

Упражнение № 8. АЛФА-СПЕКТРОМЕТРИЯ С ПОВЪРХНОСТНО-БАРИЕРЕН ПОЛУПРОВОДНИКОВ ДЕТЕКТОР. ИДЕНТИФИКАЦИЯ И ОПРЕДЕЛЯНЕ НА КОНЦЕНТРАЦИИТЕ НА НУКЛИДИТЕ.

1. Поставяне на експерименталните задачи

- Да се **снее** с полупроводников повърхностно-бариерен детектор α -спектърът на α -източник (микс), съдържащ смес от нуклидите ^{239}Pu , ^{241}Am , ^{244}Cm .
- Да се извърши **калибровка по енергия** на α -спектрометъра.
- Да се определят **енергиите и квантовите добиви** на α -линиите на ^{239}Pu , ^{241}Am и ^{244}Cm .
- Да се определят **активностите** на ^{241}Am и ^{244}Cm в източника, ако активността на ^{239}Pu е $A^{\text{Pu}} = 1,89 \cdot 10^3 \text{ Bq}$.
- Да се определи **съдържанието** на ^{239}Pu , ^{241}Am и ^{244}Cm в източника, като брой атоми.
- Да се определи „възрастта” на α -източника, ако $A^{\text{Cm}}(t_0) = A^{\text{Pu}}(t_0)$.

2. Апаратура

Вакуумна техника:

- **Вакуумна камера на α -спектрометъра**
- **Вакуумна система**

Спектрометричен тракт:

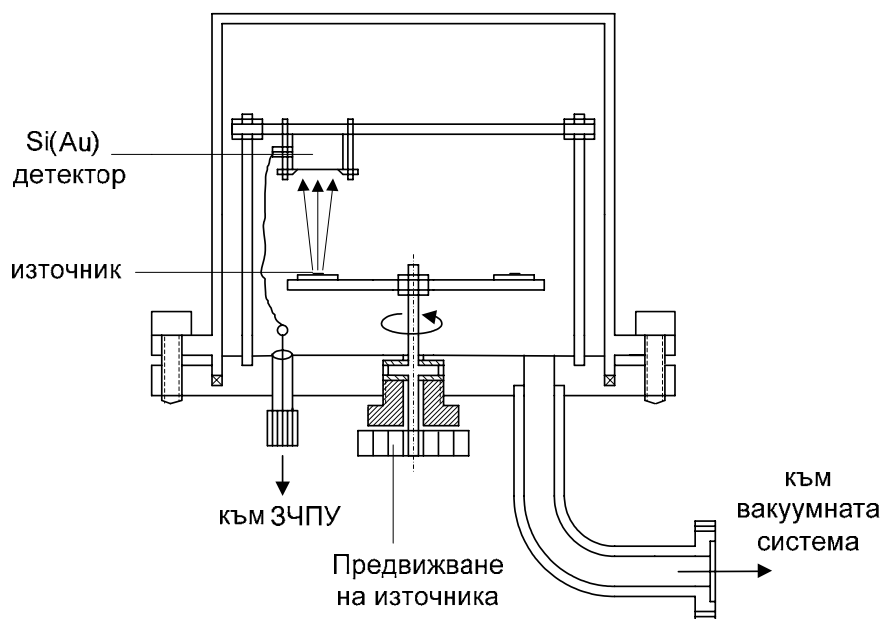
- **Крейт стандарт-NIM**
- **Повърхностно-бариерен Si(Au) детектор** (PIPS-Passived Implanted Planar Silicon) тип – **SPD 200-19-500** (CANBERRA), $S = 200 \text{ mm}^2$, обеднен слой $d = 500 \text{ }\mu\text{m}$, FWHM – 14 keV (на ^{241}Am). Работно напрежение $+65 \text{ V}$, максимално $+120 \text{ V}$.

- **Зарядо-чувствителен предусилвател** тип - **NE6287A** (Nuclear Enterprises)
- **Блок високо напрежение** тип – **TC-950A** (Tennelec). Работи се в обхвата 0-500 V.
- **Спектрометричен усилвател** тип – **TC-249** (Tennelec)
- **Многоканален анализатор** (състоящ се от: **ADC** тип - **8075** (CANBERRA), интерфейсна платка, PC – 286 или по-висок, с **инсталирана програма ANL3**).

3. Бележки по опитната постановка

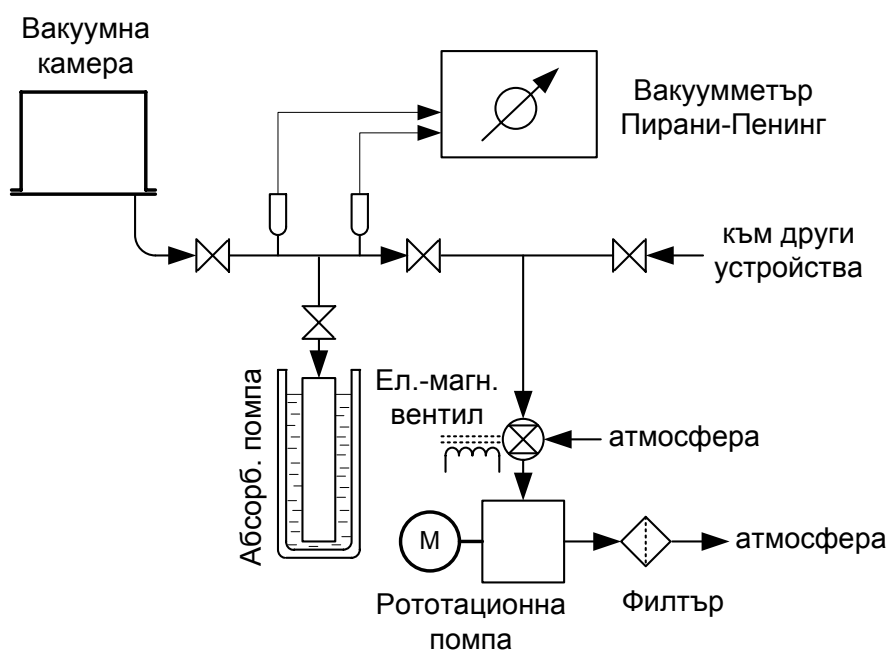
Вакуумна част:

Повърхностно-бариерният **Si(Au)** детектор и α -източникът са разположени във **вакуумна камера**, чиято схема е показана по-долу (фигура 8-1). (Забележка: Източниците са **два**: Микс (^{239}Pu , ^{241}Am , ^{244}Cm) (Amersham) и ^{252}Cf (Amersham), тъй като същата опитна постановка се използва и в следващото упражнение – Спонтанно деление на ^{252}Cf). Източниците са монтирани на въртяща се поставка, така че тяхната смяна и поставяне в измерителна позиция се извършва **без нарушение на вакуума**.



Фигура 8-1 Схема на вакуумната камера на α -спектрометъра

При спектрометрия на α -частици с висока разделителна способност е необходимо източникът и детекторът да бъдат разположени **във вакуум**, тъй като ако между тях има поглъщаща среда (въздух), α -частиците ще губят енергия при стълкновения (йонизационни загуби), при което би се получило разширяване и дори отместване на α -линиите.



Фигура 8-2 Схема на вакуумната система

Вакуумната система (виж горната фигура) се състои от следните основни части: четири ръчни вакуумни крана, ротационна двустъпална форвакуумна помпа с електромагнитен вентил, абсорбционна помпа, вакуумметър Пирани-Пенинг с вакуумметрични датчици. Пределният вакуум, който създава ротационната помпа е $1 \div 3 \cdot 10^{-2}$ mm Hg.

Пускането на ротационната помпа става от въздушния пускател, монтиран над нея. Няколко секунди след пускането ѝ (с реле за време) сработва електромагнитният вентил, който я включва към системата. Отваря се кранът към вакуумметричната част на системата. Включва се вакууметъра. Отваря се кранът към вакуумната камера.

През време на упражнението ротационната помпа поддържа работен вакуум, от порядъка на $2 \cdot 10^{-2}$ mm Hg, който е напълно достатъчен.

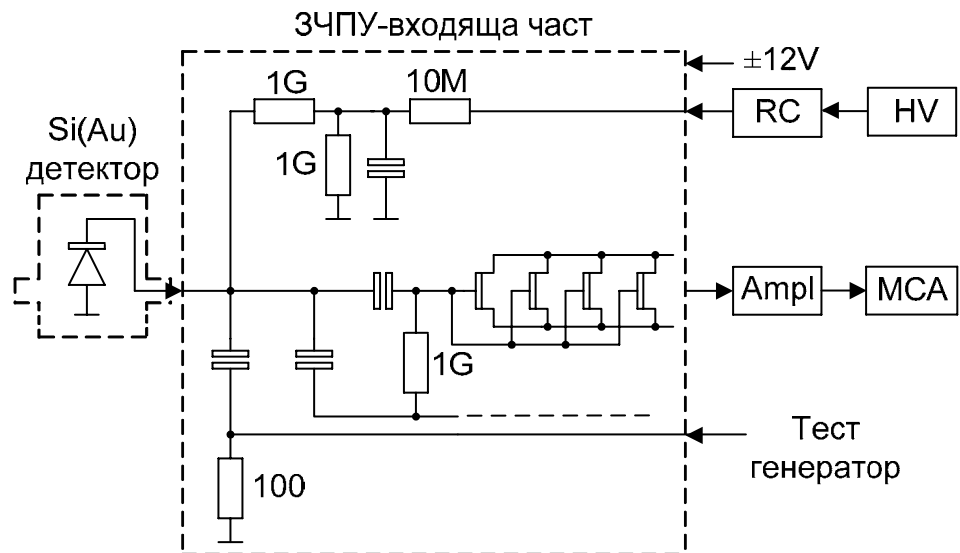
След завършване на работата, изключването на вакуумната система става по обратен ред: затваря се кранът към вакуумната камера; затваря се кранът към вакуумметричната част; Ротационната помпа се спира от въздушния пускател, при това електромагнитният вентил автоматично я изключва от вакуумната система и пуска въздух в нея.

Във вакуумната система е включена и абсорбционна помпа, с която може да се достигне значително по-висок (10^{-4} mm Hg) „безмаслен“ вакуум. Абсорбционната помпа е с пределно просто устройство и обслужване. Тя представлява цилиндър от неръждаема стомана, запълнен с цеолит. Абсорбционната помпа се потопява в дюар с течен азот. При температурата на течния азот (-196° C) цеолита енергично поглъща остатъчните газове във вакуумната система, с изключение на водорода и благородните газове. При работа с абсорбционната помпа, ротационната помпа е изключена и кранът към вакуумметричната част е затворен. В това упражнение абсорбционната помпа не се използва.

Спектрометричен тракт

Полупроводниковият повърхностно-бариерен Si(Au) детектор е разположен във вакуумната камера. Сигналят е изведен през вакуумно плътен BNC-куплунг. Необходимо условие за коректна α -спектрометрия е, дебелината на обеднения слой (при работно напрежение) да е **по-голяма от пробега** на α -частиците. Обръщаме внимание, че Si(Au) детекторите имат сравнително **голям капацитет**, който **намалява** с повишаването на напрежението.

Зарядочувствителен предусилвател тип NE6287A (Nuclear Enterprises). Зарядочувствителният предусилвател (виж фигура 8-3) е предназначен за работа с повърхностно-бариерни детектори и има някои характерни особености. На входа му паралелно са включени 4 полеве транзистора, за да се намалят шумовете, дължащи се на капацитета на детектора. Полезният сигнал се подава на затворите на полевите транзистори през **разделителен кондензатор**, който разделя по постоянен ток веригата за подаване на високо обратно напрежение на детектора от затворите на полевите транзистори.



Фигура 8-3 Схема на спектрометричния тракт

Веригата на затворите на полевите транзистори е високоомна и при бързо изменение на напрежението на входа на предусилвателя, в разделителния кондензатор се индуцира заряд, което може да доведе до пробиване на затворите на полевите транзистори. Поради това във веригата на високото напрежение (HV) е включена **външна защитна RC-група** с достатъчно голяма времеконстанта, която позволява бързо подаване на високото напрежение.

Внимание! При подадено високо напрежение абсолютно се забранява изключването на коаксиалния съединител между детектора и предусилвателя, включване или изключване на коаксиалните съединители на RC- групата.

Спектрометричният усилвател (Ampl) служи за усилване и формиране на импулсите от ЗЧПУ. Той е снабден с автоматична система за настройка на полюсите на нулата. Когато системата **не е включена**, на предния панел има мигащ червен LED. Системата се включва с бутон на предния панел, но само след поставянето на източник в позиция на измерване (необходими са определен брой импулси за нейното задействане). Еднополярният положителен сигнал от изхода на усилвателя се подава на многоканалния анализатор (MCA).

Многоканалният анализатор (MCA) се състои от: ADC, интерфейс и PC, с инсталирана програма за управление и обработка - ANL3.

Спектрите се набират в групи от по **4096** канала.

4. Теоретични бележки

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

Алфа-разпадането е процес, при който от ядрото се излъчва α -частица. Алфа-частицата е **силно свързана система** от 2 протона и 2 неутрона - ядро на ${}^4_2\text{He}_2$ с енергия на връзка $W(2,4) = 7,1$ MeV на нуклон. Процесът е характерен за **тежките ядра**.

Анализът на формулата на Вайцекер показва, че за $Z > 73$ (**Ta**); $A > 181$; енергията $Q_\alpha > 0$, т.е. процесът енергетически е възможен, но α -разпадането се проявява силно едва след $Z = 82$ (**Pb**); $A = 207$, тъй като при α -разпадането α -частицата трябва да преодолее посредством **тунелен ефект** значителен **кулонов бариер**.

Енергиите при α -разпадането са в границите: $4 \text{ MeV} \leq E_\alpha \leq 9 \text{ MeV}$

Периодите на полуразпадане по α са в границите: $10^{-7} \text{ s} \leq T_{1/2} \leq 10^{10}$ години

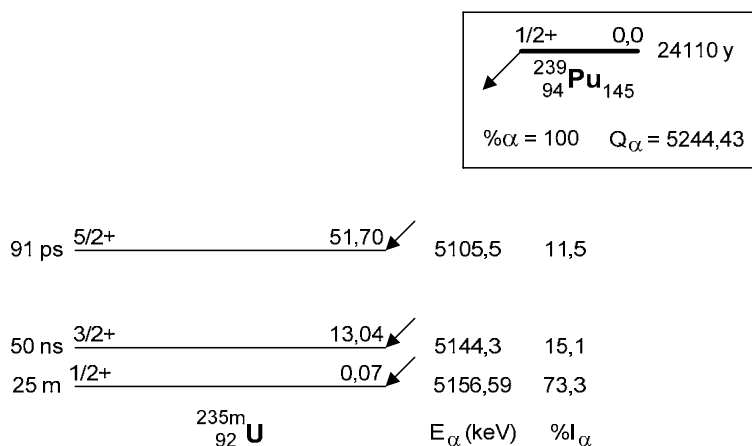
Съществува силна зависимост на $T_{1/2}$ от E_α (позната като закон на Гайгер-Неттол), която се дължи на нарастване на „прозрачността” на кулоновия бариер с нарастването на енергията на α -частиците. Малко изменение (повишаване) на енергията E_α води до голямо нарастване на прозрачността на бариера и силно намаляване на $T_{1/2}$ (нарастване на вероятността за α -разпадане).

След ${}^{238}_{92}\text{U}$ не се срещат естествени елементи, поради късите (от геохронологичен мащаб) периоди на полуразпадане по α . **Трансурановите елементи** са синтезирани изкуствено и като правило са α -радиоактивни.

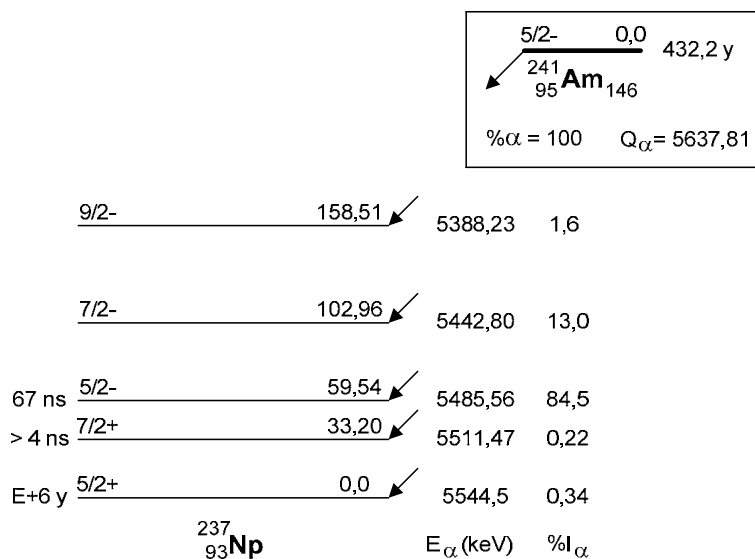
Изследваните нуклиди в микс-източника (${}^{239}\text{Pu}$, ${}^{241}\text{Am}$, ${}^{244}\text{Cm}$) са именно **трансуранови**.

Често при α -разпадането се получава дъщерно ядро във **възбудено състояние**, което се разрежда чрез излъчване на γ -кванти. При това се наблюдава фина структура – **група от няколко α -прехода с различни енергии и интензивности**.

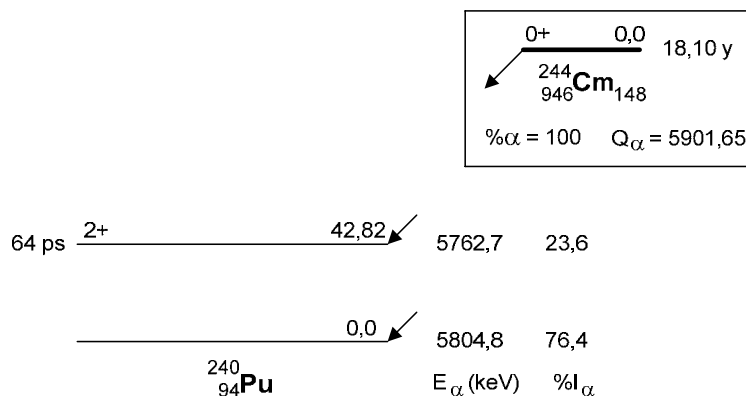
На следващите фигури са показани схемите на α -разпада на ^{239}Pu , ^{241}Am , ^{244}Cm с енергиите (E_α) и квантовия добив ($\%I_\alpha$) (относителна интензивност) на α -преходите (α -линиите).



Фигура 8-4 α -разпадане на ^{239}Pu



Фигура 8-5 α -разпадане на ^{241}Am



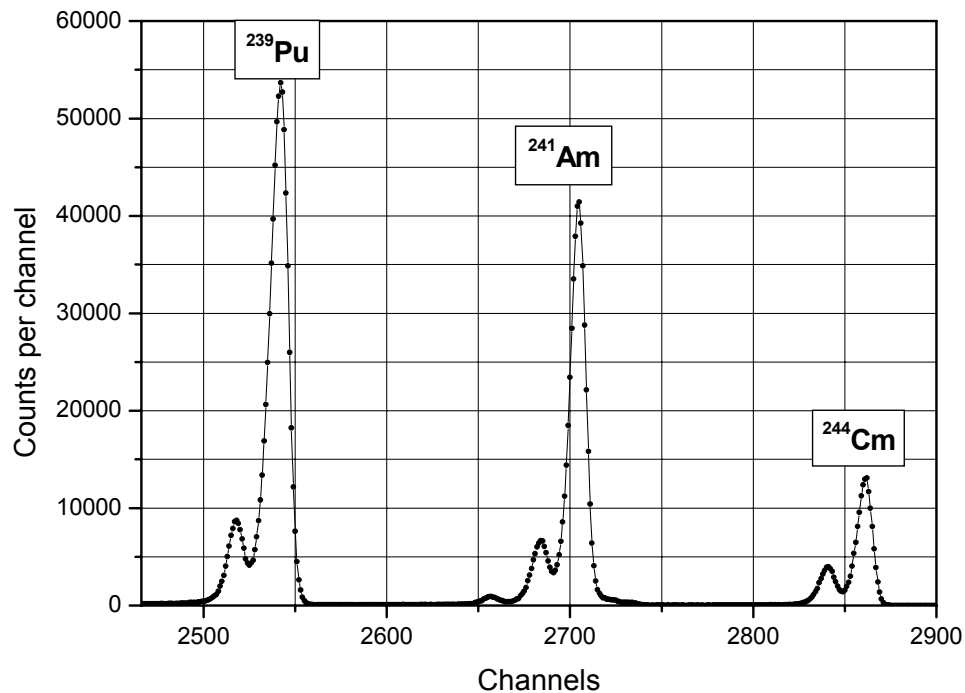
Фигура 8-6 α -разпадане на ^{244}Cm

5. Изпълнение на експерименталните задачи

- 1) Апаратурата се подготвя за работа, включва се и се прогрява за около 1 час. От диск С се зарежда програмата **ANL3**.
- 2) В същото време се включва вакуумната система (виж т. 2.) и във вакуумната камера се получава работен вакуум от порядъка на $2 \cdot 10^{-2}$ mm Hg.
- 3) Микс-източникът (^{239}Pu , ^{241}Am , ^{244}Cm) (Amersham) се поставя в позиция за измерване. (Наблюдавайте набиране на импулси **без да е подадено** високо напрежение, които се дължат на спонтанна поляризация на p-n-прехода).
- 4) Включете високото напрежение (Наблюдавайте отместването и стесняването на α -линиите). След около 500 секунди (за стабилизиране на напреженията) включете системата за **полюсите на нулата** на усилвателя.
- 5) Наберете α -спектърът на микс-източника (^{239}Pu , ^{241}Am , ^{244}Cm) в група от **4096 канала**. Време на набиране – 2000 s.
- 6) След завършване на измерването **отстранете α -източникът от позицията за измерване (Внимание! α -частиците увреждат детектора (генерират дефекти в кристалната решетка). Детекторите имат определен ресурс по флуенс от α -частици).**
- 7) Изключете високото напрежение. След известно време изключете вакуумната система по обратния ред на включването ѝ (виж т. 2.).

6. Обработка на експерименталните данни

На следващата фигура е показан **примерния вид** на α -спектъра на микс-източника.



Фигура 8-7 α -спектър на микс-източника (^{239}Pu , ^{241}Am , ^{244}Cm)

В амплитудния спектър се наблюдават **три групи α -линии** на нуклидите ^{239}Pu , ^{241}Am , ^{244}Cm . Най-нискоенергетичната група α -линии е на ^{239}Pu и съдържа три основни линии с различни интензитети, като двете високоенергетични (5156,6 и 5144,3 keV) **не могат** да бъдат разделени от α -спектрометъра. Високоенергетичната група α -линии принадлежи на ^{244}Cm .

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

2) Определете **енергиите на всички α -линии** в спектъра, чрез просто позициониране на курсора в максимума на съответната α -линия. Проверете дали

определените енергии съвпадат с известните по данни от литературата. Съвпадение в границите на ± 2 keV се счита добро (За справка вижте фигури 8-4, -5 и -6).

3) Определете **квантовия добив** ($\% I_{\alpha L}$) на α -преходите (α -линиите) във всяка една от α -групите на ^{239}Pu , ^{241}Am , ^{244}Cm . Тъй като α -линиите в съответната група са „почти разделени“ може да се използва следната опростена процедура: Всяка от α -линиите се огражда с двата курсора и се записва интегралната бройка - $\text{INT}_{\alpha L}$; Сумират се $\text{INT}_{\alpha L}$ за всички линии в групата - Σ_{α} (Σ_{α} е **пълната площ на α -групата** на съответния нуклид); Квантовият добив на отделните линии в групата се намира като $\% I_{\alpha L} = (\text{INT}_{\alpha L} / \Sigma_{\alpha}) \cdot 100$.

За удобство експерименталните резултати могат да се оформят в следната таблица:

Нуклид	E_{α} [keV]	$\text{INT}_{\alpha L}$ [imp]	$\% I_{\alpha L}$
^{239}Pu	xx	xx	xx
	5144 + 5156	xx	xx
Сума Σ_{α}		xx	$\approx 100 \%$
^{241}Am	xx	xx	xx
	xx	xx	xx
	xx	xx	xx
	xx	xx	xx
Сума Σ_{α}		xx	$\approx 100 \%$
^{244}Cm	xx	xx	xx
	5806	xx	xx
Сума Σ_{α}		xx	$\approx 100 \%$

Сравнете получените квантови добиви с литературните данни. Съвпадение в границите $\pm 2 \%$ за интензивните линии се счита добро (За справка вижте фигури

8-4, -5 и -6). (Забележка: Коректният начин за обработка на неразделени α -линии (мултиплети) е апроксимирането им с Гаусиани и работа с „чистите“ площи).

4) Определете **активностите на ^{241}Am и ^{244}Cm** в източника, ако е известно, че активността на ^{239}Pu е $A^{\text{Pu}} = 1,89 \cdot 10^3 \text{ Bq}$. Да се има предвид, че **пълната площ на α -групата** на съответния нуклид Σ_{α} се дава като:

$$\Sigma_{\alpha} = A \varepsilon \Omega t \text{ [imp/s]}$$

където: A – активност в [Bq], ε - ефективност за регистрация (В случая $\varepsilon \approx 1$), Ω - относителен пространствен ъгъл, под който площта на детектора се вижда от източника, t – време на набиране в [s]. В случая параметрите ε , Ω и t са едни и същи за нуклидите, присъстващи в източника, така че съответната активност може да се пресметне като:

$$A^{\text{XX}} = (\Sigma_{\alpha}^{\text{XX}} / \Sigma_{\alpha}^{\text{Pu}}) \cdot A^{\text{Pu}}$$

5) За определяне на **съдържанието, като брой атоми**, на нуклидите ^{239}Pu , ^{241}Am и ^{244}Cm в източника, се използва закона за радиоактивното разпадане в диференциален вид:

$$A = \frac{dN}{dt} = -\lambda N(t) = -\frac{\ln 2}{T_{1/2}} N(t)$$

т.е. общият брой неразпаднали се ядра в момента t е $N(t) = (T_{1/2} / 0,693) A$, където: A - активност в [Bq], $T_{1/2}$ – период на полуразпадане в [s] (**1 год. = $3,15 \cdot 10^7$ s**). Отбележете, че нуклидите ^{239}Pu , ^{241}Am и ^{244}Cm в източника, като брой атоми са в отношение $\approx 1 : 1,3 \cdot 10^{-2} : 2,2 \cdot 10^{-4}$.

6) „**Възрастта**” на α -източника се определя по намаляването на активността на ^{244}Cm ($T_{1/2} = 18,1 \text{ y}$), като използвате известния закон:

$$A(t) = A(t_0) \exp\left(-\frac{0,693 \cdot \Delta t}{T_{1/2}}\right)$$

и имате предвид, че $A^{\text{Cm}}(t_0) = A^{\text{Pu}}(t_0)$ и $A^{\text{Pu}}(t) \approx \text{const}$.

Тогава „**възрастта**” Δt се пресмята като:

$$\Delta t = \ln \left(\frac{A^{Cm}(t)}{A^{Pu}(t_0)} \right) \frac{T_{1/2}^{Cm}}{0,693}$$

Действителната „възраст“ на микс-източника е от порядъка на 30 години.

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.