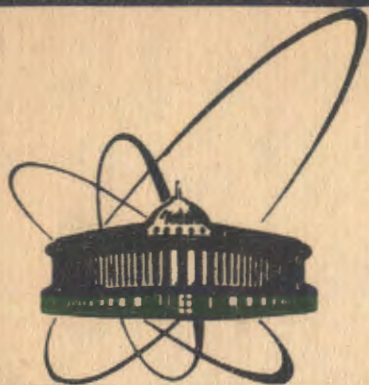


89-229



**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

Г 948

P13-89-229

**Н.А.Гундорин, А.Дука-Зойоми, Зо Сен Хен,
Я.Климан, В.Полгорски**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ АБСОЛЮТНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
Ge(Li)-СПЕКТРОМЕТРА
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МГНОВЕННОГО γ -ИЗЛУЧЕНИЯ
ИЗ ПЛУТОНИЕВОЙ КАМЕРЫ ДЕЛЕНИЯ**

1989

Введение

В практике гамма-спектроскопии очень важным вопросом является точное определение эффективности регистрации гамма-квантов.

Исследование количественных характеристик выхода гамма-квантов из осколков деления, в частности, зависит прямым образом от точности определения абсолютной эффективности гамма-спектрометра. Для определения абсолютной эффективности применяются различные методы в соответствии с типом и конструкцией гамма-спектрометра.

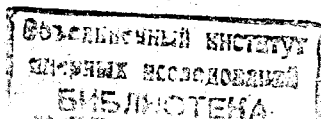
В последнее время в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ был разработан спектрометр, состоящий из камеры деления и работающего в совпадении с камерой полупроводникового Ge(Li)-детектора, для измерения интенсивностей гамма-квантов из осколков, возникающих при делении ^{235}Pu резонансными нейтронами.

В настоящей работе приведены результаты определения абсолютной эффективности гамма-спектрометра и вычисления методом Монте-Карло поправок, учитывающих поглощение гамма-квантов в слоях мишени и объемный размер источника.

1. Определение собственной эффективности Ge(Li)-детектора

На рис. 1 приведена принципиальная схема гамма-спектрометра для измерения сопутствующего делению гамма-излучения.

В рабочем объеме камеры деления имеется 39 электродов: 19 электродов из них со слоями окиси плутония PuO_2 и остальные электроды из чистого алюминия. Слои из окиси плутония толщиной $1,0 \text{ мг/см}^2$ нанесены с двух сторон на алюминиевые подложки диаметрами 77 мм и толщиной 0,1 мм.



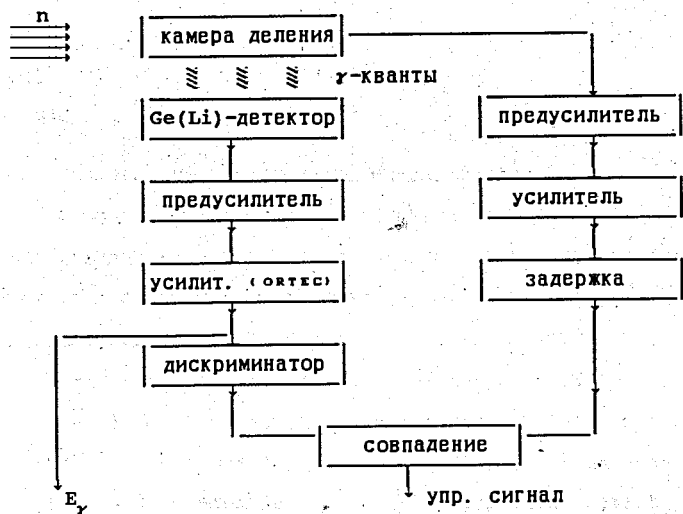


Рис. 1. Принципиальная схема γ -спектрометра

Слой окиси плутония покрыт слоем золота толщиной 30-50 мкг/см². Суммарное количество чистого плутония в камере деления составляет 1,6 г.

Для регистрации гамма-спектров из осколков деления применяется полупроводниковый Ge(Li)-детектор объемом - 60 см³.

В спектрометрический тракт входят предусилитель марки ОРТЕС и спектрометрический усилитель марки ОРТЕС-572. Собственная эффективность полупроводникового Ge(Li)-детектора определена экспериментально с использованием набора стандартных калибровочных гамма-источников СОСГИ-М с известной абсолютной активностью. В набор СОСГИ-М входят 6 гамма-источников: ⁵⁶Co, ¹³³Ba, ¹⁵²Eu, ^{110m}Ag, ¹⁸²Ta, ¹⁹²Ir. Они позволяют проводить калибровку эффективности гамма-спектрометра в энергетическом диапазоне от 53 до 3500 кэВ.

При измерении стандартные точечные источники помещались в месте, где находится центр оси камеры деления. Гамма-спектры от каждого стандартного источника измерялись с помощью 4096-канального амплитудного анализатора, и из них вычислялись значения собственной эффективности полупроводникового Ge(Li)-детектора в 66 фотопиках.

Энергетическая зависимость собственной эффективности детектора интерполировалась с помощью программы метода наименьших квадратов FUMIL1 [1] на микроЭВМ "правец-16" и представлена на рис. 2.

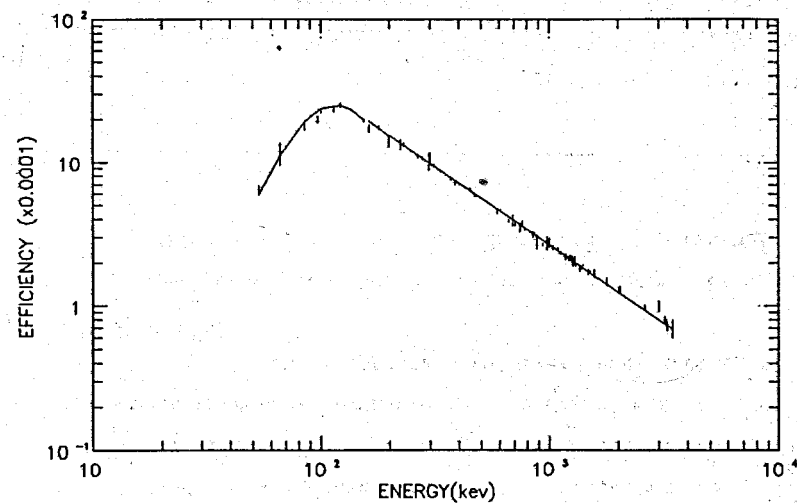


Рис. 2. Энергетическая зависимость собственной эффективности Ge(Li)-детектора

Кривая соответствует аналитическим выражениям, подобранным отдельно для двух энергетических интервалов. Энергетические интервалы и применяемые в их пределах формулы и коэффициенты, определенные из экспериментальных данных, показаны в таблице 1.

Таблица 1. Подгоночные функции и их параметры
для собственной эффективности Ge(Li)-детектора

интервал (кэВ)	функция	параметры		
		a	b	c
60 + 154	$\epsilon(E_\gamma) = e^{aE_\gamma + b \ln E_\gamma + c}$	-0,0509 $\pm 0,0019$	5,94 $\pm 0,22$	-19,1 $\pm 0,8$
136 + 3500	$\epsilon(E_\gamma) = e^{a \ln E_\gamma + b}$	-1,0866 $\pm 0,0023$	8,48 $\pm 0,01$	

2. Вычисление поправочного коэффициента, учитывающего поглощение гамма-квантов и объемность источника

1) Основные представления и предположения

При делении плутония резонансными нейтронами мгновенные γ -кванты возникают в рабочем объеме камеры и на пути к Ge(Li)-детектору поглощаются частично в слоях мишени и в материалах конструкции. Поэтому для получения абсолютной эффективности γ -спектрометра из определенной экспериментально собственной эффективности необходимо вносить ряд поправок.

Абсолютную эффективность $\epsilon(E_\gamma)$ γ -спектрометра можно выразить следующим образом:

$$\epsilon(E_\gamma) = F(f_1, f_2, \dots, f_n) \cdot \epsilon_d(E_\gamma), \quad (1)$$

где $F(f_1, f_2, \dots, f_n)$ - поправочный коэффициент,

$\epsilon_d(E_\gamma)$ - собственная эффективность детектора.

В нашем случае вводились поправки на поглощение γ -квантов в слоях PuO_2 и Au и объемность источника.

Для простоты вычисления поправочного коэффициента делались следующие предположения:

- (1) сопутствующие делению γ -кванты возникают всегда в центральных слоях электродов, содержащих PuO_2 ;
- (2) поглощение γ -квантов в конструкционном материале из Al и рабочем газе пренебрежимо мало;
- (3) в данном телесном угле эффективные толщины окиси плутония и золота определяются толщиной по линии, соединяющей точку возникновения γ -квантов с центром поверхности Ge(Li)-детектора.

На рис. 3 показана реальная геометрия, в которой проводится эксперимент. Пусть γ -квант возникает в точке $P(k, r, \varphi)$, k -номер электрода, r -радиус и φ -азимутальный угол. Телесные углы, под которыми виден детектор из точек $O(10, 0, 0)$ и $P(k, r, \varphi)$, обозначим Ω_0 и $\Omega(k, r, \varphi)$ соответственно ($k=10$ -электрод, расположенный на оси Ge(Li)-детектора).

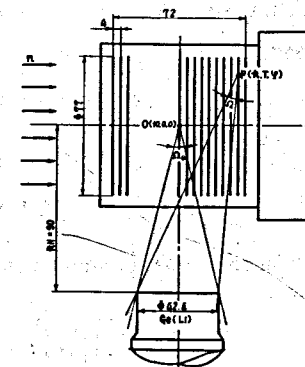


Рис. 3. Расположение камеры деления и Ge(Li)-детектора на пучке нейтронов.

При этом в выражении (1) поправку на геометрический фактор можно выразить как

$$f_1(k, r, \varphi) = \frac{\Omega(k, r, \varphi)}{\Omega_0(10, 0, 0)} \quad (2)$$

С другой стороны, для поправки, учитывающей поглощение γ -кванта, который возник в точке $P(k, r, \varphi)$ мишени, можно получить следующее выражение:

$$f_2(E_\gamma, k, r, \varphi) = e^{-\Sigma(E_\gamma) \cdot \rho_1 \cdot l_1(k, r, \varphi) + \sigma(E_\gamma) \cdot \rho_2 \cdot l_2(k, r, \varphi)} \quad (3)$$

где $\Sigma(E_\gamma) = \frac{\sigma_1(E_\gamma) \cdot M_1 + \sigma_2(E_\gamma) \cdot M_2}{M}$ - коэффициент поглощения γ -кванта с энергией E_γ в PuO_2 ,

$\sigma_1(E_\gamma), \sigma_2(E_\gamma), \sigma(E_\gamma)$ - массовые коэффициенты поглощения γ -кванта с энергией E_γ в плутонии, кислороде и золоте соответственно,

M_1, M_2, M - атомная и молекулярная масса Pu, O_2 и PuO_2 соответственно,

$l_1(k, r, \varphi), l_2(k, r, \varphi)$ - толщина слоев PuO_2 и Au , через

которые проходит γ -квант из точки $P(k, r, \varphi)$ к детектору,

ρ_1, ρ_2 - плотность PuO_2 и Au .

На основании (2), (3) можно написать выражение для поправочного коэффициента $f(E_\gamma, k, r, \varphi)$:

$$f(E_\gamma, k, r, \varphi) = f_1(k, r, \varphi) \cdot f_2(E_\gamma, k, r, \varphi) = \frac{\Omega(k, r, \varphi)}{\Omega_0(10, 0, 0)} \cdot f_2(E_\gamma, k, r, \varphi) \quad (4)$$

Если введем эффективный телесный угол

$$\Omega^{\text{эфф}}(E_\gamma, k, r, \varphi) = \Omega(k, r, \varphi) \cdot f_2(E_\gamma, k, r, \varphi) \quad (5)$$

то выражение (4) можно переписать как

$$f(E_\gamma, k, r, \varphi) = \frac{1}{\Omega_0} \cdot \Omega^{\text{эфф}}(E_\gamma, k, r, \varphi) \quad (6)$$

Усредненный по всему рабочему объему камеры деления поправочный коэффициент будет иметь вид

$$F(E_\gamma) = \sum_k \int \int f(E_\gamma, k, r, \varphi) \cdot \rho(k, r, \varphi) \cdot r \cdot dr \cdot d\varphi = \frac{1}{\Omega_0} \cdot \Omega^{\text{экв}}(E_\gamma) \quad (7)$$

где $\rho(k, r, \varphi)$ - плотность вероятности возникновения γ -кванта в точке $P(k, r, \varphi)$, а

$$\Omega^{\text{экв}}(E_\gamma) = \sum_k \int \int \Omega^{\text{эфф}}(E_\gamma, k, r, \varphi) \cdot \rho(k, r, \varphi) \cdot r \cdot dr \cdot d\varphi \quad (8)$$

- эквивалентный телесный угол.

В предположении, что γ -кванты возникают в дискретных по r и φ точках, выражения (7), (8) можно записать следующим образом:

$$F(E_\gamma) = \sum_{k, r, \varphi} f(E_\gamma, k, r, \varphi) \cdot w(k, r, \varphi) = \frac{1}{\Omega_0} \cdot \Omega^{\text{экв}}(E_\gamma) \quad (7')$$

$$\Omega^{\text{экв}}(E_\gamma) = \sum_{k, r, \varphi} \Omega^{\text{эфф}}(E_\gamma, k, r, \varphi) \cdot w(k, r, \varphi) \quad (8')$$

где $w(k, r, \varphi)$ - вероятность возникновения γ -кванта в точке $P(k, r, \varphi)$.

Можно сказать, что проблема определения поправочного коэффициента сводится к вычислению эквивалентного телесного угла с учетом поглощения γ -квантов в мишени и объемного размера источника.

Вычисления эквивалентного телесного угла проводились методом Монте-Карло с использованием известных коэффициентов поглощения γ -квантов [2] и реальной геометрии нашего эксперимента.

2) Структура программы Монте-Карло для вычисления поправочного коэффициента

На рис. 4 приведена блок-схема программы вычисления поправочного коэффициента методом Монте-Карло. Подпрограмма INPUT вводит начальные данные и вычисляет центральный телесный угол Ω_0 и толщины слоев PuO_2 и Au в каждом электроде.

В таблице 2 показаны начальные данные, необходимые для вычислений.

Подпрограмма RANDOM генерирует случайные числа, распределенные равномерно между 0 и 1 [3].

Вычисления толщины слоев PuO_2 и Au, через которые проходят γ -кванты, и телесных углов, под которыми виден Ge(Li)-детектор из данной точки, проводятся в подпрограммах THICK и OMEGA с использованием указанных выше предположений и с учетом геометрических соотношений. Полученные толщины слоев PuO_2 и Au и телесный угол используются для вычисления эффективного и эквивалентного телесных углов в подпрограмме EFF.

В подпрограмме CHECK проверяется также, что усредненный по всему рабочему объему эквивалентный телесный угол приближается к постоянной величине, и проводится сравнение с заданной точностью. Если удовлетворяется условие точности, программа прекращает

повторения и печатает результаты. В противном случае программа продолжает набор событий.

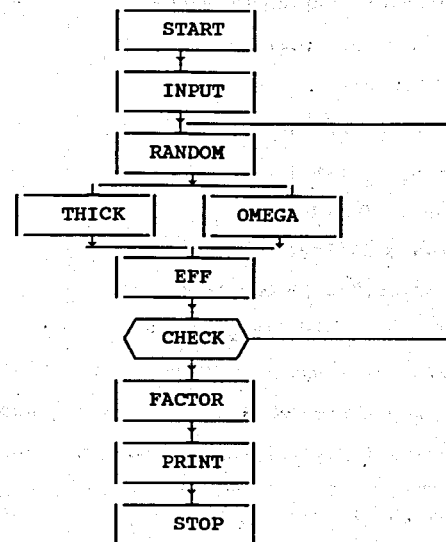


Рис. 4. Блок-схема программы

Программа написана в языке FORTRAN-77 на IBM PDP-11/70 с использованием имеющейся библиотеки.

3. Результаты вычисления и абсолютная эффективность γ -спектрометра

Вычисление поправочного коэффициента проводилось для различных начальных условий и их результаты сравнивались между собой.

Учет влияния нанесенных над слоями окиси плутония слоев золота дал отклонения максимально на 0,6 % от окончательных результатов во всем интервале энергий от 60 кэВ до 3000 кэВ.

Использование усредненной по всем электродам камеры деления толщины дает максимальное отклонение 0,8 %.

Таблица 2. Начальные входящие данные

№	наименование	величина
1	основание генератора случайных чисел	100 - 300
2	максимальное число повторений	32500
3	точность вычисления	0,000001
4	энергия гамма-квантов (кэВ)	60 - 3000
5	плотность PuO_2 (г/см ³)	11,44
6	плотность Au (г/см ³)	19,3
7	рабочий объем Ge(Li)-детектора (см ³)	- 60
8	расстояние от детектора до оси камеры(мм)	- 90
9	радиус электрода с слоем плутония (мм)	38,5
10	сечение поглощения γ -квантов в Pu(барн/атом)	2980 - 17,9
11	сечение поглощения γ -квантов в O ₂ (барн/атом)	0,438 - 0,00105
12	сечение поглощения γ -квантов в Au(барн/атом)	2740 - 0,755

Проводилась также оценка влияния центрального электрода, который дает особенно большую эффективную толщину слоев поглощения γ -кванта, и 16-го электрода, который не был включен в спектрометрический тракт по причине неисправности 16-го предусилителя.

Таблица 3. Подгоночные функции и их параметры для абсолютной эффективности γ -спектрометра

функция $p = \ln E_\gamma$	энергия (кэВ)	параметры			
		a	b	c	d
$F=e^{ap^3+bp^2+cp+d}$	53+121,7	-0,60063	5,64395	-12,8202	1,0
	122+250	-0,00736	-0,17803	1,44877	1,0
$F=e^{ap^2+bp+c}$	150+3500	-0,00588	-1,00105	8,05294	

На рис. 5 показана энергетическая зависимость поправочных коэффициентов. Непрерывные кривые - результат описания методом наименьших квадратов.

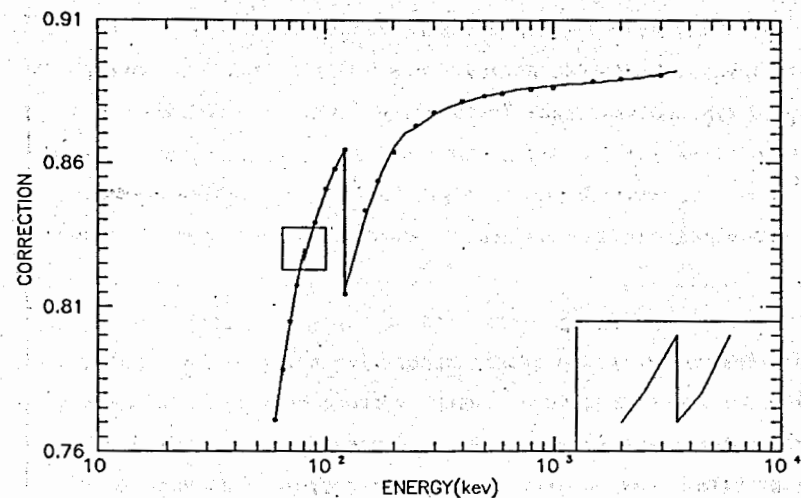


Рис. 5. Зависимость от энергии поправочных коэффициентов. Окончательно поправочные коэффициенты вычислялись в 25 энергетических точках в диапазоне от 60 кэВ до 3000 кэВ.

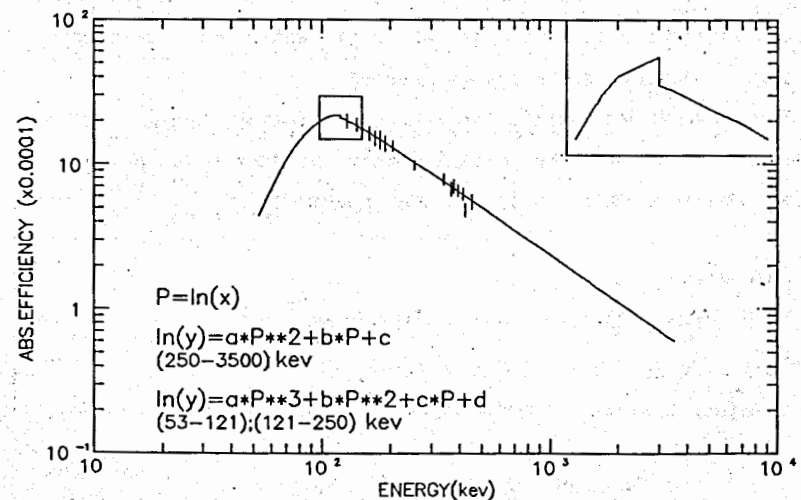


Рис. 6. Абсолютная эффективность γ -спектрометра.

На рисунке можно наблюдать 2 скачка: первый при энергии 80,725 кэВ соответствует К-границе поглощения в золоте, второй - при энергии 121,797 кэВ соответствует К-границе поглощения в плутонии.

Абсолютная эффективность, вычисленная в соответствии с выражением (1), показана на рис. 6, в таблице 3 представлены аналитические выражения и их параметры, определенные методом наименьших квадратов.

Кроме того, для проверки правильности определенной методом Монте-Карло абсолютной эффективности γ -спектрометра проводились измерения с использованием линий мягкого γ -излучения плутония, содержащегося в камере деления. Полученные результаты для 15 сравнительно интенсивных γ -фотопиков плутония нормировались на величину абсолютной эффективности при энергии $E_{\gamma} = 413$ кэВ.

Определенные таким образом величины эффективности представлены штрихами на рисунке 6. Видно, что полученные по линиям ^{239}Pu оценки эффективности в пределах 10% ошибок совпадают с кривой абсолютной эффективности. Это подтверждает надежность определения абсолютной эффективности γ -спектрометра.

В заключение мы считаем своим приятным долгом выразить благодарность Л. Б. Пикельнеру и А. Б. Попову за постоянный интерес к работе, полезные обсуждения и ценные замечания.

Литература

1. И. Н. Силин. Препринт ОИЯИ 2-8862, Дубна, 1967.
2. Nuclear Data Tables, A7, No. 6 (1970), 565.
3. V. Fajfer, L. Alvarez KFKI-1979-60, Budapest, 1979.

Рукопись поступила в издательский отдел

4 апреля 1989 года.