienia rezonansu)

Termometr QGP



Rodzina Upsilon

Energie wiązania (GeV)

Temperatura dysocjacji

$\Upsilon(1s)$

1.1

$\sim 2.5T_c$

$\Upsilon(2s)$

0.54

$\sim 0.9T_c$

$\Upsilon(3s)$

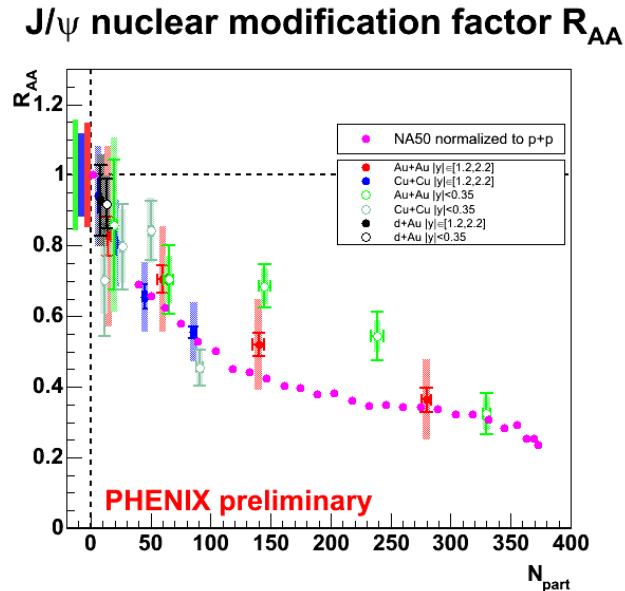
0.2

$\sim 0.7T_c$

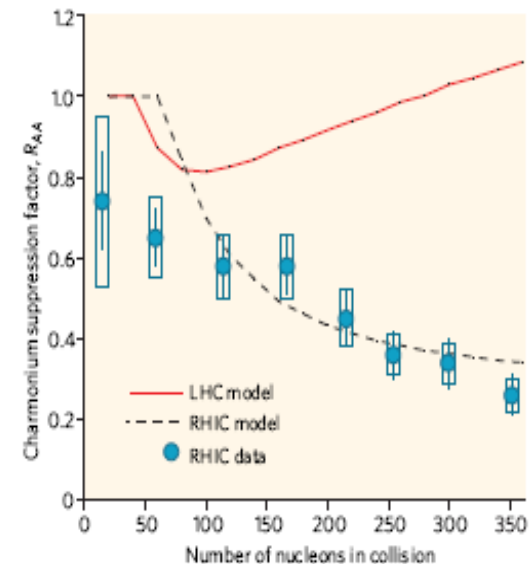
Ważna separacja stanów $\Upsilon(1s)$ i $\Upsilon(2s)$!

Produkcja stanów związanych kwark-antykwarek

Tłumienie J/ψ podobne przy
SPS i RHIC...



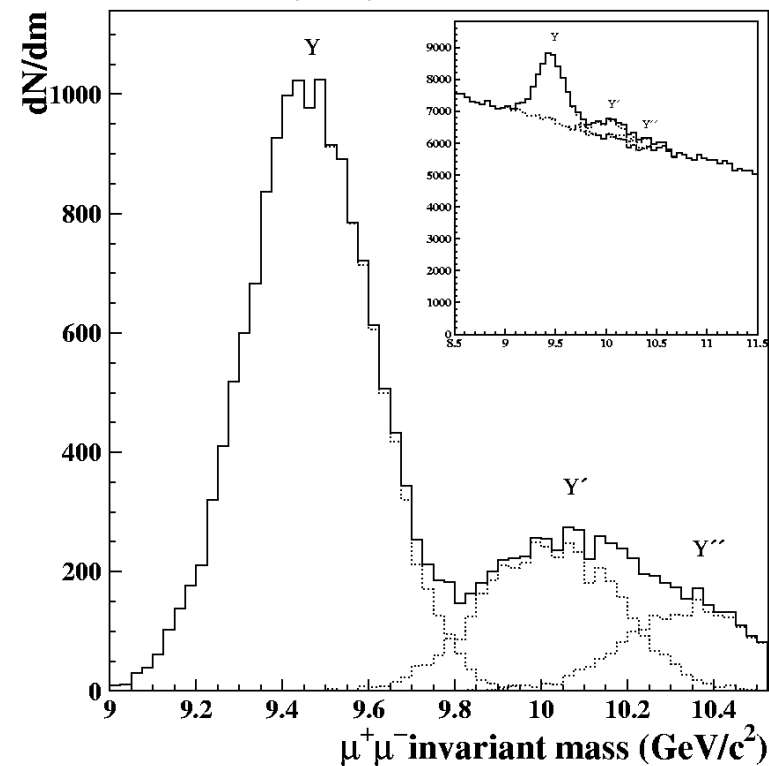
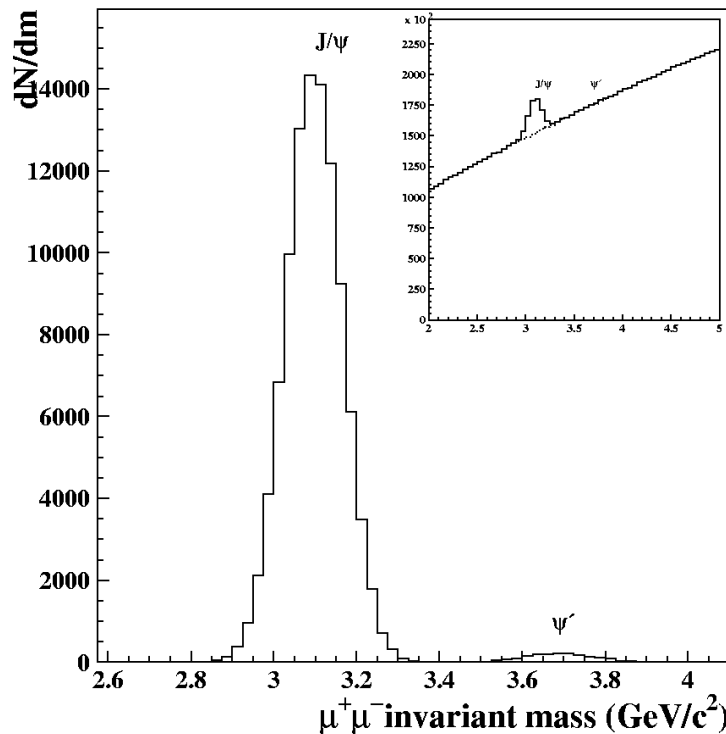
Przy LHC:
Tłumienie czy wzmocnienie??
(regeneracja)



Rekonstrukcja J/ψ i Υ poprzez rozpady na $\mu^+\mu^-$

ATLAS Spektrometr mionowy: pokrycie aż do $|\eta| < 2.7$

bardzo małe tło, bo spektrometr znajduje się za kalorymetrami



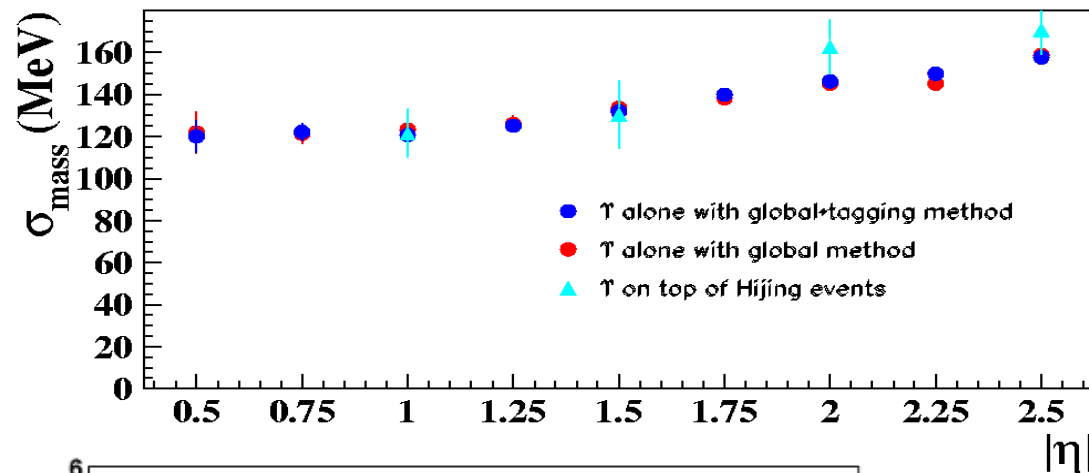
100K(11K) J/ψ

15K Υ

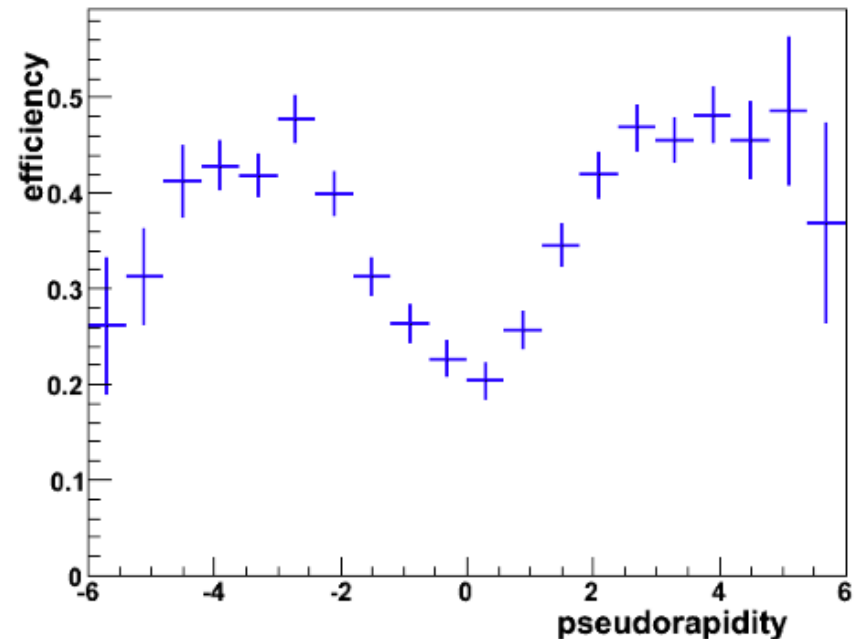
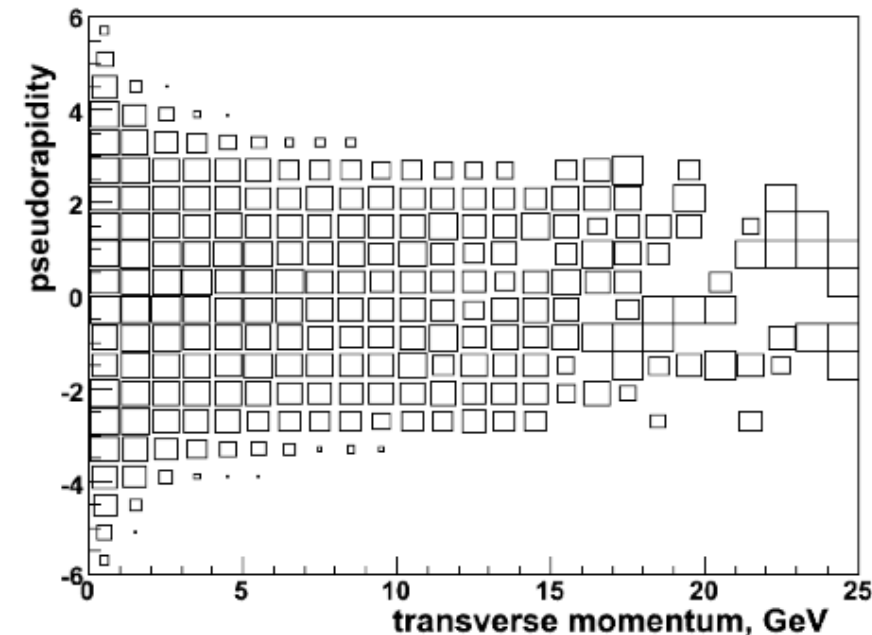
w ciągu miesiąca 10^6 s at $L=4 \times 10^{26} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Oba stany charmonium i bottomonium będą obserwowane

Zdolność rozdzielcza i akceptancja dla Υ

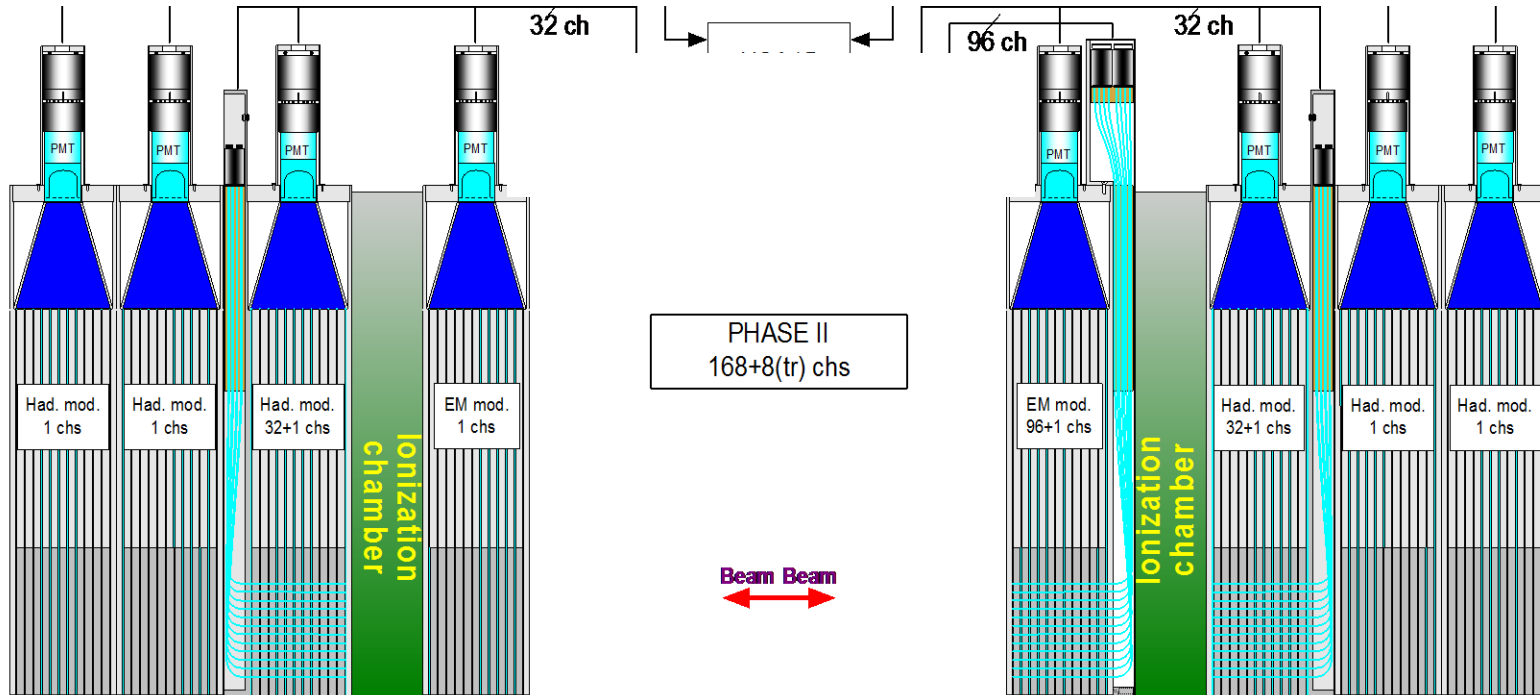


- Dostateczna masowa zdolność rozdzielcza
- Duża akceptancja
- Degradacja wydajności w pobliżu $\eta \sim 0$ ze względu na materiał



ATLAS Zero Degree Calorimeter (ZDC)

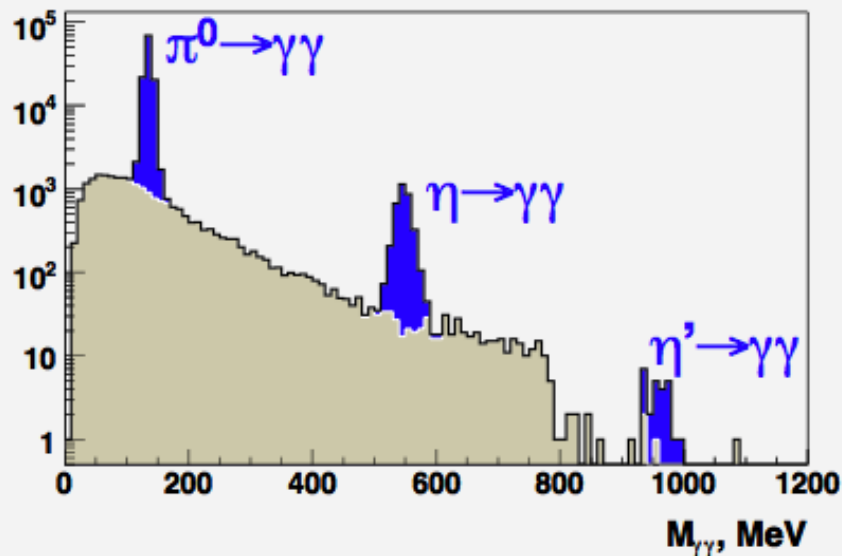
- 140 m, symetrycznie po obu stronach nominalnego punktu zderzenia
- Pojedynczy moduł EMCal o dużej segmentacji oraz 3 moduły kalorymetrów hadronowych
- Oczekujemy (dla neutronów o energii 1-7 TeV)
 - $\sigma_E/E \sim 15-20\%$, $\sigma_{x,y} \sim 1-2$ mm



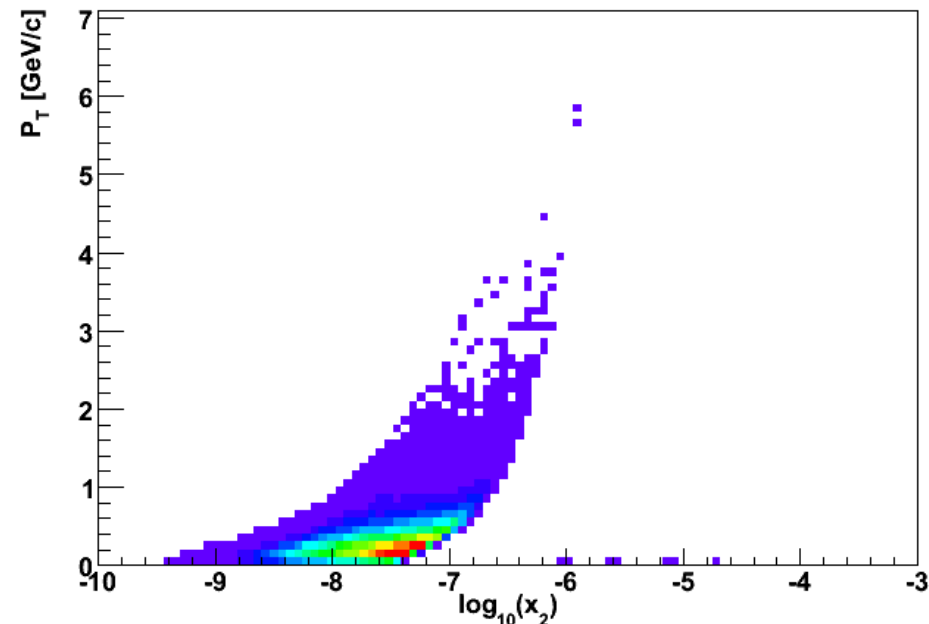
Fizyka małych x przy pomocy ZDC

ZDC głównie będzie wykorzystany do trygerowania, określania centralności zderzenia, wyznaczania płaszczyzny reakcji...

Pomiary mezonów do przodu w kanale rozpadu $\gamma\gamma$



Rejestracja π^0 w ZDC przy bardzo małych x – w obszarze saturacji.



Zderzenia proton-jądro

- Łącznik pomiędzy fizyką pp i AA
- Badanie modyfikacji jądrowej rozkładu gluonów przy małych x
- Badanie modyfikacji funkcji fragmentacji dżetów
- Wykorzystania pełnych możliwości detektora (także TRT)

Podsumowanie

ATLAS jest bardzo dobrym detektorem do badania zderzeń $A+A$ przy energiach LHC.

Program badania zderzeń ciężkich jonów obejmuje wszystkie interesujące zagadnienia.

- Omawiane w tym wykładzie:
 - Globalne charakterystyki
 - Dżety
 - Bezpośrednie fotony
 - Stany kwark-antykwar (Υ i J/ψ)
 - Fizyka małych x
- Inne zagadnienia:
 - Zderzenia ultra-peryferyczne
 - Ciężkie kwarki (zwłaszcza fizyka b)
 - Korelacje $Z+d\text{żet}$, $d\text{żet}-d\text{żet}$
 - Tryger i systemy akwizycji danych

ATLAS – fizyka zderzeń ciężkich jonów: Grupa krakowska

Prof.. Barbara Wosiek

Dr hab. Adam Trzupek

Dr Andrzej Olszewski

Dr Krzysztof Woźniak

Mgr Barbara Toczek (doktorantka-prawie dr)

Mgr Dominik Derendarz (doktorant)