

Восстановление плоскости события и расчет V_2

Левков Анатолий Александрович

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

2026 г.

В этой версии обновлен алгоритм восстановления плоскости события и добавлен расчет эллиптического потока заряженных адронов.

- в Q_2 -векторе используется вес частицы $w_i = p_{T,i}$;
- углы Ψ_2^{left} , Ψ_2^{right} и Ψ_2^{full} свернуты в диапазон $0 \leq \Psi_2 < \pi$;
- разность плоскостей также строится как $\Delta\Psi_2$ в диапазоне $0 \leq \Delta\Psi_2 < \pi$;
- добавлена оценка v_2^{obs} и $v_2 = v_2^{obs}/R_2$ для заряженных адронов;

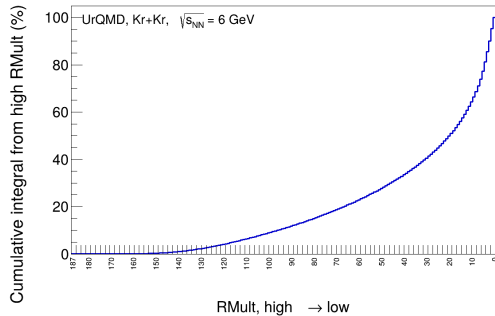
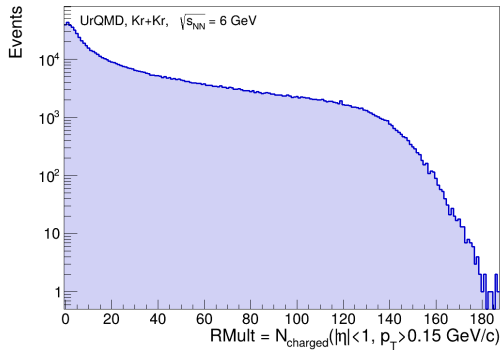
Определение центральности

Центральность задается через reference multiplicity в области трековой системы:

$$R_{\text{Mult}} = N_{\text{charged}}(|\eta| < 1, p_T > 0.15 \text{ GeV}/c).$$

- Большая R_{Mult} соответствует более центральным столкновениям.
- Границы центральности выбираются по кумулятивному интегралу распределения R_{Mult} от больших множественностей к малым.

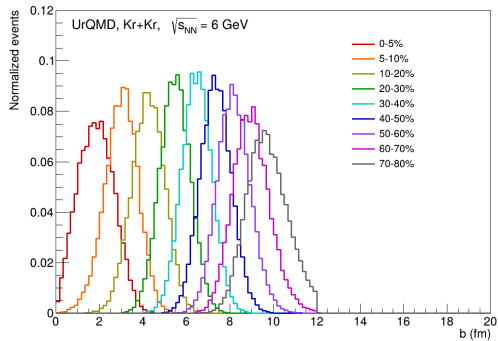
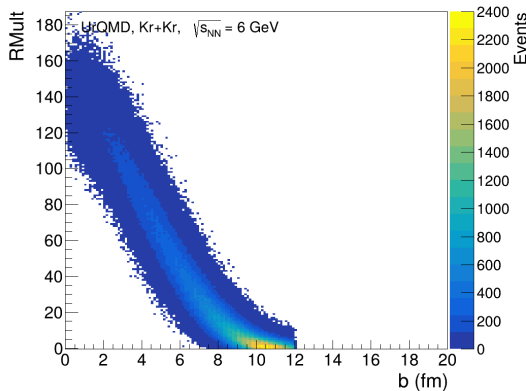
Распределение R_{Mult} и кумулятивный интеграл



Итоговые классы центральности

Центральность	$R_{\text{Mult}min}$	$R_{\text{Mult}max}$	N_{events}	$\langle R_{\text{Mult}} \rangle$	$\langle b \rangle$, fm
0-5%	116	187	40754	130.12	1.846
5-10%	96	115	42109	105.10	2.988
10-20%	67	95	81614	80.08	4.227
20-30%	46	66	83031	55.40	5.471
30-40%	31	45	81505	37.61	6.474
40-50%	20	30	83979	24.68	7.353
50-60%	12	19	89469	15.22	8.190
60-70%	7	11	86205	8.80	8.995
70-80%	4	6	83577	4.90	9.715

Проверка центральности через прицельный параметр b



Восстановление плоскости события через Q_2 -вектор

Для каждого подсобытия строится Q -вектор второго гармонического порядка:

$$Q_{2,x} = \sum_i p_{T,i} \cos(2\varphi_i), \quad Q_{2,y} = \sum_i p_{T,i} \sin(2\varphi_i).$$

Здесь φ_i берется как азимутальный угол частицы, а вес равен $p_{T,i}$.

$$\Psi_2 = \frac{1}{2} \text{atan2}(Q_{2,y}, Q_{2,x}), \quad 0 \leq \Psi_2 < \pi.$$

Отбор частиц для плоскости: заряженные адроны, $0.15 < p_T$.

Разделение на левое и правое подсобытия

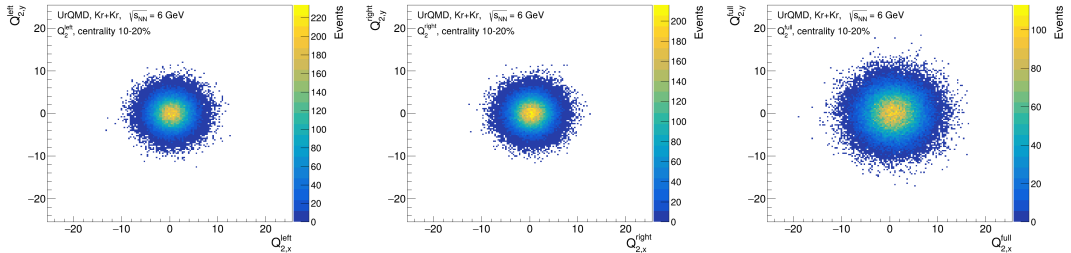
В анализе используются две независимые области по псевдобыстроте:

$$-1 < \eta < -0.05, \quad 0.05 < \eta < 1.$$

Между ними оставлен разрыв $|\eta| < 0.05$.

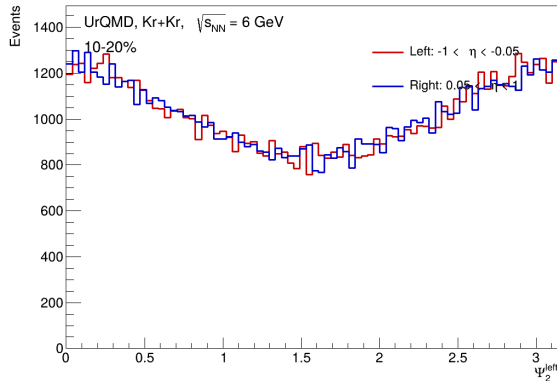
- Ψ_2^{left} и Ψ_2^{right} восстанавливаются независимо.
- Для полной плоскости используется сумма $\mathbf{Q}_2^{full} = \mathbf{Q}_2^{left} + \mathbf{Q}_2^{right}$.

Распределение Q_2 -векторов: пример 10-20%



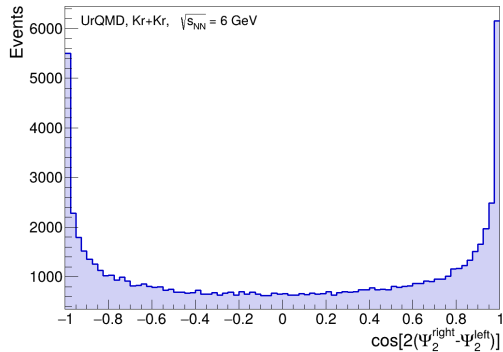
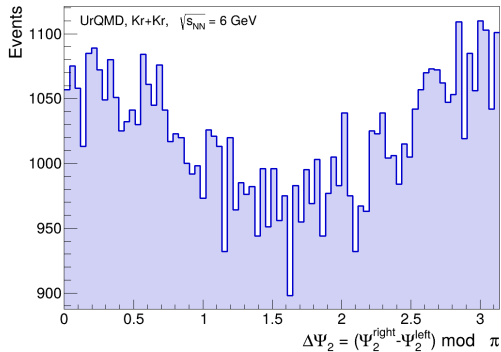
Q_2^{left} , Q_2^{right} и Q_2^{full} . Полный вектор шире, так как содержит обе стороны.

Распределения Ψ_2^{left} и Ψ_2^{right} : пример 10-20%



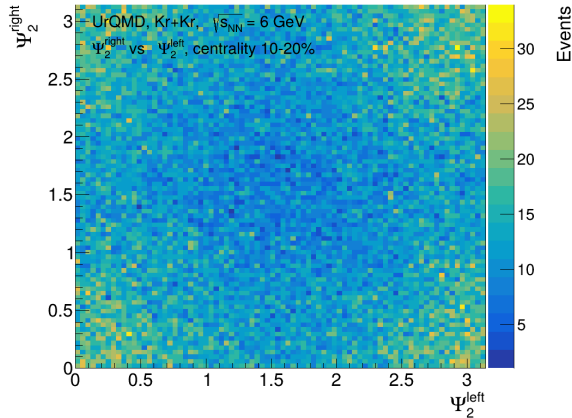
Диапазон углов: $0 \leq \Psi_2 < \pi$. Красная линия - левое подсобытие, синяя - правое.

Разность плоскостей и $\cos(2\Delta\Psi_2)$



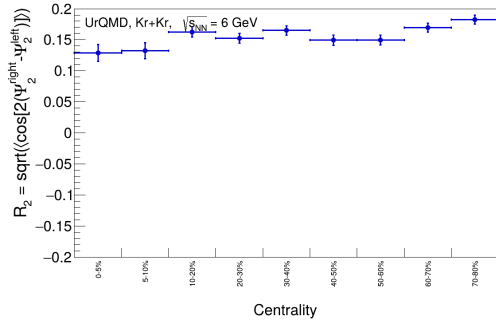
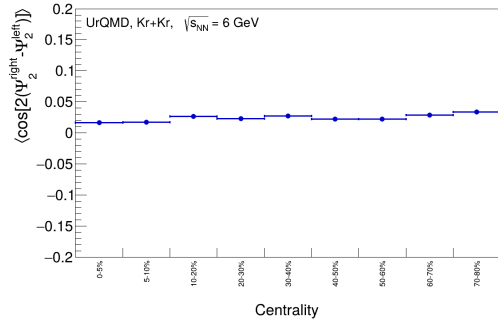
Разность построена как $\Delta\Psi_2 = (\Psi_2^{right} - \Psi_2^{left})$ в интервале от 0 до π .

Корреляция Ψ_2^{right} vs Ψ_2^{left}



- Узкой диагонали не видно: событийная корреляция слабая.
- Одномерные распределения не гарантируют совпадение углов в каждом событии.

Корреляция right-left и разрешение R_2

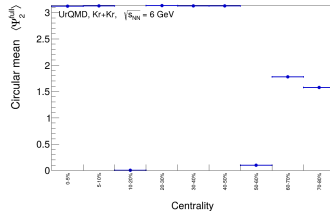
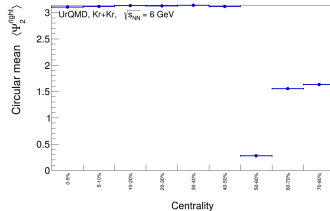
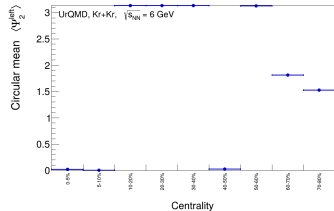


Численные значения корреляции и разрешения

Центральность	$\langle \cos 2\Delta\Psi_2 \rangle$	stat. err	R_2
0-5%	0.01667	0.00350	0.12912
5-10%	0.01751	0.00345	0.13233
10-20%	0.02639	0.00247	0.16246
20-30%	0.02324	0.00246	0.15245
30-40%	0.02722	0.00248	0.16498
40-50%	0.02232	0.00244	0.14938
50-60%	0.02245	0.00237	0.14984
60-70%	0.02882	0.00243	0.16976
70-80%	0.03334	0.00260	0.18259

Корреляция положительна во всех классах, но мала. Разрешение плоскости находится на уровне $R_2 \simeq 0.13$ -0.18.

Среднее Ψ_2 по центральности



Слева направо: $\langle \Psi_2^{left} \rangle$, $\langle \Psi_2^{right} \rangle$, $\langle \Psi_2^{full} \rangle$. Значения около 0 и π соответствуют почти одной и той же оси.

Расчет v_2 заряженных адронов

Для уменьшения автокорреляций частицы одного подсобытия коррелируются с плоскостью противоположного подсобытия:

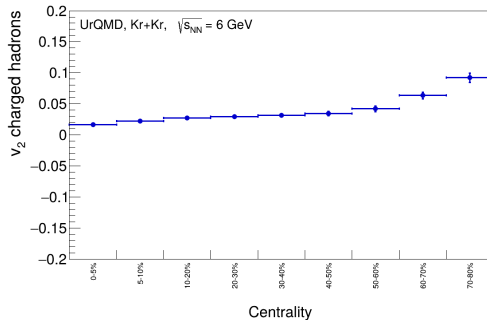
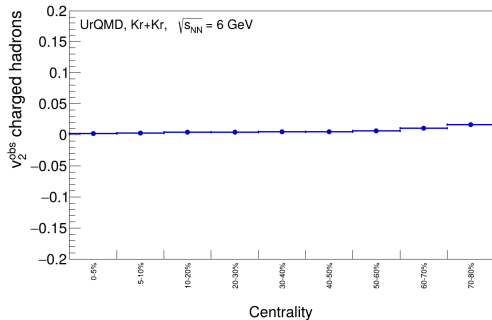
$$v_2^{obs} = \left\langle \cos \left[2(\varphi - \Psi_2^{opposite}) \right] \right\rangle.$$

Затем выполняется поправка на разрешение плоскости события:

$$v_2 = \frac{v_2^{obs}}{R_2}, \quad R_2 = \sqrt{\left\langle \cos 2(\Psi_2^{right} - \Psi_2^{left}) \right\rangle}.$$

По частицам интереса используется единичный вес.

v_2 по центральности

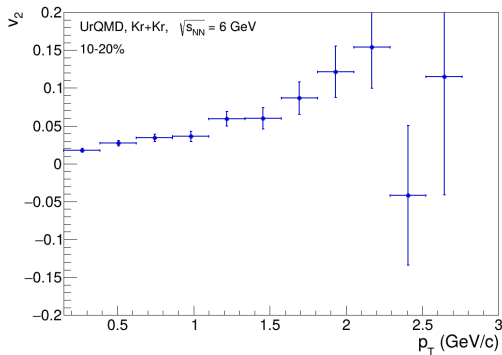
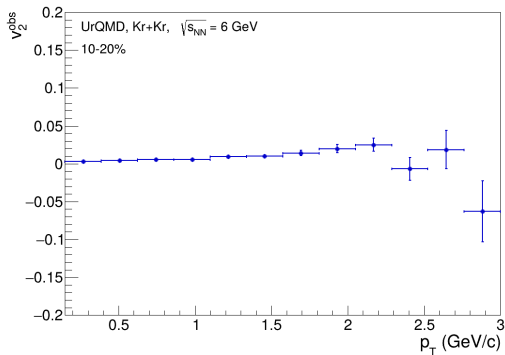


Слева - наблюдаемый v_2^{obs} ; справа - v_2 после деления на R_2 .

Численные значения v_2

Центральность	v_2^{obs}	R_2	$v_2 = v_2^{obs}/R_2$
0-5%	0.00211 ± 0.00032	0.12912	0.01635 ± 0.00299
5-10%	0.00291 ± 0.00035	0.13233	0.02198 ± 0.00339
10-20%	0.00439 ± 0.00028	0.16246	0.02704 ± 0.00216
20-30%	0.00448 ± 0.00034	0.15245	0.02939 ± 0.00271
30-40%	0.00521 ± 0.00041	0.16498	0.03160 ± 0.00290
40-50%	0.00514 ± 0.00050	0.14938	0.03442 ± 0.00386
50-60%	0.00630 ± 0.00062	0.14984	0.04206 ± 0.00471
60-70%	0.01077 ± 0.00084	0.16976	0.06342 ± 0.00562
70-80%	0.01683 ± 0.00120	0.18259	0.09215 ± 0.00747

$v_2(p_T)$ для центральности 10-20%



До $p_T \sim 2$ GeV/c виден рост v_2 с p_T . В последних бинах ошибки резко растут из-за малой статистики и деления на небольшой R_2 .

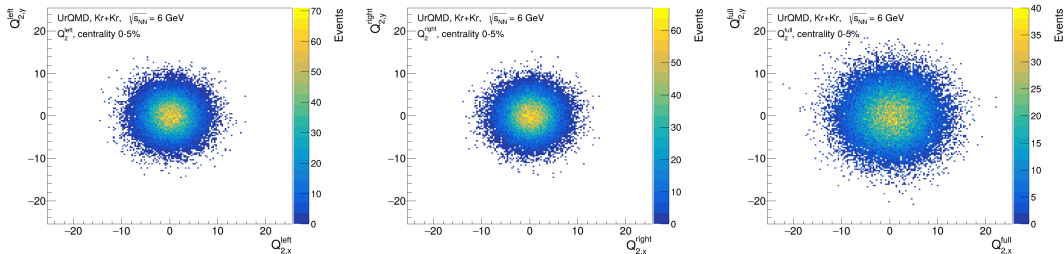
Интерпретация результата

- После перехода к весам $w_i = p_T$ корреляция right-left остается небольшой.
- Разрешение плоскости события ограничено: $R_2 \approx 0.13-0.18$.
- v_2 положителен и растет от центральных к периферическим событиям.
- В периферических классах и в последних p_T -бинах результат может быть связан с малой множественностью, что усиливает флуктуации.

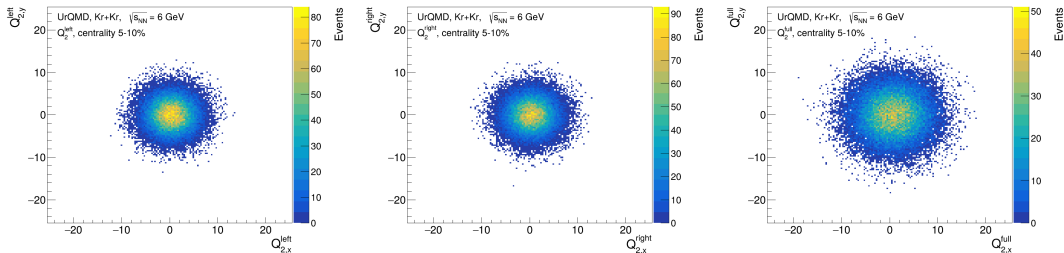
Приложение: все центральности

Дальше приведены дополнительные контрольные графики по всем классам центральности: распределения Q_2 -векторов, сравнение $\Psi_2^{left/right}$ и $v_2(p_T)$.

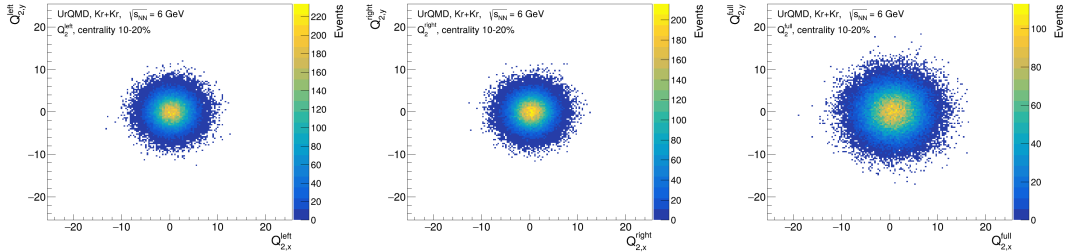
Распределения Q_2 -векторов: центральность 0–5%



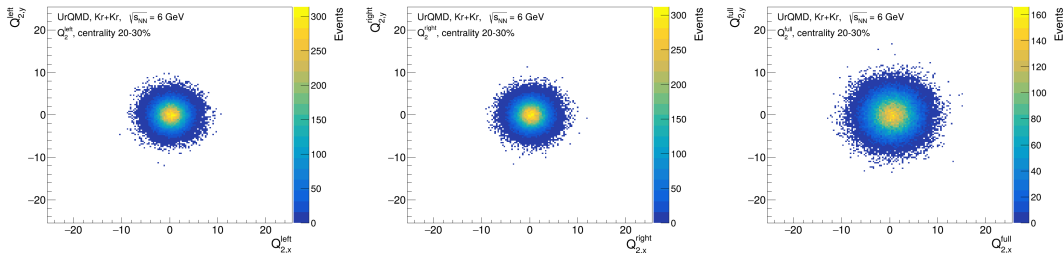
Распределения Q_2 -векторов: центральность 5–10%



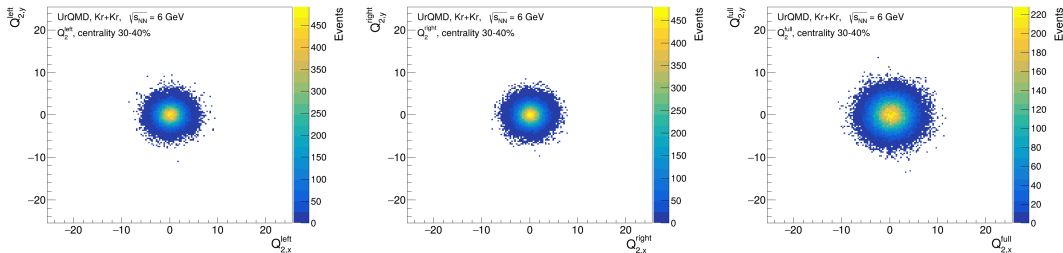
Распределения Q_2 -векторов: центральность 10–20%



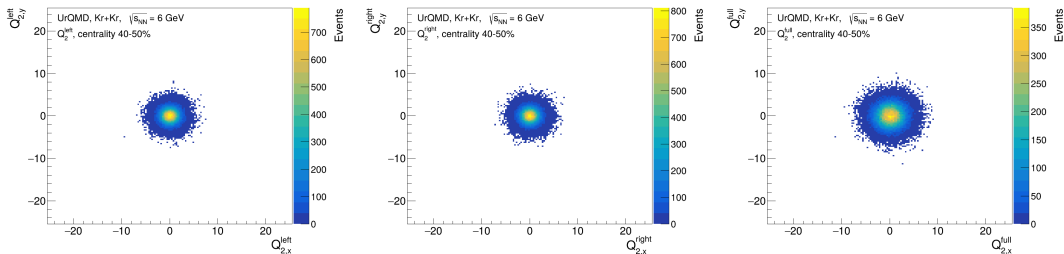
Распределения Q_2 -векторов: центральность 20–30%



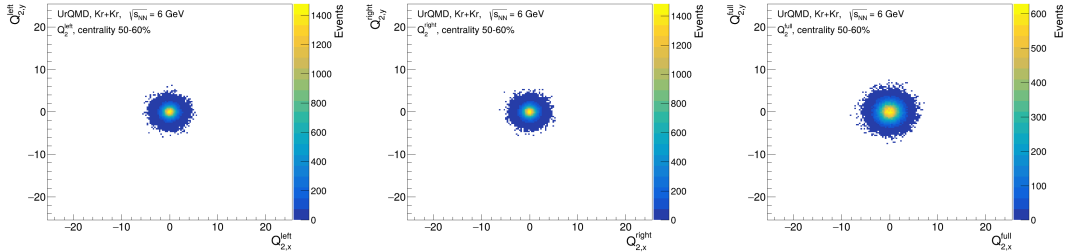
Распределения Q_2 -векторов: центральность 30–40%



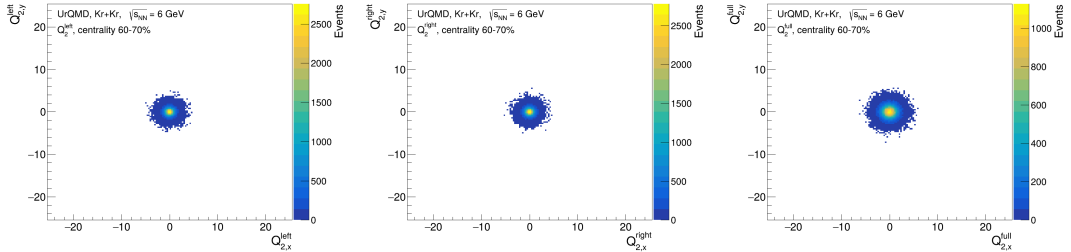
Распределения Q_2 -векторов: центральность 40–50%



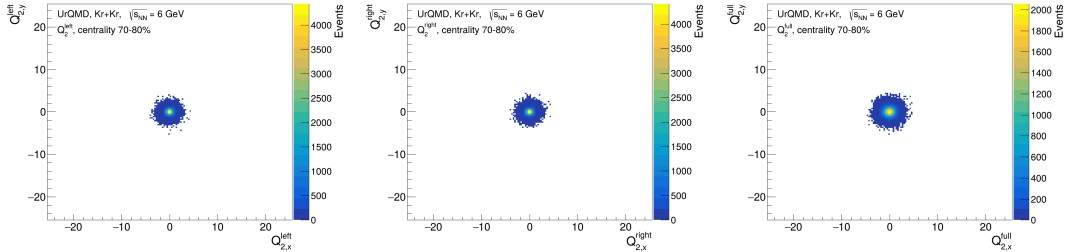
Распределения Q_2 -векторов: центральность 50–60%



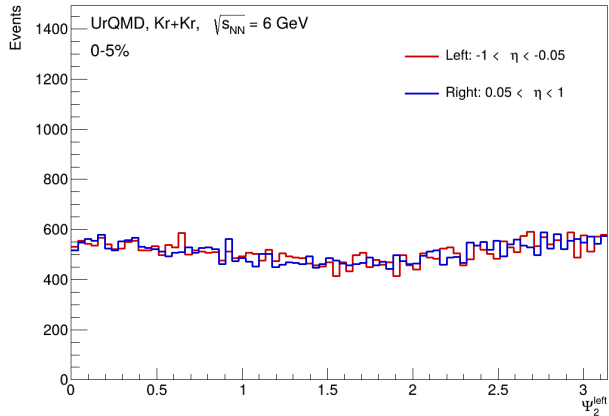
Распределения Q_2 -векторов: центральность 60–70%



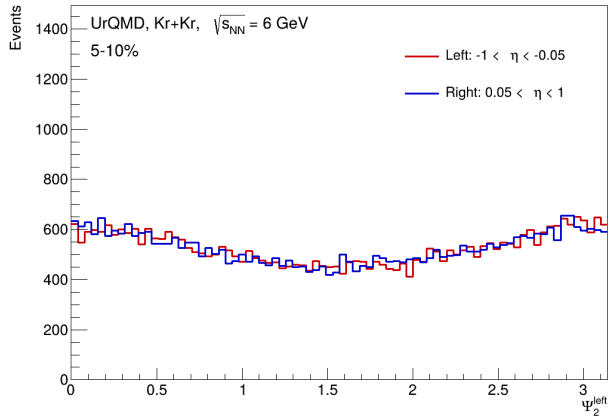
Распределения Q_2 -векторов: центральность 70–80%



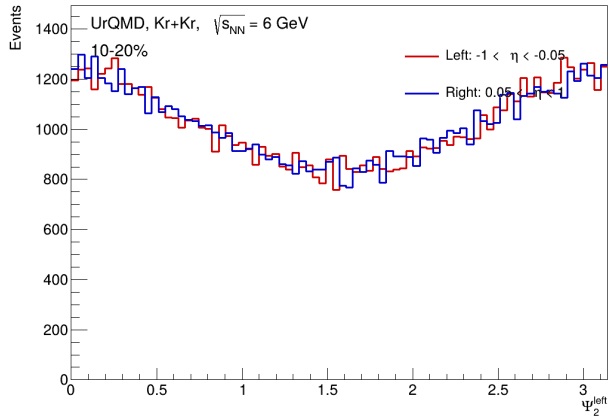
Сравнение Ψ_2^{left} и Ψ_2^{right} : центральность 0-5%



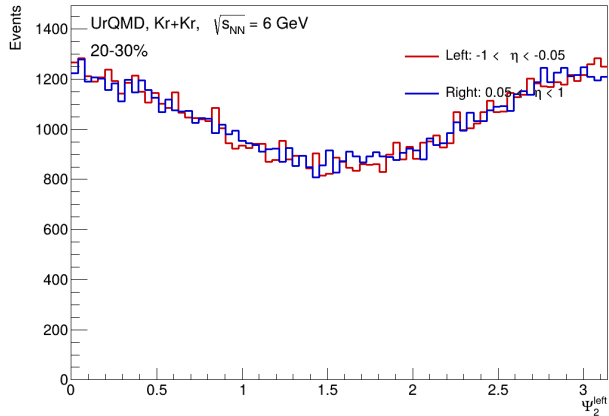
Сравнение Ψ_2^{left} и Ψ_2^{right} : центральность 5-10%



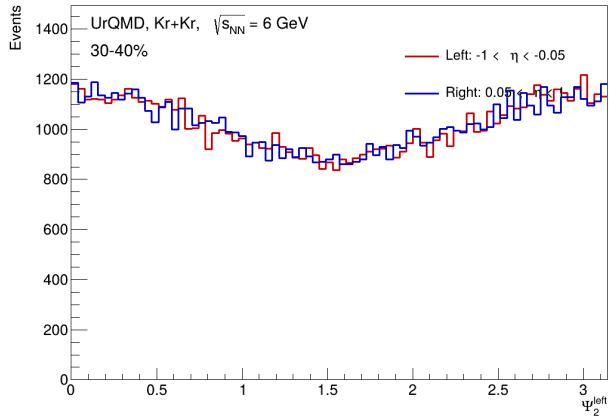
Сравнение Ψ_2^{left} и Ψ_2^{right} : центральность 10-20%



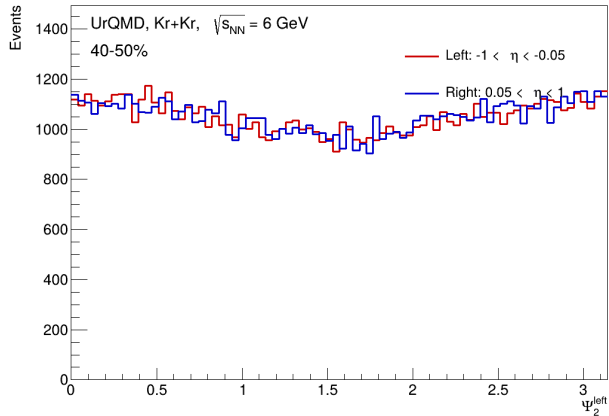
Сравнение Ψ_2^{left} и Ψ_2^{right} : центральность 20–30%



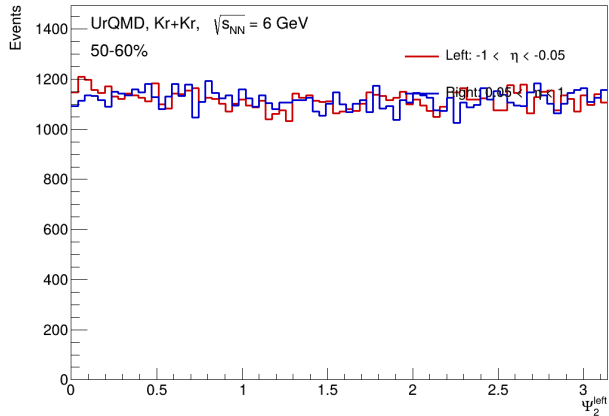
Сравнение Ψ_2^{left} и Ψ_2^{right} : центральность 30–40%



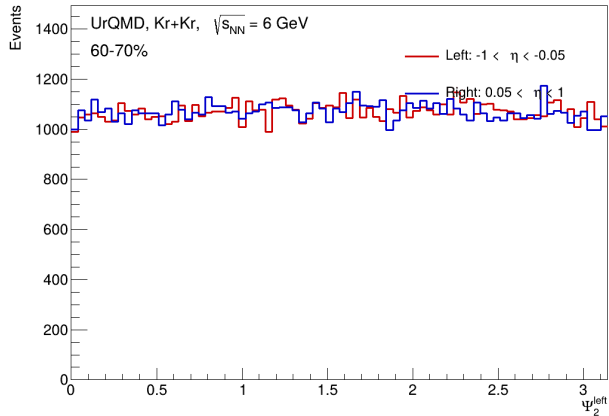
Сравнение Ψ_2^{left} и Ψ_2^{right} : центральность 40–50%



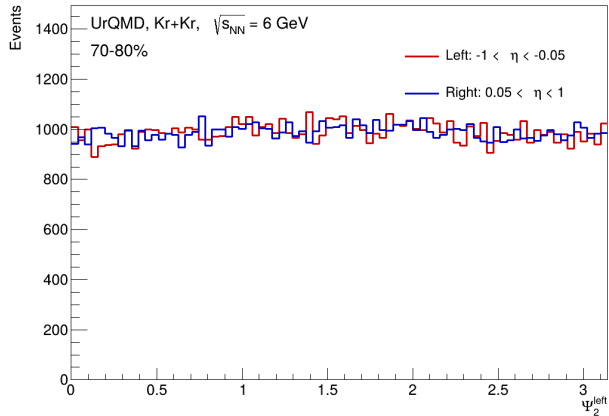
Сравнение Ψ_2^{left} и Ψ_2^{right} : центральность 50–60%



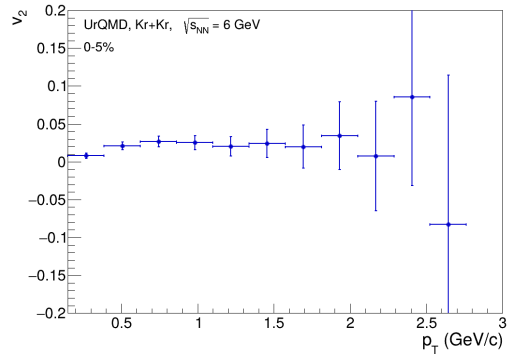
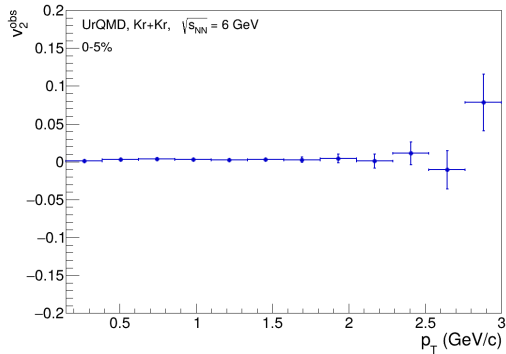
Сравнение Ψ_2^{left} и Ψ_2^{right} : центральность 60–70%



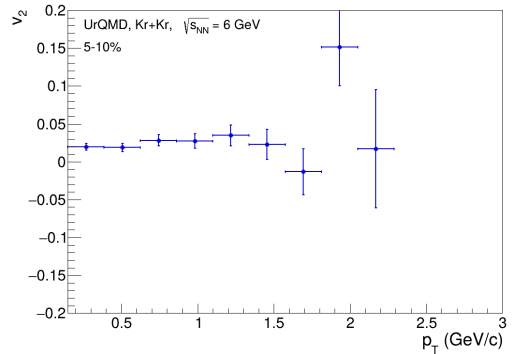
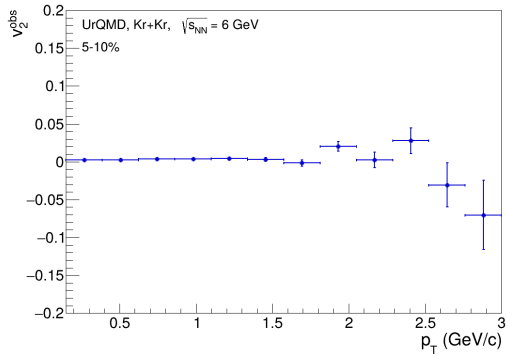
Сравнение Ψ_2^{left} и Ψ_2^{right} : центральность 70–80%



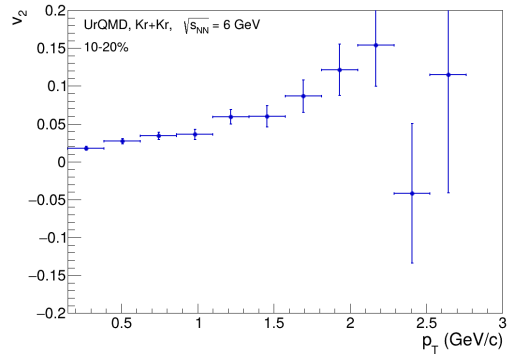
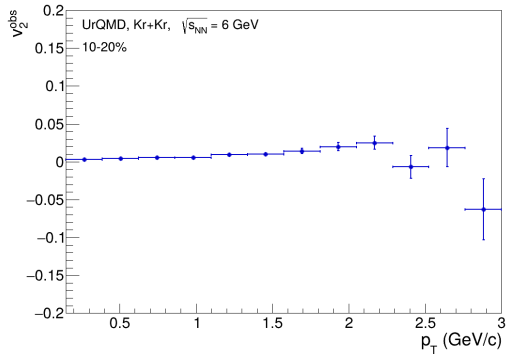
$v_2(p_T)$ заряженных адронов: центральность 0–5%



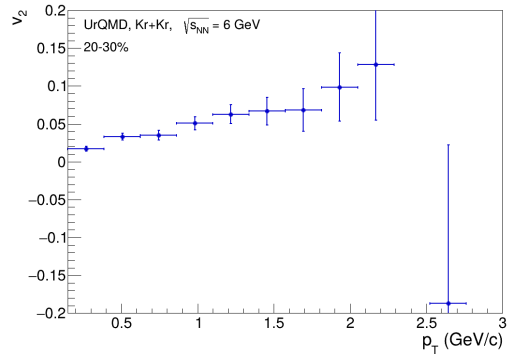
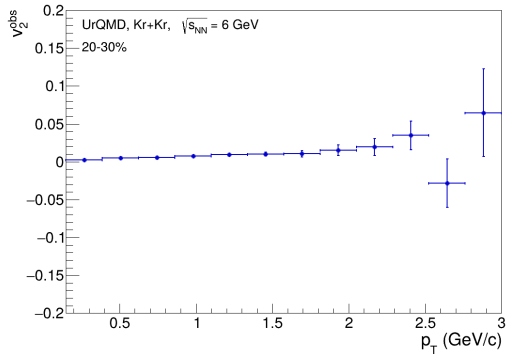
$v_2(p_T)$ заряженных адронов: центральность 5–10%



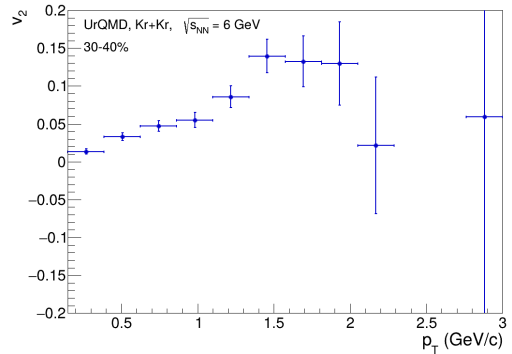
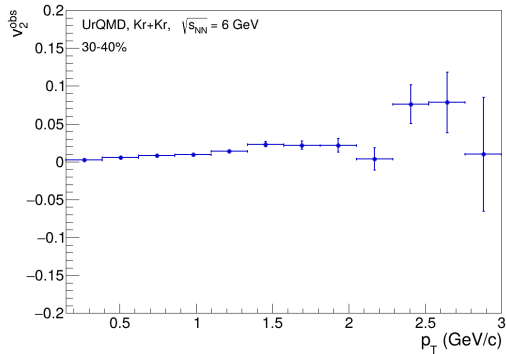
$v_2(p_T)$ заряженных адронов: центральность 10–20%



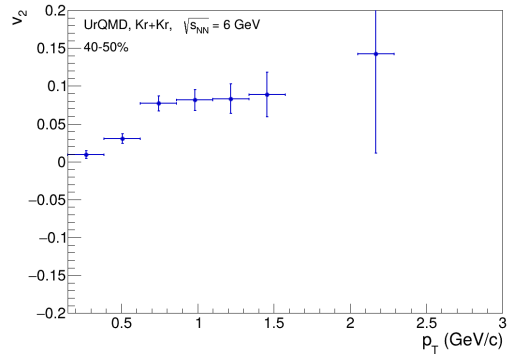
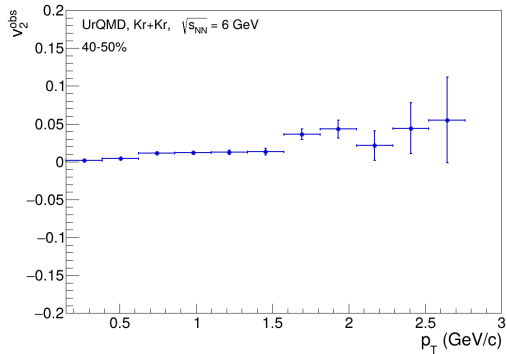
$v_2(p_T)$ заряженных адронов: центральность 20–30%



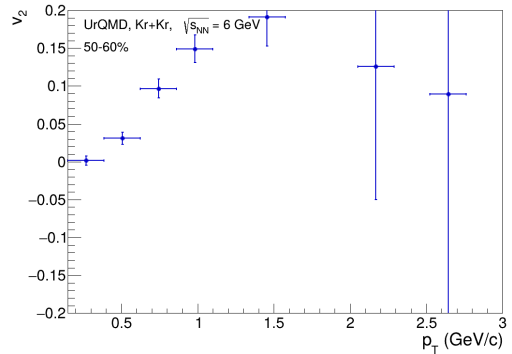
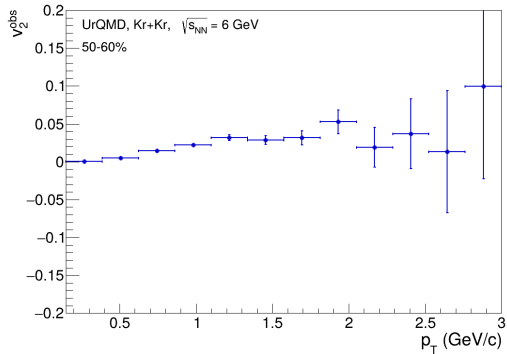
$v_2(p_T)$ заряженных адронов: центральность 30–40%



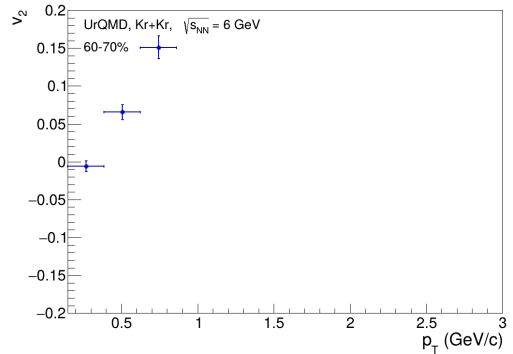
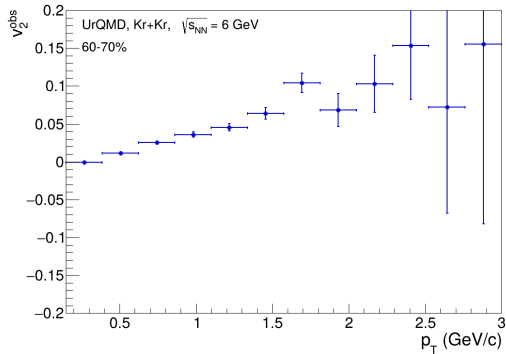
$v_2(p_T)$ заряженных адронов: центральность 40–50%



$v_2(p_T)$ заряженных адронов: центральность 50–60%



$v_2(p_T)$ заряженных адронов: центральность 60–70%



$v_2(p_T)$ заряженных адронов: центральность 70–80%

