

# Duże pędy poprzeczne w zderzeniach relatywistycznych jonów.

Konferencja QM05 – część II

Bożena Boimska

IPJ

# Plan

- Wstęp
- Modyfikacje widm  $p_T$  w zderzeniach A+A
- Czy obserwujemy gaszenie jetów?
  - > oddziaływania  $p(d)+A$
  - > korelacje azymutalne
- Podsumowanie
- Przyszłość HI

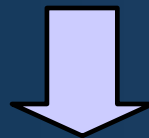


# Wyniki z konferencji Quark Matter –

Budapeszt, sierpień 2005.

W **części I** było:

- \* **charakterystyki globalne** (krotności, rozkłady prędkości)
- \* **'flow'**
- \* trochę o **'hard probes'** (cząstki z kwarkami ciężkimi, cząstki z dużym  $p_T$ ).



W zderzeniach ciężkich jąder przy wysokich energiach tworzona gęsta, gorąca materia partonowa.



# Duże $p_T$

Cząstki z dużym  $p_T$ :

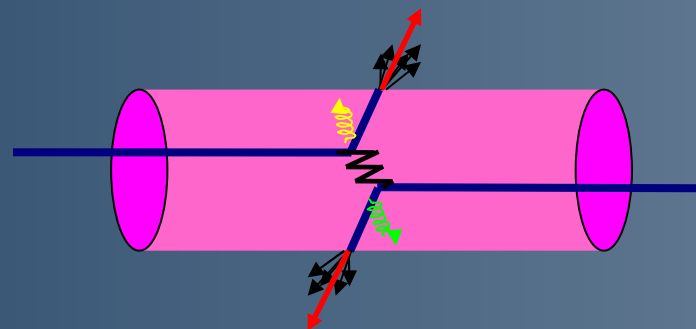
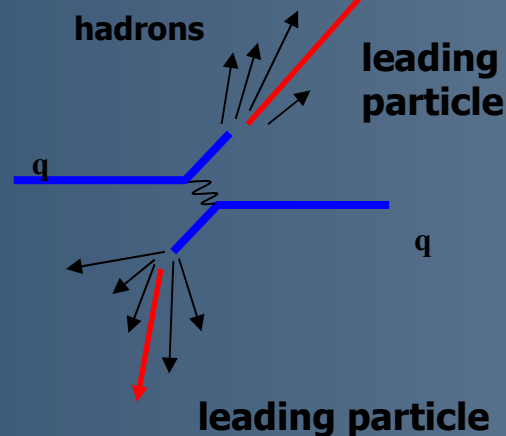
- \* pochodzą z jetów
- \* są produkowane w oddziaływaniach twardych w początkowej fazie zderzenia ( $\tau \sim 1/p_T \sim 0.1 \text{ fm}/c$ )
- \* można policzyć przekrój czynny na ich produkcję metodami pQCD.

W zderzeniach A+A:

parton, który oddziaływał twardo, porusza się w ośrodku, który jest (jeszcze) gęsty i gorący

=> **cząstki z dużym  $p_T$**  (powstałe z fragmentacji tego partonu) **niosą informację o materii powstałej zaraz po zderzeniu.**

Schematic view of jet production





# Dane:

Głównie z eksperymentów (BRAHMS, PHOBOS, PHENIX, STAR) przy akceleratorze **RHIC** w Brookhaven.

'Stare' dane:

Au+Au ( $\sqrt{s_{NN}} = 200, 130, 19 \text{ GeV}$ )

d+Au (200 GeV)

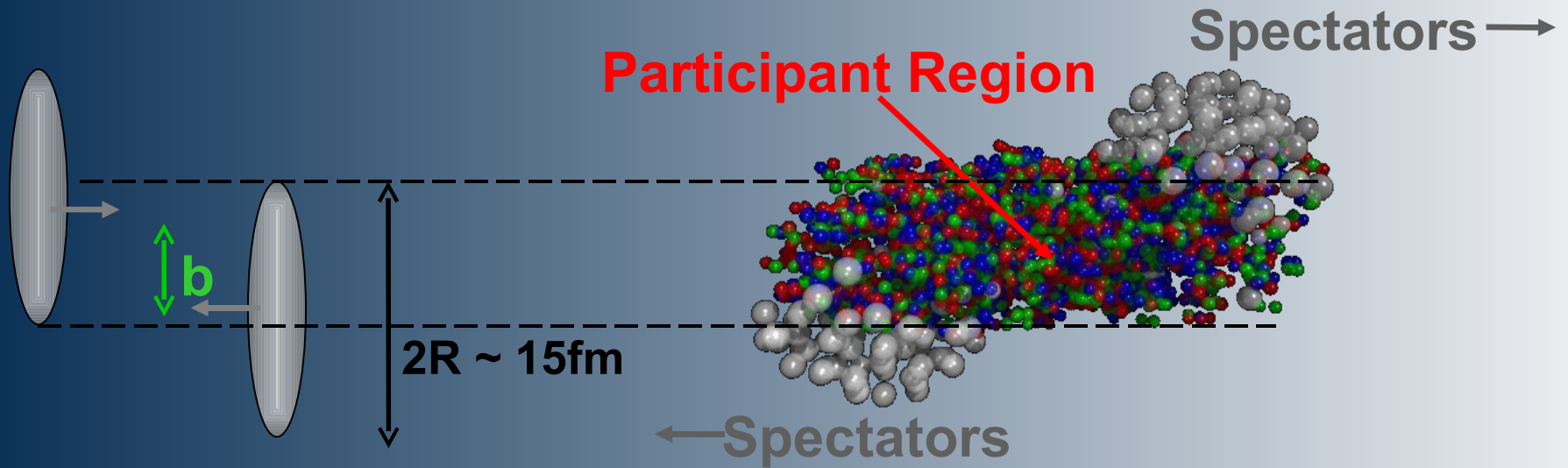
p+p (200 GeV)

Nowe dane:

Run4	Au+Au	200 GeV	„long run”, high statistics
	Au+Au	62 GeV	energy scan
Run5	Cu+Cu	200 GeV	system size
	Cu+Cu	62 GeV	energy scan
	Cu+Cu	22 GeV	

+ nowoopracowane dane z NA49 i NA57 (**SPS** w CERN) dla Pb+Pb@ $\sqrt{s_{NN}} = 17 \text{ GeV}$ .

# Wyznaczanie centralności



Mniejszy parametr zderzenia  $b$



Większy obszar zderzenia



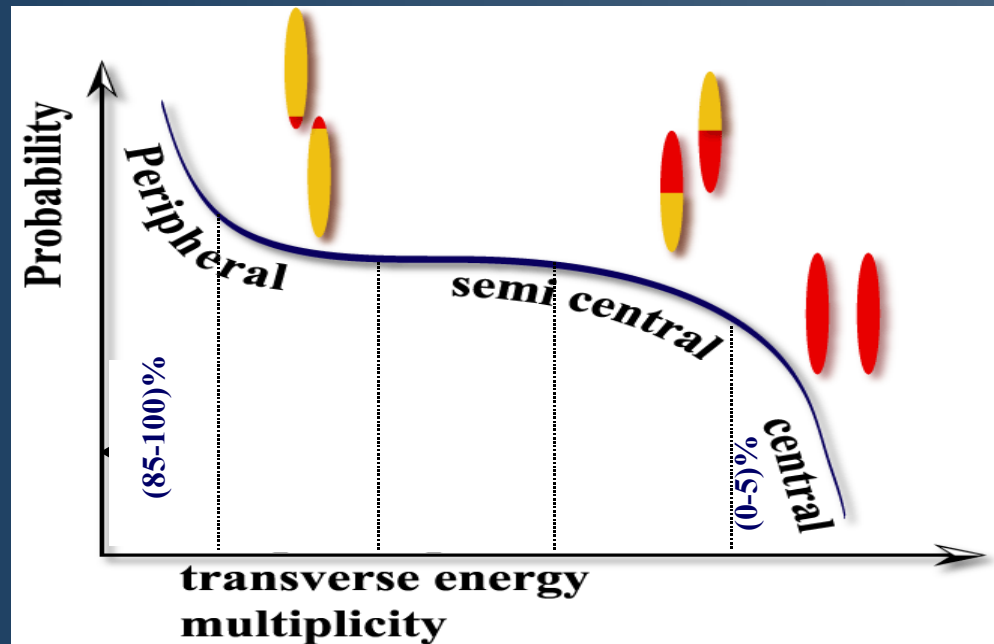
Więcej nukleonów uczestników  $N_{\text{part}}$  i zderzeń  $N_{\text{coll}}$



# Wyznaczanie centralności

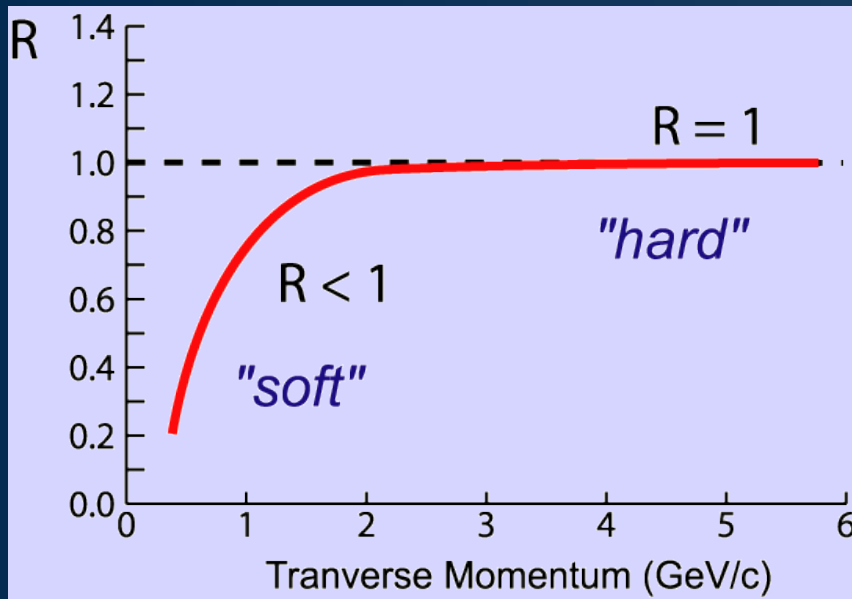
- Niestety nie da się zmierzyć parametru zderzenia  $b$

- Eksperymenty przy RHICu, centralność parametryzują przez liczbę zderzeń  $N_{coll}$  i liczbę uczestników  $N_{part}$



- Mierzy się rozkłady krotności cząstek naładowanych, i rozdziela na przedziały danego ułamka całkowitego przekroju nieelastycznego -  $\sigma$
- Z modelu Glaubera wylicza się  $N_{coll}$  i  $N_{part}$  odpowiadające danemu przedziałowi  $\sigma$

# Nuclear modification factor - R



$$R_{AA} = \frac{\text{Yield}(AA)}{N_{\text{COLL}}(AA) \times \text{Yield}(NN)}$$

Scaled N+N reference

również używane:

$$R_{CP} = \frac{\text{Yield}(\text{centr.})/N_{\text{COLL}}(\text{centr.})}{\text{Yield}(\text{periph.})/N_{\text{COLL}}(\text{periph.})}$$

\* małe  $p_T$  - miękkie oddziaływania: skalowanie z liczbą partycypantów  $N_{\text{part}} \Rightarrow R < 1$

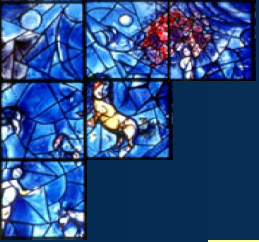
\* duże  $p_T$  - twarde oddziaływania : skalowanie z liczbą zderzeń  $N_{\text{coll}} \Rightarrow R = 1$

Coś ciekawego dzieje się gdy:

$R > 1$  - wzmocnienie

$R < 1$  - tłumienie

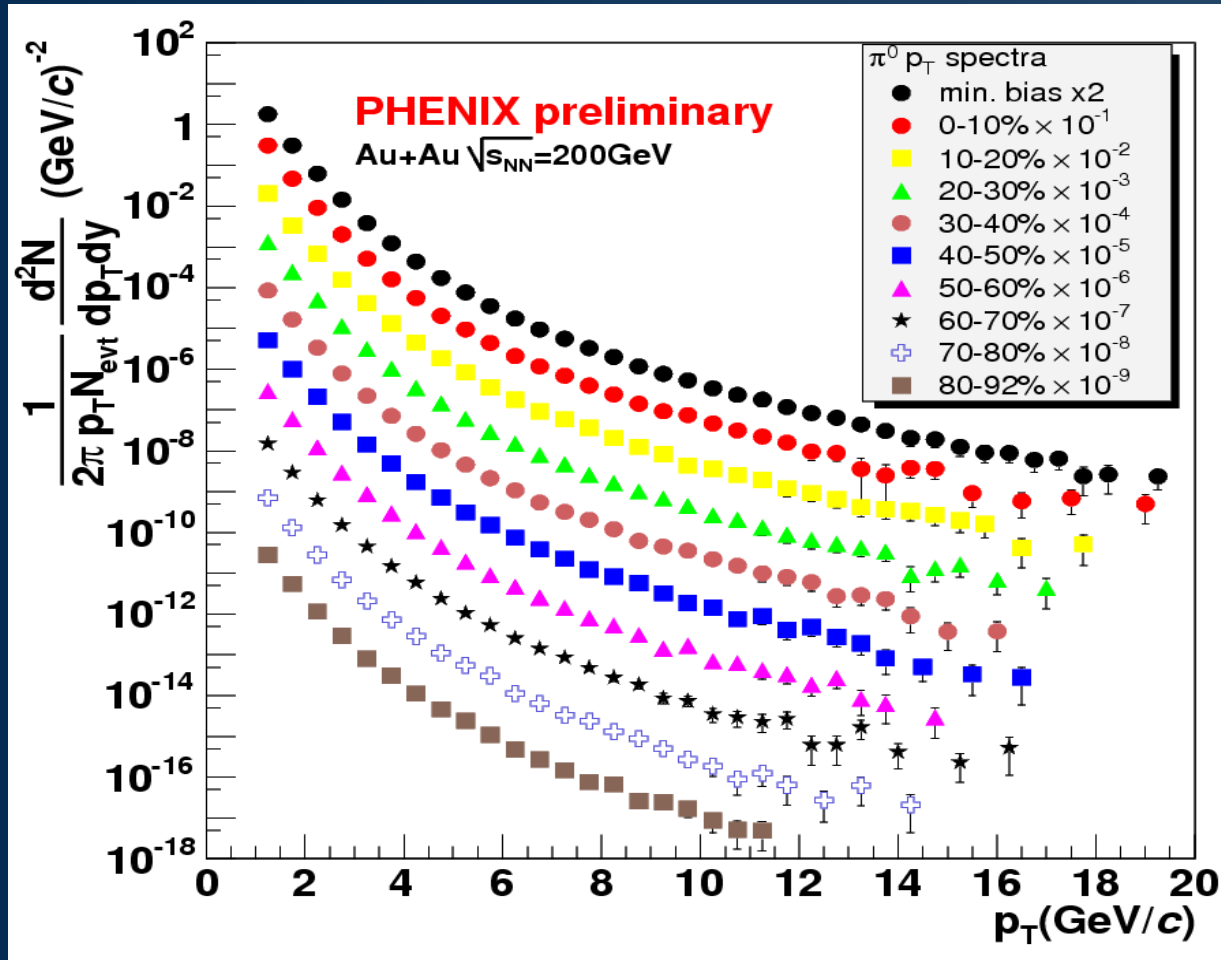




# Widma $p_T$

## Au+Au@200GeV

B.Cole



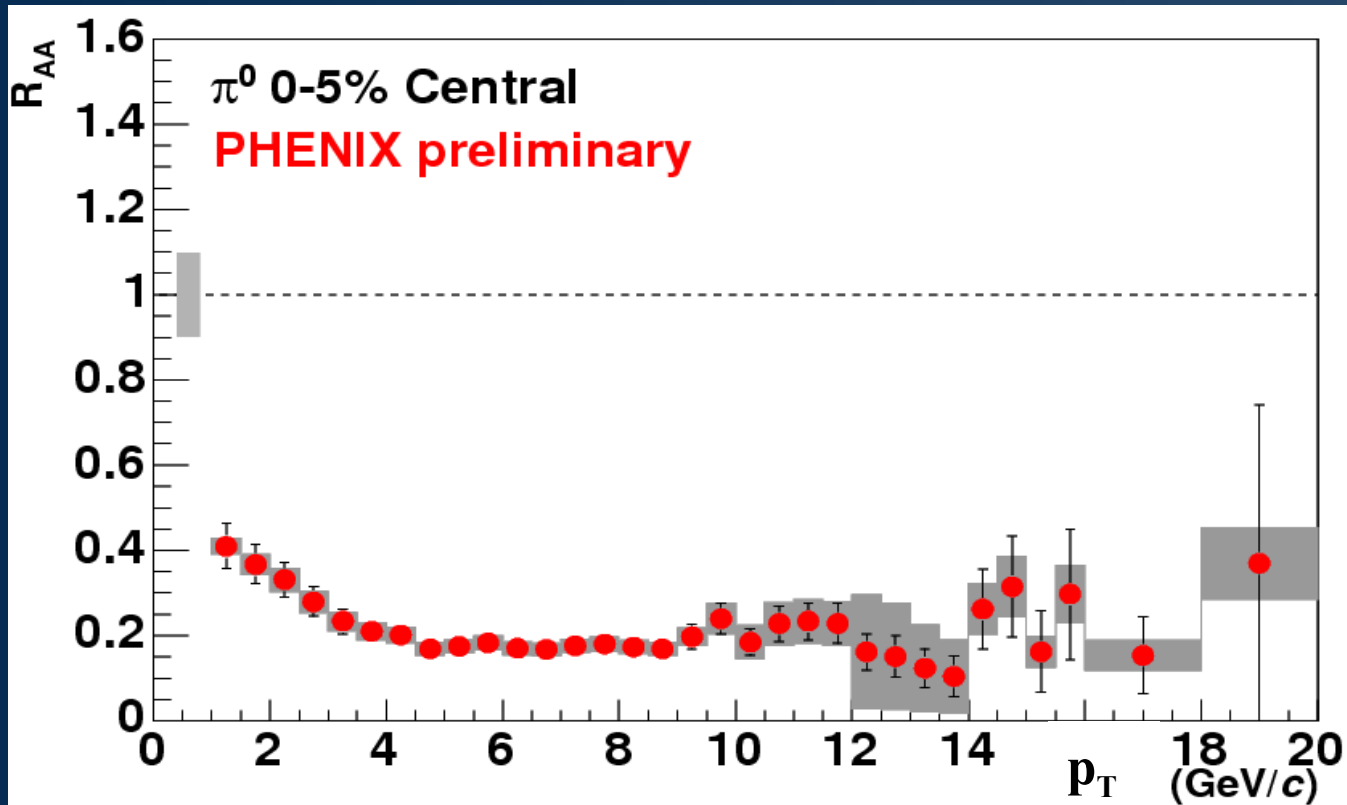
$\pi^0$

Duży zakres  
mierzonych  $p_T$  –  
aż do **20 GeV/c**

# R - zależność od centralności

Au+Au@200GeV

B.Cole



**Tłumienie**  
- rośnie z centralnością

dla centralnych: efekt bardzo silny ( $R_{AA}=0.2!$ )

dla  $p_T$  od 4 do 20 GeV/c  $\sim$  const.

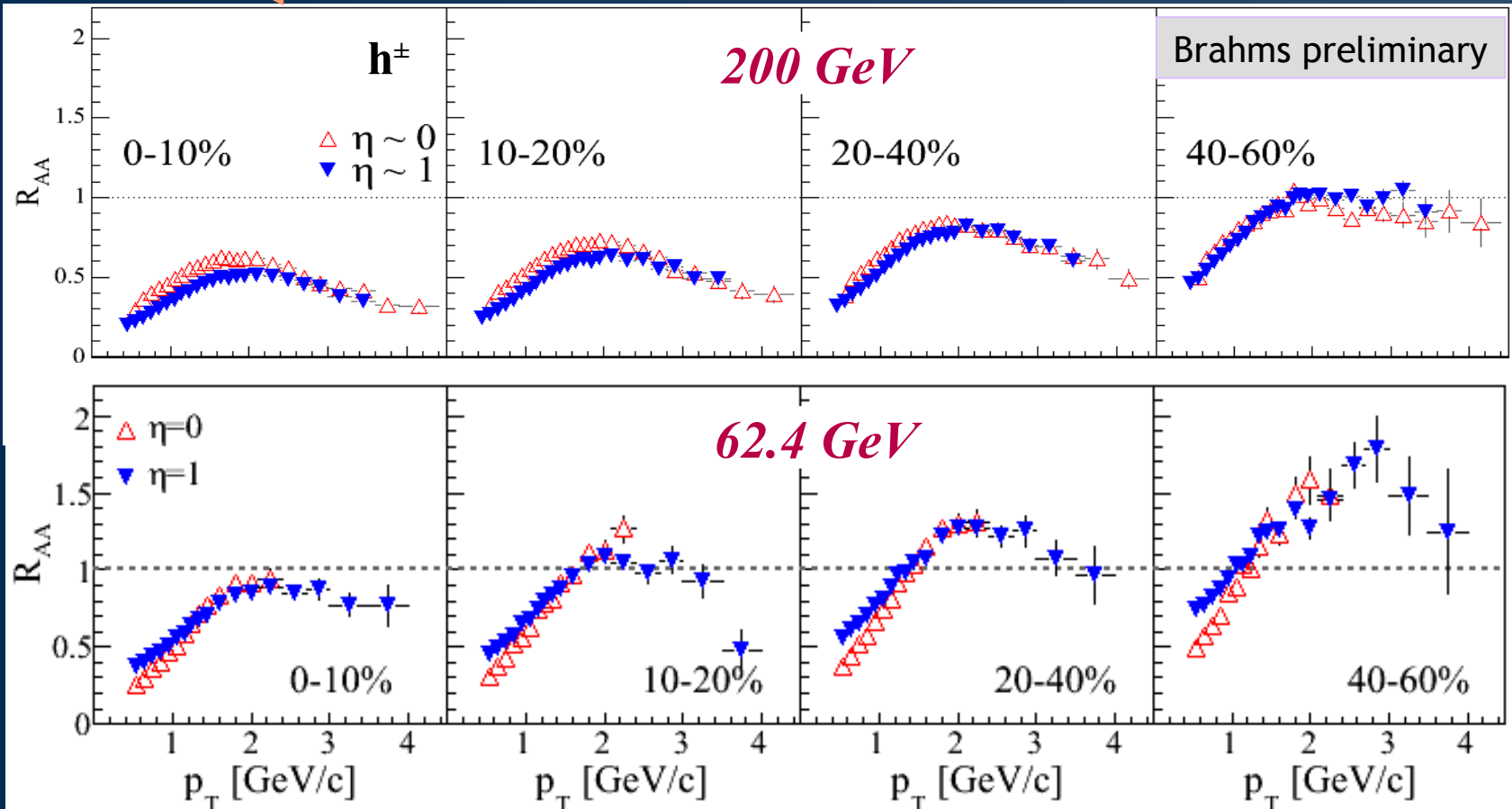
=>bardzo gęsty ośrodek(?)

# R - zależność od energii

Au+Au@200GeV & Au+Au@62GeV

centralność

P.Staszek



200 GeV pp reference from BRAHMS data – PRL 93, 242303 (2004)

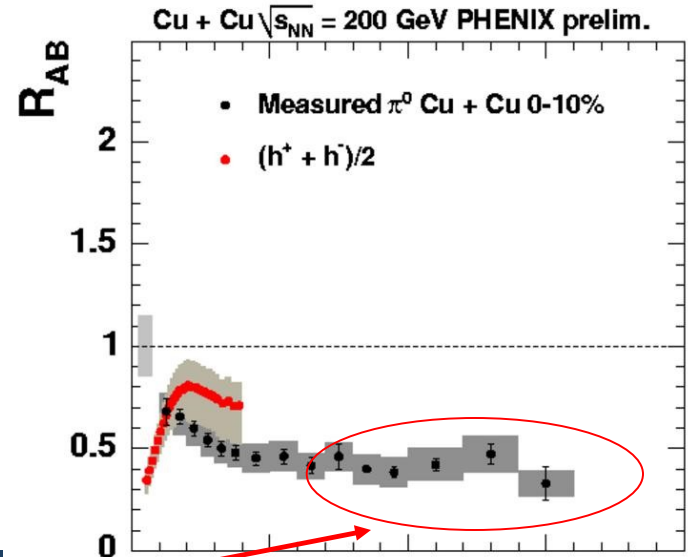
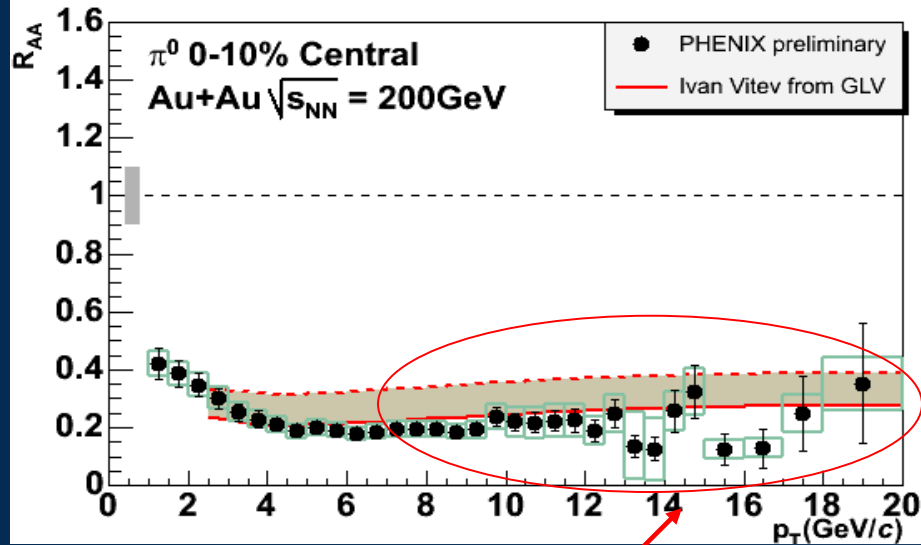
62.4 GeV pp reference is based on ISR collider data

Po obniżeniu energii do 62GeV:

- dla 'pół-centralnych' – wzmacnienie
- dla centralnych - tłumienie (ale mniejsze niż dla 200GeV)

# Au+Au vs. Cu+Cu

V. Greene

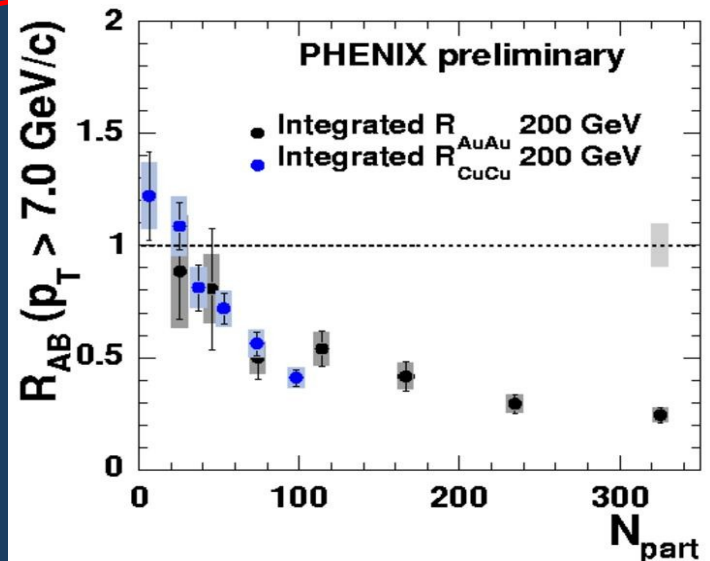


Pomiar dla dużych  $p_T$

dla centr. Cu+Cu@200GeV - tłumienie

Zależność od centralności:  
 $R_{AA}(p_T > 7\text{ GeV}/c)$

Cu+Cu podobne do Au+Au  
przy danym  $N_{part}$

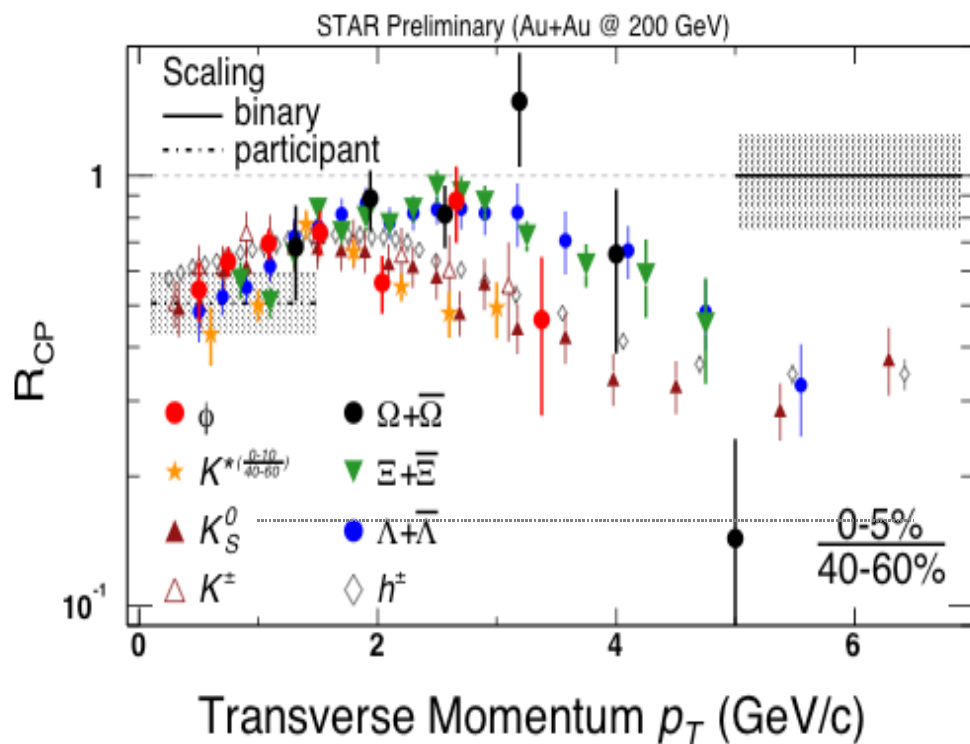
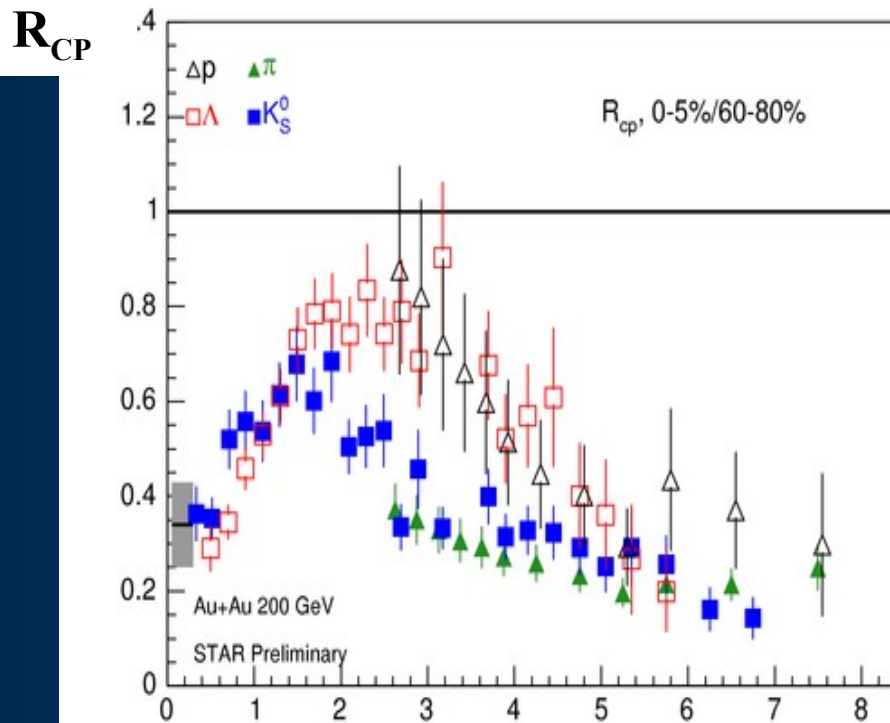




# R - zależność od rodzaju cząstki

## Au+Au@200GeV

D.Roehrich



Dla średnio-dużych  $p_T$  widoczne różnice pomiędzy cząstkami.

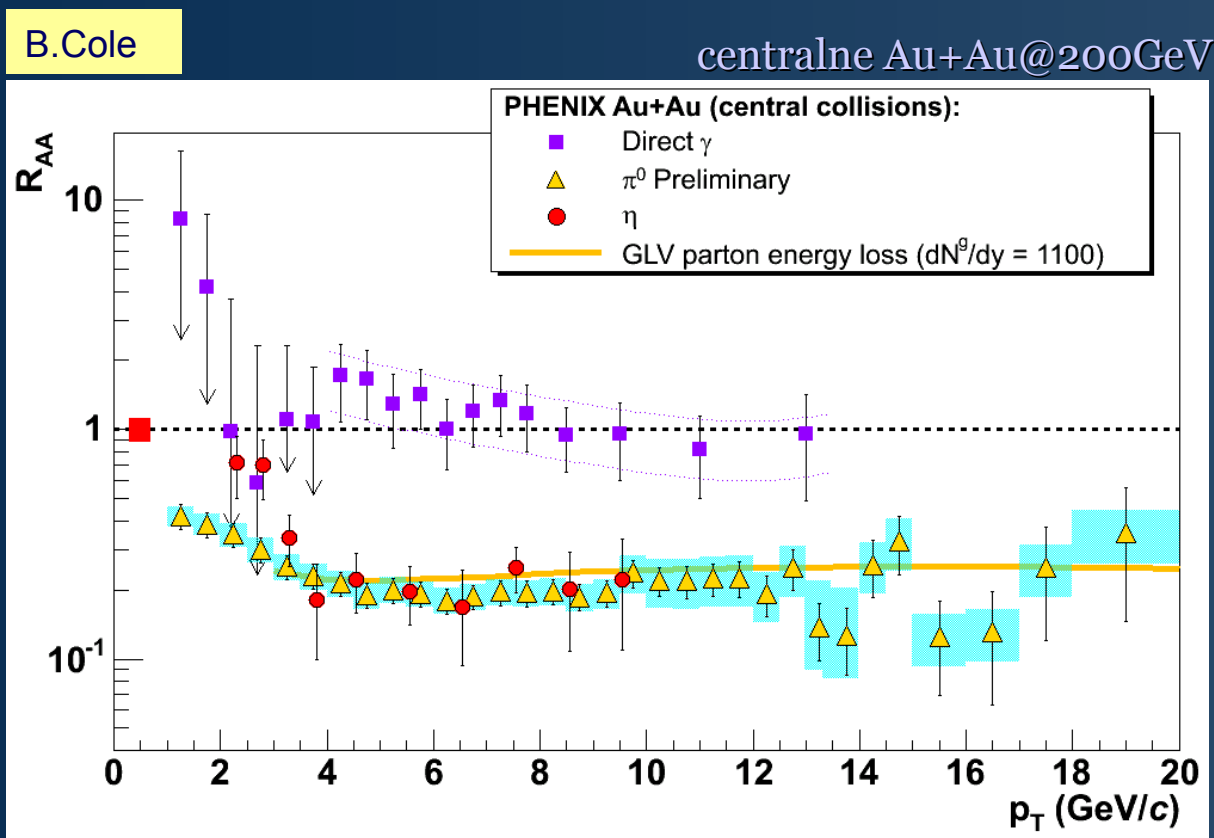
Efekt masowy czy partonowy? => zbadać np.  $\phi$

Różnica mezon-barion => różny mechanizm produkcji (rekombinacja(?))



# R - zależność od rodzaju cząstki

## Fotony bezpośrednie ('prompt photons')



Duże  $p_T$  :

$\pi^0, \eta$   $R_{AA} < 1$

'prompt'  $\gamma$   $R_{AA} = 1$  (skalowanie z  $N_{coll}$ ) - zgodne z oczekiwaniami

14

bo  $\gamma$  nie oddziałują silnie z ośrodkiem

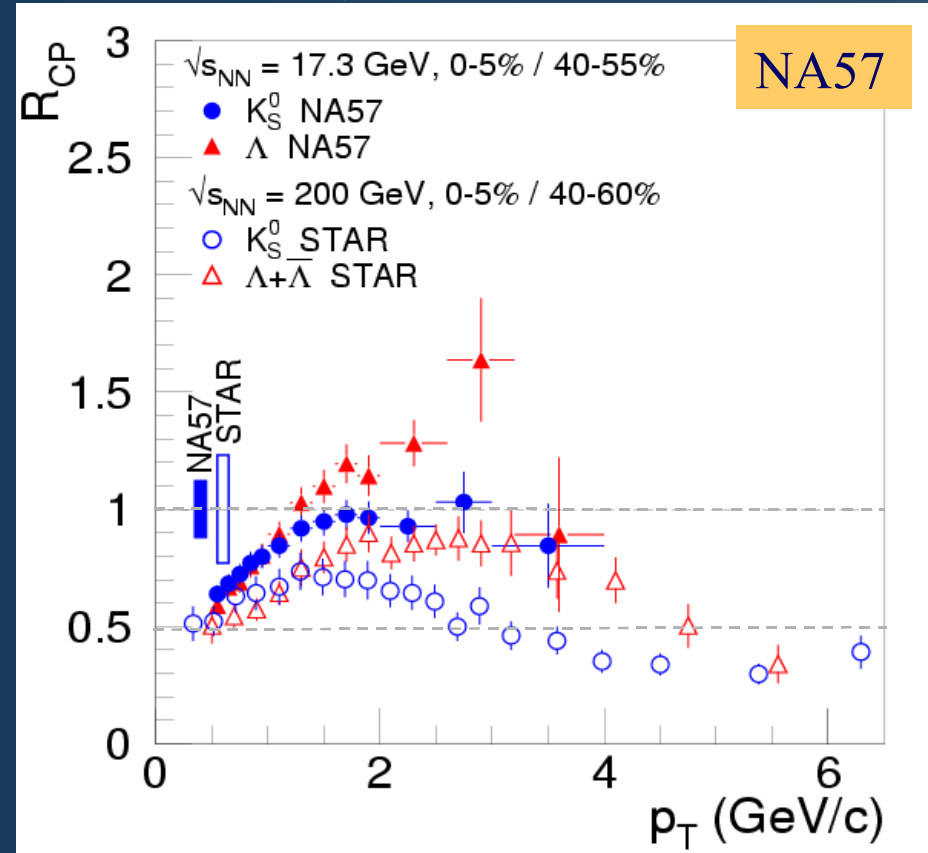
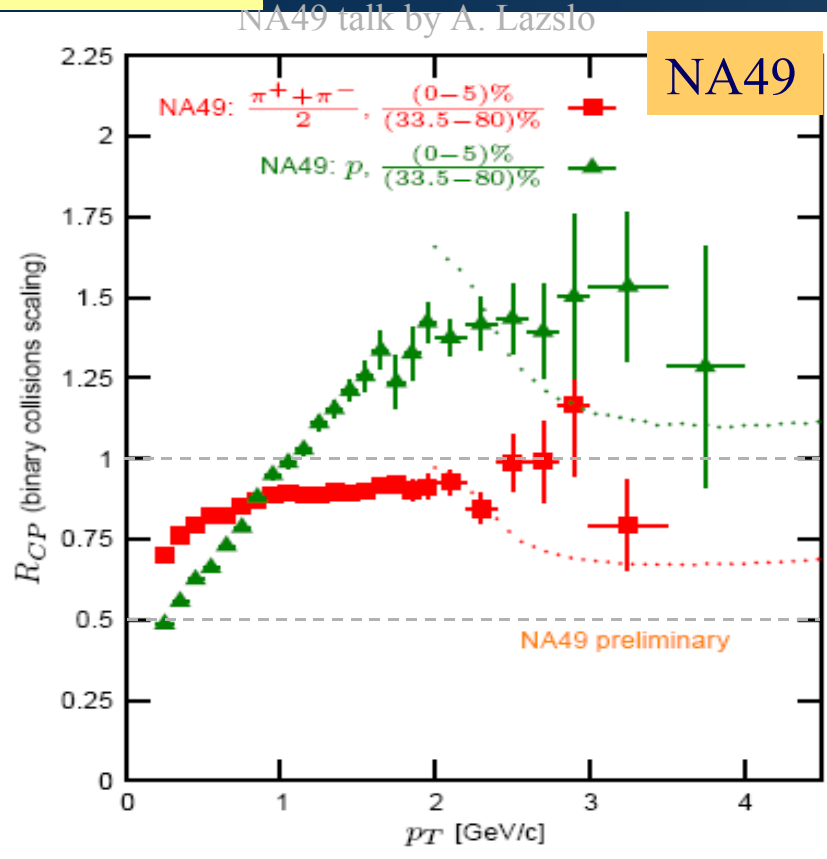


# Zależność od energii raz jeszcze ...

## Nowe dane dla SPS: Pb+Pb@17GeV

M. van Leeuwen

NA57 talk by A. Dainese; nucl-ex/0507012



Stare dane dla SPS - WA98, Eur.Phys. J. C23, 225 (2002) – niekonkluzywne

Nowe dane NA49 i NA57:

- **R(barion) > R(mezon)** - podobnie jak przy RHICu
- dla barionów – **wzmocnienie**
- dla mezonów – **niewielkie tłumienie!** (RHIC – silne tłumienie)



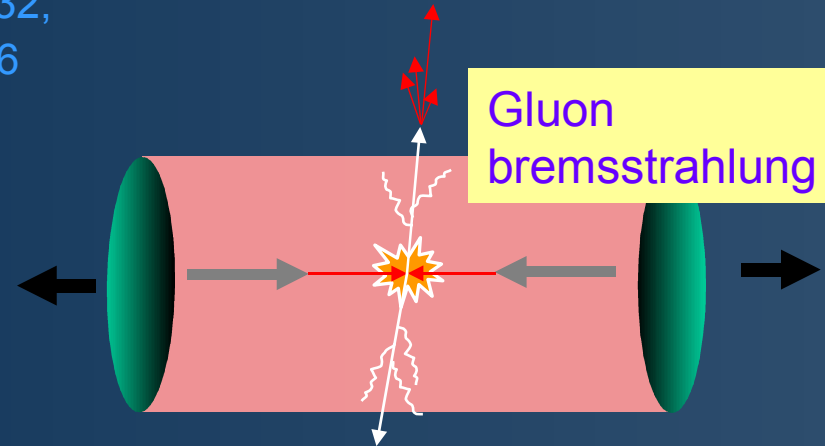
# Co na to teoria?

**Efekt tłumienia produkcji cząstek z dużymi  $p_T$  przewidziany zanim uruchomiony RHIC:**

M.Gyulassy et al. Phys.Lett.B243(1990)432,  
X.N.Wang et al. Phys.Rev.D51(1995)3436

**'jet quenching'**

**radiacyjne straty energii  
przez wysokoenergetyczne  
partony poruszające się w  
gęstym ośrodku partonowym**

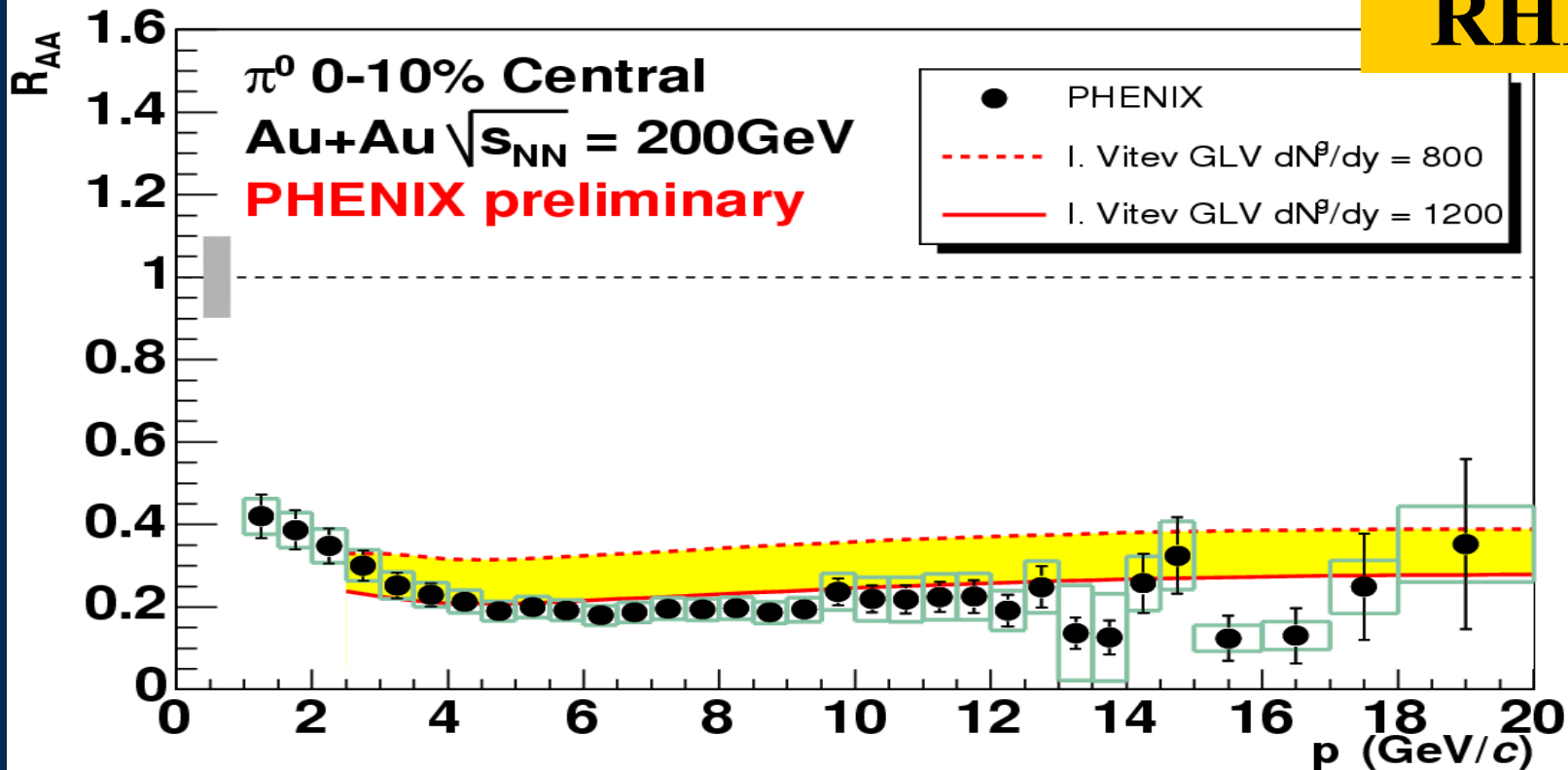


**High gluon density  
requires deconfined  
matter ("indirect" QGP  
signature !)**

# Eksperyment vs. Teoria

I. Tserruya

RHIC



Modele pQCD+'energy loss' :

- dobrze opisują dane eksperymentalne dla dużych  $p_T$
- pozwalają uzyskać informację o wytworzonej materii

np. o gęstości gluonów:  $dN^g/dy \sim 400-600$  dla SPS

$dN^g/dy \sim 1200$  dla RHIC

# Podsumowując ...

## Duże $p_T$

- Centralne Au+Au@200GeV -  $R < 1$  tłumienie
- Efekt słabszy (mniejsze tłumienie) gdy:
  - mniej centralne zderzenie
  - lżejsze jądra
  - niższa energia (początki tłumienia widoczne przy SPS)

## Średnio-duże $p_T$

- Widoczna **zależność od typu cząstki** (mezon-barion)

Efekt tłumienia tłumaczony przez modele teoretyczne poprzez tzw. **'jet quenching'**.

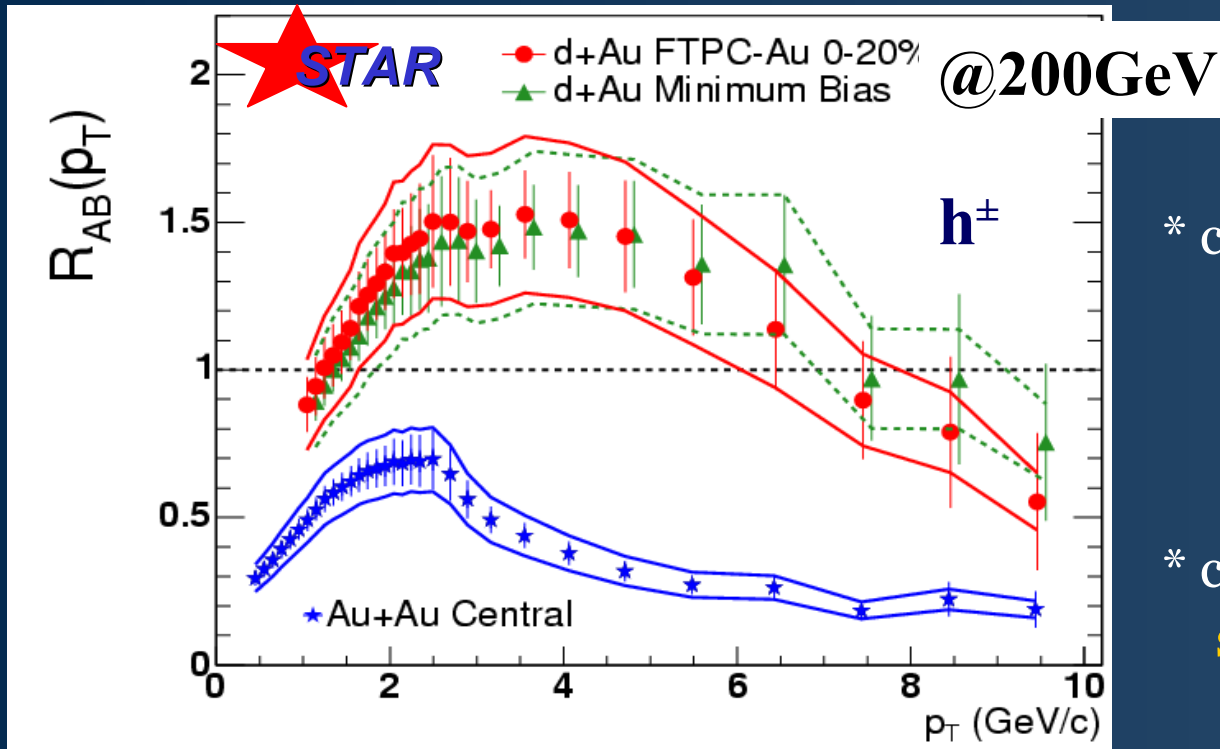
Jak sprawdzić czy obserwowany efekt może być rzeczywiście wynikiem gaszenia jetów?

⇒ **Badanie prostszych systemów:  $p(d)+A$**  (nie spodziewamy się tworzenia gęstej, gorącej materii).

⇒ **Badanie jetów**

# Porównanie d+Au & Au+Au

C. Gagliardi



\* centralne d+Au  
brak tłumienia,  
 **$R > 1$  - wzmożenie**  
(rośnie z centralnością)

\* centralne Au+Au  
silne tłumienie

Pokazywane już na QM'03 w Oakland



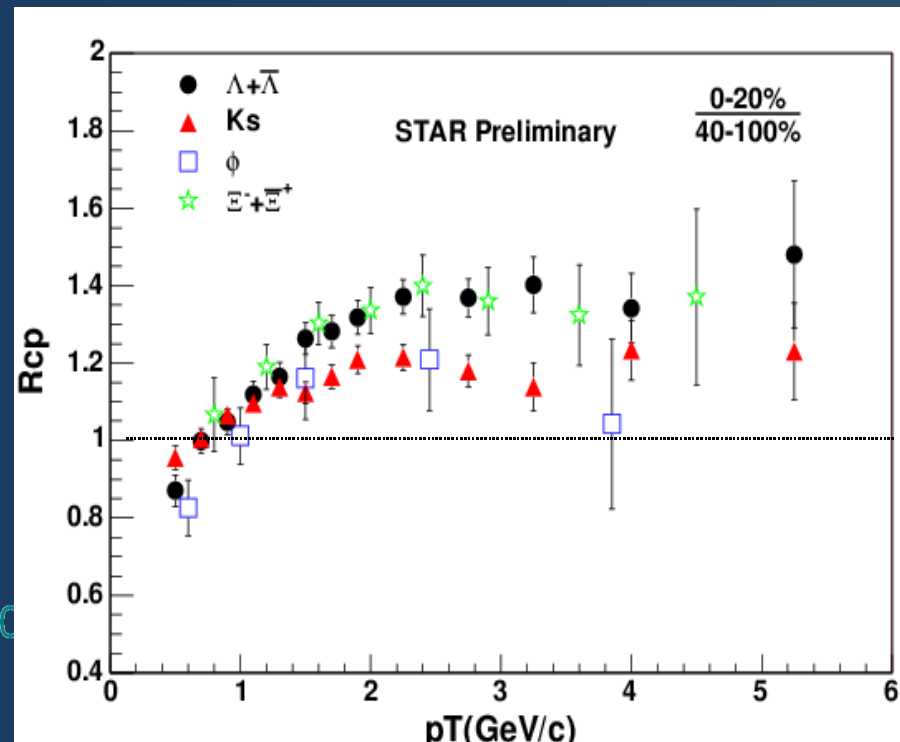
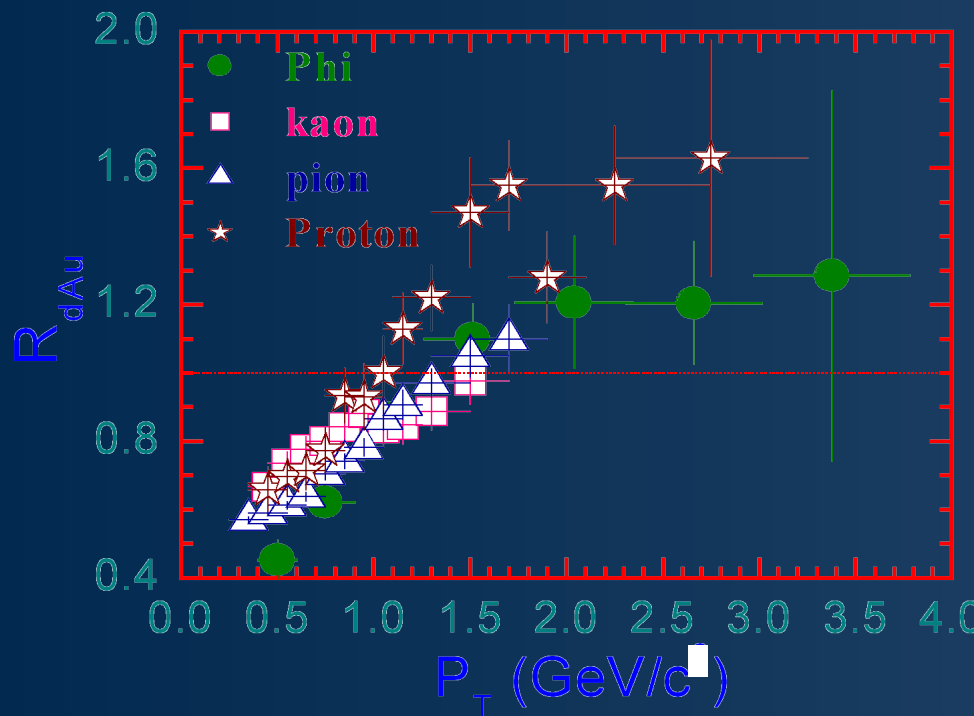
Tłumienie produkcji cząstek z dużym  $p_T$  w Au+Au wynik  
wytworzonej w zderzeniu gęstej materii partonowej  
=> **Mamy 'jet quenching'**



# Badanie zderzeń d+Au@200GeV

## R - zależność od rodzaju cząstki

X. Cai



Dla  $p_T > \sim 1 \text{ GeV}/c$ :

- \*  $R > 1$  - **wzmocnienie** (efekt Cronina)
- \*  $R(\text{barion}) > R(\text{mezon})$  - podobnie jak dla Au+Au

Czy tu też rekombinacja?

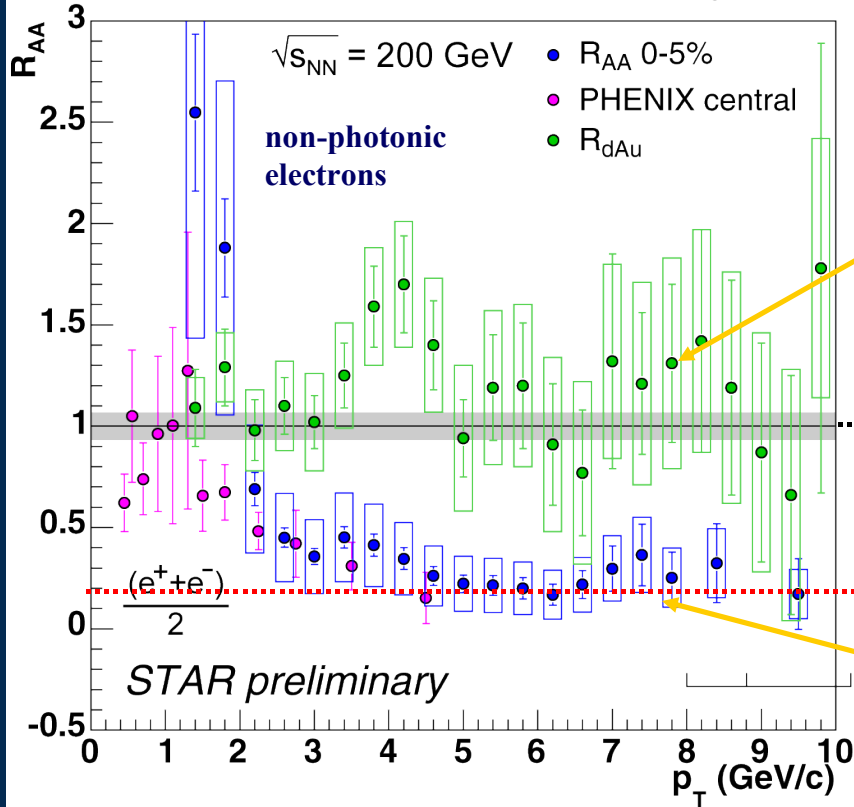


# R - zależność od rodzaju cząstki

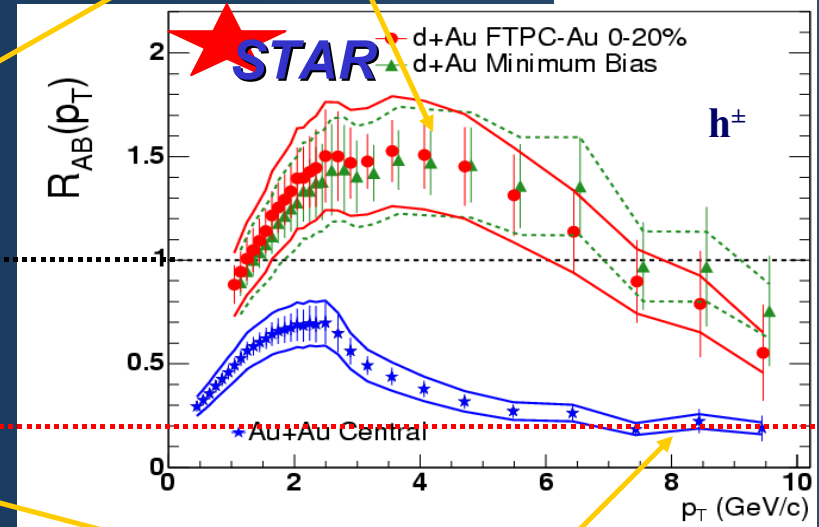
## Oddziaływanie z materią: kwarki ciężkie vs. lekkie

C. Gagliardi

Heavy quarks



Light quarks



d+Au

Au+Au

Heavy quarks:

**d+Au:**  $R \sim 1$  - skalowanie z  $N_{coll}$

**Au+Au:**  $R \sim 0.2$  - tłumienie; podobne jak dla kwarków lekkich

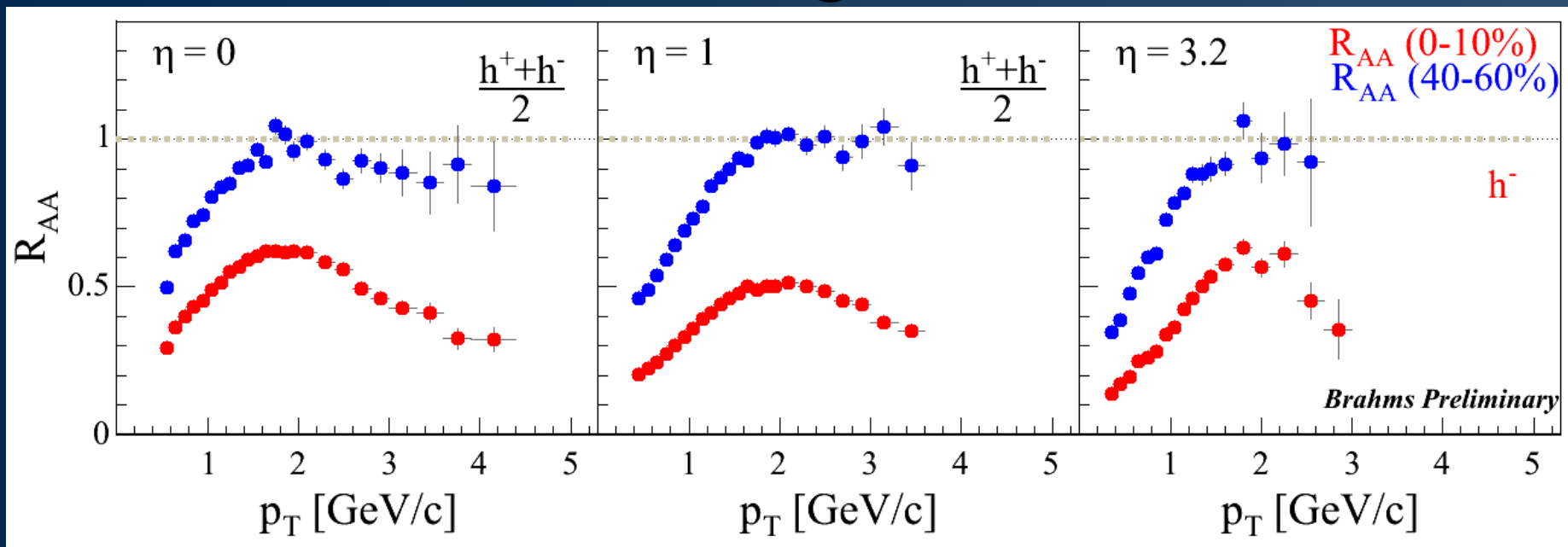


# R - zależność od prędkości

## Co dzieje się poza obszarem centralnym ?

P.Staszal

### Au+Au@200GeV



**Brak wyraźnej zależności od prędkości dla obu badanych centralności.**

Czy oznacza to, że gęsta materia partonowa powstająca w centralnych zderzeniach rozciąga się aż do  $y=3$ ?

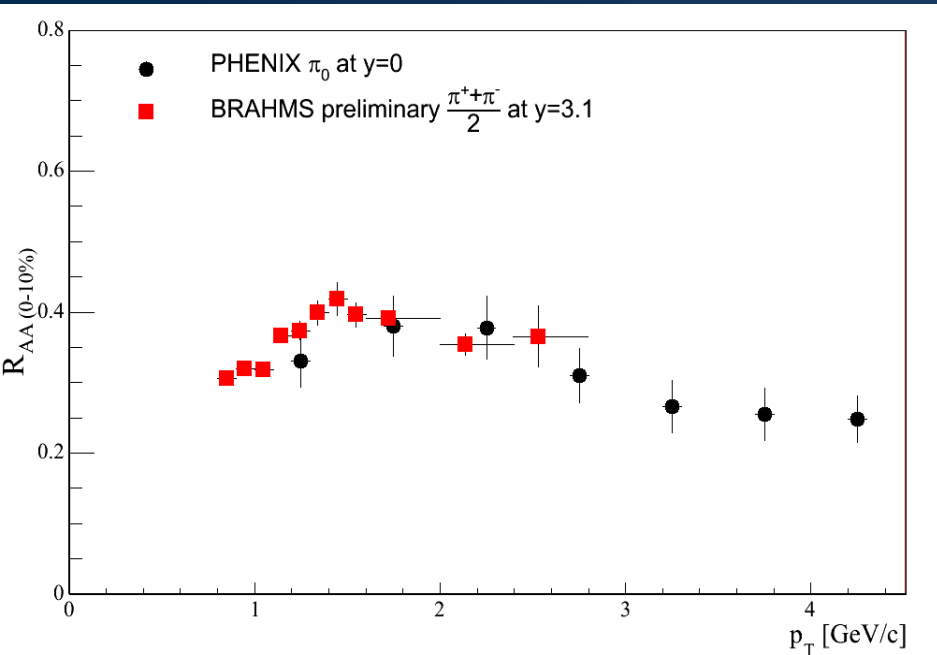


# R - zależność od prędkości

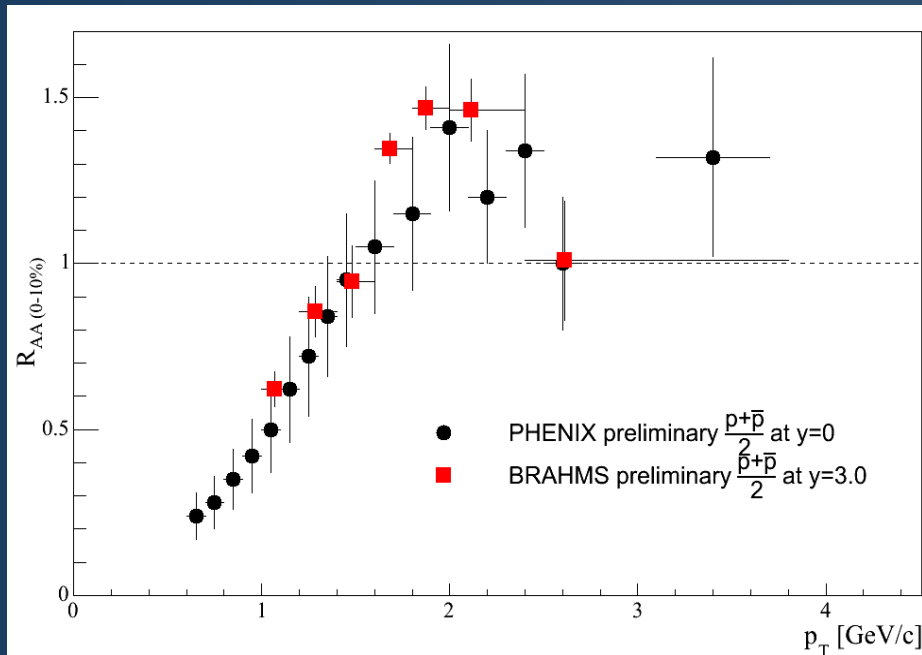
## Cząstki zidentyfikowane

centralne Au+Au@200GeV

I. Tserruya



Piony:  $y=0$ ,  $y=3.1$



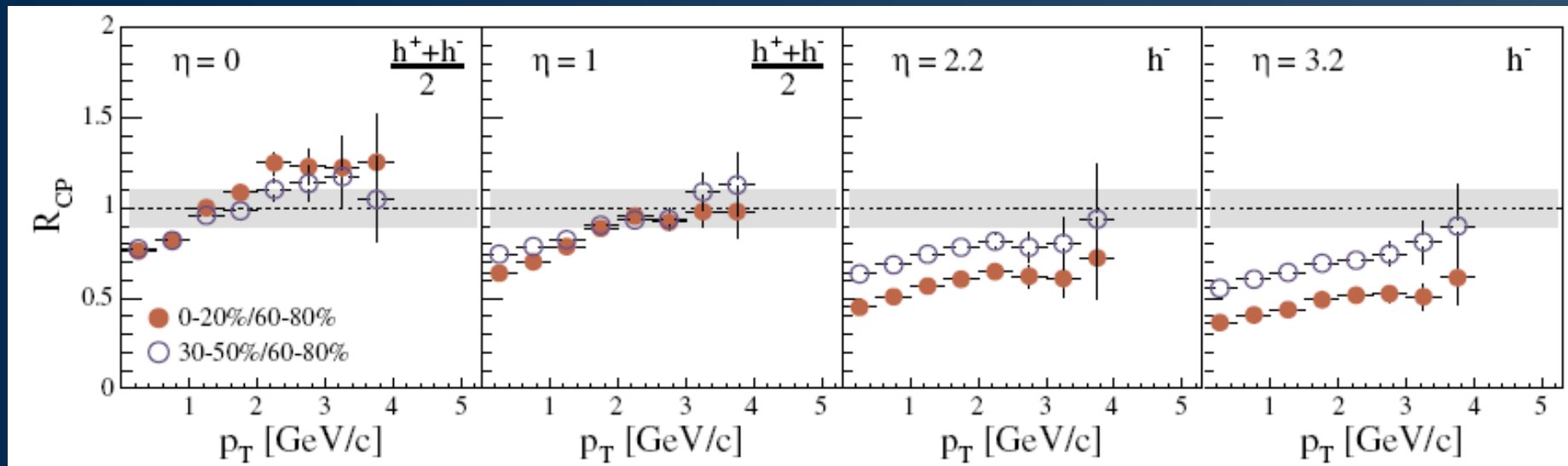
Protony:  $y=0$ ,  $y=3$

brak zależności od prędkości



# R - zależność od prędkości d+Au@200GeV

D.Roehrich



BRAHMS: PRL 93, 242303 (2004)

## Inaczej niż dla Au+Au:

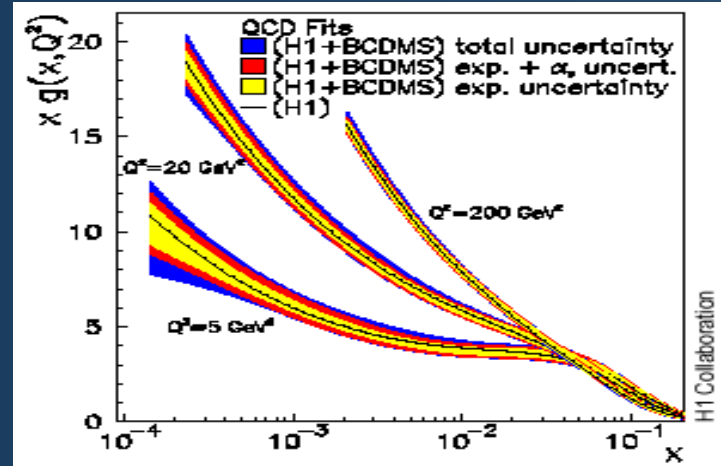
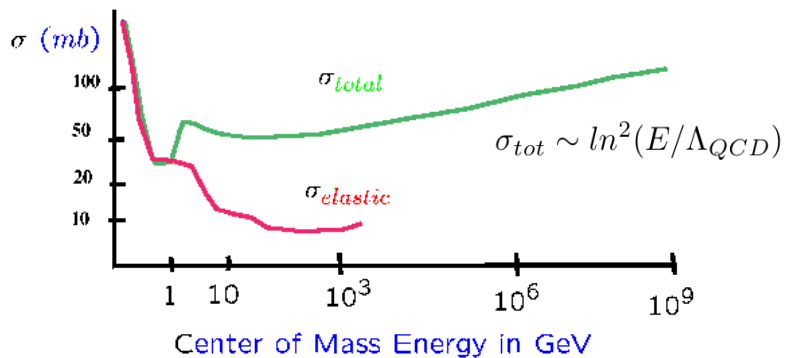
- zależności od prędkości (R maleje)
- zależność od centralności (efekt silniejszy dla zderzeń centralnych)

Efekty obserwowane w d+Au tłumaczone przez modele saturacyjne.

# Saturacja gluonów

I. Tserruya

The total hadronic cross section:



dla wysokich energii całkowite przekroje czynne rosną wolno z energią

przy maleniu  $x$  gęstość gluonów gwałtownie rośnie

Dla małych  $x$  gluony gęsto upakowane, stąd oddziaływania między nimi („gluon-gluon fusion”) i dlatego gęstości gluonów ograniczone („gluon saturation”)

-Color Glass Condensate (CGC) D.Kharzeev et al. PLB 561 (2003) 93

\* CGC poprawnie opisuje dane z HERA dla  $x < 10^{-2}$

\* Dla oddziaływań jądrowych efekt powinien być silniejszy (zależność od  $A$ ), bo większe gęstości gluonów.

**Dla RHIC  $\sqrt{s}=200\text{GeV}$   $y=3$   $p_T=1\text{GeV}/c$ :  $x \sim 10^{-3}$  => efekty saturacji gluonów**

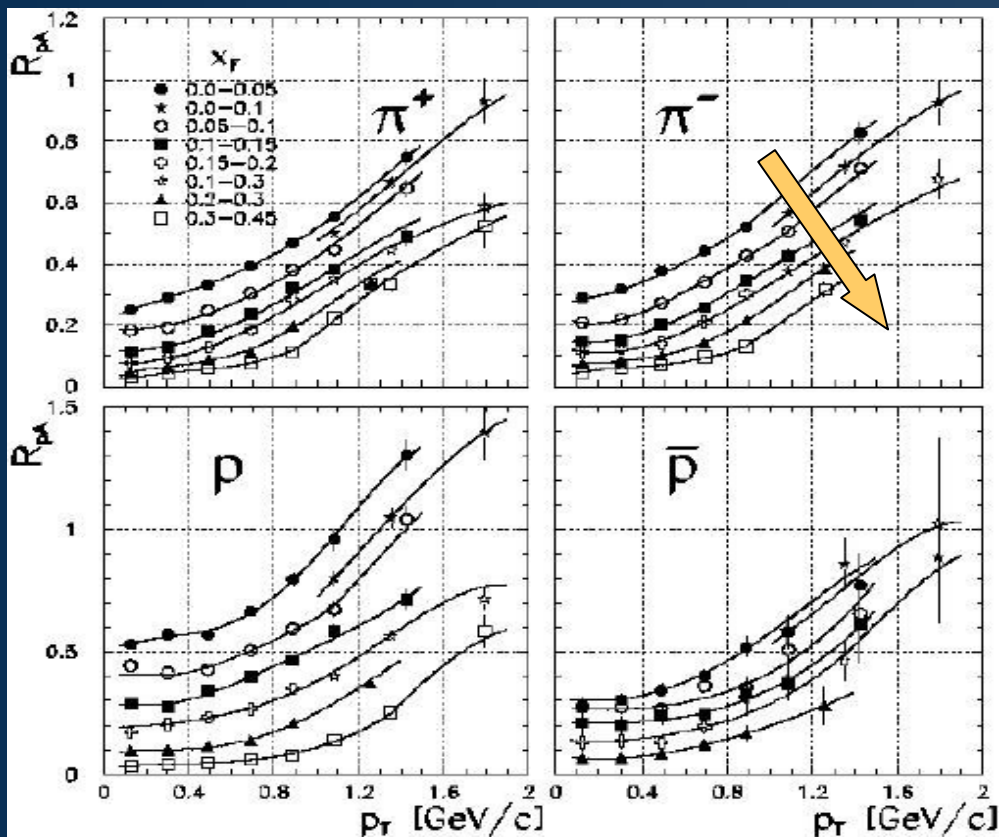
mogłyby być widoczne



# Jednak już przy SPS ...

centralne p+Pb@17GeV

D.Roehrich



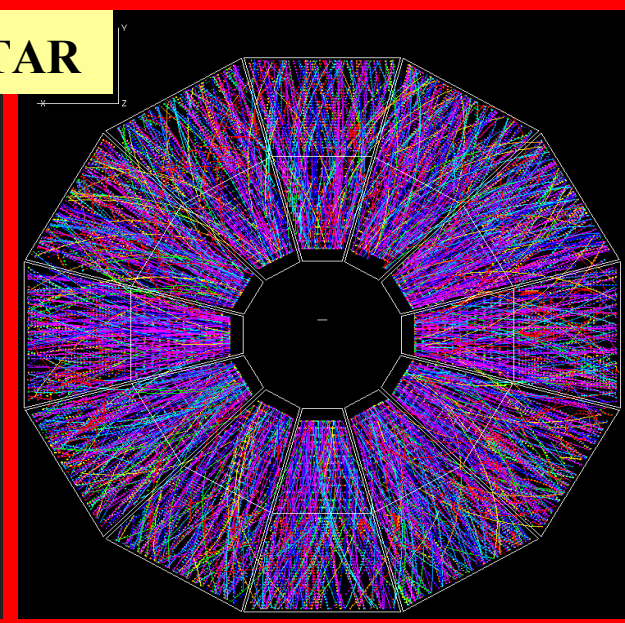
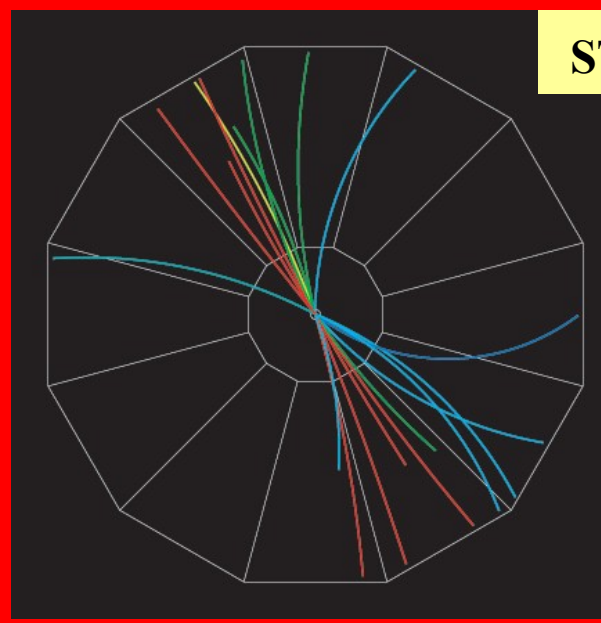
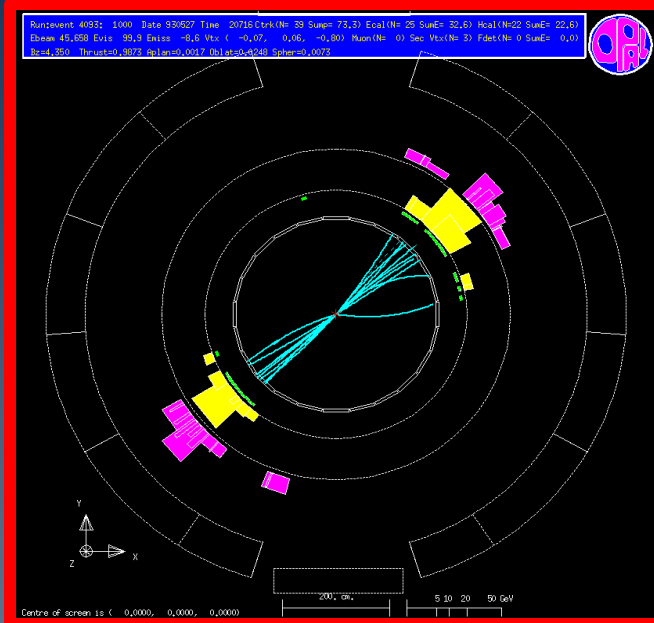
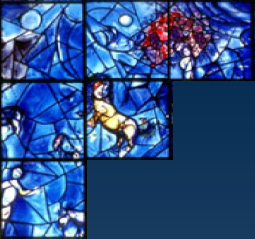
gdy  $x_F$  rośnie:  
**R maleje**

B.B. PhD

Saturacja gluonów? Raczej NIE



# Wracając do jetów ...



$e^+ + e^- \rightarrow \text{jet} + \text{jet}$

$p + p \rightarrow \text{jet} + \text{jet}$

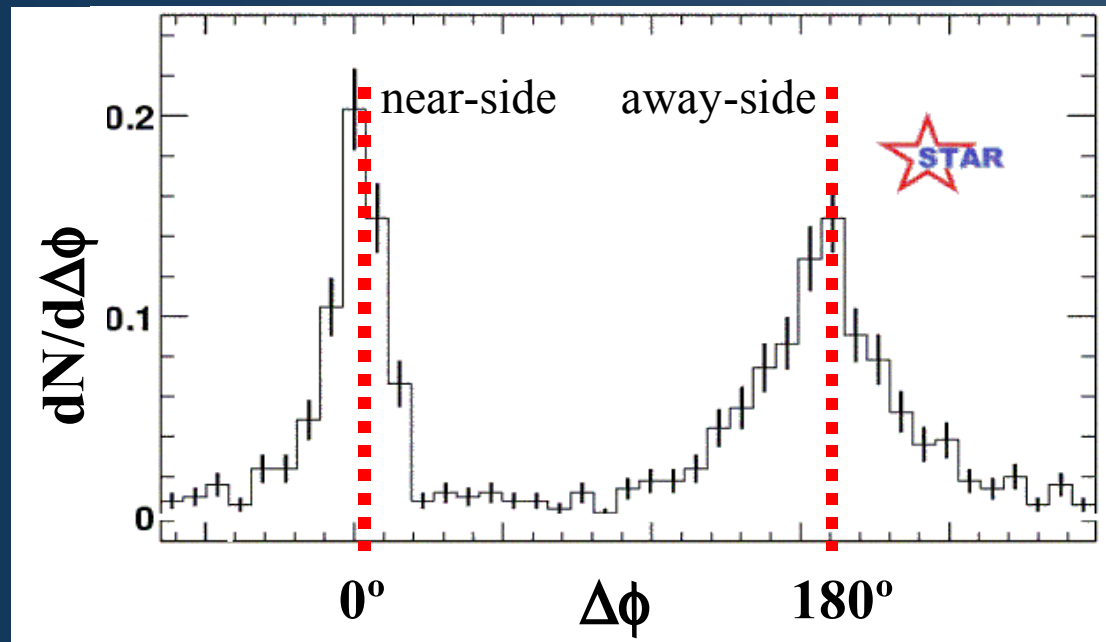
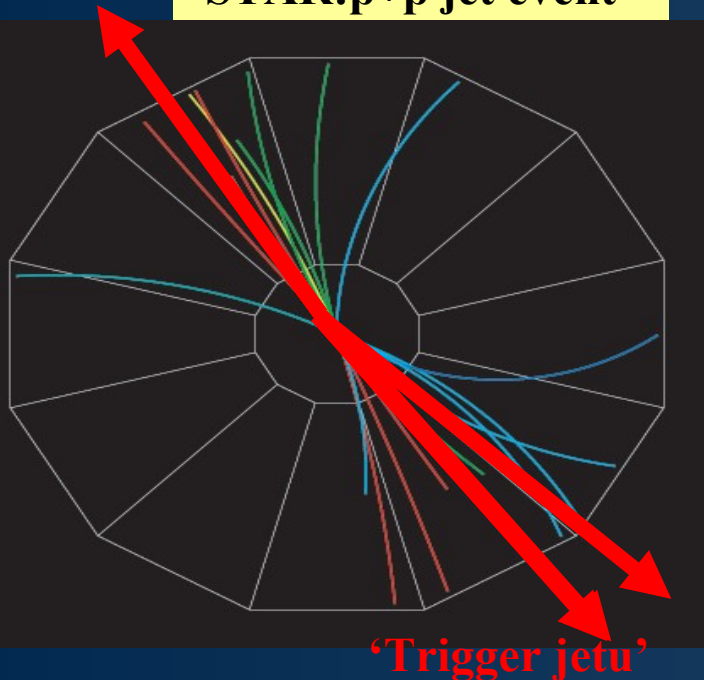
$\text{Au} + \text{Au} \rightarrow \text{stuff}$   
 $+ \text{jet} + \text{jet}$

Dla zderzeń A+A:

- zbyt duże krotności by stosować algorytmy jetowe
- badanie jetów poprzez korelacje azymutalne

# Korelacje azymutalne

STAR:p+p jet event



## Szukanie jetów (procedura statystyczna):

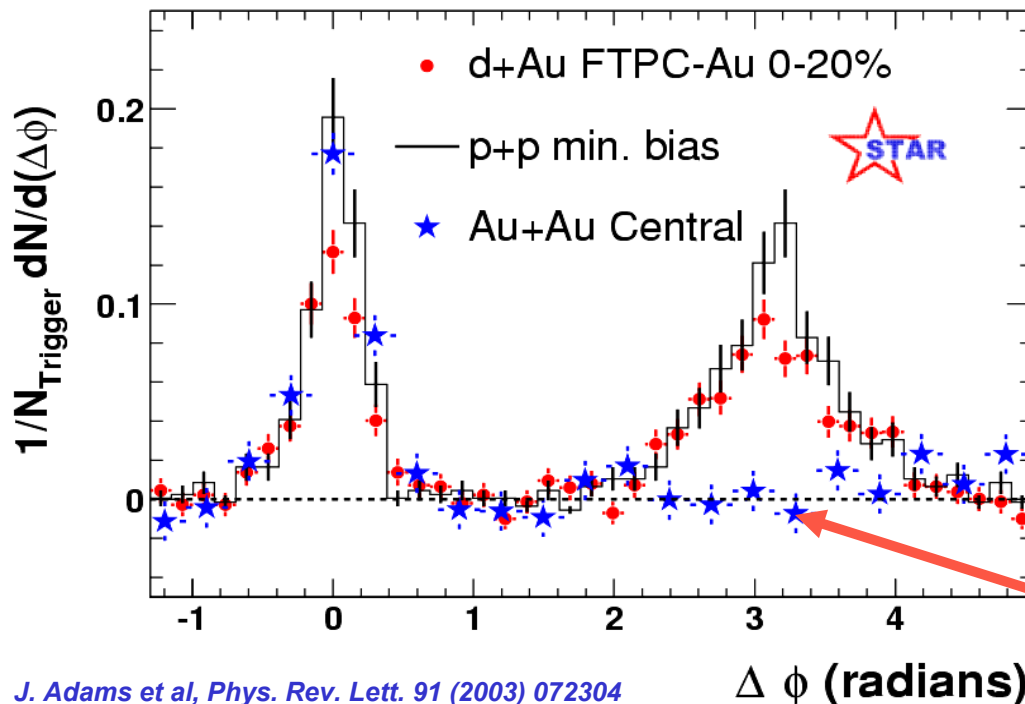
- Szukamy cząstki z dużym  $p_T$  (powyżej pewnego progu) – ‘trigger jetu’
- Patrzymy na korelacje azymutalne pomiędzy triggerem a innymi cząstkami, tzn. na rozkład  $1/N_{\text{trig}} dN/d(\Delta\Phi)$

trzeba ‘odfiltrować’ korelacje z innych źródeł (np. flow)

# Korelacje azymutalne - Wyniki

Dla Au+Au niedobór dużych  $p_T$  dla rozkładów inkluzywnych ( $R < 1$ ) - rezultat oddziaływań jetów z materią ('jet quenching')

Efekt powinien być również widoczny dla korelacji azymutalnych



$4 < p_T(\text{trig}) < 6 \text{ GeV}/c$

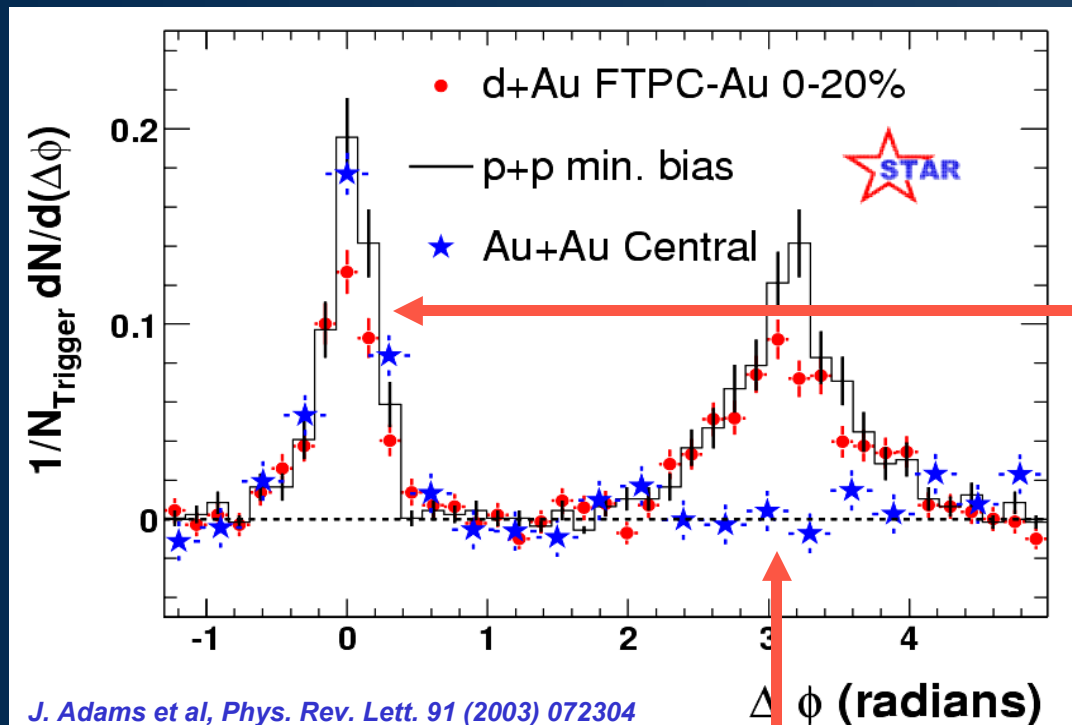
$2 < p_T(\text{assoc}) < p_T(\text{trig}) \text{ GeV}/c$

• p+p i d+Au wyglądają podobnie

• dla centralnych Au+Au ginie jet 'away'

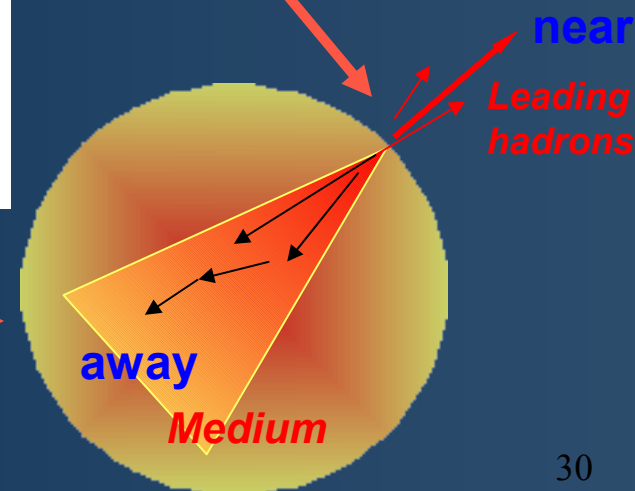
# Korelacje azymutalne

Jak można to wytłumaczyć:



Ten widać bo powstaje blisko 'brzegu'

Ten jest tłumiony w gęstym ośrodku – 'jet quenching'



# Korelacje azymutalne - nowe wyniki większe $p_T(\text{trig})$

Duża statystyka (Run4) to można badać korelacje dla cząstek z większym  $p_T$ :

**Au+Au, 0-5%**

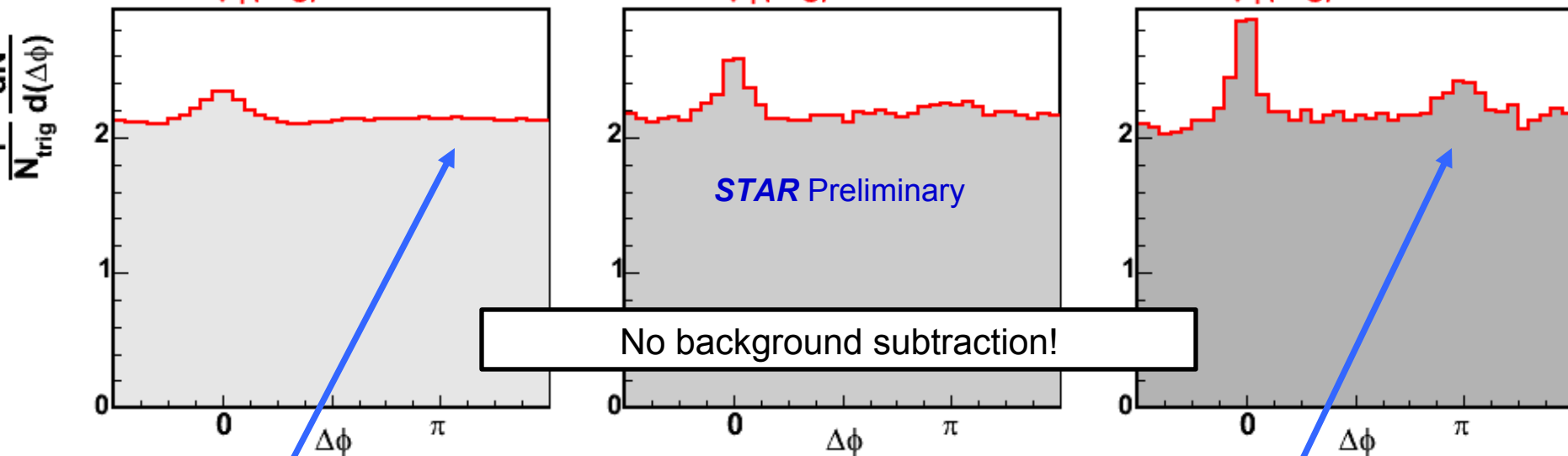
J.Dunlop

$p_T(\text{trig})$   $\longrightarrow$   
 $p_T(\text{assoc}) > 2 \text{ GeV}/c$

$4 < p_T(\text{trig}) < 6 \text{ GeV}/c$

$6 < p_T(\text{trig}) < 8 \text{ GeV}/c$

$8 < p_T(\text{trig}) < 15 \text{ GeV}/c$



‘away-side peak’  
niewidoczny

‘away-side peak’  
zaczyna być widoczny

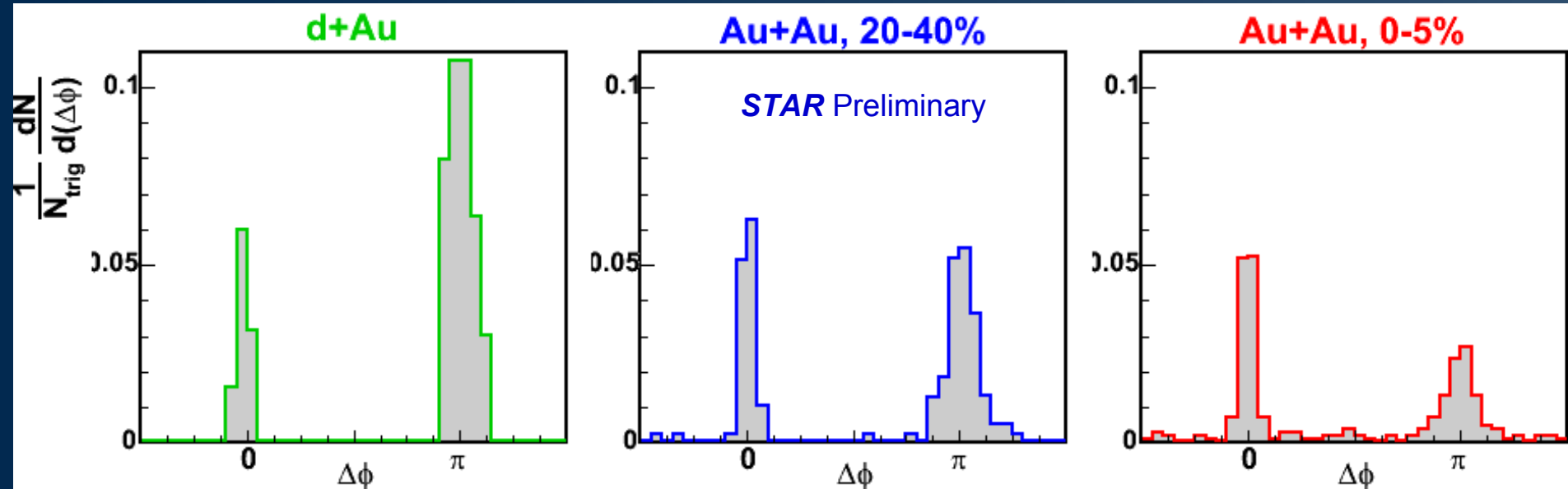


# Korelacje azymutalne - nowe wyniki większe $p_T(\text{trig})$ i $p_T(\text{assoc})$

$8 < p_T(\text{trig}) < 15 \text{ GeV}/c$

$p_T(\text{assoc}) > 6 \text{ GeV}/c$

J. Dunlop



*For the first time: clear jet-like peaks seen on near and away side in central Au+Au collisions*

$\Rightarrow$  informacja o ośrodku (z modeli)

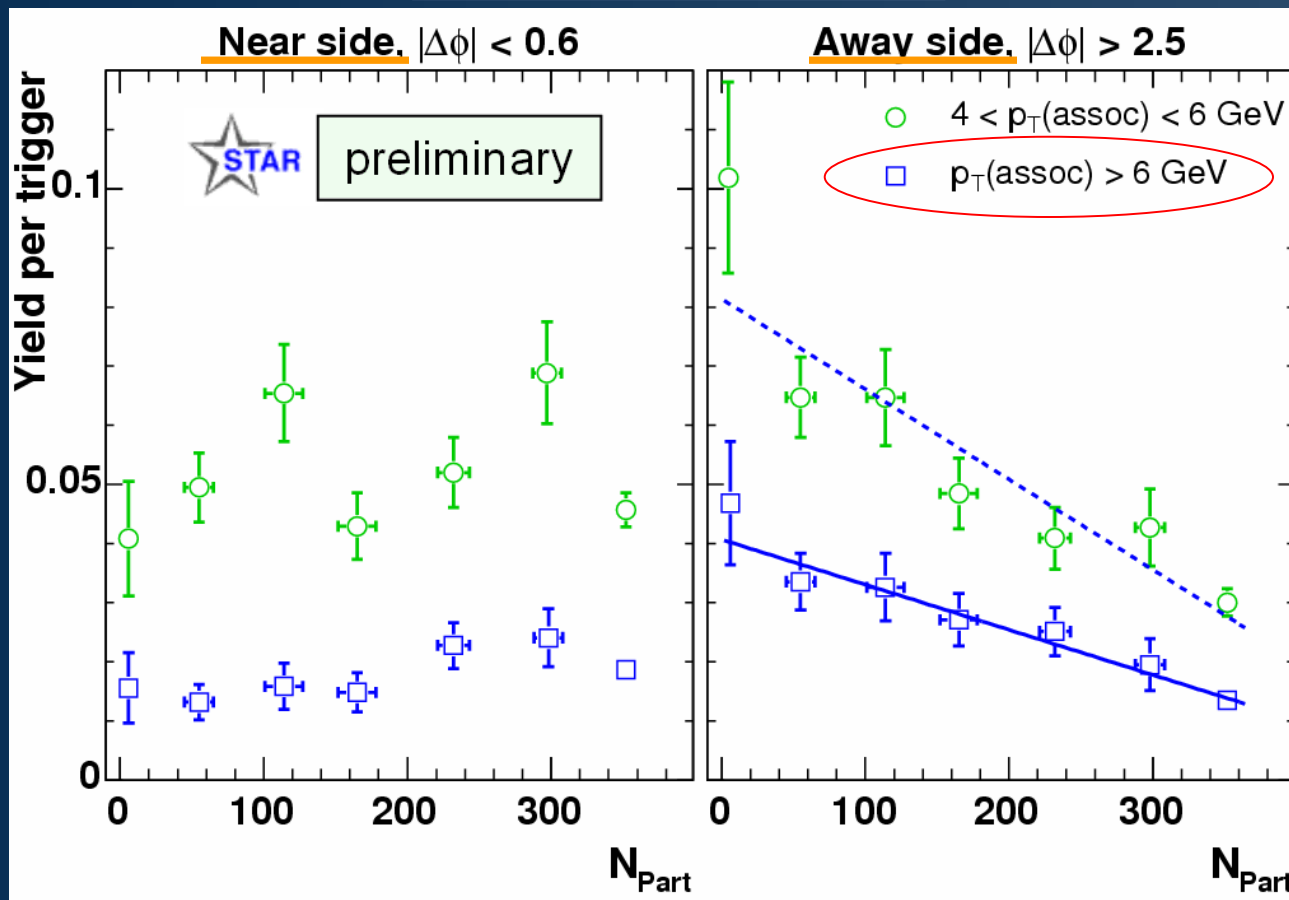


# Korelacje azymutalne

## Zależność od centralności

$$8 < p_T(\text{trig}) < 15 \text{ GeV}/c$$

C.Gadliardi



Brak zależności  
od centralności

Im centralniejsze tym  
większe tłumienie

# Podsumowanie

- \* W centralnych zderzeniach A+A:
  - produkcja cząstek z dużym  $p_T$  tłumiona w porównaniu do przewidywanego skalowania z  $N_{coll}$
  - obserwuje się znikanie 'jetu-away'.
- \* Dla zderzeń d+Au efekt nie występuje.
- \* Dane zgodne z modelami pQCD uwzględniającymi radiacyjne straty energii partonów poruszających się w gęstym ośrodku partonowym.
- \* Efekt jest silniejszy dla większych energii i bardziej centralnych zderzeń (lub cięższych jąder).
- \* W obszarze średnio-dużych  $p_T$  widoczna zależność od typu cząstki (efekt barion-mezon) -> w modelach należałoby chyba uwzględnić dodatkowo efekty nie-perturbacyjne (takie jak np. rekombinacja)

# Przyszłość - RHIC

S.Aronson

Key measurements for the future:

- **Hard probes (high  $p_T$ , heavy quarks):** sensitive to how the medium is created
  - jets
  - hidden charm & beauty
  - open charm & beauty
- **Electromagnetic probes (real & virtual  $\gamma$ s):** information about the medium's early properties
  - Low-mass  $e^+e^-$  pairs
  - Thermal radiation

Planowane:

- ⇒ **zwiększenie świetlności** (początkowo  $\times 2-3$ , docelowo  $\times 10$ )
- ⇒ **zwiększenie zakresu  $A$  dla wiązek** (aż do uranu)
- ⇒ **rozbudowa detektorów** (precyzyjne detektory wierzchołka, identyfikacja dla cząstek przy wyższych  $p_T$ , poszerzenie obszaru detekcji w kierunku „do przodu”, ...)

*Na razie to tylko plany.*

2012 – 2014 (?) - rozpoczęcie budowy eRHIC



# Przyszłość - LHC

**Akcelerator LHC** (Large Hadron Collider) w CERNie i jego 4. eksperymenty:

**ALICE** (A Large Ion Collider Experiment)

**ATLAS** (A Toroidal LHC ApparatuS)

**CMS** (Compact Muon Solenoid)

**LHC -B**

są w trakcie budowy.

**Uruchomienie planowane na rok 2007.**

**Badane zderzenia:**

p+p przy  $\sqrt{s_{NN}}=14$  TeV

Pb+Pb przy  $\sqrt{s_{NN}}=5.5$  TeV

W późniejszych latach prawdopodobnie będą również badane:

\* zderzenia p+A

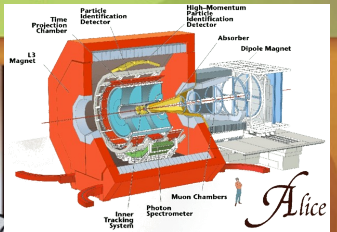
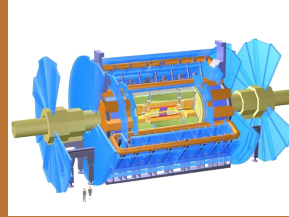
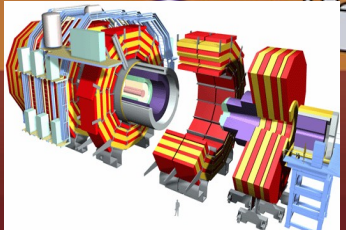
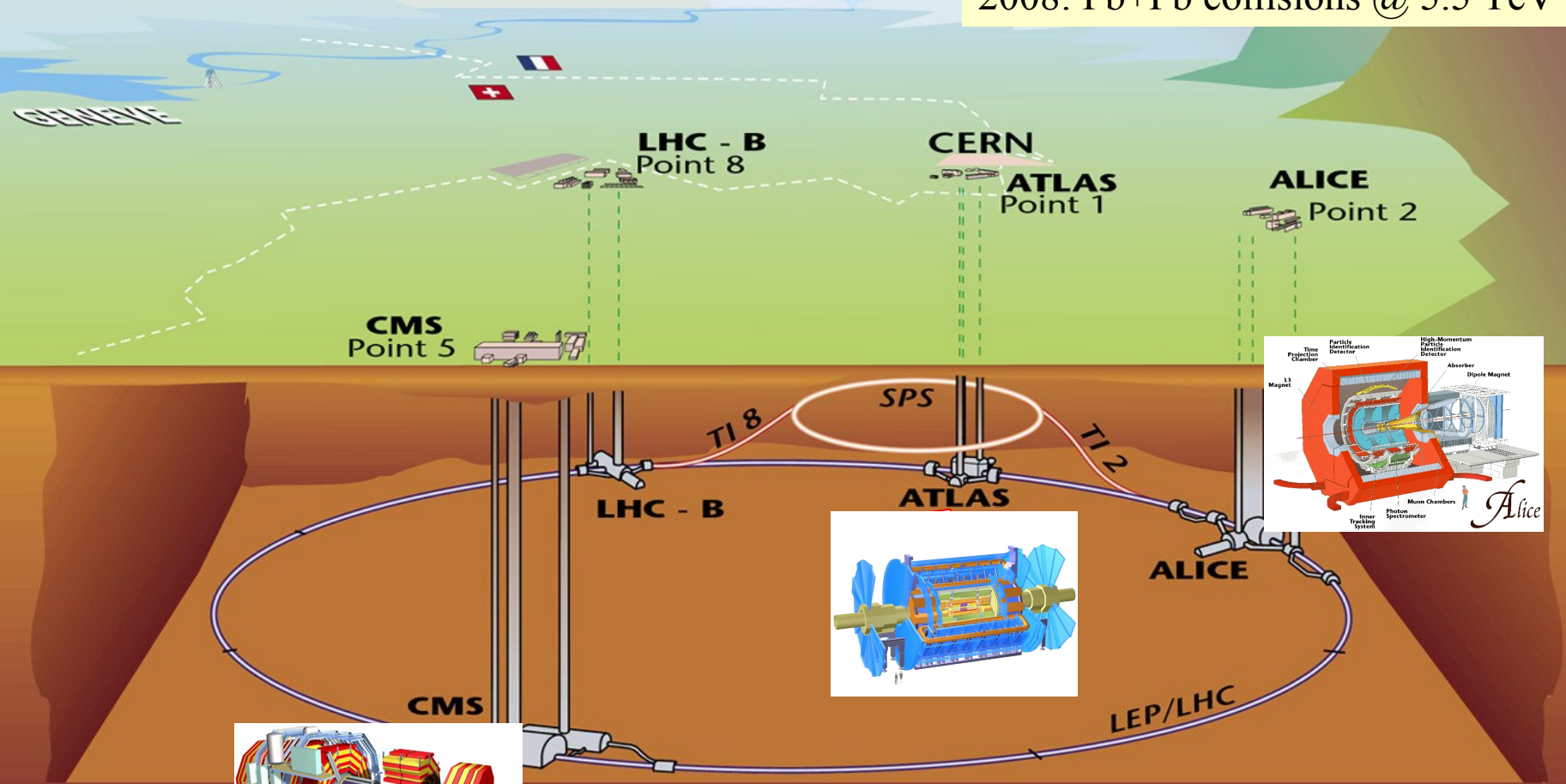
\* zderzenia lżejszych jąder (Sn, Kr, Ar, O)

\* niższe energie.

# Overall view of the LHC experiments.

**ALICE** - eksperyment dedykowany badaniom HI  
**ATLAS** i **CMS** (badanie p+p) - mają też program HI

2007: p+p collisions @ 14 TeV  
2008: Pb+Pb collisions @ 5.5 TeV





# LHC

H.A. Gustafsson

Running parameters:

Collision system	$\sqrt{s_{NN}}$ (TeV)	$\mathcal{L}$ ( $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )	Run time (s/year)	$\sigma_{\text{geom}}$ (b)
<b>pp</b>	14.0	$10^{34}$	$10^7$	0.07
<b>PbPb</b>	5.5	$10^{27}$	$10^6$	7.7

W porównaniu do RHICa, wytworzony w zderzeniu system:

- gorętszy
- większy
- gęściejszy
- o dłuższym czasie życia.

(prawie 30 razy większa energia i cięższe jądra)



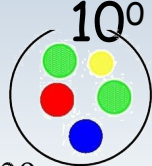
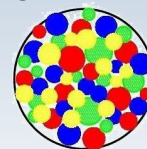
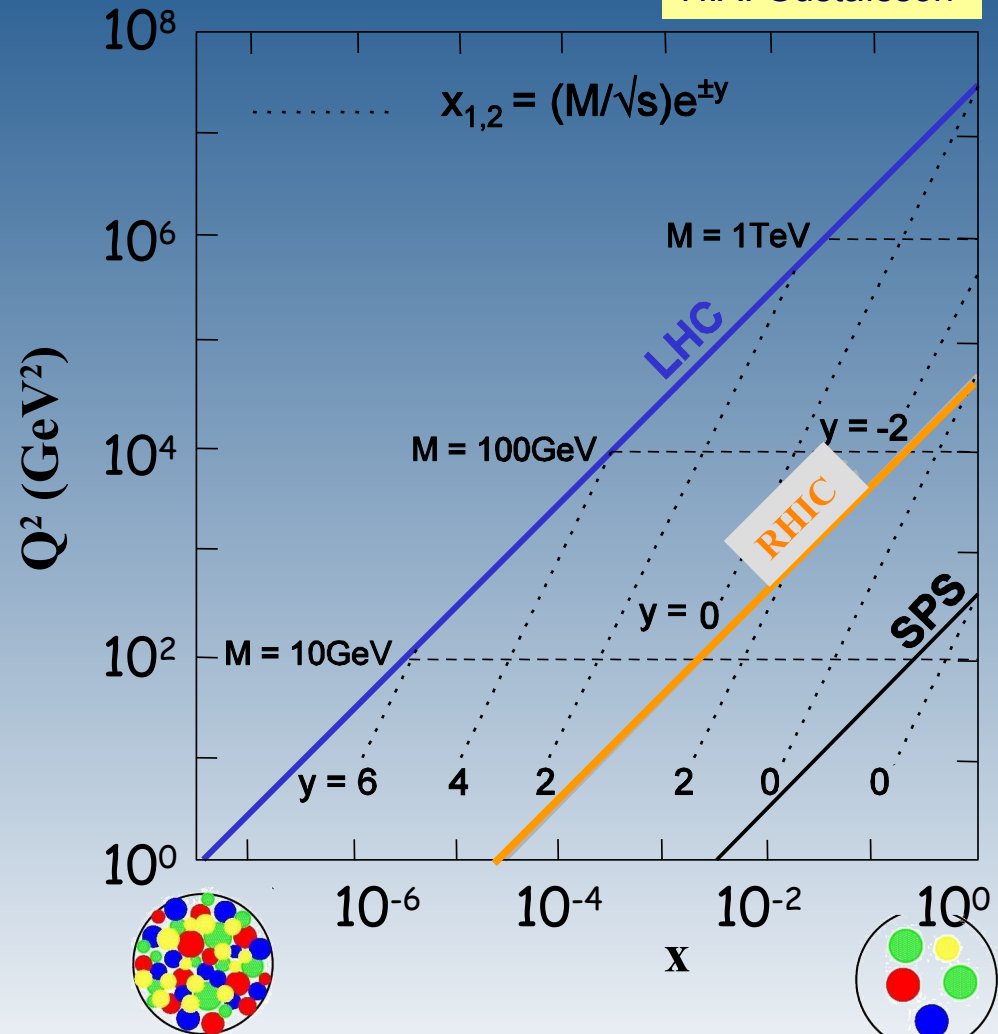
# Obszar kinematyczny



Przy LHC dostępny obszar bardzo małych  $x$  (saturacja gluonów – CGC):

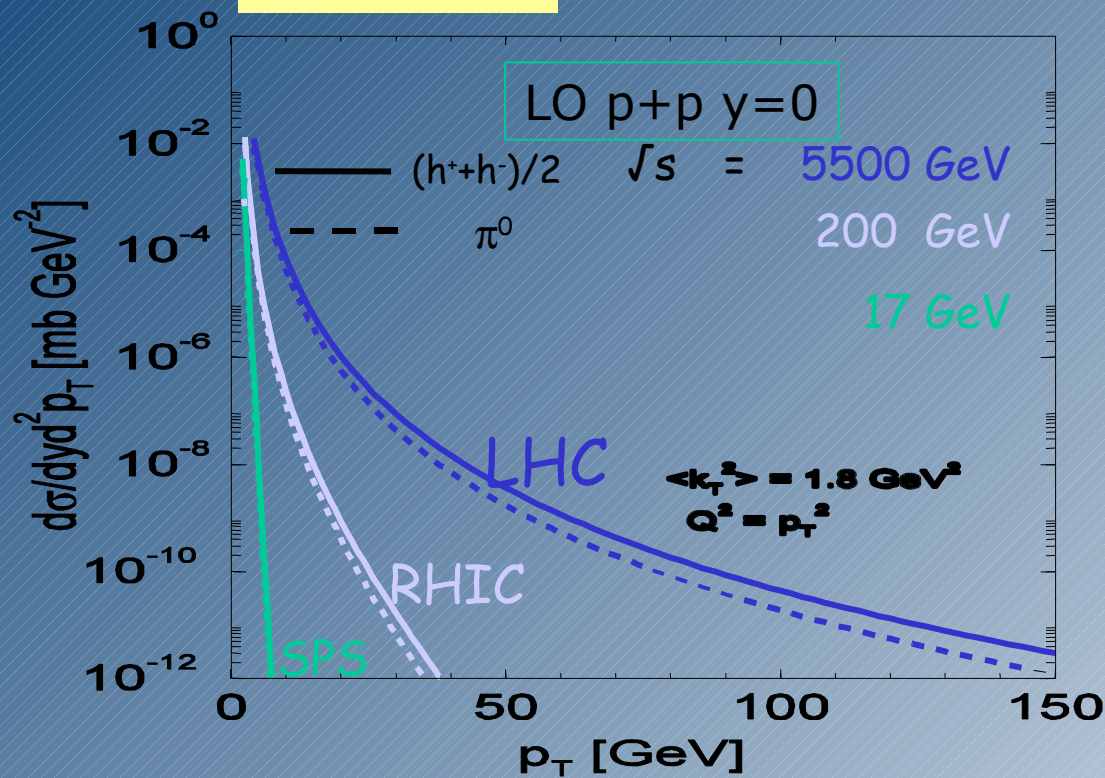
	$x \sim 10^{-3} - 10^{-4}$	$x \sim 10^{-5} - 10^{-6}$
<b>RHIC</b>	$y=3$	—
<b>LHC</b>	$y=0$	$y=5$

H.A. Gustafsson



# Procesy twarde

H.A. Gustafsson



- \* procesy twarde dominują
- \* dużo cząstek z bardzo dużymi  $p_T$
- \* dużo ciężkich kwarków

# Program fizyczny

- \* **Charakterystyki globalne** ('day-one measurements'):

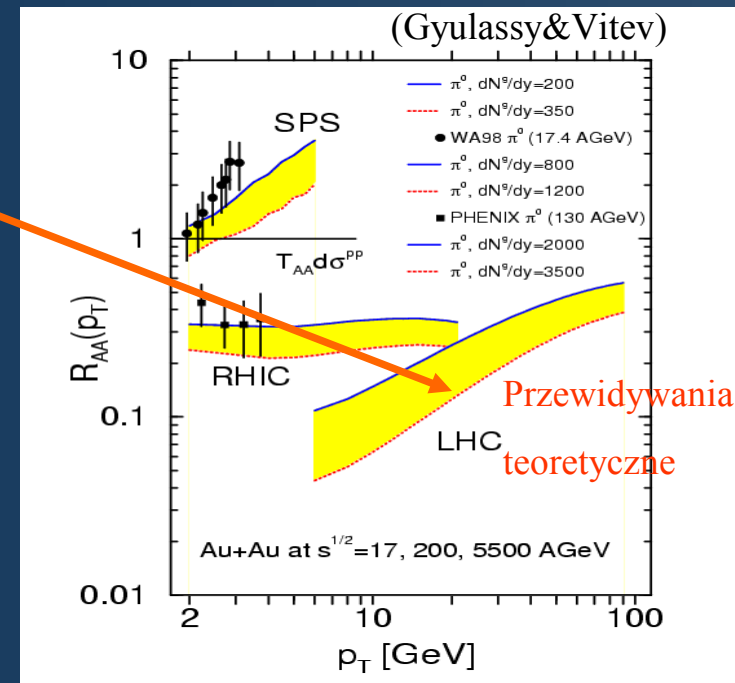
$N_{ch}$ ,  $dN/d\eta$ ,  $dE_T/d\eta$ , flow

- \* **Jety i ich tłumienie**

- \* **Ciężkie kwarki**

- \* **Quarkonia ( $J/\psi$ ,  $\Upsilon$ )**

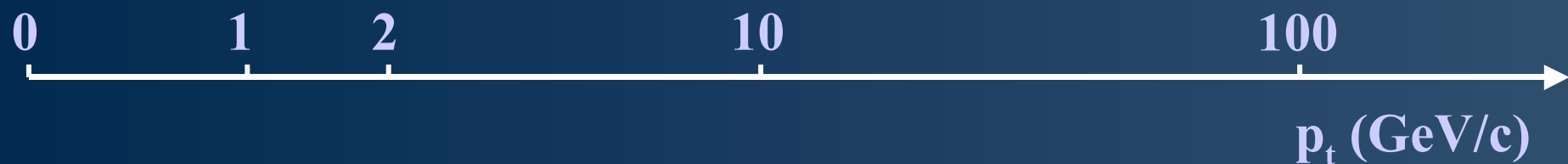
- \* **Fotony bezpośrednie (direct)**





# Porównanie eksperymentów - pokrycie w $p_T$

H.A. Gustafsson



**Bulk properties**

**Hard processes  
modified by the medium**



ALICE (małe  $p_T$ , PID)

CMS & ATLAS (bardzo duże  $p_T$ )

# Backup slides

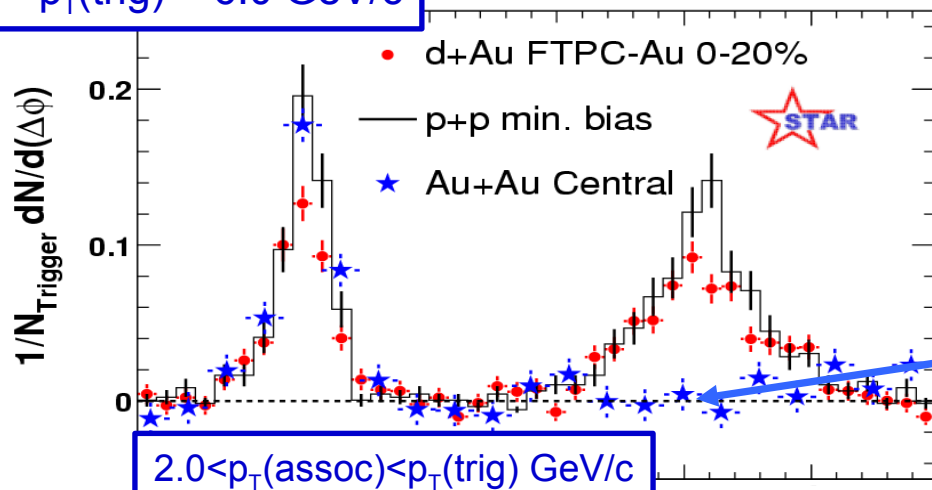


# Azimuthal correlations

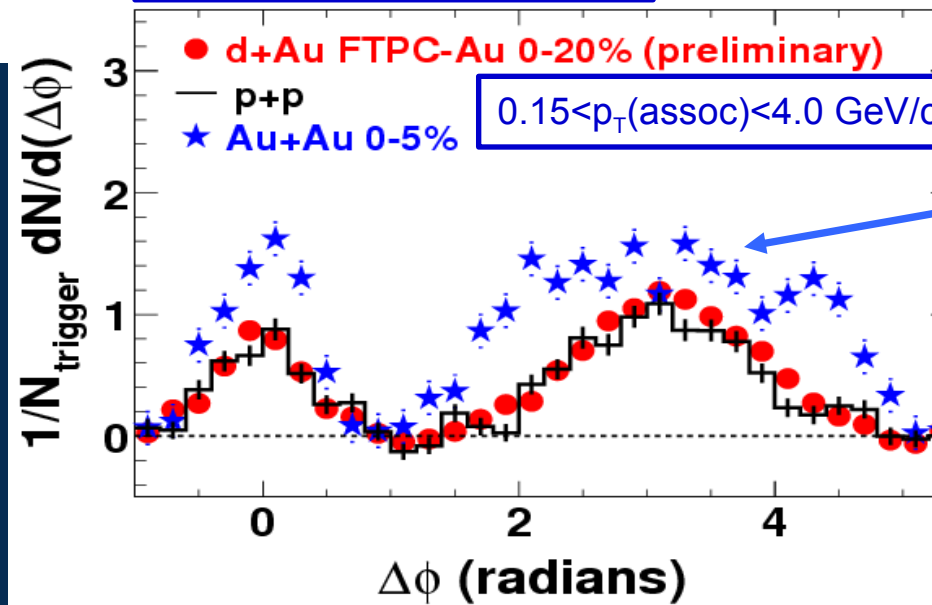
## How does the medium respond?

C.Gadliardi

$4.0 < p_T(\text{trig}) < 6.0 \text{ GeV}/c$



High momentum correlation suppressed



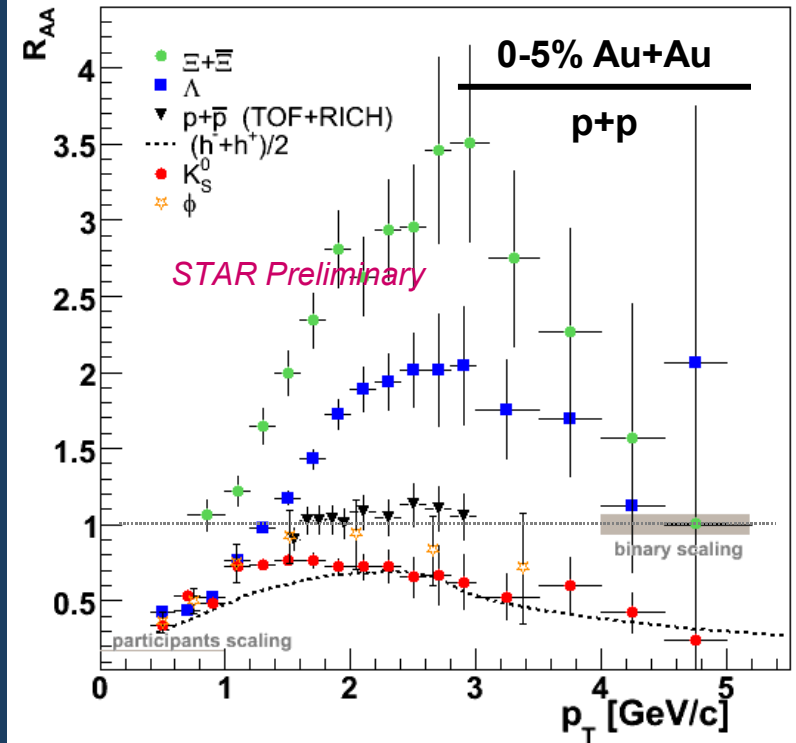
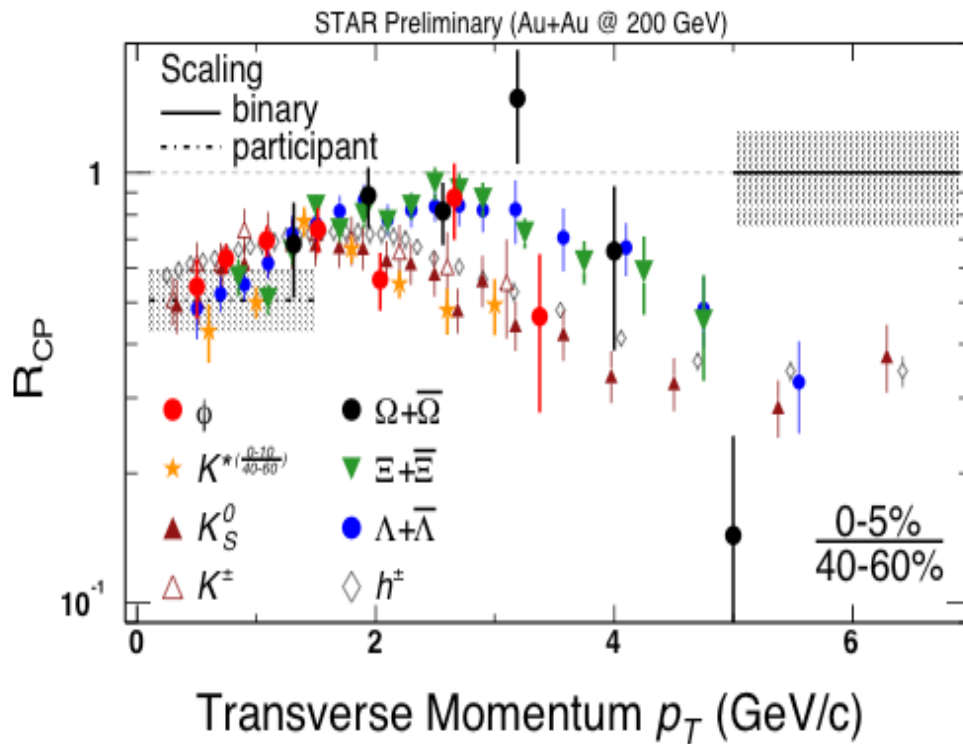
Low momentum correlation enhanced

Recoil distribution soft and broad .



# $R_{CP}$ i $R_{AA}$ - różnice

D.Roehrich



Uwaga:  $R_{CP} \neq R_{AA}$

Mezony:  $R_{CP} < 1$ ,  $R_{AA} < 1$

Bariony:  $R_{CP} < 1$ ,  $R_{AA} > 1$