

Анизотропия угловых распределений частиц и КГП

(актуальные задачи в А-А столкновениях на LHC)

В.Л. Коротких

Институт ядерной физики МГУ

Обсуждается ряд эффектов при столкновении релятивистских ионов, связанных с образованием хромодинамической среды. Среди них: эллиптический поток, фактор ядерной модификации, обратный пик азимутальных двух-частичных корреляций..

Автор благодарен сотрудникам лаборатории адронных взаимодействий ОЭФВЭ НИИЯФ МГУ нач. лаб. Л.И.Сарычевой, И.П.Лохтину, Л.В.Малининой, А.М.Снигиреву за совместные обсуждения.

Эффекты среды, наблюдаемые с определением угла плоскости реакции (в каждом событии)

Измерения на RHIC в столкновениях Au + Au при энергии в системе центра масс 200 А ГэВ позволили установить

- Большой эллиптический поток v_2 и его кварковый скейлинг.
- Подавление фактора ядерной модификации $R_A(p_T)$.
- Искажение обратного пика в двух-частичных корреляциях.

Эти факты являются сильными аргументами гипотезы образования кварк-глюонной материи с коллективными свойствами, которые **отсутствуют** в p-p столкновениях.

Обзор экспериментальных данных:

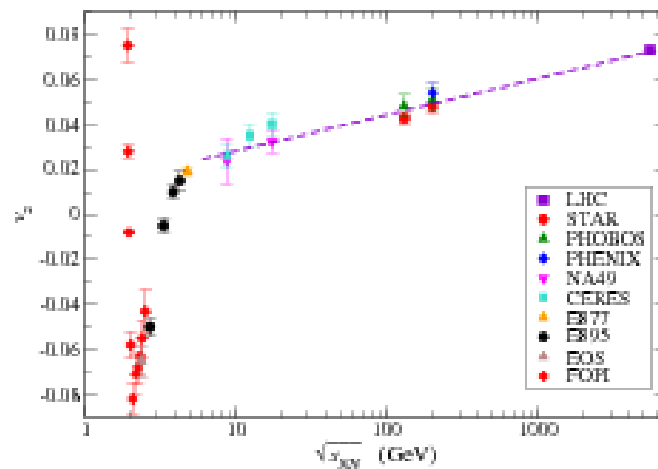
*В. Л. Коротких «Физика столкновений ультрарелятивистских ядер»,
Изд. «Книжный Дом Университет» МГУ, Москва 2008*

Электронная версия

<http://lav01.sinp.msu.ru/~vlk/lect.PRNC.html>

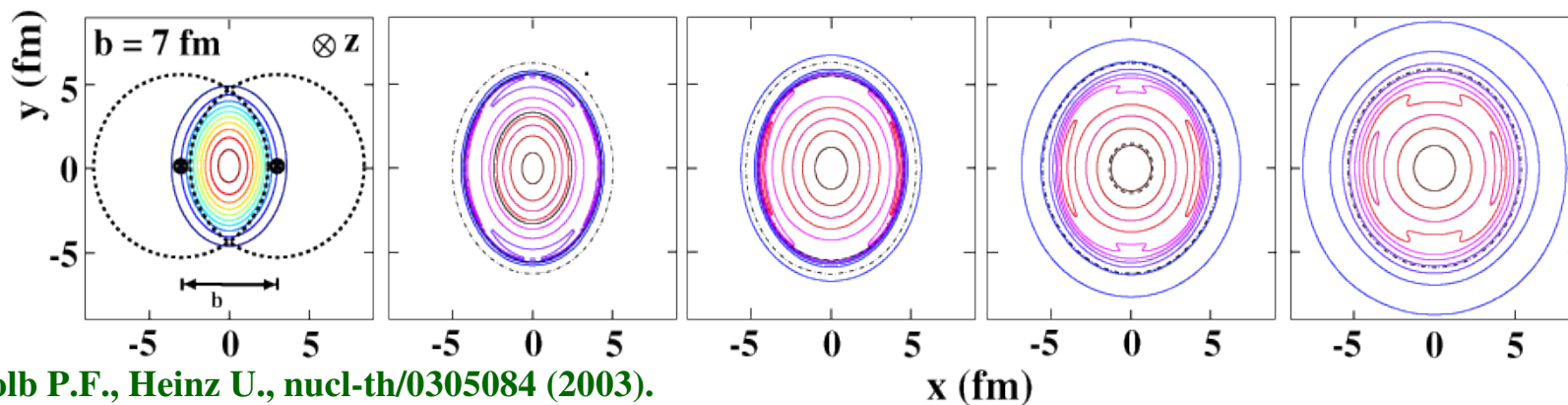
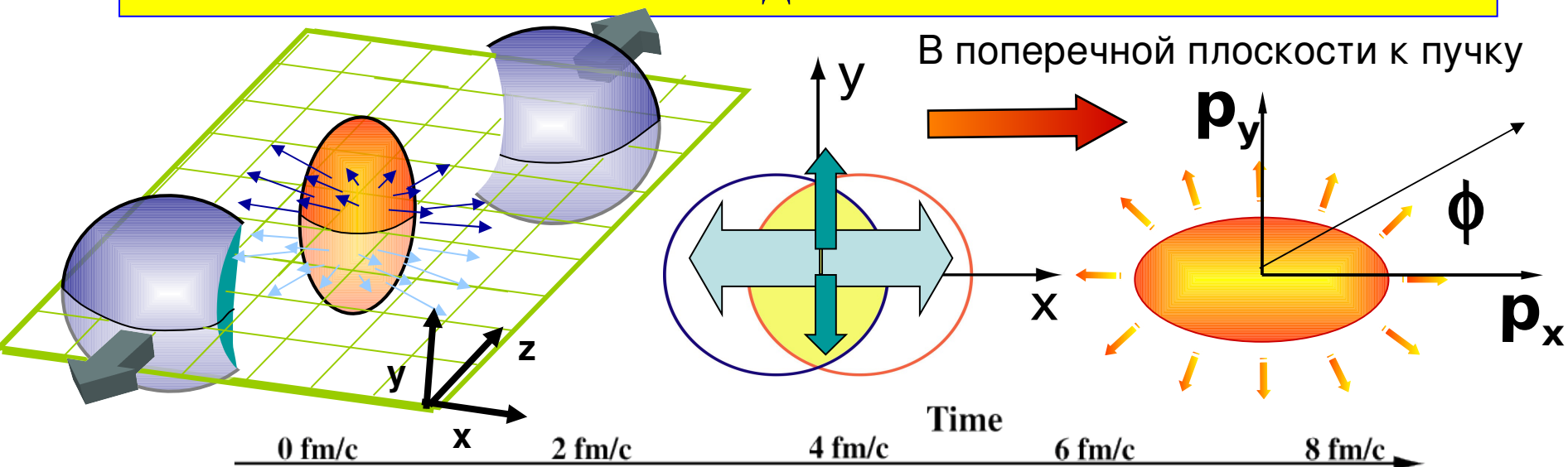
Зависимость от энергии и экстраполяция до энергии ЛHC

$\sqrt{s} = 5.5 \text{ TeV}$



Величина V_2 растет с ростом энергии как логарифм $\sqrt{s_{NN}}$ и при энергии ЛHC может быть равна $V_2 = 0.07$

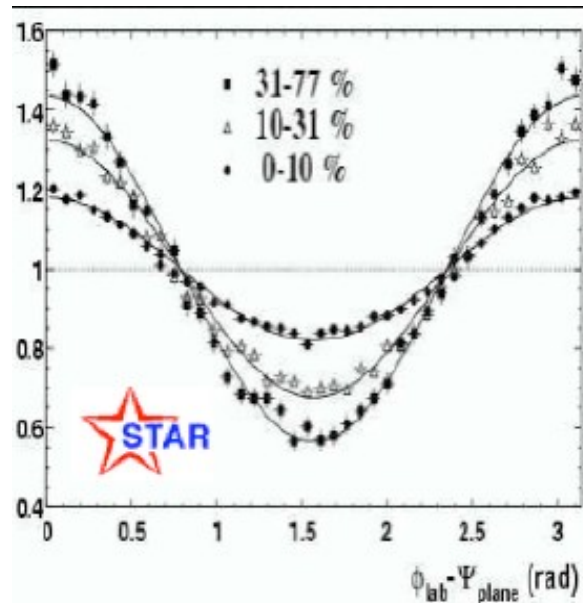
Нецентральные А-А – столкновения и эволюция капли жидкости



Kolb P.F., Heinz U., nucl-th/0305084 (2003).

В гидродинамике не сферическая форма сгустка в начальный момент приводит к азимутальной анизотропии частиц в конечном состоянии

Экспериментальное азимутальное распределение частиц в Au-Au столкновениях



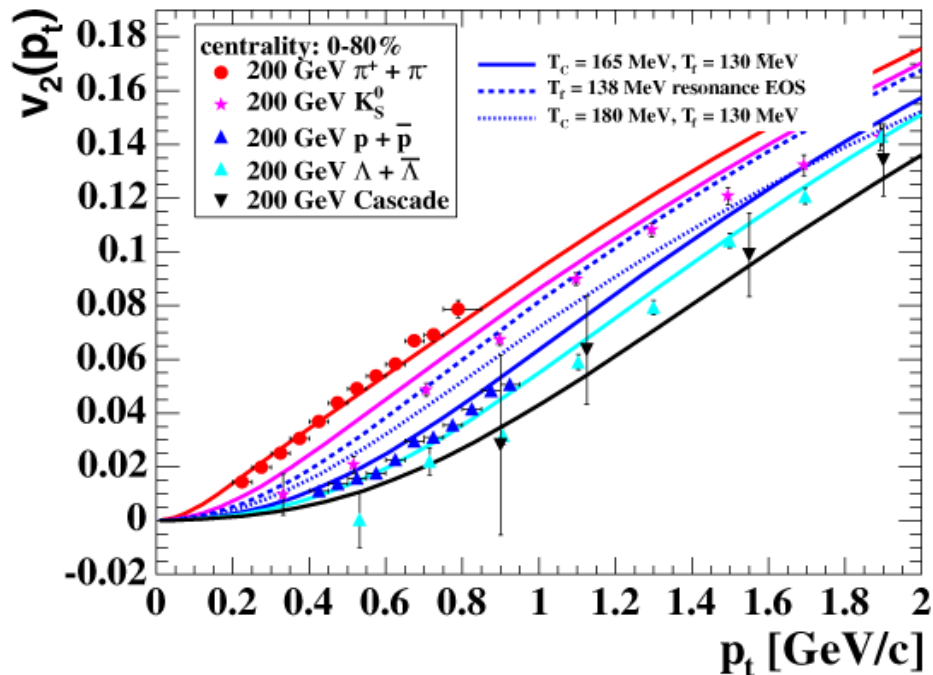
0-10% - наиболее центральные столкновения 2-х ядер, 31-77% - периферические

Ψ_R -- угол плоскости реакции, определяемый в **каждом** конкретном событии

$$E \frac{d^3 N}{d^3 p} = \frac{1}{2\pi} \frac{d^2 N}{p_t dp_t dy} \left(1 + \sum_{n=1} 2v_n \cos(n(\varphi - \Psi_r)) \right)$$

v_2 - коэффициент при $\cos 2(\varphi - \Psi_R)$ в разложении в ряд Фурье азимутального углового распределения по отношению к углу плоскости реакции Ψ_R . Его называют коллективным эллиптическим потоком

Зависимость V_2 от p_T



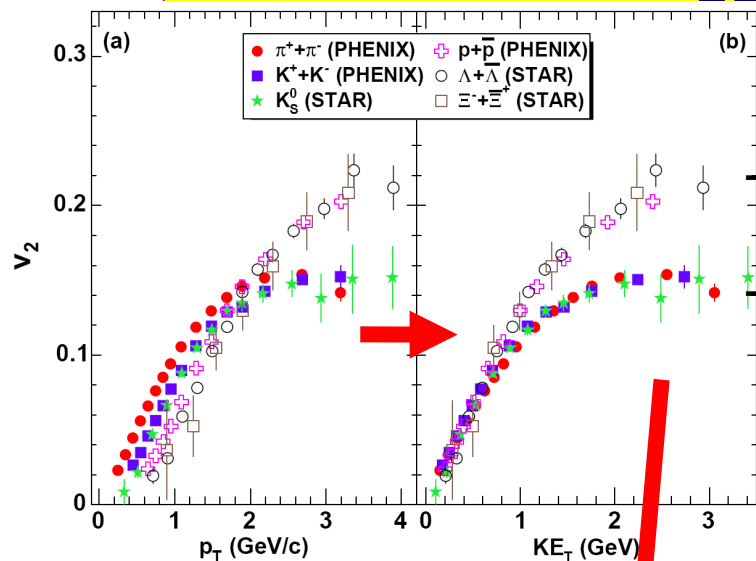
Величина V_2 , её зависимость от поперечного импульса p_T и от массы частиц при $p_T < 2 \text{ ГэВ/с}$ хорошо описываются в рамках *идеальной* гидродинамической модели с начальной плотностью $\epsilon_0 \approx 30 \text{ ГэВ/фм}^3$ и временем термолизации $\tau_0 \approx 0.6 \text{ фм/с}$

S.S. Adler et al., Phys.Rev.Lett. 91, 182301 (2003);
J. Adams et al., Nucl.Phys. A757, 102 (2005);
B.B. Back, Phys.Rev. C72, 051901(R) (2005).

Проявление кварковых степеней свободы

ободы

PHENIX data



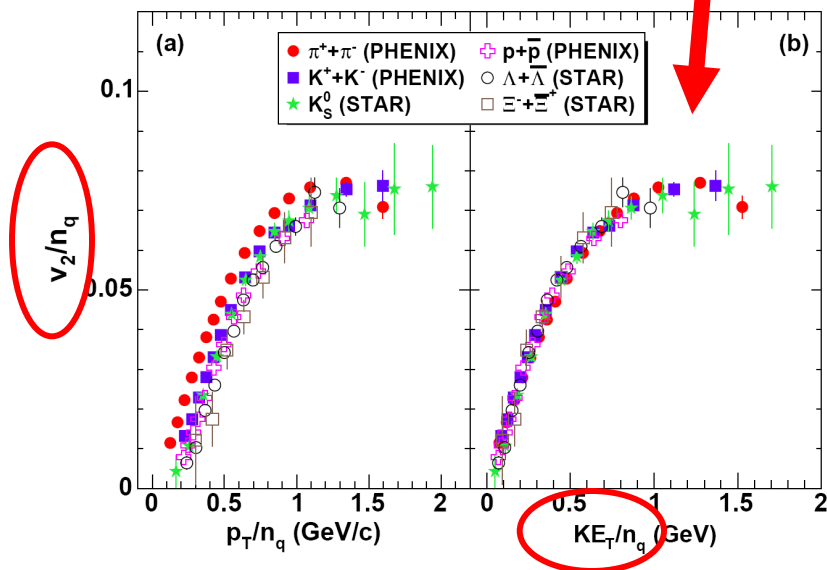
→ барионы

→ мезоны

Зависимость v_2 от поперечного импульса p_T частиц для мезонов и барионов.

Пересчет распределений в переменных V_2/n_q и E_T/n_q , где n_q - число кварков, дает универсальную зависимость.

Скейлинговое поведение v_2 (независимость от числа кварков) свидетельствует о том, что именно коллективное поведение кварков определяет динамику расширения сгустка материи в поперечной плоскости.



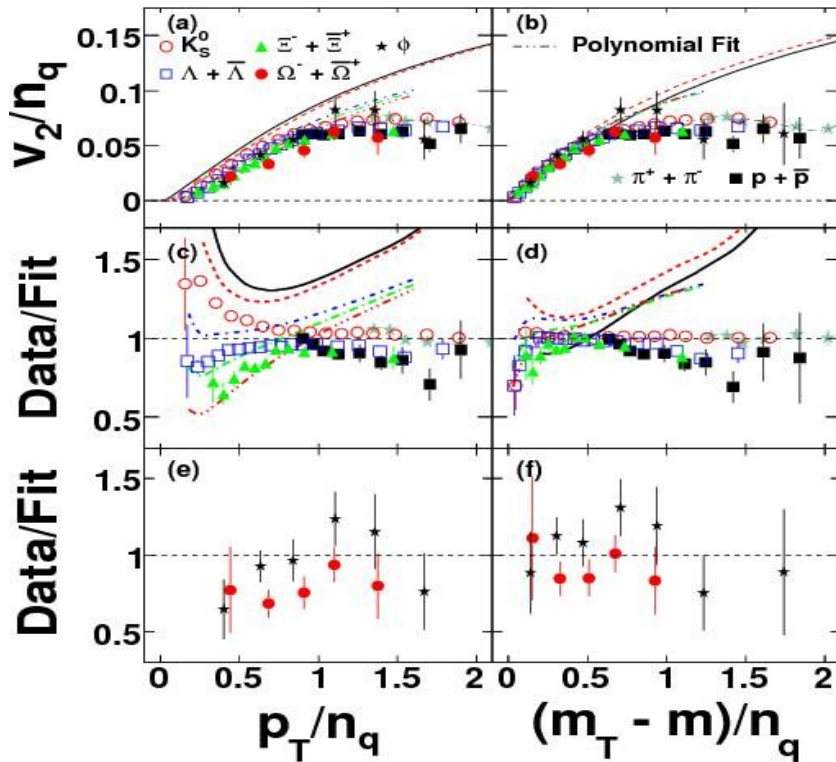
A. Adare et al. (PHENIX), PRL 98(2007)162301

Проявление кварковых степеней свободы

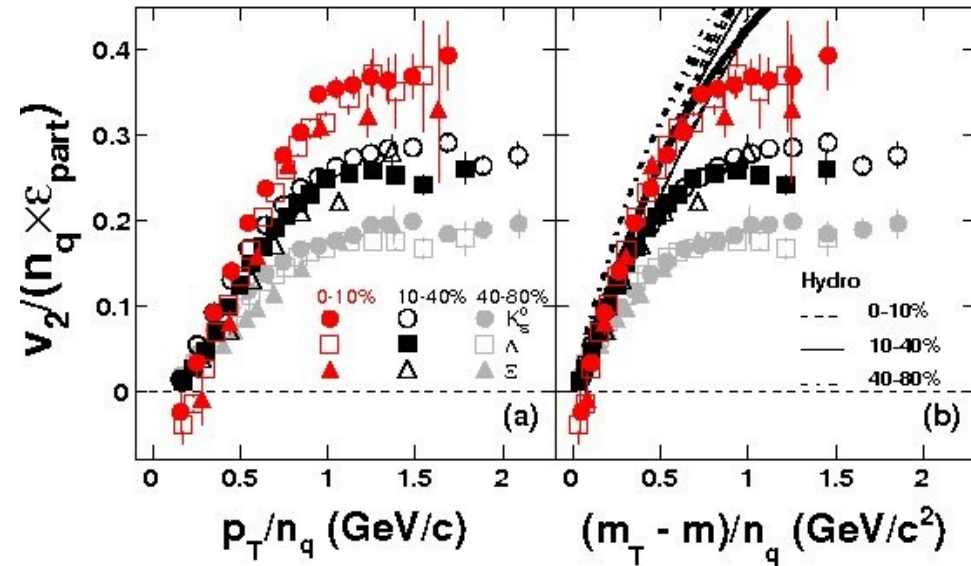
STAR data

Centrality dependence

Min-bias events



Polinomial fit to K^0



* ϕ , 1020 MeV

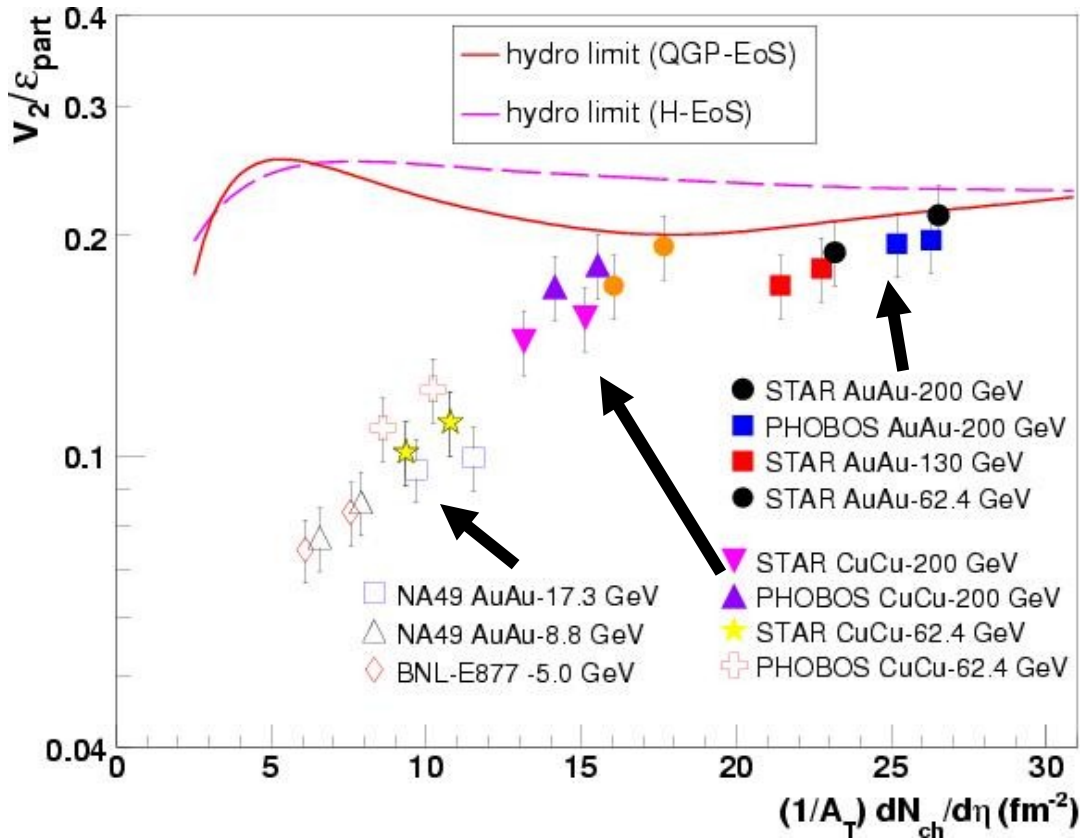
▪ Ω , 1672 MeV

Есть скэйлинг по массам адронов.

Нет скэйлинга по центральности

B.I. Abelev et al (STAR). ArXiv:0801.3466 [nucl-ex]

Эллиптический поток для совокупности всех данных



Разные энергии и разные ядра

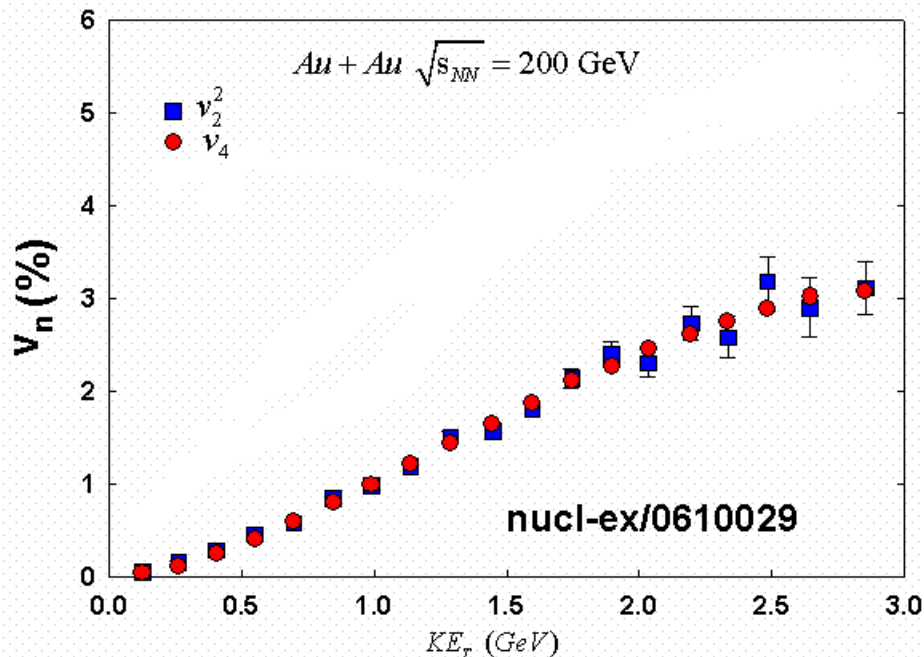
Эллиптический поток V_2 , нормированный на **начальный** пространственный эксцентриситет ϵ .

$1/A_T dN_{ch}/d\eta$ плотность частиц при $\eta = 0$, отнесенная на среднюю поперечную площадь A_T двух ядер.

Кривые – предсказания термодинамических моделей.

- Для более низких энергий SPS (17 GeV) на пару нуклонов термодинамическое равновесие не достигается.
- При энергиях RHIC (200 GeV) образованная среда близка к термодинамическому равновесию.
- При энергиях LHC (5500 GeV) ожидается достигнуть термо-равновесия

Особенность гидродинамической капли жидкости: более высокая гармоника V_4 должна быть линейной по V_2^2



$$v_4(p_T, \eta) = k v_2^2(p_T, \eta)$$

Данные RHIC дают коэффициент пропорциональности

$$k = 1.2$$

В случае установления полного равновесия (идеальная жидкость) это отношение должно быть равно **0.5** при всех KE_T (ожидание для LHC)

$$\frac{V_{4B}}{V_{2B}^2}(3p_T) = \frac{2}{3} \frac{V_{4M}}{V_{2M}^2}(2p_T) + \frac{1}{6}$$

Коалесцентная модель предсказывает соотношение, зависящее от сорта частиц – барионов (B) и мезонов (M).
V. Creco et al., Acta Phys. Hung. A24(2005)235

MSU HI group

HYDJET++ - Мотне Карло генератор событий для изучения соударения тяжелых ионов.

События в HYDJET++ представляет из себя

суперпозицию

“мягкой части” - параметризованной гидродинамики и

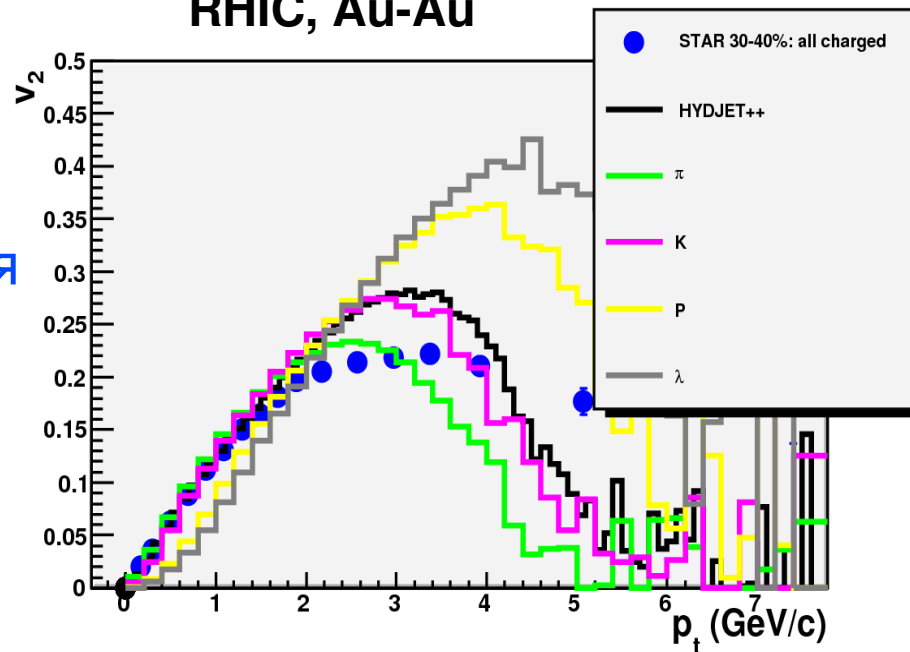
“жесткой части” - мультипартонных состояний.

I.Lokhtin, L.Malinina, S.Petrushanko,
A.Snigirev, I.Arsene, K.Tywoniuk,

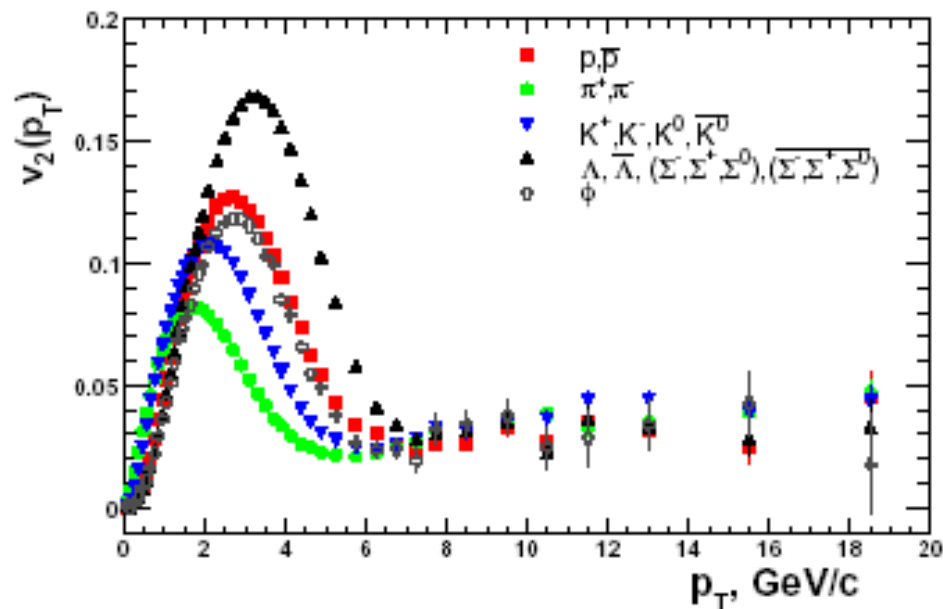
<http://cern.ch/lokhtin/hydjet++>

e-print arXiv:0809.2708, submitted to
Computer Physics Communications

RHIC, Au-Au

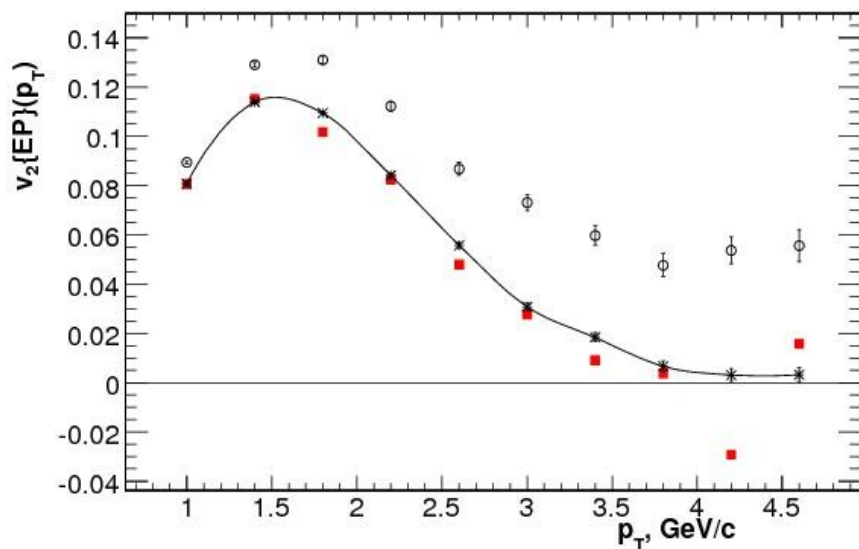
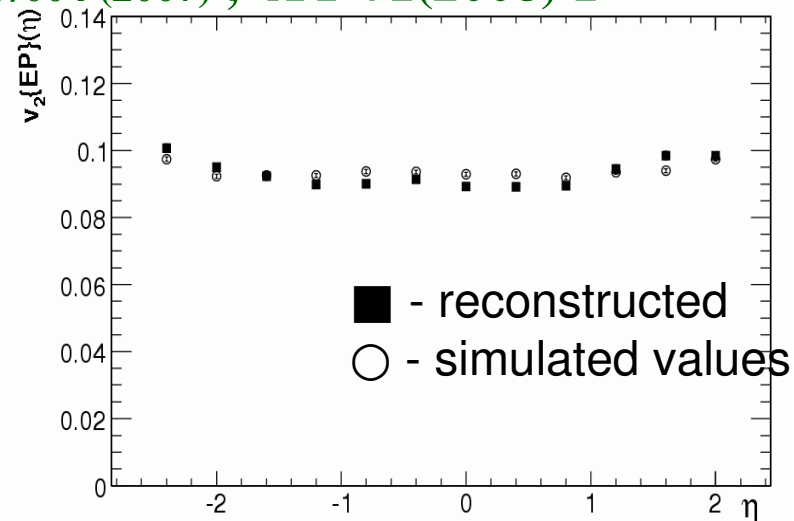
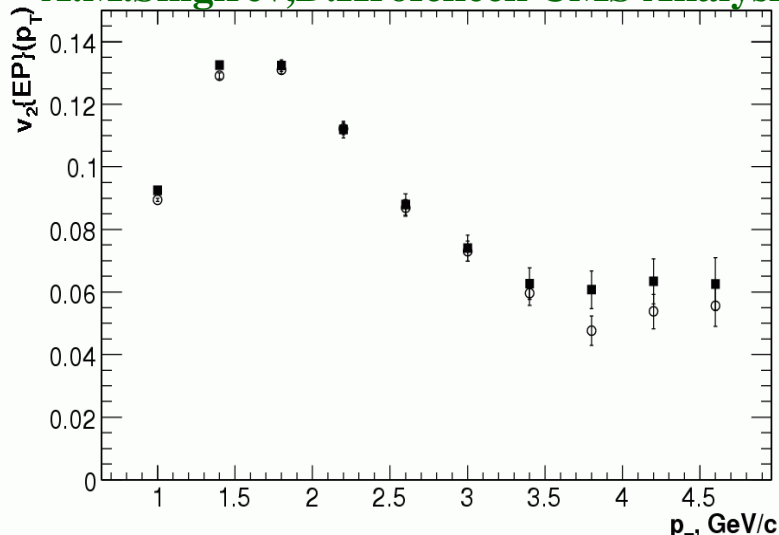


LHC, Pb-Pb



Предсказания НУДЖЕТ в Pb+Pb на CMS LHC

G.Kh.Eyyubova, V.L.Korotkikh, I.P.Lokhtin, S.V.Petrushanko, L.I.Sarycheva,
A.M.Snigirev, D.Krofcheck CMS Analysis Note 2007/004 (2007), ЯФ 71(2008) 1



Наша оценка общей систематической ошибки $\pm 3\%$. Она основана на $\sim 3\%$ разнице между смоделированным и реконструированным средним значением v_2 .

- * истинное значение V_2
- o V_2 для сгенерированных событий
- после исключения непотоковых эффектов

При измерении азимутальной анизотропии частиц на ЛНС следует исследовать

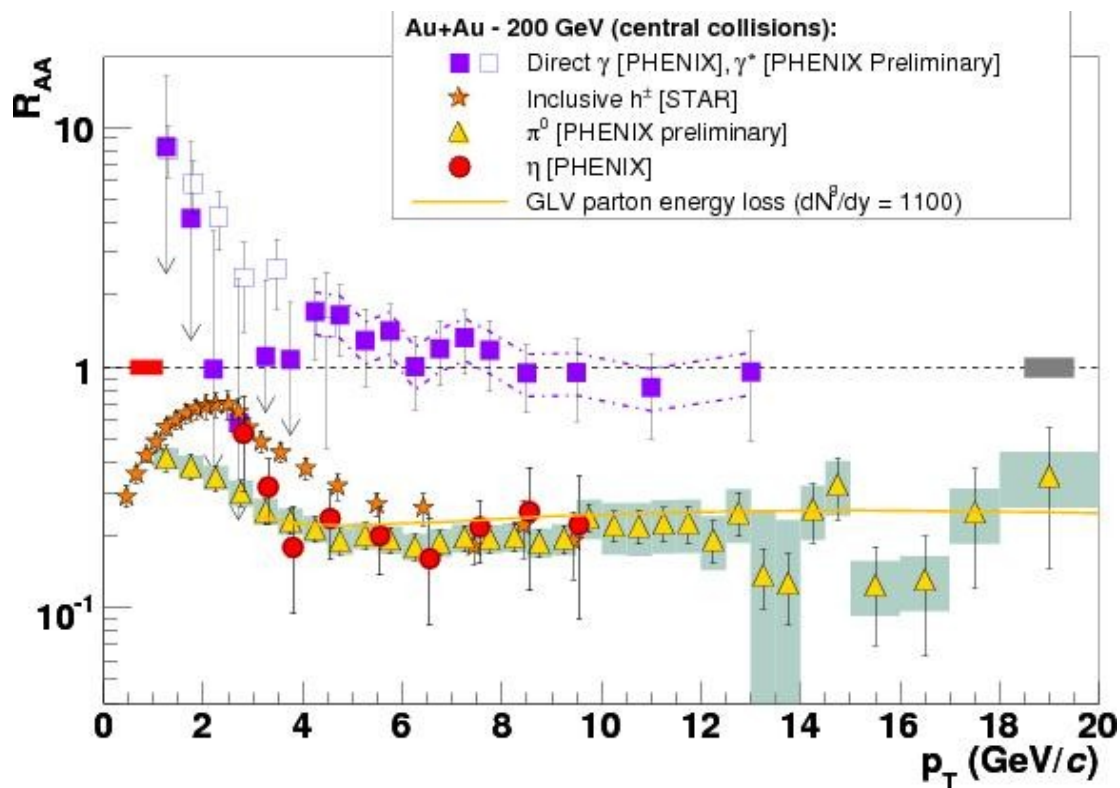
- Абсолютную величину и распределения $V_2(p_T, \eta)$
- Соотношение V_2 и V_4 для разных адронов
- Кварковый скейлинг V_2/n_q
- Вязкость образованной среды и ее свойства
- Флуктуации V_2
- Непотоковые азимутальные корреляции

Фактор ядерной модификации

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

$R_{AA} = 1$ - для жестких процессов, некогерентная сумма p+p неупругих бинарных столкновений в A+A

Подавление импульсного адронного спектра в сравнении с импульсным спектром в p-p столкновении

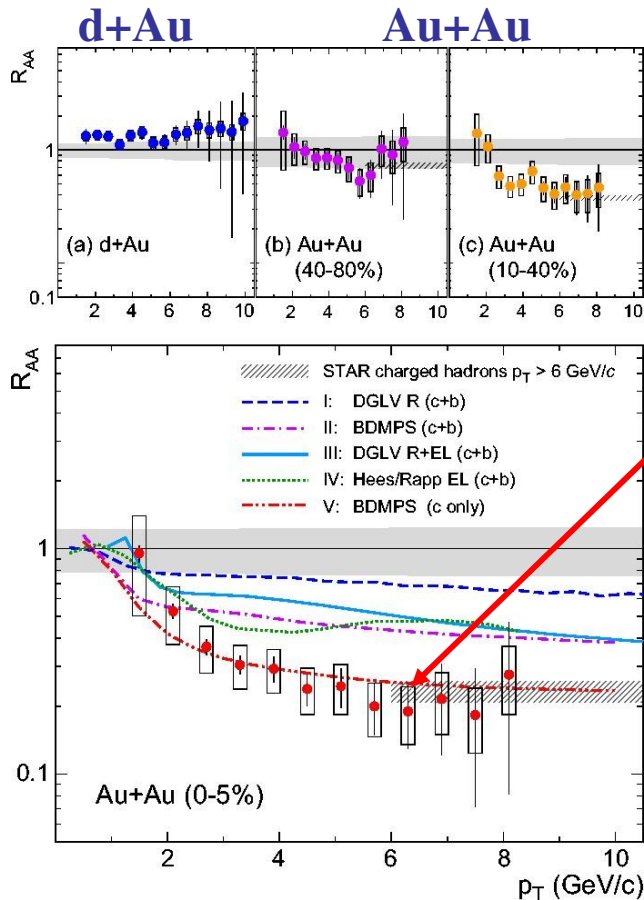


R_{AA} – отношение выхода частиц в А-А столкновениях на пару нуклонов в сравнении с p-p столкновениями

Выход фотонов не подавляется.
Выход мезонов подавляется примерно в 5 раз при больших p_T

Подавление одночастичных инклюзивных спектров адронов при больших p_T обусловлено эффектом прохождения партонов через плотную сильно взаимодействующую среду .

Подавление импульсного адронного спектра для ТЯЖЕЛЫХ МЕЗОНОВ



Подавление мезонов с **тяжелыми кварками**, такое же как с легкими. Это находится в противоречии с **моделями погашения струй**, т.к. легкие кварки излучают глюоны сильнее в среде. Чтобы описать подавление тяжелых кварков в моделях с погашением струй, нужно задать начальную плотность глюонов, равную

$$dN_g/dy \approx 3000, \quad \text{RHIC}$$

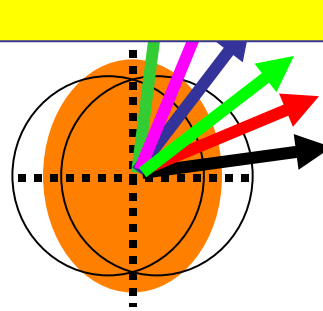
что противоречит наблюдаемой полной адронной множественности ≈ 600

$$dN_{ch}/dy \approx 0.56 dN_g/dy$$

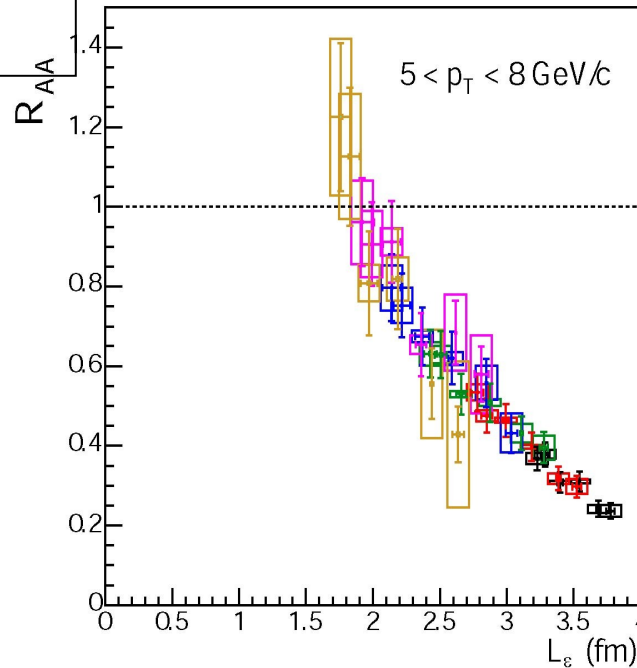
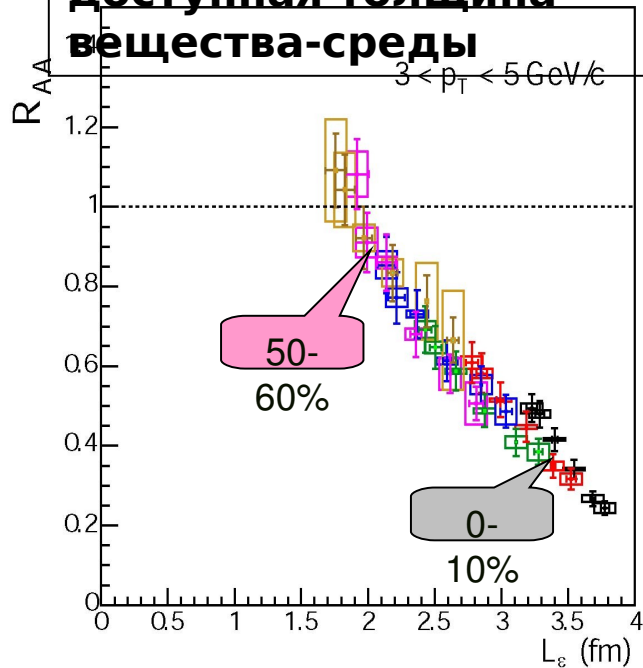
Фактор подавления для тяжелых D и B мезонов, измеренный по их лептонному распаду на e^\pm

Принципиально новые измерения R_{AA} для π^0 относительно угла к плоскости реакции (PHENIX)

При изменении центральности и ориентацией относительно плоскости реакции меняется доступная толщина вещества-среды



Перпендикуляр к плоскости реакции



С ростом толщины среды, начиная с 2 фм, подавление выхода частиц увеличивается.

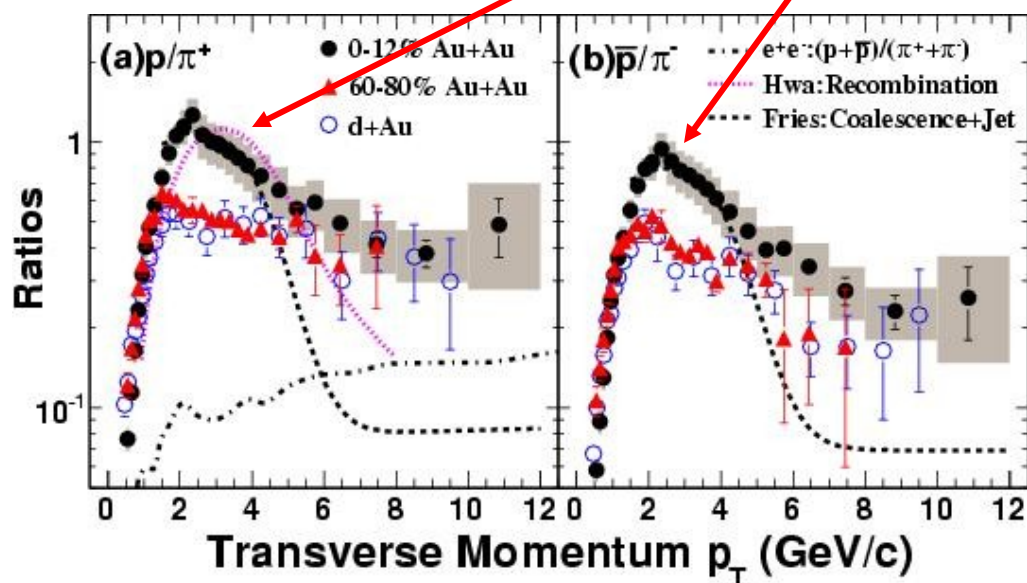
S.S. Adler et al (PHENIX), PR C76(2007)034904, nucl-ex/0611007

**Толщина
боя**

Усиленный выход барионов в сравнении с мезонами при промежуточных

p_T

Подавление мезонов контрастирует с «неподавлением» выхода барионов (p , Λ) при $p_T = 2-4$ ГэВ/с. Наблюдается аномальное отношение барион/мезон ~ 0.8 , что в 4 раза больше, чем в $p+p$ и $e+e^-$ столкновениях.



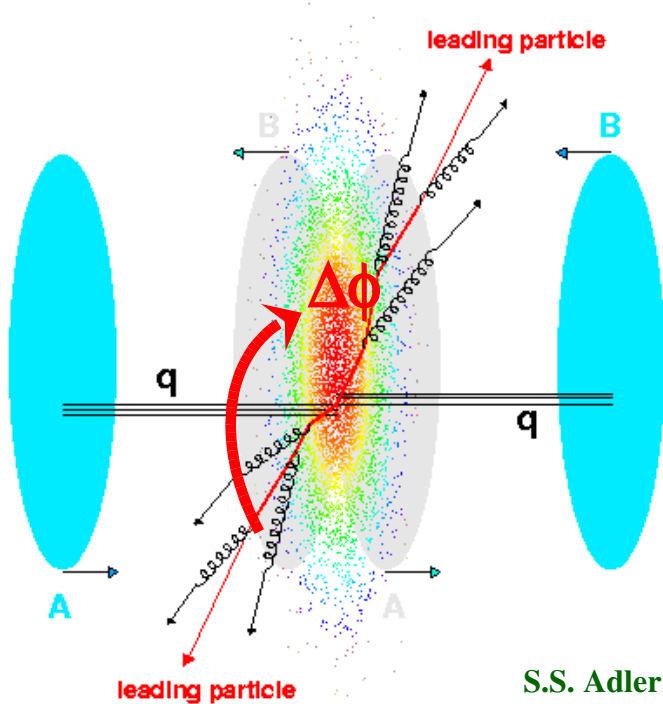
Отношение барион / мезон для центральных, периферических Au+Au и d+Au столкновениях

Эти расхождения между барионами и мезонами можно объяснить, если ввести дополнительный механизм коалесценции (слипания) кварков в плотной партонной среде.

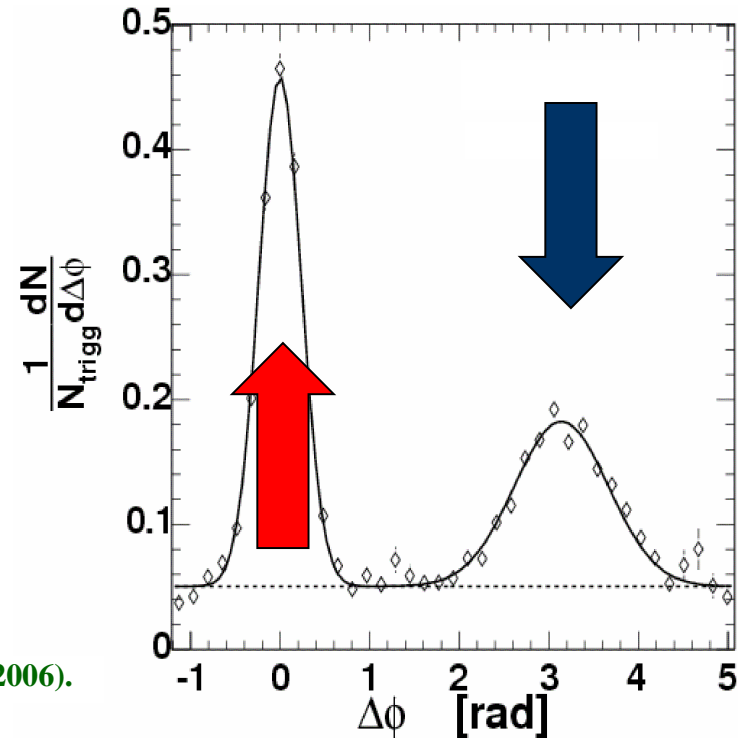
При измерении фактора ядерной модификации на ЛНС следует исследовать

- Абсолютную величину и зависимости $R_A(p_T, \eta)$
- Зависимость (независимость) R_A от сорта частиц
- Подавление частиц в зависимости от угла, измеряемого по отношению к плоскости реакции
- Эффект превышения барионов над мезонами при средних p_T

Двух частичные $\Delta\phi$ -корреляции



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



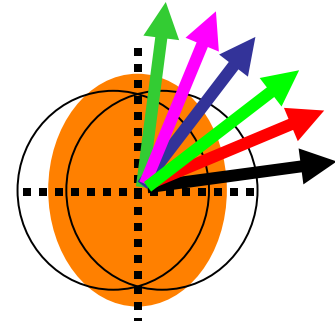
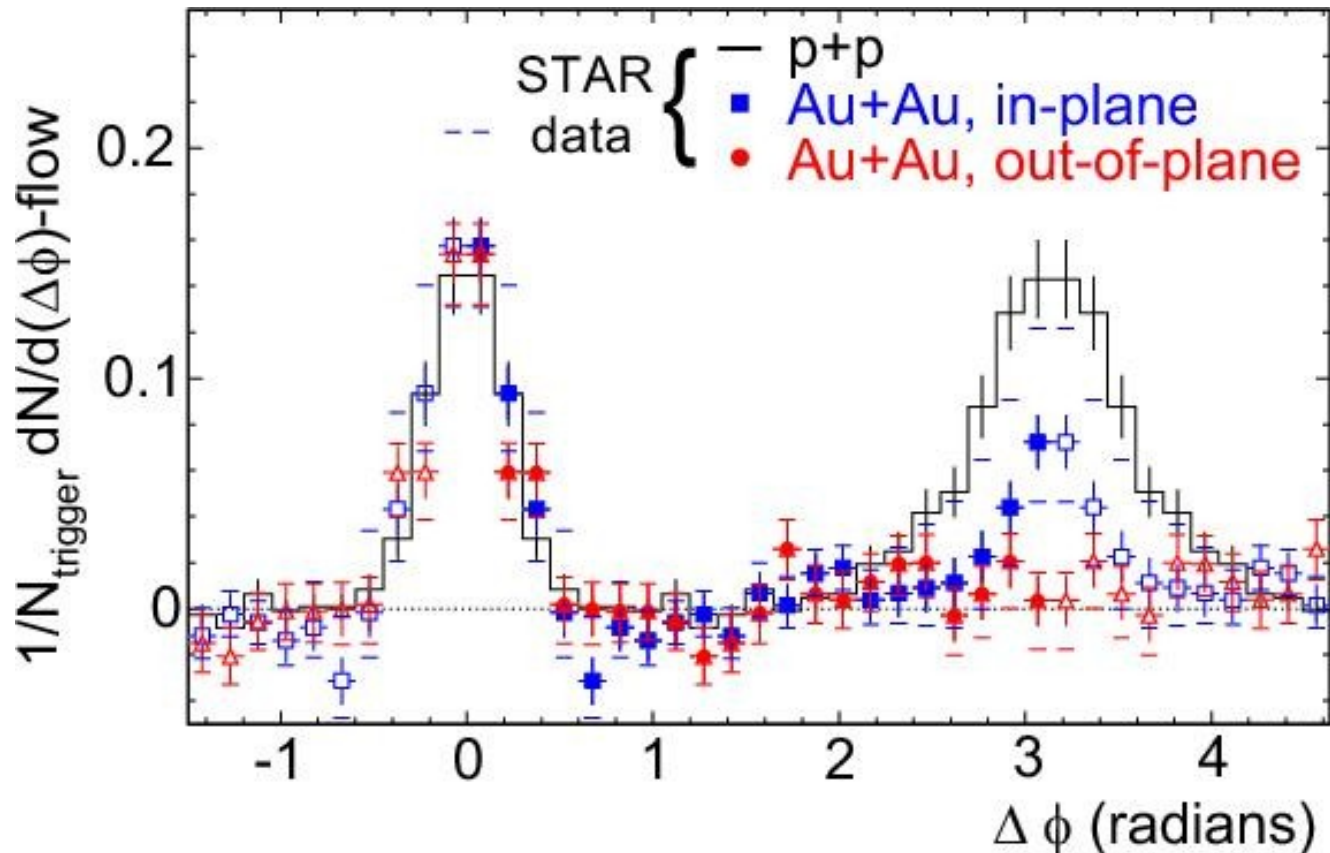
- Выбирается частица с большим p_T – триггерная частица и рассматриваются пары «триггерная частица + ассоциированная частица»

- Наблюдается корреляция при

$\Delta\phi \approx 0$ – «прямой» пик

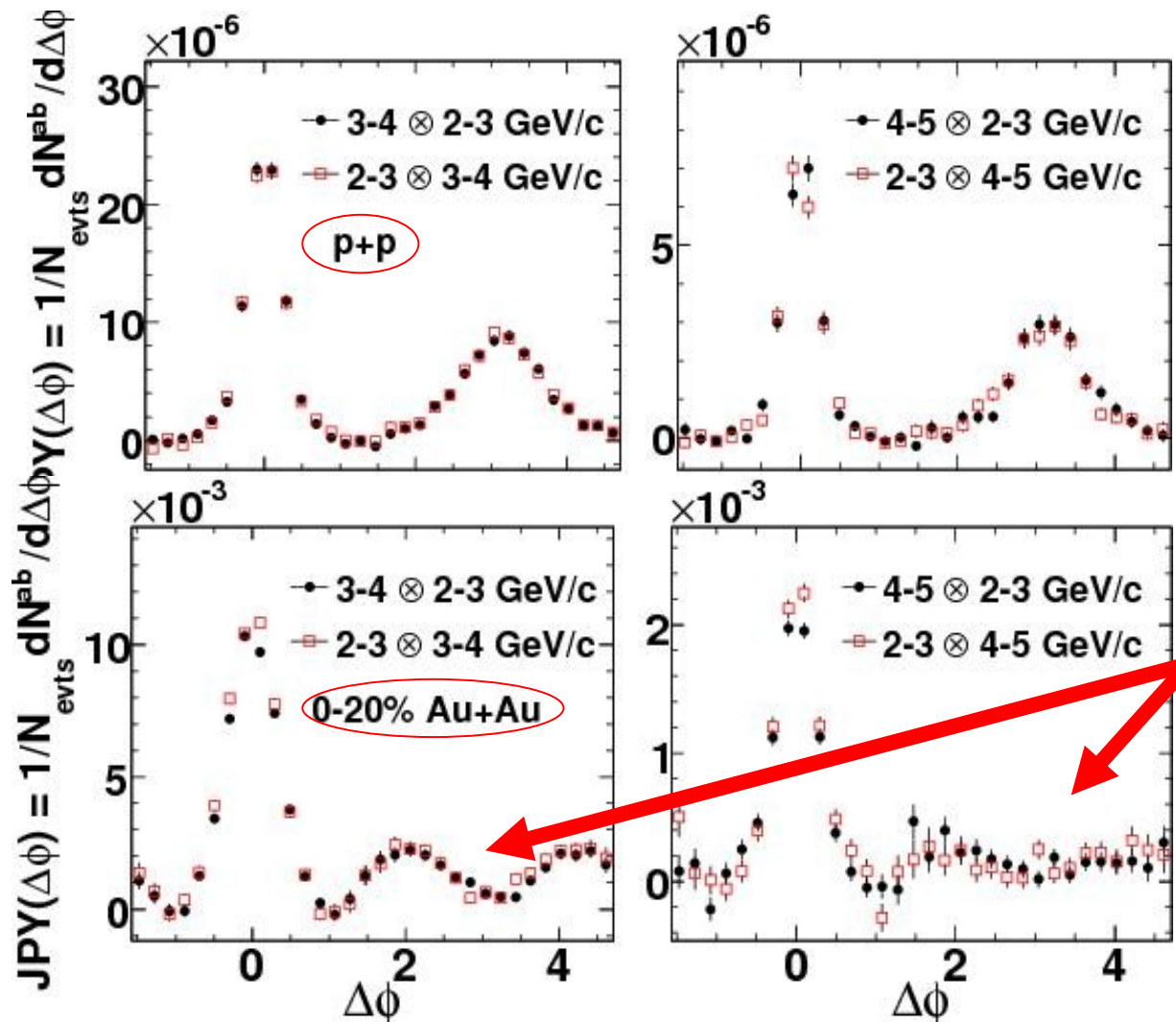
$\Delta\phi \approx \pi$ - «обратный» пик в области больших относительных азимутальных углов

Измерения азимутальной корреляции пар адронов относительно угла плоскости реакции



Если 2-ая частица проходит перпендикулярно плоскости реакции (т.е. через большой слой рожденной материи), то обратный пик исчезает.

Два плеча «обратного» пика



$p_T(\text{trig}) \otimes p_T(\text{assoc})$ –
 поперечные импульсы
 триггерной и
 ассоциированной частицы

Измерения с большой
 статистикой на установке
PHENIX (RHIC)
 показывают, что в Au-
 Au столкновениях
 появляются два плеча в
 «обратном» пике (этого
 нет в p-p столкновениях)

Пока нет измерений в
 зависимости от угла
 по отношению к
 плоскости реакции !!

A. Adare et al. (PHENIX), arXiv:0801.4541 (2008)

29 января 2009, ИЯИ Р,

В. Л. Коротких

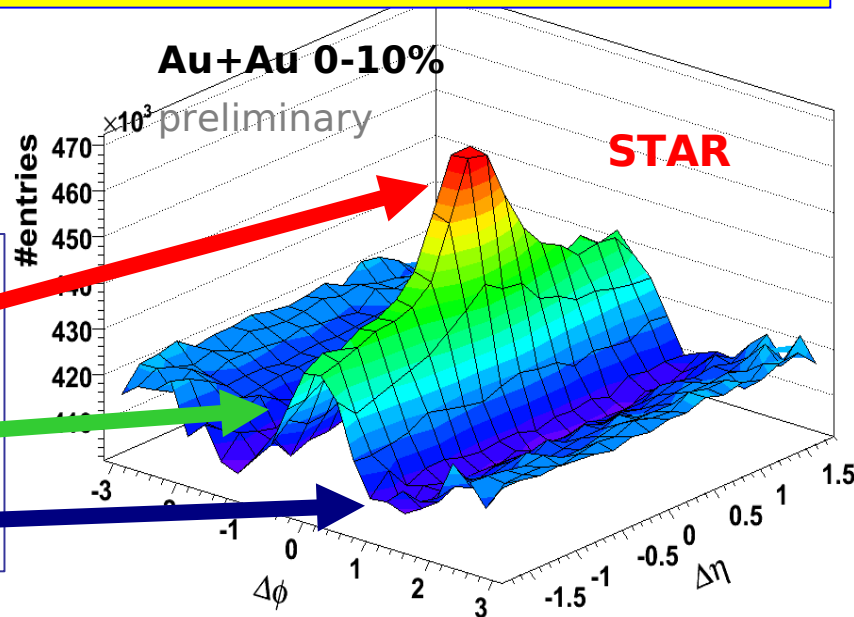
22

Подложка-шлейф в двух-частичных корреляциях

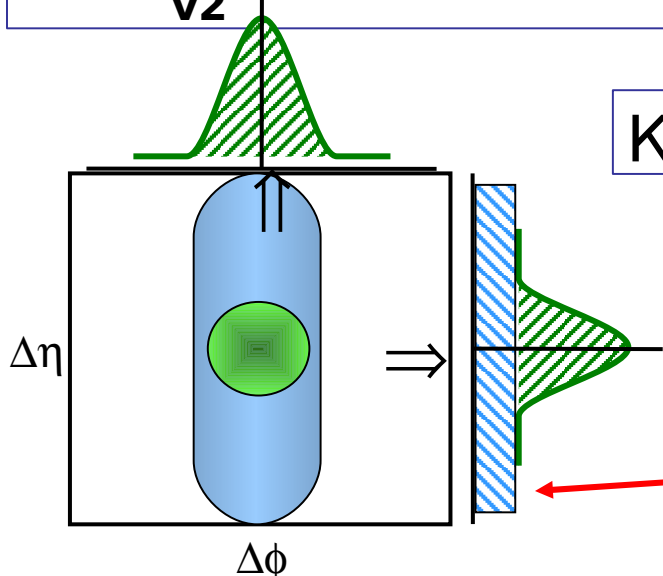
$3 < p_{t,trigger} < 4$
GeV

$p_{t,assoc} > 2$ GeV

- Составляющие
 - Пик от струи
 - Шлейф (ridge)
 - Модулированный фон от v_2



Картина в $\Delta\eta$ - $\Delta\phi$ представлении

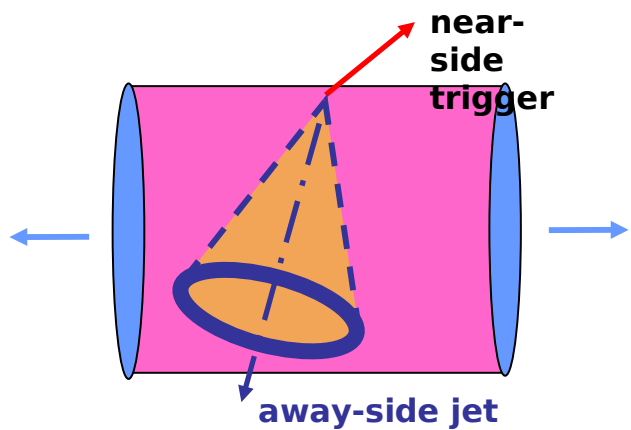


Проекция после вычитания фона от v_2

Подложка от шлейфа

J. Putschke et al. (STAR) J.Phys.G34(2007)s679

Кольца в угловом распределении частиц



**Вейвлет анализ двумерного
углового распределения
позволяет выделить события с
кольце-образной структурой**

*В.Л. Коротких, Г.Х. Эйюбова,
Вестник МГУ, 2008, т.63, №1, с.20
I.M.Dremin, G.Kh. Eyyubova, V.L. Korotkikh,
L.I. Sarycheva,
Submitted to J.Phys.G (2008)*

1) Сценарий черенковского излучения глюонов:

**Наблюдаемая структура обратного пика – одномерная проекция
конуса черенковского глюонного излучения на поперечную
плоскость.**

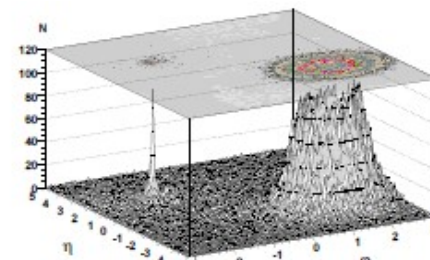
*I.M. Dremin, JETP Lett 30, 140 (1979), Sov.J.Nucl.Phys.33,726 (1981),
I.M. Dremin, Nucl.Phys. A767, 233 (2006), A785, 369 (2007);*

2) Сценарий ударной сверхзвуковой волны:

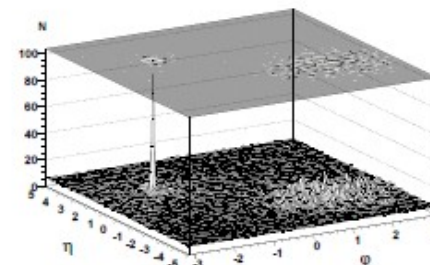
**При прохождении быстрого адрона через слой плотной
партонной материи возникают ударные волны по аналогии
с движением тела со сверхзвуковой скоростью в
макроскопической плотной среде**

*W. Scheid et al., Phys.Rev.Lett. 34, 741 (1974); J. Hofmann et al., Phys.Rev.Lett. 36, 88
(1976);*

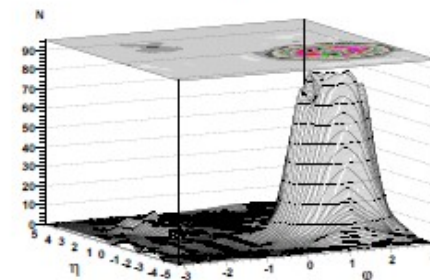
T. Renk, J. Ruppert, Phys.Rev. C73, 011901 (2006);



a)



b)



c)

η

ϕ

При измерении двух-частичных угловых корреляций на ЛНС следует исследовать

- **Искажение и деформация обратного пика**
- **Появление сложных структур в двумерном угловом распределении частиц**
- **Структуру подложки и ее свойства**
- **Структуру двумерного углового распределения частиц (без триггерной частицы) в отдельных событиях**

Преимущества ALICE в сравнении с CMS при исследовании «мягкой» физики

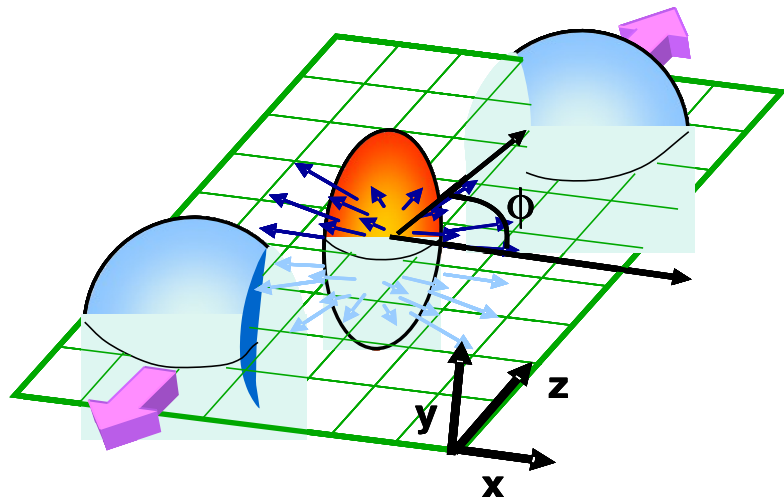
- Идентификация частиц
- Область малых p_T ALICE: $p_T > 200$ МэВ/с,
CMS: $p_T > 900$ МэВ/с
- Возможность измерять min-bias
($H_{ALICE} = 0.5$ Т, $H_{CMS} = 4$ Т)

Актуальные задачи в столкновениях релятивистских ионов при энергиях LHC

- Коллективный поток V_2 и его кварковый скейлинг.
- Подавление фактора ядерной модификации $R_A(p_T)$.
- Искажения обратного пика в двух-частичных корреляциях.

Запасные слайды

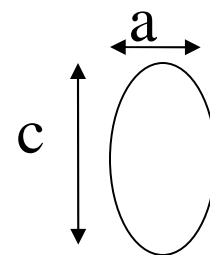
**Анизотропия плотности среды в начальном состоянии
→ в анизотропию частиц в конечном состоянии**



Пространственная асимметрия рожденного «сгустка» материи в не центральных А+А столкновениях приводит к анизотропии в импульсном распределении рожденных частиц – коллективному потоку V_2

$$\varepsilon \approx \frac{\sqrt{c^2 - a^2}}{a} \quad \text{– эксцентриситет}$$

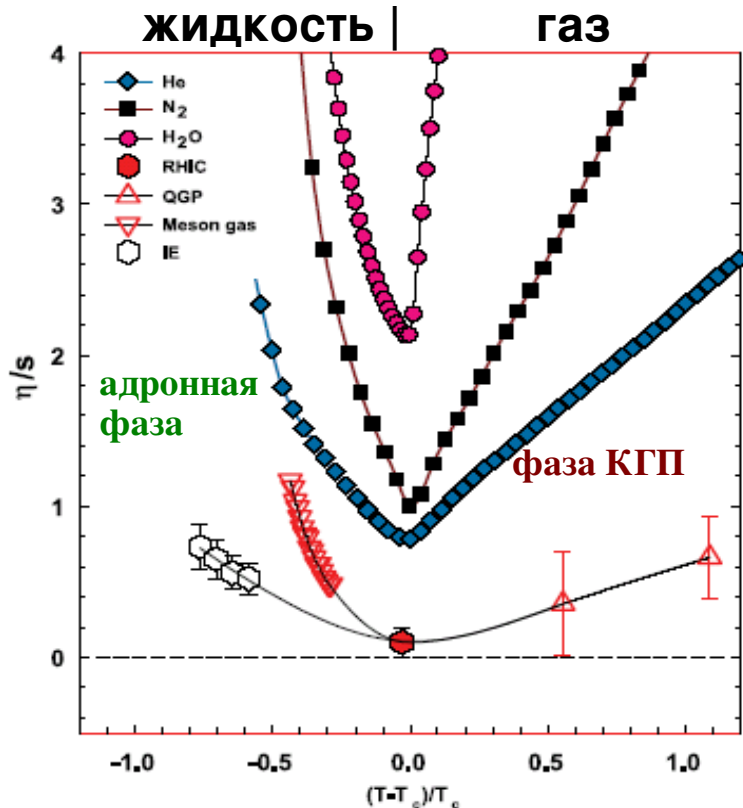
пространственного сгустка файрбола



$$\frac{dN}{d\varphi}(\varphi_p) = N_0 (1 + 2v_1 \cos(\varphi_p - \Psi_R) + 2v_2 \cos 2(\varphi_p - \Psi_R) + \dots)$$

импульсное распределение частиц по азимутальному углу φ_p

Вязкость КГМ в конечном состоянии при энергии RHIC



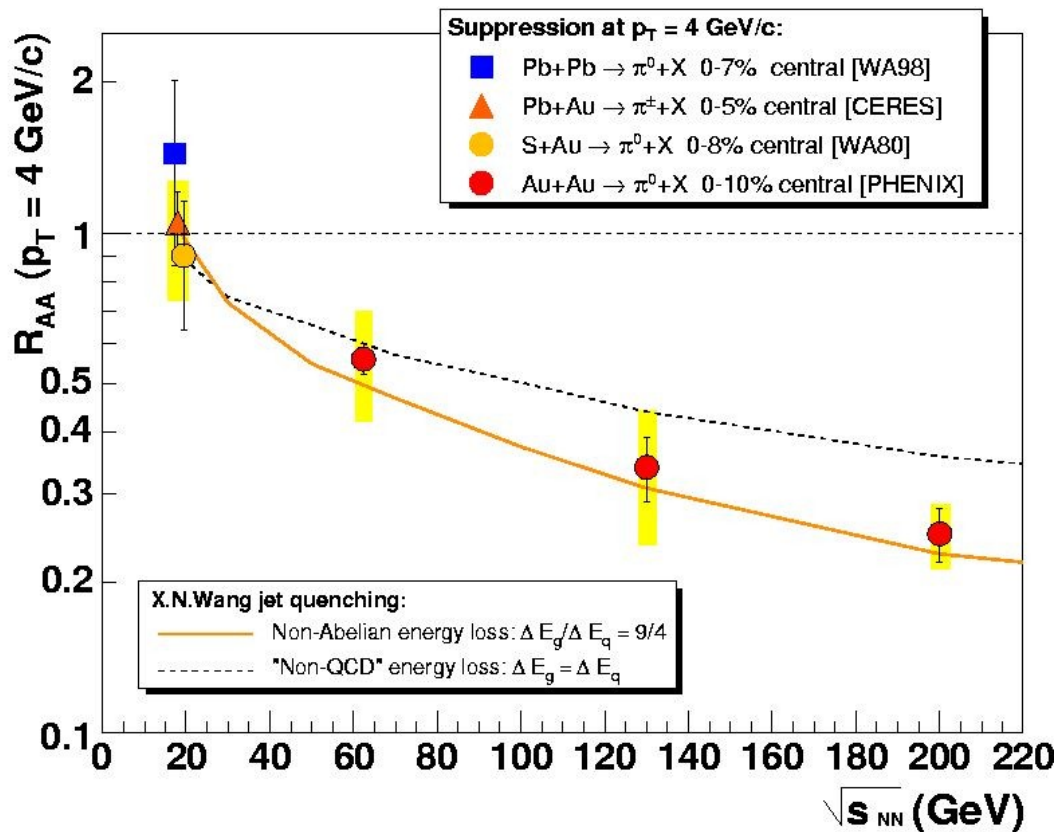
η - вязкость;
 $s=(\epsilon+p)/T$ – плотность
 энтропии

Еще один важный результат – малая вязкости в сгустке. Модели, учитывающие внутренне трение частиц **понижают значение V_2 до нуля !!!**. Оценка максимальной вязкости, позволяемая измеренным потоком V_2 дает величину безразмерного отношения вязкость /энтропия близкую к нижнему пределу $\eta/s = h/4\pi$ (Hirano, Jyulassy, NP A 769(2006)71)

R.A. Lacey et al., Phys.Rev.Lett. 98, 092302 (2007).

Экспериментальные значения v_2 предполагают, что вновь образованная материя на RHIC характеризуется малым отношением $\eta/s \sim 0.1$, значение которого близко к нижнему квантовому пределу для **СИЛЬНОСВЯЗАННЫХ СИСТЕМ** L.P. Csernai et al., Phys.Rev.Lett. 97, 152303 (2006);

Фактор подавления при энергиях $\sqrt{s_{NN}} = 17, 60, 130$ и 200 ГэВ



Наблюдается плавное изменение эффекта подавления от энергии сталкивающихся систем

Отношение выхода частиц R_{AA} в зависимости от энергии

Наблюдаемые закономерности, соответствующие предсказаниям гидродинамики

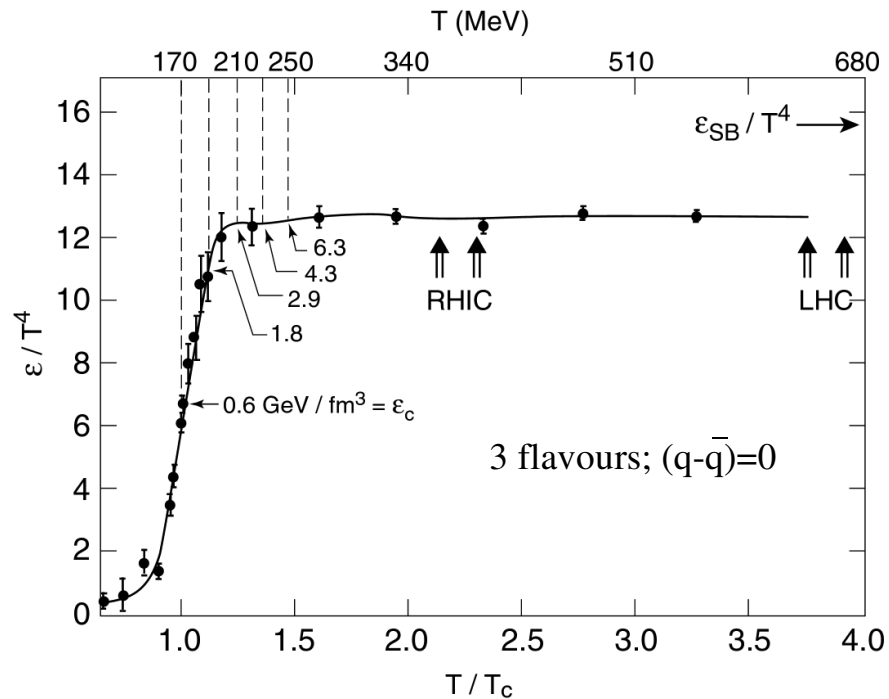
1. V_2 растет с ростом p_T и больше для мезонов, чем для барионов.
2. V_4 пропорционально V_2^2 для всех кинематических переменных.
3. V_2 не зависит от размеров области перекрытия ядер.
4. Отношение v_2 / n_q не зависит от сорта адронов (мезоны, барионы) б что соответствует термализации на кварковом уровне.
5. V_2 пропорционально начальному пространственному эксцентриситету ϵ при всех значениях центральности.
6. При достижении полной термализации отношение V_2 / ϵ не зависит от плотности рожденных частиц.

Наблюдаемые закономерности

1. Сильное и независящее от поперечного импульса подавление выхода частиц при больших p_T .
2. Рост подавления выхода частиц с увеличением энергии.
3. Уменьшение выхода частиц с ростом центральности . столкновения.
4. Отсутствие эффекта подавления в столкновении дейтрона с ядром.
5. Чувствительность подавления от величины слоя вещества, пройденного частицей

КХД на решетке

В КХД на решетке непертурбативные проблемы решаются дискретизацией пространства и времени. Как результат, ультрафиолетовые расходимости (большие шкалы импульсов) исчезают.



- Нулевая барионная плотность, 3 аромата
- Плотность ϵ быстро меняется возле критической температуры T_c
- $T_c = 170$ MeV:
 $\rightarrow \epsilon_c = 0.6 \text{ GeV}/\text{fm}^3$
- при $T \sim 1.2 T_c$ плотность ϵ достигает 80% Stefan-Boltzmann значения для идеального газа, состоящего из q, q, g (ϵ_{SB})

XXXXXXXXXXXXXXXX

Фактор ядерной модификации

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

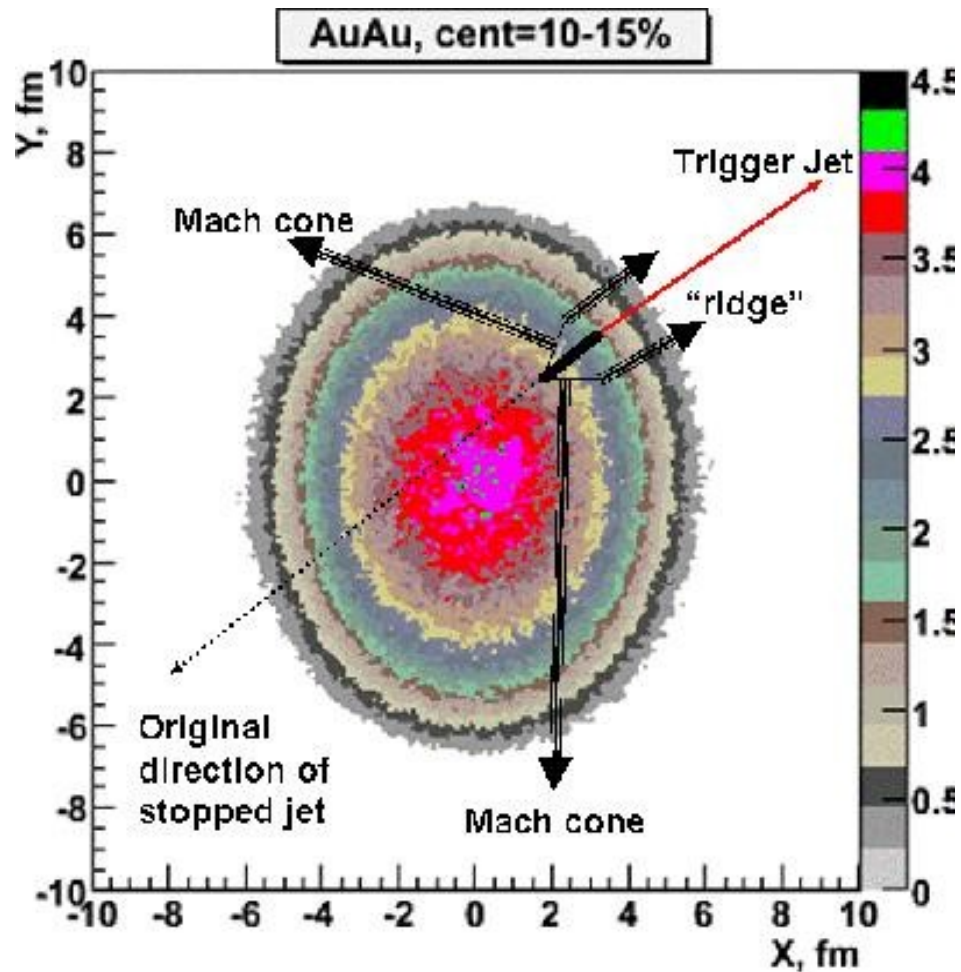
- зависит от сечения $p+p$ столкновения, но не нужны периферические

$R_{AA} = 1$ - для жестких процессов, некогерентная сумма $p+p$ неупругих бинарных столкновений в $A+A$

$$R_{CP} = \frac{\langle N_{\text{coll}}^{\text{periph}} \rangle}{\langle N_{\text{coll}}^{\text{central}} \rangle} \frac{d^2 N_{AA}^{\text{central}} / dp_T d\eta}{d^2 N_{AA}^{\text{periph}} / dp_T d\eta}$$

- не зависит от сечения $p+p$ столкновения, но нужны периферические

Эффект “шлейфа” как обратный всплеск



V. S. Pantuev. (PHENIX) ArXiv:0710.1882 [hep-ex]