

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»

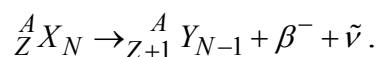
Цели работы:

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: β^- -распад, β^+ -распад и электронный захват – ЕС (или K -захват).

При β^- -распаде образуется β^- -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_β 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_β – возможная энергия бета-частицы $0 < E_\beta \leq E_{\max}$.

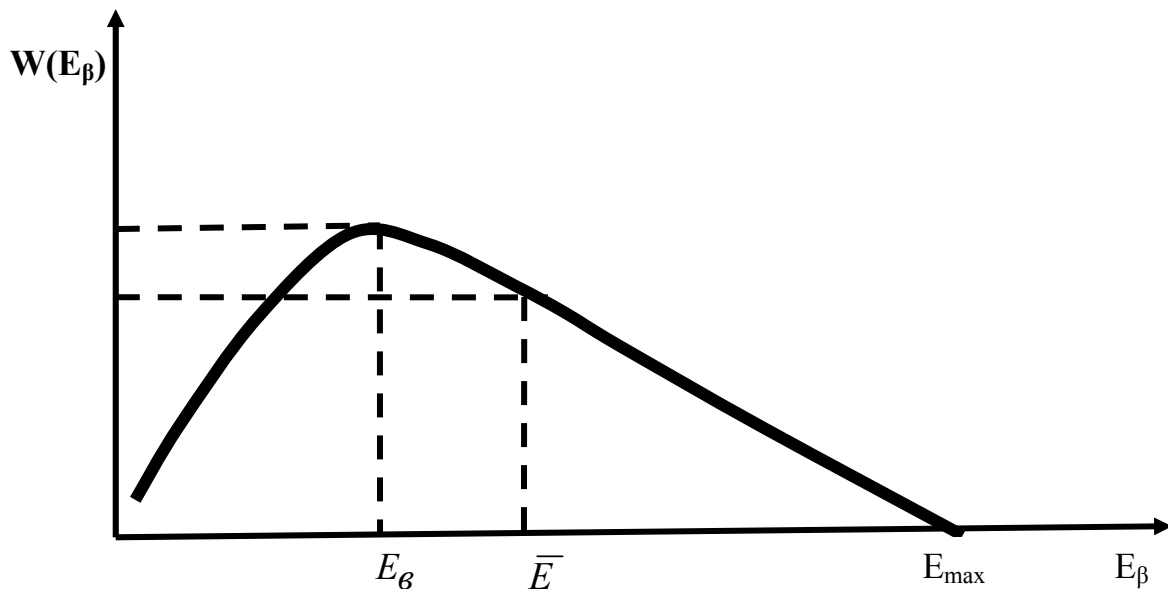


Рис. 1

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 β -распада одного ядра в единицу времени.

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

$W(E_e) = W_{\max}$, 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_{β} — 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 – μ 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 μ – 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:

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

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,