

Изучение распада K в 3π

Завидов Евгений Алексеевич

Научный руководитель д.ф.-м.н. Слабоспицкий С.Р.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Отчет о научно-исследовательской работе
6 мая 2025 г.

Содержание

- 1 Введение
- 2 Отбор событий
- 3 Диаграммы Далица и матричный элемент
- 4 Исследование связанных $\pi^+\pi^-$ состояний в реакции распада K^+
- 5 Заключение

Эксперимент ОКА

Эксперимент ОКА (сокращение от "Опыты с КАонами") - это экспериментальная установка на ускорителе У-70, находящаяся в Институте Физики Высоких Энергий в г. Протвино.

Эксперимент ОКА

Целями эксперимента является поиск отклонений от Стандартной Модели, проявляющихся в редких распадах каонов, а также наблюдении эффектов от прямого нарушения CP-симметрии в распадах заряженных каонов.

Описание установки

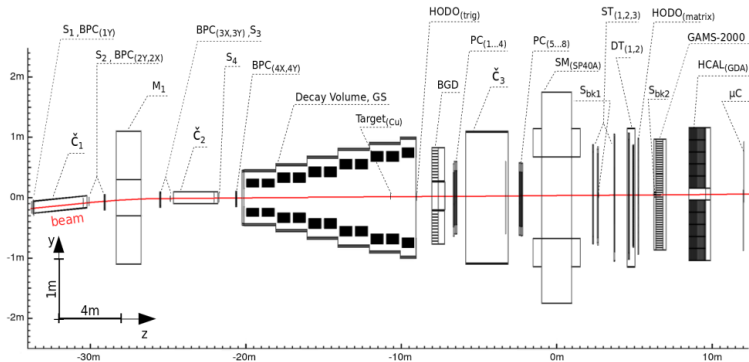


Рис.: 1. Схема установки ОКА

Критерии отбора

- 1 Число треков в реконструированном событии равняется 4, что отвечает одному первичному треку и 3 вторичным.
- 2 Распадная частица - каон. Проверка типа частицы идет по срабатыванию соответствующего триггера.
- 3 Суммарный заряд реконструированных треков равняется +1.
- 4 Вершина распада находится внутри распадного объема и не попадает в мишень.
- 5 Заряженные треки, зарегистрированные электромагнитным калориметром, не соответствуют электронам.
- 6 Энергии всех распадных частиц в системе покоя каона удовлетворяют условию $E_i^* \geq m_\pi = 0.14$ ГэВ.
- 7 Модуль импульса системы вторичных треков в системе покоя каона $p_\Sigma < 0.025$ ГэВ.

Распределение по инвариантной массе

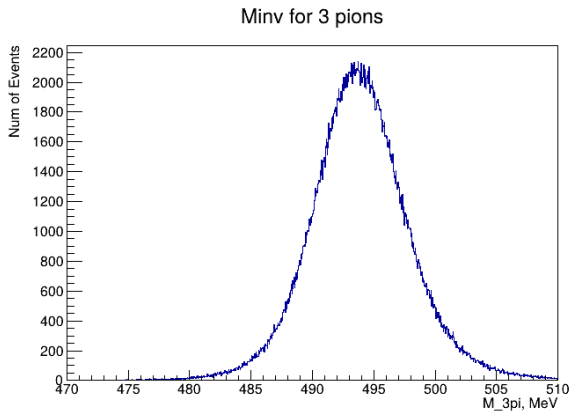


Рис.: 2. Распределение по инвариантной массе продуктов распада

Диаграммы Далица в параметризации Вайнберга

$$|M|^2 \propto 1 + g \frac{s_3 - s_0}{m_{\pi^+}^2} + h \left[\frac{(s_3 - s_0)^2}{m_{\pi^+}^4} \right] + k \left[\frac{(s_2 - s_1)^2}{m_{\pi^+}^4} \right], \quad (1)$$

где $s_i = (p_K - p_i)^2$ и $s_0 = \frac{1}{3}(m_K^2 + m_1^2 + m_2^2 + m_3^2)$, а индекс 3 относится к нечетному пиону (в данном случае отрицательному)

Диаграммы Далица в параметризации Вайнберга

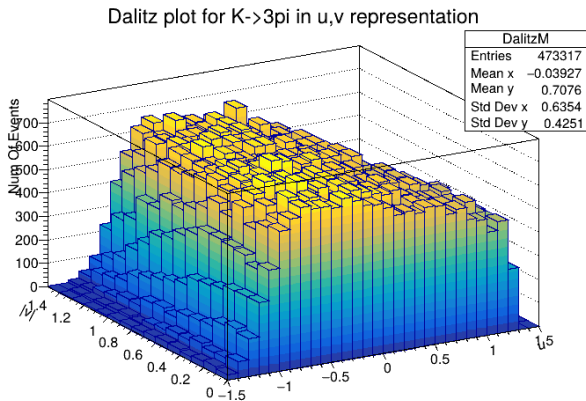


Рис.: 3. Диаграмма Далица для экспериментальных данных

Формула для фитирования

$$F(u, |v|)^{data} \sim F(u, |v|)_0^{MC} + gF(u, |v|)_u^{MC} + \\ + hF(u, |v|)_{u^2}^{MC} + kF(u, |v|)_{v^2}^{MC} \quad (2)$$

Слагаемые из правой части являются Далиц-распределениями Монте-Карло данных, взятых при постоянном матричном элементе и взвешенных с соответствующими координатами.

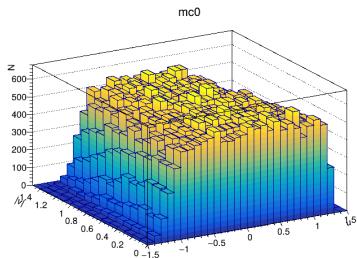
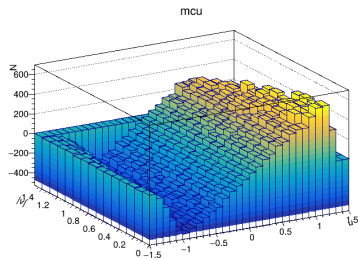
(a) Далиц плот для MC_{reco} с весом 1(b) Далиц плот для MC_{reco} с весом u

Рис.: 4. Распределения Далица для реконструированного Монте-Карло

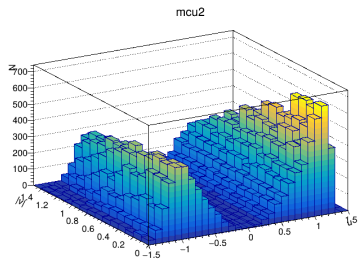
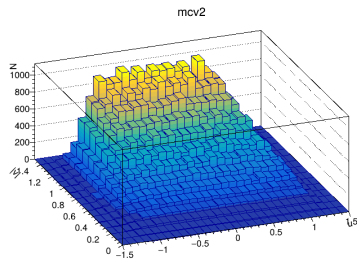
(a) Далиц плот для MC_{reco} с весом u^2 (b) Далиц плот для MC_{reco} с весом v^2

Рис.: 5. Распределения Далица для реконструированного Монте-Карло

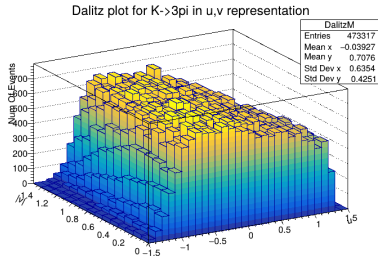
Сравнение данных эксперимента ОКА и PDG

Современные значения из PDG

$$g = (-0.21134 \pm 0.00017)$$

$$h = (0.01848 \pm 0.00040) \quad (3)$$

$$k = (-0.00463 \pm 0.00014)$$



(a) Экспериментальные данные

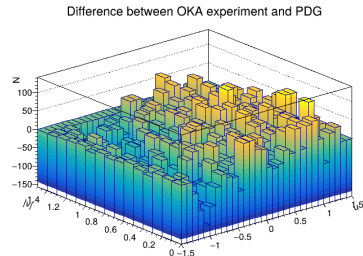
(b) Разность между распределением F^{data} и правой частью формулы (2)

Рис.: 6. Сравнение данных OKA и PDG

Исследование связанных $\pi^+\pi^-$ состояний

Амплитуда рождения пионного атома при распаде каона дается формулой

$$\langle P_2, A_{2\pi} | P_1 \rangle = I(Q_1, \frac{P_A}{2}, \frac{P_A}{2}, Q_2) i \frac{\Psi(0)}{\sqrt{m}} \quad (4)$$

Здесь $I(Q_1, \frac{P_A}{2}, \frac{P_A}{2}, Q_2)$ - амплитуда рождения свободных частиц в реакции $Q_1 \rightarrow \pi^+(p_1) + \pi^-(p_2) + Q_2$, а $\Psi(0) = \Psi(\vec{x} = 0)$ — волновая функция водородоподного атома пиония в начале координат.

Расчет парциальной ширины распада $A_{2\pi} \rightarrow 2\gamma$

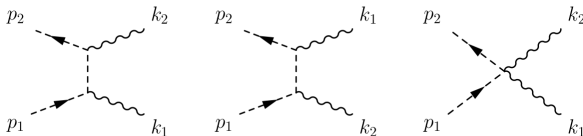


Рис.: 7. Диаграммы Фейнмана аннигиляции пионов

Матричный элемент

$$\mathcal{M} = ie^2 \epsilon^{*\mu}(k_1) \epsilon^{*\nu}(k_2) \times$$

$$\left(2g_{\mu\nu} - (p_1 + p)_\mu \frac{1}{p^2 - m^2} (p - p_2)_\nu - (p_1 + q)_\nu \frac{1}{q^2 - m^2} (q - p_2)_\mu \right) \quad (5)$$

Воспользуемся калибровкой Лоренца $k \cdot \epsilon(k) = 0$ и $p_1 \cdot \epsilon(k_i) = 0$, тогда в матричный элемент будет давать вклад только третья диаграмма

$$\mathcal{M} = 2ie^2 \epsilon^*(k_1) \cdot \epsilon^*(k_2) \quad (6)$$

Таким образом, квадрат модуля матричного элемента имеет вид

$$|\mathcal{M}|^2 = 4e^2 |\epsilon(k_1) \cdot \epsilon(k_2)|^2 \quad (7)$$

Вектор состояния пиония

$$|A_{2\pi}(\vec{P}_B)\rangle = \sqrt{2M} \int \frac{dp}{(2\pi)^3 \sqrt{2m} \sqrt{2m}} |-\vec{p}, \vec{p}\rangle \psi(p) \quad (8)$$

Здесь $\psi(p)$ - волновая функция водородоподобного атома.

Амплитуда аннигиляции атома пиония

$$\mathcal{M}(A_{2\pi} \rightarrow 2\gamma) = \sqrt{2M} \int \frac{dp}{(2\pi)^3 \sqrt{2m} \sqrt{2m}} \mathcal{M}(\pi^+\pi^- \rightarrow 2\gamma) \psi(p) e^{i\vec{p} \cdot \vec{0}} \quad (9)$$

Парциальная ширина распада дается выражением

$$d\Gamma = \frac{1}{2M} \frac{1}{2} \frac{d^3k_1 d^3k_2}{2\omega_1 2\omega_2} \frac{1}{(2\pi)^6} |\mathcal{M}_A|^2 (2\pi)^4 \delta^{(4)}(P - k_1 - k_2) \quad (10)$$

После всех вычислений ширина принимает вид

$$\Gamma = \frac{e^4}{8m_\pi^2 \pi} |\psi(0)|^2 \int d\omega_1 \delta(m_\pi - \omega_1) = \frac{e^4}{8m_\pi^2 \pi} |\psi(0)|^2 \quad (11)$$

Подставляем значение волновой функции в нуле и окончательно имеем

$$\Gamma = \frac{e^4 \alpha^3 m_\pi}{64\pi^2} = \frac{\alpha^5 m_\pi}{4} \quad (12)$$

Результаты

- Было продолжено изучение распада $K^+ \rightarrow 3\pi$, увеличено количество обрабатываемых событий, получено улучшенное Далиц распределение по кинематическим переменным в параметризации Вайнберга.
- Построены распределения для событий из Монте-Карло генератора с постоянным матричным элементом с учетом веса каждого из событий.
- Получена первичная оценка справедливости формулы (2).
- Начато изучение влияния образования связанных $\pi\pi$ состояний на Далиц распределения. Получена ширина распада пиония в 2 фотона в рамках низшего порядка теории возмущений.

Дальнейшая работа

- Дальнейшая работа заключается в независимом получении параметров наклона Далиц плота g, h, k .
- Анализе влияния появления связанных состояний на форму распределений как для распада $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+$, так и для $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0\pi^0$.