



**ПОЛИТЕХ**  
Санкт-Петербургский  
политехнический университет  
Петра Великого



# Сессия-конференция СЯФ ОФН РАН

## Эллиптические потоки нейтральных пионов в столкновениях ${}^3\text{He}+\text{Au}$ при энергии 200 ГэВ

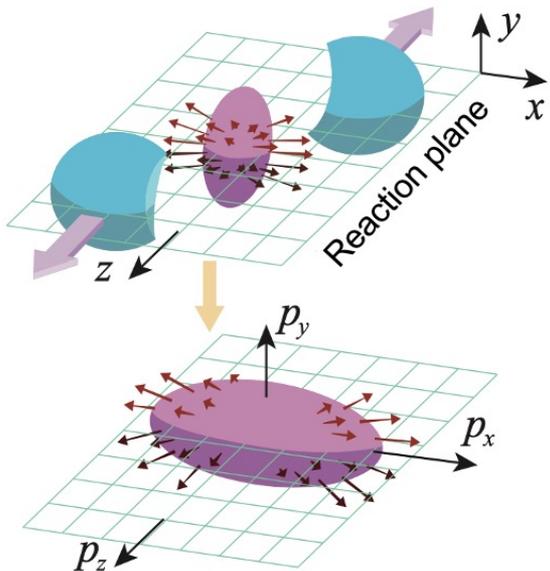
Комарова С.Д., Банников Е.В., Бердников Я.А., Котов Д.О.

(для коллаборации PHENIX)

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания на фундаментальные исследования (шифр FSEG-2025-0009).

# Азимутальная анизотропия и плоскость реакции



Пространственная анизотропия

Градиент давления

Импульсная анизотропия

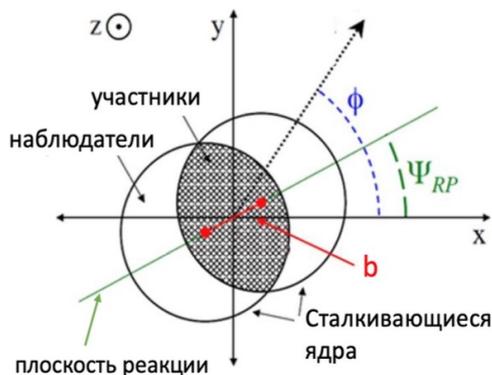
Эллиптический поток ( $v_2$ )

$$\frac{dN}{d\varphi} \propto 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} v_n(p_T) \cos(n(\varphi - \Psi_n^{RP}))$$

$n = 2$

$$v_2 = \left\langle \cos\left(2(\varphi - \Psi_2^{RP})\right) \right\rangle$$

$$v_2 = \left\langle \frac{p_x^2 - p_y^2}{p_x^2 + p_y^2} \right\rangle$$



$z$  – ось пучка

$\varphi$  – угол вылета частицы

$\Psi_{RP}$  – угол плоскости реакции

$\vec{b}$  – вектор прицельного параметра

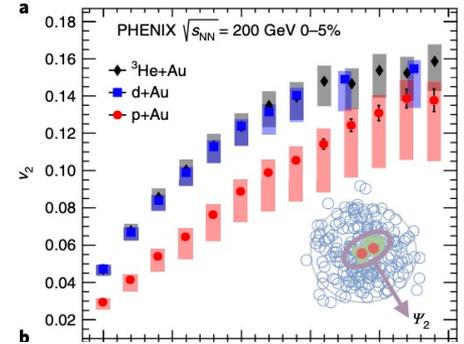
$\vec{b}$  и  $z$  определяют плоскость реакции

$v_2 > 0$

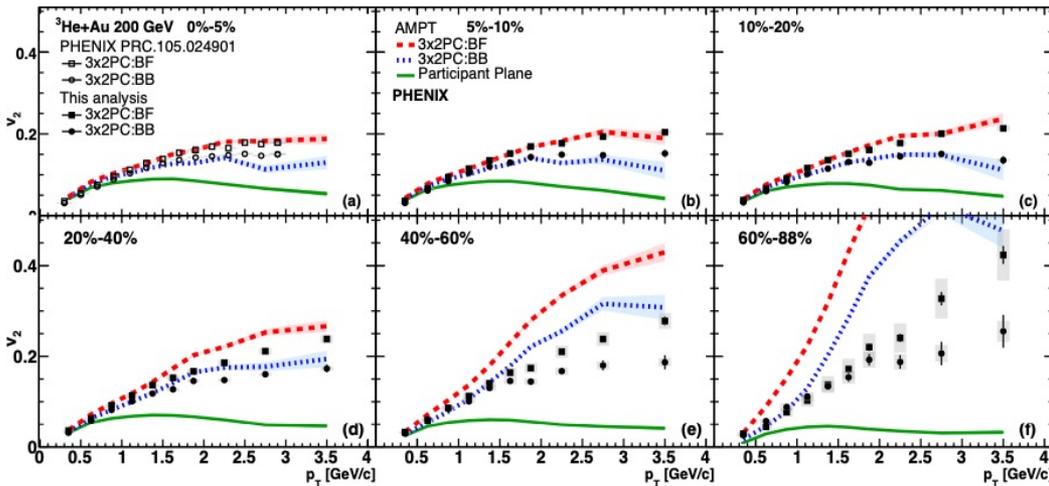
$\Rightarrow$  частицы в среднем имеют бóльший импульс вдоль оси  $px$  (в плоскости реакции)

# Мотивация

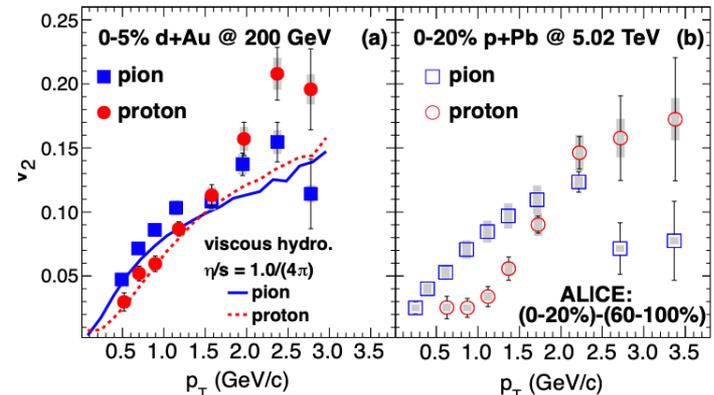
- Первые измерения  $v_2$  в легких системах в центральных столкновениях p+r/Pb на LHC + в d+Au столкновениях на RHIC\*;
  - Измерения значений  $v_2$  в  $^3\text{He}+\text{Au}$  => коллективный поток + непотоковые корреляции\*\*;
  - Порядок значений  $v_2$  в центральных столкновениях легких систем соответствует предсказаниям гидродинамических моделей\*\*\*:
- $$v_2^{p+\text{Au}} < v_2^{d+\text{Au}} \approx v_2^{\text{He}+\text{Au}};$$
- Благодаря высокому отношению сигнала к фону нейтральные пионы ( $\pi^0$ ) позволяют расширить изучение в область более низких множественностей и более высоких поперечных импульсов ( $p_T$ ).



\*\*\*Nat. Phys. 15, 214–220 (2019)

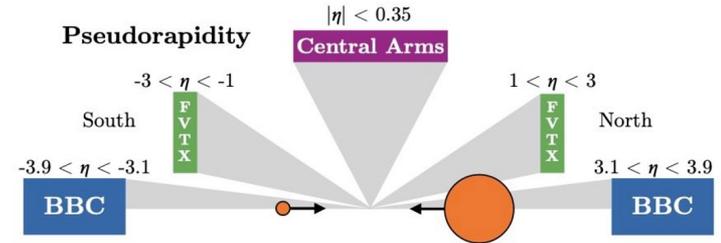
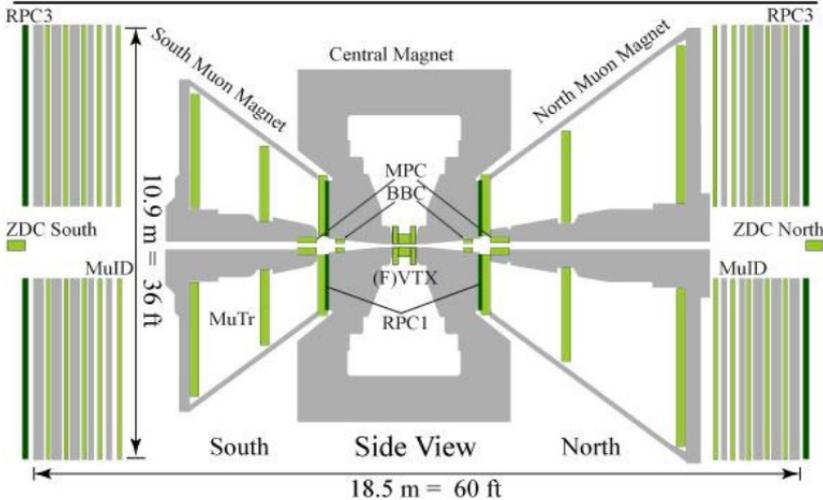
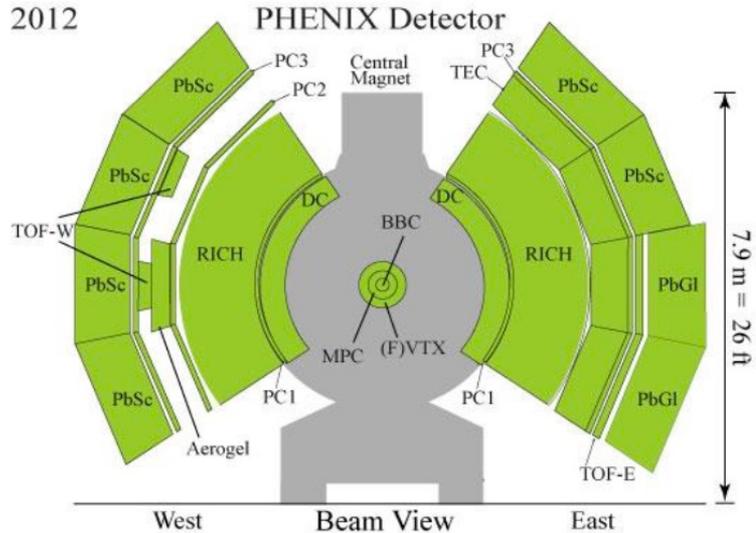


\*\*Phys. Rev. C 107, 024907 (2023)



\*Phys. Rev. L 114, 192301 (2015)

# Эксперимент PHENIX на RHIC



- Расположен в Брукхейвенской национальной лаборатории (BNL) на коллайдере RHIC;
- Класс центральности события определялся с помощью счетчика ядро-ядерных столкновений (BBCS);
- Кинематические характеристики фотонов определялись с помощью электромагнитного калориметра (EMC), состоящего из 6 PbSc и 2 PbGl секторов ( $|\eta| < 0.35$ );
- Для определения плоскости события использовались: кремниевый вершинный трекер, (F)VTXS:  $-3 < \eta < -1$ ), BBCS ( $-3.9 < \eta < -3.1$ ), расположенные в области задних псевдобыстрот, и центральные плечи (CNT:  $|\eta| < 0.35$ ).

# Метод плоскости события

- Для измерения  $v_2$  для  $\pi^0$ -мезонов использовался метод плоскости события. Распределение азимутального угла плоскости события  $\Psi_2$  анизотропно из-за ограниченного акцептанса детекторов (Raw) =>

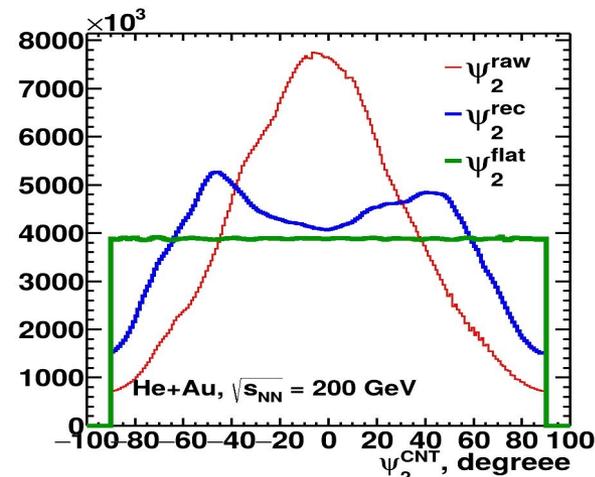
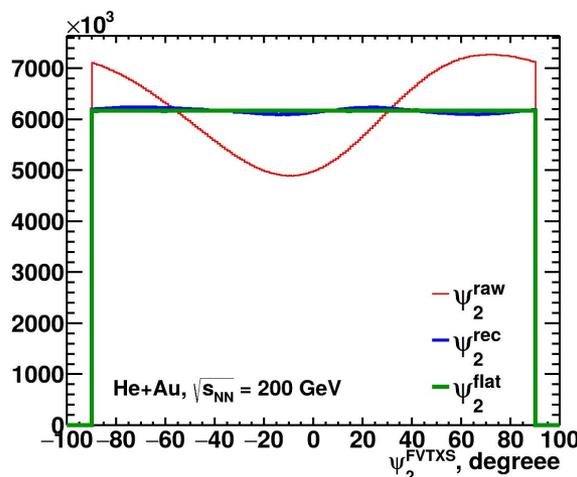
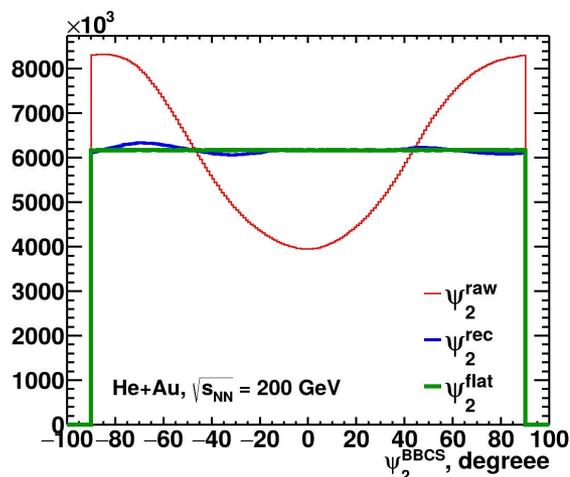
- Центрирование Q-векторов

$$Q_{2,x}^I = \frac{Q_{2,x} - \langle \cos 2\varphi \rangle}{\sigma_x}, \quad Q_{2,y}^I = \frac{Q_{2,y} - \langle \sin 2\varphi \rangle}{\sigma_y}, \quad \psi_2^I = \frac{1}{2} \arctan \frac{Q_{2,x}^I}{Q_{2,y}^I}$$

- Выполяживание  $\Psi_2$

$$\psi_2^{II} = \psi_2^I + \sum_j \frac{2}{j} (-\langle \sin 2j\psi_2^I \rangle \cos 2j\psi_2^I + \langle \cos 2j\psi_2^I \rangle \sin 2j\psi_2^I)$$

- Окончательные значения  $v_2$  определялись с использованием плоскости события, измеренной в детекторе FVTXS ( $\Psi_2^{FVTXS}$ )

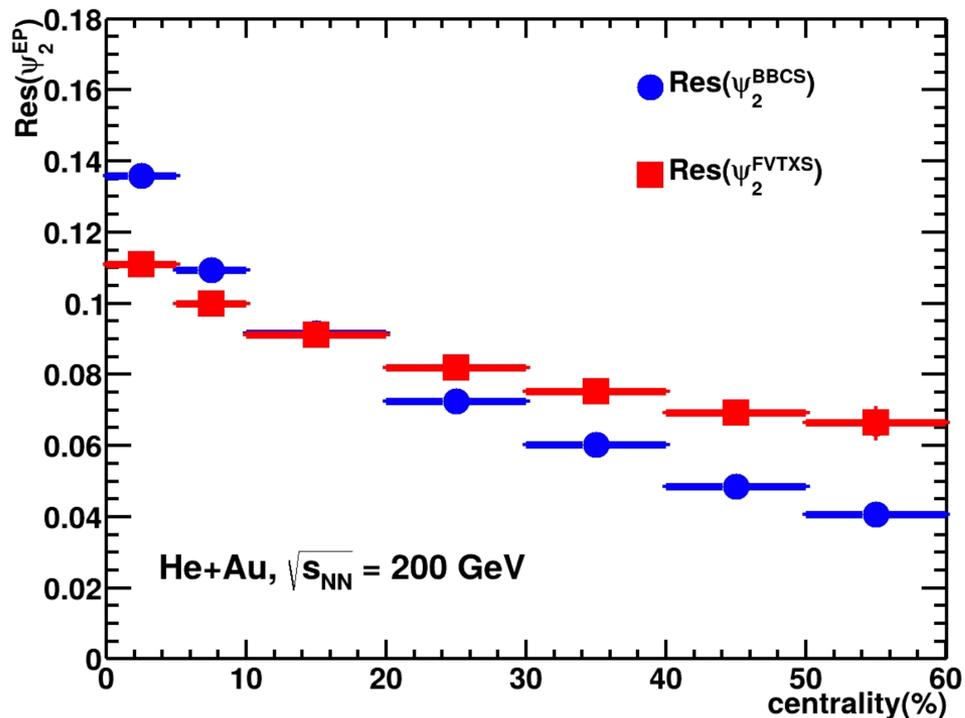


# Разрешение плоскости события

Разрешение было рассчитано методом трех подсобытий: три эквивалентные детекторные подсистемы (подсобытия), расположенные в разных диапазонах по псевдобыстроте, использовались для расчета угла плоскости события  $\Psi_2$ :

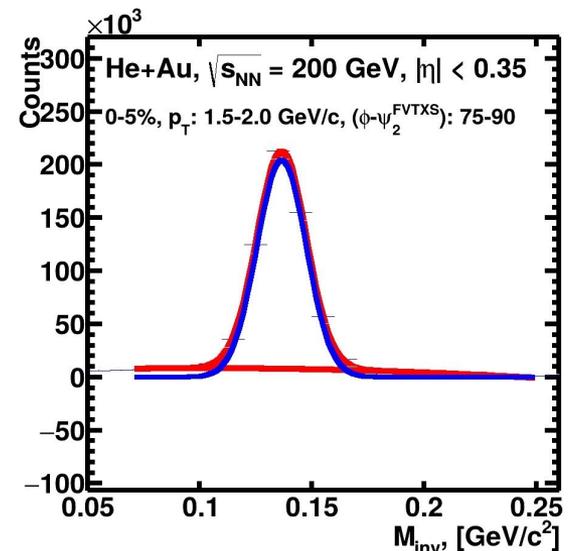
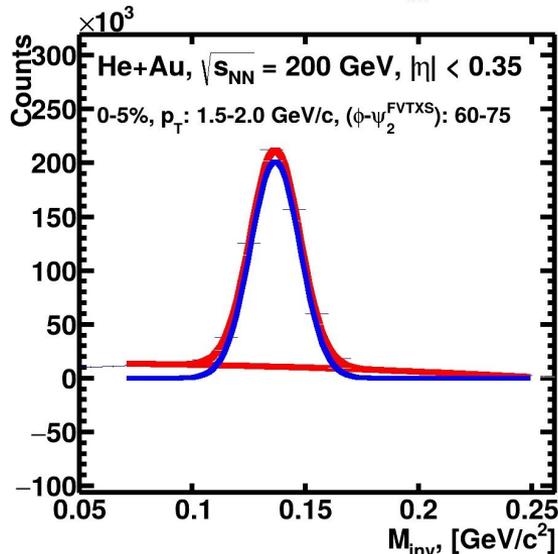
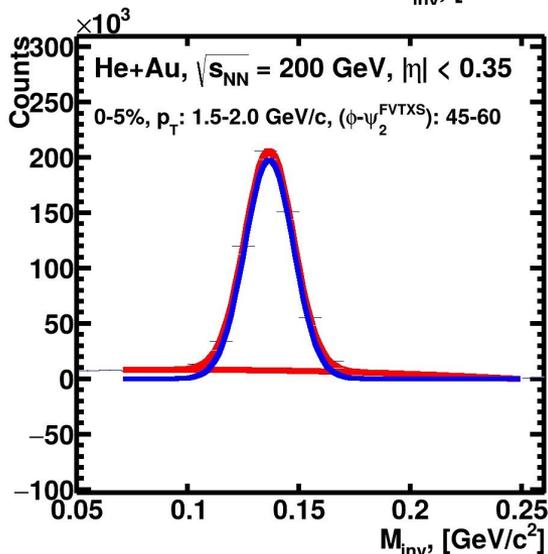
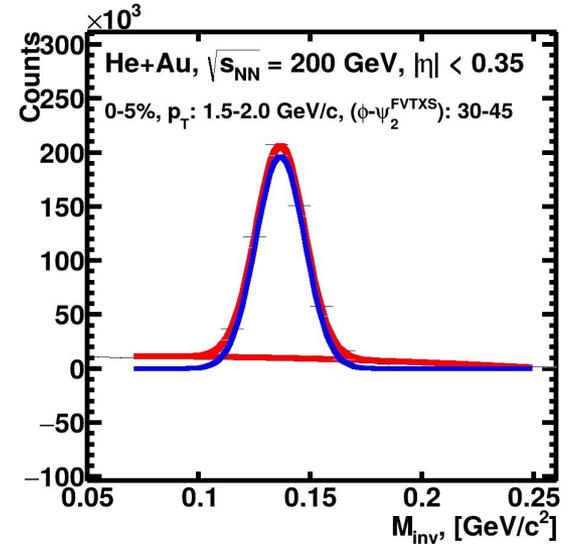
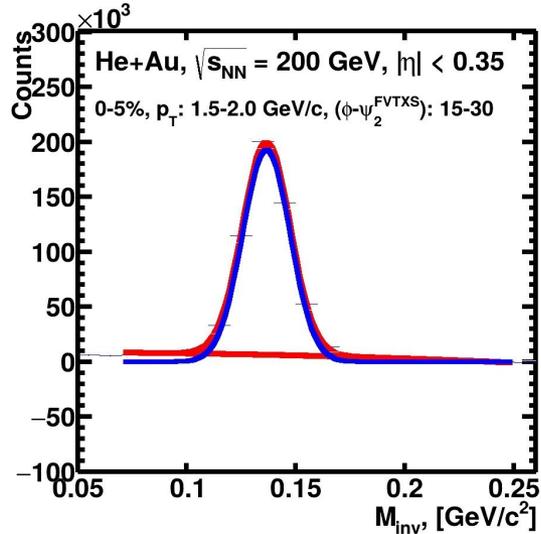
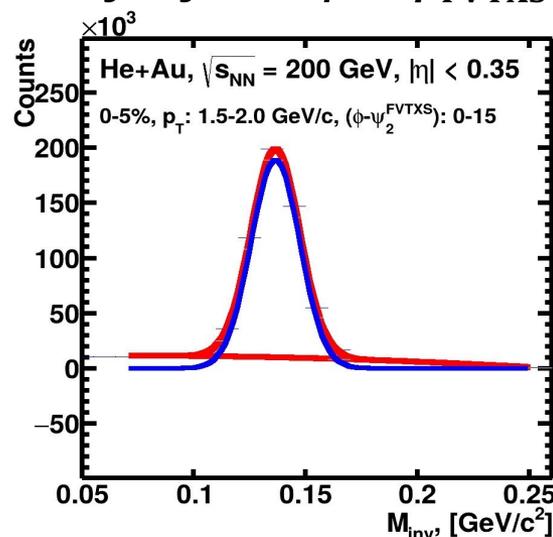
$$Res(\Psi_2^{FVTXS}) = \sqrt{\frac{\langle \cos 2(\Psi_2^{FVTXS} - \Psi_2^{BBCS}) \rangle \langle \cos 2(\Psi_2^{FVTXS} - \Psi_2^{CNT}) \rangle}{\langle \cos 2(\Psi_2^{BBCS} - \Psi_2^{CNT}) \rangle}}$$

$$Res(\Psi_2^{BBCS}) = \sqrt{\frac{\langle \cos 2(\Psi_2^{BBCS} - \Psi_2^{FVTXS}) \rangle \langle \cos 2(\Psi_2^{BBCS} - \Psi_2^{CNT}) \rangle}{\langle \cos 2(\Psi_2^{FVTXS} - \Psi_2^{CNT}) \rangle}}$$



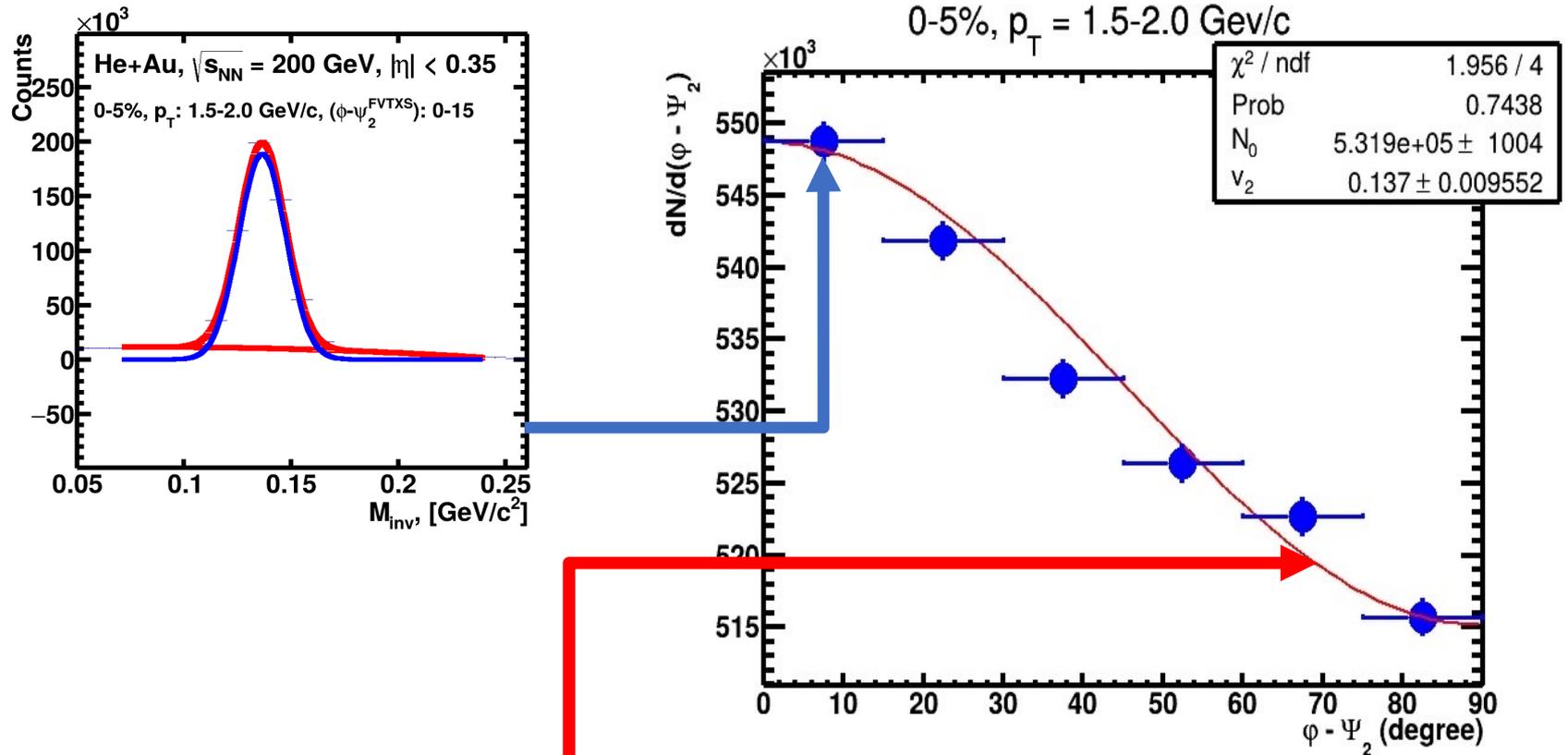
# Метод измерения $v_2$

Первичные выходы  $\gamma\gamma$  ( $dN/d(\varphi - \psi_{\text{FVTXS}})$ ) измерялись в 6 диапазонах по углу:  $0 < \varphi - \psi_{\text{FVTXS}} < \pi/2$



# Метод измерения $v_2$

Первичные выходы  $\gamma\gamma$  ( $dN/d(\varphi - \psi_{FV\text{TXS}})$ ) измерялись в 6 диапазонах по углу:  $0 < \varphi - \psi_{FV\text{TXS}} < \pi/2$

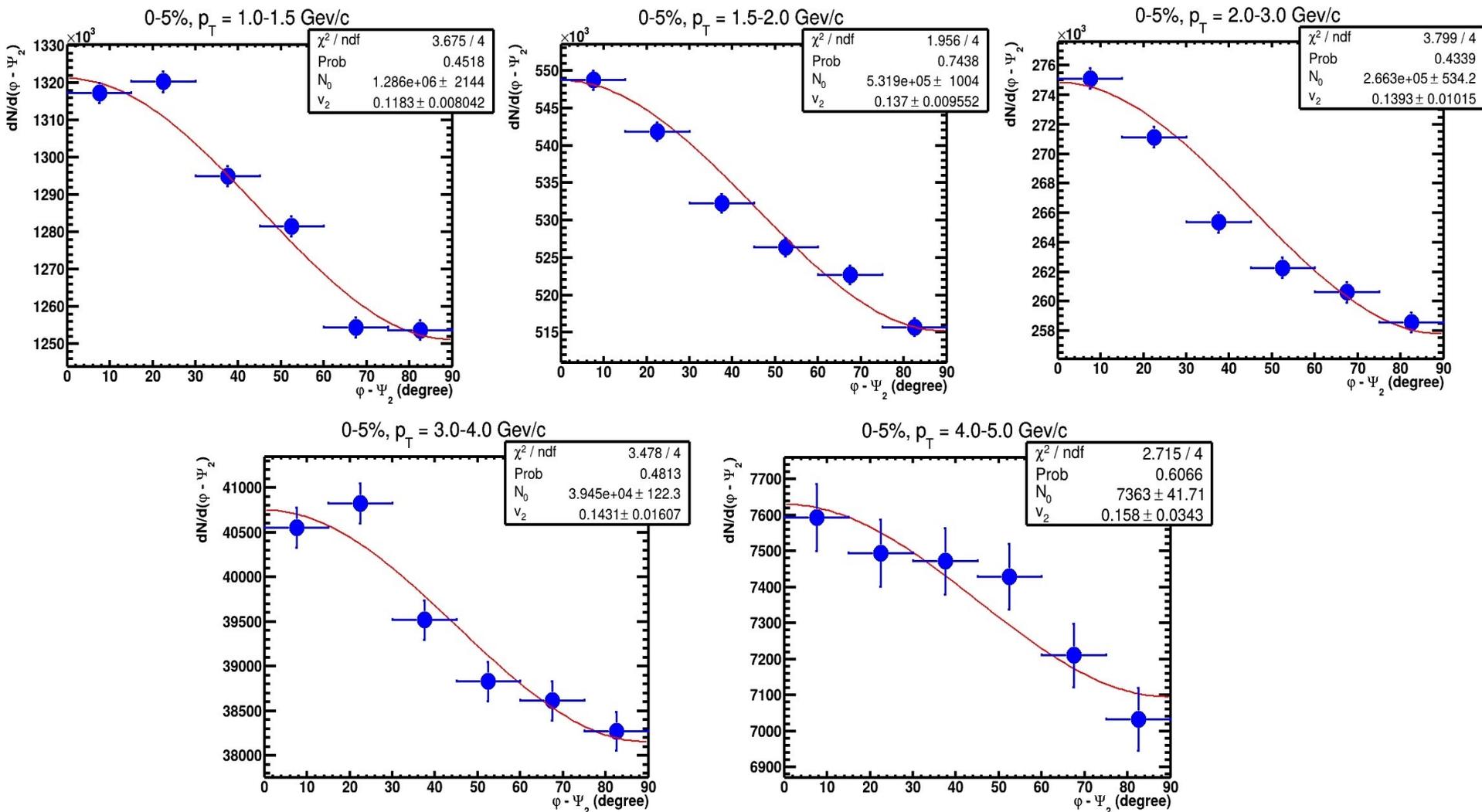


$$dN/d(\varphi - \psi_2) = N_0(1 + 2v_{2,obs} \cos[2(\varphi - \psi_2)]), \quad v_2 = \frac{v_{2,obs}}{Res(\psi_2)}$$

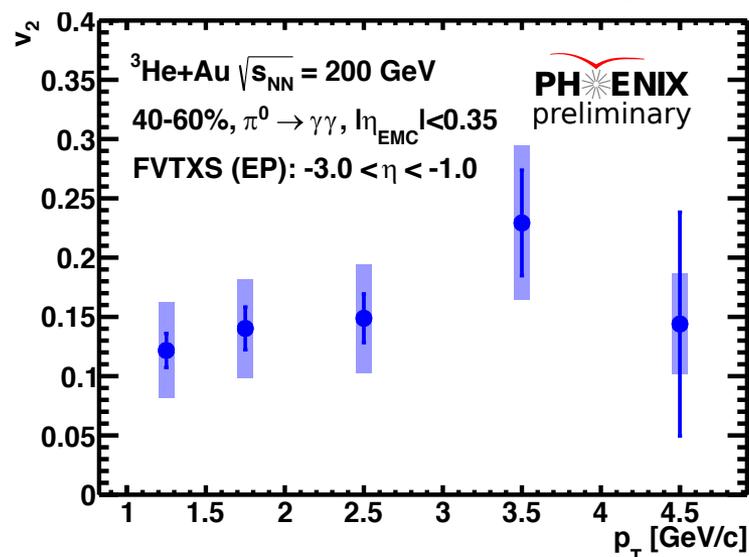
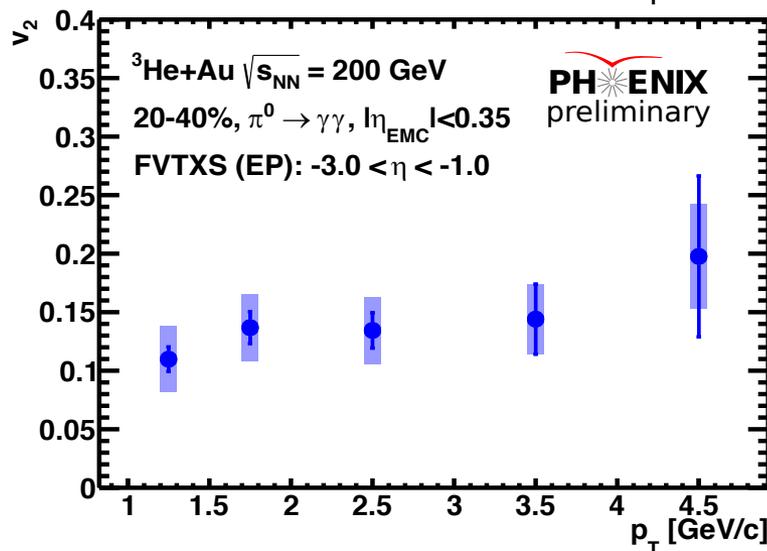
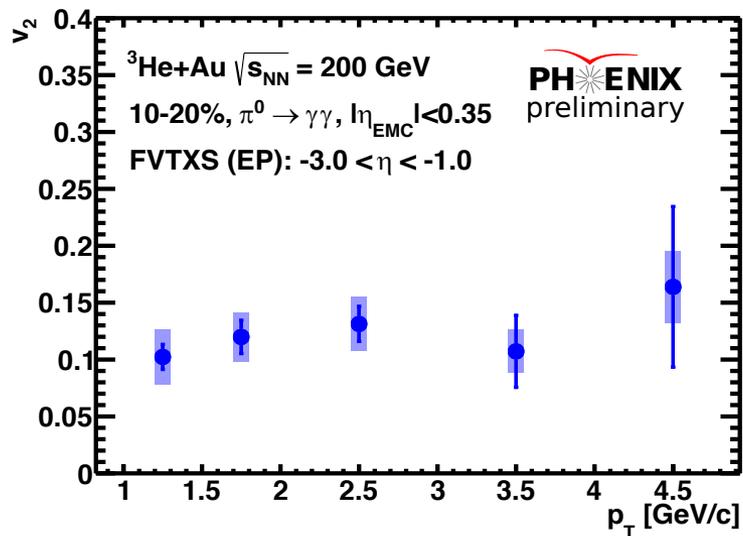
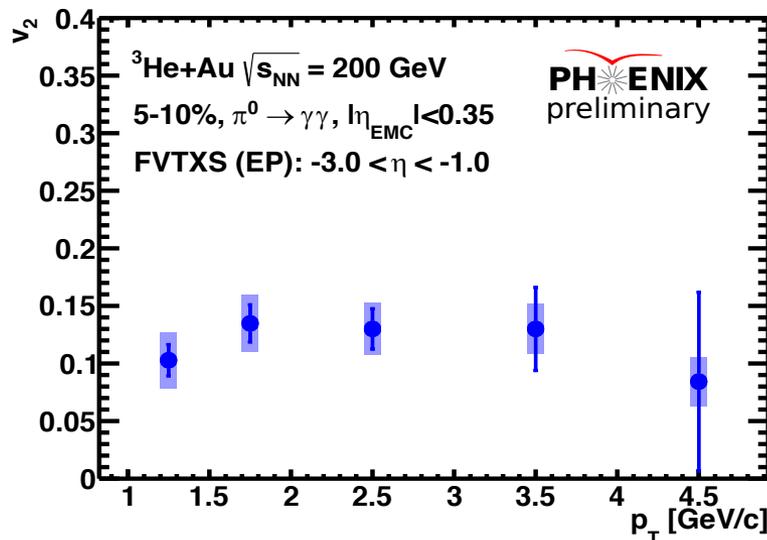
# Метод измерения $v_2$

Измерения  $\pi^0 v_2$  для каждого диапазона по центральности производились в 5 диапазонах по  $p_T$

Пример для 0-5% диапазона по центральности:

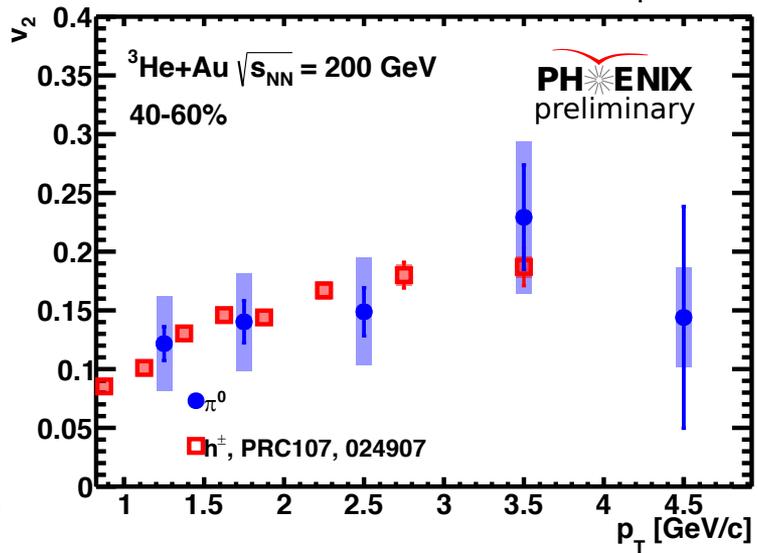
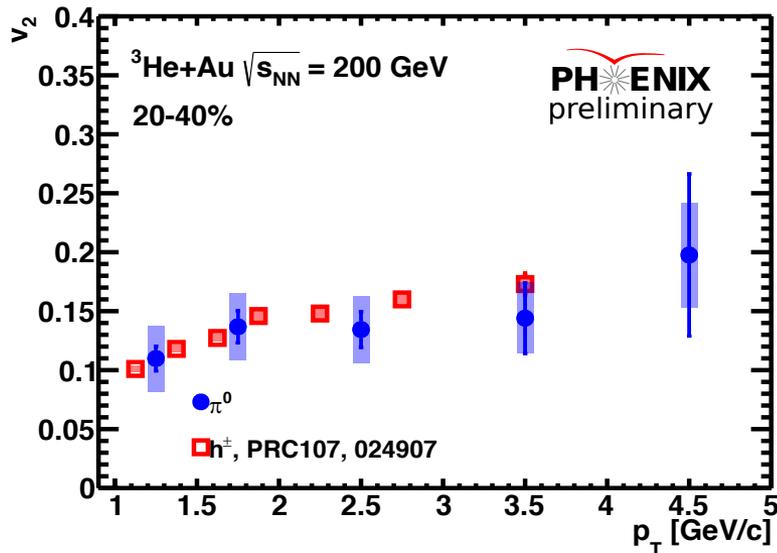
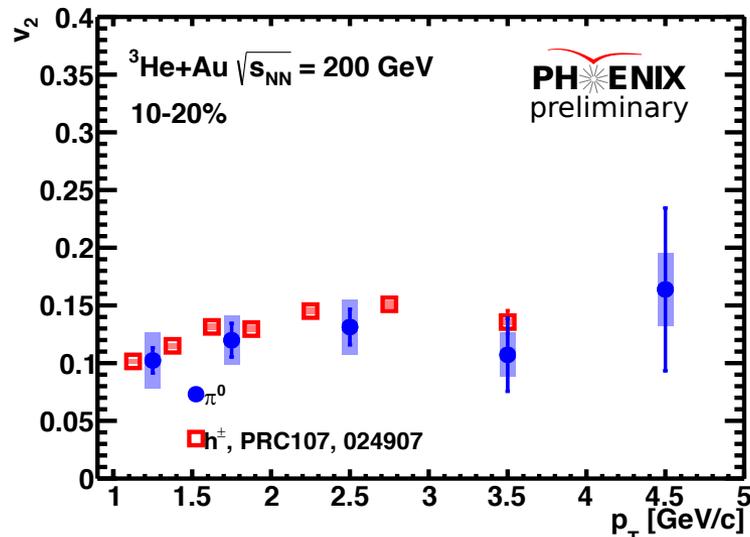
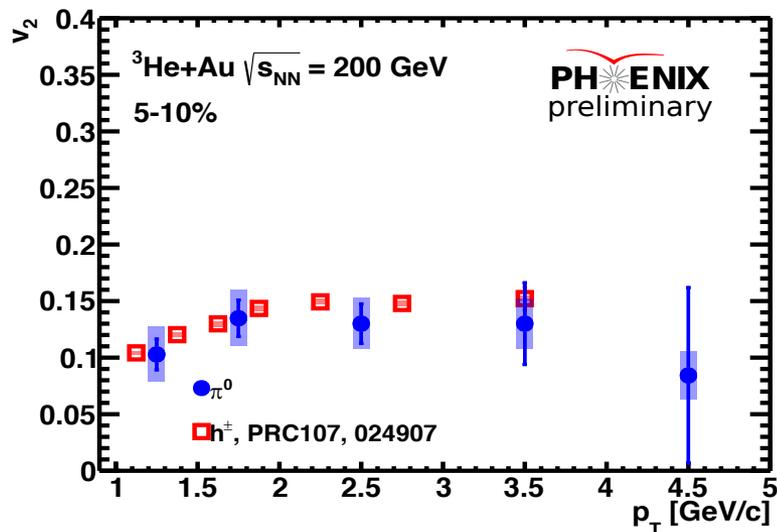


# Результаты ( $v_2$ )



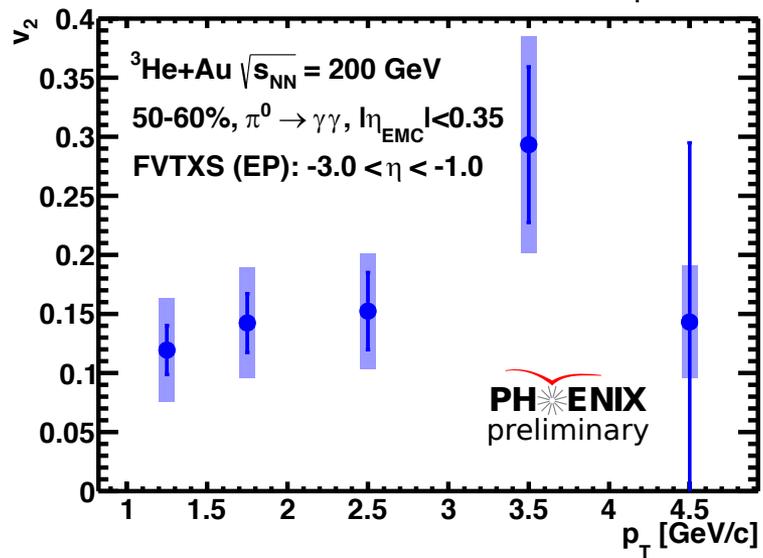
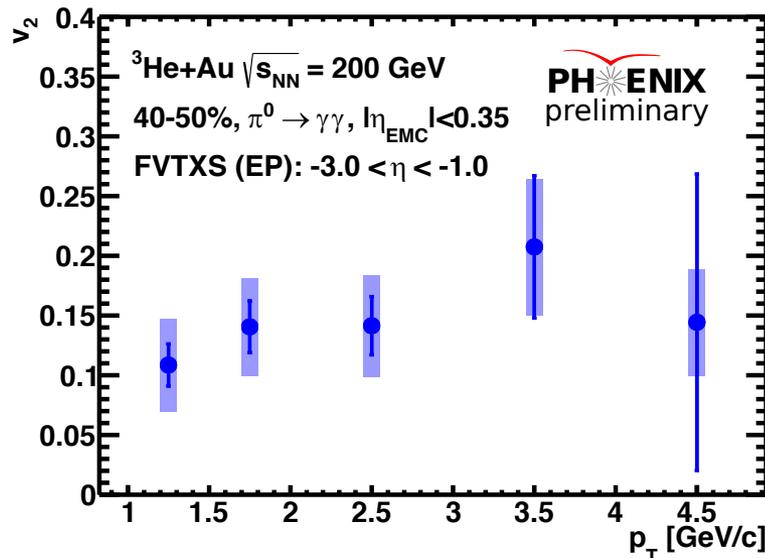
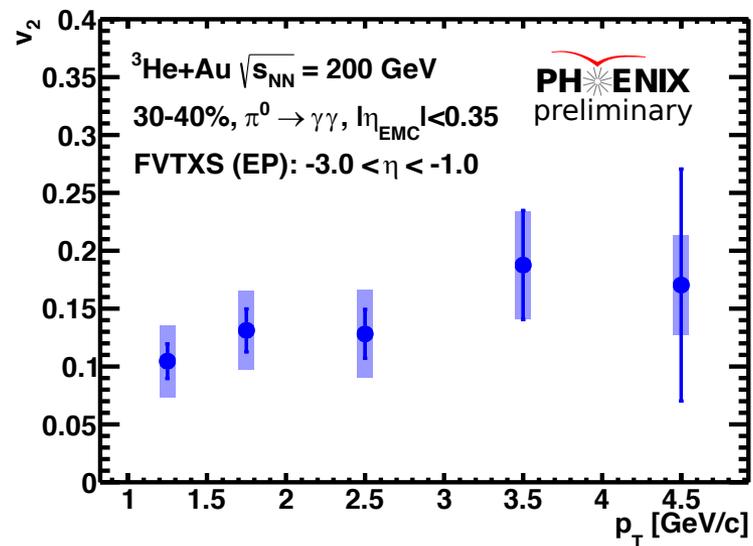
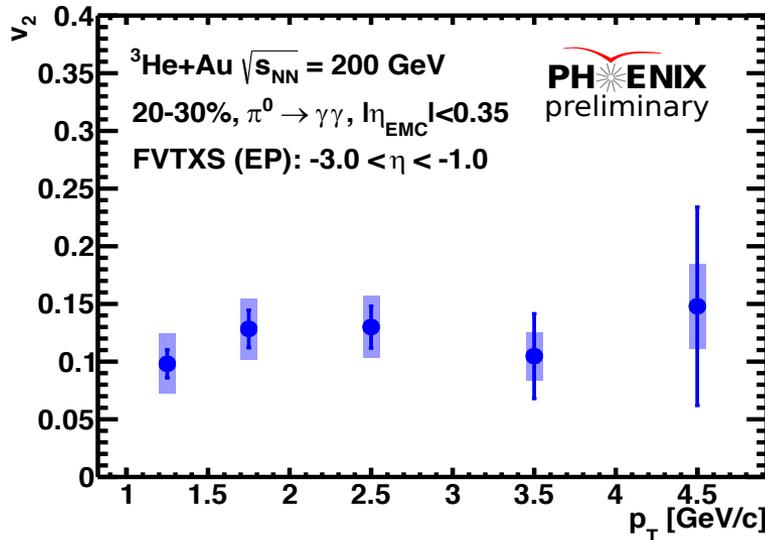
- Значения  $v_2(p_T)$  зависят от центральности столкновений: увеличиваются от центральных к периферическим.

# Результаты ( $v_2$ )



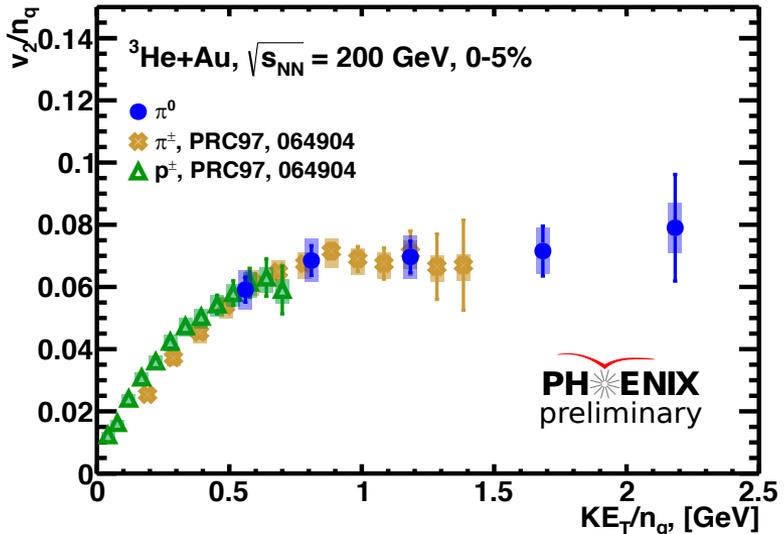
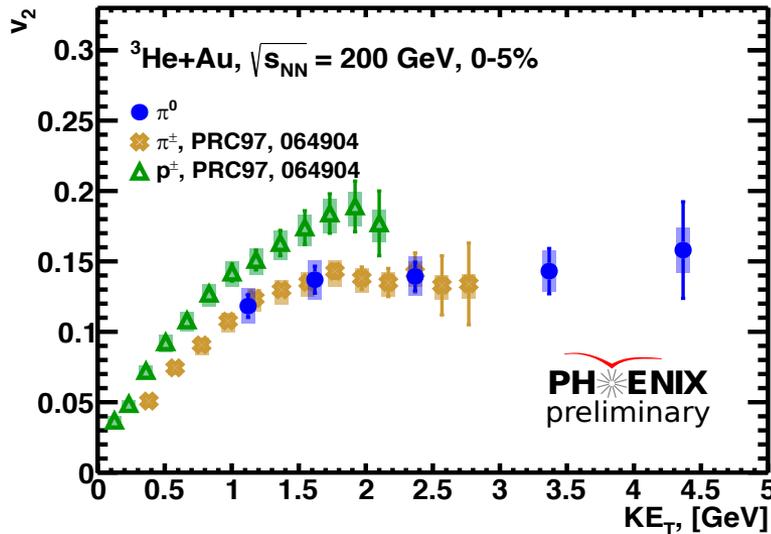
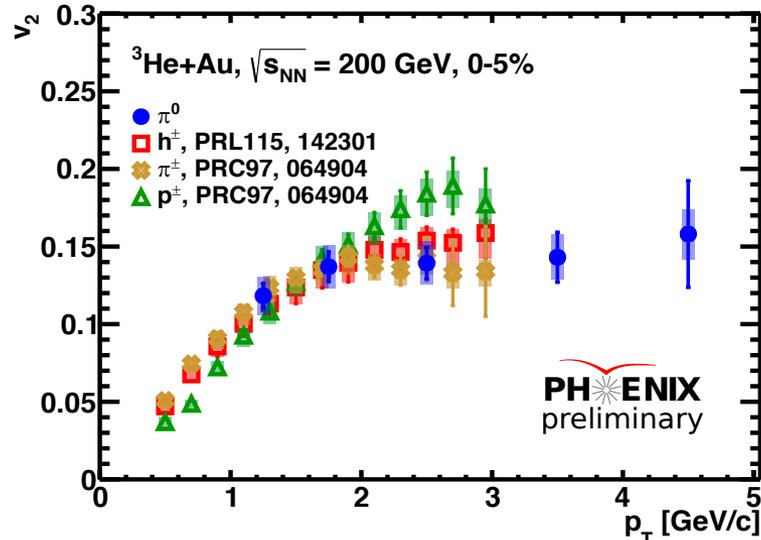
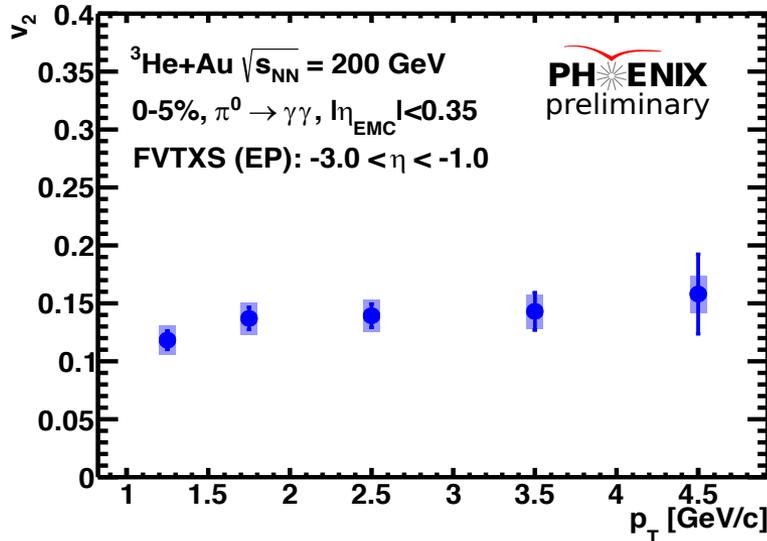
- Значения  $v_2(p_T)$  для  $\pi^0$ -мезонов и заряженных адронов совпадают с учетом неопределенностей.

# Результаты ( $v_2$ )



- Значения  $v_2(p_T)$  зависят от центральности столкновений: увеличиваются от центральных к периферическим.

# Результаты (масштабирование на число составных кварков $n_q$ )



**!** Формирование эллиптического потока может начинаться на кварковом уровне

$$KE_T = \left( \sqrt{p_T^2 + m^2} - m \right)$$

# Выводы

- Ненулевые значения  $v_2(p_T)$  наблюдаются во всем измеренном диапазоне  $p_T$  от самых центральных к периферическим столкновениям. Это может указывать как на проявление коллективного поведения, так и на наличие непотоковых корреляций, которые вносят вклад в измеряемую анизотропию;
- Обнаружено, что нормирование измеренных значений  $v_2$  для  $\pi^0$ -мезонов и ранее измеренных значений для  $\pi^\pm, h^\pm$  и  $p/\bar{p}$  на число кварков приводит к согласованию величин  $v_2/n_q$  в пределах неопределенностей. Следовательно, формирование эллиптического потока может начинаться уже на партонном (кварковом) уровне;
- Используемая в данной работе методика может быть реализована в эксперименте MPD на ускорительном комплексе NICA.

# Выводы

- Ненулевые значения  $v_2(p_T)$  наблюдаются во всем измеренном диапазоне  $p_T$  от самых центральных к периферическим столкновениям. Это может указывать как на проявление коллективного поведения, так и на наличие непотоковых корреляций, которые вносят вклад в измеряемую анизотропию;
- Обнаружено, что нормирование измеренных значений  $v_2$  для  $\pi^0$ -мезонов и ранее измеренных значений для  $\pi^\pm, h^\pm$  и  $p/\bar{p}$  на число кварков приводит к согласованию величин  $v_2/n_q$  в пределах неопределенностей. Следовательно, формирование эллиптического потока может начинаться уже на партонном (кварковом) уровне;
- Используемая в данной работе методика может быть реализована в эксперименте MPD на ускорительном комплексе NICA.

Спасибо за внимание!