

Физика столкновений релятивистских ядер

Проф. Владимир Леонидович Коротких
(корп. Высоких Энергий, комн. 1-16)

кафедра физики атомного ядра и
квантовой теории столкновений

Лекции по четвергам,
19 корп. 2-15 или корп. В.Э., комн. 3-24

Контактные телефоны : **939-51-97, 939-12-57**
<http://lav01.sinp.msu.ru/~vlk/lect.PRNC.html>

Физика столкновений релятивистских ядер

1. Сильные взаимодействия (КХД)

Сильные и электромагнитные взаимодействия, КХД, деконфайнемент, кварки, глюоны и т.д..

Смотрите файл **«LecT1_exercise_hlp»** - интерактивная лекция

2. Кинематика столкновений при высоких энергиях

«Быстрота» частицы, продольные и поперечные импульсы частиц в экспериментах на коллайдерах, распределения частиц

3. Ускорители тяжелых ионов (ядерные коллайдеры) и детекторы

BNL(USA), SPS(CERN), RHIC(USA), LHC(CERN),

экспериментальные установки и детекторы, энергии и “пучковые” ядра

Физика столкновений релятивистских ядер

4. A+A столкновения

Ядро как суперпозиция нуклонов с заданной пространственной геометрией. Число неупругих соударений и число участвующих нуклонов в A+A столкновениях. Центральные и периферические соударения. Множественность частиц в A+A взаимодействиях.

6. Глобальные характеристики

- Зависимость от энергии \sqrt{s} и поперечного импульса p_T
- Энергия, оставляемая на образование новой материи
- Зависимость от центральности ядро-ядерного столкновения

Физика столкновений релятивистских ядер

7. Азимутальная анизотропия частиц

8. Ассиметрия в 2-х струйных событиях

9. Подавление кваркониев

10. «Ридж» эффект и его связь с коллективными потоками

11. Корреляции при сверх малых импульсах (НВТ)

12. Проблемы физики новой кварк-глюонной материи

Физика столкновений релятивистских ядер

● Книги:

В.Л. Коротких, Физика столкновений ультрарелятивистских ядер, М. 2008.

WEB page:

<http://lav01.sinp.msu.ru/~vlk/lect.PRNC.html> → лекции В.Л. Коротких

Б.С. Ишханов, И.М. Капитонов, Н.П. Юдин. Физика ядра и частиц, 2008

Ю.М. Широков, Н.П. Юдин, Ядерная физика, М. Наука, 1980

Д. Перкинс, Введение в физику высоких энергий, М., Энергоатомиздат, 1991

С.У. Wong, Introduction to High Energy Heavy Ion Collisions, World Scientific, 1994

В.М. Емельянов, С.Л. Тимошенко, М.Н. Стриханов,
Введение в релятивистскую ядерную физику, 2004

● WEB pages;

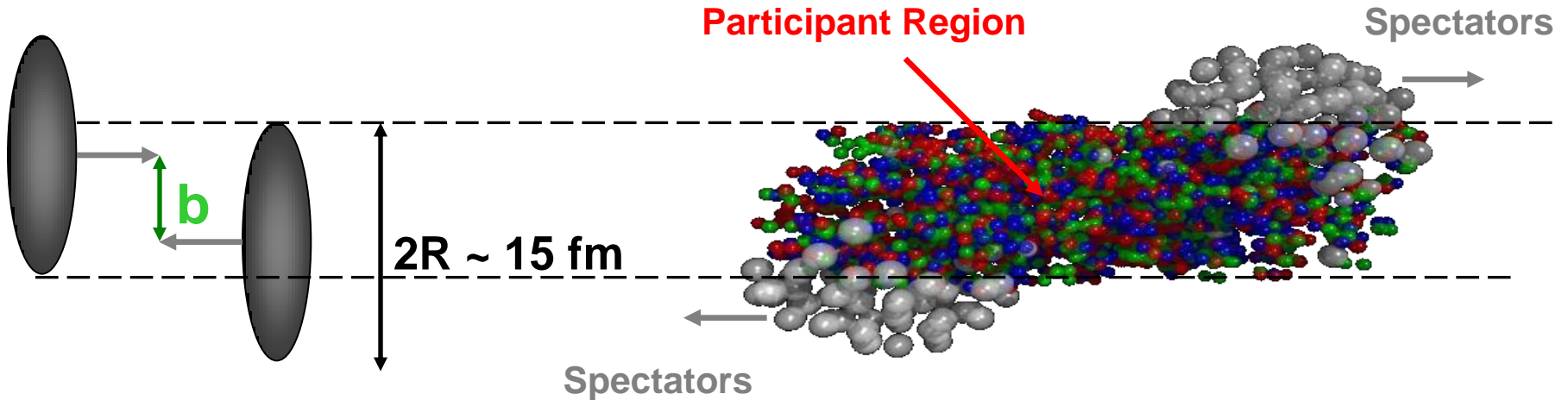
<http://pdg.lbl.gov>

<http://cern.web.cern.ch/>

<http://www.bnl.gov/RHIC>

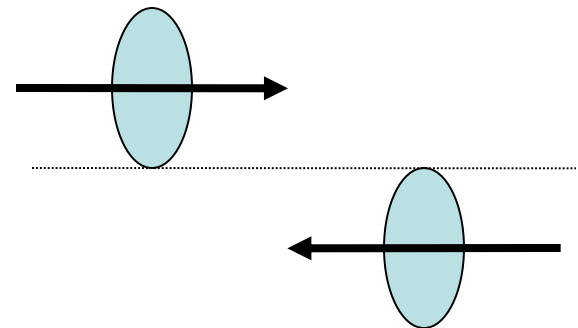
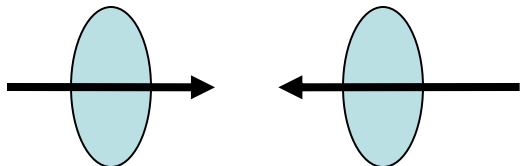
Физика столкновений релятивистских ядер

Ядра Au, Pb



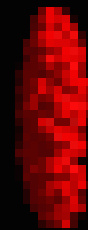
Периферические столкновения, $b \approx 2R$,
90-100% от полного неупругого сечения

Центральные столкновения, $b = 0$,
0-10% от полного неупругого сечения



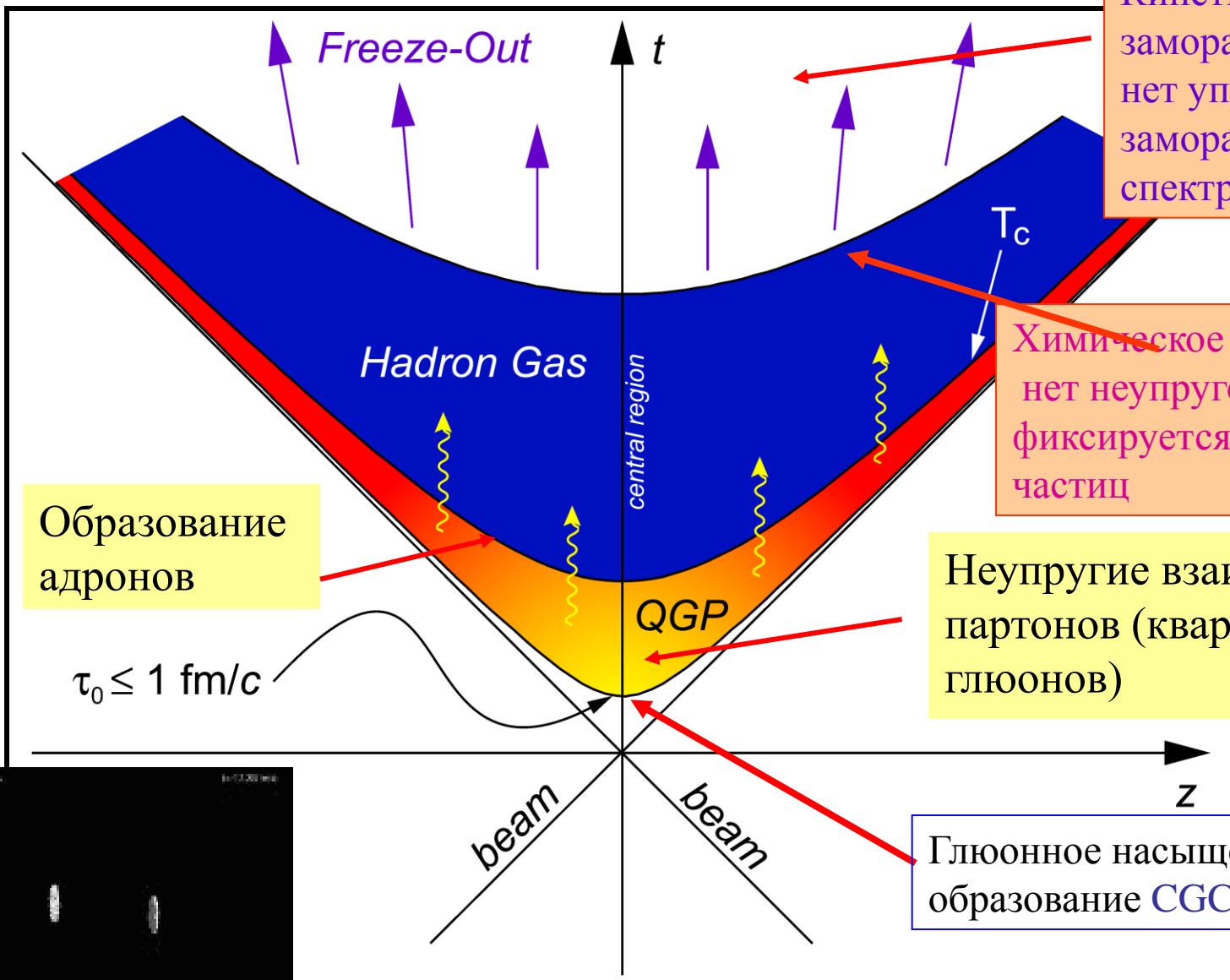
UCLA 2018

Jan 17, 18, 2018



©2018 PresentationPad

The 'Little Bang' in the Laboratory



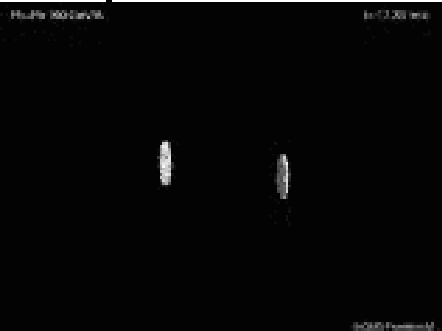
Кинетическое замораживание: нет упругого рас., замораживаются спектры.

Химическое замораживание: нет неупругого рас., фиксируется отнош. выхода частиц

Неупругие взаимодействия партонов (кварков и глюонов)

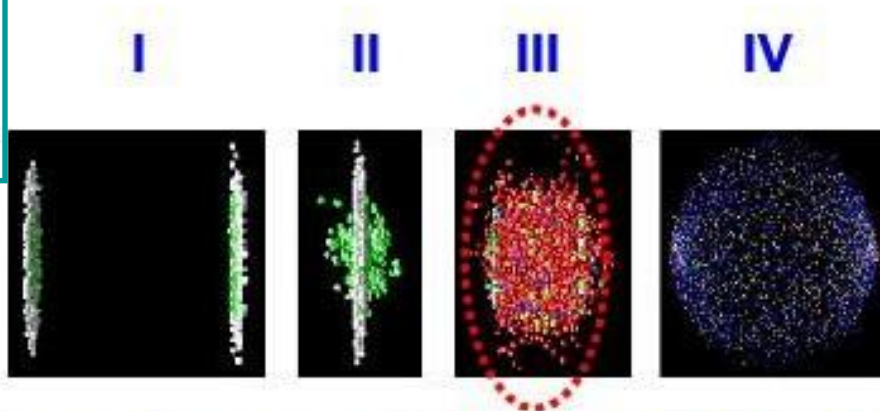
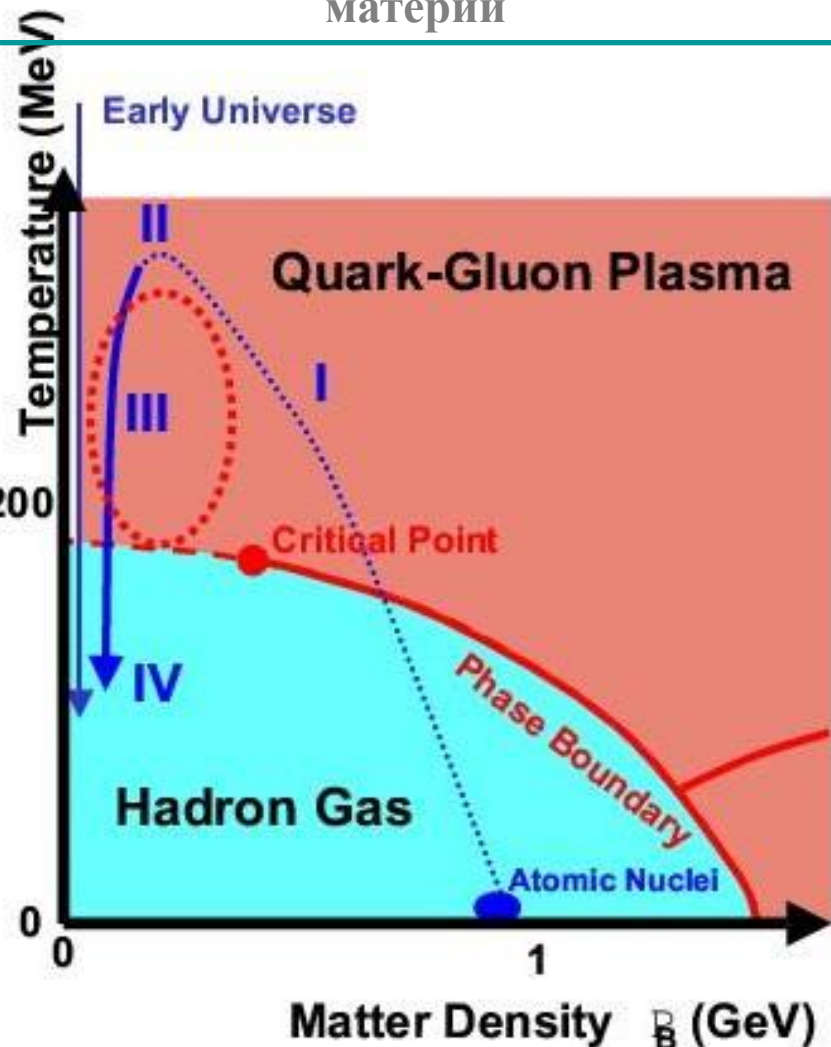
Глюонное насыщение или образование CGC

Образование адронов



Образование новой кварк-глюонной материи

КХД фазовая диаграмма температура – плотность сильно-взаимодействующей материи



4 стадии процесса столкновения релятивистских ядер:

- I. Релятивистски сжатые ядра налетают друг на друга
- II. Начальный момент с образованием частиц и новой материи за счет оставленной ядрами энергии
- III. Расширение новой материи с превращением партонов в адроны
- IV. Разлет адронов с приобретенными импульсами

Физика столкновений релятивистских ядер

Эксперименты на RHIC, LHC и проблемы физики новой материи

RHIC, Au+Au, $\sqrt{s} = 20\text{-}200$ GeV/nucleon

LHC, Pb+Pb, $\sqrt{s} = 2800\text{-}5500$ GeV/nucleon

Коллайдер RHIC

$p + p$, $Au + Au$ and $d + Au$ at $\sqrt{s} = 200$ ГэВ

Установки

STAR, PHENIX, PHOBOS, BRAHMS

RHIC

- 3.83 km по окружности
- Два независимых кольца
 - 120 сгустков в пучке
 - 106 ns время между столкновениями сгустков
- Можно ускорять и сталкивать протоны и любые ядра
- Максимальная энергия:
 - 500 GeV for p-p
 - 200 GeV for Au-Au
- Luminosity
 - Au-Au: $2 \times 10^{26} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
 - p-p : $2 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

(polarized)



“RHIC Facility”

На коллайдере RHIC

4 дополняющих друг друга эксперимента:

2 больших:

STAR – адронные сигналы

PHENIX – лептонные и электромагнитные

2 «маленьких»:

BRAHNS – широкая область значений «быстрот»

PHOBOS – глобальные характеристики и идентификация частиц

ЛНС

Большой Адронный Коллайдер (БАК)
начало измерений – 2010 г.

Энергия $\sqrt{s}=900,7000$ ГэВ в p+p
и $\sqrt{s}= 2370A$ ГэВ в A+A столкновениях



CMS

LHCb

ATLAS





LHC as a new tool for HIP



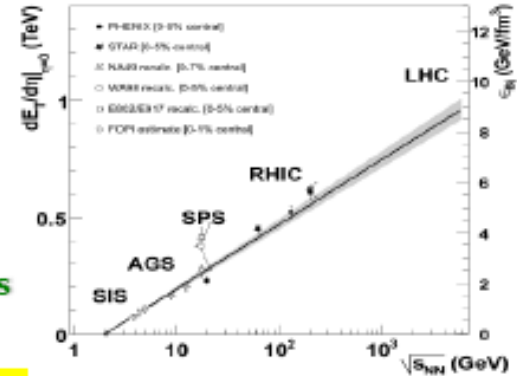
□ A big energy jump!

- Extended kinematic reach for pp, pA, AA
- New properties of the initial state
- possible gluon saturation
- A hotter and longer lived partonic phase
- Increased cross sections, new hard probes

$$\longrightarrow \bullet \quad 3.5\text{TeV} + 3.5\text{TeV} \rightarrow E = 7\text{TeV}$$

$$\longrightarrow \bullet\bullet\bullet\bullet\bullet \quad 1.38\text{ATeV} + 1.38\text{ATeV} \rightarrow E = 2.76\text{ATeV}$$

$$3.5 \times \frac{82}{208} = 1.38$$



$$\varepsilon_{Bjorken} \equiv \frac{1}{\tau_0(\pi R^2)} \frac{dE_T}{d\eta} \geq 10 \text{ GeV/fm}^3 \quad (\tau_0 \leq 1 \text{ fm}/c)$$

| | AGS | SPS | RHIC | LHC (2010) | LHC |
|------------|-------|--------|---------|------------|---------|
| s_{NN} | 5 GeV | 20 GeV | 200 GeV | 2.76 TeV | 5.5 TeV |
| E increase | | x 4 | x 10 | x 14 | x 2 |

Примеры задач:

1. Оценить время пролета двух встречных ядер золота τ , fm/c, друг через друга в центральном столкновении при энергии 100 ГэВ/нуклон

2. Вычислить плотность энергии ε_{BJ} , ГэВ/фм³, по формуле Бьеркина, считая, что $dE/dy = 600_{\text{частиц}} * 0.5 \text{ ГэВ}$

-- Ядра пролетают друг через друга на длине 2R

-- В лаб. системе продольные размеры сжаты в γ раз, $\gamma = E/m \cong 100 \text{ ГэВ} / 1 \text{ ГэВ}$

-- $\tau = 2R/c\gamma$, радиус ядра $\rightarrow R = 1.2 (197)^{1/3} \text{ fm} = 7 \text{ fm}$

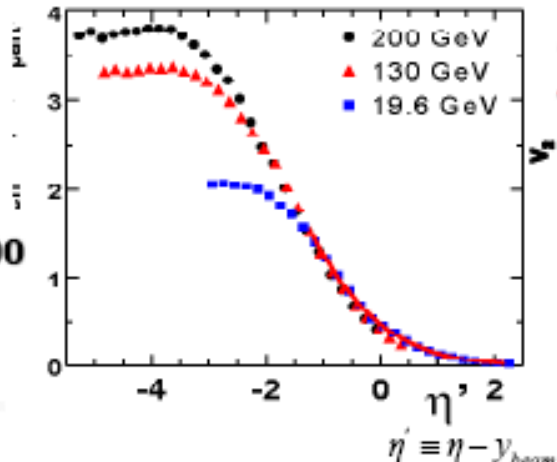
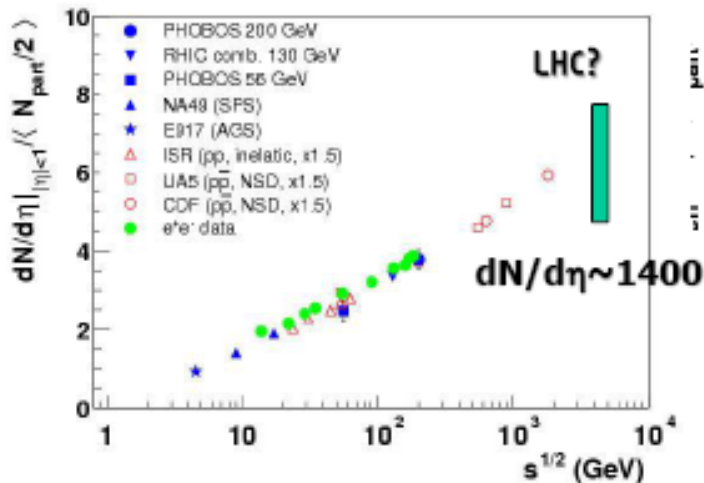
-- $\tau = 2 * 7 \text{ fm} / (c * 100) = 0.14 \text{ fm}/c$



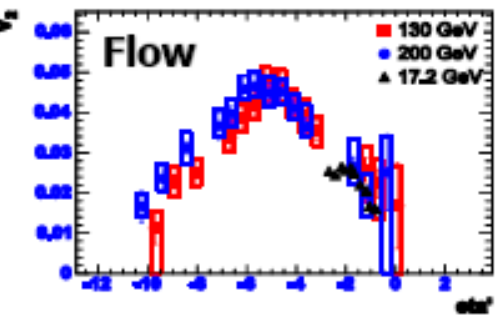
Soft observables: RHIC → LHC



- RHIC shows a simple energy dependence. How about at the LHC ?

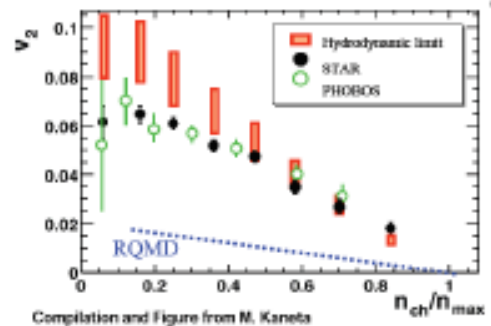


Charged particle multiplicity, limited fragmentation

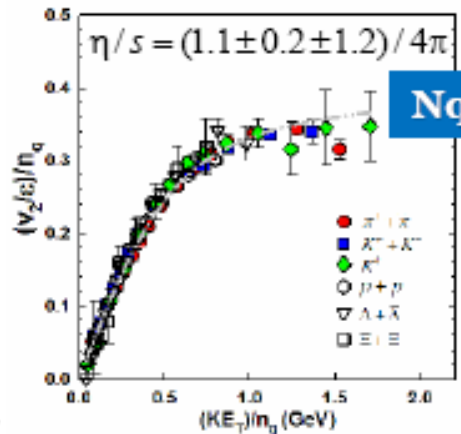
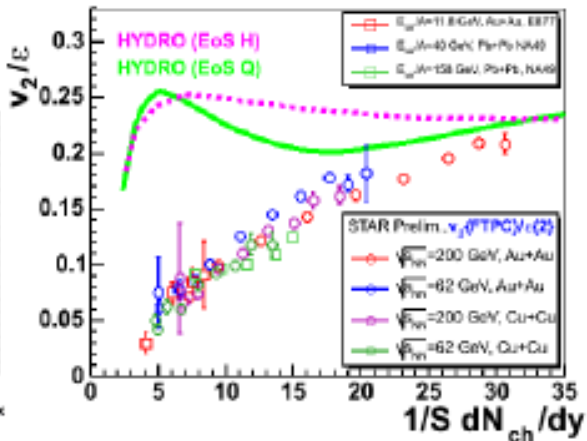


- RHIC prefers Hydrodynamic limit. How about at the LHC?

PHOBOS: Phys. Rev. Lett. 89, 222301 (2002)
STAR: Phys. Rev. Lett. 86, 402 (2001)



Compilation and Figure from N. Kania



Nq scaling

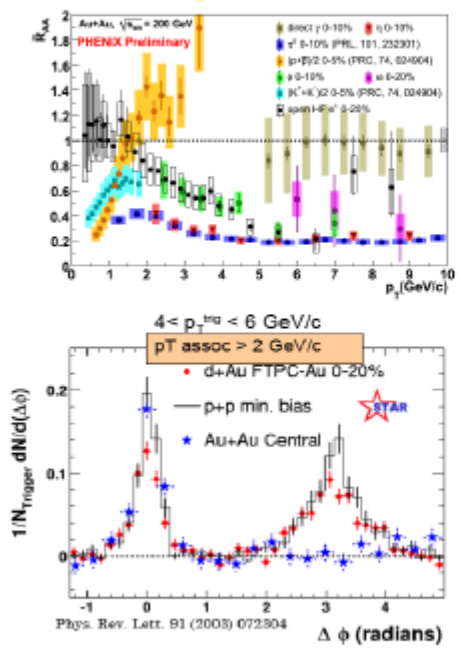


Hard observables: RHIC → LHC

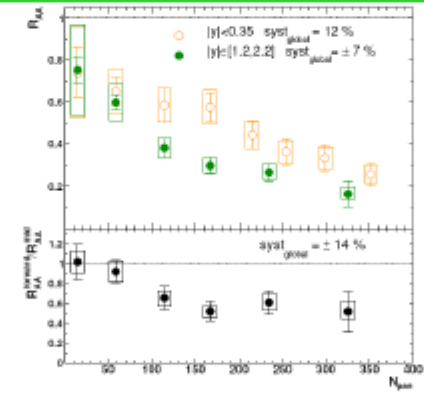


Jet quenching: strong interaction of high- p_T hadrons with dense medium

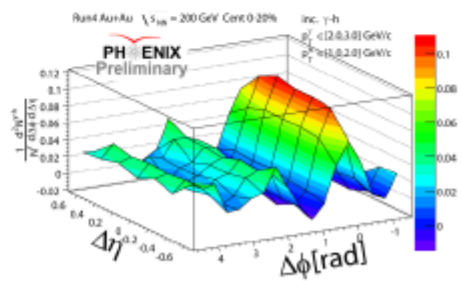
Strongly coupled hot & dense matter



J/ψ suppression: SPS \approx RHIC, larger at forward (CGC?)

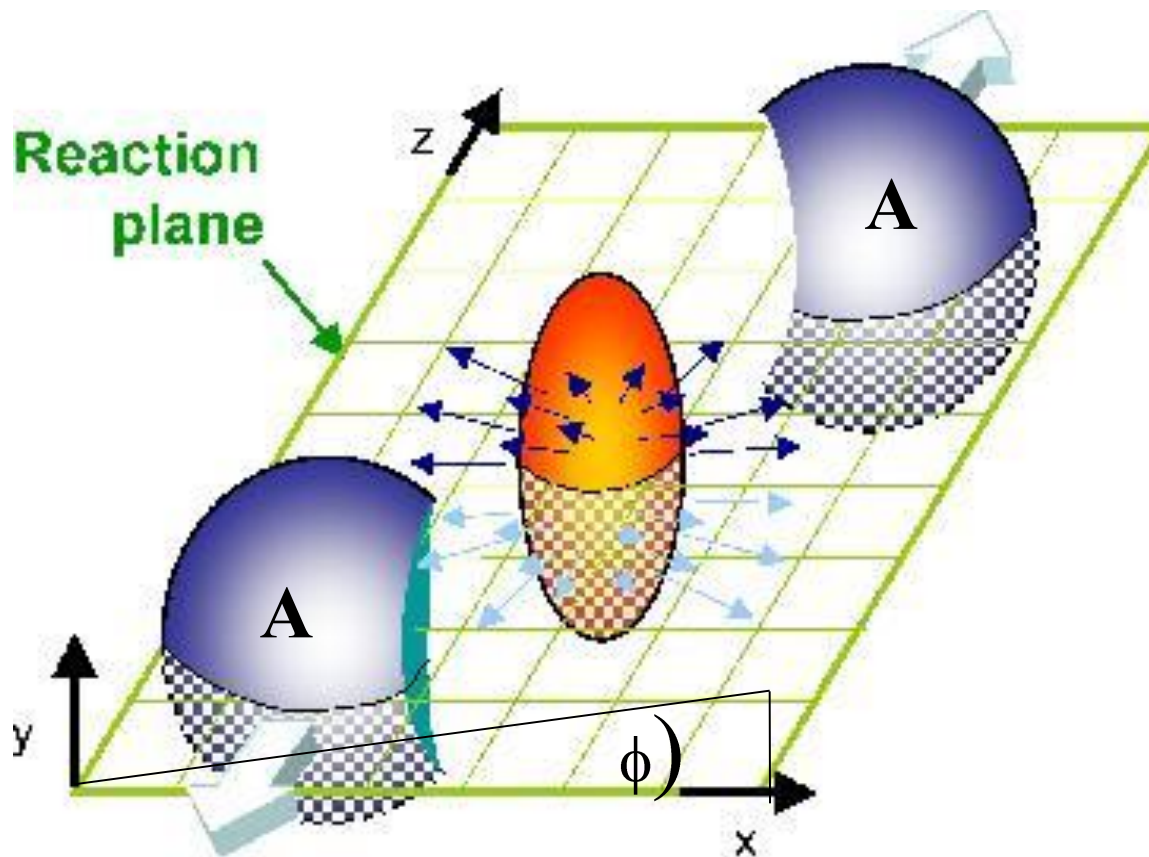


Jets are modified in medium.

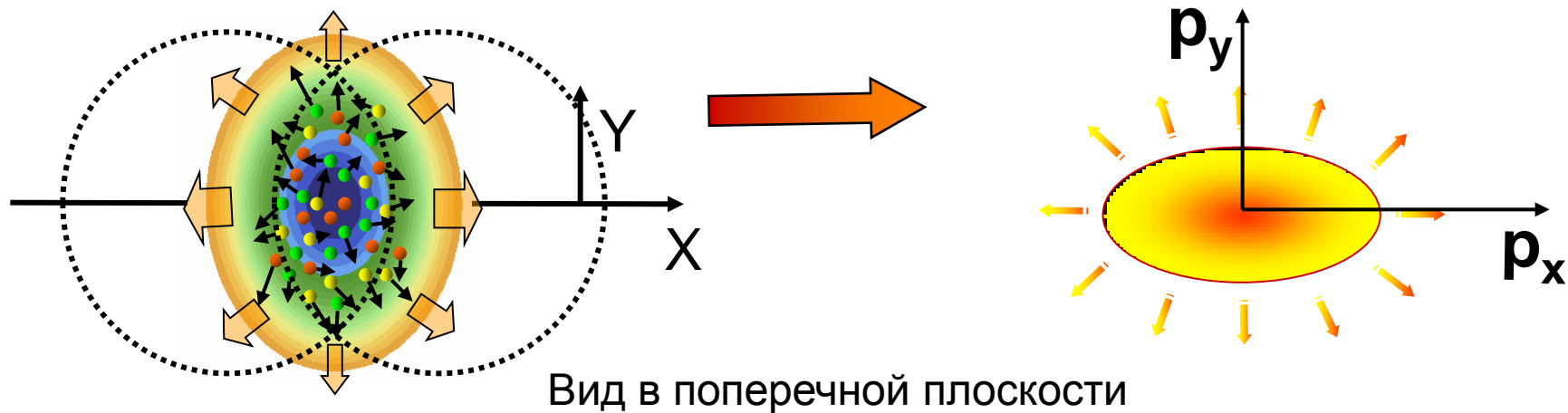


Два примера «мягкой» и
«жесткой физики»

Геометрия столкновения двух ядер $A+A$



Анизотропный разлет частиц из-за давления в сгустке образования материи



При нецентральных столкновениях ядер зона реакции имеет форму эллипса, приводя к азимутальной анизотропии градиентов давления. Такая капля жидкости стремится перейти в каплю в виде шарика. Это приведет к тому, что частицы будут иметь импульсное анизотропное распределение относительно плоскости реакции. При этом вторая компонента Фурье преобразования поперечного импульсного распределения, называемая эллиптическим потоком, доминирует.



Some details

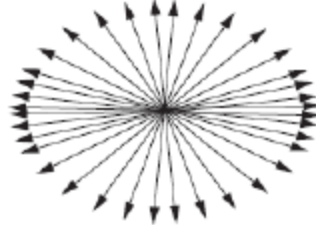


Fourier expansion of azimuthal particle distribution

$$\frac{dN}{d\varphi} = N_0 \left(1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} v_n \cos[n(\varphi - \Psi_R)] \right) \quad v_2 = \langle \cos[2(\varphi - \Psi_R)] \rangle$$

2-particle correlations

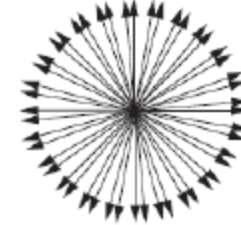
$v_2 > 0, v_2\{2\} > 0$



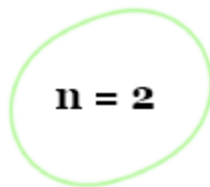
$v_2 = 0, v_2\{2\} = 0$



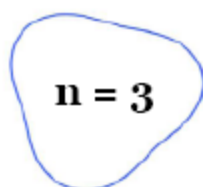
$v_2 = 0, v_2\{2\} > 0$



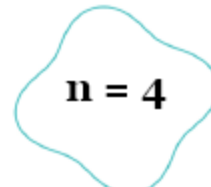
Higher harmonics



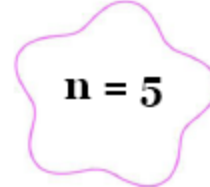
$n = 2$



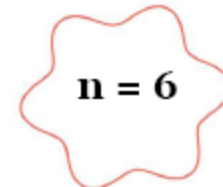
$n = 3$



$n = 4$

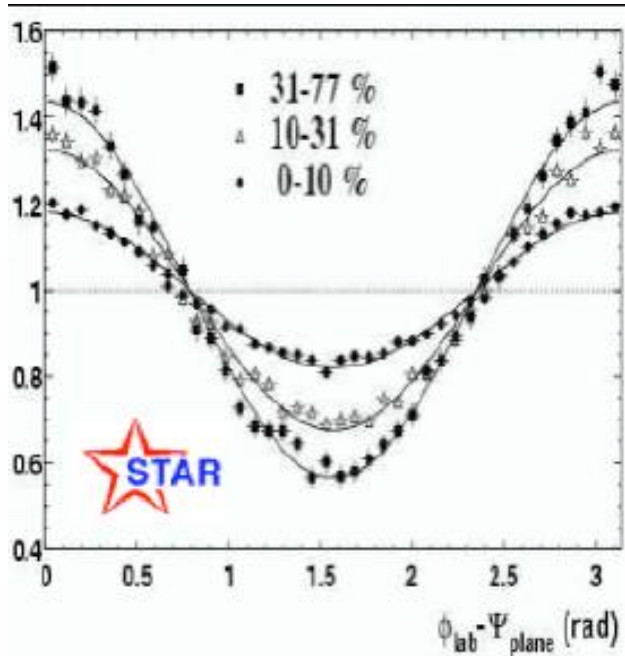


$n = 5$



$n = 6$

STAR(RHIC) и ATLAS(LHC)data



Ψ_r – azimuthal angle of reaction plane

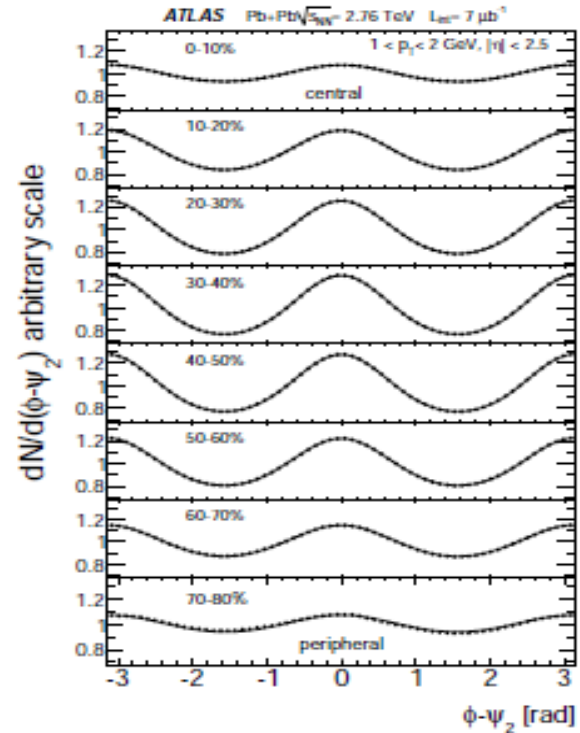


Figure 2: Distribution of the azimuthal angle of individual tracks relative to the measured event plane, in eight centrality intervals. These distributions are meant to illustrate the observed correlation relative to the event plane, and are not used in the quantitative estimates of v_2 . The curve is a fit to $1 + \sum_n 2v_n \cos(n\phi)$ up to $n = 6$.



v_2 -- elliptic flow



Сравнение CMS and ATLAS данных

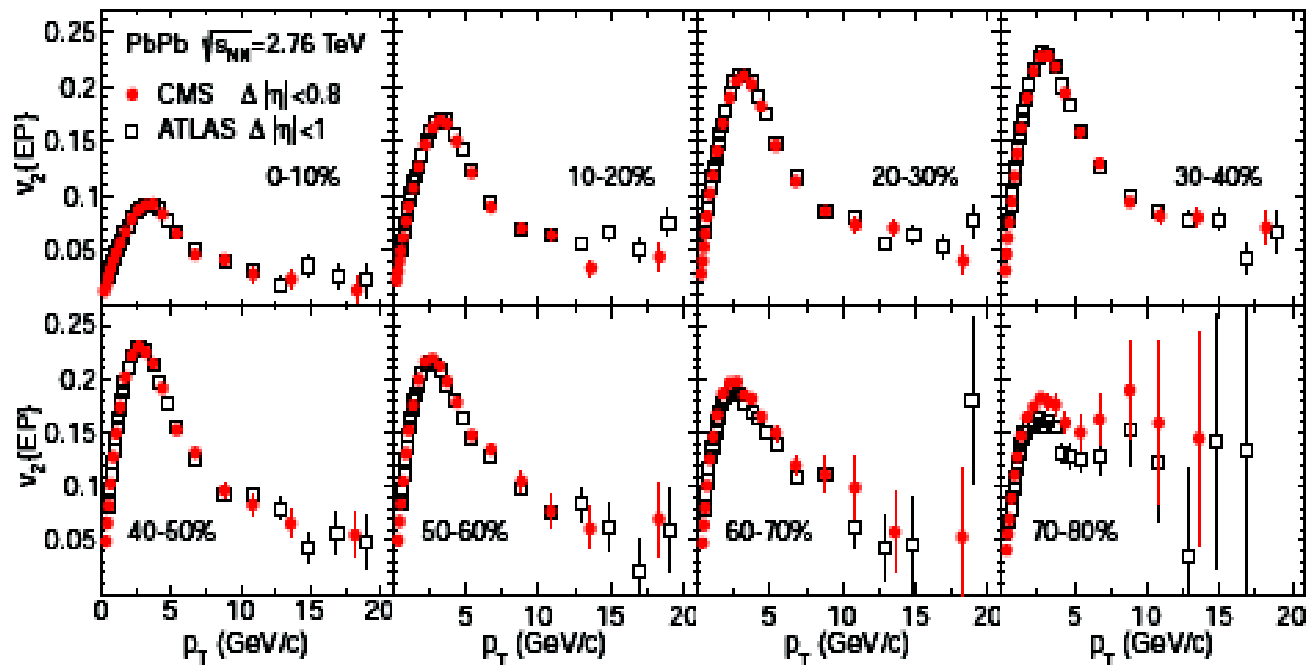


Figure 14: Comparison of results for $v_2(p_T)$ obtained with the event-plane method from CMS (closed symbols) and ATLAS (open symbols) for the centrality classes marked in the figure. The error bars show the statistical uncertainties only.

1. Величина $v_2(p_T)$ не мала
2. $v_2(p_T)$ сильно зависит от центральности столкновения ядер
3. Результаты CMS и ATLAS очень близки друг к другу

Результаты, полученные на RHIC и LHC , свидетельствуют
о том, что:

1. Обнаружение азимутальной анизотропии частиц – яркое наблюдаемое явление в ядро-ядерных столкновениях – следствие образования плотной партонной среды
2. Зависимость коэффициента азимутальной анизотропии от прицельного параметра столкновения – характеристика только ядро-ядерного столкновения, позволяющая исследовать новые свойства материи

Этот факт является признаком образования сгустка плотной кварк-глюонной материи (КГМ) и не может быть объяснен на уровне плотной нуклонной среды .

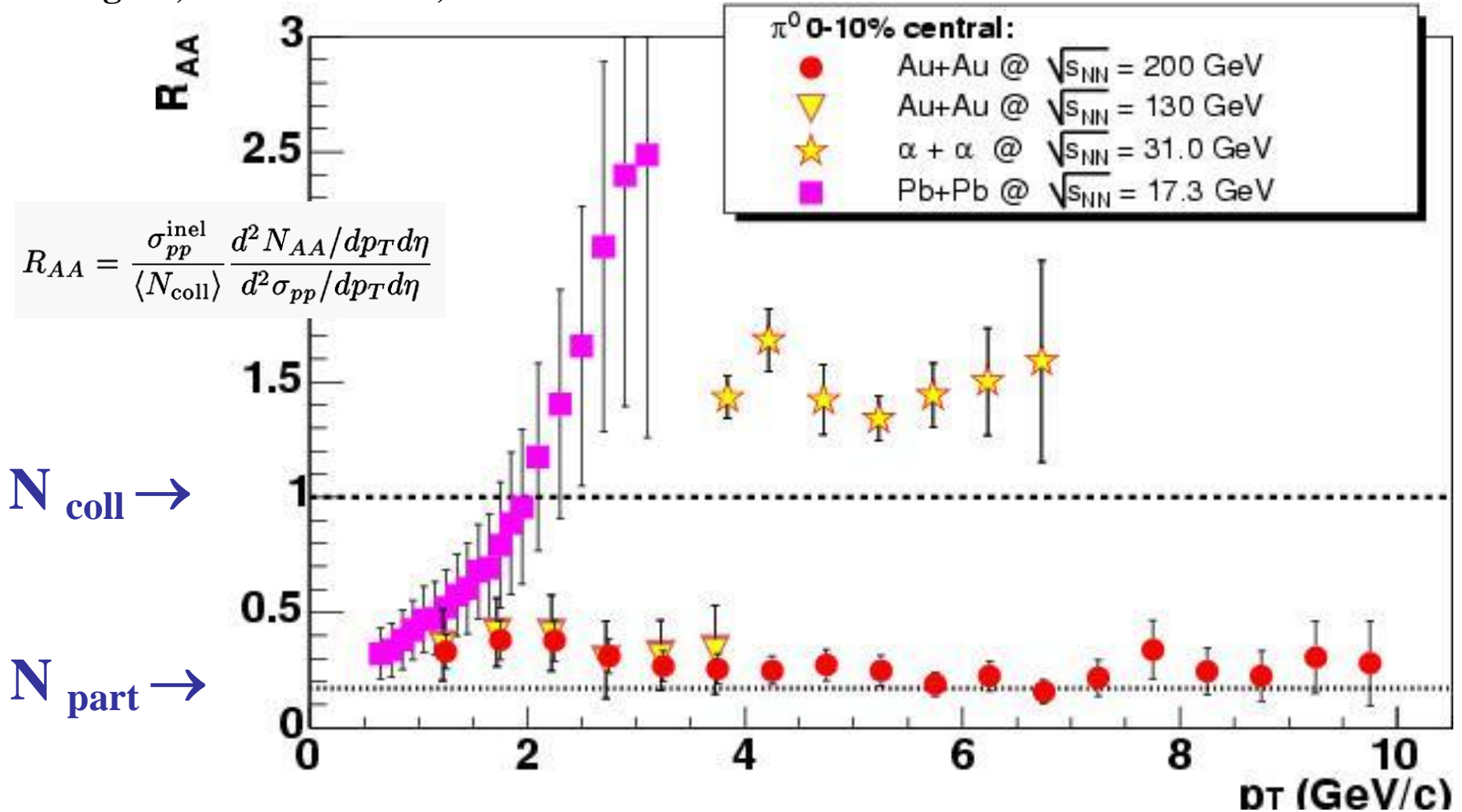
Наиболее яркие результаты последних лет в
A+A столкновениях

Подавление выхода частиц при
больших p_T

Подавление выхода частиц с ростом энергии при больших p_T для центральных А-А столкновений

S.Margets ,CMS-DELPHY, 2003

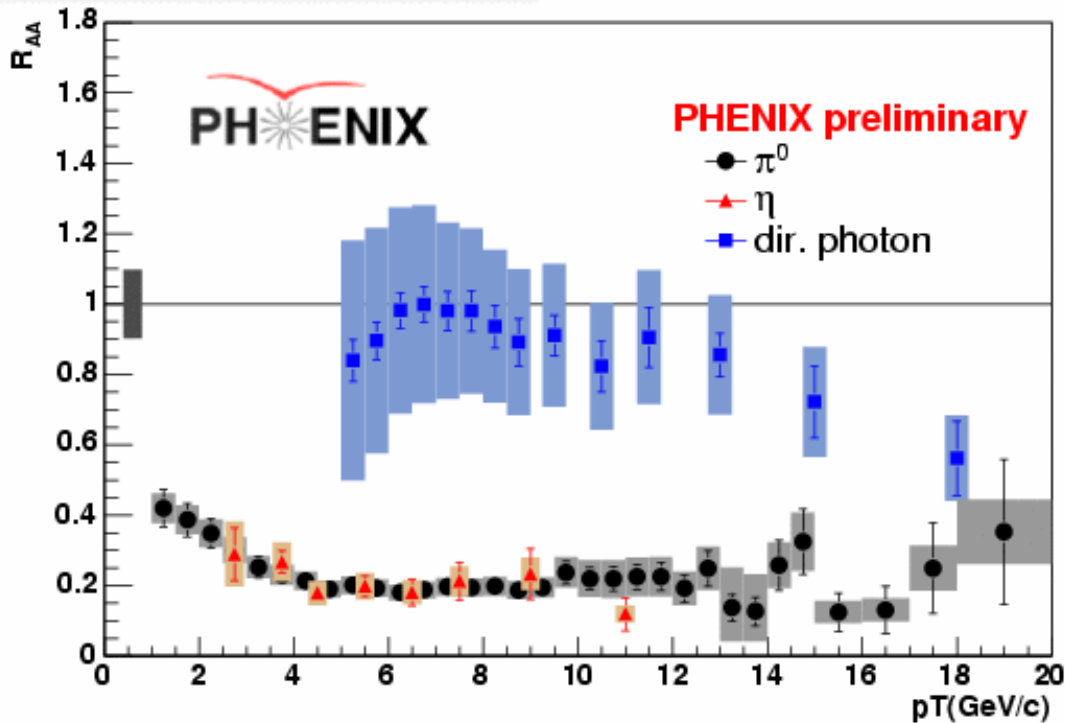
PHENIX Au+Au



Самый впечатляющий результат – подавление выхода частиц с ростом энергий и «масштабирование» по $\langle N_{part} \rangle$!!!

Данные RHIC с большой статистикой в A+A и p+p измерениях до $p_T = 20$ ГэВ/с

Au+Au $\sqrt{s_{NN}} = 200\text{GeV}$, 0-10%



Пионы подавлены ~ 5 раз, величина подавления не зависит от импульса p_T , что сильно ограничивает возможности моделей

Более тяжёлые η – мезоны согласуются с пионами

Прямые фотоны при $p_T < 14$ ГэВ в пределах ошибок не подавляются. Есть указание на отклонение при больших p_T .

$$R_{AA} = \frac{\sigma_{pp}^{\text{inel}}}{\langle N_{\text{coll}} \rangle} \frac{d^2 N_{AA} / dp_T d\eta}{d^2 \sigma_{pp} / dp_T d\eta}$$

Подавление выхода частиц на LHC при больших p_T для центральных Pb-Pb столкновений

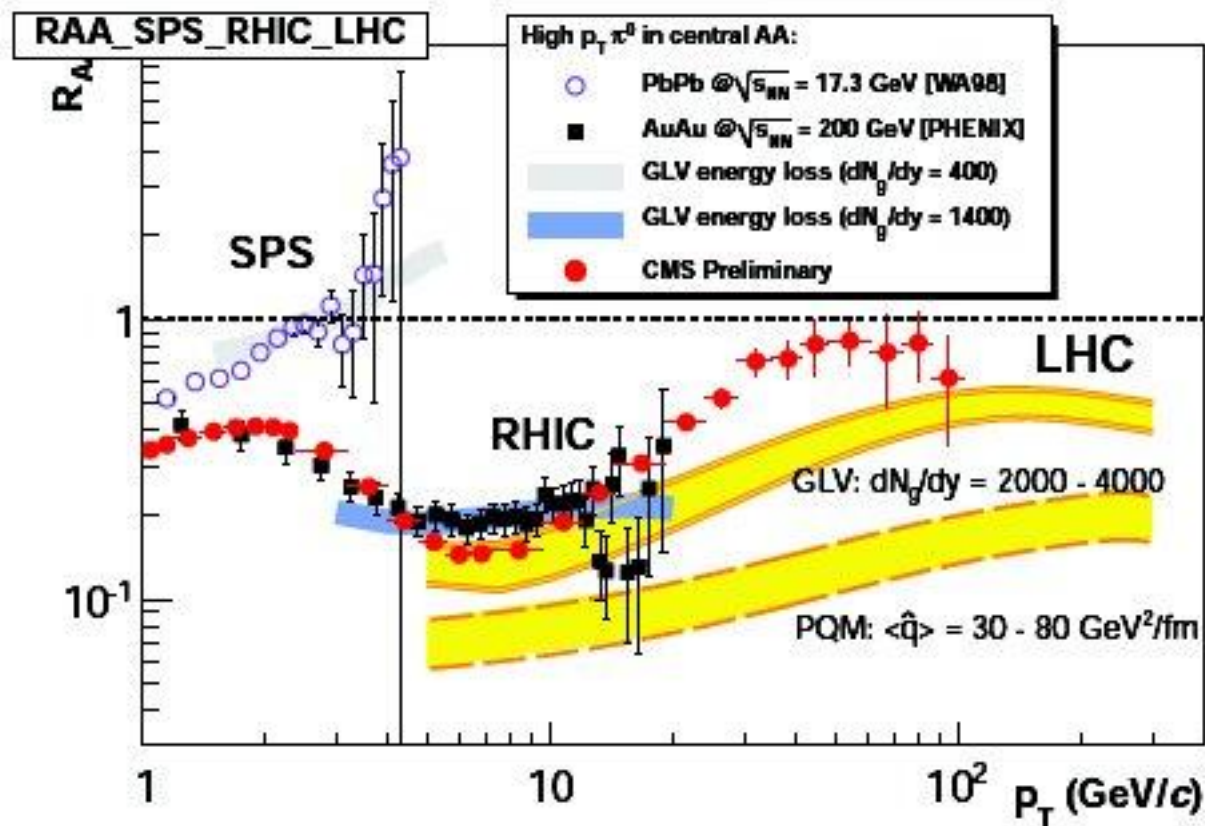


Figure 64: R_{AA} comparison with lower energy measurements and theory predictions. Note theory predictions were made for $\sqrt{s_{NN}} = 5.5$ TeV)

Результаты, полученные на RHIC и LHC , свидетельствуют
о том, что:

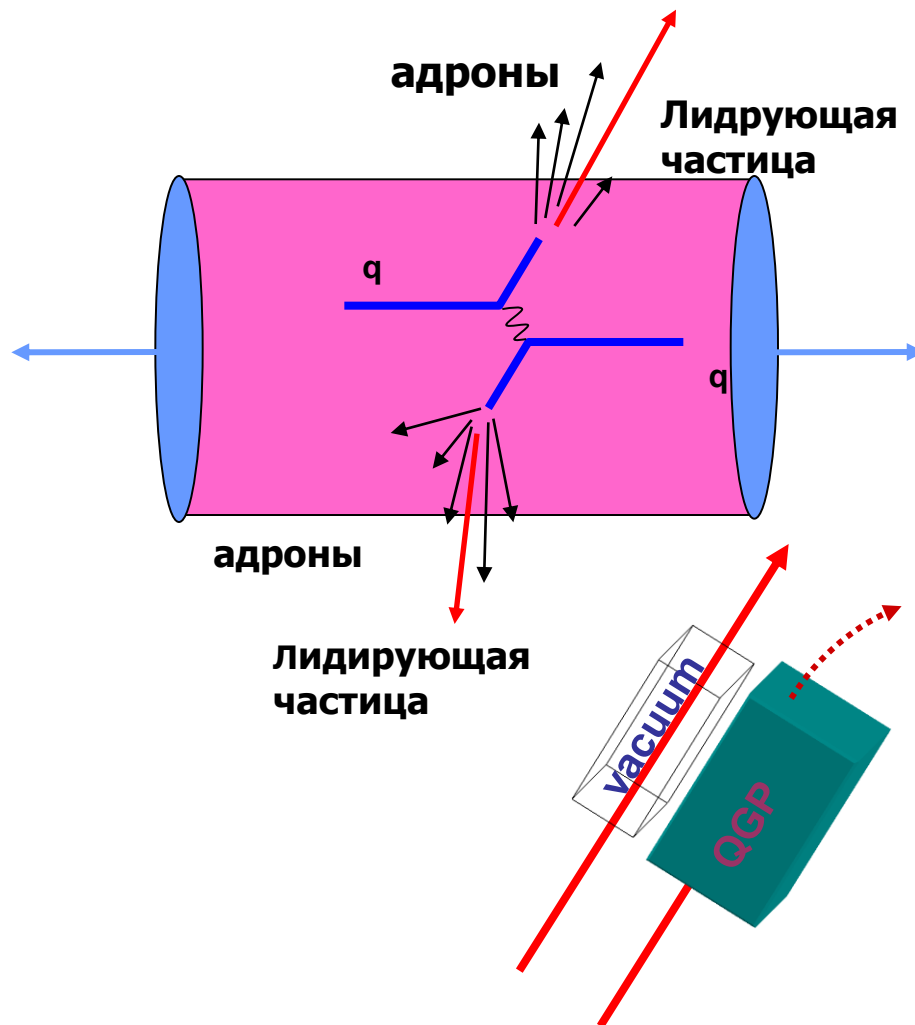
1. Относительное подавление выхода частиц проявилось при достаточно высоких энергиях и представляет собой большой эффект (в 5 раз)
2. Этот эффект не зависит от массы частиц и постоянен в широком интервале по переданному импульсу

Этот факт интерпретируется как подавление выхода партонов при прохождении плотной среды после столкновения ядер и преимущественное образование частиц от партонов, вылетающих с поверхности образованного сгустка КГМ.

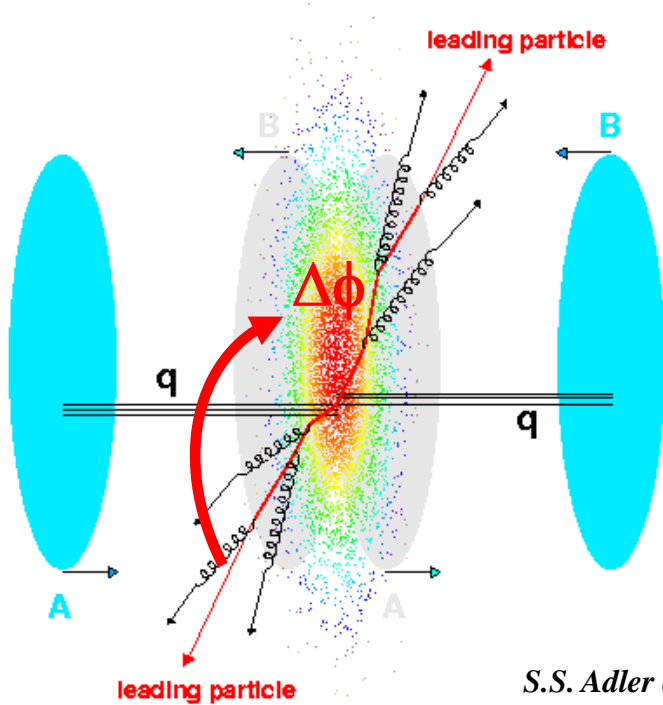
A+A столкновения

**Подавление угловых корреляций
в событиях со струями “back to
back”**

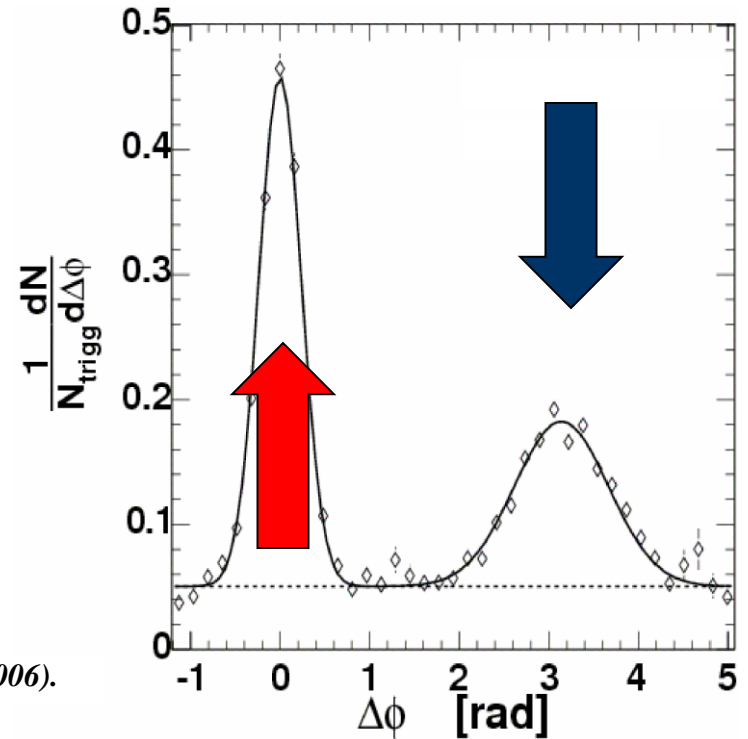
Схема прохождения струй



Двух частичные $\Delta\phi$ -корреляции



S.S. Adler et al., Phys.Rev. D74,072202 (2006).

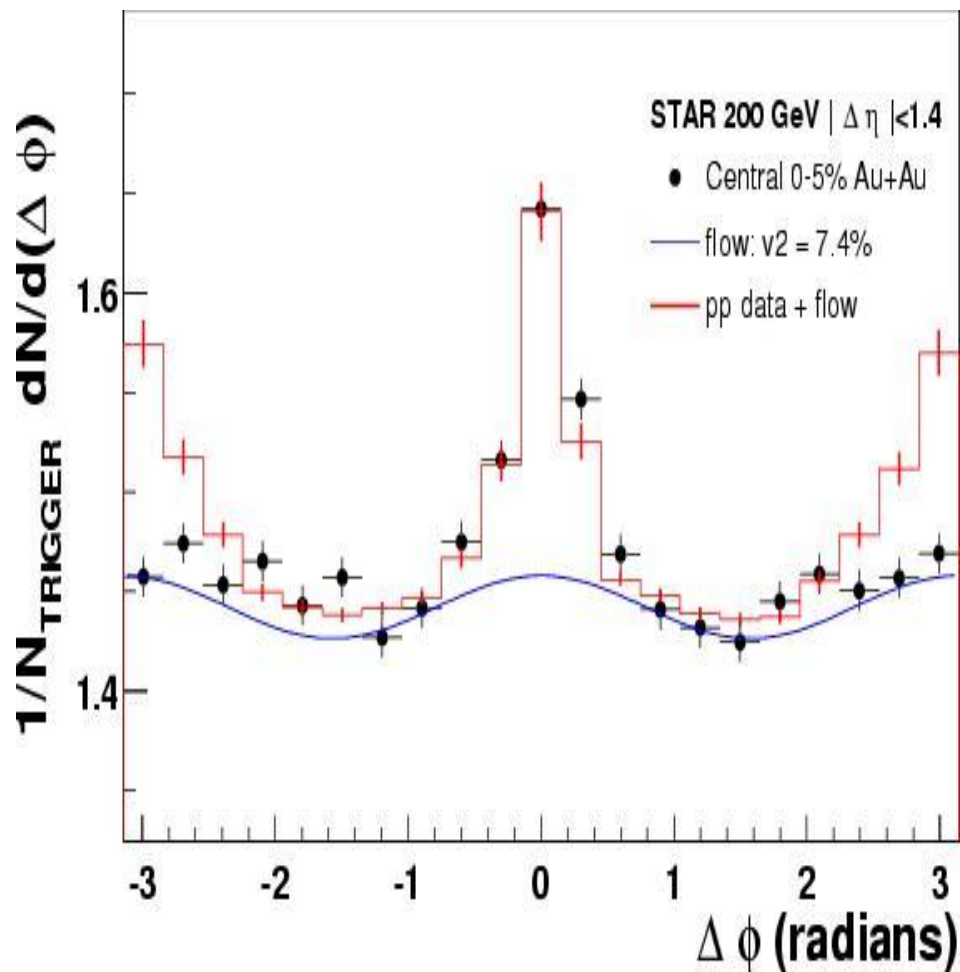
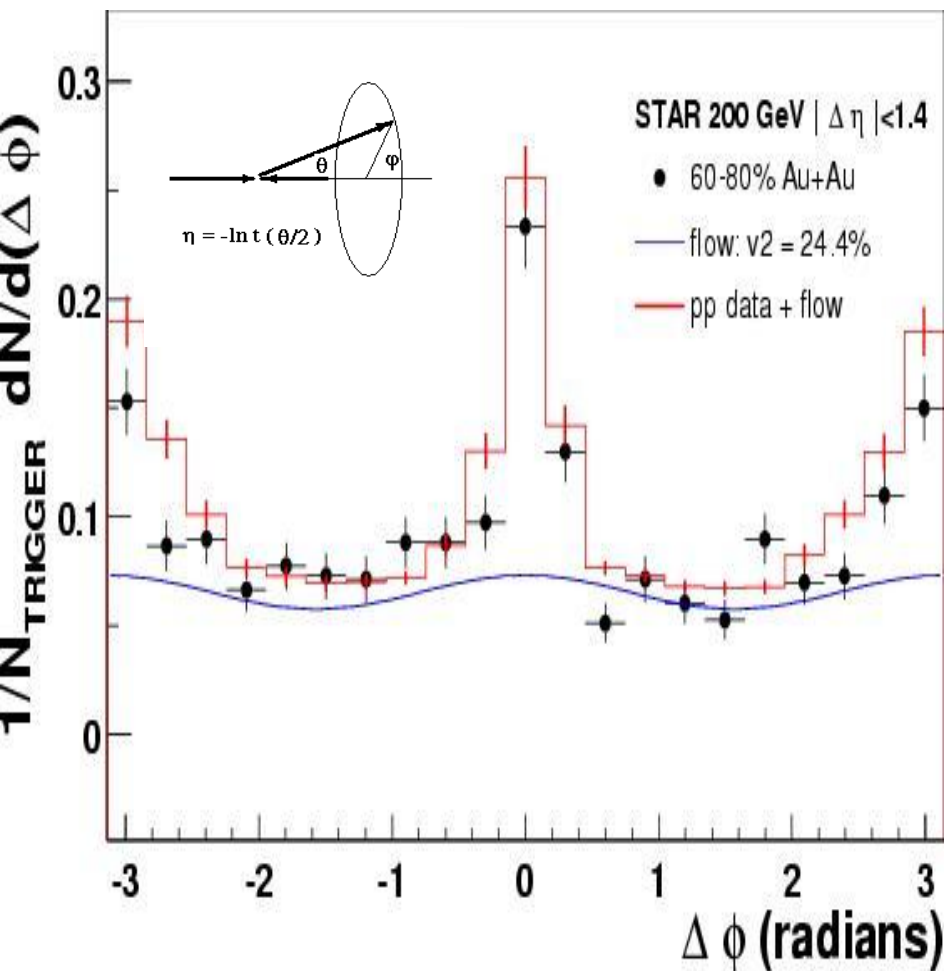


- Выбирается частица с большим p_T – триггерная частица и рассматриваются пары «триггерная частица + ассоциированная частица»
- Наблюдается корреляция при
 - $\Delta\phi \approx 0$ – «прямой» пик
 - $\Delta\phi \approx \pi$ - «обратный» пик в области больших относительных азимутальных углов

Азимутальная корреляция $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$ адронов при выборе плоскости отсчета, содержащей лидирующую частицу

Периферические – 2 пика

Центральные – нет back-to-back пиков



Точки – данные Au+Au, гистограмма – данные p+p, кривая – оценка фона в A-A

Дисбаланс энергий 2-х струйного события в эксперименте ATLAS на коллайдере LHC

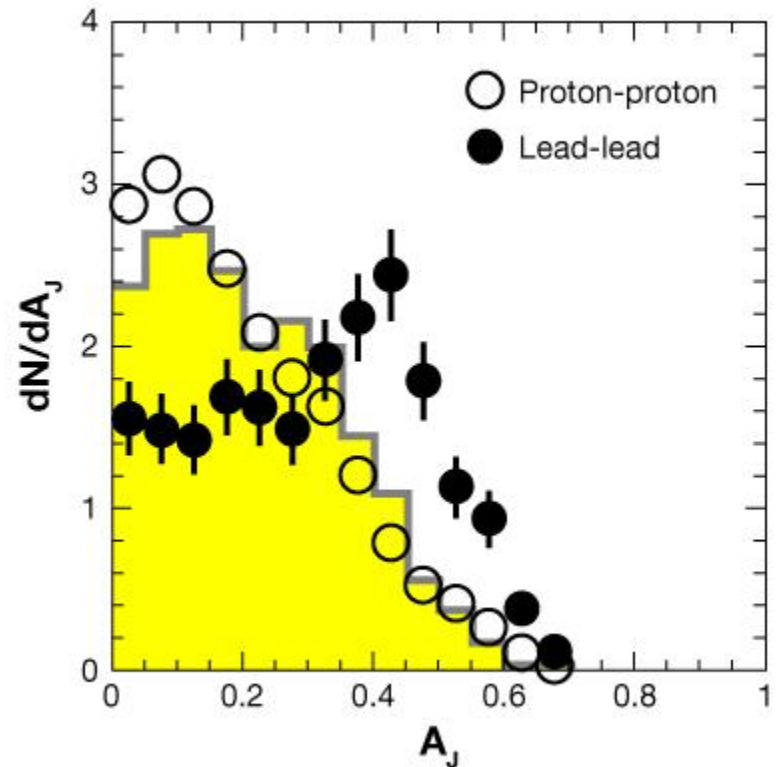
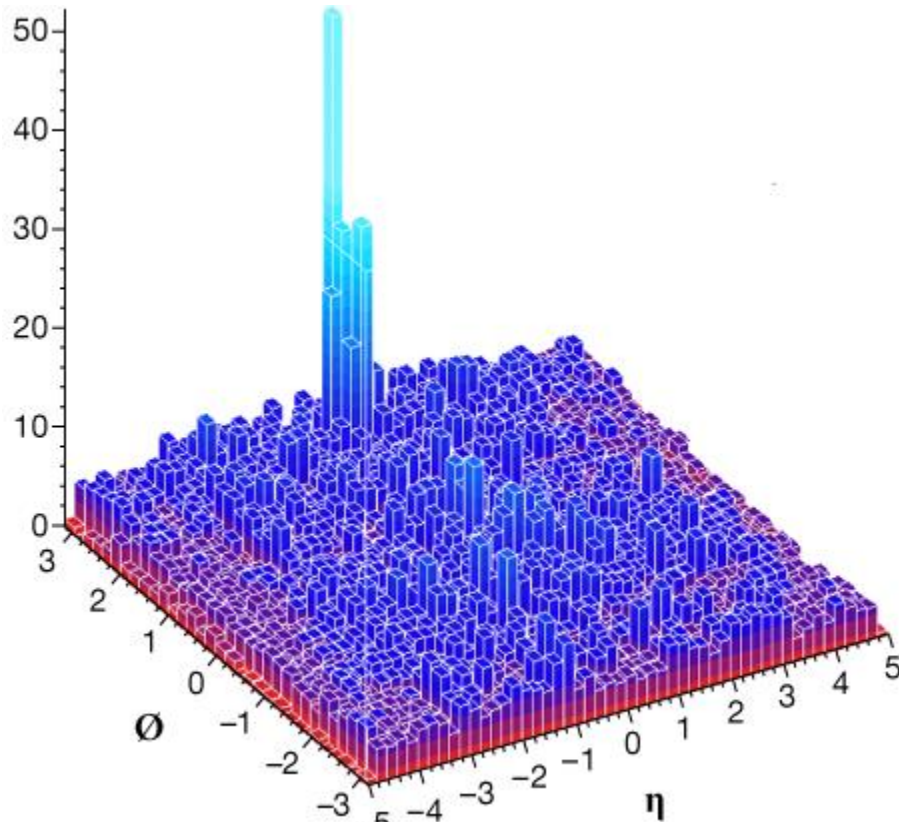


FIG. 2: (Left) Example of a jet without a visible partner. (Right) Asymmetric jets (where one jet loses most of its energy) are rare in proton-proton collisions, but the ATLAS measurements showed such events occur with a high probability in lead-lead collisions. The asymmetry A_J for two jets with energy E_1 and E_2 is defined as $A_J = (E_1 - E_2)/(E_1 + E_2)$.

Результаты, полученные на RHIC и LHC , свидетельствуют
о том, что:

1. Подавление выхода частиц в А+А столкновениях в 5 раз нельзя объяснить прохождением их через адронную среду
2. В периферических А+А столкновениях азимутальная зависимость $\Delta\phi$ частиц совпадает с $p + p$ данными с образованием 2-х струй адронов (back-to-back струи)
3. В центральных ядро-ядерных столкновениях из двух струй одна струя подавляется

Это можно объяснить поглощением партона в плотной новой среде в то время, как другой партон вылетает с периферии партонного сгустка, минуя эту среду. Эти факты являются важным признаком образования плотной кварк-глюонной материи КХД, природу которой нужно исследовать в дальнейших экспериментах.

Вместо заключения:

Экспериментально подтверждается образование хромо-динамического вещества со свойствами существенно отличающимися от обычной ядерной материи

Запасные слайды

RHIC пучки 2000-2007

| | p+p | d+Au | Au+Au | Cu+Cu |
|----------|-----------|------|--------|-------|
| 22.4 GeV | | | | ● |
| 62.4 GeV | ● | | ● | ● |
| 130 GeV | | | ● | |
| 200 GeV | ● | ● | ● | ● |
| | Reference | | sQGP ? | |

$h^{+/-}$, π^0 , $\pi^{+/-}$, η , ω , p , K_s^0 , Λ , $e^{+/-}$ (от адронов с c- и b- кварками)

Relativistic Heavy Ion Collider



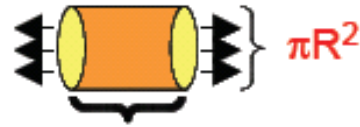
First Physics in '00
Versatile machine

- Au+Au ('00-'02)
 - 19.6 GeV
 - 56 GeV
 - 130 GeV
 - 200 GeV
- p+p ('02,'03)
 - 200 GeV polarized
- d+Au ('03)
 - 200 GeV

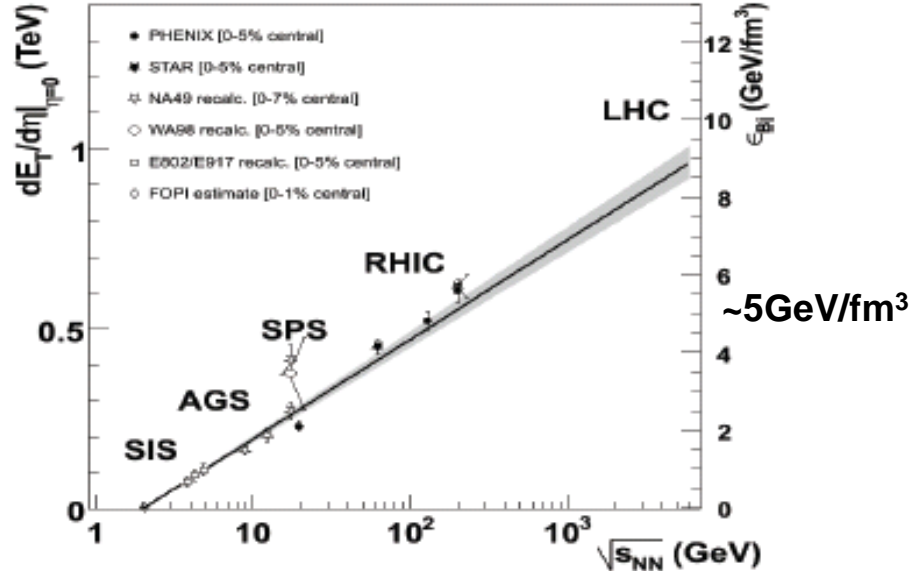
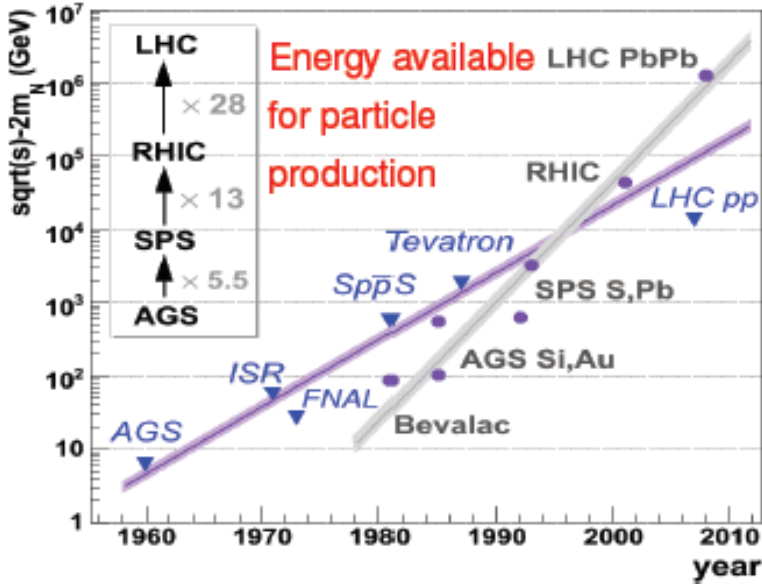
- 4 Experiments
 - 2 big
 - 2 small

• **Energy density: "Bjorken estimate" (for a longitudinally expanding plasma):**

$$\epsilon_{Bj} = \frac{dE_T}{dy} \frac{1}{\tau_0 \pi R^2}$$



$$\tau_0 \sim 1 \text{ fm/c} > \tau_{\text{cross}} = 2R/\gamma \sim 0.15 \text{ fm/c}$$



CMS-France, 31/01/2007

8/32

David d'Enterria (CERN)

Примеры задач:

1. Оценить время пролета двух встречных ядер золота τ , fm/c, друг через друга в центральном столкновении при энергии 100 ГэВ/нуклон
2. Вычислить плотность энергии ϵ_{Bj} , ГэВ/фм³, по формуле Бьеркина, считая, что $dE/dy=600_{\text{частиц}} * 0.5 \text{ ГэВ}$

- Ядра пролетают друг через друга на длине $2R$
- В лаб. системе продольные размеры сжаты в γ раз, $\gamma = E/m \cong 100 \text{ ГэВ} / 1 \text{ ГэВ}$
- $\tau = 2R/c\gamma$, радиус ядра $\rightarrow R = 1.2 (197)^{1/3} \text{ fm} = 7 \text{ fm}$
- $\tau = 2 * 7 \text{ fm} / (c * 100) = 0.14 \text{ fm/c}$

Лаборатория адронных взаимодействий (ЛАВ) (основной эксперимент – CMS LHC в ЦЕРН-е)

Отдел экспериментальной физики высоких энергий (ОЭФВЭ)

Нач. лаб. проф. Э.Э. Боос

НИИЯФ

Связь с научными центрами:

- в Дубне (ОИЯИ)
- в Протвино (ИФВЭ)
- в Европе (CERN)
- в США (BNL, FNAL, CEBAF-JLAB)