

УДК 539.12.13

О ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ НА ПРОТОННОМ СИНХРОТРОНЕ У-70 РАСПАДОВ $K^\pm \rightarrow \pi^0 e^\pm \nu(\bar{\nu})$ И $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 \pi^0$

Н. Л. Русакович, В. Б. Флягин

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Приводятся последние данные, свидетельствующие об уменьшении расхождений результатов экспериментов рассмотренных распадов K^\pm -мезонов и их противоречий с теорией.

The latest data for K^\pm decay modes considered testify to decrease of the divergence between experimental results and their disagreement with theory.

ВВЕДЕНИЕ

С целью изучения распадов заряженных K -мезонов в пучках серпуховского ускорителя У-70 на протяжении последних лет выполнен ряд точных экспериментов на установках ИСТРА, «Гиперон» и «Станция мечения нейтрино». Сравнение некоторых результатов, полученных в этих экспериментах, с мировыми данными было сделано нами недавно в [1]. К сожалению, новые важные данные, полученные на установке ИСТРА + появились после того, как статья была принята к печати, и не вошли в [1]. Мы сочли нужным устранить указанный недостаток и представить ниже полные данные, которые заметно меняют картину в целом.

ФОРМФАКТОРЫ РАСПАДА $K^\pm \rightarrow \pi^0 e^\pm \nu(\bar{\nu})(Ke3)$

В наиболее общем виде полулептонные распады K_{l3} описываются четырьмя формфакторами: векторным, аксиально-векторным, скалярным (f_s) и тензорным (f_t). Выражение матричного элемента распада $Ke3$ в этих обозначениях можно видеть, например, в [1] или у PDG (Particle Data Group) [2]. В рамках же стандартной V-A-теории, в пренебрежении массой электрона, матричный элемент распада $Ke3$ зависит только от одного векторного формфактора f_+ , выражение для которого в функции от квадрата четырехимпульса q^2 , переданного лептонной паре, имеет вид

$$f_+(q^2) = f(0)(1 + \lambda_+ q^2 / M_{\pi^0}^2). \quad (1)$$

Здесь λ_+ (параметр наклона формфактора) определяется из эксперимента; $f(0)$ и λ_+ могут быть также рассчитаны и теоретически.

Первое указание [3] на возможное отличие от нуля скалярного, тензорного и векторного формфакторов было получено в 1971 г. (результаты этого и последующих экспериментов можно видеть ниже, в табл. 1). С целью проверки этих данных, при нашем

участии, был поставлен эксперимент [4] на установке «Гиперон». На статистике $3,2 \cdot 10^4$ полностью восстановленных событий распада выполнен следующий анализ.

1. Из одномерного распределения событий по q^2 определен параметр наклона векторного формфактора λ_+ (табл. 1) в параметризации (1) при уровне значимости (significance level [2]) $SL = 21\%$.

2. При фитировании диаграммы Далитца выражением квадрата матричного элемента с учетом только векторного формфактора f_+ в его линейной параметризации по q^2 получено близкое к первому значение λ_+ при $SL = 9\%$.

3. В то же время фит диаграммы Далитца матричным элементом общего вида со скалярным и тензорным формфакторами дает для них значения, отличные от нуля на три и четыре стандартных отклонения соответственно при $SL = 16\%$.

Последний результат (f_s и $f_t \neq 0$) не позволил исключить из рассмотрения возможное отклонение от стандартной теории, что, по-видимому, и явилось мотивацией для постановки новых экспериментов.

Результаты эксперимента КЕК-Е246 опубликованы в двух работах [5, 6]. Более поздняя работа [6] включает статистику предыдущей. В эксперименте изучались распады «остановившихся» K^+ -мезонов.

Последний эксперимент [7] сделан на установке ИСТРА+, расположенной на пучке отрицательно заряженных частиц серпуховского ускорителя. Здесь, как и в основных предыдущих работах, исследовались «распады на лету». Эксперимент отличается высокой статистической обеспеченностью: анализ базировался на 550000 событиях распада.

Таблица 1. $K^\pm e3$ -формфакторы

Эксперимент/год	λ_+	f_s/f_+	f_t/f_+
Steiner H. et al./1971 [3]	$0,012^{+0,011}_{-0,014}$	$0,14^{+0,03}_{-0,04}$	$0,24^{+0,16}_{-0,14}$
«Гиперон»/1991 [4]	$0,0284 \pm 0,0027 \pm 0,0020$	$0,070 \pm 0,016 \pm 0,016$	$0,53^{+0,09}_{-0,10} \pm 0,10$
КЕК-Е246/2000 [5]	$0,0278 \pm 0,0026 \pm 0,0030$	$-0,002 \pm 0,026 \pm 0,014$	$-0,01 \pm 0,14 \pm 0,09$
КЕК-Е246/2001 [6]*	$0,0278 \pm 0,0017 \pm 0,0015$	$0,004 \pm 0,016 \pm 0,007$	$0,019 \pm 0,080 \pm 0,038$
Среднее PDG/2002 [2]	$0,0278 \pm 0,0019$	$0,045 \pm 0,033^{**}$	$0,31 \pm 0,25^{***}$
ИСТРА+/2003 [7]*	$0,0286 \pm 0,0008 \pm 0,0006$	$0,002^{+0,020}_{-0,022} \pm 0,003$	$0,021^{+0,064}_{-0,075} \pm 0,026$

Примечание. λ_+ определены в V-A-теории; f_s/f_+ и f_t/f_+ — для полного матричного элемента. Первые ошибки статистические, вторые — систематические.

* Данные не включены в таблицы PDG/2002.
 ,* Ошибки включают масштабные факторы: ** = 1, 8; *** = 2, 4.

Как видно из табл. 1, все данные о λ_+ прекрасно согласуются между собой. Напротив, результаты для f_s/f_+ и f_t/f_+ расходятся. Именно поэтому PDG/2002 ввела масштабные факторы при вычислении их средних величин. Определенные таким образом средние величины ставят под сомнение выход за рамки стандартной теории в этом распаде. Новые данные о формфакторах f_s и f_t , полученные на КЕК и У-70 и не вошедшие в мировые средние величины 2002 г., серьезно подтверждают этот вывод.

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МАТРИЧНОГО ЭЛЕМЕНТА РАСПАДА $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 \pi^0$

Для описания нелептонных распадов каонов применяют несколько подходов, самым распространенным из которых является метод эффективных киральных лагранжианов с различной методикой описания адронизации кварков. Такой подход является модельно-зависимым, следовательно, эти теоретические идеи нуждаются в точных опытных данных. Одним из наиболее сложных для экспериментального исследования среди нелептонных распадов каонов является распад $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 \pi^0$, данные о котором имели сильный разброс.

Квадрат матричного элемента этого распада параметризуется как

$$|M|^2 \propto 1 + gX + hX^2 + kY^2,$$

где $X = (s_3 - s_0)/m_\pi^2$, $Y = (s_2 - s_1)/m_\pi^2$, $s_0 = (m_K^2 + m_{\pi^+}^2 + m_{\pi^0}^2)/3$, $s_i = (p_K - p_i)^2$, p_i — четырехимпульсы, $i = (1, 2, 3)$, $i = 3$ для π^\pm -мезона.

Основным преимуществом постановки экспериментов [8] и [9], в которых изучался этот распад на установках ИСТРА+ (2003) и «Гиперон» (1998), являлось измерение энергий и импульсов всех частиц, участвующих в реакции (6С-fit-гипотеза). Благодаря такому подходу в нашем эксперименте [9], например, получен набор событий с очень низким, около 0,5%, уровнем фона.

Наивысшая точность данных, основанная на большой статистике (252000 отобранных для анализа событий), стала результатом последней по времени работы [8]:

$$\begin{aligned} g &= 0,627 \pm 0,0004 \pm 0,010, \\ h &= 0,046 \pm 0,004 \pm 0,0012, \\ k &= 0,001 \pm 0,001 \pm 0,002. \end{aligned}$$

Здесь первая ошибка статистическая, вторая — систематическая.

Сравнение данных экспериментов ИСТРА+, «Гиперон» и «Станция мечения нейтрино» с мировыми данными представляют рис. 1 и 2. При отборе значимых данных мы следовали, в основном, принципам PDG.

Как видно из рис. 1, разброс параметра g все еще остается значительным. Причем существенное расхождение происходит в наиболее точных экспериментах (PDG при вычислении ошибки мировой средней величины ввела большой масштабный фактор, увеличив ошибку в 2,7 раза). Новые точные данные эксперимента ИСТРА+, практически совпавшие со средней величиной PDG/2002, изменили картину в лучшую сторону [8].

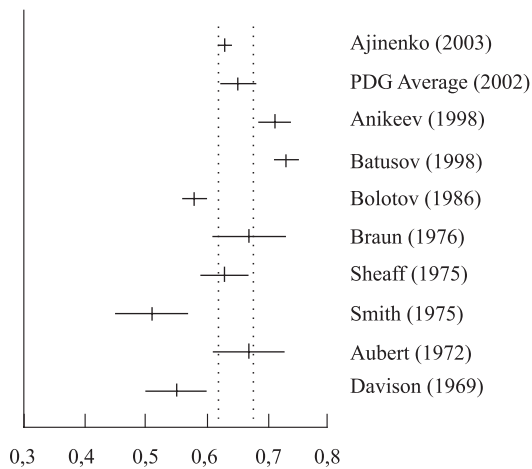
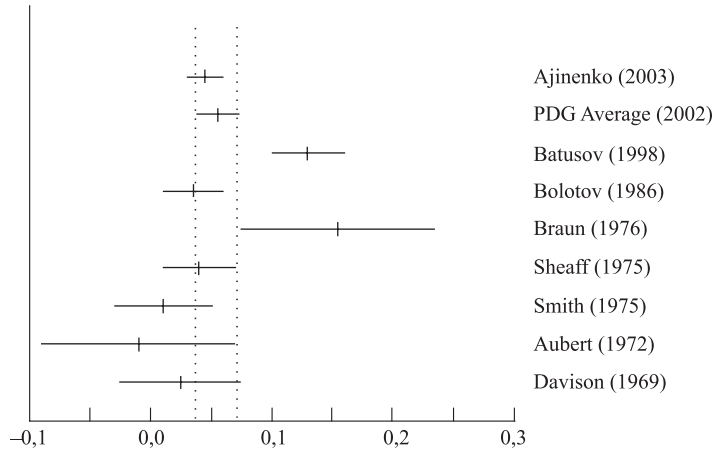


Рис. 1. Экспериментальные мировые данные параметра g распадов K^\pm -мезонов [2, 8–16]. Ссылка Anikeev et al. [10] не включена в мировую среднюю PDG [2]. Данные, имеющие большие ошибки, не показаны

Рис. 2. Экспериментальные данные параметра h [2, 8, 9, 11–16]

Что касается параметра h (рис. 2), то его разброс меньше вследствие больших ошибок измерений. Последняя измеренная величина h [8] и здесь почти совпала со средней величиной PDG/2002.

Вероятно, здесь следует упомянуть результат [17] $g = 0,518 \pm 0,039$ (при фиксированном $h = 0$) эксперимента КЕК-E246 (2000), полученный на статистике 815 событий и не учитываемый в PDG при определении мирового среднего. Мы должны отметить также, что утверждение авторов [17] о том, что их измерение распада $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 \pi^0$ — *первое* полностью кинематически определенное, неверно. Как говорилось выше, первым таким экспериментом был «Гиперон» [9] и [18].

Параметр k измерен с большой погрешностью, и до эксперимента [9] данные о нем не упоминались PDG. Мировое среднее для этого параметра пока не определено. В табл. 2 сведены немногие имеющиеся результаты (без комментариев).

Таблица 2. Результаты измерений квадратичного параметра k в матричном элементе распада $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 \pi^0$

ИСТРА	$0,011 \pm 0,007$	Bolotov/1986 [11]
«Гиперон»	$0,0197 \pm 0,0045 \pm 0,0029$	Batusov/1998 [9]
КЕК-E246	$0,043 \pm 0,020$	Shin/2000 [17]
ИСТРА+	$0,001 \pm 0,001 \pm 0,002$	Ajinenko/2003 [8]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Данные о рассмотренных распадах мезонов, полученные на пучках серпуховского ускорителя, и особенно в экспериментах на установке ИСТРА+, являются рекордными по точности. Расхождение между данными о $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 \pi^0$ -распаде последних экспериментов уменьшилось.

• Последние данные о величинах скалярного и тензорного формфакторов f_s/f_+ и f_t/f_+ распадов K_{e3}^{\pm} , скорее всего, свидетельствуют об их равенстве нулю, что согласуется с общепринятой теорией.

Благодарности. Авторы выражают свою признательность В. Д. Кекелидзе и А. А. Белькову за полезное обсуждение проблемы и всем участникам совместных экспериментов за плодотворное сотрудничество.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Русакович Н. Л., Флягин В. Б.* // Письма в ЭЧАЯ. 2004. Т. 1, № 1(118). С. 50.
2. *Hagiwara K. et al.* // Phys. Rev. D. 2002. V. 66.
3. *Stainer H. et al.* // Phys. Lett. B. 1971. V. 36. P. 521.
4. *Akimenko S. et al.* // Phys. Lett. B. 1991. V. 259. P. 225.
5. *Shimizu S. et al.* // Phys. Lett. B. 2000. V. 495. P. 33.
6. *Levchenko A. S. et al.* // Yad. Fiz. 2002. V. 65. P. 2294.
7. *Ajinenko I. V. et al.* // Phys. Lett. B. 2003. V. 574. P. 14.
8. *Ajinenko I. V. et al.* // Ibid. V. 567. P. 159.
9. *Batusov V. Y. et al.* // Nucl. Phys. B. 1998. V. 516. P. 3.
10. *Anikeev V. et al.* // JINR Rapid Commun. 1998. No. 1[87]. P. 13.
11. *Болотов В. и др.* // ЯФ. 1986. Т. 44. С. 73.
12. *Braun H. M. et al.* // LNC. 1976. V. 17. P. 521.
13. *Sheaff M.* // Phys. Rev. D. 1975. V. 12. P. 2570.
14. *Smith R. M. et al.* // Nucl. Phys. B. 1975. V. 91. P. 45.
15. *Aubert B. et al.* // Nuovo Cim. A. 1972. V. 12. P. 509.
16. *Davison D. et al.* // Phys. Rev. 1969. V. 180. P. 1333.
17. *Shin H. et al.* // Eur. Phys. J. C. 2000. V. 12. P. 627.
18. *Batusov V. Y. et al.* // Proc. of the 28th Intern. Conf. on HEP, Warsaw, 1996. P. 1200.

Получено 15 апреля 2004 г.