

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FOTONÜKLEER REAKSİYON YÖNTEMİ İLE TUNGSTEN
İZOTOPLARININ ENERJİ SEVİYELERİ VE YARI ÖMÜRLERİNİN
BELİRLENMESİ**

Fatih DÜLGER

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI**

2016

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FOTONÜKLEER REAKSİYON YÖNTEMİ İLE TUNGSTEN
İZOTOPLARININ ENERJİ SEVİYELERİ VE YARI ÖMÜRLERİNİN
BELİRLENMESİ**

Fatih DÜLGER

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI**

**Bu tez Akdeniz Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi
(Proje No: 2014.02.0121.022) ve Akdeniz Üniversitesi Nükleer Bilimler Uygulama
ve Araştırma Merkezi (NUBA) tarafından desteklenmiştir.**

2016

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FOTONÜKLEER REAKSİYON YÖNTEMİ İLE TUNGSTEN
İZOTOPLARININ ENERJİ SEVİYELERİ VE YARI ÖMÜRLERİNİN
BELİRLENMESİ**

Fatih DÜLGER

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI**

Bu tez .././2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği/Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Yrd. Doç. Dr. Mesut KARAKOÇ

Doç. Dr. Tuncay BAYRAM

Yrd. Doç. Dr. Haris DAPO

ÖZET

FOTONÜKLEER REAKSİYON YÖNTEMİ İLE TUNGSTEN İZOTOPLARININ ENERJİ SEVİYELERİ VE YARI ÖMÜRLERİNİN BELİRLENMESİ

Fatih DÜLGER

Yüksek Lisans Tezi, Fizik Bölümü Anabilim Dalı
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Mesut KARAKOÇ
Haziran 2016, 38 sayfa

Çekirdek yapılarının anlaşılmasında enerji seviyeleri ve yarı ömürlerinin belirlenmesi önemli bir yer tutar. Günümüze kadar çekirdeklerin enerji seviyeleri ve yarı ömürleri hesaplamak için pek çok çalışma yapılmıştır. Bu yapılan çalışmaların büyük bir bölümü enerji çözünürlüğü düşük olan Sodyum-iyodür (NaI) sintilasyon dedektörleri ile yapılmıştır. Çekirdeklerin enerji seviyelerini ve yarı ömürlerini belirlemek için daha yüksek enerji çözünürlüğüne sahip yarı iletken dedektörler kullanılarak daha doğru ve güvenilir sonuçlar elde edilebilir.

Çekirdeğin enerji seviyeleri ve yarı ömürlerinin belirlenmesi çekirdek-çekirdek reaksiyonları, fisyon, füsyon, elektrik ve manyetik geçişler ve radyo izotop üremi ile ilgili önemli bilgiler edinmemizi sağlar. Ülkemizde ilk fotonükleer reaksiyon kendi ekibiz tarafından gerçekleştirildi ve bu deneyle hem uluslararası hem de ulusal literatüre katkı sağlanması amaçlandı.

Gerçekleştirilen fotonükleer reaksiyonda, doğrusal elektron hızlandırıcıdan elde edilen 18 Mev enerjili bremsstrahlung fotonları tungsten hedefle bombardıman edildi. Deney sonucunda $^{180}\text{W}(\gamma, n)^{179}\text{W}$ ve $^{186}\text{W}(n, \gamma)^{187}\text{W}$ reaksiyonları gözlemlendi ve tungstenin bu iki izotopu için enerji geçişlerinin ve yarı ömürlerinin belirlenmesi konusunda çalışmalar yapıldı.

Bu tez çalışmasının sonucunda literatürle uyum içinde ve daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

ANAHTAR KELİMELEER: Enerji geçişleri, Yarı Ömür, Fotonükleer Reaksiyon, elektron lineer Hızlandırıcı, Yüksek saflıkta Germanyum Dedektörü (HpGe)

JÜRİ: Yrd. Doç. Dr. Mesut KARAKOÇ (Danışman)
Doç. Dr. Tuncay BAYRAM
Yrd. Doç. Dr. Haris DAPO

ABSTRACT

ENERGY LEVELS AND HALF-LIVES OF TUNGSTEN ISOTOPES OBTAINED BY PHOTO-NUCLEAR REACTION

Fatih DÜLGER

MSc Thesis in Physics

Supervisor: Asst. Assoc. Dr. Mesut KARAKOÇ

June 2016, 38 pages

Energy levels and half-life are very important to understanding of nuclei structure. Until now, a lot of studies have been made to determine energy levels and half life for nuclei. Most of the studies, Sodium Iodide (NaI) scintillation detectors which have low energy resolution have been used. Semiconductor detectors which have high energy resolution can be used to determine energy levels, half life for nuclei and to obtain accurate and reliable results.

Determination of energy levels and half-lives of nuclei include necessary information about the nuclei-nuclei interactions, fission, fusion, transitions of electric and magnetic and production of radioisotope. First photonuclear reaction has been realized by our team in our country. With this experience, we wanted to contribute national and international literature.

We have run an experiment to determine the energy levels and half-lives of Tungsten nucleus by using the photonuclear reactions with end-point energy of 18 MeV bremsstrahlung photons, produced by a clinical linear accelerator. As a result of $^{180}\text{W}(\gamma, n)^{179}\text{W}$ and $^{186}\text{W}(n, \gamma)^{187}\text{W}$ photonuclear reactions, the energy levels and half-lives of tungsten isotopes have been determined.

The results are in good agreement with the literature values.

KEYWORDS: Energy Levels, Half Life, Photonuclear Reaction, Electron Linear Accelerator, High Purity Germanium Dedector (HpGe)

COMMITTEE: Asst. Assoc. Dr. Mesut KARAKOÇ (Supervisor)
Assoc. Prof. Tuncay BAYRAM
Asst. Assoc. Dr. Haris DAPO

ÖNSÖZ

Fotonükleer reaksiyonlar sağlık alanından akademik çalışmalara kadar uzanan geniş bir spektruma sahiptir. Ülkemizde bu deneyi ilk gerçekleştiren bilim grubunun bir üyesi olarak gerçekleştirdiğim bu tez çalışmasında yine ülkemizde ilk olarak Tungsten çekirdeğinin enerji seviyeleri ve yarı ömürleri bu reaksiyon yöntemi ile hesaplanmıştır.

Bu tez çalışması esnasında bana bütün bilgi ve birikimi ile yardımcı olan danışman hocam sayın Yrd. Doç. Dr. Mesut KARAKOÇ'a (Akdeniz Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü), çalışmalarım da büyük ölçüde katkısı olan sayın Yrd. Doç. Dr. Haris DAPO'ya (Akdeniz Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü), desteklerini benden esirgemeyen sayın Doç. Dr. Tuncay BAYRAM (Sinop Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Nükleer Enerji Mühendisliği Bölümü) ve sayın Öğr. Gör. Tanfer CANER'e (Akdeniz Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu Nükleer Teknoloji ve Radyasyon Güvenliği Programı) en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bilginin sadece bir kişide kalmasının yerine koca bir topluluğa paylaşılmasının önemini bizlere her daim gösteren ve genç bilim adamlarını her zaman destekleyerek bu bağlamda Nükleer Bilimler Uygulama ve Araştırma Merkezini (NUBA) faaliyete geçiren sayın hocam Prof. Dr. İsmail BOZTOSUN'a (Akdeniz Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü) özel olarak teşekkür ederim.

Ayrıca tezimin her aşamasında bana her zaman destek olan sevgili aileme, eşim Berna KAYA'ya, çalışma arkadaşlarım Alp Cesur (Akdeniz Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü) ve Mahmut ÜSTÜN'e (Akdeniz Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü) teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL BİLGİLER VE KAYNAK TARAMALARI	3
2.1. Gama Işınları	3
2.2. Gama Işınlınının Madde ile Etkileşimi	3
2.2.1. Fotoelektrik olay	3
2.2.2. Compton olayı	4
2.2.3. Çift oluşumu	5
2.3. Fotonükleer Deney ve Çekirdeklerin Enerji Seviyeleri	6
2.4. Çekirdeklerin Yarı Ömürlerinin Tespiti	7
3. MATERYAL VE METOT	10
3.1. Doğrusal Elektron Hızlandırıcı	10
3.2. Germanyum Yarı İletken Dedektör	11
3.2.1. Dedektör	12
3.2.2. Yüksek voltaj kaynağı	13
3.2.3. Ön yükselteç	13
3.2.4. Ana yükselteç	13
3.2.5. Analog-dijital çevirici	13
3.2.6. Çok kanallı analizör	13
3.2.7. Yazılım	14
3.3. Gama Işını Spektroskopisi	15
3.4. Deney Süreci	16
3.4.1. Işınlama ve sayım	16
3.4.2. Kalibrasyon ve enerji seviyeleri	19
3.4.3. Yarı ömür hesabı	20
4. BULGULAR	26
4.1. Tungsten Çekirdeğinin Enerji Spektrumu	26
4.1.1. $^{180}\text{W}(n,\gamma)^{181}\text{W}$ reaksiyonu	27
4.1.2. $^{180}\text{W}(\gamma,n)^{179}\text{W}$ reaksiyonu	28
4.2. Kalibrasyon Verileri	28
4.3. Enerji Değerleri	29
4.4. Yarı Ömür Değerleri	32
4.4.1. ^{179}W izotopu için yarı ömür değerleri	32
4.4.2. ^{179}W izotopu için yarı ömür değerleri	32
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	34
6. KAYNAKLAR	36
ÖZGEÇMİŞ	

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

A^0	Angstrom
γ	Gama ışını
α	Alfa parçacığı
β^+	Beta parçacığı
β^-	Pozitron parçacığı
ν	Nötrino
$\bar{\nu}$	Anti-nötrino
n	Nötron parçacığı
p	Proton parçacığı
e	Elektronun Yüğü
Z	Atom numarası
A	Kütle numarası
eV	Elektron Volt
MeV	Mega Elektron Volt
GeV	Giga Elektron Volt
W	Watt
c	Işık hızı
N	Bozunum sayısı
t	Bozunum süresi
λ	Bozunum sabiti
ch	Kanal numarası
E_b	Bağlanma enerjisi
h	Planck sabiti
K_e	Kinetik enerji
m_0	Kütle
ν	Frekans
Θ	Saçılma Açısı
C	Karbon
Ca	Kalsiyum
Cl	Klor
Co	Kobalt
Cu	Bakır
Ga	Galyum
Ge	Germanyum
H	Hidrojen
Mg	Magnezyum
Na	Sodyum
O	Oksijen
Cs	Sezyum
Ta	Tantal
Cd	Kadmiyum
W	Tungten
Zn	Çinko

Kısaltmalar

c-LINAC	Klinik Lineer Hızlandırıcı
e-LINAC	Elektron Lineer Hızlandırıcı
LINAC	Lineer Hızlandırıcı
NUBA	Nükleer Bilimler Uygulama ve Araştırma Merkezi
HpGe	Yüksek Saflıkta Germanyum Dedektörü
MCA	Çok Kanallı Analizör
ADC	Analog-Dijital Dönüştürücü
RF	Radyofrekans



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Gama ve kararlı çekirdeğin etkileşim şeması	1
Şekil 2.1. Fotoelektrik olay	4
Şekil 2.2. Compton saçılmasının oluşumu	4
Şekil 2.3. Çift oluşumu	5
Şekil 2.4. Üç mekanizmanın baskın olduğu bölgeler	6
Şekil 2.5. Aktifliğin üstel bozunumunun Lineer ve Logaritmik çizimleri.....	8
Şekil 3.1. Bremsstrahlung fotonunun elde edilmesi	10
Şekil 3.2. Doğrusal elektron hızlandırıcısının şematik gösterimi	11
Şekil 3.3. Germanyum detektörün çalışma düzeneği.....	11
Şekil 3.4. Işınlanan numunelerin ölçümünde kullanılan HPGe dedektörü	12
Şekil 3.5. Gama ışını ölçümünde meydana gelen olaylar	15
Şekil 3.6. Gama spektroskopisi analiz sonucu	15
Şekil 3.7. Deney için hazırlanan W numunesi	16
Şekil 3.8. Numunenin ışınlama alanına yerleştirilmesi.....	18
Şekil 3.9. Fotonükleer deney şeması.....	18
Şekil 3.10. Önce ve sonra kalibrasyonu için kullanılan standart kaynaklar.....	19
Şekil 3.11. Hazırlanan komut dosyasının bir örneği	21
Şekil 3.12. Otomatik analiz için hazırlanan programın bir örneği	22
Şekil 3.13. Zaman içinde sayım sayısında ki değişmeyi gösteren çıktı dosyası.....	22
Şekil 3.14. Sayılan spektrum dosyalarından alınan sayım sayısı-zaman grafiği	24
Şekil 3.15. Sayım sayılarının birbirinden çıkarılması sonucu elde edilen yarı ömür grafiği	25
Şekil 4.1. Tungsten çekirdeğinin enerji spektrumu.....	26
Şekil 4.2. ^{186}W izotopunun nötron yakalama reaksiyonu	27
Şekil 4.3. ^{180}W izotopunun nötron koparıma reaksiyonu	28
Şekil 4.4. ^{187}W izotopunun saptanan enerji geçişi piklerinin zaman içinde sayımlarının logaritmik olarak değişimi.	33

ÇİZELGELER DİZİNİ

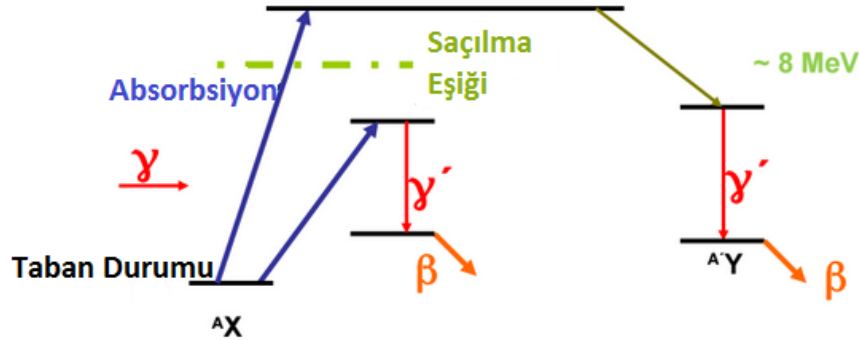
Çizelge 4.1. Kalibrasyon sonucu elde edilen parametreler	29
Çizelge 4.2. Deney öncesi ve sonrası kalibrasyon değerleri kullanılarak elde edilen enerjiler ve hata oranları	31
Çizelge 4.3. Deney analizi sonucu elde edilen enerji geçişlerinin enerjileri ve literatür değerleri ile karşılaştırılması	31
Çizelge 4.4. $^{179}\text{W} \rightarrow ^{179}\text{Ta}^* + e^+ + \nu$ reaksiyonu için elde edilen yarı ömür değeri. ...	32
Çizelge 4.5. Deney analizi sonucu elde edilen enerji geçişlerinin enerjileri ve literatür değerleri ile karşılaştırılması.....	33



1. GİRİŞ

Çekirdek reaksiyonları hedef çekirdeğin hafif, yüksek hız ve enerjili taneciklere (n, p, γ vb.) bombardımanı sonucu elde edilen reaksiyon çeşididir ve çekirdeklerin özelliklerinin anlaşılması hususunda önemli bir yer tutmaktadır. Bu özellikler kütle, yarıçap, kararlı çekirdekler için bağıl bolluk oranları, nötron veya proton koparma enerjileri, çekirdeğin radyoaktif izotoplarının enerji geçişleri ve yarı ömürleri, tesir kesitleri, spin, manyetik dipol ve elektrik kuadrapol momentleridir (Krane 2001).

Çekirdek reaksiyon çeşitleri arasında fotonükleer reaksiyon önemli bir yer tutmaktadır (Segebade vd 1987, Schumacher 1988). Fotonükleer reaksiyon, gama ışınları ve çekirdek arasındaki etkileşim sonucunda meydana gelen bir çekirdek reaksiyon çeşididir. Fotonükleer reaksiyon esnasında gama ışını fotonunun enerjisi bir çekirdek tarafından kısmi veya tam olarak soğurulur. Bu sürecin devamında, fotonun enerjisini soğuran hedef çekirdek uyarılmış duruma geçmeye zorlanarak soğurduğu enerjinin yeterliliği sağlaması durumuna göre yaygın olarak gama yayımlayabilir (Belyshev vd 2014). Buna ek olarak nötron, proton veya alfa parçacığı ve yeterli koparma enerjisine sahip olduğu zaman 2p, 2n, pn, döteron vb. gibi büyük kütleli parçacıklarda fotonükleer reaksiyonu sonucunda yayımlanabilir. Bu tarz reaksiyonlar fizikte gama-nötron reaksiyonu için ${}^A X(\gamma, n){}^{A-1} X$, gama-proton reaksiyonları için ${}^A X(\gamma, p){}^{A-1} Y$ vb. şekillerde gösterilmektedir (Şekil 1.1). Burada reaksiyonun her iki kolunda da kütle numarası ve atom sayısı toplamları eşit olmalıdır. Reaksiyon öncesi toplam enerji de enerji korunumu gereği reaksiyon sonrası enerjiye eşit olmalıdır. Toplam enerji parçacığın kinetik enerjisi ve parçacığın durgun kütle enerjisinin toplamına eşittir.



Şekil 1.1. Gama ve kararlı çekirdeğin etkileşim şeması

Fotonükleer reaksiyonlar 1970'lerden beri birçok bilim insanı tarafından çalışmalarında tercih edilerek sayısız çalışma literatüre kazandırılmıştır ve hala kullanılan en önemli metotlardan bir tanesidir. Ancak yapılan çalışmalarda kullanılan detektör tipi genel olarak düşük çözünürlüğe sahip olan sintilasyon detektörleriydi. Bu reaksiyon çeşidi kullanılarak yapılan en yaygın çalışma Oka vd tarafından 1967 yılında 75 farklı çekirdek üzerinde yapılmıştır. Bu çalışmada Oka vd (γ, n), ($\gamma, 2n$), (γ, p), (γ, γ') reaksiyon çeşitlerini gözlemişlerdir (Oka vd 1967).

Ülkemiz adına bu reaksiyon çeşidi kullanılarak gerçekleştirilmiş olan ilk çalışma çinko (Zn) örneği kullanılarak yapılmıştır. Bu çalışmada Boztosun vd Nükleer fizik

alanında birçok uygulaması olan fotonükleer reaksiyon deneyleri ülkemizde ilk kez Akdeniz Üniversitesi Nükleer Bilimler Uygulama ve Araştırma Merkezi (NUBA) tarafından yerel imkânlar kullanılarak 2013 yılında yapılmıştır (Boztosun vd 2014). Bu çalışma ülkemizde ilk kez yapılmasına ek olarak şu anada dek yapılan çalışmalardan farklı olarak yüksek çözünürlüklü Germanyum detektörü (HPGe) ile yapılmasıyla da ayrı bir önem taşımaktadır.

Fotonükleer deneylerin en genel kullanım amacı reaksiyon sonucunda oluşacak olan ürün çekirdeğin enerji seviyeleri ve yarı ömürlerinin belirlenmesidir. Bu amaçla lineer bir hızlandırıcı aracılığıyla üretilen fotonlar belirli bir hedef üzerine gönderilerek çekirdek aktive edilir ve çeşitli bozunmalar ile diğer çekirdeklere dönüşür. Bu yöntem ile ürün çekirdeklerin nükleer yapısı hakkında bilgiler elde edilir. Çekirdeklerin nükleer yapılarının anlaşılması, tıpta görüntüleme yöntemlerinde kullanılacak çekirdeklerin seçimi, hasta tedavi süreçlerinde kullanılacak izotopların belirlenmesi ve radyasyondan korunma yöntemlerinin geliştirilmesi gibi konularda önemli katkılar sağlamaktadır (Lee vd 1998).

Bu tez çalışmasında, aynı yöntemi kullanarak Tungsten (W) çekirdeğinin ^{179}W ve ^{187}W radyoaktif izotoplarının enerji geçişleri ve yarı ömürlerini hesaplayarak literatür ile uyum içinde olan sonuçlar elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmada da literatür çalışmalarından farklı olarak HPGe kullanılmıştır.

2. KURAMSAL BİLGİLER VE KAYNAK TARAMALARI

2.1. Gama Işını

Gama ışınları, γ simgesiyle gösterilen ve biyolojik olarak tehlikeli olan iyonize edici bir radyasyondur. Gama ışınları, yüksek enerji ve frekanslı fotonlardan oluşur. Bu ışınım genelde çekirdeğin yüksek enerji seviyesinden daha düşük enerji seviyesine olan, enerji geçişleri esnasında yayımlanır. Gama ışınları ilk defa 1900 yılında Radyumdan enerji yayılmasını çalışan Fransız fizikçi Paul Villard tarafından fark edilmiş. Villard tarafından fark edilen bu fotonlara Rutherford 1903 yılında gama ışını adını vermiştir.

Gama ışınları doğal olarak radyoaktif izotopların enerji geçişleri sırasında ve atmosferdeki parçacıklar ile kozmik ışınların etkileşmesi sonucunda elde edilirler. Alfa (α) ve Beta (β) ışınlarına göre maddeye nüfuz edici özelliği çok daha yüksek olan bu ışınlar doğrusal elektron hızlandırıcılar kullanılarak yapay olarak da üretilmektedir. Doğrusal hızlandırıcılar ile üretilen elektronlar genellikle Tungsten (W) veya Tantal (Ta) hedefler ile bombardıman edilerek elde edilirler. Bu işlem sonu elde edilen fotonlara Bremsstrahlung fotonları adı verilir.

Fotonükleer yöntem kullanılarak, enerji seviyeleri ve yarı ömrü hakkında hesaplamalar yapmak istediğimiz hedef çekirdeklerin gama ışını ile etkileşmesi sonucu hedef çekirdekte x_n , x_p vb. kopması ve bu işlem sonucu elde edilen uyarılmış çekirdeğin, tekrar kararlı hale geçmek için yayımladığı gama ışınının ölçümü yapılarak o çekirdeğin nükleer yapısı hakkında çeşitli bilgiler elde edebilmek mümkündür.

2.2. Gama Işınının Madde ile Etkileşimi

Fotonükleer çalışma sırasında gama ışınının maddeyle etkileşimi sonucu bazı fiziksel olaylara rastlayabiliriz. Bunların en temelleri; fotoelektrik olay, Compton saçılması ve çift oluşumdur.

2.2.1. Fotoelektrik olay

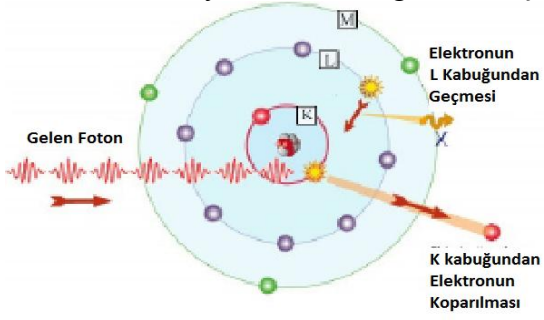
Işığın tanecikli yapıda olduğunu gösteren bir olaydır. İlk defa Hertz tarafından 1887 yılında gözlenmiş ve Einstein tarafından 1905 yılında formüle edilmiştir.

Fotoelektrik olay, basit olarak ışığa duyarlı yüzeye (katot) çarpan fotonların o yüzeyden elektron kopararak anoda doğru akım oluşturmasıdır. Bu olayla birlikte üretilen elektronlara fotoelektronlar adı verilir. Bu olay sırasında $h\nu$ enerjisi ile gelen foton atomun elektronu tarafından soğurulur ve elektron yeterli enerjiye ulaşmasının ardından atomdan kopar. Atomdan ayrılan elektronun kinetik enerjisi;

$$K_e = h\nu - E_b \quad (2.1)$$

formülü ile verilir. Burada E_b elektronu koparmak için gerekli olan bağlanma enerjisidir (Zengin ve Türeci 2007).

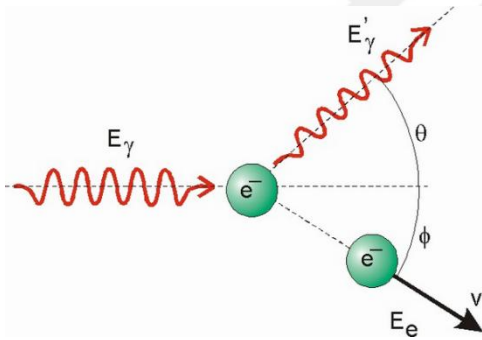
Fotoelektrik olayın temsili bir gösterimi Şekil 2.1'deki gibidir.



Şekil 2.1. Foto elektrik olay

2.2.2. Compton olayı

Compton olayı 1922'de Compton tarafından incelenmiştir. Bu olayda fotoelektrik olay gibi ışığın tanecikli yapısını inceleyen bir olaydır. Bu olay bir X-ışınının duran elektrona çarpması sonucu dalga boyundaki değişikliklerle olur. Olayın oluşumu Şekil 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.2. Compton saçılmasının oluşumu

Bu olay sırasında, X-ışınlarının atomlarla etkileşime girdikten sonra bir açı içinde dağılmış oldukları gözlenir. Bu saçılma açısından yola çıkılarak X-ışınının tanecik gibi ivmeli hareket ettiği kanısına varılarak saçılma açısıyla alakalı enerji korunum yasası kullanılarak bir bağıntı türetilir. Bu bağıntı denklem (2.2)'de ki gibi verilmiştir.

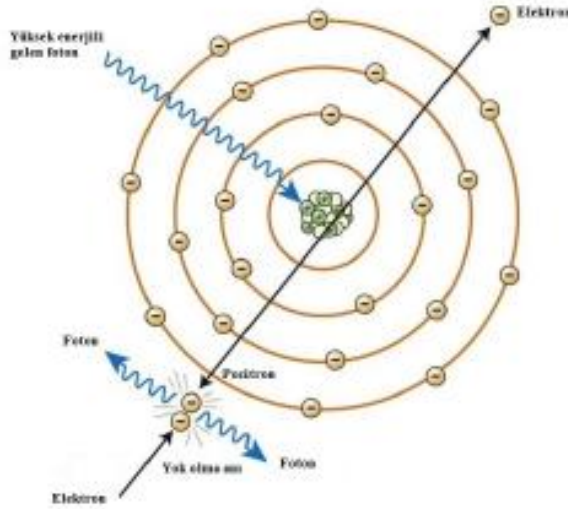
$$\lambda' = \lambda - \frac{1}{c m_0} h(1 - \cos\Theta) \quad (2.2)$$

$\frac{1}{c m_0} h$ compton dalgaboyudur ve değeri 0.024 \AA 'dur (Zengin ve Türeci 2007).

2.2.3. Çift oluşumu

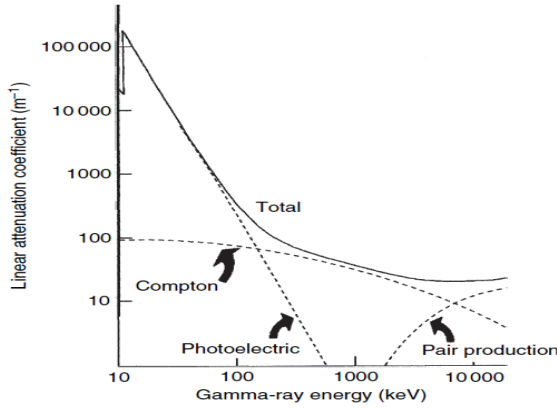
Çekirdeğin yakınına kadar sokulan yüksek enerjili gama fotonunun, onun kuvvetli elektrik alanında kaybolarak yerine elektron-pozitron çifti oluşmasına çift oluşumu adı verilir. Çift oluşumu meydana gelebilmesi için gama ışının enerjisinin en az 1,02 MeV olması gerekir. Çift oluşumunda kaybolan fotonun enerjisinin 1,02 MeV'den fazlası elektron-pozitron çifti arasında kinetik enerji olarak paylaşılır. Enerjinin 1,02 MeV'lik bölümü oluşan parçacıkların durgun kütlelerine eşdeğerdir. Daha sonra bu elektron ve pozitron birleşerek birbirlerini yok ederek kütlelerini enerjiye dönüştürürler. Bu enerji dönüşümü sonucunda, 0,511 MeV enerjili birbirine eşit fakat zıt yönde iki foton ortaya çıkar ki; bu ışınlara yok olma radyasyonu adı verilir.

Çift oluşumunun gösterimi Şekil 2.3' de gösterildiği gibidir.



Şekil 2.3. Çift oluşumunun gösterimi

Fotonükleer reaksiyon ürünlerinin detektörde sayımlarının alınması sırasında elde edilen spektrumda bu üç etkileşim çeşitide görülmektedir. Her üç etkileşimi de aynı spektrum üzerinde ele alırsak; 1-100 keV enerji aralığındaki gama ışınları için Fotoelektrik olay, 0.1-10 MeV aralığında Compton saçılması ve 0.01- 1 GeV aralığında ise Çift oluşumunun baskın olduğu görülmektedir. Üç mekanizmanın baskın olduğu bölgelerin gösterimi Şekil 2.4' de verilmiştir.



Şekil 2.4. Üç mekanizmanın baskın olduğu bölgeler

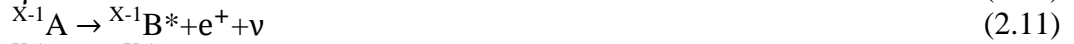
2.3. Fotonükleer Deney ve Çekirdeklerin Enerji Seviyeleri

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 hesaplamalarını pek çok çalışma yapmıştır (Weisskopf 1937). Bu çalışmalarda dikkate alınana nokta çekirdek uyarılma enerjilerinin termodinamik sıcaklığın karesi ile orantılı olduğudur.

Enerji seviyelerinin belirlenmesi için yapılan deneysel çalışmalar farklı metotları içinde barındırır. 1965 yılında $^{32}\text{S}(n,d)^{31}\text{P}$ reaksiyonu ile ^{31}S ve $^{19}\text{F}(p,n)^{19}\text{Ne}$ reaksiyonu ile ^{19}Ne çekirdeklerinin enerji seviyeleri belirlenmiştir. Burada kullanılan yöntem nötron ve proton bombardımanları şeklinde gerçekleştirilmiştir (Wesolowski vd 1965). Yine 1965 yılında döteron-proton (d,p) reaksiyonu kullanılarak ^{90}Y çekirdeğinin enerji seviyeleri ölçülmüştür (Hamburger 1965). 1966 yılında proton-alfa (p, α) reaksiyonu kullanılarak ^{47}V ve ^{49}V çekirdekleri için enerji seviyesi ölçülmüştür (Brown 1966). Konjin ve arkadaşları sintilasyon detektörü kullanarak ^{48}Sc ve ^{48}V çekirdeklerinin enerji seviyelerini belirlemişlerdir (Konjin vd 1967). Gelişen teknoloji ve çekirdekler hakkında artan bilgi sayesinde, daha sonraki yıllarda da çekirdeklerin enerji seviyelerinin belirlenmesi üzerine pek çok çalışma yapılmıştır (Bosnjakovic vd 1967, Ajzenberg-Selove vd 1973, Kent vd 1975, Pougheon vd 1981, Tilley vd 2004).

Çekirdekler üzerinde uygulanan gama-nötron (γ, n), proton-gama (p, γ), nötron-gama (n, γ) gibi reaksiyonlar çekirdek spektroskopisinin öncelikli konularından biri olan enerji seviyelerinin belirlenmesinde kullanılırlar. Çekirdeklerin hangi enerji seviyelerine sahip oldukları, bu enerji seviyelerinin hangisinde ne kadar süre kaldıkları nükleer yapının anlaşılması açısından önemlidir.

Enerji seviyelerinin ölçülmesinde, aşağıda verilen nötron, proton ve alfa parçacıklarının koparılabilirdiği fotonükleer reaksiyon deneylerini gerçekleştirmek mümkündür. Burada A hedef çekirdek, B son ürün çekirdek, X ise kütle numarasıdır.



Fotonükleer reaksiyonun gerçekleşebilmesi için gama ışınlarının enerjilerinin kopan parçacıkların kopma enerjilerinden fazla olmalıdır. Hali hazırda kullanmakta olduğumuz sistemle 6, 8, 10, 12, 25 MeV enerjilerine ulaşabilen gama ışınları ile çalışabilmekteyiz. Fakat elektronların tungsten veya benzeri bir hedefte yavaşlatılmasıyla elde edilen bu gama ışınları sürekli bir spektruma sahiptirler ve dolayısıyla tek enerjili gama ışınları üretmek ve onlarla çalışmak mümkün değildir. Bu yüzden 25 MeV'lik enerjiyle çalışılıyorsa hedef çekirdekten koparılacak parçacığın kopma enerjisi ~10 MeV civarında olmalıdır.

Işınlanan çekirdekten bir nötron kopması durumunda oluşan radyoaktif izotop kararlı duruma dönmek için önce pozitron ardında da gama ışını yayımlar. Bu sırada gelen foton kristal ile etkileşerek enerjisini kaybeder. Bu etkileşmeler sonucunda, kristalde elektron-boşluk çiftleri meydana gelir ve detektöre uygulanan yüksek voltajın etkisiyle diyotlara sürüklenir. Gelen radyasyonun etkisiyle biriken bu yük, analizörde ölçülebilen bir voltaj pulsu meydana getirir. Bu puls ön yükseltici ve ana yükselticide, önce voltaj sinyaline dönüşerek şekillendirilir ve büyütülür. Daha sonra çıkış pulsunun genliği 0 V'tan 10 V'a kadar değiştirilerek analog dijital çeviricide sayısal sisteme dönüşür. Çok kanallı analizörde bu sayısal sistem genliği ile orantılı olarak bir hafıza kanalına sayım olarak yerleştirilir. Bu işlemlerden sonra elde edilen spektrumun analiz edilmesiyle enerji seviyeleri hakkında bilgi elde edilir.

2.4. Çekirdeklerin Yarı Ömürlerinin Tespiti

Çekirdeklerin yarı ömürlerinin hassas bir şekilde ölçülmesi nükleer fizik, nükleer astrofizik ve nükleer tıp alanları açısından oldukça önemlidir. Bir çekirdeğin yarı ömrünün en küçük hata oranıyla belirlenmesi birçok çalışma için büyük yarar sağlamaktadır. Yarı ömür tayininde birçok farklı metot kullanılabilir. Ancak çekirdek yarı ömürlerinin daha hassas bir şekilde ölçülmesi için kullanılan en yaygın yöntem fotonükleer reaksiyonlardır. Fotonükleer reaksiyon sonucunda oluşan ürünlerin yayınladıkları gama ışınları bir detektör yardımıyla tespit edilerek yayımlanan ışının aktive ettiği elektron sayısına bağlı olarak ürün çekirdeklerin yarı ömürleri elde edilebilir. Bir numunede bozunan çekirdeklerin sayısı zamanla üstel olarak değişmektedir ve bozunan çekirdek sayısı üstel bozunum yasası kullanılarak hesaplanabilir. Bu yasaya göre, eğer bir t anında N radyoaktif çekirdek varsa ve bu çekirdeğe yeni çekirdekler eklenmiyorsa dt sürede bozunan çekirdek sayısı dN, N ile orantılıdır:

$$\lambda = \frac{dN/dt}{N} \quad (2.3)$$

Burada λ , bozunma veya parçalanma sabitidir. Denklem 1'in integrali alınırsa,

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.4)$$

şeklinde olup bozunma yasası olarak isimlendirilir . Burada N_0 integrasyon sabitidir ve $t=0$ anındaki bozunmamış çekirdek sayısıdır. Yarı ömür $t_{1/2}$, çekirdeklerin yarısının bozunması için gereken süredir. Denklem 2’de $N = N_0/2$ konursa,

$$t_{1/2} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (2.5)$$

bulunur.

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

$$|\Delta N| = N(t) - n(t + \Delta t) = N_0 e^{-\lambda t} (1 - e^{-\lambda \Delta t}) \quad (2.6)$$

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

$$|\Delta N| = \lambda N_0 e^{-\lambda t} \Delta t \quad (2.7)$$

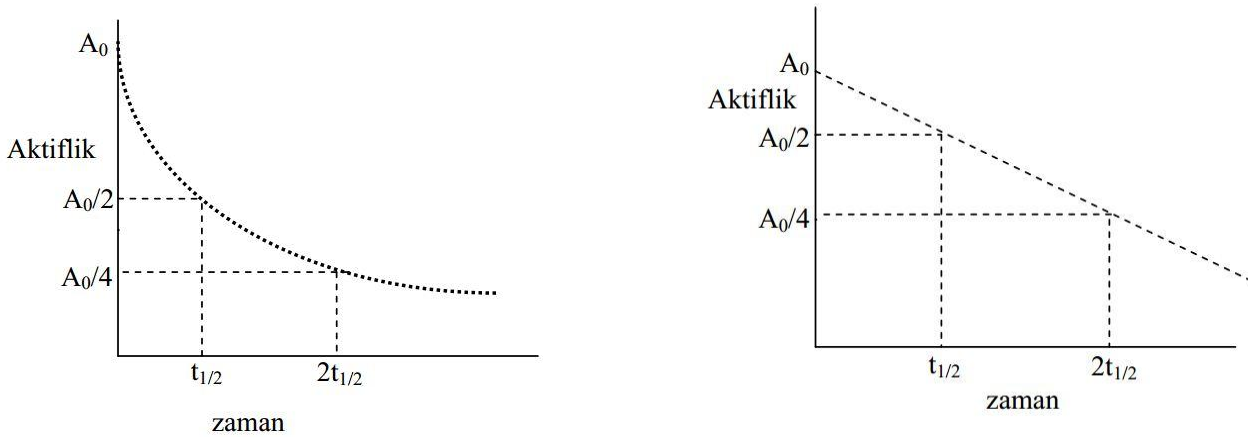
ve sonsuz küçük limitte

$$\left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.8)$$

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

$$\mathcal{A}(t) = \lambda N(t) = \mathcal{A}_0 e^{-\lambda t} \quad (2.9)$$

$t=0$ ’daki başlangıç aktivitesi $\mathcal{A}_0 = \lambda N_0$ ’dır (Krane 2001).



Şekil 2.5. Aktivite üstel bozunumunun Lineer ve Logaritmik çizimleri (Krane 2001)

Şekil 2.5 aktifliğin zamana göre değişimini göstermektedir. Sonuç olarak yapılan bir fotonükleer deneyde bozunan çekirdekten yayılan gama ışınının çeşitli süreçlerle detektör kristalinden kopardığı elektron sayısı elektronik ortamda kaydedilir. Elde edilen veriler, yarı logaritmik ve doğrusal skalalar da çizdirilerek, bu eğrilerin bozunum yasası kullanılarak analiz edilmesiyle elementlerin yarılanma süreleri belirlenir. Çekirdekler, özellikle radyoaktif olanlar, birçok araştırmada kullanıldığından bunların yarılanma sürelerinin hassas bir şekilde tespit edilmesi büyük önem taşımaktadır.

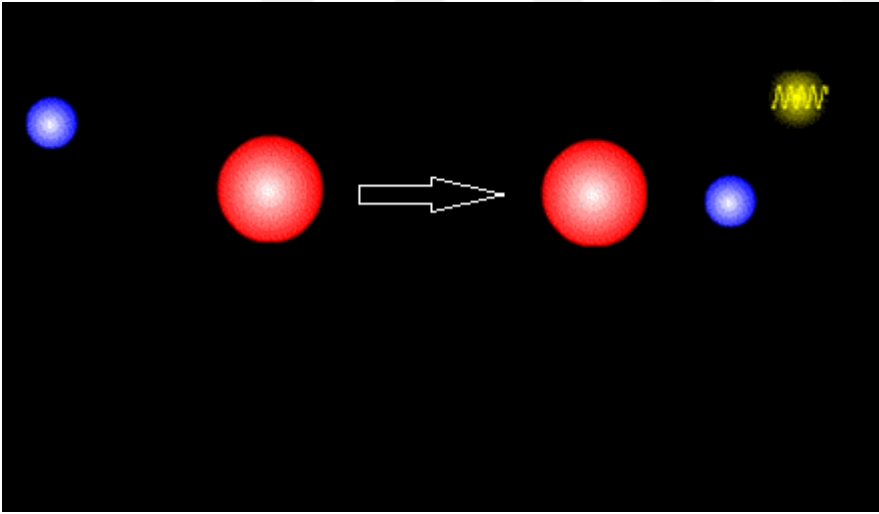


3. MATERYAL VE METOT

Fotonükleer deney için kullanılan deneysel düzenek; doğrusal elektron hızlandırıcısı, germanyum yarı iletken detektörleri ve bilgisayar kümelerinden oluşmaktadır.

3.1. Doğrusal Elektron Hızlandırıcısı

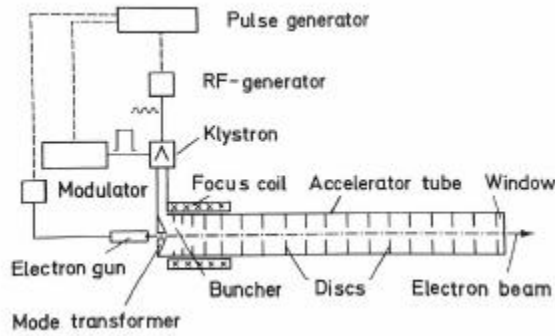
Elektron doğrusal hızlandırıcısının (eLINAC) çalışma prensibi, elektronların vakum ortamında doğrusal bir kılavuzunun içinde hızlandırılması ve manyetik alanlar ile yönlendirilmesine dayanmaktadır. İlk olarak vakum ortamında bulunan tungsten bir dirençten elektrik akımı geçirilerek elektronlar termiyonik olarak yayımlanır. Bu elektronlar düşük enerjili (~50 keV) olup, radyofrekans (RF) üretici (magnetron veya klystron) ile oluşturulan RF dalgalarına bindirilerek doğrusal dalga kılavuzunda hızlandırılırlar. Bu dalga kılavuzunun çevresinde bulunan kuadrapol mıknatıslar ile ışın doğrusal olarak şekillendirilir ve yönlendirilir. Daha sonra isteğe bağlı olarak elektron demetinin önüne tungsten veya tantal bir bremsstrahlung foton dönüştürücüsü yerleştirilerek yüksek enerjili frenleme (bremsstrahlung) X-ışınları elde edilir. Çalışmada yararlanılan elektron doğrusal hızlandırıcısı kullanılarak 4, 6, 18 ve 25 MeV' lik uç nokta enerjisine sahip bremsstrahlung fotonları üretilmektedir (Boztosun vd 2014). Bu üretilen fotonların enerjisi kullanılan tungsten hedefi uyarmak için yeterli bir seviyededir. Hızlandırıcıda frenleme bremsstrahlung oluşumunun görseli Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Bremsstrahlung fotonunun elde edilmesi

Burada kırmızı ile gösterilen tungsten veya tantal çeviricidir. Mavi daire elektron ve sarı daire de bremsstrahlung fotonu olmaktadır. İlk durumda, hızlandırılan elektron çeviriciye doğru gelmektedir. İkinci durumda ise elektron çevirici ile çarpışarak hızı yavaşlar ve enerjisiyle orantılı olarak çeviriciden bir foton koparır.

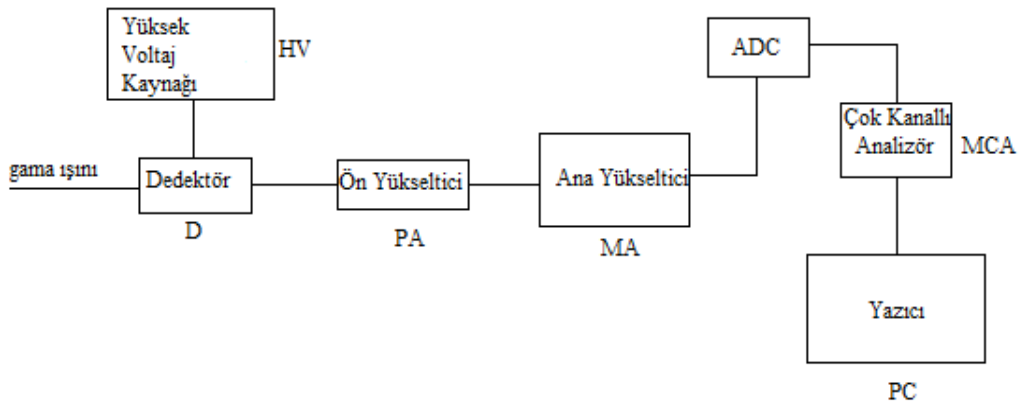
Ayrıca doğrusal elektron hızlandırıcısının şematik gösterimi Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2. Doğrusal elektron hızlandırıcısının şematik gösterimi (Segebade vd 1998)

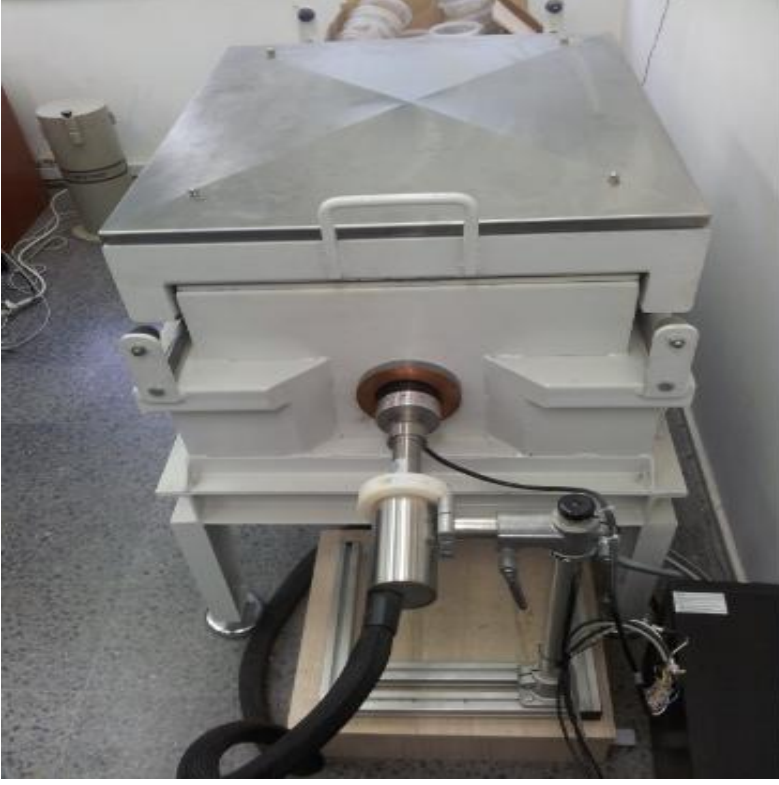
3.2. Germanyum Yarı İletken Detektörleri

Yüksek saflıktaki germanyum yarı iletken gama spektrometresi ölçüm detektörü, beraberinde ön yükseltici ve yüksek voltaj filtresi ile güç kaynağı, yükseltici, analog sayısal dönüştürücü, çok kanallı analizör, bilgisayar ve yazıcıdan oluşur. Gama ışınlarının detektör kristalinde algılanması sonucu ortaya çıkan darbeler detektörün bağlı olduğu elektronik modüllerin uygun bir kombinasyonu yardımıyla analiz edilir ve gama ışını yayan izotopların nitel ve nicel tanımlanması yapılır. Gama spektrometresi çeşitli radyoaktif numunelerdeki radyoizotopların tanımlanmasında en çok kullanılan tekniktir. Çünkü gama ışınlarının enerjisi her bir çekirdek için kesikli ve karakteristiktir. Şekil 3.3’de saf germanyum detektörlü gama spektrometrik cihazının çalışma düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Saf germanyum detektörlü gama spektrometrik cihazının çalışma düzeneği

Yüksek saflıktaki germanyum detektörler silindir şeklindeki külçelerden oluşur. Germanyum detektörün maksimum verimde kullanımını sağlamak için, genellikle silindirik bir geometriden yapılır. Akdeniz Üniversitesi Nükleer Bilimler Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan ORTEC marka bir HPGe detektörü Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4. Işınlanan numunelerin ölçümünde kullanılan HPGe detektörü

Radyoaktivite ölçümleri p tipi, koaksiyel (eş eksenli), elektrik soğutuculu HPGe ile yapılmıştır. AMATEK-ORTEC (GEM40P4-83) model HPGe detektörünün bağlı verimi %40 olup ^{57}Co radyoizotopunun 122 keV'deki piki için yarı yükseklikteki tam genişlik (FWHM) değeri 768 eV, ^{60}Co radyoizotopunun 1332 keV'deki piki için FWHM değeri 1,85 keV'dir. HPGe detektörü yine ORTEC markalı güç kaynağı, spektroskopi yükseltici, analog dijital dönüştürücüden oluşan NIM (Nuclear Instrumentation Module) kasaya ve bir bilgisayara bağlanmıştır. HPGe detektörü 10 cm kalınlığındaki kurşun bir zırh içerisinde bulunmaktadır. Ayrıca zırhtan kaynaklanabilecek X-ışınlarını filtrelemek için kurşun zırhın iç kısmı 2 mm bakırla kaplanmıştır. Veri toplama ve analiz işlemleri MAESTRO (ORTEC) VE GF3 (RADWARE) yazılımları ile gerçekleştirilmiştir.

3.2.1. Detektör

Gama ışınlarının ölçümünde kullanılan detektörlerde, gelen foton detektör kristali ile etkileşerek, kristalde elektron-boşluk çiftleri meydana gelir. Detektör kristaline yüksek gerilim uygulanarak (yaklaşık 4000V) elektrik alan oluşturulur ve

elektron-boşluk çiftleri diotlara sürüklenir. Gelen ışının enerjisi ile orantılı olarak biriken bu yük, analizörde ölçülebilecek bir voltaj pulsuna dönüştürülür.

3.2.2. Yüksek voltaj kaynağı

Detektörün yük birikimi için gerekli elektrik alanı oluşturmak üzere, (-) veya (+) 5000 V'a kadar gerilim sağlayan ünedir.

3.2.3. Ön yükselteç

Önyükselteç, detektörden gelen pulsları depolanan enerji ile orantılı olarak voltaj sinyaline dönüştürüp pulsları sekilendirir ve büyütür. Detektör ile elektronik devre arasında empedans uyumu sağlar. Önyükseltecin ilk devresi detektöre çok yakın yerleştirilmiş bir alan etki transistörü (FET)'tir. Hemen hemen bütün detektörler çok düşük genlikte pulslar ürettiklerinden ve uzun kablo kullanımı durumunda sinyal kapasitif yüklemeye gürültüsü arasında kaybolabileceğinden düşük gürültülü gerçek sinyalleri elde edebilmek için önyükselteçler detektöre çok kısa kablolarla bağlanırlar ve ön yükselticinin girişi detektörle aynı şekilde (sıvı azot sıcaklığında) soğutulur.

3.2.4. Ana yükselteç

Ön yükselteçten gelen pulsların, puls yüksekliği analizi yapılabilecek kadar yükseltilmesini ve en iyi enerji ayrılmasını sağlayacak sekilendirmeyi sağlar. Modern sistemler için maksimum çıkış pulsunun genliği 2 - 10V aralığında değişir. Yükselticilerin çoğunda unipolar çıkış (sinyalin pozitif veya negatif pik kısmı) ve bipolar çıkış (sinyalin hem pozitif hem de negatif pik kısmı) mevcuttur. En iyi sinyal - gürültü oranını elde etmek için, yükselticinin unipolar çıkışı seçilir. Bir spektrumdaki pikler için daha iyi çözünürlük genellikle puls genişliğini belirleyen daha uzun 'Shaping time' değeriyle elde edilebilir. Ancak daha uzun zaman sabitleri daha fazla rastgele toplanmaya neden olacağından optimum zaman sabiti kullanılabilir.

3.2.5. Analog-dijital çevirici (ADC)

Spektroskopi yükseltecinden gelen sinyalleri genlikleri ile orantılı olarak sayısal sisteme dönüştürür ve bu sayısal sinyallerin çok kanallı analizöre iletililerek orada piklerin genlikleri ile orantılı bir şekilde birikmesi sağlanır.

3.2.6. Çok kanallı analizör (MCA)

Çok kanallı analizörler, genellikle puls yüksekliği yapan cihazlardır, MCA'da en önemli devre veya bileşen, örneksel/sayısal dönüştürücüdür (analog to digital converter (ADC)). Burada, gelen her puls, sayısal hale çevrilir ve genliği ile orantılı olarak bir hafıza kanalına yerleştirilir. Her kanal belli bir enerjiye karşılık gelir ve sayım suresince gelen pulsların birikmesiyle pikler oluşur.

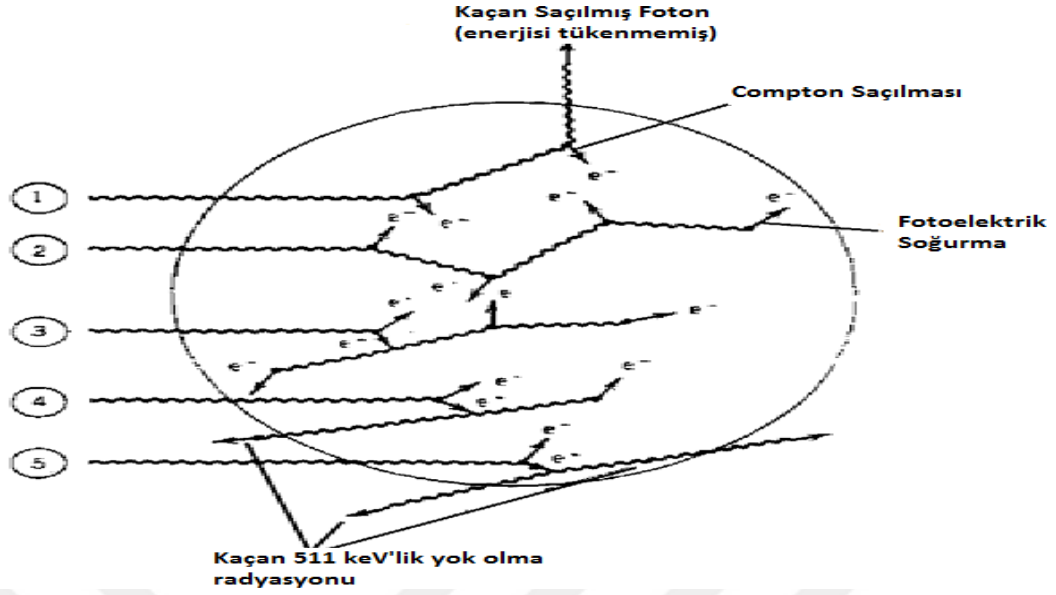
3.2.7. Yazılım

Analog dijital dönüştürücüden gelen verilerin bilgisayarda toplanıp derlenmesini sağlar. Yazılım detektörü üreten firma tarafından sistemle birlikte verilir. Mevcut detektörümüzde Ortec Firmasının lisanslı ürünü olan MAESTRO kullanılmaktadır. Ayrıca analiz işlemlerinde açık kod olan GF3 yazılımı da kullanılmaktadır (Radford 2010).

3.3. Gama Işını Spektroskopisi

Gama ışınlarının enerjileri tipik olarak 0,1 - 10 MeV arasında olup çekirdek durumları arasındaki enerji farkı mertebesinde ve bu 10^2 fm ile 10^4 fm dalga boyu aralığına karşılık gelir. Gama ışınları Şekil 3.5'te gösterilen elektromanyetik spektrumun en kısa dalga boylu ve en fazla enerjili olanlarıdır, kütleleri yoktur ve yüksüzdürler dolayısı ile elektrik ve manyetik alanda saptırılamazlar, yüksek enerjilerinden dolayı madde içerisinde yol alabilirler, ışık hızı ile yayılırlar ve gazları iyonlaştırıcı özellikleri vardır. Gama ışınları madde ile bir çok farklı yolla etkileşime girer. Bunlardan bazıları çift oluşum, fotoelektrik soğurma ve Compton saçılması biçimindedir. Şekil 3.5'te görüldüğü gibi meydana gelen olaylar sırasıyla;

- (1) Foton, birkaç kez Compton saçılması yapar ve enerjisinin tamamını kaybetmeden önce detektörü terk eder,
- (2) Pek çok Compton saçılmasından sonra fotoelektrik soğurma yapar ve enerjisinin tamamını kaybeder,
- (3) Çift oluşumu, pozitron yok olması, Compton saçılması ve fotoelektrik soğurma takip eder ve yine enerjinin tamamı aktarılır,
- (4) Yok olma fotonlarından biri detektörü terk eder ve γ ışınları 511 keV' lik enerjisinin tamamını kaybeder,
- (5) Yok olma fotonların her ikisi de detektörü terk ederken 1022 keV' lik enerjiyi detektör materyaline aktarır. (4 ve 5'deki işlemler sadece γ ışını enerjisinin 1022 keV'den fazla olduğu durumlarda meydana gelir.)

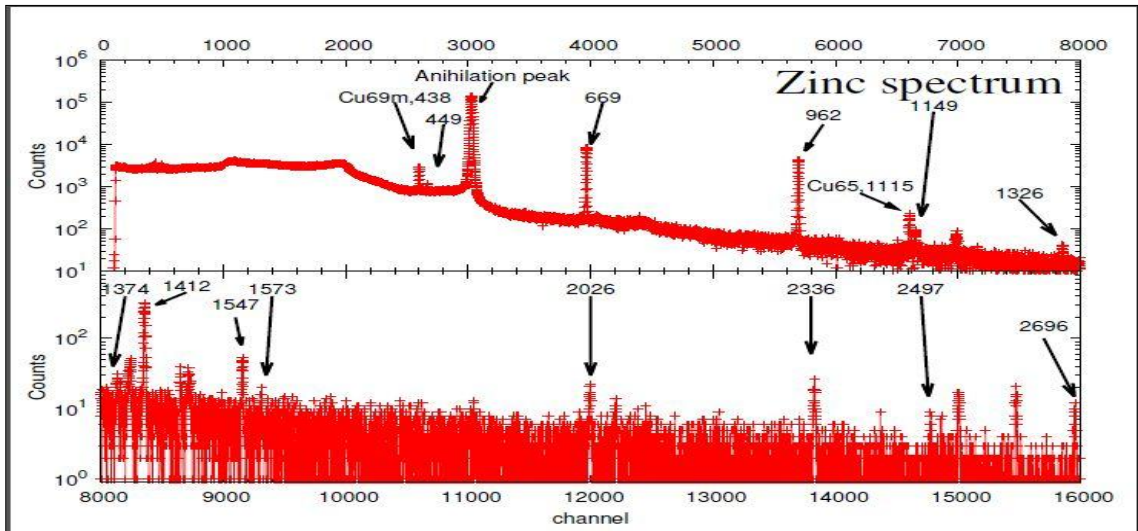


Şekil 3.5. Gama ışını ölçümünde meydana gelen olaylar (Krane 2001)

Gama ışınları detektör tarafından algılandıktan sonra analiz için kullanılan programlar ile gelen gama ışınının karakteristik özellikleri incelenir.

Bu aşamada analiz için gf3 analiz programı kullanılır. Bu programın tercih edilme sebebi, elimizde bulunan spektrum analizi için hassaslığının gayet uygun olmasıyla beraber üst üste binen pikleri birbirlerinde ayırt edebilme özelliğine sahip olmasıdır.

Şekil 3.6'da Akdeniz Üniversitesi Nükleer Bilimler Araştırma Merkezi'nde ürün incelemesi üzerine yapılmış olan bir çalışmanın gama spektroskopi sonucu görülmektedir.



Şekil 3.6. Gama spektroskopi analiz sonucu (Boztosun vd 2014)

3.4. Deney Süreci

Fotonükleer deney süreci önceki kısımlarda verilen materyaller ve materyal sistemlerinin birlikte kullanılmasıyla gerçekleştirilir.

3.4.1. Işınlama ve sayım

Bu çalışmada incelenen numune bağlı bolluklarına göre Tungsten çekirdeğinin birçok izotopunu içermektedir. Hedef çekirdeği ışınlayarak (γ,n) ve (γ,p) reaksiyonları sonucu gözlemlenmesi beklenen izotoplar şunlardır: ^{179}W ($Z=74$), ^{180}Ta ($Z=73$), ^{183}Ta ($Z=73$), ^{184}Ta ($Z=73$) ve ^{185}Ta ($Z=73$). Ürün çekirdeklerin fotonükleer yöntemi ile enerji seviyeleri ve yarı ömürlerinin belirlenmesi için çekirdekler, 18 MeV'lik Bremsstrahlung enerjisine sahip Medikal Lineer Hızlandırıcı ile belirli bir süre boyunca yüksek enerjili fotonlar ile ışınlanıp fotonükleer deney gerçekleştirildi. Kendi deney sistemimizde numunemiz toz olarak hazırlandı. Fotonükleer deney sürecinde hazırlanan numune 14.33 g ağırlığa sabit ve 11.25 g ağırlığında ki boş toz numune şişesine dolduruldu (Şekil 3.7). Deney için numunenin ağırlığının veya şeklinin hesaplamada kullanmak için değil, deney alanına yerleştirilen numunenin tamamının aktive olması için önemlidir çünkü yarı-ömür hesabında numune ağırlığının önemi yoktur ve iyi aktive olmuş bir örnek daha net bir spektrum elde etmemizi sağlamaktadır.



Şekil 3.7. Deney için hazırlanan W numunesi

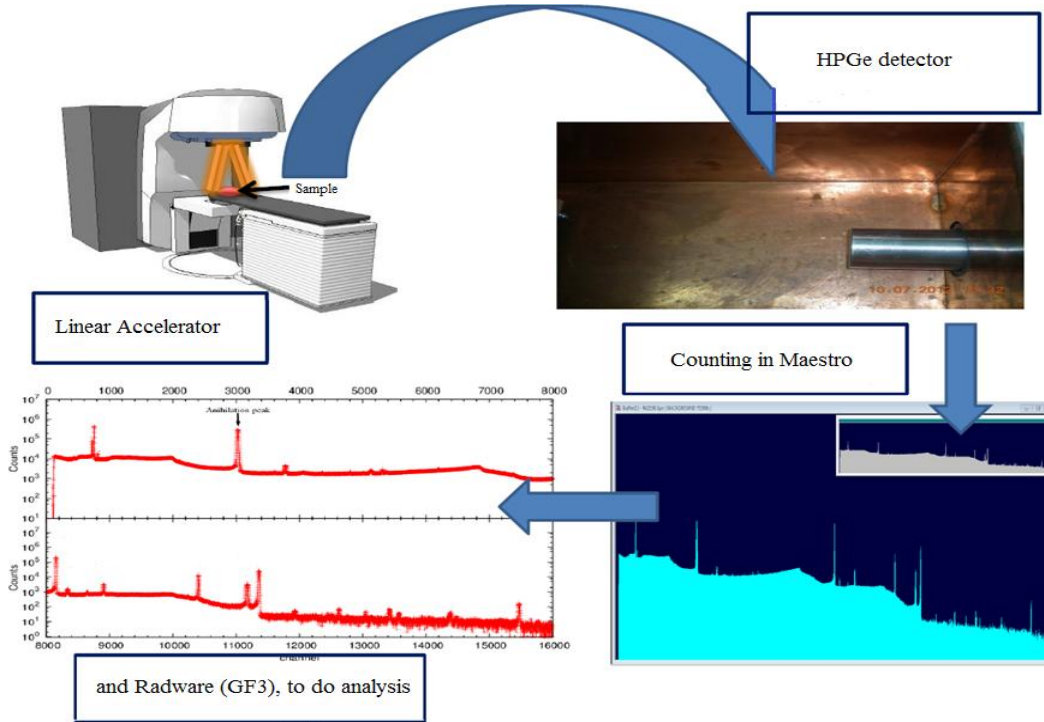
Bu süreçten sonra, ışınlanan hedeften çıkan x-ışınları, HPGe detektör sistemi aracılığıyla incelendi. Çalışmamızda aşağıda ki yöntem akışını gerçekleştirdik;

1. W çekirdeği deneye uygun hale getirilerek ölçümlerin hangi parametreler dahilinde alınması gerektiği tespit edildi. Ayrıca, numune deneye hazır hale getirildi.
2. Fotonükleer reaksiyon ile yapılabilen enerji seviye tespiti ve yarı ömür belirlenmesi deneyinde, örnek numune gerekli enerjili gama ışınları ile ışınlanarak bir nötron veya proton kopartılması sağlandı.
3. Bu deneyler için deney düzeneğinde, doğrusal hızlandırıcının ışınlama alanı 40X40 cm² alanında açıldı. Bunun sebebi kenar bölgelerde bulunan kurşun bloklardan gelmesi muhtemel nötron akısını en az düzeye indirerek ışınlanan çekirdeğin nötron yakalama sürecini girmesini engellemektir. Ancak nötron yakalama ihtimali yüksek çekirdekler de bu olaya engel olunamaktadır. Hedef numunemiz de nötron yakalama ihtimali yüksek bir çekirdektir ve biz elde ettiğimiz spektrumda bir çok enerji seviyesi için $^{186}\text{W}(n,\gamma)^{187}\text{W}$ reaksiyonunu analiz ettik.
4. Numuneler toz haline getirildi ve ışınlamanın yapılacağı doğrusal hızlandırıcı cihazda, ışınlama başlangıç bölgesinden 58 cm uzaklığa yerleştirildi (Şekil 3.8). Numunenin ince veya toz olarak tutulmasının nedeni, numune içinde ikincil ışınları en asgari düzeyde tutarak elde edilecek olan karakteristik piki en doğru şekilde belirlemektir. Çünkü; verimli bir karakteristik pik bizim daha hassas ve doğru sonuçlar almamızı sağlar. Her numune için ışınlama süresi ve ışınlama enerjisi belirlenerek numuneler gama ışınına maruz bırakıldı ve çekirdeklerden nötron kopması ve $\gamma + {}^A\text{X} \rightarrow {}^{A-1}\text{X} + n$ reaksiyonunun gerçekleşmesi sağlandı. Burada X çekirdek ve A kütle numarasıdır. Bu reaksiyon sonucu elde edilen ürün çekirdeği detektöre asgari düzeyde yakın bir şekilde yerleştirilerek, uyarılan çekirdeğin enerji geçişleri esnasında yayımladığı fotonlar sayılmaya başlandı ve karakteristik pikler elde edildi. Bu elde edilen pikleri belirleyen detektör kanal numarasının, belirli aralıklarla kaç foton yakaladığı incelenmedi ve elde edilen veriler doğrultusunda hesaplamalar yapılarak ürünün yarı ömrü belirlendi. Ayrıca bu elde edilen pik analiz edilerek enerji seviyelerinin belirlenmesi sağlandı.
5. Analiz için Linux tabanlı gf3 gama spektroskopi spektrum analiz programı kullanıldı. Bu programın kullanılmasının sebebi hassas olması ve iç içe geçen pikleri ayırt edebilmesidir (Radford 2010).



Şekil 3.8. Numunenin ışınlama alanına yerleştirilmesi

Genel olarak deney sürecinin şematik gösterimi Şekil 3.9'da gösterildiği gibidir.



Şekil 3.9. Fotonükleer deney şeması

3.4.2. Kalibrasyon ve enerji seviyeleri

Deneyel kurulumumuz offline bir yapıya sahiptir. Yani, detektörde ölçüm alma işlemi ile deneysel süreç aynı anda başlamamaktadır. Yukarıda verilen yöntem akışına ek olarak, bu çalışma için önce ve sonra olmak üzere iki ayrı kalibrasyon süreci gerçekleştirildi. İlk olarak deneyin başında detektörün kalibrasyonu yapıldı. Arkasından örneği ışınlama süreci başladı ve sonrasında ışınlanmış örneğin HPGe detektörde sayımı yapıldı. Örneğin sayımı bittikten sonra aynı sayım süreci arka plan radyasyonu için yapıldı. Deney sonunda detektör kalibrasyonu tekrar yapıldı. Burada not edilmelidir ki birden fazla deney paralel bir şekilde yapılabilmektedir. Fakat bunu kısıtlayan müsait sayıdaki detektör sayısıdır. Ters olarak online bir kurulum ile aynı anda çok sayıda deney yapılamaz çünkü buradaki kısıtlayıcı faktör radyasyon kaynağıdır. Deneyin gerçekleştirilmesinden önce ve gerçekleştirildikten sonra yapılan kullanılan standart kalibrasyon kaynakları olarak ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{54}Mn , ^{57}Co , ^{109}Cd ve ^{22}Na standartları kullanıldı (Şekil 3.10). Bu süreçte iki ayrı kalibrasyon yapılmasının nedeni, çeşitli kontrol edilemeyen etkiler nedeniyle kanallarda kaymalar yaşanabilmektedir (Nem, Sıcaklık, vb.).



Şekil 3.10. Önce ve sonra kalibrasyonu için kullanılan standart kaynaklar

Deney öncesi ve sonrası kalibrasyonu için enerji değerleri bilinen standartların ölçümleri ayrı ayrı alındı. Daha sonra her standart için spektrum analizi yapılarak sayım ve piklerin hangi kanalda olduğuna dair elde edilen veriler kaydedildi. Deney öncesi ve sonrasında yapılan bu işlemler neticesinde her referans pikin bulunduğu kanal için iki

farklı değer elde edildi. Elde edilen bu değerlerin aritmetik ortalamasını alarak ortalama bir değere sahip olduk. Referans olarak belirlenen piklerin her birisi için yapılan bu işlemler dizininin sonra elde edilen değerler, $ax^3 + bx^2 + cx + d$ formundaki üçüncü dereceden fonksiyon ile fit edildi. Fit işlemi CERN’de geliştirilen ve kullanılan ROOT adlı program kullanılarak yapıldı. Bu yapılan işlem bize deney öncesi ve sonrası için farklı a, b, c ve d katsayıları verdi. Bu katsayılar kalibrasyon sabitleridir. Burada amaç piklerin denk geldiği kanal numaralarını en hassas şekilde elde etmek ve her iki kalibrasyon sürecinden yola çıkarak ortalama bir centroid değeri elde etmektedir.

Aynı spektrum analizi GF3 gama analiz yazılımı kullanılarak W çekirdeği için kaydedilen son spektrum görüntüsü için de tekrarlandı.

Çalışılan tungsten çekirdeğinin enerji spektrumundan elde edilen kanal numaralarının, ortalama kanal numarasının (Denk 3.2) fit edilmesi sonucu ortaya çıkan kalibrasyon sabitleri a, b, c ve d katsayıları ile üçüncü dereceden polinomda kullanılarak,

$$ax^3 + bx^2 + cx + d \quad (3.1)$$

denkleminde yerine yazıldı ve böylece enerji seviyelerinin keV cinsinden değerlerine ulaşıldı.

$$\bar{C} = \frac{C_{\text{ön}} + C_{\text{son}}}{2} \quad (3.2)$$

3.4.3. Yarı ömür hesabı

Fotonükleer deneysel sürecin bitiminden sonra başlayan süreçlerden en önemlilerinden birisi de detektördeki sayım sürecidir. Işınlanan çekirdeğin görülmesi en olası izotopların yarı ömür sürelerine göre belirlenen bu sayım süreci bizim deneyimiz için 3 gün boyunca devam etti. Bunun nedeni, iyi bir yarı ömür hesabı için ölçülen izotopların detektörde ki sayım süresi esnasında en az 6-7 kez yarılanması gerekmektedir. Ancak kısıtlı imkânlar ile yapılan bu deneysel çalışmalar da 3 günlük bir süre de yaklaşık yarı ömür hesapları için yetmektedir.

Yarı ömür hesaplanması için izlenen süreç enerji hesabından biraz daha farklılık göstermektedir. Spektrum içerisinde oluşan karakteristik piklerin analizleri için o pikin belli aralıklarla sayım sayılarında ki değişikliği görmek gerekliydi. Bunun için sayım başlamadan önce detektör yazılımına bir iş dosyası tanımlandı (Şekil 3.11).

```
CLEAR
START
LOOP 1
WAIT 1
SAVE "C:\User\photonuclear_exp\Tungsten\count\Tu1test.SPE"
END_LOOP

CLEAR
START
LOOP 200
WAIT 9
SAVE "C:\User\photonuclear_exp\Tungsten\count\Tu1???.SPE"
END_LOOP

LOOP 200
WAIT 90
SAVE "C:\User\photonuclear_exp\Tungsten\count\Tu2???.SPE"
END_LOOP

LOOP 200
WAIT 900
SAVE "C:\User\photonuclear_exp\Tungsten\count\Tu3???.SPE"
END_LOOP

LOOP 8
WAIT 8775
SAVE "C:\User\photonuclear_exp\Tungsten\count\Tu4???.SPE"
END_LOOP
```

Şekil 3.11. Hazırlanan komut dosyasının bir örneği

Hazırlanan bu dosyaya göre spektrum 4 ayrı döngü içerisinde kaydedilmiştir. Bu döngüler sırasıyla; 9,90,900 ve 8775 saniye aralıklar ile 200'er spektrum kaydı alınmasını sağlamıştır.

Hazırlanan komut dosyası her çekirdek reaksiyonu için farklı biçimde oluşturulur. Bu iş dosyasının ne kadar aralıklarla alınan spektrumları kaydetmesi gerektiği, görülmesi beklenen reaksiyonlar sonucu oluşacak izotopların literatürdeki yarı ömürleri göz önüne alınarak belirlenmektedir. Sayım sonrasında kaydedilen tüm spektrum dosyaları kendi yazdığımız programlar sayesinde kayıt aralıklarına göre sınıflandırıldı ve beş ayrı bölüme ayrıldı (Şekil 3.12).


```
# ! /bin/bash
rm gfinit.cmd
rm gf3.sto
cp time_temp1.dat time.dat
gfortran gf3read.f -o gf3read
echo "log
ds0
ec
y
-0.812346 0.192419" >> gfinit.cmd

for((k=1;k<=112;k=k+1));
do
echo "sp ASC1Tu$k.spe
ft 1
676
724
699
r
8
std
0.25
hta
4

sa 1
sa -1" >> gfinit.cmd
done
```

Şekil 3.12. Otomatik analiz için hazırlanan programın bir örneği

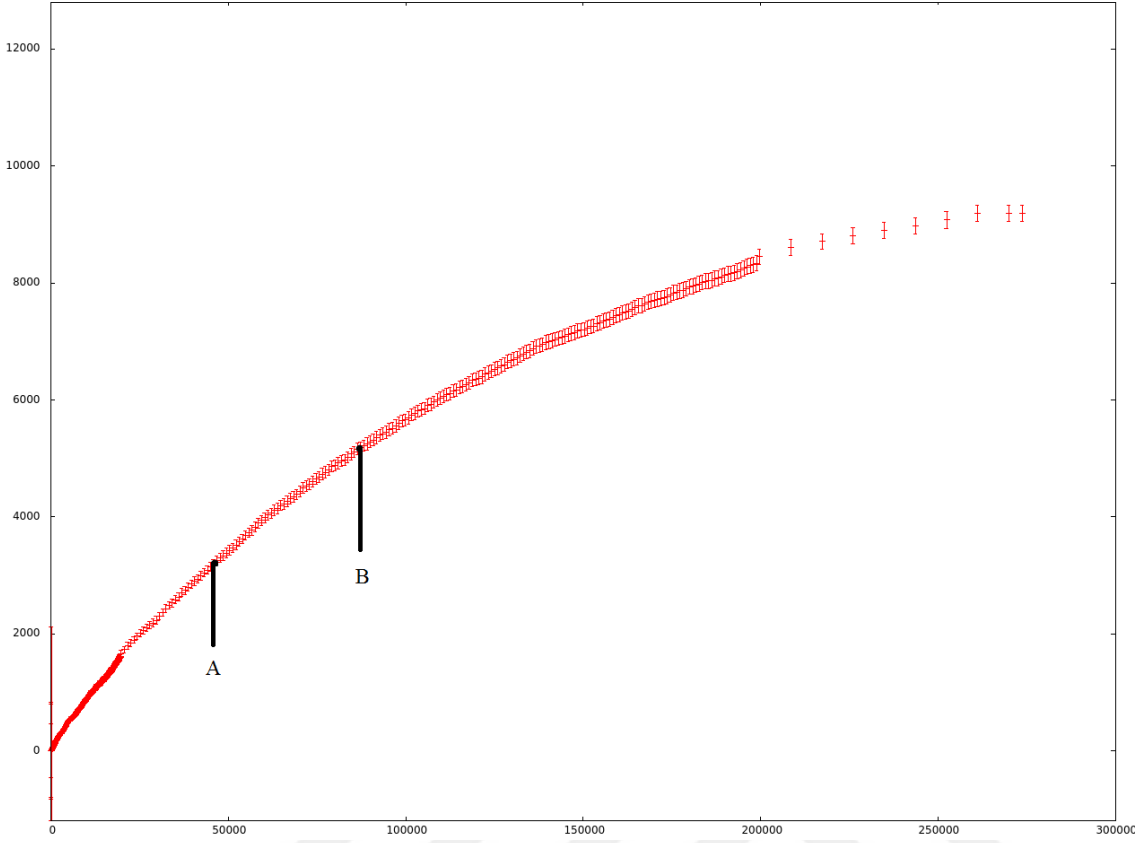
Daha sonra, yazılan bir script dosya yardımıyla her birisi kendi içinde analiz edilerek yarı ömrünü hesaplamak istediğimiz enerjiler için zamanla değişen sayım sayıları elde edildi (Şekil 3.12).

94	98	5186.74850000	1.55850000	49.00000000	13.00000000	875.92030000	0.26370000	123.00000000	128.0000
152	158	5186.74850000	1.32010000	69.00000000	16.00000000	875.92050000	0.22320000	180.50000000	187.5000
209	217	5187.20650000	1.40900000	70.00000000	18.00000000	875.99770000	0.23820000	238.50000000	247.5000
268	276	5187.05620000	1.21980000	89.00000000	19.00000000	875.97230000	0.20620000	297.00000000	307.5000
326	337	5187.91460000	1.18270000	116.00000000	23.00000000	876.11740000	0.20000000	355.00000000	367.0000
384	397	5187.86210000	1.13870000	123.00000000	24.00000000	876.11360000	0.19250000	413.00000000	427.0000
442	457	5187.43950000	1.14620000	134.00000000	27.00000000	876.03710000	0.19380000	471.50000000	487.0000
501	517	5187.87840000	1.17460000	138.00000000	28.00000000	876.11130000	0.19860000	530.50000000	547.0000
560	577	5187.58030000	1.02390000	138.00000000	26.00000000	876.06260000	0.17480000	589.00000000	607.0000
618	637	5187.29200000	0.79770000	128.00000000	21.00000000	876.01210000	0.13490000	647.50000000	667.0000
677	697	5187.31300000	0.84070000	132.00000000	23.00000000	876.01570000	0.14210000	706.50000000	727.0000
736	757	5187.54250000	0.92010000	161.00000000	27.00000000	876.05450000	0.15560000	765.50000000	787.0000
795	817	5187.35300000	0.90750000	168.00000000	28.00000000	876.02250000	0.15340000	824.50000000	847.0000
854	877	5187.19630000	0.91610000	169.00000000	28.00000000	875.99600000	0.15490000	883.50000000	907.0000
913	937	5187.04540000	0.92780000	173.00000000	29.00000000	875.97050000	0.15690000	942.50000000	967.0000
972	997	5186.91060000	0.83270000	166.00000000	27.00000000	875.94770000	0.14980000	1001.50000000	1027.0000
1031	1057	5187.00680000	0.87990000	178.00000000	29.00000000	875.96400000	0.14880000	1061.00000000	1087.0000
1091	1117	5187.00590000	0.78810000	176.00000000	27.00000000	875.96380000	0.13320000	1120.50000000	1147.0000
1150	1177	5187.00980000	0.79990000	198.00000000	29.00000000	875.96450000	0.13520000	1179.50000000	1207.0000
1209	1237	5186.92040000	0.77250000	187.00000000	28.00000000	875.94930000	0.13060000	1239.00000000	1267.0000
1269	1297	5186.97070000	0.72990000	189.00000000	27.00000000	875.97900000	0.12340000	1298.50000000	1327.0000
1328	1357	5186.76220000	0.67230000	185.00000000	26.00000000	875.92260000	0.11370000	1358.00000000	1387.0000
1388	1417	5186.71530000	0.70960000	192.00000000	27.00000000	875.91470000	0.12000000	1417.50000000	1447.0000
1447	1477	5186.93700000	0.75110000	213.00000000	30.00000000	875.95210000	0.12700000	1477.00000000	1507.0000
1507	1537	5186.83500000	0.75830000	220.00000000	31.00000000	875.93490000	0.12820000	1536.50000000	1567.0000
1566	1597	5186.74270000	0.72500000	223.00000000	30.00000000	875.91930000	0.12600000	1596.00000000	1627.0000
1626	1657	5186.58400000	0.67770000	207.00000000	28.00000000	875.89250000	0.11460000	1656.00000000	1687.0000
1686	1717	5186.46920000	0.61740000	195.00000000	26.00000000	875.87310000	0.10440000	1715.50000000	1747.0000
1745	1777	5186.34670000	0.62740000	209.00000000	27.00000000	875.85240000	0.10610000	1774.50000000	1806.5000
1804	1836	5186.47750000	0.65530000	217.00000000	28.00000000	875.87450000	0.11080000	1834.00000000	1866.0000
1864	1896	5186.49170000	0.63750000	215.00000000	28.00000000	875.87690000	0.10780000	1893.50000000	1926.0000
1923	1956	5186.53220000	0.64570000	220.00000000	28.00000000	875.88370000	0.10820000	1952.50000000	1985.5000
1982	2015	5186.49800000	0.62330000	214.00000000	28.00000000	875.87790000	0.10540000	2012.00000000	2045.0000
2042	2075	5186.49020000	0.62350000	222.00000000	28.00000000	875.87660000	0.10540000	2071.50000000	2104.5000
2101	2134	5186.42820000	0.63040000	229.00000000	29.00000000	875.89651000	0.10660000	2131.00000000	2164.0000
2161	2194	5186.43210000	0.60660000	220.00000000	28.00000000	875.86680000	0.10260000	2190.50000000	2224.0000
2220	2254	5186.41210000	0.58900000	221.00000000	28.00000000	875.86340000	0.10130000	2250.00000000	2283.5000
2280	2313	5186.46680000	0.59440000	221.00000000	28.00000000	875.87270000	0.10050000	2309.50000000	2343.0000
2339	2373	5186.35250000	0.58240000	222.00000000	27.00000000	875.85330000	0.09850000	2369.00000000	2403.0000
2399	2433	5186.30420000	0.58660000	225.00000000	28.00000000	875.84520000	0.09920000	2429.00000000	2463.0000
2459	2493	5186.26880000	0.58830000	225.00000000	28.00000000	875.83920000	0.09950000	2489.00000000	2523.0000
2519	2553	5186.28170000	0.59400000	233.00000000	28.00000000	875.84140000	0.10040000	2548.50000000	2583.0000
2578	2613	5186.23190000	0.60360000	238.00000000	29.00000000	875.83290000	0.10200000	2608.00000000	2643.0000
2638	2673	5186.28260000	0.59670000	238.00000000	29.00000000	875.82880000	0.10090000	2668.00000000	2703.0000
2698	2733	5186.27590000	0.59790000	241.00000000	29.00000000	875.84040000	0.10110000	2728.00000000	2763.0000

Şekil 3.13. Zaman içinde sayım sayısında ki değişmeyi gösteren çıktı dosyası

Her pik farklı bir enerji seviyesini gösterdiği için elde edilen çıktı dosyaları her pik için farklıdır. Ancak aynı izotopun enerji seviyeleri için yarı ömür değerlerinin teorik olarak aynı olması gerekmektedir.

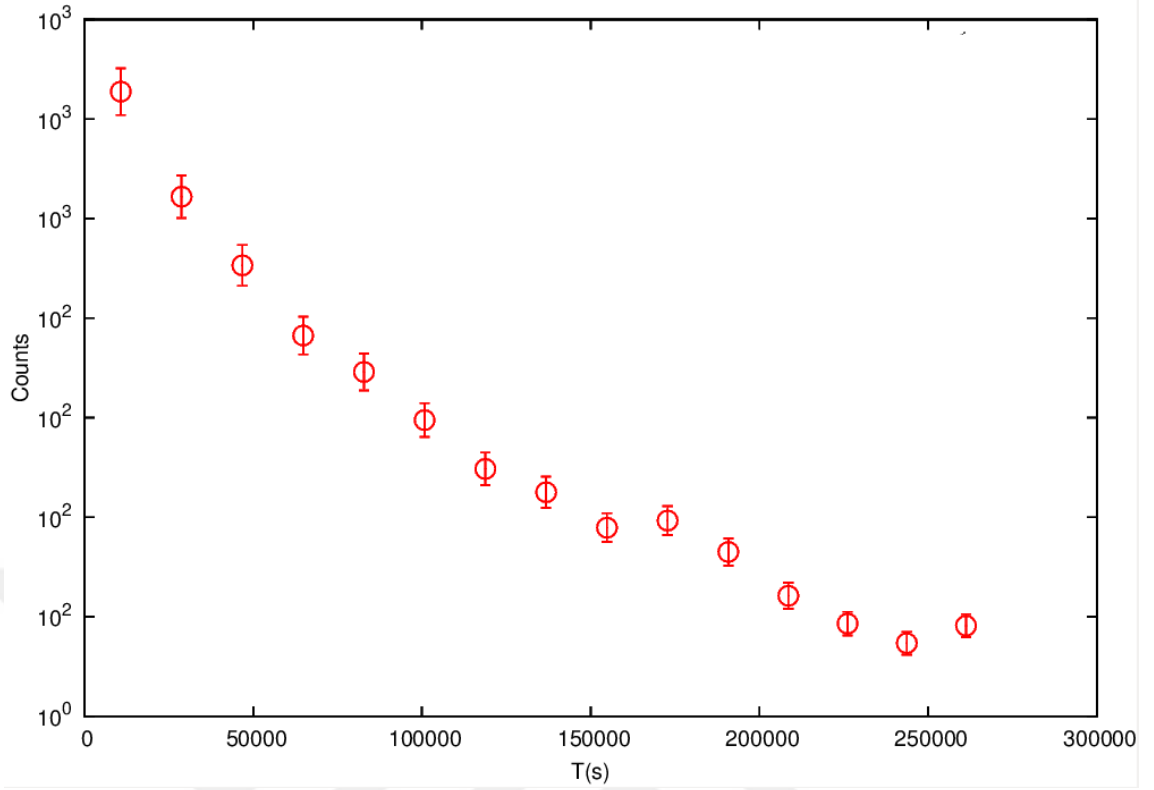
Ayrıca burada dikkat edilmesi gereken önemli hususlardan bir tanesi; hazırlanan komut dosyasından anlaşılacağı gibi detektördeki spektrum kaydı temizlenerek değil üst üste yapılmaktadır. Yani, kaydedilen ikinci spektrum içerisinde birinci spektrumun sayım verileri bulunmaktadır ki bu da bize Şekil 3.14'deki gibi bir çıktı verecektir.



Şekil 3.13. Spektrum dosyalarından alınan sayım sayısı-zaman grafiği

Yukarıda ki grafikten görüldüğü gibi bir verinin yarı ömrünün hesaplanması yanlış sonuç verecektir çünkü; A ve B noktalarındaki sayımlar göz önüne alındığında, B noktasında alınan sayım sayısına A noktasında ki sayım sayısından gelen katkının ne kadarlık bir korelasyon getirdiği bilinilememektedir. Eğer bu eksik veri ile işlem yapmaya çalışılırsa, yapılan analizlerin de doğruluğu hakkında bilgi sahibi olmak oldukça zorlaşır.

Bu bilinmezliklerin ortadan kaldırılması için yazılan programlar yardımıyla sayım sayılarının bir birlerinden çıkarılmaları sağlandı ve tam olarak sayım sayısı-zaman grafiğinin üstel olarak azalarak, net sonuçlar elde etmemiz sağlandı (Şekil 3.15).



Şekil 3.15. Sayım sayılarının birbirinden çıkarılması sonucu elde edilen yarı ömür grafiği

Detektördeki sayım sürecinden sonra elde edilen spektrumda ki piklerin altında kalan alan bize sayım sayısını vermektedir. Sayım süreci boyunca elde edilen toplam sayımdan bir önceki sayım sayılarının çıkarılarak elde edilen grafiğin bilinen yarı ömür fonksiyonu;

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t} \quad (3.3)$$

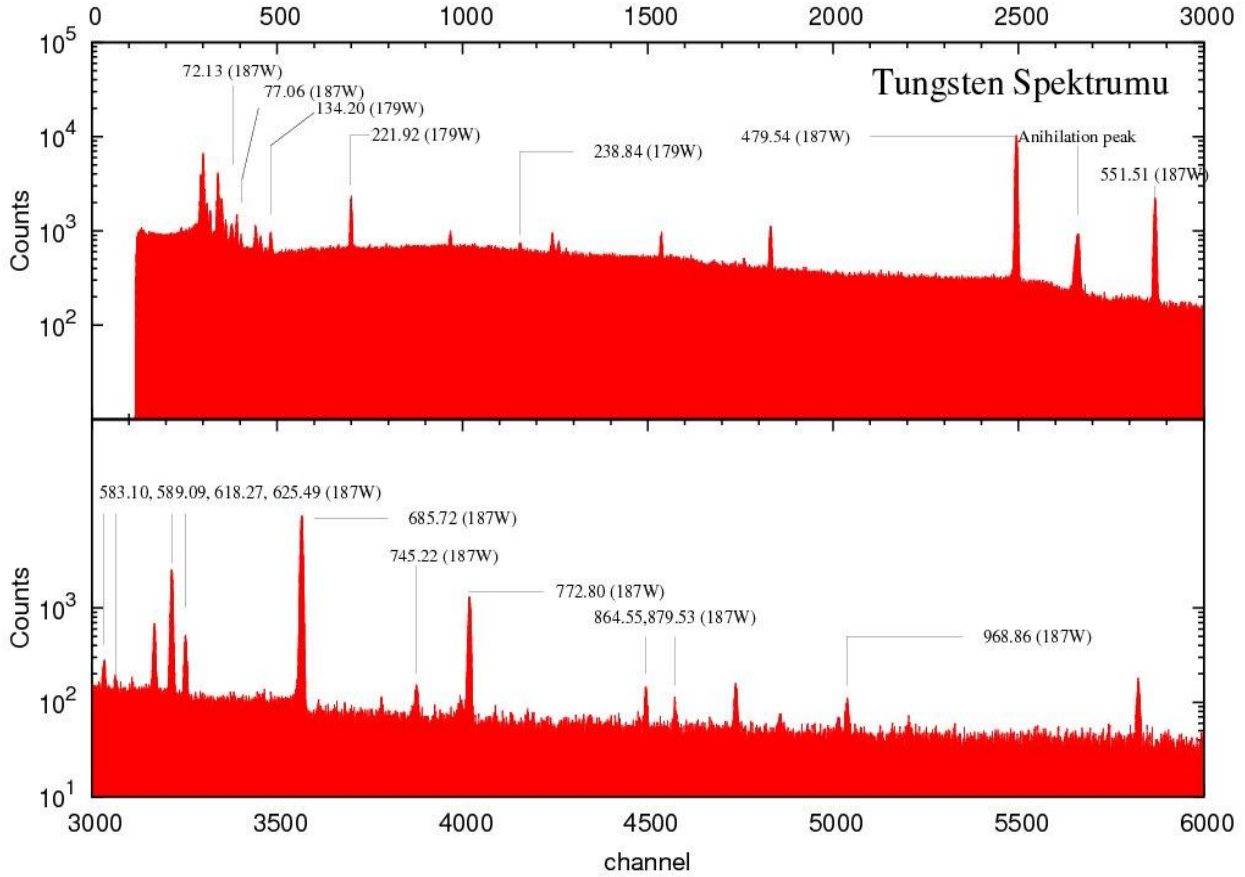
ile edilir. Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında da hazırlanan programlar la toplanan sayım sayıları birbirlerinden çıkarılmış ve bu fonksiyonla fit edilmiştir. Yarı ömür hesabı yapabilmek için ROOT için yazılmış fit programı kullanılmıştır.

Fonksiyonun fit edilmesiyle beraber A_0 ve λ değerleri elde edildi ve λ değerinden yola çıkarak yarı ömür değerleri elde edilmiş oldu.

4. BULGULAR

4.1. Tungsten Çekirdeğinin Enerji Spektrumu

Tungsten çekirdeği izotoplarının enerji seviyeleri ve yarı ömürlerinin hesaplamak ve literatüre göre daha hassas sonuçlar elde edilmesi için gerçekleştirilen bu tez çalışmasında izlenen yöntem sıralaması sonucunda elde edilen enerji spektrumu Şekil 4.1’de verildiği gibidir.



Şekil 4.1. Tungsten çekirdeğinin enerji spektrumu

Yukarıdaki enerji spektrumunun gösterimi arka plan ile birlikte gösterimdir. Arka planı çıkarıp spektrumu analiz etmekle elde edilen sonuçlar ile bu şekilde ki bir spektrumun analizi ile elde edilen sonuçlar arasında hiçbir fark olmayacaktır çünkü analiz sırasında kullanılan program arka plan çıkarımını otomatik olarak yapmaktadır.

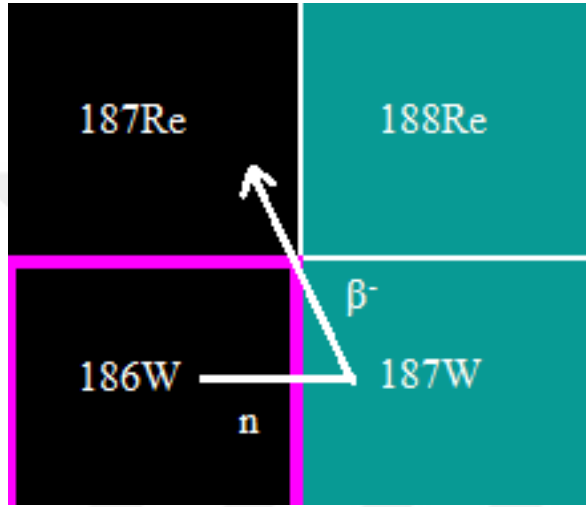
Elde edilen enerji spektrumunun analizi ile 12 enerji geçişi değeri saptandı ve literatür araştırmaları sonucunda saptanan enerji değerlerinin tungstenin iki farklı radyoaktif izotopuna ait olduğu anlaşıldı. Bunlar;

- $^{180}\text{W}(\gamma, n)^{179}\text{W}$ reaksiyonu sonucu oluşan ^{179}W ,
- $^{180}\text{W}(n, \gamma)^{181}\text{W}$ reaksiyonu sonucu oluşan ^{181}W

İzotoplarıdır (Wu ve Niu 2003, Baglin 2003). Bu spektrumda, beklenen reaksiyonlardan proton koparılmasının görülmemesinin sebepleri, proton koptuğunda oluşan çekirdeklerin çoğunun yarı ömrünün ışınlamanın bitmesi ve ölçümün başlama zamanının arasında kalması ve ölçüm için gereken yarı ömre sahip çekirdeklerin de uzun süreli sayımdan dolayı arka plan (background) içinde kaybolmuş olmasıdır.

4.1.1. $^{180}\text{W}(n,\gamma)^{181}\text{W}$ reaksiyonu

$^{180}\text{W}(n,\gamma)^{181}\text{W}$ için görülen çekirdek reaksiyonu Şekil 4.2'de gösterildiği gibi oluşmuştur.



Şekil 4.2. ^{186}W izotopunun nötron yakalama reaksiyonu

Yüksek nötron yakalama olasılığına sahip olan ^{186}W izotopu oluşturulan enerji spektrumunda ana çekirdek olarak baskın bir şekilde görülmüştür. ^{186}W izotopu nötron yakalayarak uyarılmış durumda olan ^{187}W radyoaktif izotopuna dönüşmektedir. Oluşan radyoaktif izotop β^- bozunumu gerçekleştirerek ^{187}Re kararlı izotopa dönüşmüştür (Basunia 2009).

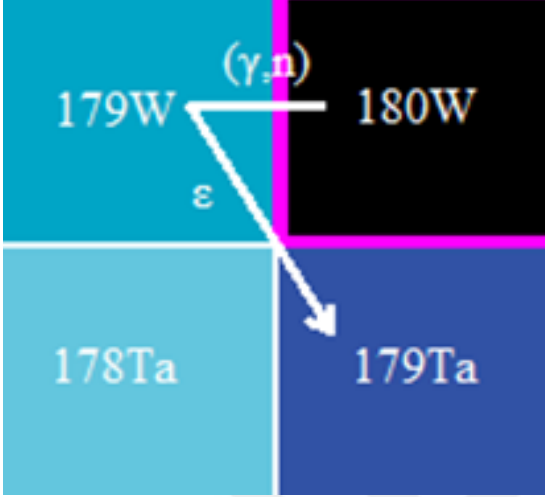
Bu reaksiyon geçişleri fiziksel olarak aşağıda ki gibi ifade edilmektedir.



Oluşan çekirdek reaksiyonları sonucunda oluşan fotonükleer reaksiyonun son ürünü olarak kararlı ^{187}Re izotopu elde edilmiştir (Yamada vd 1979, Brenner vd 1976, Reidy vd 1966).

4.1.2. $^{180}\text{W}(\gamma, n)^{179}\text{W}$ reaksiyonu

$^{180}\text{W}(\gamma, n)^{179}\text{W}$ için görülen çekirdek reaksiyonu Şekil 4.3’de gösterildiği gibi oluşmuştur.



Şekil 4.3. ^{180}W izotopunun gama ile etkileşmesi sonucu nötron koparıma reaksiyonu

Gerçekleşen fotonükleer reaksiyon neticesinde kararlı bir yapıya sahip olan ^{180}W izotopu gönderilen bremsstrahlung fotonu ile etkileşmesi sonucunda bir nötron kaybederek radyoaktif olan ^{179}W izotopuna dönüştürülmüştür. Uyarılmış durumda olan ^{179}W izotopu tekrardan kararlı hale gelmek için bozunum yapmış ve enerji geçişlerine spektrumda 3 farklı nokta da rastlanmıştır. Kararlı hale gelmek isteyen bu izotop pozitron yayımlayarak ^{179}Ta yüksek yarı tantal izotopuna dönüşmüştür (Bağlin 2009).

Bu geçişler fiziksel olarak aşağıda ki gibi ifade edilmektedir.



Oluşan reaksiyonlar sonucunda son ürün olarak 1.82 yıllık yarı ömre sahip olan ^{179}Ta elde edilmiştir (Konijn vd 1969, Harmatz vd 1968, Birattari vd 1969).

4.2. Kalibrasyon Verileri

Materyal ve metot kısmında kalibrasyon denkleminde ve aşamalarından bahsedilmiştir. Deney öncesi standart kaynakları kullanılarak alınan 8 farklı spektrum dosyası ve deney sonrası yine aynı kaynaklar kullanılan spektrum dosyalarında aynı standarda ait piklerin farklı kanallara düştüğü gözlenmiştir. Önce ve sonra kalibrasyon değerleri için elde edilen parametreler Çizelge 4.1’de gösterildiği gibidir.

Çizelge 4.1. Kalibrasyon sonucu elde edilen parametreler

Parametre	Kalibrasyon Sonucu Elde Edilen Parametreler
a ₀	-0.385755 ± 0.00726617
a ₁	0.192352 ± 1.01129e-05
a ₂	1.16849e-08 ± 2.20695e-09
a ₃	-3.42588e-13 ± 1.2211e-13
Cor _{0,1}	-0.947011
Cor _{0,2}	0.915416
Cor _{0,3}	-0.874462
Cor _{1,2}	-0.988172
Cor _{1,3}	0.954185
Cor _{2,2}	-0.986454
Cor _{3,3}	-0.986454

Burada a₀, a₁, a₂, a₃ parametreleri sırasıyla d, c, b ve a parametrelerinin göstermektedir.

Kalibrasyon için lineer, kübik ve üçüncü dereceden fonksiyonların fit işlemi de uygulanmıştır. Ancak, kübik, lineer ve ikinci dereceden fonksiyonlar içerisinde en iyi sonuçları veren fonksiyon ikinci dereceden fonksiyon olduğu için kalibrasyon işleminde o fonksiyon kullanılmıştır.

4.3. Enerji Değerleri

Bilinen standartların kullanımı ile yapılan kalibrasyon işlemi sonucu bulunan parametreler Denklem 3.1 ve Denklem 3.2’de olduğu gibi kullanılarak enerji değeri elde edilmiştir. Literatür sonuçlarıyla elde edilen sonuçların tam karşılaştırılması için hata oranları da bilinmelidir. Hata hesabının tam olarak yapılması için detektörde ki sayım esnasında oluşan kanal kaymalarından başlayarak piklerin bulunduğu kanalın analizinde ki hata oranlarına kadar bütün parametrelerin kullanılması gerekmektedir. Sayım önce ve sonrasında ki kalibrasyon amacı hata hesabının ilk kısmını vermektedir. Analiz sırasında ki hata ise gf3 gama spektroskopisi programı ile elde edildi.

Fit parametrelerinin oluşturulması sırasında ki hata oranları da enerji değerleri ve hata oranlarının hesaplanmasında kullanılmıştır. Çizelge 4.1’de parametre hataları da verilmiştir. Fit parametrelerinin hataları σ_i ile ifade edildi. Aşağıda ki formül çekirdeğin hatalarını kanalının belirlenmesinde ki hatanın yanı sıra deney önce ve sonrası kalibrasyondan gelen kovaryans veya korelasyon matrisleri ve kalibrasyon sabitlerinin hatalarını da içermekte olan hata yayılım formülüdür.

$$\begin{aligned} \sigma_E^2 &= \sum_i^n \left(\frac{\partial E}{\partial a_i} \right)^2 \sigma_{a_i}^2 + \sum_i^n \sum_{j>i}^n \left(\frac{\partial E}{\partial a_i} \right) \left(\frac{\partial E}{\partial a_j} \right) \text{cov}_{ij} + \left(\frac{\partial E}{\partial \text{ch}} \right)^2 \sigma_{\text{ch}}^2 \\ &= \sum_i^n \left(\frac{\partial E}{\partial a_i} \right)^2 \sigma_{a_i}^2 + \sum_i^n \sum_{j>i}^n \left(\frac{\partial E}{\partial a_i} \right) \left(\frac{\partial E}{\partial a_j} \right) \text{cor}_{ij} \sigma_i \sigma_j + \left(\frac{\partial E}{\partial \text{ch}} \right)^2 \sigma_{\text{ch}}^2 \quad (4.5) \end{aligned}$$

Yukarıda ki hata formülü bize iki seçenek sunmuştur. Kalibrasyon sonucunda elde edilen korelasyon veya kovaryans matris elemanlarında herhangi biri kullanılarak enerji için hata elde edilmiştir. Burada önemli olan noktalardan birisi, piklerin kanal numaralarının da hatasının gf3 programı tarafından bize verilmesidir. Buna ek olarak, ortalama kanal numarasını belirledikten sonra onun hatasının da elde edilmesi gerekmektedir. Bunlar önce ve sonra spektrumlarının analizi sonucu elde edilen kanal numarası değerlerinin hata değerleri olarak Denklem 4.5 ile hesaplanmıştır. Hesaplanan hata oranları kullanılarak genel hata ise aşağıda verilen denklem 4.6 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\sigma_C^2 = \frac{n_1 \sigma_{C_{\text{ön}}}^2 + n_2 \sigma_{C_{\text{son}}}^2}{n_1 + n_2} + \frac{n_1 (C_{\text{ön}} - \bar{C})^2 + n_2 (C_{\text{son}} - \bar{C})^2}{n_1 + n_2} \quad (4.6)$$

Burada \bar{C} değeri, Denklem 3.2 kullanılarak elde edilen ortalama kanal numarasıdır. n_1 ve n_2 değerleri ise örneklerin boyutudur. Bizim kullandığımız sistemde bu iki parametre de n değerine eşittir çünkü bizim durumumuzda örnekler arasında fark bulunmamaktadır. Böylece denklem bizim yapmış olduğumuz hesaplamalarda,

$$\sigma_C^2 = \frac{\sigma_{C_{\text{ön}}}^2 + \sigma_{C_{\text{son}}}^2}{2} + \frac{(C_{\text{ön}} - \bar{C})^2 + (C_{\text{son}} - \bar{C})^2}{2} \quad (4.7)$$

formuna dönüşmüştür.

Denklem 4.7'ye ek olarak hata formülünün ilk kısmı ve ikinci kısmı daha önceden bahsettiğimiz hatalardan oluşmaktadır. Burada ilk kısım istatistiksel olarak gelen hatalardan oluşmuştur. Formülün ikinci kısmı da sistemsel olarak gelen hataların ifadesi olmuştur.

$$\sigma_{\text{ist}}^2 = \frac{\sigma_{C_{\text{ön}}}^2 + \sigma_{C_{\text{son}}}^2}{2} \quad (4.8)$$

$$\sigma_{\text{sis}}^2 = \frac{(C_{\text{ön}} - \bar{C})^2 + (C_{\text{son}} - \bar{C})^2}{2} \quad (4.9)$$

İstatistiksel hatalar pik pozisyonunu belirleme sırasında detektörün kendi kalibrasyonu ile alakalı olarak gelen hatadır. Sistem hatası ise detektörde 3 gün süren sayım sırasında pozisyonun kaynaklanmasından gelen hatadır. Genel olarak, Güçlü görülen pikler için istatistiksel hata sistem hatasına göre daha baskındır. Ancak, normal veya zayıf pikler için her ikisinden de enerji seviyesinde ki hataya yaklaşık olarak aynı katkı gelir.

Yapılan deney öncesi ve sonrası kalibrasyonu sonucu elde edilen enerji değerleri ve tüm hata değerlerini içerisinde bulunduran bulgular Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Deney öncesi ve sonrası kalibrasyon değerleri kullanılarak elde edilen enerjiler ve hata oranları

$C_{\text{ön}}$	$\sigma_{C_{\text{ön}}}$	C_{son}	$\sigma_{C_{\text{son}}}$	\bar{C}	σ_{ist}	σ_{sis}	σ_E
277.32	0.07	277.62	0.05	277.47	0.06	0.15	0.16
1576.41	0.01	1576.31	0.01	1576.36	0.01	0.05	0.05
1852.77	0.01	1852.61	0.01	1852.69	0.01	0.08	0.08
1997.33	0.02	1997.23	0.01	1997.28	0.01	0.05	0.05
459.44	0.02	459.35	0.02	459.39	0.02	0.05	0.05
636.52	0.01	636.55	0.01	636.54	0.01	0.01	0.01
711.54	0.03	711.51	0.03	711.52	0.03	0.01	0.03
3441.00	0.01	3441.28	0.01	3441.14	0.01	0.14	0.14
4341.12	0.02	4341.04	0.02	4341.08	0.02	0.04	0.05
6099.69	0.01	6099.44	0.01	6099.56	0.01	0.12	0.13
6927.10	0.02	6927.06	0.01	6927.08	0.02	0.02	0.02
6625.97	0.02	6625.61	0.02	6625.79	0.02	0.18	0.18
1536.78	0.03	1536.66	0.03	1536.72	0.03	0.06	0.07
1831.56	0.02	1831.47	0.02	1831.52	0.02	0.04	0.05
3169.32	0.03	3169.02	0.03	3169.17	0.03	0.15	0.15
5824.47	0.08	5824.44	0.09	5824.45	0.08	0.01	0.08

Çizelge 4.3. Deney analizi sonucu elde edilen enerji geçişlerinin, literatürdeki enerji değerleri ile karşılaştırılması

Çekirdek	E_{NUDAT} (keV)	σ_{NUDAT}	E (keV)	σ_E	Δ	D	Δ/D
^{179}W	221.5	0.2	221.92	0.06	0.42	0.21	2.01
^{179}W	238.7	0.3	238.84	0.03	0.14	0.30	0.47
^{187}W	134.247	0.007	134.20	0.01	0.05	0.01	3.71
^{187}W	479.53	0.01	479.54	0.02	0.01	0.02	0.60
^{187}W	551.55	0.01	551.52	0.03	0.03	0.03	1.05
^{187}W	589.06	0.05	589.10	0.09	0.04	0.11	0.38
^{187}W	618.37	0.01	618.28	0.03	0.09	0.03	2.99
^{187}W	625.52	0.01	625.50	0.03	0.02	0.03	0.63
^{187}W	685.81	0.01	685.74	0.03	0.07	0.03	2.18
^{187}W	745.21	0.02	745.23	0.06	0.02	0.07	0.36
^{187}W	772.87	0.02	772.82	0.04	0.05	0.04	1.28
^{187}W	879.44	0.05	879.56	0.08	0.12	0.1	1.19

Çizelge 4.2’de gösterilen değerlerden Δ ve D aşağıdaki gibi ifade edilmektedir,

$$\Delta = |E_{\text{NUDAT}} - E| \quad (4.10)$$

$$D = \sqrt{\sigma_{\text{NUDAT}}^2 + \sigma_E^2} \quad (4.11)$$

Bu tez çalışmasının enerji seviyelerinin fotonükleer reaksiyon ile belirlenmesi bölümünde elde edilen enerji değerlerinin literatür değerleri ile karşılaştırıldığı tablo ise Çizelge 4.3'de verilmiştir. Literatür değerleri Nuclear Data Sheet'lerden gelmektedir ve NUDAT'tan alınmıştır(1,2). Bulduğumuz değerleri karşılaştırdığımız literatür datalarının çalışmalarını ^{179}W için Konijn vd 1969 ve Harmatz vd 1968 yılında gerçekleştirmiştir. ^{187}W için ise daha önceki çalışmalar, Reidy vd 1966 yılında, Brenner vd 1967 yılında ve Yamada vd 1979 yılında gerçekleştirilmiştir.

4.4. Yarı Ömür Değerleri

Yarı ömür hesaplamak için kullanılan fonksiyon ve de nedeni 3.bölümde Denklem 3.3 ile verilmişti. Bu çalışma da yapılan analizler sonucu elde edilen yarı ömür değerleri ve bulgular gözlenen her iki izotop içinde konu başlıkları halinde verilmiştir.

4.4.1. ^{179}W İzotopu için yarı ömür değerleri

^{179}W izotopu uyarılmış durumdan kararlı duruma aşağıda görüldüğü gibi geçiş yapmaktadır.



Bu geçişin için yarı ömür değeri yaklaşık 6.40 dakika civarındadır. Yapılan fotonükleer deneyde, Çizelge 4.4'de literatür ile karşılaştırılan değerleri göstermektedir.

Çizelge 4.4. $^{179}\text{W} \rightarrow ^{179}\text{Ta}^* + e^+ + \nu$ reaksiyonu için elde edilen yarı ömür değerleri

Enerji Geçışı	$T_{1/2}$ (dakika)	σ
221	6.7	0.4

Literatür değerleri bu reaksiyon için yarı ömür değerinin 6.40 ± 0.07 dakika olduğunu göstermektedir.

4.4.2. ^{187}W izotopu için yarı ömür değerleri

^{187}W izotopu uyarılmış durumdan kararlı duruma aşağıda görüldüğü gibi geçiş yapmaktadır.

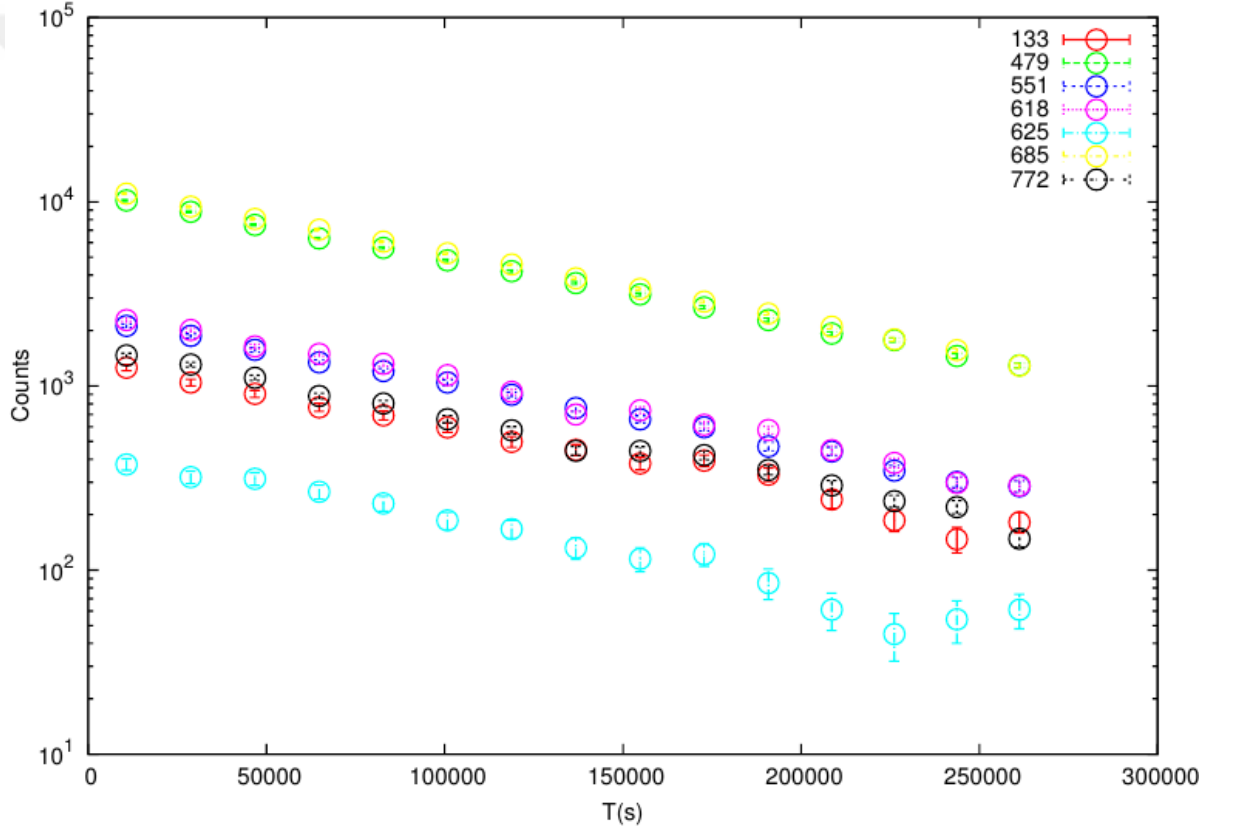


Bu geçişin için yarı ömür değeri yaklaşık 24 saat civarındadır. Yapılan fotonükleer deneyde, Şekil 4.4 ve Çizelge 4.5'de literatür ile karşılaştırılan değerleri göstermektedir.

Çizelge 4.5. $^{187}\text{W} \rightarrow ^{187}\text{Re} + e^- + \nu$ reaksiyonu için elde edilen yarı ömür değerleri

Enerji Geçişi	$T_{1/2}$ (saat)	σ
134	24.5	0.4
479	23.6	0.2
551	23.7	0.6
618	23.8	0.5
625	24	1
685	24.1	0.8
772	23.1	0.5

Literatür değerleri bu reaksiyon için yarı ömür değerinin 24.000 ± 0.004 saat olduğunu göstermektedir.

Şekil 4.4. ^{187}W izotopunun saptanan enerji geçişi piklerinin zaman içinde sayımlarının logaritmik olarak değişimi

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, biz tungsten çekirdeğinin enerji seviyeleri ve yarı ömrünü klinik doğrusal elektron hızlandırıcı ile üretilen bremsstrahlung fotonları ile araştırdık. Bu çalışma için özel olan ilginç bir nokta kullandığımız hızlandırıcının bundan önceki literatür çalışmalarından farklı olarak medikal bir cihaz olması ve bu cihazın fotonükleer deneyler gerçekleştirebilecek şekilde modifiye edilmiş olmasıdır. Bu çalışmalar ayrıca bu tarz reaksiyon deneylerinde medikal bir cihazın kullanılabileceğini göstermiştir.

Fotonükleer reaksiyon için, tungsten çekirdeğinin tüm izotoplarından proton veya nötron koparmak için gerekli enerjinin üstünde olan 18 MeV enerjili bremsstrahlung fotonları kullanıldı. Böylece, tez çalışmasında bütün izotoplar aktive edildi. Ölçüm sistemi eş zamanlı olmadığı için, çok düşük ve yüksek yarı ömre sahip çekirdekler gerekli yarılanmayı yapamadılar ve arka plan (background) içinde kayboldular. Deney için yeterli yarı ömre sahip olan izotopların bütün enerji geçişlerin görülmediği de verilen tez bulgularında rastlanmıştır. Her enerji geçişinin kendine özgü bir görülme olasılığı bulunmaktadır. Bulgularda görülmeyen bu enerji geçişleri %0.1 görülme olasılığının altında kalan enerji geçişleridir ve arka plan içerisinde kayboldukları düşünülmüştür. Gelecek planları arasında olan eş zamanlı (online) ölçüme geçilmesi ile beraber bu tarz çalışmalarda yukarıda bahsettiğimiz sebeplerden dolayı görülmemiş olan bütün geçişler belirlenecektir.

Fotonükleer deney birkaç parçadan oluşmuştur. Deney süreci için en önemli noktalar; iyi bir spektrum ölçümü almak, enerji kalibrasyonları ve analizi olmuştur. Burada en büyük pay kalibrasyon konusunda olmuştur çünkü bir deneyin sonucu olarak elde edilen spektrum analizi bir takım sonuçlar vermektedir. Enerji kalibrasyonu, elde edilen değerlerin mükemmeliyete ulaşması konusunda bir hayli önem taşımıştır ve üç farklı fonksiyon kullanılarak fit işlemleri denenmiş en iyi sonuç ikinci dereceden denklem kullanılarak yapılan kalibrasyon sonucu elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar istatistiksel hatalar içermektedir. Yapılan deney için hataların nerelerden geldiğini almak üzerinde düşünülmesi ve çalışılması gereken bir konuydu. Bazı test ve analizler sonucu zaman içindeki pik pozisyonunda kayma olduğu ve hataya etkili olduğu anlaşıldı. Doğru bir formulasyon ile beraber hataya bu olayında katkısı sistematik hata olarak eklendi. Tüm bu işlerin sonucunda enerji değerleri için literatürle mükemmel bir uyum içinde olan hatta bazı enerji geçişlerinde daha iyi hata oranlarına sahip sonuçlar elde edildi. Enerji geçişleri için bulunan değerler bizim açımızdan büyük bir başarı olmuştur. Hesaplamaların ikinci aşamasını yarı ömür hesapları aldı. Deney bulgularının yarı ömür kısmında iki farklı çekirdek reaksiyonu görüldü ve çalışıldı. Her reaksiyonun kendi enerji geçişleri sırasında sayılan pikler için yarı ömür hesapları yapıldı. Piklerin zaman içindeki kaymaları ve spektrumun başında bulunan piklerin birbirlerine çok yakın seviyede olması sayım sayılarının analizi sırasında net sonuçlar alınamamasına neden olmuştur. Buna rağmen yarı ömür değerleri içinde ideale yakın sonuçlar ve güzel hata oranları elde edilmiştir. Örneğin; ^{187}W izotopunun 625 ve 685 keV enerjiye sahip geçişlerinin zaman içinde sayımındaki değişme grafiğinde farklılıklar göstermektedir.

Bu grafiğe bakarak 685 keV için daha net sayım alınmış yüksek bir pik olduğu anlaşılmaktadır bundan dolayı da yapılan hesaplamalar sonucu en güzel hata oranına sahip olan enerji seviyesi olarak göze çarpmaktadır.

Çalışmanın sonucu olarak, enerji seviyelerinin fotonükleer reaksiyon ile belirlenmesi konusunda çok iyi sonuçlar elde edildi ve bu sonuçlar sadece tek bir izotop veya tek bir izotopun enerji geçişlerinden birisi için değil ^{179}W ve ^{187}W izotoplarının her ikisi içinde geneli kapsayan ve literatürden çok daha iyi değerlere sahip sonuçlardır. Analizler sonucu elde edilen yarı ömür değerleri enerji seviyesinde elde edilen değerler kadar çarpıcı olmadı ama yine de literatür değerleri ile uyumu yakalayan sonuçlar bulundu. Enerji geçişleri için yapılan geliştirmelerin yarı ömür içinde yapılmasıyla çok daha iyi yarı ömür değerleri elde etmek mümkün görünmektedir. Bu konuyla ilgili çalışma doktora sürecimde yapılacaktır.



6. KAYNAKLAR

- AJZENBERG-SELOVE, F. and BINGHAM, H.G. 1973. Energy levels of ^{14}C . *Nuclear Physics A*, 220(1): 152-160.
- BAGLIN, C.M. 2009. Nuclear Data Sheets for $A = 179$, *Nuclear Data Sheets*, 110(2): 265-506.
- BASUNIA, M.S. 2009. Nuclear Data Sheets for $A = 187$. *Nuclear Data Sheets*, 110(5): 999-1238.
- BELYSHEV S.S. et al. 2014. Studying photonuclear reactions using the activation technique. *Nuclear Inst. and Meth.*, 745: 133–137.
- BETHE, H. 1936. An Attempt to Calculate the Number of Energy Levels of a Heavy Nucleus. *Physics Review*, 50: 332.
- BIRATTARI, C., STRINI, G., TAGLIAFERRI, G. and BERTOLLINI, G. 1969. Decay of $^{179}\text{W-g}$, m. *Nuovo Cimento Lett.*, 2(10): 473-474.
- BOSNJAKOVIC, B., VAN BEST, J.A. and BOUWMEESTER, J. 1967. Energy level of ^{38}Ar from the $^{37}\text{Cl}(p,\alpha)^{34}\text{S}$ reaction. *Nuclear Physics A*, 94(3): 625-652.
- BOZTOSUN, İ. et al. 2014. The results of the First photonuclear reaction performed in Turkey: The zinc example. *Turk J. Phys.*, 38: 1-9.
- BRENNER, D.S. and MEYER, R.A. 1976. Decay of ^{187}W and the $1/2+[411]$ band in odd-mass Re isotopes. *Phys. Rev. C*, 13(3): 1288-1294.
- BROWN, G. and MCGREGOR, A. 1966. Level structure measurements with the (p,α) reaction: (II). Energy levels of ^{47}V and ^{49}V . *Nuclear Physics*, 77(2): 385-393.
- CORAL, M.B. 2003. Nuclear Data Sheets for $A = 186$. *Nuclear Data Sheets*, 99(1): 1-196.
- HAMBURGER, E.W. and HAMBURGER, A. I. 1965. Energy levels of ^{90}Y from the $^{89}\text{Y}(d,p)^{90}\text{Y}$ reaction. *Nuclear Physics*, 68(1): 209-220
- HARMATZ, B. and HANDLEY, T.H. 1968. Nuclear spectroscopy in the neutron-deficient $173 \leq A \leq 185$ region. *Nuclear Physics A*, 121(3): 481-528.
- HEWITT, M.G. 1996. Some genetic consequences of ice ages, and their role in divergence and speciation. *Biological J. Linnean Society*, 58: 247-276.
- KENT, J.J., 1975. Energy levels of ^{92}Nb and ^{94}Tc from $^{92}\text{Zr},^{94}\text{Mo}(p,n\gamma)^{92}\text{Nb},^{94}\text{Tc}^*$. *Nuclear Physics A*, 255(2): 296-306.

- KONJIN, J., LINDERMAN, E.W.A. and DE WIT S. A. 1967. The Decay of ^{48}Sc and ^{48}V . *Nuclear Physics A*, 90(3): 558-572.
- KONJIN, J., MEIJER, B. J., KLANK, B. and RISTINEN, R. A. 1969. The Radioactive Decays of 6.7 min $^{179\text{m}}\text{W}$ and 38 min ^{179}W . *Nucl. Phys A*, 137(3): 593-605.
- KRANE, K.S. 1955. *Introductory Nuclear Physics*, ed:D., Halliday., pp.5-6, Corvalis, USA.
- KRANE, K.S. 1955. *Introductory Nuklear Physics*, ed:D., Halliday . pp:160-164, Corvalis, USA.
- LEE, Y.O., FUKAHORI, T. and CHANG, J. 1998. Neutron- and proton-induced nuclear data evaluation of thorium, uranium and curium isotopes for energies up to 250 MeV. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 35(10): 681-691.
- OKA, Y., KATO, T., NOMURA, K. and SAITO, T. 1967. Gamma-ray spectrometric study of the photoactivation products with 20 MeV Bremsstrahlung. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 4(7): 346-352.
- POUGHEON, F., BERNAS, M., ROY-STEPHAN, M., DETRAZ, C., GUILLEMAUD, D., KASHY, E., LANGEVIN, M., MAULIN, F. and ROUSSEL, P. 1981. First study of the ($^{14}\text{C}, ^{14}\text{C}$) reaction: Selectivity of the reaction and energy levels of ^{28}Mg and ^{30}Si . *Nuclear Physics A*, 255(1): 207-220.
- RADFORD, D. 1995. ESCL8R and LEVIT8R: Software for interactive graphical analysis of HPGe coincidence data set, *Nuclear Inst. and Meth. A*, 361(1-2): 297 – 305.
- REIDY, J.J. and WEIDENBECK, M.L. 1966. A study of the decay of ^{187}W using a 2 m curved-crystal spectrometer. *Nuclear Physics*, 79(1): 193-202.
- SEGEBADE, C., WEISE, H.P. and LUTZ, G.J. 1988. *Photon Activation Analysis*. W. de Gruite, New York, USA.
- TILLEY, D.R., KELLEY, J.H., GODWIN, J.L., MILLENER, D.J., PURCELL, J.E., SHEU, C.G. and WELLER, H.R. 2004. Energy levels of light nuclei $A=8, 9, 10^*$. *Nuclear Physics A*, 745(3): 155-362.
- WEISSKOPF, V. 1937. Statistics and Nuclear Reactions. *Physics Review*, 52: 295.
- WESOLOWSKI, J.J., ANDERSON, J.D., HANSEN, L.F., WONG, C. and McCLURE J. W. 1965. Energy levels of ^{31}S and ^{19}Ne . *Nuclear Physics*, 71(3): 586-592.
- WU, S.-C. and NIU, H. 2003. Nuclear Data Sheets for $A = 180$. *Nuclear Data Sheets*, 100(4): 483-705.

YAMADA, S., SUD, S.P., MIYATAKE, Y. and HAYASHI, T. 1979. The Structure of the Low-Lying Energy Levels in ^{187}Re . *Nucl. Phys. A*, 332(3): 317.

ZENGİN, M. ve TÜRECİ. R.G. 2007. *Kuantum Fiziği. Bilim Yayınları*, pp. 30-39, Ankara



ÖZGEÇMİŞ



Fatih DÜLGER 1990 yılında İstanbul'da doğdu. İlk, orta, lise öğrenimini İstanbul'da tamamladı. 2008 yılında girdiği Bozok Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü'nden 2012 yılında mezun oldu. 2013 yılında, Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimine başlayarak NUBA bünyesine katıldı ve orada çalışmalarını devam ettirmektedir.

Yabancı Dil

(1) İngilizce

Yayınlar

(1) DULGER, F., DAPO, H., AKKOYUN, S., BAYRAM, T. and BOZTOSUN, I. 2015. Energy Levels and Half-Lives of Gallium Isotopes Obtained by Photo-Nuclear Reaction. *Journal of Physics Conference Series* . 590(1):012051

Konferans, Wokshop ve Yaz Okulu Katılımları

(1) Adım Fizik Günleri IV, 28-29 Mayıs 2015

(2) NUBA Conference Series-1: Nuclear Physics and Astrophysics, 15-21 Eylül 2014.

(3) NUBA The 1st International Nuclear Physics Summer School, 19-25 Haziran 2014

(4) Adım Fizik Günleri III, 17-18 Nisan 2014