

ОПРЕДЕЛЯНЕ КОНСТАНТАТА НА РАЗПАДАНЕ И ПЕРИОДА НА ПОЛУРАЗПАДАНЕ

Цел на упражнението е запознаване с метод за опитно определяне константите на разпадане и периодите на полуразпадане на изотопите на среброто ^{108}Ag и ^{110}Ag .

Теоретични бележки

Радиоактивно разпадане е спонтанното превръщане на едно ядро в друго с излъчване на частици, при което става промяна на атомния номер. *Ядрен преход* е промяна в енергията на едно ядро чрез разпадане или излъчване на γ -кванти. Разпадането на едно ядро може да стане по няколко различни начина, напр. α -разпадането може да се конкурира със спонтанното делене, β^+ -разпадането – с електронното захващане и т. н. В подобен случай се говори за вероятност или сечение за *парциално разпадане*. При радиоактивното разпадане дъщерното ядро може да се окаже след разпадането си не в основно състояние, а в някое от възбудените, с по-висока енергия. Тогава след един или няколко γ -прехода ядрото преминава в основното си състояние.

Радионуклид (радиоактивно ядро) е нуклид с определена енергия, който може да претърпи спонтанно разпадане или преход. *Изомер* е нуклид във възбудено състояние с относително дълго време на живот в това състояние (дни, часове, ... ms,...), който преминава в състояние с по-ниска енергия чрез γ -преход или друг вид разпадане. Изомерните състояния обикновено се означават с малко m след масовото число, напр. $^{119\text{m}}\text{Sn}$, $^{110\text{m}}\text{Ag}$. *Енергия на разпадане* е енергията, която се освобождава при разпадане от основното състояние на матерното ядро към основното състояние на дъщерното ядро. Тя съответства на разликата в атомните маси между основните нива. *Интензитет на прехода* е вероятността едно ядро в определено състояние да се трансформира чрез γ -преход. Интензитетите на преходите обикновено се дават в проценти.

Активност на радиоактивен източник, според общоприетата дефиниция на Международната комисия за радиационните единици, е отношението на броя спонтанни ядрени превръщания dN , извършващи се в дадено количество от радионуклида, към големината на интервала от време dt :

$$(III.66) \quad A = \frac{dN}{dt} .$$

Изразът *ядрено превръщане* означава промяна на нуклида или изомерен преход.

Закон за радиоактивното разпадане

Законът за радиоактивното разпадане се формулира така: *броят на разпаданията от дадено количество радионуклиди за единица време е пропорционален на количеството радиоактивни ядра.*

$$(III.67) \quad \frac{dN}{dt} = -\lambda N .$$

Константата на пропорционалност λ се нарича *константа на разпадане* и тя дава вероятността за даденото радиоактивно превръщане. Знакът "-" означава, че става намаляване на първоначалния брой ядра. След интегриране на това уравнение с начални условия при $t = 0, N = N_0$ се получава

$$(III.68) \quad N = N_0 e^{-\lambda t} \quad \text{и} \quad A = A_0 e^{-\lambda t} .$$

Време на живот, $\tau = 1/\lambda$, е времето, за което първоначалният брой ядра намалява е пъти ($e \sim 2,7$), а *период на полуразпадане* е времето, за което първоначалният брой ядра намалява наполовина

$$(III.69) \quad T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} .$$

Връзката между тези две времена е $\tau = T_{1/2}/\ln 2$.

Константата на разпадане не зависи от външните условия, при които е поставен радиоактивният източник, напр. температурата, налягането или вида на химичното съединение, в което е вграден радионуклида. Тя е физична величина, чиито стойности за различните нуклиди се менят в изключително широк интервал – от 10^{15} до 10^{-15} s^{-1} , затова и начините за нейното определяне са различни в зависимост от времето на живот: хиляди години, месеци, часове или части от секундата. Тук ще се запознаем с метод за определяне на λ , когато периодът на полуразпадане е в границите на няколко дни, часове, минути или секунди.

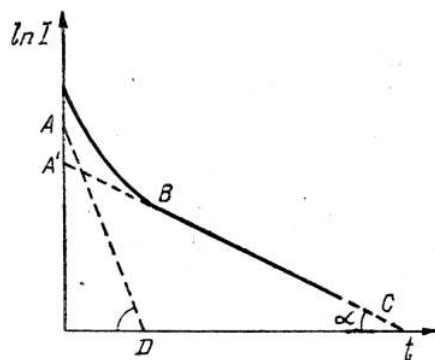
При наличието на единствен радионуклид константата на разпадане се определя чрез измерване скоростта на излъчване на частици от източника. Ако се измерва броят на частиците (α или β , излъчени в интервал от време $\Delta t \ll T_{1/2}$) и броят на регистрираните частици ΔN е сравнително голям, интензитетът $I = \Delta N/\Delta t$, ще дава средната активност за интервала Δt . На практика се регистрира някаква част от всички излъчени частици, която зависи от пространствения ъгъл (определен от взаимното разположение на източника и

детектора и неговото ефективно сечение), от чувствителния обем на детектора, неговата ефективност за дадените частици и енергия и т. н. Броят регистрирани частици за дадено време на измерване намалява с времето поради разпадането на източника. Графиката на функцията на $\ln I$ в зависимост от времето t от началото на първото измерване трябва да представлява права линия с наклон $\operatorname{tg} \alpha = \lambda$.

Често радиоактивният източник представлява смес от два или повече радионуклида, които не са генетично свързани и които имат различни константи на разпадане λ' и λ'' . Възможно е чрез детектора и свързаната с него електронна апаратура да се отреже сигнала, получен при излъчването на единия от радионуклидите и след това да се определи константата на разпадане на другия вид разпадащи се ядра. Ако $\lambda' \gg \lambda''$, може да се изчака разпадането на кратко живущия радионуклид и след това да се определи λ'' както за източник, съдържащ един радионуклид. Възможно е обаче в един експеримент да се определят и двете константи.

Пример за източник, представляващ смес от два радионуклида, е пластинка сребро от естествена изотопна смес (51,4 % ^{107}Ag и 48,6 % ^{109}Ag), която е активирана с поток топлинни неутрони. След поглъщане на неутрон ядрата ^{107}Ag и ^{109}Ag се превръщат в ^{108}Ag и ^{110}Ag съответно, които са β -радиоактивни с различни периоди на полуразпадане (няколко минути и няколко секунди). В този случай зависимостта на скоростта на броене от времето, представена в полулогаритмичен мащаб, не е линейна за малките стойности на t . Ако $T'_{1/2}$ е периодът на полуразпадане на краткоживущия изотоп, то след време $t \geq 5T'_{1/2}$ по-късоживущата активност практически ще се е разпаднала и наклонът на линейната част на графиката $\operatorname{tg} \alpha'' = \lambda''$ ще се определя от λ'' – константата на разпадане на по-дълго живущата компонента на сместа. Чрез екстраполиране на тази права до началния момент $t_0 = 0$ може да се определи активността на дългоживущия радионуклид във всички по-ранни моменти от време, когато и двата радионуклида са присъствали ($0 < t < 5T'_{1/2}$). Тогава активността на късоживущия радионуклид се определя чрез изваждане на правата от експерименталната крива, разбира се, като се има предвид полулогаритмичният мащаб. Определянето на втората права с наклон $\operatorname{tg} \alpha' = \lambda'$ става по следния начин. Интервалът от време от началния момент до началото на линейния участък ($0 < t < T'_{1/2}$) се разделя на няколко подинтервала. В първата точка $t_0 = 0$ се отчита екстраполираната ордината $\ln I''_0$, а след антилогаритмуване – и I''_0 . Тъй като общата измерена активност във всеки момент е сума от активностите на двата радионуклида, то $I'_0 = I_0 - I''_0$ ще бъде активността на късоживущия нуклид, което трябва да се нанесе на графиката като $\ln I'_0$. Същото се повтаря за следващата избрана точка: отчита се

$\ln I_1''$ от апроксимираната права с наклон $\operatorname{tg} \alpha'' = \lambda''$, след антилогаритмуване се получава I_1'' , от разликата $I_1 - I_1''$ се определя I_1' и върху графиката се нанася $\ln I_1'$. Избират се толкова точки, колкото е необходимо за точното определяне на правата $\ln I'(t)$ и нейния наклон $\operatorname{tg} \alpha'$ (вж. фиг. II.28).



Фиг. II.28. Определяне константите на разпад в случай на два радионуклида

След определяне на двете константи λ' и λ'' се определят и съответните периоди на полуразпадане

$$T'_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda'} \quad \text{и} \quad T''_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda''}.$$

Взаимодействие на неутрони с веществото

Неутроните не притежават електричен заряд и следователно не взаимодействат с атомната обвивка и зарядите на ядрата. Основното взаимодействие, което определя поведението им в поглъщаща среда, е силното ядрено взаимодействие. Но за да започне интензивното му действие, е необходимо неутронът да проникне на разстояние 10^{-15} m до ядрото. В този смисъл нормално плътните среди са твърде прозрачни за тях, което обяснява и силната им проникваща способност.

Твърде вероятен процес при преминаване на неутрони през веществото е еластичното разсейване от ядра. Неутроните са открити през 1932 г. от Чадуик именно по избитите от тях *откатни* протони в процеса на еластично разсейване. Неутроните са градивни елементи на ядрата, но неутронна радиоактивност няма освен в някои много редки случаи. Неутроните се раждат в ядрени реакции с кинетична енергия от порядъка на MeV, т. е. като бързи неутрони, но навлизайки в средата, много бързо загубват енергията си вследствие на еластични удари.

От кинематиката на еластичните удари следва, че половината от енергията си те могат да загубят в единичен удар с частици със същата маса, напр. с протон. Неутрон с енергия 1 MeV намалява скоростта си до тази на топлинното движение на молекулите в забавящата среда и се превръща в топлинен неутрон (енергия 0,025 eV) след около 20 удара във вода и едва след 1800 удара в уран.

При взаимодействието си с ядрата на средата неутроните в зависимост от енергията си могат да предизвикат различни ядрени реакции:

1. *Нееластично разсейване*. В този процес неутронът намалява енергията си, като предизвиква възбуждане на ядра, които след това излъчват γ -лъчи. За да се възбуди едно ядро, е необходимо да му се предаде енергия, не по-малка от 1 MeV, следователно нееластичното разсейване е характерно за бързите неутрони.

2. *Радиационно захващане – (n, γ)-реакция*. Сечението за захващане на неутрони е обратнопропорционално на скоростта им ($\sim 1/v$) и поради това представлява най-вероятният процес за топлинни неутрони. Но преди да достигнат до топлинни скорости, в интервала енергии до 10^{-1} eV, съществува вероятност за резонансно поглъщане от ядрата: при дадена енергия сечението изведнъж може да нарасне с няколко порядъка. Тези резонансни максимуми се наслагват върху иначе плавната зависимост на сечението ($\sim 1/v$).

3. *Ядрени реакции с излъчване на заредени частици (p, d, α , t,...)*. Тези реакции са най-вероятни за неутрони с енергия от 1 до 1000 eV. И при тях съществуват резонанси, но като цяло сечението като цяло следва зависимостта $1/v$.

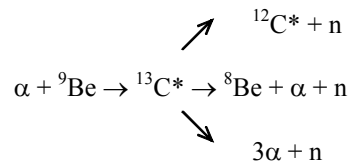
4. *Делене – реакция (n,f)*. Този процес е най-вероятен за топлинни неутрони, тъй като зависи от вероятността за залавяне. Трябва обаче да се отбележи, че топлинните неутрони предизвикват делене само на ^{235}U , но не и на ^{238}U , който може да се дели само от бързи неутрони.

Пълното сечение за взаимодействие на неутроните с веществото е сума от сеченията за отделните реакции:

$$\sigma_n = \sigma_{\text{ел}} + \sigma_{\text{неел}} + \sigma_{\text{захв}} + \sigma_{\text{дел}} + \dots$$

В лабораторни условия обикновено се използват топлинни неутрони, заради тяхното голямо сечение на взаимодействие.

Неутронните източници се основават на ядрени реакции от типа (α ,n) или (γ ,n) и обикновено за мишена се използва берилий (Be), тъй като при него реакцията протича с голям добив. В *америциево-берилиевия* неутронен източник неутроните се получават в реакцията



В нея най-напред се образува съставно ядро ${}^{13}\text{C}^*$ във възбудено състояние, което се разпада по различни канали. Неутронният добив на този източник е около 70 неутрона на 10^6 α -частици. Америцият и берилият са размесени в затворена ампула, от която излизат единствено неутрони. Времето на живот на такъв източник е равно на това на α -излъчвателя. Енергиите на неутроните са от 2 до 10 MeV и ако са необходими топлинни неутрони, неутронният поток се пропуска през забавяща среда, напр. парафин или дестилирана вода. Ако пък е необходим поток от бързи моноенергетични неутрони, се използва реакция от типа (γ, n) .

Неутроните са единственото лъчение в една учебна лаборатория по ядрена физика, което може да прави радиоактивна средата, през която преминава. Това свойство на неутроните трябва да се има предвид при използването им в експерименталната ядрена физика.

Опитна постановка

Опитната постановка се състои от камбановиден ГМ брояч с тънко прозорче за регистриране на β -частици, радиометър, пластинка от естествено сребро и америциево-берилиев източник на топлинни неутрони, поставен в парафинов блок за забавяне на неутроните до топлинни скорости.

Изпълнение на упражнението

Последователно се изпълняват следните задачи:

1. Активиране на пластинката от естествено сребро с поток топлинни неутрони. Пластинката трябва да се облъчи от поток топлинни неутрони не по-малко от 20 минути, което е около 10 периода за по-дългоживущия радионуклид, за да се достигне до насищане на активирането.

2. Докато се натрупат достатъчно радиоактивни ядра, се подготвят уредите за измерване. Включва се броячната апаратура и се подава напрежение на детектора. Избира се

автоматичен режим на работа, за да не се губи време между две измервания на активността. При този режим на дисплея на броячната апаратура се появява само пълният брой регистрирани частици за време Δt . Обикновено за мишени от сребро се избира време за набиране $\Delta t = 4 \text{ s}$

3. Преди началото на измерванията трябва да се направят няколко отчитания на фона (не по-малко от 10–15) за същото време Δt и от тях да се определи средната му стойност.

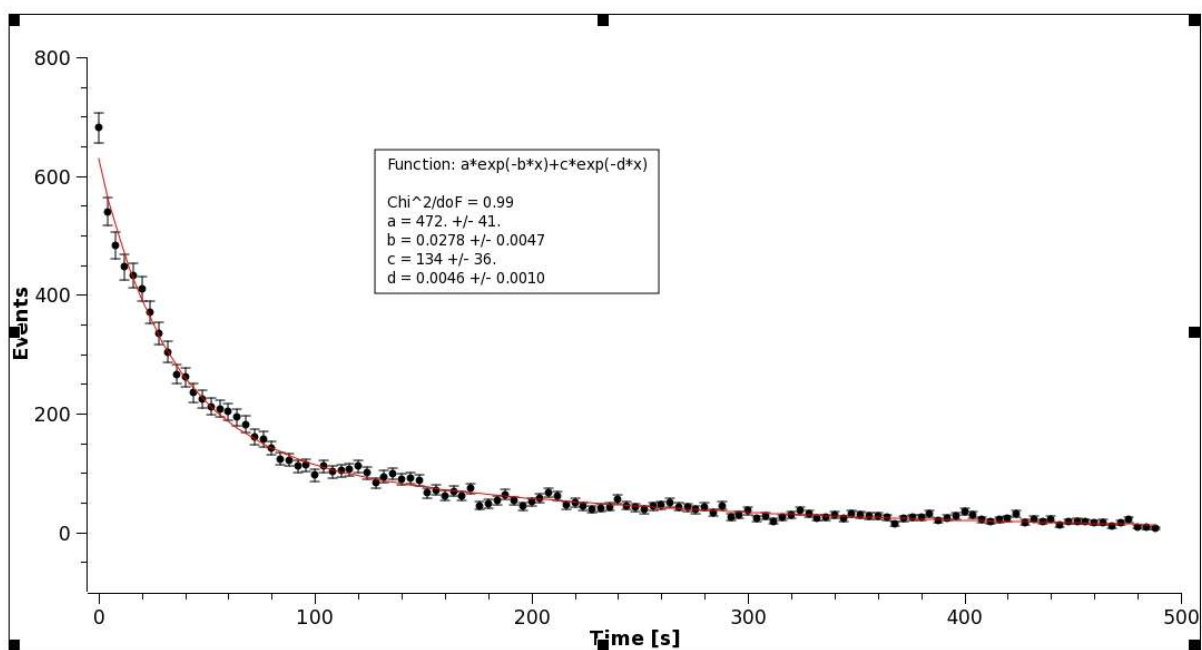
4. След поставяне на активираната пластинка пред детектора се записват *всички* последователно появяващи се върху дисплея на преброителя показания на броячната апаратура. Измерванията продължават, докато активността спадне до нивото на фона (около 160 измервания).

5. Обработката на резултатите включва изваждане на фона от всяко измерване и логаритмуване на разликата. На графика се нанасят: по ординатната ос $\ln(I_i - I_{\text{фон}})$ (или направо $\ln(N_i - N_{\text{фон}})$, ако всички времена Δt са еднакви), а по абцисата – времето, изтекло от началото на първото измерване. Обработката на получената опитна зависимост става по описания по-горе начин. Желателно е линейната част на графиката да се обработи с линейна регресия по метода на най-малките квадрати. Бърза оценка за периода на полуразпадане може да се направи, като от $\ln(I_0 - I_{\text{фон}})$ се извади $\ln 2$ и от графиката на експерименталните стойности се отчете времето, съответстващо на тази разлика.

Алтернативен метод за обработката на данните предоставя компютърна им апроксимация с предварително известна теоретична зависимост. При на разпадането на смес от два изотопа броят регистрирани импулси се определя от сумата от отделните разпадания на всеки от изотопите, които от своя страна се изменят по експоненциален закон:

$$I(t) = I_{0,1}e^{-\lambda_1 t} + I_{0,2}e^{-\lambda_2 t}$$

Използвайки тази формула можем да получим стойностите на неизвестните параметри (началните интензивности и константите на разпад на двата изотопа). От изключителна важност за успешното числено апроксимиране на данните са асоциираните неопределености (статистически в случая).



Примерни данни за определяне на константите на разпад апроксимирани със зададената функция. Използван е пакетът Scidavis и полученото качество на апроксимацията е добро.

6. Получените резултати се сравняват с данните за двете ядра ^{108}Ag и ^{110}Ag от таблицата на нуклидите или от схемите на разпадане.