

15

## Газовый детектор ионизирующего излучения для регистрации когерентного рассеяния нейтрино на ядрах

© А.В. Копылов, И.В. Орехов, В.В. Петухов, А.Е. Соломатин

Институт ядерных исследований РАН, Москва  
E-mail: beril@inr.ru

Поступило в Редакцию 5 сентября 2013 г.

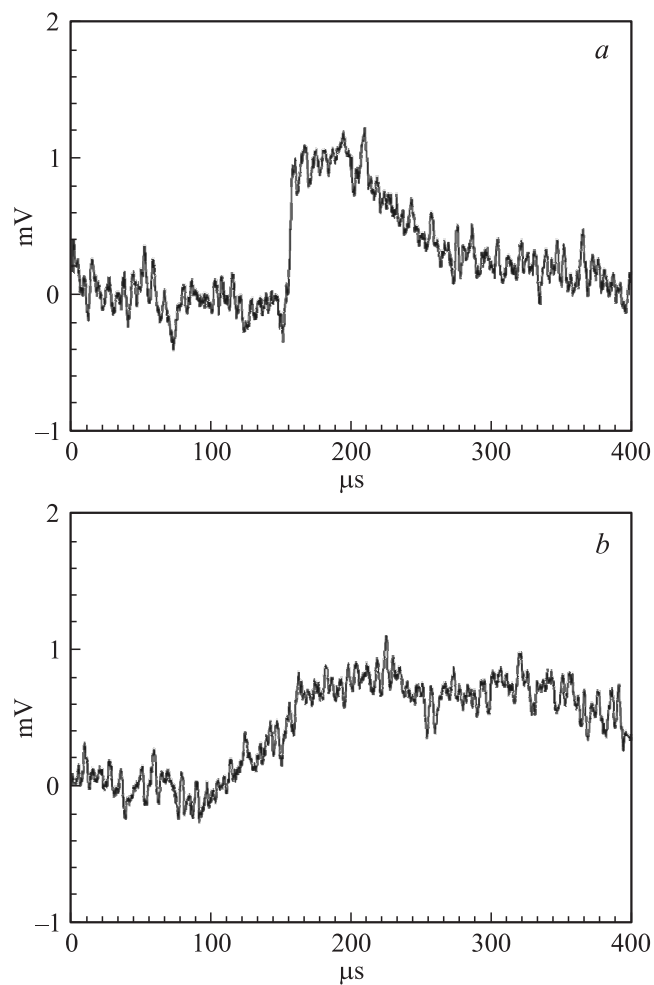
Предложен метод регистрации когерентного рассеяния реакторных антинейтрино на ядрах с помощью трехсекционного низкофонового пропорционального счетчика. В качестве рабочего вещества планируется использовать аргон и ксенон. На стендовой установке показано, что дискриминация по форме импульса позволяет эффективно подавить фон от электромагнитных наводок и микрофонного эффекта в области, где ожидается эффект от когерентного рассеяния нейтрино на ядрах (от 20 до 100 eV), с фактором примерно  $10^3$ . Рассмотрены вопросы фона от нейтронов, генерированных мюонами космических лучей. Предложена схема экспериментальной установки.

При малых отдачах ядра, когда нейтрино не „видит“ составляющие ядро нуклоны, а рассеивается на ядре как волна на решетке, рассеяние происходит когерентно посредством обмена  $Z^0$ -бозоном со всеми нуклонами ядра одновременно. Вследствие когерентности сечение рассеяния пропорционально квадрату числа нейтронов в ядре (вклад протонов входит в выражение для сечения с малым весом, примерно 0.08) и может достигать настолько больших величин, что даже при массе мишени 1 kg на пучке антинейтрино от реактора скорость счета может достигать нескольких событий в сутки. Этот

процесс был описан еще в 70-х годах прошлого столетия [1,2], неоднократно обсуждался в последующих работах [3–6], однако до сих пор никем не был зарегистрирован ввиду исключительно малой (менее 600 eV для антинейтрино от реактора) энергии отдачи ядра, причем только небольшая доля (примерно 15%) кинетической энергии ядра отдачи преобразуется в энергию ионизирующего излучения. Открытие этого процесса стало бы большим достижением современной физики, и этим объясняется интерес экспериментаторов к этой задаче. При выборе газового пропорционального счетчика в качестве детектора когерентного рассеяния делается ставка на следующие преимущества использования этого метода:

1. Высокий коэффициент газового усиления ( $> 10^4$ ).
2. Возможность работать с высоким давлением газа ( $\sim 1$  МПа), чтобы набрать необходимую массу.
3. Хорошая сигнатура события по форме импульса при высоком давлении (характерный фронт и спад импульса).
4. Возможность дискриминации электромагнитных шумов и микрофонного эффекта по форме импульса.
5. Наличие эффективных методов высокой очистки газа.
6. Детектор может быть изготовлен только из сверхчистых материалов, без ФЭУ как источника радиации, и пр.
7. Возможность легко менять рабочее вещество (газ) в детекторе, не меняя конфигурации, что важно для проведения сравнительных измерений в одних и тех же условиях.

На стендовой установке нами были измерены энергетические спектры импульсов от ионизации аргона. Для калибровки использовался радиоактивный источник  $^{55}\text{Fe}$  с энергией рентгеновского излучения 5.9 keV. Пропорциональный счетчик имел диаметр катода 37 mm, диаметр нити 20  $\mu\text{m}$ , заполнялся аргон-метановой смесью при давлениях 100 и 300 kPa. Импульсы с выхода зарядочувствительного преусилителя с чувствительностью примерно 0.4 V/pC подавались на плату 8-битного АЦП. Целью измерений было посмотреть, насколько эффективно можно дискриминировать фон от электромагнитных наводок и микрофонного эффекта в области ниже 100 eV, т.е. там, где ожидается эффект от когерентного рассеяния. На рис. 1 показаны кадры длительностью 400  $\mu\text{s}$ , на одном из которых хорошо виден импульс с сигнатурой, характерной для точечной ионизации, а на другом — импульс от электромагнитных помех.



**Рис. 1.** Импульсы с выхода предусилителя: от точечной ионизации (*a*) и от электромагнитной наводки (*b*), чувствительность тракта 100 мсV/еV.

Электромагнитные наводки имеют, как правило, нерегулярную форму, импульсы от микрофонного эффекта отличаются характерной „звуковой“ частотой колебаний с синусоидальной (или близкой к ней)

формой. Для импульсов, вызванных ионизацией в газе, характерны короткий (несколько микросекунд) фронт, соответствующий времени дрейфа ионов к катоду и длинный (сотни микросекунд) спад, определяемый временем восстановления нулевого уровня в зарядочувствительном предусилителе. Такие события в нашем случае могли быть обусловлены внутренней радиоактивностью счетчика, электронной эмиссией со стенок или ионизацией, вызванной прохождением частиц космических лучей. Амплитуда импульсов от таких событий может быть мала, поскольку спектр одноэлектронных импульсов имеет широкое распределение (распределение Поля).

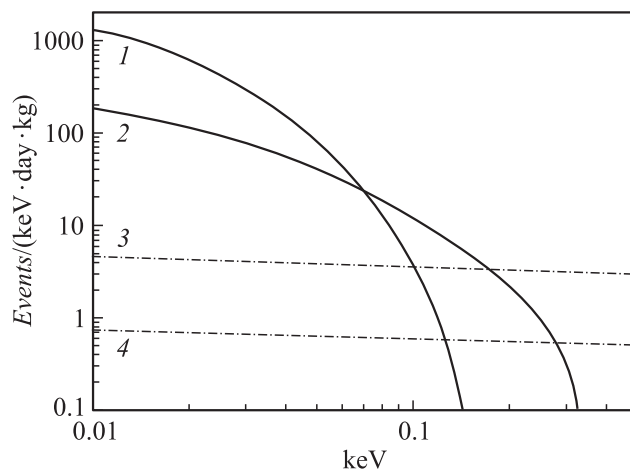
Амплитуды пиков от калибровочного источника позволили установить близкую к линейной шкалу преобразования энергия–амплитуда и определить коэффициент газового усиления  $4 \cdot 10^4$ . В области от 20 до 100 eV (где ожидаются события от когерентного рассеяния нейтрино) дискриминация по форме импульса подавляла фон от электромагнитных наводок и микрофонного эффекта с фактором примерно  $10^3$ , т.е. эта область энергий может быть вполне использована для счета единичных событий. Аналогичная задача регистрации событий с малыми энерговыделениями решается также с помощью криогенных детекторов. Так, еще в 1997 г. нами совместно с лабораторией профессора С. Витале из Генуи (Италия) были впервые в мире зарегистрированы пики 57 и 112 eV от распада изотопа  $^7\text{Be}$  [7]. В этой работе порог регистрации импульсов составил примерно 40 eV. Этого удалось достичь именно благодаря эффективной дискриминации по форме импульса электромагнитных помех и микрофонного эффекта. Ожидаемая скорость счета от когерентного рассеяния реакторных антинейтрино на аргоне составляет несколько событий в сутки на килограмм аргона в диапазоне от 20 до 100 eV. Для того чтобы набрать массу аргона порядка 1 kg, детектор должен обладать значительным объемом даже при давлении газа 1 МПа. В то же время, чтобы получить коэффициент газового усиления  $10^4$  и выше при высоком напряжении порядка 3 kV, диаметр катода должен быть примерно 40 mm. Поэтому для увеличения объема счетчика нами выбрана конструкция с наружным дрейфовым объемом диаметром 140 mm. Помимо этого, снаружи этот объем окружен слоем кольцевого счетчика в качестве антисовпадения по корпускулярному и рентгеновскому излучению и одновременно пассивной защиты от флуоресценции из стенки. Вся сборка помещена в цилиндрический корпус из титана в качестве относительно чистого по



**Рис. 2.** Детектор перед сборкой.

радиоактивным примесям материала. На рис. 2 приведена фотография с общим видом этого счетчика.

Планируется использовать сборку из 16 таких счетчиков, работающих каждый на свой предусилитель и плату оцифровки. Счетчики будут уложены слоями в 4 ряда, по 4 счетчика в каждом ряду. Ориентировочный размер сборки  $100 \times 100 \times 100$  см. Для защиты от фона, генерированного мюонами космических лучей, нейтронами и гамма-излучением, сопровождаемым работой реактора, а также от внутренней радиоактивности, планируется разместить эту сборку в низкофоновом боксе. Он будет сложен из железных блоков, толщина стенки — 30 см, внутренняя поверхность будет облицована слоем борированного полиэтилена толщиной 20 см, снаружи планируется водяная защита от нейтронов из реактора толщиной 50 см и далее все это будет облицовано пластическим сцинтиллятором в качестве устройства антисовпадений для защиты от проникающих на глубину размещения установки (около 16 м водного эквивалента) ионизирующих частиц. Водяная защита снижает поток быстрых нейтронов примерно на порядок и позволяет определить путем прямого измерения с водой и без воды, насколько велик фон от нейтронов во время



**Рис. 3.** Энергетический спектр ядер отдачи от когерентного рассеяния реакторных антинейтрино (1 — ксенон, 2 — аргон) и от рассеяния нейтронов, генерированных мюонами (3 — ксенон, 4 — аргон).

работы реактора. Вся сборка будет помещена в герметичную камеру, заполненную очищенным от радона азотом. Такая геометрия защиты была выбрана с целью получения максимального подавления потока гамма-квантов от окружающей радиоактивности и нейтронов, генерированных космическими лучами в железе. Борированный полиэтилен такой толщины поглощает примерно 90% нейтронов из железа. Само железо эффективно подавляет окружающее гамма-излучение. На рис. 3 приведены расчетные величины ожидаемого эффекта от когерентного рассеяния реакторных антинейтрино и величины фона от нейтронов на глубине 16 м водного эквивалента для аргона и ксенона в качестве рабочего вещества детектора.

Энергетический спектр ядер отдачи, приведенный на рис. 3, взят нами из [8]; для расчета фона мы использовали данные о спектре быстрых нейтронов, генерированных мюонами космических лучей, из [9]. Для количественной интерпретации ожидаемого эффекта необходимо прецизионное (с точностью в несколько процентов) измерение quenching factor в газообразном аргоне и ксеноне, который при энергии

отдачи ядра ниже 500 eV ожидается на уровне 10–15% по результатам проведенных измерений в других веществах [10]. Дальнейшее развитие описанной здесь методики представляется перспективным в плане получения значимого физического результата за сравнительно короткое время, примерно 5 лет.

Работа была выполнена при поддержке гранта Ведущих научных школ России № 871.2012.2.

## Список литературы

- [1] *Freedman D.Z.* // PRD. 1974. V. 9. P. 1389.
- [2] *Freedman D.Z., Schramm D.N., Tubbs D.L.* // Ann. Rev. Part. Sci. 1977. V. 27. P. 167.
- [3] *Drukier A., Stodolsky L.* // Phys. Rev. D. 1984. V. 33. P. 2295–2309.
- [4] *Krauss L.M.* // Phys. Lett. B. 1991. V. 269. P. 407–411.
- [5] *Horowitz C.J., Coakley K.J., McKinsey D.N.* // Phys. Rev. D. 2003. V. 68. P. 023 005(7).
- [6] *Patton K., Enge J., McLaughlin G.C., Schunk N.* // Phys. Rev. C. 2012. V. 86. P. 024 612. (9).
- [7] *Galeazzi M., Kopylov A.V., Petukhov V.V. et al.* // Phys. Lett. B. 1998. V. 398. P. 187.
- [8] *Akimov D., Bondar A., Burenkov A., Buzulutskov A.* // arXiv:0903.482v1.
- [9] *Perera T.* // PhD thesis, Department of Physics, Case Western Reserve University. 2002.
- [10] *Jones K.W., Kraner H.W.* // Phys. Rev. A. 1975. V. 11. P. 1347–1353.