

Исследования K_{e3} распада в эксперименте ОКА

О. П. Ющенко⁺¹⁾, В. Ф. Курщев⁺, А. П. Филлин⁺, С. А. Акименко⁺, А. В. Артамонов⁺, А. М. Блик⁺,
В. В. Бреховских⁺, В. С. Буртовой⁺, С. В. Донсков⁺, А. В. Инякин⁺, А. М. Горин⁺, Г. В. Хаустов⁺,
С. А. Холоденко⁺, В. Н. Колосов⁺, А. С. Константинов⁺, В. М. Леонтьев⁺, В. А. Лишин⁺, М. В. Медынский⁺,
Ю. В. Михайлов⁺, В. Ф. Образцов⁺, В. А. Поляков⁺, А. В. Попов⁺, В. И. Романовский⁺, В. И. Рыкалин⁺,
А. С. Садовский⁺, В. Д. Самойленко⁺, В. К. Семенов⁺, О. В. Стенякин⁺, О. Г. Чикилев⁺, В. А. Уваров⁺,
В. А. Дук^{*2)}, С. Н. Филиппов^{*}, Е. Н. Гуцин^{*}, Ю. Г. Куденко^{*3)}, А. А. Худяков^{*}, В. И. Кравцов^{*},
А. Ю. Поляруш[#], В. Н. Бычков[#], Г. Д. Кекелидзе[#], В. М. Лысан[#], В. Ж. Залиханов[#]

⁺ Национальный исследовательский центр “Курчатовский Институт” – ИФВЭ, 142281 Протвино, Россия

^{*} Институт ядерных исследований РАН, 142190 Троицк, Россия

[#] Объединенный институт ядерных исследований, 141980 Дубна, Россия

Поступила в редакцию 21 ноября 2017 г.

После переработки 6 декабря 2017 г.

Представлены новые результаты установки ОКА по изучению формфакторов K_{e3} распада. В анализе использовано более 5.25М событий, отобранных при распаде K^+ -мезонов с импульсом 17.7 ГэВ/с. Получены значения линейного и квадратичного наклонов для формфактора $f_+(t)$: $\lambda_+ = (2.95 \pm 0.022 \pm \pm 0.018) \times 10^{-2}$ для чисто линейного фита и $\lambda'_+ = (2.611 \pm 0.035 \pm 0.028) \times 10^{-2}$, $\lambda''_+ = (1.91 \pm 0.19 \pm 0.14) \times 10^{-3}$ для квадратичного. Скалярные и тензорные вклады сравнимы с нулем. Также определены значения параметров для некоторых альтернативных параметризаций: $M_V = 891 \pm 3$ МэВ – значение для полюсного фита; $\Lambda_+ = (2.458 \pm 0.018) \times 10^{-2}$ – для дисперсионного представления.

DOI: 10.7868/S0370274X18030013

1. Введение. Распады каонов предоставляют уникальную информацию о динамике сильных взаимодействий. Они позволяют тестировать такие теории как алгебра токов, РСАС, киральная теория возмущений (ChPT) и т.д. Другое направление при изучении распадов каонов – это поиск новых взаимодействий, таких как тензорные и скалярные. В данной работе представлены результаты анализа, проведенного на большой статистике K_{e3} распадов, полученных установкой ОКА на протонном синхротроне У-70.

2. Пучок и детектор ОКА. Аббревиатура ОКА происходит от “Опыты над КАонами”. Пучок эксперимента ОКА является вторичным ВЧ-сепарированным пучком протонного синхротрона У-70 (ИФВЭ, Протвино). Описание пучка представлено в [1]. Реализована ВЧ-сепарация со схемой Пановского. Сепаратор состоит из двух сверхпроводящих Карлсруе-ЦЕРН дефлекторов [2], предоставленных ЦЕРНОм. Специализированная криогенная система,

разработанная в ИФВЭ [3], производит сверхтекучий гелий для охлаждения полостей резонаторов. Сепарированный пучок содержит до $\sim 20\%$ положительно заряженных каонов с импульсом 17.7 ГэВ/с и интенсивностью $\sim 10^6$ каонов в 3-х секундном спиле У-70.

Установка ОКА является магнитным спектрометром, схематический вид которого представлен на рис. 1 и включает в себя:

1. Пучковый спектрометр, состоящий из 7 пропорциональных камер (ПК) с шагом 1 мм ($ВРС_{x,y}$, в общей сложности ~ 1500 каналов), 4-х сцинтилляционных счетчиков толщиной 2 мм и 2-х пороговых черенковских счетчиков.
2. Распадный объем (DV) длиной 11 м, заполненный гелием. Охранная система состоит из 670 сэндвичей свинец-сцинтиллятор: $20 \times (5$ мм Sc + 1.5 мм Pb) со съемом информации с помощью спектросмещающих волокон (WLS). Счетчики сгруппированы в 300 каналов амплитудного анализа (ADC).
3. Главный магнитный спектрометр: магнит с апertureй 200×140 см² и интегралом поля

¹⁾ e-mail: Oleg.Yushchenko@ihep.ru

²⁾ также University of Birmingham, UK

³⁾ также Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ” и Московский физико-технический институт, Москва, Россия

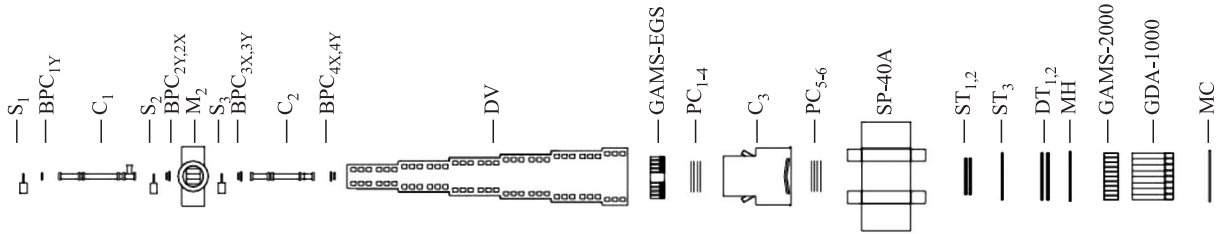
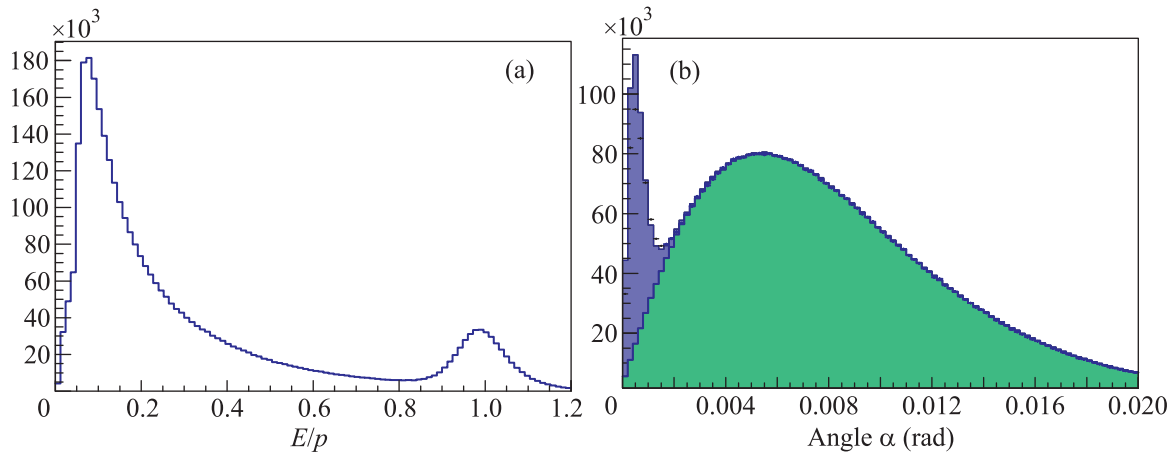


Рис. 1. Установка ОКА

Рис. 2. (Цветной онлайн) (а) – Распределение E/p – отношение энергии кластера в GAMS к импульсу ассоциированного трека. (б) – Угол α между \mathbf{p}_K и $\mathbf{p}_e + \mathbf{p}_\pi$ в лабораторной системе (справа)

$\int Bdl \sim 1$ Тлм; 8 плоскостей ПК с шагом 2 мм (5000 каналов), 1000 каналов строу-трубок диаметром 9 мм и 300 каналов дрейфовых трубок диаметром 40 мм.

- Гамма-детекторы: GAMS-2000 (~ 2300 блоков свинцового стекла размером $3.8 \times 3.8 \times 45$ см), детектор для больших углов (EGS) (~ 1050 блоков свинцового стекла $5 \times 5 \times 42$ см).
- Мюонный детектор: адронный калориметр (GDA-100) – 100 сэндвичей железосцинтиллятор размером 20×20 см; 4 сцинтилляционных счетчика размером 1×1 м, расположенные за GDA-100.

3. Триггер и статистика. При наборе данных использовался очень простой, практически “minimum bias” триггер:

$$\text{Tr} = S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot \bar{C}_1 \cdot \check{C}_2 \cdot \bar{S}_{\text{bk}} \cdot (\Sigma_{\text{GAMS}} > \text{MIP}),$$

представляющий собой комбинацию пучковых сцинтилляционных счетчиков, $\check{C}_{1,2}$ черенковских пороговых счетчиков (\check{C}_1 выделяет пионы, \check{C}_2 – пионы и каоны), S_{bk} – “beam-killer”, расположенный в центральном отверстии для пролета пучка GAMS. $\Sigma_{\text{GAMS}} >$

MIP представляет собой требование для аналоговой суммы амплитуд каналов GAMS превышать сигнал MIP. Установка ОКА набирает данные с 2010 г., полная накопленная статистика соответствует $\sim 10\text{MK}_{e3}$ распадам. В данном анализе мы используем часть статистики, набранную в 2012 и 2013 годах.

4. Исследования K_{e3} распада. Реконструкция события начинается с реконструкции пучкового трека в $\text{BPC}_1 \div \text{BPC}_4$, затем происходит поиск вторичных треков в $\text{PC}_1 \div \text{PC}_8$; $\text{ST}_1 \div \text{ST}_3$; $\text{DT}_1 \div \text{DT}_2$ и отбираются события с одним хорошо реконструированным положительно заряженным треком. Также накладываются условия на качество реконструированной вершины распада. Следующий шаг состоит в поиске ливней в калориметрах GAMS-2000 и EGS. Электрон идентифицируется по величине отношения энергии ливня к импульсу ассоциированного трека. На рис. 2 приведено отношение E/p . Частицы, для которых $0.8 < E/p < 1.2$, идентифицировались как электроны/позитроны. Для дальнейшего анализа отбирались события с одним положительно заряженным треком, идентифицированным как позитрон и двумя дополнительными ливнями в электромагнитных калориметрах. Массовый спектр $\gamma\gamma$ содержит явный пик на массе π^0 ($M_{\pi^0} = 134.9$ МэВ)

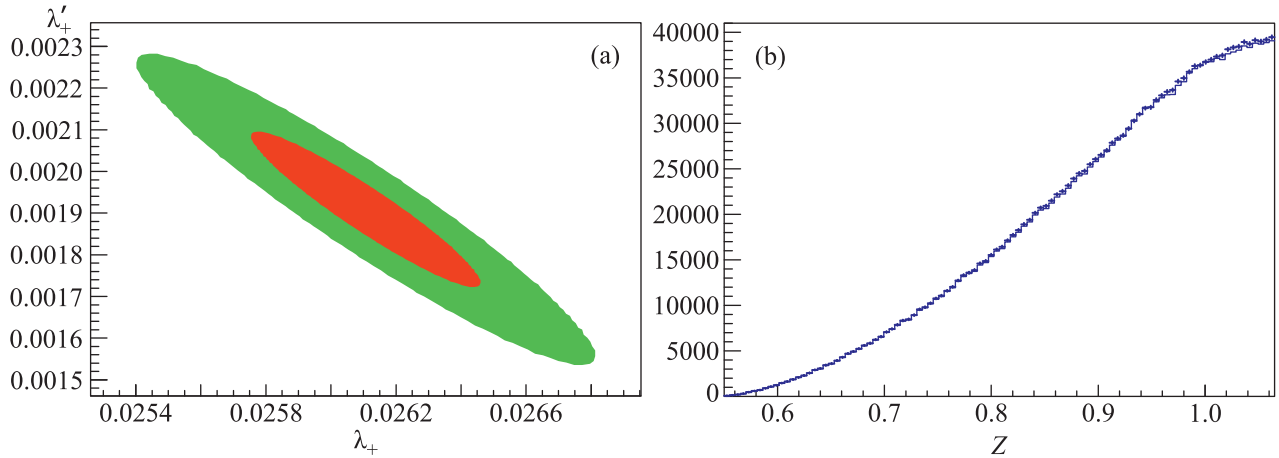


Рис. 3. (Цветной онлайн) (а) – Корреляция $\lambda' - \lambda''$. (б) – Проекция диаграммы Далица на ось z . Данные – точки с ошибками, гистограмма – фит, соответствующий первой строке табл. 1

с разрешением ~ 8.5 МэВ. Для подавления основного фона от распада $K_{\pi 2}$ используется угол между направлениями импульса пучкового трека \mathbf{p}_K и системы $e\pi$ ($\mathbf{p}_e + \mathbf{p}_\pi$). Распределение для этого угла показано на рис. 2. Вклад фоновых событий ясно виден как острый пик при малых углах. Сигнальные события отбирались при условии $\alpha > 1.6$ мрад. Также требовалось, чтобы 2С кинематический фит $K \rightarrow e\nu\pi^0$ сходилась для сигнальных событий. В конечном итоге, для анализа были отобраны 5.25М событий. Вклад фоновых событий оценен на основании анализа Монте-Карло и составляет менее 1%.

Анализ. Анализ форм-факторов основан на фите распределения событий на диаграмме Далица в переменных $y = 2E_e^*/M_K$ и $z = 2E_\pi^*/M_K$, где E_e^* , E_π^* – энергии позитрона и π^0 в системе покоя каона. Из анализа Монте-Карло можно установить, что фоновые события сосредоточены на периферии диаграммы Далица. В наиболее общем виде Лоренц-инвариантный матричный элемента для распада $K^+ \rightarrow l^+\nu\pi^0$ может быть представлен как [4]:

$$M = \frac{-G_F V_{us}}{2} \bar{u}(p_\nu)(1 + \gamma^5) \times \left[((P_K + P_\pi)_\alpha f_+ + (P_K - P_\pi)_\alpha f_-) \gamma^\alpha - 2m_K f_S - i \frac{2f_T}{m_K} \sigma_{\alpha\beta} P_K^\alpha P_\pi^\beta \right] v(p_l).$$

Представленное выражение содержит векторный, скалярный и тензорный члены. f_\pm являются функциями $t = (P_K - P_\pi)^2$.

В Стандартной Модели (СМ) диаграмма распада с обменом W -бозоном приводит к чисто векторному вкладу. Часть векторного вклада, пропорциональная

f_- , может быть сведена (с помощью уравнений Дирака) к скалярному формфактору, пропорциональному $(m_l/2m_K)f_-$. Этим малым вкладом можно пренебречь в случае K_{e3} . Для формфактора $f_+(t)$ могут быть использованы различные параметризации. Первой параметризацией является разложение в ряд Тэйлора: $f_+(t) = f_+(0)(1 + \lambda'_+ t/m_{\pi^+}^2 + \frac{1}{2}\lambda''_+ t^2/m_{\pi^+}^4)$; она обычно используется для сравнения с предсказаниями ЧРПТ. Альтернативной параметризацией является полюсная форма: $f_+(t) = f_+(0) \frac{m_V^2}{m_V^2 - t}$. В последнее время используется также относительно новая дисперсионная параметризация [5, 6]: $f_+(t) = f_+(0) \exp(\frac{t}{m_\pi^2}(\Lambda_+ + H(t)))$. Здесь $H(t)$ – определенная функция.

В процессе фита формфакторов λ_+ , f_S , f_T использовалась процедура, которая подробно описана в [7]. Эта процедура позволяет устранить систематические ошибки, возникающие из-за “миграции” событий на диаграмме Далица из-за конечного экспериментального разрешения. Радиационные поправки из [8] учитывались с помощью введения веса для каждого Монте-Карло события.

Результаты и сравнение с теорией. Фит линейной параметризацией приводит к значению $\lambda_+ = (2.95 \pm 0.022) \times 10^{-2}$. Этот параметр можно сравнить с очень старым предсказанием ЧРПТ $O(p^4)$ [9]: $\lambda_+^{\text{ChPT}} = (31.0 \pm 0.6) \times 10^{-3}$. Результаты других фитов представлены в табл. 1, на первой строке которой “стандартный” фит с двумя параметрами: линейным и квадратичным наклонами. Вклад квадратичного члена является весьма существенным. Мы также наблюдаем сильную корреляцию между линейным и квадратичным членами (см. рис. 3) на котором проиллюстрировано качество фита.

Таблица 1. Результаты фита данных с различными представлениями форм-факторов

$\lambda'_+ (10^{-2})$	m [ГэВ]	$\Lambda_+ (10^{-2})$	$\lambda''_+ (10^{-3})$	$f_t/f_+(0) (10^{-2})$	$f_s/f_+(0) (10^{-3})$
$2.611^{+0.035}_{-0.035}$	$0.891^{+0.003}_{-0.003}$	$2.458^{+0.018}_{-0.018}$	$1.91^{+0.19}_{-0.18}$		
$2.612^{+0.035}_{-0.035}$	$0.891^{+0.004}_{-0.006}$	$2.459^{+0.019}_{-0.018}$	$1.90^{+0.19}_{-0.19}$	$-1.24^{+1.6}_{-1.3}$ $-1.85^{+2.4}_{-1.2}$ $-1.14^{+1.5}_{-1.3}$	$0.13^{+3.8}_{-4.6}$ $1.95^{+3.7}_{-7.4}$ $-0.13^{+4.5}_{-3.9}$

Вторая и третья строки табл. 1 соответствуют полюсному и дисперсионному фита соответственно. Следующие строки представляют квадратичный, полюсной и дисперсионный фита с дополнительными тензорными и скалярными вкладками. Видно, что вклады f_S и f_T сравнимы с нулем.

Основные вклады в систематическую ошибку связаны с вариацией Z -координаты положения вершины распада и величины отбора по углу α . Вклады в систематическую ошибку от вариаций Z и α составляют $(0.021, 0.014) \cdot 10^{-2}$ и $(0.11, 0.06) \cdot 10^{-3}$ для λ'_+ и λ''_+ соответственно. Окончательно мы получаем результаты для квадратичного фита: $\lambda'_+ = (2.611 \pm \pm 0.035 \pm 0.028) \cdot 10^{-2}$ и $\lambda''_+ = (1.91^{+0.19}_{-0.18} \pm 0.14) \cdot 10^{-3}$. Квадратичный вклад (λ''_+) можно сравнить со значением $\sim 2.2 \cdot 10^{-3}$, полученным в вычислениях ChPT $O(p^6)$ [10].

Значение для полюсного фита можно сравнить со значением массы K^* [11]: $M_{K^*} = 891.66 \pm 0.26$ МэВ. Значения пределов на параметры F_S и F_T могут быть интерпретированы в терминах модели скалярных лепто-кварков (LQ). Соответствующая диаграмма с обменом LQ должна быть добавлена к SM-диаграмме с обменом W -бозоном. Используя тождества Фирца для матричного элемента LQ, можно получить:

$$(\bar{s}\mu)(\bar{\nu}u) = -\frac{1}{2}(\bar{s}u)(\bar{\nu}\mu) - \frac{1}{8}(\bar{s}\sigma_{\alpha\beta}u)(\bar{\nu}\sigma^{\alpha\beta}\mu),$$

где первый член является тензорным, а второй – скалярным. Можно установить соотношение между f_S, f_T и параметром LQ-модели Λ_{LQ} [12]. Полученные ограничения позволяют найти $\Lambda_{LQ} > 3.5$ ТэВ на уровне достоверности 95 %.

Приведенные выше результаты можно сравнить с результатами, полученными на установке ISTRA+ [7], принимая во внимание, что нормировка параметров в нашем анализе и в [7] различна. В данном анализе используется $t/m_{\pi^+}^2$ (вместо $t/m_{\pi^0}^2$ в [7]) и введен фактор $1/2$ перед квадратичным членом для воспроизведения разложения в ряд Тэйлора в со-

ответствии с конвенцией PDG (см. [11], с. 994–996). Результаты [7] в конвенции PDG имеют вид [11]: $\lambda_+ = (2.966 \pm 0.050) \times 10^{-2}$ для чисто линейного фита и $\lambda'_+ = (2.485 \pm 0.163) \times 10^{-2}$, $\lambda''_+ = (1.92 \pm 0.62) \times 10^{-3}$ для квадратичного. Можно отметить, что при увеличении статистики в ~ 6 раз мы имеем очень хорошее согласие текущего и предыдущего анализов. Квадратичный член в параметризации форм-фактора становится более статистически значимым с новыми измерениями, что приводит к существенному уменьшению статистических ошибок в параметрах λ'_+ и λ''_+ .

1. V. I. Garkusha, F. N. Novoskoltsev, V. N. Zapolsky, and V. G. Zarucheisky. *Preprint* IHEP 2003-4.
2. A. Citron, G. Dammertz, M. Grunder, L. Husson, R. Lehm, and H. Lengeler, *Nucl. Instr. and Meth.* **164**, 31 (1979).
3. A. Ageev, A. Bakay, L. Kalashnikov, A. Kaltchuk, S. Kozub, M. Muraviev, A. Orlov, A. P. Orlov, V. Solomko, S. Unjakov, A. Khartchenko, L. Shirshov, Ju. Shovkun, and S. Zintchenko, in: *Proc. of RuPAC*, Zvenigorod, Russia (2008), p. 282.
4. H. Steiner, S. Natali, F. Romano et al. (Collaboration), *Phys. Lett. B* **36**, 521 (1971).
5. V. Bernard, M. Oertel, E. Passemar, and J. Stern, *Phys. Lett. B* **638**, 480 (2006).
6. V. Bernard, M. Oertel, E. Passemar, and J. Stern, *Phys. Rev. D* **80**, 034034 (2009).
7. O. P. Yushchenko, S. A. Akimenko, G. I. Britvich et al. (Collaboration), *Phys. Lett. B* **589**, 111 (2004).
8. V. Cirigliano, M. Knecht, H. Neufeld, H. Rupertsberger, and P. Talavera, *Eur. Phys. J. C* **23**, 121 (2002).
9. J. Gasser and H. Leutwyler, *Nucl. Phys. B* **250**, 517 (1985).
10. J. Bijnens and P. Talavera, *Nucl. Phys. B* **669**, 341 (2003).
11. C. Patrignani, K. Agashe, G. Aielli et al. (Particle Data Group), *Chin. Phys. C* **40**, 100001 (2016).
12. V. V. Kiselev, A. K. Likhoded, and V. F. Obraztsov, *hep-ph-0204066* (2002).