

Спектры γ -лучей, возбуждаемых при неупругом рассеянии быстрых нейтронов ядрами магния, алюминия, железа, меди, олова и сурьмы*)

И. Ф. Барчук, М. В. Пасечник, Ю. А. Цыбулько

Изучение неупругого рассеяния быстрых нейтронов представляет собой важную задачу как с теоретической, так и с практической точек зрения. С теоретической точки зрения важность этих исследований состоит в возможности получить данные об уровнях стабильных ядер. Что касается практического значения, то следует указать на важную роль процессов неупругого рассеяния нейтронов в реакторах на быстрых нейтронах, а также на то, что для завершения разработки теории реакторов на быстрых нейтронах необходимы данные о спектрах неупруго рассеянных нейтронов [1], [2]. В связи с этим необходимость развития нейтронной спектрометрии быстрых нейтронов и γ -спектроскопии при неупругом рассеянии нейтронов является очевидной. Поэтому за последние 5—7 лет появилось множество работ, посвященных этим вопросам.

В данной работе измерены спектры γ -лучей, возбуждаемых при неупругом рассеянии нейтронов с энергией 2,8 Мэв ядрами магния, алюминия, железа, меди, олова и сурьмы. Измерения производились с помощью сцинтилляционного спектрометра с кристаллом NaJ(Tl), фотоэлектронного умножителя ФЭУ-1Б и 50-канального анализатора импульсов с памятью на магнитном барабане. Разрешение спектрометра составляло 6,5—7% для γ -лучей от Co^{60} . Обнаружены γ -лучи со следующими энергиями (Мэв): у магния 0,97; 1,41; 1,92; 2,3; у алюминия 0,84; 1,00; 1,80; 2,16; у железа 0,84; 1,25; 1,46; 1,70; у меди 0,63; 0,78; 0,96; 1,12; 1,38; 1,46; 1,72; 2,03; у олова 0,84; 1,16; 1,50; 1,80; 2,16; у сурьмы 1,04; 1,50; 1,84; 2,16.

В настоящей работе описаны эксперименты по изучению γ -спектров, возбуждаемых при неупругом рассеянии нейтронов с энергией 2,8 Мэв в магнии, алюминии, железе, меди, олове и сурьме.

Для измерения спектров γ -лучей при неупругом рассеянии нейтронов применялась установка, показанная на рис. 1. Нейтроны получались с помощью реакции D(d, n)He^3 на низковольтном ускорителе, работающем при напряжении 140—150 кВ. Пучок дейтронов с силой тока 100—110 мкА бомбардировал алюминиевую полусферу диаметром 40 мм и толщиной стенки 0,3 мм. Последняя являлась концом мишенной части вакуумной системы ускорителя. В результате окклюзии дейтронов в алюминии получалась дейтериевая мишень. Интен-

сивность источника нейтронов составляла 200—300 мкюри радон-бериллиевого эквивалента. Мишенная часть установки была изготовлена из тонкостенной дюралюминиевой трубы диаметром 50 мм и длиной 190 см. Таким образом, мишень была удалена на 2—3 м от всех массивных деталей ускорителя и от стен, потолка и пола помещения. При такой конструкции и таком расположении мишенной части установки источник нейтронов испускал ничтожно малое по сравнению с другими мишенями количество γ -лучей.

Сцинтилляционный спектрометр состоял из кристалла NaJ(Tl) диаметром 60 мм и высотой 50 мм и фотоэлектронного умножителя ФЭУ-1Б. Фотоумножитель и кристалл помещались и закреплялись в тонкостенном цилиндрическом контейнере из жести для защиты их от света.

Импульсы от фотоумножителя подавались на предварительный усилитель, усилитель

*) Сокращенное изложение статьи, представленной в «Український фізичний журнал».

и многоканальный амплитудный анализатор импульсов. Анализатор импульсов с памятью на магнитном барабане [3] давал возмож-

товлева из парафина (95 %) с примесью аморфного бора (5 %), а нижняя часть—из свинца. Парафиновый конус имел высоту 25 см и диаметры сечений 12 и 80 мм,

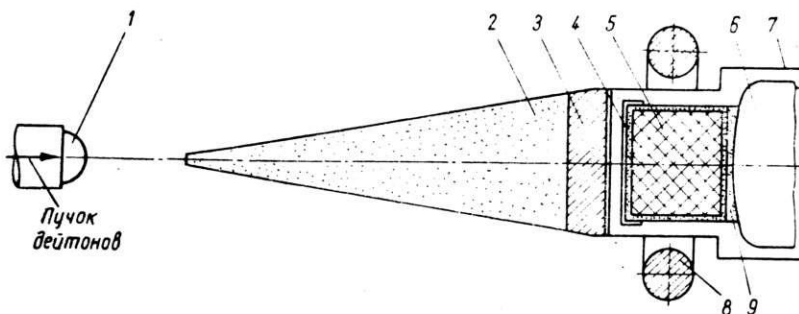


Рис. 1. Схема эксперимента.

1—мишень; 2—парафин+бор; 3—свинец; 4—окись магния; 5—кристалл NaJ(Tl); 6—фотоумножитель ФЭУ-1Б; 7—кожух; 8—рассеиватель в виде тора; 9—стекло.

ность использовать 50 или 80 каналов емкостью 2^{17} или 2^{11} импульсов на канал соответственно. Наблюдение спектра импульсов осуществлялось в двоичной и линейной системах с помощью двух электронно-лучевых трубок. Разрешающее время анализатора—1,5 мсек, отклонение амплитудной характеристики от линейности $<1\%$ при амплитуде импульсов 50 в. Усилительная часть спектрометра была линейна с отклонением $<0,25\%$ при амплитуде импульсов 80 в. Для достижения наилучших разрешения и линейности для энергий γ -лучей до 3 Мэв оптимальный режим работы ФЭУ-1Б подбирался экспериментально [4]. Питание всех узлов спектрометра осуществлялось от источников с электронной стабилизацией. Подробное описание схемы и наладки спектрометра будет дано в отдельной статье.

На рис. 2 и 3 приведены фотоснимки спектров импульсов, полученные при облучении кристалла спектрометра γ -лучами от Co^{60} (энергия γ -лучей 1,17 и 1,33 Мэв) и Sb^{124} (энергия γ -лучей 0,60 и 1,68 Мэв [5]), при работе анализатора с 80 каналами и при пороге дискриминатора, отсекающем 15 каналов. В верхней части этих рисунков приведены фотоснимки спектра импульсов в двоичной системе, а в нижней—в линейной системе. Как видно из рис. 2 энергетическое разрешение спектрометра для γ -лучей от Co^{60} составляло $\sim 6,5\text{--}7\%$. Для защиты кристалла спектрометра от прямого пучка нейтронов и γ -лучей от мишени применялся усеченный конус, верхняя часть которого была изго-

товлева из парафина (95 %) с примесью аморфного бора (5 %), а нижняя часть—из свинца. Парафиновый конус имел высоту 25 см и диаметры сечений 12 и 80 мм, свинцовый—высоту 5 см и диаметры сечений 80 и 90 мм. Примесь бора в парафине значительно понижает фон γ -лучей, возникающих при радиационном захвате нейтронов в парафине.

В качестве рассеивателей применялись торы из исследуемых элементов диаметром 130 мм и диаметрами сечения от 20 до 30 мм (более толстые рассеиватели были изготовлены из легких элементов).

Спектрометр, защитный конус и рассеиватель подвешивались к потолку и к стенам помещения на стальных струнах соосно

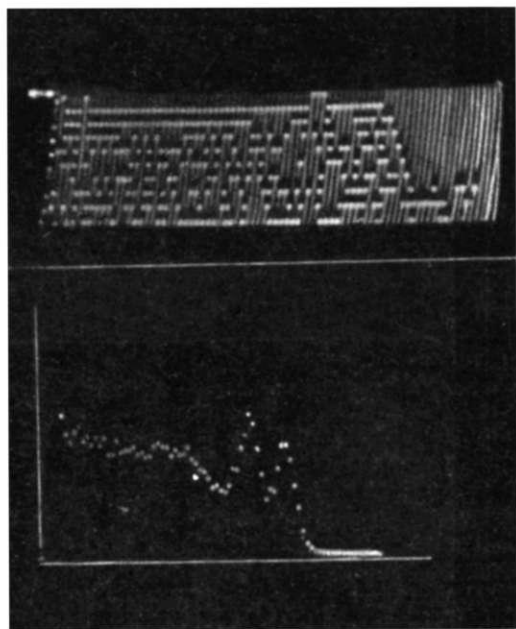


Рис. 2. Спектр импульсов от γ -лучей, испускаемых препаратом Co^{60} .

Вверху—спектр импульсов в двоичной системе; внизу—в линейной системе.

с пучком дейтронов так, что расстояние от мишени до центра кристалла было 40 см. При такой геометрии опыта от рассеивателя

к центру кристалла попадали нейтроны и γ -лучи, рассеянные под углом 100° .

В качестве монитора нейтронного потока был использован алюминиевый β -счетчик типа АС-1, на который надевался серебряный цилиндр диаметром 10 мм, высотой 50 мм и с толщиной стенки 0,3 мм. Счетчик вместе с этим цилиндром помещался внутри цилиндра из парафина диаметром 30 см и высотой 30 см вдоль его оси. Считались электроны

рассеивателя—до одинакового количества отсчетов монитора. Спектр импульсов от γ -лучей, попадающих в кристалл спектрометра из рассеивателя, получался в результате вычитания количеств импульсов в каждом канале анализатора, полученных при этих измерениях. Необходимо отметить, однако, что определенный вклад в результаты вносят импульсы от γ -лучей, возникающих при неупругом рассеянии и радиационном захвате нейтронов в кристалле NaJ(Tl). Эти нейтроны попадают в кристалл из рассеивателя.

Наше внимание было обращено на изучение распределения по амплитуде импульсов фона γ -лучей и нейтронов при работе установки без рассеивателя. Необходимость такого изучения обусловлена тем, что это распределение не является плавным, а имеет сложную структуру с пиками. Дрейф в усилении спектрометра и появление во время эксперимента новых пиков фона может внести значительные погрешности в спектры после вычитания фона. В наших экспериментах контроль за дрейфом усиления спектрометра производился путем снятия после каждого облучения спектра импульсов от γ -лучей Sb^{124} и Co^{60} . В расчет брались данные, при которых дрейф не был замечен. Оказалось, что форма спектра импульсов от фона при работе установки без рассеивателя сохраняется в пределах статистических погрешностей.

Наращение за время эксперимента длиннопериодной составляющей фона γ -лучей, возникающих в результате поглощения нейтронов, окружающими предметами и кристаллом не сказывается заметно на спектре импульсов. Последнее было проверено путем вычитания двух спектров импульсов фона, измеренных до и после работы нейтронного генератора.

На рис. 4—9 приведены спектры γ -лучей, возникающих при облучении рассеивателей нейтронами с энергией 2,8 Мэв, измеренные при работе анализатора импульсов с 50 каналами. Во всех случаях, где спектрометром захватывались малые энергии, отчетливо проявляется пик при энергии γ -лучей 0,5 Мэв. Он вызван γ -лучами, возбуждаемыми рассеянными нейтронами в кристалле NaJ(Tl). Как следует из работ [6]—[8], при неупругом рассеянии нейтронов натрием и йодом в них возбуждается интенсивная

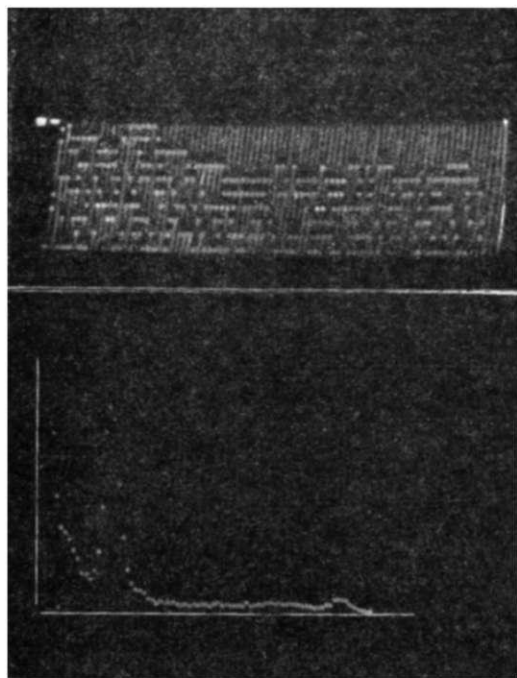


Рис. 3. Спектр импульсов от γ -лучей, испускаемых препаратом Sb^{124} .

Вверху—спектр импульсов в двоичной системе; внизу—в линейной системе.

от короткопериодной активности (24,2 сек. и 2,3 мин.), возникающей в серебре при поглощении нейтронов. Правильность работы монитора была проверена путем сравнения с отсчетами всеволнового борного счетчика. Сравнение показало, что отношение отсчетов этих двух счетчиков находилось в пределах статистических ошибок. Монитор помещался на расстоянии 1,5 м от мишени ускорителя под углом 150° по отношению к дейтону пучку.

Для получения спектра γ -лучей производилось два измерения—с рассеивателем и без

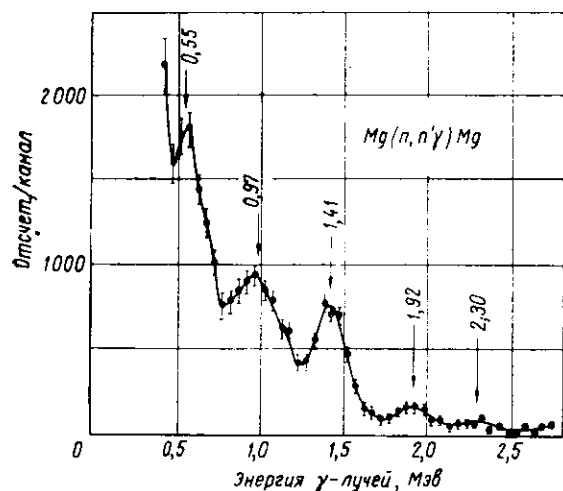


Рис. 4. Спектр импульсов от γ -лучей, возбуждаемых при неупругом рассеянии нейтронов с энергией 2,8 Мэв в магнии.

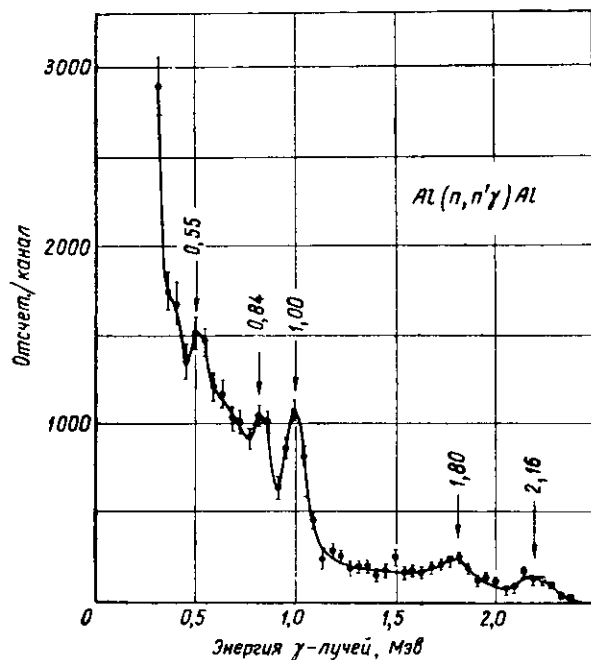


Рис. 5. Спектр импульсов от γ -лучей, возбуждаемых при неупругом рассеянии нейтронов с энергией 2,8 Мэв в алюминии.

γ -линия с энергией около 0,5 Мэв. Гамма-линии с другими энергиями, возбуждаемые в кристалле нейтронами, имеют малую интенсивность и на приведенных спектрах заметно не проявляются.

Энергии γ -лучей для всех промеренных в нашей работе элементов приведены во второй колонке таблицы. В третьей колонке

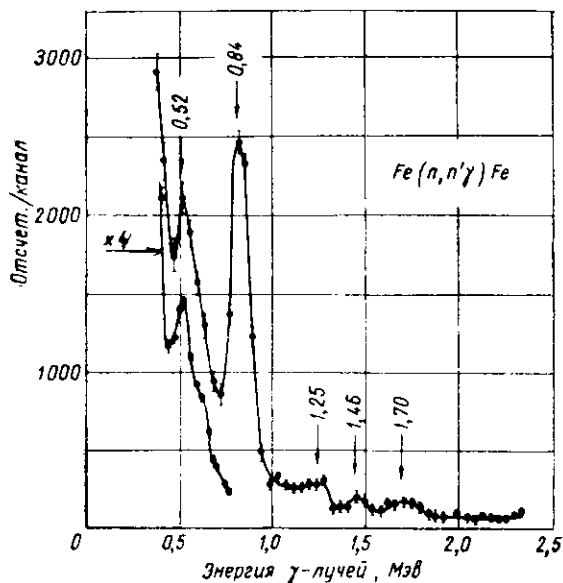


Рис. 6. Спектр импульсов от γ -лучей, возбуждаемых при неупругом рассеянии нейтронов с энергией 2,8 Мэв в железе.

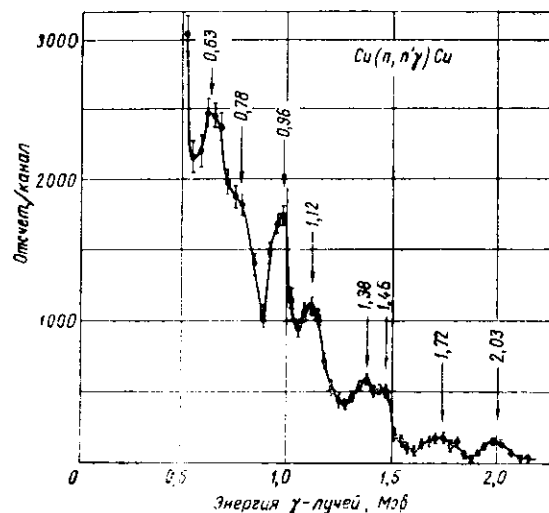


Рис. 7. Спектр импульсов от γ -лучей, возбуждаемых при неупругом рассеянии нейтронов с энергией 2,8 Мэв в меди.

даны относительные интенсивности γ -линий, определенные по отношению к наиболее интенсивной линии для каждого элемента

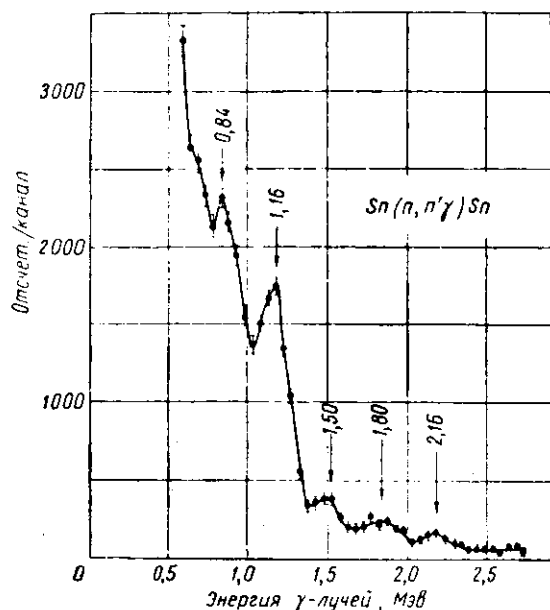


Рис. 8. Спектр импульсов от γ -лучей, возбуждаемых при неупругом рассеянии нейтронов с энергией 2,8 Мэв в олове.

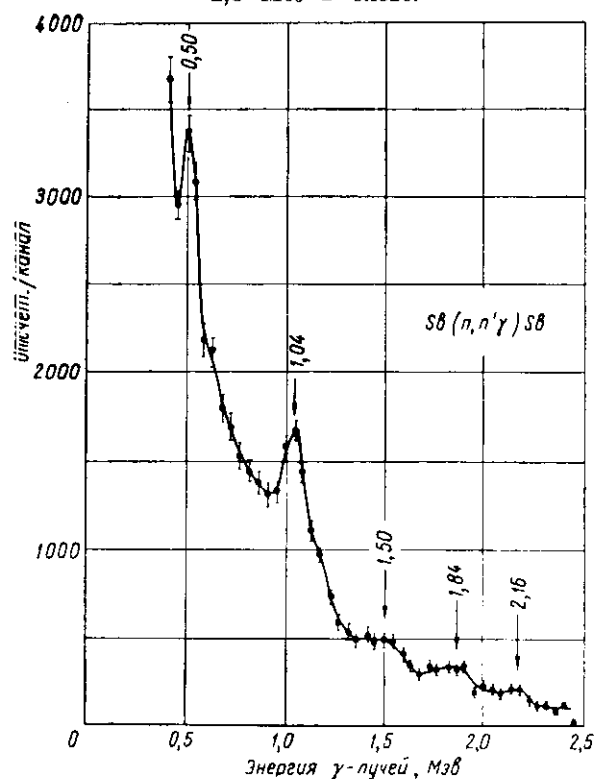


Рис. 9. Спектр импульсов от γ -лучей, возбуждаемых при неупругом рассеянии нейтронов с энергией 2,8 Мэв в сурьме.

в отдельности. Интенсивность линий определена весьма приблизительно из-за трудностей, встречающихся при разложении сложного спектра на элементарные. При этом разложении были использованы формы линий, полученные при облучении кристалла спектрометра γ -лучами с известными энергиями от радиоактивных изотопов. При определении интенсивностей γ -линий по данным [9] введены поправки на зависимость фотоэффекта в кристалле NaJ(Tl) от энергии γ -лучей. Ввиду того, что кристалл имел довольно

Таблица

Гамма-лучи, возбуждаемые при неупругом рассеянии нейтронов с энергией 2,8 Мэв

Элемент	Энергия γ -лучей Мэв	Относительная интенсивность γ -линии
Магний	$0,97 \pm 0,05$	0,3
	$1,41 \pm 0,02$	1,0
	$1,92 \pm 0,04$	0,2
	2,3	
Алюминий	$0,84 \pm 0,02$	0,6
	$1,00 \pm 0,02$	1,0
	$1,80 \pm 0,05$	0,8
	$2,16 \pm 0,03$	0,7
Железо	$0,84 \pm 0,02$	1,0
	$1,25 \pm 0,04$	0,1
	$1,46 \pm 0,04$	0,1
	$1,70 \pm 0,04$	0,1
Медь	$0,63 \pm 0,04$	0,3
	$0,78 \pm 0,08$	0,6
	$0,96 \pm 0,02$	1,0
	$1,12 \pm 0,04$	0,9
	$1,38 \pm 0,04$	0,6
	$1,46 \pm 0,04$	0,5
	$1,72 \pm 0,04$	0,4
Олово	$2,03 \pm 0,04$	0,4
	$0,84 \pm 0,02$	0,6
	$1,16 \pm 0,02$	1,0
	$1,50 \pm 0,04$	0,3
	$1,80 \pm 0,04$	0,4
Сурьма	$2,16 \pm 0,04$	0,3
	$1,04 \pm 0,02$	1,0
	$1,50 \pm 0,04$	0,4
	$1,84 \pm 0,04$	0,4
	$2,16 \pm 0,04$	0,2

большие размеры, в интенсивность пиков определенный вклад вносили эффект Комптона и эффект образования пар в кристалле. Однако поправки на зависимость этих эффектов от энергии γ -лучей не делались. Из качественного рассмотрения этих зависимостей можно заключить, что приведенные в таблице относительные интенсивности γ -линий несколько занижены для γ -лучей

с энергией < 2 Мэв и завышены для γ -лучей с большей энергией.

Авторы считают своим долгом поблагодарить сотрудников Института кристаллографии АН СССР Л. М. Беляева и Г. Ф. Добржанского за изготовление кристалла NaJ(Tl) и любезное предоставление его для выполнения данной работы.

Поступила в редакцию 22 VIII 1957 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Гурвич и др., Материалы Международной конференции по мирному использованию атомной энергии, Женева, 1955, Изд. АН СССР, Москва, 1957, т. 4, стр. 387.
2. D. Okrent, R. Avery, H. Hummel, Proc. Intern. Conf. Peaceful Uses Atomic Energy, Geneva, 1955, U. N., 1956, v. 5, p. 347.
3. Р. Г. Оффенгенден, Диссертация, Институт физики АН УССР, Киев, 1956 г.
4. И. Ф. Барчук, Е. А. Галкин, М. В. Пасечник, Н. Н. Пучеров, Известия АН СССР, сер. физ. 19, 352 (1955).
5. Б. С. Желепов, Л. К. Пекер, Схемы распада радиоактивных изотопов. Изд. АН СССР, 1957 г.
6. U. E. Scherrer, B. A. Allison, W. R. Faust, Phys. Rev. 96, 386 (1954).
7. J. L. Morgan, Phys. Rev. 103, 1031 (1956).
8. E. A. Wolf, Phil. Mag. 1, 102 (1956).
9. Дж. Биркс, Сцинтилляционные счетчики. Изд. ИЛ, 1955 г.