

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



С 344.1 ж
Б-955

14/5-74

1 - 7527

В.М.Быстрицкий, Л.С.Вертоградов, В.В.Фильченков

132/2-74

РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГИСТРАЦИИ
НЕЙТРОНОВ И ЭЛЕКТРОНОВ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ
С МЮОНАМИ

1973

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

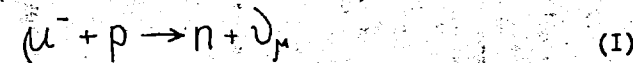
1 - 7527

В.М.Быстрицкий, Л.С.Вертоградов, В.В.Фильченков

РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГИСТРАЦИИ
НЕЙТРОНОВ И ЭЛЕКТРОНОВ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ
С МЮОНАМИ

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

В эксперименте /I/ по измерению скорости фундаментальной реакции слабого взаимодействия - захвата мюна протоном



регистрация изучаемого процесса осуществлялась путем детектирования нейтронов с энергией 5,2 Мэв. Для определения вероятности захвата в этом опыте использовалось отношение абсолютных выходов нейтронов и электронов, образующихся в результате распада мюна

$$\lambda_{\text{захв}} = \lambda_0 \cdot \frac{N_n}{\epsilon_n} / \frac{N_e}{\epsilon_e} \quad (2)$$

где $\lambda_{\text{захв}}$ - скорость процесса (1); λ_0 - скорость распада мюна; N_n, N_e - числа зарегистрированных нейтронов и электронов; ϵ_n, ϵ_e - эффективности регистрации этих частиц.

Целью настоящей работы является расчет эффективностей ϵ_n и ϵ_e регистрации нейтронов и электронов в эксперименте по захвату мюнов в газообразном водороде.

Схема основной части установки (газовая мишень и детекторы нейтронов), используемой в этом эксперименте, представлена на рис. I. Выделение останков мюнов в водороде осуществлялось с помощью расположенных внутри мишени сцинтилляторов из иодистого цезия (счетчики 4,5). Сцинтиллятор счетчика 5 выполнен в виде стакана длиной 205 мм и толщиной 5 мм. Регистрация нейтронов и электронов осуществлялась с помощью девяти сцинтилляционных счетчиков с кристаллами стильбена. Размеры этих кристаллов составляли $\varnothing 70 \times 30$ мм.

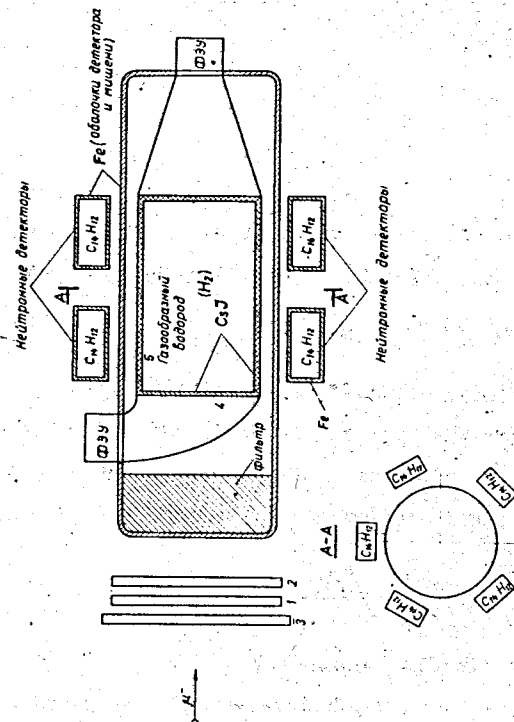


Рис. 1. Схематический чертёж экспериментальной установки.

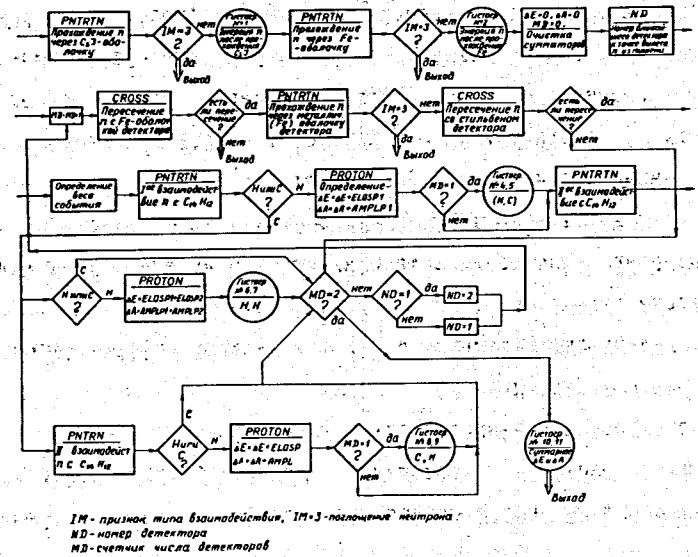


Рис. 2. Блок-схема программы для расчета эффективности регистрации нейтронов.

В условиях плохой геометрии установки (протяженные размеры мишени) эта задача наилучшим образом решается путем численного моделирования с помощью метода Монте-Карло. Расчеты по этому методу производились на ЭВМ БЭСМ-6, в основу программы была положена универсальная программа "FOWLOM"^{1/2/}.

Последовательность расчетов состояла из следующих этапов:

- 1) моделирование точки остановки мюона в мишени и угла вылета нейтрона (электрона);
- 2) моделирование взаимодействия с веществом внутренних сцинтилляторов и стенок мишени;
- 3) моделирование взаимодействий в стилибене.

Часть расчетов, относящаяся к пункту (1), была общей как для расчета эффективности регистрации нейтронов, так и электронов.

Расчет эффективности регистрации нейтронов

При моделировании точки остановки мюона было использовано экспериментальное пространственное распределение остановок мюонов по объему мишени. Распределение по углу вылета нейтронов полагалось изотропным.

На рис. 2 приведена блок-схема алгоритма моделирования процессов взаимодействий нейтрона после вылета его из мишени. Моделирование прохождения нейтрона через сцинтиллятор счетчика 5 (5 мм CsI), стенки мишени (3 мм Fe) и обложки детектора (1 мм Fe) осуществлялось с помощью программы "PMTRTN".

При этом учитывались следующие процессы, влияющие на изменение

энергии и направление движения нейтрона:

- 1) упругое рассеяние;
- 2) неупругое рассеяние;
- 3) реакции типа (n, α) , (n, p) .

Значения сечений этих процессов на ядрах цезия, йода и железа были взяты из работ /3,4,5/.

Моделирование взаимодействий нейтрона с веществом детектора проводилось с помощью той же программы "PMTRTN".

В ходе расчетов были учтены следующие взаимодействия:

- а) упругое рассеяние нейтрона на водороде (n, p) ;
- б) упругое рассеяние нейтрона на углероде (n, c) ;
- в) неупругое рассеяние нейтрона на углероде.

Нами учитывалось не более двух последовательных взаимодействий нейтрона с ядрами углерода и водорода. При этом возможны следующие комбинации взаимодействий:

$$(n, c); (n, c), (n', c'); (n, c), (n', p);$$
$$(n, p); (n, p), (n', c); (n, p), (n', p');$$

Ввиду того, что световыход от ядер отдачи углерода крайне мал, в рассмотрение брались последние четыре варианта взаимодействия.

В расчетах требовалось определить вид амплитудного распределения для нейтронов из реакции (1). Это было необходимо как для правильной интерпретации регистрируемых событий изучаемого процесса в опыте /1/, так и для определения эффективности регистра-

ции, зависящей от вида этого распределения из-за наличия конечного энергетического порога регистрирующей аппаратуры.

Известно, что в органическом сцинтилляторе амплитуда световыхода пропорциональна потере энергии лишь для релятивистских частиц (электронов), для протонов эта зависимость носит нелинейный характер. В связи с этим принято выражать величину световыхода для протона в масштабе эквивалентной (по световыходу) энергии электрона. Соотношение между энергией протона и эквивалентной энергией электрона выражается формулой Биркса /6/

$$\frac{dS}{dx} = \frac{A \frac{dE}{dx}}{1 + K\beta \frac{dE}{dx}}, \quad (3)$$

где S - световыход кристалла; X - длина пробега протона в кристалле; E - энергия протона; A и $K\beta$ - постоянные кристалла. При расчете амплитудного распределения нами было использовано значение параметра $K\beta$, равное $0,012 \text{ мг/см}^2 \text{ кэВ}$. При этом зависимость (3) согласуется в пределах точности $(2 + 3)\%$ с зависимостью, которая приводится в работе /7/.

Статистические флуктуации амплитуды световыхода моделировались по формуле /8/

$$\sigma = R_0 \cdot 0,346 \sqrt{AMP \cdot P} \quad (4)$$

σ - стандартное отклонение амплитуды световыхода;

$AMP \cdot P$ - амплитуда световыхода от протонов отдачи в масштабе эквивалентной энергии электрона;

R_0 - амплитудное разрешение нейтронного детектора.

Для определения величины R_0 была создана программа, позво-

ляющая рассчитывать амплитудные спектры комптоновских электронов, образующихся в стильбене при регистрации γ - квантов. Эти распределения сравнивались по методу наименьших квадратов с экспериментальными амплитудными спектрами, измеренными с источниками моноэнергетических γ - квантов. В результате такого сравнения были найдены оптимальные значения величины R_0 для различных энергий.

На рис. 3 приводятся амплитудные распределения для нейтронов из реакции (I), вычисленные в различных предположениях:

- 1) учет только однократного рассеяния нейтрона на водороде;
- 2) учет однократного и двукратного рассеяния на водороде;
- 3) учет одно- и двукратного рассеяния нейтрона на водороде и однократного рассеяния нейтрона на углероде.

Как можно видеть, характер распределения меняется относительно слабо в зависимости от учета только однократных или одно и двухкратных взаимодействий. Это согласуется с результатами работ /9, 10/.

В таблице I суммированы результаты расчетов для вероятности различных каналов взаимодействия нейтронов в иодистом цезии и железе, а также средние потери энергии нейтронов. Можно видеть, что средняя доля нейтронов, остановившихся в веществе стенок мишени, составляет примерно 3%.

В таблице 2 даны парциальные вклады в суммарную эффективность различных каналов взаимодействия нейтрона в стильбене (без учета энергетического порога регистрирующей аппаратуры).

Окончательное значение эффективности регистрации нейтронов

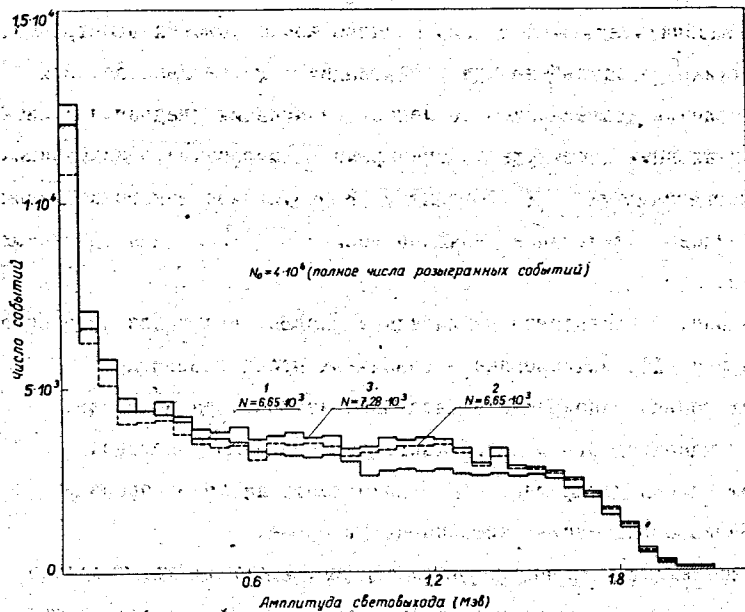


Рис. 3. Амплитудные распределения протонов отдачи. По оси абсцисс - амплитуда световыхода в эквивалентной энергии электрона, по оси ординат - число событий на интервал 0,03 Мэв; 1 - учет только однократного рассеяния нейтрона на водороде; 2 - однократного и двукратного рассеяния на водороде; 3 - однократного и двукратного рассеяния на водороде и однократного рассеяния на углероде.

Таблица 1.

Вероятности взаимодействия нейтрона с энергией 5,2 Мэв в подслое цезия и железе.

Вещество	Упругое взаимодействие		Неупругое взаимодействие		
	Вероятность взаимодействия (%)	Средние потери энергии нейтрона (Мэв)	Возбуждение сложного ядра (n, A) A*	Средн. потери энергии нейтрона (Мэв)	Реакция (n, α); (n, p)
CsI (5 мм)	3,8	0,19	2,7	0,53	1,4
Fe (3 мм)	8,0	0,28	4,8	2,9	1,3
CsI и Fe					2,7

Таблица 2.

Относительные вклады в эффективность регистрации некоторых процессов взаимодействия нейтронов в стилибене.

Тип взаимодействия	(n, p)	(n, p), (n', c)	(n, p), (n', p')	(n, c), (n', p)
Вклад в эффективность в %	56,8	15,4	17,7	10,1

от μ -захвата в водороде составляет $0,0173 \pm 0,00034$. Оно приводится в последней колонке таблицы IV. В этой же таблице приведены значения различных факторов, определяющих эффективность.

Заметим, что геометрическая эффективность определена как отношение числа нейтронов, попадающих в детектор, к полному числу разыгрываемых событий. Значения фактора временных ворот и амплитудного порога соответствовали условиям опыта /1/.

Для оценки чувствительности результатов моделирования к величине погрешности используемых данных о сечениях взаимодействия нейтронов с веществом были проведены расчеты, в которых значения указанных сечений были изменены на два стандартных отклонения. При таком же количестве разыгранных событий, как и в основном расчете, эффективность регистрации оказалась равной

$E_n = 0,0172 \pm 0,00033$, т.е. отличающейся от основного результата в пределах статистической ошибки.

Кроме того, были проведены расчеты эффективности регистрации нейтронов для условий, когда стенки отсутствуют и нейтроны падают нормально поверхности кристалла стильбена. Результаты этого расчета согласуются с данными работы /10/.

Следует отметить, что учет более чем двукратных взаимодействий в стильбене приводит, по нашим оценкам, к относительному изменению основного результата менее 1%.

Расчет эффективности регистрации электронов

Для определения эффективности регистрации электронов была создана программа расчетов, позволяющая провести моделирование взаимодействий электронов с веществом стенок мишени.

Таблица III.

Ионизационные и радиационные потери энергии электрона при прохождении 5 мм иодистого цезия.

Энергия электрона (МэВ)	Средний угол многократного рассеяния (градус)	Средние потери энергии на тормозное излучение $(\Delta E)_{\text{рад}}$ (МэВ)	Средние ионизационные потери энергии $(\Delta E)_{\text{ион}}$ (МэВ)	Средне-квадратичный разброс средних потерь энергии ионизации (МэВ)	Коэффициент прохождения
10	56,2	2,3	5,2	1,0	0,5
20	35,8	4,57	4,7	0,7	0,899
30	26,2	7,12	4,6	0,5	0,958
40	20,0	9,72	4,54	0,5	0,965
50	17,4	11,93	4,54	0,5	0,979

Таблица IV.

Основные результаты расчета эффективностей регистрации нейтронов и электронов ж.

	Телесный угол	Фактор временных верот	Эффект. в стил-бене	Кэффиц. проход. через стенки	Фактор порога в амплитудном спектре	Конечное значение эффектив-ности
Нейтроны	0,25	0,46	0,18	0,95	0,42	(0,00789 ± 0,00033)
Электроны			1,0	0,71	0,92	(0,07519 ± 0,00195)

ж) Для упрощения записи вклад в эффективность регистрации электронов за счет тормозных фотонов отдельно не выделяется, а вносится в значение коэффициента прохождения через стенки.

В ходе этих расчетов были получены данные о величине ионизационных потерь энергии электронов в иодистом цезии, железе и стиблене, а также найден вид энергетического распределения фотонов тормозного излучения, образующихся при прохождении электронов через стенки мишени. Эти данные были использованы не только для определения эффективности, но и для оценки фона нейтронов от фотоядерных реакций, возникающего в условиях опыта /1/.

Моделирование прохождения электронов через вещество проводилось общепринятым методом разделения траектории электрона на отдельные отрезки /11,12/. На каждом отрезке производился учет ионизационных и радиационных потерь, а также многократного рассеяния. Теоретические формулы Гайтлера, Шиффа для сечения тормозного излучения электрона /13/ аппроксимировались удобной для расчета формулой /14/:

$$\frac{KG(E_0, K)}{E_0 \bar{\sigma}} = B \left[(1 - V)^2 / \ln(1 - V) \right], \quad (5)$$

где $\bar{\sigma}(E_0, K)$ - сечение испускания тормозного фотона энергии K , электроном с энергией E_0 ; $\bar{\sigma}$ - эффективное сечение тормозного излучения;

$$V = \frac{E_0 - K}{E_0}$$

Параметры a и B определялись для веществ $CsI, Fe, C_{14}H_{12}$ как функции энергии электронов в диапазоне от 5 до 50 Мэв.

Вероятность того, что электрон, пройдя слой вещества толщиной t (г/см²), сохранит больше, чем $e^{-\mu_0}$ от начальной энергии, есть

$$W(BT, \mu) = \frac{(BT - 1, \mu)!}{\Gamma(BT)}, \quad (6)$$

где $T = \frac{t \cdot N_0 \cdot \sigma}{A}$ N_0 - число Авогадро;
 A - атомный вес; $(\gamma T - 1, \zeta)!$ - неполная гамма-функция;
 $\zeta = (1 + \alpha) \ln \frac{E_0}{E_0 - K}$

Розыгрыш энергии испускаемого фотона на каждом отрезке пути электрона производился по формуле (6) (подпрограмма "ГОТОН"). Для каждого вещества значение величины γT было фиксированным, что было эквивалентно разбиению всего пути электрона в веществе на равные отрезки в радиационных единицах. Это значение выбиралось таким образом, чтобы в среднем число разбиений по траектории электрона в данном веществе составляло 15-20, и длина каждого отрезка была достаточной для правильного учета многократного рассеяния.

Величина удельной ионизации $\frac{dE}{dx}$ для CsI вычислялась по формуле Бете-Блоха /15/, а для Fe и $C_{14}H_{12}$ была взята из таблиц /16/. Потери энергии на ионизацию при прохождении электронном слоем вещества толщиной T определялись с помощью выражения $(\Delta E)_{\text{иониз.}} = \frac{dE}{dx}(E') \cdot T$, где $E' = E_1 - (\Delta E)_{\text{раг}}/2$, E_1 - энергия электрона в начале данного отрезка пути, $(\Delta E)_{\text{раг}}$ - потери энергии на тормозное излучение.

Разброс в ионизационных потерях нами не учитывался. Учет многократного рассеяния электрона на данном шаге в веществе ограничивался первым членом функции распределения по Мольеру /17/ (гауссово распределение).

На рис. 4 приведена блок-схема программы для расчета эффективности регистрации электронов. Как отмечалось, геометрическая

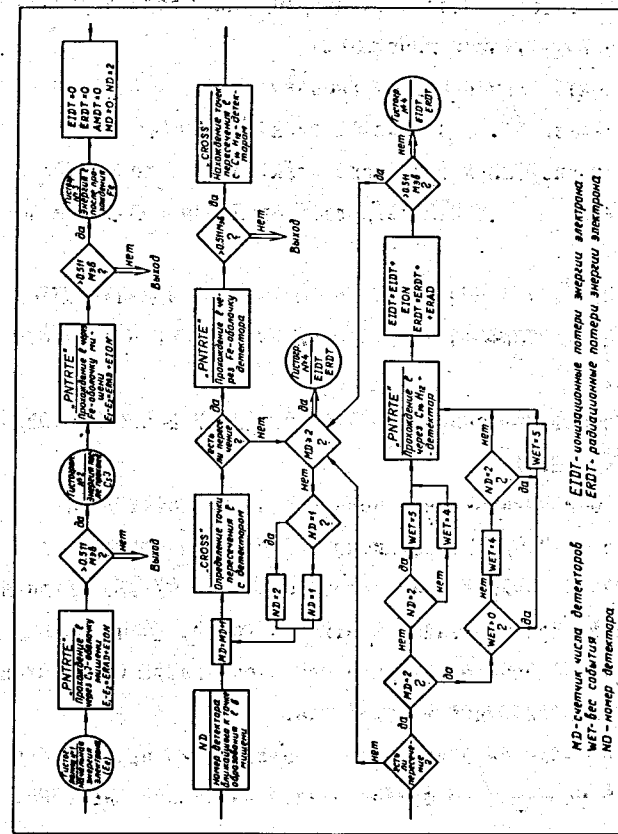


Рис. 4. Блок-схема программы для расчета эффективности регистрации электронов.

часть программы была тождественна геометрической части в расчетах эффективности регистрации нейтронов.

Энергетический спектр электронов от распада мюонов задавался аналитической функцией [18]. С помощью блока "PMT RTE"

учитывались потери энергии и рассеяние электронов в веществах CsI, Fe, C_{14}, H_{12} и производилась проверка попадания частицы в детектор.

Кроме того, программа позволяла учитывать прохождение одного электрона через два детектора и остановки электронов в промежуточных веществах.

На рис. 5а изображены спектры электронов до и после прохождения промежуточных веществ.

Доля электронов, остановившихся в иодистом цезии, составляла 14,5%, а в железе - 18,4%. Коэффициент прохождения электронов через 5 мм иодистого цезия и 3 мм железа составил 67,1%. Средняя энергия электронов, при прохождении этих оболочек, уменьшилась примерно в 2 раза. На этом же рисунке приведен спектр ионизационных потерь энергии электронов в стильбене.

В таблице III приводятся результаты моделирования прохождения электрона через 5 мм CsI с фиксированной начальной энергией.

На рис. 6 приведены распределения по углу многократного рассеяния при прохождении 5 мм иодистого цезия для различных значений начальной энергии электрона, а также спектры фотонов тормозного излучения.

Эффективность регистрации электронов, найденная как отношение числа электронов, зарегистрированных детекторами, к полному числу

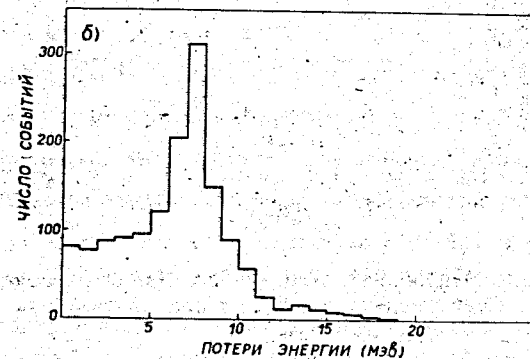
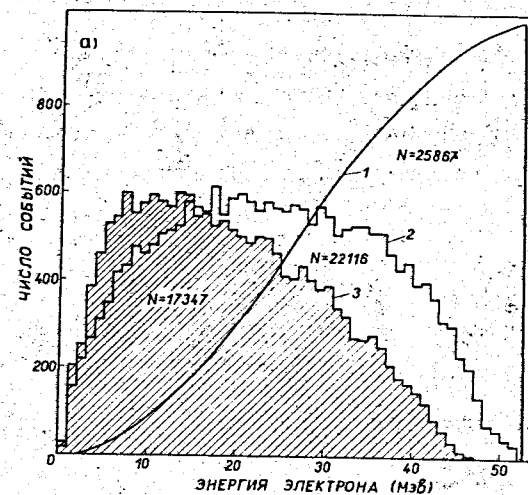


Рис. 5 (а) - Изменение энергетического спектра электронов после прохождения стенок мишени;

1 - начальный энергетический спектр электронов;
2 - спектр электронов после прохождения 5 мм CsI
3 - " - " - 5 мм CsI и 3 мм Fe .

(б) - Спектр потерь энергии электрона в стильбене.

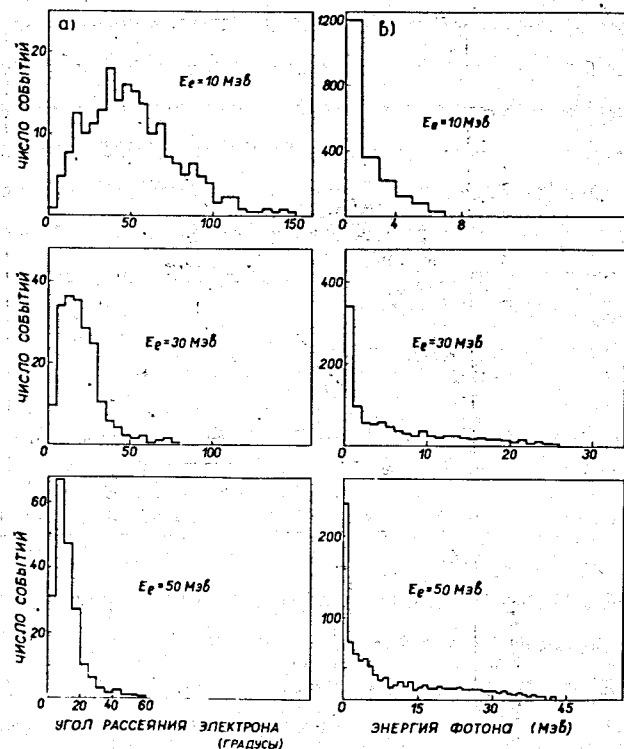


Рис. 6. а) - зависимость угла многократного рассеяния от начальной энергии электрона при прохождении 5 мм иодистого цезия;
 в) - спектры тормозного излучения электронов при прохождении 5 мм иодистого цезия.

электронов, составила $0,1675 \pm 0,0033$. В расчетах эффективности был учтен вклад за счет регистрации фотонов от тормозного излучения электронов, остановившихся в иодистом цезии и железе. Величина этого вклада составила $0,0107 \pm 0,0007$. При вычислении вклада использовались данные об энергетическом распределении и эффективности их регистрации кристаллами стильбена /19/.

Окончательно суммарная эффективность регистрации электронов составила

$$E = E_e + E_\gamma = 0,1782 \pm 0,0033.$$

Неопределенности значений ионизационных потерь энергии электрона, параметров a и b , сечений тормозного излучения, приводили к погрешности величины эффективности относительно основного результата, равной 1%.

Основные результаты расчета эффективности регистрации электронов приведены в таблице IV для опыта /1/.

Следует отметить, что отношение эффективностей регистрации нейтронов и электронов в опыте /1/, которое используется для вычисления вероятности захвата мюона протоном (2), малочувствительно к форме распределения остановок мюонов по объему мишени. Так, при моделировании резко отличных распределений (например, все мюоны останавливаются в начале мишени, в конце мишени или равномерно распределены по всему объему мишени) абсолютные значения эффективностей регистрации нейтронов и электронов изменяются примерно в 1,5 раза, а их отношение лишь на $\approx 3\%$.

Авторы выражают благодарность В.Г.Зинову и Ю.П.Мерекову за полезные обсуждения и ценные замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.М.Быстрицкий, В.П.Джелепов, П.Ф.Ермолов, К.О.Оганесян, И.Н.Омельяненко, С.Ю.Пороховой, В.С.Роганов, А.И.Руденко, В.В.Фильченков. Препринт ОИЯИ ДІ-7300, Дубна, 1973 г.
2. С.Ф.Бережнев, Л.С.Вертоградов. Препринт ОИЯИ РІІ-6175, Дубна, 1971.
3. Атлас нейтронных соединений. Издание второе, М., Атомиздат, 1958.
4. Neutron Cross Section. BNL 325, 2nd Edition, Supplement No.2 (Physics-TID-4500), 1966.
5. J.J.Schmidt. Neutron Cross Section for Fast Reactor Materials, Part II; Tables KFK 120 (EANDC-E-354), 1962.
6. C.O.Swarts, G.E.Owen. Fast Neutron Physics. Part I, 215, 1960.
7. И.Войтковская, В.С.Евсеев, Т.Козловски, В.С.Роганов. Препринт ОИЯИ РІЗ-6053, Дубна, 1971.
8. J.G.Moore, K.F.Orton. Selected Topics in Radiation Dosimetry. Proceedings of Symposium, Vienna, 1960.
9. Г.Г.Дорошенко, В.И.Глаголев, И.В.Фимошкин, М.И.Афанасьев. В сб. "Вопросы дозиметрии и защиты от излучений". Вып. I, М., Госатомиздат, 1962.

10. В.Г.Золотухин, Г.Г.Дорошенко, Б.А.Ефименко. В сб. "Вопросы дозиметрии и защиты от излучений". Вып. 2, М., Госатомиздат, 1963.
11. J.F.Perkins. Phys.Rev., 126, 1781(1962).
12. J.E.Perkins, S.Penner, C.S.Robinson. Phys.Rev., V.107, 1544, 1957.
13. H.Bethe, W.Heitler. Proc. of the Royal Society, v. 146, 83, 1934.
14. L.Eyges. Phys.Rev., 76, 264 (1949).
15. А.А.Воробьев, Б.А.Кононов. Прохождение электронов через вещество. Томск, 1966.
16. Studies in Penetration of Charged Particles in Matter. Nuclear Science Series, Report No. 39. Committee on Nuclear Science, Washington, D.C. (1964).
17. R.Biancastelli, P.Stein. Istituto Superiore di Sanita Laboratori di Fisica, Roma, 21, Giglio, 1966 ISS 66/26.
18. Г.Челен. Физика элементарных частиц. Изд. "Наука" М., 1966.
19. С.М.Ciabella, J.A.Devanney. Nuclear Instruments and Methods, v. 60, No. 3, 269 (1968).

Рукопись поступила в издательский отдел
2 ноября 1973 года.