

Упражнение № 10. СПОНТАННО ДЕЛЕНЕ НА ^{252}Cf . ОПРЕДЕЛЯНЕ НА АСИМЕТРИЯТА И СРЕДНИТЕ МАСИ НА ФРАГМЕНТИТЕ. ПАРЦИАЛЕН ПЕРИОД НА ПОЛУРАЗПАДАНЕ ПО СПОНТАННО ДЕЛЕНЕ.

1. Поставяне на експерименталните задачи

- Да се снеме **енергетичния спектър на фрагментите** на делене на ядрата на ^{252}Cf и да се определят **енергиите** на лекия и тежкия фрагмент. Да се определи **интензитета** на спонтанното делене.
- Да се определи **коэффициентът на асиметрия** и да се пресметнат **най-вероятните масови числа на лекия и тежкия фрагмент** при спонтанното делене на ^{252}Cf .
- Да се снеме **α -спектър** на източника ^{252}Cf . След извършване на **калибровка по енергия**, да се определят **енергиите на α -линиите** и да се **идентифицират нуклидите** в източника. Да се определи **интензитета** на α -разпадане.
- Да се пресметнат **парциалните периоди на полуразпадане** за α -разпадане и спонтанно делене на ^{252}Cf , от съответните интензитети.

2. Апаратура

Вакуумна техника

Спектрометричен тракт

Виж т. 2. Апаратура на Упражнение №8 – Алфа-спектрометрия

3. Бележки по опитната постановка

Вакуумна част: Вакуумна камера; Вакуумна система

Спектрометричен тракт

Виж т. 3. Бележки по опитната постановка на Упражнение №8 – Алфа-спектрометрия

Забележка: Настоящото упражнение се изпълнява на същата експериментална постановка, както Упражнение №8 – Алфа-спектрометрия.

Източниците, разположени във вакуумната камера на системата, са **два**: Микс (^{239}Pu , ^{241}Am , ^{244}Cm) (Amersham) и ^{252}Cf (Amersham). Източниците са монтирани на въртяща се поставка, така че тяхната смяна и поставяне в измерителна позиция се извършва **без нарушение на вакуума**.

Удобно е упражнения № 8 и 10 да се изпълняват по едно и също време от двама студента. В такъв случай **калибровката по енергия** на α -спектрометъра, извършена в упражнение № 8, може да се използва при обработката на α -спектъра на източника ^{252}Cf .

Обръщаме внимание, че поради **намалялата активност на ^{252}Cf** (източникът е стар) се изискват дълги времена на набиране.

4. Теоретични бележки

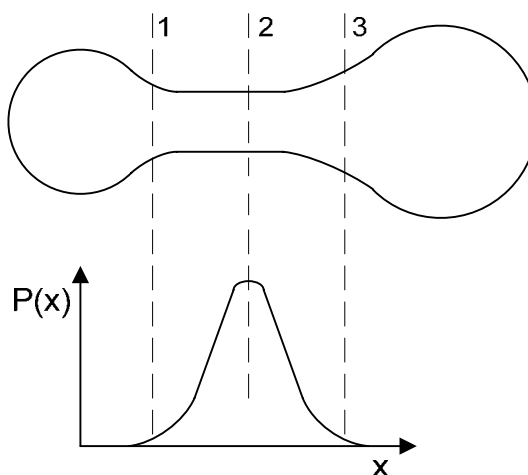
За подробности се отнесете към лекциите „Полупроводникови детектори“, „Характеристики на типовете разпадане“ в Записките към Курса по ЕЯФ.

Спонтанното делене е самопроизволно разделяне на **тежко ядро** (обикновено деформирано в основно състояние) на **два различни по маса фрагмента** – ядра от средата на периодичната система. Процесът е характерен за **тежки ядра** с $A \geq 238$ и $Z \geq 92$. При това вероятността за спонтанно делене е по-голяма за четно-четни нуклиди, като: $^{238}_{92}\text{U}$, $^{240}_{94}\text{Pu}$, $^{252}_{98}\text{Cf}$.

Вероятността за спонтанно делене твърде бързо нараства с нарастването на **параметъра на делене** - Z^2/A , което е едно от следствията на капковия модел на ядрото (виж формулата на Вайцзекер).

α -разпадането е процес (паралелен канал), който **конкурира спонтанното делене**. Като правило, вероятността за α -разпадане на даден нуклид е по-голяма (по-къс парциален период на полуразпадане) от тази за спонтанно делене. ^{252}Cf е типичен изкуствен трансуранов нуклид, който се разпада както посредством излъчване на α -частици, така и посредством спонтанно делене, като отношението на **парциалните периоди на полуразпадане** е $T_{sf}/T_{\alpha} \approx 30$.

Обикновено спонтанното делене е **асиметрично**, т.е. получават се две парчета с нееднаква маса. На фигура 10-1 са показани схематично дялящото се ядро и вероятността за разкъсване на "шийката" в областите **1**, **2** и **3**.



Фигура 10-1 Асиметрично делене

Вероятността за разкъсване на шийката в областите **1** (съответстващо на крайно асиметрично делене) и **3** (съответстващо на почти симетрично делене) е много малка. Най-голяма е вероятността за разкъсване на шийката в област **2**, съответстващо на определено отношение на масите на лекия и тежкия фрагмент.

Един от параметрите, характеризиращ асиметрията на деленето, е **коэффициентът на асиметрия** $C_A = M_L/M_H$, където M_L и M_H са съответно средните маси (в атомни единици) на лекия и тежкия фрагмент.

Интересен факт е, че за повечето от дялящите се ядра **средната маса на тежкия фрагмент** е разположена близо до **масовото число 140**, докато средната маса на лекия фрагмент варира в значително по-големи граници (в зависимост от масовото число на дялящия се нуклид). Този факт (по-голямата устойчивост по маса на тежкия фрагмент) може да се обясни със запазването в процеса на делене на слоистата структура на тежкия фрагмент – неговата нуклонна конфигурация е такава, че той се намира близо до **"магическите" числа 50 протона и 82 неутрона**.

Какво се отделя при спонтанното (и принуденото) делене

- **"Мигновени" нейтрони**

При всеки акт на делене на ядрата освен фрагментите, се получават и няколко **"мигновени" нейтрона**, за характерно време от порядъка на 10^{-14} s. Средният брой на мигновените нейтрони при спонтанното делене на ^{252}Cf е $\nu = 3,77$. Средният брой на мигновените нейтрони зависи от масовото число на делящия се нуклид (за $^{235}_{92}\text{U} - 2,41$, за $^{239}_{94}\text{Pu} - 2,87$, при принудено делене).

- **"Мигновени" γ -кванти**

Получаващите се в резултат на деленето ядра-фрагменти са силно възбудени, като възбуждането се сменя посредством бързо излъчване на каскад γ -кванти със сумарна енергия около 8 MeV.

- **Ядра-фрагменти**

Ядрата-фрагменти, в момента на получаването си, се намират далеч от **линията на β -стабилност**, поради нарушеното отношение между протоните и neutronите в ядрата - те имат **излишък на нейтрони**. Така за $^{252}_{98}\text{Cf}$ отношението $(A-Z)/Z$ е **1,57**, а за стабилните нуклиди от средата на периодичната система това отношение е **1,3 ÷ 1,4**. Процесът, който възстановява нарушеното отношение на протоните и neutronите, е **β^- -разпадането**. Ядрата-продукти на делене са радиоактивни и претърпяват **средно 4 β^- -разпадания** до достигането на линията на β -стабилност.

- **„Закъсняващи” нейтрони**

Особеност на фрагментите е, че поради големия излишък на neutronи, енергията на връзка на neutronа в тях е сравнително ниска. След съответно β^- -разпадане е възможно да се получи **възбудено ядро с енергия по-висока, отколкото енергията на връзка на neutronа**, което води до възможност за разпадане посредством **„изпарение” на neutron**. Този вид разпадане е причината за появяване на така наречените **„закъсняващи” neutronи, свързани по време със съответното β^- -разпадане**. Закъсняващите neutronи са малка част ($\sim 0,6\%$) от

общия брой излъчени при деленето неутрони (но ядрените реактори се управляват именно по частта на закъсняващите неутрони).

- **Енергия**

Във всеки акт на делене се отделя енергия ~ 200 MeV, поради голямата разлика в специфичната енергия на връзка на нуклоните в тежкото ядро и ядрата-продукти на деленето.

Сумарната кинетична енергия на двата фрагмента се дава с:

$$E_k = 0,121 \frac{Z^2}{A^{1/3}}$$

където числения коефициент **0,121** е еднакъв за всички делящи се ядра, а членът $Z^2/A^{1/3}$ е известният от капковия модел на ядрото фактор на кулоновата енергия. Този израз е пряко следствие от капковия модел на ядрото и е изпълнен достатъчно точно за почти всички делящи се ядра. Интересно е, че горната зависимост е изпълнена не само при спонтанното делене, но и при принуденото делене под действие на неутрони, γ -кванти и заредени частици. Общата кинетична енергия на фрагментите се разпределя помежду им **обратно пропорционално на масите**. Тази зависимост е следствие от **закона за запазване на импулса** в процеса делене. Импулсите на двата фрагмента трябва да бъдат противни по посока и равни по големина:

$$M_L V_L = M_H V_H ,$$

тъй като разпадащото се ядро е в покой.

Кинетичните енергии на лекия и тежкия фрагмент са съответно:

$$E_k^L = \frac{M_L V_L^2}{2} ; E_k^H = \frac{M_H V_H^2}{2}$$

Като се имат предвид горните три зависимости, то

$$C_A = \frac{M_L}{M_H} = \frac{E_k^H}{E_k^L}$$

където C_A е коефициентът на асиметрия. Забележете, че **тежкият фрагмент има по-малка кинетична енергия**.

Коефициентът на асиметрия (C_A) може веднага да бъде определен от експериментално измерените кинетични енергии на лекия и тежкия фрагменти.

- **Средни масови числа на фрагментите**

За **средните** масови числа на фрагментите са в сила следните съотношения:

$$M_L + M_H + 4 = 252 \quad \text{и} \quad C_A = M_L / M_H$$

където **252** - масовото число на ^{252}Cf ; C_A - коефициента на асиметрия.

Числото **4** отчита масите на „мигновените“ неутрони на деленето, които не участват в масовото разпределение на фрагментите.

От горните съотношения могат лесно да бъдат **пресметнати средните масови числа** M_L и M_H на лекия и тежкия фрагменти.

- **Парциални периоди на полуразпадане**

Ядрата на ^{252}Cf се разпадат по два **независими** начина (паралелни канали) – чрез α -разпадане и спонтанно делене. Тогава пълната вероятност за разпадане се дава с: $\lambda^t = \lambda^{sf} + \lambda^\alpha$ и оттам:

$$\frac{1}{T_{1/2}^t} = \frac{1}{T_{1/2}^{sf}} + \frac{1}{T_{1/2}^\alpha}$$

където $T_{1/2}^t$ е общият (наблюдаем) период на полуразпадане, а $T_{1/2}^{sf}$ и $T_{1/2}^\alpha$ са **парциалните периоди на полуразпадане** по спонтанно делене и α -разпадане съответно. По литературни данни е известно, че $T_{1/2}^t = 2,64$ години.

От експерименталните данни, чрез сравняване на интензитета в [i/s] на α -разпадането и спонтанното делене, може да бъде намерено отношението $T_{1/2}^\alpha / T_{1/2}^{sf}$, което позволява да бъдат определени поотделно парциалните периоди на полуразпадане $T_{1/2}^{sf}$ и $T_{1/2}^\alpha$. Като правило $T_{1/2}^{sf} \gg T_{1/2}^\alpha$.

5. Изпълнение на експерименталните задачи

1) Калибровка по енергия на α -спектрометъра.

В случай, че преди изпълнение на настоящото упражнение не е било изпълнено упражнение № 8, то трябва да бъдат изпълнени действията описани в т. 5 от 1) до 5) на упражнение № 8.

Калибровката по енергии на α -спектрометъра се извършва по **α -линиите: 5156,6 keV на ^{239}Pu и 5804,8 keV на ^{244}Cm** от спектъра на микс-източника според процедурата, приведена в описанието на програмата **ANL3**.

Ако това вече е направено, преминете към следващата точка.

2) Поставете източникът ^{252}Cf в позиция за измерване чрез завъртане на прободържателя. Наберете **α -спектъра** при условията на т. **1)** в група от **4096** канала. Време на набиране – не по-малко от 2000 s.

3) При набирането на **спектъра на фрагментите** (като се има предвид, че енергията им е от порядъка на 100 MeV), коефициентът на усилване на спектрометричния тракт трябва да бъде силно понижен по следния начин:

- Понижава се коефициентът на усилване на зарядочувствителния предусилвател (превключване от **x5** на **x1**).
- Въвежда се атенюатор на сигнала **1:10** между предусилвателя и основния спектрометричен усилвател, за да се избегне ограничение.
- Ключове **RANGE** и **GAIN** на **ADC** се поставят в положение **256**.

Спектърът на фрагментите се набира в следващата група канали. Време на набиране – не по-малко от 4000 s. Препоръчва се докато трае набирането на спектъра на фрагментите, да се извърши обработката на α -спектъра.

4) След завършване на измерването **отстранете източникът ^{252}Cf от позицията за измерване (Внимание! α -частиците и особено фрагментите увреждат детектора (генерират дефекти в кристалната решетка). Детекторите имат определен ресурс по флуенс от тежки частици).**

5) Изключете високото напрежение. След известно време изключете вакуумната система по обратния ред на включването ѝ (виж т. **2. на упражнение № 8**).

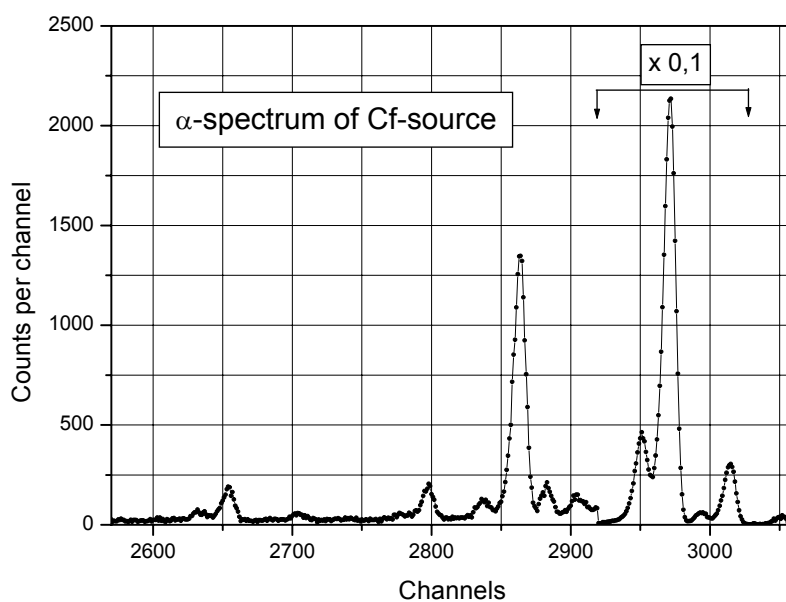
6. Обработка на експерименталните данни.

Обработка на α -спектъра

На фигура 10-2 е показан **примерния вид** на α -спектъра на източника ^{252}Cf . Обръщаме внимание, че в α -спектъра присъстват α -линии на **няколко изотопа на**

Cf с периоди на полуразпадане **по-големи** от този на ^{252}Cf поради това, че източника е много стар (в началото те са присъствали като много малък примес).

1) При наличната калибровка по енергия, **определете енергиите на α -линиите** в спектъра и като използвате справочника, **идентифицирайте α -линиите** (намерете изотопа, на който принадлежат). При идентификацията търсенето започва от най-интензивната линия на нуклида. Допустими са отклонения в енергията до $\pm 4 \text{ keV}$.



Фигура 10-2 α -спектър на източника ^{252}Cf

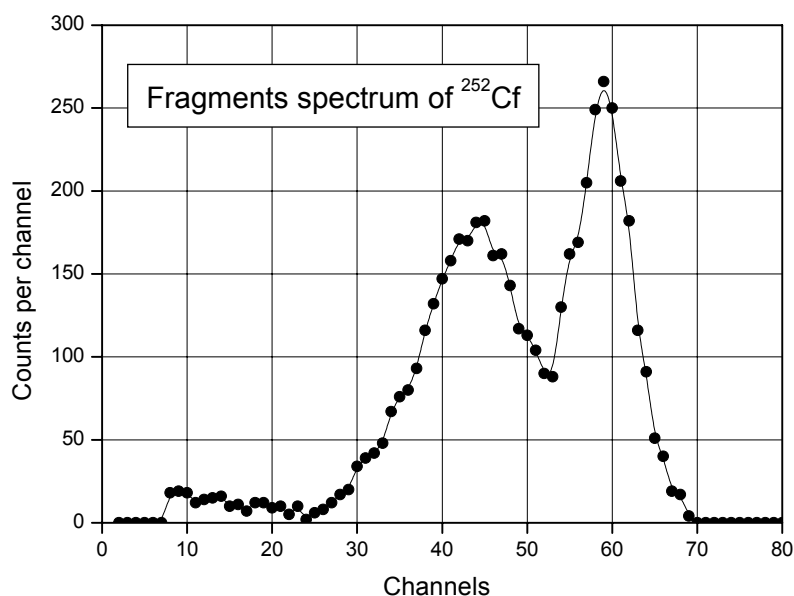
2) След идентифицирането на α -групата (дублет) на ^{252}Cf ($E_{\alpha} = 6118,3 \text{ keV} - 84\%$ и $E_{\alpha} = 6075,7 \text{ keV} - 16\%$), определете нейната площ, като INT^{α} и пресметнете интензитета на α -разпада като:

$$I^{\alpha} = \frac{\text{INT}^{\alpha}}{t^{\alpha}} \quad [\text{i/s}]$$

където: INT^{α} - площ на дублета [i], t^{α} - време на набиране на α -спектъра [s].

Обработка на спектъра на фрагментите

На фигура 10-3 е показан **примерния вид** на спектъра на фрагментите от спонтанното делене на ^{252}Cf .



Фигура 10-3 Спектър на фрагментите от спонтанното делене на ^{252}Cf

Амплитудният спектър на фрагментите има характерната "двугърба" форма, която се дължи на двете групи – на лекия и тежкия фрагменти. Спектърът на фрагментите има бедна статистика поради това, че източникът е твърде стар.

3) Калибровката по енергия на спектъра на фрагментите се извършва по кинетичната енергия на лекия фрагмент (високоенергетичния максимум) - $E_k^L = 104,5 \text{ MeV}$ по описаната в програмата **ANL3** процедура (калибровка по една точка, втората точка е 0 по подразбиране). (Забележка: За съжаление, в случая не може да се използва калибровката по енергия от α -спектъра, поради т.н. „дефицит на заряда“ (рекомбинация на носители в „следата“ на фрагмента), както и неопределености при отслабването на сигнала. Калибровката по енергия се изтрива с Ctrl+K).

4) От експерименталния спектър, определете **средната кинетична енергия на тежкия фрагмент** - E_k^H . Сравнете я с известната по литературни данни $E_k^H = 79,4$ MeV.

- Намерете **сумата от кинетичните енергии на лекия и тежкия фрагмент** и я **сравнете** с теоретично пресметнатата (за $^{252}_{98}\text{Cf}_{154}$) по формулата, приведена в т. 4.

- Определете **коефициента на асиметрия** - C_A като отношение на кинетичните енергии на тежкия и лекия фрагменти.

- От съотношенията, приведени в т. 4., пресметнете **най-вероятните масови числа M_L и M_H** на лекия и тежкия фрагменти. Убедете се, че $M_H \approx 140$ а.е.м.

5) От експерименталния спектър определете **общата площ на „линиите“** на тежкия и лекия фрагменти – INT^{sf} .

Пресметнете **интензитета на спонтанно делене** като:

$$I^{sf} = \frac{INT^{sf}}{2 t^{sf}} \quad [i/s]$$

където: INT^{sf} – обща площ на линиите на фрагментите [i], t^{sf} - време на набиране на спектъра на фрагментите [s]. Обръщаме внимание на **коефициента 2** в знаменателя, който се появява поради факта, че при деленето се излъчват **два фрагмента**, следователно актовете на делене се регистрират с два пъти по-голяма вероятност, отколкото тези на α -разпадане (излъчва се **една α -частица**).

6) Определянето на **парциалните периоди на полуразпадане** по спонтанно делене ($T_{1/2}^{sf}$) и α -разпадане ($T_{1/2}^{\alpha}$) се извършва, като се сравнят експерименталните интензитети на α -разпадането (I^{α}) и на спонтанното делене (I^{sf}) като е известно, че **общият период на полуразпадане** на ^{252}Cf е $T_{1/2}^t = 2,64$ години.

Като имаме предвид, че съответният интензитет:

$$I \sim \frac{dN}{dt} = -\lambda N(t) = -\frac{0,693}{T_{1/2}} N(t) \quad \text{то}$$

$$\frac{\lambda^{sf}}{\lambda^{\alpha}} = \frac{T_{1/2}^{\alpha}}{T_{1/2}^{sf}}, \text{ което заедно с } \frac{1}{T_{1/2}^t} = \frac{1}{T_{1/2}^{sf}} + \frac{1}{T_{1/2}^{\alpha}} \text{ позволява да бъдат пресметнати}$$

парциалните периоди на полуразпадане по спонтанно делене ($T_{1/2}^{sf}$) и α -разпадане ($T_{1/2}^{\alpha}$).

Убедете се, че парциалният период на полуразпадане по спонтанно делене е около **30 пъти по-дълъг** от този по α -разпадане, т.е. за ^{252}Cf α -разпадането протича с много по-голяма вероятност, отколкото спонтанното делене.

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

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