

Спектры p_T , η , u и переход к восстановлению V_2

Левков Анатолий Александрович

UrQMD, Kr+Kr, $\sqrt{s_{NN}} = 6$ GeV

2026 г.

Задачи

- восстановить спектры частиц по p_T , η и y на основе mcDst-данных;
- определить, куда летят разные сорта частиц относительно подсистем SPD;
- связать кинематические области с регистрацией в ST, BBC и ZDC;
- выделить области, соответствующие центральной, forward и very-forward компонентам события;
- построить спектры учитывая acceptance подсистем и определить, какие частицы могут использоваться в дальнейшем анализе;
- подготовить основу для перехода к корреляциям импульсов и измерению v_1 , v_2 .

- построить двумерные распределения $p_T(\eta)$ и $p_T(y)$ для выбранных сортов частиц;
- по двумерным распределениям определить какие детекторные и физические области необходимы для дальнейшего анализа
- построить спектры по p_T с интересующими нас катками по быстрой и псевдобыстрой
- проанализировать спектры как основу для дальнейшего перехода к корреляциям импульсов и анализу v_1, v_2 .

Частицы и подсистемы регистрации

Частицы	Подсистема	Acceptance
π^\pm	ST/VD + TOF/FARICH	$ \eta < 4$
K^\pm	ST/VD + TOF/FARICH	$ \eta < 4$
p, \bar{p}	ST/VD + TOF/FARICH	$ \eta < 4$
$\Lambda, \bar{\Lambda}$	ST/VD по дочерним трекам распада	дочерние треки: $ \eta < 4$
n	ZDC, very-forward нейтроны	схематически $ \eta \gtrsim 6.5$
Forward charged particles	BBC, без PID	$1.5 < \eta < 4.4$

- ▶ ST/VD восстанавливает заряженные треки;
- ▶ TOF/FARICH отвечает за PID;
- ▶ BBC даёт forward charged signal;
- ▶ ZDC связан со spectator-like нейтронами.

Параметры моделирования

- ▶ Генератор:

UrQMD

- ▶ Система:

Kr + Kr

- ▶ Энергия столкновения:

$$\sqrt{s_{NN}} = 6 \text{ GeV}$$

- ▶ Число событий:

$$N_{\text{evt}} = 827\,565$$

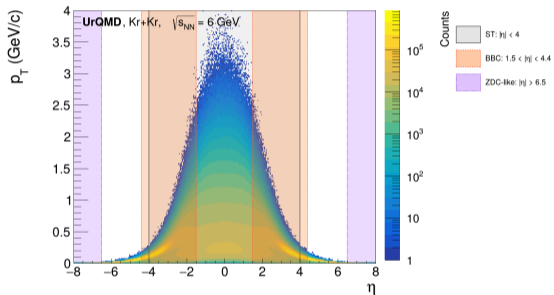
- ▶ Частицы:

π^{\pm} , K^{\pm} , p , \bar{p} , n , Λ , $\bar{\Lambda}$

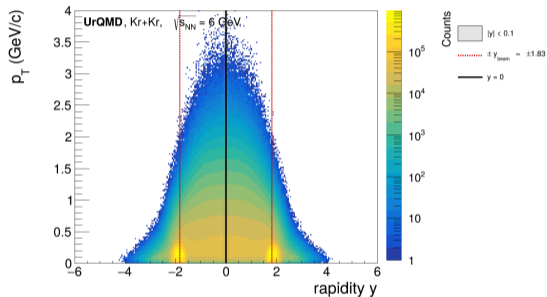
- ▶ Спектры и карты:

p_T , y , η , $p_{T-\eta}$, p_{T-y}

Двумерные карты распределений η и y

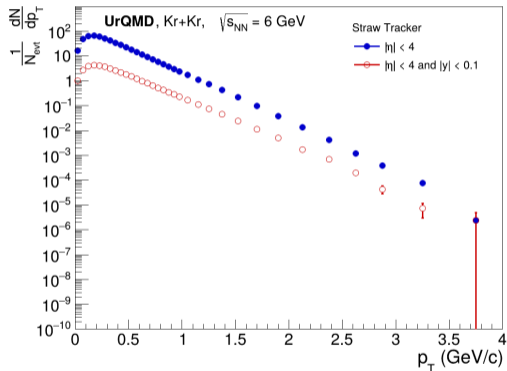


$p_T(\eta)$: направление разлёта частиц

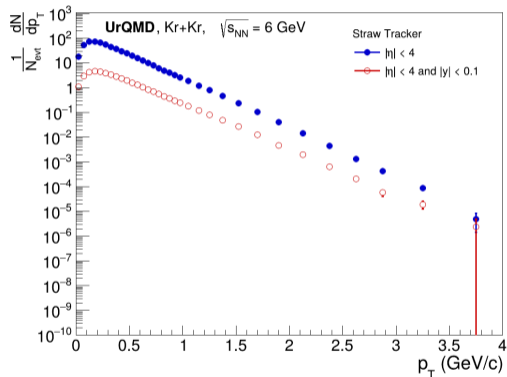


$p_T(y)$: продольные области столкновения

ST acceptance: спектры π^+ и π^-

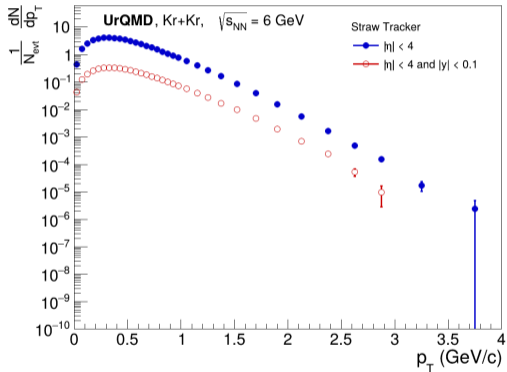


π^+ в области $|\eta| < 4$

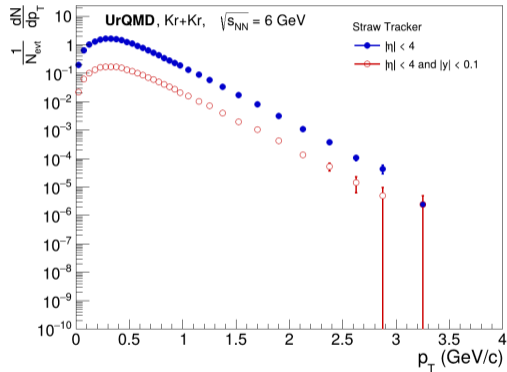


π^- в области $|\eta| < 4$

ST acceptance: спектры K^+ и K^-

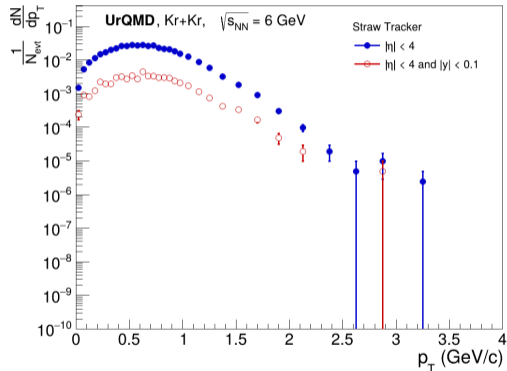
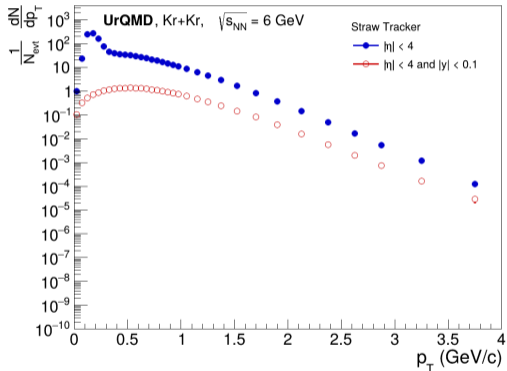


K^+ в области $|\eta| < 4$

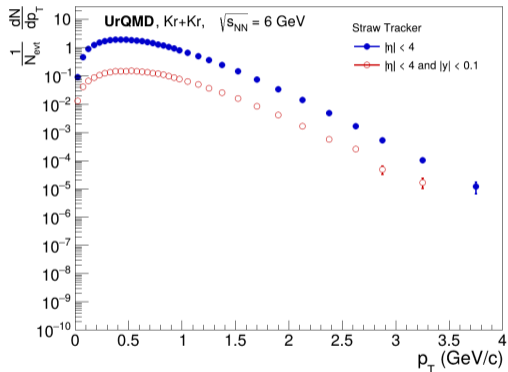


K^- в области $|\eta| < 4$

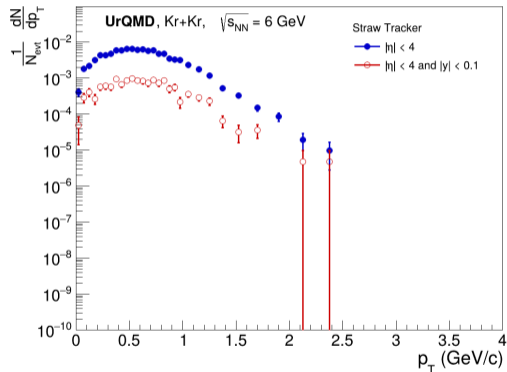
ST acceptance: спектры ρ и $\bar{\rho}$



ST acceptance: спектры Λ и $\bar{\Lambda}$

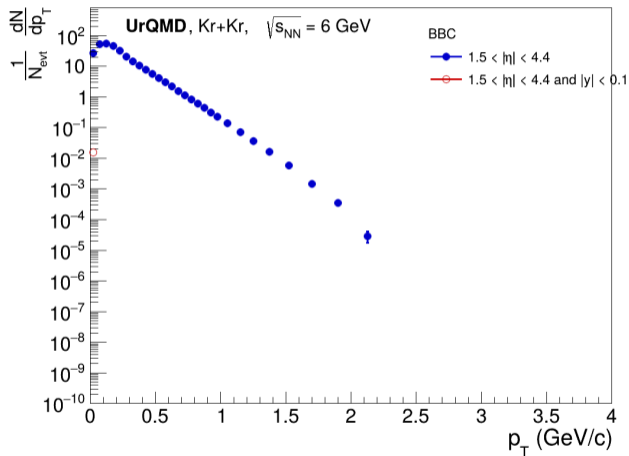


Λ в области $|\eta| < 4$



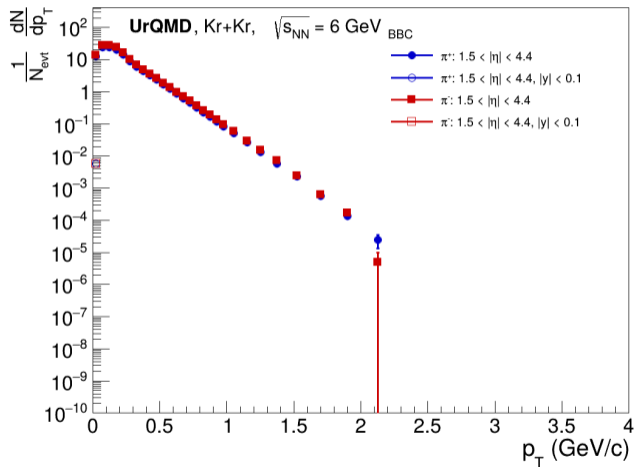
$\bar{\Lambda}$ в области $|\eta| < 4$

BBC acceptance: forward charged particles



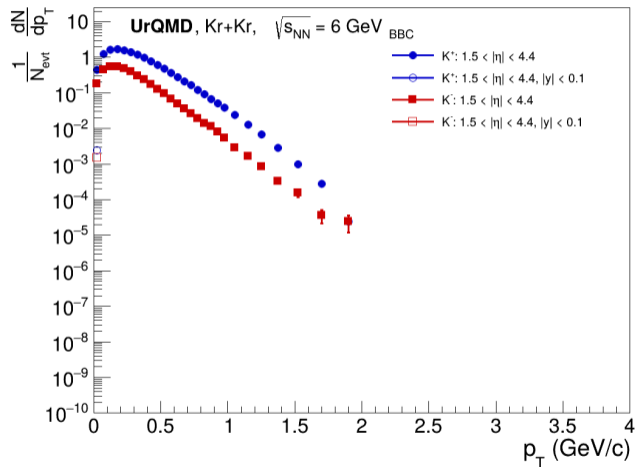
Forward charged particles в области $1.5 < |\eta| < 4.4$

BBC acceptance: спектры π^+ и π^-



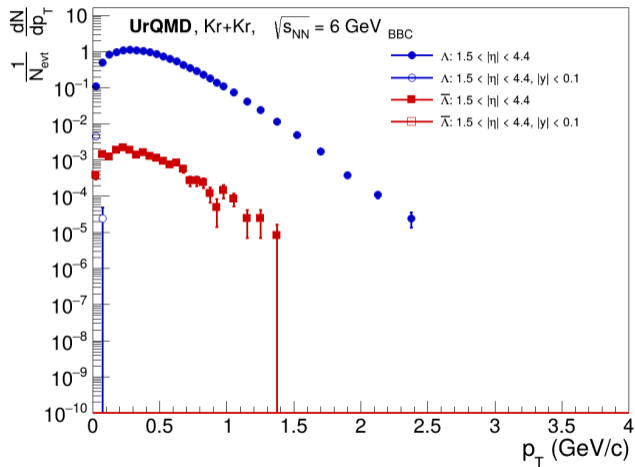
π^+ и π^- в области $1.5 < |\eta| < 4.4$

BBC acceptance: спектры K^+ и K^-



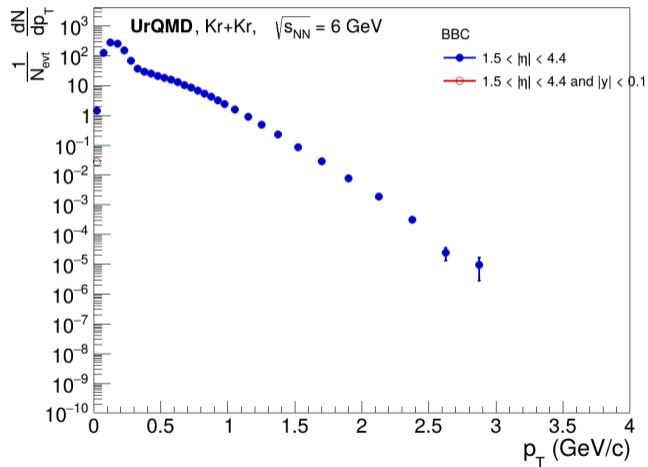
K^+ и K^- в области $1.5 < |\eta| < 4.4$

BBC acceptance: спектры Λ и $\bar{\Lambda}$



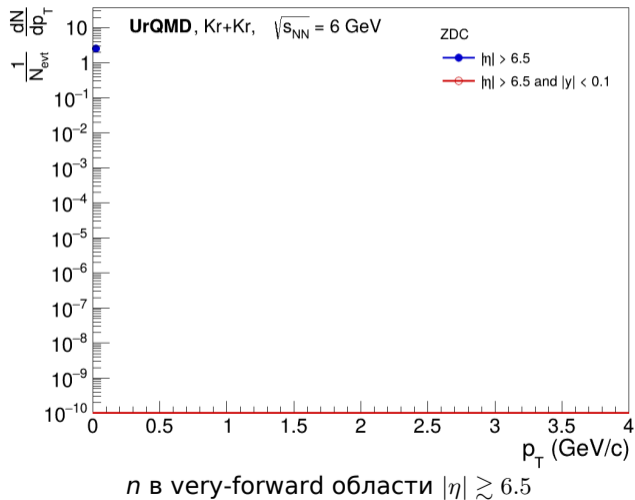
Λ и $\bar{\Lambda}$ в области $1.5 < |\eta| < 4.4$

BBC acceptance: спектр протонов



ρ в области $1.5 < |\eta| < 4.4$

ZDC acceptance: спектр нейтронов



Переход от спектров к плоскости события

Полученные спектры и карты $p_T(\eta)$, $p_T(y)$ дают первый слой анализа: они показывают, где находятся частицы и какие области SPD могут быть использованы.

Для перехода к эллиптическому потоку нужно добавить информацию об азимутальных углах частиц или сигналов:

$$\varphi_i, \quad w_i, \quad \eta_i, \quad p_{T,i}$$

- текущие спектры помогают выбрать области анализа;
- forward/backward-области можно использовать для оценки Ψ_2 ;
- центральную область можно использовать для частиц интереса;
- дальше строится Q_2 -вектор и проверяется качество восстановления плоскости.

спектры и acceptance \rightarrow выбор областей $\rightarrow Q_2 \rightarrow \Psi_2 \rightarrow R_2 \rightarrow v_2$

Что именно считается в event-plane анализе

В данной проверке используется truth-level информация UrQMD: для каждой финальной частицы известны p_T , η , y , φ и PDG-код. Детекторный отклик пока не моделируется.

1. Восстановление плоскости события

$$Q_{2,x} = \sum_i w_i \cos(2\varphi_i), \quad Q_{2,y} = \sum_i w_i \sin(2\varphi_i),$$

$$\Psi_2^{\text{rec}} = \frac{1}{2} \text{atan2}(Q_{2,y}, Q_{2,x}).$$

Суммирование выполняется по заряженным частицам в BBC-like области:

$$1.5 < |\eta| < 4.4, \quad w_i = 1.$$

2. Сравнение с истинной плоскостью

Для текущих UrQMD данных:

$$\Psi_{RP} = 0.$$

Поэтому проверяется:

$$\Delta\Psi_2 = \Psi_2^{\text{rec}} - \Psi_{RP}, \quad R_2^{\text{true}} = \langle \cos 2(\Psi_2^{\text{rec}} - \Psi_{RP}) \rangle.$$

Как восстанавливается v_2

После восстановления Ψ_2^{rec} частицы интереса выбираются в центральной области:

$$|\eta| < 1.$$

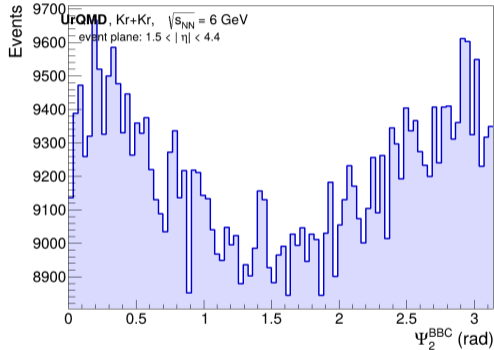
Для них вычисляется наблюдаемый поток:

$$v_2^{\text{obs}}(p_T) = \langle \cos 2(\varphi - \Psi_2^{\text{rec}}) \rangle.$$

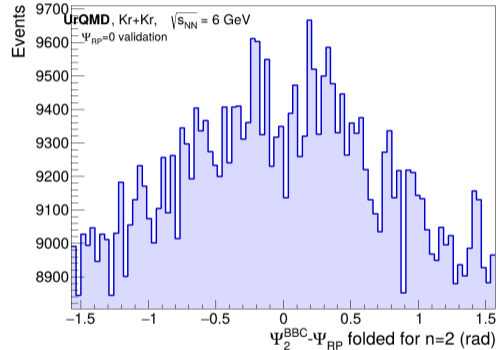
Поправка на разрешение:

$$v_2^{\text{corr}}(p_T) = \frac{v_2^{\text{obs}}(p_T)}{R_2^{\text{true}}}.$$

Восстановленная плоскость события и сравнение с RP



Распределение восстановленного угла Ψ_2^{BBC}



$$\Delta\Psi_2 = \Psi_2^{BBC} - \Psi_{RP}$$

Восстановленная плоскость и истинная RP

- Плоскость события второго порядка восстанавливалась по заряженным частицам в BBC-like области:

$$1.5 < |\eta| < 4.4, \quad w_i = 1.$$

- Для каждого события строился Q_2 -вектор:

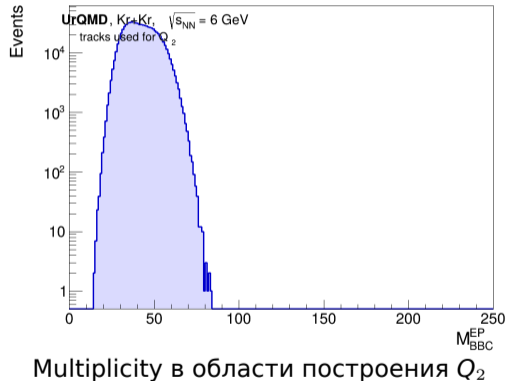
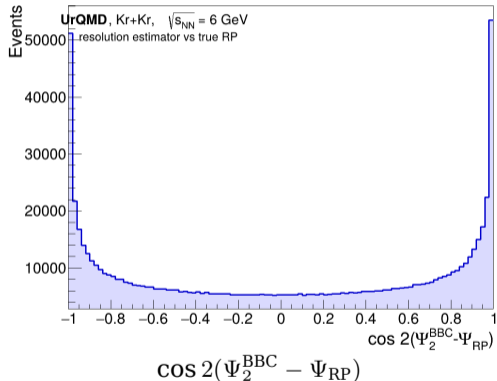
$$Q_{2,x} = \sum_i \cos 2\varphi_i, \quad Q_{2,y} = \sum_i \sin 2\varphi_i, \quad \Psi_2 = \frac{1}{2} \text{atan2}(Q_{2,y}, Q_{2,x}).$$

- В текущей постановке UrQMD истинная плоскость реакции задаётся как

$$\Psi_{RP} = 0.$$

- Распределение $\Delta\Psi_2$ не имеет выраженного узкого максимума около нуля, поэтому корреляция восстановленной плоскости с RP пока слабая.

Разрешение плоскости события относительно RP

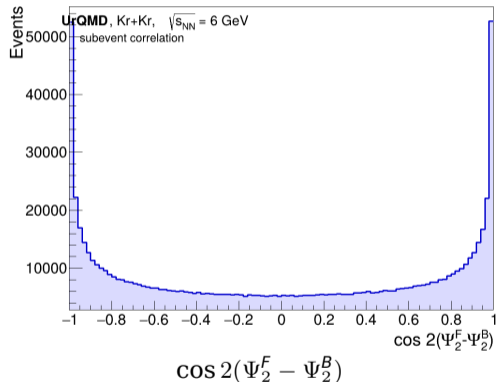
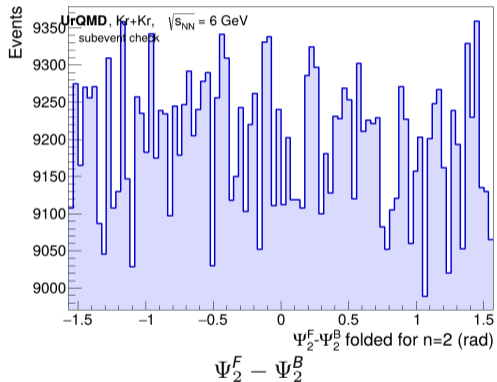


- Качество восстановления плоскости относительно известной RP можно оценить как

$$R_2^{\text{true}} = \left\langle \cos 2(\Psi_2^{\text{BBC}} - \Psi_{\text{RP}}) \right\rangle.$$

- Если R_2 близко к нулю, восстановленная плоскость почти не несёт информации об истинной плоскости реакции.
- U-образное распределение по $\cos 2\Delta\Psi_2$ характерно для слабой или почти случайной угловой корреляции.
- График multiplicity показывает, сколько треков участвует в построении Q_2

Проверка методом forward/backward-подсобытий



Пояснение: метод подсобытий

- область ВВС была разделена на две независимые части:

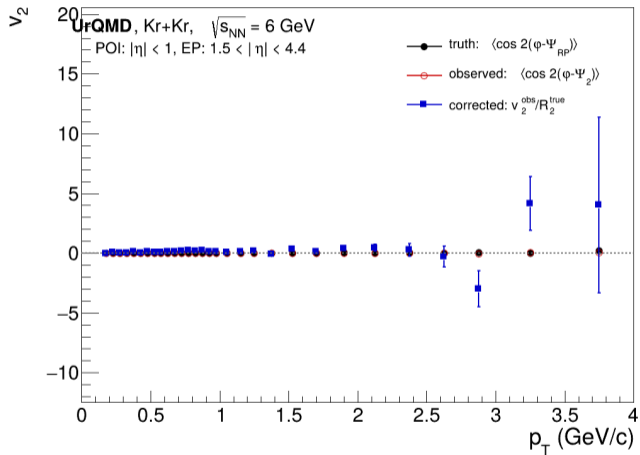
$$F : 1.5 < \eta < 4.4, \quad B : -4.4 < \eta < -1.5.$$

- В каждой области отдельно восстанавливаются Ψ_2^F и Ψ_2^B .
- Если подсобытия видят одну и ту же физическую плоскость, их углы должны быть коррелированы:

$$C_{FB} = \langle \cos 2(\Psi_2^F - \Psi_2^B) \rangle > 0.$$

- Почти равномерная разность углов и слабая корреляция означают, что текущий алгоритм требует оптимизации.

Восстановление v_2 : общий результат



Все центральные частицы: truth-level, observed и corrected оценки $v_2(p_T)$

Общий результат восстановления v_2

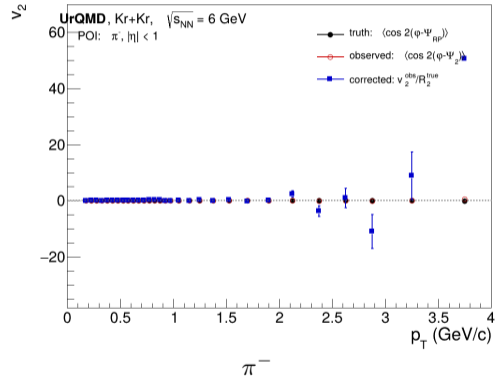
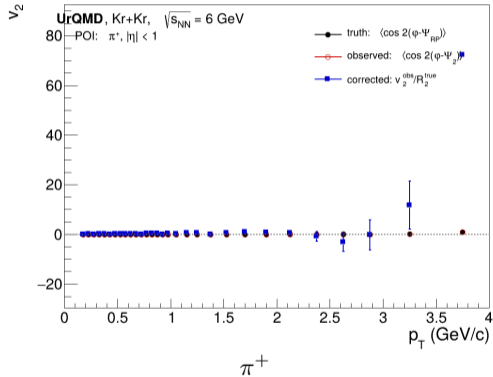
- На графике сравниваются три оценки эллиптического потока:

$$v_2^{\text{true}} = \langle \cos 2(\varphi - \Psi_{\text{RP}}) \rangle, \quad v_2^{\text{obs}} = \langle \cos 2(\varphi - \Psi_2^{\text{BBC}}) \rangle,$$

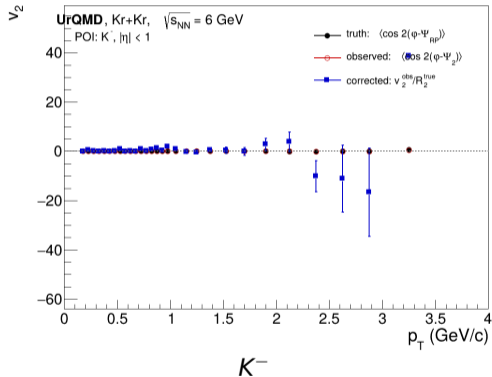
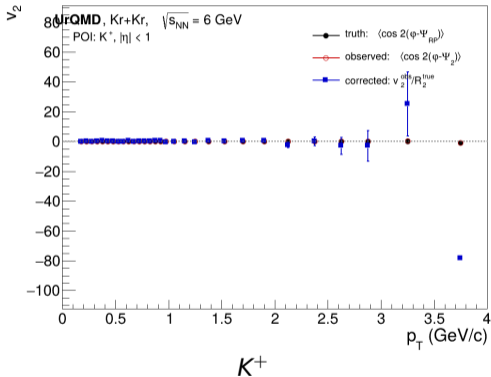
$$v_2^{\text{corr}} = \frac{v_2^{\text{obs}}}{R_2^{\text{true}}}.$$

- Центральная область используется для частиц интереса, а BBC-like область — для восстановления Ψ_2 .
- Если R_2^{true} мал, поправка v_2^{obs}/R_2 резко усиливает статистические флуктуации.
- Поэтому этот график является диагностикой метода, а не финальным физическим результатом.

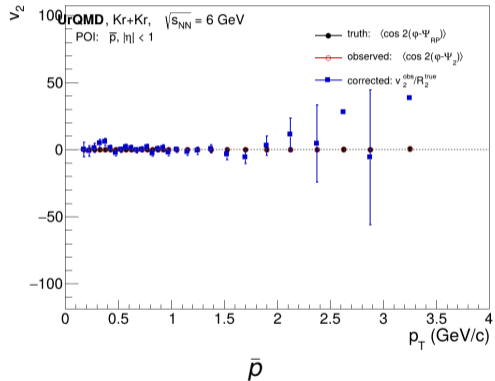
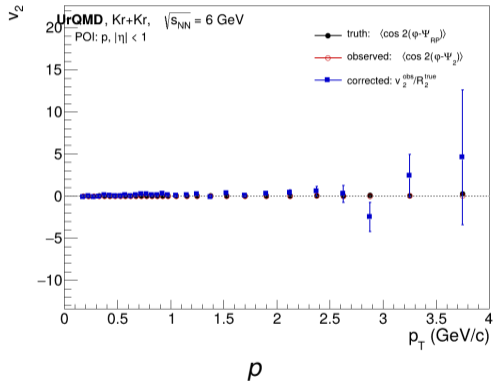
$v_2(p_T)$ для ПИОНОВ: π^+ И π^-



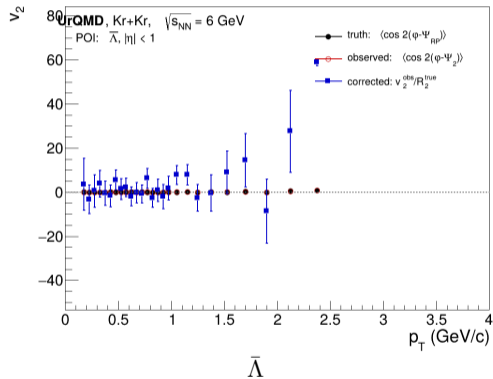
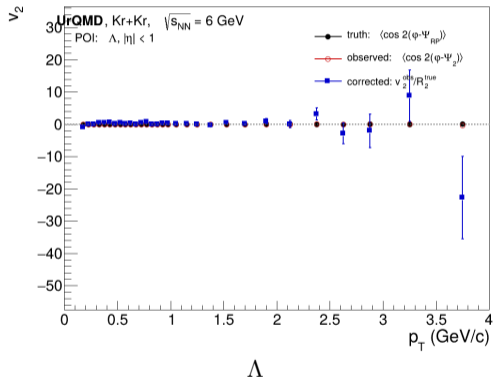
$v_2(p_T)$ для каонов: K^+ и K^-



$v_2(p_T)$ для протонов: p и \bar{p}



$v_2(p_T)$ для гиперонов: Λ и $\bar{\Lambda}$



- Данные позволяют проверить, как методика работает для частиц разных типов и с разной статистикой.
- Пионы и каоны дают наиболее статистически устойчивые мезонные каналы.
- Протоны, антипротоны и Λ -гипероны важны для дальнейшего анализа барионной динамики в области NICA.
- Большие отклонения скорректированных v_2 -кривых от truth-level результата сейчас указывают не на физический эффект, а на недоработку метода, возможно, на результаты моделирования.

Итоговая интерпретация первых event-plane графиков

- Технически реализована цепочка:

частицы в BBC-like области $\rightarrow Q_2 \rightarrow \Psi_2 \rightarrow R_2 \rightarrow v_2$.

- Сравнение с $\Psi_{RP} = 0$ показывает, что текущая Ψ_2^{BBC} пока слабо коррелирует с истинной плоскостью реакции.
- Forward/backward подсобытия также показывают слабую согласованность между Ψ_2^F и Ψ_2^B .
- Из-за малого разрешения corrected v_2 нестабилен: деление на R_2 усиливает шум.