



ANKARA ÜNİVERSİTESİ  
NÜKLEER BİLİMLER ENSTİTÜSÜ

# NÜKLEER TEPKİMELEER

101513

NÖTRON VE REAKTÖR FİZİĞİNE GİRİŞ  
PROF. DR. HALUK YÜCEL

# NÜKLEER TEPKİMELER

Nükleer tepkime;

Yeterli kinetik enerjiye sahip bombardıman eden parçacıklar ile, nüklitlerde meydana getirilen etkileşmeler sonucu ortaya çıkan değişmelerdir.

Bunlardan radyoaktif bozunmalar, kendiliğinden meydana gelen nükleer parçalanma olayları olarak ayırt edilmelidir. Nükleer tepkimeleri, kimyasal tepkimelere benzetmek (analoji) yanlış değildir. Çünkü kimyasal tepkimelerde de enerjide bir değişim, tepkimeyi meydana getirmek için minimum bir enerji gereksinimi ve reaksiyon hızı (reaction rate) kavramları geçerlidir.



# NÜKLEER TEPKİMELER

Bu benzetimde farklı noktalar şunlardır:

1. Kimyasal tepkimelerde maddenin tartılabilir (gram veya mol) miktarlarının dönüştürülmesi göz önüne alınması gerekirken, nükleer tepkimelerde maddenin atom başına değişimler söz konusudur. Yani, nükleer tepkimede bir atom başına değişim, bir kimyasal tepkimedeki değişimlerden milyon kat daha büyük enerji açığa çıkarabilir.
2. Kimyasal tepkimelerde atom çekirdekleri (nüklitler) değişmez iken, aynı nüklitler nükleer tepkimeye girdiklerinde değişirler.
3. Kimyasal tepkimelerde kütle korunumu tanımı geçerli iken kimyasal bağlarda (banding) değişmelerin neden olduğu oldukça küçük varyasyonlar ihmal edilir. Halbuki nükleer tepkimelerde, tepkimeye giren kütlelerin enerji değerleri ve toplam enerjileri  $\sum_{top}(mc^2 + E)$  eşit kalır, yani madde minimumda olsa enerjiye dönüşerek azalabilir.

Nükleer tepkimeler bombardıman edilen parçacığın tipine, enerjisine, hedef çekirdeğin tipine ve çıkan ürünlere göre sınıflandırılır.

a) Parçacığın Tipine Göre Tepkimeler

1. Nötron tepkimeleri  $(n, \gamma)$ ,  $(n, p)$ ,  $(n, \alpha)$ ,  $(n, n')$ ,  $(n, np)$ ,  $(n_{th}, f)$
2. Yüklü parçacık tepkimeleri  $p$ ,  $\alpha$ ,  ${}^2_1H$  gibi
3. Ağır iyon reaksiyonları  ${}^{12}C$ ,  ${}^{16}O$  gibi
4. Fotonükleer tepkimeler  $(\gamma, n)$ ,  $(\gamma, np)$
5. Elektron induced tepkimeler

b) Bombardıman Enerjisine Göre Tepkimeler

1. Termal enerjiler  $\approx 0.025eV$
2. Epitermal enerjiler  $\approx 1eV$
3. Yavaş nötron enerjileri  $\approx 1keV$
4. Hızlı nötron enerjileri  $\approx 0.1 - 10MeV$
5. Düşük enerjili yüklü parçacıklar  $\approx 0.1 - 10MeV$
6. Yüksek enerjiler  $\approx 10 - 100MeV$



### c) Hedef Çekirdeklere Göre Tepkimeler

1. Hafif kütleli çekirdekler  $A < 40$
2. Orta kütleli çekirdekler  $40 < A < 150$
3. Ağır kütleli çekirdekler  $A > 150$



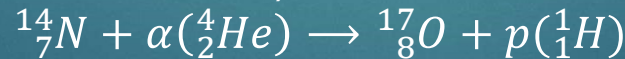
### d) Fisyon veya Spallation Tepkimeleri

- Nükleer tepkimelerde tüm korunum kanunlarına uyulmalıdır.

Tepkimeye giren ve çıkan nüklitlerin;

- Nükleonların sayısı korunur, A
- Elektriksel yük korunur, Z
- Kütle korunur, M
- Momentum korunur, P
- Kütlenin eşdeğeri enerji korunur, E
- Açısal momentum korunur, J $\pi$
- Parite korunur,  $\pi$

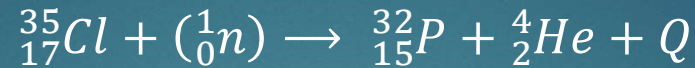
- Tepkimeye örnekler:



	<b>Kimyasal Tepkime</b> $A + B \rightarrow C + D + \Delta H$	<b>Nükleer Tepkime</b> $A + x \rightarrow B + y + Q$
<b>Enerjideki değişme</b>	$\Delta H$ , reaksiyon ısısı	$Q = \Delta M \cdot c^2$ , reaksiyon enerjisi
<b>Tepkimenin meydana gelmesi için minimum enerji</b>	Aktivasyon enerjisi, $E_{\text{act}}$	Eşik enerjisi, $E_{\text{th}}$
<b>Tepkime hızı (Reaction rate)</b>	k	R



## Q – Tepkime(reaksiyon) Enerjisinin Hesabı



$$\Delta M = [M({}_{17}^{35}\text{Cl}) + M(n)] - [M({}_{15}^{32}\text{P}) + M({}_2^4\text{He})]$$

$$\Delta M = 34.96885 + 1.00867 - 31.97391 - 4.00260$$

$$Q = 0.001101 \text{ akb} \times 931.446 = 0.94 \text{ MeV}$$

Q>0 Exoergic (dışarı enerji veren)



$$\Delta M = [M({}_{16}^{32}\text{S}) + M(n)] - [M({}_{15}^{32}\text{P}) + M({}_1^1\text{H})]$$

$$\Delta M = 31.97207 + 1.00867 - 31.97391 - 1.07$$

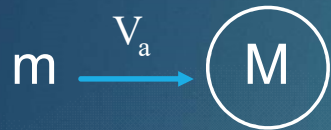
$$Q = -0.001 \text{ akb} \times 931.446 = -0.93 \text{ MeV}$$

Q<0 Endoergic (dışardan enerji alan)

## Eşik Enerjisi Kavramı

Çarpışmadan önce

a                      A



Çarpışmadan sonra

a+A



Momentum korunur;

$$m \cdot v_a = (m + M)v_{a+A}$$

( $E=p^2/2m$  momentum enerji dönüşümü)

$$m \cdot E_a = (m + M)E_{a+A}$$

Burada geri tepme enerjisi (recoil),

$$E_{a+A} = \frac{m}{(m + M)} E_a$$



Gelen a parçacığının bu reaksiyonu meydana getirmek için yeterli kinetik enerjisi olduğu varsayılırsa;

$$E_Q = Q \quad , \quad E_Q = E_a - E_{a+A} = \frac{M}{(m+M)} E_a$$

$$E_a = E_{eşik} \quad , \quad Q = \frac{M}{(m+M)} E_{Th}$$

$$E_{eşik} = \frac{(m+M)}{M} |Q|$$

$$E_{eşik} = \frac{(a+A)}{A} |Q|$$

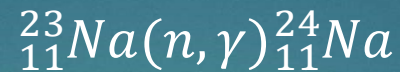
Bir nükleer tepkime meydana getirmek için bombardıman eden a parçacığı için gerekli olan minimum enerjisine eşik (threshold) enerji denir.

**Not:** Eşik enerjisi hesaplanırken genellikle gerçek M kütleleri yerine kütle numaraları kullanılmaktadır.

Exoergic bir reaksiyon için  $E_{th}=0$ 'da, örneğin  $(n,\gamma)$  için  $E_{th}=0$

Çünkü yüksüz nötron, yüksüz parçacıklar arasındaki Coulomb itme kuvvetlerine maruz kalmazlar.

## Nötron Yakalama (Radiative Capture)



(Nötronca zengin parçacık olduğu için  $\beta^-$  bozunumu yapar)

*Ürün çekirdek*



Bolluk, h(%)

0.647%  ${}^{42}\text{Ca}$

0.135%  ${}^{43}\text{Ca}$

Kararlı

2.09%  ${}^{44}\text{Ca}(n, \gamma){}^{45}\text{Ca} \rightarrow {}^{45}\text{Sc}(\%100)$



# Nükleer Tepkimelerde Enerji Hesabı



Tepkime Enerjisi Q – value:

$$\Delta E = Q = (m_A + m_x - m_B - m_y)c^2 \quad (1)$$

m: Nüklit (çekirdek) kütlesi

Elektronun kütlesi ilave edilerek

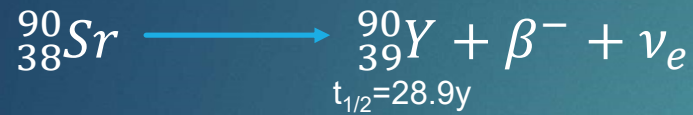
$$M = m + Z \cdot m_e$$

$$\Delta E = Q = (M_A + M_x - M_B - M_y)c^2 \quad (2)$$

Örneğin  $\beta^-$  bozunumu

$$\Delta E = [(M_1 - Z_1 \cdot m_e) - (M_2 - \overbrace{(Z_1 + 1)}^{Z_2} \cdot m_e) - m_e]c^2$$

$$\Delta E = [M_1 - M_2]c^2$$



$$\Delta E = [m_{\text{Sr}} + 38 \cdot m_e - m_{\text{Y}} - (38 + 1) \cdot m_e - m_e]c^2$$

$$\Delta E = [M_{\text{Sr}} - M_{\text{Y}}]c^2$$

$\beta^-$  bozunumu:  ${}^1_0n \rightarrow {}^1_1p + {}^0_{-1}e + \nu_e$

$$m_{\nu} = \frac{1}{1000} m_e \quad , \quad m_{\nu} = 2 \times 10^{-7} u$$



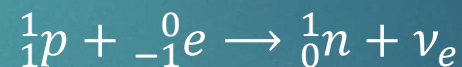
- $\beta^+$  bozunumu hariç tüm tepkimelerde elektron kütlesi iptal edilir.

$\beta^+$ , EC

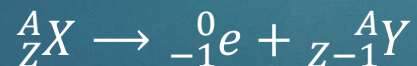
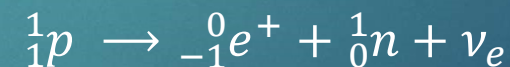
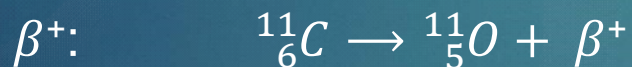
$$\Delta E = [(M_1 - Z_1 \cdot m_e) - (M_2 - (Z_1 - 1) \cdot m_e) - m_e]c^2$$

$$\Delta E = [M_{Sr} - M_Y - 2m_e]c^2$$

$M_1$  kütlesi en azından 2 elektron  $M_2$  kütesinden daha fazla ise,  $\beta^+$  bozunması meydana gelebilir.



$\Delta E = E_e + E_\nu + E_R(\text{recoil en.})$





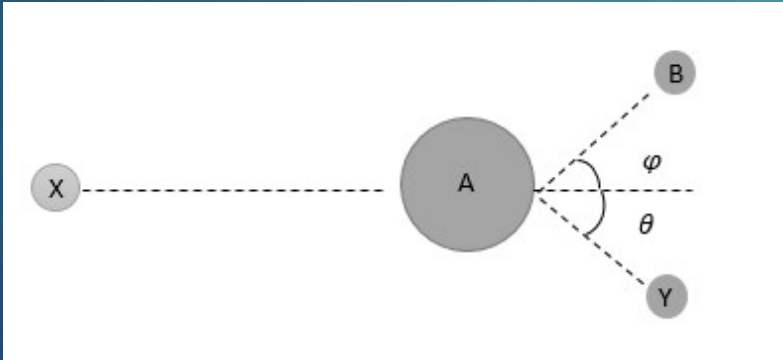
A çekirdeği durgunsa,  $E_A=0$

$$\underbrace{E_A + E_x}_{\text{İlk Kinetik Enerji}} + \underbrace{\Delta E}_{\text{Tepkime Enerjisi}} = \underbrace{E_B + E_y}_{\text{Kinetik Enerji}} + \underbrace{E_B^*}_{\text{B çekirdeğinin uyarılma enerjisi}}$$

İlk Kinetik Enerji + Tepkime Enerjisi = Kinetik Enerji + B çekirdeğinin uyarılma enerjisi

$$E_x + \Delta E = E_B + E_y + E_B^*$$

Momentum korunumunda hareket eden ürün çekirdeklerinin saçılma açıları biliniyorsa,



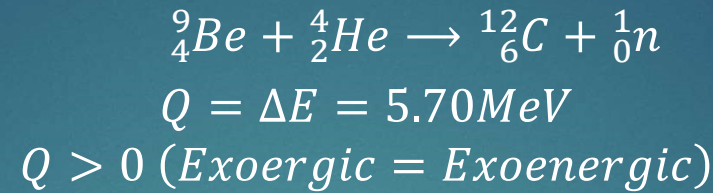
$$Q = \Delta E = E_y \left[ 1 + \frac{M_Y}{M_B} \right] - E_x \left[ 1 - \frac{M_x}{M_B} \right] \frac{2}{M_B} \sqrt{E_x E_y M_x M_y \cos \theta} + E_B$$

Nükleer tepkimelerde ürünlerin açısal dağılım gösterimi

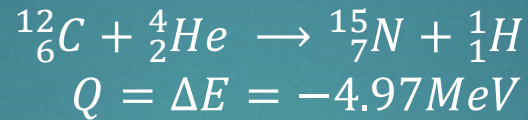


## Örnek:

Chadwick(1932)



## Soru1:



$$E_{th} = |Q| \left( 1 + \frac{m_x}{m_A} \right)$$

$$E_{th} = |-4.97| \left( 1 + \frac{4}{12} \right)$$

$E_{th} \cong 6.63\text{MeV}$  α enerjisi için doğru mu?

**Soru2:**  ${}^{27}_{13}\text{Al}(n, \gamma){}^{24}_{11}\text{Na}$  ve  ${}^{14}_7\text{N}(n, p){}^{14}_6\text{C}$  reaksiyonları endoergic/exoergic midir?

- Q değerini hesaplayınız.
- Bu iki reaksiyon için eşik enerjisini hesaplayınız.
- Coulomb bariyerini hesaplayınız.