



**ERBİYUM ÇEKİRDEKLERİNİN FOTONÜKLEER REAKSİYON
ÜRÜNLERİNİN YARI ÖMÜRLERİNİN VE GEÇİŞ ENERJİLERİNİN
BELİRLENMESİ**

SERHAT URUK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DİSİPLİNLERARASI NÜKLEER ENERJİ VE ENERJİ SİSTEMLERİ

T.C.
SİNOP ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ERBİYUM ÇEKİRDEKLERİNİN FOTONÜKLEER REAKSİYON
ÜRÜNLERİNİN YARI ÖMÜRLERİNİN VE ENERJİ SEVİYELERİNİN
BELİRLENMESİ**

SERHAT URUK

YÜKSEK LİSANS TEZİ
DİSİPLİNLERARASI NÜKLEER ENERJİ VE ENERJİ SİSTEMLERİ
DANIŞMAN

Doç. Dr. Tuncay BAYRAM

SİNOP – 2017

T.C.
SİNOP ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Bu çalışma, jürimiz tarafından 19/06/2017 tarihinde yapılan sınav ile Disiplinlerarası Nükleer Enerji ve Enerji Sistemleri Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç.Dr. Tuncay BAYRAM

Üye : Doç.Dr. Turgay KORKUT

Üye : Doç.Dr. Serkan AKKOYUN

ONAY :

Yukarıdaki imzaların adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

19./06/2017

Doç.Dr. Turgay KORKUT

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ERBİYUM ÇEKİRDEKLERİNİN FOTONÜKLEER REAKSİYON ÜRÜNLERİNİN YARI ÖMÜRLERİNİN VE ENERJİ SEVİYELERİNİN BELİRLENMESİ

ÖZET

Fotonükleer reaksiyon (PNR), foton ve çekirdek arasındaki etkileşim ile meydana gelen bir reaksiyondur. PNR ile çekirdeklerin seviyeler arası geçiş enerjileri ve yarı ömürleri belirlenebilmektedir. Çekirdeklerin hangi geçiş enerjilerine sahip oldukları, bu geçiş enerjilerinin hangisinde ne kadar süre kaldıkları gibi bilgiler nükleer yapının anlaşılması açısından önemlidir. Nükleer yapının daha iyi anlaşılması için günümüzde yoğun çalışmalar yürütülmektedir. Tıpta görüntüleme ve tedavi süreçlerinde kullanılacak radyoizotopların belirlenmesi ile radyasyon korunma yöntemlerinin geliştirilmesi gibi konular, çekirdek yapısının daha iyi bir şekilde anlaşılabilmesi ile mümkün olabilmektedir.

Çekirdeğin enerji seviyeleri ve yarı ömürlerinin belirlenmesi çekirdek-çekirdek reaksiyonları, fisyon, füzyon, elektrik ve manyetik geçişler ve radyoizotop üretimi ile ilgili önemli bilgiler edinmemizi sağlar. PNR klinik hızlandırıcıdan elde edilen yüksek enerjili γ -ışınlarının hedef çekirdeklere yönlendirilmesiyle yapılabilir.

Bu tez çalışmasında, modifiye edilmiş klinik doğrusal elektron hızlandırıcı (cLINAC) yardımı ile elde edilen 14 MeV maksimum enerjili bremsstrahlung ışınları ile erbiyum hedef çekirdekleri bombardıman edilerek PNR gerçekleştirilmiştir. Aktivasyon sonrası ürün çekirdeklerin yayınladıkları gama ışınları HPGe dedektörü ile ölçülerek, gama spektrumları elde edilmiştir. Ölçümlerin analiz edilmesi ile ^{161}Ho çekirdeğinin enerji seviyeleri arasındaki geçişler ve ^{161}Er çekirdeğinin yarı ömrü elde edilmiştir. Bu çalışmada literatür ile uyumlu sonuçlar elde edilmiş olmakla birlikte, özellikle ^{161}Ho çekirdeğinin bazı geçiş enerjileri daha hassas olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelime: Fotonükleer reaksiyon, erbiyum, yarı ömür, geçiş enerjisi, cLINAC

DETERMINATION OF HALF LIVES AND ENERGY LEVELS FOR PHOTONUCLEAR REACTION PRODUCTS OF ERBIUM NUCLEUS

ABSTRACT

Photonuclear reaction (PNR) is a reaction which occurred between a photon and a nucleus via interaction. Transition energy between levels of nucleus can be determined by PNR. Knowledges about transition energies of a nucleus and their live times are important for understanding of nuclear structure. There can be still ongoing studies for deeper understanding of nuclear structure. Determination of radioisotopes used in medical imaging methods and therapy and improvement of radiation protection methods can be possible with better understanding of nuclear structure.

Determination of transition energy of nuclei and their half-lives can give knowledges about nucleus-nucleus reactions, fission, fusion, electric and magnetic transitions and production of radioisotopes. PNR can be created by directing high-energy γ -rays to the target nuclei.

In this study, the erbium target was bombarded by bremsstrahlung rays with 14 MeV maximum energy obtained from a modified clinical linear electron accelerator (cLINAC) to create PNR. The gamma rays emitted by the product nuclei were measured after activation. By analyzing of these measurements, the experimental transition energies of ^{161}Ho and the half-life of ^{161}Er have been determined. The results have been found as consistent with the literature values. In particular some transition energies of ^{161}Ho have determined with more precise then those of literature values.

Keywords: Photonuclear reactions, erbium, half-life, transition energy, cLINAC

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında, modifiye edilmiş klinik doğrusal elektron hızlandırıcısı kullanılarak erbiyum hedef elementinde gama-nötron (γ,n) reaksiyonları gerçekleştirilmiştir. Reaksiyon ürünlerinin ölçümü sonrası gerçekleştirilen analizler ile ^{161}Ho 'ın enerji seviyeleri arasındaki geçişler ve ^{161}Er çekirdeği için yarı ömür değeri hassas bir şekilde belirlenmiştir. Bu çalışma aynı zamanda sınırlı imkan ve bütçeyle fotonükleer reaksiyon çalışmalarının ülkemizde gerçekleştirilebildiğini göstermesi açısından önemlidir.

Bu tez çalışma süresince bilgi, birikim ve tecrübeleri ile bana yol gösteren, yanında çalışmaktan onur duyduğum, alanım ve kişisel gelişimime katkısını asla unutmayacağım danışman hocam sayın Doç. Dr. Tuncay BAYRAM'a, lisans programım süresince ve bu tez çalışması sırasında desteklerini esirgemeyen sayın Doç. Dr. Serkan AKKOYUN'a teşekkür ederim. Ayrıca lisansüstü eğitimim boyunca çalışma arkadaşım olan Şevki ŞENTÜRK'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez sürecinin ve hayatımın her aşamasında bana destek olan aileme, çalışma süresince tüm zorlukları benimle göğüsleyen ve hayatımın her evresinde bana destek olan eşim Betül URUK'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca iş hayatımda ve kişisel gelişimim noktasında destek veren, bu tez çalışmasında tüm olanakları sağlayıp yardımlarını esirgemeyen MOTAŞ Genel Müdürü Sayın Enver Sedat TAMGACI'ya özel olarak teşekkür ederim.

Bu araştırma Sinop Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi Koordinatörlüğü'nce desteklenmiştir. Proje No: FEF-1901-14-04, 2014.

Lisansüstü eğitim süresince bursiyer olarak görev aldığım 115F291 nolu TÜBİTAK projesi kapsamında maddi destek sağlayan TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SEMBOLLER ve KISALTMALAR.....	v
ÇİZELGELER.....	vi
ŞEKİLLER.....	vii
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER	4
2.1. Radyoaktivite	4
2.1.1. Alfa (α) Bozunumu.....	4
2.1.2. Beta (β) Bozunumu.....	5
2.1.2.1. β^- Bozunumu:.....	5
2.1.2.2. β^+ Bozunumu:.....	5
2.1.2.3. Elektron yakalama olayı:	6
2.1.3. Gama (γ) Bozunumu.....	7
2.2. Radyoaktivite Bozunma Kanunu	8
2.3. Gama Işını	10
2.4. Gama Işınının Madde İle Etkileşmesi	11
2.4.1. Fotoelektrik Olay	11
2.4.2. Compton Olayı	12
2.4.3. Çift Oluşumu	13
3. GEREÇ VE YÖNTEM.....	15
3.1. Erbiyum Hedef Elementinin cLINAC ile Aktivasyonu	15
3.2. Erbiyum PNR Ürünlerinin HpGe Dedektör ile Sayımı.....	16
4. BULGULAR.....	19
5. TARTIŞMA	24
6. SONUÇ.....	26
KAYNAKÇA.....	27

SEMBOLLER ve KISALTMALAR

cLINAC	: Klinik Doğrusal Hızlandırıcı
Er	: Erbiyum
FWHM	: Yarı Yükseklikteki Tam Genişlik
fm	: Femtometre
Ho	: Holmiyum
HPGe	: Yüksek Safılıkta Germanyum Dedektörü
keV	: Kilo Elektronvolt
MeV	: Mega Elektronvolt
Na	: Sodyum
NaI	: Sodyum İyodür
Ne	: Neon
NIM	: Nuclear Enstrümantasyon Modülü
PNR	: Fotonükleer Reaksiyon
RF	: Radyo Frekans
Ta	: Tantalum
Te	: Tellür
W	: Tungsten
α	: Alfa
β	: Beta
γ	: Gama
n	: Nötron
p	: Proton

ÇİZELGELER

Çizelge 1.1. Er izotoplarının PNR ürünlerine ait deneysel yarı-ömür değerleri.....	3
Çizelge 4.1. Er izotoplarına ait bolluk oranları.....	19
Çizelge 4.2. ^{161}Ho 'nun geçiş enerji pikleri ve literatürdeki değerleri	23
Çizelge 5.1. ^{161}Ho 'nun literatürdeki değerlerine göre daha hassas elde edilen geçiş enerjileri ve ilgili geçişlere ait seviyeler	24
Çizelge 5.2. ^{161}Ho 'nun literatürdeki değerlerine göre daha az hassas elde edilen geçiş enerjileri ve ilgili geçişlere ait seviyeler	24



ŞEKİLLER

Şekil 2.1. Alfa bozunumu şematik gösterimi.....	4
Şekil 2.2. ^{14}C 'nin β^- bozunumunun şematik gösterimi.....	5
Şekil 2.3. ^{10}C 'nin β^+ bozunumu şematik gösterimi.....	6
Şekil 2.4. Elektron yakalama şematik gösterimi.....	7
Şekil 2.5. ^{137}Ba için gama bozunumunun şematik gösterimi.....	7
Şekil 2.7. Aktifliğin üstel bozunumu yarı logaritmik çizimi	9
Şekil 2.6. Aktifliğin üstel bozunumu Linner çizim	9
Şekil 2.8. Ne(neon) için gama bozunumu şematik gösterimi	10
Şekil 2.9. Elektromanyetik spektrum.....	11
Şekil 2.10. Potasyum metaline gelen fotonların fotoelektrik diyagramı	12
Şekil 2.11. Compton saçılması şematik gösterimi	13
Şekil 2.12. Çift oluşumu şematik gösterimi (Seyrek, 2007).....	13
Şekil 2.13. Fotoelektrik olay, Compton olayı ve çift oluşumunun baskın olduğu bölgeler (Krane, 2001).....	14
Şekil 3.1. Doğrusal elektron hızlandırıcı şematik gösterimi.....	15
Şekil 3.2. Akdeniz Üniversitesi Nükleer Bilimler Uygulama ve Araştırma Merkezinde bulunan cLINAC.....	16
Şekil 3.3. Gama spektroskopisi için kullanılan dedektör sistemi	17
Şekil 3.4. Akdeniz Üniversitesi Nükleer Bilimler Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan ORTEC marka HPGe dedektör sistemi	17
Şekil 3.5. HPGe dedektörün kalibrasyonu için kullanılan radyoaktif kaynaklar.....	18
Şekil 4.1. ^{162}Er 'un gama ile etkileşmesi sonucu gerçekleşen PNR ile $^{161}\text{Er}^*$ dönüşümü	20
Şekil 4.2. Er hedef elementinin aktivasyon sonrası elde edilen gama spektroskopisinde ^{161}Ho için analiz sonucu belirlenmiş geçiş enerji pikleri.	21
Şekil 4.3. ^{161}Er çekirdeğinin yarılanma ömrünün belirlenmesi için kullanılan ^{161}Ho çekirdeğinin 314,71 keV'lik pikine karşılık gelen bozunma eğrisi	21

1. GİRİŞ

PNR (Fotonükleer reaksiyon), foton ve çekirdek arasındaki etkileşim ile meydana gelen reaksiyondur. Foton başlatmalı reaksiyonlar üzerine ilk çalışma Chadwick ve Goldhaber (1934) tarafından gerçekleştirilmiştir. PNR ile (γ, n) , $(\gamma, 2n)$, (γ, p) , $(\gamma, 2p)$ gibi reaksiyonları gerçekleştirilebilir. Elbette bu reaksiyonların meydana gelebilmesi için γ ışını enerjisinin hedef çekirdekten ilgili parçacıkları koparma enerjisinden büyük olması gerekmektedir (Karl, 1953; Penfold ve Garwin, 1959; Segebade vd., 1987; Mazur vd., 2013; Boztosun vd., 2015; Dulger vd., 2015). Bu reaksiyonlar sonucunda oluşan ürünler genellikle kararsız veya uyarılmış yapıda olup β^- veya β^+ yayınlarak, elektron yakalamasının ardından gama ışını yayınlarak daha kararlı duruma geçerler. PNR gerçekleştirebilmek için elektron hızlandırıcılarından elde edilen yüksek enerjili bremsstrahlung fotonları kullanılabilir. Genellikle kullanılan hızlandırıcılar birçok hastane ve laboratuvarında kullanılan basit cihazlardır (IAEA, 2010). PNR reaksiyonlarından ortaya çıkan parçacıklar yüklü parçacıklar veya nötronlardır. PNR'nin giriş kanalı (foton ve hedef çekirdek arasında) tamamen elektromanyetik karaktere sahip olduğundan, PNR nükleon-nükleon etkileşimleri, nükleer uyarılma mekanizmaları ve çekirdeğin kollektif hareketinin incelenmesinde kullanışlıdır (Strauch, 1953; Segebade vd., 1987; Mazur vd., 2013). PNR'dan elde edilen veriler nükleer fizik alanında nükleer seviyelerin belirlenmesi, nükleer deformasyon, nükleer rezonans ve nükleon ayrılma enerjilerinin araştırılmasında kullanılabilir. Ayrıca PNR verileri radyasyondan korunma tasarımları, radyasyon transport analizi, soğurulmuş doz hesaplamaları, aktivasyon analizi, fisyon ve füzyon reaktörü fiziği ve astrofiziksel çekirdek oluşum süreçleri gibi birçok nükleer uygulama alanları için önemlidir (Lambert, 1992; Utsunomiya vd. 2006; Mohr vd., 2007; IAEA, 2010; Boztosun vd., 2015) .

PNR ile çekirdeklerin enerji seviyeleri arasındaki geçiş enerjileri belirlenebilmektedir. PNR ürünlerinin gama ışınları her çekirdek için ayrı olup karakteristik özellik taşıdığından reaksiyon ürünlerinin bu özelliklerinden yararlanılarak onların belirlenmek istenen niceliklerine ulaşmak mümkündür. Deneysel PNR verilerinin tamamlanması gayretleri devam etmektedir (Berman, 1975; Dietrich ve Berman, 1988; Filipescu vd., 2015; Bayram vd., 2016). Çekirdeklerin hangi geçiş enerjilerine sahip oldukları, bu geçiş enerjilerinin hangisinde ne kadar süre kaldıkları gibi bilgiler nükleer yapının anlaşılması açısından önemlidir. Nükleer yapının daha iyi anlaşılması için günümüzde yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Tıpta görüntüleme

yöntemlerinde ve tedavi süreçlerinde kullanılacak radyoizotopların belirlenmesi ve radyasyondan korunma yöntemlerinin geliştirilmesi gibi konular çekirdek yapısının daha iyi bir şekilde anlaşılması ile mümkün olabilmektedir. Çekirdekler için geçiş enerjileri ve yarı ömür ölçümlerinin hesaplanmasında gama spektroskopisi kullanılır (Utsunomiya vd., 2007; Mohr vd., 2007; IAEA, 2010). Buna göre dedektöre gelen gamalar, her biri farklı enerji için ayrılmış olan kanallarda sayılırlar. Bu sayım ile elde edilen karakteristik pikler analiz edilerek ölçülmek istenilen değer elde edilir.

Çekirdek geçiş enerjilerinin belirlenmesi ile ilgili 1936 yılında yapılan ilk çalışmalar Bethe'nin teorisine dayanmaktadır. Bethe teorik olarak termodinamiğin temel durumlarından biri olan Fermi gaz sisteminin ortalama enerjisi ile entropi arasındaki bağıntıları kullanarak çekirdek geçiş enerjilerini teorik olarak hesaplamıştır (Bethe, 1936). 1937 yılında Weisskopf, bu termodinamik etkileşimi genelleştirerek enerji hesaplamaları için pek çok çalışma yapmıştır (Weisskopf, 1937). Bu çalışmalarda dikkate alınan nokta, çekirdek uyarılma enerjilerinin termodinamik sıcaklığın karesi ile orantılı olduğudur.

Geçiş enerjilerinin belirlenmesi için yapılan deneysel çalışmalar nötron ve proton aktivasyonu gibi farklı metotları içinde barındırır. Örneğin, $^{120}\text{Te}(\gamma, n)^{119}\text{Te}$ reaksiyonu sonrası ^{119}Te elektron yakalayarak ^{119}Sb 'ye dönüşmektedir (Mazur, 2013). Gelişen teknoloji ve çekirdekler hakkında artan bilgi sayesinde, son yıllarda çekirdeklerin geçiş enerjilerinin belirlenmesi üzerine çalışmalar devam etmektedir (Fuller ve Gerstenberg, 1983; Yoshinaga vd., 1997; Toshioh vd., 2014; Boztosun vd., 2014; Akkoyun vd. 2016; Bayram vd., 2016).

Erbiyum, Carl Gustaf Mosander tarafından 1843 yılında keşfedilen ve doğal bolluk oranı oldukça düşük olan nadir bir elementtir. Yüksek teknoloji alanlarında oldukça geniş bir yelpazede kullanılmakla birlikte, bilinen en önemli kullanım alanı nükleer teknolojidir. Özellikle nükleer reaktörlerde nötron soğurma çubuklarında kullanılmaktadır. Erbiyum için PNR ürünlerinin geçiş enerjileri üzerine sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Kararlı erbiyum çekirdekleri için PNR ürünlerinin deneysel olarak belirlenmiş yarı-ömür süreleri Çizelge 1.1'de verilmektedir (Audi vd., 2003; Anonim, 2016).

Bu tez çalışmasında, cLINAC yardımı ile erbiyum hedefinde gama-nötron (γ, n) reaksiyonu gerçekleştirilerek bu reaksiyon sonucunda oluşan ürün veya ana çekirdeklerin geçiş enerjileri ve yarı ömürleri belirlenmiştir. Bu ölçümler erbiyum için yerel olanaklar kullanılarak ilk defa yapılmıştır. Bu çekirdeklerin geçiş enerjileri ve yarı

ömürleri bugüne kadar farklı deneysel yöntemler ile ölçülmüş olmakla birlikte daha sonra irdeleneceği gibi erbiyum elementinin PNR ürünlerinden ^{161}Ho için ölçülen geçiş enerjilerinin bir kısmı literatürdeki değerlerden daha hassas bir şekilde belirlenmiştir. Ayrıca ^{161}Er için belirlenen yarı ömür değeri literatürdeki uyarlanmış değer ile uyum içerisinde belirlenmiştir.

Çizelge 1.1. Er izotoplarının PNR ürünlerine ait deneysel yarı-ömür değerleri

Çekirdek	PNR	Ürün Çekirdek	Yarı-ömür
^{162}Er	$^{162}\text{Er} + \gamma \rightarrow ^{161}\text{Ho} + p$	^{161}Ho	2,48 saat
^{162}Er	$^{162}\text{Er} + \gamma \rightarrow ^{161}\text{Er} + n$	^{161}Er	3,21 saat
^{164}Er	$^{164}\text{Er} + \gamma \rightarrow ^{163}\text{Er} + n$	^{163}Er	75,0 dakika
^{166}Er	$^{166}\text{Er} + \gamma \rightarrow ^{165}\text{Er} + n$	^{165}Er	10,36 saat
^{168}Er	$^{168}\text{Er} + \gamma \rightarrow ^{167}\text{Ho} + p$	^{167}Ho	3,1 saat

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Radyoaktivite

Radyoaktivite, kararsız atom çekirdeklerinin kararlı hale gelebilmek için tanecikler veya elektromanyetik radyasyon yayması olayıdır. Radyoaktif bozunma sürecinde, çekirdekler alfa (α), beta (β) ve gama (γ) radyasyonlarından birini veya birkaçını yayınlamaya kararlı hale geçmeye çalışırlar. İlk bozunmaya uğrayan radyoaktif çekirdek "ana çekirdek" ve ana çekirdeğin radyoaktif bozunmaya uğraması sonucu oluşan çekirdek ise "kız çekirdek" olarak adlandırılır (Krane, 1987).

2.1.1. Alfa (α) Bozunumu

Atom numaraları 83'ten büyük olan kararlılık çizgisi ötesindeki elementler (ağır elementler) kararlı nötron/proton oranına erişmek için hem proton ve hem de nötron kaybederek kararlılık çizgisine ulaşmaya çalışırlar. Alfa bozunması, radyoaktif çekirdekten atom numarası 2 ve kütle numarası 4 olan He çekirdeğinin ayrılması olayıdır. Doğal olarak bulunan radyoaktif maddelerin yayınladıkları alfa parçacıklarının enerjileri genellikle 9 MeV'in altındadır. Alfa bozunum denklemi aşağıdaki gibidir (Krane, 1987):



Şekil 2.1. Alfa bozunumu şematik gösterimi

2.1.2. Beta (β) Bozunumu

Kararlılık çizgisinin üstünde bulunan elementler daha kararlı nötron/proton oranına erişmek (nötron/proton oranını azaltmak) için beta yayımlaması yapabilirler. Beta bozunumu 3 farklı tür ile gerçekleşebilir.

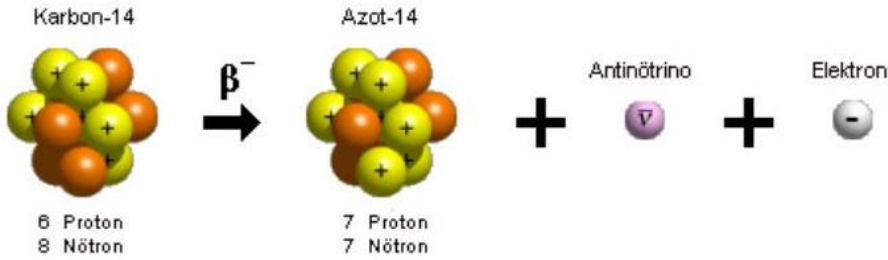
2.1.2.1. β^- Bozunumu:

Eğer kararsızlık nötron fazlalığından kaynaklanıyorsa, çekirdekteki enerji fazlalığını gidermek için nötronlardan biri proton ve elektrona parçalanır. Proton çekirdekte kalırken, elektron hızla atomdan dışarı atılır.

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e \quad (2.2)$$

Yayımlanan yüksek hızlı elektrona beta parçacığı adı verilir. Bu şekilde beta yayılımı yapan çekirdeğin atom numarası bir artarak kendinden bir sonraki elementin izobar atomuna dönüşür. Bu bozunuma da kütle sayısı değişmediği için izobarik bozunum adı verilir ve bozunma denklemi aşağıdaki gibidir:

$${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z+1}Y + {}^0_1e + \bar{\nu}_e \quad (2.3)$$



Şekil 2.2. ${}^{14}\text{C}$ 'nin β^- bozunumunun şematik gösterimi

2.1.2.2. β^+ Bozunumu:

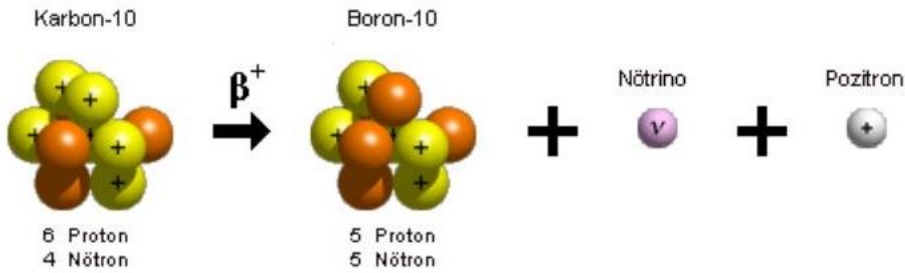
β^+ pozitif yüklü bir elektron olarak düşünülebilir ve pozitron olarak adlandırılır. Atomun kararsızlığı nötron azlığından veya proton fazlalığından kaynaklanıyorsa protonlardan biri nötron ve pozitif yüklü elektrona (pozitrona) dönüşür. Nötron çekirdekte kalır, pozitron dışarı fırlatılır. Böylece pozitron yayımlayan çekirdeğin

proton sayısı bir eksilerek kendinden bir önceki elementin izobar atomuna dönüşür, fakat kütle sayısı değişmez.

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu_e \quad (2.4)$$

Bozunum denklemi aşağıdaki gibidir:

$${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z-1}Y + {}^0_{+1}e + \nu_e \quad (2.5)$$



Şekil 2.3. ${}^{10}\text{C}$ 'nin β^+ bozunumu şematik gösterimi

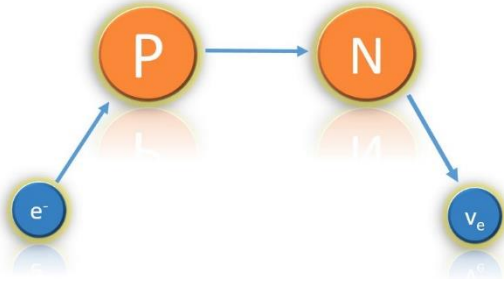
2.1.2.3. Elektron yakalama olayı:

Çekirdek proton fazlalığından dolayı kararsız ise atomun çekirdeğe yakın elektronlarından biri çekirdek tarafından yakalanır. Elektronla bir proton birleşerek nötron ve elektron nötrinosuna dönüşür.

$$p + e^- \rightarrow n + \nu_e \quad (2.6)$$

Pozitron bozunmasında olduğu gibi proton sayısı bir eksilir. Kütle numarası ise aynı kalır. Bu olay için ilgili denklem aşağıdaki gibidir:

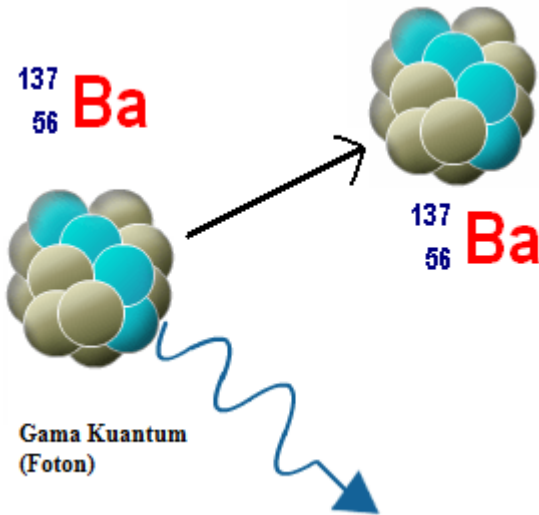
$${}^A_ZX + {}^0_{-1}e \rightarrow {}^A_{Z-1}Y + \nu_e \quad (2.7)$$



Şekil 2.4. Elektron yakalama şematik gösterimi

2.1.3. Gama (γ) Bozunumu

Çekirdek bozunuma uğrayıp bir alfa veya beta yayınladıktan sonra, ürün çekirdek çoğu zaman uyarılmış enerji seviyesinde kalır. Bu durumdaki çekirdek ikinci bir bozunum ile foton yayınlarak daha düşük enerji seviyesine ve sonunda taban enerji seviyesine geçer. Çekirdeğin uyarılmış enerji seviyesinden temel enerji seviyesine geçerken yayınladığı fotonlara gama (γ) ışını denir. Gama bozunum denklemi aşağıdaki gibidir:



Şekil 2.5. ¹³⁷Ba için gama bozunumunun şematik gösterimi

2.2. Radyoaktivite Bozunma Kanunu

Çekirdeklerin yarı ömürlerinin hassas bir şekilde ölçülmesi çekirdeğin yapısı hakkında önemli bilgiler verir. Bunun için pek çok farklı yöntem kullanılır. Bu yarı ömür ölçüm yöntemlerinden biri de PNR'dir. PNR sonucunda oluşan ürün çekirdeklerin yarı ömürleri yayınladıkları gama ışınları yüksek saflıkta Germanyum dedektöründe analiz edilerek belirlenebilir. Bunun için bozunan çekirdek sayısının zamana göre değişimi incelenir. Bozunan çekirdeklerin sayısının zamana göre değişimi aşağıda verilen Denklem (2.9)'da verildiği gibi üstel bir fonksiyon şeklindedir. Eğer bir t anında N tane radyoaktif çekirdek varsa ve bu çekirdeğe yeni çekirdekler eklenmiyorsa dt sürede bozunan çekirdek sayısı dN , N ile orantılıdır:

$$\lambda = \frac{(dN/dt)}{N} \quad (2.9)$$

Burada λ , bozunma veya parçalanma sabitidir. Yukardaki denklemin integrali alınırsa,

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.10)$$

üstel radyoaktif bozunma kanunu elde edilir. Burada N_0 integrasyon sabitidir ve $t=0$ anındaki bozunmamış çekirdek sayısıdır. Yarı ömür $t_{1/2}$, çekirdeklerin yarısının bozunması için gereken süredir. Radyoaktif bozunma denkleminde $N = N_0/2$ konursa

$$t_{1/2} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (2.11)$$

ifadesi elde edilir. Bir çekirdeğin tamamının bozunması için geçen süre ortalama ömür olarak adlandırılır ve τ ile gösterilir. t sürede bozunmadan kalan çekirdek sayısı $N(t)$ 'dir ve t ile $t+dt$ aralığında bozunanların sayısı $|dN/dt|dt$ 'dir. Bu durumda ortalama ömür;

$$\tau = \frac{\int_0^{\infty} t |dN/dt| dt}{\int_0^{\infty} |dN/dt| dt} \quad (2.12)$$

şeklindedir. Paydadaki terim toplam bozunma sayısıdır ve integrali alınırsa;

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad (2.13)$$

bulunur. Bir numunede bozunmamış çekirdeklerin sayısını ölçmek yerine t_1 ve t_2 arasındaki bozunmaların sayısını ölçmek daha kolaydır. Eğer t ile Δt arasındaki çekirdeklerin sayısındaki değişiklik ΔN ile gösterilirse;

$$|\Delta N| = N(t) - N(t + \Delta t) = N_0 e^{-\lambda t} (1 - e^{-\lambda \Delta t}) \quad (2.14)$$

dir. Sayımın yapıldığı süre, λ^{-1} 'den çok küçük ise ikinci üstel açılımındaki yüksek mertebeli ifadeler ihmal edilebilir. Bu durumda

$$|\Delta N| = \lambda N_0 e^{-\lambda t} \Delta t \quad (2.15)$$

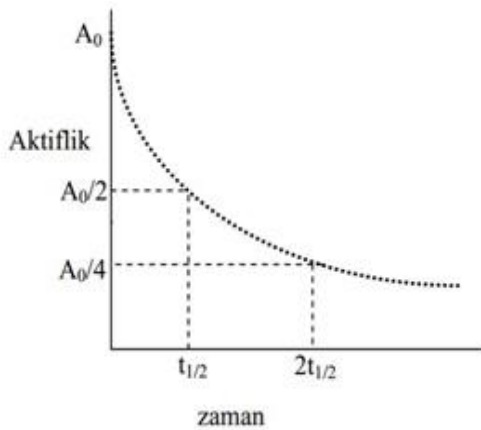
ve sonsuz küçük limitte,

$$\left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.16)$$

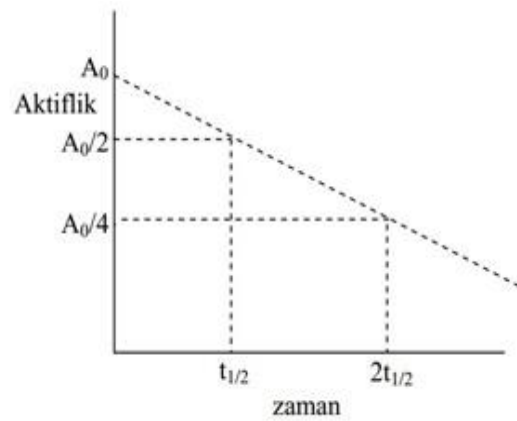
elde edilir. Aktivite $\mathcal{A}$, numunede birim zamanda bozunma sayısı, yani bozunma hızı olarak tanımlanır.

$$\mathcal{A}(t) = \lambda N(t) = \mathcal{A}_0 e^{-\lambda t} \quad (2.17)$$

$t=0$ 'daki başlangıç aktivitesi $\mathcal{A}_0 = \lambda N_0$ 'dır (Krane, 1987).



Şekil 2.6. Aktivitenin üstel bozunumu
Linner çizim



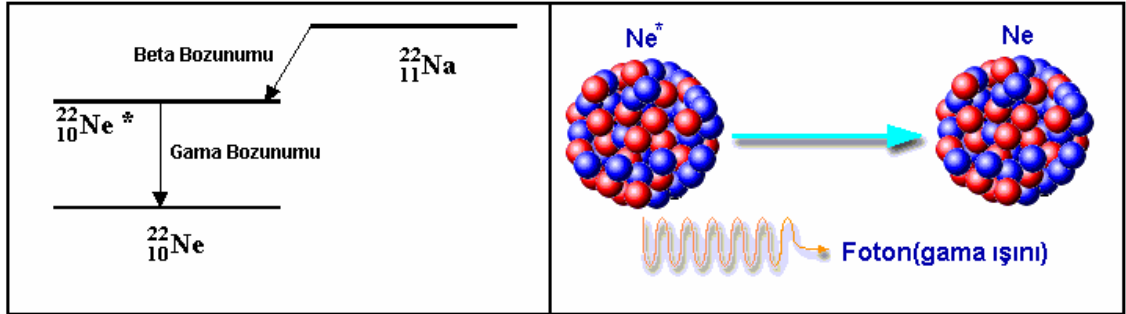
Şekil 2.7. Aktivitenin üstel bozunumu
yarı logaritmik çizimi

Deneyisel çalışmalar sonucunda bir geçiş enerjisine karşılık gelen belirli bir pik için sayım sayısının zamana bağlı olarak değişiminden faydalanılarak yarı logaritmik ve doğrusal grafikler yardımı ile ilgili geçiş enerjisine karşılık gelen yarı ömür süresi belirlenir.

2.3. Gama Işını

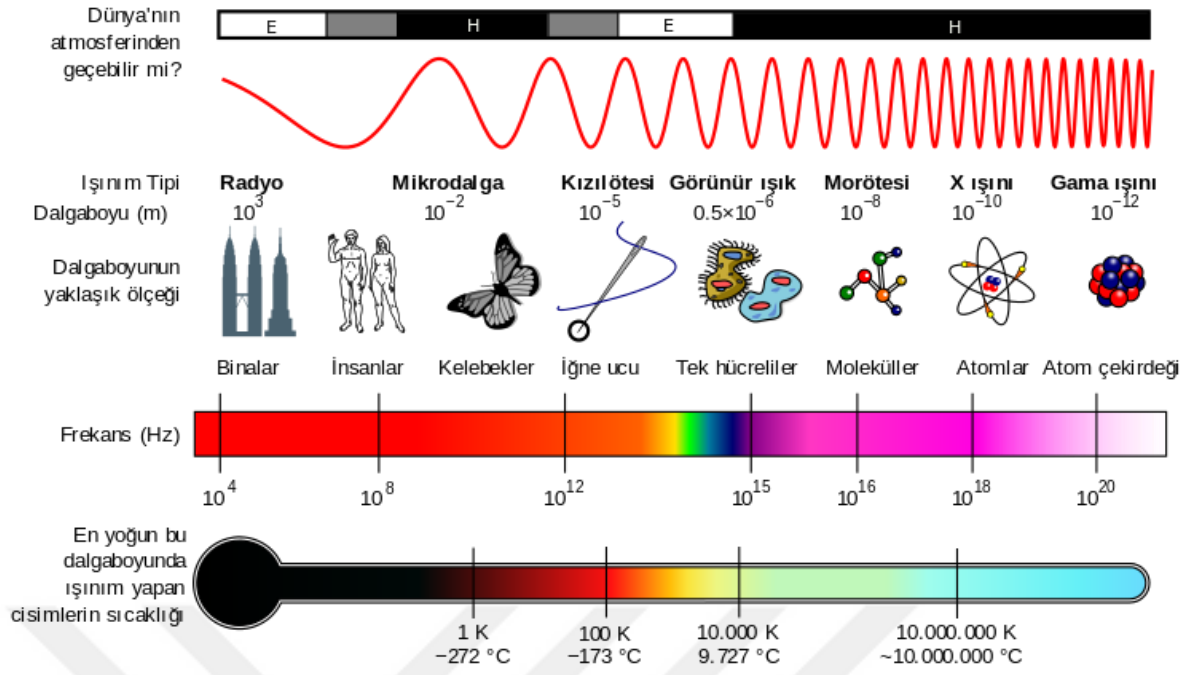
Radioaktif bozunum (alfa veya beta) yapmış veya bir nükleer reaksiyondan sonra ortaya çıkan ürün çekirdek, genellikle, uyarılmış enerji seviyesinde kalır. Bu durumdaki çekirdek ikinci bir bozunum ile bir foton yayınlayarak daha düşük enerji seviyesine ve sonunda taban enerji seviyesine geçer. Bu şekilde, çekirdeğin uyarılmış enerji seviyesinden temel enerji seviyesine geçerken yayınladığı fotonlara gama ışını denir.

Na (sodyum)'nın, beta bozunumu yaparak Ne (neon)'nin uyarılmış haline dönüşmesi ve uyarılmış halde bulunan Ne çekirdeğinin gama bozunumu ile temel enerji seviyesine düşerken yayınladığı gama ışını Şekil 2.8'de şematize edilmiştir.



Şekil 2.8. Ne(neon) için gama bozunumu şematik gösterimi

Gama ışınlarının enerjileri tipik olarak 0,1 - 10 MeV arasında olup çekirdek durumları arasındaki enerji farkı mertebesinde ve bu 10 ile 100 fm dalga boyu aralığına karşılık gelir. Gama ışınları Şekil 2.9'da gösterilen elektromanyetik spektrumun en kısa dalga boylu ve en yüksek enerjili olanlarıdır, kütleleri yoktur ve yüksüzdürler dolayısı ile elektrik ve manyetik alanda sapmazlar, yüksek enerjilerinden dolayı madde içerisinde yol alabilirler, ışık hızı ile yayılırlar (Akkoyun, 2006).



Şekil 2.9. Elektromanyetik spektrum

2.4. Gama Işınının Madde İle Etkileşmesi

Gama ışını madde ile fotoelektrik olay, Compton saçılması ve çift oluşumu olmak üzere 3 temel şekilde etkileşir.

2.4.1. Fotoelektrik Olay

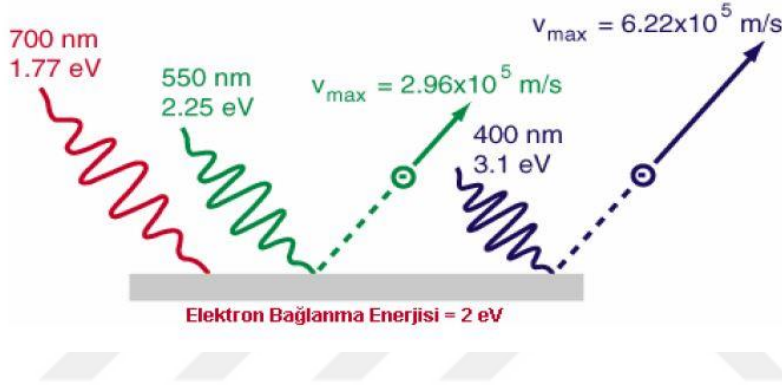
Fotoelektrik olay, E_γ enerjisi ile metal bir malzemeye gelen gama ışını E_b bağlanma enerjisi ile bağlı bir elektronla etkileşerek enerjisini aktarır ve elektron kopmuş olur. Bu olaya Fotoelektrik olay denir ve kopan elektron fotoelektrondur. Kopan elektronun kinetik enerjisi:

$$E_k = E_\gamma - E_b \quad (2.18)$$

Bu etkileşim sırasında gama ışınının bütün enerjisi kaybolur fakat bu enerji tamamen elektronlara kinetik enerji olarak aktarılmaz. Bir kısmı elektronu uyarmak için kullanılır.

Fotoelektrik soğurumdan sonra fotoelektrondan boş kalan yerin başka elektronlar tarafından doldurulması ile birlikte karakteristik X-ışınları yayınlanır. Bu X-

ışınlarının soğurulması ve ikincil elektronların kinetik enerjilerine dönüşmeleri bir anlamda kayıp enerjiyi geri çağırmak olacaktır. Teorik olarak artık fotonların enerjisinin bir kısmı, geri tepen atomların kinetik enerjisine geçer ancak bu ihmal edilebilir. Diğer yandan, geri tepen atom tarafından taşınan momentum önemlidir. Bu sayede momentumun serbest bir elektron tarafından fotoelektrik etki ile dönüştürülemeyeceği gösterilebilir. Bu yüzden fotoelektrik etki için kullanılacak elektronların atoma bağlılığı şarttır. Şekil 2.10'da potasyum metaline gelen fotonlar için fotoelektrik olayın diyagramı gösterilmiştir. Potasyum için bağlanma enerjisi 2 eV değerinden yüksek olduğundan dolayı, bu enerjinin altındaki fotonlar elektron koparamaz. (Akkoyun, 2006).



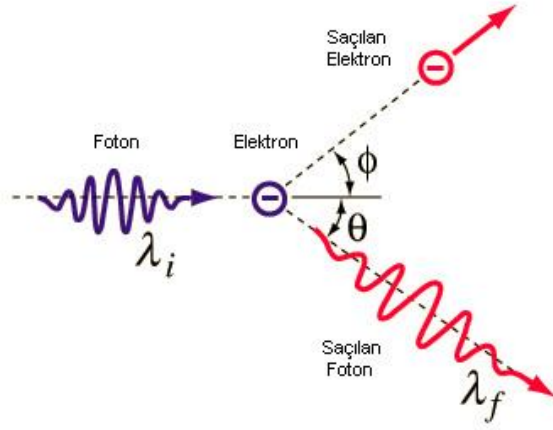
Şekil 2.10. Potasyum metaline gelen fotonların fotoelektrik diyagramı

2.4.2. Compton Olayı

Compton, elektronlardan X-ışınlarının saçıldığını gözlemlemiş ve saçılan X-ışınlarının dalga boyunun gelen ışınınkinden daha uzun olduğunu bulmuştur. Dalga boyundaki artış, Compton formülüne göre,

$$\lambda_f - \lambda_i = \Delta\lambda = \frac{h}{m_e} (1 - \cos\theta) \quad (2.19)$$

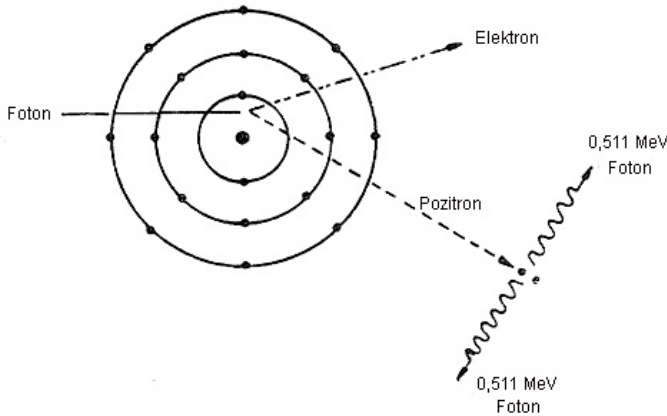
şeklinde dir. Burada λ_i gelen fotonun dalga boyu, λ_f saçılan fotonun dalga boyu, h Planck sabiti ve m_e elektronun kütlesidir. Compton olayı, ışığın tanecik (foton) karakterinde olduğunu gösterir. Foton ve elektron arasındaki etkileşimde enerji ve momentumun korunumu ilkeleri kullanılarak Denklem (2.19) kolayca elde edilebilir. Saçılan fotonun enerjisi daha düşüktür, bu nedenle dalga boyu daha uzundur.



Şekil 2.11. Compton saçılması şematik gösterimi

2.4.3. Çift Oluşumu

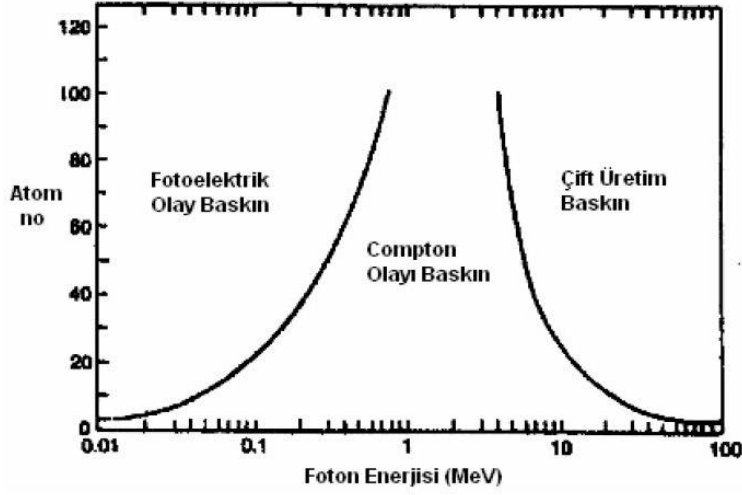
Çift oluşumu olayında gelen gama ışını çekirdeğin yakınında elektron-pozitron çifti üretecek şekilde yok olur. Bir elektron ya da pozitronun durgun kütlesi 0,511 MeV'dir. Dolayısıyla çift oluşumunun gerçekleşebilmesi için en az 1,022 MeV enerjili bir foton gerekir. Çift oluşumu sonucunda ortaya çıkan pozitron çok uzun süre ortamda kalmaz ve bir elektron ile birleşerek iki gama ışını oluşturur. Bu gama ışınlarından biri dedektöre ulaşırsa 511 keV enerji değerinde bir pik görülür bu pike, yok oluş piki yani annihilasyon (annihilation) piki denir.



Şekil 2.12. Çift oluşumu şematik gösterimi (Seyrek, 2007)

Bu üç etkileşmeyi bir grafikte özetleyecek olursak; düşük foton enerjilerinde ve büyük Z (atom) numaralı atomlarda fotoelektrik olay baskındır. Enerji değeri arttıkça, fotonun soğurulma olasılığı azalacağından dolayı, etkileştiği atom tarafından

soğrulmayacak fakat Compton saçılmasına uğrayacak ve saçılacaktır. 5 MeV'in üzerindeki enerjilerde ise çift oluşumu baskın hale gelecektir.



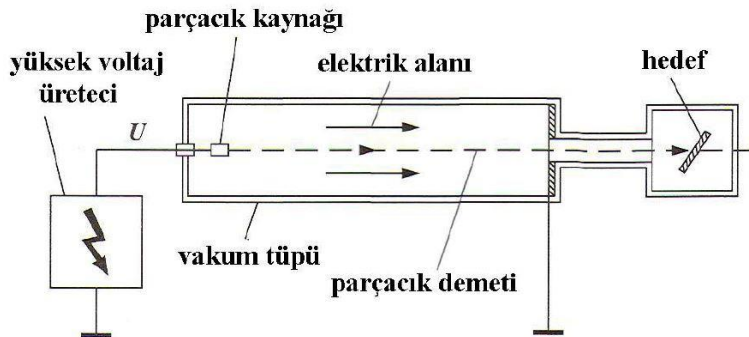
Sekil 2.13. Fotoelektrik olay, Compton olayı ve çift oluşumunun baskın olduğu bölgeler (Krane, 1987)

3. GEREÇ VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında erbiyum çekirdeklerinin PNR reaksiyon ürünlerinin geçiş enerjileri ve yarı ömürlerinin deneysel olarak belirlenmesi hedeflenmiştir. Çalışmanın deneysel kısmı erbiyum hedefinin aktivasyonunu ve aktivasyon sonrası oluşan erbiyum PNR ürün çekirdeklerinin sayımını içeren iki aşamadan oluşmaktadır. Deney sonrası ise gerçekleştirilen sayımların analizi yapılmıştır. Bu nedenle bu bölümde aktivasyon, aktivasyon sonrası sayım ve sayımların analizi ile ilgili detaylı açıklamalar maddeler halinde sunulmaktadır.

3.1. Erbiyum Hedef Elementinin cLINAC ile Aktivasyonu

Elektron doğrusal hızlandırıcının (cLINAC) çalışma prensibi, elektronların vakum ortamında doğrusal bir kılavuzunun içinde hızlandırılması ve manyetik alanlar ile yönlendirilmesine dayanmaktadır. İlk olarak vakum ortamında bulunan tungsten bir dirençten elektrik akımı geçirilerek elektronlar termiyonik olarak yayımlanır. Bu elektronlar düşük enerjili (~50 keV) olup, radyofrekans (RF) üretici (magnetron veya klystron) ile oluşturulan RF dalgalarına bindirilerek doğrusal dalga kılavuzunda hızlandırılırlar. Bu dalga kılavuzunun çevresinde bulunan kuadrapol mıknatıslar ile ışın doğrusal olarak şekillendirilir ve yönlendirilir. Daha sonra isteğe bağlı olarak elektron demetinin önüne tungsten veya tantal bir bremsstrahlung foton dönüştürücüsü yerleştirilerek yüksek enerjili frenleme (bremsstrahlung) ışınları elde edilir (Berbeco vd., 2004; Alfuraih vd., 2008; Chao vd., 2009; Tatari ve Ranjbar, 2014). Çalışmada yararlanılan elektron doğrusal hızlandırıcısı kullanılarak 4, 6, 18 ve 25 MeV'lik uç nokta enerjisine sahip bremsstrahlung ışınları üretilmektedir (Boztosun vd, 2014).



Şekil 3.1. Doğrusal elektron hızlandırıcı şematik gösterimi



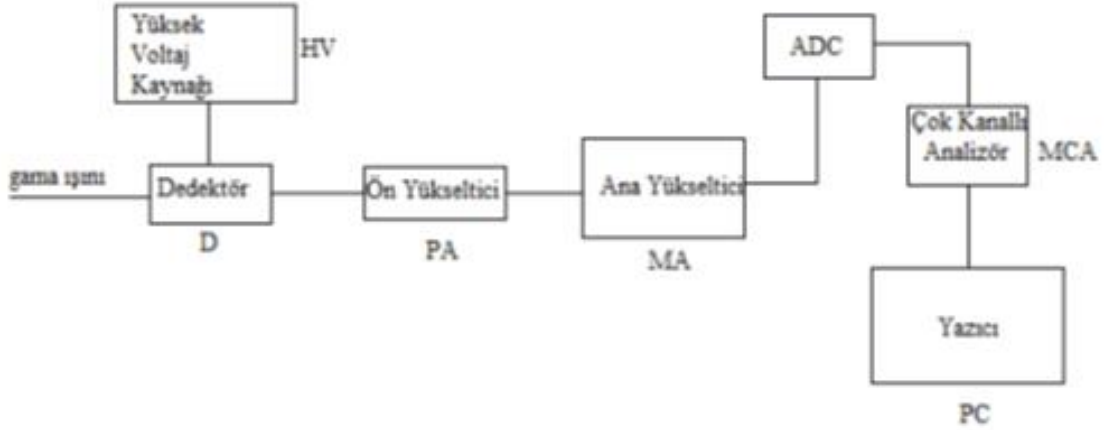
Şekil 3.2. Akdeniz Üniversitesi Nükleer Bilimler Uygulama ve Araştırma Merkezinde bulunan cLINAC

Bu tez çalışmasında Akdeniz Üniversitesi Nükleer Bilimler Uygulama Ve Araştırma Merkezinde bulunan cLINAC (Electa) kullanılarak Er hedefi üzerinde PNR reaksiyonları gerçekleştirilmiştir. Bu aktivasyon için 25 gr Er toz numunesi, küçük bir numune kabının içerisinde hazırlanmıştır. Er çekirdeğinin bolluk oranlarına göre birçok izotopunu içeren numune, 60 cm uzaklıkta, 14 MeV'lik maksimum enerjili bremsstrahlung fotonları ile bombardıman edilmiştir. Aktivasyon süresi 45 dakika olup aktivasyon sırasında herhangi bir arındırma, deneysel kısıtlamalar sebebi ile gerçekleştirilememiştir.

3.2. Erbiyum PNR Ürünlerinin HpGe Dedektör ile Sayımı

Yüksek saflıktaki HPGe dedektörü, beraberinde ön yükseltici ve yüksek voltaj filtresi ile güç kaynağı, yükseltici, analog sayısal dönüştürücü, çok kanallı analizör, bilgisayar ve yazıcıdan oluşur. Gama ışınlarının dedektör kristalinde algılanması sonucu ortaya çıkan darbeler, dedektörün bağlı olduğu elektronik modüllerin uygun bir kombinasyonu yardımıyla analiz edilir ve gama ışını yayan izotopların nitel ve nicel tanımlanması yapılır. Gama spektrometresi çeşitli radyoaktif numunelerdeki radyoizotopların tanımlanmasında en çok kullanılan tekniktir. Çünkü gama ışınlarının enerjisi her bir çekirdek için kesikli ve karakteristiktir.

Şekil 3.3’de bu çalışmada gama spektroskopisi için kullanılan yüksek saflıkta germanyum dedektörünün çalışma düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Gama spektroskopisi için kullanılan dedektör sistemi

HPGe detektörlerden en yaygın olarak kullanılanları, silindirik şeklindeki külçelerden oluşur. Germanyum dedektörün maksimum verimde kullanımını sağlamak için, genellikle silindirik bir geometriden yapılır. Bu çalışmada Er çekirdeğinin PNR ürünlerinin geçiş enerjilerinin belirlenmesi için kullanılan, Akdeniz Üniversitesi Nükleer Bilimler Uygulama ve Araştırma Merkezi’nde bulunan ORTEC marka HPGe dedektör sistemi Şekil 3.4’de gösterilmektedir (Dülger, 2016).



Şekil 3.4. Akdeniz Üniversitesi Nükleer Bilimler Uygulama ve Araştırma Merkezi’nde bulunan ORTEC marka HPGe dedektör sistemi

Kullanılan dedektör p tipi, koaksiyel (eş eksenli), elektrik soğutuculu AMATEK-ORTEC (GEM40P4-83) model HPGe dedektörüdür. HPGe dedektörünün verimi %40 olup ^{57}Co radyoizotopunun 122 keV'deki piki için yarı yükseklikteki tam genişlik (FWHM) değeri 0.77 keV, ^{60}Co radyoizotopunun 1332 keV'deki piki için FWHM değeri 1,85 keV'dir. HPGe dedektörü güç kaynağına, bir yükselticiye, ADC'den (analog dijital dönüştürücü) oluşan kasaya ve bir bilgisayara bağlanmıştır. Dedektör, 10 cm kalınlığındaki kurşun bir zırh içerisinde bulunmaktadır. Ayrıca zırhtan kaynaklanabilecek X-ışınlarını filtrelemek için kurşun zırhın iç kısmı 2 mm bakır folyo ile kaplanmıştır. Dedektörün enerji kalibrasyonu için ^{60}Co , ^{22}Na , ^{54}Mn , ^{109}Cd , ^{57}Co , ^{137}Cs ve ^{133}Ba kaynakları kullanılmıştır (Şekil 3.5). Veri toplama ve analiz işlemleri MAESTRO (ORTEC) VE GF3 (Anonim, 2016) yazılımları ile gerçekleştirilmiştir. Aktivite sayım işlemleri yaklaşık olarak 75 saat sürmüştür.



Şekil 3.5. HPGe dedektörün kalibrasyonu için kullanılan radyoaktif kaynaklar

4. BULGULAR

Çizelge 4.1’de, kararlı ^{162}Er , ^{164}Er , ^{166}Er , ^{167}Er , ^{168}Er ve ^{170}Er izotoplarının doğal bolluk oranları gösterilmektedir. Bu izotoplar için bir nötron ve bir proton ayırma enerjileri sırasıyla 6,437-9,204 ve 6,426-8,600 MeV arasındadır (Anonim, 2016). Bu çalışmada gerçekleştirilen aktivasyon enerjisi 14 MeV’e kadar uzandığından, aktivasyon sonrası bütün kararlı Er çekirdeklerinde PNR gerçekleşmesi beklenmektedir.

Çizelge 4.1. Er izotoplarına ait bolluk oranları

Çekirdek	Bolluk Oranı
^{162}Er	0,139%
^{164}Er	1,601%
^{166}Er	33,503%
^{167}Er	22,869%
^{168}Er	26,978%
^{170}Er	14,910%

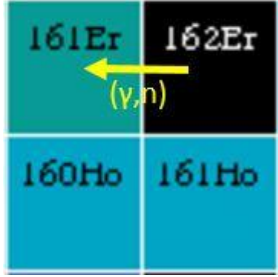
Kuşkusuz bütün kararlı Er izotoplarında PNR gerçekleşse dahi bu ürünlerin belirlenmesinde çeşitli deneysel kısıtlamalar bulunmaktadır. Işınlama sonucunda oluşan çekirdeklerin yarı ömürleri yaptığımız bu deneyde esas kısıtlamadır. Oluşan çekirdeğin yarı ömrü birkaç saniye veya dakika ise, oluşan çekirdeklerin gözlemlenmesi mümkün değildir. Ayrıca ışınlama sonucu oluşan çekirdeğin yarı ömrü gün veya ay mertebesinde ise, yaklaşık 75 saatlik sayım işlemimiz çerçevesinde bu ürünlerin gözlemlenmesi çok olanaklı değildir. Bu hususlar göz önüne alındığında, ^{162}Er ve ^{164}Er çekirdeklerinin (γ, n) reaksiyonu sonucu olarak ^{161}Er ve ^{163}Er izotoplarının gözlemlenmesi beklenmektedir.

Numunemizde bulunan ^{162}Er bolluk oranı en küçük olan izotoptur ve gözlemlenebilecek PNR:



Denklem 4.1’de belirtildiği gibi gama ışınına maruz kalan ^{162}Er , aktivasyon sonucunda bir nötron kaybederek kararsız $^{161}\text{Er}^*$ çekirdeğine dönüşür. Daha sonra $^{161}\text{Er}^*$ çekirdeği elektron yakalayarak, kararsız $^{161}\text{Ho}^*$ ’a dönüşür. Kararsız $^{161}\text{Ho}^*$ çekirdeği kararlı hale geçmek için gama ışınları yayınlar. Bu olası bozunum yolu için bu

çalışmada elde ettiğimiz deneysel spektrum Şekil 4.2'de gösterilmektedir. Bu spektrum başka bozunum yolları da içermekle beraber, bu şekilde enerji değerleri gösterilen pikler, ^{161}Ho çekirdeğinin geçiş enerjileri ile ilgili piklerdir.

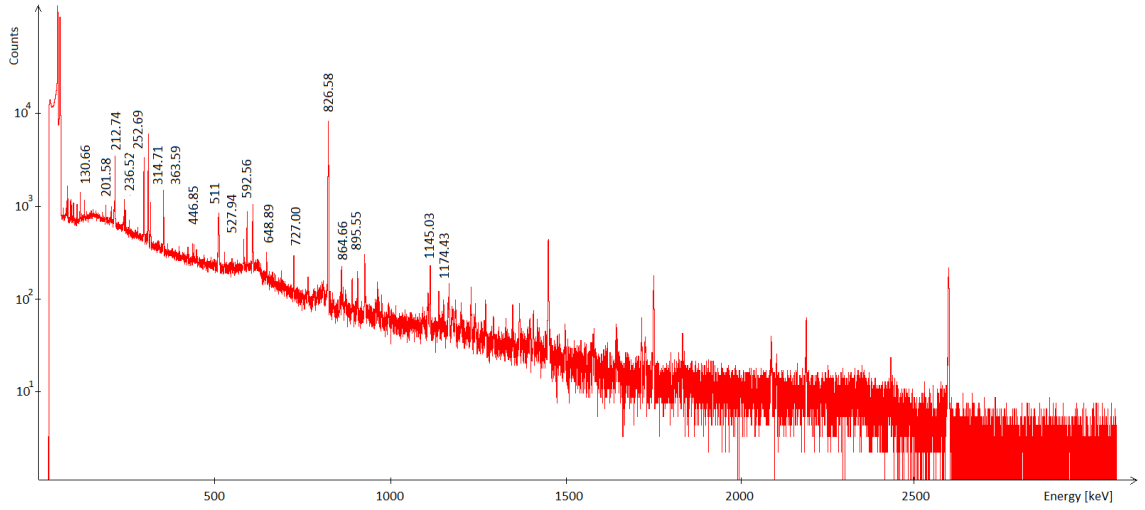


Şekil 4.1. ^{162}Er 'un gama ile etkileşmesi sonucu gerçekleşen PNR ile $^{161}\text{Er}^*$ dönüşümü

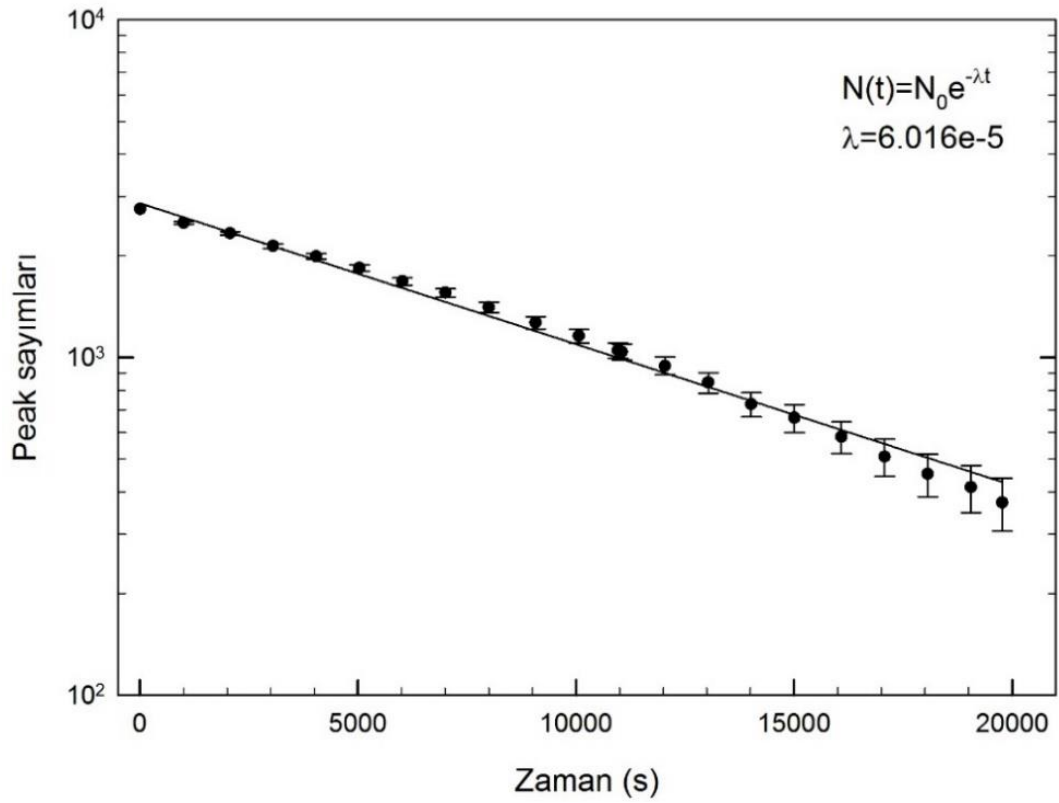
Aktivasyondan sonra çekirdekler genellikle uyarılmış durumdadırlar ve bu çekirdekler enerji seviyeleri arasındaki geçiş enerjileri ile ilişkili gama ışınları yayınlırlar. İzotopun tanımlanması, bu gama ışınlarının saptanmasıyla elde edilebilir. Ayrıca ilgili tepe noktalarını analiz ederek, ana çekirdeğin yarı-ömür bilgisi çıkartılabilir. Bu çalışmada, ^{161}Ho izotopuna ait gama ışını tepe noktaları analiz edilmiştir. Analizler RadWare program paketi kullanılarak yapılmıştır. Program, gama-ışını spektrumlarını gösterir ve her tepe noktasını bulma imkânı sunar. Ölçüm öncesi ve ölçüm sonrasında iki kez kaydedilen kalibrasyon pikleri kullanılarak, ağırlıklı ortalama enerji ve verimlilik değerleri ile nihai kalibrasyon yapılmıştır.

Çizelge 4.2'de bu deneysel çalışmada gerçekleştirilen analizler sonucunda ^{161}Ho çekirdeğine ait 21 geçiş enerjisi listelenmektedir. Ayrıca karşılaştırma için literatür değerleri de hata payları ile birlikte sunulmaktadır (Reich, 2011).

Spektrumdaki piklerin altında kalan alan, sayım sayısını vermektedir. Buradan hareket ile ilgili pikin bozunma eğrisi elde edilebilir. Buradan ana çekirdeğin yarılanma ömrü bilgilerini elde etmek mümkündür. Bu çalışmada ^{161}Er çekirdeğinin yarılanma ömrünün deneysel olarak belirlenmesi için, ^{161}Ho çekirdeğinin 314,71 keV enerjili piki seçilmiştir (Şekil 4.2). Bu pik için sayım sayısının zamana göre değişimini gösteren grafik, Şekil 4.3'te gösterilmektedir. Üstel bozunma yasası dikkate alınarak elde edilen bozunma sabiti değeri, $\lambda=6,016 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.2. Er hedef elementinin aktivasyon sonrası elde edilen gama spektroskopisinde ^{161}Ho için analiz sonucu belirlenmiş geçiş enerji pikleri



Şekil 4.3. ^{161}Er çekirdeğinin yarılanma ömrünün belirlenmesi için kullanılan ^{161}Ho çekirdeğinin 314,71 keV'lik pikine karşılık gelen bozunma eğrisi

Sayım sayısını bulabilmek için dedektördeki sayım süreci incelenmekte ve elde edilen spektrumda ki piklerin altında kalan alan bize sayım sayısını vermektedir. Dedektörde ki spektrum kayıt sistemi, bir önceki sayımı silmeden üst üste kaydetmektedir. Her kayıt esnasında bir önceki spektrumunda sayım verileri bulunmaktadır. Bu şekilde yapılacak hesaplama sonucu yanlış olacağından, yazılımlar aracılığı ile belirlenen sayım sayıları birbirlerinden çıkarılmış ve $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$ bu fonksiyonla fit edilmiştir. Yarı ömür hesabı yapabilmek için net pik ve aktiviteden yararlanılarak bozunma sabitine gidilmiştir. Bozunma sabitinden sonra yarı-ömür hesabı yapılmıştır. Yarı ömür hesabı yapabilmek için ROOT için yazılmış fit programı kullanılmıştır.

Yapılan yarı-ömür hesabı sonucunda ^{161}Er izotopunun yarı-ömrü $T_{1/2} = 3,20(9)$ sa olarak belirlenmiştir. Bu değer ^{161}Er için literatürdeki $3,20(3)$ sa yarı-ömür değeri ile uyum içerisindedir.

Çizelge 4.2. ^{161}Ho 'nun geçiş enerji pikleri ve literatürdeki değerleri

Geçiş Seviyeleri	Pik Enerjisi [keV]	Literatür Değeri [keV]
$7/2^+ \rightarrow 3/2^+$	130,66(6)	130,85(3)
$1/2^- \rightarrow 3/2^+$	201,58(3)	201,47(3)
$3/2^- \rightarrow 5/2^+$	209,29(3)	209,36(3)
$1/2^+ \rightarrow 7/2^-$	211,18(1)	211,15(3)
$1/2^- \rightarrow 1/2^+$	212,74(6)	212,77(3)
$5/2^- \rightarrow 3/2^+$	236,52(6)	236,42(3)
$7/2^+ \rightarrow 7/2^-$	252,69(4)	252,69(3)
$3/2^- \rightarrow 1/2^+$	314,71(2)	314,77(4)
$5/2^- \rightarrow 7/2^+$	363,59(7)	363,6(4)
$5/2^+ \rightarrow 7/2^-$	446,85(7)	446,9(1)
$5/2^+ \rightarrow 7/2^+$	507,44(9)	507,6(2)
$5/2^- \rightarrow 3/2^+$	527,94(8)	528,0(2)
$3/2^- \rightarrow 7/2^-$	592,56(1)	592,6(1)
$5/2^- \rightarrow 7/2^-$	648,89(4)	649,0(2)
$5/2^- \rightarrow 9/2^-$	727,00(4)	726,8(4)
$5/2^- \rightarrow 7/2^-$	826,58(4)	826,6(1)
$3/2^- \rightarrow 3/2^-$	864,66(4)	864,9(3)
$5/2^- \rightarrow 5/2^+$	895,55(5)	895,7(2)
$5/2^- \rightarrow 3/2^-$	931,50(4)	931,7(2)
$3/2^- \rightarrow 5/2^+$	1145,03(6)	1145,1(3)
$3/2^- \rightarrow 3/2^+$	1174,43(5)	1174,6(3)

5. TARTIŞMA

¹⁶¹Ho'nun geçiş enerjileri ile ilgili yapılan bu çalışmada elde edilen gama ışını enerji pikleri, literatürdeki uyarlanmış 21 değer ile karşılaştırılarak daha hassas daha az hassas elde edilen değerler sırası ile Tablo 5.1 ve Tablo 5.2'de belirtilmiştir.

Çizelge 5.1. ¹⁶¹Ho'nun literatürdeki değerlerine göre daha hassas elde edilen geçiş enerjileri ve ilgili geçişlere ait seviyeler

N	Geçiş Seviyeleri	Pik Enerjisi [keV]	Literatür Değeri [keV]
1	$7/2^+ \rightarrow 3/2^+$	130,66(6)	130,85(3)
2	$1/2^- \rightarrow 1/2^+$	212,74(6)	212,77(3)
3	$5/2^- \rightarrow 3/2^+$	236,52(6)	236,42(3)
4	$7/2^+ \rightarrow 7/2^-$	252,69(4)	252,69(3)
5	$5/2^- \rightarrow 7/2^+$	363,59(7)	363,6(4)
6	$5/2^+ \rightarrow 7/2^-$	446,85(7)	446,9(1)
7	$5/2^+ \rightarrow 7/2^+$	507,44(9)	507,6(2)
8	$5/2^- \rightarrow 3/2^+$	527,94(8)	528,0(2)
9	$5/2^- \rightarrow 7/2^-$	648,89(4)	649,0(2)
10	$5/2^- \rightarrow 7/2^-$	826,58(4)	826,6(1)
11	$3/2^- \rightarrow 3/2^-$	864,66(4)	864,9(3)
12	$5/2^- \rightarrow 5/2^+$	895,55(5)	895,7(2)
13	$5/2^- \rightarrow 3/2^-$	931,50(4)	931,7(2)
14	$3/2^- \rightarrow 5/2^+$	1145,03(6)	1145,1(3)
15	$3/2^- \rightarrow 3/2^+$	1174,43(5)	1174,6(3)

Çizelge 5.2. ¹⁶¹Ho'nun literatürdeki değerlerine göre daha az hassas elde edilen geçiş enerjileri ve ilgili geçişlere ait seviyeler

N	Geçiş	Pik Enerjisi [keV]	Literatür Değeri [keV]
1	$1/2^+ \rightarrow 7/2^-$	211,18(1)	211,15(3)
2	$3/2^- \rightarrow 1/2^+$	314,71(2)	314,77(4)

Bu çalışmada, hedef Er elementinde bulunan kararlı izotopların tamamının bremsstrahlung ışınları ile ışınlanmasına rağmen, deneysel kısıtlamalar nedeni ile bu izotopların hepsinde PNR gözlenmesi mümkün olmamıştır. Bu kısıtlamaların en önemlilerinden birisi, çok kısa ve çok uzun yarı ömürlü ürün çekirdeklerin bu çalışmadaki deneysel sistemde belirlenememesidir. Bir başka neden ise her bir çekirdek için nükleon/parçacık koparma eşik enerjilerinin yetersiz olması, PNR tesir kesitinin düşük olmasıdır. Bu da, bazı ürün çekirdeklerin geçiş enerjilerine ait piklerin

şiddetlerinin düşük olması nedeni ile iyi bir belirlemenin yapılamamasına sebep olmuştur. Ayrıca bu deneysel çalışmada kullanılan cLINAC sabit bir enerjide foton yerine, geniş bir enerji aralığına sahip (0-14 MeV) fotonlar yaymaktadır ve 14 MeV'e ulaşınca kadar γ yoğunluğu hızlı bir şekilde azalmaktadır. Bu da, iki nötron ve iki proton koparılmasının mümkün olmadığı anlamına gelmektedir. Ancak bu koşullarda dahi Er hedef elementi için PNR ürünlerinden ^{161}Ho için geçiş enerjileri hassas bir şekilde belirlenerek literatüre kazandırılmıştır.



6. SONUÇ

Bu tez çalışmasında beş kararlı izotopu olan erbiyum hedef elementi, modifiye edilmiş cLINAC kullanılarak PNR gerçekleştirmek için bombardıman edilmiştir. Yapılan ölçüm sonuçlarının analizinden, bu uygulama sonrası PNR gözlemlenmiştir. Yapılan analizler sonucunda, ^{162}Er çekirdeğinin PNR sonrası bir nötron kaybederek kararsız $^{161}\text{Er}^*$ çekirdeğine dönüştüğü ve bunun da elektron yakalayarak ^{161}Ho çekirdeğine dönüştüğü belirlenmiştir. Bu sonuca gama spektrumunda gözlenen ^{161}Ho çekirdeğine ait geçiş enerjileri ile ilgili piklerden ulaşılmıştır. Bu tez çalışmasında ^{161}Ho çekirdeğine ait 21 geçiş enerjisi deneysel olarak belirlenmiştir. Bu değerlerin büyük bir kısmının hassasiyetinin, literatürdeki değerlerden daha yüksek olduğu görülmüştür.

Belirlenen ^{161}Ho çekirdeğinin geçiş enerjilerinden hassasiyeti yüksek piklerden 314,71 keV'lik pike ait sayımların zamana göre değişimleri analiz edilerek, ^{161}Er çekirdeğinin yarı ömrü 3,20 saat olarak literatürdeki uyarlanmış değer ile uyum içerisinde belirlenmiştir.

Bu tez çalışması ayrıca, oldukça küçük bütçeli imkanlar (klinik hızlandırıcı ve dedektör sisteminden oluşan deneysel düzenek) ile temel nükleer bilim çalışmalarına katkı yapılabilceğini göstermektedir. Buradan görüleceği gibi, sınırlı ulusal olanaklarla dahi olsa literatürde eksik PNR verilerinin tamamlanabileceği gerçeğinden hareketle bu ve bu benzeri çalışmaların sürdürülmesi mümkündür.

KAYNAKLAR

1. Akkoyun S. 2006. Uzayda Gama Işını Ölçümleri-Bir Geant Simülasyonu. Yüksek Lisans, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 58 s.
2. Akkoyun S., Bayram T., Dulger F., Dapo H., Boztosun I., 2016. Energy level and half-life determinations from photonuclear reaction on Ga target, *Int. J. Mod. Phys. E*, **25** 1650045.
3. Alfuraih A. vd., 2008. Measurement of the photonuclear neutron yield of 15 MV medical linear accelerator, *J. Rad. Nucl. Ch.* **278** 681.
4. Audi G., Bersillon O., Blachot J. ve Wapstra A. H., 2003. The NUBASE Evaluation of Nuclear and Decay Properties, *Nuclear Physics A*, **729** 3.
5. Anonim, 2016. <http://www.nndc.bnl.gov/nudat2/chartNuc.jsp> (Erişim tarihi: 08.12.2016)
6. Anonim, 2017. <http://radware.phy.ornl.gov/main.html>, (Erişim tarihi: 9.05.2017)
7. Bayram T., Akkoyun S., Uruk S., Dapo H., Dulger F., Boztosun I., 2016. Transition energy and half-life determinations of photonuclear reaction products of erbium nuclei, *Int. J. Mod. Phys. E*, **25** 1650107.
8. Berbeco R. vd., 2004. Integrated radiotherapy imaging system (IRIS): design considerations of tumour tracking with linac gantry-mounted diagnostic x-ray systems with flat-panel detectors, *Phys. Med. Biol.*, **49** 243.
9. Berman B. L., 1975. Atlas of Photoneutron Cross Sections Obtained with Monoenergetic Photons, *At. Data. Nucl. Data Tables*, **15** 319.
10. Bethe H. A., 1936. An Attempt to Calculate the Number of Energy Levels of a Heavy Nucleus, *Phys. Rev.*, **50** 332.
11. Boztosun I. vd., 2014. The Results of the First Photonuclear Reaction Performed in Turkey: The zinc Example, *Turkish Journal of Physics*, **38**, 1.
12. Boztosun I. vd., 2015. Photonuclear reactions with zinc: A case for clinical linacs, *Eur. Phys. J. Plus*, **130** 185.
13. Chadwick J. ve Goldhaber M., 1934. A ‘Nuclear Photo-effect’: Disintegration of the Dipion by γ -Rays, *Nature* **134** 237.
14. Chao H. J. vd., 2009. Using medical accelerators and photon activation to determine Sr/Ca concentration ratios in teeth, *Appl. Radiat. Isot.* **67** 1121.

15. Dietrich S. S. ve Berman B. L., 1988. Atlas of Photoneutron Cross Sections Obtained with Monoenergetic Photons, *At. Data. Nucl. Data Tables*, **38** 199.
16. Dulger F., Akkoyun S., Bayram T., Dapo H. ve Boztosun I., 2015. Energy levels and half-lives of gallium isotopes obtained by photo-nuclear reaction, *Journal of Physics: Conf. Ser.* **590** 012051.
17. Dölger F., 2016. Fotonükleer Reaksiyon Yöntemi İle Tungsten İzotoplarının Enerji Seviyeleri ve Yarı Ömürlerinin Belirlenmesi. Yüksek Lisans, Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Antalya, 38 s.
18. Electa, Elekta Digital Accelerator, Technical Training Guide (Teknik destek kitabı, yayınlanmamış).
19. Filipescu, D. vd., 2015. Perspectives for photonuclear research at the Extreme Light Infrastructure – Nuclear Physics (ELI-NP) facility, *Eur. Phys. J. A*, **51** 185.
20. Fuller E. G. ve Gerstenberg H., 1983. Photonuclear data - abstract sheets (U.S. Dept. of Commerce, National Bureau of Standards).
21. IAEA-TECDOC-1178, 2010. Handbook on Photonuclear Data for Applications Cross Sections and Spectra (IAEA Nuclear Data Section).
22. Karl S., 1953. Recent Studies of Photonuclear Reactions, *Annu. Rev. Nucl. Sci.*, **2**, 105.
23. Krane K., 1987. "Inductory Nuclear Physics". Wiley.
24. Lambert D., 1992. The p-nuclei – Abundances and origins, *Astron. Astropys. Rev.*, **3** 201.
25. Mazur V. M. vd., 2013. Excitation of the ^{119}Te , ^{121}Te , ^{123}Te , ^{127}Te , ^{129}Te Isomers in Gamma-neutron Reactions from 10 to 22 Mev, *Phys.Rev. C*, **87** 044604.
26. Mohr P., Brieger S., Witucki G. ve Maetz M., 2007. Photoactivation at a clinical LINAC: The $\text{Au}(\gamma, n) ^{196-197}\text{Au}$ reaction slightly above threshold, *Nucl. Instrum. Methods A*, **580** 1201.
27. Penfold A. S. ve Garwin E. L., 1959. Photonuclear Reaction Energies, *Phys. Rev.*, **115** 2.
28. Reich C. W., 2011. Nuclear Data Sheets for A = 161, *Nuclear Data Sheets*, **112** 2497.
29. Segebade C., Weise H. P., ve Lutz G. J., 1987. Photon Activation Analysis (Walter de Gruyter and Co.).

30. Strauch K., 1953. Recent Studies of Photonuclear Reactions, *Ann. Rev. Nucl. Sci.*, **2** 105.
31. Tatari M. ve Ranjbar A. H., 2014. Design of a photoneutron source based on 10 MeV electrons of radiotherapy linac, *Ann. Nucl. Energy*, **63** 69.
32. Toshioh F. vd., 2011. Estimate of Photonuclear Reaction in a Medical Linear Accelerator Using a Water-Equivalent Phantom, *Progress in Nuclear Science and Technology*, **2**, 803.
33. Utsunomiya H., Mohr P., Zilges A., ve Rayet M., 2006. Direct determination of photodisintegration cross sections and the p-process, *Nucl. Phys. A*, **777** 459.
34. Weisskopf V. F., 1937. Statistics and Nuclear Reactions, *Phys. Rev.*, **52** 295.
35. Yoshinaga O. K. A. vd., 1997. Gamma-Ray Spectrometric Study of the Photoactivation Products with 20 MeV Bremsstrahlung, *Journal of Nuclear Science and Technology*, **4** 346.