

P6-2004-94

К. Я. Громов, В. И. Фоминых, В. Г. Чумин,
Ж. К. Саматов

СУММИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСОВ В СПЕКТРАХ
 γ -ЛУЧЕЙ

Направлено в журнал «Приборы и техника эксперимента»

Громов К. Я. и др.

P6-2004-94

Суммирование импульсов в спектрах γ -лучей

Показано, что пики, образующиеся в γ -спектрах при суммировании импульсов от каскадных γ -переходов, могут быть использованы для определения активности источника γ -лучей и эффективности регистрации γ -лучей. Исследованы возможные источники погрешностей определяемых величин. Этот способ может быть полезен при измерениях сечений ядерных реакций, для анализа фона при поиске редких распадов и др.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Дзелепова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2004

Перевод авторов

Gromov K. Ya. et al.

P6-2004-94

Pulse Summing in the γ -Ray Spectra

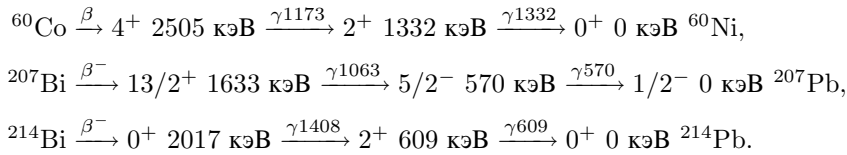
It was shown that the peaks formed at the summing of the cascade γ -rays pulses can be used for the determination of γ -ray source activity and γ -ray registration efficiency. Possible sources of the determined quantities errors have been investigated. Such a method can be useful at the nuclear reaction cross section measurements, at background analysis in looking for rare decays and so on.

The investigation has been performed at the Dzhelepov Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2004

В γ -спектрах радиоактивных нуклидов наблюдаются пики, образующиеся при суммировании импульсов от совпадающих γ -лучей. В случае, если прямой, кроссовер γ -переход не существует, можно по интенсивности (площади в спектре) пика суммы определить абсолютную активность источника (число распадов в секунду) и абсолютную эффективность регистрации γ -лучей [1]. Независимое от условий эксперимента определение этих величин может быть важно при измерениях сечений ядерных реакций, при анализе фоновых условий в экспериментах по поискам редких распадов и т. п. Цель этой работы состояла в оценке точности определения активности источника γ -лучей и эффективности регистрации γ -лучей по интенсивности пика суммы в γ -спектре.

Изучались γ -спектры ^{60}Co , ^{207}Bi и ^{226}Ra (в равновесии с ^{214}Bi). При этом изучалось образование суммарных пиков в следующих каскадах γ -лучей:



Известно [2], что при распаде ^{60}Co γ -лучи 2505 кэВ возникают с интенсивностью $\sim 4 \cdot 10^{-5}\%$ распадов; при распаде ^{207}Bi : кроссовер γ -переход 1633 кэВ имеет мультипольность М6, т. е. интенсивность его пренебрежимо мала; при распаде ^{214}Bi γ -переход 2017 кэВ типа Е0, т.е. γ -лучей нет.

Рассмотрим образование суммарного пика на примере распада $^{60}\text{Co} \rightarrow ^{60}\text{Ni}$ (рис. 1). Площадь суммарного пика и площади фотопиков γ -лучей, образующих сумму, определяются следующими уравнениями [3]:

$$\left. \begin{aligned} S_{\gamma_1+\gamma_2} &= n \frac{a_{\gamma_1} a_{\gamma_2}}{a_1} \varepsilon_{\gamma_1} \varepsilon_{\gamma_2} W(0^\circ, r) \\ S_{\gamma_1} &= n a_{\gamma_1} \varepsilon_{\gamma_1} \\ S_{\gamma_2} &= n a_{\gamma_2} \varepsilon_{\gamma_2} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где $S_{\gamma_1+\gamma_2}$, S_{γ_1} и S_{γ_2} — площади пиков в спектре за секунду; n — активность источника (число распадов в секунду); a_{γ_1} , a_{γ_2} и a_1 — интенсивности γ -лучей γ_1 и γ_2 и заселенность промежуточного уровня на один распад нуклида (в случае ^{60}Co $a_{\gamma_1} = a_{\gamma_2} = a_1 = 1, 0$); ε_{γ_1} и ε_{γ_2} — эффективности регистрации γ -лучей; $W(0^\circ, r)$ — коэффициент, учитывающий угловые корреляции γ -лучей при угле разлета 0° и расстоянии источник–детектор r , определялся по таблицам [4].

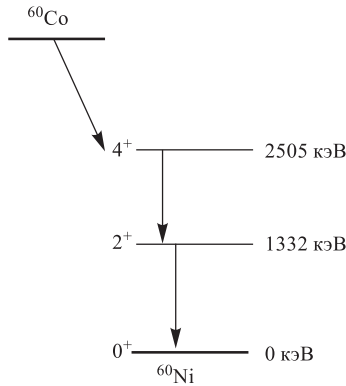


Рис. 1. Каскад γ -лучей 1332 кэВ и 1173 кэВ при β^- -распаде ^{60}Co

Из системы уравнений (1) получаем:

$$n = \frac{S_{\gamma_1} S_{\gamma_2}}{S_{\gamma_1 + \gamma_2}} W(0^\circ, r) \quad (2)$$

и

$$\varepsilon_{\gamma_1} = \frac{a_{\gamma_1}}{a_1} \frac{S_{\gamma_1 + \gamma_2}}{S_{\gamma_2}} \frac{1}{W(0^\circ, r)}. \quad (3)$$

На рис. 2 представлен спектр γ -лучей ^{60}Co , измеренный с HPGe-детектором GMS-20190. Использован источник ^{60}Co типа ОСГИ с активностью на распад на момент измерения 56,2(10) кБк. Расстояние от источника до переднего торца детектора было $r = 1,5$ см. Выполнено еще пять серий измерений при расстояниях источник–детектор от 3 до 12 см. Для того чтобы приблизиться к условиям реального эксперимента, например по измерению сечений ядерных реакций, измерения проводились в лабораторном помещении без подавления фона. В спектре проявляются фоновые γ -линии 2614 кэВ (^{208}Tl), 1460 кэВ (^{40}K) и др. Интенсивность этих линий мала, и можно считать, что их присутствие не влияет на результаты анализа. Наряду с фотопиками γ_1 1173 кэВ и γ_2 1332 кэВ в спектре рис. 2 наблюдаем пик суммы $\gamma_1 + \gamma_2$ с энергией 2505 кэВ и пики сумм $\gamma_1 + \gamma_1$ и $\gamma_2 + \gamma_2$ с энергиями 2346 и 2664 кэВ. Пики $\gamma_1 + \gamma_1$ и $\gamma_2 + \gamma_2$ возникают при случайных самосовпадениях импульсов от γ -лучей γ_1 и γ_2 . Их полуширина в два-три раза больше полуширины основных фотопиков и пика истинного суммирования $\gamma_1 + \gamma_2$. В связи с этим при анализе спектров площади всех пиков определялись методом моментов

как разность площадей суммы отсчетов на участке наблюдаемой линии и интерполированного фона под линией.

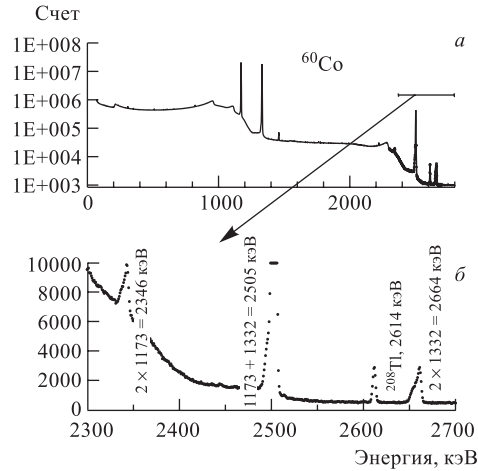


Рис. 2. а) Спектр γ -лучей ^{60}Co , измеренный с HPGe-детектором, объем 86 см^3 . Расстояние источник–детектор $1,5\text{ см}$. б) Участок спектра в диапазоне $2300\text{--}2700\text{ кэВ}$

Поскольку площадь пиков сумм пропорциональна произведению эффективностей регистрации γ -лучей ε_{γ_1} и ε_{γ_2} , а они невелики, измерения выполнены в условиях относительно близкой геометрии при больших нагрузках детектора. Это потребовало учитывать в расчетах «мертвое» время измерительной системы и учитывать уменьшение («вымывание») площадей фотопиков γ_1 и γ_2 совпадениями. Для учета «мертвого» времени в измерительную систему включался генератор импульсов — 50 Гц . Пик от генератора импульсов регистрировался с энергией 2900 кэВ , и по счету в нем определялось «живое» время экспозиции. Для учета «вымывания» из пиков γ_1 и γ_2 совпадениями были оценены отношения площадей комптоновского распределения и фотопика для γ_1 и γ_2 . Для спектра ^{60}Co они оказались равными: $\frac{S_{\text{компт}}}{S_{\text{фото}}}(E_{\gamma_{1332}}) = 5,2$ и $\frac{S_{\text{компт}}}{S_{\text{фото}}}(E_{\gamma_{1173}}) = 4,5$. Соответственно, в площадь фотопика γ_{1173} добавлялось $(5,2 + 1)S_{\gamma_1 + \gamma_2}$ и в площадь γ_{1332} — $(4,5 + 1)S_{\gamma_1 + \gamma_2}$. Таким образом, поправка на «вымывание» составляла $\sim 8\%$ при $r = 1,5\text{ см}$ и $\sim 1\%$ при $r = 12\text{ см}$.

В расчетах по формулам (2) и (3) учитывался вклад случайных совпадений в площадь пика истинных совпадений $S_{\gamma_1 + \gamma_2}$. Разрешающее время случайных совпадений 2τ определялось из площадей пиков самосовпадений:

$$S_{\gamma_1 + \gamma_1} = 2\tau S_{\gamma_1} S_{\gamma_1} \quad \text{и} \quad S_{\gamma_2 + \gamma_2} = 2\tau S_{\gamma_2} S_{\gamma_2}.$$

В случае ^{60}Co оно оказалось равным $2\tau = 6 \cdot 10^{-7}$ с, что приводило к вкладу случайных совпадений, равному $0,035S_{\gamma_1+\gamma_2}$.

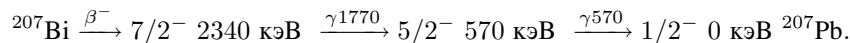
Результаты расчетов представлены в таблице. В первой строке приведены полученные значения активности источника ^{60}Co без поправок на угловые корреляции — n_1 , во второй строке то же с учетом угловых корреляций — n_0 . В третьей строке таблицы представлены полученные величины эффективности регистрации γ -лучей 1332 кэВ. Погрешности везде статистические.

r , см	1,5	3	5	7	10	12	Среднее
$n_1/10^4$	4,84(4)	4,87(4)	5,05(3)	4,89(4)	5,10(6)	4,89(7)	4,94(10)
$n_0/10^4$	5,19	5,27	5,49	5,36	5,63	5,42	5,4(2)
ε_{1332} , %	1,30(3)	0,779(6)	0,495(3)	0,292(2)	0,169(2)	0,161(2)	—

Полученные значения n_1 не обнаруживают плавного изменения (уменьшения) с увеличением расстояния источник–детектор, т. е. мы не наблюдаем угловых корреляций. О том же свидетельствует тот факт, что погрешность среднего значения n_0 не меньше погрешности среднего значения n_1 . Определенное из таблиц [4] отношение $W(0^\circ, r = 12 \text{ см})$ к $W(0^\circ, r = 1,5 \text{ см})$ равно 1,03, т. е. следовало ожидать, что $n_1(r = 1,5 \text{ см})$ на 3 % больше $n_1(r = 12 \text{ см})$. Статистические погрешности значений n_1 около 1 %. Таким образом, ненаблюдение угловых корреляций может быть объяснено погрешностями значений n_1 , тем более что реальные погрешности значений n_1 , вероятно, несколько больше статистических. Влияние угловых корреляций на интенсивность пика суммы в γ -спектрах наблюдается и используется в исследованиях физико-химических свойств вещества при изучении возмущенных угловых корреляций (см., например, [5]). Среднее значение активности использованного нами источника ^{60}Co с учетом угловых корреляций, равное 54(2) кБк (см. таблицу), в пределах погрешностей совпадает с его паспортным значением 56,2(10) кБк.

Аналогичные измерения и расчеты выполнены с источниками ^{207}Bi и ^{226}Ra . Получены величины их активности 240(20) и 8,3(5) кБк соответственно. Это источники собственного изготовления. Паспортных данных на них нет. Сравнить полученные значения их активности не с чем. Погрешности полученных величин демонстрируют возможности обсуждаемого метода. Несколько большие погрешности этих значений по сравнению с ^{60}Co объясняем для ^{207}Bi значительным вкладом случайных совпадений в пик суммы 1633 кэВ и для ^{226}Ra — сложностью γ -спектра этого нуклида и относительно малой интенсивностью перехода 1408 кэВ (2,5 % распадов).

При распаде ^{207}Bi , наряду с каскадом $570 + 1063 = 1633$ кэВ, возникает и другой, менее интенсивный каскад:



Интенсивность γ -лучей 1770 кэВ — 5,9(2) % распадов. Кроссовер γ -переход 2340 кэВ типа (МЗ,Е4) неизвестен [2]. В γ -спектре ^{207}Bi мы наблюдаем пик 2340 кэВ = 570 + 1770. Вычисленная по площади этого пика величина активности источника ^{207}Bi , равная 230(30) кБк, совпадает с полученной по пику суммы 1633 кэВ. Измерения γ -спектра ^{207}Bi , выполненные при разных расстояниях от источника до детектора, позволяют оценить интенсивность кроссовер γ -перехода 2340 кэВ — $2,5(20) \cdot 10^{-3}$ % распадов ^{207}Bi .

Таким образом, проведенные исследования γ -спектров ^{60}Co , ^{207}Bi и ^{226}Ra показывают, что для нуклидов, при распаде которых возникает каскад γ -лучей и отсутствует прямой кроссовер γ -переход, абсолютная активность источника и эффективность регистрации γ -лучей могут быть определены при измерении γ -спектра с погрешностью, достигающей 5 %. Заметим здесь, что при измерениях в относительно далекой геометрии: расстояние источник–детектор в три и более раз больше диаметра детектора, активность источника может быть вычислена по формуле (2) без поправок на случайное суммирование и на «вымывание» с погрешностью, не превышающей 10 %.

Авторы признательны В. М. Горожанкину и В. Г. Калининскому за полезные обсуждения и поддержку при проведении экспериментов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 04-02-17144).

ЛИТЕРАТУРА

1. Вылов Ц., Горожанкин В. М., Желев Ж. и др. // Спектры излучений радиоактивных нуклидов. Ташкент: Изд-во ФАН Узб. ССР, 1980. С. 27.
2. Firestone R. B., Shirley V. S. Table of Isotopes, 8th ed. Wiley, New York, 1998.
3. Громов К. Я., Фоминых В. И. // Изв. РАН. Сер. физ. 61 (1997) 2051
4. Возмущенные угловые корреляции / Под ред. Э. Карлссона, Э. Маттиаса, К. Зигбана. М.: Атомиздат, 1966. С. 428, 437.
5. Философов Д. В., Новгородов А. Ф., Королев Н. А. и др. Препринт ОИЯИ Р6-2001-112. Дубна, 2001.

Получено 21 июня 2004 г.

Редактор *Е. В. Калинин*

Подписано в печать 21.07.2004.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,44. Уч.-изд. л. 0,53. Тираж 290 экз. Заказ № 54524.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@pds.jinr.ru

www.jinr.ru/publish/