



NADİR TOPRAK ELEMENTLERİ BÖLGESİNDE
¹²⁶⁻¹³⁶Ce , ¹³²⁻¹³⁸Nd ve ¹³⁴⁻¹⁴⁰Sm İZOTOPLARININ B(E2) GEÇİŞ
OLASILIKLARI

Atalay KÜÇÜKBURSA¹, Mehmet ÖZER²

¹Dumlupınar Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Kütahya, atalay.kucukbursa@dpu.edu.tr

²Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya

Geliş Tarihi: 31.03.2015

Kabul Tarihi: 30.09.2015

ÖZ

Nadir toprak elementleri bölgesinde bulunan ¹²⁶⁻¹³⁶Ce , ¹³²⁻¹³⁸Nd ve ¹³⁴⁻¹⁴⁰Sm izotoplarının B(E2) geçiş olasılıkları, nötron ve proton bozonlarının farklı olarak ele alındığı Etkileşen Bozon Modeli-2 (IBM-2) çerçevesinde, NPBOS programı kullanılarak hesaplandı. Hesaplanan değerler deneysel verilerle karşılaştırıldı. Hesaplanan B(E2) geçiş olasılıklarının deneysel verilerle oldukça uyumlu sonuçlar verdiği görüldü.

Anahtar Kelimeler: Ce, Nd ve Sm izotopları, IBM-2, B(E2) geçiş olasılıkları

THE TRANSITION PROBABILITIES OF ¹²⁶⁻¹³⁶Ce , ¹³²⁻¹³⁸Nd ve ¹³⁴⁻¹⁴⁰Sm ISOTOPES IN THE RARE-EARTH REGION

ABSTRACT

B(E2) transition probabilities for ¹²⁶⁻¹³⁶Ce , ¹³²⁻¹³⁸Nd and ¹³⁴⁻¹⁴⁰Sm isotopes in the rare-earth region are calculated within Interaction Boson Model-2 (IBM-2) in which neutron and proton bosons are considered explicitly by NPBOS. These calculated values for B(E2) transition probabilities are compared with experimental ones. It is seen that calculated B(E2) transition probabilities are good agreement with the experimental ones.

Keywords: Ce, Nd ve Sm isotopes, IBM-2, B(E2) transition probabilities

1. GİRİŞ

Çekirdeklerin yapısı, bağımsız parçacık hareketine ağırlık veren kabuk modeli ve sadece sınırlı sayıda koordinat kullanan kolektif model sayesinde geniş ölçüde anlaşılmıştır. Fakat karşılıklı parçacık etkileşimi, kolektif serbestlik dereceleri, geçiş bölgesindeki çekirdeklerin nükleer yapısı, çekirdeklerin enerji spektrumundaki geçişlerin çokkutuplulukları ve onların karışım oranları ile ilgili bir çok cevaplanmamış soru vardır. Bu problemleri çözmeye yönelik, 1974 yılında Arima ve Iachello, kabuk

modeli ve kolektif modelin özellikleriyle birlikte grup teorisi tekniklerinin kullanıldığı “Etkileşen Bozon Modeli” (IBM) adı verilen yeni bir nükleer model öne sürdüler [1,2]. Bu modelin öne sürüldüğü sıralarda orta ve ağır çekirdekler için modeller genelde iki yaklaşım üzerinde yoğunlaşmıştı. Birincisi rastgele faz yaklaşımı gibi yaklaşımları içine alan kabuk modeli köşegenleştirilmesi, diğeri de çekirdeklerin geçişlerini veya bu geçişlerin şekillerini görüntüleyen geometrik modeller. IBM, 1950’lerin sonlarında ve 1960’ların başlarında Elliot ve arkadaşları tarafından hafif çekirdekler için başarıyla uygulanan bir metodu andıran, cebirsel ve grup teorisine dayalı bir yaklaşım olarak ortaya çıktı ve son otuz yıl boyunca IBM ilgi odağı haline geldi [3,4].

2. MATERYAL VE METOT

IBM, her biri açısız momentumun sıfır veya iki birimini taşıyan ve etkileşen bozonlar topluluğuna dayanır. Bu modelde bozonlar, nükleon (proton veya nötron) çiftleri olarak yorumlanır. Nükleonların üç kuarktan oluştuğuna inanılmasına rağmen, bu modelde nükleonlar elementer parçacıklar olarak düşünölmüştür.

IBM’deki temel fikir, çift-çift çekirdeklerin düşük seviye kolektif durumlarının sırasıyla 0 ve 2 toplam açısız momentuma sahip s ve d bozonlar sistemiyle tanımlanabileceği varsayımdır [1,5-7]. Bu varsayım kabuk modelindeki genelleştirilmiş acayıplık hesaplarına ve 0⁺ ve 2⁺ durumlarının, açısız momentumu daha büyük olan durumlardan enerjisinin belirgin bir şekilde az olduğu, kapalı kabuğa yakın çekirdeklerin deneysel olarak iyi bilinen yapısal özelliklerine dayanır [8]. Bu, aynı yörüngedeki iki özdeş nükleonun iki-parçacık dizilimindeki kısa-menzilli rezidüel etkileşmesinden meydana gelen seviye hesaplarının karakteristik bir özelliğidir [9]. Bu modelin ilk versiyonunda (IBM-1) nötronlar ve protonlar aynı parçacıklar olarak ele alınır. Aynı zamanda toplam bozon sayısı (N = n_d+n_s), sonludur, çekirdek içinde korunur ve en dış yörüngedeki nükleon sayısının yarısına eşittir. Ayrıca en dış yörüngedeki bozon sayısı en yakın kapalı kabuğa göre belirlenir. Bunun yanında IBM, bozon sayısındaki değişmeden kaynaklanan ve ana kabuk boyunca meydana geldiği varsayılan yapısal değişmelerin önemli bir kısmının da mikroskobik açıklamasını yapar.

s (l=0) ve d (l=2) bozonları toplam altı bileşene (alt duruma) sahiptir. Dolayısıyla altı boyutlu bir uzay tanımlarlar. Bu da altı boyutlu birim grup, U(6) cinsinden ifade edilebilir. Sonuç olarak IBM’in bir çok özelliği grup teorisi metotları ile analitik olarak ifade edilebilir. U(6) grubunun alt grupları ele alındığında geometrik modeldeki küresel titreşim, asimetric (γ-soft) deforme rotor, deforme rotor fikirlerinden yola çıkan sırasıyla U(5), O(6) ve SU(3) olarak bilinen üç dinamik simetri meydana gelir [10-12].

Simetriler, varlığı ve oynadığı rol itibarıyla IBM’in en önemli özelliklerindedir. Bu simetrilerin basit analitik bağıntıları ve fiziksel açıklamaları vardır. En önemli pratikliği de tahmin parametrelerinin serbest parametreler olmasıdır. Bunun ötesinde çekirdeklerin çoğu bu simetriden birini sergilemese de tanım gereği yine IBM Hamiltoniyeni sadeleştirilmelidir. IBM simetri özelliklerinin kavranması, dalga fonksiyonlarının, enerji seviyelerinin ve geçiş oranlarının yorumlamasını kolaylaştırdığı gibi sayısal analizde de büyük kolaylıklar sağlar. Ayrıca simetric yapıdan dolayı IBM, geçiş bölgelerini izah etmekte de oldukça yararlı bir modeldir. Çünkü hesaplamalar, simetri çiftleri arasındaki geçiş boyunca göreceli yapıyı belirleyen serbest parametreler cinsinden yapılabilir. Bundan dolayı model, daha önceden bilinen, deneysel olarak gözlenen özelliklere göre farklı yapılara uygulanabilen modellere iyi bir alternatiftir.

IBM aslında düşük seviyedeki kolektif uyarılmalara yönelik bir model ise de son uyarılmalarla bu sınır genişletilmiştir. Bunlardan birisi de bu modelin ikinci versiyonudur (IBM-2) [13-14]. IBM-2’de nötron ve proton serbestlik dereceleri birbirinden farklı olarak ele alınır ve Hamiltoniyen proton-nötron bozon

etkileşmelerini de içerir. Sadece hesaplamaları ilerletme kolaylığı vermesinden dolayı değil, aynı zamanda daha ileri düzeyde bir sistematığı ve yeni kollektif uyarılma durumlarını açıklamasından, daha da önemlisi varolan kabuk modeli ile bağ kurmasından dolayı önemli bir gelişme sayılır. IBM bundan başka tek-çift çekirdekler için Scholten [15] ve tek-tek çekirdekler için van Isacker [16] tarafından uyarlandı.

3. BULGULAR

$^{126-136}\text{Ce}$, $^{132-138}\text{Nd}$, $^{134-140}\text{Sm}$ izotopları için IBM-2 modeli çerçevesinde NPBOS programı kullanılarak B(E2) geçiş olasılıkları hesaplanarak IBM-2 modelinin güçlü sistematik tavrının Ce, Nd, Sm izotopları için de devam edip etmediğine yanıt aranmıştır. Sonuçlar modelin güçlü sistematik davranışının ilgili izotoplar için de devam ettiği ortaya koymuştur.

Ce, Nd, Sm izotopları için geçiş olasılık oranları hesaplanabilen 13 parametreye sahip,

$$H = \varepsilon_d (n_{dv} + n_{d\pi}) + \kappa(Q_v \cdot Q_\pi) + M_{v\pi} + V_{vv} + V_{\pi\pi}$$

hamiltoniyeni kullanılmıştır. Bu parametreler ε_d , κ , χ_v , χ_π , ε_i ($i=1, 2, 3$), c_v^j ($j=0, 2, 4$) ve c_π^j ($j=0, 2, 4$) dir. Proton bozonları (parçacık) sayısı $N_\pi = (N_p - 50)/2$ ve nötron bozonları (boşluk) sayısı $N_v = (82 - N_n)/2$ ile belirlenmiştir. Girdi verileri için referans geçiş olasılık oranı

$$R = \frac{B(E2; 2_\gamma^+ \rightarrow 0_g^+)}{B(E2; 2_\gamma^+ \rightarrow 2_g^+)}$$

olarak seçilmiştir. Hesaplamaların sonuçları Çizelge 1’de verilmiştir. İzotopların geçiş olasılık oranlarının belirlenebilmesi için NPBOS programı çalışmasında aşağıda verilen işlem sırası takip edilmiştir:

İlk olarak $\chi_\pi = c_v^{(0)} = c_\pi^{(0)} = 0$ ve $c_v^{(2)} = c_\pi^{(2)} = 0,13 \text{ MeV}$ seçilerek başlangıçtaki 13 parametre 8’e düşürülmüştür. Sonra $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = -0,09$ ve $\xi_2 = 0,12 \text{ MeV}$ seçilmiştir. Ayrıca nötron ve proton etkin yükleri $e_v = e_\pi = 0,123$ eb olarak alınmıştır. Bu çekirdekler için yeterli düzeyde bilgi olmaması nedeniyle etkin yükler eşit alınmıştır. Bu seçimin geçiş olasılık oranlarını etkilemediği Çizelge 1’den görülmektedir. $c_v^{(4)}$ ve $c_\pi^{(4)}$ parametreleri R oranı deneysel verilerle uyuşuncaya dek her çekirdek için ayrı ayrı ayarlanmıştır. $c_v^{(4)}$ ve $c_\pi^{(4)}$ değerleri $-0,22 \text{ MeV}$ ’den $-0,48 \text{ MeV}$ ’e kadar değişmektedir.

Çizelge 1. B(E2) oranlarının IBM-2 hesaplamalarının sonuçları ile deneysel sonuçların yüzde olarak karşılaştırılması. g ve γ sembolleri, sırasıyla taban-durum bandı ve gama bandını gösterir. Belirsizlikler parantez içerisinde verilmiştir.

Çekirdekler	$\frac{B(E2;2_\gamma \rightarrow 0_g)}{B(E2;2_\gamma \rightarrow 2_g)}$		$\frac{B(E2;3_\gamma \rightarrow 2_g)}{B(E2;3_\gamma \rightarrow 2_\gamma)}$		$\frac{B(E2;3_\gamma \rightarrow 4_g)}{B(E2;3_\gamma \rightarrow 2_\gamma)}$	
	Bu çalışma(%)	Deney(%)	Bu çalışma (%)	Deney(%)	Bu çalışma(%)	Deney(%)
¹²⁶ Ce ^a	15.4		9.98		22.5	
¹²⁸ Ce ^a	12.2		9.82		23.4	
¹³⁰ Ce	10.17	12.6 (1.9) ^s	9.33	9.7 (3.1) ^s	26.3	27.6(12.0) ^s
¹³² Ce	5.82	6.0 (1) ^s	5.28	5.6 (0.9) ^s	31.3	
¹³⁴ Ce	6.34	7.8 (2.5) ^b	3.43	3.6 (1.0) ^b	33.1	
¹³⁶ Ce ^c	0.98	1.0 (0.1) ^d	1.44	1.5 (0.2) ^d	34.8	
¹³² Nd	17.8	20.5 (4.4) ^s	3.32	2.5 (1.6) ^s	25.5	
¹³⁴ Nd	8.33	8.4 (0.6) ^s	6.15	5.1 (0.8) ^s	34.6	42.8(5.8) ^s
¹³⁶ Nd	5.87	6.0 (0.5) ^e	4.96	5.3 (0.4) ^e	43.5	48.9(10.5) ^e
¹³⁸ Nd ^c	135	1.2 (0.3) ^h	1.23	1.1(0.2) ^f	36.5	
¹³⁴ Sm ^a	18.2		9.12		17.2	
¹³⁶ Sm	9.7	9.3 (2.4) ^g	6.94		25.6	75.1(35.4) ^g
¹³⁸ Sm	2.21	2.1 (0.3) ^h	3.04	2.7 (0.4) ^h	31,3	
¹⁴⁰ Sm ^c	2.03		1.83		32.7	

Çekirdekler	$\frac{B(E2;4_\gamma \rightarrow 2_g)}{B(E2;4_\gamma \rightarrow 2_\gamma)}$		$\frac{B(E2;4_\gamma \rightarrow 4_g)}{B(E2;4_\gamma \rightarrow 2_\gamma)}$		$\frac{B(E2;5_\gamma \rightarrow 4_\gamma)}{B(E2;5_\gamma \rightarrow 3_\gamma)}$	
	Bu çalışma (%)	Deney(%)	Bu çalışma(%)	Deney(%)	Bu çalışma (%)	Deney(%)
¹²⁶ Ce	0.86		45.6		50.6	
¹²⁸ Ce	079		44.8		48.1	
¹³⁰ Ce	0.67		47.4	46.6(13.4) ^s	47.3	
¹³² Ce	0.48		78.7	104.0(38.8) ^s	46.9	
¹³⁴ Ce	0.39		49.4	45.7(14.1) b,m	47.2	
¹³⁶ Ce	0.41		70.3		44.8	
¹³² Nd	0.59		44.5		51.4	
¹³⁴ Nd	0.63		46.6	42.8(5.8) ^s	48.2	
¹³⁶ Nd	0.42		73.4	85.2(26.5) ^e	50.3	51.3(14.8) ^e

¹³⁸ Nd	0.38		69.5	66.8(8.7) ^f	46.2	
¹³⁴ Sm	1.44		40.2		57.5	
¹³⁶ Sm	0.60		45.6		51.8	
¹³⁸ Sm	0.96		81.8	118 (16.7) ^h	48.7	
¹⁴⁰ Sm	0.91		70.4		49.3	

Çizelge 1. B(E2) oranlarının IBM-2 hesaplamalarının sonuçları ile deneysel sonuçların yüzde olarak karşılaştırılması. g ve γ sembolleri, sırasıyla taban-durum bandı ve gama bandını gösterir. Belirsizlikler parantez içerisinde verilmiştir (devamı).

Çekirdekler	$\frac{B(E2;5_{\gamma} \rightarrow 4_g)}{B(E2;5_{\gamma} \rightarrow 3_{\gamma})}$		$B(E2;0_g \rightarrow 2_g)$	
	Bu çalışma(%)	Deney(%)	Bu çalışma(e ² b ²)	Deney (e ² b ²)
¹²⁶ Ce	6.22		2.48	2.46 (0.13) ^j
¹²⁸ Ce	5.76		2.16	2.15 (0.18) ^k
¹³⁰ Ce	5.04		1.78	1.73(0.09) ^k
¹³² Ce	3.08		1.56	1.77 (0.14) ^{k,l}
¹³⁴ Ce	2.23		1.08	1.03 (0.09) ^k
¹³⁶ Ce	0.84		0.77	0.8 ^c
¹³² Nd	6.68		2.33	2.50 (0,20) ⁿ
¹³⁴ Nd	4.42		1.62	1.56 (0.12) ^o
¹³⁶ Nd	3.87	4.1 (0,5) ^e	1.31	>0.50 ^p
¹³⁸ Nd	1.73		0.72	0.6 ^b
¹³⁴ Sm	6.11		3.84	4.01 (0.32) ^q
¹³⁶ Sm	4.23		2.15	2.16 (0.15) ^r
¹³⁸ Sm	2.95	3.3 (0.5) ^h	1.58	1.64 (0.34) ^k
¹⁴⁰ Sm	1.98		1.24	1.2 ^c

^a B(E2;0_g → 2_g) gama bandı olmayan seviyelerden elde edilmiştir.

^b Kaynak [17]

^c B(E2;0_g → 2_g) ilave değerin kullanıldığını bildirmez.

^d Kaynak [18]

^e Kaynak [14]

^f Kaynak [19]

^g Kaynak [20]

^h Kaynak [21] ve [22]

ⁱ Nötron ve protonun etkin yükleri = 0,129 e b alınmıştır.

^j Kaynak [23]

^k Kaynak [24]

^l Kaynak [25]

^m Eşleşmiş şiddetin yarısının biri kullanılıyor.

ⁿ Kaynak [23], [26], ve [27] daki verilerin ortalaması

^o Kaynak [27] ve [28] daki verilerin ortalaması

^p Kaynak [28]

^q Kaynak [27]

^r Kaynak [26], [27] ve [29] daki verilerin ortalaması

^s Kaynak [27]

İzotoplar için ϵ_d değerleri 0,42 MeV'den 0,98 MeV'e N_n ile doğrusal olarak değişecek şekilde çeşitlendirilmiştir. κ değeri $-0,182$ MeV ile $-0,542$ MeV aralığında değişmektedir. χ_v değerleri Ce izotopları için 0,23'den 0,56 değerine kadar doğrusal olarak artırılmıştır. Nd ve Sm izotopları için de küçük farklılıklar olmakla birlikte aynı değer aralığı benimsenmiştir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Çizelge 1'de hesaplanan B(E2) oranları deneysel sonuçlarla birlikte karşılaştırmalı bir şekilde verilmiştir. Band içi ve bandlar arasındaki göreceli B(E2) değerleri, şekil geçişlerinin yönünü daha iyi anlamamızı sağlar. Örneğin nötron sayısı arttıkça B(E2) geçiş olasılık oranlarının SU(5) titreşim limit değerinden O(6) γ -kararsız limit değerine yaklaştığı gözlenmektedir. Bu sonuçlar teorisinin öngörülleri ile tamamen uyumdadır. Çizelge 1'in son iki sütununda hesaplanmış ve deneysel $B(E2; 0_g^+ \rightarrow 2_g^+)$ geçiş olasılığı değerleri arasında bir karşılaştırma yer almaktadır. B(E2) geçiş olasılıkları

$$B(E2; 0_g^+ \rightarrow 2_g^+)_{up} = 5 \left\{ 56 \cdot 56 \left[E_{\gamma}^5 T_{1/2} (E2) \right]^{-1} \right\}$$

ifadesi yardımıyla hesaplanmıştır. Burada enerji keV, yarı-ömür saniye ve B(E2) e^2b^2 olarak alınmıştır. Hesaplanmış B(E2) değerlerinin farklı kaynaklardan alınmış deneysel değerlerle uyumu çok iyi olmakla birlikte aynı zamanda tatmin edicidir. Hesaplanan B(E2) değerleri genellikle deneysel B(E2) değerlerinden küçük olduğu görülmektedir. Bunun etkin yükün seçiminden kaynaklandığı tahmin edilmektedir. Çünkü B(E2) değerleri etkin yüklerin alanıyla orantılıdır.

Bu çalışmada hesaplanan değerler, deneysel değerlerle uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Ancak verilerin daha iyi değerlendirilebilmesi için daha duyarlı ölçümlere ve daha çok deneysel çalışmaya ihtiyaç vardır.

Ölçümlerin duyarlılığı ile ilgili olarak başka bir önemli konu da bazı çekirdeklerin beta ve gama bandlarının bozunma yarı-ömrülerinin birkaç dakika gibi kısa oluşudur. Bu durum özel veri toplama ve deneysel standın kurulmasını gerektirir. Ek durumlar Coulomb uyarmalarının ardından oluşan açısız dağılımlar veya bazı nükleer tepkimelerle nötron yakalanmasının ardından gama ışınlarının açısız korelasyonlarının takip edilmesi ile bulunabilir. Burada yapılabilecek en önemli düzeltme, bozunumun incelenmesi sırasında geçen zaman üzerinde hesaplamalarda integral metodu ile yapılabilecek bir düzeltmedir. Bazı araştırmacılar bunu yapmamakta ve deney hatalarının artmasına sebep olmaktadırlar. Elektronik sistemin ayarı ile buna benzer bir düzeltme yapılabilir [31].

Nükleer Fizik açısından önemli konulardan biri de nükleer yapının açık ve net bir şekilde anlaşılmasıdır. Bu ise ancak nükleonların çekirdek içerisinde oluşturdukları sistemin etkileşiminin tam olarak açıklanması ve eksiksiz gösterimi ile mümkündür. Henüz bu problem orta ağırlıktaki çekirdekler için

çözülmemiştir. Daha basit bir çözüme ve modele gereksinim vardır. Bu model bilinen önemli fiziksel karakteristikleri açıklayabilmeli ve çekirdeklerin çeşitli gözlenebilir özelliklerini öngörebilmelidir. Bunlara ek olarak içerdiği parametreler, çekirdeğin esas biçimini ve iç özelliklerini açık bir fikir verecek şekilde seçilmelidir. Bir modelin kabul edilebilirliği, gerçeği ne kadar yansıttığına bağlıdır. Bunun anlaşılmasının en iyi yolu, o modelin sonuçları ve gösterimlerinin deneysel verilerle karşılaştırılmasıdır. Bu çalışmada, görüldüğü gibi Etkileşen Bozon Modeli ve Geometrik Model'den yararlanılarak geliştirilen bir metod uygulanmıştır. Bazı olumsuzluklara rağmen genelde tatmin edici, uyumlu, isabetli sonuçlar elde edilmiştir. Uygulanan metod başarılı olarak bütün izotoplara uygulanmıştır.

KAYNAKÇA

- [1] A. Arima and F. Iachello, "Collective nuclear states as representations of a SU(6) group", Phys. Rev. Lett. 35, 1069 (1975).
- [2] F. Iachello and A. Arima, "Boson symetries in vibrational nuclei", Phys. Rev. Lett. B 53, 309 (1974).
- [3] J. P. Elliot, "Collective motion in the nuclear shell model. I. Classification schemes for states of mixed configurations", Proc. R. Soc. London, Ser. A 245, 128 (1958).
- [4] J. P. Elliot, "Collective motion in then nuclear shell model. II. The introduction of intrinsic wave-functions", Proc. R. Soc. London, Ser. A 245, 562 (1958).
- [5] A. Arima and F. Iachello, "Interacting boson model of collective states I. The vibrational limit", Ann. Phys. 99, 253 (1976).
- [6] P. O. Lipas, "International Review of Nuclear Physics", World Scientific, Singapure, 175 (1984).
- [7] O. Scholten, Ph. D Thesis, Kernfisch Versneller Instituut, Groningen (1980).
- [8] I. Talmi, "Progress in Particle and Nuclear Physics", Pergamon, Oxford, 27 (1983) .
- [9] A. De Shalit and H. Feshbach, "Theoretical Nuclear Physics", Wiley, New York, (1974).
- [10] A. Bohr and B. R. Mottelson, "The original papers on the unified model", K. Dan. Vidensk. Selsk. Mat. Fys. Medd. 27, 16 (1953).
- [11] G. Scharf-Goldhaber and C. Weneser, "System of even-even nuclei", Phys. Rev. 98, 212 (1955).
- [12] L. Willets and M. Jean, "Surface oscillations in even-even nuclei", Phys. Rev. 102, 788 (1956).
- [13] A. Arima et al., "System of Even-Even Nuclei", Phys. Rev. 98, 212 (1977).
- [14] T. Otsuka et al., "Interacting boson model of collective nuclear states III. The transition from SU(5) to SU(3)", Ann. Phys. 115, 325 (1978).
- [15] F. Iachello and O. Scholten, "Interacting Boson-Fermion Model of Collective States in Odd-A Nuclei", Phys. Rev. Lett. 43, 679 (1979).
- [16] P. van Isacker et al., "Extension of Supersymmetry in Nuclear Structure", Phys. Rev. Lett. 54, 653 (1985).
- [17] M. Müller-Veggian, H. Béuscher, D. R. Haenni, R. M. Lieder, and A. Neskakis, "Study of the level structure in ¹³⁴Ce", Nucl. Phys. A 417, 189 (1984).
- [18] T. W. Burrows, "Nuclear data sheets for A = 136", Nucl. Data Sheets 52, 273 (1987).

- [19] J. Deslauriers, S. C. Gujrahi, and S. K. Mark, “Structure of even-even ^{138}Nd from the decay of ^{138}Pm ”, Z. Phys. A 303, 151 (1981).
- [20] K. S. Vierinen, J. M. Nitschke, P. A. Wilmart, R. B. Frestone and J. Gilat, “Decay of neutron deficient Eu, Sm and Pm isotopes near the proton drip line”, Nucl Phys. A 499, 1 (1989).
- [21] A. Charvet, T. Ollivier, R. Béraud, R. Duffait, A. Emsallem, N. Idrissi, J. Genevey and A. Gizon, “Identification and decay of $12s$ ^{138}Eu ”, Z. Phys. A 321, 697 (1985).
- [22] N. Redon, T. Ollivier, R. Béraud, A. Charvet, R. Duffait, A. Emsallem, J. Honkanen, M. Meyer, J. Genevey, A. Gizon and N. Idrissi, “New exotic neutron-deficient nuclei near $N=82$ ”, Z. Phys. A 325,127 (1986).
- [23] R. Moscrop, M. Campbell, W. Gelletly, L. Goetting, C. J. Lister, B. J. Varley and H. G. Price, “Deformation of ^{126}Ce ”, Nucl. Phys. A481, 559 (1988).
- [24] S. Raman, C. H. Malarkey, W. T. Milner, C. W. Nestor and P. H. Stelson, “Transition probability, $B(E2)\uparrow$, from the ground to the first-excited 2^+ state of even-even nuclides”, At. Data Nucl. Data Tables 36, 1 (1987).
- [25] A. J. Kirwan et al., “Lifetime measurements in the yrast band of ^{132}Ce ”, J. Phys. G 15, 85 (1989).
- [26] A. Makishima, M. Adachi, H. Taketani and M. Ishii, “Yrast bands in $^{136,138}\text{Sm}$ and Nd ”, Phys. Rev. C 34, 576 (1986).
- [27] R. Wadsworth et al., “Lifetimes of low-lying levels in light rare earth nuclei around $A=135$ ”, J. Phys. G 13, 205 (1987).
- [28] J. Billowes et al., “Lifetime and g -factor measurements of yrast states in ^{134}Nd and ^{136}Nd ”, Phys. Rev. C 36, 974 (1987).
- [29] F. Soramel et al., “Nucleus ^{136}Sm and the transition to a deformed regime at $N=76-74$ ”, Phys. Rev. C 38, 537 (1988).
- [30] M. O. Kortelahti et al., “Transitional nuclei in the rare-earth region: Energy levels and structure of $^{130,132}\text{Ce}$, $^{132,134}\text{Nd}$ and ^{134}Pm , via β decay of $^{130,132}\text{Pr}$, $^{132,134}\text{Pm}$, and ^{134}Sm ”, Phys. Rev. C 42, 1267 (1990).
- [31] M. Özer, “Nadir Toprak Elementleri Bölgesinde Geçiş Çekirdeklerinin Nükleer Özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (2004).