

¹⁹⁷Au VE ¹²⁴La Çekirdeklerinin Parçalanmasına Yüzey Gerilim Enerjisinin Etkileri

Habibe DURMUŞOĞLU, Rıza OĞUL

Selçuk Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Konya-TURKEY

e-mail: h.drmsoglu@gmail.com

Öz: Uyarılmış atomik çekirdeklerin parçalanma mekanizmasını ve parçalanma ürünlerini çalışmak için birçok reaksiyon modeli vardır. Bu modellerden birisi de İstatistik Çok Katlı Parçalanma (SMM) modelidir. Bu çalışma kapsamında SMM yöntemi ile ¹⁹⁷Au ve ¹²⁴La çekirdeklerinin farklı uyarılma enerjilerinde parçalanma özelliklerini inceledik. Hesaplamalarda nükleon başına uyarılma enerjisi değerleri olarak $E_x=1,2,3,4,5,6,7,8,9,10$ MeV/n değerlerini aldık ve bu değerler için bu çekirdeklerin kalorik eğrilerini elde ettik. Bu uyarılma sonucu oluşan parçalanmalarda her iki atom çekirdeği için yük dağılımlarını belirledik. Hesaplamalarda yüzey gerilim katsayısı için $B_0=17,18,19$ MeV değerlerini kullandık. Hesaplama sonucunda yüzey gerilim katsayısının oluşan parçacıkların dağılımlarını etkilediği gözlenmiştir. Elde ettiğimiz sonuçları deneysel verilerle karşılaştırdık ve sonuçların uyumlu olduğunu gözledik.

Anahtar kelimeler: İstatiksel Çok Katlı Parçalanma, İzotopik Dağılımlar, Yük Dağılımı

Surface Energy Effects on Fragmentations of ¹⁹⁷Au and ¹²⁴La Nuclei

Abstract: There are many reaction models to study the mechanisms of fragmentation and decomposition products of excited atomic nuclei. One of these models is Statistical Multifragmentation Model (SMM). In this study, we determined fragmentation properties of ¹⁹⁷Au and ¹²⁴La nuclei at various excitation energies. For the excitation energy values we have taken $E_x = 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10$ Me/n. For these fragmentations of the nuclei we determined charge distribution for each atomic nucleus. We also determined the caloric curves of these nuclei. As a result, we observe that surface tension values, $B_0=17,18,19$ MeV, produce significant changes in the product yields for the values of excitation energies $E_x = 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10$ MeV/n. We compared our results with experimental data and it was seen a good agreement.

Keywords: Statistical multifragmentation, Isotopic Distributions, Charge Distribution.

1. Giriş

Hızlandırılmış parçacığın enerjisi ya da hedef çekirdeğe gönderilen çekirdeğin enerjisi yükseldikçe, meydana gelen bileşik çekirdeğin sıcaklığı yanı sıra bileşik çekirdekte depo edilen uyarılma enerjisi de artar. Ayrıca çarpışma sonucu meydana gelen bileşik çekirdek sıkışır ve böylece

sistemin yoğunluğu artar. Bu yüzden yüksek enerjilerde bileşik çekirdeği, sıcak bir ara durum ve sıkışmış bir çekirdek şeklinde düşünebiliriz. Bu ara durumun hayatta kalma süresi ise sistemin basıncına ve bileşik çekirdekte depo edilen uyarılma enerjisine bağlıdır. İlk sıcaklık ve basınç çok fazla değilse sistem genişleme süreci sonunda parçalanma yerine irili ufaklı

parçalara ayrılır. Ve açığa çıkan bu parçalar nükleer damlalar olarak kabul edilir. Bu olay ise nükleer çok katlı parçalanma (multifragmentation) olarak adlandırılır. Günümüzde genellikle Copenhagen Modeli olarak adlandırılan SMM (İstatistiksel Çok Katlı Parçalanma Modeli), (Bondorf ve ark., 1995) kaynağında tasvir edilmiştir. Parçacıkların kanonik, mikrokanonik ve makrokanonik toplulukları için istatistik modelin genel formülasyonu yapılmıştır. Burada şekillenim uzayının özellikleri de çalışılmıştır. Tek bozunma kanalları ve temsili dağılım (partisyon) örnekleri için sayısal çözümler gerçekleştirilmiştir. Nükleer madde içindeki sıvı-gaz faz geçişi ile parçalanmanın ilişkisi gösterilerek parçalanmış sistemin termodinamik özellikleri çalışılmıştır. Reaksiyonun son aşamalarında Coulomb yayılması ve sıcak parçacıkların yeniden uyarılmaları (de-excitation) (D'Agostino ve ark., 1995) sayısal çözümlerle gerçekleştirilmiştir. İstatistiksel çok katlı parçalanma modeline göre, değişik bozunma kanallarının olasılığı işlemin detaylı dinamiklerinin yanı sıra, temelde istatistik ağırlıklar ile hesaplanıyor ve ayrıca yüksek uyarılma enerjilerinde çok büyük serbestlik dereceleri işleme dahil ediliyor. Bu düşünce, çok uyarılmış hadronlar sisteminin ve nükleon yapılarının tam bir tasvirinin kolaylıkla yapılmasını olası hale getiriyor. Böylece nükleer sistemlerin kendine özgü pek çok özelliğini

uygulamada basit hale getirmek için geniş imkanlar sunuyor. İstatistiksel parçalanma modelleri, sonlu nükleer sistemler için uygundur (Eren ve ark., 2007). Modelin böyle versiyonları; sayısal hesaplama metotları, bireysel parçacıkların tanımı ve istatistiksel topluluğun seçiminde farklılık gösterir. Yine de istatistik modeller farklılıklardan daha çok ortak özelliklere sahiptirler (Goodman ve ark., 1984).

2. Materyal ve Metot

Bu makale kapsamında uyarılmış atomik çekirdeklerin parçalanmasının teorik olarak simülasyonunu yaparak ağır-iyon çarpışmaları sırasında oluşan sıcak ve yoğun bileşik çekirdeklerin bozunma modları istatistiksel parçalanma modeli temel alınarak araştırılmıştır. Bu modele göre, iki ağır atomik çekirdek çarpıştığında oluşan sıcak ve yoğun madde, genişleme fazında düşük yoğunluklara ulaşacak ve donma hacminde istatistiksel dengeye ulaşacaktır (lowdensityfreeze-out). Bu aşamada, nükleer parçalanma olayı sıvı-gaz faz geçiş teorisine göre ele alınır ve sıvı fazın oluşturduğu damlacıklar nükleer parçacıklar olarak ortaya çıkar. Bütün bozunma kanalları nükleonların kümelenmesi ile oluşur ve enerjinin korunumu, açısal momentumun korunumu, kütle numarası A ve yük sayısı Z korunumları göz önüne alınır. Markovchain hesaplamalarında mikrokanonik yaklaşım

kullanılır ve bozunma kanallarının istatistiksel ağırlık fonksiyonu $W_i = C \exp(S_i(E^*, A, Z))$ ile verilir. Burada C normalizasyon katsayısı, S_i sistemin i kanalında bulunduğu andaki entropisi, E^* ise nükleon başına uyarılma enerjisidir. Bozunma kanalları, bu kanalların istatistiksel ağırlıklarına göre Monte Carlo yöntemi ile belirlenir. Kütle numarası $A=4$ ve daha küçük, yük sayısı $Z=2$ ve daha küçük olan parçacıklar temel gaz parçacıkları olarak ele alınırken, daha büyük parçacıklar da sıcak nükleer damlacıklar olarak ele alınır. Her bir nükleer parçanın serbest enerjisi $F_{A,Z}$ Bethe- Weizsäcker'in yarı deneysel kütle formülündeki hacim (bulk), yüzey, Coulomb ve simetri terimi ile parametrize edilir. Yarı deneysel kütle formülü ile verilen bu terimler, sistem izole edilmiş varsayıldığında normal yoğunluk (nükleer maddenin dengedeki veya taban durumundaki yoğunluğu 0.15 fm^{-3}) göz önüne alınır. Ancak, sıvı-gaz faz geçişi sırasında bu yoğunluk nükleer maddenin normal yoğunluğunun $1/3$ ile $1/10$ 'una kadar düştüğü belirlenmektedir ve bu değer astrofizikte stellar madde için binde birler mertebesine kadar çok daha düşük değerler alabilir. Bizim çalışmalarımızda freze-out yoğunluğu normal yoğunluğun yanal çarpışmalar için $1/3$ 'ü olarak alınmıştı ancak merkezi çarpışmalarda bu değer akı (flowdevelopment) nedeniyle oluşan ek genişlemenin de içine alınmasından dolayı

$1/6$ olarak alınabilir.

Hesaplamlarda kullanılacak olan temel atomik çekirdekler ALADIN deneylerinde kullanılan sistemlerle ilgili olarak farklı nötron-proton oranlarına sahip olan ^{197}Au ve ^{124}La gibi atomik çekirdekler olmuştur. Bu atomik çekirdeklerin değişik uyarılma enerjilerindeki parçalanmaları sonucunda ortaya çıkan yük dağılımları farklı sıvı-damlası parametreleri (simetri enerjisi ve yüzey gerilim enerjisi gibi) kullanılarak parçacık ürünlerinin dağılımları belirlenmiştir. Sıcak birincil parçacıkların ikincil-uyarılma sürecinin formüle edilmesi güvenilir sonuçlar elde etmek için önemlidir. Birincil sıcak parçacıkların; küçük parçacıkların buharlaşması ile bozunup soğuması ya da Fermi ayrışması (Fermi break-up) ile bozunduğu varsayılır. Bu kodlarda soğuk izole çekirdeklerin kütleleri fit edilerek izole edilmiş çekirdek kütle formülleri elde edilirken, bazı mümkün değişimlerin öngörülebildiği durumlarda, örneğin ilk ikincil uyarılma aşamasında sıcak parçacıkların kendi etrafındaki irili ufaklı nükleer parçacıklarla karmaşık bir Coulomb etkileşmesine girmesi hesaplara katılmalıdır. Bu kütle hesaplamaları uyarılma enerjisinin büyüklüğüne göre düzenlenir, yüksek enerjilerde standart sıvı-damla formülleri düşünülürken, düşük enerjilerde shell- effect'i içine alan standart

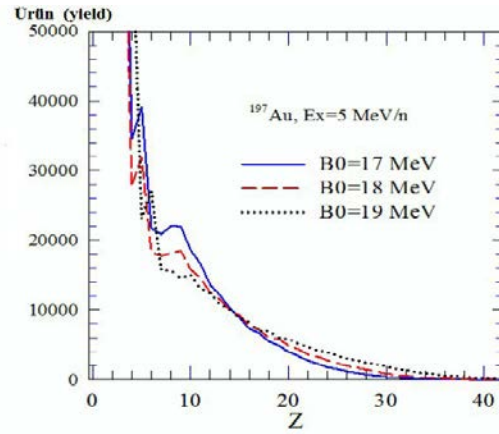
deneysel kütlelere düzgün bir geçiş yapan uyarlamalar geliştirilir.

3. Araştırma Sonuçları ve Tartışma

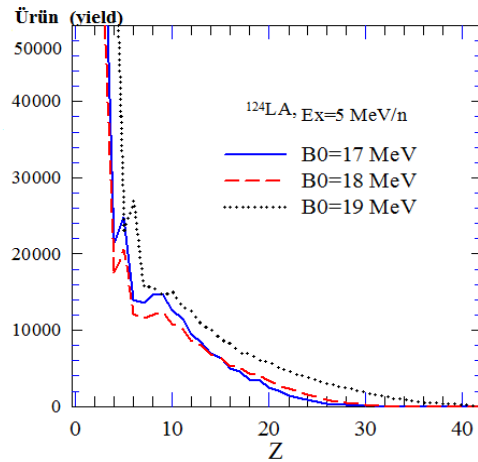
3.1. Kütle ve Yük Dağılımı

Bu çalışmada, İstatistiksel Çok Katlı Parçalanma Modeli kullanılarak, ¹⁹⁷Au ve ¹²⁴La çekirdeklerinin çeşitli uyarılma enerjilerinde parçalanma ürünleri belirlenmiştir. Hesaplamalar da nükleon başına uyarılma enerjisi değerleri olarak $E_x=1,2,3,4,5,6,7,8,9,10$ MeV/n değerlerini alınmıştır. Bu uyarılma sonucu oluşan parçalanmalarda her iki atom çekirdeği için yük dağılımlarını belirlenmiştir. Yük dağılımlarının yüzey gerilimi enerjisine bağlılığını araştırmak için yüzey gerilimi enerjisi kat sayısı için 17, 18 ve 19 MeV değerleri kullanılmıştır. Burada 18 MeV değeri doyma yoğunluğundaki standart değerdir. Hesaplamamızda kullanılan çekirdeklerin nükleer çok katlı parçalanmalarında oluşan orta kütleli parçacıkların kütleleri $6 \leq A \leq 40$ aralığında ve yükleri $6 \leq Z \leq 20$ aralığında seçilmiştir. Hesaplamalar sonucunda, çok parçalanmaya maruz kalan çekirdeklerin N/Z oranlarının $E_x=1,2,3,4,5,6,7,8,9,10$ MeV/n enerjilerinde oluşan parçacıkların dağılımlarını etkilediği gözlenmiştir. Çalışmamızda yüksek uyarılma enerjisinde ağır çekirdeklerin buharlaşması görülebilmektedir. Çekirdekler

için çok katlı parçalanmaya geçişin gözlemlendiği uyarılma enerjisinin hemen hemen aynı değerde olduğu gösterilmiştir. Kütle ve yük dağılımları arasında ise yüzey gerilim enerjisinin değişimine bağlı olarak kayda değer bir fark olmadığı anlaşılmıştır.



Şekil 1. ¹⁹⁷Au çekirdeğinin çok katlı parçalanmasında oluşan parçacıkların, 5 MeV/n uyarılma enerjisi için yük dağılımları



Şekil 2. ¹²⁴La çekirdeğinin çok katlı parçalanmasında oluşan parçacıkların, 5 MeV/n uyarılma enerjisi için yük dağılımları

Bu çalışmada ¹⁹⁷Au ve ¹²⁴La çekirdeklerini kullanarak nükleer çok katlı parçalanması sonucu oluşan parçacıkların kütle ve yük dağılımları, sıcaklık değerleri

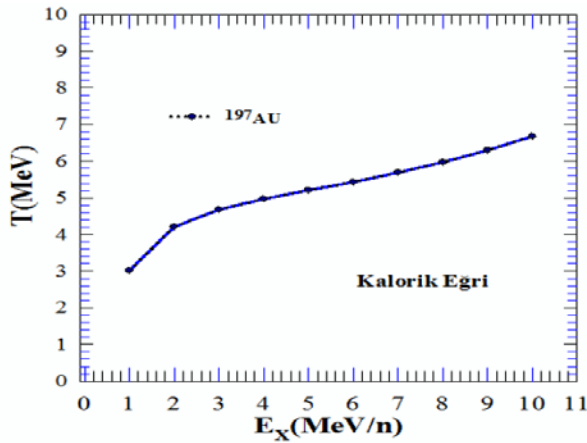
hesaplayarak bu özelliklerin çekirdeklerin $\langle N \rangle / Z$ oranlarına bağlılığı incelenmiştir. Ayrıca, nükleer sıvı-gaz geçiş bölgesindeki back-bending (geri bükülme) davranışı ve sıcaklığın varyans değerleri hesaplamalarımızda gösterilmiştir. Yapılan incelemelerin sonuçları standart SMM kodu ve ALADIN deneysel verileriyle karşılaştırılmıştır. Bu çekirdeklerin nükleer çok katlı parçalanması soğuk parçalanma ve sıcak parçalanma olarak ele alınmıştır. Bu çalışmada soğuk parçalanma üzerinde durulmuştur.

3.2. Sıcaklık Değişiminin Uyarılma Enerjisi Yardımıyla Hesaplanması

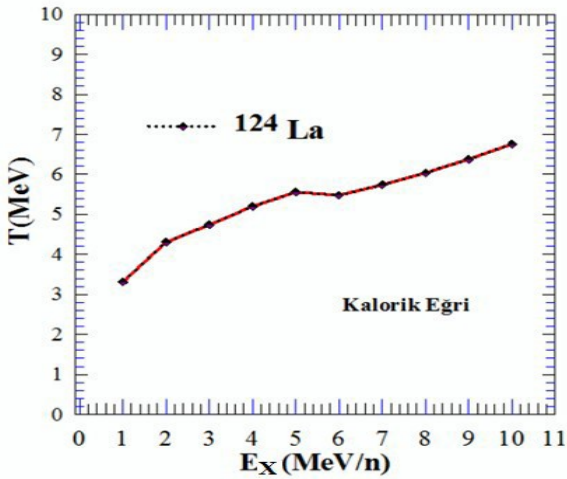
Nükleer parçalanmada izotopik etkiler nükleer fizik alanında da olduğu gibi süpernova patlaması, nötron yıldızı modelleri ve stellar maddenin durum denkleminde astrofiziksel alanlarda da çok büyük önem taşır. Bugüne kadar yapılan çalışmalarda rölativistik ağır iyon çarpışmalarıyla elde edilen deneysel ve teorik çalışmalarda parçalanmanın $\langle N \rangle / Z$ 'ye bağlılığı simetri enerjisinde bazı değişimlerin olması gerektiğini ortaya koymuştur. Bu hesaplamalar ile çok katlı parçalanma ve buharlaşmayı kapsayan nükleer reaksiyonlar için kütle ve yük dağılımları SMM çatısı altında incelenmiş ve çok katlı parçalanma reaksiyonlarının analizi için üretilen SMM'in daha düşük ve daha yüksek uyarılma enerjileri için de

tatmin edici bulgular ortaya koyduğu gözlenmiştir. ^{124}La ve ^{197}Au çekirdeklerinin parçalanması sonucu oluşan sıcak birincil parçacıkların uyarılma enerjisinin artışı, yüzey gerilimini azaltacağı için bir çekirdek düşük sıcaklıklı daha küçük parçacıklara ayrılacaktır. Parçacıkların büyüklüklerindeki dalgalanmalar anlık olarak dikkate değer derecede artabilir. Sonuç olarak geçiş bölgesinde kütle ve yük dağılımı düz hale gelir. Bu bölgede, kalorik kıvrımın plato-benzeri davranışı, sıcaklıktaki ve ortaya çıkan parçacıkların sayısındaki büyüklük dalgalanmalar gibi çok sayıdaki özellik deneylerle elde edilmiştir. Ayrıca nükleer çok katlı parçalanmanın başladığı andan itibaren (örneğin; $E_x=4,5,6,7$ MeV/n uyarılma enerjilerinde nükleer sıvı-gaz faz geçiş bölgesinde) orta kütleli parçacıkların dağılımlarının çekirdeklerin N/Z oranları ile doğrudan bağlantılı olduğu açıkça görülmektedir. 5 MeV/n uyarılma enerjisi ve daha büyük enerjilerde ise; dağılım çekirdeklerinin yükleri ile doğru orantılı olarak üstel biçimde azalır. Yani atom numarası büyük olan çekirdekler uyarılma enerjisinin artışıyla daha hızlı biçimde küçük parçacıklara bozunurlar. Hesaplamalar sonucunda, çok katlı parçalanmaya maruz kalan çekirdeklerin N/Z oranlarının $E_x = 5$ MeV/n enerjisinde oluşan parçacıkların dağılımlarını etkilediği gözlenmiştir. Çalışmadaki çekirdeklerin atom numaraları birbirine yakın olduğu için

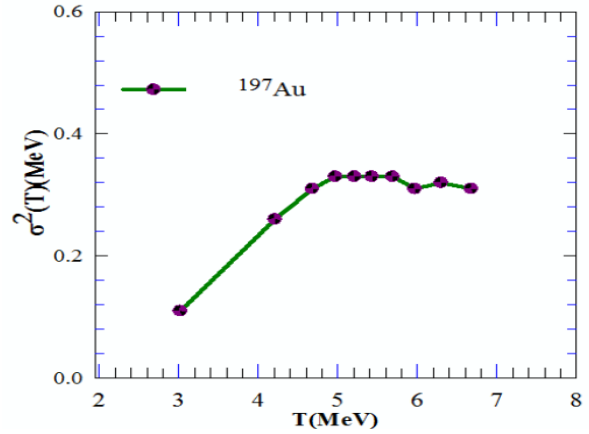
özellikle yüksek enerjilerdeki kütle ve yük dağılımları oldukça benzer çıkmıştır. Ağır çekirdeklerde coulomb itmesinin baskınlaşmaya başlaması enerji eşik seviyesinin düşmesine sebep olur. Hafif çekirdeklerde ise çok katlı parçalanmaya geçiş için daha büyük uyarılma enerjisi gerekmektedir.



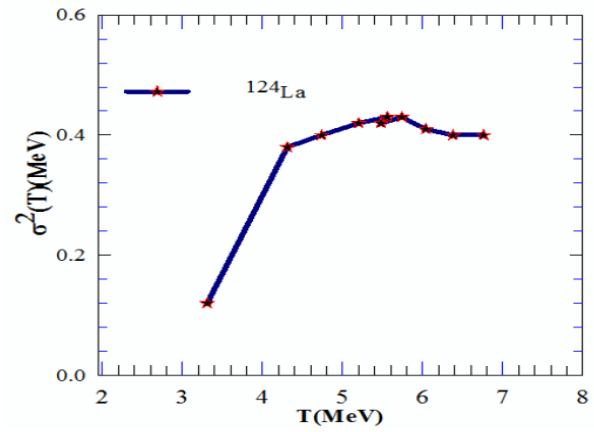
Şekil 3. ¹⁹⁷Au için B0=18 MeV standart değerinde, sıcaklığın uyarılma enerjisine göre değişimi.



Şekil 4. ¹²⁴La için B0=18 MeV standart değerinde, sıcaklığın uyarılma enerjisine göre değişimi.



Şekil 5. ¹⁹⁷Au için B0=18 MeV standart değerinde bulunması gereken değerden ne kadar saptığının gösterimi.



Şekil 6. ¹²⁴La için B0=18 MeV standart değerinde bulunması gereken değerden ne kadar saptığının gösterimi

Biz bu çalışmamızda istatistiksel çok katlı parçalanma modelini kullanarak yüzey gerilim enerjisindeki azalma-artmanın parçalanma ürünlerine etkilerini hesapladık. Bugüne kadar yapılan deneysel çalışmalarda nükleer parçalanma reaksiyonları sonucunda 'rise-and-fall', kalorik eğrilerde plato davranışı gibi parçalanma ürünlerinin dağılımı hakkında önemli bilgiler edinilmiştir. Düşük uyarılma enerjilerinde sıcaklık, bileşik çekirdeğin sıcaklığıdır;

Sonsuz bir nükleer madde içindeki bir parçacığın (fragment) ortalama kütesinin, başlangıçtaki çekirdek kütesinden daha az duruma gelmesi şartından belirlenebilen böyle bir sıcaklığın varlığı ilk kez Bondorf ve ark. (1995) tarafından önerilmiştir.

Bu gerçek, parçalanma durumlarının eş entropili (isoentropic) spinodal bölge içinde ve izotermi kritik bölgenin altında olduğu anlamına gelir. 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 5 ve Şekil 6'da ^{197}Au ve ^{124}La için sıcaklığın varyans değerleri gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi geçiş bölgesinde (transition region, 5,5 - 6 MeV/n) sıcaklığın varyansı en yüksek değerler almaktadır (Oğul ve ark., 1998, 2009, 2011). Çeşitli çekirdeklerin parçalanması durumunda, uyarma enerjisi artarken sıcaklık değişiminin çekirdeklerin N/Z oranları ile ilişkileri incelenmiştir.

Kaynaklar

- Bondorf JP, Botvina AS, Iljinov AS, Mishustin IN ve Sneppen K (1995). Statistical Multifragmentation of Nuclei, *Physics Reports* 257(3), 133–221.
- D'Agostino M, Botvina AS, Milazzo PM, Bruno M, Kunde GJ, Bowman DR, Celano L, Colonna N, Dinius JD, Ferrero A, Fiandri ML, Gelbke CK, Glasmacher T, Gramegna F, Handzy DO, Horn D, Hsi WC, Huang M, Iori I, Lisa MA, Lynch WG, Manduci L, Margagliotti GV, Mastinu PF, Mishustin IN, Montoya CP, Moroni A, Peaslee GF, Petruzzelli F, Phair L, Rui R, Schwarz C, Tsang MB, Vannini G, Williams C (1995). Statistical multifragmentation in central Au+Au collisions at 35 MeV/u, *Phys. Rev. Lett* B 371, 175–180.
- Eren N, Buyukcizmeci N, Oğul R (2007). Mass distributions for nuclear disintegration from fission to evaporation, *Physica Scripta* 76, 657–660.
- Goodman AL, Kapusta JL, Mekjian AZ (1984). Liquid-gas phase instabilities and droplet formation in nuclear reactions, *Phys. Rev. C* 30, 851–865.
- Oğul R (2009). Surface and symmetry energies in isoscaling for multifragmentation reactions, *J. Phys G: Nucl. Part. Phys.* 36, 115106.
- Oğul R (2011). Isospin dependent multifragmentation of relativistic projectiles, *Phys. Rev. C* 83, 024608.
- Oğul R (1998). On the spinodal instabilities at subnuclear densities. *Int. J. Mod. Phys. E*, 7 (3), 419–424.