

## UYARILMIŞ $^{124}\text{Sn}$ ve $^{124}\text{La}$ ATOMİK ÇEKİRDEKLERİNİN PARÇALANMA ÜRÜNLERİNDEKİ FARKLILIKLARIN İNCELENMESİ

Tuğba Aybar \*, Rıza Oğul

Selçuk Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Konya-TÜRKİYE  
e-mail: tubaaybaar@gmail.com

(Geliş: 13 Şubat 2015; Düzeltme: 19 Nisan 2015; Kabul: 29 Nisan 2015)

**Özet:** Sıcak çekirdeğin parçalanması sonucu açığa çıkan ürünler yardımıyla çekirdeğin iç yapısıyla ilgili birçok bilgi elde edilebilmektedir. Çeşitli reaksiyonlar için uyarılma enerjisinin parçalanma ürünlerine etkileri için istatistiksel çok katlı parçalanma modelini (SMM) kullanarak sonuçlar elde ettik. Bu amaçla istatistiksel çok katlı parçalanma modeli (SMM) temelinde  $^{124}\text{Sn}$  ve  $^{124}\text{La}$  çekirdeklerinin yük ve kütle dağılımlarını analiz ettik. Bunlara ek olarak farklı uyarılma enerjilerinde T sıcaklıklarını belirleyip, bu sıcaklık değerlerinin uyarılma enerjileriyle değişimlerinin sıvı-gaz faz geçişiyle ilişkisi gösterilmiştir. Farklı ortalama nötron-proton oranlarına sahip atomik çekirdekler için, simetri enerji katsayısının parçacık yük dağılımına ve kütle dağılımına etkisi Ex (uyarma enerjisi) değerleri için araştırıldı. Simetri enerji parametresi 25 MeV, 14MeV ve 8 MeV değerleri için hesaplamalar yapıldı. Parçacıkların simetri enerjisinin yük dağılımını ve kütle dağılımını temel olarak etkilemediği gözlemlendi.

**Anahtar kelimeler:** İstatistiksel Çok Katlı Parçalanma Modeli, kütle dağılımı, yük dağılımı, kalorik eğri, simetri enerjisi.

## INVESTIGATION OF THE DIFFERENCES IN FRAGMENTATION PRODUCTS OF EXCITED $^{124}\text{Sn}$ AND $^{124}\text{La}$ ATOMIC NUCLEI

**Abstract:** With the help of the properties of fragments which are derived from the disintegration of hot nuclei, it is likely to bring information about inside of the nuclei. We have obtained some results with different excitation energies which effects the fragmentation yields for different reactions, using the Statistical Multifragmentation Model (SMM). For this purpose we have analyzed the charge and mass distributions of  $^{124}\text{Sn}$  and  $^{124}\text{La}$  on the basis of the Statistical Multifragmentation Model (SMM). In addition to these calculations, we have determined the values of temperature T and their relations to the liquid-gas phase transition at different excitation energies. Influence of the symmetry energy parameter gamma on charge distributions and mass distributions of produced fragments in different ranges the excitation energy Ex is investigated for the nuclei with different neutron-proton ratios. The symmetry energy parameters used in the calculations were 25 MeV, 14 MeV and 8 MeV. We observed that the symmetry energy of individual fragments does not essentially influence the charge distributions and mass distributions.

**Keywords:** Statistical Multifragmentation Model (SMM), mass distributions, charge distributions, caloric curve, symmetry energy.

## 1. Giriş

Nükleer reaksiyonlarda çok katlı parçalanma olayı son yıllarda pek çok laboratuarda geniş bir şekilde araştırılmıştır (Scharenberg ve ark. 2001, Avdeyev ve ark. 2002). Ağır iyon reaksiyonlarında, sıcaklık ve basıncın sınır şartlarında nükleer maddenin davranışını ve alt nükleer yoğunluklarda mümkün faz geçişlerini çalışmak için en uygun olaylardan biri de 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 dönüştürülebilir. 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. Dolayısıyla, nükleer maddenin tipik olarak sıvı-gaz faz geçişi gösteren karakteristik bir van der Waals davranışı ile ilişkilendirilebilir. 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 süpernova dinamikleri ve nötron yıldızları gibi astrofiziksel olayları anlamamız açısından çok önemlidir. Nükleer maddenin sıvı-gaz tipi faz geçişi ile ilişkisi ve nükleer çok katlı parçalanma olayına simetri enerjisinin etkileri son yıllarda çalışılan güncel konular arasında yer almaktadır (Bondorf ve ark. 1995). Bu çalışmamızda, nükleon başına 0,5-15 MeV uyarma enerjisi aralığındaki, çekirdeklerin kütle dağılımları için yapılan hesaplamalar tartışılarak, nükleon başına uyarma enerjisinin sıcaklıkla değişiminin grafiği (kalorik eğri) verildi. İstatistiksel artık çekirdek topluluğu modeli kullanılarak  $^{124}\text{Sn}$  ve  $^{124}\text{La}$  için simetri enerjisinin kütle ve yük dağılımına etkisi hesaplandı.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. İstatistiksel Çok Katlı Parçalanma Modeli

İstatistiksel Çok Katlı Parçalanma Modeli, ayrışmadan hemen önce parçacıklar arasında bir termodinamik dengenin olduğunun kabul edilmesine dayanır. Modelde nükleonlardan oluşan tüm bozunma kanalları göz önünde bulundurulur. Bu modelin temeli ilk olarak, 1936'da bileşik çekirdek kavramı ile Niels Bohr tarafından atılmıştır. Daha sonra pek çok bilim adamı farklı istatistik modeller geliştirmişlerdir. 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 ( $E^* \geq 2 - 8 \text{ MeV/n}$ ), çekirdek hızlı bir biçimde irili ufaklı parçacıklara bozunur. Böyle bir sistemi incelemek için, çalışmamızda İstatistik Çok Katlı Parçalanma Modeli (Statistical Multifragmentation Model, SMM) kullanıldı (Bondorf ve ark. 1995). Bu model, donma durumunda ve düşük yoğunlukta istatistiksel bir dengenin olduğu kabulüne dayanır ve nükleonlardan oluşan tüm bozunma kanalları göz önünde bulundurulabilir. Ayrıca modele göre bozunma kanallarının topluluğu mikrokronik olarak kabul edilir ve sistem yük  $Z$ , kütle  $A$  ve enerji  $E^*$  korunum kanunlarına uymalıdır (Bethe ve ark. 1937). Mikrokronik davranışta bozunma kanallarının istatistik ağırlığı

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

biçiminde ifade edilir. Burada  $S_j$ ,  $j$  bozunma kanalının çok parçacıklı durumun entropisidir. Bozunma kanalları, bu kanalların istatistiksel ağırlığına göre Monte Carlo metodu ile genel hale getirilir. Kütle numarası  $A \leq 4$  olarak kabul edilen hafif parçacıklar, sadece geniş 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  $E_{A_0, Z_0}^{taban durum}$  taban seviye enerjisine bağlı olarak ölçüm yapılır. Özel bir  $j$  konfigürasyonu için  $E_j$  enerji değeri, enerji korunumu şartı altında

$$E_j = E^* + E_{A_0, Z_0}^{taban durum} = E \quad (2)$$

biçimde ifade edilir. Ayrışma dağılımı ise

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

biçiminde yazılır.  $N_{AZ}$ ,  $A$  kütle numaralı ve  $Z$  yüklü parçacıkların sayısını (çarpımını) ifade eder ve  $0, 1, 2, 3, \dots$  değerlerini alabilir. Bütün son durumlar, parçacık çarpınlarının 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

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

Sınırlamaları sağlayan bütün  $j$  dağılımları mümkündür. Burada toplam,  $j$  dağılımına ait bütün parçacıklar üzerinden alınır. Bir  $j$  dağılımının ortalama enerjisi

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

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

$$E_j(T, V) = E_j^{\circ}(T, V) + \sum_{(A,Z)} E_{AZ}(T, V) N_{AZ} + E_0^C(V) \quad (6)$$

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 (Bethe ve ark. 1937 ve Mustafa ve ark. 1992).

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

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

biçiminde verilir. Hacim katkısı

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

ile ifade edilir. Burada, T sıcaklık,  $\epsilon_0$  parametresi ise seviye yoğunluğuna bağlı bir parametredir.  $W_0=16$  MeV değeri ise sonsuz nükleer maddenin bağlanma enerjisidir. Yüzey enerjisinin kat sayısı

$$F_{AZ}^{yüzey}(T) = 4\pi R_{AZ}^2 \sigma(T) = B(T)A^{2/3} \quad (9)$$

ile ifade edilir. B(T) yüzey terimi ise

$$B(T) \equiv 4\pi r_0^2 \sigma(T) = B_0 \left( \frac{T_c^2 - T^2}{T_c^2 + T^2} \right)^{5/4} \quad (10)$$

Biçiminde ifade edilir. Burada  $B_0=18$  MeV değeri  $T=0$  için yüzey terimi ve  $T_c=18$  MeV değeri sonsuz nükleer maddenin kritik sıcaklığıdır. Coulomb enerjisinin kat sayısı

$$E_{AZ}^C = \frac{3}{5} Z^2 e^2 \left( \frac{1}{R_{AZ}} - \frac{1}{R_{AZ}^C} \right) \quad (11)$$

ile verilir. Son olarak simetri enerjisi,

$$F_{AZ}^{Simetri} = E_{AZ}^{Simetri} = \gamma(N - Z)^2 / A \quad (12)$$

ile ifade edilir 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.

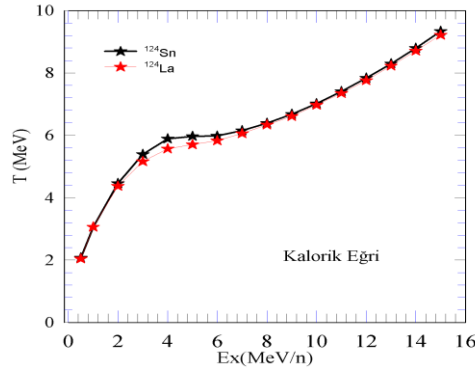
### 3. Araştırma Sonuçları ve Tartışma

İstatistik çok katlı parçalanma modeli kullanılarak  $^{124}\text{Sn}$  ve  $^{124}\text{La}$  çekirdeklerinin parçalanma özelliklerini belirlemek için hesaplamalar yaptık. İncelediğimiz çekirdekler olan  $^{124}\text{Sn}$  ve  $^{124}\text{La}$  çekirdekleri aynı kütle numarasına sahip olmasına rağmen N/Z oranları (1,48 ve 1,18) farklıdır.

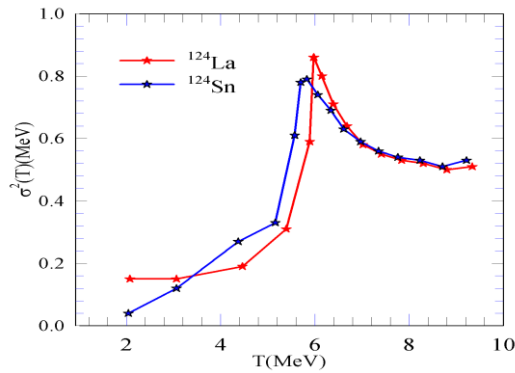
#### 3.1.1. Uyarılma Enerjisi ile Sıcaklığın Değişiminin Hesaplanması

Bugüne kadar yapılan deneysel çalışmalarda nükleer parçalanma reaksiyonları sonucunda ‘rise-and-fall’, kalorik eğrilerde plato davranışı gibi parçalanma ürünlerinin dağılımı hakkında önemli bilgiler edinilmiştir. Çeşitli çekirdeklerin parçalanması durumunda, uyarma enerjisi artarken sıcaklık değişiminin çekirdeklerin N/Z oranları ile ilişkilerini inceledik. Nötron fakir kaynaklar için geçiş

bölgesinde ( $E^* = 3,4,5$  MeV/n) daha küçük sıcaklıklar bulunduğu Şekil 1. de gösterdik. Çalışmada kullanılan çekirdekler büyük N/Z oranına sahip olduğundan T ayrışma sıcaklığı değerine ulaşıldıktan hemen sonra sıcaklık değerinde hafif bir düşme (geri bükülme) gözlenmiştir. Kalorik eğrideki bu geri bükülme davranışı, birinci derece faz geçişinin bir göstergesidir. Nispeten hafif çekirdeklerde böyle bir davranış gözlenmez. Hafif çekirdeklerin parçalanmada ağır olanlardan daha kararlı olabildikleri açığa çıkar. Bu sonlu çekirdek büyüklüğünün etkisinin bir kanıtıdır. Çünkü nükleer maddenin daha küçük damlacıklara parçalanması daha yüksek sıcaklıklar gerektirir. Şekil 2. de  $^{124}\text{Sn}$  ve  $^{124}\text{La}$  için sıcaklığın varyans değerleri gösterilmiştir. Bu şekilde de görüldüğü gibi geçiş bölgesinde (transition region, 5,5\_6 MeV/n ) sıcaklığın varyansı en yüksek değerler almaktadır.



Şekil 1. Farklı çekirdekler için  $\gamma = 25$  MeV standart değerinde, sıcaklığın uyarılma enerjisine göre değişimi.



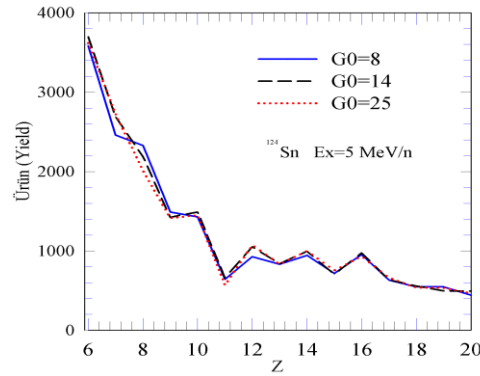
Şekil 2. Farklı çekirdekler için  $\gamma = 25$  MeV standart değerinde bulunması gereken değerlerden ne kadar saptığının gösterimi.

İstatistiksel Çok Katlı Parçalanma Modeli ile  $^{124}\text{Sn}$  ve  $^{124}\text{La}$  çekirdekleri için parçacıklar sisteminin 0,5 MeV/n uyarılma enerjisinden başlayarak 16 MeV/n uyarılma enerjisi de dâhil olmak üzere uyarılma enerjileri için sıcaklık değerleri tek tek hesaplanarak Şekil 1.'de gösterildi.

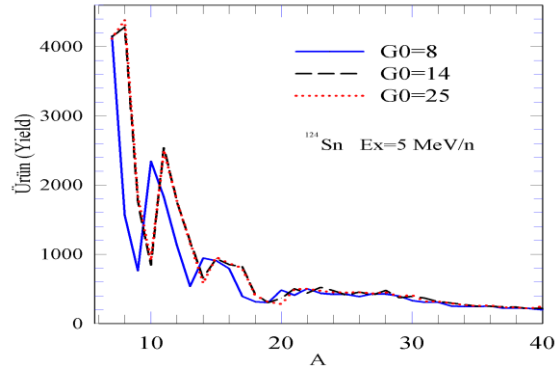
Parçalanmanın başladığı kabul edilen  $E^*$  değerlerinin çekirdeklerin N/Z oranlarına göre değer aldığı görülmektedir. Ayrıca  $T^*$  ayrışma sıcaklığı değerine ulaşıldıktan hemen sonra sıcaklık değerlerinde hafif bir düşme (back bending) gözlenmiştir. Kalorik eğrideki bu geri bükülme davranışı, birinci derece faz geçişinin bir göstergesidir. Ancak geri bükülmenin gerçekleştiği T ayrışma sıcaklığı N/Z oranına bağlı olarak farklılık göstermiştir. Şekil 2.'de  $^{124}\text{Sn}$  ve  $^{124}\text{La}$  için sıcaklığın varyans değerleri gösterilmiştir ve geçiş bölgesinde (transition region, 5,5 - 6 MeV/n ) sıcaklığın varyansı en yüksek değerleri aldığı gözlenmiştir.

### 3.1.2. Simetri Enerjisinin Yük ve Kütle Dağılımına Etkileri

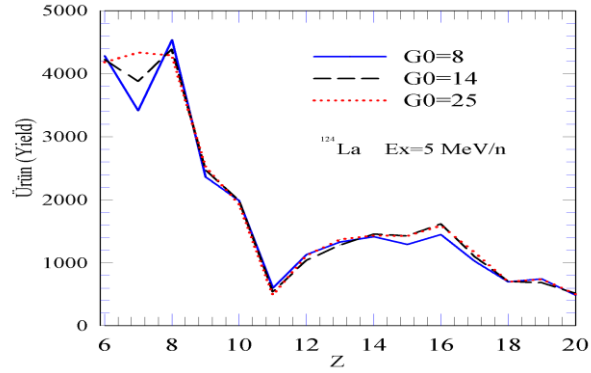
Bir parçacıktaki proton ve nötron sayısı arasındaki farklılığa karşılık gelen simetri enerjisini genel Bethe-Weizsaecker denklemi olarak alınır. Kısaca simetri enerjisi, oluşan parçacıkların nötron zenginliğine bağlıdır. A kütleli ve Z yüklü bir parçacığın simetri enerjisi, SMM içinde  $E_{simetri} = \gamma(A - 2Z)^2 / A$  şeklinde tanımlanır. Burada  $\gamma$ , veri ile karşılaştırmayla bulunması gereken olaycıl bir katsayıdır.  $^{124}\text{Sn}$  için Şekil 3. ve şekil 4.te,  $^{124}\text{La}$  için şekil 5. ve şekil 6.da bu parçalanma ürünlerinin yük ve kütle dağılımının simetri enerjisine göre değişimi gösterilmiştir. Açıkça görüldüğü gibi yük dağılımları U-şeklinde olmaktadır ve simetri enerji katsayısının yük ve kütle dağılımına etkisi ihmal edilebilir düzeydedir.



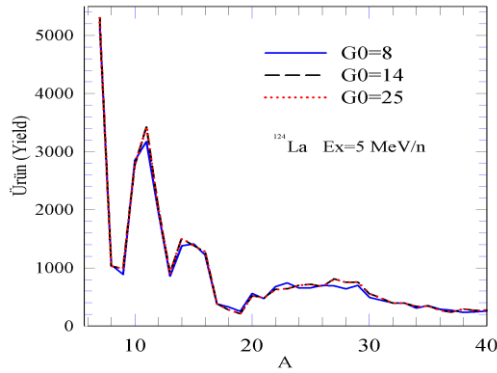
**Şekil 3.**  $^{124}\text{Sn}$  çekirdeğinin 5 MeV/n uyarma enerjisinde simetri enerjisinin yük dağılımına etkisi.



Şekil 4.  $^{124}\text{Sn}$  çekirdeğinin 5 MeV/n uyarma enerjisinde simetri enerjisinin kütle dağılımına etkisi.



Şekil 5.  $^{124}\text{La}$  çekirdeğinin 5 MeV/n uyarma enerjisinde simetri enerjisinin yük dağılımına etkisi.



Şekil 6.  $^{124}\text{La}$  çekirdeğinin 5 MeV/n uyarma enerjisinde simetri enerjisinin kütle dağılımına etkisinin gösterimi.

Simetri enerjisi, oluşan parçacıkların nötron zenginliğini doğrudan belirler. Le Fevre ve ark. (2005) parçacıkların sıcaklıkları arttıkça simetri enerjisinin azaldığına dair bazı deneylerde kanıtlar buldular. Sıcaklıkla simetri enerjisinin azalması durumunun sonuçları, astrofiziksel olayların açıklanabilmesi içinde oldukça önemlidir. Bu nedenle, istatistiksel çok katlı parçalanma modeli kullanılarak parçacıkların simetri enerjisindeki farklı kabuller için kütle ve yük dağılımlarını

hesaplayarak sonuçları şekil 3. ve şekil 5.'de yük dağılımlarını, şekil 4. ve şekil 6.'da ise kütle dağılımlarını gösterdik. Oluşan parçacıkların ortalama karakteristiklerinin simetri enerjisine çok duyarlı olmadığını belirledik. Sonuç olarak, nükleer çok katlı parçalanmada oluşan parçacık dağılımları üzerinde simetri enerjisinin etkisinin ihmal edilebilir olduğunu gösterdik.

## Kaynaklar

- Fohr V, Basquias A, Casarejos E, Enqvist T, Junghans AR, Kelic-Heil A, Kurtukian T, Lukic S, Perez-Loureiro D, Pleskas R, Ricciardi MV, Schmidt K-H, Taieb J, 2011. Experimental study of fragmentation products in the reactions  $112\text{Sn}+112\text{Sn}$  and  $124\text{Sn}+124\text{Sn}$  at 1 A GeV. *Physical Review C* 84, 054605, 1-13.
- Ogul R, Atav U, Bulut F, Buyukcizmeci N, Erdogan M, Imal H, Botvina AS, Mishustin IN, 2009. Surface and symmetry energies in isoscaling for multifragmentation reactions. *J Physical G:Nucl. Part. Physical* 6, 115106-115112.
- Ogul R, Botvina AS, Atav U, Buyukcizmeci N, Mishustin IN, Adrich P, Aumann T, Bacri CO, Barczyk T, Bassini R, Bianchin S, Boiano C, Boudard A, Brzychczyk J, Chbihi A, Cibor J, Czech B, De Napoli M, Ducret E, Emling H, Frankland JD, Hellstrom M, Henzlova D, Imme G, Iori I, Johansson H, Kezzar K, Lafriakh A, Le Fevre A, Le Gentil E, Leifels Y, Luhning J, Lukasik J, Lynch WG, Lynen U, Majka Z, Mocko M, Muller WFJ, Mykulyak A, Orth H, Otte AN, Palit R, Pawlowski P, Pullia A, Raciti G, Rapisarda E, Sann H, Schwarz C, Sfienti C, Simon H, Summerer K, Trautmann W, Tsang MB, Verde G, Volant C, Wallace M, Weick H, Wiechula J, Wieloch A, Zwieglinski B, 2011. Isospin dependent multifragmentation of relativistic projectiles. *Physical Review C* 83, 024608, 1-21.
- Scharenberg RP, Srivastava BK, Albergo S, Bieser F, Brady FP, Caccia Z, Cebra DA, Chacon AD, Chance JL, Choi Y, Costa S, Elliott JB, Gilkes ML, Hauger JA, Hirsch AS, Hjort EL, Insolia A, Justice M, Keane D, Kintner JC, Lindenstruth V, Lisa MA, Matis HS, Mc Mahan M, Mc Parland C, Müller WF, Olson DL, Partlan MD, Porile NT, Potenza R, Rai G, Rasmussen J, Ritter HG, Romanski J, Romero JL, Russo GV, Sann H, Scott A, Shao Y, Symons TJ, Tincknell M, Tuve C, Wang S, Warren P, Wieman HH, Wienold Wolf K, 2001. Comparison of 1 A GeV  $197\text{Au}+\text{C}$  Data With Thermodynamics: The Nature of The Transition in Nuclear Multifragmentation. *Physical Review C* 64, 054602, 1-19
- Avdeyev SP, Karnaukhov VA, Petrov LA, Rodionov VK, Rukoyatkin PA, Toneev VD, Oeschler H, Bochkarev OV, Chulkov LV, Kuzmin EA, Budzanowski A, Karcz W, Janicki M, Norbeck E, Botvina AS, Gudima KK, 2002. Comparative Study of Multifragmentation of Gold Nuclei Induced by Relativistic Protons,  $4\text{He}$  and  $12\text{C}$ . *Nuclear Physical A*, 709392, 392-414.
- Bondorf JP, Botvina AS, Iljinov AS, Mishustin IN ve Sneppen K, 1995. Statistical Multifragmentation of Nuclei. *Physics Reports*, 257, (3), 133-221.
- Bethe HA, 1937. Nuclear Physics B. Nuclear Dynamics, Theoretical. *Reviews of Modern Physics*, 9, 69, 2.
- Mustafa MG, Blann M, Ignatyuk AV, Grimes SM, 1992. Nuclear Level Densities at High Excitations. *Physical Review*, C 45, 1078, 1-3.



- Souliotis GA, Botvina AS, Shetty DV, Keksis AL, Jandel M, Veselsky M, Yennello SJ, 2007. Tracing the evolution of the symmetry energy of hot nuclear fragments from the compound nucleus towards multifragmentation. *Physical Review C* 75, 011601 (R), 1-5.
- Ogul R, 1998. On the spinodal instabilities at subnuclear densities. *International Journal of Modern Physics E*, 7 (3) , 419-424.
- Ogul R, Botvina AS, 2002. Critical temperature of nuclear matter and fragment distributions in multifragmentation of finite nuclei. *Physical Review C* 66, 051601 (R), 1-5.
- Botvina AS, Buyukcizmeci N, Erdogan M, Lukasik J, Mishustin IN, Ogul R, Trautmann W, 2006. Modification of Surface Energy in Nuclear Multifragmentation. *Physical Review C* 74, 044609, 4, 1-10.
- Ogul R, Buyukcizmeci N, Botvina AS, 2005. Nuclear Fragmentation and Critical Temperature for the Liquid-Gas Phase Transition Region. *Nuclear Physical A*, 749,18, 126-129.
- Le Fevre A, Auger G, Begemann-Blaich ML, Bellaize N, Bittiger R, Bocage F, Borderie B, Bougault R, Bouriquet B, Charvet JL, Chbihi A, Dayras R, Frankland JD, Galichet E, Gourio D, Guinet D, Hudan S, Imme G, Lantesse P, Lavaud F, Legrain R, Lopez O, Lukasik J, Lynen U, Müller WFJ, Nalpas L, Orth H, Plagnol E, Raciti G, Rosato E, Saija A, Schwarz C, Seidel W, Sfienti C, Tamain B, Trautmann W, Trzcinski A, Turzo K, Vient E, Vigilante M, Volant C, Zwieglinski B, Botvina AS, 2005. Isotopic Scaling and the symmetry energy in spectator fragmentation. *Physical Review Letters* 94, 162701, (16), 1-5.