TÜBİTAK

Yüksek Enerjili Nükleer Etkileşmelerde Egzotik Çekirdekler, Hiper Madde ve Hiper Çekirdeklerin Oluşumu ve Ayrışması

Program Kodu: 1001

Proje No: 114F328

Proje Yürütücüsü:

Prof.Dr. Nihal Büyükçizmeci

Araştırmacılar:

Prof. Dr. Rıza Oğul

Prof. Dr. Alexander S. Botvina

Bursiyer(ler):

Ayşegül Kaya (Dr ve Dr Sonrası araştırmacı bursiyer)

Ocak 2018

KONYA

ÖNSÖZ

"Yüksek Enerjili Nükleer Etkileşmelerde Egzotik Çekirdekler, Hiper Madde ve Hiper Çekirdeklerin Oluşumu ve Ayrışması" başlıklı bu proje 15.05.2015-15.11-2017 tarihleri arasında gerçekleştirilmiş ve TÜBİTAK tarafından 1001 projeleri kapsamında 114F328 numaralı proje olarak desteklenmiştir. Bu projenin gerçekleştirilmesinde büyük oranda Selçuk Üniversitesi alt yapısından yararlanılmıştır. Ayrıca, FIAS (Frankfurt Institute of Advanced Studies) Frankfurt İleri Araştırmalar Enstitüsü ile de ortak çalışmalar gerçekleştirilmiştir. FIAS, GSI, GANIL, CEA-ORSAY araştırma merkezlerine yaptığımız çalışma ziyaretleri proje kapsamında desteklenmiş ve projenin başarılı bir şekilde sonuçlanmasında çok önemli rol oynamıştır.

Avrupa Bilim ve Teknoloji İşbirliği-COST kapsamında CA15213 numaralı THOR (Theory of hot matter and relativistic heavy-ion reactions) aksiyonuna 114F328 numaralı projemiz ile üye olunmuştur. Prof. Dr. Nihal Büyükçizmeci COST CA15213 numaralı THOR aksiyonununun önerilmesi aşamasında Türkiye'den ikincil proje önericisi olarak aksiyonu öneren uluslararası grup içinde yer almıştır. Aksiyonun kabul edilerek yürürlüğe girmesi ile 114F328 numaralı projemiz COST projesine çevirilerek uluslararası nitelik kazanmış ve proje yürütücüsü TÜBİTAK tarafından aksiyonun Türkiye yönetim kurulu üyesi (MC) olarak atanmıştır. Brüksel, Frankfurt ve Paris'te yapılan yönetim kurulu ve çalışma grubu toplantılarına katılım, 114F328 numaralı projemiz kapsamında gerçekleştirdiğimiz çalışmalarımızı sunarak tanıtım ve bilgi alışverişi fırsatı elde etmiş olduk. 2016-2020 yılları arasında gerçekleştirilecek olan CA15213 aksiyonu kapsamında FIAS ile ortak çalışmalarımız devam etmektedir.

Projede incelenen konular nükleer fizik, parçacık fiziği ve astrofizik kapsamında da çok önemli yer tutmaktadır. Atom çekirdeğinin yüksek sıcaklık ve değişik yoğunluklardaki davranışları astrofiziksel nesnelerin yapısını oluşturan stellar maddenin davranışına benzediği için ağır iyon çarpışma deneyleri ve teorik çalışmaları süpernova patlamaları ve nötron yıldızlarının modellenmesi gibi astrofiziksel çalışmalara ışık tutmakta ve evrenin oluşumu, şekillenmesi ve elementlerin oluşumu gibi konuların aydınlatılmasına temel oluşturmaktadır. Bu projede göreceli hızlardaki ağır iyon çarpışmalarında çarpan ve hedef çekirdek artıklarından çıkan hiper maddenin parçalanmasını ve oluşumunu hesaplamak için hiper-SMM kodu içindeki Monte-Carlo bilgisayar kodlarını buharlaşma ve fisyon süreçlerinde hiperonlar için geliştirerek araştırılmıştır. Hiper çekirdek sistemlerinin istatistiksel parçalanmasını ve hiperon bağlanma enerjileri ile parçacık oluşumlarının bağlantısını hiperonlar için "çift oran metodu" önererek analitik olarak türettik. Bu sonuçlara, projede yer alan bir öğrencimiz doktora ve doktora sonrası araştırmacı bursiyer olarak katkılarda bulunmuştur.

Proje çalışmalarımızdan Phys. Rev. C dergisinde 1 makalemiz yayınlamış ve Jour. Phys. G:Nuclear and Particle Physics dergisine de ayrı bir makale değerlendirilmek üzere gönderilmiştir. Uluslararası konferanslarda 3 davetli konuşma, 6 sözlü bildiri olarak sunulan ve özeti yayınlanan proje çalışanları tarafından sunulmuş ve bu sunumlardan biri SCI (Science Citation Index) kapsamında yer alan dergide, diğerleri ise konferans bildiri kitaplarında özet veya tam metin olarak yayınlanmıştır.

1. A.S. Botvina, N. Buyukcizmeci, A.Ergun, R. Ogul, M. Bleicher, J. Pochodzalla, “Formation of hypernuclei in evaporation and fission processes”, Phys. Rev. C 94 (2016) 054615 (SCI)

2. A.S. Botvina, M. Bleicher, N. Buyukcizmeci, “Evaluation of the hyperon binding energy via statistical production of hypernuclei” 2017, Jour. Phys. G: Nuc. and Particle Physics dergisine sunuldu, değerlendiriliyor. ArxiV: 1711.01159v2, (SCI)

3. N. Buyukcizmeci, A.S. Botvina, M. Bleicher, A. Ergun, R. Ogul, J.Pochodzalla, “Mechanisms of production of hypernuclei in nuclear reactions”, Workshop on “Production and study of neutron-rich hypernuclei. Physics and potentialities at FAIR/R3B” Espace de Structure et de réactions Nucléaires Théorique(ESNT), CEA, SPhN, Orme des Merisiers, Paris, France 19-21 January 2016 (İstanbul’daki kar fırtınası nedeniyle Paris’e gidemeyen N. Buyukcizmeci yerine A.S. Botvina tarafından davetli konuşmacı olarak sunuldu.)

4. N. Buyukcizmeci, Ogul R., “Probing the Lambda hypernuclei in nuclear reactions” ICONSETE2016, Barcelona, Spain, Proceeding book pp.464-467 (sözlü bildiri)

5. N. Buyukcizmeci, Ogul R., Botvina, “A Comparison of Mass Formulas for Lambda hypernuclei”, TFD32, 6-9 September 2016 Bodrum, Turkey (sözlü bildiri), Tam metin: N.Buyukcizmeci, A.S. Botvina, R. Ogul, “Influence of the hyper-terms in mass formulae on yield of hypernuclei in nuclear reactions” AIP CP 1815, 060003 (2017); doi: 10.1063/1.4976399

6. N. Buyukcizmeci A.S. Botvina, M. Bleicher, A. Kaya, R. Ogul, J. Pochodzalla "Probing the structure of hypermatter at low temperatures at low densities” May 14-19, 2017, ISTROS 2017, Ćasta Papiernićka, Slovakia (sözlü bildiri)

7. N. Büyükçizmeci, A.S.Botvina, R. Ogul, A. Ergun Kaya, M. Bleicher, J. Pochodzalla, “Production of hyper nuclei in fission reactions” Fazia-Indra Days, Ganıl 4-5 April 2017, Caen France. (davetli konuşmacı)

8. A. Kaya, N. Büyükçizmeci, A.S. Botvina, R. Oğul "Temperature Dependence Of Hypernuclei Distributions" Turkish Physical Society, 33th International Physics Congress, 06-10 September 2017, Bodrum (sözlü bildiri)

9. A. Kaya, B. Büyükçizmeci, A. S. Botvina, R. Oğul, "Investigations Of Mass Distributions Of Hypernuclei" X. International Conference On Nuclear Structure Proporties 20-22 September 2017, Karabük University-Karabük, Türkiye (sözlü bildiri)

10. N. Büyükçizmeci, A. Kaya, A.S.Botvina, R. Ogul "Statistical Approach For Hypernuclei" X. International Conference On Nuclear Structure Proporties 20-22 September 2017, Karabük University-Karabük, Türkiye (davetli konuşmacı)

11. N. Buyukcizmeci, A.Kaya, A.S. Botvina, R. Ogul "Fission of Hypernuclei at Subnuclear Densities" Turkish Physical Society, 33th International Physics Congress, 06-10 September 2017, Bodrum (sözlü bildiri)

TÜBİTAK

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ……ii
İÇİNDEKİLER……v
ŞEKİL VE TABLO LİSTELERİ ……vi
ÖZET……vii
ABSTRACT……viii
1. GİRİŞ……1
2. LİTERATÜR ÖZETİ……3
3. GEREÇ ve YÖNTEM……7
3.1 Hiper madde ve hiper çekirdeklere ayrışma……7
3.2 Sıcak hiper parçacıkların yeniden uyarılmaları……10
3.2.1 Fermi ayrışması……10
3.2.2 Sıcak parçacıkların buharlaşması……12
3.2.3 Fisyon……13
4. HESAPLAMALAR VE SONUÇLAR……15
4.1 Hiper çekirdekler için buharlaşma ve fisyon hesaplamaları……16
4.2 Hiper çekirdekler için çift oran metodu……33
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA……37
6. KAYNAKLAR ……39

ŞEKİL VE TABLO LİSTELERİ

Şekil 1……sayfa 17
Şekil 2…… 18
Şekil 3…… 20
Şekil 4…… 21
Şekil 5…… 22
Şekil 6…… 23
Şekil 7…… 24
Şekil 8…… 26
Şekil 9…… 27
Şekil 10…..…… 29
Şekil 11…..…… 30
Şekil 12…..…… 31
Şekil 13…..…… 32
Tablo 1…..…… 8

ÖZET

Relativistik hadron ve yanal ağır iyon çarpışmaları, uyarılmış ağır hiperçekirdekleri üretmek için çok uygun koşullar sağlar. Baryonların ve hafif parçacıkların buharlaşması ve fisyona uğraması sonucu ortaya çıkan bu hiperçekirdeklerin parçalanmasını inceledik. Daha önceden, bu parçalanma süreçleri normal çekirdekler için düşük uyarma enerjilerindeki bozunma kanalları olarak biliniyordu. Biz bu modelleri hiper madde için genelledik. Bu şekilde, düşük sıcaklıklar için dikkate alınan nükleer reaksiyon çalışmalarını 'acaip' kuarkının etkin olduğu bu alan için genişlettik. Yeni bozunma kanallarının bütün parçalanma sürecine nasıl bir katkı sağlayabileceğini gösteriyoruz. Bu bozunma kanallarının, üretilen hiper parçacıkların kütle ve izotop dağılımları için önemi vurgulanmaktadır. Bu süreçler sırasında elde edilen yeni ve egzotik izotoplar, nükleer maddede hiperon etkileşimini araştırmak için benzersiz bir fırsat sağlayabilir.
Hiper çekirdek sistemlerinin istatistiksel parçalanmasını ve hiperon bağlanma enerjileri ile parçacık oluşumlarının bağlantısını inceledik. Hiperçekirdeklerin farklı izotoplarının ürünlerinden hiperon bağlanma enerjilerinin etkin biçimde türetilebleceğini gösterdik. Bu amaç için çift oran metodu önerilmiştir. Bu sürecin avantajı evrenselliği ve çok farklı izotopları içerme olasılığıdır.
Bu metod bağlanma enerjilerini ölçmenin çok olduğu önceki hiper çekirdek deneylerinde ve çoklu hiper çekirdekler için de uygulanabilir.

Anahtar sözcükler: nükleer parçalanma, nükleer etkileşme, hiperon, hiper madde, egzotik çekirdekler, çift oran metodu

ABSTRACT

There are excellent opportunities to produce excited heavy hyperresidues in relativistic hadron and peripheral heavy-ion collisions. We have investigated the disintegration of such residues into hypernuclei via evaporation of baryons and light clusters and their fission. Previously these processes were well known for normal nuclei as the decay channels at low excitation energies. We have generalized these models for the case of hypermatter. In this way we make extension of nuclear reaction studies at low temperature into the strange sector. We demonstrate how the new decay channels can be integrated in the whole disintegration process. Their importance for mass and isotope distributions of produced hyperfragments is emphasized. New and exotic isotopes obtained within these processes may provide a unique opportunity for investigating hyperon interaction in nuclear matter. We consider statistical disintegration of hypernuclear systems and the connection of fragment production with the binding energies of hyperons. It is demonstrated that the hyperon binding energies can be effectively evaluated from the yields of different isotopes of hypernuclei. The double ratio method is suggested for this purpose. The advantage of this procedure is its universality and the possibility to involve many different isotopes. This method can also be applied for multi-strangenuclei, which binding energies were very difficult to measure in previous hypernuclear experiments.

Key words: nuclear fragmentation, nuclear interaction, hyperon, hypermatter, egzotic nuclei, double ratio method

1. GİRİŞ

Hiper çekirdekler, yüksek enerjili etkileşimlerde üretilen hiperonların (Y=Λ, Σ, Ξ, Ω) çekirdekler tarafından yakalanması ile oluşur. Tipik reaksiyon sürelerine göre çok daha uzun süre var olurlar. Nükleer ortamda bulunan 'acaip kuark' a sahip olan baryonları araştırmak, düşük enerjilerdeki güçlü üç-kuark etkileşimini, çok parçacıklı sistemler çerçevesinde açıklayabilmenin tek olası imkânını sağlamaktadır. Aynı zamanda hiper çekirdekler, hiperon-nükleon ve hiperon-hiperon etkileşimini çalışmak için de bir araç olarak görülebilir. Hiper çekirdeklerin oluşmasına yol açan reaksiyonları ve hiperçekirdeklerin yapısını incelemek, nükleer fiziğin ilerleyen alanlarından biridir. Çünkü geleneksel nükleer çalışmaları geliştirmek için tamamlayıcı metodlar sunar ve parçacık fiziği ve nükleer astrofiziği çalışmak için yeni ufuklar açar (Bando vd., 1990; Hashimoto ve Tamura, 2006; Schaffner vd., 1993; Gal vd., 2012; Buyukcizmeci vd., 2013; Hell ve Weise, 2014 ve içindeki referanslar)

Geleneksel olarak, hiper çekirdek fiziği sprektroskopik bilgiye odaklanır ve bu bilgi oldukça az sayıda uyarılmış lepton-hadron reaksiyonlarından toplanabilir (Bando vd., 1990; Hashimoto ve Tamura, 2006; Schaffner vd., 1993). Bu reaksiyonlar da doğrudan üretilen kaon'lar genellikle taban durumu ve uyarılmış halde bulunan hiper çekirdekleri ayırmak için kullanılır. Bununla birlikte, relativistik iyon çarpışmalarında ve çekirdeklere büyük miktarda enerjinin aktarıldığı diğer reaksiyonlarda (Danysz ve Pniewski, 1953; STAR işbirliği, 2010; Dönigus vd. (ALICE işbirliği); 2013), hiper çekirdekler ile ilgili çok teşvik edici sonuçlar elde edilmiştir(Vassiliev vd.(CBM iş birliği), 2017; Saito vd.(HypHI işbirliği) 2012). Birçok deneysel işbirliği; The PANDA işbirliği (2006), Vassiliev vd. (CBM işbirliği) (2015), Saito vd. (HypHI işbirliği) (2012), SuperFRS, GSI(FAIR) 'da R3B, BM@N ve Nükletron-tabanlı İon Çarpıştırıcısı Tesisi NICA'daki MPD (NICA White paper) relativistik hadronlar ve iyonlar tarafından tetiklenen reaksiyonlarda hiperçekirdekleri ve özelliklerini araştırmayı planlamaktadır. İzospin uzayındaki sınırlar, parçacıkların kararsız enerji seviyeleri, çoklu garip çekirdekler ve hassas ömür ölçümleri, bu parçalanma reaksiyonlarının kendine özgü konularındandır.

Uzun zaman önce keşfedilen hiperçekirdeklerin, derin-inelastik reaksiyonlardaki parçalanma süreçlerinde oluşma ihtimalini özellikle vurgulanmıştır (Botvina vd., 2011). Daha önce tartışıldığı gibi (Buyukcizmeci vd., 2013; Botvina vd., 2013), yüksek enerjili hadronlar, leptonlar ve iyonlar tarafından başlatılan bu reaksiyonlarda, egzotik olanlar da dâhil olmak üzere üretilen (olağanüstü izospinli) hiperçekirdeklerin çok geniş bir dağılımı elde edilebilir. Bu dağılımlar, nükleer tabloya acaiplik bölümü ekleyerek çekirdeklerin yapısını incelemeye

yardımcı olabilir(Bando vd., 1990; Hashimoto ve Tamura, 2006; Schaffner vd., 1993). İkiden fazla hiperon içeren karmaşık çoklu-hiper-nükleer sistemler çekirdek-çekirdek çarpışmalarında üretilebilir ve bu $|s|=2$ 'nin ötesine geçmek için akla yatkın tek yöntem olabilir. Hem yanal relativistik ağır-iyon çarpışmaları hem de uyarılmış-hadron reaksiyonlarıyla ilgili olan 'normal nükleer reaksiyonlar' araştırılarak bu çalışmalarda önemli teorik ilerleme kaydedildi (Botvina vd., 2015, 2017; Rudy vd., 1995) ve buradaki referanslar). Bu çalışmada, uyarılmış bileşik çekirdekten hafif parçacıkların buharlaşması ve bileşik çekirdeğin fisyonu gibi iki çok popüler nükleer reaksiyon modelini, uyarılmış hiperçekirdeklerin bozunmasını tanımlamak için genelleştirdik. Daha önce Buyukcizmeci vd. (2013) ve Armstrong vd. (1993) referanslarında analiz edilen çoklu parçalama süreçlerine yol açan yüksek uyarma enerjili durumlara ek olarak, düşük uyarma enerjili durumlar için özellikleri inceledik. Gösterdiğimiz gibi, hiper çekirdeklerin oluşumu için birçok yeni olasılık ortaya çıkmaktadır. Hiperçekirdeklere yönelik, özellikle de GSI/FAIR ve diğer hızlandırıcılarda, yapılan yeni deneyler bu tür üretim mekanizmaları kullanılarak yönlendirilebilir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Nükleer fiziğin kapsamı günümüzde temel parçacıklar, kuark ve gluonlardan süpernova patlamaları gibi en devasa kozmik olaylara kadar uzanır. Kozmik patlamaların kalıntıları nötron yıldızlarıdır. Çok yüksek nükleer yoğunluklu bir çekirdeğe veya düşük nükleer yoğunluklarda bir kabuksu yapıya sahip olabilen böyle yıldızsı maddeler nükleer fiziğin tüm özelliklerini içerir. İki güneş kütlesi nötron yıldızlarının son gözlemleri (Antoniadis, 2013; Demorest vd., 2010) yüksek yoğunluklarda hadronik maddenin hal denkleminin geçerliliğini sınırlamaktadır. Fakat böyle dikkate değer gözlemler bile nötron yıldızlarının içerik oluşumları hakkında kesin bir açıklama getirmemektedir. Bu sınırlı bilgi, baryonik sistemlerdeki baryon-baryon ve çok-cisim etkileşimlerinin, çoklu karışımlar gibi temel kuark-gluon dinamikleri ile ilişkilerine değinilmediğini ve eksikliği yansıtır. Üç çeşitli (three-flavor) nükleer hal denkleminin detaylı çalışmaları nötron yıldızlarının yapısını anlamak ve temel Kuantum Kromodinamik (KKD) teorileri geliştirmek için zorunlu olacaktır.

Aslında hiper çekirdeklerin araştırılması, nükleer astrofizik ve parçacık fiziği çalışmalarında yeni ufuklar vadeden ve geleneksel nükleer çalışmalarını geliştirmek için tamamlayıcı metotlar sağlayan nükleer fiziğin hızla gelişen alanlarından biridir (Bando vd., 1990; Schaffner vd., 1993; Greiner, 1996; Hashimoto ve Tamura, 2006; Schaffner-Bielich, 2008; Buyukcizmeci vd., 2013; Hell ve Weise, 2014; ve bu kaynaklar içindeki kaynaklar). Yüksek yoğunluk ve düşük sıcaklıklarda nükleer hal denklemi için temel düzeltmeler üçlü baryon etkileşimlerinin özelliklerinden elde edilebilir (Gal, 1966; Nishizaki vd 2001,2002; Lonardoni vd 2013; Yamamoto vd 2013). Nükleer ortamlarda bulunan acaip baryonlar olan hiperonlar üç farklı türden parçacığın kuvvetli etkileşiminin çok parçacık yönüne yaklaşım için kullanılabilir.

Kuantum kromodinamiğin temel ilkelerine dayanan hassas yapı hesaplamaları ile örtüşen hafif hiper çekirdeklerin hassas deneysel çalışmaları, aynı zamanda çekirdeklerdeki baskın iki baryon etkileşimini ve yokolmasını (üç baryon kuvvetler ve yük simetri kırılma etkileri. gibi) keşfetmek için yardımcı olacaktır. İzospin ve acaiplik uzayında kararlılık sınırlarının araştırılması da güncel hiper çekirdek çalışmaları arasındadır.

Bütün bu özelliklerin deneysel ve teorik olarak araştırılmasında bu projede geliştirdiğimiz simülasyonlar ve yaklaşımlar anahtar rol alacak ve daha önce bahsedilen dünyanın önemli araştırma merkezlerinde deneysel öneri ve deneylerin teorik analizi için kullanılabilecektir.

Şu anda, hiper nükleer fizikteki çalışmalar sınırlı sayıda reaksiyonun incelenmesi ve hala spektroskopik bilgi edinilmesi üzerine odaklıdır. Kaonları da içeren birkaç parçacığın oluşumuna neden olan yüksek enerjili hadronlar ve leptonlarla uyarılmış böyle reaksiyonlarla taban ve düşük uyarılmış durumlardaki hiper çekirdekler incelenebilmektedir. Bu durumda, $\rho_0 \approx 0.15$ fm^{-3} nükleer doyma yoğunluğu civarında baryon yoğunluklu hiper sistemler oluşur. Bu nedenle daha önceki teorik çalışmaların çoğunluğu soğuk hiper çekirdeklerin yapısının hesaplanması üzerine odaklanmıştır.

Ancak yine de, PANDA (The PANDA işbirliği), FAIR için FOPI/CBM ve Super-FRS (Rappold vd., 2013), RHIC'de STAR (The STAR işbirliği 2010), LHC'de ALICE (Dönigus vd., 2013), BM@N ve NICA'da MPD (NICA white paper) gibi pek çok deneysel işbirliği grupları hadron ve ağır iyon reaksiyonlarında hiper çekirdeklerin özelliklerini araştırmayı planlıyor veya çalışmaya başladılar. İzospin uzayındaki sınırlar, parçacık kararsız haller, çoklu acaip çekirdekler ve yarı ömür belirleme ölçümleri böyle parçalanma reaksiyonlarının araştırma konularıdır.

Projemiz mevcut ve gelecek deneysel çalışmalarla yakından ilişkilidir. Teorik ve deneysel bilgileri birleştirerek, böyle reaksiyonlarda uyarılmış hiper maddenin oluşmasıyla, hiper nükleer çalışmaların önemli ölçüde genişletilebileceğini gösterdik. Hiper maddenin bozunması ile yeni egzotik hiper çekirdekler oluşabileceğini hiperonlar için geliştirdiğimiz istatistiksel çok katlı parçalanma modelini hiper SMM ile ilk kez göstermiş olduk(Botvina vd., 2016).

Hiper çekirdeğin ilk deneysel gözlemi (Danysz ve Pniewski, 1953) 1950 lerde kozmik ışınlarla uyarılan nükleer parçalanma reaksiyonlarında elde edilmiştir. Son zamanlarda göreceli hızlardaki ağır iyon çarpışmalarıyla ilişkili çok katlı parçalanma reaksiyonlarının araştırılmasında önemli ilerleme kaydedilmiştir (Bondorf vd., 1995; Xi vd., 1997; Scharenberg vd., 2001; Ogul vd., 2011 ve içindeki kaynaklara bakınız). Böylece hiper çekirdeklerin üretimi için böyle reaksiyonları tanımlamak için uyarlanan iyi bilinen teorik metotları (Buyukcizmeci vd., 2013; Botvina ve Pochodzalla, 2007) uygulayabiliriz.

Projemizin önemli bir getirisi de hiper çekirdekleri araştırırken deneysel şartları iyileştirmek için detaylı model tahminleriyle rehberlik etmek olacaktır. Özellikle aşağıdaki ana konuları araştırdık.

1.Hiper nükleer maddenin durum denklemi ve faz geçiş olayını içeren mekanizmalar ve yeni bulgular sağlayabilecek hiper çekirdek oluşumlarına yol açan parçalanma reaksiyonları çalışılmıştır.

2. Hiper çekirdekler acaiplik bölgesinde nükleer tablonun genişletilmesiyle çekirdeklerin yapısı araştırmada yardımcı olabilir. İkiden fazla hiperon içeren karmaşık çoklu hiper nükleer sistemler, FAIR'deki CBM ve NUSTAR, RHIC'deki STAR (The STAR işbirliği, 2010) veya CERN'deki ALICE (Dönigus vd., 2013) deneyleri gibi yüksek enerjili çekirdek çekirdek çarpışmalarında oluşturulabilir. Aslında ağır iyon çarpışmaları s=2 acaiplik sayısının ötesine gitmek için bile en makul yöntem olabilir. Bu projemizde tek türde hiperon (lambda) içeren hiper çekirdekler için egzotik parçacıklar hesaplanmıştır. İleriki çalışmalarımızda iki veya daha çok çeşit hiperon için hesaplamaların genişletilmesi düşünülmektedir ki bu ise başlı başına ayrı ve yeni bir proje konusu oluşturacak genişlikte ve zorlukta bir konudur.

3. Ağır hiper sistemler nötron ve proton kararlılık çizgilerinin ötesinde acaip olmayan çekirdekleri de üretebilmek için bir açık kapı olduğunu çalışmalarımızla göstermiş olduk. Bu proje çalışması ile egzotik izospinli çekirdekler hakkında bilgimizi önemli ölçüde genişlettik ve sonuçlarımızı yayınlamayı başardık(Botvina vd., 2016).

Hiper çekirdeklerin oluşum süreçleri merkezcil ve yanal iyon çarpışmalarında oldukça farklıdır. Çok yüksek enerjili merkezcil çarpışmalarda birleşme (coalesence) mekanizması, üretilen hiperon ve nükleonlardan (anti baryonlar dahil) hafif hiper parçacıkları birleştiren oluşumun baskın olduğunu gösteren çalışmalar bulunmaktadır (The STAR işbirliği, 2010; Dönigus vd., 2013; Ma vd., 2013; Camerini vd., 2013). Termal modeller de sıcak birleşik çekirdeğin çok yüksek sıcaklığı nedeniyle (T≈160 MeV) yalnızca A≤4 kütle numaralı hafif parçacıkların oluşabileceğini desteklemektedirler (Andronic, 2011; Steinheimer, 2012). Ayrıca, yanal (peripheral) nükleer çarpışmalardan sonra seyirci (spectator) bölgelerdeki hiperonların soğurulmasının hiper çekirdeklerin oluşumu için alternatif bir yol olduğu da ortaya çıkarılmıştır (Wakai vd., 1988; Rudy vd., 1995; Gaitanos vd., 2009; Botvina vd., 2011). Yanal çarpışmalarda oluşan nükleer madde ortalama hızlı (midrapidity) nükleer maddeye nazaran çok farklı özellikler gösterir. Orta derecede uyarılmış seyirci artık çekirdekler (T ≤ 5-6 MeV) için böyle reaksiyonlar (Bondorf vd., 1995; Xi vd., 1997; Scharenberg vd., 2001; Pochodzalla, 1997) oldukça iyi biçimde incelenmişlerdir. Artık çekirdekler için hiperon soğurulması hiperon-nükleon kuvvetleri nükleon-nükleon kuvvetleri ile aynı mertebede olduğu için olayı etkilememelidir.

Daha önce normal parçacık oluşumu için başarı ile uygulanan (Bondorf vd., 1995; Xi vd., 1997; Scharenberg vd., 2001; Ogul vd., 2011; Ogul ve Buyukcizmeci'nin son 10 yıldaki yayınları) İstatistik Çok Katlı parçalanma Modelinin (SMM) hiper çarçacıklar için tasarlanan versiyonu Hiper-SMM hiper artık çekirdeklerin hiper parçacıklara ayrışmasının genel özelliklerini araştırmak için kullanılabilir(Buyukcizmeci vd., 2013). Hiper-SMM kullanarak başka reaksiyonlarda elde edilmesi çok zor olan kararlılık çizgisi ötesindeki hiper parçacıkları ve egzotik hiper çekirdekleri tahmin edebilmekteyiz. Alternatif yöntem ise uyarılmış artık çekirdeklerin bozunması için önce SMM'i kullanıp sonra hiper parçacıkların son ürünleri için birleştirme (coalesence) modelini uygulamaktır (Gaitanos vd., 2009). Her iki teorik model mekanizması üzerine de araştırmalarımız devam etmekte olup deneylerle test etmek için beklemekteyiz.

Ağır fisyona uğrayabilir hiper çekirdeklerin eşik enerjileri civarında protonlarla uyarılan reaksiyonlarla yüksek olasılıkla belirlenebilir (Ohm vd., 1997). Daha önce de belirttiğimiz gibi hafif hiper çekirdeklerle ilgili umut verici deneysel sonuçlar vardır. İyi bilinen hiper çekirdekler (Saito vd., 2012), iki nötronlu Λ hiperon gibi beklenmedik egzotik hiper nükleer durumlar için bulgular (Rappold vd., 2013a-b) yayınlamıştır. Yeni egzotik durumların oluşumu uyarılmış hiper nükleer sistemlerin ayrışması ile doğal olarak açıklanabilir (Saito vd., 2012; Botvina vd., 2012b).

Düşük enerjili (2 AGeV) ağır iyon çarpışmalarında, yarı ömür ölçümlerini de içeren hiper-tiriton oluşumuyla ilgili ön sonuçlar FOPI işbirliği tarafından sunuldu (Hermann vd., 2013; Leifels vd., 2011). Bu sonuçlar hedef kinematik bölgeye doğru ürünlerde bir kayma olduğunu da göstermektedir. Bütün deneyler, çarpan ve hedef çekirdeklerin oluşturduğu artık çekirdeklerden hiper çekirdeklerin üretildiğini ve bu mekanizmanın yeni hiper nükleer durumların araştırılması için çok ümit verici olduğunu doğrulamaktadır.

3. GEREÇ ve YÖNTEM

Hiper çekirdeklerin oluşumu ve ayrışmasını tanımlamak için oluşturmayı planladığımız her iki hibrid modelin de (DCM+SMM ve UrQMD+SMM) birinci aşamasını dinamiksel model süreci oluşturur. Bu süreç, atomik çekirdekler gerekli göreceli hızlarda çarpıştırıldıktan sonra sıcak uyarılmış çekirdek topluluklarının denge öncesi oluşum süreçlerini tanımlar ve sıcak uyarılmış kaynak çekirdeklerin oluşumu INC (intra nuclear cascade) transport modeline göre hesaplanır. DCM (Toneev vd., 1990) ve UrQMD (Bleicher vd., 1999) hesaplamalarında Boltzmann-Uehling-Uhlenbeck (BUU) göreceli kinetik denklem seti Monte Carlo yaklaşımı ile çözülür. BUU denkleminin zamana bağlı çarpışma terimi nükleer çarpışmaların simülasyonu yapılarak oluşturulur. Gelen çekirdek enerjisi nükleon başına 10 GeV'nin üzerine çıkınca oluşma süresi değişimi göz önüne alınarak DCM yerine UrQMD yaklaşımını kullanmayı planlamıştık. Her iki modelde de hipermaddenin oluşum süreci farklıdır (Botvina vd., 2011). Biz bu hesaplamaları ve kodu daha önceki ALADIN deneylerinin (0.6 GeV/nucleon) teorik analizinde yaptık (Oğul vd., 2011) ve bu sefer hipermadde için düzenlemelerimizi yapacağız. Ancak hesaplamalarımız sürecinde araştırmacılarımızla vardığımız ortak görüş dinamik süreci çalışmayı istatistiksel model çalışmalarımızı tamamladıktan sonra entegre etmenin hem zamanlama hem de modelin tamamlanması açısından daha uygun olmasıydı. Bu ortak görüş nedeniyle projemizde istatistiksel model kısmının buharlaşma ve fisyon modellemesinin hiper çekirdeklere uyarlanması hesaplamaları üzerine yoğunlaşılmıştır. Sıcak ve uyarılmış hipermaddenin ayrışması, hibrit modelin ikincil aşaması olan hiper SMM ile tanımlanır. Bu hesaplama yöntemini de aşağıdaki gibi açıklayalım:

3.1. Hiper madde ve hiper çekirdeklere ayrışma

Başlangıç olarak istatistiksel yaklaşımla aşağıda belirtilen hesaplamaları yaptık. Hiper maddenin ayrışmasını tasvir etmek için tasarlanan hiper SMM ile hiper çekirdekler için farklı kütle formülleri Botvina ve Pochodzalla (2007), Samanta vd. (2006), gibi kullanılarak Tablo 1'de gösterilen büyük kanonik, kanonik ve mikro kanonik istatistiksel topluluklar için geliştirerek genişletmiş olduk. H0=0, hiperonsuz SMM hesaplamalarına karşılık gelmektedir. H_0>0 durumunda SMM modelini hiper çekirdekler için genelleştirmiş olacağız.

Tablo1. V hacminde, A_0 kütle numaralı, Z_0 yüklü, H_0 hiperonlu ve E_0 toplam enerjili parçalanan nükleer sistem için istatistiksel toplulukların sınıflandırılması. T, sıcaklık, Parçacıkların dağılımı: N_{AZH}, $1 \le A \le A_0$, $0 \le Z \le Z_0$, $0 \le H \le H_0$.

Mikrokanonik	Kanonik	Büyükkanonik
$\sum AN_{AZH} = A_0$	$\sum AN_{AZH} = A_0$	$\sum A\langle N_{AZH}\rangle = A_0$
$\sum ZN_{AZH} = Z_0$	$\sum ZN_{AZH} = Z_0$	$\sum Z\langle N_{AZH}\rangle = Z_0$
$\sum HN_{AZH} = H_0$	$\sum HN_{AZH} = H_0$	$\sum H\langle N_{AZH}\rangle = H_0$
$E_f(N_{AZH}, T_f, V) = E_0$	$\langle E_f(N_{AZH}, T_f, V)\rangle = E_0$	$\langle E_f(\langle N_{AZH}\rangle, T_f, V)\rangle = E_0$
$W_f^{mik} \propto \exp S_f(E_0, V, A_0, Z_0, H_0)$	$W_f^{kan} \propto \exp\left(-\frac{F_f(T, V, A_0, Z_0, H_0)}{T}\right)$	$W_f^{büy} \propto \exp\left(-\frac{F_f(T, V, A_0, Z_0, H_0) - \mu\sum A - \upsilon\sum Z - \xi\sum H}{T}\right)$ $W_f^{büy} \approx \exp$

SMM içinde parçacıkların bağlanma enerjileri sıvı damlası yaklaşımı ile hesaplanır. A<4 olan hafif nükleer parçacıklar literatürdeki deneysel bağlanma enerjileri ve spinleri dikkate alınarak gaz parçacıklar kabul edilir. A=4 olan parçacıklar da gaz parçacıklar kabul edilir ancak, $E_x = AT^2/\varepsilon_0$ (ε_0 seviye yoğunluk parametresi) ile hesaplanan ^4He, $^4_\Lambda H$, $^4_\Lambda He$ gibi bazı uyarılmış durumlar dikkate alınır. A>4 parçacıklar sıcak sıvı damlaları olarak kabul edilir. Donma hacminde hipermaddenin nükleer sıvı-gaz fazın aynı anda varoluşunu dikkate alabiliriz. Botvina ve Pochodzalla (2007) tarafından böyle parçacıkların iç serbest enerjileri, hacim F^{hacim}, yüzey $F^{yüzey}$, simetri $F^{Simetri}$, Coulomb $F^{Coulomb}$ ve hiper F^{hiper} enerji terimlerinin toplamı

$$F_{AZH}(T,V) = F_A^{hacim} + F_A^{yüzey} + F_{AZH}^{simetri} + F_{AZ}^{C} + F_{AH}^{hiper}$$

(1)

olarak ifade edilmiştir. H Lambda sayısını göstermektedir. İlk üç terim standart sıvı damlası yaklaşımından yazılmıştır (Bondorf vd 1995):

$$F_A^{hacim} = \left(-\omega_0 - \frac{T^2}{\varepsilon_0} \right)$$

$$F_A^{yüzey} = \beta_0 \left(\frac{T_c^2 - T^2}{T_c^2 + T^2} \right)^{5/4} A^{2/3}$$

$$F_{AZH}^{simetri} = \gamma \frac{(A-H-2Z)^2}{(A-H)}$$

Burada, ω_0=16 MeV, β0 = 18 MeV, *Tc* = 18 MeV and γ = 25 MeV deneylerden çıkarılmış model parametreleri olup nükleer çok katlı parçalanma için iyi bir şekilde tanımlamaktadır. Denklem 1'deki dördüncü terim Wigner-Seitz yaklaşımına göre parçacıkların Coulomb etkileşimini ifade eder (Bondorf vd 1995). Hiper parçacıkların serbest enerjisi ise:

$$F_{AH}^{hiper} = \left(H / A \right).(-10.68\,A + 21.27\,A^{2/3}) \qquad (2)$$

ile tanımlanmıştır. Samanta vd (2006) tarafından ise:

$$F_{AH}^{hiper} = H.\left(-10.68\,A + 48.7/\left(A^{2/3}\right)\right)$$

(3)

ile tanımlanmıştır. Bu serbest enerji eşitlikleri, tek tip (lambda veya sigma) hiperon içeren sistemler için geçerli olan sonuçları gösterebilir. Hiper maddenin ayrışması sonucu oluşan hiper çekirdekler ve onların bağıl ürünleri arasındaki ilişki madde içinde hiperon etkileşimi hakkında bilgi edinmemizi sağlayacaktır. Maddenin hal denklemi parçacıklar arasındaki etkileşime ve ayrışmalarına da bağlıdır. Hipermaddenin ayrışmasında parçacıkların kütle, yük, izotop ürünleri, bir nötron ayrışma enerjisi, ,iki nötron ayarışma enerjisi, bir ve iki proton

ayrışma enerjileri gibi özelliklerini detaylı olarak inceleyerek hiper parçacıkların özelliklerini ve hal denklemini genişletmeyi planlamıştık(Buyukcizmeci vd., 2013; Botvina ve Pochodzalla, 2007). Bununla ilgili ön çalışmalarımıza zaten başlamıştık (Buyukcizmeci vd., 2013). Proje çalışmamızda öncelikle bu iki eşitliği kullanarak sistematik hesaplamalar yaptık ve yayınladık (Buyukcizmeci vd., 2017a, 2017b, 2017c; Kaya vd., 2017a, 2017b). Gelecek projelerimizde çok-çeşitli hyperon içeren sistemler için yeni serbest enerji eşitlikleri araştırmaya devam etmeyi planlamaktayız.

Ayrışma sonlu sistemlerde faz geçişleri gibi de düşünülebilir. Faz geçişlerinde kiritik üstel çarpanlar gibi (Scharenberg vd., 2001) bazı parametreleri incelenmesiyle maddenin hiperon içeriğinin süresi nasıl etkilediğini ve nötron yıldızları için gerçek sonsuz madde durumuyla bağlantının nasıl kurulabileceği gösterilebilir. Proton ve nötron kararsızlık eğrilerinin ötesindeki hiper parçacıklar bu araştırmamızda çok önem taşımaktadır. Hiper-SMM Monte Carlo kodu ile gelecekte yapılması planlanan deneylerin verileri ile karşılaştırmaları dikkate alarak her bir olay için ayrışma olayı tasvir edilmiştir. Her bir hesaplama için standard olarak 100.000 olay üzerinden hesaplamalar yaparak çalışmalarımıza başladık.

3. 2. Sıcak hiper parçacıkların yeniden uyarılmaları

Hafifçe uyarılmış nükleer artık çekirdeklerle, birincil sıcak parçacıkların yeniden uyarılmaları yanal reaksiyonların ana süreçlerinden biridir. Standart SMM (Bondorf vd., 1995) hafif parçacıkların Fermi ayrışması, buharlaşma, ağır parçacıkların fisyonu gibi her tür yeniden uyarılma süreçlerini içermektedir ve hiper-SMM modeli (Buyukcizmeci vd., 2013; Botvina ve Pochodzalla, 2007) için bu süreçlerden buharlaşma ve ağır parçacıkların fisyonunu içeren model kısımlarını hiperonları dahil ederek genişlettik.

İstatistiksel tanım zamanı açıkça içermemesine rağmen, birincil parçacıkların oluşum süreci ve ayrışma hacminde sistemin yayılma süresi $\tau_{exp} \sim R/Cs \sim$ 50-100 fm/c civarında tahmin edilmektedir. Son ayrışma durumunun oluşumu daha uzun bir zaman ölçeği ile karakterize edilir. Bu aşamada parçacıklar karşılıklı Coulomb alanının etkisi altında hareket ederler. Sıcak parçacıkların yeniden uyarılmaları da bu aşamada gerçekleşir. Böyle süreçler, hafif parçacıkların artmasına ve parçacık enerjilerinin yeniden dağılımına neden olur. Özellikle birincil sıcak parçacıklar ve bunların parçacık yayınlayarak dönüştüğü soğuk parçacıklar bu süreçlerin bir sonucudur. Standart SMM (Bondorf vd., 1995) içinde bu süreçlerin normal ve uyarılmış çekirdekler için nasıl incelendiğini aşağıdaki gibi kısaca özetleyebiliriz.

3.2.1 Fermi ayrışması

Hafif birincil parçacıkların (A<16) küçük uyarma enerjileri, toplam bağlanma enerjileriyle karşılaştırılabilir mertebededir. Bu durumda, yeniden uyarılmanın (ikincil ayrışma), uyarılmış çekirdeğin patlayarak daha küçük parçacıklara ayrışması olduğu kabul edilebilir. Bu süreci tanımlamak için, ünlü Fermi (1950) Modeli kullanılır. Bütün son durum parçacıklarının, taban ya da düşük uyarılmış durumlarda oldukları kabul edilir. Bu durumda, V_f hacminde m_i (i=1, 2, 3,...n) kütleli n parçacığa sahip kanalın istatistik ağırlığı, mikrokanonik yaklaşımla hesaplanabilir:

$$\Delta\Gamma_f^{mic} \propto \frac{S}{G}\left(\frac{V_f}{(2\pi\hbar)^3}\right)^{n-1}\left(\frac{\prod_{i=1}^{n} m_i}{m_0}\right)^{3/2}\frac{(2\pi)^{(3/2)(n-1)}}{\Gamma\left(\frac{3}{2}(n-1)\right)}\left(E_{kin}-U_f^C\right)^{(3/2)n-5/2}$$

(4)

Burada, $m_0 = \sum_{i=1}^{n} m_i$ ayrışan çekirdeğin kütlesi, $S = \prod(2s_i+1)$ spin dejenerasyon çarpanı (si, i. parçacığın spini) ve $G = \prod_{j=1}^{k} n_j!$ parçacık türü çarpanıdır (n_j, j türündeki parçacıkların sayısıdır.). Burada, E_{kin} parçacıkların sonsuzdaki toplam kinetik enerjisidir ve bu toplam birincil parçacıkların E_{AZ}^* uyarma enerjisi ile aşağıdaki gibi bağlantılıdır:

$$E_{kin} = E_{AZ}^{i} + m_0 c^2 - \sum_{i=1}^{n} m_i c^2$$

(5)

Ayrıca, U_f^C

$$U_F^C = \frac{3}{5}\frac{Z_0^2 e^2}{R} - \sum_{(A,Z)}\frac{3}{5}\frac{Z^2 e^2}{R_{AZ}^C}N_{AZ}$$

(6)

denklemi ile verilen soğuk ikincil parçacıklar arasındaki Coulomb etkileşme enerjisidir. Bu durumda, U_f^C ve V_f terimleri ikincil bozunma süreci için tanımlanır. Fermi bozunma olayları, bozunma kanallarının direkt seçilmesi metodu ile elde edilir. O^{16} çekirdeği için kanal sayısı 10^3, ^{12}C için $2x10^2$ civarındadır. Coulomb genişlemesi süreci böyle hafif sistemler için dikkate alınmamıştır. Son ayrışma ürünlerinin momentum dağılımları ulaşılabilir tüm uzay üzerinden rasgele elde edilir, momentum ve enerji korunum kanunları dikkate alınarak (5) denkleminden toplam kinetik enerji belirlenir. Detaylar için Bondorf vd. (1995) kaynağına bakınız.

Şu anda kadar çoğunlukla hafif hiper çekirdeklerin oluşumu ile ilgili deneyler çalışıldığı için yalnızca A<16 olan çift ve tek hafif hiper çekirdeklerin Fermi ayrışma modeli (Fermi break-up model, FBM) daha önce Lorente vd. (2011) tarafından çalışılmıştır. Biz PANDA işbirliği grubu tarafından planlanan Ω-hiperonlarıyla yapılacak gelecek deneyler için FBM tarafımızdan uyarılmış durumları da içeren S=-3 acaiplik sayılarına kadar hafif çekirdekler için tablo değerlerini ekleyerek genişletmek istiyoruz. Bağlanma enerjileri için yapılacak basit tahminler yeni durumların önemini anlamak için yeterli olacaktır. İleriki aşamalarda elde edilebilecek yeni deneyleri değerleri hiper çekirdek yapı hesaplamalarının sonuçlarına uyarlayabileceğiz. Bahsedilen hesaplamaların ve hiper SMM kodunun fermi ayrışması model kısmının hiperonlara uygun hale getirilmesi ve sistematik hesaplamaların yapılabilmesi için yeni bir proje konusu oluşturacak nitelikte geniştir. Hiperonlar için fermi ayrışma kodunun geliştirilmesini içeren yeni bir araştırma proje önerisi hazırlığı içerisindeyiz.

3.2.2. Sıcak parçacıkların buharlaşması

A>16 olan sıcak birincil parçacıklardan ardışık parçacık yayılması, yeniden uyarma (de-excitation) mekanizması olarak kabul edilir. Böyle parçacıkların uyarma enerjileri büyük olduğu için, standart Weisskopf buharlaşma modeli (Weisskopf, 1937) kullanılır. Standart modelle benzer şekilde, bir (A, Z) bileşik çekirdeğinden bir j parçacığının saçılma genişliği,

$$\Gamma_j = \sum_{i=1}^{n} \int_0^{E^{*}_{AZ}-B_p-\varepsilon_j^{(i)}} \frac{\mu_j g_j^{(i)}}{\pi^2 \hbar^3}\, \sigma_j(E)\, \frac{\rho_{A'Z'}\left(E^{*}_{AZ}-B_j-E\right)}{\rho_{AZ}\left(E^{*}_{AZ}\right)}\, E\, dE \qquad (7)$$

olarak ifade edilir. Burada toplam, j parçacığının $E_j^{(i)}$ (i=0,1,...,n) parçacık kararlı uyarılmış durumları ve taban durumları üzerinden alınır. $g_j^{(i)}$ = $(2s_j^{(i)}+1)$ i. uyarılmış durumun spin dejenerasyon çarpanıdır. μ_j ve B_j indirgenmiş kütle ve ayrılma enerjisidir. E_{AZ}^{*} ilk çekirdeğin uyarma enerjisidir. E kütle merkezi çerçevesinde, saçılan bir parçacığın kinetik enerjisidir. Denklem (7) de ρ_{AZ} ve $\rho_{A'Z'}$ terimleri (A, Z) ilk ve (A′, Z′) son bileşik çekirdeğin seviye yoğunluklarıdır. Termal enerji çekirdek seviye yoğunluğu için Bethe (1937) formülü kullanılarak Fermi gaz modeli ile hesaplanır.

$$\rho_{AZ}(E) = \frac{\pi^{1/2}}{12\, E^{5/4}\, a^{1/4}} \exp\left(2\sqrt{aE}\right) \qquad (8)$$

.

Burada, a seviye yoğunluk parametresidir, Fermi yüzeyindeki tek parçacık seviye yoğunluğu $\frac{1}{6}\pi^2 a$ 'dır. İç istatistik toplam, exp(-E/T) Gibbs çarpanı ile bu ifadenin integralinin alınmasıyla elde edilir. Bu durumda düşük sıcaklıklarda,

$$F_{\mathrm{AZ}}^{\mathrm{bulk}}(T) = -\left(W_0 + T^2/\varepsilon_0\right)A \tag{9}$$

ifadesi geçerlidir. Burada, $\varepsilon_0 = A/a$ 'dır. İdeal Fermi gazı için $\varepsilon_0 = 4E_f/\pi^2$ olup, E_f Fermi enerjisidir. Normal nükleer madde yoğunluğunda, $E_f = 40$ MeV ve $\varepsilon_0 = 16$ MeV'dir. Az uyarılmış çekirdek için ε_0 'ın deneysel değeri 2 çarpanı kadar küçüktür ve kütle numarasına önemli derecede bağlıdır. Termal denge şartı altında $\varepsilon_0 \approx 16$ MeV'dir.

3.3. Fisyon

Ağır çekirdeklerin (A>200) yeniden uyarılmasının önemli bir kanalı fisyondur. Bu süreç parçacık yayımı ile rekabet eder. Bohr-Wheeler istatistiksel yaklaşımını izleyerek bileşik çekirdek fisyonu için kısmî genişliğin semer noktasındaki $\sigma_{sp}(E)$ ile orantılı olduğu Kabul edilir (Bohr, 1936; Bohr ve Wheeler, 1939):

$$\Gamma_f = \frac{1}{2\pi\sigma_{AZ}(E_{AZ}^*)} \int_0^{E_{AZ}^* - B_f} \sigma_{sp}(E_{AZ}^* - B_f - E)\,dE \tag{10}$$

Burada B_f, Myers-Swiatecki yöntemiyle belirlenen fisyon bariyeri yüksekliğidir. $\rho_{sp}(E)$ yaklaşımı için çekirdek saçılabilirliği (fissility) ve Γ_n/Γ_f dallanma oranlarının (Ignatyuk vd.,1985; Iljinov vd., 1992) analizi kullanılır. σ_{sp} ve σ_{AZ} seviye yoğunluklarında kabuk yapısının etkisi (shell effect) göz ardı edilir, çünkü çok katlı parçalanma olayında kabuk etkisinin saf dışı edilmesi beklenilen E^* > 30-50 MeV gibi yüksek uyarılma enerjileri ile ilgilenilmektedir. Fisyon ürünlerinin kütle ve kinetik enerjisi üzerindeki deneysel verilerin analizinden, bileşik çekirdeğin kütleleri ve uyarılma enerjilerinin geniş bir aralığında

kullanılabilen yaklaşık ara değeri bulma formülleri fisyon parçacıklarının kütle ve enerjileri için elde edilmiştir (Adeev vd., 1993). Bu formüller ile özellikle simetrik fisyondan asimetrik fisyona geçiş tam olarak tanımlanmıştır (Eren vd., 2013).

Yukarıda özetlediğimiz buharlaşma ve orta ve ağır kütleli çekirdeklerin fisyonu sürecinde hiper çekirdekler için deneysel verilerin (Ohm vd., 1997) azlığı nedeniyle şimdiye kadar dikkate alınmamıştı. Ancak düşük uyarma enerjilerinde bu bozunma şekilleri baskın olacaktır. Bu çalışmayla nötron zengin ve nötron fakir egzotik hiper çekirdeklerin oluşumunu da çalışabilmek için hiper madde için buharlaşma ve fisyon modelleri geliştirilmiştir. Böyle süreçlerin yeni incelenmeleri nedeniyle, hiper çekirdeklerin bazı parametreleri, kabuk düzeltmeleri ve seviye yoğunlukları ile ilgili bilgilerde birtakım eksiklikler vardır. Başlangıçta, biz ve göreceli hızlarda ortalama alan teorisi çalışan diğer gruplar tarafından elde edilen iyi sonuçlar veren hiper çekirdek kütle formülleri kullanılmıştır (Buyukcizmeci vd., 2013). Seviye yoğunlukları; hiperonlar, nötronlar ve protonlar dikkate alınarak Fermi gaz yaklaşımıyla hesaplanacaktır. Fisyon için, semer noktası civarında çekirdek yüzey deformasyonları dikkate alınacaktır. Gelecekteki deneyleri analiz edebilmek için böyle bozunma şekillerinin gerçekçi tahminlerini elde ettiğimizi düşünmekteyiz. Gelecekte yapılması olası model ve deneysel veri karşılaştırmaları için, hiperonların varlığı durumda model parameterlerini değiştirebilme olasılıklarını da göz önünde bulundurduk.

4. HESAPLAMALAR VE SONUÇLAR

Proje kapsamı doğrultusunda, göreceli hızlardaki ağır iyon çarpışmalarında çarpan ve hedef çekirdek artıklarından çıkan hiper maddenin parçalanmasını ve oluşumunu hesaplamak için hiper-SMM kodu içindeki Monte-Carlo bilgisayar kodlarını geliştirerek hesaplamalar yaptık. Standart SMM (Bondorf vd., 1995) hafif parçacıkların buharlaşma, ağır parçacıkların fisyonu gibi yeniden uyarılma (de-excitation) süreçlerini hiper-SMM modeli (Buyukcizmeci vd., 2013; Botvina ve Pochodzalla, 2007) içine integre ederek tek hiperonlu sistemler için hesaplamalar yaptık. Özellikle bir lambda hiperonu içeren ^{238}U, ^{209}Bi (fisyon veren), ^{165}Ho, ^{112}Sn ve ^{124}Sn (daha az fisyon veren) gibi ağır çekirdeklerinin fisyon ve buharlaşma olasılıkları ve kütle dağılımları detaylı olarak incelenmiştir.

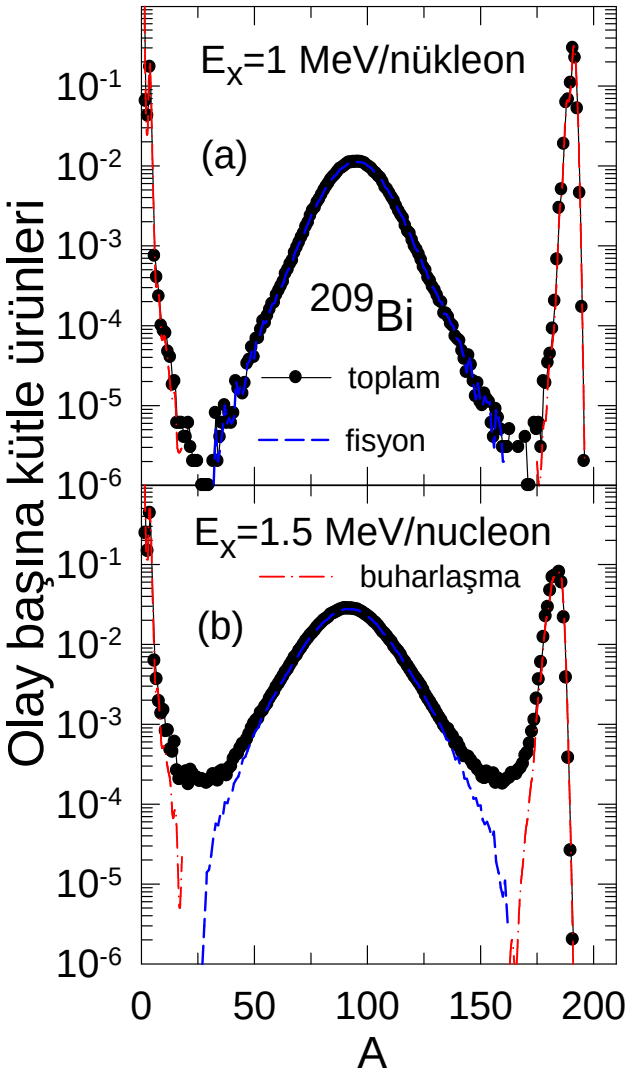
Hesaplamalarımızı planladığımız gibi 100 000 olay üzerinde tek-tek olay bazında 0.25-2.5 MeV/n uyarma enerjileri arasındaki 10 farklı enerji değeri için yaptık ancak fisyon olayı için istatistiksel olarak olay sayısının artırılması gerekliliği ortaya çıktı. Bu nedenle, özellikle ^{238}U ve ^{209}Bi çekirdekleri için 1 milyon olay ve ^{165}Ho, ^{112}Sn ve ^{124}Sn çekirdeklerinin fisyon hesaplamaları için 10 milyon olay üzerinden hesaplamalarımızı tekrarladık. Toplamda proje başlangıcında öngörülen 10 milyon hesaplamaya ek olarak 640 milyon hesaplama da yapmış olduk. 3 atom çekirdeği için x 10 Uyarma enerjisi x 2 (normal ve hiper çekirdek durumu) x 10 milyon hesap = 600milyon hesaplama ve 2 atom çekirdeği için x 10 Uyarma enerjisi x 2 (normal ve hiper çekirdek durumu)x1milyon hesap=40milyon hesaplama: Toplamda 640 milyon olay. Hesaplamalarımızı hiperon içermeyen normal çekirdekler için de test ettik ve karşılaştırmalı olarak yeni araştırma sonuçları ile elde edilen sonuçlarımızı karşılaştırdık. İleriki süreçte hesaplamalarımızı çok katlı parçalanma sürecini de gözönüne alarak kodumuzu geliştirip genişletmeyi planlıyoruz. ^{238}U, ^{209}Bi, ^{165}Ho, ^{112}Sn ve ^{124}Sn çekirdekleri için yapılan hesaplamalar içinden seçilen örnek şekiller alt bölüm 4.1'de sunulmuştur. Bu proje çalışmamızda gerçekleştirdiğimiz teorik analizler daha önce öncü çalışmalar olarak başlayıp yayınladığımız (Buyukcizmeci vd., 2013) teorik analizlerinin sonuçlarını daha da genişletmiştir ve literatüre önemli ölçüde katkıda bulunmuştur. Bu bölümde detaylarını açıkladığımız proje kapsamındaki çalışmalarımız uluslararası SCI kapsamındaki dergide yayınlanlanmıştır (Botvina vd., 2016). İlk olarak teorik analiz sonuçlarını alt bölüm 4.1'de vereceğiz.

Proje kapsamında iş-zaman çizelgesindeki "Gelecekteki yeni deneyleri planlama ve mevcut deneysel verileri karşılaştırma için hesaplamalar**"** planımızda projeye başlarken istatistik çok katlı parçalanma modeli (SMM) ile dinamik coalesence model (DCM) ve ultra relativistik kuantum moleküler dinamik model (UrQMD) gibi dinamik modelleri birbirine bağlamak, DCM+SMM ve UrQMD+SMM gibi hibrit yaklaşımlar oluşturmayı planlamaktaydık. Projemizin 2. gelişme raporumuzda da belirttiğimiz gibi çalışma sürecinde şu ana kadar yaptığımız

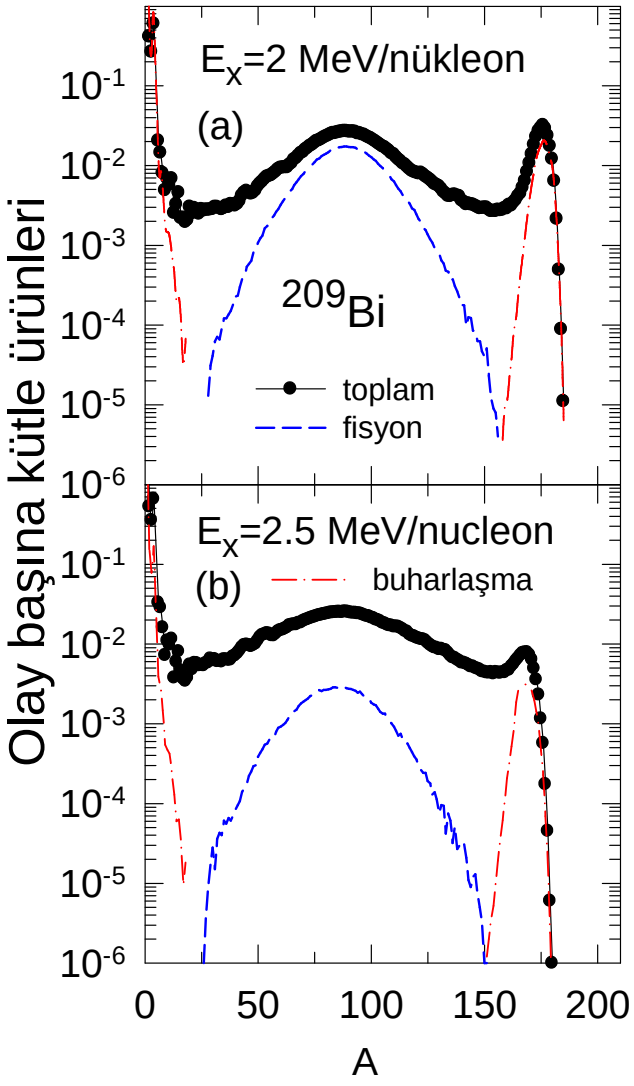
hiper-SMM hesaplamaları ve bulguları ışığında DCM+SMM ve UrQMD+SMM hesaplamalarına geçebilmek için kalan 1 yılın yeterli bir zaman dilimi olmayıp yeni bir proje konusu olabileceği ortak görüşüne ulaştık. İşpaketi 1 ve 2 kapsamında yaptığımız çalışmaları (buharlaşma ve fisyon süreçlerini hiper çekirdekler için geliştirme) 1. Gelişme raporumuzda belirttiğimiz gibi ileride çok katlı parçalanmayı da içine alarak genişletme ve hiper-SMM kodunu diğer modeller ile entegre edebileceğimiz en iyi düzeye çıkarmak için çalışmalar yaptık. Ayrıca normal çekirdekler için literatürde mevcut olan ve bizim daha önceki çalışmalarımızda uyguladığımız(Ogul vd., 2009) izotopik ölçeklendirme yöntemi (isoscaling yöntemi: deneylerle kıyaslanabilir hesaplamalar) hesaplamalarından esinlenerek hiper çekirdekler için hiper izotopik ölçeklendirme hesaplamaları için teorik çalışmalara başladık. Hiper çekirdeklerin parçalanmasında oluşan ürün çekirdeklerin analizi için kullanılabilecek çift izotopik oran metodu (hiper double ratio method) ile hiperon bağlanma enerjilerinin etkin biçimde belirlenebileceğini analitik olarak ilk kez türetmiş olduk(Botvina vd., 2017). Önerdiğimiz teorik metodun avantajı; tamamen yeni, evrensel ve pek çok farklı hiper çekirdek için uygulanabilir nitelikte olmasıdır. Özgün analitik formülasyon türetimini içeren makalemizi Aralık 2017'de Jour. Phys. G:Nucl. and Part. Phys dergisine sunduk, hakem değerlendirmesi devam etmektedir. İleriye dönük olarak, yeni proje önerimizde bu projede geliştirdiğimiz özgün formülasyonumuzu çeşitli hiper çekirdekler için hiper SMM ile elde ettiğimiz verilerle teorik simülasyonlarla genişletip mevcut deneysel verilerle karşılaştımayı planlamaktayız. Alt bölüm 4.2'de proje kapsamında geliştirdiğimiz öncü çalışma niteliğindeki hiper izotopik oran metodunun teorik türetimini anlatacağız.

4. 1. Hiper çekirdekler için buharlaşma ve fisyon hesaplamaları

Başlangıç olarak, farklı yeniden uyarılma mekanizmalarının (buharlaşma, fisyon ve çoklu parçalanma) gerçek bir parçalanma sürecinde birbirleri ile bağlantılı olduğunu göstermek önemlidir. Üretilen parçacıkların kütle dağılımlarının ^{209}Bi kaynak çekirdeğin uyarma enerjisine göre değişimini Şekil 1 ve 2'de gösterdik. Bu hesaplamalar öncelikle normal çekirdekler için gerçekleştirilmiştir. Düşük sıcaklıklarda (1 MeV) standart buharlaşma ve fisyon parçacıklarının bulunduğu görülebilir.



Şekil 1. Uyarılmış normal nükleer bir sistemde ^{209}Bi çekirdeğinin parçalanması sonucu ortaya çıkan parçacıkların kütle dağılımları. Uyarma enerjileri a ve b panellerinde verilmiştir. Hesaplamalar bütün bozunma süreçlerini içermektedir, ağır çekirdekler için: Başlangıçtaki birleşik çekirdeğin fisyonu (kesikli mavi çizgiler) ve buharlaşması (noktalı kırmızı çizgiler) ayrı olarak gösterilmiştir. Toplam ürünün geri kalanı (siyah daireli çizgiler) çoklu parçalanma sürecinin katkısıdır.



Şekil 2. Şekil 1'deki gibi fakat daha yüksek enerjiler için kütle dağılımları

Uyarma enerjisinin artması, çoklu parçalanmanın bozunma kanallarında orta kütleli parçacıkların üretilmesine sebep olur. Nükleon başına 2.5 MeV'de bile, A>15 olan parçacıkların önemli bir bölümü hızlı çoklu parçalanma aşamasında üretilmektedir. Daha önce bahsedildiği gibi, nitel olarak hiper nükleer sistemlerin de aynı davranışı göstermesini bekliyoruz.

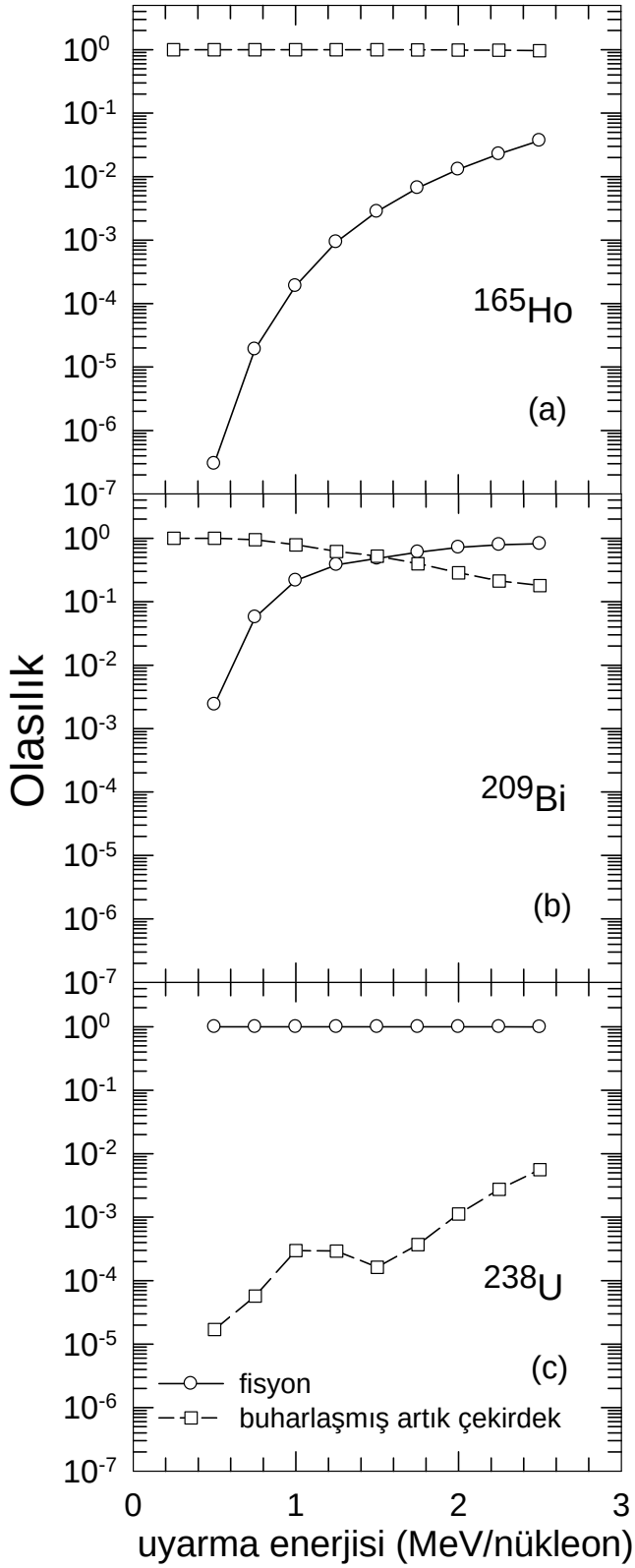
Buharlaşma ve fisyon süreçlerinin oluşma olasılıkları deneylerde kolaylıkla ölçülmektedir. Bu deneyler genellikle birbiriyle uyumlu modelleri test etmek için kullanılırlar. Şekil 3 ve 4' de bu olasılıkların ağır çekirdeklerin uyarma enerjisiyle değişimini gösterdik. Özellikle, fisyon

ifadesi, buharlaşma-fisyon basamaklarının birindeki yeniden uyarılma sürecinde, çekirdeklerin fisyona uğradığı anlamına gelmektedir. 'Buharlaşmış artık çekirdekler' ifadesi, yeniden uyarılma sürecinde sadece 'nükleonların buharlaşması' ve 'hafif parçacık kümeleri'nin fisyona uğramaksızın rol aldığı anlamına gelmektedir. Şekil 3 içinde normal çekirdekler için yapılan simülasyonlardan, fisyonun net olarak çok büyük çekirdeklerde (^{238}U) meydana geldiği ve bu durumun orta-ağırlıktaki çekirdeklerde (^{165}Ho) baskınlanmış olduğu görülebilir. Aynı zamanda orta-ağırlıkta çekirdeklerin fisyon yapma olasılığı esasen uyarma enejisiyle artmaktadır. Aslında bu durum geçmiş deneylerle de uyumludur.

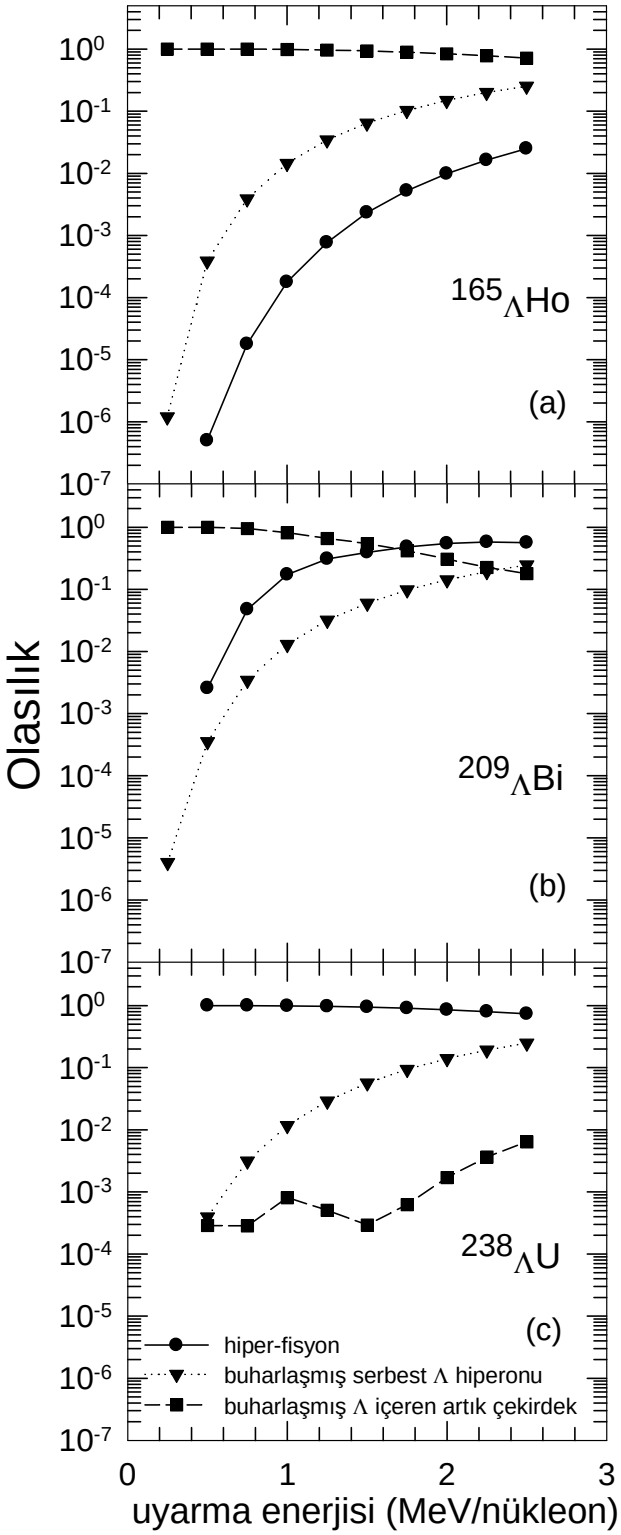
Aradaki büyük çekirdekler için, bu bozunma kanalları (^{209}Bi) arasında açık bir rekabet vardır ve bu da deneylerde ölçülebilir. Şekil 3'ü, hiper çekirdeklerdeki buharlaşma ve fisyon için aynı süreçlerin sunulduğu sonraki Şekil 4'ün anlaşılmasını kolaylaştırmak için gösterdik. Şekil 4'te gösterilen tüm nükleer sistemler için, çekirdekteki bir nötron yerine bir Λ-hiperonu yerleştirildiğini kabul etmekteyiz. Özellikle düşük uyarma enerjili tek Λ-hiperonu içeren hiper çekirdekler nükleer reaksiyonlarda karşılaşılabilecek en mümkün durumdur (Botvina vd., 2017). Çoğu hiperonun yakalanmasına, genellikle büyük nükleon kayıpları eşlik eder ve bu nedenle hiperon yakalanması, çok katlı parçalanma kanallarına özgü olan, yüksek uyarma enerjilerine yol açmalıdır (Botvina ve Pochodzalla, 2007; Imal vd., 2015).

Şekil 4'te, fisyon ve buharlaşmış artık çekirdeklerin olasılık dağılımları için Şekil 3'tekine benzer eğilimler görülebilir. Fakat bu durumda, "hiper fisyon" kalıntıları yanlızca bir lambda hiperonu içerecektir. Aksi takdirde buharlaşmadan sonra kalan artık çekirdek bu Λ hiperonunu içerebilir. Buharlaşmadan sonra Λ hiperonu içeren artık çekirdek ifadesi şekillerde 'buharlaşmış Λ içeren artık çekirdek' olarak kısaltılmıştır. Şekil 4.'de gösterilen başka bir önemli bozunma kanalı Λ-hiperonunun buharlaşma olasılığı durumudur. Bu olasılığın uyarma enerjisiyle beraber arttığı görülebilir. Bununla beraber, buharlaşmış Λ hiperonu içeren artık çekirdeğin olasılık dağılımının hiper-fisyon olasılık dağılımından küçük olduğu görülebilir. Bunun sebebi Λ hiperonunun bağlanma enejisi nedeniyle bu hiperonu çekirdek içerisinde tutmasıdır.

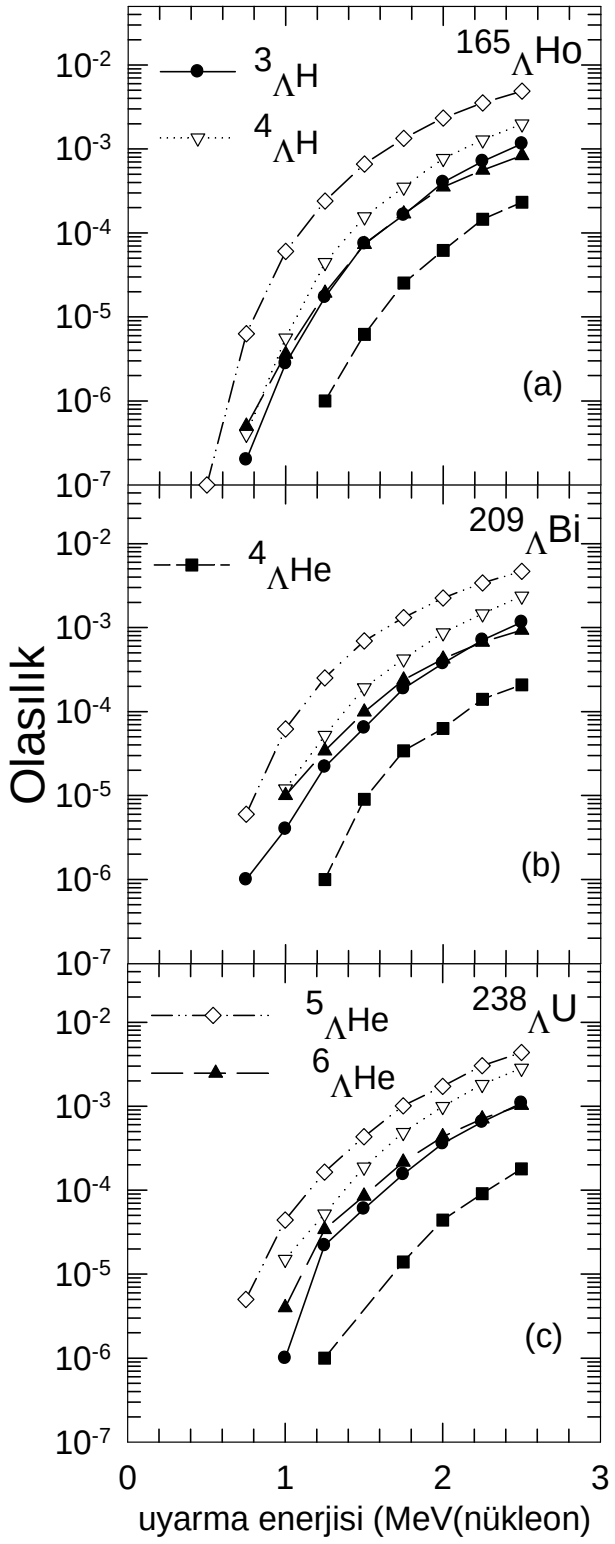
Yukarıda tartışıldığı gibi, Λ buharlaşmasının yanısıra hafif 'hiper-küme' lerin de uyarılmış hiper-bileşikten buharlaşması mümkündür. Bu durum Şekil 5'te $^{3}_{\Lambda}$H, $^{4}_{\Lambda}$H, $^{4}_{\Lambda}$He, $^{5}_{\Lambda}$He, $^{6}_{\Lambda}$He hiperçekirdekleri için gösterilmiştir. Tek Λ içeren hiperçekirdeklerin buharlaşmasına benzer şekilde, bu hiperçekirdeklerin ürünleri, artan uyarma enerjisi ile birlikte önemli ölçüde artar. Yine de, bu hiperçekirdeklerin ürünleri aslında Λ hiperonundan (yaklaşık 0.1 katı kadar) daha düşüktür ve buharlaşma/fisyon süreçlerine hâkim olma ihtimalleri çok daha yüksektir (Şekil 5 ile Şekil 4'ü karşılaştırınız).



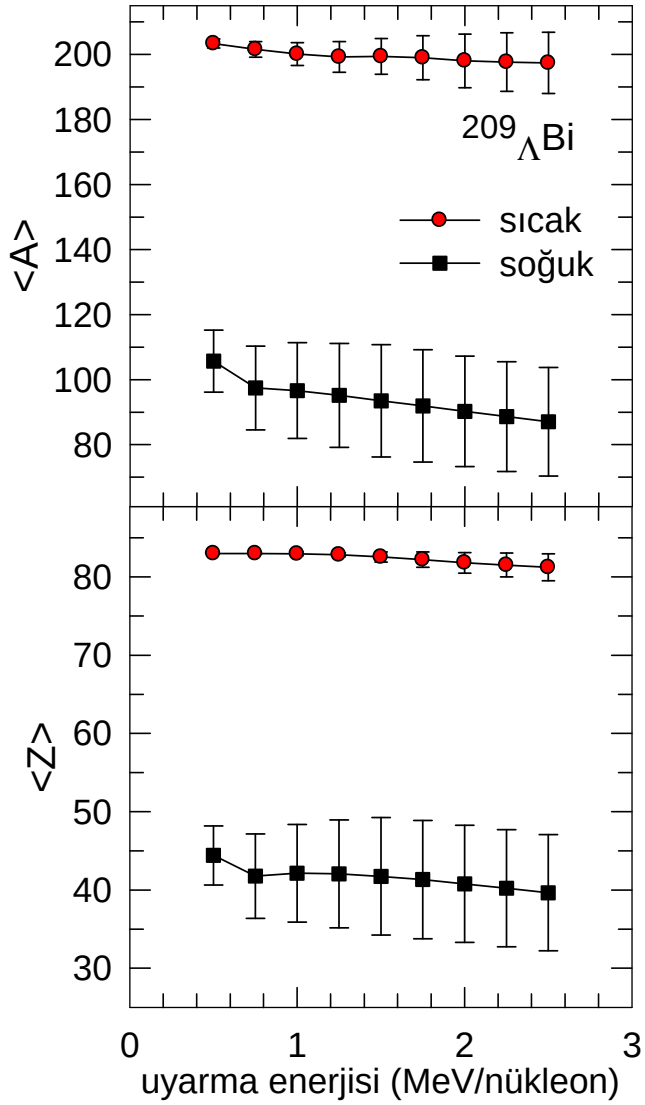
Şekil 3. Nükleer fisyon(daire, sürekli çizgiler) ve hafif parçacıkların buharlaşmasından sonra birleşik çekirdekten geriye kalan(buharlaşmış artık çekirdek)(kare, kesikli çizgiler) olasılığına karşılık çekirdeklerin uyarma enerjileri. Çekirdekler a, b ve c panellerinde belirtilmiştir.



Şekil 4. Hiper nükleer fisyon(dolu daire, sürekli çizgiler) ve hafif parçacıkların buharlaşmasından sonra birleşik hiper çekirdekten geriye kalan (buharlaşmış Λ içeren artık çekirdek) (dolu kare, kesikli çizgiler) olasılığına karşılık hiper çekirdeklerin uyarma enerjileri. Dolu üçgenler (noktalı çizgiler) tek Λ'lı hiperonların yayınlanması olasılığını göstermektedir. Başlangıçtaki hiper çekirdekler a, b ve c panellerinde belirtilmiştir.

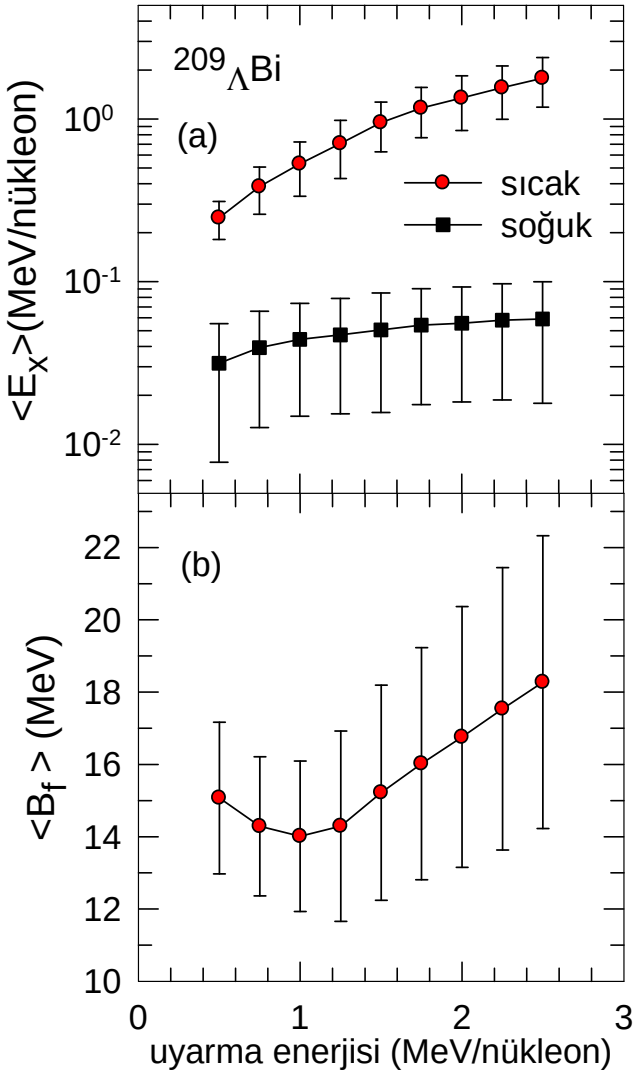


Şekil 5. Ağır birleşik hiper çekirdeklerden (panellerde görülebilir) hafif hiper çekirdeklerin buharlaşması olasılığına karşılık uyarma enerjisi. Buharlaştırılan çekirdeklerin notasyonu (semboller ve çizgiler) a, b ve c panellerinde verilmiştir.



Şekil 6. Semer noktasında (kırmızı daireler) fisyona uğrayan $^{209}_{\Lambda}$Bi hiper çekirdekleri ve bu hiper çekirdeklerin yeniden uyarılmasından sonra kalan nükleer kalıntılar için (siyah kareler), ortalama kütle(üst panel) ve yük(alt panel) numaralarına karşılık uyarma enerjisi. İstatistiksel sapmalar hata çubukları ile gösterilir.

Normal nükleer reaksiyonlardaki hafif kümelerin buharlaşması iyi bilinen bir konudur. Hiper çekirdeklerin araştırılmasında bu süreçler önemli rol oynayabilir çünkü bunlar doğrudan bir sürecin (ya da birleşim gibi) sonucu olarak değil karmaşık kollektif bir olayın bir sonucu olarak üretilirler. Daha önce, uyarılmış gelen çekirdek kalıntılarının parçalanmasından gelen, olağandışı *ΛNN* durumunun varlığına dair işaretler sunulmuştu(Rappold vd., 2013). Bunlar hiç bir zaman doğrudan reaksiyonlarda gözlemlenmemiştir. Bu durum, yeni egzotik

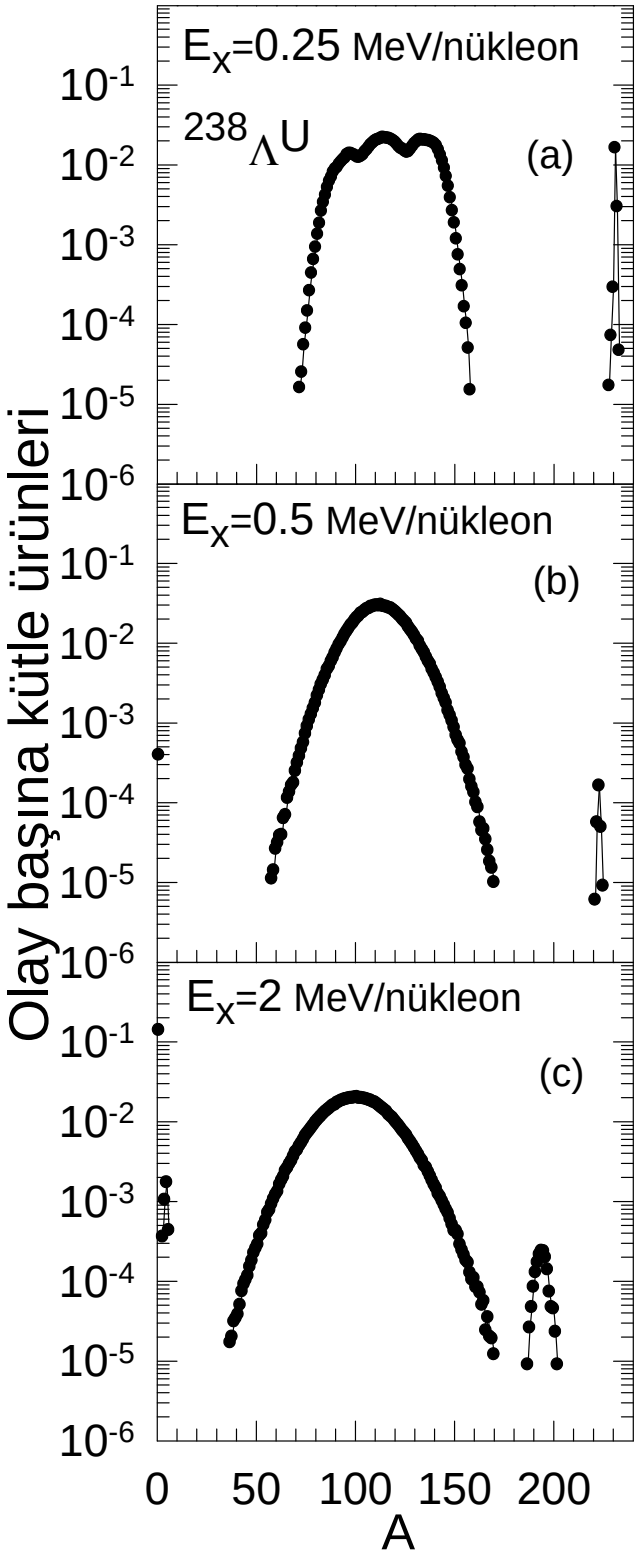


Şekil 7. Saddle noktasında (sıcak) fisyona uğrayan $^{209}_{\Lambda}$Bi hiperçekirdeğinin <Ex> ortalama uyarma enerjisi (a) ve <Bf> fisyon bariyerine karşılık başlangıç uyarma enerjisi(b). Yeniden uyarılmış lambda hiperonu içeren soğuk çekirdeklerin ortalama uyarma enerjileri (a) panelinde ayrıca gösterilmiştir. Diğer notasyonlar Şekil 6'daki gibidir.

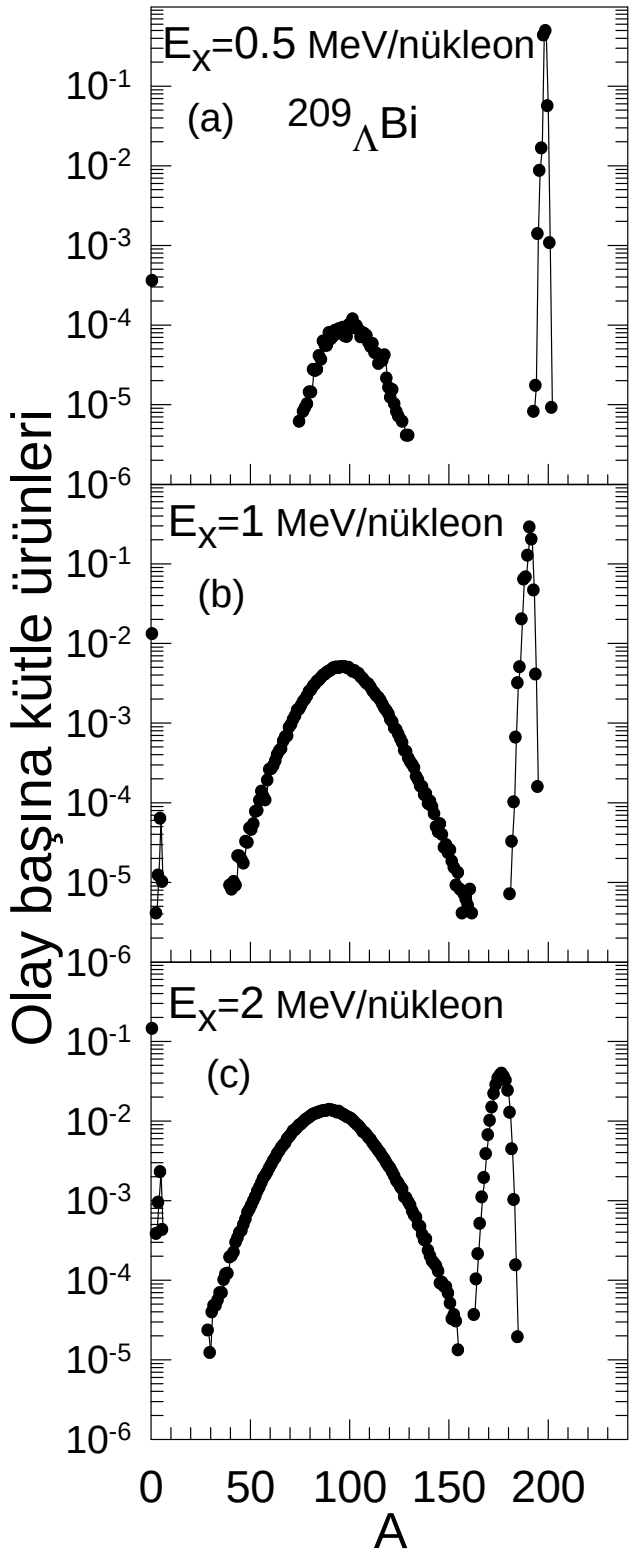
durumlarda hiperçekirdeklerin oluşumunun reaksiyon mekanizmasına nasıl bağlı olduğunu incelemek için bir fırsat verir. En hafif hiper çekirdekler, gelen/hedef çekirdek kinematik bölgesinde pionlar ve normal parçacıklar arasındaki bozunma ilişkisi araştırılarak, güvenilir bir şekilde tanımlanabilir. Şekil 5'teki hesaplamalarımız, $^{5}_{\Lambda}$He'nin yüksek bağlanma enerjisinden dolayı, bozunumunun en büyük olasılığa sahip olduğunu göstermektedir. Bu hiperçekirdeklerin ötekiler ile kıyas edildiğinde en büyük ürün dağılımınına sahip olduğu bozunma deneylerinden de ayrıca görülebilir (Rappold vd., 2014).

Şimdi hiper fisyon sürecinin ayrıntılarına daha çok dikkat çekmek istiyoruz. Bilindiği gibi, bileşik çekirdek, deformasyon süreci esnasında fisyonun semer noktasına kadar buharlaşma yaparak parçacık ve uyarma enerjisini kaybedebilir. Bu yüzden, semer noktasındaki nükleer bileşim, buharlaşma-fisyon basamağının başlangıcındaki nükleer bileşimden farklı olacaktır. Şekil 6. ve 7. de bu etkiyi $^{209}_{\Lambda}$Bi için uyarma enerjisine bağlı olarak simüle ettik. 'Sıcak' ifadesi, fisyon sürecinin tersinmez olabildiği semer noktasındaki parametrelere karşılık gelmektedir. 'Soğuk' ifadesi, fisyon kalıntılarının bölünmeleri ve nihai buharlaşma basamaklarından sonraki ortalama parametrelerine karşılık gelmektedir. Monte Carlo simülasyonlarında elde edilen istatistiksel sapmalar "hata çubukları" ile ortalama değerlerin üstünde ve altında ayrı olarak gösterilmiştir. Başlangıçtaki çekirdeğin, semer deformasyonuna kadar giden değişim sürecinde yaklaşık on nükleon kaybedebileceğini ve bu semer öncesi bozunmasının uyarma enerjisi ile arttığını görüyoruz (Şekil 6). Buna ek olarak, çekirdek mevcut enerjisinin önemli bir bölümünü kaybedebilir (Şekil 7). Bununla birlikte, saddle noktasındaki fisyon bariyerinin, ilk olarak düşük uyarma enerjilerinde azalması ilginçtir. Bunun sebebi buharlaşan nötronların fisyonlaşmayı arttırmasıdır. Yüksek uyarma enerjilerinde protonların da buharlaşması sebebiyle fisyonlaşma azalır ve fisyon bariyeri yükselir. 'Soğuk' artık çekirdekler için de bazı uyarılmış durumlar öngörülmektedir. Bu çekirdekler *γ* bozunumu yaparak uyarılmış hallerinden kurtulurlar. Bu durum belki hiper nükleer yapıyı açıklamak için de kullanılabilir.

Fisyon sürecini tanımlayabilmek için fisyon parçacıklarının kütle dağılımını incelemek önemlidir. Şekil 8 ve 9'da fisyona uğrayan $^{238}_{\Lambda}$U ve $^{209}_{\Lambda}$Bi hiperçekirdekleri için kütle dağılımlarının enerjiye göre değişimini gösterdik. Normal nükleer maddede olduğu gibi (Bondorf vd., 1995; Eren vd., 2013), uranyumun fisyonu düşük enerjilerde asimetrik ve simetrik fisyon modlarının karışımına yol açar (Şekil 8(a)). Daha yüksek enejilerde bu durum simetrik fisyona dönüşür (Şekil 8(a) ve 8(b)). Burada, ayrıca fisyon yokken bileşik çekirdeğin buharlaşmasından gelen küçük katkılar da vardır. Orta ağırlıklıktaki hiperçekirdekler'in (Bi, Şekil 9) sadece bileşik çekirdek buharlaşmasından gelen katkıları içeren simetrik fisyon yapmasını öngörüyoruz. Buharlaşma ve fisyon kütle dağılımlarının her ikisi de, uyarma enerjisiyle birlikte daha da genişlemektedir. Bu şekillerde, sadece Λ hiperonu içeren hiper parçacıkları sunduğumuza dikkat edilmelidir. Tamamlayıcı fisyon kalıntısı normal bir parçacıktır. Bu yüzden, bu figürlerde simetrik fisyon dağılımını görebiliriz çünkü hiperonların büyük parçacıklarda bulunma olasılığı daha fazladır (bknz. Denklem 8). Bu durum özellikle Şekil 8'in a panelinden açıkca görülmektedir. Burada sağ asimetrik moddaki ürünler, soldakinden daha fazladır. Daha önceden, hiperonlu kalıntıların benzer bir dağılım gösterdiği deneyde (Armstrong vd., 1993) gözlemlenmiştir.



Şekil 8. Farklı E_x (MeV/nükleon) uyarma enerjilerindeki (bknz. panel a, b, c) $^{238}{}_{\Lambda}U$ hiper çekirdeğinin parçalanmasından sonra ortaya çıkan fisyon ve buharlaşma hiper parçacıklarının kütle dağılımları. Hesaplamalar buharlaşma ve fisyon bozunma modlarının rekabetini içermektedir.

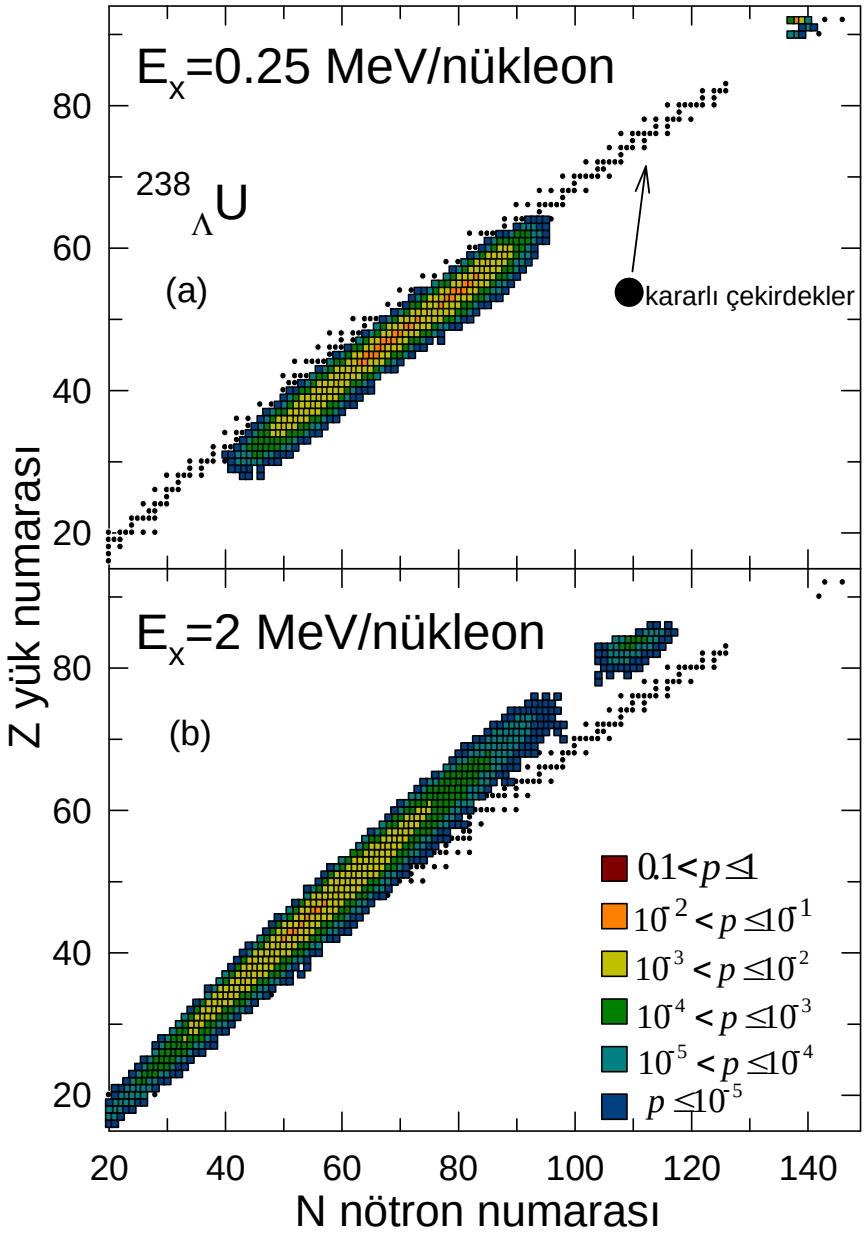


Şekil 9. Şekil 8'deki gibi fakat $^{209}_{\Lambda}$Bi uyarılmış hiper çekirdeği içindir.

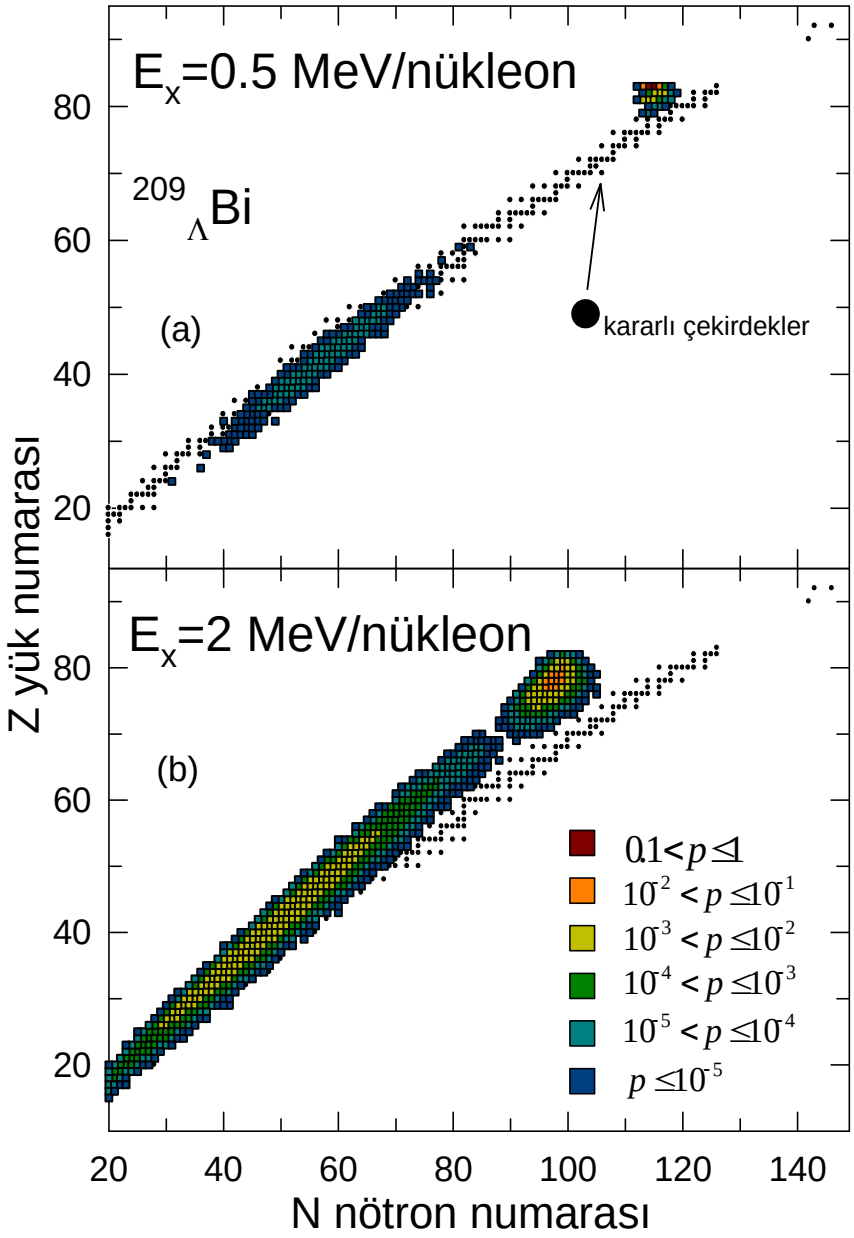
Normal çekirdekteki fisyon ve buharlaşma süreçlerinde yeni nükleer izotopların elde edilmesi, son zamanlarda araştırılan bir konudur. Bu konunun araştırılması, nükleer tablonun genişlemesine ve egzotik çekirdeğin yapısının keşfedilmesine yardımcı olacaktır. Bu araştırmaya hiper çekirdeklerin dâhil edilmesinin yeni bir bakış açısı getireceğini vurguluyoruz (Buyukcizmeci vd., 2013,; Botvina ve Pochodzalla, 2007).

Şekil 10.-13.'te buharlaşma-fisyon basamağının bir sonucu olarak üretilen hiper çekirdeklerin izotop bileşimini gösterdik. Aslında, başlangıçtaki U, Bi, Sn hiper çekirdeklerinin farklı uyarma enejilerdeki yeniden uyarılma durumları sonucunda oluşan izotopların elde edilme olasılıklarını hesapladık. Yük-nötron numarası düzlemindeki sonuçlar, belirli izotopları çalışmak ve hangi reaksiyonun daha iyi olacağına karar vermek için uygun bir bakış açısı sağlamaktadır.

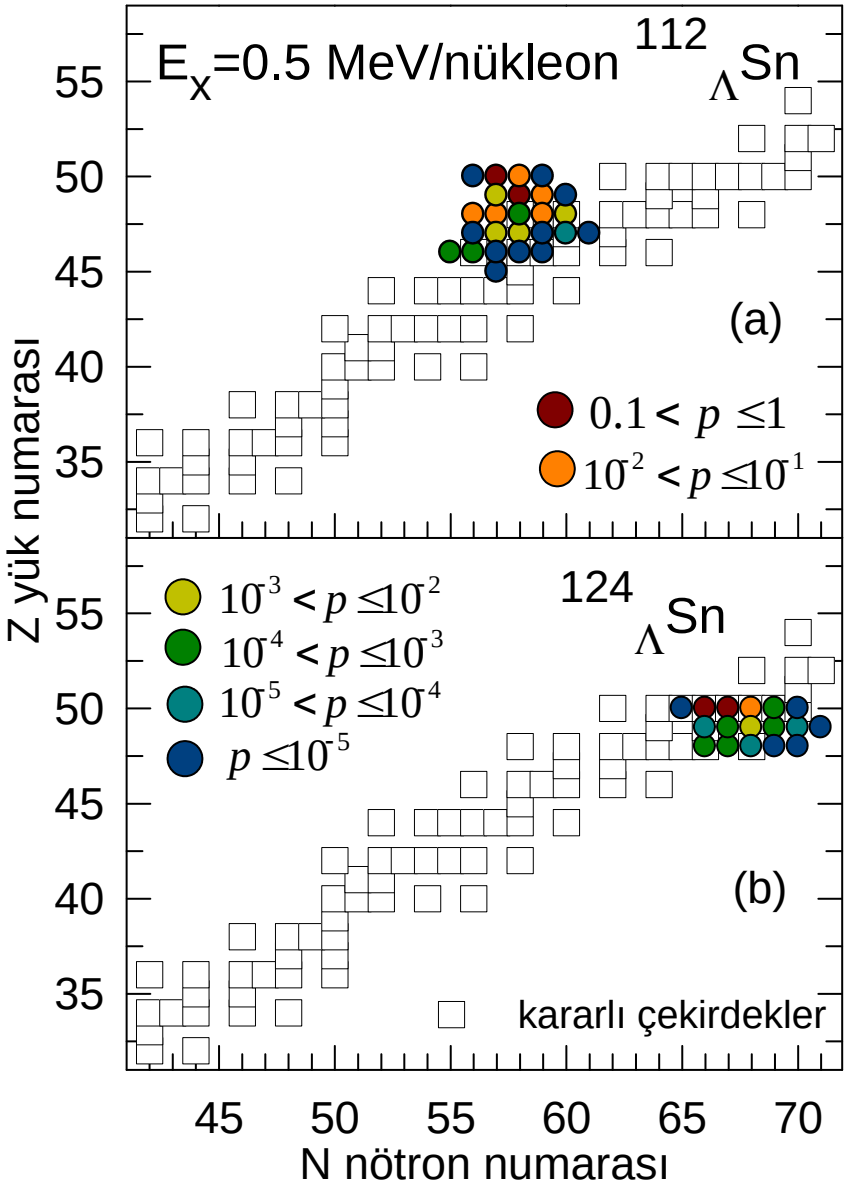
Şekil 10 ve 11'deki sonuçlar hiperon yakalayabilen uranyum ve bizmut gibi iki ağır fisyon yapan çekirdek için gerçekleştirilmiştir. Yukarıda, başlangıçtaki çekirdeğe yakın büyüklükteki yük numaraları için buharlaşma bozunumundan sonra kalan bileşik hiper bölgeyi görmekteyiz. Beklendiği gibi buharlaşma sırasında büyük nötron kayıpları meydana gelir, bu durum şekillerde ayrıca gösterilen kararlı çekirdek alanı ile karşılaştırıldığında çok net görülebilir. Düşük uyarma enerjilerinde (0.25 Mev/nükleon) fisyon sürecinin bir sonucu olarak pek çok orta kütleli nötron-zengin hiper çekirdek üretilebilir. Yani, normal çekirdekler için fisyon reaksiyonu, egzotik nötron-zengin çekirdekler üretmek için uygun bir metod olarak düşünülebilir. Çekirdeğin içinde hiperonun bulunması, çekirdeğin bağlanma enerjisini arttırabilir ve bu sayade daha egzotik nükleer parçacık elde edebiliriz(Buyukcizmeci vd., 2013). Uyarma enerjisin artmasıyla art arda meydana gelen yeniden uyarmalar nötron-fakir hiper çekirdeklerin üretimine yol açar. Bu durum sonraki çalışmalar için ilgi çekici bir konu olacaktır. Fisyonlaşmadan sonraki parçacıkların ürün dağılımı eğilimleri, ağır çekirdekler için de nitel olarak aynıdır.



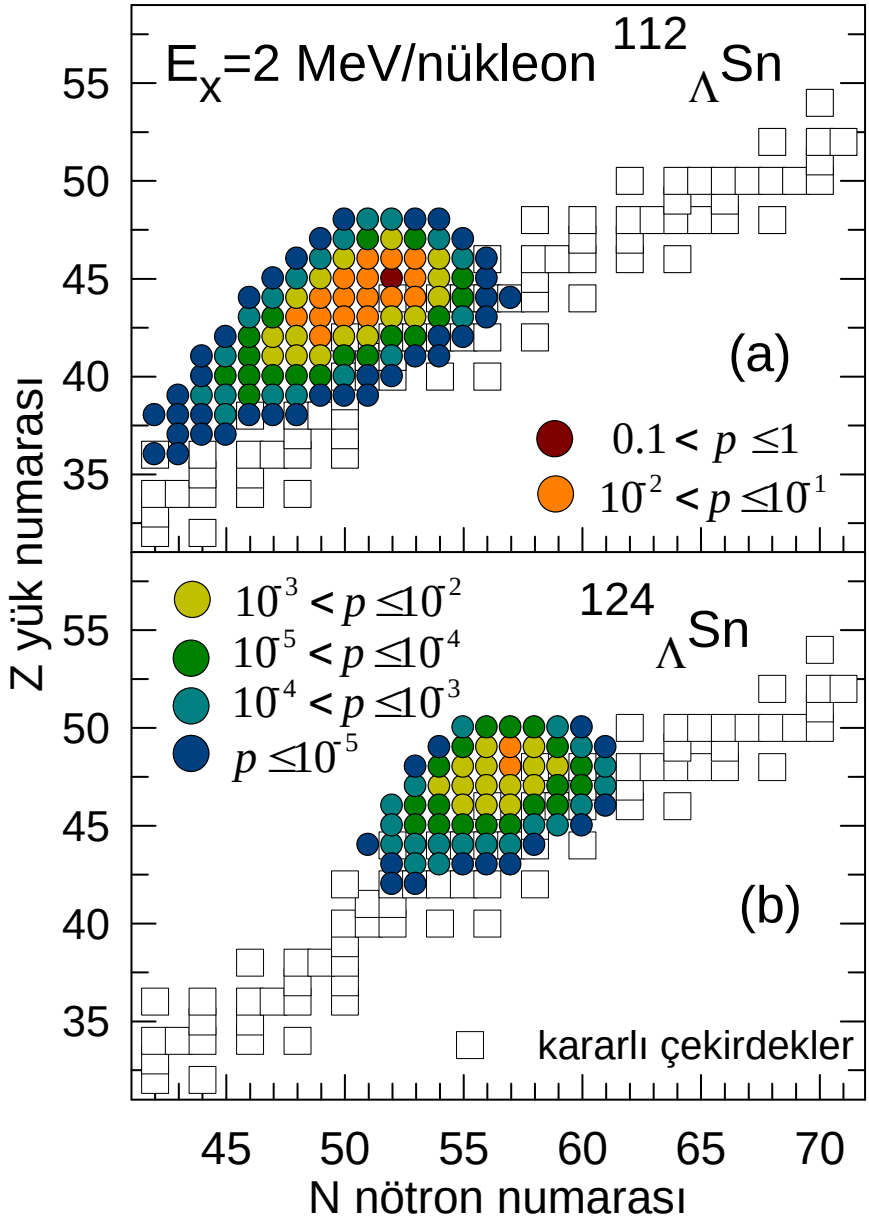
Şekil 10. $^{238}{}_{\Lambda}U$ çekirdeğinin parçalanmasında açığa çıkan Λ içeren artık çekirdeklerin olasılıklarının proton nötron (N-Z düzleminde) kararlılık çizgisine göre değişimi nucleon başına 0.25 ve 2 MeV uyarma enerjileri için karşılaştırılmıştır. Siyah kareler normal kararlı çekirdeklerin (N-Z stability line) nükleer tablo dağılımını göstermektedir. Renkli kareler ise hesaplamalarımızda elde edilen hiper çekirdeklerin olasılıklarını göstermektedir. Şekilde büyük renkli kısımlar fisyon ürünlerini ve büyük nötron ve proton değerlerine karşılık gelen küçük renkli parçalar ise buharlaşmada açığa çıkan artık hiper çekirdek dağılımlarını göstermektedir. İstatistiksel modelimizle $^{238}{}_{\Lambda}U$ çekirdeğinin parçalanması ile oluşan egzotik hiper çekirdek oluşumlarını N-Z kararlılık çizgisinden sapmaları ilk kez göstermiş oluyoruz.



Şekil 11. Şekil 10 ile aynı fakat başlangıçtaki $^{209}{}_{\Lambda}$Bi hiperçekirdeği içindir.



Şekil 12. $^{112}{}_{\Lambda}$Sn ve $^{112}{}_{\Lambda}$Sn çekirdeklerinin parçalanmasında açığa çıkan Λ içeren artık çekirdeklerin ve fisyon ürünlerinin olasılıklarının nükleon başına 0.5 MeV uyarma enerjisinde hesaplanan dağılımları nötron proton düzleminde karşılaştırılmıştır. Renkli yuvarlaklar hesaplamalarımızda elde edilen hiper çekirdeklerin olasılıklarını göstermektedir. Boş kareler normal kararlı çekirdeklerin (N-Z stability line) nükleer tablo dağılımını göstermektedir.



Şekil 13. $^{112}_{\Lambda}$Sn ve $^{112}_{\Lambda}$Sn çekirdeklerinin parçalanmasında açığa çıkan Λ içeren artık çekirdeklerin ve fisyon ürünlerinin olasılıklarının nükleon başına 2 MeV uyarma enerjisinde hesaplanan dağılımları nötron proton düzleminde karşılaştırılmıştır. Renkli yuvarlaklar hesaplamalarımızda elde edilen hiper çekirdeklerin olasılıklarını göstermektedir. Boş kareler normal kararlı çekirdeklerin (N-Z stability line) nükleer tablo dağılımını göstermektedir.

Son zamanlarda, benzer çekirdekler için yapılan ölçümlerin karşılaştırılması için kullanılan metodlar başarılı bir şekilde kullanılmıştı. Fakat bu ölçümler farklı izospine sahip çekirdekler için yapıldı. Bize göre, yeni elde edilen bu hiper nükleer izotopların araştırma konularından biri, onların 'yaşam süreleri' olmalıdır. Çekirdeğin içindeki bir Λ hiperonunun yaşam süresi ile serbest bir Λ hiperonunun yaşam süresinin farklı olduğu bilinmektedir(Rappold vd., 2014). Bu durum nükleer maddedeki zayıf etkileşim ile ilgilidir. Nötron-zengin ve nötron-fakir hiperçekirdekler üreterek, nükleer izospinin hiperon bozunma süresi üzerindeki etkisi incelenebilir. Bu amaçla, relativistik iyon çarpışmalarında nötron-zengin(-fakir) gelen(ya da hedef) çekirdekler kullanılabilir. Bu deneyleri GSI/FAIR gibi tesislerde gerçekleştirmek mümkündür (Geissel vd., 2003; Auman 2007). Bu nedenle Şekil 12 ve 13'te kalay hiperçekirdeğinin parçalanmasından sonra oluşan hiper elementlerin ürün olasılıklarını değişik bir izospin içeriği ile gösterdik. $^{124}_{\Lambda}$Sn ve $^{112}_{\Lambda}$Sn durumlarını kıyaslayarak, soğuk hiperçekirdeklere karşılık gelen bölgelerin düzgün bir şekilde ayrılmış olduğunu görüyoruz. Özellikle nötron-zengin ve nötron-fakir hiper çekirdeklerin üretiminin başlangıçtaki izotop bileşimi ile açık bir şekilde uyumlu olduğunu görüyoruz. Genel hiper nükleer reaksiyonlara kıyasen, relativistik iyonların ömür sürelerini ölçmek oldukça kolaydır(Rappold vd., 2014). Bu sebeple, bu gibi deneylerde isospin bağımlılığı ile ilgili önemli bilgilerin yakında elde edilebileceğini düşünüyoruz.

4.2 Hiper çekirdekler için çift izotopik oran metodu

Kütle numarası A, yükü Z ve hiperon sayısı H olan bir hiper çekirdeğin içinde T sıcaklığındaki bir hiperonun bağlanma enerjisini aşağıdaki gibi yazabiliriz.

$$E_A^{bh} = F_{A,Z,H} - F_{A-1,Z,H-1}$$

Λ hiperonu genellikle çekirdek içinde bağlıdır ve bu değer negatiftir. Böylece Λ hiperonu içeren çekirdekler için ürün değerlerini aşığıdaki gibi yeniden yazabiliriz.

$$Y_{A,Z,H} = Y_{A-1,Z,H-1} \cdot C_{A,Z,H} \cdot \exp\left[\frac{-1}{T}\left(E_A^{bh} - \mu - \xi\right)\right] \qquad (11)$$

Burada $C_{A,Z,H}=\left(\frac{g_{A,Z,H}}{g_{A-1,Z,H-1}}\right).\left(A_{\square}^{3/2}/(A-1)_{\square}^{3/2}\right)$ terimi A,Z,H ve $A-1,Z,H-1$ çekirdeklerinin izospinlerine ve zayıf biçimde çekirdeklerin kütle numaralarına bağlıdır. Sıvı damlası modeli yaklaşımında A>4 parçacıkların uyarılmış durumda olduklarını ve parçacıkların serbest enerjilerinin sıcaklığa bağımlılığı nedeniyle taban durum üzerindeki durumlar için $g_{A,Z,H}=1$ kabul ederiz. İstatistiksel çok katlı parçalanma modelimizle hiperon bağlanma enerjileri ile hiperçekirdeklerin bağıl ürünleri arasında bağlantı kurabiliriz. Formulasyonumuzda donma yoğınluğunda çekirdekleri tanımlayabilmek için diğer parametre değişmlerini de kullanabiliriz. Bu istatistiksel yaklaşımımız oldukça evrensel ve tablolardan bulunabilecak spin ve enerji değerleri gibi yalnızca küçük düzeltmelerle geniş bir araştırma alanı açacaktır.

Çekirdekler içindeki hiperonların bağlanma enerjilerini elde edebilmek için aşğıda açıklanan teorik yöntemi önermekteyiz. Farklı kütleli (A,Z,H) ve ¿) sadece bir Λ hiperon farkı bulunan iki hiper çekirdek düşünelim. Bu iki hiperçekirdeğin $Y_{A_1,Z_1,H}/Y_{A_1-1,Z_1,H-1}$ ve $Y_{A_2,Z_2,H}/Y_{A_2-1,Z_2,H-1}$ çift oranını düşünecek olursak (Double Ratio:DR) denklem 11 kullanılarak aşağıdaki denklemi yazabiliriz.

$$DR_{A_1,A_2}=\frac{Y_{A_1,Z_1,H}/Y_{A_1-1,Z_1,H-1}}{Y_{A_2,Z_2,H}/Y_{A_2-1,Z_2,H-1}}=\alpha_{A_1A_2}\exp\left[\frac{-1}{T}\left(\Delta E_{A_1A_2}^{bh}\right)\right] \qquad (12)$$

burada

$$\Delta E_{A_1A_2}^{bh}=E_{A_1}^{bh}-E_{A_2}^{bh} \qquad (13)$$

ve C katsayılarının oranını da aşağıdaki gibi yazabiliriz.

$$\alpha_{A_1A_2}=C_{A_1,Z_1,H}/C_{A_2,Z_2,H} \qquad (14)$$

Bu yaklaşımla hafif parçacıkların oluşumuna neden olan çok yüksek enerjilerdeki merkezcil çarpışmalarda, donma yoğunluğunda son halini almış soğuk hiper çekirdekleri de modelleyebiliriz. Parçalanma sürecinde açığa çıkan sıcak parçacıkalrın karmaşık tanımlamalarından ve sıcaklıktan bağımsız bağlanma enerjilerini inceleyebiliriz. Bu nedenle,

istatistiksel yaklaşımımızda Denklem 1'deki $F_{A,Z,H}$ yanlızca $E^{b}_{A,Z,H}$ parçacıkların serbest enerjilerine bağlı olacaktır.

Denklem 12'den görülebileceği gibi hiperçekirdeklerin çift oranının logaritması A_1 ve A_2 hiper çekirdeklerinin bağlanma enerjilerinin farkının sıcaklığa bölümü ile doğrudan orantılıdır. Bu nedenle, hiperçekirdeklerin ürn oranları ve bağlanma enerjileri arasındaki ilişkiyi yeniden yazabiliriz.

$$\Delta E^{bh}_{A_1 A_2} = T \cdot \left[\ln\left(\alpha_{A_1 A_2}\right) - \ln\left(D R_{A_1 A_2}\right) \right] \qquad (15)$$

Önerdiğimiz bu yaklaşımla, deneylerden bağlanma enerjisi farkını tam olarak belirlenmesi için bir olasılık açığa çıkmaktadır. Bu durumda, deneysel bir reaksiyonda hiperçekirdeklerin sayılarını ölçerek, denklemimizde önerdiğimiz yaklaşıma uygun hiper çekirdek çiftlerini seçmek gerekir. Deneysel ölçümlerde (Danysz ve Pniewski, 1953; STAR işbirliği, 2010; Dönigus vd. (ALICE işbirliği), 2013; Vassiliev vd. (CBM işbirliği) (2015), Saito vd. (HypHI işbirliği) (2012)) "vertex" metodu veya (Armstrong vd., 1993, Ohm vd., 1997) "shadow" tekniği ile böyle hiper çekirdekler ayrıştırılmalıdır.

Çalışmamızdaki bir diğer ilginç yöntem, aynı kütle numaralı ağır ve hafif hiper çekirdeklerin çift oranlarını kullanmaktır. Bu durum soğuk parçacıları tasvir etmek için çok kolaydır. Relativistik ağır iyon çarpışmalarında hafif hiper çekirdeklerin tahmini için Armstrong vd., (2004) tarafından acaiplik nüfus çarpanı S (GeV/c) tanımlamıştır:

$$S = \frac{Y_{{}^{3}_{\Lambda}H} / Y_{{}^{3}He}}{Y_{\Lambda} / Y_{P}} \qquad (16)$$

Genel olarak, bir Λ hiperon yerine bir proton farkı bulunan iki hiper çekirdek dikkate alınırsa aşağıdaki gibi izobarik çift oranı yazabiliriz.

$$D R^{I}_{A_1,A_2} = \frac{Y_{A_1,Z_1,H} / Y_{A_1-1,Z_1,H-1}}{Y_{A_2,Z_2,H} / Y_{A_2-1,Z_2,H-1}} = \alpha^{I}_{A_1,A_2} \exp\left[\frac{-1}{T} \left(\Delta E^{bh}_{A_1 A_2} \right) \right] \qquad (17)$$

Burada,

$$\alpha^{I}_{A_1,A_2}=\frac{g_{A_1,Z_1,H}/g_{A_1,Z_1+1,H-1}}{g_{A_2,Z_2,H}/g_{A_2,Z_2+1,H-1}} \qquad 18)$$

ve dört farklı çekirdek arasındaki bağlanma enerjisi farkı aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\Delta E^{bh}_{X}=\left(E^{b}_{A_1,Z_1,H}-E^{b}_{A_2,Z_2,H}\right)-\left(E^{b}_{A_1,Z_1+1,H-1}-E^{b}_{A_2,Z_2+1,H-1}\right) \qquad (19)$$

Denklem 13 A_1 ve A_2 normal çekirdeklerin bağlanma enerjileri ile çarpılamaz ve Z+1 yüklü hiper çekirdeklerdeki hiperon bağlanma enerjilerinin farkını da içerdiği için yalnızca hiperon bağlanma enerjisi ile ilgilidir. Bu nedenle hiperon bağlanmasını belirleyebilmek için birkaç denklemin karmaşık hesaplamalrını içermektedir. Bunun yanısıra ekstra deneysel izobar ölçümleri gerekli olacaktır. Bu yüzden, H=1 tek hiperon içeren hiperçekirdekler için DR^{I} hesaplamaları yapmak daha uygun olacaktır, çift çekirdekler için *H-1=0* ve *Z+1* olduğunda normal çekirdeklerin bağlanma enerjileri zaten bilinmektedir. Böylece denklem 15'i aşağıdaki gibi yeniden yazabiliriz.

$$\Delta E^{bh}_{A_1A_2}=T\,.\left[\ln\left(\alpha^{I}_{A_1A_2}\right)-\ln\left(DR^{I}_{A_1A_2}\right)\right]+\Delta E^{GS}_{A_1A_2} \qquad (20)$$

Burada $\Delta E^{GS}_{A_1A_2}$ acaip olamyan çekirdeklerin taban durum bağlanma enerjilerinin farkıdır.

$$\Delta E^{GS}_{A_1A_2}=\left(E^{b}_{A_1,Z_1+1}-E^{b}_{A_2,Z_2+1}\right)-\left(E^{b}_{A_1-1,Z_1}-E^{b}_{A_2-1,Z_2}\right) \qquad (21)$$

AGS-E864 işbirliği (Armstrong vd., 2004) tarafından elde edildiği gibi orta hızlı bölgede üretilen parçacıklar için ve merkezcil çarpışmalar için S=0.36 (büyük hata paylarında +-0.26). Enerji ile bu çarpanın değişimi dinamik modellerle de analiz edilmiştir(Steinheimer vd., 2012). Denklem 16'daki S çarpanı içindeki bütün çekirdeklerin bağlanma enerjileri diğer deneylerden bilindiğinden denklem 11'den böyle parçacık ve hiper çekirdeklerin oluşumuna neden olan sıcaklığı türetebiliriz. Bu denklemden buluna kimyasal sıcaklık yaklaşık olarak 5.5 MeV civarındadır. Bu sıcaklık dinamik yolla oluşabilen bütün hadronların bulunabileceği nükleer sıvı-gaz aynı anda varoluş bölgesine karşılık gelmektedir. Bu sıcaklık Neubert vd. (2003) tarafından merkezcil ağır iyon çarpışmaları için acaip olmayan normal çekirdekler için öngörülen kimyasal sıcaklık ve limitleri ile tutarlıdır. Önerdiğimiz çift oran metodunun

herhangi bir sayıdaki hiperonlar ile hiperçekirdekler için uygulanabilir ve genel bir yaklaşım olduğu ve deneysel veriler için de kullanılabileceği açıkça görülebilir(Botvina vd., 2017).

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Özetle, yanal çarpışmalarda hiper çekirdeklerin oluşumunun teorik olarak anlaşılması ve modellenmesi gerekmektedir. Böyle yeni reaksiyonların araştırılması, hiper maddenin yeni hallerini oluşturan yeni reaksiyon mekanizmalarını içeren yeni çekirdeklerin oluşumuyla hiper nükleer fizikte ilerlemeler doğuracaktır.

Çalışmamız, kararlılık çizgisinin ötesinde ve egzotik çekirdeklerin oluşumuyla ilgili olarak geleneksel nükleer fizik ve nükleer reaksiyon fiziğine önemli ölçüde katkı sağlayacaktır. FAIR projesinde super parçacık ayrıştırıcısının (Super-FRS) inşaatının tamamlamasıyla ilk etapta yapılması beklenen deneylerle ilgili bazı durumlar için öncü bazı hesaplamalar yapılmıştır (STAR işbirliği, 2010; Dönigus vd., 2013). Buna ek olarak, bu hiper çekirdeklerin oluşumları ile ilgili bu mekanizma oldukça geneldir ve bu mekanizmanın tam olarak anlaşılması yüksek enerjili hadron ve leptonlar ve tek acaiplik sayılı parçacıkların yakalanması ile uyarılan reaksiyonlarda yer alan benzer süreçlerin tanımlanmasına katkıda bulunacaktır.

Uyarılmış normal çekirdekler için iyi bir şekilde tanımlanan parçalanma süreci aynı zamanda sıcak hiperçekirdekler içinde geçerli olabilir. Parçalanma süreçleri göreli düşük sıcaklıklarda bulunan hiperçekirdeklerin içindeki acaip maddenin oluşumunu ve değişik hiper nükleer seviyeleri araştırmak için bir fırsat sunar. Nükleer maddenin hiperonlarla etkileşimi, nükleonlarla etkileşimi ile aynı özellikler gösterdiği için, normal çekirdeklerin yeniden uyarılması için tasarlanan reaksiyon modelleri hiperçekirdekler için de kullanılabilir. Bu çalışmada, uyarılmış hiperçekirdekler için buharlaşma ve fisyon modelleri geliştirdik. Modele eklenmesi gereken en önemli unsur çekirdeğin içinde bulunan hiperonun bağlanma enerjisidir.

Derin esnek olmayan nükleer çarpışmalarda yer alan hiper nükleer buharlaşma ve fisyon reaksiyonlarının normal buharlaşma ve fisyon reaksiyonlarına benzediğini hesaplamalarımızda gösterdik. Ancak, bu tür nükleer çarpışmalarda elde edilen soğuk hiper çekirdekler bu araştırmaya yeni bir yön vermektedir. Bu durum, çekirdeğin içerisinde bulunan bir hiperonun egzotik seviyeler oluşturmasıyla ilgilidir. Böyle bir durumu diğer reaksiyonlarda

elde etmek zor olacaktır, çünkü deneylerde radyoaktif hedeflerin kullanılması için uygulamada bazı sınırlamalar bulunmaktadır. Hedef-mermi çekirdek kalıntılarından meydana gelen hafif hiper çekirdeklerin bozunumu için buharlaşma mekanizmasını gösterdik. Yani, bu küçük ve büyük kümelenmelerin oluşumundan kolektif süreçler sorumludur. Dolayısıyla, birleşim-benzeri (coalescence-like) ve doğrudan süreçlerdeki son seviye etkileşimlerinin yerine, yeni hipernükleer seviyelerin var olabileceği dikkate alınmalıdır. Nötronca çok zengin hiper çekirdeklerin üretiminde rol alan fisyon süreci ile ilgili önemli teorik öngörüler yapılmıştır. Bu nötronca çok zengin hiper çekirdekler birçok amaç için kullanılabilir, örneğin nötron yıldızı koşullarına yaklaşmaya yönelik olarak: Zayıf etkileşim bozunma süresini izospin ile ilişkilendiren araştırmalara özel bir ilgi vardır. Ayrıca, nötron zengin maddedeki hiperon bağlanma enerjisinin izospinle ilişkisi, hiper çekirdek ürünlerinin kıyaslanması ile elde edilebilir. Nükleer reaksiyon araştırmalarının hiperon yakalama olgusu dâhil edilerek genişletilmesi, bu alandaki çalışmalar için büyük bir etki yaratacaktır. Sunduğumuz nükleer tablolardan da görülebileceği gibi, bu reaksiyonlarda çok geniş bir hiper çekirdek dağılımı elde ettik. Bu çekirdekler bilinmeyen özelliklerinin kapsamlı bir şekilde araştırılması için kullanılabilirler. Hiper çekirdek sistemlerinin istatistiksel parçalanmasını ve hiperon bağlanma enerjileri ile parçacık oluşumlarının bağlantısını hiperonlar için “çift oran metodu” önererek analitik olarak türettik. Hiper çekirdekler için çift oran metodu herhangi bir sayıdaki hiperonlar ile hiperçekirdekler için uygulanabilir ve genel bir yaklaşım olduğu ve deneysel veriler için de kullanılabileceği açıkça görülebilir Bu tür araştırmalar Darmstadt’daki FAIR ve Dubna’daki NICA vb., yeni nesil iyon hızlandırıcılarında mümkün olabilecektir. Proje kapsamında elde edilen öncü ve yeni bulgulara dayanarak işbirliklerinin devam ettirilmesi, yeni işbirliklerinin kurulması ve yeni Tübitak projesi önerisi hazırlanması planlanmaktadır.

6. KAYNAKLAR

Adeev, G.D., Botvina, A.S., Iljinov, A.S., Mebel, M.V. , Pischasov N.I., Serduk, O.I. 1993. Preprint INR, 816, 93, Moscow.

Armstrong, T. A. vd. 2004. "Production of 3ΛH and $^{4}_{\Lambda}$H in central 11.5GeV/c Au+Pt heavy ion collisions", Phys. Rev. C70, 024902.

Armstrong, T. A., Bocquet J. P., Ericsson G., Johansson T., Krogulski T., Lewis R. A., Malek F., Maurel M., Monnand E., Mougey J., Nifenecker H., Passaneau J., Perrin P., Polikanov S. M., Rey-Campagnolle M., Ristori C., Smith G. A., and Tibell G. 1993. "Fission of heavy hypernuclei formed in antiproton annihilation", Phys. Rev. C 47, 1957

Aumann, Th. 2007. "Prospects of nuclear structure at the future GSI accelerators", Progr. Part. Nucl. Phys. 59, 3.

Bando H., Motoba T., and Zofka J. 1990. "Production, Structure and decay of hypernuclei", Int. J. Mod. Phys. A 5, 4021.

Bondorf, J. P., Botvina A. S., Iljinov A. S., Mishustin I. N., and Sneppen K. 1995. "Statistical multifragmentation of nuclei", Phys. Rep. 257, 133.

Botvina, A. S. ve Pochodzalla J. 2007. "Production of hypernuclei in multifragmentation of nuclear spectator matter", Phys. Rev. C 76, 024909.

Botvina, A. S. vd. 2015. "Formation of hypermatter and hypernuclei within transport models in relativistic ion collisions", Phys. Lett. B 742, 7.

Botvina, A. S., Buyukcizmeci N., Ergun A., Ogul R., Bleicher M., Pochodzalla J. 2016. "Formation of hypernuclei in evaporation and fission processes", Phys. Rev. C94,054615.

Botvina, A. S., Gudima K. K., and Pochodzalla J. 2013. "Production of hypernuclei in peripheral relativistic ion collisions", Phys. Rev. C 88, 054605.

Botvina, A. S., Gudima K. K., Steinheimer J., Bleicher M., and Mishustin I. N. 2011. "Production of spectator hypermatter in relativistic heavy-ion collisions", Phys. Rev. C 84, 064904.

Botvina, A. S., Gudima K. K., Steinheimer J., Bleicher M., ve Pochodzalla J. 2017. "Formation of hypernuclei in heavy-ion collisions around the threshold energies", Phys. Rev. C 95, 014902.

Botvina, A. S. vd. 1987. "Statistical simulation of the break-up of highly excited nuclei", Nucl. Phys. A 475, 663 (1987).

Botvina, A.S. vd 2012a. “Production of hypernuclei in peripheral collisions of relativistic ions”, Nucl. Phys. A, 881, 228.

Botvina, A.S., Mishustin, I.N., Pochodzalla, J. 2012b. “Production of exotic hypernuclei from excited nuclear systems”, Phys. Rev. C, 86, 011601 (R)

Botvina, A. S. vd. 2015. "Formation of hypermatter and hypernuclei within transport models in relativistic ion collisions" Phys. Lett. B 742, 7.

Botvina, A. S., Bleicher, M., Buyukcizmeci N. 2017 “Evaluation of the hyperon binding energy via statistical production of hypernuclei” Jour. Phys. G: Nuc. and Particle Physics dergisinde hakem değerlendirmesinde, ArxiV: 1711.01159v2

Botvina, A. S. vd. 1995. "Multifragmentation of spectators in relativistic heavy-ion reactions", Nucl. Phys. A 584, 737.

Buyukcizmeci, N. vd. 2005. "Isospin and symmetry energy effects on nuclear fragment production in liquid-gas-type phase transition region", Eur. Phys. J. A25, 57.

Buyukcizmeci, N., Ogul R., Botvina, A. S. 2017a. “A Comparison of Mass Formulas for Lambda hypernuclei”, TFD32, 6-9 September 2016 Bodrum, Turkey (sözlü bildiri), Tam metin: N.Buyukcizmeci, A.S. Botvina, R. Ogul, “Influence of the hyper-terms in mass

formulae on yield of hypernuclei in nuclear reactions” AIP CP 1815, 060003 ; doi: 10.1063/1.4976399

Buyukcizmeci, N., Kaya, A., Botvina, A.S., Ogul, R. 2017b "Fission of Hypernuclei at Subnuclear Densities" Turkish Physical Society, 33th International Physics Congress, 06-10 September 2017, Bodrum (sözlü bildiri)

Buyukcizmeci, N., Kaya, A., Botvina, A.S., Ogul, R. 2017c "Statistical Approach For Hypernuclei" X. International Conference On Nuclear Structure Proporties 20-22 September 2017, Karabük University-Karabük, Türkiye (sözlü bildiri)

Buyukcizmeci, N., Botvina A., S., Pochodzalla J., and Bleicher M. 2013. "Mechanisms for the production of hypernuclei beyond the neutron and proton drip lines", Phys. Rev. C 88, 014611.

Danysz, M. ve Pniewski J. 1953. "Delayed disintegration of a heavy nuclear fragment", Philos. Mag. 44, 348.

Dönigus, B. vd. (ALICE Collaboration), 2013, "(Anti-)matter and hyper-matter production at the LHC with ALICE" Nucl. Phys. A 904-905, 547c.

Eren, N. vd. 2013. Eur. Phys. J. A 49, 48 .

Gaitanos, Th., Lenske H., and Mosel U. 2009. "Formation of hypernuclei in high energy reactions within a covariant transport model", Phys. Lett. B 675, 297 (2009).

Gal, A. 1966. "Possible Role of ΛNN Forces in Hypernuclei" Phys. Rev. **152**, 975

Gal, A., Hashimoto, O. ve Pochodzalla, J. 2012. "Special issue on Progress in Strangeness Nuclear Physics", Nucl. Phys.A 881, 1.

Geissel, H. vd. 2003. "The Super-FRS project at GSI", Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. B 204, 71.

Hashimoto, O. ve Tamura H. 2006. "Spectroscopy of Λ hypernuclei", Prog. Part. Nucl. Phys. 57, 564.

Hell T. ve Weise W. 2014. "Dense baryonic matter: Constraints from recent neutron star observations", Phys. Rev. C 90, 045801.

https://indico.gsi.de/event/superfrs3 (access to pdf files via timetable and key “walldorf”).
Son erişim: 10 Ocak 2018

Kaya. A, Büyükçizmeci, N., Botvina, A.S., Oğul, R. 2017a "Temperature Dependence Of Hypernuclei Distributions" Turkish Physical Society, 33th International Physics Congress, 06-10 September, Bodrum (sözlü bildiri)

Kaya. A, Büyükçizmeci, N., Botvina, A.S., Oğul, R. 2017b "Investigations Of Mass Distributions Of Hypernuclei" X. International Conference On Nuclear Structure Proporties 20-22 September, Karabük University-Karabük, Türkiye (sözlü bildiri)

Lonardoni, D., Gandolfi, S., Pederiva, F. 2013. “Effects of the two-body and three-body hyperon-nucleon interactions in Λ hypernuclei”, Phys. Rev. C, 87, 041303(R).

Lorente, A. S., Botvina A. S., ve Pochodzalla J. 2011. "Production of excited double hypernuclei via Fermi breakup of excited strange systems", Phys. Lett. B 697, 222.

Neubert, W. and Botvina A.S. 2003. "Limits of complete equilibration of fragments produced in central Au on Au collisions at intermediate energies", Eur. Phys. J. A 17, 559.

NICA White Paper
http://theor.jinr.ru/twiki-cgi/view/NICA/WebHome
http://nica.jinr.ru/files/BM@N
Son erişim: 11 Ocak 2018 - 16:05:26

Nishizaki, S., Yamamoto, Y. and Takatsuka, T. 2001. “Effective *YN* and *YY* Interactions and Hyperon-Mixing in Neutron Star Matter *Y*≡Λ Case”, Prog. Theor. Phys.,105, 607.

Ogul, R., Atav, U., Bulut, F., Buyukcizmeci, N., Erdogan, M., Imal, H., Botvina, A.S., Mishustin, I. N. 2009. “Surface and symmetry energies in isoscaling for multifragmentation reactions”, Jour. of Phys. G- Nucl. Part. Phys., 36, 115106.

Ogul, R. vd. 2011. "Isospin-dependent multifragmentation of relativistic projectiles", Phys. Rev. C 83, 024608.

Ohm, H., vd., 1997, "Λ-hyperon lifetime in very heavy hypernuclei produced in the p+U interaction" Phys. Rev. C 55, 3062

PANDA işbirliği. 2006. "Exploring the Mysteries of Strong Interactions-The PANDA Experiment" Nucl.Phys. News 16, 15, http://www-panda.gsi.de

Pochodzalla, J. 1997. "The search for the liquid-gas phase transition in nuclei", Prog. Part. Nucl. Phys. 39, 443.

Rappold, C. vd., 2014. " On the measured lifetime of light hypernuclei $^{3}_{\Lambda}$H and $^{4}_{\Lambda}$H Phys. Lett. B 728, 543.

Rappold, C. vd. 2013a. "Search for evidence of $^{3}_{\Lambda}$n by observing d+π^- and t+π^- final states in the reaction of ^{6}Li+^{12}C at 2A GeV" Phys. Rev. C 88, 041001(R).

Rappold, C., Saito, T. R. ve Scheidenberger, C. 2013b. "Simulation Study of the Production of Exotic Hypernuclei at the Super-FRS" Scientific Report 2012 Darmstadt : GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung, GSI Report, 2013-1, 176 p.

Rudy, Z., Cassing W. vd., 1995. " Λ-Hypernucleus formation in proton-nucleus reactions", Z. Phys. A 351, 217.

Saito, T.R. vd.(HypHI işbirliği) 2012. “Production of hypernuclei in peripheral HI collisions: The HypHI project at GSI”, Nucl. Phys. A, 881, 218-227.

Schaffner, J., Dover, C. B., Gal A., Greiner C., and Stoecker H. 1993. "Strange hadronic matter", Phys. Rev. Lett. 71, 1328.

Schaffner-Bielich, J. 2008. "Hypernuclear physics for neutron stars", Nucl. Phys. A 804, 309 (2008).

Scharenberg, R. P. vd. 2001. "Comparison of 1AGeV 197Au+C data with thermodynamics: The nature of the phase transition in nuclear multifragmentation", Phys. Rev. C 64, 054602.

STAR işbirliği. 2010. "Observation of an Antimatter Hypernucleus" Science 328, 58. DOI: 10.1126/science.1183980

Steinheimer, J., vd. 2012 " Hypernuclei, dibaryon and antinuclei production in high energy heavy ion collisions: Thermal production versus Coalescence", Phys. Lett. B 714, 85.

Toneev V.D. vd. 1990. "Dynamics of relativistic heay-ion collisions", Nucl. Phys. A, 519, 463c.

Vassiliev, I. (CBM işbirliği) 2017 " Hypernuclei program at the CBM experiment "JPS Conf. Proc. 17, 092001.

Vassiliev, I. (CBM işbirliği) 2015 "Hypernuclei program at the CBM experiment". HYP2015, http://indico2.riken.jp/indico/contributionListDisplay.py?confId=2002.

Weisskopf, W. 1937. "Statistics and Nuclear Reactions" Phys. Rev. 52, 295".

Xi, H. vd. 1997. "Breakup Temperature of Target Spectators in Au + Au Collisions at E/A = 1000 MeV ", Z. Phys. A 359, 397.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Prof. Dr. NİHAL BÜYÜKÇİZMECİ
Proje No:	114F328
Proje Başlığı:	Yüksek Enerjili Nükleer Etkileşmelerde Egzotik Çekirdekler, Hiper Madde Ve Hiper Çekirdeklerin Oluşumu Ve Ayrışması
Proje Türü:	Uluslararası
Proje Süresi:	30
Araştırmacılar:	RIZA OĞUL, ALEXANDER S. BOTVINA (Yurt Dışı)
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	SELÇUK Ü. FEN F. FİZİK B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	15/05/2015 - 15/11/2017
Onaylanan Bütçe:	253225.0
Harcanan Bütçe:	103090.84
Öz:	Relativistik hadron ve yanal ağır iyon çarpışmaları, uyarılmış ağır hiper çekirdekleri üretmek için çok uygun koşullar sağlar. Baryonların ve hafif parçacıkların buharlaşması ve fisyona uğraması sonucu ortaya çıkan bu hiper çekirdeklerin parçalanmasını inceledik. Daha önceden, bu parçalanma süreçleri normal çekirdekler için düşük uyarma enerjilerindeki bozunma kanalları olarak biliniyordu. Biz bu modelleri hiper madde için genelledik. Bu şekilde, düşük sıcaklıklar için dikkate alınan nükleer reaksiyon çalışmalarını 'acaip' kuarkının etkin olduğu bu alan için genişlettik. Yeni bozunma kanallarının bütün parçalanma sürecine nasıl bir katkı sağlayabileceğini gösteriyoruz. Bu bozunma kanallarının, üretilen hiper parçacıkların kütle ve izotop dağılımları için önemi vurgulanmaktadır. Bu süreçler sırasında elde edilen yeni ve egzotik izotoplar, nükleer maddede hiperon etkileşimini araştırmak için benzersiz bir fırsat sağlayabilir. Hiper çekirdek sistemlerinin istatistiksel parçalanmasını ve hiperon bağlanma enerjileri ile parçacık oluşumlarının bağlantısını inceledik. Hiper çekirdeklerin farklı izotoplarının ürünlerinden hiperon bağlanma enerjilerinin etkin biçimde türetilebileceğini gösterdik. Bu amaç için çift oran metodu önerilmiştir. Bu sürecin avantajı evrenselliği ve çok farklı izotopları içerme olasılığıdır. Bu metot bağlanma enerjilerini ölçmenin çok olduğu önceki hiper çekirdek deneylerinde ve çoklu hiper çekirdekler için de uygulanabilir.
Anahtar Kelimeler:	nükleer parçalanma, nükleer etkileşme, hiperon, hiper madde, egzotik çekirdekler, çift oran metodu
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır
Projeden Yapılan Yayınlar:	1- Formation of hypernuclei in evaporation and fission processes (Makale - Diğer Hakemli Makale), 2- Statistical approach for hypernuclei (Bildiri - Uluslararası Konferans - Davetli Konuşmacı), 3- Production of hypernuclei in fission reactions (Bildiri - Uluslararası Konferans - Davetli Konuşmacı), 4- Mechanisms of production of hypernuclei in nuclear reactions (Bildiri - Uluslararası Konferans - Davetli Konuşmacı), 5- Fission of hypernuclei at subnuclear densities (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum), 6- Probing the lambda hypernuclei in nuclear reactions (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum), 7- Investigations of mass distributions of hypernuclei (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum), 8- Temperature dependence of hypernuclei distributions (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum), 9- Probing the structure of hypermatter at low temperatures at low densities (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum), 10- A comparison of mass formulas for Lambda hypernuclei (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),

TÜBİTAK