

Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)

Лабораторная работа № 5.5.5 по курсу
Квантовая физика

«Компьютерная сцинтилляционная γ - спектрометрия»

Выполнили:
студентки 3 курса 103 группы
Фитэль Алена
Флоренская Лидия

Москва, 05.12.23 г

1 Теоретическое введение

Процессы взаимодействия гамма-излучения с веществом

Основными процессами взаимодействия гамма-излучения с веществом являются:

1. Фотоэффект - процесс взаимодействия гамма-кванта с электроном, связанным с атомом, при котором электрону передается вся энергия гамма-кванта.

$$T_e = E_\gamma - I_i,$$

где I_i - потенциал ионизации i -ой оболочки атома.

2. Эффект Комптона - упругое рассеяние фотона на свободном электроне, сопровождающееся изменением длины волны фотона. Максимальная энергия образующихся комптоновских электронов соответствует рассеянию гамма-квантов на 2π и равна:

$$E_{c_max} = \frac{\hbar\omega}{1 + \frac{m_e c^2}{2\hbar\omega}} \quad (1)$$

3. Процесс образования электрон-позитронных пар. Происходит при высокой энергии гамма-кванта. Появившийся в результате процесса образования пары электрон теряет свою энергию на ионизацию среды. Позитрон будет двигаться до тех пор, пока практически не остановится, аннигилирует с электроном среды, в результате чего появятся два гамма-кванта. Далее возможны три варианта:

- (а) оба родившихся гамма-кванта не вылетают из детектора, и тогда вся энергия первичного гамма-кванта останется в детекторе, а в спектре появится пик с $E = E_\gamma$;
- (б) один из родившихся гамма-квантов покидает детектор, и в спектре появляется пик, соответствующий энергии $E = E_\gamma - E_0$, где $E_0 = mc^2 = 511$ кэВ;
- (с) оба родившихся гамма-кванта покидают детектор, и в спектре появляется пик, соответствующий энергии $E = E_\gamma - 2E_0$;

Помимо этих процессов взаимодействия гамма-излучения с веществом, добавляются экспонента, связанная с наличием фона, пик характеристического излучения, возникающий при взаимодействии гамма-квантов с окружающим веществом, а также пик обратного рассеяния, образующийся при энергии квантов $E_\gamma \gg mc^2/2$ в результате рассеяния гамма-квантов на большие углы на материалах конструктивных элементов детектора и защиты. Положение пика обратного рассеяния определяется по формуле (E — энергия фотопика):

$$E_{обр} = \frac{E}{1 + \frac{2E}{mc^2}} \quad (2)$$

Энергетическое разрешение спектрометра

Энергетическим разрешением спектрометра называется величина

$$R_i = \frac{\Delta E_i}{E_i} \quad (3)$$

т.е. отношение ширины пика полного поглощения (измеренной на полувысоте) к регистрируемой энергии пика поглощения. Это значение $E_i \propto \bar{n}_i$ — числу частиц на выходе ФЭУ. При этом $\Delta E_i \propto \Delta n_i = \sqrt{\bar{n}_i}$ — ширина пика пропорциональна среднеквадратичной флуктуации, которая равна корню из числа частиц. Таким образом, наша формула (3) примет вид

$$R_i = \frac{\text{const}}{\sqrt{E_i}} \quad (4)$$

2 Экспериментальная установка

Принципиальная блок-схема гамма-спектрометра (Рисунок 1):

1. сцинтиллятор - кристалл NaI(Tl) с размерами 45×50 мм и 20×25 мм,
2. фотоэлектронный умножитель (ФЭУ),
3. предусилитель импульсов,
4. высоковольтный блок питания для ФЭУ,
5. блок преобразования аналоговых импульсов с ФЭУ в цифровой код (АЦП),
6. компьютер для сбора данных, их обработки и хранения.

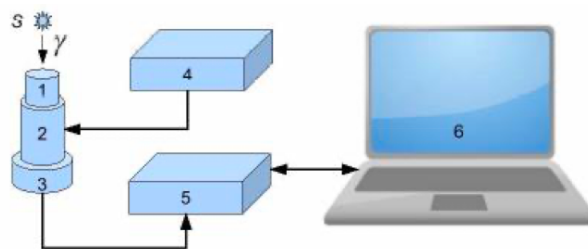


Рис. 1: Принципиальная блок-схема спектрометра.

3 Ход работы

3.1 Измерение значений фотопиков

1. Снимем энергетические спектры с помощью экспериментальной установки для образцов ^{22}Na , ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{241}Am и ^{152}Eu (см. Приложение). По значениям каналов у пиков полного поглощения излучения от радиоактивных источников ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{22}Na определим калибровочную формулу перехода от значений каналов к значениям энергий, используя табличные данные (Таблица 1, Рисунок 2).

Таблица 1: Пики полного поглощения эталонных образцов

Элемент	^{60}Co	^{60}Co	^{137}Cs	^{22}Na	^{22}Na
N_i	1620	1840	960	750	1770
dN_i	100	100	70	60	120
E_i , МэВ	1.173	1.332	0.662	0.511	1.274

$$N = aE + b, \quad a = 1.320 \pm 0.008 \frac{1}{\text{кэВ}}, \quad b = 83 \pm 9 \quad (5)$$

2. По полученной формуле посчитаем значения для пиков поглощения для различных материалов, а также ширину самих пиков - Таблица 2.

Таблица 2: Пики полного поглощения исследуемых образцов

Элемент	N_i	ΔN_i	E_i , МэВ	ΔE_i , МэВ	R_i
^{22}Na	750	60	510	50	0.096
^{22}Na	1770	120	1280	90	0.073
^{60}Co	1620	100	1160	80	0.065
^{60}Co	1840	100	1330	80	0.059
^{137}Cs	640	120	420	90	0.220
^{241}Am	110	20	20	20	0.640
^{241}Am	160	20	61	15	0.245
^{152}Eu	130	20	39	14	0.355
^{152}Eu	250	30	120	20	0.158
^{152}Eu	400	50	240	30	0.141
^{152}Eu	530	50	340	40	0.104

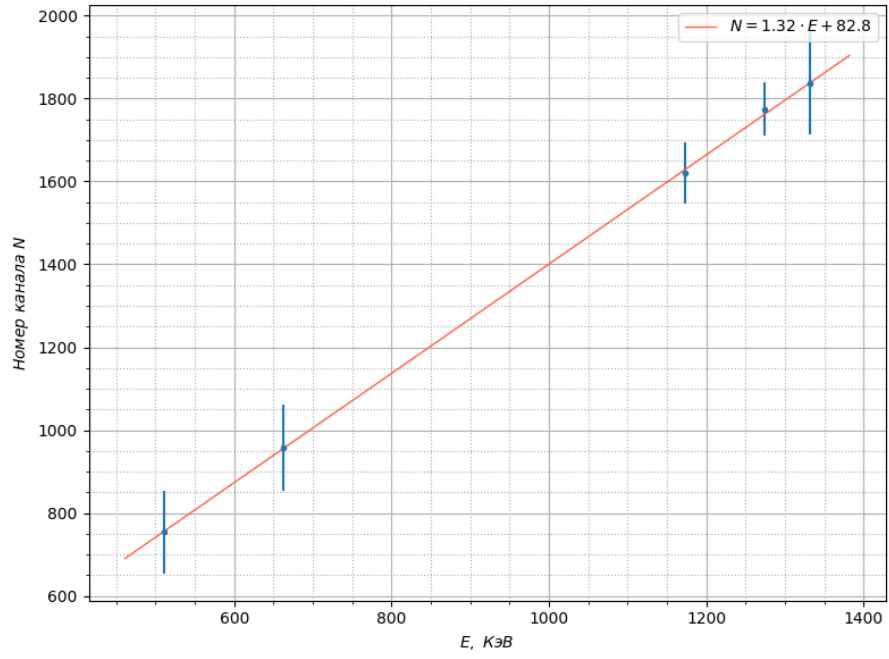


Рис. 2: Калибровочная прямая $N(E)$

3.2 Комptonовское рассеяние.

Посмотрим на корреляцию значений края комптоновского рассеяния, полученных в ходе эксперимента, и [теоретического расчета](#) (Рисунок 3, Таблица 3). Получаем значение тангенса угла наклона линейной аппроксимации $k = 1.040 \pm 0.016$. Таким образом, теоретический расчет близок к экспериментальным данным.

Элемент	N_{edge}	ΔN_{edge}	E_{edge} , МэВ	ΔE_{edge} , МэВ	$E_{edgetheor}$, МэВ
^{22}Na	460	120	280	90	250
^{60}Co	1220	260	860	190	810
^{137}Cs	640	120	420	90	370

Таблица 3: Значения пиков комптоновского рассеяния.

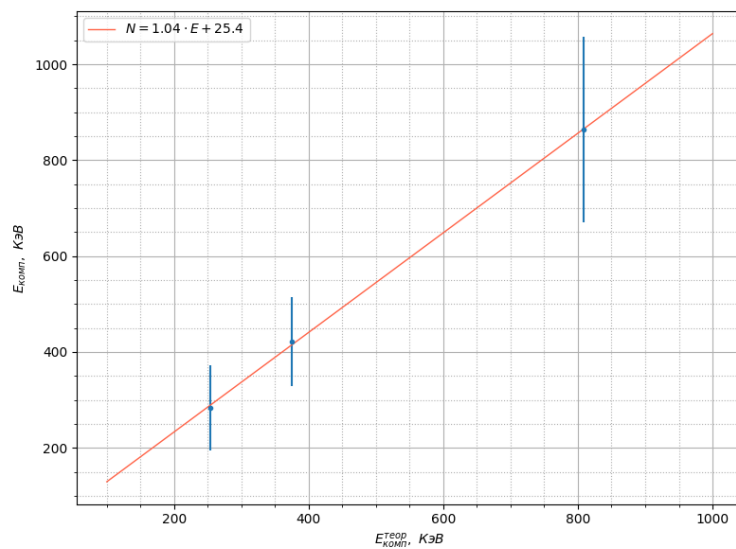


Рис. 3: График зависимости $E_{\text{комп}}(E_{\text{комп}}^{\text{теор}})$

3.3 Проверка формулы энергетического разрешения

Построим график зависимости $R_i^2(1/E_i)$ (Рисунок 4). Видно, что зависимость плохо описывается [линейной аппроксимацией](#).

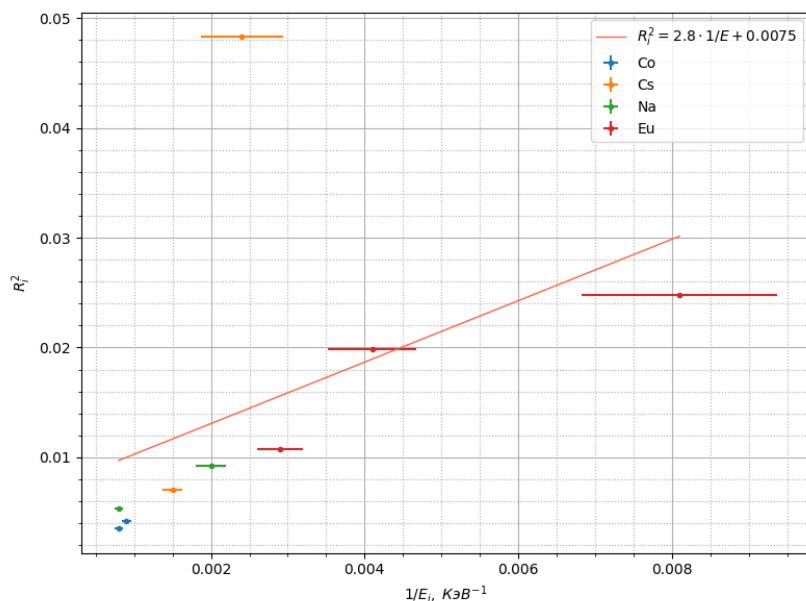


Рис. 4: График зависимости $R_i^2(1/E_i)$

3.4 Обратное рассеяние

Построим график зависимости $E_{\text{обр}} = f(E)$ и нанесем экспериментальные точки (Рисунок 5). В пределах погрешностей экспериментальные точки совпадают с [теоретически построенной зависимостью](#).

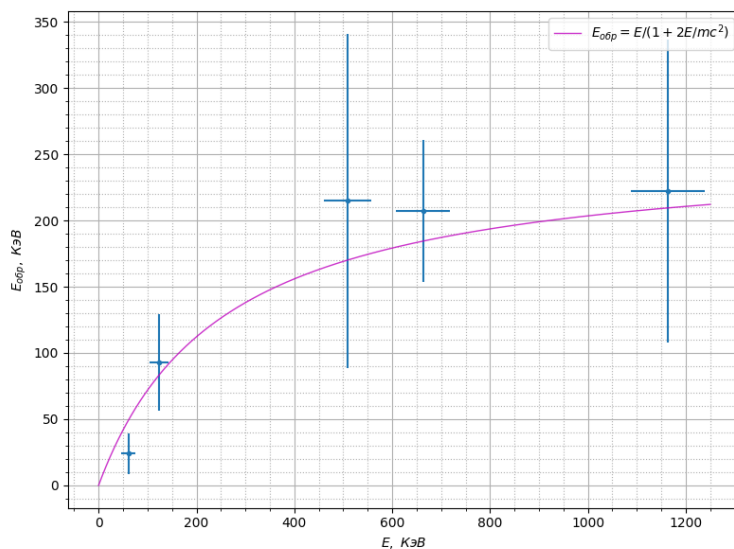


Рис. 5: График зависимости $E_{\text{обр}}(E)$

3.5 Характеристическое излучение свинца

Посмотрим на спектр фоновое излучения (Рисунок 6). На нем выделяется один пик, из аппроксимации гауссианом получим его значение: $E = 240 \pm 175 \text{ КэВ}$.

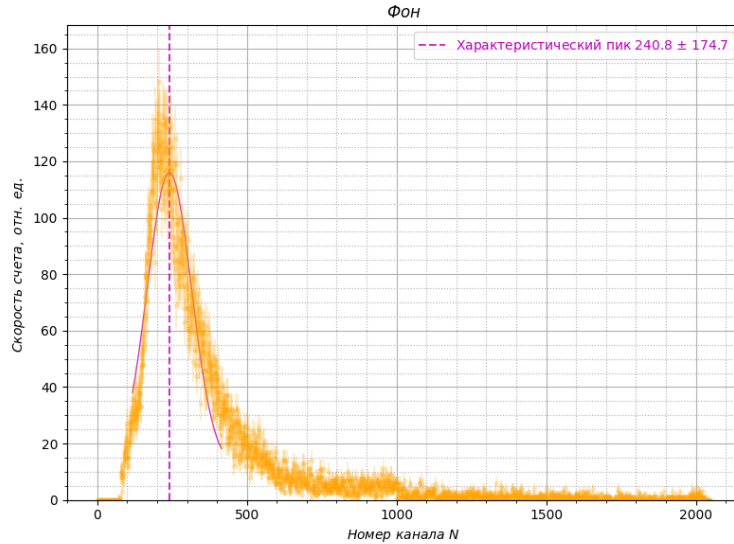


Рис. 6: Энергетический спектр фоновое излучения

3.6 Оценка характеристик фотоэлектронного умножителя(ФЭУ)

Осциллограмма импульсов на выходе ФЭУ имеет вид

$$U(t) = \text{const} \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_0}} \right), \quad (6)$$

где τ_0 – время высвечивания сцинтиллятора, а RC – постоянная времени, $RC \gg \tau_0$. По переднему фронту импульса можно оценить τ_0 :

$$U(t) \approx \text{const} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_0}} \right) \approx \text{const} \cdot \frac{t}{\tau_0}. \quad (7)$$

Таким образом, τ_0 можно оценить по прекращению нарастания импульса (т.е. на моменте, когда вырождается линейная зависимость): $\tau_0 = 1.8$ мкс.

По заднему фронту оценим RC , зафиксировав момент спада сигнала в e раз: $RC = 5.2$ мкс.

4 Обсуждение результатов и вывод

В ходе работы были измерены спектры гамма-излучений для образцов ^{22}Na , ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{241}Am и ^{152}Eu , найдены для их пики полного поглощения, обратного рассеяния, а также комптоновские края. Проверены формулы для пиков обратного рассеяния и комптоновских краев.

Найдено значение характеристического излучения свинца, служащего защитой спектрометра от внешнего излучения - $E = 240 \pm 175$.

По форме импульсов на выходе ФЭУ оценены время высвечивания сцинтиллятора $\tau_0 = 1.8$ мкс, а также $RC = 5.2$ мкс – постоянная времени цепи на выходе ФЭУ.

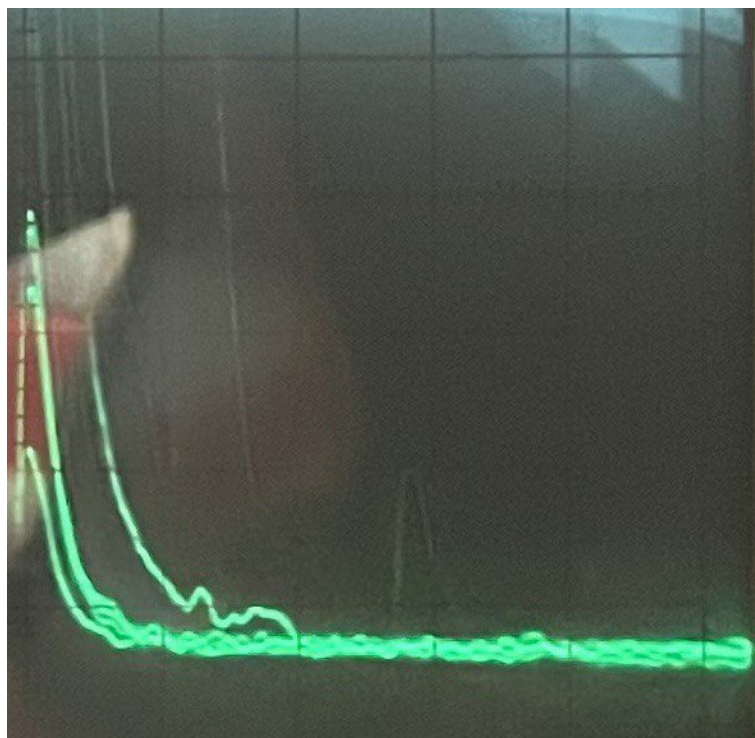


Рис. 7: Осциллограмма импульсов

Приложение

Энергетические спектры образцов ^{22}Na , ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{241}Am , ^{152}Eu :

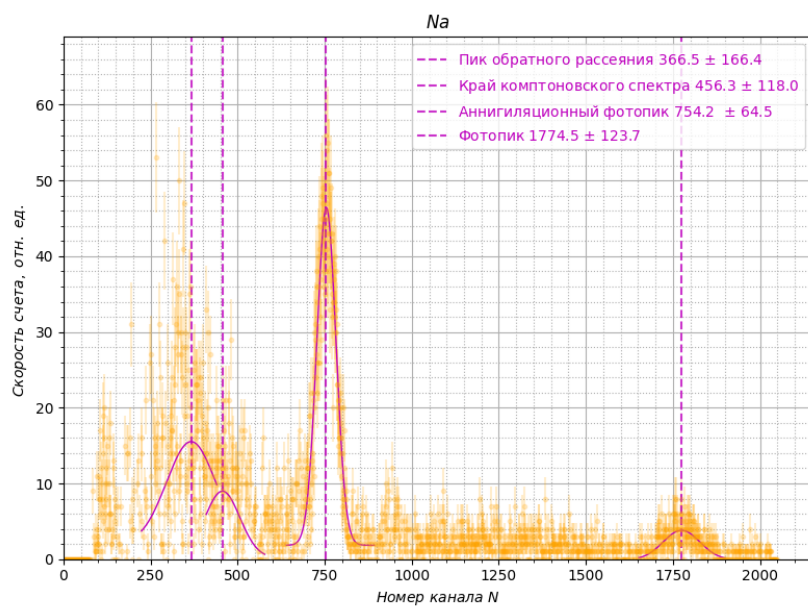


Рис. 8: Энергетический спектр ^{22}Na

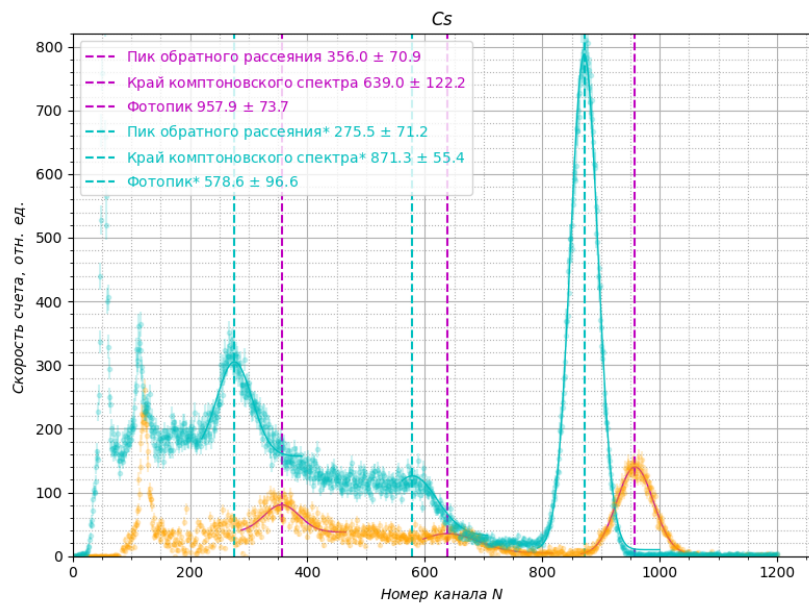


Рис. 9: Энергетический спектр ^{137}Cs

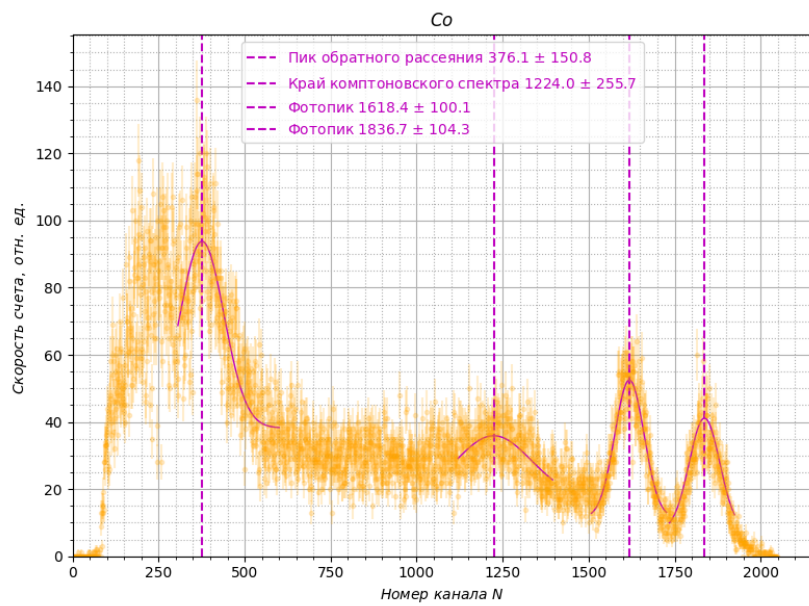


Рис. 10: Энергетический спектр ^{60}Co

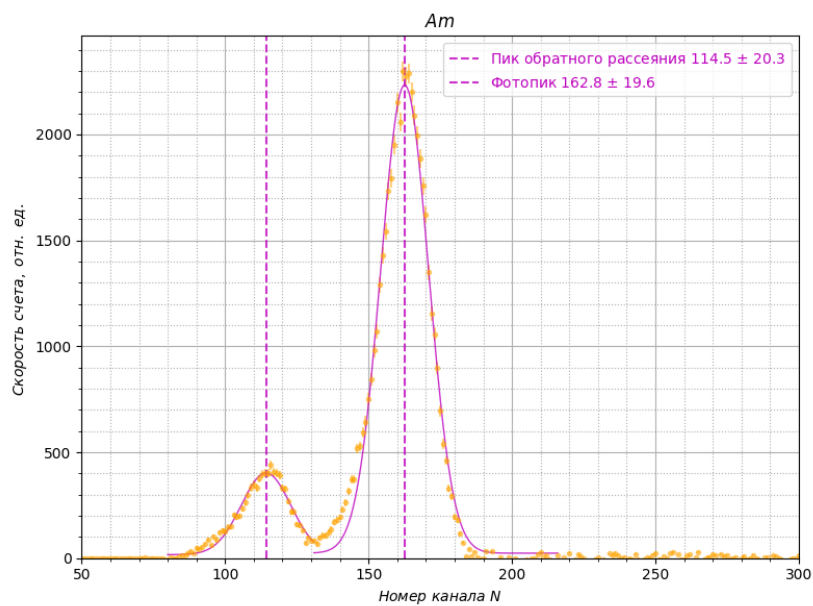


Рис. 11: Энергетический спектр ^{241}Am

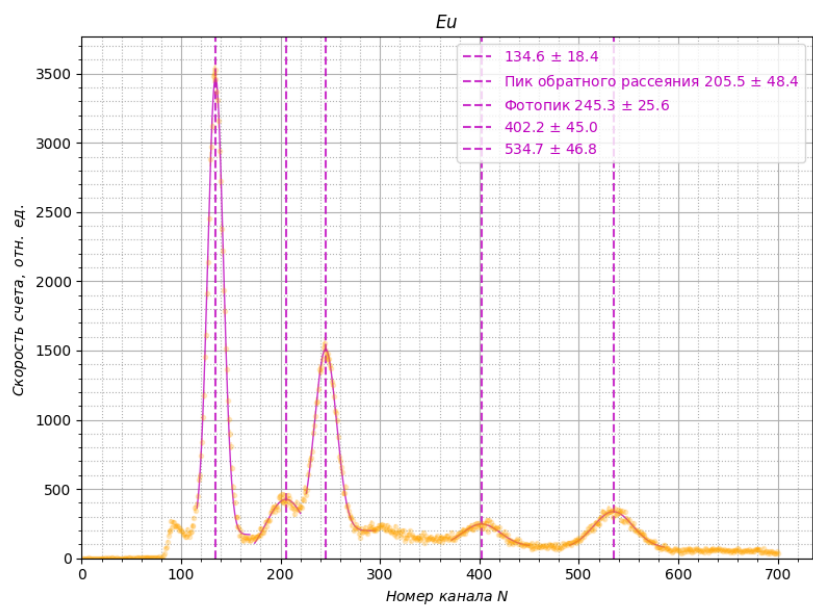


Рис. 12: Энергетический спектр ^{152}Eu