

T.C.
BİTLİS EREN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nb VE I ÇEKİRDEKLERİNİN FOTONÜKLEER REAKSİYON SONUCU ELDE EDİLEN
ÜRÜN ÇEKİRDEKLERİNİN ENERJİ SEVİYELERİNİN DENEYSEL OLARAK
BELİRLENMESİ

Muhammed KANARYA

ŞUBAT 2018

FİZİK ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nb VE I ÇEKİRDEKLERİNİN FOTONÜKLEER REAKSİYON SONUCU ELDE EDİLEN
ÜRÜN ÇEKİRDEKLERİNİN ENERJİ SEVİYELERİNİN DENEYSEL OLARAK
BELİRLENMESİ

Hazırlayan

Muhammed KANARYA

Danışman

Doç. Dr. Murat AYGÜN

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Ekrem ALMAZ

Doç. Dr. Murat AYGÜN

Yrd. Doç. Dr. Sultan ŞAHİN BAL

ŞUBAT 2018

Muhammed KANARYA tarafından hazırlanan “Nb ve I Çekirdeklerinin Fotonükleer Reaksiyon Sonucu Elde Edilen Ürün Çekirdeklerinin Enerji Seviyelerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi” adlı tez çalışması 07/02/2018 tarihinde yapılan sınavla aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Ekrem ALMAZ
(Başkan)

Doç. Dr. Murat AYGÜN
(Danışman)

Yrd. Doç. Dr.Sultan ŞAHİN BAL
(Üye)

İmza



Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun 11/02/2018. gün ve 13.04 Sayılı kararı ile onaylanmıştır.



Doç. Dr. Koray KÖKSAL
Enstitüsü Müdürü

ÖZET

Nb VE I ÇEKİRDEKLERİNİN FOTONÜKLEER REAKSİYON SONUCU ELDE EDİLEN ÜRÜN ÇEKİRDEKLERİNİN ENERJİ SEVİYELERİNİN DENEYSEL OLARAK BELİRLENMESİ

Muhammed KANARYA

Yüksek Lisans Tezi

Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Murat AYGÜN

Şubat 2018, 61 sayfa

Tezimizin amacı, Nb ve I çekirdeklerinin fotonükleer reaksiyon sonucunda oluşan ürün çekirdeklerinin enerji seviyelerini deneysel olarak belirlemektir. Çekirdek yapılarının anlaşılmasında enerji seviyelerinin belirlenmesi önemli bir yer tutmaktadır. Bu amaçla, numuneler bir klinik lineer hızlandırıcı kullanılarak 18 MeV maksimum enerjili bremsstrahlung fotonları yardımıyla ışınlanmıştır. Işınlanma sonucunda $^{93}\text{Nb}(\gamma, n)^{92\text{m}}\text{Nb}$, $^{127}\text{I}(\gamma, n)^{126}\text{I}$ ve $^{127}\text{I}(n, \gamma)^{128}\text{I}$ reaksiyonları gözlenmiştir. Bu reaksiyonlar ile oluşan ürünlerin hassas enerji seviyelerinin ölçümü yüksek saflıkta germanyum (HPGe) dedektörü kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen deneysel veriler gf3 ve ROOT programları yardımıyla analiz edilmiştir. Sonuçlarımız literatürle karşılaştırmış, benzerlik ve farklılıkları tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Enerji seviyesi, Fotonükleer reaksiyon, Klinik linak (c-Linac), HPGe dedektör.

ABSTRACT

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE ENERGY LEVELS OF PRODUCT NUCLEI OBTAINED BY PHOTONUCLEAR REACTION OF Nb AND I NUCLEI

Muhammed KANARYA

Master Thesis

Bitlis Eren University Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Physics

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Murat AYGÜN

February 2018, 61 pages

The aim of our thesis is to experimentally determine the energy levels of the product nuclei formed with photonuclear reaction of Nb and I nuclei. Determination of energy levels takes an important place in understanding the nucleus structures. With this goal, the samples have been irradiated with 18 MeV maximum energy bremsstrahlung photons using a clinical linear accelerator. As a result of irradiation, $^{93}\text{Nb}(\gamma, n)^{92\text{m}}\text{Nb}$, $^{127}\text{I}(\gamma, n)^{126}\text{I}$ ve $^{127}\text{I}(n, \gamma)^{128}\text{I}$ reactions have been observed. The precise energy levels of the products formed by these reactions have been measured by using a high purity germanium (HPGe) detector. The obtained experimental data have been analyzed with the help of gf3 and ROOT programs. Our results have been compared with literature and similarities and differences have been discussed.

Keywords: Energy level, Photonuclear reaction, Clinical linac (c-Linac), HPGe detector.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca değerli bilgi birikimini ve deneyimini aktararak her zaman yanımda olan çok değerli hocam Sayın Doç. Dr. Murat AYGÜN'e teşekkür ederim.

Çalışmamızın ölçümlerinin alınması esnasında değerli katkılarından dolayı Akdeniz Üniversitesi Nükleer Bilimler Uygulama ve Araştırma Merkezine özellikle Prof. Dr. İsmail BOZTOSUN, Yrd. Doç. Dr. Mesut KARAKOÇ, Alp CESUR ve Dr. Haris Đapo'ya teşekkür ederim.

Bitlis Eren Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Öğretim Elamanlarına teşekkür ederim.

Bu çalışmada incelenen numuneler ve deneysel ölçümler, Sayın Doç. Dr. Murat AYGÜN'ün yürütücülüğünü yaptığı 2014.03 numaralı BEBAP projesi kapsamında sağlanmıştır. Desteğinden dolayı Bitlis Eren Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olan ve desteklerini hiçbir zaman benden esirgemeyen değerli aileme çok teşekkür ederim.

Muhammed KANARYA

Şubat 2018

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL BİLGİLER VE ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	4
2.1. Radyoaktif Bozunma Çeşitleri.....	4
2.1.1. Alfa (α) Bozunumu.....	4
2.1.2. Beta (β) Bozunumu.....	5
2.1.3. Gama (γ) Bozunumu.....	6
2.2. Radyasyonun Madde ile Etkileşmesi.....	6
2.2.1. Ağır Yüklü Parçacıkların Etkileşimi.....	6
2.2.2. Elektronların Etkileşimi.....	7
2.2.3. Gama Işınlarnın Etkileşimi.....	8
2.2.3.1. Fotoelektrik Soğurma.....	8
2.2.3.2. Compton Saçılması.....	9
2.2.3.3. Çift Oluşum.....	10
2.3. Radyasyon Sayaçları.....	10
2.3.1. İyonlaşma Odası.....	10
2.3.2. Orantılı Sayaç.....	11
2.3.3. Geiger-Müller Sayacı.....	11
2.3.4. Sintilasyon Sayacı.....	12
2.3.5. Yarıiletken Dedektörler.....	13
2.4. Hızlandırıcılar ve Çeşitleri.....	14
2.4.1. Elektrostatik Hızlandırıcılar.....	15
2.4.2. Siklotron Hızlandırıcıları.....	15
2.4.3. Sinkrotronlar.....	16
2.4.4. Lineer Hızlandırıcılar.....	17

2.5. Niyobyum ve İyod Çekirdeklerine Genel Bir Bakış.....	18
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	20
3.1. Fotonükleer Reaksiyon.....	20
3.2. Numunelerin Elde Edilmesi ve Hazırlanması	24
3.3. Deneysel Düzenek ve Numunelerin Işınlanması.....	26
3.4. Numunelerin Ölçümlerinin Analiz Edilmesi.....	31
4. BULGULAR	33
4.1. Nb Çekirdeğinin Fotonükleer Reaksiyon Analizi.....	33
4.2. I Çekirdeğinin Fotonükleer Reaksiyon Analizi.....	40
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	55
KAYNAKLAR	56
ÖZGEÇMİŞ	61

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>ÇİZELGE</u>	<u>Sayfa</u>
3.1 Doğal ürünlerin foton aktivasyon analizi için ilgili nükleer data.....	23
4.1 $^{93}\text{Nb}(\gamma,n)^{92m}\text{Nb}$ reaksiyonundan elde edilen nükleer spektroskopik data...	35
4.2 Nb çekirdeğinin fotonükleer reaksiyonu ile elde edilen ürün çekirdeğinin 912.780 keV pikini gf3 programı kullanılarak fit etmede kullanılan değerler.....	37
4.3 Nb çekirdeğinin fotonükleer reaksiyonu ile elde edilen ürün çekirdeğinin 934.515 keV pikini gf3 programı kullanılarak fit etmede kullanılan değerler.	38
4.4 Nb çekirdeğinin fotonükleer reaksiyonu ile elde edilen ürün çekirdeğinin 1847.357 keV pikini gf3 programı kullanılarak fit etmede kullanılan değerler.	39
4.5 $^{127}\text{I}(\gamma,n)^{126}\text{I}$ reaksiyonundan elde edilen nükleer spektroskopik data.....	42
4.6 I çekirdeğinin fotonükleer reaksiyonu ile elde edilen ürün çekirdeğinin 388.640 keV pikini gf3 programı kullanılarak fit etmede kullanılan değerler.....	44
4.7 I çekirdeğinin fotonükleer reaksiyonu ile elde edilen ürün çekirdeğinin 491.268 keV pikini gf3 programı kullanılarak fit etmede kullanılan değerler.....	45
4.8 I çekirdeğinin fotonükleer reaksiyonu ile elde edilen ürün çekirdeğinin 666.345 keV pikini gf3 programı kullanılarak fit etmede kullanılan değerler.....	46
4.9 I çekirdeğinin fotonükleer reaksiyonu ile elde edilen ürün çekirdeğinin 753.841 keV pikini gf3 programı kullanılarak fit etmede kullanılan değerler.....	47
4.10 I çekirdeğinin fotonükleer reaksiyonu ile elde edilen ürün çekirdeğinin 879.867 keV pikini gf3 programı kullanılarak fit etmede kullanılan değerler.....	48
4.11 I çekirdeğinin fotonükleer reaksiyonu ile elde edilen ürün çekirdeğinin 1420.151 keV pikini gf3 programı kullanılarak fit etmede kullanılan değerler.....	49
4.12 $^{127}\text{I}(n,\gamma)^{128}\text{I}$ reaksiyonundan elde edilen nükleer spektroskopik data.....	50

4.13	$^{127}\text{I}(n,\gamma)^{128}\text{I}$ reaksiyonundan elde edilen ürün çekirdeğinin 442.857 keV pikini gf3 programı kullanılarak fit etmede kullanılan değerler.....	52
4.14	$^{127}\text{I}(n,\gamma)^{128}\text{I}$ reaksiyonundan elde edilen ürün çekirdeğinin 526.541 keV pikini gf3 programı kullanılarak fit etmede kullanılan değerler.....	53
4.15	$^{127}\text{I}(n,\gamma)^{128}\text{I}$ reaksiyonundan elde edilen ürün çekirdeğinin 969.374 keV pikini gf3 programı kullanılarak fit etmede kullanılan değerler.....	54



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>		<u>Sayfa</u>
2.1	α bozunumunun bir gösterimi.....	4
2.2	β bozunumunun bir gösterimi.....	5
2.3	γ bozunumunun bir gösterimi.....	6
2.4	Silikonda farklı yüklü parçacıklar için hesaplanan enerji kayıpları.....	7
2.5	Tek enerjili elektronların bir kaynağından ortaya çıkabilecek izlerin bir serisi.....	8
2.6	Fotoelektrik olayın bir gösterimi.....	9
2.7	Compton saçılmasının bir gösterimi.....	9
2.8	Çift oluşumun bir gösterimi.....	10
2.9	Orantılı sayacının bir görünümü.....	11
2.10	Geiger-Müller sayacının bir görünümü.....	11
2.11	NaI (TI) sintilasyon sayacının bir görünümü	12
2.12	n-tipi yarıiletken	13
2.13	p-tipi yarıiletken.....	14
2.14	1932 yılında ilk nükleer reaksiyon deneyinde kullanılan Cockroft-Walton hızlandırıcısı.....	15
2.15	Siklotron hızlandırıcısının bir gösterimi.....	16
2.16	Sinkrotron hızlandırıcısının bir gösterimi.....	17
2.17	a) Lineer hızlandırıcısının bir gösterimi, b) Fermi ulusal hızlandırıcı laboratuvarında Alvarez tipi Linac'ın iç görünümü.....	17
2.18	^{92}Nb çekirdeğinin bozunma şeması.....	18
2.19	^{126}I çekirdeğinin bozunma şeması.....	19
3.1	Bremsstrahlung gama ışınlarıyla deneysel bir plan.....	21
3.2	30 MeV Bremsstrahlung ile atom sayısının bir fonksiyonu olarak fotonükleer reaksiyonların ürünleri.....	22
3.3	Çalışmamızda kullanılan Nb numunesinin görünümü.....	25
3.4	Çalışmamızda kullanılan I numunesinin görünümü.....	26
3.5	Fotonükleer reaksiyonlar için Bremsstrahlung kaynağı olarak kullanılan cLINAC'ın görünümü.....	27

3.6	Philips SLI-25 medikal (klinik) lineer hızlandırıcısının 18 ve 25 MeV'lik nihai enerjilerinde elde edilen fotonlarının akısına ait Bremsstrahlung spektrumları.....	28
3.7	cLINAC kurulumunun sistematik görünümü.....	29
3.8	Germanyum dedektörlü sistemin çalışma düzeneği.....	30
3.9	HPGe dedektör ve donanımı.....	31
3.10	gf3 programı kullanılarak ^{93}Nb analizini gösteren örnek bir görüntü.....	32
4.1	Nb çekirdeği için temel ve izomerik durum bilgisi.....	33
4.2	Doğal fon (background) çıkarılmadan 18 MeV maksimum enerjili bremsstrahlung fotonları kullanılarak ışınlanmış ^{93}Nb (a) 0–1000 keV, (b) 1000–2000 keV.....	34
4.3	Nb çekirdeğinin fotonükleer reaksiyonu ile elde edilen ürün çekirdeğinin 912.780 keV pikinin gf3 programı kullanılarak fit edilmiş hali.....	37
4.4	Nb çekirdeğinin fotonükleer reaksiyonu ile elde edilen ürün çekirdeğinin 934.515 keV pikinin gf3 programı kullanılarak fit edilmiş hali.....	38
4.5	Nb çekirdeğinin fotonükleer reaksiyonu ile elde edilen ürün çekirdeğinin 1847.357 keV pikinin gf3 programı kullanılarak fit edilmiş hali.....	39
4.6	I çekirdeği için temel ve izomerik durum bilgisi.....	40
4.7	Doğal fon (background) çıkarılmadan 18 MeV maksimum enerjili bremsstrahlung fotonları kullanılarak ışınlanmış ^{127}I	41
4.8	I çekirdeğinin fotonükleer reaksiyonu ile elde edilen ürün çekirdeğinin 388.640 keV pikinin gf3 programı kullanılarak fit edilmiş hali.....	44
4.9	I çekirdeğinin fotonükleer reaksiyonu ile elde edilen ürün çekirdeğinin 491.268 keV pikinin gf3 programı kullanılarak fit edilmiş hali.....	45
4.10	I çekirdeğinin fotonükleer reaksiyonu ile elde edilen ürün çekirdeğinin 666.345 keV pikinin gf3 programı kullanılarak fit edilmiş hali.....	46
4.11	I çekirdeğinin fotonükleer reaksiyonu ile elde edilen ürün çekirdeğinin 753.841 keV pikinin gf3 programı kullanılarak fit edilmiş hali.....	47
4.12	I çekirdeğinin fotonükleer reaksiyonu ile elde edilen ürün çekirdeğinin 879.867 keV pikinin gf3 programı kullanılarak fit edilmiş hali.....	48
4.13	I çekirdeğinin fotonükleer reaksiyonu ile elde edilen ürün çekirdeğinin 1420.151 keV pikinin gf3 programı kullanılarak fit edilmiş hali.....	49

4.14	$^{127}\text{I}(n,\gamma)^{128}\text{I}$ reaksiyonundan elde edilen ürün çekirdeğin 442.857 keV pikinin gf3 programı kullanılarak fit edilmiş hali.....	52
4.15	$^{127}\text{I}(n,\gamma)^{128}\text{I}$ reaksiyonundan elde edilen ürün çekirdeğin 526.541 keV pikinin gf3 programı kullanılarak fit edilmiş hali.....	53
4.16	$^{127}\text{I}(n,\gamma)^{128}\text{I}$ reaksiyonundan elde edilen ürün çekirdeğin 969.374 keV pikinin gf3 programı kullanılarak fit edilmiş hali.....	54



SİMGELER DİZİNİ

Nb	Niyobyum
I	İyot
α	Alfa parçacığı
β	Negatif beta parçacığı
γ	Gama
n	Nötron
p	Proton

KISALTMALAR DİZİNİ

NAA	Nötron Aktivasyon Analizi
NaI	Sodyum İyodür
TLA	İnce Film Aktivasyon
ADC	Analog-Dijital Dönüştürücü
MCA	Çok Kanallı Analizör
HPGe	Yüksek Saflıkta Germanyum Dedektörü
Nudat	Uluslararası Nükleer Veri Tabanı

1. GİRİŞ

Rutherford'un çekirdekli atom modelini öne sürdüğü 1911 yılından bu zamana teknolojik alanda sağlanan çok önemli gelişmelerle nükleer fizik alanında yapılan çalışmalar çok önemli boyutlara ulaşmıştır. Burada amaç her zaman insanoğlunun ilgisini çeken evrenin yaratılışındaki oluşumu anlamak ve aynı zamanda insanoğlunun hizmetine sunulabilecek bilgi ve teknolojiyi bulmak olmuştur. Bu amaçla elde edilen bilgiler nükleer tıp alanında hastalıkların teşhis ve tedavi edilmesinde, enerji alanında önemli bir alternatif olarak nükleer enerjinin kullanılmasında, gıdaların radyoaktivite analizinde, astrofiziksel olayların açıklanması gibi daha birçok farklı uygulama alanlarında sıkça kullanılmaktadır.

Nükleer fizik aynı zamanda çekirdeğin yapısını ve çekirdek etkileşimlerini anlamaya çalışır. Bu amaçla nükleer fizik alanında hem deneysel hem de teorik olarak çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda kullanılan metotlardan biriside nükleer reaksiyonlardır. Nükleer reaksiyon, etkileşen parçacıklar nükleer boyutlar derecesindeki uzaklıklar içerisinde birbirine yaklaştığında çekirdekler arasındaki etkileşimlerin bir sonucu olarak meydana gelen bir işlemdir. Etkileşim sonucunda son ürünler başlangıçtaki parçacıklar ile aynı ise bu işlem saçılma olarak adlandırılır. Saçılma durumu sistemin kinetik enerjisinde değişimin olup olmamasına göre elastik veya inelastik olarak ifade edilir. Bunun aksine son durum ürünleri ilk durumdan farklıysa bu işlem bir reaksiyon olarak adlandırılır. Transfer reaksiyonları, parçalanma reaksiyonları, yakalama reaksiyonları ve fotonükleer reaksiyonlar bunlardan bazılarıdır.

Fotonükleer reaksiyonlar ile meydana gelen nükleer reaksiyonlar nükleer fizik alanının önemli konularından biridir (Belyshev vd. 2014). Gama ışını kaynaklarının teknik kullanılabilirliğiyle fotonükleer biliminin gelişimi etkin olmuştur (Pietralla 2012). Çekirdeklerin proton ve nötron koparma enerjisine bağlı olarak fotonükleer reaksiyon yardımıyla (γ, n) , $(\gamma, 2n)$ ve (γ, p) reaksiyonlarının gerçekleşmesi mümkün olabilmektedir. Bu kapsamda meydana gelen ürünler kararsız bir yapıya sahip olup daha kararlı bir yapıya geçmek için gama ışını yayınlarlar. Bremsstrahlung fotonlarıyla fotonükleer reaksiyonlar sonucunda ortaya çıkan nötronlar ikincil radyasyonun etkisinin kesin hesaplanması amacı için düşünülür. Aynı zamanda, istenilmeyen ışınlanmadan kaçınmak için fotonötronlardan gelen dozu hesaplamak önemlidir (Kishida vd. 2005).

Çekirdeklerin yayınladıkları gama ışınları, çekirdeğe göre farklılık göstermekte ve karakteristik bir özellik olarak ortaya çıkmaktadır. Bu yapıları nedeniyle farklı ölçümler yapılarak çekirdeklerin

incelenmek istenen özelliği ortaya konulabilir. Çekirdeklerin sahip oldukları enerji seviyelerinin belirlenmesinde gama spektroskopisinin bu özelliği işleme konulur. Bu anlamda detektöre gelen gamalar farklı enerji değerlerine sahip kanallarda ölçülürler. Böylece ortaya çıkan karakteristik pikin analiziyle amaçlanan sonuca ulaşılır.

Nükleer fizik çalışmalarında kullanılan üç temel foton kaynağı olarak radyoaktif izotoplar, Bremsstrahlung, pozitron annihilation söylenebilir (Bramblett vd. 1963, Bergere vd. 1968, Utsunomiya vd. 2004). Bir gama ışını incelenecek bir çekirdek üzerine geldiği zaman uyarılmış çekirdek bir uyarılma enerjisiyle herhangi bir bileşik çekirdek gibi davranmaktadır (Akkoyun and Bayram 2014). Fotonükleer reaksiyonlar bir yönüyle çekirdeklerin bozunmasını sağlayarak özelliklerini incelemek için kullanılan reaksiyonlardan biridir (Akkurt vd. 2014). Malzemelerin fotonla uyarılmış reaksiyon tesir kesitleri füzyon ve fisyon reaktörlerinin teknolojisinde, aktivasyon analizinde, radyoterapi esnasında insan vücudunda absorblanan dozun hesabında, astrofiziksel nükleosentezde, güvenlik ve denetim teknolojilerinde, radyasyon transport analizinde, radyasyon zırhlama tasarımı gibi farklı uygulama alanlarında önem arz etmektedir (Ishkhanov and Varlamov 2004, Crasta vd. 2013, Zaman vd. 2014). Düşük enerjilerde hafif çekirdekler için fotonükleer reaksiyonlar evrendeki çekirdeklerin üretiminde önemli roller oynar (Shima vd.). Bu reaksiyonlarla ilgili deneysel çalışmalar 1930'lu yıllarda başlamıştır (Chadwick ve Goldhaber 1934, Lee vd.1998).

Fotonükleer reaksiyon çekirdeklerin enerji seviyelerinin belirlenmesinde kullanılan önemli metotlardan biridir. Nükleer yapı çalışmalarında çekirdeklerin sahip olduğu enerji seviyeleri ve bu seviyelerde ne kadar buldukları ile ilgili bilgiler önemli bir yere sahiptir. Örneğin, tıp alanında yaygın bir şekilde kullanılan görüntüleme teknolojisinde değerlendirecek çekirdeklerin tespitinde, hasta tedavisinde hangi izotopun kullanılacağına belirlenmesinde ve radyasyonun zararlı etkilerinin azaltılmasında sağlanacak ilerlemeler çekirdeklerin yapılarının yeterince anlaşılmasıyla daha mümkün olacaktır.

Ülkemizde gerçekleştirilen deneysel nükleer fizik konularının genişletilmesi günümüz teknolojisinde çok önem arz etmektedir. Bu kapsamda değerlendirebileceğimiz fotonükleer reaksiyonlar üzerine deneysel araştırmaların yapılması ülkemizde deneysel nükleer fizik alanında nitelikli bilim insanı yetiştirilmesi açısından da önemli olacaktır. Bu kapsamda gerçekleştirilen tez çalışmamızın ana hatları takip eden formdadır:

Bölüm 2'de, deneysel çalışmanın konusu olan fotonükleer reaksiyonlar ve tezde gerçekleştirilen deneysel çalışmaya alt yapı sağlayacak genel bilgiler verildi.

Bölüm 3'de, deneysel ölçümlerde kullanılan materyal ve yöntem hakkında bilgi verildi.

Bölüm 4'de, fotonükleer reaksiyon ile Nb ve I çekirdeklerinin reaksiyon sonucunda oluşan ürün çekirdeklerinin enerji seviyeleri belirlendi. Elde edilen sonuçlar hem Nudat (Uluslararası Nükleer Veri Tabanı) hem de literatür sonuçlarıyla karşılaştırıldı.

Bölüm 5'de deneysel ölçümler ile elde edilen sonuçlar için genel bir değerlendirme yapıldı.



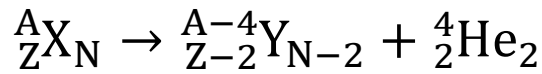
2. KURAMSAL BİLGİLER VE ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Radyoaktif Bozunma Çeşitleri

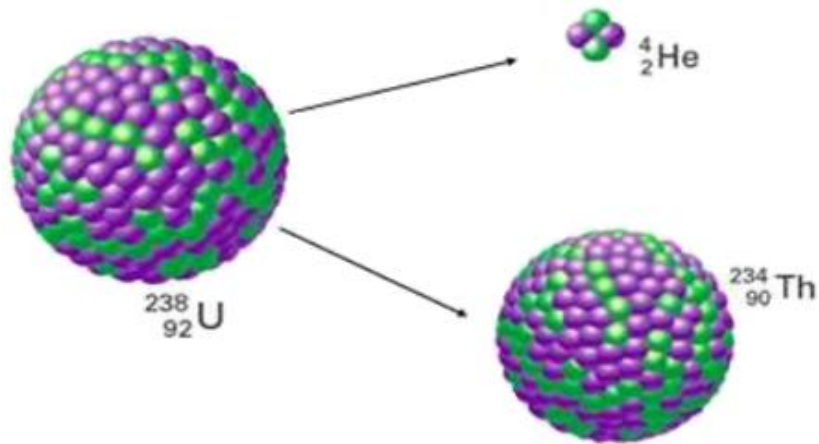
Kararsızlığı mevcut olan bir çekirdeğin bulunduğu durumu daha kararlı bir yapıya değiştirmek için gösterdiği davranışlara radyoaktiflik denir (Zeren 1998). Kararsızlık kuşağının farklı bölgelerinde bulunan çekirdeklerin radyoaktiflik durumlarında farklı olmaktadır. Nötronu fazla olan çekirdekler mevcut nötron sayılarını azaltıp proton sayılarını artırarak kararlılık değerine yaklaşmaya çalışır. Protonu fazla olan çekirdekler ise mevcut proton sayılarını azaltıp nötron sayılarını artırarak kararlılık değerine yaklaşmaya çalışırlar. Bazı çekirdekler ise buldukları uyarılmış halden temel duruma geçme halindedirler.

2.1.1. Alfa (α) Bozunumu

Çekirdeğin, bir ürün çekirdeğe ve alfa parçacığı adı verilen iki kere iyonlaşmış helyum atomlarına (He^{++}) dönüşmesi işlemine denir (Arya 1966). Alfa bozunumu gerçekleştiren bir çekirdek (Şekil 2.1.) mevcut haline göre iki proton ve iki nötron kaybederek kütle numarası dört azalır. Alfa bozunum ifadesi,



şeklindedir.

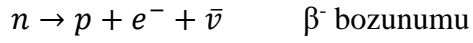


Şekil 2.1. α bozunumunun bir gösterimi (Anonim 2018a).

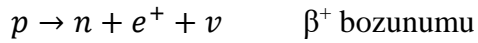
2.1.2. Beta (β) Bozunumu

İzobarik geçişler olarak da adlandırılan, nükleer yükte bir değişiklik olmasına karşın kütle numarasında değişiklik olmaması, üç çeşit işlemin genel adıdır. Buna göre,

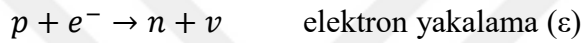
- Çekirdeğin elektron yayınlaması veya negatron yayınlamasıyla bozunması (Şekil 2.2.)



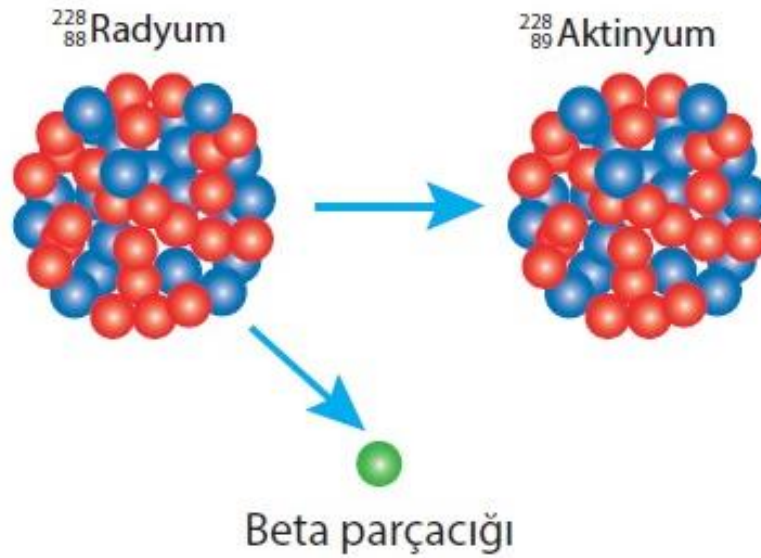
- Çekirdeğin pozitron yayınlamasıyla bozunması



- Çekirdeğe çok yakın elektronun yakalanması



şeklindedir.

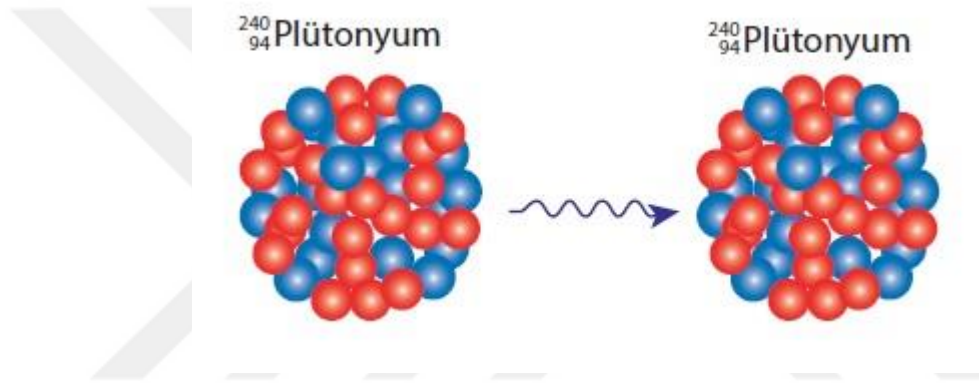


Şekil 2.2. β bozunumunun bir gösterimi (Anonim 2018b).

2.1.3. Gama (γ) Bozunumu

Bir çekirdek α ya da β bozunumu sonucunda uyarılmış durumda bulunabilir. Bu durumdaki çekirdek fazla enerjisini daha düşük bir uyarılmış duruma ya da taban duruma nükleer durumlar arasındaki farka eşit bir enerjiyle bir γ ışını yayınlamaya geçer (Krane 1955). Böylece çekirdeğin enerjisi azalmış olacaktır.

γ bozunumu yapan bir çekirdeğin (Şekil 2.3.) sahip olduğu atom numarası ve kütle sayısında bir değişiklik olmaz. γ bozunumunun yarı ömrü çok kısadır. γ ışınları çok kısa dalga boylu, tipik olarak 0,1-10 MeV aralığında enerjileri olan elektromanyetik radyasyon fotonlarıdır (Krane 1955).



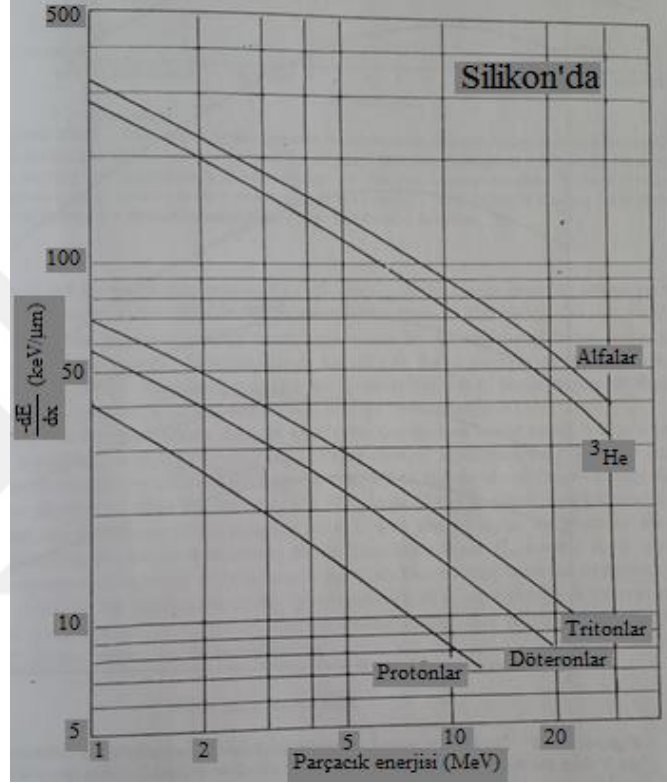
Şekil 2.3. γ bozunumunun bir gösterimi (Anonim 2018b).

2.2. Radyasyonun Madde ile Etkileşimi

2.2.1. Ağır Yüklü Parçacıkların Etkileşimi

Alfa parçacığı gibi ağır yüklü parçacıklar soğurucu atomlar içerisindeki orbital elektronlarının negatif yükü arasındaki Coulomb kuvveti boyunca öncelikli olarak madde ile etkileşirler. Çekirdekler (Rutherford saçılması veya alfa parçacık kaynaklı reaksiyonlar) ile parçacığın etkileşimleri aynı zamanda mümkün olmasına rağmen, böyle karşılaşmalar nadiren meydana gelir ve radyasyon dedektörlerinin cevabında önemli değildir. Yüklü parçacık herhangi bir soğurucu ortama girdiğinde çok sayıda elektronla eşzamanlı olarak etkileşir. Dedektör materyalinin çekirdekleri atom hacimlerinin yaklaşık 10^{-15} kapsadıklarından dolayı parçacığın çekirdeklerden ziyade elektronlarla çarpışma ihtimaliyeti 10^{15} kat daha fazladır. Buradan yüklü parçacığın sahip olduğu enerjiyi kaybetmesinde dedektörün atom elektronlarıyla yaptığı Coulomb saçılmasının

baskın olduğu söylenebilir. E kinetik enerjili ve m kütleli yüklü bir parçacıktan m_0 kütleli bir elektrona tek bir çarpışmada transfer edilen maksimum enerji $4Em_0/m$ veya nükleon başına parçacık enerjisinin yaklaşık 1/500'dür. Son olarak, herhangi bir zamanda parçacık çok sayıda elektronla etkileşir, hızı sürekli olarak azalır ve parçacık durur (Knoll 1989). Silikonda; proton, döteron, triton, ^3He ve alfa gibi farklı yüklü parçacıklar için hesaplanan enerji kayıpları Şekil 2.4'de gösterilmektedir.



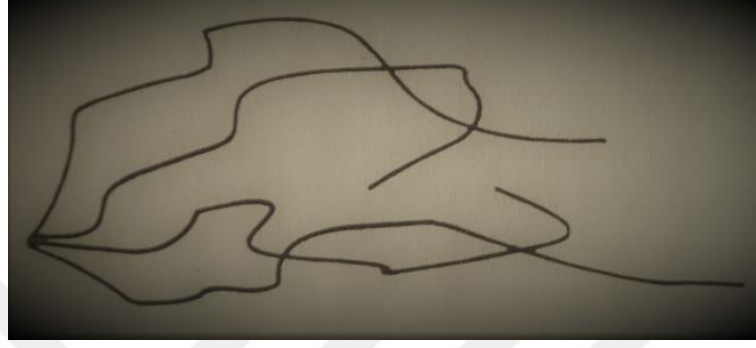
Şekil 2.4. Silikonda farklı yüklü parçacıklar için hesaplanan enerji kayıpları (Knoll 1989).

2.2.2. Elektronların Etkileşimi

Elektronların maddeyle etkileşimi düşünüldüğünde, elektronların sahip oldukları yükten dolayı atomik elektronlarla Coulomb saçılması ile etkileşirler. Bu durum ağır yüklü parçacıkların etkileşimine benzetmekle birlikte bazı yönlerden aşağıda belirtildiği üzere farklılıklar göstermektedir:

- β bozunumlarında yayınlanan elektronların hareketi göreceli hızlarla gerçekleşir.
- Elektronlar diğer elektronlarla çarpıştıklarında büyük sapmalara maruz kalırlar ve düzenli olmayan yörüngeler takip ederler.

- Elektronun bir başka elektronla etkileşimi olan kafa-kafaya çarpışmasında sahip olduğu ilk enerjisinin büyük bir bölümü çarpıştığı elektrona aktarılabilir.
- Elektronun sahip olduğu hızın doğrultu ve büyüklüğünde hızlı bir değişim meydana gelebileceğinden büyük bir ivmenin etkisinde bulunabilir ve elektromanyetik enerji yayımlayabilir. Bu radyasyona frenleme ışınımı (bremsstrahlung) denir (Krane 1955).



Şekil 2.5. Tek enerjili elektronların bir kaynağından ortaya çıkabilecek izlerin bir serisi (Knoll 1989)

2.2.3. Gama Işınlarnın Etkileşimi

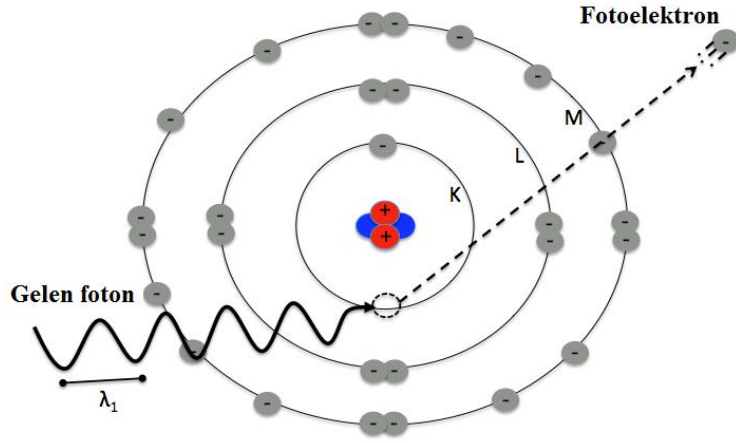
Gama ışınlarının çok sayıda etkileşim mekanizmasının mümkün olduğu bilinmesine rağmen radyasyon ölçümlerinde yalnızca üç ana tipi önemli bir rol oynar. Bunlar; fotoelektrik soğurma (photoelectric absorption), Compton saçılması (Compton scattering) ve çift oluşum (pair production) dur.

2.2.3.1. Fotoelektrik Soğurma

Fotoelektrik soğurma etkileşimi genelde düşük enerjili gelen fotonlarda daha yaygındır. Gelen foton tamamen kayboluncaya kadar soğurucu atom ile etkileşime girer ve atom tarafından

$$E_{e^-} = h\nu - E_B$$

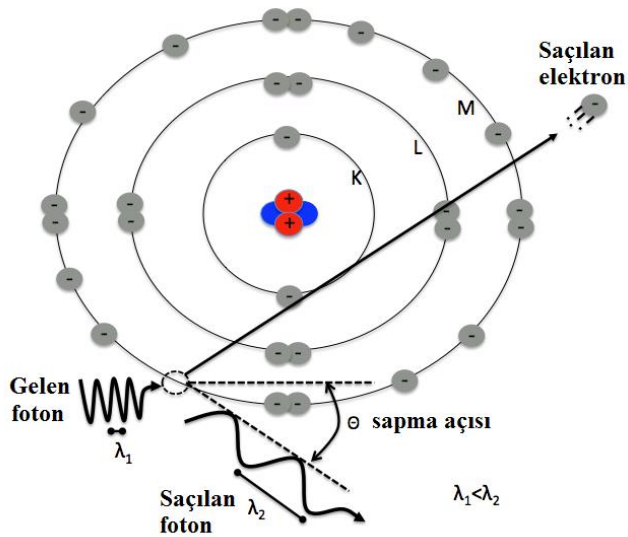
kinetik enerjili bir fotoelektron yayınlanır (Şekil 2.6.). Burada E_B yörünge elektronlarının bağlanma enerjisi ve $h\nu$ ise gelen fotonun enerjisidir. Yeterli enerjili gama ışınları için fotoelektronların en muhtemel kaynağı en sıkı bağlı veya atomun K tabakasıdır.



Şekil 2.6. Fotoelektrik olayın bir gösterimi (Anonim 2018c).

2.2.3.2. Compton Saçılması

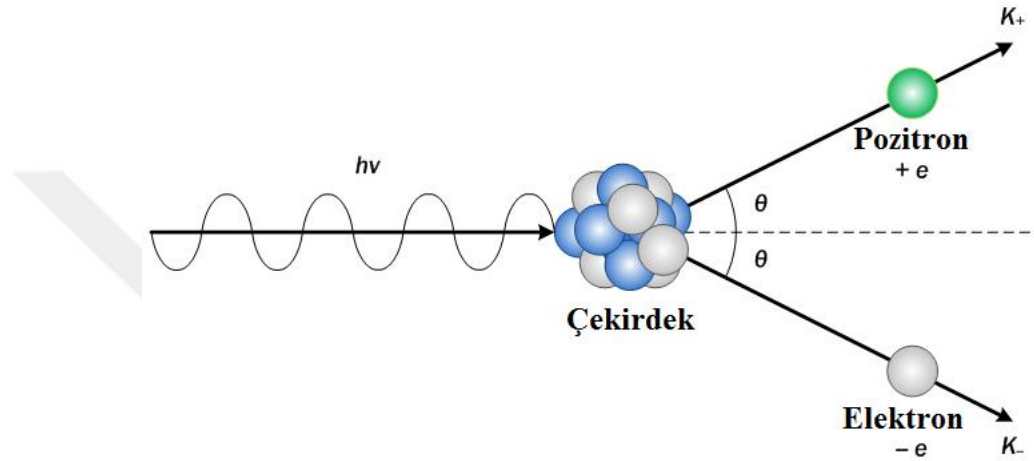
Compton saçılması, gelen gama ışını fotonu ve soğurucu bir materyaldeki elektron arasında meydana gelen bir etkileşimdir (Şekil 2.7.). Compton saçılmasında gelen foton orijinal yönüne kıyasla bir θ açısı boyunca saptırılır. Foton enerjisinin bir bölümünü başlangıçta durgun olduğu kabul edilen elektrona aktarır. Saçılma tüm açılarda mümkündür ve elektrona transfer edilen enerji sıfırdan gama ışını enerjisinin büyük bir kesrine değişebilir. Herhangi verilen etkileşim için enerji transferi ve saçılma açısıyla ilişkili ifade enerji ve momentum korunumundan üretilebilir (Knoll 1989).



Şekil 2.7. Compton saçılmasının bir gösterimi (Anonim 2018c).

2.2.3.3. Çift Oluşum

Bir gama ışınının enerjisi bir elektronun durgun kütle enerjisinin iki katını (1.02 MeV) geçerse çift oluşum işlemi mümkün olur. Bu etkileşim ihtimaliyeti gama ışını enerjisi birkaç MeV enerjiye yaklaşıncaya kadar çok düşük kalır. Bundan dolayı, çift oluşum ağırlıklı olarak yüksek enerjili gama ışınlarına sınırlandırılır. Etkileşimde gama ışını fotonu gözden kaybolur ve bir elektron-pozitron çifti ile yer değiştirir (Şekil 2.8.).



Şekil 2.8. Çift oluşumun bir gösterimi (Anonim 2018d)

2.3. Radyasyon Sayaçları

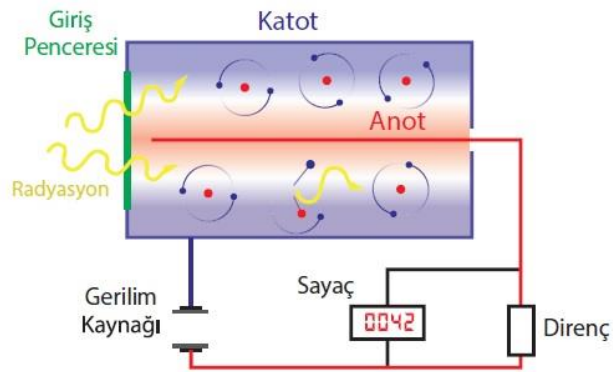
Nükleer fizik deneylerinin en önemli araçlarından biriside radyasyon sayacıdır. Bu kapsamda farklı nükleer radyasyon ölçümlerinde farklı sayacılar mevcut olup sayacı seçimi iki önemli parametreye dayandırılarak seçilir. Bunlardan ilki, ölçmek istenen radyasyonun türü, diğeri ise bulmak istenen ölçümün türüdür (Arya 1966).

2.3.1. İyonlaşma Odası

Yüksek potansiyelde iki elektrodu ve yaklaşık atmosfer basıncında bir gaz ile dolu bulunan radyasyon detektörüdür. İyonlaşma odasına giren radyasyon burada iyonlaşmaya sebep olur. Böylece iyonlar + ve - elektrotlarda toplanırlar. İyonlaşma odası genelde X-ışınları gibi sürekli bir radyasyonun ölçümlerinde kullanılır (Arya 1966).

2.3.2. Orantılı Sayaç

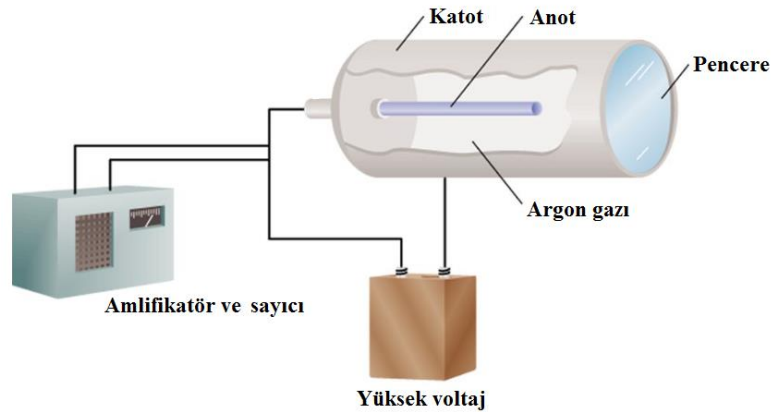
Bu sayaç bir gaz dolu dedektör tipi olup iyonlaşma odasının bir türevidir (Arya 1966). Orantılı sayaç içi boş bir silindir ve bu silindir içerisinde geçmekte olan bir telden ibarettir (Şekil 2.9.). Bu elektrotlara uygulanan gerilim iyonlaşma odasına uygulanmakta olandan daha büyük bir değerdedir (Aydoğan 2007). Bu dedektörler ile düşük enerjili X-ışını ölçülür. Orantılı sayaçlar aynı zamanda nötronları tespit etmede yaygın bir şekilde kullanılır (Knoll 1989).



Şekil 2.9. Orantılı sayacının bir görünümü (Anonim 2018e)

2.3.3. Geiger-Müller Sayacı

Orantılı sayacın sahip olduğu elektrotlara uygulanan voltaj eğer orantılılık bölgesini geçecek şekilde artırılırsa bu sayaç Geiger-Müller sayacı olur. Tipik bir Geiger-Müller sayacı (Şekil 2.10.), ince bir mika pencere yardımıyla alfa ve beta parçacıklarının ölçülerinde kullanılabilir (Arya 1966).

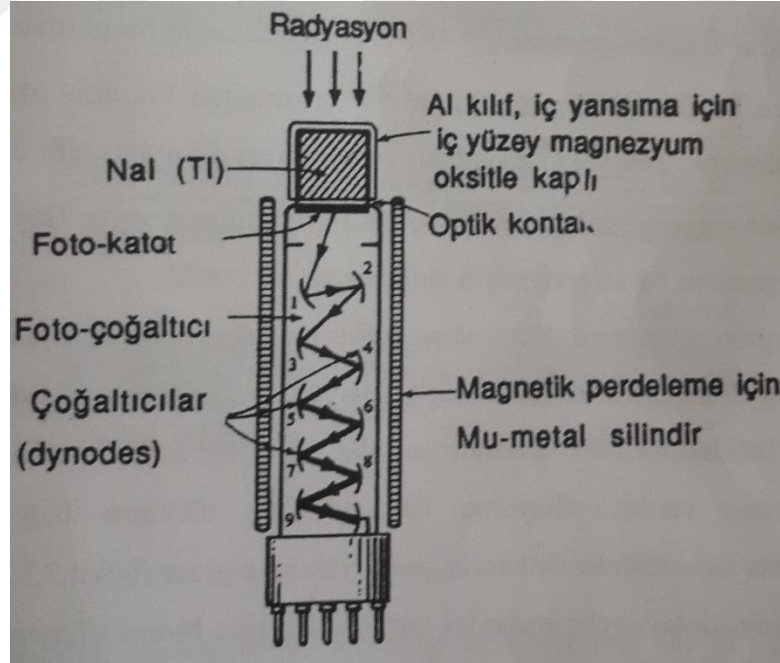


Şekil 2.10. Geiger-Müller sayacının bir görünümü (Anonim 2018f).

2.3.4. Sintilasyon Sayacı

Bazı maddelere (sodyum iyodür, sezyum iyodür, antrasin, naftalin gibi) X veya gama ışını veya tek yüklü parçacık çarptığında ışık pırlıtsı ortaya çıkarırlar. Bu türden maddelere sintilatörler adı verilir. Meydana gelen ışık pırlıtları yükseltilek sayılabilen elektrik pulslarına dönüştürülür. Dedeksiyon ve sayma işlemleri için ihtiyaç duyulan sistem sintilasyon sayacı (Şekil 2.11.) olarak bilinmektedir (Arya 1966).

Yüklü bir parçacık veya bir fotonun neden olduğu ilk iyonlaşma kaynaklı kristalde serbest elektronlar ortaya çıkar. Bu elektronlar kristalin sahip olduğu atom veya moleküllere bağlanmasyla 3300-5000 Å aralığında değişen dalgaboylu görünür bölgede ışık yayınlanır. Bu ışınlar foto-çoğaltıcı tüpün fotokatodu üzerine düşer ve elektron yayınlanmasına sebep olurlar. Elektronlar, çoğaltıcı (dynode) yardımıyla son çoğaltıcıdan 10^6-10^7 civarında yayınlanması mümkün olabilmektedir. Bu kapsamda elde edilen pulsun yüksekliği gelen fotonun veya parçacığın enerjisiyle orantılı olmaktadır. NaI (Tl) kristali, X veya gama ışınlarının dedeksiyonunda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

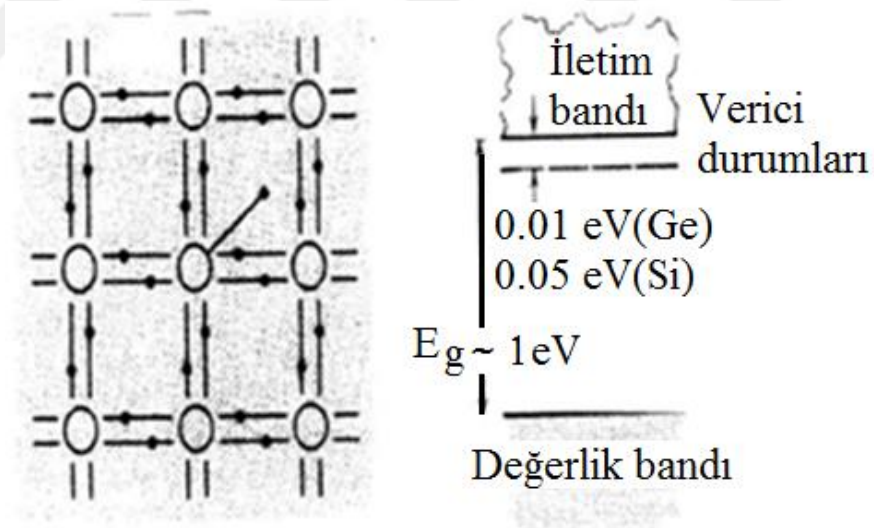


Şekil 2.11. NaI (Tl) sintilasyon sayacının bir görünümü (Arya 1966).

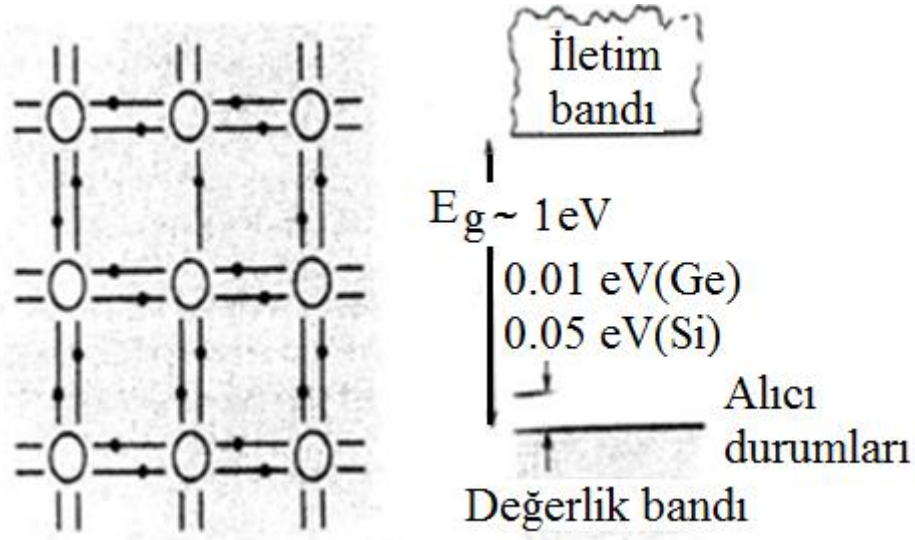
2.3.5. Yarı iletken Dedektörler

Düşük sıcaklık değerlerinde metallere kıyasla elektriği çok az ileten veya yüksek sıcaklıklarda yalıtkan maddelere kıyasla daha iyi ileten maddelere yarıiletken madde adı verilir. Atomun en dış kabuğundaki elektronların enerji seviyelerinin üst üste binmesiyle oluşan sürekli banda valans bandı denir. Yarı iletken veya yalıtıkanda valans bandından yasak enerji aralığıyla ayrılmış olan banda iletkenlik bandı denir (Aydoğan 2007).

Yarı iletken materyallerde az miktarda katkı maddesi ilavesiyle elektrik akımı kontrol edilebilir. Bu kapsamda üç ya da beş değerlikli atomlar örgü içerisine girerler. Beş değerlikli atom düşünüldüğünde (As, P, Sb) dört elektron komşu Si ya da Ge ile kovalent bağ yaparken beşinci elektron örgü içerisinde rahatça hareket edebilir. Böyle bir materyalde sayıca fazla olan negatif yük taşıyıcılarından (elektron) dolayı n-tipi yarıiletken denir (Şekil 2.12.). Eğer üç değerlik elektronlu atomlar kullanılırsa, dört komşu atomla kovalent bağ ve deşik fazlalığı gerçekleşirdi. Bu türden materyallere ise p-tipi yarıiletken (Şekil 2.13.) denir ve yük taşıyıcıları pozitif yüklü deşiklerdir (Krane 1955).



Şekil 2.12. n-tipi yarıiletken (Krane 1955).



Şekil 2.13. p-tipi yarıiletken (Krane 1955).

Tükenme bölgesine ulaşan radyasyon, elektron-deşik çiftleri oluşturabilirse iyonlaşma odasına çok benzer bir durum gerçekleşir. Bu durumda elektronlar bir yönde hareket ederken deşikler ise diğer yönde hareket ederler. Oluşan elektronları ifade eden toplam sayısı bir puls ortaya çıkarır. Bu pulsun genliği ise radyasyonun enerjisi ile orantılı olarak değişecektir (Krane 1955).

2.4. Hızlandırıcılar ve Çeşitleri

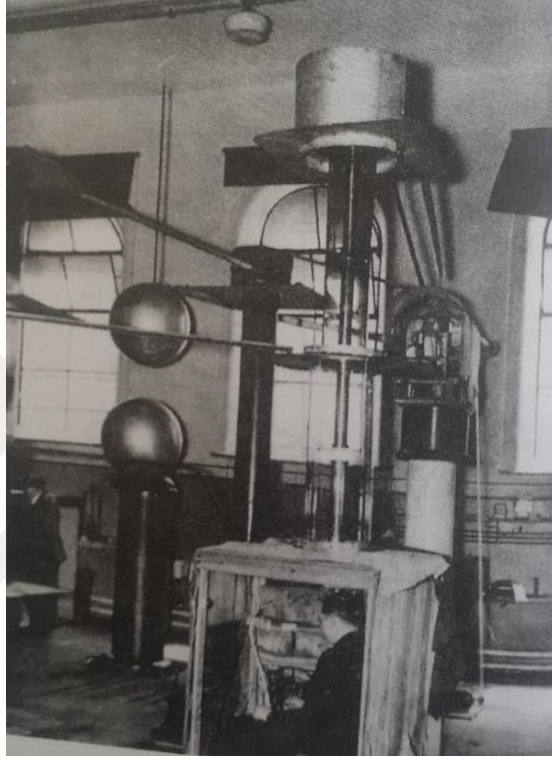
Hızlandırıcı; elektron, proton, döteron, alfa parçacığı gibi yüklü parçacıklara çok yüksek kinetik enerji aktaran düzeneklere denir (Boyla and Canyürek 1995). Böylece amaçlanan enerji ve parçacık demeti istenilen bir hedef üzerine gönderilebilecektir (Krane 1955). Hızlandırıcılar enerjilerine göre,

- Düşük enerjili hızlandırıcılar, 10-100 MeV arasında enerjileri olan demetler için
- Orta enerjili hızlandırıcılar, 100-1000 MeV arasında enerjileri olan demetler için
- Yüksek enerjili hızlandırıcılar, 1000 MeV ve üzeri enerjileri olan demetler için

olarak sınıflandırılabilirler. Hızlandırıcılar, kullanım amaçlarına göre farklılıklar göstermektedir.

2.4.1. Elektrostatik Hızlandırıcılar

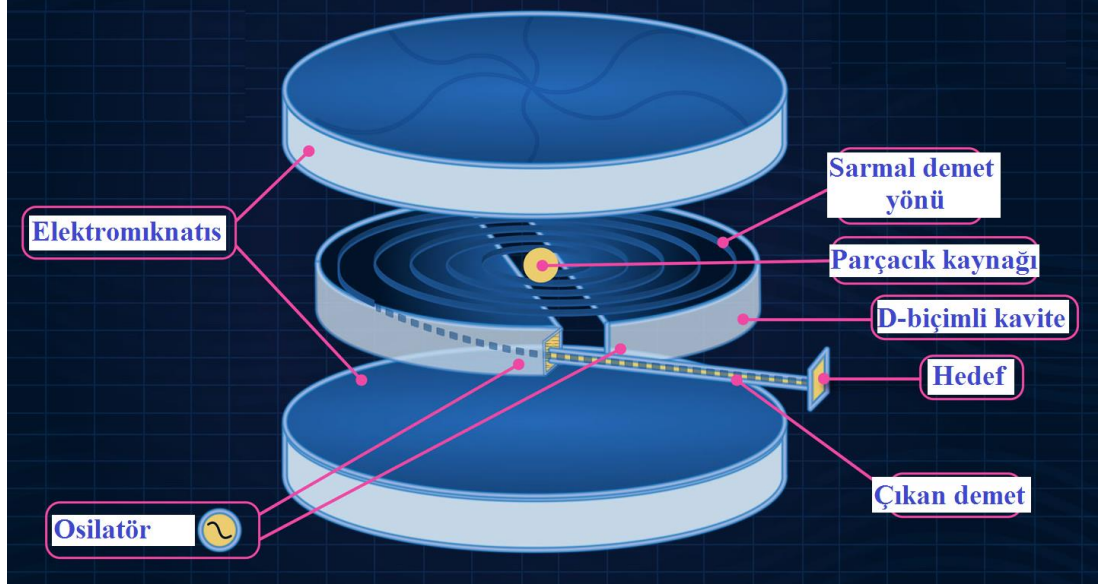
Bu tür hızlandırıcılar yüksek gerilim terminali oluşturarak iyon kaynağından gelen yüklü parçacıkların hızlanmasını sağlarlar (Krane 1955). En belirgin örnekleri, Cockroft-Walton hızlandırıcısı (Şekil 2.14.), Van de Graff hızlandırıcısı ve Tandem Van de Graff hızlandırıcısıdır.



Şekil 2.14. 1932 yılında ilk nükleer reaksiyon deneyinde kullanılan Cockroft-Walton hızlandırıcısı (Krane 1955).

2.4.2. Siklotron Hızlandırıcıları

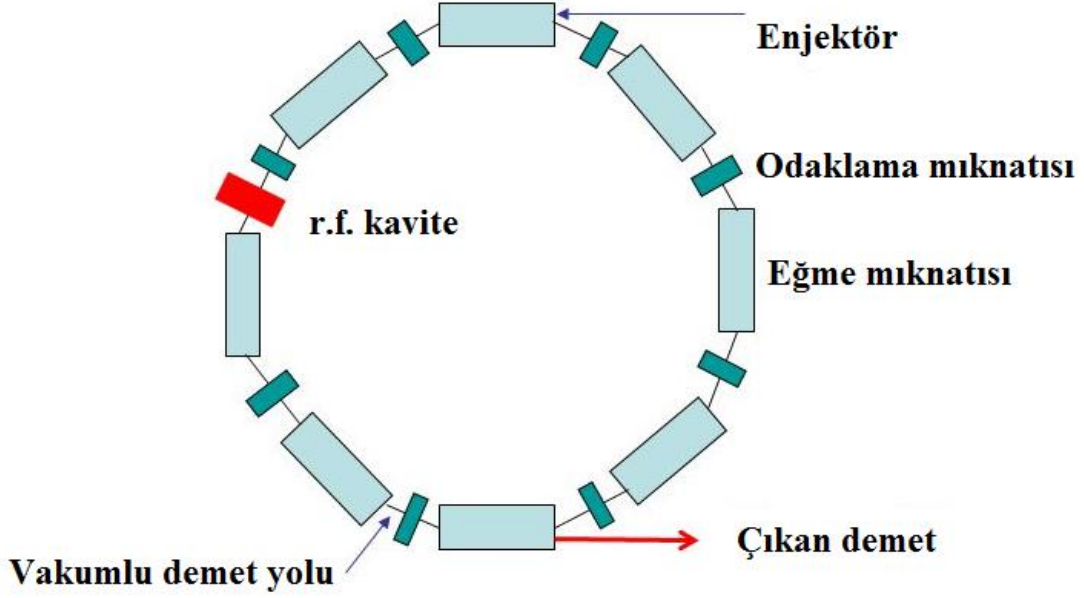
Tasarım fikri ilk olarak Berkeley Üniversitesi'nde Ernest Lawrence tarafından ve parçacıkları hızlandırmak için ilk siklotron yapımı ise 1931 yılında Berkeley'de M. Stanley Livingston tarafından yapıldı (Krane 1955). Siklotronun çalışma prensibinde, demet manyetik alanın etkisiyle dairesel bir yol izler ve yarım daire şekline sahip metal odalar içinde hareketini gerçekleştirirler (Şekil 2.15.). Böylece parçacık demeti her dönüşü esnasında küçük bir enerji kazanırlar.



Şekil 2.15. Siklotron hızlandırıcısının bir gösterimi (Anonim 2018g).

2.4.3. Sinkrotronlar

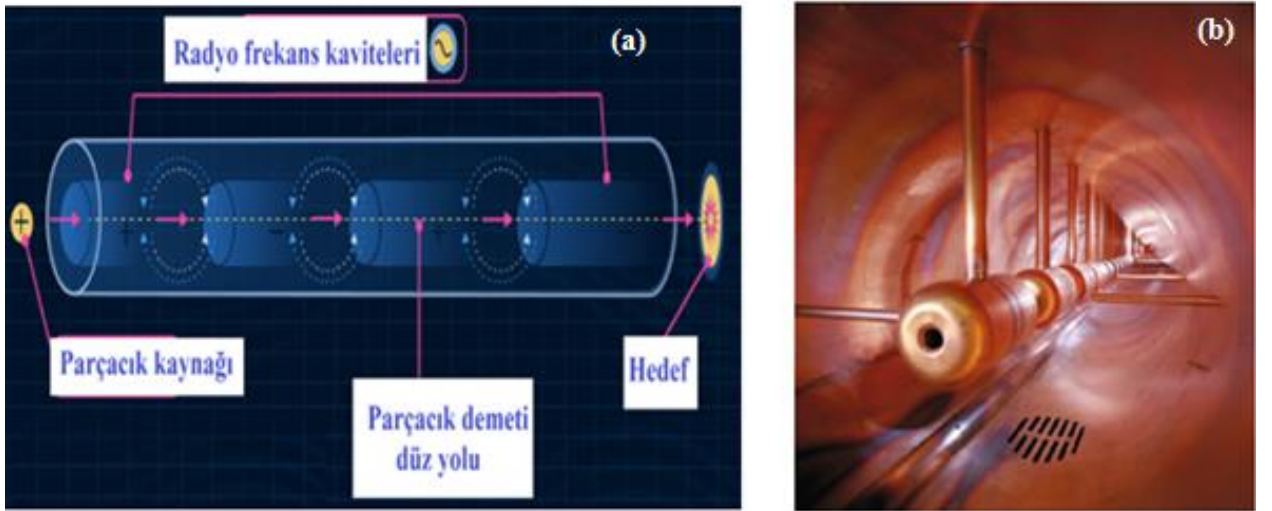
Parçacık demetinin RF kavite ile hızlandırıldığı ve mıknatıslarla sabit R yarıçaplı yörüngede tutulduğu hızlandırıcılardır (Şekil 2.16.). İlk proton sinkrotronu Brookhaven Ulusal Laboratuvarında, 3 GeV enerjide protonları elde etmek amacıyla tasarlanan ve 1952 yılında tamamlanan kozmotron adı verilen hızlandırıcıdır. Benzer zamanlarda Berkeley Lawrence Radyasyon Laboratuvarında bevatron adı verilen bir proton sinkrotronu inşa edildi (Krane 1955). Son zamanların en güçlü hızlandırıcıları sinkrotron prensibine dayandırılır. Fermi ulusal hızlandırıcı laboratuvarında tevatron, Brookhaven ulusal laboratuvarında rölativistik ağır iyon çarpıştırıcısı, Avrupa Nükleer Araştırma Merkezinde (CERN) büyük hadron çarpıştırıcısı bunlardan bazılarıdır (Cerrito 2017). Sinkrotronlar, aynı zamanda isimlerinin sinkrotron ışması olarak bilinen radyasyonun bir çeşidine verilmesiyle de bilinirler (Cerrito 2017). Bu kapsamda sinkrotron ışması, manyetik alan ortamında rölativistik hızlarla dairesel bir yörüngede hareket eden yüklü parçacıkların yayınladığı elektromanyetik radyasyona denir (Aydoğan 2007). Sinkrotronlar; materyal, biyolojik ve tıbbi araştırmalarında kullanılmak üzere günümüzde hızlandırıcılar olarak inşa edilmektedir (Cerrito 2017).



Şekil 2.16. Sinkrotron hızlandırıcısının bir gösterimi (Anonim 2018h).

2.4.4. Lineer Hızlandırıcılar

Linac olarak da ifade edilen lineer hızlandırıcılar (Şekil 2.17.) parçacık demetini ac gerilimi yardımıyla çok defa hızlanmasını sağlar. Parçacık demeti ac gerilim kaynağının zıt kutuplarına birbiri ardına bağlanmış elektrot dizisi boyunca hareket ederler ve elektrotlar arasındaki boşluğu geçerken hızlanırlar (Krane 1955).

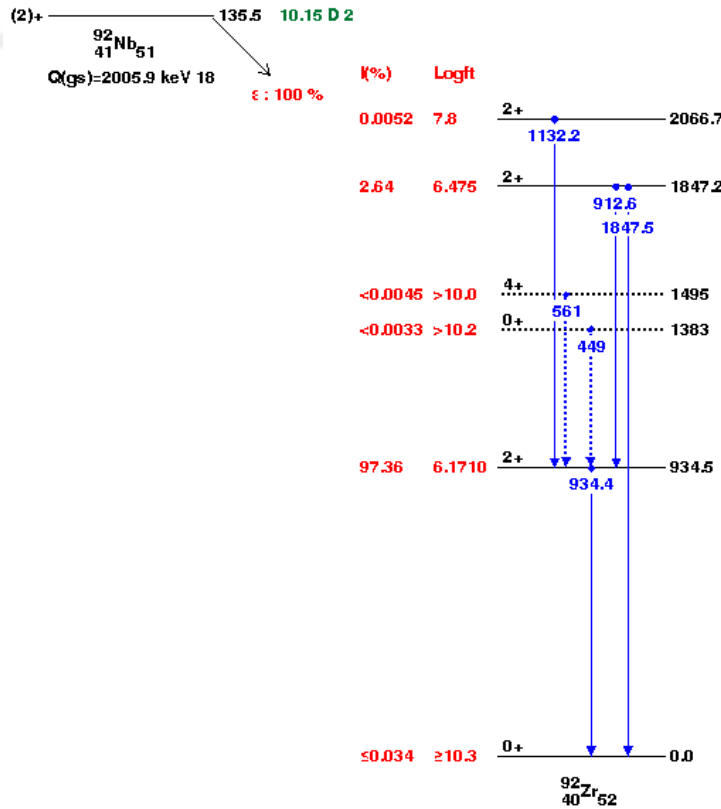


Şekil 2.17. a) Lineer hızlandırıcısının bir gösterimi (Anonim 2018g), b) Fermi ulusal hızlandırıcı laboratuvarında Alvarez tipi Linac'ın iç görünümü (Cerrito 2017).

2.5. Niyobyum ve İyod Çekirdeklerine Genel Bir Bakış

Niyobyum yumuşak, işlenebilir, cisim merkezli kübik kristal yapılı gri-beyaz metal ve periyodik cetvelin 5. grubunda yer alan bir elementtir. Niyobyum ateşe dayanıklı olup yüksek sıcaklıkta yüksek mukavemete sahiptir. Çeliklerde bir alaşım elementi olarak kullanımı bulunmaktadır (Ditrói vd. 2008). Niyobyum düşük termal nötron tesir kesitine sahiptir (Naik vd. 2013). ^{93}Nb doğada bolluk oranı %100 olan ve nükleer reaktörlerin yapısal materyallerinde kullanılan niyobyumun izotopudur. ^{93}Nb aynı zamanda füzyon reaktörlerinde süperiletken alaşımların bir elementi olarak da önemlidir (Wang vd. 2011).

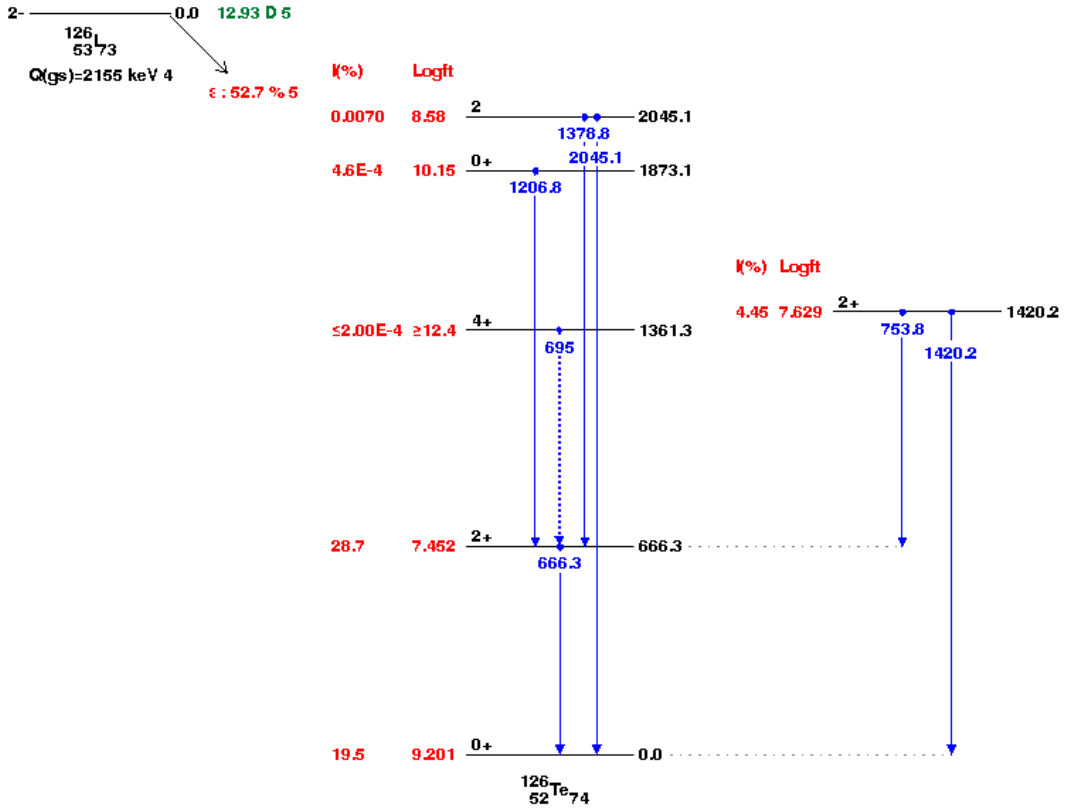
^{93}Nb çekirdeğinin fotonükleer reaksiyon sonucu meydana gelen ürün çekirdeği $^{92\text{m}}\text{Nb}$ çekirdeğidir. $^{92\text{m}}\text{Nb}$, 10.15 gün yarı ömüre sahiptir ve niyobyum içeren alaşımlardan yapılmış bileşenlerin ince film aktivasyon (TLA) ölçümlerinde uygulamak için değerlendirilir (Steyn vd. 2011). ^{92}Nb çekirdeğinin bozunma şeması Şekil 2.18'de gösterilmektedir. Bu çekirdekler kullanılarak gerçekleştirilmiş çalışmalar literatürde mevcuttur (West vd. 1959, Bunker vd. 1962, Baglin 1997, Baglin 2011, Naik vd. 2013, Crasta vd. 2013).



Şekil 2.18. ^{92}Nb çekirdeğinin bozunma şeması (Nudat).

İyodun ^{107}I 'den ^{145}I 'e kadar bilinen 39 tane izotopu vardır. Bunlar içerisinde yalnızca bir tanesi ^{127}I kararlı olan çekirdeğidir. En uzun yarı ömürlü (15.7 milyon yıl) ^{129}I çekirdeğidir. ^{127}I çekirdeğinin fotonükleer reaksiyon sonucu meydana gelen ürün çekirdeği ^{126}I çekirdeğidir. ^{126}I çekirdeğinin spini 2 ve paritesi (-)'dir. ^{126}I çekirdeğinin yarı ömrü 12.93 gündür. ^{126}I çekirdeğinin bozunma şeması Şekil 2.19'da gösterilmektedir. ^{126}I çekirdeği ya elektron yakalama yaparak ^{126}Te ya da beta bozunması yaparak ^{126}Xe dönüşebilir. ^{128}I çekirdeği ise elektron yakalama yaparak ^{128}Te ya da beta bozunması yaparak ^{128}Xe dönüşebilir (Nudat).

İyot çekirdeğinin farklı izotopları nükleer tıp alanında araştırma, tanılama ve tedavi amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır (Dzhilavyan vd. 2011). ^{128}I çekirdeği radyasyon dozunun önemli bir azalma ile diagnostik araştırmalarda yararlanılabilir (Maruyama and Kazuhide 1967). Tiroid tarafından iyodun alınımından dolayı, radyoiod izotopları görüntüleme (^{131}I) ve sorunlu tiroid dokularını ve diğer dokularda da imha etmede yaygın bir şekilde kullanılır. ^{125}I radyasyon terapisinde kullanılan diğer bir radyoizotoptur (Muljadi 2012). Bu çekirdekler kullanılarak gerçekleştirilmiş çalışmalar literatürde mevcuttur (Mulvey vd. 1965, Jackson ve Meyer 1977, Zaman vd. 2011, Mandal vd. 2012, Kuo vd. 2013, Fan vd. 2013).



Şekil 2.19. ^{126}I çekirdeğinin bozunma şeması (Nudat).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Fotonükleer Reaksiyon

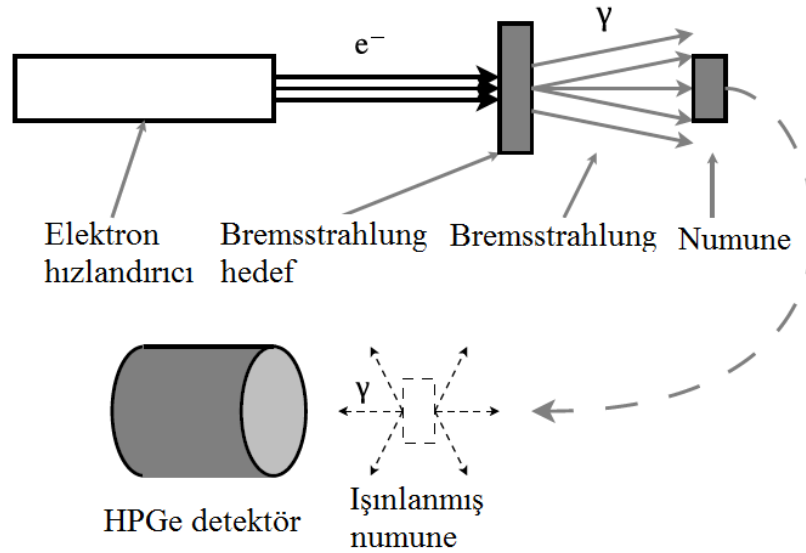
Nükleer fizik bilim dalında çekirdeklerin özelliklerinin belirlenmesinde nükleer reaksiyonlar önemli bir yer tutmaktadır. İlerleyen yıllarda teknolojik alanda sağlanan gelişmelerle hızlandırıcı alanında önemli gelişmeler yaşanmıştır. Böylece nükleer fizik alanının çalışma sahası genişlemiş ve yeni çalışmalara ufuk açmıştır. Bu çalışmalardan birisi de fotonükleer reaksiyon olmuştur.

Fotonükleer reaksiyonlar çekirdeklerin yapısını incelemek için kullanılan nükleer reaksiyonlardan biridir. Fotonükleer reaksiyon genel manada düşünüldüğünde incelenmesi düşünülen bir çekirdek ile foton arasındaki etkileşimdir. Bu bağlamda fotonükleer reaksiyona ait tesir kesiti fotonun absorpsiyonunun oranına bağlı olarak değerlendirilir. Fotonükleer reaksiyonlar üzerine öncü çalışma 1934'de Chadwick and Goldhaber (1934) tarafından gerçekleştirildi. Bu çalışmada uyarıcı kaynak olarak ^{208}Tl 'den yayımlanan 2.62 MeV enerjili gama ışınlarının bombardımanı ile döteronların fotoparçalanması incelendi. Fotonükleer reaksiyonlar teknolojinin gelişmesiyle kendine yaygın bir kullanım alanı bulmuş ve günümüzde de çoğu araştırma merkezlerinde başvurulan bir yöntem olmuştur. Bu metodu diğer metotlardan üstün kılan bir özellik olarak; nükleer reaktörler kullanılarak nötron aktivasyon analizi (NAA) ile belirlenemeyen C, N ve O gibi bazı hafif elementler için uygun bir yöntem olduğu dolayısıyla fotonükleer analizinin nötron aktivasyon analiz için tamamlayıcı bir metod olduğu söylenebilir (Masumoto and Segebade).

Fotonükleer reaksiyonların uygulama alanları konu başlıkları şeklinde verilmek istenirse aşağıda belirtilen alanlar olarak sınıflandırılabilir (Masumoto and Segebade):

- Çevresel bilim
- Biyolojik bilim
- Sağlık bilimi
- Endüstriyel ürün
- Materyal analizi
- Arkeoloji biliminde
- Adli bilimde
- Materyallerin sertifikasyonunda

Fotonükleer reaksiyonlar metoduyla numune incelenirken öncelikle bilinmeyen numune (hedef çekirdek) yüksek enerjili fotonlara maruz bırakılır. Bu işlem sonucunda yüksek enerjili bir seviyeye uyarılmış halde bulunan çekirdek foton yayımlayarak bozunabilir. Fotonükleer reaksiyonla (örneğin (γ, n) gibi reaksiyon) elde edilen radyoizotoplar, yayımladıkları enerji ile belirlenir. Aynı zamanda bu etkileşim esnasında radyoaktivite yoğunluğu söz konusu elementin bolluğuyla orantılıdır. Bu duruma ait ölçümleri gerçekleştirmek için uygun dedektörler kullanılır. Bu amaçla en yaygın kullanılan ise yüksek saflıkta germanyum (HPGe) dedektörüdür. Buradan alınan spektrum incelenilen numunede bulunan elementlerin piklerinin bulunduğu bir yapıdır. Bu spektrumdaki piklerin alanı elementlerin içeriklerinin tespitinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Kullanılan dedektör yardımıyla tespit edilen enerji ve parçacıklar için uygun programlar yardımıyla analizi gerçekleştirilir. Bu işlemler için uygun bir enerji aralığı seçilmelidir. Bunun için ise genellikle lineer hızlandırıcı benzeri kaynaklarla üretilen bremsstrahlung metodu kullanılabilir. Sonraki bölümlerde hem dedektör hem de analizde kullanılan program açıklanmıştır.

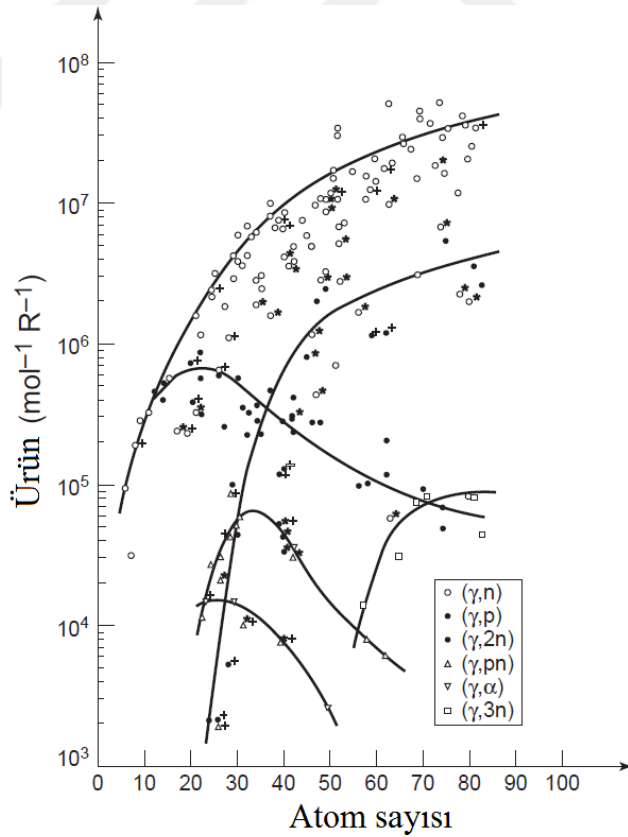


Şekil 3.1. Bremsstrahlung gama ışınlarıyla deneysel bir plan (Ishkhanov vd. 2013).

Şekil 3.1’de gösterildiği gibi elektron hızlandırıcısı yardımıyla elektronlar hızlandırılarak bir tungsten hedefe etkileşmek üzere gönderilir. Burada oluşan bremsstrahlung fotonları incelenilecek numuneye gönderilir. Böylece ışınlanmış olan bu numunenin yayımladığı gama ışınlarının yüksek saflıkta germanyum dedektörü yardımıyla sayımı gerçekleştirilir.

(γ,n) fotonükleer reaksiyon sonucunda meydana gelmiş olan radyoizotoplar çoğunlukla pozitron ve/veya elektron yakalama (capture) ile bozunurlar. C, N, O, F gibi bazı hafif elementler pozitron neşreden nüklitlere neden olur. Buna karşın orta ağır elementlerden ağır elementlere (γ,n) ürünlerinin çoğu elektron yakalama olayı ile bozunurlar.

Masumoto and Segebade çalışmalarında farklı çalışmalardan 20 MeV Bremsstrahlung ile ölçülen (γ,n) , (γ,p) ve (γ,α) reaksiyonlarının reaksiyon ürünlerini 30 MeV ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırdı ve her iki enerjili durumun ürünleri arasındaki farkın küçük olduğunu gösterdiler. Şekil 3.2'de 30 MeV bremsstrahlung maksimum enerjisinde fotonükleer reaksiyonun ürünlerinin, fotonükleer reaksiyonların çeşitli tiplerinin ürünlerinin atom sayısına karşı değişimi gösterilmektedir. (γ,n) , $(\gamma,2n)$ ve $(\gamma,3n)$ reaksiyonlarının ürünleri kütle sayısı ile artar. (γ,p) reaksiyonu atom sayısı 20'de maksimum ürün gösterir ve atom sayısıyla azalır. Daha yüksek yüklü parçacıkların neşredildiği reaksiyonda, ürün eğrileri (γ,p) reaksiyonundakine benzer bir biçim gösterir.



Şekil 3.2. 30 MeV bremsstrahlung ile atom sayısının bir fonksiyonu olarak fotonükleer reaksiyonların ürünleri (Masumoto and Segebade).

Çizelge 3.1. Doğal ürünlerin foton aktivasyon analizi için ilgili nükleer data (Masumoto and Segebade).

Element	Hedef Çekirdek	Reaksiyon	Ürün Çekirdek	Yarı-Ömür ^a	γ -ışın enerjisi (keV)
C	¹² C	(γ ,n)	¹¹ C	20.39 m	511
N	¹⁴ N	(γ ,n)	¹³ N	9.97 m	511
O	¹⁶ O	(γ ,n)	¹⁵ O	1.18 m	511
F	¹⁹ F	(γ ,n)	¹⁸ F	1.830 h	511
Na	²³ Na	(γ ,n)	²² Na	2.602 y	1274.5
Mg	²⁵ Mg	(γ ,p)	²⁴ Na	14.66 h	1368.6
Si	³⁰ Si	(γ ,p)	²⁹ Al	6.6 m	1273.4
P	³¹ P	(γ ,n)	³⁰ P	2.50 m	511
Cl	³⁵ Cl	(γ ,n)	^{34m} Cl	32.2 m	146.4, 2127.7
K	³⁹ K	(γ ,n)	³⁸ K	7.64 m	2167.7
Ca	⁴⁴ Ca	(γ ,p)	⁴³ K	22.3 h	372.8, 617.5
Ca	⁴⁸ Ca	(γ ,n)	⁴⁷ Ca	4.536 d	1297.1
Sc	⁴⁵ Sc	(γ ,n)	⁴⁴ Sc	3.93 h	1157
Ti	⁴⁷ Ti	(γ ,p)	⁴⁶ Sc	83.83 d	889.3, 1120.5
Ti	⁴⁸ Ti	(γ ,p)	⁴⁷ Sc	3.341 d	159.4
Ti	⁴⁹ Ti	(γ ,p)	⁴⁸ Sc	1.821 d	983.5, 1037.5, 1312.0
Cr	⁵² Cr	(γ ,n)	⁵¹ Cr	27.704 d	320.1
Mn	⁵⁵ Mn	(γ ,n)	⁵⁴ Mn	312.2 d	834.8
Fe	⁵⁷ Fe	(γ ,p)	⁵⁶ Mn	2.578 h	846.8
Co	⁵⁹ Co	(γ ,n)	⁵⁸ Co	70.92 d	810.8
Ni	⁵⁸ Ni	(γ ,n)	⁵⁷ Ni	1.503 d	1377.6
Cu	⁶⁵ Cu	(γ ,n)	⁶⁴ Cu	12.701 h	511.0, 1345.8
Zn	⁶⁶ Zn	(γ ,n)	⁶⁵ Zn	244.1 d	1115.5
Zn	⁶⁸ Zn	(γ ,p)	⁶⁷ Cu	2.580 d	184.6
Ga	⁶⁹ Ga	(γ ,2n)	⁶⁷ Ga	3.261 d	184.6, 300.2
As	⁷⁵ As	(γ ,n)	⁷⁴ As	17.78 d	595.9
Se	⁷⁶ Se	(γ ,n)	⁷⁵ Se	119.77 d	136.0, 264.7
Br	⁷⁹ Br	(γ ,2n)	⁷⁷ Br	2.3765 d	239.0, 520.6
Rb	⁸⁵ Rb	(γ ,n)	⁸⁴ Rb	32.9 d	881.7
Sr	⁸⁸ Sr	(γ ,n)	^{87m} Sr	2.80 h	388.4
Y	⁸⁹ Y	(γ ,n)	⁸⁸ Y	106.61 d	898.1, 1836.1
Zr	⁹⁰ Zr	(γ ,n)	⁸⁹ Zr	3.268 d	909.2
Nb	⁹³ Nb	(γ ,n)	^{92m} Nb	10.15 d	934.5
Mo	¹⁰⁰ Mo	(γ ,n)	⁹⁹ Mo	2.7477 d	140.5
Sb	¹²³ Sb	(γ ,n)	¹²² Sb	2.70 d	564.4
I	¹²⁷ I	(γ ,n)	¹²⁶ I	13.0 d	388.6, 666.4
Cs	¹³³ Cs	(γ ,n)	¹³² Cs	6.48 d	667.7
Ba	¹³⁶ Ba	(γ ,n)	^{135m} Ba	1.20 d	268.3
Ce	¹⁴⁰ Ce	(γ ,n)	¹³⁹ Ce	137.66 d	165.9
Tm	¹⁶⁹ Tm	(γ ,n)	¹⁶⁸ Tm	93.1 d	198.2, 815.9
Tl	²⁰³ Tl	(γ ,n)	²⁰² Tl	12.23 d	439.6
Pb	²⁰⁴ Pb	(γ ,n)	²⁰³ Pb	2.169 d	279.2
U	²³⁸ U	(γ ,n)	²³⁷ U	6.75 d	208

^a y, yıl; m, ay; d, gün; h saat

Nükleer yapı çalışmalarında çekirdeklerin sahip olduğu enerji seviyeleri ve bu seviyelerde ne kadar buldukları ile ilgili bilgiler önemli bir yere sahiptir. Çekirdek enerji seviyelerinin 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 enerji seviyelerini teorik olarak hesaplamıştır (Bethe 1936). 1937 yılında Weisskopf bu termodinamik etkileşimi genelleştirerek enerji hesaplamalarıyla ilgili çalışma yapmıştır (Weisskopf 1937). Bu çalışmalarda dikkate alınan nokta çekirdek uyarılma enerjilerinin termodinamik sıcaklığın karesi ile orantılı olduğudur.

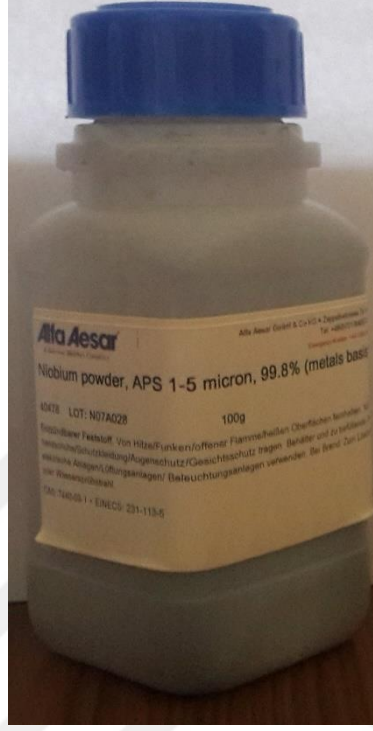
Enerji seviyelerinin belirlenmesi için yapılan deneysel çalışmalar nötron ve proton aktivasyon gibi farklı metotları içinde barındırır. Örneğin, ^{19}Ne çekirdeğine ait enerji seviyeleri proton bombardımanı kapsamında $^{19}\text{F}(p,n)^{19}\text{Ne}$ reaksiyonu ile belirlenmiştir (Wesolowski vd. 1965). ^{90}Y çekirdeğinin enerji seviyeleri ise döteron-proton (d,p) reaksiyonu ile ölçülmüştür (Hamburger ve Hamburger 1965). Diğer taraftan ^{47}V ve ^{49}V çekirdeklerinin enerji seviyeleri proton-alfa (p, α) reaksiyonu kullanılarak ölçülmüştür (Brown ve Macgregor 1966). Konjin ve arkadaşları sintilasyon dedektörü kullanarak ^{48}Sc ve ^{48}V çekirdeklerinin enerji seviyelerini belirlemişlerdir (Konjin 1967). Bu kapsamda, gelişen teknoloji ve çekirdekler hakkında artan bilgi sayesinde çekirdeklerin enerji seviyelerinin belirlenmesi üzerine pek çok çalışma yapılmıştır (Bosnjakovic vd. 1967, Ajzenberg-Selove and Bingham 1973, Kent 1975, Pougheon vd. 1981, Tilley vd. 2004, Nica 2012).

3.2. Numunelerin Elde Edilmesi ve Hazırlanması

Çalışılması planlanan numuneler toz, metal ya da bileşik olmak üzere farklı formlarda kullanılabilirler. Numunenin formu ve safsızlık oranı istenilen değerde belirlendikten sonra farklı firmalar tarafından bu numuneler tedarik edilebilir.

İşinlanacak numune toz halinde ise belli geometriye kaplara yerleştirilirken metal formdaki numuneler ise kesilmek suretiyle istenilen ebatlara uyarlanabilir. Numuneler üzerinde çalışılırken; temas veya solunum yoluyla sağlık açısından sakınca olup olmadığına, başka bir etken ile patlama veya alev alma gibi durumunun olup olmadığına çok dikkat edilmelidir. Tüm bu durumlarla ilgili bilgiler numuneler tanıtıldığı yerlerde verilmektedir.

Tez çalışmamızda deneysel ölçümler iki hedef numune için gerçekleştirilmiştir. ^{93}Nb , bunlardan ilkidir. Bu numune %99.8 saflıkta hava sızdırmaz bir kap içerisinde Alfa Aesar Company, Karlsruhe, Germany firmasından temin edilmiştir (Şekil 3.3.). Numune toz halinde kullanılmıştır.



Şekil 3.3. Çalışmamızda kullanılan Nb numunesinin görünümü.

^{127}I , diğer çalışılan numunedir. ^{127}I , %99.99 saflıkta hava sızdırmaz bir kap içerisinde ACI ALLOYS firmasından temin edilmiştir (Şekil 3.4.). Bu numune de yine toz formunda kullanılmıştır.



Şekil 3.4. Çalışmamızda kullanılan I numunesinin görünümü.

3.3. Deneysel Düzenek ve Numunelerin Işınlanması

Elektron hızlandırıcıları fotonükleer reaksiyonlarda bremsstrahlung ile fotonların elde edilmesinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Burada bir karşılaştırma yaparsak fotonükleer reaksiyonlar kapsamında tesir kesitleri, aynı enerjili elektronların neden olduğu nükleer reaksiyonlara ait tesir kesitlerinden yaklaşık yüz kat daha büyüktür (Masumoto and Segebade). Bundan dolayı yüksek enerjili elektronlar yardımıyla elde edilen bremsstrahlung radyoizotopların üretiminde ve sıklıkla da aktivasyon analizinde kullanılabilir.

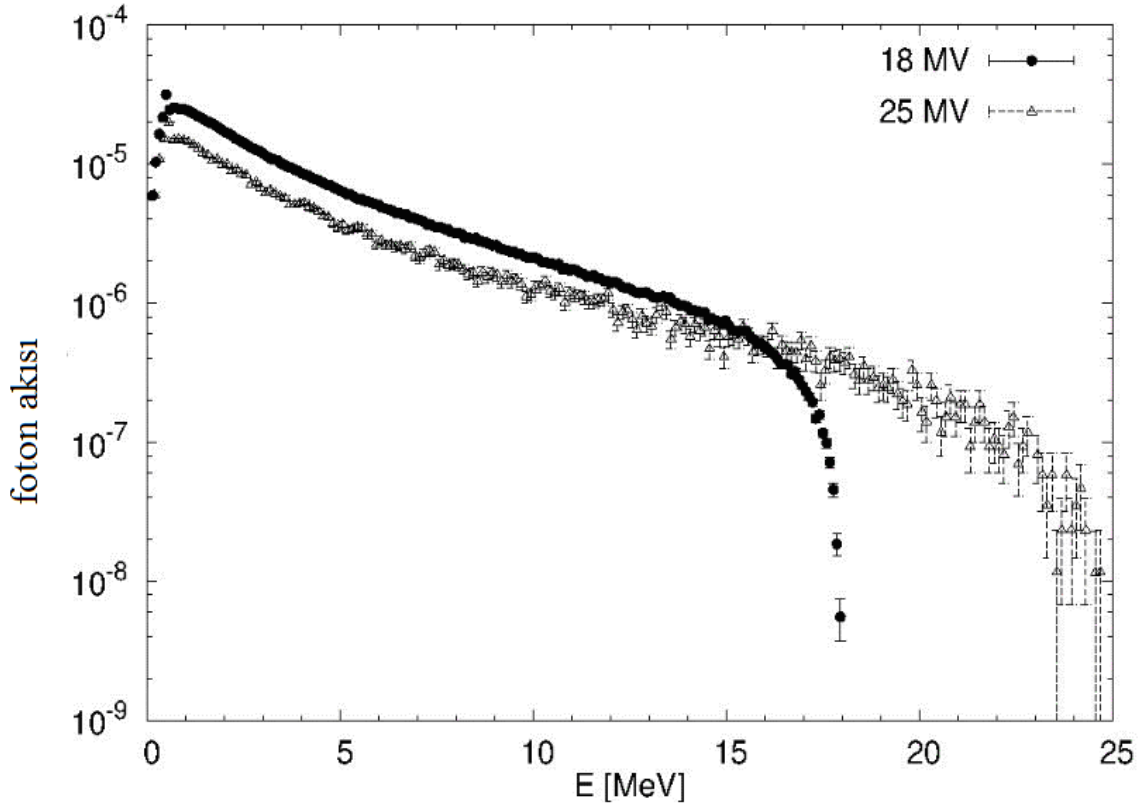
Elektronlar ile madde arasındaki etkileşim için düşük atom numaralı hedef materyal ve düşük enerjili elektronlar için enerji kaybının büyük bir kısmı iyonizasyondan dolayıdır. Buna karşın yüksek atom numaralı hedef materyal ve yüksek enerjili elektron için enerji kaybı artar. Bu enerji kaybı atom numarasının karesi ile orantılı olduğu için yüksek atom numaralı elementler bremsstrahlung olayını daha etkin olarak gerçekleştirir. Bremsstrahlung şuasının bazı özelliklerini sıralarsak (Ishkhanov vd. 2013):

- Yüksek yoğunluktadırlar,
- Elde edilen sonuçların istatistiksel doğruluğu sağlanabilir,
- Bremsstrahlung fotonlarının enerji spektrumu süreklidir.



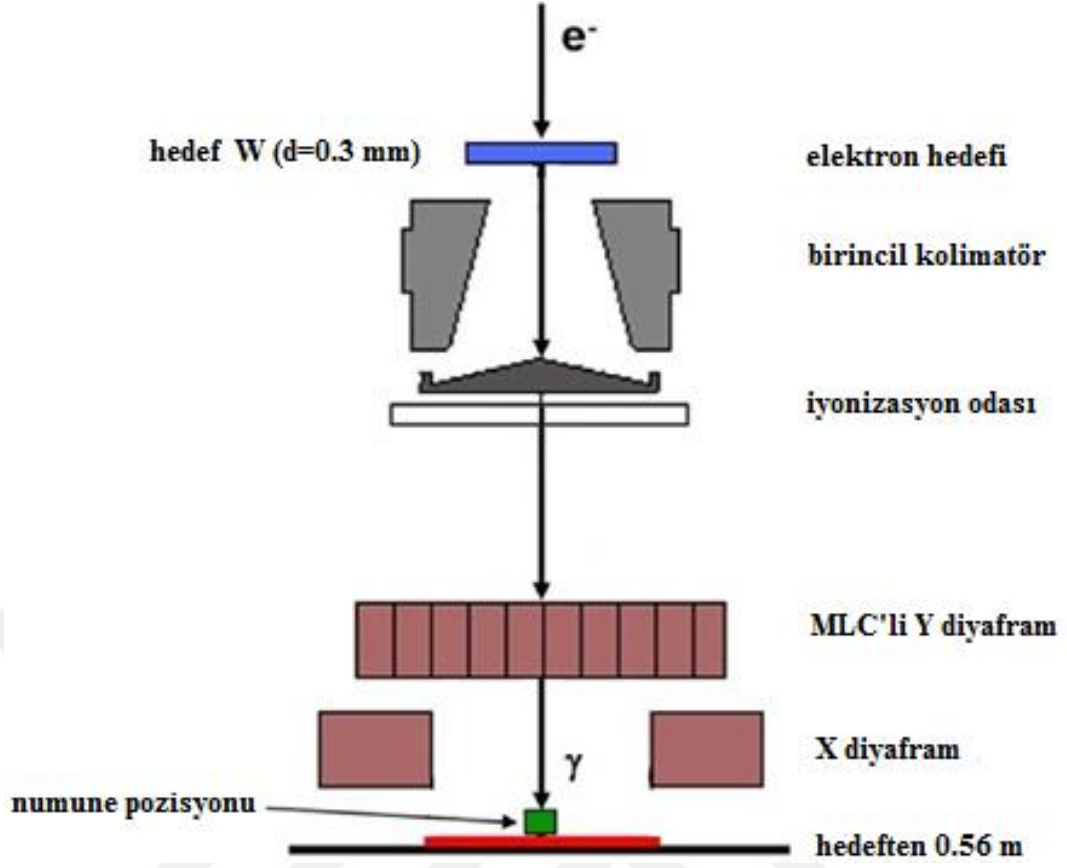
Şekil 3.5. Fotonükleer reaksiyonlar için bremsstrahlung kaynağı olarak kullanılan cLINAC'ın görünümü.

Elektron doğrusal hızlandırıcı sistemi, elektronların vakumda doğrusal bir kılavuzda hızlandırılması ve manyetik alanlar yardımıyla yönlendirilmesi olarak düşünülebilir. Bu kapsamda ilk etapta termiyonik yöntemle elektronların yayınlanması sağlanır. Bu vakum ortamındaki tungsten bir dirençten elektrik akımının geçirilmesiyle gerçekleştirilir. Yaklaşık 50 keV civarında düşük enerjiye sahip bu elektronlar radyofrekans (RF) dalgalarına bindirilerek doğrusal dalga kılavuzunda hızlandırılırlar. Dalga kılavuzunun çevresindeki kuadrapol mıknatıslar yardımıyla ışın doğrusal olarak şekillendirilebilir ve aynı zamanda yönlendirilebilir. Sonrasında elektron demetinin önüne hedef olarak yerleştirilecek tungsten ile yüksek enerjili frenleme (bremsstrahlung) X-ışınları elde edilebilir. Böylece araştırmalarda yararlanılacak olan elektron doğrusal hızlandırıcısı ile 4, 6, 18 ve 25 MeV'lik nihai enerjisine sahip bremsstrahlung fotonları üretilmektedir. Şekil 3.5'de fotonükleer reaksiyonlar için bremsstrahlung kaynağı olarak kullanılan cLINAC'ın ve Şekil 3.6'da Phillips SLI-25 marka lineer hızlandırıcının bremsstrahlung enerji sürekliliği gösterilmiştir.



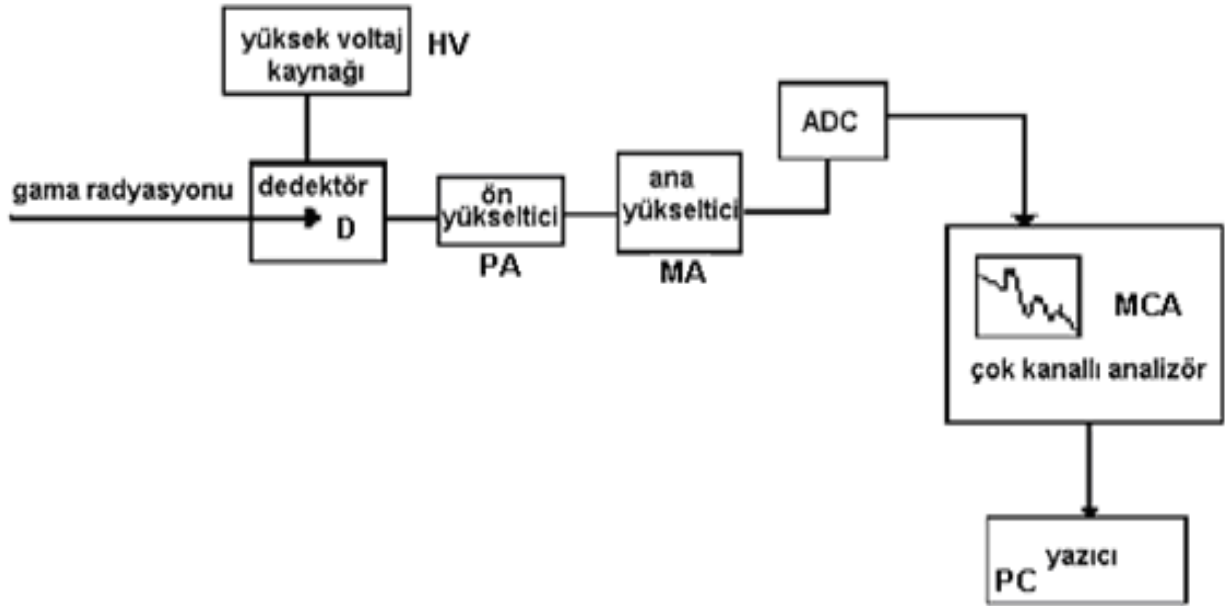
Şekil 3.6 Philips SLI-25 medikal (klinik) lineer hızlandırıcısının 18 ve 25 MeV'lik nihai enerjilerinde elde edilen fotonlarının akısına ait bremsstrahlung spektrumları.

Çalışmamızda incelenen toz halindeki numuneler ışınlanmadan önce $40 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ bir kabın içerisine yerleştirildi. Bu kap Şekil 3.7'de görüleceği üzere cLINAC'ın tungsten dönüştürücüsünden 56 cm uzaklığa yerleştirildi ve 18 MeV son nokta enerjili fotonlarla bombardıman edildi. Numuneler yaklaşık 35 dakika ışınlandı. Işınlamadan sonra hiçbir kimyasal işlem uygulanmadı. Işınlama süresinin bitmesi ile örneklerin sayımı bu aşamadan sonra yüksek saflıkta germanyum dedektörü ile yapıldı.



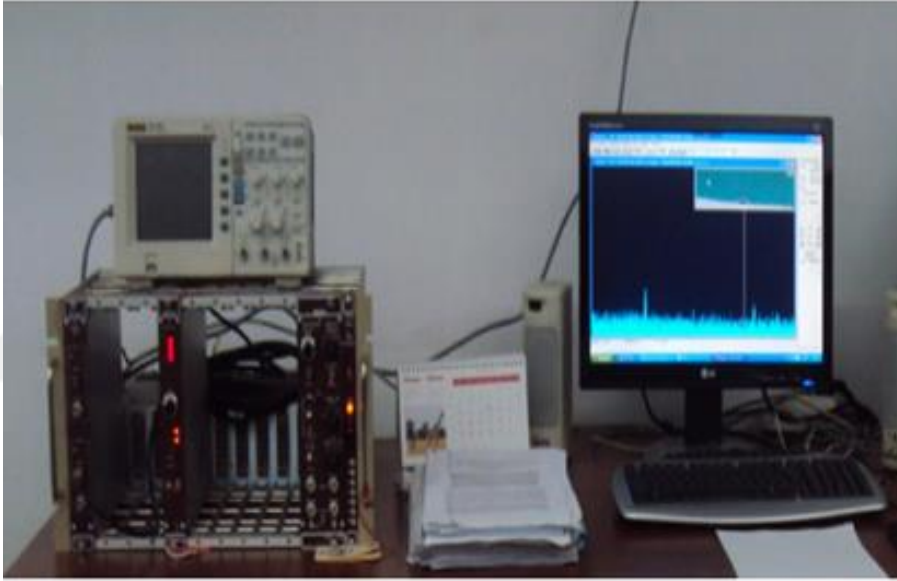
Şekil 3.7. cLINAC kurulumunun sistematik görünümü.

AMATEK-ORTEC (GEM40P4-83) model yüksek saflıkta germanyum dedektörü %40 bağlı verime sahip olup yarı yükseklikteki tam genişlik (FWHM) değeri ^{57}Co radyoizotopunun 122 keV'deki piki için 768 eV, ^{60}Co radyoizotopunun 1332 keV'deki piki için 1,85 keV olmaktadır. 10 cm kalınlığındaki kurşun zırh içerisinde bulunan yüksek saflıkta germanyum dedektörü; güç kaynağı, spektroskopi yükseltici, NIM (Nuclear Instrumentation Module) kasa ve bir bilgisayara bağlı haldedir. Kullanılan zırhın neden olabileceği X-ışınlarını filtrelemek amacıyla kurşun zırhın iç kısmı 2 mm bakırla kaplanmıştır. Şekil 3.8'de germanyum dedektörlü sistemin çalışma düzeneği ve Şekil 3.9'da çalışmamızda kullanılan yüksek saflıkta germanyum dedektörü ve ekipmanlarının bir gösterimi verilmektedir.



Şekil 3.8. Germanyum dedektörlü sistemin çalışma düzeni.

Burada dedektör ile birlikte dedektörün yük birikimi için gerekli elektrik alanı elde etmede (-) veya (+) 5000 volt'a kadar gerilim sağlayan yüksek voltaj ünitesi mevcuttur. Dedektörden gelen atmaları depolanan enerji ile orantılı olarak voltaj sinyaline dönüştürüp atmaları şekillendirip aynı zamanda büyüten önyükselteç ve ön yükselteçten gelen atmaların analizi yapılabilecek düzeyde atmanın yükseltilmesini ve en iyi enerji çözünürlüğünü sağlayacak şekilde şekillendirmeyi sağlayan yükselteç diğer elemanlardır. Bunlara ilave olarak, spektroskopi yükseltecinden gelen sinyalleri genlikleri ile orantılı olarak sayısal sisteme dönüştüren analog-dijital dönüştürücü (ADC) ve spektrumda ortaya çıkan piklerin yüksekliğini ve küçük voltaj aralıklarında oluşan sayımları ölçen çok kanallı analizör (MCA) spektrometre sisteminde bulunan ve ölçümün bilgisayar yazılımları ile değerlendirilmesine olanak sağlayan tamamlayıcı elemanlardır. Dedektör spektrumu Çekmece Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi tarafından sağlanan ^{22}Na , ^{54}Mn , ^{57}Co , ^{60}Co , ^{109}Cd , ^{133}Ba ve ^{137}Cs izotoplarını içeren standart kaynaklar kullanılarak kalibre edildi.

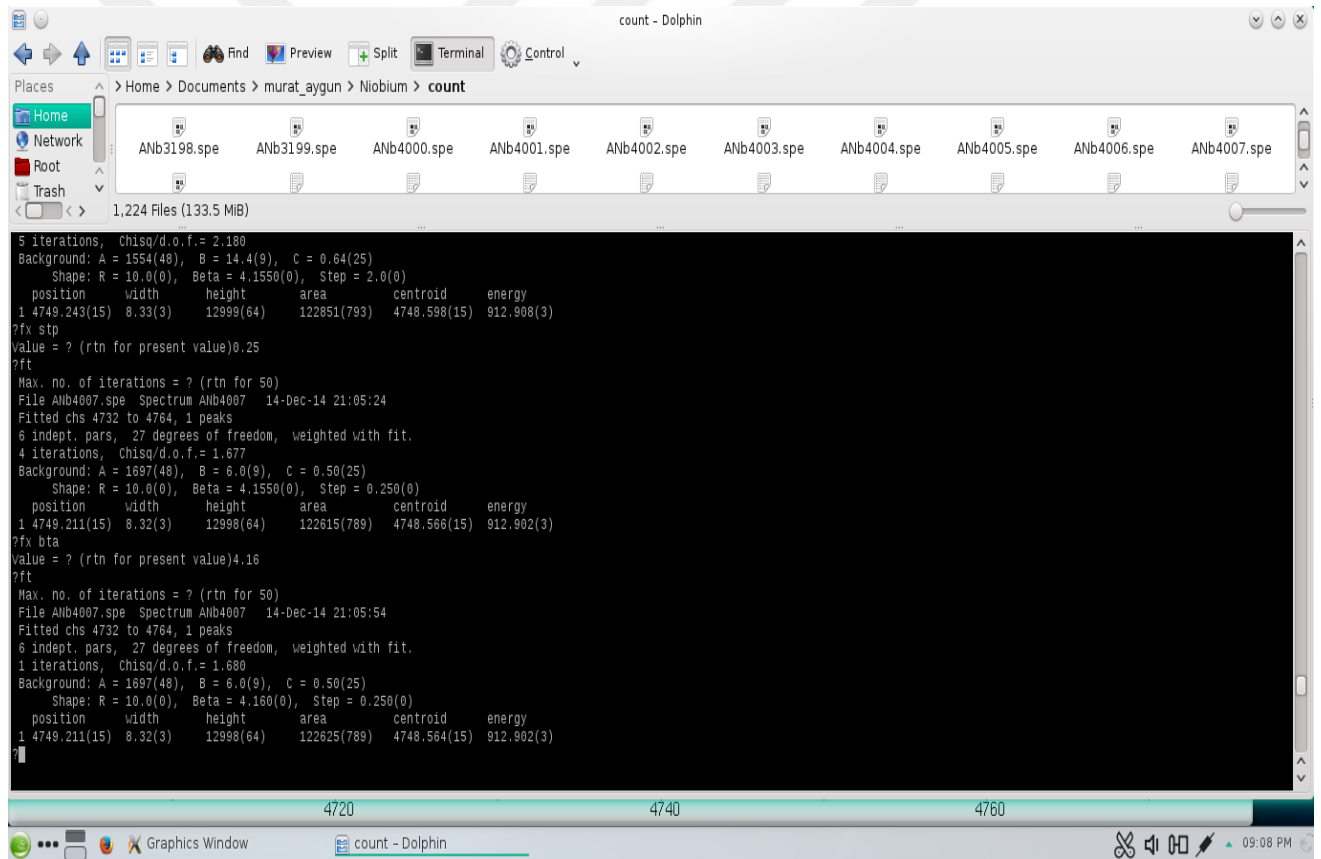


Şekil 3.9. HPGe dedektör ve donanımı (Ertuğay 2015).

3.4. Numunelerin Ölçümlerinin Analiz Edilmesi

Çalışmamıza ait deney ile ilgili verileri toplama ve analiz işlemleri MAESTRO (ORTEC) ve gf3 (RADWARE) yazılımları ile gerçekleştirilmektedir. gf3 Radware programı germanyum dedektörlerinin gama-ışını spektrumunu analiz etmek için tasarlanmış en küçük kareler pik fit etme programıdır (Radford 2000). Bununla birlikte, gf3 programı aynı zamanda Si(Li) elektron dedektörleri ve silikon yüzey bariyer dedektörleri gibi spektrumun diğer tiplerini analiz etmek içinde kullanılabilir. gf3 programı <http://radware.phy.ornl.gov/download.html> internet adresinden ücretsiz olarak indirilebilir.

gf3 programı ile incelenen piklerin şekilleri programda tanımlı parametreler yardımıyla ayarlanabilmektedir. R, Beta ve Step bu amaç için kullanılır. Bu parametrelerin varsayılan değerleri R için 10, Step için 0.25 ve Beta değeri için incelenen pikin yüksekliğinin yarısıdır. Daha sonra R, Beta ve Step'in bu değerleri hata değeri en aza indirgenecek ve analiz edilen piki verecek şekilde değiştirilir ve en uygun değerlere sabitlenir (Şekil 3.10.). Bu işlem incelenen numunenin sahip olduğu spektruma ait tüm pikler için yapılır ve numuneye ait her pikin enerji değeri belirlenir. Belirlenen enerji değerleri literatür ile karşılaştırılır. Karşılaştırmada ilk etapta en kullanışlı yollardan birisi Nudat (Uluslararası Nükleer Veri Tabanı) programını kullanmak olacaktır. Bu kapsamda değerlerin karşılık geldiği çekirdek incelenen çekirdek olarak karşımıza çıkacaktır. Eğer numune daha önceden biliniyor ise sahip olduğu enerji değerleri yine literatürden elde edilerek karşılaştırmalı analiz ile elde edilen sonuçlar üzerine çıkarımlar yapılabilecektir.

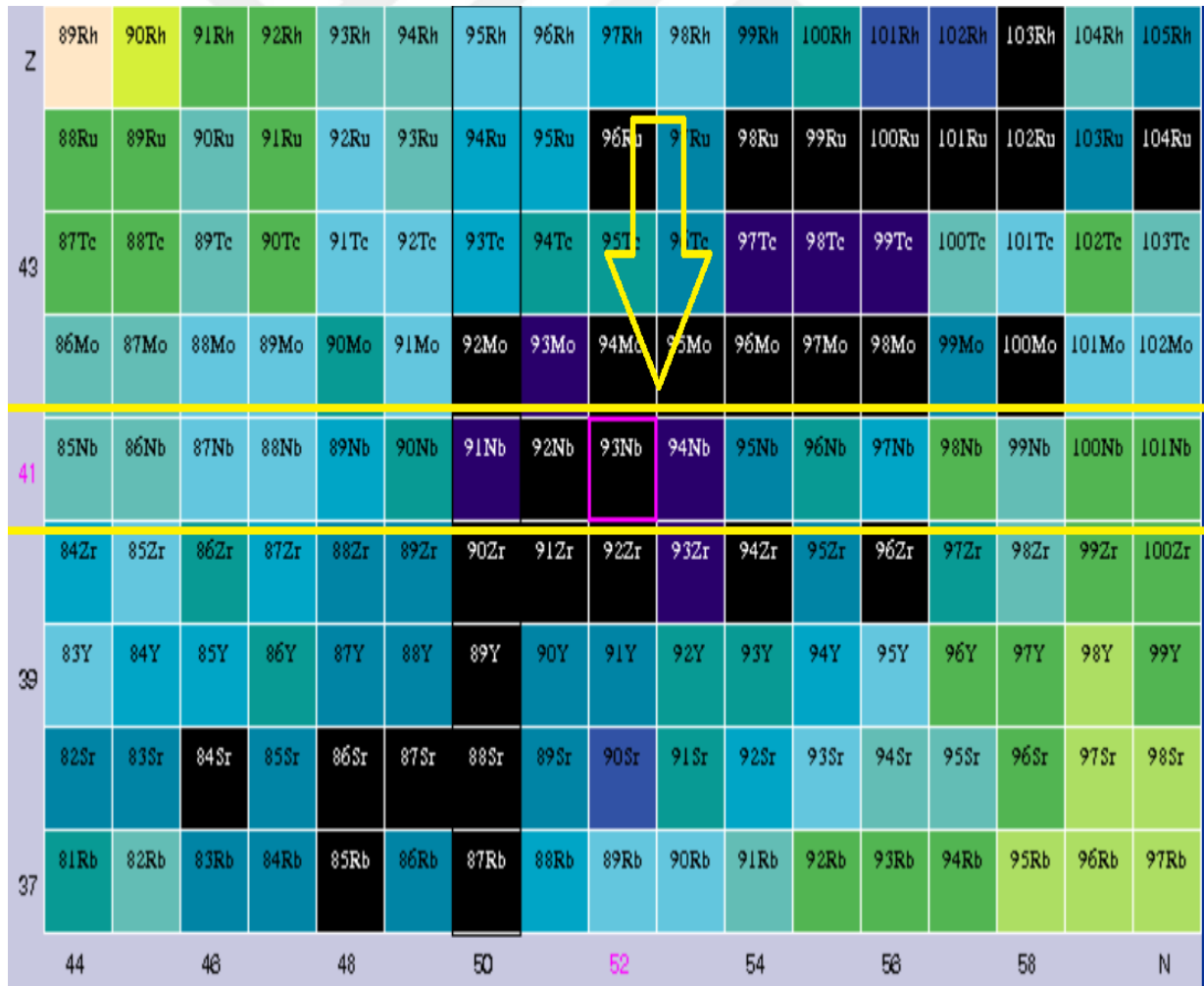


Şekil 3.10. gf3 programı kullanılarak ^{93}Nb analizini gösteren örnek bir görüntü.

4. BULGULAR

4.1. Nb Çekirdeğinin Fotonükleer Reaksiyon Analizi

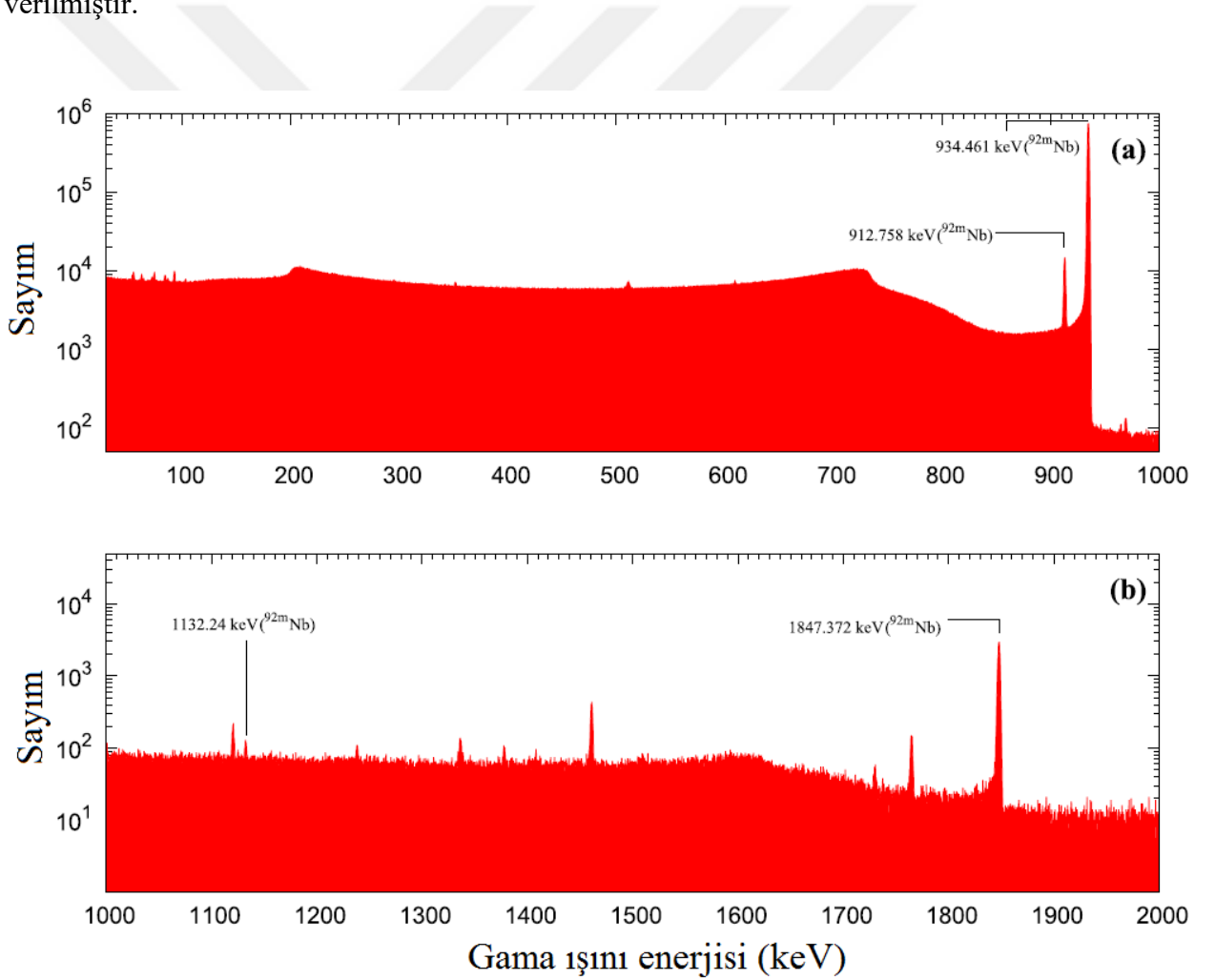
Bu kısımda Nb çekirdeğinin 18 MeV enerjili Bremsstrahlung fotonlarla ışınlanması sonucu meydana gelen fotonükleer olayı incelenmiştir. Şekil 4.1'de Nb çekirdeğinin temel ve izomerik durum bilgisi verilmektedir. Buradan Nb çekirdeğinin kararlı ve bolluk oranı %100 olan izotopunun ^{93}Nb çekirdeği olduğu görülmektedir. Bu kapsamda ^{93}Nb çekirdeğinin ışınlanmasıyla gerçekleşen fotonükleer reaksiyon sonucunda $^{92\text{m}}\text{Nb}$ çekirdeğinin meydana geldiği görülmüştür. Dolayısıyla çalışmamızda $^{92\text{m}}\text{Nb}$ ürün çekirdeğinin deneysel olarak enerji seviyelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Sayım işlemleri germanyum dedektörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Enerji spektrumunda görülen enerji seviyeleri sırasıyla belirlenmiş ve fit etme işleminde gf3 ve ROOT programları kullanılmıştır.



Şekil 4.1. Nb çekirdeği için temel ve izomerik durum bilgisi (Nudat).

$^{93}\text{Nb}(\gamma,n)^{92\text{m}}\text{Nb}$ fotonükleer reaksiyonundan $^{92\text{m}}\text{Nb}$ radyonüklidi oluşabilmektedir. Nb çekirdeği ya ^{92}Nb temel durumunda ya da %99 kesin yoğunlukla 934.4 keV karakteristik γ -ışını yayımıyla bozulan ve ilk uyarılmış durumu olan $^{92\text{m}}\text{Nb}$ olarak kalabilir (Crista vd. 2013). Ancak 3.5×10^7 yıl gibi çok uzun bir yarı ömüre sahip olmasından dolayı ^{92}Nb 'un temel durumundan gamanın bozunumunu ölçmek imkânsız olduğundan, çalışmamızda 10.15 gün yarı ömüre sahip olan $^{92\text{m}}\text{Nb}$ 'un yalnızca uyarılmış durumundan gama bozunumlarını inceliyoruz (Rahman vd. 2010).

$^{93}\text{Nb}(\gamma,n)^{92\text{m}}\text{Nb}$ fotonükleer reaksiyon sonucu oluşan enerji seviyeleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. Bu kapsamda doğal fon (background) çıkarılmadan 18 MeV maksimum enerjili bremsstrahlung fotonları kullanılarak ışınlanmış ^{93}Nb 'un 0–2000 keV aralığında spektrumu Şekil 4.2'de verilmiştir. Aynı zamanda her bir pik enerji büyüklüğüne göre sırasıyla Şekil 4.3-4.5'de verilmiştir.



Şekil 4.2. Doğal fon (background) çıkarılmadan 18 MeV maksimum enerjili bremsstrahlung fotonları kullanılarak ışınlanmış ^{93}Nb (a) 0–1000 keV, (b) 1000–2000 keV.

Ölçülen enerji değerleri Nudat veri tabanı (Nudat) ve önceki çalışmalarda elde edilen literatür değerleriyle karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda, Nudat veri tabanına göre ilk enerji değerinin 912.6 keV olduğu belirtilmiştir. Çalışmamızda bu enerji değeri Çizelge 4.1'den görüleceği gibi 912.780 keV olarak bulunmuştur. Bu iki değer birbirleriyle yakın olduğu bununla birlikte çalışmamızdan elde ettiğimiz sonucun hata sınırları içerisinde Nudat veri tabanından daha iyi olduğu söylenebilir. Aynı zamanda çalışmamızdan elde edilen sonucun hassasiyetinin Nudat veri tabanına göre daha iyi olduğu söylenebilir.

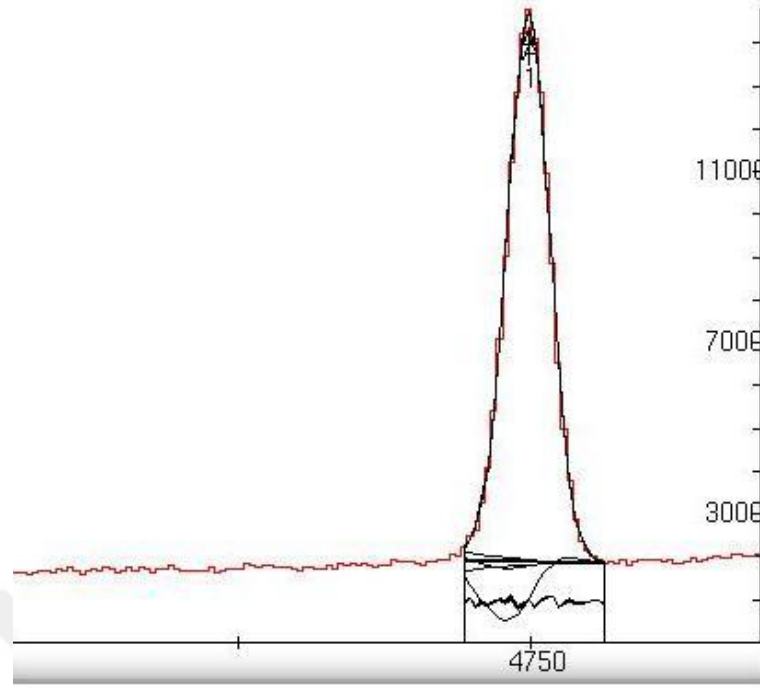
Diğer bir enerji değeri olarak Nudat veri tabanına göre %99.1 bollukla 934.44 keV enerji değeridir. Çalışmamızda bu enerji değeri 934.515 keV olarak bulunmuştur. Bu enerji değerini literatür değerleriyle karşılaştırdığımızda Ditrói vd. (2008) tarafından ana enerji değerini 934.53 keV olarak bulmuştur. Yine bu enerji değeri Naik vd. (2013) tarafından 934.46 keV olarak bulunmuştur. Bu kapsamda literatür sonuçlarıyla çalışmamızda ölçtüğümüz enerji değerinin birbirlerine çok yakın olduğu görülmektedir. Bu ana enerji değerini de hata sınırları içerisinde kıyasladığımızda bu çalışmayla elde ettiğimiz sonucun Nudat veri tabanına göre daha iyi olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.1. $^{93}\text{Nb}(\gamma,n)^{92m}\text{Nb}$ reaksiyonundan elde edilen nükleer spektroskopik data

Element	Hedef Çekirdek	Reaksiyon	Ürün Çekirdek	Çalışmamızda Bulduğumuz γ -ışını enerjisi (keV)	Sonuçlarımızın Hata Değeri	Nudat	Nudat Hata Değeri	Ditrói vd. (2008)	Naik vd. (2013)
				912.780	0.055	912.6	0.2		
Nb	^{93}Nb	(γ,n)	^{92m}Nb	934.515	0.057	934.44	0.1	934.53	934.46
				1847.357	0.198	1847.5	0.3		

Elde ettiğimiz sonuçları incelemeye devam ettiğimizde son olarak Nudat veri tabanının sonuçlarıyla uyumlu olarak görülen enerji değeri 1847.5 keV'dir. Tez çalışmamızda deneysel sonuçların analiziyle bulunan enerji değeri 1847.357 keV'dir. 912.780 keV ve 934.515 keV enerji değerlerine benzer olarak 1847.357 keV enerji değerinin de hata sınırları içerisinde Nudat veri tabanıyla uyumlu olduğu bununla birlikte hata sınırları içerisinde Nudat'ın sonucundan biraz daha iyi olduğu görülmüştür.

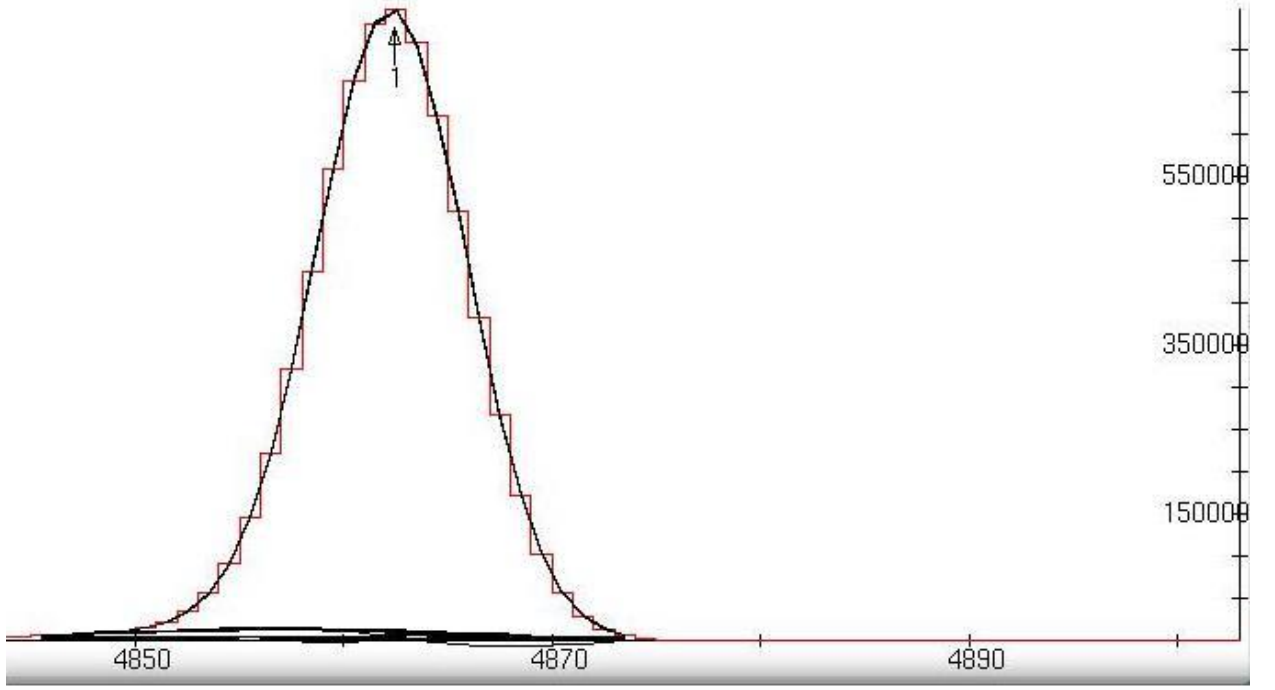
Bu sonuçlardan hareketle γ -ışınlarıyla etkileşen ^{93}Nb çekirdeğinin fotonükleer reaksiyon sonucu meydana getirdiği ürün çekirdek $^{92\text{m}}\text{Nb}$ 'li fotonötron nükleer reaksiyonu sonucu elde ettiğimiz enerji değerlerinin literatür sonuçlarıyla uyumlu olduğu ve birbirlerini desteklediği görülmüştür. Böylece çalışmamızdan elde edilen sonuçların $^{92\text{m}}\text{Nb}$ çekirdeğinin enerji değerinin belirlenmesinde geçerliliğinin oldukça iyi olduğu söylenebilir.



Şekil 4.3. Nb çekirdeğinin fotonükleer reaksiyonu ile elde edilen ürün çekirdeğinin 912.780 keV pikinin gf3 programı kullanılarak fit edilmiş hali.

Çizelge 4.2. Nb çekirdeğinin fotonükleer reaksiyonu ile elde edilen ürün çekirdeğinin 912.780 keV pikini gf3 programı kullanılarak fit etmede kullanılan değerler.

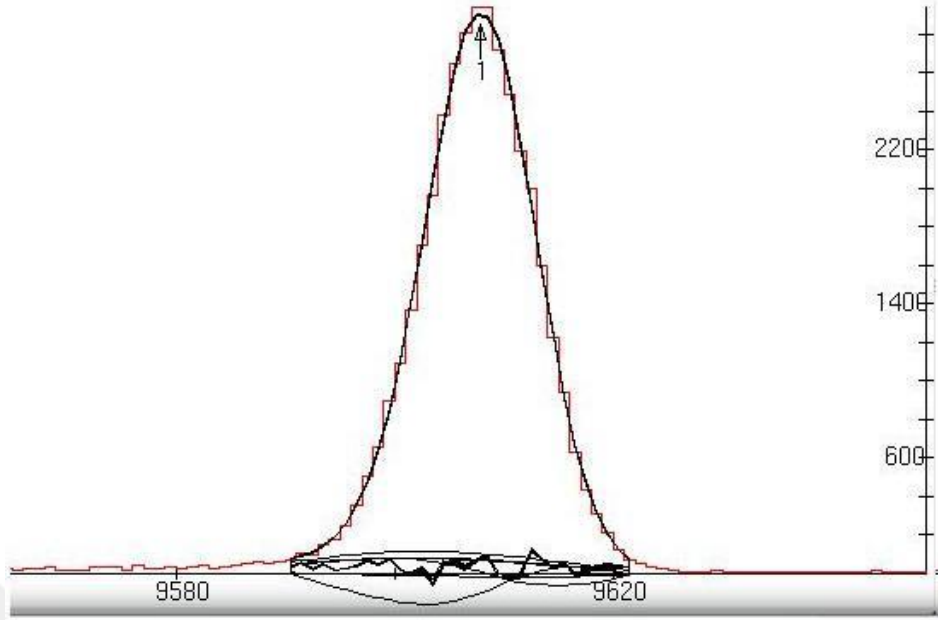
Enerji	R	Beta	Step	Centroid +- error	Area +- error	Energy error
912.780	5.0	4.16	0.10	4748.7324+- 0.0161	118618+-1534	0.0031



Şekil 4.4. Nb çekirdeğinin fotonükleer reaksiyonu ile elde edilen ürün çekirdeğın 934.515 keV pikinin gf3 programı kullanılarak fit edilmiş hali.

Çizelge 4.3. Nb çekirdeğinin fotonükleer reaksiyonu ile elde edilen ürün çekirdeğın 934.515 keV pikini gf3 programı kullanılarak fit etmede kullanılan değerler.

Enerji	R	Beta	Step	Centroid +- error	Area +- error	Energy error
934.515	1.0	4.26	0.90	4861.7280+- 0.0016	6745148+-3371	0.0003



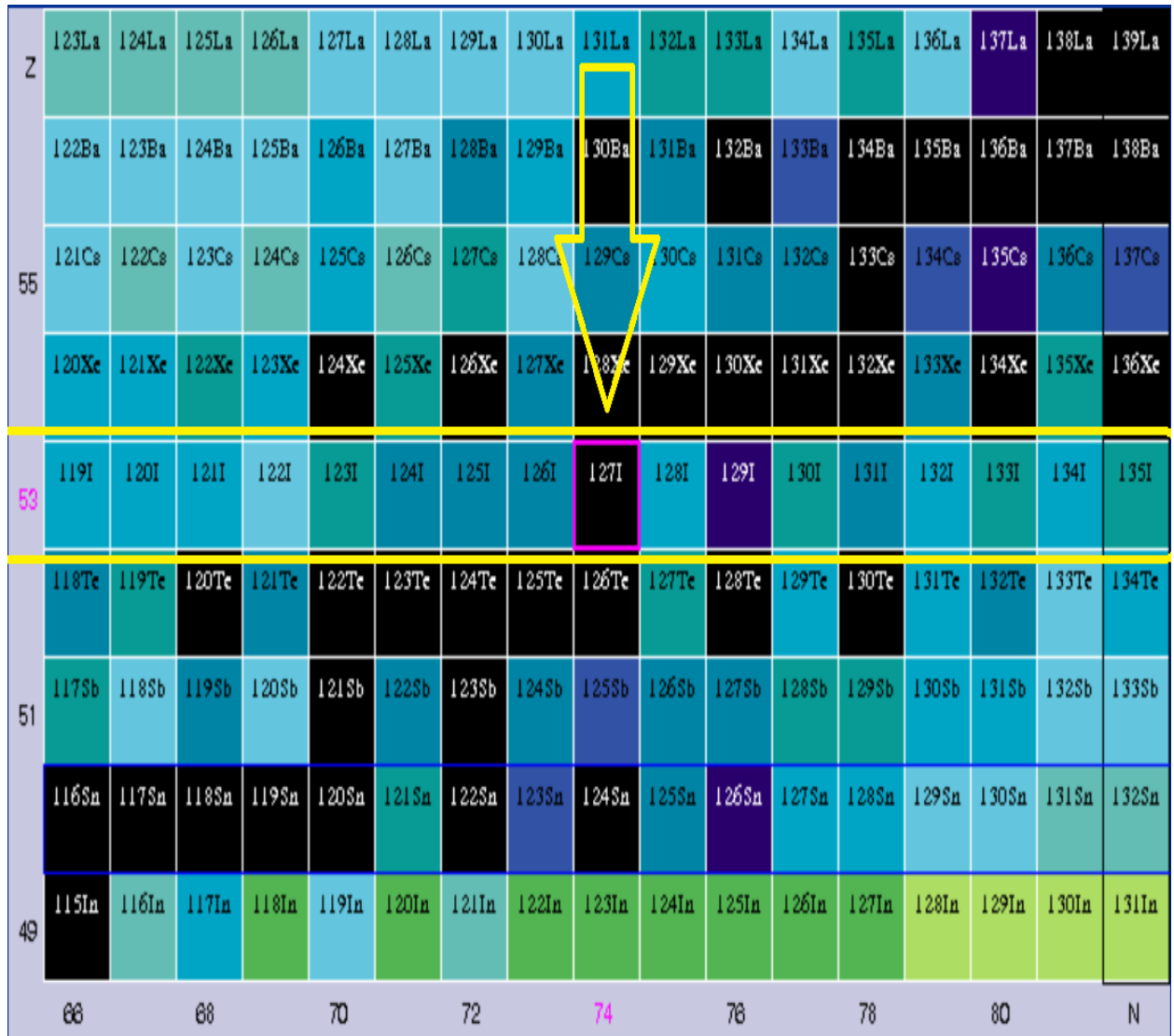
Şekil 4.5. Nb çekirdeğinin fotonükleer reaksiyonu ile elde edilen ürün çekirdeğın 1847.357 keV pikinin gf3 programı kullanılarak fit edilmiş hali.

Çizelge 4.4. Nb çekirdeğinin fotonükleer reaksiyonu ile elde edilen ürün çekirdeğın 1847.357 keV pikini gf3 programı kullanılarak fit etmede kullanılan değerler.

Enerji	R	Beta	Step	Centroid +- error	Area +- error	Energy error
1847.357	10.0	5.58	0.80	9606.7930+- 0.0359	38837 +- 729	0.0069

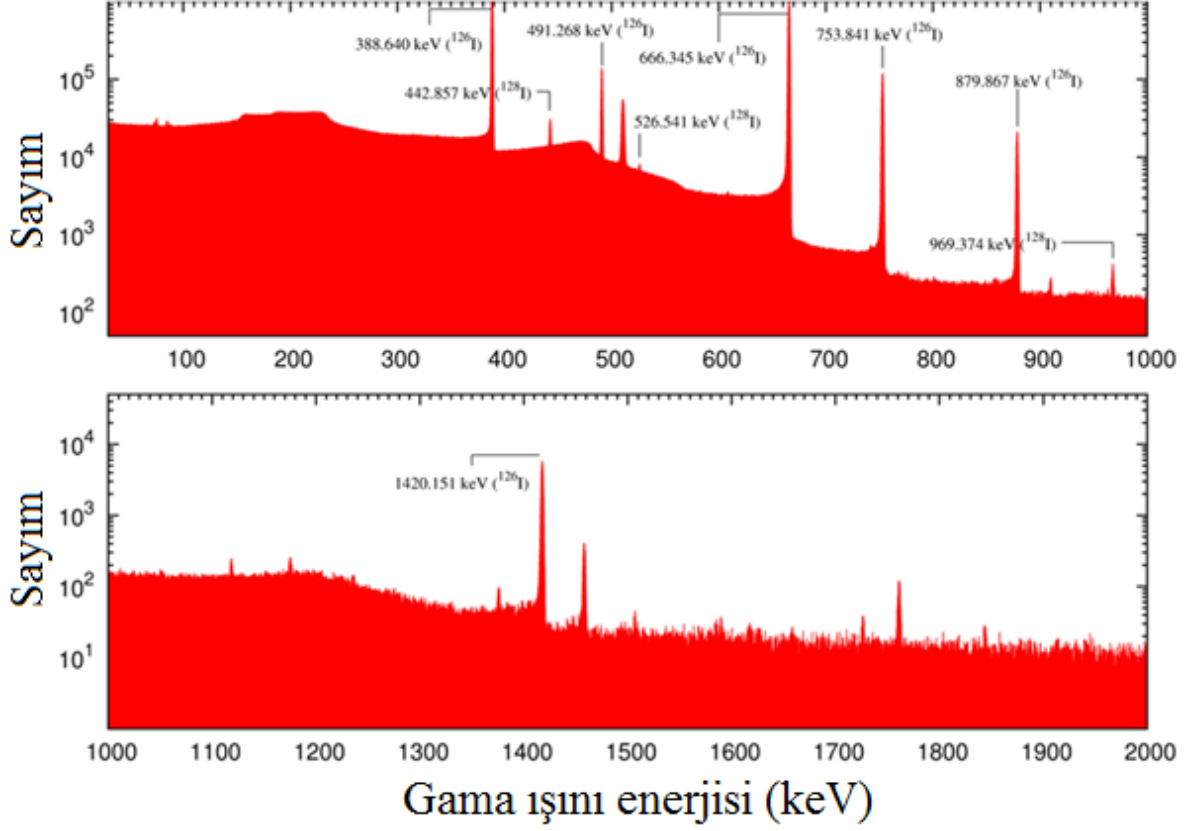
4.2. I Çekirdeğinin Fotonükleer Reaksiyon Analizi

Çalışmamızda bremsstrahlung fotonları ile ışınlanarak fotonükleer reaksiyonu incelenen diğer bir element I çekirdeğidir. Şekil 4.6'da I çekirdeğinin temel ve izomerik durum bilgisi verilmektedir. I çekirdeğinin kararlı ve bolluk oranı %100 olan izotop çekirdeği ^{127}I çalışmamızın bu bölümünde kullanılacaktır. Bu amaçla 18 MeV enerjili fotonlarla ^{127}I çekirdeğinin ışınlanması sonucu $^{127}\text{I}(\gamma, n)^{126}\text{I}$ fotonükleer reaksiyonundan elde edilen ürün çekirdeğin deneysel enerji değerlerinin sonuçlarını gösteriyoruz.



Şekil 4.6. I çekirdeği için temel ve izomerik durum bilgisi

18 MeV maksimum enerjili bremsstrahlung fotonları kullanılarak ışınlanma sonucu $^{127}\text{I}(\gamma,n)^{126}\text{I}$ fotonükleer reaksiyonunun doğal fon (background) çıkarılmadan 0–2000 keV aralığında spektrumu Şekil 4.7’de verilmiştir. Aynı zamanda her bir pik enerji büyüklüğüne göre sırasıyla Şekil 4.8-4.13’de verilmiştir.



Şekil 4.7. Doğal fon (background) çıkarılmadan 18 MeV maksimum enerjili bremsstrahlung fotonları kullanılarak ışınlanmış ^{127}I .

$^{127}\text{I}(\gamma,n)^{126}\text{I}$ fotonükleer reaksiyonundan ^{126}I radyonüklidi oluşturulabilir. Böylece, çalışmamızda $^{127}\text{I}(\gamma,n)^{126}\text{I}$ fotonükleer reaksiyonundan elde edilen enerji seviyeleri Çizelge 4.5’de verilmiştir. Elde edilen sonuçların hem Nudat veri tabanı hem de önceki çalışmaların sonuçlarıyla (Jackson and Mayer 1977) karşılaştırmalı bir analizi yapılmıştır.

Nudat veri tabanında verilen ilk enerji değeri %35.6 bollukla 388.633 keV’dir. Jackson and Mayer (1977) çalışmalarında bu enerji değerini 388.63 keV olarak bildirmiştir. Bu çalışmada ise 388.640 keV enerji değeri bulunmuştur.

Çalışmamızda bulunan sonuçların analizine devam edildiğinde Nudat sonuçlarına uygun bir diğer enerji değeri de %2.88 bollukta 491.243 keV’dir. Bu değer Jackson and Mayer (1977)

Çizelge 4.5. $^{127}\text{I}(\gamma,n)^{126}\text{I}$ reaksiyonundan elde edilen nükleer spektroskopik data

Element	Hedef Çekirdek	Reaksiyon	Ürün Çekirdek	Çalışmamızda Bulduğumuz γ -ışını enerjisi (keV)	Sonuçlarımızın Hata Değeri	Nudat	Nudat Hata Değeri	Jackson and Mayer (1977)
				388.640	0.011	388.633	0.011	388.63
				491.268	0.014	491.243	0.011	491.24
I	^{127}I	(γ,n)	^{126}I	666.345	0.020	666.331	0.012	666.33
				753.841	0.024	753.819	0.013	753.82
				879.867	0.037	879.876	0.013	879.88
				1420.151	0.072	1420.19	0.03	1420.17

çalışmasında 491.24 keV olarak verilmektedir. Çalışmamızdan bulunan enerji değeri ise 491.268 keV'dir. Bu enerji değerlerinin birbirleriyle oldukça uyumlu olduğu söylenebilir.

Nudat veri tabanında verilen bir diğer enerji değeri %32.9 bollukla 666.331 keV'dir. Bu değeri Jackson and Mayer (1977) çalışmalarında 666.33 keV olarak bulmuşlardır. Deneysel sonuçlarımızın analizinden bulduğumuz değer ise 666.345 keV'dir. Önceki enerji değerinde olduğu gibi sonuçlar birbirine çok yakın ve destekleyici olduğu görülmüştür.

Deneysel ölçümlerimizden bulunan 753.841 keV enerji değeri Nudat'a göre 753.819 keV ve Jackson and Mayer (1977) tarafından ise 753.82 keV olarak verilmektedir. Sonuçların birbirlerini doğruladığı Çizelge 4.5'den de açıkça görülmektedir.

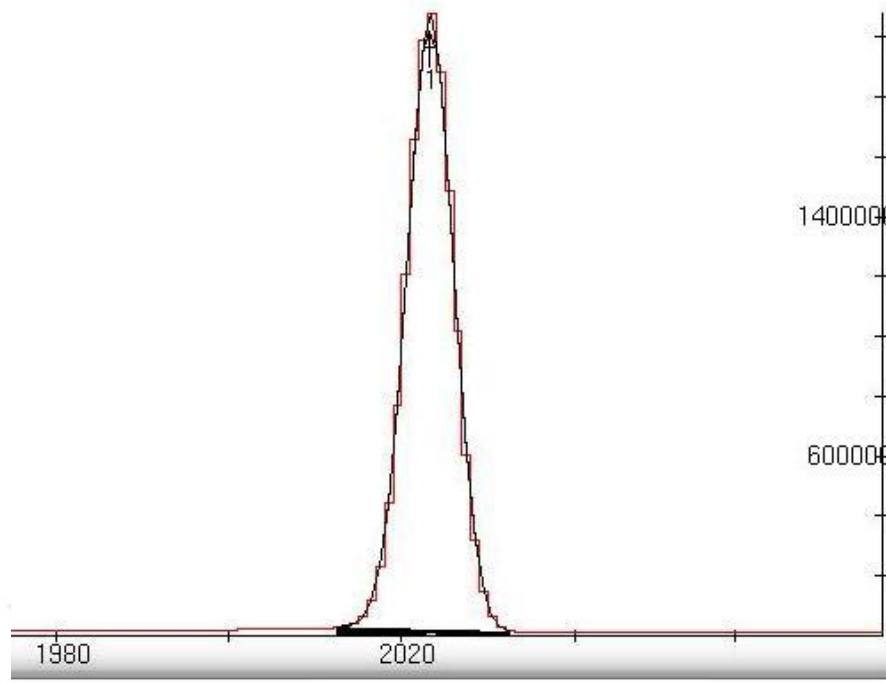
Başka bir enerji değeri ise Nudat veri tabanına göre %0.743 bollukla 879.876 keV'dir. Jackson and Mayer (1977) bu değeri 879.88 keV olarak belirtmiştir. Deneysel sonuçların analiziyle bulduğumuz değer 879.867 keV'dir. Sonuçlar birbirlerine çok yakın ve destekleyicidir.

Çalışmamızda $^{127}\text{I}(\gamma,n)^{126}\text{I}$ fotonükleer reaksiyonundan elde edilen son enerji değeri 1420.151 keV'dir. Bu enerji değeri Nudat veri tabanına göre 1420.19 keV'dir. Jackson and Mayer (1977) çalışmalarında bu enerji değerini 1420.17 keV olarak bulmuşlardır. Önceki enerji değerlerinde

gözlemlendiği gibi deneysel olarak ölçtüğümüz enerji değerinin literatür sonuçlarıyla birbirlerine çok yakın ve destekleyici olduğu görölmüştür.

Bu sonuçlardan hareketle γ -ışınlarıyla etkileşen ^{127}I çekirdeğinin fotonükleer reaksiyon sonucu meydana getirdiği ürün çekirdek ^{126}I ile fotonötron nükleer reaksiyonu sonucu elde ettiğimiz enerji değerlerinin gerek Nudat veri tabanıyla gerekse de literatür sonuçlarıyla uyumlu olduğu görölmüştür. Aynı zamanda deneysel sonuçlarımızın analizinden elde ettiğimiz enerji değerlerindeki hassasiyetin literatür sonuçlarına kıyasla daha hassas olduğu söylenebilir. Böylece çalışmamızdan elde edilen sonuçların ^{127}I çekirdeğine ait ürün çekirdeğinin enerji değerlerinin belirlenmesinde geçerliliğinin oldukça iyi olduğu söylenebilir.

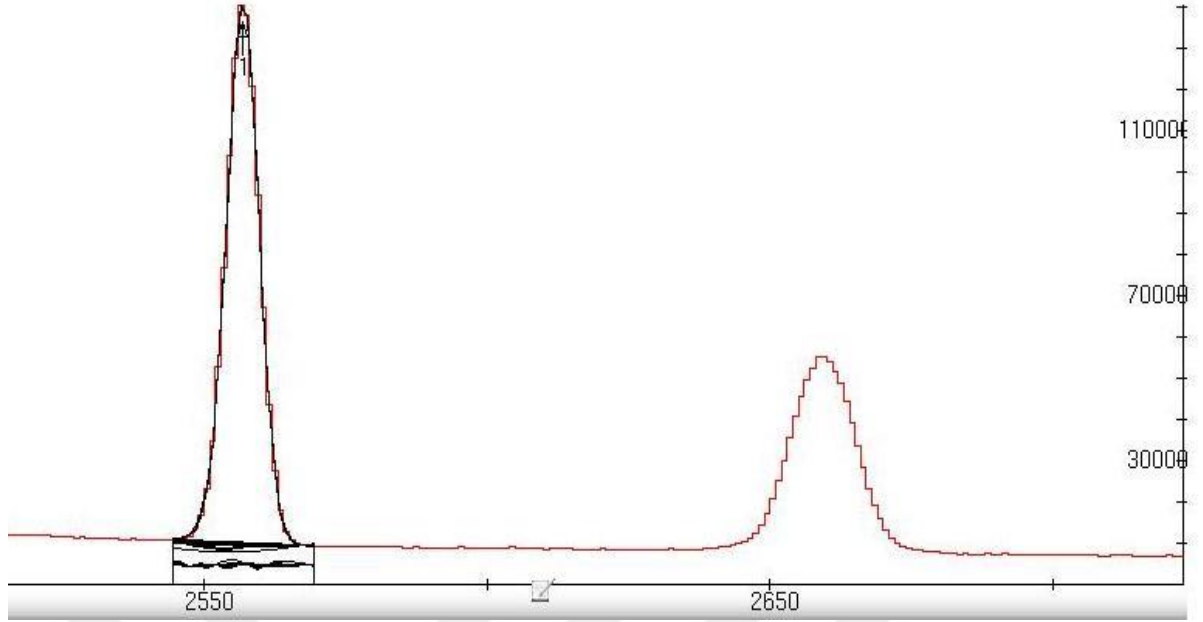




Şekil 4.8. I çekirdeğinin fotonükleer reaksiyonu ile elde edilen ürün çekirdeğinin 388.640 keV pikinin gf3 programı kullanılarak fit edilmiş hali.

Çizelge 4.6. I çekirdeğinin fotonükleer reaksiyonu ile elde edilen ürün çekirdeğinin 388.640 keV pikini gf3 programı kullanılarak fit etmede kullanılan değerler.

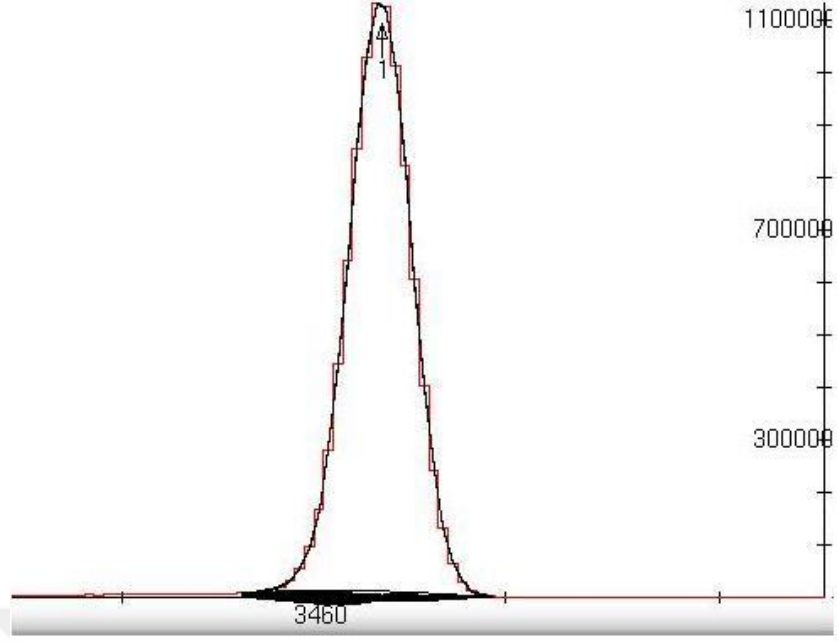
Enerji	R	Beta	Step	Centroid +- error	Area +- error	Energy error
388.640	2.80	3.10	0.10	2022.7086+- 0.0008	13964673+-6156	0.0002



Şekil 4.9. I çekirdeğinin fotonükleer reaksiyonu ile elde edilen ürün çekirdeğin 491.268 keV pikinin gf3 programı kullanılarak fit edilmiş hali.

Çizelge 4.7. I çekirdeğinin fotonükleer reaksiyonu ile elde edilen ürün çekirdeğin 491.268 keV pikini gf3 programı kullanılarak fit etmede kullanılan değerler.

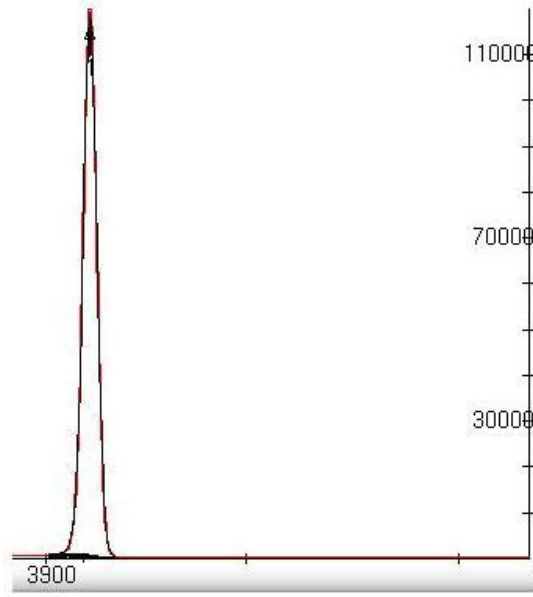
Enerji	R	Beta	Step	Centroid +- error	Area +- error	Energy error
491.268	3.0	3.29	0.25	2556.2227+- 0.0037	949062+-1811	0.0007



Şekil 4.10. I çekirdeğinin fotonükleer reaksiyonu ile elde edilen ürün çekirdeğin 666.345 keV pikinin gf3 programı kullanılarak fit edilmiş hali.

Çizelge 4.8. I çekirdeğinin fotonükleer reaksiyonu ile elde edilen ürün çekirdeğin 666.345 keV pikini gf3 programı kullanılarak fit etmede kullanılan değerler.

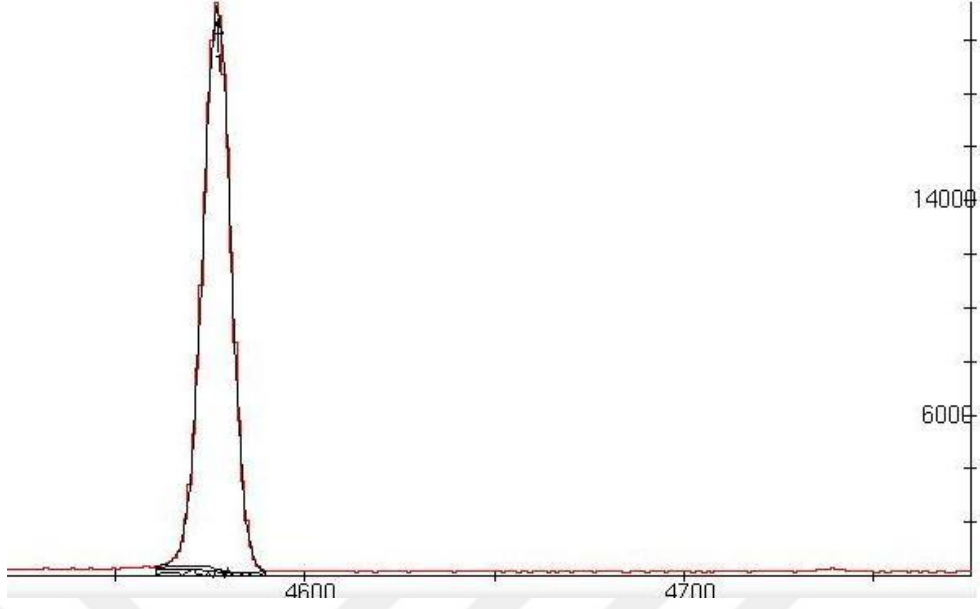
Enerji	R	Beta	Step	Centroid +- error	Area +- error	Energy error
666.345	4.0	3.70	0.10	3466.2654+- 0.0011	9231894+-3955	0.0002



Şekil 4.11. I çekirdeğinin fotonükleer reaksiyonu ile elde edilen ürün çekirdeğin 753.841 keV pikinin gf3 programı kullanılarak fit edilmiş hali.

Çizelge 4.9. I çekirdeğinin fotonükleer reaksiyonu ile elde edilen ürün çekirdeğin 753.841 keV pikini gf3 programı kullanılarak fit etmede kullanılan değerler.

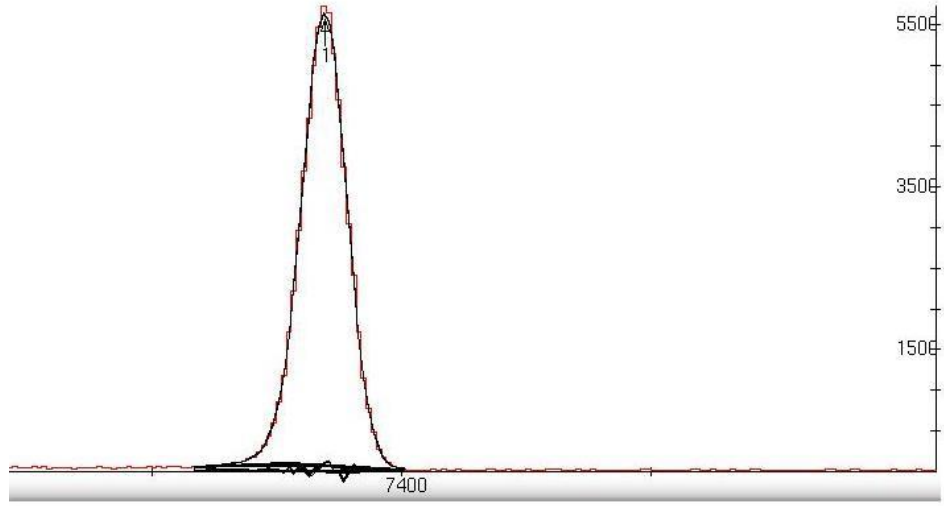
Enerji	R	Beta	Step	Centroid +- error	Area +- error	Energy error
753.841	4.10	3.85	0.25	3921.0259+- 0.0036	1010585+-1116	0.0007



Şekil 4.12. I çekirdeğinin fotonükleer reaksiyonu ile elde edilen ürün çekirdeğinin 879.867 keV pikinin gf3 programı kullanılarak fit edilmiş hali.

Çizelge 4.10. I çekirdeğinin fotonükleer reaksiyonu ile elde edilen ürün çekirdeğinin 879.867 keV pikini gf3 programı kullanılarak fit etmede kullanılan değerler.

Enerji	R	Beta	Step	Centroid +- error	Area +- error	Energy error
879.867	4.5	4.15	0.90	4576.0146+- 0.1065	192891+- 2777	0.0205



Şekil 4.13. I çekirdeğinin fotonükleer reaksiyonu ile elde edilen ürün çekirdeğinin 1420.151 keV pikinin gf3 programı kullanılarak fit edilmiş hali.

Çizelge 4.11. I çekirdeğinin fotonükleer reaksiyonu ile elde edilen ürün çekirdeğinin 1420.151 keV pikini gf3 programı kullanılarak fit etmede kullanılan değerler.

Enerji	R	Beta	Step	Centroid +- error	Area +- error	Energy error
1420.151	10.0	5.10	0.90	7383.6748+- 0.0201	65088+- 303	0.0039

I numunesinin bremsstrahlung fotonları ile ışınlanması sonucu gerçekleştirdiğimiz deneysel fotonükleer reaksiyonda muhtemel durumlardan birisi de nötronların oluşmasıdır. Bu nötronların ^{127}I hedef çekirdeğiyle etkileşmesiyle nötron yakalama olayı meydana gelebilmektedir. Gerçekleştirdiğimiz deneysel sonuçların analizinden nötronların ^{127}I hedef çekirdeğiyle etkileşmesiyle nötron yakalama olayının meydana geldiği görülmüştür. Böylece deneysel çalışmamızda $^{127}\text{I}(\gamma,n)^{126}\text{I}$ fotonükleer reaksiyonu dışında $^{127}\text{I}(n,\gamma)^{128}\text{I}$ reaksiyonun meydana geldiği görülmüştür. Bu durum için elde edilen enerji seviyelerini gösteren değerler Çizelge 4.12’de verilmektedir. Bu reaksiyon için çalışmamızda ölçtüğümüz değerler ile Nudat veri tabanının değerleri karşılaştırmalı olarak Çizelge 4.12’de verilmektedir. Bununla birlikte bu enerji değerlerine ait spektrumların gf3 programı yardımıyla elde edilmiş halleri Şekil 4.14-4.16’da verilmektedir.

Çizelge 4.12. $^{127}\text{I}(n,\gamma)^{128}\text{I}$ reaksiyonundan elde edilen nükleer spektroskopik data

Element	Hedef Çekirdek	Reaksiyon	Ürün Çekirdek	Çalışmamızda Bulduğumuz γ -ışını enerjisi (keV)	Sonuçlarımızın Hata Değeri	Nudat	Nudat Hata Değeri
				442.857	0.030	442.901	0.010
I	^{127}I	(n, γ)	^{128}I	526.541	0.034	526.557	0.014
				969.374	0.057	969.458	0.020

Bu kapsamda ^{128}I çekirdeğinin bozunumuyla oluşabilecek ana enerji değeri Nudat veri tabanına göre %12.62 bollukla 442.901 keV’dir. Bu enerji değeri çalışmamızda 442.857 keV olarak bulunmuştur.

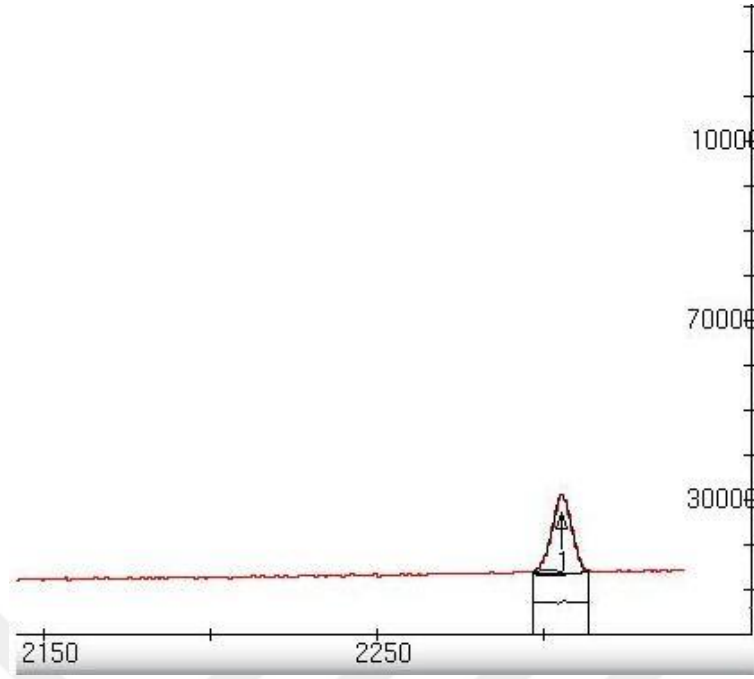
Diğer bir enerji değeri yine Nudat veri tabanına göre %1.203 bollukla 526.557 keV olup bu değer çalışmamızda 526.541 keV olarak ölçülmüştür. Sonuçların birbirlerini destekler nitelikte çok yakın oldukları görülmüştür.

Çalışmamızda son olarak ölçebildiğimiz enerji değeri 969.374 keV’dir. Bu değer Nudat veri tabanına göre %0.299 bollukla 969.458 keV olarak verilmektedir. Bu enerji değerinin de literatürle

uyumlu olduğu söylenebilir. Bununla birlikte sonuçların birbiriyle uyumunun daha da artırılmasına açık olduğunu söyleyebiliriz.

Sonuç olarak ^{127}I hedef çekirdeğinin Bremsstrahlung fotonları ile ışınlanması sonucu iki durum oluşmuştur. Bu reaksiyonlardan ilki $^{127}\text{I}(\gamma, n)^{126}\text{I}$ fotonükleer reaksiyonudur. Bu reaksiyona ait ^{126}I ürün çekirdeğinin enerji seviyeleri hem Nudat veri tabanı ile hem de daha önce gerçekleştirilmiş literatür sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür. İkinci reaksiyon ise $^{127}\text{I}(n, \gamma)^{128}\text{I}$ nötron yakalama reaksiyonudur. Bu reaksiyon kapsamında ortaya çıkan ^{128}I ürün çekirdeği için elde edilen enerji seviyeleri de Nudat veri tabanı ile karşılaştırılmış ve sonuçların birbirine yakın olduğu görülmüştür.

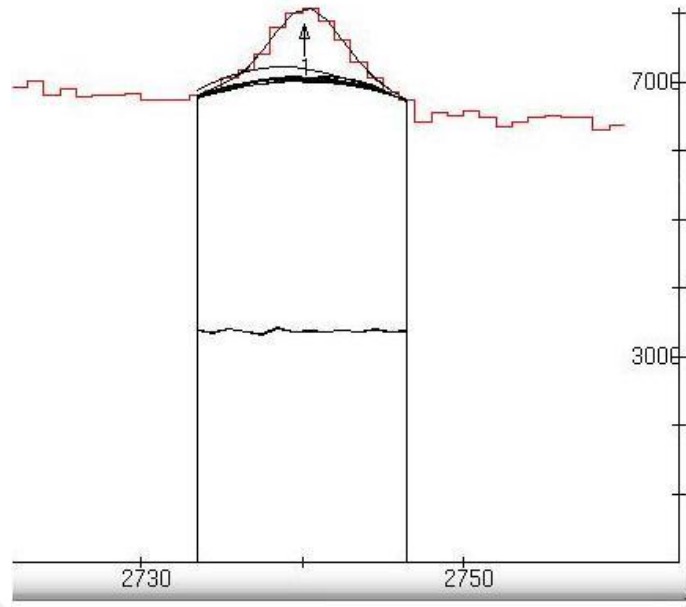




Şekil 4.14. $^{127}\text{I}(n,\gamma)^{128}\text{I}$ reaksiyonundan elde edilen ürün çekirdeğin 442.857 keV pikinin gf3 programı kullanılarak fit edilmiş hali.

Çizelge 4.13. $^{127}\text{I}(n,\gamma)^{128}\text{I}$ reaksiyonundan elde edilen ürün çekirdeğin 442.857 keV pikini gf3 programı kullanılarak fit etmede kullanılan değerler.

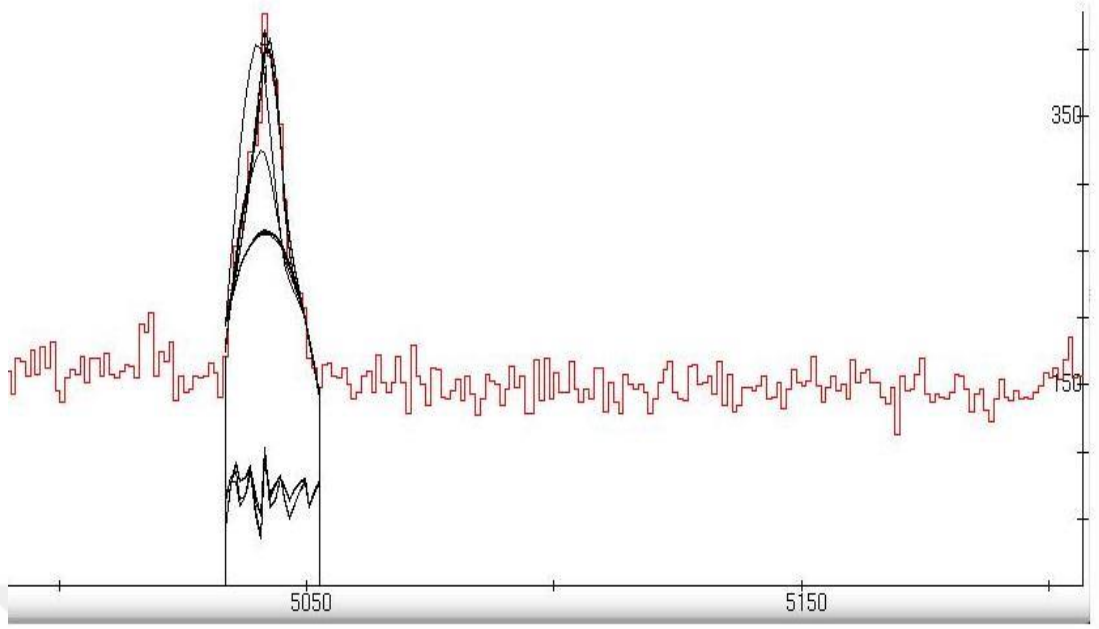
Enerji	R	Beta	Step	Centroid +- error	Area +- error	Energy error
442.857	10.0	3.15	0.25	2304.5620+- 0.1411	129479+-7751	0.0271



Şekil 4.15. $^{127}\text{I}(n,\gamma)^{128}\text{I}$ reaksiyonundan elde edilen ürün çekirdeğin 526.541 keV pikinin gf3 programı kullanılarak fit edilmiş hali.

Çizelge 4.14. $^{127}\text{I}(n,\gamma)^{128}\text{I}$ reaksiyonundan elde edilen ürün çekirdeğin 526.541 keV pikini gf3 programı kullanılarak fit etmede kullanılan değerler.

Enerji	R	Beta	Step	Centroid +- error	Area +- error	Energy error
526.541	10.0	2.50	0.25	2739.5764+- 0.1599	6055+-2582	0.0307



Şekil 4.16. $^{127}\text{I}(n,\gamma)^{128}\text{I}$ reaksiyonundan elde edilen ürün çekirdeğinin 969.374 keV pikinin gf3 programı kullanılarak fit edilmiş hali.

Çizelge 4.15. $^{127}\text{I}(n,\gamma)^{128}\text{I}$ reaksiyonundan elde edilen ürün çekirdeğinin 969.374 keV pikini gf3 programı kullanılarak fit etmede kullanılan değerler.

Enerji	R	Beta	Step	Centroid +- error	Area +- error	Energy error
969.374	9.0	2.65	0.25	5041.1772+- 0.2336	847+- 174	0.0448

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez çalışmamızda Nb ve I atomik çekirdeklerin fotonükleer reaksiyon sonucunda meydana gelen ürün çekirdeklerinin enerji seviyelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla numunelerin ışınlanması sonucu germanyum dedektörü ile yapılan sayımlar hem gf3 hem de ROOT programları kullanılarak en iyi enerji değerleri belirlenmiştir.

Nb ve I atomik çekirdekleriyle fotonükleer reaksiyon sonucunda meydana gelen ürün çekirdekleri sırasıyla ^{92m}Nb ve ^{126}I çekirdekleridir. Bu çekirdeklerden ilki olan ^{92m}Nb çekirdeğinin enerji seviyeleri belirlenmiş ve elde edilen değerler Çizelge 4.1'de verilmiştir. ^{92m}Nb çekirdeği için ölçülen enerji değerleri hem Nudat veri tabanı ile hem de literatürle karşılaştırılmıştır. Buna göre hata sınırları içerisinde çalışmamızda bulduğumuz 912.780 keV, 934.515 keV ve 1847.357 keV enerji değerlerinin Nudat veri tabanı ile oldukça uyumlu sonuçlar olduğu görülmüştür.

^{126}I çalışmamızda enerji seviyeleri belirlenen bir diğer ürün çekirdeğimize ^{126}I çekirdeği için ölçtüğümüz enerji değerleri Çizelge 4.5'de verilmiştir. Çalışmamız kapsamında ölçülen enerji değerleri gerek Nudat veritabanı gerekse daha önceden gerçekleştirilmiş çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Bu bağlamda çalışmamızdan elde edilen enerji seviyelerinin Nudat veri tabanı ile kıyaslandığında makul hata sınırları içerisinde olup Nudat veri tabanına yakın sonuçlar olarak karşımıza çıkmaktadır.

Son olarak deneysel ölçümlerimizin analizinde deney esnasında ortaya çıkan nötronların hedef çekirdek ile etkileşmesi sonucu nötron yakalama olayının yani $^{127}\text{I}(n,\gamma)^{128}\text{I}$ reaksiyonunun gerçekleştiği görülmüştür. Bu reaksiyon sonucu oluşan ^{128}I ürün çekirdeğine ait enerji değerleri ayrıca belirlenerek Çizelge 4.12'de verilmiştir. Elde edilen enerji değerleri literatür değerleriyle karşılaştırılmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında, Türkiyede deneysel nükleer fizik çalışmalarına başlangıç olarak kabul edilebilecek olan ve son zamanlarda ülkemizde çalışılmaya başlanılan fotonükleer reaksiyonlar konusunda tecrübe sahibi olunmuştur. Aynı zamanda tez çalışması gerçekleştirilirken deneysel nükleer fizik çalışmalarında karşılaşılan olumsuzluklar ve bu olumsuzlukların çözümleri hakkında da önemli bilgiye sahip olunmuştur. Böylece gerçekleştirdiğimiz bu tez ile ülkemizde yeni bir çalışma alanı olarak karşımıza çıkan fotonükleer reaksiyonlar hakkında bilgi birikimi ve elde edilen sonuçlarla uygun veriler oluşturulmuş, daha farklı çekirdekler ve daha farklı fotonükleer etkileşimlerin çalışılması için yeterli alt yapıya zemin hazırlanmıştır.

KAYNAKLAR

- Abdullaeva G, Djuraeva G, Kim A, Koblik Y, Kulabdullaev G, Rakhmonov T, Saytjanov S, 2015. Evaluation of absorbed dose in Gadolinium neutron capture therapy. *De Gruyter Open*, 13, 183-187.
- Ajzenberg-Selove F, Bingham HG, 1973. Energy levels of ^{14}C . *Nuclear Physics A*, 220: 152-160.
- Akkoyun S, Bayram T, 2014. Photonuclear Reaction Cross Sections for Gallium Isotopes. *NUBA Conference Series-1: Nuclear Physics and Applications*.
- Akkurt I, Karpuz N, Mavi B, Demir N, 2014. Activation cross sections for the (γ, n) reactions on zirconium isotopes. *Annals of Nuclear Energy*, 65:181–183.
- Anonim, 2018a. <https://www.slideshare.net/bulduki/nuclear-chemistry-17467911> (Erişim tarihi: 05.01.2018).
- Anonim, 2018b. <https://sivilsavunma.afad.gov.tr/kategori-1205-iyonlastirici-radyasyon-cesitleri.html> (Erişim tarihi: 05.01.2018).
- Anonim, 2018c. http://index.php/Physical_Interaction_processes#Learning_Objectives (Erişim tarihi: 05.01.2018).
- Anonim, 2018d. <http://electrons.wikidot.com/pair-production-and-annihilation> (Erişim tarihi: 05.01.2018).
- Anonim, 2018e. <https://kbrn.afad.gov.tr/kategori-1181-dedektorler.html> (Erişim tarihi: 05.01.2018).
- Anonim, 2018f. <http://slideplayer.com/slide/273378/> (Erişim tarihi: 05.01.2018).
- Anonim, 2018g. <https://bilimfili.com/parcacik-hizlandirici-turlerine/> (Erişim tarihi: 05.01.2018).
- Anonim, 2018h. <http://slideplayer.com/slide/6841322/> (Erişim tarihi: 07.01.2018).
- Arya AP, 1966. *Çekirdek Fiziğinin Esasları* (Çev. Şahin Y), Aktif Yayınevi, 1999.
- Aydoğan Ş, 2007. *Fizik terimleri sözlüğü*, Aktif Yayınevi, İstanbul.
- Baglin CM, 1997. Nuclear Data Sheets for $A = 93^*$. *Nuclear Data Sheets*, 80, D970001.
- Baglin CM, 2011. Nuclear Data Sheets for $A = 93^*$. *Nuclear Data Sheets*, 112, 1163–1389.
- Belyshev SS, Ermakov AN, Ishkhanov BS, Khankin VV, Kurilik AS, Kuznetsov AA, Shvedunov VI, Stopani KA, 2014. Studying photonuclear reactions using the activation technique. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* 745, 133-137.
- Bergère R, Beil H, Veyssièrè A, 1968. Photoneutron cross sections of La, Tb, Ho and Ta. *Nuclear Physics A*, 121, 463-480.

- Bethe H, 1936. An Attempt to Calculate the Number of Energy Levels of a Heavy Nucleus. *Physical Review*, 50:332.
- Bosnjakovic B, Van Best JA, Bouwmeester J, 1967. Energy level of ^{38}Ar from the $^{37}\text{Cl}(p,\alpha)^{34}\text{S}$ reaction. *Nuclear Physics A*, 94: 625-652.
- Boyla M, Canyürek Y, 1995. Nükleer Enerji Terimleri Sözlüğü, Türk Dil Kurumu Yayınları.
- Boztosun I, Dapo H, Özmen SF, Çeçen Y, Karakoç M, Çoban A, Cesur A, Caner T, Bayram E, Keller GB, Küçük B, Güvendi A, Derman M, Kaya D, 2014. The results of the first photonuclear reaction performed in Turkey: the zinc example. *Turkish Journal of Physics* 38: 1-9.
- Bramblett RL, Cladwell JT, Auchampaugh GF, Fultz SC, 1963. Photoneutron Cross Sections of Ta^{181} and Ho^{165} . *Physical Review*, 129: 2723.
- Brown G, Macgregor A, 1966. Level structure measurements with the (p, α) reaction: (II). Energy levels of ^{47}V and ^{49}V . *Nuclear Physics*, 77: 385-393.
- Bunker ME, Dropesky BJ, Knight JD, Starnes JW, 1962. Decay of Y^{92} and Nb^{92} . *Physical Review*, 127, 844.
- Cantone MC, Cornolti E, de Bartolo D, Giussani A, Tsipenyuk Yu M, Firsov VI, Gorbunov AV, 2000. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 243:707-714.
- Cerrito L, 2017. Radiation and detectors. Springer International Publishing, Switzerland.
- Chadwick J, Goldhaber M, 1934. A Nuclear Photo-effect: Disintegration of the Deuteron by γ -rays. *Nature*, 134, 237.
- Crasta R, Naik H, Suryanarayana SV, Ganesh S, Prajapati PM, Kumar M, Nathaniel TN, Nimje VT, Mittal KC, Goswami A, 2013. Measurement of bremsstrahlung-induced reaction cross-section for ^{93}Nb using electron Linac. *Radiochimica Acta*, 101:541-546.
- Ditrói F, Takács S, Tárkányi F, Baba M, Corniani E, Shubin YN, 2008. Study of proton induced reactions on niobium targets up to 70 MeV. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, 266, 5087-5100.
- Dzhilavyan LZ, Karev AI, Raevsky VG, 2011. Possibilities for the Production of Radioisotopes for Nuclear-Medicine Problems by Means of Photonuclear Reactions. *Physics of Atomic Nuclei*, 74, 1690–1696.
- Ertuğay C, 2015. Fotoaktivasyon Analiz Yöntemi ile Antik Sikkelerin Element Konsantrasyonlarının Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Antalya.
- Fan Y, Hou X, Zhou W, 2013. Progress on ^{129}I analysis and its application in environmental and geological researches. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 321: 32-46.

- Granja C, Pospíšil S, Aprahamian A, Börner H, Lehmann H, von Egidy T, Wirth H.-F, Graw G, Hertenberger R, Eisermann Y, Nosek D, Rubáček L., Telezhnikov SA, 2004. Nuclear structure of ^{159}Gd . *Physical Review C*, 70, 034316.
- Hamburger EW, Hamburger AI, 1965. Energy levels of ^{90}Y from the $^{89}\text{Y}(d,\gamma)^{90}\text{Y}$ reaction, *Nuclear Physics*, 68:209-220.
- Ishkhanov BS, Varlamov VV, 2004. Photonuclear Reactions: Modern Status of the Data. *Physics of Atomic Nuclei*, 67, 1664–1673.
- Ishkhanov BS, Orlin VN, Stopani KA, Varlamov VV, 2013. Photonuclear reactions and astrophysics. *Yayımlanmamış*.
- Jackson SV, Meyer RA, 1977. Population of 0^+ states in ^{126}Te by decay of ^{126}I and γ softness in even-even Te nuclei. *Physical Review C*, 15, 1806.
- Kent JJ, 1975. Energy levels of ^{92}Nb and ^{94}Tc from ^{92}Zr , $^{94}\text{Mo}(p,n\gamma)^{92}\text{Nb}$, $^{94}\text{Tc}^*$. *Nuclear Physics A*, 255: 296-306.
- Kishida N, Murata T, Asami T, Kosako K, Maki K, Harada H, Lee YO, Chang J, Chiba S, Fukahori T, 2005. JENDL Photonuclear Data File. CP769, International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, AIP.
- Knoll GF, 1989. *Radiation Detection and Measurement*. Second Edition. John Wiley & Sons, Inc, United States of America, 802.
- Konjin J, Linderman EWA, De Wit SA, 1967. The Decay of ^{48}Sc and ^{48}V . *Nuclear Physics A*, 558-572.
- Krane SK, 1955. *Nükleer Fizik* (Çev. Şarer B), Palme Yayıncılık, 2001.
- Kuo CL, Tsai TL, Chiang AC, Chang-Liao KS, Caho JH, 2013. Determination of ^{129}I in cement-solidified radwastes using neutron activation. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 298: 465-473.
- Lee YO, Fukahori T, Chang J, 1998. Evaluation of Photonuclear Reaction Data on Tantalum-I81 up to 140 MeV. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 35: 685-691.
- Mandal S, Mandal A, Lahiri S, 2012. Separation of nca $^{123,124,125,126}\text{I}$ from alpha particle induced the natural antimony trioxide target. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 292:579–584.
- Maruyama Y, Kazuhide I, 1967. Production of Iodine-128 by Small Research Reactor. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 4, 565-569.
- Masumoto K, Segebade C. Photon activation analysis, encyclopedia of analytical chemistry, John Wiley & Sons Ltd.

- Morales M, Pascholati PR, Vanin VR, Helene O, 1995. Decay of $^{159}\text{Gd}^*$. Applied Radiation and Isotopes, 46, 133-138.
- Muljadi P, 2012. Ioine. Yayınlanmamış.
- Mulvey PF, Jr., Cardarelli JA, Meyer RA, Cooper R, Burrows BA, 1965. Proceedings of The Symposium on Radioisotope Sample Measurement Techniques In Medicine and Biology Held By The International Atomic Energy Agency In Vienna, 24 - 28 May 1965.
- Naik H, Kim GN, Schwengner R, Kim K, Zaman M, Tatari M, Sahid M, Yang SC, John R, Massarczyk R, Junghans A, Shin SG, Key Y, Wagner A, Lee MW, Goswami A, Cho MH, 2013. Photo-neutron reaction cross-section for ^{93}Nb in the end-point bremsstrahlung energies of 12–16 and 45–70 MeV. Nuclear Physics A 916, 168-182.
- Nica N, 2012. Nuclear data sheets for A=34. Nuclear data sheets, 113:1563-1733.
- Nudat, <http://www.nndc.bnl.gov/nudat2/> (Erişim tarihi: 07.07.2015).
- Pietralla N, 2012. Photonuclear Reactions: Past, Present, and Future. AIP Conference Proceedings, 1462, 195-202.
- Pougheon F, Bernas M, Roy-Stephan M, Detraz C, Guillemaud D, Kashy E, Langevin M, Maulin F, Roussel P, 1981. First study of the (^{14}C , ^{12}C) reaction: Selectivity of the reaction and energy levels of ^{28}Mg and ^{30}Si . Nuclear Physics A, 255: 207-220.
- Radford DC, 2000. Notes on the use of the program gf3, <http://radware.phy.ornl.gov/gf3/gf3.html> (Erişim tarihi: 07.07.2015).
- Rahman AKL, Kato K, Arima H, Shigyo N, Kenji Ishibashi K, Hori JI & Ken Nakajima K, 2010. Study on Effective Average (γ,n) Cross Section for ^{89}Y , ^{90}Zr , ^{93}Nb , and ^{133}Cs and ($\gamma,3n$) Cross Section for ^{99}Tc . Journal of Nuclear Science and Technology, 47:618-625.
- Reich CW, 2012. Nuclear Data Sheets for A = 159*. Nuclear Data Sheets, 113, 157-363.
- Shima T, Nagai Y, Naito S, Baba T, Takahashi T, Tamura K, Kii T, Ohgaki H, Toyokawa H. Photonuclear Reactions of Light Nuclei in Low- and Intermediate-Energy Regions. Unpublished.
- Soares DCF, Menezes MA de BC, dos Santos RG, Ramaldes GA, 2010. ^{159}Gd : preparation and preliminary evaluation as a potential antitumoral radionuclide. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 284:315-320.
- Steyn GF, Vermeulen C, Szélecsényi F, Kovács Z, Suzuki K, Fukumura T, Nagatsu K, 2011. Excitation Functions of Proton Induced Reactions on ^{89}Y and ^{93}Nb with Emphasis on the Production of Selected Radio-Zirconiums. Journal of the Korean Physical Society, 59, 1991-1994.
- Tilley DR, Kelley JH, Godwin JL, Millener DJ, Purcell JE, Sheu CG, Weller HR, 2004. Energy levels of light nuclei A=8, 9, 10*. Nuclear Physics A, 745:155-362.

- Utsunomiya H, Hara KY, Goko S, Akimune H, Yamagata T, Ohta M, Ohgaki H, Toyokawa H, Hayakawa T, Shizuma T, Mohr P, Lui Y.-W, Ohkuma H, Yonehara H, Soutome K, Arnould M, 2004. Photonuclear reaction studies at synchrotron radiation facilities in Japan. *Nuclear Physics A*, 738: 136-142.
- Wang T, Kim G, Lee MW, Kim KS, Cho MH, Kang HS, Namkung W, 2011. Measurements of neutron total cross-sections and resonance parameters of niobium using pulsed neutrons generated by an electron linac. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 289:945–952.
- Weisskopf V, 1937. Statistics and Nuclear Reactions, *Physical Review*, 52:295.
- Wesolowski JJ, Anderson JD, Hansen LF, Wong C, McClure JW, 1965. Energy levels of ^{31}S and ^{19}Ne . *Nuclear Physics*, 71:586-592.
- West HI, JR, Mann LG, Iddings GM, 1959. Decay of Nb^{92} . *Physical Review*, 113, 881.
- Zaman M, Kim G, Naik H, Kim K, Shin SG, Tatari M, Cho MH, 2014. Measurement of photo-neutron cross-sections of ^{89}Y with bremsstrahlung energies of 45 and 55 MeV. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 299:1739–1745.
- Zaman MR, Sarkar MJA, Hossain MA, 2011. Production of ^{128}I Atoms through $^{127}\text{I}(n,\gamma)^{128}\text{I}$ Reactions in some Solid Iodocompounds Using an (^{241}Am -Be) Neutron Source. *Journal of Scientific Research*, 3(2), 357-366
- Zeren A, 1998. *Atomlar Moleküller*, Birsen Yayınevi, İstanbul.

ÖZGEÇMİŞ

25.12.1983 yılında Malazgirt 'de doğdum. İlköğretimi Çukurbağ İlköğretim Okulu'nda, ortaokulu Namık Kemal Orta Okulu'nda ve liseyi Muş Lisesi'nde tamamladım. 2003 yılında kazandığım Yüzüncüyıl Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü'nden 2008 yılında mezun oldum. 2013'de Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda yüksek lisansa başladım. Şubat 2018'te yüksek lisansımı tamamladım. Yabancı dilim İngilizce'dir

Muhammed KANARYA

