



# ANKARA ÜNİVERSİTESİ NÜKLEER BİLİMLER ENSTİTÜSÜ

## 101523-NÖTRON AKTİVASYON ANALİZİ VE ÖLÇÜMLERİ LABORATUVARI

**Prof. Dr. Haluk YÜCEL**

EPİTERMAL NÖTRONLAR, REAKSİYON HIZI VE NÖTRON ÖZ-ZIRHLAMASI

### Epitermal Nötronlar

Termal nötronlarla birlikte değişmez olarak (belli bir noktada sabit bir termal/epitermal oranı) her zaman mevcut olan epitermal nötronların etkilerini belirlemek için, kadmiyum kılıflı foil ışınlamaları yapılır. Bazı epitermal nötronların, kadmiyum etkin kesme (cut-off) enerjisi altında enerjilere sahip olabileceğinin de bilinmesi önemlidir. Oda sıcaklığındaki (293 °K) nötronlar için, epitermal nötronların en düşük enerjisi, genellikle, 5 kT'ye eşit olan 0,13 eV alınır. Burada, k: Boltzmann sabitidir. Bununla birlikte, bazı reaktörler için en düşük epitermal nötron enerjisi olarak 4 kT olması da tavsiye edilir. Epitermal nötronların etkisini düzeltmek için, epitermal nötron spektrumunun şekli hakkında bazı kabüllerin yapılması gereklidir. Birim enerji başına epitermal nötron akısı, 1/E ile orantılıdır:

$$\phi_e(E) = \frac{\phi_e}{E}, \quad E \geq kT \quad (6)$$

Burada,  $\phi_e$ , 1 eV'luk nötron enerjisinde; birim enerji başına akı  $\phi(E)$ 'ye eşit olan, epitermal akı parametresidir. Bu varsayım, genellikle, kadmiyum kesme enerjisi altındaki enerjilere sahip olan epitermal nötronlar için termal nötron akı ölçümlerinin düzeltilmesi bakımından uygundur. Epitermal akıyı daha doğru şekilde temsil etmek için, çok sayıda araştırmacı,  $1/E^{(1+\alpha)}$  spektrum şeklinin kullanılmasının tercih edilebileceğini göstermişlerdir. Burada,  $\alpha$ : ampirik bir parametredir(8-10).

## Rezonans İntegrali

İdeal bir nötron soğurma tesir kesiti düşük başka bir izotopla seyreltilmiş (dilute) dedektör için rezonans integrali aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$I_0 = \int_{E_{Cd}}^{\infty} \sigma(E) \frac{dE}{E} \quad (7)$$

Kadmiyum kesme enerjisi ( $E_{Cd}$ ), 1 mm et kalınlığı olan silindirik kadmiyum kutu için, 0,55 eV olarak alınır(10-11). Tarif edilen metotlarda, epitermal nötron reaksiyonlar için düzeltmeyi gerektiren veriler, her reaksiyon için  $I_0/g\sigma_0$  değeri şeklinde Çizelge 2’de verilmiştir. Bu  $I_0/g\sigma_0$  değerleri integral ölçümleri esasına dayanır.

**Çizelge 2- Epitermal Akı Düzeltmeleri İçin Nükleer Veriler**

Tepkime	$\sigma_0$ (barn)	g (T=293 K)	$\frac{I_0}{g\sigma_0}$	w'
$^{59}\text{Co}(n,\gamma)^{60}\text{Co}$	37.233±0.16%	1.0	1.98±0.034	0
$^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$	98.69±0.14%	1.0051	15.7±0.3	0.0500
$^{115}\text{In}(n,\gamma)^{116}\text{In}$	166.413±0.6%	1.0194	15.8±0.5	0.2953
$^{163}\text{Dy}(n,\gamma)^{164}\text{Dy}$	2650±3.8%	0.975	0.23±0.04	0

## Reaksiyon Hızı

Termal ve epitermal nötronların karışımının olduğu bir nötron alanında ışınlamaya maruz kalan bir izotop için, atom başına reaksiyon hızı:

$$R_s = \phi_0 g \sigma_0 + \phi_e g \sigma_0 \left[ f_1 + \frac{w'}{g} + \frac{I_0}{g\sigma_0} \right] \quad (8)$$

Burada,  $f_1$ , nötron enerji aralığı 5 kT-  $E_{Cd}$  (yani, 0,13 eV-0,55 eV) arasında 1/v dedektörünün epitermal aktivasyonunu tanımlayan bir fonksiyondur:

$$f_1 = \int_{5kT}^{E_{Cd}} \left( \frac{kT_0}{E} \right)^{1/2} \cdot \frac{dE}{E} \quad (9)$$

$E_{Cd}=0,55$  eV ve  $T=293,4$  °K için  $f_1=0,468$ 'dir.

Eşitlik 8'deki  $w'$  ise, 5 kT-  $E_{Cd}$  (yani, 0,13 eV-0,55 eV) enerji aralığında, dedektör tesir kesitinin 1/v-davranışından ayrılmasını hesaba katan bir fonksiyondur:

$$w' = \frac{1}{\sigma_0} \int_{5kT}^{E_{Cd}} \left[ \sigma(E) - g\sigma_0 \left( \frac{kT}{E} \right)^{1/2} \right] \cdot \frac{dE}{E} \quad (10)$$

T=293,4 °K için bazı  $w'$  değerleri, Çizelge 2'de verilmiştir.

Kadmiyum kılıflı foil için reaksiyon hızı:

$$R_{s,Cd} = \phi_e I_0 \quad (11)$$

şeklinde verilir.

Eşitlik 11 ile verilen kadmiyum kılıflı reaksiyon hızı, Eşitlik 8'den bilinmeyen epitermal akı parametresi  $\phi_e$ 'yi elemine etmek için kullanılabilir. Eşitlik 8 yeniden düzenlenerek, sadece termal nötronların etkisiyle oluşan doyum aktivitesi için aşağıdaki ifade elde edilir:

$$\phi_0 g \sigma_0 = (R_s)_0 = R_s - R_{s,Cd} \left( 1 + \frac{g\sigma_0}{I_0} \cdot f_1 + \frac{\sigma_0 w'}{I_0} \right) \quad (12)$$

### Nötron Öz-Zırhlaması (Self-Shielding)

Oldukça ince veya izotonik olarak seyreltilmiş (diluted) alaşım malzemeler kullanılmadığı takdirde, ölçme yöntemlerinde nötron öz-zırhlama etkilerinin düzeltilmesi gerekir. Eşitlik 12'nin hem termal öz-zırhlama faktörünü  $G_{th}$ , hem de epitermal öz-zırhlama faktörünü  $G_{res}$  hesaba katan değiştirilmiş bir biçimi aşağıda verilmiştir:

$$\phi_0 g \sigma_0 = \frac{(R_s)_0}{G_{th}} = \frac{1}{G_{th}} \cdot \left[ R_s - R_{s,Cd} \left( 1 + \frac{g\sigma_0}{G_{res} I_0} \cdot f_1 + \frac{\sigma_0 w'}{G_{res} I_0} \right) \right] \quad (13)$$

Altın ve kobalt foilleri veya telleri ile indiyum foilleri için termal nötron öz-zırhlaması  $G_{th}$  ve epitermal nötron öz-zırhlaması  $G_{res}$  faktörleri, Çizelge 3 ilâ Çizelge 7 arasında verilmiştir. Literatürde, rezonans öz-zırhlama faktörleri için bu değerler iki tarzda verilmektedir ve bu nedenle, bunlar karıştırılmamalıdır. Burada kullanılan  $G_{res}$  epitermal nötron öz-zırhlaması, Eşitlik 7'de tanımlandığı gibi rezonans integraliyle çarpılan bir faktördür.  $G'_{res}$  ise, tesir kesitinin  $1/v$ -kısmından farkı alınarak indirgenmiş rezonans integraliyle çarpılan bir faktördür. Çizelge 3 ilâ Çizelge 7 arasında ihtiyaç duyulan yerde uygulanmış olan, gerekli dönüştürme faktörü ise:

$$G_{res} = G'_{res} + (1 - G'_{res}) \left( 0,429 \cdot \frac{g\sigma_0}{I_0} \right) \quad (14)$$

formülünden hesaplanır.

**Çizelge 3- Kobalt foiller için rezonans öz-soğurma verileri**

Foil Kalınlığı		$G'_{res}$ (132 eV)	$G_{res}$
(inç)	(cm)		
0.0004	0.001018	0.8264	0.864
0.0010	0.02254	0.7000	0.765
0.0025	0.00635	0.5470	0.645
0.0050	0.0127	0.4395	0.561
0.0075	0.01905	0.3831	0.517
0.010	0.0254	0.3476	0.489
0.015	0.0381	0.3028	0.454
0.020	0.0508	0.2744	0.432

**Çizelge 4- Kobalt teller için termal ve rezonans öz-soğurma verileri**

Tel çapı		Kobalt Miktarı (% Kütle)	$G'_{res}$ (132 eV)	$G_{th}$	$G_{res}$
(inç)	(cm)				
0.050	0.127	0.104	1.00	1.00	1.00
0.050	0.127	0.976	0.95±0.04	0.99±0.01	0.96
0.001	0.00254	100	0.81±0.03	0.99±0.02	0.85
0.005	0.01270	100	0.52±0.02	0.97±0.01	0.62
0.010	0.0254	100	0.42±0.02	0.94±0.01	0.55
0.015	0.0381	100	0.38±0.01	0.92±0.02	0.51
0.020	0.0508	100	0.34±0.01	0.90±0.02	0.48
0.025	0.0635	100	0.32±0.01	0.88±0.03	0.47

**Çizelge 5- Altın foiller için rezonans öz-soğurma verileri**

Foil Kalınlığı (cm)	Rezonans Integrali I(barn)	G <sub>res</sub> (Teorik)	G <sub>res</sub> (Deneysel)	(G <sub>teori</sub> -G <sub>deneysel</sub> )/ G <sub>deneysel</sub> (%)
2x10 <sup>-6</sup>	1556.83	0.9936	...	...
4x10 <sup>-6</sup>	1550.04	0.9893	...	...
8x10 <sup>-6</sup>	1577.91	0.9815	...	...
2x10 <sup>-5</sup>	1507.41	0.9621	0.9644	-0.24
4x10 <sup>-5</sup>	1465.83	0.9355	0.9340	+0.16
8x10 <sup>-5</sup>	1398.77	0.8927	0.8852	+0.85
2x10 <sup>-4</sup>	1252.38	0.7993	0.7852	+1.80
4x10 <sup>-4</sup>	1088.91	0.6950	0.6836	+1.66
8x10 <sup>-4</sup>	890.482	0.5683	0.5612	+1.27
2x10 <sup>-3</sup>	628.570	0.4012	0.3952	+1.51
4x10 <sup>-3</sup>	468.493	0.2990	0.3020	-0.99
8x10 <sup>-3</sup>	347.671	0.2219	0.2219	-0.0036
2x10 <sup>-2</sup>	234.983	0.1450	0.1505	-0.35

**Çizelge 6- Altın teller için rezonans öz-soğurma verileri**

Tel çapı			G <sub>res</sub>
Anma çapı (10 <sup>-3</sup> inç)	Ortalama (10 <sup>-3</sup> inç)	Ortalama (cm)	
0.5	0.505	0.00128	0.703
1.0	0.98	0.00249	0.552
2.0	1.98	0.00503	0.410
4.0	4.05	0.01029	0.302
6.0	6.02	0.01529	0.258
8.0	7.98	0.02027	0.228
10.0	10.01	0.02542	0.208

**Çizelge 7- İndiyum foiller için rezonans öz-soğurma verileri**

Doğal indiyum foil kalınlığı (mg/cm <sup>2</sup> )	G <sub>res</sub>	G <sub>th</sub>	G <sub>res</sub> /G <sub>th</sub>
0.05	0.988	1.000	0.988
0.1	0.977	1.000	0.977
0.2	0.959	0.999	0.960
0.5	0.920	0.998	0.922
1.0	0.868	0.997	0.870
2.0	0.796	0.993	0.801
5.0	0.649	0.987	0.658
10	0.519	0.976	0.531
20	0.400	0.956	0.417
30	0.334	0.939	0.357
40	0.294	0.924	0.319
60	0.243	0.897	0.271
100	0.192	0.850	0.226
150	0.156	0.800	0.195
200	0.134	0.759	0.177
250	0.120	0.720	0.167