

## Лабораторная работа 4.2

Исследование энергетического спектра  
 $\beta$ -частиц и определение их максимальной  
энергии при помощи магнитного спектрометра

Аксенова Светлана

Гарина Ольга

17 октября 2021 г.

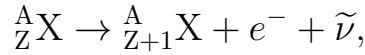
## Содержание

1	Теоретическое введение	3
2	Экспериментальная установка	4
3	Измерения и обработка результатов	5
4	Вывод	6
5	Список литературы	7

**Цель работы:** с помощью магнитного спектрометра исследовать энергетический спектр  $\beta$ -частиц при распаде ядер  $^{137}\text{Cs}$  и определить их максимальную энергию. Калибровка спектрометра осуществляется по энергии электронов внутренней конверсии  $^{137}\text{Cs}$ .

## 1 Теоретическое введение

*Бета-распадом* называется самопроизвольное превращение ядер, при котором их массовое число не изменяется, а заряд увеличивается или уменьшается на единицу. В данной работе мы будем иметь дело с электронным распадом



при котором кроме электрона испускается антинейтрино. Освобождающаяся при  $\beta$ -распаде энергия делится между электронами, антинейтрино и дочерним ядром, одна доля энергии, передаваемой ядру, исчезающе мала по сравнению с энергией, уносимой электроном и антинейтрино. Практически можно считать, что эти две частицы делят между собой всю освобождающуюся энергию - от нулевой до некоторой максимальной, которая равна энергии, освобождающейся при  $\beta$ -распаде, являющейся важной физической величиной.

Число электронов  $dN$ , вылетающих из ядра с импульсом, абсолютная величина которого лежит между  $p$  и  $p + dp$ :

$$dN = \frac{16\pi^2 N_0}{c^2} D p^2 (E_e - E)^2 dp, \quad (1)$$

где  $N_0$  - полное число распадов,  $D$  - некоторый коэффициент пропорциональности,  $E_e$  - максимальная энергия электрона,  $E$  - кинетическая энергия электрона. Чтобы получить распределение электронов не по импульсам, а по энергиям, надо в (1) перейти от  $dp$  к  $dE$ :

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

после чего выражающая форму  $\beta$ -спектра величина  $N(E) = dN/dE$  приобретает вид

$$\frac{dN}{dE} = N_0 D \sqrt{E(E + 2mc^2)} (E_e - E)^2 (E + mc^2), \quad (3)$$

где  $B = \frac{16\pi^2}{c^4} D$ . В нерелятивистском приближении, которое и имеет место в нашем случае, выражение (3) упрощается и мы имеем

$$\frac{dN}{dE} \approx \sqrt{E} (E_e - E)^2. \quad (4)$$

Выражение (4) 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  $E_e$ .

Дочерние ядра, возникающие в результате  $\beta$ -распада, нередко оказываются возбужденными. Возбужденные ядра отдают свою энергию либо излучая  $\gamma$ -квант, либо передавая избыток электронов одному из электронов с внутренних оболочек атома. Излучаемые в таком процессе электроны имеют строго определенную энергию и называются *конверсионными*.

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

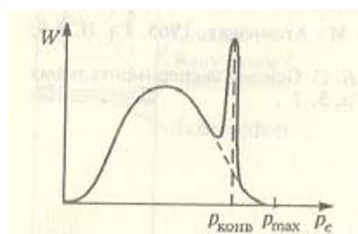


Рисунок 1 – Форма спектра  $\beta$ -частиц при разрешенных переходах

## 2 Экспериментальная установка

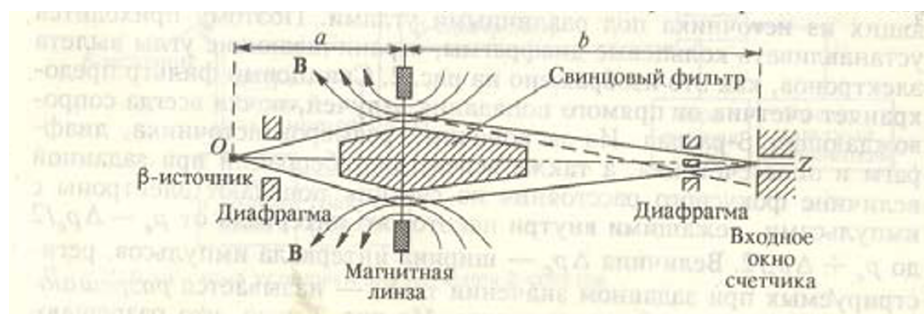


Рисунок 2 – Схема  $\beta$ -спектрометра с короткой магнитной линзой

Энергию  $\beta$ -частиц определяют с помощью  $\beta$ -спектрометра. В работе используется магнитный спектрометр с «короткой линзой». Электроны, испускаемые радиоактивным источником (рис. 2), попадают в магнитное поле катушки, оси которой параллельна оси симметрии прибора. Траектория электронов в магнитном поле представляют собой схематически показанные на рисунке сложные спирали, сходящиеся за катушкой в фокусе. Там установлен детектор электронов - сцинтилляционный счетчик. Его чувствительным элементом является тонкий кристалл постирола. При попадании электрона в кристалле возникает световая вспышка - сцинтилляция, регистрируемая фотоумножителем.

Для заряженных частиц тонкая катушка эквивалентна линзе с фокусным расстоянием  $f$ :

$$\frac{1}{f} \propto \frac{I^2}{p_e^2} \quad (5)$$

При заданной силе тока на входное окно счетчика фокусируются электроны с определенным импульсом, он пропорционален силе тока:

$$p_e = kI. \quad (6)$$

Константа прибора определяется из опыта по известной конверсионной линии.

Из-за конечных размеров источника, диафрагм и окна счетчика, а также вследствие aberrаций при заданной величине фокусного расстояния на счетчик попадают электроны с импульсами, лежащими внутри некоторого интервала от  $(p_e - \Delta p_e/2; p_e + \Delta p_e/2)$ . Величина  $\Delta p_e$  - разрешающая способность  $\beta$ -спектрометра:

$$\Delta p_e = \frac{1}{2} \frac{\Delta f}{f} p_e. \quad (7)$$

Блок-схема установки для изучения  $\beta$ -спектров изображена на рис. 3.

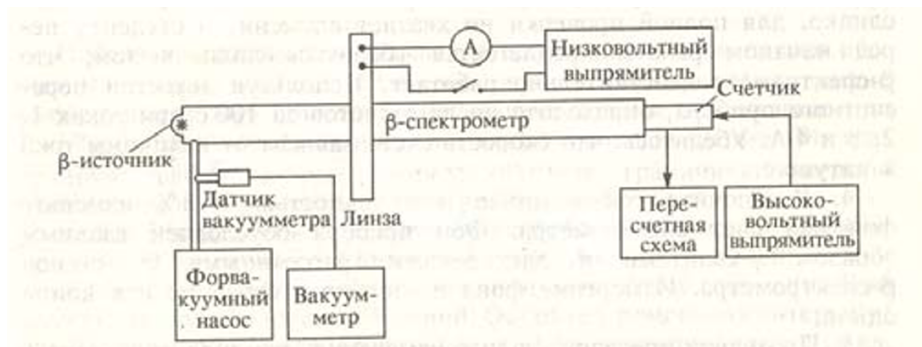


Рисунок 3 – Блок-схема установки для изучения  $\beta$ -спектра

### 3 Измерения и обработка результатов

Проведя измерения зависимости числа отсчетов от тока в фокусирующей катушке и вычтя фон, был построен график на рис. 4. Далее, по полученных данным, была построена зависимость импульса (рис. 5) и кинетической энергии (рис. 6). Коэффициенты наклона были рассчитаны по методу наименьших квадратов. Для рис. 5 это константа прибора

$$k = 163 \pm 5 \text{ кэВ}/(\text{с} \cdot \text{А}),$$

для рис. 6

$$a_1 = 194.9 \pm 2.1 \text{ кэВ}/\text{А}.$$

Далее на рис. 7 изображен график Ферми, коэффициент наклона

$$a_2 = -0.246 \pm 0.025 \text{ мкФерми}/\text{кэВ}.$$

Экстраполируя график до пересечения с осью абсцисс, была рассчитана максимальная кинетическая энергия

$$T_{max} = 756 \pm 92 \text{ кэВ}.$$

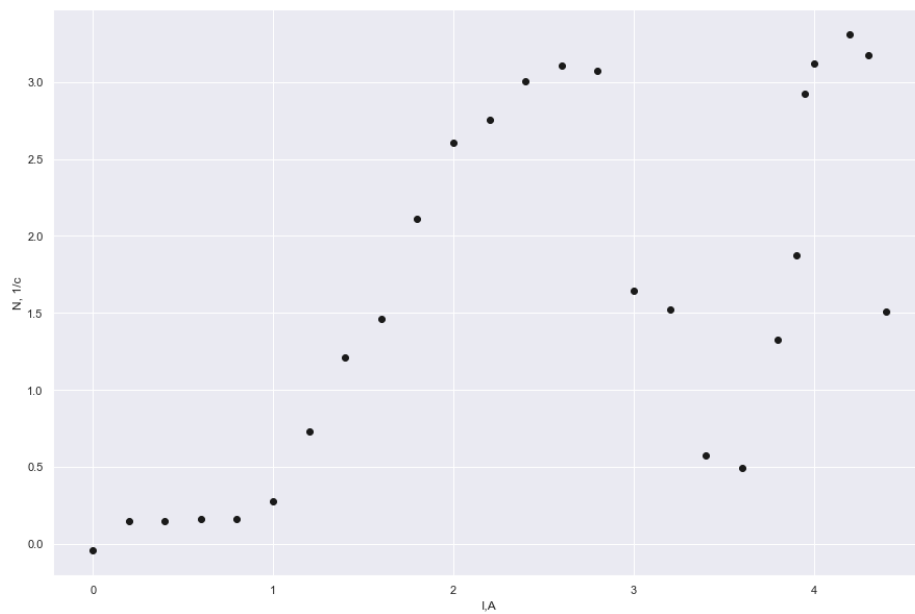


Рисунок 4 – Зависимость числа отсчетов от тока в фокусирующей катушке

## 4 Вывод

В результате с помощью магнитного спектрометра был исследован энергетический спектр  $\beta$ -частиц при распаде ядер  $^{137}\text{Cs}$ , графически была рассчитана их максимальная энергия, а также константа прибора.

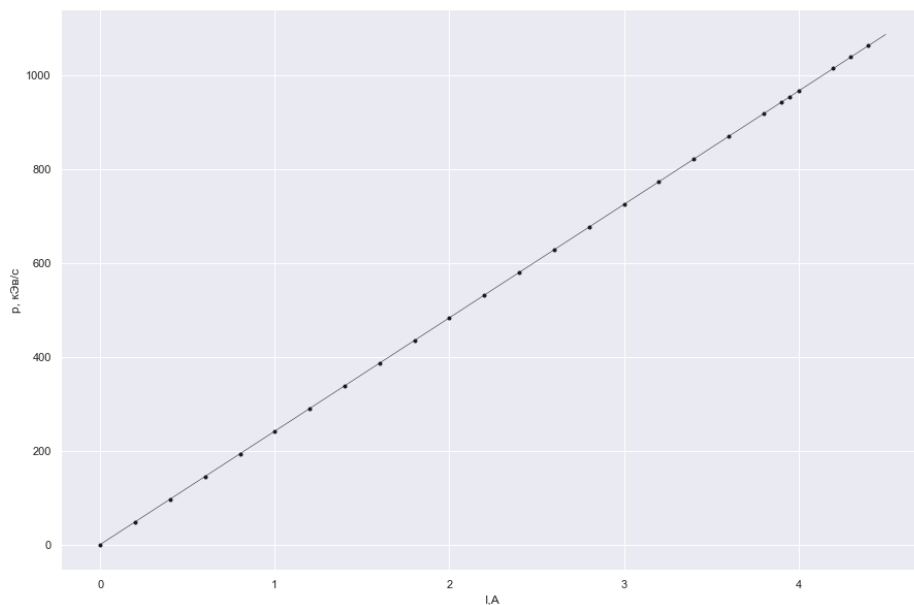


Рисунок 5 – Зависимость импульса частицы от тока в фокусирующей катушке

## 5 Список литературы

1. Лабораторный практикум по общей физике. Квантовая физика: Учеб. пособие для вузов / Игошин Ф.Ф., Самарский Ю.А., Ципенюк Ю.М.; Под ред. Ципенюк Ю.М. - М.: Физматкнига, 2012. - С. 111-118.
2. Ципенюк Ю.М. Квантовая микро- и макрофизика. - М.: Физматкнига, 2006. - С. 345-364.

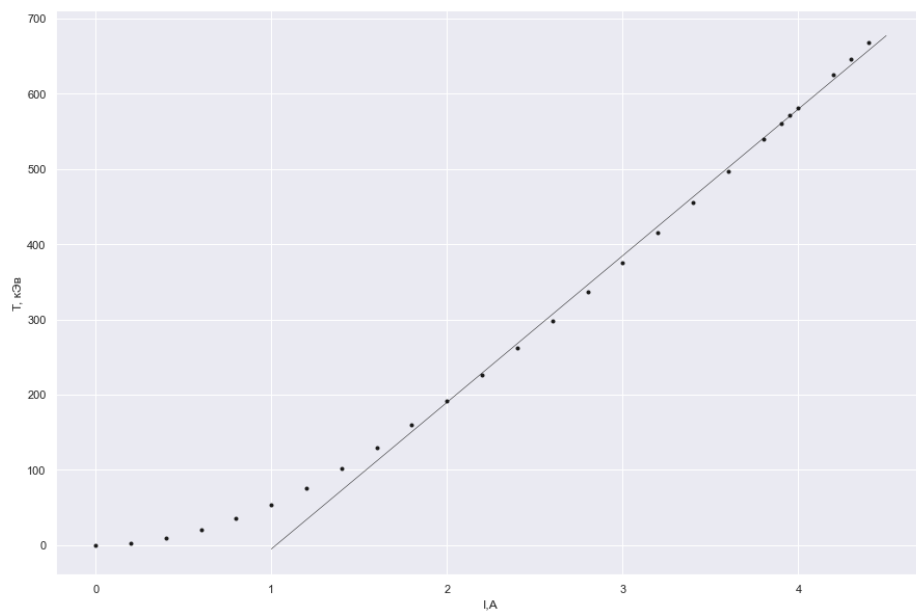


Рисунок 6 – Зависимость кинетической энергии частицы от тока в фокусирующей катушке

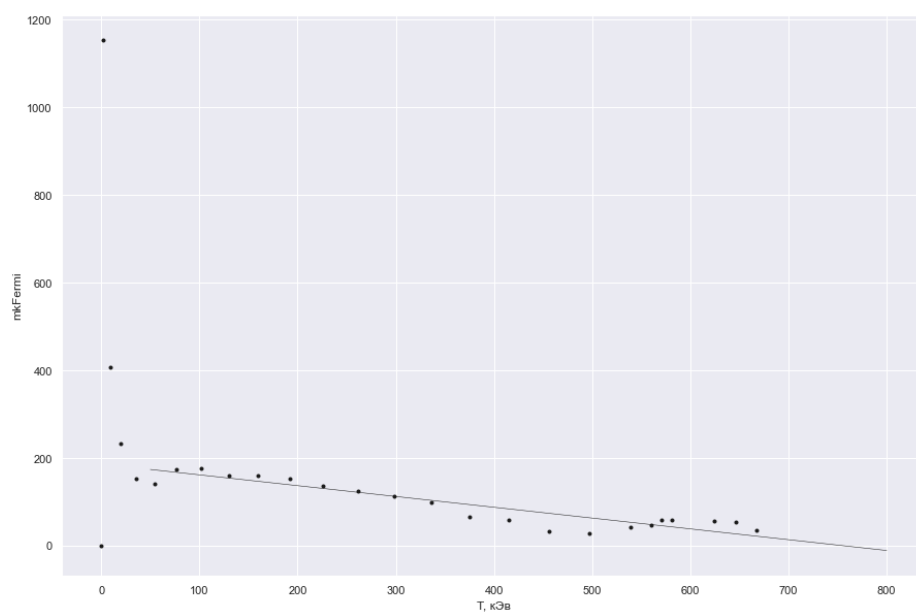


Рисунок 7 – График Ферми