

# НОВІ РЕЗУЛЬТАТИ З RHIC ТА LHC ПО УЛЬТРА-РЕЛЯТИВІСТСЬКИМ ЗІТКНЕННЯМ ВАЖКИХ ІОНІВ

Борисова М.С.

*ІЯД НАН України*

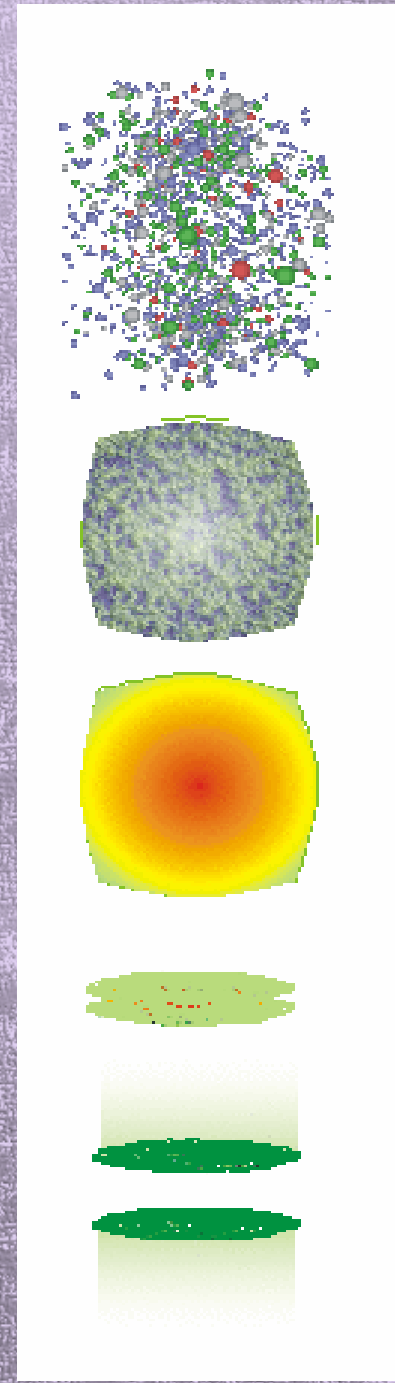
*Щорічна Наукова Конференція ІЯД НАН України  
24 січня 2012 р.*

# ЗМІСТ

- ❑ Квантова Хроمودинаміка та проблема Кварк Глюонної Плазми (КГП)
- ❑ Пошук сигналів КГП в експериментах з важкими іонами (ВІ)
- ❑ Експерименти по зіткненню ВІ на на RHIC та LHC
- ❑ Експеримент ALICE
- ❑ Перші результати:
  - множинність заряджених частинок
  - спектри адронів
  - кореляції Бозе-Ейнштейна
  - ядерний модифікаційний фактор  $R_{AA}$
  - колективні потоки частинок
- ❑ Теоретичний опис
  - Опис початкового стану
  - Гідро-Кінетична Модель (ГКМ)
- ❑ Підсумки



ЭРА ВЕЩЕСТВА	настоящее время	15 млрд лет
	первые Суперновые	5 млрд лет
	образование галактик и звезд	1 млрд лет
	Вселенная становится прозрачной	
	образование атомов	$10^{11}$ с
	разделение вещества и излучения	$10^{11}$ с
	эпоха фотонов	
	синтез ядер гелия	$10^2$ с
	исчезновение позитронов	$10^2$ с
	эпоха лептонов	
ЭРА ИЗЛУЧЕНИЯ	«плениение» кварков	
	образование протонов и нейтронов	
	исчезновение антикварков	$10^{-10}$ с
	эпоха электрослабых сил	
	магнитные монополи	
	эпоха кварков	
	асимметрия Q-Q, L-L	$10^{-34}$ с
	расширение Вселенной	
	эпоха великого объединения	
	эпоха квантовой гравитации	$10^{-43}$ с



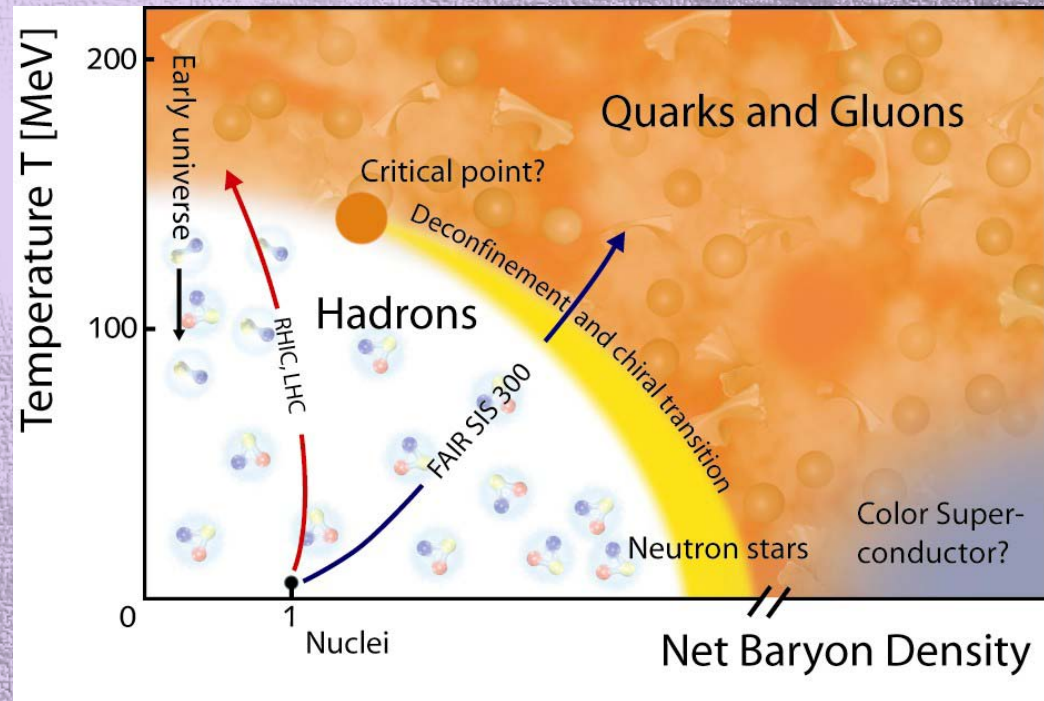
# Ультра-релятивістські зіткнення важких іонів: RHIC vs LHC

**Квантова Хромодинаміка (КХД)** – теорія сильних взаємодій, передбачає існування фазового переходу при високих  $T$  від адронної до матерії, у стані деконфайменту - **Кварк-глюонної плазми (КГП)**

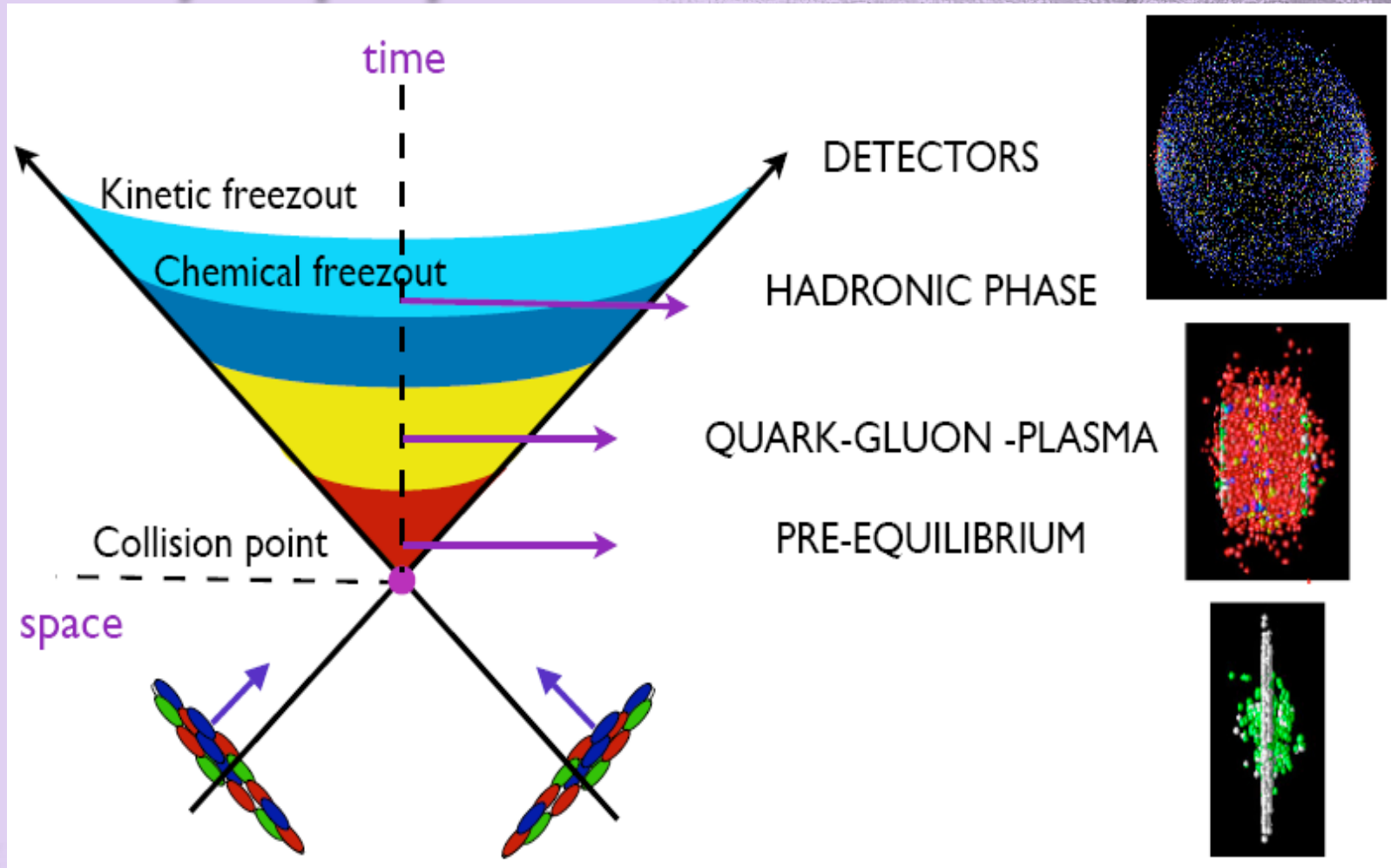
Створення КГП у лабораторії та вивчення її властивостей – це головна мета експериментів по зіткненню ВІ з ультра-релятивістськими енергіями

Експериментальні сигнали появи КГП у релятивістських АА зіткненнях:

- Прямі фотони
- Підсилення виходу дивних частинок
- Подавлення виходу  $J/\psi$ -мезонів
- Гасіння струменів (jet-quenching)
- Поведінка колективних потоків частинок

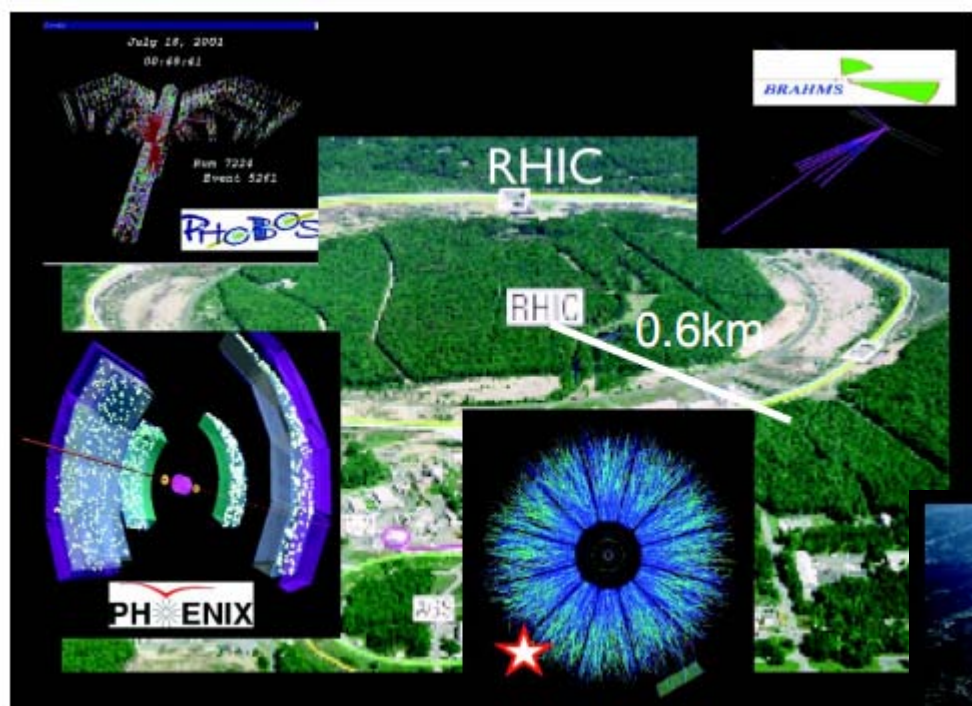


# Просторово-часова еволюція взаємодії ядер з ультра-релятивістськими енергіями.



*E. Shuryak, Phys. Rep. 61(1979)71; з цих пір більше 1000 публікацій*  
QGP - Екстремально збуджена матерія з вільних кварків, антикварків та глюонів.  
Критична густина енергії  $\sim 2 \text{ GeV/fm}^3$  Критична температура  $T_{cr} \sim 200 \text{ MeV}$

# Експерименти по ультра-релятивістським зіткненням важких іонів на RHIC та LHC



- **RHIC:** перші пучки червень 2000
  - p+p, d+Au, Cu+Cu, Au+Au
  - (~20, 62.4, 130, 200 GeВ/нуклон)
    - 4 експерименти
  - З 2005, тільки STAR + PHENIX
  - Програма Beam energy scan (2010/11)

- **LHC:** перші пучки у листопаді 2009
  - p+p (900, 2.36, 2.76, 7 TeV)
  - Pb+Pb при 2.76 ATeV 11.2010, 2011
    - $L_{int} > 7 \mu\text{b}^{-1}$  Pb за 4 тижні



# Експеримент ALICE на LHC

**A Large Ion Collider Experiment:** - експеримент загального призначення на LHC, сконструйований для дослідження зіткнень важких іонів

**кінцева мета – дослідження властивостей КГП**

дуже насичена програма по фізиці важких іонів:

□ глобальні характеристики с-ми:

множинність,  $\eta$  розподіли

□ властивості с-ми, що утворилась в результаті зіткнення:

хімічний склад, температура, густина енергії, НВТ, потоки, струмені

**Основні властивості детектора:**

□ точний та надійний трекінг у широкому діапазоні  $p_T$  імпульсів вивчення частинок з дуже малими  $p_T$ , з нижньою границею  $\sim 100$  MeV/c

відмінна ідентифікація частинок

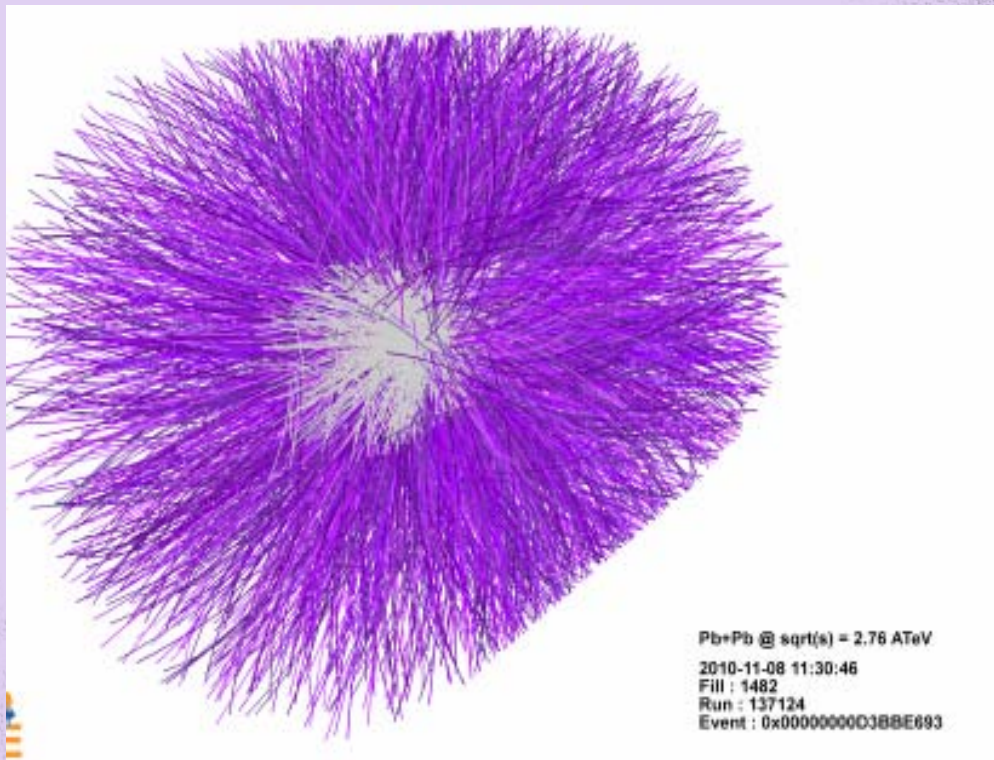
діелектроний та дімюоний (спеціальні спектрометри)

прямі фотони (калориметри високої роздільної здатності)

# Множинність заряджених частинок

Множинність заряджених частинок – кількість народжених заряджених частинок:

□ **~ 1600** заряджених частинок для центральних зіткнень



Найвищі, що коли не-будь досягались

□

□ **1.9 x pp @ 2.76 TeV**

□ **2.2 x AuAu @ RHIC**

густина енергії:

$\epsilon(\tau_0)\text{LHC} \geq 3 \times \epsilon(\tau_0)\text{RHIC}$

(вважаючи  $\tau_0$  однаковим і для RHIC і для LHC)

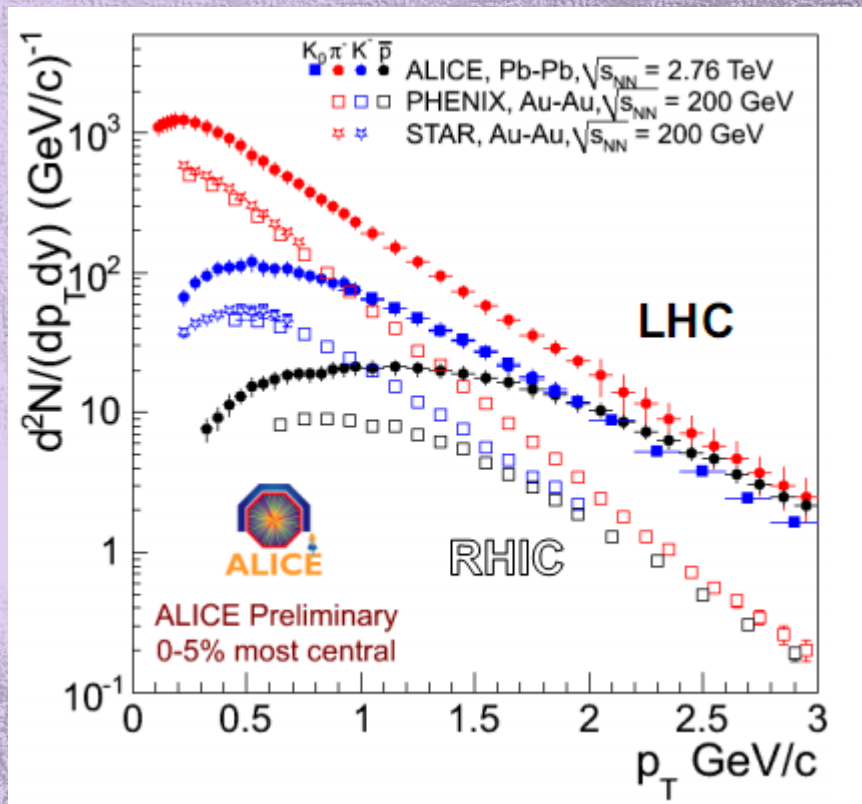


# Спектри частинок

Порівняння ALICE з експериментами на RHIC (STAR та PHENIX) :

- ✓ значні зміни у нахилі спектрів
- ✓ найбільш драматично для протонів

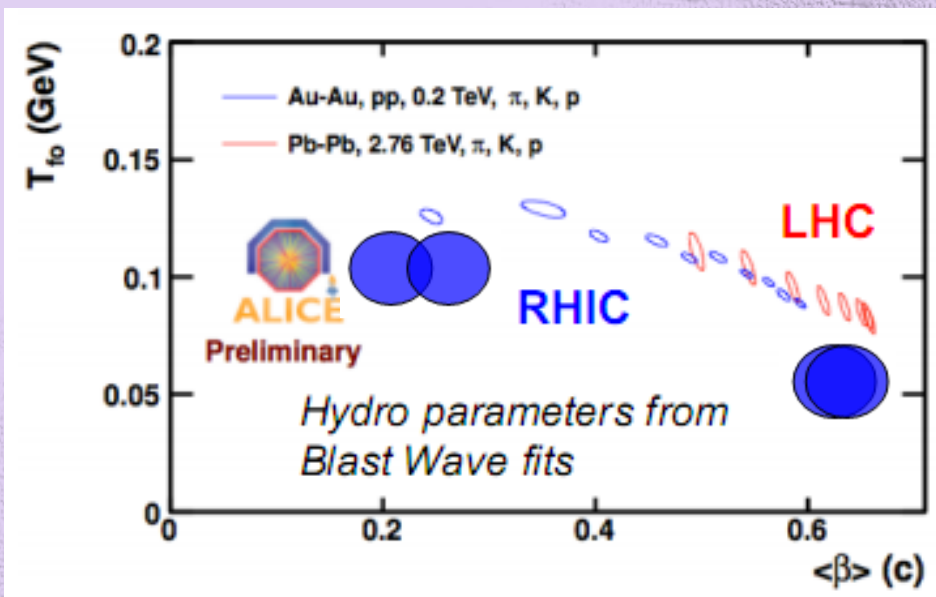
визначено в рамках Blast Wave моделі



[arXiv:1108.3257v1](https://arxiv.org/abs/1108.3257v1) [hep-ex]

Дуже сильний радіальний потік,  $\beta \approx 0.66$

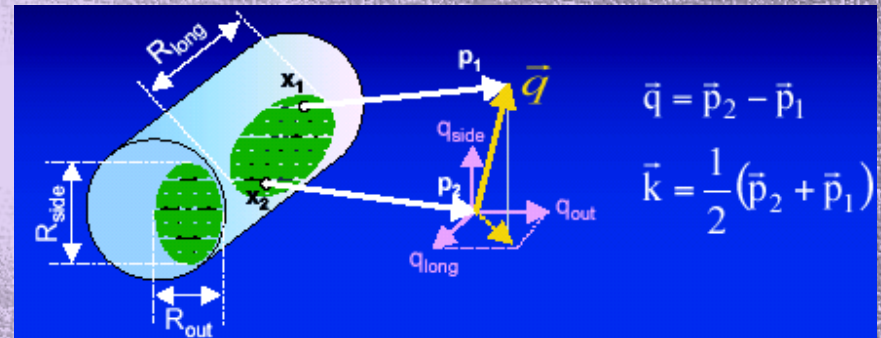
□ сильніший, ніж передбачався в рамках гідродинамічних моделей



# Кореляційна фемптоскопія (або НВТ інтерферометрія)

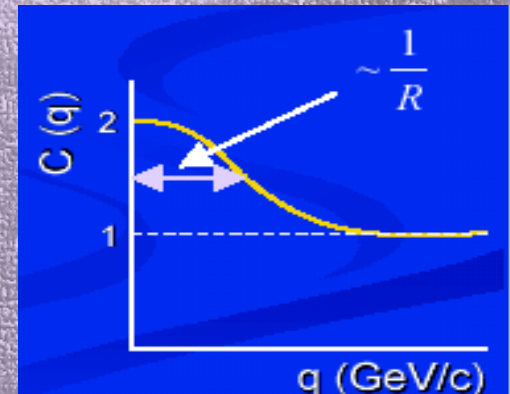
Система, що утворюється в результаті релятивістських А+А зіткнень, має надзвичайно короткі просторові розміри. Цей унікальний метод дозволяє міряти такі довжини та часові шкали з точністю  $10^{-15}$  м та  $10^{-23}$  сек., відповідно

**Кореляційна фемптоскопія (або НВТ інтерферометрія)** – вимірює просторово-часові характеристики народження частинок на стадії розвалу системи, використовуючи кореляції частинок.

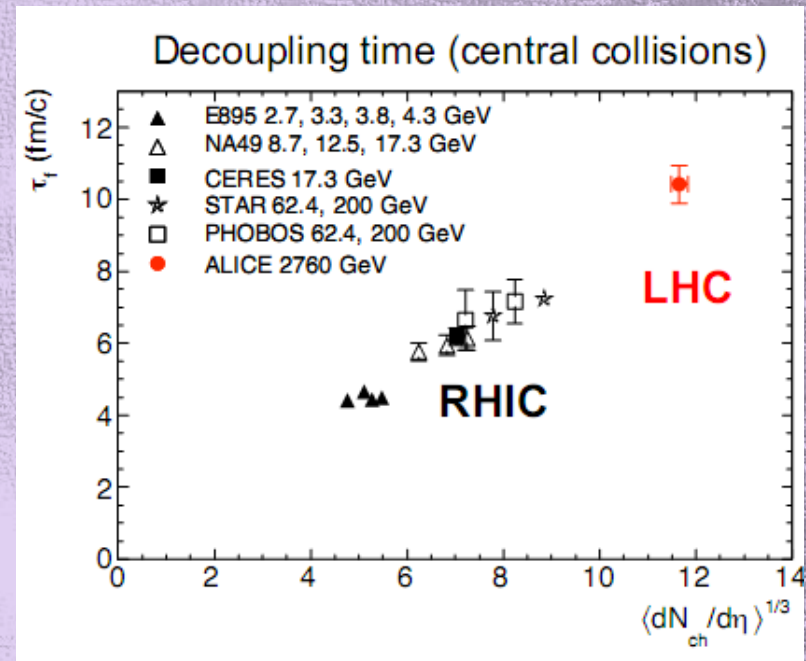
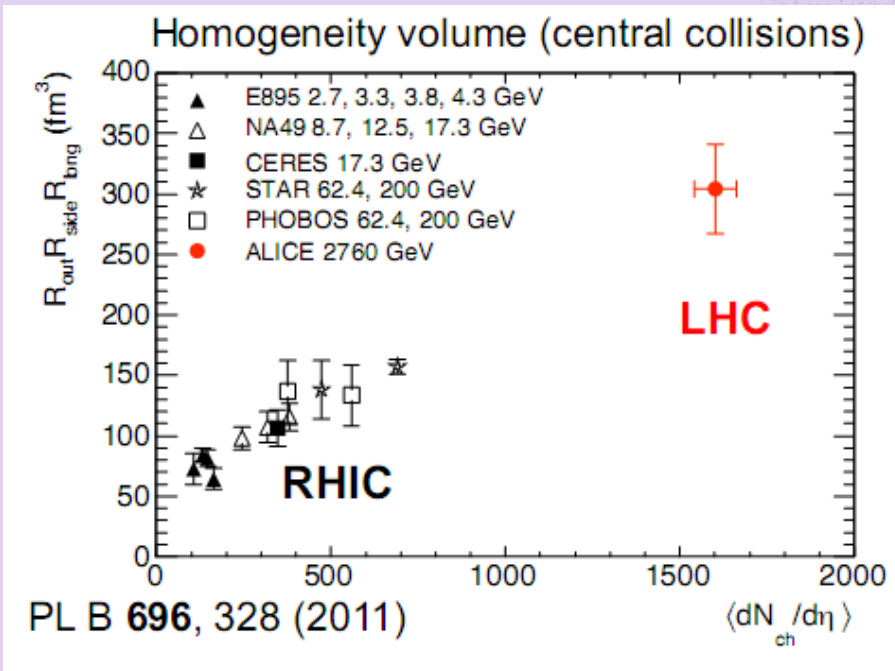


Кореляційна функція у Гаусівському наближенні:

$$C(\mathbf{q}, \mathbf{p}) \approx 1 + \exp\left[-R_o^2(p_T)q_o^2 - R_s^2(p_T)q_s^2 - R_l^2(p_T)q_l^2\right]$$



# кореляції Бозе-Ейнштейна



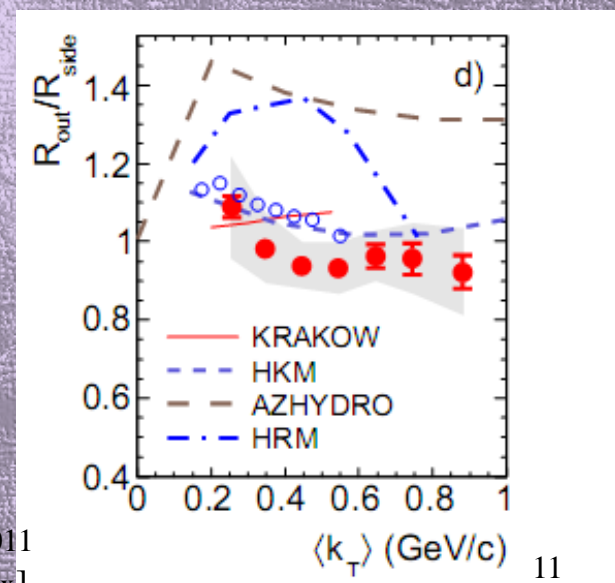
Доступ до просторово-часової еволюції системи:

□ лінійна залежність від  $dN_{ch}/d\eta$   
 об'єм с-ми на стадії розвалу:

$$V(\text{LHC}) \sim 300 \text{ fm}^3 \sim 2 \times V(\text{RHIC})$$

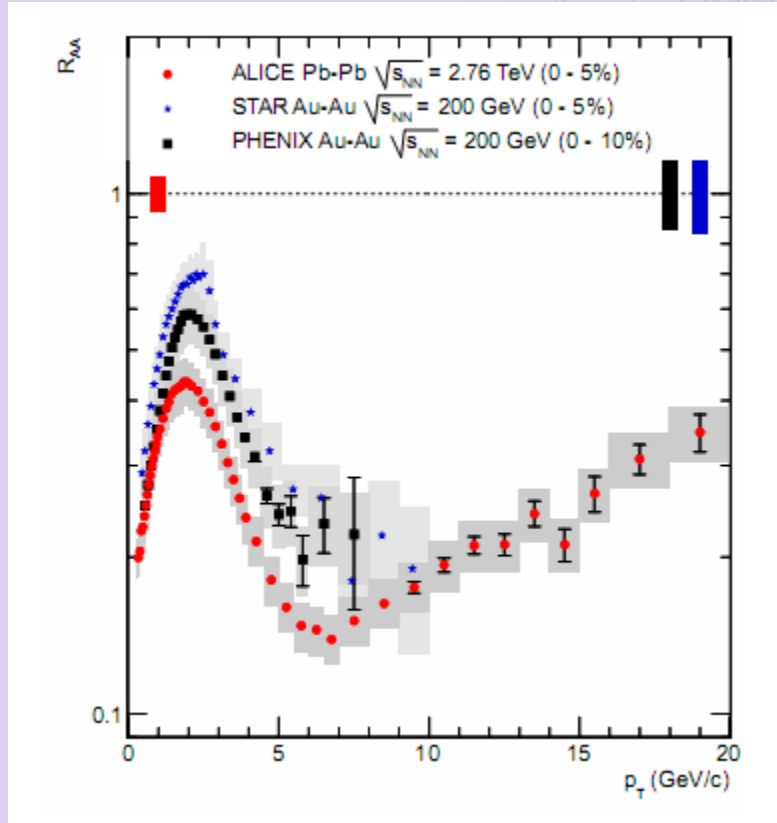
Власний час життя (від зіткнення до фріз-ауту):

$$\tau_f(\text{LHC}) \sim 10\text{-}11 \text{ fm/c} \sim 1.4 \times \tau_f(\text{RHIC})$$



# ядерний модифікаційний фактор $R_{AA}$

$$R_{AA}(p_T) = \frac{1}{N_{coll}} \times \frac{dN_{AA}/dp_T}{dN_{pp}/dp_T}$$



[arXiv:1012.1004v1](https://arxiv.org/abs/1012.1004v1) nucl-ex

## Порівняння ALICE з експериментами на RHIC (STAR та PHENIX) :

схожі величини при  $p_T \sim 1$  GeV/c

форма та положення максимуму схожі при низьких та середніх  $p_T$

великі  $p_T$  (6-7 GeV/c):  
більші втрати енергії,  
більш густа речовина на LHC!

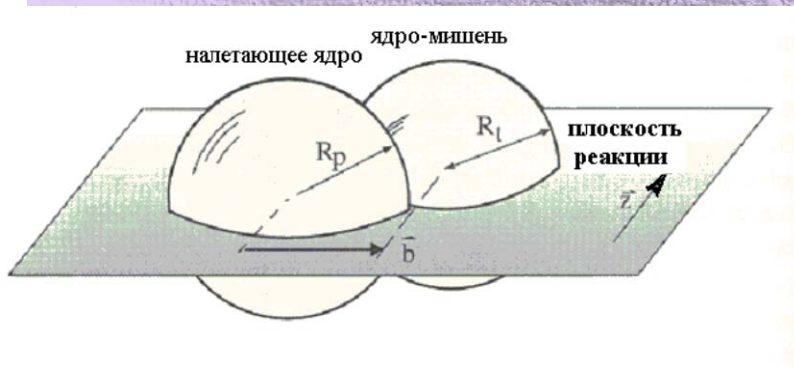
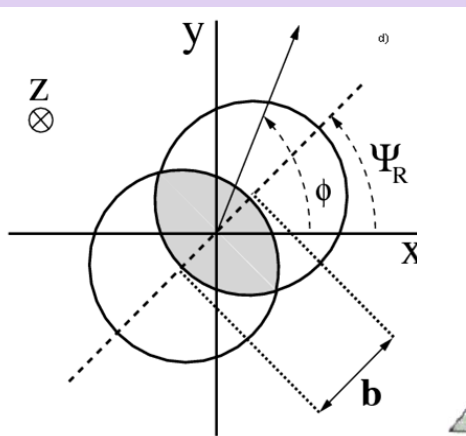
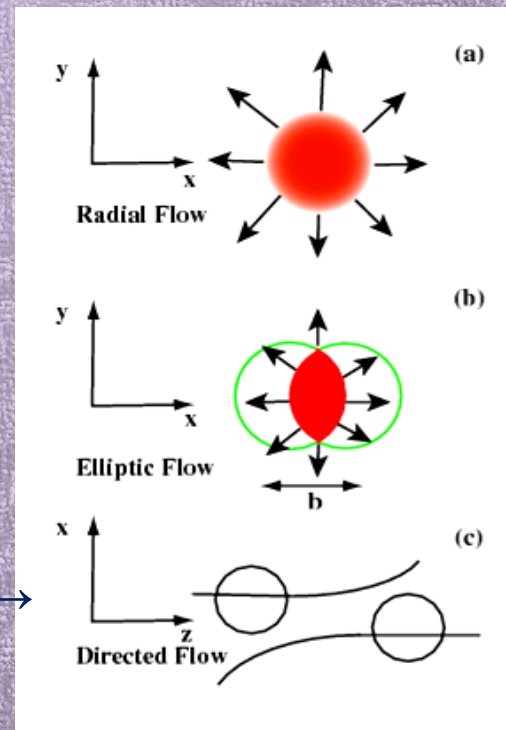
# Коллективные потоки частинок

Геометрия реакции: z-ось пучка,  
 x,y-азимутальная плоскость,  
 b-прицельный параметр,  $\phi$ -азим.  
 угол вильоту частинки,  $\Psi_R$ -азим.  
 угол плоскости реакции (ПР), яка  
 визначається b та z.

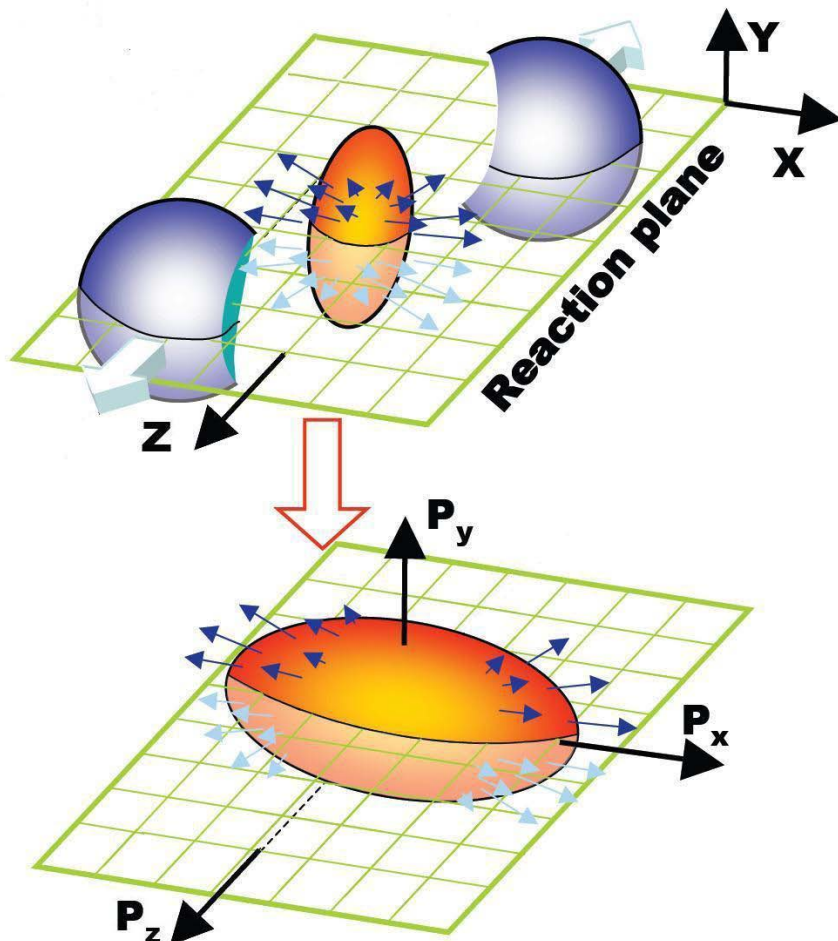
Радіальний потік  
 поперечне  $\rightarrow$   
 Ізотропне  
 розширення.

Еліптичний потік  
 (ЭП)  $\rightarrow$   
 $\cos(2\phi)$  2 пор.

Направлений потік  $\rightarrow$   
 (НП)  $\cos(\phi) > 1$   
 порядку



# Коллективні потоки частинок: еліптичні потоки



- ▣ Вивчення властивостей матерії, яка утворилась в результаті  $A+A$  зіткнень

Граденти тиску більші вздовж короткої вісі еліпсоїду.

$\epsilon_2$

- Просторова анізотропія  $\rightarrow$  Імпульсна анізотропія

- Еліптичний потік ( $v_2$ ) визначається другою гармонікою у розкладі Фур'є



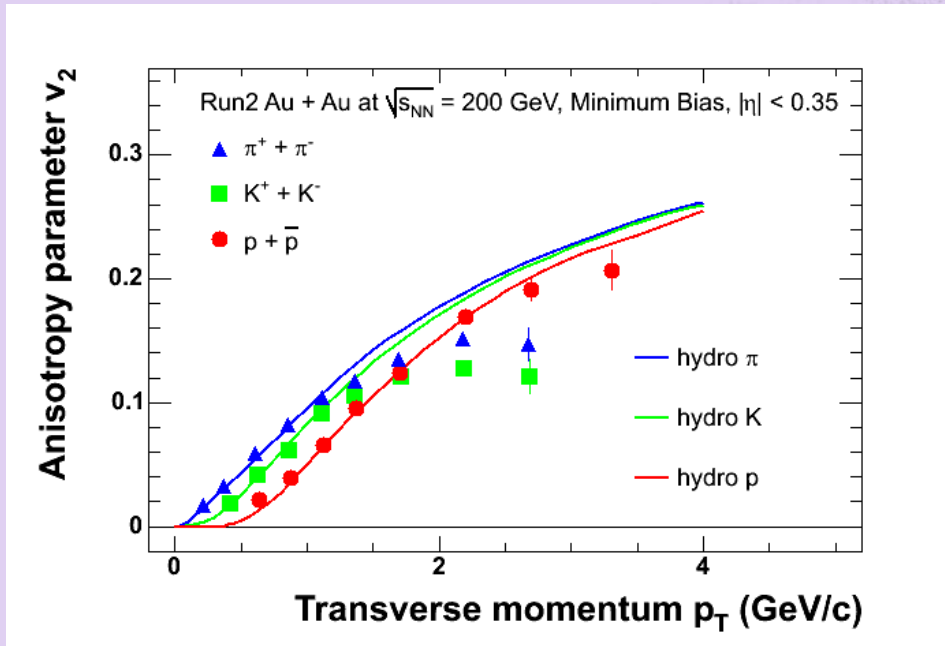
$v_2$

$$\frac{dN}{dp_T dy d\phi} = \frac{1}{2\pi} \frac{d^2N}{dp_T dy} (1 + 2v_1 \cos(\phi) + 2v_2 \cos(2\phi) + \dots)$$

$$v_2 = \langle \cos(2\phi) \rangle$$

# Коллективні потоки частинок: $v_2$ vs $p_T$ , RHIC vs LHC

PHENIX : PRL 91, 182301 (2003)

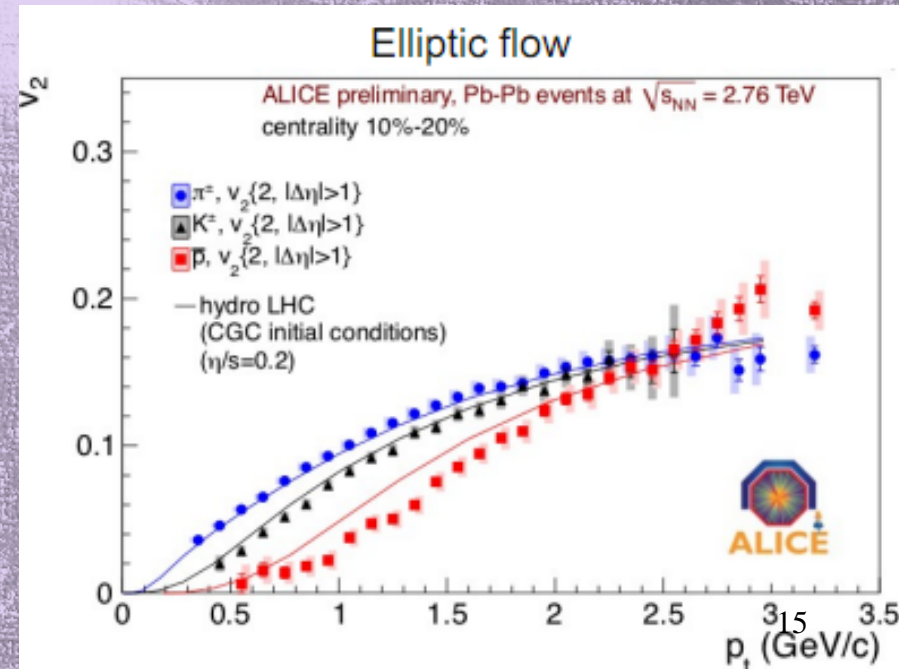


Більш значне розділення по масам, ніж на RHIC, що добре узгоджується з ростом радіального потоку та відповідає передбаченням в'язкої гідродинаміки

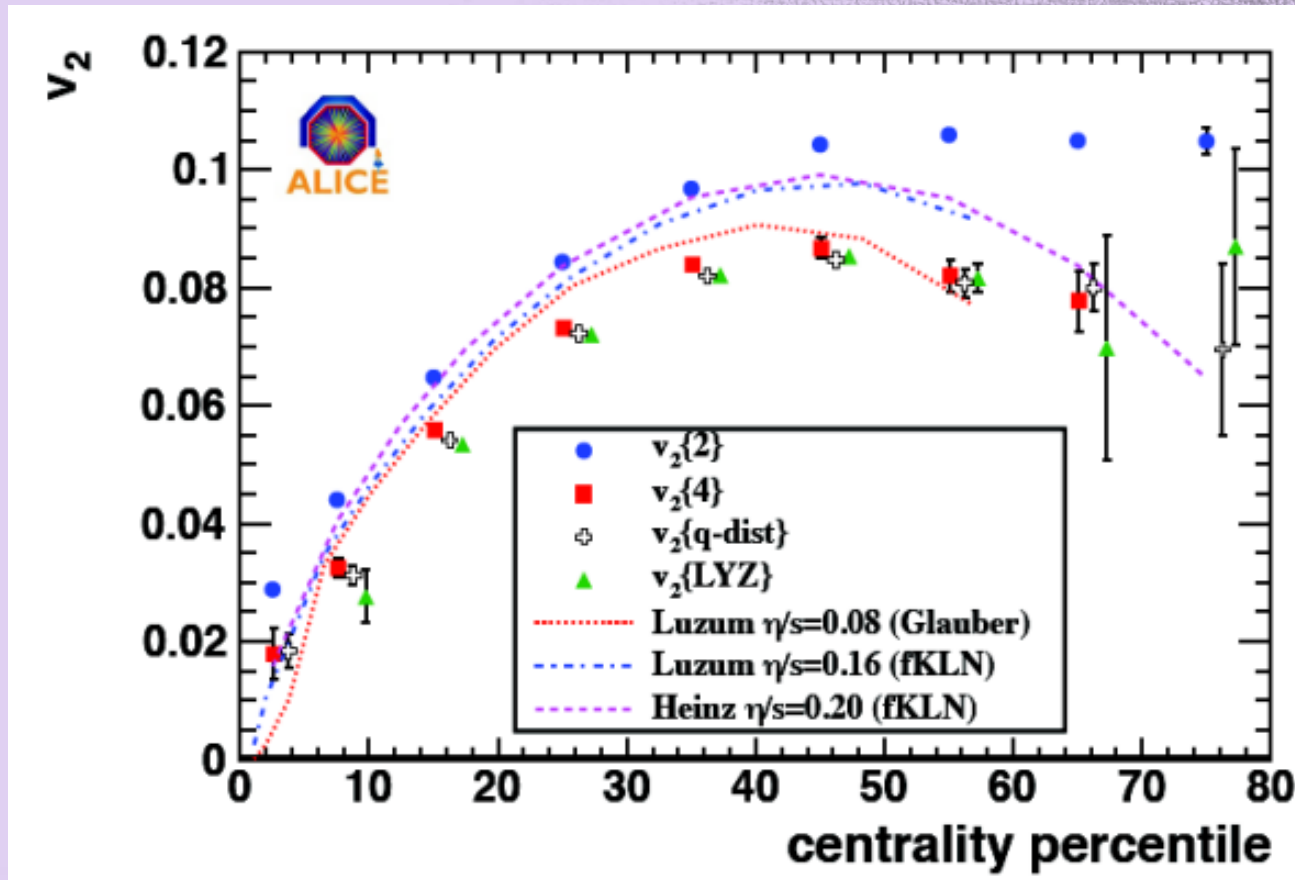
Phys.Rev.Lett.105:252302,2010s: [arXiv:1011.3914v2](https://arxiv.org/abs/1011.3914v2)  
 [nucl-ex], [arXiv:1111.1875](https://arxiv.org/abs/1111.1875)[nucl-ex]6  
[arXiv:1107.0080v1](https://arxiv.org/abs/1107.0080v1) [nucl-ex]

## Великі еліптичні потоки на RHIC

- Сумісне з гідродинамікою із швидкою термалізацією,  $\tau \sim 1$  fm/c
- $v_2$  масштабується з початковим ексцентриситетом ( $\epsilon$ ) зони реакції



# Коллективні потоки частинок: Рідина з малою в'язкістю

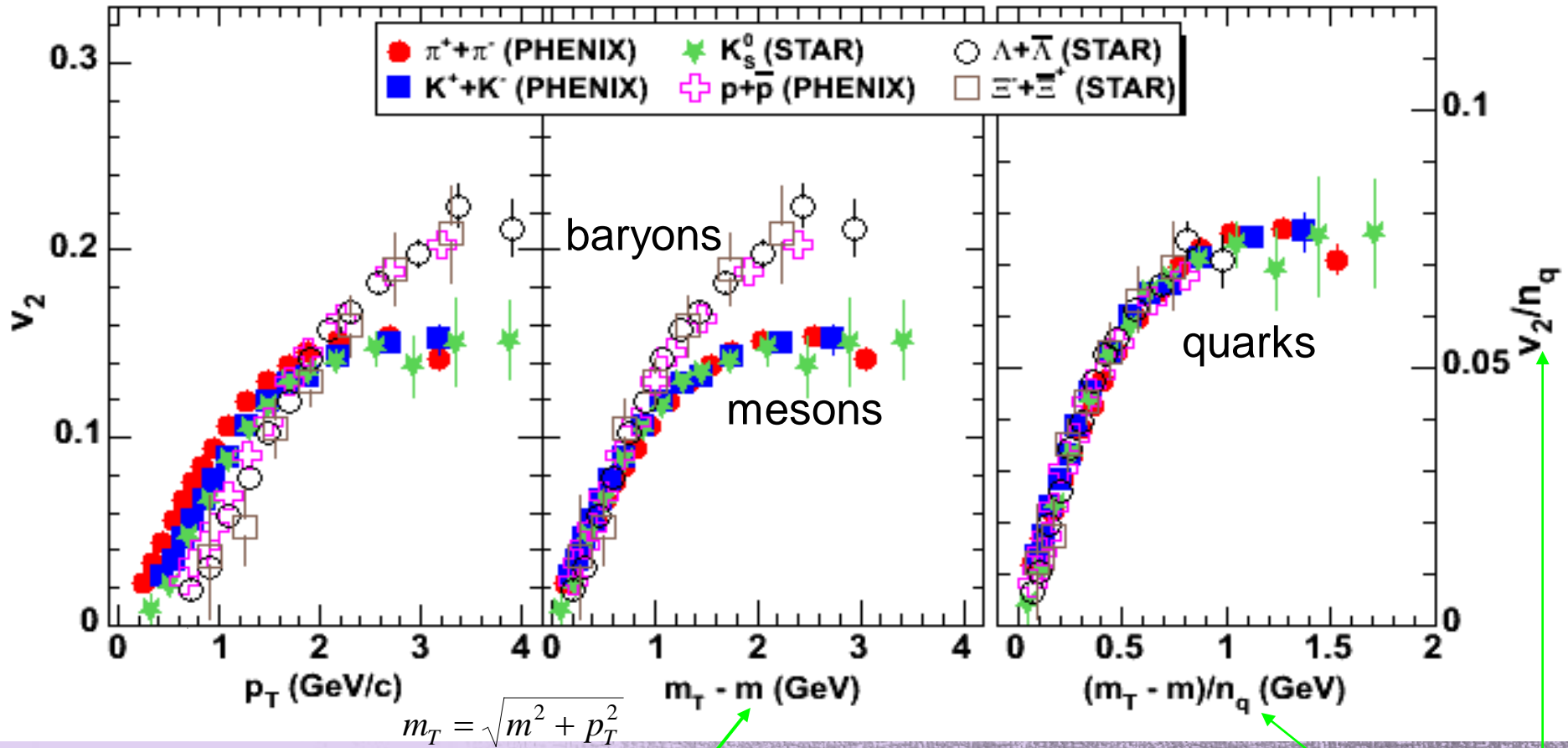


Calculation:  
M.Luzum,  
arXiv:1011.5173

- Система, що утворилась в результаті зіткнень важких іонів свинцю на ЛНС поводить себе як рідина з дуже малою в'язкістю



# Коллективні потоки частинок: Масштабування з числом кварків, RHIC



зображено vs.  
поперечної кінетичної  
енергії

Обидві вісі промасштабовано  
з числом складових кварків

$n_q = 2$  для мезонів  
 $n_q = 3$  для барионів

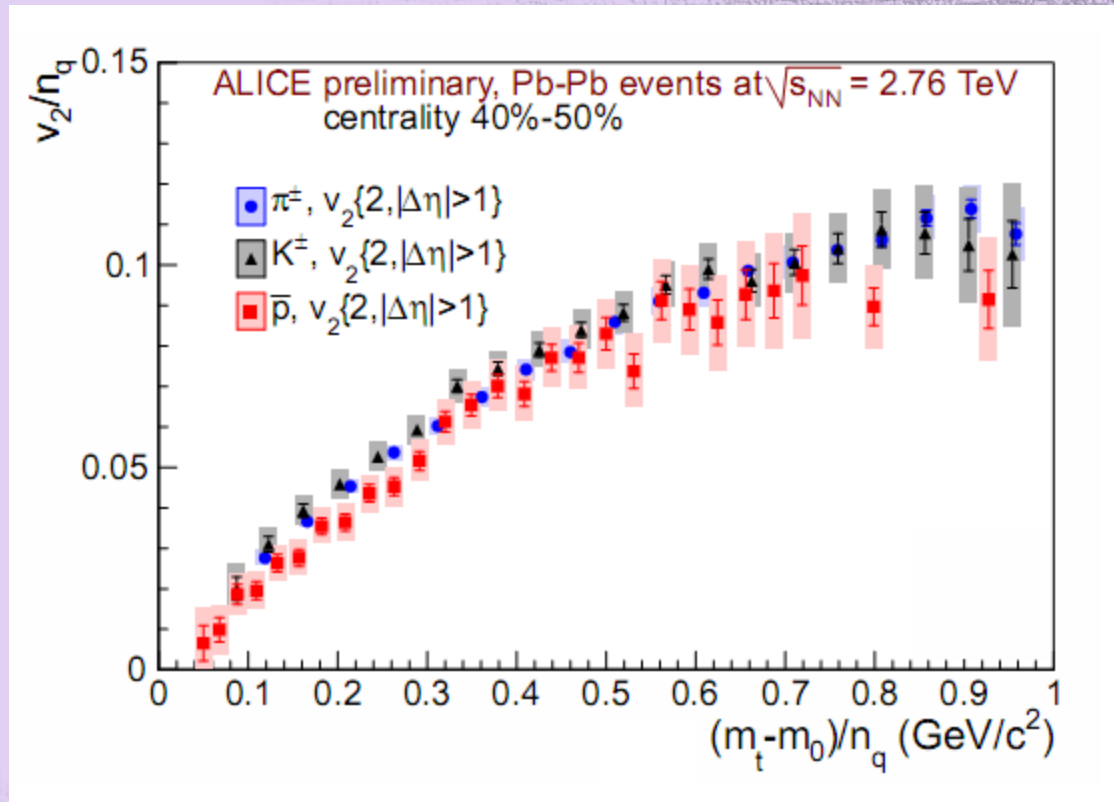
Рекомбінація кварків:  
Кварки мають  $v_2$  до адронізації

S. Voloshin, QM02, 379c (2003)

STAR, PRL **95**, 122301 (2005)

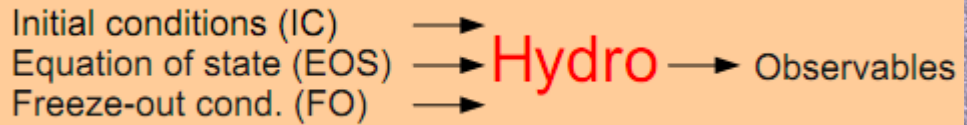
PHENIX, PRL **98**, 162301 (2007)

# Коллективні потоки частинок: Масштабування з числом кварків, LHC



Антипротони випадають з універсального масштабування з числом кварків

# Релятивістська гідродинаміка



✓ (ідеальна) гідродинаміка

Закони збереження енергії-імпульсу

$$\partial_\nu T^{\mu\nu} = 0$$

додаткові рівняння, що описують закон збереження заряду:

$$\partial_\mu (n(x) u^\mu) = 0$$

ідеальна рідина :

$$T^{\mu\nu} = (\epsilon(x) + p(x)) u^\mu(x) u^\nu(x) - p(x) \cdot g^{\mu\nu}$$

**+ EoS  $p=p(\epsilon)$**

Необхідне рівняння стану (EoS), для того, щоб закрити систему гідродинамічних рівнянь

**+ початкові умови (ПУ)**

Припущення:

За короткий час термалізації ( $\leq 1\text{fm}/c$ ) с-ма сягає локальної рівноваги з нульовим вільним пробігом та нульовою в'язкістю.

# Гідро-кінетична модель

• Yu.M. Sinyukov , Akkelin, Hama: PRL 89 , 052301 (2002);

+ Karpenko: PRC 78, 034906 (2008).

M. S. Borysova <sup>1</sup>, Yu. Karpenko <sup>2</sup> and Yu.M. Sinyukov <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Kyiv Institute for Nuclear Research, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup> Bogolubov Institute for Theoretical Physics, Kyiv, Ukraine

## Повний алгоритм включає:

- Розв'язок рівнянь ідеальної гідродинаміки;
- Розрахунки нерівноважних  $\phi$ -ій розподілу та функції емісії в першому наближенні
- Розв'язок рівнянь ідеальної гідродинаміки з ненульовою правою частиною, що враховує закони збереження для нерівноважних процесів в системі, яка випромінює вільні частинки підчас розширення;
- Розрахунки “точних”  $\phi$ -ій розподілу та функції емісії
- Розрахунки спектрів, потоків і кореляцій.

# Опис початкового стану

Прицільний параметр  
( $\langle b \rangle$ )

#учасники ( $\langle N_{part} \rangle$ ) –  
Нуклони, що зіткнулись  
хоча б один раз

#NN-зіткнення ( $\langle N_{coll} \rangle$ ) –  
Повна кількість зіткнень

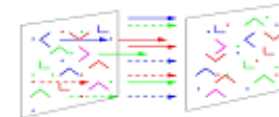
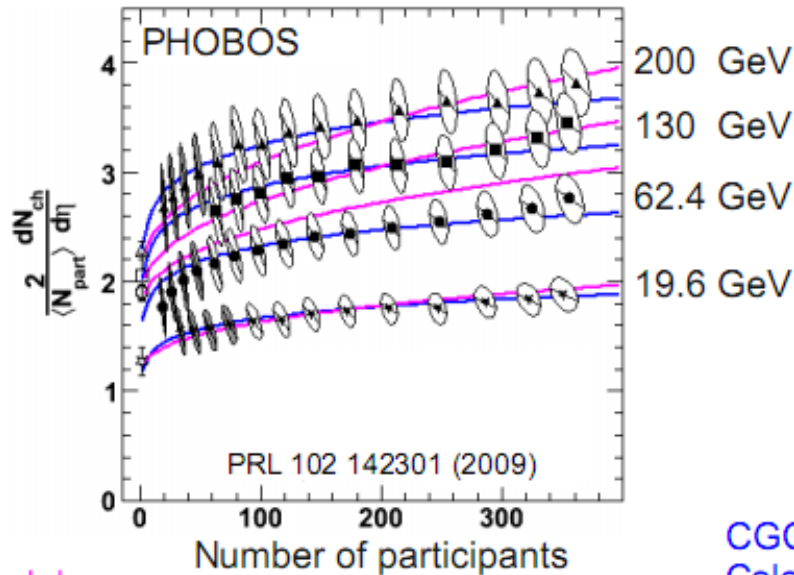


Glauber IC  
Two-component model

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

PRC 70 021902 (2004)

## Mid-rapidity density



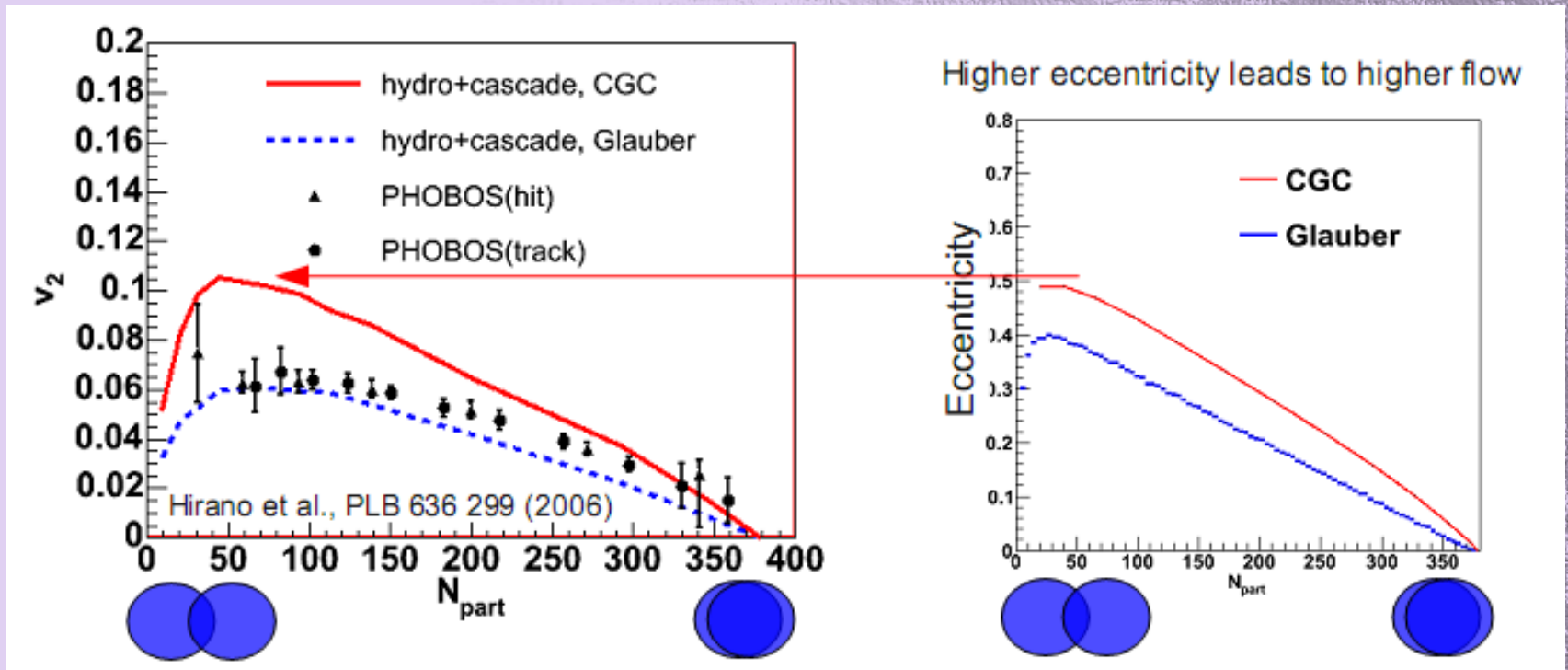
CGC IC  
Color glass condensate

$$\frac{dN}{d\eta} \propto N_{part}^{\alpha} \sqrt{s}^{\lambda}$$

PRL 94 022002 (2005)

- Обидва класи моделей добре описують множинність в центральній області бистрот, але..

## CGC vs Glauber: опис потоків



- Неоднозначність в описі початкового стану призводить до варіювання параметра в'язкості чи рівняння стану чи введення флуктуюючих початкових умов

# Початкові умови для гідро-кінетичної еволюції

ПУ з CGC vs Glauber в моделях, що  
включають початкові флуктуації:

Монте-Карло симуляції NeXSPheRIO

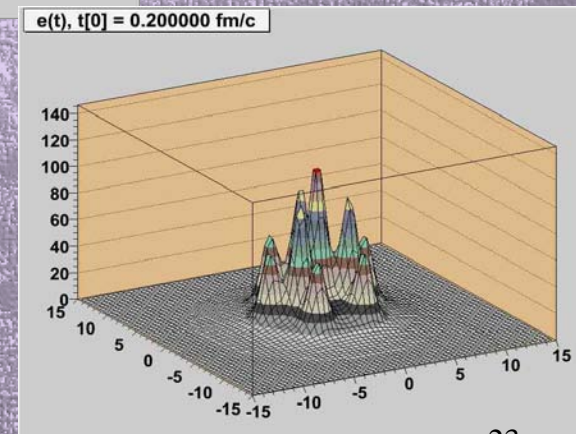
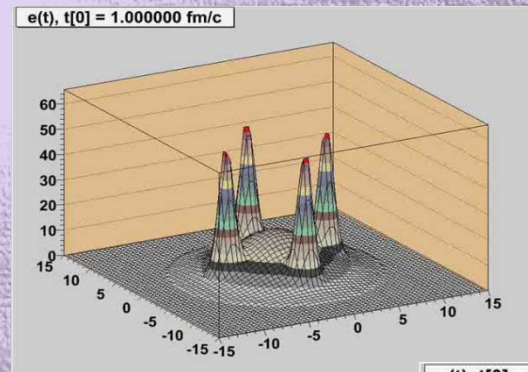
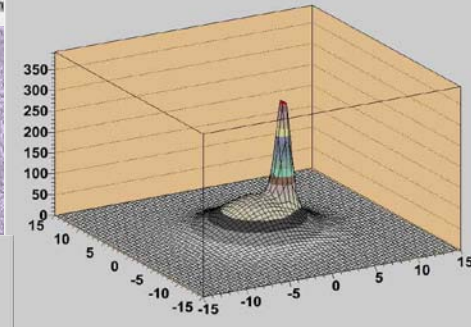
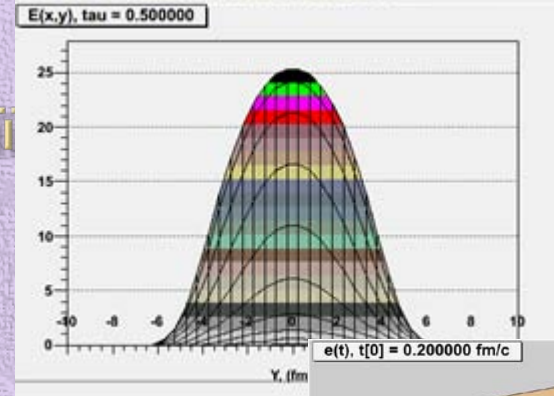
UrQMD зв'язане з гідродинамікою

EPOS зв'язане з гідродинамікою

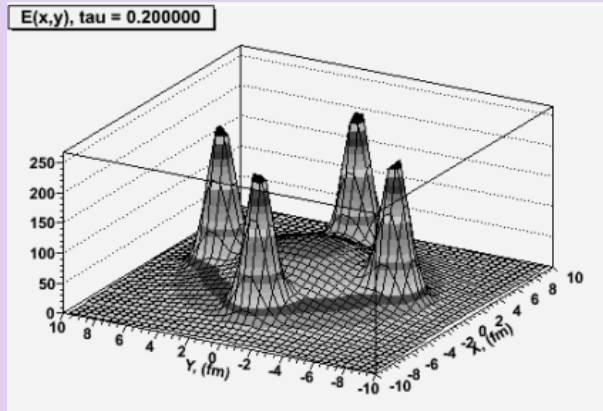
AMPT

Модель Глаубера зв'язана з гідродинамікою

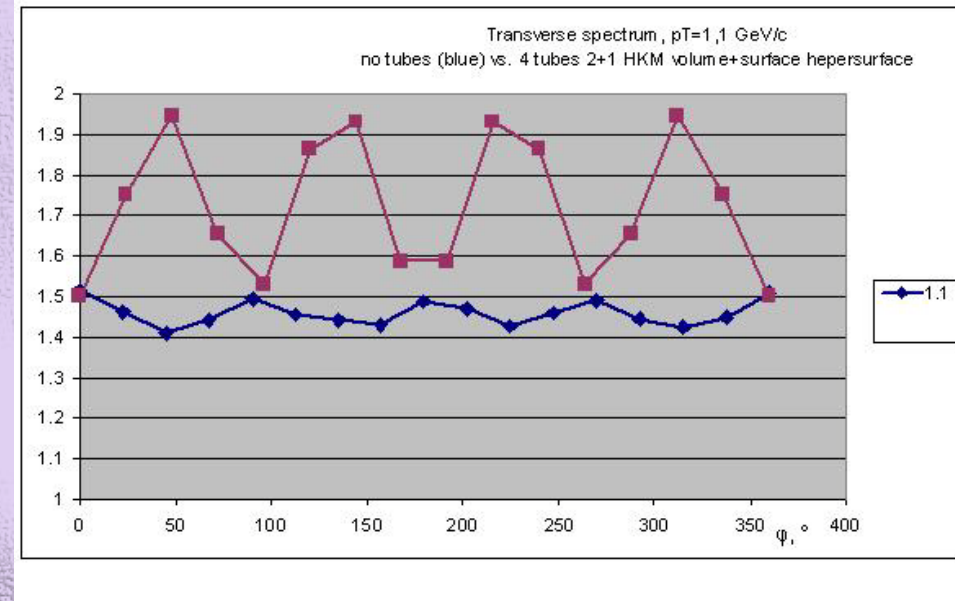
Флуктуації у геометрії  
системи, що щойно  
утворилась в результаті  
зіткнення, відповідають  
за появу нових явищ,  
таких як трикутові  
потоки, які дозволили  
розв'язати проблеми у  
описі існуючих даних



# Спектри піонів в залежності від азимутального кута для різних $p_T$



ПУ типу Бьоркена при 0.2 фм/с:  
початковий повздовжній потік  
 $v_L = z/t$   
буст-інваріантність у  
повздовжньому напрямку та  
початкові профілі густини  
енергії у поперечній площині  
типу Глаубера, з/без  
поперечного колективного  
розширення.





# Висновки

## ▣ Запуск LHC з важкими іонами!

### ● Характеристика загальних властивостей

- в 3 рази вищі початкові густини в порівнянні з найвищими енергіями на RHIC
- Схожі залежності від центральності для потоків та множинності
- Рідина з дуже низькою в'язкістю

### ● Початкові умови та ГКМ

- Було знайдено, на прикладі 4 флуктуацій у геометрії системи, що щойно утворилась в результаті зіткнення, що такі флуктуюючі умови впливають на кінцеві спектри (поява чотирьох піків у азимутальних розподілах спектрів частинок), що може бути причиною формування рідж структур

# Висновки

Тільки частина результатів показана:

внаслідок обмеженого часу та власних вподобань ...

в дійсності, багато ще аналізується:

- з вимірів по спектрам, відношенням різних частинок
- більше по еліптичним потокам (великі  $p_T$ , гармоніки вищих порядків  $v_n$  ...)
- по резонансам, баріонам, дивності, НВТ в залежності від центральності
- жорсткі проби: кварконій, втрати енергії в середовищі, струмені ...

## Майбутні перспективи

- ▣ Багато роботи (та захоплюючої фізики) попереду:
- ▣ Тільки 8 тижнів з 10-річної програми!
- ▣ Для рідких сигналів необхідне збільшення інтегральної світимості  $\sim 100$  : планується досягти цього року ( $\sim \times 20$  wrt 2010)
- ▣ кварконій ( $J/\psi$ ,  $\Psi'$ ,  $\Upsilon$ ,  $\Upsilon'$ ), важких кварків (b,c),  $\gamma$ -струмені, ...
- ▣ Запуск LHC з максимально передбаченими енергіями:
  - порівняння даних p-A з A-A з ціллю:
    - відрізнити ефекти КГП від ядерних ефектів (“shadowing”)
    - дослідження початкових умов
  - зіткнення з меншими масами іонів (Ar-Ar?):
    - дослідження об’ємних ефектів, досягнення більших світимостей

**Дякую за увагу !**