



ANKARA ÜNİVERSİTESİ
NÜKLEER BİLİMLER ENSTİTÜSÜ

FİSYON
ETKİ İLE (INDUCED) - DEVAMI

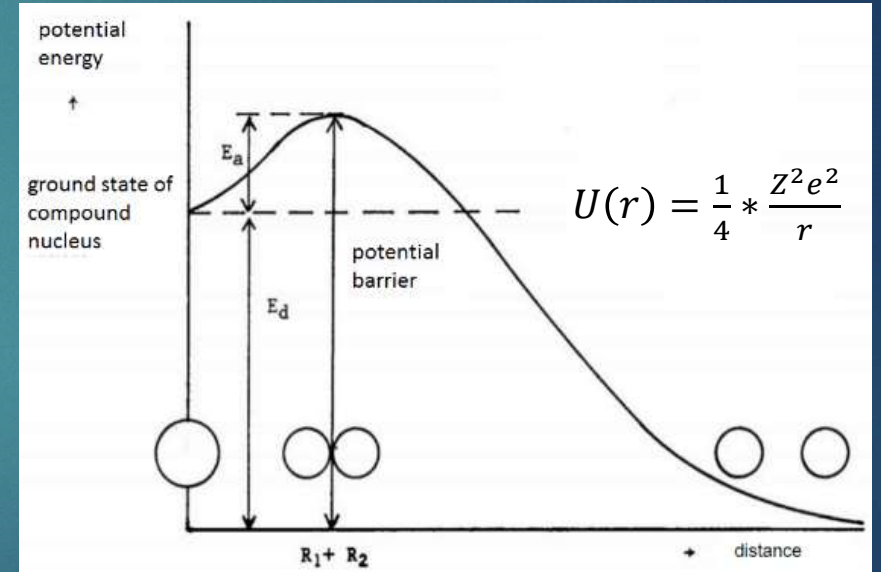
101513
NÖTRON VE REAKTÖR FİZİĞİNE GİRİŞ
PROF. DR. HALUK YÜCEL

Fisyon Olayının Ayrıntıları

- Eğer $\frac{A}{Z}X$ çekirdeği $\frac{A/2}{Z/2}Y$, $\frac{A/2}{Z/2}Y$ gibi eşit iki parçacığa ayrılırsa buna “Simetrik Fisyon” denir.

Fisyon Engeli (Barrier)

- Varsayalım ki iki tane küresel çekirdek ki her biri $(A/2, Z/2)$ kütle ve atom numaralarına sahip olsun. Bu iki çekirdeği bir araya getirelim. Şekilde “Potansiyel Enerji Diyagramı” solunda iki tane simetrik fisyon parçacığı görülmektedir. 1 durumunda çekirdek kendiliğinden fisyon (spontaneous) ile aniden bozunacak, 2 durumunda fisyon meydana getirmek için belirli bir aktivasyon enerjisi (E_{ex} ya da E_a) vermek gerekecektir.



- Küresel çekirdekler arasındaki potansiyel enerji, $U(r) = \frac{1}{4} * \frac{Z^2 e^2}{r}$, dır. Burada, r küre merkezleri arasındaki mesafedir. Küresel çekirdekler dokunduğu zaman nükleer kuvvetlerin etkisi ve osilasyon başlar. Nükleer kuvvetler deformasyonu yenmeye, tersine çevirmeye çalışırken, çekirdek küresel şekilde kaldığı zaman potansiyel enerji azalmaz. Sistemdeki eksitasyon enerjisi yeteri kadar yüksekse, çekirdek ortadan ayrılma eğilimindedir. Coulomb etkileri iki ucu birbirinden iter.

- Ani Enerji Salıvermesi $Q(\text{prompt}) = \text{Fisyon Bariyer Yüksekliği}$

$${}^{235}_{92}\text{U} \quad E_{ex} = 6 \text{ MeV} \quad Q(\text{prompt}) = E_{fission \text{ barier}}$$

$${}^{238}_{92}\text{U} \quad E_{ex} = 5 \text{ MeV} \quad E_{ex}({}^{238}_{92}\text{U}) < E_{ex}({}^{235}_{92}\text{U})$$

- ${}^{235}_{92}\text{U}$ ile ${}^{238}_{92}\text{U}$ çekirdeklerindeki nötron bağlanma enerjilerindeki farka, δ – çiftlenim enerjisi neden olur. Bu nedenle çift – çift çekirdeklerin fisyonu için bir “fisyon eşik enerjisi” gerekirken, çoğu tek – A çekirdeklerde fisyon olayı termal enerjili nötronlarla gerçekleşir.

$$\delta \approx \frac{1}{2} [S_n(A, Z, \text{çift}N) - S_n(A - 1, Z, N - 1)]$$

$$S_n = [M(A - 1, Z) + M_n - M(A, Z)]c^2$$

- $^{235}_{92}\text{U}$ son nötron B. Enerjisi

$$S_n = [M(^{234}_{92}\text{U}) + M_n - M(^{235}_{92}\text{U})]c^2$$

$$S_n = [M(^{234}_{92}\text{U}) + M_n - M(^{235}_{92}\text{U})]c^2$$

$$S_n = 5.29 \text{ MeV}$$

- $^{238}_{92}\text{U}$ son nötron B. Enerjisi

$$S_n = [M(^{237}_{92}\text{U}) + M_n - M(^{238}_{92}\text{U})]c^2$$

$$S_n = 45.3919 \text{ MeV} + 8.07 \text{ MeV} - 47.3089 \text{ MeV}$$

$$S_n = 6.15 \text{ MeV}$$

$$\delta \approx \frac{1}{2} [S_n(238,92,146) - S_n(237,92,145)]$$

$$\delta \approx \frac{1}{2} [S_n(^{238}_{92}\text{U}) - S_n(^{237}_{92}\text{U})]$$

- $^{236}_{92}\text{U}^*$ ve $^{239}_{92}\text{U}^*$ son nötron B.E :



$$S_N = [M(^{235}_{92}\text{U}) + M_n - M(^{236}_{92}\text{U})]c^2$$

$$S_N = 40.9205\text{MeV} + 8.07\text{MeV} - 42.4463\text{MeV} = 6.54\text{ MeV}$$



$$S_N = [M(^{238}_{92}\text{U}) + M_n - M(^{239}_{92}\text{U})]c^2$$

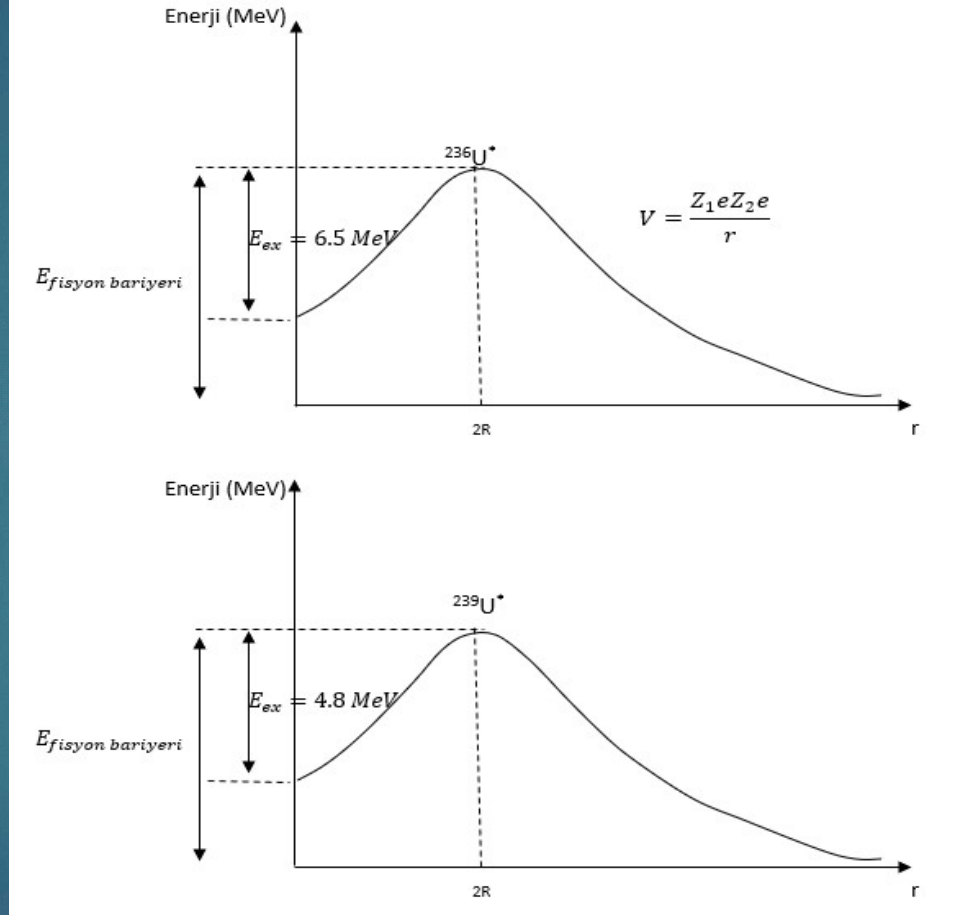
$$S_N = 47.3089\text{MeV} + 8.07\text{MeV} - 50.5739\text{MeV} = 4.80\text{ MeV}$$

Son nötronun B.E $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow E_n = 6.54\text{ MeV}$ çift – çift

Son nötronun B.E $^{238}_{92}\text{U} \rightarrow E_n = 4.80\text{ MeV}$ çift – tek

- $E_n(^{238}_{92}\text{U}) < E_n(^{235}_{92}\text{U})$, olması nedeniyle $^{235}_{92}\text{U}$ fisyonu termal, $^{238}_{92}\text{U}$ fisyonu ise hızlı nötronlarla gerçekleşir.

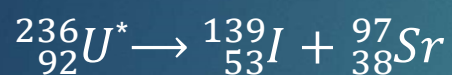
- Yavaş nötron eksitasyon enerjisi,



$\frac{A_1}{Z_1}Y, \frac{A_2}{Z_2}Y$ iki küresel dokunmuş durumdayken;

$$\text{Coulomb Enerji } U_c = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{R_1 + R_2}$$

$$r_0 = 1.5 \text{ fm alınır}; U_c = \frac{Z_1 Z_2}{A_1^{1/3} + A_2^{1/3}} \text{ MeV}$$



$$U_c = 0.96 \frac{53 \times 38}{139^{1/3} + 97^{1/3}} = 197.8 \text{ MeV}$$

Birincil fisyon ürünleri

$$S_N = [M({}_{92}^{236}\text{U}) - M({}_{53}^{139}\text{I}) - M({}_{38}^{97}\text{Sr})]c^2$$

$$S_N = 42.4463 \text{ MeV} + 68.7881 \text{ MeV} + 68.8379 \text{ MeV} = 180.07 \text{ MeV}$$

$$E_A = E_{Ex} = 4\pi R^2 s f(x)$$

Activation Energy = Excitation Energy

=Height of Barrier

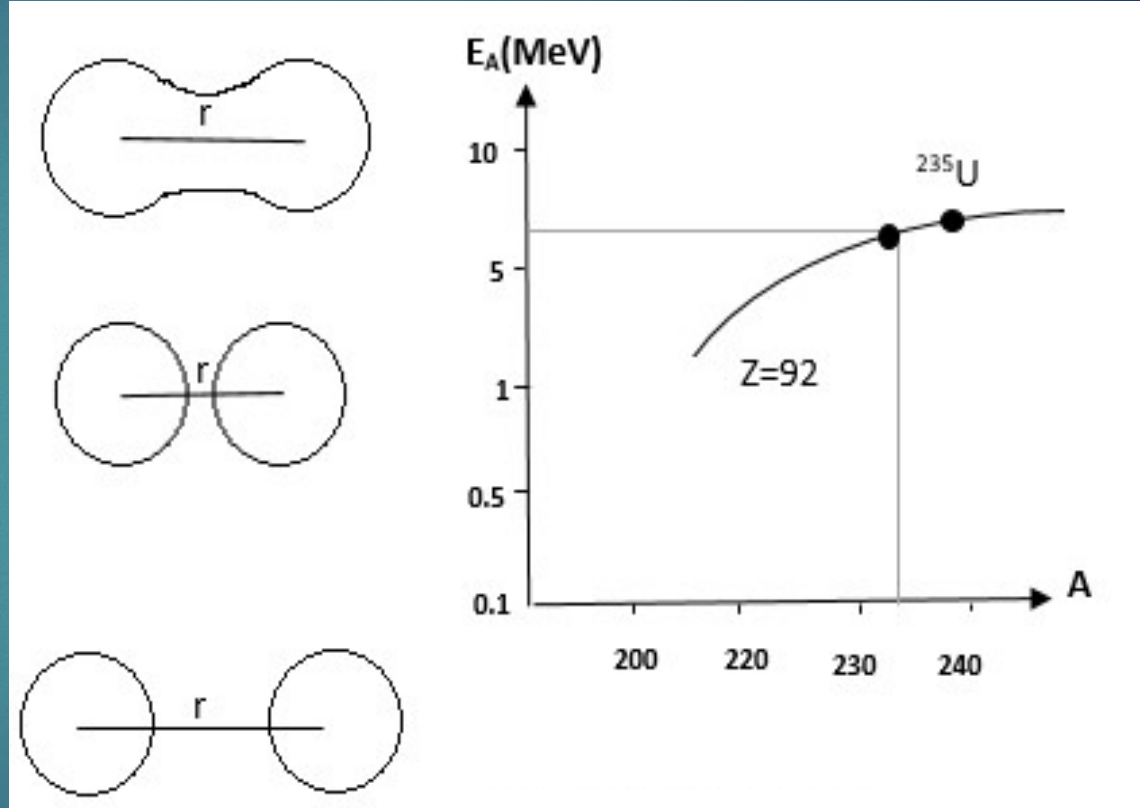
s = yüzey gerilimi

$$x = \frac{\frac{Z^2}{A}}{\left(\frac{Z^2}{A}\right)_{\text{kritik}}}, \left(\frac{Z^2}{A}\right)_{\text{kritik}} = 47.8$$

Bölge I: Bozulma
(Distortion)

Bölge II: Ayrılma, fakat artık
(residual) nükleer kuvvetler var

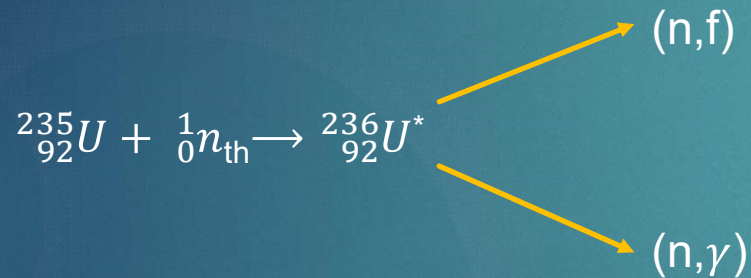
Bölge III: Tamamen ayrılma,
sadece coulomb kuvveti etkili.



$$^{236}_{92}\text{U} \text{ için } E_A = 6.4 \text{ MeV}$$

$$^{239}_{92}\text{U} \text{ için } E_A = 4.8 + 1.4 = 6.2 \text{ MeV}$$

- $^{236}_{92}\text{U}$ için aktivasyon enerjisi 6.4 MeV değeri, $^{236}_{92}\text{U}$ 'nin son nötronun bağlanma enerjisi $E_n \cong 6.46$ değerine çok yakındır. Dolayısıyla $^{235}_{92}\text{U}$ çekirdeği termal bir nötron yakalarsa yaklaşık 6.4 MeV civarında uyarılmış bir seviye elde edilir. Bu uyarılmış seviyeden taban seviyeye gama emisyonu (n,γ) veya fisyon ile bozunma meydana gelir.



Yani her 7 çekirdekten 1 tanesi γ yayınlr, 6 tanesi fisyon yapar.

Uyarma enerjisi; E_{exc}

T_n kinetik enerjili bir nötron çekirdek tarafından soğurulursa, oluşan bileşik çekirdeğin uyarma enerjisi, E_{exc} .

$$E_{exc} = B_n + \frac{A}{A+1} \cdot T_n$$

Örneğin, ${}^{235}_{92}\text{U} + {}^1_0\text{n} \rightarrow ({}^{236}_{92}\text{U})$

${}^{236}_{92}\text{U}$ için $E_{exc} \geq E_{kritik}$ olursa;

$$B_n + \frac{A}{A+1} \cdot T_n \geq E_{kritik}$$

Burada, $E_{kritik} = E_{coul} - E_G$

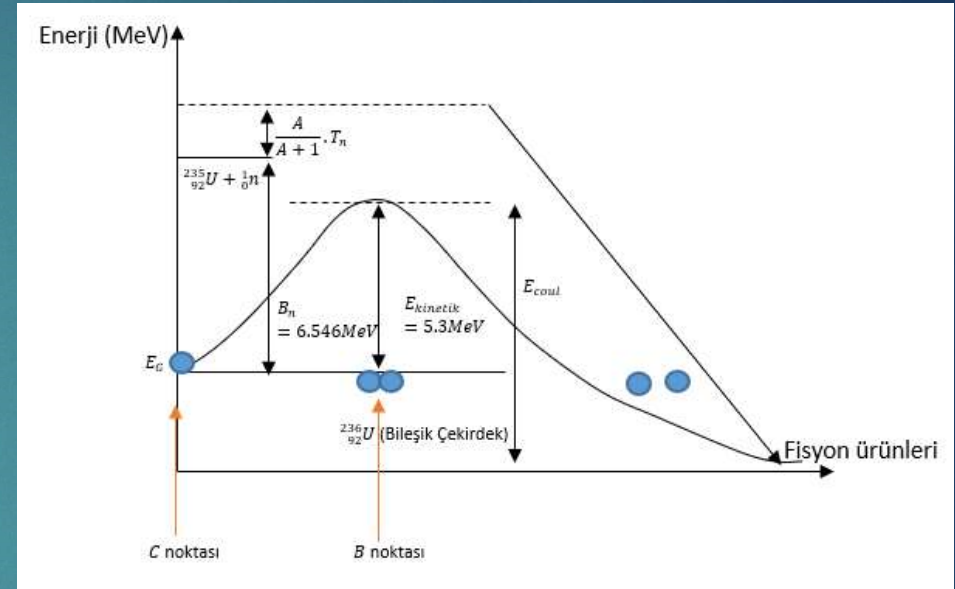
${}^{236}_{92}\text{U}$ için $B_n = M(A-1, Z) + M_n - M(A, Z)$

$$= {}^{235}_{92}\text{U} + {}^1_0\text{n} - ({}^{236}_{92}\text{U})$$

$$= [40.921 + 8.071 - 42.446] = 6.546\text{MeV}$$

$$B_n + \frac{A}{A+1} \cdot T_n \geq E_{kritik}$$

$$6.546 + \frac{235}{235+1} \cdot 0.025 \times 10^{-6} \geq 5.3\text{MeV}$$



${}^{238}_{92}\text{U} + {}^1_0\text{n}$ Fisyon meydana gelmesi için nötronun kinetik enerjisi ne olmalıdır?
($E_{kritisik} = 5.5 \text{ MeV}$)

$$\begin{aligned} \text{Son nötronun bağlanma enerjisi } B_n &= M({}^{238}_{92}\text{U}) + M_n - M({}^{239}_{92}\text{U}) \\ &= [47.309 + 8.071 - 50.574] = 4.81 \text{ MeV} \\ T_n &\geq \frac{A+1}{A} (E_{kritisik} - B_n) = \frac{239}{238} (5.5 - 4.81) = 0.69 \text{ MeV} \end{aligned}$$

Fisyonda açığa çıkan enerji $\Delta E \approx 200 \text{ MeV}$ gibi çok yüksek değerdedir çünkü, ağır kütleli çekirdekler için $\frac{BE}{A}$ enerjisi, fisyon ürünleri için $\frac{BE}{A}$ enerjisinden daha düşüktür.

Ağır kütleli ${}^{235}_{92}\text{U}$, ${}^{233}_{92}\text{U}$, ${}^{239}_{94}\text{Pu}$ ve ${}^{241}_{94}\text{Pu}$ çift – tek ($N=143$, $Z=92$) çekirdeklerde ilave edilen bir nötronun bağlanma enerjisi özellikle yüksektir ve fisyon bariyeri kolayca aşılabılır. Bu nedenle bu çekirdeklerin termal nötronlar için yüksek fisyon tesir kesitlerine ($\sigma_{n,f}$) sahiptirler. Fisyon tesir kesitleri $\sigma_{n,f}$ nötronların enerjilerine sıkı bir şekilde bağımlıdır.

Termal nötronlar (0.025eV) fisyon tesir kesitleri ($\sigma_{n,f}$) ve fisyonda açığa çıkan ortalama nötron sayısı ($\bar{\nu}$)

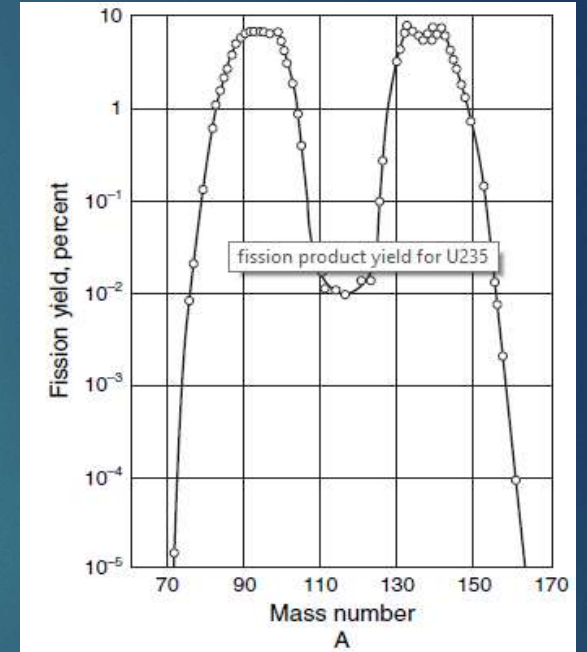
Nüklit	$\sigma_{n,f}$ (barn)	$\bar{\nu}$	Nüklit	$\sigma_{n,f}$ (barn)	$\bar{\nu}$	Nüklit	$\sigma_{n,f}$ (barn)	$\bar{\nu}$
Th-227	≈ 200	-	Np-234	≈ 900	-	Cm-242	≈ 5	2.65 ∓ 0.09
Th-228	< 0.3	-	Np-236	2600	-	Cm-243	620	-
Th-229	30	-	Np-237	0.020	-	Cm-244	1.1	3.43 ∓ 0.05
Th-230	≤ 0.0005	2.08 ∓ 0.02	Np-238	2100	-	Cm-245	2100	-
Th-232	3.3×10^{-6}	-	Np-239	< 1	-	Cm-246	0.16	3.83 ∓ 0.03
Th-233	15	-				Cm-247	82	-
Th-234	< 0.01	-				Cm-248	0.38	-
						Cm-249	1.6	-
Pu-230	1500	-	Pu-236	160	2.30 ∓ 0.19	Bk-250	1000	-
Pu-231	< 0.020	-	Pu-237	2300	-			
Pu-232	≈ 700	-	*Pu-238	17	2.33 ∓ 0.08	Cf-249	1700	-
Pu-233	< 0.1	-	*Pu-239	752	2.874 ∓ 0.138	Cf-250	< 350	-
Pu-234	< 5000	-	Pu-240	≈ 0.044	2.884 ∓ 0.007	Cf-251	4500	-
Pu-234m	< 500	-	*Pu-241	1010	2.969 ∓ 0.023	Cf-252	32	3.86 ∓ 0.07
			Pu-242	< 0.2	2.91 ∓ 0.2	Cf-253	1300	-
			Pu-243	200	-			
U-230	≈ 25	-	Am-241	-	-	Es-254	2000	-
U-231	250	-	Am-242	-	-	Es-254m	180	-
U-232	74	-	Am-242m	-	-			
*U-233	530	3.15 ∓ 0.06	Am-243	-	-	Fm-255	3300	-
*U-235	586	2.432 ∓ 0.066	Am-244	-	-	Fm-257	2900	-
U-238	3×10^{-6}	-	Am-244m	-	-			
U-239	15	-						

- Termal nötronlarla indüklenen fisyonunda, nötron bağlanma enerjisi ($\approx 6\text{MeV}$), çekirdeği uyarır ve osilasyon başlar, çekirdekdeki deformasyon kritik durumu aşarsa çekirdekteki ağır kütleli fisyon parçacığına (fragments) ayrılırlar. Birincil fisyon ürünleri (primary fission products) 10^{-11}s zaman sürecinde oluşurlar, ani (prompt) nötronlar serbest kalır. Birbirini takip eden seri $-\beta$ bozunumları sonucunda fisyon parçacıkları transmutasyona uğrarlar ve bu esnada γ – ışınları da yayımlarlar. Fisyonunda, nötron yakalandıktan sonra, 10^{-1} s içinde çekirdekteki kritik deformasyona ulaşılır. Fisyon çok hızlı vuku bulur.
- ^{235}U 'in termal nötronlarla fisyonunda elde edilen fisyon nötronlarının veriminde, düşük kütleli $A_L(90 - 100)$ ve ağır kütleli $A_H(133 - 143)$ iki tane maksimum meydana gelir. Bu maksimumlarda %6 fisyon verimi meydana gelirken, simetrik fisyonlarda %0.01'dir.

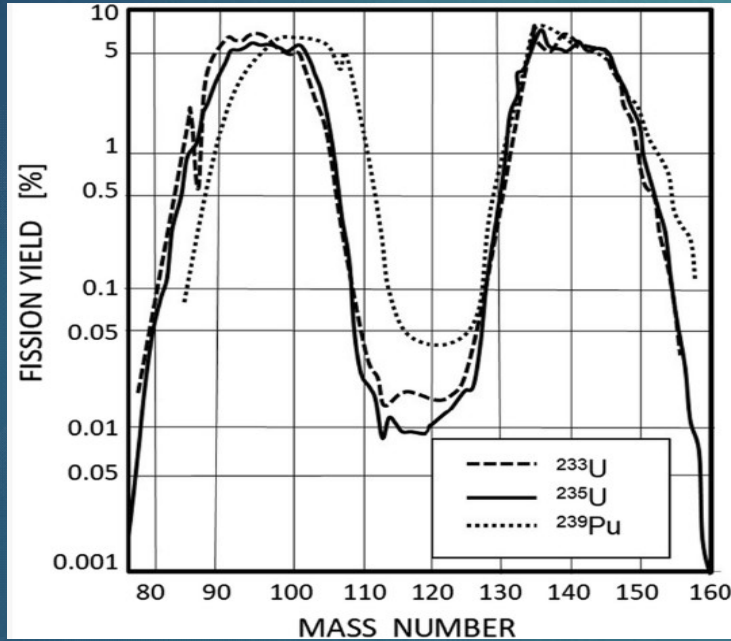
$$A_L(\text{maximum})@100=A$$

$$A_H(\text{maximum})@134=A$$

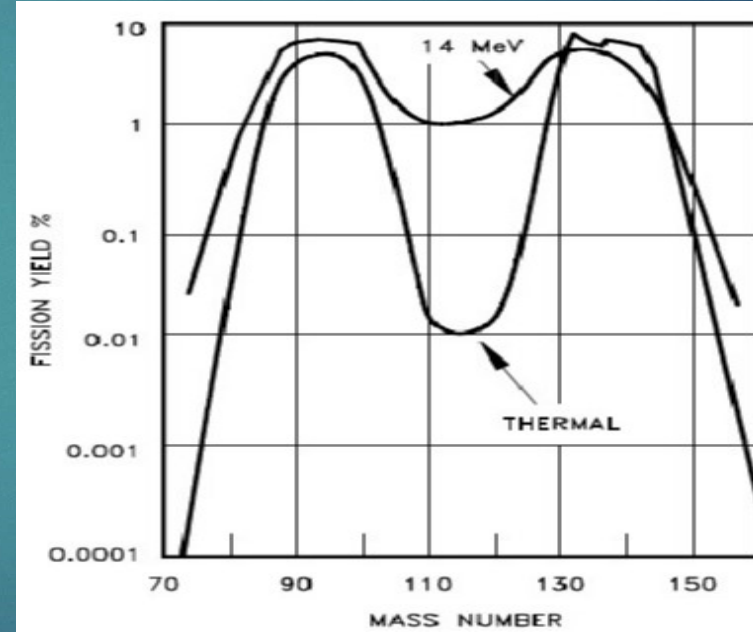
Fisyon verimlerinin toplamı %200'dür. Çünkü fisyonunda iki parça fisyon ürünü açığa çıkar.



- ^{233}U ve ^{239}U 'un termal nötron fisyonu ^{235}U 'unkine benzer, ancak maksimumlar soldan sağa doğru kayar. Bu sağa doğru kayma eğilimi fisyon yapan çekirdeğin kütlesi arttıkça devam eder. Örneğin, ^{258}Fm 'un termal nötron fisyonunda bu iki maksimumdan biri diğerinin üstüne biner.

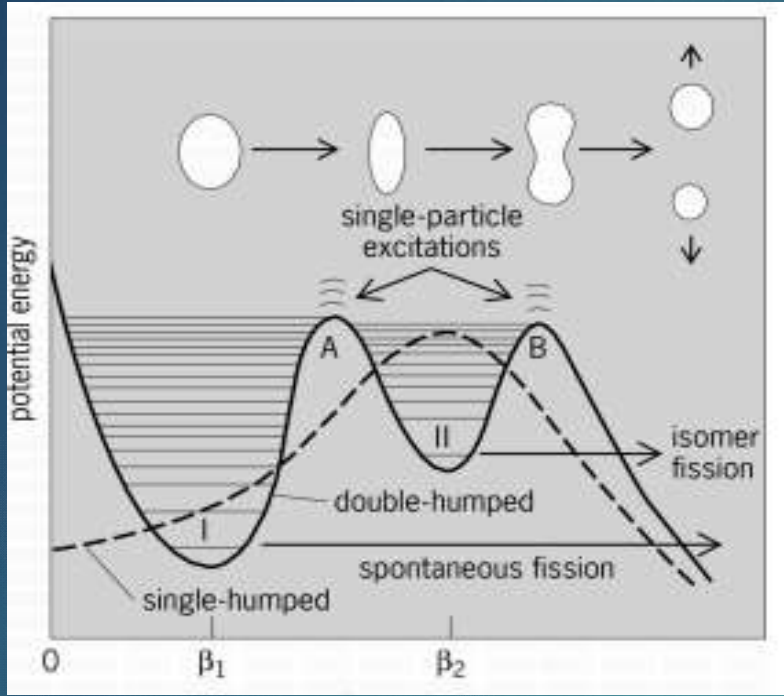


^{233}U , ^{235}U ve ^{239}Pu kütle dağılım eğrisi



Kütle numarası – fisyon verimi grafiği

Simetrik fisyon olasılığı ↑



Potansiyel enerji - deformasyon diyagramı

Th'dan Cf elementine gelindiğinde, fisyon bariyeri A'nın yüksekliği artan Z ile değişmez, hemen hemen sabit kalır. Halbuki fisyon bariyeri B'nin yüksekliği $\sim 6MeV$ 'den $\sim 4MeV$ 'e kadar azalabilir. Bu yüzden, $Z > 92$ nüklitlerin izomerik durumları şiddetli olarak şiddetli olarak deforme olur ve A ile B bariyerleri arasındaki vadideki izomerik durumlar kolayca B – fisyon bariyerini aşabilirler. Fisyonda serbest kalan ΔE toplam enerji, birincil fisyon parçacıklarının kinetik enerjisi ve uyarılma enerjisi olarak açığa çıkar.

$$\Delta E = E_{kinetik} + E_{exc}$$

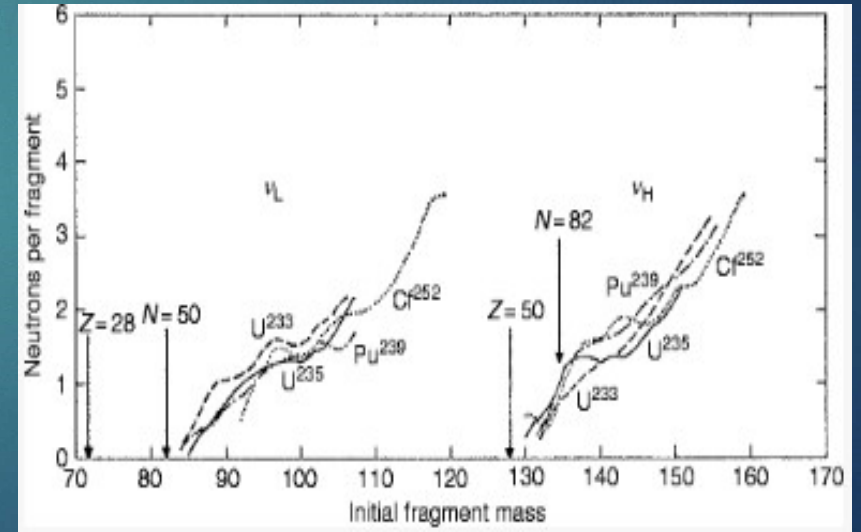
ΔE 'nin büyük kısmını $E_{kinetik}$, fisyon parçacıklarının kinetik enerjisi oluşturur. Düşük enerjili nötron etkisiyle oluşan fisyonunda açığa çıkan kinetik enerji:

$$E_{kinetik} \sim \frac{Z^2}{A^{1/3}}$$

İki özdeş ($Z/2$) fisyon parçacığının Coulomb enerjisi (r_1+r_2) yarıçaplarının toplamı bir mesafede;

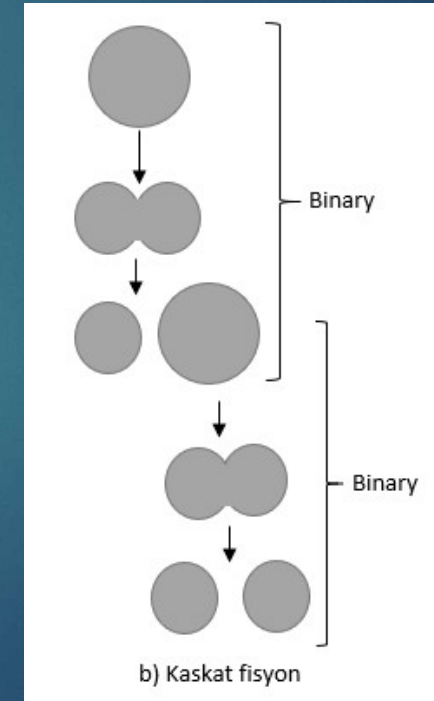
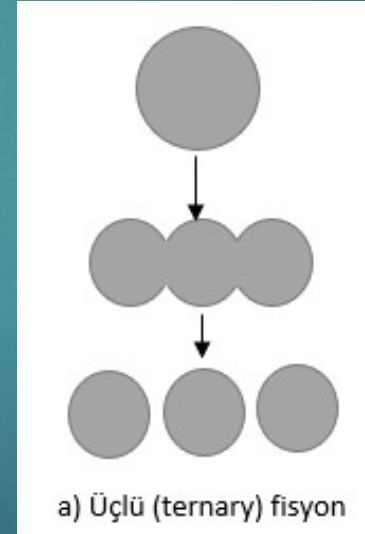
$$E_{kin} = \frac{\frac{Z}{2}e \cdot \frac{Z}{2}e}{r_1 + r_2} = \frac{Z^2 e^2}{8(1/2)^{1/3} r_0 A^{1/3}}$$

- Birincil fisyon parçacıklarından yayınlanan ν (ani nötronların sayısı), temelde uyarılma enerjisine bağlıdır ve ani nötronların sayısı fisyon yapmaya uygun (fissioning nuclei) kütle numarası arttıkça artar. ($N=50$, $N=82$) nötronlar dolu olan kabuklara sahip fisyon parçacıklarında, ani nötronların sayısı oldukça düşüktür.



- Genelde her fisyonunda ortalama enerjisi $\sim 1\text{MeV}$ olan 7.5γ – ışını yayınlanır. Buna karşılık enerji $7.5 \times 1\text{MeV} = 7.5\text{MeV}$ 'dir. Uyarılmış fisyon parçacıklarında düşük enerjili geçişler ise dönüşüm (Conversion electrons) elektronları ve x – ışınları emisyonunda meydana gelir. Her fisyon başına bir x – ışını fotunu açığa çıkar (\sim one x – ray photon/fission).
- Düşük enerjili fisyonunda nadiren yüksek enerjili α parçacıkları aynı zamanda gözlenir.
Olasılığı: $1\alpha/300\text{fisyon} \rightarrow 1\alpha/500\text{fisyon}$

- Fisyonun erken (başlangıç) evrelerinde, fisyon parçacıkları birbirine daha yakın iken “üçlü ternary)” fisyonunda meydana gelebilir. İkili (binary) fisyonun aksine üç tane fisyon parçacığı meydana gelir.



- Termal nötron fisyonunda, α parçacıklarından başka p, d, t, ^3He , ^7Li , ^8Li , ^9Li , ^9Be , ^{10}Be ve B, C, N ve O izotopları da açığa çıkabilir.

Ancak, bunların yayınlanma olasılığı, $10^{-6} \rightarrow 10^{-5}$ p/fisyon olayı

- Üçlü fisyonun olma olasılığı, fisyon yapan çekirdeğin (fissioning nuclei/fissionable) uyarma (excitation) enerjisiyle artar. Yüksek enerji fisyon,



$$\frac{400\text{MeV}}{\text{Ternary fission}} \approx \frac{1}{\text{Binary fission}} \approx \frac{1}{30}$$

- İki ikili (binary) fisyon arka arkaya meydana gelirse, buna “kaskat fisyon” denir.

Nükleer reaktörlerde 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.