

NÜKLEER FİSYON

Salih DİNÇER*

ÖZET

Nükleer reaksiyonlar arasında fisyon reaksiyonu tipik bir reaksiyon olup burada ağır bir atom çekirdeği orta ağırlıkta iki çekirdeğe bölünür. Bu bölünme sonunda iki veya üç nötronla birlikte büyük bir miktarda enerji açığa çıkar. Örneğin U^{235} in bir yavaş nötron absorblaması sonunda oluşan fisyon reaksiyonunda yaklaşık 200 MeV enerji açığa çıkar.

Bir nükleer reaktörde birim zamanda oluşan fisyon sayısı kontrol altında tutulur. Çıkan enerji ısı yoluyla ile buhar oluşumuna ve buhar da türbünlere verilerak elektrige dönüştürülür. Eğer birim zamanda oluşan fisyon sayısı kontrol altında tutulmaz ise kısa zamanda çok büyük bir enerji açığa çıkar ve sistem nükleer bombaya dönüşür.

Bu makalede ise yukarıda konu edilen nükleer fisyonun teorisi kısaca ele alınmıştır.

ABSTRACT

Fission reaction is a special type of a nuclear reaction in which a large nucleus split into two medium-mass nuclear fragments and additional two or three neutrons, but also a large amount of energy is emitted. A special type of fission in which a heavy nucleus such as U^{235} absorbs a slow neutron and breaks into two equal-size fragments in each such fission 200 MeV of energy is released.

In a nuclear reactor the number of fissions per unit time is controlled and the liberated nuclear energy is used to make steam to drive turbines and generate electrical power. If the reaction is uncontrolled the number of fissions will increase geometrically, resulting in all the energy of the source being released over a short time interval, producing a nuclear bomb.

In this article the theory of the fission reaction mentioned above is described.

GİRİŞ

Nükleer fisyon, bir ağır çekirdeğin bölünerek orta ağırlıkta iki çekirdeğe ayrılması olayıdır. Bu olayda fisyon ürünleri adı verilen iki çekirdekle beraber büyük miktarda enerji (200 MeV) ve yeni nötronlar (2 veya 3 nötron) da açığa çıkar.

* Doç. Dr.; Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Bursa.

Fisyon olayı, bazı ağır çekirdeklere kendiliğinden olabilir (spontane fisyon). Diğer bazı çekirdeklere ise nötronlar, gamma ışınları ve ağır iyonlarla bombarduman edilerek fisyonu uğrayabilirler. Fisyon yapabilen çekirdeklere ${}_{90}\text{Th}$, ${}_{91}\text{Pa}$, ${}_{92}\text{U}$, ${}_{93}\text{Np}$, ${}_{94}\text{Pu}$, ${}_{95}\text{Am}$, ve ${}_{98}\text{Cf}$ elementlerinin izotopları arasında yer almaktadır. Bu izotoplar arasında U^{233} , U^{235} ve Pu^{239} yarı ömürleri ve nötron fisyon tesir kesitlerinin yüksek oluşu nedeniyle diğerleri arasında önemli yer tutmaktadırlar. Bunlardan U^{235} doğal olarak tabii uranyumun içerisinde % 0,7 oranında bulunmaktadır. U^{233} ve Pu^{239} ise nükleer reaktörlerde Th^{232} ve U^{238} den üretilmektedir.

Fisyon olayı, O. Hahn ve F. Strassman tarafından ortaya çıkarılmıştır (1939). Olayın başlangıcı ise E. Fermi ve arkadaşlarının uranyumu, parafinde yavaşlatılmış nötronlarla bombarduman ederek transuranyum elementler elde etmek için yaptıkları çalışmalara kadar uzanır (1934). 1934 ile 1939 arasındaki zamanda, uranyumun nötron bombardumanı ile ortaya çıkan çok çeşitli beta ışını aktifliklerinin, transuranyum elementlerin radyoizotoplarından geldiği sanılıyordu. O. Hahn ve arkadaşları bu beta aktifliklerinden birinin, yaptıkları radyokimyasal analizler sonunda baruya ait olduğunu buldular. Gene bu arada nadir toprak elementleri arasında bulunan lantanı ortaya çıkardılar. Burada lantan, baryumun beta bozunmasından oluşmaktadır. Böylece Hahn ve arkadaşları beta ışını aktifliklerinin, daha küçük atom numaralı elementlerin radyoizotoplarından gelebileceğini ileri sürdüler. Bir nötron kaptaması ile kararsız hale gelen uranyum çekirdeğinin orta ağırlıkta iki çekirdeğe bölündüğünü, bu çekirdeklere birinin, ${}_{56}\text{Ba}$ olduğunu diğerinin de ${}_{36}\text{Kr}$ olması gerektiğini ve böyle olduğunu ortaya çıkardılar.

Fisyonun bulunmasından hemen sonra Bohr ve Wheeler, olayın teorik yorumunu, yüklü sıvı damlası modeline göre yaptılar (1939). Gene E. Fermi başkanlığındaki bir grup ilk olarak kendi kendine devam ettiren zincirleme fisyon reaksiyonunu Cp-1 reaktöründe gerçekleştirdiler (1942). O zamandan beri de nükleer teknoloji hızla gelişerek bugünkü seviyesine ulaştı.

TEORİ

Nükleer fisyonun oluşumunu bütün yönleri ile açıklayabilen bir teori henüz kurulamamakla beraber N. Bohr ve J.A. Wheeler tarafından geliştirilen ve sonra üzerinde başkaları tarafından eklemeler yapılan sıvı damlası modeline dayalı teori, olayı birçok yönleri ile açıklayabilmektedir. Bu modele göre bir atom çekirdeği düzgün olarak yüklenmiş bir sıvı damlasına benzetilmektedir. Çekirdek taban enerji seviyesinde iken sıvı damlası tam bir küre biçimindedir. Atom numarası Z , kütle numarası A olan bir çekirdeği, protonlarına ve nötronlarına ayırabilmek için gerekli enerji,

$$BE = [m_p Z + m_n (A - Z) - M(A, Z)] c^2 \quad (1)$$

dir. Bu enerjiye bağlanma enerjisi denir. Burada m_p protonun, m_n nötronun, $M(A, Z)$ parçalanmamış çekirdeğin kütlesi ve c de ışığın boşluktaki hızıdır. Yarı ampirik olarak

$$M(A, Z) = m_p Z + m_n (A - Z) - a_1 A + a_2 A^{2/3} + \frac{a_3 Z^2}{A^{1/3}} + a_4 \frac{(A/2 - Z)^2}{A} + \delta \quad (2)$$

dir. Burada a_1, a_2, a_3 ve a_4 sabitlerdir. Yarı ampirik kütle formülünde çekirdeğin biçimi üzerine etkisini gösteren terimlerden birincisi yüzey gerilim, diğeri de Coulomb etkisine aittir. Yarıçapı $R = 1,25 \times 10^{-13} A^{1/3}$ cm olan bir çekirdeğin potansiyel enerjisi ise,

$$E_0 = E_s + E_c = 4 \pi R^2 \tau + \frac{3}{5} \frac{Z^2 e^2}{R} \quad (3)$$

dir. Burada τ yüzey gerilim parametresidir ve birim yüzeye düşen yüzey gerilim enerjisidir.

Çekirdek herhangi bir nedenle uyarılacak olursa şekil değişikliğine uğrar ve küresellikten ayrılır. Şekil değişikliğinde hacmi sabit kalan çekirdeğin yüzey gerilim etkisi, ilk küresel biçimine getirmeye çalışırken Coulomb etkisi de küresellikten ayrılmaya çalışır.

Şimdi kütle numarası A ve atom numarası Z olan bir çekirdeğin kendiliğinden fisyonu karşı kararlılığını araştıralım. Bunun için sıvı damlasına benzetilen çekirdeğin bir an için küresellikten ayrılarak elipsoide dönüştüğünü kabul edelim. Bu durumda elipsoidin yarı eksenleri büyüklük sırasına göre,

$$a = R(1 + \epsilon), \quad b = R(1 + \epsilon)^{-1/2} \quad (4)$$

dir. Yeni durumda çekirdeğin yüzey gerilim enerjisi ve Coulomb enerjisi sırası ile,

$$E_s = 4\pi R^2 \tau \left(1 + \frac{2}{5} \epsilon^2 + \dots\right) \quad \text{ve} \quad E_c = \frac{3}{5} \frac{Z^2 e^2}{R} \left(1 - \frac{\epsilon^2}{5} + \dots\right) \quad (5)$$

olur. Küresellikten elipsoid biçimine geçen çekirdeğin potansiyel enerjisindeki toplam değişme miktarı ise,

$$\Delta E = \Delta E_s + \Delta E_c = 4\pi R^2 \frac{2}{5} \epsilon^2 \tau - \frac{3}{5} \frac{Z^2 e^2}{R} \frac{1}{5} \epsilon^2 \quad (6)$$

$$\Delta E = \epsilon^2 \left(\frac{2}{5} E_s - \frac{1}{5} E_c \right)$$

olur. ΔE nin pozitif olması halinde biçim değişikliğine uğrayan çekirdek, gene eski küresel durumuna dönebilir ve fisyon bakımından kararlı olur. Aksi halde fisyonu uğrayabilir. Buna göre fisyon bakımından kararlılık için,

$$E > 0 \quad \text{ve} \quad 2 E_s > E_c \quad (7)$$

olur. Yarı ampirik kütle formülünden E_s ve E_c enerjilerinin A ve Z cinsinden ifade edilen

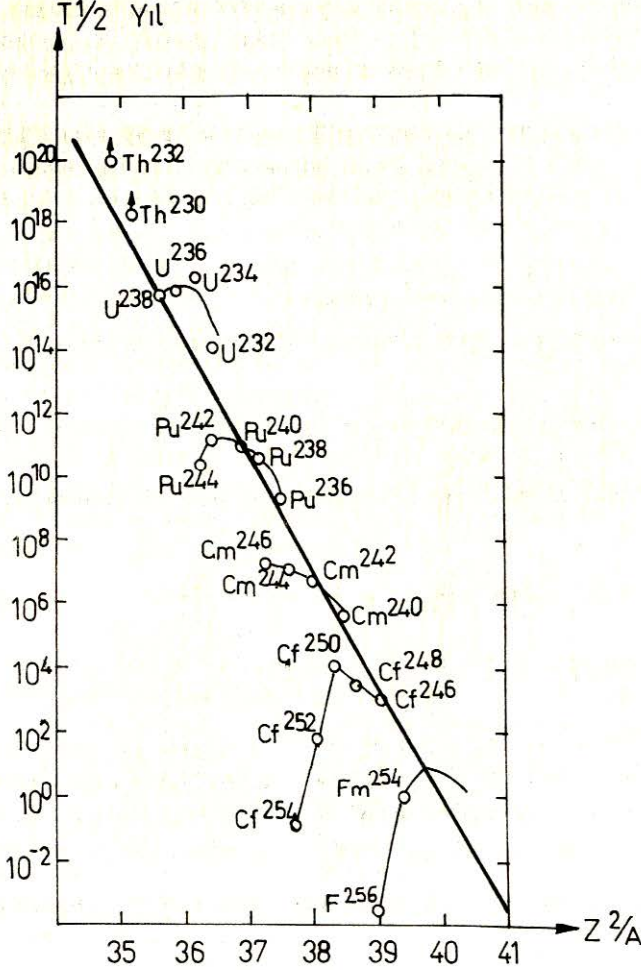
$$E_s \cong 17,97 A^{2/3} \quad \text{ve} \quad E_c \cong 0,71 \frac{Z^2}{A^{1/3}} \text{ MeV} \quad (8)$$

değerleri yukarıdaki eşitsizlikte yerine konulduğunda,

$$\frac{Z^2}{A} < 50 \quad (9)$$

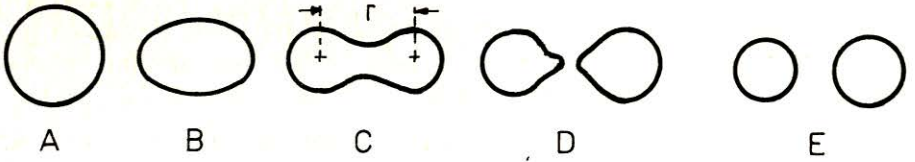
şartı elde edilir.

Kuantum mekaniğinde tünel olayının sonucuna göre yukarıdaki şarta rağmen ağır çekirdeklerin kendiliğinden fisyonu için azda olsa bir olasılık vardır. Şekil 1'de bu olasılığın bir ölçüsü olan kendiliğinden fisyonla ait yarılanma ömrünün, Z^2/A ya göre değişimi verilmiştir.



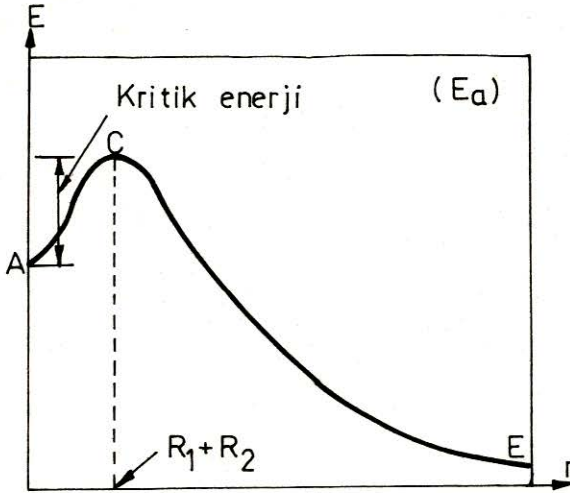
Şekil: 1

Şimdi de dışarıdan bir etki ile örneğin nötron soğurulması ile uyartılan bir ağır çekirdeğin fisyonunu ele alalım. Nötron soğurulması ile oluşan uyartılmış bir bileşik çekirdeğin biçim değiştirerek, Coulomb etkisinin yüzey gerilim etkisini yenmesi ile Şekil 2'deki safhalardan geçerek bölünmeye uğradığını kabul edelim.



Şekil: 2

Şekil 2C de bileşik çekirdek yeterli derecede uyarılmıştır. Bu durumda yüzey gerilim etkisi hala Coulomb etkisinden fazla ise çekirdek ilk küresel biçimini alabilir ve enerji fazlalığı gamma ışını halinde dışarıya verilir. Coulomb etkisinin fazla olması halinde de biçim değişikliği gittikçe artarak çekirdek bölünmeye uğrar. Nötron soğuran çekirdeğin Bohr-Wheeler teorisine göre hesaplanan potansiyel enerjisinin biçim değişikliğine bağlı değişimi Şekil 3'de verilmiştir. Şekilde yatay eksen bölünme ile oluşacak fisyon ürünlerinin merkezleri arasındaki uzaklıktır.



Şekil: 3

Grafikteki harfler, Şekil 2'deki durumları göstermektedir. Enerji grafiğini daha kolay yorumlayabilmek için bölünmenin olduğu ve ürün çekirdeklerin birbirinden yeteri kadar uzakta bulunduğu $r \rightarrow \infty$ noktasından başlayıp, $r = 0$ noktasına doğru hareket edelim. Birbirinden ayrı olan ürün çekirdekler, birbirlerine yaklaştıkça aralarındaki itici Coulomb potansiyel enerjisi gittikçe artar. İki çekirdek birbirine dokunur hale gelince potansiyel enerji en yüksek değerine erişir. Bu değer C konumunda,

$$E_C = k \frac{Z_1 Z_2 e^2}{R_1 + R_2} \quad (10)$$

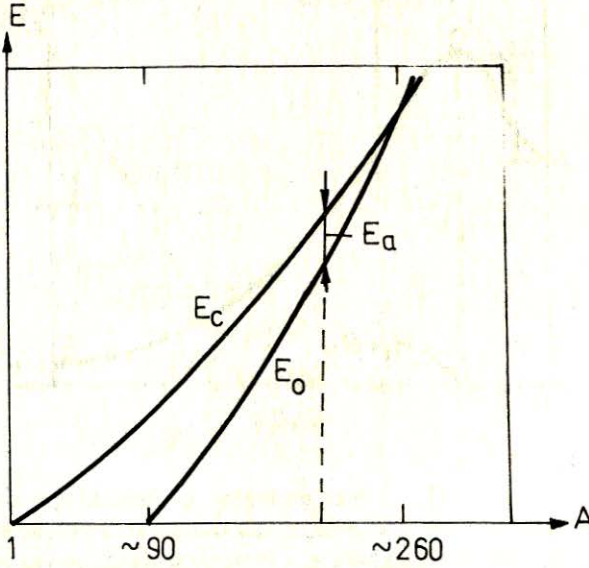
dir. Ürün çekirdekler biri diğeri içine girerek kaynaşmaya başlayınca geri çağırıcı

yüzey gerilimin etkisi ile potansiyel enerji azalır ve $r = 0$ da, A 'daki değerini alır. Bu konumda enerji, bileşik çekirdeğin taban enerji seviyesi olup içerisinde nötron soğurulması ile ortaya çıkan uyarılma enerjisi yoktur. Bu enerji,

$$E_0 = E_s + E_c = [M(A, Z) - M_1(A_1, Z_1) - M_2(A_2, Z_2)] c^2 \quad (11)$$

dir.

Bileşik çekirdeğin fisyonu için $E_a = E_c - E_0$ kadar bir enerjiye gerek vardır. Bu miktar enerji, aktivasyon enerjisi veya kritik enerji olarak adlandırılmaktadır. E_a , E_c ve E_0 enerjilerinin elementlerin kütle numaralarına göre değişimleri Şekil 4 de verilmiştir. Görüldüğü gibi kütle numarası arttıkça E_0 enerjisi E_c den daha çabuk yükselmekte ve $E_c - E_0$ farkı da gittikçe azalarak sifıra ulaşmaktadır. $A = 120$ civarında kritik enerjinin değeri 50 MeV kadardır. Fisyon için bu kadar enerjili nötron bulmak ve olayı devam ettirmek olanağı çok azdır. $A = 235$ civarı kritik enerji 6 MeV kadardır. Bu bölgedeki çekirdeklerin fisyonu için gerekli enerjide nötron veren kaynakların bulunma kolaylığı vardır. Kütle numarası 260 ve daha fazla olan çekirdekler için kritik enerjiye gerek yoktur ve kendiliklerinden fisyonu uğrayabilirler.



Şekil: 4

Bir nötron yakalayan bileşik çekirdeğin uyarılma enerjisi nötronun bu çekirdekteki bağlanma enerjisine eşittir. Bu da bileşik çekirdeğin toplam bağlanma enerjisi ile hedef çekirdeğin toplam bağlanma enerjisi arasındaki farka eşittir. E_u uyarılma enerjisi kritik enerji ile karşılaştırıldığında, uyarılma enerjisi kritik enerjiyi aşarsa $E_u > E_a$ fisyon olabilir. Buna göre sıfır kinetik enerjili bir nötron yakalayan U^{235} ile U^{238} çekirdeklerinin uyarılma enerjilerini bularak kritik enerjileri ile karşılaştırıp fisyonu uğrayıp uğramayacaklarını araştıralım.

U^{235} in nötron kapması ile oluşan U^{236} nın uyarılma enerjisi,

$$E_u = BE(U^{236}) - BE(U^{235}) = 6,4 \text{ MeV}$$

ve U^{238} için ise,

$$E_u = BE(U^{239}) - BE(U^{238}) = 4,9 \text{ MeV}$$

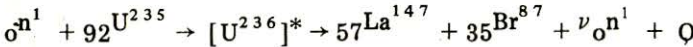
dir. Diğer taraftan U^{236} için kritik enerjinin değeri $E_a = 5,3 \text{ MeV}$ ve U^{239} için de $E_a = 5,5 \text{ MeV}$ dir. Bu kritik değerler uyarılma enerjileri ile karşılaştırıldığında U^{235} in sıfır kinetik enerjili nötronlarla fisyon yapabildiği fakat U^{238} için ise 0,6 MeV lik fazladan enerjinin gerektiği görülmektedir. Bu hal ${}_{92}U^{233}$, ${}_{94}Pu^{239}$ gibi A sı tek ve Z si çift olan çekirdekler için de aynıdır. Bunlarda sıfır kinetik enerjili nötronlarla fisyonla uğrayabildikleri halde, aynı elementlerin A sı çift olan izotoplarının fisyonu için bir eşik enerji gerekmektedir. Bunun nedeni, gelen nötronun bileşik çekirdek içerisindeki bağlanma enerjisinin (bileşik çekirdeğin uyarılma enerjisi), A ve Z nin tek veya çift oluşuna göre farklı değerler almasındandır. Yarı ampirik kütle formülünde spin etkisi olarak yer alan $\delta(A, Z)$ terimi aşağıdaki değerleri almaktadır.

	A	Z
$\delta(A, Z) =$	$-0,036 A^{-3/4}$	Çift
	0	Tek
	$0,036 A^{-3/4}$	Çift
		Tek

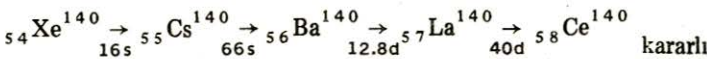
Bu terim A sı çift ve Z si çift olan hedef çekirdeklerin fisyonunda uyarılma enerjisine pozitif etki yapmakta fakat A sı çift Z si tek olan hedef çekirdeklerin fisyonunda ise uyarılma enerjisine negatif etki yapmaktadır.

FİSYON ÜRÜNLERİNİN KÜTLE VE ENERJİ DAĞILIMLARI

Fisyon ürünlerinin kütle ve enerji dağılımları için örnek olarak U^{235} in termik nötronlarla fisyonunu ele alalım.



Burada ν fisyon başına çıkan ortalama nötron sayısı olup değeri 2,5 dir. Fisyon ürünleri hayli uyarılmış olarak doğarlar. Kendilerindeki bu enerji fazlalığı nötron ve gamma ışını yayınlamak suretiyle giderilir. Fisyonu takibeden 10^{-14} s içerisinde ani nötronlar ve ani gammalar çıktıktan sonra fisyon ürünleri beta aktifliklerini sürdürerek kararlı hale gelene kadar bir seri ara safhalardan geçerler. Örneğin fisyon ürünlerinden Xe ve geçirdiği safhalar aşağıda gösterilmiştir.

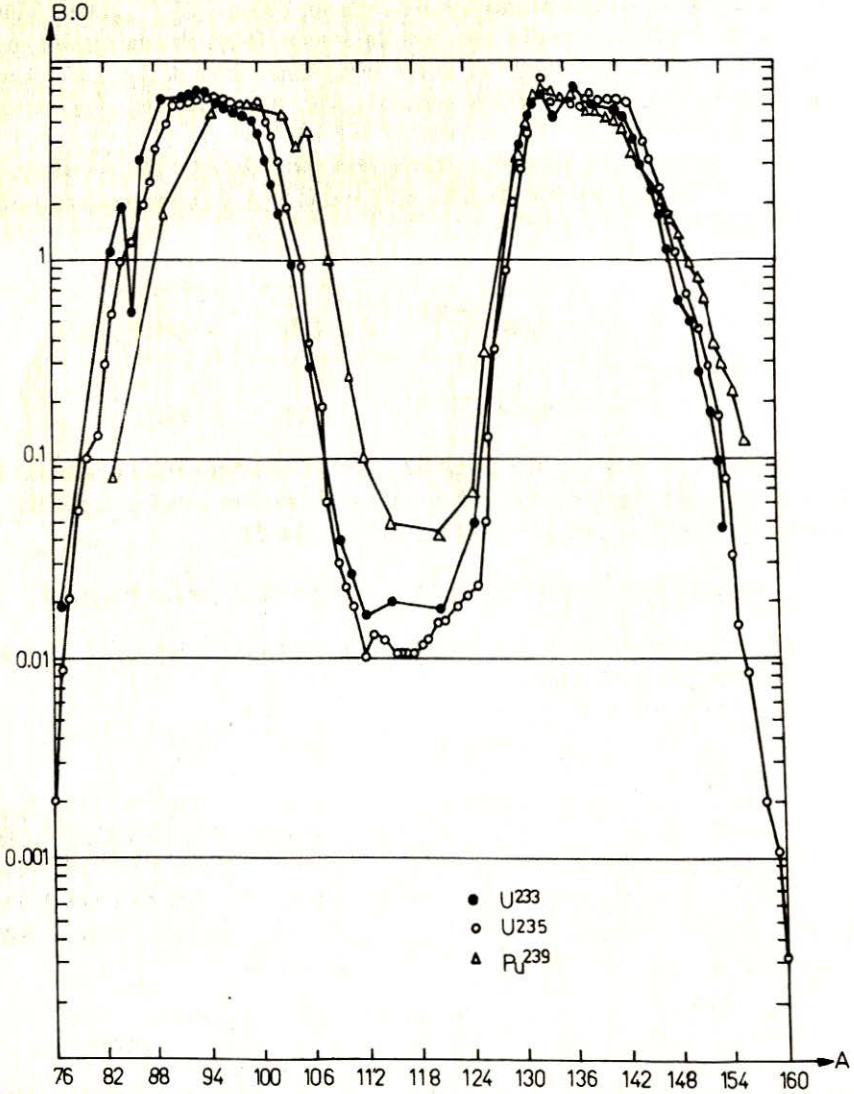


Her U^{235} çekirdeğinin fisyonundan oluşan fisyon ürünleri birbirinin aynısı değildir. Bir uranyum kütleğinde N_0 tane fisyon olmuşsa bu kadar fisyon olu-

şan ve kütle numarası A olan fisyon ürünü sayısı da N (A) ise bu ürüne ait bolluk oranı % olarak,

$$B.O = \frac{N(A)}{N_0} \times 100$$

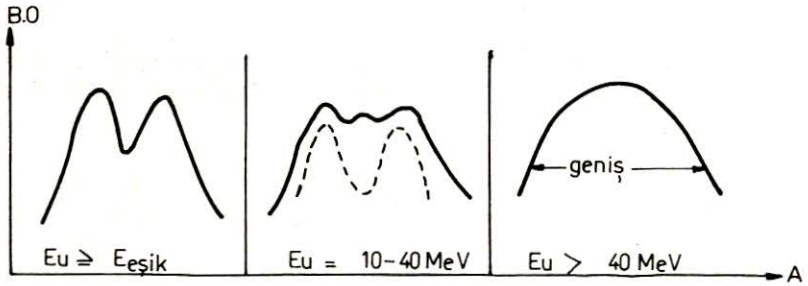
dir. Şekil 5'de fisyon ürünlerine ait bolluk oranının kütle numarasına göre dağılımı görülmektedir. Bolluk oranı eğrisinden fisyonda çekirdeğin eşit kütle numarasına



Şekil: 5

ralı iki ürüne bölünme olasılığının ancak % 0,01 buna karşılık biri $A_1 = 90$ diğeri $A_2 = 140$ olacak şekilde bölünme olasılığının % 7 ile % 8 arasında olduğunu görüyoruz. Bu hali ile dağılım fisyonun simetrik olmadığını gösteriyor. Dağılımdaki $A = 90$ etrafındaki 85 - 105 arasındaki kütle numaralı fisyon ürünleri grubuna hafif grup ve $A = 140$ etrafında kütle numarası 130 - 140 arasında olan gruba da ağır fisyon ürünleri diyoruz.

Ağır kütle numaralı elementlerin fisyonunda, fisyona neden olan parçacığın enerjisinin artması ile simetrik fisyon olasılığı giderek artar ve dağılım eğrisindeki vadi dolarak uyarılma enerjisinin $E_u > 40$ MeV olması halinde dağılım eğrisinde iki maksimum yerine yarı genişliği oldukça fazla olan bir tek maksimum görülür (Şekil: 6).



Şekil: 6

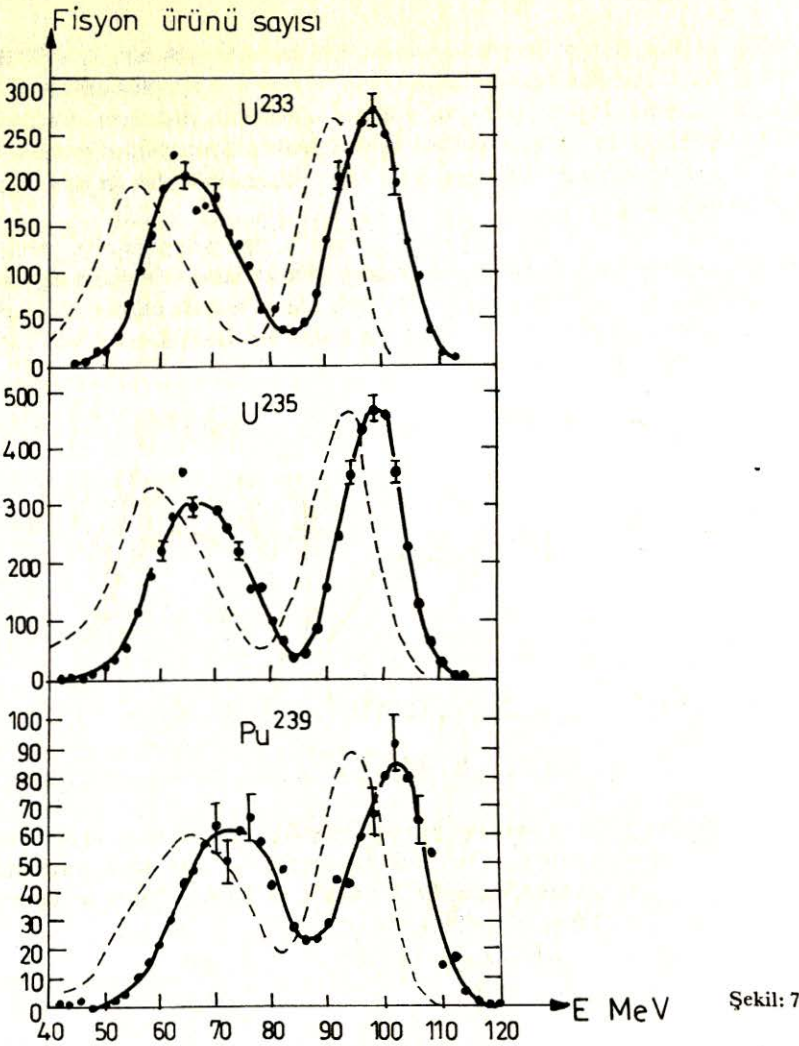
Fisyonda açığa çıkan enerjiye gelince, bildiği gibi bu enerji, reaksiyonun giriş kanalındaki kütleler toplamı ile çıkış kanalındaki kütleler toplamı arasındaki farkın enerji birimleri cinsinde ifadesidir. Bu enerjinin fisyon ürünleri ve diğer radyasyonlar arasındaki dağılımı şöyledir;

Fisyon ürünlerinin kinetik enerjisi	165 MeV
Ani nötronların kinetik enerjisi	5 MeV
Ani gamma ışınları	7 MeV
Bozunma beta, gamma ışınları ve nötrinolar	25 MeV
	<hr/>
	202 MeV

Fisyon ürünlerine ait kinetik enerjinin fisyon ürünleri arasında bölüşülmesi, momentumun korunumundan ötürü kütleler ters orantılı olur. Fisyon ürünlerine ait enerji spektrumu, Şekil 7'de verilmiştir. Spektrumdaki birinci maksimum ağır grup fisyon ürünlerine diğeri ise hafif gruba aittir. U^{235} için ağır grubun kinetik enerjisi 70 MeV ve hafif grubunki ise 100 MeV civarında yer almaktadır.

SONUÇ

Bu makalede nükleer fisyonun tanımı, tarihçesi, olayın klasik teoriye dayalı açıklaması, fisyon ürünleri ile bunlara ait kütle ve enerji dağılımları mümkün olduğu kadar kısa ve açık olarak anlatılmaya çalışılmıştır.



KAYNAKLAR

1. JOHN R. LAMARSH: "Introduction to Nuclear Reactor Theory", Addison-Wesley, 1966.
2. HENRY SEMAT: "Introduction to Atomic and Nuclear Physics", Chapman and Hall, Ltd. 1962.
3. GLASSTONE, S. and M.C. EDLUND: "The Elements of Nuclear Reactor Theory", D. Van Nostrand Comp., 1952.
4. ATOM P. ARYA: "Fundamentals of Nuclear Physics", Allyn and Bacon, 1966.
5. I. KAPLAN: "Nuclear Physics", Addison-Wesley, 1963.