

Работа 5.4.2

Исследование энергетического спектра β -частиц и определение их максимальной энергии при помощи магнитного спектрометра.

Работу выполнил Матренин Василий Б01-008

Цель работы: С помощью магнитного спектрометра исследовать энергетический спектр β -частиц при распаде ядер ^{137}Cs и определить их максимальную энергию.

1 Теория

Бета-распадом называется самопроизвольное превращение ядер, при котором их массовое число не изменяется, а заряд увеличивается или уменьшается на единицу. Бета-активные ядра встречаются во всей области значений массового числа A , начиная от единицы (свободный нейтрон) и заканчивая самыми тяжелыми ядрами. Период полураспада β -активных ядер изменяется от ничтожных долей секунды до 10^{18} лет. Выделяющаяся при единичном акте β -распада энергия варьируется от 18 кэВ до 13.4 МэВ.

В данной работе мы будем иметь дело с электронным распадом:

$${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z+1}^AX + e^- + \tilde{\nu} \quad (1)$$

При данном распаде кроме электрона испускается антинейтрино. Освобождающаяся при β -распаде энергия делится между электроном, антинейтрино и дочерним ядром, однако доля энергии, передаваемой ядру, мала по сравнению с энергией, уносимой электроном и антинейтрино. Практически можно считать, что эти две частицы делят между собой всю освобождающуюся энергию. Поэтому электроны могут иметь любое значение энергии от нулевой до некоторой максимальной, которая равна энергии, освобождающейся при β -распаде, являющейся важной физической величиной.

Вероятность dw того, что при распаде электрон вылетит с импульсом в интервале d^3p , а антинейтрино с импульсом в интервале d^3k , пропорциональна произведению этих дифференциалов. Но мы должны еще учесть закон сохранения энергии, согласно которому импульсы p и k электрона и антинейтрино связаны соотношением:

$$E_e - E - ck = 0 \quad (2)$$

где E_e — максимальная энергия электрона, кинетическая энергия электрона E связана с его импульсом обычным релятивистским соотношением:

$$E = c\sqrt{p^2 + m^2c^2} - mc^2 \quad (3)$$

Через ck обозначена энергия антинейтрино с импульсом k . Условие можно учесть введением в выражение для dw δ -функции:

$$\delta(E_e - E - ck) \quad (4)$$

Таким образом, вероятность dw может быть записана в виде:

$$dw = D\delta(E_e - E - ck)d^3pd^3k = D\delta(E_e - E - ck)p^2dpk^2dkd\Omega_e d\Omega_{\tilde{\nu}}, \quad (5)$$

Где D — некоторый коэффициент пропорциональности, $d\Omega_e$, $d\Omega_{\tilde{\nu}}$ — элементы телесных углов направлений вылета электрона и нейтрино. Вероятность dw непосредственно связана с β -спектром, поскольку для большого числа N_0 распадов число dN распадов с вылетом электрона и антинейтрино с импульсом соответственно от p до $p+dp$ и от k до $k+dk$ определяется соотношением:

$$dN = N_0 dw \quad (6)$$

Коэффициент D в формуле (5) можно считать для рассматриваемых нами так называемых разрешённых фермиевских типов распадов с хорошей точностью константой (разрешёнными называются такие переходы, при которых не изменяются ни момент, ни чётность состояния ядра). В этом случае величину dw из (6) можно проинтегрировать по всем углам и по абсолютному значению импульса нейтрино.

После умножения на полное число распадов N проинтегрированное выражение приобретает смысл числа электронов dN , вылетающих из ядра с импульсом, абсолютная величина которого лежит между p и $p + dp$:

$$dN = \frac{16\pi^2 N_0}{c^2} D p^2 (E_e - E)^2 dp \quad (7)$$

Чтобы получить распределение электронов по энергиям, надо в (7) перейти от dp к dE :

$$dE = \frac{c^2 p}{E + mc^2} dp \quad (8)$$

После чего выражающая форму β -спектра величина $N(E) = \frac{dN}{dE}$ приобретает вид:

$$\frac{dN}{dE} = N_0 B c p (E + mc^2) (E_e - E)^2 = N_0 B \sqrt{E(E + 2mc^2)} (E_e - E)^2 (E + mc^2) \quad (9)$$

Где $B = \frac{16\pi^2}{c^4} D$. В нерелятивистском приближении, которое и имеет место в нашем случае, выражение (9) упрощается, и мы имеем:

$$\frac{dN}{dE} \approx \sqrt{E} (E_e - E)^2 \quad (10)$$

Выражение (10) приводит к спектру, имеющему вид широкого колокола (рис 1). Кривая плавно отходит от нуля и столь же плавно, по параболе, касается оси абсцисс в области максимальной энергии электронов E_e .

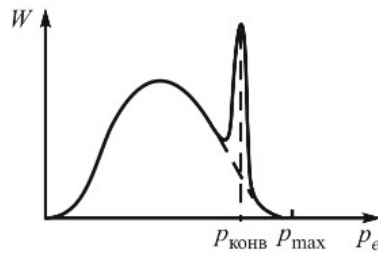


Рис 1. Форма спектра β -частиц при разрешённых переходах.

Дочерние ядра, возникающие в результате β -распада, нередко оказываются возбуждёнными. Возбуждённые ядра отдают свою энергию либо излучая γ -квант (энергия которого равна разности энергий начального и конечного уровней), либо передавая избыток энергии одному из электронов с внутренних оболочек атома. Излучаемые в таком процессе электроны имеют строго определённую энергию и называются конверсионными.

Конверсия чаще всего происходит на оболочках K или L . На спектре, представленном на рис. 1, видна монохроматическая линия, вызванная электронами конверсии. Ширина этой линии в нашем случае является чисто аппаратной, по ней можно оценить разрешающую силу спектрометра.

2 Экспериментальная установка

Для определения энергии β -частиц в работе используется магнитный спектрометр, схема которого показана на рисунке 1. Электроны испускаются радиоактивным источником и попадают в магнитное поле катушки, ось которой параллельна OZ .

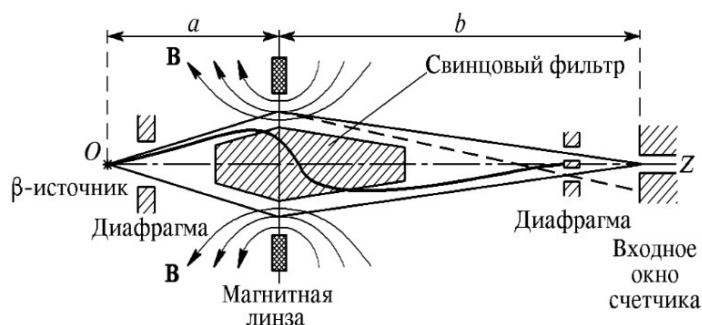


Рис 2. Схема β -спектрометра с короткой магнитной линзой.

Траектории электронов сходятся в одной точке — фокусе, где и установлен сцинтилляционный счетчик, сигналы которого усиливаются фотоумножителем и регистрируются пересчётным прибором. Фокусное расстояние f магнитной линзы связано с током в катушке I и импульсом p_e регистрируемых частиц следующим образом:

$$\frac{1}{f} \propto \frac{I^2}{p_e^2} \quad (11)$$

При неизменной геометрии установки, увеличивая и уменьшая силу тока, можно фокусировать электроны разных импульсов, причём:

$$p_e = kI \quad (12)$$

где k — коэффициент пропорциональности, являющийся параметром установки.

Блок-схема установки изображена на рисунке 3.

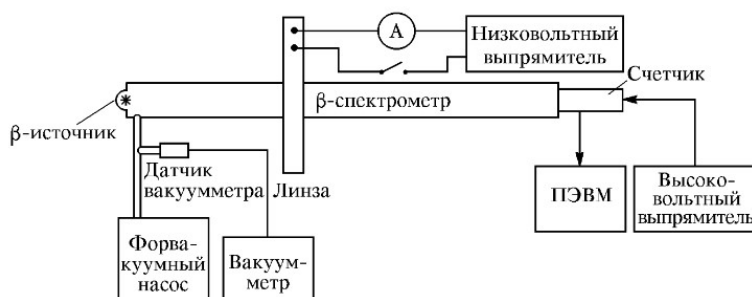


Рис 3. Блок-схема установки для изучения β -спектра.

Радиоактивный источник ^{137}Cs помещён внутри откачанной трубы. Электроны, сфокусированные магнитной линзой, попадают в счётчик. В газоразрядном счётчике они инициируют газовый разряд и тем самым приводят к появлению электрических импульсов на его электродах, которые затем регистрируются пересчётным прибором. В результате попадания электронов в сцинтиллятор на выходе фотоумножителя появляются электрические импульсы, которые заносятся в память персонального компьютера и выводятся на экран монитора. Давление в

спектрометре поддерживается на уровне около 0.1 Тор и измеряется термопарным вакууметром. Лучший вакуум в приборе не нужен, поскольку уже при этом давлении потери энергии электронов малы и их рассеяние незначительно. Откачка осуществляется форвакуумным насосом. Магнитная линза питается постоянным током от выпрямителя. Ток можно повышать до 6 А, он измеряется цифровым прибором. Высокое напряжение на ФЭУ или газоразрядный счётчик подаётся от стабилизированного выпрямителя.

3 Ход работы

Откачали воздух из полости спектрометра, включили вакуумметр, ПЭВМ, формирователь импульсов и питание магнитной линзы. Уменьшили ток через магнитную линзу до нуля.

Провели измерения β -спектра, изменяя ток в магнитной линзе, при каждом значении тока будем сняли число попаданий частиц в детектор за 100 секунд. Значения сразу будут приведены в виде $N = \frac{N'}{t}$ – число частиц в единицу времени. Результаты представлены на рисунке 4.

Так же учли фон:

$$N_{\Phi} = 0.750 \text{ с}^{-1}$$

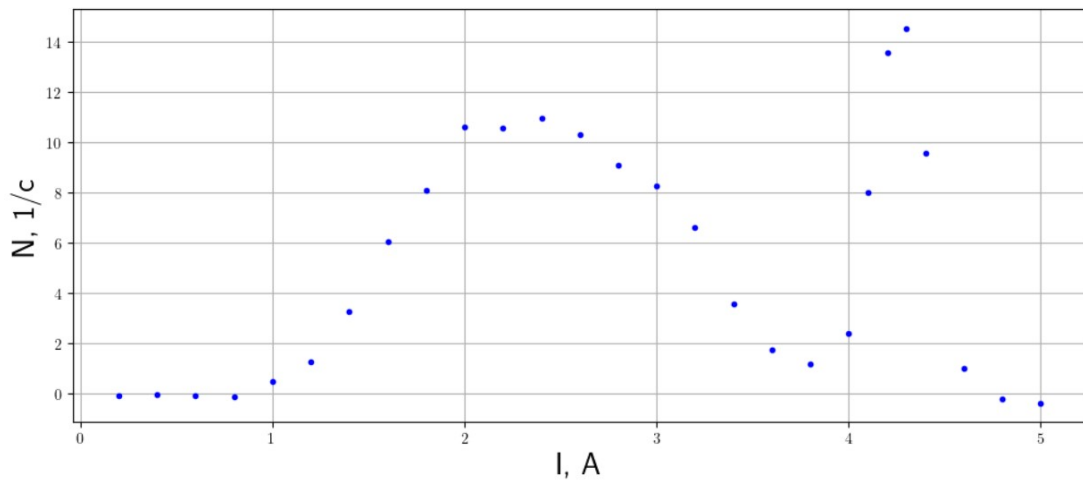


Рис 4. Экспериментальный β -спектр

Нашел постоянную установки:

$$K = (235 \pm 6) \frac{\text{keV}}{\text{A}} \cdot \text{с}^{-1}$$

Зная конверсионный пик и соответствующие ему импульс $p_c = 1013.5 \text{ кэВ/с}$ и энергию $T = 634 \text{ кэВ}$, откалибровал шкалу токов в шкалу импульсов и энергий.

Из формулы (10) следует:

$$\frac{\sqrt{N}}{p^{3/2}} \propto T_{max} - T \quad (13)$$

Отложив по оси y величину $\frac{\sqrt{N}}{p^{3/2}} = f$, а по x — кинетическую энергию, построил график, называемый графиком Ферми-Кюри (рис. 5), и определил по нему T_{max} .

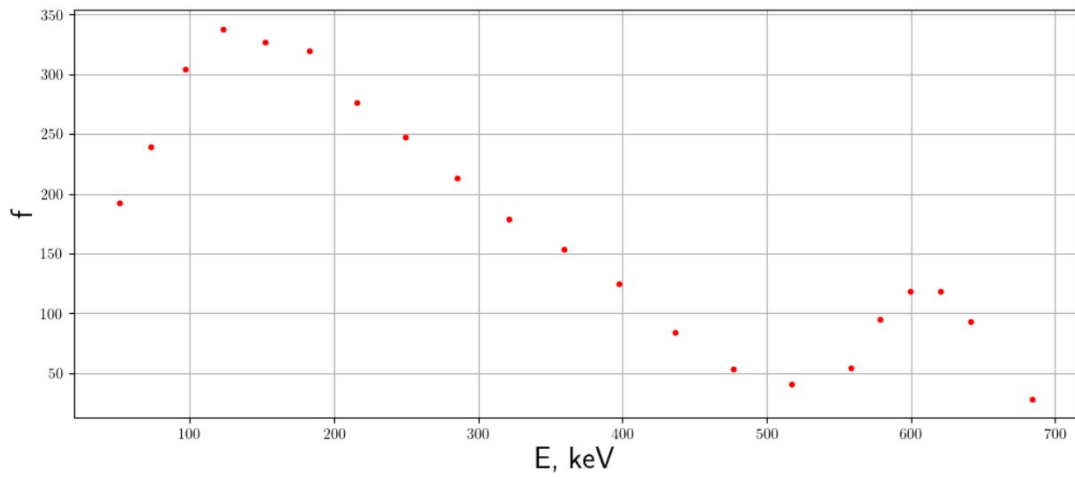


Рис 5. График Ферми-Кюри

Получил:

$$T_{max} = (688 \pm 10) \text{ кэВ}$$

4 Вывод

Таким образом, в ходе данной работы был изучен спектр β -распада ^{136}Cs . Так же были исследованы различные свойства данного спектра и установки: конверсионный пик, параметр установки и максимальная кинетическая энергия в данном распаде.