

УДК 539.1.074.8+539.1.074.23+539.12–164

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДИСКРИМИНАЦИИ γ -ФОНА В НЕЙТРОННОМ СПЕКТРОМЕТРЕ С ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫМ СЧЕТЧИКОМ ПРОТОНОВ ОТДАЧИ

© 2007 г. А. М. Швецов, Ю. И. Виноградов, О. П. Вихлянцев, А. В. Курякин

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (РФЯЦ – ВНИИЭФ)
Саров

E-mail: shvetsov@expd.vniief.ru

Исследовалась возможность расширения диапазона измерения нейтронных спектров в область низких энергий в полях смешанного n - γ -излучения посредством разделения импульсов от протонов отдачи и электронов, индуцированных γ -излучением, при использовании разработанного во ВНИИЭФ пропорционального счетчика для спектрометрии нейтронов. С помощью цифрового осциллографа был получен массив данных о форме импульсов счетчика при его облучении в поле смешанного n - γ -излучения (^{252}Cf) и в поле γ -квантов (комплект СОСГИ-М). В результате математической обработки полученного массива данных показано, что существует возможность различить импульсы от протонов отдачи и электронов, так что для источника ^{252}Cf нижняя граница рабочего диапазона нейтронного спектрометра может быть понижена до ≈ 80 кэВ.

НЕЙТРОННЫЙ СПЕКТРОМЕТР НА БАЗЕ ПРОПОРЦИОНАЛЬНОГО СЧЕТЧИКА

Во ВНИИЭФ был разработан нейтронный спектрометр с пропорциональным газовым счетчиком протонов отдачи, который в течение ряда лет использовался в нейтронных измерениях [1, 2]. Основные параметры счетчика: длина 1 м, диаметр 75 мм, наполнение – метан 3 атм с небольшой добавкой ^3He , относительное энергетическое разрешение $\eta \approx 3.66\%$, нижний предел энергии для спектрометра равен 50 кэВ, верхний предел ≈ 8 МэВ, эффективность регистрации нейтронов, образующихся в результате спонтанного деления ^{252}Cf , порядка 13.9%.

Недостатком пропорциональных газовых счетчиков является их чувствительность к γ -квантам, которые являются сопутствующим фоном практически в любых нейтронных измерениях. По этой причине измерения нейтронных спектров в области низких энергий затруднены, так как в экспериментальный аппаратный спектр вносятся искажения, которые приводят к получению некорректных восстановленных спектров нейтронов. Значение энергии, ниже которой сказывается влияние γ -фона, зависит от материала и геометрии счетчика, а также от состава и давления рабочего газа. Для используемого в настоящей работе счетчика значение этой энергии без применения каких-либо способов дискриминации составляет ≈ 0.5 МэВ.

МЕТОДЫ ДИСКРИМИНАЦИИ γ -ФОНА

Уменьшить влияние γ -фона можно различными способами, например путем физического экра-

нирования γ -излучения или расчетным методом. Физическое экранирование позволяет существенно уменьшить γ -фон, но при этом возникают проблемы, связанные с искажением измеряемого нейтронного спектра. Расчетный метод учета γ -фона весьма сложен и обладает невысокой точностью.

Наилучший метод дискриминации γ -фона – использование электронных средств, которые позволяют различать импульсы от протонов отдачи и электронов по их форме. Техническая реализация дискриминаторов по форме импульса для пропорциональных счетчиков базируется на методах “деления” и “времени нарастания” [3].

Электронные схемы γ -дискриминаторов для пропорциональных газовых счетчиков, основанные на этих методах и описанные в литературе, достаточно сложны [3–6], поэтому, прежде чем проводить разработку схем дискриминации γ -фона для нашего нейтронного спектрометра, следовало изучить особенности формы импульсов при регистрации нейтронов и γ -квантов нашим пропорциональным счетчиком, выбрать метод разделения и путем математической обработки полученных данных оценить качество разделения и порог дискриминации γ -фона.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ВОЗМОЖНОСТИ ДИСКРИМИНАЦИИ γ -ФОНА

Для проведения этих исследований нейтронный спектрометр был дополнен каналом регистрации формы импульса (рис. 1), который включал быст-

рый усилитель (БУ) модели 2111 (фирма “Canberra”) и цифровой осциллограф (ЦО) типа TDS-3034B (фирма “Tektronix”), подключенный к персональному компьютеру (ПК) через интерфейс RS-232.

Минимальная длительность фронта импульса со счетчика при регистрации нейтронов и γ -квантов составляет 500 нс. Зарядочувствительный предусилитель (ПУ) 1105А имеет собственное время нарастания около 10 нс, что позволяет регистрировать форму переднего фронта выходного импульса практически без искажений. Время спада для этого предусилителя фиксировано и составляет 50 мкс, что может приводить к наложениям импульсов. Полоса частот быстрого усилителя лежит в пределах от 1 кГц до 45 МГц. Запоминающий цифровой осциллограф TDS-3034B позволяет проводить оцифровку входного сигнала с частотой выборки до 100 МГц.

Рабочее напряжение счетчика, снимаемое с блока высокого напряжения (БВН), было выбрано равным 3.2 кВ. Относительно величины энергетического разрешения счетчика самым оптимальным является напряжение 2.7 кВ, однако коэффициент газового усиления при напряжении 3.2 кВ в ≈ 2.5 раза больше, чем при напряжении 2.7 кВ. Это позволило работать с лучшим значением отношения сигнал/шум.

Спектрометрический канал, включающий спектрометрический усилитель (СУ) и аналого-цифровой преобразователь (АЦП), использовался для настройки рабочего режима – измерения относительного энергетического разрешения счетчика в поле тепловых нейтронов и проведения энергетической калибровки шкалы анализатора. Доступ к данным, зарегистрированным аналого-цифровым преобразователем со стороны КАМАК-магистральной крейта, обеспечивался интерфейсным модулем АЦП/КАМАК. Для связи КАМАК-крейта с персональным компьютером использовался крейт-контроллер (КК).

Для управления цифровым осциллографом и сбора данных была разработана специальная программа на базе программного пакета CRW-DAQ [7, 8]. Программа обеспечивала дистанционное управление осциллографом и позволяла в автоматическом режиме читать данные из памяти осциллографа и записывать осциллограммы импульсов на жесткий диск персонального компьютера. Для передачи каждой осциллограммы требовалось ≈ 5 с. Данные записывались в файл в виде текстовой таблицы время–амплитуда.

При изучении формы импульсов осциллограф работал в режиме запуска входным сигналом, уровень запуска был выбран 30 мВ, что соответствует энергии ≈ 0.05 МэВ. Для получения хорошего временного разрешения была выбрана длительность развертки 5 мкс, при этом регистрировалась предыстория за время, равное 8% от выбранной

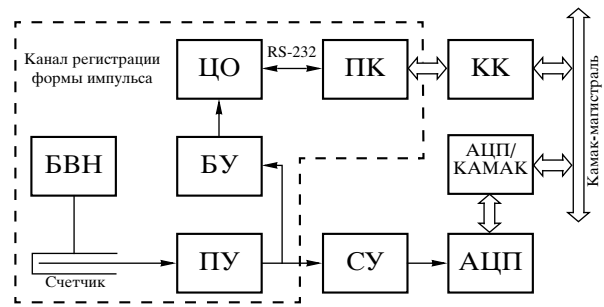


Рис. 1. Нейтронный спектрометр с каналом регистрации формы импульса.

развертки. Это позволяло достоверно определить нулевой уровень сигнала. Частота оцифровки составляла 50 МГц, и соответственно в память осциллографа записывались координаты 2500 точек.

Измерения в смешанных полях нейтронного и γ -излучения проводились с источником ^{252}Cf , который располагался на расстоянии ≈ 1.5 м от торца счетчика на его оси симметрии. Источником γ -квантов служил комплект СОСГИ-М. В состав комплекта входят шесть источников (в скобках указаны энергии наиболее интенсивных γ -линий): ^{56}Co (0.511 МэВ), $^{110\text{m}}\text{Ag}$ (0.658 МэВ), ^{133}Ba (0.081 МэВ), ^{152}Eu (0.122 МэВ), ^{182}Ta (1.122 МэВ), ^{192}Ir (0.316 МэВ). Кроме указанных линий в спектре излучения входящих в комплект изотопов присутствует большое число линий меньшей интенсивности. Если к тому же учесть наличие подложки в энергетических спектрах изотопов, то можно утверждать, что используемые γ -источники в совокупности охватывают широкий энергетический диапазон и испускают непрерывный спектр γ -квантов.

Кроме измерений на быстрых нейтронах и γ -квантах, были выполнены измерения на тепловых нейтронах, что позволило прокалибровать записываемые данные в единицах энергии по пику реакции $^3\text{He}(n, p)\text{T}$. В качестве источника тепловых нейтронов использован ^{252}Cf , помещенный в полиэтиленовый замедлитель.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В процессе проведения исследований регистрируемые от нейтронов и γ -квантов импульсы оцифровывались с помощью осциллографа ЦО (см. рис. 1), т.е. каждый регистрируемый импульс представлялся в виде таблицы из 2500 пар чисел, первым из которых являлось текущее время, а вторым – значение огибающей напряжения импульса в данный момент времени. В результате проведенных измерений было накоплено большое количество файлов данных (порядка 60000 осциллограмм). Процесс обработки каждой осциллограммы достаточно сложен, поскольку необходимо отфильтровать шумы, исключить импульсы большой ампли-

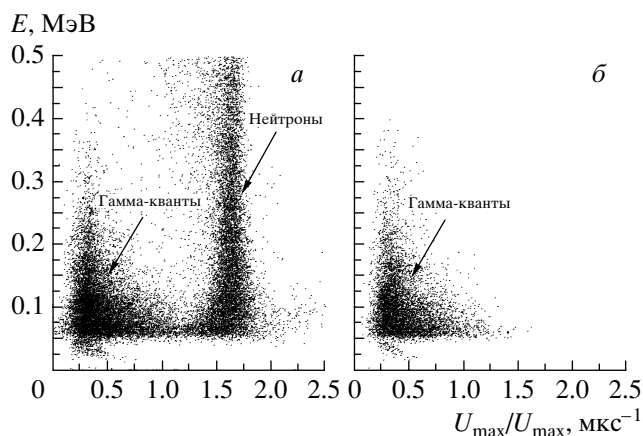


Рис. 2. Двумерные распределения импульсов для источника смешанного нейтронного и γ -излучения (а) и для набора источников γ -излучения (б).

туды, выходящие за пределы диапазона регистрации, обнаружить и исключить импульсы с наложениями, а для кондиционных сигналов определить те или иные параметры формы.

В пакете CRW-DAQ [7] с использованием встроенного языка программирования Daq Pascal было написано специальное программное обеспечение, которое позволяло проводить обработку полученных данных в ручном и автоматическом режимах. Графический интерфейс программы обработки включает в себя панель управления, графическое окно для отображения текущей осциллограммы и два спектрометрических окна для отображения полученных промежуточных величин. Панель управления позволяет задавать списки файлов, подлежащих обработке. В ручном режиме можно просмотреть осциллограмму импульса, провести визуальный анализ и решить, пропускать ее на дальнейшую обработку или нет. Ручной режим удобен в тех случаях, когда необходимо просмотреть и обработать небольшое количество зарегистрированных сигналов. В автоматическом режиме все графические окна сворачиваются (для увеличения быстродействия), и пользователь не может контролировать процесс обработки.

При обработке осциллограмм проводилось их сглаживание путем вычисления взвешенного среднего интегрального значения с переменной шириной окна. Чем ближе точка к фронту, тем меньше ширина окна сглаживания.

В процессе дальнейшей обработки выполнялись следующие операции: отсеивались импульсы неправильной формы, искаженные наводками; выполнялась привязка к положению фронта импульса; определялась максимальная амплитуда сглаженного импульса U_{max} ; определялась длительность фронта t_f на интервале от 0.1 до 0.9 от максимальной амплитуды и, наконец, вычислялся

максимум производной по времени \dot{U}_{max} на переднем фронте импульса.

В результате обработки массива осциллограмм, полученных в калибровочных измерениях, построено распределение импульсов по максимальной амплитуде, в котором наблюдается пик, обусловленный реакцией ${}^3\text{He}(n, p)\text{T}$. По положению этого пика была выполнена энергетическая калибровка измерительного канала $\dot{E}(U)$. С учетом результата энергетической калибровки параметр U_{max} был перенормирован в параметр E .

По этим данным были построены двумерные распределения по параметрам $t_f - E$ и $\dot{U}_{max} - E$ как для источника смешанного нейтронного и γ -излучения, так и для источника γ -излучения.

Для распределения по параметрам $\dot{U}_{max} - E$, полученного с источником ${}^{252}\text{Cf}$, четко выделяются две группы событий, связанных с регистрацией нейтронов и γ -квантов. При уменьшении энергии эти области частично перекрываются, что, собственно, и определяет порог дискриминации γ -фона. Соответствующее распределение, полученное по результатам измерений с источником γ -квантов, подтверждает правильность идентификации этих групп.

В соответствии с методом деления было получено более удобное для анализа двумерное распределение событий в координатах $\dot{U}_{max}/U_{max} - E$. Параметр \dot{U}_{max}/U_{max} , по своему смыслу, обратно пропорционален длительности электронной лавины в пропорциональном счетчике. Для источника ${}^{252}\text{Cf}$ группы событий, связанных с нейтронами и γ -квантами, хорошо разделены (рис. 2а). Распределение, полученное для источника γ -квантов на рис. 2б, согласуется с γ -компонентой на рис. 2а.

Из полученных данных можно сделать вывод, что распределения импульсов от нейтронов и γ -квантов достаточно хорошо разделены, и их дискриминацию легко осуществить по параметру \dot{U}_{max}/U_{max} . При этом очевидно, что качество дискриминации зависит от энергии протонов и электронов, а уровень дискриминации должен устанавливаться, исходя из компромисса между нижним пределом измерений и коэффициентом подавления γ -фона.

Для более корректного сравнения спектральных характеристик γ -излучения источника ${}^{252}\text{Cf}$ и набора γ -источников СОСГИ-М были получены распределения числа импульсов по параметру \dot{U}_{max}/U_{max} для всего исследуемого энергетического диапазона от 0.05 до 0.5 МэВ (рис. 3). При этом данные для СОСГИ-М были перенормированы из условий равенства площадей под γ -распределением. Видно, что распределения для импульсов, обу-

словленных γ -квантами, в обоих случаях практически одинаковы по форме.

Для предварительной оценки нижнего диапазона энергий, при котором еще возможно надежное разделение импульсов от протонов отдачи и электронов, был выбран критерий 5%-ного ($P = 0.95$) перекрытия распределений, никак не связанный с порогом дискриминации. Это означает, что если для данной энергии отношение площади перекрытия распределений к площади распределения для протонов отдачи оказывается меньше 5%, то именно эту энергию следует считать нижним пределом измерений. Для получения такой оценки экспериментальные данные аппроксимировались суммой двух логнормальных распределений.

Первым был аппроксимирован энергетический срез для самого низкого интервала энергий 0.05–0.06 МэВ. Отношение общего участка площади под кривыми, аппроксимирующими распределения величины \dot{U}_{max}/U_{max} для нейтронов и γ -квантов, к площади под нейтронной кривой $\Delta S_{общ}/S_n$ оказалось равным $\approx 27\%$. Аппроксимация последующих энергетических срезов и вычисление доли общей площади перекрытия позволили вычислить значения $\Delta S_{общ}/S_n$ для разных интервалов энергий.

По энергетической зависимости величины $\Delta S_{общ}/S_n$ был построен график, представленный на рис. 4 сплошной кривой. Как видно, при увеличении энергии кривая пересекает граничный 5%-ный барьер при значении абсциссы ≈ 0.084 МэВ. Именно это значение можно считать нижним энергетическим порогом при измерении спектров нейтронов от спонтанного деления ^{252}Cf с помощью описанного в настоящей работе счетчика при заполнении его метаном до давления 3 атм с небольшой добавкой ^3He при напряжении на катоде 3.2 кВ.

О значении порога именно для данных параметров сказано не случайно. При неизменных параметрах счетчика (напряжение, давление и т.д.) на величину порога γ -дискриминации влияют параметры источника. Соотношение между количеством вылетающих из источника ^{252}Cf γ -квантов и нейтронов (N_γ/N_n) составляет ≈ 2.5 . Пусть в нашем распоряжении имеется источник нейтронов с приблизительно такими же по форме, как у ^{252}Cf , спектрами нейтронов и γ -квантов, но количество вылетающих из него γ -квантов относительно количества нейтронов будет равно единице (известно, что для многих источников нейтронов отношение N_γ/N_n существенно меньше 2.5). Поскольку, распределения от γ -квантов более широкие, чем от нейтронов, можно ожидать, что уменьшение относительного вклада испускаемых нейтронным источником γ -квантов позволит достичь допустимого 5%-ного барьера при меньшем значении энергии. Это означает, что порог дискриминации γ -квантов при уменьшении их относительного вклада будет понижаться.

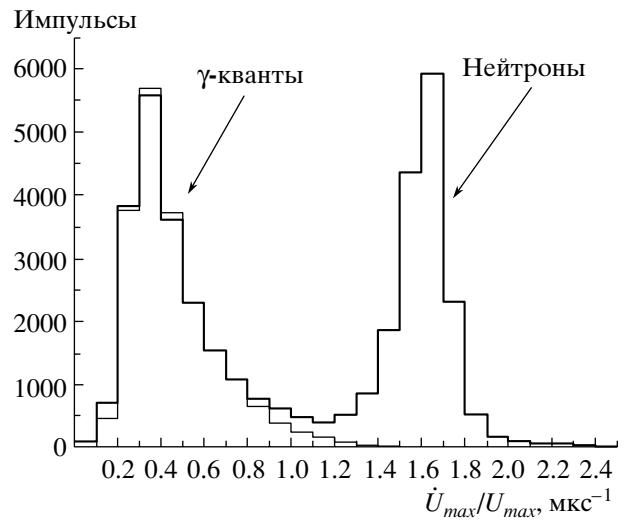


Рис. 3. Распределение импульсов по параметру \dot{U}_{max}/U_{max} для диапазона энергий от 0.05 до 0.5 МэВ: данные для источника смешанного нейтронного и γ -излучения (жирная линия); данные для набора источников γ -излучения (тонкая линия).

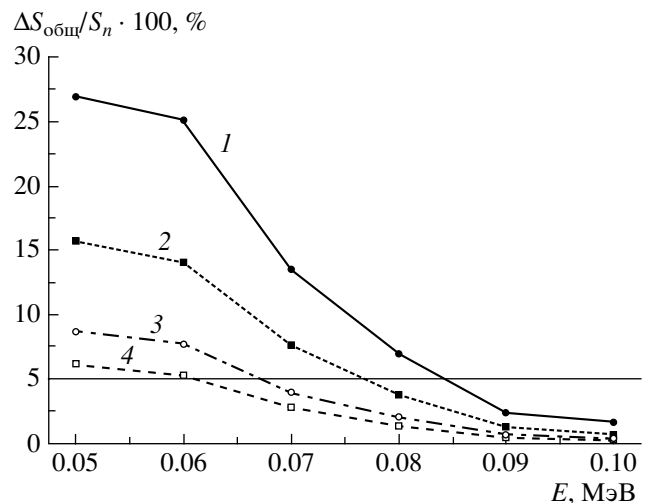


Рис. 4. Зависимости от энергии относительного перекрытия площадей распределений величины \dot{U}_{max}/U_{max} для нейтронов и γ -квантов для соотношений N_γ/N_n : 1 – 2.5 (^{252}Cf), 2 – 0.7, 3 – 0.3, 4 – 0.2. Горизонтальная прямая – 5%-ный допустимый порог перекрытия площадей.

Для нахождения порогов дискриминации других источников достаточно воспользоваться экспериментальными данными, полученными для источника ^{252}Cf . Для этого все полученные для него аппроксимирующие кривые необходимо перенормировать в соответствии с новыми значениями величины N_γ/N_n . Затем точно так же, как и ранее, построить зависимость величины относительного

перекрытия площадей от энергии. Далее в точке пересечения построенной кривой с линией 5%-ного допустимого барьера определить порог дискриминации γ -квантов. На рис. 4 кроме кривой для ^{252}Cf представлены также данные для значений $N_\gamma/N_n = 0.2, 0.3, 0.7$, для которых значения порогов γ -дискриминации оказались равными 0.061, 0.067 и 0.077 МэВ соответственно. Видно, что эти значения, как и ожидалось, ниже полученного ранее значения порога 0.084 МэВ для ^{252}Cf .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования показали, что спектрометр нейтронов на базе пропорционально-счетчика протонов отдачи может быть дополнен средствами дискриминации γ -фона, которые позволяют различать импульсы от протонов отдачи и электронов по их форме. Качество дискриминации зависит от энергии протонов и электронов, а уровень дискриминации должен устанавливаться на основании компромисса между нижним пределом измерений и коэффициентом подавления γ -фона. Так, для ^{252}Cf было получено значение нижнего энергетического порога разделения импульсов от нейтронов и гамма-квантов, равное ≈ 80 кэВ.

Дальнейшее развитие начатой работы будет заключаться в компоновке конкретной схемы дис-

криминации γ -фона и включении ее в систему регистрации спектрометра. Назначение схемы – выполнение операций по анализу переднего фронта импульсов счетчика на линии с экспериментом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shvetsov A.M., Egorov V.P., Fomushkin E.F. et al.* // Proc. Int. Conf. Nuclear Data for Science and Technology, Trieste: Italian Phys. Soc. Inc., 1997. P. 2. P. 1359.
2. *Марковский Д.В., Чувилин Д.Ю., Загрядский В.А. и др.* // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Вып. 4. Саров: ВНИИЭФ, 2003. С. 126.
3. *Obi M., Ichimori T., Shirakata K.* // Nucl. Instrum. Methods. 1970. V. 89. P. 131.
4. *Bennett E.F.* // Nucl. Sci. Eng. 1967. V. 27. № 1. P. 16.
5. *Kinbara S., Kumahara T.* // Nuc. Instrum. Methods. 1969. V. 70. № 2. P. 173.
6. *Vehar D.W., Clikeman F.M.* // Nucl. Instrum. Methods. 1981. V. 190. P. 351.
7. *Курякин А.В., Виноградов Ю.И.* // Сб. докл. Второго междунар. семинара “Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM-04”, Саров: ВНИИЭФ, 2005. С. 411.
8. *Курякин А.В., Виноградов Ю.И.* Программа для автоматизации физических измерений и экспериментальных установок: Свидетельство о регистрации № 2006612848 от 10.08.06.

Сдано в набор 00.00.2007 г.

Подписано к печати 00.00.2007 г.

Формат бумаги $60 \times 88^{1/8}$

Цифровая печать

Усл. печ. л. 00.0

Усл. кр.-отт. 5.9 тыс.

Уч.-изд. л. 00.0

Бум. л. 0.0

Тираж экз.

Зак.

Учредители: Российская академия наук,
Институт прикладной физики РАН

Издатель: Академиздатцентр “Наука”, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 90
Оригинал-макет подготовлен МАИК “Наука/Интерпериодика”
Отпечатано в ППП “Типография “Наука”, 121099, Москва, Шубинский пер., 6
www.gpi.ru/isvestiyaran-fiz