

Упражнение № 3. ИЗСЛЕДВАНЕ НА БЕТА-СПЕКТЪРА НА ^{137}Cs ПОСРЕДСТВОМ СЦИНТИЛАЦИОНЕН СПЕКТРОМЕТЪР СЪС СТИЛБЕНОВ КРИСТАЛ.

1. Поставяне на експерименталните задачи

- Да се снимат спектрите на електроните на източници ^{207}Bi и ^{137}Cs . β -спектъра на ^{137}Cs да се коригира за приноса на γ -лъчението.
- Да се извърши калибровка по енергии по известните конверсионни линии на ^{207}Bi .
- Да се построи графикът на Ферми-Кюри и определи максималната енергия на β -спектъра на ^{137}Cs .

2. Апаратура

- Сцинтилационен детектор тип – **VA-S-968.1** (GDR) със сцинтилатор стилбен с размери $\varnothing 30 \times 20$ mm (отворен) и с предусилвател. Изходящият сигнал е с отрицателна полярност.
- **Pb-защита** (домик) тип – **75002** (GDR) с прободържател.
- **Едноканален амплитуден анализатор** тип - **20160** (GDR) (използват се блоковете: **Усилвател - тип 20111** и **Високо напрежение - тип 20105**),
- **Многоканален амплитуден анализатор** (състоящ се от: **ADC-DIDAC** (France), интерфейсна платка, PC – 286 или по-висок, с **инсталирана програма ANL3**).

3. Бележки по опитната постановка

В това упражнение се използват специални източници на електрони (**β -частици и конверсионни електрони**) ^{207}Bi и ^{137}Cs (AMERSHAM), при които подложката и покритието са **твърде тънки**, за да се сведат до минимум загубите на енергия и обратното разсейване. При работа с тях се изисква особено внимание, за да не бъдат повредени.

Припомняме, че процесът **вътрешна конверсия** е пряко предаване на енергията на ядрения преход на един от атомните електрони (свързани). Обикновено най-вероятна е конверсията върху електрон от К-слоя. Енергията на конверсионните електрони е **дискретна** (енергията на прехода минус енергията на връзка) и в спектъра те дават **конверсионна линия**. Конверсионните линии с известна енергия ще бъдат използвани за калибровката по енергия на спектрометъра.

Снемането на електронните спектри се извършва със сцинтилационен детектор със **стилбен кристал (органичен сцинтилатор)**, монтиран в оловна защита. Стилбеновия кристал е снабден с входящо прозорче, закрито с много тънък алуминизиран майлар (**да се пази от механични увреждания!**). Електроните от източника преминават през около 1 cm въздух до детектора. Загубите на енергия на електроните в слоевете въздух и майлар не влияят съществено на експерименталните резултати.

Амплитудните спектри се набират в различни **групи от по 256 канала** за едно и също „живо“ **време на набиране $L = 2000$ s**.

4. Теоретични бележки

За подробности се отнесете към лекциите „**Сцинтилационни детектори**“, „**Бета-разпадане, Бета-спектри**“ и „**Вътрешна конверсия**“ в Записките към **Курса по ЕЯФ**

Известно е, че енергията на даден β -преход е **дискретна (E_0)**, но енергийният спектър на излъчваните β -частици е **непрекъснат** и се простира от **0** до E_0 . Това се дължи на факта, че освен β -частица, при β -разпадане се излъчва и „неуловимата“ частица **електронно неутрино (или анти-)**, която отнася част от енергията E_0 на β -прехода. Формата на **β -спектъра** е специфична и освен всичко друго е повлияна и от кулоновото взаимодействие на β -частицата със заряда на **дъщерното ядро**.

Чрез функцията на Ферми **$F(Z,E)$** , която е известна в явен вид и е табулирана, се отчита влиянието на кулоновото поле на ядрото. **$F(Z,E)$** е различна за β^- и β^+ разпадания. Обръщаме внимание, че **Z** е атомния номер на **дъщерното ядро**.

От теорията на β -разпадането при допускане, че:

масата на покой на неутриното $m_\nu c^2 = 0$

$$E_\nu = E_0 + m_e c^2 + m_\nu c^2 - E_e$$

$$p_\nu = \frac{1}{c} \sqrt{E_\nu^2 - (m_\nu c^2)^2}$$

за експерименталния спектър на β -частиците се получава:

$$N_E \sim \frac{dW}{dE} = \text{const} | M |^2 E_e \sqrt{E_e^2 - (m_e c^2)^2} [E_0 - E_e + m_e c^2]^2 F(Z, E)$$

При използване на пълната енергия ϵ в единици $m_e c^2 = 511 \text{ keV}$, експерименталния спектър се изразява като:

$$N_\epsilon = \text{const} | M |^2 \epsilon \sqrt{\epsilon^2 - 1} (\epsilon_0 - \epsilon)^2 F(Z, E)$$

$$\epsilon = 1 + \frac{E_k}{m_e c^2} ; \epsilon_0 = 1 + \frac{E_k^{\max}}{m_e c^2}$$

Където: E_k^{\max} е граничната кинетична енергия на β -частиците в спектъра.

Функцията:

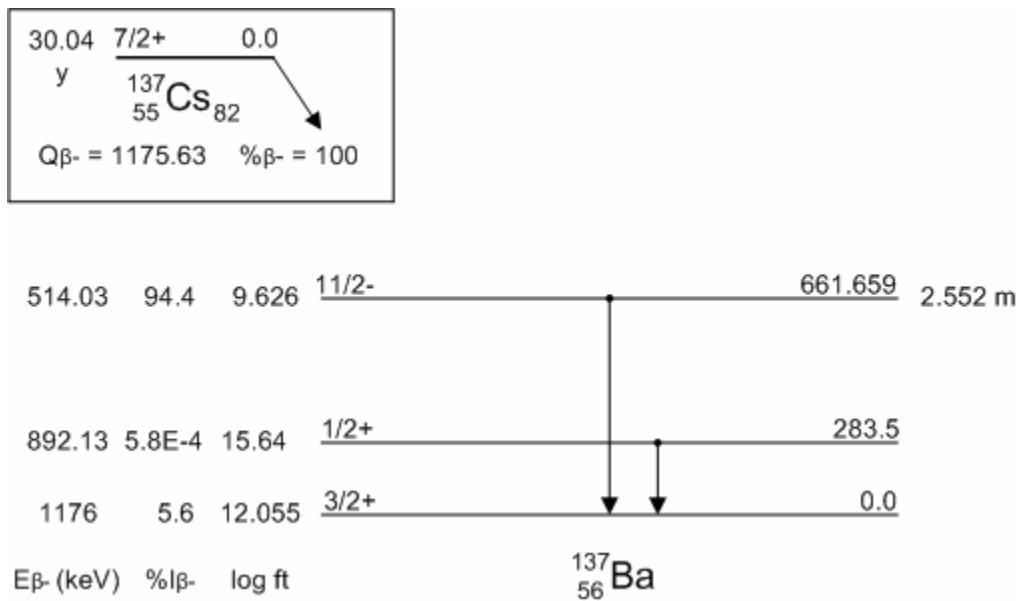
$$K(\epsilon) = \left[\frac{N_\epsilon}{F(Z, E) \epsilon \sqrt{\epsilon^2 - 1}} \right]^{1/2} = \epsilon_0 - \epsilon$$

където N_ϵ е експерименталния спектър, е известна като **График на Кюри**.

Функцията $K(\epsilon)$ е **линейна** по ϵ (за разрешените β -преходи) и **пресича абсцисата при ϵ_0** - граничната енергия на β -частиците, т.е. $K(\epsilon_0) = 0$.

Построяването на **Графика на Кюри** е единственият коректен начин за определяне на граничната енергия (ϵ_0) $\rightarrow E_k^{\max}$.

На фигура 3-1 е показана схемата на разпадане на ^{137}Cs



Фигура 3-1 Схема на разпадане на ¹³⁷Cs

В настоящото упражнение се изследва β^- -прехода $^{137}\text{Cs} \rightarrow ^{137}\text{Ba}$ с $E_k^{\text{max}} = 514 \text{ keV}$ (94,4%, $\log ft = 9,63$) (наличието на по-слаб преход с $E_k^{\text{max}} = 1176 \text{ keV}$ (5,6%, $\log ft = 12,1$) не смущава силно изследването). Изследваният β -преход е забранен от 1 порядък, уникален ($n = 1$, $\Delta P = (-1)^n$, $\Delta I = 2$), но точността на експеримента не позволява доказването на нелинейност на Графика на Кюри, дължаща се на степента на забрана.

Обръщаме внимание, че възбуденото състояние 662 keV в ядрото на ¹³⁷Ba е **изомер с $T_{1/2} = 2,6 \text{ min}$** . Изомерният преход с $E_\gamma = 662 \text{ keV}$ има тип и мултиполност **M4**.

5. Изпълнение на експерименталните задачи

- 1) Апаратурата се подготвя за работа, включва се и се прогрява за около 1 час.
- 2) Източникът ²⁰⁷Bi се поставя под детектора на определеното място в прободържателя и се снима амплитудния му спектър. Време на набиране $L = 1000 \text{ s}$. (виж Фигура 3-2)

3) Източникът ^{137}Cs се поставя под детектора на определеното място в прободържателя и в следващата група канали се снима амплитудният му спектър. Време на набиране $L = 1000$ s. Експерименталният спектър представлява сума от непрекъснат β -спектър, **K-конверсионна линия** ($E_{\text{CE}} = 624$ keV) (виж Фигура 3-3) и разпределение на комптонови електрони, получени при **взаимодействието на γ -квантите** с енергия 662 keV от ^{137}Cs в кристала на детектора. За да се отстрани влиянието на γ -квантите върху β -спектъра – следва **т. 4**).

4) Без да се изменя геометрията, между източника ^{137}Cs и детектора, на определеното място, се поставя **Al-поглъtitел** с дебелина 500 mg/cm^2 (№ 23 от комплекта – VA-H-402), който **напълно поглъща** излъчените от източника β -частици и конверсионни електрони, но е „прозрачен“ за γ -квантите. В следваща група се набира спектър, дължащ се **само на γ -квантите** с енергия 662 keV. Време на набиране $L = 1000$ s.

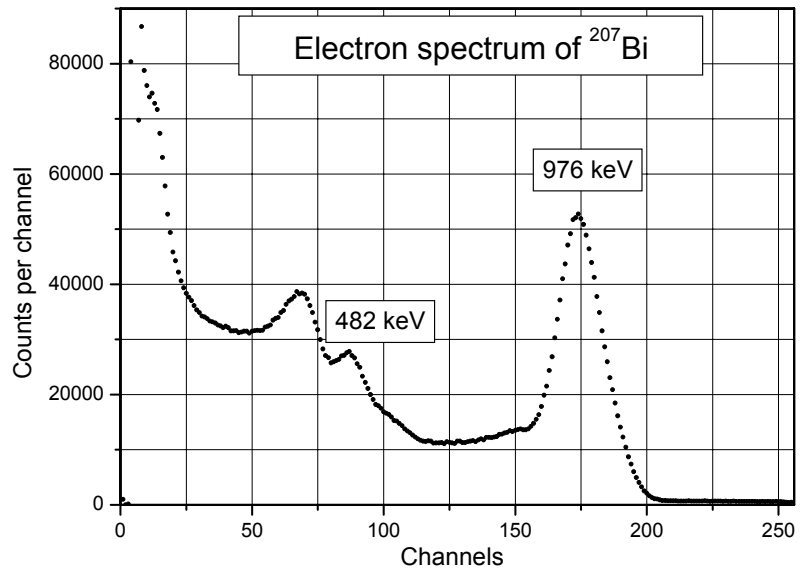
Поради ниския атомен номер на сцинтилатора (**стилбен**) - $Z_{\text{eff}} \approx 6$, вероятността за фотоефект е нищожна в сравнение с тази за Комптон ефект, и в спектърта не се наблюдава фотопик, а **само комптоново разпределение** (виж Фигура 3-4).

5) От некоригирания спектър на източника ^{137}Cs (**т. 3**) се **изважда** спектърта, дължащ се **само на γ -квантите** (**т. 4**). Процедурата за изваждане е описана в упътването на програмата **ANL3**. Препоръчва се некоригирания спектър на ^{137}Cs да се прехвърли в свободна група канали и операцията да се извърши там.

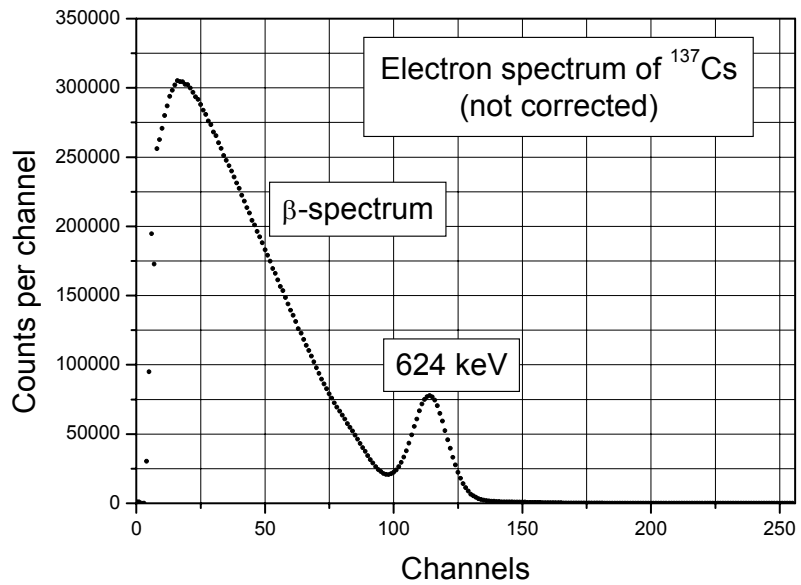
Разликовият спектър съдържа импулси, дължащи се **само на конверсионните електрони и β -частиците** от източника ^{137}Cs .

6. Обработка на експерименталните данни

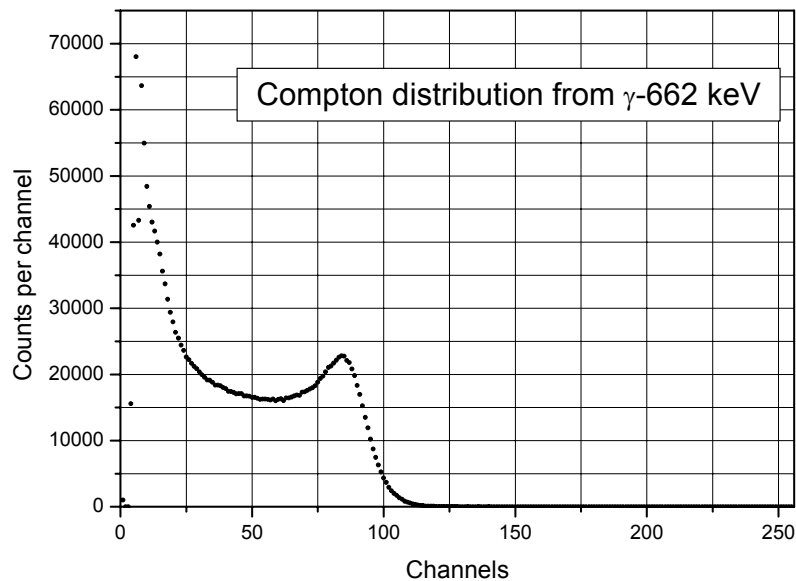
На следващите фигури е показан приблизителният вид на експерименталните спектри на ^{207}Bi , ^{137}Cs и комптоновото разпределение от γ -квантите **662 KeV**.



Фигура 3-2 Спектър на източника ^{207}Bi



Фигура 3-3 Некоригиран спектър на източника ^{137}Cs



Фигура 3-4 Принос на комптоновото разпределение от γ -квантите 662 keV в некоригирания спектър на източника ^{137}Cs

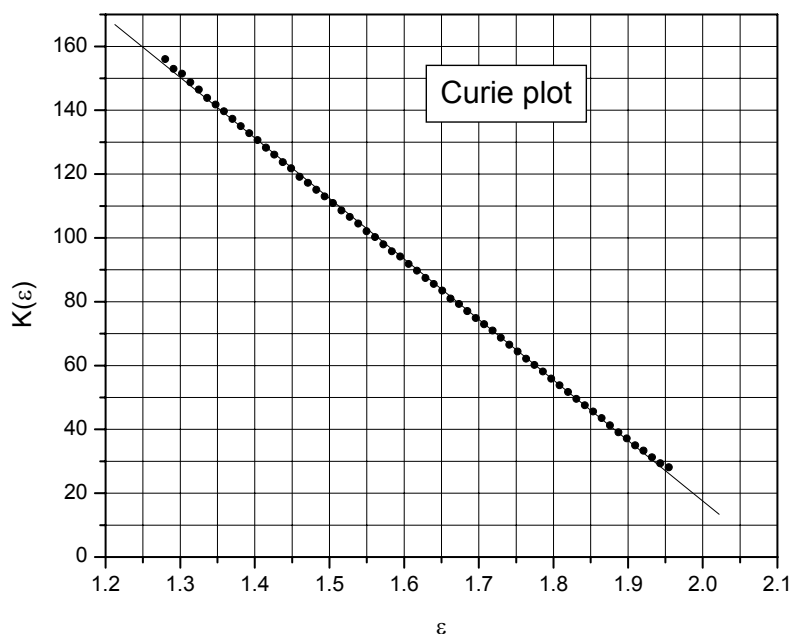
1) Калибровката по енергии на спектрометъра се извършва по конверсионните линии на ^{207}Bi по процедурата, дадена в описанието на програмата ANL3.

Първата линия с енергия $E_{ce} = 481,7 \text{ keV}$ е К-конверсионна линия на прехода с енергия $E_{\gamma} = 569,7 \text{ keV}$ и с квантов добив 1,5% на 100 разпада. Втората линия е с енергия $E_{ce} = 975,7 \text{ keV}$ и е К-конверсионна линия на прехода с енергия $E_{\gamma} = 1063,7 \text{ keV}$ и с квантов добив 7%.

При така извършената калибровка, проверете дали конверсионната линия на ^{137}Cs е с енергия $E_{ce} = 624 \text{ keV}$. Съвпадението се счита добро, ако е в границите на $\pm 6 \text{ keV}$ (т.е. ± 1 канал).

2) От коригирания и калибриран спектър на ^{137}Cs се избира частта на експерименталния β -спектър, като $E_k [\text{keV}] \rightarrow N [\text{брой импулси}]$ в обхвата например от 150 до 470 keV. Обхватът е стеснен, за да се избегне влиянието на поглъщащите слоеве и влиянието на конверсионната линия на ^{137}Cs .

- 3) За всяка от точките на експерименталния β -спектър (за всяка E_k) намерете **стойността на кулоновия фактор $F(Z, E_k)$** от таблицата в Приложение № 1. Кулоновият фактор $F(Z, E)$ е функция на заряда Z на дъщерното ядро (в нашия случай Ba , $Z = 56$) и енергията E_k на β -частиците. (Не интерполирайте, а избирайте стойността за най-близката енергия).
- 4) За всяка от точките на експерименталния β -спектър, **превърнете** кинетичната енергия E_k [keV] в пълна енергия ε в единици mc^2 .
- 5) За всяка от точките на експерименталния β -спектър **пресметнете стойността на $K(\varepsilon)$** . **Постройте графично** функцията $K(\varepsilon)$ (**График на Кюри**). **Примерният вид на Графика на Кюри** е показан на следващата фигура.



Фигура 3-5 График на Кюри за β^- -прехода $^{137}\text{Cs} \rightarrow ^{137}\text{Ba}$ с $E_k^{\text{max}} = 514 \text{ keV}$
(94,4%)

Продължението на линейната част на графика пресича оста X в точка ε_0 , която е максималната пълна енергия на β -спектъра на ^{137}Cs . Тъй като в справочната

литература се привежда максималната кинетична, а не пълната енергия, то получената стойност на максималната енергия ε_0 трябва да се превърне в кинетична E_k^{\max} [keV].

По литературни данни максималната енергия на β -спектъра на ^{137}Cs е $E_k^{\max} = 514$ keV. (Забележка: Възможно е получаването на **завишена стойност** на E_k^{\max} поради наличието на поглъщащи слоеве: покритие на източника, въздух, майларово прозорче на детектора, които влияят по-силно върху нискоенергийната част на β -спектъра, както и поради наличието на по-слаб β -преход с по-висока енергия (виж фигура 3-1)).

За удобство при работата с експерименталните данни се предлага те да бъдат оформени в следната таблица:

Канал №	$N(E_k)$ [бройка]	E_k [keV]	$F(Z, E_k)$	$\varepsilon = 1 + E_k/511$	$K(\varepsilon)$
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-

За пресмятанията се препоръчва използването на работна страница в **EXCEL** (програмата е на разположение на РС в лабораторията по ЕЯФ).

За построяването на **Графика на Кюри** се препоръчва използването на подходяща графична програма (напр. програмата **ORIGIN**, която е инсталирана на РС в лабораторията по ЕЯФ). На фигура 3-5 е показана апроксимацията на $K(\varepsilon)$ с права. Стойността на ε_0 може да бъде определена лесно от параметрите на линейния фит.

Като илюстративен материал към това упражнение са използвани експериментални данни, получени от студентите по време на занятия в лабораторията.

Напомниме, че **експерименталните данни** получени във всеки отделен експеримент **са уникални**, поради **статистическия характер** на измерваните величини и някои изменения в условията на експеримента.

Приложение №1

Стойности на кулоновия фактор **F(Z,E)** при **Z = 56 (Ba)**

E_k [keV]	F	E_k [keV]	F	E_k [keV]	F	E_k [keV]	F	E_k [keV]	F	E_k [keV]	F
122	10,792	182	9,276	242	8,408	302	7,835	362	7,428	422	7,119
124	10,724	184	9,242	244	8,386	304	7,820	364	7,416	424	7,110
126	10,656	186	9,208	246	8,364	306	7,805	366	7,404	426	7,100
128	10,588	188	9,174	248	8,342	308	7,790	368	7,392	428	7,091
130	10,520	190	9,140	250	8,320	310	7,775	370	7,380	430	7,082
132	10,460	192	9,106	252	8,298	312	7,760	372	7,368	432	7,073
134	10,400	194	9,072	254	8,276	314	7,745	374	7,356	434	7,064
136	10,340	196	9,038	256	8,254	316	7,730	376	7,344	436	7,054
138	10,280	198	9,004	258	8,232	318	7,715	378	7,332	438	7,045
140	10,220	200	8,970	260	8,210	320	7,700	380	7,320	440	7,036
142	10,168	202	8,941	262	8,191	322	7,686	382	7,310	442	7,027
144	10,116	204	8,912	264	8,172	324	7,672	384	7,300	444	7,018
146	10,064	206	8,883	266	8,153	326	7,658	386	7,290	446	7,008
148	10,012	208	8,854	268	8,134	328	7,644	388	7,280	448	6,999
150	9,960	210	8,825	270	8,115	330	7,630	390	7,270	450	6,990
152	9,912	212	8,796	272	8,096	332	7,616	392	7,260	452	6,982
154	9,864	214	8,767	274	8,077	334	7,602	394	7,250	454	6,975
156	9,816	216	8,738	276	8,058	336	7,588	396	7,240	456	6,967
158	9,768	218	8,709	278	8,039	338	7,574	398	7,230	458	6,960
160	9,720	220	8,680	280	8,020	340	7,560	400	7,220	460	6,952
162	9,678	222	8,655	282	8,003	342	7,548	402	7,211	462	6,944
164	9,636	224	8,630	284	7,986	344	7,536	404	7,202	464	6,934
166	9,594	226	8,605	286	7,969	346	7,524	406	7,192	466	6,929
168	9,552	228	8,580	288	7,952	348	7,512	408	7,183	468	6,922
170	9,510	230	8,555	290	7,935	350	7,500	410	7,174	470	6,914
172	9,470	232	8,530	292	7,918	352	7,488	412	7,165	472	6,906
174	9,430	234	8,505	294	7,901	354	7,476	414	7,156	474	6,899
176	9,390	236	8,480	296	7,884	356	7,464	416	7,146	476	6,891
178	9,350	238	8,455	298	7,867	358	7,452	418	7,137	478	6,884
180	9,310	240	8,430	300	7,850	360	7,440	420	7,128	480	6,876