

**T.C.
ANKARA ÜNİVERSİTESİ
NÜKLEER BİLİMLER ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**160 < A < 166 KÜTLE BÖLGESİNDEKİ TUNGSTEN İZOTOPLARININ
NÜKLEER UYARILMIŞ SEVİYELERİN YARILANMA ÖMÜRLERİNİN
ÖLÇÜLMESİ**

Ömer Sefa TEMİZ

**MEDİKAL FİZİK ANABİLİM DALI
SAĞLIK FİZİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**ANKARA
2025**

Her hakkı saklıdır.

TEZ ONAYI

Ömer Sefa TEMİZ tarafından hazırlanan “ **$160 < A < 166$ Kütle Bölgesindeki Tungsten İzotoplarının Nükleer Uyarılmış Seviyelerin Yarılanma Ömürlerinin Ölçülmesi**” adlı tez çalışması **18/06/2025** tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü Medikal Fizik Anabilim Dalında **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Bahadır SAYGI

Ankara Üniversitesi, Medikal Fizik Anabilim Dalı

Jüri Üyeleri:

Prof. Dr. Haluk YÜCEL

Ankara Üniversitesi, Medikal Fizik Anabilim Dalı

Prof. Dr. Aynur ÖZCAN

Gazi Üniversitesi, Fizik Bölümü, Nükleer Fizik Anabilim Dalı

Doç. Dr. Bahadır SAYGI

Ankara Üniversitesi, Medikal Fizik Anabilim Dalı

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Haluk YÜCEL

Enstitü Müdürü, Nükleer Bilimler Enstitüsü, Ankara Üniversitesi

Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik davranış ilkelerine uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu beyan ederim. Ayrıca, bu kurallar ve davranışların gerektirdiği şekilde, başka kaynaklardan aldığım tüm materyalleri ve sonuçları alıntı yaparak, bunlara kaynak gösterdiğimi beyan ederim.

Tarih

İmza

Ömer Sefa TEMİZ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

160 < A < 166 KÜTLE BÖLGESİNDEKİ TUNGSTEN İZOTOPLARININ NÜKLEER UYARILMIŞ SEVİYELERİN YARILANMA ÖMÜRLERİNİN ÖLÇÜLMESİ

Ömer Sefa TEMİZ

Ankara Üniversitesi
Nükleer Bilimler Enstitüsü
Medikal Fizik Anabilim Dalı
Sağlık Fiziği Tezli Yüksek Lisans Programı

Danışman: Doç. Dr. Bahadır SAYGI

Radyonüklitlerin yarılanma ömürleri/ortalama ömürleri, nükleer fiziğin ve radyonüklit metrolojisinin temel taşlarından birisidir. Uyarılmış nükleer durumların yarı ömürleri, geçiş olasılıklarına erişim sağlar, çekirdeğin yapısı hakkında doğrudan bilgi sağlar ve nükleer modellerin en sağlam testlerinden birini sunar. Pikosaniye ve saniye arasındaki yarı ömür aralıklarını kapsamak için farklı ölçüm teknikleri uygulanır. Yaklaşık 1 pikosaniye ile birkaç nanosaniye arasında değişen uyarılmış nükleer seviyelerin kısa ömürleri, Geri Tepme Ürünü-Mesafe Doppler Kayması Yöntemi-GMDK (Recoil Distance Doppler Shift Method) yöntemi ile ölçülmektedir. Bu tezde, $160 < A < 166$ kütle bölgesindeki tungsten izotoplarının nükleer uyarılmış seviyelerin yarılanma ömür ölçümleri JUROGAM-II gama spektrometresi, Gama Geri Tepme Elektron Alfa Etiketleme (GGEAE) spektrometresi ve Geri Tepme Ürünü Taşıma Birimi (GÜTB) ayırıştırıcısının yer aldığı Finlandiya'daki Jyväskylä Üniversitesinde yer alan Hızlandırıcı Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. ^{106}Cd hedef üzerine 270 MeV enerjide hızlandırılarak gönderilen ^{60}Ni çekirdeklerinin füzyon buharlaşma reaksiyonu sonucu tungsten izotopları üretilmiştir. ^{164}W izotopu için DPUNS diferansiyel hedef-yavaşlatıcı mesafe ayar cihazı ve GMDK (Geri Tepme Ürünü-Mesafe Doppler Kayması Yöntemi) ile hedef ve yavaşlatıcı (Degrader) arasındaki 10 farklı mesafede veri toplanmıştır. Toplanan verilerden çakışık DBEM (Diferansiyel bozunum eğrisi metodu) kullanılarak. ^{164}W çekirdeği için 12^+ ve 14^+ seviyelerine ait kuadropol geçişlerin yarılanma ömürleri gama spektroskopisi yöntemlerinden birisi olan çakışıklık metodu ile elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar tezde ayrıntılı tartışılmıştır.

Bu tez çalışması, TÜBİTAK 117F508 kodlu “Nötron Fakiri Tungsten Çekirdeklerinde Uyarılmış Seviyelerin Ortalama Ömür Ölçümleri” başlıklı proje tarafından kısmen desteklenmiştir.

Haziran 2025, 51 sayfa

Anahtar Kelimeler: Radyonüklit metrolojisi, Geri tepme ürünü mesafe doppler kayması yöntemi, Diferansiyel bozunum eğrisi metodu, Füzyon buharlaşma reaksiyonları

ABSTRACT

Master's Thesis

MEASURING THE HALF-LIFE OF NUCLEAR EXCITED STATES OF TUNGSTEN ISOTOPES IN THE MASS REGION OF $160 < A < 166$

Ömer Sefa TEMİZ

Ankara University
Institute of Nuclear Sciences
Department of Medical Physics
Health Physics Master's Degree Program

Supervisor: Doç. Dr. Bahadır SAYGI

The half-lives/mean lives of radionuclides are one of the cornerstones of nuclear physics and radionuclide metrology. The half-lives of excited nuclear states provide access to transition possibilities, provide direct information about the structure of the nucleus, and offer one of the most stringent tests of nuclear models. Different measurement techniques are applied to cover half-life intervals between picoseconds and seconds. The short lifetimes of stimulated nuclear levels, ranging from about 1 picosecond to a few nanoseconds, are measured by the Recoil Doppler Shift Technique (RRDS) method. In this thesis, half-life measurements of nuclear stimulated levels of tungsten isotopes in the mass region $160 < A < 166$ were carried out at the Accelerator Laboratory at the University of Jyväskylä in Finland, where the JUROGAM-II gamma spectrometer, the Gamma Recoil Electron Alpha Tagging (GREAT) spectrometer and the Recoil Ion Transport Unit (RITU) separator are located. Tungsten isotopes were produced via the fusion evaporation reaction of ^{60}Ni nuclei, which were accelerated to the ^{106}Cd target at 270 MeV energy. For the ^{164}W isotope, data were collected at 10 different distances between the target and the degrader with the DPUNS differential Plunger device and the RRDS. Using the coincident DDCM (Differential decay curve method) from the collected data. Half-lives of quadrupole transition from 12^+ and 14^+ levels were extracted for the ^{164}W using coincidence technique of gamma spectroscopy. In this thesis, the obtained findings are discussed in detail.

This thesis is partially supported by 117F508 coded TÜBİTAK Project titled “Lifetime Measurements of Excited States in Neutron-Deficient Tungsten Nuclei”

June 2025, 51 pages

Key Words: Radionuclide metrology, Recoil-distance doppler shift technique, Differential decay curve method, Fusion evaporation reactions

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde maddi, manevi katkılarını esirgemeyen, Tez çalışması için bilimsel araştırma problemini belirleyen, verilerin analizi ve değerlendirilmesi sırasında desteğini hiç esirgemeyen; tezin yazılması aşamasında değerli vaktini ve titiz değerlendirmelerini paylaşan; bilimsel çalışma heyecanını örnek alabilmeyi dilediğim değerli Hocam, Sayın Doç. Dr. Bahadır SAYGI' a teşekkür ederim.

Bilimsel görüşleri ve deneyimleri ile yol gösteren ve lisans üstü öğrenim hayatıma başladığımdan bu yana Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsünün tüm imkanlarını kullanmamda yardımcı olan değerli Hocam Sayın Prof. Dr. Haluk YÜCEL' e teşekkür ederim.

Tez çalışmamın gerçekleştirilmesi sürecinde destek olan Enstitü Müdürü Sayın Prof.Dr. Haluk YÜCEL'e, teşekkür ederim

Bu tez çalışması, Jyvaskyla Üniversitesi Hızlandırıcı laboratuvar imkanları kullanılarak ve 117F508 kodlu “Nötron Fakiri Tungsten Çekirdeklerinde Uyarılmış Seviyelerin Ortalama Ömür Ölçümleri” bilimsel araştırma projesinin kısmen desteği ile yapılmıştır.

Öğrenim hayatıma başladığımdan bu yana bana inanan, her türlü desteği ve imkânı sağlayan sevgili babam Reşat TEMİZ'e, Kendinden çok benimle ilgilenip her defasında beni cesaretlendiren sevgili annem Arzu TEMİZ'e, her sıkıntı ve problemde hayatımın her anında yanımda duran, bana inanan ve destek olan biricik sevgilim ve hayat arkadaşım Birsen'e, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen kardeşlerim Nafiye, Bahriye ve Rabia TEMİZ'e teşekkür ederim.

Ömer Sefa TEMİZ
2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR	vi
LIST OF SYMBOLS AND ABBREVIATIONS.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	4
2.1 Füzyon Buharlaşma Reaksiyonu	4
2.2 Gama Bozunumu.....	6
2.2.1 Gamaların madde ile etkileşimi.....	7
2.3 Gama Bozunumu Kinematığı.....	8
2.4 Gama Geçiş i için Seç ilim Kuralları	9
2.5 Gama-Gama Koinsidans Yöntemi	10
2.6 Ortalama Ömür	13
2.7 Toplam Veri Okuma	15
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	16
3.1 JUROGAM-II Dedektör Kümesi.....	17
3.2 Hedef-Yavaşlatıcı Mesafe Ayar Cihaz ı (Plunger)	19
3.3 Geri Tepme Ürünü Taşıma Birimi	20
3.4 Gama Geri Tepme Elektron Alfa Etiketleme Yöntemi	21
3.5 Grain Veri Analizi Programı	23
3.6 TV Spektrum ve Matris Analizi Programı.....	24

3.7 Geri Tepme Ürünü-Mesafe Doppler Kayması Yöntemi	25
3.8 Diferansiyel Bozunum Eğrisi Metodu	27
3.9 Dedektör Kalibrasyonu.....	29
3.1 Yöntem Geçerli Kılma	32
3.1.1 ^{163}W radyoizotopunun nükleer uyarılmış seviyeleri	32
3.1.2 ^{163}W radyoizotopunun normal ve yavaşlatılmış pikleri	33
3.1.3 ^{163}W radyoizotopunun ortalama ömür ölçümleri	34
4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	36
4.1 ^{164}W Radyoizotopunun Nükleer Uyarılmış Seviyeleri	36
4.2 ^{164}W Radyoizotopunun Normal ve Yavaşlatılmış Pikleri.....	37
4.3 ^{164}W Radyoizotopunun Ortalama Ömür Ölçümleri	39
4.4 Ölçüm İstatistiği	41
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	43
KAYNAKLAR	49

SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

BEAM	Demet
BGO	Bizmut Germanyum
CLOVER GE	Yonca Germanyum Dedektör
DBEM	Diferansiyel Bozunum Eğrisi Metodu
DPUNS	Bağlı Olmayan Durumlar için Diferansiyel Plunger
DSSD	Çift Taraflı Silikon Şerit Dedektör
E	Enerji
E₀	Son Durum Enerjisi
GRAİN	Veri Analiz Programı
γ	Gama
GGEAE	Gama Ürün Elektron Alfa Etiketleme
HPGE	Yüksek Çözünürlüklü Germanyum Dedektör
λ	Bozunum Sabiti
MWPC	Çok Telli Orantılı Sayaç
NAPATAU	Ortalama Ömür Süresi Analiz Programı
N	Çekirdek Miktarı
N₀	İlk Durumdaki Çekirdek Miktarı
PLANAR GE	Düzlemsel Germanyum Dedektör
PMT	Foto Çoğaltıcı Tüp
TV	Spektrum ve Matris Analiz Programı
TVO	Toplam Veri Okuma
GÜTB	Geri Tepme Ürünü Taşıma Birimi
GMDK	Geri Tepme Ürünü Mesafe Doppler Kayması Yöntemi
x	Mesafe
τ	Tau

LIST OF SYMBOLS AND ABBREVIATIONS

ADC	Analog to Dijital Converter
BGO	Bismuth Germanate
CAMAC	CAMAC Based Amplifier Module
CLOVER	Clover type High Purity Germanium Detector
D	Dipole Magnet
DDCM	Differential Decay Curve Method
DEGRADER	Material Used to Reduce the Energy of Charged Particles
DPUNS	Differential Plunger for Unbound Nuclear States
DSSD	Double Sided Silicon Detector
GREAT	Gamma Recoil Electron Alpha Tagging Spectrometer
HPGE	High Purity Germanium Detector
MCA	Multi Channel Analyzer
MWPC	Multi Wire Proportional Chamber
NIM	Nuclear Instrumentation Module
PIN	Silicon PIN Diode
PMT	Photomultiplier Tube
Qh	Horizontal Quadrupole Magnet
Qv	Vertical Quadrupole Magnet
RDDS	Recoil Distance Doppler-Shift Method
RITU	Recoil Ion Transport Unit
TDR	Triggeless Data Read

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Füzyon buharlaşma reaksiyonu şematik gösterimi	5
Şekil 2.2 ^{60}Co 'ın bozunum şeması	7
Şekil 2.3 Gama fotonlarının madde ile etkileşimlerinin enerjiye göre baskınlığı.....	8
Şekil 2.4 ^{164}W çekirdeğinin seviyeler arası bozunma şeması	11
Şekil 2.5 Gama-gama 2-B matrisin X ve Y eksenindeki bileşenleri. Füzyon buharlaşma sonucu açığa çıkan ürün çekirdekler ile ilişkilendirilmiş spektrumlar	12
Şekil 2.6 ^{164}W çekirdeğine ait 332 keV'lik geçiş ile çakışık olan 4+, 6+, 8+ ve 10+, 12+, 14+, 16+, 18+, 7- ve 9- seviyelere ait olan gama ışın geçişleri.....	12
Şekil 2.7 Toplam veri okuma (TVO) elektroniği şematik gösterimi.....	15
Şekil 3.1 Faz 1 HPGe + BGO dedektör bileşenlerinin detaylı şematik gösterimi	18
Şekil 3.2 Yonca HPGe (Clover) dedektörünün şematik gösterimi.....	19
Şekil 3.3 Hedef-yavaşlatıcı mesafe ayar cihazının deney düzeneğine entegrasyonunun gösterimi	20
Şekil 3.4 Geri tepme ürünü taşıma birimi (GÜTB) optik konfigürasyonunun ($Q_v D Q_h Q_v$) şematik gösterimi.....	21
Şekil 3.5 GGEAE spektrometresinde gerçekleşen olayların dedekte edilmesinin şematik gösterimi	22
Şekil 3.6 GGEAE spektrometresinin detaylı gösterimi	22
Şekil 3.7 Grain veri analizi programı kullanıcı ara yüzünün görüntüsü	23
Şekil 3.8 TV spektrum ve matris analizi programı kullanıcı ara yüzünün görüntüsü.....	24
Şekil 3.9 Geri tepme ürünü mesafe Doppler kayması yöntemi şematik gösterimi.....	25

Şekil 3.10 Örnek seviye şeması	26
Şekil 3.11 JUROGAM-II faz I germanyum kristalleri için ^{152}Eu ve ^{133}Be gama kaynakları kullanılarak elde edilen ham ve kalibre edilmiş spektrumları.....	31
Şekil 3.12 ^{163}W 'in nükleer uyarılmış seviyeler arası bozunma şeması.....	32
Şekil 3.13 ^{163}W 'nin $17/2^+$ seviyesinin 384 keV ve 506 keV enerjideki gamalarının normal (Turuncu çizgi) ve yavaşlatılmış (Beyaz çizgi) piklerinin gösterimi	33
Şekil 3.14 NAPATAU ortalama ömür analiz programında elde edilen ^{163}W izotopuna ait $17/2^+$ seviyesine ait grafikler. a) $\theta=158^\circ$ b) $\theta=134^\circ$ c) Lewis (2019).....	34
Şekil 4.1 ^{164}W 'in nükleer uyarılmış seviyeler arası bozunma şeması.....	36
Şekil 4.2 ^{164}W 'nin 12^+ seviyesinin 609 keV ve 392 keV enerjideki gamalarının normal (Turuncu çizgi) ve yavaşlatılmış (Beyaz çizgi) piklerinin gösterimi	37
Şekil 4.3 ^{164}W 'nin 14^+ seviyesinin 392 keV ve 508 keV enerjideki gamalarının normal (Turuncu çizgi) ve yavaşlatılmış (Beyaz çizgi) piklerinin gösterimi	38
Şekil 4.4 NAPATAU ortalama ömür analiz programında elde edilen ^{164}W izotopuna ait 12^+ seviyesine ait ortalama ömür ölçümleri. Sol taraf $\theta=158^\circ$, sağ taraf $\theta=134^\circ$	39
Şekil 4.5 NAPATAU ortalama ömür analiz programında elde edilen ^{164}W izotopuna ait 14^+ seviyesine ait ortalama ömür ölçümleri. Sol taraf $\theta=158^\circ$, sağ taraf $\theta=134^\circ$	40
Şekil 5.1 GMDK tekniği şematik gösterimi.....	44

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Üçgen koşulu ve eşlik seçim kuralının kombinasyonu gösterimi.....	9
Çizelge 3.1 JUROGAM II dedektör kümesinde yer alan dedektörlerin beam doğrultusuna göre konumları	18
Çizelge 3.2 ^{163}W radyoizotopunun ortalama ömür değerleri	35
Çizelge 4.1 ^{164}W radyoizotopunun ortalama ömür değerleri.....	41
Çizelge 4.2 Ağırlıklı ortalama ile hesaplanan ortalama ömür değerleri.....	42

1. GİRİŞ

Metroloji, Yunancada metron kelimesinden türetilmiş olup ölçme bilimi olarak tanımlanır. Ölçümlerin uyumlu, karşılaştırılabilir, doğru olması ve belirtilen bir belirsizlik düzeyine sahip olmasını metroloji sayesinde sağlanmaktadır. Kısaca, birimleri tanımlamak, birimleri oluşturmak ve izlenebilirlik zinciri kurmak gibi üç ana görev üzerinden de tanımlanabilmektedir (TÜBİTAK 2025). Metroloji, toplumun ölçüm yapan cihazların faydalarından maksimum güvenilirlikle yararlanabilmesi için ölçüm sonuçlarına kesinlik kazandırmayı amaç edinmiştir. Metroloji, ulusal/uluslararası ticaret, sağlık, endüstri, güvenlik, çevresel izleme, gıda güvenliği, kolluk kuvvetleri, iyonlaştırıcı radyasyon ve diğer sektörel alanlarda temel öneme sahiptir (Aswal 2024). Özellikle iyonlaştırıcı radyasyonun uygulama alanları göz önüne alınırsa, sağlık, sanayi, gıda, tarım, enerji ve uzay çalışmalarında kullanılan teknik cihazlar ve nükleer teknikler metrolojide önemli yerlerden birisine sahip olan radyonüklit metrolojisinin alanını oluşturmaktadır. Radyonüklit metrolojisi, Ulusal standart enstitülerinde 1913 yılında Curie, Rutherford ve Meyer tarafından ilk birincil radyum standartlarının sertifikalandırılmasıyla başlamıştır (Judge vd. 2014). Doğal olarak bulunan ya da yapay olarak üretilen radyoizotoplar nükleer bozunum sırasında yayınladıkları parçacık ve fotonlar ile kolayca tespit edilebilmektedir. Radyoaktif bozunumu inceleyen nükleer teknikler sayesinde bozunumu yapan radyoizotoplar hakkında birçok bilimsel veri kazanılmaktadır. Ölçüm yapılan niceliğin hassas bir şekilde ölçülebilmesi de ölçüm cihazlarının hassa kalibrasyonlarına bağlıdır. Bu tarz metrolojik çalışmalarının güvenilirliği, yöntemlerinin titiz bir şekilde incelenmesine ve kapsamlı belirsizlik bütçelerinin hazırlanmasına büyük ölçüde bağlıdır (Pommé 2022). Binlerce radyonüklit, yalnızca atomun iç kısmına bir bakış açısı olarak değil, aynı zamanda nükleer analiz teknikleri aracılığıyla tanımlama ve inceleme aracı olarak bozunum özellikleri açısından araştırılmıştır. Yüzlerce radyonüklit, insan sağlığı, tıbbi uygulamalar, nükleer enerji üretimi, çevresel izleme veya astrofizik bağlamında özellikle önemlidir. Bozunum özellikleri, örneğin bozunum modları, bozunum dallanma oranları, foton ve parçacık yayınlama olasılıkları ve enerjileri, yarı ömürler ve nükleer üretim süreçleri için tepkime tesir-kesit verileri hakkında güvenilir ve kesin verileri elde etmek dikkatli çalışmalar gerektirmektedir. (Pommé 2022). Gama çakışık (Coincidence) mod, gama-parçacık

çakışıklığı, 4π gama dedektör sistemleri, gama seviye şemalarının oluşturulması, bozunum modları, bozunum dallanma oranları, foton ve parçacık yayınlama olasılıkları ve enerjileri, yarı ömürler ve nükleer üretim süreçleri için etkileşim reaksiyon tesir-kesit verileri elde edilirken kullanılan teknik ve teknolojiler arasında yer almaktadır. Radyonüklitlerin yarılanma ömürleri/ortalama ömürleri, nükleer fiziğin ve radyonüklit metrolojisinin temel taşıdır. Uyarılmış nükleer durumların yarı ömürleri, geçiş olasılıklarına erişim sağlar, çekirdeğin yapısı hakkında doğrudan bilgi sağlar ve nükleer modellerin en katı testlerinden birini sunar. Pikosaniye ve saniye arasındaki yarı ömür aralıklarını kapsamak için farklı ölçüm teknikleri uygulanır. Yaklaşık 1 ps ile birkaç ns arasında değişen uyarılmış nükleer seviyelerin kısa ömürleri, Geri tepme ürünü Mesafe Doppler Kayması Yöntemi-GMDK (Recoil Distance Doppler Shift Method) yöntemi ile ölçülmektedir. (Pommé 2015). Bu teknikle yapılan ilk ölçümler Nolan ve Sharpey-Schafer (1979) ile Schwarzschild ve Warburton (1968) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu metodun kullanılabilmesi için kapsamlı deney düzeneklerine ihtiyaç duyulur. Hızlandırıcıda ivmelendirilmiş mermi çekirdek ile hedef çekirdekler arasında nükleer tepkime gerçekleştirilir. GMDK yöntemi için özel olarak Plunger (hedef-yavaşlatıcı mesafe ayar cihazı) adlı bir cihaz geliştirilmiştir. Bu cihaz tam olarak lavabo pompasına benzemektedir ve bu nedenle İngilizce de bu cihaza “Plunger” adı verilmiştir.

Bu çalışmada Tungsten elementinin $160 < A < 166$ kütle bölgesindeki radyoizotoplarının füzyon buharlaşma tepkimesi sonucu üretilmesi ve üretilen radyoizotopların nükleer uyarılmış seviyelerinin gama spektroskopik teknikler ile yarılanma ömürlerinin ölçülmesi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada JUROGAM II dedektör kümesinin hedef haznesi yerine hedef-yavaşlatıcı mesafe ayar cihazı monte edilmiştir.

Nükleer tepkime sonucu uyarılmış seviyede üretilen ürün çekirdekler, hedeften belirli bir uzaklığa konumlandırılmış yavaşlatıcı bir levhadan geçirilerek Doppler kaymasına maruz bırakılmıştır. Doppler kayması sonucu normalde tek enerjiye sahip gama geçişi ikiye yarılır ve ortalama 500 keV’de 5 keV fark olacak şekilde yavaşlatılmış ve normal pikler meydana gelmiştir. Yavaşlatılmış ve normal pikler uzaklığın bir fonksiyonu olarak incelenmiş ve ikinci dereceden polinomlar yardımı ile gama geçişinin ait olduğu seviyenin ortalama ömrü deneysel verilerden ve simülasyondan bağımsız bir şekilde elde

edilmiştir. Diferansiyel Bozunum Eğrisi Metodu – DBEM (Differential Decay Curve Method) (Dewald vd. 2012) hedef-yavaşlatıcı mesafe ayar cihazı ile alınan verinin analizinde kullanılan bir metottur ve iki farklı modda veri işleme yapabilmektedir. Bunlar tekli spektrum modu ve çakışık modudur. Tekli spektrum modunun, bazı dezavantajları bulunmaktadır. İnceleme altındaki seviyeye yan bantlardan gelen gama geçişi katkıları ve gözlenmeyen geçişlerin varlığı gibi nedenler ile tekli spektrumdan elde edilen ortalama ömürlerde tutarsızlıklar meydana gelebilir. Bu tutarsızlıkların giderilmesi için γ - γ çakışık modu, DBEM içinde geliştirilmiştir. Bu metotlar sayesinde yarı ömür ölçümlerindeki tutarsızlık minimuma indirilir.

Tezde, Jyvaskyla 'da bulunan K130 Siklotron kullanılarak üretilen kısa ömürlü tungsten radyoizotopları incelenmiş ve kısa yarı ömürlü tungsten radyoizotoplarının farklı spin-kuantum sayılı uyarılmış seviyelerin yarılanma ömürleri/ortalama ömürleri ilk kez deneysel olarak ölçülmesi amaçlanmıştır.

Bu tez beş bölümden oluşmaktadır. Tezin birinci bölümünde, metroloji ve radyonüklit metrolojisinin tarihsel gelişimi ve bilimde, sanayide çevresel ve gıda sanayisindeki önemi açıklandıktan sonra, bu tezin araştırma problemi açıklanmıştır. Tezin ikinci bölümünde, kuramsal temeller açıklanmıştır. Tezin üçüncü bölümünde, kullanılan materyaller ve yöntemler detaylı şekilde açıklanmıştır. Tezin dördüncü bölümünde, araştırma bulguları açıklanmıştır. Tezin beşinci bölümünde, elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

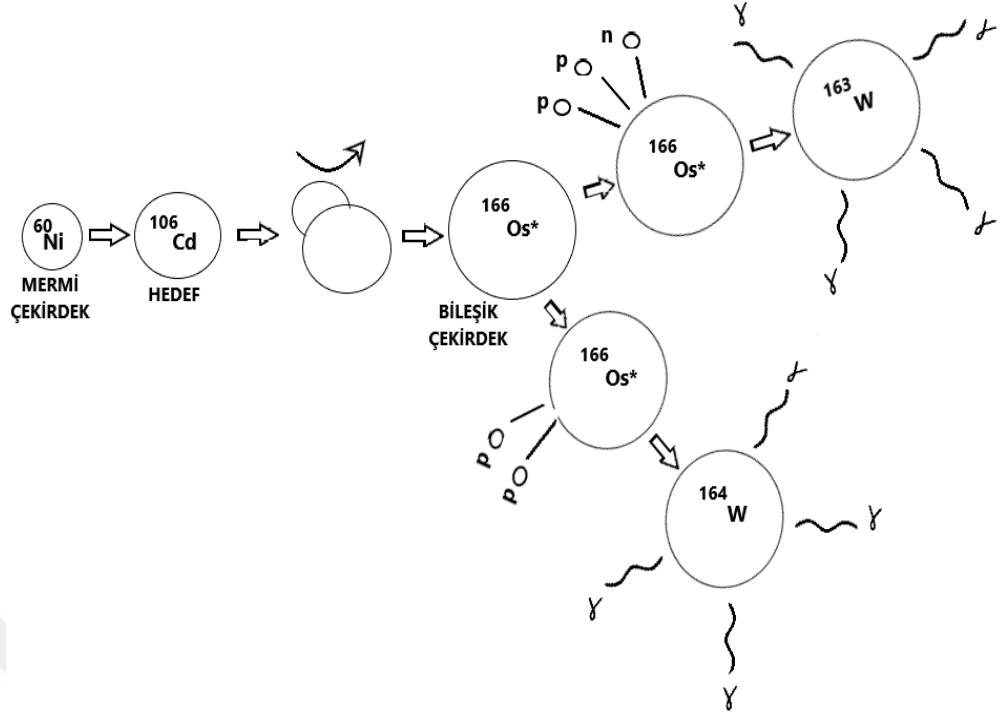
Bu tez çalışması, Jyvaskyla Üniversitesi Hızlandırıcı laboratuvar imkanları kullanılarak ve 117F508 kodlu “Nötron Fakiri Tungsten Çekirdeklerinde Uyarılmış Seviyelerin Ortalama Ömür Ölçümleri” bilimsel araştırma projesinin kısmen desteği ile yapılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER

Gama ışınları elektromanyetik spektrumunun enerji açısından yüksek bölgesinde yer almaktadırlar. Bu özellikleri nedeni ile gama ışınlarına ait enerjiler birbirinden ayrılabilir, gama-ışını spektrometreleri bu enerjileri ölçebilir ve dedekte edilen gama ışınlarına ait spektrumları gösterebilir. Tezin bu bölümünde, tez çalışmasında kullanılan reaksiyon mekanizması, gama bozunum özellikleri, seçim kuralları, bozunum kinematiği, yarılanma süresi ile ortalama ömür arasındaki ilişki, koincidans yöntemi ve veri alma sistemi açıklanmaktadır.

2.1 Füzyon Buharlaşma Reaksiyonu

Proton sayısına göre nötron sayısı daha az olan, Nötron fakiri çekirdeklerin üretilmesinde en verimli tepkime mekanizmalarından birisi füzyon buharlaşma tepkimeleridir (Morinaga ve Gugelot 1963). Bu tepkime mekanizmasında, mermi çekirdek bir ivmelendirici vasıtasıyla, mermi çekirdek ve hedef çekirdek arasında oluşan Coulomb kuvvetini aşacak bir enerjiye kadar ivmelendirilir ve Coulomb potansiyelinin aşılması ile mermi çekirdek ile hedef çekirdek yaklaşık 10^{-20} saniyede tepkimeye girerek yüksek enerjide hızlı bir şekilde dönme hareketi yapan bir çekirdek oluşturur. Bu çekirdek fazla enerjisini iki şekilde üzerinden atmaya çalışır. İlki fisyon seçeneğidir. İkinci yöntem ise füzyon buharlaşması dediğimiz bir yoldur. İkinci yolda çekirdek proton ve/veya nötron parçacıkları fırlatarak ürün çekirdekler meydana gelir. Örneğin bizim bu projede inceleyeceğimiz reaksiyonda Ni mermi çekirdekleri Cd hedef çekirdeğini bombaladığı zaman Os çekirdeği üretilir. Os çekirdeği proton ve/veya nötron parçacıkları atarak W, Ta ve Hf gibi reaksiyon ürünleri oluşur. Ürün çekirdekler oluştuklarında genel olarak fazla açısal momentuma ve enerjiye sahiptirler. İlk önce istatistiksel gama (E1) ışınları yayarlar daha sonra ise E2 gama ışınları yayarak temel duruma geçerler. Son olarak ürün çekirdekler, temel seviyeye ya da bir izomer seviyeye ulaşırlar. Ürün çekirdeğin karakterine göre bozunum bu aşamadan sonra yüklü parçacık salınımı ile devam edebilir.



Şekil 2. 1 Füzyon buharlaşma reaksiyonu şematik gösterimi

Füzyon buharlaşma reaksiyon mekanizması aşağıdaki şekildedir;

Mermi çekirdekler bir hızlandırıcı yardımı ile hedef ile mermi çekirdek arasında meydana gelen Coulomb bariyerini aşacak şekilde hızlandırılır (Eşitlik 2.1).

$$E_C = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_H Z_M}{(r_H + r_M)} \quad (2.1)$$

Burada, Z_H - r_H sırasıyla hedef çekirdeğin atom numarasını ve yarı çapını, Z_M - r_M sırasıyla mermi çekirdeğin atom numarasını ve yarı çapını temsil eder. Mermi ve hedef çekirdek 10^{-20} saniye içerisinde birleşir ve oldukça yüksek enerji ve açısal momentuma sahip bir çekirdek meydana getirir.

Birleşik çekirdek ya fisyonu uğrar ya da parçacık yayınlar. Parçacık yayınlama sırasında sistemden yaklaşık olarak 8 MeV'lik enerjiler atılır. Parçacıklar sistemden çok fazla açısal momentum çekmezler. Parçacık yayınlama eşik değerine kadar parçacık yayınlama süreci devam eder.

Parçacık yayınlama eşik değerini geçtikten sonra sistemde istatistiksel gama ışınları yayınlanmaya başlar. Bu gama ışınları elektrik karakterde dipol geçişlerdir. E1 geçişleri çekirdeği yrast bant (enerjisi en düşük durumların bir araya geldiği bant) 'a doğru yaklaştırır.

Yrast bant boyunca ardışık elektrik karakterde ama kuadropole gama ışın geçişleri yayınlanmaya başlar. Böylelikle sistemden her bir gama ışını geçişi ile 2 birimlik açıl momentum alınmış olur. Sonuç olarak sistem, taban duruma geçmiş olur.

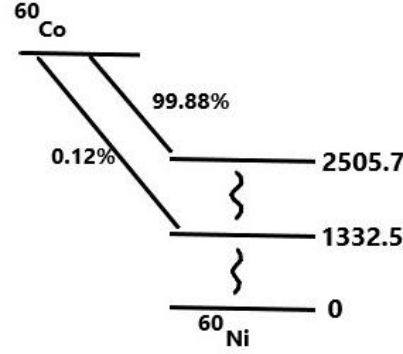
2.2 Gama Bozunumu

Gama bozunması çekirdeğin içerisinde proton ve nötronların kendi kabukları arasında yaptığı geçişte meydana gelir, alfa ve beta bozunması gibi atomun kütleğinde değişikliğe sebep olmaz. Yarı ömrü çok küçük olmasına rağmen giricilik değeri oldukça yüksek elektromanyetik dalgalar. Elektromanyetik dalga olduğu için manyetik ve elektrik alanında sapmazlar. Çekirdeklerin uyarılmış bir enerji düzeyinden daha düşük bir düzeye geçişi sırasında ortaya çıkan enerji farkı, üç temel olay aracılığıyla dış ortama aktarılmaktadır (Krane 1988). Bu olaylardan birincisi, çekirdeğin enerji fazlasını elektromanyetik bir gama fotonu şeklinde yaydığı gama bozunumu sürecidir. İkinci olay olan dahili dönüşümde, çekirdek söz konusu enerjiyi atomun iç kabuk elektronlarından birine doğrudan aktarır; böylece elektron çekirdek tarafından fırlatılarak atomdan ayrılır. Üçüncü olay ise, eğer çekirdekten yayılan gama fotonunun enerjisi 1.022 MeV 'i aşarsa, fotonun çevredeki bir çekirdek alanında bir elektron-pozitron çiftinin oluşmasına yol açtığı çift oluşumu sürecidir. Bu olaylar sayesinde, çekirdeğin enerjisini elektromanyetik radyasyon veya parçacık üretimi yoluyla atarak temel enerji durumuna geçişini sağlar.

Gama spektrumları incelendiğinde çekirdekler farklı enerji seviyelerine sahip olduğu gözlenmektedir. Yayınladıkları gamaların enerjileri (Eşitlik 2.2).

$$h\nu = \Delta E = E_{üst} - E_{alt} \quad (2.2)$$

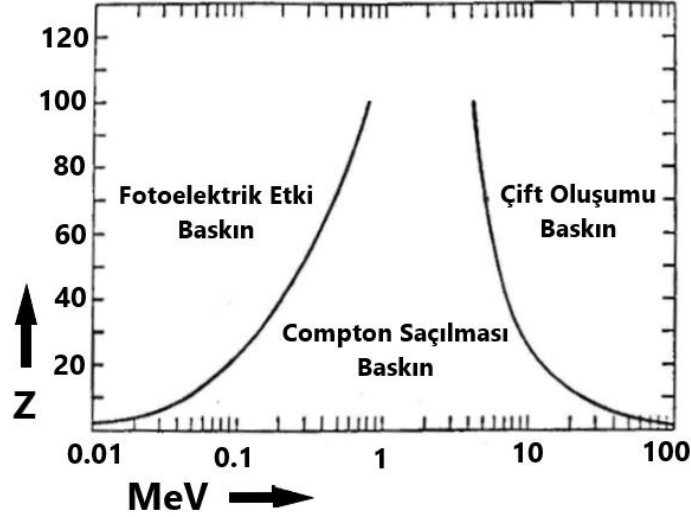
Burada $E_{üst}$ uyarılmış seviyeyi ve E_{alt} taban durumunu temsil eder. E_{alt} , taban durumu temsil ederse başka foton yayımlaması olası değildir (Krane 1988). Bunu Şekil 2.2'deki ^{60}Co bozunum şemasında görülebilir.



Şekil 2. 2 ^{60}Co 'ın bozunum şeması (Lamarsh ve Baratta 2001)

2.2.1 Gamaların madde ile etkileşimi

Gama ışınlarının maddeyle etkileşimi çoğunlukla üç ana olay ile meydana gelir. Bu olayların meydana gelmesi için gerekli olan enerjiler farklı büyüklüktedir. Nükleer bozunma sonucu açığa çıkan gama fotonları bir MeV 'den az enerjiye veya birkaç MeV 'den fazla enerjiye sahip olabilir. Bozunma sonucu açığa çıkan gamaların madde ile etkileşmesi üç ana olay ile meydana gelir. Bu olaylar, enerji farklarına göre sıralandığında i) Fotoelektrik Etki (Photoelectric Effect), ii) Compton Saçılması veya Compton Etkisi (Compton Scattering) ve iii) Çift Oluşumu (Pair Production) ile meydana gelebilir. Düşük enerjili gama ışınları, genellikle fotoelektrik etkileşimlerle maddeyle etkileşir ve yüksek Z'ye sahip maddelerde daha yaygındır. Orta enerjili gama ışınlarında Compton saçılması baskın olup, fotonun enerjisi bir elektronla paylaşılır. Yüksek enerjili gama ışınları ise, çift oluşumu (elektron-pozitron çifti) ile maddeyle etkileşir ve fotonun tüm enerjisi bu çiftin üretimi için kullanılır (Knoll 2010).



Şekil 2. 3 Gama fotonlarının madde ile etkileşimlerinin enerjiye göre baskınlığı (Knoll 2010)

2.3 Gama Bozunumu Kinematığı

Uyarılmış bir çekirdek, emisyon veya iç dönüşüm yoluyla daha düşük bir enerji durumuna bozunabilir. Bozunum enerjisi, başlangıç ve son durumların kütleleri tarafından şu şekilde belirlenir (Eşitlik 2.3):

$$M_i c^2 = M_f c^2 + E_\gamma + E_R \quad (2.3)$$

Burada, E_γ , yayılan ışın enerjisi ve E_R çekirdeğin geri tepme enerjisidir. Doğrusal momentum korunumu gereği $P_R = E/c$ yazılabilir, burada P_R geri tepen çekirdeğin momentumu ve E/c 'nin de gama ışını tarafından taşınan momentumdur. Dolayısı ile geri tepme enerjisi şu şekilde verilir (Eşitlik 2.4):

$$E_R = \frac{E^2 \gamma}{2M_f c^2} \quad (2.4)$$

1 MeV enerjiye sahip γ ışını enerjisi için, $A = 100$ kütleli bir çekirdeğin geri tepme enerjisi yaklaşık 5 eV'dir. Bu değer gama ışını enerjisinden çok daha küçüktür ve ihmal edilebilir. Böylece, γ - ışını enerjisi eşitlik 2.5'deki şekilde belirlenir:

$$E\gamma = (M_i - M_f)c^2 \quad (2.5)$$

2.4 Gama Geçişi için Seçim Kuralları

Bir γ -ışını geçişi için ilk seçim kuralı, E_0 geçişinin olmamasıdır. Eşitlik (2.6)'daki elektrik tensör operatörüne göre, elektrik momenti $\lambda = 0$ olduğunda sabittir. İki farklı nükleer durum bir sabit ile birbirine bağlanamaz. Bununla birlikte, E_0 geçişleri λ bozunma yerine iç dönüşüm yoluyla gerçekleşebilir.

$$Q_{\lambda\mu} = \zeta^{E\lambda} \sum_{j=1}^A e(j) r_j^\lambda Y_{\lambda\mu}(\Omega_j) \quad (2.6)$$

Burada (Eşitlik 2.6) $\zeta^{E\lambda}$ faz faktörüdür, $e(j)$ elektron yüküdür ve λ çok kutupluluktur. λ geçişleri çok kutupluluklarına göre kategorize edilir: $\lambda = 0$ monopol (E_0, M_0), $\lambda = 1$ dipol (E_1, M_1), $\lambda = 2$ dört kutuplu (E_2, M_2), $\lambda = 3$ oktopol (E_3, M_3) vb. λ -ışın geçişlerinin seçimi için, açısal momentum için Eşitlik (2.7)'deki üçgen koşulu ile nükleer seviyelerin J_i ve J_f arasındaki ilişki aşağıdaki gibi verilir.

$$|J_f - J_i| \leq \lambda \leq J_f + J_i \quad (2.7)$$

Çizelge 2. 1 Üçgen koşulu ve eşlik seçim kuralının kombinasyonu gösterimi

λ	1	2	3	4	5
$\pi_i \pi_f = -1$	E1	M2	E3	M4	E5
$\pi_i \pi_f = +1$	M1	E2	M3	E4	M5

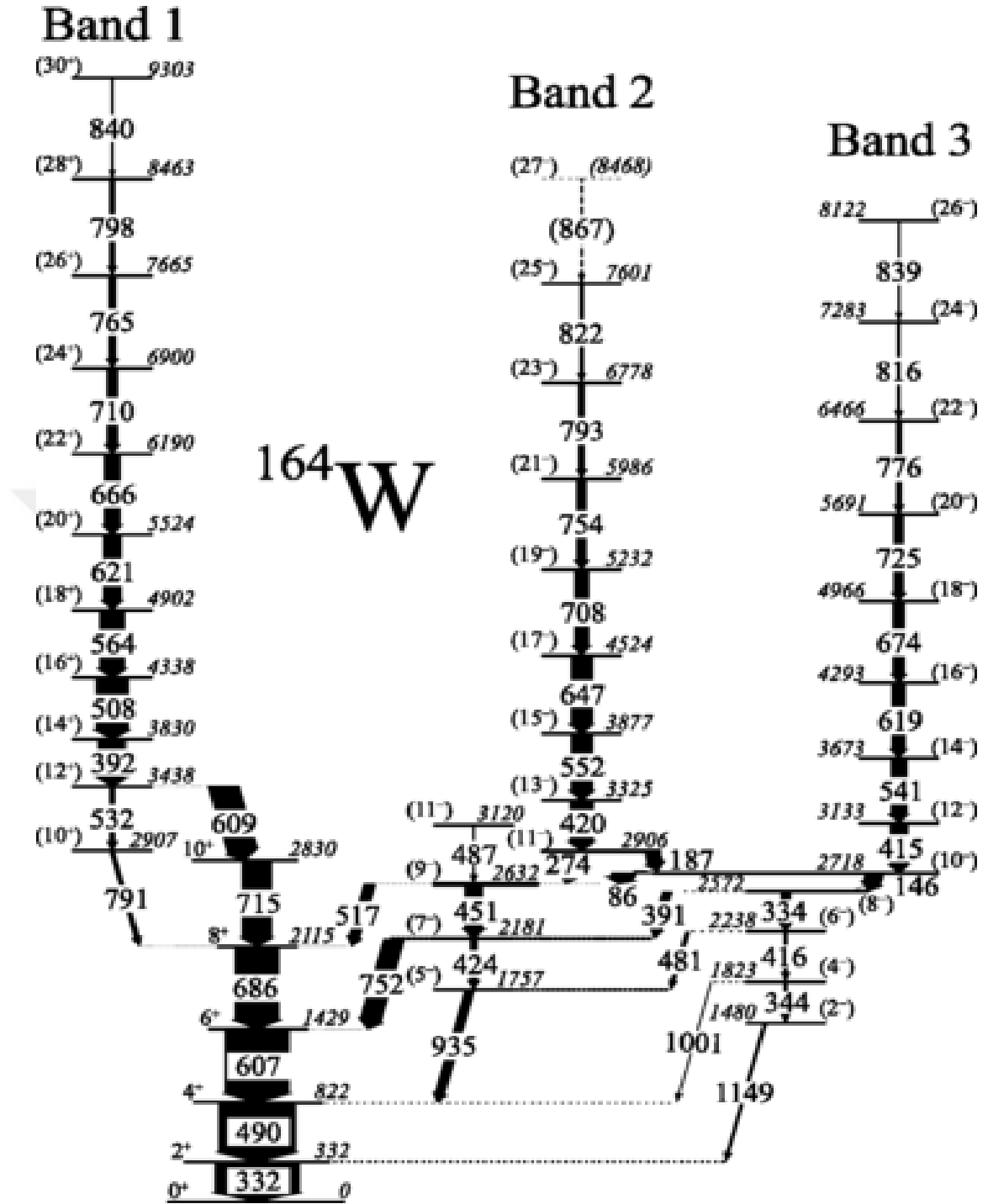
Başlangıç J_i ve son durumlar J_f arasındaki λ geçişinin çok kutuplulukları $\Delta\pi = \text{hayır}$ için, o zaman çift elektrik ve garip manyetik geçişler gözlenir. Parite değişimi $\Delta\pi = \text{evet}$ için, garip elektrik ve çift manyetik geçişler gözlenir. Üçgen koşulu ve eşlik seçim kuralının kombinasyonu, Çizelge 2. 1 'deki elektromanyetik geçişlerin sınıflandırılmasına yol açar.

Örneğin, $2^+ \rightarrow 2^+$ geçiş için, çok kutupluluklu λ ışınları M1, E2, M3 ve E4 geçişleri ile ilerleyebilir. Daha düşük çok kutuplu durumlar tercih edilir, ancak kuadropol (E2) geçişler genellikle dipol (M1) geçişlerle rekabet eder (Eşitlik 2.8) (Suhonen 2007).

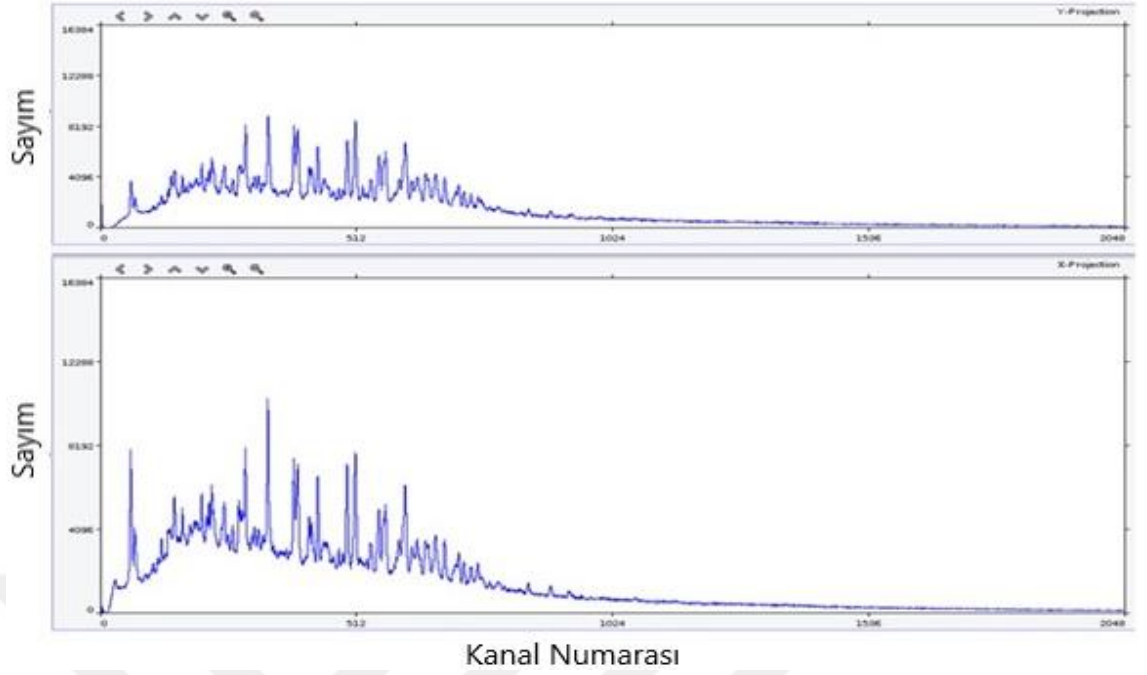
$$\pi_i \pi_f = \begin{cases} (-1)^\lambda & E\lambda \\ (-1)^{\lambda-1} & M\lambda \end{cases} \quad (2.8)$$

2.5 Gama-Gama Koinsidans Yöntemi

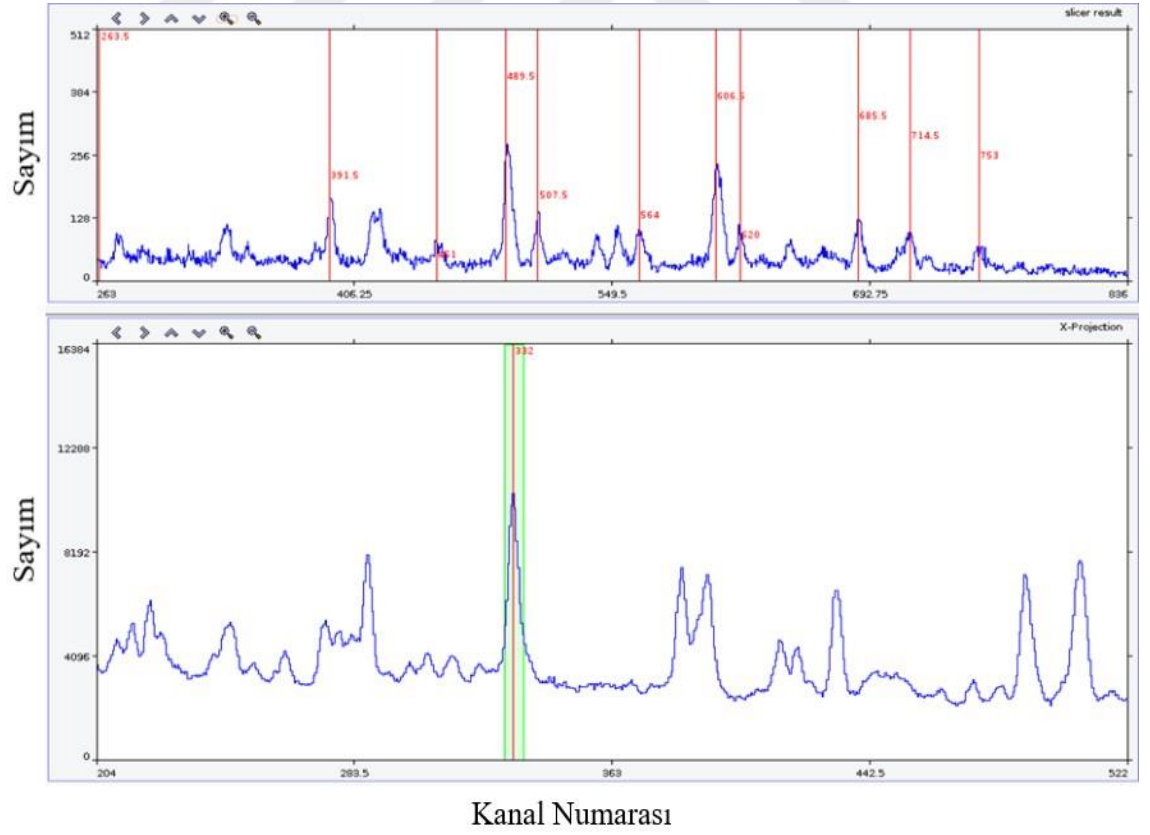
$\gamma - \gamma$ çakışıklık (coincidence) yöntemi gama fotopikleri ve Compton sürekliliğin birbiri üzerine binmesinden kaynaklı doğal fon radyasyon gürültüsünü azaltmakta önemli bir rol oynamaktadır. Diğer yandan karmaşık gama seviyeleri bulunan çekirdeklerde gama geçişlerinin hangi seviyeler arasında meydana geldiğini bulma konusunda oldukça kullanışlıdır. Şekil 2. 4, ^{164}W çekirdeğine gama geçişlerinin ait olduğu nükleer seviyeleri gösteren bir seviye şemasıdır. Şekil 2. 5, füzyon buharlaşma reaksiyonu sonucu ortaya çıkan ürün çekirdeklerden kaynaklanan gama ışımlarını veren 2-B gama-gama matrisinin X ve Y izdüşümlerini göstermektedir. Görüldüğü üzere gama spektrumunda ^{164}W tam olarak seçilememektedir. Ancak ^{164}W çekirdeğine ait 332 keV'lik gama ışını ile çakışık olan ve Şekil 2. 4 'de yer alan ^{164}W ait olan gama geçişleri ise koinsidans yardımı ile Şekil 2. 6'de açıkça görülmektedir.



Şekil 2. 4 ^{164}W çekirdeğinin seviyeler arası bozunma şeması (Joss vd. 2016)



Şekil 2. 5 Gama-gama 2-B matrisin X ve Y eksenindeki bileşenleri. Füzyon buharlaşma sonucu açığa çıkan ürün çekirdekler ile ilişkilendirilmiş spektrumlar (Rahkila 2008)



Şekil 2. 6 ^{164}W çekirdeğine ait 332 keV'lik geçiş ile çakışık olan 4+, 6+, 8+ ve 10+, 12+, 14+, 16+, 18+, 7- ve 9- seviyelere ait olan gama ışın geçişleri (Rahkila 2008)

2.6 Ortalama Ömür

Parçacıkların bozunması genellikle yarı ömür , bozunma sabiti veya ortalama ömür cinsinden ifade edilir . Bozunma olasılığı bir dağılım fonksiyonu olarak ifade edilebilir. Radyoaktif bozunmalar olasılık kanunlarına uyduğu için belirli bir çekirdeğin ne zaman bozunacağını söylemek mümkün değildir. Tek bir atomun ortalama ömür süresini ise aşağıdaki Eşitlik (2.9) ile elde ederiz.

$$f_{\text{bozunum}}(t) = A e^{-\lambda t} \quad (2.9)$$

Burada λ bozunum sabitidir. Bu dağılım fonksiyonunu normalize etmek için (Eşitlik 2.10):

$$\int_0^{\infty} f_{\text{bozunum}}(t) dt = \int_0^{\infty} A e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} A e^{-\lambda t} \Big|_0^{\infty} = \frac{A}{\lambda} = 1 \quad (2.10)$$

Belirli bir parçacığın t süresi içinde bozunma olasılığı, 0'dan t 'ye bozunma dağılım fonksiyonunun integrali ile verilir. Hesaplamak istenilen nicelik bu değildir, parçacığın bozunmadan var olacağı ortalama süre istenmektedir. Bir parçacığın bozunmama olasılığı, bozunma olasılığının bir eksisidir. Bir parçacığın t zamanında kalma olasılığı ise şu şekildedir (Eşitlik 2.11):

$$P_u(t) = 1 - \int_0^t \lambda e^{-\lambda t'} dt' = 1 - [-e^{-\lambda t'}]_0^t = e^{-\lambda t} \quad (2.11)$$

Ortalama ömür süresi, bu olasılık fonksiyonu kullanılarak zamanın ortalama değeridir (Eşitlik 2.12).

$$\langle t \rangle = \tau = \frac{\int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt}{\int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt} = \frac{\int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt}{\frac{1}{\lambda} [-e^{-\lambda t}]_0^{\infty}} = \lambda \int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt \quad (2.12)$$

Bu integral, parçalarına göre değerlendirilebilir. $x = \lambda t$ biraz daha doğrudan hale getirilir (Eşitlik 2.13):

$$\langle t \rangle = \lambda \int_0^{\infty} x e^{(-x)} dx \quad (2.13)$$

İntegral dönüşümü uygulanarak (Eşitlik 2.14 ve 2.15):

$$u dv = d(uv) - v du \quad (2.14)$$

$$u = x, \quad du = dx, \quad dv = e^{(-x)} d(x), \quad v = -e^{(-x)} \quad (2.15)$$

İntegral dönüşümleri yerine yazıldığında (Eşitlik 2.16 ve 2.17):

$$\langle t \rangle = \tau = -x e^{(-x)} \Big|_0^{\infty} - \frac{1}{\lambda} \int_0^{\infty} -e^{(-x)} dx \quad (2.16)$$

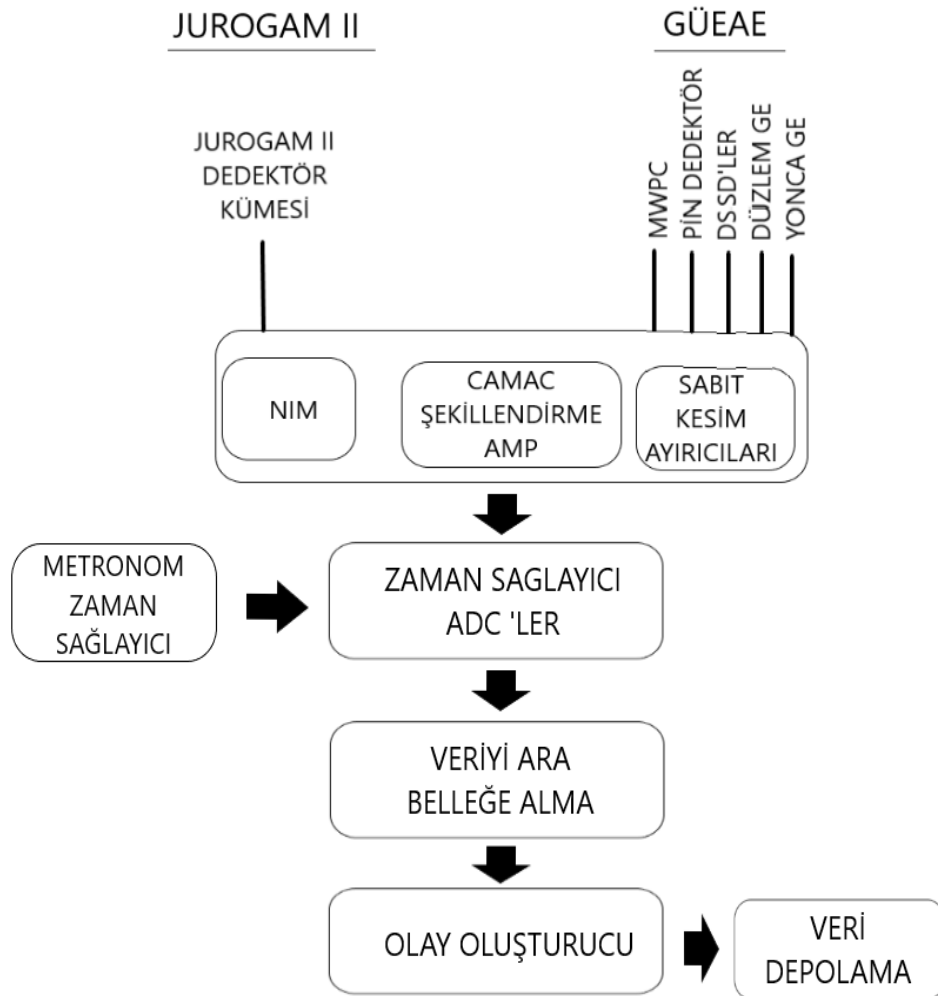
$$\langle t \rangle = \tau = 0 + \frac{1}{\lambda} [e^{(-x)}]_0^{\infty} = \frac{1}{\lambda} \quad (2.17)$$

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad (2.18)$$

Burada (Eşitlik 2.18) τ ortalama ömrü temsil eder (Bateman 1910).

2.7 Toplam Veri Okuma

Toplam veri okuma-TVO (Triggeless Data Read) elde edilen tüm verileri işleme ve işlenen verilere zaman etiketleri koymak sureti ile çeşitli zamansal ve konumsal korelasyon yaparak ürün çekirdekler ile gamaların eşleştirilmesini sağlar. Yöntemin bize sağladığı diğer bir avantaj ise belirli bir zaman periyodunda elde edilen verilerden rastgele gama ışınlarını ortadan kaldırabilme yeteneği vermesidir. Bu avantaj bize ilgilenilen aralıkta elde edilen gamaların sadece ürün çekirdek ile ilişkili olduğunu anlamamıza yarar. Kısacası TVO yöntemi çok nadir gerçekleşen olayların ölü zaman sorununa takılmadan aynı anda hızlı veri toplama ve incelemeye olanak tanıyan bir yöntemdir (Lazarus 2001).



Şekil 2. 7 Toplam veri okuma (TVO) elektroniği şematik gösterimi (Lazarus 2001)

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Tungsten (W) izotoplarının uyarılmış seviyeleri ^{106}Cd hedef çekirdeğinin ^{60}Ni mermi çekirdekleri tarafından 270 MeV enerjide bombardıman edilmesi ile üretilmiştir. ^{60}Ni mermi çekirdekleri, K130 Siklotron ivmelendiricileri kullanarak 270 MeV mertebesine ivmelendirilme / hızlandırma sonucu ^{166}Os çekirdeği elde edilmiştir. Bu çekirdek 2 proton 1 nötron veya 2 nötron yayımlayarak tungsten izotoplarını meydana getirmiştir. Bu tez kapsamında kullanılan ve yukarıda özelliklerini sıraladığımız reaksiyonda ortaya çıkan gama ışınları JUROGAM II (15 adet HPGe) Germanyum dedektör kümesi ile dedekte edilmiştir. Tepkimeye girmeyen mermi çekirdekler, tepkime ürünlerinden Geri Tepme Ürünü Taşıma Birimi-GÜTB (Recoil Ion Transport Unit) tarafından ayıklanmıştır. Daha sonra ürün çekirdekler GÜTB'nin çıkış noktasında bulunan Gama Ürün Elektron Alfa Etiketleme-GGEAE (Gamma Recoil Electron Alpha Tagging) adlı spektrometrenin giriş penceresine düşürülmüş ve ürün etiketleme yöntemi ile bir şekilde GÜTB'den geçen mermi çekirdekler ayıklanmıştır. Uyarılmış seviyelerin ortalama ömürlerini ölçmede kullanılan bir yöntem olarak Geri tepme ürünü mesafe Doppler kayması yöntemi (GMDK) uygulanabilmesi için JUROGAM II dedektör kümesinin hedef haznesine hedef-yavaşlatıcı mesafe ayar cihazı yerleştirilmiştir.

Ortalama ömrü ölçülecek çekirdeğin üretilmesi için kullanılacak reaksiyon çeşidi deneyin amacına göre seçilir. Bir kez uyarılmış seviye üretildikten sonra, çekirdek bu seviyede ortalama bir zaman aralığında kalacaktır. Ortalama ömür ölçme teknikleri doğrudan ve dolaylı ölçümler olmak üzere ikiye ayrılmıştır; doğrudan ortalama ömrü ölçmemizi sağlayan ve bozunma genişliğini ölçerek dolaylı olarak ortalama ömrü bulmamızı sağlamaktadır (Nolan ve Sharpey-Schafer 1979).

GMDK'da Doppler kayması ürün çekirdeğin yavaşlatıcı levhadan geçerken hızında meydana gelen değişimden kaynaklanmaktadır. Çekirdeğin hedef levha ve yavaşlatıcı levha arasındaki mesafeyi aldığı süre ile yapmış olduğu gama ışını yayınlanması, bize çekirdeğin uyarılmış seviyede ne kadarlık bir zaman diliminde bulunduğu hakkında fikir verir. Uyarılmış nükleer seviyelerin ortalama ömürleri GMDK kullanılarak uzun zamandan beri ölçülmektedir. Diferansiyel bozunum eğrisi yöntemi (DBEM), araştırma

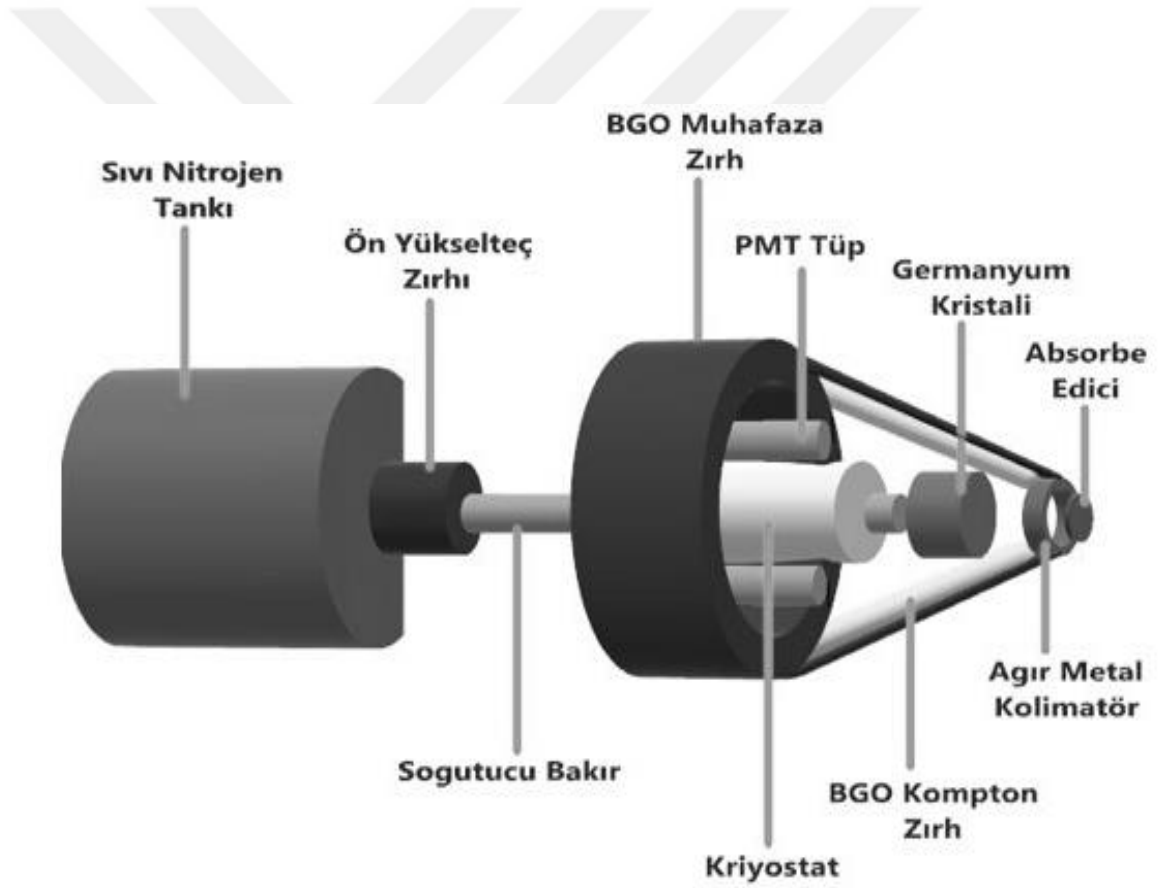
altında olan uyarılmış seviyenin ortalama ömrünü hesaplamadaki karmaşıklığı azaltmak için ortaya atılmıştır. Bu yöntemde tüm bozunum eğrilerini ikinci dereceden diferansiyel denklemle ifade edebiliriz ve bu diferansiyel denklemler inceleme altındaki seviyenin tüm besleyici geçişleri biliniyorsa deneysel gözlemlerden elde edilebilir. Tezin bu bölümünde, JUROGAM-II dedektör kümesi, Hedef-yavaşlatıcı mesafe ayar cihazı, Geri tepme ürünü taşıma birimi, gama ürün elektron alfa etiketleme birimi, analiz yazılımları, Geri tepme ürünü mesafe Doppler kayması yöntemi, diferansiyel bozunum eğrisi yöntemi, dedektör kalibrasyonu ve ölçüm metot-validasyonu açıklanmaktadır.

3.1 JUROGAM-II Dedektör Kümesi

JUROGAM II spektrometresi %5,8 Fotopik verime ve 1.3 MeV enerjide 2 KeV enerji çözünürlüğüne sahiptir. Yarıiletken germanyum dedektörlerden (HPGe) oluşur. JUROGAM kümesi 15 adet faz 1 (Şekil 3.1) tipinde ve 24 adet Clover HPGe (Şekil 3.2) tipinde dedektörden meydana gelir. Faz 1 n-tipi germanyum dedektörlerinden oluşur. Kristali 70 mm uzunluğa ve 69-75 mm çapa sahiptir. Clover HPGe dedektörleri isim olarak yonca anlamına gelir ve şekil 3.2'deki gibi yonca şeklinde tasarlanmıştır. Her biri 50mm çap ve 70 mm uzunluğa sahip 4 adet HPGE dedektörün bir araya getirilmesi ile oluşturulan yapı Işınlama yönüne 105° ve 76° açı ile yerleştirilmiştir. Germanyum dedektörler bizmut germanat ya da bizmut germanyum oksit (BGO) ile zırhlanması, kristalden seken gamaların elimine edilmesi için gereklidir. Dedektörler gerçekleşen deneye göre belli açılarda halkalara yerleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deney için kullanılan halkaların açıları ve dedektörlerin konumları aşağıdaki tabloda belirtilmiştir (Pakarinen vd. 2020).

Çizelge 3. 1 JUROGAM II dedektör kümesinde yer alan dedektörlerin beam doğrultusuna göre konumları (Pakarinen vd. 2020)

Halka	Konuyllandığı Açđ	Dedektör Tipi	Dedektör Sayısı
1	158 °	Faz 1	5 HPGe
2	134 °	Faz 1	10 HPGe
3	105 °	Clover	12 HPGe
4	76 °	Clover	12 HPGe



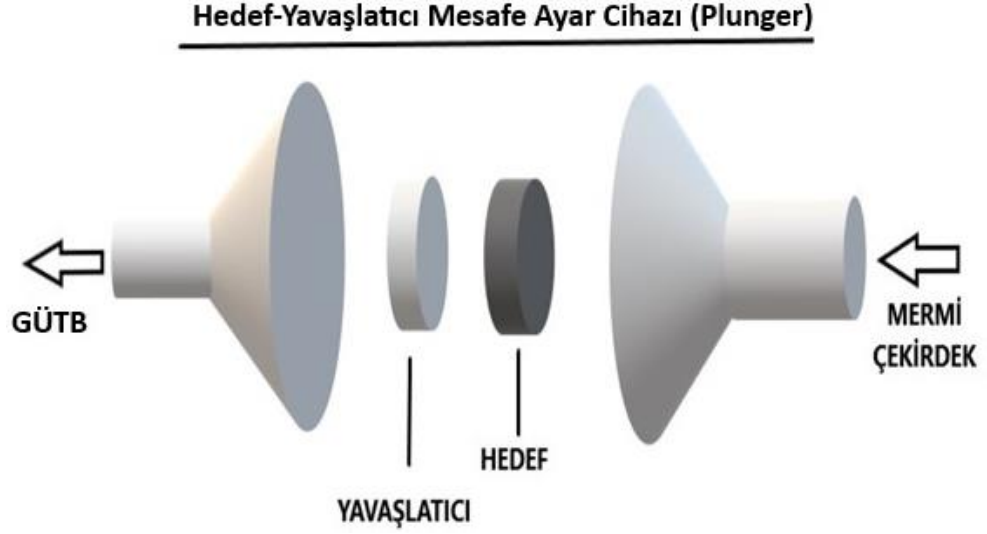
Şekil 3. 1 Faz 1 HPGe + BGO dedektör bileşenlerinin detaylı şematik gösterimi (Siciliano vd. 2013)



Şekil 3. 2 Yonca HPGe (Clover) dedektörünün şematik gösterimi (Siciliano vd. 2013)

3.2 Hedef-Yavaşlatıcı Mesafe Ayar Cihazı (Plunger)

Bu tezde kullanılan verilerin elde edilmesinde Bağılı Olmayan Nükleer Durumlar için Diferansiyel Plunger (Differential Plunger for Unbound Nuclear States-DPUNS) kullanılmıştır. DPUNS Finlandiya'daki Jyvaskyla Üniversitesi hızlandırıcı laboratuvarında bulunan JUROGAM-II dedektör kümesinde kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Tasarım olarak Köln Hedef-yavaşlatıcı mesafe ayar cihazı referans alınmıştır. JUROGAM II dedektör kümesinde yer alan GÜTB ve GGEAE ile bütünleşik olarak çalışır. DPUNS hedef-yavaşlatıcı mesafe ayar cihazı çalışma prensibi , kendisi bir hedef haznesine sahiptir ve bu hazne içerisine reaksiyonun hedef materyali ve Doppler kaymasını sağlaması için yavaşlatıcı levha yerleştirilir (Şekil 3.3). Doppler kayması için kullanılan metal levha ve reaksiyonun hedef malzemesi, hedef-yavaşlatıcı mesafe ayar cihazı düzeneğinde birbirlerine paralel hale getirilir. Metal levhanın bağlandığı halka sabit tutulur, hedef levhanın bağlandığı halka hareket ettirilerek yavaşlatıcı-hedef arası uzaklık ayarlanır. Bu iki levha arasında meydana gelen elektrostatiklenme ile kondansatör işlevi görür. Mesafeler, metal levha ile hedef çekirdek levhanın meydana getirdiği kondansatörlerin levhaları arasındaki potansiyeli ölçerek hesaplanır (Taylor vd. 2013).

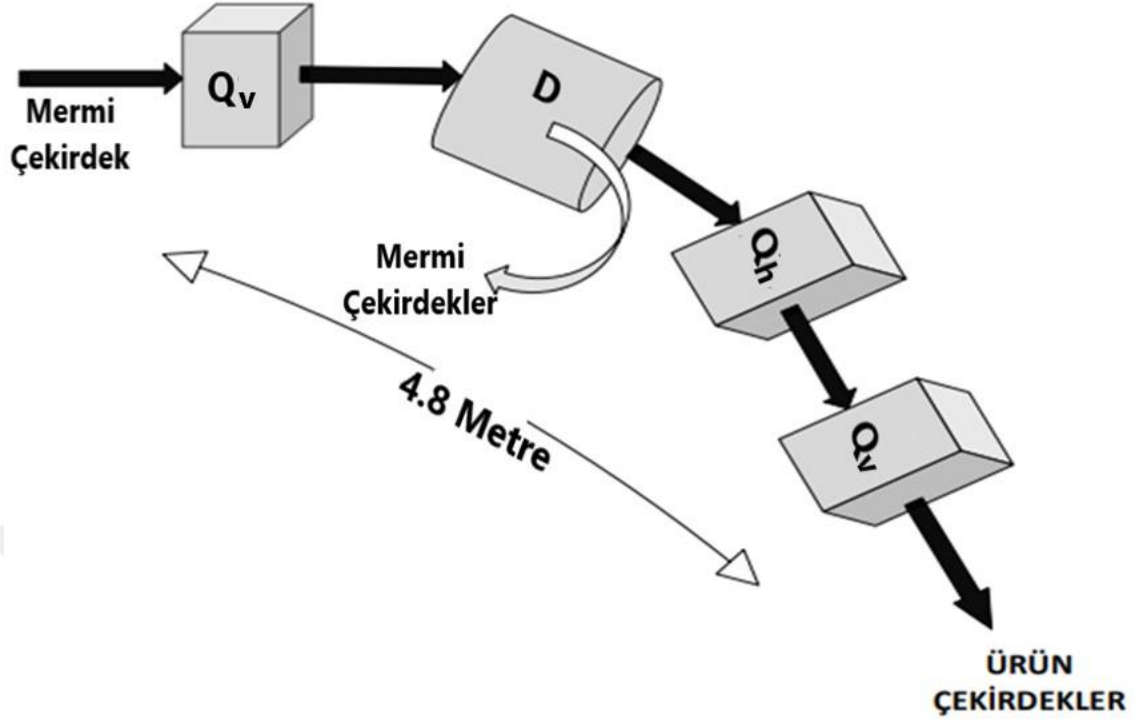


Şekil 3. 3 Hedef-yavaşlatıcı mesafe ayar cihazının deney düzeneğine entegrasyonunun gösterimi (Taylor vd. 2013)

3.3 Geri Tepme Ürünü Taşıma Birimi

Finlandiya'daki Jyväskylä Üniversitesi hızlandırıcı laboratuvarında yer alan Geri Tepme Ürünü Taşıma Birimi-GÜTB (Recoil Ion Transport Unit-RITU) füzyon buharlaşma reaksiyonlarında sıklıkla kullanılır. İçerisinde Helyum gazı vardır ve 0.6 mb basınca sahiptir. GÜTB üzerinden uçuşu ≈ 1 mikro saniyedir ve GÜTB'nin yaklaşık %50 iletim verimi vardır (Saygı 2013). İletim olasılığının maksimum seviyede tutulması için ideal bir basınca ihtiyaç duyulur. Çünkü çok düşük basınçlarda iyonlar uzaysal olarak ayrılmaya başlar. Daha yüksek basınç durumunda ise saçılma artar ve odak düzleminde sapmalar yaşanır. Sapma ve saçılma miktarı arttığı durumlarda dedektörün sınırlı yüzey alanı ile etkileşim olasılığı azalır.

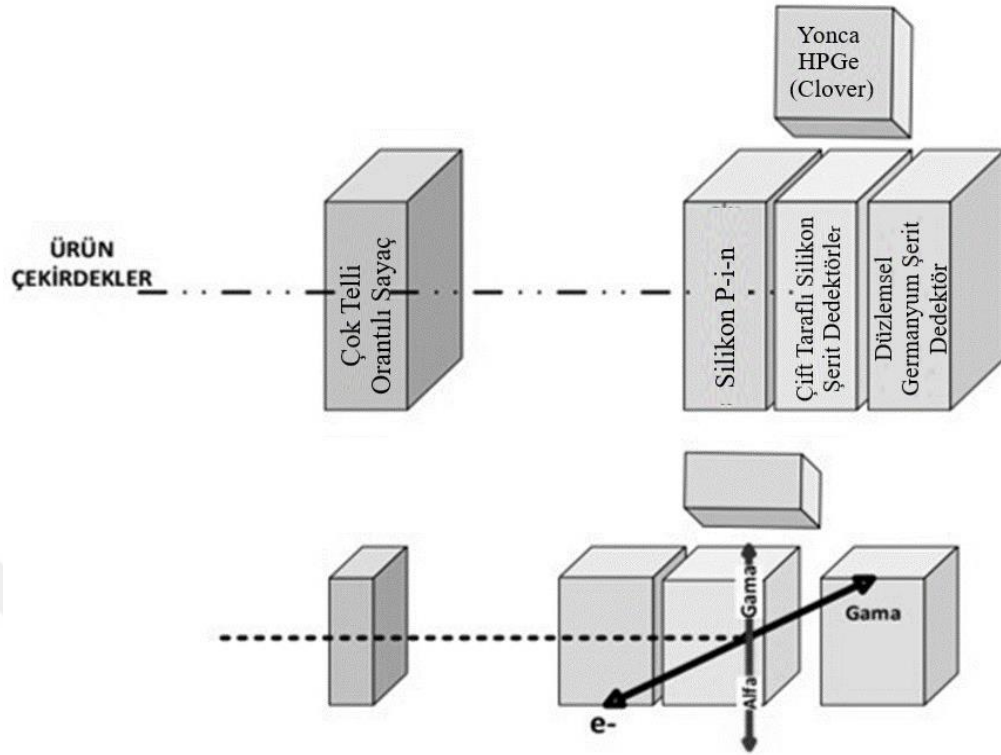
Optik konfigürasyonuna bakıldığında $Q_v D Q_h Q_v$ sahiptir. Burada Q_v dört kutuplu ve dikey yapıya sahip mıknatıslara, D manyetik çift kutuplu ve Q_h ise dört kutuplu ve yatay mıknatıslara sahip olduğu anlamına gelir. Diğer gaz dolu ayırıcılarda kullanılan DQQ yapısından farklı olarak GÜTB'de ön kısma bir dört kutuplu mıknatıs eklenmiştir. Bu yapılan ekleme hedef malzeme etrafında açılı kaybı olmadan gama dedektör dizisi (Clover) eklemeyi mümkün kılmıştır (Sarén vd. 2011). GÜTB ile ilgili bilgiler Şekil 3.4'te yer almaktadır.



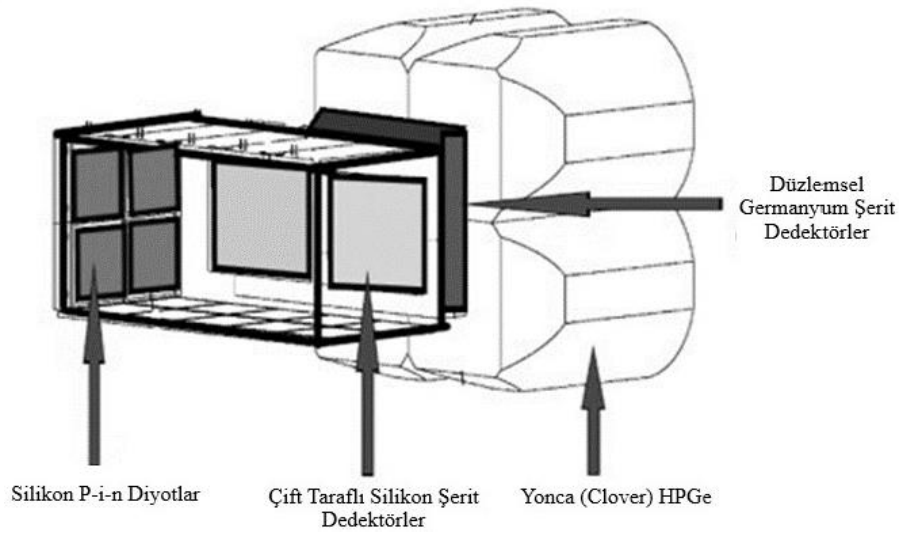
Şekil 3. 4 Geri tepme ürünü taşıma birimi (GÜTB) optik konfigürasyonunun ($Q_v D Q_h Q_v$) şematik gösterimi (Sarén vd. 2011)

3.4 Gama Geri Tepme Elektron Alfa Etiketleme Yöntemi

Gama Geri Tepme Elektron Alfa Etiketleme Yöntemi-GGEAE (Gamma Recoil Electron Alpha Tagging-GREAT) ürün çekirdeklerin GÜTB'den geçtikten sonra yapmış oldukları bozunumların belirlenmesine yarayan bir spektrometredir. Tasarımında (Şekil 3.6) kullanılan Silikon, Germanyum, P-i-n ve Gazlı dedektörleri sayesinde alfa, beta, proton, gamma, X-ışını ve elektronları dedekte edilmesine ve düşük tesir kesitine sahip çekirdeklerin incelenmesine olanak sağlamaktadır. JUROGAM II deney düzeneğine entegre olmadan kendi başına bir spektrometre olarak da çalışabilme özelliğine sahiptir. GÜEAE bölümleri detaylandırıldığında Çok Telli Orantılı Sayaç (MWPC), Silikon P-i-n Diyotlar(Si PIN Diode), Çift Taraflı Silikon Şerit Dedektörler(DSSD), Yonca (Clover) HPGe Dedektörler ve Düzlemsel Germanyum Şerit Dedektörlerinden(Planar Ge) oluşmaktadır (Andreyev vd. 2003).



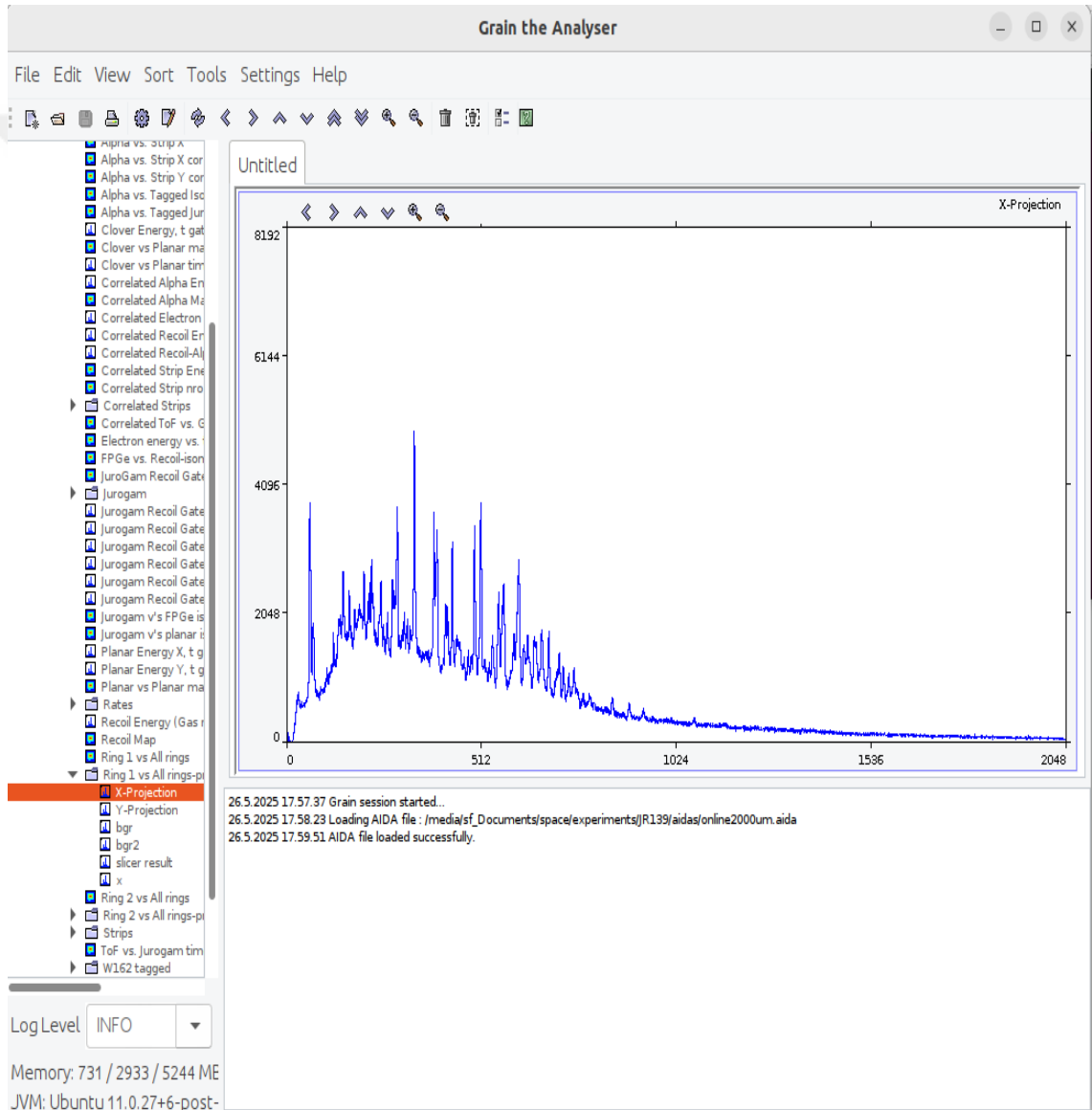
Şekil 3. 5 GGEAE spektrometresinde gerçekleşen olayların dedekte edilmesinin şematik gösterimi



Şekil 3. 6 GGEAE spektrometresinin detaylı gösterimi (Page 2003)

3.5 Grain Veri Analizi Programı

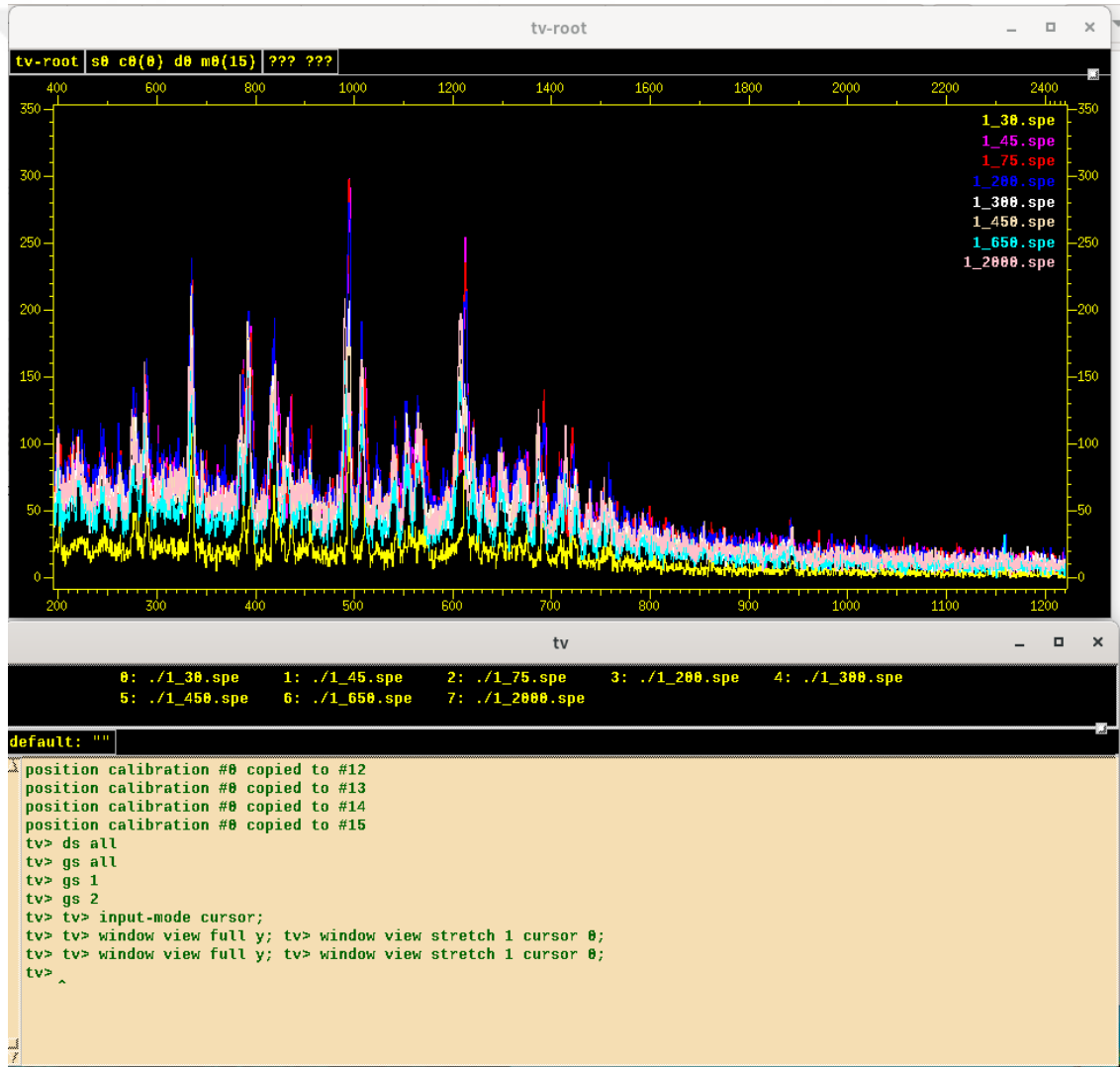
Java programlama dilinde yazılmış bir veri analiz programıdır. Toplam veri okuma (TVO) sisteminde elde edilen verileri hem çevrim içi hem de çevrim dışı olarak eksiksiz, bağımsız ve platformlar arası incelemeye olanak tanır. Taşınabilir, temiz nesne yönelimi, birleştirilmiş kullanıcı ara yüzü ve ağ kitaplığı sayesinde kullanıcıya geniş bir kolaylık sağlar (Rahkila 2008).



Şekil 3. 7 Grain veri analizi programı kullanıcı ara yüzünün görüntüsü (Rahkila 2008)

3.6 TV Spektrum ve Matris Analizi Programı

TV, bir spektrum ve matris analiz programıdır. Elde edilen çakışık(coincidence) gama verileri bir dizi işlemten geçirildikten sonra spektrum dosyası olarak farklı bir formatta (.spe) kaydedilir. Kaydedilen bu spektrum dosyası TV programı üzerinden bir arayüze geçirilerek analize olanak sağlar. Programın sunduğu avantajlar incelenen dosyanın program arayüzünde kalibrasyonu yapabilme, belirli kısımları keserek detaylı inceleme yapabilme ve gama-gama çakışık matrise enerji şartı koyarak istenilen gama ile kolere spektrum elde etmeye olanak sağlar (Fitzler 2000).



Şekil 3. 8 TV spektrum ve matris analizi programı kullanıcı ara yüzünün görüntüsü (Fitzler 2000)

Geri tepme ürünü mesafe Doppler kayması yöntemi (GMDK), nükleer uyarılmış seviyelerin $10^{-12} - 10^{-9}$ saniye mertebesinde ömür sürelerini ölçmek için kullanılan bir tekniktir. 1950'li yıllardan beri geliştirilen bu teknik gama spektroskopisi için standart bir hale gelmiştir. Doğrudan seviyelerin ömür süresi ölçümlerinde hızlandırıcı yardımı ile yapılan deneylerde ilgi çekici hale gelmiştir. Yeni dedektörlerin üretilmesi ve deney düzeneklerine yapılan eklemeler ile egzotik çekirdeklerin keşfedilmesi GMDK yöntemine ilgiyi artırmıştır.

GÜTB GİRİŞİ

Germanyum Dedektör

γ'

γ

θ

MERMİ ÇEKİRDEK

Yavaşlatıcı

Hedef

$t = \infty$

$x = v \cdot t$

$t = T$

$t = 0$

$0 < t < T$ Doppler Kayması Gözlenmez

$T < t < \infty$ Doppler Kayması Gözlenir

25

$$E = E_0 * (1 + \beta \cos \theta) \quad (3.1)$$

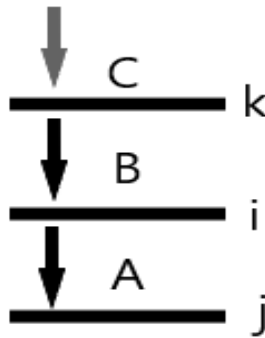
Eşitlik (3.1) yardımı ile bu enerji hesaplanır. Burada $\beta = v/c$ ve E_0 ise yavaşlatıcı folyodan geçtikten sonra yayınlanan (γ') gama enerjisidir.

Hedef ve yavaşlatıcı folyo arasında geçen sürede oluşan γ geçişleri iki şekilde tanımlanır. Bunlardan ilki normal bileşendir. Normal bileşen hedef ve yavaşlatıcı arasında oluşan gamaların pik alanını temsil etmek için kullanılır. Diğer bileşen ise yavaşlatıcı folyoda yavaşlayan çekirdeğin yayınladığı gamaların pik alanını temsil etmek için kullanılan yavaşlatılmış bileşendir. Bu iki bileşen bozunum eğrisi şeklinde formülize edildiğinde (Eşitlik 3.2 ve 3.3)(Dewald 2012).

$$\text{Normal} = \frac{I_n(x)}{I_y(x) + I_n(x)} \quad (3.2)$$

$$\text{Yavaşlatılmış} = \frac{I_y(x)}{I_y(x) + I_n(x)} \quad (3.3)$$

Olarak ömür süresi ölçümünde kullanılırlar. Bu bozunum eğrisi denklemlerinin betaman denklemleri ile düzenlenmesi gerekir çünkü ilgilenilen seviye sayısı arttığı için besleyici (feedr) seviye birden fazla olacaktır.



Şekil 3. 10 Örnek seviye şeması

3.8 Diferansiyel Bozunum Eğrisi Metodu

Diferansiyel Bozunum Eğrisi Metodu (DBEM), GMDK'da hedef-yavaşlatıcı mesafe ayar cihazının içine yerleştirilen yavaşlatıcı folyo sayesinde uyarılmış çekirdeğin hızında azalma meydana getirilir ve yayınladığı gama enerjisi ikiye ayrılır. Burada yavaşlatıcı bileşenden çıkan normal bileşen yerine yavaşlatıcıdan çıkan bileşen hesaba dahil edilir. Tek seviye analizi için (Eşitlik 3.4) (Dewald 2012):

$$\frac{d}{dt} n_i(t) = \lambda_i n_i(t) + \sum_{k=i+1}^N \lambda_k n_k(t) b_{ki} \quad (3.4)$$

Formülünü düzenlediğimizde ve integralini aldığımızda (Eşitlik 3.5 ve 3.6):

$$-n_i(t) = -N_i(t) + \sum_{k=i+1}^N b_{ki} N_k(t) \quad (3.5)$$

$$N_j(t) = \int_t^{\infty} \lambda_j n_j(t') dt' \text{ ve } \int_t^{\infty} \frac{d}{dt'} n_i(t') dt' = -n_i(t) \quad (3.6)$$

Burada $j=i$ bileşenine eşittir, b_{ki} ise k 'den i 'ye dallanma oranını temsil eder (Eşitlik 3.7).

$$\frac{d}{dt} N_i(t) = \lambda_i [n_i(\infty) - n_i(t)] \text{ olur ve } n_i(\infty) = 0 \quad (3.7)$$

i seviyesi için ömür süresi aşağıdaki Eşitlik (3.8) ile ifade edilir.

$$\tau_i = \frac{1}{\lambda_i} = \frac{-N_i(t) + \sum_k b_{ki} N_k(t)}{\frac{d}{dt} N_i(t)} \quad (3.8)$$

$$N_i(t) \rightarrow R_i(t) = \frac{N_i(t)}{\alpha_i} \quad (3.9)$$

$$N_k(t) \rightarrow R_k(t) = \frac{N_k(t)}{\alpha_k} \quad (3.10)$$

Eşitlik (3.9) ve (3.10) yerine yazıldığında Eşitlik (3.8) aşağıdaki şekilde düzenlenir.

$$\tau_i = \frac{1}{\lambda_i} = \frac{-R_i(t) + \sum_k \alpha_k b_{ki} R_k(t)}{\frac{d}{dt} R_i(t)} \quad (3.11)$$

Eşitlik (3.11)'de α_{ki} dedektörlerin verimlerini ($\epsilon(E_{\gamma})$) ve açısal dağılımlarından ($\omega(\theta)$) kaynaklı bir düzeltme faktörüdür. α_{ki} Eşitlik (3.12) olarak ifade edilir.

$$\alpha_{ki} = \frac{\omega_k(\theta) \in (E_{\gamma k})}{\omega_i(\theta) \in (E_{\gamma i})} \quad (3.12)$$

Dolaylı olarak ölçüm için hedef malzeme ve yavaşlatıcı arasındaki mesafe belirli aralıklarla değiştirilerek her ölçüm noktası için ayrı ayrı ömür süresi hesaplanır. Hedef malzeme ve yavaşlatıcı arasında oluşan A ve B geçişleri için bileşenleri zaman aralığında tanımladığımızda $B_t^\infty \rightarrow B_y$ $B_0^t \rightarrow B_n$ ve $A_t^\infty \rightarrow A_y$ $A_0^t \rightarrow A_n$ olur. B için B_y yavaşlatılmış bileşeni, B_n ise normal bileşeni temsil eder.

$$\tau(x) = \frac{-\{C,A_y\}(x) + \{C,B_y\}(x) \alpha}{\frac{d}{dt}\{C,A_n\}(x)} \frac{1}{v} \text{ (Dolaylı)} \quad (3.13)$$

Eşitlik (3.13)'de; α tüm geçişlerin ortalama değerini, v ise ürün çekirdeğin ortalama hızını temsil eder ve denkleme eklememiz gerekir. α 'nın detaylı şekilde açılımı (Eşitlik 3.14);

$$\alpha(x) = \frac{\{C_n,A_y\}(x) + \{C_n,A_n\}(x)}{\{C_n,B_y\}(x) + \{C_n,B_n\}(x)} \quad (3.14)$$

Elde edilen ömür süresinde C'den gelen katkıları engellemek için B'ye Enerji şartı metodu (Gated) kullanılır. Bu metot ile sadece B'den A'ya geçiş elde edilir. C'yi denklemden çıkarttığımızda şu şekilde düzenlenir ve doğrudan ölçüm (Eşitlik 3.15) elde edilmiş olur.

$$\tau(x) = \frac{\{B_n,A_y\}(x)}{\frac{d}{dt}[\{B_n,A_n\}(x)]} \frac{1}{v} \text{ (Doğrudan)} \quad (3.15)$$

Doğrudan enerji şartı konulması ile elde edilen ömür süresi formülü bu şekilde yazılır. Her iki formülde aynı sonucu vermektedir.

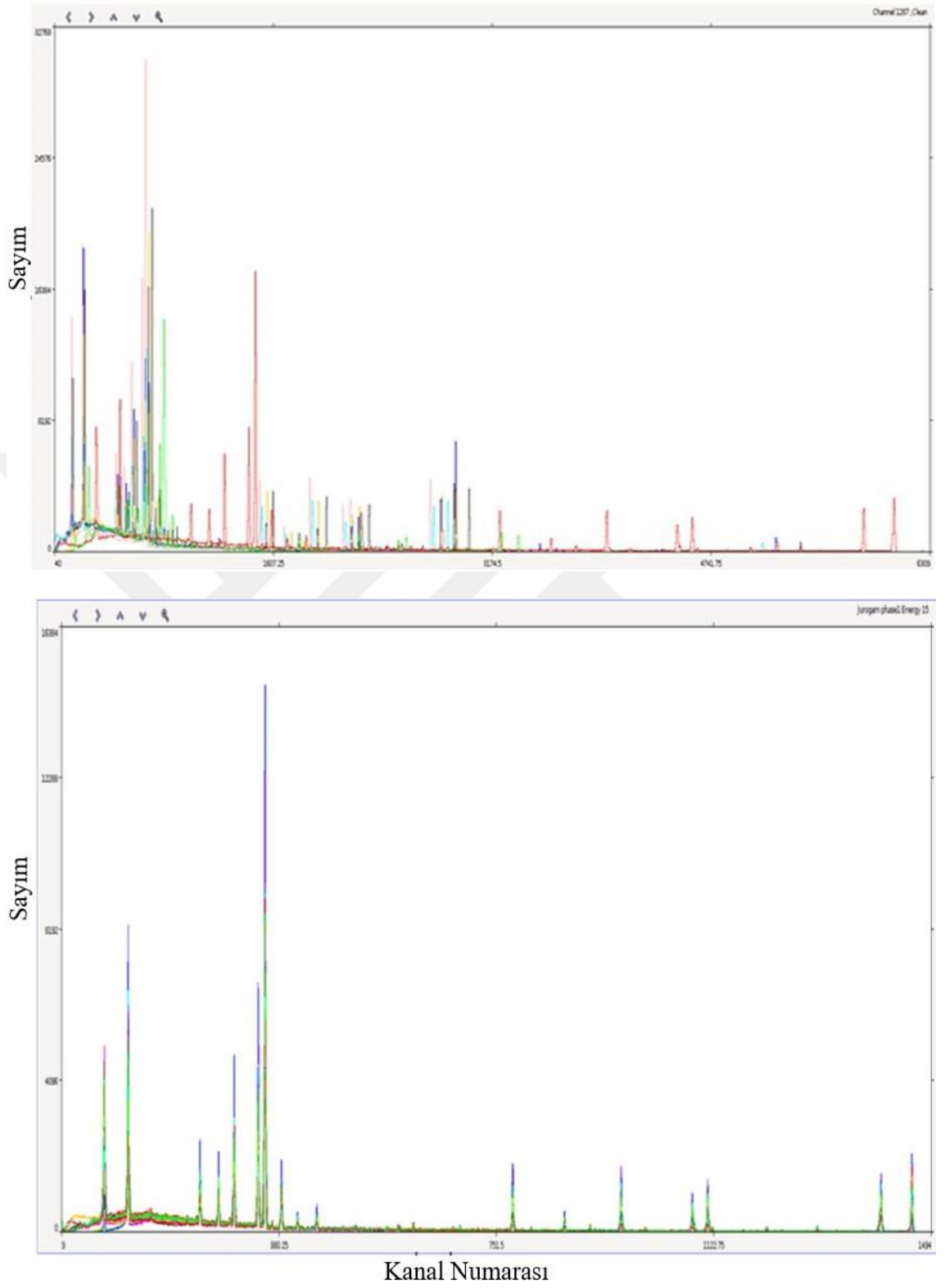
3.9 Dedektör Kalibrasyonu

HPGe dedektörlerine belirli kalibrasyonların ve ayarlamaların yapılması gereklidir. Bunlardan ilki, enerji kalibrasyonudur ve bu işlem dedektör çıkışında oluşan sinyalin genliği ile soğurulan enerji arasındaki ilişkiyi kurmayı amaçlar. Dedektör çıkışındaki sinyal genliği, soğurulan enerji ile orantılıdır, ancak sinyal yükselticisinin kazancına bağlı olarak darbe yüksekliği değişir. Bu nedenle, sisteme pulsların hangi enerji soğurmalarına karşılık geldiği bilgisi sağlanmalıdır. Bu işlem, enerji kalibrasyonu olarak adlandırılır ve bu amaçla standart gama kaynakları kullanılır. Standart kaynaklar dedektörün karşısına yerleştirilir ve sayımlar alınır. Bu sayımların pik tepe noktalarına karşılık gelen kanal numaraları not edilir. Kanal numaraları ve karşılık gelen gama enerjileri çizildikten sonra, elde edilen grafik genellikle doğrusal bir fonksiyon şeklinde seçilir. Bu sayede, enerjisi bilinmeyen bir pikin enerjisi fonksiyona göre bulunur.

Enerji ayırımı yapabilen dedektörlerin çıkış sinyalleri genellikle mili volt (mV) ile volt (V) arasında değişen seviyelerde olup, bu sinyaller enerji ile doğru orantılıdır. Bu sinyaller, enerjiye karşılık gelen sayım grafiği (spektrum) oluşturulabilmesi için yükselteçten çıkan şekillendirilmiş ve yükseltilmiş sinyaller analog-dijital dönüştürücüye (ADC) oradan da kaydedilmek üzere çok kanallı analizöre (MCA) gönderilir. MCA'da sinyaller genliklerine göre kanallara yerleştirilerek spektruma dönüştürülür (Knoll 2010). HPGe dedektörlerinin kalibrasyonu doğru yapılmazsa, doğru enerji ölçümleri yapılamaz ve elde edilen veriler yanıltıcı olur. Kalibrasyon olmayışı, yanlış enerji spektrumları elde edilmesine ve hatalı analizlere sebep olur. Ayrıca, Doppler etkisi gibi hareketli kaynakların doğru tespiti de mümkün olmaz. Kalibrasyon uygunsuzluğu, deneysel bulguların güvenilirliğini azaltır ve hatalı bilimsel sonuçlar doğurur.

Bu çalışmada, JUROGAM II dedektör kümesinin enerji kalibrasyonunun gerçekleştirilmesi amacıyla, çoklu gama enerjilerine sahip ^{152}Eu ve ^{133}Ba radyoizotop kaynakları kullanılmıştır. ^{152}Eu çekirdekleri, β -bozunumu ile ^{152}Sm ve ^{152}Gd 'nin uyarılmış durumlarına geçer ve sonrasında 122-1408 keV enerji aralığında γ -ışını salımlarını gerçekleştirir (Grigorescu vd. 2002). ^{133}Ba çekirdekleri ise, β -bozunumu ile ^{133}Cs 'nin uyarılmış durumlarına geçerek 80-384 keV enerji aralığında γ -ışınları üretir (Schötzig vd. 1977). Bu aralık, ^{152}Eu 'nun katkı sağladığı enerji aralığından daha dar olmakla birlikte, JUROGAM II ve CLOVER dedektörlerinin enerji verimliliğinde önemli değişiklikler gösteren bir bölgeyi kapsar ve bu bölgedeki ek veri noktaları kalibrasyon sürecinin doğruluğunu artırmaktadır.

Kalibrasyon işlemi sırasında, her iki kaynak sabit bir ölçüm geometrisinde dedektör kümesinin merkezine yerleştirilmiş ve yeterli sayım istatistiği elde edilene kadar veri toplanmıştır. Elde edilen spektrumlar, çok kanallı analizör (ADC/MCA) sistemine kaydedilmiş ve spektrumda gözlemlenen gama piki merkezleri, Gaussian dağılım fonksiyonu kullanılarak analiz edilmiştir. Pik merkezlerinden elde edilen kanal numaraları, literatürde bilinen gama enerjileriyle (Grigorescu vd. 2002; Schötzig vd. 1977) eşleştirilmiş ve enerji-kanal ilişkisi yöntemiyle enerji kalibrasyonu yapılmıştır. Kalibrasyon eğrisi, $E = ax^2 + bx + c$ formunda belirlenmiş olup, her bir HPGe dedektörü için bireysel kalibrasyon eğrileri oluşturulmuştur. Bu sayede, JUROGAM II sisteminin farklı dedektörlerinin karakteristikleri dikkate alınarak yüksek çözünürlüklü gama spektroskopisi uygulamalarında kullanılmak üzere hassas enerji kalibrasyon parametreleri elde edilmiştir.



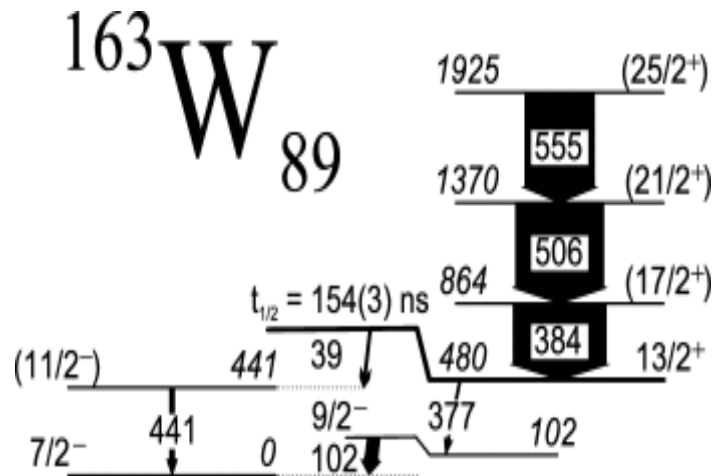
Şekil 3. 11 JUROGAM-II faz I germanyum kristalleri için ^{152}Eu ve ^{133}Be gama kaynakları kullanılarak elde edilen ham ve kalibre edilmiş spektrumları (Rahkila 2008)

3.1 Yöntem Geçerli Kılma

Ortalama ömür ölçümü için kullanılan yöntemin geçerli kılınması (validasyonu) yapılmıştır. Bu tez kapsamında ^{164}W çekirdeğine ait uyarılmış seviyelerin ortalama ömür ölçümlerini gerçekleştirmeden önce literatürde yer alan ve yine bu tezde kullanılan deney verisinden üretilmiş ^{163}W çekirdeğine ait $17/2^+$ uyarılmış seviyesine ait ortalama ömür ölçülmüş ve literatürdeki değer ile karşılaştırılması yapılmıştır.

3.1.1 ^{163}W radyoizotopunun nükleer uyarılmış seviyeleri

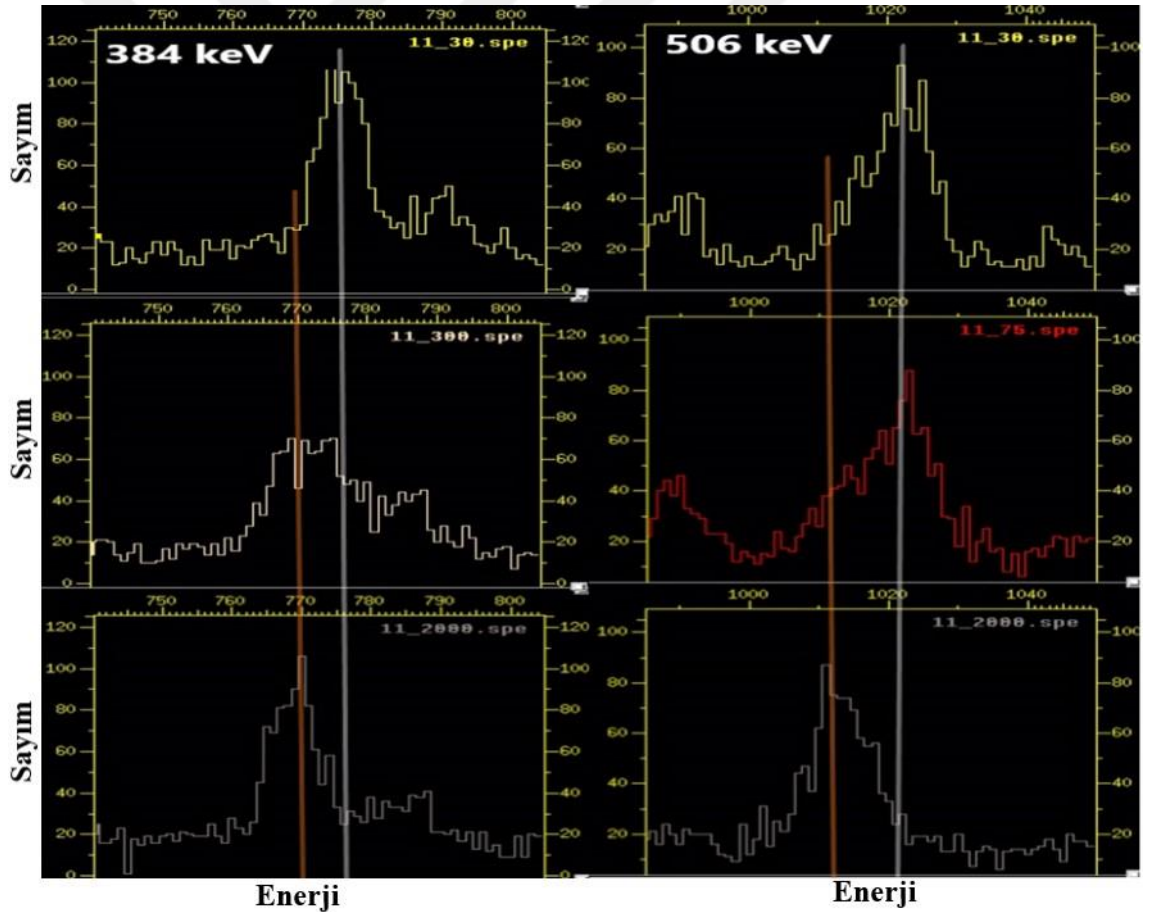
^{166}Os , 2 proton ve 1 nötron yayınlarak ^{163}W 'e dönüşmüştür. JUROGAM II ile elde edilen gama-gama matrisleri Grain veri analizi programında kullanılarak spektrumlar elde edilmiş ve ^{163}W 'in $25/2^+$ nükleer uyarılmış seviyeye kadar gama geçişleri spektrumunda gözlenmiştir. ^{163}W çekirdeğinin nükleer uyarılmış seviyeleri Lewis vd. (2019) tarafından yapılan çalışma ile ölçülmüştür. Lewis (2019) 'in $17/2^+$ seviyesi için bulduğu değerler Çizelge 3. 2'de gösterilmiştir. Bu tez çalışmasında öncelikle kullanılan metotların doğru şekilde anlaşılması ve uygulanmasının tekrar edilmesi için $17/2^+$ seviyesi tekrar ölçülmüştür. Elde edilen ölçüm sonuçları Lewis (2019) 'in çalışması ile karşılaştırılmış ve yaklaşık aynı sonuca ulaşılmıştır. Buradan yola çıkarak ^{164}W çekirdeğinde spin-kuantum sayısı 12^+ ve 14^+ olan seviyelerin ölçümleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. ^{163}W 'in nükleer uyarılmış seviyeler arası bozunma şeması (Lewis vd. 2019)

3.1.2 ^{163}W radyoizotopunun normal ve yavaşlatılmış pikleri

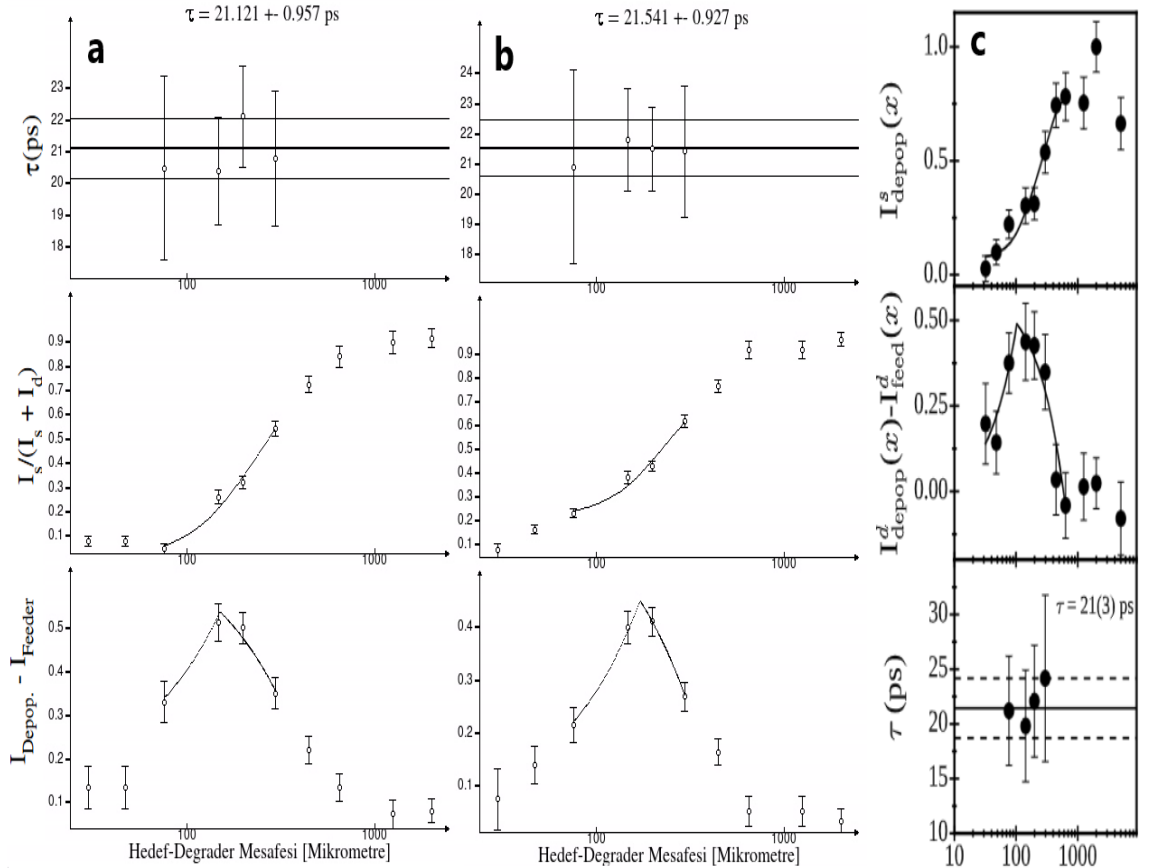
^{163}W 'nin $17/2^+$ seviyesi için 384 keV (Sönümleyen) ve 506 keV (Besleyen) enerjiye sahip gamalarının JUROGAM-II dedektör kümesi yardımı ile çakışık gama pikleri dedekte edilmiştir. Beam doğrultusunda Halka-1 158° açı ile 5 adet (HPGe) ve Halka-2 134° açı ile 10 adet (HPGe) dedektör konumlandırılmış, bu konumlarda yer alan dedektörlerin seçilmesindeki amaç Doppler kaymasındaki açı terimidir. Bu açı konumlarında Doppler kayması net bir şekilde görülmektedir. Hedef - Yavaşlatıcı arası mesafe için 30 ve 2000 μm arasında 10 adet uzaklık kullanılmıştır. Dedektörlerden elde edilen veriler GMDK metodu kullanılarak, normal (Turuncu çizgi) ve yavaşlatılmış (Beyaz çizgi) pikleri TV spektrum ve matris analizi programı ile farklı mesafelerdeki oluşumları analiz edilmiştir.



Şekil 3. 13 ^{163}W 'nin $17/2^+$ seviyesinin 384 keV ve 506 keV enerjideki gamalarının normal (Turuncu çizgi) ve yavaşlatılmış (Beyaz çizgi) piklerinin gösterimi (Fitzler 2000)

3.1.3 ^{163}W radyoizotopunun ortalama ömür ölçümleri

Demet doğrultusunda Halka-1 158° açılı ile 5 adet (HPGe) ve Halka -2 134° açılı ile 10 adet (HPGe) dedektör JUROGAM II dedektör kümesinde konumlandırılmıştır. DBEM metodu kullanılarak, Köln Üniversitesi Fizik Bölümü tarafından NAPATAU adlı ve veri tabanlı bir ortalama ömür analiz programı (Saha 2003) kullanılarak ^{163}W izotopuna ait $17/2^+$ seviyesinin ortalama ömür süreleri hesaplanmıştır. Elde edilen veriler sırası ile üst panel τ değerlerinin ağırlıklı ortalamasını, orta panel (Normal)/(Normal + Yavaşlatılmış)’dan elde edilen verilerin normalize edilmiş eğrisini, alt panel ise sönmüleyen ve besleyen geçişlerin farklarından elde edilen verilerle oluşturulan ve orta panelde gösterilen eğrinin türevidir. Lewis (2019)’in yaptığı çalışmadaki ortalama ömür süreleri ile Çizelge 4.1’de karşılaştırılmış ve tutarlı olduğu gözlenmiştir.



Şekil 3. 14 NAPATAU ortalama ömür analiz programında elde edilen ^{163}W izotopuna ait $17/2^+$ seviyesine ait grafikler. a) $\theta=158^\circ$ b) $\theta=134^\circ$ c) Lewis (2019) (Saha 2003)

Çizelge 3. 2 ^{163}W radyoizotopunun ortalama ömür değerleri

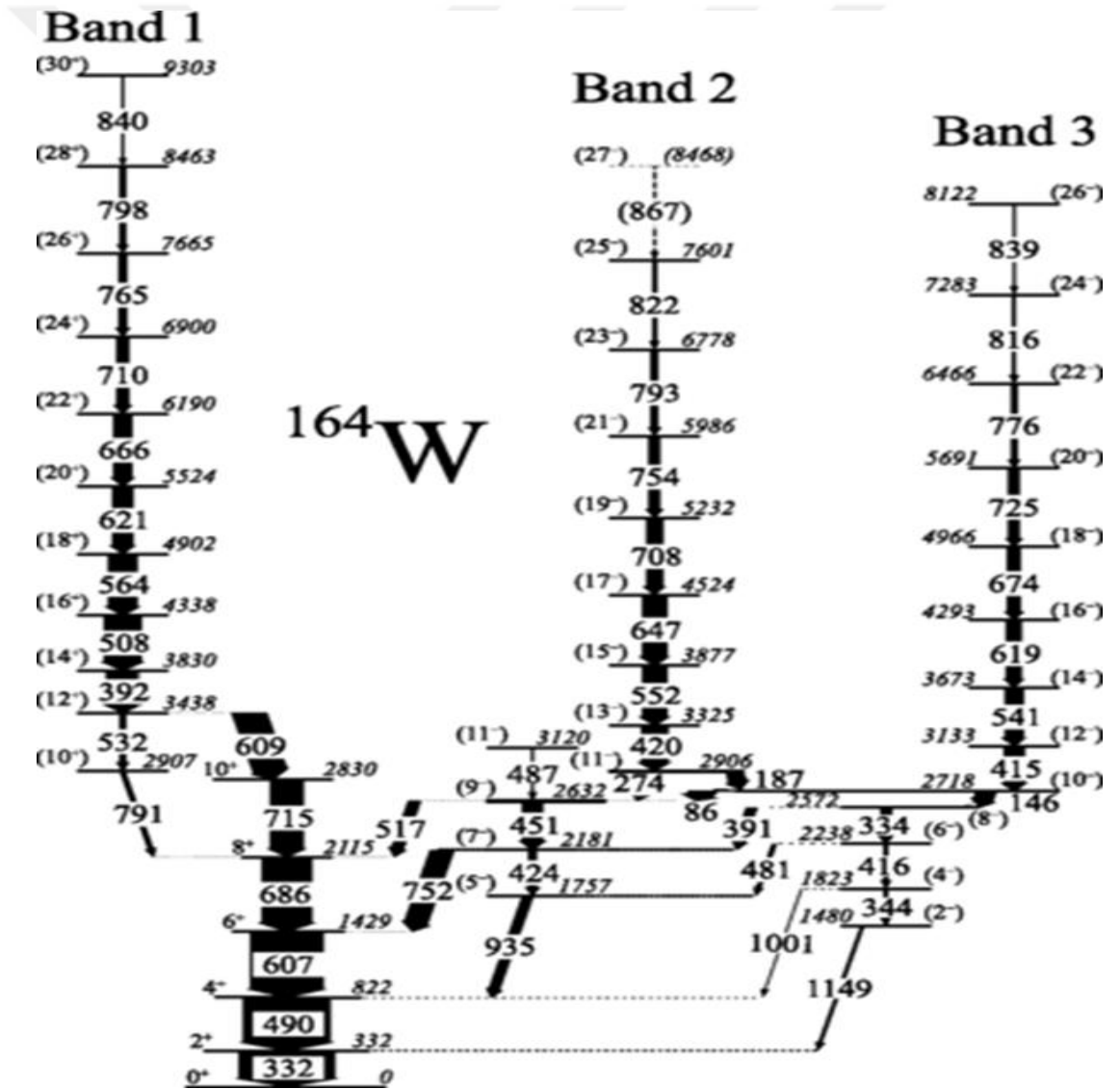
Radyoizotop	Spin Seviyesi	Gama Işını Enerjisi (keV)	Ortalama Ömür		
			Halka 1	Halka 2	Ortalama
			$\approx \tau_1$ (ps)	$\approx \tau_2$ (ps)	$\approx \tau_{ort}$ (ps)
^{163}W	$17/2^+ \rightarrow 13/2^+$	384	21.12 ± 0.96	21.54 ± 0.93	21.34 ± 1.00
Referans τ			21.3^1	21.4^1	22^1

¹Lewis (2019), ps = pikosaniye

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1 ^{164}W Radyoizotopunun Nükleer Uyarılmış Seviyeleri

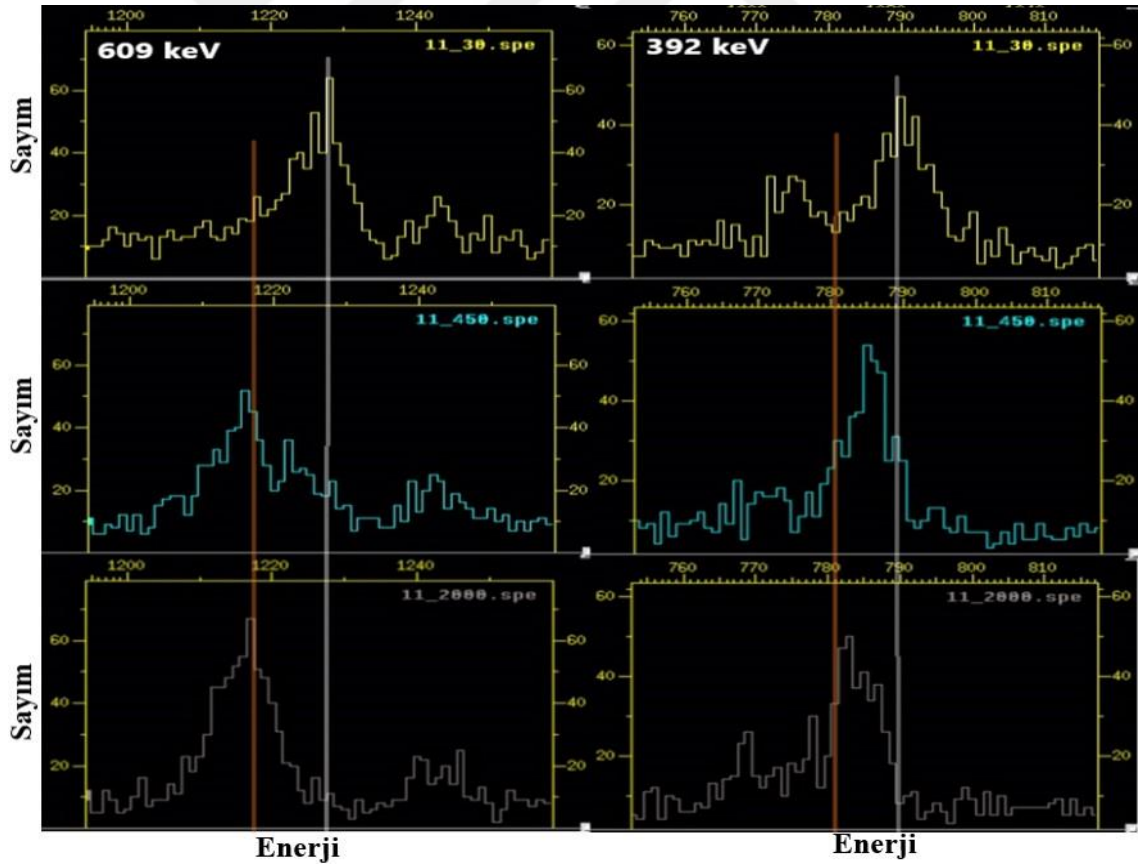
^{166}Os , 2 proton yayınlarak ^{164}W 'e dönüşmüştür. JUROGAM II ile elde edilen gama-gama matrislerin ölçüm için iyi bir sayım istatistiğine sahip olduğu gözlenmiştir. Grain veri analiz programı kullanılarak spektrumlar elde edilmiş ve ^{164}W 'in 16^+ nükleer uyarılmış seviyeye kadar gama geçişleri spektrumunda gözlenmiştir. Elde edilen veriler ile ilk defa 12^+ ve 14^+ seviyelerinin yarılanma ömür/ortalama ömür değerleri hesaplanmıştır.



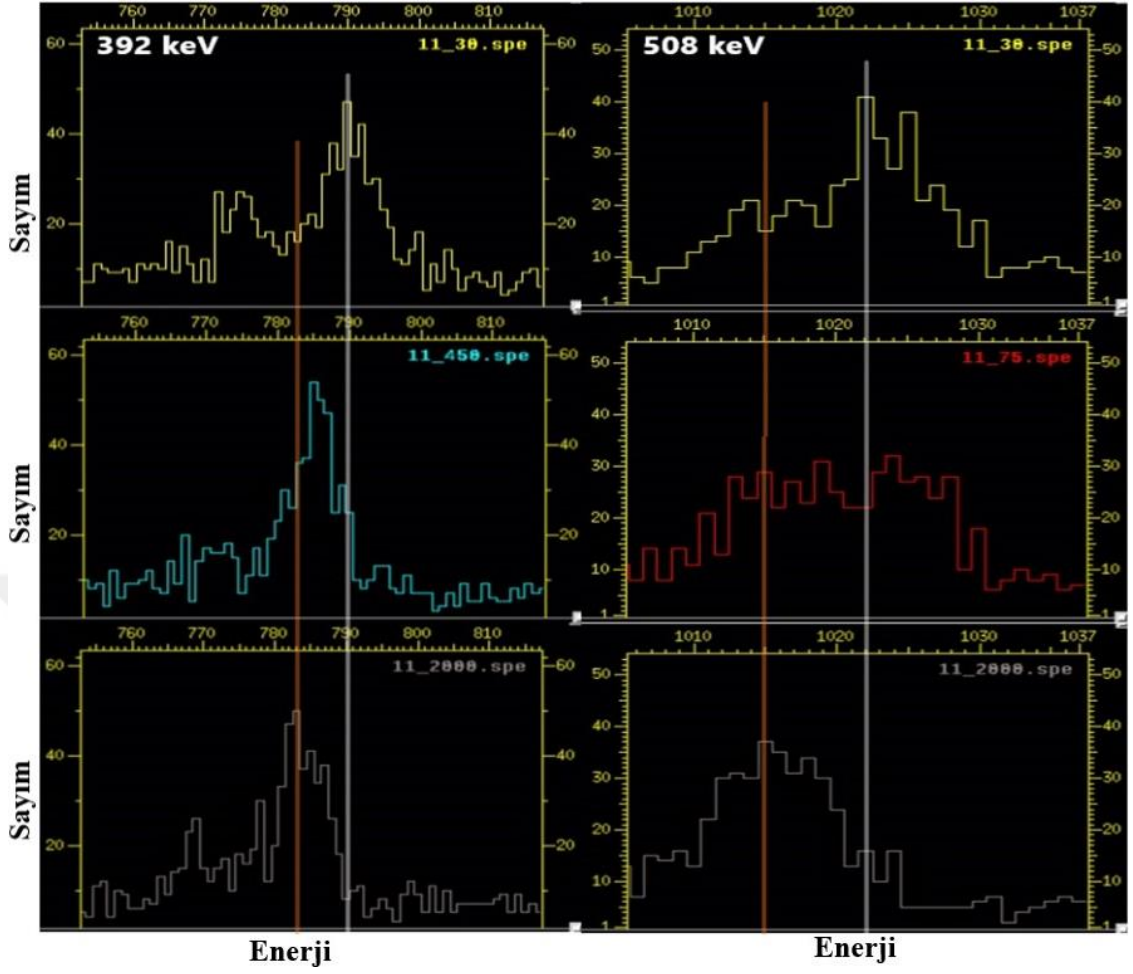
Şekil 4. ^{164}W 'in nükleer uyarılmış seviyeler arası bozunma şeması (Joss vd. 2016)

4.2 ^{164}W Radyoizotopunun Normal ve Yavaşlatılmış Pikleri

^{164}W 'nin 12^+ seviyesi için 609 keV (Sönümleyen) ve 392 keV (Besleyen) enerjiye sahip gamaları ile 14^+ seviyesinin 392 keV (Sönümleyen) ve 508 keV (Besleyen) enerjiye sahip gamalarının JUROGAM-II dedektör kümesi yardımı ile çakışık gama pikleri dedekte edilmiştir. Demet doğrultusunda Halka-1 158° açı ile 5 adet (HPGe) ve Halka-2 134° açı ile 10 adet (HPGe) dedektör konumlandırılmış, bu konumda yer alan dedektörlerin seçilmesindeki amaç Doppler kaymasındaki açı terimidir. Bu açı konumunda Doppler kayması net bir şekilde görülmektedir. Hedef - Yavaşlatıcı arası mesafe için 30 ve 2000 μm arasında 10 adet uzaklık kullanılmıştır. Dedektörlerden elde edilen veriler GMDK metodu kullanılarak, normal (Turuncu çizgi) ve yavaşlatılmış (Beyaz çizgi) pikleri TV spektrum ve matris analizi programı ile farklı mesafelerdeki oluşumları ilk defa bu çalışmada analiz edilmiştir.



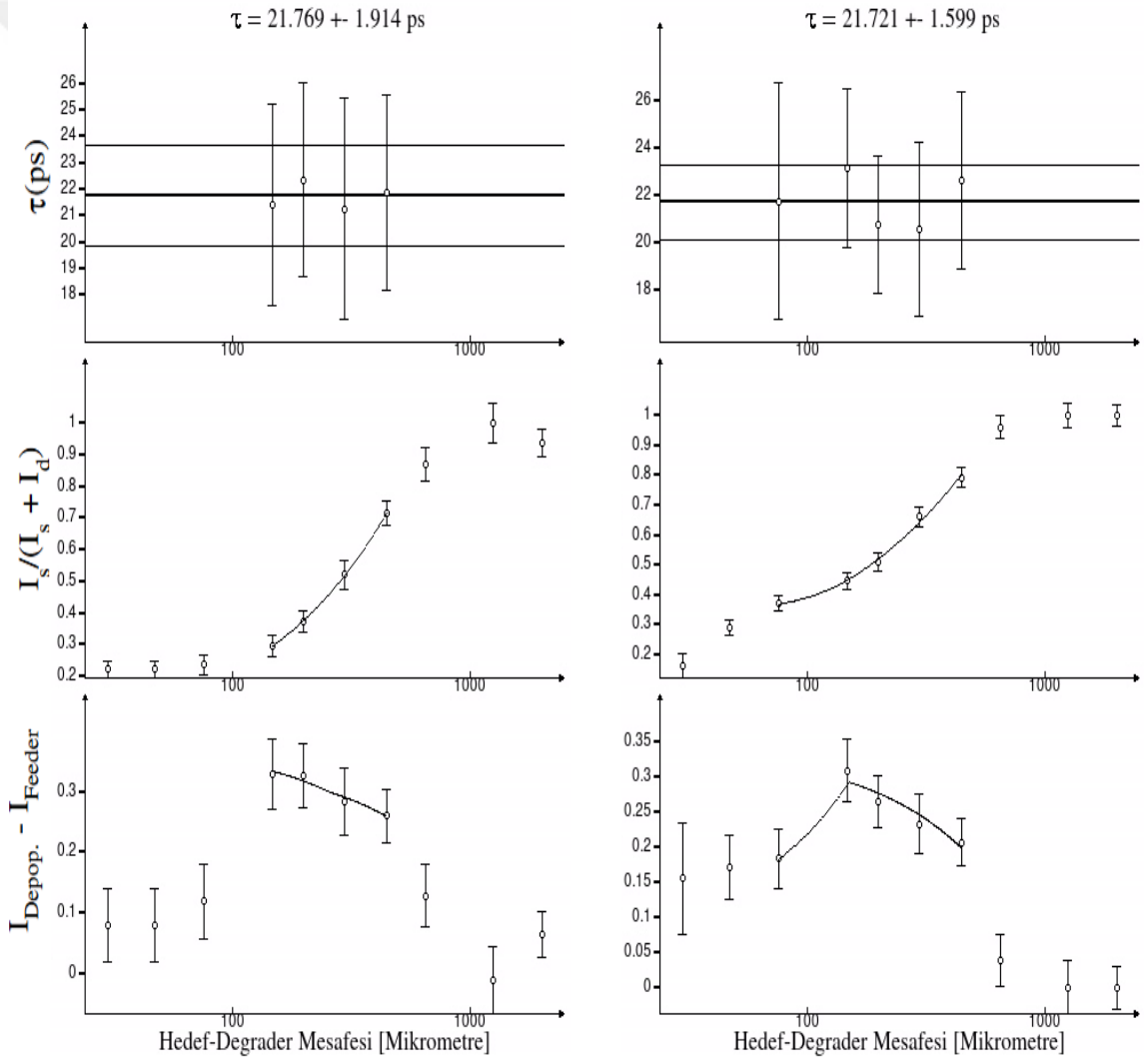
Şekil 4. 2 ^{164}W 'nin 12^+ seviyesinin 609 keV ve 392 keV enerjideki gamalarının normal (Turuncu çizgi) ve yavaşlatılmış (Beyaz çizgi) piklerinin gösterimi (Fitzler 2000)



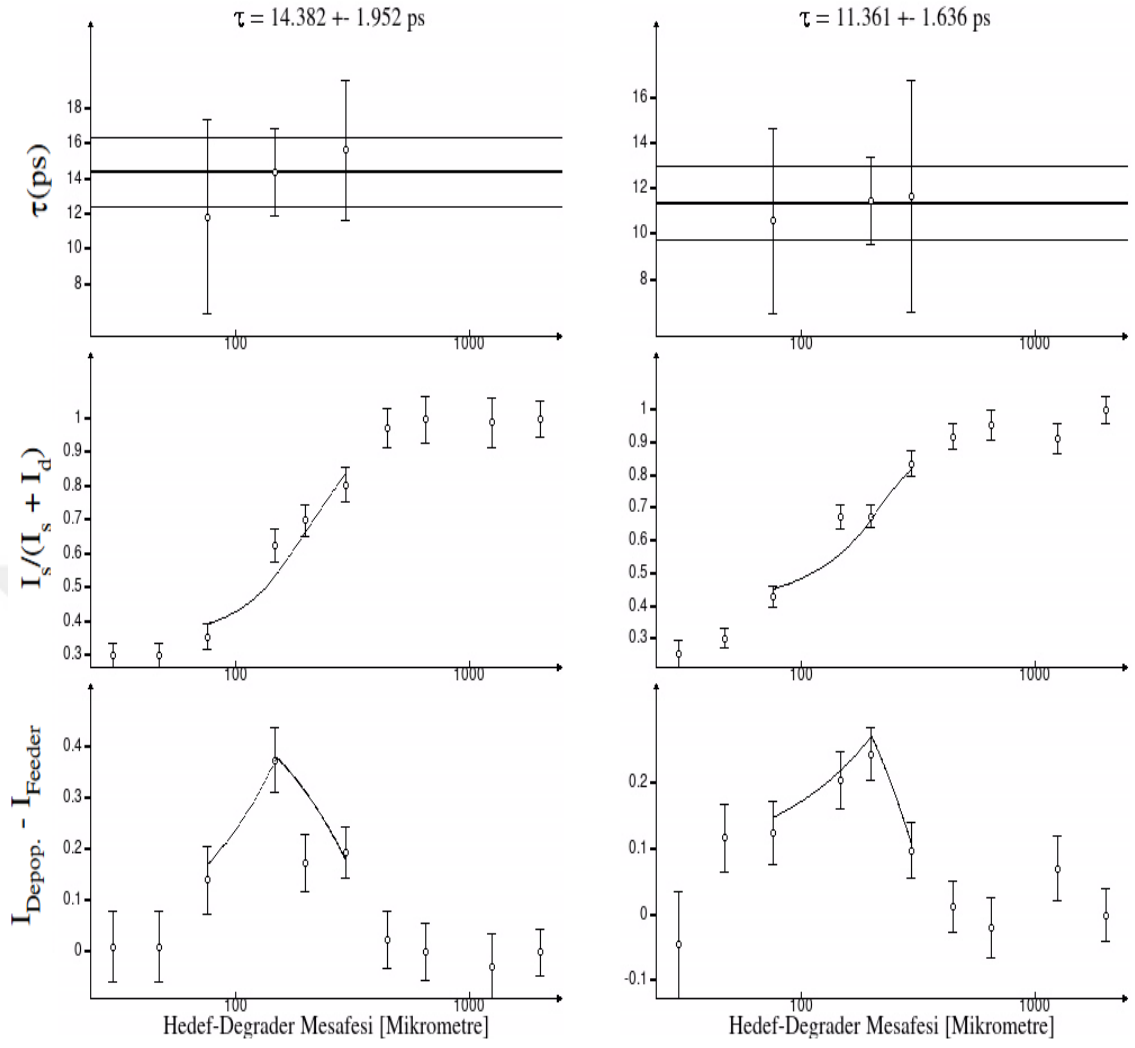
Şekil 4. 3 ^{164}W 'nin 14^+ seviyesinin 392 keV ve 508 keV enerjideki gamalarının normal (Turuncu çizgi) ve yavaşlatılmış (Beyaz çizgi) piklerinin gösterimi (Fitzler 2000)

4.3 ^{164}W Radyoizotopunun Ortalama Ömür Ölçümleri

Demet doğrultusunda Halka-1 158° açı ile 5 adet (HPGE) ve Halka -2 134° açı ile 10 adet (HPGE) dedektör JUROGAM II dedektör kümesinde konumlandırılmıştır. DBEM metodu kullanılarak, ^{164}W izotopuna ait 12^+ ve 14^+ seviyelerinin ortalama ömür süreleri ilk defa hesaplanmıştır. Elde edilen veriler sırası ile üst panel τ değerlerinin ağırlıklı ortalamasını, orta panel (Normal)/(Normal + Yavaşlatılmış)'dan elde edilen verilerin normalize edilmiş eğrisini, alt panel ise sönmüleyen ve besleyen geçişlerin farklarından elde edilen verilerle oluşturulan ve orta panelde gösterilen eğrinin türevidir.



Şekil 4. 4 NAPATAU ortalama ömür analiz programında elde edilen ^{164}W izotopuna ait 12^+ seviyesine ait ortalama ömür ölçümleri. Sol taraf $\theta=158^\circ$, sağ taraf $\theta=134^\circ$ (Saha 2003)



Şekil 4. 5 NAPATAU ortalama ömür analiz programında elde edilen ^{164}W izotopuna ait 14^+ seviyesine ait ortalama ömür ölçümleri. Sol taraf $\theta=158^\circ$, sağ taraf $\theta=134^\circ$ (Saha 2003)

Çizelge 4. 1 ^{164}W radyoizotopunun ortalama ömür değerleri

Radyoizotop	Spin Seviyesi	Gama Işını Enerjisi (keV)	Ortalama Ömür		
			Halka 1	Halka 2	Ortalama
			$\approx \tau_1$ (ps)	$\approx \tau_2$ (ps)	$\approx \tau_{ort}$ (ps)
^{164}W	$12^+ \rightarrow 10^+$	609	21.77 ± 1.90	21.72 ± 1.60	21.74 ± 2.00
	$14^+ \rightarrow 12^+$	392	14.38 ± 2.00	11.36 ± 1.60	12.61 ± 2.00

Ps = pikosaniye

4.4 Ölçüm İstatistiği

Aynı parametrenin iki farklı ölçümünü gerçekleştirdiğimizi ve bu ölçümlerle ilişkili belirsizliği hesapladığımızı varsayalım. Örneğin, aynı izotopa denk gelen ömür süreleri belirlenmiştir. Hesaplamaların basitleştirilmesi adına, güven sınırını (bir standart belirsizlik) %68,3 güven seviyesi (Gilmore 2008) olarak kabul edelim. Bu güven sınırlarının yalnızca sayım belirsizliğini değil, tüm belirsizlik kaynaklarını içerdiği varsayılmaktadır. Bu durumda, ölçümler aşağıdaki biçimde ifade edilebilir:

$$a1 \pm 1.0 s1 \text{ ve } a2 \pm 1.0 s2 \quad (4.1)$$

Eğer iki sonucun varyansları eşit değilse, basit bir aritmetik ortalama almak istatistiksel olarak geçerli değildir. Çünkü basit ortalama, her iki ölçüme eşit ağırlık atfederek değerlendirme yapar. Daha yüksek varyansa sahip bir ölçüm, daha düşük kesinlik içerdiğinden, diğer ölçümlerle aynı düzeyde dikkate alınmamalıdır. Bu nedenle, istatistiksel açıdan en doğru yaklaşım, ağırlıklı ortalama $\hat{a}$ hesaplanmasıdır. Ağırlıklı

ortalama yöntemi, ölçümlerin belirsizlik düzeylerini göz önünde bulundurarak daha güvenilir ve tutarlı bir sonuç elde edilmesini sağlar.

$$\hat{a} = \frac{\sum_i a_i w_i}{\sum_i w_i} \quad (4.2)$$

Birleştirilmiş bir sonucun hesaplanmasında, her bir sonucun ağırlıklandırılması belirli faktörlere bağlıdır. Bu faktörler, her bir sonucun varyansının tersine dayalıdır ve tüm kalemlerin toplamını ifade eder (Gilmore 2008). Verilen durumda ağırlık faktörleri aşağıdaki formüldeki gibi tanımlanabilir.

$$w1 = \frac{1}{(1.0 s1)^2}, w2 = \frac{1}{(1.0 s2)^2} \quad (4.3)$$

Çizelge 4. 2 Ağırlıklı ortalama ile hesaplanan ortalama ömür değerleri

Spin Seviyesi	Ortalama Ömür		
	Halka 1	Halka 2	Ortalama
	$\approx \tau_1$ (ps)	$\approx \tau_2$ (ps)	$\approx \tau_{ort}$ (ps)
17/2 ⁺	21.12 ±0.96	21.54 ±0.93	21.34 ±1.00
12 ⁺	21.77 ±1.90	21.72 ±1.60	21.74 ±2.00
14 ⁺	14.38 ±2.00	11.36 ±1.60	12.61 ±2.00

Ps = Pikosaniye

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

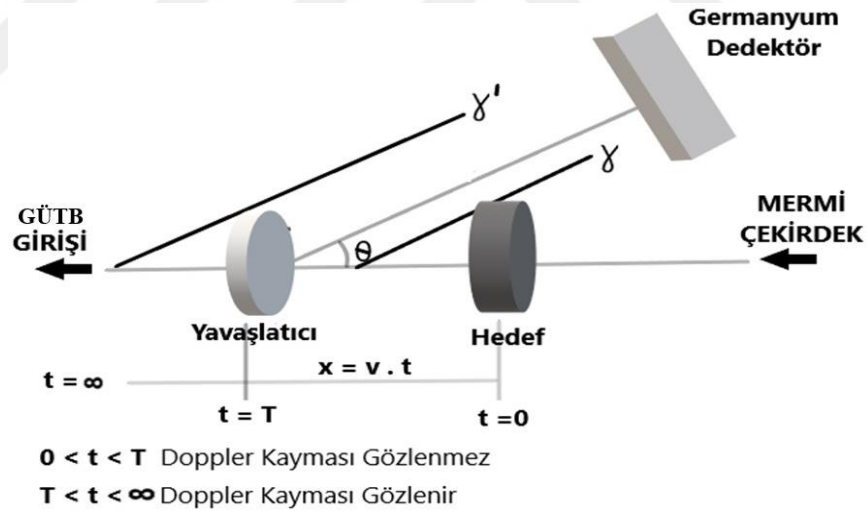
Radyonüklitlerin yarılanma ömürleri/ortalama ömürleri, nükleer fiziğin ve radyonüklit metrolojisinin temel taşlarından birisidir. Uyarılmış nükleer durumların yarı ömürleri, geçiş olasılıklarına erişim sağlar, çekirdeğin yapısı hakkında doğrudan bilgi sağlar ve nükleer modellerin en katı testlerinden birini sunar. Pikosaniye (ps) ve nanosaniye (ns) mertebesindeki kısa yarı ömürlü uyarılmış seviyelerin ölçülmesi amacıyla geliştirilen GMDK yöntemi, nükleer uyarılmış seviyelerin ortalama ömürlerinin ölçülmesi açısından önemli bir teknik olarak öne çıkmaktadır. Bu yöntemin etkin bir şekilde uygulanabilmesi için GAMASPHERE, EUROBALL ve JUROGAM gibi kapsamlı deney düzeneklerine ihtiyaç duyulmaktadır. Deney sistemi temel olarak hızlandırıcı sistemleri, hedef ve hedef-yavaşlatıcı mesafe ayar cihazı mekanizması, dedektör sistemleri ve veri analiz altyapısından oluşmaktadır. Bu bağlamda, çalışma Finlandiya'daki Jyväskylä Üniversitesi Hızlandırıcı Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiş olup, deneyde JUROGAM-II gama spektrometresi, GÜEAE spektrometresi ve GÜTB ayrıştırıcısı kullanılmıştır. Deneysel çalışmada, ^{106}Cd hedef üzerine ^{60}Ni mermi çekirdekleri gönderilerek füzyon-buharlaşma reaksiyonu gerçekleştirilmiştir. Reaksiyon ürünleri $v/c = \%3.1$ başlangıç hızına sahip olup, yavaşlatıcı Mg folyodan geçtikten sonra bu hız $v/c = \%2.1$ 'e düşmüştür.

Deneyin en kritik bileşenlerinden biri olan hedef-yavaşlatıcı mesafe ayar cihazı mekanizması, tepkimenin hemen ardından uyarılmış seviyede bulunan çekirdeklerin belirli bir mesafelerde yavaşlatılmasını sağlamaktadır. Bu çalışmada, DPUNS diferansiyel hedef-yavaşlatıcı mesafe ayar cihazı kullanılarak deney gerçekleştirilmiştir. ^{164}W izotopu için hedef ve yavaşlatıcı (Degrader) arasındaki 10 farklı mesafe (30, 45, 75, 150, 200, 300, 450, 650, 1250, 2000) ölçümler alınmış ve elde edilen veriler, nükleer uyarılmış seviyelerin yarılanma ömürlerinin/ortalama ömürlerinin hesaplanmasında kullanılmıştır.

Deneyde kullanılan yüksek saflıkta germanyum (HPGe) dedektörleri, yayınlanan gama ışınlarının hassas bir şekilde tespit edilmesini sağlamıştır. JUROGAM-II'de yer alan germanyum dedektörleri ile dedekte edilen gama ışınları ile GÜEAE içerisinde ürün çekirdekler tarafından bırakılan konum ve zaman sinyalleri eşlenerek spektrumlar ve iki

boyutlu matrisler elde edilmiştir. Elde edilen γ - γ iki boyutlu matrisleri, GRAİN veri analiz programı yardımıyla analiz edilmiştir. Bu matrislerin y ekseninde ayna spektrumları oluşturulmuş, ardından TV spektrum ve matris analizi programı ile y-eksenindeki spektrumları analiz edilerek ilgili seviyelerdeki enerjilere enerji şartı uygulanmış ve piklerin pozisyon ve alan bilgileri kaydedilmiştir.

GMDK yöntemi, ince bir hedefe çarpan mermi çekirdekleriyle başlatılan nükleer reaksiyonlar sonucunda uyarılmış seviyelere sahip çekirdeklerin belirli bir hızla hedeften uzaklaşmasına dayanır. Reaksiyonun ardından momentum transferi gerçekleşerek, uyarılmış çekirdekler v hızıyla hedeften ayrılır ve belirli bir uçuş süresi sonunda yavaşlatıcı folyodan geçerek yavaşlar. Uçuş süresi boyunca alınan mesafe (x), hedef ve yavaşlatıcı arasındaki uzaklığı temsil etmektedir. Yavaşlatıcıdan geçtikten sonra çekirdeğin hızında azalma meydana gelir, bu azalmadan kaynaklı enerjisinde Doppler kayması oluşur.



Şekil 5. 1 GMDK tekniği şematik gösterimi

Ancak, GMDK yönteminin tek başına uygulanması çeşitli sistematik belirsizliklere neden olabilir. Bu tür belirsizliklerin azaltılması amacıyla DBEM tekniği geliştirilmiştir (Dewald vd. 2012).

Ölçülmek istenen seviyenin üst (besleyen) ve alt (sönümleyen) gama geçişlerine enerji şartı konularak elde edilen spektrumlar, tüm mesafeler için analiz edilmiştir. İlgili enerji seviyelerindeki piklerin tepe konumları ve alanları belirlenerek, veriler NAPATAU ortalama ömür analiz programında işlenmek üzere uygun formata çevrilmiştir. NAPATAU ortalama ömür analiz programında, ömür süresi hesabında iki bileşeni temel alır. İlk bileşen, ilgili seviyenin altında yer alan sönümleyen (Depopulator) bileşenini temsil eden normal ve yavaşlatılmış pikin sayımları ve hata oranlarından oluşur. İkinci bileşen ise ilgili seviyenin üstünden gelen doğrudan beslenmeyi (Direct Feeder) temsil eden normal ve yavaşlatılmış bileşenlerinden oluşmaktadır.

Hedef ve yavaşlatıcı arasındaki mesafe arttıkça bozunum normal bileşende gerçekleşir ve belirli bir enerji kanalında ölçüm yapılır. Yavaşlatıcıdan sonra gerçekleşen bozunum yavaşlatılmış bileşende oluşur ve çekirdeğin hızında azalma meydana gelir. Bu azalma sonucunda yayımlanan gama ışınlarının enerjileri değişerek Doppler kayması gözlemlenir. Doppler kaymasının etkisi, aşağıdaki bağıntıyla ifade edilmektedir:

$$E_1 = E_0 \left(1 + \frac{v}{c} \cos \theta \right) \quad (5.1)$$

Yavaşlatıcıdan çıkan bileşenin hızı daha düşük olduğundan, v/c oranı azalmakta ve sabit bir açı için E_1 enerjisi artmaktadır. Bu nedenle, yavaşlatılmış bileşende oluşan gama ışınları, gerçek enerji değeri (E_0) ile karşılaştırıldığında daha yüksek bir enerjiyle tespit edilmektedir. Hedef ve yavaşlatıcı arasındaki mesafe arttıkça, Normal bileşen şiddeti azalırken, yavaşlatılmış bileşende gerçekleşen sayım artmaktadır. Bu yaklaşım, uyarılmış seviyeler arası geçişler sonucu yayımlanan gama ışınlarının daha doğru bir şekilde tespit edilmesini ve ortalama ömür hesaplarının hassasiyetini artırmaktadır.

^{164}W izotopu için daha önce yapılan çalışmalarda 2^+ seviyenin ortalama ömür değeri Doncel vd. (2017) tarafından gama-gama koinsidans yöntemi kullanılarak ölçülmüş ve 26(17) ps gibi oldukça yüksek bir belirsizlik ile ölçülmüştür. Bu gözlenen yüksek hata payı deney verisinde yeterli istatistiğin olmamasından kaynaklanmaktadır. Daha sonra Saygı (2020) tarafından yapılan ölçümlerde 2^+ , 4^+ ve 6^+ ölçülmüş ve sırasıyla bu

seviyelere ait ortalama ömür değerleri 36(3) ps, 9(2) ps ve 4(1) ps olarak  l  lm   t r ve bu belirsizlik ortadan kaldırılmıştır. Spin-kuantum sayısında doğru azalan ortalama ömür değerleri ^{164}W için 8^+ ve 10^+ uyarılmış seviyelerin ortalama ömürlerine ait değerlerin GMDK ile yapılan deneyde alınan uzaklıkların sınır değerlerinin dışına çıktığı için deneysel olarak 30 mikro metreden daha küçük hedef-yavaşlatıcı uzaklıklarında veri alınması gerektiğini ortaya koymuştur. 12^+ ve 14^+ spin-kuantum sayılı uyarılmış durumlar ise proton ya da nötron çiftlerinin geri b   lmesi (backbending) nedeni ile nükleer deformasyonda azalma meydana gelmesi sonucu, bu seviyelere ait ortalama ömür değerleri    lebilir bir hale gelmiştir. Benzer durum ^{166}W izotopunda da görülmektedir (Saygı, B. vd. 2017).

^{164}W izotopu için uyarılmış seviyelerinin elektromanyetik geçişlerine karşılık gelen gama ışını enerjileri (E_γ) ve bu seviyelerde    len ortalama ömür süreleri (τ_{ort}) belirlenmiştir. GMDK ve DBEM teknikleri kullanılarak farklı dedektör halkalarındaki (Halka 1: 158° ve Halka 2: 134°)    mler kar ıla tırılmı  ve ortalama ömür süreleri hesaplanmıştır.

^{164}W  ekirdeęi için  m r Süresi Analizi

$12^+ \rightarrow 10^+$ ge i i ($E_\gamma = 609 \text{ keV}$):

- Halka 1    m : $21.77 \pm 1.90 \text{ ps}$
- Halka 2    m : $21.72 \pm 1.60 \text{ ps}$
- Ortalama  m r süresi (τ_{ort}): $21.74 \pm 2.00 \text{ ps}$

Bu seviyede önemli bir ömür süresi artı ı gözlemlenmiştir. 12^+ seviyesinde, yüksek spin nedeniyle yasaklanmış geçişlerin etkisi olabilir. Uzun  m r süresi, bu seviyede yavaş bozunum mekanizmalarının etkin olabileceğini düşündürmektedir.

$14^+ \rightarrow 12^+$ ge i i ($E_\gamma = 392 \text{ keV}$):

- Halka 1 ölçümü: 14.38 ± 2.00 ps
- Halka 2 ölçümü: 11.36 ± 1.60 ps
- Ortalama ömür süresi (τ_{ort}): 12.61 ± 2.00 ps

Bu seviyede, $12^+ \rightarrow 10^+$ geçişine kıyasla daha kısa bir ömür süresi ölçülmüştür. Yüksek spin seviyelerinde gama bozunumunun hızlandığı ve nükleer konfigürasyonların değiştiği söylenebilir. 12^+ seviyesine kıyasla, 14^+ seviyesinde daha hızlı bir gama yayını gözlemlenmesi, bu seviyenin artan kolektif özellikler sergilediğini göstermektedir.

^{166}Os 'dan 2 proton yayımlayarak dönüşen ^{164}W izotopu olan ^{166}W çekirdeğinde 12^+ ve 14^+ seviyelerinin ortalama ömür değerleri sırasıyla 27(4) ps ve 21(2) ps olarak ölçülmüştür (Saygı vd. 2017). ^{168}W izotopu için literatürde 12^+ ve 14^+ seviyelerine ait yarılanma/ortalama ömür değerleri verilmiş olsa da yrast banda ait olan 12^+ ve 14^+ seviyelere ait ölçüm yer almamaktadır. ^{168}Os izotopuna ait 12^+ ve 14^+ seviyelerine ait yarılanma/ortalama ömür değerleri sırasıyla 740(50) ps ve 17(2) ps olarak verilmektedir (Grahm vd. 2016). ^{168}Os izotopuna ait 12^+ ve 14^+ seviyelerine ait yarılanma/ortalama ömür değerleri henüz ölçülmemiştir. ^{164}Hf ve ^{162}Hf izotoplarına ait 12^+ ve 14^+ seviyelerine ait yarılanma/ortalama ömür değerleri de henüz ölçülmemiştir. ^{164}W izotopunun nükleer periyodik tabloda olduğu konum göz önüne alındığında 2 proton yukarısında 2 nötron sağında yer alan çekirdekler ile yapılan ölçümler piko saniye mertebesinde ölçümler vermektedir. ^{164}W izotopu da bölgede yer alan diğer çekirdekler gibi piko saniye mertebesinde ortalama ömür değerlerine sahiptir. Herhangi bir uyarılmış izomer seviyeye rastlanmamıştır.

Bu çalışma kapsamında ^{164}W izotopunda 12^+ ve 14^+ seviyelerine ait yarılanma/ortalama ömür değerleri ilk kez ölçülmüştür ve yarı ömür ölçümleri açısından önemli bir referans niteliği taşımaktadır ayrıca nükleer seviyelerin karakterizasyonunda kritik rol oynamaktadır. Özellikle, farklı açılardaki dedektör konumlarından elde edilen veriler, çekirdek seviyelerinin hassas bir şekilde analiz edilmesinde büyük önem taşımaktadır.

GMDK ve DBEM yöntemleri kullanılarak yapılan bu tür ölçümler, bozunum mekanizmaları hakkında daha güvenilir ve kesin sonuçlar elde edilmesine olanak tanımaktadır.

Bu tür verilerin güvenilirliği, nükleer spektroskopi çalışmaları kapsamında daha önce yapılan benzer deneylerle kıyaslanarak değerlendirilir. Dewald vd. (2012) tarafından GMDK-DBEM tekniği ile gerçekleştirilen çalışmalar, gama geçişlerinin enerji bağımlılığının ve Doppler kaymalarının doğru bir şekilde modellenmesi için kritik katkılar sunmuştur.

Sonuçta, radyonüklit metrolojisi kapsamında nükleer analiz metodu açısından önem arz eden gama spektroskopisi, gama-gama koinsidans ve ortalama ömür ölçüm yöntemleri kullanılarak elde edilen veriler, yarı ömür ölçümlerinin doğruluğunu artırmaya yönelik metodolojik gelişmelerin değerlendirilmesinde ve nükleer spektroskopi alanındaki teorik modellerin sınanmasında temel bir referans olarak kullanılabilir. Dolayısıyla, bu tür ölçümler, nükleer uyarılmış seviyelerinin hassas şekilde belirlenmesinde önemli bir yer tutmaktadır.

KAYNAKLAR

- Aswal, D. K. (2024). Handbook on Radiation Environment, Volume 2.
- Bateman, H. (1910). The solution of a system of differential equations occurring in the theory of radioactive transformations. *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 15, 423–427.
- Dewald, A., Möller, O., & Petkov, P. (2012). Developing the Recoil Distance Doppler-Shift technique towards a versatile tool for lifetime measurements of excited nuclear states. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 67(3), 786–839.
- Doncel, M., Cederwall, B., Qi, C., Li, H., Jakobsson, U., Auranen, K., ... & Uusitalo, J. (2017). Lifetime measurements of excited states in W 162 and W 164 and the evolution of collectivity in rare-earth nuclei. *Physical Review C*, 95(4), 044321.
- Fitzler, A. (2000). Tv user-manual. Institute for Nuclear Physics, University of Cologne.
- Gilmore, G. (2008). Practical Gamma-ray Spectrometry (2nd ed.). Wiley & Sons Ltd.
- Grahn, T., Stolze, S., Joss, D. T., Page, R. D., Saygı, B., O'Donnell, D., ... & Wood, J. L. (2016). Excited states and reduced transition probabilities in Os 168. *Physical Review C*, 94(4), 044327.)
- Grigorescu, E. L., Razdolescu, A. C., Sahagia, M., Luca, A., Ivan, C., & Tanase, G. (2002). Standardization of 152Eu. *Applied Radiation and Isotopes*, 56(1–2), 435–439.
- Joss, D., Dracoulis, G., Higgins, E., Lewis, M., Thomson, J., Lane, G., ... & Uusitalo, J. (2016). Evolving collective structures in the transitional nuclei W 162 and W 164. *Physical Review C*, 93(2), 024307.
- Judge, S. M., Arnold, D., Chauvenet, B., Collé, R., De Felice, P., García-Toraño, E., & Wätjen, U. (2014). 100 Years of radionuclide metrology. *Applied Radiation and Isotopes*, 87, 27–31.
- Knoll, G. F. (2010). Radiation detection and measurement (4th ed., pp. 47–51).
- Krane, K. S. (1988). Introductory nuclear physics (3rd ed., pp. 264–270).
- Lamarsh, J. R., & Baratta, A. J. (2001). Introduction to nuclear engineering (3rd ed., p. 22).
- Lazarus, I., Appelbe, E. E., Butler, P. A., Coleman-Smith, P. J., Cresswell, J. R., Freeman, S. J., ... & Wadsworth, R. (2001). The GREAT triggerless total data readout method. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 48(3), 567–569.

- Lewis, M. C., Joss, D. T., Saygı, B., Page, R. D., Cullen, D. M., Barber, L., ... & Uusitalo, J. (2019). Lifetime measurements of excited states in ^{163}W and the implications for the anomalous $B(E2)$ ratios in transitional nuclei. *Physics Letters B*, 798, 134998.
- Morinaga, H., & Gugelot, P. C. (1963). Gamma rays following (α, xn) reactions. *Nuclear Physics*, 46, 210–224.
- Nolan, P. J., & Sharpey-Schafer, J. F. (1979). The measurement of the lifetimes of excited nuclear states. *Reports on Progress in Physics*, 42(1), 1–42.
- Page, R. D., Andreyev, A. N., Appelbe, D. E., Butler, P. A., Freeman, S. J., Greenlees, P. T., ... & Wadsworth, R. (2003). The GREAT spectrometer. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 204, 634–637.
- Pakarinen, J., Ojala, J., Ruotsalainen, P., Tann, H., Badran, H., Calverley, T., ... & Zimba, G. (2020). The JUROGAM 3 spectrometer. *The European Physical Journal A*, 56, 1–8.
- Pommé, S. (2015). The uncertainty of the half-life. *Metrologia*, 52(3), S51.
- Pommé, S. (2022). Radionuclide metrology: confidence in radioactivity measurements. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 331(12), 4771–4798.
- Rahkila, P. (2008). GRAIN—A Java data analysis system for total data readout. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 595(3), 637–642.
- Saha, B. (2003). NAPATAU 2.0 or Tk-Lifetime-Analysis. Institut für Kernphysik, Köln.
- Sarén, J., Uusitalo, J., Leino, M., & Sorri, J. (2011). Absolute transmission and separation properties of the gas-filled recoil separator RITU. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 654(1), 508–521.
- Saygı, B. (2013). Anomalous $B(E2)$ $4^{+}/2^{+}$ ratios in the neutron-deficient nuclide ^{168}Os and ^{166}W (Doctoral dissertation, University of Liverpool).
- Saygı, B., Joss, D. T., Page, R. D., Grahn, T., Simpson, J., O'Donnell, D., ... & Uusitalo, J. (2017). Reduced transition probabilities along the yrast line in ^{166}W . *Physical Review C*, 96(2), 021301.
- Saygı, B. (2020). TÜBİTAK 3001, Proje No: 117F508, Proje Yürütücüsü: Doç. Dr. Bahadır SAYGI, Temmuz, İzmir.
- Schötzig, U., Debertin, K., & Walz, K. F. (1977). Standardization and decay data of ^{133}Ba . *The International Journal of Applied Radiation and Isotopes*, 28(5), 503–507.
- Schwarzschild, A. Z., & Warburton, E. K. (1968). The measurement of short nuclear lifetimes. *Annual Review of Nuclear Science*, 18(1), 265–290.

- Siciliano, M., Lunardi, S., & Julin, R. (2013). Shape coexistence in the neutron-deficient nucleus ^{194}Po (Master's thesis, Università degli Studi di Padova).
- Suhonen, J. (2007). From nucleons to nucleus: concepts of microscopic nuclear theory. Springer Science & Business Media.
- Taylor, M. J., Cullen, D. M., Smith, A. J., McFarlane, A., Twist, V., Alharshan, G. A., ... & Uusitalo, J. (2013). A new differentially pumped Plunger device to measure excited-state lifetimes in proton emitting nuclei. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 707, 143–148.
- TÜBİTAK (2025). <https://www.ume.tubitak.gov.tr/tr/metroloji-nedir> (Erişim tarihi: 31 Mayıs 2025)

