

ДОЛГОВРЕМЕННАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ КВАРЦЕВОГО ПРОПОРЦИОНАЛЬНОГО СЧЕТЧИКА

© 2019 г. Д. Н. Абдурашитов^{а,*}, В. Г. Чернов^а

^аИнститут ядерных исследований РАН

Россия, 117312, Москва, просп. 60-летия Октября, 7а

* e-mail: jna@inr.ru

Поступила в редакцию 21.03.2018 г.

После доработки 21.03.2018 г.

Принята к публикации 25.04.2018 г.

Исследована долговременная стабильность счетных и спектрометрических свойств цельнопаяного кварцевого пропорционального счетчика с точки зрения возможности его использования для поиска примеси стерильных нейтрино. Представлены результаты непрерывных измерений положения *K*-пика в спектре энерговыделений при распаде микродозы ³⁷Ar, помещенной в счетчик в смеси с CO₂. Показано, что газовое усиление остается стабильным в пределах 0.1% на протяжении одного месяца непрерывных измерений при начальной активности изотопа порядка 100 Бк. Указанная оценка стабильности в 5 раз лучше оценок для кварцевых счетчиков, опубликованных до настоящего времени.

DOI: 10.1134/S0032816218060162

1. ВВЕДЕНИЕ

Ненулевая масса нейтрино и существование темной материи, природа которой неизвестна, свидетельствуют о том, что Стандартная модель физики частиц не полна. Одним из наиболее естественных кандидатов на роль темной материи являются массивные стерильные нейтрино, в связи с чем прямые лабораторные поиски таких нейтрино представляют особый интерес.

В работе [1] был предложен эксперимент по поиску гипотетической примеси стерильных нейтрино в β -распаде трития. Примесь может быть обнаружена по специфическому искажению энергетического спектра тритиевых электронов в газовом пропорциональном счетчике. Искажение спектра ожидается очень слабым, поэтому крайне важно исследовать все возможные источники систематической ошибки при измерении. В [1] было показано, что точности 0.1% для таких систематических факторов, как коэффициент подложки в спектре и доля неразличимых случайных наложений, достаточно для постановки верхнего предела на примесь вплоть до 10^{-5} для стерильных нейтрино с массой в диапазоне 1–8 кэВ. В работе [2] проведено детальное исследование отклика пропорционального счетчика на электроны с энергией порядка 10 кэВ, в результате которого были определены основные факторы, искажающие энергетический спектр электронов.

Поиск слабой примеси стерильных нейтрино предполагает длительный набор данных, поэтому высокая стабильность характеристик счетчика является необходимым условием проведения измерений. Этому требованию удовлетворяют цельнопаяные кварцевые счетчики с углеродным катодным напылением, изготовленные по технологии [3, 4]. Газовое усиление таких счетчиков, по данным [5], остается стабильным в пределах 0.5% в течение длительного времени измерений. Однако из-за технологической сложности и узости области применения такие счетчики не производятся серийно, и поэтому не представляется возможным воспользоваться методически выверенными значениями важнейших параметров счетчиков от производителя. Указанная выше стабильность газового усиления 0.5% является одной из лучших опубликованных оценок; в то же время эта оценка получена как побочный результат калибровок энергетической шкалы счетчиков внешними источниками.

В настоящей работе приводятся результаты прямого исследования долговременной стабильности счетных и спектрометрических свойств кварцевого счетчика с точки зрения возможности его использования для поиска примеси стерильных нейтрино. С целью воспроизведения условий измерений с тритием для исследования выбран

газообразный радиоактивный источник ^{37}Ag , добавляемый в рабочую смесь счетчика.

2. ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Для исследования стабильности был использован пропорциональный счетчик, изготовленный на основе кварцевой трубки длиной 200 мм с внутренним диаметром 4 мм. Анодом служила вольфрамовая нить $\varnothing 12$ мкм, в качестве катода использовался тонкий (1 мкм) слой пиролитического углерода, нанесенный на внутреннюю поверхность кварцевой трубки. Счетчик был заполнен чистым CO_2 при давлении 1 атм и установлен в экранирующую коробку из медного листа, оборудованную зарядочувствительным предусилителем (з.ч.п.у.). В качестве источника ионизирующего излучения использовался короткоживущий изотоп ^{37}Ag , наработанный на протонном циклотроне Научно-исследовательского института ядерной физики Московского государственного университета (НИИЯФ МГУ) по реакции $^{40}\text{Ca}(p, \alpha)^{37}\text{Ag}$ при энергии протонов 7 МэВ. Изотоп ^{37}Ag вводился в рабочую смесь в виде микропримеси, активность которой на начало измерений составила примерно 110 Бк. При распаде ^{37}Ag энергия выделяется в виде оже-электронов и характеристического рентгеновского излучения дочернего ^{37}Cl . Основные пики в спектре энерговыделений формируются в процессе K - и L -захвата. K -пик соответствует энерговыделению 2.82 кэВ; L -пик — 0.27 кэВ [6] при условии, что рентгеновское излучение поглощается в объеме детектора. Период полураспада ^{37}Ag составляет 35.04 ± 0.04 сут [7].

Источником высокого напряжения для счетчика служил отдельный блок HARSHAW NV-25A, подаваемое напряжение 1350 В, паспортное значение вариации выходного напряжения $\leq 0.03\%$ за сутки. Сигнал з.ч.п.у. подавался на спектрометрический усилитель ORTEC 673 с временем формирования 0.25 мкс. С выхода тыльной панели усиленный сигнал поступал на усилитель-формирователь ORTEC 4890 с регулируемым порогом, а с выхода передней панели — на канал “0” регистратора Lan12-PCI.

Регистратор Lan12-PCI производства “Руднев-Шиляев” имеет в своем составе 12-битный амплитудно-цифровой преобразователь (а.ц.п.) и работает на частоте оцифровки 12.5 МГц. В качестве триггера для Lan12-PCI используется TTL-выход ORTEC 4890, подаваемый на вход канала “1” регистратора. Регистратор Lan12-PCI управляется отдельной программой нашего производства, работающей с максимальным приоритетом в окне командной строки системы Windows 7. Каждый импульсный сигнал от счетчика, оцифрованный в кадре размером 256 точек, записывается в файл;

Амплитуда импульса, канал а.ц.п.

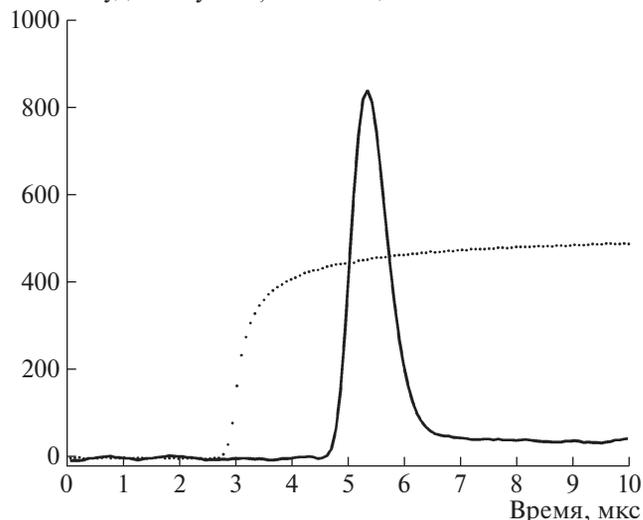


Рис. 1. Пример кадра осциллограммы сигналов от пропорционального счетчика. Пунктирная линия — сигнал с выхода зарядочувствительного предусилителя, сплошная — сигнал с выхода спектрометрического усилителя.

обработка кадров проводится в режиме оффлайн в среде GNU Octave (см. [8]). Пример оцифрованного кадра показан на рис. 1, где представлен исходный сигнал з.ч.п.у. и соответствующий ему сформированный сигнал на выходе усилителя ORTEC 673. Амплитуда сформированного сигнала определяется с учетом значения базовой линии в кадре, усредненной на участке в несколько микросекунд до появления сигнала.

Для контроля стабильности электронного тракта использовался прецизионный генератор ORTEC 419, сигнал с которого подавался на спектрометрический усилитель вместо з.ч.п.у. счетчика. Паспортное значение суточной вариации амплитуды генератора $< 1\%$. Набор сигналов от генератора проводился примерно раз в сутки в течение получаса с частотой 50 Гц. Измеренное мертвое время системы регистрации составило 200 ± 1 мкс и использовалось для коррекции живого времени набора сигналов.

Амплитудный спектр от радиоактивного источника характеризует газовое усиление пропорционального счетчика, поэтому за меру стабильности принято положение K -пика ^{37}Ag , выраженное в каналах а.ц.п. регистратора (рис. 2). Набор кадров данных осуществляется непрерывно в течение длительного времени, сравнимого с периодом полураспада источника. Каждый час записывается отдельный файл, содержащий записи кадров и момент старта набора. По каждому файлу строится амплитудный спектр, в котором проводится поиск положения, интенсивности и энергетического разрешения K -пика.

Положение пика находится как математическое ожидание $M = \sum iN(i)/\sum N(i)$ амплитуды сигнала в области K -пика; оценкой разрешения служит дисперсия $S = [\sum (M - i)^2 N(i)/\sum N(i)]^{1/2}$ амплитуды. Здесь i – амплитуда сигнала, выраженная в каналах а.ц.п., а $N(i)$ – число отсчетов в i -м канале. Суммирование проводится в пределах области K -пика: от 550 до 1150 каналов а.ц.п. За интенсивность пика принята простая сумма чисел событий в указанных границах, поправленная на живое время измерения.

Найденные значения привязываются к моменту старта текущего часового спектра, тем самым формируется последовательный по времени набор перечисленных параметров пика. Возможным систематическим смещением оценок положения, разрешения и интенсивности пика в данных измерениях можно пренебречь, поскольку интерес представляет в первую очередь динамика оценок.

В процессе набора данных со счетчика проводился также мониторинг температуры воздуха в помещении и основных узлов счетной системы: источника высокого напряжения и спектрометрического усилителя. В качестве монитора использовалась система на базе USB-контроллера MB110-8A производства “Овен” с датчиками Pt1000. Датчик № 1 был установлен на верхней панели блока HARSHAW NV-25A, датчик № 2 – на боковой панели ORTEC 673. Датчик № 3 измеряет температуру воздуха в помещении.

3. ИЗМЕРЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Измерения проводились в зимнее время при наличии постоянного центрального отопления в помещении. Объем помещения составлял 420 м³ и способствовал демпфированию изменений температуры воздуха. Набор данных продолжался в течение ~30 сут. Получасовые перерывы в измерениях, связанные с контрольным набором сигналов от генератора, использовались для изъятия файлов суточных данных с целью оперативной обработки. Интенсивность K -пика в единичном часовом спектре составила около $3 \cdot 10^5$ событий в начале измерений. Полное количество распадов ^{37}Ag , зарегистрированное в процессе измерений, составило более $4 \cdot 10^8$. Величина заряда, собранного на анод, оценивалась как $\geq 10^{14}$ электронов вторичной ионизации (примерно 10^{-5} Кл) при газовом усилении порядка 10^4 .

На рис. 2 представлен амплитудный спектр сигналов от счетчика, суммированный по всем файлам. K -пик расположен в 804 канале а.ц.п. регистратора, L -пик – в 58 канале. Наблюдается подложка в спектре между пиками, имеющая характерный наклон. Дисперсия K -пика составляет

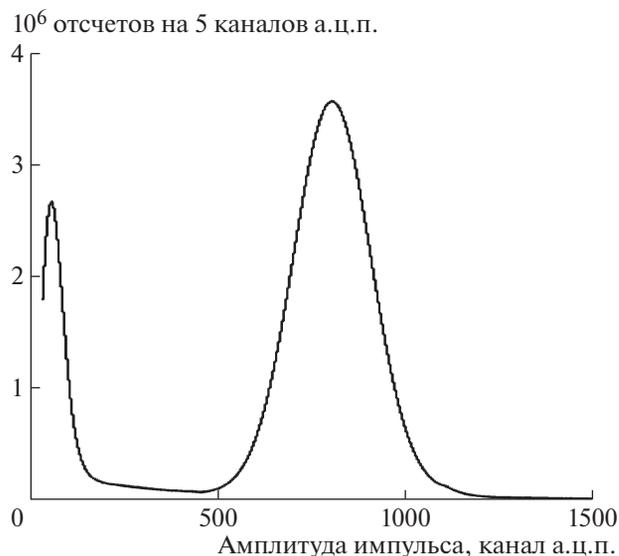


Рис. 2. Набранный за все время измерений амплитудный спектр сигналов пропорционального счетчика с рабочей смесью с примесью ^{37}Ag . Число событий в спектре $4 \cdot 10^8$, K -пик расположен в 804-м канале а.ц.п., L -пик – в 58-м канале.

102 канала а.ц.п., что соответствует энергетическому разрешению 30%.

На рис. 3 точками показана динамика интенсивности K -пика в процессе измерений. Число отсчетов в каждом измерении поправлено на живое время; величина поправки составила около 2% в начале измерений. Экспериментальные значения фитированы экспоненциальной функцией со свободными параметрами, результат фитирования показан сплошной линией. Фитирование проведено штатными средствами вычислительной среды GNU Octave; оценка периода полураспада составила 35.1 сут.

На рис. 4 отображена динамика положения K -пика (кривая 1) и положения пика от генератора (кривая 2); кривыми 3–5 показаны изменения температуры в ходе измерений. Динамика положения K -пика отображена точками, каждая из которых соответствует значению оценки положения пика в отдельном часовом спектре. Сплошная линия показывает положение, усредненное по всем точкам, и соответствует значению 804.2 ± 0.9 канала а.ц.п. регистратора. Усредненное значение положения контрольного пика от генератора (кривая 2) составляет 776.9 ± 0.6 канала а.ц.п. Ошибки указанных значений соответствуют стандартному отклонению. Кривыми 3–5 показаны соответственно изменения температуры датчика № 1, установленного на блоке высокого напряжения, датчика № 2 на спектрометрическом усилителе и датчика № 3, отображающего температуру воздуха в помещении. После прогре-

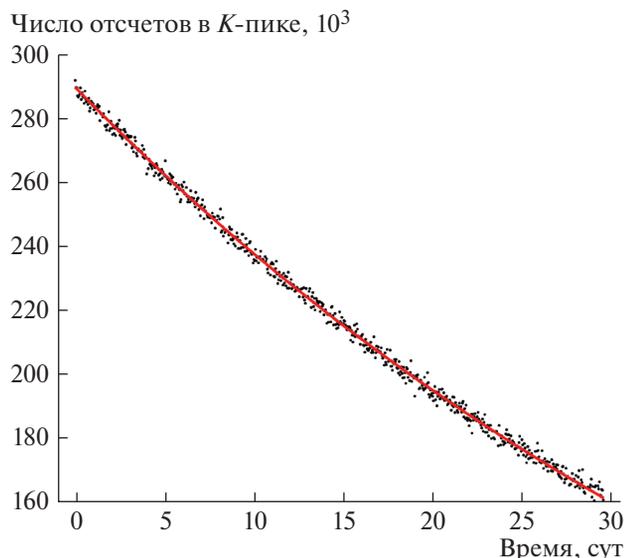


Рис. 3. Динамика интенсивности скорости счета под K -пиком ^{37}Ag . Точки – число отсчетов под K -пиком в каждом часовом спектре ^{37}Ag , поправленное на живое время измерений; сплошная линия – результат фитирования экспонентой.

ва узлов счетной системы колебания температуры воздуха и блоков остаются в пределах $\pm 1.5^\circ\text{C}$, что соответствует размаху $\pm 0.5\%$.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты проведенных измерений в целом соответствуют представлениям о процессе распада ^{37}Ag в пропорциональном счетчике и об отклике счетчика на распад. В частности, специфический наклон подложки в спектре между пиками свидетельствует о преобладании пристеночного эффекта над краевым (см. [2]). Доминирование пристеночного эффекта характерно для длинного счетчика, у которого диаметр много меньше его длины; именно такой счетчик использовался в проведенных измерениях.

Положение L -пика в амплитудном спектре соответствует энергии 0.20 кэВ. Это согласуется со схемой излучения в распаде ^{37}Ag . После K -захвата примерно 8% событий заполнения вакансии на K -оболочке сопровождаются испусканием рентгеновского излучения 2.62 кэВ и оже-электронов с суммарной энергией 0.20 кэВ. Однако в CO_2 при давлении 1 атм и указанных размерах счетчика поглощается не более 10% рентгеновских лучей. Это приводит к тому, что значительная часть K -захватов дает вклад в спектр в области L -пика с энерговыделением 0.20 кэВ.

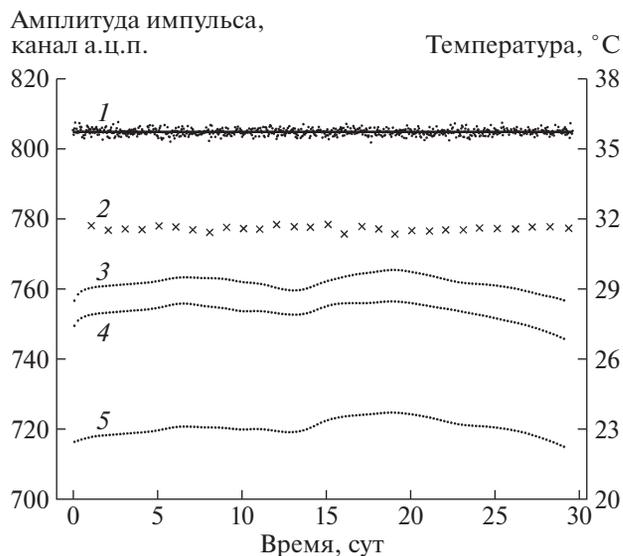


Рис. 4. 1 – динамика положения K -пика ^{37}Ag , точки – оцененные положения K -пика в каждом часовом спектре ^{37}Ag , линия – среднее значение положения K -пика; 2 – положение пика от генератора; 3–5 – показания датчиков температуры: на корпусе блока высокого напряжения (3), на корпусе спектрометрического усилителя (4), воздуха в помещении (5). Положение пиков указано в каналах а.ц.п. (левая шкала), температура датчиков – в градусах Цельсия (правая шкала).

Далее, оцененный период полураспада составил 35.1 ± 0.1 сут, что согласуется с литературными данными для ^{37}Ag – 35.04 ± 0.04 сут.

Не наблюдается значимой корреляции положения K -пика с изменением температуры воздуха и узлов счетной системы; контроль электронного тракта также свидетельствует о стабильности электронного усиления в процессе измерений. Таким образом, можно сделать заключение о долговременной стабильности кварцевого счетчика. В условиях данного исследования газовое усиление оставалось стабильным в пределах $\pm 0.1\%$ (уровень достоверности 0.68) в течение длительного времени непрерывной работы. Это указывает на отсутствие как значимых утечек рабочего газа и процессов сорбции-десорбции различных примесей, так и деградации рабочей смеси и конструкционных материалов пропорционального счетчика. Кроме того, полученное значение стабильности газового усиления в 5 раз лучше оценок, опубликованных до настоящего времени.

Необходимо также отметить, что величина заряда, собранного на анод в процессе данных измерений, на 3–4 порядка меньше величин, ожидаемых при работе с тритиевыми электронами. Заметная деградация дрейфовых камер наблюдается, начиная с заряда ~ 0.1 Кл, собранного на 1 см анодной нити [9]; при этом деградируют в основ-

ном рабочие смеси с органическими компонентами. Заключение о долговременной стабильности в таком контексте следует рассматривать как базовую оценку характеристики цельнопаяного кварцевого счетчика, которую можно брать за основу для планирования эксперимента с тритием.

В заключение авторы выражают признательность Т. Чувильской, В. Янцу и С. Задорожному за предоставленную возможность и помощь в проведении измерений, а также И. Ткачеву, В. Пантуеву и А. Нозику за плодотворное обсуждение и конструктивную критику результатов эксперимента. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-02-00361-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абдурашитов Д.Н., Берлев А.И., Лиховид Н.А., Лохов А.В., Ткачев И.И., Янц В.Э.* // ЯФ. 2015. Т. 78. № 3–4. doi 10.7868/S0044002715020026
2. *Abdurashitov D.N., Malyshkin Yu.M., Matushko V.L., Suerfu B.* // Nucl. Instrum. and Methods B. 2016. V. 373. P. 5. doi 10.1016/j.nimb.2016.02.029
3. *Кузьминов В.В., Лиховид Н.А., Новиков В.М.* // ПТЭ. 1990. № 4. С. 86.
4. *Danshin S., Kopylov A., Yants V.* // Nucl. Instrum. and Methods A. 1994. V. 349. № 2–3. P. 466. doi 10.1016/0168-9002(94)91212-2
5. *Abdurashitov J.N., Gavrin V.N., Girin S.V., Gorbachev V.V., Gurkina P.P., Ibragimova T.V., Kalikhov A.V., Khairnasov N.G., Knodel T.V., Matveev V.A., Mirmov I.N., Shikhin A.A., Veretenkin E.P., Vermul V.M., Yants V.E.* et al. // Phys. Rev. 2006. V. C73. P. 045805. doi 10.1103/PhysRevC.73.045805
6. *Browne E., Firestone R.B.* Table of Radioactive Isotopes. N.Y.: Wiley, 1986. ISBN: 047184909X
7. *Endt P.M.* // Nucl. Phys. 1990. V. A521. P. 1. doi 10.1016/0375-9474(90)90598-G
8. <http://www.gnu.org/software/octave>
9. *Blum W., Riegler W., Rolandi L.* Particles Detection with Drift Chambers. / 2nd ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008. ISBN: 978-3-540-76683-4