

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа биологической и медицинской физики

Лабораторная работа по общей физике

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

Выполнили студенты группы Б06-103:

Фитэль Алена

Флоренская Лидия

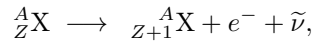
1 Введение

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

2 Теоретическая справка

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

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

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

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

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

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 сцинтилляционного счетчика является тонкий кристалл полистирола. При попадании электрона в кристалле возникает световая вспышка — сцинтилляция, 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

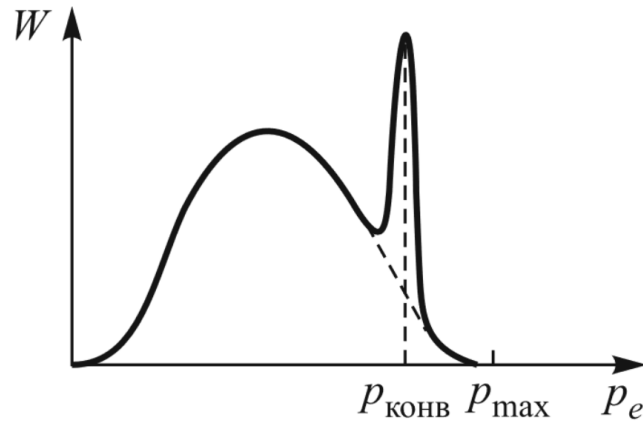


Рисунок 1: Форма спектра β -частиц при разрешенных переходах

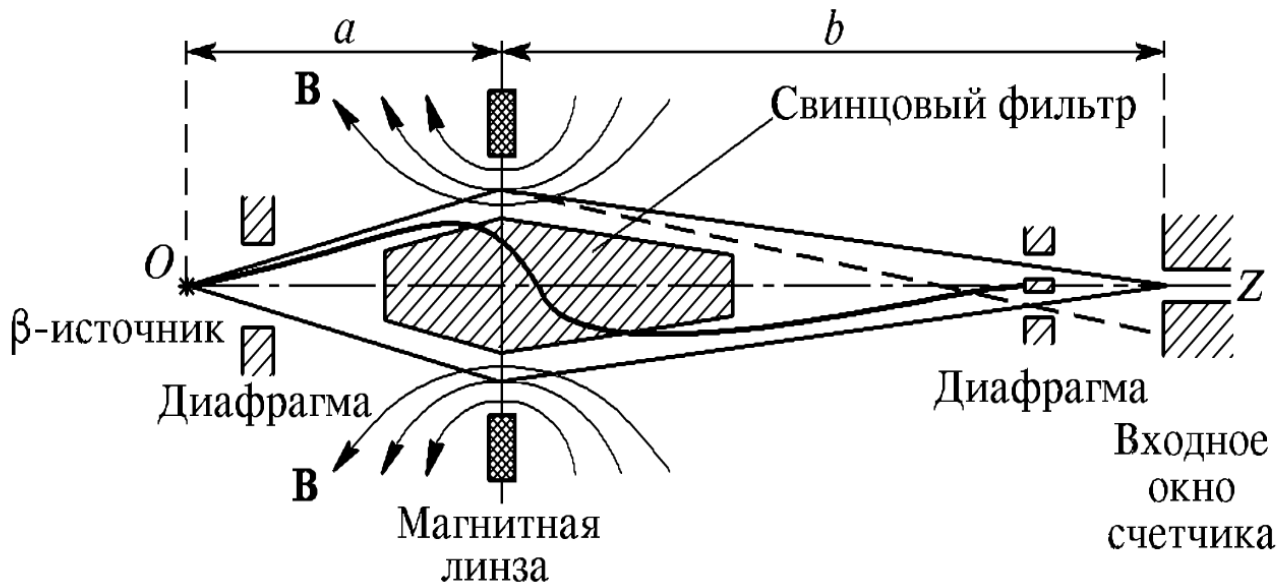


Рисунок 2: Схема β -спектрометра с короткой магнитной линзой

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 аберраций 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 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 термпарным вакуумметром. 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. Высокое напряжение на ФЭУ или газоразрядный счетчик подается от стабилизированного выпрямителя.

3 Ход работы

1. Откачаем воздух из полости спектрометра. Включим формирователь импульсов, питание магнитной линзы.
2. Приступим к подробному измерению β -спектра. Результаты приведены в Таблице 1 (Приложение) и проиллюстрированы на Рисунке 3.
3. Коэффициент k (кс) из зависимости (3) определим по известной (табличное значение) конверсионной линии:

$$624 \text{ кэВ} = kcI_0,$$

где c – скорость света, $I_0 = 4,20 \pm 0,02 \text{ А}$ – сила тока, при которой наблюдается конверсионный пик:

$$kc = 149 \pm 7 \frac{\text{кэВ}}{\text{А}},$$

4. Теперь, зная эту калибровочную константу, построим график Ферми-Кюри (Рисунок 5, Таблица 2 (Приложение)) с помощью взвешенного МНК, 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. Анализ спектра

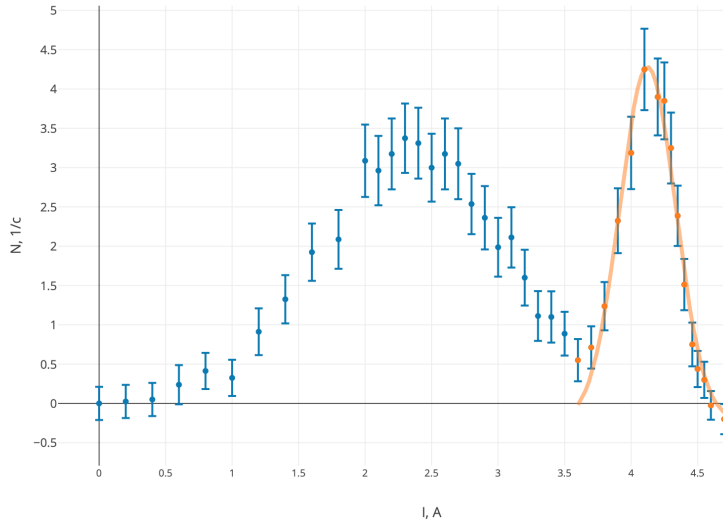


Рисунок 3: β -спектр (с вычетом фона)

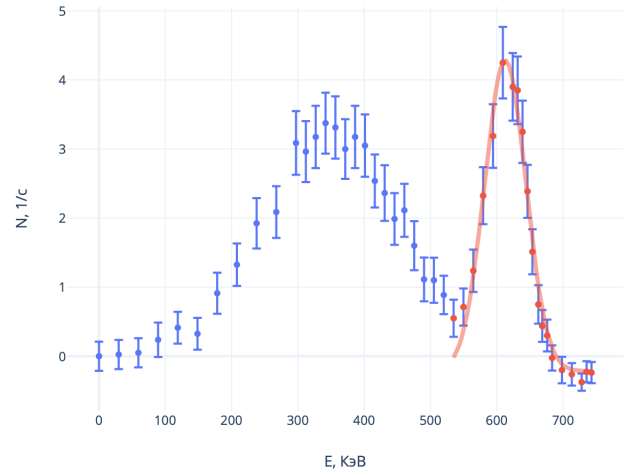


Рисунок 4: График зависимости числа N частиц от их энергии E

в координатах $N(T)$ (Рисунок 4) в нашем случае даст грубый результат для оценки максимальной энергии, так как придётся ограничиться исследованием точек у самой верхней границы спектра. График Ферми-Кюри позволяет избежать столь грубых оценок и учесть больше точек, поэтому для подсчета максимума энергии мы будем использовать именно его.

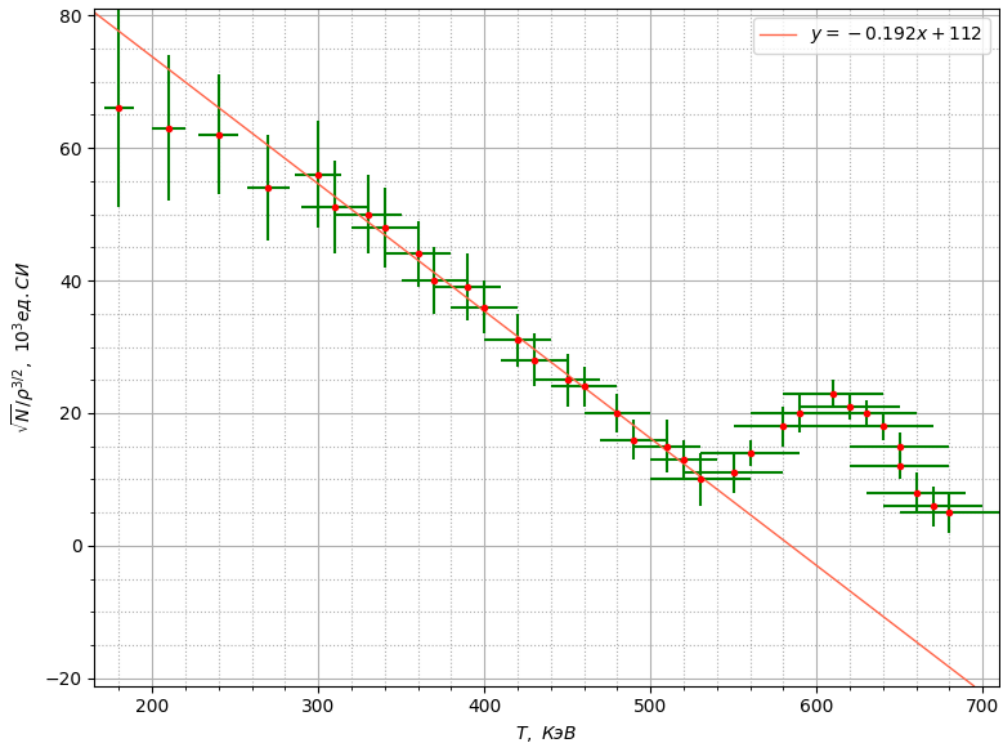


Рисунок 5: График Ферми-Кюри

Получаем следующие коэффициенты из аппроксимации прямой графика Ферми-Кюри $y = Ax + B$:

- $A = (-0,192 \pm 0,005) \left(\frac{\text{М}}{\text{с} \cdot \text{В}^2}\right)^{3/2}$
- $B = (112 \pm 2) \left(\frac{\text{М}}{\text{с} \cdot \text{В}}\right)^{3/2}$

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

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

$$E_{\max} = (584 \pm 18) \text{ кэВ}$$

Табличное значение: $E_{\max}^{\text{истин}} = 634 \text{ кэВ}$.

4 Вывод

- В результате выполнения лабораторной работы был изучен энергетический спектр β - частиц при распаде ядер ^{137}Cs .
- Мы экспериментально удостоверились в том, что спектр β - частиц имеет вид широкого купола, причем данная кривая плавно касается оси абсцисс в области максимальной энергии электронов E_e . Также в спектре отчетливо наблюдается конверсионный пик.
- Была определена максимальная энергия β -частиц при данном распаде: $E_{\max} = (584 \pm 18) \text{ кэВ}$. Относительная погрешность составляет 9% (табличное значение величины: $E_{\max}^{\text{истин}} = 634 \text{ кэВ}$).

5 Приложение

№	I , A	σ_l , A	N , 1/c	σ_N , 1/c	$N - N_f$, 1/c	σ_{N-N_f} , 1/c
1	0	0.02	0.7	0.2	0	0.3
2	0.2	0.02	0.8	0.2	0	0.3
3	0.4	0.02	0.8	0.2	0.1	0.3
4	0.6	0.02	1	0.2	0.2	0.4
5	0.8	0.02	1.2	0.2	0.4	0.3
6	1	0.02	1.1	0.2	0.3	0.3
7	1.2	0.02	1.6	0.3	0.9	0.4
8	1.4	0.02	2.1	0.3	1.3	0.4
9	1.6	0.02	2.7	0.4	1.9	0.5
10	1.8	0.02	2.8	0.4	2.1	0.5
11	2	0.02	3.8	0.5	3.1	0.7
12	2.1	0.02	3.7	0.4	3	0.6
13	2.2	0.02	3.9	0.5	3.2	0.6
14	2.3	0.02	4.1	0.4	3.4	0.6
15	2.4	0.02	4	0.5	3.3	0.6
16	2.5	0.02	3.7	0.4	3	0.6
17	2.6	0.02	3.9	0.5	3.2	0.6
18	2.7	0.02	3.8	0.5	3	0.6
19	2.8	0.02	3.3	0.4	2.5	0.5
20	2.9	0.02	3.1	0.4	2.4	0.6
21	3	0.02	2.7	0.4	2	0.5
22	3.1	0.02	2.8	0.4	2.1	0.5
23	3.2	0.02	2.3	0.4	1.6	0.5
24	3.3	0.02	1.8	0.3	1.1	0.4
25	3.4	0.02	1.8	0.3	1.1	0.5
26	3.5	0.02	1.6	0.3	0.9	0.4
27	3.6	0.02	1.3	0.3	0.6	0.4
28	3.7	0.02	1.4	0.3	0.7	0.4
29	3.8	0.02	2	0.3	1.2	0.4
30	3.9	0.02	3.1	0.4	2.3	0.6
31	4	0.02	3.9	0.5	3.2	0.7
32	4.1	0.02	5	0.5	4.2	0.7
33	4.2	0.02	4.6	0.5	3.9	0.7
34	4.25	0.02	4.6	0.5	3.8	0.7
35	4.3	0.02	4	0.5	3.2	0.7
36	4.35	0.02	3.1	0.5	2.4	0.6
37	4.4	0.02	2.2	0.4	1.5	0.5
38	4.46	0.02	1.5	0.3	0.8	0.5
39	4.5	0.02	1.2	0.3	0.4	0.4
40	4.55	0.02	1	0.2	0.3	0.3
41	4.6	0.02	0.71	0.18	0	0.3
42	4.7	0.02	0.54	0.19	-0.2	0.3
43	4.8	0.02	0.48	0.16	-0.3	0.2
44	4.9	0.02	0.36	0.12	-0.4	0.2
45	4.95	0.02	0.51	0.15	-0.2	0.2
46	5	0.02	0.5	0.15	-0.2	0.2

Таблица 1: Результаты измерений.

№	I , А	p_c , кэВ	σ_{p_c} , кэВ	T , кэВ	σ_T , кэВ	$f, (\frac{M}{c\Delta B})^{3/2}$	$\sigma_f, (\frac{M}{c\Delta B})^{3/2}$
1	0	-	-	-	-	-	-
2	0.2	30	3	30	3	160	963
3	0.4	60	4	60	4	80	240
4	0.6	90	5	90	5	100	80
5	0.8	120	6	120	6	81	30
6	1	150	8	150	8	52	24
7	1.2	180	9	180	9	66	15
8	1.4	210	10	210	10	63	11
9	1.6	240	12	240	12	62	9
10	1.8	270	13	270	13	54	8
11	2	300	14	300	14	56	8
12	2.1	310	20	310	20	51	7
13	2.2	330	20	330	20	50	6
14	2.3	340	20	340	20	48	6
15	2.4	360	20	360	20	44	5
16	2.5	370	20	370	20	40	5
17	2.6	390	20	390	20	39	5
18	2.7	400	20	400	20	36	4
19	2.8	420	20	420	20	31	4
20	2.9	430	20	430	20	28	4
21	3	450	20	450	20	25	4
22	3.1	460	20	460	20	24	3
23	3.2	480	20	480	20	20	3
24	3.3	490	20	490	20	16	3
25	3.4	510	20	510	20	15	4
26	3.5	520	20	520	20	13	3
27	3.6	530	30	530	30	10	4
28	3.7	550	30	550	30	11	3
29	3.8	560	30	560	30	14	2
30	3.9	580	30	580	30	18	3
31	4	590	30	590	30	20	3
32	4.1	610	30	610	30	23	2
33	4.2	620	30	620	30	21	2
34	4.25	630	30	630	30	20	2
35	4.3	640	30	640	30	18	2
36	4.35	650	30	650	30	15	2
37	4.4	650	30	650	30	12	2
38	4.46	660	30	660	30	8	3
39	4.5	670	30	670	30	6	3
40	4.55	680	30	680	30	5	3
41	4.6	680	30	680	30	-	-
42	4.7	700	30	700	30	-	-
43	4.8	710	30	710	30	-	-
44	4.9	730	30	730	30	-	-
45	4.95	740	40	740	40	-	-
46	5	740	40	740	40	-	-

Таблица 2: Вычисление энергии и импульса для соответствующего измерения, данные для построения графика Ферми-Кюри.