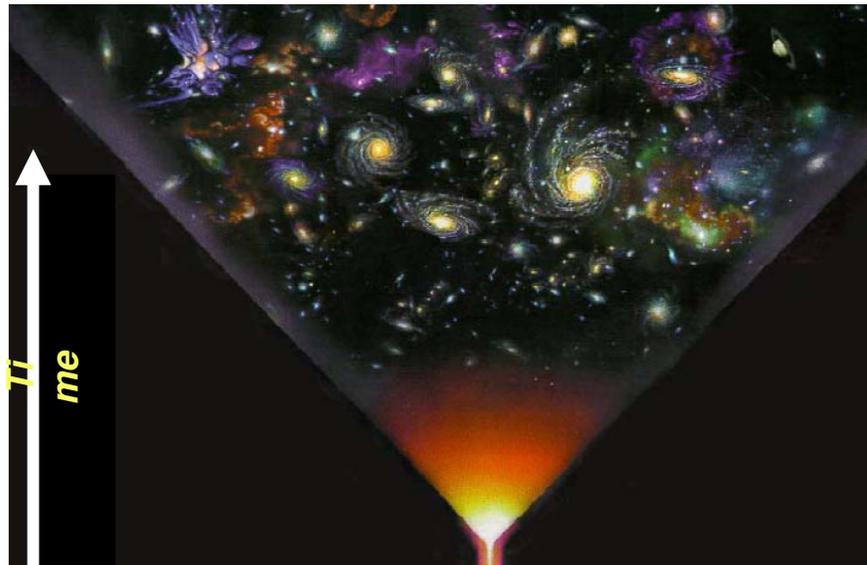


Ядро-ядерные столкновения: от  
релятивистского ядерного коллайдера к  
Большому адронному коллайдеру –  
первые впечатления  
*В. Пантуев, ИЯИ*



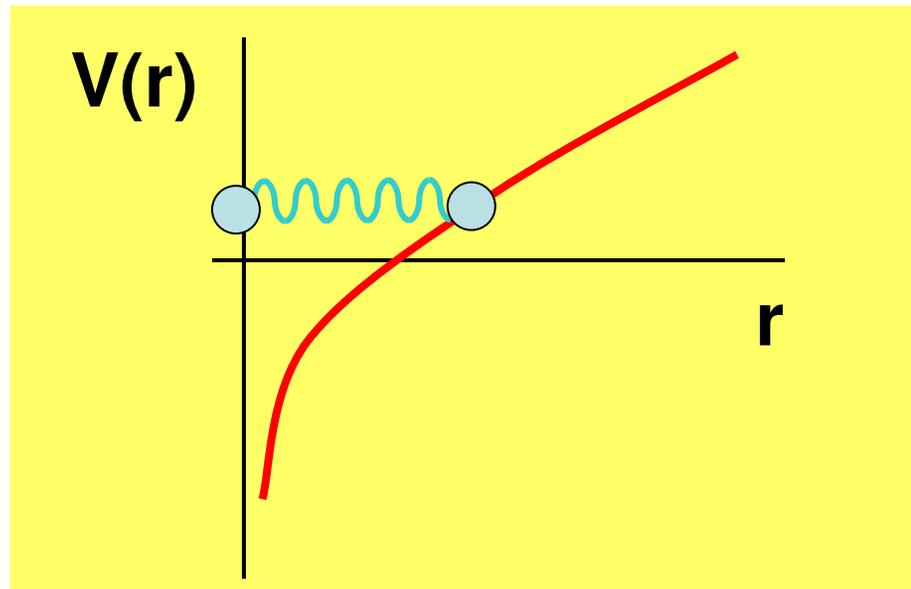
# Мотивация столкновений релятивистских ядер

Квантовая хромодинамика:

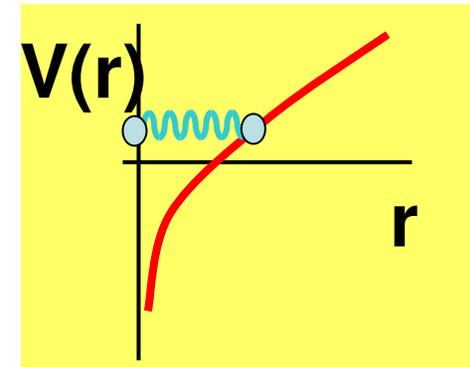
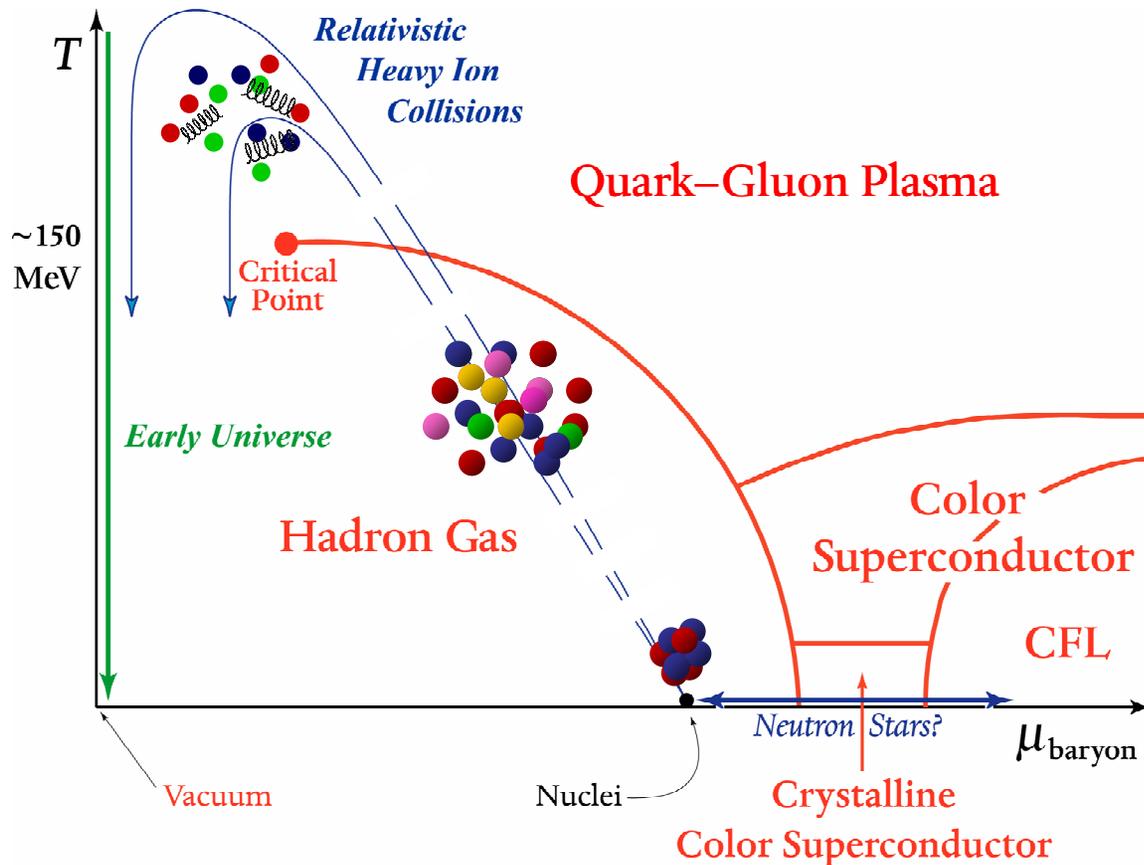
Адроны являются составными объектами из кварков и глюонов

КХД потенциал растет с расстоянием - **конфайнмент**

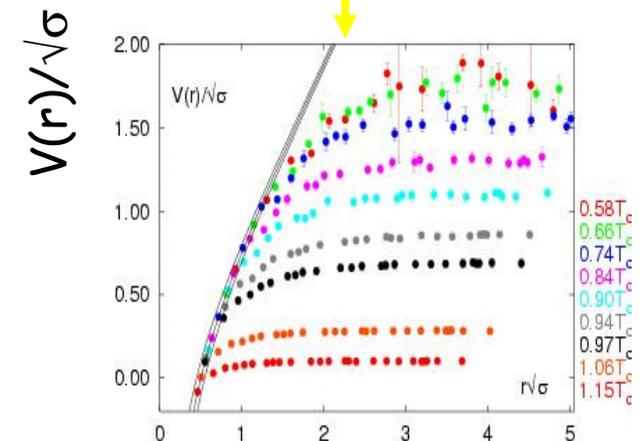
$$V(r) = -\frac{4}{3} \frac{\alpha_s}{r} + kr$$



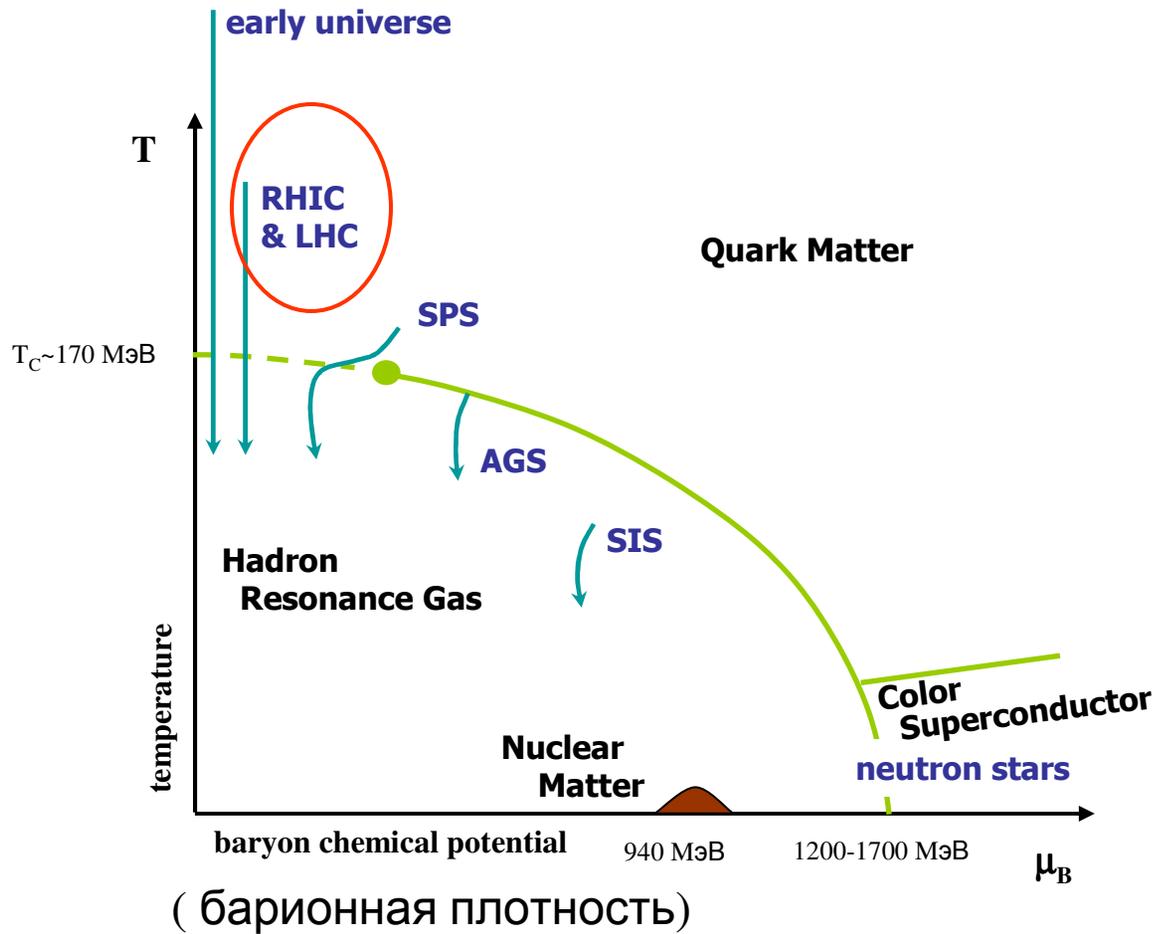
# Что произойдет если КХД вещество нагреть/сжать?



КХД расчеты на решетке



Ускорение релятивистских ядер - оптимальный подход для исследования КХД вещества при экстремальной температуре и плотности в лабораторных условиях



В случае достижения асимптотической свободы в КХД

плотность энергии на  $\nu$  степеней свободы в пределе по Стефану-Больцману:

$$\varepsilon \approx \nu \int \frac{d^3p}{(2\pi)^3} E \left( e^{E/T} \pm 1 \right)^{-1} \approx \left( \nu_G + \frac{7}{8} \nu_Q \right) \frac{\pi^2}{30} T^4$$

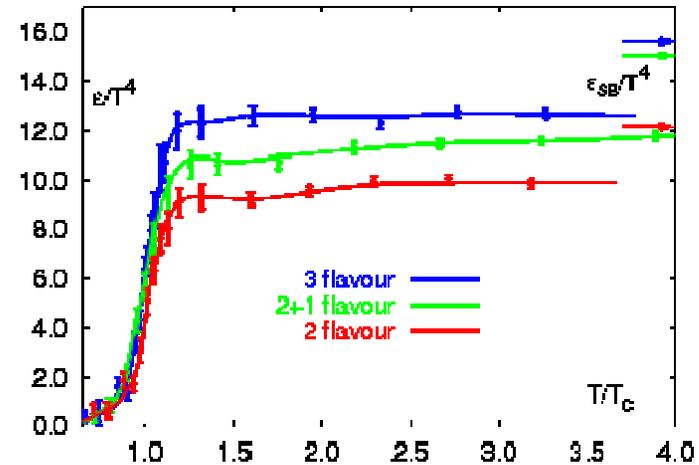
При фазовом переходе возникают глюонные и кварковые степени свободы

$$\nu_G = 2(N_c^2 - 1) \quad \text{- спин и цвет}$$

$$\nu_Q = 4N_c N_f \quad \text{- спин, цвет и аромат}$$

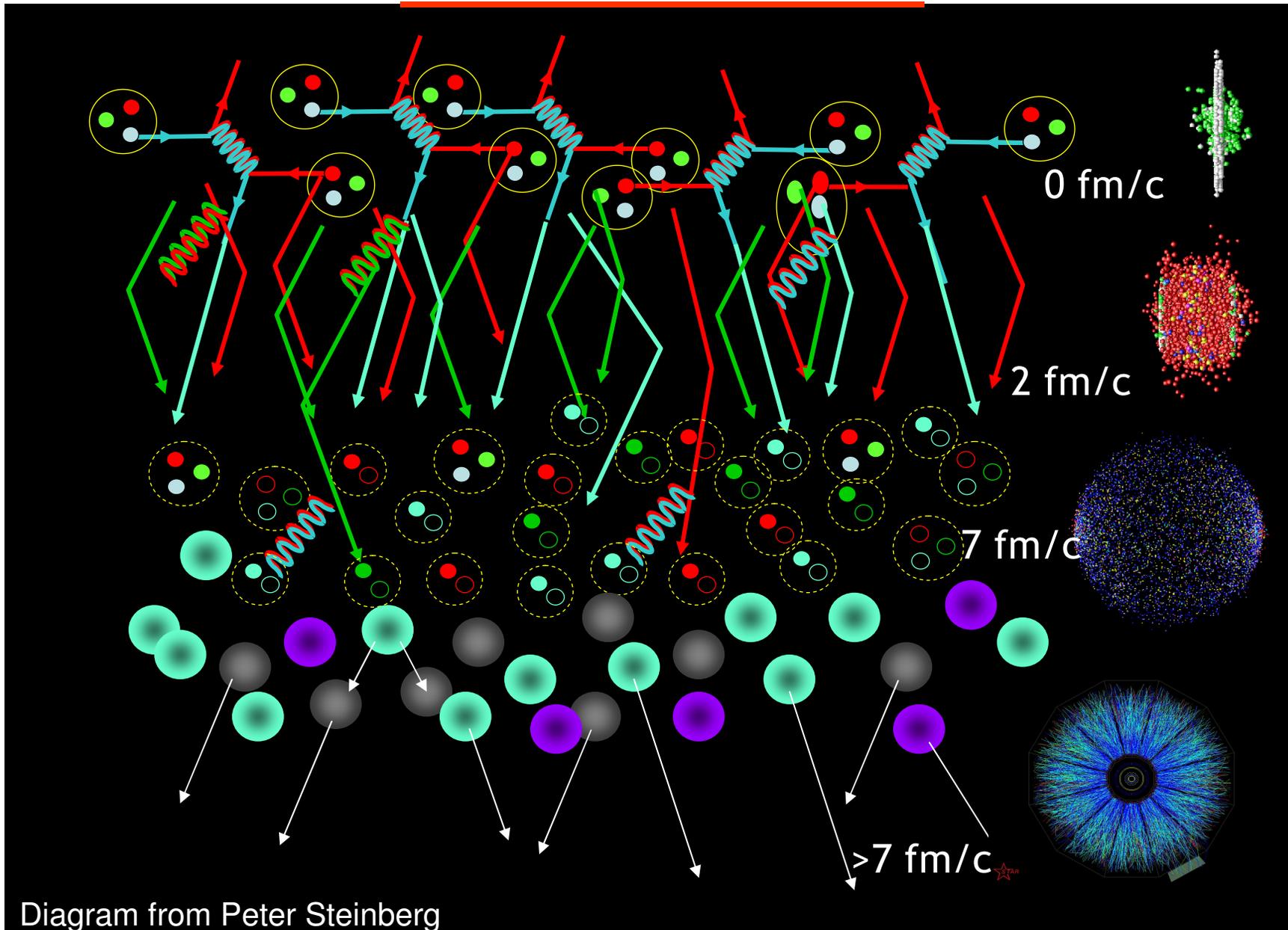
Для двух ароматов кварков *up* и *down*, скобки = 37.

Для трех ароматов- =47,5



КХД вычисления на решетке подтверждают оценки и дают  $T$  перехода около 170 МэВ и плотность  $\sim 1$  ГэВ/фм<sup>3</sup>

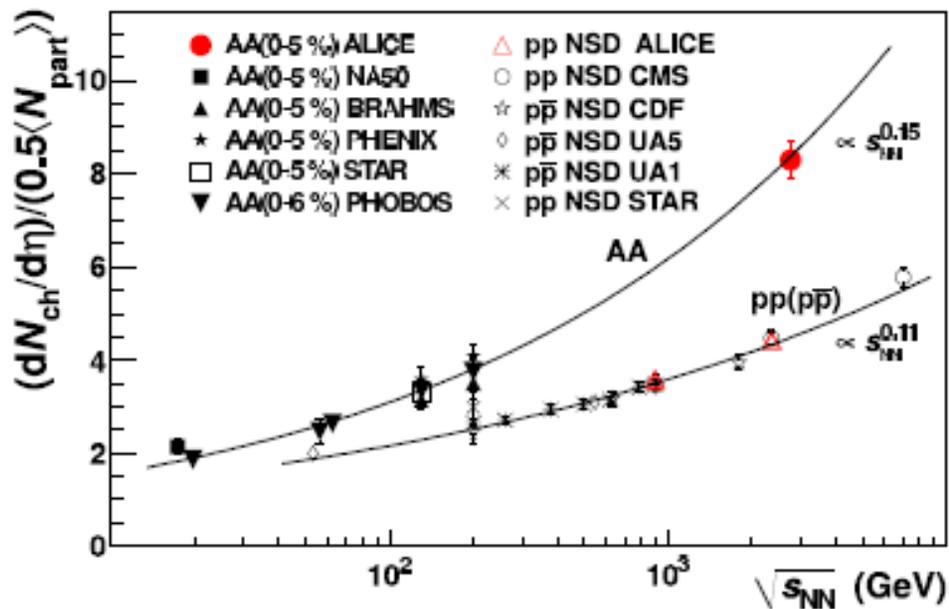
# Time Evolution



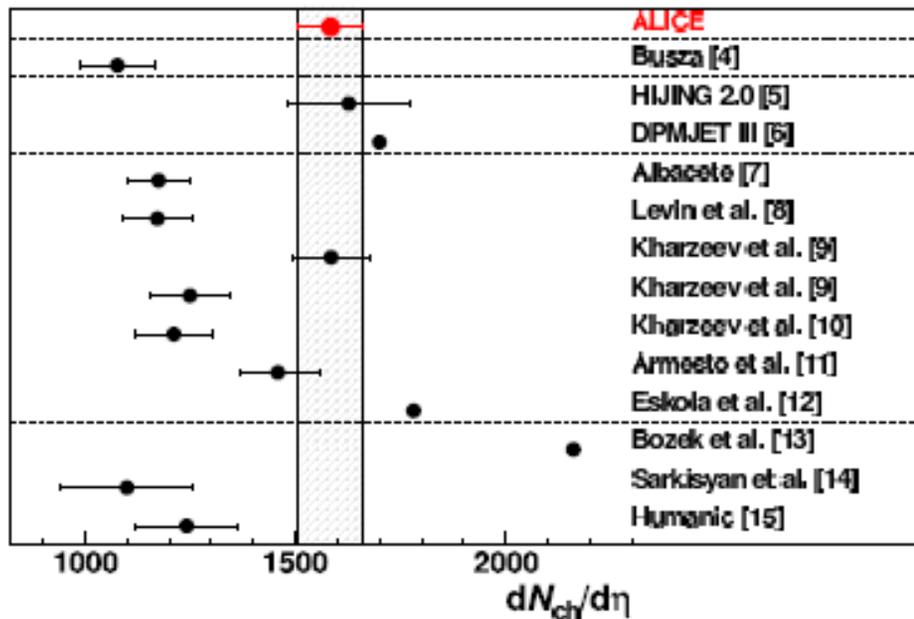
## Два ускорительных комплекса:

- RHIC – Relativistic Heavy Ion Collider, Au+Au,  $\sqrt{s_{NN}}=0.2$  TeV
- LHC – Large Hadron Collider, Pb+Pb, 2.76 TeV (2010)



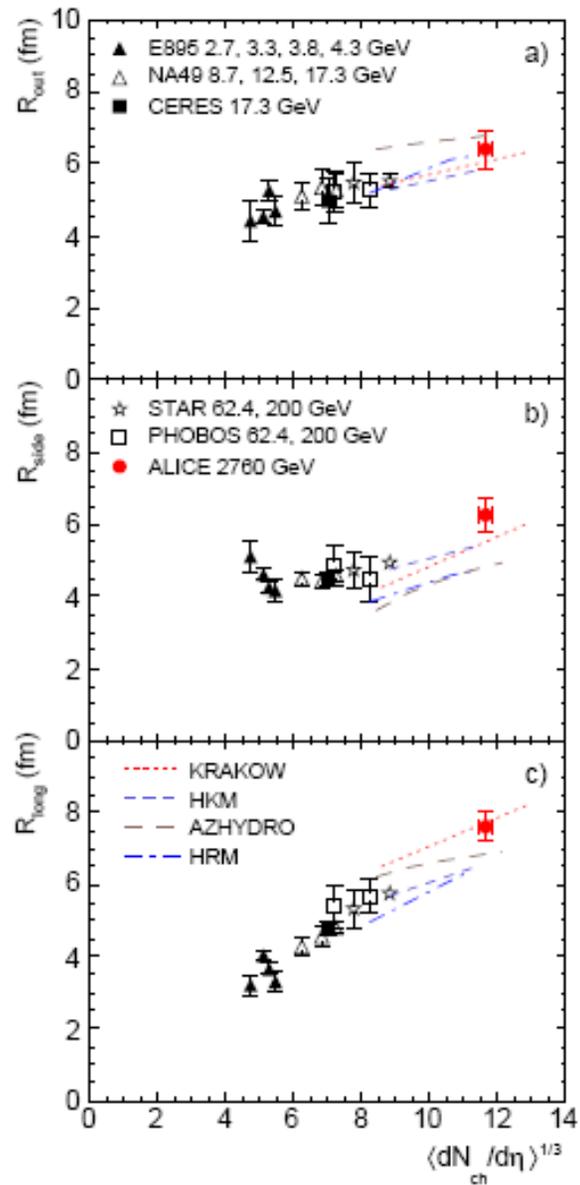


ALICE: Множественность частиц:  
 С увеличением энергии растет быстрее, чем для pp



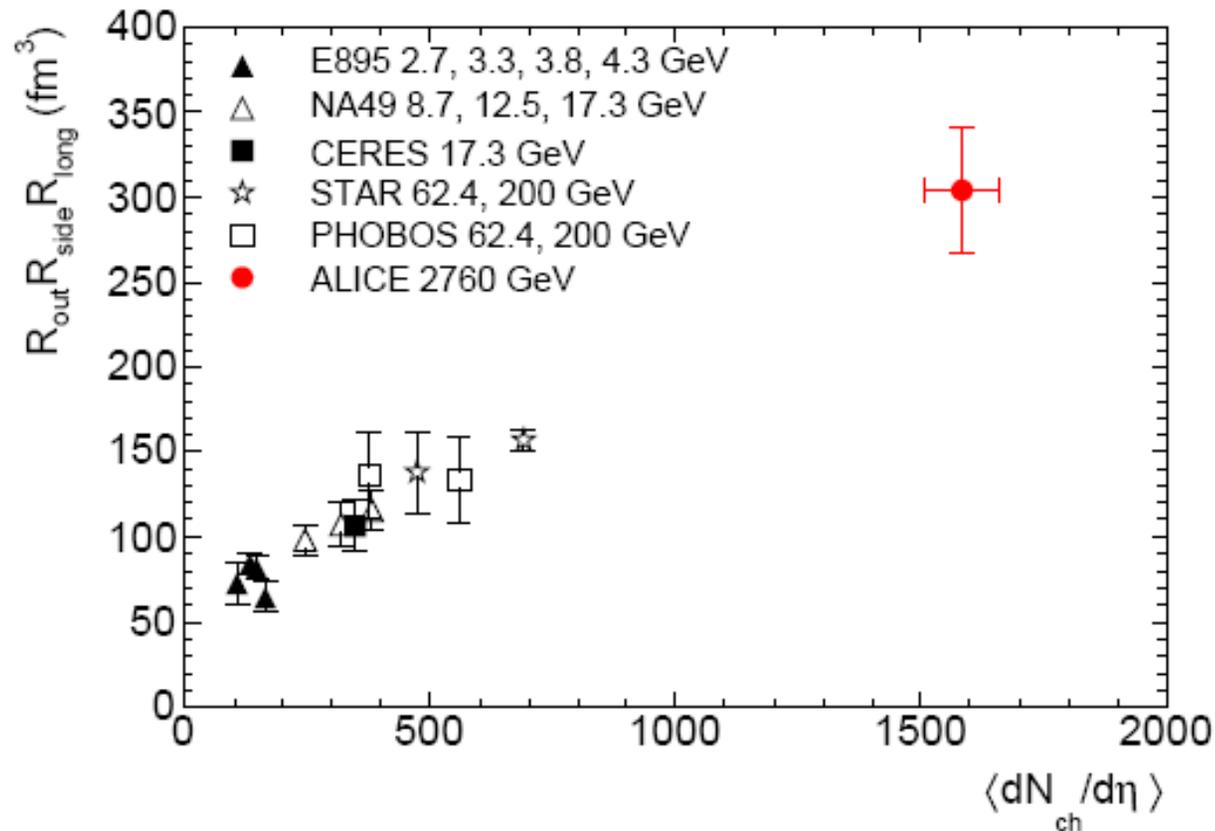
Большинство предсказаний ниже на 20%, однако это связано с увеличенной экспериментальной множественностью в pp

FIG. 4. Comparison of this measurement with model predictions. Dashed lines group similar theoretical approaches.



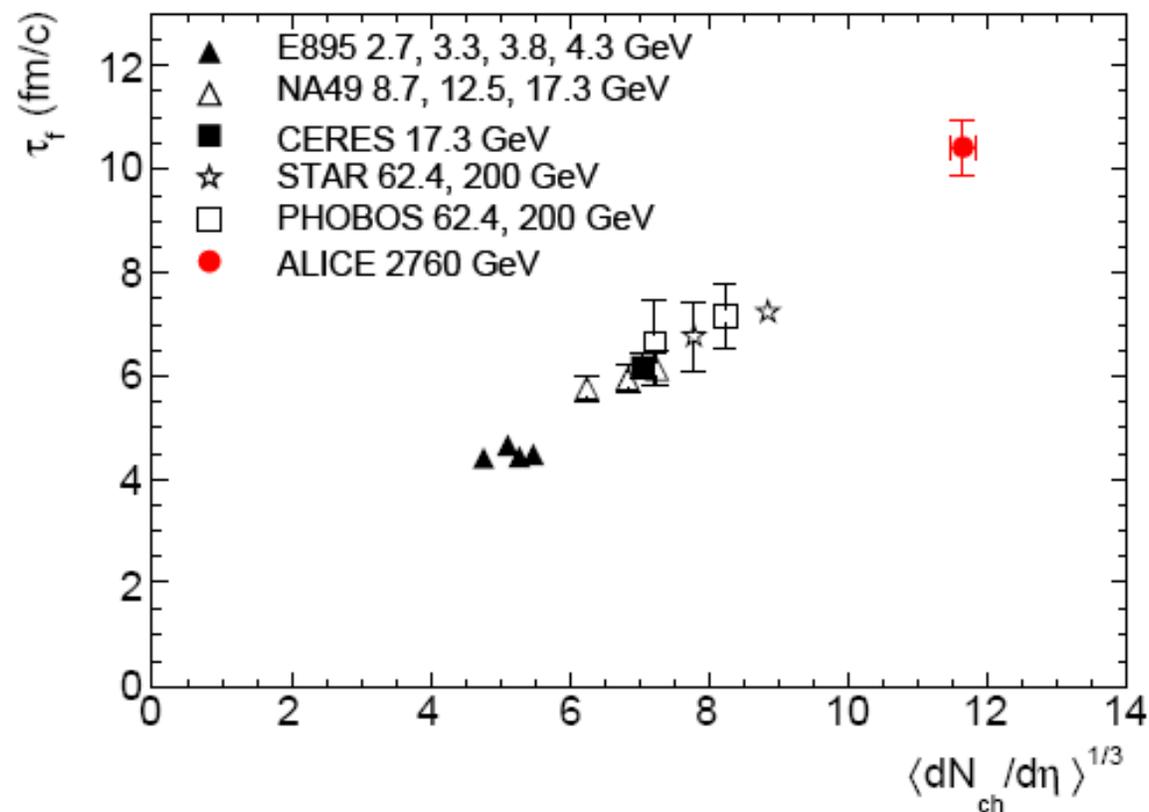
**ALICE:** Измерение размеров системы методом интерферометрии тождественных частиц.

Все размеры увеличились, особенно  $R_{long}$



**Fig. 4:** Product of the three pion HBT radii at  $k_T = 0.3 \text{ GeV}/c$ . The ALICE result (red filled dot) is compared to those obtained for central gold and lead collisions at lower energies at the AGS [35], SPS [36, 37, 38], and RHIC [39, 40, 41, 42, 30, 43],

**ALICE:** Объём системы до момента адронизации возрос в 2 раза по сравнению с RHIC, что примерно и ожидалось при увеличении энергии



**Fig. 5:** The decoupling time extracted from  $R_{long}(k_T)$ . The ALICE result (red filled dot) is compared to those obtained for central gold and lead collisions at lower energies at the AGS [35], SPS [36, 37, 38], and RHIC [39, 40, 41, 42, 30, 43],

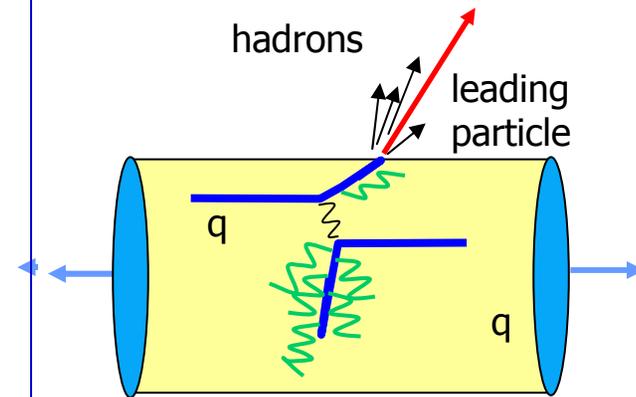
**ALICE:** Время жизни системы до момента адронизации возросло так же в 2 раза по сравнению с RHIC, что примерно и ожидалось при увеличении энергии

## Метод jet tomography кварковой материи

Baier, Dokshitzer, Mueller, Schiff  
Gyulassy, Levai, Vitev, Wang

- Было предположено (1992), что в **цветной** “кварк-глюонной” среде **цветные заряды должны терять существенную энергию** за счет излучения глюонов, что проявится как:
  - Ослабление или поглощение струй, “квенчинг”
  - **Подавление адронов при больших  $p_T$**
  - Модификация корреляции частиц
  - Подавление струи отдачи

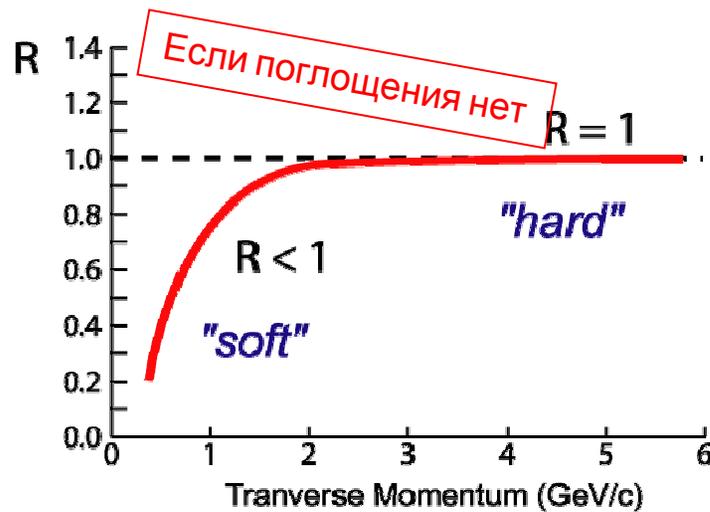
Образование струй



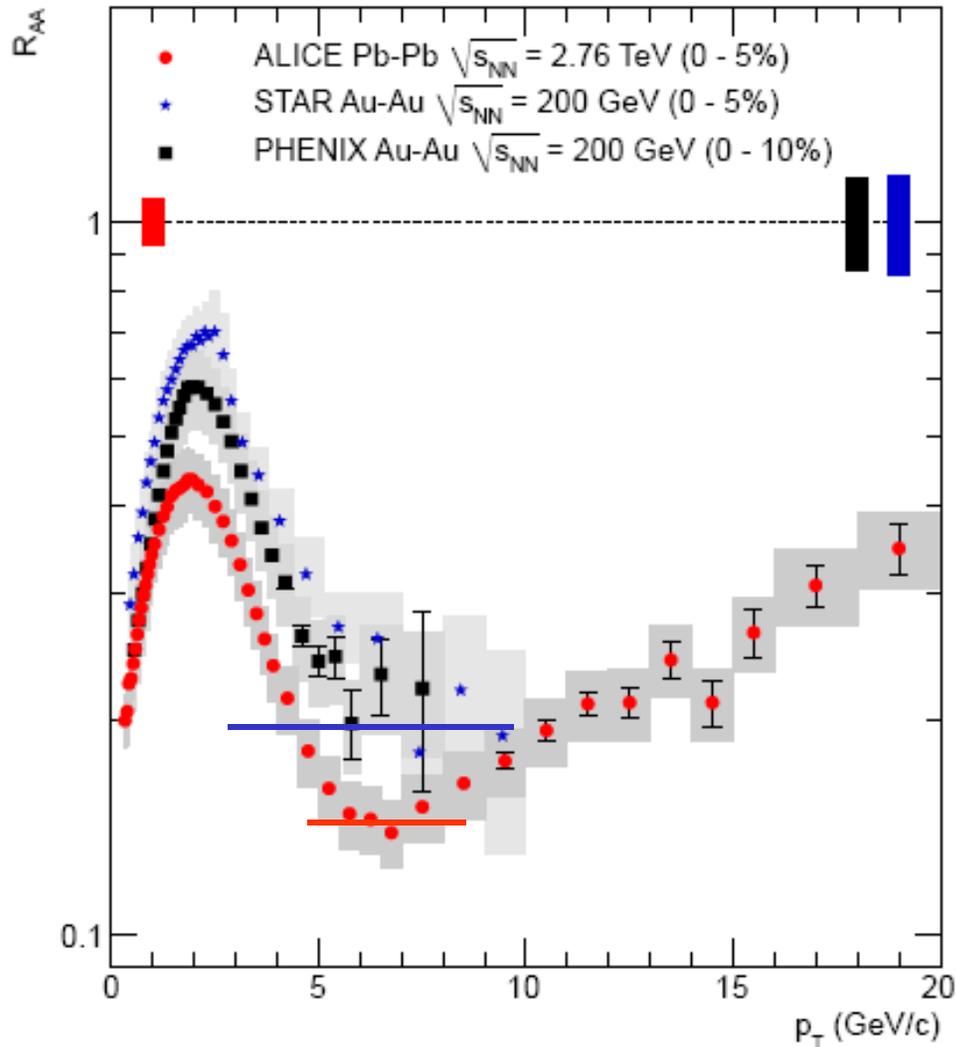
- Обычные методы выделения струй **не работают** в А-А столкновениях на RHIC – слишком большая множественность частиц и очень малая возможная энергия струи
- На LHC струи удалось выделить

**Ядерный модификационный фактор** – оценка выхода жёстких частиц по сравнению с ожидаемым выходом, основываясь на данных из pp с учетом скейлинга по числу нуклонных столкновений

$$R_{AA}(p_T) = \frac{(1/N_{evt}^{AA}) d^2 N_{ch}^{AA} / d\eta dp_T}{\langle N_{coll} \rangle (1/N_{evt}^{pp}) d^2 N_{ch}^{pp} / d\eta dp_T},$$



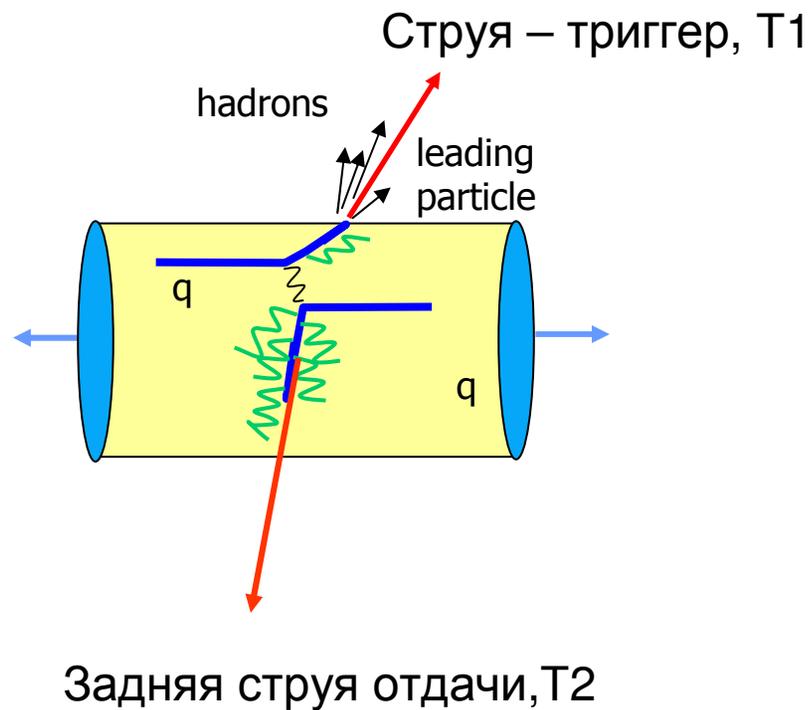
На RHIC это было одно из первых и самых значимых наблюдений – подавление струй / jet quenching /



Результаты **ALICE** указывают на усиление поглощения почти в два раза – **ПЛОТНОСТЬ** образующейся среды больше, чем на RHIC

P.S. Данные ALICE получены для инклюзивных адронов, то есть для мезонов и барионов. На RHIC наблюдается необъяснимая аномалия в выходах барионов

# Двуструйные события



Параметр асимметрии по энергии:

$$A_J = \frac{E_{T1} - E_{T2}}{E_{T1} + E_{T2}}, \Delta\phi > \frac{\pi}{2}$$

# Данные ATLAS и CMS

периферийные

центральные

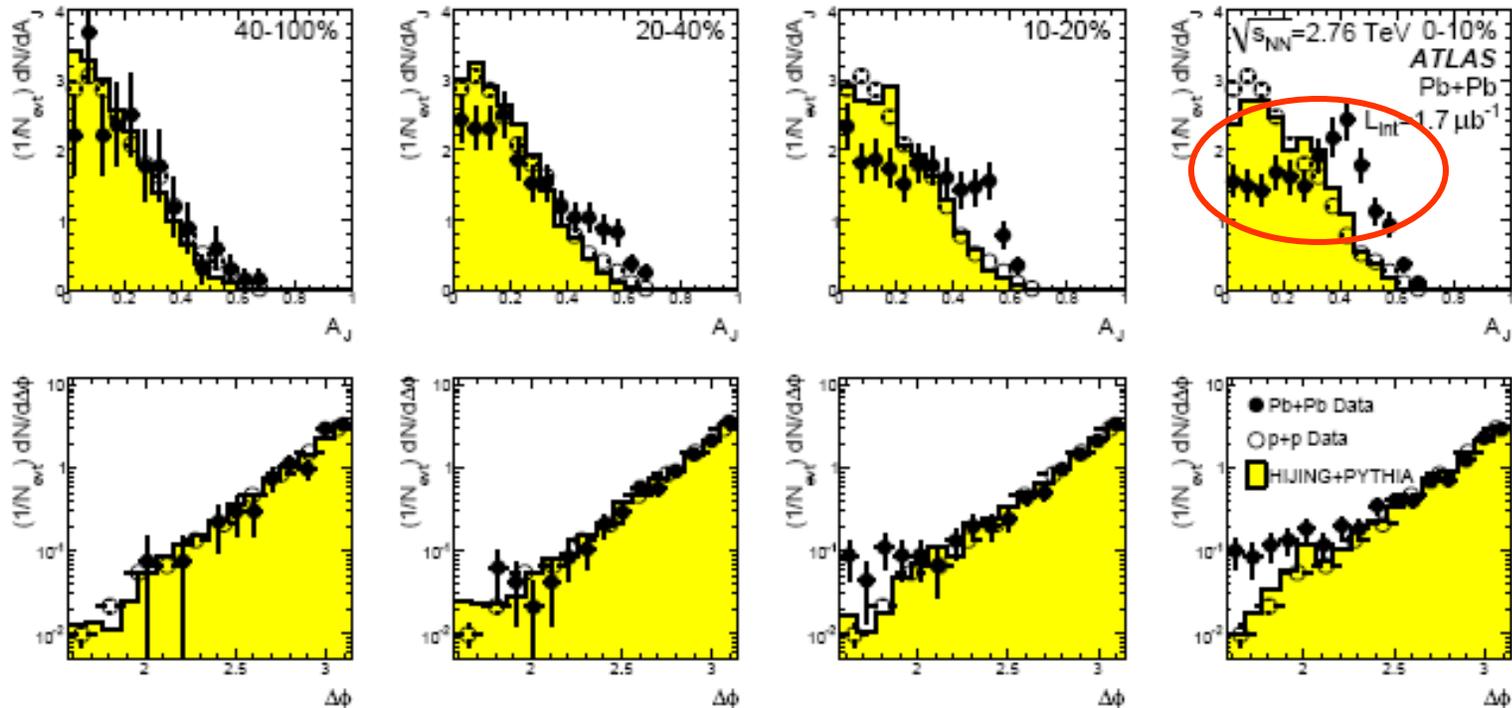
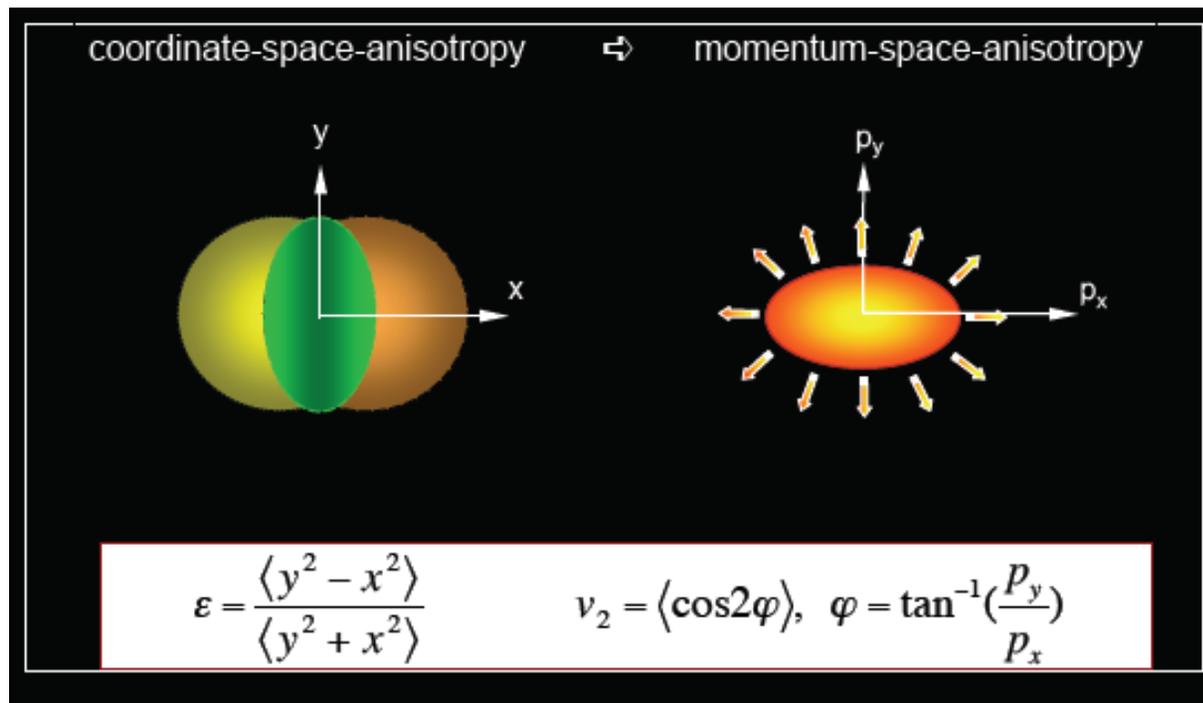


FIG. 3: (top) Dijet asymmetry distributions for data (points) and unquenched HIJING with superimposed PYTHIA dijets (solid yellow histograms), as a function of collision centrality (left to right from peripheral to central events). Proton-proton data from  $\sqrt{s} = 7$  TeV, analyzed with the same jet selection, is shown as open circles. (bottom) Distribution of  $\Delta\phi$ , the azimuthal angle between the two jets, for data and HIJING+PYTHIA, also as a function of centrality.

Результаты подтверждают эффект RHC: искажение струи отдачи, проходящей через образующуюся среду

## Коллективные потоки. Партонная жидкость?

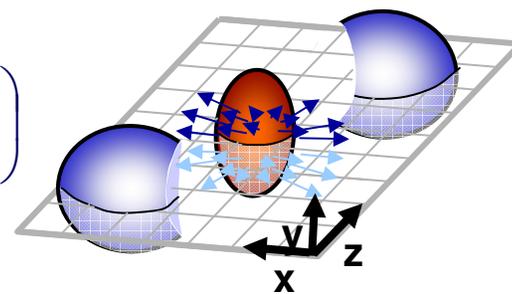
- Радиальный
- Эллиптический (азимутальная асимметрия)
- Ударные волны?
- Гребень (ridge) ?



Пространственная анизотропия для  
 полуцентральных столкновений приводит в  
 анизотропии в импульсном распределении за  
 счет разных градиентов давления

**V2**

$$E \frac{d^3 N}{d^3 p} = \frac{1}{2\pi} \frac{d^2 N}{p_T dp_T dy} \left( 1 + \sum_{n=1}^{\infty} 2v_n \cos(n\Delta\varphi) \right)$$



Распределение по углам разлагается в ряд Фурье.  
 Доминирующей является эллиптическая  
 компонента, V2

Обнаружение эллиптического потока явилось одним из основных и неожиданных открытий RHIC.

Система проявляет свойства жидкости, а не газа слабо связанных партонов, причем поперечная вязкость жидкости,  $\eta$ , близка к пределу вязкости (почти идеальная жидкость)

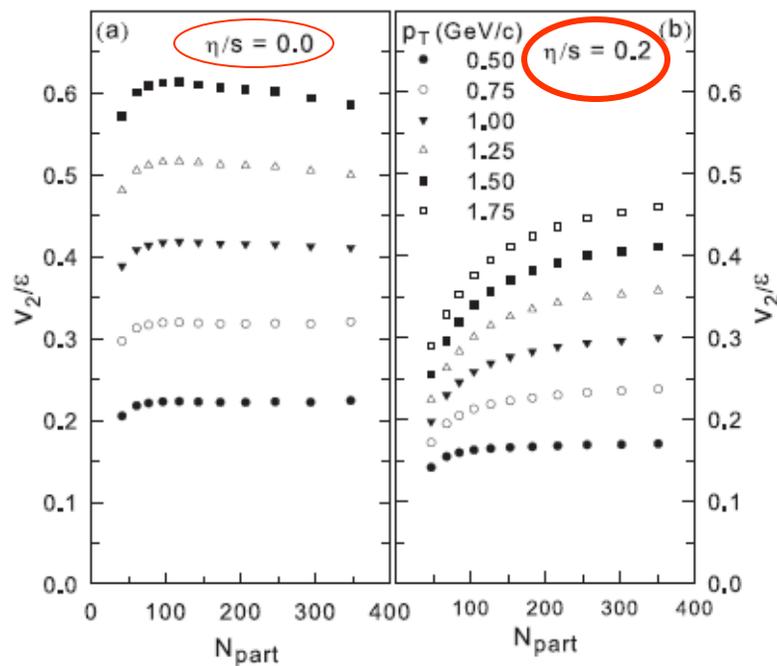


FIG. 1. (color online) Comparison of  $v_2/\varepsilon_2$  vs.  $N_{part}$  for several  $p_T$  selections, obtained from perfect fluid (a) and viscous (b) hydrodynamic simulations [34] of Au+Au collisions.

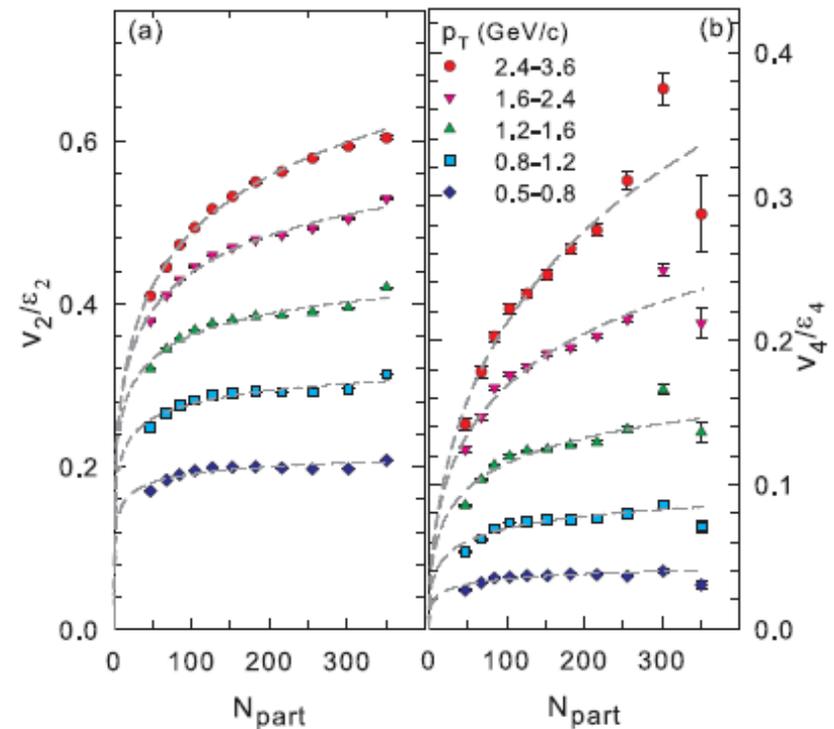


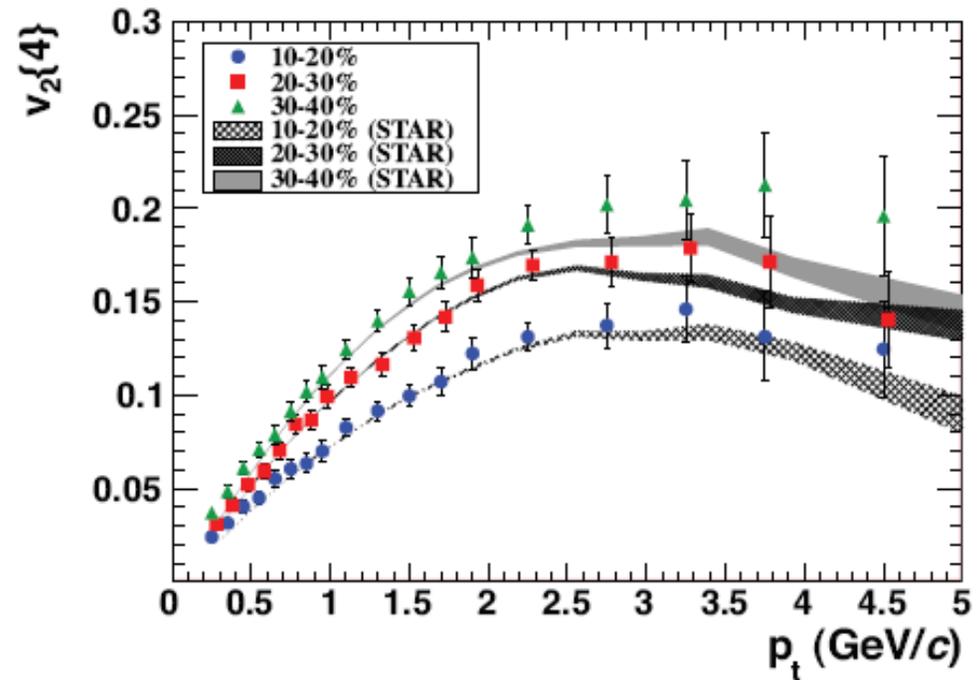
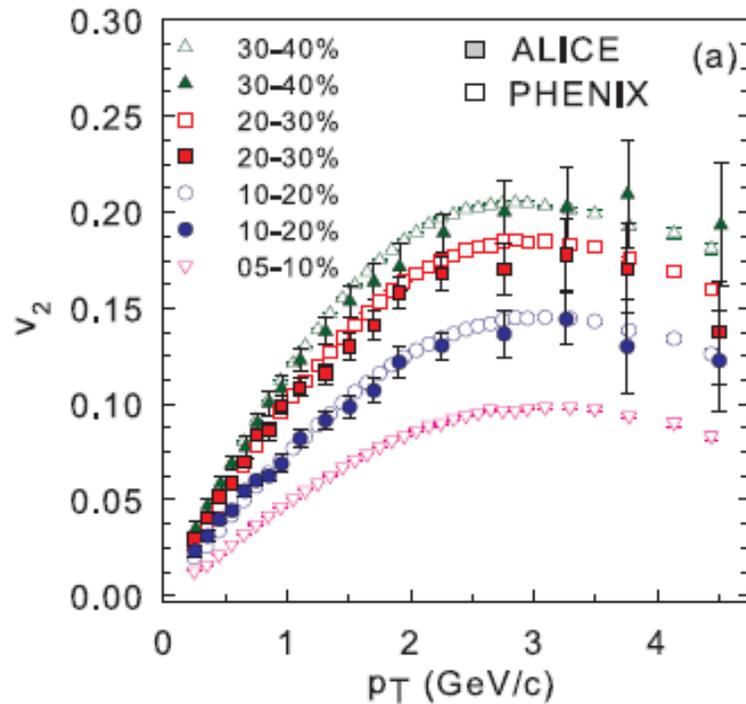
FIG. 2. (color online) Comparison of  $v_2/\varepsilon_2$  vs.  $N_{part}$  (a) and  $v_4/\varepsilon_4$  vs.  $N_{part}$  (b) for several  $p_T$  selections as indicated. The dashed curves indicate a simultaneous fit to the data in (a) and (b) [for each  $p_T$ ] [33]. The  $v_{2,4}$  data are from Ref. [23].

Поперечная вязкость/  
энтропия



Предел  $\eta/s = 1/(4\pi)$

# Результаты ALICE очень близки к данным на RHIC

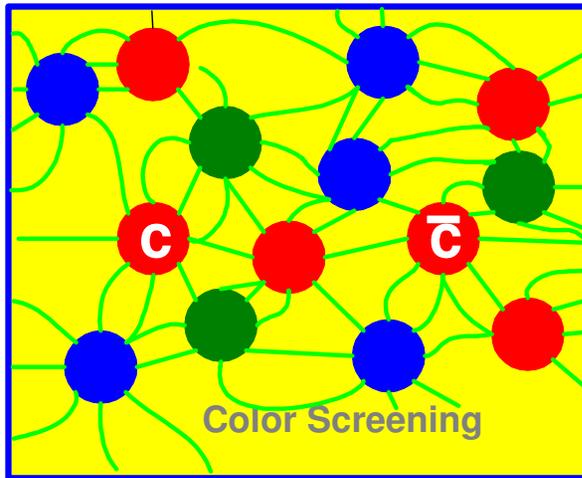


На LHC среда **остается в виде жидкости** с вязкостью почти идеальной жидкости (в некоторых моделях ожидалось, что среда будет более горячей и в виде газа)

## Подавление чармония, $J/\psi$ – мезона, связанного состояния очарованных кварка и анти кварка

Считалось, что подавление этих частиц – в цветной среде за счет **экранировки** взаимодействия между составляющими кварками, будет являться «явным и безусловным» критерием образования кварк-глюонной плазмы.

Однако, все оказалось не так просто....



С увеличением температуры все больше состояний чармония будет «плавиться»:

Ad hoc choice for a dissociation condition: Thermal width  $> 2 \times$  binding energy

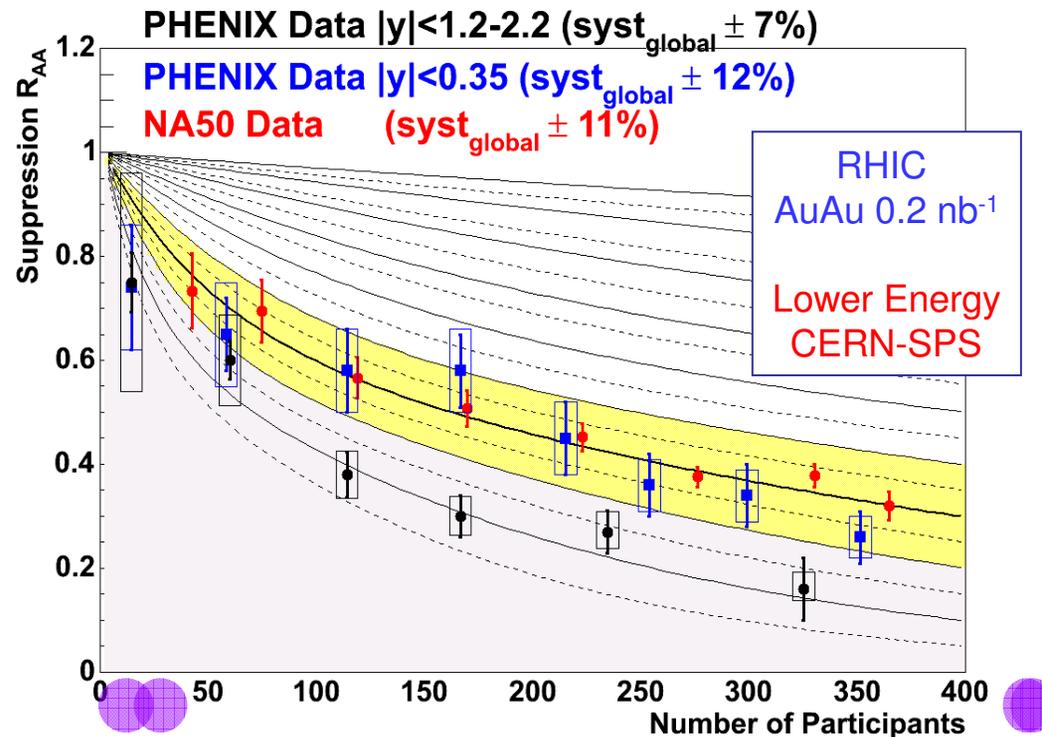
$$\Gamma(T) \geq 2E_{binding}(T)$$

state	$\chi_c$	$\psi'$	$J/\psi$	$\Upsilon'$	$\chi_b$	$\Upsilon$
$T_{dis}$	$\leq T_c$	$\leq T_c$	$1.2T_c$	$1.2T_c$	$1.3T_c$	$2T_c$

Mócsy, Petreczky PRL (2007)

$T_c$  –  
температура  
перехода в  
плазму

# J/ψ подавление на RHIC такое же, как на CERN-SPS (0.017 ТэВ)



Opposite to many expectations

(*e.g. expected hotter medium  $\rightarrow$  more suppression*)

Hard work ahead to check cold nuclear matter effects and check suppression versus  $p_T$

Результаты **ATLAS** показали, что подавление практически такое же как на RHIC и SPS !!

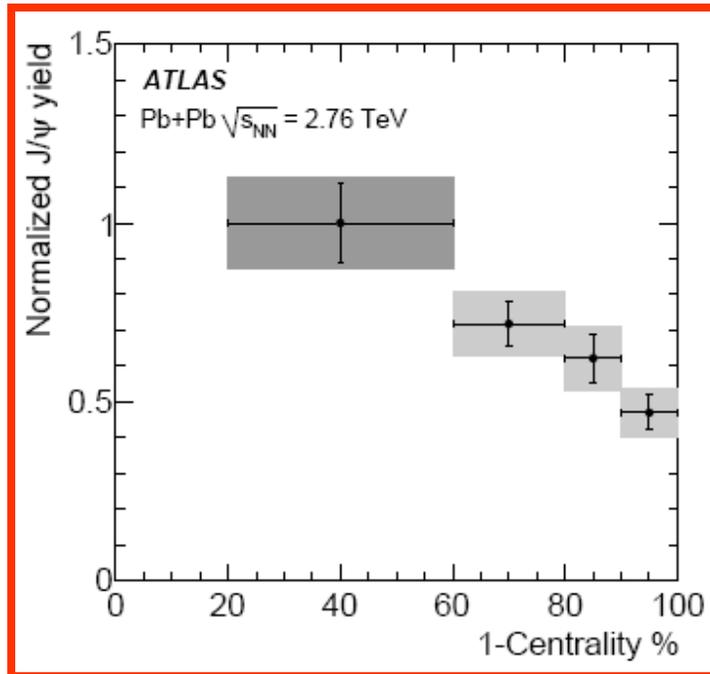
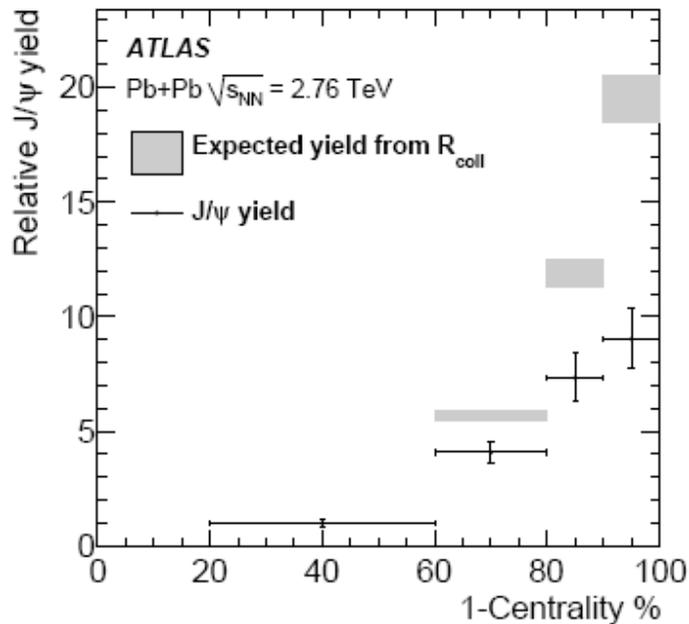


Figure 3: (left) Relative  $J/\psi$  yield as a function of centrality normalized to the most peripheral bin (black dots with errors). The expected relative yields from the (normalized) number of binary collisions ( $R_{coll}$ ) are also shown (boxes, reflecting  $1\sigma$  systematic uncertainties). (right) Value of  $R_{cp}$ , as described in the text, as a function of centrality. The statistical errors are shown as vertical bars while the grey boxes also include the combined systematic errors. The darker box indicates that the 40-80% bin is used to set the scale for all bins, but the uncertainties in this bin are not propagated into the more central ones.

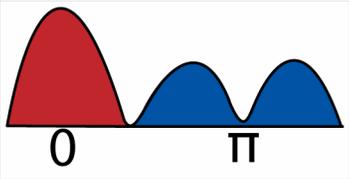
Этот результат безусловно «отсекает» многие модели....

Скорее, большая «головная боль», чем явный критерий...

**Действительно новое явление** (если окончательно подтвердится) было обнаружено на LHC в **p+p** столкновениях, а не в Pb+Pb, **CMS** коллаборацией:

в событиях с большой множественностью наблюдается структура в распределении частиц по **азимутальному углу  $\phi$**  и **быстроте частиц  $\eta$**  в виде некоего «горного гребня» - ridge.

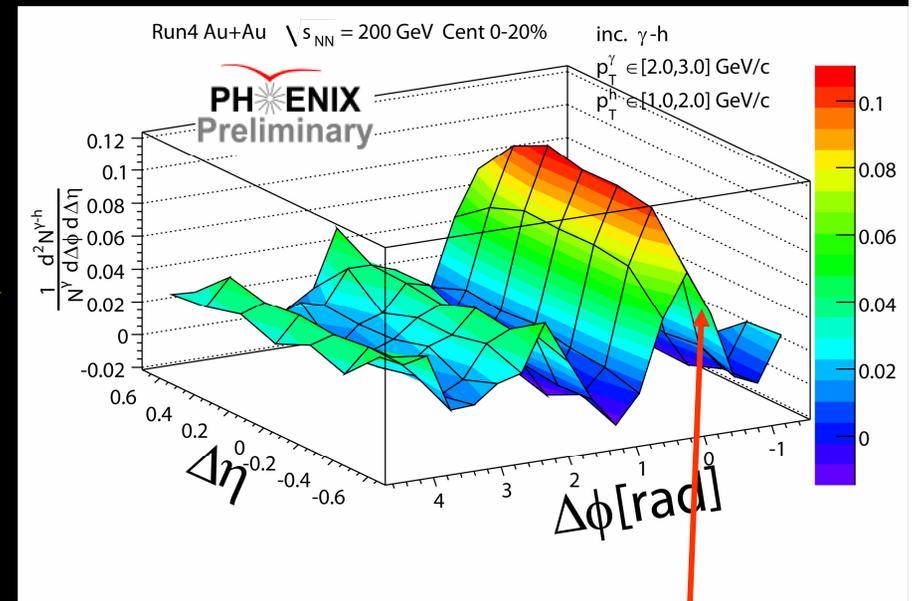
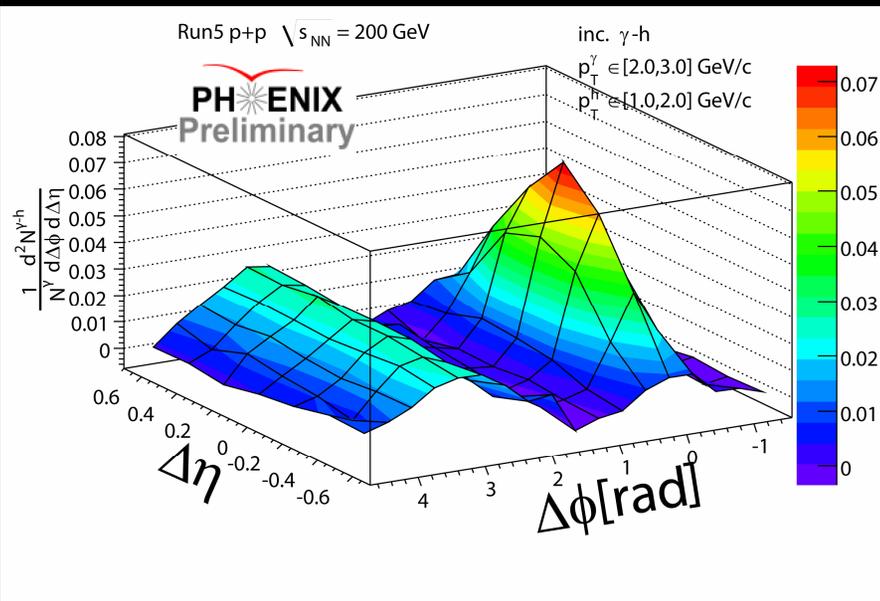
Аналогичная структура наблюдается на RHIC, но только в ядро-ядерных столкновениях



# RHIC

p+p, peripheral Au+Au

central Au+Au



Typical:

- Near-side Jet
- Away-side Jet - "Head"

New:

- **Near-side Modification - "Ridge"**
- Away-side Modification - "Shoulder"

Near-side Ridge theories: Boosted Excess, Backsplash, Local Heating, ...

Away-side Shoulder theories: Mach, Jet Survival + Recom, Scattering, ...

# CMS наблюдает нечто похожее в $pp$

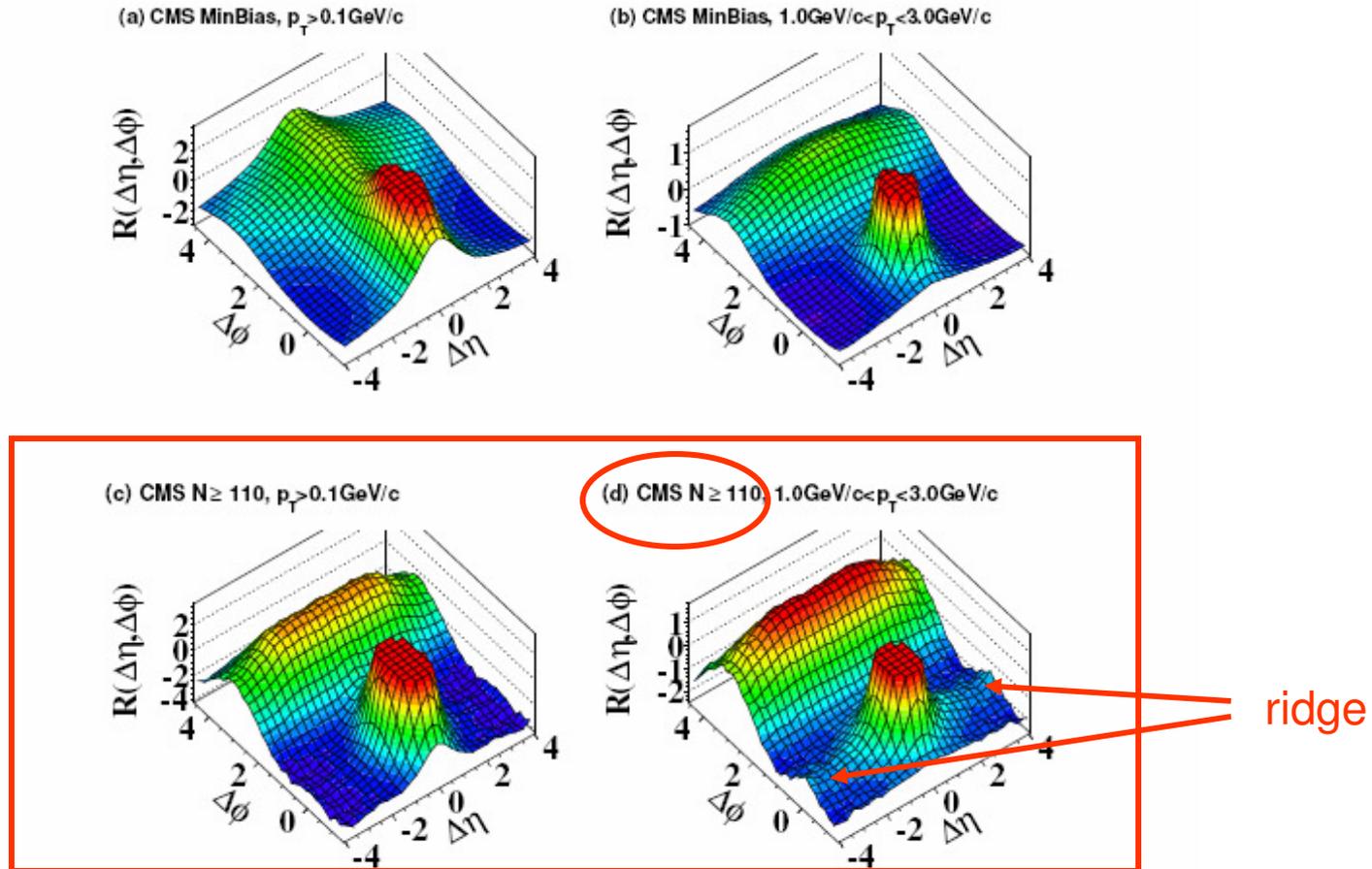


Figure 7: 2-D two-particle correlation functions for 7 TeV  $pp$  (a) minimum bias events with  $p_T > 0.1 \text{ GeV}/c$ , (b) minimum bias events with  $1 < p_T < 3 \text{ GeV}/c$ , (c) high multiplicity ( $N_{\text{trk}}^{\text{offline}} \geq 110$ ) events with  $p_T > 0.1 \text{ GeV}/c$  and (d) high multiplicity ( $N_{\text{trk}}^{\text{offline}} \geq 110$ ) events with  $1 < p_T < 3 \text{ GeV}/c$ . The sharp near-side peak from jet correlations is cut off in order to better illustrate the structure outside that region.

Высота Ridge растёт с множественностью, однако только для  $p_T < 3$  ГэВ/с

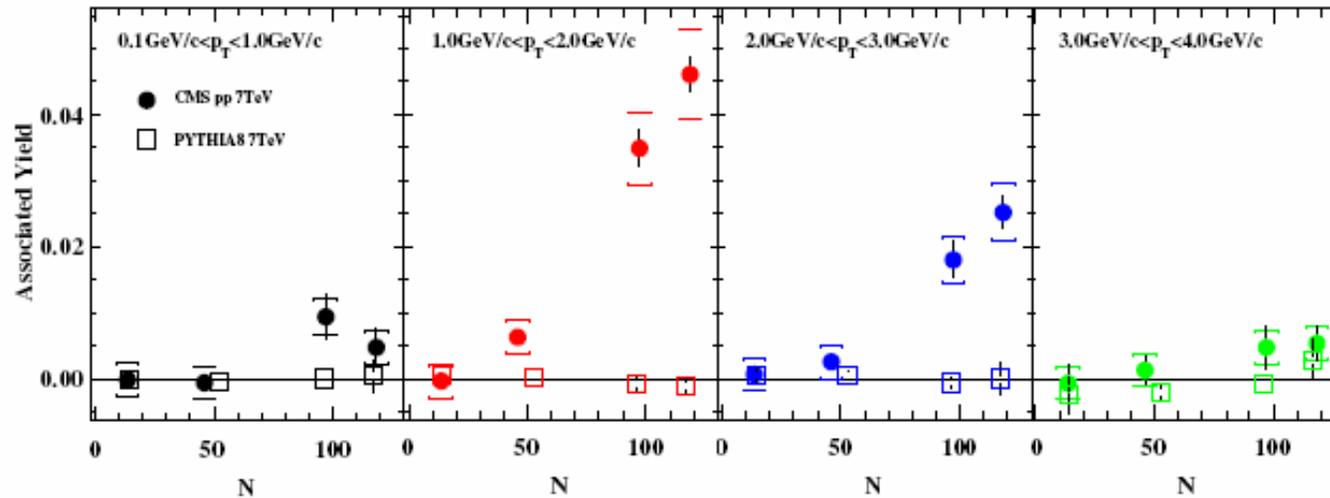


Figure 9: Associated yield for the near-side of the correlation function integrated over the region of  $2.0 < |\Delta\eta| < 4.8$  as a function of event multiplicity in bins of  $p_T$  for 7 TeV  $pp$  collisions. The error bars correspond to statistical errors, while the brackets around the data points denote the systematic uncertainties. The open squares show results for PYTHIA8.

«Выплёскивание» частиц из образовавшегося фаербола?

## Выводы

Первые результаты ядерных столкновений на LHC подтвердили:

Модели настроенные по pp столкновениям успешно описывают множественность частиц.

Наблюдение большого эллиптического потока, сравнимого с аналогичной величиной на RHIC указывают на то, что

- образующаяся среда по-прежнему проявляет свойства жидкости,
- вязкость на RHIC и LHC примерно одинакова.

Наблюдается более сильное подавление выхода энергичных адронов: Среда более плотная.

Эффект искажения струи отдачи примерно такой же как на RHIC. Дополнительное подтверждение образования плотного ядерного вещества.

Размер системы и время её жизни примерно в 2 раза больше.

$J/\psi$  подавление как на RHIC и SPS совершенно «спутало все карты»

**LHC открывает новые возможности для исследования свойств кварк-глюонной среды обнаруженной на RHIC.**

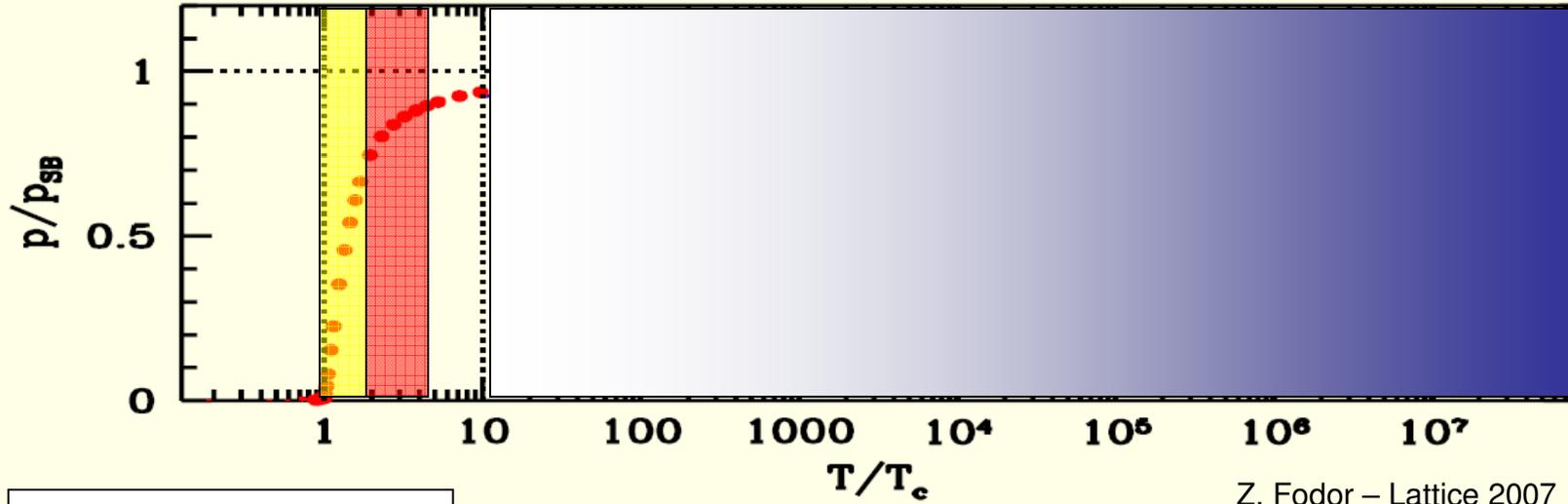
На LHC открываются новые возможности:

- Четкое выделение струй большой энергии
- событийная обработка событий с большой множественностью
- прямое измерение D- мезонов (с очарованным кварком, 1.5 ТэВ)
- прямое измерение B- мезона (с bottom кварком, 5 ТэВ)
- измерение прямых фотонов
- измерение тепловых фотонов – «термометр» среды
- широкие возможности корреляций нескольких частиц
- продвинуться по полному спектру «очарованных состояний»
- ? Z и W бозоны?
- возможно наконец удастся приблизиться к проблеме конфаймента/удержания КХД цвета....

RHIC Perfect Fluid

LHC Perfect Fluid?

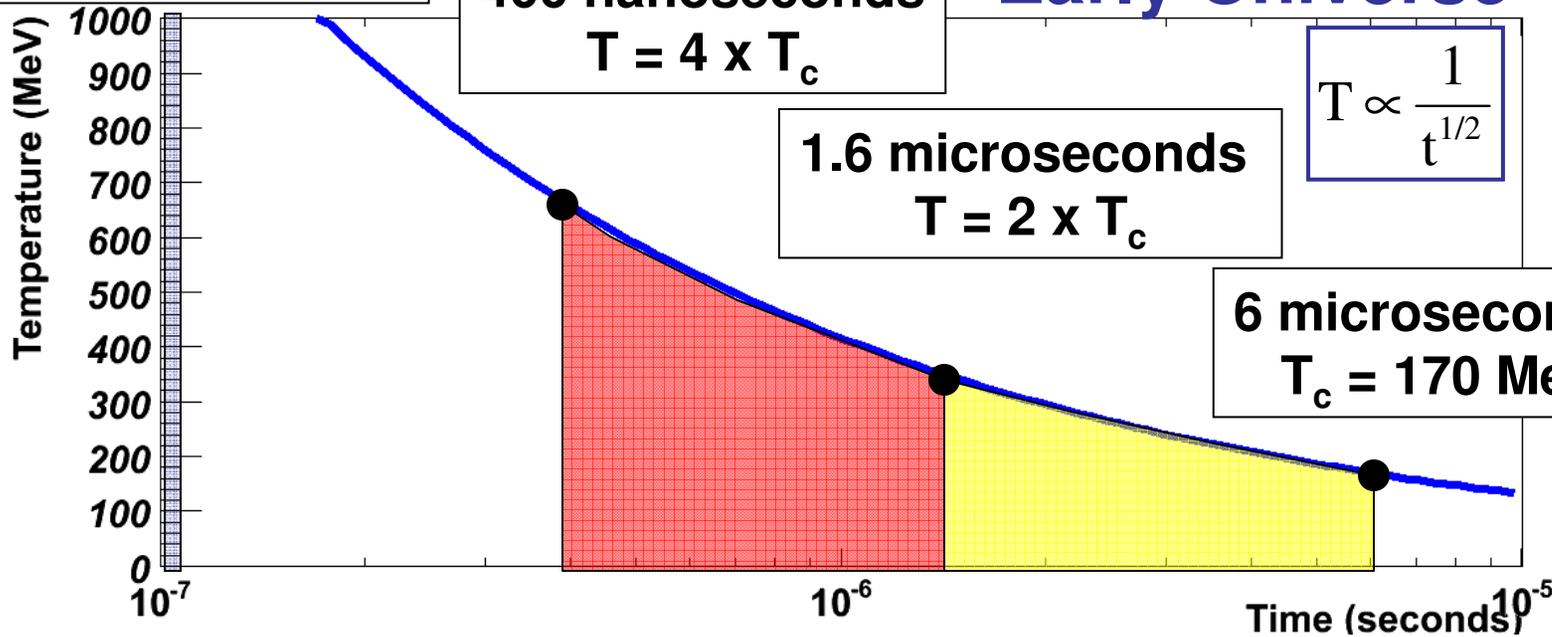
Ideal Gas



50 nanoseconds  
 $T = 10 \times T_c$

400 nanoseconds  
 $T = 4 \times T_c$

Early Universe



1.6 microseconds  
 $T = 2 \times T_c$

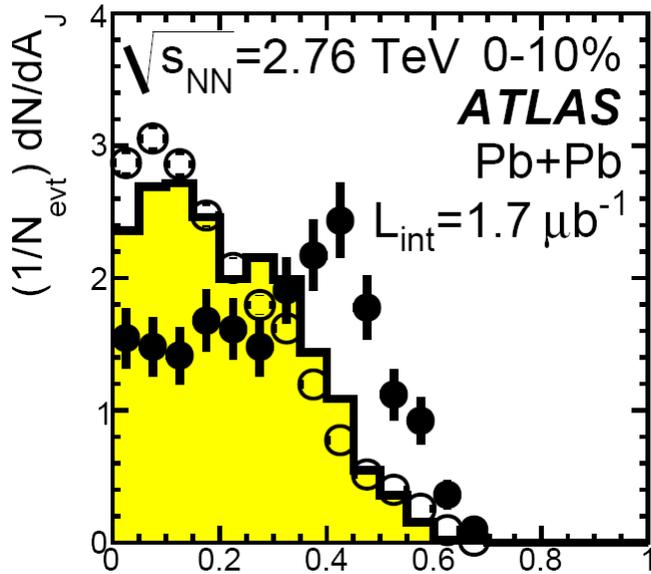
6 microseconds  
 $T_c = 170$  MeV

$$T \propto \frac{1}{t^{1/2}}$$

# Backup

# Transforming Atlas/CMS parameter “A<sub>J</sub>” to RHIC “style”: GeV and I<sub>aa</sub>

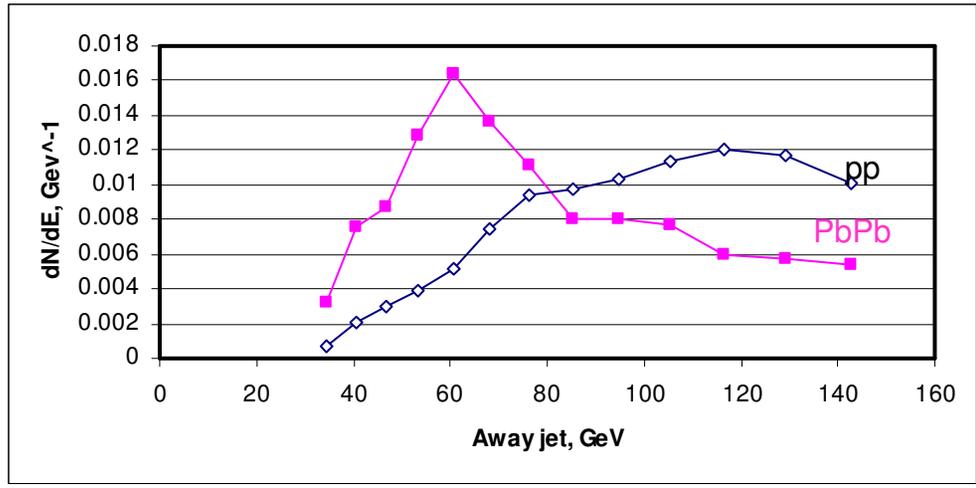
[http://arxiv.org/PS\\_cache/arxiv/pdf/1011/1011.6182v2.pdf](http://arxiv.org/PS_cache/arxiv/pdf/1011/1011.6182v2.pdf)



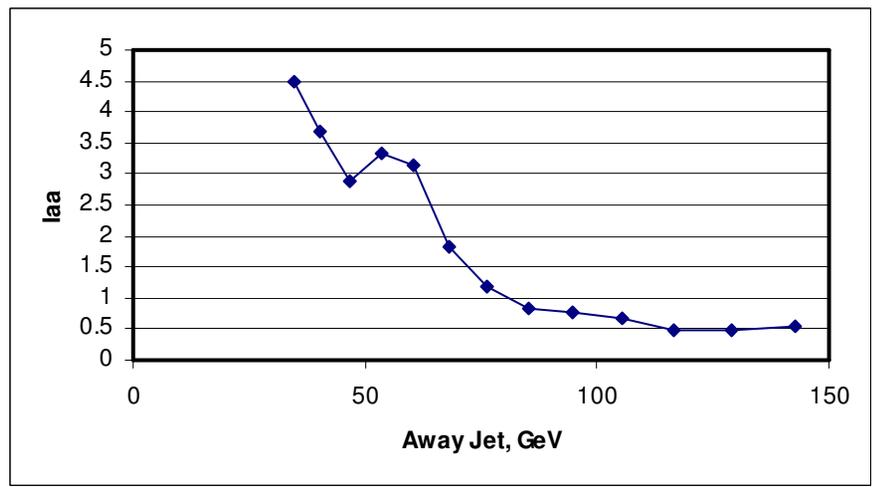
$$A_J = \frac{E_{T1} - E_{T2}}{E_{T1} + E_{T2}}, \Delta\phi > \frac{\pi}{2}$$

$E_{T1} > 100 \text{ GeV}$

I use  $\langle E_{T1} \rangle = 150 \text{ GeV}$



$E_{T2}$



PS. Errors ~10% are not shown