



ANKARA ÜNİVERSİTESİ
NÜKLEER BİLİMLER ENSTİTÜSÜ

FİSYON
ETKİ İLE (INDUCED)

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

101513 - Nötron ve Reaktör Fizikine Giriş
- Prof. Dr. Haluk YÜCEL

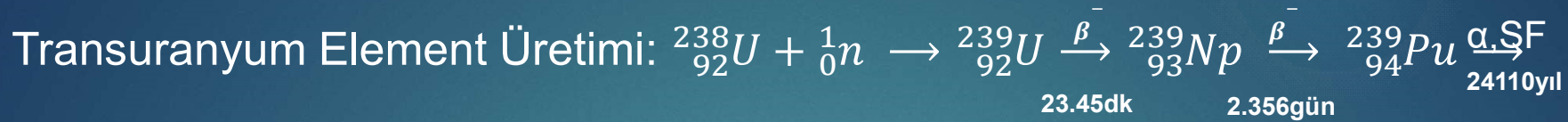
19.3.2019

FİSYON

Reaksiyon; $X(a,b)Y$ sonucunda,

- Ürün çekirdekleri b ve Y 'nin kütleleri ile karşılaştırılabilir büyüklükte ($M_b \approx M_Y$) iseler buna fisyon reaksiyonu denir. Genellikle “Fisyon” çekirdeğe yeterli enerjiyi verecek bir nötron yakalaması veya n , p , d , ... veya γ – ışınlarının bombardımanı sonucu meydana gelir.
- Kütle numarası $A > 100$ olan nüklitler parçalanma/bölünmeye (fisyon) karşı enerjetik olarak kararsızdırlar, ancak yüksek fisyon bariyeri nedeniyle fisyon yine de gözlenmez. Fakat, bu ağır kütleli nüklitlere yeterli “uyarma enerjisi” transfer edildiğinde, bu fisyon bariyerinin üstüne çıkabilir ve bu tür nüklitler fisyon yapabilirler.

- 1939 yılından Hahn ve Strassmann yaptıkları deneysel çalışmalarda uranyumu nötronlarla ışınlayarak uranyum ötesi (transuranium) elementleri (ışınlama sonucunda oluşacak ürünlerin β^- bozunumunu takiben elde edebileceklerini) üretmeyi hedeflemişlerdir.
- Ancak, transuranyum elementleri üretmek yerine nötron bombardımanı sonunda daha düşük kütleli (^{140}Ba , ^{137}Cs gibi), uranyumun parçalandığını (fisyonu) gösteren radyoaktif ürün çekirdekleri gözlediler.



- Fisyon olayı, bombardıman eden parçacıklar (projectiles), düşük enerjilerle indüklenebileceği gibi, enerjileri 10MeV'e kadar olan parçacıkları kullanarak da meydana getirilebilir.
- Enerjisi 100MeV ve daha üstü olan parçacıklarla meydana getirilebilecek “yüksek enerjili parçacık fisyonu” farklı özellikler gösterir. Düşük enerjili nötronlarla meydana getirilen fisyon:



Kısa gösterimi: $A(n, f)B$ f: fisyon

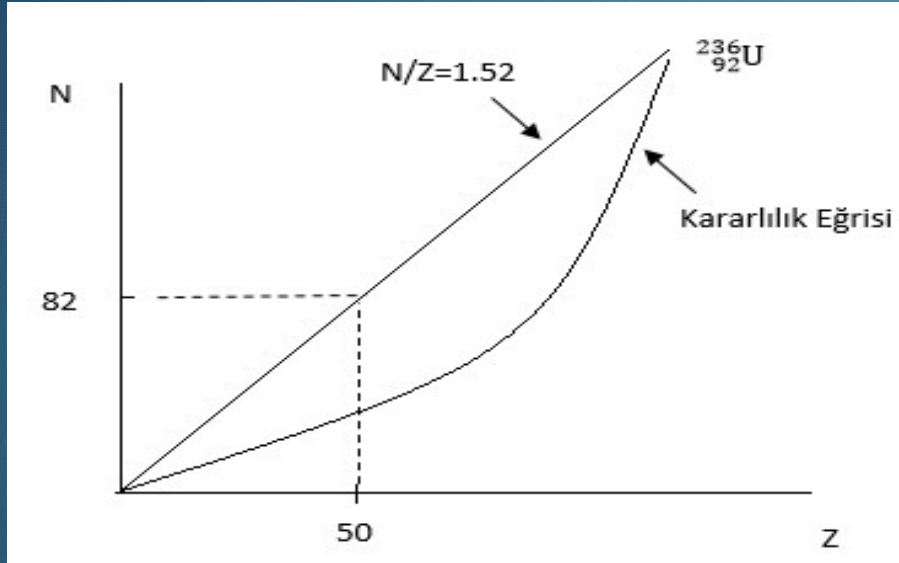
Fisyon ürünleri kütlesi; $A_1 \rightarrow A_2$

$$70 \rightarrow 160$$

$$\nu = 2 - 3$$

$$\Delta E_{fisyon} \approx 200\text{MeV}$$

- Fisyon olayında, bir “bileşik çekirdek” oluşma aşaması her zaman gerçekleşir. Bileşik çekirdek, parçalanarak birkaç tane ani(prompt) nötron emisyonuyla birlikte iki yeni parçaya bölünür. Bu termal bileşenlere “fisyon parçacıkları” denir. Fisyon parçacıklarının kütleleri ve enerjileri farklı değerler alır. Fisyon parçacıklarının “kütle dağılım” eğrisi, kabuk olgularından (shell effects) etkilenir.



Kararlılık eğrisine göre “fisyon parçacıklarının” bulunduğu bölge ($Z=50$, $N=82$) yerleşiyor. (Bu $^{236}_{92}\text{U}$ fisyonu için gösterilmiştir.)

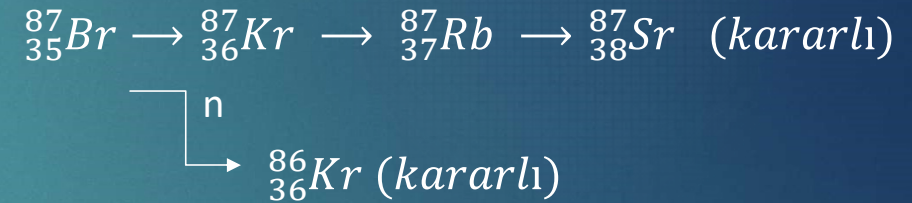
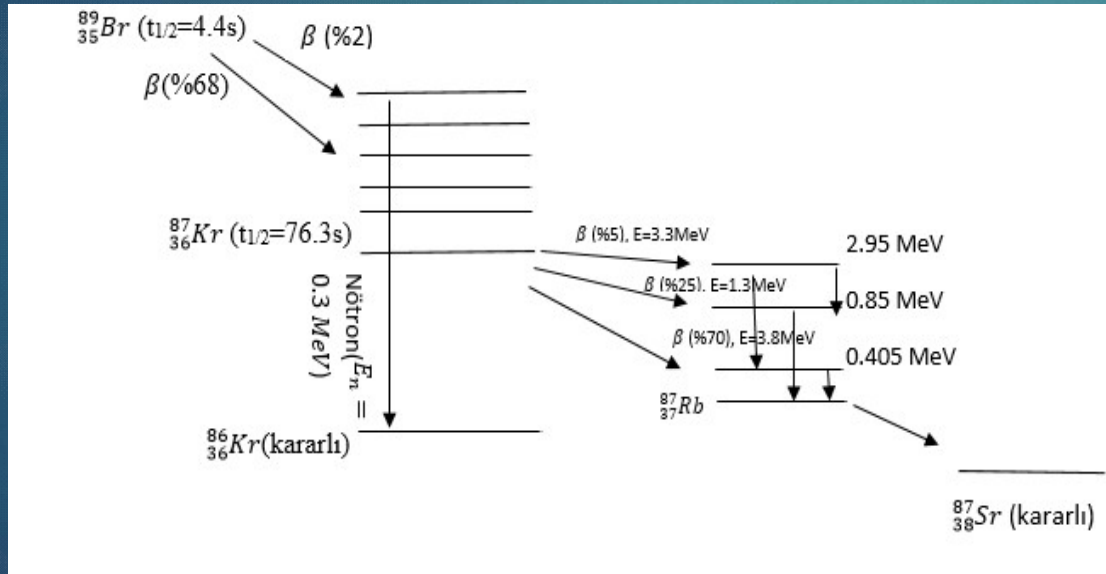
Şekilden görülüyor ki, ani fisyon parçacıkları kararlı çekirdekler değildirler. Fisyon parçacıkları nötronca zengin çekirdeklerdir. Fisyon parçacıklarının her ikisinin de N/Z oranı, sabit N/Z çizgisine çok yakındır. Bu nedenle “Ani nötron emisyonu” beklenen bir durumdur.

- Fisyon ürünleri “kararlılık eğrisi”ne doğru yaklaşacak şekilde negatif beta (β) ve gama (γ) bozunmaları yapar.
- Fisyon ürünlerinin bazı uyarılmış seviyelerinde, ki bu seviyeler çekirdeğin “nötron ayrılma enerjisi”nin üzerinde yer aldığında “gecikmiş nötron emisyonu” vuku bulur. Gecikmiş nötron emisyonunun olduğu seviyeler, üst seviyelerden β bozunumu ile desteklenir.
- Gecikmiş nötron emisyonu yapan öncüllere (precursor) örnek:
 - $^{89}_{35}\text{Br}$ ($t_{1/2}=4.4\text{s}$)
 - $^{87}_{35}\text{Br}$ ($t_{1/2}=55.6\text{s}$)
 - ^{94}Rb ($t_{1/2}=2.8\text{s}$)
 - ^{137}I ($t_{1/2}=24.5\text{s}$)
 - ^{135}Sb ($t_{1/2}=1.7\text{s}$)

$^{87}_{35}\text{Br}$ β bozunumunun %30’ u ^{87}Kr ’nin taban durumuna geçer.

$^{87}_{35}\text{Br}$ β bozunumunun %70’ u ^{87}Kr ’nin uyarılmış seviyesine geçer.

- Bu uyarılmış seviyede %2'lik β bozunmaları, ^{87}Kr çekirdeğindeki son nötronun bağlanma enerjisinin yarısından daha fazla enerjiye sahip nükleer enerji seviyesine geçiş yapar. Bunun sonucu olarak oldukça yüksek uyarılmış seviyedeki nötron $^{87}_{36}\text{Kr} \rightarrow ^{86}_{36}\text{Kr} + ^1_0n$ (delayed neutron).
- Gecikmiş nötron emisyonu, nötron sayısı $Z=50$ $N=82$ gibi sayıların hemen üzerindeki çekirdeklerden tercihi olarak yayımlanır.



Taban durumundaki hedef çekirdek

Uyarılmış durumundaki hedef çekirdek

Kırılma (saddle) noktasındaki çekirdek

Çekirdek fisyon parçacıkları (fragments) ayrılıyor

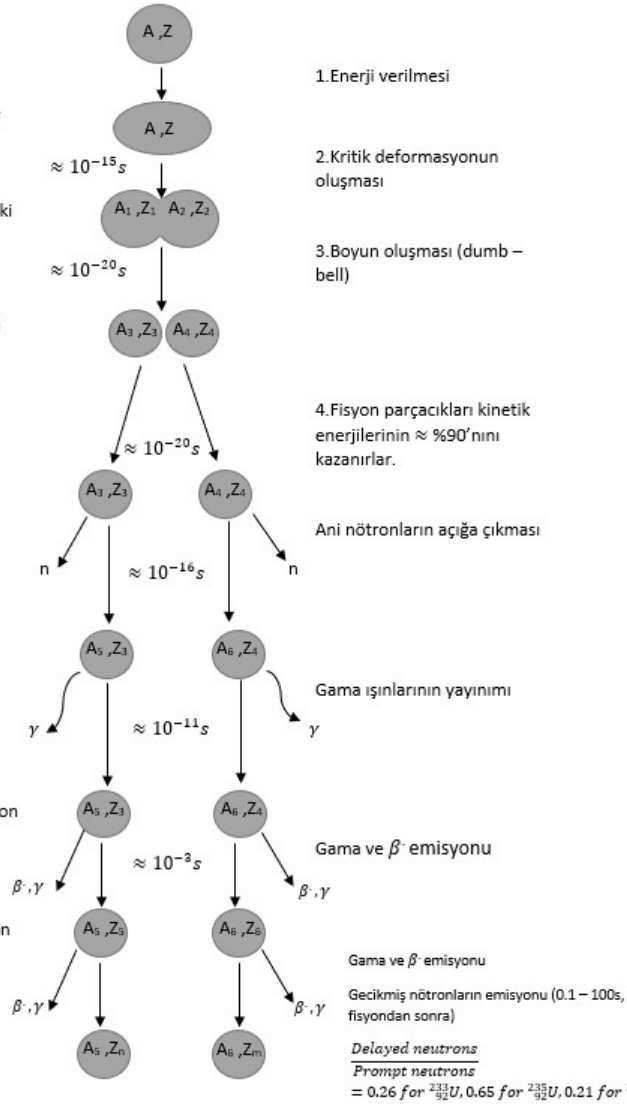
Birincil fisyon parçacıkları (fragments)

İkincil fisyon parçacıkları (fragments)

Birincil fisyon ürünleri (fission products)

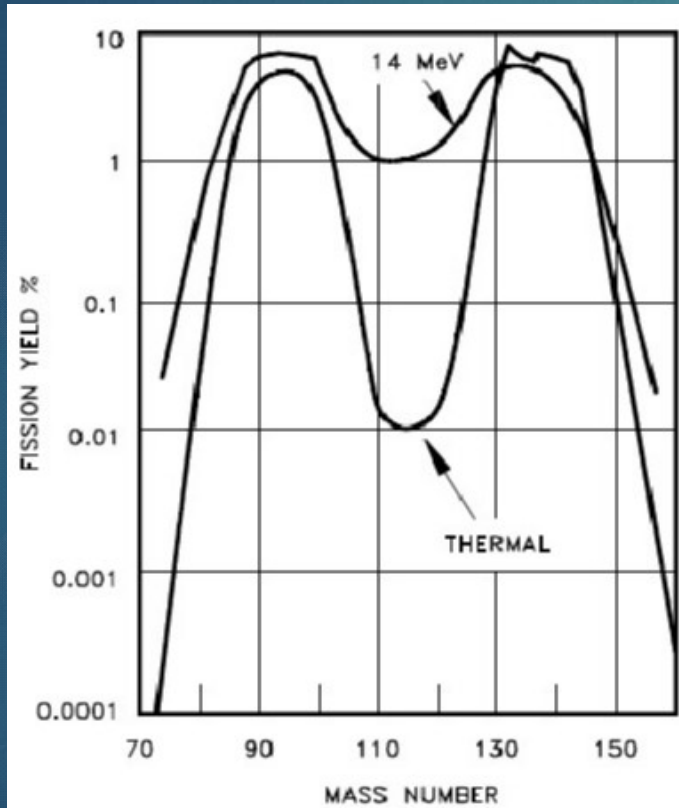
İkincil fisyon ürünleri (fission products)

Kararlı son uç ürünleri

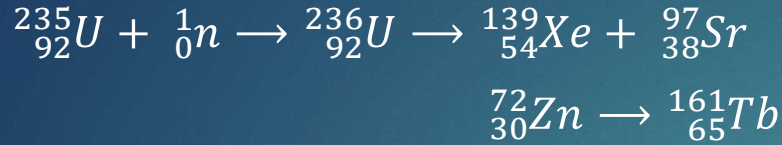


Düşük enerjili nötronlarla çekirdek fisyonunun aşamaları

- $^{236}_{92}\text{U}$ fisyonunda $N/Z=1.57$ sabit çizgisi ($Z=50$, $N=82$) sihirli çekirdeğine yakın geçtiğinden, kütle dağılım eğrisinde başlıca kütle sayısını $A=50+82=132$ olması beklenir.



Nötronlar için verim – kütle numarası grafiği



- ${}^{235}_{92}\text{U}$ 'nin termal nötronlarla fisyonunda, ${}^{72}_{30}\text{Zn}$ ile ${}^{161}_{65}\text{Tb}$ arasında fisyon ürünleri çıkar. Kütle sayısı-verim eğrisinde, $M_L=95$ ve $M_H=138$ fisyon ürünleri sıklıkla (%6.6 verimle) ortaya çıkar. Kütle ayrılmaları asimetriktir ($M_L / M_H = 1.45$). Simetrik fisyon ($M_L / M_H = 1$) oranı minimum seviyede olur. Yani iki eşit kütle fisyon parçacığının fisyon verimi yaklaşık $\%10^{-2}$ 'dir.
- Fisyon parçacıkları "Nötron fazlalığına" sahiptirler.



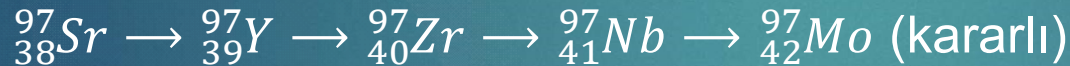
İzobarik geçişlerden sonra ${}^{139}\text{La}$ (kararlı), $\text{N/Z}=1.46$

İzobarik geçişlerden sonra ${}^{97}\text{Mo}$ (kararlı), $\text{N/Z}=1.31$

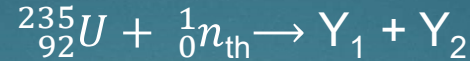
Nötron fazlalığının azaltılmasının yolları:

1. Hafif kütleli fisyon parçacıkları (örnek: ${}^{97}_{38}\text{Sr}$) daha fazla nötron fazlalığına sahip olduğundan, ani nötron emisyonu olasılığı hafif kütleli fisyon parçacıklarında daha yüksektir. ($\frac{\gamma_{hafif}}{\gamma_{ağır}} = 1.30$)

2. İzobarik β^- bozunumları:



Fisyonda Enerji Açığa Çıkması



Burada Y_1 ve Y_2 aynı N/Z oranına sahip olsun ki bu da ${}^{236}_{92}\text{U}$ 'nin N/Z=1.57 ile aynı olsun.

$$\begin{aligned} Q(\text{ani}) &= T_{Y_1} + T_{Y_2} \\ &= [M({}^{235}_{92}\text{U}) + M_n - (M_{Y_1} + M_{Y_2})]c^2 \\ &= B_{\text{tot}}(Y_1) + B_{\text{tot}}(Y_2) - B_{\text{tot}}({}^{235}_{92}\text{U}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q(\text{ani}) &= [M({}^{235}_{92}\text{U}) + M_n - (M_{{}^{139}_{54}\text{Xe}} + M_{{}^{97}_{38}\text{Sr}})]c^2 \\ &= 170 \text{ MeV} \end{aligned}$$

$$B_{\text{top}}(A, Z) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - a_a \frac{(N-Z)^2}{A} \pm \delta + n$$

$$a_v = 14, \quad a_s = 13, \quad a_c = 0.6, \quad a_a = 19, \quad \delta = \frac{34}{A^{3/4}} \quad \text{veya}$$

$$a_v = 16, \quad a_s = 18, \quad a_c = 0.72, \quad a_a = 23.5, \quad \delta = \frac{11}{A^{1/2}}$$

Paring terimi $\delta \approx \frac{1}{2}[S_n(A, Z, çiftN) - S_N(A - 1, Z, N - 1)]$

Burada bir nötronu ayırma enerjisi $S_N = [M(A - 1, Z) + M_n - M(A, Z)]c^2$

$$B_{top}({}^{139}_{54}Xe) = 16x139 - 18x139^{\frac{2}{3}} - 0.72 \frac{54(54 - 1)}{139^{\frac{1}{3}}} - 23.5 \frac{(85 - 54)^2}{139} + 0$$
$$= 1336.30$$

$$B.E({}^{139}_{54}Xe) = [(54M_H + (A - Z)M_n - M(A, Z)]c^2$$

$$B.E({}^{139}_{54}Xe) = [(54x7825 + 85x8665 - 82.16]x931.475x10^{-6}$$

- Ani(prompt) değeri ilk fisyon parçacıklarından (${}^{139}_{54}Xe$, ${}^{97}_{38}Sr$) hesaplanır.
- Toplam enerji ise son fisyon ürünleri (ki beta enerjilerini, γ enerjilerini, nötron enerjilerini ve ν enerjilerini kapsar.)

$$Q(Toplam) = B_{top}(Y'_1) + B_{top}(Y'_2) - B_{top}({}^{235}_{92}U)$$

- Fisyondaki Ortalama Enerji ($^{235}_{92}\text{U}$ fisyonu için):

1) Fisyon ürünlerinin kinetik enerjisi (fragments $A_L=95$ ve $A_H=95$)	165±5 MeV
2) Prompt(Ani) ve Gecikmiş (delayed) nötronların kinetik enerjisi (2-3 nötron)	5 MeV
3) Ani gamaların enerjisi (≈ 5 γ - ışını)	6 MeV
4) Fisyon ürünlerinin β - bozunmalarının enerjisi (≈ 7 β ışını)	8±1.5 MeV
5) Fisyon ürünlerinin γ - bozunum enerjisi (gecikmiş gamalar)	6±1 MeV
6) Antinötrinoların enerjisi	12±2.5 MeV
Toplam Açığa Çıkan Enerji; Q (overall)	204±7 MeV

- Hafif kütleli fisyon parçacıklarının kinetik enerjisi daha yüksektir.

$$E_{kin}(\text{hafif}) = 105 \text{ MeV}$$

$$E_{kin}(\text{ağır}) = 70 \text{ MeV}$$

+

$$175 \text{ MeV}$$

$$m_L V_L = m_H V_H$$

$$E_{kin}(\text{top}) = \frac{1}{2} m_L V_L^2 + \frac{1}{2} m_H V_H^2$$

$$= E_L + \frac{1}{2m_H} m_H m_L V_L^2$$

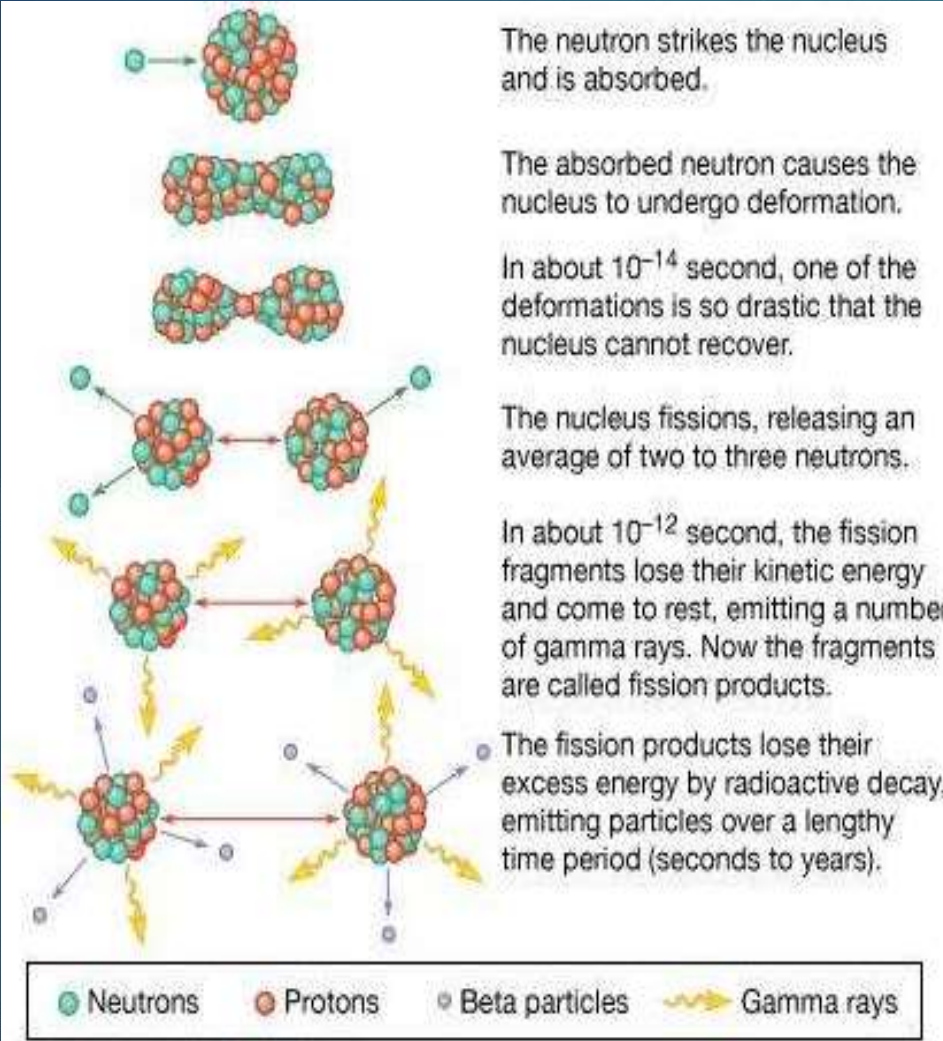
$$= E_L + E_L \left(\frac{m_L}{m_H} \right)$$

$$E_{kin}(\text{top}) = E_L \left(\frac{A_L + A_H}{A_H} \right)$$

$$175 \text{ MeV} = E_L \left(\frac{140 + 9}{140} \right)$$

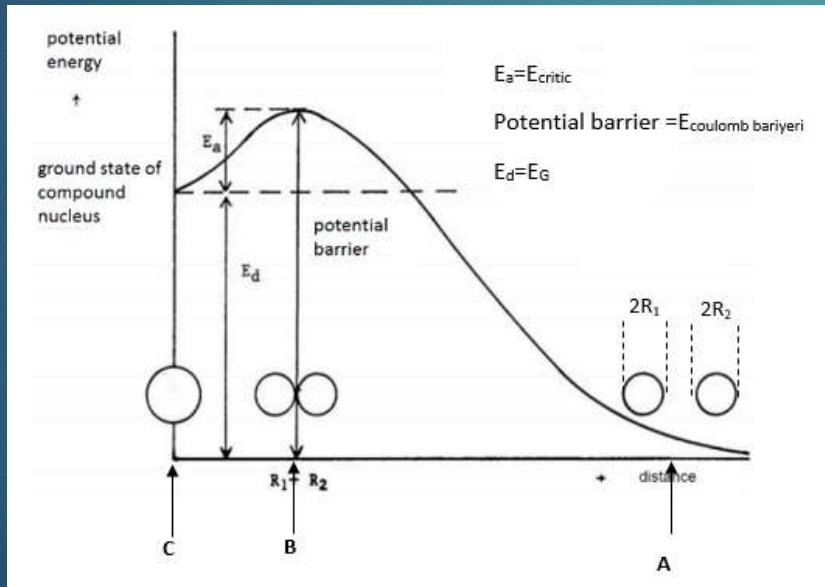
$$E_L = \left(\frac{140}{235} \right) \times E_{kin}(\text{top}) \cong 105 \text{ MeV}$$

$$E_H = \left(\frac{m_L}{m_{Top}} \right) \times E_{kin}(\text{top})$$



Bir nötron tarafından, uranyum çekirdeğinin fisyonundaki olayların dizisi

- Konvansiyonel nükleer reaktörlerde (LWR) niçin ^{235}U izotopu içeren uranyum yakıt olarak kullanılır da ^{238}U kullanılmaz? (Ağır su reaktörleri hariç!)
- Bunun nedeni; nötronun herhangi bir enerjisi ($>0.025\text{eV}$), ^{235}U çekirdeğini “taban durumu enerji” seviyesinden daha yukarıda bir enerji seviyesi olan fisyon bariyeri (coulomb potansiyel bariyer) üzerine yükseltir, dolayısıyla fisyon meydana gelir.



$$E_{coul} = 1.03x \frac{Z.z}{A^{1/3} + a^{1/3}}$$



$$E_G = \Delta m. c^2$$

$$235.0439 + 1.008665 - 236.0457 = 0.006885 \times 931.5$$

$$\approx 6.4\text{MeV}$$

$$E_G = 40.921 + 8.07 - 42.446 = 6.546\text{MeV}$$

- Elektriksel yükleri Z_1 ve Z_2 olan iki fisyon parçacığının (fragment) karşılıklı itmesinden kaynaklanan Coulomb enerjisi, bu iki parçacığın arasındaki mesafe ile ters orantılı olduğundan Coulomb enerjisi, $E_c = \frac{Z_1 Z_2 c^2}{r} = \frac{Z^2 e^2}{r}$ (simetrik fisyon için $Z_1=Z_2=Z$) olur.
- Ve bu durum şekil üzerinde A noktası ile gösterilmiştir. Olayı tersine doğru götürürsek, iki fisyon parçacığının dokunma noktasında (B- noktası), coulomb enerjisi, $r = R_1 + R_2$ olduğundan maksimum olacaktır. C- noktasında ise fisyonu uğrayacak çekirdek, taban durumu konfigürasyonuna sahiptir. Gösterimsel olarak orijinal çekirdek E_G potansiyel kuyusundan tepenin zirvesine enerji olarak yükseltilir ve oradan yuvarlanır ve aşağıda iki parçaya bölünür. Bu işin yapılması için gerekli enerjiye $E_{kritik} = E_{coul} - E_G$, burada, $E_G[M(A, Z) - M(A_1, Z_1) - M(A_2, Z_2)]c^2$

Nüklit	Fisyon Bariyeri (MeV)	Kritik Enerji	Uyarma Enerjisi	İlave bir nötronun bağlanma enerjisi	Fisyon tesir kesiti $\sigma_{n,f}$	$x = \frac{Z^2}{A}$
(fertil) ${}^{232}_{90}\text{Th} + {}^1_0n = {}^{233}_{90}\text{Th}$	7.5	6.5>	5.1	5.4	4×10^{-5}	34.4
(fissil) ${}^{233}_{92}\text{U} + {}^1_0n = {}^{234}_{92}\text{U}$	6.0	4.6<	6.6	7.0	531	36.4
(fissil) ${}^{235}_{92}\text{U} + {}^1_0n = {}^{236}_{92}\text{U}$	6.5	5.3<	6.4	6.8	582	36.0
(fertil) ${}^{238}_{92}\text{U} + {}^1_0n = {}^{239}_{92}\text{U}$	7.0	5.5>	4.9	5.5	$< 5 \times 10^{-4}$	35.4
(fissil) ${}^{239}_{94}\text{Pu} + {}^1_0n = {}^{240}_{94}\text{Pu}$	5.0	4.0<	6.4	6.6	743	37.0

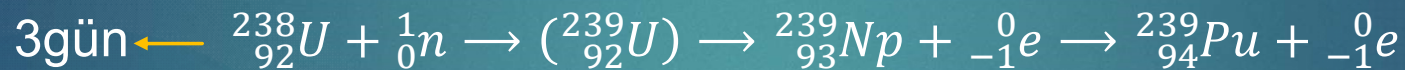
- ^{238}U çekirdeğini fisyonla parçalayabilmek için en azından 1 MeV enerjili nötron ilave etmek gerekir. Bu nedenle, termal reaktörlerde yakıt içindeki ^{238}U 'in neden olduğu fisyon sayısının toplam fisyon sayısına katkısı %2 mertebesindedir. Bu iki uranyum izotopunun farkı nötronu yutarak bileşik çekirdeğin tek – çift olma karakterine bağlıdır.



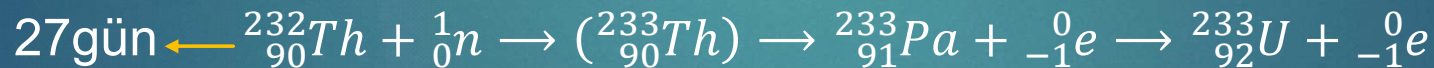
- Çünkü çift – çift bileşik çekirdek (${}^{236}_{92}\text{U}$, ${}^{234}_{92}\text{U}$), sıvı damlası modeline göre spin etkisi terimi (parite), $\delta(A, Z)$ pozitif (+) değeri alırken,
- Tek – çift bileşik çekirdek ${}^{239}_{92}\text{U}$ $\delta(A, Z) = 0$ değerini alır. Spin terimi $A=\text{çift}$, $Z=\text{tek}$ için çekirdek dışardan bombardımanla çekirdeği uyarmak için daha fazla enerjiye gereksinim duyulur. Bu nedenle, reaktörlerde fisyon malzemeleri; ^{233}U , ^{235}U ve ^{239}Pu iyi bir nükleer yakıt malzemesidir. Çünkü fisyonu indüklemek için düşük enerjili nötronlar yeterlidir.

- $\frac{Z^2}{A}$ oranı > 35.5' den büyük ise çekirdek daha kolay fisyonu uğrayabilir.
- ^{238}U ve ^{232}Th fertile malzemeler için daha yüksek enerjili nötronlar gerekir.

- ^{239}Pu



- ^{233}U



- Termal reaktörler, bu izotopları üretmek için “converter” olarak kullanılır.