



Физический факультет
Московского
государственного университета
имени М.В.Ломоносова



ИЗУЧЕНИЕ АЗИМУТАЛЬНОЙ АНИЗОТРОПИИ В СОУДАРЕНИЯХ РАЗЛИЧНЫХ ИОНОВ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИ NUDJET++ ПРИ ЭНЕРГИЯХ БОЛЬШОГО АДРОННОГО КОЛЛАЙДЕРА

Выполнил: студент 213м группы Мягков Д.А.

Научный руководитель: с.н.с. ЛСВ ОЭФВЭ НИИЯФ МГУ к. ф.-м. н. Петрушанко С.В.



Введение

- Кварк-глюонная плазма (КГП) — новое фазовое состояние вещества получаемое при сверхвысоких температурах и плотностях энергии
- Экспериментальное изучение КГП проводится на коллайдерах и ускорителях высоких энергий
- Теоретическое изучение КГП осуществляется с помощью компьютерного моделирования, в т.ч. методами Монте-Карло

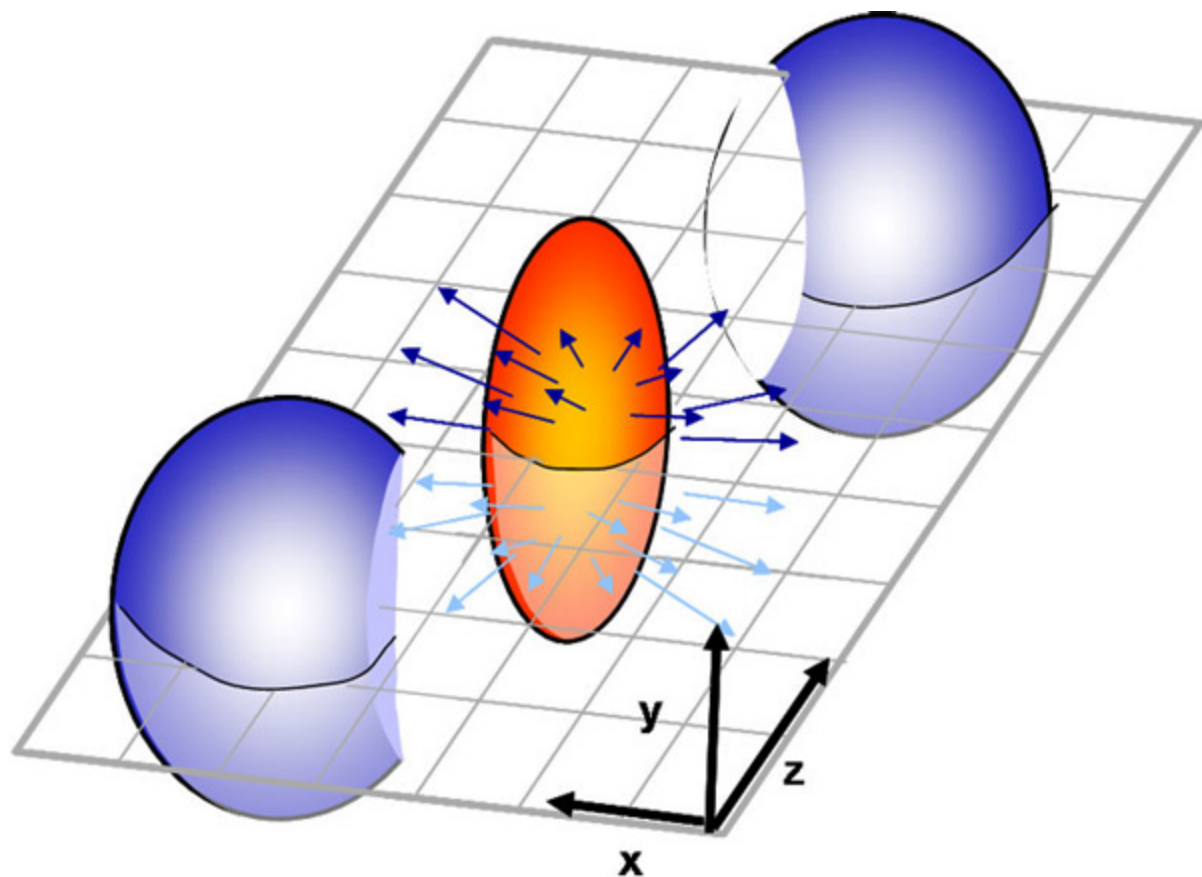


Азимутальная анизотропия в соударениях тяжелых ядер

В нецентральных соударениях тяжелы ядер образуется анизотропный объем КГП.

После адронизации КГП рождаются тысячи заряженных частиц, начальный импульс которых зависит от градиента давления в объеме КГП

Рождаемые частицы будут распределены неравномерно в азимутальной плоскости, что порождает азимутальную анизотропию



Азимутальные потоки заряженных частиц

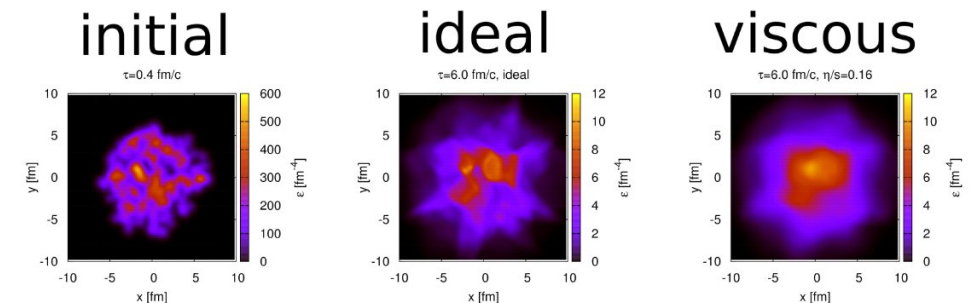
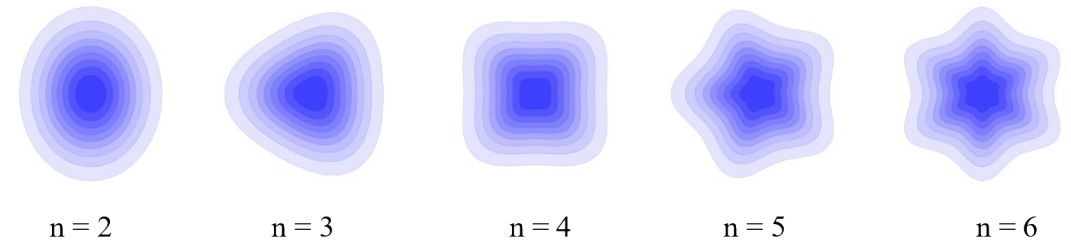
Информация об азимутальной анизотропии частиц напрямую связана с процессами эволюции «капли» КГП, поэтому ее изучение представляет научный интерес

Для численного описания азимутальной анизотропии можно воспользоваться Фурье-разложением распределения числа частиц по азимутальному углу

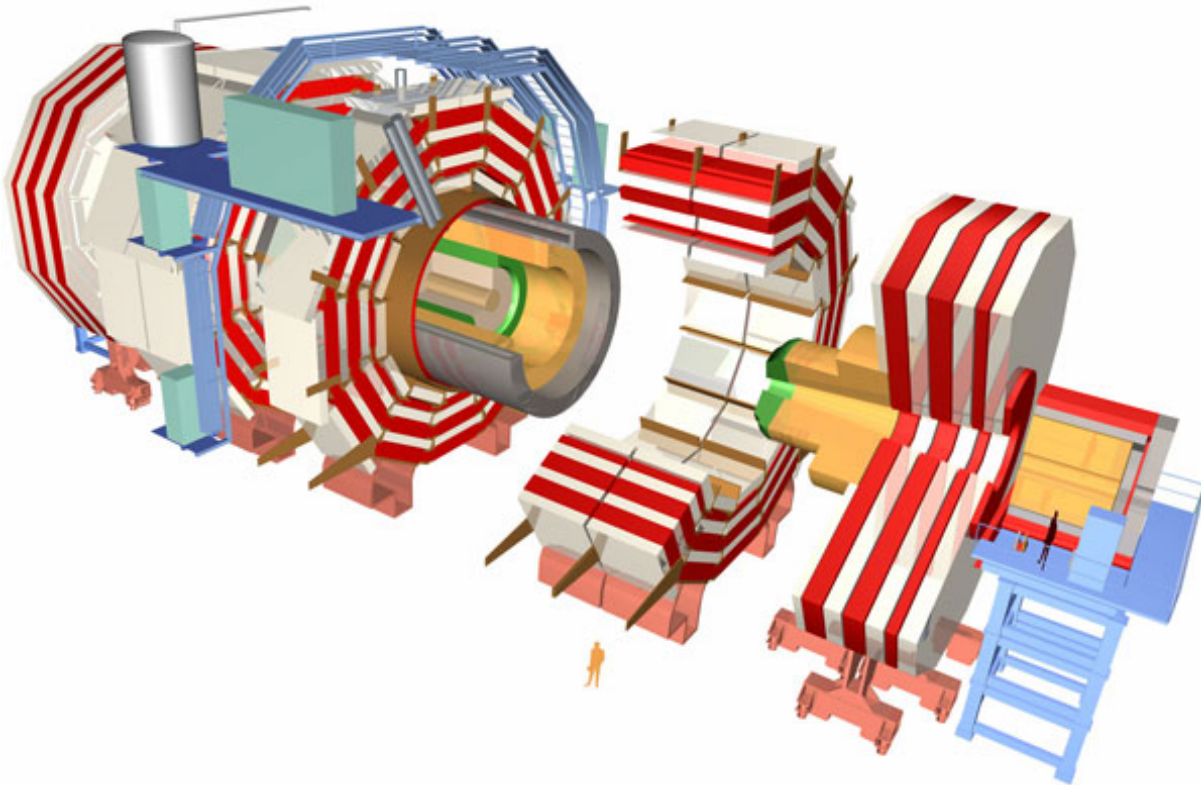
$$E \frac{d^3 N}{d^3 p} = \frac{1}{\pi} \frac{d^2 N}{dp_t^2 dy} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} v_n \cos n(\phi - \Psi_n) \right]$$

$$\frac{2\pi}{N} \frac{dN}{d\phi} = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} v_n \cos n(\phi - \Psi_n)$$

Коэффициенты этого разложения v_n называют гармониками азимутального потока или просто эллиптическим (v_2) триангулярным (v_3) и т.д. потоками



Экспериментальное исследование азимутальной анизотропии



Изучением КГП занимались: STAR, PHENIX, BRAHMS, PHOBOS, CMS, ATLAS, ALICE и др.

Детектор CMS (Compact Muon Solenoid)

- Трекинг-детектор $|\eta| < 2.4$
- Эм калориметр $|\eta| < 3.0$
- Адронный калориметр $|\eta| < 3.0$
- Мюонные камеры $|\eta| < 2.4$
- Форвард-калориметры $3.0 < |\eta| < 5.2$
- Поле соленоида до 3.8 Тл
- Аппаратный триггер L1 до 100 кГц
- Триггер высокого уровня (HLT) до 1 кГц



Экспериментальные данные CMS по азимутальной анизотропии

В работе используются три набора данных коллаборации CMS

- Pb-Pb события $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ, набранные во время Run2 в 2015 г. ($26 \mu b^{-1}$)
Sirunyan A.M. et al. Azimuthal anisotropy of charged particles with transverse momentum up to 100 GeV/c in PbPb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV // Physics Letters B. — 2018. — Jan. — Vol. 776. — P. 195–216.
- Xe-Xe события $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$ ТэВ, набранные во время Run2 в 2017 г. ($3.42 \mu b^{-1}$)
Sirunyan A. M. et al. Charged-particle angular correlations in XeXe collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$ TeV // Physical Review C. — 2019. — Окт. — Vol. 100, no. 4.
- Pb-Pb события $\sqrt{s_{NN}} = 5.36$ ТэВ, набранные во время Run3 в 2023 г. ($2 nb^{-1}$)
Characterizing the Initial State in XeXe and PbPb Collisions using Multiparticle Cumulants : Rep. / CERN. — Geneva : 2025.

Для всех наборов справедливо:

$$|\eta| < 2.4 \text{ и } 0.3 < p_T < 10.0 \text{ ГэВ}/c$$



Монте-Карло генератор HYDJET++

HYDJET

Гибридный Монте-Карло генератор
ядро-ядерных соударений. Включает в
себя мягкую гидродинамическую часть и
жесткие мультипартонные процессы

<http://lav01.sinp.msu.ru/~igor/hydro/hydjet.html>

(HYDRO + PYQUEN)

Lokhtin & Snigirev, 2006,

EPJC, 45, 211

HYDJET++

Дальнейшее развитие генератора
(улучшена мягкая компонента на основе
FAST MC + идентичная HYDJET
жесткая компонента PYQUEN)

<http://lav01.sinp.msu.ru/~igor/hydjet++/>

(стандартная версия 2.4)

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

K.Tywoniuk, Comp.Phys.Comm. 180 (2009) 779



Методы расчета азимутальных потоков

Метод истинной плоскости реакции. В HYDJET++ по умолчанию

- В генераторе плоскость реакции задается внутренним кодом и считается известной.
- Таким образом, вычисление потоков возможно сразу по формуле:
$$v_n = \langle \cos[n(\phi - \psi_{r.p.})] \rangle$$
, где $\psi_{r.p.}$ — азимутальный угол плоскости реакции

Метод с расчетом плоскости реакции

- В этом методе угол плоскости реакции вычисляется из двух независимых групп частиц.
- $$\Psi_n = \left(\tan^{-1} \frac{\sum_i \omega_i \sin(n\phi_i)}{\sum_i \omega_i \cos(n\phi_i)} \right) / n$$
- Зная угол плоскости реакции, можно рассчитать потоки по известной формуле



Методы 2-х и 4-х частичных кумулянтов

- Двух- и четырехчастичные корреляции в методе кумулянтов могут быть описаны так:
- $\langle\langle 2 \rangle\rangle = \langle\langle e^{in(\varphi_1 - \varphi_2)} \rangle\rangle$ $\langle\langle 4 \rangle\rangle = \langle\langle e^{in(\varphi_1 + \varphi_2 - \varphi_3 - \varphi_4)} \rangle\rangle$, здесь двойные угловые скобки означают усреднение по частицам и по событиям
- Кумулянты второго и четвертого порядков:
 $c_n\{2\} = \langle\langle 2 \rangle\rangle$ $c_n\{4\} = \langle\langle 4 \rangle\rangle - 2 * \langle\langle 2 \rangle\rangle^2$
- Тогда поток может быть вычислен по формуле:
 $v_n\{2\} = \sqrt{\langle\langle e^{in(\varphi_1 - \varphi_2)} \rangle\rangle}$ или $v_n\{2\} = \sqrt{c_n\{2\}}$ и $v_n\{4\} = \sqrt[4]{-c_n\{4\}}$



Методы кумулянтов и метод скалярного произведения

С точки зрения вычислений, рассчитывать азимутальные потоки легче через т.н. Q-вектор потока:

$$c_n\{2\} = \left\langle \frac{|Q_n|^2 - M}{M(M-1)} \right\rangle; c_n\{4\} = \frac{\langle |Q_n|^4 \rangle + \langle |Q_n|^2 \rangle - 2\langle \text{Re}(Q_{2n} Q_n^* Q_n^*) \rangle}{M(M-1)(M-2)(M-3)} - 2 \frac{2(M-2)\langle |Q_n|^2 \rangle - M(M-3)}{M(M-1)(M-2)(M-3)}$$

Q-вектор определяется так: $Q_n = \sum_{j=1}^M e^{i\varphi_j}$, M – множественность

В свою очередь, метод скалярного произведения в терминах Q-векторов:

$$v_n\{SP\} = \frac{\langle Q_n^A Q_n^B \rangle}{\sqrt{\langle Q_n^A Q_n^A \rangle \langle Q_n^B Q_n^B \rangle}}, \text{ где под } Q_n^A \text{ и } Q_n^B \text{ подразумеваются Q-вектора независимых подсобытий}$$



Азимутальные потоки в столкновениях Xe-Xe и Pb-Pb

Договоримся, что далее, до тех пор пока не будет указано обратное, на всех рисунках синими квадратами будут изображаться результаты, полученные стандартным методом HYDJET++ — методом истинной плоскости реакции (TRPM). Красными квадратами будут изображаться результаты, полученные новым, для данного графика методом

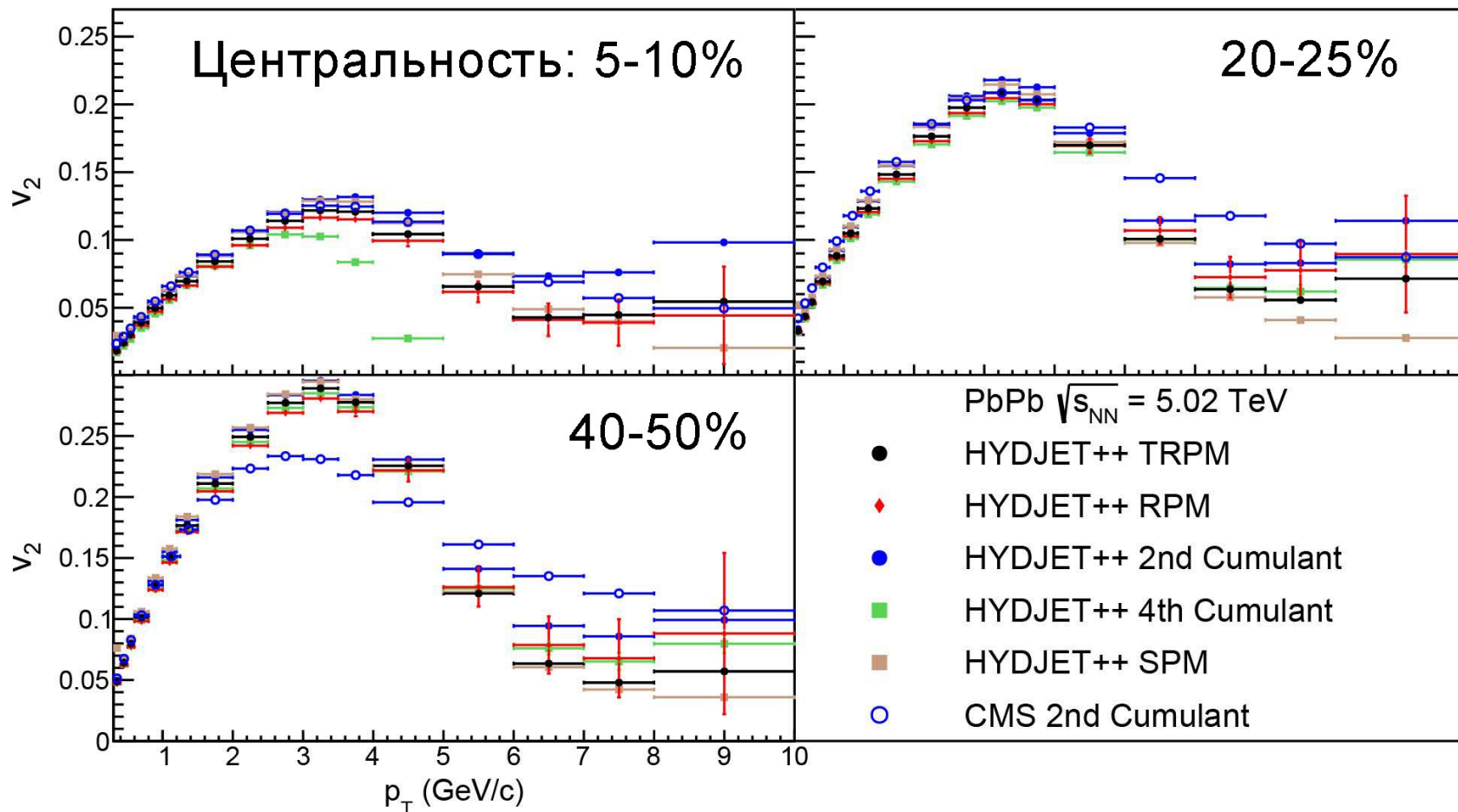
Черными кругами, по возможности, будут изображаться экспериментальные данные коллаборации CMS

Рассматриваться будут избранные регионы центральности: 5-10% (центральные столкновения), 20-25% (полуцентральные столкновения) и 40-50% (периферические столкновения).

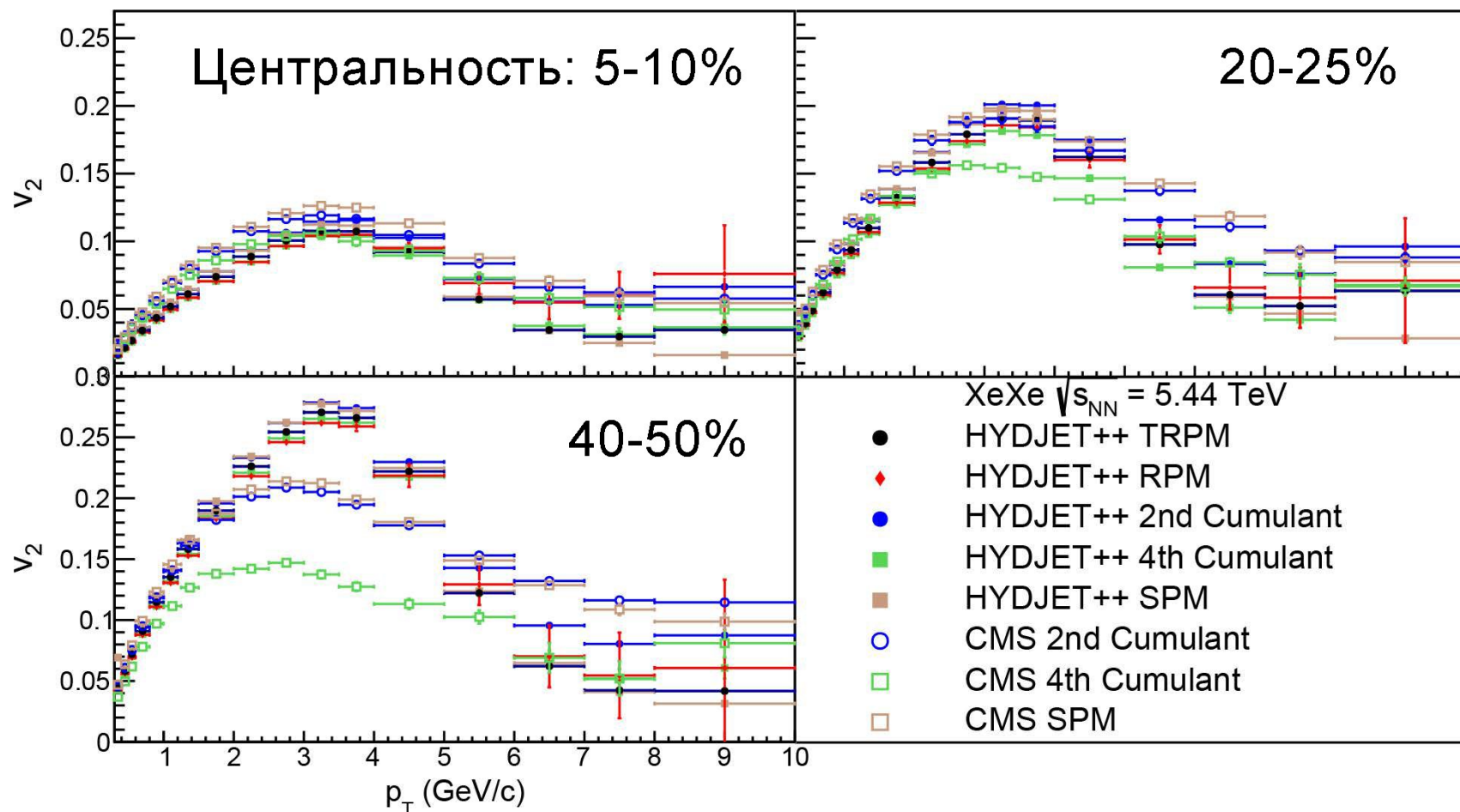
Для каждого региона центральности статистика составляет ок. 1 млн. событий



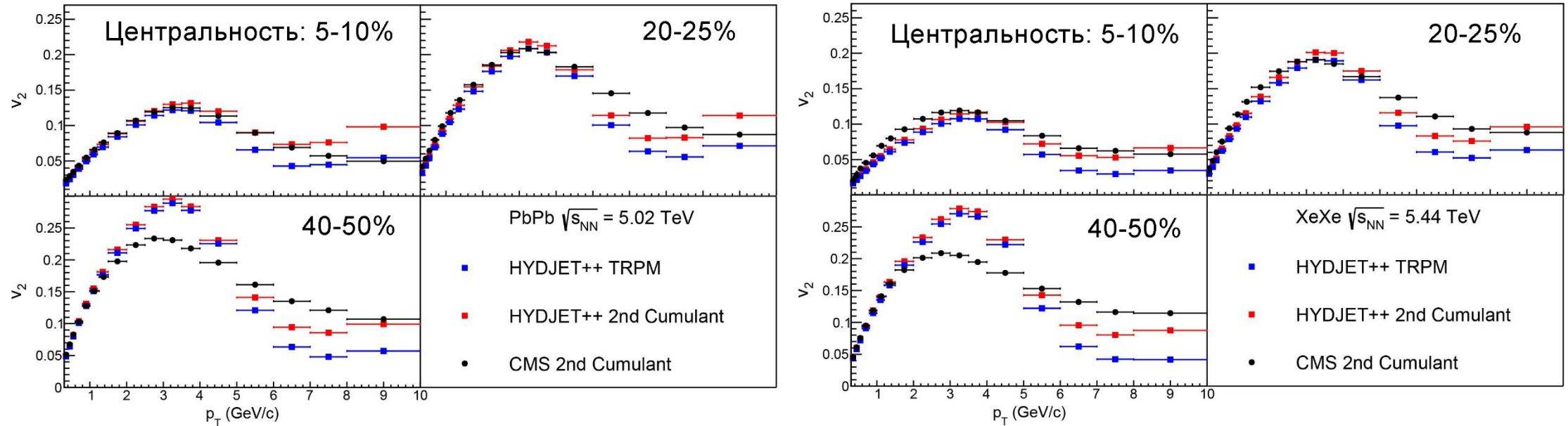
Зависимости коэффициента эллиптического потока v_2 от поперечного импульса p_T рождающихся заряженных частиц для столкновений Pb–Pb при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ, вычисленных методами истинной плоскости реакции (TRPM), второго и четвертого кумулянтов (2nd и 4th Cumulant), а также методом скалярного произведения (SPM)



Зависимости коэффициента эллиптического потока v_2 от поперечного импульса p_T рождающихся заряженных частиц для столкновений Xe–Xe при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$ ТэВ, вычисленных методами истинной плоскости реакции (TRPM), второго и четвертого кумулянтов (2nd и 4th Cumulant), а также методом скалярного произведения (SPM)



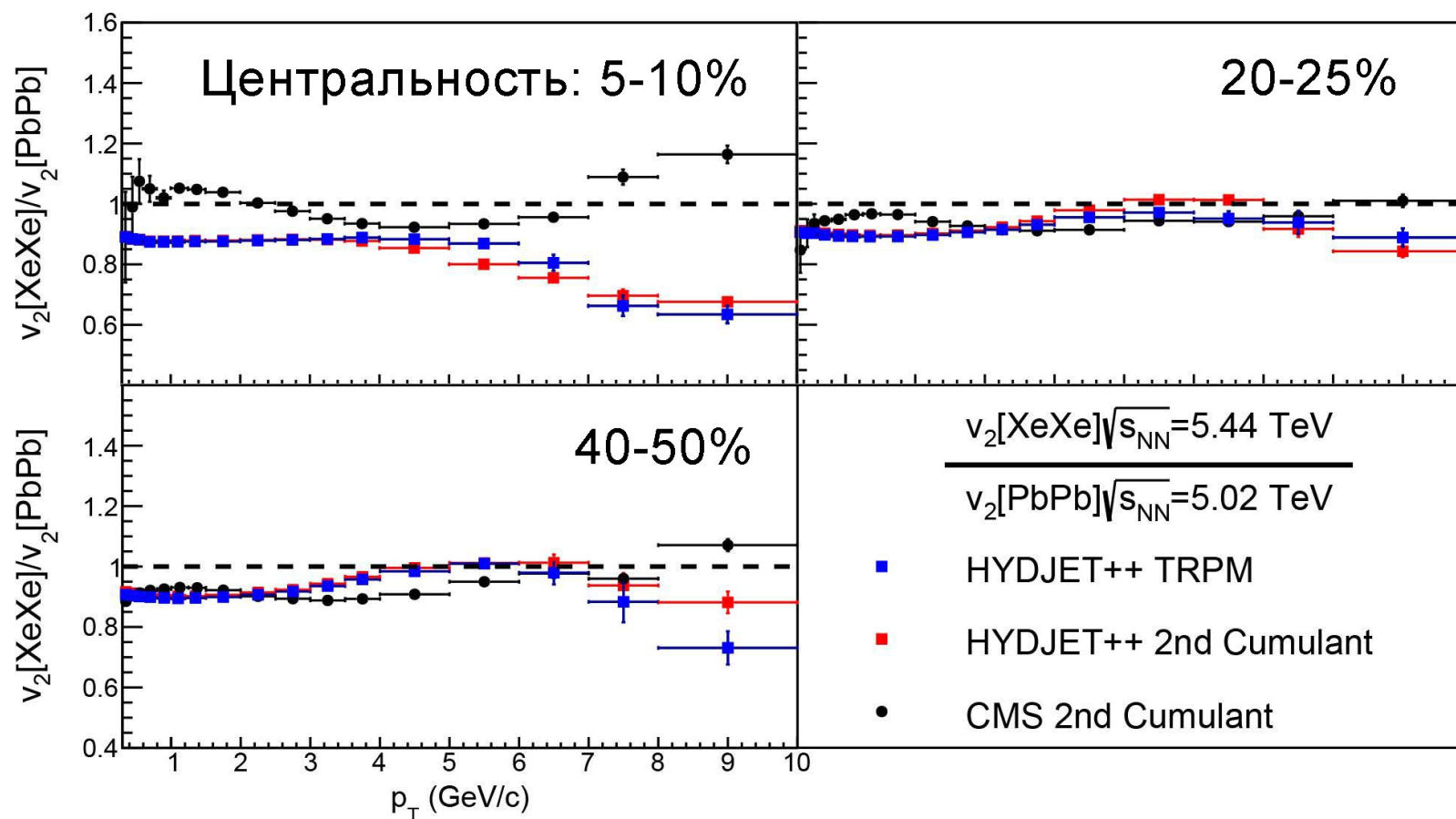
Зависимости коэффициентов v_2 от поперечного импульса p_T для столкновений Pb-Pb (слева) и Xe-Xe (справа), вычисленных методами второго кумулянта (2nd Cumulant) и TRPM



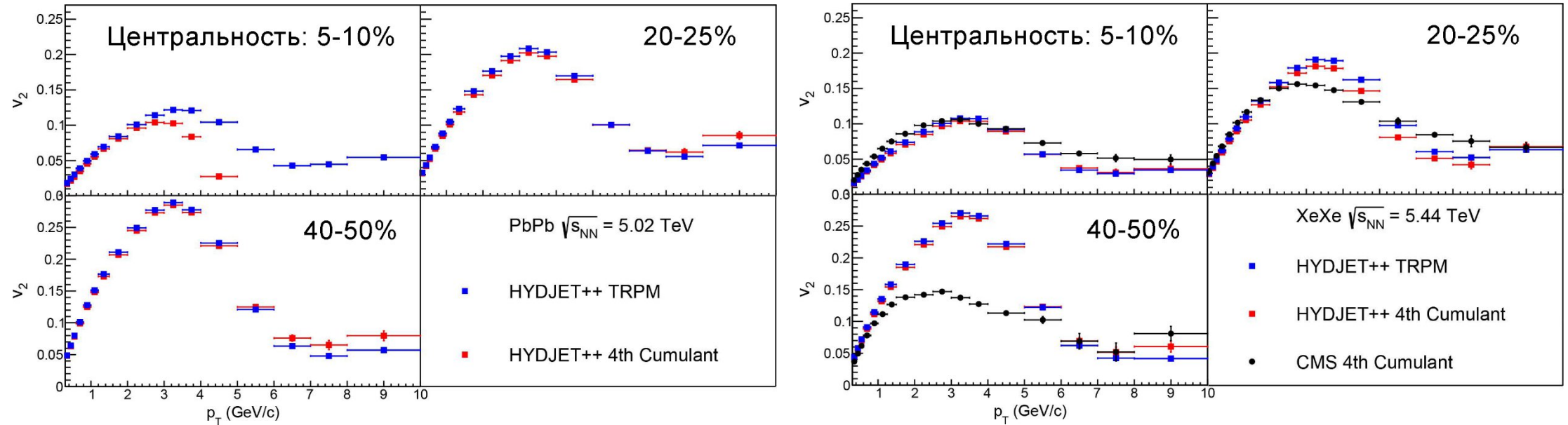
- При сравнении результатов генератора HYDJET++ с экспериментом CMS, вычисленных теми же методами, наблюдается наибольшее согласование данных
- Важным является отличие сходимости данных в области малых p_T для центральных столкновений между Xe-Xe и Pb-Pb. Это сигнал о важности учета начальной геометрии



Зависимости отношений коэффициентов эллиптических потоков v_2 в столкновениях Pb-Pb к коэффициентам в столкновениях Xe-Xe от p_T вычисленные с помощью метода второго кумулянта (2nd Cumulant)



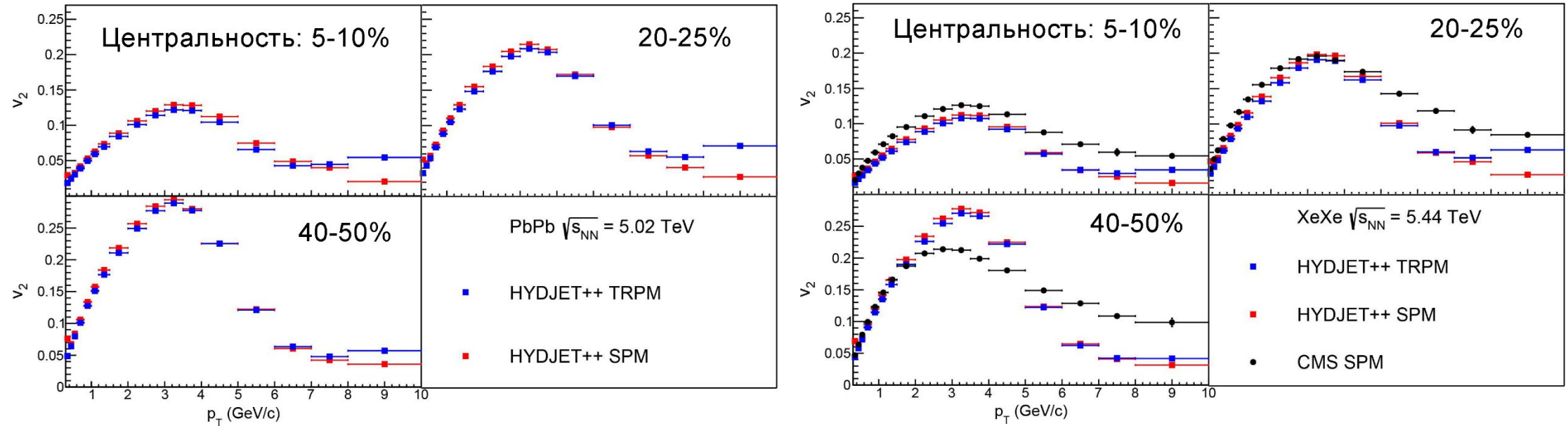
Зависимости коэффициентов v_2 от поперечного импульса p_T для столкновений Pb-Pb (слева) и Xe-Xe (справа), вычисленных методами четвертого кумулянта (4th Cumulant) и TRPM



- Значения, полученные методом четвертого кумулянта, как и ожидалось, находятся систематически ниже значений, полученных TRPM
- Сравнение с экспериментальными данными (для Xe) показывает хорошую сходимость в полуцентральной области, в области низких p_T



Зависимости коэффициентов v_2 от поперечного импульса p_T для столкновений Pb-Pb (Слева) и Xe-Xe (справа), вычисленных методами скалярного произведения (SPM) и TRPM



- Результаты полученные методом скалярного произведения систематически выше аналогичных для TRPM.
- Сравнение с экспериментальными данными показывает о удовлетворительную сходимость в области малых p_T



Интегральные значения азимутальных потоков

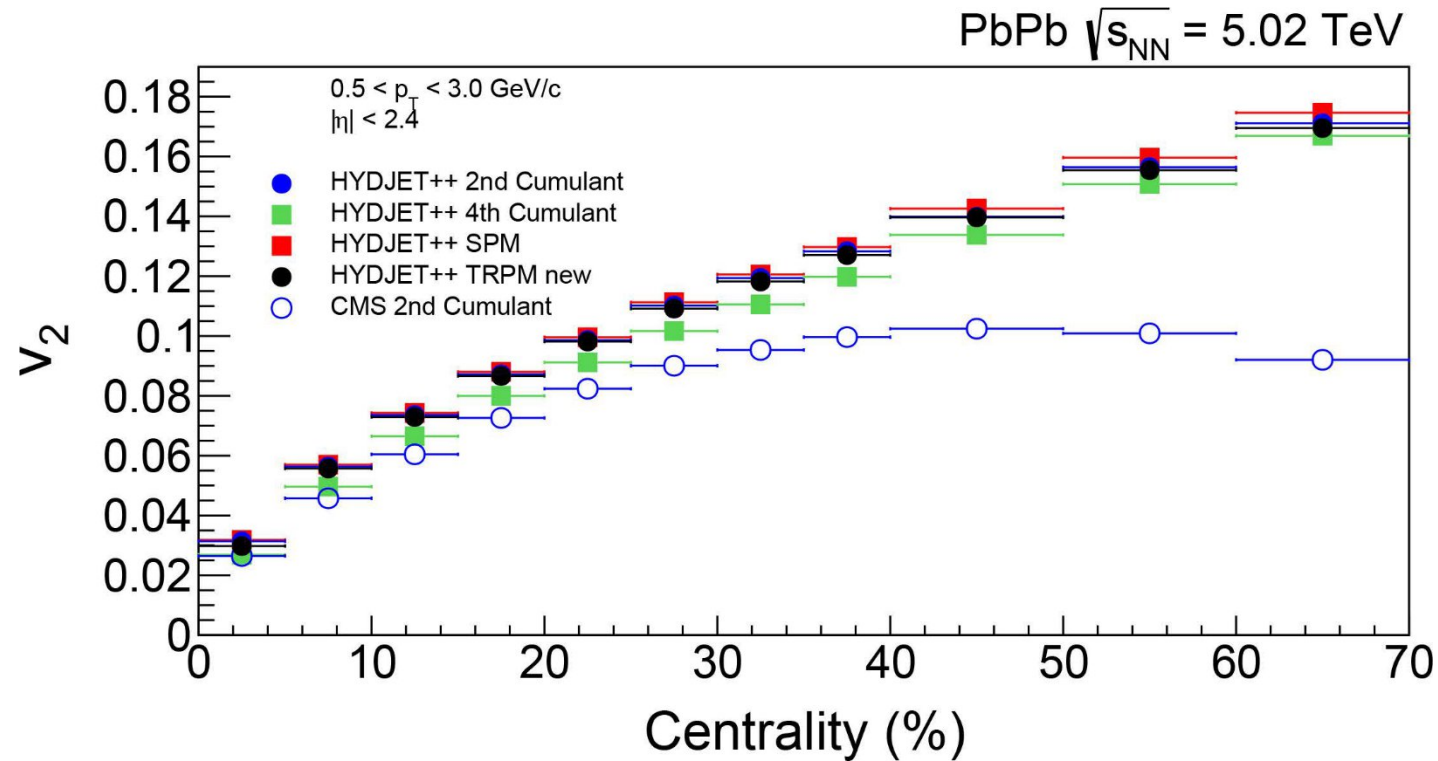
Интегральными коэффициентами азимутальной анизотропии называют усредненные по спектру значения дифференциальных коэффициентов v_2 (рассматривали ранее)

Интегральные потоки в отличие от дифференциальных более устойчивы к начальным флуктуациям и служат надежным источником информации о глобальных параметрах гидродинамических моделей и, в частности, о влиянии начальной геометрии

В данной работе, с целью точного сравнения результатов с данными CMS, используются интегральные значения, полученные в диапазоне $0.3 < p_T < 3.0$ ГэВ/с, кроме того продолжает действовать введенное ранее условие $|\eta| < 2.4$



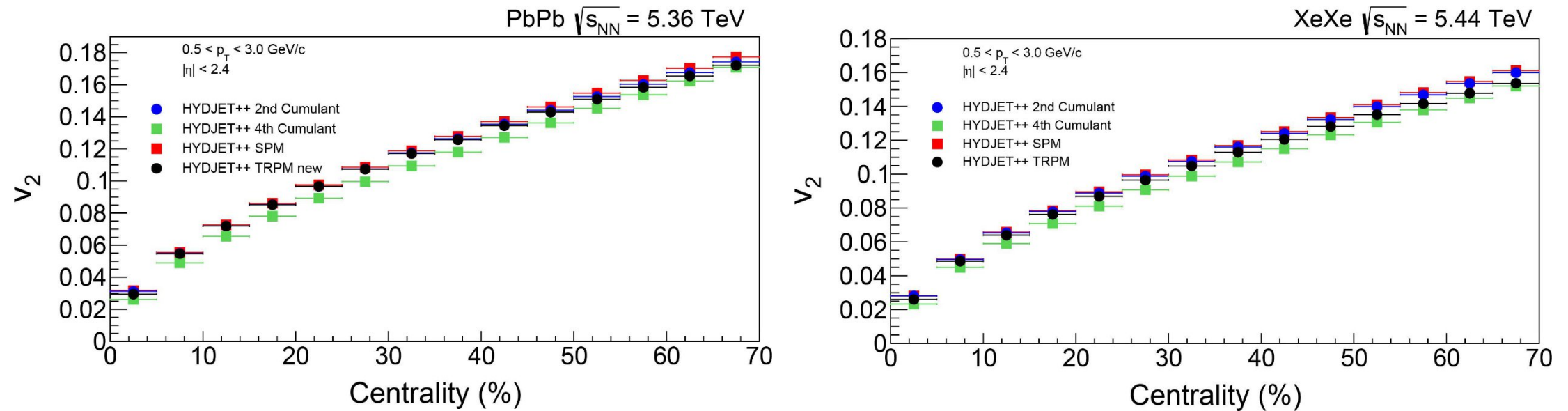
Интегральные распределения эллиптических потоков v_2 в зависимости от центральности в столкновениях Pb–Pb при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ, вычисленные с помощью методов истинной плоскости реакции, скалярного произведения, 2-го и 4-го кумулянтов в HYDJET++ и методом второго кумулянта в эксперименте CMS



- Установим иерархию методов: $v_2\{4\} < v_2\{TRPM\} < v_2\{2\} < v_2\{SP\}$
- Удовлетворительное описание эксперимента наблюдается в области до 30% центральности



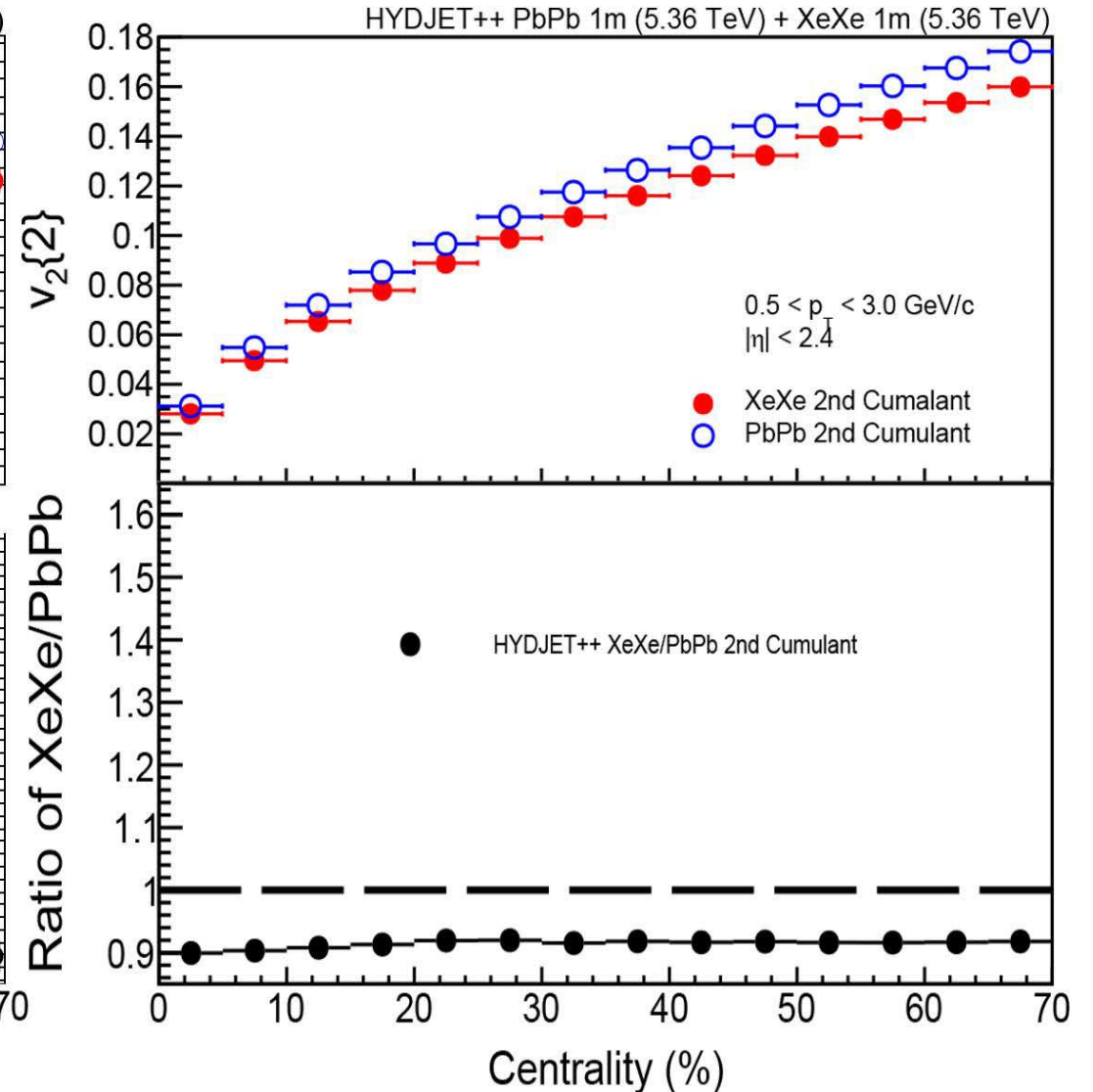
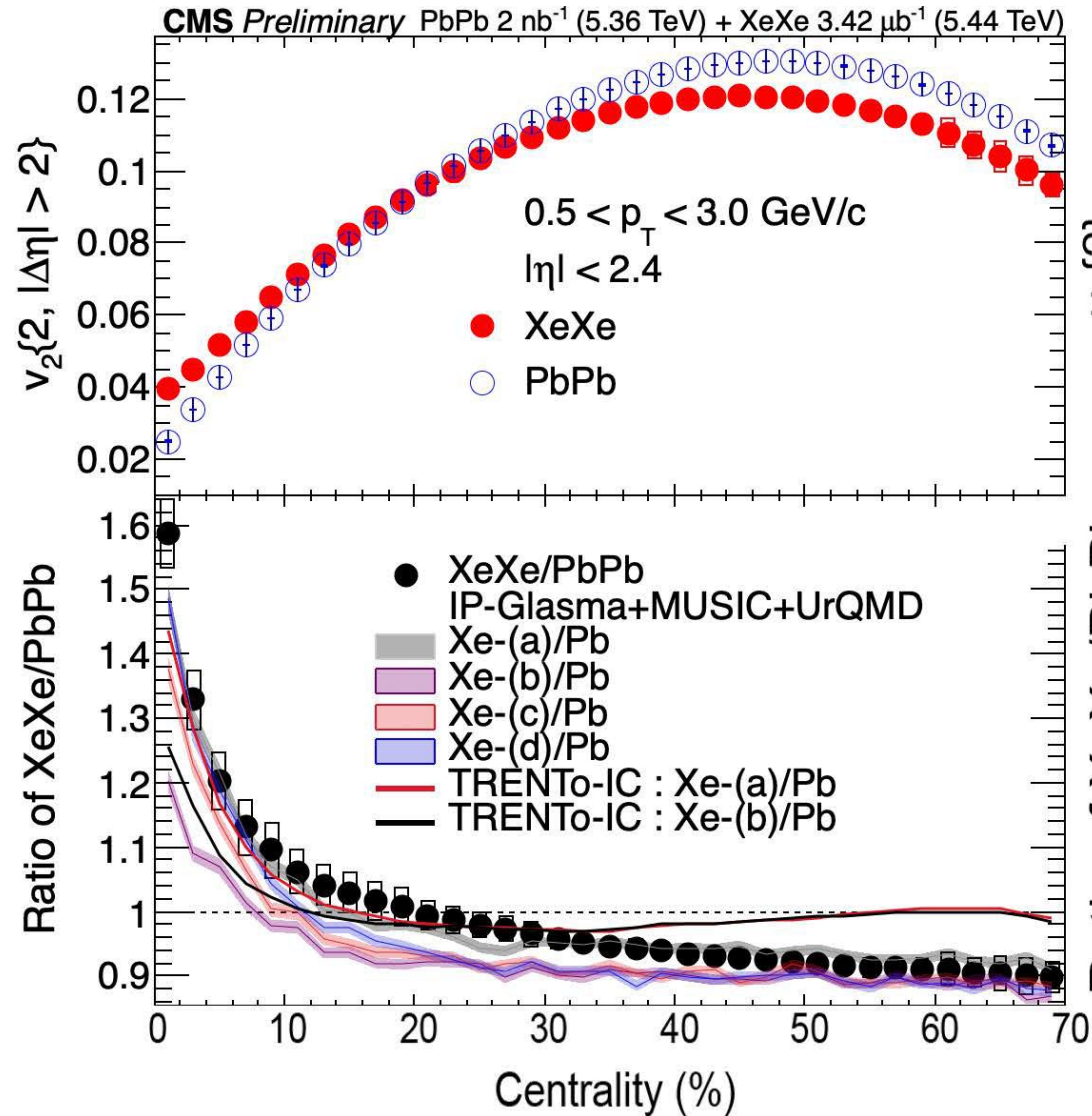
Интегральные распределения эллиптических потоков v_2 рассчитанные 4-мя различными методами для столкновений Pb-Pb при $\sqrt{s_{NN}} = 5.36$ ТэВ (слева) и столкновений Xe-Xe при $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$ ТэВ (справа)



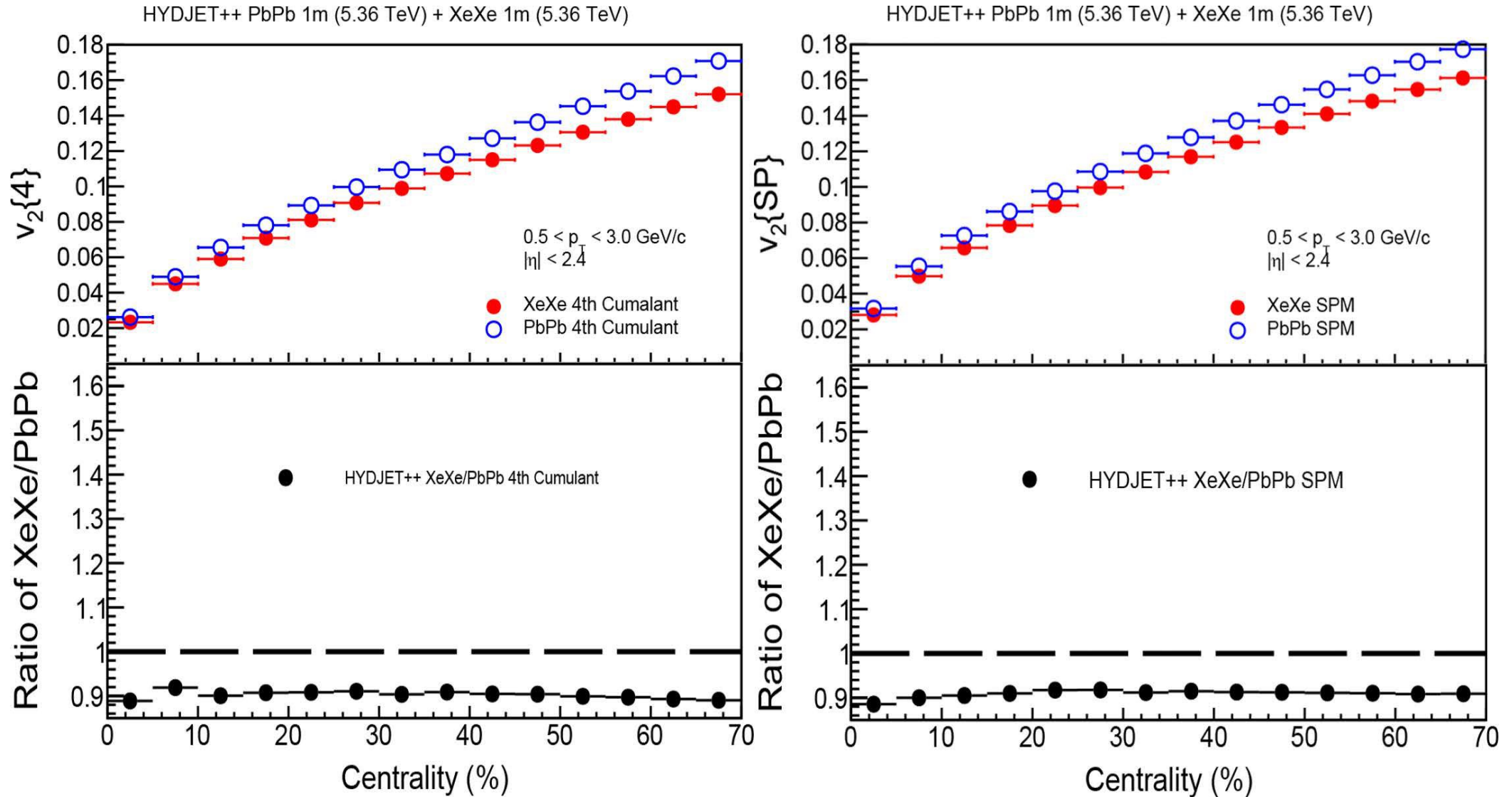
- Сохраняется взаимная иерархия методов, установленная ранее
- Абсолютные значения интегральных потоков для таких ядерных систем мало различаются, несмотря на разницу по массовому числу почти в 1.5 раза.



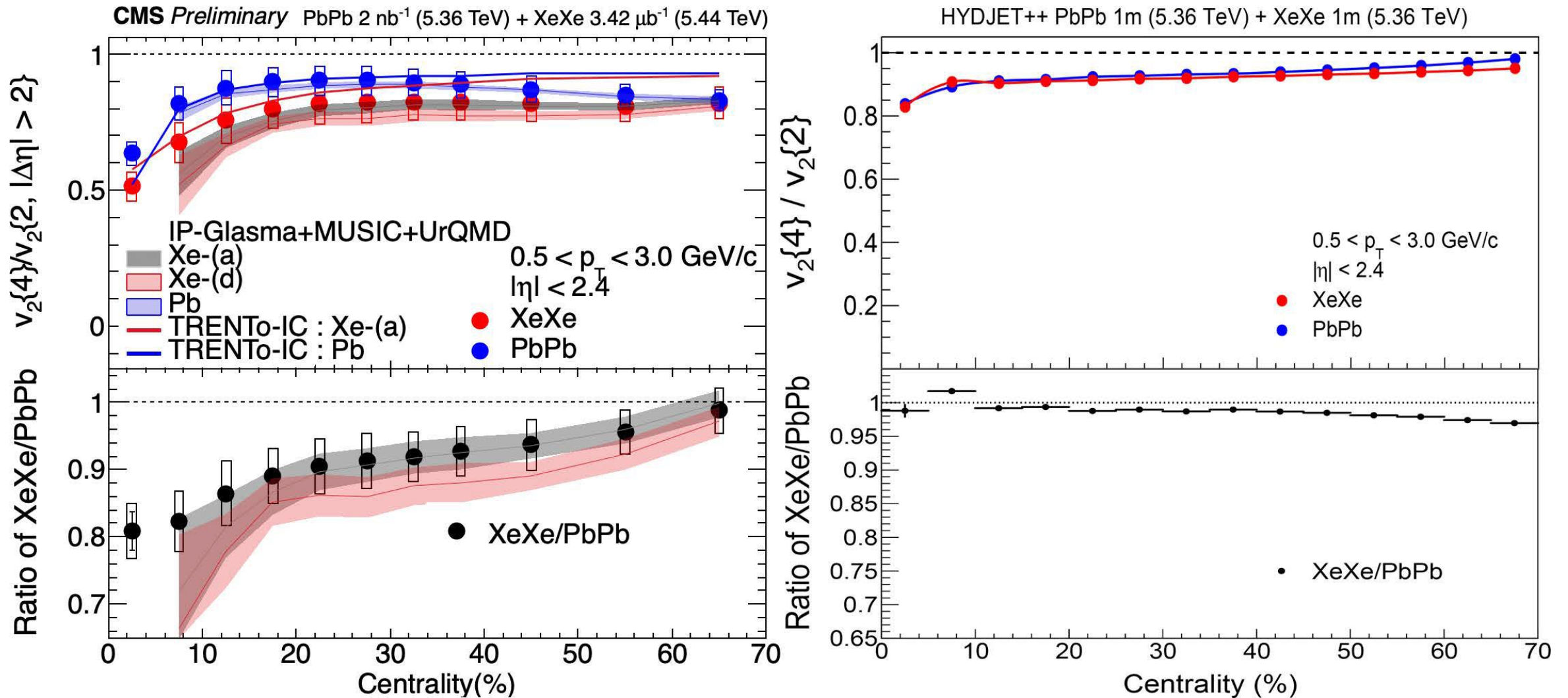
Интегральные значения эллиптических потоков в столкновениях Xe—Xe и Pb—Pb, вычисленные с помощью метода 2го кумулянта в HYJET++ (справа) и сравнение с экспериментом CMS (слева)



Интегральные значения эллиптических потоков в столкновениях Xe—Xe и Pb—Pb, вычисленные с помощью метода 4го кумулянта (слева) и метода скалярного произведения (справа) в HYJET++



Сравнение отношений интегральных эллиптических потоков $v_2\{4\}/v_2\{2\}$ в зависимости от центральности соударений, вычисленные в HYDJET++ (справа) и в эксперименте CMS (слева)



Предсказания для столкновений O-O при энергиях LHC

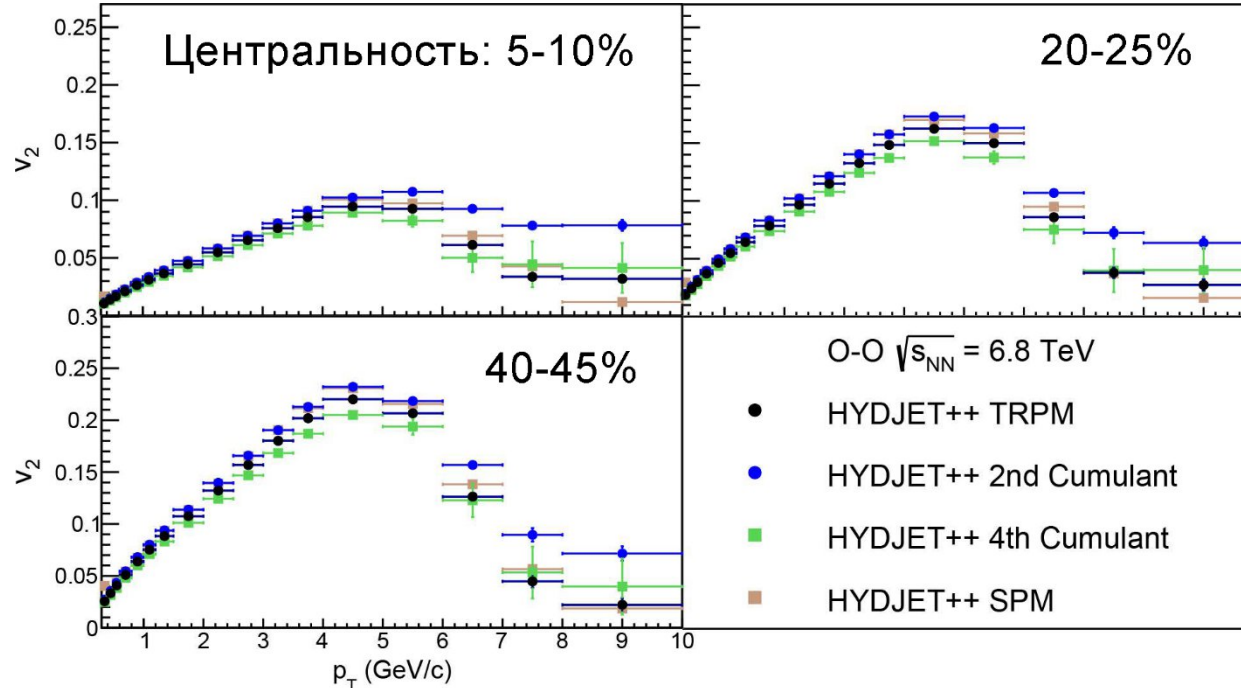
Планируемые столкновения ядер кислорода (O–O) на Большом адронном коллайдере представляют собой уникальную возможность для изучения переходного режима между малыми и большими системами в ядерных столкновениях

Ядро кислорода является дважды-магическим с предполагаемой кластерной структурой (упаковка 4-х альфа-частиц), что делает его интересным для исследований

Ряд теоретических исследований предсказывает сильное влияние выбора начальной конфигурации системы (кластерная модель или «капля») на типичные для столкновений тяжелых ионов распределения: по псевдобыстроте, по p_T и распределений v_n



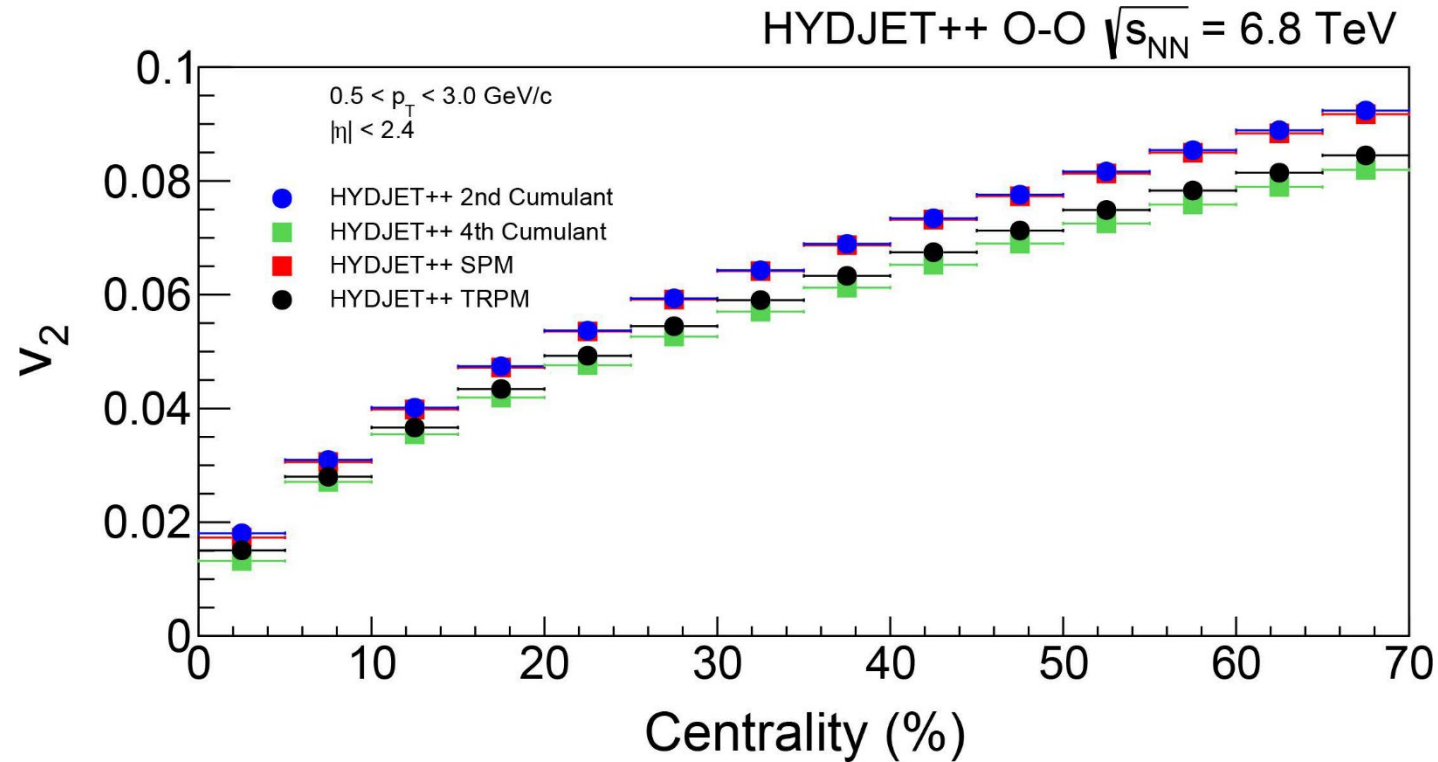
Зависимости коэффициента эллиптического потока v_2 от поперечного импульса p_T рождающихся заряженных частиц для столкновений О–О при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 6.8$ ТэВ, вычисленных методами истинной плоскости реакции (TRPM), второго и четвертого кумулянтов (2nd и 4th Cumulant), а также методом скалярного произведения (SPM)



- Поведение распределений v_2 для О-О сильно отличается от аналогичных для тяжелых ядерных систем, что может свидетельствовать о слабом гидродинамическом отклике системы О-О
- Несмотря на различия в поведении, сохраняется глобальная иерархия методов



Интегральные распределения эллиптических потоков v_2 в зависимости от центральности в столкновениях О–О при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 6.8$ ТэВ, вычисленные с помощью методов истинной плоскости реакции (TRPM), скалярного произведения (SPM), 2-го и 4-го кумулянтов (2nd и 4th Cumulant) в HYDJET++



- Сохраняется иерархия методов: $v_2\{4\} < v_2\{TRPM\} < v_2\{2\} < v_2\{SP\}$
- Абсолютные значения интегральных величин в столкновениях О-О заметно ниже, чем аналогичные для тяжелых ядерных систем



Планы по дальнейшей модификации генератора HYDJET++

В результате проведенного исследования были выявлены области недостаточно хорошего описания генератором HYDJET++ экспериментальных данных. Зачастую расхождения были вызваны отсутствием учета в HYDJET++ деформационной структуры сталкивающихся ядер

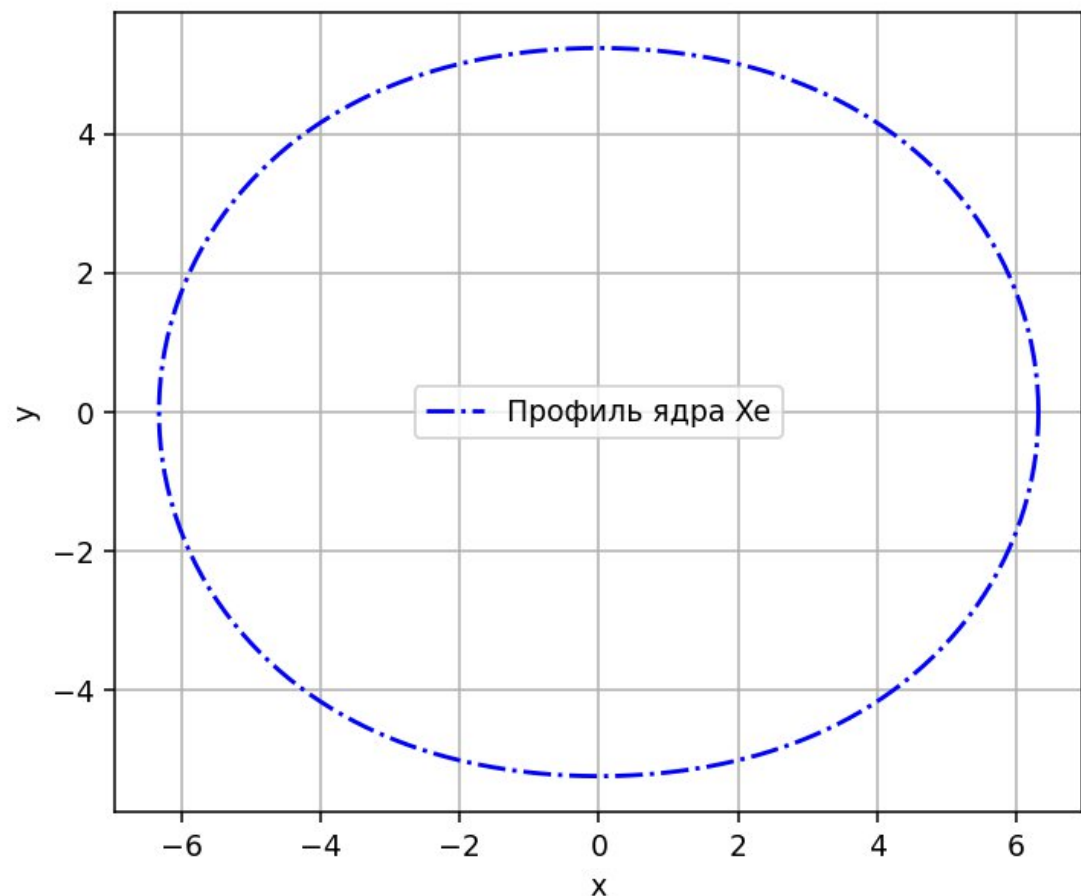
В дальнейшем планируется внедрить в HYDJET++ аппарат по учету ядерной деформации в следующем формализме:

$$\rho(r, \theta) = \frac{\rho_0}{1 + \exp[(r - R(\theta))/a_0]}, \quad R(\theta) = R_0 [1 + \beta_2 Y_{20}(\theta) + \beta_4 Y_{40}(\theta)]$$

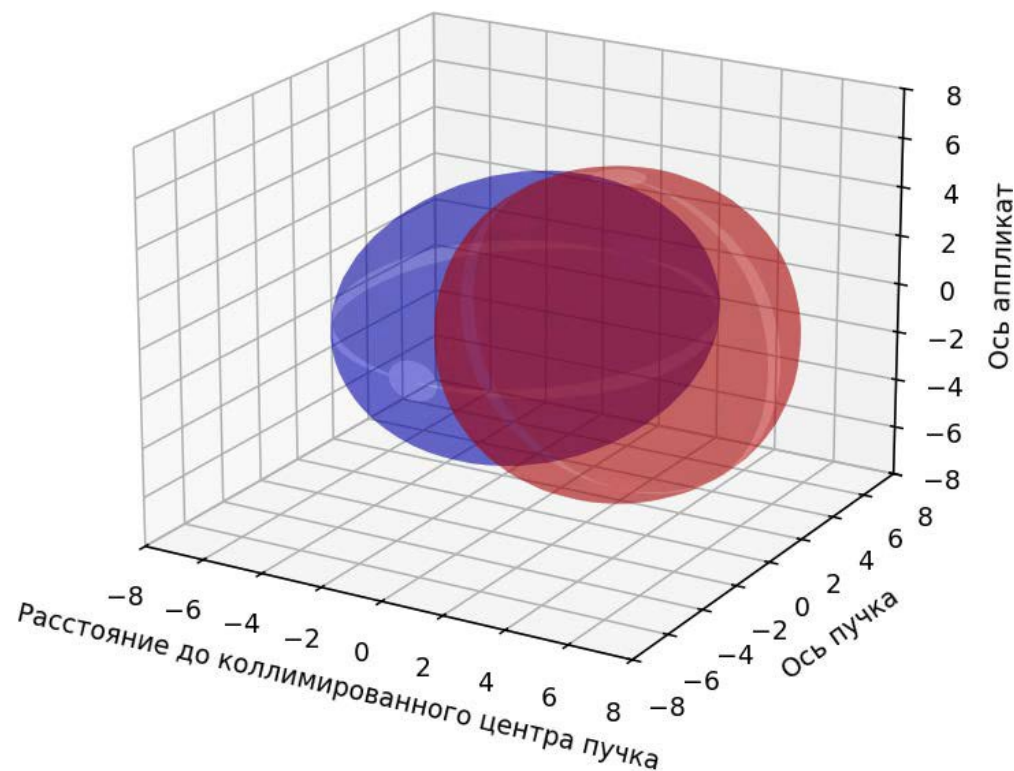
где β_2 и β_4 параметры деформации для квадрупольной и гексадекапольной моды, а Y_{nm} является сферической функцией в привычном понимании. Левое выражение представляет из себя ядерную плотность в потенциале Вудса-Саксона.



Пример геометрии столкновения двух деформированных ядер



Столкновение деформированных ядер (тел вращения)



Выводы

1. С помощью Монте-Карло генератора HYDJET++ было проведено моделирование рождения частиц в соударениях Xe–Xe и Pb–Pb в рамках изучения азимутальной анизотропии при энергиях коллайдера LHC и осуществлено их сравнение с экспериментальными данными эксперимента CMS. Использовано 4 метода для вычисления интегральных и дифференциальных значений v_2
2. Проведен анализ отличия и согласия указанных методов между собой на уровне сгенерированных событий модели HYDJET++, а также при сравнении с экспериментальными данными. Выявлены области наилучшего описания для каждого метода, а также их взаимная иерархия
3. Было показано, что HYDJET++ хорошо описывает поведение эллиптического и триангулярного азимутальных потоков в столкновениях тяжелых ионов в полуцентральных соударениях. В то же время периферические взаимодействия описываются недостаточно хорошо из-за известной ограниченности их описания в рамках гидродинамической модели.



Выводы

4. Показано, что для центральных соударений отличие результатов моделирования от экспериментальных данных вызвано влиянием деформационной структуры ядер. Таким образом установлена важность учета деформации ядер.
5. Также с помощью генератора HYDJET++ было проведено моделирование событий O–O как предсказание для будущих данных на коллайдере LHC. Был выявлен ряд особенностей, характерных для малых ядерных систем.
6. Был разработан план по дальнейшей модификации генератора HYDJET++, в которой будет учтены деформационные особенности различных ядер для более точного описания существующих и будущих экспериментальных данных на коллайдерах LHC, RHIC и NICA.



Публикации

- Д. А. Мягков and С. В. Петрушанко. Эллиптический и триангулярный потоки заряженных частиц в релятивистских столкновениях ядер Xe и Pb в модели HYDJET ++ и эксперименте CMS (LHC). *Ученые записки физического факультета Московского Университета*, (3):2330205, 2023.
- Д. А. Мягков and С. В. Петрушанко. Эллиптический и триангулярный азимутальные потоки частиц в столкновениях ядер Xe–Xe и Pb–Pb в Монте-Карло модели HYDJET ++ и эксперименте CMS на коллайдере LHC (CERN). *Ученые записки физического факультета Московского Университета*, (4):2340305, 2023.
- A. V. Belyaev, L. V. Bravina, A. S. Chernyshov, G. Kh Eyyubova, V. L. Korotkikh, I. P. Lokhtin, L. V. Malinina, D. A. Miagkov, S. V. Petrushanko, A. M. Snigirev, and E. E. Zabrodin. Recent results with HYDJET++ model for heavy-ion collisions. *Physics of Atomic Nuclei*, 86(6):1487–1492, 2023.
- Д. А. Мягков and С. В. Петрушанко. Azimuthal anisotropy in Xe–Xe and Pb–Pb collisions with the monte carlo model HYDJET ++ and the CMS detector at the energies of the LHC. *Moscow University Physics Bulletin*, 79(Suppl. 1):S82–S85, 2024.
- D. Myagkov, S. Petrushanko. calculations of azimuthal flows in collisions of heavy ions using the reaction plane and two-particle cumulant methods at the HYDJET++ for LHC energies.. *Particles and Nuclei, Letters* (Accepted by publisher), 2025
- D. A. Myagkov S. V. Petrushanko calculating azimuthal flows in Pb–Pb and Xe–Xe collisions with the HYDJET++ monte carlo generator at the LHC energies *Physics of Atomic Nuclei* (Accepted by publisher), 2025



Доклады

- D.A. Myagkov, S.V. Petrushanko. Azimuthal anisotropy in Xe–Xe and Pb–Pb collisions with the Monte- Carlo model HYDJET++ and the CMS detector at the energies of the LHC. *21st Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, (МГУ, Москва, Россия, 24-30 августа 2023)*
- Д. А. Мягков and С. В. Петрушанко. Предсказания для зависимостей азимутальных потоков заряженных частиц в релятивистских столкновениях тяжелых ядер в Монте-Карло модели HYDJET++ и эксперименте Компактный Мюонный Соленоид. *XXIII межвузовская молодежная научная школа-конференция имени Б. С. Ишханова "Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине" (МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия, 22-23 ноября 2023)*
- Д. А. Мягков and С. В. Петрушанко. Предсказания эллиптических и триангулярных потоков заряженных частиц в столкновениях Pb-Pb и O-O с помощью Монте-Карло генератора HYDJET++ для ускорителя LHC в сеансе Run 3. *XXXI Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2024» (МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия, 12-26 апреля 2024)*
- D. Myagkov, S. Petrushanko Elliptical and triangular azimuthal flows in heavy-ion collisions with HYDJET++ model at the LHC energies. *74-я международная конференция «ЯДРО-2024: Фундаментальные вопросы и приложения» (Дубна, Московская область, Россия, 1-5 июля 2024)*
- D.A. Myagkov, S.V. Petrushanko. CALCULATING AZIMUTHAL FLOWS IN PB–PB AND XE–XE COLLISIONS WITH THE HYDJET++ MONTE CARLO GENERATOR AT THE LHC ENERGIES. *The 7th International Conference on Particle Physics and Astrophysics, (МИФИ, Москва, Россия, 22-25 октября 2024)*



Доклады

- D.A. Myagkov, S.V. Petrushanko. CALCULATIONS OF AZIMUTHAL FLOWS IN RELATIVISTIC COLLISIONS OF HEAVY IONS WITH THE REACTION PLANE AND TWO-PARTICLE CUMULANT METHODS AT THE MONTE-CARLO GENERATOR HYDJET++ FOR LHC ENERGIES. *28th International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2024)* (Дубна, Россия, 27 октября - 1 ноября 2024)
- Д. А. Мягков and С. В. Петрушанко. Расчет азимутальных потоков при столкновениях ионов свинца и ксенона с помощью Монте-Карло генератора при энергиях БАК. *XXV межвузовская молодежная научная школа-конференция имени Б. С. Ишханова "Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине"* (МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия, 27-28 ноября 2024)
- Д. А. Мягков and С. В. Петрушанко. Изучение азимутальной анизотропии в соударениях различных ионов с помощью модели HYDJET++ при энергиях LHC. *Научная конференция "ЛОМОНОСОВСКИЕ ЧТЕНИЯ-2025"* (Москва, Россия, 24 марта - 3 апреля 2025)
- Д. А. Мягков and С. В. Петрушанко. Вычисление азимутальных потоков для столкновений Xe-Xe и Pb-Pb кумулянтными методами в генераторе HYDET++ при энергиях LHC. *67-я Всероссийская научная конференция МФТИ, (г. Долгопрудный, Московская область, Россия, 31 марта - 5 апреля 2025)*
- Д. А. Мягков and С. В. Петрушанко. Изучение влияние деформации ядер на азимутальные потоки в столкновениях Xe-Xe и Pb-Pb при энергиях LHC в Монте-Карло генераторе HYDJET++. *Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Ломоносов-2025"* (МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, 11-25 апреля 2025)



Спасибо за внимание!



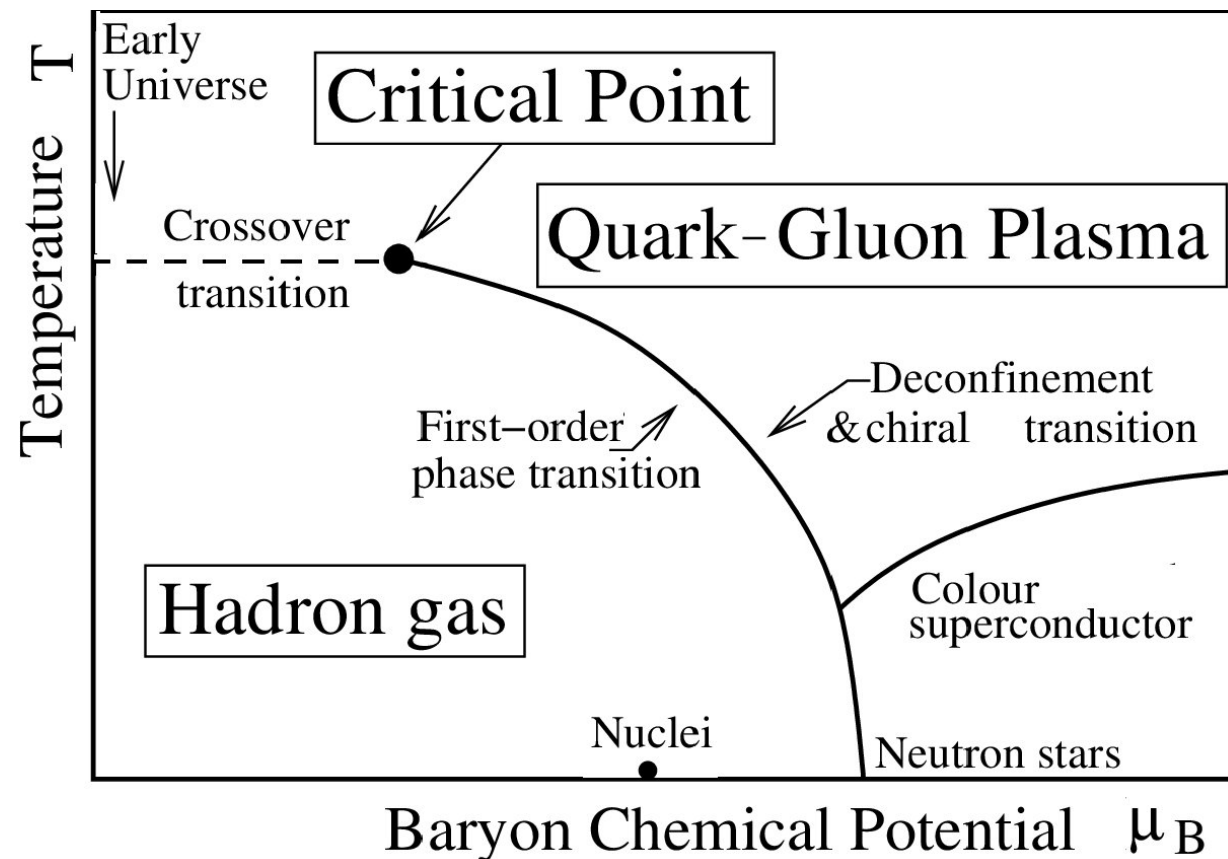
Основы теоретического описания азимутальной анизотропии заряженных частиц

Фазовый переход к новому состоянию вещества возможен после преодоления порога плотности энергии $\sim 1 \text{ ГэВ/фм}^3$

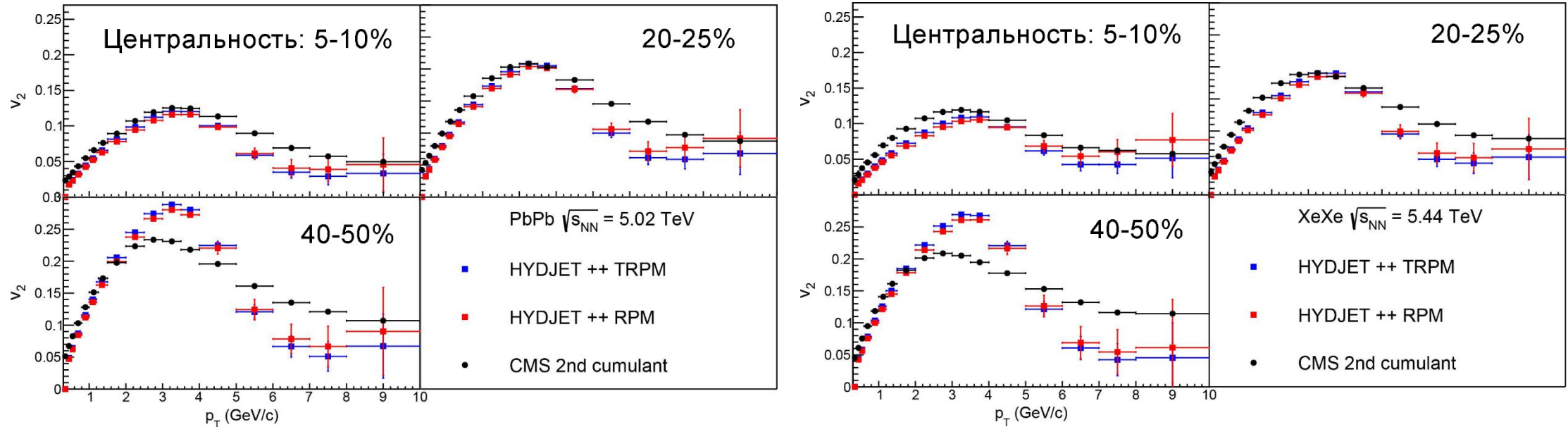
Считается, что КГП обладает свойствами почти идеальной жидкости, характеризуемой набором гидродинамических параметров: температурой, вязкостью, хим. потенциалом.

Современное видение эволюции КГП: стадия глюонного насыщения $\rightarrow$ стадия газы $\rightarrow$ КГП $\rightarrow$ адронизация $\rightarrow$ вымораживание

После кинематического вымораживания импульсы и состав частиц фиксируются.



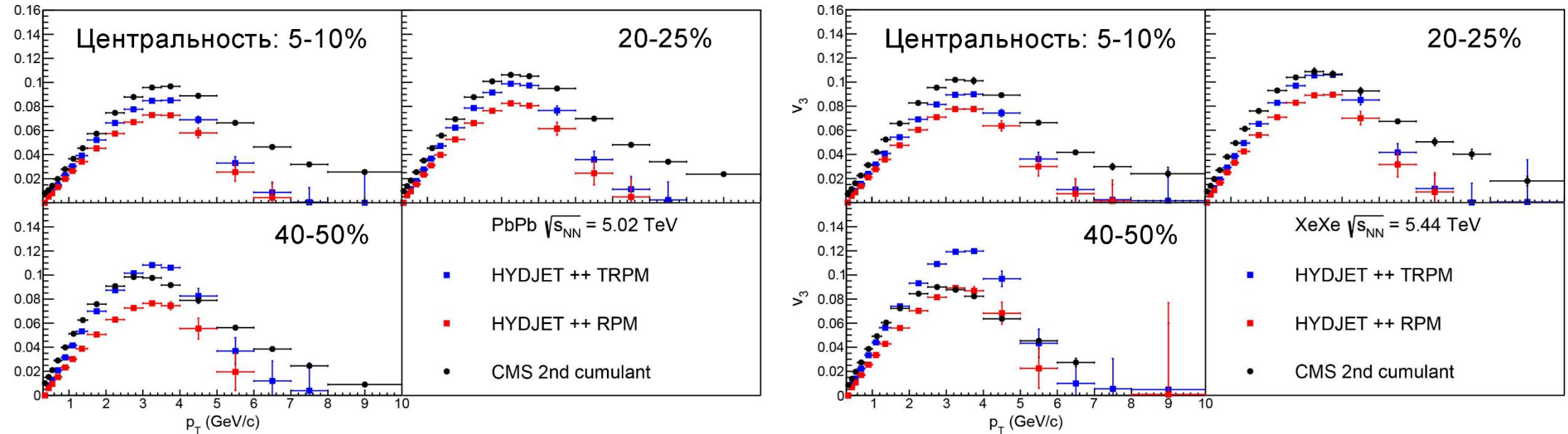
Зависимости коэффициента эллиптического потока v_2 от поперечного импульса p_T рождающихся заряженных частиц для столкновений Pb–Pb при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ (слева) и Xe–Xe при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$ ТэВ (справа), вычисленных методами плоскости реакции (RPM) и истинной плоскости реакции (TRPM)



- Внедрение вычисления угла плоскости реакции практически не повлияло на результаты вычисления эллиптического потока в генераторе HYDJET++ как для столкновений свинца, так и для столкновений ксенона
- В очередной раз подтверждены области удовлетворительного описания генератором экспериментальных данных (центральные и полуцентральные регионы)



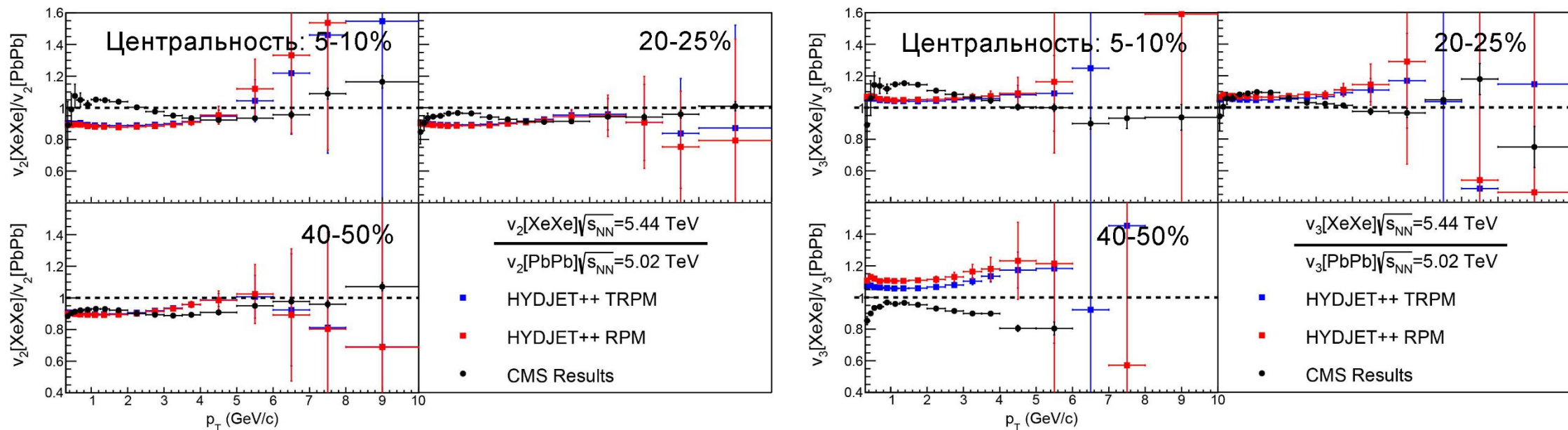
Зависимости коэффициента триангулярного потока v_3 от поперечного импульса p_T рождающихся заряженных частиц для столкновений Pb–Pb при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ (слева) и Xe–Xe при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$ ТэВ (справа), вычисленных методами плоскости реакции (RPM) и истинной плоскости реакции (TRPM)



- Результаты вычисления триангулярных потоков в генераторе HYDJET++ оказались восприимчивы к внедрению расчета угла плоскости реакции.
- Это связано с особенностью вычисления v_3 внутри генератора



Зависимости отношений коэффициентов эллиптических потоков v_2 (слева) и триангулярных потоков v_3 (справа) от поперечного импульса p_T рождающихся заряженных частиц для столкновений Pb–Pb к коэффициентам в столкновениях Xe–Xe, вычисленных методами плоскости реакции (RPM) и истинной плоскости реакции (TRPM)



- Для отношений эллиптических и триангулярных потоков наблюдается малое расхождение результатов между методами RPM и TRPM в области $p_T < 6.0$ ГэВ/с, однако при увеличении p_T изменения становятся все более заметными
- Причина такого поведения вызвана малой статистикой в «хвостах» распределений

