



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»

**Спиновая выстроенность векторных мезонов в
эксперименте СПАСЧАРМ на У-70**

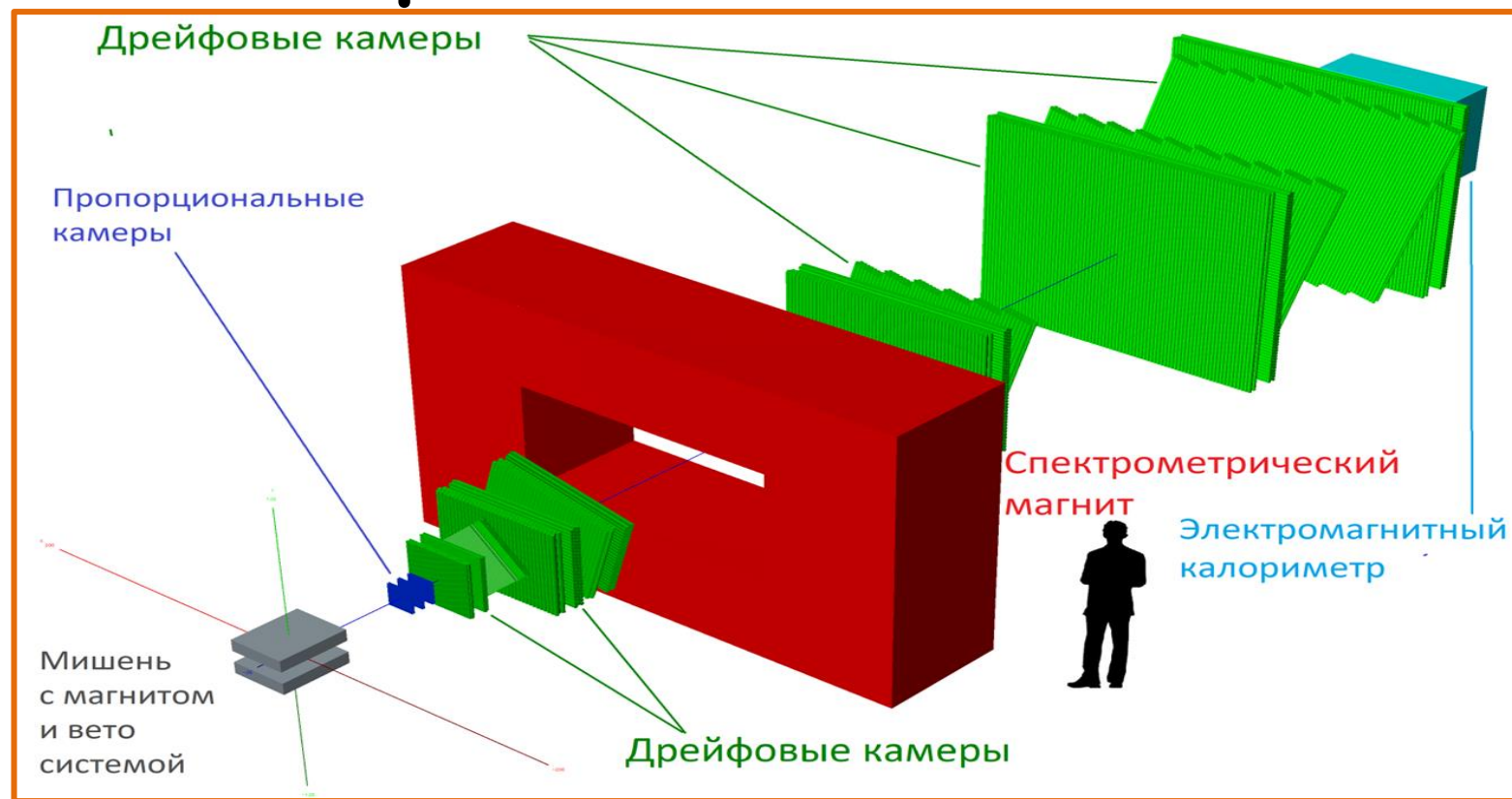
Никита Калугин, НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ

Введение

Информация о спиновых свойствах частиц, рождающихся в адрон-адронных взаимодействиях, может быть важна для понимания механизма рождения этих же частиц. Спиповые свойства векторных мезонов описываются в терминах матрицы спиновой плотности (эрмитова матрица 3×3). Диагональные элементы этой матрицы ρ_{00} , ρ_{11} , ρ_{1-1} представляют собой относительные вероятности мезону иметь 0,+1,-1 проекции спина на ось квантования.

Исходя из примитивной модели рождения мезонов, никакое из направлений проекции спина не обособлено, подразумевается, что все проекции спина равновероятны, ($\rho_{00} = \rho_{11} = \rho_{1-1} = 1/3$), т.е. для вектора спина нет выделенного направления в пространстве (изотропность). В неизотропном случае говорят о наличии выстроенности вдоль оси квантования (spin alignment). Исследование подобных свойств векторных мезонов является важным направлением, и эта область нуждается в различных экспериментальных данных для множества теоретических моделей в области физики элементарных частиц.

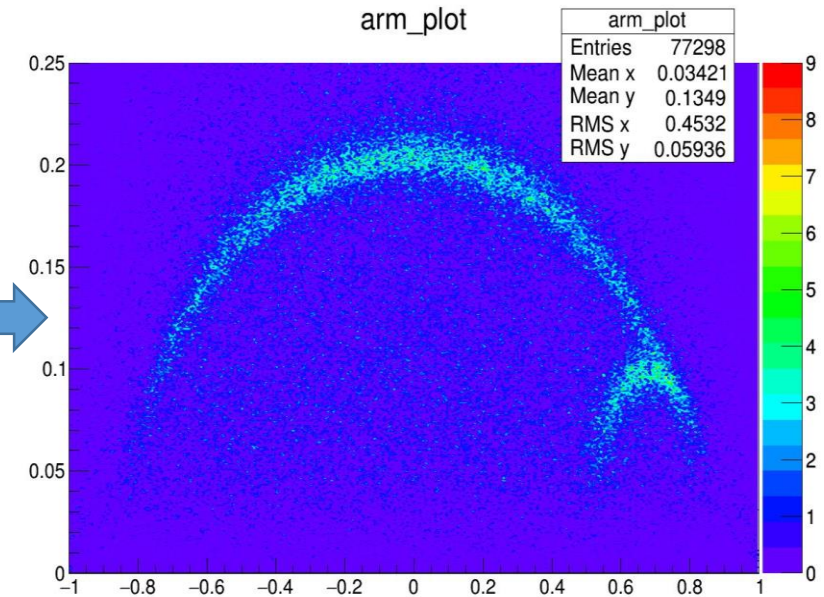
Эксперимент СТАСЧАРМ



Проведен анализ данных, набранных в сеансе **2021** г. на ядерных мишенях (C,Al,Cu,Sn,W,Pb)

Отбор Событий

1. Множественность пучковых треков равна строго единице
2. Идентифицированный π^- пучковый трек черенковскими счетчиками $\check{C}_1, \check{C}_2, \check{C}_3$
3. По крайней мере реконструирован один положительно заряженный трек и по крайней мере два отрицательно заряженных трека
4. Вторичная вершина, сформированная вилкой (V^0), лежит в диапазоне $Z_{\text{decay}} \approx 31$ см от $Z_{\text{decay}} \approx 77$ см
5. Расстояние между треками в вилке не больше ~ 0.6 см
- ~~6. Удаление кинематических областей с помощью критерия Арментероса-Подольянского отвечающих за $A^0 \rightarrow \rho\pi$ и $\gamma \rightarrow e^+e^-$~~
7. Z-координата первичной вершины находится в пределах $\pm 3\sigma$ ($\sigma \approx 2.5$ см) от Z-координаты центра мишени (~ 23 см)
8. Косинус угла между направлением вектора 3-импульса V^0 и вектора, проведенного из первичной вершины во вторичную, должен быть больше 0.98.
9. 1С-ФИТ V^0 на массу K_S^0 мезона.
10. $x_F > 0.4$ для $K_S^0 h^-$



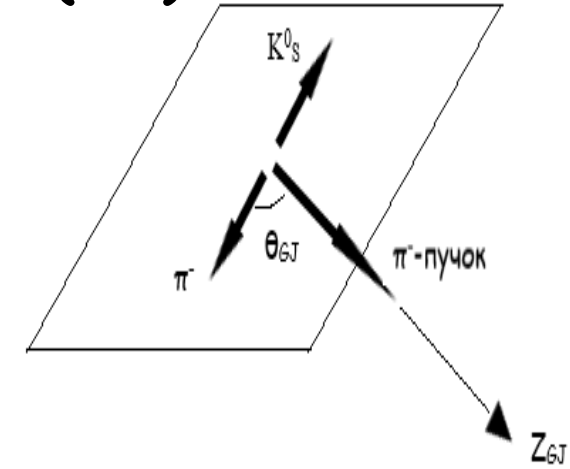
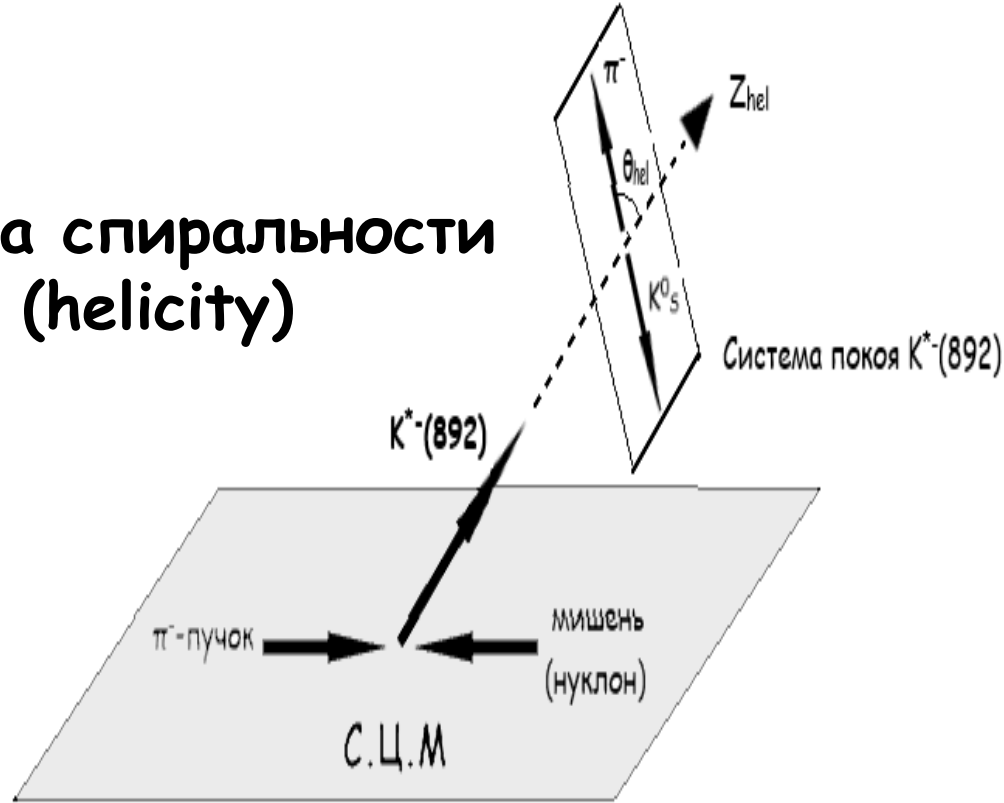
отбирается все

K_S^0 meson production in π -A interactions at Accelerator complex U-70, N.K.Kalugin et. al., Phys.Atom.Nucl 87 (2024),3,200-207

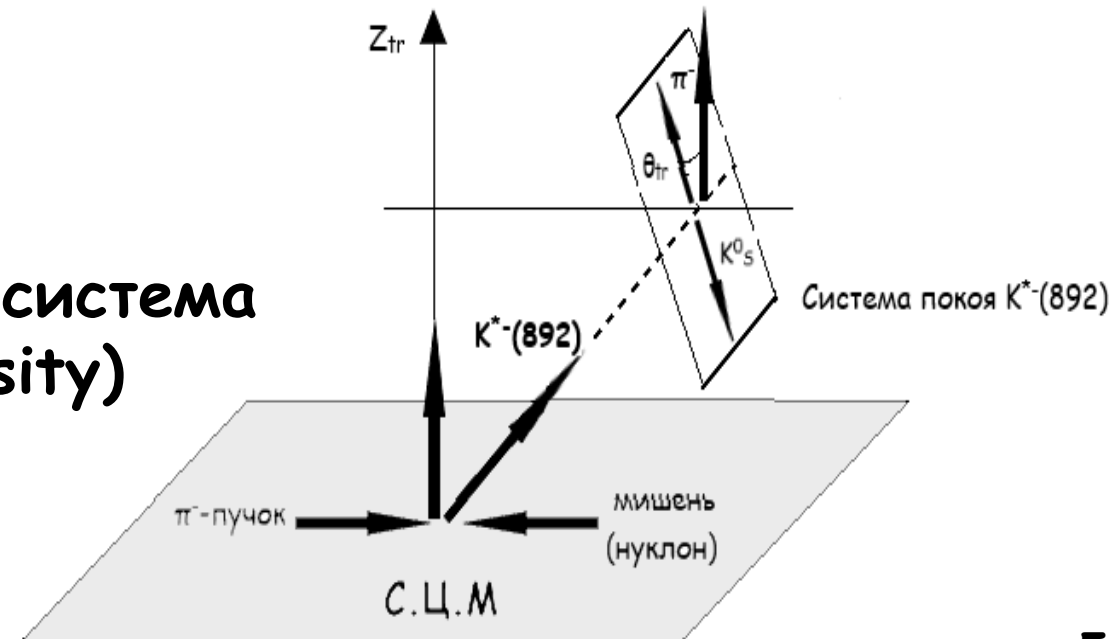
Системы отсчета (reference frames)

Система Готфрида-Джексона
(GJ) Система покоя $K^*(892)$

Система спиральности
(helicity)

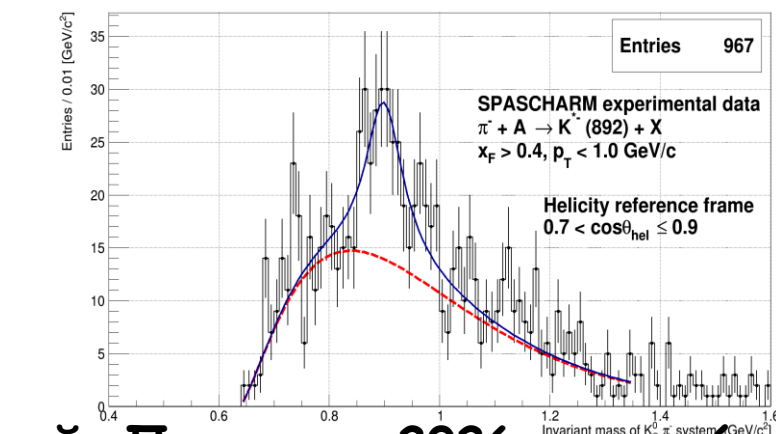
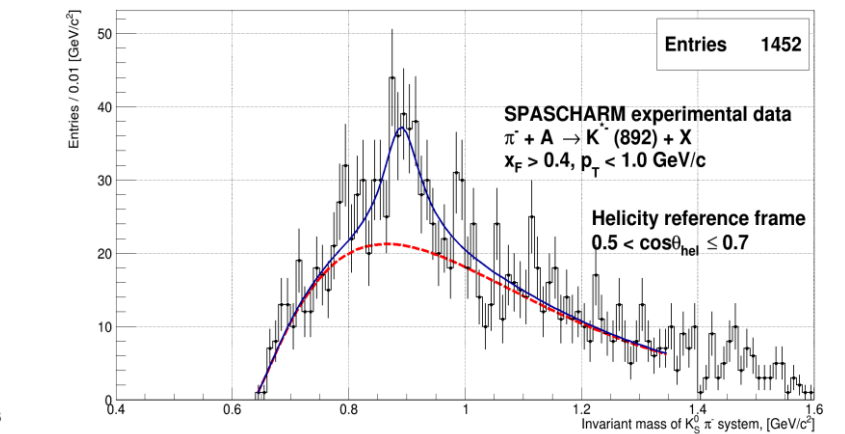
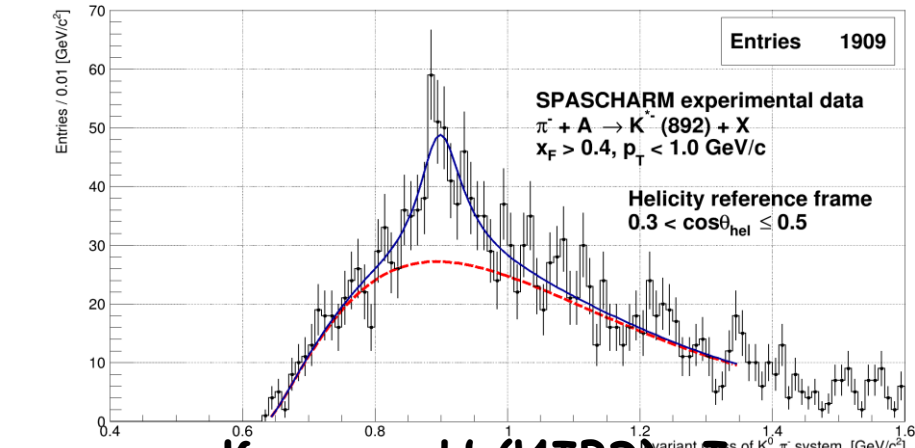
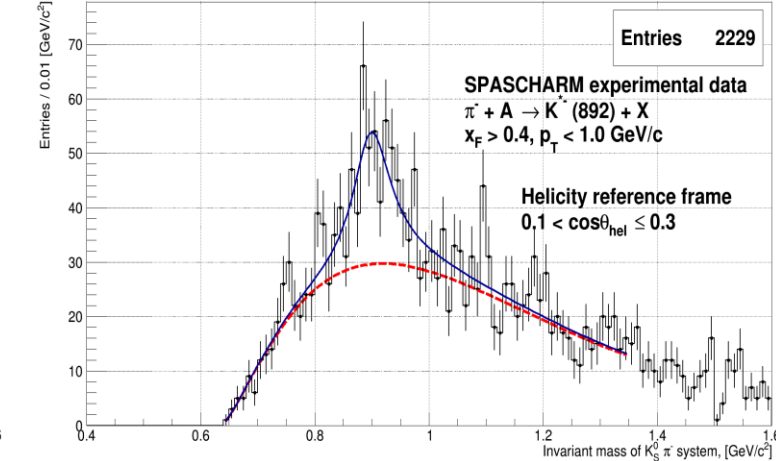
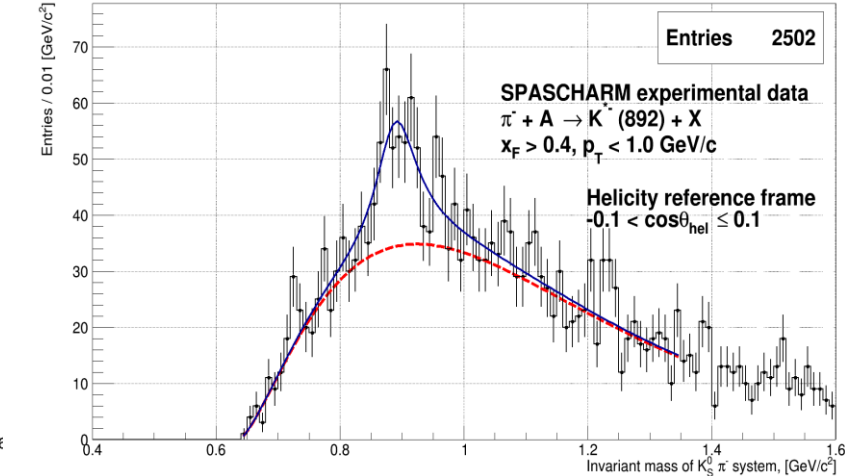
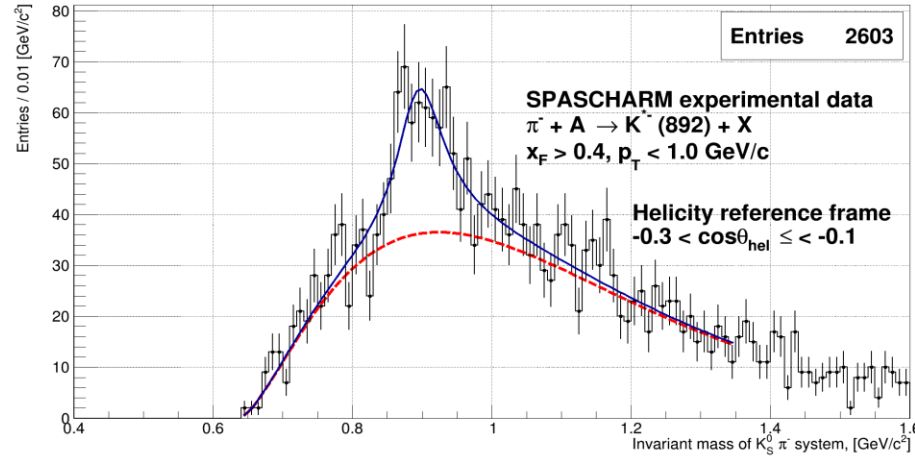
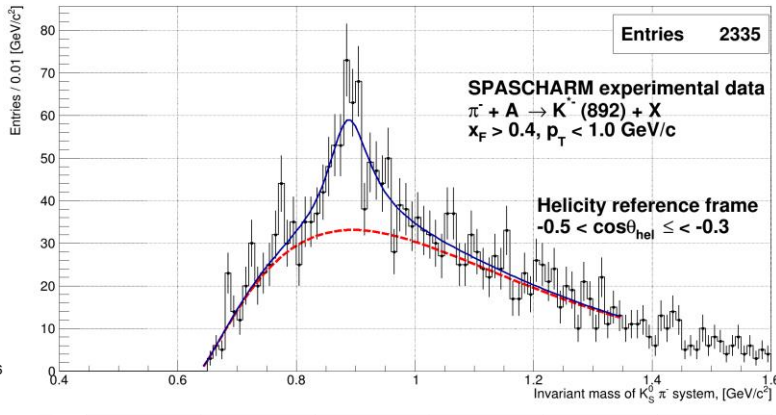
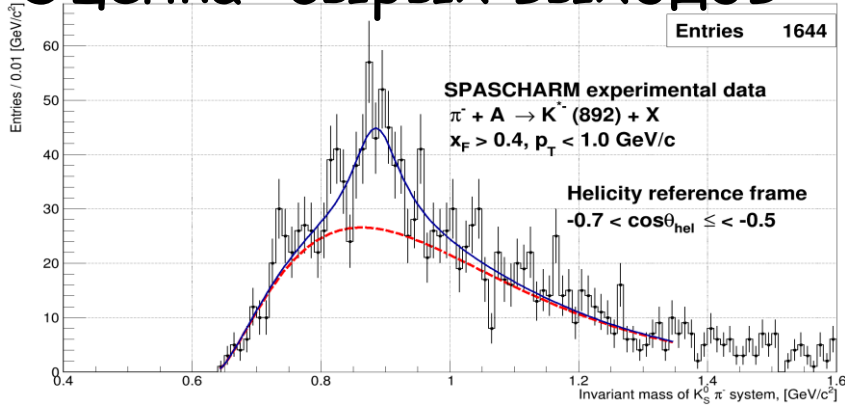
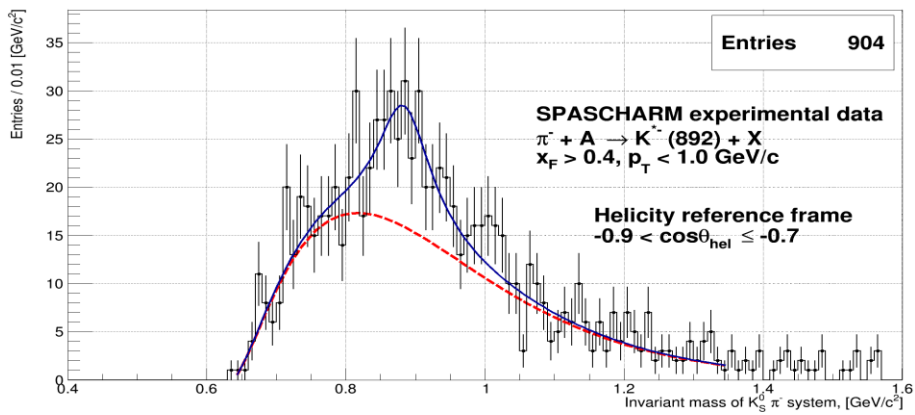


Поперечная система
(transversity)



Для оценки матричного элемента ρ_{00} производится анализ угловых распределений одного из продуктов распада векторного мезона (в системе покоя этого мезона) в различных системах отсчета (С. Bourrely, E. Leader and J. Sopher, Phys. Rep. 59,95 (1980)).

Оценка "сырых выходов"



Спектры инвариантных масс аппроксимировались следующей формулой:

$$\frac{dN}{dM} = BW \cdot PS + BG \approx BG(1 + \alpha 1BW)$$

Предполагая $PS \approx BG$

$$BW(M) = \frac{M}{p^*} \cdot \frac{\Gamma(M)}{(M^2 - M_0^2)^2 + M_0^2 \Gamma^2(M)}$$

$BW(M)$ - релятивистская р-волновая функция Брейта-Вигнера с динамической шириной:

$$\Gamma(M) = \Gamma_0 \cdot \left(\frac{p^*(M)}{p^*(M_0)}\right)^{2l+1} \frac{\rho(M)}{\rho(M_0)} + 2\sqrt{2} \cdot \sigma(K_s^0 \pi^-)$$

$$\rho(M) \approx \frac{1}{M}$$

$p^*(M)$ - импульс продукта распада в системе покоя резонанса
 $l=1$ орбитальный момент.

J.D.Jackson, Nuovo Cimento 34 (1964) 76

Оценка "сырых выходов" производилась с использованием различных функций для описания фона:

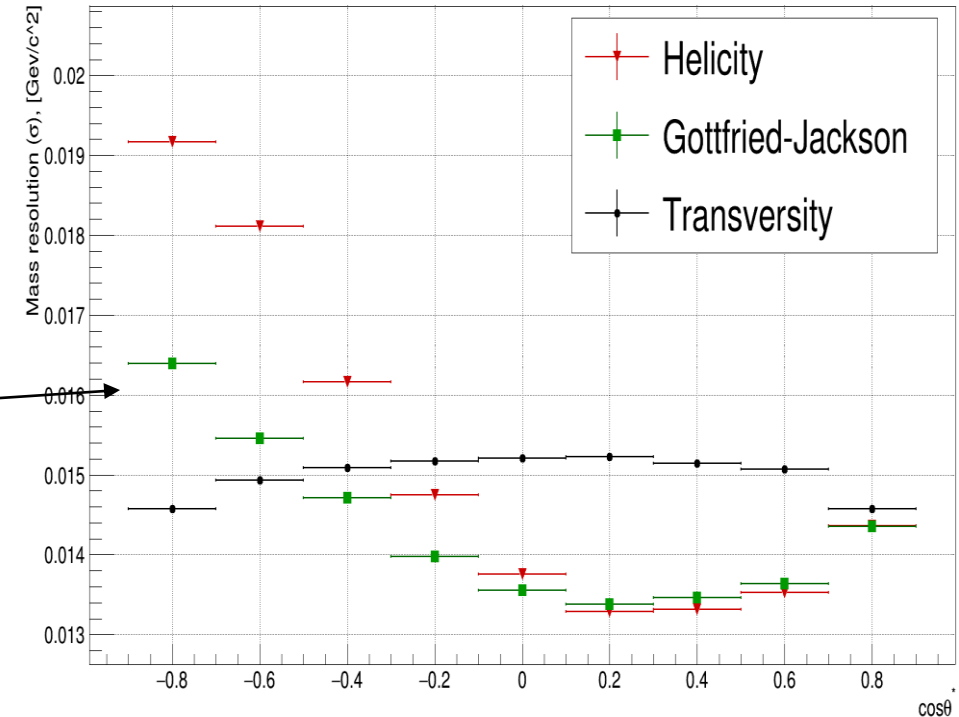
$$BG(M) = \alpha 2 \cdot (M - M_{tres})^{\alpha 3} \cdot e^{-\alpha 4M}$$

$$BG(M) = \alpha 2 \cdot (M - M_{tres})^{\alpha 3} \cdot e^{-\alpha 4M - \alpha 5M^2}$$

$$BG(M) = \alpha 2 \cdot (M - M_{tres})^{\alpha 3} \cdot e^{-\alpha 4M - \alpha 5M^2 - \alpha 6M^3}$$

с варьированием пределов аппроксимации, с разным биннингом гистограмм инвариантных масс (10 МэВ и 20 МэВ). Статистическая ошибка "сырых выходов" вычислялась как среднее значение ошибок интегралов после вычитания фона в пределах $\mp 2.5\Gamma$, систематическая ошибка вычислялась как RMS всех полученных значений интегралов.

Оценка "сырых выходов"

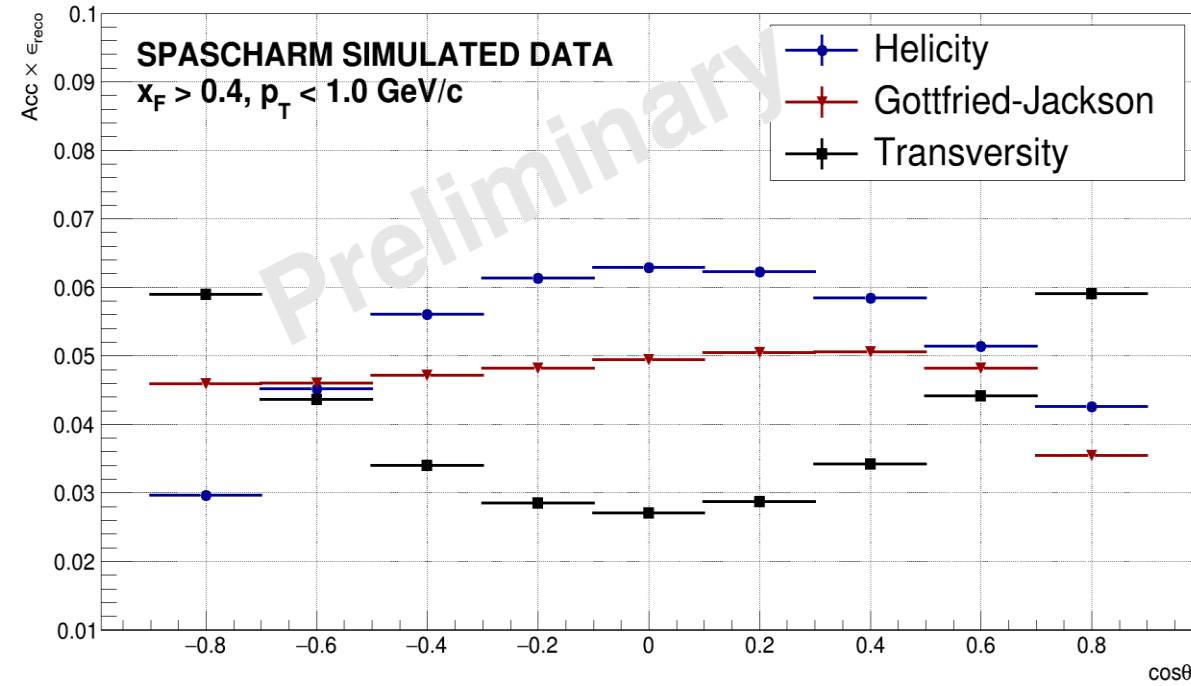
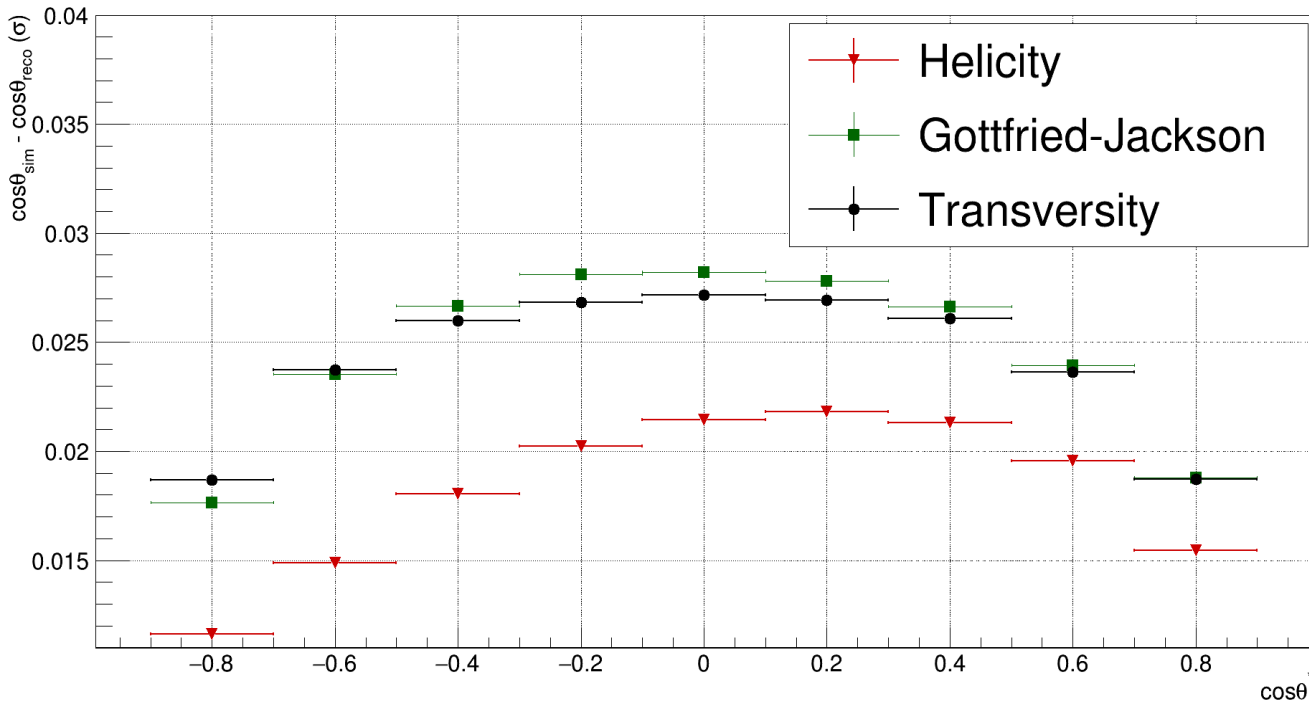


Оценка "сырых выходов"

	"Сырые" выходы (raw yields) K^* - (892)		"Сырые" выходы (raw yields) K^* - (892)
$-0.9 < \cos\theta^*_H \leq -0.7$	151±12(стат) ±16(сис)	$-0.9 < \cos\theta^*_{GJ} \leq -0.7$	184±14(стат) ±21(сис)
$-0.7 < \cos\theta^*_H \leq -0.5$	200±14(стат) ±14(сис)	$-0.7 < \cos\theta^*_{GJ} \leq -0.5$	201±14(стат) ±25(сис)
$-0.5 < \cos\theta^*_H \leq -0.3$	271±16(стат) ±17(сис)	$-0.5 < \cos\theta^*_{GJ} \leq -0.3$	159±13(стат) ±24(сис)
$-0.3 < \cos\theta^*_H \leq -0.1$	299±17(стат) ±24(сис)	$-0.3 < \cos\theta^*_{GJ} \leq -0.1$	253±16(стат) ±21(сис)
$-0.1 < \cos\theta^*_H \leq 0.1$	232±17(стат) ±22(сис)	$-0.1 < \cos\theta^*_{GJ} \leq 0.1$	242±15(стат) ±18(сис)
$0.1 < \cos\theta^*_H \leq 0.3$	248±16(стат) ±16(сис)	$0.1 < \cos\theta^*_{GJ} \leq 0.3$	248±16(стат) ±24(сис)
$0.3 < \cos\theta^*_H \leq 0.5$	235±16(стат) ± 24(сис)	$0.3 < \cos\theta^*_{GJ} \leq 0.5$	236±16(стат) ± 14(сис)
$0.5 < \cos\theta^*_H \leq 0.7$	207±14(стат) ±15(сис)	$0.5 < \cos\theta^*_{GJ} \leq 0.7$	177±13(стат) ±24(сис)
$0.7 < \cos\theta^*_H \leq 0.9$	155±13(стат) ±15(сис)	$0.7 < \cos\theta^*_{GJ} \leq 0.9$	183±15(стат) ±22(сис)

	"Сырые" выходы (raw yields) K^* - (892)
$-0.9 < \cos\theta^*_{tr} \leq -0.7$	306±17(стат) ±23(сис)
$-0.7 < \cos\theta^*_{tr} \leq -0.5$	236±13(стат) ± 19(сис)
$-0.5 < \cos\theta^*_{tr} \leq -0.3$	220±15(стат) ± 16(сис)
$-0.3 < \cos\theta^*_{tr} \leq -0.1$	216±14(стат) ±21(сис)
$-0.1 < \cos\theta^*_{tr} \leq 0.1$	149±15(стат) ± 21(сис)
$0.1 < \cos\theta^*_{tr} \leq 0.3$	158±13(стат) ±27(сис)
$0.3 < \cos\theta^*_{tr} \leq 0.5$	174±13(стат) ± 21(сис)
$0.5 < \cos\theta^*_{tr} \leq 0.7$	208±13(стат) ± 19(сис)
$0.7 < \cos\theta^*_{tr} \leq 0.9$	261 ±16(стат) ±25(сис)

Оценка эффективности



Равномерная генерация $K^{*-}(892)$ в экспериментальных диапазонах по x_F и p_T (всего 20млн событий)

PhaseSpace Generator для генерации распада $K^{*-}(892) \rightarrow K^0_S \pi^-$
 GENBOD (CERNLIB, F.James, Monte Carlo Phase Space, CERN 68-15 (1968))

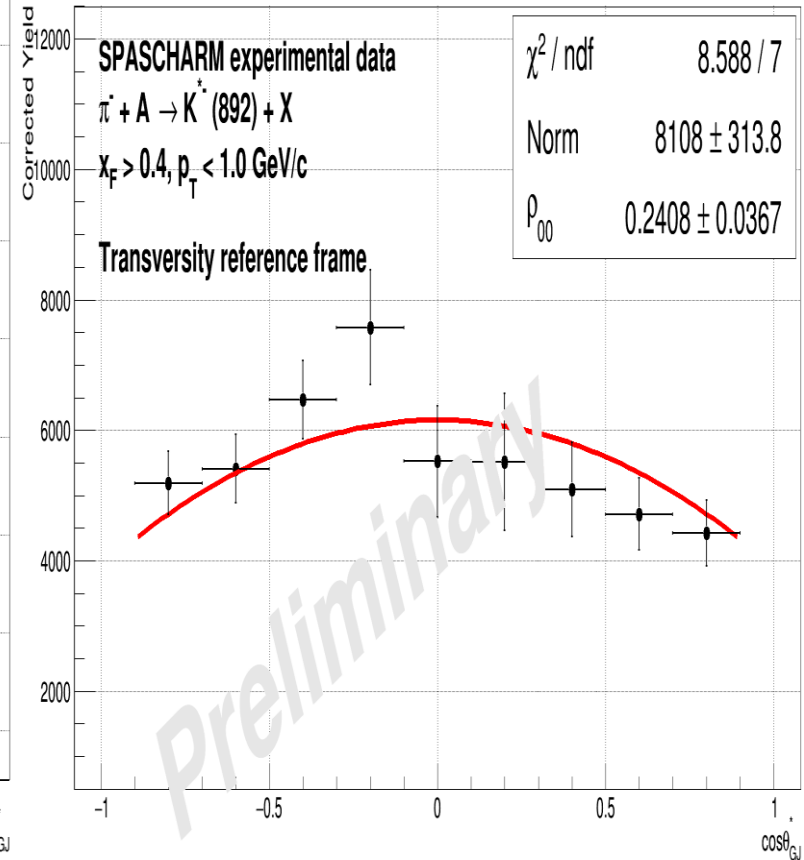
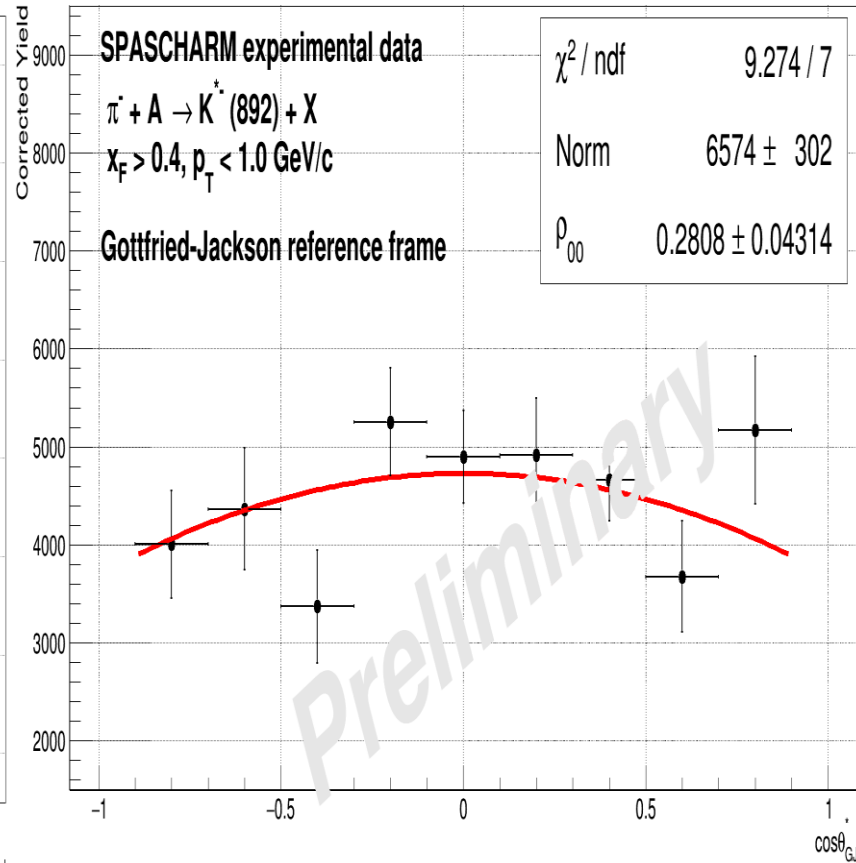
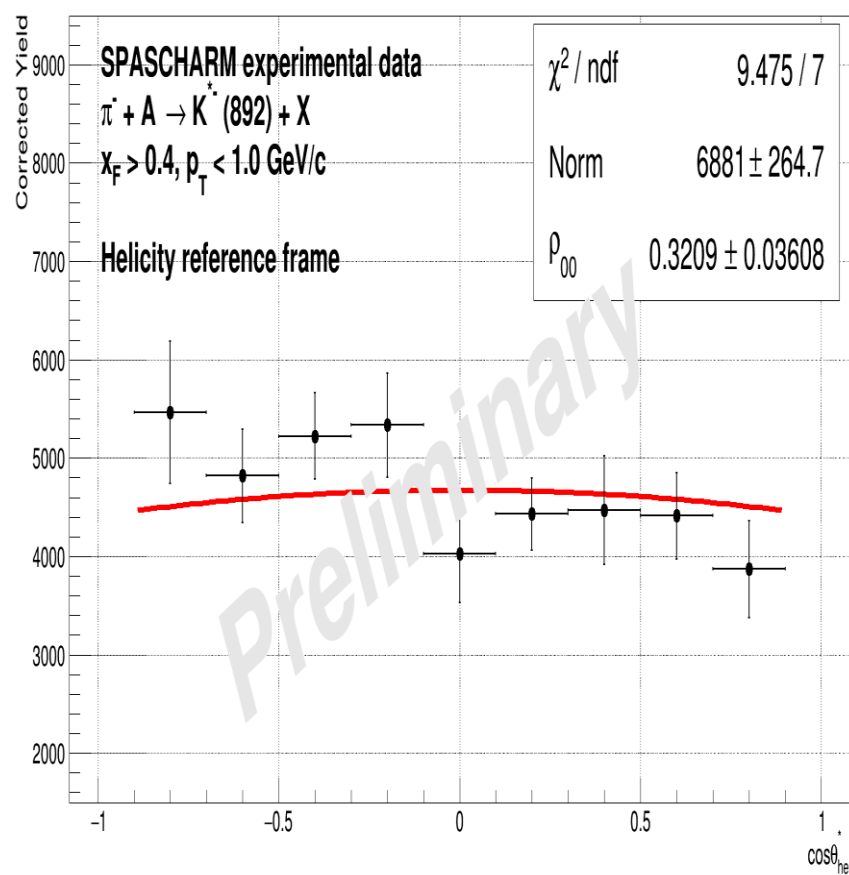
Geant модель установки СПАСЧАРМ

$$acceptance \times \epsilon_{reco}(|\cos\theta_{frame}^*|) = \frac{Yield}{N_{generated}}(|\cos\theta_{frame}^*|)$$

Измерение элемента ρ_{00} спиновой матрицы плотности

$$\text{Corrected Yield}(|\cos\theta_{frame}^*|) = \frac{\text{Raw Yield}}{\text{acceptance} \times \varepsilon_{reco}} (|\cos\theta_{frame}^*|)$$

$$\frac{dN}{d \cos \theta^*} \sim [1 - \rho_{00} + (3\rho_{00} - 1)(\cos \theta^*)^2]$$



Заключение

Измерен элемент ρ_{00} спиновой матрицы плотности векторного $K^{*-(892)}$ -мезона, образованного инклюзивно в π^- -ядерных взаимодействиях при импульсе пучка ~ 26.5 ГэВ/с в кинематической области $x_F > 0.4$ в системах спиральности, GJ , поперечной на установке СПАСЧАРМ на ускорительном комплексе У-70 НИЦ ИФВЭ Курчатовский институт. Величина ρ_{00} составляет 0.32 ± 0.03 (система спиральности), 0.28 ± 0.04 (GJ), 0.24 ± 0.03 (поперечная система), что является указанием на высокую вероятность рождения $K^{*-(892)}$ -мезона с проекциями спина $+1$ и -1 . Значение ρ_{00} спиновой матрицы плотности векторного $K^{*-(892)}$ -мезона для реакции с участием π^- -пучка получено впервые. Ранее нами было получено $\rho_{00} = 0.39 \pm 0.02$ (система спиральности) для $K^{*-(892)}$ -мезона в K^- -ядерных взаимодействиях (этот результат доложен на конференции ЯДРО-2025 в г. Санкт-Петербург).

В ранее проведенных экспериментах величина ρ_{00} $K^{*-(892)}$ -мезона составляет:

1. в $n\bar{c}$ взаимодействиях: 0.393 ± 0.025 в поперечной системе (ЭКСЧАРМ)
2. в $\nu_{\mu}d$ взаимодействиях: 0.28 ± 0.07 в поперечной системе (NOMAD)
3. в K^-p взаимодействиях: варьируется от 0.01 ± 0.05 до 0.58 ± 0.13 для $0.0 \text{ GeV}^2 < |t| \leq 1.2 \text{ GeV}^2$ в системе Готфрида-Джексона, варьируется от 0.06 ± 0.06 до 0.66 ± 0.12 для $0.0 \text{ GeV}^2 < |t| \leq 1.2 \text{ GeV}^2$ в системе спиральности (2м водородная пузырьковая камера, импульс пучка 14.3 ГэВ/с, CERN)
4. в K^-p взаимодействиях: варьируется от 0.12 ± 0.06 до 0.57 ± 0.18 для $0.0 \text{ GeV}^2 < |t| \leq 1.2 \text{ GeV}^2$ в системе Готфрида-Джексона, варьируется от 0.06 ± 0.18 до 0.50 ± 0.19 для $0.0 \text{ GeV}^2 < |t| \leq 1.2 \text{ GeV}^2$ в системе спиральности (пузырьковая камера Мирабель, импульс пучка 70 ГэВ/с, ИФВЭ)
5. Антипротон-протонных взаимодействиях: 0.28 ± 0.06 в спиральной системе, 0.25 ± 0.06 в системе Готфрида-Джексона, 0.23 ± 0.07 в системе Эдэйра, 0.48 ± 0.07 в поперечной системе (пузырьковая камера Мирабель, импульс пучка 32 ГэВ/с, ИФВЭ)