



Потоки и корреляции частиц в физике высоких энергий

Дмитрий Сергеевич Блау, НИЦ КИ, МФТИ

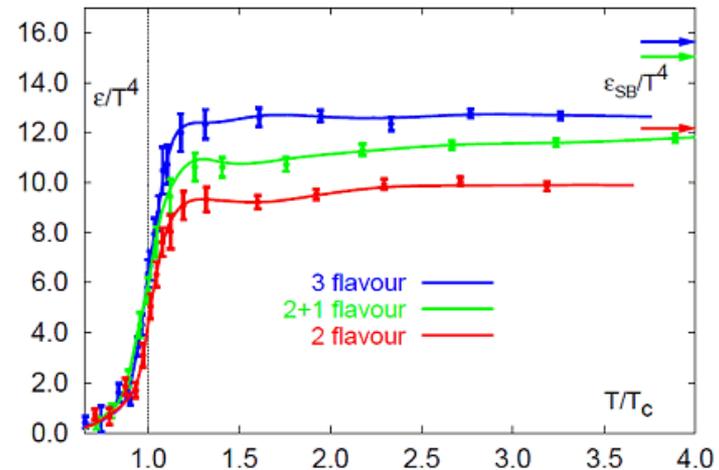
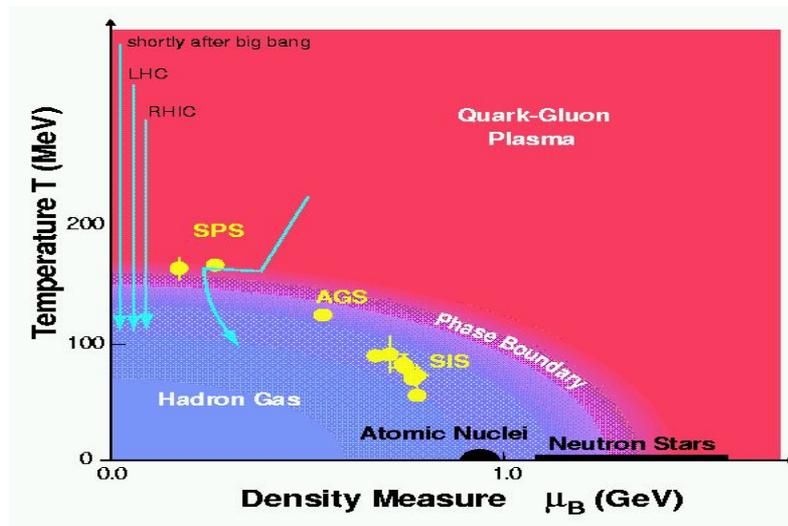
Введение. Кварк-глюонная плазма

Кварк-глюонная плазма (КГП) - состояние адронной материи, в которой кварки и глюоны находятся в состоянии деконфайнмента (свободны).

Фазовый переход между КГП и адронной материей похож на переход между газом и жидкостью, порядок этого фазового перехода – вопрос экспериментального изучения.

Исследуемые наблюдаемые:

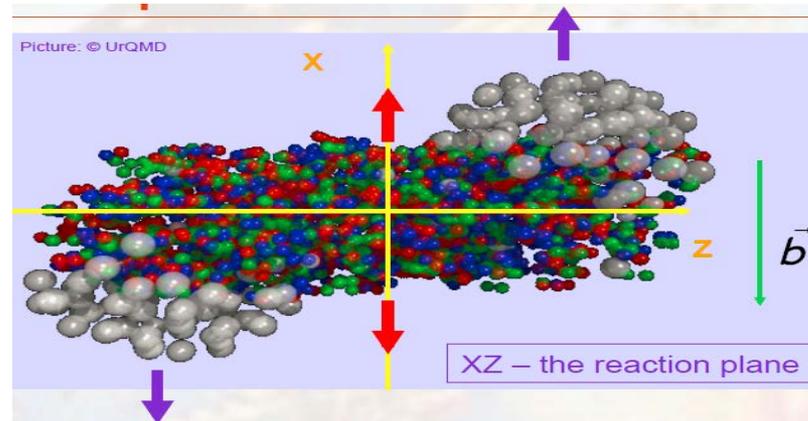
- Фактор ядерной модификации выхода частиц (напр. J/Ψ , странных адронов);
- Выходы частиц (напр., выход прямых фотонов);
- **Потоки и корреляции частиц.**



Frithjof Karsch, Lect. Notes Phys. 583 (2002) 209-249

Решеточные расчеты: плотность энергии в зависимости от температуры

Введение. Коллективные потоки и корреляции



Исследуемые наблюдаемые:

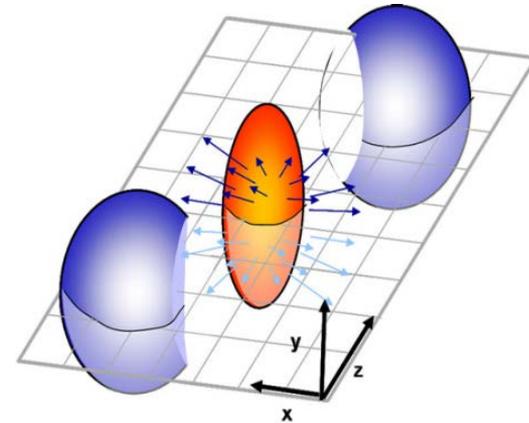
- Коллективные потоки частиц (v_n);
- Двух- и многочастичные корреляции частиц и струй (в зависимости от $\Delta\phi$ и $\Delta\eta$);
- Подавление выхода частиц в зависимости от $\Delta\phi$ ($R_{AA}(p_T, \Delta\phi)$).

Что можно узнать о КГП с помощью этих наблюдаемых?

- Пространственно-временную эволюцию системы;
- Начальную геометрию и ее флуктуации;
- Транспортные свойства (η/s);
- Структуру КГП и эффективное число степеней свободы с помощью жестких наблюдаемых.

Коллективные потоки: введение

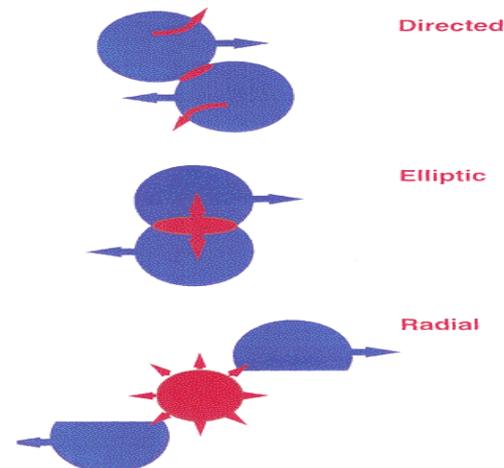
- В случае сильного взаимодействия частиц проявляются коллективные эффекты, т.е. корреляции между положением частицы и ее импульсом.
- В зависимости от энергии столкновения эффекты, приводящие к коллективному движению, различны.
- Раскладывая асимметрию рождения частиц относительно плоскости реакции в ряд Фурье, можно говорить о «направленном», «эллиптическом» и т.д. потоках.



Плоскость реакции (z-x) определяется осью пучка и прицельным параметром сталкивающихся ядер.

$$\frac{dN}{d\varphi} \propto 1 + 2v_1 \cos(\varphi - \Psi_{RP}) + 2v_2 \cos[2(\varphi - \Psi_{RP})] + 2v_3 \cos[3(\varphi - \Psi_{RP})] + \dots$$

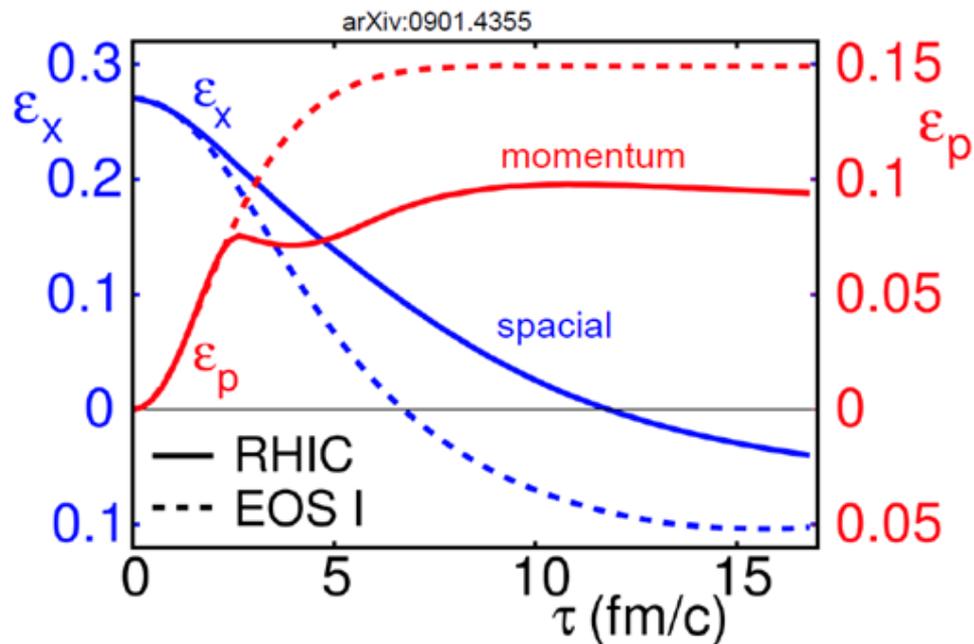
- Изучаются потоки частиц в зависимости от типа частицы, от метода (различный вклад от непотоковых эффектов), от центральности столкновения, от энергии столкновения и т.д.



Временная эволюция пространственной и импульсной асимметрии

- Быстрое падение пространственной анизотропии.
- Быстрое развитие импульсной анизотропии.
- Импульсная анизотропия чувствительна к ранней эволюции системы и уравнению состояния.

EOS1 – безмассовый идеальный газ
EOS RHIC – согласующееся с
решеточными КХД расчетами для RHIC

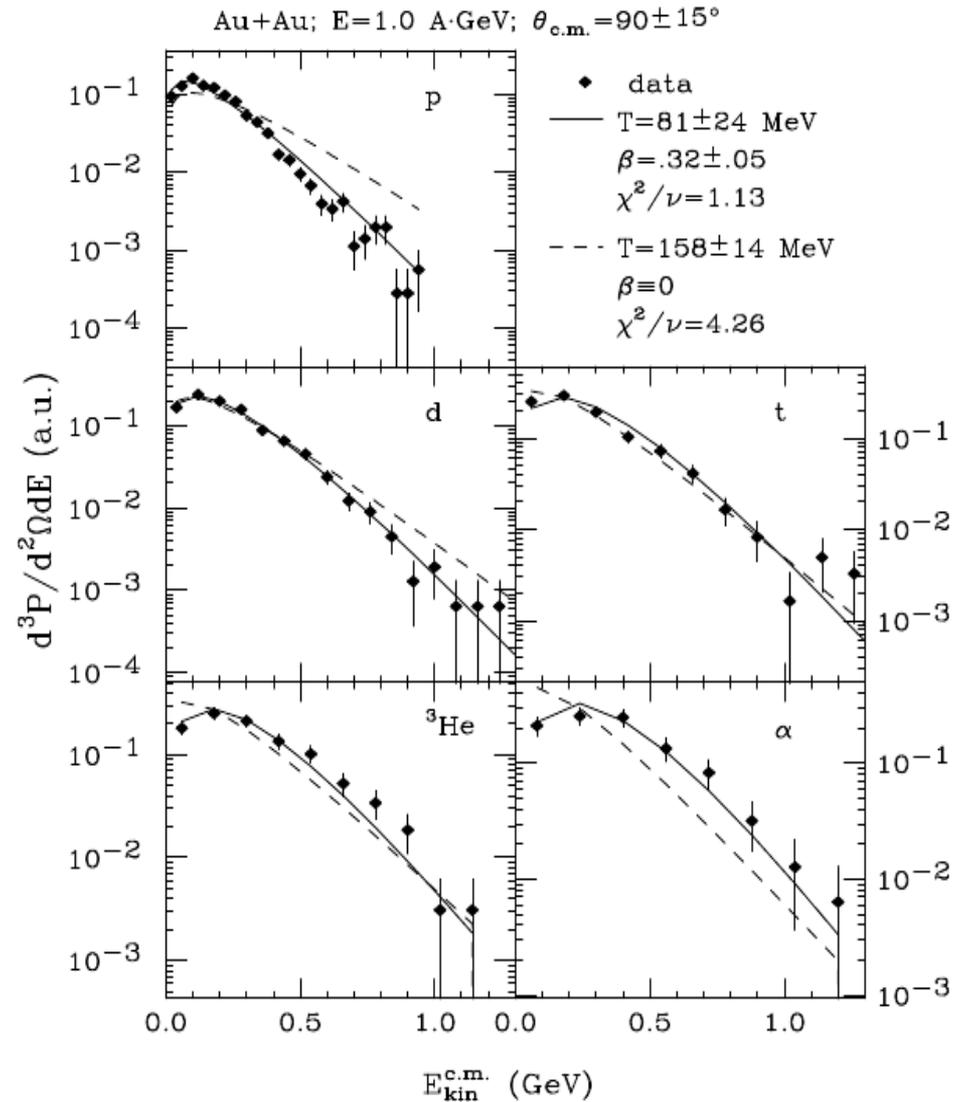
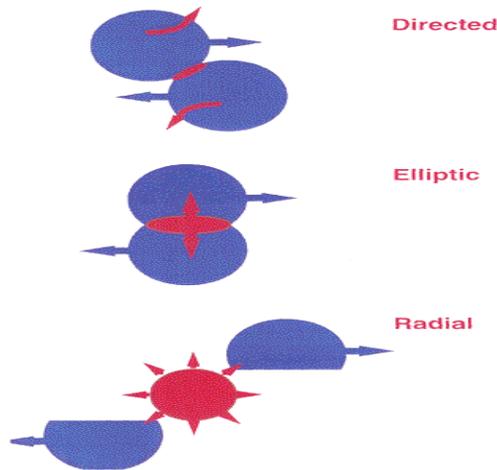


Коллективные потоки: радиальный поток

- Радиальный поток: коллективное ускорение частиц в радиальном направлении. Более массивные частицы ускоряются сильнее (см. презентацию Д.Ю. Пересунько)! В модели взрывной волны (Blast Wave):

$$T = T_{thermo} + m\beta^2$$

- Более массивные частицы дают вклад в «излом» в области малых p_T в спектрах частиц.



Коллективные потоки: методы измерений

- Метод плоскости события (EP);
- Метод скалярного произведения (SP);
- Методы кумулянтов (PC);
- Метод q -распределений;
- Метод Lee-Yang Zeroes (LYZ); Метод преобразований Фурье и Бесселя;
- Непотоковые эффекты и eta gap

Метод плоскости события

- Метод плоскости события (EP);
- Q-вектор — направлен в сторону макс. множественности частиц в азимутальном направлении.
- Ψ_N — угол плоскости события (n-ой гармоники!)
- «Настоящая» плоскость реакции – одна (она определяется прицельным параметром и осью пучка), тогда как плоскости события – некое приближение к ней. Поток максимален в плоскости реакции, любое отклонение от нее (из-за конечности числа частиц) – уменьшает поток. Поэтому, чтобы получить реальный поток в плоскости реакции, требуется поток, измеренный относительно плоскости события разделить на разрешение.

$$Q_{n,x} = \sum_i \omega_i \cos(n\phi_i)$$

$$Q_{n,y} = \sum_i \omega_i \sin(n\phi_i)$$

$$\Psi_n = \arctan\left(\frac{Q_{n,x}}{Q_{n,y}}\right)/n.$$

$$v_n = v_n^{obs} / R_n,$$

$$R_n = \langle \cos[n(\Psi_n - \Psi_{RP})] \rangle$$

- Q-вектор может быть записан в виде комплексного вектора:

$$\vec{Q}_n = \sum_{i \in \text{RFP}} w_i e^{in\phi_i}$$

Метод скалярного произведения

- Метод скалярного произведения - модификация метода плоскости события, когда в качестве веса берется длина Q-вектора:

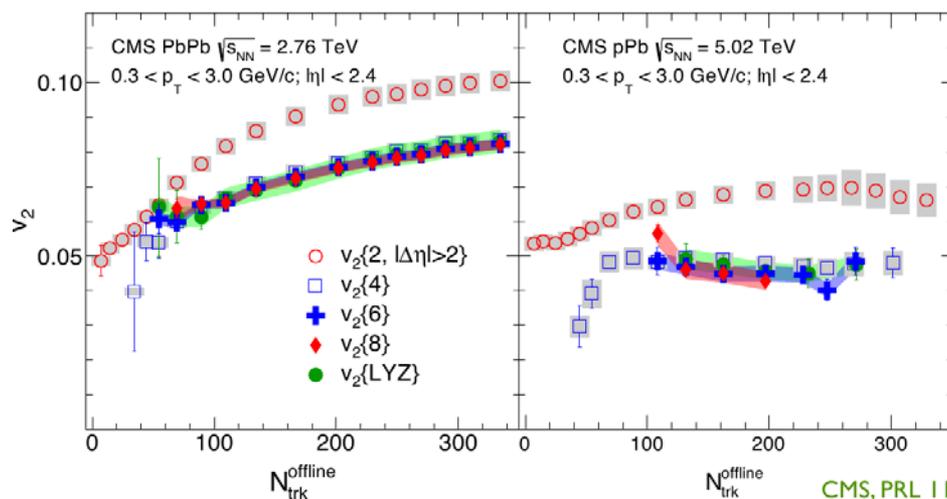
$$v_n(p_T, y) = \frac{\langle Q_n u_{n,i}^*(p_T, y) \rangle}{2\sqrt{\langle Q_n^a Q_n^{b*} \rangle}},$$

- $u_{n,i}$ – единичный вектор частицы (не входит в Q_n), а и b – подсобытия для определения разрешения.
- Этот метод позволяет уменьшить статистическую ошибку измерений.

Методы кумулянтов

- Метод двух- и многочастичных корреляций позволяет значительно уменьшить вклад от непотоковых эффектов, так как последние являются следствием корреляций небольшого числа частиц.

$$v_n\{2\}^2 = \langle \cos[n(\phi_1 - \phi_2)] \rangle = \langle u_{n,1} u_{n,2}^* \rangle$$



CMS, PRL 115 (2015) 012301

Cumulant method:

The idea of using 2k-particle cumulants is to suppress the non-flow contribution by eliminating the correlations which act between fewer than 2k particles.

$$c_n\{2\} = \langle\langle 2 \rangle\rangle$$

$$c_n\{4\} = \langle\langle 4 \rangle\rangle - 2\langle\langle 2 \rangle\rangle^2$$

$$c_n\{6\} = \langle\langle 6 \rangle\rangle - 9\langle\langle 4 \rangle\rangle\langle\langle 2 \rangle\rangle + 12\langle\langle 2 \rangle\rangle^3$$

→

$$v_n\{2\} = \sqrt{c_n\{2\}}$$

$$v_n\{4\} = \sqrt[4]{-c_n\{4\}}$$

$$v_n\{6\} = \sqrt[6]{\frac{1}{4}c_n\{6\}}$$

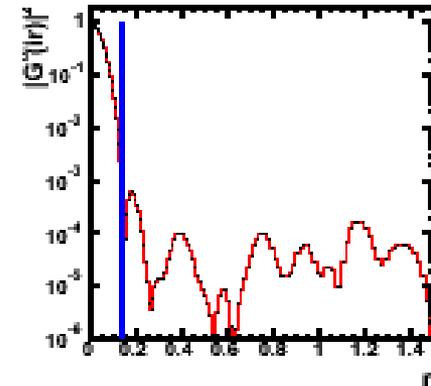
Метод нулей Ли-Янга

- Корреляция всех частиц в событии \rightarrow исключение непотоковых эффектов.
- Проекция вектора Q_2 на лабораторный угол Θ .

$$Q_2^\Theta = \sum_{i=1}^M w_i \cos[2(\phi_i - \Theta)]$$

- Метод основан на поиске нулей генерирующей функции:

$$G_2^\Theta(ir) = |\langle e^{irQ_2^\Theta} \rangle|$$



- Положение первого нуля генерирующей функции связано с потоком следующим образом:

$$V_2^\Theta = j_{01}/r_0^\Theta$$

$$v_2 = \langle V_2^\Theta \rangle_\Theta / M$$

- Метод работает только при достаточно большом соотношении сигнала к шуму.
- Метод преобразований Фурье и Бесселя – похож на метод нулей Ли-Янга.

$f_0(Q_{n,x})$ - распределение x-компоненты Q-вектора.

$$\begin{aligned} f(k) = \langle e^{ikQ_{n,x}} \rangle &= \int \frac{d\Psi}{2\pi} \int dQ_{n,x} e^{ikQ_{n,x}} f_0(Q_{n,x} - v_n M \cos(n\Psi)) = & v_n = j_{01}/(k_1 M) \\ &= \int \frac{d\Psi}{2\pi} e^{ikv_n M \cos(n\Psi)} \int dt e^{ikt} f_0(t) = J_0(kv_n M) \tilde{f}_0(k) \end{aligned}$$

Метод q-распределений

- Q-вектор растет как корень квадратный из множественности M в отсутствии корреляций. q_n – укороченный вектор потока.
- Его распределение при $M \gg 1$:

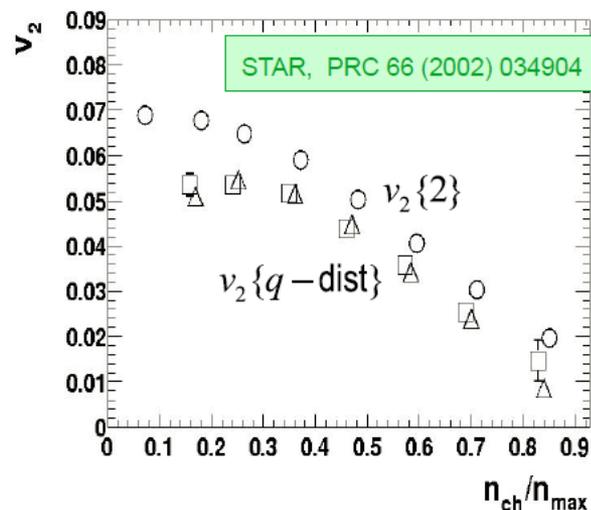
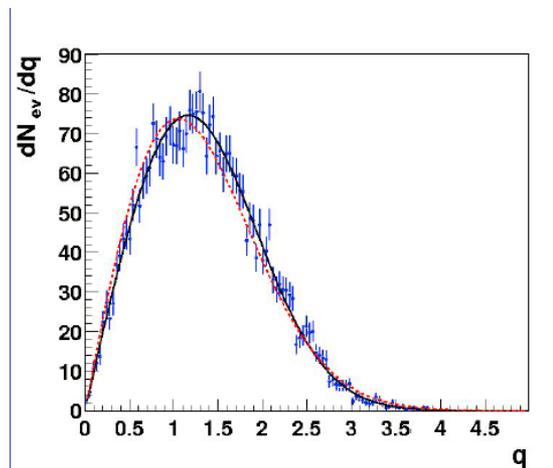
$$\frac{dN}{dq_n} = \frac{q_n}{\sigma_n^2} e^{-\frac{v_n^2 M + q_n^2}{2\sigma_n^2}} I_0\left(\frac{q_n v_n \sqrt{M}}{\sigma_n^2}\right)$$

$$q_n = Q_n / \sqrt{M}$$

$$\sigma_n^2 = 0.5(1 + g_n)$$

nonflow effects

- Фитируя распределение q-векторов можно получить v_n и σ – ширину распределения, на которую влияют флуктуации и непотоковые корреляции.



Non-flow и eta gap

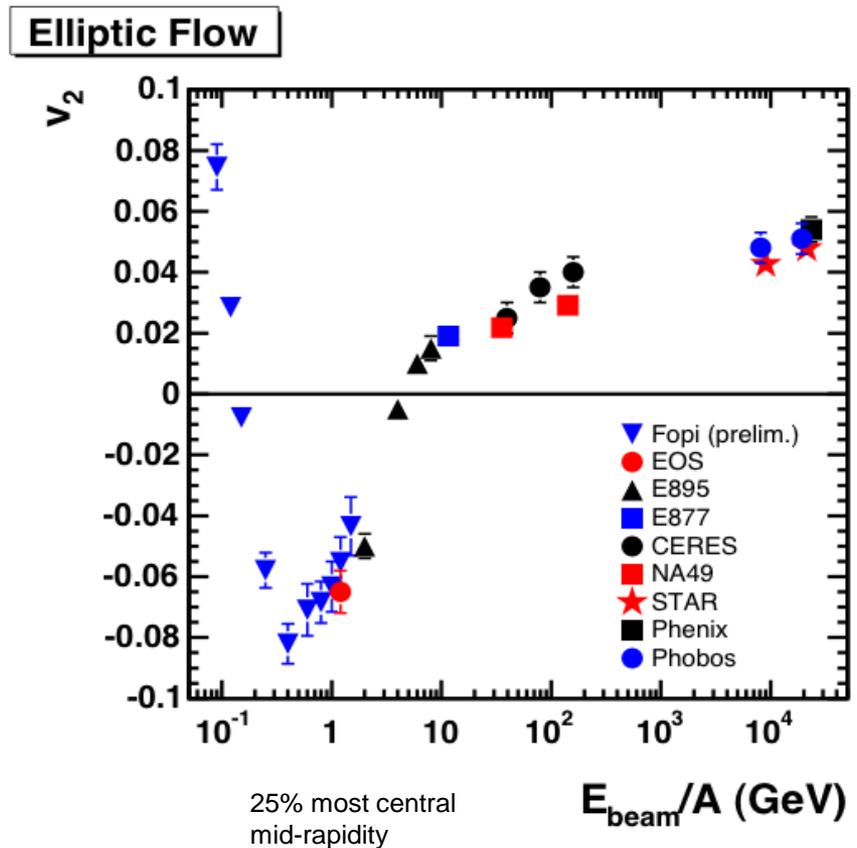
- Как двухчастичные, так и корреляции с плоскостью события (EP-метод) содержат кроме потоковых эффектов, также так называемые непотоковые (non-flow), например, корреляции от фрагментировавших струй. Поскольку такие корреляции обычно короткие, то введение так называемого «зазора» по быстрой значительно уменьшает вклад непотоковых эффектов:

$$\begin{aligned} \frac{d^2n}{d\varphi_1 d\varphi_2} &\propto \int \frac{d\Psi_{RP}}{2\pi} \left\{ 1 + \sum_n 2v_n \cos[n(\varphi_1 - \Psi_{RP})] \right\} \left\{ 1 + \sum_n 2v_n \cos[n(\varphi_2 - \Psi_{RP})] \right\} = \\ &= 1 + \sum_n 2v_n^2 \cos[n(\varphi_1 - \varphi_2)] \Rightarrow \langle \cos^2[n(\varphi_1 - \varphi_2)] \rangle = v_n^2 + \delta \end{aligned}$$

- δ – вклад non-flow.
- В случае двухчастичных корреляций две частицы берутся из разных интервалов по псевдобыстройте. В случае корреляции с плоскостью события, плоскость события строится по частицам из детектора, расположенным в одной области по псевдобыстройте, а частицы, которые коррелируются с ней, - из другой.

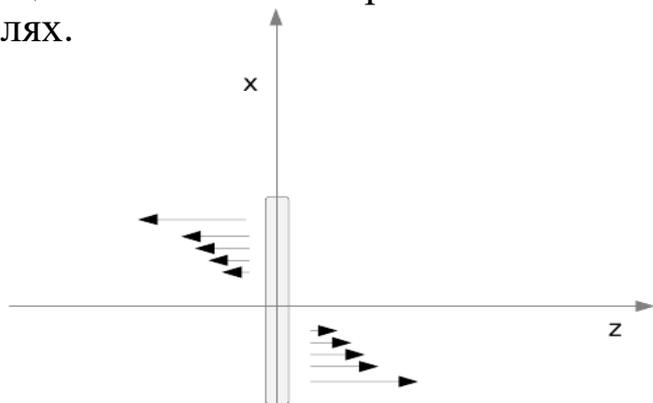
Коллективные потоки: эксперимент

- Направленный поток (v_1)
- Эффект squeeze-out (Plastic Ball @ Bevalac, FOPI);
- Эллиптические потоки на RHIC, LHC. Влияние радиальных потоков на v_n идентифицированных частиц;
- Эффект кваркового скейлинга;
- High-pT v_2 ;
- $R_{AA}(\Delta\phi)$;
- v_3 ;
- Потоки высших гармоник;
- Зависимость потоков от бытроты;
- Коллективные потоки в малых системах (dAu, pPb). Сравнение с hot quark matter.
- Beam energy scan: сравнение потоков при различных энергиях столкновений;
- Потоки в Pb-Pb при $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ ТэВ (LHC Run 2).



Коллективные потоки: эксперимент. v_1

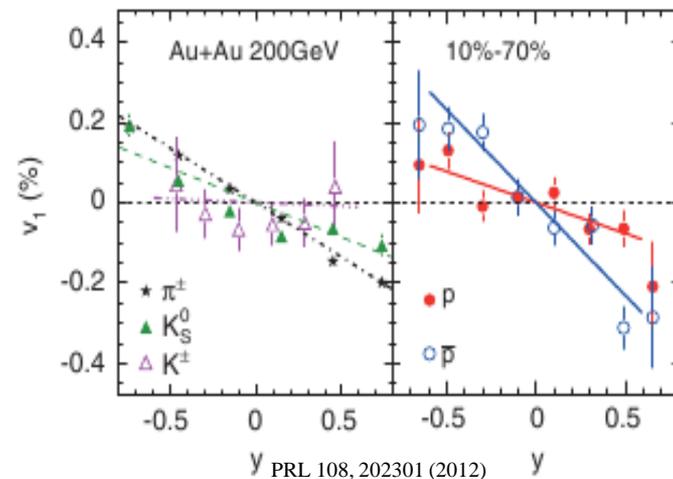
- Направленный поток (v_1)
- Из-за взаимодействия частиц со средой изменяется профиль скоростей вдоль оси пучка z , что приводит к асимметрии в выходе частиц при заданной скорости.
- Измеренные v_1 для различных типов частиц можно описать в различных моделях.



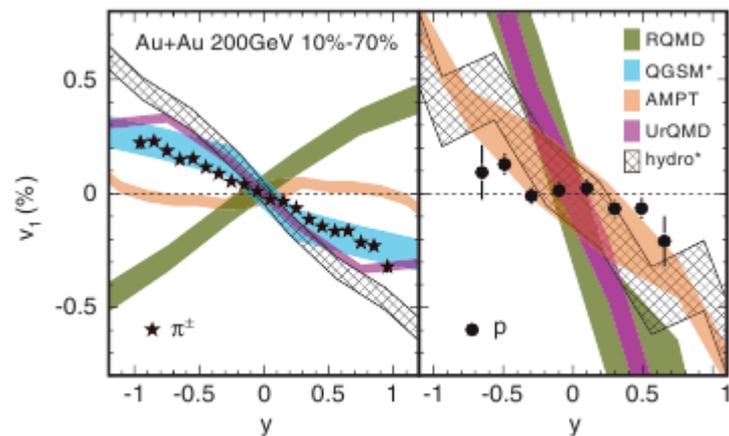
RHIC @ BNL



STAR

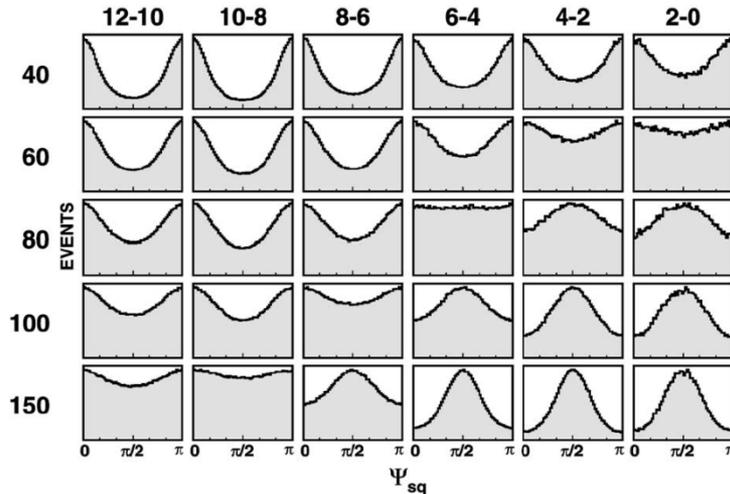
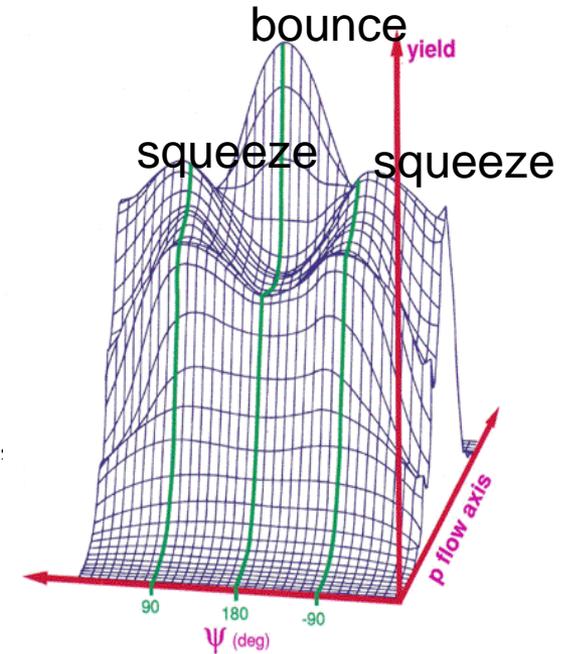


v_1 для π^{\pm} , K^{\pm} , K_S^0 , p , \bar{p} в Au-Au столкновениях при $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV, центральность 10-70%, эксперимент STAR.



Коллективные потоки: эксперимент. Squeeze-out

- При небольших энергиях, таких как на ускорителе Bevalac (0,4 ГэВ/нуклон), участники в плоскости реакции подвергаются «затенению» со стороны наблюдателей, не успевающих покинуть зону реакции и мешающих участникам распространяться в плоскость реакции.
- В этом случае участники как бы выжимаются из плоскости реакции, и большая ось эллипсоида направлена перпендикулярно плоскости реакции. Такой эллиптический поток называется «out-of-plane» т.е. «вне плоскости реакции», он был обнаружен на ускорителе Bevalac (Беркли, США) и сначала был назван «squeeze-out», т.е. «выжимание».

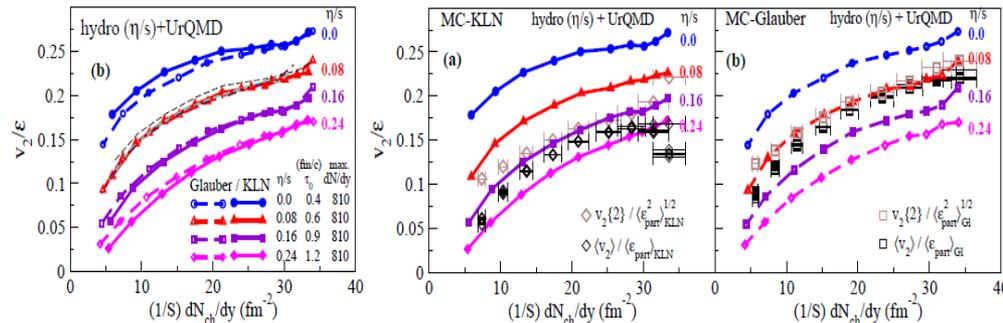
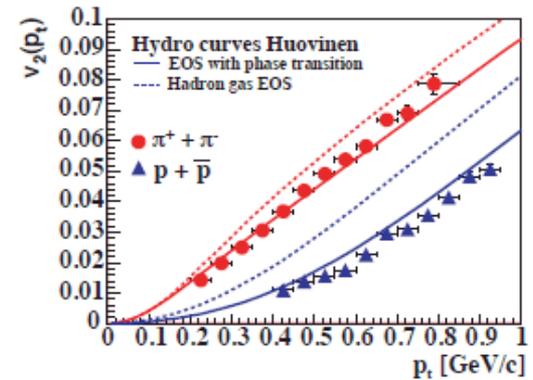
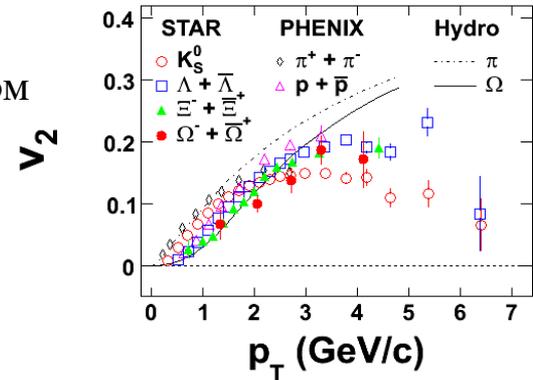


Коллективные потоки: эксперимент. v_2

- RHIC: измеренные коллективные потоки описываются гидродинамическими моделями (а не моделями адронного газа) с низкой сдвиговой вязкостью к энтропии – η/s .
- Гидродинамика переводит начальную пространственную анизотропию в импульсную анизотропию частиц в конечном состоянии:

$$\epsilon_x = \frac{\langle (y^2 - x^2) \rangle}{\langle (y^2 + x^2) \rangle} \rightarrow \epsilon_p = \frac{\langle T^{xx} - T^{yy} \rangle}{\langle T^{xx} + T^{yy} \rangle}$$

- Чем выше вязкость – тем меньше наблюдаемый поток.
- Эллиптический поток на RHIC описывается модельными расчетами (VISHNU) с $\eta/s=0.16$, на LHC – $\eta/s=0.20$.



U.Heinz, C.Shen, H. Song “The Viscosity of Quark-Gluon Plasma at RHIC and the LHC”, 1108.5323v1

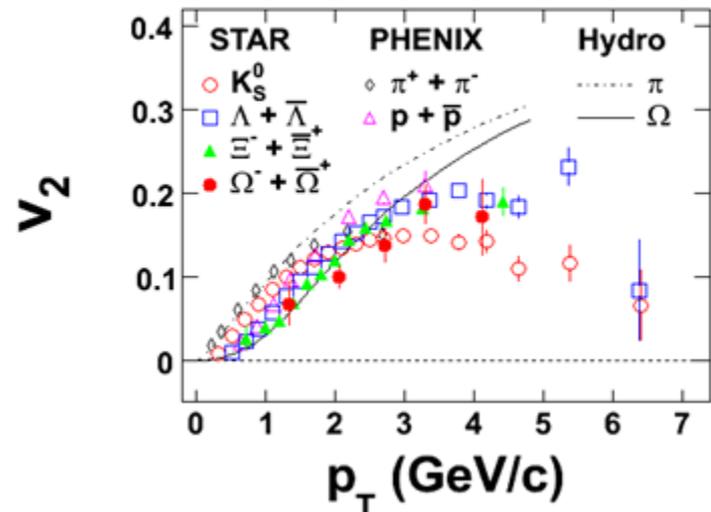
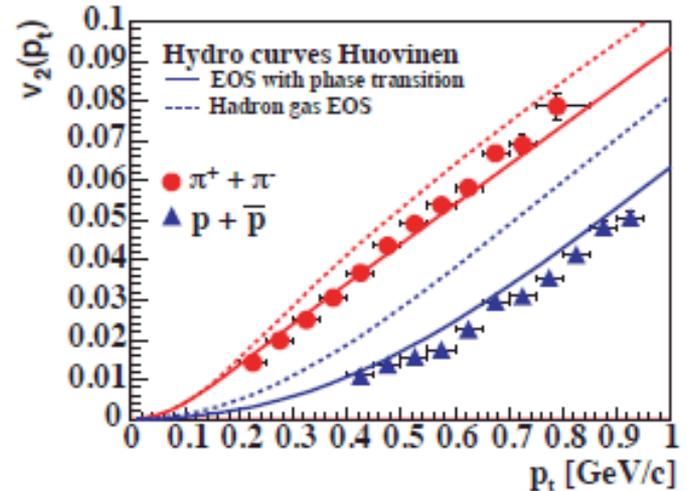
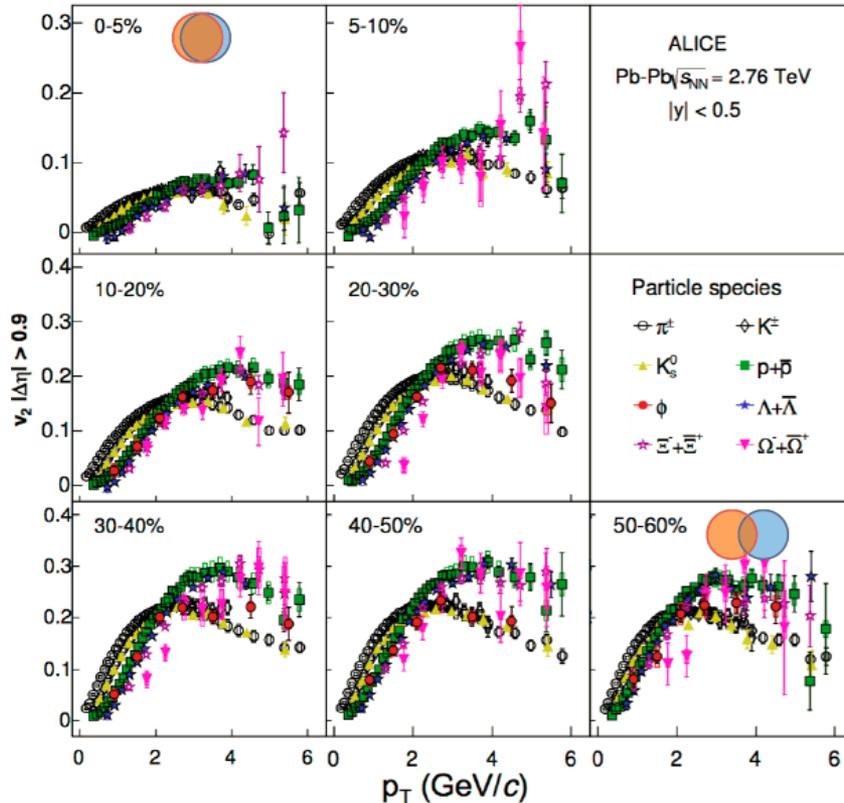
P. Huovinen, P. F. Kolb, U.W. Heinz, P. V. Ruuskanen and S. A. Voloshin, Phys. Lett. B 503 (2001)
 J. Adams et al., (STAR Collaboration), Nucl.Phys. A757 (2005) 102
 K. Adcox et al., (PHENIX Collaboration), Nucl. Phys. A757, (2005) 184

Коллективные потоки: эксперимент. v_2

- Потоки идентифицированных частиц: взаимодействие с радиальным потоком – проверка предсказаний моделей.
- Радиальный поток сильнее в центральных столкновениях (больше разделение между частицами с разной массой).

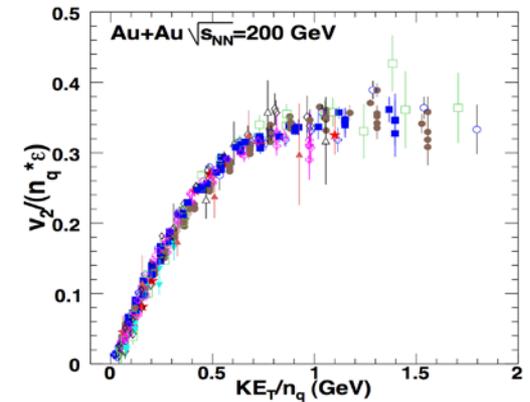
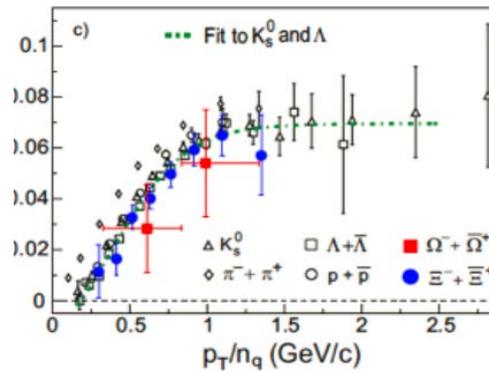
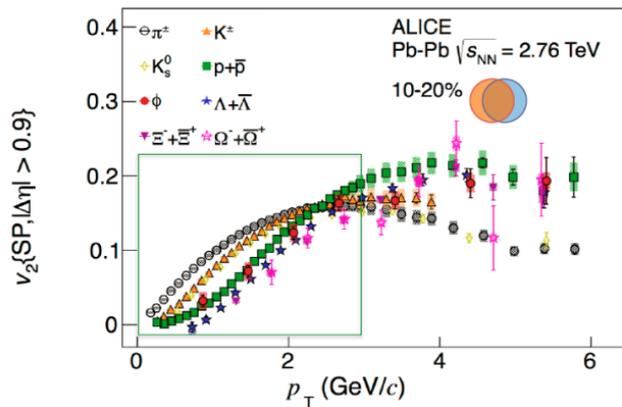
P. Huovinen, P. F. Kolb, U.W. Heinz, P. V. Ruuskanen and S. A. Voloshin, Phys. Lett. B 503 (2001)
 J. Adams et al., (STAR Collaboration), Nucl.Phys. A757 (2005) 102
 K. Adcox et al., (PHENIX Collaboration), Nucl. Phys. A757, (2005) 184

v_2 in Pb-Pb for different centralities



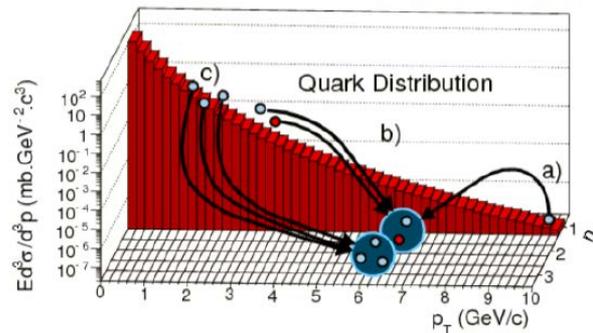
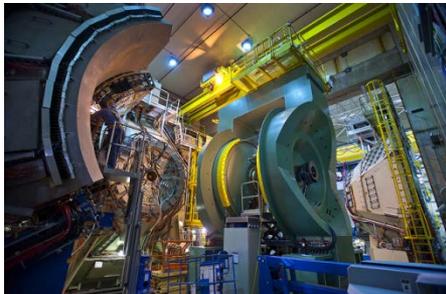
Коллективные потоки: эксперимент. Эффект кваркового скейлинга

- v_2 мезонов (кварк-антикварк) и барионов (три кварка или антикварка) группируется.
- Скейлинг на число кварков приблизительно (с точностью $\sim 20\%$ на RHIC) выстраивает частицы разных типов на одну кривую.
- Наиболее распространенное объяснение этой картины – коалесценция кварков.

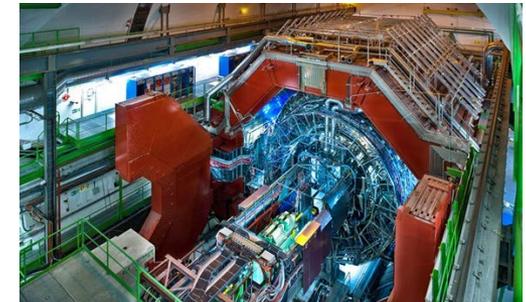


Eur.Phys.J.C62:237-242,2009

PHENIX

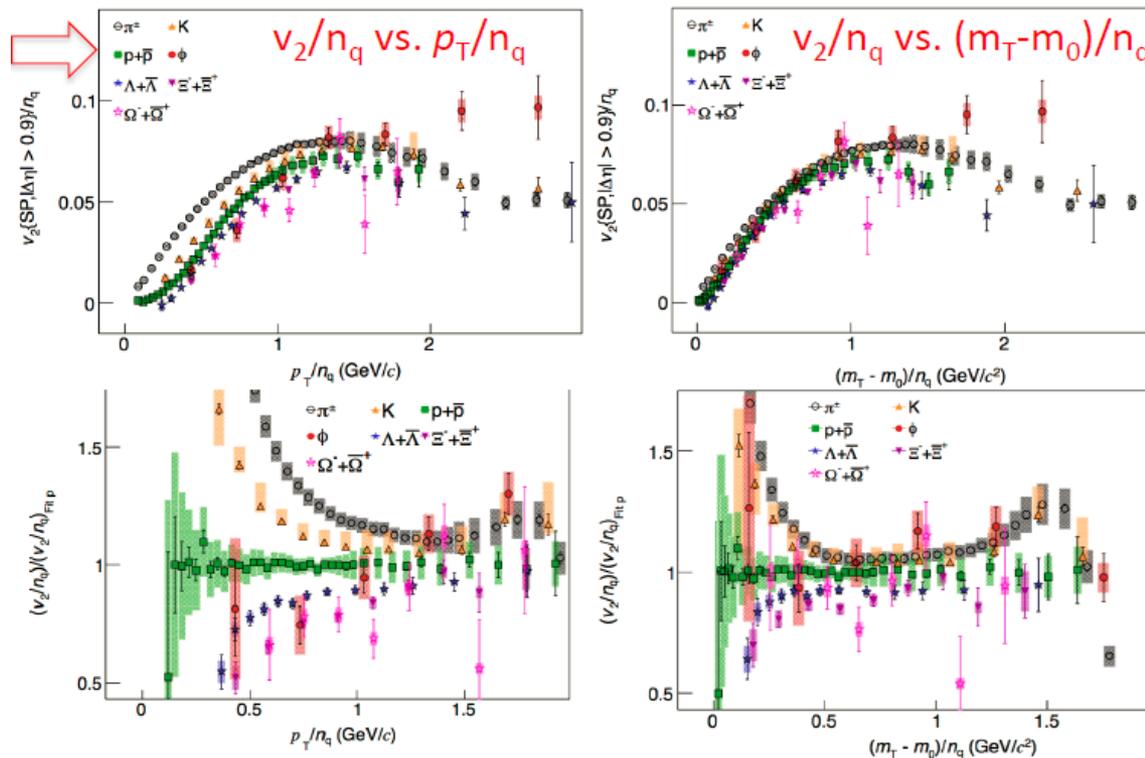


ALICE

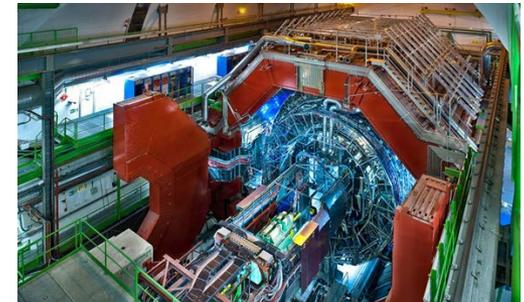


Коллективные потоки: эксперимент. Эффект кваркового скейлинга (ALICE)

- Скейлинг в результатах, полученных ALICE при более высоких, чем на RHIC, энергиях, также соблюдается приблизительно в пределах 20% (выше 0.5 GeV/c).

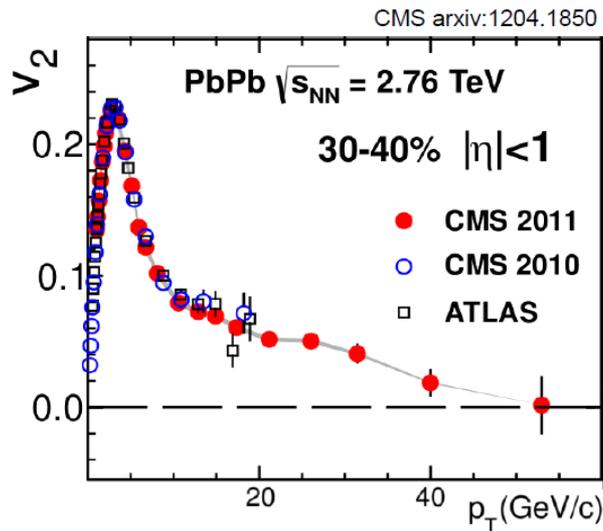


ALICE

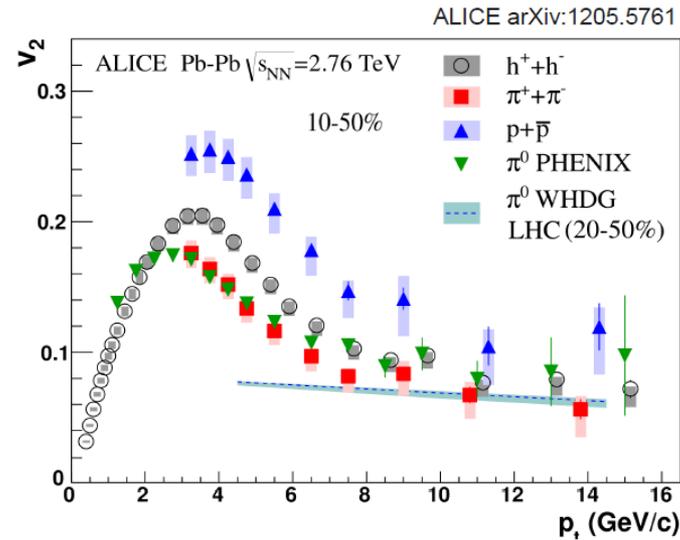


Коллективные потоки: эксперимент. Высокие p_T .

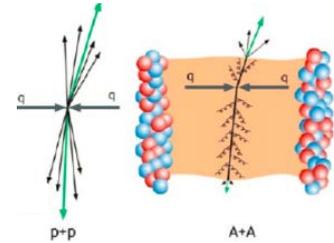
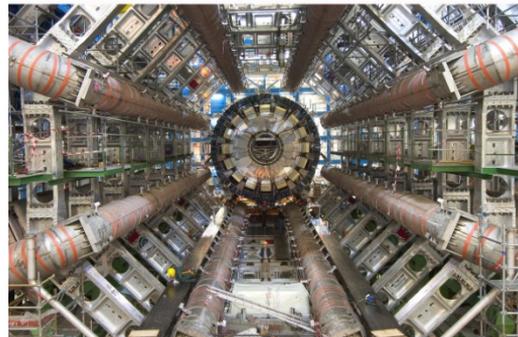
- Ненулевой v_2 сохраняется вплоть до больших p_T (~ 40 GeV/c). Существенное влияние взаимодействия партонов со средой и эффекта гашения струй на потоки (различное расстояние, которое проходят частицы в и вне плоскости реакции).
- Разница между различными типами частиц сохраняется вплоть до больших $p_T \rightarrow$ различная фрагментация различных типов частиц.



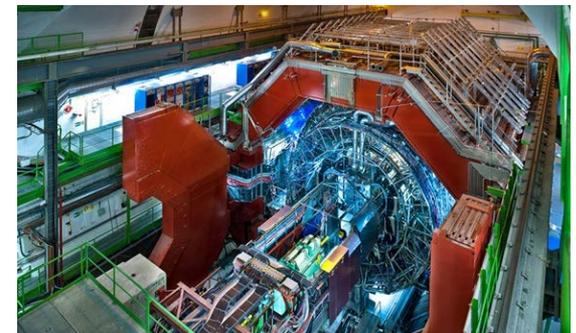
CMS



ATLAS

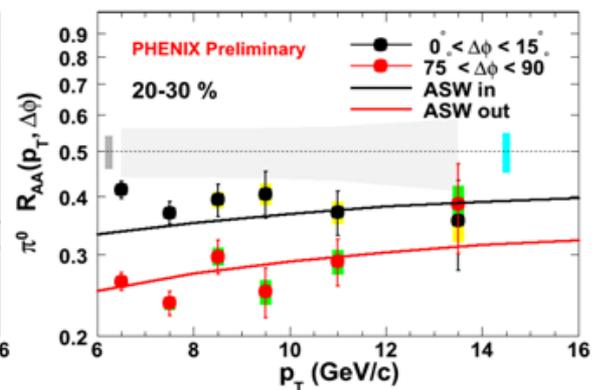
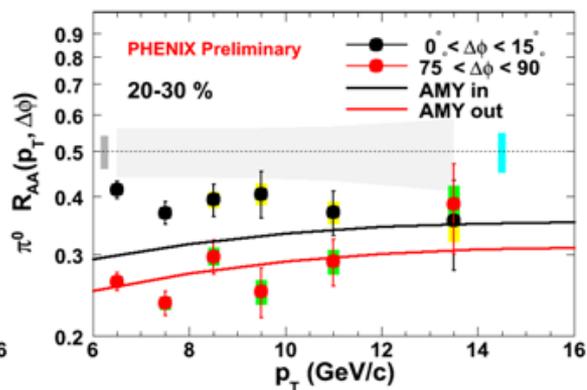
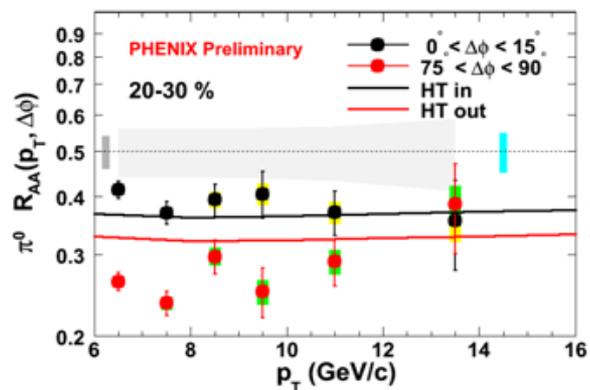
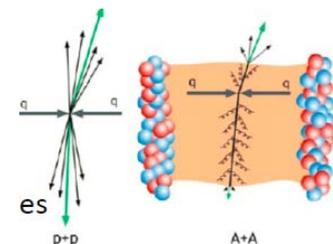


ALICE

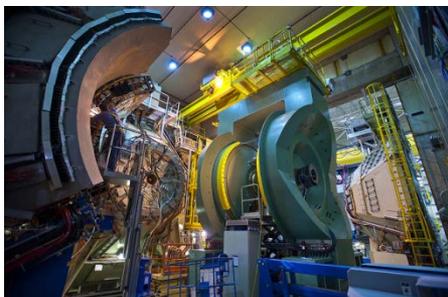


Коллективные потоки: эксперимент. $R_{AA}(\Delta\phi, p_T)$

- Фактор ядерной модификации R_{AA} – отношение инвариантного спектра в ядро-ядерных столкновениях к спектру в pp столкновениях, нормированному на число бинарных нуклон-нуклонных столкновений.
- R_{AA} можно мерить в зависимости от угла $\Delta\phi$ (между частицей и плоскостью реакции) \rightarrow зависимость от расстояния, пройденного частицей в среде.

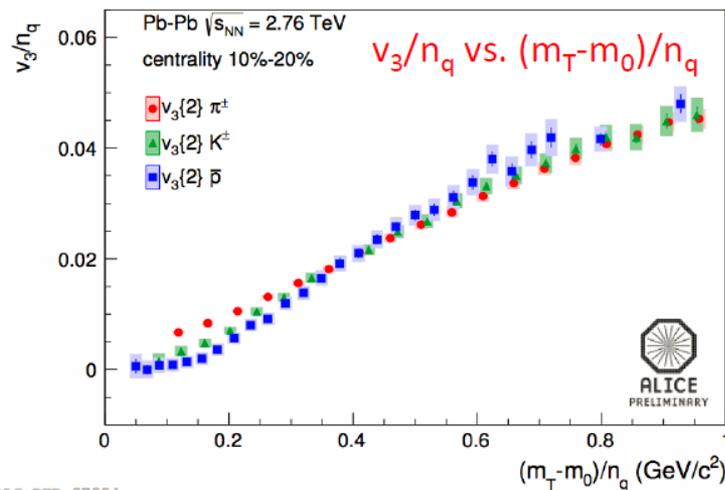
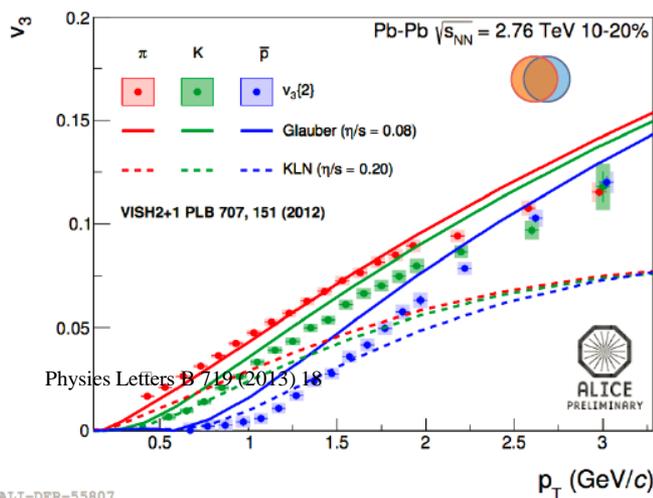
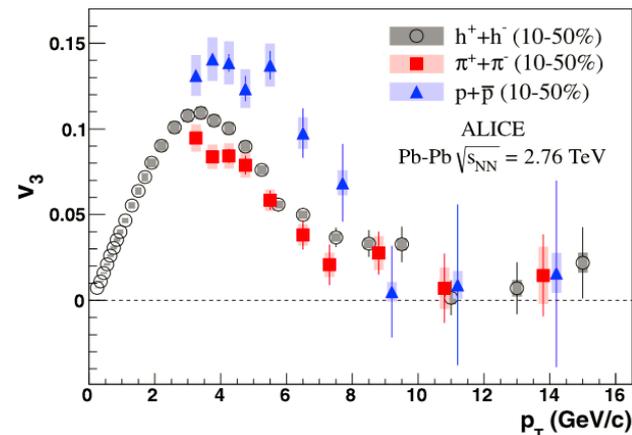


PHENIX



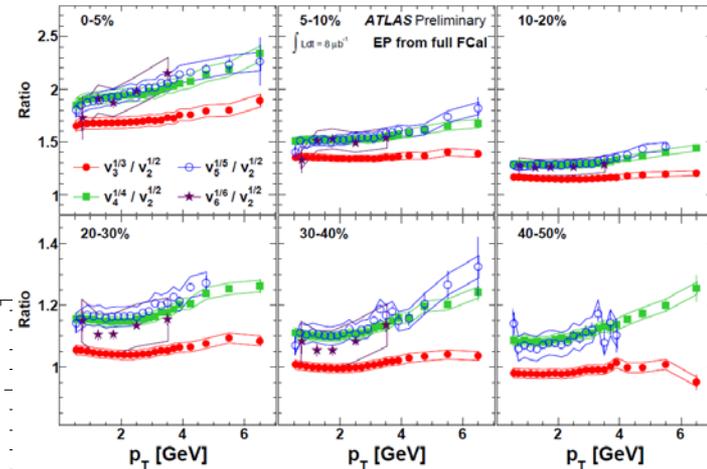
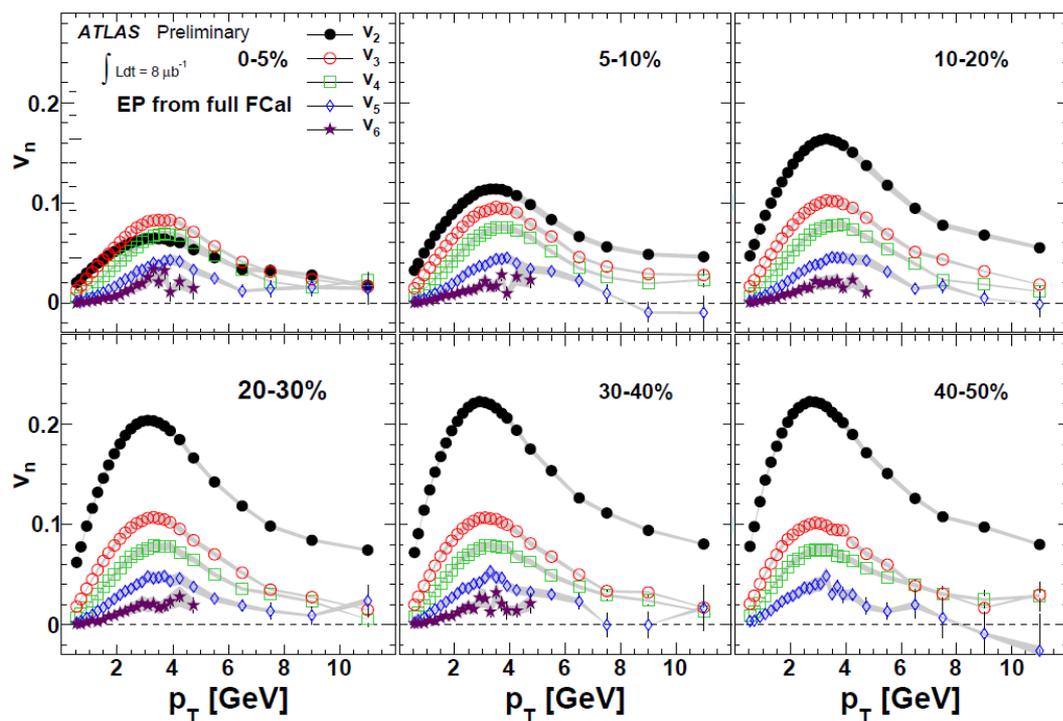
Коллективные потоки: эксперимент. v_3

- Причина возникновения v_3 (и более высоких гармоник) – флуктуации начального пространственного распределения провзаимодействовавших нуклонов.
- Скейлинг на число конституэнтных кварков – аналогично v_2 .
- Вплоть до ~ 8 ГэВ/с сохраняется разница между протонами и пионами.

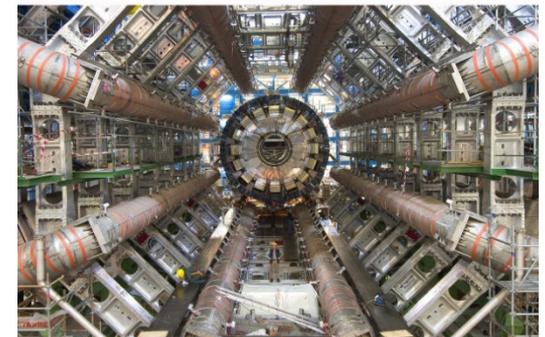


Коллективные потоки: эксперимент. потоки высших гармоник

- v_n вплоть до 6-ой гармоники померены в эксперименте ATLAS.
- Обнаружен скейлинг $v_n^{1/n} = k_n v_2^{1/2}$
- Коэффициенты k_n слабо зависят от p_T , но довольно сильно – от центральности.

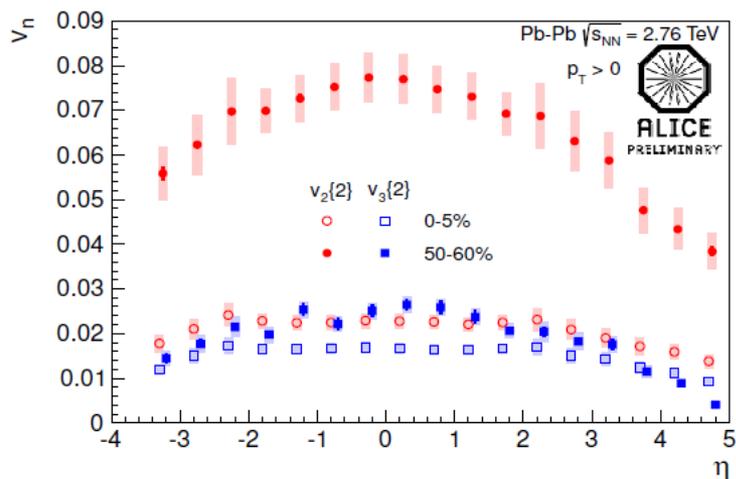


ATLAS

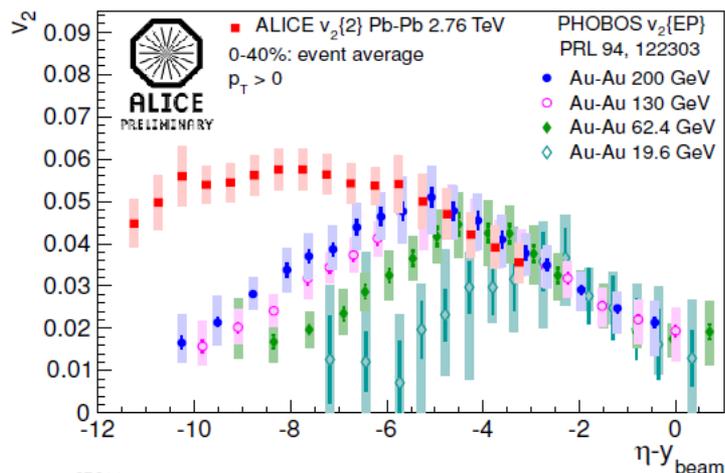


Коллективные потоки: зависимость от псевдобыстроты

- v_2, v_3 практически не зависят от псевдобыстроты в области $|\eta| < 2$. Вне этой области – небольшое уменьшение.
- Наблюдается эффект скейлинга v_2 , если откладывать его в зависимости от $\eta - y_{\text{beam}}$ (быстрота пучка). Энергия пучка меняется на два порядка!



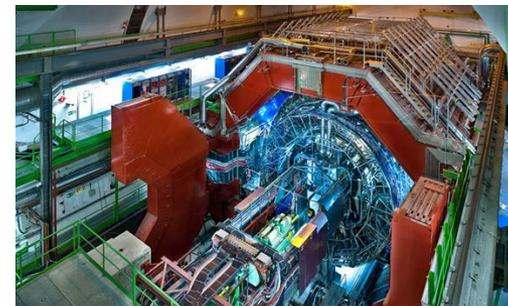
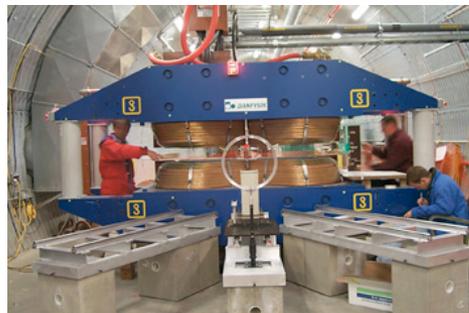
ALI-PREL-28033



ALI-PREL-27811

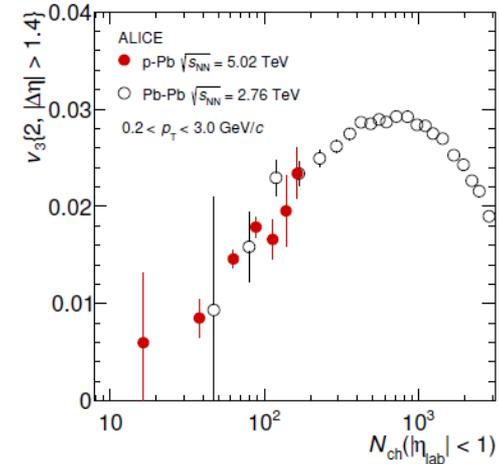
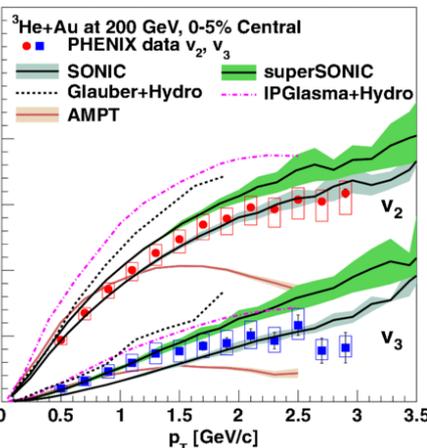
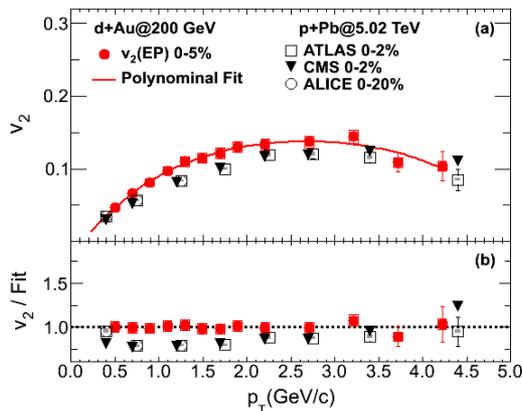
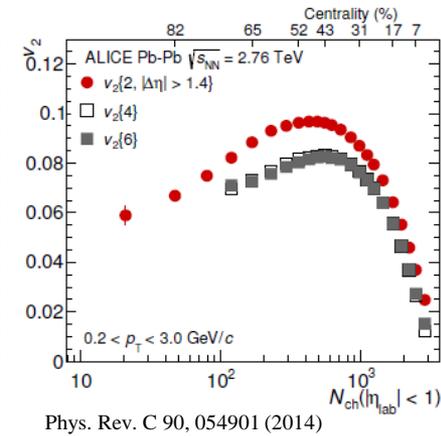
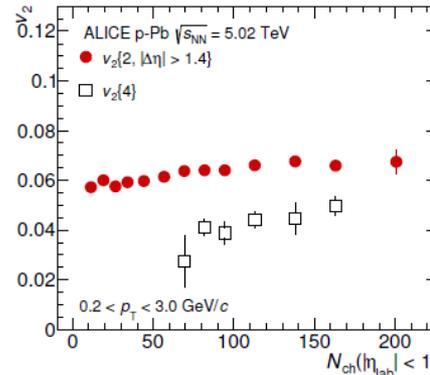
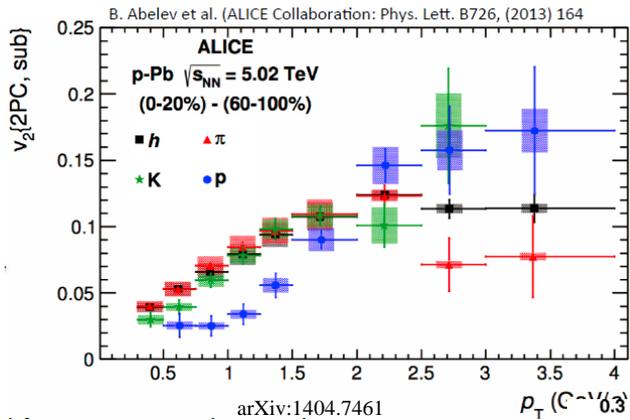
PHOBOS

ALICE



Коллективные потоки: потоки в малых системах (dAu, pPb)

- В малых системах – слишком мало частиц, чтобы достичь равновесного состояния. Нет образования кварк-глюонной плазмы. → Эффекты «холодной ядерной материи» (cold nuclear matter effects)
- Но сохраняются коллективные эффекты (в событиях с высокой множественностью)! v_2, v_3 сравнимы с Au-Au, Pb-Pb.



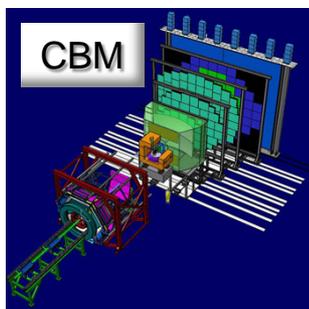
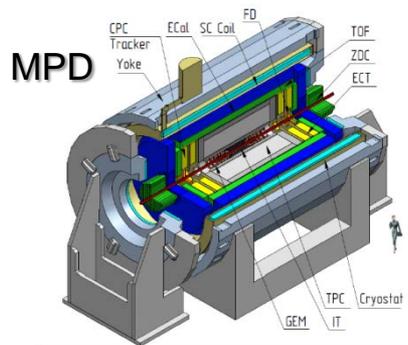
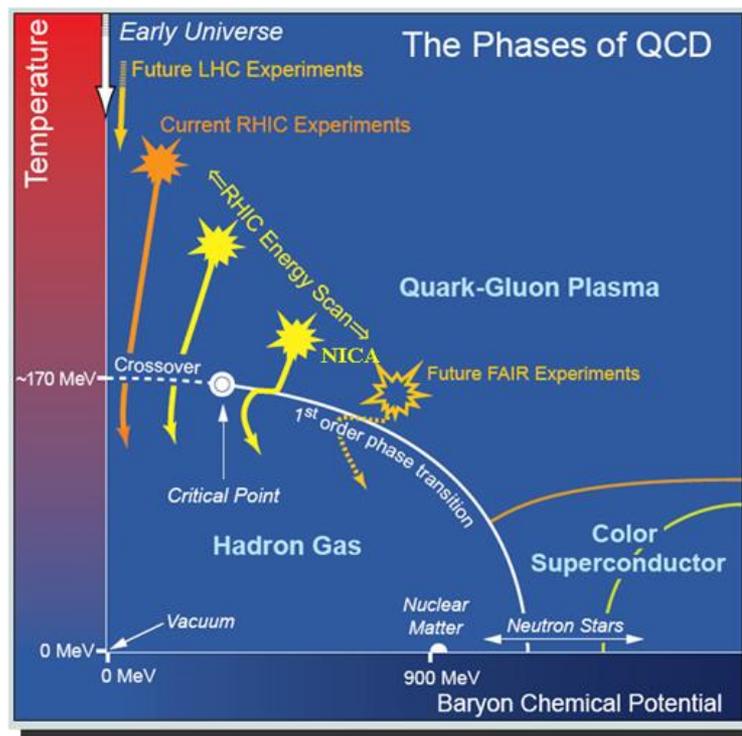
Коллективные потоки: beam energy scan и поиски трикритической точки

Действующие эксперименты:

- STAR, PHENIX @ RHIC
- NA49/NA61 (SHINE) @ CERN
- HADES @ GSI

В стадии подготовки

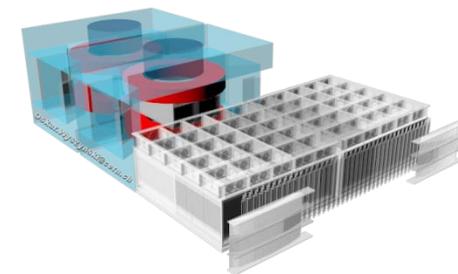
- NICA @ Dubna
- CBM @ GSI



HADES



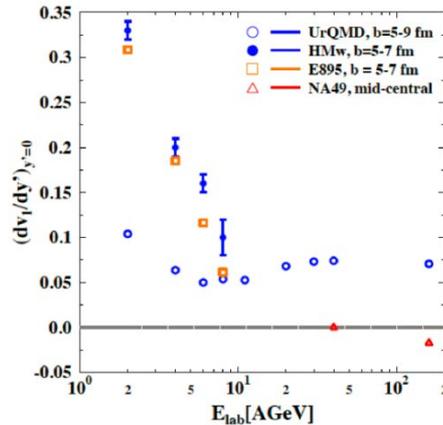
NA61/SHINE



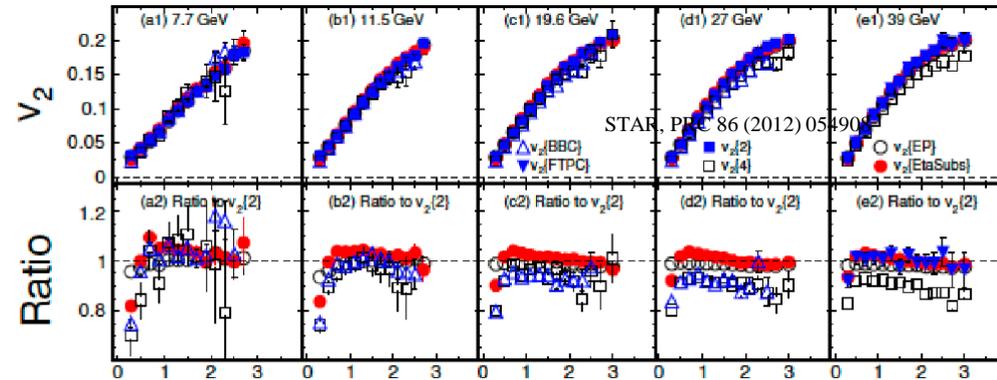
Коллективные потоки: beam energy scan и поиски трикритической точки

Результаты RHIC BES:

- v_2 мало меняется с энергией;
- v_1 – немонотонный наклон (меняет знак) – свидетельство фазового перехода первого рода?
- NA49:

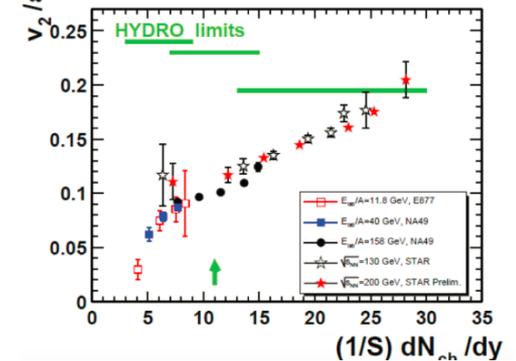


PHENIX

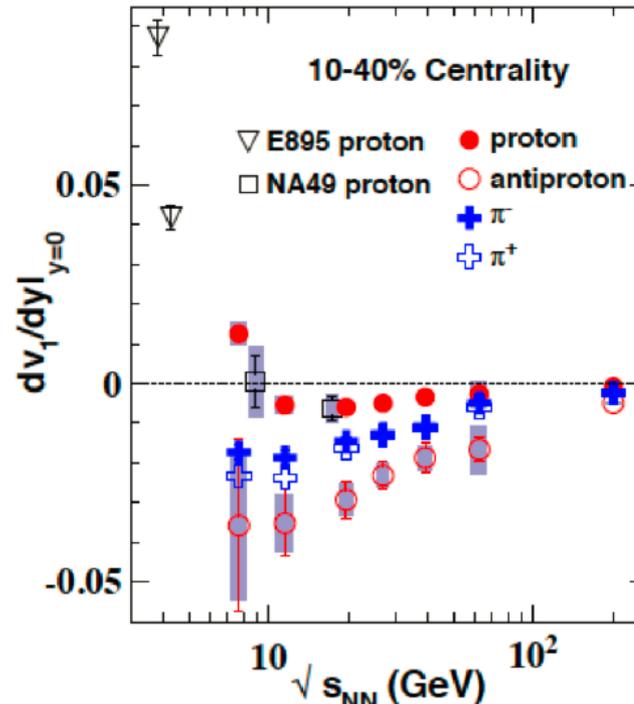


p_T (GeV/c)

Voloshin, Snellings, Poskanzer, arXiv: 0809.2949

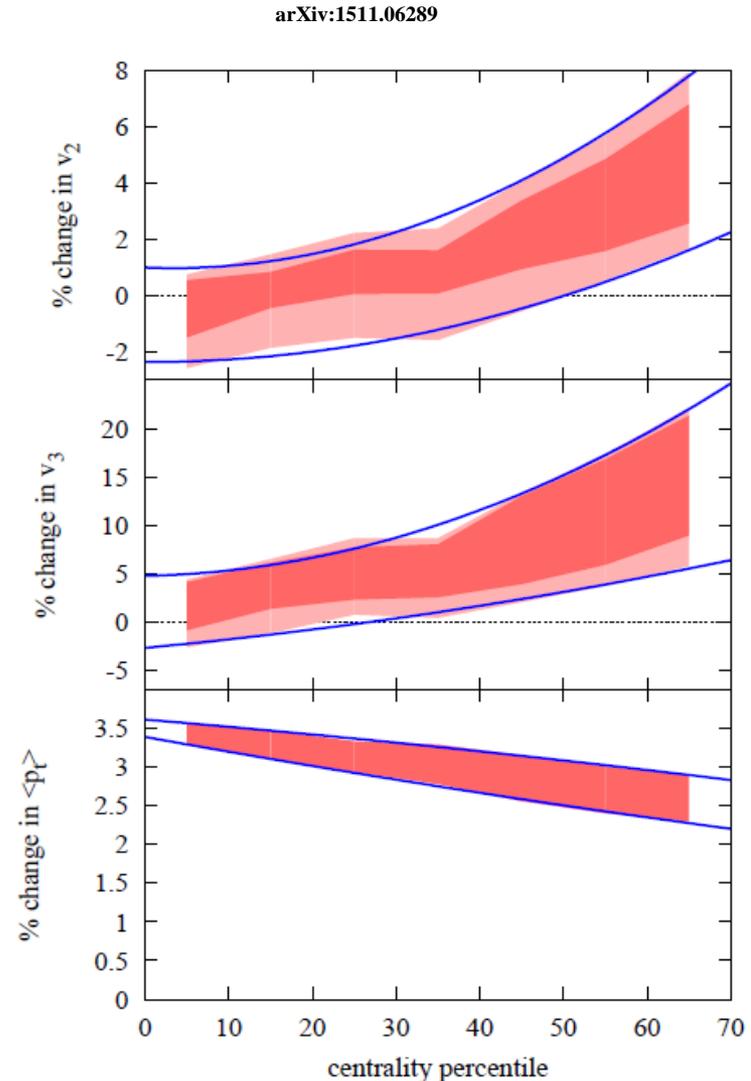


STAR



Коллективные потоки: предсказания для LHC HI Run 2015.

- 11.2015-12.2015 – Тяжелоионный сеанс Pb+Pb на LHC при энергии 5.02 ТэВ на пару нуклонов (сеансы 2010-2011 годов – 2.76 ТэВ на пару нуклонов)
- Изменение в множественности (предсказанное): $\sim 19.7\%$ ($dN/d\eta \sim s^{0.15}$)
- Изменения: эксцентриситет, гидродинамический отклик (независим от начальных условий)
- Предсказано увеличение v_2 и v_3 на несколько процентов, по сравнению с данными сеансов 2.76 ТэВ.
- Измерения покажут, насколько справедливы предсказания!

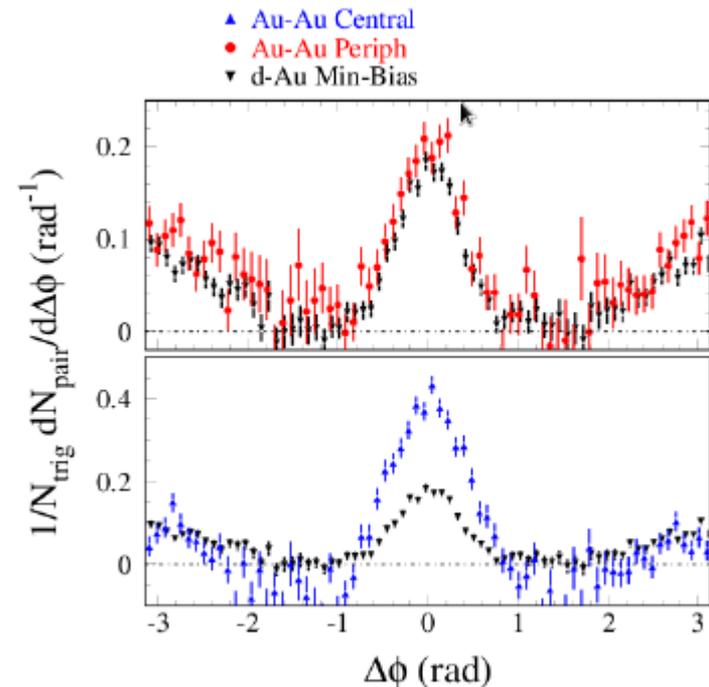
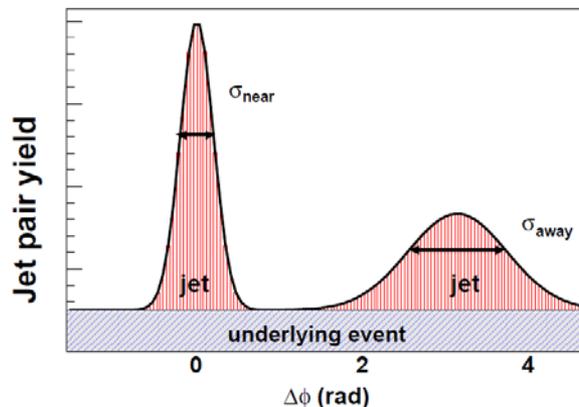
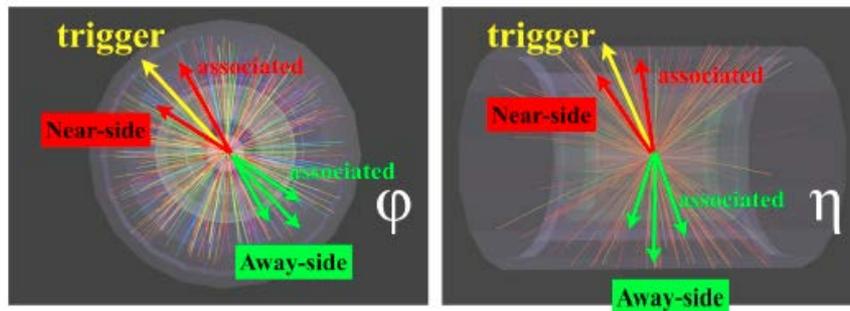


Двухчастичные корреляции

- Двухчастичные корреляции в pp и AA столкновениях: ближний и дальний пики;
- Двойной дальний пик в центральных ядро-ядерных столкновениях;
- I_{AA}, I_{CP} ;
- Дальние корреляции в pp , p - Pb и Pb - Pb столкновениях. Ридж эффект;
- Связь коэффициентов $V_{n\Delta}$, получаемых с помощью разложений двухчастичных корреляционных функций в ряд Фурье, и коэффициентов v_n .

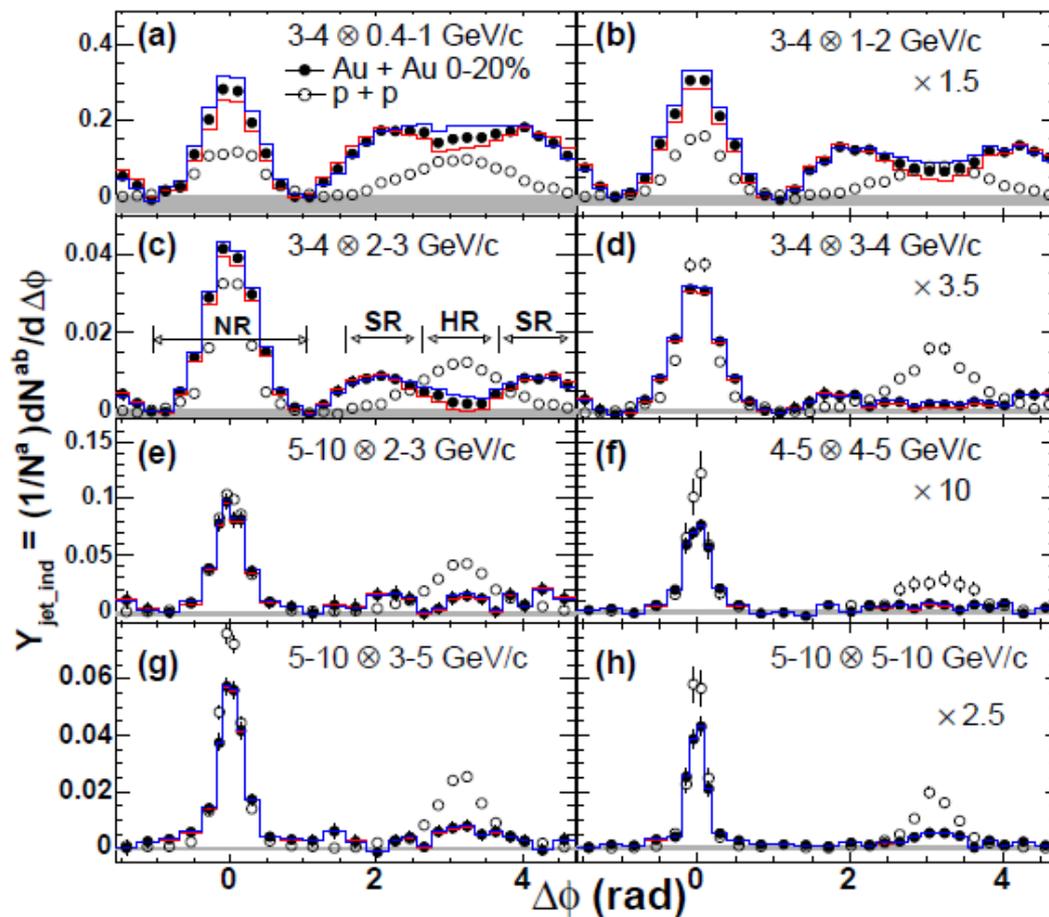
Двухчастичные корреляции: ближний и дальний пики

- Измеряется корреляция между высокоэнергетической (триггерной) частицей и ассоциированными частицами.
- Из-за фрагментации высокоэнергетической частицы (струи) корреляционная функция имеет пик области $(\Delta\phi, \Delta\eta) = (0, 0)$.
- С противоположной стороны – дальний пик из-за второй струи, уравнивающей первую. Из-за большего взаимодействия со средой он «размывается».
- Изучение процесса фрагментации партона (рождаются в результате жестких рассеяний), выход ассоциированных частиц меняется из-за взаимодействия партона со средой.



Двухчастичные корреляции: двойной пик в центральных ядро-ядерных столкновениях

- «Двойной пик» проявляется в центральный ядро-ядерных столкновениях.
- Черенковское глюонное излучение? Коллективные потоки высоких гармоник?

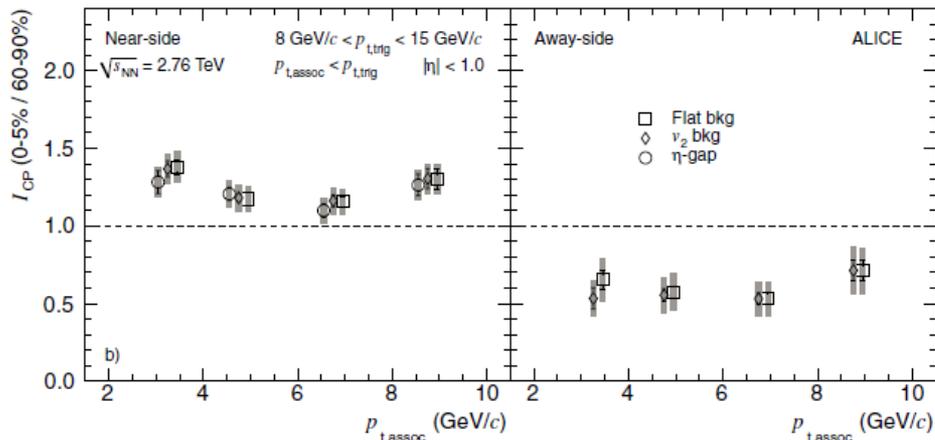
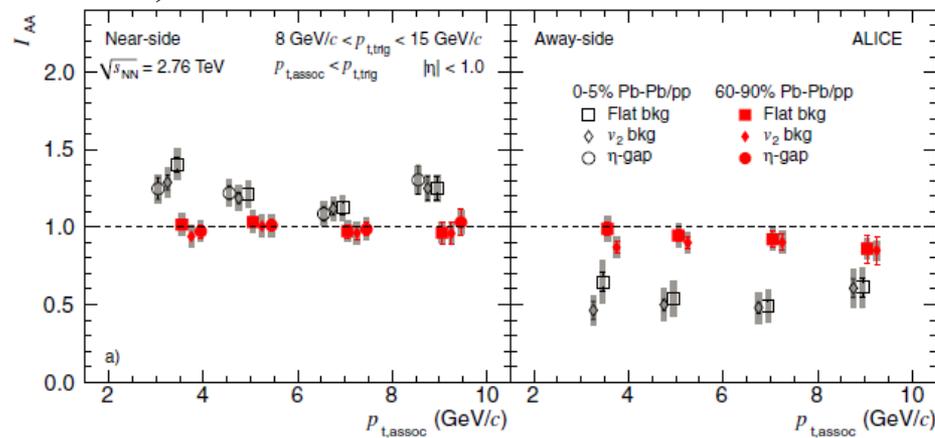


Фактор ядерной модификации струй. I_{AA} , I_{CP}

- Количественное измерение модификации струй – отношение выходов ассоциированных частиц на триггерную в АА столкновениях к выходам в pp столкновениях (I_{AA}).
- I_{CP} – отношение этой же величины в центральных АА столкновениях к периферическим.
- Ближний пик – усиление (больше ассоциированных частиц, чем в pp). Дальний пик – подавление (меньше ассоциированных частиц).
- Аналогичная картина для I_{CP}

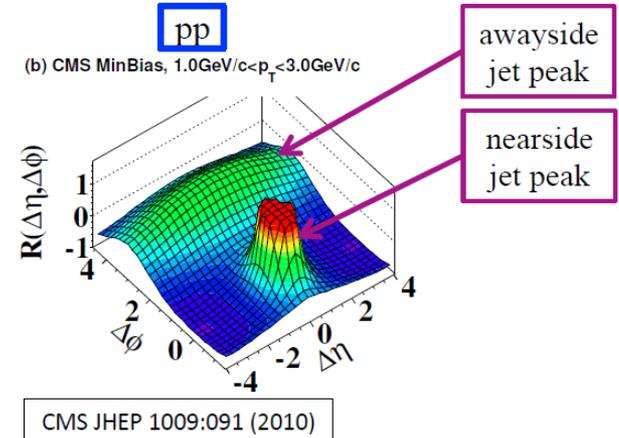
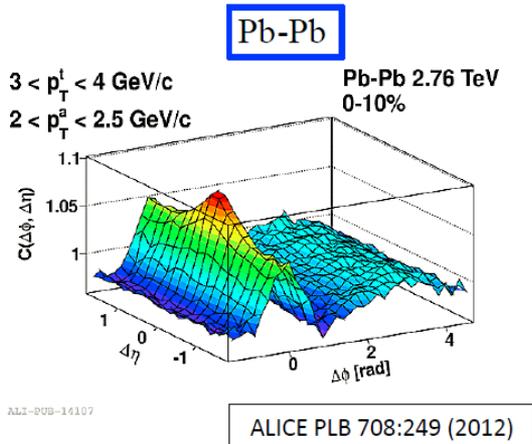
- К усилению может привести:
 - Изменение функции фрагментации;
 - Изменение доли глюонных/кварковых струй;
 - Искажение p_T спектра партонов в результате потери энергии (изменяется диапазон триггерных частиц).

PRL 108, 092301 (2012)

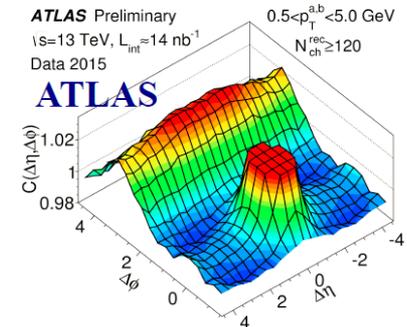
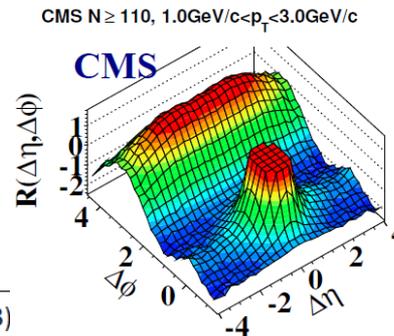
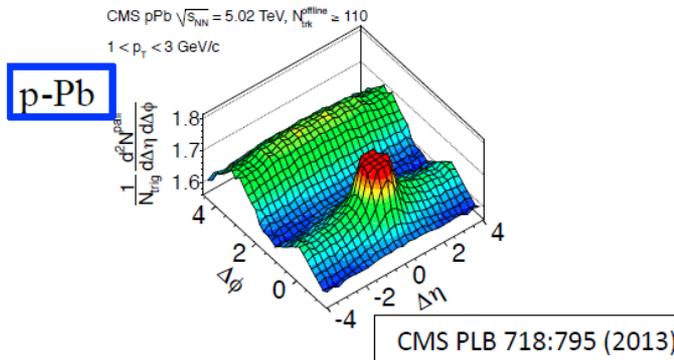


Двухчастичные корреляции: ридж эффект в pp, pPb и PbPb столкновениях

- «Хребет» по $\Delta\eta$ в ядро-ядерных столкновениях называется «ридж».
- Также ридж наблюдается в центр. p-Pb столкновениях.
- И даже в pp!



Ridges in pp

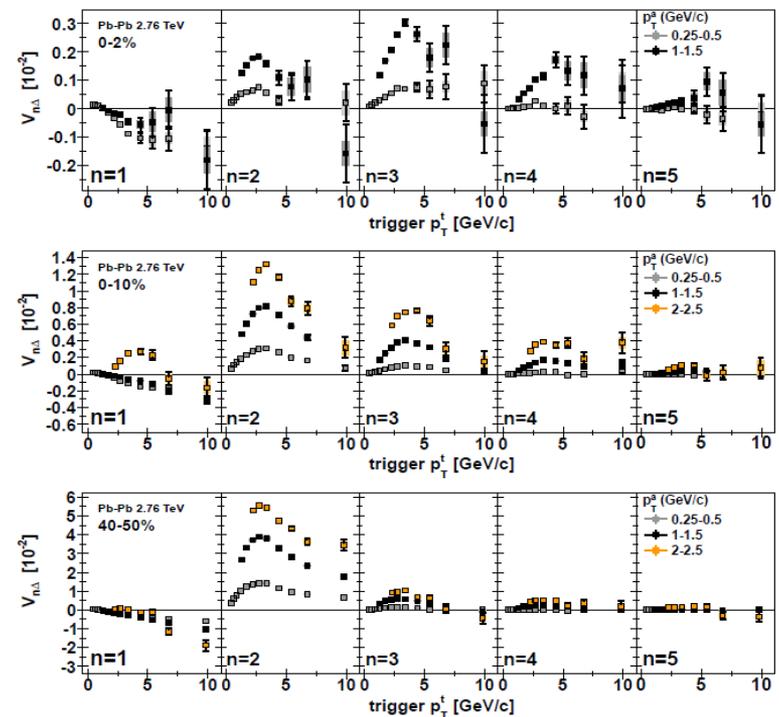
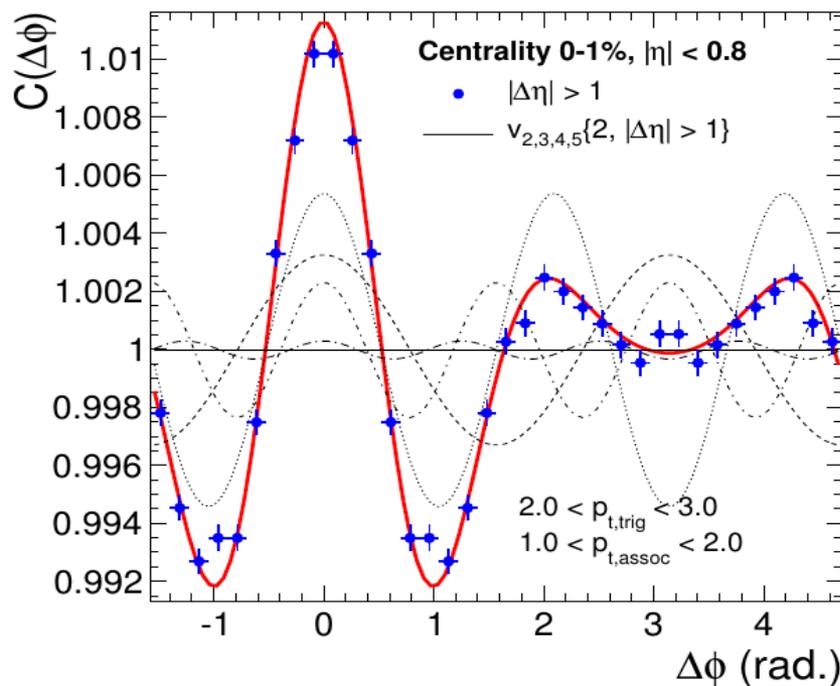


Двухчастичные корреляции: разложение корреляционной функции на гармоники

- В центральных ядро-ядерных столкновениях корреляционная функция при высоких $\Delta\eta$ целиком описывается коллективными потоками (гармоники вплоть до 5-ой).
- Поточковые коэффициенты приблизительно факторизуются ($V_{n\Delta}(p_T^a, p_T^t) = v_n(p_T^a)v_n(p_T^t)$) для $p_T^a < 4$ ГэВ/с, за исключением $V_{1\Delta}$
- Коллективные свойства - анизотропию в начальной геометрии системы.

$$\frac{dN_{\text{pairs}}}{d\Delta\phi} \propto 1 + \sum_{n=1}^{\infty} 2v_n(p_T^t)v_n(p_T^a) \cos(n\Delta\phi).$$

$$\frac{dN_{\text{pairs}}}{d\Delta\phi} \propto 1 + \sum_{n=1}^{\infty} 2V_{n\Delta}(p_T^t, p_T^a) \cos(n\Delta\phi).$$



Backup

Signatures of QGP

- J/Psi suppression
- Strangeness enhancement
- Parton energy loss (RAA)
- The Hanbury-Brown-Twiss effect
- **Collective flow**
- Direct photons spectra and flow

