



# Потоки и корреляции частиц в физике высоких энергий

Дмитрий Сергеевич Блау, НИЦ КИ, МФТИ

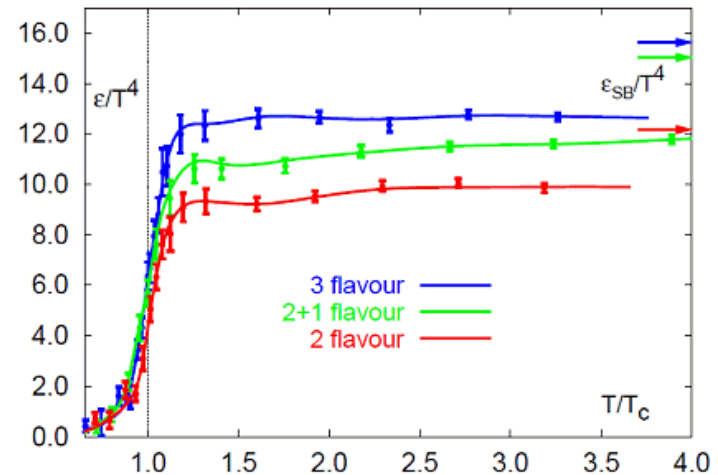
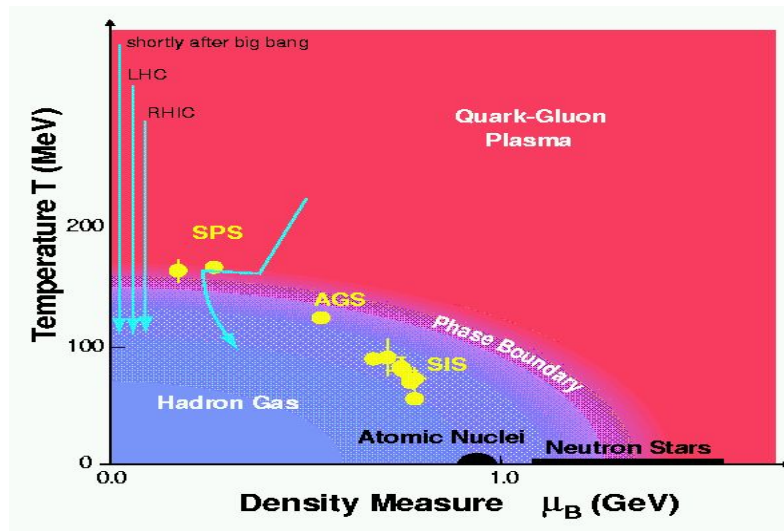
# Введение. Кварк-глюонная плазма

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:

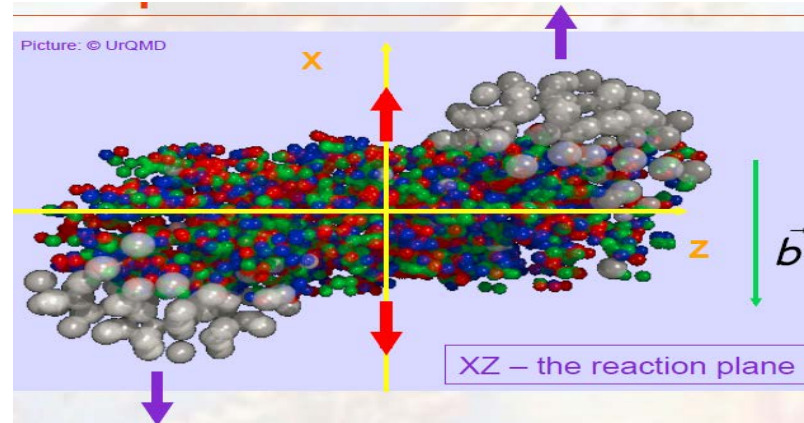
- Фактор ядерной модификации выхода частиц (напр.  $J/\Psi$ , странных адронов);
- Выходы частиц (напр., выход прямых фотонов);
- **Потоки и корреляции частиц.**



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

Решеточные расчеты: плотность энергии в зависимости от температуры

# Введение. Коллективные потоки и корреляции



Исследуемые наблюдаемые:

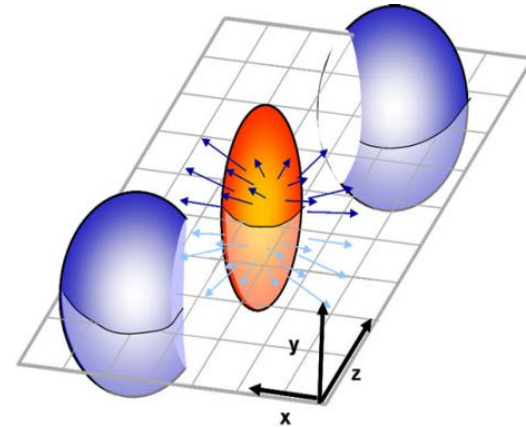
- Коллективные потоки частиц ( $v_n$ );
- Двух- и многочастичные корреляции частиц и струй (в зависимости от  $\Delta\phi$  и  $\Delta\eta$ );
- Подавление выхода частиц в зависимости от  $\Delta\phi$  ( $R_{AA}(p_T, \Delta\phi)$ ).

Что можно узнать о КГП с помощью этих наблюдаемых?

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

# Коллективные потоки: введение

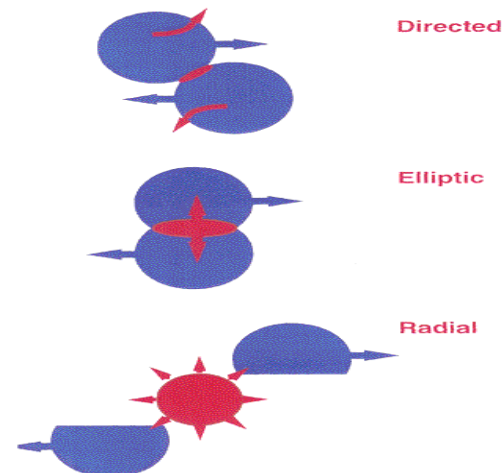
- В случае сильного взаимодействия частиц проявляются коллективные эффекты, т.е. корреляции между положением частицы и ее импульсом.
- В зависимости от энергии столкновения эффекты, приводящие к коллективному движению, различны.
- Раскладывая асимметрию рождения частиц относительно плоскости реакции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



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

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

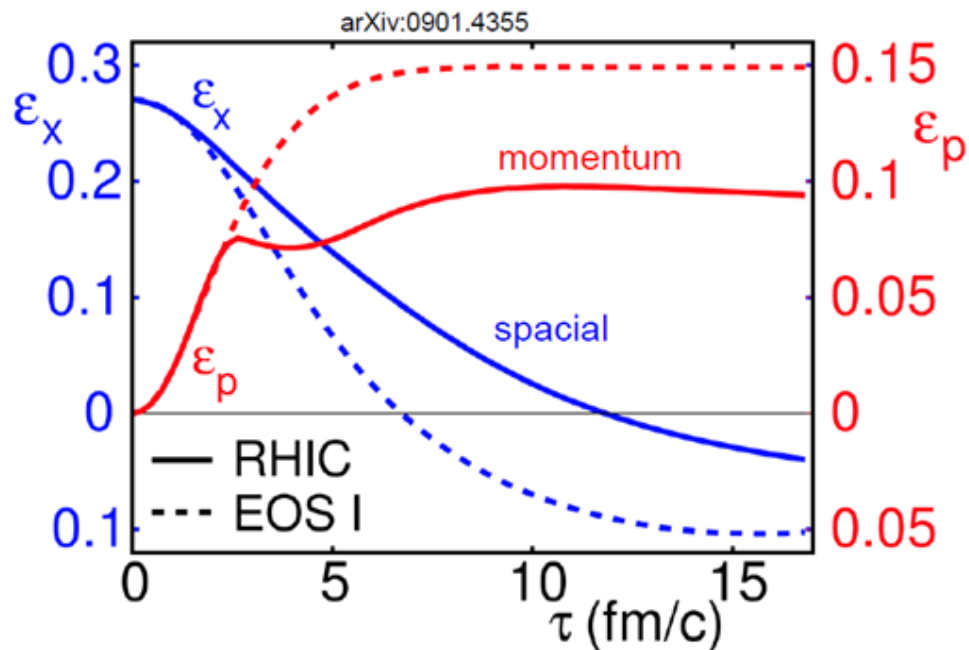
- Изучаются потоки частиц в зависимости от типа частицы, от метода (различный вклад от непотоковых эффектов), от центральности столкновения, от энергии столкновения и т.д.



# 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

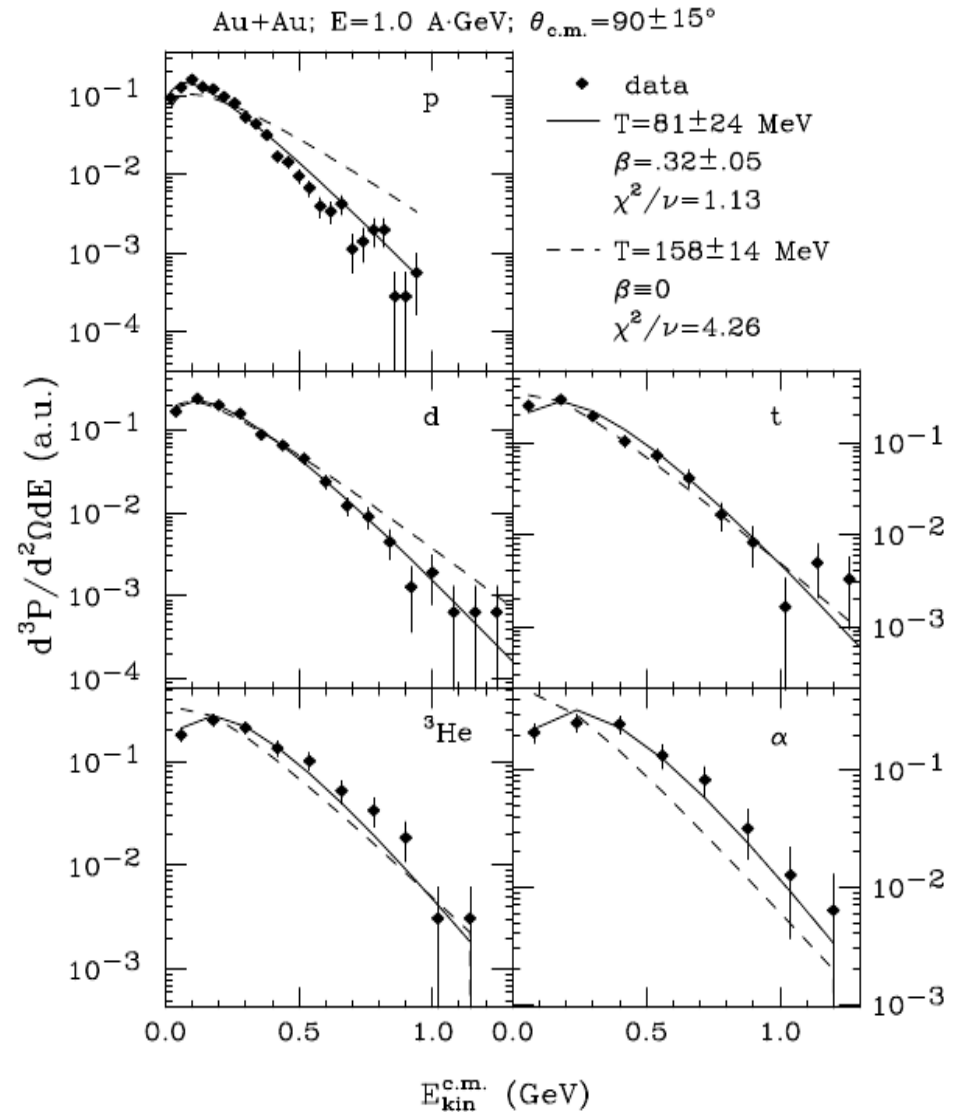
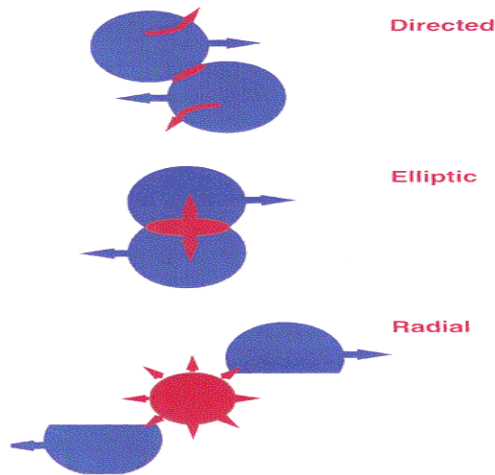


# Коллективные потоки: радиальный поток

- 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.
- $\Psi_N$  — 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:

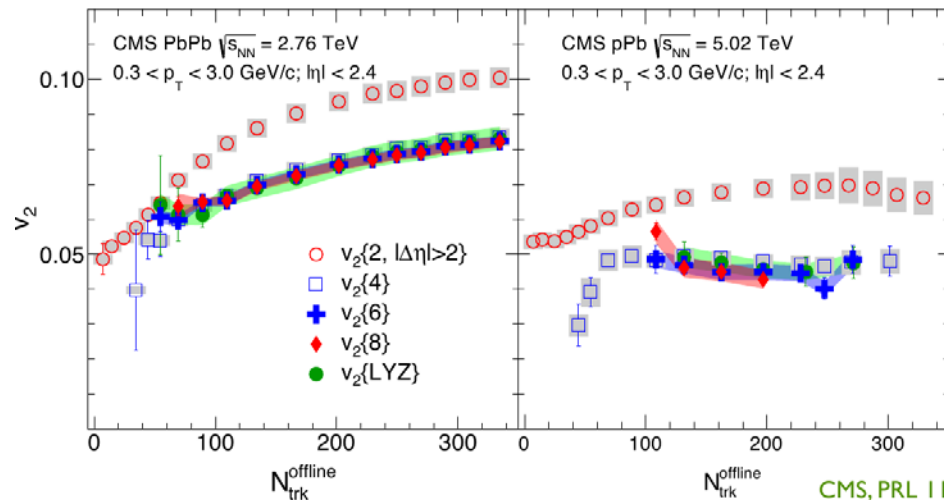
$$v_n(p_T, y) = \frac{\langle Q_n u_{n,i}^*(p_T, y) \rangle}{2\sqrt{\langle Q_n^a Q_n^{b*} \rangle}},$$

- $u_{n,i}$  – 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.

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

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

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

→

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

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

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

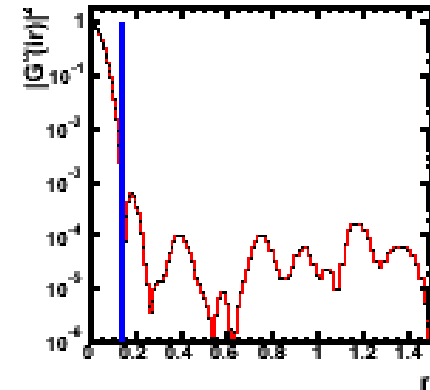
# Метод нулей Ли-Янга

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

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

- 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  $M \gg 1$ :

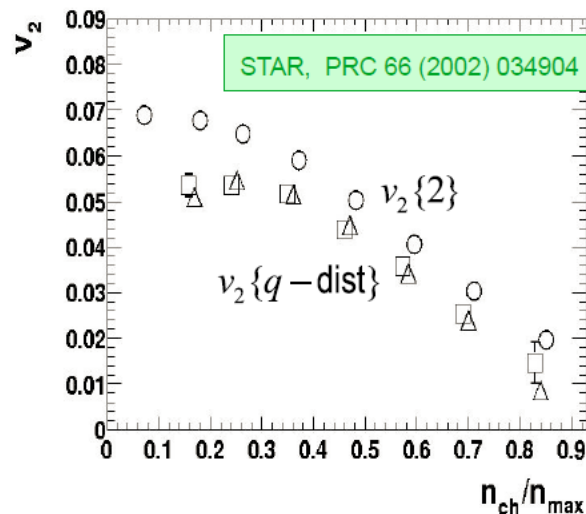
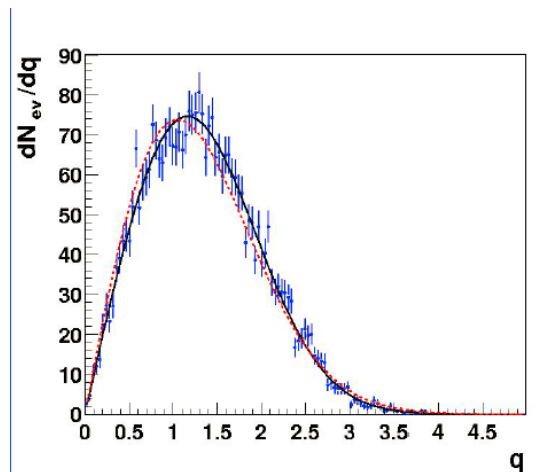
$$\frac{dN}{dq_n} = \frac{q_n}{\sigma_n^2} e^{-\frac{v_n^2 M + q_n^2}{2\sigma_n^2}} I_0\left(\frac{q_n v_n \sqrt{M}}{\sigma_n^2}\right)$$

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

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

nonflow effects

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



# Non-flow и eta gap

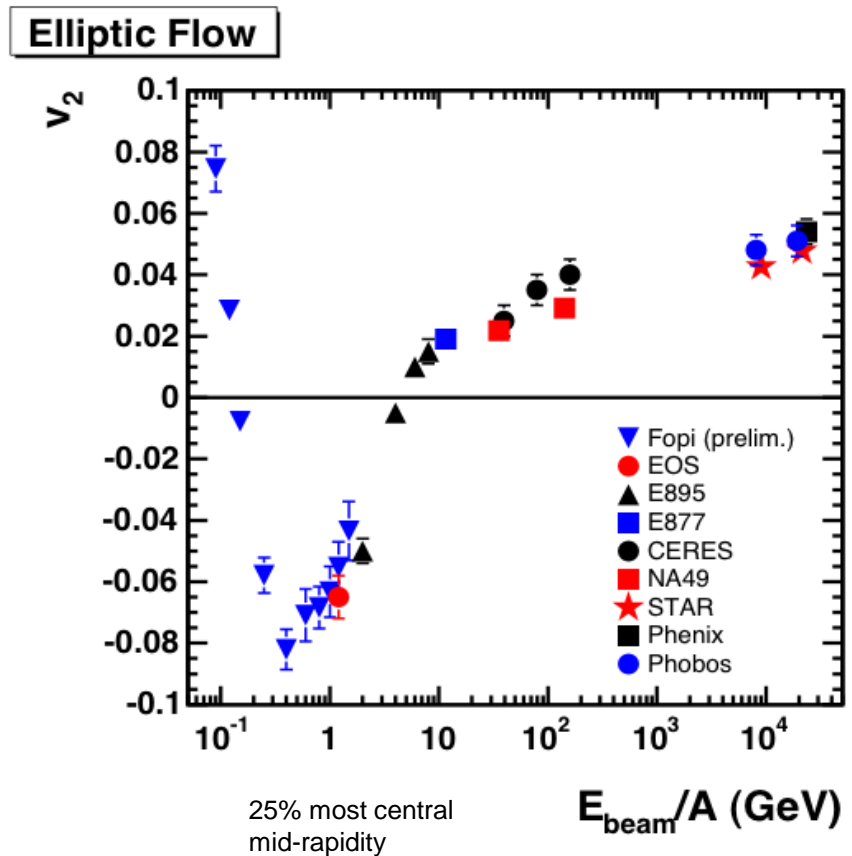
- Как двухчастичные, так и корреляции с плоскостью события (EP-метод) содержат кроме потоковых эффектов, также так называемые непотоковые (non-flow), например, корреляции от фрагментировавших струй. Поскольку такие корреляции обычно короткие, то введение так называемого «зазора» по быстрой значительно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

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

- $\delta$  – 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.

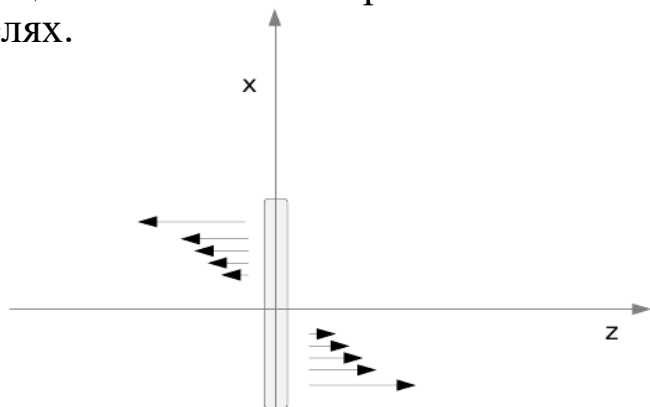
# Коллективные потоки: эксперимент

- 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. $v_1$

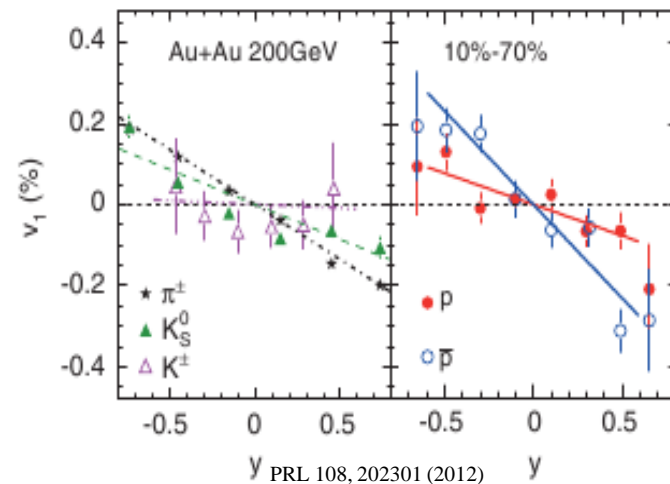
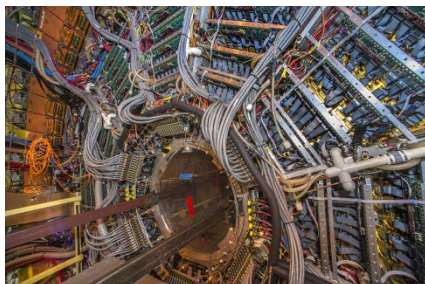
- Направленный поток ( $v_1$ )
- Из-за взаимодействия частиц со средой изменяется профиль скоростей вдоль оси пучка  $z$ , что приводит к асимметрии в выходе частиц при заданной скорости.
- Измеренные  $v_1$  для различных типов частиц можно описать в различных моделях.



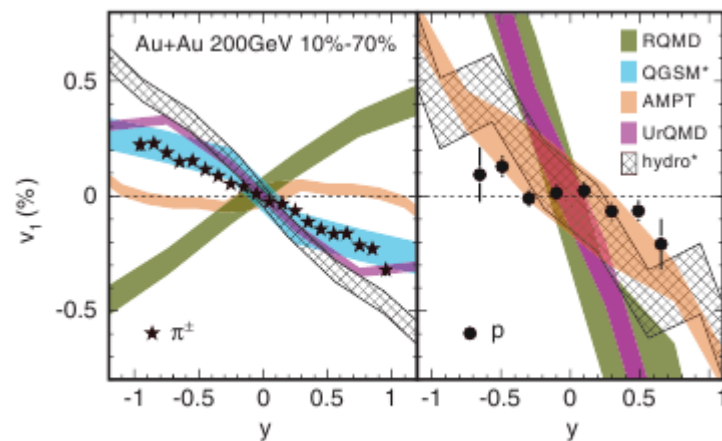
RHIC @ BNL



STAR

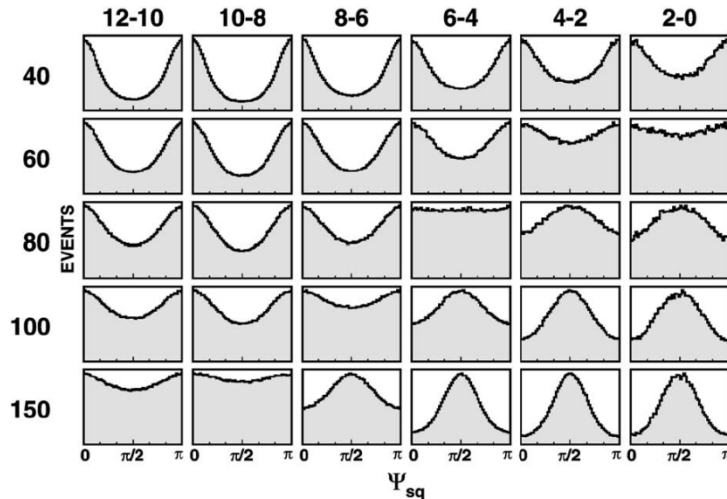
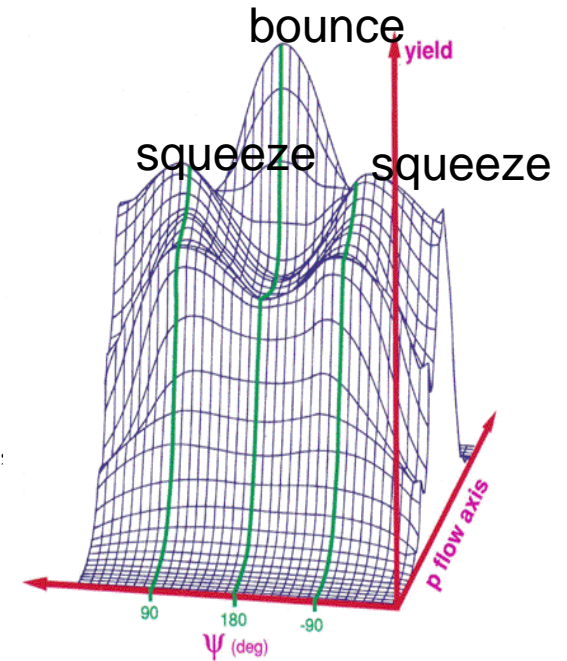


$v_1$  для  $\pi^\pm$ ,  $K^\pm$ ,  $K_s^0$ ,  $p$ ,  $\bar{p}$  в Au-Au столкновениях при  $\sqrt{s_{NN}}=200$  GeV, центральность 10-70%, эксперимент STAR.



# 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».



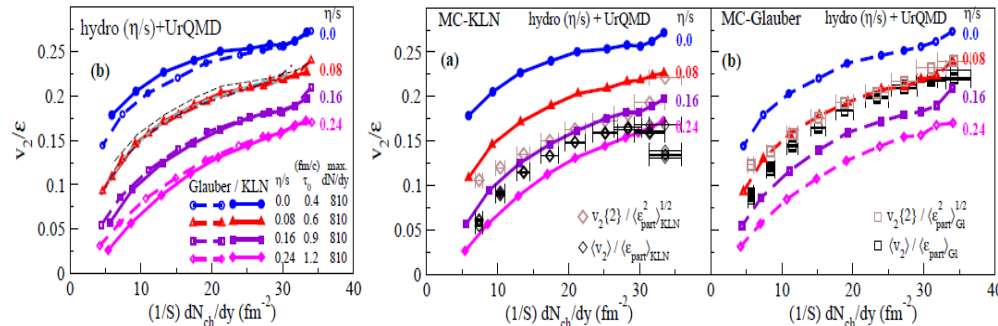
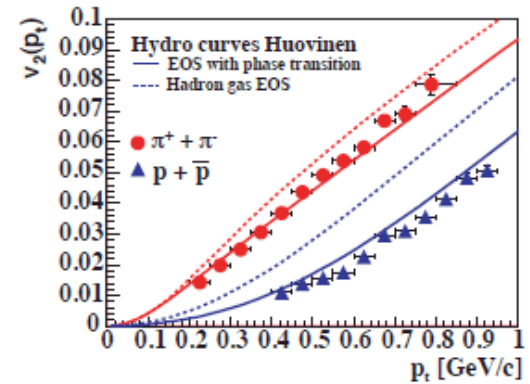
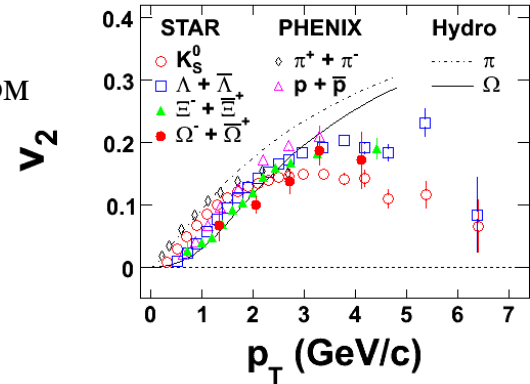


# Коллективные потоки: эксперимент. $v_2$

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

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

- 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

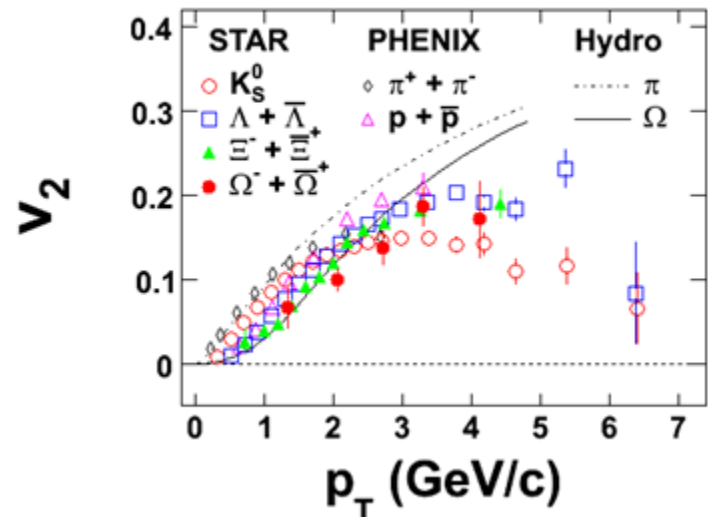
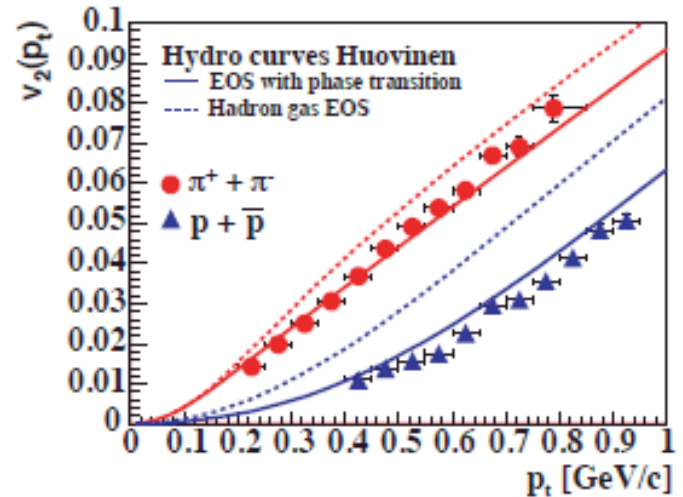
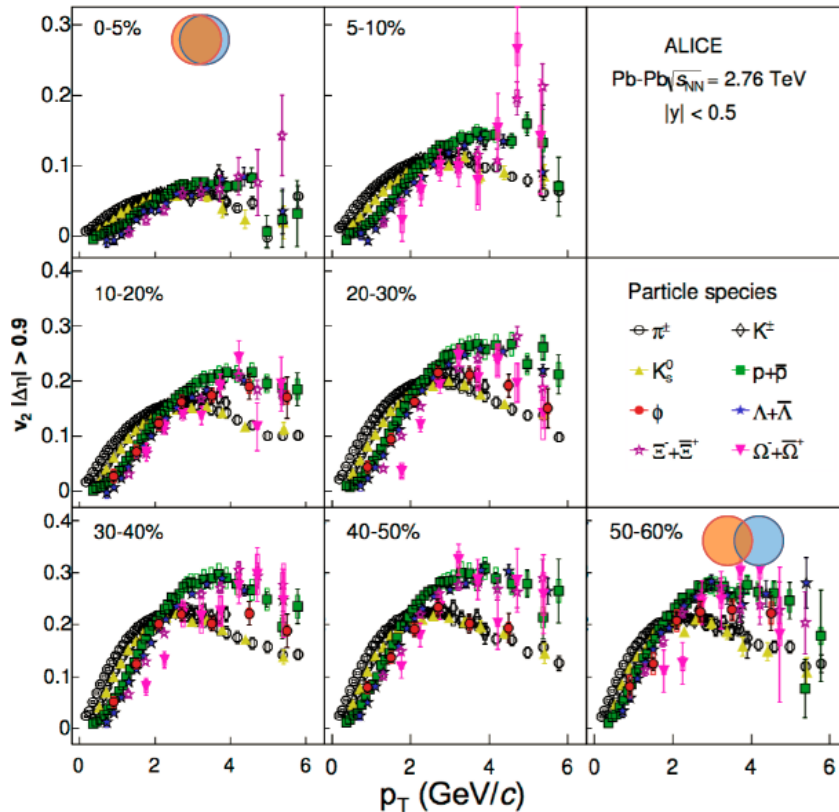
P. Huovinen, P. F. Kolb, U.W. Heinz, P. V. Ruuskanen and S. A. Voloshin, Phys. Lett. B 503 (2001)  
 J. Adams et al., (STAR Collaboration), Nucl.Phys. A757 (2005) 102  
 K. Adcox et al., (PHENIX Collaboration), Nucl. Phys. A757, (2005) 184

# 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).

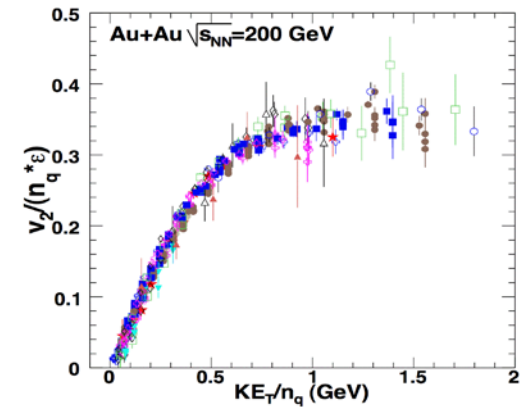
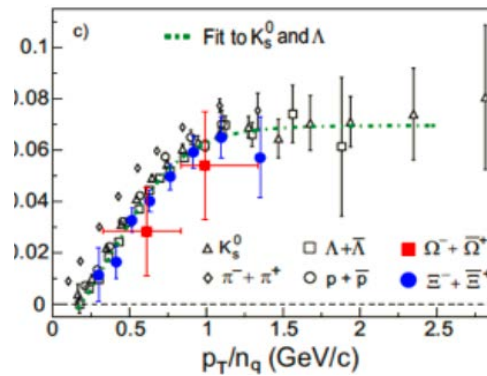
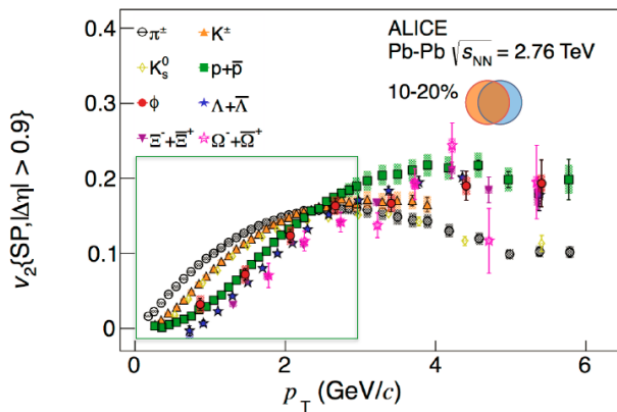
P. Huovinen, P. F. Kolb, U.W. Heinz, P. V. Ruuskanen and S. A. Voloshin, Phys. Lett. B 503 (2001)  
 J. Adams et al., (STAR Collaboration), Nucl.Phys. A757 (2005) 102  
 K. Adcox et al., (PHENIX Collaboration), Nucl. Phys. A757, (2005) 184

## $v_2$ in Pb-Pb for different centralities



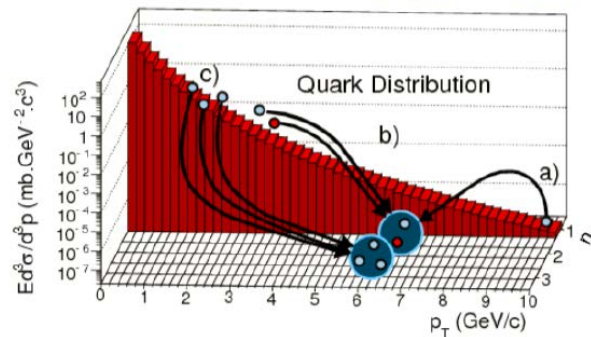
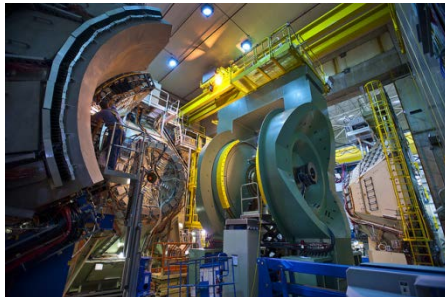
# Коллективные потоки: эксперимент. Эффект кваркового скейлинга

- $v_2$  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.

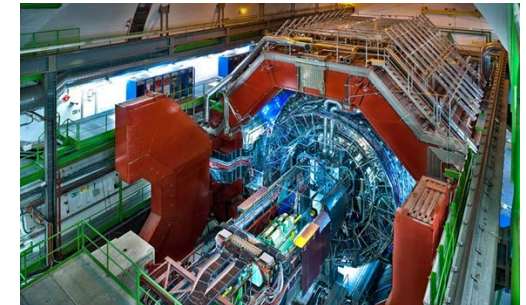


Eur.Phys.J.C62:237-242,2009

PHENIX

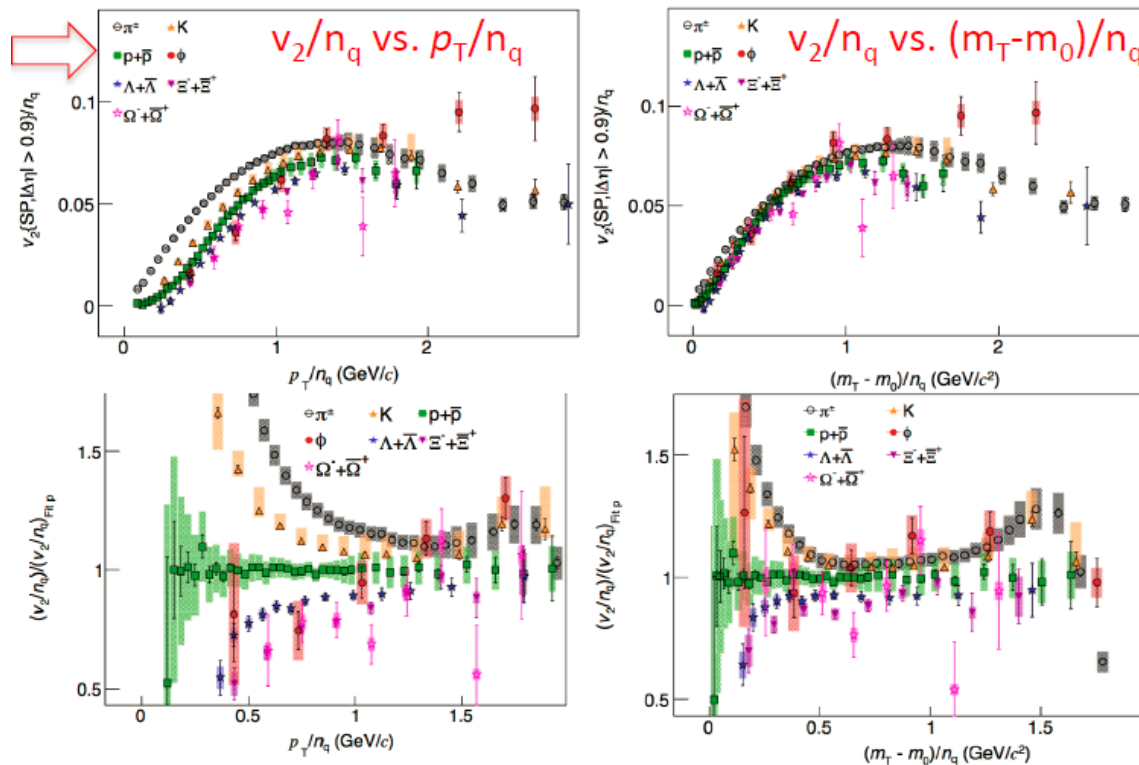


ALICE

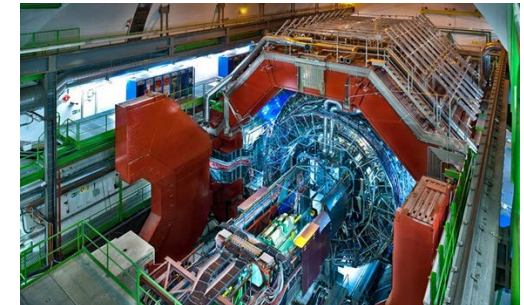


# Коллективные потоки: эксперимент. Эффект кваркового скейлинга (ALICE)

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

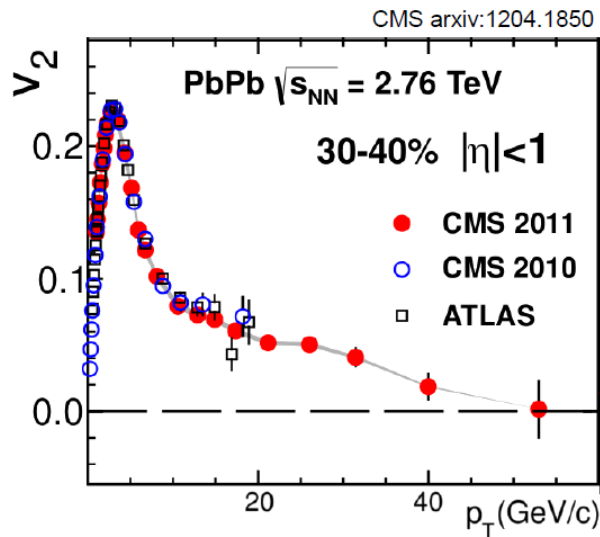


ALICE

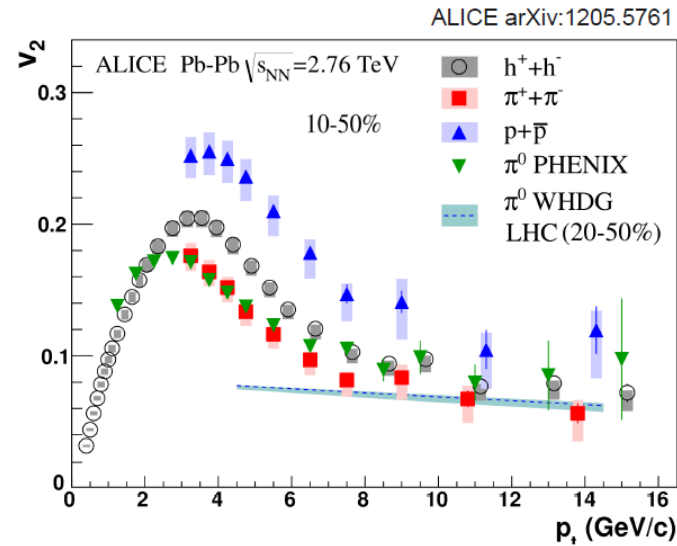
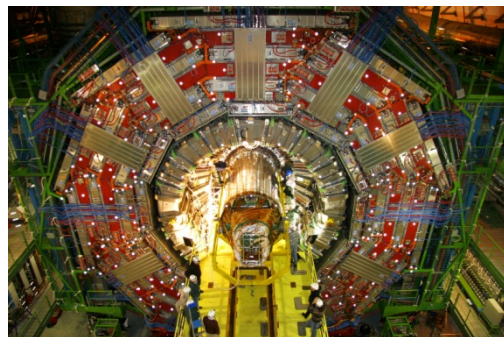


# Коллективные потоки: эксперимент. Высокие $p_T$ .

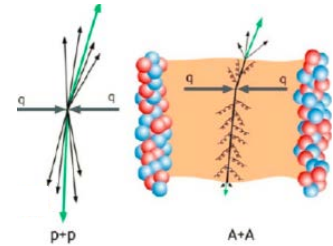
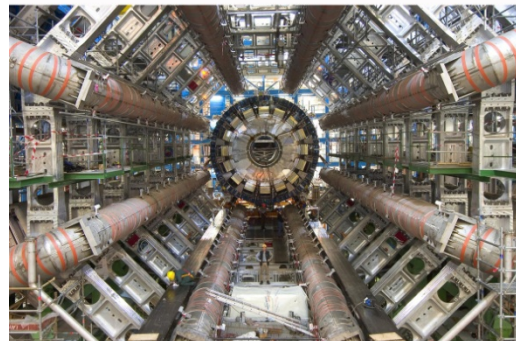
- Ненулевой  $v_2$  сохраняется вплоть до больших  $p_T$  ( $\sim 40$  GeV/c). Существенное влияние взаимодействия партонов со средой и эффекта гашения струй на потоки (различное расстояние, которое проходят частицы в и вне плоскости реакции).
- Разница между различными типами частиц сохраняется вплоть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



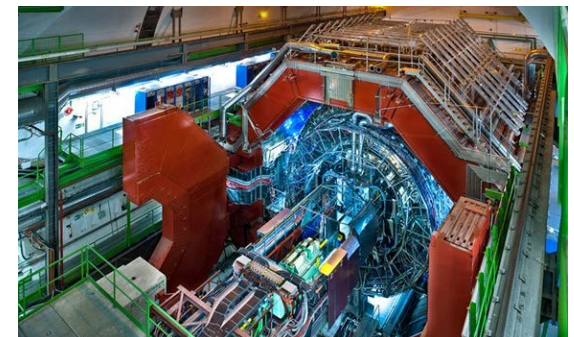
CMS



ATLAS

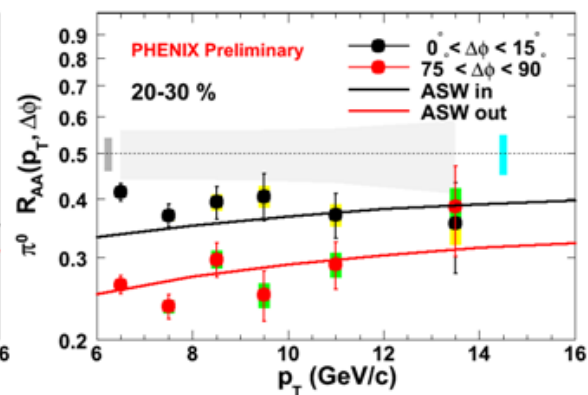
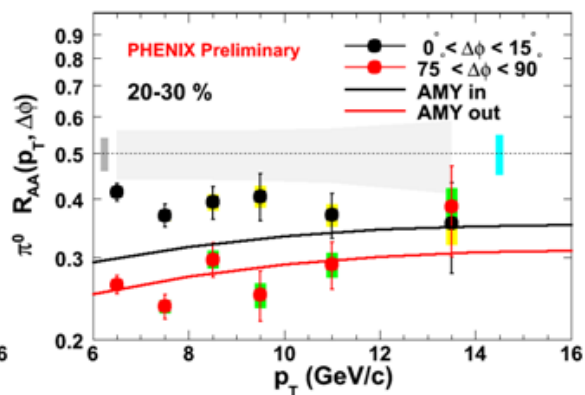
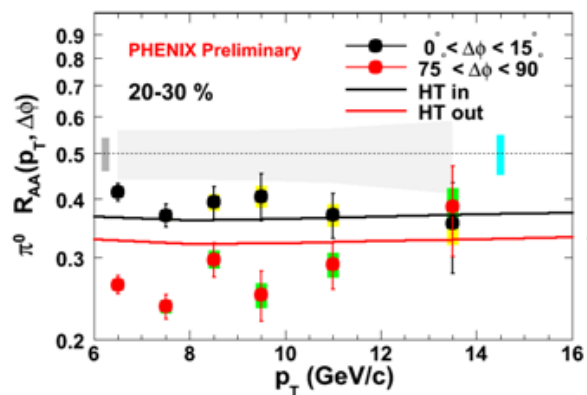
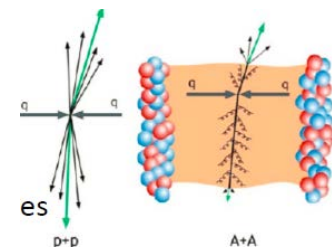


ALICE

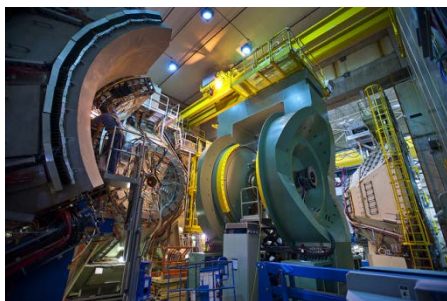


# Коллективные потоки: эксперимент. $R_{AA}(\Delta\phi, p_T)$

- 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.

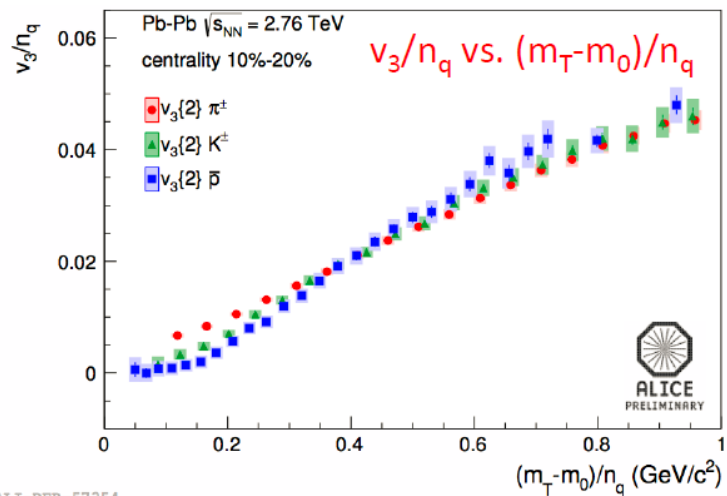
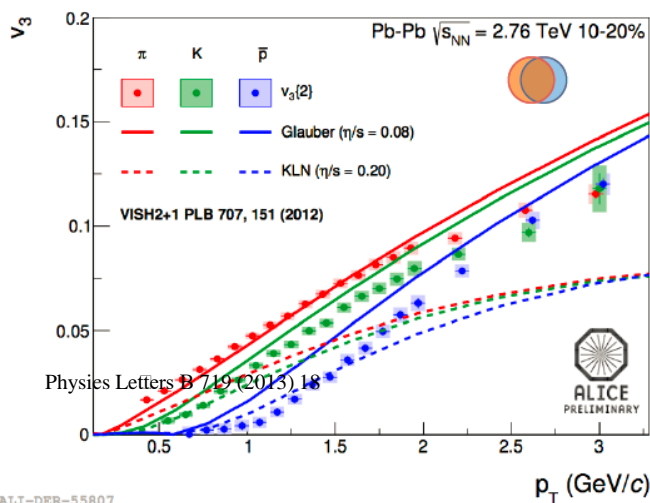
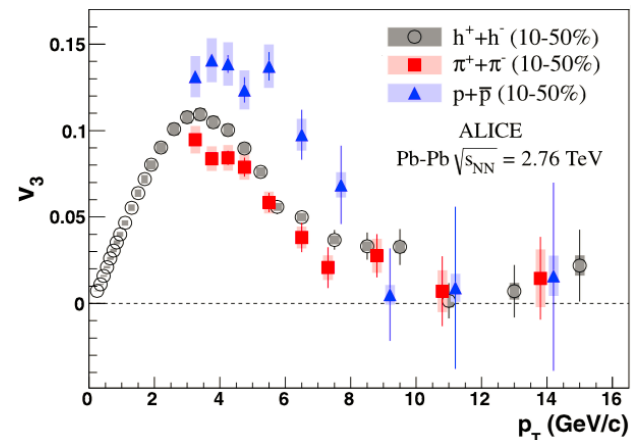


PHENIX



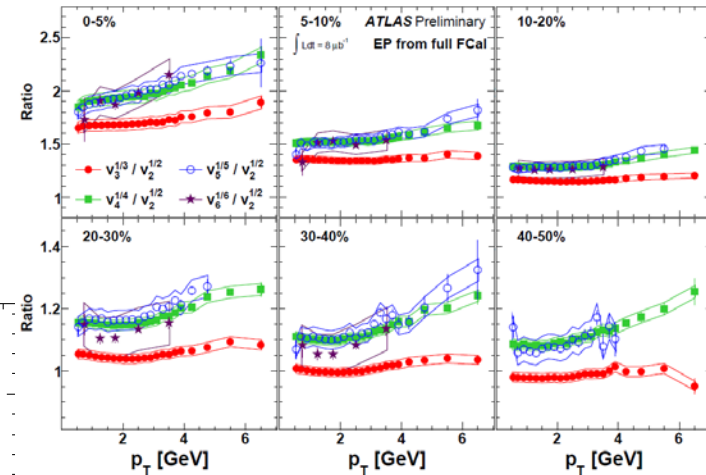
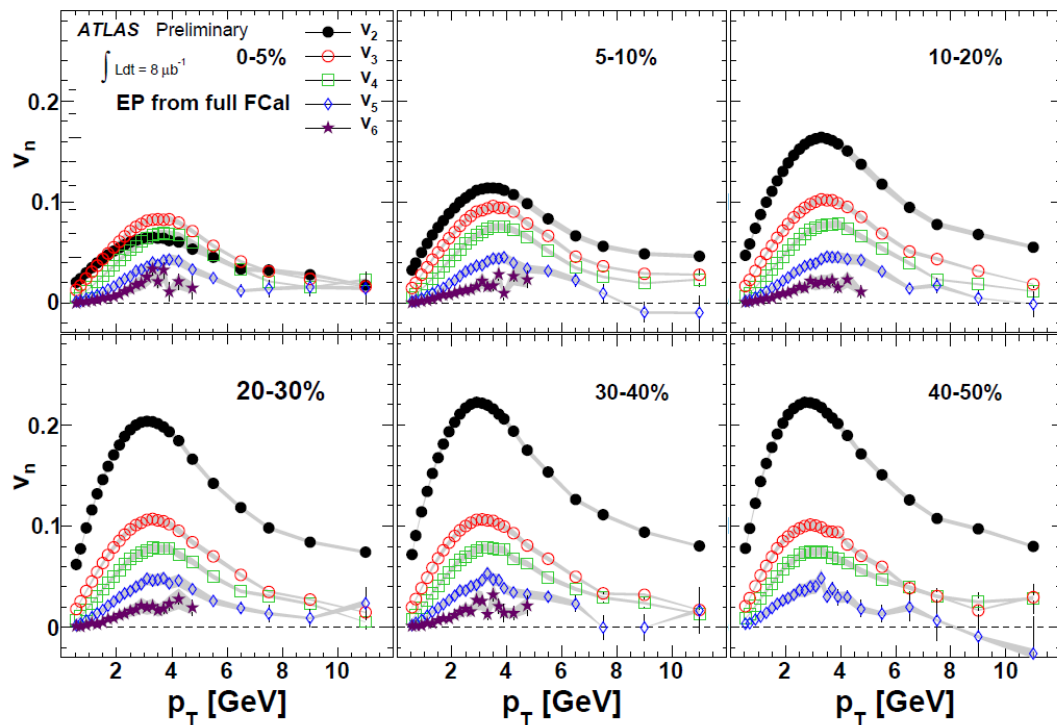
# Коллективные потоки: эксперимент. $v_3$

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

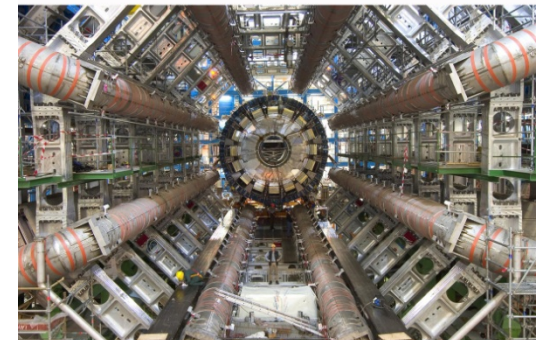


# Коллективные потоки: эксперимент. потоки высших гармоник

- $v_n$  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.



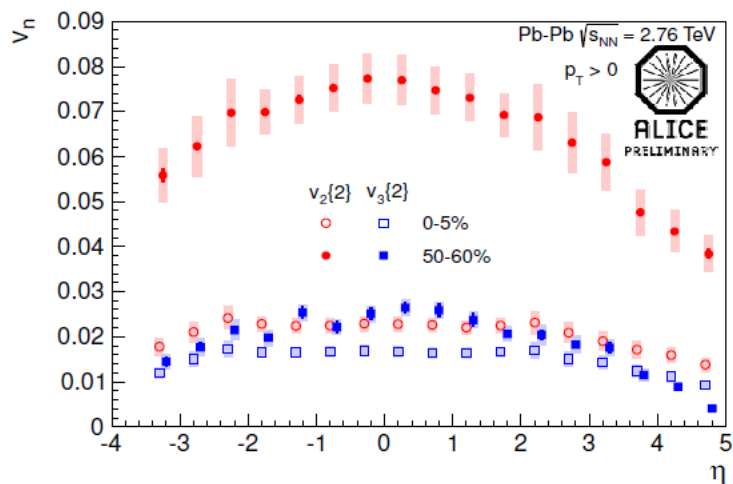
ATLAS



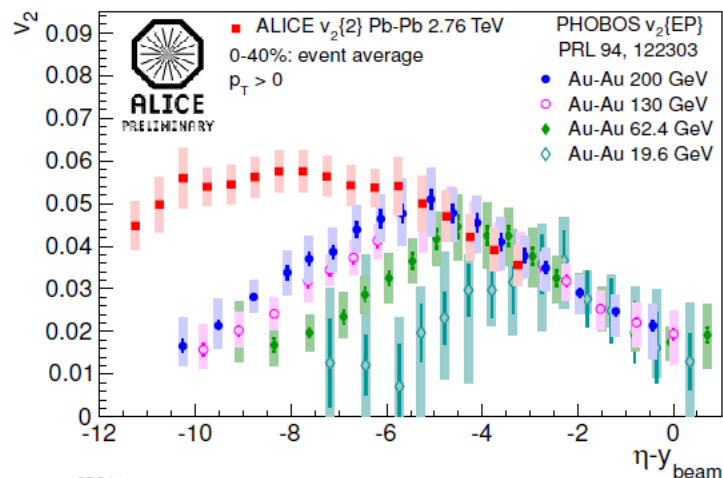


# Коллективные потоки: зависимость от псевдобыстроты

- $v_2, v_3$  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!



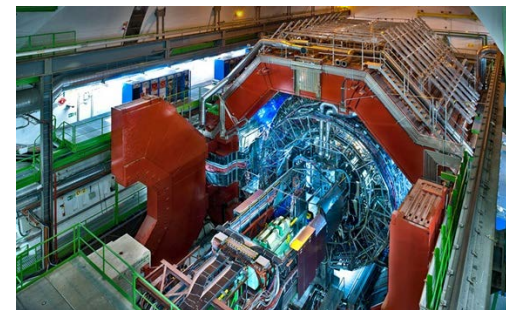
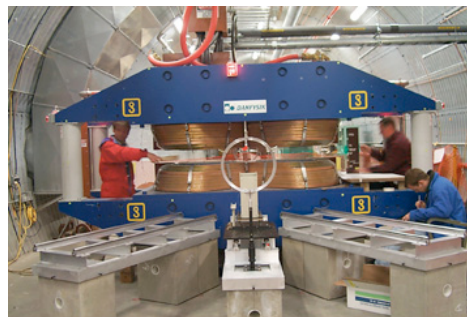
ALI-PREL-28033



ALI-PREL-27811

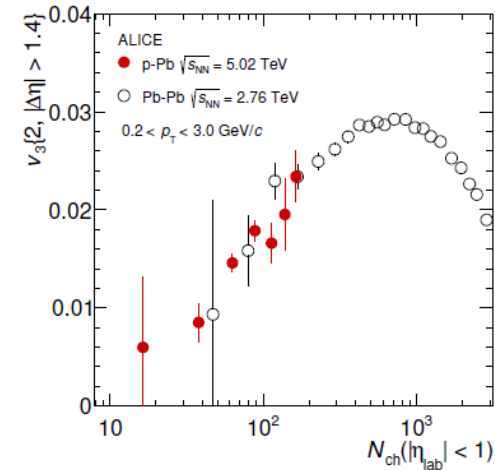
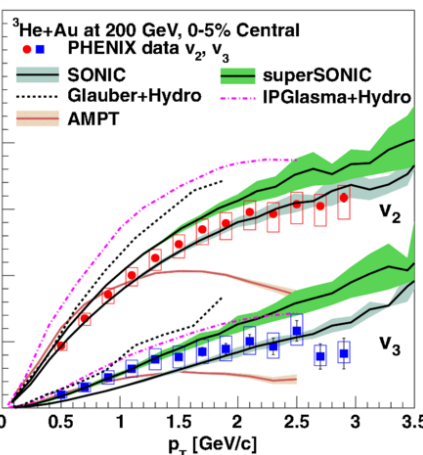
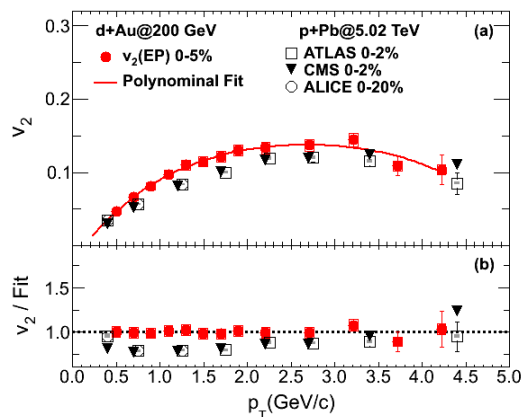
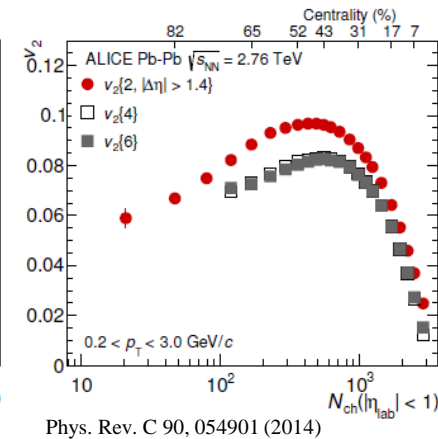
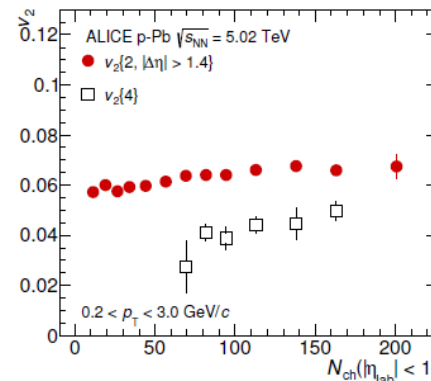
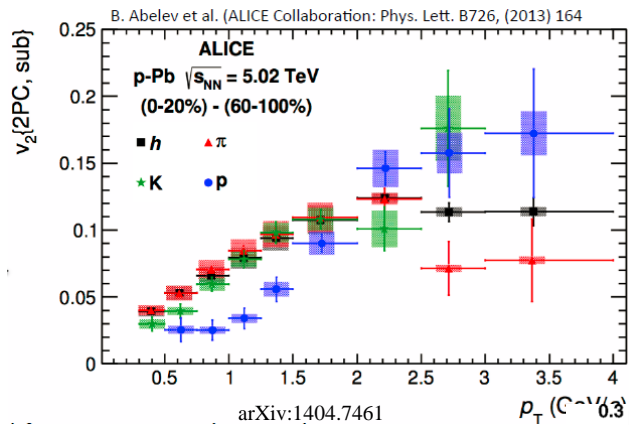
PHOBOS

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.



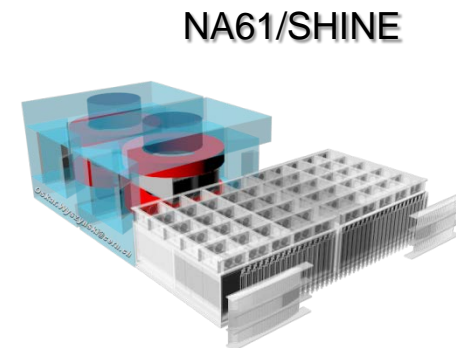
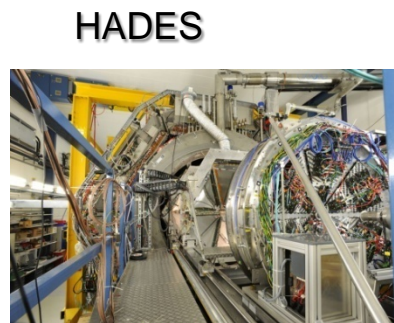
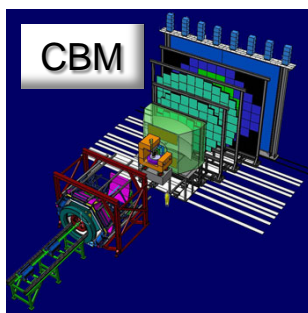
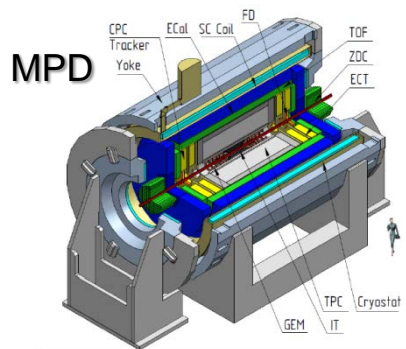
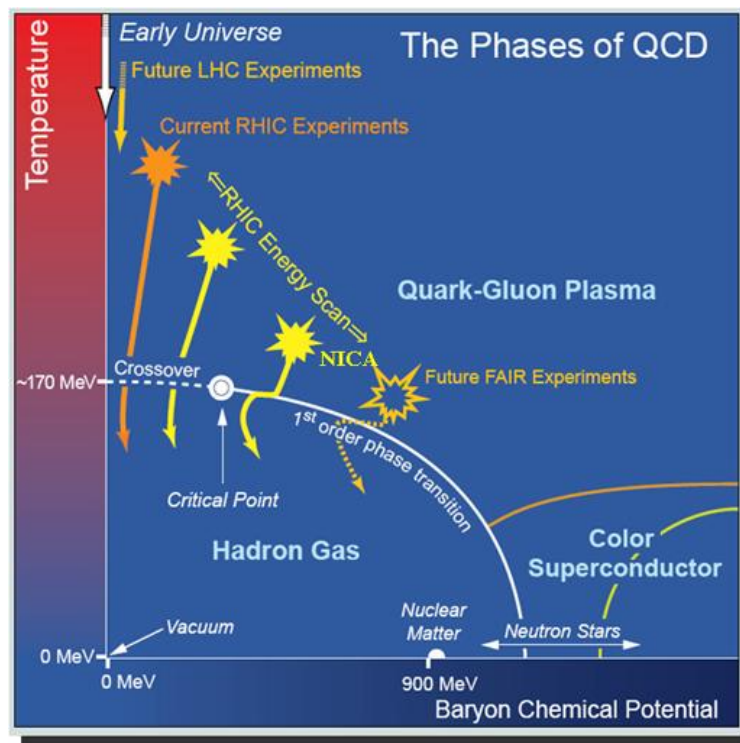
# Коллективные потоки: beam energy scan и поиски трикритической точки

Действующие эксперименты:

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

В стадии подготовки

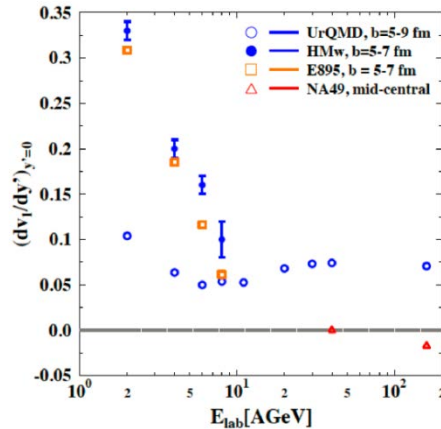
- NICA @ Dubna
- CBM @ GSI



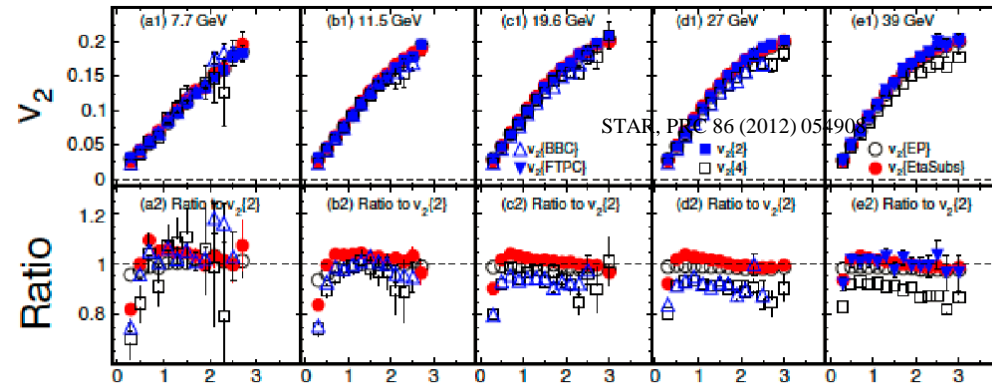
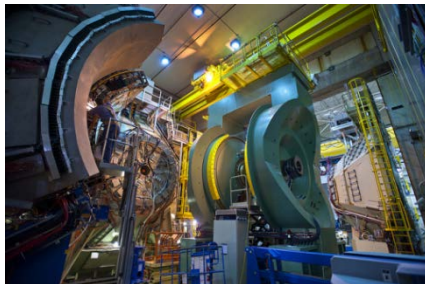
# Коллективные потоки: beam energy scan и поиски трикритической точки

Результаты RHIC BES:

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

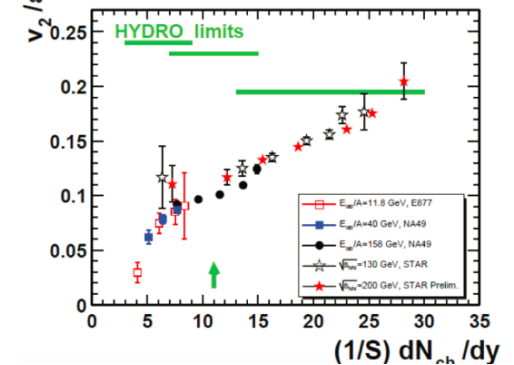


PHENIX

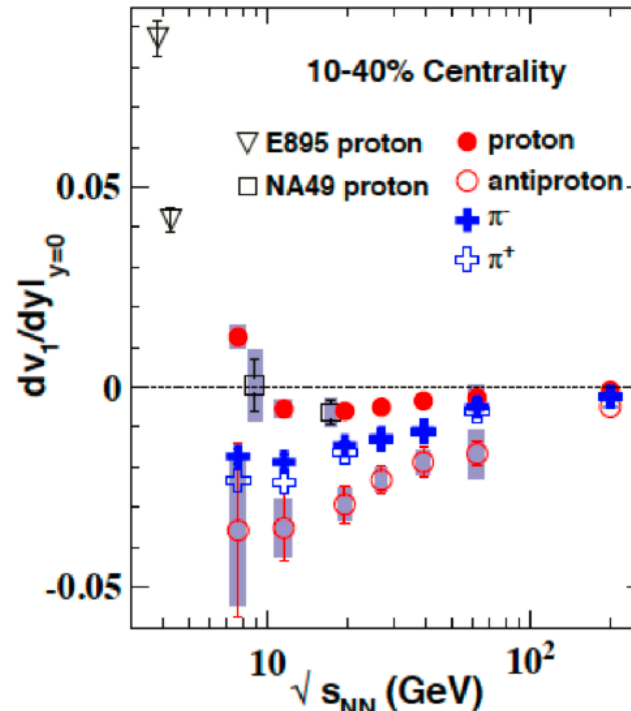
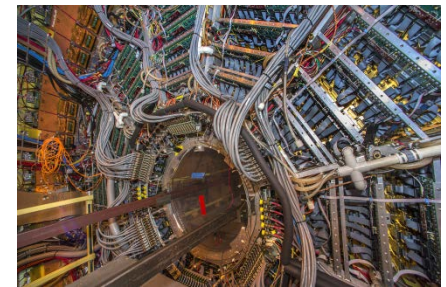


$p_T$  (GeV/c)

Voloshin, Snellings, Poskanzer, arXiv: 0809.2949

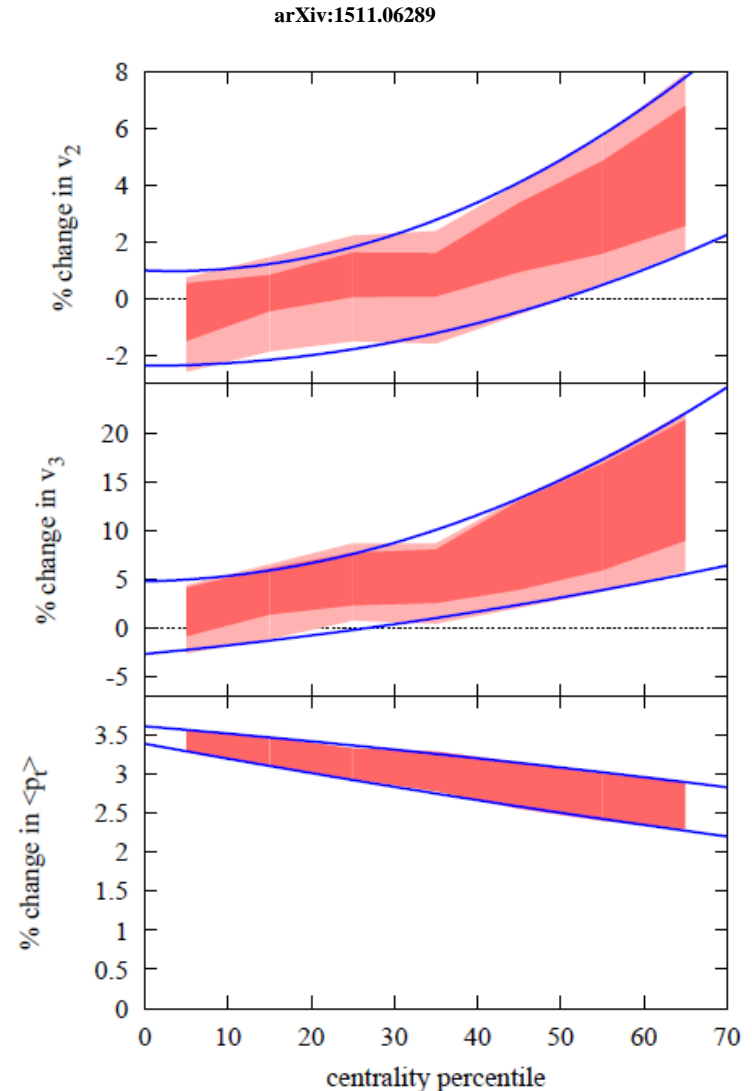


STAR



# 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!

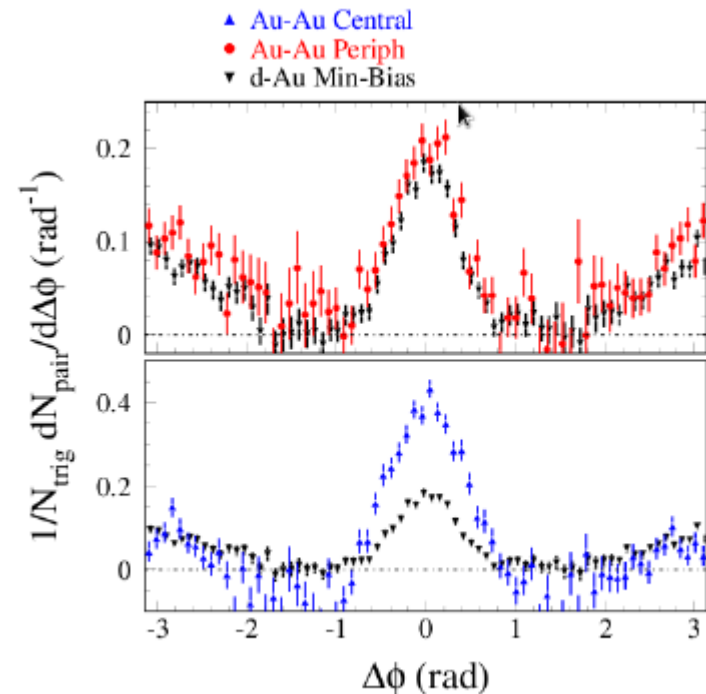
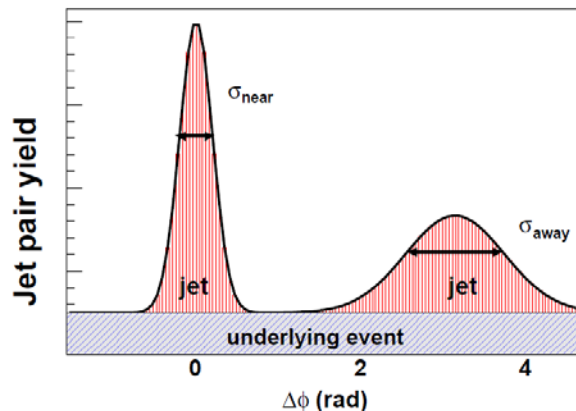
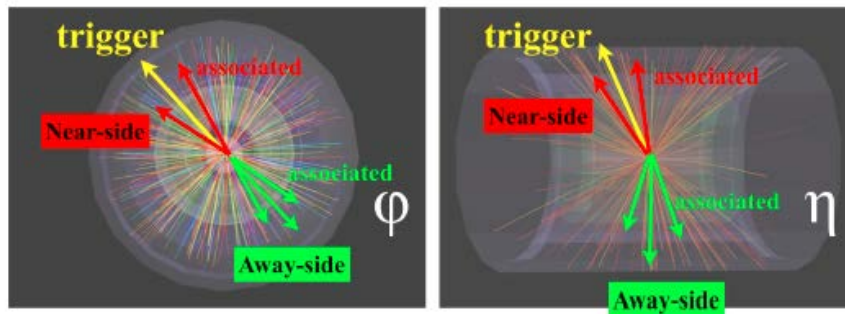


# Двухчастичные корреляции

- 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  $v_n$ .

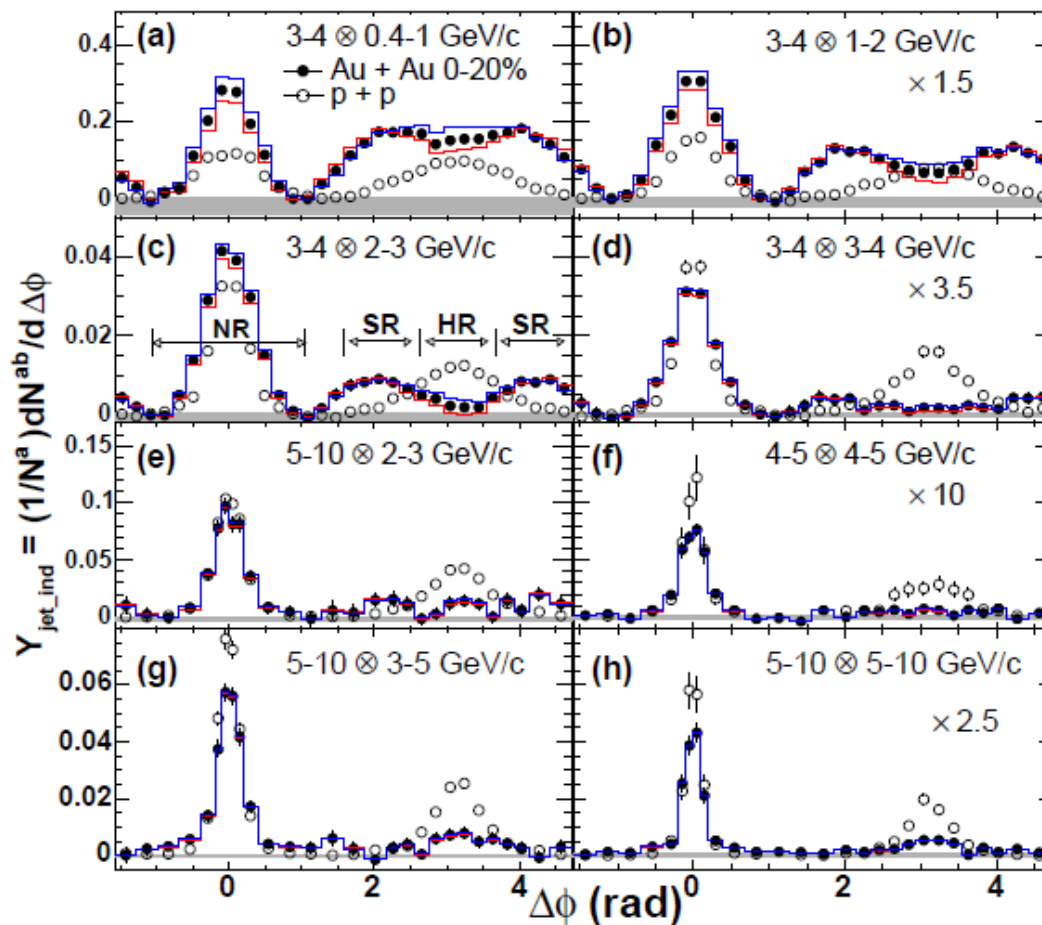
# Двухчастичные корреляции: ближний и дальний пики

- Измеряется корреляция между высокоэнергетичной (триггерной) частицей и ассоциированными частицами.
- Из-за фрагментации высокоэнергетичной 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?



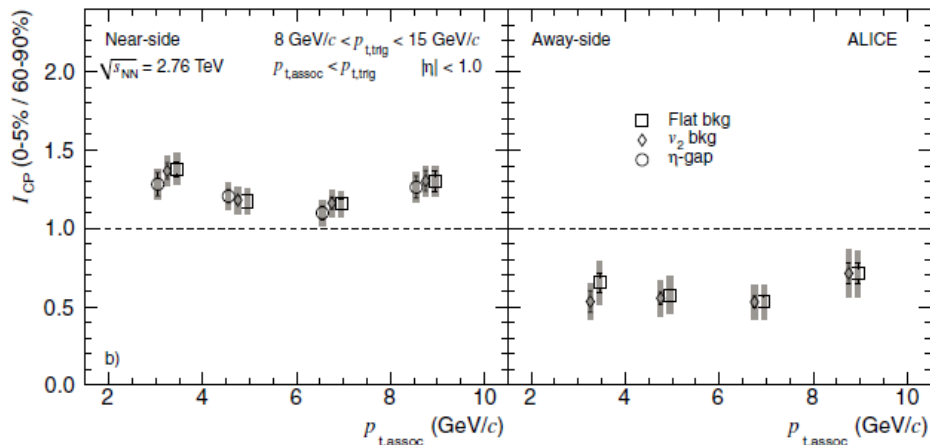
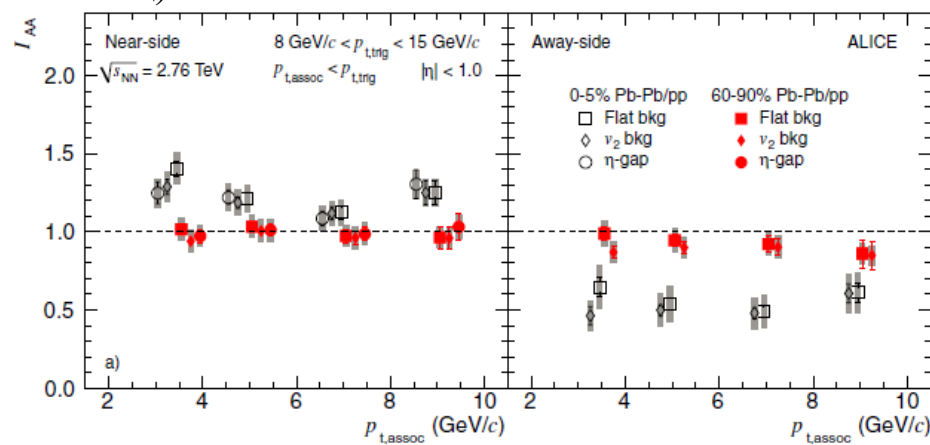


# Фактор ядерной модификации струй. $I_{AA}$ , $I_{CP}$

- Количественное измерение модификации струй – отношение выходов ассоциированных частиц на триггерную в АА столкновениям 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  $I_{CP}$

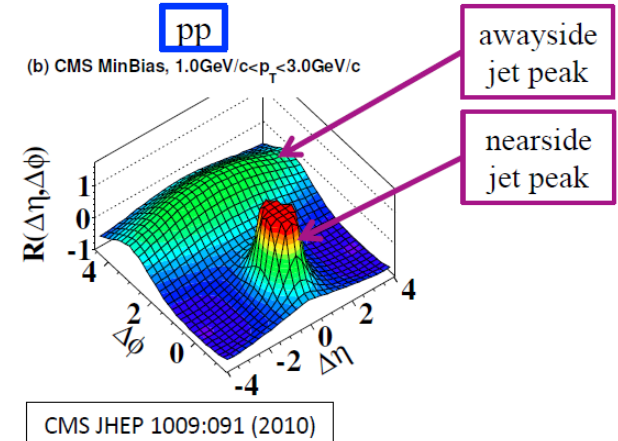
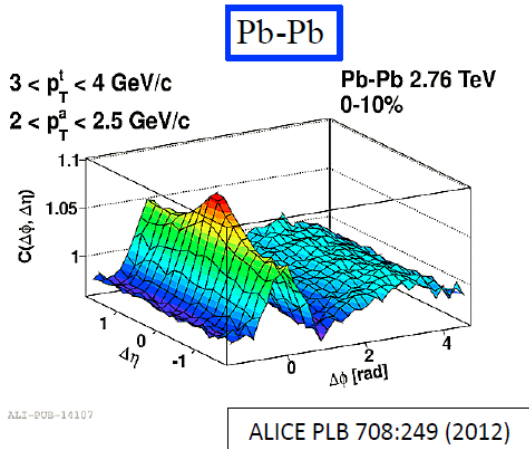
- К усилению может привести:
  - Изменение функции фрагментации;
  - Изменение доли глюонных/кварковых струй;
  - Искажение  $p_T$  спектра партонов в результате потери энергии (изменяется диапазон триггерных частиц).

PRL 108, 092301 (2012)

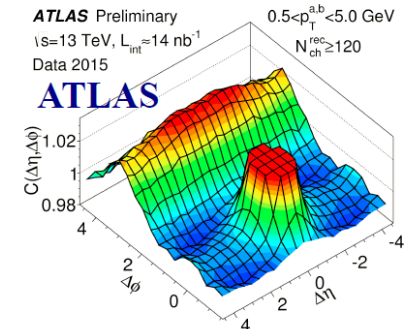
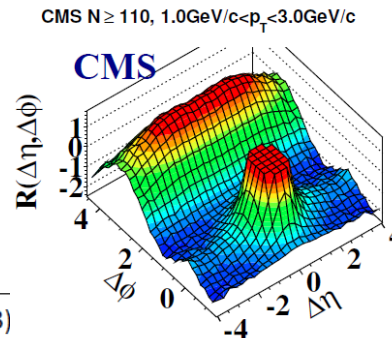
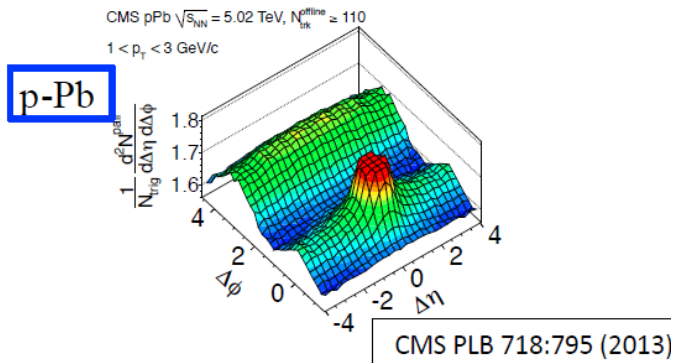


# Двухчастичные корреляции: ридж эффект в pp, pPb и PbPb столкновениях

- «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

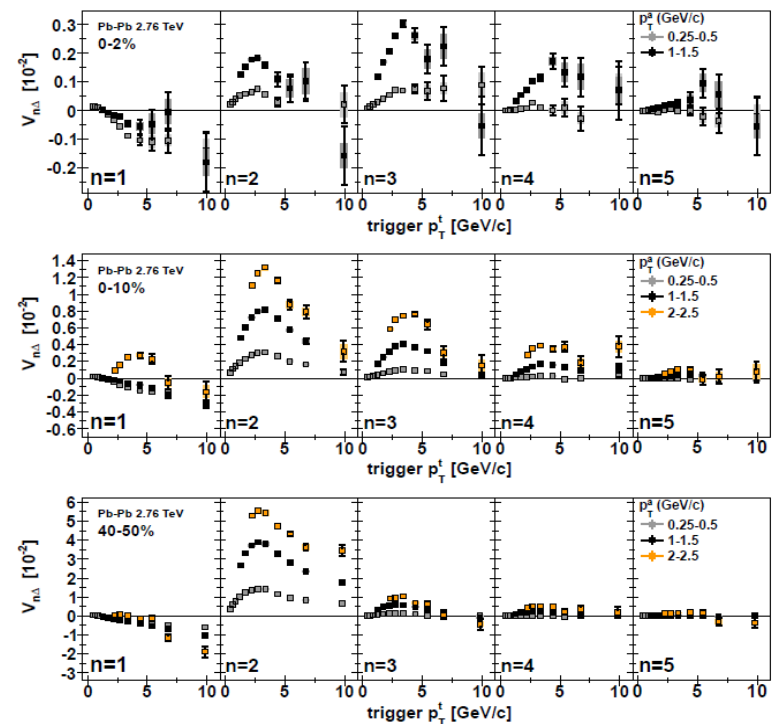
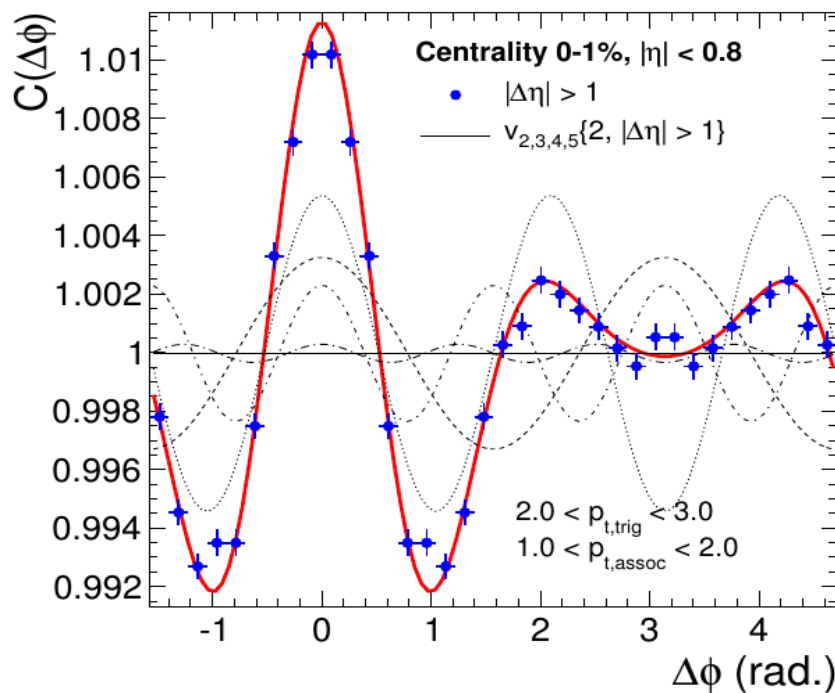


# Двухчастичные корреляции: разложение корреляционной функции на гармоники

- 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

