

**NÜKLEER TIPTA KULLANILAN BAZI HAFİF
DEFORME RADYOAKTİF ÇEKİRDEKLERİN KOLLEKTİF BAND
YAPISININ İNCELENMESİ**

Hilal SARAÇ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK BÖLÜMÜ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ŞUBAT 2010
ANKARA**

Hilal SARAÇ tarafından hazırlanan NÜKLEER TIPTA KULLANILAN BAZI HAFİF DEFORME RADYOAKTİF ÇEKİRDEKLERİN KOLLEKTİF BAND YAPISININ İNCELENMESİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

(Doç. Dr. Şeref OKUDUCU)

.....

Tez Danışmanı, Fizik Bölümü

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği / oy çokluğu ile FİZİK Anabilim Dalında Yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

(Doç.Dr. Eyüp TEL)

.....

(Fizik Bölümü, Gazi Üniversitesi)

(Doç. Dr. Şeref OKUDUCU)

.....

(Fizik Bölümü, Gazi Üniversitesi)

(Doç.Dr. Mustafa KARADAĞ)

.....

(Fizik Eğitimi, Gazi Üniversitesi)

Tarih: 05 /02 /2010

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

HİLAL SARAÇ

**NÜKLEER TIPTA KULLANILAN BAZI HAFİF DEFORME
RADYOAKTİF ÇEKİRDEKLERİN KOLLEKTİF BAND YAPISININ
İNCELENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Hilal SARAÇ

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Şubat 2010**

ÖZET

Bu çalışmada, nükleer tıpta kullanılan, kütle numarası $40 < A < 100$ aralığındaki bazı hafif deforme radyoaktif çekirdeklerin seviye yoğunluk parametreleri, her radyoaktif çekirdeğin farklı bandları için, enerji spektrumlarından yararlanılarak hesaplanmıştır. İncelenen radyoaktif çekirdeklerin uyarılma enerjisine bağlı olarak enerji seviye yoğunluk parametrelerinin hesaplanmasında hafif deforme çekirdeklerin enerji seviyelerinin eş-aralıklı ve nükleonların kollektif hareketlerini dikkate alan bir model kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, s dalgalı nötron rezonans verileri için diğer çalışmalardan elde edilen diğer değerler ile karşılaştırılmıştır.

Bilim Kodu : 202.1.008
Anahtar Kelimeler: Seviye yoğunluğu, kollektif model, medikal radyonüklid
Sayfa Adedi : 51
Tez Yöneticisi : Doç. Dr. Şeref OKUDUCU

**INVESTIGATION OF COLLECTIVE BAND STRUCTURE OF SOME LIGHT
DEFORMED RADIOACTIVE NUCLEUS USED
IN NUCLEAR MEDICINE
(M.Sc. Thesis)**

Hilal SARAÇ

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
February 2010**

ABSTRACT

In this study, the nuclear energy level density parameters of some light deformed radioactive nucleus used in nuclear medicine have been determined by using energy spectrum of the interest radioactive nucleus for different band. The investigated radionuclides have been considered in the region of mass number $40 < A < 100$. In calculation of nuclear energy level density parameters dependent upon excitation energy of radioactive nuclei studied, a model was considered which relies on the fact that energy levels of deformed light nuclei are equidistant and which relies on collective motions of their nucleons. The present calculated results have been compared with the compiled values from the literatures for s-wave neutron resonance data.

Science Code : 202.1.008
Key Words : Level density, collective model, medical radionuclid
Page Number : 51
Advisor : Assoc. Prof. Dr. Şeref OKUDUCU

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasını hazırlamamda yardım ve önerilerini eksik etmeyen değerli tez danışmanım Doç. Dr. Şeref OKUDUCU' ya, yüksek lisans eğitimim boyunca bana her konuda yol gösteren, ilgi ve desteğini esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Güneş TANIR' a, yardım ve desteğini eksik etmeyen değerli hocam Prof. Dr. Eyüp TEL' e, ayrıca medikal fizik alanında uzmanlaşmamda önemli katkıları bulunan Ankara Üniversitesi Cebeci Araştırma ve Uygulama Hastanesi Radyasyon Fiziği sorumlusu Yüksek Fizik Mühendisi Tuğba ATAKUL' a, yüksek lisans eğitimim boyunca hiç bir zaman desteğini esirgemeyen aileme ve isimlerini sayamadığım tüm arkadaşlarıma en içten duygularıyla teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER.....	4
2.1. NÜKLEER TIP.....	4
2.1.1. Teşhis ve tedavide nükleer tıp.....	4
3. NÜKLEER MODELLER.....	13
3.1. Fermi Gaz Modeli.....	13
3.2. Sıvı Damla Modeli.....	15
3.3.Shell (Kabuk) Modeli.....	18
3.4. Kollektif Model.....	20
3.4.1. Nükleer titreşimler.....	21
3.4.2.Nükleer dönme.....	26
4. NÜKLEER ENERJİ SEVİYE YOĞUNLUĞU.....	29
4.1. Enerji Seviye Yoğunluğu Parametresinin Hesaplanması.....	31
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	39

	Sayfa
KAYNAKLAR.....	44
EKLER.....	48
EK-1 PET/CT akciğer görüntüsü.....	49
EK-2 SPECT' ten elde edilen beyin görüntüsü.....	50
ÖZGEÇMİŞ.....	51

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1 Bazı radyoaktif çekirdeklerin nükleer tıpta kullanım alanları ve özellikleri.....	11
Çizelge 2.2 Bazı radyoaktif çekirdeklerin nükleer tıpta kullanım alanları ve özellikleri.....	12
Çizelge 5.1 Nükleer tıpta kullanılan bazı hafif deforme radyoaktif çekirdeklerin farklı bandları için hesaplanan enerji seviye yoğunluk parametreleri a_0 ve diğer çalışmalardan elde edilen a değerleri.....	40
Çizelge 5.2 Nükleer tıpta kullanılan bazı hafif deforme tek-A' lı radyoaktif çekirdekler için nükleer seviye yoğunluk parametreleri a ve a_0 ' ın kütle numarasına göre değişimi. Taban durum dönme bandları, oktopul ve beta titreşim bandları için hesaplanan a_0 değerleri ve bazı referanslardan alınan a değerleri.....	41
Çizelge 5.3 Nükleer tıpta kullanılan bazı hafif deforme tek-tek radyoaktif çekirdekler için nükleer seviye yoğunluk parametreleri a ve a_0 ' ın kütle numarasına göre değişimi. Taban durum dönme bandları ve beta titreşim bandları için hesaplanan a_0 değerleri ve bazı referanslardan alınan a değerleri karşılaştırılmıştır.....	42

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1 Fermi Gaz Modeline göre şematik enerji-seviye diyagramı.....	14
Şekil 3.2 Sıvı damlası modeline göre çekirdek fisyonunun şematik görünümü.....	17
Şekil 3.3 a) Kare kuyu potansiyeli, b) Harmonik osilatör potansiyeli, c) Shell modeli potansiyeli.....	19
Şekil 3.4 Küresel denge biçimli titreşen bir çekirdek. Zamana- bağlı $R(t)$ koordinatı, θ , ϕ doğrultusundaki yüzey üzerinde bir noktayı göstermektedir.....	22
Şekil 3.5 Bir çekirdeğin en düşük üç titreşim modu	22
Şekil 3.6 Kuadropol titreşimi	23
Şekil 3.7 β ve γ – titreşim durumu	25
Şekil 3.8 Titreşim enerji seviyeleri.....	25
Şekil 3.9 Kalıcı deformasyonlara sahip çekirdeklerin denge şekilleri.....	26
Şekil 4.1 Deforme çekirdeğin ortak hareketinin titreşim şekillerinin gösterilmesi.....	34
Şekil 4.2 $^{75}_{34}\text{Se}$ çekirdeğinin taban durum bandı.....	37
Şekil 4.3 $^{81}_{36}\text{Kr}$ çekirdeğinin oktopul titreşim bandı.....	38

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. SPECT.....	7
Resim 2.2. PET/CT simülatör.....	8

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
A	Çekirdeğin kütle numarası
a	Enerji seviye yoğunluk parametresi
B	Toplam bağlanma enerjisi
C	Coulomb
e^+	Pozitron
e^-	Elektron
$g(\varepsilon_f)$	Fermi enerjisi
I	Çekirdeğin toplam açısal momentumu
l	Açısal momentum kuantum sayısı
K	Açısal momentumun simetri eksenini üzerindeki izdüşümü
m	Magnetik kuantum sayısı
R	Ortalama yarıçap
r	Yarıçap
t	Fermi gaz modelindeki çekirdeklerin termodinamiksel sıcaklığı
U	Uyarılma enerjisi
$V(r)$	Potansiyel

Simgeler	Açıklama
$Y_{\lambda\mu}(\theta, \phi)$	Küresel harmonikler
Z	Çekirdeğin proton sayısı
X	X-ışını
ω_{β}	Titreşim frekansı
α	Alfa parçacığı
β	Beta parçacığı
β^{+}	Pozitron
β^{-}	Elektron
γ	Gama
σ	Spin dağılım parametresi
β	Deformasyon parametresi
J	Eylemsizlik momentidir
J_0	Eksensel simetriye sahip çekirdeğin simetri eksenine dik bir eksen etrafındaki eylemsizlik momenti
$\alpha_{\lambda\mu}(t)$	Zamana- bağlı genlik
$\rho(U, I)$	Nükleer seviye yoğunluğu
ΔE	Enerji seviye aralığı
Ω_p	Proton simetri eksenine üzerindeki açısal momentumlarının yansıması

Simgeler**Açıklama** Ω_n

Nötronun simetri ekseni üzerindeki açısal momentumlarının yansıması

 $\mathcal{E}_{0i}$

Birim enerji

Kısaltmalar	Açıklama
BET	Bilgisayar emisyon tomografi
PET	Pozitron emisyon tomografi
SPECT	Bilgisayar tek foton emisyon tomografisi
R	Röntgen
TAEK	Türkiye atom enerjisi kurumu
LET	Lineer enerji transferi
CAT	Bilgisayarlı tomografi
MeV	Mega elektron-volt
keV	Kilo elektron-volt
eV	Elektron-volt
fm	Fermi

1.GİRİŞ

Enerji seviye yoğunluğu, belli enerji seviyeleri arasındaki enerji seviyelerinin sayısı olarak tanımlanır. Nükleer enerji seviye yoğunluğu nükleer fizik alanında uyarılmış çekirdeklerin özelliklerinin ve teorik bilgilerin ortaya çıkarılmasında, nükleer tıp ve medikal fizik gibi dallarda nükleer reaksiyon tesir kesiti hesaplamalarında çok büyük önem taşımaktadır[1-10].

Özellikle seviye yoğunlukları, nükleer bilim ve teknolojiye ilerleme sağlanması ve nükleer modellerde nötron yakalama tesir kesitinin hesaplanmasında başarılı bir şekilde kullanılmıştır. Günümüzde nükleer seviye yoğunluğundan elde edilen tesir kesiti verileri kanser tedavisinde, medikal radyoizotop taramalarının ortaya çıkarılması gibi birçok biyomedikal alanda ve uzun ömürlü radyoaktif atıkların dönüştürülmesinde başarılı bir biçimde kullanılmaktadır [11].

Son zamanlarda birçok radyoaktif çekirdek nükleer tıp alanındaki uygulamalarda kullanılmaktadır. Nükleer tıp teşhis ve tedavi uygulamalarında birçok radyofarmasotik (bir radyoizotopun insan üzerinde teşhis ve tedavi amacı ile uygulanmasını sağlayan kimyasal şekli, radyoaktif ilaç) kullanılmakta ve her geçen yıl ihtiyaç duyulan radyoaktif standartlar artmaktadır [12]. Genel olarak ^{45}Ca , ^{51}Cr , ^{55}Fe , ^{60}Co , ^{64}Cu , ^{75}Se , ^{79}Se , ^{81}Kr , ^{82}Br , ^{85}Sr , ^{90}Y (bu çalışmadaki bazı hafif deforme tıbbi radyoaktif çekirdekler) gibi medikal radyonüklidler parçalama özelliklerine göre teşhis ve tedavi amacıyla kullanılan radyoaktif çekirdekler olarak sınıflandırılabilir. Son on yıl içinde bu radyoaktif çekirdekleri üretmek ve kullanmak çok büyük bir başarı haline gelmiştir. Bu radyoaktif çekirdekler tümörlerin, kan dolaşımının, iskelet sisteminin görüntülenmesi, böbrek fonksiyon çalışmaları ve birçok medikal uygulama için fizyolojik bilgi sağlar. Diğer bir deyişle bu radyoaktif çekirdekler, Pozitron Emisyon Tomografisi, Tek Foton Emisyon Tomografisi ve yanı sıra endoradyoterapide (radyonüklidlerle internalterapi) teşhis çalışmalarında kullanılır [13-17].

Radyozitop üretimindeki nükleer reaksiyon hesaplamaları standart nükleer reaksiyon modellerine dayanmaktadır. Bu nükleer reaksiyon hesaplamaları nükleer modellerin çeşitli parametrelerini belirlemek ve deneysel ölçümler için önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle, medikal radyonüklidler için hesaplanan nükleer seviye yoğunluk parametreleri tesir kesiti reaksiyonlarının geliştirilmesinde yardımcı olabilir.

Bu nedenle, özellikle ağır ve hafif deforme çekirdekler bölgesinde atom çekirdeklerinin toplam seviye yoğunluklarını tahmin etmek için çok yönlü teorik yaklaşımlar geliştirilmiştir. Genel olarak kullanılan analitik ifadeler [1,2,4], çoğunlukla çekirdek içindeki nükleonların bağımsız parçacık davranışını geçerli kılan fermi gaz modelinde, çiftlenim ve shell etkilerinin önemli bir rol oynadığı düşük uyarılma enerjisi bölgesinde değişiklik gösterir. Teorideki seviye yoğunluk parametreleri ve seviye yoğunluğu ile ilgili parametreler nötron bağlanma enerjisine yakın enerji değerlerinde gözlenen enerji seviyelerinden elde edilmiştir. Genellikle verilerin değerlendirilmesi tek parçacık nükleer modelini varsayan Bethe teorisine dayanmaktadır [1]. Bethe, birbiri ile etkileşmeyen parçacıkların oluşturduğu Fermi gaz sisteminin ortalama enerjisi ile entropisi arasındaki termodinamik ilişkileri dikkate alarak çekirdek enerji seviyeleri yoğunluğunu hesaplamıştır. Bu teoriye göre, çekirdekte bulunan protonlar ve nötronlar temel halde tek-tek düşük enerji seviyelerini doldururlar ve herhangi bir uyarılma durumunda son doldurulan seviyeden daha yüksek enerji seviyelerine çıkarlar [2,18-21]. Ancak Bethe teorisi, bazı deforme radyoaktif çekirdeklerin nükleer seviye yoğunluğu hesaplamalarının tanımlanmasında önemli bir rol oynayan kolektif etkileri dikkate almamaktadır.

Daha sonra Landau ve Weisskopf bu termodinamik ilişkileri genelleştirerek enerji seviyeleri yoğunluğu ile ilgili hesaplamalar yapmışlardır [22,23]. Bu çalışmalarda (Bethe, 1936; Landau, 1936; Weisskopf, 1937), atom çekirdeğinin uyarılma enerjisi termodinamik sıcaklığın karesi olarak dikkate alınmış olup [1,22,23], Bohr ve Kalckar tarafından yapılan nükleer uyarılma

enerjilerinin eş aralıklı olduğu fikri temel alınmıştır[24]. Temelde bütün bu hesaplama metotları Fermi gaz modeline dayanmakta olup, bu hesaplamalarda dikkate alınmayan ilave etkiler Hurwitz ve Bethe tarafından, kapalı kabuklu çekirdeklere yakın ve temel seviyelerinde bulunan çift parçacıklı sistemler için çiftlenim enerjisine karşılık gelen karakteristik Bethe-Hurwitz parametresi ilave edilerek çözülmeye çalışılmıştır [25]. Daha sonra eksiklikleri hissedilen tek-parçacıklı seviye yoğunluk parametresinin proton ve nötron ortalama spinlerine bağımlılığı [18], çekirdeğin uyarılma enerjisine bağımlılığı [26], nükleer maddenin uyarılmasında rol oynayan kolektif etkileri ve hatta süper iletkenlik gibi etkiler modele dâhil edilmeye çalışılmış [2], ancak, mevcut modelin daha karmaşık bir hal almasına neden olunmuştur.

Son olarak Ahmedov tarafından modifiye edilen basit fiziksel bir modelin kullanılması ile karışıklığın kısmen ortadan kalkması sağlanmıştır [5]. Deforme çift-çift çekirdeklerin aynı modele uygunluğu test edilmiş ve bazı deforme çekirdekler için enerji seviye yoğunluk parametreleri hesaplanmıştır. Okuducu ve Ahmedov'un çalışmalarında da aynı modelin deforme tek A' lı ve tek-tek çekirdekler için uygunluğu gösterilmiştir [6].

Çekirdek seviyeleri yoğunluğu ile ilgili enerji seviyeleri yoğunluğu parametreleri, enerji seviyeleri aralığı uyarılma enerjisinin nötron bağlanma enerjisine yakın değerleri için olup s-dalgali nötron rezonans verileri olarak adlandırılır [1]. Bu verilerin değerlendirilmesi Bethe teorisine ve bu teori üzerinde yapılan düzeltmelere dayanır [2,18]. Nötron bağlanma enerjisine yakın herhangi bir uyarılma enerjisindeki enerji seviyeleri kolektif dönme ve kolektif titreşim gibi farklı karakterlere sahiptir. Bu özellikler çift-çift, tek-tek ve tek A' lı nadir toprak ve aktinit çekirdeklerde daha açık bir şekilde görülmektedir. Bu çekirdeklerde düşük enerji seviyeleri kolektif dönme, kolektif kuadropol ve oktopul titreşim yöntemleri ile uyarılmış olabilirler.

Bu çalışmada nükleer tıpta ve diğer uygulama alanlarında kullanılan kütle numarası $40 < A < 100$ aralığındaki nükleer spektrumları gözlemlenen bazı hafif deforme radyoaktif çekirdeklerin enerji seviye yoğunlukları, çekirdeklerin

farklı kollektif uyarılma biçimleri kullanılarak hesaplanmış ve detaylı band analizi yapılmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Nükleer Tıp

Nükleer Tıp, radyoaktif elementler, radyofarmasotikler ve biyolojik materyaller yardımıyla, hastalıkların tanı ve tedavisi ile uğraşan bir tıp dalıdır. Radyolojik tetkiklerin aksine nükleer tıpta organların yapısından çok işlevi ve çalışma bozuklukları incelenir. Nükleer tıpta kullanılan radyoaktif ilaçlar, insan vücuduna enjekte edilmek amacıyla özel olarak üretilmiş, düşük radyasyonlu, kısa ömürlü ve vücutta birikim yapmayan radyoaktif maddelerdir.

Nükleer tıpta kullanılan radyasyon kaynağı çeşitli şekillerde olabilir ve vücuda değişik yollarla verilebilir. Damardan, ağızdan, kas içine veya vücut boşluklarının içine enjekte edilerek uygulanabilir. Birçok organın nükleer tıp teknikleriyle incelenmesi mümkündür. Yapılan testler sayesinde vücudun birçok organının işleyiş ve yapılarına ait güvenilir bilgiler elde edilir. Tiroid, karaciğer, dalak, akciğer ve beyin sintigrafisi gibi uygulamalar birçok hastalığın teşhisinde yaygın olarak kullanılır.

Nükleer tıpta, tiroid ve böbrek üstü bezlerine, iltihap odağı ve tümör görüntülemeye, dolaşım, iskelet ve solunum sistemine, kalp ve damar hastalıklarına ilişkin birçok tetkik yapılabilmektedir. Ayrıca özel radyoaktif ilaçların hedef organda tutulma özelliğinden yararlanarak yüksek dozda radyoaktif ilaçlar tedavi amacıyla da kullanılır.

2.1.1. Teşhis ve tedavide nükleer tıp

Tıbbi görüntüleme alanındaki gelişmeler: γ -ışını kameraları, tıbbi radyoizotopların üretimi için kullanılan özel hızlandırıcılar ve vücutta belirli derinlikteki görüntüleri elde etmek için kullanılan teknikler nükleer tıp olarak adlandırılır. Nükleer tıpta amaç, organları ve organ fonksiyonlarını görüntülemektir. Görüntüleme, hastaya verilen radyoaktif maddeden çıkan

fotonların dedeksiyonuna dayanır ve bu görüntülerle hastaya ait bilgiler elde edilir.

Belirlenen organda birikmeye eğilimli bir radyoaktif izotop içeren radyofarmasotik bileşik seçilerek, radyoaktif izotopun bölgesel bir konsantrasyonu elde edilebilir.

Görüntüleme tekniklerinde en dikkate değer gelişmeler ya dışarıdan gelen X-ışınları ya da hastaya enjekte edilen radyoizotoplarla vücudun içyapısının belirli bir "diliminin" görüntülenmesine imkân veren tomografi alanında olmuştur. X-ışını tüpü ve film, vücudun bir kesiti üzerindeki sabit bir noktanın görüntüsü film üzerinde kalacak şekilde, zıt yönlerde hareket ettirilir. Eğer hareket doğrusal ise, düzlemdeki bütün noktalar film üzerindeki yerlerini korurlar ve diğer düzlemlerdeki tüm noktalar lekelenir ya da bulanık hale gelir. Günümüzde tomografik görüntüler, çok sayıdaki X-ışını demetinin ilgili bölge boyunca birçok farklı doğrultudan geçirilmesiyle elde edilir.

Organ yapılarının ve fonksiyonlarının incelenmesinde SPECT ve PET gibi görüntüleme yöntemleri kullanılmaktadır. Bilgisayar Emisyon Tomografisine (BET), pozitron ile yapılan ve çift fotonun oluşturduğu incelemelerden ayırmak için tek foton sözcüğü eklenerek, Bilgisayar Tek Foton Emisyon Tomografisi denilmiştir(SPECT) [28]. SPECT sistemlerinde, gama kamera dedektörü hasta etrafında dönerek belirli açılarda planar görüntüleri toplar. Kesit görüntüleri, organın iki boyutlu görüntülerinden, bilgisayarda gerçekleştirilen işlemler sonucu elde edilir. Organ derinliği boyunca alınan bu kesit görüntülerinin hepsinin incelenmesi sonucu tüm organa (üç boyut üzerinden) ait bilgi elde edilmiş olur.



Resim 2.1. SPECT

Vücudun yoğunluk profilinin çok sayıdaki "tek-boyutlu" izdüşümleri kullanılarak, iki boyutlu bir görüntü oluşturmak mümkündür (Ek.1) Bu çalışma bir bilgisayar gerektirdiğinden ve X-ışını demeti hastayı dairesel bir şekilde taradığından, bu teknik bilgisayarlı eksensel tomografi ya da CT (CAT) olarak adlandırılmıştır. Birkaç saniye içinde tam bir görüntü elde edilebilir. Uzaysal çözme gücü mm mertebesinde ve çok ayrıntılı bir görüntü ortaya çıkarılır [29].

Bir başka görüntüleme tekniği de pozitron emisyon tomografisi olarak adlandırılır (PET). Pozitron yayınlayan izotoplar incelenecek bölgeye verilir ve elektron-pozitron yok olmasını takiben yayınlanan iki 511 keV' lik foton aynı anda gözlenir. Zıt yöndeki foton dedeksiyonu, bozunumun meydana geldiği doğrultunun belirlenmesini sağlar. Böyle çok sayıda, radyoizotopun orijinal dağılımını ortaya çıkarmak ve bölgenin bir görüntüsünü oluşturmak mümkündür (Ek.2).

PET, beyin taramaları durumunda, CT' ye göre birçok avantaj sağlar. CT (CAT) taraması sadece doku yoğunluğunu gösterirken, PET taraması ise kan akışında olduğu gibi dinamik etkileri ortaya çıkarır[30]. Bir PET tarayıcı tek bir makine içinde bir CT(CAT) tarayıcı ile birleştirilebilir. Burada metabolik bilgi PET tarayıcıdan, anatomik bilgi ise CT' den elde edilir. PET görüntülerinin yorumlanmasında vücudun aynı bölgesinin eşzamanlı anatomik bilgisi çok önemlidir [30].

CT(Bilgisayarlı Eksensel Tomografi) ile vücudun kesit şeklinde görüntüleri elde edilir. Kullanılan radyasyon enerjisi X-ışınıdır. Yöntemde X-ışını çok iyi sınırlandırıldığı için saçılma en aza indirilmiş, dolayısıyla doku yoğunluk farkları daha belirgin hale gelmiştir[28]. Bilgisayarlı tomografi, tüm vücudu görüntüleyebilme özelliğine sahip olduğu için, birçok hastalığın teşhisinde kullanılmaktadır.



Resim 2.2. Pet/Ct simülatör

Tedavide nükleer radyasyonların esas kullanım amacı, kanser tümörü veya süper aktif tiroid bezi gibi, vücuttaki istenmeyen veya iyi çalışmayan dokuların yok edilmesidir. Bu etki, nükleer radyasyonların iyonlaştırma yeteneğinden kaynaklanmaktadır.

Radyoaktif çekirdeklerin çoğu teşhis amacıyla çok miktarda kullanılırken, küçük bir kısmı da radyasyon kaynağı olarak tedavi amacıyla kullanılmaktadır. Bir radyoaktif çekirdeğin insan üzerinde teşhis ve tedavi amacı ile uygulanmasını sağlayan kimyasal şekline Radyofarmasötik (radyoaktif ilaç) adı verilir [31]. Radyofarmasötikler, ilgili organın yeri ve şeklini tespit etmek, organa ait hücrelerin ömür sürelerini belirlemek, kan hacmini belirlemek, organda bir tümör veya kist bulunup bulunmadığı konusunda bilgi edinmek, herhangi bir tümör dokusunu tedavi etmek ve metastatik oluşumun önlenmesi amacıyla kullanılır.

Radyofarmasötik, teşhis ve tedavi amaçlı hastaya verildiğinde hastada fizyolojik bir bozukluğa neden olmayan radyoaktif bir bileşiktir. Radyofarmasötikler, hastalıkların teşhisinde, organlar ile ilgili fonksiyonel bilgi elde edilmesinde, tümör dokularının teşhisinde ve kanser tedavisinde son derece önemlidir. Nükleer tıpta gama fotonu yayınlayan radyoaktif çekirdekler, uygun kimyasallar ile (radyofarmasötik) birleştirilerek kullanılır.

Organdan yayınlanan gama fotonlarının dedeksiyonu ve işlenmesi ile organ görüntüleri elde edilir. Bu görüntüler organın fonksiyonel işlevine ilişkin bilgi verirler. Radyoaktif çekirdeklerin bir kimyasal ile birleştirilmeden saf olarak kullanıldığı uygulamalarda bulunmaktadır.

Nükleer tıpta görüntüleme, ilgili organı radyoaktif kaynak haline getirecek radyofarmasötiğin hastaya uygulanmasını takiben, salınan ışınların etkin bir dedeksiyon sistemi tarafından algılanması ile elde edilir. Bu amaçla konvansiyonel gama kameralar ve bilgisayarlı tek foton emisyon tomografileri (SPECT) ile pozitron emisyon tomografileri (PET) kullanılmaktadır.

Nükleer tıpta kullanılan radyonüklitlerin (radyoaktif çekirdeklerin), hastaya en az doz ile en iyi kalitede görüntülerin elde edilmesini sağlayacak özellikte olması gerekir [32]. Radyofarmasötik izleme tekniğinde, hastaya verilen radyasyonun dozu, dedeksiyon için uygun olan enerjisi, moleküle bağlı kalışı,

izotopun yarı-ömrü ve işaretli maddenin metabolik geleceği gibi özellikleri göz önünde bulundurulur.

Radyoaktif çekirdeklerin insana verilmesinden sonra bunların özellikle bazı organlara giderek biriktikleri saptanmıştır. Örneğin; $^{60}_{27}\text{Co}$ kanser hücrelerinin yok edilmesinde, $^{64}_{29}\text{Cu}$ PET ve SPECT taramasında, $^{85}_{38}\text{Sr}$ kemik hastalıkları ve beyin görüntülemede, $^{90}_{39}\text{Y}$ göğüs ve karaciğer kanser tedavisinde yaygın olarak kullanılan radyoizotoplardır. İncelenen radyoaktif çekirdeklerin özellikleri ve nükleer tıptaki kullanım alanları ayrıntılı bir şekilde (Çizelge 2.1 ve 2.2) verilmiştir.

Çizelge 2.1. Bazı radyoaktif çekirdeklerin özellikleri ve nükleer tıptaki kullanım alanları

Radyoaktif çekirdek	Radyofarmasötik kimyasal şekli	Radyasyon	Yarı-ömrü	Nükleer Tıptaki kullanım alanları
$^{42}_{19}\text{K}$	Potasyum Klorür	Beta Gama	12.321 saat	Potasyum elektrolitinin ölçülmesinde
$^{45}_{20}\text{Ca}$	Kalsiyum Klorür	Beta	162.61 gün	Kalsiyum metabolizması
$^{51}_{24}\text{Cr}$	Sodyum Kromat	Gama	27.70 gün	Dalak sintigrafisinde Kan hacmi tayinininde Alyuvarların ömrünün belirlenmesinde Bağırsakta proteik kaybın araştırılmasında Mideve bağırsak hastalıklarında Böbrek hastalıklarında Hematolojide Medikal uygulamalarda Hücre etiketleme ve dosimetride
$^{55}_{26}\text{Fe}$	Demir Sitrat	Beta Gama	2.73 yıl	Eritropez incelemesinde Mide ve bağırsak hastalıklarında Medikal uygulamalarda
$^{57}_{27}\text{Co}$	Kobalt	Gama	271.74 gün	Nükleer tıpta radyoizotop doz kalibratörleri, gama kameraları ve ölçüm sistemlerinde kaynak olarak Kalite kontrol dedektörü ve gama ışını dedektörlerinin kalibrasyonunda Endoterapide SPECT sistemleri için kalibrasyon kaynağı olarak Organ boyutunu tahmin etmekte bir markır olarak kullanılır in-vitro teşhis kitlerinde Mide ve bağırsak hastalıklarında
$^{58}_{27}\text{Co}$	Kobalt	Beta Gama	70.86 gün	Mide ve bağırsak hastalıklarında
$^{60}_{27}\text{Co}$	Kobalt	Beta Gama	5.40 yıl	Eksternal radyoterapi uygulamalarında Kanser hücrelerini yok etmekte Cerrahi malzemeyi dezenfekte etmekte

Çizelge 2.2. Bazı radyoaktif çekirdeklerin özellikleri ve nükleer tıptaki kullanım alanları

Radyoaktif Çekirdek	Radyofarmasötik kimyasal şekli	Radyasyon	Yarı-ömrü	Nükleer Tıptaki kullanım alanları
$^{64}_{29}\text{Cu}$	Bakır sitrat	Beta Gama	12.70 saat	Bakır metabolizmasının incelenmesi Tümörün yapısında bulunan dokuların görüntülenmesi Beyin ve kalbin görüntülenmesi Protein ve peptitlerin etiketlenmesi PET taramasında Planar görüntüleme SPECT taraması Dozimetri çalışmalarında Myocardial kan akışının belirlenmesinde Kolonorektal kanser tedavisinde Mide ve bağırsak hastalıklarında
$^{75}_{34}\text{Se}$	Sodyum Selenit	Gama	120.0 gün	Beyin çalışmalarında izleyici olarak Sintigrafi görüntülenmesinde Sindirimle ilgili enzimlerin üretilmesinde Mide ve bağırsak hastalıkları Paratiroidin incelenmesi Pankreasın incelenmesi Tümörlerin lokalizasyonu
$^{79}_{34}\text{Se}$	Sodyum Selenit	Beta	2.95 yıl	Biyomedikalde izleyici olarak
$^{82}_{35}\text{Br}$	Sodyum Bromür	Beta Gama	35.28 saat	Hücre dışı sıvı miktarı tayininde Mide ve bağırsak hastalıklarında Planar görüntüleme, SPECT veya PET
$^{81}_{36}\text{Kr}$	Kripton	Gama	2.29 yıl	Akciğer fanksiyonları ve görüntülenmede Akciğer hastalıklarının erken teşhisinde Astımlı hastalarda
$^{85}_{38}\text{Sr}$	Stronsyum	Gama	64.84 gün	Kemik lezyonlarının bulmasında Beyin görüntülemeye Mide ve bağırsak hastalıklarında Kemik hastalıklarında
$^{90}_{39}\text{Y}$	Yttrium	Beta	64.05 saat	Monoklonal antikorlarda, Hodgkins hastalığı ve hepatomanın İnternal terapide Hücresele dosimetri, Eklem iltihabı, Karaciger kanseri, Gastrointestinal adenocarcinomasın tedavisinde.

3. NÜKLEER MODELLER

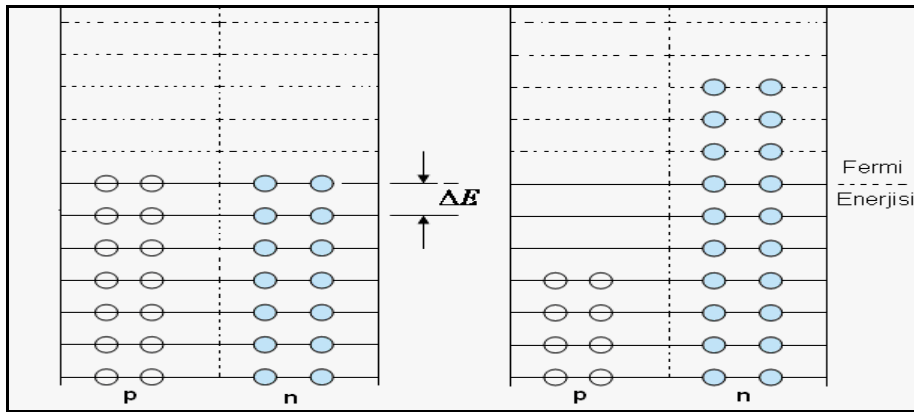
Nükleonların özelliklerini belirlemek ve enerji seviyelerini hesaplamak için, nükleonlar arasındaki saçılmaları incelemek karışık bir matematiksel işlem gerektirir. Bunun yerine, nükleer bilimciler, çekirdeği tanımlayan ve matematiksel hesaplamaları basitleştiren nükleer modeller geliştirmişlerdir. Çekirdek yapısını ve çekirdeklerin özelliklerini açıklayabilmek için ortaya çıkan çekirdek modellerinin temelinde potansiyeller için belirli varsayımlar bulunduğundan, modelin başarısı potansiyel seçiminin doğruluğuna bağlıdır. İlk nükleer modeller, α parçalanmasını ve çekirdek ile nükleonların etkileşmelerini açıklamak için geliştirilmiştir. Daha sonra geliştirilen modeller, yarı klasik ve kuantum mekaniksel olarak ikiye ayrılabilir. Bunlar da kendi içlerinde bağımsız parçacık modeli ve kolektif modeller olarak ikiye ayrılırlar. Bağımsız parçacık modelleri Fermi gaz modeli ve nükleer shell (kabuk) modelidir. Kolektif Modelleri ise sıvı damla modeli ve kolektif (birleşik) modeldir [33].

3.1. Fermi Gaz Modeli

Fermi gaz modeli, çekirdek potansiyeli içindeki nükleonların belirli düzeylere sahip olduklarını ve bu düzeylere belirli açısal momentum öz değerlerinin karşılık geldiğini kabul etmektedir. Bu modelde çekirdek içerisinde bulunan nükleonlar bu düzeyleri sadece serbest oldukları ve çekirdek içinde çarpışma yapmadan hareket ettikleri zaman oluşturabilecekleri kabul edilir.

Bu sistem içindeki tek bir nükleonun düzeyleri, bu nükleonunun dışında kalan diğer bütün nükleonların oluşturduğu ortalama bir potansiyel için Schrödinger denkleminin çözülmesi ile bulunur. Bu modelde, ortalama potansiyelin yanında, bir nükleon çiftinin etkileşmesinin çok önemli olmadığı varsayılır [34]. Çekirdeğe uygulanan Fermi gaz modeli, deneysel kütle formülündeki bazı terimleri, çok yüksek enerjilerdeki nükleon saçılmalarını ve potansiyel kuyunun derinliği hakkında tahminler yapar [35].

Fermi enerjisi, bir sistemin doldurulmuş en yüksek enerji seviyesindeki nükleonun enerjisi olarak tanımlanır. Fermi gazı parçacıkları olan nükleonlar (protonlar ve nötronlar) taban durumunda enerji seviyelerini klasik bir gazın aksine, Pauli dışarlama ilkesine göre minimum enerjiye sahip olacak şekilde doldururlar. Her bir nötron seviyesi (veya bir proton) iki nötron (veya iki proton) içerir (Şekil 4.1) [35].



Şekil 3.1. Fermi gaz modeline göre şematik enerji-seviye diyagramı

Sonuç olarak, kararlı bir çekirdekte, nötronların sayısının protonların sayısından niçin daha fazla olduğu açıklanabilir. Eğer V , çekirdek içindeki elektrostatik potansiyel ise, proton kuyusunun tabanı, nötron kuyusu ile karşılaştırıldığında yaklaşık 1 eV yükselecektir. Bunun sebebi, yüklü parçacıklar olan protonlar arasındaki Coulomb etkileşimden kaynaklanmaktadır. Ancak, proton ve nötronların her ikisi için doldurulmuş en yüksek enerji seviyeleri hemen hemen aynı enerjiye sahiptir. Bu yüzden verilen bir enerji için, bir çekirdek daha fazla nötron seviyesine sahiptir ve bundan dolayı, kararlı bir durumda, nötronlar protonlardan daha fazladır.

Sonuç olarak:

- Fermi gaz modeli potansiyel seçimi ve çekirdeklerin özelliklerinin açıklanmasına yardımcı olur.

- Çekirdek içinde bulunan nükleonlar, nükleer bir hacim içinde çekirdek boyutunda çekici bir potansiyel de serbest olarak hareket etmektedirler.
- Bütün nükleonların, çekirdeğin hacmine eşit bir küçük küresel hacim içinde olduğu varsayılır.
- Nötronlar ve protonlar ayırt edilemediğinden iki bağımsız gaz olarak düşünülür. Bu, her bir seviyenin farklı özelliklerini belirlemek için, sayısal değerlerin tam olarak bulunmasına imkân vermez.
- Nükleon çiftleri arasındaki etkileşmeler ihmal edilir.
- Bu modele göre, nükleonlar enerji seviyelerini Pauli ilkesine göre minimum enerjiye sahip olacak şekilde doldururlar.
- Fermi enerjisi; bir sistemin doldurulmuş en yüksek enerji seviyesindeki nükleonun enerjisi olarak ifade edilir.
- Protonlar arasındaki Coulomb saçılmasından dolayı nötronların ve protonların kuyuları farklı derinliktedirler.

3.2. Sıvı Damla Modeli

Sıvı Damla Modeli, 1936 yılında Niels Bohr tarafından formüle edilmiş ve sıkıştırılamayan nükleer sıvı damlası olarak çekirdeğe uygulanan bir nükleer fizik modelidir. Bu modelde; nükleonların sıvı damlasında bulunan moleküller gibi birbirleri ile kuvvetli bir etkileşme halinde oldukları hayal edilmektedir. Çekirdek içindeki nükleonların De Broglie dalga boyları nükleonlar arası ortalama uzaklıktan daha büyük olduğundan, çekirdekteki durum klasik bir sıvıya değil, kuantumlu bir sıvıya benzetilir [36].

Sıvı damla modeli, bir sıvı damlasının özelliklerine benzer bir şekilde çekirdeğin kolektif özelliklerinin incelenmesinde kullanılan bir model olup, çekirdeğin kütlelerini, bağlanma enerjisini ve çekirdeğin nasıl deforme olduğunu açıklayan kaba bir modeldir. Sıvı damla modeli çekirdeği bir küre olarak kabul eder. Bu yüzden çekirdeğin bağlanma enerjisi aşağıdaki gibi düşünülebilir.

- Çekirdek hacmi, nükleon sayısı A ile orantılıdır.
- Kütle yoğunluğu çekirdek içinde sabittir, bununla birlikte yüzey üzerinde hızla sıfıra gider.
- Her bir nükleon için bağlanma enerjisi yaklaşık olarak sabittir (nükleer kuvvetlerin doyumu).
- Nükleer kuvvet bir nükleon için aynıdır, özel olarak nükleonun proton veya nötron olup olmamasına bağlı değildir (nükleer kuvvetin yük bağımsızlığı).

Sıvı damla modelinde, bağlanma enerjisi üzerinde beş etki vardır. Bunlar kuvvetli nükleer kuvvet tarafından bütün nükleonların bağlanmasına karşılık gelir. Bu beş etki, hacim enerji terimi, yüzey enerji terimi, Coulomb itme etkisi, simetri enerji terimi ve çiftlenim enerji terimi'dir. Bu beş terim birleştirilerek toplam bağlanma enerjisi bulunur (Eş. 3.1).

$$B(A, Z) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - a_{sim} \frac{(A-2Z)^2}{A} + \delta \quad (3.1)$$

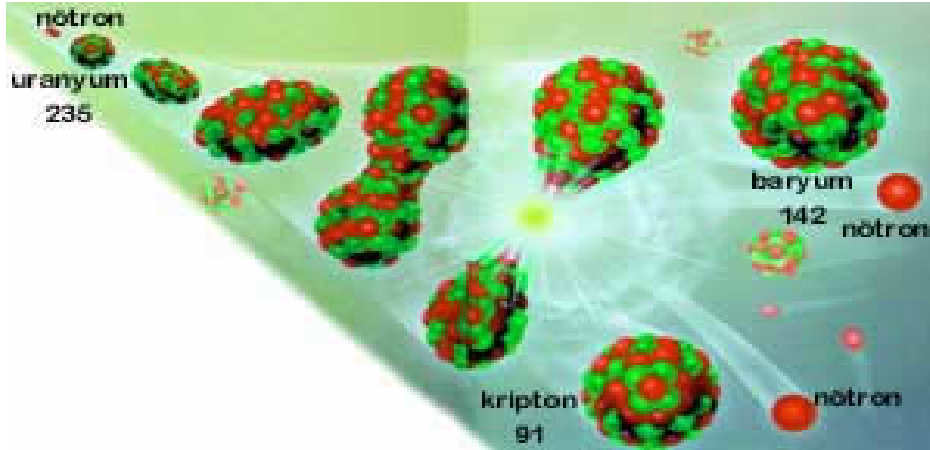
Bağlanma enerjisi için bu ifade kullanılarak deneysel kütle formülünü elde edilebilir (Eş.3.2):

$$M(Z, A) = Zm(^1H) + Nm_n - B(Z, A) / c^2 \quad (3.2)$$

Bu formüldeki sabitler, deneysel verilerle uyuşacak şekilde ayarlanarak elde edilir. Deneysel kütle formülünün önemi, nükleer fiziğe ait herhangi bir yeni veya ilginç bir olayın anlaşılması imkânını vermesi değildir. Daha çok, bağlanma enerjisi gibi bir nükleer özelliğin sistematik davranışını anlamak için nükleer model uygulaması olarak kabul edilebilir olmasıdır. Nükleon başına bağlanma enerjisi ise aşağıdaki gibidir (Eş. 3.3).

$$\frac{B(A, Z)}{A} = a_v - a_s A^{-1/3} - a_c \frac{Z(Z-1)}{A^{4/3}} - a_{sim} \frac{(A-2Z)^2}{A^2} + \delta \quad (3.3)$$

Ancak, sıvı damla modeli, kararlılık koşulu ve açısal momentum gibi çekirdek yapısının ince ayrıntılarının açıklanması için yeterli değildir. Fakat model çekirdek fisyonu olayının nitel olarak açıklanmasında yeterli olmaktadır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Sıvı damlası modeline göre çekirdek fisyonunun şematik görünümü

Sonuç olarak:

- Modelde, çekirdekteki her bir nükleonun çevreleri ile olan etkileşimleri, bir sıvı damlasındaki moleküllere benzetilmekte ve her birinin diğerinin etrafında “dans eder gibi” sıçramalar (titreşimler) yapmakta olduğu varsayılır.
- Çekirdeğin kolektif özelliklerinin incelenmesinde kullanılan bir model olup, çekirdeğin kütlelerini ve bağlanma enerjisini açıklayan kaba bir modeldir.
- Sıvı damla modeli de Shell modeli gibi, çekirdeği bir küre olarak kabul eder.
- Model çekirdek fisyonunu nitel olarak açıklamakta olup, açısal momentum ve kararlılık koşulu gibi çekirdek yapısının ince ayrıntılarını açıklamada yetersizdir.
- Bağlanma enerjisi gibi bir nükleer özelliğin sistematik davranışını anlamak için kullanılabilir.
- Çekirdeğin kolektif özelliklerinin incelenmesinde kullanılan bir modeldir.

3.3. Shell (Kabuk) Modeli

Fermi gaz modeli ve Sıvı damla modeli, kabaca çekirdeği temsil eder. Aynı zamanda, hem Sıvı damla modeli hem de Fermi gaz modeli protonları veya nötronları ya da her ikisi için sihirli sayılar olarak adlandırılan (2, 8, 20, 28, 50, 82 ve 126) belli değerlere sahip çekirdeklerin kararlılığını açıklayabilmektedir. Ancak, bu modeller spin, parite ve manyetik moment gibi çekirdek özelliklerini tam olarak açıklayamamaktadır.

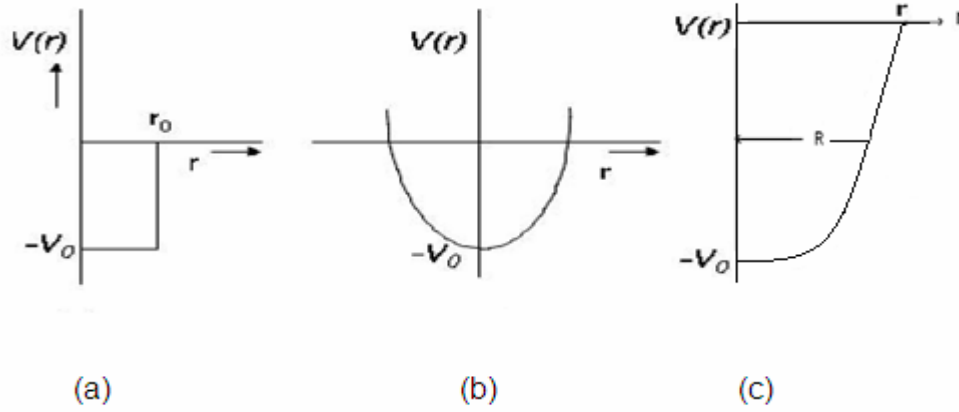
Shell modeli, protonların ve nötronların sihirli sayıları ile birlikte çekirdeğin kararlılığını açıklar. Aynı zamanda, bu model tek-A'lı çekirdeklerin taban durum spin, parite ve dipol momentini büyük bir başarı ile açıklamaktadır [27]. Shell modelinde, çekirdeğin özelliklerinin belirlenmesinde çiftleşmiş nükleonların oluşturduğu kor'un etkisi ihmal edilir. Bu modelde, tek A'lı bir çekirdeğin taban durum özellikleri, A-1 tane nükleonun toplam spini sıfır olacak şekilde çiftleştikten sonra, kalan çiftlenmemiş tek nükleonun kuantum sayıları tarafından belirlenir ve aşağıdaki iki temel varsayım üzerine kurulmuştur:

- 1- Çekirdekte bulunan nükleonlar, bir $V(r)$ potansiyelinde bağımsız olarak hareket ederler. Bu potansiyel, bir nükleona diğer tüm nükleonlardan gelen ortalama etkiyi gösterir ve sadece radyal uzaklığa bağlı olup, tüm çekirdekler için aynıdır.
- 2- Enerji seviyelerinin tümü, Pauli dışarlama prensibine göre nükleonlar tarafından doldurulur.

Çekirdeğin shell modeli, verilen bir nükleonun diğer tüm nükleonlar tarafından biçimlenmiş etkili çekici bir potansiyelde hareket ettiğini varsayar. Çekirdekdeki potansiyeli aşağıdaki gibi sonsuz kare kuyu potansiyeli olarak düşünersek, bir nötron veya bir protonu ayırmak için onu kuyudan dışarı çıkarmaya yetecek enerjiyi, sonsuz büyüklükte sağlamamız gerekir.

$$V(r) = \begin{cases} -V_0 & , r < r_0 \\ 0 & , r \geq r_0 \end{cases} \quad (3.4)$$

Sonsuz kuyu potansiyeli, ortalama R yarıçapından sonra r' ye doğru düzenli olarak azalması gerekirken aniden azaldığından dolayı nükleer potansiyel seçimi için iyi bir yaklaşım değildir (Eş. 3.4). Potansiyel enerjinin birden sıfır olması çok kararlı bir çekirdek olması demektir.



Şekil 3.3. a) Kare kuyu potansiyeli, b) Harmonik osilatör potansiyeli c) Shell modeli potansiyeli

Diğer taraftan harmonik salıncı potansiyeli keskin bir şekle sahip değildir ve yine sonsuz ayrılma enerjisi gerektirir (Şekil 3.3b) [27]. Kare kuyu potansiyeli ve Harmonik osilatör potansiyeli ile tüm sihirli sayılar elde edilemediğinden dolayı, Shell modeli potansiyeli için doğru bir potansiyel değildir. Doğru potansiyel tüm sihirli sayıları vermelidir. Bu problemi ortadan kaldırmak için, bu iki potansiyel arasında bir şekle sahip olan bir potansiyel seçilir (Şekil 3.3c) [27].

$$V(r) = \frac{-V_0}{1 + \exp[(r - R)/a]} \quad (3.5)$$

R ve a parametreleri sırasıyla ortalama yarıçap ve yüzey kalınlığını verir. $R \approx 1.25 A^{1/3}$ fm ve $a=0.524$ fm olarak seçilir. V_0 kuyu derinliği uygun ayrılma enerjilerini verecek şekilde ayarlanır ve 50 MeV mertebesinde dir.

3.4. Kollektif Model

Shell modeli, çekirdeklerin taban durumu spin ve paritelerini açıklamada çok başarılı olsa da, büyük kuadropol momente sahip çekirdeklerin özelliklerini açıklamada yetersiz kalmaktadır. Shell modeline göre; uyarılmış durumlar bir veya daha fazla nükleonun taban durumundan uyarılmış durumlara çıktığı zamanlarda oluşur. Ancak, farklı biçimde oluşturulan ve shell modeli tarafından önceden açıklanamayan durumlar vardır.

Deneysel olarak hesaplanmış kuadropol ve manyetik momentler, çekirdek korunun dikkate alınmadığı shell modeli kullanılarak hesaplanmış olan değerlerden dikkate değer biçimde sapar. Bu nedenle, “Rotasyon modeli” de denilen ve büyük deformasyona uğramış çekirdeklerin nükleonlarının kollektif hareketlerini incelemeye çalışan “Kollektif Model” geliştirilmiştir [34]. Bizim çalışmamızın da temelini oluşturan kollektif model ilk olarak Rainwater (1950) tarafından ileri sürülmüş olup, modelin gelişimi Bohr ve Mottelson (1969-1975) tarafından yapılmıştır [37-38]. Bohr ve Mottelson’a göre; uyarılmış durum, manyetik moment ve kuadropol moment sadece kapalı kabuk dışındaki nükleonların değil, çekirdeğin özelliklerinin kor ve kor dışında bulunan nükleonların belirlediği fikrine dayanmaktadır. Aynı zamanda bu model, deforme (küresel simetriğe sahip olmayan) ve çift-çift nükleona sahip çekirdeklerin özellikleri ile bu çekirdeklerin kuadropol momentlerini de çok iyi açıklamaktadır.

Kollektif modele göre, shell modelinde olduğu gibi çekirdekte bulunan bütün nükleonlar, gerçek bir $V(r)$ potansiyelinde bağımsız olarak hareket ederler. Fakat shell modeli potansiyelinin aksine kollektif modelde potansiyel, statik küresel simetrik potansiyel değildir. Bu potansiyel, kor etrafındaki nükleon veya nükleonların hareketi sonucunda deformasyona neden olan potansiyeldir [35]. Bu potansiyel, korun küresel simetriğini kaybetmesine ve korun elipsoid bir şekil almasına neden olur.

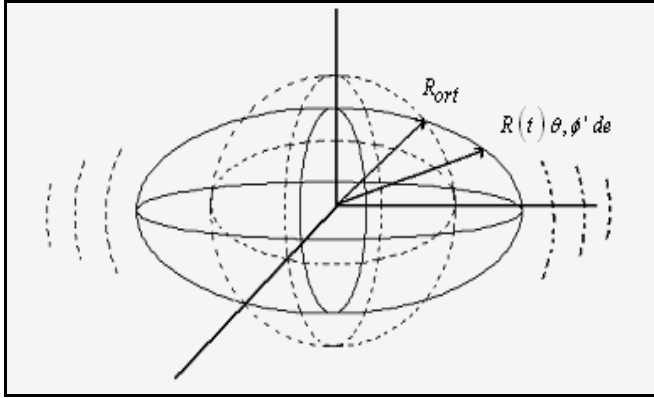
Çekirdeğin şekli, potansiyel tarafından belirlenir. Nükleonların kollektif hareketi, çekirdeğin deforme biçimini koruyan bir dönme hareketi ve denge durumuna yakın bir titreşim hareketi olarak tanımlanır. Titreşim hareketine karşı gözlemlenen birkaç değişim olsa da daha önemli olan dönme hareketidir. Dönme enerji seviyeleri $E_{dön}$, titreşim enerji seviyeleri E_{tit} ile karşılaştırıldığında daha küçüktür.

3.4.1. Nükleer titreşimler

Küçük atom numaralı çekirdeklerde titreşim hareketi kalıcı deformasyon oluşturmazken, büyük atom numaralı çekirdeklerde ise titreşim kalıcıdır ve düzenli bir titreşim vardır. Titreşim hareketi sıvı damla modelindeki gibi düşünülür. Ortalama şekil küresel olmakla birlikte herhangi bir andaki şekil küresel değildir. Nükleer yüzey üzerindeki bir (θ, ϕ) noktasının $R(t)$ koordinatını $Y_{\lambda\mu}(\theta, \phi)$ küresel harmonikler cinsinden belirtmek kolaylık sağlar (Şekil 3.4). Her küresel harmonik bileşeni, $\alpha_{\lambda\mu}(t)$ genliğine sahiptir:

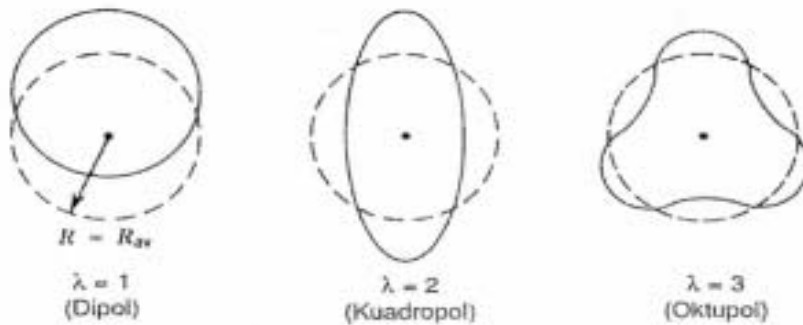
$$R(t) = R_{ort} + \sum_{\lambda \geq 1} \sum_{\mu = -\lambda}^{+\lambda} \alpha_{\lambda\mu}(t) Y_{\lambda\mu}(\theta, \phi) \quad (3.6)$$

$\alpha_{\lambda\mu}$ 'lar tamamen keyfi olmayıp; yansıma simetrisi, $\alpha_{\lambda\mu} = \alpha_{\lambda-\mu}$ eşitliğinin olmasını gerektirir.



Şekil 3.4. Küresel denge biçimli titreşen bir çekirdek. Zamana- bağılı $R(t)$ koordinatı, θ , ϕ doğrultusundaki yüzey üzerinde bir noktayı göstermektedir

Ayrıca nükleer akışkanın sıkıştırılmaz olduğunu varsayarak başka sınırlandırmalar da uygulanır. Sabit ($\lambda=0$) terim, R_{ort} , ortalama yarıçaptır ve $R_0 A^{1/3}$, e eşittir. Tipik bir $\lambda=1$ titreşimi, dipol titreşim olarak bilinir. Bu titreşimde kütle merkezi yer değiştirdiği için bunun nükleer kuvvetler etkisiyle oluşmadığını ve bu nedenle bundan sonraki en düşük titreşim modu olan $\lambda=2$ (kuadropol) titreşim modu ele alınır. Bir çekirdeğin en düşük üç titreşim modu Şekil 3.5' de görülmektedir. Kesikli çizgiler küresel denge şeklini, düz çizgiler ise titreşen yüzeyin herhangi bir andaki biçimini göstermektedir.



Şekil 3.5. Bir çekirdeğin en düşük üç titreşim modu

Kollektif titreşim güçlü bağlanmalardan dolayı $^{124}_{52}\text{Te}$ ve $^{40}_{20}\text{Ca}$ gibi sihirli çekirdeklerde mevcut değildir. Küresel çekirdeklerde kolektif titreşimsel

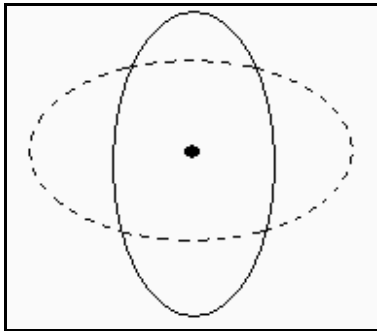
durumların tayini, tek parçacık geçiş terimlerindeki çekirdeklerin enerjisine, açısal momentumuna ve radyoaktif gücüne bağlıdır [27].

Kapalı kabuklar dışındaki yörüngelerde birkaç parçacık ile çekirdek, küresel bir denge şekline sahiptir ve küresel yüzey civarındaki parçacıkların bir titreşim şekli, kolektif şekil oluşturur. Böyle bir çekirdeğin seviye spektrumu, bazı durumlarda bir dönme ince yapısı ilave olmakla birlikte, bu titreşim durumları üzerine kurulur. Bu çekirdek için, kararlı bir deformasyon yok iken, kapalı kabuklardan uzaktaki çekirdeğin durumundaki gibi, statik durumlar artmaz.

En basit titreşimsel yörünge, öz hareketinin nükleer spinine katkısı olmayan, çift-çift çekirdekler için bulundu. Pratikte, farklı seviyeler arasındaki dejenerelik çözülür ve beklenen bir 0^+ taban durumu ve bir 2^+ ilk uyarılmış durumu, ilk uyarılmış durumun ikinci düzey enerjileri ile 0^+ , 2^+ , 4^+ üçlü durumu izlenir. Enerjiler çekirdeğin kapalı kabuklardan olan uzaklığına göre, düzenli olarak değişir [39].

Kuadropol titreşim ($\lambda=2$ titreşimi)

Genel bir durum için yüzeyin şekli, Y_{2m} , $m=\pm 2, \pm 1, 0$ ile tanımlanabilir. Ancak, R, θ 'nin bir fonksiyonu olduğu için $m=0$ 'dır. Çekirdeğin şekli küresel ve elipsel biçim arasında değişir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Kuadropol titreşimi

Elektromanyetik enerjinin bir parçası foton olarak adlandırılır. $\lambda=2$ nükleer titreşiminin birimi bir kuadropol fonondur. En düşük titreşim durumu sadece $J^\pi = 2^+$ 'e sahip bir fonon tarafından oluşturulur.

$$R(t) = R_{avr} + \sum_{\mu=-1}^1 \alpha_{1\mu} Y_{1\mu}(\theta, \varphi) = R_{avr} + \alpha_{22} Y_{22} + \alpha_{21} Y_{21} + \alpha_{20} Y_{20} + \alpha_{2-1} Y_{2-1} + \alpha_{2-2} Y_{2-2} \quad (3.7)$$

$$= R_{avr} + \alpha_{20} Y_{20} \quad \mu \neq 0 \text{ için } \alpha_{2\mu} = 0 \quad (\text{elipsel biçim için}) \quad (3.8)$$

$$= R_{avr} + \alpha_{20} \frac{I}{4} \left(\frac{5}{\pi} \right)^{1/2} (3 \cos^2 \theta - 1) \quad (3.9)$$

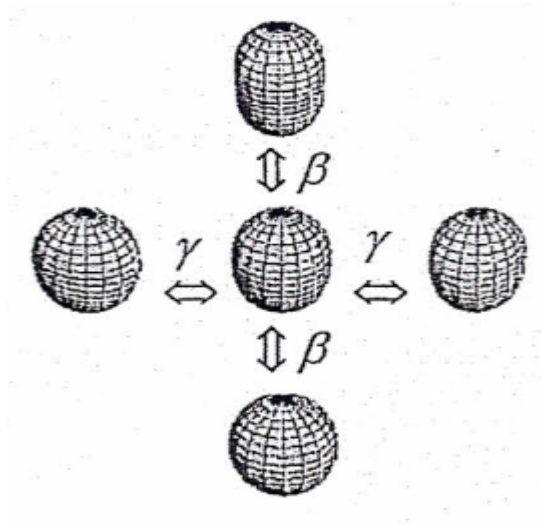
Kuadropol biçimleri, hemen hemen tüm çekirdeklerde baskın titreşimsel özelliklerdir. Kuadropol rezonans, $E \approx 63 A^{-1/3}$ MeV büyüklüğünde bir enerjide bulunur.

Kuadropol titreşim durumları iki kısma ayırabiliriz:

- 1) β – titreşim durumu
- 2) γ – titreşim durumu

β – titreşimi, β deformasyon parametresi ile salınır ve çekirdek silindirik şeklini korur. Yani yüzey simetri eksenini boyunca titreşim gösterir. Amerikan topu şeklinde olup topun uçlarının itilip çekilmesine karşılık gelir.

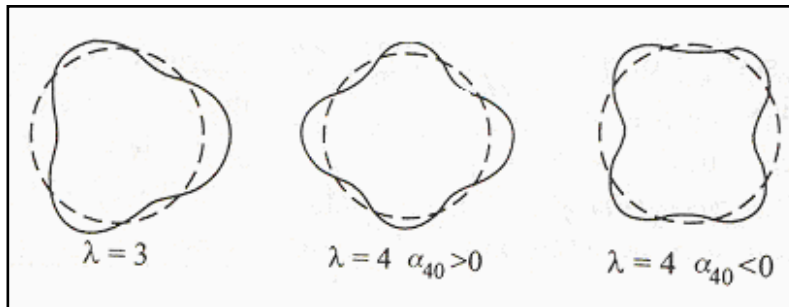
γ – titreşiminde ise topun yan tarafı çekirdeğin itilip çekilmesine karşılık gelir. Yani çekirdeğin yüzeyi simetri eksenine dik olarak titreşir.



Şekil 3.7. β ve γ – titreşim durumu

$\lambda = 3$ Oktupol titreşimi ve $\lambda > 3$ titreşimleri

Kuadropol titreşim modundan sonraki en yüksek titreşim modu , $\lambda=3$ oktupol modudur.



Şekil 3.8. Titreşim enerji seviyeleri

$J^\pi = 3^-$ ile birlikte, $\lambda=3$ oktupol biçimleri pek çok çekirdekte görülebilir (Şekil 3.8). Çok yüksek sıcaklıklarda meydana gelen kuadropol biçimlerinin olduğu kabuk yapılı çekirdeklerde, oktupol durumu çoğunlukla en düşük uyarılmış durumdur.

3.4.2. Nükleer dönme

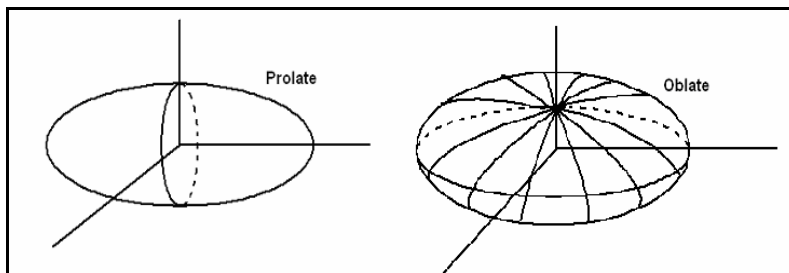
Nükleer dönme hareketi sadece denge şekli küresel olmayan çekirdeklerde gözlemlenebilir. Bu çekirdekler, küresel şekilden önemli ölçüde sapmalara sahip olabilirler ve deforme çekirdekler olarak adlandırılırlar. Bu çekirdeklerin ortak şekilleri dönen bir elipsoittir (Şekil 3.9) ve bu elipsoitlerin yüzeyi aşağıdaki gibi tanımlanır(Eş. 3.10).

$$R(\theta, \phi) = R_{ort} [1 + \beta Y_{20}(\theta, \phi)] \quad (3.10)$$

Yüzey ϕ 'den bağımsız olduğu için çekirdek silindirik simetriye sahiptir. β deformasyon parametresi aşağıdaki gibi hesaplanır(Eş 3.11).

$$\beta = \frac{4}{3} \sqrt{\frac{\pi}{5}} \frac{\Delta R}{R_{ort}} \quad (3.11)$$

Burada, ΔR elipsin büyük yarı eksenini ile küçük yarı eksenini arasındaki farktır. Genellikle $R_{ort} = R_0 A^{1/3}$ alınır. Yaklaşım tamamen doğru değildir, çünkü (Eş. 3.10) ile ifade edilen çekirdeğin hacmi tam olarak $\frac{4}{3} \pi R_{ort}^3$ değildir. Simetri eksenini, θ 'ya göre tanımlanan referans eksenidir (Eş. 3.10). $\beta > 0$ Olduğu zaman çekirdek bir *prolate*, $\beta < 0$ olduğu zaman ise bir *oblate* elipsoit şeklindedir(Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Kalıcı deformasyonlara sahip çekirdeklerin denge şekilleri

Deforme bir çekirdekteki nükleonların hareketi, kollektif dönme veya titreşim olabilir. Çift çift çekirdekler için uyarılmış durumlar, bir nükleon çiftinin bozunumu ile meydana gelir. Bu çok fazla eşleşme enerjisi gerektirir ve çok düşük uyarılmış bütün durumlar için karışık uyarılmalar meydana getirir. Bu karışık uyarılmalar, çekirdeğin dinamik hareketleri, yani titreşim ve dönme kavramları ile açıklanabilir [40].Çift-çift çekirdeklerde dönme durumlarının meydana gelmesi, titreşim durumlarının meydana gelmesinden daha kolaydır [41].

Deforme çekirdeğin dönme hareketi sistemin içyapısına tesir etmez. Küresel bir çekirdeğin dönme spektrumu vardır ama kalıcı değildir. Küresel bir çekirdeğin iç hareketini, titreşim ve tek parçacık hareketi oluşturur. Deforme bir çekirdekte bunlara ilave olarak dönme spektrumu mevcuttur. Yani deforme bir çekirdeğin hareketi üç hareketten meydana gelir.

Çekirdek, çok parçacıklı olduğundan bu üç hareket birbirini etkilemektedir. Titreşim hareketine uygun gelen seviyeler, yüksek ($\approx 2-3 \text{ MeV}$) enerjilerdir. Dönme hareketine uygun gelen enerjiler ise çok düşük ($\approx 400-600 \text{ eV}$) enerjileridir. Deforme çekirdeklerdeki dönme spektrumu ile titreşim spektrumu karşılaştırıldığında, birbirlerine çok uzak olduğu görülür. Bu durumda titreşim ve dönme hareketleri birbirini etkilemez. Dönme hareketinin, tek parçacık hareketine de etkisi yoktur. Çünkü tek parçacık hareketine uygun gelen enerji $\approx 2 \text{ MeV}$ gibi çok yüksek bir enerjidir. Bu da, dönme spektrumu enerjisinin yanında çok yüksek bir enerjidir. Bu nedenle, birbirinden bağımsızlardır [44].Klasik olarak dönen bir cismin kinetik enerjisi aşağıdaki gibidir (Eş. 3.12).

$$E_{dön} = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (3.12)$$

Burada J , cismin eylemsizlik momentidir. Açısal momentum cinsinden $l = J\omega$ ve enerji $l^2 = J\omega^2$ 'dir. l 'nin kuantum mekaniksel değerini alırsak ve l ile açısal

momentum kuantum sayısını gösterirsek dönen bir cismin kuantum mekaniğindeki enerjisi (Eş. 3.13) ile verilir.

$$E = \frac{\hbar^2}{2J} I(I+1), \quad I = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (3.13)$$

I kuantum sayısının artışı, çekirdeğe dönme enerjisi ilave edilmesine karşılık gelir ve nükleer uyarılmış durumlar dönme bandı olarak bilinen bir dizi oluşturur.

Bir çift-Z ve çift-N' li çekirdeğin taban durumu daima $I=0^+$ ' dır ve birinci uyarılma durumu genellikle $I=2^+$ ' dır. Çekirdeğin ayna simetrisi (yani nükleer eksene dik bir düzlem etrafında simetri) bu özel durumdaki dönme düzeyleri dizisini I ' nın çift değerlerine sınırlar. Bu durumda aşağıdaki şekilde çift açısal momentum değerlerini alır (Eş. 3.14).

$$E = \frac{\hbar^2}{2J} I(I+1), \quad I = 0, 2, 4, 6, \dots \quad (3.14)$$

Çift-çift büyük deforme çekirdeklerin gözlemlenen düşük enerji seviyelerini göstermektedir ve çekirdek açısal momentumunun $I = 0, 2, 4, 6, \dots$ değerleri için geçerlidir (Eş. 3.14). Bu enerji seviye artışı pozitif pariteye sahiptir ve taban durumu dönme bandı olarak adlandırılır [27].

4. NÜKLEER ENERJİ SEVİYE YOĞUNLUĞU

Enerji seviye yoğunluğu, belli enerji seviyeleri arasındaki enerji seviyelerinin sayısı olarak tanımlanır. Enerji seviye yoğunluğu hem parçacığın anlaşılması hem de çeşitli reaksiyonlarda gama ışını yayınlanması için önemli bir nicelik olmasının yanı sıra değişik çekirdeklerde (α, α') , (p, α) , (α, p) , (p, n) , (α, n) , (n, n') ve (n, γ) reaksiyonlarının uygulanması, çekirdek spektroskopisinin önemli bir konusu olan enerji seviyeleri yoğunluğunun belirlenmesinde ve sınıflandırılmasında büyük önem taşımaktadır [6]. Uyarılmış çekirdeklerin enerji seviye yoğunluklarının doğru olarak tanımlanması, farklı uyarılma enerjilerindeki nükleer özelliklerin belirlenmesi için bir ölçüttür. Aynı zamanda, farklı uyarılma enerjileri için, seviye yoğunluğunun öğrenilmesi; kanser tedavisinde, medikal radyoizotop taramalarının ortaya çıkarılması gibi birçok biyomedikal alanda ve uzun ömürlü radyoaktif atıkların dönüştürülmesinde önemli bir yere sahiptir [11].

Enerji seviye yoğunlukları ile ilgili ilk çalışmalar Bethe (1936) teorisine dayanmaktadır [1]. Bethe, birbiri ile etkileşmeyen parçacıkların oluşturduğu Fermi gaz sisteminin ortalama enerjisi ile entropisi arasındaki termodinamik ilişkileri dikkate alarak çekirdek enerji seviyeleri yoğunluğunu hesaplamıştır. Bu teoriye göre çekirdekte protonlar ve nötronlar temel halde tek-tek düşük enerji seviyelerini doldururlar ve herhangi bir uyarılma halinde yukarı seviyelere çıkarlar. Daha sonra bu termodinamik ilişkileri genelleştirerek enerji seviyeleri yoğunluğu ile ilgili hesaplamalar yapılmıştır [22-23]. Bu çalışmalarda, atom çekirdeğinin uyarılma enerjisi termodinamik sıcaklığın karesi olarak dikkate alınmış olup [1,22-23], nükleer uyarılma enerjilerinin eş aralıklı olduğu fikri temel alınmıştır [24]. Temelde bütün bu hesaplama metotları Fermi gaz modeline dayanmakta olup, bu hesaplamalarda dikkate alınmayan ilave etkiler Hurwitz ve Bethe tarafından, kapalı kabuklu çekirdeklere yakın ve temel seviyelerinde bulunan çift parçacıklı sistemler için çiftlenim enerjisine karşılık gelen karakteristik Bethe-Hurwitz parametresi ilave edilerek çözülmeye

çalışılmıştır [25]. Daha sonra eksiklikleri hissedilen tek-parçacıklı seviye yoğunluğu parametresinin proton ve nötron ortalama spinlerine bağımlılığı[18], çekirdeğin uyarılma enerjisine bağımlılığı [26], nükleer maddenin uyarılmasında rol oynayan kollektif etkileri ve hatta süper iletkenlik gibi etkiler modele dahil edilmeye çalışılmış [26], ancak, mevcut modelin daha karmaşık bir hal almasına neden olunmuştur.

Bu karışıklık basit fiziksel bir modelin kullanılması ile kısmen ortadan kalkması sağlanmıştır [5]. Bu çalışmada nadir toprak elementleri ve aktinitler bölgesindeki deforme ağır çift-çift çekirdeklerin modifiye edilen çekirdeklere uygunluğu test edilmiştir. Daha sonraki çalışmalarında da aynı modelin deforme tek A' lı ve tek-tek çekirdekler için uygunluğu gösterilmiştir [6]. Deforme çekirdeklerin enerji spektrumları kollektif modlarla tanımlanır. Bu nedenle, çekirdeklerin enerji spektrumları temel ve çeşitli uyarılma bandları ile karakterize edilir. Tek-tek ve tek-A' lı çekirdeklerin temel ve çeşitli uyarılma bandları da çift-çift çekirdekler gibi benzer özellikler taşımakta ve bu çekirdeklerde tek parçacığın uyarılma enerjisi kollektif uyarılma bandlarının temelini oluşturmaktadır. Enerji seviye yoğunluğu, uyarılma enerjisi ile birlikte hızlı bir şekilde artış göstermekte olup, uyarılma enerjisi MeV bölgesine çıktığında nükleer yörüngenin karmaşıklığının arttığı bilinmektedir. Bu bölgedeki seviyeler arasındaki aralıklar, taban durumuna yakın olan bölgelerdeki aralıklara göre önemli ölçüde azalmaktadır. Bu azalma, yaklaşık olarak gittikçe artan bir azalmaya ya da uyarılmaya ya da uyarılma enerjisinin oldukça yüksek bir değeriyle ters orantılı bir azalmaya sahiptir [33].

Enerji seviye yoğunluğunun incelenmesinde, uygulama enerjisi ile birlikte seviye yoğunluk parametresi terimininde dikkate alınması gerekmektedir. Bu parametrenin kendisi, kabuk etkisine bağlı olarak uyarılma enerjisi ile birlikte değişiklik gösterir. Çekirdek seviyeleri yoğunluğu ile ilgili enerji seviyeleri yoğunluğu parametreleri, enerji seviyeleri aralığı, uyarılma enerjisinin nötron bağlanma enerjisine yakın değerleri için olup s-dalgali nötron rezonans verileri olarak adlandırılır [1]. Bu verilerin değerlendirilmesi Bethe teorisine ve bu teori

üzerinde yapılan düzeltmelere dayanır [18,2]. Nötron bağlanma enerjisine yakın herhangi bir uyarılma enerjisindeki enerji seviyeleri kollektif dönme ve kollektif titreşim gibi farklı karakterlere sahiptir. Bu özellikler çift-çift, tek-tek ve tek A' lı çekirdeklerde daha açık bir şekilde görülmektedir. Bu çekirdeklerde düşük enerji seviyeleri kollektif dönme, kollektif kuadropol ve oktopul titreşim yöntemleri ile uyarılmış olabilirler.

4.1. Enerji Seviye Yoğunluğu Parametresinin Hesaplanması

Herhangi bir çekirdeğin uyarılma enerjisi U , toplam açısal momentumu I olmak üzere nükleer seviye yoğunluğu aşağıdaki gibi ifade edilir (Eş. 4.1) [1, 2] .

$$\rho(U, I) = \frac{\sqrt{\pi}}{12} \frac{\exp(2\sqrt{aU})}{a^{1/4} U^{5/4}} \frac{(2I+1) \exp\left[-(2I+1)^2 / 2\sigma^2\right]}{2\sqrt{2\pi} \sigma^3} \quad (4.1)$$

Burada; a : enerji seviye yoğunluk parametresi ve σ : spin dağılım parametresi olup, (Eş.4.2) gibi tanımlanır.

$$a = \frac{\pi^2}{\sigma} g(\varepsilon_f), \quad \sigma^2 = g \langle m^2 \rangle t \quad (4.2)$$

Burada; $g(\varepsilon_f)$:Fermi enerji seviyesindeki tek parçacıkların yoğunluğu, $\langle m^2 \rangle$: magnetik kuantum sayısının karesinin ortalaması, t : Fermi gaz modelindeki çekirdeklerin termodinamiksel sıcaklığıdır(Eş. 4.3).

$$g(\varepsilon_f) = \frac{3}{2} \frac{A}{\varepsilon_f}, \quad \langle m^2 \rangle = 0,146 A^{2/3} \quad (4.3)$$

Burada A ; çekirdeğin kütle numarasıdır. Deneysel gözlemler, çekirdeğin açısal momentumu I ' nın farklı yönelmelerini belirleyemediği için, enerji seviyelerinin

gözlemlenen yoğunluğu daha kullanışlı olup aşağıdaki biçimde ifade edilir (Eş. 4.4) [1,2].

$$\sum \rho(U, I) = \frac{\pi^2 \exp(2\sqrt{aU})}{12 a^{1/4} U^{5/4}} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \quad (4.4)$$

$$\rho(U) = \frac{a}{12\sqrt{2}(0,298A^{1/3})(aU)^{3/2}} \exp(2\sqrt{aU}) \quad (4.5)$$

Bethe teorisi, çekirdeğin uyarılmasında çekirdek parçacıklarının kolektif hareketlerini dikkate almamaktadır. Oysa çekirdek hareketlerinde kolektif doğaya sahip enerji seviyelerinin varlığı ihmal edilemez bir gerçektir. Enerji seviyeleri yoğunluğunun hesaplanmasında çekirdeğin kolektif hareketlerini dikkate alan bazı çalışmalar yapılmıştır [26,43,44,46]. Ancak bunlar karmaşık denklemler içerdiğinden kullanımı kolay değildir.

Nadir toprak ve aktinit elementler bölgesindeki çekirdekler, kendilerinin taban durumlarında kararlı deformasyona sahiptirler ve kolektif hareket yapabildiklerinden dolayı enerji spektrumlarına sahiptir [38,47]. Çift-çift çekirdeklerin uyarılması halinde dönme enerjisi aşağıdaki gibi ifade edilir (Eş. 4.6) [38].

$$E_{rot}(I, K) = \frac{\hbar^2}{2} \left[\frac{I(I+1)}{J_0} + \left(\frac{1}{J_3} - \frac{1}{J_0} \right) K^2 \right] \quad (4.6)$$

Burada I ve K, sırasıyla bir çekirdeğin toplam açısal momentumu ve açısal momentumun simetri eksenindeki izdüşümüdür. J_0 eksensel simetriye sahip çekirdeğin simetri eksenine dik bir eksen etrafındaki eylemsizlik momenti, J_3 ise, simetri eksenine göre olan eylemsizlik momentini karakterize etmektedir. Çekirdek yüzeyinin kuadropol titreşim yapması göz önüne alınırsa, K açısal momentumunun sıfır olması gerekir. Bu nedenle $J_3 = 0$ alınırsa, dönme kinetik enerjisi aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$E_{rot} = \frac{\hbar^2}{2J_0} I(I+1), I=0, 1, 2, 3, 4, \dots \quad (4.7)$$

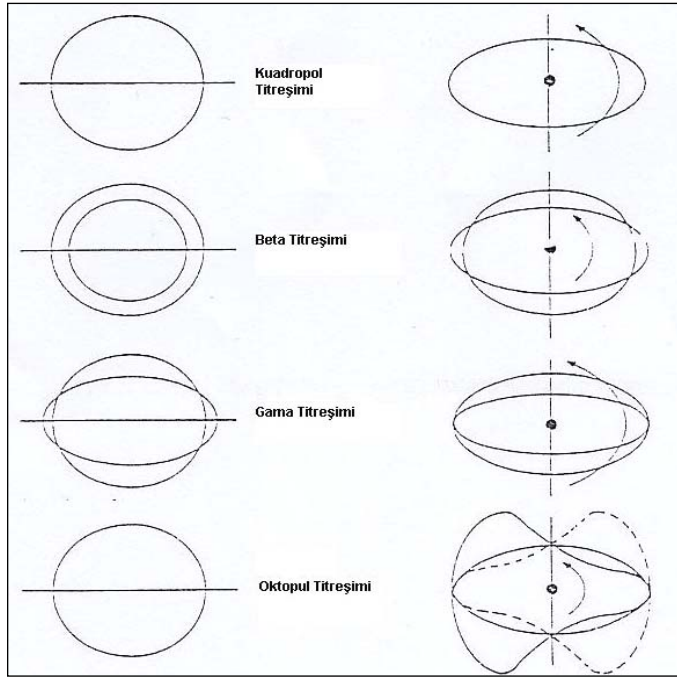
Bu bağıntı, dönen bir cismin kuantum mekaniğindeki enerjisini verir. I kuantum sayısının artışı, çekirdeğe dönme enerjisi ilave edilmesine karşılık gelir. Bu enerji seviye artışı pozitif pariteye sahiptir ve taban durumu dönme bandı olarak adlandırılan bir dizi oluşturur. Bir çift-Z ve çift-N'li çekirdeğin taban durumu daima bir 0^+ durumudur ve bu çekirdekler için $K=0$ 'dır. Çekirdeğin ayna simetrisi, bu özel durumdaki enerji öz değerlerinin $0^+, 2^+, 4^+, 6^+, \dots$ şeklinde olmasını, yani I 'nın çift değerler almasını sağlar. Bu durumda, aşağıdaki şekilde çift açısal momentum değerlerini alır (Eş.4.8).

$$E_{rot} = \frac{\hbar^2}{2J_0} I(I+1), \quad I = 0, 2, 4, 6, \dots \quad (4.8)$$

Bu denklem, çift-çift büyük deforme çekirdeklerin gözlemlenen düşük enerji seviyelerini göstermektedir. Küresel olmayan çift-çift çekirdeklerde de β ve γ olarak bilinen uyarılmış bantlarda gözlemlenen enerji seviyeleri kolektif doğaya sahiptir [38]. β (titreşimlerinin) bantlarının simetri eksenleri etrafında açısal momentumları yoktur. Bu nedenle kuantum sayısı $K=0$ olan kolektif titreşimlerle tanımlanmaktadır. Bu bandın enerji seviyeleri $0^+, 2^+, 4^+, 6^+, \dots$ şeklinde düzenlenmiş olup band başlangıcı w_β titreşim frekansı ile oluşan $\hbar w_\beta$ enerjili 0^+ seviyesidir. Beta titreşim hareketi, γ parametresinin sıfır değerinde sabit kalarak β 'nın zamanla değişmesini verir.

γ bandı (titreşimleri) ise, oldukça düşük uyarmalar olup, bu titreşim sırasında deformasyon parametresi sabit kalır ve gamma simetri eksenini etrafında titreşir. Kuantum sayısı $K=2^+$ olan kolektif titreşimlerle tanımlanmaktadır. Bu bandın enerji seviyeleri $I = 2^+, 3^+, 4^+, 5^+, \dots$ şeklinde düzenlenmiştir. γ - titreşimlerinde

silindirik simetri bozulmaktadır. Yani; çekirdek bir amerikan futbol topu şeklindedir. β titreşimleri topun uçlarının itilip çekilmesine karşılık gelir. γ titreşimleri ise topun yan tarafının itilip çekilmesine karşılık gelir(Şekil 4.1).



Şekil 4.1.Deforme çekirdeğin ortak hareketinin titreşim şekillerinin gösterilmesi

Tek A' lı deforme çekirdeklerde gözlemlenen enerji seviyelerinin basit olarak ifade edilmesi eksensel simetrik çift-çift deforme bir kordaki tek nükleonun çiftlenimine bağlıdır. Verilen bir K değeri için dönme bandı ve açısal momentum değerleri, $I=K= \Omega$, $K+1$, $K+2$, ...olarak ifade edilir. K ve Ω sırasıyla, toplam açısal momentumun simetri eksenini üzerindeki izdüşümü ve tek nükleonun açısal momentumunun simetri eksenini üzerindeki yansıması olup, aşağıdaki enerji seviye aralıklarına sahiptir (Eş.4.9) [48].

$$\Delta E(I, K) = \frac{\hbar^2}{2J_0} [I(I+1) - K(K+1)] \quad (4.9)$$

Deforme tek- tek çekirdeklerin enerji bandları birçok durumda dönme band yapısı ile tanımlanmaktadır. Bu çekirdeklerdeki kuantum sayısı K , $K=|\Omega_p \pm \Omega_n|$ olarak yazılır. Ω_p , Ω_n , sırasıyla proton ve nötronun simetri eksenini üzerindeki açısal momentumlarının yansımasıdır. K ' sı belli olan her bir band, modelinin proton ve nötronunun içyapısı üzerine kurulmuştur [48]. Bu durumda, enerji seviyeleri yoğunluğunu uyarılma enerjisine bağlı olarak aşağıdaki gibi yazabiliriz (Eş.4.10).

$$\rho(U) = \sum \alpha_i \rho_i(U) \quad (4.10)$$

$$\sum \rho = \rho_{taban} + \rho_{oktopul} + \rho_{beta} + \dots$$

Burada; $\rho(U) \rightarrow i$. uyarılma yöntemine bağlı kısmi enerji seviyeleri yoğunluğu, a_i , ağırlık katsayısıdır ve $\sum_i a_i = 1$ şartına uymaktadır. Burada, enerji seviye yoğunluk parametre hesaplamalarında, kollektif uyarılma yöntemlerini dikkate alan bir ifadeyi kullanmak için, çekirdeklerin önemli bir özelliği olan “uyarılmış enerji seviyelerinin eş aralıklı” olma özelliğinden yararlanıldı. Çift-çift çekirdeklerin uyarılmış bandları için simetri özelliğini tanımlamak için $E_1(I_1^\pi) - E_0(I_0^\pi)$ “birim enerjisini” seçebiliriz. Burada $E_0(I_0^\pi)$, spini I_0 ve paritesi π olan en aşağı seviyenin enerjisi, $E_1(I_1^\pi)$ ise uygun kuantum sayıları I_1 ve π olan ve $E_0(I_0^\pi)$ seviyesi üzerinde birinci uyarılma seviyesi enerjisidir. Uyarılmış enerji bantlardaki enerji oranları hesabında, temel bandlar için verilen oranların yerine, genel olarak aşağıdaki gibi tanımlanabilir (Eş.4.11).

$$R_n \equiv \frac{E_n(I_n^\pi) - E_0(I_0^\pi)}{E_1(I_1^\pi) - E_0(I_0^\pi)} \quad n = 1, 2, 3, 4, \dots \quad (4.11)$$

Bu durumda deneysel veriler ($n = 1, 2, 3, 4, \dots$) dikkate alındığında aşağıdaki gibi ifade edilir (Eş.4.12) [49].

$$R_1; R_2; R_3; R_4; \dots = 1:r; 2r; 3r; \dots \quad (4.12)$$

Burada, $R_1; R_2; R_3; R_4; \dots$, uygun bir bandın ayrılma enerji birimine göre ardışık seviye enerjilerinin oranıdır.

$$r \equiv R_2 = \frac{E_2(I_2^\pi) - E_0(I_0^\pi)}{E_1(I_1^\pi) - E_0(I_0^\pi)} \quad (4.13)$$

Eş.4.12, Eş.4.13 gibi tanımlanmakta olup, değişik enerji bandları için bu oran değeri 2 ile 3,3 arasında olmaktadır. Buna bağlı olarak herhangi bir i'inci bandın enerji seviye yoğunluğu aşağıdaki gibi ifade edilir (Eş.4.14) [5,6].

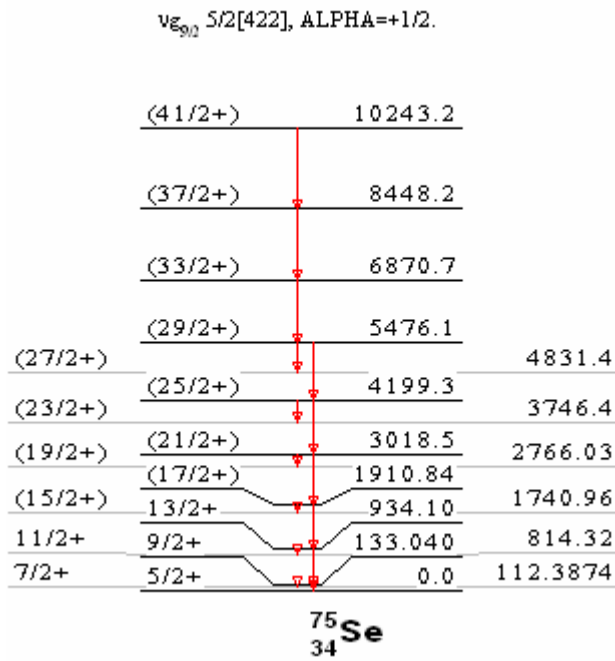
$$\rho_i(U, \varepsilon_{0i}) \cong \frac{\pi^2 a_{0i}}{24\sqrt{3} (a_{0i} U)^{\frac{3}{2}}} \exp\left(2\sqrt{a_{0i} U}\right) \quad (4.14)$$

$$a_{0i} = \frac{\pi^2}{6 \varepsilon_{0i}} \quad (4.16)$$

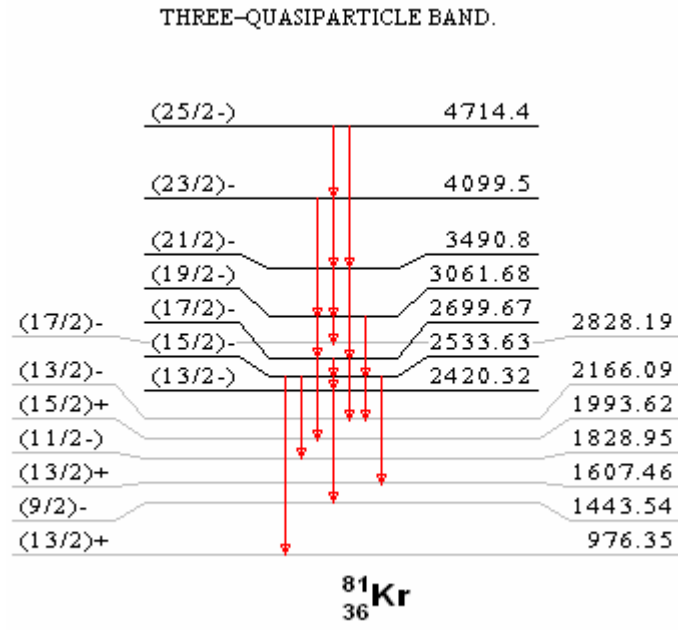
Burada, $a; \varepsilon_{0i}$ birim enerji ile birlikte i'inci banda karşılık gelen kollektif seviye yoğunluk parametresidir ve bu parametre birim enerji aralığına, ε_{0i} , düşen enerji seviyelerinin sayısını verir [5,8]. Deforme ağır çekirdeklerde olduğu gibi, deforme hafif çekirdekler için de birim enerjiler, taban durumu, β ve oktopul bantları için sırasıyla, $\varepsilon_{0TD} = E(2^+)$, $\varepsilon_{0\beta} = E(2^+) - E(0^+)$, $\varepsilon_{0OCT} = E(3^-) - E(1^-)$ şeklinde tanımlanır.

Tek- A' lı ve tek-tek çekirdeklerde birim enerji, ilk uyarılmış durum enerjisi veya verilen K kuantum sayısı ile birlikte birinci ve ikinci uyarılmış durumlara karşılık

gelen bandları ayırma enerjisidir. Bu çalışmada da kollektif model dikkate alınarak elde edilen Eş.4.16 kullanılmış, çalıştığımız hafif deforme çekirdeklerin enerji spektrumlarından yararlanılarak farklı uyarılma bandları için ε_{0i} birim enerji değerleri elde edilmiş ve a_0 parametre değerleri belirlenmiştir. Bazı çekirdeklerin enerji bantları ve enerji spektrumları örnek olarak verilmiştir (Şekil 4.1, Şekil 4.2)



Şekil 4.2. $^{75}_{34}\text{Se}$ Çekirdeğinin taban durum bandı



Şekil 4.3. $^{81}_{36}\text{Kr}$ Çekirdeğinin oktopul titreşim bandı

5.SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, nükleer tıpta kullanılan ve nükleer spektrumları gözlemlenen bazı hafif deforme radyoaktif çekirdeklerin(^{45}Ca , ^{51}Cr , ^{55}Fe , ^{60}Co , ^{64}Cu , ^{75}Se , ^{79}Se , ^{81}Kr , ^{82}Br , ^{85}Sr , ^{90}Y) nükleer seviye yoğunluk parametreleri, farklı uyarılma biçimleri kullanılarak hesaplanmıştır.

Nükleer seviye yoğunluk parametrelerinin hesaplanmasında kullanılan radyoaktif çekirdeklerin spektrumları Isoexp (ENDSF, 2003) [49] adlı bir bilgisayar programından elde edildi ve yine bu program kullanılarak radyoaktif çekirdeklerin detaylı band analizleri yapıldı.

İncelenen radyoaktif çekirdeklerin (Çizelge 5.2 ve 5.3) farklı kolektif uyarılma bantlarının nükleer seviye yoğunlukları, uygun bir bandın ardışık seviye enerjilerinin oranı (Bkz. Eş.4.12) ile yaklaşık olarak uyum sağlamaktadır. Bu nedenle, (Eş.4.16) ilgili seviye yoğunluk parametrelerinin belirlenmesi için kullanılabilir. Çalışmamızda, kütle numarası $40 < A < 100$ arasında olan bazı deforme radyoaktif çekirdekler için farklı uyarılma bandları, diğer çalışmalardan elde edilen veriler a ve hesaplanan seviye yoğunluk parametreleri a_0 , Çizelge 5.1’ de verilmektedir.

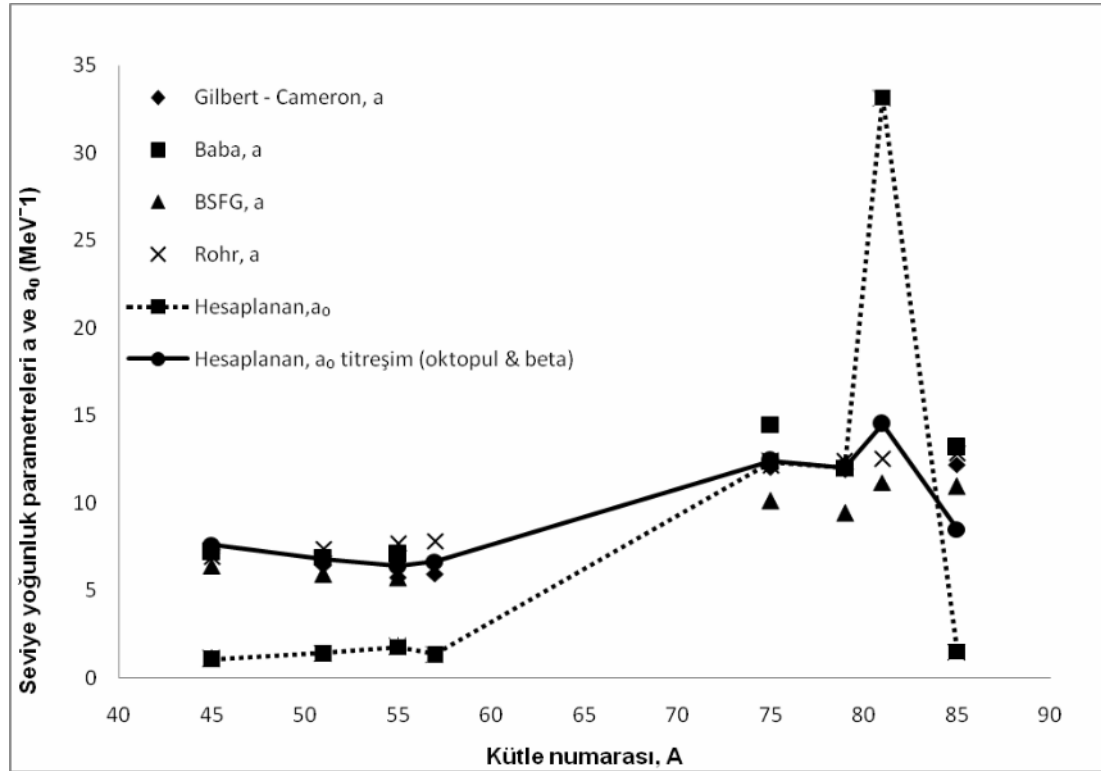
Çizelge 5.1, Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3’ te nötron bağlanma enerjisi yakınındaki s-dalgali nötron rezonans değerleri için verilen a parametreleri Gilbert-Cameron [2] Baba [50], BSFG model [3] ve Rohr [46] tarafından hesaplanan değerlerden elde edilmiştir.

Nükleer tıpta kullanılan bazı deforme tek-A’ lı ve tek-tek çekirdeklerin kolektif – GS ve titreşim bandları (Beta, Gama ve Oktupol) için, farklı bandlara karşılık gelen tek parçacık seviye yoğunluk parametreleri a ve hesaplanan seviye yoğunlukları a_0 , kütle numaralarına göre dağılımı Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3’te sırasıyla verilmiştir.

Çizelge 5.1.Nükleer tıpta kullanılan bazı hafif deforme radyoaktif çekirdeklerin farklı bandları için hesaplanan enerji seviye yoğunluk parametreleri a_0 ve diğer çalışmalardan elde edilen a değerleri.

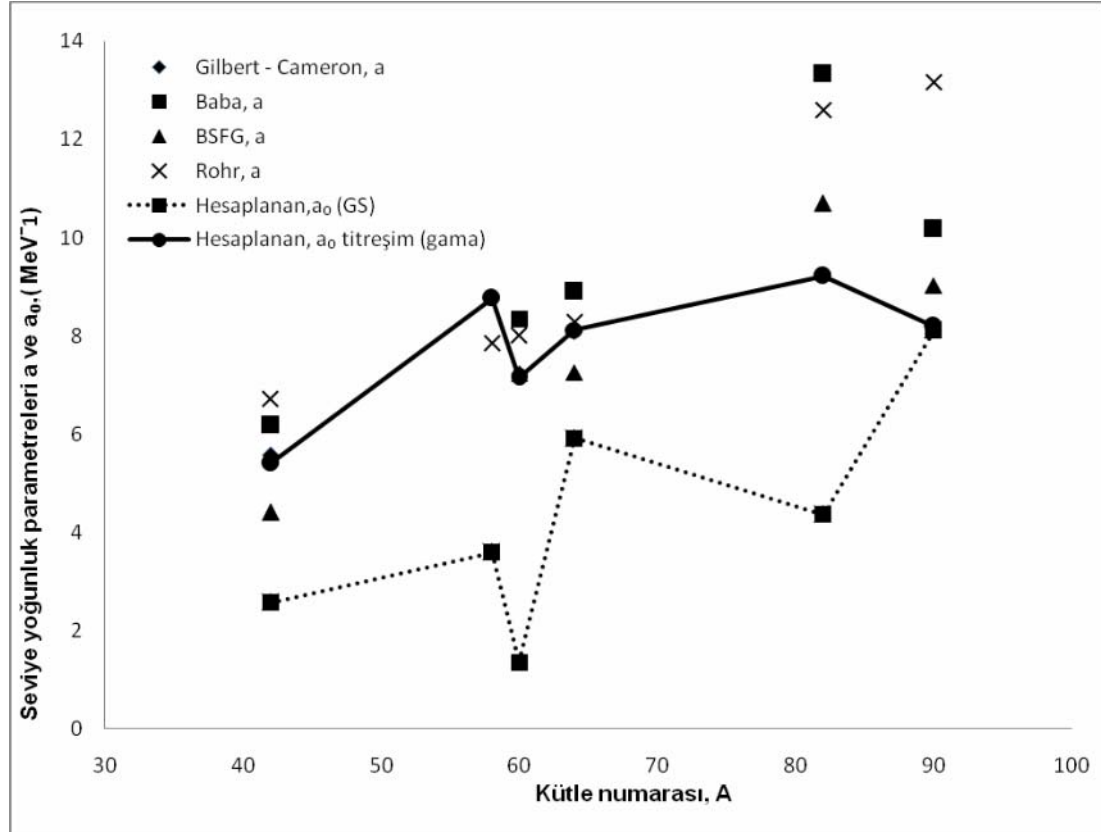
Radyoaktif Çekirdekler	Gilbert-Cameron, $a(\text{MeV}^{-1})$ [2]	Baba a (MeV^{-1}) [50]	BSFG, a (MeV^{-1}) [3]	Rohr, a (MeV^{-1}) [46]	a_0 (MeV^{-1})	BANDLAR
$^{42}_{19}\text{K}$	5.56	6.18	4.40	6.72	5.41 2.57	Gamma Titreşim bandı Taban Durum bandı
$^{45}_{20}\text{Ca}$	7.11	7.2	6.38	6.94	7.6 1.06	Octopul- Titreşim bandı Taban Durum bandı
$^{51}_{24}\text{Cr}$	6.44	6.89	5.91	7.36	6.78 1.41	Octopul- Titreşim bandı Taban Durum bandı
$^{55}_{26}\text{Fe}$	5.76	7.06	5.73	7.65	6.39 1.76	Octopul- Titreşim bandı Taban Durum bandı
$^{57}_{27}\text{Co}$	5.95	-	-	7.79	1.34 6.64	Taban Durum bandı Octopul- Titreşim bandı
$^{58}_{27}\text{Co}$	-	-	-	7.86	3.59 14.19 8.76	Taban Durum bandı Beta Titreşim bandı Gamma Titreşim bandı
$^{60}_{27}\text{Co}$	7.23	8.35	7.23	8.00	2.96 3.67 1.35 7.15	Gamma Titreşim bandı Gamma Titreşim bandı Taban Durum bandı Gamma Titreşim bandı
$^{64}_{29}\text{Cu}$	8.09	8.90	7.26	8.28	8.12 5.91	Gamma Titreşim bandı Taban Durum bandı
$^{75}_{34}\text{Se}$	12.02	14.48	10.12	12.11	12.35 12.42 2.34 3.56	Taban Durum bandı Beta Titreşim bandı $v_{g_{9/2} 5/2}$ [422] Alfa= -1/2 PI=- Alfa=-1/2
$^{79}_{34}\text{Se}$	11.89	12.00	9.41	12.39	12.02 11.99 1.86 3.45	Beta Titreşim bandı Taban Durum bandı DJ=2 band based on 5/2-state DJ=2 band based on 1/2-state
$^{82}_{35}\text{Br}$	-	13.33	10.70	12.60	6.71 16.23 9.22 4.36	Possible PI=- Kolektif band PI=-Seq. with Conf=((P,G9/2) (N,G9/2)) Gamma Titreşim bandı Taban Durum bandı
$^{81}_{36}\text{Kr}$	-	-	11.17	12.53	33.16 3.69 14.50 2.44	Taban Durum bandı $f_{5/2}$ one-quasNötron Kolektif band Octopul- Titreşim bandı $g_{9/2}$ one-quasi Nötron Kolektif band
$^{85}_{38}\text{Sr}$	12.19	13.17	10.93	12.82	8.48 1.48	Octopul- Titreşim bandı Taban Durum bandı
$^{90}_{39}\text{Y}$	-	10.17	9.03	13.17	8.11 8.20 10.64 3.07	Taban Durum bandı Octopul- Titreşim bandı Negatif pariteli band Positive pariteli band

Çizelge 5.2. Nükleer tıpta kullanılan bazı hafif deforme tek-A' lı radyoaktif çekirdekler için nükleer seviye yoğunluk parametreleri a ve a_0 ' ın kütle numarasına göre değişimi. Taban durum dönme bandları, oktopul ve beta titreşim bandları için hesaplanan a_0 değerleri ve bazı referanslardan alınan a değerleri [2,3,46,50].



Nükleer tıpta kullanılan hafif deforme tek-A' lı radyoaktif çekirdekler için dikkate alınan kolektif – titreşim bandları (Beta ve Oktopul) için (Bkz. Eş.4.16) ile hesaplanan seviye yoğunluk parametrelerinin değerleri a_0 , literatürlerden elde edilen seviye yoğunluk parametreleriyle a [2,3,46,50] çok iyi tutarlılık göstermektedir (Çizelge 5.2). Ancak, kolektif taban durum bandları için hesaplanan seviye yoğunluk parametreleri a_0 , diğer çalışmalardan elde edilen değerlerle uyum sağlamamaktadır. Genellikle tek-A' lı hafif deforme radyoaktif çekirdeklerin baskın bandlar oktopul ve beta titreşim bandlarıdır.

Çizelge 5.3. Nükleer tıpta kullanılan bazı hafif deforme tek-tek radyoaktif çekirdekler için nükleer seviye yoğunluk parametreleri a ve a_0 ' ın kütle numarasına göre değişimi. Taban durum dönme bandları ve beta titreşim bandları için hesaplanan a_0 değerleri ve bazı referanslardan alınan a değerleri karşılaştırılmıştır [2,3,47,51].



Özellikle düşük kütle bölgesinde Baba ve Rohr tarafından elde edilen seviye yoğunluk parametreleri ile hesaplanan seviye yoğunluk parametreleri karşılaştırıldığında, tek-tek deforme radyoaktif çekirdekler için gama titreşim bandının baskın olduğu söylenebilir (Çizelge 5.3). Ancak titreşim bandları dışındaki diğer bandlardan hesaplanan parametreler ile diğer çalışmalardan elde edilen parametreler [2,3,46,50], arasında tutarsızlık vardır.

Bu çalışmada, nükleer tıpta kullanılan, kütle numarası $40 < A < 100$ aralığındaki bazı hafif deforme radyoaktif çekirdeklerin seviye yoğunluk parametreleri, her radyoaktif çekirdeğin farklı bandları için, enerji spektrumlarından yararlanılarak hesaplanmıştır. İncelenen radyoaktif çekirdeklerin uyarılma enerjisine bağlı olarak enerji seviye yoğunluk parametrelerinin hesaplanmasında, hafif deforme çekirdeklerin enerji seviyelerinin eş-aralıklı ve nükleonların kollektif hareketlerini dikkate alan bir model kullanılmıştır. Nötron bağlanma enerjisi yakınındaki uyarılmalarda nükleer seviye yoğunluğu, kollektif titreşim ve kollektif dönme gibi farklı karakterlere sahip olabilir. İncelenen radyoaktif çekirdekler için seviye yoğunluk parametrelerinin belirlenmesinde baskın tek bir band etkin değildir. Yani, (Bkz. Eş.4.10) ile verilmiş olduğu gibi, böyle radyoaktif çekirdekler için seviye yoğunluğu, kısmi seviye yoğunlukları farklı bandlara ait kombinasyonunu içermelidir.

Sonuç olarak, farklı radyoaktif çekirdeklerin seviye yoğunluk parametrelerini elde etmek için nükleer kollektif uyarılma modlarının oldukça önemli olduğu görülmektedir. Radyoaktif çekirdeklerin spektrumlarındaki uyarılma bandlarına bağlı olarak hesaplanan bu parametreler yardımıyla deneysel olarak üzerinde çalışılan zorluklar ortadan kaldırılabilir. Hesaplanan bu parametreler yeni tıbbi uygulamalarda, radyoaktif çekirdeklerin üretim aşamalarında elde edilen nötron yakalama tesir kesiti verilerinin belirlenmesinde çok kullanışlı olabilir.

KAYNAKLAR

1. Bethe , H.A., “An attempt to calculate the number of energy levels of a heavy nucleus”, **Phys. Rev.**, 50: 332-341 (1936).
2. Gilbert, A., Cameron, A.G.W., “A Composite nuclear-level density Formula with shell corrections”, **Can. J. Phys.**, 43: 1446-1496 (1965).
3. Von Egidy ,T., Bucurescu, D., “Systematics of nuclear level density parameters” **Phys. Rev. C**, 72: 044311-044322 (2005).
4. Ignatyuk, A.V., Shubin, Yu. N., “Density of discrete levels in ^{116}Sn ”, **Sov. J. Nucl. Phys.**, 8: 660-663 (1969).
5. Ahmedov, H., Zorba, I., Yılmaz, M., Gönül, B., “On the level density of even–even nuclei in the regions of rare-earth and actinide elements”, **Nucl. Phys. A**, 706: 313-321 (2002).
6. Okuducu,Ş., Ahmedov, H., “On the estimation of nuclear level density parameters in the region of some large deformed nuclei”, **Phys. Lett. B**, 565: 102-106 (2003).
7. Okuducu,Ş., Eser, E., Sönmezoğlu, S., “Analysis of the nuclear level density parameters of some large deformed odd-A and odd-odd nuclei in the region of rare-earth elements”, **Nucl. Science and Eng.**, 154: 374-381 (2006).
8. Okuducu, Ş., Sönmezoğlu, S., Eser, E., “Calculation of nuclear level density parameters of some deformed light nuclei using collective excitation modes”, **Phys. Rev. C**, 74: 034317-034320 (2006).
9. Bucurescu., D., von Egidy, T., “Nucl. part. phys”, **J. Phys. G.**, 31: 51675-51677 (2005).
10. Kataria, S. K.Ramamurthy, V. S. “Macroscopic systematics of nuclear level densities”, **Nucl. Phys. A**, 349: 10-28 (1980).
11. Okuducu, Ş., Aktı, N.N., Saraç, H., Bölükdemir, M.H., Tel, E., “Calculation of nuclear level density parameters of some light deformed medical radionuclides using collective excitation modes of observed nuclear spectra”, **Modern Physics Letter A**, 24(2681): 1-15 (2009).
12. Amiot, M. N., “Calculation of ^{18}F , $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{111}In and ^{123}I calibration factor using the penelope ionization chamber simulation method”, **App. Rad. Isotopes**, 60: 529-531 (2004).

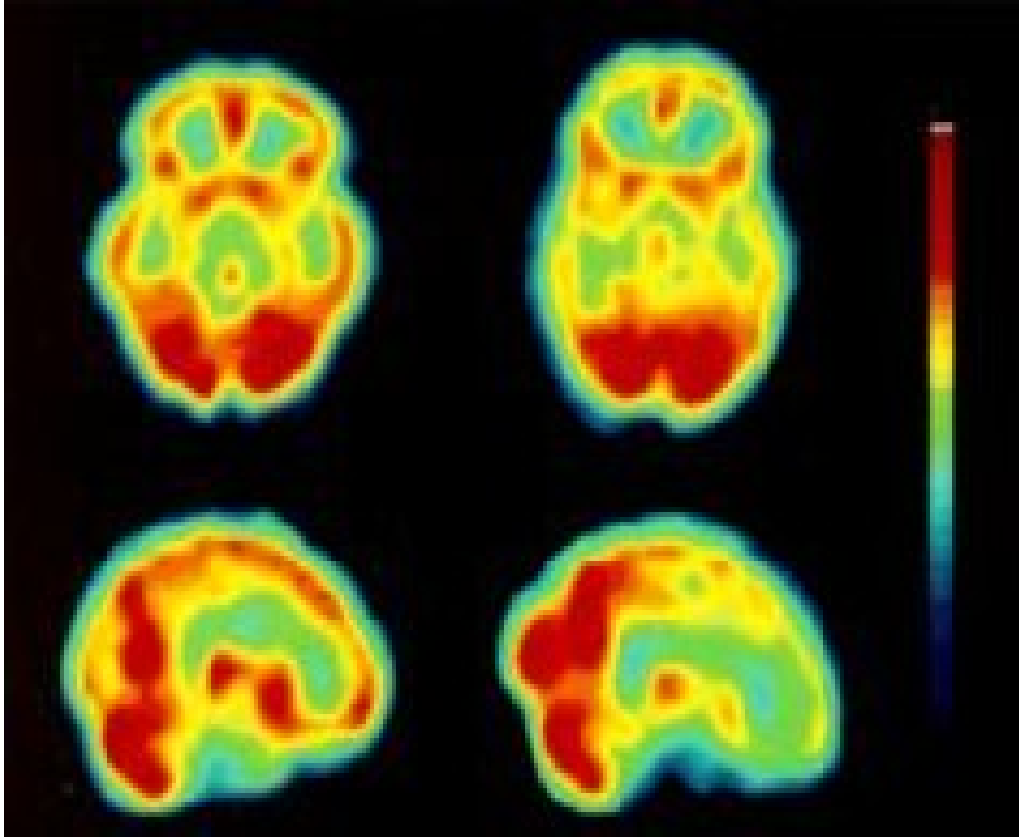
13. Qaim SM, "Nuclear data for production of new medical radionuclides", **J. Nucl. Sci. and Tech.**, 2: 1272-1277 (2002).
14. Wolf, A. P., Jones, W. B., "Cyclotrons for biomedical radioisotope production", **Radiochim. Acta**, 34: 1-7 (1983).
15. Qaim SM, "Therapeutic radionuclides and nuclear data", **Radiochim. Acta**, 89: 297-302 (2001).
16. Aydın, A., Sarer, B., Tel, E., "New calculation excitation functions proton induced reactions in some medical isotopes of Cu, Zn and Ga" **Appl. Radiat. Isot.**, 65: 365-370 (2007).
17. Aydın, G.E., Tel, E., Kaplan, A., Aydın, A., "New calculations of excitation functions of some positron emitting and single photon emitting radioisotopes" **Kerntechnik**, 73(4): 184-189 (2008).
18. Newton, T., "Shell effects on the spacing of nuclear levels", **Canada Journal Physics**, 34, 804-829 (1956).
19. Ericson, T., "Level density of degenerate fermi systems", **Nucl. Phys**, 8, 265 -283 (1958).
20. Po-lin Huang, Grimes, S. M., Massey, T., "Level densities for nuclei with $20 < A < 41$ ", **Phys. Rev. C**, 62: 024002-024014 (2000).
21. Grimes, S. M., "In theory and applications of moments methods in many-fermion systems", **Plenum Yayınları**, New York, 273-276 (1980).
22. Landau, L., "Soviet Journal Nuclear Physics", 9, 533-547 (1936).
23. Weisskopf, V., "Statistics and nuclear reactions", **Physics Review**, 52, 295-303 (1937).
24. Bohr, N., Kalckar, F., "On the transmutation of atomic nuclei by impact of material particles", *Mathematics Fysiske Meddelelser*, **Danish Academy of Sciences**, 14(10): 1-40 (1937).
25. Hurwitz, H., BETHE, H., "Neutron capture cross sections and level density", **Physics Review**, 81: 898-898 (1951).
26. Ignatyuk, A.V., Simerinkin, G.N., Tishin, A.S., "Phenomenological description of the energy dependence of the level density parameters", **Soviet Journal Nuclear Physics**, 22: 255-257(1975).

27. Krane, S.K., "Nükleer Fizik 1", Şarer B., **Palme Yayıncılık**, Ankara, 116-149,173-178,246-247,273-274,327 (2001).
28. Tuncel, E., "Klinik Radyoloji", **Nobel&Güneş Tıp Kitabevi Yayını**, Bursa, 92-93 (2002).
29. Krane, S.K., "Nükleer Fizik 2", Şarer B., **Palme Yayıncılık**, Ankara, 800-812 (2002).
30. Jadvar. H., Parker. J. A., "Klinik Pet/Ct", Tunacı. A., **Nobel Tıp Kitabevi Yayını**, İstanbul, 8-10 (2008).
31. Yeğin, M. M., "Genel Nükleer Tıp", **Atatürk Üniversitesi Yayınları**, Erzurum, 136-142,225-227 (1985).
32. Yalçiner. E. G., "Proton hızlandırıcılarının nükleer uygulama alanları ile protonlarla oluşturulan nükleer reaksiyon tesir kesitlerinin incelenmesi", Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 25-30 (2008).
33. Eser, E., "Bazı deforme ağır çekirdeklerin enerji seviye yoğunluk parametresinin incelenmesi", **Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Tokat ,1-50 (2006).
34. Gedikoğlu, A., "Çekirdek Fiziğine Giriş", **Karadeniz Teknik Üniversitesi**, 1-30 (1988).
35. Arya, A. P., "Fundamental of Nuclear Physics", **Allyn and Bacon**, Boston, 646-650 (1966).
36. Serway, R. A., Physics-3, "For Scientists & Engineers with ModernPhysics", **Palme Yayıncılık**, 1102-1440 (1995).
37. Rainwater, J., "Nuclear energy level argument for a spheroidal nuclear Model", **Physics Review**, 79: 432-434 (1950).
38. Bohr, A., Mottelson, B. R., "Nuclear Structure, Volume I and II", **New York; Benjamin**, 1-1219 (1969)
39. Şen, S., "A-150 deforme bölge girişinde bazı çekirdeklerin elektromanyetik geçişlerin kutupsal karışım oranlarının incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, **Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kırıkkale, 1-30 (2000).
40. Meyerof, W. E., "Elements of nuclear physics", **Mc Graw Hill** , 245-273 (1989).

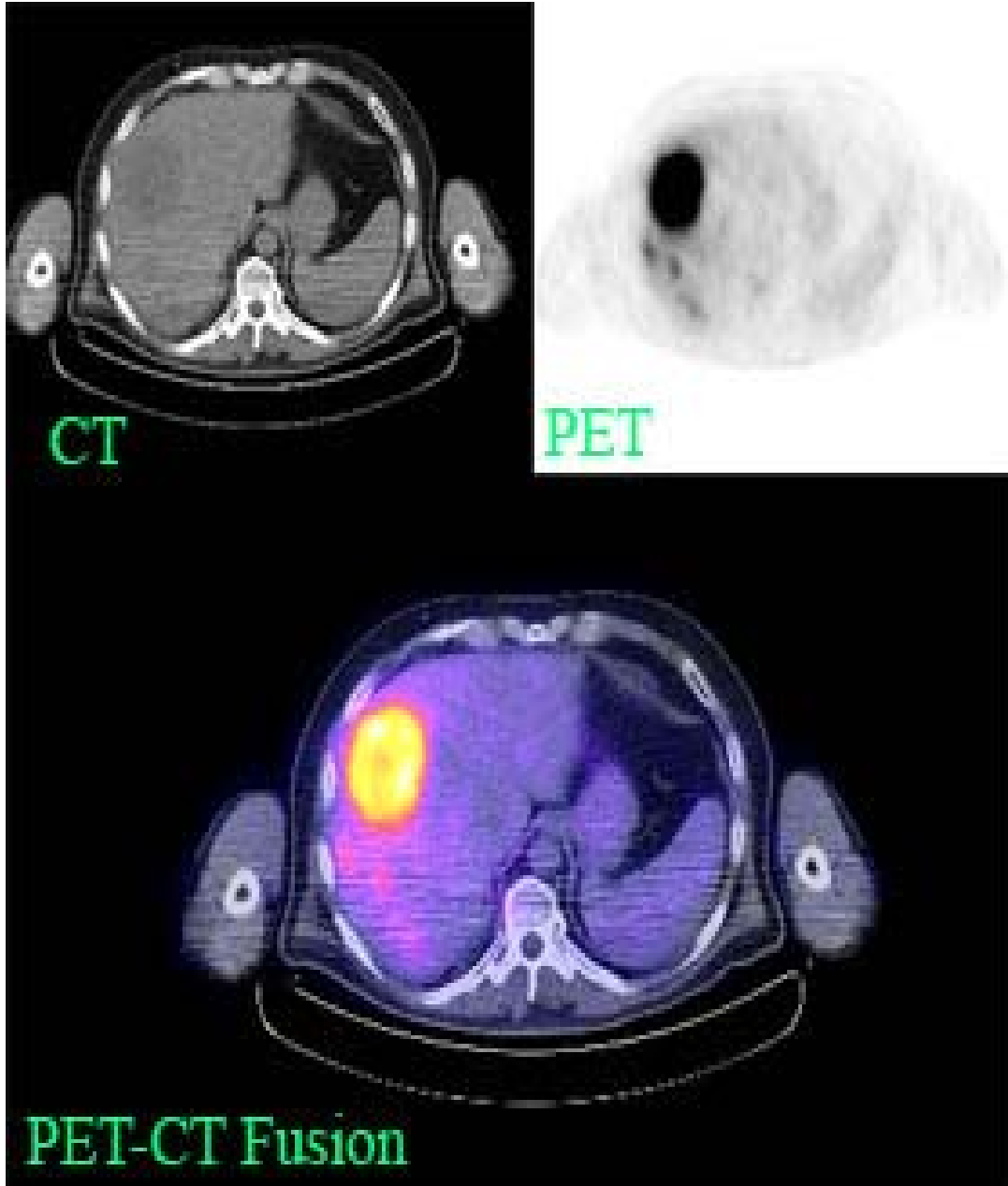
41. Hornyak, W. F., "Nuclear Structure", **Academic Press**, New York, 525-616 (1975).
42. Ignatyuk, A.V., Istekov, K.K., Simerinkin, G.N., "The role of collective effects in the systematics of nuclear level densities", **Soviet Journal Nuclear Physics**, 29, 450-453 (1979).
43. Davidov, A. S., Chaban A. A., "Rotation-vibration interaction in non-axial even nuclei", **Nuclear Physics**, 20: 499-508 (1960).
44. Davidov, A. S., Filippov, G.F., "Rotational states in even atomic nuclei" **Nuclear Physics**, 8: 237-249 (1958).
45. Ertuğral, F., "Nadir toprak elementlerinin kuadropol momentlerinin mikroskopik model çerçevesinde hesaplanması" Yüksek Lisans Tezi, **Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Sakarya, 14-25 (2002).
46. Rohr, G., "New perspectives on the level density of compound resonances" , **Zeitschrift Physics A**, 318: 299-301 (1984).
47. Bohr, A., "Rotatioal states of atomic nuclei", Ejnar Munksguards Forlog, **Universitetes Institut For Teoretisk Fysik**, Kbenhavn, 1-55 (1954).
48. Davidson, J. P., "Collective models of the nucleus", **Academic Press** , 231-238 (1968).
49. Nuclear Structure and Decay Data, National Nuclear Data Center, Brookhaven National Laboratory, **ENSDF (Evaluated Nuclear Structure Data File)**, **Upton**, NewYork (2003).
50. H. Baba, "A shell-model nuclear level density", **Nuclear Physics A**, 159: 625-641 (1970).

EKLER

EK-1 SPECT'ten elde edilen beyin görüntüsü



EK-2 Pet/Ct akciğer görüntüsü



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : SARAÇ, Hilal
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 08.06.1982 Ankara
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (312) 358 45 83
 Faks : 0 (312) 359 09 43
 E-mail : hilal_sarac@hotmail.com

Eğitim Derece

Eğitim Birimi

Mezuniyet tarihi

Lisans	Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü	2006
Lise	Anıttepe Süper Lisesi	2000

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar:

- Okuducu, Ş., Aktı, N.N., Saraç, H., Bölükdemir, M.H., Tel, E.,
 "Calculation of nuclear level densitiy parameters of some light deformed medical radionuclides using collective excitation modes of observed nuclear spectra", Modern Physics Letter A, 24(2681): 1-15 (2009).
- Okuducu, Ş., Aktı, N.N., Saraç, H., Bölükdemir, M.H., Tel, E.,
 "Calculation of nuclear level densitiy parameters of some light deformed medical radionuclides using collective excitation modes of observed nuclear spectra", Türk Fizik Derneği, 26. Uluslararası Fizik Kongresi, Bodrum, (2009)