

УДК 530.1;539.12

Редкий распад $K_L^0 \rightarrow \pi^0 + \nu + \bar{\nu}$ на ускорителе У-70 (ИФВЭ, Протвино)

Н. В. МАКСИМЕНКО, А. С. КУРИЛИН, С. В. ПОДОЛЬСКИЙ, М. Ю. ДОРОШЕНКО,
В. В. АНДРЕЕВ, А. А. ЮЧКО, А. М. СЕЙТЛИЕВ, Ю. Ю. СТЕПАНЕНКО

1. Введение

Среди всех способов экспериментальной проверки Стандартной Модели (СМ) измерение относительной вероятности распада $K_L^0 \rightarrow \pi^0 + \nu + \bar{\nu}$ общепризнано одним из наиболее приоритетных.

В целом ряде работ [1,2 и др.] показывается чувствительность данного процесса как к эффектам “новой” (вне СМ) физики, так и к параметрам самой СМ. Его непосредственное измерение долгое время оставалось недостижимой целью, поскольку этот процесс очень редок: $Br(K_L^0 \rightarrow \pi^0 + \nu + \bar{\nu}) \approx 10^{-11}$. Первым экспериментом, непосредственно направленным на измерение относительной вероятности процесса $K_L^0 \rightarrow \pi^0 + \nu + \bar{\nu}$, является E391a, проводимый в КЕК (Япония). Однако указанный эксперимент недостаточен для открытия распада (при условии справедливости предсказаний СМ), т.к. проектное значение чувствительности составляет $\sim 10^{-9}$. Основной задачей эксперимента E391a является проверка метода регистрации процесса $K_L^0 \rightarrow \pi^0 + \nu + \bar{\nu}$ для последующего его применения в более чувствительных экспериментах.

1.1 История экспериментального изучения

Первым экспериментальным исследованием распада $K_L^0 \rightarrow \pi^0 + \nu + \bar{\nu}$ является работа Литтенберга [3], в которой были проанализированы данные, накопленные в эксперименте [4] по изучению относительной вероятности процесса $K_L^0 \rightarrow \pi^0 + \pi^0$. Результатом данной работы стало первое значение верхнего предела

$$Br(K_L^0 \rightarrow \pi^0 + \nu + \bar{\nu}) < 7,6 \times 10^{-3}.$$

Позднее значение относительной вероятности распада $K_L^0 \rightarrow \pi^0 + \nu + \bar{\nu}$ измерялось в других экспериментах в качестве побочной задачи. Наиболее точным результатом является значение верхнего предела относительной вероятности распада, полученной КTeV [5]:

$$Br(K_L^0 \rightarrow \pi^0 + \nu + \bar{\nu}) < 5,9 \times 10^{-7}.$$

В настоящее время E391a является единственным действующим экспериментом по измерению относительной вероятности процесса $K_L^0 \rightarrow \pi^0 + \nu + \bar{\nu}$ и в текущее время осуществляется анализ набранной в эксперименте статистики.

Относительная вероятность изучаемого распада может быть измерена и на других ускорителях. Существует возможность постановки эксперимента на ускорителе У-70 Института физики высоких энергий (Протвино, Россия) – эксперимент KLOD [6], на ускорителе Национальной Лаборатории в Брукхевене (США, BNL – Brookhaven National Laboratory) – эксперимент КОPIO [7], Лаборатории им. Э. Ферми (Fermilab) [8] – эксперимент КАМI, на строящемся ускорительном комплексе J-PARC[9](Япония).

Активные работы для подготовки новых экспериментов сосредоточены вокруг трёх ускорительных комплексов: CERN, JPARC, ИФВЭ. Наиболее подготовленными к

проведению этих экспериментов являются коллаборации, создающие экспериментальные установки для ускорителей JPARC и ИФВЭ, поскольку в обоих центрах полностью завершены расчёты и проектирование каналов K_L^0 -мезонов, а инициаторами их проведения являются опытные члены коллаборации E391. В то же время, ускоритель JPARC ещё строится, перспективы достижения проектной интенсивности этого комплекса не вполне ясны и уже официально объявлено о задержках ввода его в эксплуатацию. Этот эксперимент находится в аналогичной стадии, что и KLOE, а именно на стадии подготовки детального проекта установки.

1.2 Принципы регистрации распада

Методика регистрации в эксперименте основана на наблюдении распада по сигналам $K_L^0 \rightarrow \pi^0 (\pi^0 \rightarrow 2\gamma) + \nu + \bar{\nu}$ (ничто) при распаде K_L^0 налету. Поскольку среднее время жизни продукта распада $K_L^0 \rightarrow \pi^0 + \nu + \bar{\nu} - \pi^0$ мезона крайне мало ($\sim 10^{-17}$ с) [10], то после рождения в исследуемой моде он практически сразу с вероятностью $\sim 98,8\%$ распадается на два γ -кванта, которые и регистрируются электромагнитным калориметром установки.

Энергии и координаты двух фотонов измеряются, а “ничто” подтверждается отсутствием дополнительного сигнала в детекторах, окружающих рабочую область распада. Событие $K_L^0 \rightarrow \pi^0 (\pi^0 \rightarrow 2\gamma) + \nu + \bar{\nu}$ идентифицируется по наличию вершины в рабочей зоне установки и величине импульса в заданном диапазоне.

Экспериментальная установка состоит из электромагнитного калориметра и вето-системы. Поскольку осуществляется поиск очень редкого процесса, происходящего на фоне большого числа различных распадов K_L^0 -мезона, а также частиц, которые не могут быть выведены магнитной системой из пучка, прежде всего нейтральных, необходимо иметь развитую вето-систему, подавляющую большинство из них.

Те из фоновых процессов, которые в конечном состоянии ничего не содержат, кроме двух регистрируемых γ -квантов, частично могут быть отсеяны путём реконструкции кинематических величин.

При наличии герметичной вето-системы и ограничений по поперечному импульсу большинство фоновых распадов может быть подавлено.

Геометрия детектора (Рис. 1) определяется в первую очередь жесткими требованиями к герметичности измерительного объема для эффективной регистрации γ -квантов. Весь вакуумный объем установки делится на основной распадный объем и его входную вето-секцию (концепция двойной распадной камеры). Такая конфигурация необходима для эффективного подавления фона как от взаимодействия пучковых частиц с веществом, так и от распадов K_L^0 (Λ) на всем пути от мишени до входа в установку. Измерительный объем (до задней стенки переднего калориметра) должен быть откачан до уровня высокого вакуума ($\sim 10^{-7}$ торр) для подавления фона от взаимодействия K_L^0 и нейтронов с остаточным газом в самой установке.

Для реализации этого рассматривается возможность создания двойной вакуумной системы. Основной объем внешнего металлического кожуха, содержащий детектирующие элементы установки, может быть откачан до уровня $\sim (10^{-3} - 10^{-4})$ торр. Сам распадный объем и прилегающая к нему область выше по пучку отделены тонкой (0.19 мм, $4 \times 10^{-4} X_0$) CH_2 -мембраной, показанной внутренним контуром на рисунке, и поддерживаются на уровне высокого вакуума.

К элементам основного распадного объема относятся передний электромагнитный калориметр, вето-система распадного объема и передний вето-годоскоп. Детекторы

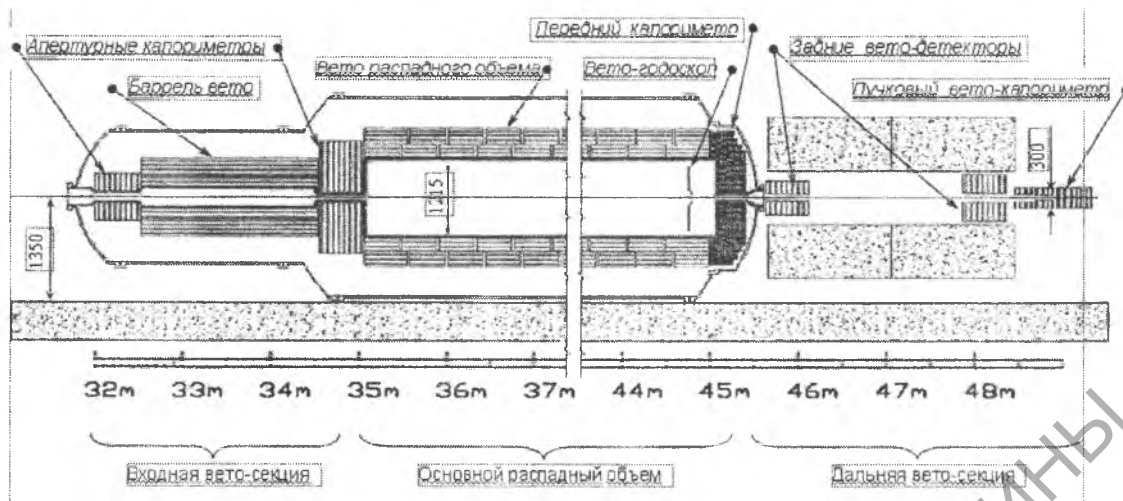


Рисунок 1 — Общая схема установки

входной вето-секции – 2 апертурных калориметра и переднее баррель-вето. Замыкает установку дальняя вето-секция, находящаяся вне вакуумного кожуха и состоящая из 2-х задних вето-детекторов и пучкового вето-калориметра. Рисунок 1 демонстрирует некоторые геометрические размеры основных детекторов. Представленная шкала расстояний имеет свое начало в голове канала, в месте расположения мишени.

2. Нейтральный пучок К-мезонов на ускорителе У-70 ИФВЭ

Успех эксперимента по поиску экстремально редкого распада $K_L^0 \rightarrow \pi^0 + \nu + \bar{\nu}$ в огромной степени определяется характеристиками нейтрального пучка K_L^0 . Основными функциональными элементами канала K_L^0 -мезонов (Рисунок 2) являются [11]:

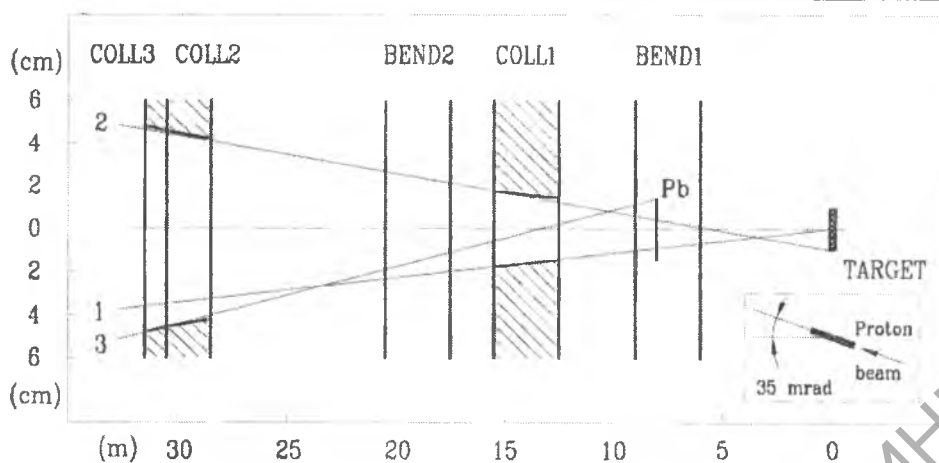
1 мишень (*TARGET*), представляющая собой стержень из меди длиной 25 см и диаметром 1 см, в котором взаимодействует $\sim 80\%$ первичных протонов. Мишень помещена в специальный бокс, за которым следует охранный коллиматор длиной 4.5 м.;

2 два дипольных магнита (*BEND1*, *BEND2*), очищающих пучок K_L^0 -мезонов от заряженных частиц. Для снижения примеси γ -квантов в первый магнит помещен конвертер из свинца (*Pb*) длиной 5 см и диаметром 2.8 см.;

3 три коллиматора (*COLL1* ÷ *COLL3*), формирующих пучок K_L^0 -мезонов с необходимыми пространственными и угловыми размерами;

4 два поглотителя (*DUMP1*, *DUMP2*), первый из которых предназначен для поглощения не провзаимодействовавших в мишени протонов, вторичных заряженных частиц, а также нейтральных частиц, не попавших в акцептанс канала. Нейтральные частицы, прошедшие через весь канал и экспериментальную установку, поглощаются во втором поглотителе.

Угол между направлением протонного пучка на мишень и осью канала составляет 35 мрад. Это значение было выбрано как компромисс между интенсивностью пучка K_L^0 -мезонов и значением импульса, соответствующего максимуму распределения каонов по импульсам. Длина канала от мишени до конца последнего коллиматора составляет 31.5 м.

Рисунок 2 — Схема канала K_L^0 -мезонов.

Основную роль в формировании пучка K_L^0 -мезонов выполняют стальные немагнитные коллиматоры $COLL1 \div COLL3$, имеющие коническую форму внутренней поверхности. Эти поверхности были выбраны посредством следующих построений:

Коллиматор 1. Линия 1, соединяющая центр мишени и точку с координатами $Z = 35 \text{ м}$, $R = 4 \text{ см}$, определяет конус с половинным углом $\theta = 1.14 \text{ мрад}$. Часть поверхности этого конуса и есть внутренняя поверхность $COLL1$.

Коллиматор 2. Линия 2, проходящая через ось канала, соединяет точку с координатами $Z = 0$, $R = 1 \text{ см}$ и край внутренней поверхности на выходе из $COLL1$. Внутренняя поверхность $COLL2$ параллельна поверхности конуса, определяемого линией 2. Между этими поверхностями есть зазор в 1 мм , поэтому с мишени $COLL2$ напрямую не виден.

Коллиматор 3. Линия 3, также проходящая через ось канала, соединяет точку с координатами $Z = 8 \text{ м}$, $R = 1.4 \text{ см}$ и край внутренней поверхности на выходе из $COLL2$. Внутренняя поверхность $COLL3$ в точности соответствует поверхности конуса, определяемого линией 3.

Построенные таким образом коллиматоры достаточно эффективны. При этом первый коллиматор собственно и формирует пучок K_L^0 -мезонов, а второй и третий — понижают уровень частиц, рассеянных в конвертере и первом коллиматоре. Длина коллиматоров составляет 3, 2 и 1 м соответственно.

2.1 Параметры формируемого пучка

В расчетах [12] использовалась упрощенная модель канала, построенная в соответствии со схемой (см. Рисунок 2). При этом расчеты ограничивались только приосевой частью канала радиусом 30 см . Модель дипольного магнита представляет собой цилиндр длиной 3 м и радиусом 30 см с однородным полем внутри и значением магнитной индукции 18 кГс . Везде, где возможно, предполагался вакуум. Расчеты проводились для первичного протонного пучка с энергией 60 ГэВ и интенсивностью 10^{13} частиц за цикл. Протоны были сфокусированы на мишени в пятно с размерами $(\sigma_x \times \sigma_y) = (1.5 \times 1.5) \text{ мм}^2$. Сначала были получены пространственные, угловые и импульсные распределения K_L^0 -мезонов, нейтронов и γ -квантов на выходе из мишени. Расчеты проводились на программе *GEANT-3.21* с адронным генератором *FLUKA*. Порог обрезания по энергии в этих и последующих расчетах был равен 10 МэВ . Полученные таким образом распреде-

ления затем были использованы в расчетах параметров формируемого пучка в районе экспериментальной установки.

Везде, если специально не оговорено, приводятся и обсуждаются результаты расчетов для сечения канала с координатой $Z = 35$ м, что соответствует началу основной части экспериментальной установки. Рисунок 3 демонстрирует распределения пучка K_L^0 -мезонов по полному P и поперечному P_T импульсам. Интенсивность пучка составляет 5.4×10^7 частиц в цикле, а импульсы в максимуме своих распределений равны примерно 6.5 ГэВ/с и 3.5 МэВ/с.

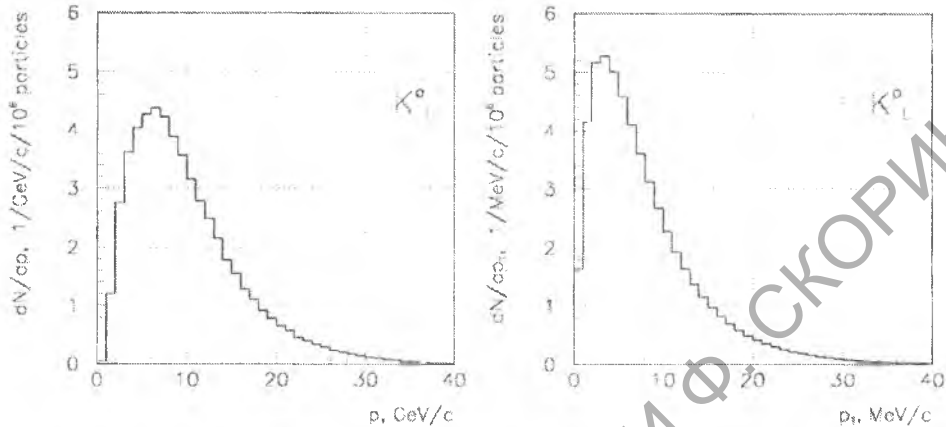


Рисунок 3 — Распределения пучка K_L^0 -мезонов по полному P и поперечному P_T импульсам

Пространственный и угловой профили пучка K_L^0 -мезонов показаны на Рисунок 4. Центральную часть этих распределений в основном составляют не рассеянные в конвертере и коллиматорах частицы. Доля таких частиц составляет не менее 99%, и они сосредоточены в пределах радиуса $R \sim 5$ см и угла $\theta \sim 1.6$ мрад.

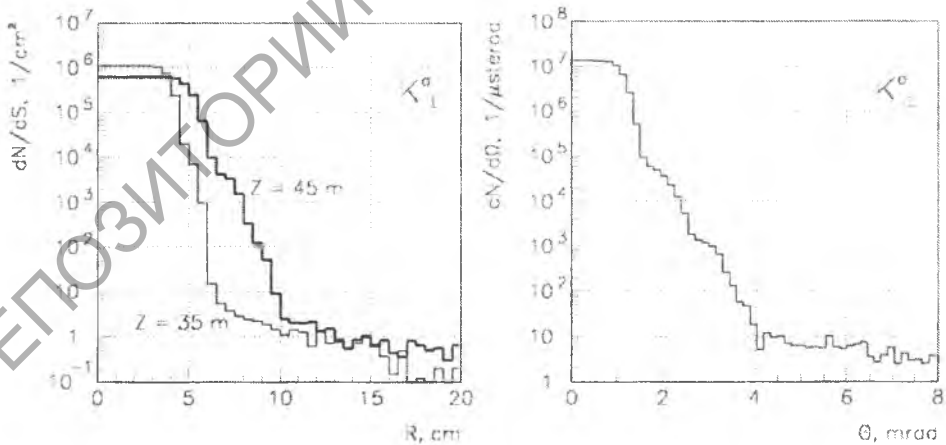


Рисунок 4 — Плотности пространственного и углового распределений пучка K_L^0 -мезонов

3. Заключение

В работе представлены результаты расчётов экспериментальной установки KLOD, а также пучка K_L^0 -мезонов, который можно получить на ускорителе У-70 Инсти-

тута Физики Высоких Энергий (Россия, Протвино). Полученные результаты интенсивности и профиля пучка свидетельствуют о возможности экспериментального измерения распада $K_L^0 \rightarrow \pi^0 + \nu + \bar{\nu}$ на ускорителе У-70 ИФВЭ.

Abstract. Rare decay $K_L^0 \rightarrow \pi^0 + \nu + \bar{\nu}$ on the accelerator U-70 (IHEP, Protvino) is considered in the paper. The computer model of the experimental plant KLOD is presented. Calculations of K_L^0 -meson beam for accelerator U-70 (IHEP, Protvino) are realized. Calculated beam intensity proves that the experimental detection $K_L^0 \rightarrow \pi^0 + \nu + \bar{\nu}$ on the accelerator U-70 is possible.

Литература

1. D.Bryman, et.al. Int. J. Mod. Phys. 2006 v. A21, p. 487-504.
2. N. G Deshpande et.al. Phys. Rev. D70 2004, p. 093003.
3. CP-violation decay $K_L^0 \rightarrow \pi^0 + \nu + \bar{\nu}$ / Littenberg L. // Phys. Rev. D. — 1989. — Vol. 39 №11. — P. 3322-3324.
4. Measurement of the Decay Rate of $K_L^0 \rightarrow \pi^0 + \pi^0$ / J. W. Cronin [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 1967. — Vol. 18 №1. — P. 25-29
5. Search for the decay $K_L^0 \rightarrow \pi^0 + \nu + \bar{\nu}$ using $\pi^0 \rightarrow e^+ + e^- + \gamma$ / A. Alavi-Harati [et al.] // Phys. Rev. D. — 2000. — Vol. 61. — P. 072006 (1–5).
6. A. Kurilin. Search for $K_L^0 \rightarrow \pi^0 + \nu + \bar{\nu}$ Decay (KLOD project at IHEP) / Kurilin A. // IV International conference on non-accelerator new physics, 2003 [Electronic resource]. — 2003. — Mode of access: <http://nanp.dubna.ru/2003/talks/kurilin.pdf>. — Date of access: 15.02.2007.
7. Prospects for measuring $K_L^+ \rightarrow \pi^+ + \nu + \bar{\nu}$ and $K_L^0 \rightarrow \pi^0 + \nu + \bar{\nu}$ at BHL / D. Bryman, L. Littenberg // Nucl. Phys. B. — 2001. — Vol. 99B. — P. 61-69.
8. The KAMI experiment at Fermilab / T. Yamanaka // Nucl. Phys. B. — 2001. — Vol. 99, Iss. 1-2. P. 104-109.
9. Eidelman S., Hayes K. G., Olive K. A. [et al]. The review of particle physics // Phys. Lett. B. — 2004. — V. 592, N 1-4. — P. 1.
10. T. Yamanaka [et al.] “Proposal for $K_L^0 \rightarrow \pi^0 + \nu + \bar{\nu}$ Experiment at J-Parc” / Yamanaka T. // Japan Physics Accelerator Research Complex [Electronic resource]. — 2003. — Mode of access: http://j-parc.jp/NuclPart/pac_0606/pdf/p14-Yamanaka.pdf. — Date of access: 15.02.2007.
11. О возможности создания экспериментальной установки для поиска и исследования распада $K_L^0 \rightarrow \pi^0 + \nu + \bar{\nu}$, на ускорителе У-70 ИФВЭ. Эксперимент KLOD / А.С. Курилин [и др.] // Препринт ИФВЭ. — 2007, №8.
12. F. Novoskoltsev [et al.] “KL beam line at Institute For High Energy Physics (U-70 Accelerator, Protvino), Calculated Parameters” / Novoskoltsev F. // RuPAC 2004 - Contributions to the Proceedings [Electronic resource]. — 2004. — Mode of access: <http://epaper.kek.jp/r04/>. — Date of access: 15.02.2007.