

Sıvı-Gaz Faz Geçiş Bölgesinde U^{238} Çekirdeğinin Nükleer Çok Katlı Parçalanmasına Yüzey ve Simetri Enerjisinin Etkileri

Mehmet ERDOĞAN*, Nihal BÜYÜKÇİZMECİ

Selçuk Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 42075, Kampus, Konya.

Özet: Bu çalışmada, İstatistiksel Çok Katlı Parçalanma Modeli (Statistical Multifragmentation Model, SMM) kullanılarak, U^{238} çekirdeğinin orta enerjilerdeki nükleer çok katlı parçalanmasına yüzey ve simetri enerjisinin etkilerini gösterdik. Geçiş bölgesinde, nükleer çok katlı parçalanma sonucunda oluşan parçacıkların bağıl kütle değerlerinin parçacıkların kütlelerine göre değişimleri araştırıldı. Sıcak parçacıkların simetri enerjisinin, oluşan parçacıkların kütle dağılımlarına önemli bir etkisinin olmadığı görüldü. Diğer taraftan yüzey enerjisinin, nükleer çok katlı parçalanmada oluşan kütle dağılımını etkilediği görüldü.

Anahtar kelimeler: Nükleer çok katlı parçalanma, yüzey enerjisi, simetri enerjisi

The Effects of Surface Energy on the Nuclear Multifragmentation of U^{238} Nucleus in the Liquid-Gas Phase Transition Region

Abstract: In this study, we have shown the effects of surface and symmetry energies on the nuclear multifragmentation of U^{238} nucleus at intermediate energies within the framework of Statistical Multifragmentation Model (SMM). In the transition region, the variations of relative yields of fragments produced in the process of nuclear multifragmentation with the fragment mass have been investigated. It has been shown from analysis that symmetry energy of hot fragments has no significant effect on the mass distributions of produced fragments. On the other hands, the surface energy has effect on the mass distributions observed in the nuclear multifragmentation process.

Key Words: Nuclear multifragmentation, surface energy, symmetry energy

* E-mail: merdogan@selcuk.edu.tr

1. Giriş

Sıvı-gaz faz geçiş bölgesindeki nükleer çok katlı parçalanma olayı ile nükleer çok katlı parçalanmaya, izospin, simetri enerjisi ve yüzey enerjisinin etkileri daha önce çalışıldı[1-6]. Ayrıca, son yıllarda nükleer çok katlı parçalanma reaksiyonları pek çok laboratuvarında geniş bir şekilde araştırılmıştır [7-11]. Ağır iyon reaksiyonlarında, sıcaklık ve basıncın sınır şartlarında nükleer maddenin özelliklerini araştırmak ve alt nükleer yoğunluklarda mümkün faz geçişlerini çalışmak için en ilginç olaylardan biri nükleer çok katlı parçalanmadır. Nükleer çok katlı parçalanma reaksiyonları, düşük yoğunluklarda ($\rho \approx \rho_0 / 3$ ve $\rho_0 = 0.15 \text{ fm}^{-3}$, normal nükleer madde yoğunluğu) ve düşük sıcaklıklarda ($T \approx 3-8 \text{ MeV}$) nükleer maddenin faz diyagramını ve nükleer parçalanmada oluşan sıcak parçacıkların özelliklerini çalışmak bakımından ve süpernova dinamikleri ve nötron yıldızları gibi astrofiziksel olayları anlamamız açısından çok önemlidir. Homojen nükleer maddenin dinamiği göz önüne alınarak nükleer parçalanma olayı daha iyi anlaşılabilir. Hafif parçacıklar ya da ağır iyonlarla uyarılan bir çekirdek sıkışır ve uyarılmış sıcak bir nükleer çekirdek oluşur. Bu çekirdek termodinamik dengeye ulaşmak için genişler ve alt nükleer yoğunluk bölgesine girer ve bu bölgede nükleer madde yoğunluk çalkantılarına karşı kararsızdır. Yoğunluk çalkantılarının bir sonucu olarak nükleer madde birçok orta kütleli sıcak parçalara bozunur. Bu olay van der Waals denklemi ile nükleer maddenin durum denklemi arasındaki benzerlik temelinde sıvı-gaz tipi faz geçişi ile ilişkilendirilebilir. Nükleer parçalanma olayı ve bunun sonucunda ortaya çıkan sıcak damlaların, sıvı-gaz tipi faz geçişiyle ilişkileri son yıllarda yoğun olarak çalışılmaktadır [12-16].

2. İstatistiksel Çok Katlı Parçalanma Modeli

Nükleer fizikte kullanılan istatistiksel yaklaşım ilk olarak, 1936'da bileşik çekirdek kavramı ile Niels Bohr tarafından önerilmiştir. Daha sonra pek çok bilim adamı farklı istatistik modeller geliştirmişlerdir. Standart bileşik çekirdek hali, sadece düşük uyarma enerjilerinde geçerlidir ve bu durum sistemin buharlaşması ya da fisyonu ile sonuçlanır. Yüksek uyarma enerjilerinde ($E^* > 3 \text{ MeV/nükleon}$) ise çekirdek hızlı bir biçimde irili ufaklı parçacıklara bozunur. Böyle bir sistemi incelemek için, çalışmamızda İstatistiksel Çok Katlı Parçalanma Modeli (Statistical Multifragmentation Model, SMM) kullanıldı [12]. Bu model, donma durumunda ve düşük bir yoğunlukta istatistiksel bir dengenin olduğu kabulüne dayanır ve nükleonlardan oluşan tüm bozunma kanallarını göz önünde bulundurmaz. Ayrıca modele göre bozunma kanallarının topluluğu mikrokanonik olarak kabul edilir ve sistem yük Z , kütle A ve enerji E^* korunum kanunlarına uymalıdır[17]. Mikrokanonik davranışta bozunma kanallarının istatistik ağırlığı

$$W_j \propto \exp(S_j(E^*, A, Z)) \dots\dots\dots (1)$$

biçiminde verilir. Burada S_j , j bozunma kanalının çok parçacıklı durumunun entropisidir. Bozunma kanalları, bu kanalların istatistiksel ağırlığına göre Monte Carlo metodu ile genelleştirilir. Kütle numarası $A \leq 4$ olarak kabul edilen hafif parçacıklar, sadece geçiş serbestlik derecesine sahip olan temel parçacıklardır (nükleer gaz). $A > 4$ olan çekirdekler sıcak sıvı damlası olarak kabul edilir. Bu durumda, donma hacminde nükleer sıvı ve gaz fazın bir arada bulunduğu durum çalışılabilir. Toplam uyarma enerjisi, A_0 nükleon ve Z_0 proton içeren bileşik bir sistemin $E_{A_0, Z_0}^{\text{taban durum}}$ taban seviye enerjisine bağlı olarak ölçülür. Özel bir j konfigürasyonu için E_j enerji değeri, enerji korunum şartları altında

$$E_j = E^* + E_{A_0, Z_0}^{\text{t.d.}} = E \dots\dots\dots (2)$$

biçiminde yazılır. Ayrışma dağılımı ise

$$j: \{N_{AZ}; 1 \leq A \leq A_0, 0 \leq Z \leq Z_0\} \dots\dots\dots (3)$$

biçiminde verilir. N_{AZ} , A kütle numaralı ve Z yüklü parçacıkların sayısını (çarpanını) ifade eder ve 0,1,2,3,... değerlerini alabilir. Bütün son durumlar, parçacık çarpanlarının setine göre

sınıflandırılabilir. Bu set, A_0 elemanlı satırları ve Z_0+1 sütunları olan bir matristir. Satır ve sütun elemanları A ve Z'ye göre düzenlenir. Sistemin toplam kütle ve yükü üzerinde

$$\sum_{(A,Z)} N_{AZ} A = A_0 \quad \text{ve} \quad \sum_{(A,Z)} N_{AZ} Z = Z_0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

sınırlamalarını sağlayan bütün j dağılımları mümkündür. Bir j dağılımının ortalama enerjisi

$$E_j(T_j, V) = E \quad \dots\dots\dots (5)$$

biçiminde yazılır. Burada $E_j(T, V)$ ifadesi

$$E_j(T, V) = E_j^{\text{öteleme}}(T, V) + \sum_{(A,Z)} E_{AZ}(T, V) N_{AZ} + E^C(V) \quad \dots\dots\dots (6)$$

denkleme eşittir. İlk terim parçacıkların öteleme hareket enerjisidir. İkinci terim, parçacıkların iç uyarma ve Coulomb enerjilerini ifade eder. Son terim ise, homojen olarak V hacmine dağılan toplam yükün Coulomb enerjisidir. Bir j dağılımını karakterize eden T_j denge sıcaklığı için denklem (5) dikkate alınmalıdır. Denklem (6)'nın ikinci teriminden izole edilmiş bir çekirdeğin uyarma enerjisi $E = aT^2$ şeklinde yazılabilir. Burada a seviye yoğunluk parametresidir ve $a=A/8$ 'dir[17,18].

Sıcak nükleer sıvı damlası için F_{AZ} serbest enerjisi, hacim, yüzey, Coulomb ve simetri enerjisinin katkılarının toplamı olarak

$$F_{AZ} = F_{AZ}^{\text{Hacim}} + F_{AZ}^{\text{Yüzey}} + F_{AZ}^{\text{Coulomb}} + F_{AZ}^{\text{Simetri}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

biçiminde verilir. Hacim katkısı

$$F_{AZ}^{\text{Hacim}}(T) = -(W_0 + T^2 / \epsilon_0) A \quad \dots\dots\dots (8)$$

ile verilir. Burada, T sıcaklık, ϵ_0 parametresi ise seviye yoğunluğuna bağlı bir parametredir. $W_0=16$ MeV değeri ise sonsuz nükleer maddenin bağlanma enerjisidir. Yüzey enerjisinin katkısı

$$F_{AZ}^{\text{Yüzey}}(T) = B(T) A^{2/3} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ile verilir. $B(T)$ yüzey terimi ise

$$B(T) = B_0 \left(\frac{T_c^2 - T^2}{T_c^2 + T^2} \right)^{5/4} \quad \dots\dots\dots (10)$$

biçimindedir. Burada $B_0=18$ MeV değeri $T=0$ için yüzey terimi ve $T_c=18$ MeV değeri sonsuz nükleer maddenin kritik sıcaklığıdır. Coulomb enerjisinin katkısı

$$E_{AZ}^C = c \frac{Z^2}{A^{1/3}} \quad \dots\dots\dots (11)$$

ile verilir ve Coulomb parametresi c, Wigner-Seitz yaklaşımıyla

$$c = \left(\frac{3}{5} \right) \left(\frac{e^2}{r_0} \right) \left[1 - \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{1/3} \right] \quad \dots\dots\dots (12)$$

biçiminde verilir. e , birim yük, $r_0=1.17$ fm ve ρ_0 normal nükleer maddenin yoğunluğudur ve yaklaşık 0.15 fm^{-3} ile verilir. Son olarak simetri enerjisi,

$$E_{AZ}^{\text{Simetri}} = \gamma(A - 2Z)^2 / A \dots\dots\dots (13)$$

ile verilir ve $\gamma = 25$ MeV simetri enerjisi parametresidir. Tüm parametreler donma hacminde ve normal yoğunlukta izole edilmiş bir parçacık kabulüne karşılık gelen Bethe-Weizsacker formülünden bulunmuştur.

2.1. U²³⁸ Çekirdeğinin Nükleer Çok Katlı Parçalanmasına Yüzey ve Simetri Enerjilerinin Etkileri

Yüzey terimi, B_0 yüzey enerji katsayısı ve T_c kritik sıcaklığı olmak üzere iki parametrenin bir fonksiyonudur. Kritik sıcaklık, sonsuz nükleer maddede nükleer sıvı-gaz faz geçişi için 18 MeV olarak tanımlanır ve bu sıcaklık sıcak çekirdeğin faz geçiş sıcaklığından farklıdır. Sıcak çekirdeğin faz geçiş sıcaklığı daha düşüktür ve 5-6 MeV civarındadır[12]. Nükleer çok katlı parçalanma olayında, yeni parçacıkların oluşumundan sonra sistemin toplam enerjisine yüzey katkısı artacağından yüzey enerjisi oldukça önemlidir. Böylece yüzey enerjisinin küçük değişimleri parçacıkların yük ve kütle dağılımında büyük değişimlere yol açar. Sıcak parçacıkları ve nükleonları içeren düşük yoğunluklu nükleer bir ortamda, yüzey parametreleri değiştirilebilir. Yüzey enerjisinin, donma hacmindeki Au¹⁹⁷ çekirdeğinin parçacık yük dağılımlarına etkisini [1] numaralı referansta inceledik. Bu parametrelerden T_c 'nin mümkün olan değişimlerinin nükleer çok katlı parçalanmaya etkileri ise [2,3,5,6] referanslarında detaylı olarak çalışılmıştır.

Bu çalışmada U²³⁸ çekirdeğinin nükleer çok katlı parçalanması sonucunda oluşan sıcak çekirdeklerin bağıl kütle değerlerinin yüzey enerjisi ve simetri enerjisi ile değişimlerini inceledik. B_0 yüzey enerji katsayısının 16, 18 ve 20 MeV değerleri ve E^* uyarma enerjisinin 3, 5, 6 ve 8 MeV/n değerleri için U²³⁸ çekirdeğinin nükleer çok katlı parçalanması sonucunda oluşan sıcak çekirdeklerin A/A_0 değerlerine karşı bağıl kütle değerlerinin değişimlerini inceledik(Şekil 1). Bununla birlikte yine aynı çekirdek için γ simetri enerjisi katsayısının 8, 16 ve 25 MeV değerlerini kullanarak oluşan sıcak parçacıkların A/A_0 değerlerine karşı bağıl kütle değerlerinin değişimlerini inceledik(Şekil 2).

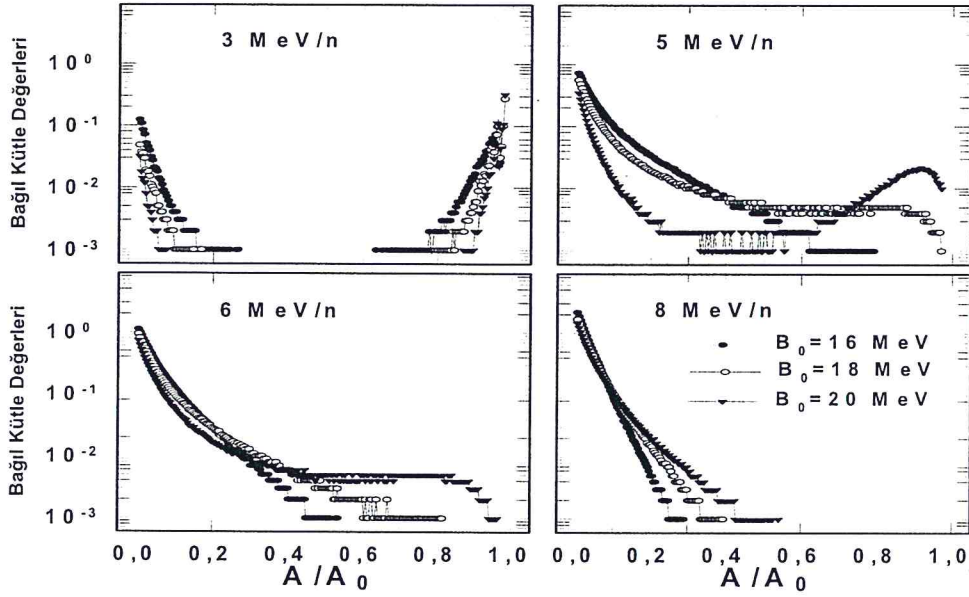
3. Sonuç ve Tartışmalar

İstatistiksel Çok Katlı Parçalanma Modeli kullanılarak U²³⁸ çekirdeğinin çok katlı parçalanmasına yüzey ve simetri enerjisinin etkilerini gösterdik(Şekil 1-2). Düşük uyarma enerjilerinde ($T \leq 5$ MeV), yüzey enerji katsayısının incelenen tüm değerleri için sıcak parçacıkların bağıl kütle değerlerinin U şeklinde bir dağılım gösterdiği görülmüştür(Şekil 1). Bu durum bir büyük artık parçacık ve birkaç küçük parçacıktan oluşan dağılıma karşılık gelir. Yüksek uyarma enerjilerinde ($T \geq 6$ MeV), büyük parçacık gözden kaybolur ve oluşan sıcak parçacıkların dağılımı üstel olarak düşer. Bununla birlikte, sıcak parçacıkların bağıl ürünlerinin B_0 yüzey enerji katsayısının küçük değerlerinde arttığı görülür. Geçiş bölgesi, bu sıcaklık değerlerinin arasındaki değerlerde gözlenir(Şekil 1). Yüzey enerjisinin nükleer çok katlı parçalanmaya etkisini Au¹⁹⁷ çekirdeği için daha önce inceledik[1]. [1] numaralı referans Au¹⁹⁷ çekirdeği için ALADIN S114 deneyinin verilerini içermektedir ve hesaplamalar deneysel verilerle uyum içindedir. U²³⁸ çekirdeğini için yaptığımız soğuk parçalanma ürünlerinin dağılımından elde edilen hesaplamalar da [1] numaralı referansla ve ALADIN S114 deney verileri ile uyumludur.

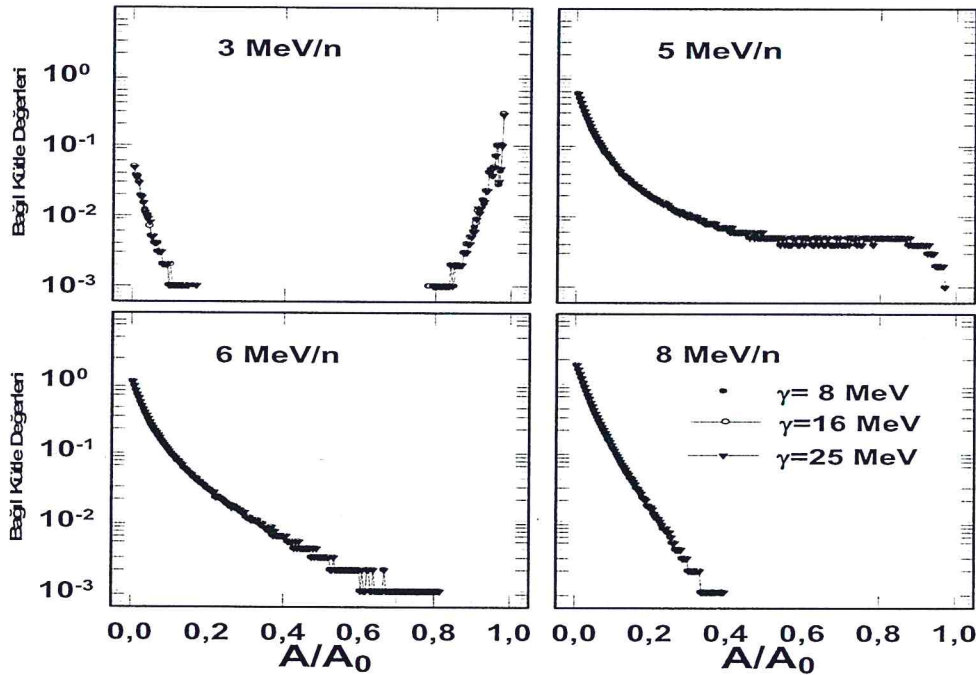
Donma hacmindeki U²³⁸ çekirdeğinin çok katlı parçalanmasına simetri enerjisinin etkisi $E^* = 3, 5, 6$ ve 8 MeV/n uyarma enerjisi değeri için araştırıldı. Yaptığımız yeni hesaplamaların sonucunda U²³⁸ çekirdeğinin çok katlı parçalanması ile oluşan sıcak parçacıkların kütle dağılımları üzerinde de simetri enerjisinin bir etkisinin olmadığı görülmüştür(Şekil 2). Bu sonuç, Ref. [6]'daki, ¹⁹⁷Au, ¹²⁴Sn ve ¹²⁴La çekirdeklerinin çok katlı parçalanması incelenirken, maksimum kütleli parçacıkların dağılımı ve uyarma enerjisiyle sıcaklığın değişiminden (kalorik eğri) elde edilen;

"Nükleer çok katlı parçalanmada oluşan sıcak parçacıkların ortalama karakteristikleri simetri enerjisine çok duyarlı değildir." ifadesini desteklemektedir.

Katkılarından dolayı A. S. Botvina'ya ve R. Oğul'a teşekkür ederiz.



Şekil 1. U^{238} çekirdeğinin nükleer çok katlı parçalanmasında, B_0 yüzey enerji katsayısının 16, 18 ve 20 MeV değerleri ve E^* uyarma enerjisinin 3, 5, 6 ve 8 MeV değerleri kullanılarak hesaplanan sıcak birincil parçacıkların bağıl ürünlerinin A/A_0 ile değişimleri



Şekil 2. U^{238} çekirdeğinin nükleer çok katlı parçalanmasında, γ simetri enerji katsayısının 8, 16 ve 25 MeV değerleri ve E^* uyarma enerjisinin 3, 5, 6 ve 8 MeV değerleri kullanılarak hesaplanan sıcak birincil parçacıkların bağıl ürünlerinin A/A_0 ile değişimleri

Kaynaklar

1. Botvina, A.S., Büyükçizmeçi, N., Erdoğan, M., Lukasik, J., Mishustin, I.N., Oğul, R. ve Trautmann, W., "Modification of Surface Energy in Nuclear Multifragmentation", Phys. Rev. C 74 044609 (2006).
2. Oğul, R., Botvina, A.S., "Critical Temperature of Nuclear Matter and Fragment Distributions in Multifragmentation of Finite Nuclei", Phys. Rev. C 66 051601 (2002).
3. Oğul, R., Büyükçizmeçi, N. ve Botvina, A.S. "Nuclear Fragmentation and Critical Temperature for the Liquid-Gas Phase Transition Region"; Nucl. Phys. A 749 126c (2005).
4. Oğul, R., Atav, Ü., Investigating the droplet formation in a nucleonic vapor, Physica Scripta 67 34 (2003)
5. Büyükçizmeçi, N., Oğul, R. ve Botvina A.S. "Isospin and Symmetry Energy Effects on Nuclear Fragment Production in Liquid-Gas Type Phase Transition Region", Eur. Phys. Journal A 25 57 (2005).
6. Büyükçizmeçi, N., Nükleer Çok Katlı Parçalanmaya Çekirdek Yükünün Etkileri, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya (2005).
7. Scharenberg, R. P. ve ark. "Comparison of 1 A GeV $^{197}\text{Au}+\text{C}$ Data With Thermodynamics: The Nature of The Phase Transition in Nuclear Multifragmentation", Phys. Rev. C 64 054602 1-19 (2001).
8. Pienkowski, L. "Breakup Time Scale Studied in the 8 GeV/c π^- + ^{197}Au Reaction", Phys. Rev. C 65 064606 (2002).
9. D'Agostino, M. ve ark. "Statistical Multifragmentation in Central Au+Au Collisions at 35 MeV/u", Phys. Lett. B 371 175 (1996).
10. Botvina, A.S. ve ark. "Multifragmentation of Spectators in Relativistic Heavy-Ion Reactions", Nucl. Phys. A 584 737 (1995).
11. Avdeyev S.P., Karnaukhov, V. A., Petrov, L. A. ve ark. "Comparative Study of Multifragmentation of Gold Nuclei Induced by Relativistic Protons, ^4He and ^{12}C ", Nucl. Phys. A 709 392 (2002).
12. Bondorf, J. P., Botvina, A.S., Iljinov, A.S., Mishustin, I. N. ve Sneppen, K. "Statistical Multifragmentation of Nuclei" Phys. Rep. 257 133 (1995).
13. Botvina, A. S. ve Mishustin, I. N. "Statistical Evolution of Isotope Composition of Nuclear Fragments", Phys. Rev. C 63 061601 (2001).
14. Goodman, A. I., Kapusta, I. J. ve Mekjian, A. Z. "Liquid-Gas Phase Instabilities and Droplet Formation in Nuclear Reactions", Phys. Rev. C 30 851 (1984).
15. Siemens, P. J. "Liquid-Gas Phase Transition in Nuclear Matter", Nature 305 410 (1983).
16. Oğul, R. "On The Spinodal Instabilities at Subnuclear Densities", Int.J. Mod. Phys. E 7(3) 419 (1998).
17. Bethe, H., "Nuclear Physics B. Nuclear Dynamics, Theoretical", Rev. Mod. Phys. 9 69 (1937).
18. Mustafa, M.G., Blann, M., Ignatyuk, A.V. ve Grimes, S.M., "Nuclear Level Densities at High Excitations", Phys. Rev. C 45 (3) 1078 (1992).