



ПОЛИТЕХ

Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого



Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН,
посвященная 70-летию В.А. Рубакова

Результаты измерений эллиптических потоков нейтральных пионов в $Cu+Au$, $U+U$ и ${}^3He+Au$ столкновениях

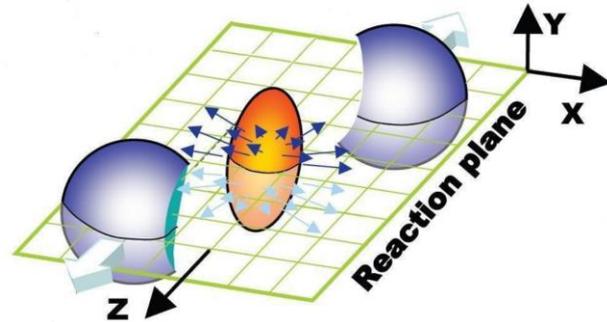
Банников Е.В., Бердников Я.А., Котов Д.О., Басиров К.Н.

(для коллаборации PHENIX)

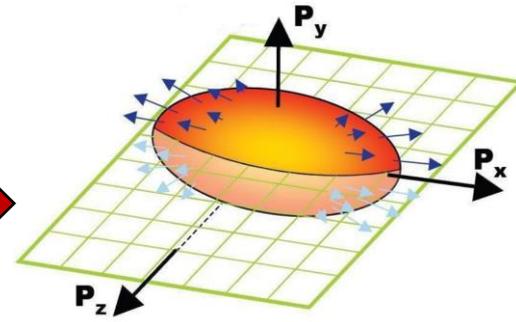
*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого (СПбПУ)*

Работа выполнена в рамках Государственного задания на проведение
фундаментальных исследований (код темы FSEG-2025-0009).

1. Азимутальная анизотропия



Пространственная анизотропия



Импульсная анизотропия

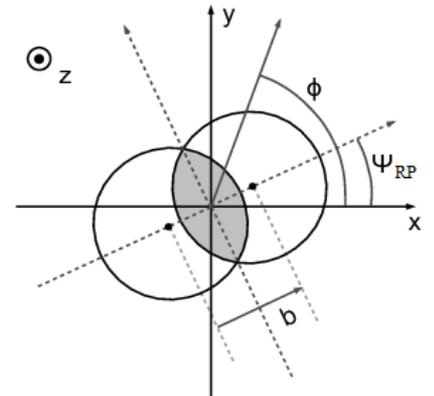
Эллиптический поток (v_2)

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

$$f(\varphi, p_T) \propto 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} v_n(p_T) \cos(n(\varphi - \Psi_{RP}))$$

$n = 2$

$$v_2 = \langle \cos(2(\varphi - \Psi_{RP})) \rangle$$

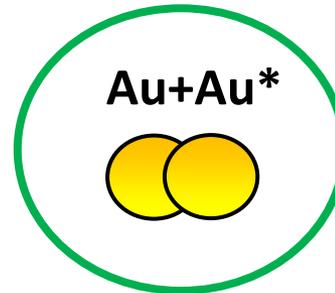


2. Мотивация

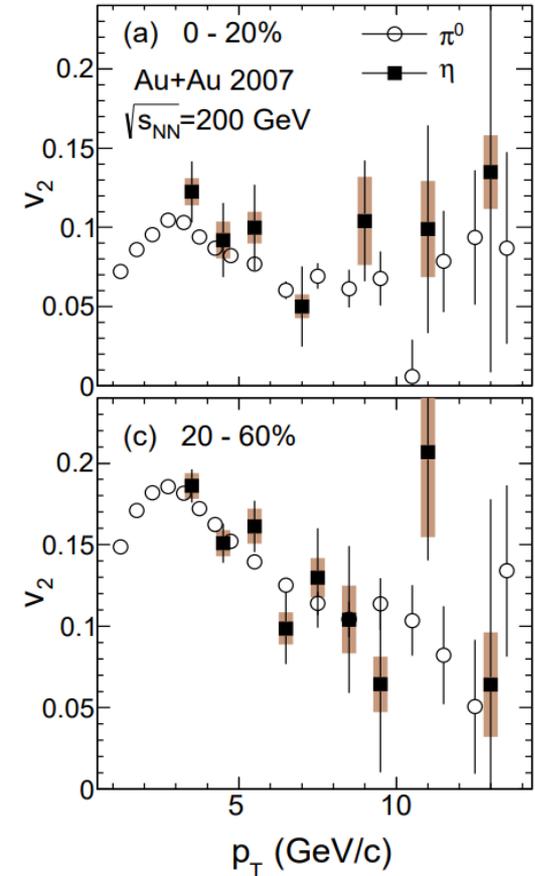
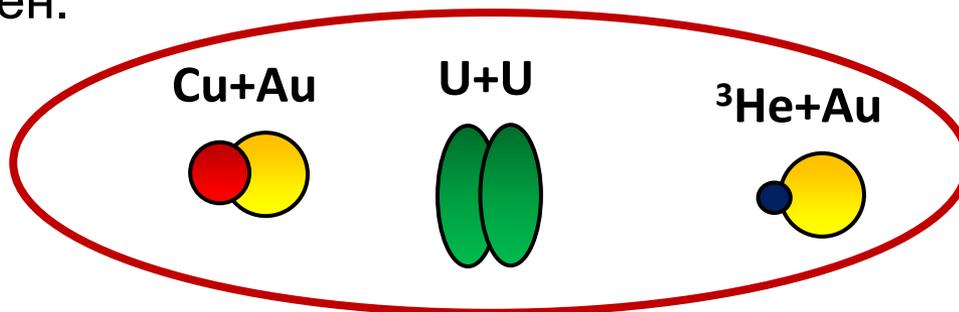
Использование различных систем столкновений для измерения значений v_2 позволяет оценить влияние начальных условий столкновений на величину эллиптического потока.

Ранее были измерены:

Phys. Rev. C* **88, 064910 (2013)



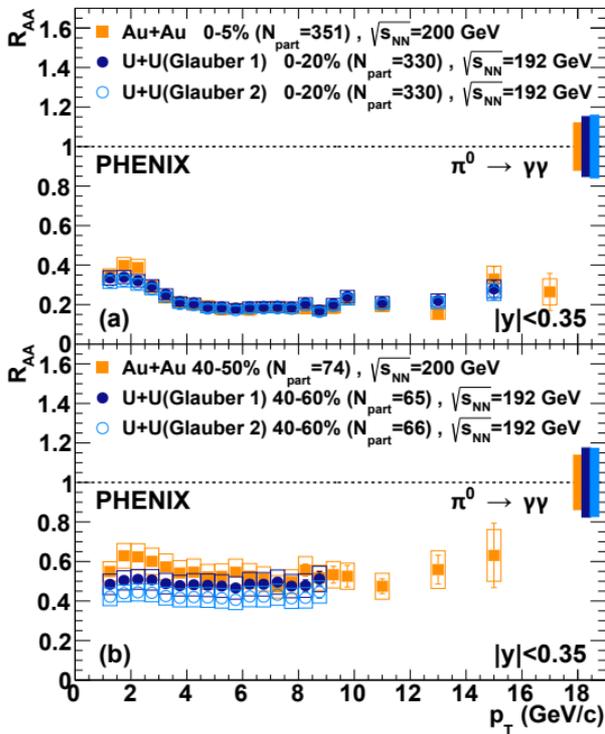
Результаты измерений в Cu+Au и U+U столкновениях будут представлены сегодня, анализ эллиптических потоков нейтральных пионов в столкновениях $^3\text{He}+\text{Au}$ еще не завершен.



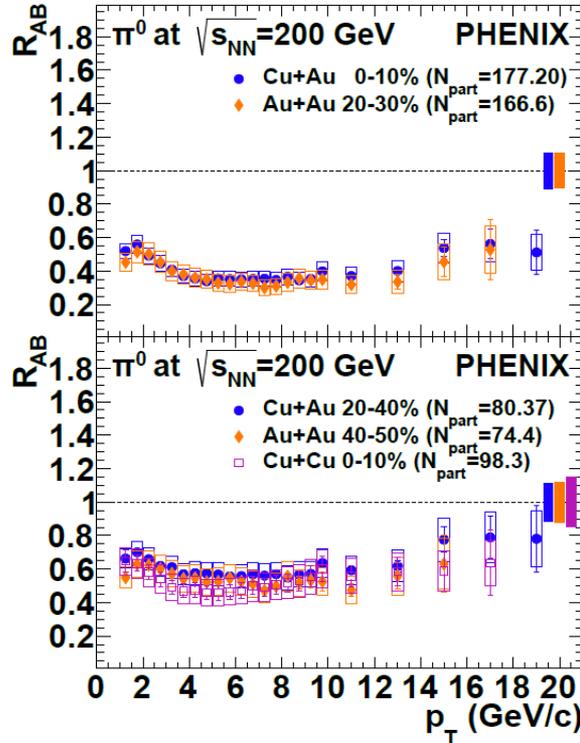
2. Мотивация

1. π^0 -мезоны:

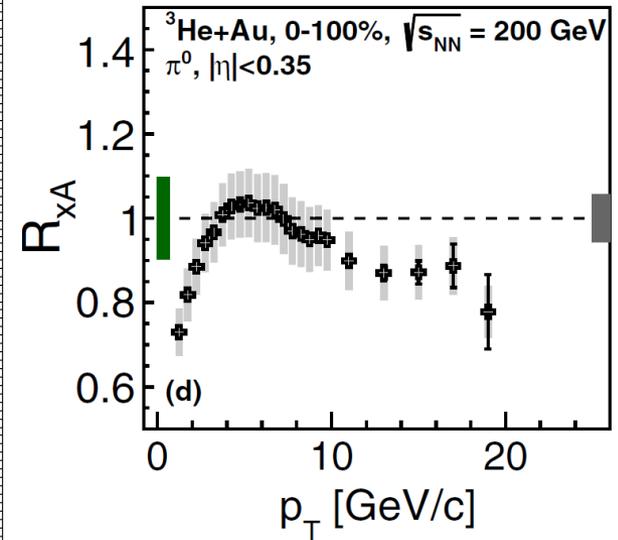
Они рождаются в большом количестве вплоть до $p_T \approx 16 - 20$ ГэВ/с
 \Rightarrow **Эффективный инструмент для изучения механизма развития эллиптического потока в широком кинематическом диапазоне в легких и тяжелых системах столкновений.**



Phys. Rev. C **102**, 064905 (2020)



Phys. Rev. C **98**, 054903 (2018)



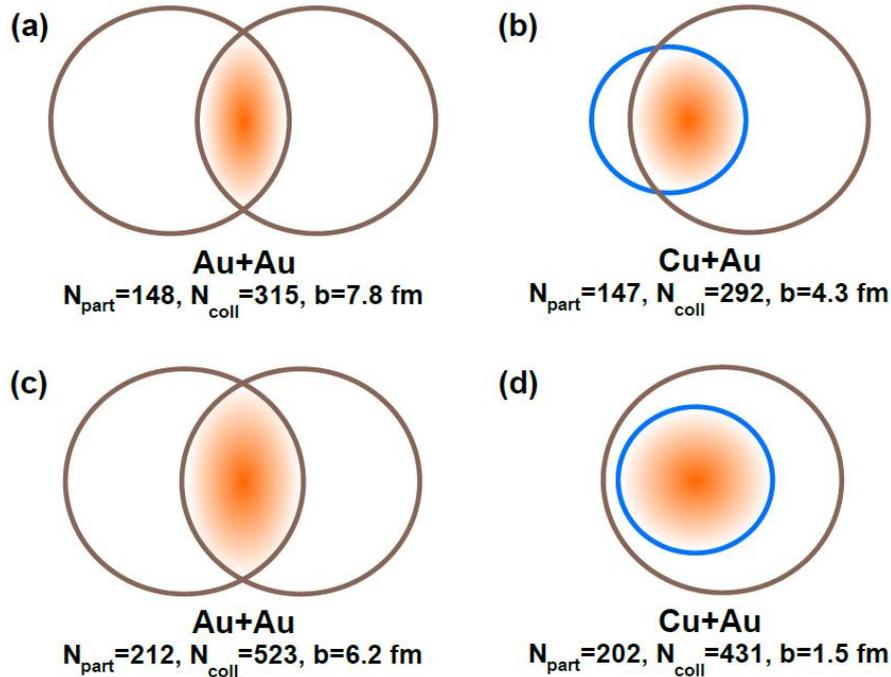
Phys. Rev. C **105**, 064902 (2022)

2. Мотивация

2. Система столкновений Cu + Au:

Тяжелая асимметричная система столкновений. Ядро Cu может полностью перекрыться ядром Au:

⇒ При сравнении с данными, полученными в столкновениях Au+Au – определение зависимости эллиптического потока от начальной геометрии.



*Phys. Rev. C **98**, 054903 (2018)

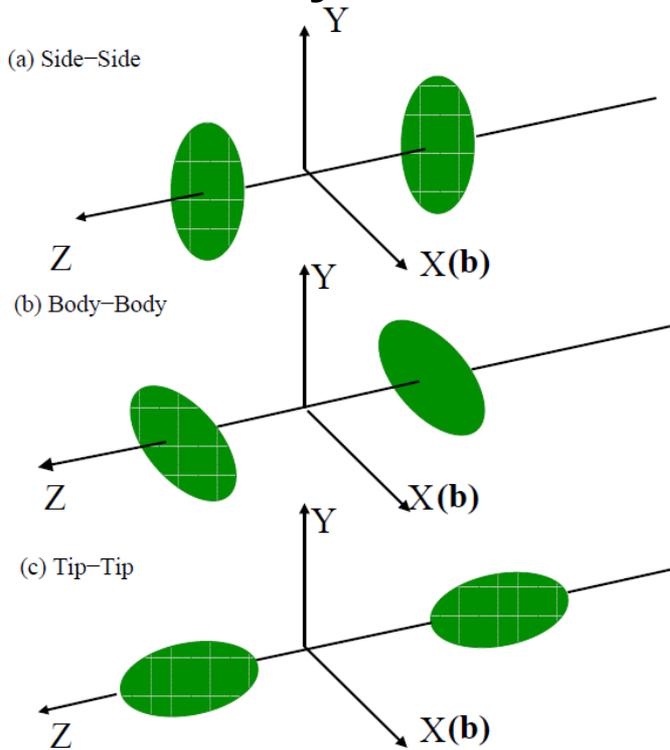
2. Мотивация

3. Система столкновений U + U:

^{238}U имеет сферически асимметричную форму

⇒ Возможны различные варианты начальных конфигураций*

⇒ **Эффективный инструмент для изучения зависимости v_2 от начальных условий**



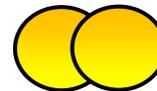
*Phys. Rev. C **85**, 034905 (2012)

Au+Au ⇔ U+U

Большой эксцентриситет без уменьшения размера образующегося фаербола в случае полного перекрытия ядер U (tip-tip => side-side)

⇒ **Отличный метод изучения потерь энергии партонов (гашение струй) ****

Au+Au



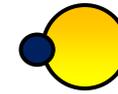
U+U



Phys. Rev. Lett. **94, 132301 (2005)

2. Мотивация

³He+Au

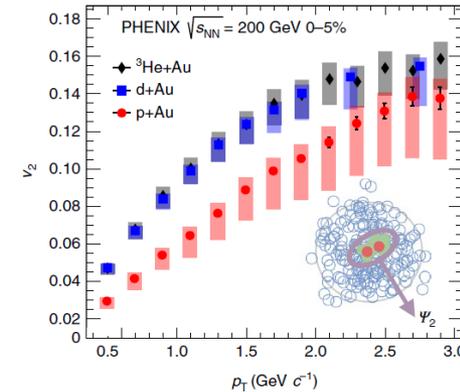
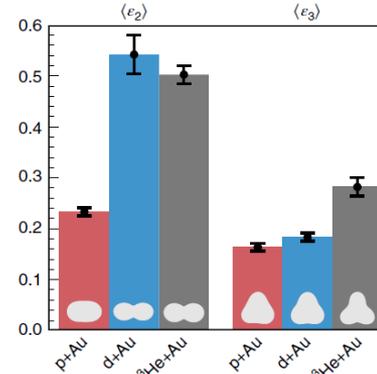


4. Система столкновений ³He + Au:

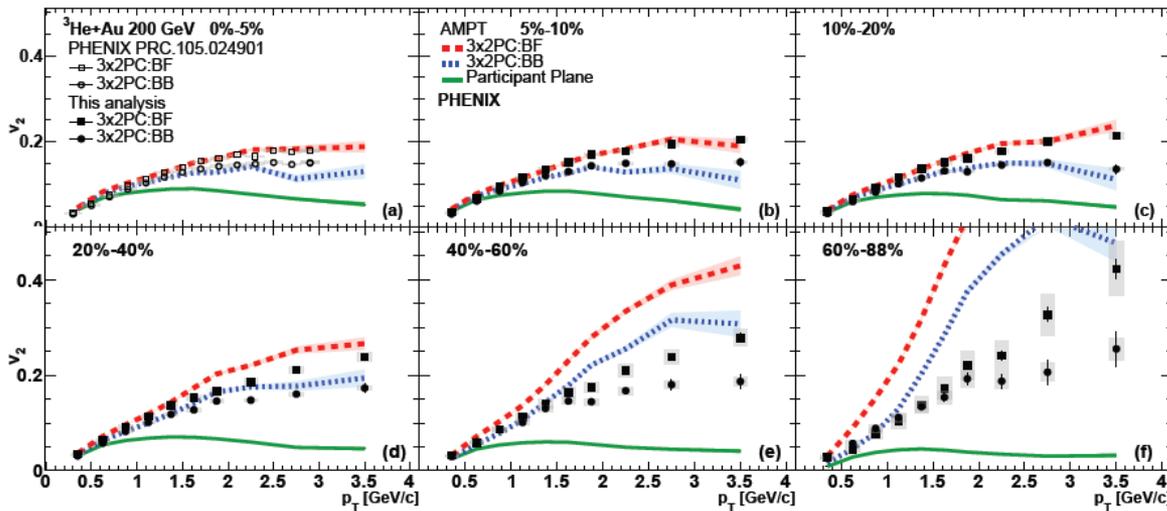
Порядок значений азимутальной анизотропии второго порядка в самых центральных столкновениях легких систем соответствует предсказаниям гидродинамических моделей:

$$\varepsilon_2^{p+Au} < \varepsilon_2^{d+Au} \approx \varepsilon_2^{^3He+Au}$$

$$v_2^{p+Au} < v_2^{d+Au} \approx v_2^{^3He+Au}$$



Nat. Phys. 15, 214-220 (2019)

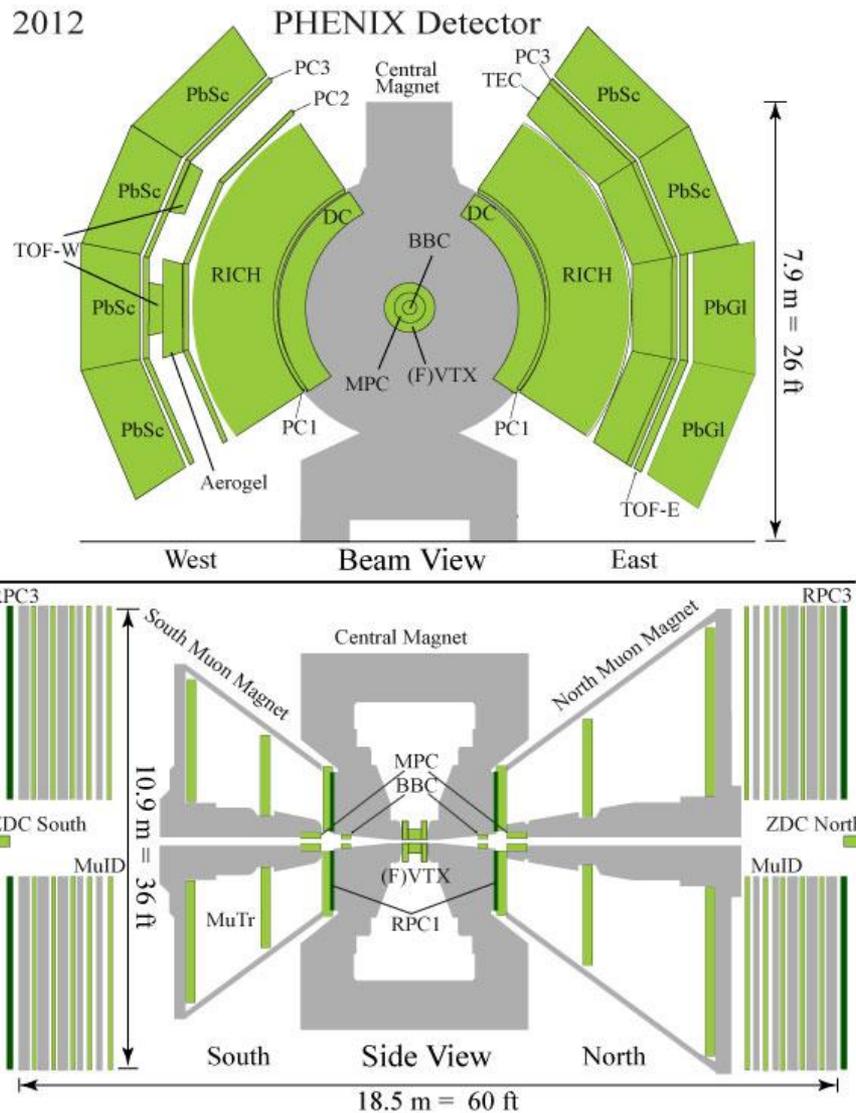


*Phys. Rev. C 107, 024907 (2023)

Увеличение диапазона по центральности => значения v_2 – поток и не потоковые эффекты.*

Анализ $\pi^0 v_2$ в столкновениях ³He+Au еще не завершен!

3. Эксперимент PHENIX на RHIC



Класс центральности событий определяется с помощью счетчиков ядро-ядерных столкновений (**BBC**).



Кинематические характеристики фотонов определяются с помощью электромагнитного калориметра (EMCal), состоящего из **6 PbSc** и **2 PbGI** секторов ($|\eta| < 0.35$).



Для определения плоскости события используются: кремниевых вершинный трекер (**FVTX: $1 < |\eta| < 3$**), мюонно-поршневой калориметр (**MPC**) и **BBC ($3.1 < |\eta| < 3.9$)**.

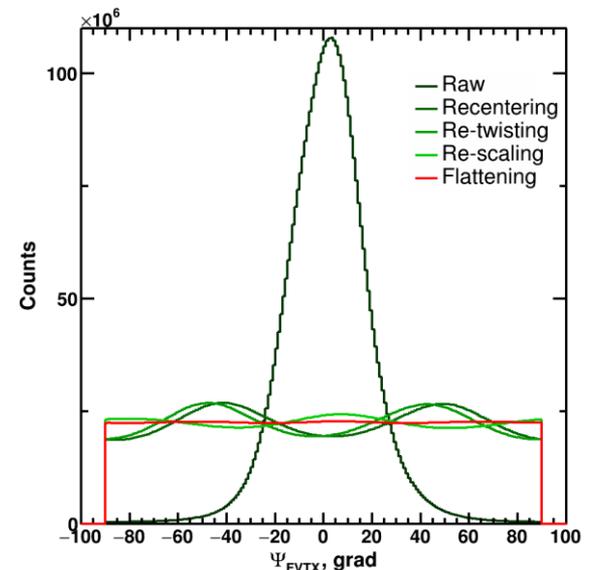
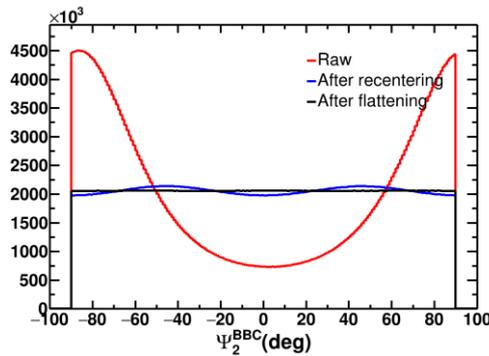
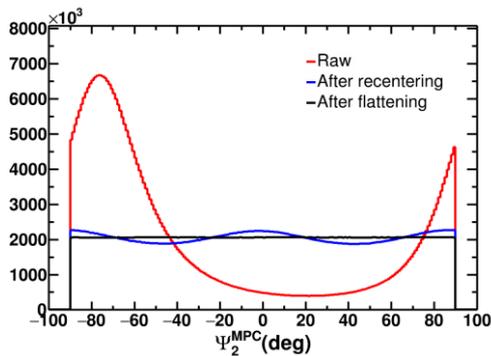
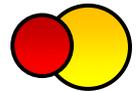
4. Плоскость события

Для измерения v_2 π^0 -мезонов использовался **метод плоскости события***.
Распределение азимутального угла плоскости события анизотропно из-за ограниченного акцептанса детекторов** (Raw) =>

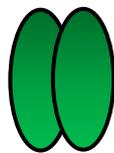
- **Recentering;**
- **Twist;**
- **Rescaling;**
- **Flattening***.**

Однако, основной вклад в калибровку распределения азимутов плоскостей события вносят процедуры **Recentering** и **Flattening**.

Cu+Au



U+U



*[arXiv:0809.2949](https://arxiv.org/abs/0809.2949)

***Phys. Rev. C* **77**, 034904 (2008)

****Phys. Rev. C* **58**, 1671 (1998)

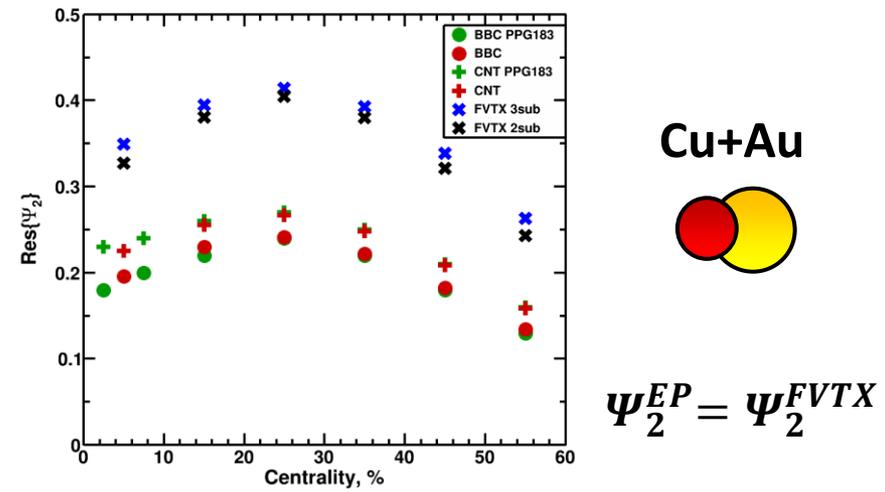
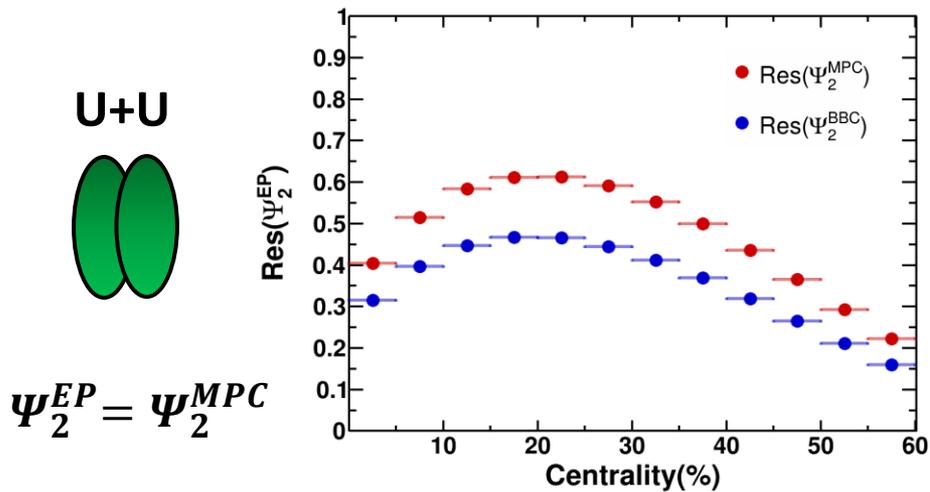
5. Разрешение

Разрешение была рассчитано с помощью **метода подсобытий***.

В случае симметричной системы столкновений **U+U** можно воспользоваться **двумя подсобытиями**: две эквивалентные детекторные подсистемы, расположенные в разных диапазонах по псевдобыстроте.

В случае асимметричных систем (**Cu+Au**) используется **три подсобытия** (три детекторные подсистемы).

$$Res(\Psi_2^{MPC}) = \sqrt{2 \langle \cos 2(\Psi_2^{MPCS} - \Psi_2^{MPCN}) \rangle} \quad Res(\Psi_2^{FVTX}) = \sqrt{\frac{\langle \cos 2(\Psi_2^{FVTX} - \Psi_2^{CNT}) \rangle \langle \cos 2(\Psi_2^{FVTX} - \Psi_2^{BBC}) \rangle}{\langle \cos 2(\Psi_2^{CNT} - \Psi_2^{BBC}) \rangle}}$$

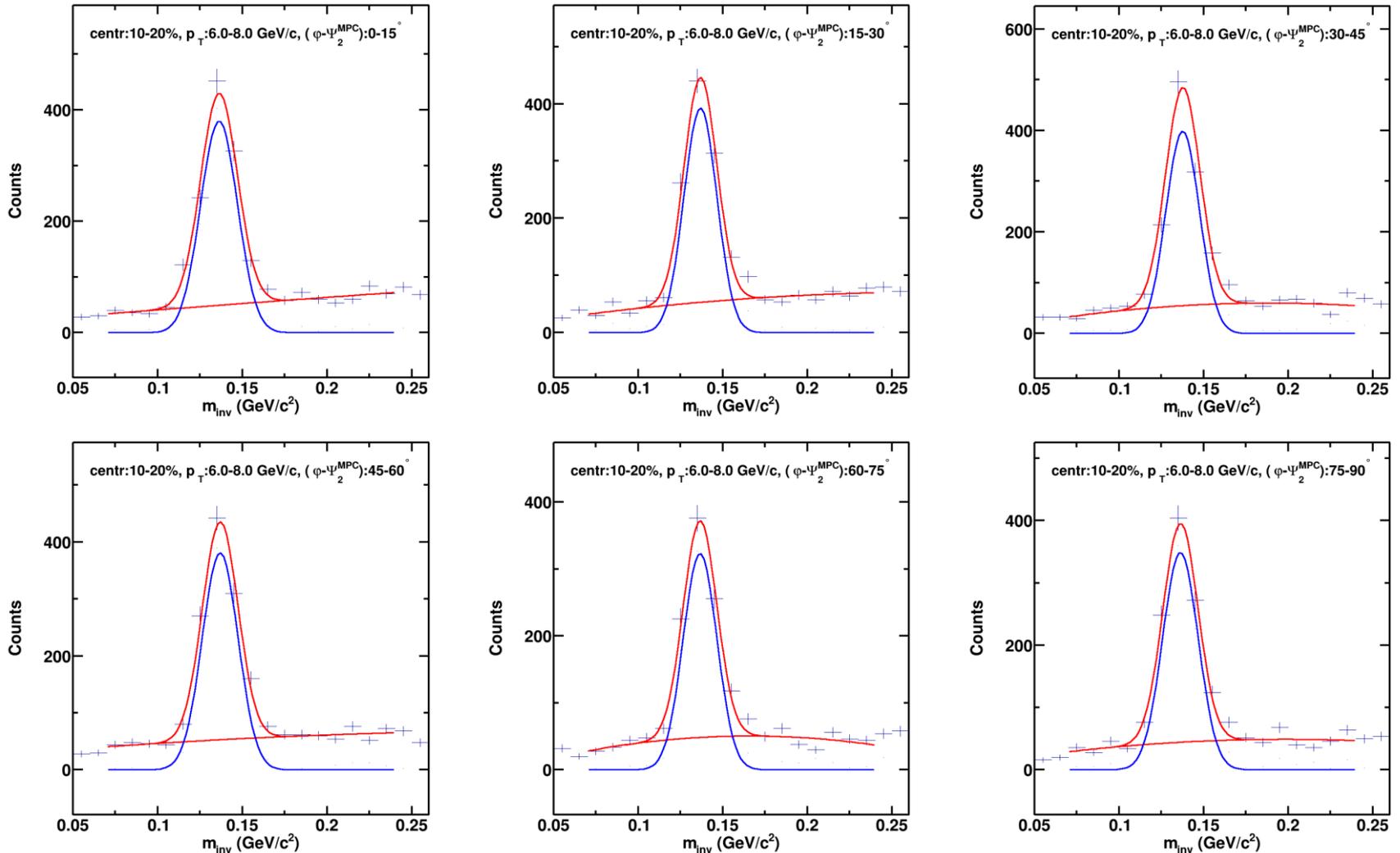


*arXiv:0809.2949

PPG183: Phys. Rev. C **94**, 054910 (2016)

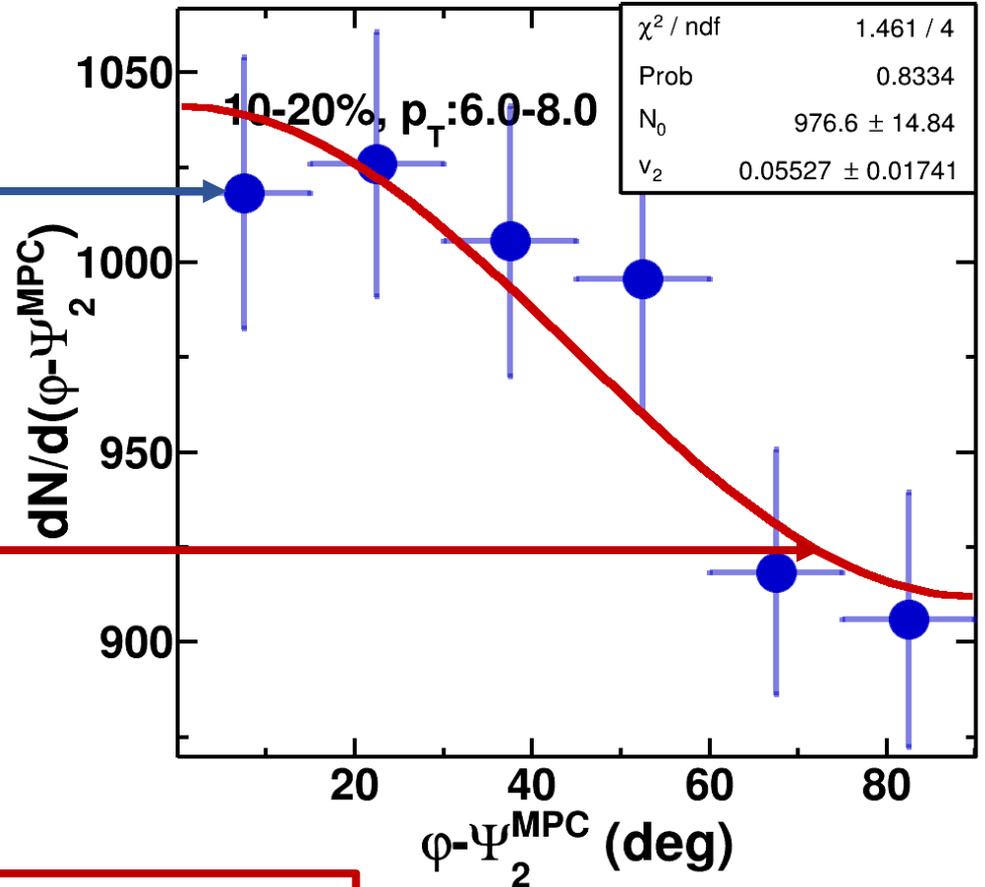
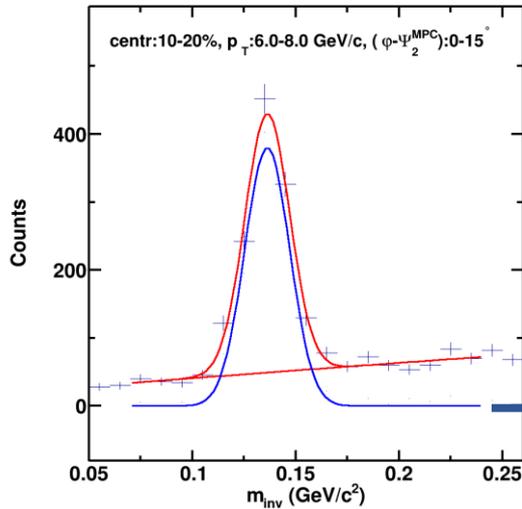
6. Метод измерения ν_2

Первичные выходы $\gamma\gamma$ ($dN/d(\varphi - \Psi_2^{EP})$) измеряются в **6 диапазонах** по углу: $0 < \varphi - \Psi_2^{EP} < \pi/2$



6. Метод измерения v_2

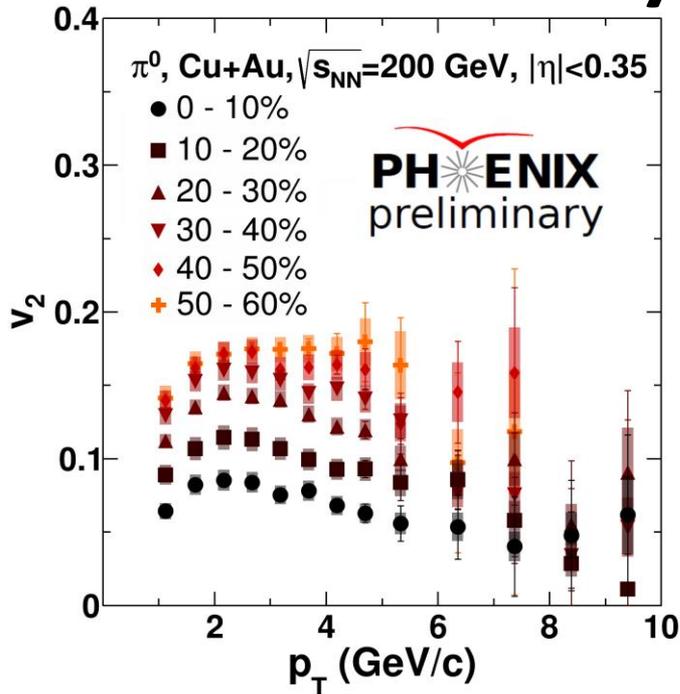
Первичные выходы $\gamma\gamma$ ($dN/d(\varphi - \Psi_2^{EP})$) измеряются в **6 диапазонах** по углу: $0 < \varphi - \Psi_2^{EP} < \pi/2$



В случае U+U: $\Psi_2^{EP} = \Psi_2^{MPC}$

$$dN/d(\varphi - \Psi_2^{MPC}) = N_0(1 + 2v_2 \cos[2(\varphi - \Psi_2^{MPC})])$$

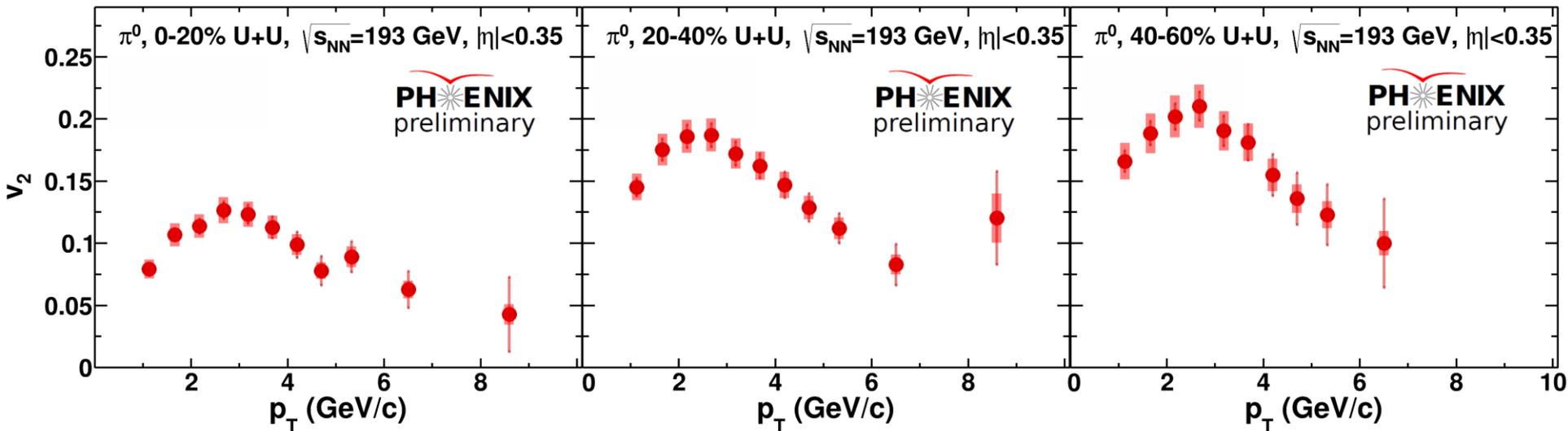
7. Результаты (v_2)



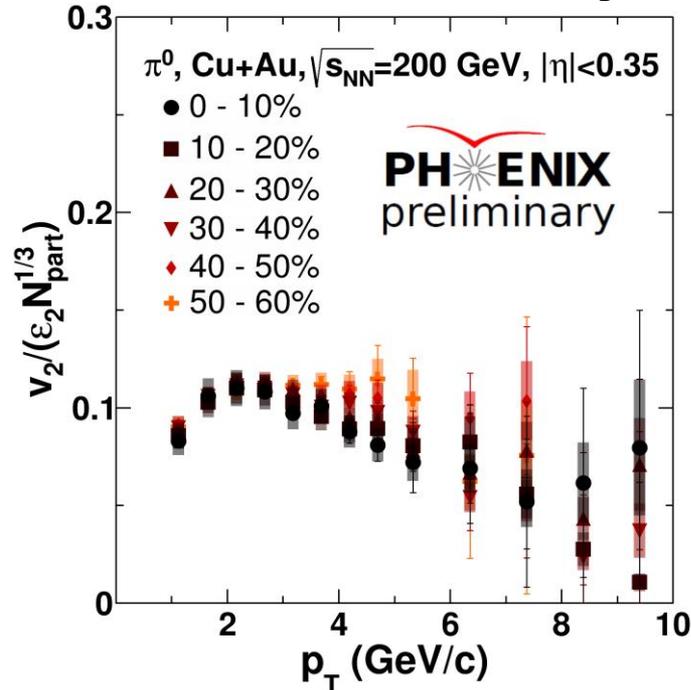
Значения $v_2(p_T)$ зависят от центральности столкновений: увеличиваются от центральных к периферическим;



Значения $v_2(p_T)$ нейтральных пионов в системе столкновений U+U превосходят аналогичные значения, измеренные в столкновениях Cu+Au.



7. Результаты (скейлинг $\varepsilon_2 N_{part}^{1/3}$)

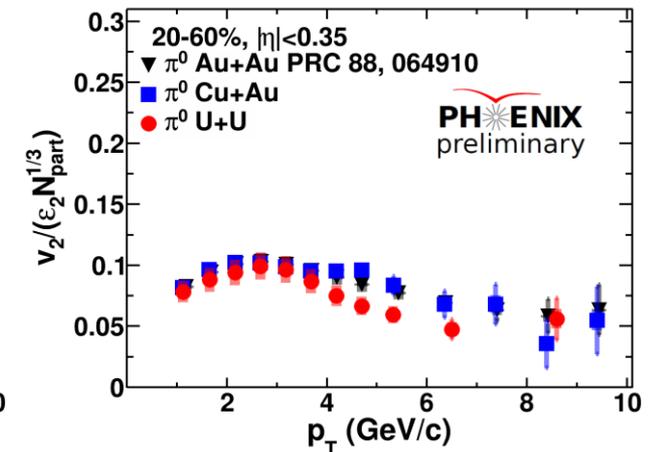
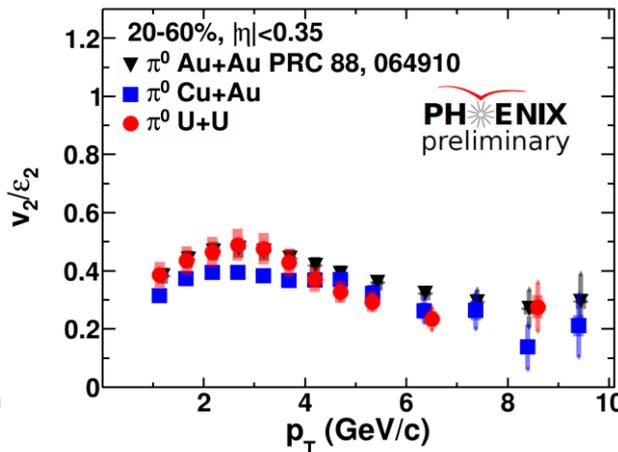
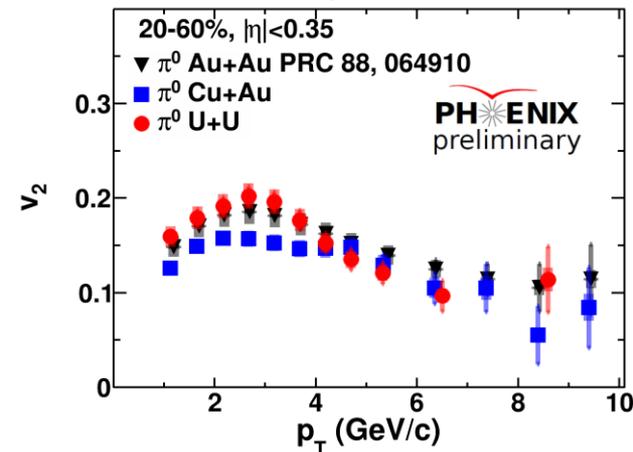


Диапазон по поперечному импульсу вплоть до $p_T \approx 4$ ГэВ/с:

- Значения $v_2/\varepsilon_2 N_{part}^{1/3}$ совпадают с учетом неопределенностей во всех центральностях столкновений Cu+Au, а также в центральности 20-60% во всех трех системах столкновений;
- $v_2^{UU} \geq v_2^{AuAu} > v_2^{CuAu}$



При больших $p_T > 5$ ГэВ/с: значения $v_2(p_T)$ нейтральных пионов больше нуля во всех трех системах столкновений.



Значения ε_2 и N_{part} для всех столкновений: *Phys. Rev. C* **85**, 034905 (2012), *Phys. Rev. C* **94**, 054910 (2016)

7. Результаты (потери энергии партонов)

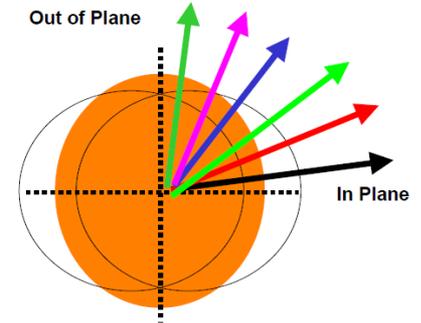
Доля потери энергии S_{loss} :

$$S_{loss} = \frac{p'_T - p_T}{p'_T} = \frac{\Delta p_T}{p'_T} \approx \frac{\Delta E}{E_{in}}$$

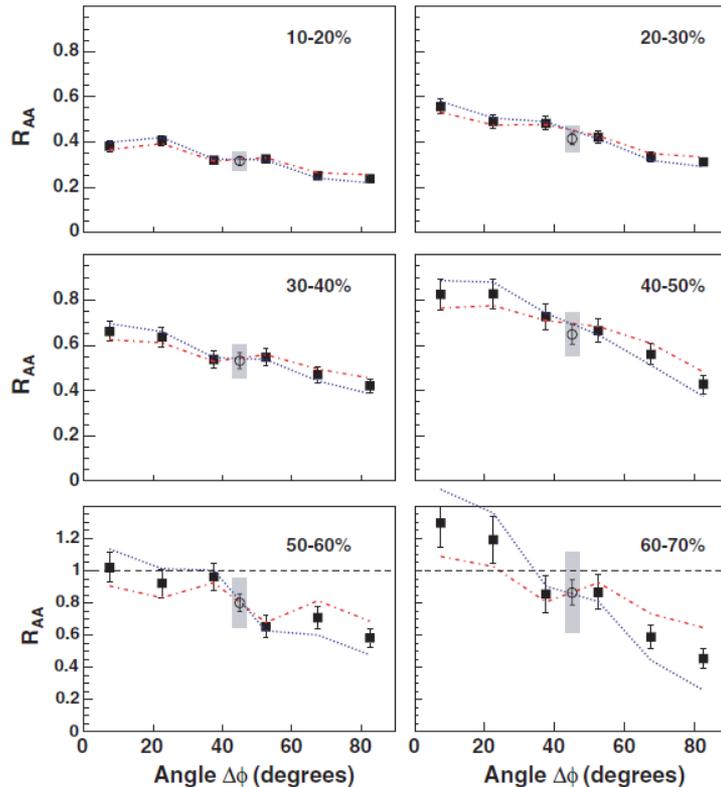
Nucl. Phys. A, **757**, 1–2 (2005)
Phys. Rev. C **87**, 034911 (2013)

$$S_{loss}(p_T, \Delta\varphi) = 1 - R_{AA}^{1/(n-2)}(p_T, \Delta\varphi),$$

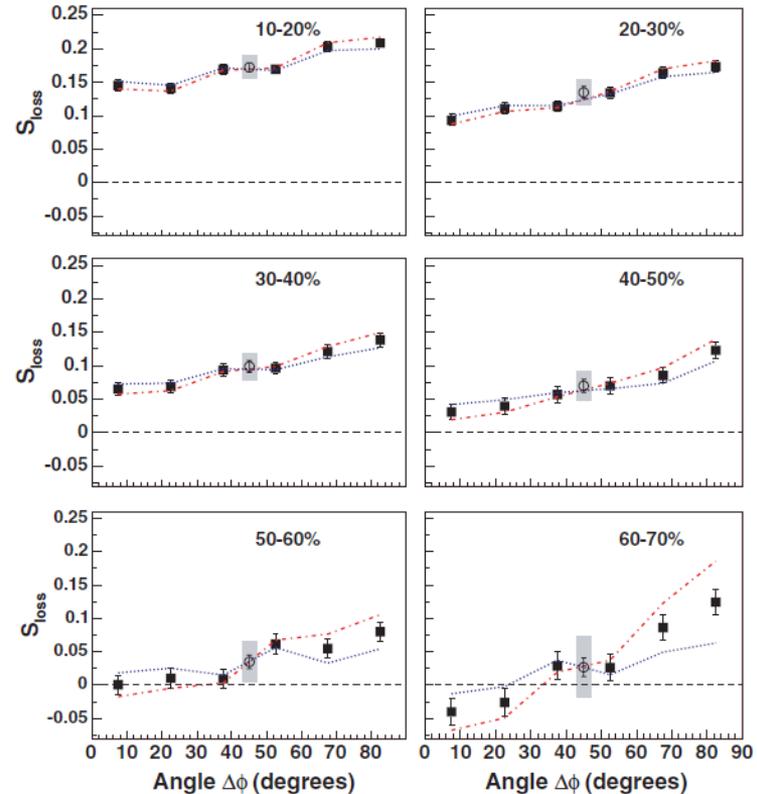
где $R_{AA}(p_T, \Delta\varphi) \approx R_{AA}(p_T)(1 + 2v_2 \cos(2\Delta\varphi))$



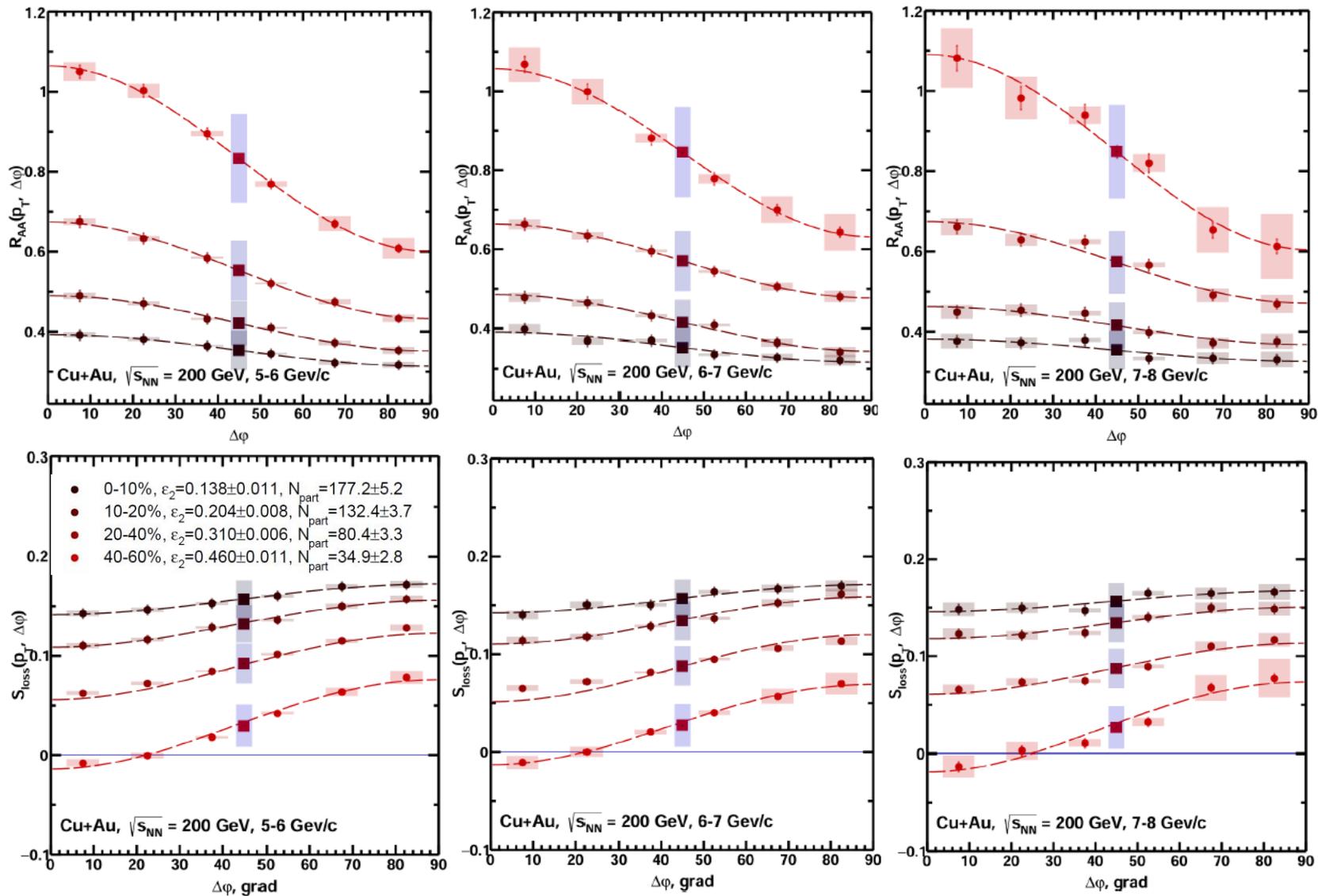
Столкновения Au+Au при $5 < p_T < 8$ ГэВ/с:



Phys. Rev. C **76**, 034904 (2007)

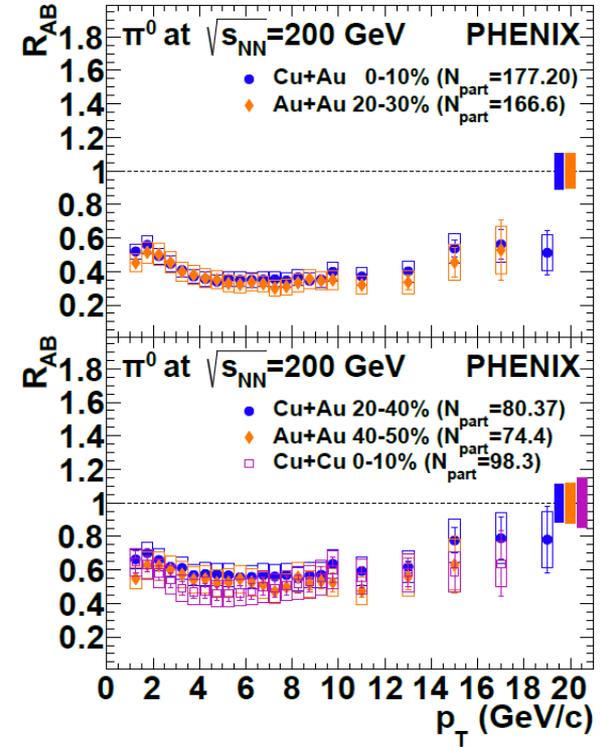
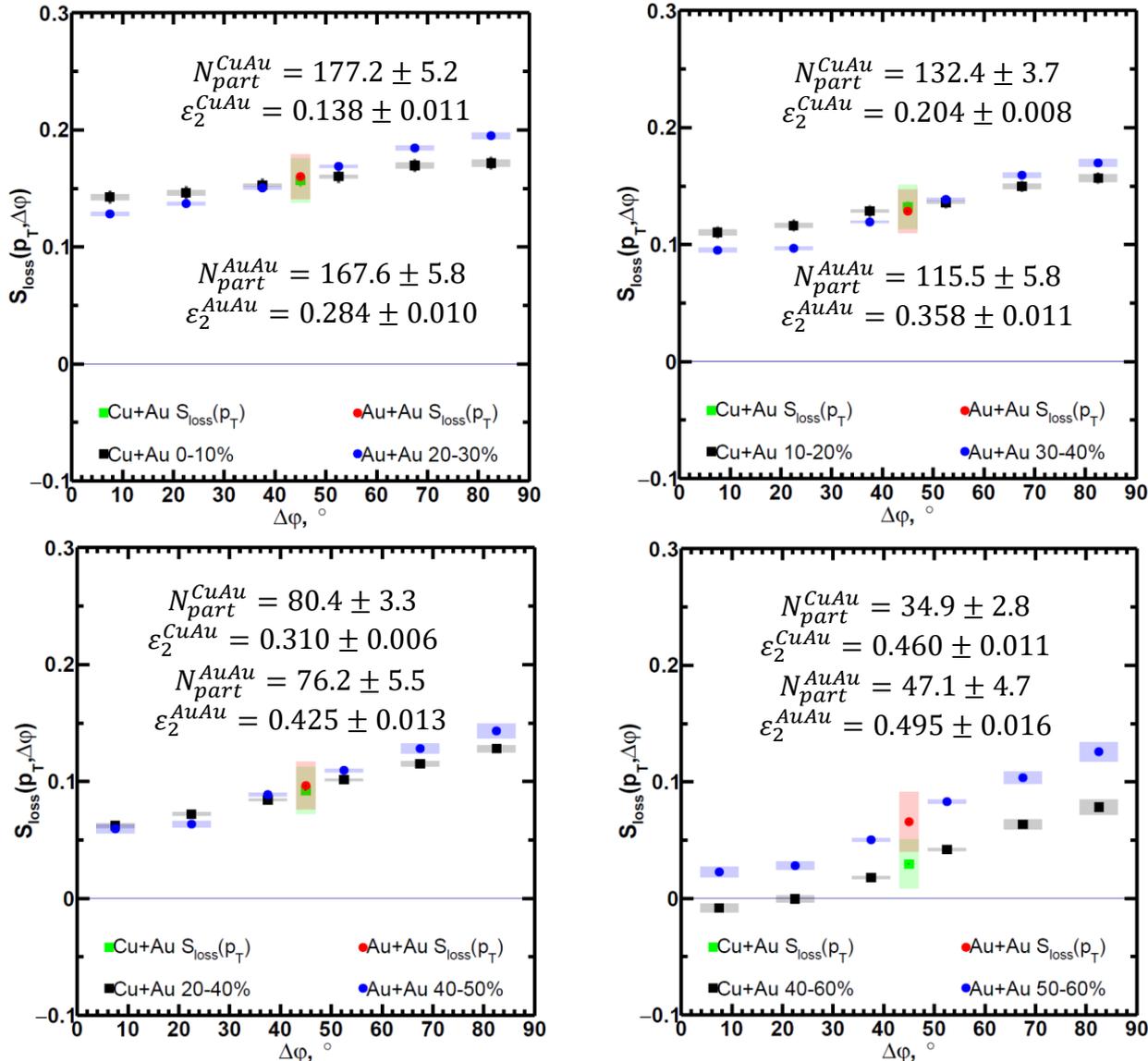


7. Результаты (потери энергии партонов)



Значения ε_2 и N_{part} : *Phys. Rev. C* **94**, 054910 (2016). Значения $R_{AA}(p_T)$: *Phys. Rev. C* **98**, 054903 (2018)

7. Результаты (потери энергии партонов)



Значения ε_2 и N_{part} : *Phys. Rev. C* **94**, 054910 (2016). Значения $R_{\text{AA}}(p_T)$: *Phys. Rev. C* **98**, 054903 (2018)

8. Выводы

- ✓ Были получены значения эллиптических потоков π^0 -мезонов как функция их p_T в столкновениях Cu+Au и U+U;
- ✓ Рассчитанные масштабированные значения $v_2/\varepsilon_2 N_{part}^{1/3}$ для π^0 -мезонов совпадают с учетом неопределенностей в столкновениях Cu+Au, Au+Au и U+U вплоть до ~ 4 ГэВ/с => **размер и форма системы столкновений не влияет на значения $v_2/\varepsilon_2 N_{part}^{1/3}$, что объясняется в рамках гидродинамической модели;**
- ✓ Были рассчитаны значения $R_{AA}(p_T, \Delta\varphi)$ и $S_{loss}(p_T, \Delta\varphi)$ для нейтральных пионов в 4 классах центральности столкновений Cu+Au при энергии 200 ГэВ. Было обнаружено, что подавление выходов π^0 -мезонов перпендикулярно плоскости реакции может быть больше в **~ 1.8 раз** чем в плоскости реакции. Кроме того, доля потери энергии партонов от их начальной энергии может достигать **$\sim 17.5\%$** в центральных столкновениях Cu+Au;

8. Выводы

- ✓ Значения $R_{AA}(p_T, \Delta\varphi)$ и $S_{loss}(p_T, \Delta\varphi)$ для нейтральных пионов в 4 классах центральности столкновений Cu+Au и Au+Au при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ близки по значениям. Расхождения могут быть связаны с небольшой разницей в параметрах ε_2 и N_{part} .
- ✓ В столкновениях U+U при $\sqrt{s_{NN}} = 193$ ГэВ измеренные эллиптические потоки нейтральных пионов имеют положительные значения в области больших $p_T > 5$ ГэВ/с. Эти значения могут быть связаны с потерями энергии партонов в образующейся среде. Дальнейшее изучение измеренных значений v_2 в области больших поперечных импульсов позволит более детально исследовать свойства образующейся в столкновениях U+U среды, **особенно в случае полного перекрытия ядер**;
- ✓ Анализ посвященный измерению значений v_2 нейтральных пионов в столкновениях ${}^3\text{He}+\text{Au}$ при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ в данный момент находится в работе.

8. Выводы

- ✓ Значения $R_{AA}(p_T, \Delta\varphi)$ и $S_{loss}(p_T, \Delta\varphi)$ для нейтральных пионов в 4 классах центральности столкновений Cu+Au и Au+Au при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ близки по значениям. Расхождения могут быть связаны с небольшой разницей в параметрах ε_2 и N_{part} .
- ✓ В столкновениях U+U при $\sqrt{s_{NN}} = 193$ ГэВ измеренные эллиптические потоки нейтральных пионов имеют положительные значения в области больших $p_T > 5$ ГэВ/с. Эти значения могут быть связаны с потерями энергии партонов в образующейся среде. Дальнейшее изучение измеренных значений v_2 в области больших поперечных импульсов позволит более детально исследовать свойства образующейся в столкновениях U+U среды, **особенно в случае полного перекрытия ядер**;
- ✓ Анализ посвященный измерению значений v_2 нейтральных пионов в столкновениях ${}^3\text{He}+\text{Au}$ при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ в данный момент находится в работе.

Спасибо за внимание!