

Лабораторная работа 5.4.2

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

Симанкович Александр
Б01-108

08.11.2023

Аннотация

В работе экспериментально исследуется энергетический спектр β -частиц ^{137}Cs . В качестве экспериментальной установки используется магнитный спектрометр. Определяется максимальная энергия β -частиц при распаде $T_{max} = (570 \pm 25)$ кэВ. Калибровка производится по положению конверсионного пика $T_k = 624$ кэВ.

Теоретическое введение

Основы β -распада

β -распад – явление самопроизвольного превращения ядер, в котором массовое число A ядра сохраняется, а заряд изменяется на единицу. Ядра, подверженные β -распаду встречаются во всей области значений массового числа A . Диапазон энергий, высвобождаемых при β -распаде: 18 кэВ \div 13.4 МэВ. Периоды полураспада лежат в пределах 10^{-6} с \div 10^{18} лет.

В данной работе изучается бета-минус-распад (β^-) ядра ^{137}Cs :



В данном типе распада испускается электрон и антинейтрино.

Поскольку масса ядра много больше массы электрона $A \cdot m_p \gg m_e$, энергия, уносимая ядром, очень мала. Однако, в эксперименте у электронов наблюдается сплошной спектр, который объясняется существованием антинейтрино, которое в состоянии унести оставшуюся энергию. Таким образом, электроны могут иметь любую энергию от нулевой до полной энергии, выделяемой при β -распаде T_{max} .

Спектр β -электронов

Как было отмечено выше, спектр является непрерывным от нуля до T_{max} . W – спектральная плотность вероятности.

Спектр β -электронов для разрешенных фермиевских переходов может быть рассчитан теоретически. В этом случае вероятность β -распада с заданными p_e и p_ν пропорциональна статистическому весу. Поскольку энергия, уносимая ядром, мала, мы можем считать, что $T_e + E_\nu = T_\beta = T_{max}$. Тогда энергия и импульс нейтрино полностью определяются p_e .

Интервалу $(p_e; p_e + dp_e)$ соответствует фазовый объём $4\pi p_e^2$. Аналогичный шаровой слой соответствует антинейтрино: $4\pi p_\nu^2$. Тогда получаем:

$$W(p_e)dp_e \propto p_e^2 p_\nu^2 dp_e. \quad (2)$$

Выразим импульс антинейтрино:

$$p_\nu = E_\nu/c = \frac{T_{max} - T_e}{c}. \quad (3)$$

Подставляя (3) в (2) получаем:

$$W(p_e)dp_e \propto p_e^2 (\sqrt{p_{max}^2 + m_e^2 c^2} - \sqrt{p_e^2 + m_e^2 c^2})^2 dp_e. \quad (4)$$

На спектре (см. рис. 1) также наблюдается выраженный пик при $p_e = p_{конв}$. Этот пик называется конверсионным. При β -распаде ядро может оказаться возбужденным. Энергия возбуждения может быть излучена через γ -квант или передана электрону с внутренней оболочки атома. Эти электроны образуют монохроматический пик. Для ^{137}Cs он расположен на энергии $T_k = 0.624$ МэВ.

Методика эксперимента

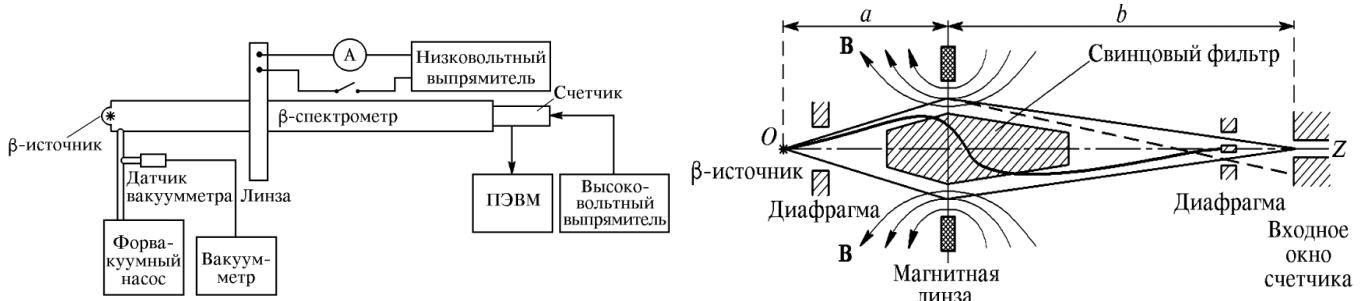


Рис. 1: Спектр β -электронов.

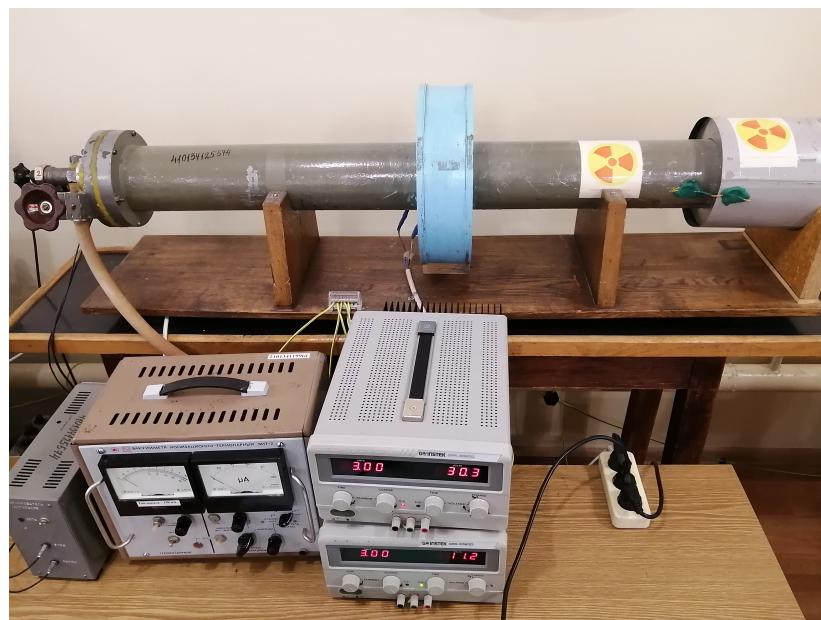


Рис. 2: Схема установки для изучения β -распада.

Для определения энергии β -частиц используется β -спектрометр с "короткой линзой" (см. рис. 2). Электроны, испускаемые источником, попадают в магнитное поле катушки (магнитной линзы). В фокусе этой линзы расположен счетчик – сцинтиллятор. Сигнал с сцинтиллятора попадает в ФЭУ, после чего с помощью АЦП сохраняется на компьютере.

Для предотвращения попадания прямого γ -излучения и β -частиц устанавливается свинцовый фильтр. Магнитная линза имеет значительные сферические aberrации, для исключения их влияния необходимо устанавливать диафрагму.

Для исключения рассеяния электронов в спектрометре с помощью форвакуумного насоса поддерживается давление $P \sim 0.1$ Торр.

Для фокусного расстояния линзы можно показать, что:

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

где I – сила тока в линзе. При заданной силе тока в счетчик попадают электроны с импульсом $p_e \pm \Delta p_e/2$. Δp_e – разрешающая способность спектрометра.

Геометрия прибора не изменяется в ходе опыта, поэтому

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

где k – константа прибора.

Рассмотрим связь частоты регистрации частиц и спектральной плотности вероятности.

$$N(p_e) = W(p_e) \cdot \Delta p_e.$$

Исходя из (5) получим:

$$\Delta p_e = \frac{1}{2} \frac{\Delta f}{f} p_e.$$

Тогда:

$$N(p_e) = C \cdot W(p_e) p_e \quad (7)$$

Результаты

Проведем измерения частоты регистрации частиц для токов в диапазоне $I = (0.0 \div 4.2)$ А. Каждое измерение проводится в течение 100 секунд. Для учета фона вычтем из N значение N_0 при $I = 0$ А.

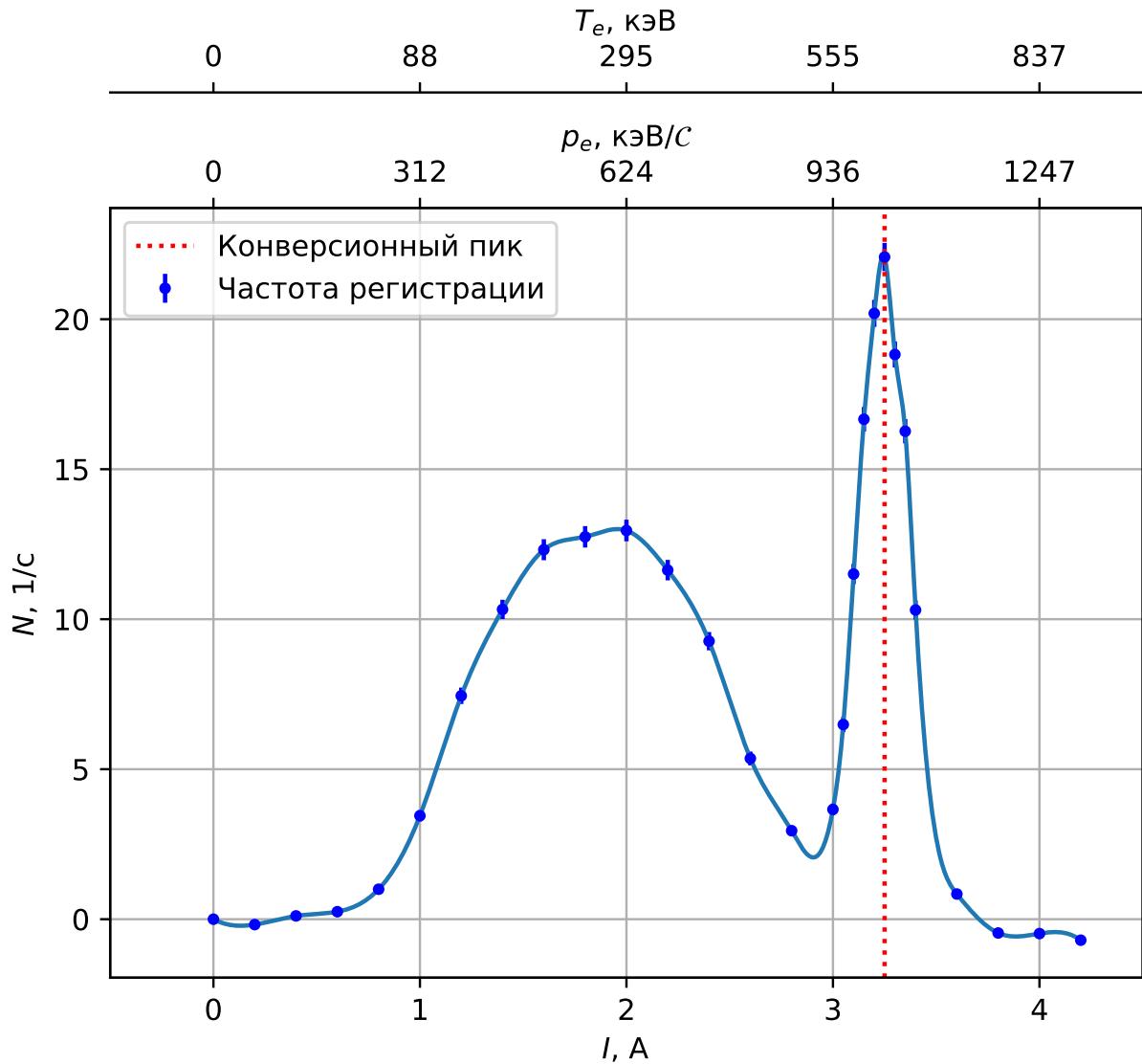


Рис. 4: Зависимость частоты регистрации частиц от тока.

На графике наблюдается конверсионный пик. Для ^{137}Cs он расположен на $T_k = 624$ кэВ. Таким образом, нормируем график по энергии и импульсам T_e, p_e (см. рис. 4).

Исходя из ширины конверсионного пика оценим разрешающую способность спектрометра.

$$\Delta p_e \approx 20 \text{ кэВ/с}.$$

I , A	N , 1/c	p_e , кэВ/с	T_e , кэВ
0.00	1.36	0.00	0.00
0.20	1.18	62.37	3.79
0.40	1.47	124.73	15.00
0.60	1.61	187.10	33.18
0.80	2.36	249.47	57.64
1.00	4.81	311.83	87.63
1.20	8.81	374.20	122.36
1.40	11.69	436.57	161.10
1.60	13.68	498.93	203.18
1.80	14.11	561.30	248.07
2.00	14.32	623.67	295.28
2.20	13.00	686.04	344.43
2.40	10.63	748.40	395.22
2.60	6.72	810.77	447.37
2.80	4.31	873.14	500.68
3.00	5.02	935.50	554.97
3.05	7.85	951.09	568.68
3.10	12.87	966.69	582.44
3.15	18.02	982.28	596.24
3.20	21.55	997.87	610.10
3.25	23.43	1013.46	624.00
3.30	20.18	1029.05	637.94
3.35	17.62	1044.64	651.93
3.40	11.67	1060.24	665.95
3.60	2.20	1122.60	722.43
3.80	0.90	1184.97	779.46
4.00	0.88	1247.34	836.95
4.20	0.66	1309.70	894.86

Таблица 1: Исходные и обработанные данные эксперимента.

В соответствии с (7) построим график Ферми.

$$\sqrt{N(p_e)} \cdot p_e^{-3/2} \propto T_{max} - T.$$

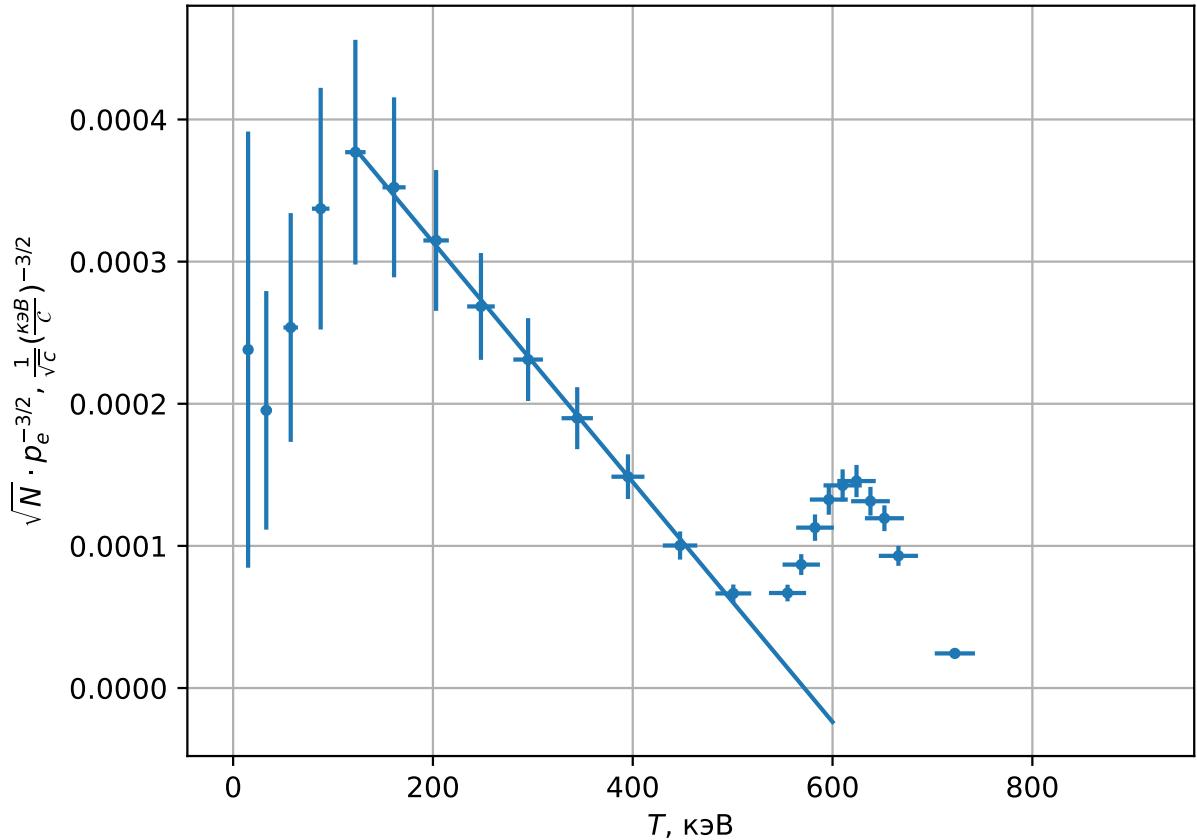


Рис. 5: Зависимость частоты регистрации частиц от тока.

На графике есть линейный участок, его экстраполяция пересекает ось абсцисс в точке $T = T_{max}$.

\bar{x}	S_x	\bar{y}	S_y	R_{xy}	a	Δa	b	Δb
301.96	15104.01	2.28e-04	1.08e-08	-1.27e-02	-8.44e-07	1.25e-08	4.83e-04	4.08e-06

Таблица 2: Аппроксимация линейного участка.

$$T_{max} = \frac{-b}{a} = (572 \pm 25) \text{ кэВ.}$$

Построим теоретическую зависимость $N(I)$ исходя из (2).

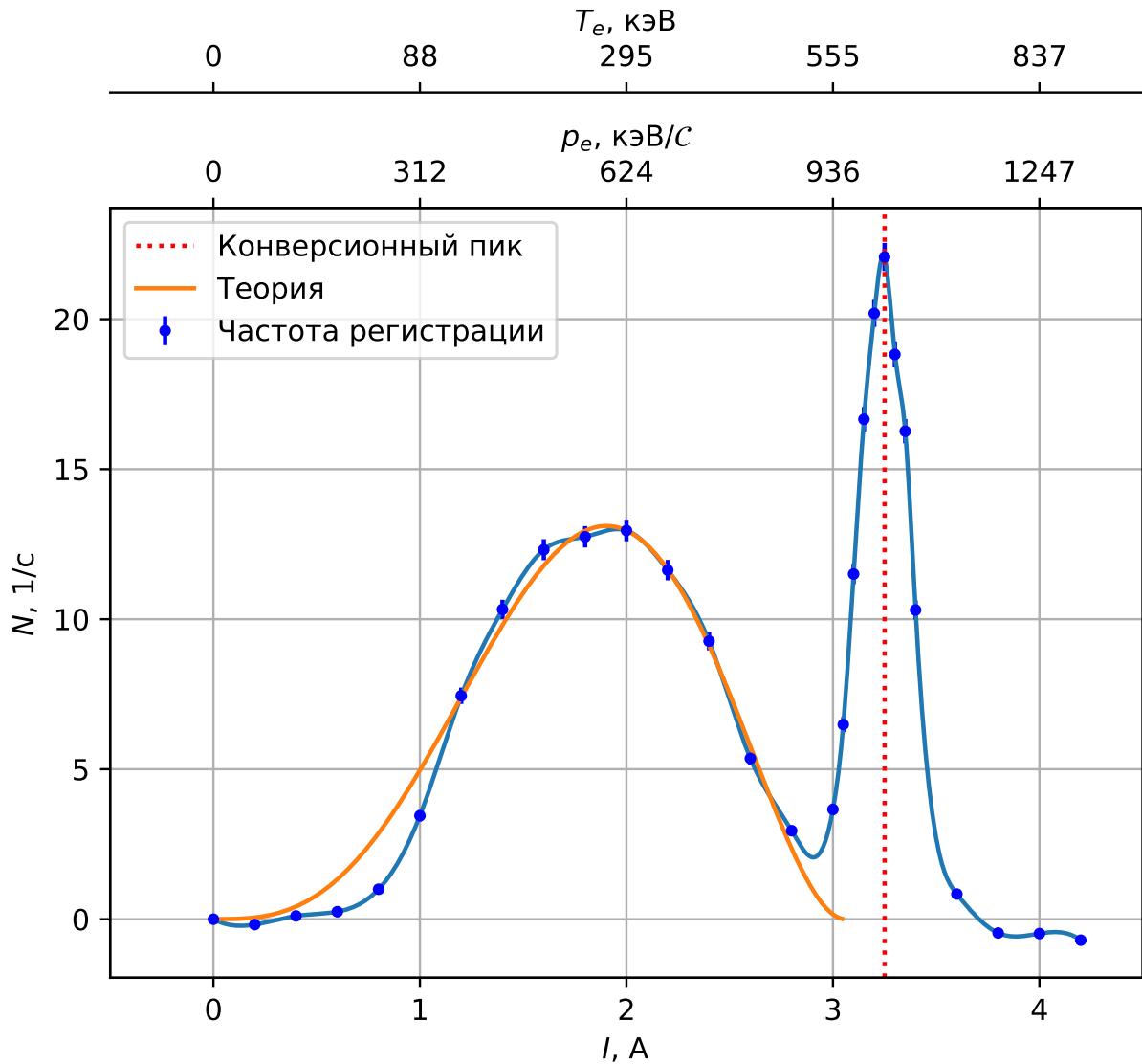


Рис. 6: Зависимость частоты регистрации частиц от тока.

Как можно видеть, теоретическая зависимость хорошо описывает экспериментальный результат.

Заключение и выводы

В работе определено значение максимальной энергии β -частиц при распаде ^{137}Cs $T_{max} = (570 \pm 25)$ кэВ.

Подтверждена теоретическая зависимость $N(p_e)$.

Определено значение разрешающей способности спектрометра $\Delta p_e \approx 20$ кэВ/с.