

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

**БЕТА-РАСПАД**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОЙ  
ЭНЕРГИИ БЕТА-СПЕКТРА**

Лабораторный практикум

Учебное пособие

2-е издание, стереотипное

Воронеж  
Издательский дом ВГУ  
2019

## БЕТА-РАСПАД

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ БЕТА-СПЕКТРА

Это в высшей степени важно для того, чтобы Вы могли разобраться в дальнейшем...

М.Фарадей «История свечи»

#### Цели работы:

Определить максимальную энергию  $E_{\max}$  в энергетическом спектре бета-частиц при бета-распаде ядер методом измерения характеристик функции ослабления потока бета-частиц при их прохождении через поглотитель. Идентифицировать бета-радионуклид по значению  $E_{\max}$ . Оценить вклады ионизационных и радиационных потерь энергии бета-частицами в веществе поглотителя.

#### Бета-распад

Бета-распадом ядра  ${}^A_Z X_N$  называется самопроизвольное радиоактивное превращение этого ядра в дочернее ядро с тем же массовым числом  $A$ , но с зарядовым числом  $Z$ , отличающимся на единицу  ${}^A_{Z\pm 1} Y_{N\mp 1}$ . Существуют три вида бета-распада:  $\beta^-$ -распад,  $\beta^+$ -распад и электронный захват – ЕС (или  $K$ -захват).

При  $\beta^-$ -распаде образуется  $\beta^-$ -частица, являющаяся электроном  $e^-$ , антинейтрино  $\tilde{\nu}_e$  и дочернее ядро  ${}^A_{Z+1} Y_{N-1}$  с зарядовым числом  $Z_y = Z_x + 1$ . Этот процесс символически представляется в виде:



Подчеркнем, что характерной особенностью именно бета-спектра является его непрерывность в отличие, например, от дискретного энергетического спектра альфа-частиц при альфа-распаде.

Спектр бета-частиц, понимаемый как плотность вероятности образования бета-частиц с энергией  $E_\beta$  в единицу времени, можно описать приближенно формулой:

$$W(E_\beta) \sim \sqrt{E_\beta(E_\beta + 2m_0c^2)} \cdot (E_\beta - m_0c^2)(E_{\max} - E_\beta)^2,$$

где  $m_0$  – масса покоя электрона,  $m_0c^2 = 0,511$  МэВ,  $E_{\max}$  – максимальная энергия спектра,  $E_\beta$  – возможная энергия бета-частицы  $0 < E_\beta \leq E_{\max}$ .

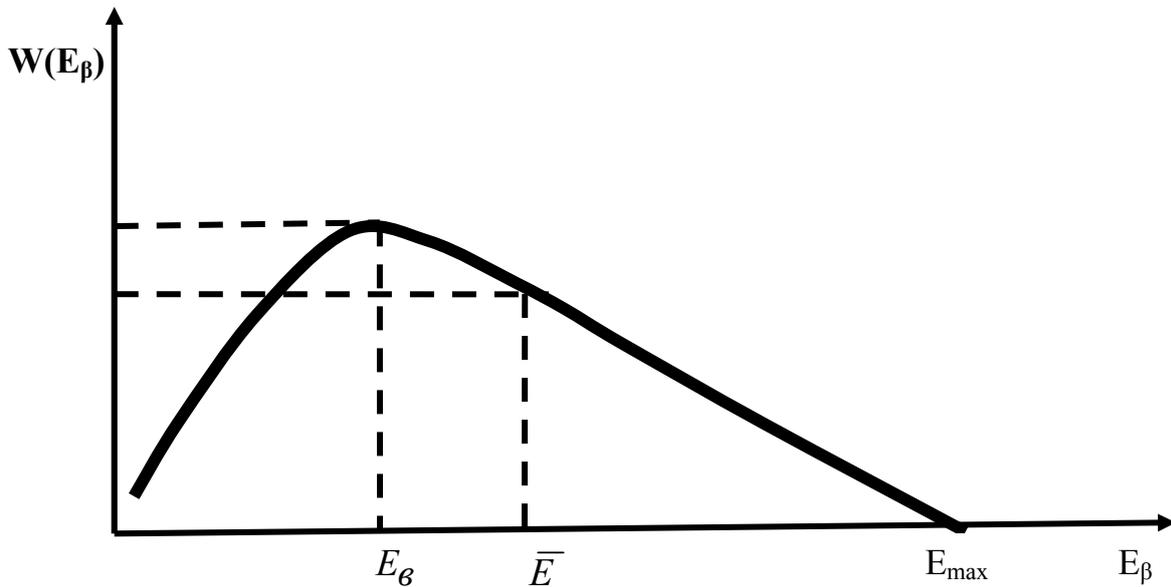


Рис. 1

Величина  $W(E_\beta)dE_\beta$  есть вероятность образования бета-частиц в энергетическом интервале  $E_\beta, E_\beta + dE_\beta$  и  $\lambda_\beta = \int_0^{E_{\max}} W(E_\beta)dE_\beta$  – вероятность  $\beta$ -распада одного ядра в единицу времени.

Бета-спектр характеризуется, кроме  $E_{\max}$ , еще двумя значениями энергии: наиболее вероятным значением –  $E_0$ , соответствующим

$W(E_0) = W_{\max}$ , и средним значением энергии  $\bar{E} = \int_0^{E_{\max}} E_{\beta} W(E_{\beta}) dE_{\beta}$  (рис. 1).

Средняя энергия бета-спектра приблизительно равна  $\bar{E} \approx 0,4 Q_{\beta}$  (для различных радионуклидов она лежит в интервале от  $0,25 E_{\max}$  до  $0,45 E_{\max}$ ).

Так как  $E_{\max} \approx Q_{\beta}$ , то, зная значение  $E_{\max}$  и массу одного из атомов, можно определить массу другого – дочернего или материнского атома. Очевидно, величина  $Q_{\beta}$  – уникальная фундаментальная характеристика радионуклида  ${}^A_Z X_N$ . Это позволяет идентифицировать радионуклиды по значению  $E_{\max}$ , поскольку каждый бета-радионуклид характеризуется своей максимальной энергией бета-спектра.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ БЕТА-СПЕКТРА

1.1. Создано несколько методов и основанных на них методик экспериментального определения максимальной граничной энергии бета-спектра. Основными из них являются следующие.

*Метод ослабления потока бета-частиц в слоях поглотителей различной толщины*

Известно несколько следующих методик определения максимальной граничной энергии бета-спектра с использованием метода ослабления:

– *полного ослабления*, заключающаяся в определении минимального значения толщины слоя поглотителя  $d$ , полностью ослабляющего, то есть поглощающего поток от источника бета-частиц изучаемого радионуклида  ${}^A_Z X_N$ . Величина  $d$  есть однозначная функция  $E_{\max}$ ;

– аппроксимации кривой ослабления потока бета-частиц экспоненциальной функцией толщины поглотителя и определение  $E_{\max}$  по значению коэффициента ослабления  $\mu$  в показателе экспоненты;

– кратного ослабления потока  $J_0$  бета-излучения и определения  $E_{\max}$  по значениям толщин поглотителя  $d_{1/2}$ ,  $d_{1/4}$ ,  $d_{1/8}$ , ослабляющих поток в два  $J_0/J_2(d_{1/2}) = 2$ , в четыре  $J_0/J_4(d_{1/4}) = 4$  или в восемь  $J_0/J_8(d_{1/8}) = 8$  раз.

*Метод обратного рассеяния бета-частиц веществом рассеивателя, позволяющий определить значение  $E_{\max}$  по измеренной толщине рассеивателя  $d_{\text{нас}}(E_{\max}) \sim E_{\max}^{3/2}$ , при которой поток обратнорассеянного бета-излучения, возрастая с увеличением  $d$ , достигает насыщения.*

*Методы ионизационной и сцинтилляционной спектрометрии, позволяющие, кроме величины  $E_{\max}$ , определить форму бета-спектра  $W(E_\beta)$ , путем измерения энергии непосредственно отдельных бета-частиц.*

Все эти методы основаны на особенностях процессов потерь энергии бета-частицами при их взаимодействии с атомами и электронами вещества поглотителя.

*Методы магнитной и электростатической спектрометрии, обеспечивающие наиболее точное определение свойств бета-спектров, основаны на измерении характеристик распределений в пространстве потока бета-частиц, взаимодействующих с магнитными и электрическими полями.*

**1.2. Наиболее простым и наглядным является метод ослабления, на котором основана эта лабораторная работа.** Поэтому рассмотрим кратко физические явления, связанные прямо только с этим методом.

При прохождении бета-частиц через слой вещества монотонно уменьшается интенсивность потока бета-частиц, весь энергетический спектр сдвигается в область малых энергий и уширяется угловое распределение потока.

Явление прохождения бета-частиц через толстые слои поглотителя можно представить на качественном уровне следующим образом. Основная доля бета-частиц высокоэнергетической части спектра (быстрые электроны  $E \sim mc^2$ ) проходят первоначально некоторый отрезок пути  $l$  приблизительно прямолинейно, испытывая лишь незначительные отклонения направления импульса за счет рассеяния, теряя энергию на ионизацию, и незначительно, на тормозное излучение. По мере того как энергия быстрых бета-частиц уменьшается вследствие ионизационных потерь энергии, вероятность рассеяния возрастает и угловое распределение относительно первоначального направления уширяется, приобретая вид, близкий к распределению Гаусса, обусловленному многократным рассеянием бета-частиц. Наиболее вероятный угол рассеяния при этих условиях возрастает пропорционально корню квадратному из толщины поглотителя. При дальнейшем перемещении в поглотителе с ростом пути  $l$  угловое распределение движения частиц приобретает диффузный характер. То есть распределение импульсов частиц по всем направлениям становится равновероятным, и исчезает преимущественное направление перемещения бета-частиц в пределах начального телесного угла.

Величину пути  $l$ , после прохождения, которого распределение направлений движения бета-частиц становится равновероятным, можно приближенно оценить по формуле:

$$l \approx \left(1 - \exp\left(-\frac{5,9}{Z}\right)\right) l_c,$$

где  $Z$  – атомный номер вещества,  $l_c$  – средняя длина свободного пробега бета-частиц в веществе и  $l_c = \mu^{-1}$ , где  $\mu$  – коэффициент ослабления бета-излучения.

Для средних толщин порядка  $l_c$  убывание потока обусловлено в значительной степени рассеянием на углы  $\geq 90^\circ$  и потерями энергии на иони-

зацию вдоль пути. Когда толщина возрастает до значений, при которых поток бета-частиц существенно уменьшается (более, чем в 10 раз) относительно поступающего на поверхность поглотителя, то энергетический бета-спектр становится низкоэнергетическим, и дальнейшее убывание потока с ростом толщины происходит за счет полной потери энергии бета-частицами вследствие ионизационных потерь  $dE/dl \sim E^{-1}$ , монотонно возрастающих с убыванием энергии.

Средний путь  $\bar{l}$  бета-частицы в данном поглотителе связан с функцией ее средних линейных удельных потерь  $(dE/dl) = S(E)$  (см. приложение) выражением:

$$\bar{l} \approx \int_{E_{\max}}^0 \frac{1}{S(E)} dE,$$

где  $S(E)$  – средняя потери энергии на единицу пути, а  $\frac{1}{S(E)}$  – средний путь при единице потерь энергии бета-частиц с энергией  $E$  (см. приложение). Однако толщина поглотителя  $d$ , при которой поток, практически, становится равным нулю, значительно меньше  $\bar{l}$ , поскольку траектории (треки) бета-частиц в веществе существенно непрямолинейны (в отличие от тяжелых частиц, например, альфа-частиц).

*Зависимость числа бета-частиц, в пределах заданного телесного угла прошедших слой вещества от толщины этого слоя, называется функцией ослабления.* Функция ослабления зависит от всех (рассмотренных в приложении) процессов потерь энергии бета-частиц и уширения угловых распределений рассеянных бета-частиц. Теоретическое описание этих процессов и функции ослабления очень громоздко из-за многократного взаимодействия бета-частиц в веществе. Поэтому для описания явления прохождения бета-частиц через вещество используют модели, приблизительно описывающие поведение функции ослабления, позволяющие, в частности,