

Deforme Yb - İzotopik Nadir Toprak Çekirdekleri İçin Enerji Seviye Yoğunluk Parametrelerinin İncelenmesi

Ş. OKUDUCU¹, E. ESER², S. SÖNMEZOĞLU²

Gazi Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Teknikokullar, ANKARA
Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, TOKAT
okuducu@gazi.edu.tr

Özet: Nükleer seviye yoğunluğu bilgisi, reaktör fiziğinde istatistiksel hesaplamaların yapılmasında, astrofizikte ve ağır iyon çarpışmalarının incelenmesinde önemli bir rol oynar. Nükleer enerji seviye yoğunluğu hem parçacığın anlaşılması hem de çeşitli reaksiyonlarda gamma ışını yayınlanması için önemli bir fiziksel niceliktir. Seviye yoğunluk parametre terimleri genellikle uyarılma enerjisi ile birlikte nükleer seviye yoğunluğunun değişiminin tanımlanmasında kullanılır. Bu parametre tek-parçacık modelindeki kabuk etkisine bağlı olarak uyarılma enerji ile birlikte değişir. Tek-A'lı deforme çekirdeklerin genel yapısı, kabuk model potansiyelinden hesaplanan tek-parçacık durumları üzerine inşa edilen dönme bantları ile karakterize edilir. Deforme olmuş potansiyeldeki enerji düzeyleri yörüngenin uzaysal yönelimine bağlıdır. Bu çalışmamızda, bazı Yb-izotopik nadir-toprak çekirdeklerinin enerji spektrumlarından yararlanarak enerji seviye yoğunluk parametreleri belirlenmiştir. Daha sonra elde edilen enerji seviye yoğunluk parametrelerinin detaylı band analizleri yapılarak, deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış, özellikle incelenen tek-A'lı büyük deforme potansiyele sahip çekirdeklerin parametrelerinin belirlenmesinde sadece tek bir bandın etkili olamayacağı sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Enerji seviye yoğunluğu, kolektif uyarılma bantları, deforme çekirdekler.

The Investigation Of Energy Level Density Parameters For Deformed Yb -Isotopic Rare-Earth Nuclei

Abstract: The knowledge of the nuclear level density plays a major role in make of the statistical calculation in reactor physics, in astrophysics, in the investigations of heavy-ion collision. The nuclear level density (NLD) is an important physical quantity both from the fundamental point of view as well as in understanding the particle and gamma ray emission in various reactions. The nuclear level density parameters have been usually used in investigation of the nuclear level density. This parameter itself changes with excitation energy depending on the shell effect in the single-particle model. General structure of odd-A deformed nucleus is characterized with rotational bands built on single-particle states estimated from the shell model potential and the energy levels in deformed potential connect to spacely tendency of the orbit. In this study, the energy level density parameters of various Yb-izotopic rare-earth nuclei are determined by using energy spectrum of the interest nuclei. Then, the detail band analysis of the obtained energy level density parameters has been made and the obtained results have been compared with the available experimental results. Especially, it has been shown that no any dominant band alone is responsible for identification of parameter for odd-A nuclei of the region of interest.

Keywords: Energy level density, collective excitation bands, deformed nuclei.

Giriş

Deforme ağır çekirdeklerin enerji spektrumları kolektif modlarla tanımlanır. Bu nedenle bu çekirdeklerin enerji tayfları temel ve çeşitli uyarılma bantları ile karakterize edilir. Farklı uyarılma enerjilerinde çekirdek seviyeleri yoğunluğunun öğrenilmesi; reaktör fiziğinde, astrofizikte ve ağır iyon çarpışmalarının incelenmesinde, istatistiksel hesaplamaların yapılmasında önemli bir yere sahiptir. Çekirdek seviyeleri yoğunluğu ile ilgili veriler, enerji seviyeleri yoğunluğu parametresi, enerji seviyeleri aralığı genellikle çekirdek uyarılma enerjisinin, nötron bağlanma enerjisine yakın değerleri için olup, s-dalgali nötron rezonans verileri olarak adlandırılır. Bu verilerin değerlendirilmesi Bethe [1] teorisine ve bu teori üzerinde yapılan bazı düzeltmelere [2,3] dayanır. Bu teoriye göre, çekirdekte protonlar ve nötronlar temel halde tek tek düşük enerji seviyelerini doldururlar ve herhangi bir uyarılma

durumunda son doldurulan seviyeden daha yüksek seviyelere çıkarlar. Daha sonraları modelde eksiklikleri hissedilen tek-parçacıklı seviye yoğunluğu parametresinin proton ve nötronun ortalama spinlerine bağımlılığı; bu parametrenin de çekirdeğin uyarılma enerjisine bağımlılığı [2], nükleer maddenin uyarılmasında rol oynayan kolektif etkiler [3] modele dahil edilmeye çalışılmış ve sonuçta da mevcut modelin daha karmaşık bir hal almasına neden olmuştur. Son olarak Ahmedov H. ve arkadaşları [4] tarafından modifiye edilen basit fiziksel bir modelin kullanılması ve bu modelin çift-çift çekirdeklerle uygulanması ile karışıklığın kısmen ortadan kalkması sağlanmıştır. Deforme tek A'lı ve tek-tek çekirdeklerin de aynı modele uygunluğu Okuducu Ş. ve Ahmedov H. [5] tarafından test edilmiş ve bazı deforme çekirdekler için yoğunluk parametreleri hesaplanmıştır.

Bu çalışmada bir radyasyon kaynağı olarak da kullanılan büyük deformasyona sahip bazı izotopik-Yb çekirdekleri için, çekirdeklerin kollektif uyarılma [6] modları dikkate alınarak, bu çekirdeklerin enerji seviye yoğunluk parametreleri hesaplanmış ve band analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar diğer araştırmacıların deneysel sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Hesaplama

Her bir parçacık aynı açısız momentuma sahip olup, bu momentumların toplamı, çekirdeğin I açısız momentumunu vermektedir. Teoride çekirdeğin herhangi bir uyarılma enerjisi U , momentumu I olmak üzere; enerji seviyeleri yoğunluğu için aşağıdaki denklem alınır [1,3].

$$\rho(U, I) = \frac{\sqrt{\pi} \exp(2\sqrt{aU}) (2I+1) \exp\left[-(2I+1)^2 / 2\sigma^2\right]}{12 a^{1/4} U^{5/4} 2\sqrt{2\pi} \sigma^3} \quad (1)$$

Burada; a : enerji seviye yoğunluk parametresi ve σ : spin dağılım parametresi olup,

$$a = \frac{\pi^2}{\sigma} g(\varepsilon_f), \quad \sigma^2 = g \langle m^2 \rangle t \quad (2)$$

olarak tanımlanır. Burada; $g(\varepsilon_f)$: Fermi enerji seviyesindeki tek parçacıkların yoğunluğu, $\langle m^2 \rangle$: manyetik kuantum sayısının karesinin ortalaması, t : Fermi gaz modelindeki çekirdeklerin termo-dinamiksel sıcaklığıdır.

$$g(\varepsilon_f) = \frac{3}{2} \frac{A}{\varepsilon_f}, \quad \langle m^2 \rangle = 0,146A^{2/3}$$

$$t = \sqrt{U/a} \quad (3)$$

olup, A ; çekirdeğin kütle numarasıdır. Deneysel gözlemler, çekirdeğin açısız momentumu I 'nin farklı yönelmelerini belirleyemediği için, enerji seviyelerinin gözlemlenen yoğunluğu daha kullanışlı olup aşağıdaki biçimde ifade edilir.

$$\sum \rho(U, I) = \frac{\pi^2 \exp(2\sqrt{aU})}{12 a^{1/4} U^{5/4}} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} \quad (4)$$

(2) ve (3) denklemleri, (4) denkleminde yerine koyulursa,

$$\rho(U) = \frac{a}{12\sqrt{2} \cdot (0,298A^{1/3})(aU)^{3/2}} \exp(2\sqrt{aU}) \quad (5)$$

eşitliği elde edilir. Bethe teorisi, çekirdeğin uyarılmasında çekirdek parçacıklarının kollektif hareketini dikkate almıyor. Enerji seviyeleri yoğunluğunun hesaplanmasında parçacıkların kollektif hareketlerini de dikkate alan çekirdek modelleri vardır [7,8]. Ancak bunlar karmaşık denklemler içerdiğinden kullanımı kolay değildir. Toprak alkali ve aktinit elementler bölgesindeki çekirdekler, kendilerinin taban durumlarında kararlı deformasyona sahiptirler. Çift-çift çekirdeklerin uyarılması halinde dönme enerjisi [9];

$$E_{rot}(I, K) = \frac{\hbar^2}{2} \left[\frac{I(I+1)}{J_0} + \left(\frac{1}{J_3} - \frac{1}{J_0} \right) K^2 \right] \quad (6)$$

olarak ifade edilir. Burada I ve K , sırasıyla bir çekirdeğin toplam açısız momentumu ve simetri eksenindeki izdüşümüdür. J_0 , simetri eksenine dik olan herhangi bir eksene göre olan eylemsizlik momentini ve J_3 ise simetri eksenine göre olan eylemsizlik momentini karakterize etmektedir. Burada $J_3 = 0$ alabilmemiz için, Eşitlik (6)'da K 'nin sifıra yakın olması gerekir. Buna göre, dönme kinetik enerjisi;

$$E_{rot} = \frac{\hbar^2}{2J_0} I(I+1), \quad I = 0, 1, 2, 3, 4, \dots \quad (7)$$

şeklinde ifade edilir. Bu bağıntı, dönen bir cismin kuantum mekaniğindeki enerjisini verir. I kuantum sayısının artışı, çekirdeğe dönme enerjisi ilave edilmesine karşılık gelir ve nükleer uyarılmış durumlar dönme bandı olarak bilenen bir dizi oluşturur. Bir çift-Z, çift-N'li çekirdeğin taban durumu daima 0^+ durumundadır. Çekirdeğin ayna simetrisi bu özel durumdaki dönme düzeyleri dizisini I 'nin çift değerlerine sınırlar. Bu durumda Eşitlik (7) aşağıdaki şekilde çift açısız momentum değerlerini alır.

$$\Rightarrow E_{rot} = \frac{\hbar^2}{2J_0} I(I+1), \quad I = 0, 2, 4, 6, \dots \quad (8)$$

Bu denklem, çift-çift büyük deforme çekirdeklerin gözlemlenen düşük enerji seviyelerini göstermektedir ve çekirdek açısız momentumunun $I = 0, 2, 4, 6, \dots$ değerleri için geçerlidir. Bu enerji seviye artışı pozitif pariteye sahiptir ve taban durumu dönme bandı olarak adlandırılır.

Kaynak [9]'da tanıtılan β ve γ olarak isimlendirilen uyarılma bantları aynı zamanda, çift-çift büyük deforme çekirdeklere gözlenen enerji seviyelerinin kollektif enerji özelliğini iyi tanımlar. β titreşimleri, β deformasyon parametresi salar ve çekirdeğin silindirik simetrisini korur. γ titreşimlerinde ise silindirik simetri bozulur. Yani; çekirdek bir amerikan futbol topu şeklindedir. β titreşimleri topun uçlarının itilip çekilmesine karşılık gelir, γ titreşimlerinde ise topun yan tarafının itilip çekilmesine karşılık gelir. Tek A'lı deforme çekirdek-lerdeki gözlemlenmiş nükleer

seviyelerin basit olarak ifade edilmesi eksensel simetrik çift-çift deforme bir kordaki nükleon'un çiftlenimine bağlıdır. Verilen bir K değeri ile birlikte dönme bandı ve açıl momentum değerleri, $I=K=\Omega, K+1, K+2, \dots$ olarak yazılır. K ve Ω sırasıyla nükleer simetri eksenindeki toplam açıl momentumun ve tek nükleonun açıl momentumunun izdüşümü olup, aşağıdaki enerji seviye aralığına sahiptir,

$$\Delta E(I, K) = \frac{\hbar^2}{2J_0} [I(I+1) - K(K+1)] \quad (9)$$

simetrik tek- tek deforme çekirdeklere kuantum sayısı K , $K = |\Omega_p \pm \Omega_n|$ gibi alınır. Ω_p, Ω_n sırasıyla proton ve nötronun açıl momentumunun simetri eksenindeki izdüşümüdür. K 'sı belli olan her bir band, Nillson modelinin proton ve nötronunun içyapısı üzerine kurulmuştur. Bu durumda, enerji seviyeleri yoğunluğunu uyarılma enerjisine bağlı olarak aşağıdaki gibi yazabiliriz:

$$\rho(U) = \sum \alpha_i \rho_i(U) \quad (10)$$

Burada; $\rho(U)$, i . uyarılma yöntemine bağlı kısmi enerji seviyeleri yoğunluğu, α_i , ağırlık katsayısıdır ve $\sum_i \alpha_i = 1$ şartına uymaktadır. Burada çekirdeklerin gözlenen enerji spektrumlarının önemli bir özelliği olan,

$$R_1: R_2: R_3: R_4: \dots = 1:r: 2r: 3r: \dots \quad (11)$$

oranları dikkate alınarak eşitlik (11)' in doğruluğu test edilmiştir. Diğer bir ifadeyle, enerji seviye yoğunluk parametre hesaplamalarında, kollektif uyarılma yöntemlerini dikkate alan bir ifadeyi kullanmak için, bu çekirdeklerin önemli bir özelliği olan "uyarılmış enerji seviyelerinin eşit aralıklı" olma özelliğinden yararlanıldı. Burada $R_1; R_2; R_3; R_4; \dots$, uygun bir bandın uyarılma enerji birimine göre ardışık seviye enerjilerinin oranıdır. Buna bağlı olarak herhangi bir i 'inci bandın enerji seviye yoğunluğu [3],

$$\rho_i(U, \varepsilon_{0i}) \cong \frac{\pi^2 a_{0i}}{24\sqrt{3} (a_{0i} U)^2} \exp(2\sqrt{a_{0i} U}) \quad (12)$$

gibi ifade edilir. Burada,

$$a_{0i} = \frac{\pi^2}{6\varepsilon_{0i}} \quad (13)$$

$a_{0i}; \varepsilon_{0i}$ birim enerji ile birlikte i 'inci banda karşılık gelen kollektif seviye yoğunluk parametresidir. Bu parametre bize, birim enerji aralığına (ε_{0i}) düşen uyarılmış seviye yoğunluk sayısını vermektedir. Örneğin,

çift-çift nadir toprak ve aktinit elementler için birim enerjiler, taban durumu, beta ve oktopol bantlarından oluşur. Bu bantlar için birim enerjiler sırayla; taban durumu için $\varepsilon_{0TD} = E(2^+)$, beta bandı için $\varepsilon_{0\beta} = E(2^+) - E(0^+)$, oktopol bandı için $\varepsilon_{0oct} = E(3^-) - E(1^-)$ olarak ifade edilir. Tek- A' lı ve tek-tek çekirdeklere birim enerji, ilk uyarılmış durum enerjisi veya verilen K ile birlikte birinci ve ikinci uyarılmış durumlara karşılık gelen bantları ayırma enerjisidir.

Sonuç ve Tartışma

Bazı izotopik Yb nadir toprak çekirdekleri için hesaplanmış teorik ve deneysel enerji seviye yoğunluk parametre değerleri Tablo-1'de verilmiştir.

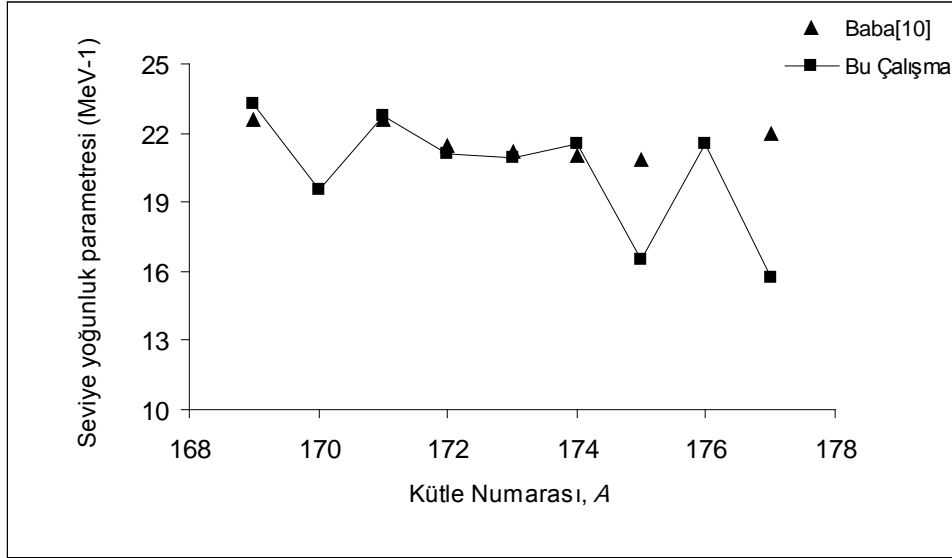
Tablo-1. Bazı izotopik Yb nadir toprak çekirdeklerin hesaplanmış teorik ve deneysel enerji seviye yoğunluk parametre değerleri.

Çekirdek	Deneysel a, MeV ⁻¹ [10]	Hesaplan an a ₀ , MeV ⁻¹	Karşılık gelen bantlar
¹⁶⁹ Yb	22.58	23.23	7/2[633]
¹⁷⁰ Yb	-	19.52	KPI=0+GS Band
¹⁷¹ Yb	22.55	22.74	7/2[633]
¹⁷² Yb	21.45	21.11	KPI=0+GS Band
¹⁷³ Yb	21.16	20.93	5/2[512]
¹⁷⁴ Yb	21.02	21.50	KPI=0+GS Band
¹⁷⁵ Yb	20.87	16.463	7/2[514]
¹⁷⁶ Yb	-	21.527	K=0+GS
¹⁷⁷ Yb	21.95	15,75	7/2 [514]

Elde edilen deneysel ve teorik enerji seviye yoğunluk parametrelerin, çekirdek- kütle numarasına (A) göre değişimleri ise Şekil-1'de gösterilmiştir. Hesaplamalar sadece taban durum dönme bandı dikkate alınarak yapılmıştır. Şekilde görüldüğü gibi, taban durum dönme bandına göre hesaplanan sonuçlar deneysel sonuçlara [10] daha yakındır. Özellikle pozitif pariteli 7/2 [633], bandına karşılık gelen ¹⁶⁹Yb ve ¹⁷¹Yb tek-A' lı çekirdekleri için elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla uyum içinde olduğu görülmektedir. Aynı şekilde çift-çift ¹⁷⁰Yb, ¹⁷²Yb ve ¹⁷⁴Yb çekirdeklerinin pozitif taban durum bantlarının (KPI=0⁺GS band) da beklenen sonuçlarla uyum içinde olduğu görülmektedir. Pozitif pariteli bu çekirdeklerin kollektif uyarılmış durumlarında taban durum dönme bandının etkili olduğu görülmüştür. Ancak tek A'lı ve negatif pariteli 7/2[514] bandına karşılık gelen ¹⁷⁵Yb ve ¹⁷⁷Yb çekirdeklerinin elde edilen parametre değerlerinde sapmalar

ığı görüldü. Çalıştığımız negatif pariteli çekirdeklerin pozitif pariteli çekirdeklere göre daha karmaşık bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. Taban durum bandının ^{175}Yb ve ^{177}Yb gibi negatif pariteli ve tek-A'lı çekirdeklerin kollektif uyarılmış bandlarının oluşmasında etkin olmadığını; belki diğer uyarılmış bandların (Octupol, β ve γ titreşim bandları) daha baskın olduğunu gösterir. Sonuç olarak, büyük deformasyona sahip çekirdeklerin

seviye yoğunluk parametrelerinin belirlenmesinde sadece tek bir bandın etkili olmadığı tespit edilmiştir. Bu çekirdeklerin enerji seviye yoğunluk parametreleri analiz edilirken bütün kollektif uyarılma durumların göz önüne alınması gerekir. Ancak, nadir toprak elementleri bölgesinde bulunan incelediğimiz izotopik-Yb çekirdeklerin çoğunda taban durumu dönme bandının daha baskın olduğu görülmektedir.



Şekil-1. İzotopik -Yb çekirdeklerinin taban durum dönme bandına göre hesaplanmış a_0 (bu çalışma) ve deneysel a [10] parametre değerlerinin, kütle numarası A'ya göre değişimi.

Kaynaklar

- (1) Bethe, H., 1937, Phys. Rev. 52, 332.
- (2) Newton, T., 1956, Can. J. Phys. 34, 804.
- (3) Gilbert, A., Cameron, 1965, A.G.W., Can. J. Phys. 43, 1446.
- (4) Ahmedov, H., Zorba, I., Yılmaz, M., Gönül, B., 2003, Nucl. Phys. A 706, 313.
- (5) Okuducu, Ş., Ahmedov, H., 2003, Phys. Lett. B, 565, 102.
- (6) Nuclear Structure And Decay Data, 2001, National Nuclear Data Center, Brookhaven National Laboratory, ENSDF (Evaluated Nuclear Structure Data File), Upton, NY.
- (7) Ignatyuk, A.V., Istekov, K.K., Simerinkin, G.N., 1979, Sov. J. Nucl. Phys. 29, 450.
- (8) Rohr, G., 1984, Z. Phys. A 318, 299.
- (9) Bohr, A., Mottelson, B., 1969, in: Nuclear Structure, Vol. 2, Benjamin, New York.
- (10) Baba, H., 1970, Nucl. Phys. A 159, 625.