

Nükleer Parçalanmada Kütle Dağılımlarına ve Sıcaklığa Yüzey Enerjisinin Etkileri

Mehmet ERDOĞAN¹, Nihal BÜYÜKÇİZMECİ

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

Özet: Bu çalışmada, uyarılmış sonlu çekirdeğin ayrışması sonucu oluşan sıcak parçacıkların kütle dağılımlarına ve sıcaklık değişimlerine yüzey enerjisinin etkileri araştırıldı. 2-12 MeV/nükleon aralığında uyarma enerjisine sahip U^{238} çekirdeğinin, nükleer ayrışması sonucunda oluşan maksimum kütleli parçacık A_{max} ve T sıcaklığının yüzey enerjisi ile değişimleri incelendi. Yüzey enerjisinin, nükleer çok katlı parçalanmada kütle dağılımı oluşumunu, maksimum kütleli parçacık oluşumunu ve parçacıkların sıcaklığını etkilediği görüldü. Sıcaklığın uyarma enerjisi ile değişiminin, farklı yüzey enerjileri için sıvı-gaz faz geçiş bölgesinde plato benzeri bir davranış sergilediği gösterildi.

Anahtar kelimeler: Nükleer çok katlı parçalanma, yüzey enerjisi, kütle dağılımı, faz geçişi

The Effects of Surface Energy On the Mass Distributions and the Temperature in the Nuclear Fragmentation

Abstract: In this study, the effects of surface energy on the mass distribution and the temperature variation of the hot fragments forming in the result of fragmentation of excited finite nuclei have been investigated. The variations of the fragment with maximum mass occurring in the result of nuclear fragmentation in U^{238} nucleus with the excitation energy in the range of 2-12 MeV/nucleon and of the temperature T with the surface energy have been analyzed. It has been seen that the surface energy has effected on the mass distribution, on the forming of fragment with maximum mass and on the temperature of fragments in the nuclear multifragmentation. It has been shown that the variation of temperature with the excitation energy for different surface energies show in the region of liquid-gas phase transition.

Key Words: Nuclear multifragmentation, surface energy, mass distribution, phase transition

¹ E-mail:merdogan@selcuk.edu.tr

1. Giriş

Son yıllarda nükleer reaksiyonlarda çok katlı parçalanma olayı pek çok laboratuvarında geniş bir şekilde araştırılmıştır. Ağır iyon reaksiyonlarında, sıcaklık ve basıncın sınır şartlarında nükleer maddenin davranışını ve alt nükleer yoğunluklarda mümkün faz geçişlerini çalışmak için en ilginç olaylardan biri nükleer çok katlı parçalanmadır. Hedef çekirdeğin, hafif parçacıklar ve ağır iyonlarla tamamen esnek olmayan (deep-inelastic) çarpışmaları, nükleer sistemi, nükleer taban durumdan uyarılmış durumdaki ara nükleer sisteme dönüştürebilir. Uyarma enerjisi yeterince yüksekse, çekirdeğin iç özellikleri, özellikle kabuk yapısı önemini kaybeder. Bu durumda çekirdek veya hadronik maddenin uyarılmış durumdaki özellikleri çalışılabilir. Yeterince yüksek uyarma enerjilerinde çekirdek, sıkışmış ve sıcak bir ara durum gibi düşünülebilir. Uyarma enerjisi yüksek olduğu için sistem termodinamik dengeye ulaşmak için genişleme sürecine girer ve bu sürecin sonunda irili ufaklı sıcak parçalara ayrılır. Bu durumda iri nükleer damlaların sıvı fazı ve küçük parçacıkların gaz fazı oluşturduğu düşünülebilir. Uyarılmış nükleer madde bir sıvı-gaz faz geçişi düşünülerek parçalanma olayı çalışılabilir[11,12]. Dolayısıyla, nükleer maddenin tipik olarak sıvı-gaz faz geçişi gösteren karakteristik bir van der Waals davranışına sahip olduğunu söyleyebiliriz. Nükleer çok katlı parçalanma olayı, düşük yoğunluklarda ($\rho \approx \rho_0 / 3$ ve $\rho_0 = 0.15 \text{ fm}^{-3}$) ve düşük sıcaklıklarda ($T \approx 3-8 \text{ MeV}$) nükleer maddenin faz diyagramını, nükleer parçalanma sonucu oluşan irili ufaklı sıcak parçacıkların özelliklerini çalışmak bakımından ve bazı astrofiziksel olayların anlaşılması bakımından önem taşımaktadır. Nükleer maddenin sıvı-gaz tipi faz geçişi ile ilişkisi ve nükleer çok katlı parçalanma olayına izospin, simetri enerjisi ve yüzey enerjisinin etkileri son yıllarda çalışılan güncel konular arasında yer almaktadır[1-13]. Daha önceki çalışmalarımızda, sonlu bir çekirdeğin ayrışması sonucunda oluşan sıcak parçacıkların simetri enerjisi ve yüzey enerjisi gibi bazı özelliklerini araştırdık [5-8,10,18]. Bu çalışmamızda, U^{238} çekirdeğinin çok katlı parçalanması sonucu oluşan sıcak parçacıkların kütle dağılımlarının yüzey enerjisi ile değişimi incelendi. Yüzey enerjisinin, ayrışma sonucu oluşan parçacıkların sıcaklığına ve maksimum kütleli parçacığa etkisi incelenerek sonuçlar yorumlandı.

2. Nükleer Ayrışmanın İstatistiksel Tanımı

Nükleer parçalanma için kullanılan istatistiksel modellerden birisi de İstatistiksel Çok Katlı Parçalanma Modelidir (Statistical Multifragmentation Model, SMM)[1]. İstatistiksel Çok Katlı Parçalanma Modeli, ayrışmadan hemen önce parçacıklar arasında bir termodinamik dengenin olduğu kabulüne dayanır. Modelde nükleonlardan oluşan tüm bozunma kanalları göz önünde bulundurulur. Bu modelin temelleri ilk olarak, 1936'da bileşik çekirdek kavramı ile Niels Bohr tarafından atılmıştır. Standart bileşik çekirdek durumu düşük uyarma enerjilerinde görülür ($E \leq 1-2 \text{ MeV/n}$). Bu durumda bileşik çekirdekte buharlaşma ya da fisyon kanalları baskındır. Nükleon başına daha yüksek uyarma enerjilerinde ($E \geq 2-8 \text{ MeV/n}$), çekirdeğin bozunma kanallarının sayısı oldukça fazladır. Bu durumda, parçacıkların son durumlarını tanımlamak için istatistiksel yaklaşımlar kullanmak daha uygun olur. Çünkü istatistiksel yaklaşımda tüm olası son durumlar seçilir ve bağıl olasılıkları hesaplanır. Her bir bozunma kanalının olma olasılığı onun istatistiksel ağırlık fonksiyonu ile verilir. İstatistiksel ağırlık fonksiyonu tüm bozunma kanalları üzerinden toplam enerji, kütle ve yük korunumu göz önüne alınarak hesaplanmalıdır. Mikrokanonik davranışta bozunma kanallarının istatistik ağırlığı

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

ile 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 damlaları olarak kabul edilir. Bu durumda, donma hacminde nükleer sıvı ve gaz fazın bir arada bulunduğu durum çalışılabilir. İstatistiksel Çok Katlı Parçalanma Modelinde sıcak parçacıkların yüzey serbest enerjisi

$$F_{AZ}^{yüzey}(T) = B(T)A^{2/3} \quad (2)$$

ile verilir. $B(T)$ yüzey terimi ise

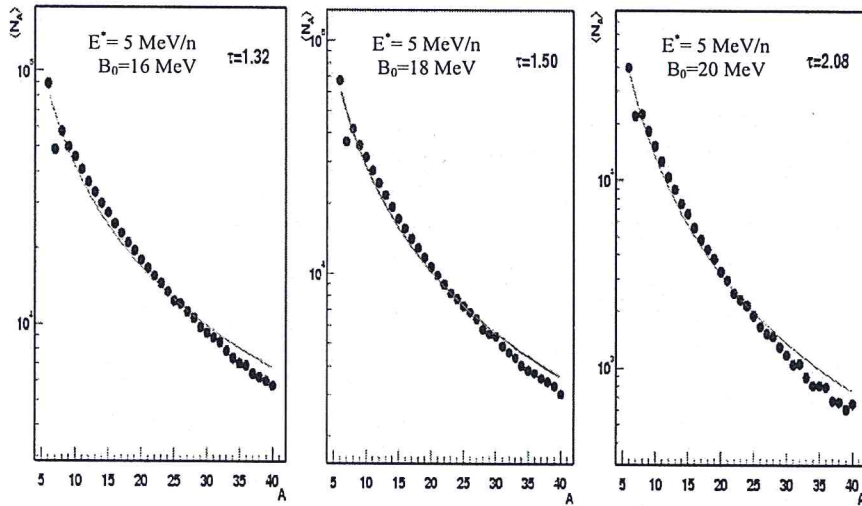
$$B(T) = B_0 \left(\frac{T_c^2 - T^2}{T_c^2 + T^2} \right)^{5/4} \quad (3)$$

biçimindedir. Burada $B(0)=B_0 \approx 18$ MeV değeri Bethe-Weizsacker formülündeki yüzey katsayısıdır. $T_c=18$ MeV değeri sonsuz nükleer maddenin kritik sıcaklığıdır. Hesaplamalarda kullandığımız İstatistiksel Çok Katlı Parçalanma Modeli'nde tüm parametreler donma hacminde ve normal yoğunlukta izole edilmiş bir parçacık kabulüne dayanan Bethe-Weizsacker formülünden elde edilmiştir. İstatistik modeller kullanılarak elde edilen parçacık dağılımları genellikle, deneylerden[4,7,14-17] elde edilen verileri başarıyla doğrulamaktadır.

2.1. Nükleer ayrışma sonucu oluşan parçacıkların kütle dağılımlarına ve sıcaklıklarına yüzey enerjisinin etkileri

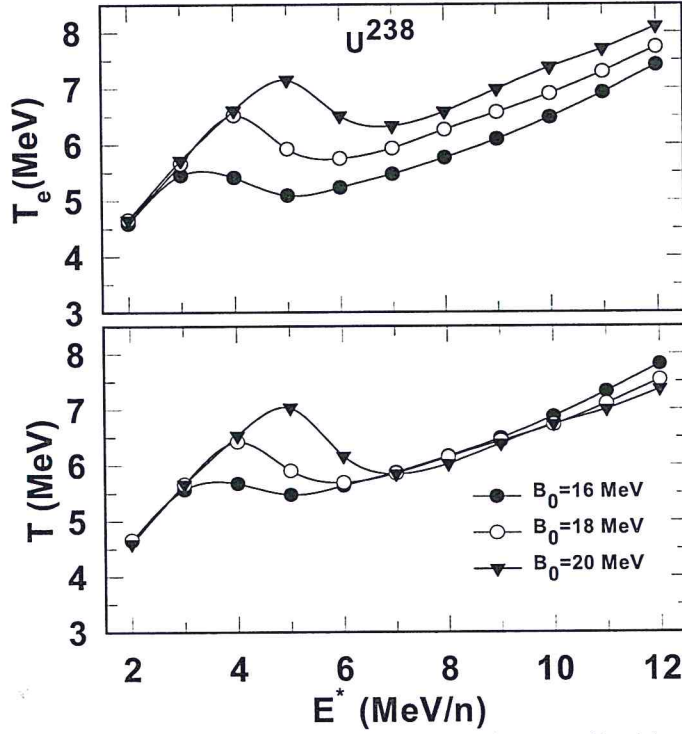
Sıcak parçacıklar için yüzey serbest enerjisi ve yüzey terimi sırayla denklem[2] ve denklem[3] ile verildi. Bu denklemlerden de görüldüğü gibi yüzey terimi, yüzey enerji katsayısı B_0 , kritik sıcaklık T_c ve donma sıcaklığı T parametrelerine bağlıdır. Nükleer çok katlı parçalanmada yüzey enerjisine sıcaklığın katkısı büyüktür. Burada T_c sıcaklığı, sonlu bir çekirdeğin parçalanma sıcaklığından ayırt edilmelidir. Sonlu bir çekirdek için parçalanma sıcaklığı T_c sıcaklığından daha düşüktür ve 5-6 MeV civarındadır[1]. 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 Au^{197} çekirdeğinin parçacık yük dağılımlarına etkisi [7] numaralı referansta incelendi. Bu parametrelerden T_c 'nin mümkün olan değişimlerinin nükleer çok katlı parçalanmaya etkileri ise [2,3,5,6] referanslarında detaylı olarak çalışılmıştır.

Nükleer parçalanma sonucunda oluşan orta kütleli parçacıkların kütle ve yük dağılımları $A^{-\tau}$ ve $Z^{-\tau_z}$ terimleri ile orantılı bir kuvvet kanunu ile verilir. Burada τ ve τ_z sırayla kütle ve yük dağılımı için kritik üstel parametreleridir. İstatistiksel Çok Katlı Parçalanma Modeli kullanılarak U^{238} çekirdeği için $E=5$ MeV/nükleon uyarma enerjisinde farklı yüzey enerji katsayıları için τ parametreleri hesaplandı(Şekil 1). Buna göre $B_0=16, 18$ ve 20 MeV değerleri için τ parametresi sırayla 1.32, 1.50 ve 2.08 olarak hesaplandı. Bu hesaplamalardan, B_0 yüzey katsayısının değeri büyüdükçe, hesaplanan τ parametresinin de arttığı görüldü. Bu durum, yüzey enerjisinin artmasıyla, çekirdeğin parçalanmaya karşı daha kararlı hale geldiğini gösterir. ALADIN S114 deneyinde Au, U ve Xe çekirdekleri için kütle dağılımından elde edilen τ parametrelerinin $B_0=18$ MeV için yapılan hesaplamalarla uyumlu olduğu görülmüştür[7]. Hesaplamamızda orta kütleli parçacıkların kütleleri $5 < A \leq 40$ ve yükleri $4 < Z \leq 15$ aralığında seçildi. Daha hafif parçalar nükleer gaz olarak kabul edildi.



Şekil 1. U^{238} çekirdeğinin çok katlı parçalanmasında oluşan sıcak parçacıklar için $E^*=5$ MeV/n uyarma enerjisinde ve B_0 yüzey katsayısının 16, 18 ve 20 MeV değerlerinde hesaplanan τ parametreleri.

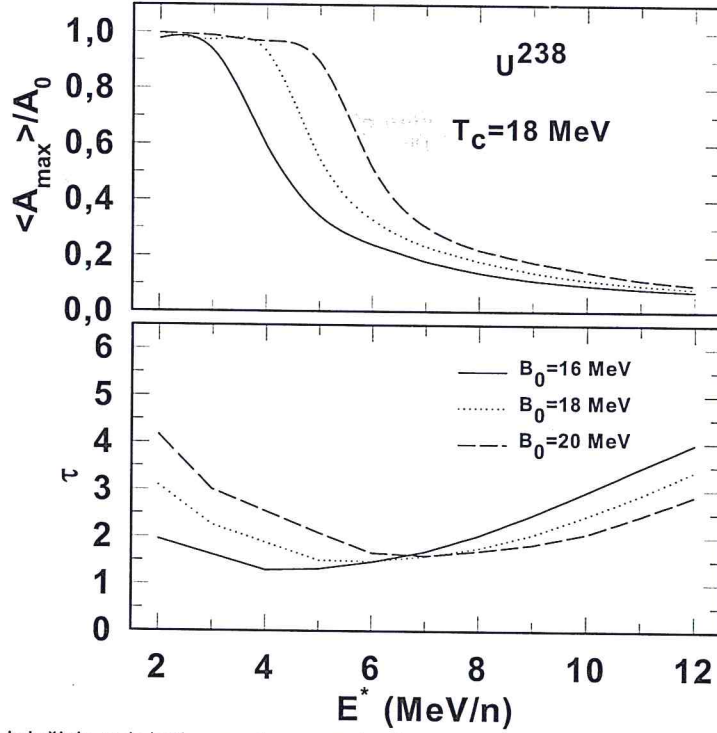
Donma hacmindeki sistemin termodinamiksel özellikleri, parçacıkların yüzey enerjisinin değişiminden etkilenir. Sıcak parçacıklar donma hacmini terk ederek bozunur ve onların normal özellikleri değişir. Dolayısıyla donma hacmindeki çekirdek ile izole edilmiş çekirdek arasındaki farklılığı vurgulamak için iki farklı sıcaklık tanımlanır. Bunlardan ilki T_e , etkin sıcaklıktır ve parçacıkların özelliklerinin izole edilmiş çekirdeğin özellikleri ile aynı olduğu kabul edilerek donma hacmindeki enerji dengesinden bulunur. Etkin sıcaklık parçacıkların taban durumlarına göre iç uyarılmalarını yansıtır. Böylece etkin sıcaklık, aynı uyarılmada bileşik çekirdekte ulaşılmış sıcaklık ile karşılaştırılabilir. Diğer sıcaklık ise T , donma sıcaklığıdır ve nükleer bir ortamdaki parçacıkların özelliklerinin değişimlerini kapsar. Her iki sıcaklığın uyarma enerjisi ile değişimleri Şekil (2)'de gösterildi. Düşük uyarma enerjilerinde her iki sıcaklıkta benzer davranış sergiler. Yüzey enerji katsayısı B_0 değerinin düşük olduğu durumlarda etkin sıcaklık değerinin donma sıcaklığına göre daha düşük olduğu görülür. Yüksek uyarma enerjilerinde ise sistem hafif parçacıklara bozunduğundan daha küçük yüzey enerji katsayısı değerlerinde, donma sıcaklığının daha yüksek değerler aldığı görülür (Şekil 2). Bu olayın fiziksel açıklaması, yüzey teriminin küçülmesinin parçacıkların iç uyarılmalarını yansıtan seviye yoğunluk parametresinin de küçülmesine yol açmasıdır. Enerji dengesinin sağlanması için de donma sıcaklığının daha yüksek değer alması gerekir.



Şekil 2. U^{238} çekirdeğinin çok katlı parçalanmasında oluşan sıcak parçacıklar için yüzey enerji katsayısı $B_0=16, 18$ ve 20 MeV değerlerinde etkin sıcaklık ve donma sıcaklığının uyarma enerjisine göre değişimleri.

Nükleer çok katlı parçalanmada oluşan en büyük kütleli parçacık A_{max} ile ifade edilir ve bu ifade seviye parametresi olarak kullanılabilir. Bu ilişkiden dolayı U^{238} çekirdeğinin farklı yüzey enerjileri için hesaplanan A_{max} değerinin davranışı uyarma enerjisine göre, U^{238} çekirdeğinin kütle numarası A_0 cinsinden incelendi. U^{238} çekirdeği için hesaplanan A_{max}/A_0 değerleri, uyarma enerjisinin bir fonksiyonu olarak farklı yüzey enerjisi parametreleri için gösterildi (Şekil 3). Buradan, artan uyarma enerjisiyle maksimum kütleli parçacığın değerinin düştüğü görülmektedir. Bu keskin düşüşün başladığı ve bittiği ara bölge nükleer parçalanmanın olduğu uyarma enerjisi aralığına karşılık gelir.

τ parametresi kütle dağılımının değişiminde genel bir davranışa sahiptir ve bu davranış farklı yüzey enerji katsayıları için uyarma enerjisine bağlıdır. Şekil (3)'ün alt panelinde, U^{238} çekirdeğinin çok katlı parçalanmasında oluşan sıcak parçacıkların yüzey enerji katsayısının $B_0=16, 18$ ve 20 MeV değerleri için τ parametresinin uyarma enerjisiyle değişimleri gösterildi. Düşük uyarma enerjilerinde, çekirdeğin yüzey enerjileri düştükçe τ parametresinin de düştüğü görülmektedir. Yani düşük yüzey enerjisine sahip bir çekirdek daha düşük uyarma enerjilerinde parçalanır. Yüzey enerjisinin artmasıyla τ parametresinin minimum olduğu uyarma enerjisi de artar. τ parametresinin küçük değerleri, en büyük parçanın olma olasılığının sıcaklıkla ciddi biçimde azaldığını gösterir. Yüksek uyarma enerjilerinde yüzey enerjisinin etkisi, sıcaklıkla hızla azalacağı için çekirdek, düşük sıcaklıklı daha küçük parçacıklara ayrılacaktır. Dolayısıyla, yüksek uyarma enerjilerinde çekirdeklerin yüzey enerjileri arttıkça τ parametresinin de düştüğü görülmektedir.



Şekil 3. U^{238} çekirdeğinin çok katlı parçalanmasında oluşan sıcak parçacıklar için yüzey enerji katsayısı $B_0=16, 18$ ve 20 MeV değerlerinde maksimum kütleli parçacık A_{\max} ve τ parametresinin uyarma enerjisine göre değişimleri.

3. Sonuçlar ve Tartışma

İstatistiksel Çok Katlı Parçalanma Modeli kullanılarak U^{238} çekirdeğinin çok katlı parçalanması sonucu oluşan sıcak parçacıkların kütle dağılımlarının, parçacıkların sıcaklık değerlerinin ve maksimum kütleli parçacığın yüzey enerjisiyle değişimi gösterildi (Şekil 1-3). Daha önceki çalışmamızda ise U^{238} çekirdeği için, yüzey enerjisinin bağlı kütle değerlerini etkilediği, simetri enerjisinin ise etkilemediği gösterildi [18]. Yüzey enerji katsayısı $B_0=16, 18$ ve 20 MeV değerlerinde, uyarma enerjisi $E^*=5$ MeV/n alınarak hesaplanan τ kritik üstel parametresinin yüzey enerjisi ile arttığı görüldü. Bu da, yüksek yüzey enerjisine sahip çekirdeklerin daha yüksek uyarma enerjilerinde parçalandığını gösterir (Şekil 1). Şekil (2)'de farklı yüzey enerjileri için etkin sıcaklık ve donma sıcaklığının uyarma enerjisi ile değişimleri gösterildi. Şekil (3)'te ise nükleer parçalanma sonucu oluşan, maksimum kütleli sıcak parçacığın ve parçacık kütle dağılımlarının yüzey enerjisi ile değiştiği gösterildi. Hesaplamalar, uyarma enerjisinin $E^*=2-12$ MeV/nükleon olduğu aralıkta yapıldı. Uyarma enerjisinin $E^*=3-7$ MeV/nükleon olduğu aralıkta (iki fazın bir arada bulunduğu (coexistence) bölge), τ kritik üstel parametresi minimum değere ulaştığı görüldü. Ayrıca bu bölgede maksimum kütleli parçacığın değerinin uyarma enerjisi ile hızla azaldığı görüldü. Yüzey enerjisinin nükleer çok katlı parçalanmaya etkisi Au^{197} çekirdeği için [7] numaralı referansta incelendi. [7] numaralı referans Au^{197} çekirdeği için ALADIN S114 deneyinin verilerini içermektedir ve hesaplamalar deneysel verilerle uyum içindedir. U^{238} çekirdeğini için yaptığımız hesaplamalar da deneysel verilerle [7] ve ALADIN S114 deney verileri ile uyumludur.

Çalışmalarımızda, bilgi ve önerilerini bizimle paylaşan A.S. Botvina ve R. Oğul'a teşekkür ederiz.

Kaynaklar

1. Bondorf, J. P., Botvina, A.S., Iljinov, A.S., Mishustin, I. N. ve Sneppen, K. "Statistical Multifragmentation of Nuclei" Phys. Rep. 257 133 (1995).
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. Botvina, A.S., Mishustin, I. N., Begemann-Blaich, M. ve ark. "Multifragmentation of Spectators in Relativistic Heavy-Ion Reactions", Nucl. Phys. A 584 737 (1995).
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, (2005).
7. 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).
8. Erdoğan, M., Buyukcizmeçi, N. Ve Ogul, R. "Fragmentation of Xe¹²⁹ in the Liquid-Gas Phase Transition Region", Turkish Journal of Chemistry 31 403-409 (2007).
9. Botvina, A. S. ve Mishustin, I. N. "Statistical Evolution of Isotope Composition of Nuclear Fragments", Phys. Rev. C 63 061601 (2001).
10. Erdoğan, M., "Artık Çekirdek İstatistik Topluluğunun Rasgele Hesaplanması: Yüzey Enerjisinin Nükleer Çok Katlı Parçalanmaya Etkisi", Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2007).
11. 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).
12. Siemens, P. J. "Liquid-Gas Phase Transition in Nuclear Matter", Nature 305 410 (1983).
13. Ogul, R. "On The Spinodal Instabilities at Subnuclear Densities", Int.J. Mod. Phys. E 7(3) 419 (1998).
14. Scharenberg, R. P., Srivastava, B. K., Albergo, S. ve ark. "Comparison of 1 A GeV ¹⁹⁷Au+C Data With Thermodynamics: The Nature of The Phase Transition in Nuclear Multifragmentation", Phys. Rev. C 64 054602 1-19 (2001).
15. Pienkowski, L., Kwiatkowski, K., Lefort, T. Ve ark. "Breakup Time Scale Studied in the 8 GeV/cπ⁺¹⁹⁷Au Reaction", Phys. Rev. C 65 064606 (2002).
16. D'Agostino, M., Botvina, A. S., Milazzo, P. M. ve ark. "Statistical Multifragmentation in Central Au+Au Collisions at 35 MeV/u", Phys. Lett. B 371 175 (1996).
17. Bellaïze, N., Lopez, O., Wieleczko, J. P. ve ark. "Multifragmentation Process for Different Mass Asymmetry in the Entrance Channel Around the Fermi Energy", Nucl. Phys. A 709 367 (2002).
18. Erdoğan, M. ve Büyükçizmeçi, N. "Sıvı-Gaz Faz Geçiş Bölgesinde U²³⁸ Çekirdeğinin Nükleer Çok Katlı Parçalanmasına Yüzey ve Simetri Enerjisinin Etkileri" S.Ü. Fen-Edebiyat Fak. Fen Dergisi, Sayı:31, 47-52 (2008).

