

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: Fizyka ciężkich jonów w eksperymencie ATLAS (LHC)

Plan

Eksperyment PHOBOS przy akceleratorze RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) w Brookhaven National Laboratory

- Detektor eksperymentu PHOBOS
- PHOBOS – dane doświadczalne
- Odkrycie nowego stanu materii
 - przewidywania vs. obserwacje
 - ewidencja w oparciu o wyniki eksperymentu PHOBOS

Akceleratory ciężkich jonów

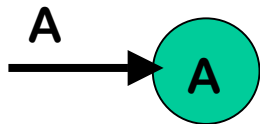
Akcelerator	Kiedy	Wiązka	$E_{\text{lab}}/A(\text{maks.})$ [GeV]	$\sqrt{s_{\text{NN}}}$ [GeV]
<u><i>Eksperymenty ze stałą tarczą</i></u>				
AGS(BNL)	1992	^{197}Au	11.5	4.8
SPS(CERN)	1994	^{208}Pb	160.0	17.4

Eksperymenty z przeciwbieżnymi wiązkami

RHIC(BNL)	2000	$^{197}\text{Au} + ^{197}\text{Au}$	20,000	200.0
LHC(CERN)	2009	$^{208}\text{Pb} + ^{208}\text{Pb}$	15×10^6	5500.0

Zderzenia ciężkich jonów przy najwyższych energiach akceleratorowych

Energie osiągnane w akceleratorach ciężkich jonów
(w układzie środka masy nukleon-nukleon):



$\sqrt{s_{NN}}$

Au+Au at BNL-AGS

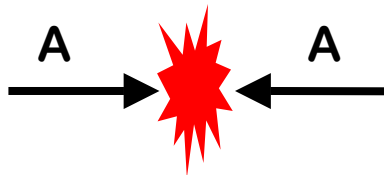
2.6 - 4.8 GeV

1992-1999

Pb+Pb at CERN-SPS

6.3 - 17.3 GeV

1994-2004



Au+Au at BNL-RHIC

19.6 - 200.0 GeV 2000 →

Pb+Pb at CERN-LHC

5500.0 GeV 2009

Relativistic Heavy Ion Collider - BNL, USA



RHIC - Podstawowe parametry

Układ: Dwa nadprzewodzące pierścienie
+istniejący kompleks (AGS) do wstępnej akceleracji.

Wiązki	Au	→	p
Energia/wiązkę	10 -100 GeV/A	max.	250 GeV
Natężenie wiązki	10^9		10^{11}
Liczba pęczków	57		114
Świetlność[cm ⁻² s ⁻¹]	2×10^{26}		10^{32}
Czas przecięcia pęczków		106 ns	
Magnesy nadprzewodzące (D-4T, Q-72T/m)		1740	
Obwód		3.8 km	
Ilość zużytego Au	10^{-6} g w ciągu	20 lat	
Koszt		10^3 M\$	

Eksperymenty: RHIC @ BNL



Współpraca



ARGONNE NATIONAL LABORATORY
BROOKHAVEN NATIONAL LABORATORY

INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS, KRAKOW

MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY

NATIONAL CENTRAL UNIVERSITY, TAIWAN

UNIVERSITY OF ILLINOIS AT CHICAGO

UNIVERSITY OF MARYLAND

UNIVERSITY OF ROCHESTER



Birger Back, Alan Wuosmaa

Mark Baker, Donald Barton, Alan Carroll, Nigel George, Stephen Gushue, George Heintzelman, Burt Holzman, Robert Pak, Louis Remsberg, Peter Steinberg, Andrei Sukhanov

Roman Hołyński, Andrzej Olszewski, Adam Trzupek, Barbara Wosiek, Krzysztof Woźniak, **Tomasz Gburek**

Maartin Ballintijn, **Wit Busza (Spokesperson)**, Patrick Decowski, **Kristjan Gulbrandsen**, **Conor Henderson**, **Jay Kane**, Judith Katzy, Piotr Kulinich, **Jang Woo Lee**, Heinz Pernegger, **Corey Reed**, Christof Roland, Gunther Roland, Leslie Rosenberg, **Pradeep Sarin**, Stephen Steadman, George Stephans, **Carla Vale**, Gerrit van Nieuwenhuizen, Gábor Veres, Robin Verdier, Bernard Wadsworth, Bolek Wysłouch

Chia Ming Kuo, Willis Lin, Jaw-Luen Tang

Russell Betts, Edmundo Garcia, Clive Halliwell, David Hofman, **Richard Hollis**, **Aneta Iordanova**, Wojtek Kucewicz, Don McLeod, Rachid Nouicer, Michael Reuter, **Joe Sagerer**

Abigail Bickley, **Richard Bindel**, Alice Mignerey, Marguerite Belt Tonjes

Joshua Hamblen, **Erik Johnson**, **Nazim Khan**, Steven Manly, Inkyu Park, Wojtek Skulski, Ray Teng, Frank Wolfs

Detektor PHOBOS

Księżyc MARS'a (a Modular Array for RHIC Spectra)

Cerenkov Trigger Counters

Time of Flight Counters

Octagon Multiplicity Detector
+ Vertex Detector (Silicon)

Spectrometer Detectors (Silicon)

Ring Multiplicity Detectors

Beryllium Beam Pipe

Ring Multiplicity Detectors
(Silicon)

Magnet (top part removed)

Paddle Trigger Counters

Aparatura

Detektory krotności o dużej akceptancji

$$|\eta| < 5.4$$

Detektory Si: Vertex, Rings, Octagon

Dwu-ramienny spektrometr magnetyczny (2T)

$$0 < y < 2$$

16 płaszczyzn detektorów Si o dużej segmentacji

ToF



- Pozwala rejestrować rzadkie przypadki
- Daje najlepszą ogólną charakterystykę przypadku
- Pomiar hadronów o bardzo małych pędach poprzecznych
- Dostarcza szybko wyniki

Krótką historia eksperymentu PHOBOS

1990 - 1992 Zawiązanie międzynarodowej współpracy

USA: **Massachusetts Institute of Technology** (W. Busza, spokesman)

Brookhaven National Laboratory

Argonne National Laboratory

University of Illinois at Chicago

University of Rochester

University of Maryland

Polska: IFJ PAN

Tajwan: National Central University



1992 , listopad Zatwierdzenie projektu:

„Proposal to study very low- p_T phenomena at RHIC”

Historii c.d.

- 1992- 1999* *Konstrukcja detektora*
Opracowywanie programu badawczego
- 2000, 13 czerwiec* *PHOBOS rejestruje 1-e zderzenie*
Au+Au, $\sqrt{s_{NN}} = 56$ GEV
- 2000, 24 czerwiec* *PHOBOS rejestruje 1-e zderzenie*
Au+Au, $\sqrt{s_{NN}} = 130$ GEV
- 2000, 19 lipiec* *Współpraca PHOBOS wysyła do*
publikacji pierwsze wyniki fizyczne
uzyskane przy energiach RHIC
(Phys. Rev. Lett., 2000)

Historii c.d.

2001 - 2005 Zbieranie danych podczas corocznych seansów akceleratora RHIC

Ponad miliard przypadków zderzeń na taśmach
30 publikacji, w tym 11 w Phys. Rev. Lett.
(+32 publ. filadelfijskie konferencyjne)

2004, 15 maj Ogłoszenie odkrycia nowego stanu materii przez eksperymenty RHIC

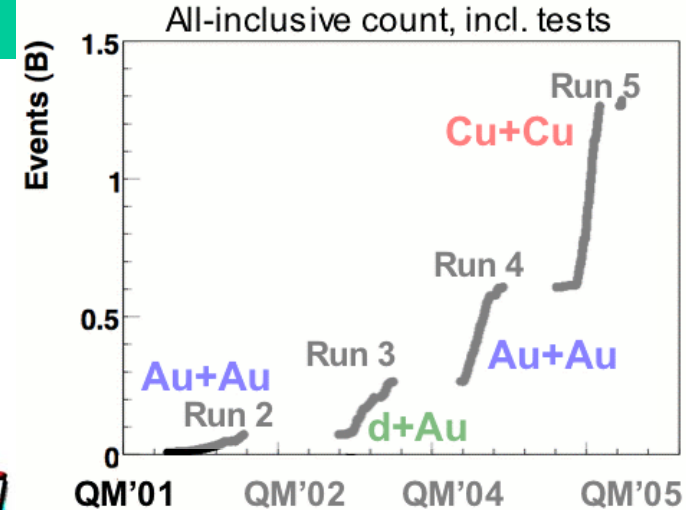
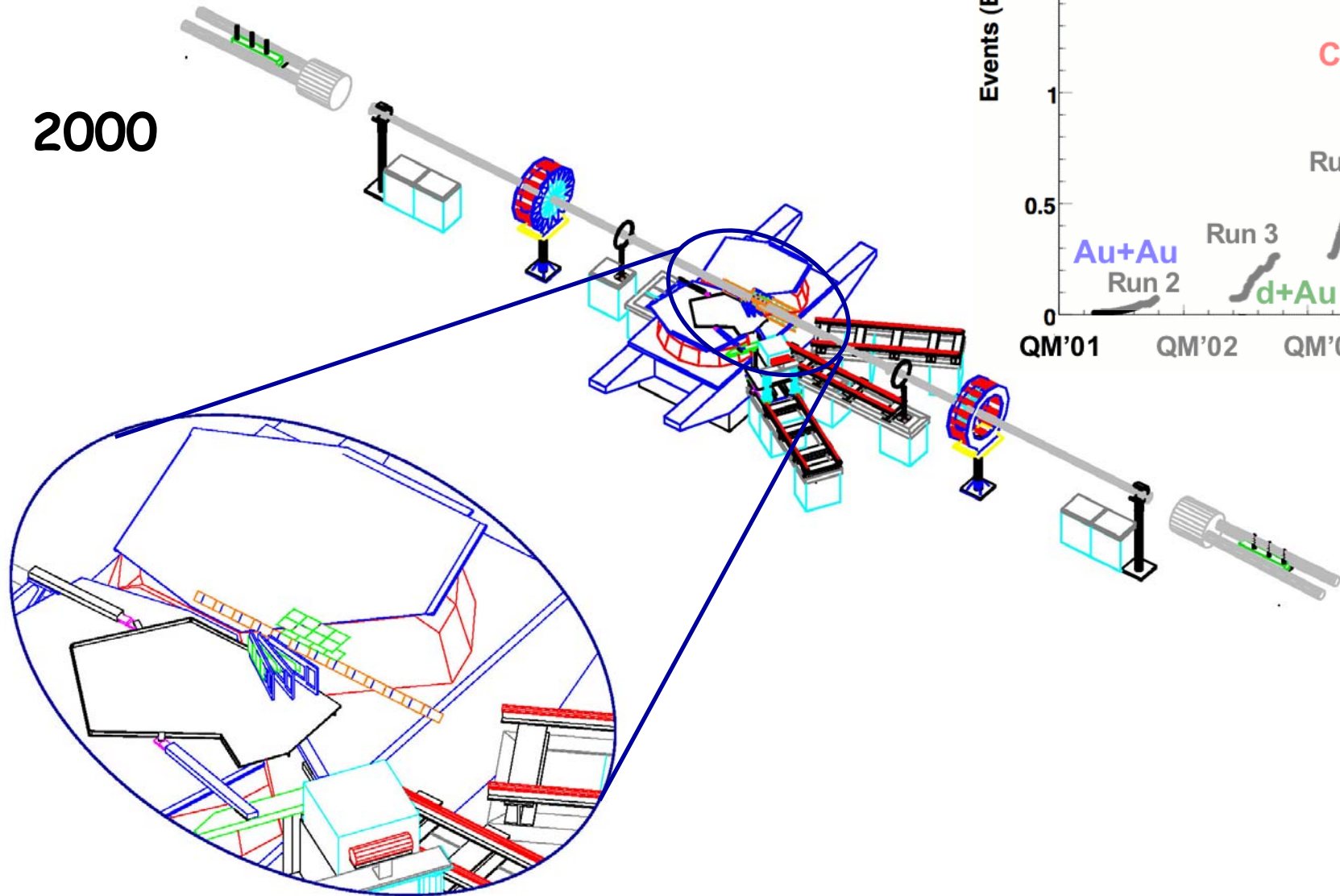
2005 → Kontynuacja analizy danych doświadczalnych

z IFJ PAN:

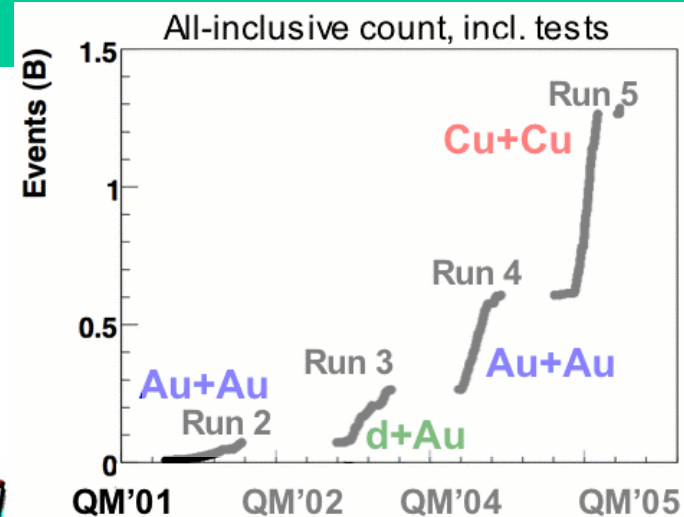
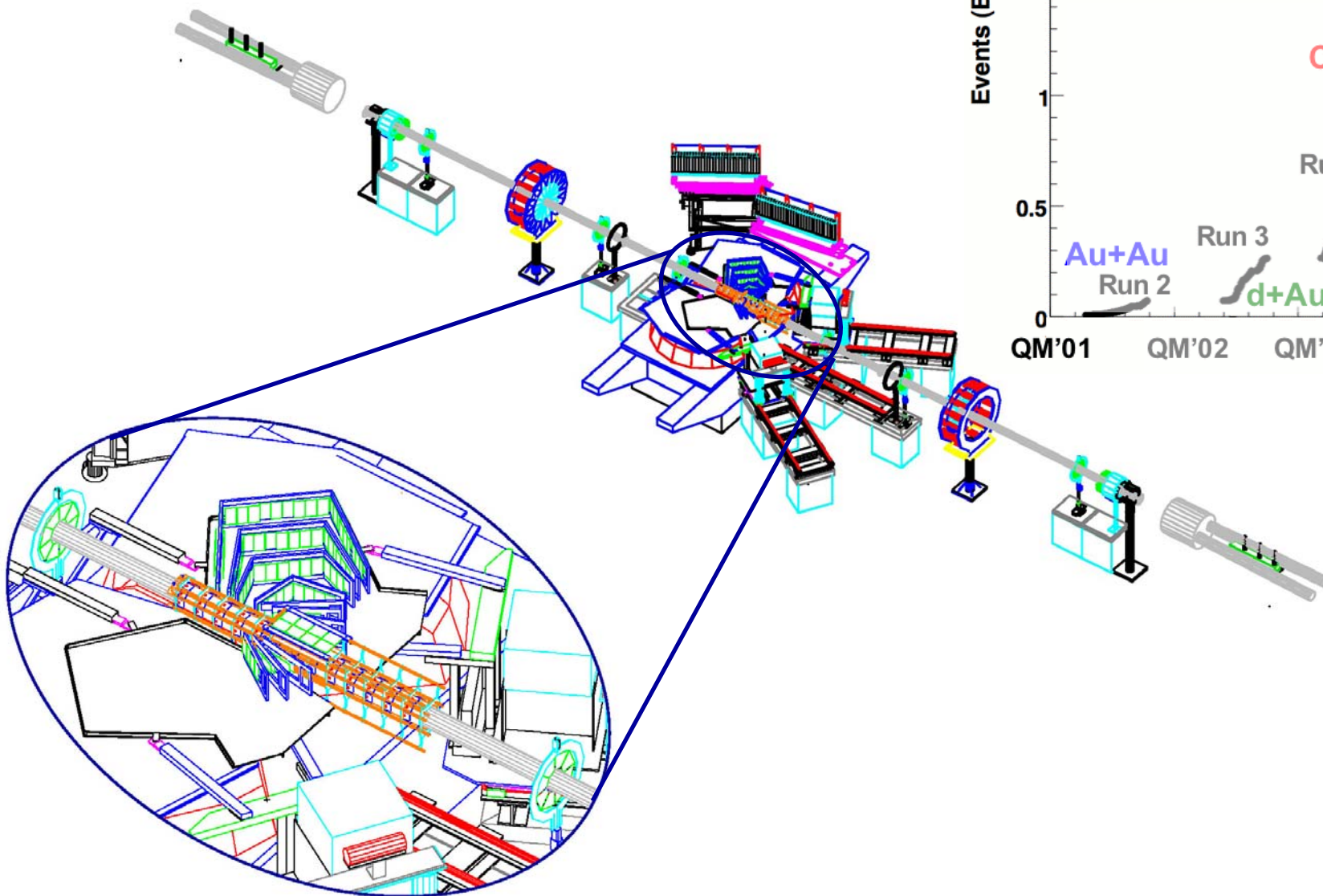
R. Hołyński, A. Olszewski, A. Trzupek, B. Wosiek, K. Woźniak, T. Gburek(SD)

Eksperyment PHOBOS - Seans inżynieryjny

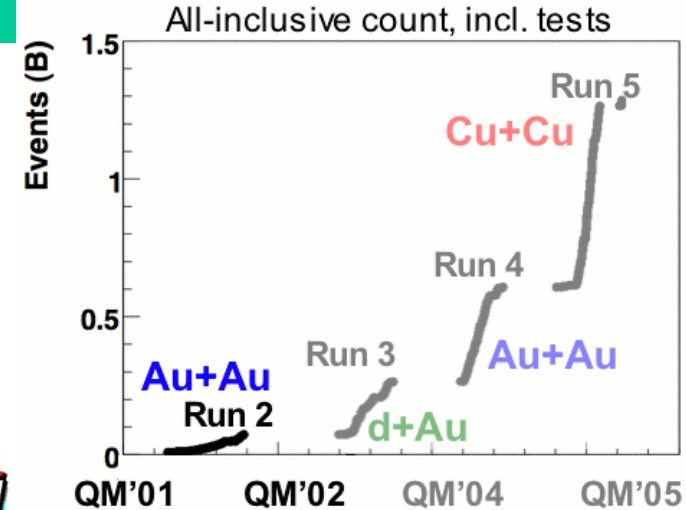
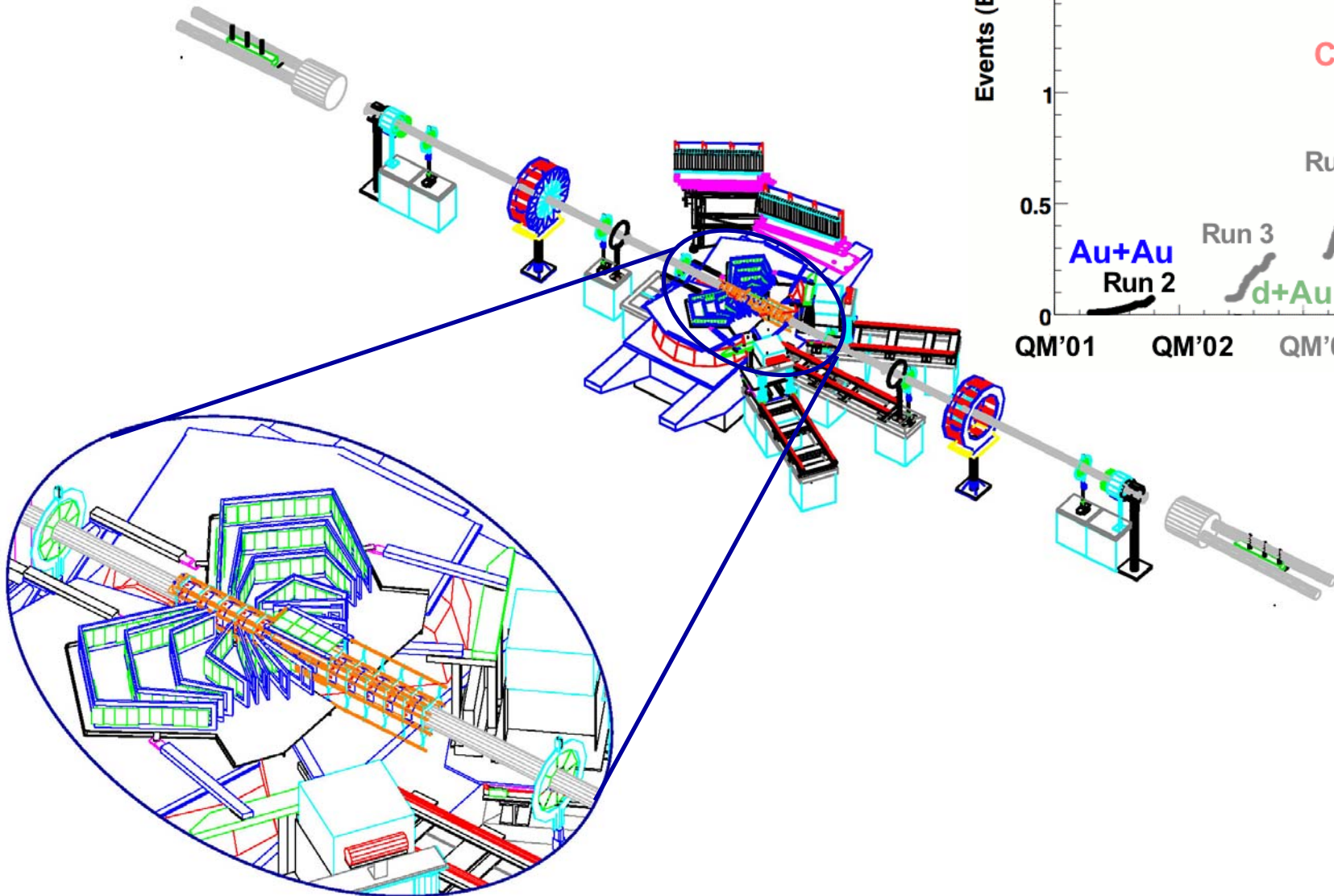
2000



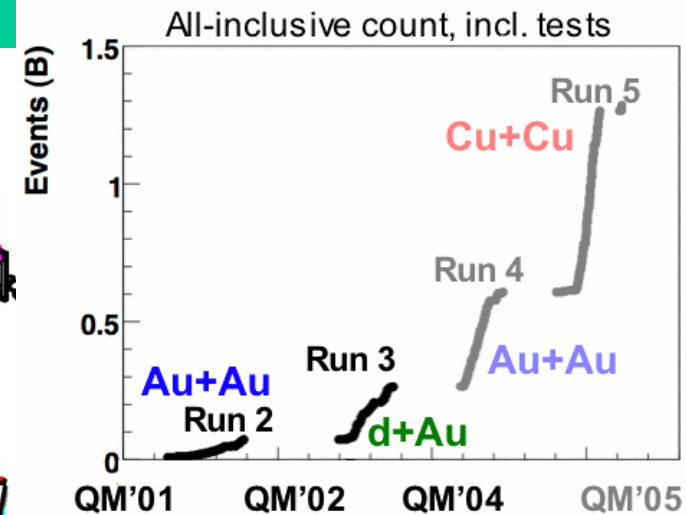
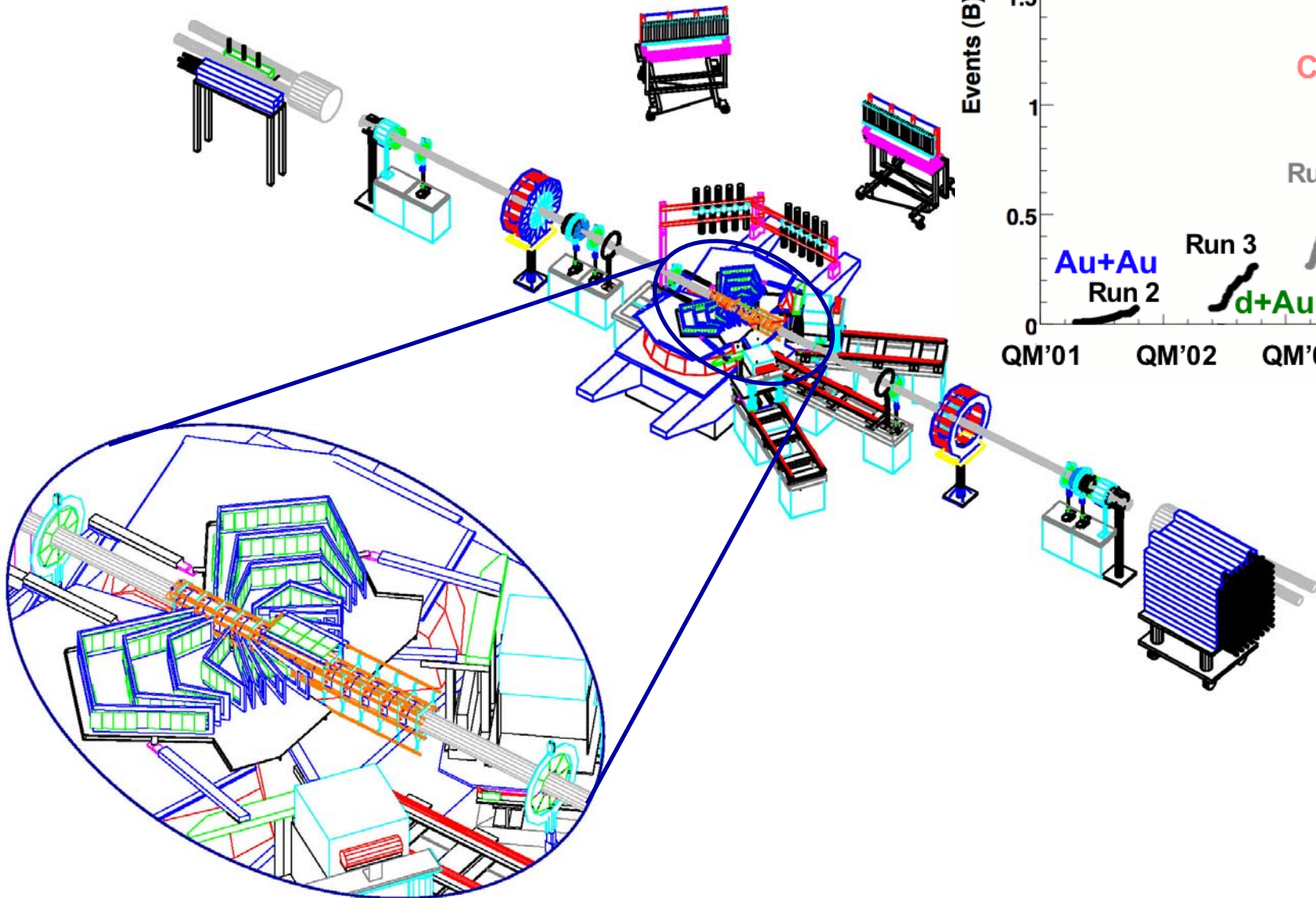
Eksperyment PHOBOS - Seans 1



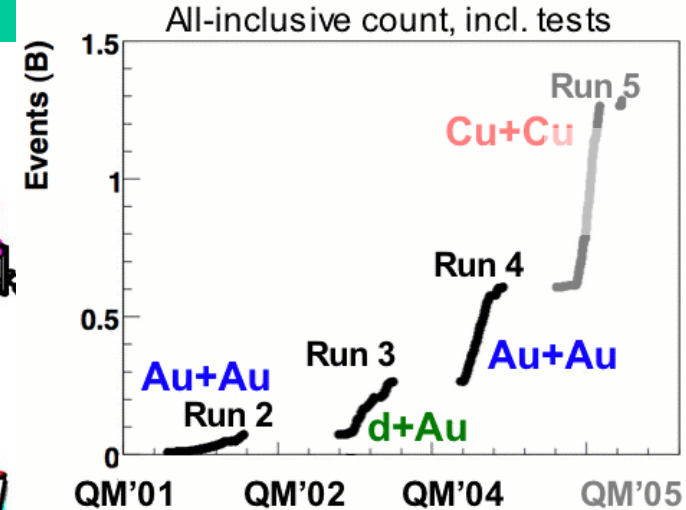
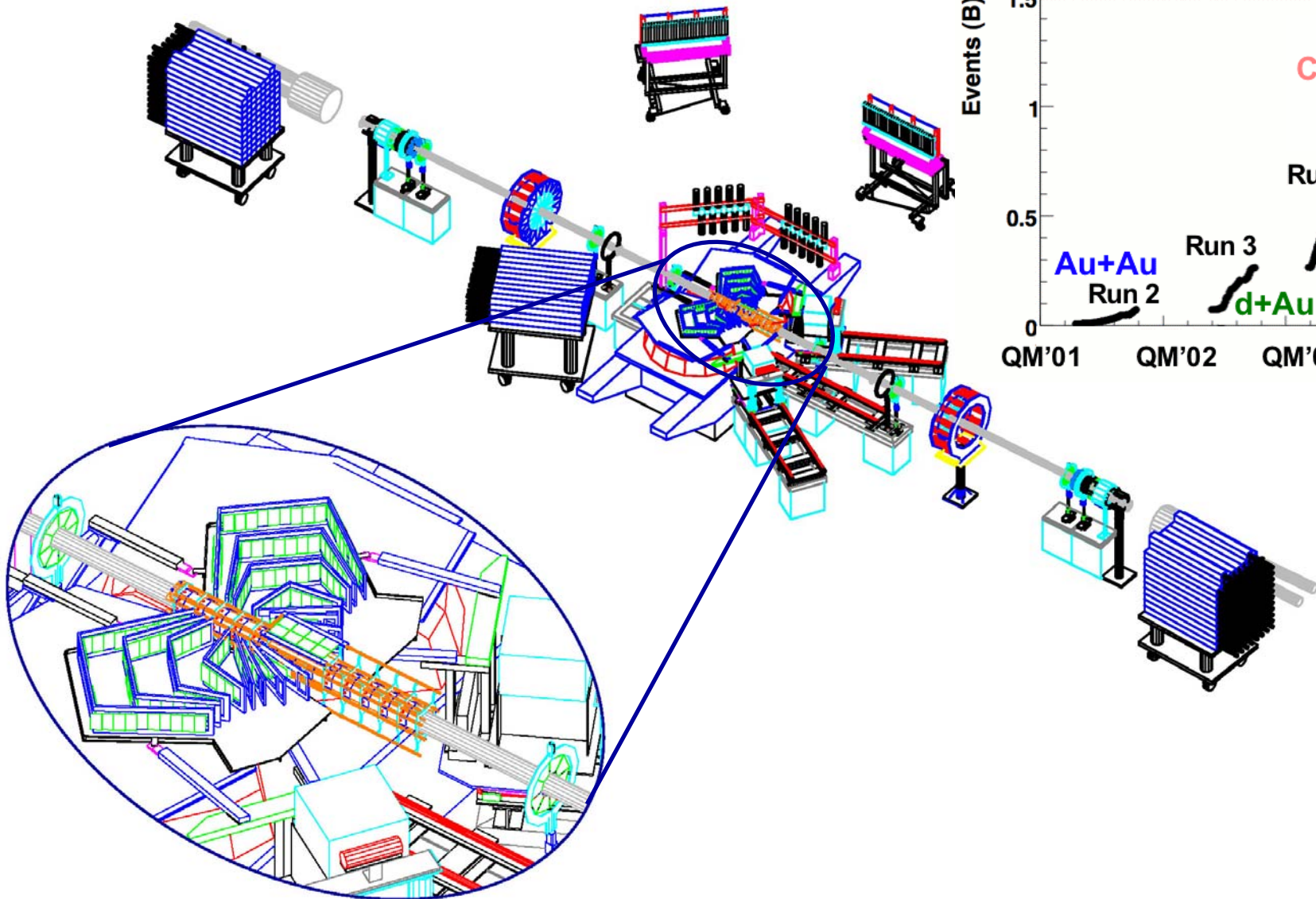
Eksperyment PHOBOS - Seans 2



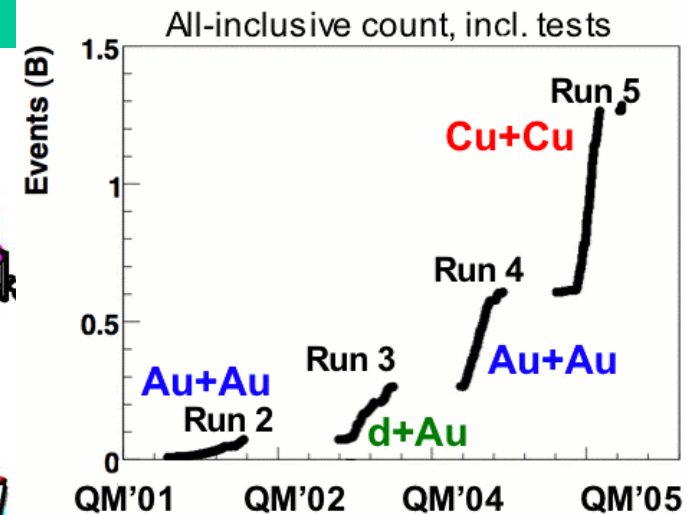
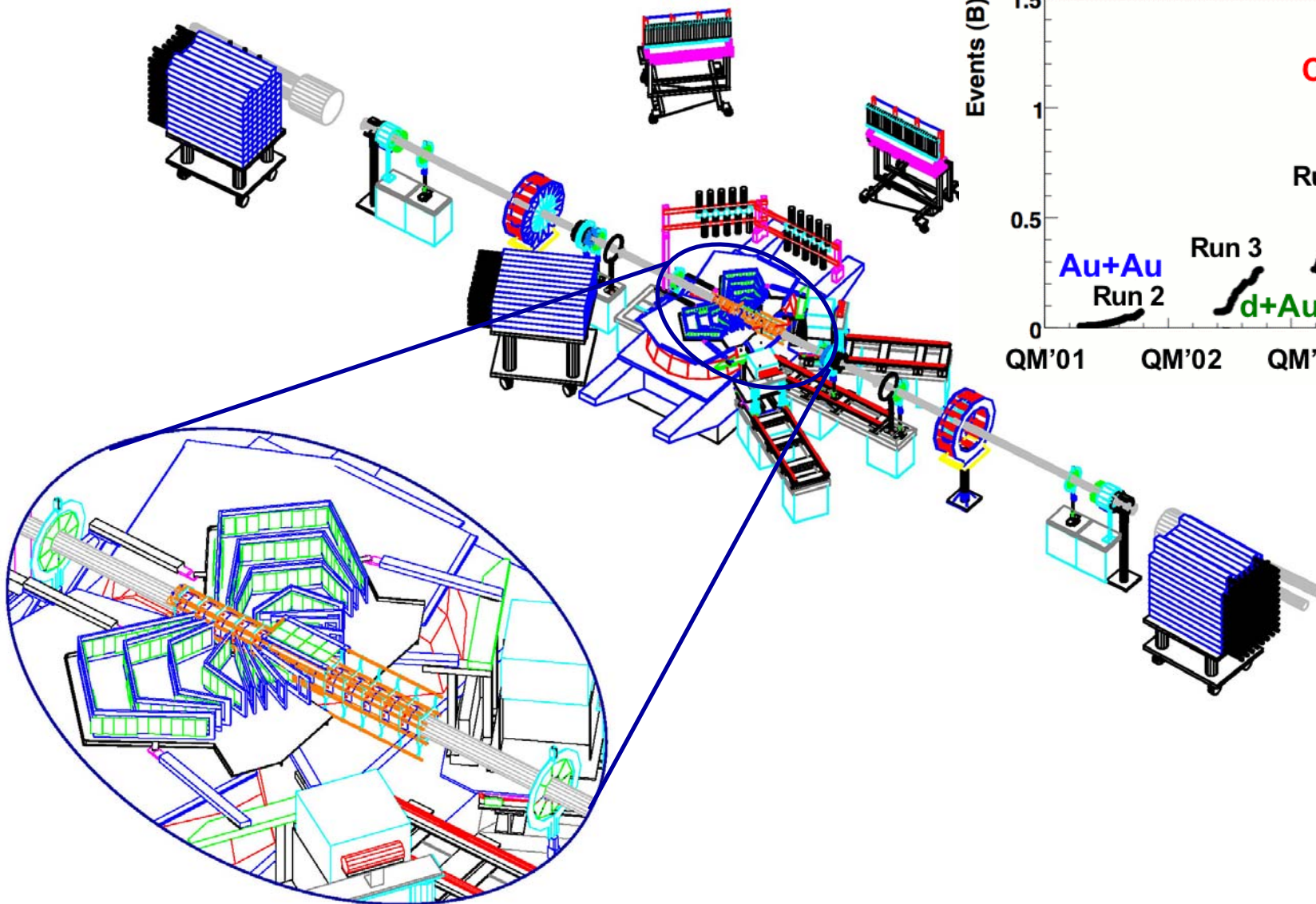
Eksperyment PHOBOS - Seans 3



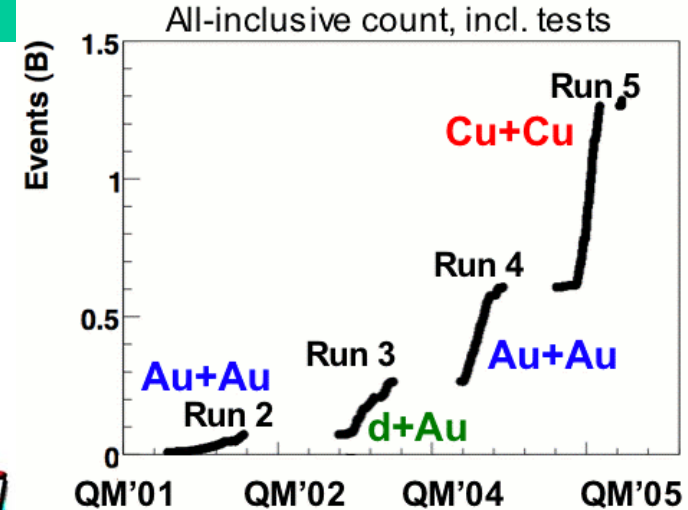
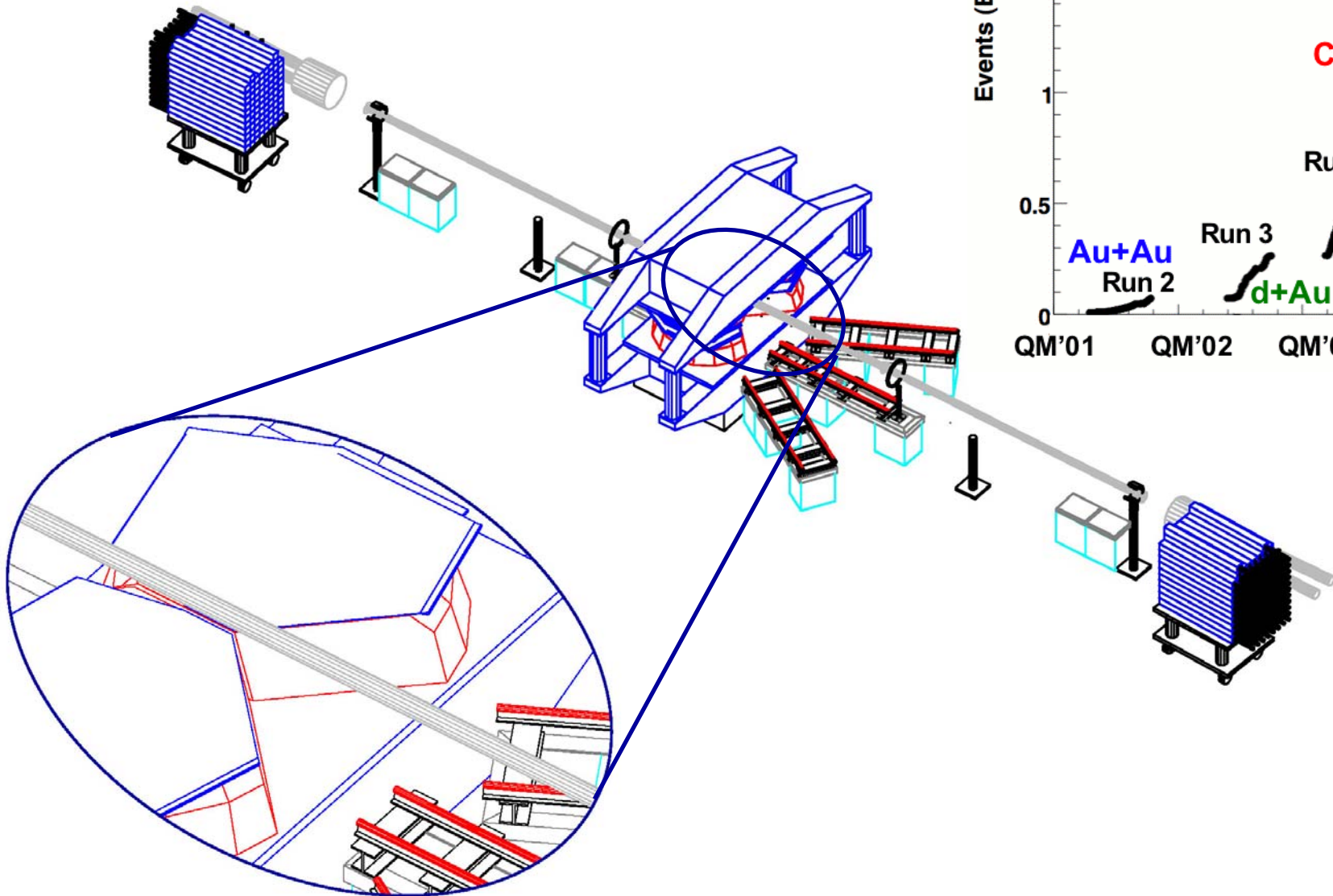
Eksperyment PHOBOS - Seans 4



Eksperyment PHOBOS - Seans 5



Eksperyment PHOBOS - Seans 6



Detektor PHOBOS

Księżyc MARS'a (a Modular Array for RHIC Spectra)

Cerenkov Trigger Counters

Time of Flight Counters

Octagon Multiplicity Detector
+ Vertex Detector (Silicon)

Spectrometer Detectors (Silicon)

Ring Multiplicity Detectors

Beryllium Beam Pipe

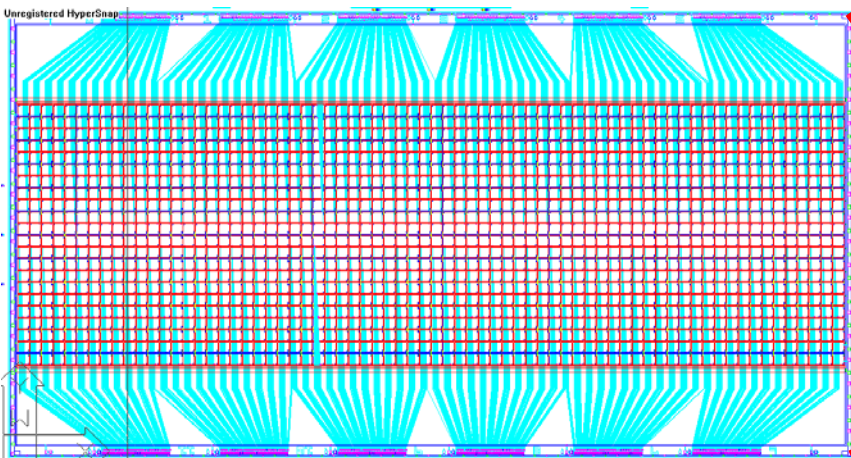
Ring Multiplicity Detectors
(Silicon)

Magnet (top part removed)

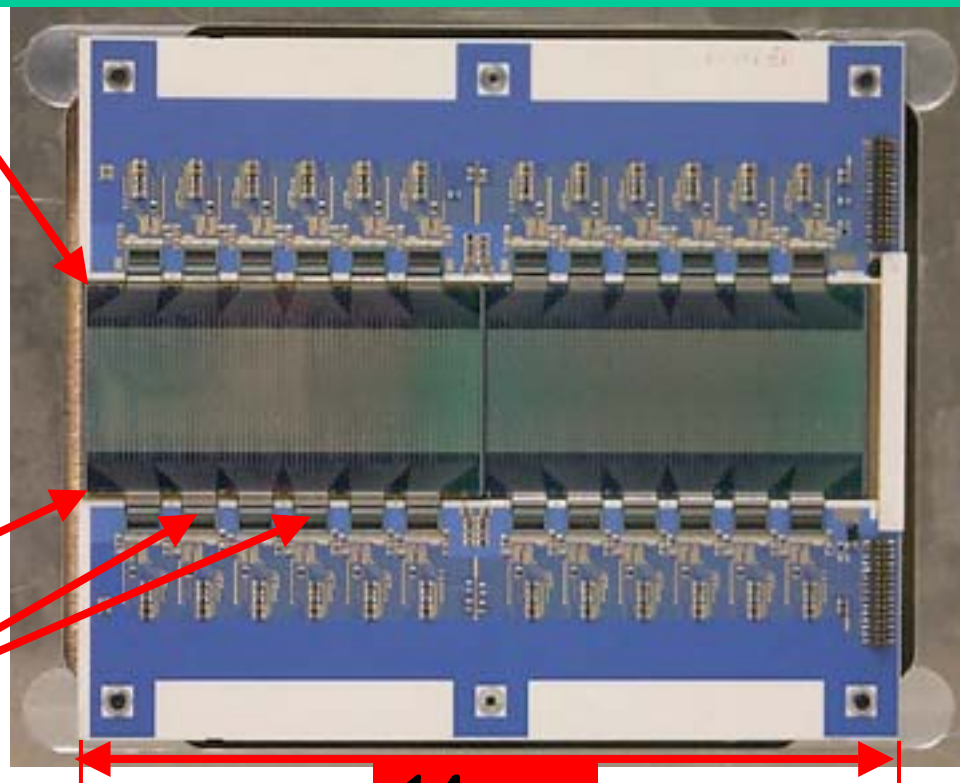
Paddle Trigger Counters

Komórkowe detektory krzemowe

Typowy schemat



Elektronika odczytu
IDE VA-HDR1 (chips)

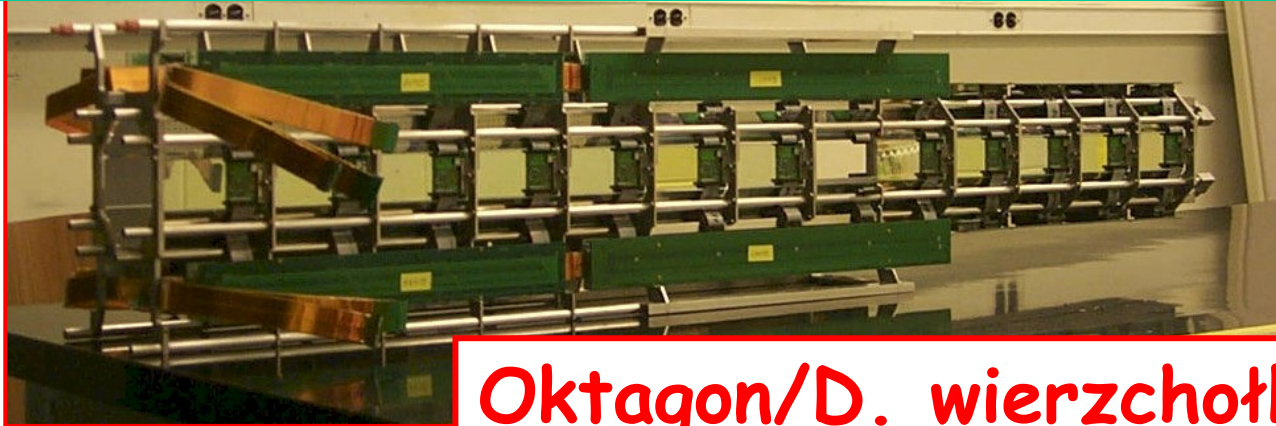


14 cm

- Duży zakres dynamiczny (> 100 MIPs)
- Czas odczytu 1.1 μ s
- Rozmiary komórek Si

D. oktagonalny: $2.7 \times 8.8 \text{ mm}^2$
D. wierzchołka: $0.5 \times (12-24) \text{ mm}^2$
D. pierścieniowy: $(5 \times 5) - (10 \times 10) \text{ mm}^2$
Spektrometr: $(1 \times 1) - (0.5 \times 19) \text{ mm}^2$

Wszędzie krzem!

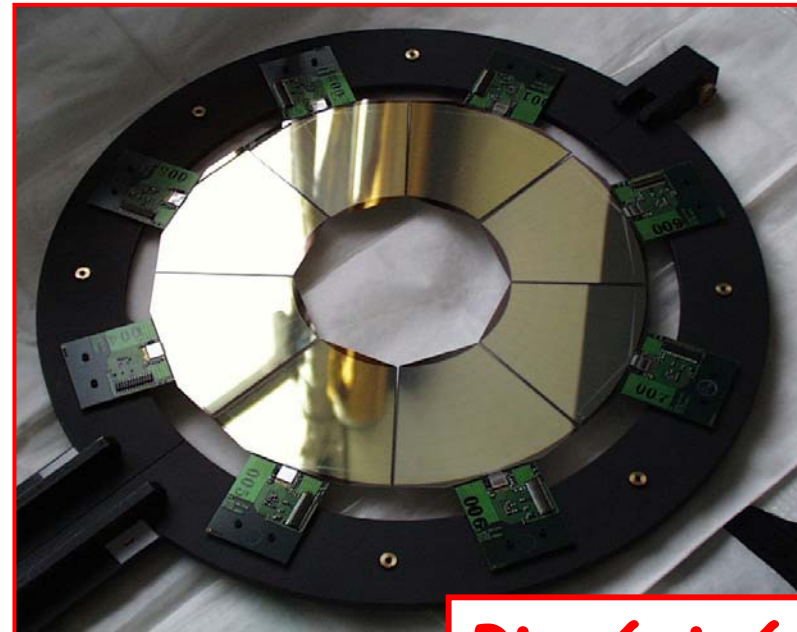


Oktagon/D. wierzchołka

137,000
kanałów
elektroniki
odczytu



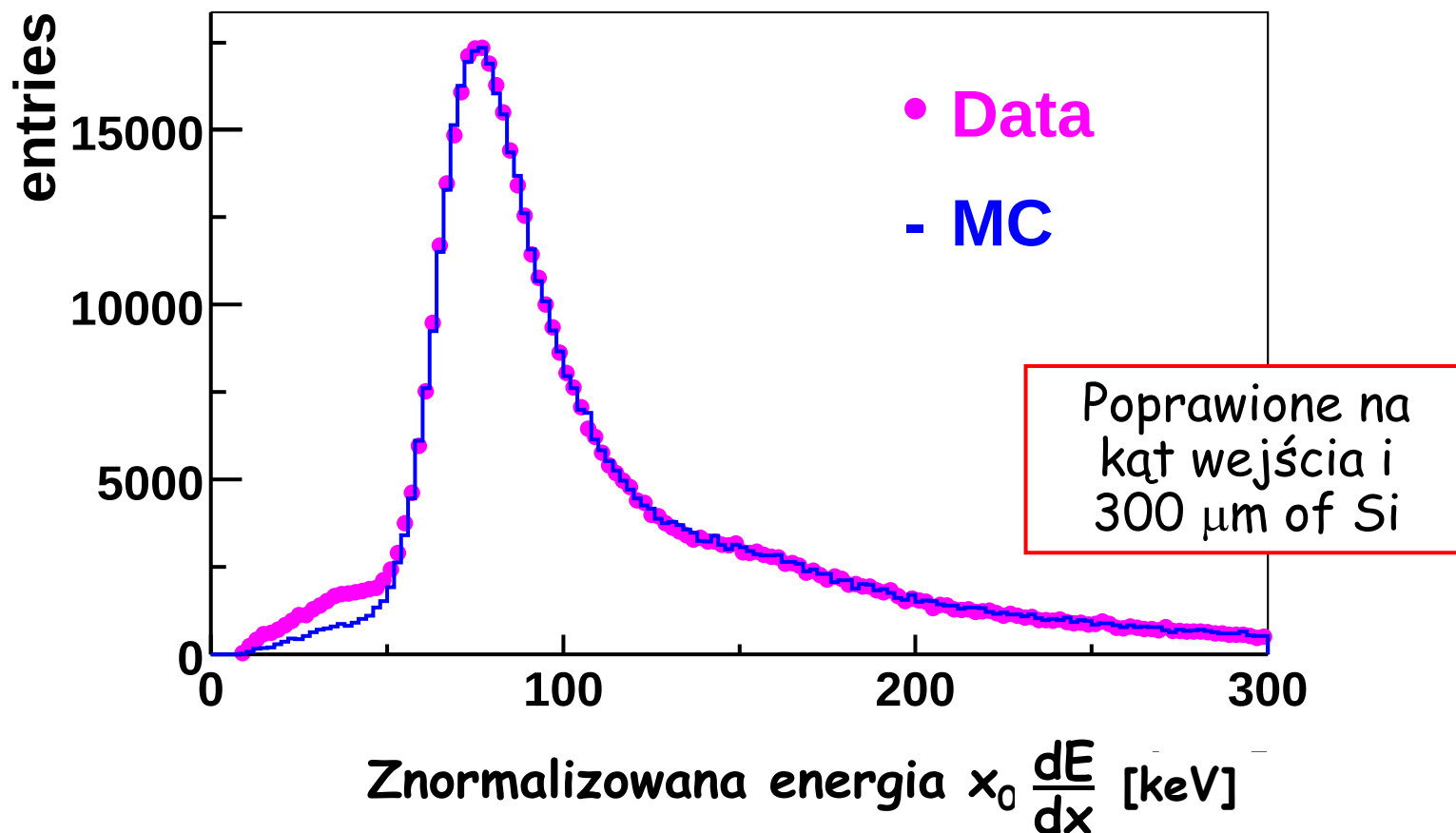
Ramię spektrometru



Pierścień

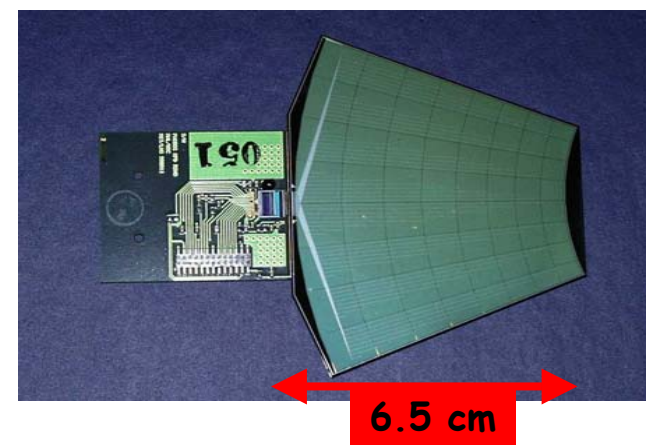
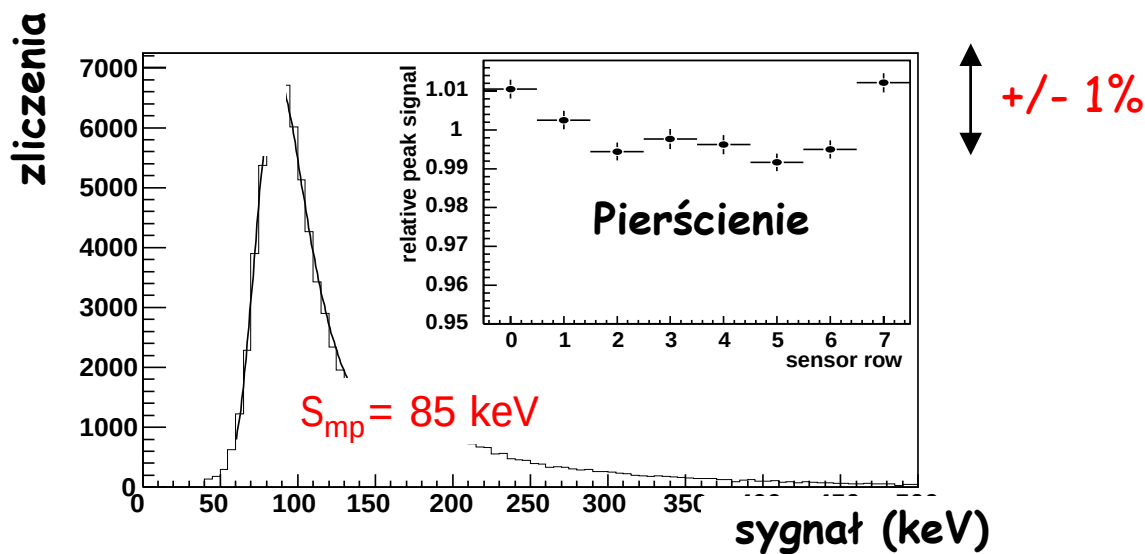
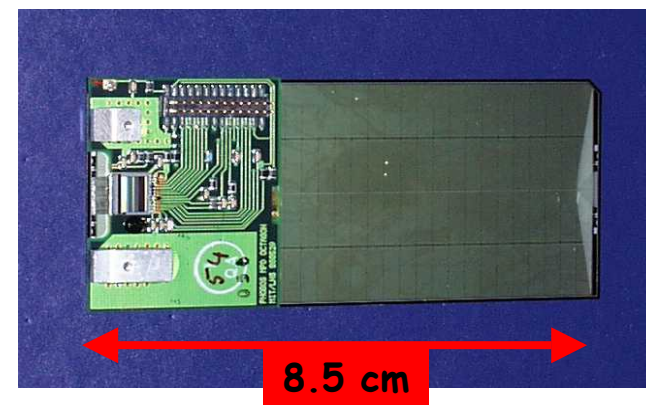
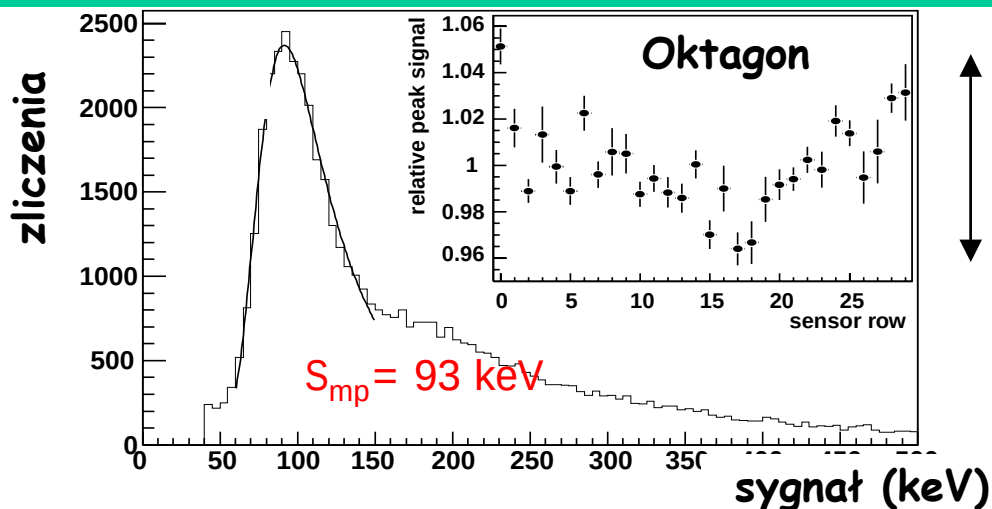
Symulacje sygnałów z detektorów Si

Sygnał z detektora wierzchołka



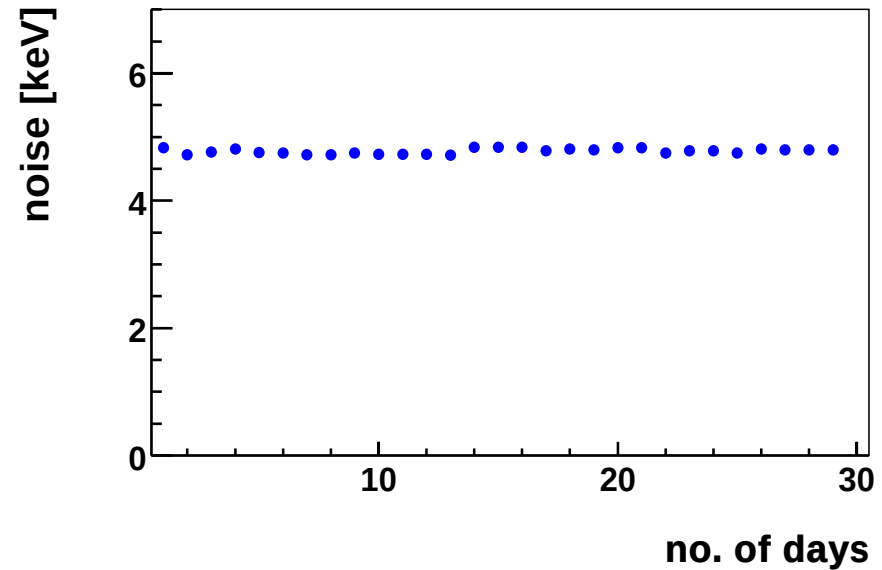
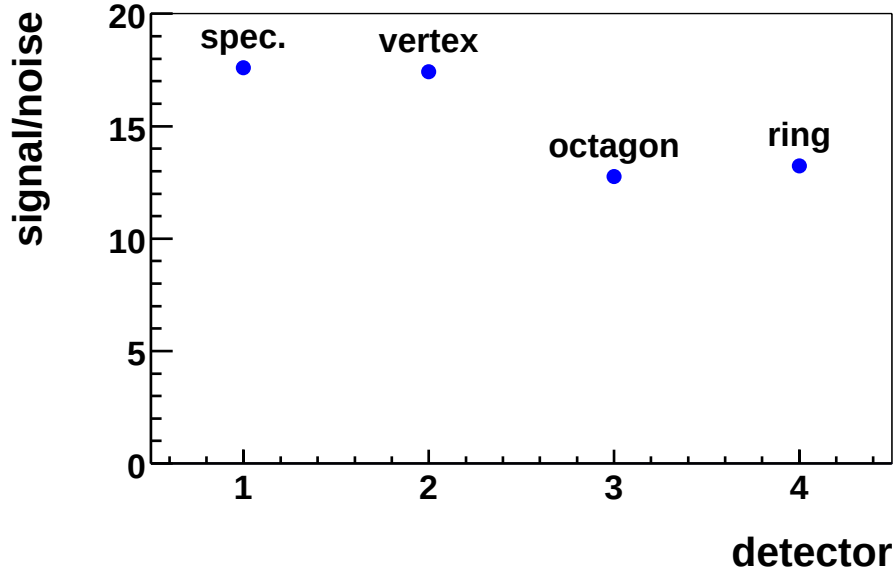
➤ Pełne zrozumienie sygnałów z detektora na najbardziej podstawowym poziomie

Jednorodność sensorów



Brak znaczących zmian sygnału dla różnych typów sensorów krzemowych

Stosunki sygnału do szumu S/N

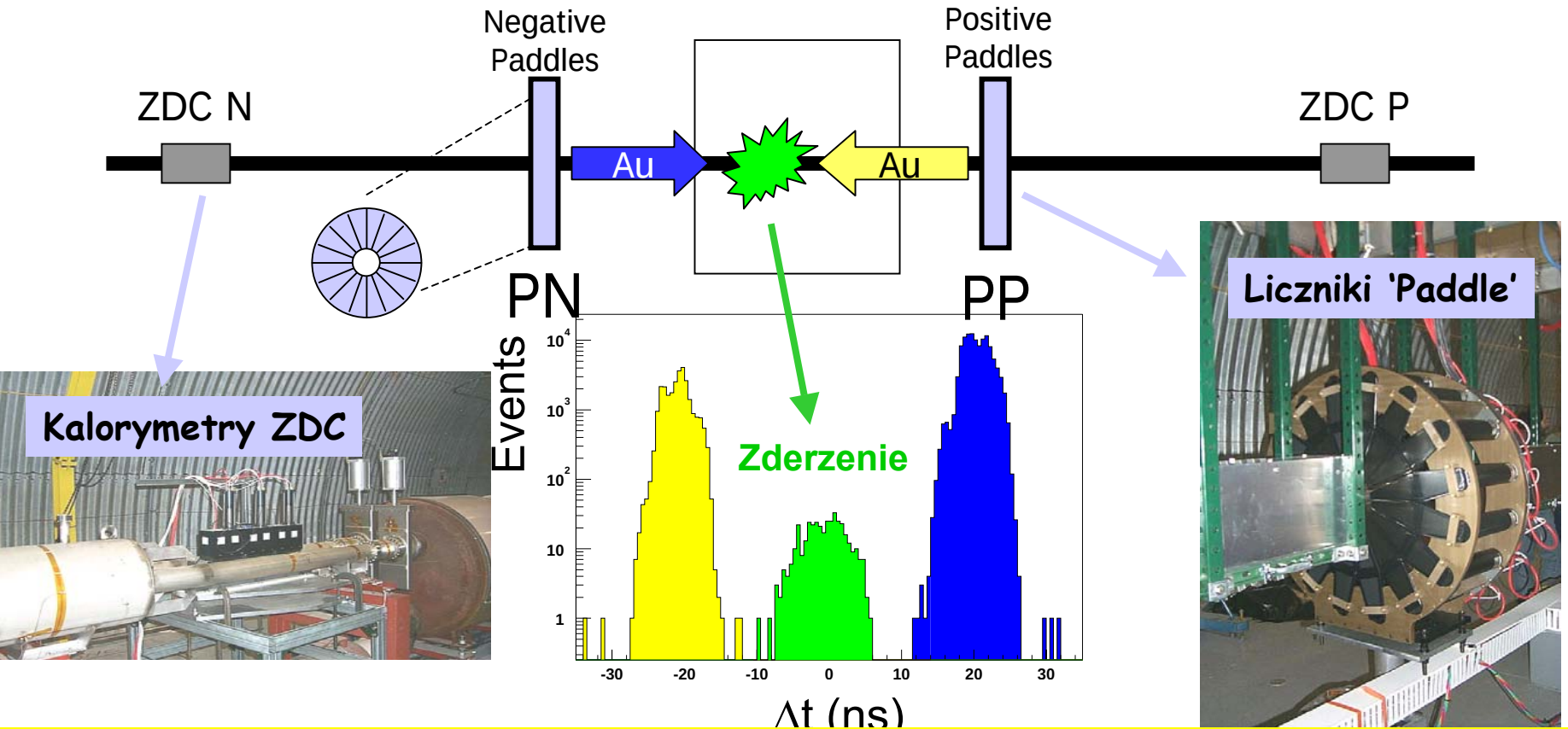


- Stosunki S/N lepsze niż planowane 10:1
- Większe komórki & 'dłuższy' odczyt $\Rightarrow$ mniejszy S/N
- Średni szum w całym detektorze nie zmienia się z czasem

Selekcja przypadków

- Tryger: 'hardware'
 - Czasowe i topologiczne selekcje (np. koincydencje) podczas zbierania danych
- Tryger: 'software'
 - Szczegółowe cięcia na zmiennych czasowych, topologicznych, krotności sygnałów, itp.
- Selekcja 'offline' - rekonstrukcja
 - Wierzchołek oddziaływania - Czy jest to dobry przypadek?
 - Centralność zderzenia - Czy jest to przypadek z dostatecznie małym parametrem zderzenia?

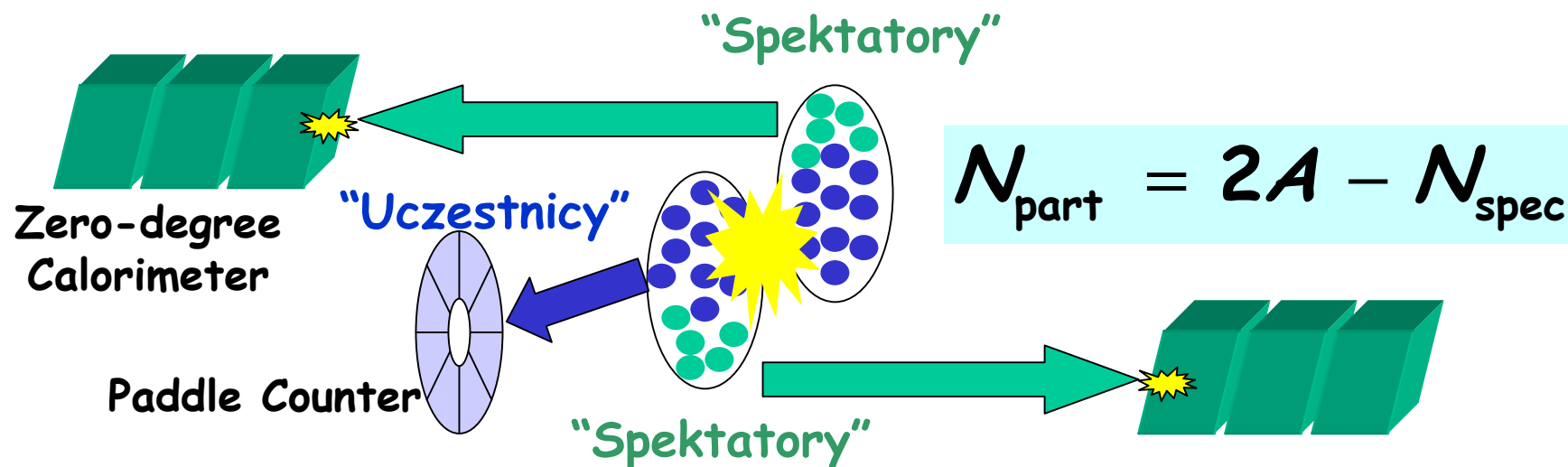
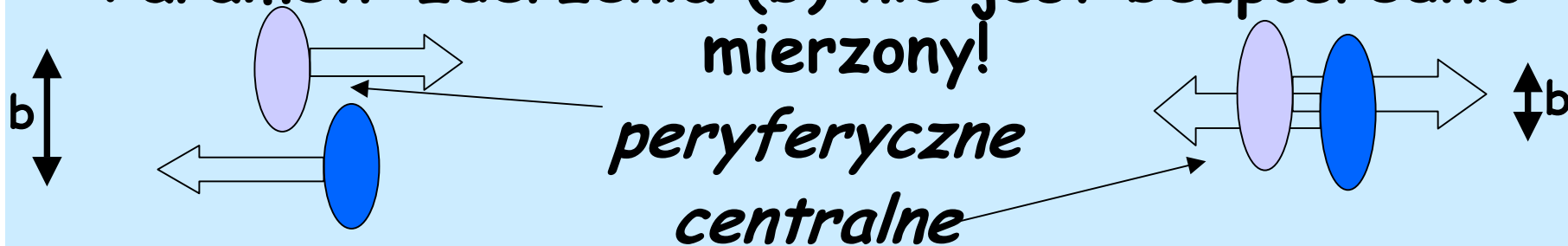
Selekcja przypadków



- Koincydencja czasowa (38 ns) pomiędzy licznikami 'Paddle'
- Koincydencje czasowe 'Paddle' + ZDC: odrzucenie tła
- Selekcja 97% nieelastycznego przekroju czynnego dla Au+Au przy $\sqrt{s_{NN}} = 130/200 \text{ GeV}$

Pomiar centralności zderzenia

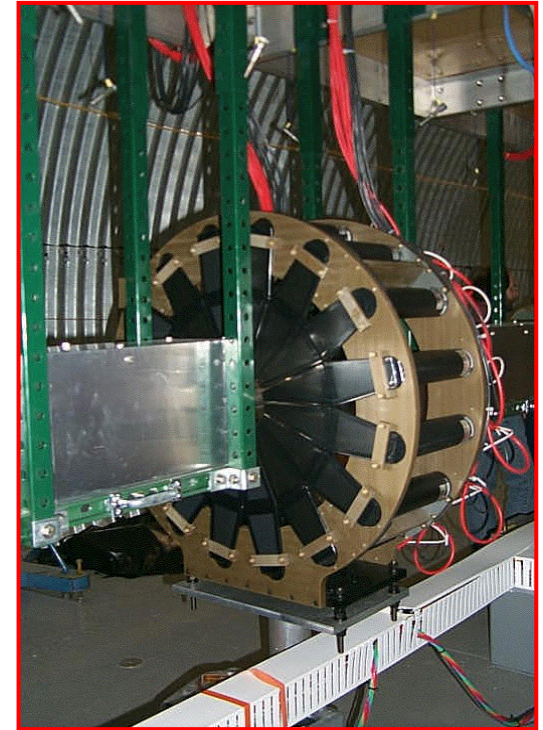
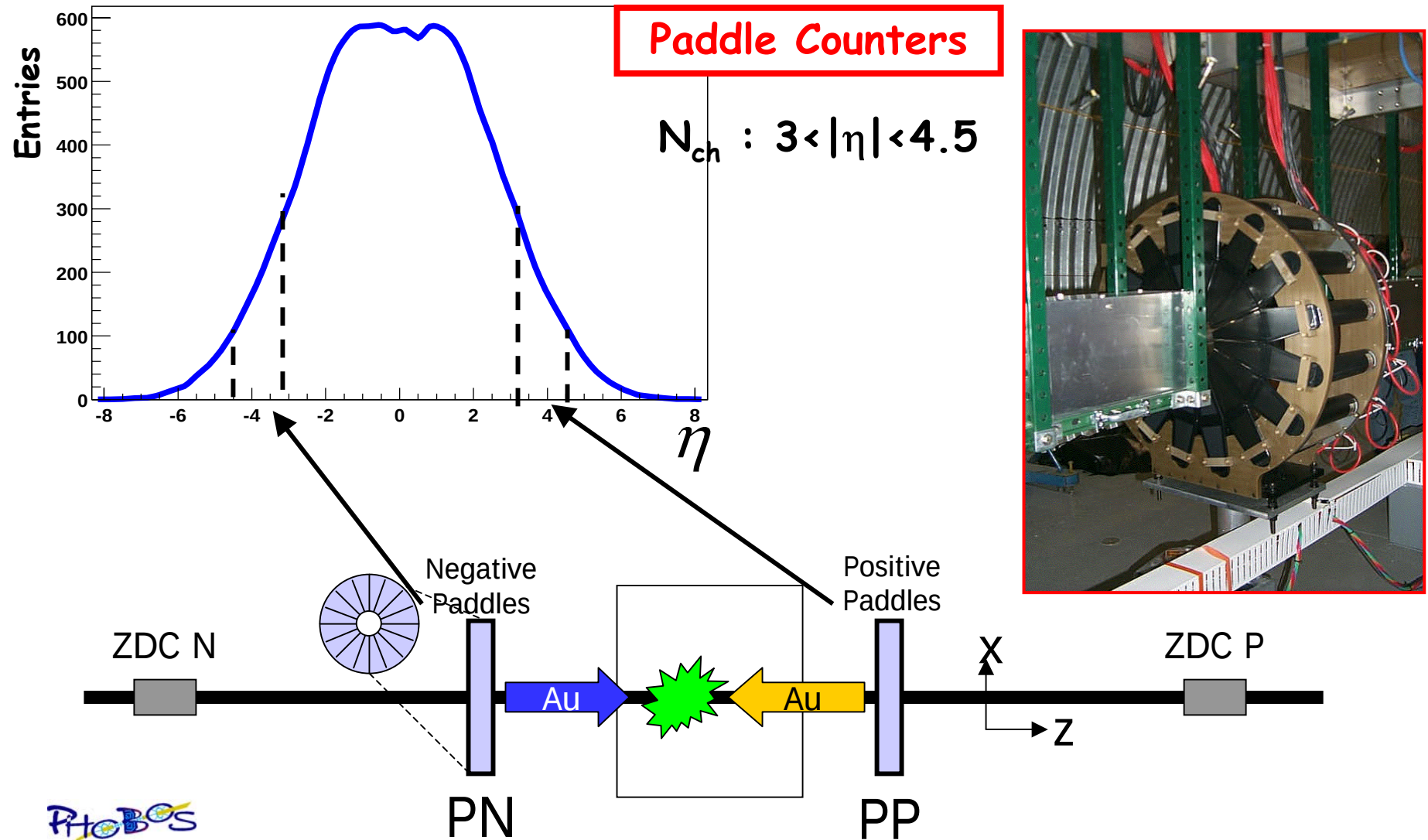
Parametr zderzenia (b) nie jest bezpośrednio mierzony!



spektatory – badane przy pomocy kalorymetrów 0°

uczestnicy – ocena w oparciu o monotoniczną korelację z liczbą produkowanych cząstek

Centralność a pomiar cząstek w licznikach scyntylacyjnych ('Paddle')



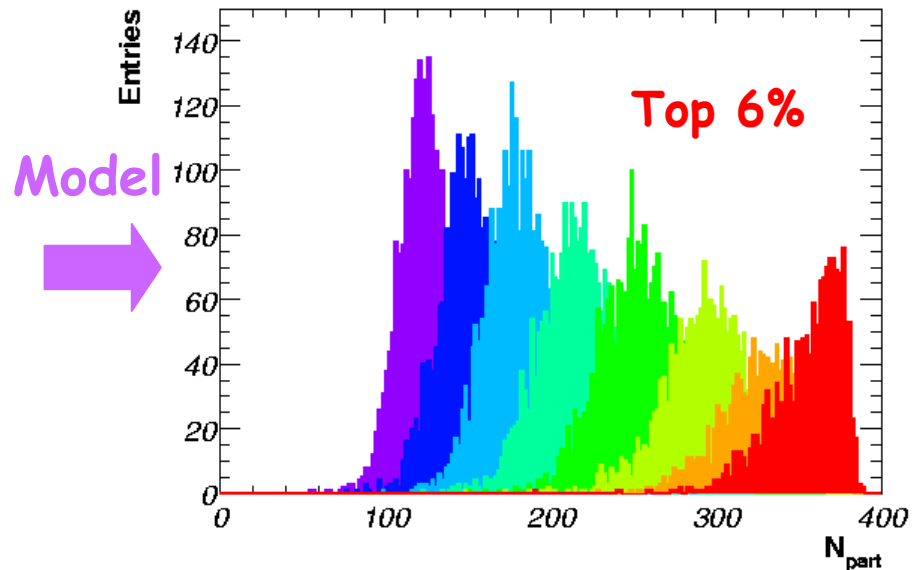
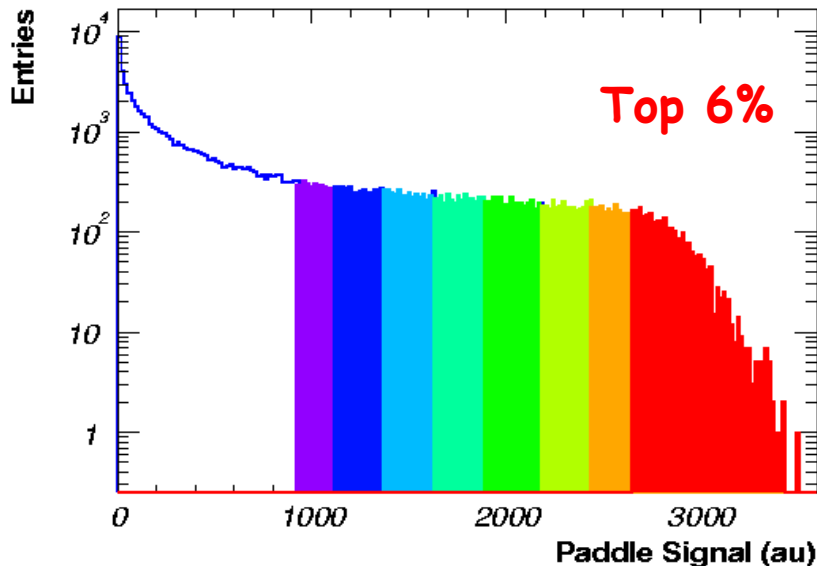
Założenia

monotoniczna relacja (w średniej) pomiędzy

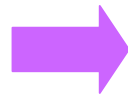
$X(b, N_{\text{part}}, N_{\text{spec}}, N_{\text{coll}})$ a mierzoną wielkością M
 $(N_{\text{ch}}(\Delta\eta)) d\langle X \rangle / d\langle M \rangle > 0$ (lub < 0) dla wszystkich wartości $\langle M \rangle$

Określony procent przypadków wybranych z rozkładu dN_{ev}/dM powinien odpowiadać $\langle X \rangle$ dla tego samego procentu przypadków

$\% \sigma(dN_{\text{ch}} \text{ sygnał}) \longrightarrow \% \sigma(N_{\text{part}})$



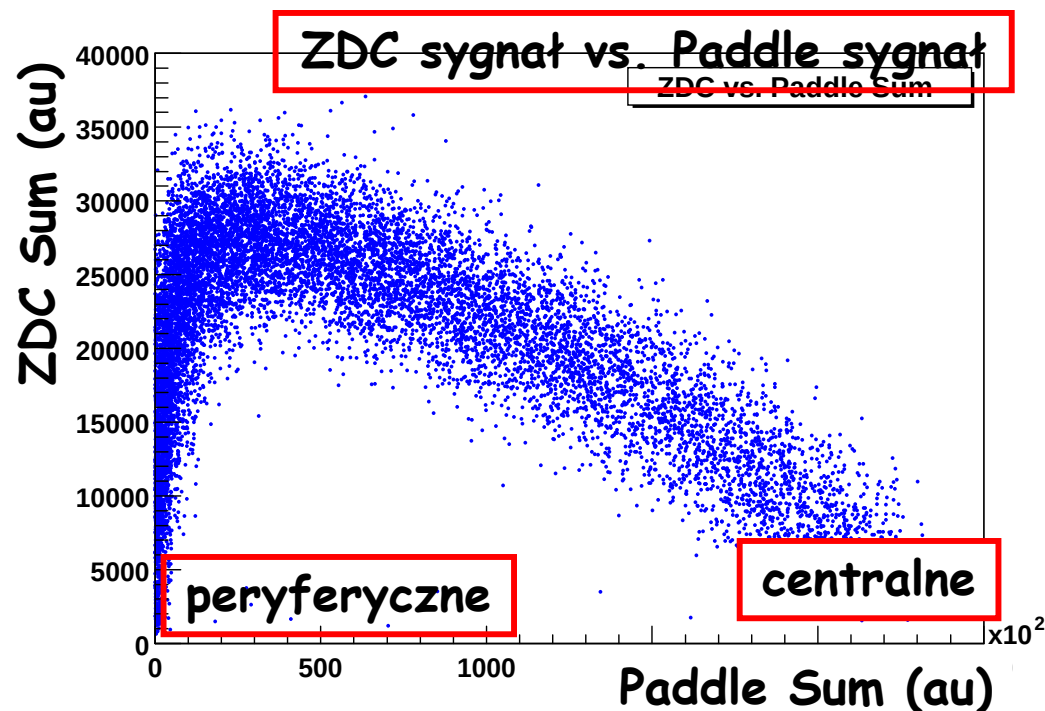
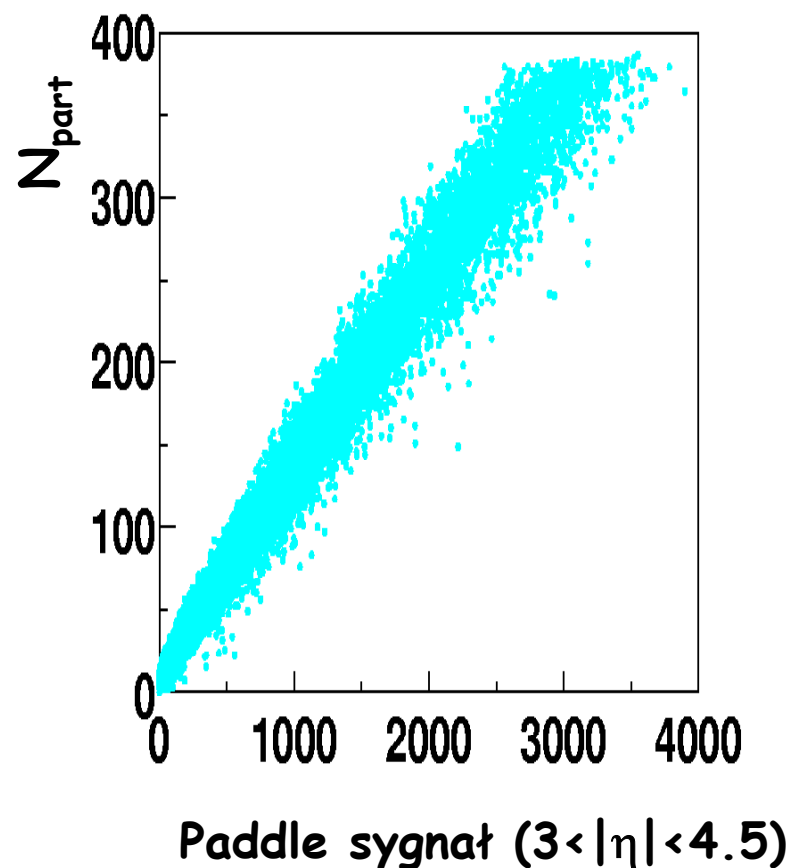
Model



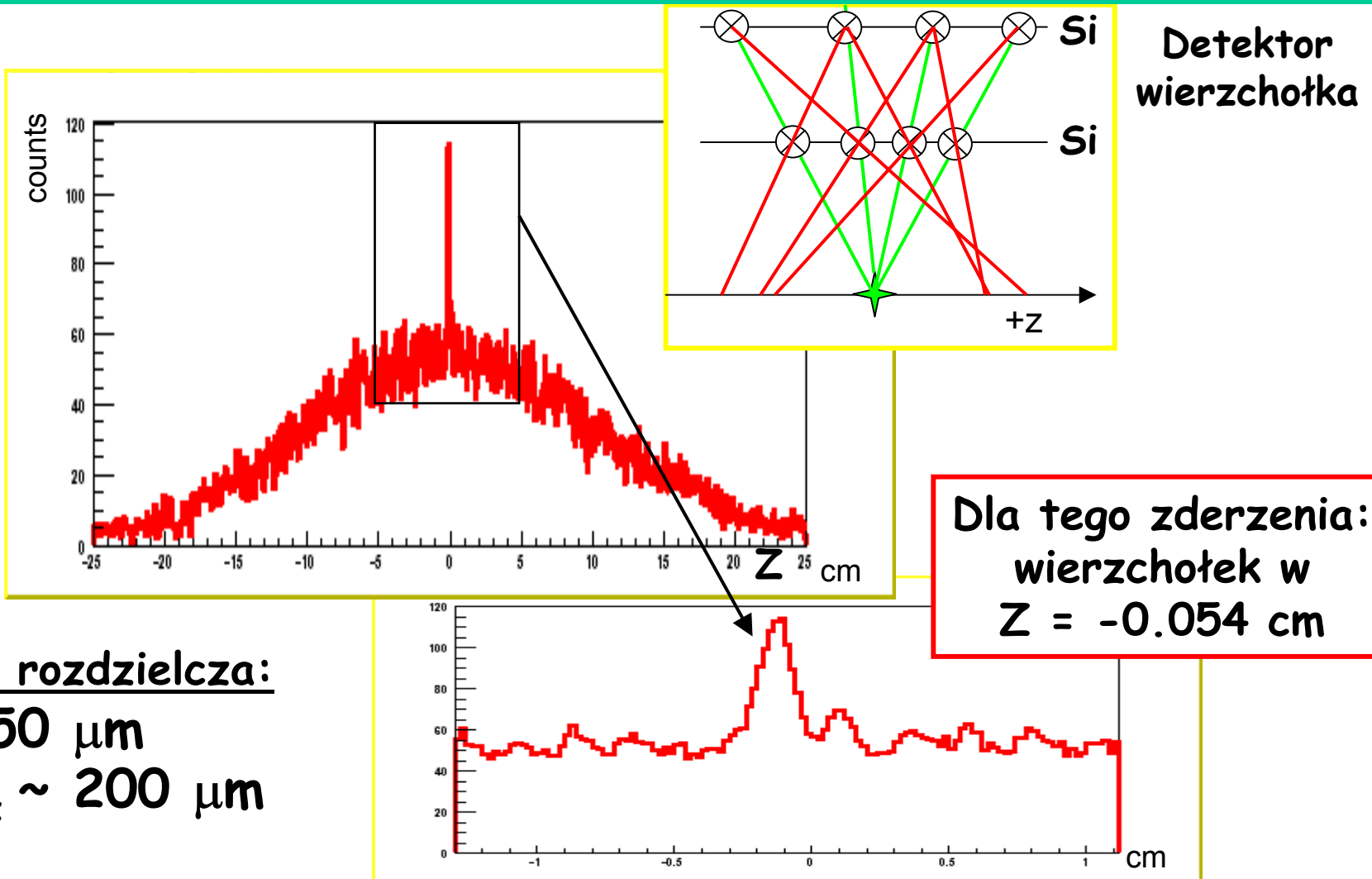
Potwierdzenie monotonicznej zależności

DANE (spektatory neutronowe)

MC HIJING + GEANT



Wyznaczanie wierzchołka oddziaływania



Zdolność rozdzielcza:

$$\sigma_x \sim 450 \mu\text{m}$$

$$\sigma_y \sim \sigma_z \sim 200 \mu\text{m}$$

Dane z eksperymentu PHOBOS

Liczby przypadków zapisanych na taśmę w milionach:

$\sqrt{s_{NN}}(\text{GeV})$	p+p	d+Au	Cu+Cu	Au+Au
410	20			
200	100	150	400	250
130				4.3
62.4			110	22
55.9				1.8
22.5			20	
19.6				~1

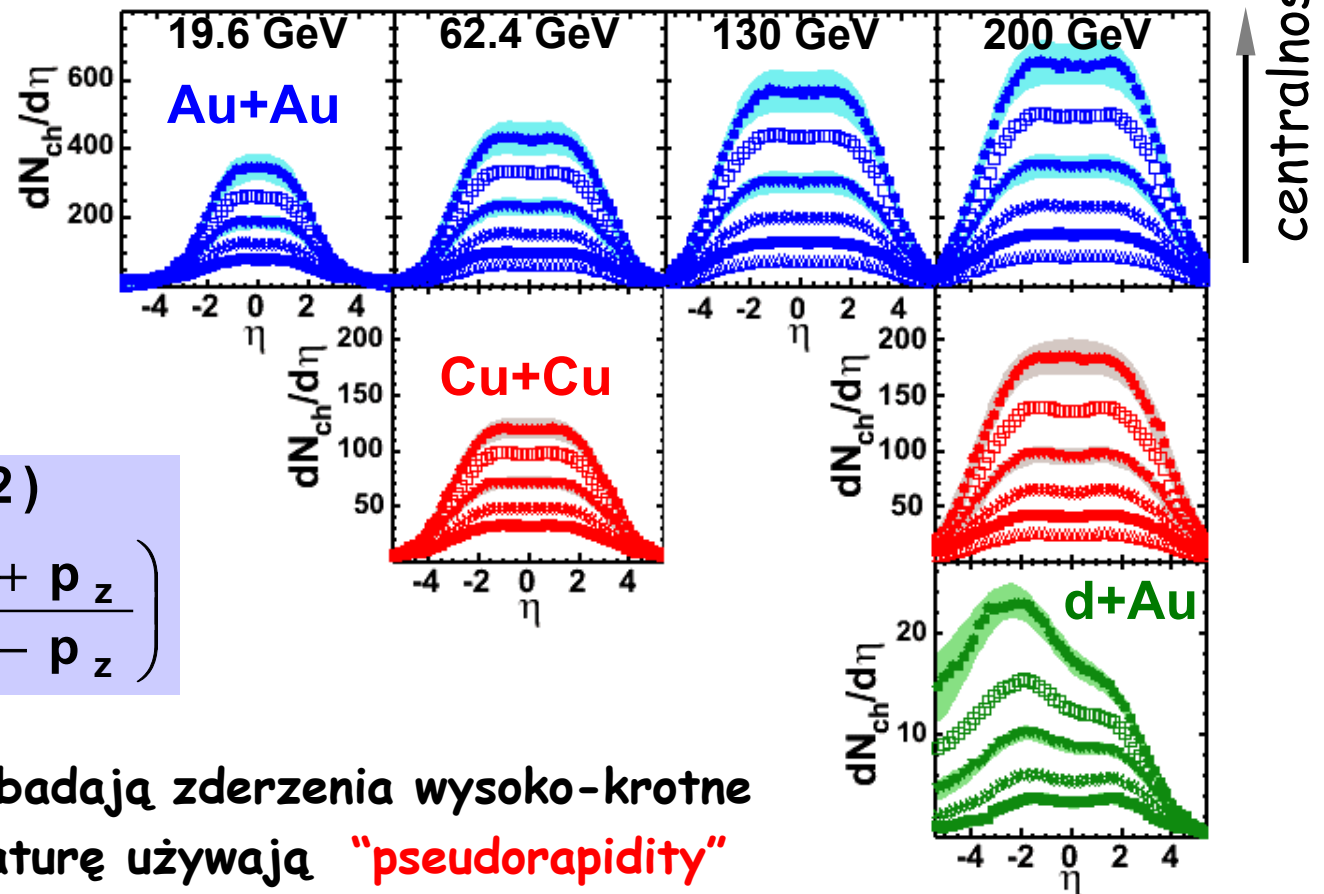
Dane z eksperymentu PHOBOS

Podłużne charakterystyki naładowanych cząstek badane w funkcji pseudorapidity, η :



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

$$\eta \approx y \equiv \frac{1}{2} \ln \left(\frac{E + p_z}{E - p_z} \right)$$

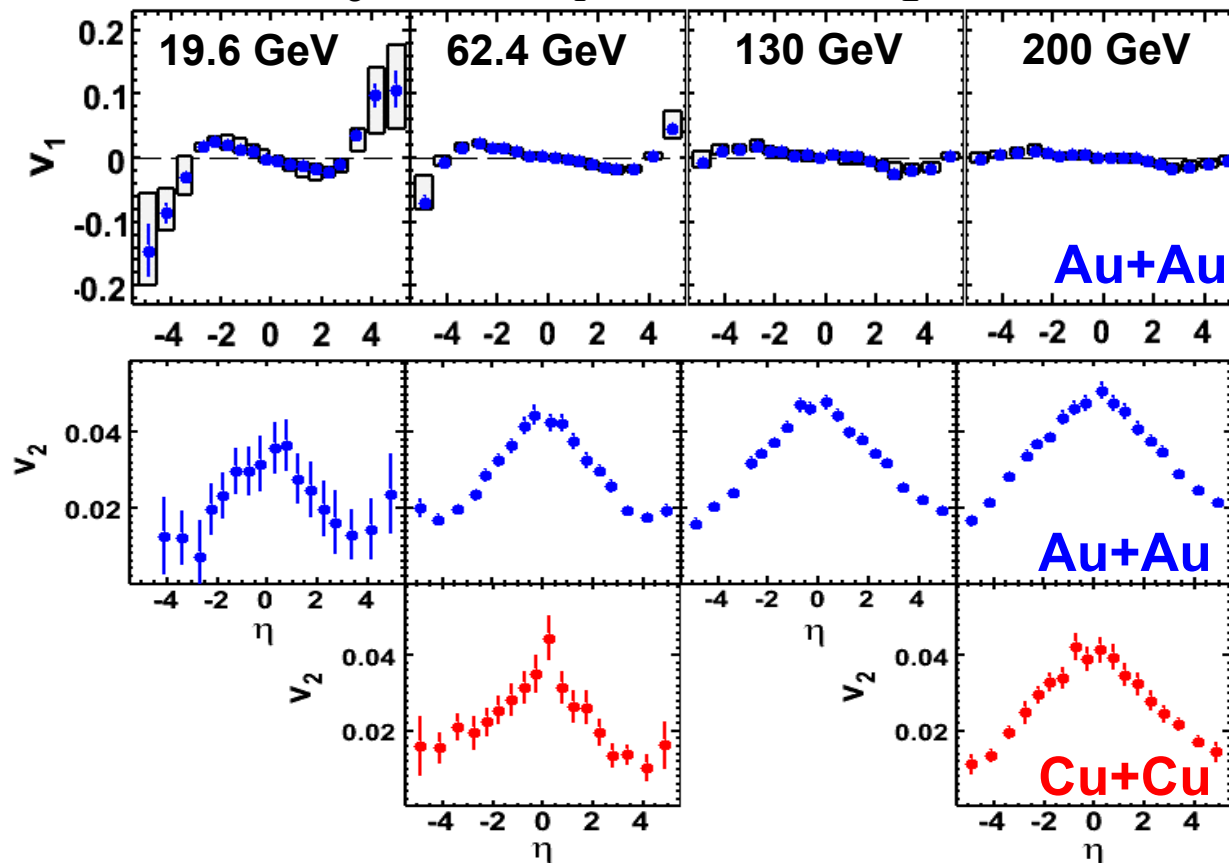


Eksperymenty, które badają zderzenia wysoko-krotne lub mają 'ubogą' aparaturę używają "pseudorapidity"

Dane z eksperymentu PHOBOS

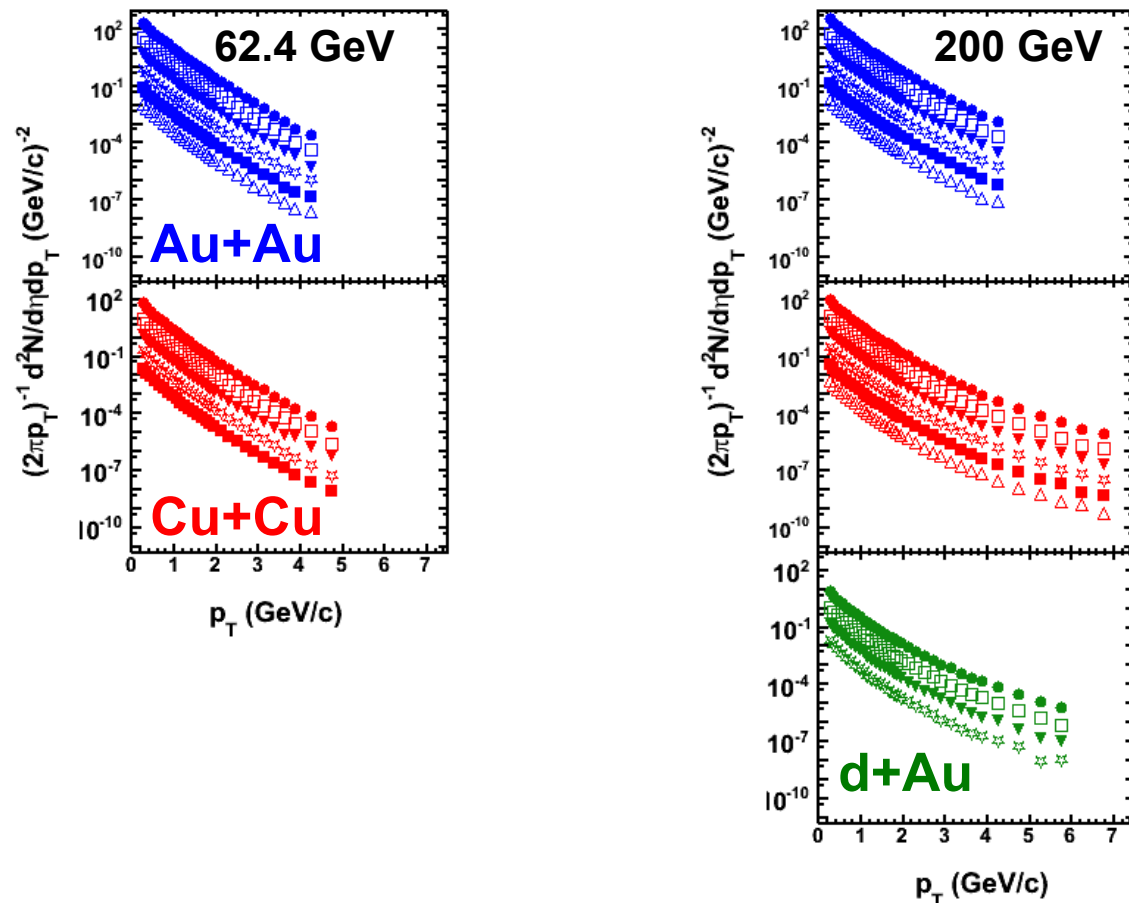
Asymetrie w rozkładach kątów azymutalnych:

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



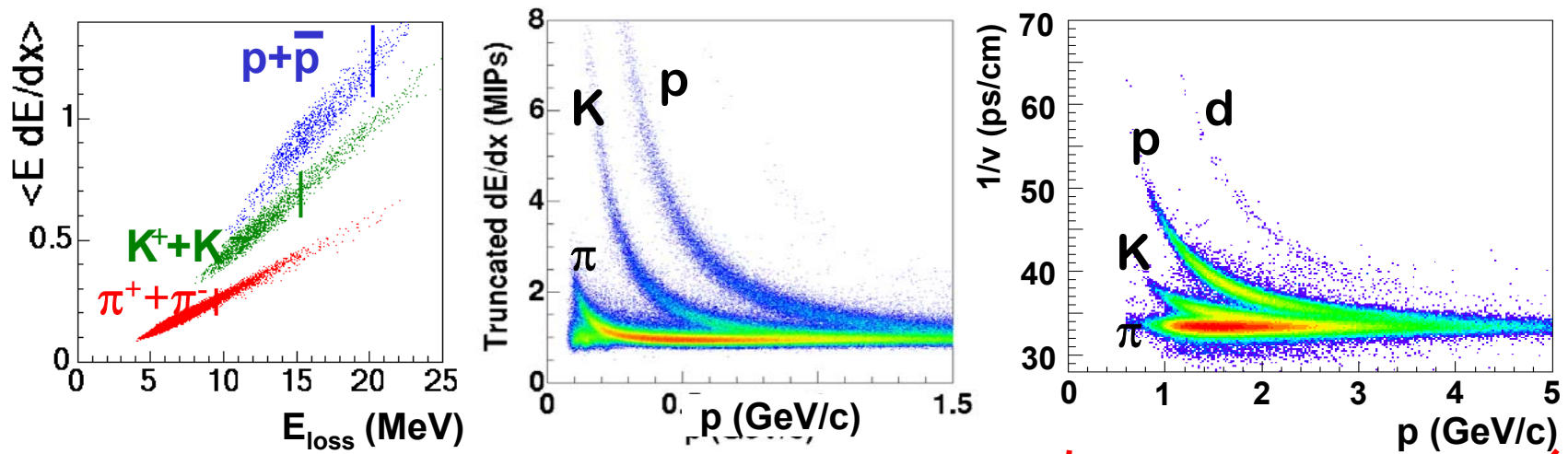
Dane z eksperymentu PHOBOS

Poprzeczne charakterystyki naładowanych cząstek
badane w funkcji p_T :



Dane z eksperymentu PHOBOS

Identyfikacja cząstek naładowanych w szerokim zakresie p_T :



Cząstki
zatrzymujące się
(Kraków)

dE/dx

TOF

0.03

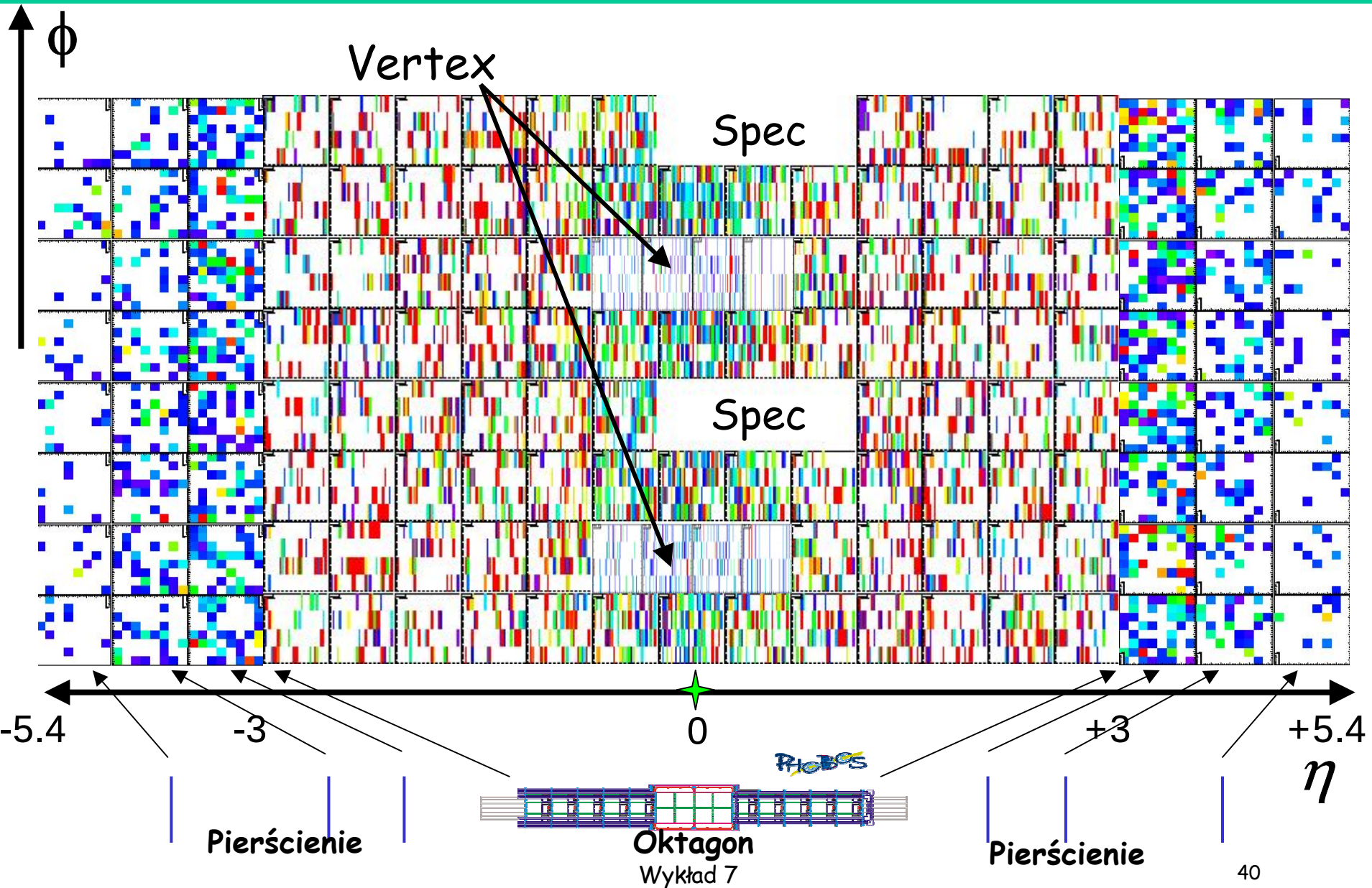
0.5

5.0

p_T (GeV/c)

...Krotności produkowanych cząstek...

Pojedynczy przypadek: 'rozwinięty' w η - ϕ



Krotność naładowanych cząstek

Centralne zderzenia Au+Au

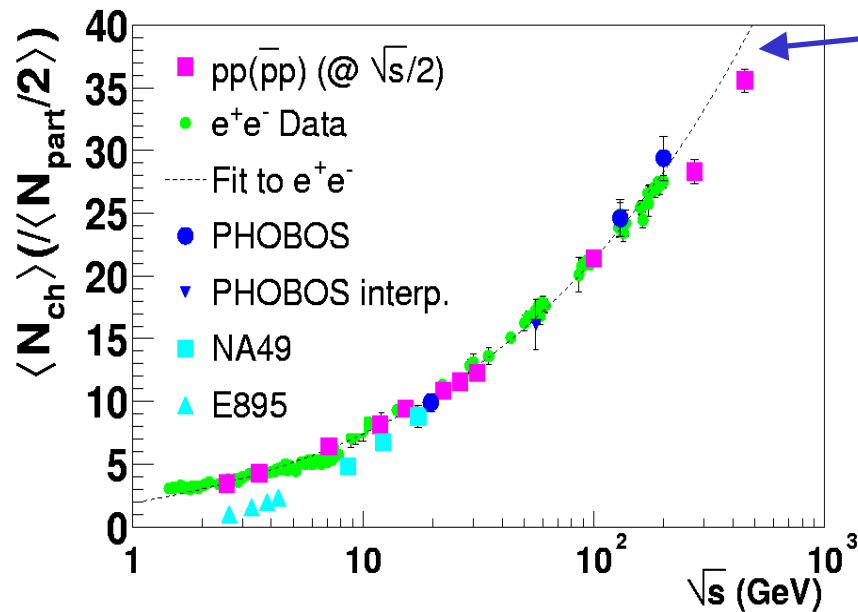
Całkowita krotność naładowanych cząstek- N_{ch} :

5060 $\pm$ 250 @ 200 GeV

4170 $\pm$ 210 @ 130 GeV

1680 $\pm$ 100 @ 19.6 GeV

N_{ch} - zależność od energii



pQCD fit do N_{ch} w e^+e^- !

Krotność na parę oddziaływujących nukleonów - $\langle N_{part} \rangle / 2$:

Różne systemy przy dużych $\sqrt{s}$ stają się podobne:

W pp efekt cząstki wiodącej - należy odjąć energie wiodących protonów, aby uzyskać efektywną energię.

Uniwersalność N_{ch} ?

Pomiary w centralnym obszarze rapidity

- W zderzeniach nukleon-nukleon (NN), badamy wysokość “plateau”

$$dN / d\eta \Big|_{|\eta| < 1}$$

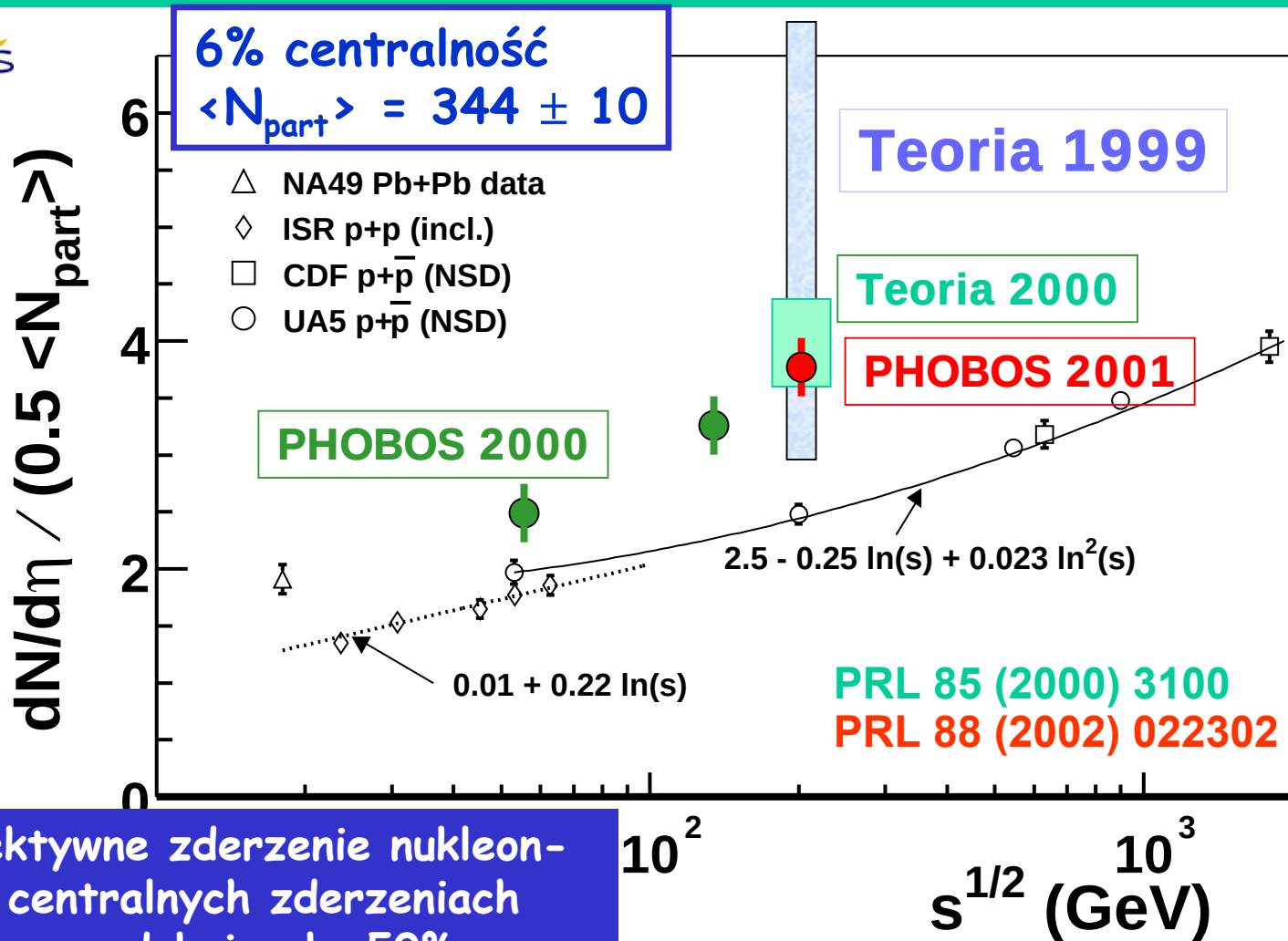
(mid-rapidity)

- W zderzeniach A+A, normalizujemy gęstość cząstek na parę oddziaływujących nukleonów, aby bezpośrednio porównać z NN

$$\frac{dN / d\eta \Big|_{|\eta| < 1}}{N_{part} / 2}$$

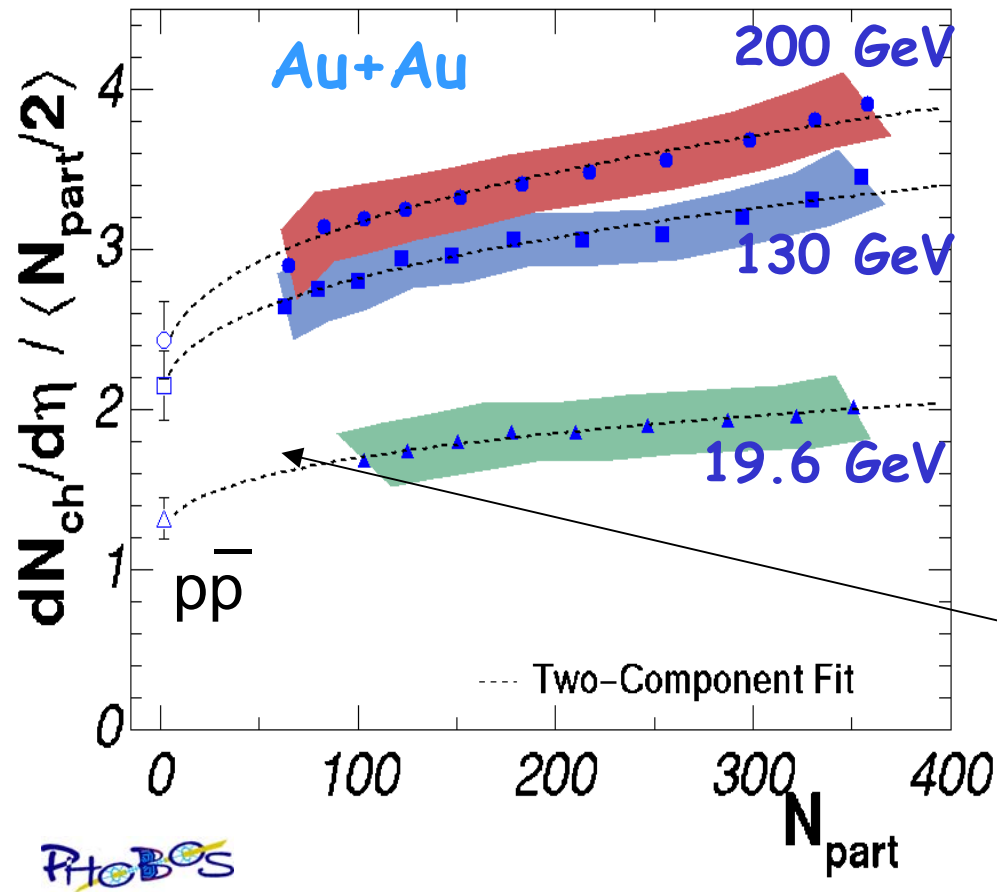
Gęstość cząstek produkowanych w środkowym obszarze rapidity dla centralnych zderzeń Au+Au

PHOBOS



Każde efektywne zderzenie nukleon-nukleon w centralnych zderzeniach jądro-jądro produkuje ok. 50% więcej cząstek niż zderzenie pp!

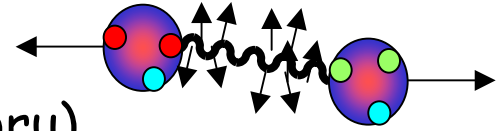
Zależność od centralności zderzenia dla $\eta \approx 0$



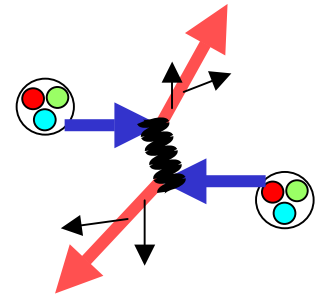
Dane z PRC 65 061901R (2002)

Model dwu-składnikowy:

Miękkie:
(wymiana koloru)
Zranione nukleony

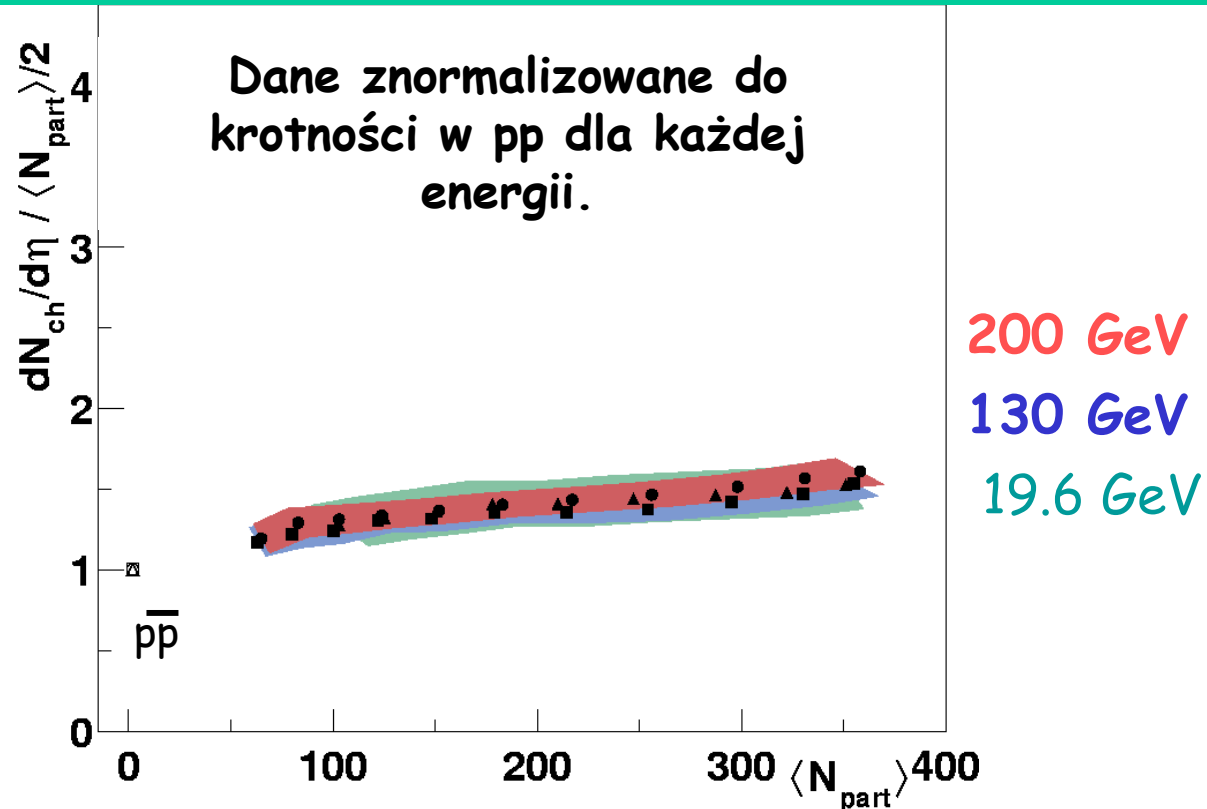


Twarde:
zderzenia binarne



$$\frac{dN}{d\eta} = (1 - x)n_{pp} \frac{N_{part}}{2} + xn_{pp}N_{coll}$$

Zależność od centralności zderzenia dla $\eta \approx 0$



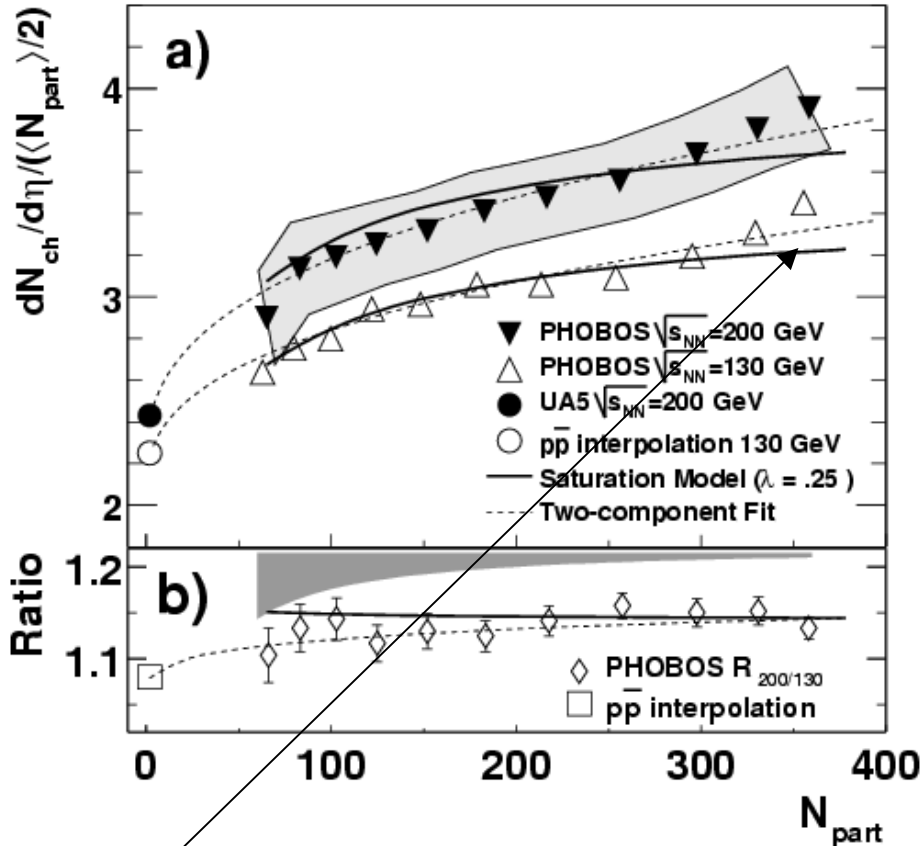
→ Ten sam wkład od twardych procesów, ok. 10%, opisuje dane przy różnych energiach.

→ Nieoczekiwany wynik: stosunek twardych/miękkich zderzeń nie zależy od energii!!!

→ Produkcja cząstek: ~60% z miękkich, ~40% z twardych

Zależność od centralności zderzenia dla $\eta \approx 0$

Kharzeev & Levin. nucl-th/0108006



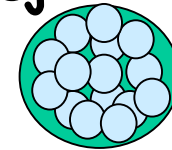
$$\frac{dN}{d\eta} \cong c N_{part} (\sqrt{s})^\lambda f(\lambda |y|, Q_s)$$

Model saturacji:

- Rozkład gluonów rośnie szybko dla małych x : $xG(x) \sim x^{-\lambda}$

~ 0.25 z fitów do danych HERA)

Gluony o rozmiarach π/Q^2 przekrywają się w płaszczyźnie poprzecznej



Przy skali saturacji gluony wypełniają całą powierzchnię poprzeczną

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

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

- Poniżej skali saturacji Q_s^2 następuje fuzja gluonów

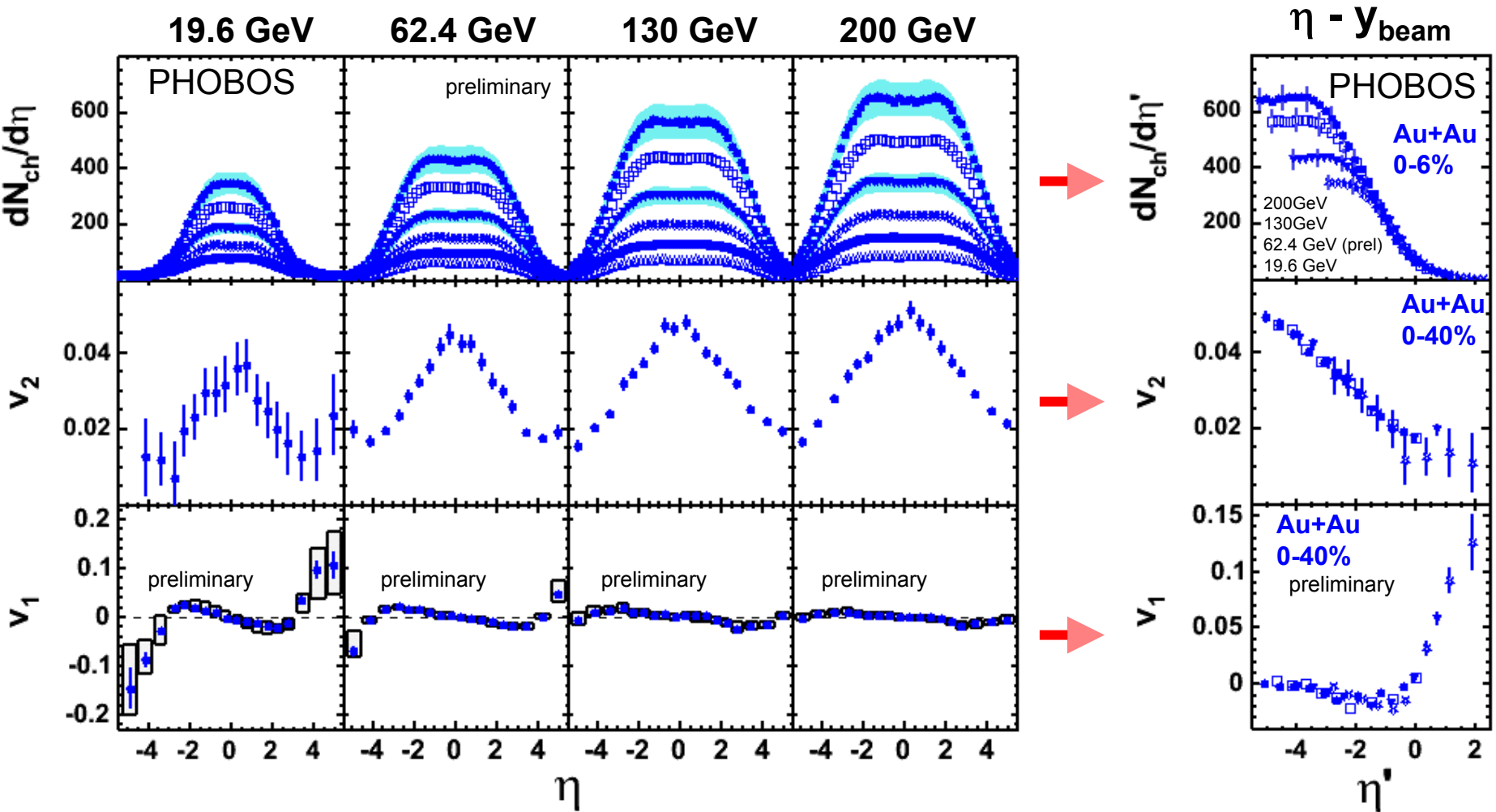
$$g+g \rightarrow g$$



Modele dwu-składnikowy i saturacyjny

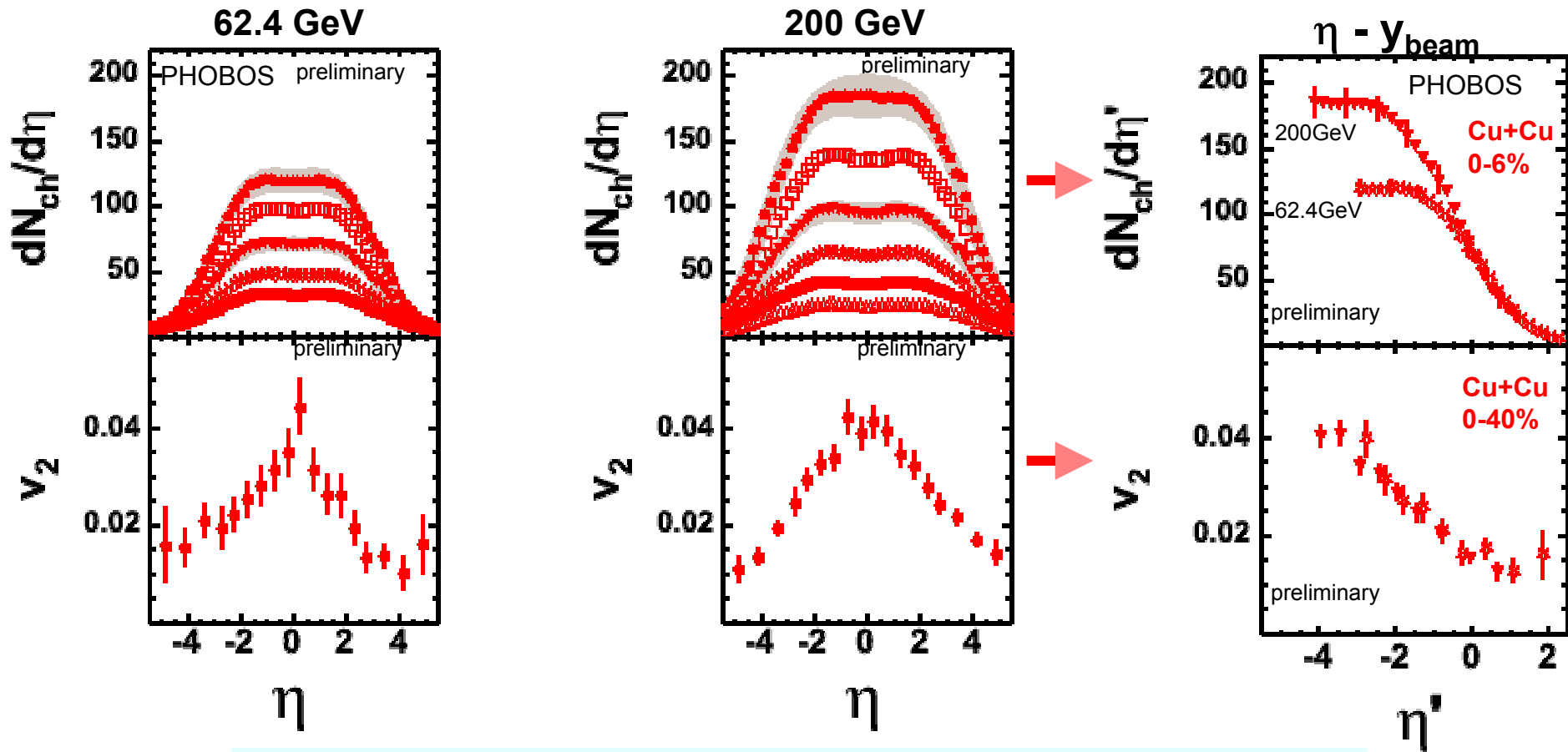
- Porównanie z danymi PHOBOS'a w centralnym obszarze rapidity dla różnych energii
- Model dwu-składnikowy używa modelu Glauber'a do interpolacji pomiędzy pp i centralnymi zderzeniami AA
 - $x \approx 0.10$ dla $\sqrt{s_{NN}}$ od 19.6 do 200 GeV
 - Opiera się o produkcję mini-jetów (pQCD)
- Model saturacyjny także opisuje dane i zależność od energii dla $N_{part} > 60$

Graniczna fragmentacja (Au+Au)



"Extended Longitudinal Scaling" dla wszystkich rozkładów zmiennych podłużnych

Graniczna fragmentacja (Cu+Cu)



'Extended Longitudinal Scaling' - także w
zderzeniach Cu+Cu

Występuje w p+p do Au+Au w szerokim zakresie η'

Podsumowanie pomiarów krotności

- Model 2-składnikowy jest słuszny tylko w środkowym obszarze rapidity
- Modele saturacyjne także opisują dane w mid-rapidity
- Graniczna fragmentacja obserwowana dla różnych systemów
 - AA, pp, e^+e^- → Uniwersalność obszaru do przodu
 - Dane wykazują graniczne zachowanie w η'
- Uniwersalność całkowitej krotności
 - Taka sama dla wszystkich systemów przy tym samym $\sqrt{s}$ ($\sqrt{s}_{\text{eff}}$ dla pp)
 - Zaskakujący związek pomiędzy Au+Au & e^+e^-

...Odkrycie nowego stanu materii...

Przewidywania dla zderzeń A+A

Rachunki Chromodynamiki Kwantowej na sieciach:

- Gwałtowny wzrost gęstości energii, $\varepsilon(T)$ przy temperaturze
 $T_{\text{crit}} = 191 \pm 8 \text{ MeV}$
 $\varepsilon_{\text{crit}} = 0.7 \pm 0.2 \text{ GeV/fm}^3$
- Wzrost gęstości energii jest związany ze wzrostem liczby stopni swobody
- Materia istnieje w dwóch różnych fazach powyżej i poniżej $T_{\text{crit}}, \varepsilon_{\text{crit}}$.
- Zmienne termodynamiczne osiągają 80% wartości charakterystycznej dla idealnego gazu nieoddziaływujących cząstek (granica Stefan-Boltzmann'a).

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

RHIC: Odkrycia

Wyniki uzyskane dla centralnych zderzeń Au+Au przy energii $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$ przez cztery eksperymenty: BRAHMS, PHENIX, PHOBOS i STAR wskazują na:

- ▶ Kreację nowego stanu materii o bardzo dużej gęstości energii (najwyższej wyprodukowanej w warunkach laboratoryjnych)
- ▶ Stanu tego nie można opisać przy pomocy 'hadronowych' stopni swobody
- ▶ Składniki tego nowego stanu materii oddziałują bardzo silnie; system zachowuje się jak idealna ciecz (lepkość ≈ 0).

To nie jest przewidywana słabo-sprężona plazma kwarkowo-gluonowa!

Ewidencja w oparciu o wyniki uzyskane przez Współpracę PHOBOS

...Kreacja stanu materii o ekstremalnie
wysokiej gęstości energii...

Gęstość energii

Centralne zderzenia Au+Au , $\sqrt{s} = 200$ A GeV

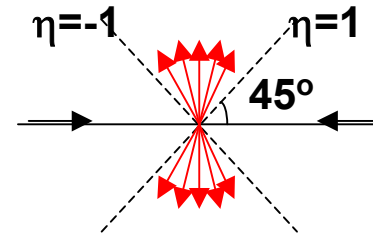
❖ **Energia** niesiona przez cząstki o porównywalnych poprzecznych i podłużnych składowych pędu (~równowagi termicznej)

Gęstość cząstek naładowanych: $dN_{ch}/d\eta = 655 \pm 35$

Rozkłady p_T : $E_{part} = 0.6$ GeV

Poprawki na cząstki neutralne oraz te dla których $p_L \geq p_T$:

$$E_{tot}(|\eta| \leq 1) = 1600 \text{ GeV}$$



❖ **Objętość** w której zdeponowana jest energia

Rozmiar poprzeczny $\sim 150 \text{ fm}^2$ (Au)

Rozmiar podłużny $\sim 2.0 \text{ fm}$

(2 fm=czas do osiągnięcia równowagi, oszacowany z pomiarów anizotropii pędowych)

Konserwatywne oszacowanie dolnej granicy na gęstość energii $\rightarrow$

Gęstość energii

Centralne zderzenia Au+Au , $\sqrt{s} = 200$ A GeV

$$\varepsilon \geq 5 \text{ GeV} / \text{fm}^3$$

$$\varepsilon \gg \varepsilon_{\text{crit}} = 0.7 \text{ GeV} / \text{fm}^3$$

Gęstość energii w nukleonie $\approx 0.5 \text{ GeV} / \text{fm}^3$

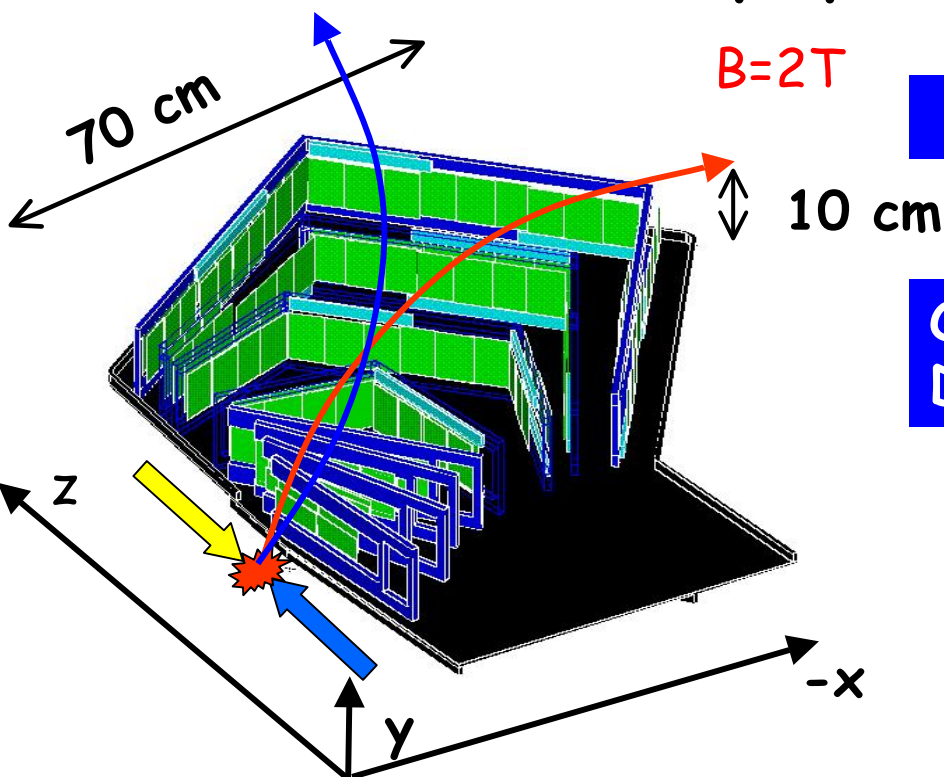
Gęstość energii w jądrze $\approx 0.15 \text{ GeV} / \text{fm}^3$

Stanu materii o tak dużej gęstości energii
nie można opisać przy pomocy 'hadronowych'
stopni swobody

...Kreacja stanu materii o wypadkowej liczbie barionowej $(B - \bar{B}) \approx 0 \dots$

Pomiary stosunków antycząstek do cząstek

Dwu-ramienny spektrometr magnetyczny



Dokładność pomiaru pędu 1 - 2 %

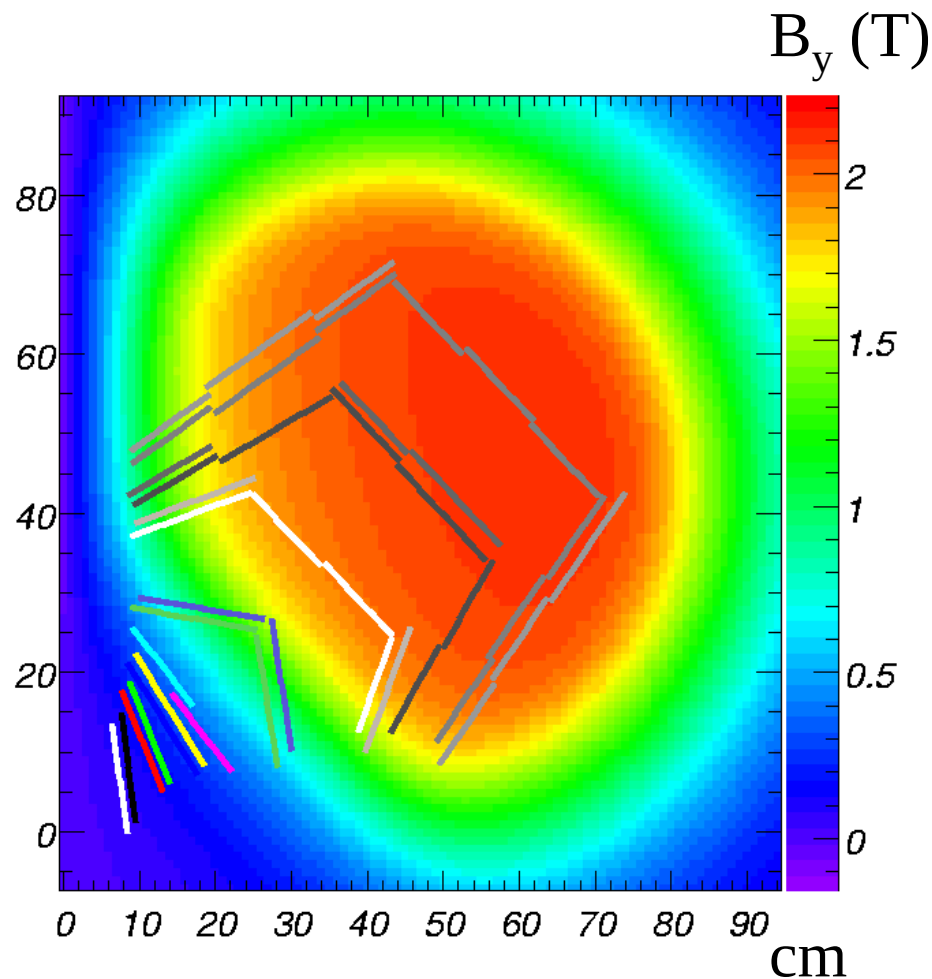
Odwracalne pole magnetyczne
Dwa symetryczne ramiona

- Seria niezależnych pomiarów
- Poprawki na akceptancję i wydajność znoszą się

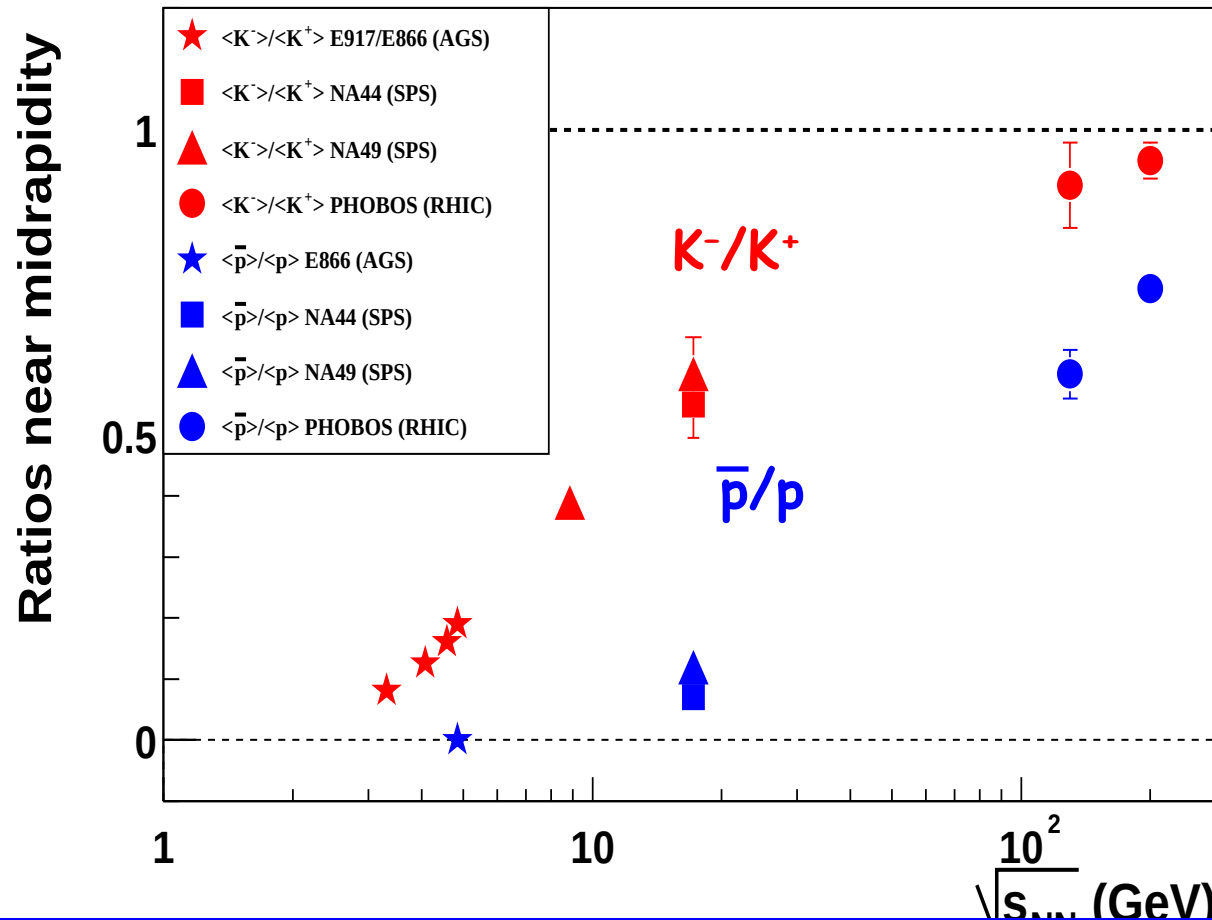
Magnes



Siła pola magnetycznego
odtworzana z dokładnością
lepszą niż 1%



Stosunki cząstek - zależność od energii

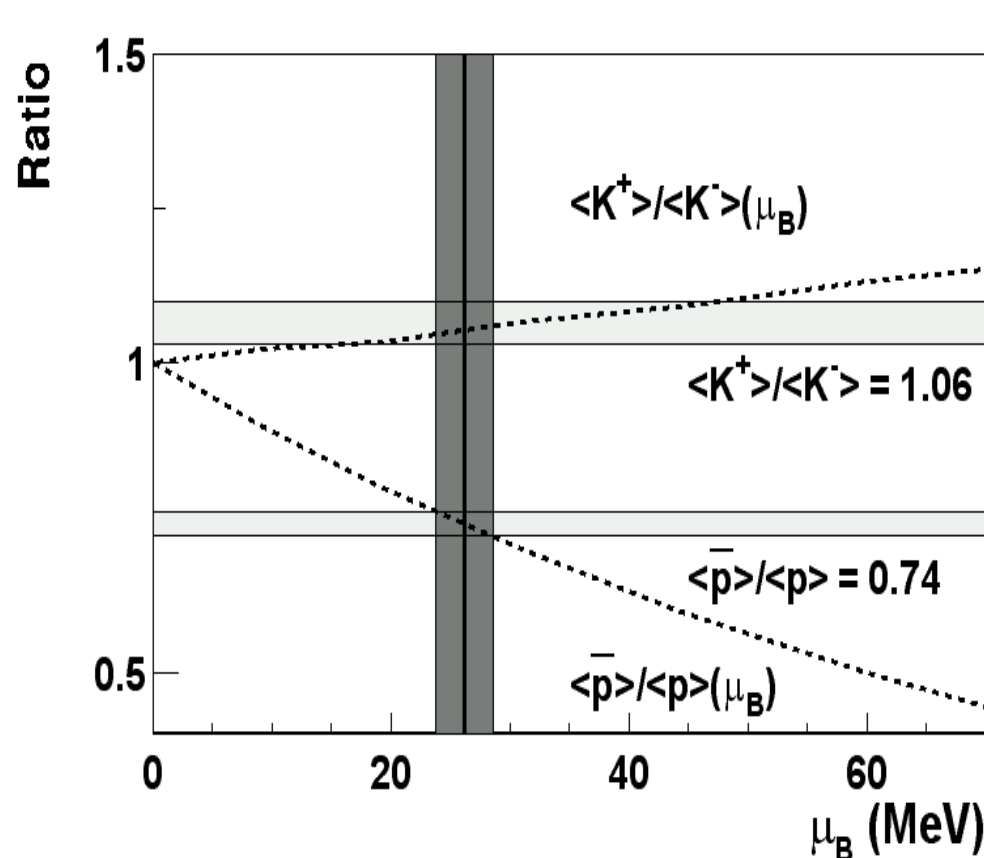


➤ Wypadkowa gęstość barionowa w obszarze mid-rapidity szybko spada z energią ($\bar{B}/B \rightarrow 1$)

Barionowy potencjał chemiczny, μ_B

μ_B – miara energii, którą należy dodać do systemu aby wyprodukować pojedynczy barion

Normalna 'zimna' materia jądrowa: $\mu_B \approx 920 \text{ MeV}$



$$N_B = e^{\mu_B / T}$$

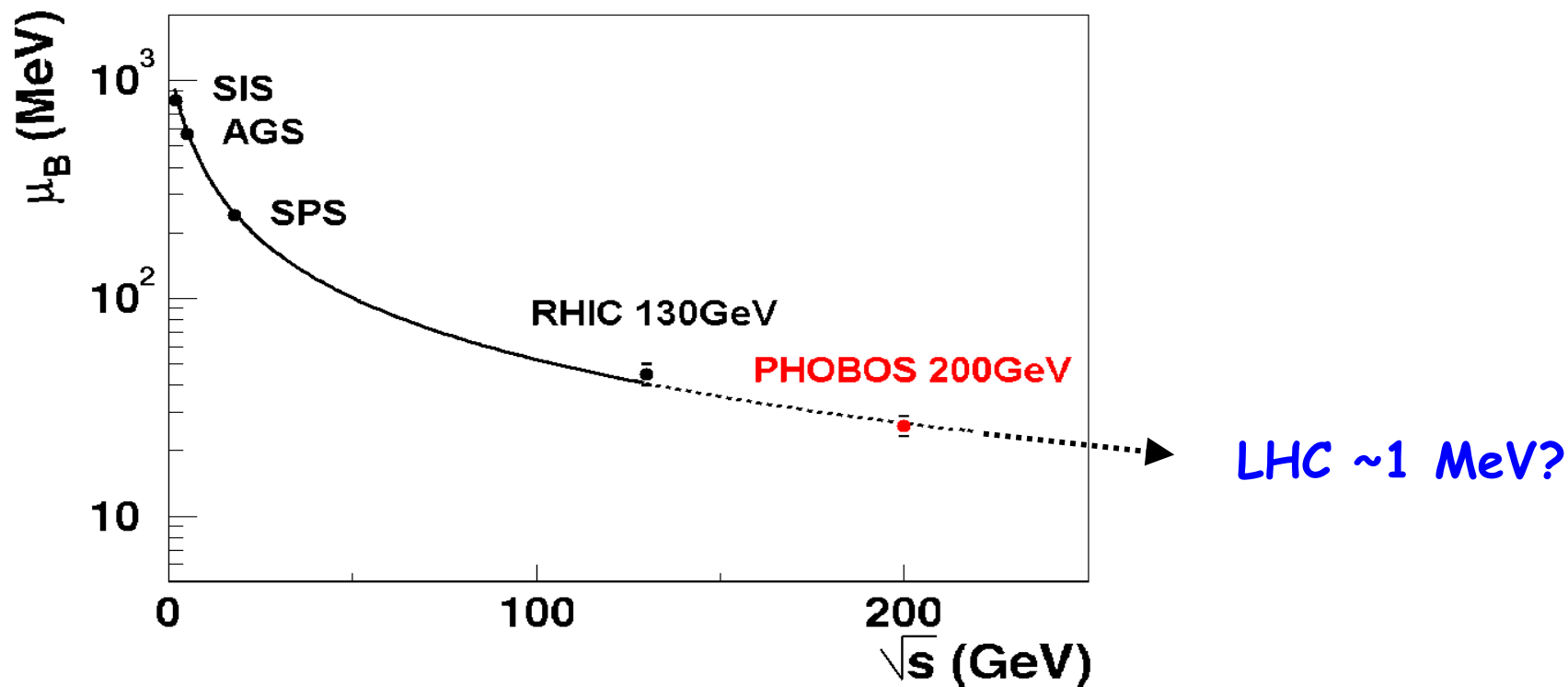
$$N_{\bar{B}} / N_B = e^{-2\mu_B / T}$$

Zmierzone $\langle K^- \rangle / \langle K^+ \rangle$ i $\langle \bar{p} \rangle / \langle p \rangle$
+ statystyczny model
(F. Becattini et al., PRC64,024901,2001)
z $T \approx 160 - 170 \text{ MeV}$

$\Rightarrow \mu_B$

μ_B - zależność od energii

Oszacowany barionowy potencjał przy $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$:
 $\mu_B = 26 \pm 2 \text{ MeV}$

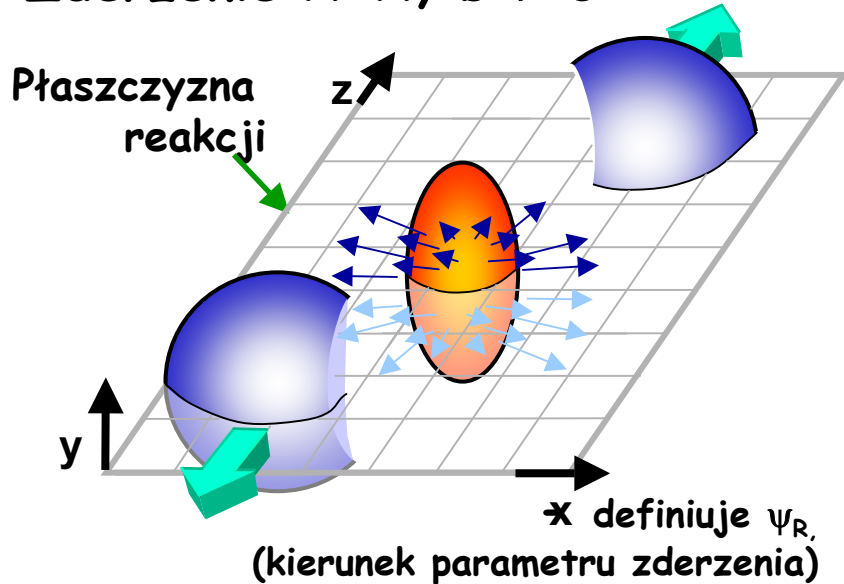


Materia ~ wolna od barionów, tak jak we wczesnym Wszechświecie

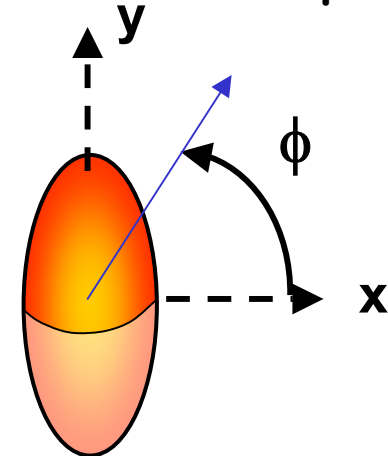
**...silne oddziaływania pomiędzy
składniki tego gorącego stanu...**

Kolektywny wyptyw ('flow') czstek

Zderzenie $A+A$, $b \neq 0$

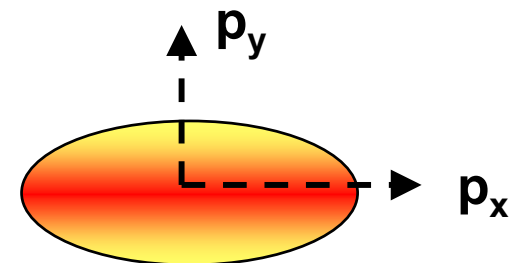


Początkowa anizotropia w (x, y)



Rozpraszanie czstek

Końcowa anizotropia w (p_x, p_y)



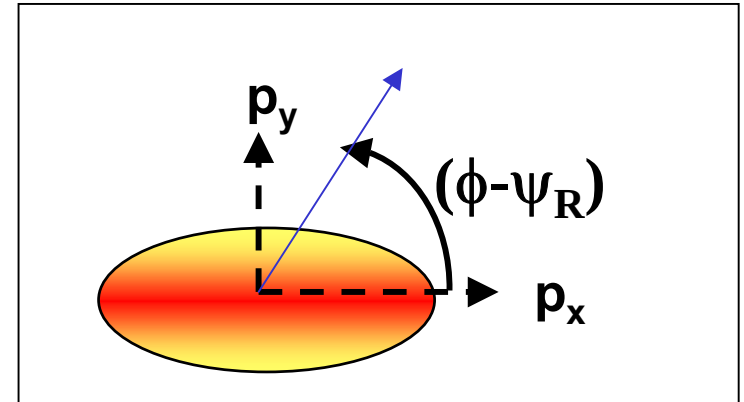
Efekty czute na:

- wczesne etapy ewolucji systemu (gradient ciśnienia przy maksymalnej kompresji materii)
- równanie stanu, które rządzi ewolucją
- stopień osiągniętej równowagi (wtórne rozproszenia czstek)

Kolektywny wyptyw ('flow') czstek

Pomiar koŃcowej anizotropii azymutalnej

Rozwinięcie Fourierowskie
rozkładów kątów azymutalnych:



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

Elliptic Flow: v_2

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

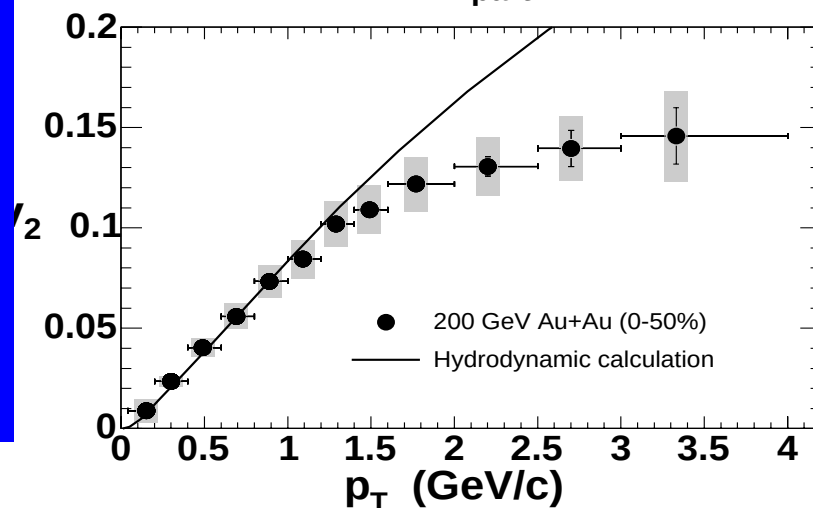
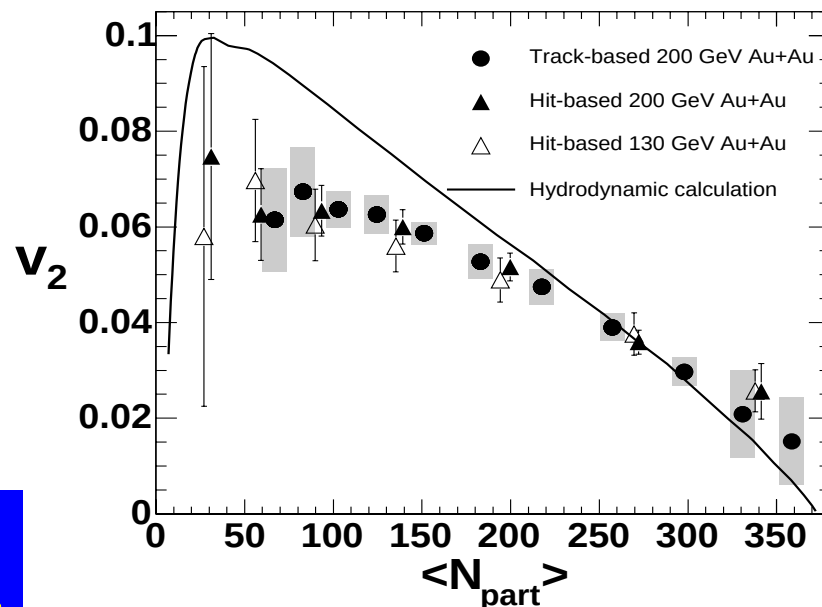
Wyptyw eliptyczny

PHOBOS: Au+Au $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV

$$v_2 > 0$$

→ Silne oddziaływania między cząstkami we wczesnym etapie ewolucji systemu

Po raz pierwszy przy energiach akceleratora RHIC współczynnik anizotropii jest poprawnie opisany przez modele hydrodynamiczne, zakładające idealny przepływ (mfp=0)!!



Produkcja cząstek o bardzo małych p_T

Jeżeli powstaje układ słabo-oddziaływujących cząstek, to spodziewamy się wzmożonej produkcji cząstek o bardzo małych pędach poprzecznych (długości fal $\approx$ rozmiaru systemu).

PHOBOS jest jedynym eksperymentem, który pozwala na pomiar cząstek o bardzo małych pędach.

Pomiar: $(\pi^+ + \pi^-)$ $(K^+ + K^-)$ $(p + \bar{p})$
z $p_T = 0.030 - 0.200 \text{ GeV}/c$ w zależności od masy cząstki

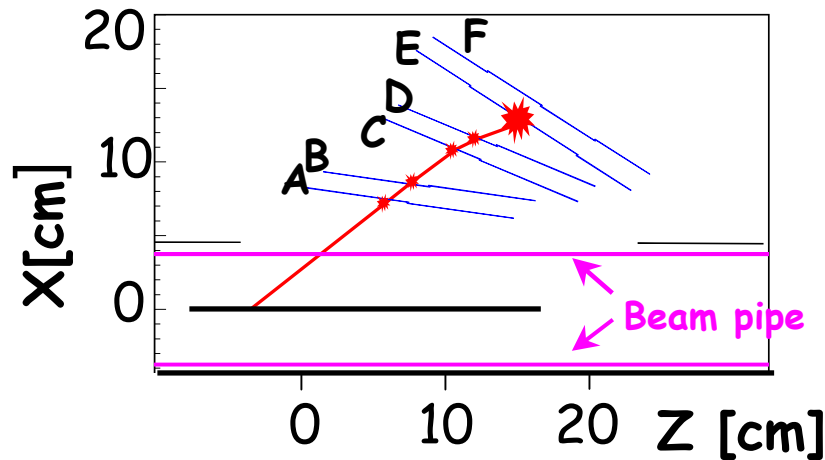
Analiza wykonana w Krakowie Dr Adam Trzupek
doktorant, magistrantka

Metoda

Szukanie cząstek zatrzymujących się
w 5-tej płaszczyźnie spektrometru

Pomiar masy (metoda energia-zasięg)

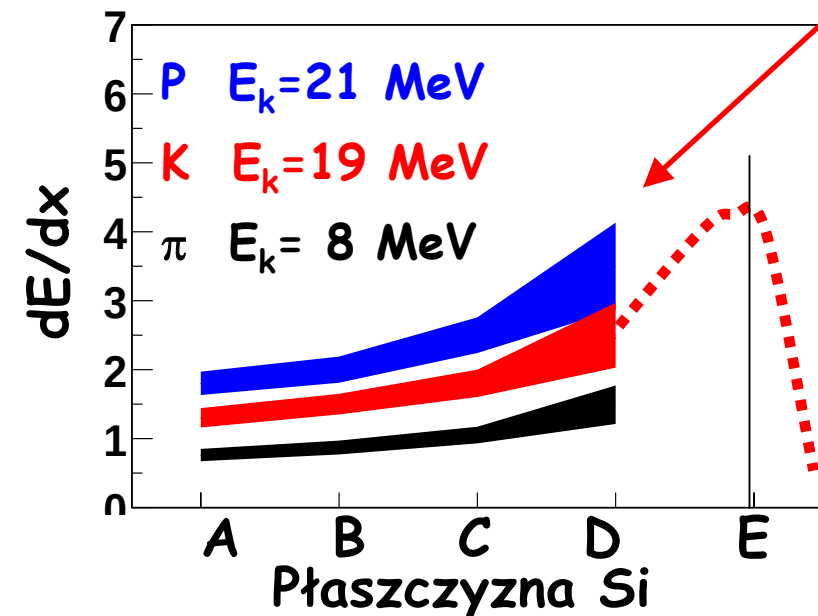
- $E_{\text{loss}} = \Sigma dE$
- $M_p = \langle dE/dx \rangle E_{\text{loss}} \sim m$
($\sim 1/\beta^2$) ($\sim m\beta^2$)



➤ **Cięcia na dE/dx w k.płaszczyz.**
"Sprawdzenie hipotezy masowej"

➤ **Cięcia na E_{loss} (E_k =energia kinetyczna)**
"Sprawdzenie hipotezy pędowej"

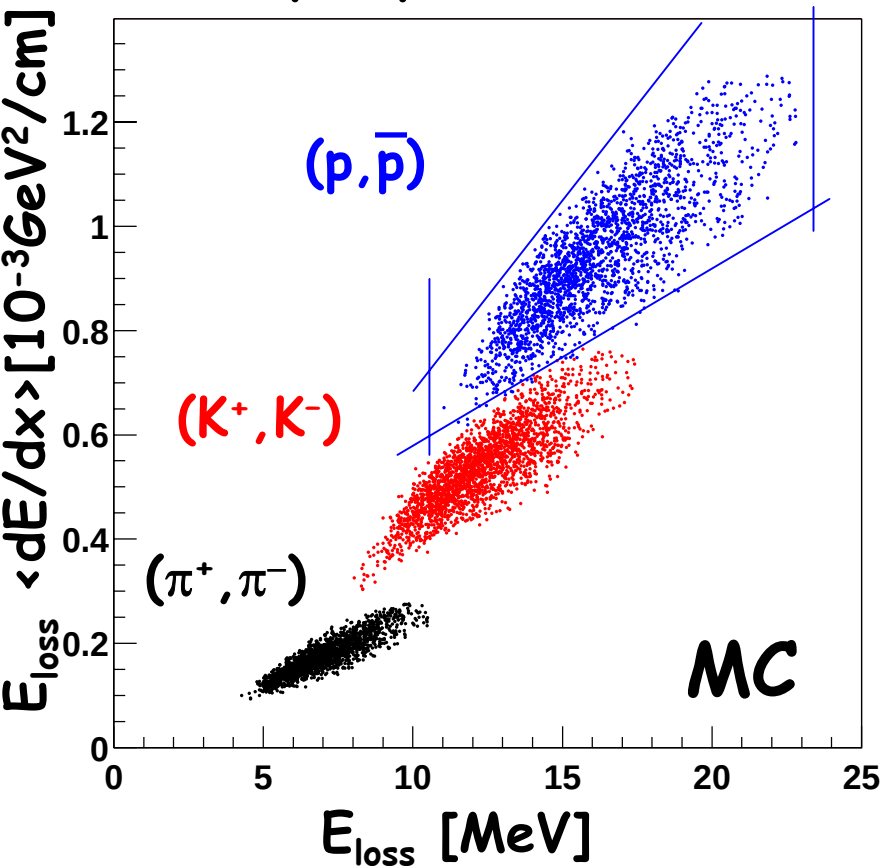
➤ **Poprawki**
akceptancja
wydajność
tło



Metoda c.d.

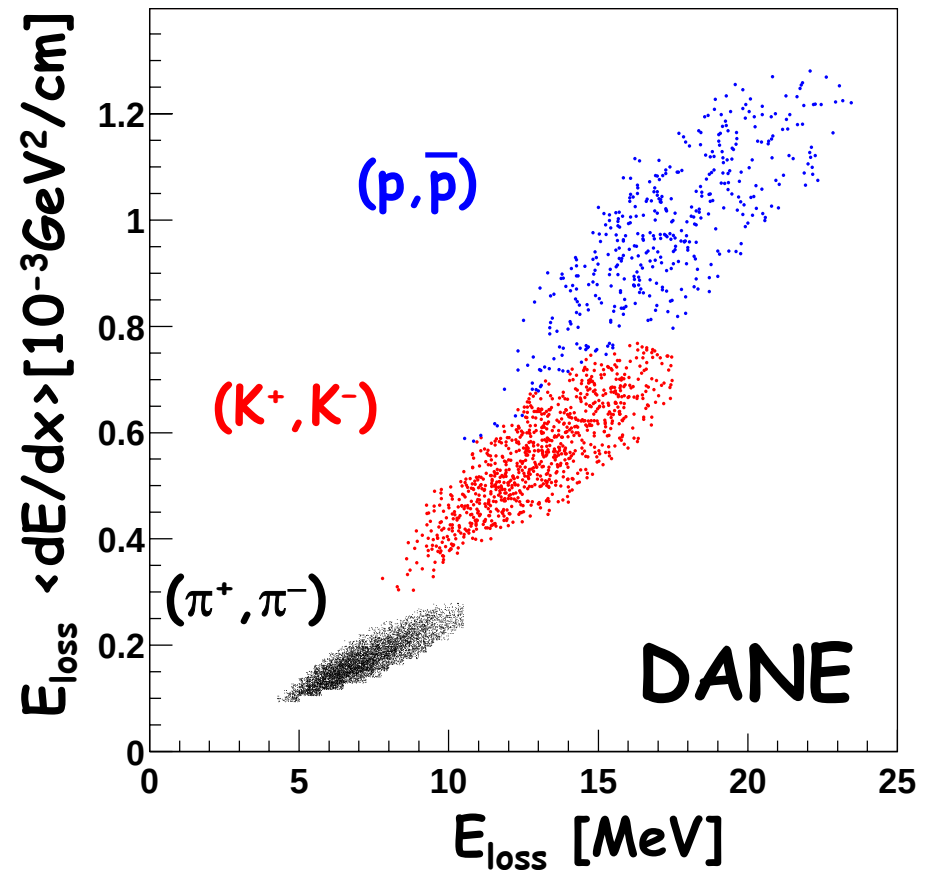
Sprawdzenie metody:

Rekonstrukcja cząstek MC
o małych pędach



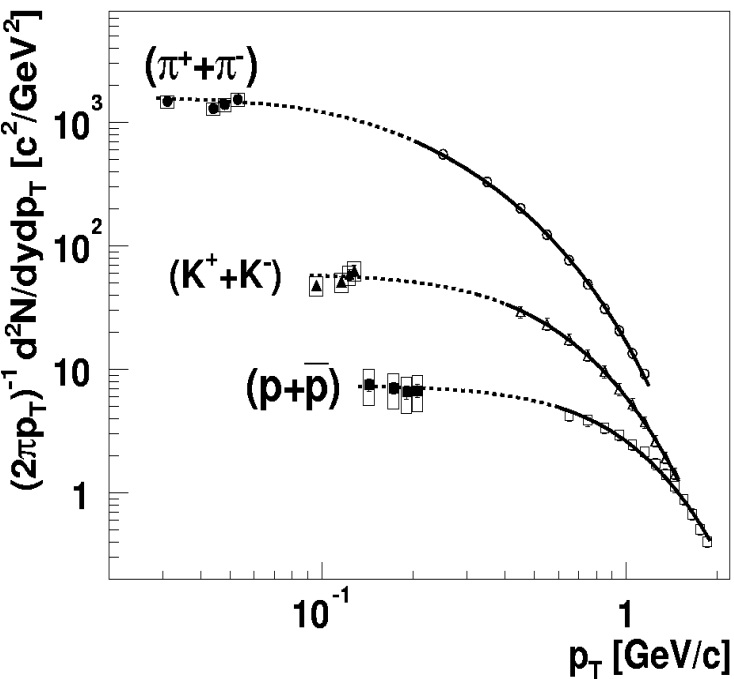
Wyniki

Au+Au $\sqrt{s_{\text{NN}}}=200 \text{ GeV}$
15% centralne



Produkcja cząstek o bardzo małych p_T

Centralne zderzenia
Au+Au $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV



❖ Nie obserwuje się wzmocnionej produkcji cząstek o małych p_T (30 MeV/c dla $\pi^\pm$)

❖ Widma wyłaskzczają się przy małych p_T , silniej dla cięższych cząstek.

$$\frac{1}{2\pi} \frac{1}{m_T} \frac{d^2N}{dy dm_T} = A [\exp(m_T / T_{BE}) - 1]^{-1} \quad m_T = \sqrt{p_T^2 + m_h^2}$$

$T_{BE} = 229$ MeV for $(\pi^+ + \pi^-)$
 293 MeV for $(K^+ + K^-)$
 392 MeV for $(\bar{p} + p)$

→ Poprzeczna ekspansja systemu przyspiesza cząstki początkowo wyprodukowane z małymi pędami.

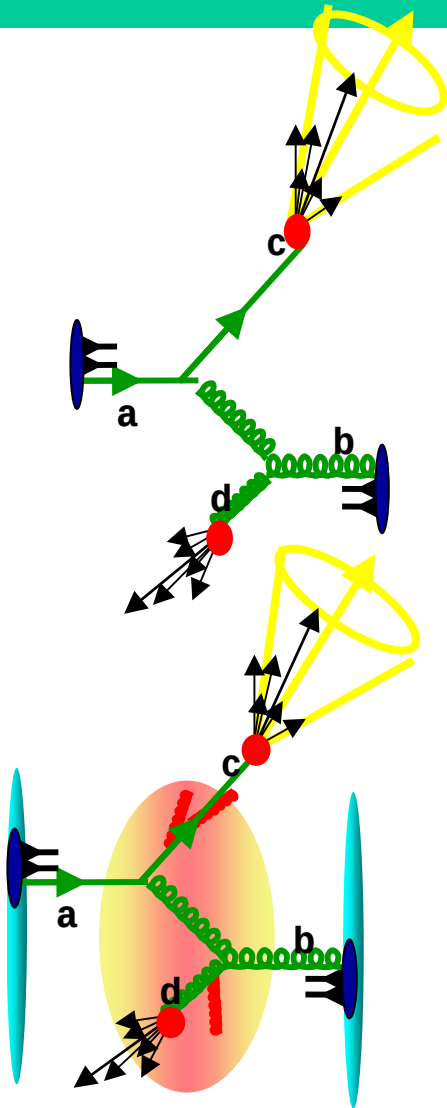
Pośrednia ewidencja, że cząstki silnie oddziałują!

Produkcja cząstek o dużych p_T

$p+p$: twarde rozproszenie w 'próżni' QCD
(z dużym przekazem czteropędu)

$A+A$: Twarde rozproszenie w gorącej materii QCD

Tłumienie produkcji cząstek o dużych p_T
związane ze stratami energii partonów
przechodzących przez gorący/gęsty ośrodek
(J.D.Bjorken,1982) „jet quenching”



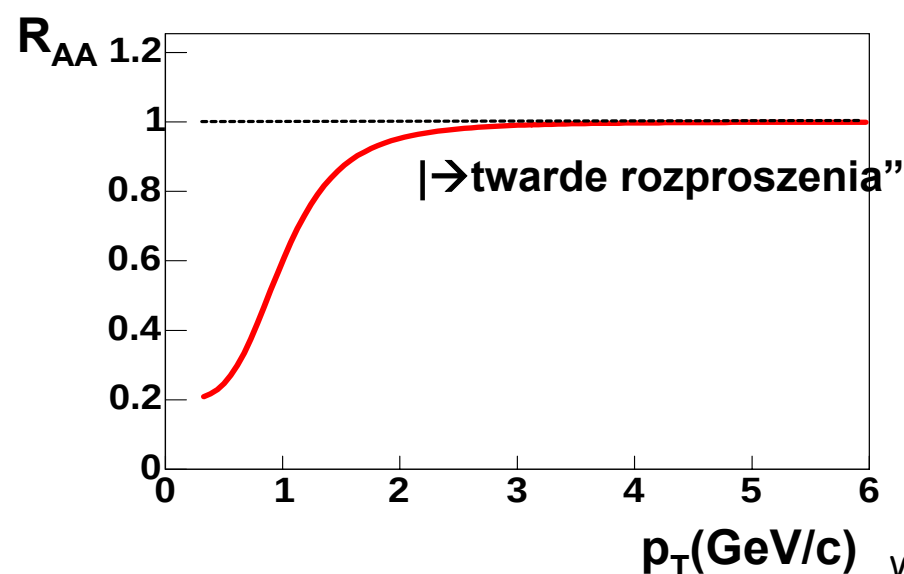
Produkcja cząstek o dużych p_T

Dla procesów z dużym przekazem pędu obowiązuje faktoryzacja QCD: każde zderzenie nukleon-nukleon może być źródłem twardego rozproszenia.

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

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

N_{coll} - liczba zderzeń N - N



$R_{AA}=1$ (skalowanie z N_{coll})
Brak efektów jądrowych

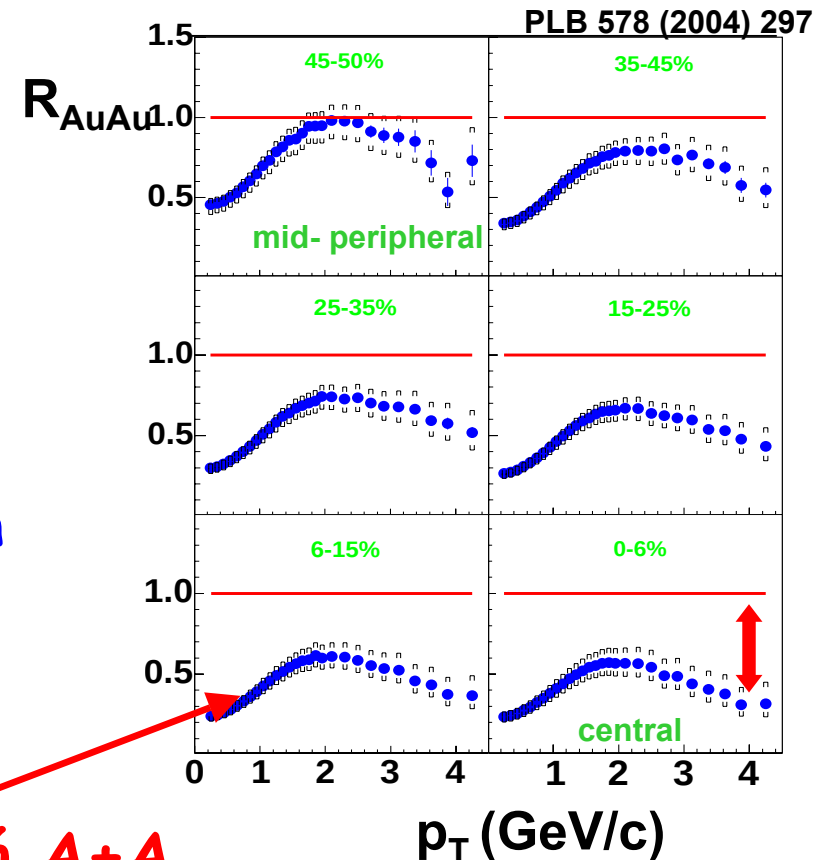
Tłumienie produkcji hadronów o dużych p_T

- Stosunek rozkładów p_T : AA/pp

$$R_{AA} \equiv \frac{d^2N^{AA}/dydp_T}{d^2N^{pp}/dydp_T \cdot \langle N_{coll}^{AA} \rangle}$$

R_{AA} - Czynniki modyfikacji jądrowej

- $R_{AA} = 1$ w przypadku skalowania z liczbą zderzeń nukleon-nukleon
- $R_{AA} > 1$ dla reakcji przy niższych energiach: SPS i ISR
- $R_{AA} < 1$ dla centralnych zderzeń A+A przy energii RHIC



Tłumienie produkcji hadronów o dużych p_T

Dwa alternatywne wytłumaczenia efektu tłumienia:

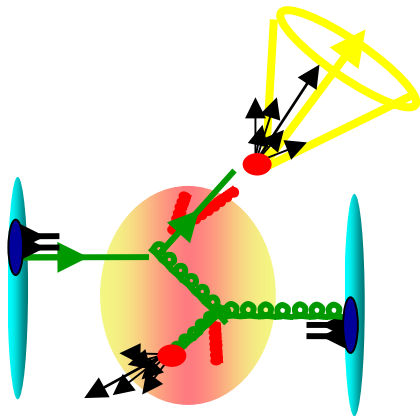
- Straty energii partonów w gęstym ośrodku (w stanie końcowym)?
 - Wskazują na kreację silnie oddziaływującej materii o dużej gęstości (QGP)!
- Tłumienie w stanie początkowym?
 - Wskazuje na efekty wielo-partonowe w jądrowej funkcji falowej (Saturacja w rozkładach gęstości partonów przy wysokich energiach)

Rozstrzygnięcie poprzez 'wyłączenie' stanu końcowego
 $Au+Au \Rightarrow d+Au$

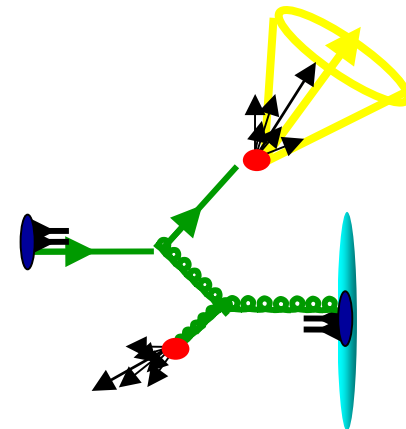
Tłumienie produkcji cząstek o dużych p_T

- ❖ Dla centralnych zderzeń **Au+Au** produkcja cząstek jest tłumiona w porównaniu do danych p+p przeskalowanych przez N_{coll}
- ❖ Brak tłumienia dla zderzeń **d+Au**

$$R_{AA} \ll 1$$



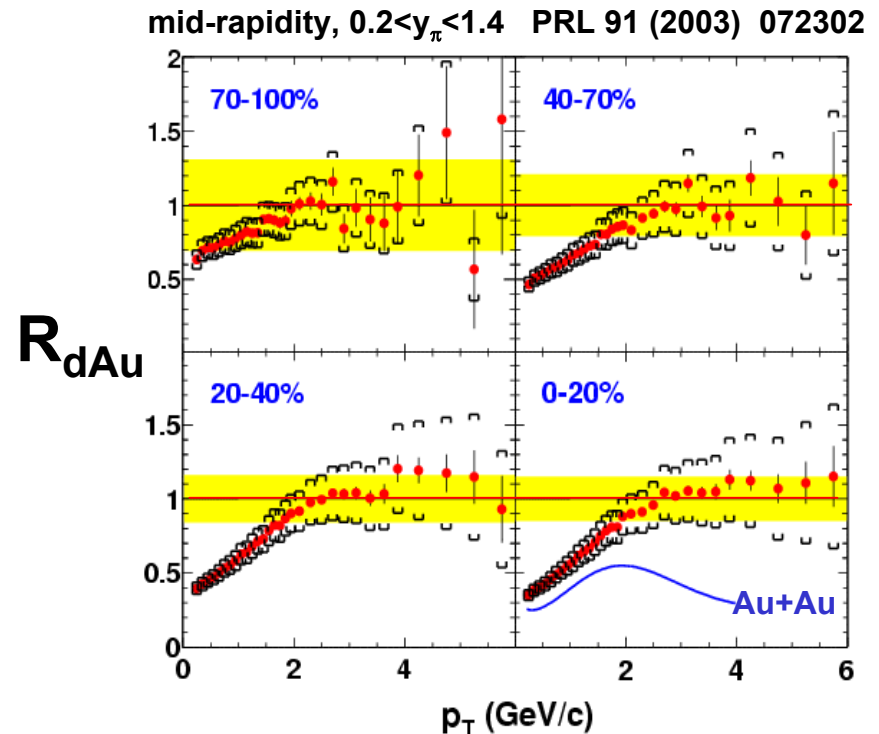
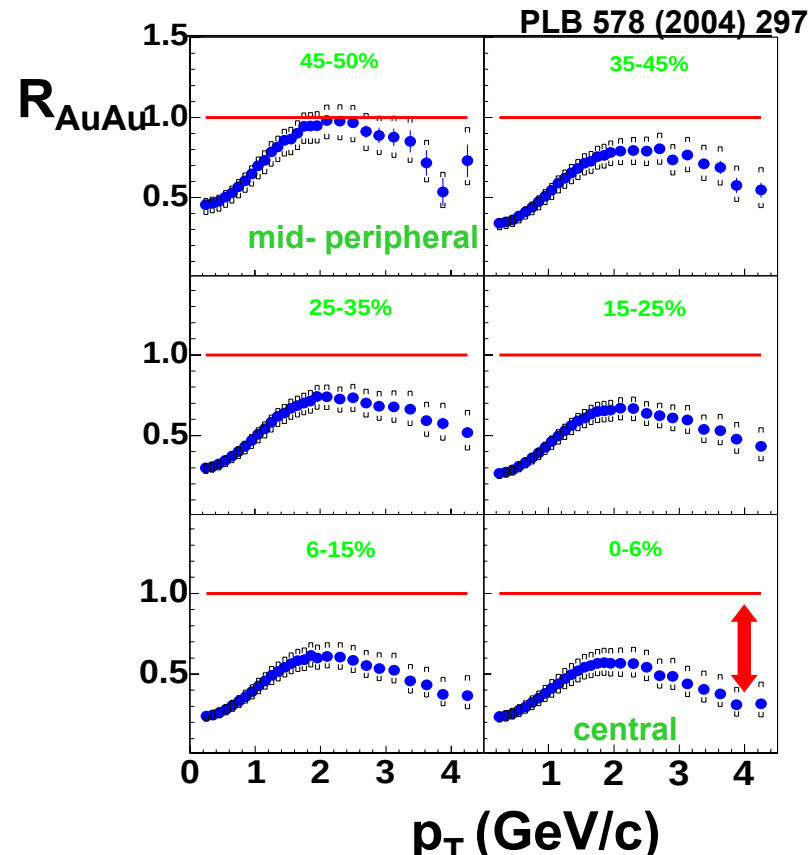
$$R_{AA} \geq 1$$



Tłumienie produkcji cząstek o dużych p_T

PHOBOS: **Au+Au**

d+Au

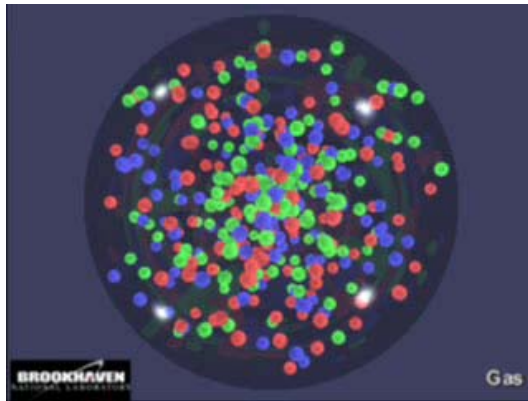


Bezpośrednia ewidencja, że partony o dużym p_T oddziałują z materią o dużej gęstości energii!

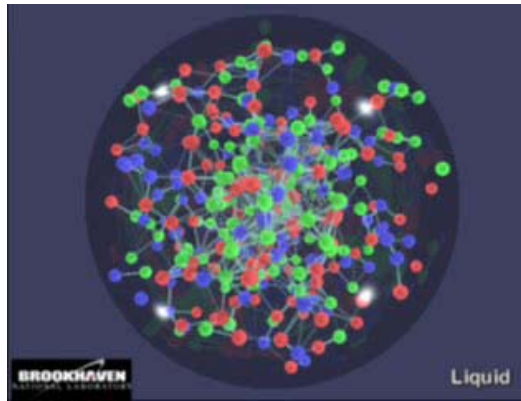
Podsumowanie

Odkrycie nowego stanu materii o ekstremalnie wysokiej gęstości energii, którego składniki bardzo silnie ze sobą oddziałują.

Oczekiwano
'gaz' →



Znaleziono
← 'ciecz'



Składniki nowego stanu materii??

- Obiekty złożone, także kolorowe

- Czarna dziura??

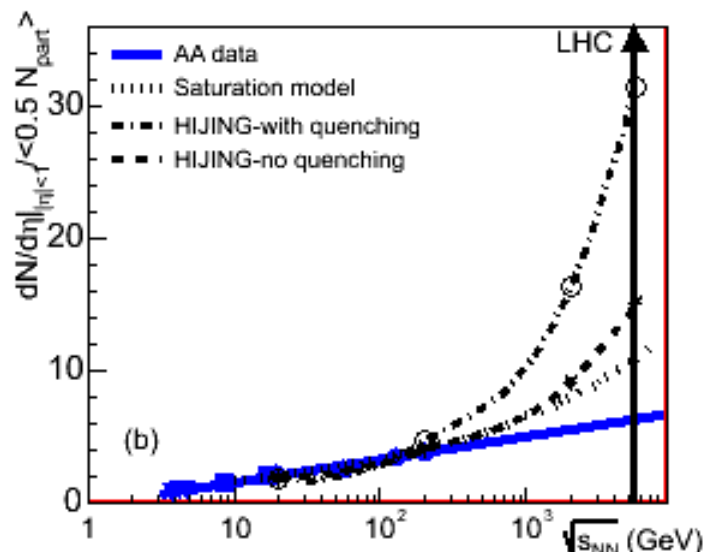
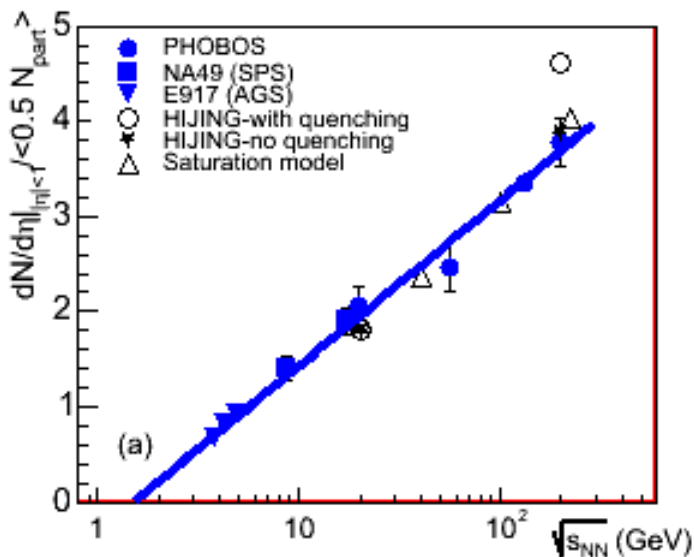


→ teorie strun (supersymetryczne)

Podsumowanie: PHOBOS

- Znaczący wkład do odkrycia nowego stanu materii
- Szereg innych ciekawych wyników dotyczących mechanizmu produkcji cząstek
- Interesujące perspektywy ciekawych analiz danych doświadczalnych dla nowych współpracowników, studentów, doktorantów...

Ekstrapolacja do zderzeń Pb+Pb @LHC



Ekstrapolacja do LHC

$$\sqrt{s_{NN}}(\text{LHC}) = 30 \sqrt{s_{NN}}(\text{RHIC})$$

200 GeV Au+Au 6% najbardziej centralnych przypadków

$$dN/d\eta = 655 \pm 35$$

50% więcej niż w $\bar{p}+p$

A + A Fit

$$dN/d\eta \approx 1300$$

Model saturacji

$$dN/d\eta \approx 2000$$

HIJING MC

$$dN/d\eta \approx 6000$$