



ANKARA ÜNİVERSİTESİ
NÜKLEER BİLİMLER ENSTİTÜSÜ

NÜKLEER TEPKİME MEKANİZMALARI

101513
NÖTRON VE REAKTÖR FİZİĞİNE GİRİŞ
PROF. DR. HALUK YÜCEL

NÜKLEER TEPKİME MEKANİZMALARI

Nötronlarla nükleer tepkimeler daha yaygındır.

1. Nötronlar Coulomb itmesiyle karşılaşmazlar. (Çünkü pozitif bir yük taşımazlar.) Bu nedenle, çok düşük enerjili nötronlar (thermal/slow) çekirdeklere girebilirler.
2. Nötron enerjileri 1 – 10 eV (Rezonans nötronları) çok şiddetli soğurulma maksimumları gösterirler.
3. Nükleer reaktörlerde, nötronlar $10^{10} - 10^{16}$ n/cm²/s mertebesinde çok yüksek akılarla elde edilebilir.

Nötron Üretim Mekanizmaları:

- ${}^9_4\text{Be}(\alpha, n){}^{12}_6\text{C}$ $\alpha \leftarrow {}^{226}\text{Ra}, {}^{210}\text{Po}, {}^{241}\text{Am}, {}^{238}\text{Pu}$
- ${}^9_4\text{Be}(\gamma, n)2\alpha$ $\gamma \leftarrow {}^{124}\text{Sb}$
- ${}^9_4\text{Be}(d, n){}^{10}\text{B}$
- $d(d, n) {}^3\text{He}$ 0.1 – 10MeV
- $t(d, n)\alpha$ 14MeV
- ${}^{252}_{98}\text{Cf}$ (sf) $1\mu\text{g } {}^{252}_{98}\text{Cf} = 2.3 \times 10^6 \text{ n/s}$

Yüklü Parçacık Tepkimeleri:

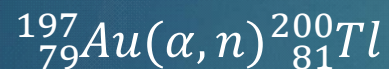
Coulomb engeli (barrier)

$$U \approx \frac{Z_x Z_A e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \approx \frac{Z_x Z_A e^2}{r_0 (A_x^{\frac{1}{3}} + A_A^{\frac{1}{3}})} \cong \frac{Z \cdot z \cdot e^2}{r_0 (A_x^{\frac{1}{3}} + A_A^{\frac{1}{3}})}$$

$$r = r_0 (A_x^{\frac{1}{3}} + A_A^{\frac{1}{3}}), \quad U = \frac{Z_x Z_A e^2}{r_0 (A_x^{\frac{1}{3}} + A_A^{\frac{1}{3}})}$$

$$e^2 = 1.44 \times 10^{-13}, \quad r_0 \cong 1.41 \times 10^{-13} \text{ cm}$$

Örnek:



$$U \cong 1.03 \frac{79 \times 2}{197^{\frac{1}{3}} + 4^{\frac{1}{3}}} \cong 21.97 \text{ MeV}$$

| | | | |
|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|---|
| $Z_x = p$ | $Z_A = {}^{12}_6\text{C}$ | $U \approx 1.8 \text{ MeV}$ | $p + {}^{12}_6\text{C} \rightarrow$ |
| $Z_x = p$ | $Z_A = {}^{238}_{92}\text{U}$ | $U \approx 13 \text{ MeV}$ | $p + {}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow$ |
| $Z_x = \alpha$ | $Z_A = {}^{238}_{92}\text{U}$ | $U \approx 24 \text{ MeV}$ | $\alpha + {}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow$ |
| $Z_x = {}^{12}_6\text{C}$ | $Z_A = {}^{238}_{92}\text{U}$ | $U \approx 130 \text{ MeV}$ | ${}^{12}_6\text{C} + {}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow$ |
| $Z_x = {}^{235}_{92}\text{U}$ | $Z_A = {}^{235}_{92}\text{U}$ | $U \approx 700 \text{ MeV}$ | ${}^{235}_{92}\text{U} + {}^{235}_{92}\text{U} \rightarrow$ |

Gelen parçacık ile çekirdek merkezi bir çarpışma yapmaz ise açısal momentumun çekirdeğe transferi aynı zamanda söz konusudur. Bu nedenle, Coulomb bariyerinin yanısıra santrifüj bariyeri de hesaba katılmaktadır.

$$V = \frac{\hbar^2 \cdot l \cdot (l + 1)}{8\pi^2 \mu r_0^2 (A_A^{1/3} + A_x^{1/3})^2}$$

$l = 0$ Merkezi çarpışmayı gösterir.

Ancak, l 'nin $\hbar = h/2\pi$ katları olduğunda, açısal momentum transfer edilebilir.

Burada Etkin kütle, $\mu = \frac{m_x \cdot m_A}{m_x + m_A}$

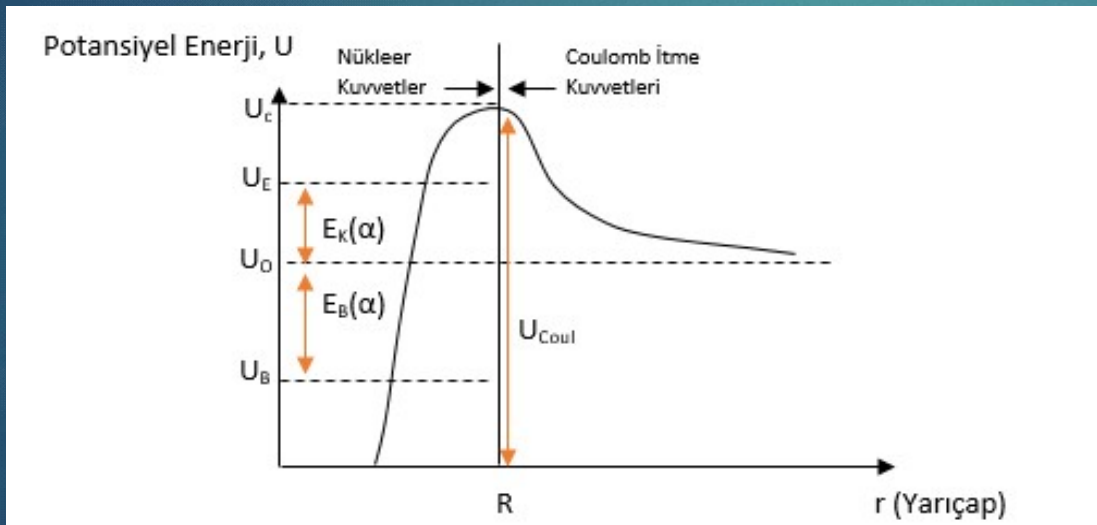
Sonuç olarak gelen parçacık enerjisi $E_x \geq U + V$ olması beklenir.

Ancak, α – bozunmasında $E_x < U + V$ olduğunda da “tunnel effect” tünelleme olayı nedeniyle nükleer tepkimeye yol açabilir.

Örnek:

$$^{197}_{79}\text{Au}(\alpha, n)^{200}_{81}\text{Tl}$$
$$U \cong 1.03 \frac{79 \times 2}{\frac{1}{197^{\frac{1}{3}}} + \frac{1}{4^{\frac{1}{3}}}} \cong 21.97 \text{MeV}$$

Halbuki, kuantum mekanik yasalarına göre, α – tünelleme olayı nedeniyle $E_{th}(\alpha) \geq 12 \text{MeV}$ olduğunda bu nükleer tepkime meydana gelebilir.



Potansiyel enerji diyagramı

U_C : Coulomb potansiyel enerji (Coulomb bariyer)

U_E : Uyarma potansiyel enerjisi

$E_B(\alpha)$: α 'nın bağlanma enerjisi

$E_K(\alpha)$: α 'nın kinetik enerjisi

$$\text{Excitation Enerji} = (U_E - U_B) + (U_O - U_B)$$

$$\text{Excitation Enerji, } U_E = \underbrace{(U - U_O)}_{E_K(\alpha)} + \underbrace{(U_O - U_B)}_{E_B(\alpha)}$$

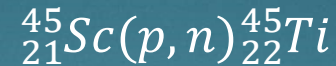
$E_K(\alpha)$ Gelen parçacık kinetik enerjisi
 $E_B(\alpha)$ Parçacık bağlanma enerjisi

Eksitasyon enerjisi < Coulomb potansiyel enerjisi

$$U_E < U_C \text{ olduğu için;}$$

Kuantum mekanik yasalarına göre, gelen α – parçacığı daha düşük enerjilerde gelse bile soğurulma olasılığı vardır ve böyle bir tepkimenin $U_C = 22\text{MeV}$ yerine $E_{th}(\alpha) \cong 12\text{MeV}$ de gerçekleşme olasılığı vardır.

Proton Tepkimeleri:



Minimum gerekli olan kinetik enerji, eşik enerjisi (E_{th}) ve potansiyel bariyerin bilinmesi gerekir.

$$Q = [6.778 - 41.068 + 39.006 - 8.071] = -3.355\text{MeV}$$

$$E_{th} = |Q| \frac{A + a}{A} = |-3.355\text{MeV}| \frac{45 + 1}{45} \approx 3.43\text{MeV}$$

$$U_C \cong 1.03 \frac{Z \cdot z}{\left(A_A^{\frac{1}{3}} + A_x^{\frac{1}{3}}\right)} = 1.03 \frac{21 \times 1}{45^{\frac{1}{3}} + 1} \cong 4.74\text{MeV}$$

$$M_n = 8.071\text{MeV}$$

$$M_p = 6.778\text{MeV}$$

$$M({}_{21}^{45}\text{Sc}) = -41.068\text{MeV}$$

$$M({}_{22}^{45}\text{Ti}) = -39.006\text{MeV}$$

Döteron Tepkimeleri:

$$E_{B,E}=2.23 \text{ MeV}$$

$$m_d = m_n + m_p + Q$$

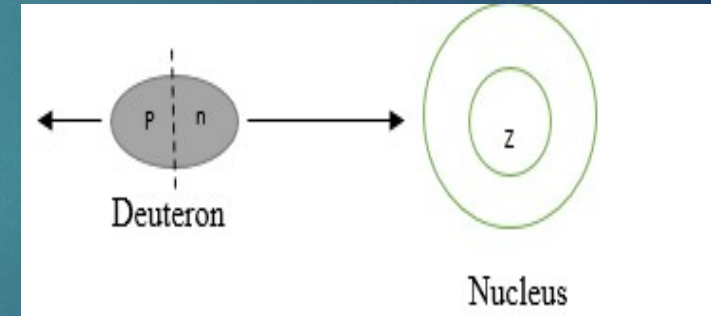
Sıyırma Tepkimesi (stripping reaction):

Döteronlar, hedef çekirdeğin alanına girdiklerinde kolayca polarize olabilirler, yani döteron içerisinde itilecek olan proton, nötronun çekirdeğe yönelmesine yardımcı olur. Böylece döterondaki nötron, döteronun tamamen yakalanması yerine soğurulur. Böylece reaksiyona soyma /soyulma (stripping) denilir. Burada nötron döterondan sıyırılıp alınmaktadır.

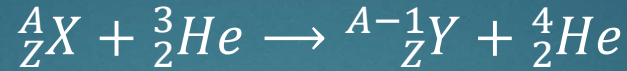
- $(d, n); (d, p); (d, \alpha)$ tepkimeleri $Q > 0$ ve *exoergic*
- Eşik enerjileri yoktur. $E_{th} = 0$

Örnek: ${}_{25}^{55}\text{Mn}(d, p){}_{25}^{56}\text{Mn}$

$$U_C(\text{potansiyel bariyer}) \cong 1.03x \frac{Z.z}{\left(A_A^{\frac{1}{3}} + A_x^{\frac{1}{3}}\right)} \cong 1.03 \frac{25x1}{55^{\frac{1}{3}} + 1} \cong 5.4 \text{ MeV}$$



Kapma Tepkimesi (Pick-up Reaction):



Bu tip tepkimeler (d,p); (d,n); (d,t); (t, α) ve (${}^3_2He, \alpha$) şeklinde görülebilir.

Burada, çekirdeğe yaklaşan/bombardıman eden parçacık (projectile) çekirdekten bir nükleon kapabilir. Bu olayın adına “direct reaction” da denilir ve gelen parçacığın enerjisi arttıkça artar.

- Düşük enerjili (<50MeV) tepkimelerle çekirdek transmutasyonları

p=Z

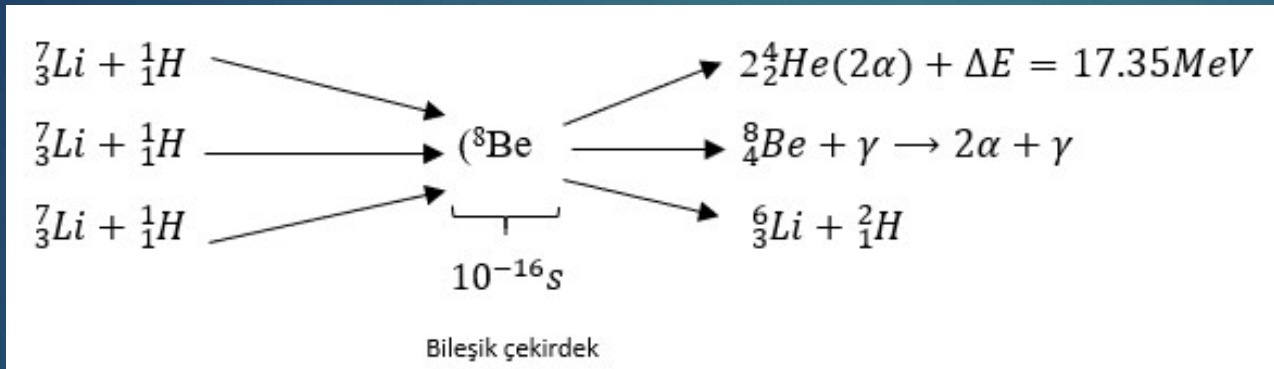
| | | | | |
|-------------------------------|------------------------|------------------------------------|-------------------------------|-------------|
| | | $\alpha, 2n$ | α, n | |
| p, 2n | p, n d, 2n | α, t p, γ d, n | t, n | α, p |
| | d, t n, 2n p, pn | Hedef Çekirdek | d, p n, γ t, n | t, p |
| p, α | d, α | n, d γ, p | n, p d, 2p | |
| | n, α | | | |

n=A-Z

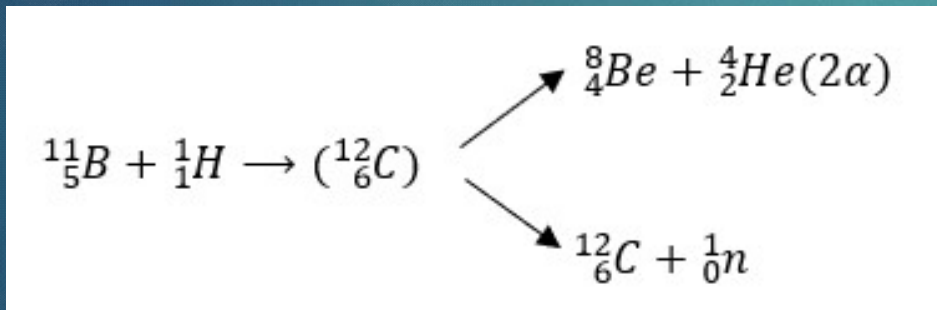
- Çeşitli enerji aralıkları için baskın olan nükleer tepkimeler

| Gelen Radyasyon Enerjisi | Orta Ağırlıktaki Çekirdekler ($25 < A < 80$) | | | | Ağır Çekirdekler ($80 < A < 250$) | | | |
|--------------------------|---|-------------|------|---------------------|--|-------------|------|---------------------|
| | n | p | d | α | n | p | d | α |
| 0 – 1keV | n, γ | - | - | - | n, γ | - | - | - |
| 1 – 500keV | n, γ | p,n | d,p | α ,n | n, γ | - | - | - |
| | - | p, γ | d,n | α , γ | - | - | - | - |
| | - | p, γ | - | α ,p | - | - | - | - |
| 0.5 – 10MeV | n, α | p,n | d,p | α ,n | n,p | p,n | d,p | α ,n |
| | n,p | p, α | d,n | α ,p | n, γ | p, α | d,n | α ,p |
| | - | - | d,pn | - | - | - | d,pn | α , γ |
| | - | - | d,n | - | - | - | d,2n | - |
| 10 – 50MeV | n,2n | p,2n | d,p | α ,2n | n,2n | p,2n | d,p | α ,2n |
| | n,p | p,n | d,2n | α ,n | n,p | p,n | d,2n | α ,n |
| | n,np | p,np | d,pn | α ,p | n,pn | p,np | d,np | α ,p |
| | n,2p | p,2p | d,3n | α ,np | n,2p | p,2p | d,3n | α ,np |
| | n, α | p, α | d,t | α ,2p | n, α | p, α | d,t | α ,2p |

${}^7_3\text{Li}(p, ?)$ Tepkimesi için Alternatif Yollar:



${}^{11}_5\text{B}(p, ?)$ Tepkimesi için Alternatif Yollar:



(d,p) ve (d,n) Tepkimesi;



Tritiyum Üretimi: d(d,p)t



$$\sigma_{n,\gamma} = 940b$$
$$Q > 0$$

3He Üretimi: d(d,n) 3He



Belirli bir nüklit farklı tepkimelerle elde edilebilir. Örneğin, ${}^{24}Na$:

1. ${}^{23}Na(n,\gamma) {}^{24}Na$
2. ${}^{24}Mg(n,p) {}^{24}Na$
3. ${}^{27}Al(n,\alpha) {}^{24}Na$
4. ${}^{23}Na(d,p) {}^{24}Na$
5. ${}^{26}Mg(d,\alpha) {}^{24}Na$
6. ${}^{27}Al(n,p\alpha) {}^{24}Na$
7. ${}^{25}Mg(\gamma,p) {}^{24}Na$
8. ${}^{27}Al(\gamma,2pn) {}^{24}Na$
9. ${}^{27}Al(p,3pn) {}^{24}Na$

