

ARAŞTIRMA MAKALESİ /RESEARCH ARTICLE

DEFORME ÇİFT-ÇİFT ÇEKİRDEKLERDE $I^\pi K = 1^+1$ SEVİYELERİNİN MANYETİK MOMENTLERİ

Hakan YAKUT¹, Mehmet BEKTAŞOĞLU², Ali KULİEV²

ÖZ

Bu çalışmada deforme çekirdeklerde izovektör spin-spin kuvvetlerinin ürettiği tek fononlu $I^\pi K = 1^+1$ seviyelerinin Manyetik momentleri için QRPA metodu çerçevesinde analitik bir ifade elde edildi. Çift-çift deforme ^{154}Sm , ^{156}Gd ve ^{158}Dy çekirdekleri için spektroskopik bölgede ($\omega < 4$ MeV) yerleşen $I^\pi K = 1^+1$ seviyelerinin Manyetik momentleri hesaplandı. Ayrıca herbir enerji seviyesi için indirgenmiş geçiş ihtimali B(M1) ve ortalama ömürler (τ) hesaplandı.

Anahtar Kelimeler : QRPA metodu, B(M1), Manyetik moment, Ortalama ömür

MAGNETIC MOMENTS OF THE $I^\pi K = 1^+1$ STATES EVEN-EVEN DEFORMED NUCLEI

ABSTRACT

In this study, an analytic expression is obtained for the magnetic moments of the one-phonon $I^\pi K = 1^+1$ states generated by the isovector spin-spin forces in deformed nuclei using the QRPA method. Magnetic moments for three even-even ^{154}Sm , ^{156}Gd and ^{158}Dy deformed nuclei are calculated in the spectroscopic energy region ($\omega < 4$ MeV). The reduced transition strength probability B(M1) and lifetime (τ) for each energy level are calculated, as well.

Keywords: QRPA method, B(M1), Magnetic moment, Lifetime

¹ Sakarya Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 54100 Serdivan, Adapazarı, Türkiye
e-posta: hyakut@sakarya.edu.tr

² Sakarya Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 54100 Serdivan, Adapazarı, Türkiye

1. GİRİŞ VE MOTİVASYON

Bir nükleer seviyenin teorik yorumu genel olarak birbirinden bağımsız belirlenen birkaç özellik üzerine kurulur. Bu özellikler:

1. Spin-Parite tayini
2. Manyetik dipol ve elektrik kuadropol momentler
3. Bozunma özellikleri
4. Tesir kesitleri
5. Diğer seviyelerle olan ilişkisi

şeklinde sıralanabilir. 1 ve 2 nin tespit edilmesi durumunda 3, 4 ve 5 özellikleri konusunda daha kolay bilgi sahibi olunabilir. Spin-parite tayini özellikle tek-tek çekirdeklerde başlıbaşına bir seviyeyi belirlemek için yeterli değildir. Çünkü tek-tek çekirdeğin istenilen spin ve paritesini verecek şekilde tek nötron ve proton için pek çok erişilebilir seviye bulunur. Böyle bir durumda nükleer manyetik dipol momentin bilinmesi önemli bilgi sağlar. Bunun nedeni aynı spin ve paritelere yol açan farklı nötron-proton çiftlenimlerinin genellikle birbirlerinin tamamen aynı manyetik momente yol açmaması olarak belirtilebilir ve bu tür bazı çekirdekler için manyetik momentler ölçülmüştür (Allsop vd., 1982).

Tek A'lı çekirdeklerde de manyetik momentin değeri tek-parçacık kabuk modeli kullanılarak bulunabilir. Bu modelde manyetik moment iki kuantum sayısı l ve j ile karakterize edilen uygun kabuk modelindeki tek nükleonun manyetik moment değeridir. Manyetik momente katkı nükleonunun spin manyetik momentinden, ve eğer nükleon proton ise spine ek olarak orbital hareketinden ileri gelir. Tek proton ve tek nötronlu çekirdeklerde manyetik moment, $j = l \pm 1/2$ gibi iki durum için hesaplanır ve sonuçlar iyi bilinen Schmidt diyagramları ile verilir. Bu diyagramlarda kabuk model tahminlerinin neredeyse her zaman ölçülen manyetik momente bir sınır belirlediği gözlenir. Ancak tek parçacık model manyetik momentlerin genel eğilimiyle uyumlu sonuç verse bile, çoğu durumda deneye yakın sonuçlar vermez. Bunun nedeni modelin oldukça basit olması ve manyetik moment tahminlerinin gerçekte nükleon çiftlerinin ayrılması sonucu dalga fonksiyonunda oluşan küçük değişimlere olan duyarlılığıdır. Bu türde pek çok çekirdeğin hem nükleer taban hem de uyarılmış durumlarının manyetik momentleri deneysel olarak ölçülmüştür (Raghavan vd., 1989). Manyetik moment ölçümünde kullanılan teknikler arasında hiper-ince yapı çalışmaları, mikrodalga spektroskopisi, nükleer manyetik rezonans, paramanyetik rezonans, moleküler ve atomik demetler kullanımı sayılabilir (Blin Stoye vd., 1991).

Manyetik moment açısal momentum ile orantılı bir büyüklüktür. Çift-çift çekirdeklerin taban durumunun açısal momentumu sıfır olduğundan bu durumdaki manyetik momentleri de sıfırdır. Bu türdeki pekçok çekirdeğin taban durumu dışındaki pekçok seviyesinin manyetik momentleri deneysel olarak ölçül-

müştür (Raghavan vd., 1989). Ancak, ortalama ömürlerinin oldukça küçük (femto saniye mertebesinde) olmaları sebebiyle 1^+ seviyelerinin manyetik momentine ait deneysel sonuçlara henüz rastlanmamıştır (Pietrella, 2005). Bunun yanı sıra çift-çift deforme çekirdeklerin 2^+ seviyeleri için manyetik moment hesapları yapılmış olmasına rağmen (Bohr ve Mottelson, 1974) 1^+ seviyeleri konusunda bir çalışma bulunmamaktadır.

Bu çalışmada QRPA metodu çerçevesinde ^{154}Sm , ^{156}Gd ve ^{158}Dy deforme çekirdekleri için izovektör spin-spin kuvvetlerinin ürettiği tek fononlu $I^\pi K = 1^+1$ seviyelerinin manyetik dipol momentleri için analitik bir bağıntı elde edilmiştir.

Mevcut bildirinin amacı çift-çift deforme ^{154}Sm , ^{156}Gd ve ^{158}Dy çekirdeklerindeki $I^\pi K = 1^+1$ durumlarının yapısını araştırmak ve seviyeler arasındaki $B(M1;0 \rightarrow 1)$ indirgenmiş geçiş ihtimalini, bu seviyelerin ortalama ömürlerini ve manyetik dipol momentlerini hesaplamaktır.

2. TEORİ

2.1 Deforme Çekirdeklerde $I^\pi K = 1^+1$ Seviyeleri

Eksenel simetrik ortalama bir alanda çiftleşme kuvvetleri yoluyla etkileşen nükleonlar sistemini ele alalım. Bu durumda sistemin uygun tek kuazi-parçacık Hamiltoniyeni,

$$H_{sqp} = \sum_{s,\tau} E_s \left(\alpha_s^+ \alpha_s \right) \left(\alpha_s^+ \alpha_s \right) \quad (1)$$

şeklinde verilir. Burada E_s nükleonların tek kuaziparçacık enerjileri, $\alpha_s^+ \alpha_s$ kuazi parçacık yaratma(yoketme) operatörleri ve τ izospin indeksi nötronlar(protonlar) için $n(p)$ 'leri gösterir.

Şimdi spin-spin kuvvetlerinin deforme çekirdeklerde 1^+ durumlarını ürettiği kabul edilerek sistemin Hamiltoniyeni (Gbrakov vd., 1972),

$$H = H_{sqp} + V_{\sigma\tau} = H_{sqp} + V_{\sigma\tau}^{coll} + V_{\sigma\tau}^{int} \quad (2)$$

şeklinde yazılabilir. $V_{\sigma\tau}^{coll}$ ve $V_{\sigma\tau}^{int}$ terimleri spin etkileşmelerinin sırasıyla kuazi parçacık tasvirindeki bozon ve fermiyon kısımlarıdır. Burada 1^+ seviyelerini üreten spin-spin etkileşmelerinin $V_{\sigma\tau}$ ifadesi aşağıdaki gibidir;

$$V_{\sigma\tau}^{coll} = \frac{1}{4} \chi_{nn} \bar{\sigma}_n \bar{\sigma}_n + \frac{1}{4} \chi_{pp} \bar{\sigma}_p \bar{\sigma}_p + \frac{1}{2} \chi_{np} \bar{\sigma}_n \bar{\sigma}_p \quad (3)$$

QRPA'da kolektif 1^+ seviyelerinin dalga fonksiyonlarına bir fonon fonksiyonu olarak bakılmaktadır (Kuliev vd., 2000). Bu dalga fonksiyonu,

$$|\psi_i\rangle = Q_i^+ |\psi_0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\sum_{n\dot{o}t.} \varphi_{ss'}^i C_{ss'}^+ - \varphi_{ss'}^i C_{ss'} \right] \left[\sum_{prot.} \varphi_{vv'}^i C_{vv'}^+ - \varphi_{vv'}^i C_{vv'} \right] |\psi_0\rangle \quad (4)$$

ile verilir. Burada Q_i^+ fonon üretim operatörü ve $|\psi_0\rangle$ çift çift çekirdeğin taban durumuna uygun gelen fonon vakumu, yani $Q|\psi_0\rangle=0$ dır. $\psi_{ss'}$, $\varphi_{ss'}$ iki kuaziparçacık durum genlikleridir.

Hamiltoniyenimizin özfonksiyon ve özdeğerlerini bulmak için RPA'nın bilinen işlemleri ve

$$\delta \left\langle \psi | Q_i H Q_i^+ | \psi \right\rangle - \left\langle \psi | H | \psi \right\rangle - \omega_i \left(\sum_i (\psi_s^i{}^2 - \varphi_s^i{}^2) - 1 \right) = 0 \quad (5)$$

ile verilen varyasyon ilkesi kullanılarak 1^+ seviyelerinin uyarılma enerjilerini bulacağımız

$$(1 + \chi F_n)(1 + \chi F_p) - q^2 \chi^2 F_n F_p = 0 \quad (6)$$

seküler denklemi elde edilir. Bu denklemin kökleri spin titreşimlerinin meydana getirdiği uyarılmış 1^+ hallerinin enerjilerini verir. Burada $\chi \equiv \chi_{nn} \equiv \chi_{pp}$ ve nötron-proton etkileşmesini karakterize eden q , $q = \chi_{np} / \chi$ şeklinde verilir. Tek çekirdeklerdeki manyetik momentlerin deneysel verilerle karşılaştırılmaları sonucu q ' nun -1 değerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu da kullanılan spin-spin etkileşimlerinin izovektör dalına karşı gelmektedir.

2.2 Deforme Çift-Çift Çekirdeklerde $I^\pi K = 1^+1$ Seviyelerinin Manyetik Momentleri

Spin titreşimlerinin en karakteristik niceliklerinden birisi manyetik dipol operatörüdür. Manyetik dipol operatörü,

$$\mu_\nu = g_s^\tau s_\nu + g_\ell^\tau \ell_\nu \quad \nu = 0, \pm 1 \quad (7)$$

ile verilir. Burada s ve ℓ sırasıyla nükleonların spin ve yörüngesel açısal momentumları, g_s^τ ve g_ℓ^τ ise nükleonların spin ve yörüngesel jromanyetik oranlarıdır.

Çift-çift deforme çekirdekler için 1^+1 seviyelerinin manyetik momentleri, manyetik dipol operatörünün z bileşeninin bu durumdaki beklenen değeri,

$$\langle \mu_z \rangle_{1^+} = \langle \psi | \mu_z | \psi \rangle \quad (8)$$

ve (4)'te verilen tek fononlu dalga fonksiyonu kullanılarak

$$\langle \mu \rangle_{1^+} = \sum_{\substack{ss' \\ q\tau}} M_{ss'} \mu_{ss'}^\tau (\psi_{qs}^\tau \psi_{qs'}^\tau - \varphi_{qs}^\tau \varphi_{qs'}^\tau) \quad (9)$$

$$\mu_z \equiv \mu_0 \equiv \mu$$

şeklinde analitik olarak elde edilir. Yukarıdaki (9) ifadesinde $M_{ss'} = u_s u_{s'} + v_s v_{s'}$ olup $u(v)$ bilinen Bogolyubov kuaziparçacık dönüşüm parametreleridir.

Spin titreşim 1^+ seviyelerinin diğer bir karakteristiği,

$$B(M1, 0^+ \rightarrow 1^+) = \sqrt{\frac{3}{4\pi}} \left[\sum_{ss'} \mu_{ss'} L_{ss'}^i g_{ss'}^i + \sum_{vv'} \mu_{vv'} L_{vv'}^i g_{vv'}^i \right] \quad (10)$$

ile verilen B(M1) geçiş ihtimalidir (Gabrakov vd., 1972). Bu geçiş ihtimali kolektif uyarılmaların koherent karakteriyle ilişkilidir. Bu sebeple B(M1)'in aldığı değerlerin büyük olması çekirdek seviyesinin kolektif olmasının bir kriteri olarak kabul edilmektedir.

Çekirdek yapısının incelenmesinde geçiş matris elemanlarının tabi olduğu toplam kurallarının büyük önemi vardır. Toplam kurallarının yardımıyla kullanılan model ve yaklaşımların başarısı, incelenen rezonans seviyelerinin kolektifliği ve manyetik dipol rezonansın yerini belirlemede bilgi edinilebilir. M1 geçişlerinin enerji ağırlıklı toplam kuralı aşağıdaki şekilde yazılır;

$$\frac{8\pi}{3} \sum_i \omega_i B_i(M1) = \langle 0 | \left[\mu_\nu^+, \left[H, \mu_\nu \right] \right] | 0 \rangle \quad (11)$$

Bu eşitliğin sağ tarafı toplam kuralının modelden bağımsız değeridir.

3. HESAPLAMALAR

Nümerik hesaplamalar çift-çift ^{154}Sm , ^{156}Gd ve ^{158}Dy deforme çekirdekleri için gerçekleştirilmiş ve tek parçacık enerjileri Warsaw deforme Woods-Saxon potansiyelinden elde edilmiştir (Dudek ve Werner, 1978). Ortalama alan deformasyon parametreleri δ_2 , deneysel kuadropol momentlerinde (Raman vd., 1987) tanımlanan β_2 deformasyon parametreleri kullanılarak ve Ref.(Bohr ve Mottelson, 1974) da verilen formül aracılığıyla hesaplanmıştır. Ref. (Soloviev, 1976)'dan alınan çiftlenim etkileşim sabitleri, ilgili çekirdeğin tek parçacık seviyelerine dayanır. Spin-spin etkileşme sabitleri $\chi = 40/A$ MeV ve $q = -1$ Ref.(Kuliev vd., 2000)'dan alınmıştır. Ortalama alan potansiyel parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.

Çalıştığımız çekirdekler için yaptığımız hesaplamaların sayısal sonuçları Tablo-2, 3 ve 4'te ayrıntılı olarak verilmiştir.

Tablo 1. Ele alınan çekirdekler için δ_2 deformasyon ve süperakışkan korelasyon parametreleri (MeV birimlerinde)

Çekirdek	Δ_N	Δ_Z	λ_N	λ_Z	δ_2
^{154}Sm	1,183	0,733	-6,877	-8,622	0,2964
^{156}Gd	1,07	1,03	-7,488	-7,414	0,2938
^{158}Dy	1,07	1,09	-7,975	-6,236	0,2556

Tablo 2. ^{154}Sm çekirdeğinde spektroskopik enerji bölgesinde 1^+ seviyelerinin manyetik momentleri ($\mu_N = e\hbar/2m_p c$ ve fs: 10^{-15} s)

ω [MeV]	B(M1) [μ_N^2]	τ [fs]	$\langle\mu\rangle_{1^+}$ [μ_N]			
			Spin		Orbital	Toplam
			Nötron	Proton	Proton	
2,268	3,090	1,5694	-0,0004	0,9907	1,0648	2,0551
2,460	1,010	3,7627	-0,0058	0,7162	0,6111	1,3215
3,185	1,990	0,8799	0,0023	0,8891	0,0911	0,9824
3,401	0,405	3,5510	0,0006	-0,9934	0,4686	-0,5242
3,441	0,811	1,7122	0,0293	-0,6245	0,6729	0,0776
4,591	0,653	0,8953	-0,0125	0,8735	0,0848	0,9457

Tablo 3. ^{156}Gd çekirdeğinde spektroskopik enerji bölgesinde 1^+ seviyelerinin manyetik dipol momentleri ($\mu_N = e\hbar/2m_p c$ ve fs: 10^{-15} s)

ω [MeV]	B(M1) [μ_N^2]	τ [fs]	$\langle\mu\rangle_{1^+}$ [μ_N]			
			Spin		Orbital	Toplam
			Nötron	Proton	Proton	
2,602	2,544	1,2624	0,0041	0,9798	1,0537	2,0375
3,075	0,150	12,9716	-0,2922	-0,6746	0,2841	-0,6827
3,485	0,361	3,7026	-0,0491	0,6552	0,5607	1,1668
3,788	0,650	1,6013	0,1003	0,7275	0,0585	0,8863
3,815	0,384	2,6534	0,2953	0,2307	0,0231	0,5491
4,186	0,573	1,3461	-0,0001	-0,8050	0,8913	0,0863

Tablo 4. ^{158}Dy çekirdeğinde spektroskopik enerji bölgesinde 1^+ seviyelerinin manyetik dipol momentleri ($\mu_N = e\hbar/2m_p c$ ve fs: 10^{-15} s)

ω [MeV]	B(M1) [μ_N^2]	τ [fs]	$\langle \mu \rangle_{1^+}$ [μ_N]			
			Spin		Orbital Proton	Toplam
			Nötron	Proton		
2,650	1,403	2,1668	0,0009	0,8605	1,0401	1,9015
2,721	0,271	10,3625	0,1399	-0,5840	0,2777	-0,1664
2,829	0,396	6,3100	0,2222	-0,3233	0,1883	0,0873
3,461	0,905	1,5079	0,0008	1,1600	1,5333	2,6940
3,752	0,847	1,2646	-0,0084	1,1360	0,5135	1,6411
3,793	0,116	8,9375	-0,0300	0,5977	0,5420	1,1096
3,811	0,309	3,3079	-0,1698	0,1204	0,1135	0,0641
3,994	0,762	1,1653	0,0018	-1,0719	1,4267	0,3566

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada ^{154}Sm , ^{156}Gd ve ^{158}Dy çekirdeklerinde spektroskopik bölgede ($\omega < 4$ MeV) yerleşen $I^\pi K=1^+1$ seviyelerinin manyetik momentleri hesaplandı. Hesaplamalardan manyetik momente en büyük katkının protonlardan geldiği saptandı. Ayrıca (9) formülündeki köşegen olmayan ($s \neq s'$) terimlerin manyetik momente katkısının ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu görüldü. Ortalama ömür (τ) enerjinin üçüncü kuvveti ve B(M1) ile ters orantılı bir büyüklük olduğundan incelenen çekirdeklerin 1^+ seviyelerinin hesaplanan ortalama ömürleri için femto saniye mertebesinde sonuçlar alındı.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın bazı safhalarında yardımlarını bizden esirgemeyen Filiz Ertuğral'a teşekkür ederiz.

REFERANSLAR

- Allsop, A. L., Hornung, S., Krane, K.S. and Stone, N.J. (1982). The nuclear magnetic moment of ^{186}Ir . *J. Phys. G: Nucl. Phys.* 8, 857-870.
- Blin Stoyale, R. J. (1991). *Nuclear and Particle Physics*. Kluwert Academic Pub., United States
- Bohr, A. ve Mottelson, B. (1974). *Nuclear Structure v.2*, Benjamin, New York, Amsterdam
- Dudek, J. ve Werner, T. (1978). *J. Phys. Nucl. Part. Phys.* 4G, 1543
- Gabrakov, S.I., Kuliev, A.A., Pyatov, N.I., Salamov, D.I. ve Schulz, H. (1972). *Collective 1^+ States*

in Doubly even deformed nuclei. *Nuclear Phys.* 182(A) 625-633

- Kuliev, A. A., Akkaya, R., İlhan, M., Guliyev, E., Selam, C.I. ve Selvi, S. (2000). Rotational-Invariant Model of The States With $K^\pi=1^+$ and Their Contribution to The Scissors Mode. *Int. J. Mod. Phys.* 9(E), 249
- Raghavan, P. (1989). *At. Data Nucl. Data Tables* 42, 189
- Raman, S. et al. (1987), *At. Data Nucl. Data Tables* 36, 1.
- Pietrella, N. Özel Görüşme
- Soloviev, V. G. (1976). *Theory of Complex Nuclei*, Pergamon Press, New York



Hakan Yakut, 1979 yılında Sakarya'da doğdu. 1997'de kazandığı Sakarya Üniversitesi Fizik Bölümü'nden 2001 yılında mezun oldu. Aynı yıl Fizik'te mastıra başladı. 2004 yılında yüksek lisans eğitimini tamamladı ve doktora yapmaya başladı. Halen Sakarya Üniversitesi Fizik Bölümü'nde görev yapmaktadır.



Mehmet Bektaşoğlu, 1969 Bingöl doğumlu. Yıldız Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü'nden 1993 yılında mezun oldu. Amerika'nın Virginia Eyaletindeki Old Dominion Üniversitesi'nden Fizik yüksek lisans derecesini 1997 yılında, aynı okuldaki Nükleer Fizik doktora programını 2002 yılında tamamladı. Halen Sakarya Üniversitesi Fizik Bölümü'nde görev yapmaktadır.



Ali Ekber Kuliev, 1940 yılında Azerbaycan'da doğdu. Moskova Devlet Üniversitesi Fizik Bölümü'nden 1965 yılında mezun oldu. 1965-1971 yıllarında Moskova Devlet Üniversitesinde Yüksek Lisans ve Doktorasını tamamladı. 1974'te doçentliğini, 1990'da Profesörlüğünü aldı. Halen Sakarya Üniversitesi Fizik Bölümü'nde Nükleer Fizik anabilim dalında görev yapmaktadır.