

Отчет о выполнении лабораторной работы 5.4.2

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

Выполнил: Голубович Тимур, группа Б01-110

20.09.2023

Цель работы

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

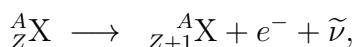
Оборудование и приборы

Магнитный спектрометр с "короткой линзой"; высоковольтный и низковольтный выпрямители; форвакуумный насос и вакууметр; ЭВМ.

Теоретическое введение

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 кончая самыми тяжелыми ядрами.

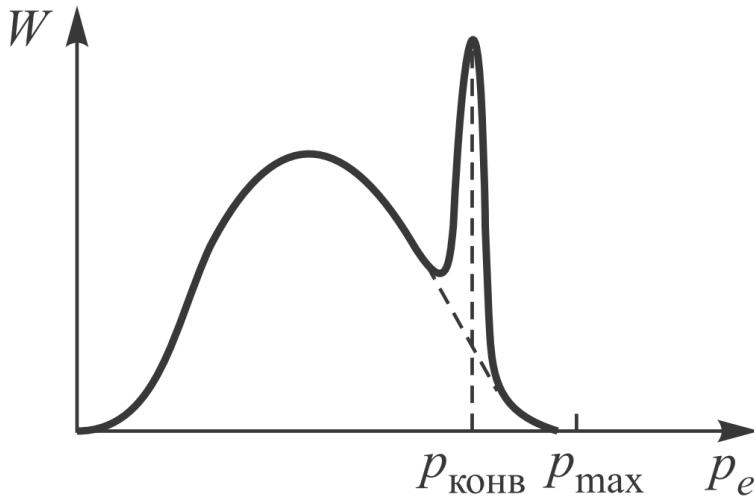
В данной работе мы будем иметь дело с электронным распадом



при котором кроме электрона испускается антинейтрино. Освобождающаяся при β -распаде энергия делится между электроном, антинейтрино и дочерним ядром, однако 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. Поэтому электроны могут иметь любое значение энергии — от нулевой до некоторой максимальной, которая равна энергии, освобождающейся при β -распаде, являющейся важной физической величиной.

Кинетическая энергия электрона E связана с его импульсом обычным релятивистским соотношением

$$E = \sqrt{(pc)^2 + (mc^2)^2} - mc^2. \quad (1)$$

Рис. 1: Форма спектра β -частиц при разрешенных переходах

В нерелятивистском приближении формула, выражающая форму β -спектра приобретает вид:

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

где E_e — максимальная энергия электрона.

Выражение (2) приводит к спектру, имеющему вид широкого колокола (см. 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 β -распада, нередко оказываются возбужденными. Возбужденные 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 определенную 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 аппаратурной — по ней можно оценить разрешающую силу спектрометра.

Экспериментальная установка

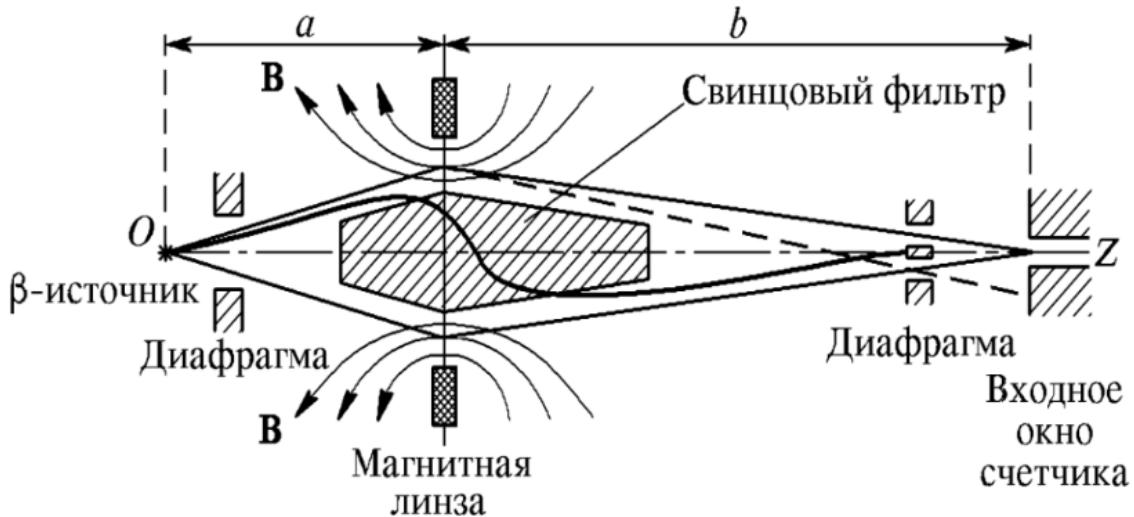


Рис. 2: Схема β -спектрометра с короткой магнитной линзой

Энергию β -частиц определяют с помощью β -спектрометров. В работе используется магнитный спектрометр с «короткой линзой». Электроны, испускаемые радиоактивным источником (рис. 2), попадают в магнитное поле катушки, ось которой параллельна оси OZ (оси симметрии прибора). Траектории электронов в магнитном поле представляют собой схематически показанные на рисунке сложные спирали, сходящиеся за катушкой в фокусе, расположенном на оси OZ . В фокусе установлен детектор электронов. Чувствительным элементом сцинтиляционного счетчика является тонкий кристалл полистирола. При попадании электрона в кристалле возникает световая вспышка – сцинтиляция, регистрируемая фотоумножителем.

При заданной силе тока на входное окно счетчика фокусируются электроны с определенным импульсом. Электроны, обладающие другими значениями импульса, при этом не сфокусированы и в основном проходят мимо окна (штриховой луч). При изменении тока в катушке на счетчик последовательно фокусируются электроны с разными импульсами. Так как геометрия прибора в течение всего опыта остается неизменной, импульс сфокусированных электронов пропорционален величине тока I :

$$p_e = kI. \quad (3)$$

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 $p_e - \Delta p_e/2$ до $p_e + \Delta p_e/2$. Величина Δp_e – ширина интервала импульсов, регистрируемых при заданном значении тока, – называется разрешающей способностью β -спектрометра.

Ширина интервала Δp_e , регистрируемого спектрометром, пропорциональна величине импульса.

В результате попадания электронов в сцинтилятор 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 вакуумметром.

Ход работы

1. Откачаем воздух из полости спектрометра.
2. Включим формирователь импульсов, питание магнитной линзы и уменьшим ток через нее до нуля.
3. Приступим к подробному измерению β -спектра. Результаты запишем в таблицу 1.

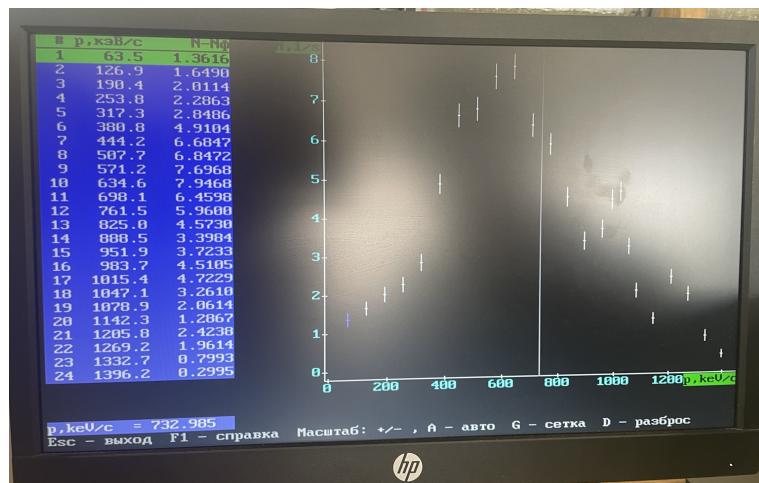


Рис. 3: Картина спектра на компьютере

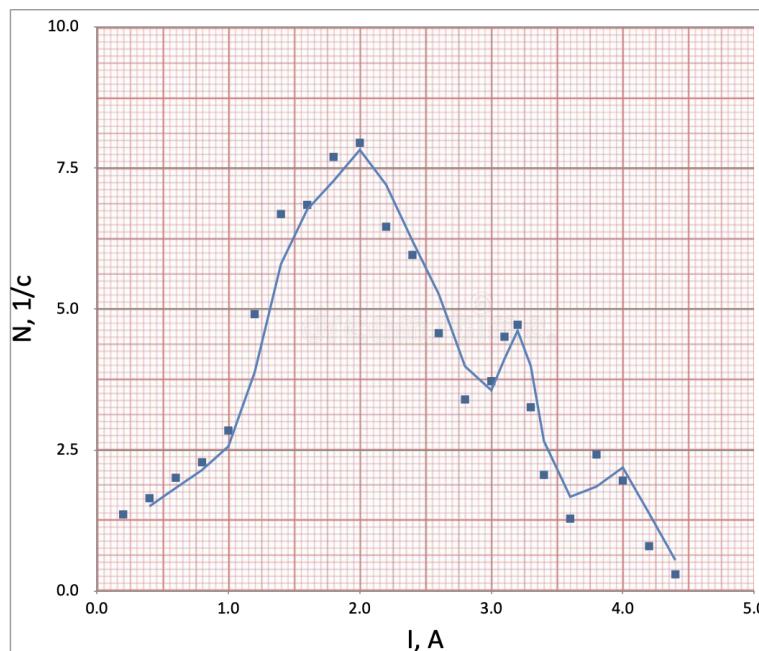


Рис. 4: β -спектр за вычетом фона

4. Измерим фон. В нашем случае он получился $N_{\phi} = 0.929 \text{ c}^{-1}$. Эту информацию тоже занесем в таблицу 1.

I , А	$N + N_\Phi$, с^{-1}	N , с^{-1}	p , кэВ/с	$\sqrt{N}/p^{3/2}$, $c^{3/2} \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1/2} \cdot \text{кэВ}^{-3/2}$	E , кэВ
0.2	2.3617	1.3616	56.3	3.1	2762.2
0.4	2.6491	1.6490	112.6	12.3	1074.7
0.6	3.0115	2.0114	168.9	27.2	646.1
0.8	3.2864	2.2863	225.2	47.5	447.4
1.0	3.8487	2.8486	281.5	72.5	357.4
1.2	5.9105	4.9104	337.8	101.7	356.9
1.4	7.6848	6.6847	394.1	134.5	330.5
1.6	7.8473	6.8472	450.4	170.4	273.8
1.8	8.6969	7.6968	506.7	208.9	243.2
2.0	8.9469	7.9468	563.0	249.7	211.0
2.2	7.4599	6.4598	619.3	292.3	164.9
2.4	6.9601	5.9600	675.6	336.5	139.0
2.6	5.5731	4.5730	731.9	382.1	108.0
2.8	4.3985	3.3984	788.2	428.8	83.3
3.0	4.7234	3.7233	844.5	476.5	78.6
3.1	5.5106	4.5105	872.7	500.8	82.4
3.2	5.7230	4.7229	900.8	525.2	80.4
3.3	4.2611	3.2610	929.0	549.7	63.8
3.4	3.0615	2.0614	957.1	574.5	48.5
3.6	2.2868	1.2867	1013.4	624.5	35.2
3.8	3.4239	2.4238	1069.7	675.1	44.5
4.0	2.9615	1.9614	1126.0	726.1	37.1
4.2	1.7994	0.7993	1182.3	777.6	22.0
4.4	1.2996	0.2995	1238.6	829.5	12.6

Таблица 1: Экспериментальные данные

5. По конверсионному пику определим константу пропорциональности k из уравнения (3). Величина произведения импульса конверсионного электрона на скорость света равна 1013.5 кэВ. Откуда:

$$k = 281.5 \cdot \frac{1}{c} \frac{\text{кэВ}}{\text{А}},$$

где c – это скорость света, а не секунды.

6. Теперь, зная эту калибровочную константу, построим график Ферми-Кюри, то есть зависимость величины $\frac{\sqrt{N}}{p^{3/2}}$ от энергии электрона E . Из него, по пересечению с осью абсцисс можно определить максимальную энергию β -частиц.

Для построения графика не использовались первые 4 точки, поскольку они давали слишком большие значения по ординате из-за чего главную часть графика не было хорошо видно.

Также, мы видим, что сам график хоть и напоминает прямую, однако все же он не линеен. Именно поэтому строим аппроксимирующую прямую лишь по линейному участку.

Получаем следующие коэффициенты для аппроксимации прямой $y = Ax + B$:

- $A = (-0.84 \pm 0.02) c^{3/2} \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1/2} \cdot \text{кэВ}^{-5/2}$
- $B = (425 \pm 5) c^{3/2} \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1/2} \cdot \text{кэВ}^{-3/2}$

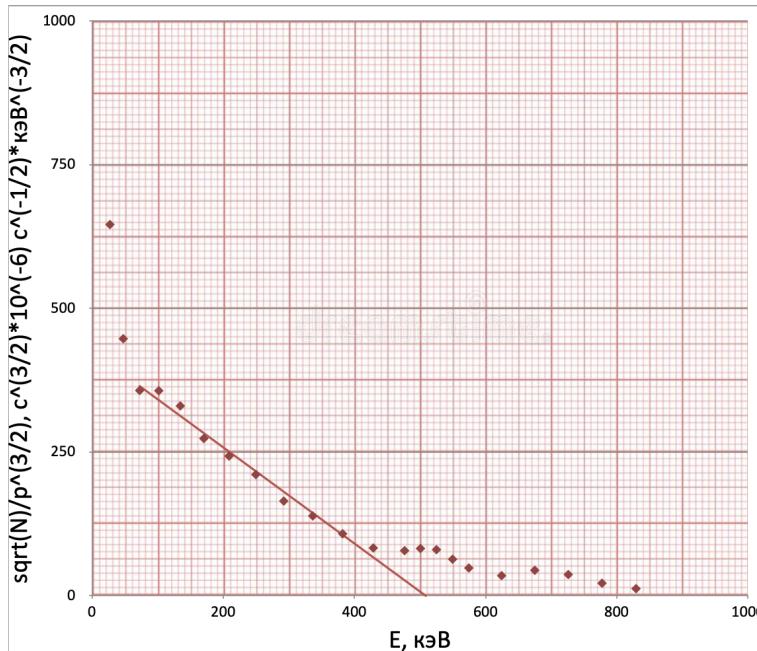


Рис. 5: График Ферми-Кюри

Максимальная энергия β -частиц определяется пересечением прямой с осью абсцисс:

$$E_{\max} = -\frac{B}{A}$$

$$E_{\max} = (509 \pm 30) \text{ кэВ}$$

Относительная погрешность составляет $\sim 5\%$.

Значение получилось несколько заниженное, по сравнению с табличным: $E_{\max}^{\text{истин}} \simeq 634 \text{ кэВ}$.

Вывод

В данной работе мы исследовали спектр β -частиц при распаде цезия ^{137}Cs . Также, была определена максимальная энергия β -частиц при данном распаде: $E_{\max} = (509 \pm 30) \text{ кэВ}$. Относительная погрешность составляет $\sim 6\%$. Истинное значение находится немного больше, чем найденное нами: $E_{\max}^{\text{истин}} \simeq 634 \text{ кэВ}$. Хоть ошибки и есть, но достаточно малы.

Список литературы

- [1] *Лабораторный практикум по общей физике. В 3 томах. Том 3. Квантовая физика: учебное пособие* под ред. Ю. М. Щипенюка