

Взаимодействие на заредени частици, неутрони и γ -кванти с веществото. Сечения на взаимодействие

Средната енергия на връзка между електроните и ядрото в атома се нарича *йонизационен потенциал* $I \approx 13,5Z$ eV. Разглеждането ще бъде ограничено за заредени частици и γ -кванти с енергии на порядъци по-големи от средния йонизационен потенциал, т.е. с енергии от $0,01 \div 0,1$ MeV до хиляди GeV. Основна роля за описание на процеса на преминаване на ядрените частици през веществото играят следните характеристики:

- за частиците – маса, заряд, енергия;
- за веществото – плътност, атомен номер, среден йонизационен потенциал.

По механизма на преминаване на ядрените частици през веществото те могат да се разделят на четири групи:

- тежки заредени частици;
- леки заредени частици $/e^+$ и e^- /;
- γ -кванти;
- неутрални частици.

За заредените частици и γ -квантите основна роля при описание на взаимодействието им с веществото играят електромагнитните взаимодействия. Въпреки, че процесите са доста сложни, могат да се направят следните допускания:

- при енергии на преминаващите частици по-големи, но сравними със средния йонизационен потенциал, могат да се пренебрегнат ядрените сили, тъй като те са близкодействащи и освен това електроните във веществото са значително повече от ядрата;
- при енергии, много по-високи от средния йонизационен потенциал, могат да се пренебрегнат връзките на електроните с ядрото в атома и да се счита, че електроните имат среден йонизационен потенциал.

От неутралните частици най-голям практически интерес представлява взаимодействието на неутрони с веществото.

Действието на ядрените излъчвания върху веществото в общи линии е свързано със следните процеси:

- налитащите частици, сблъсквайки се с електроните, ги избиват, предизвиквайки йонизация на атомите;
- налитащите частици с достатъчно голяма енергия при нееластичен удар с ядрото могат частично да го разрушат – например да избият от него протони и неутрони. Това води до появата във веществото на нови изотопи или нови елементи. Те могат да бъдат радиоактивни. В резултат, във веществото възниква вторична /индуцирана/ радиоактивност;
- при избиване на електрони във веществото може да се предизвика промяна на химичната му структура;
- при еластични удари на налитащите частици с ядрата положението на атомите в кристалната решетка може да бъде променено, което води до различни дефекти. Тези дефекти могат да окажат влияние на физичните свойства на кристала.

Взаимодействие на заредени частици с веществото

Преминавайки през веществото, чрез кулоново взаимодействие, тежката частица възбужда атомните електрони, като при това постепенно губи своята енергия. В резултат атомите или се йонизират, или се възбуждат. Тъй като частицата има много по-голяма от електроните маса $/10^3$ /, тя слабо се отклонява при взаимодействието с електроните. Тъй като тя взаимодейства с много електрони преди да изгуби напълно кинетичната си енергия, то средното отклонение от първоначалното ѝ направление е нула, т.е. движението ѝ във веществото е приблизително праволинейно.

Основни величини, характеризиращи тежките частици, са *загубите на енергия на единица дължина* $\frac{dT}{dx}$ и *пълния пробег* R на частицата. Загубите на енергия на единица дължина зависят главно от заряда на частицата (z), скоростта ѝ (v) и концентрацията на електроните в средата (n_e):

$$(1) \frac{dT}{dx} \sim \frac{z^2 n_e}{v^2}.$$

Зависимостта (1) показва, че ефективните загуби на енергия зависи доста силно от заряда на частицата, но не и от масата ѝ. Пълният пробег на частицата също е пряко свързан с тези загуби – колкото повече енергия губи на единица дължина, толкова по-малко разстояние ще измине в даденото вещество. Затова α -частица ще има по-малък пробег от протон със същата начална енергия, а по-тежки ядра (с по-голям заряд) – още по-малък.

В общия случай частицата може да губи енергия, както при взаимодействие с електроните, така и при кулоново взаимодействие с ядрата. Освен това може да се осъществи и ядрено /силно/ взаимодействие с ядрата. В този случай се сумират загубите при различните механизми.

Препминавайки през веществото, електроните (позитроните) взаимодействат (кулоново) с атомните електрони. Тъй като масите им са сравними, то отклонението от първоначалното направление ще бъде значително, т.е движението им ще бъде по силно начупена линия. Освен това при взаимодействие леките частици могат да пораждат кванти електромагнитно лъчение. Това означава, че леките частици губят енергия по две причини:

- взаимодействие с атомните електрони /главно йонизационни загуби/;
- радиационни загуби, свързани с електромагнитното излъчване /излъчване при движение с ускорение/.

При препминаване на електрони през веществото взаимодействието им с атомните електрони може да бъде и обменно, което е продиктувано от неразличимостта на взаимодействащите електрони. При препминаване на позитрони през веществото обменни ефекти не възникват, но могат да възникнат процеси на аниhilация.

Йонизационните загуби за електроните са съществени при сравнително малки енергии ($10 \div 100$ MeV в зависимост от средата) и зависят главно от концентрацията на атомите (n) и заряда на средата (Z):

$$\left(\frac{dT}{dx} \right)_{\text{ion}} \sim nZ ,$$

докато радиационните загуби зависят и от енергията на електрона:

$$\left(\frac{dT}{dx} \right)_{\text{rad}} \sim Z^2 nT .$$

Препминаване на γ – кванти през веществото

Под γ -лъчи се разбира електромагнитно излъчване (кванти) с дължина на вълната значително по-малка от междоатомните разстояния $\lambda \ll a$, където $a \sim 10^{-10}$ m. Долната граница на енергията на γ -квантите $E = \frac{2\pi\hbar c}{\lambda}$ е от порядъка на keV. Горна граница няма. В съвременните ускорители се получават γ -кванти с енергия до десетки GeV. При препминаване на γ -кванти през веществото те се поглъщат от него за сметка на електромагнитното взаимодействие. Поради липса на електричен заряд, γ -квантите не участват в кулоново взаимодействие. Взаимодействието им с атомните електрони става на разстояния $\sim 10^{-13}$ m, което е по-малко от междоатомните разстояния. γ -квантите или се поглъщат от веществото, или силно се разсейват – те не могат да се забавят, тъй като имат маса на покой, равна на нула, и се движат със скоростта на светлината. За тях няма свободен пробег. При препминаване на сноп γ -кванти през веществото тяхната енергия не се променя, но се променя интензивността на потока. Нека I е интензитетът на монохроматичния поток γ -кванти, т.е. частиците, препминаващи за единица време, през единица площ. Изминавайки разстояние през веществото dx снопа отслабва с dI . Тогава $dI = -\mu I dx$, където μ е коефициент на поглъщане. Ако средата е еднородна, чрез интегриране получаваме:

$$I = I_0 e^{-\mu x} ,$$

където I_0 е началната интензивност при $x = 0$. Коефициентът μ зависи от свойствата на средата и енергията на γ -квантите. Взаимодействието на γ -квантите с веществото се извършва главно чрез процесите фотоефект, ефект на Комптън и образуване на електрон-позитронни двойки.

Взаимодействие на неутрони с веществото. Делене на ядрата

Неутронът играе изключително важна роля в ядрената физика. Тъй като неутронът няма електричен заряд, той лесно може да достигне ядрото и да предизвика разнообразни ядрени

превръщания.

В ядрената енергетика се работи с неутрони, които имат енергия $0,025 \text{ eV} \div 10 \text{ MeV}$. Сечението на взаимодействие на неутроните с ядрата расте с намаляване на енергията на неутрона по закона $1/v$, където v е скоростта на неутрона. Това дава основание неутроните условно да се разделят на две големи групи – бавни и бързи неутрони. Границата между тези групи условно се приема за $0,1 \text{ MeV}$. Бавните неутрони силно взаимодействат с ядрата. Прието е бавните неутрони да се делят на

- ултрахладни $/E_1 < 3 \cdot 10^{-7} \text{ eV}/$
- хладни $/E_1 < E_2 < 0,025 \text{ eV}/$
- топлинни $/E_3 = 0,025 \div 0,625 \text{ eV}/$
- резонансни $/E_4 = 0,625 \text{ eV} \div 100 \text{ keV}/$

Ултрахладните и хладни неутрони имат голямо сечение на захват от ядрата. Енергията на топлинните неутрони съответства на най-вероятната скорост - когато неутроните се намират в топлинно равновесие със среда със стайна температура. Бързите неутрони имат енергия от $100 \text{ keV} \div 10 \text{ MeV}$. Неутроните с енергия по-големи от 10 MeV се използват главно за изследвания в ядрената физика и физиката елементарните частици. За бавните неутрони най-важни са екзотермичните реакции от типа (n, p) , (n, α) и реакцията (n, f) на деление на ядрата.

Поглъщайки неутрон, тежкото ядро се дели на две /три или четири/ ядра. Забележителна черта на това деление е, че то се съпровожда с изпускането на два, три неутрона. При всеки акт на деление се освобождава енергия около $2 \cdot 10^8 \text{ eV}$. Делението на ядрото е свързано с много дълбокото му преустройство и по своя механизъм рязко се различава от другите ядрени реакции. Делението на ядрото е в основата на работата на ядрените реактори, т.е. на цялата ядрена енергетика.

Спонтанното деление ограничава възможността за получаване на трансуранови изотопи, тъй като при увеличение на атомния номер периода на полуразпад по отношение на делението рязко пада по закона Z^2/A . Интензивността на реакцията делене на ядрото силно зависи от енергията на неутроните и от вида на ядрото. Под действието на неутрони с достатъчно висока енергия /над 10 MeV / практически се делят всички ядра. Под действие на неутрони с енергия няколко MeV се делят само достатъчно тежките ядра $/A > 210/$. Някои тежки ядра се делят от неутрони с всички енергии, започвайки от нулата. Такива са изотопите на урана ${}_{92}^{233}\text{U}$, ${}_{92}^{235}\text{U}$, изотопа на плутоний ${}_{94}^{239}\text{Pu}$, ${}_{94}^{241}\text{Pu}$, изотопите ${}_{95}^{242}\text{Am}$, ${}_{92}^{245}\text{Am}$ и ред други трансуранови изотопи.