Fizyka zderzeń relatywistycznych ciężkich jonów

- Wykład 1: AA: Motywacja, cele fizyczne, akceleratory, 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: Korelacje HBT (doc. M. Kowalski)
- Wykład 8: Eksperyment PHOBOS przy akceleratorze RHIC
- Wykład 9: Eksperyment ALICE przy akceleratorze LHC (doc.M. Kowalski) Wykład 10: Fizyka ciężkich jonów w eksperymencie ATLAS (LHC)
- Wykład 11: LHC okno na Mikroświat

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

Zderzenia ciężkich jonów przy najwyższych energiach akceleratorowych

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

Au+Au at BNL-AGS Pb+Pb at CERN-SPS

√s _{nn}	
2.6 - 4.8 GeV	1992-1999
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



RHIC - Podstawowe parametry

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

Wiązki	Au	Þ
Energia/wiązkę	10 -100 GeV/A	max. 250 GeV
Natężenie wiązki	10 ⁹	1011
Liczba pęczków	57	114
Świetlność[cm ⁻² s ⁻¹]	2x10 ²⁶	10 ³²
Czas przecięcia pęcz	ków 1	06 ns
Magnesy nadprzewod (D-4T, Q-72T/m)	zące 1	740
Obwód	3.8	8 km
Ilość zużytego Au Koszt	10 ⁻⁶ g w ciągu 20 10) lat)³ M\$

Eksperymenty: RHIC @ BNL











ARGONNE NATIONAL LABORATORY BROOKHAVEN NATIONAL LABORATORY

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

INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS, KRAKOW Rom

NATIONAL CENTRAL UNIVERSITY, TAIWAN

UNIVERSITY OF ILLINOIS AT CHICAGO

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

<u>MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY</u> 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

<u>UNIVERSITY OF MARYLAND</u> Abigail Bickley, Richard Bindel, Alice Mignerey, Marguerite Belt Tonjes

<u>UNIVERSITY OF ROCHESTER</u> 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)



Aparatura

```
Detektory krotności o dużej
akceptancji
|η| < 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

Krótka 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, $\sqrt{s_{NN}} = 56 \text{ GEV}$ PHOBOS rejestruje 1-e zderzenie 2000, 24 czerwiec Au+Au, $\sqrt{s_{NN}} = 130 \text{ GEV}$ 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)















Detektor PHOBOS

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



Komórkowe detektory krzemowe







137,000 kanałów elektroniki odczytu



Ramię spektrometru



Symulacje sygnałów z detektorów Si



>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 √s_{NN} = 130/200 GeV

Pomiar centralności zderzenia



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



Założenia

<u>monotoniczna</u> relacja (w średniej) pomiędzy

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

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



Potwierdzenie monotonicznej zależności



Wyznaczanie wierzchołka oddziaływania



Liczby przypadków zapisanych na taśmę w milionach:

√s _{NN} (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

Podłużne charakterystyki naładowanych cząstek badane w funkcji pseudorapidity, η:



centralność



Wykład 7

Poprzeczne charakterystyki naładowanych cząstek badane w funkcji p_T:



· · / · · · - · -

36
Dane z eksperymentu PHOBOS

Identyfikacja cząstek naładowanych w szerokim zakresie p_T :



....Krotności produkowanych cząstek...

Pojedynczy przypadek: 'rozwinięty' w $\eta-\phi$



Krotność naładowanych cząstek

<u>Centralne zderzenia Au+Au</u>

Całkowita krotność naładowanych cząstek-N_{ch}:

5060±250 @ 200 GeV 4170±210 @ 130 GeV 1680±100 @ 19.6 GeV

N_{ch} – zależność od energii



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

$$\left. \frac{dN \, / \, d\eta}{N_{part} \, / \, 2}
ight|_{\eta|<1}$$

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



Zależność od centralności zderzenia dla η≈0



Zależność od centralności zderzenia dla η≈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 η≈0



Model saturacji:

- Rozkład gluonów rośnie szybko dla małych x: ×G(x)~x^{-λ}
 - ~0.25 z fitów do danych HERA)

Gluony o rozmiarach π/Q² przekrywają się w płaszczyźnie poprzecznej



Przy skali saturacji gluony wypełniają całą powierzchnię poprzeczną $\pi = \pi D^2$

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

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

Poniżej skali saturacji Q_s² następuje fuzja gluonów

 $q+q \rightarrow q$

Wykład 7

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 ≈ 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)



Graniczna fragmentacja (Cu+Cu)



Wykład 7

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} ($\sqrt{s_{eff}}$ 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, ϵ (T) przy temperaturze $T_{crit} = 191 \pm 8 \text{ MeV}$ $\epsilon_{crit} = 0.7 \pm 0.2 \text{ GeV/fm}^3$
- Wzrost gęstości energii jest związany ze wzrostem liczby stopni swobody
- Materia istnieje w dwóch różnych fazach powyżej i poniżej T_{crit} , ϵ_{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 √s_{NN} = 200 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 oddziaływają bardzo silnie; system zachowuje się jak idealna ciecz (lepkość ≈ 0).

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

Ewidencja w oparciu o wyniki uzyskane przez Współpracę PHOBOS

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

Gęstość energii

<u>Centralne zderzenia Au+Au , \sqrt{s} = 200 A GeV</u>

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: $E_{part} = 0.6 \text{ GeV}$ Poprawki na cząstki neutralne oraz te dla których p_L ≥ p_T : $E_{tot}(|\eta| \le 1) = 1600 \text{ GeV}$

 Objętość w której zdeponowana jest energia Rozmiar poprzeczny ~150 fm² (Au) Rozmiar podłużny ~2.0 fm
 (2 fm=czas do osiągnięcia równowagi, oszacowany z pomiarów anizotropii pędowych)

Konserwatywne oszacowanie dolnej granicy na gęstość energii →

Gęstość energii

<u>Centralne zderzenia Au+Au , \sqrt{s} = 200 A GeV</u>

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

$$\epsilon >> \epsilon_{crit} = 0.7 GeV/fm^3$$

Gęstość energii w nukleonie ≈ 0.5 GeV/fm³ Gęstość energii w jądrze ≈ 0.15 GeV/fm³

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

...Kreacja stanu materii o wypadkowej liczbie barionowej (B-B) ≈ 0...

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 odtwarzana z dokładnością lepszą niż 1%



Stosunki cząstek – zależność od energii



Barionowy potencjał chemiczny, μ_B

μ_B – miara energii, którą należy dodać do systemu aby wyprodukować pojedynczy barion Normalna 'zimna' materia jądrowa: μ_B ≈ 920 MeV



$$N_{\beta} = e^{\mu_{\beta}/T}$$

$$N_{\overline{\beta}} / N_{\beta} = e^{-2\mu_{\beta}/T}$$

Zmierzone <K⁻>/<K⁺> i / + statystyczny model (F. Becattini et al.,PRC64,024901,2001) z T≈ 160 - 170 MeV

 $\Rightarrow \mu_{B}$

μ_B - zależność od energii

Oszacowany barionowy potencjał przy $\sqrt{s_{NN}}$ = 200 GeV: μ_B = 26 ± 2 MeV



Materia ~ wolna od barionów, tak jak we wczesnym Wszechświecie

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

Kolektywny wypływ ('flow') cząstek



Kolektywny wypływ ('flow') cząstek

Pomiar końcowej anizotropii azymutalnej

Rozwinięcie Fourierowskie rozkładów kątów azymutalnych:



 $dN/d(\phi - \psi_R) = N_0 (1 + 2v_1 \cos (\phi - \psi_R) + 2v_2 \cos (2(\phi - \psi_R)) + ...)$ fElliptic Flow: v_2 $v_2 = <\cos 2(\phi - \psi_R) > \equiv \left\langle \left(\frac{p_x}{p_T}\right)^2 - \left(\frac{p_y}{p_T}\right)^2 \right\rangle$

Wypływ eliptyczny

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)!!

 $v_2 > 0$

PHOBOS: Au+Au √s_{NN}=200 GeV

→ Silne oddziaływania między



Produkcja cząstek o bardzo małych p_T

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

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

Pomiar: $(\pi^+ + \pi^-)$ $(K^+ + K^-)$ $(p + \overline{p})$ z p_T = 0.030 – 0.200 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)

•
$$E_{loss} = \Sigma dE$$

• $M_p = \langle dE/dx \rangle E_{loss} \sim m$
(~1/ β^2) (~ $m\beta^2$)

Cięcia na dE/dx w k.płaszcz.
 "Sprawdzenie hipotezy masowej"

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

Poprawki akceptancja wydajność tło

Wykład 7

Metoda c.d.

Sprawdzenie metody:

Rekonstrukcja cząstek MC o małych pędach

Wyniki Au+Au √s_{NN}=200 GeV 15% centralne



Produkcja cząstek o bardzo małych p_T

Centralne zderzenia Au+Au √s_{NN} = 200 GeV



Nie obserwuje się wzmocnionej produkcji cząstek o małych p_T (30 MeV/c dla π^{\pm})
Widma wypłaszczają się przy małych p_T, silniej dla cięższych cząstek. $\frac{1}{2\pi} \frac{1}{m_{\tau}} \frac{d^2 N}{dy dm_{\tau}} = A[\exp(m_{\tau} / T_{BE}) - 1]^{-1} \qquad m_{\tau} = \sqrt{p_{\tau}^2 + m_{h}^2}$

$$T_{BE}^{=} 229 \text{ MeV for } (\pi^{+}+\pi^{-})$$

293 MeV for $(K^{+}+K^{-})$
392 MeV for $(p + p)$

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

Pośrednia ewidencja, że cząstki silnie oddziaływają!

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'/'próżniaQCD '



$$R_{AA} = \frac{d^2 N_{AA} / dp_T dy}{\left< N_{coll} \right> d^2 N_{pp} / dp_T dy}$$

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

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

R_{AA} – Czynnik 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 ⇒ 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} Srak tłumienia dla zderzeń d+Au



Tłumienie produkcji cząstek o dużych p_T

PHOBOS: Au+Au

mid-rapidity, 0.2<y_r<1.4 PRL 91 (2003) 072302 PLB 578 (2004) 297 1.5 45-50% 35-45% R_{AuAu1.0} 70-100% 40-70% 1.5 0.5 mid-periphera 0.5 25-35% 15-25% R_{dAu} 1.0 0-20% 20-40% 1.5 0.5 6-15% 0-6% 0.5 1.0 Au+Au 0.5 2 n 2 4 л p_T (GeV/c) centra 0 2 3 2 p_T (GeV/c) <u>Bezpośrednia ewidencja, że partony o dużym p</u>_ oddziaływają z materią o dużej gęstości energii

d+Au

6

Podsumowanie

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



Znaleziono ←'ciecz'

Składniki nowego stanu materii?? - Obiekty złożone, także kolorowe

- Czarna dziura??

'qaz'→



 \rightarrow 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



200 GeV Au+Au 6% najbardziej centralnych przypadków dN/dη = 655 ± 35 50% więcej niż w p+p



A + A Fit $dN/d\eta \approx 1300$ Model saturacji $dN/d\eta \approx 2000$ HIJING MC $dN/d\eta \approx 6000$