

5542

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. В.Ф. УТКИНА**

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ β -ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

Методические указания
к лабораторной работе

Рязань 2020

УДК 537.027

Взаимодействие β -излучения с веществом: методические указания к лабораторной работе / Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.: А.Е.Малютин, А.П.Соколов. – Рязань, 2020. – 8 с.

Изложены элементы теории, метод эксперимента, описание экспериментальной установки, порядок выполнения работы, а также указания по обработке полученных экспериментальных данных.

Предназначены для студентов всех специальностей, изучающих дисциплину «Физика».

Табл. 2. Ил. 5. Библиогр.: 5 назв.

Радиоактивное излучение, β -излучение, ослабление β -излучения, пробег β -частиц

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра общей и экспериментальной физики РГРТУ (зав. кафедрой доц. М.В.Дубков)

Взаимодействие β -излучения с веществом

Составители: М а л ю т и н Александр Евгеньевич
С о к о л о в Александр Павлович

Редактор Р.К. Мангутова

Корректор С.В. Макушина

Подписано в печать 26.03.20 Формат бумаги 60 × 84 1/16.

Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 0,5.

Тираж 200 экз. Заказ .

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

Цель работы: исследование взаимодействия β -излучения с веществом.

Приборы и принадлежности: источник β -частиц, держатель, набор алюминиевых фильтров, скамья с линейкой, измерительное устройство.

ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ И МЕТОД ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Бета-излучение

Французский физик А.Беккерель в 1896 г. при изучении люминесценции солей урана случайно обнаружил самопроизвольное испускание ими излучения неизвестной природы, обладающее высокой ионизирующей и проникающей способностью. Обнаруженное излучение было названо радиоактивным. Дальнейшие исследования показали, что радиоактивное излучение бывает трёх типов: α -, β - и γ -излучение.

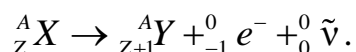
Альфа-излучение отклоняется электрическим и магнитным полями, обладает высокой ионизирующей и малой проникающей способностью. Альфа-излучение представляет собой поток ядер гелия ${}^4_2\text{He}$.

Бета-излучение отклоняется электрическим и магнитным полями, его ионизирующая способность значительно меньше, а проникающая – намного больше, чем у α -излучения. Бета-излучение представляет собой поток быстрых электронов.

Гамма-излучение не отклоняется электрическим и магнитным полями, обладает слабой ионизирующей и очень большой проникающей способностью. Оно представляет собой электромагнитное излучение с чрезвычайно короткой длиной волны и вследствие этого – ярко выраженными корпускулярными свойствами.

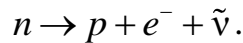
Бета-излучение вызвано радиоактивным превращением ядер, называемым β -распадом. Бета-распад – самопроизвольное превращение нестабильного ядра в ядро с тем же массовым числом A , но с зарядом, отличающимся на $\Delta Z = \pm 1$. Существуют три вида β -распада: электронный и позитронный распады и электронный захват.

1. В электронном распаде (β^- -распаде) ядро испускает электрон e^- и антинейтрино $\bar{\nu}$:

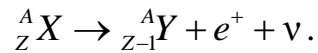


Электрон рождается в результате процессов, происходящих внутри ядра, – один из нейтронов ядра n в процессе β^- -распада превращается

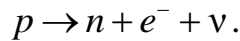
в протон p с испусканием e^- и $\tilde{\nu}$:



2. В позитронном распаде (β^+ -распаде) ядро испускает позитрон e^+ , являющийся античастицей для электрона, и нейтрино ν :

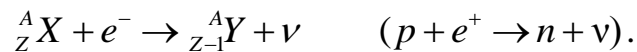


В этом случае протон превращается в нейтрон n с испусканием e^+ и ν :



Так как масса нейтрона больше массы протона, то такой процесс невозможен для свободного протона по энергетическим соображениям. Однако в ядре протон может получить требуемую энергию от других нуклонов.

3. В электронном захвате (ε -захвате) ядро поглощает электрон из атомной оболочки (обычно из K -оболочки) и испускает нейтрино:



В этом распаде не испускается никаких частиц, кроме нейтрино, которые зарегистрировать очень сложно вследствие чрезвычайно слабого взаимодействия их с веществом. Поэтому ε -захват регистрируется по сопровождающему его характеристическому рентгеновскому излучению.

2. Энергетический спектр β -излучения

Исследование энергетического спектра электронов (позитронов) показало, что он является непрерывным (рис. 1). При β -распаде испускаются электроны (позитроны), энергия которых может иметь любое значение от нуля до некоторого максимального E_{\max} , которое называют граничной энергией β -спектра.

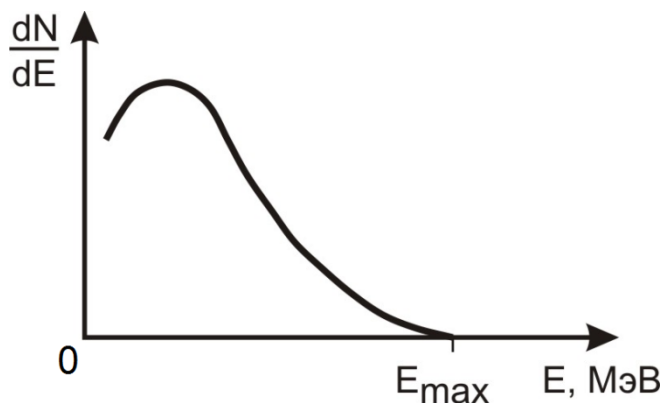


Рис. 1. Бета-спектр

Значения E_{\max} для β -частиц от различных радиоактивных изотопов сильно отличаются. Граничная энергия β -излучения определяется по разности энергий состояний, между которыми происходит переход (см. рис. 2) и которые имеют строго определенную энергию.

Непрерывность β -спектра объясняется тем, что радиоактивное ядро разделяется на три компоненты: 1) дочернее ядро; 2) β -частицу; 3) нейтрино (антинейтрино). Освобождающаяся при β -распаде энергия E_{\max} делится между ними. Доля энергии, получаемая ядром, ничтожна из-за большой его массы. Фактически всю энергию уносят электрон (позитрон) и антинейтрино (нейтрино). Граничная энергия β -излучения соответствует случаю, когда всю освобождающуюся энергию уносит электрон (позитрон).

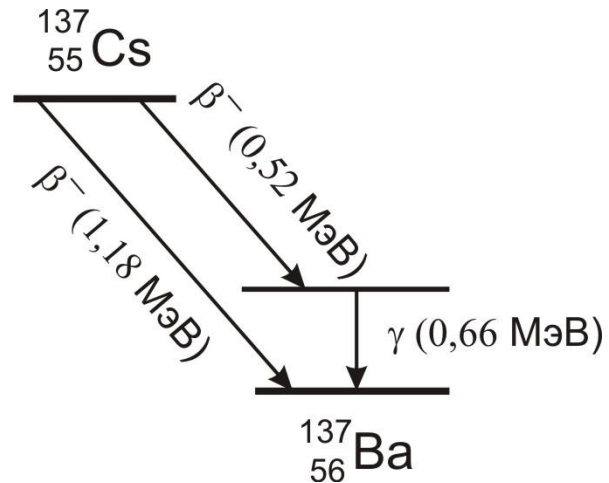


Рис. 2. Схема распада $^{137}_{55}\text{Cs}$

Энергетически β -распад возможен, если масса покоя системы в начальном состоянии (исходное ядро) больше массы покоя системы в конечном состоянии (конечное ядро и испущенные частицы). Считается, что масса покоя нейтрино (антинейтрино) равна нулю. Поэтому условия неустойчивости ядра по отношению к различным видам β -распада запишутся в виде:

$$M(A, Z) > M(A, Z + 1) + m_e \quad \beta^- \text{-распад,}$$

$$M(A, Z) > M(A, Z - 1) + m_e \quad \beta^+ \text{-распад,}$$

$$M(A, Z) + m_e > M(A, Z + 1) \quad \varepsilon\text{-захват,}$$

где $M(A, Z)$ – масса исходного ядра; $M(A, Z + 1)$ – масса конечного ядра, m_e – масса электрона (позитрона).

3. Взаимодействие β -излучения с веществом

Бета-частицы, проходя через вещество, теряют кинетическую энергию на возбуждение и ионизацию атомов среды и на тормозное (электромагнитное) излучение. Поглощение β -излучения в веществе можно описать экспериментально установленным законом: если на слой вещества толщиной l падает узкий параллельный пучок электронов N_0 , то через слой пройдет только N частиц, причем N_0 и N связаны зависимостью

$$N = N_0 e^{-\mu l}, \quad (1)$$

где μ – линейный коэффициент ослабления. Если l измеряется в см, то μ в см^{-1} , так как μl – безразмерная величина.

Толщину слоя можно измерять в единицах массы, выразив толщину через количество вещества в слое, приходящемся на 1 см^2 поперечного сечения пучка частиц, т.е. г/см^2 . Если толщину слоя, измеренного в г/см^2 , обозначить через l' , то

$$l' = l\rho, \quad (2)$$

где ρ – плотность вещества, г/см^3 . Соответственно закон поглощения β -излучения записывается в виде:

$$N = N_0 e^{-\mu' l'}, \quad (3)$$

где μ' – массовый коэффициент ослабления, измеряемый в $\text{см}^2/\text{г}$. Массовый и линейный коэффициенты ослабления связаны зависимостью

$$\mu = \rho \mu'. \quad (4)$$

Линейный коэффициент зависит от природы поглощающего вещества и граничной энергии β -спектра E_{\max} . Массовый коэффициент ослабления, главным образом, зависит от свойств β -спектра (E_{\max}) и примерно одинаков для всех веществ, если порядковые номера Z вещества среды мало отличаются. Зная μ' какого-либо вещества, например алюминия (табл. 1), по соотношению (4) можно оценить μ для другого поглотителя.

При исследовании поглощения излучения в веществе часто используют понятие слоя половинного ослабления $D_{1/2}$ – это толщина слоя, ослабляющего направленное ионизирующее излучение в два раза.

Из закона поглощения β -излучения (1) при

$$N = \frac{N_0}{2} \text{ и } l = D_{1/2}$$

получаем, логарифмируя его,

$$D_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{0,693}{\mu} \text{ (см)} \quad (5)$$

или

$$D'_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu'} = \frac{0,693}{\mu'} \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^2} \right). \quad (6)$$

На практике часто важно знать максимальный пробег β -частиц в веществе, т.е. минимальную толщину слоя вещества, практически полностью поглощающую пучок β -частиц. Максимальный пробег выражают в

линейных единицах R_{\max} (см) или массовых R'_{\max} (г/см²). Соответственно R_{\max} и R'_{\max} связаны соотношением:

$$R'_{\max} = R_{\max} \rho. \quad (7)$$

Для оценки максимального пробега электронов по их максимальной энергии в алюминии можно использовать эмпирические выражения:

$$R_{\max} = 0,407 E_{\max}^{1,36}, \text{ если } 0,15 < E_{\max} < 0,8 \text{ МэВ}, \quad (8)$$

$$R_{\max} = 0,542 E_{\max} - 0,163, \text{ если } 0,8 < E_{\max} < 3 \text{ МэВ}. \quad (9)$$

Если использовано поглощающее вещество из другого материала, то

$$R'_{\max} = \frac{Z_{Al}}{A_{Al}} \frac{A}{Z} R'_{\max Al} = 0,4815 \frac{A}{Z} R'_{\max Al}. \quad (10)$$

Поправочный коэффициент при $R'_{\max Al}$ обычно мало отличается от 1, например, для меди он равен 1,06.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Лабораторная установка (рис. 3) состоит из источника β -излучения 1, блока поглотителей 2, торцевого счётчика с блоком питания 3 и измерительного устройства 4. Тумблер включения находится на задней панели измерительного устройства.

1. Установить источник β -излучения и блок поглотителей на скамью счётчика согласно рис. 3 и открыть защитную крышку окна счётчика.

2. Нажать на передней панели измерительного устройства кнопку

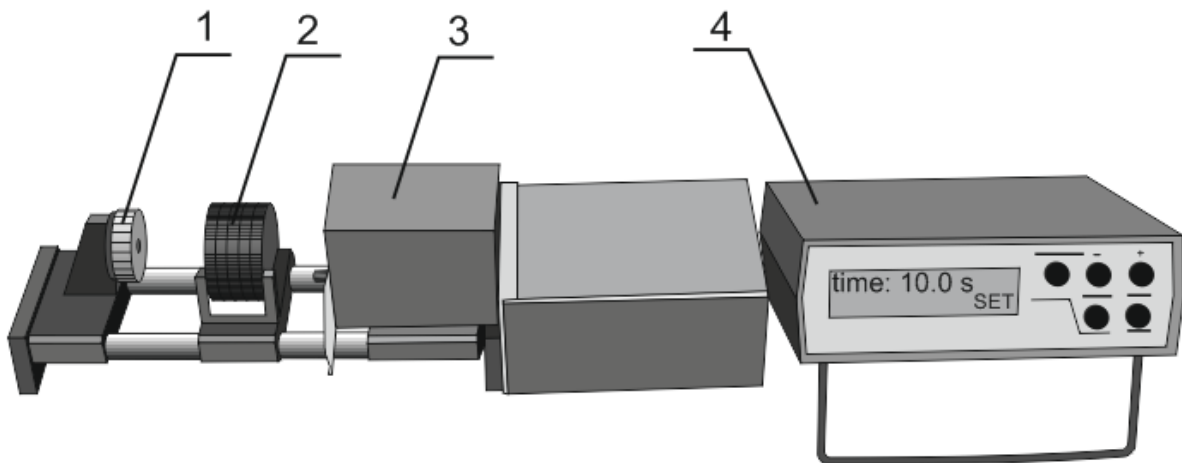


Рис. 3. Лабораторная установка

«УСТАНОВКА» и кнопками «+» и «-» установить время измерения 10 с.

3. Измерить зависимость скорости счета n от толщины l поглощающего слоя, начиная с $l=0$ (без поглотителя) и последовательно добавляя фильтры до тех пор, пока скорость счета будет примерно постоянной. Толщина фильтров поглотителя приведена в табл. 2. Построить график зависимости $n = f(l)$.

4. По графику зависимости $n = f(l)$ (рис. 4) определить уровень фона n_ϕ и слой половинного ослабления $D_{1/2}$ как толщину l , соответствующую скорости счета $(n_0 - n_\phi)/2$.

5. Построить зависимость скорости счёта от толщины поглощающего слоя в полулогарифмическом масштабе: $\ln(n - n_\phi) = f(l)$. Экстраполируя прямолинейный участок графика до пересечения с осью l , определить максимальный пробег β -частиц R_{\max} , т.е. толщину слоя, при котором кривая достигает уровня фона (рис. 5).

6. Определить линейный коэффициент ослабления μ . Логарифмируя закон поглощения (1) и учитывая фон, можно получить

$$\ln(n - n_\phi) = \ln(n_0 - n_\phi) - \mu l. \quad (11)$$

Откуда следует, что линейный коэффициент ослабления μ равен по модулю угловому коэффициенту зависимости $\ln(n - n_\phi) = f(l)$ и может быть определён по формуле:

$$\mu = \frac{\Delta[\ln(n - n_\phi)]}{\Delta l} = \frac{\ln(n - n_\phi)}{R_{\max}}. \quad (12)$$

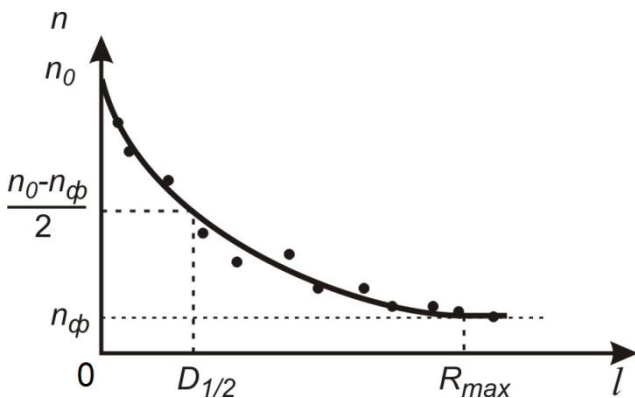


Рис. 4. Кривая поглощения β -излучения

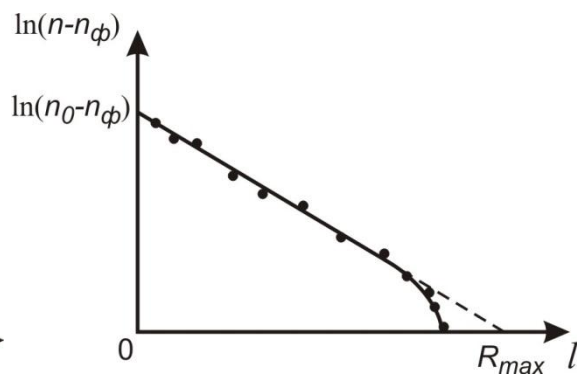


Рис. 5. Кривая поглощения β -излучения в полулогарифмическом масштабе

7. Определить линейный коэффициент ослабления μ' , используя формулу (4), массовый слой половинного ослабления $D'_{1/2}$ по формуле (6) и массовый максимальный пробег R'_{\max} по формуле (7). Фильтры поглотителя изготовлены из алюминия, плотность которого $\rho = 2,7 \text{ г/см}^3$.

8. По величине R'_{\max} с помощью табл. 1 определить граничную энергию β -излучения. Сравнить экспериментально найденные и табличные величины $D'_{1/2}$ и μ' для соответствующей граничной энергии.

Таблица 1

Максимальные пробеги R'_{\max} , слои половинного ослабления $D'_{1/2}$, коэффициенты ослабления μ' β -излучения в алюминии

Максимальная энергия частиц, МэВ	R'_{\max} , $\frac{\text{МГ}}{\text{см}^2}$	$D'_{1/2}$, $\frac{\text{МГ}}{\text{см}^2}$	μ' , $\frac{\text{см}^2}{\text{г}}$
0,01	0,16	0,1	6930
0,02	0,70	0,3	2310
0,05	3,9	0,8	866
0,10	14	1,8	385
0,20	42	3,9	178
0,30	76	7,0	99
0,40	115	11,7	59
0,50	160	17,5	40
0,60	220	24	29
0,70	250	30	23
0,80	310	37	19
0,90	350	45	15
1,00	410	53	13
1,25	540	74	9,4
1,50	670	97	7,1
1,75	800	119	5,8
2,00	950	140	5,0
2,50	1220	173	4,0

Таблица 2

Толщины фильтров блока поглотителей

Маркировка фильтра	Толщина, мм
0,5	0,58
1	0,76
2	1,72
4	3,80
6	5,91

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Что такое радиоактивное излучение?
2. Какие существуют виды β -распада?
3. Как доказать, что при β^- -распаде, кроме электронов, излучается антинейтрино?
4. Почему β -излучение имеет сплошной энергетический спектр?
5. Как делится энергия β -распада между электроном (позитроном), антинейтрино (нейтрино), дочерним ядром и его электронной оболочкой?
6. Почему при прохождении β -излучения через вещество оно ослабляется? Какой вид имеет закон ослабления β -излучения?
7. От каких факторов зависит максимальный пробег β -частиц в веществе?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Курс физики. 9-е изд., стер. – М.: Академия, 2014. – 720 с.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. 20-е изд., стер. – М.: Академия, 2014. – 560 с.
3. Савельев И.В. Курс общей физики в 4-х томах. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. – М.: КноРус, 2012. – Т.3. – 368 с.
4. Мухин К.Н. Экспериментальная ядерная физика: учебник. В 3-х томах. Т. 1. Физика атомного ядра. 7-е изд., стер. — СПб.: Издательство «Лань», 2009.— 384 с.
5. Сивухин Д.В. Общий курс физики в 5 т. Том V. Атомная и ядерная физика. 2-е изд., стер. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 784 с.