



Физический факультет
Московского
государственного университета
имени М.В.Ломоносова



The nuclear deformation effect in the HYDJET++ azimuthal anisotropy simulations at the LHC energies

Myagkov D.A.

Dr. Petrushanko S.V.



Introduction

- Quark-gluon plasma (QGP) is a new phase state of matter produced at ultrahigh temperatures and energy densities
- The experimental study of the QGP is carried out at high-energy colliders and accelerators.
- The theoretical study of the QGP is carried out using computer modeling, including Monte Carlo methods.

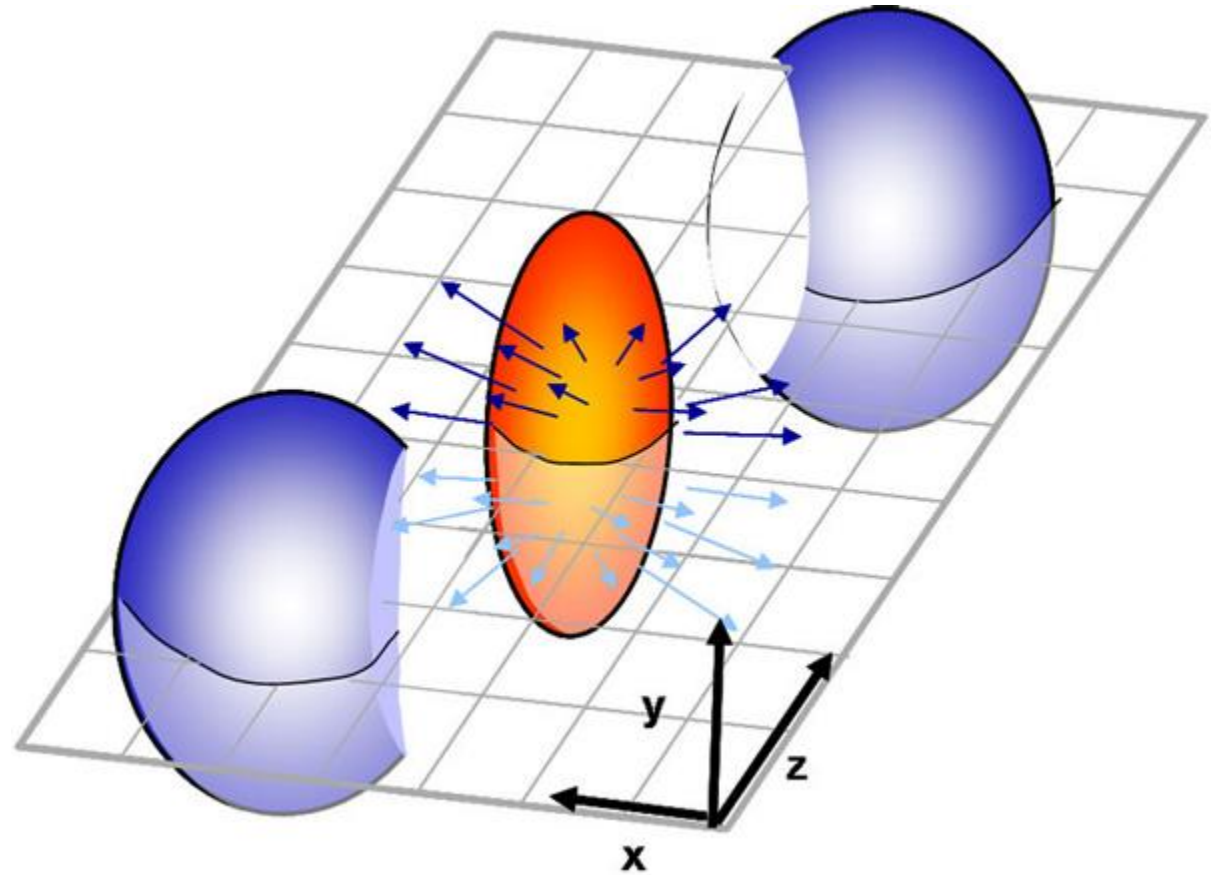


Azimuthal anisotropy in collisions of heavy nuclei

In non-central collisions of heavy nuclei, an anisotropic volume of QGP is formed.

After the hadronization of the QGP, thousands of charged particles are born, the initial momentum of which depends on the pressure gradient in the volume of the QGP

The generated particles will be distributed unevenly in the azimuthal plane, which generates azimuthal anisotropy.



Azimuthal flows of charged particles

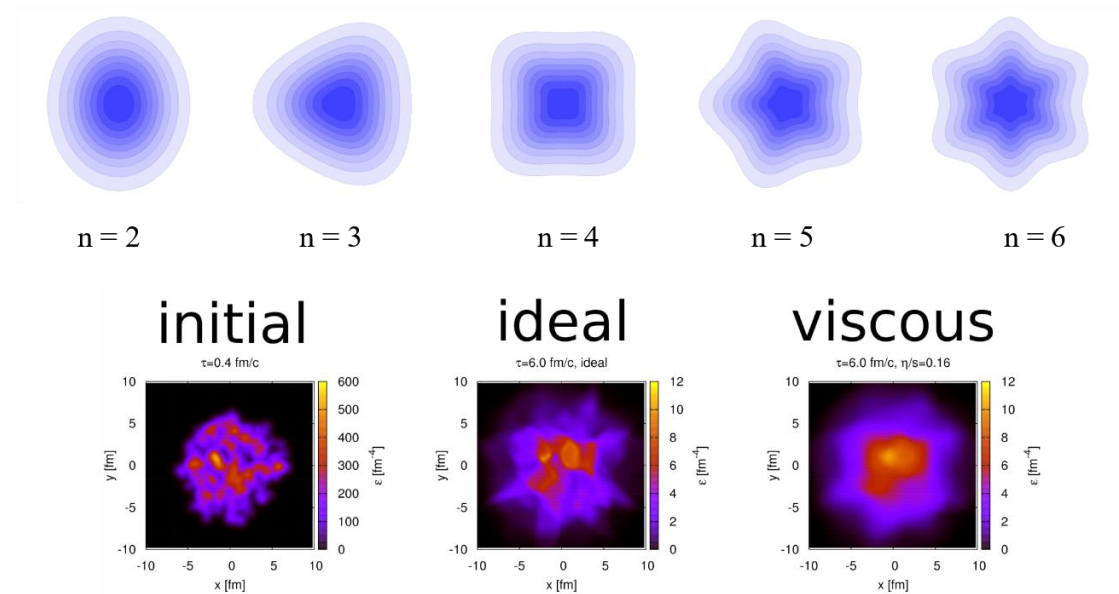
Information about the azimuthal anisotropy of particles is directly related to the evolution of the "droplet" of the QGP, so its study is of scientific interest.

The coefficients of this expansion are called harmonics of the azimuthal flow or simply elliptical (v_2) triangular (v_3), etc. flows.

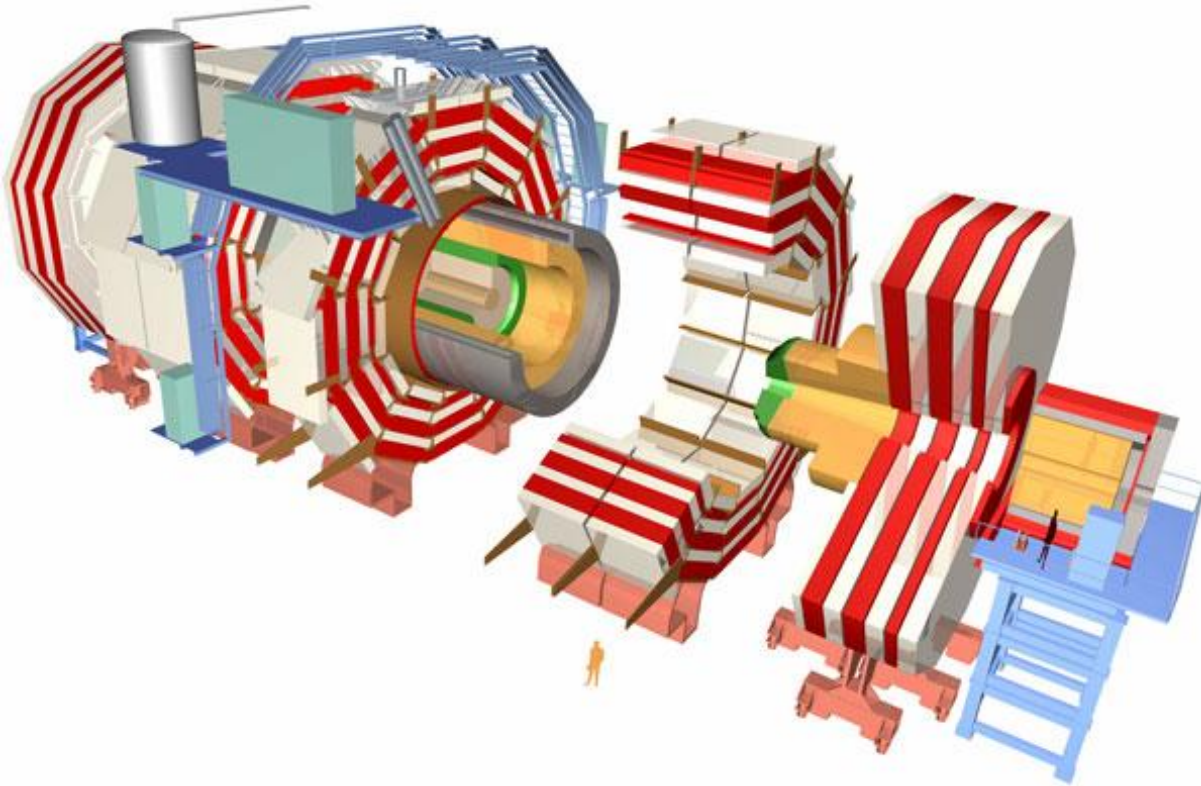
To numerically describe azimuthal anisotropy, we can use the Fourier decomposition of the distribution of the number of particles over the azimuthal angle.

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

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



Experimental study of azimuthal anisotropy



QGP studies were carried out by: STAR, PHENIX, BRAHMS, PHOBOS, CMS, ATLAS, ALICE.

Detector CMS (Compact Muon Solenoid)

- Tracking detector $|\eta| < 2.4$
- EM calorimeter $|\eta| < 3.0$
- Hadron calorimeter $|\eta| < 3.0$
- Muon chambers $|\eta| < 2.4$
- Forward-calorimeters $3.0 < |\eta| < 5.2$
- Solenoid field up to 3.8 T
- Trigger L1 up to 100 kHz
- High level trigger (HLT) up to 1 kHz

Monte Carlo generator HYDJET++

HYDJET

Hybrid Monte Carlo generator of core-nuclear collisions. It includes a soft hydrodynamic part and hard multiparton processes.

<http://lav01.sinp.msu.ru/~igor/hydro/>
(HYDRO + PYQUEN)

*I. Lokhtin, A. Snigirev, 2006,
EPJC, 45, 211*

HYDJET++

Further development of the generator (improved soft component based on FAST MC + PYQUEN hard component identical to HYDJET)

<http://lav01.sinp.msu.ru/~igor/hydjet++/>
(standard version 2.4)

*I.Lokhtin, L.Malinina, S.Petrushanko, A.Snigirev, I.Arsene,
K.Tywoniuk, Comp.Phys.Comm. 180 (2009) 779*



Methods for calculating azimuthal flows

The true Reaction plane method

- In the generator, the reaction plane is set by an internal code and is considered known.
- Thus, the calculation of flows is possible immediately using the formula:
- $v_n = \langle \cos[n(\phi - \psi_{r.p.})] \rangle$, where $\psi_{r.p.}$ — azimuthal angle of the reaction plane

The method of calculating the reaction plane

- In this method, the angle of the reaction plane is calculated from two independent groups of particles.
- $\Psi_n = \left(\tan^{-1} \frac{\sum_i \omega_i \sin(n\phi_i)}{\sum_i \omega_i \cos(n\phi_i)} \right) / n$
- Knowing the angle of the reaction plane, it is possible to calculate the flows using the well-known formula



Methods of 2 and 4 partial cumulants

- Two- and four-particle correlations in the cumulant method can be described as follows:
- $\langle\langle 2 \rangle\rangle = \left\langle \left\langle e^{in(\varphi_1 - \varphi_2)} \right\rangle \right\rangle$ $\langle\langle 4 \rangle\rangle = \left\langle \left\langle e^{in(\varphi_1 + \varphi_2 - \varphi_3 - \varphi_4)} \right\rangle \right\rangle$, here, double angle brackets mean averaging by particles and by events.
- Cumulants of the second and fourth orders:
$$c_n\{2\} = \langle\langle 2 \rangle\rangle \quad c_n\{4\} = \langle\langle 4 \rangle\rangle - 2 * \langle\langle 2 \rangle\rangle^2$$
- Then the flow can be calculated using the formula:
- $v_n\{2\} = \sqrt{\left\langle \left\langle e^{in(\varphi_1 - \varphi_2)} \right\rangle \right\rangle}$ или $v_n\{2\} = \sqrt{c_n\{2\}}$ и $v_n\{4\} = \sqrt[4]{-c_n\{4\}}$



Cumulant methods and scalar product method

From a computational point of view, it is easier to calculate azimuthal fluxes through the so-called Q-vector of the flow:

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

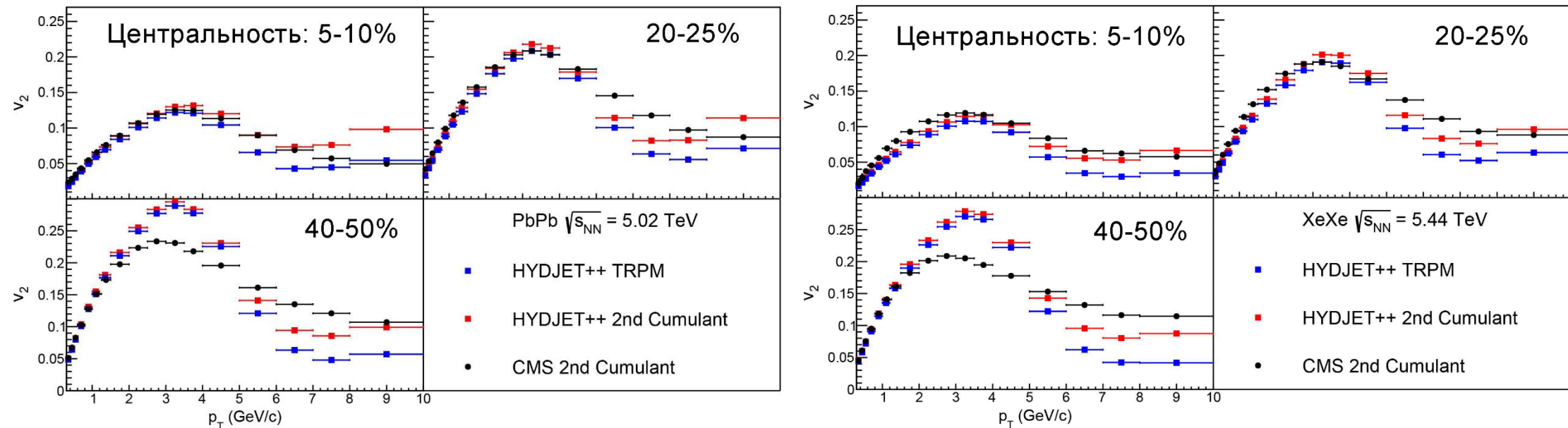
Q-vector is defined as: $Q_n = \sum_{j=1}^M e^{in\varphi_j}$, M – multiplicity

In turn, the scalar product method in terms of Q-vectors:

$$v_n\{SP\} = \frac{\langle Q_n^A Q_n^B \rangle}{\sqrt{\langle Q_n^A Q_n^A \rangle \langle Q_n^B Q_n^B \rangle}}, \text{ where } Q_n^A \text{ and } Q_n^B \text{ mean Q-vectors of independent subevents}$$



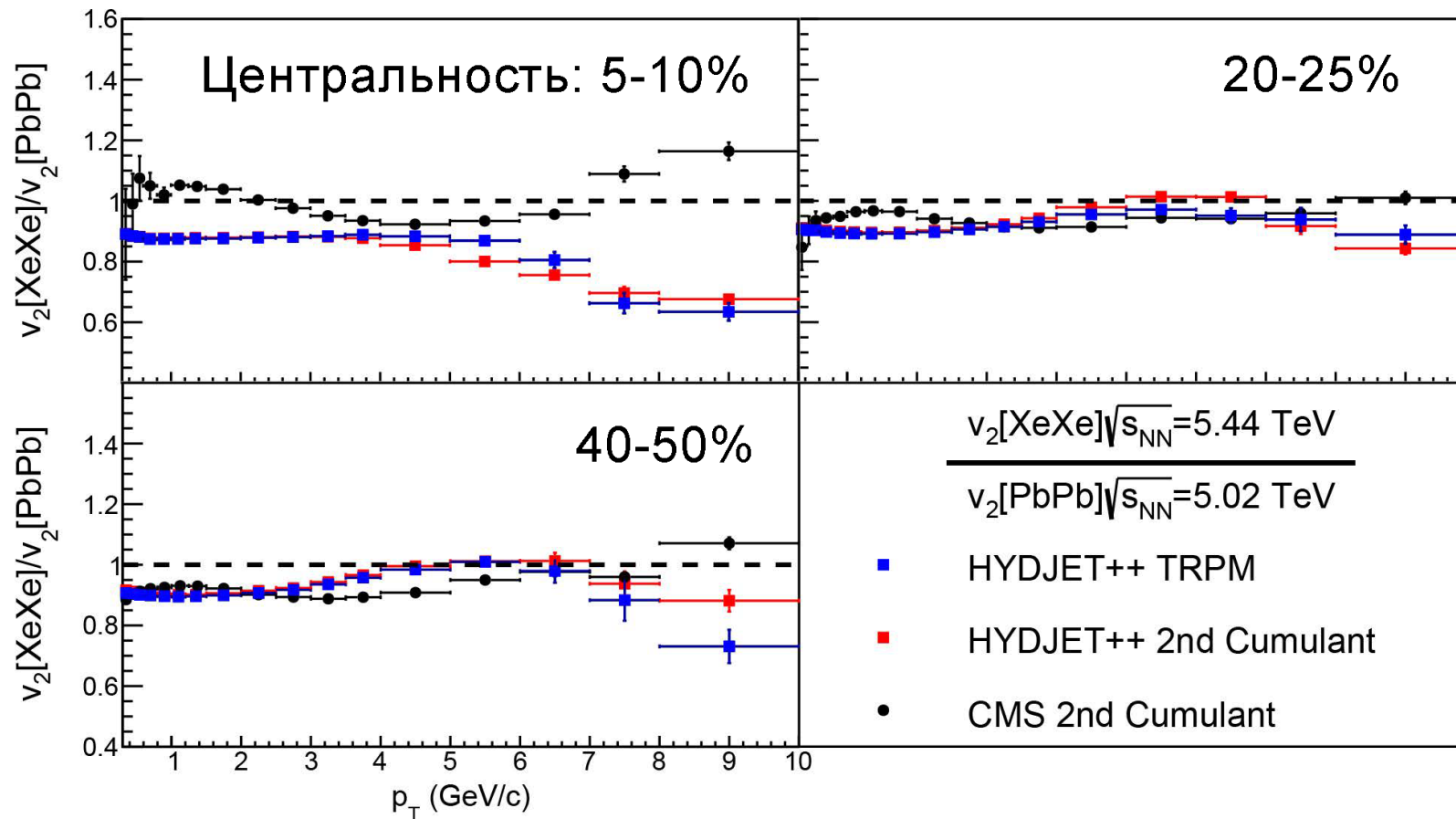
The dependences of the coefficients v_2 on the transverse momentum p_T for collisions Pb-Pb (left) and Xe-Xe (right), calculated by the methods of the second cumulant and TRPM



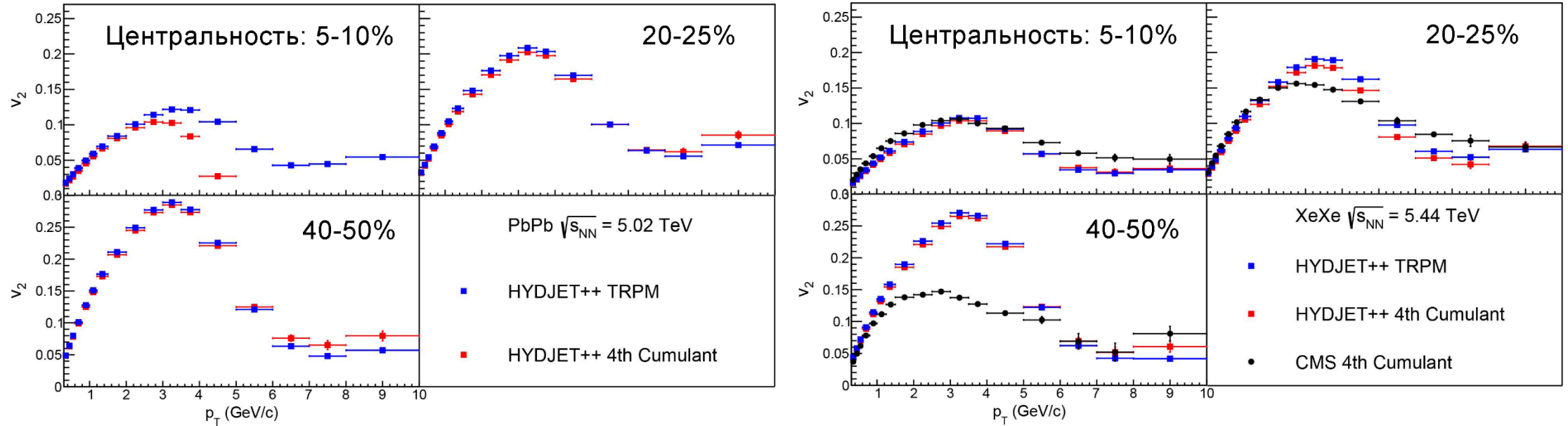
- When comparing the results of the HYDJET++ generator with the CMS experiment calculated by the same methods, the greatest data consistency is observed.
- An important difference is the convergence of data in the small p_T region for central collisions between Xe-Xe and Pb-Pb. This is a signal of the importance of taking into account the initial geometry.



The dependences of the ratios of the coefficients of elliptical flows v_2 in Pb-Pb collisions to the coefficients in Xe-Xe collisions of p_T calculated using the 2nd Cumulant method



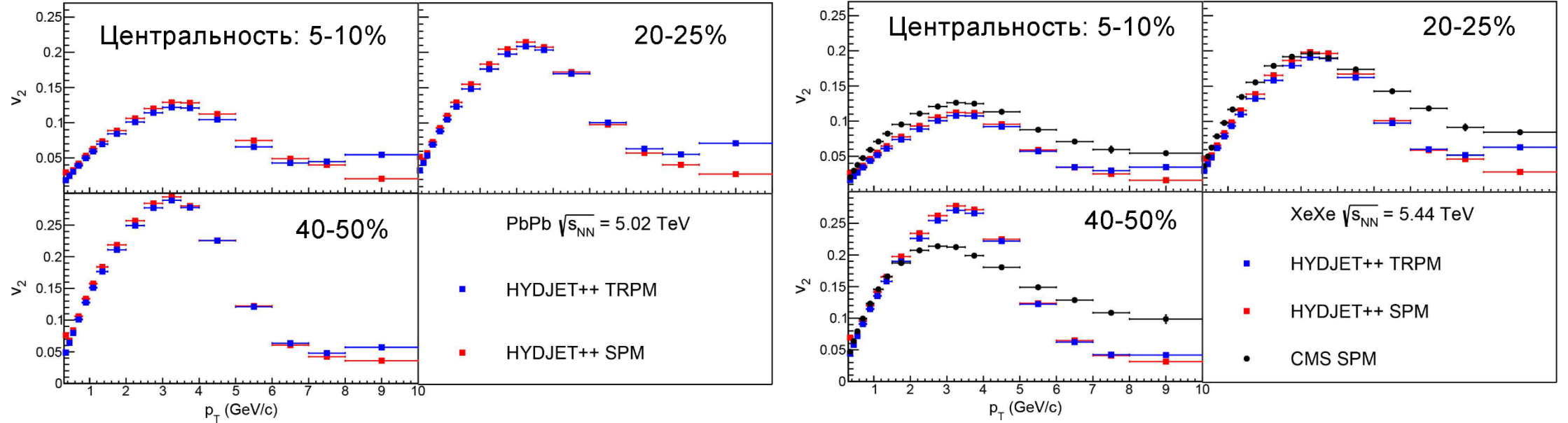
The dependences of the coefficients v_2 on the transverse momentum p_T for collisions Pb-Pb (left) and Xe-Xe (right), calculated by the methods of the 4th Cumulant and TRPM



- The values obtained by the fourth cumulative method, as expected, are systematically lower than the values obtained by TRPM
- Comparison with experimental data (for Xe) shows good convergence in the semi-central region, in the region of low p_T



The dependences of the coefficients v_2 on the transverse momentum p_T for collisions Pb-Pb (Left) and Xe-Xe (right), calculated by the methods of scalar product (SPM) and TRPM



- The results obtained by the scalar product method are systematically higher than those for TRPM.
- Comparison with experimental data shows satisfactory convergence in the field of small p_T



Integral values of azimuthal flows

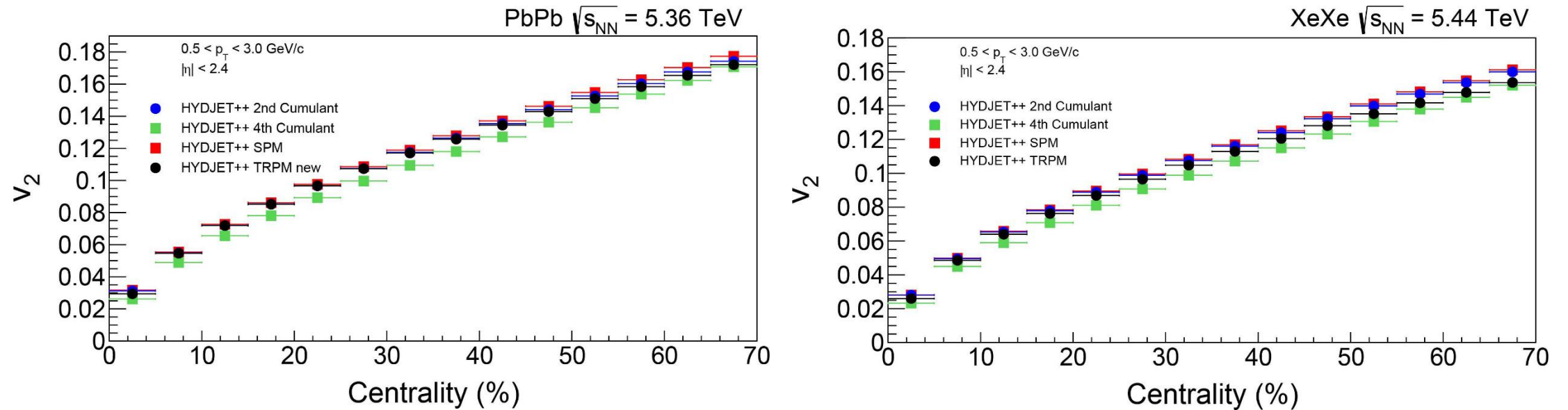
The integral coefficients of azimuthal anisotropy are the spectral-averaged values of the differential coefficients v_2 (discussed earlier)

Integral flows, unlike differential flows, are more resistant to initial fluctuations and serve as a reliable source of information about the global parameters of hydrodynamic models and, in particular, about the influence of the initial geometry.

In this work, in order to accurately compare the results with CMS data, integral values obtained in the range $0.3 < p_T < 3.0 \text{ GeV}/c$ are used. In addition, the previously entered condition $|\eta| < 2.4$ continues to apply



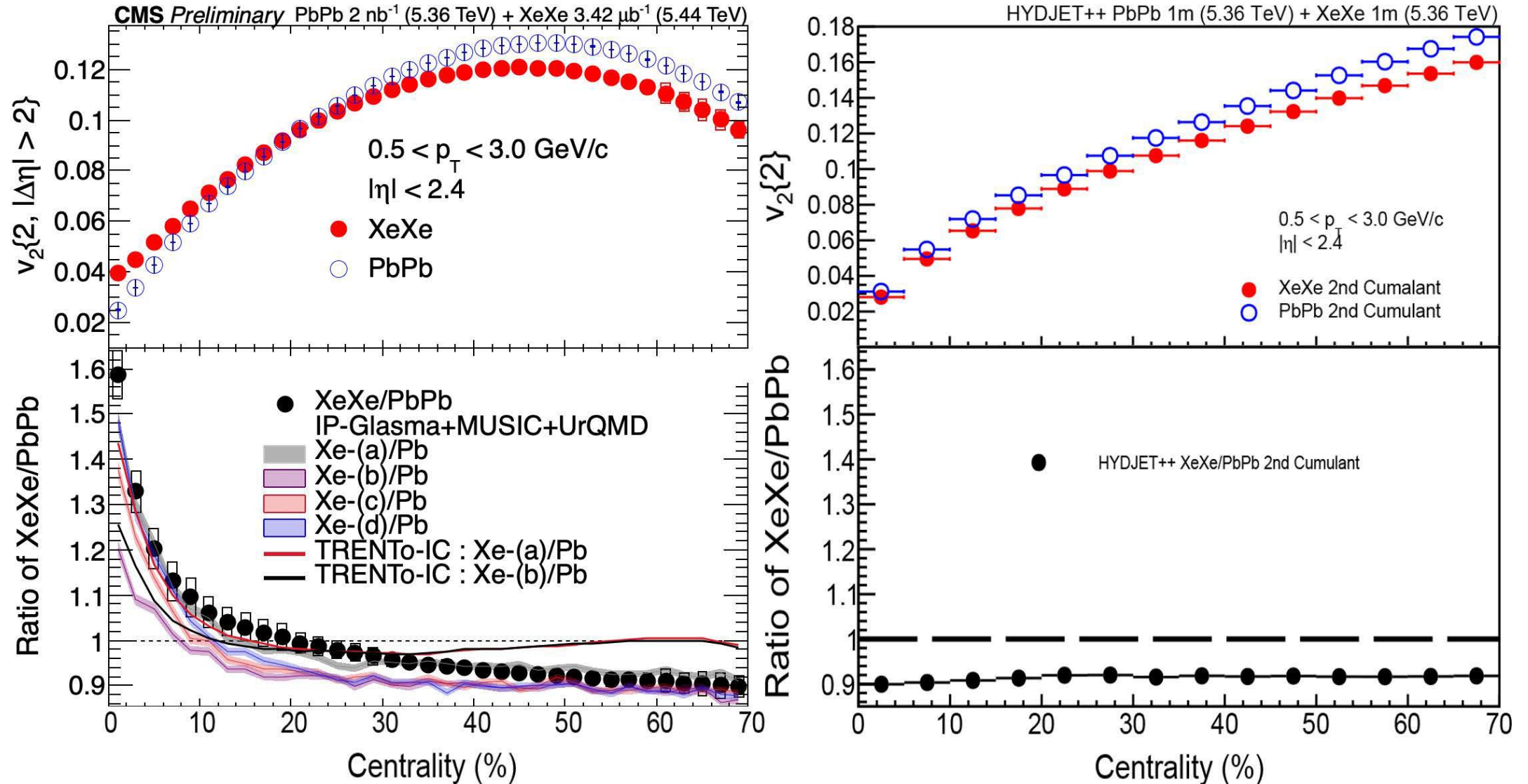
Integral distributions of elliptical flows v_2 calculated by 4 different methods for Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.36$ TeV (left) and collisions Xe-Xe at $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$ TeV (right)



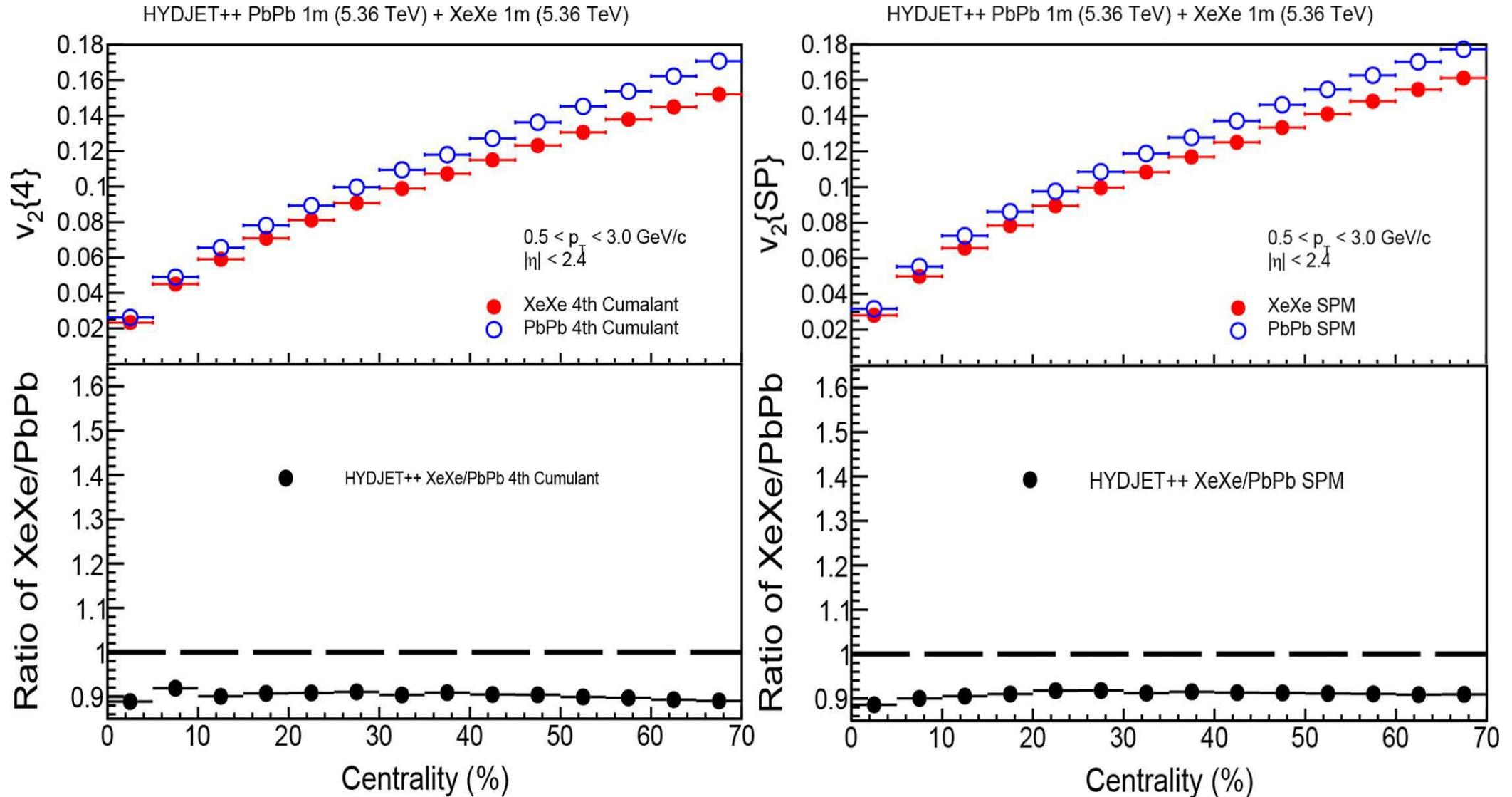
- The mutual hierarchy of methods established earlier remains in place.
- The absolute values of the integral fluxes for such nuclear systems differ little, despite the difference in mass number of almost 1.5 times.



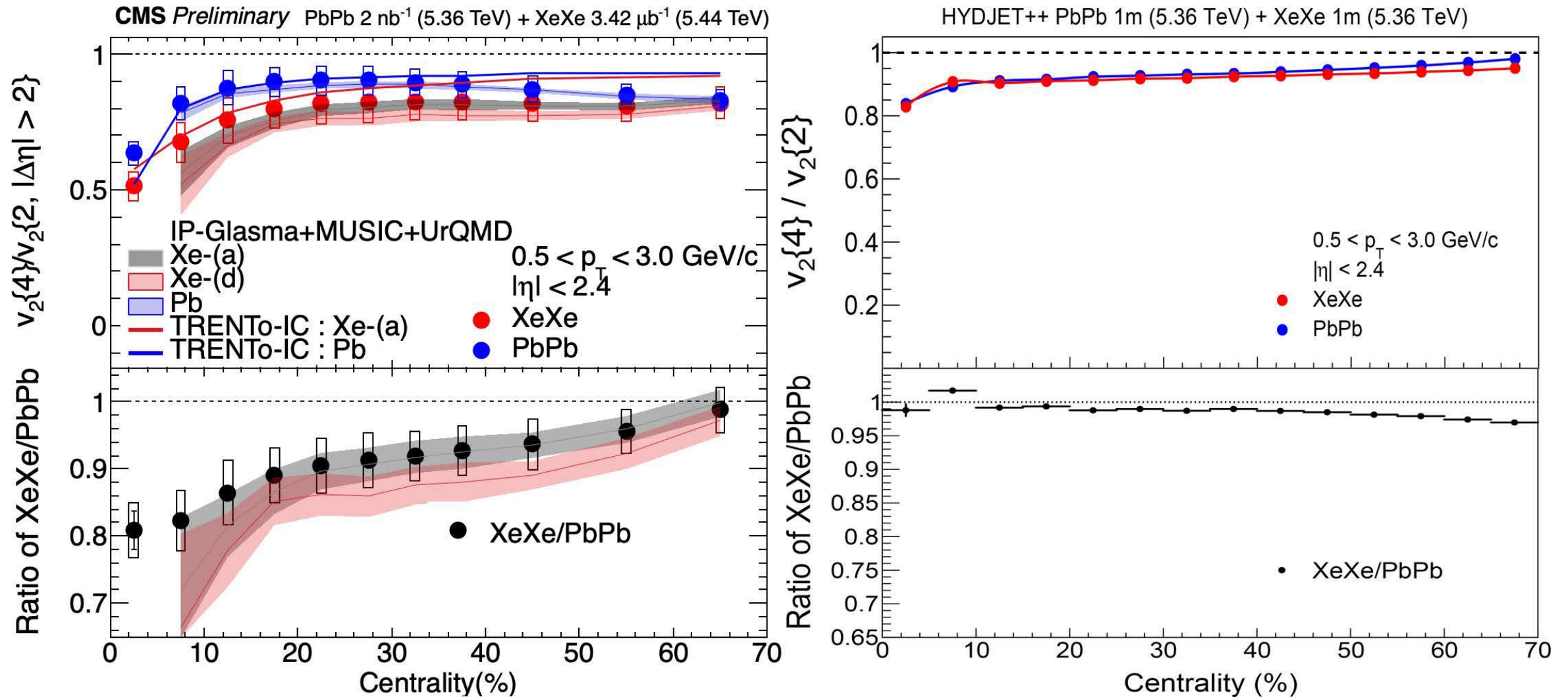
Integral values of elliptical flows in Xe—Xe and Pb—Pb collisions calculated using the 2nd cumulant method in HYJET++ (right) and comparison with the CMS experiment (left)



Integral values of elliptical flows in Xe—Xe and Pb—Pb collisions, calculated using the 4th cumulant method (left) and the scalar product method (right) in HYJET++



Comparison of the relations of integral elliptical flows $v_2\{4\}/v_2\{2\}$ depending on the centrality of the collisions, calculated in the HYDJET++ (right) and CMS experiment (left)



Predictions for O-O collisions at LHC energies

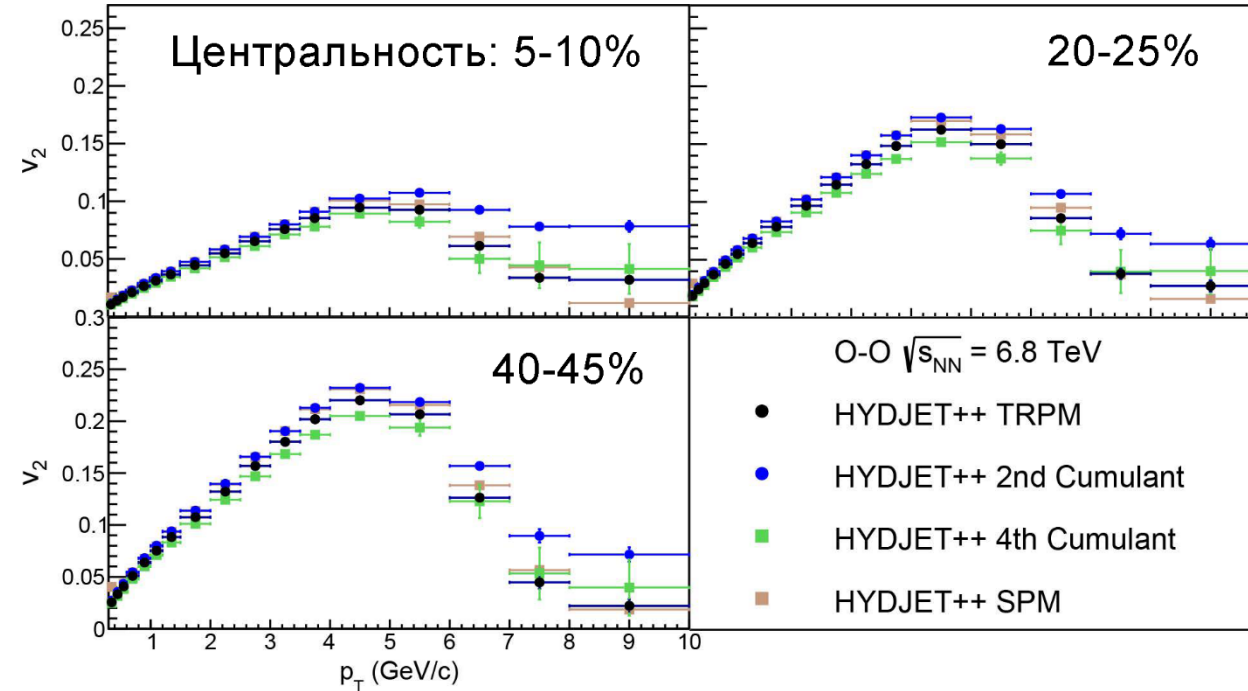
The planned collisions of oxygen (O-O) nuclei at the Large Hadron Collider represent a unique opportunity to study the transition regime between small and large systems in nuclear collisions.

The oxygen core is doubly magical with a proposed cluster structure (packing 4 alpha particles), which makes it interesting for research.

A number of theoretical studies predict a strong influence of the choice of the initial configuration of the system (cluster model or "drop") on the distributions typical for heavy ion collisions: pseudo-velocity, p_T and v_n distributions



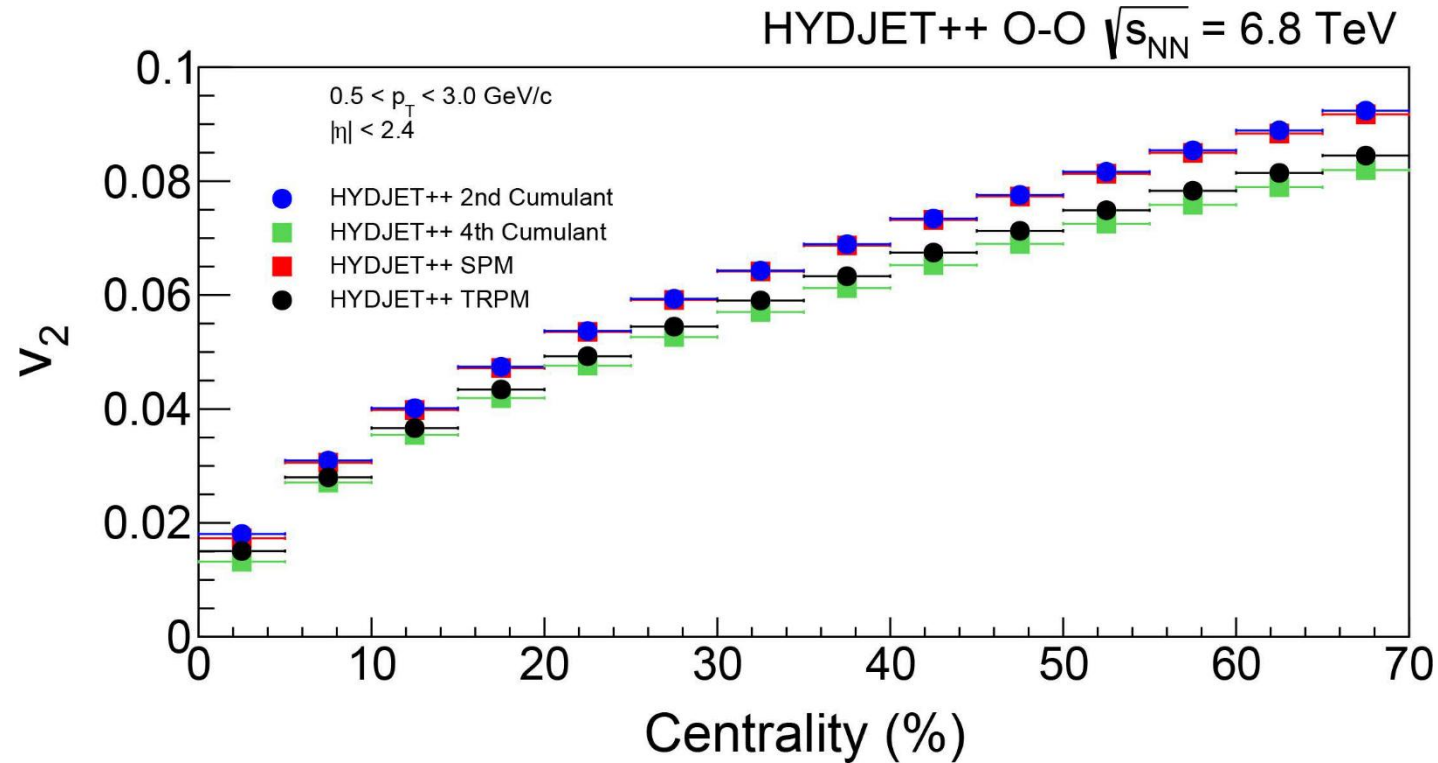
Dependences of the elliptical flow coefficient v_2 on the transverse momentum p_T of the generated charged particles for O–O collisions at energy $\sqrt{s_{NN}} = 6.8 \text{ TeV}$, calculated by the methods of the true reaction plane (TRPM), the second and fourth cumulants, as well as the scalar product (SPM) method



- The behavior of the v_2 distributions for O–O differs greatly from those for heavy nuclear systems, which may indicate a weak hydrodynamic response of the O–O system.
- Despite the differences in behavior, the global hierarchy of methods remains.



Integral distributions of elliptical flows v_2 as a function of centrality in O–O collisions at energy $\sqrt{s_{NN}} = 6.8$ TeV, calculated using the methods of the true reaction plane (TRPM), scalar product (SPM), 2nd and 4th cumulants in HYDJET++



- The hierarchy of methods is preserved : $v_2\{4\} < v_2\{TRPM\} < v_2\{2\} < v_2\{SP\}$
- The absolute values of integral quantities in O–O collisions are noticeably lower than those for heavy nuclear systems.

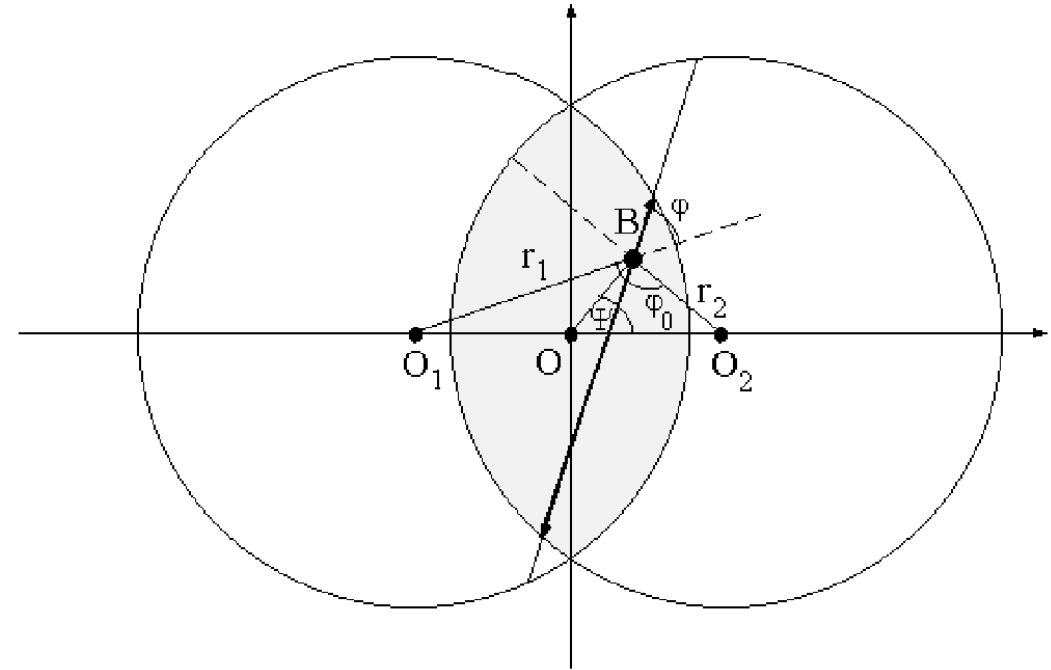


Modification of the HYDJET++ generator

As a result of the conducted research, areas of insufficiently good description of experimental data by the HYDJET++ generator were identified. The discrepancies were often caused by the lack of consideration in HYDJET++ of the deformation structure of colliding nuclei.

Currently, the HYDJET++ generator uses the simplest formalism, with the representation of nuclei in the form of spheres, with a uniform distribution of nuclear density. See <https://arxiv.org/pdf/hep-ph/0004176> I.P. Lokhtin A.M. Snigirev

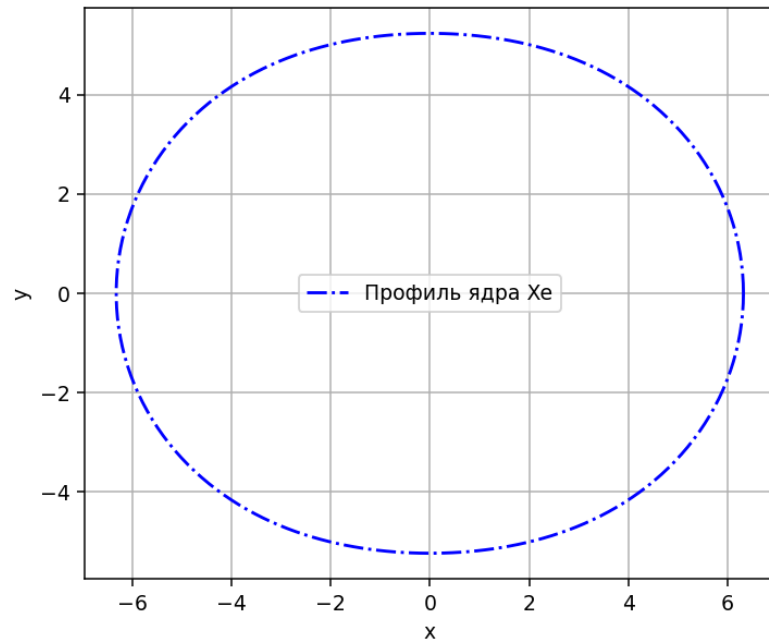
It is also worth noting the features of integration over the nuclear volume – it is performed along the "cylinder", and not along the body of rotation.



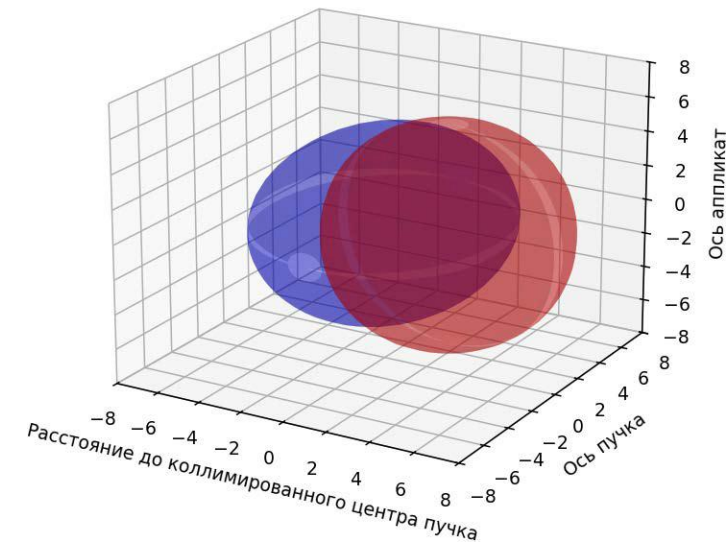
In the future, it is planned to introduce into HYDJET++ an apparatus for accounting for nuclear deformation in the following formalism:

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

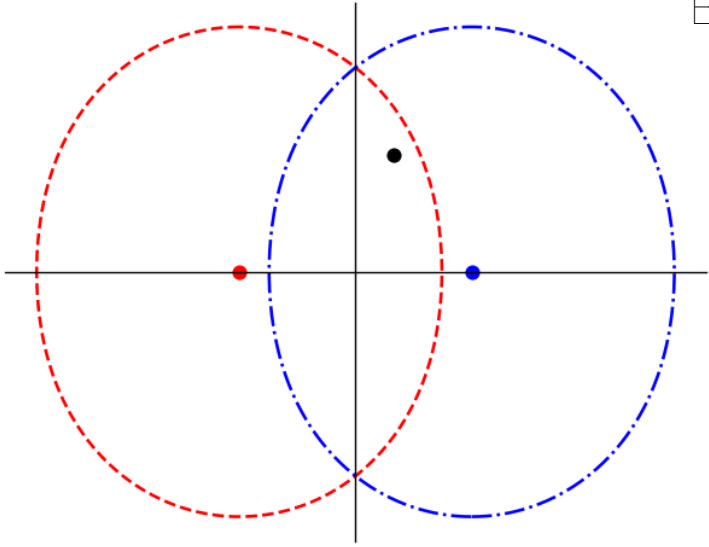
Where β_2 and β_4 are the deformation parameters for the quadrupole and hexadecapole modes, and Y_{nm} is a spherical function in the usual sense. The left expression represents the nuclear density in the Woods-Saxon potential



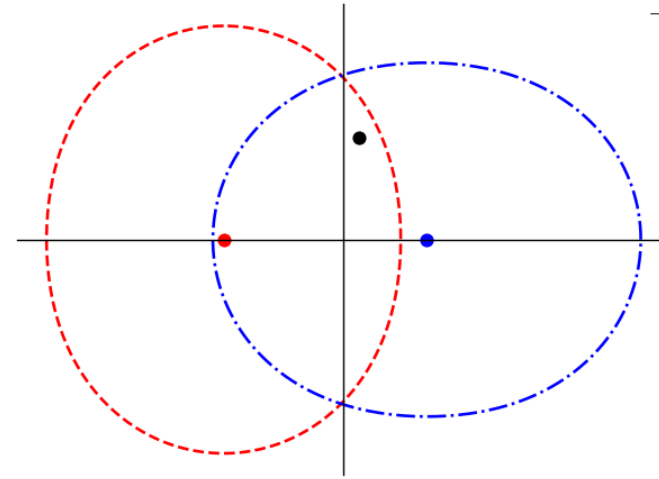
Столкновение деформированных ядер (тел вращения)



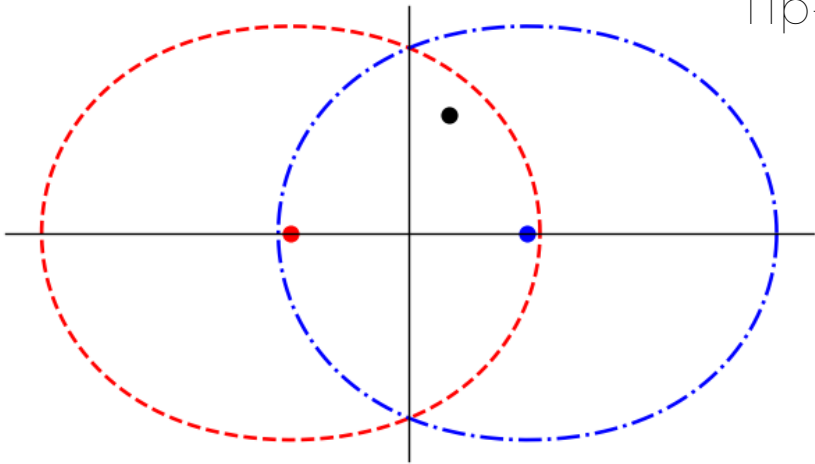
Body-body



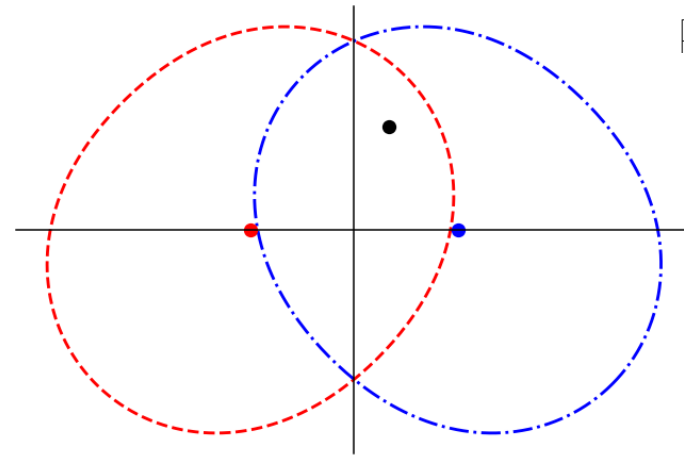
Tip-Body



Tip-tip



Random angle



Saraswati Pandey and B. K. Singh
<https://arxiv.org/pdf/2312.05853>

Our future work



Conclusions

1. Using a Monte Carlo HYDJET++ generator, particle generation in Xe–Xe and Pb–Pb collisions was simulated as part of the study of azimuthal anisotropy at LHC collider energies and compared with experimental data from the CMS experiment. 4 methods were used to calculate integral and differential values of v_2
2. The analysis of the differences and agreement of these methods with each other at the level of generated events of the HYDJET++ model, as well as when comparing with experimental data, is carried out. The areas of the best description for each method are identified, as well as their mutual hierarchy.
3. It has been shown that HYDJET++ well describes the behavior of elliptical and triangular azimuthal fluxes in heavy ion collisions in semi-central collisions. At the same time, peripheral interactions are not described well enough due to the known limitations of their description within the framework of the hydrodynamic model.



Conclusions

4. It is shown that for central collisions, the difference between the simulation results and the experimental data is caused by the influence of the deformation structure of the nuclei. Thus, the importance of taking into account the deformation of the nuclei is established.
5. Also, using the HYDJET++ generator, O–O events were simulated as a prediction for future data at the LHC collider. A number of features characteristic of small nuclear systems have been identified.
6. A plan has been developed for further modification of the HYDJET++ generator, which will take into account the deformation features of various nuclei for a more accurate description of existing and future experimental data at the LHC, RHIC and NICA colliders.



Thank for your attention!



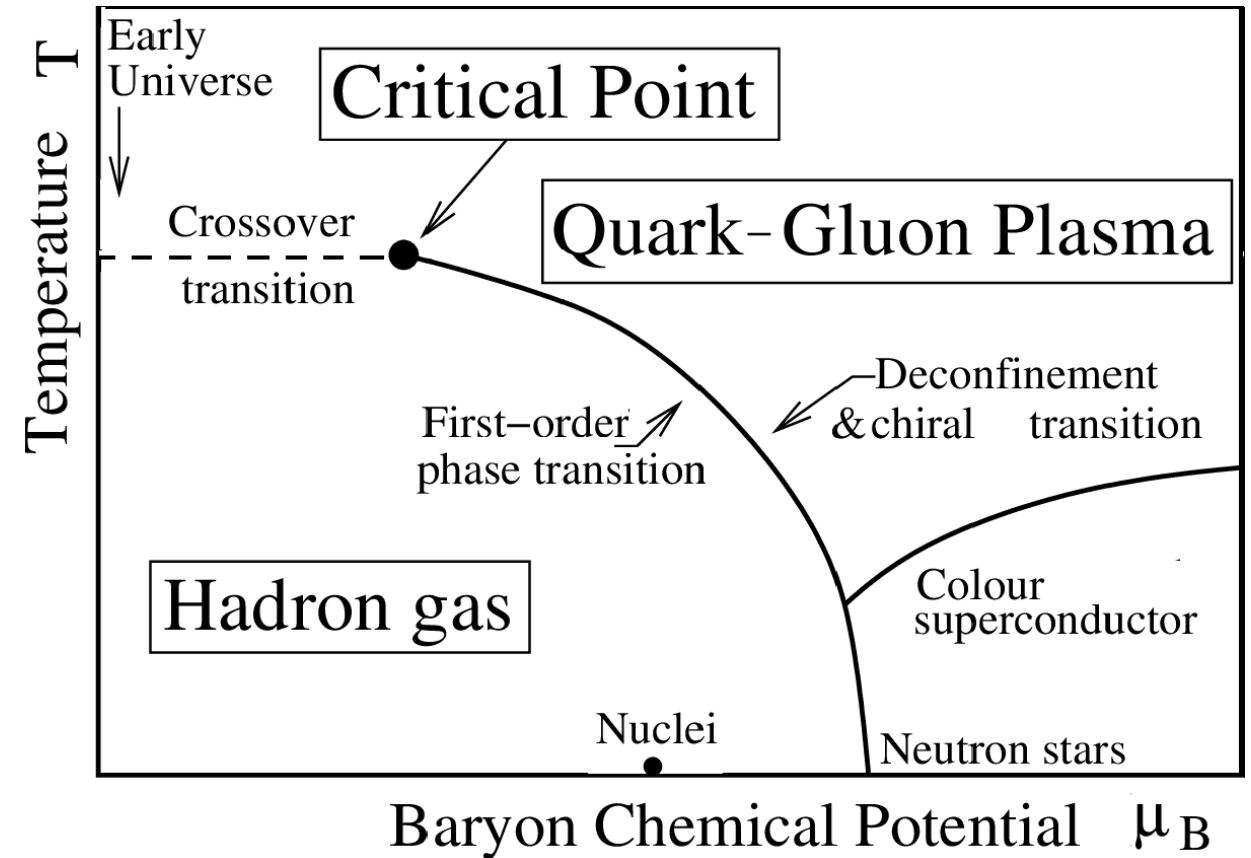
Основы теоретического описания азимутальной анизотропии заряженных частиц

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 глазмы $\rightarrow$ КГП $\rightarrow$ адронизация $\rightarrow$ вымораживание

После кинематического вымораживания импульсы и состав частиц фиксируются.



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 справедливы следующие условия для регистрируемых заряженных частиц: $|\eta| < 2.4$ и $0.3 < p_T < 10.0$ ГэВ/с



Азимутальные потоки в столкновениях Xe-Xe и Pb-Pb

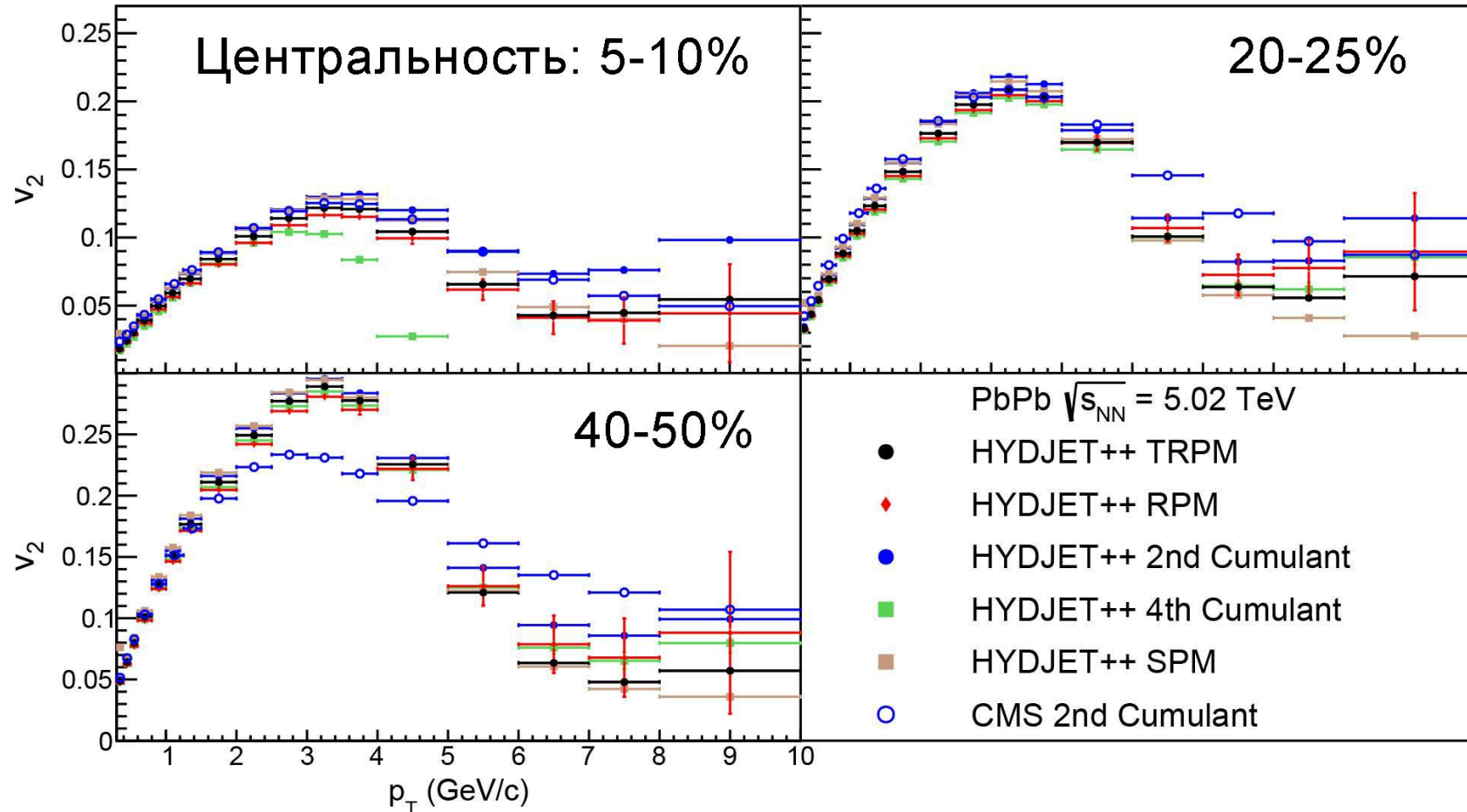
Договоримся, что далее, будут рассматриваться только избранные регионы центральности: 5-10% (центральные столкновения), 20-25% (полуцентральные столкновения) и 40-50% (периферические столкновения).

Для каждого региона центральности в HYDJET++ было сгенерированно около 1 миллиона событий

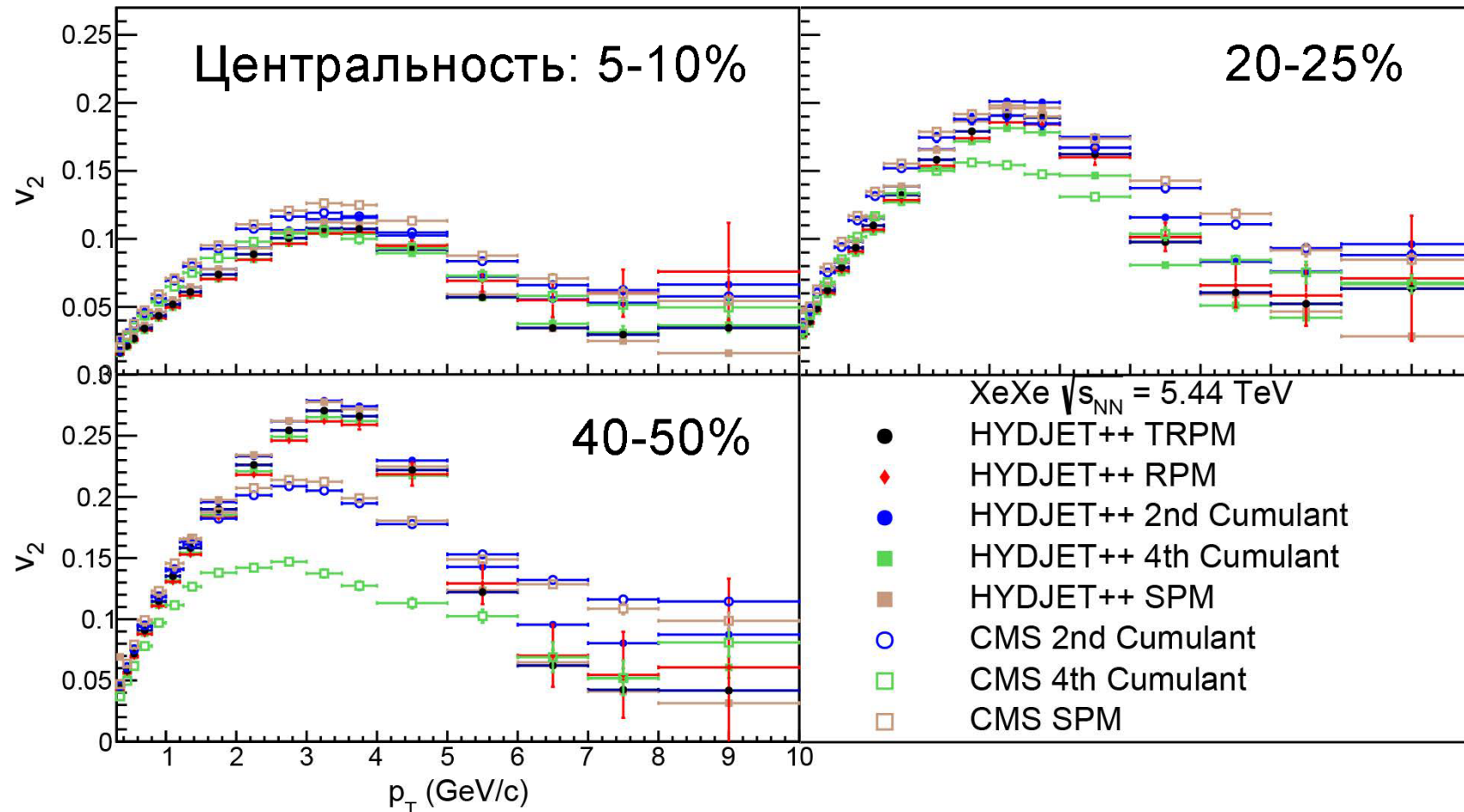
Результаты сгенерированы для сравнения с 1 и 2 группами данных CMS, а именно: столкновения Pb-Pb при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ и столкновения Xe-Xe при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$ ТэВ



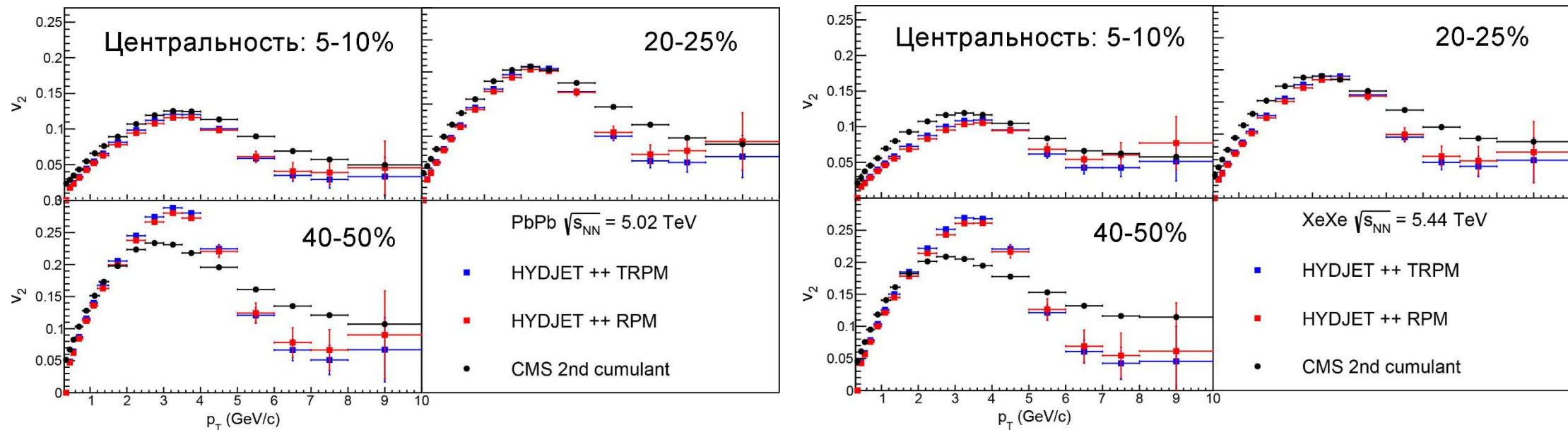
Зависимости коэффициента эллиптического потока v_2 от поперечного импульса p_T рождающихся заряженных частиц для столкновений Pb–Pb при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ, вычисленных методами истинной плоскости реакции (TRPM), методом с расчетом плоскости реакции (RPM), второго и четвертого кумулянтов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



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), методом с расчетом плоскости реакции (RPM), второго и четвертого кумулянтов (2nd и 4th Cumulant), а также методом скалярного произведения (SPM) в генераторе HYDJET++



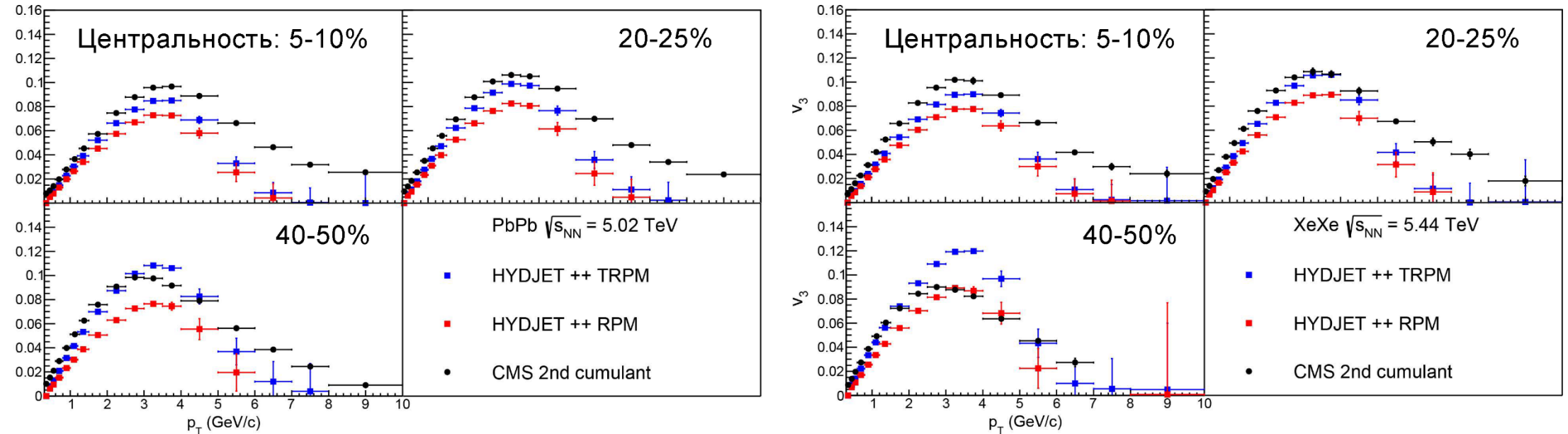
Зависимости коэффициента эллиптического потока v_2 от поперечного импульса p_T рождающихся заряженных частиц для столкновений Pb-Pb при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ (слева) и Xe-Xe при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$ ТэВ (справа), вычисленных методами плоскости реакции (RPM) и истинной плоскости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



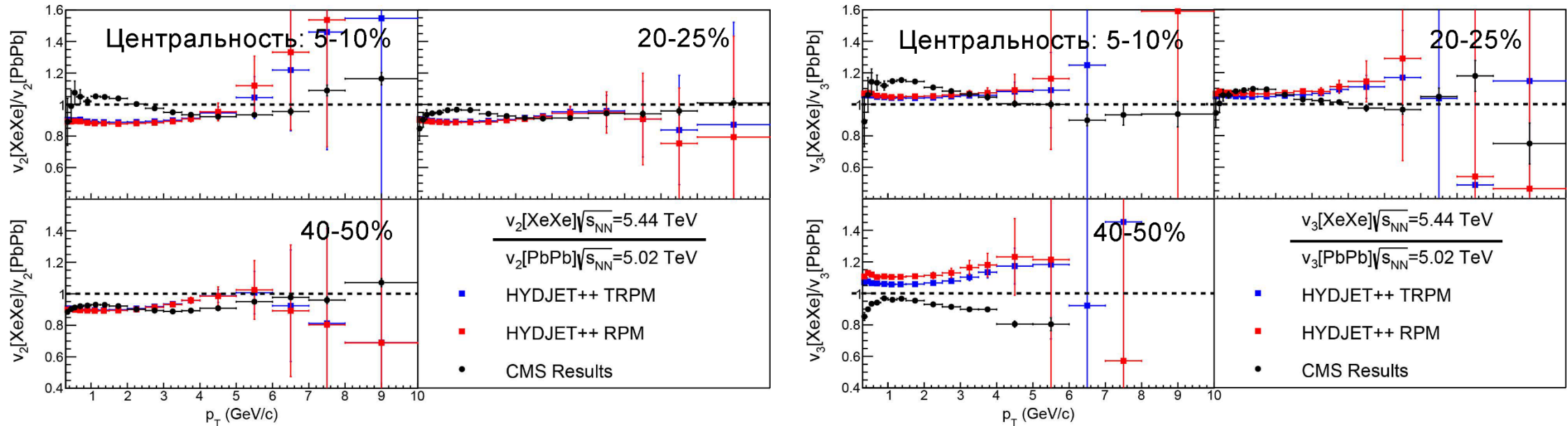
Зависимости коэффициента триангулярного потока v_3 от поперечного импульса p_T рождающихся заряженных частиц для столкновений Pb–Pb при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ (слева) и Xe–Xe при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$ ТэВ (справа), вычисленных методами плоскости реакции (RPM) и истинной плоскости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



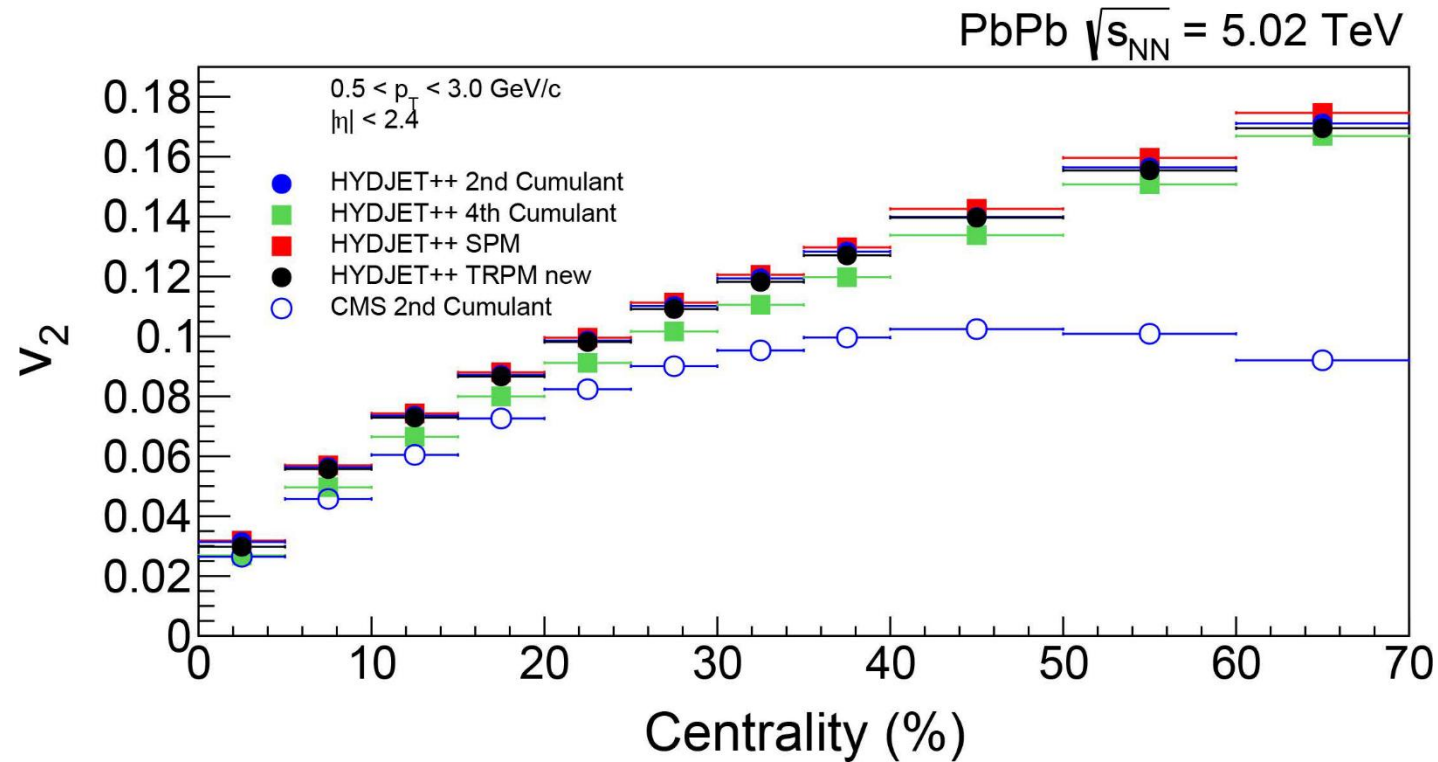
Зависимости отношений коэффициентов эллиптических потоков v_2 (слева) и триангулярных потоков v_3 (справа) от поперечного импульса p_T рождающихся заряженных частиц для столкновений Pb–Pb к коэффициентам в столкновениях Xe–Xe, вычисленных методами плоскости реакции (RPM) и истинной плоскости реакции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



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



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



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)*

