

**HPGe DEDEKTÖRÜN 13-1212 keV ENERJİ ARALIĞINDA
FOTOPİK VERİMİNİN BELİRLENMESİ VE KAYNAK İÇ
SAÇILIMLARININ İNCELENMESİ**

Muzaffer EROĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fizik Anabilim Dalı

Doç. Dr. Demet DEMİR

2011

Her Hakkı Saklıdır

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HPGe DEDEKTÖRÜN 13-1212 keV ENERJİ ARALIĞINDA FOTOPİK
VERİMİNİN BELİRLENMESİ VE KAYNAK İÇ SAÇILIMLARININ
İNCELENMESİ

Muzaffer EROĞLU

FİZİK ANABİLİM DALI

ERZURUM
2011

Her Hakkı Saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

HPGe DEDEKTÖRÜN 13-1212 keV ENERJİ ARALIĞINDA FOTOPIK
VERİMİNİN BELİRLENMESİ ve KAYNAK İÇ SAÇILIMLARININ
İNCELENMESİ

Doç. Dr. Demet DEMİR danışmanlığında, Muzaffer EROĞLU tarafından hazırlanan bu çalışma 23/12/2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından. Fizik Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak ~~oybirliği/oy çokluğu~~ (.../...) ile kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Demet DEMİR

İmza :

Üye : Doç. Dr. Ali GÜROL

İmza :

Üye : Yrd. Doç. Dr. Tuba ÖZNÜLÜER

İmza :

(imza)

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

HPGe DEDEKTÖRÜN 13-1212 keV ENERJİ ARALIĞINDA FOTOPİK VERİMİNİN
BELİRLENMESİ VE KAYNAK İÇ SAÇILIMLARININ İNCELENMESİ

Muzaffer EROĞLU

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Demet DEMİR

Bu çalışmada, HPGe dedektörün 13,81-1212,95 keV enerji aralığında fotopik veriminin, farklı dedektör-kaynak mesafelerinde (0 cm, 5 cm, 10 cm, 15 cm ve 20 cm) ve nokta kaynak geometrisinde düşük aktiviteli (10 µCi) test kaynakları (Am^{241} , Ba^{133} , Cs^{137} ve Eu^{152}) kullanılarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında, kullanılan test kaynaklarının enerji spektrumları incelenerek enerji çözme gücü (FWHM) ölçülmüştür. Gama tepeleri için asimetri indeksi belirlenmiştir. Bir diğer dedektör parametresi olan minimum dedekte edilebilir aktiflik (MDA) ölçülmüştür. Ayrıca kaynak iç saçılmasını belirleyebilmek amacıyla, Am^{241} ile Ba^{133} nokta ve test kaynakları kullanılmıştır.

2011, 58 Sayfa

Anahtar Kelimeler: HPGe Dedektör, Fotopik Verimi, Enerji Rezolüsyonu, Minimum Dedekte Edilebilir Aktiflik, Asimetri İndeksi, Kaynak İç Saçılması.

ABSTRACT

MS Thesis

**DETERMINATION OF PHOTOPEAK EFFICIENCY OF HPGe DETECTOR FROM
13.81 TO 1212.95 keV AND INVESTIGATION OF INTERNAL SCATTERING OF
SOURCE**

Muzaffer EROĞLU

Atatürk University

Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Demet DEMİR

In this study, the photopeak efficiency of HPGe detector from 13.81 to 1212.95 keV is determined at different detector-source distances (0 cm, 5 cm, 10 cm, 15 cm and 20 cm) and a point source geometry with low activity (10 μ Ci) test sources (Am^{241} , Ba^{133} , Cs^{137} and Eu^{152}). Also, the energy resolution (FWHM) and the minimum detectable activities (MDA) are measured. In order to determine the internal scattering of source, point and test sources of Am^{241} with Ba^{133} have been used.

2011, 58 Pages

Keywords: HPGe Detector; Photopeak Efficiency; Energy Resolution; Minimum Detectable Activity; Asymmetry Index; Internal Scattering of Source.

TEŞEKKÜR

Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümünde hazırlanan bu çalışma süresinde tecrübesini, sabrını ve zamanını benden esirgemeyen tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Demet DEMİR'e,

çalışmalarım boyunca tecrübesini ve bilgilerini benimle paylaşan Sayın Doç. Dr. Ali GÜROL'a, çalışma arkadaşlarım Sayın Ahmet TURŞUCU'ya, Sayın Pınar ÖNDER'e, bu çalışmanın gerçekleşmesine imkan sağlayan A.Ü. Fen Fakültesi Fizik Bölümü elemanlarına ve lisansüstü eğitim yapan tüm arkadaşlarıma,

sevgilerini, maddi ve manevi desteklerini hiç esirgemeyen ve bu çalışmada da bana yardımcı olan sevgili ailem; babam Mehmet Emin EROĞLU, annem Hamdiye EROĞLU ve kardeşlerime teşekkür ederim.

Muzaffer EROĞLU

Aralık-2011

İÇİNDEKİLER

| | |
|---|----------|
| ÖZET..... | i |
| ABSTRACT..... | ii |
| TEŞEKKÜR..... | iii |
| SİMGELER DİZİNİ..... | vii |
| ŞEKİLLER DİZİNİ..... | ix |
| ÇİZELGELER DİZİNİ | xi |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 2. KURAMSAL TEMELLER..... | 4 |
| 2.1. Gama ve x-ışınlarının maddeyle etkileşimleri..... | 4 |
| 2.2. Elektromanyetik radyasyonun soğurulması | 4 |
| 2.2.1. Lambert-Beer kanunu..... | 5 |
| 2.2.2. Fotoelektrik olay | 5 |
| 2.2.3. Compton saçılması | 7 |
| 2.2.4. Çift oluşumu..... | 8 |
| 2.3. Gama ışını spektroskopisi | 9 |
| 2.4. Radyoaktif bozunma kanunu | 10 |
| 2.5. Radyoaktiflik birimleri..... | 12 |
| 2.5.1. Aktiflik birimleri | 12 |
| 2.5.2. Doz ve doz hızı birimleri..... | 13 |
| 2.6. Radyoaktif bozunma çeşitleri ve bozunmada rastlanan bazı olaylar | 13 |
| 2.6.1. Alfa bozunması | 13 |
| 2.6.2. İzobarik bozunma..... | 14 |
| 2.6.2.a. Beta bozunması | 14 |

| | |
|--|-----------|
| 2.6.2.b. Pozitron bozunması..... | 15 |
| 2.6.3. Elektron yakalama (EC) olayı..... | 15 |
| 2.6.4. İzomerik geçiş (IT)..... | 16 |
| 2.6.5. İç dönüşüm (Internal conversion) olayı | 16 |
| 3. MATERYAL ve YÖNTEM..... | 17 |
| 3.1. HPGe dedektörlerinin çalışma prensibi | 17 |
| 3.1.1. Sayma sistemi | 18 |
| 3.1.2. Yüksek voltaj kaynağı..... | 19 |
| 3.1.3. Ön yükseltici | 19 |
| 3.1.4. Yükseltici | 20 |
| 3.1.5. Analog sayısal dönüştürücü (ADC) | 20 |
| 3.1.6. Çok kanallı analizör (MCA) | 21 |
| 3.1.7. Puls yükseklik analizi ve sayma tekniği..... | 21 |
| 3.2. Zırhlama | 21 |
| 3.3. HPGe dedektörün karakteristik özellikleri..... | 22 |
| 3.3.1. Fiziksel ayarlar | 24 |
| 3.3.1.a. Dedektör tanımlama | 24 |
| 3.3.1.b. HPGe dedektörde escape (kaçış) pikleri | 27 |
| 3.3.1.c. Dedektör zırhlama ve background azaltma | 27 |
| 3.3.1.d. Radon gazı..... | 27 |
| 3.3.1.e. Bağlantı kabloları | 28 |
| 3.3.2. Elektronik ayarlar..... | 29 |
| 3.3.2.a. Amplifier zaman sabiti ve puls şekli | 29 |
| 3.3.2.b. Pole-zero (P/Z) ayarı | 29 |
| 3.3.2.c. Pile-up pulsu..... | 29 |
| 3.3.2.d. Kademeli toplanma (Cascade summing) | 31 |

| | |
|--|-----------|
| 3.3.2.e. Saçılma radyasyonu..... | 31 |
| 3.4. HPGe dedektörün performansı..... | 31 |
| 3.4.1. Verim (efficiency)..... | 31 |
| 3.4.2. Enerji çözme gücü (FWHM)..... | 32 |
| 3.4.3. Asimetri indeksi | 33 |
| 3.4.4. Kaynak iç saçılması..... | 34 |
| 3.4.5. Minimum dedekte edilebilir aktiflik (MDA) | 35 |
| 4. ARAŞTIRMA BULGULARI | 36 |
| 4.1. Am ²⁴¹ , Ba ¹³³ , Cs ¹³⁷ ve Eu ¹⁵² radyoaktif kaynaklarının özellikleri | 36 |
| 4.2. HPGe dedektörün verimi..... | 41 |
| 4.3. HPGe dedektörün enerji çözme gücü (Rezolüsyon) | 49 |
| 4.4. HPGe dedektörün asimetri indeksi..... | 50 |
| 4.5. Kaynak iç saçılması..... | 50 |
| 4.6. Minimum dedekte edilebilir aktiflik (MDA) | 52 |
| 5. TARTIŞMA ve SONUÇ | 54 |
| KAYNAKLAR | 57 |
| ÖZGEÇMİŞ | 59 |

SİMGELER DİZİNİ

| | |
|-----------------|---|
| A | Aktiflik |
| ADC | Analog sayısal dönüştürücü (Analog Digital Converter) |
| α | Alfa parçacığı |
| β | Beta parçacığı |
| dt | Sonsuz küçük kalınlık |
| E_0 | Gelen foton enerjisi |
| E | Saçılan foton enerjisi |
| e | Elektronun yükü |
| EC | Elektron yakalama |
| ε | Dedektör verimi |
| eV | Elektron volt |
| Ge(Li) | Lityum sürüklenmiş germanyum |
| \hbar | 2π 'ye bölünmüş Planck sabiti |
| HPGe | Yüksek saflıklı germanyum dedektör (High purity germanium detector) |
| I_0 | Monokromatik paralel x-ışını veya γ -ışını demetinin şiddeti |
| I | X veya gama ışınlarının numuneden geçtikten sonraki şiddeti |
| K_e | Compton olayında geri tepen elektronun kinetik enerjisi |
| ψ | Saçılma açısı |
| λ | Dalgaboyu |
| λ_c | Compton dalgaboyu |
| $\Delta\lambda$ | Compton kayması |
| m | Atomik kütle |
| MCA | Çok kanallı analizör (Multi Channel Analyzer) |
| m_0 | Elektronun durgun kütlesi |
| μ | Lineer azaltma katsayısı |
| μ_m | Kütle azaltma katsayısı |
| μ_t | Toplam azaltma katsayısı |

| | |
|-----------|--------------------------------------|
| N | Foton sayısı |
| ρ_e | Yük yoğunluğu |
| t | g/cm ² cinsinden kalınlık |
| $t_{1/2}$ | Yarıömür |
| T | Gama ışınlarının geçme ihtimali |
| ν | Saçılan fotonun frekansı |
| ν_0 | Gelen fotonun frekansı |
| XRF | X-ışını flöresans |

ŞEKİLLER DİZİNİ

| | |
|---|----|
| Şekil 2.1. Alfa ve beta parçacıkları ile gama ışınlarının 1 m kalınlıklı beton duvara girme gücü..... | 4 |
| Şekil 2.2. Gama ışınının şiddetinin soğurulması..... | 5 |
| Şekil 2.3. Fotoelektrik olay | 6 |
| Şekil 2.4. Compton saçılması..... | 8 |
| Şekil 2.5. Çift oluşumu | 9 |
| Şekil 3.1. Dedeksiyon sistemi | 19 |
| Şekil 3.2. Planar HPGe dedektör | 24 |
| Şekil 3.3. Farklı hacimli (% 1,1, % 6 ve % 150) HPGe dedektörlerle elde edilen spektrumlar..... | 25 |
| Şekil 3.4. HPGe dedektörün rezolüsyonu | 26 |
| Şekil 3.5. Yüksek ve düşük konsantrasyonlu radon gazının spektruma katkısı..... | 28 |
| Şekil 3.6. HPGe dedektörle elde edilen bir spektrumdaki pile-up pikleri | 30 |
| Şekil 3.7. FWHM ve asimetri indeksinin belirlenmesi | 34 |
| Şekil 4.1. Am^{241} 'in bozunma şeması | 37 |
| Şekil 4.2. Ba^{133} 'ün bozunma şeması..... | 38 |
| Şekil 4.3. Cs^{137} 'nin bozunma şeması..... | 39 |
| Şekil 4.4. Eu^{152} 'nin bozunma şeması..... | 40 |
| Şekil 4.5. Deney düzeneği..... | 41 |
| Şekil 4.6. Am^{241} 'in spektrumu (dedektör-kaynak mesafesi=20 cm) | 45 |
| Şekil 4.7. Ba^{133} 'ün spektrumu (dedektör-kaynak mesafesi=20 cm)..... | 45 |
| Şekil 4.8. Cs^{137} 'nin spektrumu (dedektör-kaynak mesafesi=0 cm) | 46 |
| Şekil 4.9. Eu^{152} 'nin spektrumu (dedektör-kaynak mesafesi=0 cm)..... | 46 |

| | |
|--|----|
| Şekil 4.10. HPGe dedektörün fotopik verim eğrisi (dedektör-kaynak mesafesi=0 cm)..... | 48 |
| Şekil 4.11. HPGe dedektörün fotopik verim eğrisi (dedektör-kaynak mesafesi=20 cm)..... | 48 |
| Şekil 4.12. Am ²⁴¹ test ve nokta kaynaklarının 59,54 keV enerjili gama tepelerinin karşılaştırılması | 51 |
| Şekil 4.13. Ba ¹³³ test ve nokta kaynaklarının 356,01 keV enerjili gama tepelerinin karşılaştırılması | 52 |
| Şekil 4.14. MDA'nın enerjiyle değişimi..... | 53 |
| Şekil 5.1. HPGe dedektörün FWHM'sinin enerji ile değişimi | 55 |

ÇİZELGELER DİZİNİ

| | |
|--|----|
| Çizelge 3.1. Kurşun ve tungstenin lineer azaltma katsayısının enerjiye bağlı değişimi | 22 |
| Çizelge 3.2. Farklı yarıiletken dedektörlerin karakteristik özellikleri | 23 |
| Çizelge 4. 1. HPGe dedektörün karakteristik özellikleri..... | 42 |
| Çizelge 4.2. Radyoaktif kaynaklarının aktiviteleri | 42 |
| Çizelge 4.3. Radyoaktif kaynakların çeşitli enerjilerinin toplam emisyon ihtimalleri | 43 |
| Çizelge 4.4. Radyoaktif kaynakların çeşitli enerjili tepelerinin altında kalan alanlar | 44 |
| Çizelge 4.5. HPGe dedektörün hesaplanan fotopik verimleri..... | 47 |
| Çizelge 4.6. HPGe dedektörün 13,81-1212,95 keV enerji aralığındaki enerji çözme gücü..... | 49 |
| Çizelge 4.7. 13,81-1212,95 keV enerji aralığındaki asimetri indeksleri..... | 50 |
| Çizelge 4.8. Am ²⁴¹ nokta ve test kaynaklarının 59,54 keV enerjili gama tepeleri için asimetri indeksleri | 51 |
| Çizelge 4.9. Ba ¹³³ nokta ve test kaynakların 356,01 keV enerjili gama tepeleri için asimetri indeksleri | 52 |

1. GİRİŞ

İlk Ge(Li) dedektörler 1962'de yılında üretildi. 1970 yılından sonra Ge(Li) dedektörler, gelişen kristal teknolojisi ile yerini ($10^9 - 10^{12} \text{ cm}^{-3}$) HPGe dedektörlere bıraktı. 1990'larda geniş hacimli HPGe dedektörlerin safsızlık konsantrasyonu $<10^9 \text{ cm}^{-3}$ 'e kadar düşürüldü. Germanyum kristalinin en büyük özelliklerinden birisi düşük bant aralığına (0,661 eV) sahip olmasıdır (Ahmed *et al.* 2007).

Si ve Ge dedektörler elektron ve gama ışın spektroskopileri gibi birçok nükleer uygulamada kullanılmaktadır. Germanyum dedektörlerin yük taşıyıcı toplama özelliği, zamanlama karakteristikleri ve elektron-hol çifti oluşturmak için gereken enerji düşük olduğundan rezolüsyonları mükemmeldir. Germanyum dedektörler 20-80 keV enerji aralığında Si(Li) dedektörlerden daha verimlidir. 2-14 keV enerji aralığında ise iki dedektörün verimi aynıdır. Germanyum dedektörün verimi, L kabuğu için yüksek atom numaralı elementlerde ($70 \leq Z \leq 90$) en yüksek, orta atom numaralı elementlerde K kabuğu için orta ve düşük atom numaralı elementlerde ($13 \leq Z \leq 40$) ise en azdır.

HPGe dedektör lityum sürüklenmesi yapılmadan da oda sıcaklığında kullanılabilir. Günümüzde modern dedektör üretim teknikleri farklı sıcaklıklar için geliştirilmiştir. Bu uygulamanın sonucunda HPGe dedektörler, Ge(Li) dedektörlerin yerini almıştır (Knoll 1979).

Yüksek saflıkta germanyum (HPGe) dedektörlerle elde edilen pik şekilleri çoğunlukla enerji ve şiddet parametresine bağlı olarak bi-Gaussian fonksiyonuna uyar (Agnello *et al.* 2009). HPGe dedektör temel araştırmalarda (nükleer fizik) ve uygulamalı araştırmalarda (Compton görüntüleme) kullanılır (Zocca *et al.* 2009).

HPGe dedektörler sıvı azot sıcaklığında tutulmaktadır. Dedektör veriminin belirlenmesinde dedektör kristalinin şekli ve hacmi, kaynak uzaklığı, kristalin soğurma tesir kesiti,

dedektör penceresinin soğurma tabakası, kaynağın pozisyonu ve uzaklığı önemlidir. Analitik fonksiyonlar ve yarı deneysel ifadeler enerjiye bağlı verimi tanımlamak için kullanılır. Bu fonksiyonlar farklı enerji aralıkları ve farklı kristal boyutları için iyi bir yaklaşımdır. Polinom fonksiyonları, verim değerlerinin fit edilmesinde kullanılan en basit analitik fonksiyondur (Andujar *et al.* 2004).

HPGe dedektörlerin verimi gama ışın spektroskopisinde numunelerin kantitatif analizinin yapılması için geniş enerji aralığında belirlenir. HPGe dedektörlerin verimi x-ışınları için 20 ile 150 keV enerji aralığındadır (Ozben 2009). Gama ışınları için birkaç keV'den birkaç MeV'e (10 keV ile 10-20 MeV) kadardır. 1 MeV için enerji rezolüsyonu % 1-2'dir.

Son yıllarda HPGe dedektörler hiper nükleer fizik uygulamalarında kullanılmaktadır. Hiper nükleer fizik çalışmalarının en büyük avantajı geleneksel yöntemlerle manyetik spektrometreleri kullanmak yerine nükleer geçişleri ve bozunmalardan kaynaklanan gama ışınlarını belirleyebilmesidir (Szymańska *et al.* 2008). Yüksek saflıkta germanyum dedektörlerin gelecekte hadronik fizik deneylerinde kullanılması planlanmaktadır.

HPGe dedektör yüksek rezolüsyonlu gama ışın spektrometrelerinde doğal ve yapay radyonüklidlerin yoğunluklarının belirlenmesinde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Doğal ve yapay radyonüklidlerin mutlak aktivite hesaplamaları için dedektörün tam enerji pik veriminin (FEPE) doğru ve güvenilir olarak belirlenmesi gerekir. Dedektörlerin FEPE analizlerinde Monte Carlo metodu yaygın olarak kullanılmaktadır. Literatürde çeşitli foton enerjilerinde ve numune-dedektör geometrilerinde FEPE analizlerinin yapıldığı çalışmalar mevcuttur. Farklı dedektör ve farklı kaynaklar için FEPE değeri değişir. Dolayısıyla her çalışma için ayrı bir FEPE değerinin belirlenmesi gerekir (Gültekin 2006).

Nükleer fizik uygulamalarında kullanılan HPGe dedektörlerin verimleri soğurma faktörleri ve geometriden dolayı önemli ölçüde değişir. Matematiksel verim hesaplamalarında kaynak-dedektör mesafesine göre verim eğrisi belirlenir. Düzlemsel ve yarı-düzlemsel dedektörler en çok tercih edilen HPGe dedektörlerindedir (Mohammadi *et al.* 2011).

HPGe dedektörde verilen bir radyonüklid için dedeksiyon limiti, dedeksiyon veriminin artırılmasıyla ve temel sayma (background) seviyesinin azaltılmasıyla azaltılabilir. HPGe dedektörlerle elde edilen spektrumda background seviyesinin düşük olması radyoaktif kirliliğe ve zırhlamaya bağlıdır (Laborie *et al.* 2002).

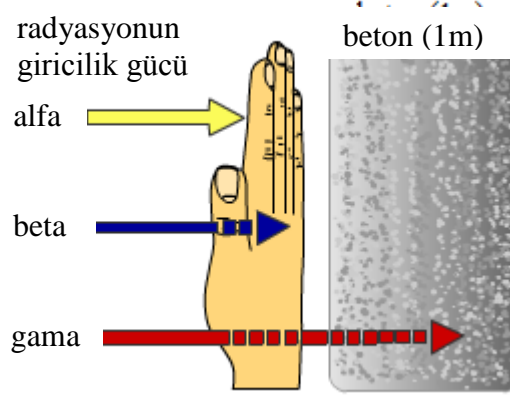
Dedektörün hacmi veya boyutu, onun biçimine bağlı olarak farklı yollarla belirlenebilir. Düzlemsel bir dedektör için dedektörün çapı ve gerçek kalınlığı, hassas çap ve kalınlıktan hata sınırları içerisinde farklı olarak belirlenebilir. Bu durumda dedektör kalınlığı, verimi keskin bir şekilde azaltmaya başlamasının ötesinde, direkt olarak enerjiyi etkilediğinden dolayı, birinci derecede önemlidir. Dedektör çapı, verilen bir kaynak mesafesinde rezolüsyonu ve verimi etkiler (Debertin *et al.* 1988).

Bu çalışmada HPGe dedektörün fotopik verimi uzaklığa bağlı olarak (0 cm, 5 cm, 10 cm, 15 cm ve 20 cm) 13,81-1212,95 keV enerji aralığında incelenmiştir. Verimin belirlenmesinde Am^{241} , Ba^{133} , Cs^{137} ve Eu^{152} radyoaktif test kaynakları kullanılmıştır. Kaynak iç saçılmalarının enerji spektrumuna getireceği katkıyı belirleyebilmek için Am^{241} (nokta ve test kaynağı) ve Ba^{133} (nokta ve test kaynağı) radyoaktif kaynakları kullanılmıştır. Ayrıca, HPGe dedektör için minimum dedekte edilebilir aktiflik (MDA) de belirlenmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Gama ve x-ışınlarının maddeyle etkileşimleri

İlk olarak 1900 yılında Becquerel ve Villard tarafından radyoaktif uranyum ve radyum ile yapılan çalışmalarda keşfedilen gama ışınları, alfa ve beta parçacıklarından daha fazla giricilik gücüne sahiptirler. Şekil 2.1'de alfa ve beta parçacıkları ile gama ışınlarının giricilik güçleri 1 m kalınlıklı bir beton duvar için kıyaslanmıştır.



Şekil 2.1. Alfa ve beta parçacıkları ile gama ışınlarının 1 m kalınlıklı beton duvara girme gücü.

2.2. Elektromanyetik radyasyonun soğurulması

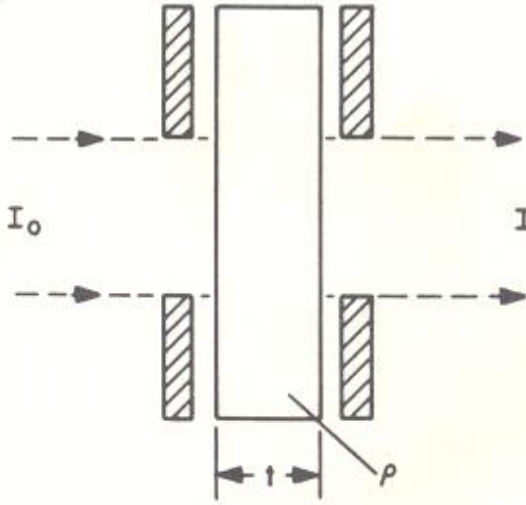
Bütün nükleer radyasyon dedektörleri radyasyonun madde ile etkileşmesi prensibine göre çalışırlar. Dedeksiyon işleminde, genellikle uyarma yöntemi veya yüklü parçacığın geçişi ile dedektörde atomun iyonlaştırılması esastır. Elektromanyetik radyasyon üç etkileşimden birine neden olmaktadır: Fotoelektrik olay, Compton saçılması ve Çift oluşumu.

2.2.1. Lambert-Beer kanunu

1909 yılında Soddy ve Russell tarafından gama ışınlarının azaltma katsayısının üstel olduğu ve bütün materyaller için neredeyse sabit bir değere sahip olduğu bulundu. I_0 gelen gama ışını şiddeti, t materyal kalınlığı, μ soğurma katsayısı (cm^{-1}) ve I ise t uzunluğunda soğurulmadan geçen şiddet olmak üzere

$$I = I_0 e^{-\mu t} \quad (2.1)$$

ifadesiyle verilebilir. Bu ifade "Lambert kanunu", "Beer kanunu" veya "Beer-Lambert kanunu" olarak bilinir. I/I_0 oranına geçiş oranı (transmission) denir. Şekil 2.2'de gama ışını şiddetinin soğurulması gösterilmiştir.

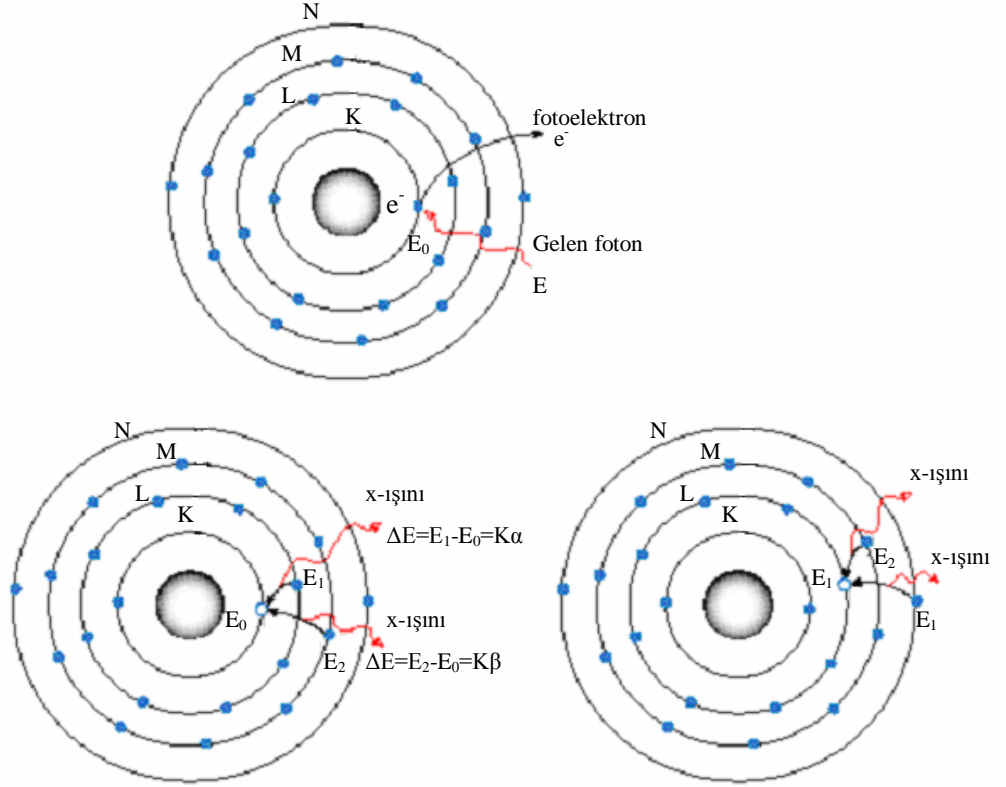


Şekil 2.2. Gama ışınının şiddetinin soğurulması.

2.2.2. Fotoelektrik olay

Düşük enerjili bir foton genellikle içinden geçtiği ortamdaki atomların K veya L tabakasındaki bir elektrona bütün enerjisini vererek onu pozitif yüklü çekirdeğin bağlayıcı

kuvvetinden kurtarır. Dışarıya fırlatılan bu elektrona fotoelektron denir. Bu olay neticesinde oluşan elektron boşluğu dış yörüngedeki başka bir elektron tarafından doldurulur ve bu sırada atomun karakteristik x-ışınlarından birisi yayımlanır. 0,5 MeV'den daha küçük enerjili fotonların ağır elementler tarafından soğurulmasında bu olay oldukça önemlidir. Fotoelektrik olay Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Fotoelektrik olay.

Fotoelektrik olayda gelen fotonlar atomun yörünge elektronları ile etkileşir. Elektron fotondan aldığı enerji ile orbital dışına çıkar. Oluşan elektron boşluğu üst yörüngeden bir elektrona doldurulur. Bu elektron geçişi ile x-ışınları, ultraviyole veya görünür bölgede spektrum gözlemlenir. Enerjinin korunumu yasasına göre toplam gama enerjisi;

$$E_{\gamma} = E_e + E_a + E_B \quad (2.2)$$

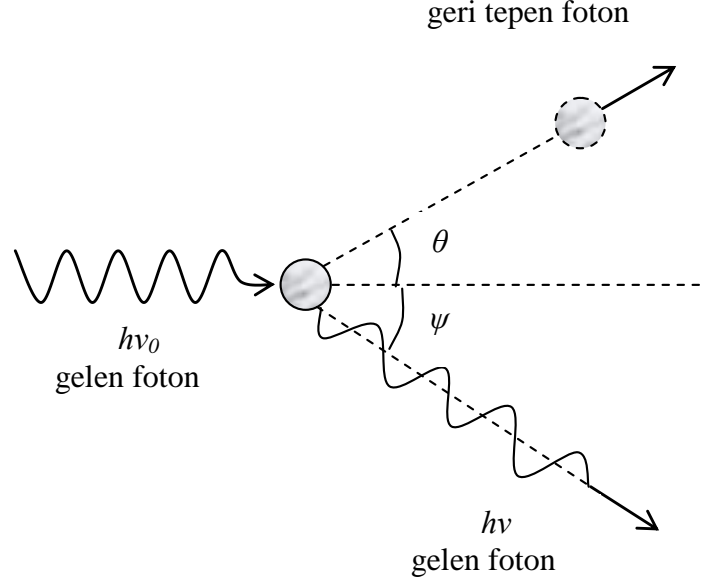
ifadesi ile verilir. Burada E_γ gelen fotonun enerjisi, E_e elektronu sökmek için gereken kinetik enerji, E_a atomun geri tepme enerjisi ve E_B bağlanma enerjisidir. Bağlanma enerjisi aynı zamanda elektronu sökmek için gerekli olan en küçük enerjidir. Fotoelektrik olay artan atom numarası ile hızla artarken, artan enerji ile azalır.

2.2.3. Compton saçılması

Atoma gevşek olarak bağlanmış bir dış yörünge elektronu, enerjisi kendisine kıyasla çok daha büyük olan bir fotonla çarpışması sonucunda fotonun enerji kaybederek saçılması olayına Compton saçılması denir. Elektron kütleli bir parçacık olduğu için fotonun bütün enerjisini soğurması momentumun korunumu gereği mümkün değildir. Dolayısıyla foton, enerjisinin bir kısmını elektrona aktarır saçılma uğrayarak yoluna devam eder. Foton ile elektron arasında oluşan açılı fotonun enerjisine bağlıdır. Saçılan fotonun dalgaboyu ile gelen fotonun dalgaboyu arasındaki fark

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0c} (1 - \cos\theta) \quad (2.3)$$

ifadesi ile verilir. Burada h/m_0c Compton dalgaboyu olarak adlandırılır. Enerjileri 0,5 – 2,0 MeV arasında olan fotonların hafif elementlerden oluşan ortamlar tarafından soğurulmasında bu olay diğerlerine göre daha baskındır. Yüksek enerjili fotonlar enerjileri belirli bir seviyeye düşene kadar Compton saçılmasına uğrarlar bu andan sonra da fotoelektrik olayla soğurulurlar. Çünkü sadece Compton saçılması ile fotonlar tamamen soğurulamazlar. Compton saçılması Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Compton saçılması.

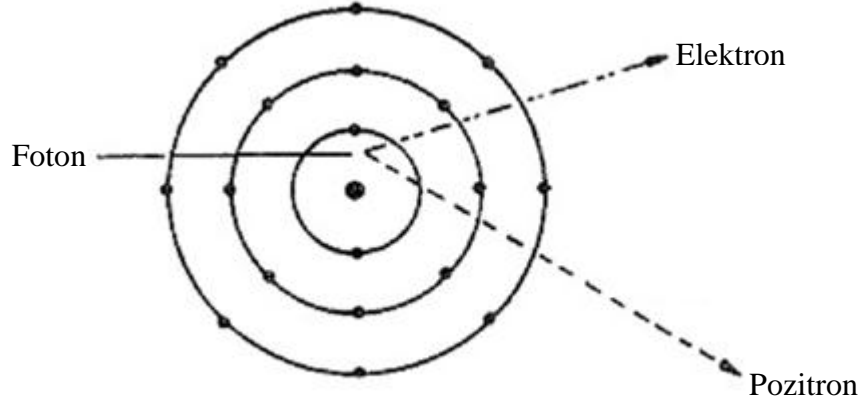
Fotonun saçılma açısı ψ , gelen ve saçılan fotonların enerjisi sırasıyla E_0 ve E olmak üzere son durumdaki enerjisi

$$E = E_0 \left(\frac{1}{1 + (E_0 / m_0 c^2)(1 - \cos \psi)} \right) \quad (2.4)$$

ifadesi ile verilir. Burada $m_0 c^2$ elektronun durgun kütle enerjisi olup 511 keV'dir. Compton saçılması artan foton enerjisi ile azalır. Fakat bu azalma fotoelektrik olaya göre daha azdır.

2.2.4. Çift oluşumu

Eğer fotonun enerjisi yeteri kadar büyük ise ve bu foton atom çekirdeğinin çok yakınından geçiyorsa, fotonun enerjisinden kütlesi olmayan aynı anda biri negatif yüklü elektron, diğeri pozitif yüklü pozitron olmak üzere iki parçacık üretilir. Foton enerjisi elektron-pozitron çiftinin kinetik enerjisine ve durgun kütle enerjisine dönüşür. Böylece elektromanyetik bir dalgadan madde oluşur. Çift oluşum Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Çift oluşumu.

Teorik olarak böyle bir çift oluşumunun meydana gelebilmesi için, fotonun enerjisinin en az $2 \times 0,511 = 1,022$ MeV olması gerekir. Bu enerji iki elektronun durgun kütle enerjisine eşittir. Foton enerjisinin daha büyük olduğu durumlarda ise bu enerjinin arta kalan kısmı elektron ve pozitrona kinetik enerji olarak aktarılır. Oluşan elektron, atomla serbest elektronlar gibi etkileşirken, pozitron ise bir yörünge elektronu ile birleşir ve zıt yönlü iki foton salarak yok olur. Bu foton ise fotoelektrik yolla soğurulur. Pratikte çift oluşumu 2 MeV'den daha büyük enerjili fotonlar ve ağır elementler için göreceli olarak daha baskındır.

2.3. Gama ışını spektroskopisi

Gama ışınlarının düşük azaltma katsayılarından dolayı gama radyasyonunda etkili verim dedeksiyonu için dedektör malzemesinin yüksek durdurma gücüne sahip olması gerekir. Gama ışın spektroskopisinde dedektör seçiminde bazı faktörler önemlidir. Bu faktörler; çözme gücü, dedeksiyon verimi, veri toplama kolaylığı ve yanıt vermede lineerlik ile kararlılıktır.

Gama ışını spektroskopisinde dedektörler kristale göre sintilasyon dedektörleri ve yarı iletken dedektörler olmak üzere iki şekilde sınıflandırılırlar. Yüklü parçacık veya gama ışınının yarıiletken (katıhal) dedektör materyali ile doğrudan etkileşmesi sonucu enerji

kaybedilir. Elektron bu etkileşme ile valans bandından iletim bandına veya daha yüksek enerji seviyesine çıkartılır. Yüksek enerjili elektronlar hızlıca diğer elektronlarla etkileşir. Gama radyasyonunun soğurma katsayısı küçük olduğundan dedektör hacmi geniş olmalıdır. Küçük hacimli dedektörlerde çoklu Compton saçılması kaçınılmazdır.

Yarıiletken dedektörlerde elektron-hol çiftinin yeniden birleşmesi, tuzaklanmalar ve kaçak akımlar meydana getirebilir. Yük taşıyıcıdaki tuzaklanmalar spektrumdaki düşük enerji bölgesinde görülebilir. Gerilimin artmasıyla kuyruklanmalar kaybolur. Belli bir gerilim değerinden sonra kaçak (sızıntı) akım da artmaya başlar.

2.4. Radyoaktif bozunma kanunu

Bir atom çekirdeğinin alfa parçacığı, beta parçacığı ya da gama ışını yayımlaması ya da iç yörüngelerden bir elektron yakalaması olayına radyoaktif bozunma denir. Atom çekirdeğinin kararlılığı nötron ve proton sayısına bağlıdır. Nötron sayısının proton sayısına oranının 1 olduğu çekirdekler kararlıdır. Bu oran 1,5'tan büyük olan çekirdekler kararsızdır. Kararlı en son çekirdek $^{209}_{83}\text{Bi}$ 'dir. Çekirdekleri kararsız olan atomlar radyoaktiftir ve radyoaktif bozunmalar yaparak kararlı duruma geçmeye çalışırlar. Çekirdekteki proton sayısının artmasıyla birlikte aralarındaki itme kuvveti de artmaktadır ve bir seviyeden sonra daha da ön plana çıkmaktadır. Dolayısıyla çekirdek kararsız hale geçmektedir. Yapılan deneyler bu bozunmanın üstel bir kanuna uyduğunu gösterir. Buna göre herbir çekirdeğin birim zamanda parçalanma olasılığı λ olsun. O zaman herbir çekirdeğin dt gibi sonsuz küçük bir zaman aralığında parçalanma olasılığı λdt olur. Eğer herhangi bir anda N tane parçalanmamış atom varsa, dt zaman aralığında parçalananların sayısı

$$dN = -\lambda N dt \quad (2.5)$$

olur. Bu ifadedeki eksi (-) işareti N 'deki değişimin azalan olmasından kaynaklanır. Bu denklemin integrali alınır;

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.6)$$

ifadesi elde edilir. Burada N_0 , $t=0$ anındaki atom sayısını ve $N(t)$ ise t anındaki parçalanmamış atomların sayısını gösterir.

Birim zamandaki parçalanma sayısına *aktiflik* denir ve

$$A = \left| \frac{dN(t)}{dt} \right| = \left| -\lambda \underbrace{N_0 e^{-\lambda t}}_N \right| = |-\lambda N| \quad (2.7)$$

ifadesi ile verilir. Parçalanmamış atomların sayısının yarıya inmesi için geçen süre *yarı-ömür* olarak isimlendirilir ve $t_{1/2}$ ile gösterilir. Başlangıçtaki N_0 'ın yarıya düşmesi için geçen süre olan yarıömür

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t_{1/2}} \quad (2.8a)$$

veya

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (2.8b)$$

ifadesi ile verilir. Parçalanma üstel olduğu için eldeki radyoaktif atomların tamamen parçalanması için geçen zaman sonsuz olur. Bir sonraki parçalanacak atomun hangisi olduğunu söylemek mümkün olmadığından, verilen bir numunedeki bir atomun ömrü sıfırla sonsuz arasında değişir. Bu nedenle ortalama ömür olan τ , bütün çekirdeklerin yarı-ömürlerini toplayıp toplam çekirdek sayısına bölünerek hesaplanabilir.

dN_1 tane çekirdek t_1 ve dN_2 tane çekirdek t_2 ve dN_n tane çekirdek t_n ömürlerine sahip olsun. Bu durumda ortalama ömür

$$\tau = \frac{t_1 dN_1 + t_2 dN_2 + \dots}{dN_1 + dN_2 + \dots} \quad (2.9)$$

olur. İntegral alınırsa

$$\tau = \frac{\int_0^{N_0} t dN}{\int_0^{N_0} dN} = \frac{-\int_{-\infty}^0 \lambda t N_0 e^{-\lambda t} dt}{N_0} = \int_0^{\infty} \lambda t e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (2.10)$$

eşitliği elde edilir.

2.5. Radyoaktivlik birimleri

2.5.1. Aktiflik birimleri

Curie: Bir gram radyumun bir saniyede yapmış olduğu ışımaya (parçalanma) sayısıdır ve $3,7 \times 10^{10}$ parçalanma/sn (Becqurel) olarak verilir.

Rutherford: Saniyede 10^6 parçalanma yapan numunenin aktifliği olarak tanımlanır.

Buna göre

$$1 \text{rd} = 10^6 \text{ parçalanma / saniye}$$

$$1 \text{Curie} = 3,7 \times 10^4 \text{ Rutherford}$$

olarak yazılabilir.

Becqurel: Bir saniyede bir ışımaya 1 Becqurel denir. 1 Bq=1 parçalanma/saniye yazılabilir. Dolayısıyla

$$1\text{Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{Bq}$$

$$1\text{Bq} = 27,03 \times 10^{-12} \text{Ci}$$

olur.

2.5.2. Doz ve doz hızı birimleri

Maddenin soğurduğu toplam ışımanın enerji cinsinden değeri doz olarak tanımlanır.

Rad: 1 gramlık maddeye 100 erg'lik enerji aktaran radyasyon miktarıdır.

Rem: 1 gramlık canlı dokuya 1 Rad'lık radyasyon bırakan radyasyon miktarıdır.

Röntgen: Birim hacimdeki havada ($d = 0,001293 \text{ gr / cm}^3$) 1 esb'lik (elektrostatik birim) iyon çifti üreten gama ışınlarının (veya x-ışınlarının) sayısıdır.

Sievert: Rem'in yüz katıdır.

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ Rem}$$

Doz Hızı: Birim zamanda birim hacimdeki maddeye aktarılan radyasyon enerjisidir ve Rad/sn, Röntgen/sn gibi birimlerle ifade edilir.

2.6. Radyoaktif bozunma çeşitleri ve bozunmada rastlanan bazı olaylar

2.6.1. Alfa bozunması

Çekirdeğin kararsızlığı hem proton hem de nötron fazlalığından ileri geliyorsa, çekirdek iki proton ve iki nötrondan oluşan bir alfa parçacığı yayımlayarak bozunur. Rutherford, alfa parçacığının gerçekte He atomu çekirdeği olduğunu göstermiştir. Aralarındaki tek

fark helyum atomunun dış yörünge elektronlarının bulunması ve nötr durumda olmasıdır. Alfa parçacıkları ise, yüklü tanecik olarak 2 protonu olduğu için +2 değerlidir. Alfa parçacıkları güçlü pozitif elektriksel çekim kuvveti ile yolu üzerindeki bir atomun 2 elektronunu çekerek alır ve atomu iyonize eder. Böylece etkileştiği ortamla güçlü iyonizasyon oluşturur. Alfa parçacığı elektronlardan yaklaşık olarak 7400 kat daha ağırdır. Havada yaptığı iyonizasyon başına 34 eV enerji kaybeder. Alfa bozunmasında bir ana çekirdek, bir alfa parçacığı ile bir ürün çekirdek oluşturarak parçalanır. Bu bozunmada proton ve nötron sayıları ayrı ayrı korunur. Ayrıca toplam enerji de korunmalıdır. Bu parçalanmada,



eşitliği elde edilir.

2.6.2. İzobarik bozunma

2.6.2.a. Beta bozunması

Eğer bir radyonüklidin kararsızlığı çekirdekteki nötron fazlalığından ileri geliyorsa, çekirdeğindeki enerji fazlalığını gidermek için nötronlardan biri proton ve elektron haline dönüşür. Proton çekirdekte kalırken, elektron atomdan dışarı atılır.



Bu yüksek hızlı elektrona beta parçacığı (veya negatron) adı verilir. Burada $\bar{\nu}$ anti nötrindir. Bu şekilde beta emisyonu yapan radyonüklidin atom numarası bir artarak kendinden bir sonraki elementin izobar atomuna dönüşür. Bu bozunmada kütle sayısı değişmediği için izobarik bozunma olarak adlandırılır.



2.6.2.b. Pozitron bozunması

Atomun kararsızlığı nötron azlığından veya proton fazlalığından ileri geliyorsa protonlardan biri nötron ve pozitif yüklü elektrona (pozitrona) dönüşür.



Nötron çekirdekte kalır, pozitron dışarı fırlatılır. Böylece pozitron yayımlayan radyonüklidin proton sayısı (atom numarası) bir eksilerek kendinden bir önceki elementin (izobar) atomuna dönüşür, fakat kütle numarası değişmez.

2.6.3. Elektron yakalama (EC) olayı

Çekirdek proton fazlalığından dolayı kararsız ise atomun çekirdeğe yakın (K, L) yörüngelerinde bulunan elektronlarından biri çekirdek tarafından yakalanır. Elektronla bir proton birleşerek nötron ve nötrino haline dönüşür.



Bu bozunumda çekirdekten parçacık salınmaz ancak pozitron bozunmasında olduğu gibi proton sayısı bir eksilir. Kütle numarası ise aynı kalır. Bu olayda boşalan elektron yörüngesine üst yörüngelerdeki başka bir elektron geçer ve Bremsstrahlung (frenleme) radyasyonu adı verilen x-ışınları yayınlanır.

Yukarıda bahsedilen her üç beta bozunumunda da proton ve nötron sayıları bir birim değişmesine rağmen kütle numarası sabit kalır. Ayrıca her üç bozunumda da nötrino ve anti-nötrino denilen yüksüz ve kütleli parçacıkların yayımlandığı görülmektedir.

2.6.4. İzomerik geçiş (IT)

Radyoaktif geçişlerin çoğu birkaç adımda olur. Çoğu radyonüklid için ilk adım yörünge elektronları ile etkileşim ve izomerik geçişten sonra izobarik geçiştir. Bir izomer çekirdekten, daha aşağı seviyede bulunan öteki izomere geçiş, bir gama fotonu yayımlanması ile olur. İzomerik geçiş sonucu gama ışını emisyonu, iç dönüşüm olayında veya her ikisinin sonucu nükleer uyarda kullanılır. Nükleer izomer kısa yarı ömürlü olmayan ve ölçülebilir iki veya daha fazla enerji seviyesine sahiptir. Çoğu zaman bunun arkasından, bir iç dönüşüm sonucu meydana gelen x-ışını veya Auger elektronu yayımlanması kendini gösterir. Bilindiği gibi Auger elektronları, x-ışınlarının, aynı atomdan fırlattığı elektronlardır. Gama emisyonu ile meydana gelen yarı kararlı ya da izomerik haldeki parçalanmaya izomerik geçiş denir. Yarı kararlı ve uyarılmış hallerde ise, ortalama ömürleri hariç hiçbir fark yoktur.

2.6.5. İç dönüşüm (Internal conversion) olayı

İç dönüşüm olayı izomerik geçişe benzerdir. Bağlanma enerjisinden yüksek bir enerji elektrona aktarılır. Bu enerji ile elektron yörüngeyi terk eder. Bu yöntem, gama emisyonuna alternatif olarak iç dönüşüm olayı denir. Yörüngeyi terk eden elektron iç dönüşüm elektronudur. Nüklidlerin çoğunda izomerik geçişle gama enerjili foton ve iç dönüşüm elektronu üretilir. Elektron iç dönüşüm olayı ile bir yörüngeyi terk ederse bir elektron boşluğu oluşur. Bu elektron boşluğu üst yörüngelerden bir elektronla doldurulur. Bu geçiş sırasında karakteristik x-ışınları veya Auger elektronu yayımlanabilir. Genellikle bütün geçişlerde ya gama ışını ya da iç dönüşüm elektronu yayımlanır. İç dönüşüm ve elektron yakalama (EC), x-ışını veya Auger elektronu yayımlanmasına öncülük eder.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. HPGe dedektörlerinin çalışma prensibi

Katılarda iyonlaşma enerjisi, bant aralıklarıyla doğru orantılıdır. İletkenlerde yasak enerji aralığı küçük, yalıtkanlarda ise büyüktür. Yarıiletkenlerin iki önemli dezavantajı vardır. Bunlardan ilki, enerji seviyelerindeki tuzaklanmalardan dolayı valans bandından iletkenlik bandına giden elektronun gecikmesi, dolayısıyla elektriksel çıkış sinyali üretmemesi ve diğeri kristal safsızlıklarıdır.

Temel sayma bölgesinin çoğu dedektöre gelen fotonların Compton saçılmasından kaynaklanır. Bu durum bazen de dedektörü çevreleyen materyalden kaynaklanır. Kaynağın içindeki radyasyon kirliliği de spektruma katkı sağlar. Birçok dedektörde dıştaki aktif olmayan kontak tabakanın güçlü soğurmasından dolayı radyasyon miktarı beklenenin altındadır. Enerji rezolüsyonu, pik/Compton oranı, dedeksiyon verimi, pencere kalınlığı, background seviyesi ve dedektör-kaynak mesafesi radyoaktif kaynaktan gelen radyasyonun spektrumunu etkiler.

HPGe dedektör diyotları arasına uygulanan ters gerilimle çalışır. Radyasyon, dedektörün hassas hacminde soğurulduğundan soğurulan foton enerjisi ile orantılı olarak elektrik sinyaline çevirir. Üretilen bu elektrik sinyali dedektöre yakın olan ön yükselticiye gelir. Oradan ana yükselticiye ve sonra çok kanallı analizöre ulaşır. Buraya gelen sinyal elektronik gürültü, yük taşıyıcılarda istatistiksel dalgalanma ve tamamlanmamış yük toplanmasından dolayı genişletilmiş çizgi spektrumunu oluşturur. Temel sayma (background) radyasyonu spektrumun altında kalır.

Yarıiletken dedektörler bütün yük taşıyıcıları durdurmak için sıvı azot sıcaklığında tutulmalı ve dedektör kristali vakuma alınmalıdır. Ön yükselticiler küçük sinyal akımını daha geniş sinyal pulsuna dönüştürmek için ana yükselticiye düşük dirençli (50 ohm) kablolarla bağlanır. Dirençli geri beslemeli (resistive feed-back (RFB)) ve optik pulslu

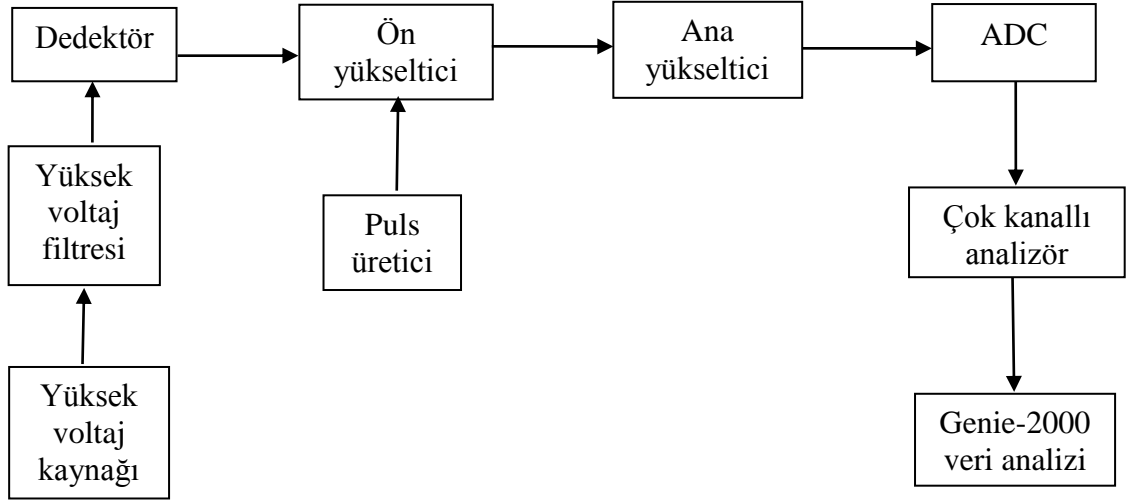
geri beslemeli (pulsed optical feed-back (POFB)) olmak üzere iki farklı ön yükseltici vardır. RFB ön yükselticiler puls şekillendirme çıkışına sahiptirler ve bu yüzden genel amaçlı dedektörlerde kullanılır. POFB önyükselticiler ise düşük enerji bölgesindeki yüksek rezolüsyonlu spektrometrelerde kullanılırlar. Bütün POFB ön yükselticilerin ön kısmının (FED ve LED) dedektöre yakın olması ve soğuk tutulması gerekir.

3.1.1. Sayma sistemi

Belirli bir radyasyon ölçümü için dedektör tipi seçiminde olduğu gibi

- a) Sayma verimi
- b) Enerji rezolüsyonu
- c) Sinyal yükselme zamanı
- d) Dead time (ölü zaman)
- e) Sinyal – gürültü oranı

gibi dedektör parametrelerinin de dikkate alınması gerekir. Genel olarak dedeksiyon sistemi; elektronik puls işleme birimleri ve tek veya çok kanallı analizörden oluşur. Bu çalışmada kullanılan sayma sistemi Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Dedeksiyon sistemi.

3.1.2. Yüksek voltaj kaynağı

Yüksek gerilim güç kaynağı (HVPS), dedektör için gereken gerilimi ve polaritesini sağlar. Yarıiletken dedektörlere yeniden yük birleşmesini engellemek için negatif potansiyelin uygulanması gerekir.

3.1.3. Ön yükseltici

Ön yükselticilerin; sinyal genişletme, puls şekillendirme ve potansiyel puls üretimi olmak üzere yük dönüşümünde üç temel görevi vardır. Ön yükselticide puls yükselme ve yük toplama zamanı birkaç mikrosaniyeden birkaç nanosaniyeye kadar değişir. Çoğu ön yükselticide puls çıkış gerilimi giriş yükü ile doğru orantılıdır. Ön yükselticilerin yüke hassas olması için

- Düşük gürültülü ve yüksek kazançta sahip olması (rezolüsyon %0,15)
- Geniş band aralığına sahip olması (puls şekillendirme analizlerinde yükselme zamanı 20 ns'den küçük olmalı)
- Geniş dinamik aralığa sahip olması (en az 10^3 'ten 10^4 'e kadar) gerekir.

3.1.4. Yükseltici

Yükseltici puls şekillendirmek için kullanılmaktadır. Yükselticilerin önemli karakteristikleri; lineerlik, çıkış puls biçimi, kazanç (gain), kararlılık (stability) ve gürültü seviyesidir. Modern sistemler için maksimum çıkış puls genliği 7V'tan 10V'a kadardır. Çoğu yükselticiler hem unipolar çıkış (sinyalin pik biçimi tamamen pozitif veya tamamen negatif) hem de bipolar çıkış (sinyal hem bir pozitif hem de bir negatif bileşene sahiptir) sağlarlar. En iyi sinyal/gürültüye oranını (signal-to-noise ratio) elde etmek için yükselticinin (amplifier) unipolar çıkışı seçilir.

Amplifierin kazanç (gain) kararlılığı çok önemlidir. Eğer 4000 kanaldaki bir pik, 4 kanallık bir genişliğe sahipse, gainde %0,01'lik bir değişim pulsün pozisyonunda 0,4 kanallık bir kaymaya sebep olur. Böyle bir değişim pikin genişlemesine de sebep olur.

X-ışını floresans çalışmalarında bazı ölçümler bir gün veya daha uzun bir süre de gerçekleştirildiğinden gain kararlılığı birkaç günün üzerinde %0,01 'den daha iyi olmalıdır.

3.1.5. Analog sayısal dönüştürücü (ADC)

Foton spektrometrelerinde temel görev, yükseltici çıkışında puls yükseklik dağılımının ölçülmesidir. Analog dijital dönüştürücü ile yükselticinin genişlettiği analog puls, sayısal bir veriye dönüştürülür. ADC'den alınan puls yükseklik bilgisinin, her bir kanalda gözlenen sayıların birikmiş sayısını veren bir düzende saklanmış olması gerekir. ADC, puls yükseklik spektrumuna ek olarak, sayma süresini (live time) de saklar. Sayma süresinin sonunda hafızadaki veriler, bir manyetik bant gibi saklama ortamlarına bilgi olarak gönderilebilir.

3.1.6. Çok kanallı analizör (MCA)

Çok kanallı analizör tek kanallı analizörün (SCA) serisi gibi düşünülebilir. Temelde analog dijital dönüştürücü (ADC), bellek ve görüntüleme birimlerinden oluşur. Görüntüleme birimi hafızadaki pulsları okur ve her pulsu şiddeti ile orantılı olarak bir kanala yerleştirilir. Her bir kanala yerleştirilen puls sayısı enerjiye eş değerdir ve enerji spektrumu elde edilir.

3.1.7. Puls yükseklik analizi ve sayma tekniği

Puls yükseklik analizi gürültü seviyesinden (background) ayarlanabilir. Dedeksiyon sistemi sinyal çıkışı, tek kanallı (SCA) veya çok kanallı (MCA) analizörden alınabilir. Analizörlerde alt kademe ayırıcı (lower level discriminator (LLD)) ve üst kademe ayırıcı (upper level discriminator (ULD)) bulunur.

3.2. Zırlama

Dedektör zırlama, ilgilenilen pik (tepe) bölgesinin altında kalan temel sayma bölgesinin azaltılması için gerekir. Çevredeki tabii radyasyondan dolayı background bölgesi önemli ölçüde etkilenir. Zırlamada, bulunması kolay ve nispeten ucuz olan ve yoğunluğu ($11,36 \text{ g/cm}^3$) ile atom numarası (82) yüksek olan kurşun kolimatörler tercih edilir. Kurşun sert bir madde olmadığından makinelerde istenilen şekli alması zordur. Bazı uygulamalarda kurşun yerine tungsten alaşımı kullanılır. Tungsten, atom numarası (74) ile yoğunluğunun ($19,3 \text{ g/cm}^3$) yüksek ve bir malzeme olmasından dolayı makinelerde istenilen şekillerde kolimatör haline getirilebilir. 500 keV'in üzerindeki enerjilerde tungstenin lineer azaltma katsayısı kurşundan daha fazladır. Kurşun ve tungstenin lineer azaltma katsayısının enerjiye bağlı değişimi Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Kurşun ve tungstenin lineer azaltma katsayısının enerjiye bağlı değişimi.

| Enerji (keV) | Azaltma katsayısı (cm ⁻¹) | |
|--------------|---------------------------------------|----------|
| | Kurşun | Tungsten |
| 1000 | 1,307 | 2,084 |
| 500 | 1,261 | 2,027 |
| 200 | 1,170 | 1,872 |
| 100 | 1,058 | 1,698 |

Zırhlama iki şekilde yapılabilir:

- a) Pasif zırhlama
- b) Aktif zırhlama

Pasif zırhlama, gama ışını dedektörünün kurşun, demir gibi ağır materyallerle kaplanmasıyla yapılır. Böylece çevredeki radyoaktif kaynaklardan gelen background azaltılır. Gama ışın spektrometreleri için kullanılan 10 cm'lik kurşun kolimatör, çevredeki backgroundu yüzde birine düşürebilir. Pb²¹⁰'un yarı ömrü 22,2 yıldır ve Bi²¹⁰ gibi başka elementlerin ikincil beta ışınlarını yayımlayabilir. Böylece background seviyesi artırılabilir. Bundan dolayı eski kurşun kullanımı öncelikli olmalıdır.

Aktif zırhlama ise ana dedeksiyon sisteminin elektronik çevresinin kaplanmasıyla yapılır. Plastik ve inorganik sintilatörlerde gama ışınları için pasif zırhlama kullanılır. Sıvı sintilasyon dedektörlerde (liquid scintillation counters (LSC)) ve gaz dedektörlerinde aktif zırhlama kullanılır.

3.3. HPGe dedektörün karakteristik özellikleri

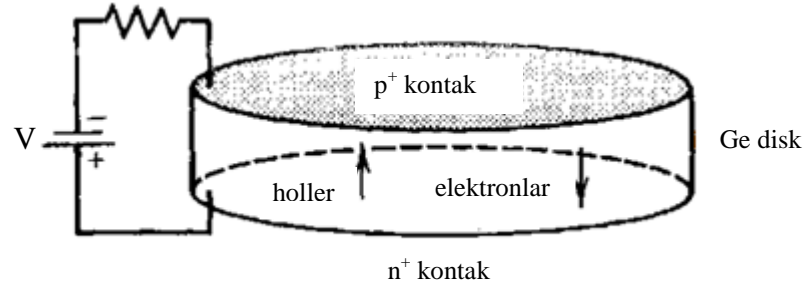
Germanyum dedektörün nemden korunması için vakum odasında ve kaçak akımları kabul edilebilir seviyede tutulması için de sıvı azot sıcaklığında bulunması gerekir. Dedektör kristali ultra saf germanyum kristalden veya lityum sürüklenmiş germanyum kristalden de olabilir. Ön yükseltici, elektronik gürültüyü önlemek için dedektör kristali

yakınlarında yer alır. Coaxial (eş eksenli), planar (düzlemsel), well type (kuyu tipi) gibi farklı germanyum dedektör tipleri vardır. Farklı dedektör tiplerinde gama ve x-ışınları için dedektör verimi, enerji aralığı ve enerji rezolüsyonu farklıdır. Coaxial p-tipi germanyum dedektörler gama ışınları için kullanılır ve enerji aralığı 100 keV'den yaklaşık 10 MeV'e kadardır. Bu dedektörler düşük enerjili gama ve x-ışınları için tercih edilmezler. Çünkü yüksek enerjili gama ışınları dedektörün alüminyum penceresiyle dedektörün aktif hacmine geçebilmelidir. X-ışını spektroskopisinde, n-tipi ve planar dedektörler kullanılabilir. Çünkü bu dedektörler ince berilyum pencereden yapılmıştır. Düşük enerjilerde dedektör verimi, kesit alanı ve pencere kalınlığının fonksiyonu iken, yüksek enerjilerde dedektör veriminin az veya çok olması dedektörün aktif hacmi ile doğrudan bağlantılıdır. Farklı yarıiletken dedektörlerin karakteristik özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Farklı yarıiletken dedektörlerin karakteristik özellikleri.

| Dedektör | Be Pencere Kalınlığı/μm | Foton Enerji Aralığı | Rezolüsyon/FWHM |
|-----------------|--|-----------------------------|------------------------|
| Si(Li) | 0,1 | 1-60 keV | 5,9 keV'de 160-200 eV |
| Ge(Li) | 300-1000 | 50 keV-10 MeV | 1,33 MeV'de 1,8-22 keV |
| p-tipi HPGe | 300-6000 | 50 keV-10 MeV | 1,33MeV'de 1,8-22 keV |
| n-tipi HPGe | 0,1 | 3 keV-10 MeV | 1,33 MeV'de 1,8-22 keV |

Planar geometrili germanyum diskin, iki düz yüzünde elektriksel kontak sağlanır. n^+ ve p^+ kontaklar ya lityum buharlaştırılmasıyla ya da sürüklemesiyle oluşturulur. HPGe dedektörler genellikle tam deplasyon bölgeli dedektörlerdir. Negatif gerilim ile çalışırlar. Bir planar dedektör Şekil 3.2'de görülmektedir.



Şekil 3.2. Planar HPGe dedektör.

Son zamanlarda n^+ ve p^+ kontaklara 1 μm 'den küçük kalınlıkta Li sürüklenmektedir (drift edilmektedir).

HPGe dedektörle elde edilen bir spektrumun kalitesini etkileyen faktörler şunlardır:

1. Fiziksel ayarlar
2. Elektronik ayarlar
3. Sayma koşulları
4. Kaynağın istenmeyen iyonlaştırıcı radyasyonu

3.3.1. Fiziksel ayarlar

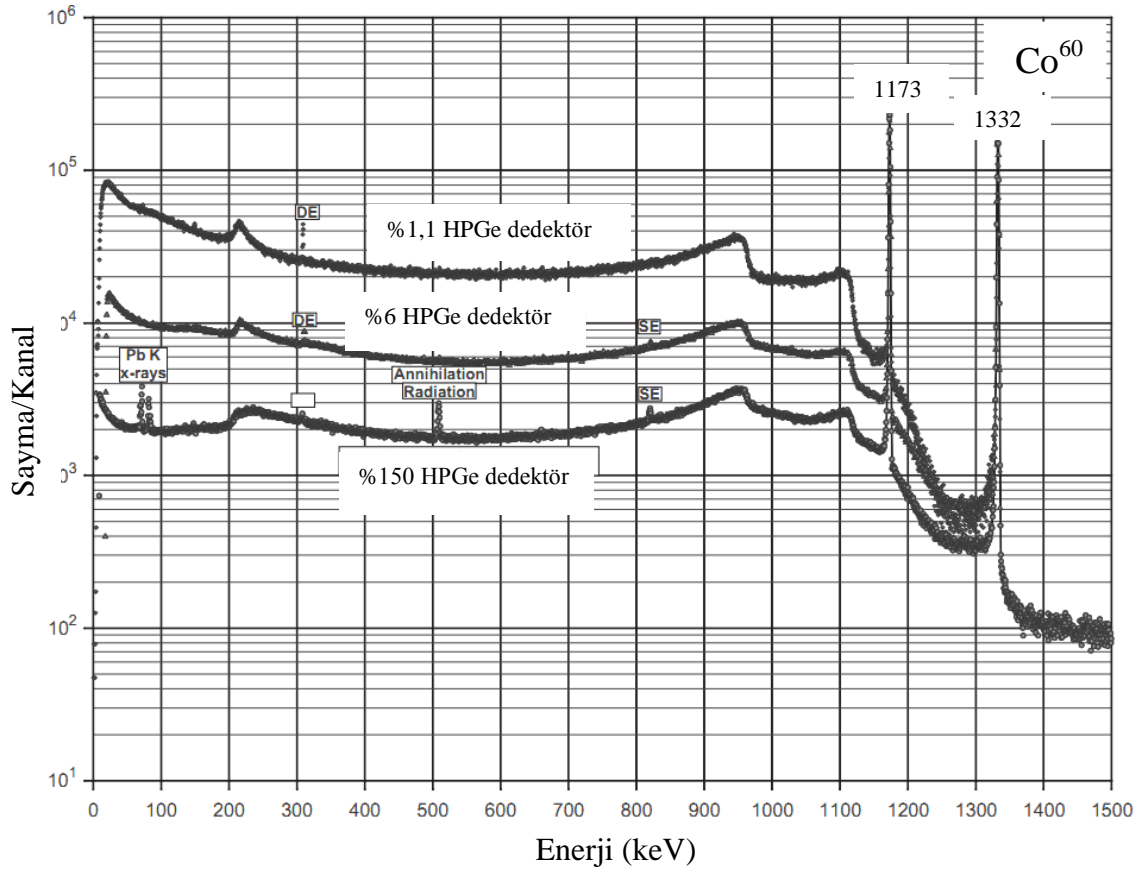
3.3.1.a. Dedektör tanımlama

HPGe dedektörün şekli ve boyutları gama ışını analizinde maksimum pik-yükseklik oranı için önemlidir. Günümüzde çeşitli özelliklerde HPGe dedektör tipleri ve üreticileri [Canberra, Ortec, Princeton Gamma Tech (PGT), Detector System GmbH (DSG)] mevcuttur.. Bunlar; küçük enerji aralıklı dedektörler (3-100 keV), n- ve p-tipi geniş enerji aralıklı dedektörler (3 keV-3 MeV) ve n- ve p-tipi eş eksenli (coaxional) dedektörler (30 keV-10 MeV) olarak ayrılabilir.

Genel olarak düşük enerji rezolüsyonu ve hassasiyeti, yüksek enerjili hassasiyeti ve hem düşük hem de yüksek rezolüsyonlu yüksek enerjili hassasiyeti sağlamak için optimize

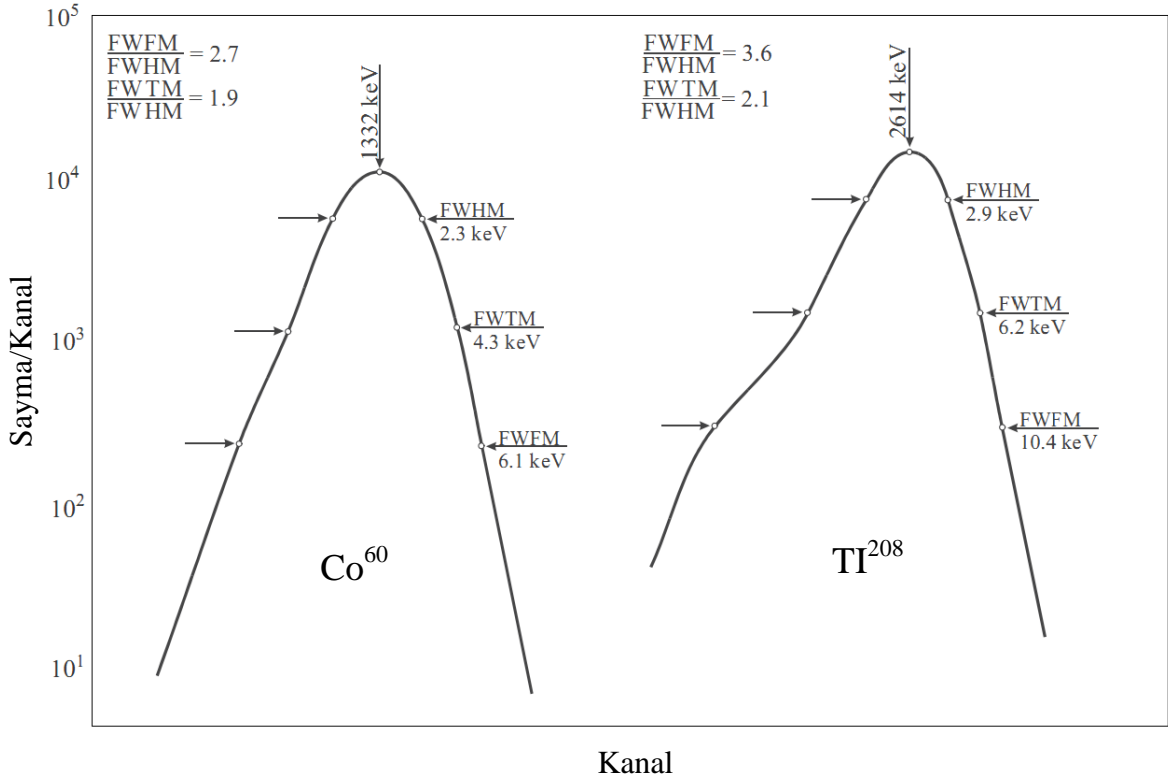
dedektörler vardır. Ancak son 15 yılda teknolojinin gelişmesiyle dedektör üreticileri foton dedektörleri için zayıf kontaklı ve düşük enerjili p-tipi dedektörler geliştirmişlerdir. n-tipi dedektörler nötronlar için kullanılmaya daha elverişlidir. Çünkü bu dedektörler yüksek nötron etkilerine maruz kalabilir.

HPGe dedektör sıvı azot (LN_2) ile doldurulmuş bir dewar içerisinde tutularak veya çeşitli mekanik soğutucular kullanılarak soğutulabilir. 1 MeV'den küçük gama ışın enerjilerinde dedektör geometrisi numune için önemlidir. Dedektörler için büyük çap ve relatif küçük kalınlık; yüksek enerjili gama ışınlarının etkileşme olmadan büyük ihtimalle tamamen geçmesine sebep olur. Böylece pik oluşmaz. Sadece background bölgesinin olduğu bir spektrum elde edilir. Şekil 3.3'te Co^{60} kaynağı ile farklı hacimli (%1,1, %6, %150) HPGe dedektörle elde edilen spektrumlar görülmektedir.



Şekil 3.3. Farklı hacimli (%1,1, %6 ve %150) HPGe dedektörlerle elde edilen spektrumlar.

Gaussian fonksiyonuna uymayan bir pikte kuyruklanmalar olabilir. Pik/Compton oranı enerji rezolüsyonu ile dedektör verimine bağlıdır. Bu nedenle ya dedektör verimliliği ya da enerji rezolüsyonu tek başına dedektör performansını gösterebilir. Şekil 3.4'te rezolüsyon FWHM, FWHM ve FWTM cinsinden ifade edilmiştir.



Şekil 3.4. HPGe dedektörün rezolüsyonu.

Foton enerjileri 80 keV'den büyük olduğunda dedektör penceresi elektrolit bakırdan yapılabilir. Ancak dedektör nötron bombardımanına maruz bırakılacaksa bakır elektrot kullanımı tavsiye edilmez. 80 keV'den küçük enerjilerde dedektör penceresi bakır malzemenen olmamalıdır. Çünkü bu, düşük enerjili fotonlar için ciddi bir zayıflamaya sebep olur. Düşük enerjili fotonlar için yüksek saflıkta magnezyum, alüminyum-berilyum (Al-Be) alaşımı veya karbon fiber pencereler tavsiye edilir. Ancak Be dedektör penceresi düşük aktiflikli kaynaklarda genellikle önerilmez (Gehrke *et al.* 2005).

3.3.1.b. HPGe dedektörde escape (kaçış) pikleri

Foton enerjisi 80 keV'in altında ise öncelikle fotonlar dedektörün ön yüzeyi ile etkileşir. Foton enerjisi 11,103 keV olan K soğurma kıyısında ise flöresans olayı sonucu x-ışını üretilir. X-ışını kaçış pik yoğunluğu foton enerjisi ile ters orantılı ve etkileşen fotonun şiddetiyle doğru orantılıdır. Ge dedektörü için x-ışını kaçış pikleri spektrumlardan kaldırılamaz. Bu nedenle gama ışın enerjilerinde (<80 keV) bu piklerin varlığının bilincinde olunmalıdır.

3.3.1.c. Dedektör zırhlama ve background azaltma

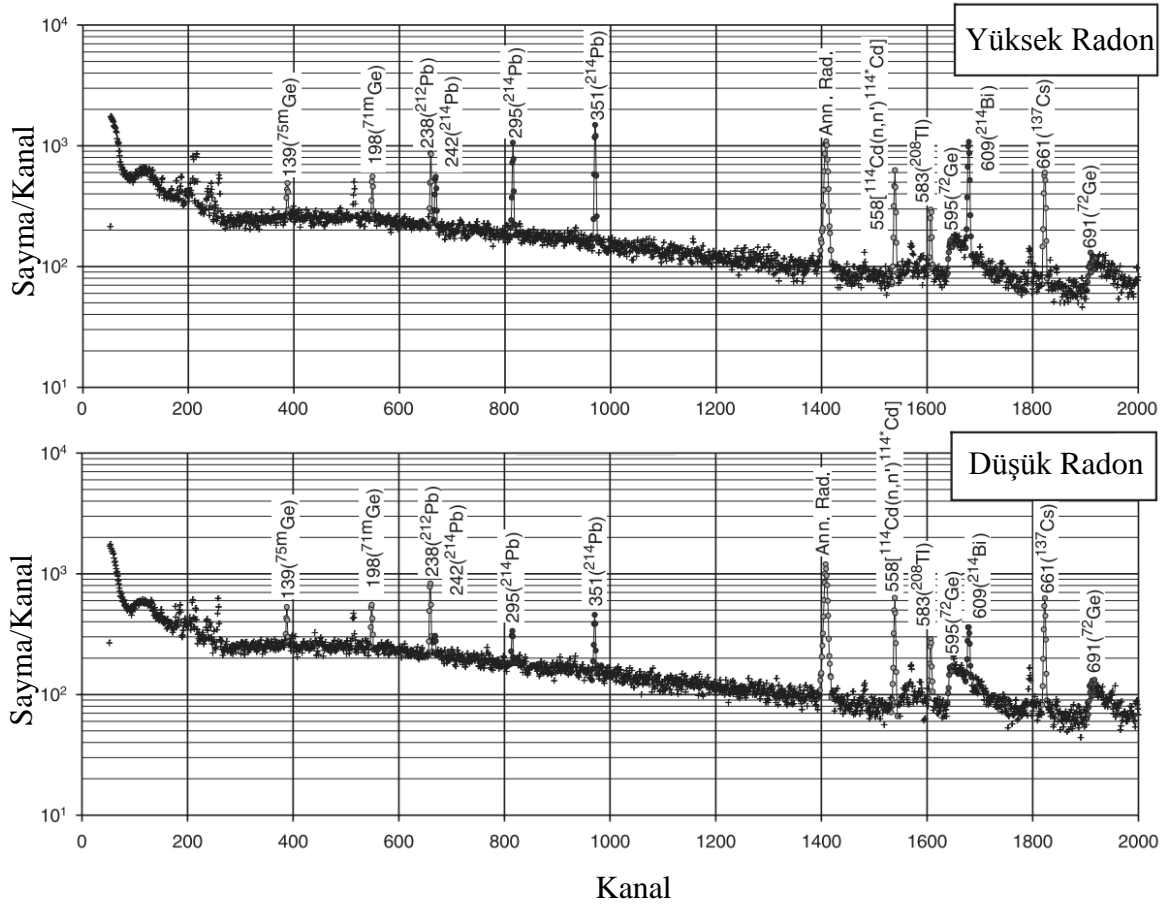
Dedektör zırhlama kolay, nispeten ucuz ve yüksek yoğunluklu olduğu için sıklıkla kurşun malzemeler kullanılarak yapılır. Kurşun tuğlalar nükleer reaktörler veya parçacık hızlandırıcılarla kullanıldığında ya bozunur ya da aktifleşir. Bu nedenle eski kurşunların kullanımı öncelikli olmalıdır. Pratikte her ne kadar dedektör kristali tamamen zırhlamaya alınsa da preamplifier veya dewar için bu söz konusu değildir. Bu bileşenler doğal olarak meydana gelen radyonüklidleri dedekte edebilmek için kurşun zırh dışında tutulur.

HPGe dedektörü korumak için en iyi yaklaşım 'J' tipli düşük sıcaklık kabıdır. Bu kap, genellikle bakır kadmiyum veya kalaydan yapılır ve flöresans x-ışınlarını önlemek için kullanılır. Dedektör hassasiyetini 3 keV azaltmak için ya 0,5 mm kalınlıkta yüksek safılıkta alüminyum levha veya 5 mm kalınlıkta plastik levha (flor içermeyen) kullanılır. Her ne kadar kurşun zırh flöresans etkisini azaltıyorsa da düşük enerjili sistemlerde sayımı arttırır.

3.3.1.d. Radon gazı

Th^{232} ve U^{238} serisi olan radon gazı düşük aktiviteli numunelerde problem olabilen bir gazdır. Bu gaz Rn^{220} 'ye düşük yarı ömründen dolayı ($t_{1/2}=55,6$ s) fazla bağlı olmayıp gama ışını spektrumunda U^{238} katkısıyla background oluşturur. Radon gazının aktivitesi

atmosfer basıncına, sıcaklığa, neme ve rüzgar hızına bağlıdır. Rüzgar hızının artması, iklim koşullarının değişmesi, atmosferi çevreleyen (durgun hava) radon gazındandır. Bu koşullarda alınan ölçümlerde backgroundun artması beklenir. Bu durumdan kurtulmak için radyasyonsuz azot kullanılabilir. Şekil 3.5'te yüksek ve düşük konsantrasyonlu radon gazının spektruma katkısı gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Yüksek ve düşük konsantrasyonlu radon gazının spektruma katkısı.

3.3.1.e. Bağlantı kabloları

Sayma sisteminde bağlantı kablolarındaki empedanstan dolayı kablolar 4 m'den kısa tutulmalıdır. Uzun kablolar enerji rezolüsyonunu düşürebilir. Kablolar elektromanyetik radyasyonu toplamak için anten görevi görebilir ve böylece sinyal kalitesini etkileyebilir. Çünkü iki sinyal arasında gecikme oluşabilir. Gecikme süresi 500 ns'den büyükse

başka bir pulsmuş gibi işlem görebilir ve reddedilebilir. Böylece spektral veri toplanamaz. Çıkış kablolarının direnci 50 ohm olmalıdır (Zocca *et al.* 2009).

3.3.2. Elektronik ayarlar

Elektronik koşullar yüksek kaliteli spektrum için önemlidir. Pile-up rejection (PUR), pole-zero ayarı, yükseltici (amplifier) zaman sabiti ve puls-şekli elektronik ayarlardandır.

3.3.2.a. Amplifier zaman sabiti ve puls şekli

Amplifier zaman sabiti sinyal gürültü oranını ve puls süresini belirler. Kısa amplifier zaman sabiti puls genişliğini azaltarak yüksek sayma oranları sağlar. Böylece pile-up pulsu oluşur. Yüksek zaman sabitinde sinyal gürültü oranı ve enerji rezolüsyonu kötüleşir. Farklı amplifier zaman sabitlerinde ölçüm serilerinin optimum performans için pile-up pulsunun olduğu ve olmadığı devre sistemleri karşılaştırılır.

3.3.2.b. Pole-zero (P/Z) ayarı

Uygun P/Z oranı yüksek kaliteli spektrum elde etmek için gereklidir. Her bir dedektör için ön yükseltici (preamplifier), yükseltici (amplifier) ve şekillendirme zamanı değişebilir. Amplifier kazancının değişmesi P/Z'yi etkilemez. Bu ayar osiloskop yardımıyla manuel olarak yapılabilir. Orta ölçekli saymalarda ve preamplifier pole-zero düzeltilmesi yapılmadığında, enerji piki genişler.

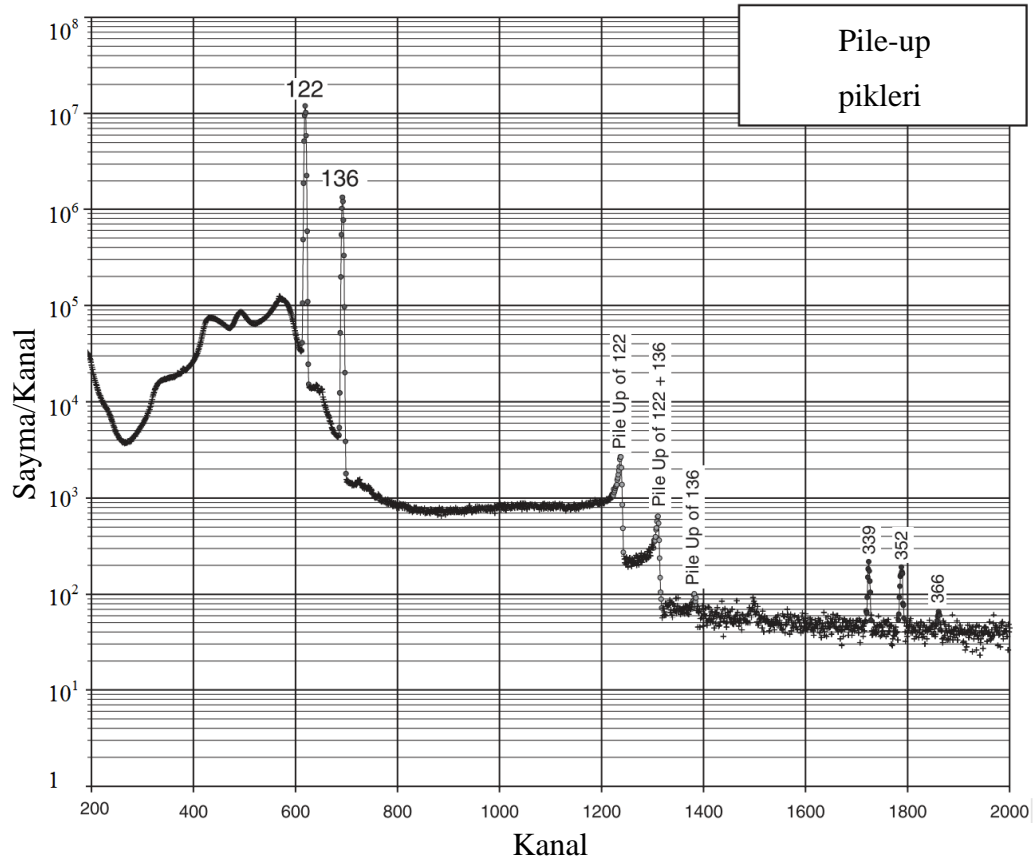
3.3.2.c. Pile-up pulsu

Yüksek sayma hızlarında, dedektör ardı ardına gelen iki pulsu ayırd edemez ve doğru kanala yerleştiremez. Bu pulslar genellikle sürekli spektruma katkı sağlar. Dedektör için

toplama zamanı, pile-up rejector ve amplifier çıkış pulsunun pik zamanı ile karşılaştırıldığında çok kısadır.

Amplifier zaman sabitinin azaltılması, pulsun genişliğini azaltır. Amplifier zaman sabiti çok düşürülürse enerji rezolüsyonunda kötüleşme olacaktır. Zaman zaman radyonüklidlerden kaynaklanan zayıf gama ışını enerjisi ve başka radyonüklidlerden kaynaklanan pile-up pulsu dedeksiyonu önler.

Pile-up, Gaussian olmayan pik şekillerine sebep olur. Pile-up pulsunun azaltılması, toplam sayma oranının azaltılmasıyla yapılabilir. Şekil 3.6'da foton soğurulması olmadan 20 cm kaynak-dedektör mesafesinde HPGe dedektörle elde edilen bir spektrumdaki pile-up pikleri gösterilmiştir.



Şekil 3.6. HPGe dedektörle elde edilen bir spektrumdaki pile-up pikleri.

3.3.2.d. Kademeli toplanma (Cascade summing)

Kademeli toplanma (cascade summing) olasılığı nükleer seviye düzeni ile ilgilidir. Kademeli toplanma çoğunlukla kademeli geçiş pik alanların azalmasıyla ve süreklilik sayımlarının artmasıyla oluşur. Bu katkı yüksek enerjilerde önemlidir. Kademeli toplanmayı azaltmak için numune-dedektör arasındaki uzaklık arttırılmalıdır.

3.3.2.e. Saçılma radyasyonu

Compton saçılması sürekli spektrum için önemlidir. Kurşundan yapılmış bir numune odasında kaynak ile kurşun oda duvarı arasındaki uzaklığın en az 15 cm olması gerekmektedir.

3.4. HPGe dedektörün performansı

3.4.1. Verim (efficiency)

Dedektör verimi kaynak-dedektör mesafesine, kaynağın aktivitesine, kaynağın gama ışını enerjisinin mutlak soğurma ihtimaline bağlıdır. Bir dedektörün verimi gama ışınlarının spektrumunun nasıl ortaya konduğunun bir ölçüsüdür. Verimlilik tanımları çeşitli gama ışını dedektörleri için ortak kullanılır:

- a) Mutlak (Absolute) Verim: Dedektör tarafından üretilen sayımların kaynak tarafından yayımlan (her yöne) gama ışınlarına oranıdır.
- b) Asıl (Intrinsic) Verim: Dedektör tarafından üretilen puls sayısının dedektöre ulaşan foton sayısına oranıdır.
- c) Göreli (Relative) Verim: Bir dedektörün diğer dedektöre göre verimi; çoğunlukla 3" çaplı germanyum dedektörün 3" kristal uzunluklu NaI dedektörü için (her bir dedektörün kaynağa uzaklığı 25 cm) 1,33 MeV'lik enerjideki bağlı verimdir.

d) Full Enerji Pik (veya Fotopik) Verimi: Gama ışını için her büyüklükteki bir puls değil, sadece tam enerji pikinin verimidir.

Verim üç adımda belirlenir:

- a) X-ışını yayan kalibrasyon kaynağıyla standart bir mesafede dikkatli deneysel ölçüm yapılması,
- b) Teorik olarak mutlak dedeksiyon verimliliğini tahmin etmek için gerekli parametrelerin ölçülmesi,
- c) İnterpolarizasyon (ara değer kestirimi) hatalarını minimuma indirmek için teorik ve deneysel terimlerin karşılaştırılması ve aynı zamanda dedeksiyon verimindeki anormalliklerin ortaya koyulması.

3.4.2. Enerji çözme gücü (FWHM)

Dedektörün farklı iki parçacık veya fotonu ayırt edebilme yeteneğidir. Tek enerjili fotonlar için tepeler (pikler) veya çizgileri oluşturmada dedektörün yeteneği, pik verimi veya pik genişliği ile karakterize edilir. Genişlik yaygın olarak keV biriminde FWHM olarak tayin edilir ve rezolüsyon olarak da isimlendirilir. Rezolüsyon terimi daha çok çözme gücüyle veya pik genişliği ile doğrudan ilgilidir. Yarı maksimumdaki tam genişlik

$$FWHM = 2,35\sqrt{\varepsilon E} \quad (3.1)$$

ifadesi ile verilir. Burada E gelen radyasyonun enerjisi, ε ortalama iyonlaşma enerjisidir. Rezolüsyon değeri için bu ifade birden küçük olan fono faktör ile çarpılmalıdır:

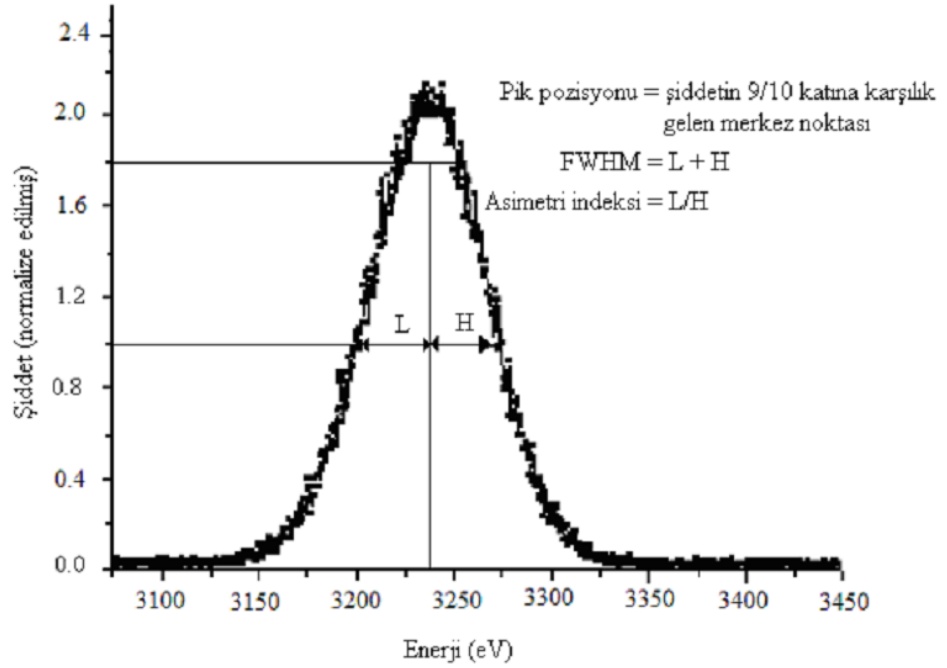
$$W_D^2 = (2,35)^2 FE\varepsilon \quad (3.2)$$

Burada W_D rezolüsyondur.

3.4.3. Asimetri indeksi

Dedektörlerin enerji çözünürlüğü, sinyal yük taşıyıcıları olan elektronların ve özellikle hollerin yaşam süresi tarafından sınırlanmaktadır. Bilindiği gibi yük taşıyıcıların elektrotlar üzerinde toplanması sürecinde, bunlar elektriksel olarak aktif olan kristal kusurlarından önemli derecede etkilenirler ve bu etki elektron ve hollerin hareketlilik (mobilité) ve ömürlerinin çarpım değeri ile ilişkilidir. Özellikle yük taşıyıcıların mobilitelerinin çok farklı olması sonucu dedektördeki bu tuzaklanma merkezleri, kararlılık problemlerine de neden olur. Oldukça düşük kabul edilen dedektör kaçak akımları üzerine, enerji bant genişliklerinden ziyade bu kristal kusurları baskındır. Holler elektronlardan 10-30 kat daha düşük mobilitéye sahiptir. Bu nedenle kristal içinde daha yavaş sürüklenir, elektroda ulaşmadan önce, kristal içindeki sürüklenme zamanlarının (drifting time) artmasıyla tuzaklanma olasılıkları da artar. Kayıp olan sinyal yük miktarı, gama etkileşim noktası ile elektrot arasındaki mesafeye bağlıdır. Enerjisi yüksek olan gama ışınlarının etkileşim noktaları ise, gama soğurma katsayısına göre dedektör kristalinin derinliğinin üstel fonksiyonu olarak dağılır. Dolayısıyla ölçülen enerji spektrumundaki pik tepeleri, asimetrik bir şekilde düşük enerjilere doğru genişlerler. Tam toplanamayan hol yükü olayının etkisiyle, dedektörde gözlenen fotopiklerin sol tarafa genişleyerek kuyruklanmasının yanı sıra, sinyal genliklerinde de kayıplar olur ve elde edilen spektrum kalitesi düşer. Fotopiklerdeki genişlemenin, foton etkileşme derinliğine bağlı olan enerji çözme gücünden kaynaklandığı ifade edilmiştir.

FWHM ve asimetri indeksini belirlerken önce pikler smoothe (soyma) edilir, ardından background (temel sayma) düzeltilmesi yapılarak Gaussian fonksiyonuna fit edilir. Bir x-ışını emisyon çizgisinde pik merkezi, FWHM ve asimetri indeksi değerlerinin nasıl belirlenebileceği Şekil 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3.7. FWHM ve asimetri indeksinin belirlenmesi.

3.4.4. Kaynak iç saçılması

Bir element yeterince yüksek enerjide gama ışınıyla uyarılırsa, Compton geri tepme enerjisinin üst sınırı foton veya herhangi bir tabakadaki dönüşüm elektronunun minimum enerjisinden daha azdır. Kaynak, materyal içinde Compton saçılması, fotoelektrik olay veya iç dönüşüm elektronu oluşturabilir. İç dönüşüm fotoelektrik olayın analog şeklidir. Fotoelektrik olayla iç dönüşüm arasındaki başlıca fark, fotoelektrik olay için ışın bir düzlem dalgadır. Ancak iç dönüşüm için ışın çok kutuplu küresel dalgadır. Compton saçılması iç dönüşüme benzer fakat fotoelektrik olaydan farklıdır. Dolayısıyla Compton saçılmasına iç saçılma da diyebiliriz. İç saçılma, Compton saçılmasının aksine, belirli enerji aralığında elektronlar verebilir. Compton saçılmasında geri tepen elektrona momentumun korunumundan dolayı isteğe bağlı enerji aktarılamaz.

3.4.5. Minimum dedekte edilebilir aktiflik (MDA)

En düşük dedeksiyon limiti backgroundun karesi ile orantılı olmalıdır. Minimum dedekte edilebilir aktiflik (MDA), radyoizotopun en küçük konsantrasyonu olarak tanımlanabilir. Düşük radyoaktivite ölçümleri için background seviyesi minimuma düşürülmeli ve dedeksiyon verimi maksimuma ayarlanmalıdır. Sayma verimi, kaynak-dedektör geometrisi ayarlanarak iyileştirilebilir. MDA,

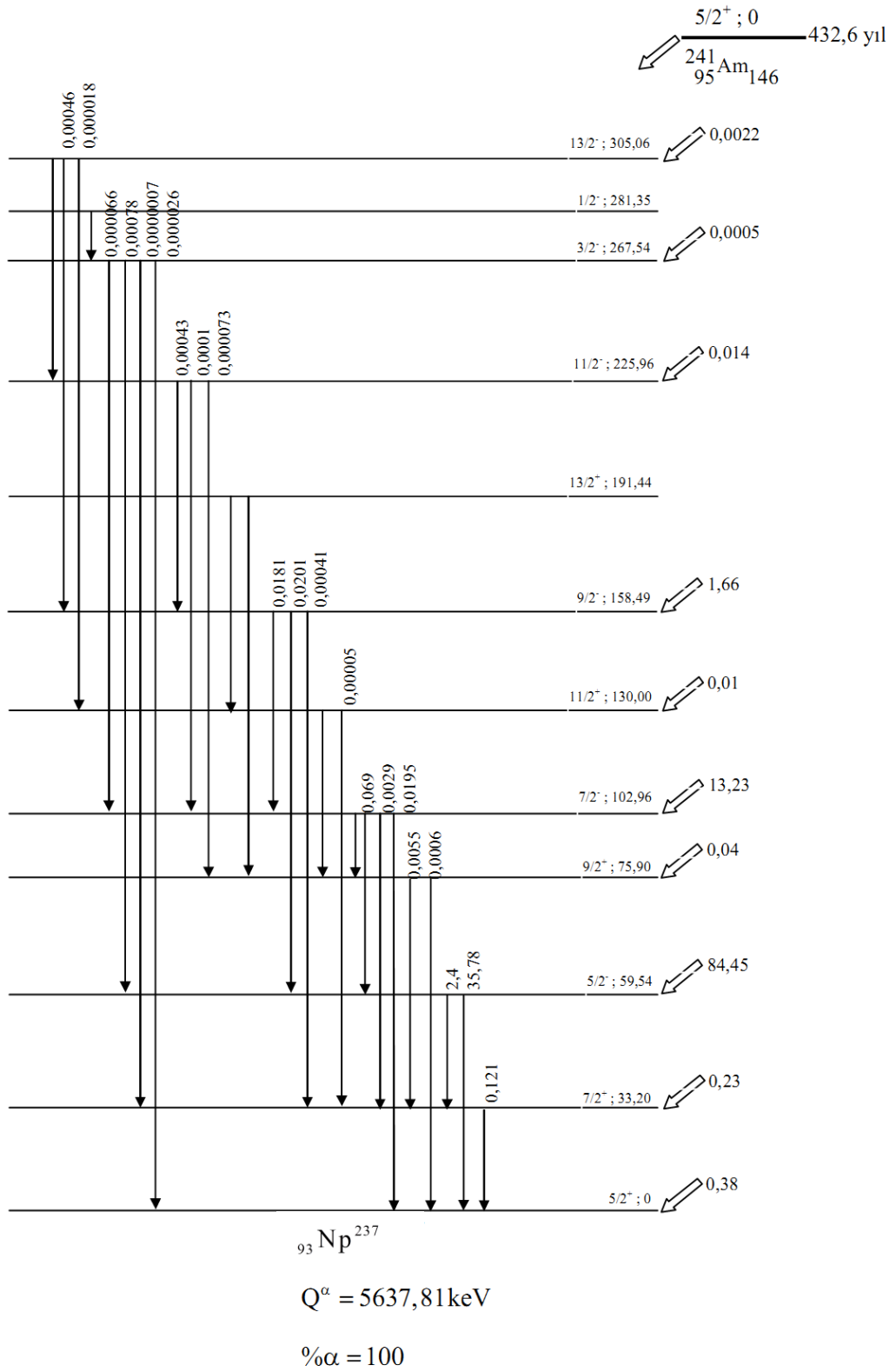
$$\text{MDA} = 2,71 + 4,65 \frac{\sqrt{B}}{t \cdot \varepsilon} \quad (3.3)$$

ifadesiyle verilebilir. Burada; B ilgilenilen bölge için background, t ilgilenilen bölge için sayma zamanı ve ε sayma verimidir.

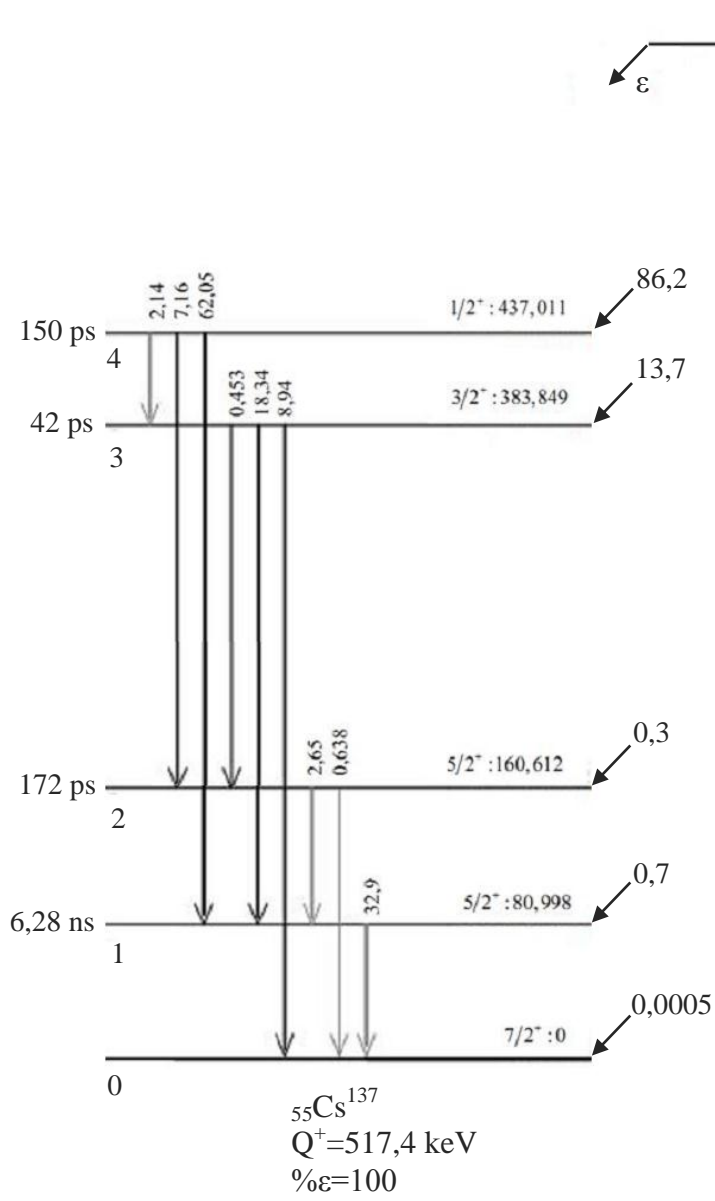
4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Am²⁴¹, Ba¹³³, Cs¹³⁷ ve Eu¹⁵² radyoaktif kaynaklarının özellikleri

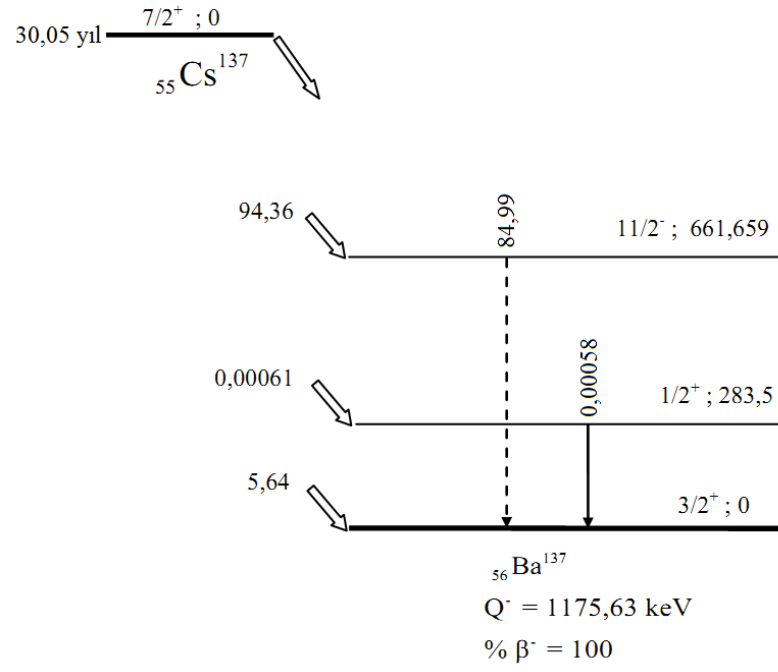
Bu çalışmada kullanılan radyoaktif kaynaklardan Am²⁴¹, 9,64 µCi aktiviteye sahiptir. Am²⁴¹ alfa bozunmasıyla Np²³⁷ 'a dönüşür. Am²⁴¹ izotopunun yarı ömrü 432,6 yıldır ve bozunması Şekil 4.1'de verilmiştir. Ba¹³³, 5,67 µCi aktiviteye sahiptir. Ba¹³³, beta bozunmasıyla Cs¹³³ 'e dönüşür. Ba¹³³ izotopunun yarı-ömrü 10,54 yıldır ve bozunması Şekil 4.2'de verilmiştir. Bu çalışmada kullanılan bir diğer kaynak Cs¹³⁷ 'dir. Cs¹³⁷'nin aktivitesi 5,88 µCi olup beta bozunmasıyla Ba¹³⁷ 'a dönüşür. Cs¹³⁷ izotopunun yarı ömrü 30,05 yıldır ve bozunma şeması Şekil 4.3'te verilmiştir. Eu¹⁵², 6,38 µCi aktiviteye sahiptir. Eu¹⁵², beta bozunmasıyla Gd¹⁵² 'a dönüşür. Eu¹⁵² izotopunun yarı ömrü 13,522 yıldır ve bozunma şeması Şekil 4.4'te verilmiştir.



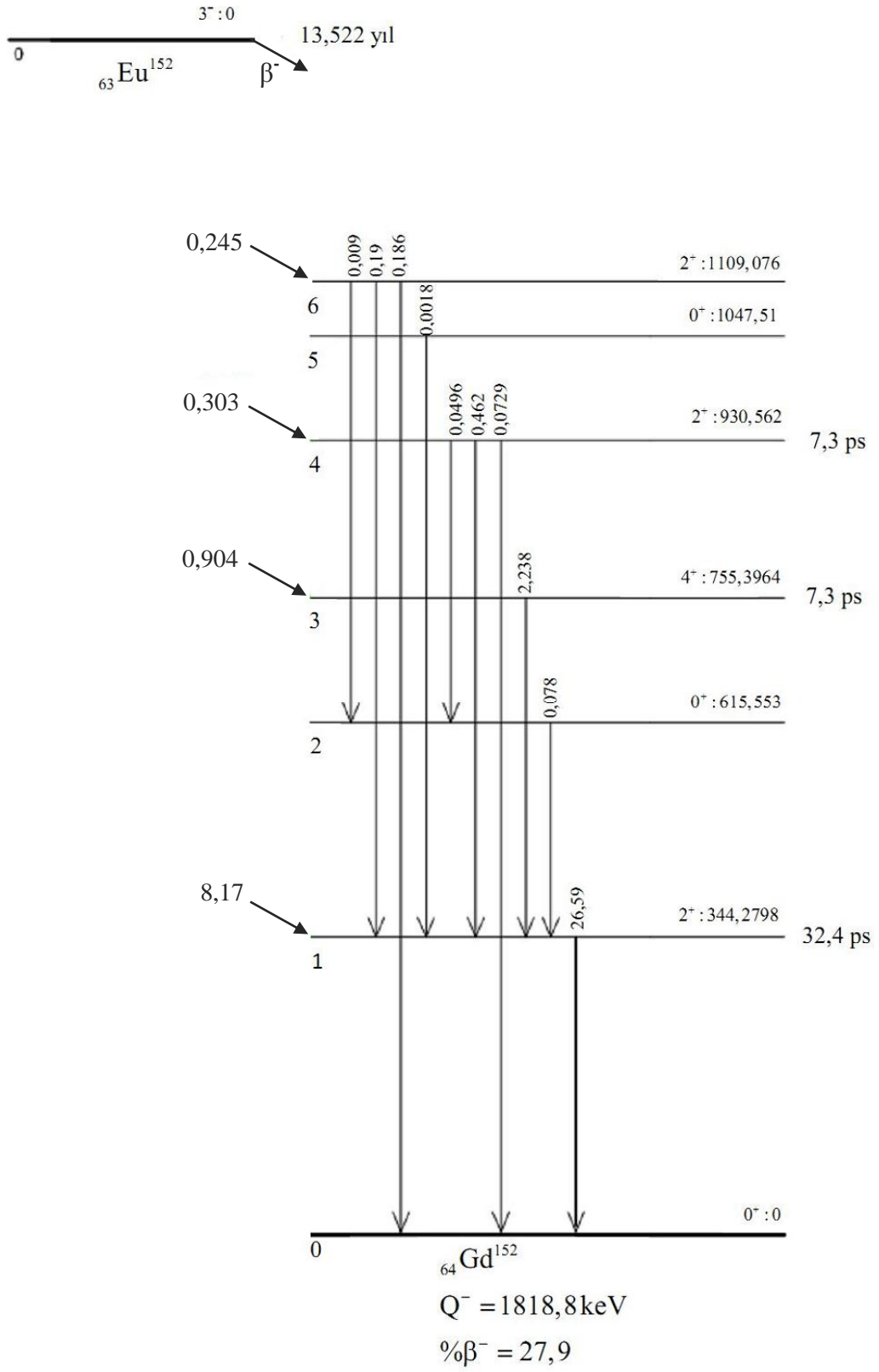
Şekil 4.1. Am^{241} 'in bozunma şeması.



Şekil 4.2. Ba^{133} 'ün bozunma şeması.



Şekil 4.3. Cs^{137} 'nin bozunma şeması.



Şekil 4.4. Eu^{152} 'nin bozunma şeması.

4.2. HPGe dedektörün verimi

Aktifliği bilinen radyoaktif kaynaklar kullanılmak suretiyle bir HPGe dedektörün foto-pik verimi

$$\varepsilon = \frac{A_c}{N_0 p_\gamma e^{-\lambda t}} \quad (4.1)$$

ifadesi ile bulunur. Burada ε dedektörün fotopik verimini, A_c spektrumda ilgilenilen pikin net alanını, N_0 radyoaktif kaynağın ölçüm anındaki aktifliğini, p_γ ilgilenilen kaynak enerjisinin yayımlanma olasılığını, t ölçüm süresini ve λ bozunma sabitini göstermektedir. Verim eğrisi belirlenecek olan HPGe dedektör, zırlama ünitesi, dedeksiyon ve analizleyici sistem, biyolojik kaplama ünitesi ve elektronikler Şekil 4.5'te görülmektedir. Bu çalışmada kullanılan HPGe dedektörün (Detector System GmbH, DSG) karakteristik özellikleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.5. Deney düzeneği.

Çizelge 4. 1. HPGe dedektörün karakteristik özellikleri.

| | |
|-----------------------------|---------------------|
| Aktif çapı | 16 mm |
| Aktif alan | 200 mm ² |
| Dedektör hassas derinliği | 10 mm |
| Pencereden uzaklık | 5 mm |
| Berilyum pencere kalınlığı | 0,12 mm |
| Besleme gerilimi | -1500 V |
| Rezolüsyon (5,9-122 keV)'de | 182-488 eV |

Dedektör veriminin uzaklıkla değişimini incelemek için dedektör-kaynak arasındaki mesafe; 0 cm, 5 cm, 10 cm, 15 cm ve 20 cm'ye ayarlanmıştır. Her bir radyoaktif kaynak için gama ışınlarının puls yükseklik spektrumları 900-43200 s'lik sürelerle alınmıştır. Bu çalışmada kullanılan her bir radyoaktif kaynak için farklı mesafelerde alınan ölçümler 5'er kez tekrarlanmıştır. Elde edilen spektrumlarda incelenen tepelerin alanları Microcal Origin 7.5 programı kullanılarak hesaplanmıştır. Alan hesaplamaları, hatayı en aza indirmek için, tepelerin sağ ve sol yamaçlarında on kanal ortalamasına eşit background noktaları esas alınarak yapılmıştır. Bu çalışmada kullanılan radyoaktif kaynakların özellikleri Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Radyoaktif kaynaklarının aktiviteleri.

| Radyoaktif kaynak | Yarıömür (gün) | Aktivite (μCi) | Parçalanma/s |
|-------------------|----------------|----------------|--------------|
| Am ²⁴¹ | 158012,32 | 9,64 | 356549,8486 |
| Ba ¹³³ | 3842,46 | 5,67 | 209645,42 |
| Cs ¹³⁷ | 10993,59 | 5,88 | 217388,29 |
| Eu ¹⁵² | 4949,13 | 6,38 | 236113,40 |

Çizelge 4.3. Radyoaktif kaynakların çeşitli enerjilerinin toplam emisyon ihtimalleri.

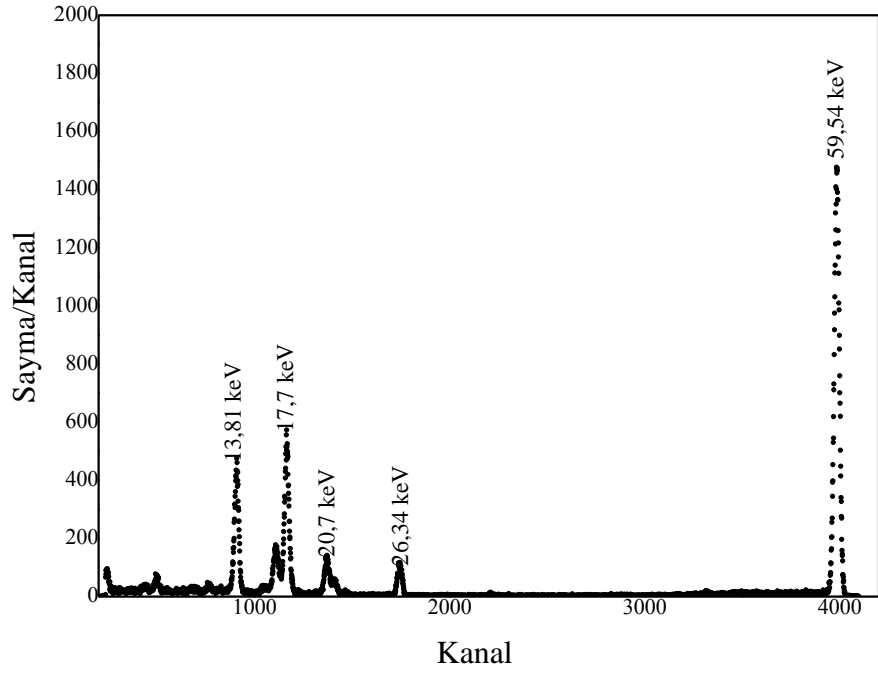
| Radyoaktif Kaynak | Enerji (keV) | Toplam emisyon ihtimali (%) |
|-------------------|--------------|-----------------------------|
| Am ²⁴¹ | 13,81 | 13,30 |
| Am ²⁴¹ | 59,54 | 35,78 |
| Ba ¹³³ | 80,99 | 32,90 |
| Eu ¹⁵² | 121,78 | 28,41 |
| Eu ¹⁵² | 244,70 | 7,55 |
| Ba ¹³³ | 356,01 | 62,05 |
| Eu ¹⁵² | 443,97 | 2,237 |
| Cs ¹³⁷ | 661,66 | 84,99 |
| Eu ¹⁵² | 778,90 | 12,96 |
| Eu ¹⁵² | 964,07 | 14,62 |
| Eu ¹⁵² | 1085,84 | 10,13 |
| Eu ¹⁵² | 1112,08 | 13,40 |
| Eu ¹⁵² | 1212,95 | 1,42 |

Her bir radyoaktif kaynak için incelenen gama ve x-ışını tepelerinin alan değerlerinin ortalaması Çizelge 4.4'te verilmiştir.

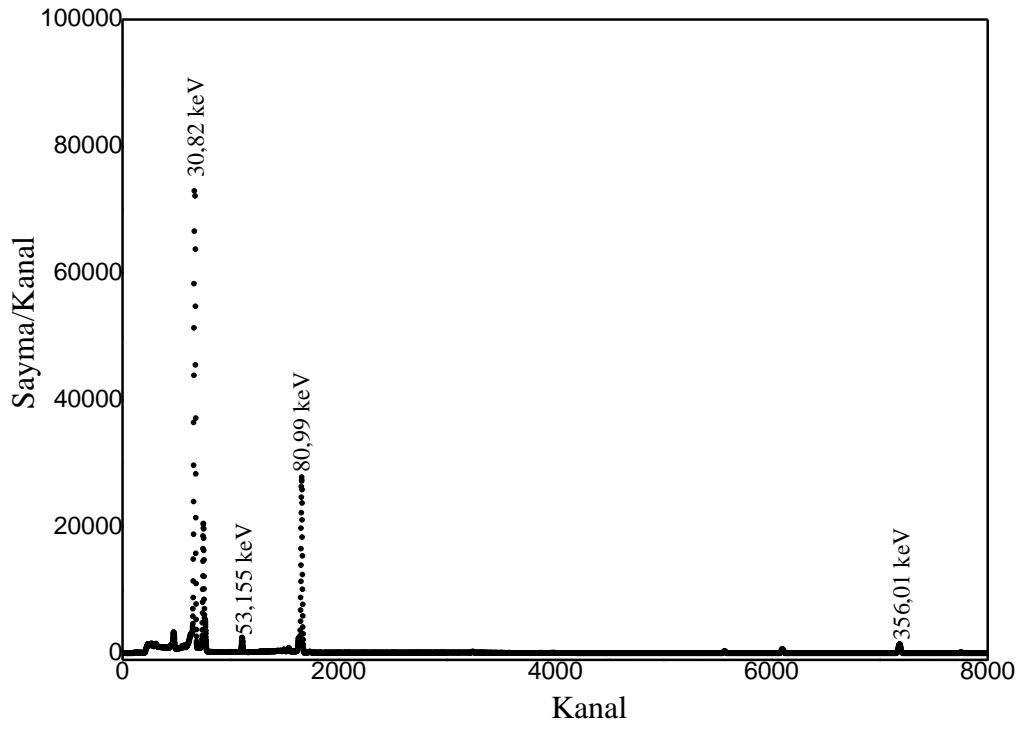
Çizelge 4.4. Radyoaktif kaynakların çeşitli enerjili tepelerinin altında kalan alanlar.

| Radyoaktif Kaynak | Enerji (keV) | Sayma/Kanal (Ortalama) | | | | |
|-------------------|--------------|--------------------------|---------|---------|---------|--------|
| | | Dedektör-Kaynak Mesafesi | | | | |
| | | 0 cm | 5 cm | 10 cm | 15 cm | 20 cm |
| Am ²⁴¹ | 13,81 | 2646466 | 746251 | 41107 | 19329 | 11042 |
| Am ²⁴¹ | 59,54 | 8986980 | 2904233 | 168335 | 81081 | 47707 |
| Ba ¹³³ | 80,99 | 21696620 | 6746670 | 408727 | 201856 | 114228 |
| Eu ¹⁵² | 121,78 | 102037525 | 6870170 | 2120960 | 1062380 | 621125 |
| Eu ¹⁵² | 244,70 | 5172450 | 376258 | 117494 | 58778 | 35474 |
| Ba ¹³³ | 356,01 | 1560828 | 557495 | 34760 | 17417 | 10356 |
| Eu ¹⁵² | 443,97 | 538450 | 37779 | 11517 | 1145 | 3566 |
| Cs ¹³⁷ | 661,66 | 2314916 | 590528 | 36427 | 18685 | 10955 |
| Eu ¹⁵² | 778,90 | 658368 | 38603 | 12157 | 6280 | 3661 |
| Eu ¹⁵² | 964,07 | 359190 | 23634 | 7531 | 3684 | 2301 |
| Eu ¹⁵² | 1085,84 | 210984 | 12887 | 4223 | 2199 | 1331 |
| Eu ¹⁵² | 1112,08 | 212225 | 14460 | 4317 | 2248 | 1411 |
| Eu ¹⁵² | 1212,95 | 13575 | 912 | 338 | 193 | 93 |

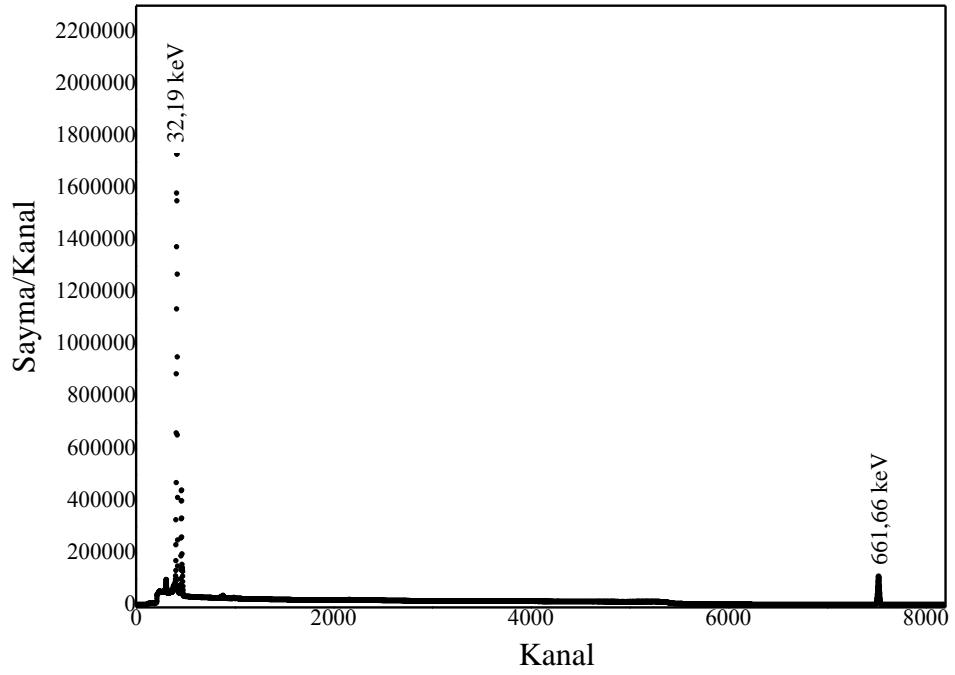
HPGe dedektörün fotopik verimini bulmak için bu çalışmada kullanılan radyoaktif kaynaklardan elde edilen spektrumlar Şekil 4.6-9'da görülmektedir.



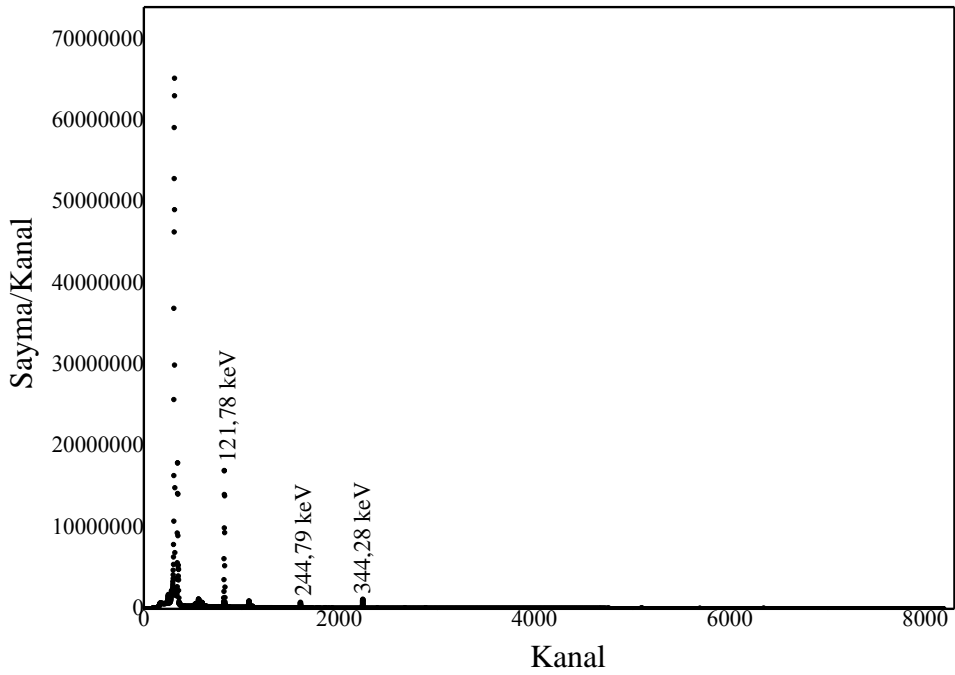
Şekil 4.6. Am^{241} 'in spektrumu (dedektör-kaynak mesafesi=20 cm).



Şekil 4.7. Ba^{133} 'ün spektrumu (dedektör-kaynak mesafesi=20 cm).



Şekil 4.8. Cs^{137} 'nin spektrumu (dedektör-kaynak mesafesi=0 cm).



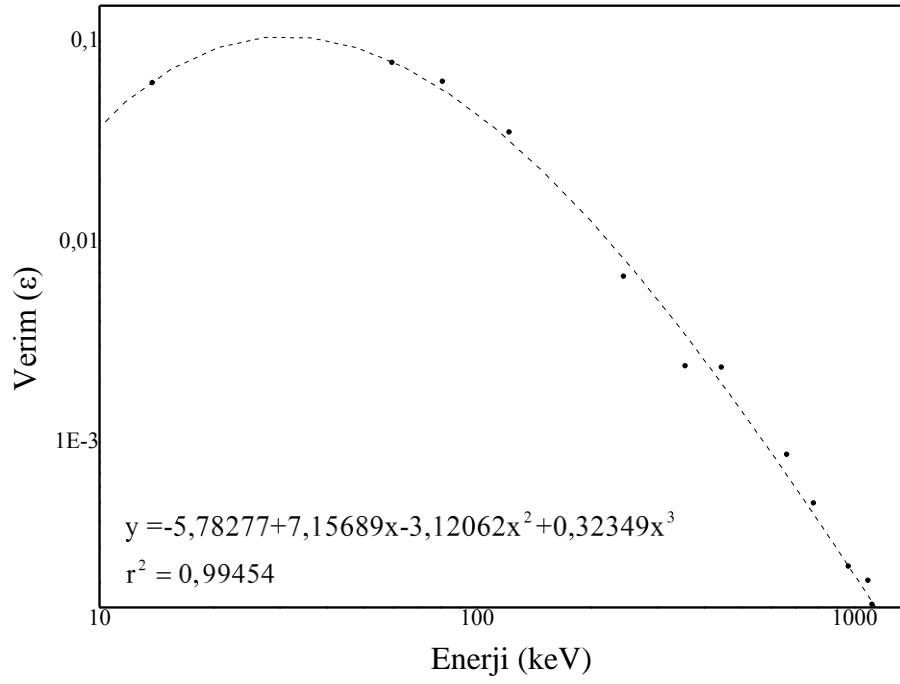
Şekil 4.9. Eu^{152} 'nin spektrumu (dedektör-kaynak mesafesi=0 cm).

HPGe dedektör için (4.1) ifadesi kullanılarak çeşitli enerji ve kaynak-dedektör mesafesinde hesaplanan fotopik verim değerleri Çizelge 4.5'de verilmiştir. Verim değerleri hesaplanırken Çizelge 4.4'te verilen alan değerlerinin ortalamaları alınmıştır.

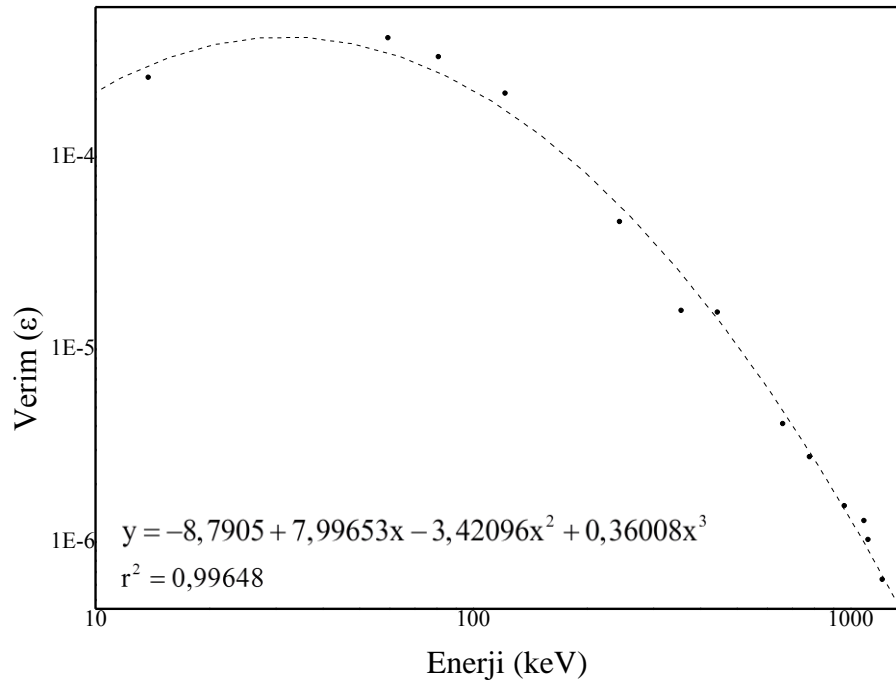
Çizelge 4.5. HPGe dedektörün hesaplanan fotopik verimleri.

| Enerji (keV) | 0 cm | 5 cm | 10 cm | 15 cm | 20 cm |
|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 13,81 | 0,062009 | 0,017485 | 0,000963 | 0,000453 | 0,000259 |
| 59,54 | 0,078273 | 0,025295 | 0,001466 | 0,000706 | 0,000416 |
| 80,99 | 0,062913 | 0,019563 | 0,001185 | 0,000585 | 0,000331 |
| 121,78 | 0,035211 | 0,002371 | 0,000732 | 0,000367 | 0,000214 |
| 244,70 | 0,006717 | 0,000489 | 0,000153 | 0,000076 | 0,000046 |
| 356,01 | 0,002400 | 0,000857 | 0,000053 | 0,000027 | 0,000016 |
| 443,97 | 0,002360 | 0,000166 | 0,000050 | 0,000005 | 0,000016 |
| 661,66 | 0,000870 | 0,000222 | 0,000014 | 0,000007 | 0,000004 |
| 778,90 | 0,000498 | 0,000029 | 0,000009 | 0,000005 | 0,000003 |
| 964,07 | 0,000241 | 0,000016 | 0,000005 | 0,000002 | 0,000002 |
| 1085,84 | 0,000204 | 0,000012 | 0,000004 | 0,000002 | 0,000001 |
| 1112,08 | 0,000155 | 0,000011 | 0,000003 | 0,000002 | 0,000001 |
| 1212,95 | 0,000094 | 0,000006 | 0,000002 | 0,000001 | 0,000001 |

HPGe dedektörün fotopik verim eğrisi 0 cm ve 20 cm dedektör-kaynak mesafeleri için Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'den görülmektedir.



Şekil 4.10. HPGe dedektörün fotopik verim eğrisi (dedektör-kaynak mesafesi=0 cm).



Şekil 4.11. HPGe dedektörün fotopik verim eğrisi (dedektör-kaynak mesafesi=20 cm).

4.3. HPGe dedektörün enerji çözme gücü (Rezolüsyon)

Belirli bir enerjideki tek bir pikin genişliği (full width at half maximum) olan rezolüsyon, ya germanyum dedektörlerde olduğu gibi keV olarak ya da NaI sintilasyon dedektörlerinde olduğu gibi yüzde olarak ifade edilir. Bu çalışmada kullanılan her bir radyoaktif kaynağın puls yükseklik spektrumlarından faydalanarak HPGe dedektörün enerji çözme gücü (FWHM) değerlerinin ortalaması Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.6.HPGe dedektörün 13,81-1212,95 keV enerji aralığındaki enerji çözme gücü.

| Enerji (keV) | FWHM | | |
|--------------|--------------|----------------|------------------|
| | (Ort., keV)* | Standart Sapma | (Değ. Kat., %)** |
| 13,81 | 0,3342 | 0,0124 | 0,0371 |
| 59,54 | 0,464 | 0,00367 | 0,00792 |
| 80,99 | 0,6514 | 0,00673 | 0,01033 |
| 121,78 | 0,732 | 0,00274 | 0,00374 |
| 244,70 | 0,9302 | 0,0254 | 0,02731 |
| 356,01 | 1,078 | 0,05748 | 0,05332 |
| 443,97 | 1,2036 | 0,06914 | 0,05745 |
| 661,66 | 1,6418 | 0,0323 | 0,01967 |
| 778,90 | 1,8454 | 0,13779 | 0,07466 |
| 964,07 | 1,9596 | 0,17793 | 0,0908 |
| 1085,84 | 1,708 | 0,33116 | 0,19389 |
| 1112,08 | 2,1176 | 0,50019 | 0,2362 |
| 1212,95 | 0,2584 | 0,02492 | 0,09642 |

*Beş farklı ölçümün ortalamasıdır.

$$**\% \text{ de\u0131işim katsayısı} = \left(\frac{\text{standart sapma}}{\text{ortalama de\u0131er}} \times 100 \right)$$

4.4. HPGe dedektörün asimetri indeksi

Spektrumlardaki her bir fotopikin asimetri indeksi Şekil 3.7 dikkate alınarak hesaplanmış ve Çizelge 4.7'de verilmiştir.

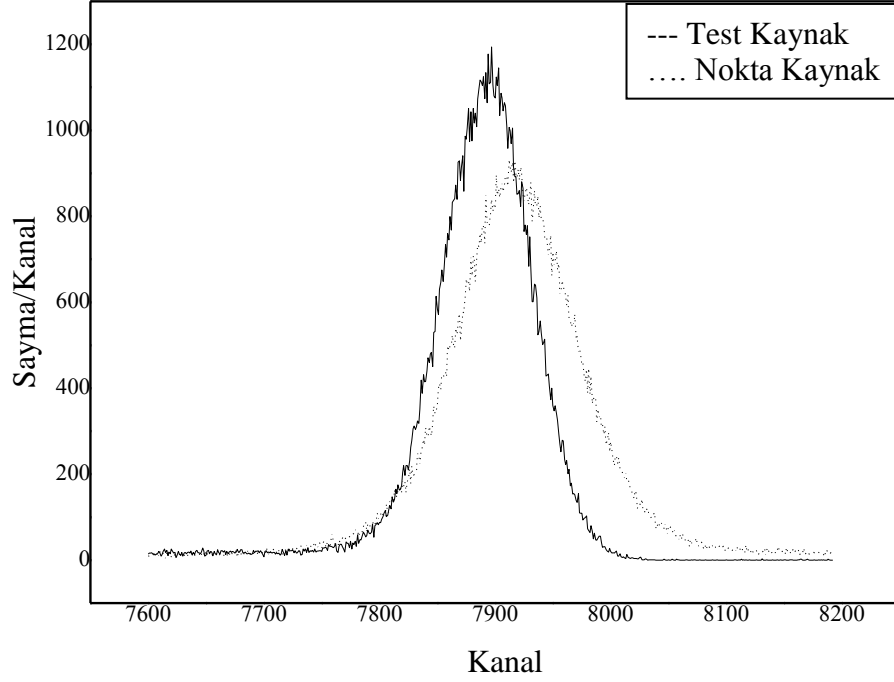
Çizelge 4.7. 13,81-1212,95 keV enerji aralığındaki asimetri indeksleri.

| Enerji (keV) | L | H | L/H |
|--------------|----|----|------|
| 13,81 | 14 | 16 | 0,88 |
| 59,54 | 17 | 18 | 0,94 |
| 80,99 | 6 | 8 | 0,75 |
| 121,78 | 5 | 7 | 0,71 |
| 244,70 | 2 | 3 | 0,67 |
| 356,01 | 11 | 13 | 0,85 |
| 443,97 | 4 | 5 | 0,80 |
| 661,66 | 9 | 9 | 1 |
| 778,90 | 6 | 6 | 1 |
| 964,07 | 7 | 7 | 1 |
| 1085,84 | 9 | 6 | 1,5 |
| 1112,08 | 7 | 15 | 0,47 |
| 1212,95 | 7 | 8 | 0,88 |

4.5. Kaynak iç saçılması

Kaynak iç saçılması belirleyebilmek amacıyla dedektör-kaynak mesafesi sabit tutularak Am^{241} nokta kaynak ile test kaynağı ve Ba^{133} nokta kaynak ile test kaynağı kullanılarak ölçümler alındı. Am^{241} kaynağının 59,54 keV enerjili gama tepesi ve Ba^{133} kaynağının 356,01 keV enerjili gama tepesi altında kalan alanlar nokta kaynak ve test kaynaklarından aynı olacak şekilde ölçümler gerçekleştirildi. Am^{241} nokta ve test kaynaklarından elde edilen spektrumlar Şekil 4.12'de verilmiştir. Am^{241} nokta ve test kaynaklarının 59,54 keV enerjili gama tepeleri için hesaplanan asimetri indeksleri Çizelge 4.8'den

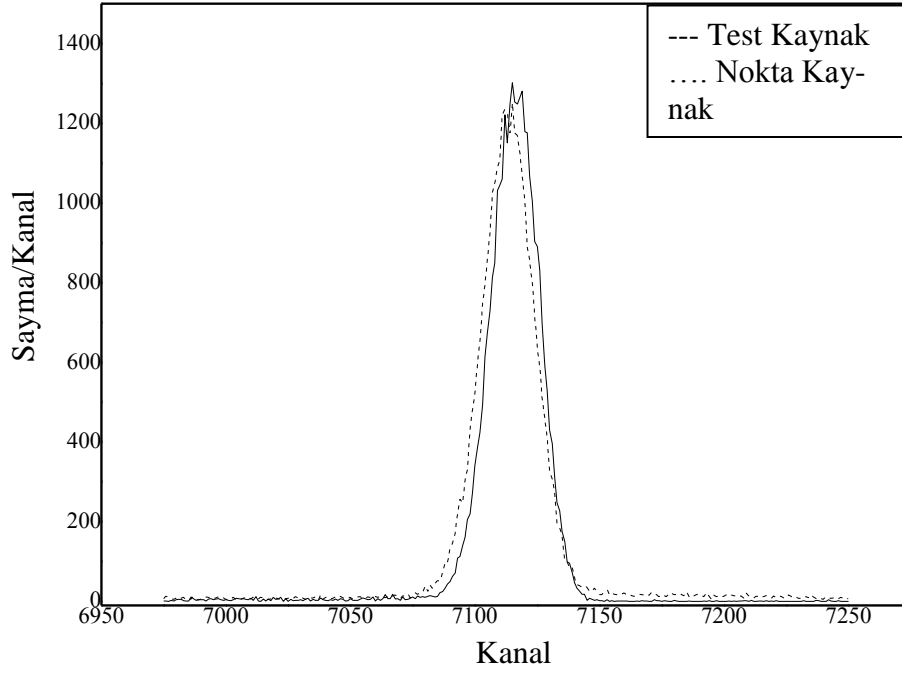
görülmektedir. Ba^{133} nokta ve test kaynaklarından elde edilen spektrumlar Şekil 4.13'te verilmiştir. Ba^{133} nokta ve test kaynaklarının 356,01 keV enerjili gama tepesi için hesaplanan asimetri indeksleri Çizelge 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.12. Am^{241} test ve nokta kaynaklarının 59,54 keV enerjili gama tepelerinin karşılaştırılması.

Çizelge 4.8. Am^{241} nokta ve test kaynaklarının 59,54 keV enerjili gama tepeleri için asimetri indeksleri.

| Am^{241} | L | H | L/H |
|--------------|----|----|------|
| Nokta Kaynak | 65 | 63 | 1,03 |
| Test Kaynak | 46 | 42 | 1,09 |



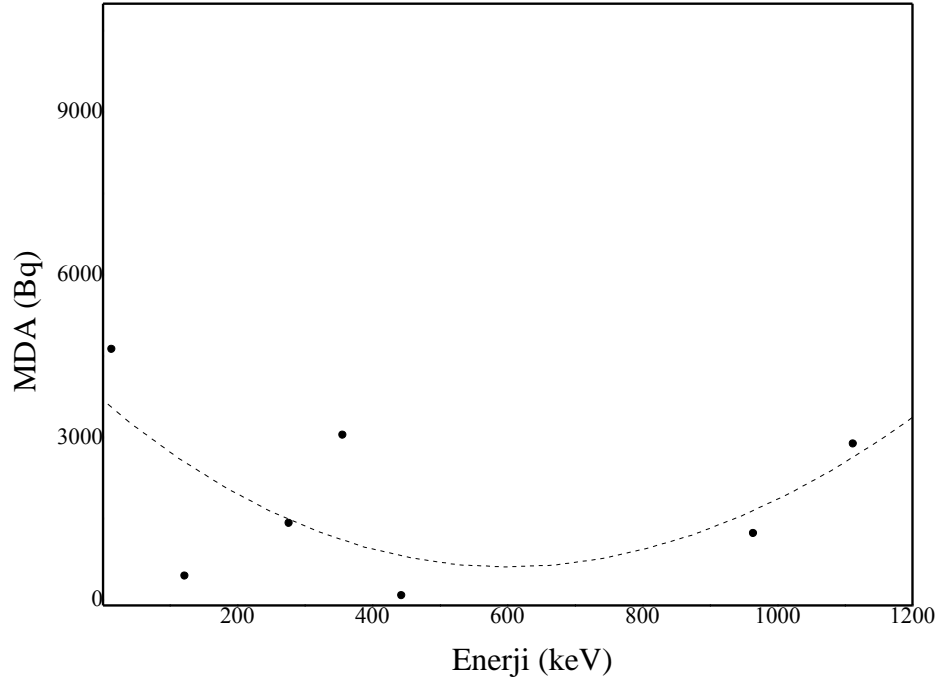
Şekil 4.13. Ba¹³³ test ve nokta kaynaklarının 356,01 keV enerjili gama tepelerinin karşılaştırılması.

Çizelge 4.9. Ba¹³³ nokta ve test kaynakların 356,01 keV enerjili gama tepeleri için asimetri indeksleri.

| Ba ¹³³ | L | H | L/H |
|-------------------|----|----|------|
| Nokta Kaynak | 14 | 12 | 1,17 |
| Test Kaynak | 12 | 11 | 1,09 |

4.6. Minimum dedekte edilebilir aktiflik (MDA)

HPGe dedektör için 20 cm dedektör-kaynak mesafesinde elde edilen ölçümlerden faydalanarak hesaplanan MDA değerleri, gama ışını enerjisinin bir fonksiyonu olarak Şekil 4.14'te verilmiştir.



Şekil 4.14. MDA'nın enerjile değişimi.

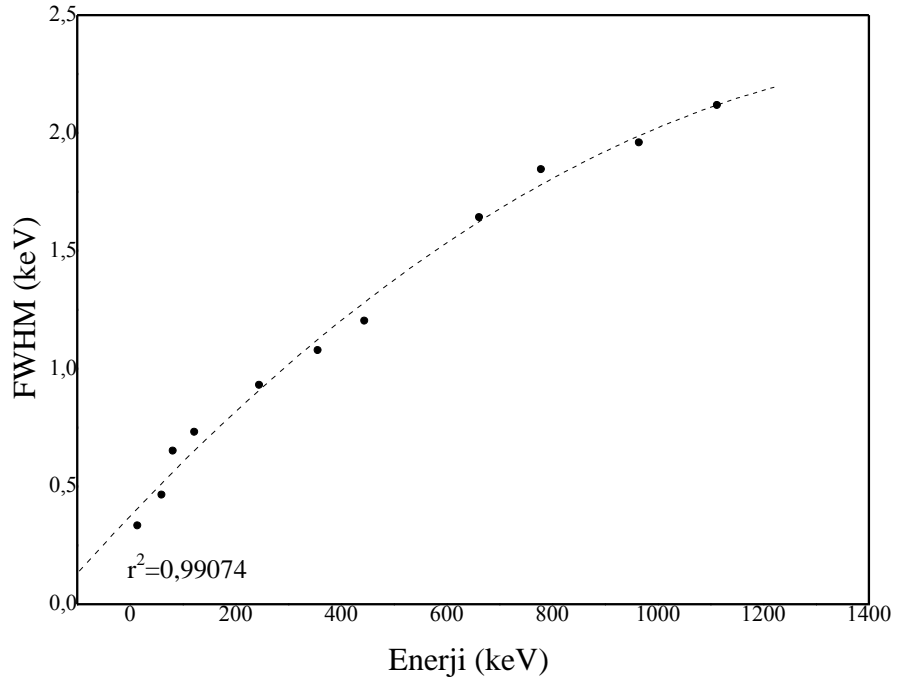
5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmada, HPGe dedektörün 13,81-1212,95 keV enerji aralığında fotopik veriminin, farklı dedektör-kaynak mesafelerinde (0 cm, 5 cm, 10 cm, 15 cm ve 20 cm) ve nokta kaynak geometrisinde düşük aktiviteli (10 µCi) test kaynakları (Am^{241} , Ba^{133} , Cs^{137} ve Eu^{152}) kullanılarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında, kullanılan test kaynaklarının enerji spektrumları incelenerek enerji çözme gücü (FWHM) ölçülmüştür. Gama tepeleri için asimetri indeksi belirlenmiştir. Bir diğer dedektör parametresi olan minimum dedekte edilebilir aktiflik (MDA) ölçülmüştür. Ayrıca kaynak iç saçılmasını belirleyebilmek amacıyla, Am^{241} ile Ba^{133} nokta ve test kaynakları kullanılmıştır.

Genie 2000 programında, amaca göre iki farklı kanal sayısı (4096 ve 8192) ile çalışılmıştır. Am^{241} , Ba^{133} , Cs^{137} ve Eu^{152} test kaynakları kullanılarak kalibrasyon işlemi yapılmıştır. "Genie2000" programından alınan veriler kullanılarak, en küçük kareler (a least square fitting) yöntemiyle spektrumlar fit edilip çizdirilmiştir. Tepelerin enerji ve net alanları tespit edilmiştir. İlgilenilen her bir tepenin (pikin) altında kalan alanların (Eu^{152} 'nin yüksek enerjileri hariç) 10000 sayımın üzerinde olması sağlanmıştır. HPGe dedektörün spektroskopik özelliklerinin belirlenmesi için gerçekleştirilen bu çalışmanın tekrarlanabilirliğini incelemek amacıyla çoklu ölçümler yapılmıştır. Çoklu ölçümler için yapılan istatistiksel hesaplamalarda alan değerlerinin bağıl standart sapmanın küçük olması kullanılan EDXRF sisteminin hassasiyetinin iyi olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.5'ten görüldüğü üzere HPGe dedektörün fotopik verimi dedektör-kaynak mesafesine bağlıdır. En küçük dedektör-kaynak mesafesinde ve 20-150 keV enerji aralığında HPGe dedektör en verimlidir. Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'den görüldüğü üzere HPGe dedektörün fotopik verimi enerji ile 3. dereceden bir polinomla ilişkilidir.

Bu çalışmada kullanılan dedektör (DSG, Detector System GmbH) için rezolüsyon 5,9 keV'de 182 eV iken 122 keV'de 488 eV'dir. HPGe dedektörünün rezolüsyonu Çizelge 4.6'dan görüldüğü gibi artan enerji ile kötüleşmektedir ve kaynak-dedektör mesafesinden bağımsızdır.



Şekil 5.1. HPGe dedektörün FWHM'sinin enerji ile değişimi.

Şekil 5.1'den görüldüğü gibi enerji ile FWHM arasında

$$\text{FWHM}=0,37416+0,00236E-7,11206\text{exp}-7E^2$$

şeklinde olan 2. dereceden bir polinomla ilişkilidir. Bu polinom için korelasyon katsayısı $r^2=0,99074$ olarak bulunmuştur. HPGe dedektörün rezolüsyonu düşük enerjilerden yüksek enerjilere doğru gidildikçe kötüleşmektedir.

Çizelge 4.7'den görüldüğü üzere HPGe dedektörün asimetri indeksi 662-964 keV enerji aralığında simetrik dağılım göstermektedir.

HPGe dedektör için MDA, (3.3) denklemi kullanılarak ilgili enerjiler için hesaplanmıştır. (3.3) denkleminde görüldüğü üzere MDA fotopik verimi ile ters orantılıdır. Bu, MDA'nın enerji ile bağımlılığının verildiği Şekil 4.14'ten de doğrulanmaktadır. Kısa ölçme zamanı ve yüksek background şiddetlerinde MDA'nın yüksek olması, dedektör hassasiyetini azaltacaktır.

Kaynak iç saçılımlarını belirleyebilmek için Am^{241} ve Ba^{133} test ve nokta kaynaklardan alınan sırasıyla 59,54 ve 356,01 keV enerjili gama tepelerinin spektrumu Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'ten görülmektedir. Şekillerden görüldüğü üzere test kaynaklarına ait gama tepeleri nokta kaynakların gama tepelerinden daha keskindir. Her iki spektrumda sol yamaçlardaki yayvanlaşma kaynak iç saçılımlarından kaynaklanmaktadır. Bu, Çizelge 4.8 ve Çizelge 4.9'da hesaplanan asimetri indeksleri ile de doğrulanmaktadır.

KAYNAKLAR

- Abbas, M.I., 2001. Analytical formulae for well-type NaI(Tl) and HPGe detectors efficiency computation, *Appl. Rad. and Isot.*, 55, 245-252.
- Agnello, M., Botta, E., Bressani, T., Bruschi, M., Bufalino, S., De Napoli, M., Feliciello, A., Fontana, A., Giacobbe, B., Lavezzi, L., Raciti, G., Rapisarda, E., Rotondi, A., Sbarra, C., Sfienti, C., Zoccoli, A., 2009. Study of the performance of HPGe detectors operating in very high magnetic fields, *Nucl. Instr. and Meth. A*, 606, 560-568.
- Ahmed, S.N., 2007. *Physics and engineering of radiation detection*, Academic Press Inc. Published by Elsevier.
- Ahn, J. K., Kim, J.S., Lee, H.M., Kim, T.H., Park, J.N., Kang, Y.S., Lee, H.S., Kim, S.J., Park, J.Y., Ryu, S.Y., Kim, H.C., Kang, W.G., Kim, S.K., 2011. Measurement limits to Cs¹³⁴ concentration in soil, *Appl. Rad. and Isot.*, 69, 1294-1298.
- Andujar, A.P., Pibida, L., 2004. Performance of CdTe, HPGe and NaI(Tl) detectors for radioactivity measurements, *Appl. Rad. and Isot.*, 60, 41-47.
- Blinowski, J., Mycielski, J., 1964. Theory of absorption of electromagnetic radiation by hopping in n-type silicon and germanium, *Physical Review A*, 136, 266-271.
- Canberra, 2011. *Gamma and x-ray detection*.
<http://www.canberra.com/pdf/Products/Gamma-Xray-Detection.pdf>
- Cooper, E.P., Morrison, P., 1940. Internal Scattering of Gamma-Rays, *Physical Review*, 57, 862-866.
- Debertin K., Helmer, R.G., 1988. *Gamma and X-ray spectrometry with semiconductor detectors*, Elsevier Science Publishers, Amsterdam.
- DeFelice, P., Fazio, A., Vidmar, T., Korun, M., 2006. Close-geometry efficiency calibration of p-type HPGe detectors with a Cs¹³⁴ point source, *Appl. Rad. and Isot.*, 64, 1303-1306.
- Gehrke, R.J., Davidson, J.R., 2005. Acquisition of quality gamma ray spectra with HPGe spectrometers, *Appl. Rad. and Isot.*, 62, 479-499.
- Gültekin, A., Kaynak, G., Gürler, O., 2006. Determination of full peak efficiency of HpGe detector from 59.5 to 1332.5 keV, *Indian Journal of Pure & Applied Physics*, 44, 281-286.
- Karamanis, D., Lacoste, V., Andriamonje, S., Barreau, G., Petit, M., 2002. Experimental and simulated efficiency of a HPGe detector with point-like and extended sources, *Nucl. Inst. and Meth. A*, 487, 477-487.
- Keyser, R.M., Sergent, F., Twomey, T.R., Upp, D.L., Minimum detectable activity estimates for a germanium-detector based spectroscopic portal monitor, Ortec Oak Ridge, TN, 37831 USA.
- Khater, A., *Radiation detection methods*, 2004. National Center for Nuclear Safety and Radiation Control, Atomic Energy Authority, Egypt.
- Knoll, G. F., 1979. *Radiation detection and measurement*. Second edition, Wiley, New York, USA.
- Knoll, G.F., 2010. *Radiation detection and measurement*. Fourth edition, John Wiley & Sons, Inc., 416-417, New York, USA.

- Laborie, J.M., Petit, G., Le, Abt, D., Girard, M., 2002. Monte Carlo calculation of the efficiency response of a low-background well-type HPGe detector, *Nucl. Inst. and Meth. A*, 479, 618-630.
- Martine, M., Chisté, V., Dulieu, C., 2008. Nucléide-lara bibliothèque des émissions alpha, x et gamma. Commissariat à l'Energie Atomique, 14-15 p, France.
- Mohammadi, M.A., Abdi, M.R., Kamali, M., Mostajaboddavati, M., Zare, M.R., 2011. Evaluation of HPGe detector efficiency for point sources using virtual point detector model, *Appl. Rad. and Isot.*, 69, 521-526.
- Mohanty, B.P., Balouria, P., Garg, M.L., Nandi, T.K., Mittal, V.K., Govil, I.M., 2008. Comparison of experimental and theoretical efficiency of HPGe X-ray detector, *Nucl. Inst. and Meth. A*, 584, 186-190.
- Nelson, G., Reilly D., *Gamma-ray interactions with matter*, 27-42.
- Oğul, R., Eren, N., 2007. Nükleer ve reaktör fiziği, Selçuk Üniversitesi, Konya.
- Önder, P., 2009. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Erzurum.
- Özben, C.S., Emirhan, E.M., 2009. A hybrid method to determine efficiency curve of HPGe detectors, *Appl. Rad. and Isot.*, 67, 1110-1113.
- Sharshar, T., Elnimr, T., El-Husseiny, F.A., El-Abd, A., 1997. Efficiency calibration of HPGe detectors for volume-source geometries, *Appl. Rad. and Isot.*, 48, 695-697.
- Szymańska, K., Achenbach, P., Agnello, M., Botta, E., Bracco, A., Bressani, T., Camera, F., Cederwall, B., Feliciello, A., Ferro, F., Gerl, J., Iazzi, F., Kavatsyuk, M., Kojouharov, I., Pochodzalla, J., Raciti, G., Saito, T.R., Sanchez Lorente, A., Tegner, P.-E., Wieland, O., 2008. Resolution, efficiency and stability of HPGe detector operating in a magnetic field at various gamma-ray energies, *Nucl. Inst. and Meth. A*, 592, 486-492.
- Şahin, Y., 1999. Çekirdek fiziğinin esasları, Çeviri, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Zocca, F., Pullia, A., 2009. Design of low-noise wide-bandwidth charge preamplifiers for HPGe detectors, CMOS emerging technologies workshop, Banff, Feb. 18-20.

ÖZGEÇMİŞ

1986 yılında Mardin-Midyat'ta doğan Muzaffer EROĞLU, ilk ve orta öğrenimini Batman'da tamamladı. 2005 yılında Selçuk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümünü kazandı. 2009 yılında aynı bölümden mezun oldu. 2010 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Bölümü Atom ve Molekül Fiziği bilim dalında başladığı yüksek lisans çalışmasını Aralık 2011 itibariyle tamamlamıştır.