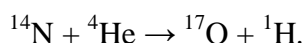


## ЯДРЕНИ РЕАКЦИИ

### 1. Основни понятия

Ядрени реакции - трансформация на ядрата при доближаване на две ядра на разстояние в обхвата на ядрените сили ( $10^{-15}$  m). При по-големи разстояния - кулоново възбуждане (променя се само вътрешното състояние на ядрото).

Първата ядрена реакция - 1919 г., Ръдърфорд:



Ръдърфорд открива *протона* (идентифицира го по пробегата). „Ядрото на азота се разпада вследствие на граматните сили, които се проявяват при сблъскване на бързата  $\alpha$ -частица, и полученият водороден атом се явява съставна част от ядрото на азота”.

Ядрена реакция става при бомбардиране на мишена със сноп частици (от ускорител).



„A” - мишена, „a” – частици от снопа, а „B” и „b” са новото ядро и новата лека частица. Първата ядрена реакция е  $^{14}\text{N}(\alpha, p)^{17}\text{O}$ .

### Типове ядрени реакции

#### 1) Според вида на бомбардиращите частици:

\* реакции с неутрони,

\* със заредени частици (p, d,  $\alpha$ , HI – тежки йони),

фотоядрени (с  $\gamma$ -кванти).

Съкратен запис (a, b), напр. (n,  $\gamma$ ), (p, d), (d, p) и пр. Реакцията на Ръдърфорд е от типа ( $\alpha$ , p)

#### 2) Според механизма на самата реакция:

\* *преки* – прехвърляне на нуклеон от бомбардиращата частица към ядрото-мишена или обратно

\* *с образуване на съставно ядро* - частицата от снопа се слива с ядрото-мишена и след известно време от новото ядро се излъчва частица или леко ядро

\* *резонансни* - междинен случай между преките реакции и реакциите с образуване на съставно ядро. Влизащата частица е в *квазисвързано състояние* преди излизащата частица да се изхвърли.

\* *еластично разсейване* - идентично входно и изходно ядро, което остава в основното си състояние

\* *нееластично разсейване* - идентично входно и изходно ядро, но след реакцията ядрото е във възбудено състояние

#### Канали на реакцията

При ядрени реакции с образуване на съставно ядро е възможно разпадането му да стане по различни начини - канали на реакцията.

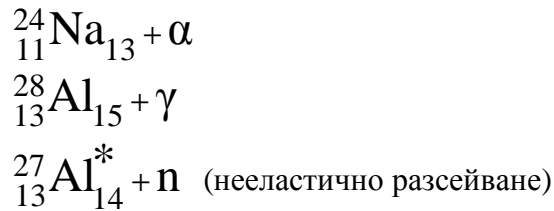
Входен канал (a + A)

Изходни канали: (b + B), (c + C), (a + A\*), (a + A).

Пример  $\rightarrow$   $^{27}_{13}\text{Al}_{14} + n$  с образуване на съставно ядро  $^{28}_{13}\text{Al}_{15}$

изходни канали:  $^{26}_{13}\text{Al}_{14} + 2n$

$^{27}_{12}\text{Mg}_{15} + p$



Всеки канал протича с определена вероятност (или сечение  $\sigma_i$ ).

$$W_b = \frac{1}{\tau_b} = \frac{\Gamma_b}{\mathbf{h}}$$

$\tau_b$  - време на живот,  $\Gamma_b$  – парциална „ширина на канала“ с изхвърляне на частицата  $b$   
 $\rightarrow \Gamma_b \tau_b \sim \mathbf{h}$ . Вероятността за даден канал е пропорционална на неговата ширина -  
 вместо за вероятност се говори за *ширина на канала*.

Пълна вероятност за протичане на реакцията  $\Gamma = \Gamma_a + \Gamma_b + \Gamma_c + \dots$

Пълно сечение за реакцията  $\sigma_{tot} = \sum_i \sigma_i$ .

Включена е и вероятността за разпадане на съставното ядро през входния канал.  $\sigma_{tot}$   
 $\sim$  геометричното сечение на ядрото.

Понятие за съставно ядро

Идеята за съставно ядро е въведена от Нилс Бор:



$C^*$  е съставното ядро (винаги във възбудено състояние). Влизащата частица и ядрото на мишената се *сливат напълно* и внесената енергия се разпределя между всички нуклеони в съставното ядро. По-късно един от тях поеме повече енергия и излита (аналогично на изпарение на молекула от затоплена течност).

Съставното ядро живее “дълго”  $\sim 10^{-14}$ - $10^{-15}$  s ( $\gg 10^{-22}$ - $10^{-23}$ s). То е силно възбудено и деформирано (по излъчените  $\gamma$ -кванти). Богати  $\gamma$ -спектри с ротационни ивици и много други  $\gamma$ -линии - строят се схеми на нивата и правят изводи за структурата на тези ядра.

Радиоактивното разпадане е разпадане на съставно ядро с много дълго време на живот.

Причини за дългото време на живот на съставното ядро:

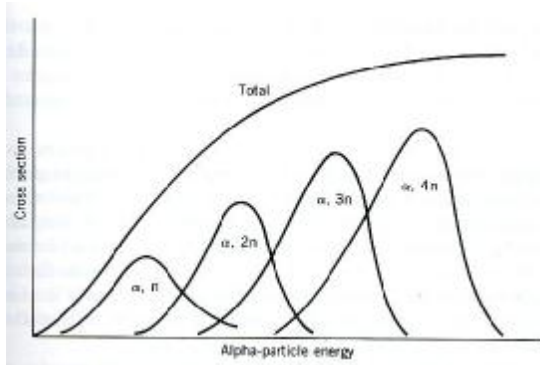
\* внесената енергия бързо се разпределя между всички останали нуклеони. Благодарение на флуктуации в енергията, по-късно някой нуклеон може да увеличи енергията си и да напусне ядрото

\* съществуване на кулонова бариера за протоните и леките заредени частици. Тя намалява с няколко порядъка вероятността за излитане на заредени частици от ядрото.

При висока енергия на възбуждане (над 10 MeV) се излъчват неутрони и тогава започва излъчването на каскади от  $\gamma$ -лъчи

\* Подборните правила при  $\gamma$ -преходите често причиняват задържане на разпадането при силно преустройство на ядрото (време от порядъка на  $10^{-13}$  s)

Функция на възбуждане – зависимост на сечението за реакцията от енергията на бомбардиращата частица.



Функциите на възбуждане за реакции с  $\alpha$ -частица и излъчване на няколко неутрона

Разпадането на съставното ядро не зависи от входния канал, а от пълната енергия на системата

Функцията на възбуждане зависи от изходния канал

пример съставното ядро  ${}^{64}_{30}\text{Zn}^*$  при реакциите

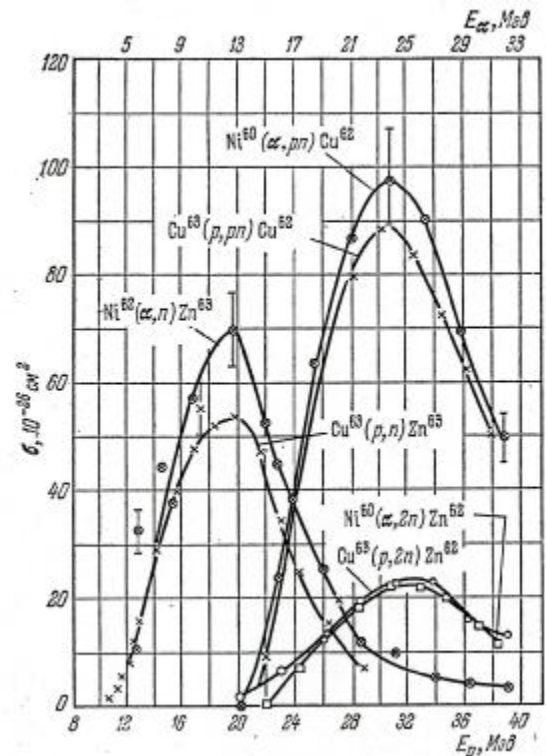
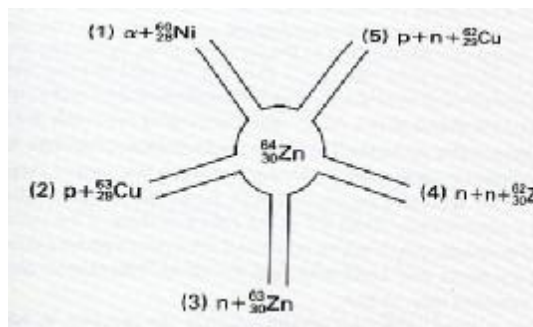


с три еднакви изходни

канала:  ${}^{63}_{30}\text{Zn} + n$

${}^{62}_{29}\text{Cu} + n + p$

${}^{62}_{30}\text{Zn} + 2n$ .



Хипотезата за съставното ядро се проверява чрез сравняване на сеченията за два еднакви изходни канала, съответно за двата входни канала:

$$\sigma(a_1, b), \sigma(a_1, c), \sigma(a_2, b) \text{ и } \sigma(a_2, c)$$

ВХОДНИ ЧАСТИЦИ:  $a_1$  и  $a_2$ ,  
ИЗХОДНИ ЧАСТИЦИ –  $b$  и  $c$

от 
$$\frac{\sigma(a_1, b)}{\sigma(a_1, c)} = \frac{\sigma(a_1)W_b}{\sigma(a_1)W_c} = \frac{W_b}{W_c} \frac{\sigma(a_2, b)}{\sigma(a_2, c)} = \frac{\sigma(a_2)W_b}{\sigma(a_2)W_c}$$

следователно  $\rightarrow \frac{\sigma(a_1, b)}{\sigma(a_1, c)} = \frac{\sigma(a_2, b)}{\sigma(a_2, c)}$

### Резонансни реакции

Възбудените нива на съставното ядро са с ширина  $\Gamma$ , а разстоянието между тях да е  $\delta E$ . В зависимост от енергията на възбуждане и конкретното съставно ядро е възможно:

- $\delta E < \Gamma$  – нивата са нагъсто и линиите се припокриват (непрекъснат спектър - статистически  $\gamma$ -кванти). Функцията на възбуждане е плавна функция, а изходните частици излитат от ядрото изотропно (в с.ц.м.).
- $\delta E > \Gamma$  – спектърът на съставното ядро е дискретен и може да се достигне до резонансни реакции

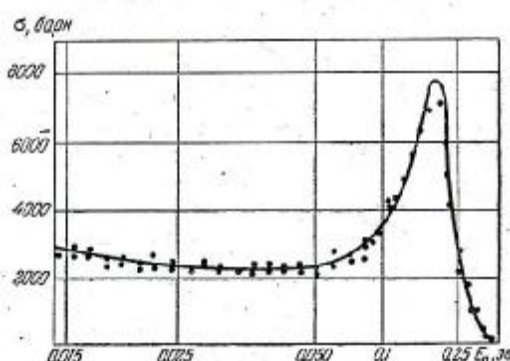
Нека съставното ядро има изолирано ниво с енергия  $E_0$ . Тогава зависимостта на сечението от енергията на входната частица  $E_a$  е функция с остър максимум около енергията  $E_0$ :

$$\sigma(a, b) = \pi D_a^2 \frac{\Gamma_a \Gamma_b}{(E - E_0)^2 + \frac{\Gamma^2}{4}}$$

$D_a = h/mv$  е приведената дължина на вълната на дьо Бройл на нейтрона

$$\Gamma = \Gamma_a + \Gamma_b.$$

Това е формулата на Брайт-Вигнер. Резонансният вид идва от лоренцовата функция



$$L(E) = \frac{\Gamma}{(E - E_0)^2 + \frac{\Gamma^2}{4}}$$

Форма на сечението на Брайт-Вигнер за поглъщане на нейтрони

### Преки ядрени реакции

Бързи ядрени реакции без образуване на съставно ядро. Взимат участие много малък брой нуклеони, които се откъсват от ядрото-мишена или се захващат от него.

Връхлитащата частица взаимодейства непосредствено с един нуклеон от периферията на ядрото.

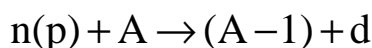
Примери:

*реакции на прехвърляне* (transfer) на един нуклеон, напр. *реакция на разкъсване* (stripping) на деутрона:



d - деутрон ( ${}^2\text{H}$ ), A – ядро на мишената.

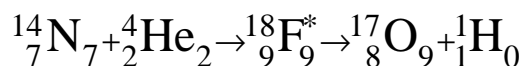
*Реакции на захващане* (pick-up)



Закони за запазване при ядрените реакции

При ниски енергии (под 1 GeV) не се създават нови частици  
*запазва се броят на протоните и неутроните поотделно –*

$\sum_i Z_i = \text{const}$  и  $\sum_i N_i = \text{const}$ . Сумирането е по броя на входните нуклеони, както и по броя на изходните нуклеони. Пример с първата реакция:



за броя на протоните  $(7 + 2) = 9 = (8 + 1)$ .

Обобщение - закон за запазване на барионния заряд– запазва се общият брой на нуклеоните:

$\sum_i A_i = \text{const}$ , за горната реакция  $(14 + 4 = 18 = 17 + 1)$ .

*Запазването на пълната енергия и импулса* може да се използва за свързване на неизвестните, но измерими енергии на продуктите от реакцията, с добре известната енергия на частиците от снопа.

*Запазването на ъгловия момент* позволява да се свържат спиновете на влезлите във взаимодействие частица и ядро с орбиталния ъглов момент на излезлите частици, който експериментално се определя от измерване на ъгловото разпределение на тези частици. От тук - спиновете на възбудените ядрени нива.

*Запазването на четността*, означава, че четността на влизащите в реакцията частици трябва да е равна на четността на излизащите от реакцията. От тук - определяне на неизвестните четности на ядрените нива от известните предварително четности на нивата или частиците, прилагайки правилото за определяне на четността  $(-1)^{\mathbf{l}}$ ,  $\mathbf{l}$  е определеният вече орбитален момент на излизащата частица.