



**İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**İLERİ GAMA IŞINI İZ-SÜRME TEKNİKLERİ
KULLANARAK YÖNE DUYARLI DEDEKTÖRLER
GELİŞTİRİLMESİ**

Elif İnce

Fizik Anabilim Dalı

Nükleer Fizik Programı

Danışman

Prof.Dr. M.Nizamettin ERDURAN

Mayıs, 2009

İSTANBUL



**İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**İLERİ GAMA IŞINI İZ-SÜRME TEKNİKLERİ
KULLANARAK YÖNE DUYARLI DEDEKTÖRLER
GELİŞTİRİLMESİ**

Elif İnce

Fizik Anabilim Dalı

Nükleer Fizik Programı

Danışman

Prof.Dr. M.Nizamettin ERDURAN

Mayıs, 2009

İSTANBUL

Bu çalışma 16.06.2009 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı Nükleer Fizik programında Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Prof.Dr. M. Nizamettin ERDURAN
(Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi

Prof. Dr. Melih BOSTAN
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi

Prof. Dr. Metin SUBAŞI
Yıldız Teknik Üniversitesi
Fen-Edebiyat Fakültesi

Prof. Dr. Ali TUTAY
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi

Prof.Dr. Hüseyin GÜVEN
İstanbul Teknik Üniversitesi
Fen-Edebiyat Fakültesi

Bu alışma İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliğinin 2326 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında, başlangıcından sonuna kadar, gerekli bütün yardım, öneri ve yönlendirmeleri yapan, karşılaştığım sorunların çözümünde bilgi ve deneyimleri ile bana her zaman ışık tutan, ayrıca sonsuz hoşgörüsü ve anlayışı ile bana sabretmenin ne demek olduğunu öğreten Danışmanım Prof. Dr. M. Nizamettin ERDURAN'a katkıları ve hayatımdaki varlığından dolayı teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmamızda her türlü katkı ve yardımlarından dolayı tez izleme komitesi üyeleri olan Prof. Dr. Melih BOSTAN ve Prof. Dr. Metin SUBAŞI' na ayrıca çok sevdiğim hocam Prof. Dr. Ali TUTAY'a teşekkürlerimi sunarım. 2008 yılı itibari ile kaybettiğimiz ve tez izleme komitemde bulunan Prof. Dr. Engin IŞIKSAL'a da ayrıca teşekkürlerimi sunar, Allahtan Rahmet, yakınlarına başsağlığı dilerim.

Bu tez çalışması boyunca, tez çalışmasına konu edilen AGATA Demonstrator + PRISMA düzeneği ile ilgili her türlü bilgi, destek ve yardımlarından dolayı LNL-INFN' de görev yapmakta olan Prof. Dr. Enrico FARNEA'ya ve tüm AGATA + PRISMA projesi çalışanlarına, ayrıca Prof. Dr. Giovanni POLLAROLO(Torino-INFN)'ya minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam süresince bana gösterdikleri hoşgörü ve yardımlarından ötürü İstanbul Üniversitesi Hasan Ali Yücel Eğitim Fakültesi Fen Bilgisi Eğitimi Anabilim Dalı Başkanımız Doç. Dr. F. Gülay KIRBAŞLAR başta olmak üzere, tüm araştırma görevlisi arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak eğitim hayatım boyunca bana verdikleri tüm destekler için Sevgili AİLEM'e çok teşekkür ederim.

Mayıs, 2009

Elif İNCE

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	İ
İÇİNDEKİLER.....	İİ
ŞEKİL LİSTESİ.....	İV
TABLO LİSTESİ.....	Vİİ
KISALTMALAR	İX
ÖZET.....	X
SUMMARY.....	11
1. GİRİŞ	12
1.1. MOTİVASYON.....	14
1.2 GAMA-IŞINI SPEKTROMETRELERİNİN DÜNYADAKİ GELİŞİMİ.....	16
2. GENEL KISIMLAR	20
2.1. GAMA IŞINI İZ SÜRME PRENSİPLERİ.....	20
2.1.1. Çok Parçalı Germanyum (Ge) Dedektörleri	21
2.2. GAMA IŞINI İZ SÜRME TEKNİĞİ.....	23
2.2.1. Geri İz-Sürme (BACK - TRACKING) Metodu	24
2.2.2. İleri İz-Sürme (FORWARD - TRACKING) Metodu.....	26
2.3. GAMA IŞINI İZ-SÜRME SONUÇLARI	33
2.4. DARBE BİÇİM ANALİZİ	35
2.5. AGATA PROJESİ	37
2.5.1 Agata Dedektörü	40
2.5.2. Agata Elektronik Ve Veri Elde Etme	41
2.5.3 Agata Proje Ortaklığı.....	42
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	44
3.1. AGATA DEMONSTRATOR DİZİM.....	46

3.2. PRISMA MANYETİK SPEKTROMETRESİ.....	48
3.2.1 Giriş Dedektörü-MCP.....	49
3.2.2 Kuadropol Mercek.....	50
3.2.3 Manyetik Dipol.....	51
3.2.4 MW-PPAC Focal Plane Dedektörü	51
3.2.5 İyonizasyon Odası	53
3.3. AĞIR İYONLAR İLE GERÇEKLEŞEN NÜKLEER REAKSİYONLAR	54
3.4 DOPPLER KAYMASI VE DOPPLER DÜZELTMESİ.....	57
4. BULGULAR.....	60
4.1 PRISMA'YA GİRİŞ	61
4.1.1. İyon Yörüngelerinin Yeniden Yapılandırılması.....	63
4.1.2. İyon Kimliklerinin Belirlenmesi	66
4.1.3. Yük Seviyelerinin Ve Kütle Spektrumlarının Belirlenmesi	69
4.1.4. Doppler Düzeltmesi	71
4.1.4 Gama Işınlmasının Belirlenmesi	73
4.2.CLARA + PRISMA VE AGATA DEMONSTRATOR + PRISMA PERFORMANS KARŞILAŞTIRMASI.....	75
4.3. ÇOKLU-NÜKLEON TRANSFER (GRAZING) REAKSİYONLARINA AİT GERÇEKSİL SİMÜLASYONU	80
5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	108
KAYNAKÇA.....	111
ÖZGEÇMİŞ	118

ŞEKİL LİSTESİ

- Şekil 1.1** :Nükleer yapı çalışmalarının spin değerleri göz önüne alınarak dedeksiyon sistemlerinin gelişimi ile son yüzyıldaki değişimlerinin gösterimi.....5
- Şekil 2.1** :AGATA için kullanılması planlanan 36 çok parçalı bir GRETA Ge prototip örneğinin yapısı.....11
- Şekil 2.2** :Üçlü küme kesitinin gösterildiği AGATA detektör modülü.....12
- Şekil 2.3** :İki etkileşme noktası için geri iz-sürme algoritmasının gösterimi.....14
- Şekil 2.4** :İç yarıçapı 15cm, dış yarıçapı 24cm olan ideal Ge kabuğu göz önüne alınarak 1,33 MeV enerjili fotonların yayınlanmasıyla oluşmuş, 30 çoklu saçılmanın ($M\gamma=30$) eş zamanlı olduğu “World Map” gösterimi.....17
- Şekil 2.5** :Compton saçılması ile oluşan etkileşmenin gösterimi.....18
- Şekil 2.6** :Standart küresel kabukta $E\gamma=1\text{MeV}$ enerjili 10^5 gama geçişinin X^2 dağılımının gösterimi..19
- Şekil 2.7** :Fotonun ard arda iki compton saçılması ve son olarak fotoelektrik etkileşme yaparak tüm enerjisini dedektör materyalinde kaybetmesinin gösterilmesi.....20
- Şekil 2.8** :Çift oluşum etkileşmesinin gösterimi. Elektron ve pozitron kinetik enerjilerini, etkileşme noktasının birkaç mm. yakınında bırakırlar ve annihilation fotonları oluşur.....21
- Şekil 2.9** :Standart bir kabukta oluşturulan bir küme (cluster) için pozisyon çözünürlüğünün, verim ile değişiminin 1,33 MeV enerjili γ -ışını kaskatları için gösterimi.....23
- Şekil 2.10** :6 kat çok parçalı bir Ge detektöründe meydana gelen etkileşmede 4. parçada fotonun tamamının absorblanması ile 4. parça ve komşu parçalarda meydana gelen sinyallerin gösterimi.....25
- Şekil 2.11** :Düzenli icosahedron yapılarla etiketlenmiş hexagonlardan oluşturulan küre konfigürasyonlarının gösterimi. Her bir konfigürasyondaki her bir renk ayrı bir kristal yapısını göstermektedir. Şekilde kare içine alınarak gösterilen $N_H=120$ ve $N_H=180$ konfigürasyonları ise AGATA dizimi için öngörülen mümkün konfigürasyonlardır.....27
- Şekil 2.12** :Düzensiz hexagon prizma kristal yapılarının gösterimi.....28
- Şekil 2.13** :Agata dedektörünün etkin parçalı yapısının gösterimi. Renkler, Agata prototip kristalinin pozisyon duyarlılığını göstermektedir. Ön kısımdaki parça yapısının hacminin daha geniş olması, elektrik alan yöneliminden kaynaklanmaktadır..... 30
- Şekil 2.14** :AGATA asimetrik 3'lü kümelenmelerinin aynı soğutucu içinde gösterimi.....30
- Şekil 2.15** :Tüm Agata Detektörü Projesinin öngörülen gelişiminin ve aşamalarının gösterimi.....32

Şekil 3.1	:CLARA+PRISMA (üstte) ile AGATA Demonstrator + PRISMA (altta) deneysel düzeneklerinin karşılaştırmalı gösterimi.....	34
Şekil 3.2	:15 kristal ve 3'lü kümelenmiş AGATA Demonstrator prototipinin gösterimi.....	35
Şekil 3.3	:Agata Demonstrator'e ait Ge dedektörlerinin hedefe 13.5 cm uzaklıkta yerleştirilmesi durumunda uzaklığa bağlı olarak fotopik veriminin (üstte) ve P/T(alta) oranının değişiminin gösterimi.....	36
Şekil 3.4	:PRISMA spektrometresini oluşturan bölümlerinin yerleşimi.....	38
Şekil 3.5	:MCP giriş dedektörünün görünüşü.....	38
Şekil 3.6	:Dipol magnetin iyonları odaklayarak saptırmasının gösterimi.....	40
Şekil 3.7	:Vakum kabının içine monte yerleştirilmiş MW-PPAC dedektörü.....	41
Şekil 3.8	:MW-PPAC dedektörünün üçlü katot yapısının sökülmüş görünüşü.....	41
Şekil 3.9	:IC dedektörünün şematik görünüşü.....	43
Şekil 3.10	:Ağır iyon reaksiyonlarının çarpma parametresine göre değişiminin şematik gösterimi.....	44
Şekil 3.11	:Reaksiyon sonrasında doppler kaymasının oluşumunun gösterimi.....	47
Şekil 4.1	:Yukarıdan aşağıya doğru sırası ile MCP, TOF ve XFP matrislerinin ⁹⁰ Zr iyon hüzmesi için gösterimi.....	51
Şekil 4.2	:Menzil(IC)-Enerji(IC) matrisinin yakınlaştırılmış görüntüsü ve her bir elementi seçmek üzere iki boyutlu muz şeklindeki kapılamanın gösterimi.....	58
Şekil 4.3	:Zr çekirdeğine ait q yük seviyelerinin Rβ-Eic matrisi kullanılarak belirlenmesinin gösterimi.....	59
Şekil 4.4	:Zr ve Y izotoplarına ait kütle spektrumlarının gösterimi.....	60
Şekil 4.5	:Reaksiyonda oluşan Zr izotoplarına ait (v/c) hız dağılımı.....	61
Şekil 4.6	:1 MeV enerjili gama ışını için AGATA Demonstrator + PRISMA düzeneğinin doppler düzeltme performansının gösterimi.....	62
Şekil 4.7	:Kütlelerin seçiminden önce (siyah) ve kütle seçiminden sonra ⁹⁰ Zr (pembe), ⁹¹ Zr (yeşil), ⁸⁹ Y (mavi) ve ⁹⁰ Y (kırmızı) iyonlarının belirlenen gama enerjilerindeki FWHM değerlerinin gösterimi.....	63
Şekil 4.8	:Kanal seçiminden önceki ve sonraki durumlarda AGATA Demonstrator+PRISMA deneysel düzeneği için doppler düzeltme kabiliyetinin ve iyonların FWHM değerlerinin gösterimi.....	64
Şekil 4.9	:Simülasyonda ⁴⁸ Ca+ ²⁰⁸ Pb multi-nükleon transfer reaksiyonu sonrasında gözlenen Sc, Ca ve K ürün çekirdekleri, izotopları ve tepkime kesitlerinin gösterimi.....	65
Şekil 4.10	: ⁴⁸ Ca izotopuna ait simülasyon ve gerçek deneye ait verilerin analiz sonuçlarının karşılaştırması.....	66
Şekil 4.11	:AGATA Demonstrator+PRISMA düzeneği için ⁴⁸ Ca+ ²⁰⁸ Pb reaksiyon simülasyonu sonrasında oluşan ⁴⁷ K(360keV), ⁴⁸ Ca(3831.80keV), ⁵⁰ Ca(1027keV), ⁵¹ Ca(2380keV), ⁴⁹ Sc(3524keV), ⁵¹ Sc(1065keV), ⁵² Sc(212 keV) izotoplarının ve bu izotopların 2+→0+ geçiş enerjileri için doppler düzeltme kabiliyetinin gösterimi.....	68
Şekil 4.12	:AGATA Demonstrator+PRISMA düzeneği için gerçekleştirilen Gerçeksil Simülasyon'un oluşturulma aşamalarının gösterimi.....	69

Şekil 4.13	: ⁴⁸ Ca+ ²⁰⁸ Pb@310MeV reaksiyonu sonrasında oluşan giriş-çıkış kanallarının gösterimi.....	70
Şekil 4.14	:CLARA+PRISMA deneysel düzeneği ile gerçekleştirilen ⁴⁸ Ca+ ²⁰⁸ Pb@310MeV reaksiyonu sonrasında oluşan ürün çekirdekler için Grazing Kodları kullanılarak üretilen açısız dağılım-diferansiyel tepkime kesiti değerlerinin CM sisteminde gösterimi.....	71
Şekil 4.15	:CLARA+PRISMA deneysel düzeneği ile gerçekleştirilen ⁴⁸ Ca+ ²⁰⁸ Pb@310MeV reaksiyonu sonrasında oluşan ürün çekirdeklerinin tepkime kesiti değerlerinin gösterimi.....	72
Şekil 4.16	:CLARA+PRISMA deneysel düzeneği ile gerçekleştirilen ⁴⁸ Ca+ ²⁰⁸ Pb@310MeV reaksiyonu sonrasında oluşan ürün çekirdeklerinin Kinetik Enerji Kayıp değerlerinin gösterimi.....	72
Şekil 4.17	:AGATA Demonstrator + PRISMA deneysel düzeneği için gerçekleştirilen çoklu-nükleon transfer reaksiyonunun şematik gösterimi.....	75
Şekil 4.18	:Gerçeksil Simülasyon sonrasında elde edilen verinin analizi ile oluşturulan her bir çıkış kanalına ait kütle spekturumlarının gösterimi.....	80
Şekil 4.19	:Reaksiyon sonrasında gözlenen her bir çıkış kanalına ait hız dağılımın gösterimi.....	81
Şekil 4.20	: ⁴⁶ K kanalına ait “doppler düzeltmesi öncesi” ve “doppler düzeltmesi sonrası” enerji spektrumlarının gösterimi.....	83
Şekil 4.21	: ⁴⁷ K kanalına ait “doppler düzeltmesi öncesi” ve “doppler düzeltmesi sonrası” enerji spektrumlarının gösterimi.....	84
Şekil 4.22	: ⁴⁸ K kanalına ait “doppler düzeltmesi öncesi” ve “doppler düzeltmesi sonrası” enerji spektrumlarının gösterimi.....	85
Şekil 4.23	: ⁴⁶ Ca kanalına ait “doppler düzeltmesi öncesi” ve “doppler düzeltmesi sonrası” enerji spektrumlarının gösterimi.....	86
Şekil 4.24	: ⁴⁷ Ca kanalına ait “doppler düzeltmesi öncesi” ve “doppler düzeltmesi sonrası” enerji spektrumlarının gösterimi.....	87
Şekil 4.25	: ⁴⁸ Ca kanalına ait “doppler düzeltmesi öncesi” ve “doppler düzeltmesi sonrası” enerji spektrumlarının gösterimi.....	88
Şekil 4.26	: ⁴⁹ Ca kanalına ait “doppler düzeltmesi öncesi” ve “doppler düzeltmesi sonrası” enerji spektrumlarının gösterimi.....	89
Şekil 4.27	: ⁵⁰ Ca kanalına ait “doppler düzeltmesi öncesi” ve “doppler düzeltmesi sonrası” enerji spektrumlarının gösterimi.....	90
Şekil 4.28	: ⁴⁸ Sc kanalına ait “doppler düzeltmesi öncesi” ve “doppler düzeltmesi sonrası” enerji spektrumlarının gösterimi.....	91
Şekil 4.29	: ⁴⁹ Sc kanalına ait “doppler düzeltmesi öncesi” ve “doppler düzeltmesi sonrası” enerji spektrumlarının gösterimi.....	92
Şekil 4.30	: ⁵⁰ Sc kanalına ait “doppler düzeltmesi öncesi” ve “doppler düzeltmesi sonrası” enerji spektrumlarının gösterimi.....	93
Şekil 4.31	:Gerçeksil Simülasyon sonrasında her bir çıkış kanalına ait γ -ışını enerjilerinin FWHM değerleri ile daha önce gerçekleştirilen Monte Carlo Simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması.....	95

TABLO LİSTESİ

Tablo 4.1	: ⁴⁸ Ca+ ²⁰⁸ Pb çoklu-nükleon transfer reaksiyonu sonrasında, oluşan her bir reaksiyon ürün iyonuna ait gözlenmesi beklenen γ -ışınların, FWHM değerlerinin CLARA+PRISMA ve AGATA Demonstrator+PRISMA için gösterilmesi.	78
Tablo 4.2-a	: ⁴⁶ K çekirdeğine ait yayınlanan γ -ışınlarının seviye bozunma enerji değerlerinin, bozunma şiddetlerinin, geçiş seviyelerinin ve oluşan simülasyonunun analizi sonrasında gözlenen FWHM değerlerinin gösterimi.	87
Tablo 4.2-b	: ⁴⁷ K çekirdeğine ait yayınlanan γ -ışınlarının seviye bozunma enerji değerlerinin, bozunma şiddetlerinin, geçiş seviyelerinin ve oluşan simülasyonunun analizi sonrasında gözlenen FWHM değerlerinin gösterimi.	87
Tablo 4.2-c	: ⁴⁸ K çekirdeğine ait yayınlanan γ -ışınlarının seviye bozunma enerji değerlerinin, bozunma şiddetlerinin, geçiş seviyelerinin ve oluşan simülasyonunun analizi sonrasında gözlenen FWHM değerlerinin gösterimi.	87
Tablo 4.2-d	: ⁴⁶ Ca çekirdeğine ait yayınlanan γ -ışınlarının seviye bozunma enerji değerlerinin, bozunma şiddetlerinin, geçiş seviyelerinin ve oluşan simülasyonunun analizi sonrasında gözlenen FWHM değerlerinin gösterimi.	88
Tablo 4.2-e	: ⁴⁷ Ca çekirdeğine ait yayınlanan γ -ışınlarının seviye bozunma enerji değerlerinin, bozunma şiddetlerinin, geçiş seviyelerinin ve oluşan simülasyonunun analizi sonrasında gözlenen FWHM değerlerinin gösterimi.	88
Tablo 4.2-f	: ⁴⁸ Ca çekirdeğine ait yayınlanan γ -ışınlarının seviye bozunma enerji değerlerinin, bozunma şiddetlerinin, geçiş seviyelerinin ve oluşan simülasyonunun analizi sonrasında gözlenen FWHM değerlerinin gösterimi.	88
Tablo 4.2-g	: ⁴⁹ Ca çekirdeğine ait yayınlanan γ -ışınlarının seviye bozunma enerji değerlerinin, bozunma şiddetlerinin, geçiş seviyelerinin ve oluşan simülasyonunun analizi sonrasında gözlenen FWHM değerlerinin gösterimi.	89
Tablo 4.2-h	: ⁵⁰ Ca çekirdeğine ait yayınlanan γ -ışınlarının seviye bozunma enerji değerlerinin, bozunma şiddetlerinin, geçiş seviyelerinin ve oluşan simülasyonunun analizi sonrasında gözlenen FWHM değerlerinin gösterimi.	89

Tablo 4.2-i	: ⁴⁸ Sc çekirdeğine ait yayınlanan γ -ışınlarının seviye bozunma enerji değerlerinin, bozunma şiddetlerinin, geçiş seviyelerinin ve oluşan simülasyonunun analizi sonrasında gözlenen FWHM değerlerinin gösterimi.	89
Tablo 4.2-j	: ⁴⁹ Sc çekirdeğine ait yayınlanan γ -ışınlarının seviye bozunma enerji değerlerinin, bozunma şiddetlerinin, geçiş seviyelerinin ve oluşan simülasyonunun analizi sonrasında gözlenen FWHM değerlerinin gösterimi.	90
Tablo 4.2-k	: ⁵⁰ Sc çekirdeğine ait yayınlanan γ -ışınlarının seviye bozunma enerji değerlerinin, bozunma şiddetlerinin, geçiş seviyelerinin ve oluşan simülasyonunun analizi sonrasında gözlenen FWHM değerlerinin gösterimi.	90

KISALTMALAR

ADC	: Analog to Digital Converter
AGATA	: Advanced GAMMA Tracking Array
BGO	: $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$
CM	: Center of Mass
DAQ	: Digital to Analog Converter
ESS	: Escape Suppression Shield
GEANT 4	: GEometry ANd Tracking
HpGe	: High Purity Germanium
LNL-INFN	: Legnaro National Laboratory
IC	: Ionization Chamber
MCP	: Micro-Channel Plates
MW-PPAC	: Multi-Wire Parallel Plate Avalanche Counters
PSA	: Pulse Shape Analysis
P/T	: Peak to Total
Γ	: FWHM (Tam Yükseklikte Yarı Genişlik)

ÖZET

İLERİ GAMA IŞINI İZ-SÜRME TEKNİKLERİ KULLANARAK YÖNE DUYARLI DEDEKTÖRLER GELİŞTİRİLMESİ

Bu çalışmanın amacı, ileri gamma ışını iz sürme teknikleri kullanılarak yöne-duyarlı dedektörlerin geliştirilmesidir. Bu amaçla, AGATA projesinin başlangıç aşaması olan AGATA DEMONSTRATOR ve yöne duyarlı bir dedektör olan PRISMA manyetik spektrometresinin birlikte kullanılması ile “*Gama Işını İz-sürme Tekniği*” ve “*Darbe Biçim Analizi*” uygulamaları, Gerçekçil Monte Carlo Simülasyonlar ile oluşturulmuştur. AGATA Demonstrator dizimi, 5 adet 3’lü kümelenmiş 15 kristalden oluşmaktadır. İlk uygulaması LNL-INFN laboratuvarında, CLARA diziminin yerine monte edilerek PRISMA manyetik spektrometresi ile birlikte gerçekleştirilecektir. AGATA projesinin amacı, yüksek fotopik verimi (40% den yüksek) ve P/T oranı (50% den yüksek) ile yüksek saflıklı HPGe dedektörlerinin geliştirilmesidir. Bu tip yüksek değerlere, fotonun dedektör kristalinde etkileşme pozisyonlarının belirlenmesini sağlayan pozisyon duyarlı HPGe dedektörlerinin kullanılmasıyla ulaşılabilir. Bu çalışma kapsamında, gerçekleştirilen Monte Carlo simülasyonları ile AGATA Demonstrator + PRISMA deneysel düzeneğinin doppler düzeltme kabiliyeti gösterilmiş, $^{90}\text{Zr} + ^{208}\text{Pb}$ (560 MeV) ve $^{48}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb}$ (310MeV) çoklu-nükleon transfer reaksiyonları kullanılarak gerçekçil Monte Carlo simülasyonları oluşturulmuş, sonuçları tartışılmış ve AGATA+PRISMA düzeneğinin Doppler düzeltme kabiliyetinin, Ge dedektörlerinin iç (intrinsic) enerji çözünürlük değerine çok yakın olduğu ispatlanmıştır.

SUMMARY

DEVELOPMENT OF DIRECTION SENSITIVE DETECTORS USING ADVANCED GAMMA TRACKING ARRAY

The aim of this project is development of the direction sensitive detectors by using Advanced GAMMA Tracking Techniques. In this study, the initial phase of the AGATA project, a subset of the array, known as the AGATA Demonstrator and PRISMA magnetic spectrometer which is a direction sensitive detector are coupled enabling γ -ray tracking and pulse shape analysis methods at the realistic Monte Carlo Simulations. The AGATA Demonstrator Array composed of 15 crystals, arranged into 5 triple clusters will be first installed at the Laboratori Nazionali di Legnaro, where it will be coupled to the PRISMA magnetic spectrometer, replacing the CLARA array. The goal of the AGATA project is the construction of an array of high-purity germanium detectors with very high photopeak efficiency (larger than 40%) and peak-to-total ratio (larger than 50%) under a wide range of experimental conditions. Such values can only be achieved by operating the HPGe detectors in position-sensitive mode. In this study, the performance of the AGATA Demonstrator Array coupled to the PRISMA magnetic spectrometer have been evaluated in a consistent way using detailed Monte Carlo simulations of the two devices. For this purpose, $^{90}\text{Zr} + ^{208}\text{Pb}$ at 560 MeV and $^{48}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb}$ at 310MeV multi-nucleon transfer reactions are presented and discussed. It is shown that the Doppler correction capabilities of the AGATA+PRISMA setup will be very close to the intrinsic energy resolution of the Ge detectors.

1. GİRİŞ

Çekirdek, yapısını oluşturan nükleonların, kuvvetli etkileşmelerle bir arada tutulduğu kuantum mekaniksel bir sistemdir. Nükleer fiziğin amacı, nükleer limitlerin çerçevesinde çekirdeklerin yapılarını anlayabilmek için hem teorik hem de deneysel verileri sağlamaktır. γ -ışını spektroskopisi, bu verilerin elde edilmesinde nükleer çekirdek yapılarının araştırılmasını mümkün kılarak önemli bir rol üstlenmektedir.

Nükleer reaksiyon sonucunda uyarılmış hale geçen bileşik çekirdek, kararlı hale geri dönebilmek için önce nükleon ve hafif parçacıklar (proton salımı, nötron salımı, alpha bozunumu, beta bozunumu), daha sonra da γ -ışınlarını yayımlar. γ -ışınları, uyarılmış durumda olan çekirdeğin nükleer yapısı hakkında bilgiler verir. Günümüze kadar yapılan nükleer fizik çalışmalarında kararlı demetlerle oluşturulan nükleer reaksiyonlarla, nükleer haritada kararlılık çizgisine yakın olan çekirdekler incelenmiş fakat kararlılık çizgisinin dışına geçilememiştir. Özellikle son 30 yılda GANIL [1], GSI [2], Japonya [3] 'da gerçekleştirilen radyoaktif demetlerinin kullanıldığı çalışmalar, nükleer fizik açısından bilinmeyen "ekzotik" çekirdeklerin gözlenebileceği limit durumları olan "proton drip-line" ve "nötron drip-line" na ulaşma olasılığını ortaya çıkarmıştır.

Nükleer reaksiyonlar sonrasında salınan γ -ışınlarının çok iyi dedekte edilmesi, bu bilinmeyen bölgelerdeki çekirdek yapılarının anlaşılmasını mümkün kılabilir. Bu sebeple nükleer fizik çalışmalarında γ -ışını spektroskopisi çok önemli bir yere sahiptir. Kullanılacak γ -ışını dedeksiyon sistemlerinin; çok iyi cevap fonksiyonuna, yüksek verim ve duyarlılık özelliklerine sahip olmaları gerekmektedir. Günümüzdeki dedektör sistemleri ile (EXOGAM, LNL-CLARA + PRISMA, vb.) ile yapılan γ -ışını dedeksiyon

çalışmalarında γ -ışını gözlenebilir limitinin, istenilen değerden düşük olması sebebi ile dedeksiyon sistemlerinin geliştirilmesi çalışmalarına başlanmıştır.

Geliştirilme aşamaları devam eden bu tip yeni nesil dedektör sistemleri (AGATA, GRETA) ile, dedektörde depolanan enerjinin ve dedektörde meydana gelen etkileşmelerin pozisyonlarının çok hassas bir şekilde belirlenebilmesi, “*darbe biçim analizi* (Pulse Shape Analysis, PSA) “ ve “ *γ -ışını iz-sürme* (γ -Ray Tracking)” metotlarının kullanılması ile sağlanacaktır. İlerleyen bölümlerde yeni nesil dedektör sistemleri hakkında ayrıntılı bilgi verilecektir.

Bu tez çalışmasına, AGATA Demonstrator deneysel düzeneği ile pozisyon ve yöne duyarlı bir yapı olan PRISMA spektrometesinin birlikte kullanılması durumu konu edilmiş olup “*darbe biçim analizi* ve *γ -ışını iz-sürme*” tekniklerinin bu yapı için kullanılarak dedeksiyon sisteminin verim ve Doppler düzeltme performanslarının gösterilmesi amaçlanmıştır, C++ programlama dili kullanılarak oluşturulan GEANT 4 [4] kodları ile gerçekçi simülasyonlar üretilmiştir.

Tez çalışmasının bu bölümünde; γ -ışını spektrometrelerinin kullanım amacı ve dünyadaki gelişimine ayrıntılı olarak yer verilerek, AGATA ve GRETA gibi uygulamaları darbe biçim analizi ve γ -ışını iz-sürme tekniklerine dayalı olan yöne duyarlı dedektör sistemlerinin kullanılmasındaki esas beklentiler sunulacaktır.

Tez çalışmasının ikinci bölümünde, “Darbe Biçim Analizi ve γ -ışını iz-sürme teknikleri” uygulamaları ile birlikte AGATA projesi ve AGATA dedektör sisteminin özelliklerine yer verilmiştir.

Tez çalışmasının üçüncü bölümünde, N=Z ya da Nötron-Zengin yapıda bulunan çekirdeklere ulaşılması amacı ile CLARA+PRISMA yerine AGATA Demonstrator + PRISMA deneysel düzeneğinin kullanılması durumu göz önüne alınmış, bu nedenle AGATA projesinin bir alt yapısı olan ve 5 adet 3’lü küme yapısını içeren AGATA Demonstrator Dizimi (Array) ile yöne duyarlı bir dedektör olan PRISMA spektrometresi sistemlerinin yapıları ve özellikleri, ayrıca bu dedeksiyon sistemi ile

gerçekleşmesi öngörülen Çoklu-Nükleon Transfer reaksiyonu prensipleri ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Tez çalışmasının dördüncü bölümünde, AGATA Demonstrator + PRISMA dedeksiyon sistemi ile çoklu-nükleon transfer reaksiyonları için gerçekleştirilen GERÇEKSİL SİMÜLASYON çalışmaları sunulacaktır. Bu bölümde CLARA+PRISMA ile gerçekleştirilen $^{48}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}@330\text{ MeV}$ reaksiyonuna ait, reaksiyon ürün çekirdekleri için GRAZING kodları kullanılarak, tepkime kesiti ve açısal dağılım hesaplamaları yapılmış, bu veriler kullanılarak da GERÇEKSİL “OLAY ÜRETECİ” oluşturulacak, ve sonuçları tartışılacaktır. AGATA Demonstrator + PRISMA kullanılması durumunda çoklu-nükleon transfer reaksiyonları için, sistemin Doppler düzeltme kabiliyetinin ve iz-sürme nedeni ile verim değerinin mükemmel olacağı gösterilmiştir.

Tez çalışmasının beşinci bölümünde ise bu amaca yönelik olarak “AGATA Demonstrator + PRISMA” ile “CLARA + PRISMA” dedeksiyon sistemlerinin performans karşılaştırmaları yapılmış ve AGATA Demonstrator + PRISMA dedeksiyon sistemi ile yapılması öngörülen çalışmalardan bahsedilmiştir.

Yapılan çalışmada, AGATA Demonstrator + PRISMA dedeksiyon sisteminin çoklu-nükleon transfer reaksiyonları için kullanılması durumunda sistemin Doppler düzeltme kabiliyetinin ve iz-sürme nedeni ile verim değerinin mükemmel olacağı gösterilmiştir.

1.1. MOTİVASYON

Nükleer uyarılmaların anlaşılması, nükleer yapı çalışmalarının temel prensibidir. Bunun için en güçlü yöntem, yüksek duyarlılıklı γ -ışını spektroskopisi kullanmaktır. Bir nükleer reaksiyon sonrasında oluşan γ -ışını bozunumları; uyarılma enerjisi, açısal dağılımın olduğu seviyeye ait spin değeri, lineer polarizasyondan elde edilen parite değeri, yarı ömür ölçümlerinden elde edilen geçiş olasılığı ve manyetik moment değerleri, proton / nötron oranı ve toplam kütle gibi bilgileri taşıması nedeni ile çok büyük önem taşır.

Nükleer yapı çalışmalarında yüksek şiddetli radyoaktif iyon hüzmelerinin geniş enerji aralığında kullanılması amaçlanmaktadır. Bu amaçla uygulamaya geçirilen Fransa' da GANIL Spiral-2 [5], EURISOL [6] ve ABD'de RIA [7] projeleri bulunmaktadır.

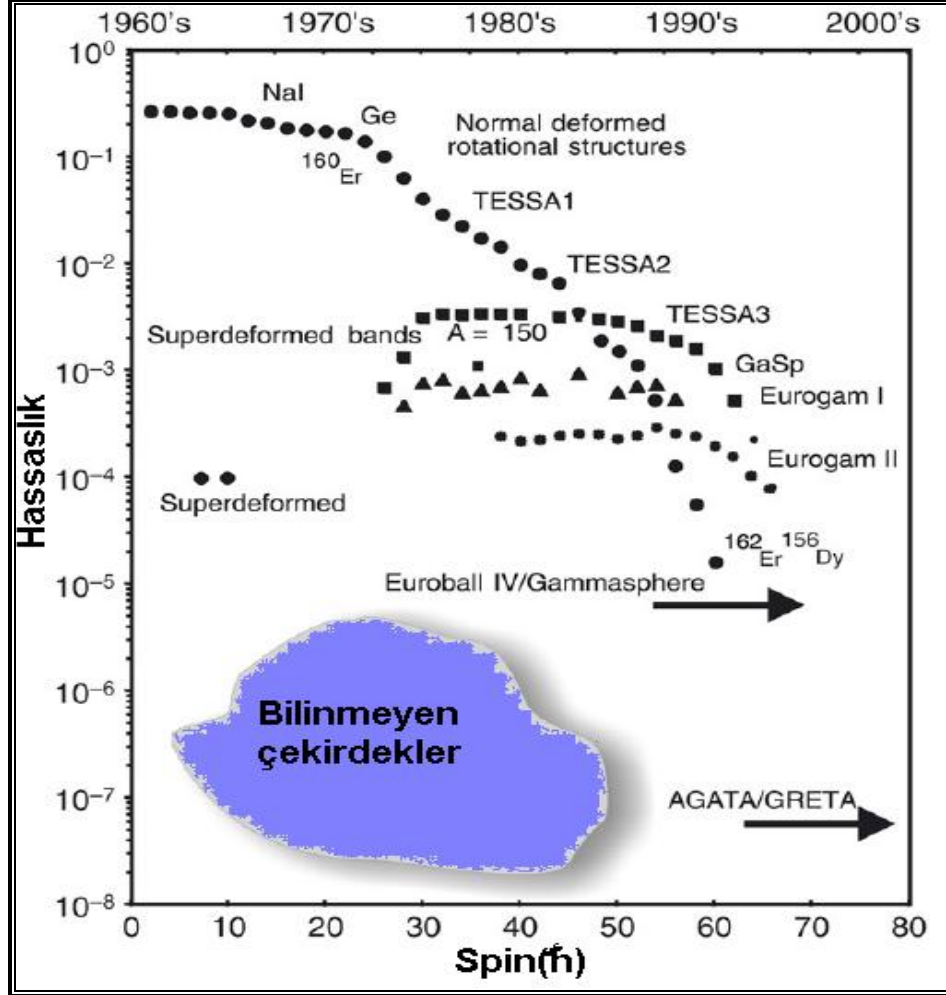
Bu geniş enerji aralığı içerisinde radyoaktif iyon hüzmeleri kullanımı;

- Coulomb enerji bölgesinde oluşabilecek reaksiyonlar; kararlı huzmeler ile oluşturulan transfer, derin - inelastik ve bileşik çekirdek reaksiyonlarıdır ve düşük spin seviyelerinin gözlenmesini mümkün kılar.
- (50-200) MeV/u orta enerji bölgesinde ise yüksek uyarılmış seviyeler ile giant rezonanslarına ulaşılabilir.
- Çok yüksek enerjilerde ise ekzotik fragmentler ve ikincil fragmentasyonlar oluşur. Bu enerji bölgesinde $30\hbar$ 'dan daha yüksek spin seviyelerine ulaşılabilir.

Özellikle ekzotik hüzmeler ile gerçekleştirilen reaksiyonlar, nükleer kararlılık ile ilgili çalışmalara olanak sağlar. Bu çalışmaların yapılabilmesi için ise yüksek performanslı, γ -ışını iz sürme teknikleri prensibine dayalı γ - ışını spektrometrelerinin kullanılması kaçınılmazdır.

1.2 GAMA-IŞINI SPEKTROMETRELERİNİN DÜNYADAKİ GELİŞİMİ

Nükleer yapı çalışmalarının evrimi Şekil 1.1' de verilmiştir.



Şekil 1.1: Nükleer yapı çalışmalarının spin değerleri göz önüne alınarak dedeksiyon sistemlerinin gelişimi ile son yüzyıldaki değişimlerinin gösterimi.

İlk nükleer yapı çalışmaları, γ -ışını spektroskopisinde açılma momentum ve uyarılma enerjisinin belirlenmesi amacı ile birkaç NaI(Tl) sintilasyon dedektörü ile yapılmıştır [8]. Bu tarz deneylerin duyarlılığı, hem sintilasyon dedektörlerinin zayıf cevap fonksiyonları (≈ 90 keV @1300 keV) hem de dedektör boyutlarının küçük olması nedeni ile sınırlanmıştır. Bu olumsuz faktörlere rağmen bu tip dedektörlerin

kullanılması ile çekirdeğin düşük spin değerlerindeki ($I \leq 8-10\hbar$) rotasyonel yapıları açıklanabilmiştir [8].

Daha sonraki yıllarda sintilatör dizim boyutları, hedef çerçevesine yerleştirilmiş çok parçalı NaI(Tl) dedektörleri ile arttırılmıştır. 4π dizimlerinin ilk örnekleri Oak Ridge National, USA laboratuvarındaki 72 segmentli Spin spektrometresi ve Max-Planck – Institute’ de bulunan 162 segmentli Cristal Ball’dur [9]. Bu dizimler sahip oldukları enerji kalorimetreleri ile yüksek çokluklu (kaskat) γ -ışını enerjilerinin belirlenmesini sağlamışlar, fakat NaI(Tl) dedektörünün düşük enerji çözünürlüğü nedeni ile sınırlı kalmıştır.

1960’lı yılların ortalarında çok iyi enerji çözünürlüğüne ($< 1 \text{ keV @ } 122 \text{ keV}$ ‘den $\sim 2 \text{ keV @ } 1332 \text{ keV}$ ’e kadar) sahip Ge ve Ge(Li) dedektörleri geliştirilmiştir. Yüksek spin seviyeleri üzerine yapılan ilk çalışma ise 1970’li yılların sonlarında Ge(Li) dedektörlerinin kullanılması ile Niels-Bohr Institute’de gerçekleştirilmiştir [10].

Gerçekleştirilen bir çok ilerlemeye rağmen Ge ve Ge(Li) ile yapılan ilk deneylerden itibaren değişmeyen büyük bir deneysel sorunun varlığı ortaya konmuştur. Bu sorun, Ge dedektörlerinde bırakılan enerjinin tamamen absorblanamaması nedeninden kaynaklanan düşük *tepe/toplam* (P/T-Peak to Total) diğer bir deyişle *sinyal/gürültü* oranıdır. Bu sorunun çözümü ise, saçılan radyasyonun kaçış bastırıcı zırh; ESS (Escape Suppression Shield) kullanılarak dedekte edilmesi ve Ge ile ESS ‘de eş zamanlı oluşan olayların çıkarılması sayesinde mümkün olmuştur.

Zırhlama işlemi için önceleri NaI(Tl) sintilatör dedektörleri kullanılmıştır. 1980’lerin ortalarında sintilatör materyali olarak BGO ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) kristalleri geliştirilmiş ve zırhların birbirlerine çok yakın yerleştirilmeleriyle dedektör çevresinin tamamen örtülmesi sağlanmıştır. 1980’li yıllarda ESS-HpGe dedektör dizimlerinin sayısı hızla artmıştır. Bunlardan bazıları; TESSA3 (UK) [11], Chateau de Cristal (France) [12], OSIRIS (Germany) [13], NORDBALL (Denmark) [14], HERA (USA) [15], 8π spectrometer (Canada) [16] ‘dır.

Dedeksiyon sistemine ait toplam verim, 1990'lı yıllarda GASP [17], ve EUROGAM [18] dizimlerinin kullanılması ile 5% değerlerine kadar artmıştır.

LNL-INFN(Legnaro National Laboratory)' de kullanıma başlanan GASP çok dedektör dizimi, 40 adet ESS-HpGe dedektöründen oluşmuştur. 1.332 MeV enerjili tek bir foton için toplam pik verimi $\epsilon_{ph} \approx 3\%$, P/T oranı 60% dir. Her bir kristal 30 msr'lik katı açığı örter ve çözüm gücü ise $R \approx 6.5$ 'dır. EUROBALL ise 239 kristalden oluşmaktadır. GASP' a nazaran daha yüksek pik verimine $\epsilon_{ph} \approx 9\%$ sahiptir. P/T oranı 60% , çözümcü ise $R \approx 9$ 'dur [19].

Yukarıda adı geçen spektrometrelerden elde edilen deneyler sonucunda ESS-HpGe dedektör dizimlerinin geliştirilebilmesi için birbirine zıt 2 gereksinimin dengelenmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bunlar;

- 1) Dedektör, hedef pozisyonundan uzak mesafelere yerleştirilmelidir. Böylece her bir kristalin daha küçük katı açı görmesi ve etkin enerji çözünürlüğünün uygun değerlerde kalması mümkün olabilir.
- 2) Dedeksiyon sisteminin veriminin artırılması için her bir kristal, hedef pozisyonuna mümkün olduğu kadar yakın yerleştirilmelidir. Fakat bu durumda da verim, ESS zırh yapılarının hacimleri ile sınırlı kalacaktır.

Bu problem, "CLOVER" [20] ve "CLUSTER" [21] gibi bileşik (composite) dedektörlerin EUROBALL diziminde kullanılması ile kısmen çözülmüştür [19]. Bu tip bileşik dedektörlerde; 4 ya da 7 kristal, aynı soğutucu ve aynı ESS zırhının içine yerleştirilmiştir. Verim ve P/T iyileştirilmesi, komşu dedektörlerde bırakılan enerjilerin de eklenmesi *GERİ EKLEME (add-back)* ile sağlanmıştır.

Bu dizimlerin "ESS" ve "add-back" performanslarına rağmen her bir kristal, çok küçük ($\approx 1\text{msr}$)'lık katı açı görmeleri sebebi ile özellikle çift vuruş (double hits) durumlarında yetersiz kalmış ve enerji çözünürlüğü minimum değerlerde gözlenmiştir. Bu durumda verimin (25%-30%) değerlerine çıkarılabilmesi için binlerce kristal kullanılması gerekmektedir fakat düşüncenin ekonomik olarak mümkün olmayacağı aşıkardır. Bununla birlikte Monte Carlo simülasyonları bu tip dizimler için, P/T oranının en az

30% civarında olması gerektiğini göstermektedir [22]. Bunun anlamı, bu tip dizimlerin çözüm gücünün en az EUROBALL'dan daha iyi olması gerekliliğidir.

Her bir kristal tarafından küçük katı açılı görölmesi ve çok sayıda kristal kullanılması gerekliliği sebebi ile MARS [23], MINIBALL [24], SeGA [25] ve EXOGAM [26] gibi elektriksel olarak parçalı yapıda olan dedektör dizimlerinin kullanılmasına başlanmıştır. Şekil 1.1'de dedeksiyon sistemlerine ait gelişimin bir gösterimi bulunmaktadır.

Bu tip dizimlerin çalışma mekanizması, γ -ışını iz-sürme algoritmasına dayanmakla birlikte 100-200 adet pozisyon duyarlı Ge dedektörünün 4π 'lik katı açılı örtecek şekilde hedef etrafına konuşlanması ile oluşturulmaktadır. Dedektörlerin pozisyon duyarlılığı, etkileşmenin gerçekleştiği parça (segment) ve komşu parçalarda oluşan yük sinyallerin analizi ile belirlenir. γ -ışınlarının izlerinin sürülmesi ile de etkileşme sıralarının ve her bir etkileşimde dedektör materyalinde bırakılan enerjinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Monte Carlo simülasyonları, bu tip γ -ışını iz sürme dizimlerinin katı açılı maksimum şekilde görebildikleri için en yüksek verime sahip olacaklarını, bununla birlikte doppler düzeltme etkisinin ve P/T oranının çok yüksek değerlerde bulunacağını göstermektedir. Bu sonuçlar göz önüne alınarak “ γ -ışını iz sürme teknikleri” ve “darbe biçim analizi” yöntemlerinin kullanılacağı çok parçalı pozisyon duyarlı dizimlerin γ -ışını spektroskopisinde kullanılması amaçlanmaktadır. Şu anda Avrupa’ da AGATA [22] ve Amerika’ da GRETA [27] projeleri bu prensiplere dayanarak uygulamalarına başlanan çok önemli gama dedektör dizimleridir.

2. GENEL KISIMLAR

İleri γ -ışını iz sürme teknikleri dizimi (Advanced GAMMA Tracking Array), AGATA, yüksek enerjili iyon hüzmeleri için tasarlanmış, yüksek cevap fonksiyonu ile γ -ışını spektroskopisi için kullanılması amaçlanan bir dedektör sistemidir. AGATA; yeni geliştirilen “*darbe biçim analizi*” ve “ *γ -ışını iz-sürme*” metodlarının uygulanması temeline dayanan çok parçalı Ge dedektörleri ile tamamen dijital elektronikten oluşmaktadır.

2.1. GAMA IŞINI İZ SÜRME PRENSİPLERİ

Yeni nesil 4π spektrometrelerinin “verim” ve “çözüm gücü” özellikleri açısından oldukça gelişmiş olmaları sebebi ile γ -ışını spektroskopisinin yüksek duyarlılıkta olması beklenmektedir. Bu dizimler; çok parçalı Ge kristalleri ile her bir kristale ait sinyalin dijital olarak işlenebilmesi özelliklerine sahiptirler. Bununla birlikte Ge kristallerinde meydana gelebilecek etkileşmelerin etkileşme pozisyonlarının yüksek doğrulukla belirlenebilmesi, bu tip dizimlerin en önemli özelliklerinden biridir. “*Darbe biçim analiz*” algoritması kullanılarak, Ge dedektöründe oluşan γ -ışını etkileşmelerinin uzaysal koordinatlarının, pozisyonlarının ve enerji bilgilerinin belirlenmesi mümkündür. Her bir etkileşmenin Ge materyalindeki etkileşme noktası, compton saçılma formülüne uygun olarak hesaplanır ve 3 boyutta belirlenir. γ -ışını iz-sürme tekniklerinin kullanılacağı dizimlerin;

- Çok parçalı Ge dedektörlerinden oluşmaları,
- Dijital sinyal elektroniğine sahip olmaları,
- Zamanlama uygulamaları için “*Darbe biçim analiz*” algoritmasını içermeleri

gerekmektedir. Araştırmalar ve teknik gelişmeler, 4π γ -ışını dedektör dizimlerinin yukarıda belirtilen özelliklere sahip olmaları gerekliliğini doğrulamaktadır [28]. Özellikle Avrupa’da İtalyan MARS [29], EXOGAM [30], MINIBALL [31] VEGA

[32] ve Amerika’da GRETA [33] ile GRETINA [34] çok dedektör dizimleri, çok parçalı Ge dedektör uygulamalarının en önemli örneklerindedir.

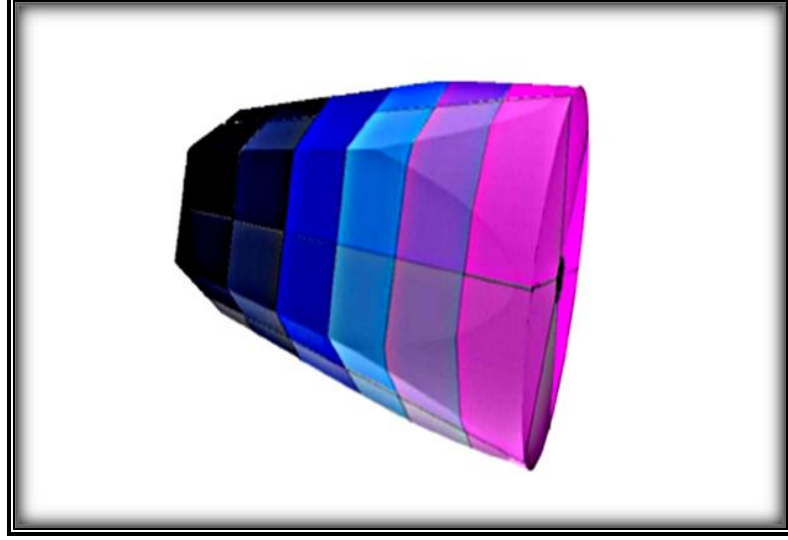
2.1.1. Çok Parçalı Germanyum (Ge) Dedektörleri

İz-sürme algoritmasının başarı ile uygulanabilmesi için, Ge dedektör hacminde oluşan γ -ışını etkileşme pozisyonlarının (1-2) mm.’lik duyarlılık ve doğruluk ile belirlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle, her bir Ge dedektörünün 30000 voksel’ lik etkin parçacıklı yapıya sahip olması gerekir. Böylece yüksek enerji çözünürlüğü ve zamanlama bilgileri, *darbe biçim analizi* algoritması kullanılarak yüksek doğrulukta belirlenebilir.

Çok parçalı ve eş-ksenli yapıdaki Ge dedektörlerinin kullanılması ile, boyutları normal Ge dedektörlerine göre daha büyük dedektör topluluklarının oluşturulması sağlanmıştır. Dedektörlerde parçalı yapı, her bir parçaya elektronik devre ve elektrotların konulmasıyla gerçekleştirilmiştir. Böylece her bir parça, ayrı bir dedektör özelliği gösterir. Çok parçalı dedektörlerin getirdiği en önemli kazanç, γ -ışınları için iz sürme tekniğinin kullanılmasına olanak vermesi, böylece daha önce kullanılan compton zırh yapılarının çıkarılarak tüm katı açının büyük bir bölümünün Ge ile kaplanabilmesinin sağlanmasıdır. Compton zırhlarının kullanıldığı dönemlerde veto sinyali ile ihmal edilen ve compton saçılması ile dedektörden kaçan γ -ışınları, iz sürme tekniğinin kullanılması ile doğru enerjileri hesaplanmış olarak veriye aktarılır. Böylece dedektör verimi artar. Bununla birlikte çok parçalı yapının kullanılması ile dedektör topluluğunun açısız çözünürlüğü ve buna bağlı olarak da enerji çözünürlüğü artar.

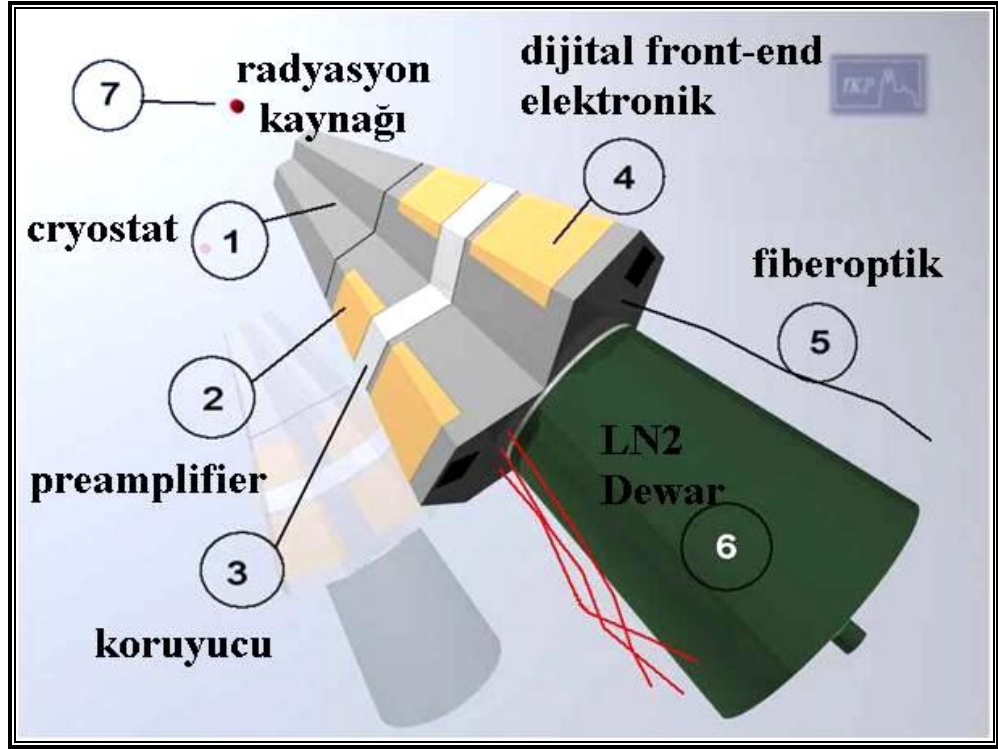
İz-sürme algoritmasının uygulandığı, çok parçalı Ge dedektörleri için en önemli örnekler; Amerika’da GRETA ve Avrupa’da AGATA projeleridir. Şekil 2.1 ‘de GRETA dedektörünün bir prototip örneği gösterilmektedir. GRETA, 120 hexagonal ve 12 pentogonal eş-ksenli HpGe dedektörden oluşmaktadır. Her üç hexagonal dedektör kristali bir küme oluşturmak üzere, dedektör topluluğu 40 adet küme içermektedir. Dedektörlerin boyutu; 8cm. çapında ve 9cm. uzunluğundadır. Her bir hexagonal dedektör 36 parçalı yapıya sahiptir. Yani her bir dedektör, merkez elektrotta dahil olmak üzere 37 adet sinyal üretmektedir. Üçlü kümeler içerisindeki dedektör tiplerinin ikisi

aynı kalan diğeri ise farklı tipte bir dedektördür. Her bir dedektör kümesine alüminyum kapsüllenmesi uygulanmıştır [33].



Şekil 2.1: AGATA için kullanılması planlanan 36 çok parçalı bir GRETGe prototip örneğinin yapısı.

AGATA dedektörü için de aynı tip Ge dedektör yapısı kullanılacaktır. AGATA küresi, 4π katı açının yaklaşık 80%' lik kısmını görecektir şekilde yerleştirilen çok parçalı ve eş-eksenli HpGe tipli dedektörlerden oluşmaktadır. AGATA, 180 adet hexagonal ve 12 adet pentagonal n-tipi HpGe dedektörü içermektedir. Hexagonal dedektörlerinin her biri boyuna (z yönünde) ve enine (açısal koordinat cinsinden) elektronik olarak parçalı yapıya sahip olacak şekilde bulunur ve böylece 36 parçalı bir dedektör elde edilir. Bu dedektörlerin boyutu, 8cm. çapına ve 9cm. uzunluğuna sahiptir. Oluşturulması öngörülen AGATA küresinde toplam 192 adet dedektör ve 6780 çok parça yapısı bulunacaktır. Toplam kullanılacak Ge kütlesi 362 kg. civarında iken, AGATA küresinin tamamı 1,5 ton civarında olacaktır. Bu dizim, 60 adet küme ve her bir kümede birbirinden farklı üç adet HpGe yapısına sahiptir. Her bir küme Al ile kapsüllenmesi yapıldıktan sonra aynı soğutucunun içine konularak üçlü kümelerin oluşturulması sağlanacaktır [35]. Tüm AGATA küresinin tamamlanması durumunda 4π lik katı açının 82% 'sinin örtülmesi öngörülmektedir.



Şekil 2.2: Üçlü küme kesitinin gösterildiği AGATA dedektör modülü [35] .

2.2. GAMA IŞINI İZ SÜRME TEKNİĞİ

Bu teknik, dedektör materyali ile etkileşen her γ -ışınının etkileşme pozisyonlarını ve bu noktalarda dedektöre depolanan enerjilerin bulunması amacı ile geliştirilmiştir.

Nükleer ve parçacık fiziğinde yüklü parçacıklar, pozisyon duyarlı hacimlerde sürekli iyonizasyonları sayesinde bıraktıkları izlerle izlenirler. Fakat γ -ışınları için bu durum tamamen farklıdır. γ -ışınlarının dedektör hacmindeki etkileşmelerinin istatistiksel kanunlara göre düşük olması, birbirinden uzak etkileşme noktalarının meydana gelmesinden kaynaklanır. Bu nedenle, γ -ışını iz sürme algoritmasının, dedektör hacminde etkileşen γ -ışınlarının fiziksel karakteristiklerinin (compton saçılması, çift oluşum, fotoelektrik etkileşim ve ikincil Rayleigh) göz önüne alacak kadar güçlü olması gerekmektedir. Compton saçılma algoritmasına göre 1 MeV enerjili foton, birkaç compton saçılması yaptıktan sonra kalan tüm enerjisini fotoelektrik etkileşimle

dedektör materyalinde bırakır. γ -ışınının dedektör materyalindeki saçılmasına, Compton saçılma formülünün uygulanabilmesi için yaptığı her saçılmada bıraktığı enerji ve toplam bırakılan enerji bilgileri kullanılmalıdır.

γ -ışını iz-sürme algoritmasının geliştirilmesinde başlıca 2 yöntem kullanılmaktadır. Bunların ilki “geri iz-sürme (*backtracking*)” [36], diğeri ise “ileri iz-sürme (*forward-tracking*)” [37] dir. İleri iz-sürme metodu, “kümeleme (*clusterisation*)” [37] uygulaması temeline dayanmaktadır.

2.2.1. Geri İz-Sürme (BACK - TRACKING) Metodu

Bu algoritmanın temel prensibi, son fotoelektrik etkileşme noktasından başlanarak γ -ışınının tüm etkileşme noktalarını ve bu noktalarda depolanan enerjilerini bulmak, böylece γ -ışınının tüm enerjisini hesaplamaktır. Darbe biçim analizi sonucunda elde edilmiş etkileşme noktalarının enerji ve konum değerlerinden yararlanarak etkileşme noktaları, foto elektrik olay için geçerli enerji bölgesi aralığı için belirlenir. Bu enerji bölgesinde, eşik enerjisi (100 keV) altındaki etkileşme noktalarının enerjileri ihmal edilir ve etkileşme noktalarının enerjilerindeki artışına bağlı olarak maksimum foto elektrik olay yapma durumu göz önüne alınır. Fotonun, dedektör materyali ile ilk etkileşme noktası belirlenirken, fotonun enerjisinin eşik değerine eşit ya da bu değerden daha fazla olması durumlarında, ilk etkileşme noktası “ $int = 1$ ” olarak seçilir. Bu etkileşme noktasına en yakın sonraki etkileşme noktası ise “ $int = 2$ ” olarak kabul edilir. Bu iki nokta arasındaki fotoelektrik etkileşme yapma olasılığı, eşitlik 2.1’e göre hesaplanır. Eğer bu olasılık, minimum fotoelektrik etkileşme yapma olasılığından küçük ise başlamak için başka bir etkileşme noktası seçilir. Eğer yüksek enerji seviyesinde herhangi bir başlama noktası kalmamış ise algoritma, 100 keV’in altındaki noktalar için fotoelektrik etkileşme yapma olasılığını hesaplar [38].

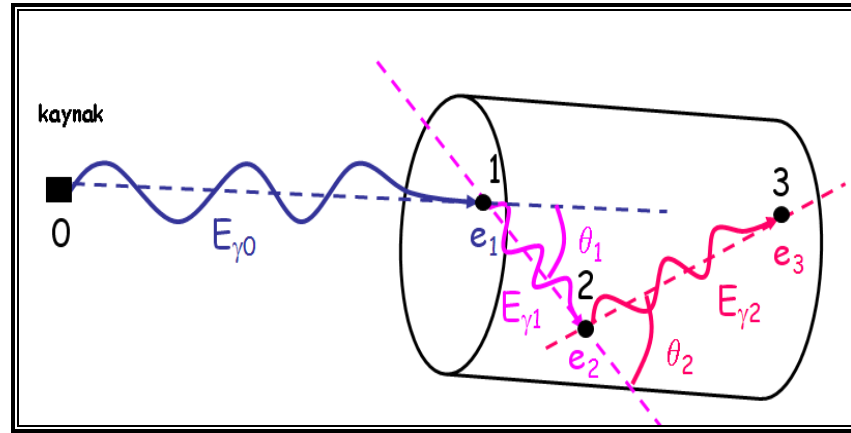
İlk iki etkileşme noktası arasındaki uzaklık $d_{2 \rightarrow 1}$ olmak üzere; fotonun bu uzaklık arasında tüm enerjisini depolama olasılığı;

$$P(d_{2 \rightarrow 1}) = e^{-\frac{d_{2 \rightarrow 1}}{\lambda(E_{abs})}} \quad (2.1)$$

Burada λ ortalama serbest yol değeridir. E_{abs} ; etkileşimde absorblanan enerji değeri, n ; Ge materyalinde hacim başına atom sayısı ve σ ; tesir kesiti değeri olmak üzere, ortalama serbest yol;

$$\lambda(E_{abs}) = (n\sigma(E_{abs}))^{-1} \text{fotelektrik} \quad (2.2)$$

şeklinde dir.



Şekil 2.3: İki etkileşme noktası için geri iz-sürme algoritmasının gösterimi.

Eğer belirlenen olasılık değeri, minimum foto-elektrik yapma olasılığından büyük ise “int = 2 ” noktası kabul edilir. Eğer int=2 noktası için bulunan olasılık değeri minimum fotoelektrik etkileşme olasılık değerinden küçük ise int=2 noktası kabul edilmez ve int=1 noktasına en yakın farklı bir etkileşme noktasının bu kurala uyup uymadığına bakılır. Diğer noktanın int=2 noktası olarak kabul edilmesi durumunda; bu nokta için “figure of merit” belirlenir [29]. Bu noktaya en yakın olan int=3 etkileşme noktası seçimi ve kabul edilmesi ise aşağıdaki biçimdedir:

$$\cos\theta_{deneysel} = \frac{\vec{d}_{21} \cdot \vec{d}_{32}}{|\vec{d}_{21}| |\vec{d}_{32}|} \quad (2.3)$$

$$\cos\theta_{teorik} = 1 - m_e c^2 \left(\frac{1}{E_{saçılan}} - \frac{1}{E_{gelen}} \right) \quad (2.4)$$

Burada $E_{gelen} = E_{dep} = e_1 + e_2$, yani her bir etkileşme noktasında depolanan enerji değerleri cinsinden yazılabilir. Minimum compton saçılması yapabilme olasılığı ve compton saçılma formülü kullanılması ile Compton saçılma açısının teorik olarak belirlenir. Bu sonuç, deneysel olarak elde edilen compton saçılma açısı sonucu ile karşılaştırılır. Sonuçların uyumlu olması durumunda ise “figure of merit” kabul edilmiş olur. Elde edilen her bir işlem sonrasındaki “figure of merit” değerlerinden toplam istatistiksel “figure of merit” değeri hesaplanır. Eğer bu değer simülasyon programında belirlenmiş olan limit istatistiksel değerinden büyük ise işlem sona erer ve sonuçlar önceden sınıflandırılan listeden çıkartılır, değil ise $int = 2$ için farklı bir nokta seçilir. Algoritma en son sistem içerisinde sınıflandırılmış ($foto_{min} < e_{int} < foto_{max}$) herhangi bir başlama noktası kalmamışsa, geri iz-sürme işlemi sona erer [38].

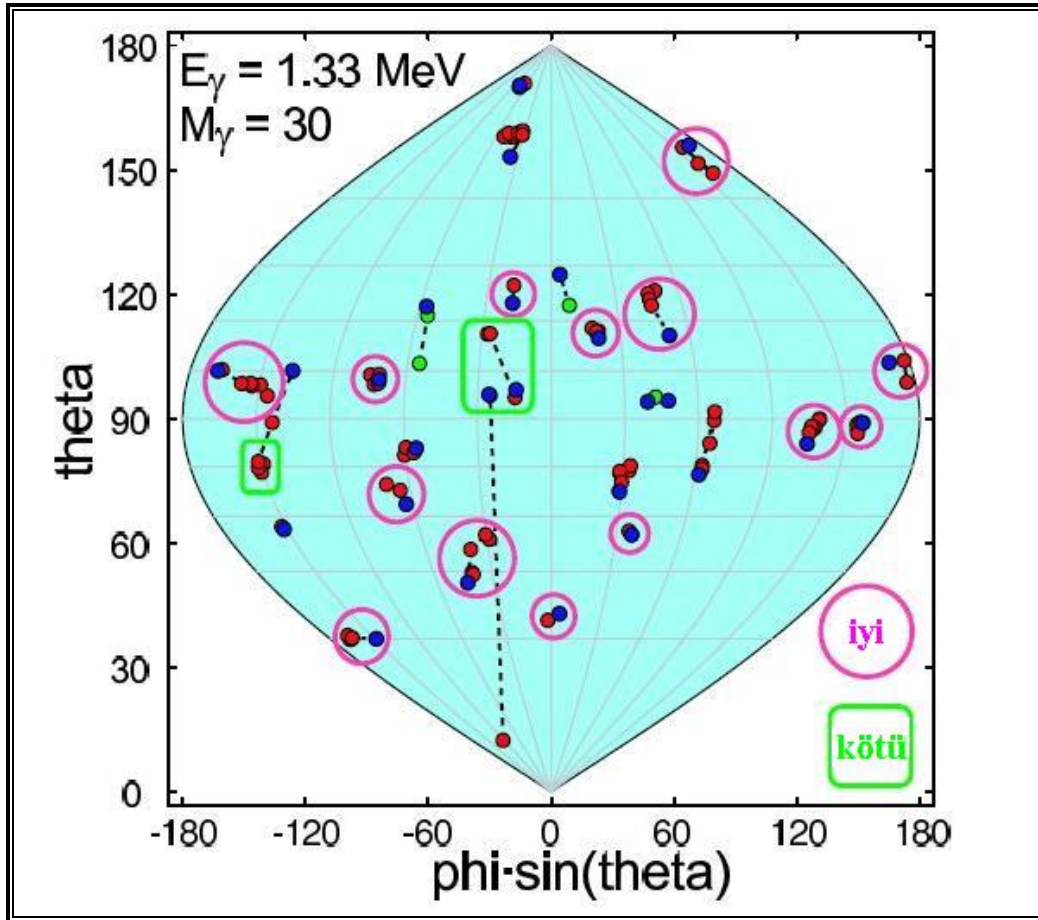
2.2.2. İleri İz-Sürme (FORWARD - TRACKING) Metodu

Bu metod, GRETA projesi tarafından uygulanmaktadır. Bununla birlikte ileri iz-sürme prensibine dayalı olan “*mgt (Mars Gamma Tracking)*” kodları ise AGATA için üretilmiştir [30]. Bu kodlara göre; fotonların başlangıç etkileşme noktalarının bilindiği varsayılır ve her bir saçılma olasılığı compton saçılma formülü ile hesaplanır. Fotonun dedektör içindeki hareketi göz önüne alındığı gibi dedektör dışına kaçan etkileşmelerde incelenir. Compton saçılması için toplam etkileşmenin toplam tepkime kesiti olasılığı hesaplanır. Eğer γ -ışını çift oluşum mekanizması ile etkileşirse bu durumu incelemek oldukça kolaydır çünkü annihilation fotonları dedektör materyalinde çok uzun yolculuk edemezler.

Bu algoritma, iki basamaktan oluşmaktadır. Bunların ilki; “kümeleme (clusterisation)”, bir sonraki adım ise “iz-sürme (tracking)” işlemidir. Kümeleme algoritması ile

etkileşmelere ait ön veriler sağlamakta, iz-sürme algoritmasının kullanılması ile de compton formülü ve istatistiksel hesaplamalar yardımıyla, oluşturulan kümelerin geçerlilikleri “figure of merit” yapısının oluşturulması ile karşılaştırılmakta ve en iyi kümeler belirlenmektedir. İz-sürme tekniğinin kullanılabilmesi için gerek ve yeter koşullardan en önemlisi; darbe biçim analizi yöntemi kullanılarak etkileşme noktalarının her birine ait konum, zaman ve enerji ifadelerinin belirlenmesidir.

Geniş hacimli Ge dedektörlerinde, etkileşme noktaları kendilerini sınırlı bir hacimde tutma eğilimindedirler. Aslında bu olgunun sebebi, Klein-Nishina formülünde de açıklandığı gibi γ -ışınlarının compton saçılması yaptıkça enerjilerinin ve ortalama çarpışma uzaklıklarının (mean free path) azalmasıdır. Kümeleme yönteminde Şekil 2.4’te de gösterildiği gibi her bir küme, 1 γ -ışınına ait etkileşmelerde bırakılan toplam enerjiye karşılık gelir. Bu metod, compton saçılma formülünde yer alan “açı-enerji” ilişkisi kullanılarak geliştirilmiştir.



Şekil 2.4: İç yarıçapı 15cm, dış yarıçapı 24cm olan ideal Ge kabuğu göz önüne alınarak 1,33 MeV enerjili fotonların yayınlanmasıyla oluşmuş, 30 çoklu saçılmanın ($M\gamma=30$) eş zamanlı olduğu “World Map” gösterimi.

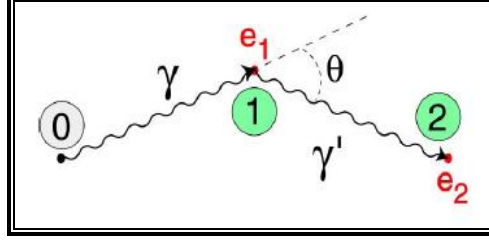
Şekil 2.4’de gösterilen simülasyonu yapılmış data çalışmasında, 1 noktasal kaynak çevresinde 4π ‘lik katı açığı gören, iç yarıçapı 15cm, dış yarıçapı 24cm olan ideal Ge kabuğu göz önüne alınarak 1,33 MeV enerjili fotonların yayınlanmasıyla oluşmuş, 30 fotona ait eşzamanlı saçılma durumları incelenmiştir. Her bir dedektörde ilk etkileşme noktaları “mavi” renk ile işaretlenmiştir. “Kırmızı” renk, tamamen absorblanan enerjiyi, “yeşil” renk ise, kısmi kaçışları gösterir. Etkileşme noktaları, polar koordinat sisteminde bulunan kaynağın (θ, ϕ) açılarına göre çizilmiştir. Böylece farklı fotonlar tarafından birbirlerine yakın olma durumlarına göre oluşturulan farklı kümeler gösterilmiştir.

Prensipite; eğer bir etkileşme noktası yüksek duyarlılıkla belirlenebiliyor ise, her bir fotonun saçılma sırası belirlenebilir. γ -ışını iz sürme algoritmasının uygulanmasında, γ -ışınının etkileşme mekanizmalarının hem fiziksel karakteristikleri hem de dedektör geometrisi göz önüne alınmalıdır.

γ -ışını spektroskopisi, (10 keV – 20MeV)’ lik geniş enerji bölgesi aralığı ile ilgilenir. Bu bölgedeki en baskın etkileşme tipleri; compton saçılması, çift oluşum ve fotoelektrik etkileşmedir. Fotoelektrik etkileşme, genellikle compton saçılması sonrasında, çift oluşum ise yüksek enerji bölgesinde gerçekleşen mekanizmalardır. Saçılma süreci hem dedektör performansı hem de fiziksel belirsizlikler nedeni ile bazı sınırlamalara sahiptir. Açıklamak gerekirse; dedektör performansı; dedektörün enerji çözünürlüğü, her bir etkileşmenin meydana gelme mekanizması ve etkileşme noktalarının pozisyonlarının belirlenmesindeki duyarlılığa bağlı olarak değişir. Fiziksel belirsizlikler ise; Compton, Rayleigh ve Bremsstrahlung saçılmaları sonrasında oluşabilecek atomik elektronun momentumuna bağlı olarak değişir. Her iki belirsizlik durumu da γ -ışını iz-sürme algoritmasının duyarlılığını etkiler.

Compton saçılması, iz-sürme algoritmasının kullanılacağı enerji bölgesindeki en önemli etkileşme tipidir. Bu etkileşme mekanizmasında geri tepen (recoil) elektronun

etkileşme noktasında bıraktığı enerjiden dolayı saçılan γ fotonun enerjisi; gelen foton enerjisi ile geri tepen elektron enerjisinin farkı kadarlık bir değere sahip olur.



Şekil 2.5: Compton saçılması ile oluşan etkileşmenin gösterimi.

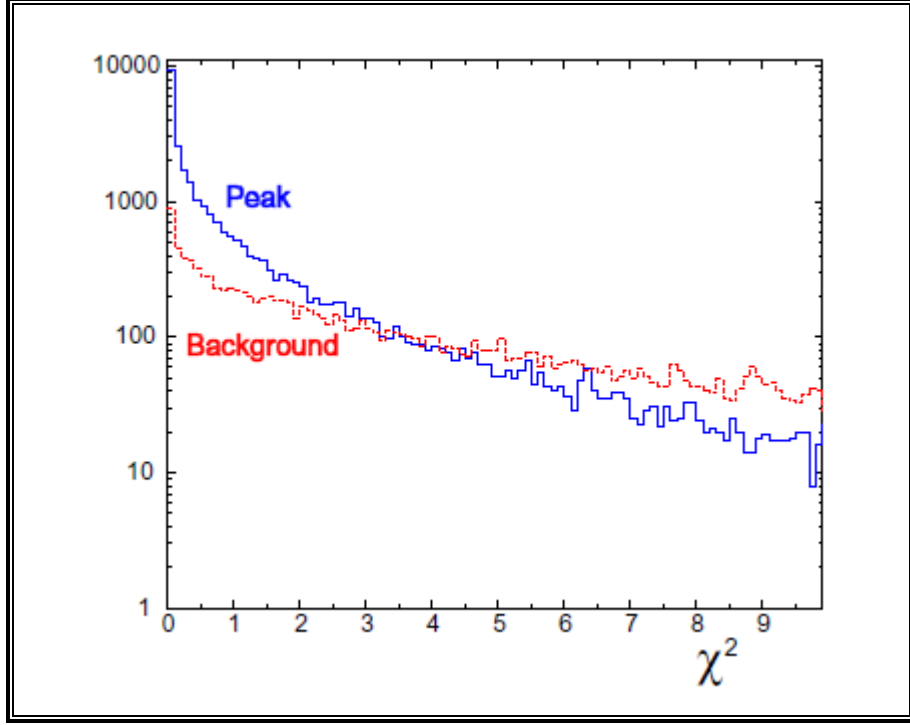
Compton saçılma mekanizmasında, elektron serbest kalır ve saçılan fotonun enerjisi, saçılma açısına bağlı olarak compton saçılma formülü ile aşağıdaki gibi belirlenir.

$$E_{\gamma'} = \frac{E_{\gamma}}{1 + \frac{E_{\gamma}}{m_0 \cdot c^2} (1 - \cos\theta)} \quad (2.5)$$

MeV enerji mertebesindeki elektronların saçılma ile alabilecekleri yol 1mm civarındadır. Bu sebeple detector, bu elektronların enerjilerini saçılma noktasına çok yakın bir mesafede algılar. Pozisyon duyarlı dedektörlerin kullanılması ile bu saçılma noktalarının konumları, 3 boyutta belirlenebilir. Eğer saçılmanın orijini biliniyorsa, saçılma açısı da hesaplanabilir.

$$\cos\theta = \frac{\vec{01} \cdot \vec{12}}{|\vec{01}| |\vec{12}|} \quad (2.6)$$

Bu formülün compton saçılma formülü olan (2.5)'de yerine koyulması ile saçılan γ -ışınının enerjisi ve o noktada bırakılan toplam enerji değeri en küçük kareler yöntemi (χ^2) kullanılarak karşılaştırılabilir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6: Standart küresel kabukta $E_\gamma = 1\text{MeV}$ enerjili 10^5 gama geçişinin χ^2 dağılımının gösterimi.

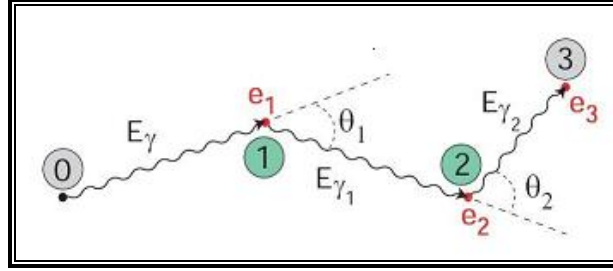
(2.7)

Bu model, Şekil 2.5' te de gösterildiği üzere etkileşmelerin orijininin başlayarak (012) şeklinde sıralanmasını sağlar. Gerçek dedektörlerde önce (1) daha sonra (2) noktasında etkileşme olmayabilir. Bu yüzden (021) etkileşme olasılığı da göz önüne alınarak χ^2 yaklaşımı genelleştirilirse; N etkileşme noktasında oluşan (N-1) tane compton saçılma noktası için;

$$\chi^2 \approx \sum_{n=1}^{N-1} W_n \left(\frac{E_{\gamma'} - E_{\gamma'}^{Pos}}{E_\gamma} \right)_n^2 \quad (2.8)$$

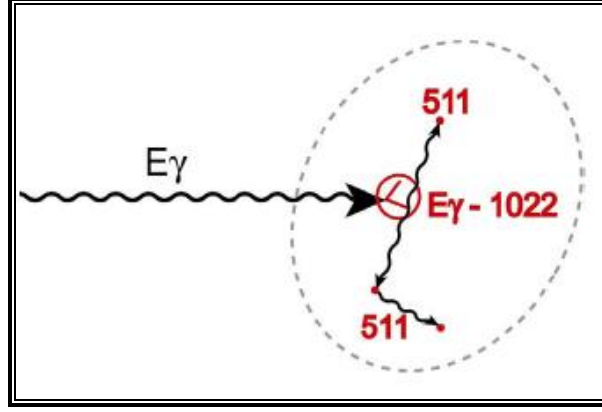
yaklaşımı kullanılır. Bu formülde E_γ ; n. etkileşme noktasında ki gelen fotonun enerji değeri iken $E_{\gamma'}$;bu noktadaki saçılan fotonun enerjisidir.

Fotoelektrik absorpsiyon, γ -ışınlarının 150 keV enerjisinin altındaki düşük enerjilere sahip olmaları durumunda dedektör materyalinde enerjilerini bırakma yöntemidir. Dedekte edilen enerjilerin, Şekil 2.7’de gösterildiği gibi düşük enerjili γ ışınları mı yoksa compton saçılması ardından oluşan γ ışınları mı olduğunun ayırt edilmesi oldukça zordur. Bu durumun belirlenebilmesi için en uygun yöntem, dedektörde etkileşme noktasına ulaşan γ -ışınlarının bu noktada bulunma olasılıklarının hesaplanmasıdır.



Şekil 2.7: Fotonun ard arda iki compton saçılması ve son olarak fotoelektrik etkileşme yaparak tüm enerjisini dedektör materyalinde kaybetmesinin gösterilmesi.

Çift Oluşum, birkaç MeV enerjisi üzerindeki γ -ışınları için önemli bir etkileşme mekanizması halini alır ve 9MeV üzerindeki enerji bölgesinde compton saçılmasını tamamen bastırır. Bu etkileşme tipinde elektron-pozitron çiftinin ilk oluştuğu etkileşme noktası çok önemlidir. Elektron-pozitron çiftinin toplam kinetik enerjisi, bu iki partner arasında ($E_\gamma - 2m_0c^2$)’e uygun olarak paylaşılır. MeV mertebesinde enerjiye sahip olan bu iki parçacık, çift oluşumun gerçekleştiği noktaya yakın mesafede durdurulabilirler. Yavaşlayan pozitron, atomik elektrona bağlanarak Şekil 2.8’ de de gösterildiği üzere 2 adet 511 keV enerjili annihilation fotonu yayınlar. Bu fotonlar dedektör materyali tarafından tamamen absorblanabilir ya da dedektörden kaçabilir.



Şekil 2.8: Çift oluşum etkileşmesinin gösterimi. Elektron ve pozitron kinetik enerjilerini, etkileşme noktasının birkaç mm. yakınında bırakırlar ve annihilation fotonları oluşur.

Görüldüğü üzere γ -ışınlarının dedektör materyali ile fiziksel etkileşme süreçleri, γ -ışını iz-sürme algoritmasının temelini oluşturmakla birlikte “compton saçılma” süreci bu algoritmanın en önemli rolünü oynayarak γ -ışını iz sürme algoritmasının temelini oluşturmaktadır.

Prensipite, γ -ışını iz sürme algoritması, compton saçılması ile oluşan tüm noktasal saçılmaları göz önüne almalıdır. Fakat bu durum; çoklu saçılma durumları için mümkün değildir. Bu sorun, “kümeleme” tekniğinin kullanılması ile aşılabılır.

1 MeV enerjili γ -radyasyonunun dedektör materyalinde enerjisini bırakabilmesi için alması gereken ortalama uzaklık 3cm civarındadır fakat bu tip yüksek cevap fonksiyonu olan sistemler için bu mesafe daha da azdır. Bu nedenle “kümeleme” işlemi hem açısal hem de lineer yaklaşımlar kullanılarak uygulanmaktadır. Şekil 2.4’ te gösterilen datada da “kümeleme” işlemi için açısal yöntemler kullanılmıştır. Genellikle 1 foton tarafından oluşturulan kümeleme, çok doğru şekilde belirlenebilir. Fakat bazı durumlarda saçılmalar tamamlanamaz; yani enerjilerini dedektör materyalinde kaybedemezler. Bu durumlar ise Şekil 2.4’ te “dikdörtgen” ile gösterilmektedir. Bu durumların enerjilerinin belirlenebilmesi için yüksek performanslı compton zıhları kullanılmalıdır.

Her bir foton tarafından oluşturulan kümelerin belirlenmesinin ardından her bir grup için compton saçılma prensibi göz önüne alınarak saçılma sıraları kontrol edilir ve “figure of merit” belirlenir.

2.3. GAMA IŞINI İZ-SÜRME SONUÇLARI

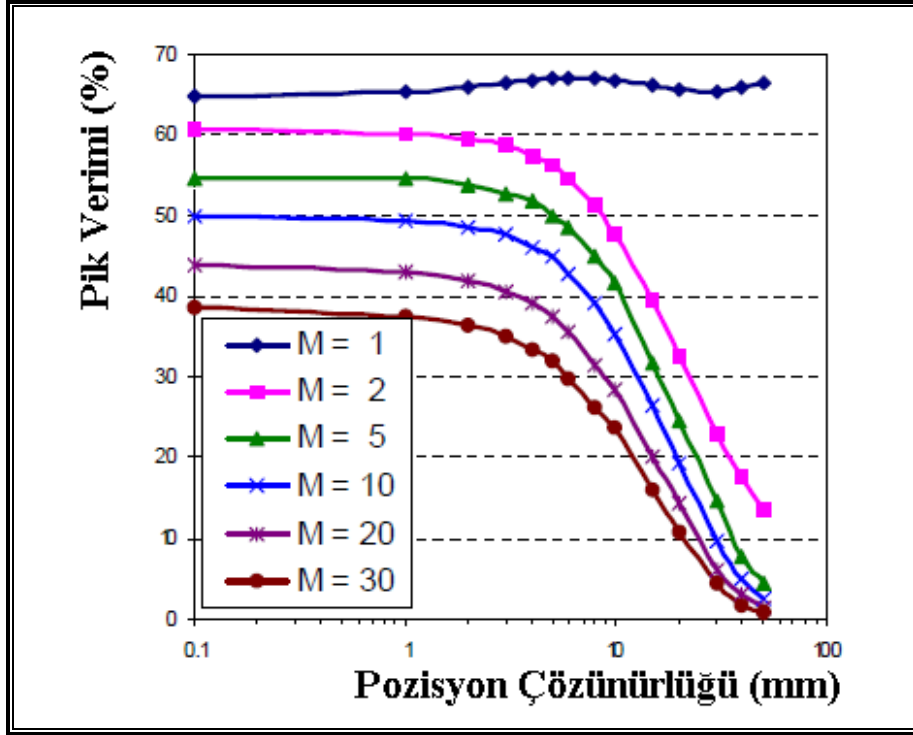
Yukarıda anlatılan 2 metotta da optimum iz sürme çalışmaları kullanılmakta ve her ikisi de çift oluşum ile aktif nötron rejeksiyon (rejection) özelliklerini içermektedir. Nötronlar, madde ile γ -ışınlarından farklı bir biçimde etkileşme eğilimindedirler. Bu nedenle iz sürme algoritması tarafından dikkate alınmazlar.

Bununla birlikte Compton saçılma uygulamalarında bazı temel sınırlandırmalar bulunmaktadır. Bunlar; dedektörlerin pozisyon çözünürlüğü ve sınırlı enerjilerinin hesaba katılması gerekliliği ile saçılma sonrasında oluşan ve bağısız olan elektronların varlığıdır.

Öncelikle dedektör çözünürlüğünün sınırlandırılmasındaki etkiler göz önüne alınmalıdır. Monte Carlo kodları, etkileşme yöntemlerinin fiziksel modellerini içerir. Fakat gerçek dedektör performansı ile ilgili bilgi içermez. Bu yüzden simülasyonu gerçekleştirilen data, çok keskin sonuçlar içerir. Bu sonuçları gerçekçi hale dönüştürmek için algılanan 'enerji' ve 'pozisyon' bilgilerine random olarak '*smearing*' prosedürü uygulanır [39]. Bununla birlikte tipik bir Ge dedektöründe 1,33 MeV enerjili γ -ışınının, $FWHM \approx 2,3 \text{ keV}$ ' lik çözünürlüğe sahip olabilmesi için simülasyonda gausiyen dağılım kullanılmaktadır.

Pozisyon çözünürlüğünün deneysel duyarlılık açısından belirlenmesi çok daha karmaşıktır. Dedektörün farklı parçalarında meydana gelen her bir etkileşmede bırakılan enerjiye, parça (segment) başına etkileşme sayısına ve bu etkileşmede bırakılan göreceli enerjilere bağlıdır. Gerçekçi varsayımlar, pozisyon çözünürlüğünün; birkaç mm' lik izole edilmiş etkileşme noktaları için olması gerektiğini göstermektedir [40]. Bu nedenle, deneysel çözünürlük değerlerinin ve her bir etkileşmenin 3 boyutlu kartezyen koordinatlarındaki gausiyen dağılımının birbirinden bağımsız olarak modellenmesi gerekir. Pozisyon çözünürlüğünün belirlenmesinde daha gerçekçi sonuçlar gözlemleyebilmek için bazı önemli noktalarında göz önüne alınması gerekir. Bunlardan biri; etkileşmede bırakılan enerji, FWHM değeri ile orantılıdır fakat elektronikten kaynaklanan gürültü de FWHM değerini etkileyebilir. Dikkatle değerlendirilmesi

gereken diğ er bir nokta ise pozisyon ç özünürlüğü hesaplanırken, birbirine yakın noktalar için, ortalama enerji ağırlıkları alınır.



Şekil 2.9: Standart bir kabukta oluşturulan bir küme (cluster) için pozisyon ç özünürlüğü, verim ile değışiminin 1,33 MeV enerjili ̳-ışını kaskatları için gösterimi.

Pozisyon ç özünürlüğü değ eri, ̳-ç okluğunun 1'den büyük değ erleri için çok önemli bir faktör halini alır. Ç ünkü bu durumda paketlenmiş (packed) noktalar, birbirinden farklı etkileş melere aittir. Bu nedenle, ̳ ç okluğu arttıkça, pozisyon ç özünürlüğü ve pık verimi kötüleş ir [39].

İ z sürme algoritmasının yukarıda belirtilen temel özellikleri nedeni ile darbe biç im analizinin kullanıldığı ̳-ışını dedektör dizimlerinde, tüm ̳-ışını etkileş melerinin ve pozisyon bilgilerinin yüksek duyarlılık ve doğırlukla belirlenmesi mümkündür.

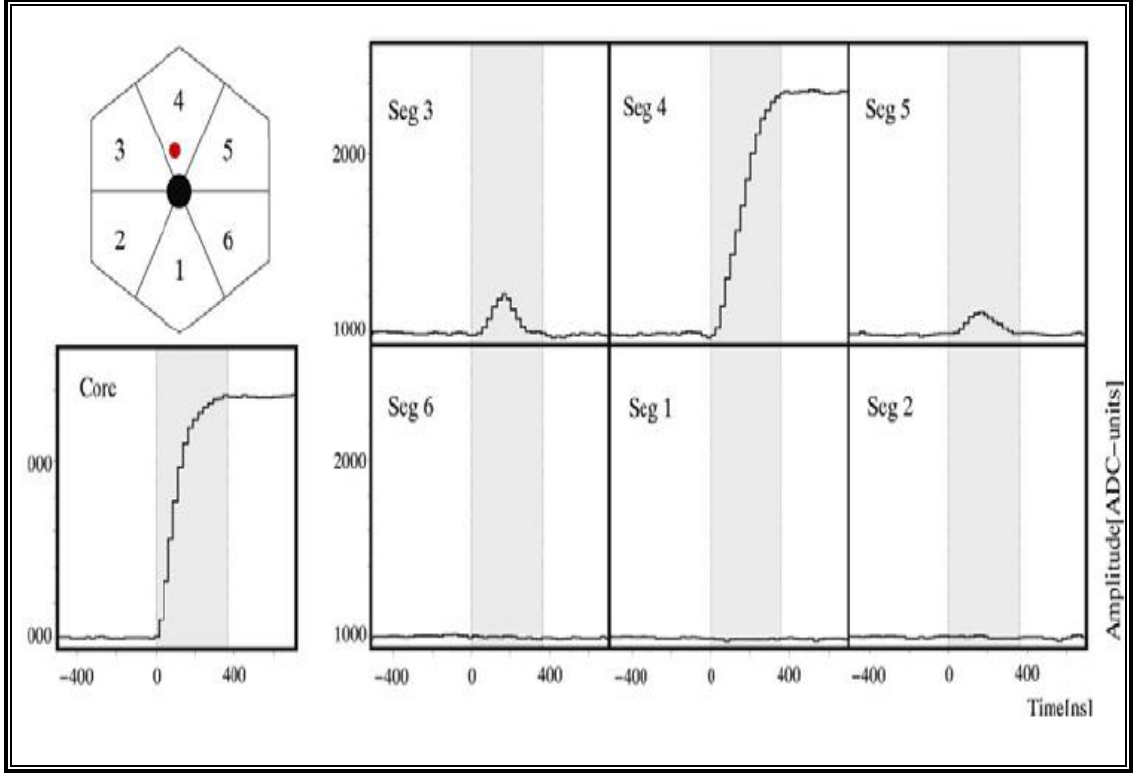
Günümüzde; iz sürme algoritması uygulamaları, gerçekç il varsayımlar kullanılarak pozisyon ç özünürlüğü belirlenmesi amacı ile kullanılmakta ve 60%' lara varan verim değ eri gözlenmektedir. Bu algoritmanın uygulamalarının AGATA dedektör

diziminde de kullanılacak olması, nükleer yapı çalışmalarında büyük gelişmelere olanak sağlayacaktır.

2.4. DARBE BİÇİM ANALİZİ

γ -ışını iz sürme algoritmasının kullanımıyla, fotopik verimin maksimum değerlerde olabilmesi, çok iyi pozisyon çözünürlüğü ile sağlanır. Darbe biçim analizi algoritması, pozisyon bilgilerini taşıyan sinyallerin analizi ile gerçekleştirilir. Eş-eksenli dedektörler için Ge kristalinde oluşan etkileşmelerin pozisyon bilgileri çok zor hesaplanmaktadır fakat etkileşmelerin radyal pozisyon bilgileri, darbe (sinyal) yapılarından basit bir formül ile elde edilebilir. [41]. Daha fazla bilgi için ise, elektriksel olarak parçalı (segmentli) dedektörler kullanılmalıdır.

Darbe biçim analizinde, dedektörde meydana gelen her bir etkileşmede, bırakılan enerji ile orantılı bir sinyal oluşur. Bu sinyalin olduğu parçanın komşu parçalarında da çeşitli sinyaller oluşur. Etkileşmenin gerçekleştiği parçadaki sinyale “net-yük (net-charge)”, denir ve akımın integrasyonu ile kaybolmaz. Komşu parçalarda oluşan sinyaller ise “geçici (transient)” sinyaller olup, akım integrali ile kaybolurlar. İşte sinyaller arasındaki bu farklar kullanılarak etkileşmenin olduğu pozisyon tayin edilebilir [22].



Şekil 2.10: 6 kat çok parçalı bir Ge dedektöründe meydana gelen etkileşimde 4. parçada fotonun tamamının absorblanması ile 4. parça ve komşu parçalarda meydana gelen sinyallerin gösterimi.

Şekil 2.10 'da 6 kat parçalı dedektör göz önüne alınmıştır. Etkileşmenin gerçekleştiği ve fotonun tüm enerjisinin absorblandığı yer 4. parçadır. Bununla birlikte 3. ve 5. Parçalarda da geçici sinyaller oluşmuştur. 3. parçada oluşan sinyalin genliğinin 5. parçada oluşan sinyal genliğinden daha büyük olmasının sebebi ise 4. parçada gerçekleşen etkileşmenin pozisyonunun 3. parçaya daha yakın olmasıdır. Bu yöntem MINIBALL dedektörler diziminde etkileşmelerin azimuthal koordinatlarının belirlenmesi için kullanılmaktadır [42]. İz sürme algoritmasının uygulanabilmesi için net pozisyon bilgisine ihtiyaç vardır. Bu nedenle kullanılan bu yöntemlerin geliştirilerek daha gerçekçi yaklaşımlar kullanılmalı, her bir parçaya ait sinyalin dijitalasyonu, “transient” ve “net-charge” yük sinyallerinin, referans sinyali ile karşılaştırılması gerekmektedir.

2.5. AGATA PROJESİ

AGATA projesinin amacı, γ -ışını iz sürme tekniği ve darbe biçim analizi algoritmasının kullanılması ile HPGe dedektörlerinin geliştirilmesidir. Bu çeşit dizimler, radyoaktif iyon hüzmeleri ve yüksek şiddetli kararlı hüzmeler ile yapılması planlanan çalışmalar için uygundur. AGATA diziminin başlıca özellikleri aşağıdaki gibidir:

- $M_\gamma = 1$ için verimin 40%' dan daha fazla, $M_\gamma = 30$ için verimin 25 %'ten daha fazladır.
- P/T oranının 60% civarındadır.
- Yüksek γ -çokluklu (multiplicity) olaylarda, çoklu vuruş olasılığı minimize edilebilir.
- Tekli etkileşmeler için pozisyon çözünürlüğünün FWHM değeri 5mm'den daha iyidir.
- Yüksek şiddetli hüzmelerin kullanılması durumunda her bir Ge dedektörü için sayma hızı 50kHz'dir.
- Ancillary dedektörlerin kullanılabilmesi için dizimin içinde yeterli iç boşluk bulunmalıdır.

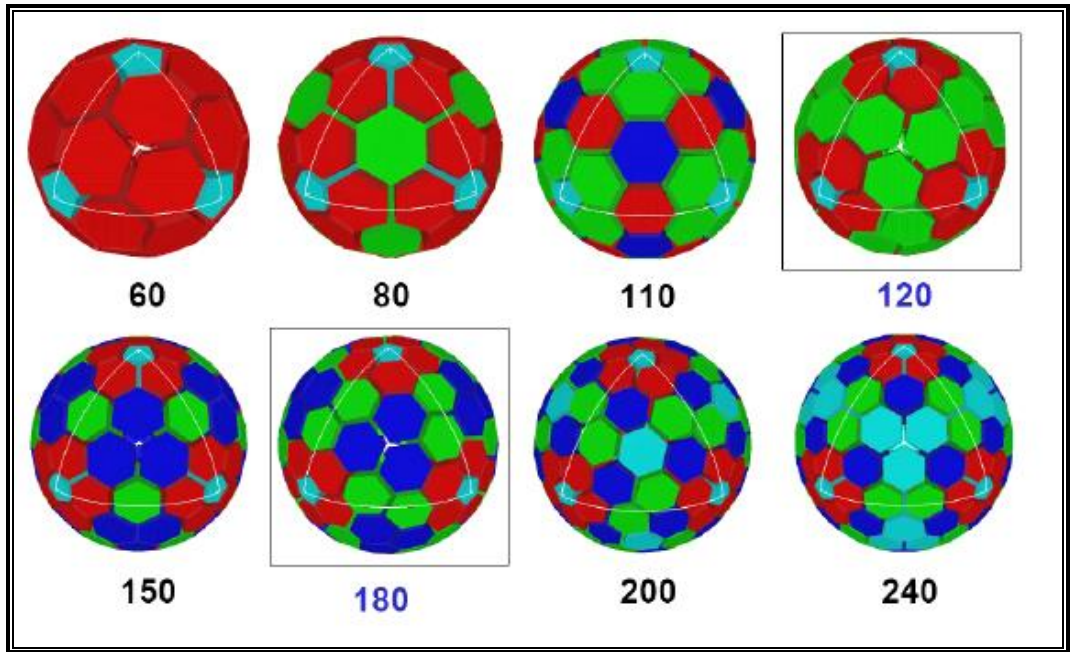
Bu özellikler ile birlikte iz sürme algoritmasının uygulanabilmesi için, AGATA diziminin;

- Yüksek enerjili γ - ışınları için yüksek verim ve
- Dedekte edilen fotonların polarizasyonlarının ölçülebilme kabiliyetlerine sahip olması gerekir [22].

AGATA dizimde öngörülen fotopik veriminin elde edilebilmesi için, 4π 'lik katı açığı görece şekilde tüm Ge dedektörlerinin hedef etrafında ve birbirlerine mümkün olduğunca yakın mesafede yerleştirilmeleri gerekir. Ge kristalleri 3'lü ya da 4'lü kümeler (clusterlar) oluştururlar ve aynı soğutucu yapı içerisine yerleştirilirler. Bununla birlikte bu yapının enkapsüle olabilmesi için ince bir alüminyum tabaka kullanılır.

Katı açının örtülmesinin maksimum olması, birkaç farklı kristal yapısı ile sağlanabilir. En mümkün olasılık, “platonic polyhedra” olarak bilinen düzenli çevrilmiş polyhedronların kullanılmasıdır. Küresel döşeme ile maksimum simetrinin düzenli hexagon yapısı oluşturabilmeleri için 20 eşit üçgen yapısı gözlenmelidir. Bu tip döşemeler her zaman $N_p=12$ pentagon ve $N_h=20$ hexagon yapısı ile sonlanır.

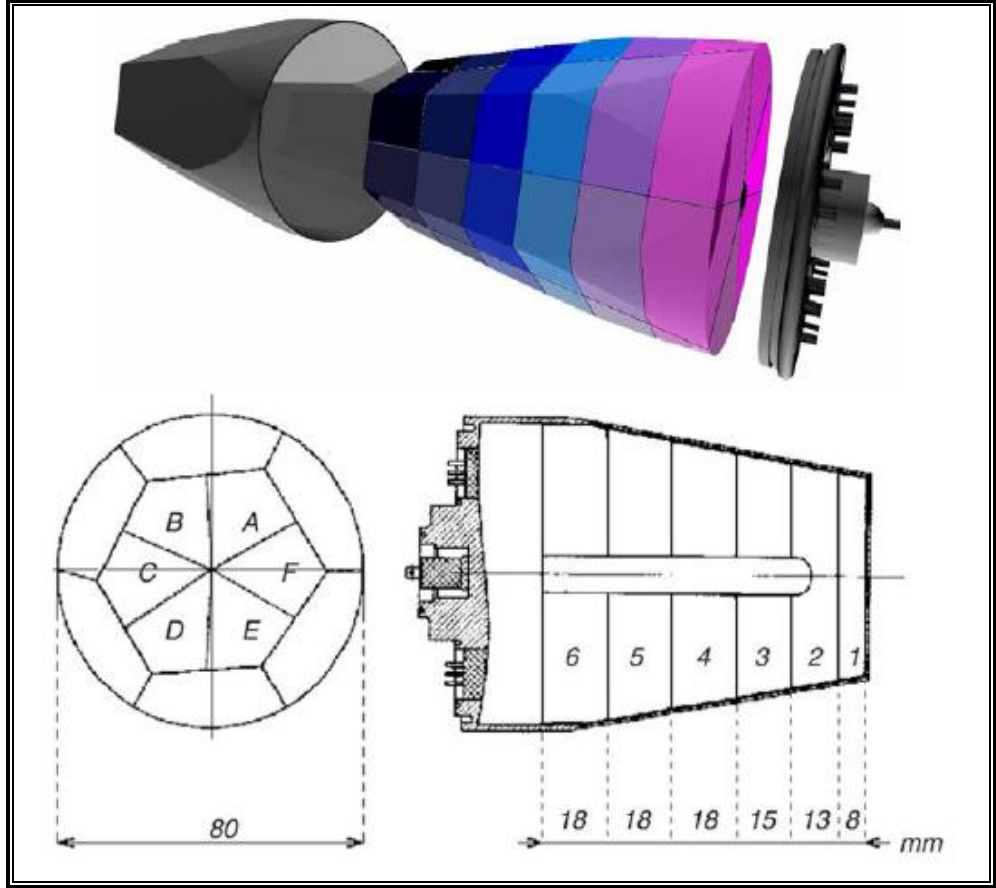
$n = [i^2 + 3j^2 - 4] / 8$, $i+j$ çift sayı, $2n$, i, j integer'dır. Bu formülüzasyona uygun olarak oluşturulan bazı konfigürasyonlar Şekil 2.11'te gösterilmiştir.



Şekil 2.11: Düzenli icosahedron yapılarla etiketlenmiş hexagonlardan oluşturulan küre konfigürasyonlarının gösterimi. Her bir konfigürasyondaki her bir renk ayrı bir kristal yapısını göstermektedir. Şekilde kare içine alınarak gösterilen $N_H=120$ ve $N_H=180$ konfigürasyonları ise AGATA dizimi için öngörülen mümkün konfigürasyonlardır.

AGATA dizim için Şekil 2.11'de gösterilen tüm konfigürasyonlar uygun değildir. Örneğin küçük (n) değerleri kullanılarak oluşturulan konfigürasyonların kullanımı, ancillary dedektörleri için gerekli iç hacime yer bırakmayacağı için uygun değildir. Bu nedenle büyük (n) değerleri ile oluşan konfigürasyonlar tercih edilmektedir.

Dedektörlerin yapısı ise Şekil 2.12' te gösterildiği üzere düzensiz hexagon prizmaları yapısından oluşmakta, 3'lü veya 4'lü dedektör kümeleri oluşturularak aynı soğutucu içine yerleştirilmektedir.



Şekil 2.12: Düzensiz hexagon prizma kristal yapılarının gösterimi.

$N_H = 120$ yada $N_H = 180$ olan konfigürasyonları AGATA dizimin kullanılabileceği en uygun durumlardır. $N_H = 180$ durumunda, 3 farklı kristal yapılarından oluşan üçlü kümeler kullanılır. $N_H = 120$ durumunda ise $N_H = 180$ konfigürasyonu ile aynı katı açığı görür fakat dördü kümeler kullanılır.

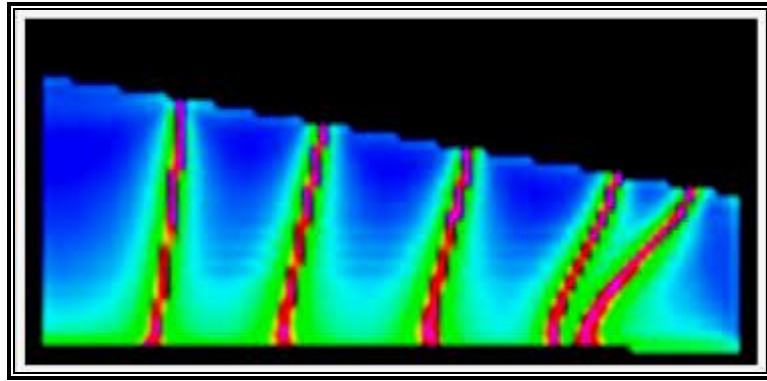
Yukarıda anlatılan AGATA dizim konfigürasyonları için GEANT 4 [4] temeline dayanan Monte Carlo Simülasyonları gerçekleştirilmiştir. 120 dedektör ile gerçekleştirilen 3 farklı konfigürasyon (A120, A120F ve A120C4) ve 180 dedektörle oluşturulan konfigürasyon ise A180'dir. Yapılan simülasyonun sonuçlarına göre AGATA, geniş hedef-dedektör uzaklığı, fotonların doğrultularının daha iyi belirlenmesi ve iz-sürme algoritmasının daha uygulanabilir olması açılarından A180 konfigürasyonunun kullanılmasına karar vermiştir.

2.5.1 Agata Dedektörü

Bir önceki bölümde de anlatıldığı gibi AGATA dizim, düzensiz hexagonal prizmalarla meydana gelen polyhedron kristal yapılarından oluşacaktır. Bu yapı, “hexagonal” dedektörler olarak adlandırılır. Bu yapının kullanılmasının en büyük önemi, tüm katı açının örtülmesini sağlamasıdır.

AGATA kristalleri 0,5 mm kalınlığında alüminyum ile kaplanacak, Ge yüzeyleri arasındaki iç boşluk 0,5 mm civarında olacaktır. Dedektör vakumu, soğutucu vakumundan ayrıdır ve böylece kapsüller birbirlerine oldukça yakın pozisyonda aynı soğutucu içinde bulunabileceklerdir.

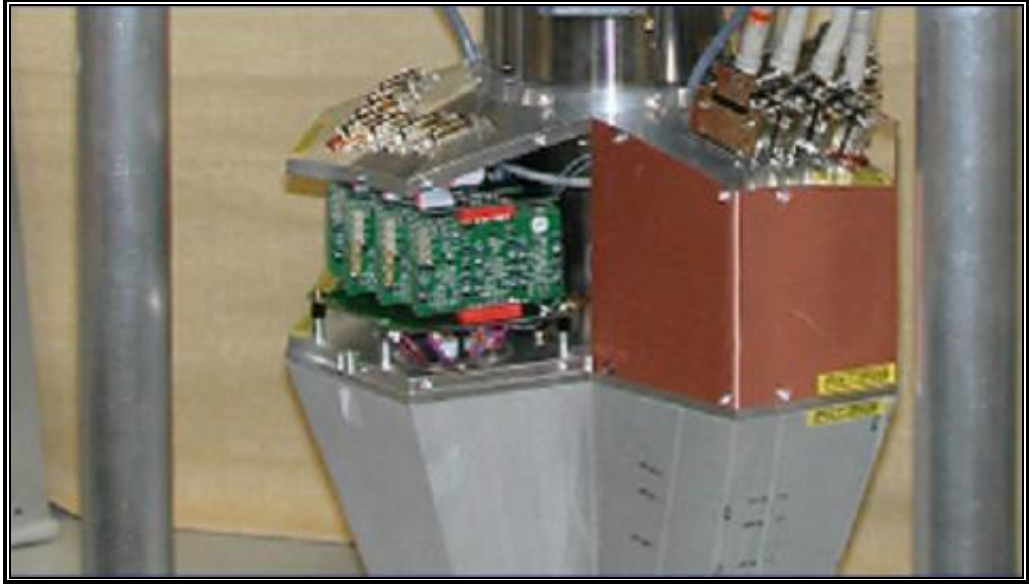
Darbe biçim analizi tekniğinin kullanılabilmesi için HPGe dedektörlerinin çok parçalı yapıda olmalarının gerekliliğini açıklamıştık. Bu nedenle ve en iyi elektrik alan [22] hesaplamalarının yapılabilmesi amacıyla AGATA diziminin 36 kat (fold) parçalı yapıdan oluşması uygun bulunmuştur. Bu yapı ayrıca birkaç mm’lik hassasiyetle her bir etkileşme noktasının pozisyonunun belirlenmesine de olanak sağlayacaktır. Hexagonal yapıda olan kristaller 6 bölme x 6 dilim olacak şekilde parçalıdır. Dilimlerin (slice) boyutları parça hacimlerinin etkin dengede olması amacı ile kristal eksenine boyunca, geometrik hacimden farklı seçilmiştir. Bu farklılık, Şekil 2.13’ te de gösterildiği gibi geometrik hacmin, dedektörün ön kısmında bulunan elektrik alanın yöneliminden kaynaklanmaktadır.



Şekil 2.13: Agata dedektörünün etkin parçalı yapısının gösterimi. Renkler, Agata prototip kristalinin pozisyon duyarlılığını göstermektedir. Ön kısımdaki parça yapısının hacminin daha geniş olması, elektrik alan yöneliminden kaynaklanmaktadır.

AGATA için öngörülen son geometriye uygun olarak, prototip dedektörler Canberra France'dan satın alınmıştır [43]. Böylece bu tip karmaşık olan bir yapının kalitesinin ve vereceği sonuçların test edilmesi amaçlanmaktadır.

Daha önce de anlatıldığı üzere AGATA dedektörleri, aynı soğutucuda bulunan 3'lü kümeler şeklinde gruplandırılacaklardır. Her bir soğutucu 111 kanal için (36 parça yapısı + her bir kristal merkez (kor)) önyükselteçisi içerecektir. Şekil 2.14' te AGATA simetrik 3'lü kümelenmelerinin aynı soğutucu içinde bulunma durumu gösterilmiştir.



Şekil 2.14: AGATA asimetrik 3'lü kümelenmelerinin aynı soğutucu içinde gösterimi.

2.5.2. Agata Elektronik Ve Veri Elde Etme

Elektronik ve veri elde etme sistemleri, γ -ışınlarının dedektörle etkileştikleri zaman oluşturdukları darbeleri, dijital darbe süreçleri ve veri doğrulama sistemlerinden geçirerek bilgisayarlara aktaran elektronik devre elemanlarıdır. Dedektörde meydana gelen darbenin, dedektör üzerine yerleştirilmiş olan ön yükselteç sayesinde genliği artırılır ancak ön yükselteçten çıkan darbe analog olduğu için bu verinin dijital hale dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu çevrimi ADC elektronik devreleri yapmaktadır.

ADC ile elde edilen dijital darbeler, her bir etkileşme noktasına karşılık gelen enerji, zaman ve üç boyutlu koordinatlar cinsinden data elde etme sistemlerine aktarılmaktadır.

DAQ' lar ise bilgisayarların anakartları üzerinde yardımcı kart görevi yapan ve sinyaller ile bilgisayar arasında bir arayüz görevi gören donanımlardır. Özellikle sinyallerin data verilerine çevrilmesinde çok büyük rol oynamaktadır. Sonuç olarak DAQ' lardan elde edilen veriler çeşitli analiz programları ile görüntülenebilmektedir.

Yeni tip dedektör sistemlerinde ise özellikle çok parça yapısı dolayısı ile dedektör sayısının artışıdan dolayı, sinyal aktarımı için oldukça geniş bant aralığına sahip fiber optik kablolar kullanılması planlanmaktadır. Agata tipi dedektörde ise her bir parça, ön ve arka elektronik devrelerinden oluşmaktadır ve her biri, darbeyi analog duruma çeviren önyükselteç ve bu analog darbeyi dijital hale çeviren FADC sistemlerini içermektedir.

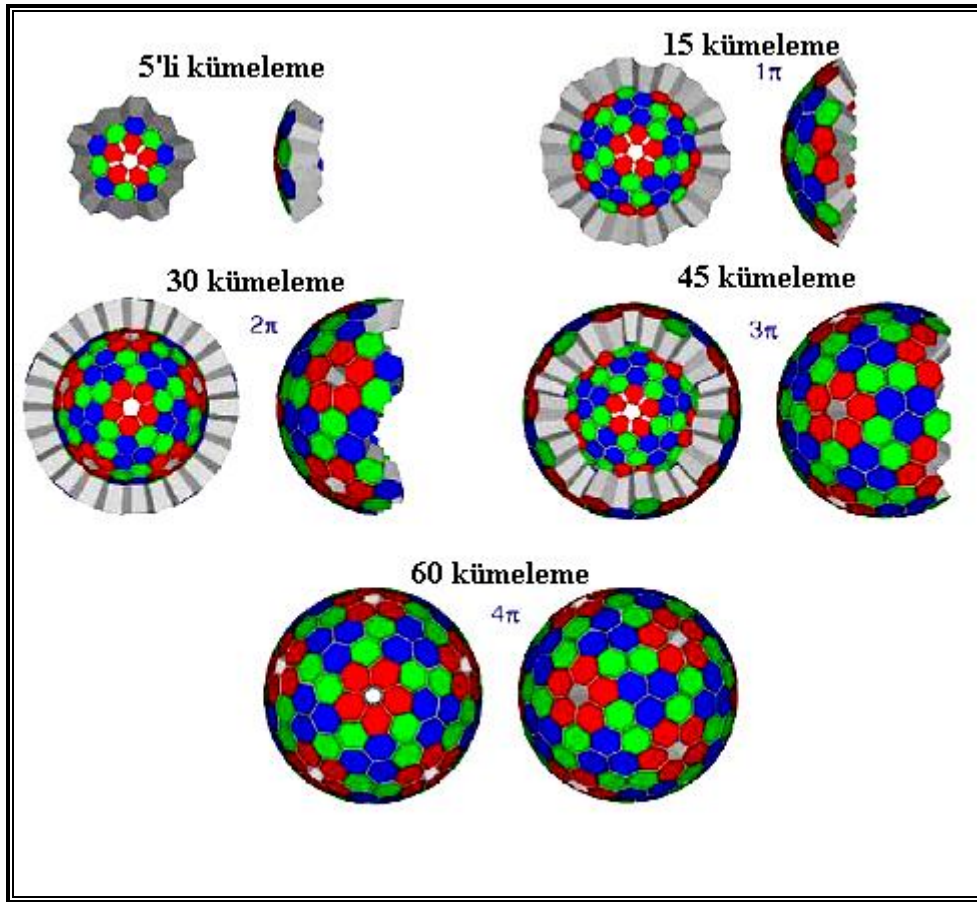
AGATA dedektörleri, tek bir etkileşme noktasının “enerji” ve “pozisyon” bilgilerinin belirlenebilmesi için “Darbe Biçim Analiz” ve ön yükselteçten gelen sinyallerin dijitalizasyonu ile “positon-sensitive” (pozisyon duyarlı) modda kullanılacaktır. Pozisyon bilgilerinin bozulmadan elde edilebilmeleri için sinyallerin en az 100MHz'lik frekansta, 14 bitlik ADC ile dijitalizasyonu sağlanmalıdır. AGATA için düşünülen (kristal/ parça) sayısı ve kristal başına 50kHz'lik sayma hızı ile çok yüksek data akışı (6600 segment x 200MB/sn) amaçlanmaktadır. Fakat bu kadar çok datanın depolanması çok zor olduğundan, yararlı fiziksel bilgilerin elde edilmesi için verilerin on-line analiz edilmesi gerekir. Bu noktada darbe biçim analizi ve iz-sürme algoritmaları online uygulanacaktır.

2.5.3 Agata Proje Ortaklığı

AGATA projesine şimdiye kadar 12 Avrupa ülkesi; Bulgaristan, Danimarka, Finlandiya, Fransa, Almanya, Macarista, İtalya, Polonya, Romanya, İsveç, Türkiye, İngiltere katılmış olup 2008 yılının sonunda Agata projesinin , 5 adet 3 kümeli Ge dedektörünü ihtiva eden bir alt durumu olan “AGATA Demonstrator” dizimi çalışır hale gelmiştir. AGATA Demonstrator' ünün ilk denemesi 2009 yılının ortalarında LNL-

INFN(Legnano National Laboratory) laboratuvarında yapılacak ve CLARA dedektörünün yerine monte edilerek yöne duyarlı bir yapı olan PRISMA spektrometresi ile birlikte kullanılacaktır.

Bu projede γ -ışını iz-sürme teknikleri ve on-line darbe biçim analizi teknikleri kullanılacaktır. Agata projesini şimdilik 5 adet 3 kümeli alt durumu çalışır hale gelmiştir fakat amaç 4π lik katı açığı görecektir şekilde tamamlanmasıdır. Tüm projenin tamamlanması 2018 yılı civarında olacaktır. Şekil 2.15’de Agata Dedektör projesinin öngörülen gelişimini göstermektedir.



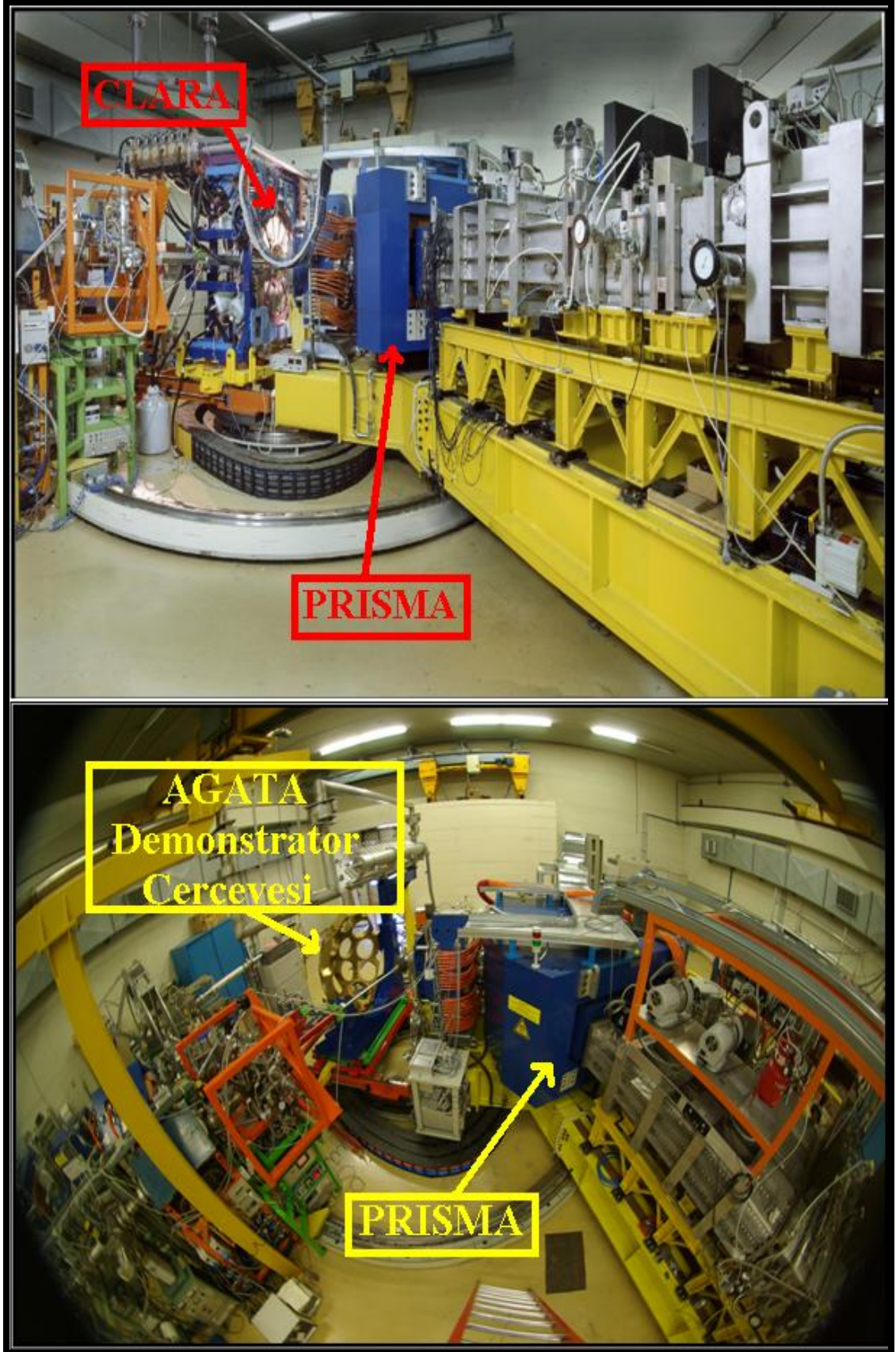
Şekil 2.15: Tümü Agata Dedektörü Projesinin öngörülen gelişiminin ve aşamalarının gösterimi.

3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında AGATA Demonstrator + PRISMA dedeksiyon sistemine ait gerçekçil simülasyon oluşturulmuş olup, CLARA+PRISMA [44,45] yapısının yerine AGATA Demonstrator + PRISMA kullanılması durumunda çoklu-nükleon transfer reaksiyonları için bu sistemin dedeksiyon verimine ait sonuçlar sunulmuştur.

Daha önce belirtildiği üzere, Agata projesinin amacı, yüksek fotopik verimi (40% den yüksek) ve P/T oranı (50% den yüksek) ile yüksek saflıklı HPGe dedektörlerinin geliştirilmesidir. Bu tip yüksek değerlere, fotonun dedektör kristalinde etkileşme pozisyonlarının belirlenmesini sağlayan pozisyon duyarlı HPGe dedektörlerinin kullanılmasıyla ulaşılabilir. Bu yöntem “*γ-ışını iz sürme tekniği*” olarak bilinir. Dedektörde meydana gelen etkileşme bilgisi, etkileşmenin meydana geldiği pozisyona ait sinyallerden elde edilir. Bu yöntem ise “*darbe biçim analizi*” olarak bilinir ve uygulanabilmesi için elektriksel olarak parçalı kristaller ile dijital elektronik kullanılması gereklidir.

AGATA projesinin başlangıç aşaması olan “*AGATA Demonstrator Dizim*” in kullanılmasıyla γ -ışını iz-sürme tekniği ve darbe biçim analizinin uygulanması gerçekleştirilecektir. AGATA Demonstrator dizim, Şekil 3.2 ‘de gösterildiği üzere 5 adet 3’lü kümelenmiş 15 kristalden oluşmaktadır. İlk uygulaması LNL-INFN laboratuvarında, CLARA [44] dizimin yerine monte edilerek PRISMA [45] manyetik spektrometresi ile birlikte yapılacaktır (Şekil 3.1).

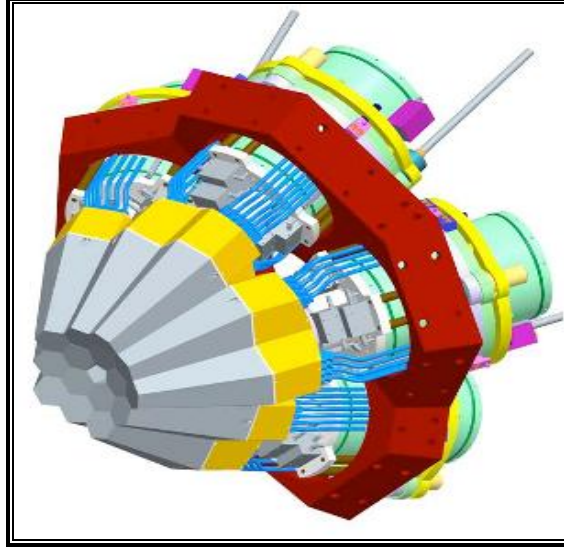


Şekil 3.1: CLARA+PRISMA (üstte) ile AGATA Demonstrator + PRISMA(altta) deneysel düzeneklerinin karşılaştırmalı gösterimi.

Bu tez çalışmasına konu olan yöne duyarlı dedektörlerin geliştirilmesi çalışmaları, AGATA Demonstrator + PRISMA yapılarının birlikte kullanımı ve γ -ışını iz sürme prensiplerinin bu düzenek için uygulanması ile gerçekleşmiştir.

3.1. AGATA DEMONSTRATOR DİZİMİ

Agata Demonstrator dizimi, AGATA dedektörünün performansının gösterilmesi amacıyla AGATA dedektörünün bir alt durumu olarak geliştirilmiştir. Şekil 3.2 'de de gösterildiği üzere 5 adet 3'lü kümelenmiş 15 kristalden oluşmaktadır.

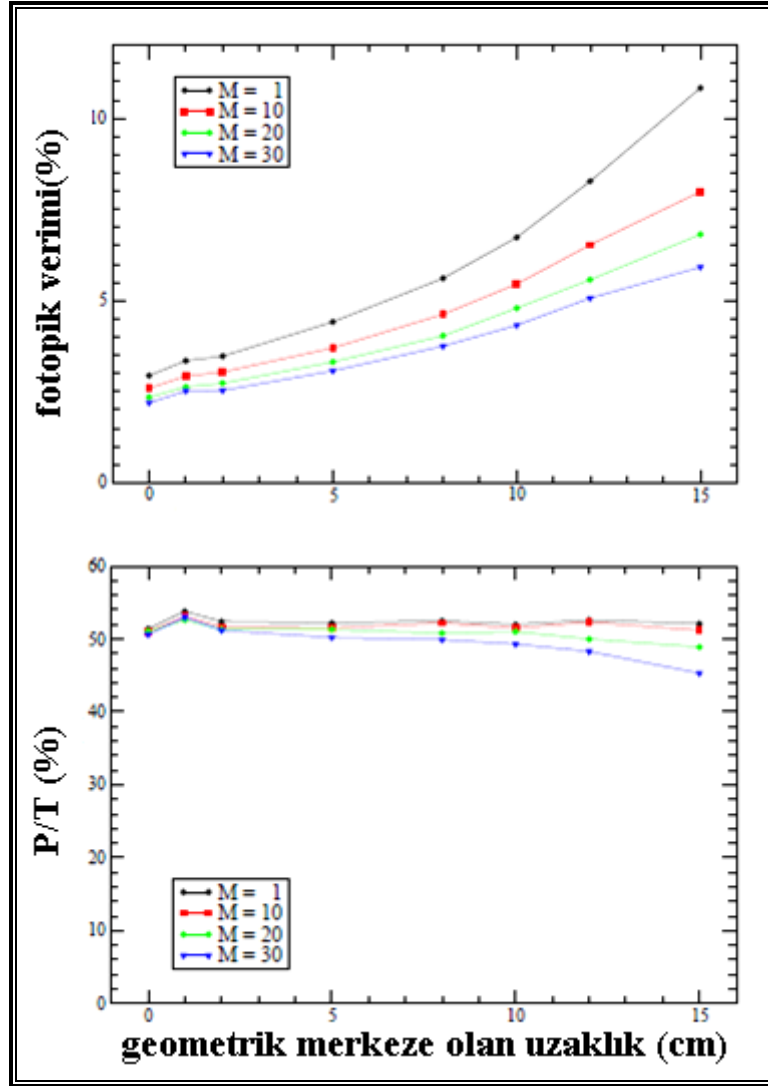


Şekil 3.2: 15 kristal ve 3'lü kümelenmiş AGATA Demonstrator prototipinin gösterimi.

Agata Demonstrator diziminin, CLARA dedektörü ile aynı pozisyona yerleştirilmesi durumu için yapılan Monte Carlo simülasyonları [46], 1 MeV enerjili tek foton için fotopik veriminin 3%, P/T oranının ise 50% civarında olacağını göstermiştir.

Tüm Agata Dedektör dizimi için hedef-dedektör uzaklığı 23,7 cm' dir. İlk aşamada Agata Demonstrator çalışmaları için de bu uzaklığın kullanılması öngörülmüştür fakat bu yapıda dedektörlerin önlerinde kolimatörlerin bulunmaması nedeni ile hedef-dedektör mesafesinin daha da azaltılarak dedeksiyon veriminin artırılması

amaçlanmıştır. Bu nedenle Agata Demonstrator'ün 23,7 cm' den 10 cm daha yakına yerleştirilmesi durumu için Monte Carlo simülasyonları gerçekleştirilmiş ve sonuçları Şekil 3.3 'de gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre demonstratörün 10cm daha yakında bulunması durumunda; fotopik verimi yaklaşık 2 kat artarken, P/T oranında belirgin bir değişiklik olmamıştır.



Şekil 3.3: Agata Demonstrator'e ait Ge dedektörlerinin hedefe 13.5 cm uzaklıkta yerleştirilmesi durumunda uzaklığa bağlı olarak fotopik veriminin (üstte) ve P/T(alta) oranının değişiminin gösterimi.

Sonuçlara göre, AGATA Demonstrator'ün fotopik verimi, hedef-dedektör uzaklığına bağlı olarak 3% - 7% aralığına değişmekte olup bu değerler mevcut dizimler ile

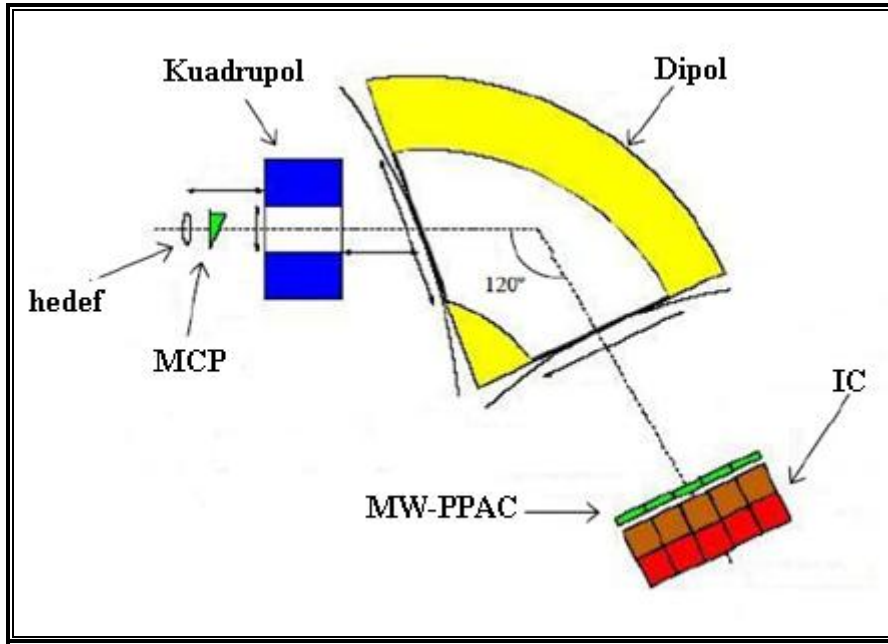
karşılaştırılabilir aralıktadır [46]. Bu büyük ilerleme, darbe biçim analizinin 5 mm'lik FWHM pozisyon çözünürlüğü sonucu çok daha iyi spektrum kalitesi elde edilmesi ile kaydedilecektir. Doppler düzeltmesinin uygulanabilmesi için ise yük ve kütle seçimi ile elde edilen tüm bilginin, PRISMA spektrometresi tarafından olay-olay sağlanması gerekmektedir [45]. Bu tez çalışmasının amacı, AGATA + PRISMA düzeneğinin doppler düzeltme kabiliyetinin belirlenmesidir.

3.2. PRISMA MANYETİK SPEKTROMETRESİ

Prisma spektrometresi, başlıca 5-20 MeV/A enerjilerdeki ağır iyonlarla gerçekleşen ve çoklu-nükleon transfer reaksiyonları ile oluşan çekirdeklerin, kimlik tayinlerinin gerçekleştirilmesi için büyük γ -dizim dedektörleri ile birlikte kullanılması amacıyla tasarlanmış olup ilk deney 2004 yılında LNL-INFN' de gerçekleşmiştir [47].

PRISMA spektrometresi, 80 msr'lık giriş katı açısına, $\pm 10\%$ 'luk momentum kabulüne, $\Delta A/A \approx 1/200$ kütle çözünürlüğüne, $\Delta Z/Z \approx 1/60$ atomik yük çözünürlüğüne, $\Delta E/E \approx 1/1000$ enerji çözünürlüğüne ve $-20^\circ \leq \theta \leq 130^\circ$ arasında geniş bir açısal menzili kapsayan reaksiyon sıyrılma açılarında hedef etrafında rotasyon opsiyonu özelliklerine sahiptir [47,48].

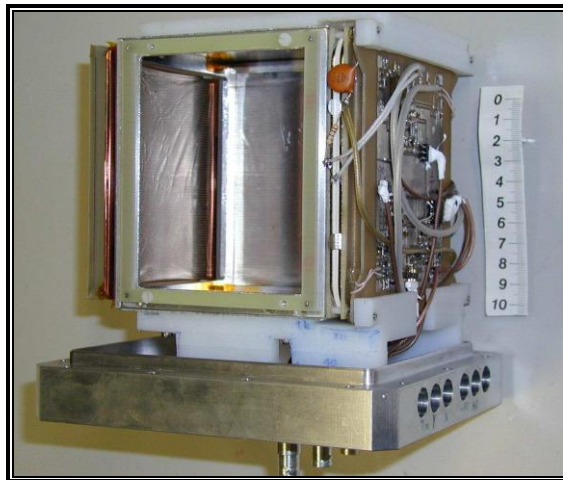
Çok geniş bir açısal kabule sahip olan PRISMA spektrometresi ; kuadropol mercek ve bükücü dipol magnet, mikro kanallı düzlemler (MCP, Micro-Channel Plates) esasına dayalı giriş dedektörü [49], odaksal düzlemin giriş kısmında bulunan MW-PPAC (Multi-Wire Parallel Plate Avalanche Counters) [47,50] ve iyon yörüngelerinin son bulunduğu odaksal düzlemin uç kısmında bulunan iyonizasyon odası (IC, Ionization Chamber) olmak üzere 5 yapıdan oluşmaktadır. Tüm dedektör bileşenleri şematik olarak Şekil 3.4'de gösterilmektedir. TOF ölçümleri için gerekli olan sinyaller MCP ve MW-PPAC dedektörlerinden alınmaktadır. Bu dedektörler ise 200 ile 400 ns arasında değişen oldukça dar bir gecikme zaman penceresi (delay time window) ve dolayısıyla TOF ölçümlerinde yüksek çözünürlük sağlamaktadırlar.



Şekil 3.4: PRISMA spektrometresini oluşturan bölümlerinin yerleşimi.

3.2.1 Giriş Dedektörü-MCP

İyonların yeniden yapılandırılması ve TOF ölçümleri için kullanılan MCP, $80 \times 100 \text{ mm}^2$ alanlı chevron konfigürasyonundaki MCP dedektör çifti ile X-Y yönlerinde pozisyon bilgisi için pozisyona duyarlı anotdan oluşmaktadır (Şekil 3.5). Hedeften 25cm uzağa, manyetik kuadrupol'den önce yerleştirilmiştir.



Şekil 3.5: MCP giriş dedektörünün görünüşü.

Dedektörün şematik görünümü Şekil 3.5’de verilmektedir. Bu şekle göre, dedektörün iç kısmı optiksel eksene göre 45° eğilmiş metal kafes içine yerleştirilmiştir. Bu kafesin sadece iki geçirgen yüzeyi iyonlar tarafından geçilmekte iken diğer dört yüzey, MCP iç yüzeyi ve üç adet paslanmaz çelik duvarlardan ibarettir. Dedeksiyonun ardından iyonlar ilk olarak $20 \mu\text{m}$ çapında ve 1 mm aralıklarla yerleştirilmiş altın kaplı tungsten tellerden oluşmuş giriş gridi barındıran geçirgen yüzeyi ve ardından iç grid, -2300 V bias voltajda $20 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ kalınlığındaki karbon foil ve son olarak dış gridi içeren diğer geçirgen yüzeyi geçerler. Karbon foilde üretilen ikincil elektronlar iç grid tarafından 300 eV ’a kadar MCP çiftine doğru hızlandırılırlar. Elektronların pozisyonları, MCP yüzeylerine olan yolculukları boyunca MCP yüzeyleri ile foil arasındaki yarı mesafede bulunan dıştaki bobin tarafından sağlanan manyetik alan ile muhafaza edilir. Daha sonra, her bir iyon tarafından üretilen bu ikincil elektronlar bir elektrik impulsunun veri olarak okunduğu (read-out) pozisyona duyarlı anota doğru yönlendirilirler.

MCP anot read-outu $100 \mu\text{m}$ altın kaplı tungsten telden yapılmış iki adet dikey geciktiriciden (delay line) oluşur. Geciktiricinin herhangi bir yerinde ortaya çıkan bir sinyal geciktiricinin bir ucuna doğru ilerler ve bu uca varış zamanı MCP çıkışından gelen hızlı zaman sinyali ile karşılaştırılır. Pozisyon tespiti, pozisyona duyarlı anottan gelen delay line sinyali ve MCP çıkış yüzeyinden gelen hızlı sinyal arasındaki zaman farkı ölçülerek yapılır. Hızlı zaman sinyali aynı zamanda, MCP ve MW-PPAC dedektörleri arasında yapılan TOF ölçümleri için başlangıç (START) sinyali olarak kullanılır. MCP dedektörünün intrinsic zaman çözünürlüğü $250\text{-}300 \text{ ps}$, X ve Y koordinatlarındaki çözünürlük 1mm ’den daha iyi ve ağır iyonlar için dedeksiyon verimi yaklaşık olarak $\%100$ ’dür .

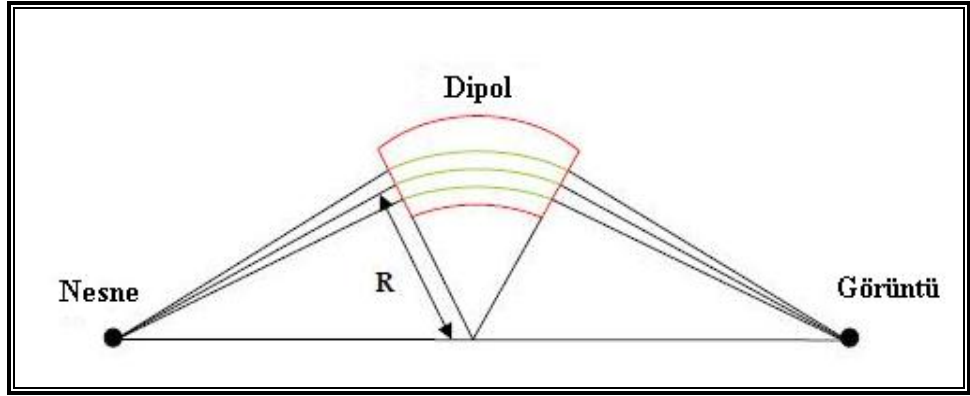
3.2.2 Kuadrupol Mercek

PRISMA’nın kuadrupol merceği, iyonları düşey yönde odaklamak için kullanılır. Kuadrupol, 30cm ’lik çapa ve 50cm ’lik uzunluğa sahiptir. Dipole’den 60cm öne yerleştirilmiştir MCP dedektör pozisyonundan ise 25 cm uzaklığa yerleştirilmiştir. Merceğin açıklık çapı, $d=32 \text{ cm}$ iken etkin uzunluğu, $l_{\text{eff}}=50 \text{ cm}$ ’dir. Bu değerler

karşılaştırılırsa, d/l_{eff} oranı 1.5 civarında olduğu bulunur. Bu ise mıknatısın iç alanı yanında saçak alanının yeterince küçük olmasını sağlayan limit değerine eşittir [47,51].

3.2.3 Manyetik Dipol

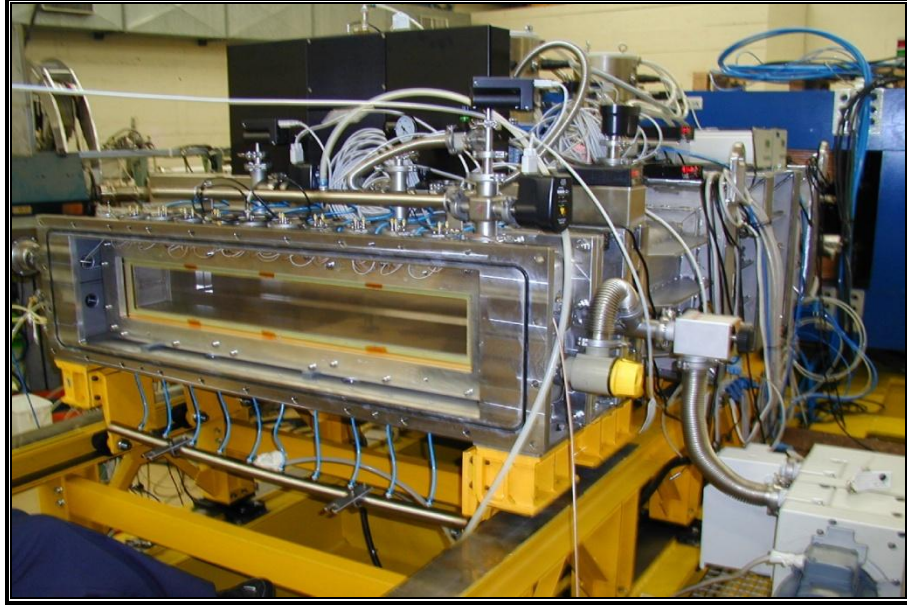
Dipol mıknatıs, iyonların akışı doğrultusunda, kuadrupolden 60 cm uzaklıkta yerleştirilmiştir. Dipolün başlıca görevi iyon yörüngelerini manyetik sertliklerine göre odaksal düzleme doğru saptırmaktır. Mıknatısın 1.2 m'lik ρ maksimum bükülme yarıçapı ve 1.0 Tesla değerindeki B maksimum manyetik alan değerine sahiptir. Merkezci yörünge için bükülme açısı 60° , kutup boşluğu 20 cm ve giriş ve çıkış genişlikleri 1 m'dir.



Şekil 3.6: Dipol magnetin iyonları odaklayarak saptırmasının gösterimi.

3.2.4 MW-PPAC Focal Plane Dedektörü

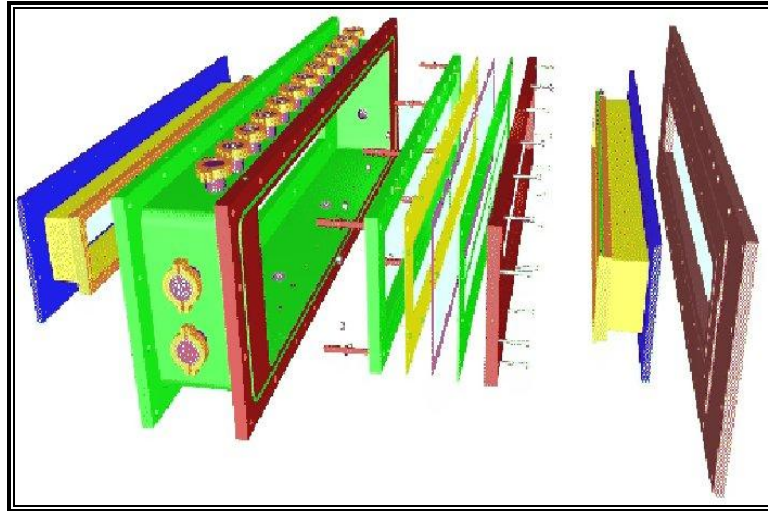
Dipol çıkışından 323 cm uzaklıkta yerleştirilen bir çeşit gazlı-orantılı sayaç olan MW-PPAC dedektörü, odaksal düzlemde toplam aktif alanı $100 \times 13 \text{ cm}^2$ olan üçlü elektrot yapısından oluşmuştur. Bu üçlü elektrot yapısı boyunca iyonlar sırasıyla X tel düzlemini, merkezci katodu ve Y tel düzlemini geçerler. Elektrotlar G-10 çerçevesine monte edilip ve Şekil 3.7'de gösterilen paslanmaz çelikten yapılmış vakum kabına sabitleştirilmiştir. Çelik kap, anot tel düzlemlerinden 3 mm uzaklıktaki $100 \times 13 \text{ cm}^2$ alanında iki geniş Mylar pencere ile kapatılmıştır.



Şekil 3.7: Vakum kabının içine monte yerleştirilmiş MW-PPAC dedektörü

Metalik çerçevelere yapıştırılmış 1.5 μm kalınlığında Mylar foillerden yapılmış pencereler, 3.5 mm aralıklı 100 μm kalınlığında paslanmaz çelik teller ile desteklenmişlerdir. Pencereler, MW-PPAC dedektörünün gaz dolu hacmini spektrometrenin geri kalan kısmından ayırarak mümkün gaz kirliliğini önlemektedirler.

Üçlü katot yapının sökülmüş görünümü Şekil 3.8’ de verilmektedir. X pozisyona duyarlı anot her biri, 20 μm çapında ve 1 mm aralıklarla 100 adet altın kaplamalı tungsten telden oluşan 10 bölüme ayrılmıştır.



Şekil 3.8: MW-PPAC dedektörünün üçlü katot yapısının sökülmüş görünüşü.

Katot da X tel düzlemi gibi, her biri 20 μm çapında ve 0.3 mm aralıklarla 330 adet altın kaplamalı tungsten telden oluşan 10 bölüme ayrılmıştır. Hızlı zaman sinyalleri her bölümden bağımsız olarak sağlanmakta ve bu sinyaller MCP ve MW-PPAC arasında gerçekleştirilen TOF ölçümleri için STOP sinyali olarak kullanılmaktadır.

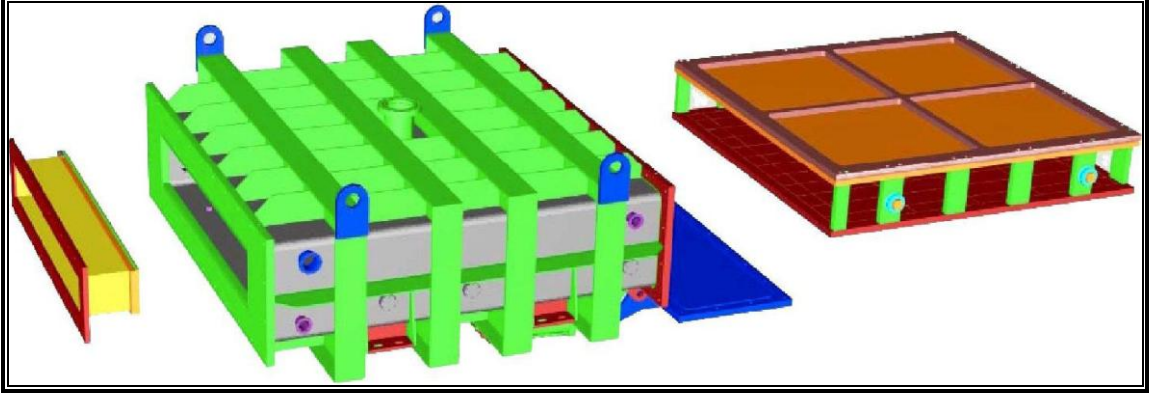
Y pozisyona duyarlı anot, 20 μm çapında ve 2 mm aralıklarla 130 adet altın kaplamalı tungsten telden oluşmuştur.

MW-PPAC dedektöründen pozisyon bilgisi delay-line methodu kullanılarak sağlanır: Delay-line'nın herhangi bir yerinde ortaya çıkan sinyal uçlara doğru her iki yönde ilerler. Delay-line'in her iki ucuna ulaşan iki sinyal arasındaki gecikme farkı gelen iyonun pozisyonu ile orantılıdır.

3.2.5 İyonizasyon Odası

Çok parametrelili ve çok parçalı çarpaz alan iyonizasyon odası, PRISMA'nın odaksal düzleminde dedekte edilen iyonların enerji kaybı ve toplam enerjisini ölçmek üzere akış yönünde MW-PPAC dedektöründen 60 cm uzaklıkta yerleştirilmiştir. Dedektör sahip olduğu $110 \times 20 \times 110 \text{ cm}^3$ boyutlarıyla odaksal düzlemde geniş bir alanı kaplamaktadır.

IC, MW-PPAC'dan gelen tüm iyonların iyonizasyon odasının aktif alanına direkt olarak girebilmesini sağlayacak bir şekilde 10 parçaya ayrılmıştır. Her bir parça ΔE enerji kaybı sinyallerini bağımsız olarak veren $99 \times 265 \text{ mm}^2$ yüzey alanlı dört adet anota bölünmüştür. 50 mm uzunluğunda 28 adet pedi kapsayan 2 parça, aktif hacim içinde tüm enerjisini kaybetmeyip iyonizasyon odasını terk eden iyonlardan gelen sinyalleri red etmek üzere dedektörün iki yanına eklenmiştir. (Şekil 3.9).

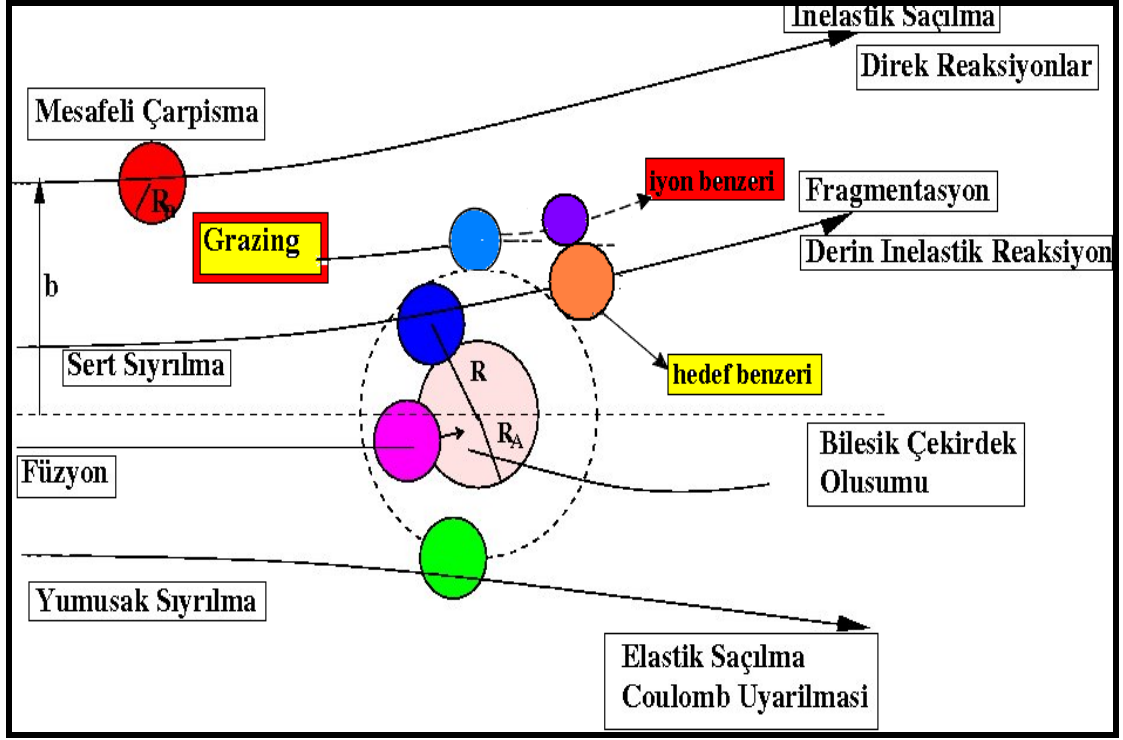


Şekil 3.9: IC dedektörünün şematik görünüşü.

1.5 μm kalınlığında mylar foilden yapılmış giriş penceresi paslanmaz çelik bir burun üzerine yapıştırılmış ve 100 μm çapında ve 1 mm aralıklarla yerleştirilen 1000 adet altın kaplamalı tungsten teller ile desteklenmiştir.

3.3. AĞIR İYONLAR İLE GERÇEKLEŞEN NÜKLEER REAKSİYONLAR

Nükleer spektroskopide, ağır iyonlarla gerçekleşen çoklu-nükleon transfer reaksiyonlarının kullanılması ile nötron-zengin ve $N=Z$ bölgesindeki çekirdek yapılarına ulaşılması gerçekleştirilmiştir. Bir nükleer reaksiyon; CM (center-of-mass) enerji, etkileşme parametresi (b), iyon hüzme çekirdeği ve hedef çekirdek ile belirlenir. Coulomb bariyeri üzerinde gerçekleşen 3 farklı tip nükleer reaksiyon vardır. Nükleer reaksiyonların çeşitliliği Şekil 3.10' da şematik olarak sunulmaktadır.



Şekil 3.10: Ağır iyon reaksiyonlarının çarpma parametresine göre değişiminin şematik gösterimi.

- En geniş çarpma parametreleri, mermi ve hedef çekirdeklerin nükleer dağılımlarının örtüşmediği çarpışmalarla ilgilidir. Bu “uzak çarpışmalar”da kütle değiş tokuşu yoktur ve elastik (Rutherford) saçılma ve inelastik (Coulomb) uyarılma gibi olayları uzun menzilli Coulomb kuvveti belirler [52,53].
- Mermi ve hedef çekirdekler birbirleri ile daha yakın temasa girdiklerinde, nükleer etkileşme baskın olmaya başlar. Bu “yumuşak sıyırılma çarpışmaları”nda, enerji ve bazı durumlarda kütle değiş tokuşu yapılacak ancak sistem kinetik enerji ve kütledeki orjinal asimetriyi korumaya devam edecektir. Bu tür reaksiyon mekanizmasına, inelastik saçılma ve direkt transfer reaksiyonları örnek olarak gösterilebilir.
- “Sert sıyırılma çarpışmaları” mermi çekirdeğin hedef çekirdek içine girerek etkileşme yapması sonucu meydana gelirler. Sistem daha sonra parçalanabilir ya da kısa süreliğine bileşik sistem halini alabilir. Derin inelastik reaksiyonlar ve

parçalanma gibi bu tür reaksiyonlarda reaksiyon süresi artacak ve önemli miktarda kütle ve/veya enerji transferi olacaktır. Ancak yayınlanan parçacıkların kütle ve/veya enerjisi yine de mermi çekirdeğin kütle ve/veya enerjisine karşılık gelecektir.

- Çok daha küçük çarpma parametrelerinde, belirli bir R mesafesindeki nükleer çekimin Coulomb ve merkezkaç itmeden daha kuvvetli olması sonucu mermi çekirdek hedef çekirdek ile termal dengede bir bileşik sistem oluşturmak üzere kaynaşma (füzyon) yapabilir. R, mermi ve hedef çekirdek arasındaki ayrılma mesafesidir.

Ürün çekirdeklerin uyarılma enerjisinin 20MeV'den daha küçük ve kesikli enerji seviyelerinde bulunması durumunda ise çoklu-nükleon transfer reaksiyonları oluşur [54,55,56]. Bu reaksiyonda, geri saçılan iyon hüzmesi benzeri reaksiyon ürünlerinin, açısal dağılım ve uyarılma fonksiyonlarına göre “sıyrılmalı temas” (grazing contact) mekanizması ile oluşurlar [57,58]. Bu tür bir sıyrılmalı temas reaksiyonunda, mermi çekirdeğin, Coulomb engeli tarafından saptırılmasına rağmen, hedef çekirdeğin nükleer bağlanma bölgesine girmesi ve sürtünme ile uyarılan çekirdekler arasındaki temas bölgesiyle birlikte hedef çekirdeğin yüzeyi boyunca hareket etmesi nedeniyle bileşik çekirdek oluşumu engellenmiş olur. Sistem, itici Coulomb ve merkezkaç kuvvetler nükleer bağlanma kuvvetini aştığı için, yarım ya da daha az bir dönme hareketinin ardından ikiye ayrılır. Ayrılma moduna bağlı olarak, böyle bir sıyrılmalı temas mekanizması, nükleon transferi, inelastik saçılma veya mermi çekirdeğin parçalanması (break up) ile sonuçlanabilir. Coulomb engelinin üzerindeki enerjilerde, bu tür sıyrılmalı olayları geometrik tepkime kesitinin önemli bir kısmını oluşturacak şekilde ortaya çıkar [47].

Çoklu-nükleon transfer reaksiyon deneylerinde tepkime kesitinin belirlenebilmesi için açı bilinmelidir. En yüksek olasılıkla iyonların dedeksiyonu için PRISMA gibi bir spektrometrenin bu açıda bulunması gerekir. Laboratuvar sistemindeki bu açığa “*Sıyırma Açısı (Grazing Angle)*” denir. Bu açı, nükleer reaksiyon ürünlerinin doğrultusunu gösterir. 2 çekirdeğin birbirine sadece dokunduğu durumun varsayımında d ; en yakın uzaklık değeri,

$$d = \left(\frac{Z_A Z_X e^2}{4\pi\epsilon_0 E_k} \right) \cdot \left(1 + \text{csc} \frac{\theta_g}{2} \right) \quad (3.4)$$

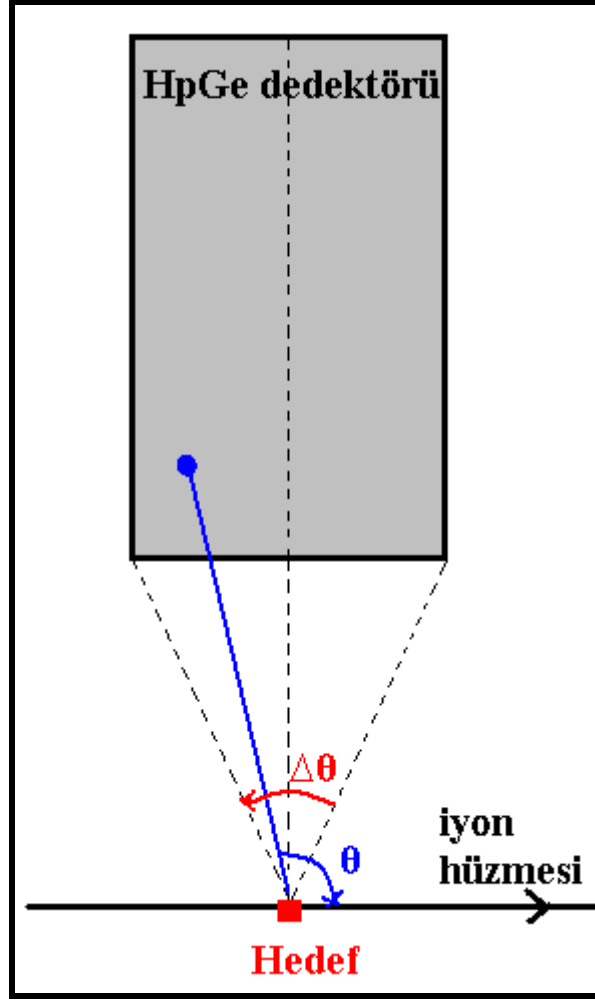
ile hesaplanır. Bu değer aynı zamanda çekirdeklerin çaplarının toplamına eşittir.

Bu tez çalışmasında, AGATA Demonstrator + PRISMA düzeneği için çoklu-nükleon transfer reaksiyonlarının kullanılarak CLARA + PRISMA düzeneği ile ulaşılmayan nötron-zengin yapılara ulaşılması öngörülen çoklu-nükleon saçılma reaksiyonlarına yönelik simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

3.4 DOPPLER KAYMASI VE DOPPLER DÜZELTMESİ

Bir nükleer reaksiyondan sonra yayınlanan tüm radyoaktif parçacıklara ait enerji ve hız bilgileri dedektörler ile belirlenir. Bu alışmada AGATA Demonstrator+PRISMA deneysel düzeneği için gerçekleşmesi öngörülen çoklu-nükleon transfer reaksiyonları göz önüne alınmıştır.

şekil 3.10'da da gösterildiği üzere bir çoklu-nükleon transfer reaksiyonunda iyon hüzmesi belli bir hız ile hedef çekirdeğe çarpar. Bu çekirdekler çok kısa bir süre için bileşik çekirdek gibi davranırlar. Bu durumda iki çekirdek arasında bir kaç nükleon transferi olur ve reaksiyon sonrasında hüzme benzeri olan *rn çekirdek* ve hedef benzeri olan *partner çekirdekler* reaksiyon kinematiğine uygun olarak, yüksek hız değerlerinde iyon hüzmesi doğrultusundan saçılma açıları ile yayınlanırlar. Uyarılmış hale geçen bu çekirdekler saçılma esnasında, uyarılma enerjilerine bağlı olarak, belli doğrultu ve yüksek hızlarda γ -ışınları yayınlırlar. Reaksiyon sonrasında yayınlanan ürün çekirdeklerin dedeksiyonu PRISMA spektrometresi ile yapılırken, bu çekirdeklerden yayınlanan γ -ışınları ise AGATA Demonstrator'n Ge kristalleri tarafından gerçekleştirilir.



Şekil 3.11: Reaksiyon sonrasında doppler kaymasının oluşumunun gösterimi.

Fakat, yüksek hızlarda yayınlanan çekirdeklerden salınan γ -ışınlarının dedektör kristalleri ile ilk etkileşme pozisyonlarında, yayınlanma doğrultuları ve hızlarından kaynaklanan birkaç derecelik bir kayma meydana gelir ki bu durum “*Doppler Kayması*” olarak bilinir (Şekil 3.11) ve tüm nükleer reaksiyonlar sonrasında oluşması kaçınılmazdır. Bu nedenle nükleer spektroskopide bu kaymanın düzeltilmesi uygulaması, “*Doppler Düzeltmesi*” ile yapılır. Böylece algılanan parçacıkların dedektör kristali ile ilk etkileşme noktası yüksek doğrulukta belirlenebilir.

$$E_Y^{CM} = E_Y^{Lab} \frac{1 - \beta(\cos\theta)}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (3.6)$$

Burada, E_{γ}^{cm} intrinsic γ -ışını enerjisi, E_{γ} ; laboratuvar sisteminde dedektör tarafından algılanan γ -ışını enerjisi, β ; reaksiyon sonrasında yayınlanan ürün çekirdeğin hızı ve θ ; laboratuvar sisteminde ürün çekirdeğin doğrultusu ile ürün çekirdekten yayınlanan γ -ışınının arasındaki açıdır. Yukarıdaki formülde bulunan herbir parametrenin doppler belirsizliğine etkisi;

$$(\Delta E_{\gamma}^{CM})^2 = \left(\frac{\partial E_{\gamma}^{CM}}{\partial \theta}\right)^2 (\Delta \theta)^2 + \left(\frac{\partial E_{\gamma}^{CM}}{\partial \beta}\right)^2 (\Delta \beta)^2 + \left(\frac{\partial E_{\gamma}^{CM}}{\partial E_{\gamma}}\right)^2 (\Delta E_{\gamma})^2 \quad (3.7)$$

ile verilmektedir [35]. Bu yaklaşımda, $\Delta \beta$; hız değerindeki belirsizlik, $\Delta \theta$; yayınlanan iyonun doğrultusundaki belirsizlik ve ΔE_{γ} ; ise dedektörün intrinsic enerji çözünürlüğüdür.

Prensipte, ürün çekirdekten yayınlanan γ -ışınları için doppler kayması gerçekleşmesinin 3 ana sebebi vardır. Bunlar; iç (intrinsic) dedektör enerji çözünürlüğü, γ -ışınına ait hız vektöründeki hata ve γ -ışını doğrultusunda ki belirsizlik'tir.

Tez çalışmasının önceki bölümlerinde de önemle vurgulandığı üzere, bu çalışmanın amacı dedekte edilen parçacıkların enerji ve pozisyon bilgilerinin yüksek duyarlılıkla belirlenmesidir. Bu nedenle yüksek verim, yüksek pozisyon çözünürlüğü ve yüksek cevap fonksiyonu özelliklerine sahip ayrıca pozisyon duyarlı bir yapı olan AGATA Demonstrator + PRISMA dedeksiyon sistemi kullanılmaktadır.

Tez çalışmasına konu edilen ve bu dedeksiyon sistemi için oluşturulan gerçekçi Monte Carlo simülasyonları ile AGATA Demonstrator + PRISMA yapısının Doppler Düzeltme kabiliyetinin mükemmel olduğu, dedekte edilen γ -ışınlarının dedektör kristali ile ilk etkileşme noktalarının yüksek doğrulukta belirlenebilmesi ile gösterilmiştir.

4. BULGULAR

Bu tez çalışması kapsamında, AGATA Demonstrator + PRISMA deneysel düzeneğinin doppler düzeltme kabiliyetinin gösterilmesi amacı ile gerçekleştirilmesi öngörülen çoklu-nükleon transfer reaksiyonları için *Gerçekçil Monte Carlo Simülasyon* [35, 59] kodlarının oluşturulması aşamaları ve simülasyon sonuçları sunulmaktadır. AGATA Demonstrator ve PRISMA simülasyonları aynı olay dosyası (event file) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Agata simülasyonundan oluşan çıkış dosyası (output) ”mgt” iz sürme kodu için giriş dosyası (input) olarak kullanılmaktadır [60]. mgt programı ve PRISMA simülasyonu ile oluşan dosyalar “CMERGE” kodu kullanılarak kombine edilir [61]. Sonuç olarak üretilen dosya, iyon ve gama ışınlarına ait pozisyon ve enerji bilgilerini eş zamanlı olarak içerir ve datanın analizini mümkün kılar.

Prensipte, AGATA Demonstrator + PRISMA deneysel düzeneği kullanılarak yapılması öngörülen çoklu-nükleon transfer reaksiyonlarından iyonların açısız dağılımlarının ve tepkime kesitlerinin kesin olarak bilinmemesi sebebi ile gerçekçil simülasyonlarının oluşturulması oldukça karmaşıktır. Bu nedenle, tez çalışmasında oluşturulan simülasyon kodlarına, belirtilen deney düzeneği için en basit yaklaşımlar kullanılarak başlanmış ve aşama aşama gerçekçil veriler eklenerek gerçeğe en yakın sonuçlara ulaşılmıştır.

Tez çalışmasının bu bölümünde PRISMA manyetik spektrometresinin çalışması ve AGATA Demonstrator ile ekileşimi incelenmiş olup, AGATA Demonstrator + PRISMA düzeneği için oluşturulan simülasyon kodları ve gerçekçil olayların, “*OLAY ÜRETECİ (event generator)*” üretilme aşamaları ve sonuçlarına ayrıntılı olarak yer verilmiştir.

4.1 PRISMA'YA GİRİŞ

PRISMA deneysel verisinin analiz işlemi ile spektrometre tarafından sağlanan pozisyon, zaman (TOF) ve enerji bilgileri kullanılarak, iyonların yörünge yeniden yapılandırılması, Z ve A numaralarının tespiti; AGATA Demonstrator verisinin analiz işlemi ile de iyon hız değerlerinin belirlenmesini amaçlanmaktadır. Böylece spektrometrede algılanan reaksiyon ürün çekirdeklerinden yayınlanan gama ışınları için doppler düzeltmesi, ürün çekirdeklerin yörünge yeniden yapılandırması ile elde edilen hız vektörü bilgisi alınarak olay-olay yapılabilecektir. PRISMA manyetik spektrometresinin yapısı, bölüm 3'teki Şekil 3.4'te şematik olarak verilmiştir.

PRISMA, her bir iyon için;

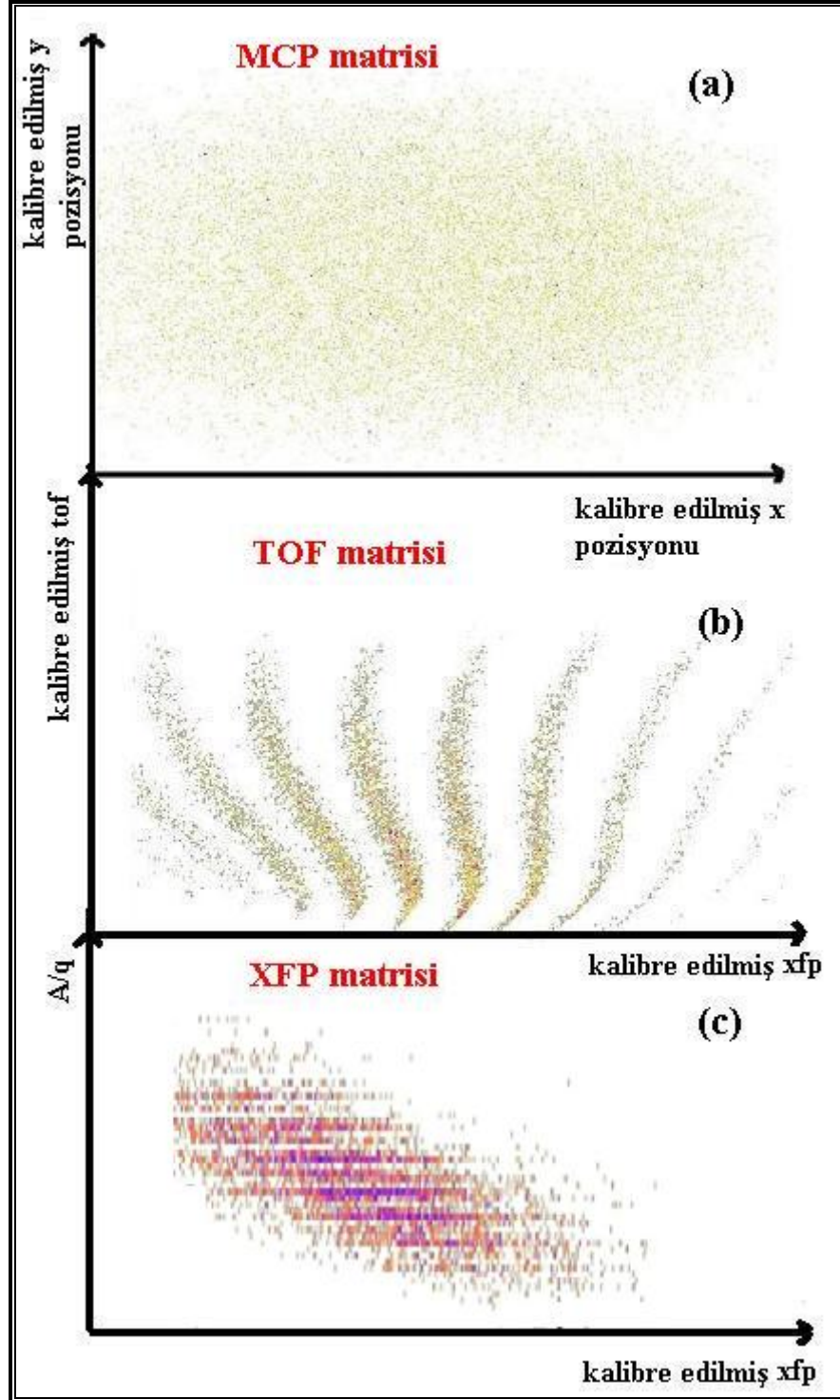
- (MCP) giriş dedektöründen gelen iyon pozisyon koordinatları (Şekil 3.5),
- (MW-PPAC) focal plane dedektöründen gelen iyon pozisyon koordinatları (Şekil 3.7),
- MCP(başlangıç sinyali) ve MW-PPAC(bitiş sinyali) arasındaki zamanlama (TOF) bilgisi,
- IC dedektörünün her bir bölümünde bırakılan enerji bilgisi (Şekil 3.9),

olan dedeksiyon sistemine ait karakteristik parametreleri kullanılarak;

- ❖ İyon yörüngelerinin uzunluğu,
- ❖ Dipol mavnette bulunan iyon yörüngelerinin eğrilik yarıçapı,
- ❖ IC'de bırakılan toplam enerji ve
- ❖ IC'de bulunan iyonların erimi

bilgilerini üretir. PRISMA veri analizinin amacı, iyonlarının kimliklerinin (Z), kütlelerinin (m) ve atom numaralarının (A) belirlenmesidir. İyonların kimlik sinyal bilgileri IC'de algılanırken, kütleleri o anda belirlenemez. Bu yüzden MCP, PPAC ve IC dedektörlerinden sağlanan bilgilerle iyon yörüngelerinin yeniden yapılandırılması gerekir. Bu işlemden sonra ise reaksiyon ürünlerine ait fiziksel bilgiler kullanılarak, dedektör ile etkileşme pozisyonları ve tepkime kesitleri belirlenebilir.

Bu tez çalışmasında, Prisma verisinin yukarıda belirtilen aşamalarda analizinin gerçekleştirilebilmesi amacı ile C++ programlama dili ile yazılan ve geliştirilen “*Prisma-Simulation*” [62] programı kullanılmıştır.



Şekil 4.1: Yukarıdan aşağıya doğru sırası ile MCP, TOF ve XFP matrislerinin ^{90}Zr iyon hüzmesi için gösterimi.

Yukarıdaki matrislerin oluşturulmasından sonra, AGATA Demonstrator + PRISMA deneysel düzeneğinin doppler düzeltme performansının belirlenmesi amacı ile ilk aşamada her bir ^{90}Zr iyonunun 1MeV enerjili fotonlar yayınladıkları varsayılarak simülasyon gerçekleştirilmiştir.

4.1.1. İyon Yörüngelerinin Yeniden Yapılandırılması

İyon yörüngelerinin yeniden yapılandırılması, iyonlar spektrometrenin girişinde bulunan MCP dedektörünü baştan sona geçtikten sonra, PRISMA'nın optik elemanları içinde iyon hareket yönlerinin belirlenmesidir. MCP tarafından belirlenen pozisyon bilgileri aynı zamanda iyonların kuadropol elemanına giriş pozisyon koordinatlarıdır. Kuadropol giriş pozisyonuna göre kuadropolde ilerleyen iyonlar üzerine etki eden kuvvetler aşağıdaki bağıntılar ile verilir [47]:

$$F_x \cong qv_z bx, F_y \cong -qv_z by \quad (4.1)$$

Burada, b manyetik alan gradyanıdır ($\approx \frac{B}{a}$, a: kuadropol yarıçapı). Böylece, manyetik alandan meydana gelen hareket denklemleri x ve y yönlerinde;

$$qv_z bx = m \frac{d^2x}{dt^2} = m \frac{d^2x}{dz^2} \left(\frac{dz}{dt}\right)^2 = m \frac{d^2x}{dz^2} v_z^2 \quad (4.2)$$

$$-qv_z by = m \frac{d^2y}{dt^2} = m \frac{d^2y}{dz^2} \left(\frac{dz}{dt}\right)^2 = m \frac{d^2y}{dz^2} v_z^2 \quad (4.3)$$

olarak belirlenirler ve kuadropoldeki ρ_M manyetik sertliğinin fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi düzenlenirler:

$$\frac{d^2x}{dz^2} = \left(\frac{qb}{mv_z}\right)x = \left(\frac{b}{\rho_m}\right)x = k^2x \quad (4.4)$$

$$\frac{d^2y}{dz^2} = -\left(\frac{qb}{mv_z}\right)y = -\left(\frac{b}{\rho_m}\right)y = -k^2y \quad (4.5)$$

x ve y yönlerinde hareketin türünü belirlemek üzere bu ikinci dereceden denklemlerin genel çözümleri:

$$x(z) = A\sinh(kz) + B\cosh(kz), \quad y(z) = C\sin(kz) + D\cos(kz)$$

$$\dot{x}(z) = Ak\cosh(kz) + Bksinh(kz), \quad \dot{y}(z) = Ck\cos(kz) - Dksin(kz) \quad (4.6)$$

Şeklinde olup burada, $k^2 = \frac{qb}{mv_z}$ 'dir. Yukarıda yazılan genel çözümlere göre,

kuadropol içindeki iyonun hareketi, hareketi x yatay düzleminde dağıtan hiperbolik fonksiyon ve y düşey düzleminde odaklayan sinüzoidal fonksiyon olarak tespit edilir [51]. Aşağıdaki sınır koşulları kullanılarak;

$$x(z=0) = x_Q, \quad y(z=0) = y_Q \quad (4.7)$$

$$\dot{x} = \left.\frac{dx}{dz}\right|_{z=0} = \frac{v_x}{v_z} = \tan(\alpha), \quad \dot{y} = \left.\frac{dy}{dz}\right|_{z=0} = \frac{v_y}{v_z} = \tan(\beta) \quad (4.8)$$

A, B, C, D sabitleri:

$$A = \frac{\tan(\alpha)}{k}, \quad B = x_Q, \quad C = \frac{\tan(\beta)}{k}, \quad D = y_Q \quad (4.9)$$

şeklinde belirlenir. Denklem çözümleri, iyon pozisyon koordinatlarının kuadrupol mıknatıs çıkışında hesaplanmasında kullanılır.

Kuadrupolü takiben iyonlar bükücü dipol içine girer ve burada Lorentz kuvvetleri nedeniyle yörüngeleri bir R yarıçapıyla eğrilir. Bir B_D dipol manyetik alanı içindeki bir iyonun hareketi Lorentz kuvveti ile:

$$\frac{mv^2}{R} = qv_{\perp}B_D \quad (4.10)$$

m; iyonun kütlesi, q; iyonun yükü, B_D ; dipol manyetik alan kuvveti, v_{\perp} : dipol manyetik alan yönüne dik iyon hız bileşeni, R; merkezi yörünge için dipol mıknatısın eğrilik yarıçapı şeklinde tanımlanır. $v_x \ll v_z \cong v$ olması nedeniyle, eğrilik yarıçapı;

$$R = \frac{mv}{aB_D} = \frac{\rho_M}{B_D} \quad (4.11)$$

Bağıntısı ile verilir [47].

İyonların kuadrupole giriş noktası belirlendiği anda, kuadrupol girişinden MW-PPAC girişine kadar olan yörünge, R_Q ve R_D parametreleri cinsinden aşağıdaki gibi belirlenir.

$$R_Q = \frac{mv}{qB_Q} = \frac{\rho_M}{B_Q}, \quad R_D = \frac{mv}{qB_D} = \frac{\rho_M}{B_Q} \quad (4.12)$$

Burada, $\frac{mv}{qB_Q}$, kuadrupol içindeki para-axial yörüngeli iyonun hareketini temsil etmekte

iken, $\frac{mv}{qB_D}$, dipol içindeki eğimli hareketi göstermektedir. Oluşturulan event (olay)

dosyasının analizinde yörünge, tekrarlı prosedür ile hesaplanır. Buna göre: Dipol içindeki merkezi yörüngeye karşılık gelen eğrilik yarıçapı, $R_D=120$ cm ve dolayısıyla $\frac{mv^2}{R_D} = qvB_D$ oranı başlangıçta tahmin edilir. B_Q ve B_D manyetik alan değerleri bilindiği

için kuadrupol içindeki R_Q para-axial yörünge yarıçapı:

$$R_Q = \frac{\rho_M}{B_Q} = R_D \frac{B_Q}{B_D} \quad (4.13)$$

bağıntısı ile bulunur.

Sonuç olarak, MCP dedektörü içinde giriş pozisyon koordinatları yani kuadrupol girişindeki koordinatlar, B_Q/ B_D oranı ve dipol içindeki eğrilik yarıçapı bilinir ise iyonların MW-PPAC dedektörü üzerinde etkileştikleri çarpma noktaları tümüyle belirlenir.

Yörünge yeniden yapılandırılması ile, analiz işleminde kullanılmak üzere $R_D (=R)$, D ve dolayısıyla $v=D/TOF$ çıkış parametreleri ayrıntılı olarak belirlenmekte olup burada, D ; iyonların MCP ve MW-PPAC dedektörleri arasında kat ettikleri yol uzunluğu ve v iyon hızlarıdır. $\frac{mv^2}{R} = qvB$, bağıntısını kullanarak R/v oranı;

$$\frac{R}{v} = R \frac{TOF}{D} = \frac{m}{qB} \quad (4.14)$$

Şeklinde yazılır. Burada, B and R parametreleri sırasıyla dipol mıknatısına ait manyetik alan ve eğrilik yarıçapını göstermektedir. Bundan sonraki aşamada ise $R/v \approx m/q$ yaklaşımı göz önüne alınarak analiz işlemine devam edilir.

4.1.2. İyon Kimliklerinin Belirlenmesi

Aynı bir ortamda yüklü parçacığın enerji kaybı, durdurma gücü (stopping power), ünlü Bethe-Bloch formülü ile tanımlanır [54]:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi}{m_e c^2} \frac{N_A Z_M \rho Z^2}{A \beta^2} \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon} \right)^2 \left[\ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2}{I(1-\beta^2)} \right) - \beta^2 \right] \quad (4.15)$$

$\beta = \frac{v}{c}$ olmak üzere,

v : parçacığın hızı, E : parçacığın enerjisi, Ze : parçacığın yükü, x : parçacığın ortamda kat ettiği yol, c : ışık hızı, e : elektronun yükü, m_e : elektronun kütlesi, Z_M : durdurucu materyalin atom numarası, A :durdurucu materyalin kütle numarası, ρ : durdurucu materyalin yoğunluğu, N_A : avagadro sayısı, I : durdurucu materyalin iyonizasyon potansiyeli'dir.

Sadece ağır yüklü iyonun Ze yükü ve v hızı durdurma gücü ifadesine katılır. Bu gerçek, ani çarpışmalardaki yüklü parçacık enerji kayıp spektrumlarının evrenselliği ile tutarlılık sergilemektedir.

Yüklü parçacığın menzili ise parçacığın durgun hale geçmeden önce kat ettiği mesafedir. Durdurma gücünün tersi, birim enerji kaybı başına kat edilen mesafeyi verir. Bu durumda, bu niceliğin sıfır enerjisine kadar integrali, herhangi bir T kinetik enerjisine sahip parçacığın menzildir:

$$R(T) = \int_0^T \left(-\frac{dE}{dx}\right)^{-1} dx \quad (4.16)$$

Bu ifadeye göre, aynı başlangıç hızına sahip iki parçacığın menzilleri R_1 ve R_2 arasındaki ilişki

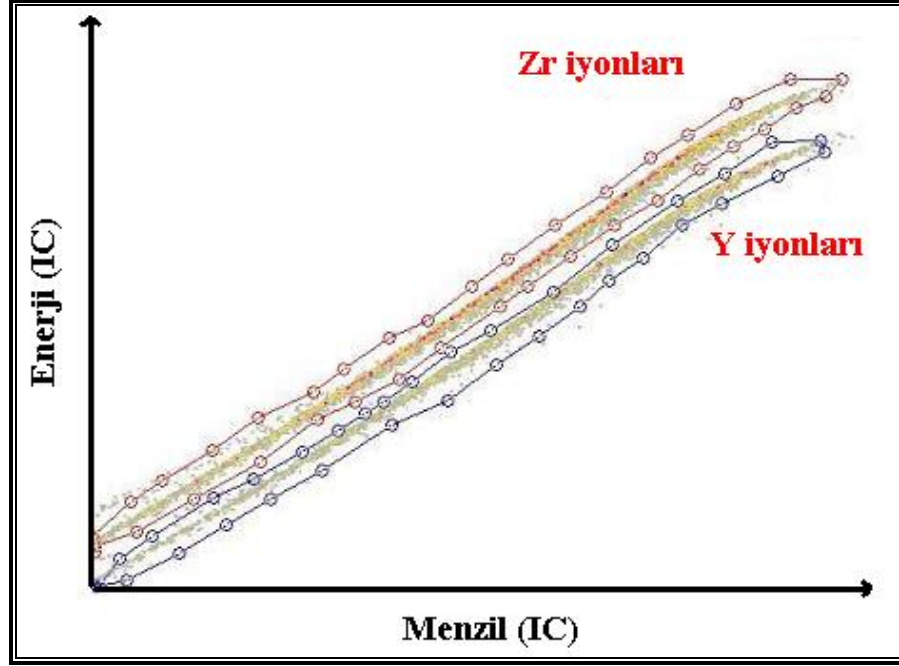
$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{Z_2^2 M_1}{Z_1^2 M_2} \quad (4.17)$$

şeklinde yazılır. Burada, M_1 ve M_2 durgun kütleler ve Z_1 ve Z_2 parçacıkların yükleridir [55].

Sonuç olarak, IC dedektöründen elde edilen kinetik enerjiye (E_{IC}) karşılık menzil (Range) matrisinde, Menzil(IC)-Enerji(IC), birbirinden ayrılmış her bir çizgisel yapı, farklı Z atom numaralarıyla birbirinden ayrılmış olup hüzmeye benzeri reaksiyon ürünlerine karşılık gelir (Şekil 4.2).

Başlangıç aşaması olarak, CLARA+PRISMA deneysel düzeneğinde gerçekleştirilen $^{90}\text{Zr} + ^{208}\text{Pb}$ çoklu-nükleon transfer reaksiyonu konu edilmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi, Pb hedef kalınlığı 0.300 mg/cm^2 , hedef açısı 45° 'dir. Bu simülasyon çalışmasında iyon hüzmesi olarak kullanılan ^{90}Zr iyonu monokromatik değildir. Realistik koşulların sağlanması amacı ile gausiyen enerji dağılımı, enerji değerinin %20'si olarak hesaplanmış ve %29'luk FWHM değeri kullanılmıştır. ^{90}Zr iyonunun enerjisi, 560 MeV 'dir. Bu reaksiyon sonrasında oluşan ürün çekirdekler; ^{90}Zr , ^{91}Zr , ^{89}Y , ^{90}Y 'dir ve ortalama enerjileri yaklaşık 346 MeV 'dir. Oluşan her bir iyonun tek enerjili bir foton yayması durumu göz önüne alınarak foton enerjileri, ^{90}Zr (1000 keV), ^{91}Zr (1003 keV), ^{89}Y (998 keV) ve ^{90}Y (999 keV) olarak belirlenmiştir. Foton enerjilerinin birbirine çok yakın seçilmesinin sebebi, düzeneğin doppler düzeltme kabiliyetinin belirlenmesidir. Simülasyon, Agata Demonstrator diziminin 5 adet asimetrik 3'lü kümeden oluştuğu durum göz önüne alınarak gerçekleştirilmiş, 5 mm 'lik pozisyon çözünürlüğü ve 100.000 event (olay) kullanılmıştır.

Şekil 4.1'de bu reaksiyon mekanizması için oluşturulan MCP, TOF ve XFP matrisleri gösterilmiştir. MCP matrisi, ^{90}Zr iyon hüzmesinin başlangıç dedektöründeki kalibre edilmiş X ve Y koordinatlarını içerir. TOF matrisi, ^{90}Zr iyon hüzmesinin MCP ve MW-PPAC dedektörleri arasındaki zamanlama bilgisi kullanılarak oluşturulur. Bu yüzden focal plane'deki koordinat bilgisine ihtiyaç vardır. XFP matrisinin oluşturulabilmesi için ise diğer iki matristen farklı olarak ekstra bilgilere ihtiyaç vardır ve bu bilgiler gsort scriptinde tez çalışması için geliştirilen "*SIM_SOLVER*" [62] altprogramının eklenmesi ile sağlanır. Böylece iyon kimliklerine ait bilgilere ulaşılır.



Şekil 4.2: Menzil(IC)-Enerji(IC) matrisinin yakınlaştırılmış görüntüsü ve her bir elementi seçmek üzere iki boyutlu muz şeklindeki kapılamanın gösterimi.

Matrisde en fazla popüle edilen “Zr-Y” izotopları gösterilmektedir. Her bir Z çizgisinin iki boyutlu muz şeklinde kapılamalar (banana gates) kullanılarak seçilmesi, analizin bundan sonraki adımlarının her bir reaksiyon ürünü için birbirinden bağımsız olarak yapılmasına izin verecektir.

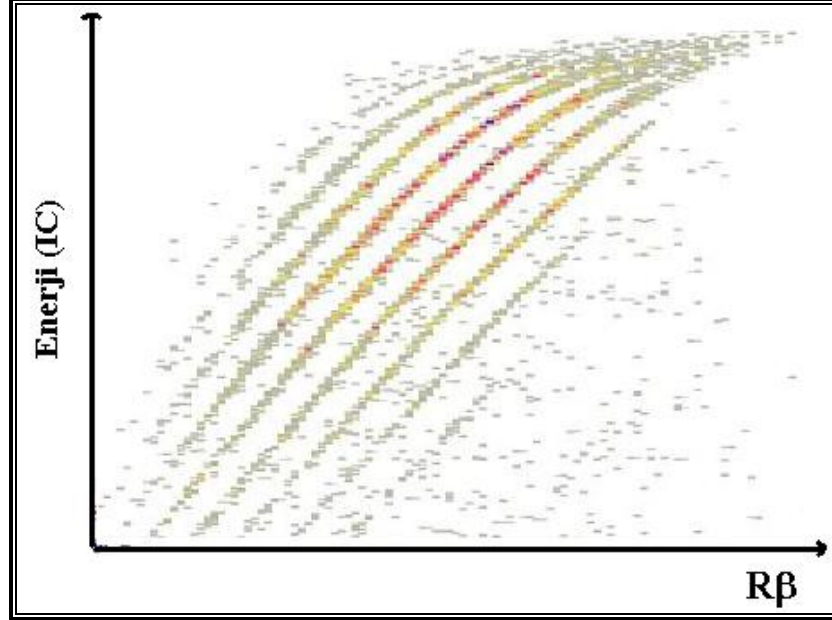
4.1.3. Yük Seviyelerinin Ve Kütle Spektrumlarının Belirlenmesi

Reaksiyon ürünleri için yük seviyelerinin kesin değerleri, Şekil 4.3’de verilen ve Zr izotopları için oluşturulan $R\beta-E_{ic}$ matrisi ile hesaplanır. Matriste ortaya çıkan her bandımsı yapı, belirli bir yük seviyesine (q) karşılık gelmektedir.

Her bir q çizgisinin iki boyutlu muz şeklinde kapılamalar (banana gates) kullanılarak seçilmesi, Zr ve Y çekirdeklerine ait q_1, q_2, q_3, q_4, q_5 yük seviyelerinin aşağıdaki formüllerde kullanılarak belirlenmesini mümkün kılar.

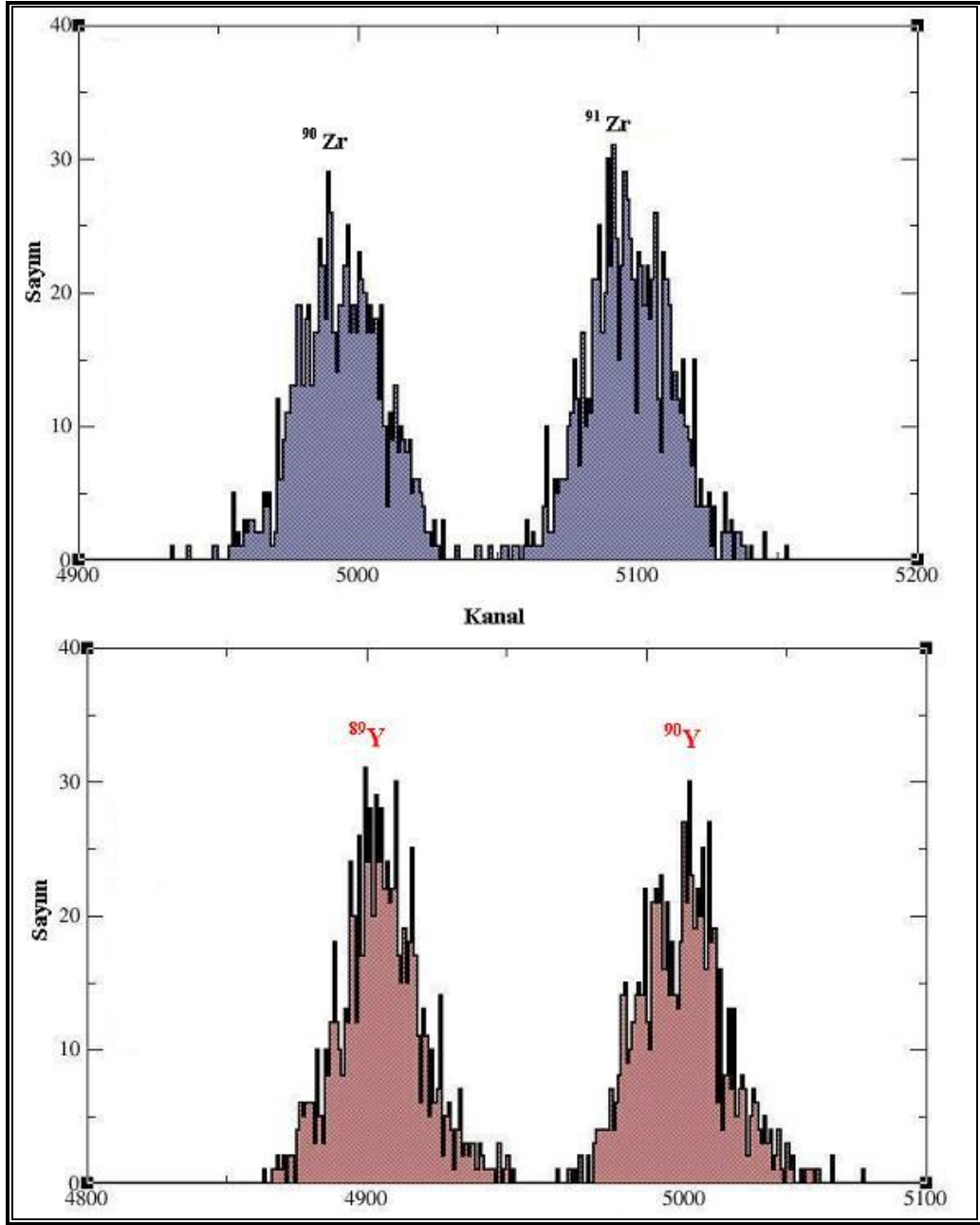
$$m \frac{v^2}{R} = qvB \quad E_{IC} = \frac{1}{2} mv^2 \quad (4.18)$$

$$\frac{E_{IC}}{Rv} \approx q \quad q = \frac{2}{B} \frac{E_{IC}}{Rv} \quad (4.19)$$



Şekil 4.3: Zr çekirdeğine ait q yük seviyelerinin Rβ-E_{ic} matrisi kullanılarak belirlenmesinin gösterimi.

Yük seviyelerinin belirlenmesinin ardından her bir yük seviyesi için Zr ve Y izotoplarının elde edilen kütle spektrumları Şekil 4.4'te gösterilmektedir.



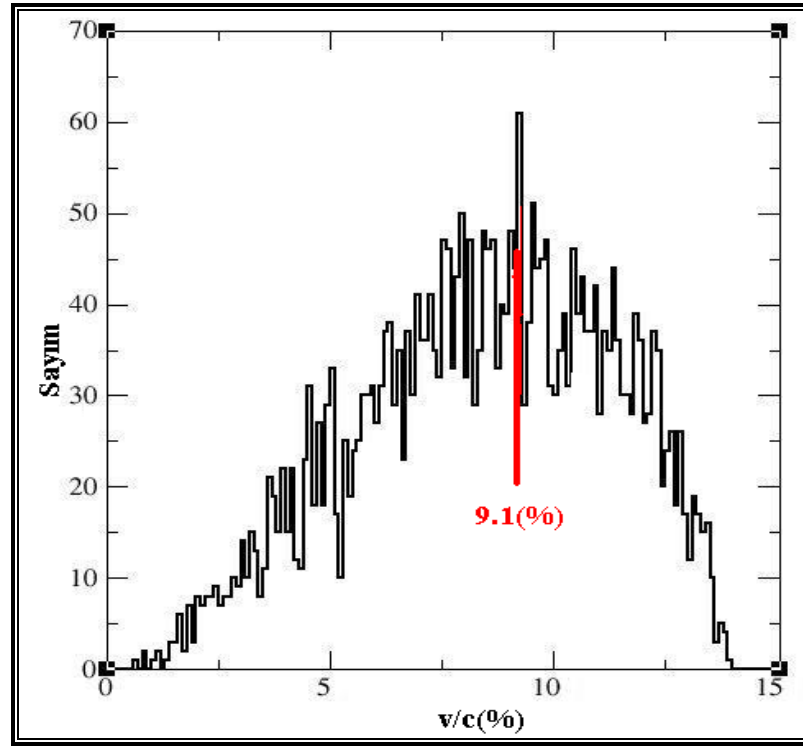
Şekil 4.4: Zr ve Y izotoplarına ait kütle spektrumlarının gösterimi.

4.1.4. Doppler Düzeltmesi

Daha önce de belirtildiği gibi, reaksiyon ürünlerinden yayımlanan gama ışınlarının Doppler düzeltmesi PRISMA'dan alınan ürün çekirdeklere ait hız vektör bilgileri ile olay-olay gerçekleştirilir. Yazılan program, yörünge yeniden yapılandırılması algoritması ile belirlenen geri saçılma hız vektörünü ve bu hız vektörü ile geri tepen

çekirdekten yayınlanan γ -ışını arasındaki açıyı kullanarak Doppler düzeltilmiş enerjileri hesaplar.

Geri tepen çekirdeğin hız vektörü ile bu çekirdekten yayınlanan gama ışını doğrultusu arasındaki açı ise AGATA Demonstrator'e ait Ge kristallerinin pozisyonlarını bilerek MCP girişindeki kutupsal koordinatlardan hesaplanır. Örnek olarak, v/c 'nin fonksiyonu olarak Zr izotopları için ortalama hız dağılımı ve reaksiyonda ortaya çıkan hız değerinin 9.1% olduğu hesaplanmıştır.

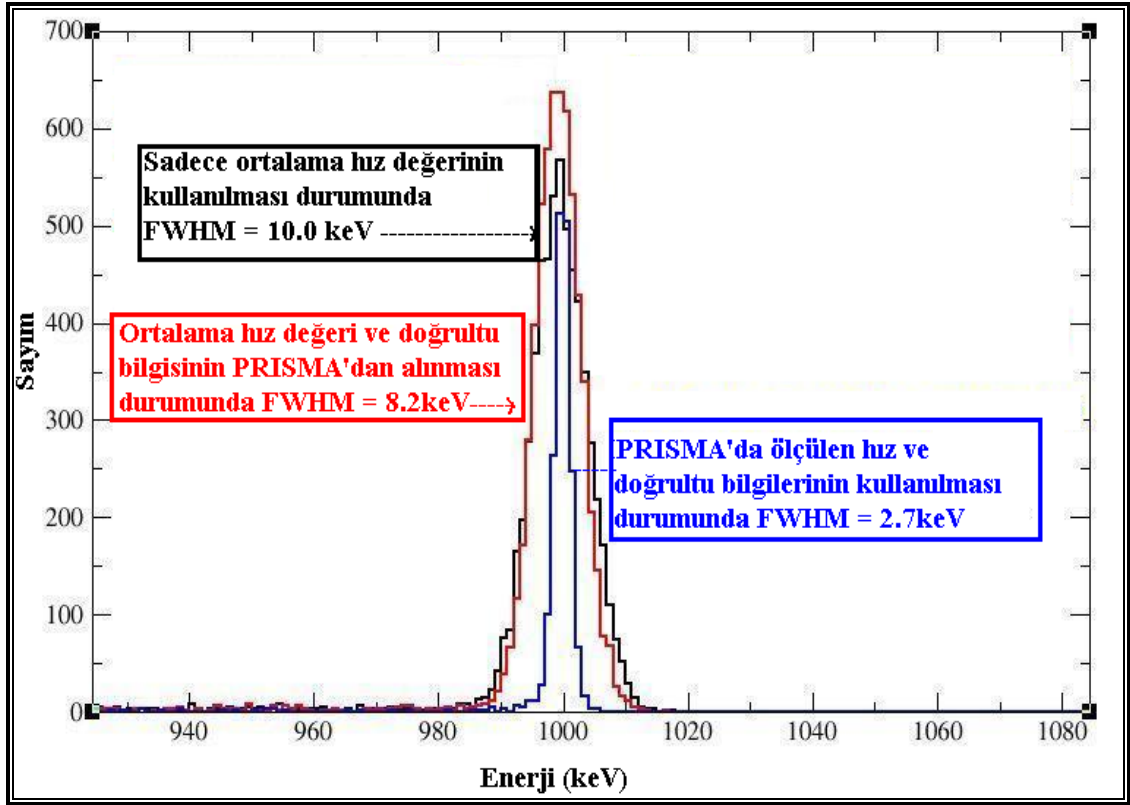


Şekil 4.5: Reaksiyonda oluşan Zr izotoplarına ait (v/c) hız dağılımı.

Veri analizinde bu aşamadan sonra ürün çekirdeklere ait;

- Ortalama hız değeri ile pozisyon bilgilerinin MCP'den alındığı
- Ölçülen hız değerleri ile pozisyon ve enerji bilgilerinin PRISMA spektrometresinden

alındığı durumları varsayılarak doppler düzeltmesi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, PRISMA spektrometresinden ölçülen bilgilerin verilere eklenmesi ile doppler düzeltmesinin performansının mükemmel olduğu ve 1 MeV enerjili γ -ışınları için FWHM değerinin 2.7 keV olduğu gözlenmiştir.

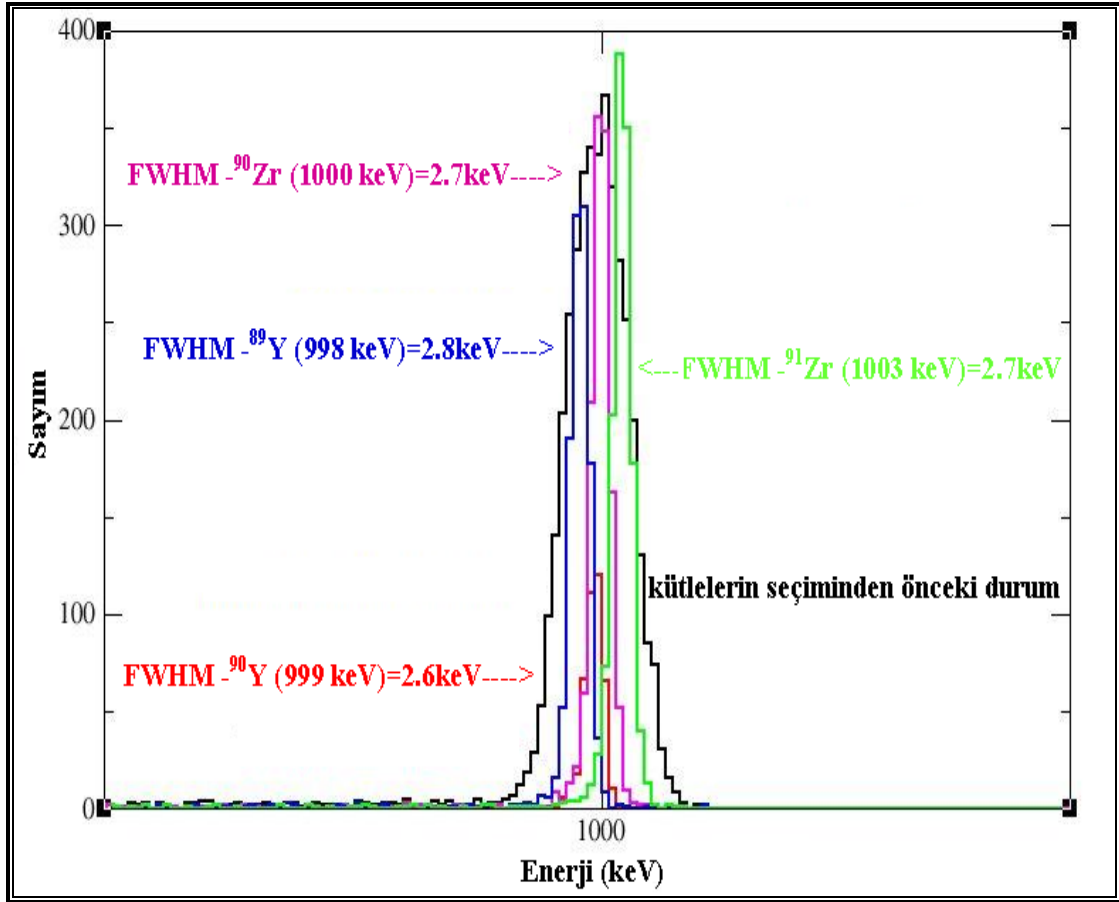


Şekil 4.6: 1 MeV enerjili gama ışını için AGATA Demonstrator + PRISMA düzeneğinin doppler düzeltme performansının gösterimi.

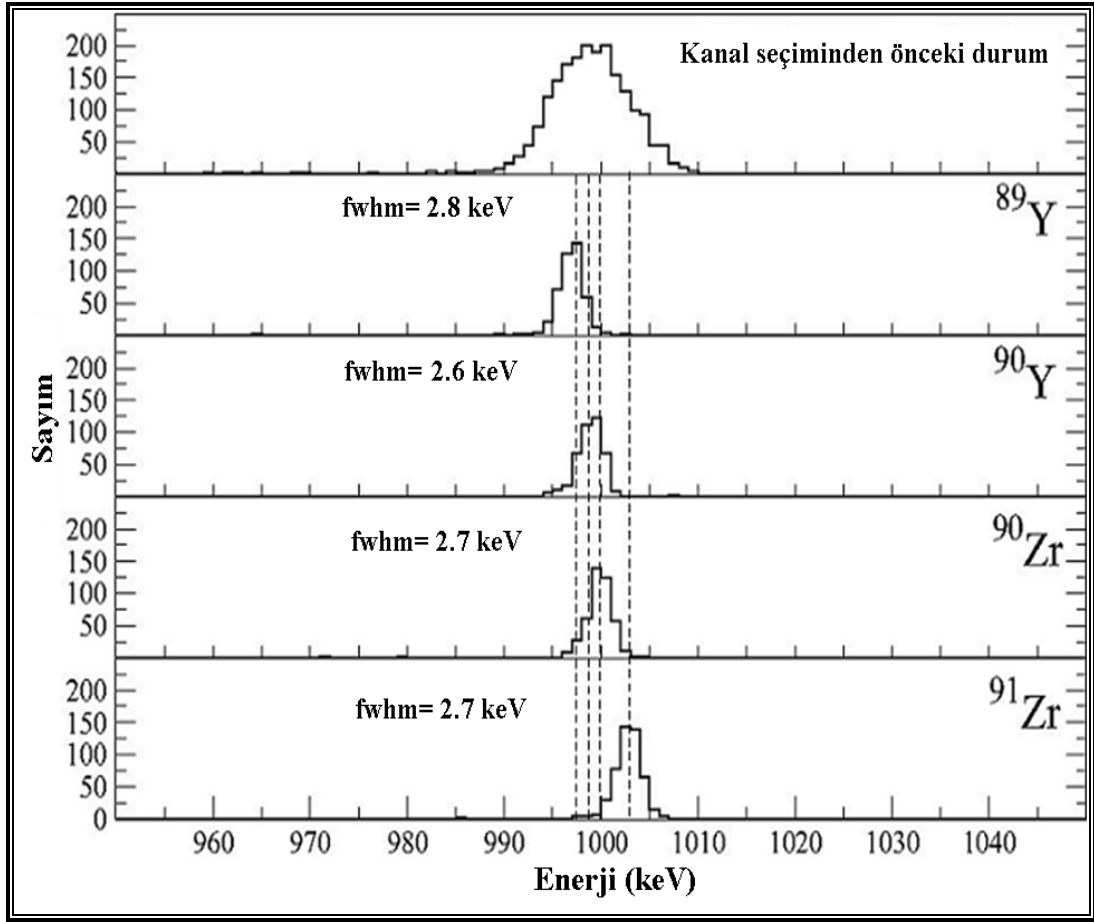
4.1.4 Gama Işınlarnının Belirlenmesi

Analiz işleminin bu aşamasında, Şekil 4.2' de de gösterilen her bir ürün çekirdeğe ait kütleler iki boyutlu muz şeklinde kapılamalar (banana gates) kullanılarak seçilmiştir ve bu iyonun ait gama ışını enerjisi belirlenmiştir. Hatırlanacağı üzere simülasyon başlangıcında her bir iyonun gama enerjisi ^{90}Zr (1000 keV), ^{91}Zr (1003 keV), ^{89}Y (998 keV) ve ^{90}Y (999 keV) olarak belirlenmişti. Simülasyon ve analiz sonrasında ise, her bir iyonun ait γ -ışını enerjileri beklenen kanallarda gözlenmiş, her bir gama ışınının FWHM değerleri incelenmiş, FWHM (998 keV) = 2.8 keV ve FWHM (999 keV) = 2.6 keV, FWHM (1000 keV) = 2.7 keV, FWHM (1003 keV) = 2.7 keV değerlerinde ölçülüp, AGATA Demonstrator + PRISMA düzeneğinin doppler düzeltme kabiliyetinin

mükemmel olduğu gösterilmiştir. Bununla birlikte bu enerji değerlerindeki pik veriminin 7% civarında olduğu hesaplanmıştır. (Şekil 4.7, Şekil 4.8)



Şekil 4.7: Kütlelerin seçiminden önce (siyah) ve kütle seçiminden sonra ^{90}Zr (pembe), ^{91}Zr (yeşil), ^{89}Y (mavi) ve ^{90}Y (kırmızı) iyonlarının belirlenen gama enerjilerindeki FWHM değerlerinin gösterimi.



Şekil 4.8: Kanal seçiminden önceki ve sonraki durumlarda AGATA Demonstrator+PRISMA deneysel düzeneği için doppler düzeltme kabiliyetinin ve iyonların FWHM değerlerinin gösterimi.

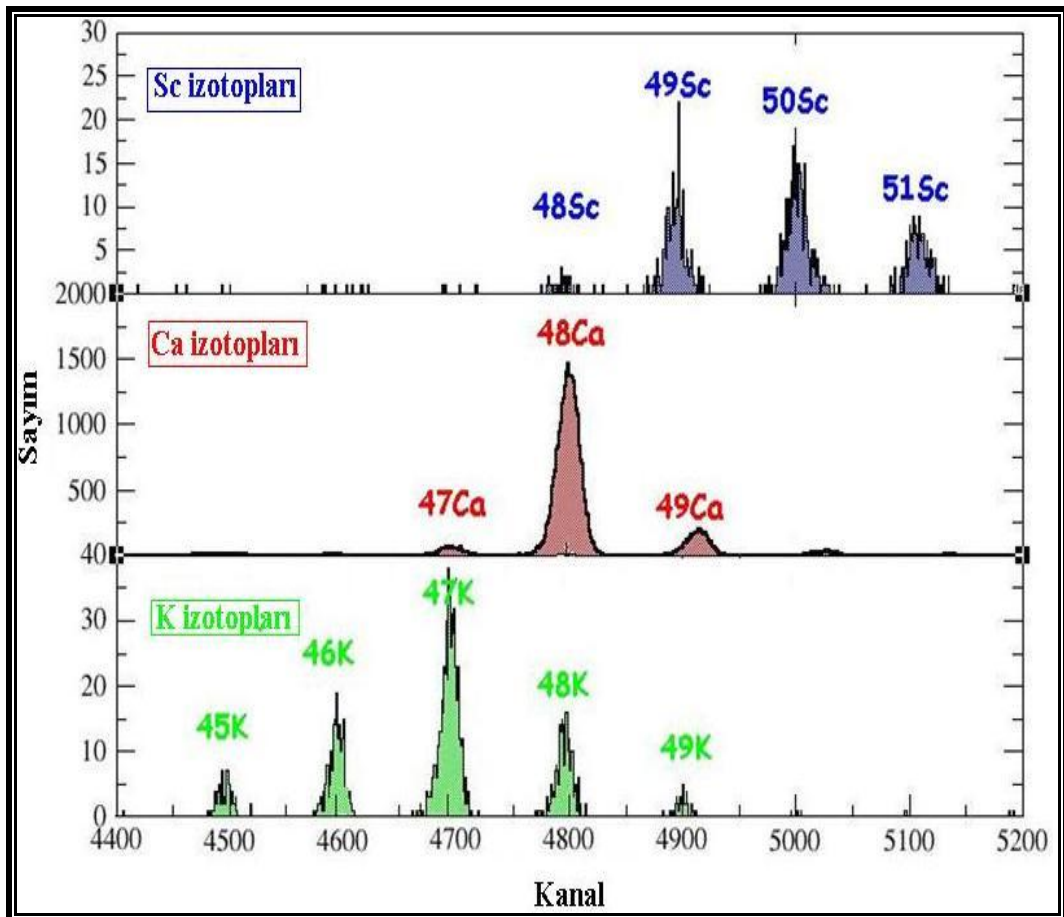
4.2.CLARA + PRISMA VE AGATA DEMONSTRATOR + PRISMA PERFORMANS KARŞILAŞTIRMASI

Gerçekleştirilen simülasyon çalışmasının bu aşamasında, CLARA+PRISMA deneysel düzeneği ile gerçekleştirilmiş $^{48}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}(@310\text{MeV})$ [63] reaksiyonunun iyon dağılımlarının deneysel verisi ve sonuçları kullanılmıştır.

CLARA+PRISMA deneysel düzeneğinde gerçekleştirilen $^{48}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$ çoklu-nükleon transfer reaksiyonunda 310 MeV enerjili ^{48}Ca iyon hüzmesi kullanılmıştır. Pb hedef kalınlığı 0.300 mg/cm², hedef açısı 45°, Prisma açısı ise 61°'dir.

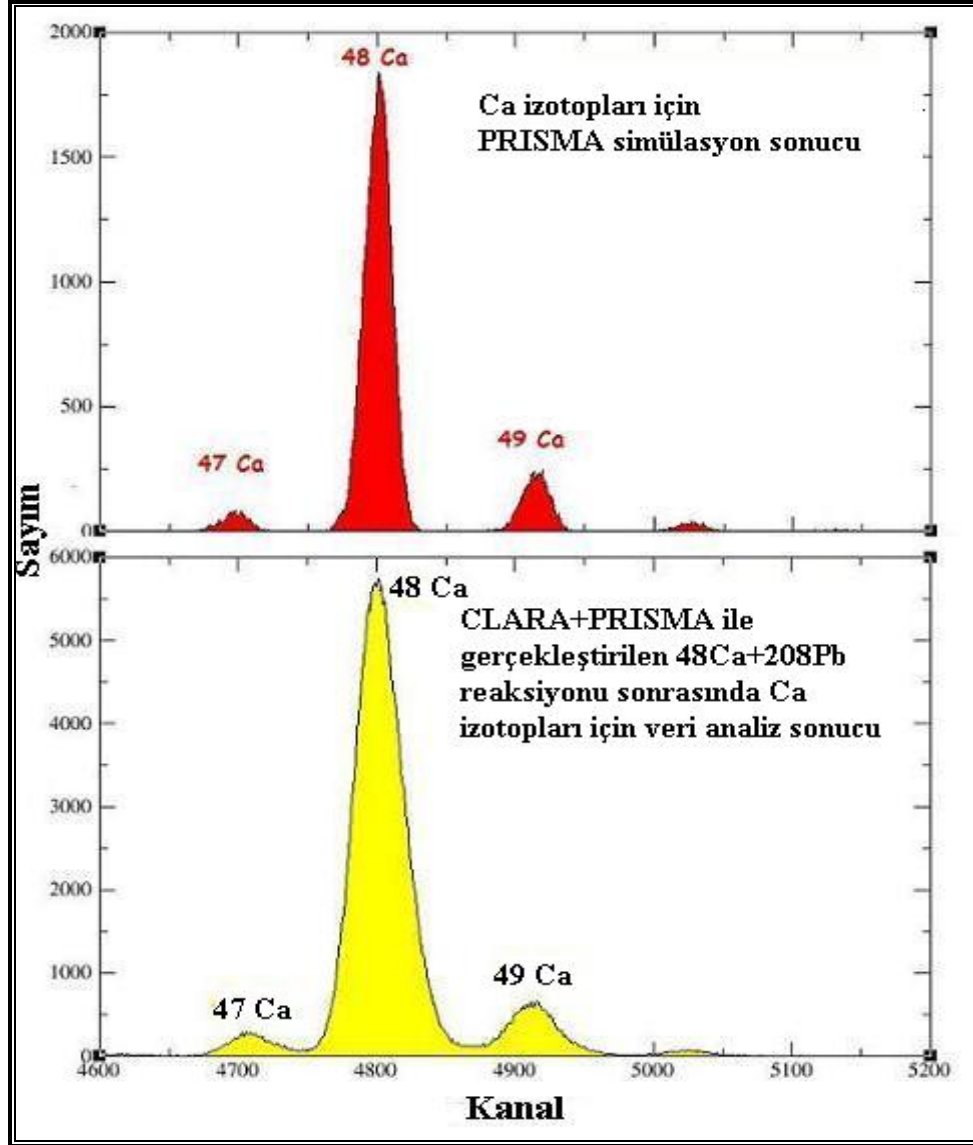
Çalışmanın bu bölümünde gerçekçil simülasyon , yukarıda belirtilen reaksiyon için AGATA Demonstrator + PRISMA deneysel düzeneğine uygun olacak biçimde oluşturulmuştur. Bu simülasyon ile ilgili sonuçlar ise;

- İlk aşamada sadece PRISMA deneysel düzeneğinde gerçekleştirilen $^{48}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$ çoklu-nükleon transfer reaksiyonu göz önüne alınmış, reaksiyon sonrasında Sc, Ca ve K izotopları gözlenmiştir.
- Reaksiyonda iyon hüzmesi olarak ^{48}Ca çekirdeğinin kullanılması sebebi ile reaksiyon sonrasında gözlenen ürün çekirdeklerin içinde tepkime kesiti en yüksek olan izotop ^{48}Ca 'dir. (Şekil 4.9)



Şekil 4.9: Simülasyonda $^{48}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$ multi-nükleon transfer reaksiyonu sonrasında gözlenen Sc, Ca ve K ürün çekirdekleri, izotopları ve tepkime kesitlerinin gösterimi.

- CLARA+PRISMA deneysel düzeneği ile gerçekleştirilen $^{48}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$ çoklu-nükleon transfer reaksiyonu sonrasında yapılan veri analiz sonuçları ile simülasyon sonrasında elde edilen verinin analizi sonuçları karşılaştırılmış olup sonuçların, bir biri ile birebir uyumlu olduğu gözlenmiştir. Ca izotopları için karşılaştırma sonuçları Şekil 4.10'de gösterilmiştir.



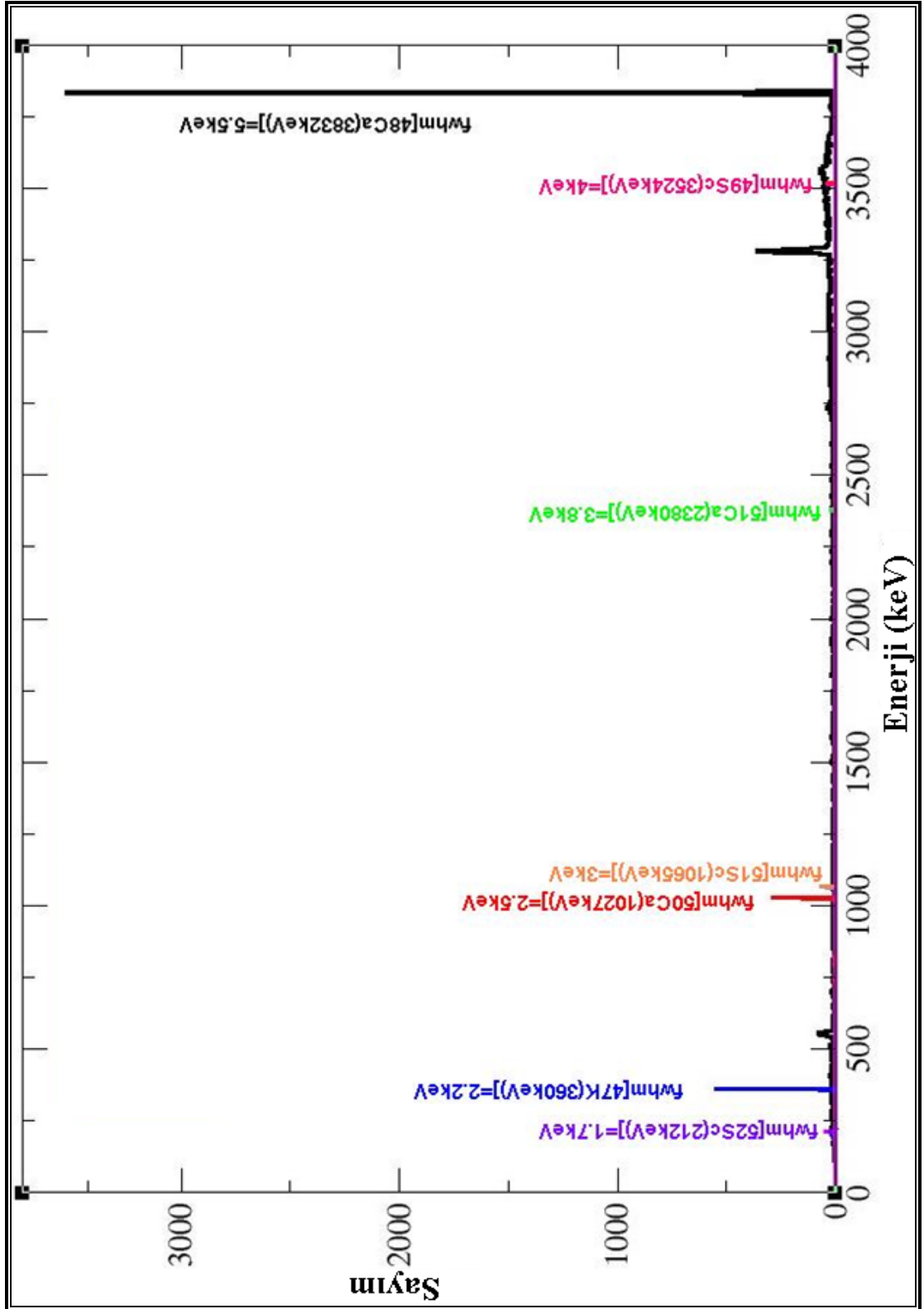
Şekil 4.10: ^{48}Ca izotopuna ait simülasyon ve gerçek deneye ait verilerin analiz sonuçlarının karşılaştırması.

- Simülasyonda AGATA Demonstrator + PRISMA düzeneği ile oluşturulan $^{48}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$ çoklu-nükleon transfer reaksiyonu sonrasında, bu düzeneğin doppler düzeltme kabiliyetinin belirlenmesi çalışması yapılmıştır. Bu amaçla simülasyon öncesinde reaksiyon sonrasında gözlenmesi öngörülen her bir izotopun $2^+ \rightarrow 0^+$ gama ışını enerjileri tablo 4.1’ de sunulmuştur.

Tablo 4.1: $^{48}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$ çoklu-nükleon transfer reaksiyonu sonrasında, oluşan her bir reaksiyon ürün iyonuna ait gözlenmesi beklenen γ -ışınların, FWHM değerlerinin CLARA+PRISMA ve AGATA Demonstrator+PRISMA için gösterilmesi.

İYON	ENERJİ $2^+ \rightarrow 0^+$ [64]	Fwhm (AGATA D.+PRISMA)
^{47}K	360.000 keV	2.2 keV
^{48}Ca	3831.80 keV	5.5 keV
^{50}Ca	1027.00 keV	2.5 keV
^{51}Ca	2380.00 keV	3.8 keV
^{49}Sc	3524.00 keV	4.0 keV
^{51}Sc	1065.00 keV	3.0 keV
^{52}Sc	212.000 keV	1.7 keV

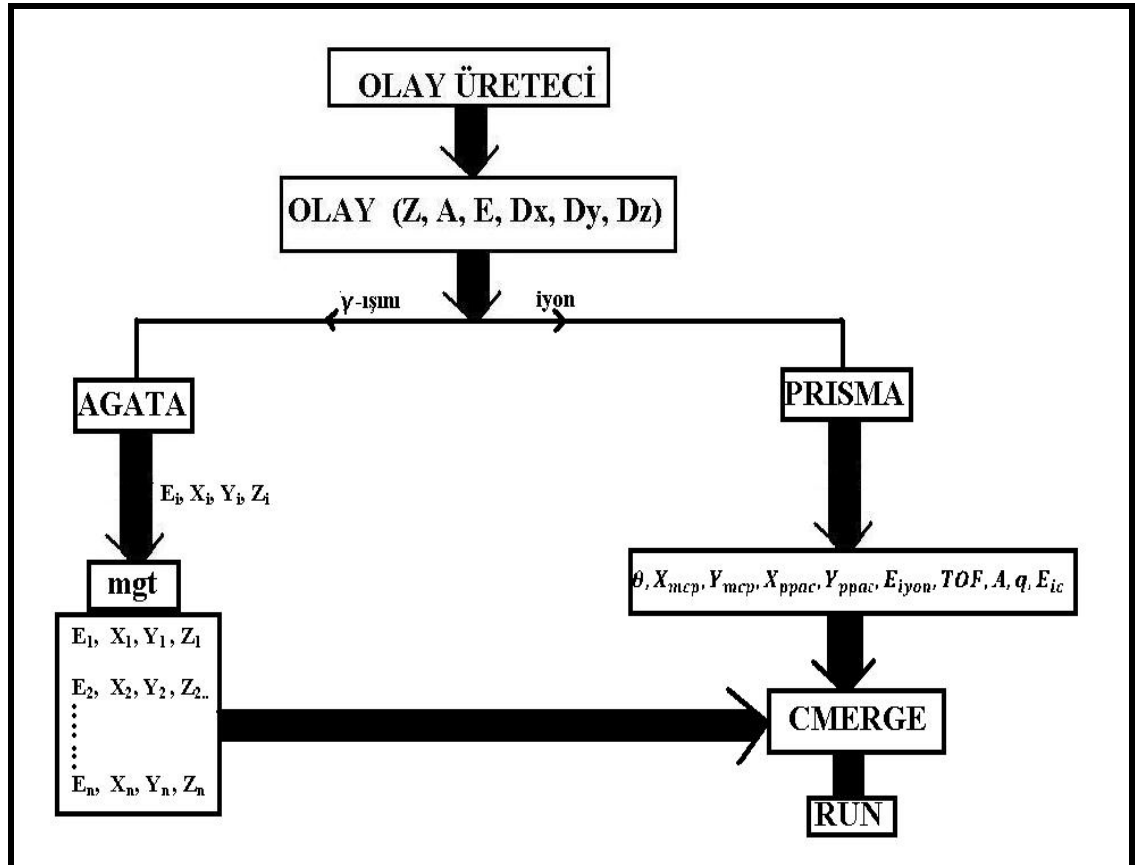
Bu reaksiyon için gerçekleştirilen simülasyon sonrası veri analizinde ise sadece 1 MeV enerjisi civarında değil çeşitli enerji bölgelerinde dahi AGATA Demonstrator + PRISMA deneysel düzeneğinin doppler düzeltme performansının çok iyi olduğu, γ -ışını enerjilerinin FWHM değerlerinin ise 1.7 keV ile 5.5 keV aralığında değiştiği gözlenmiştir. CLARA+PRISMA deneysel düzeneğinde bu enerji çizgilerindeki fwhm değeri 10 keV’den daha fazladır. Bu sonuçlar doğrultusunda AGATA Demonstrator + PRISMA deneysel düzeneğinin doppler düzeltme performansının mükemmel derecede olduğu gözlenmiştir. Her bir izotoptan yayımlanan gama ışınlarına ait doppler düzeltmesi yapılmış enerjileri ise Şekil 4.11’de gösterilmiştir.



Şekil 4.11: AGATA Demonstrator+PRISMA düzeneği için $^{48}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$ reaksiyon simülasyonu sonrasında oluşan ^{47}K (360keV), ^{48}Ca (3831.80keV), ^{50}Ca (1027keV), ^{51}Ca (2380keV), ^{49}Sc (3524keV), ^{51}Sc (1065keV), ^{52}Sc (212 keV) izotoplarının ve bu izotopların $2^+ \rightarrow 0^+$ geçiş enerjileri için doppler düzeltme kabiliyetinin gösterimi.

4.3. ÇOKLU-NÜKLEON TRANSFER (GRAZING) REAKSİYONLARINA AİT GERÇEKSİL SİMÜLASYONU

AGATA Demonstrator + PRISMA düzeneği için gerçekleştirilen simülasyonların bu aşamasında ise CLARA+PRISMA deneysel düzeneği ile gerçekleştirilen $^{48}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}@310\text{MeV}$ [63] çoklu-nükleon transfer reaksiyonuna ait deney ve *Grazing Kodu* [65,66,67] hesaplamaları sonuçları ile “Gerçeksil Simülasyon” ve “Olay Üreteci” oluşturulmuştur. Gerçek deneye ait olan iyon tepkime kesiti, açısal dağılım ve enerji değerleri kullanılarak, AGATA Demonstrator + PRISMA düzeneği ile gerçekleşmesi öngörülen $^{48}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$ çoklu-nükleon transfer reaksiyonu için simülasyon gerçekleştirilmiş ve sonuçları incelenmiştir. Bu aşamalara ait şematik gösterim Şekil 4.12’de ayrıntılı olarak verilmiştir.

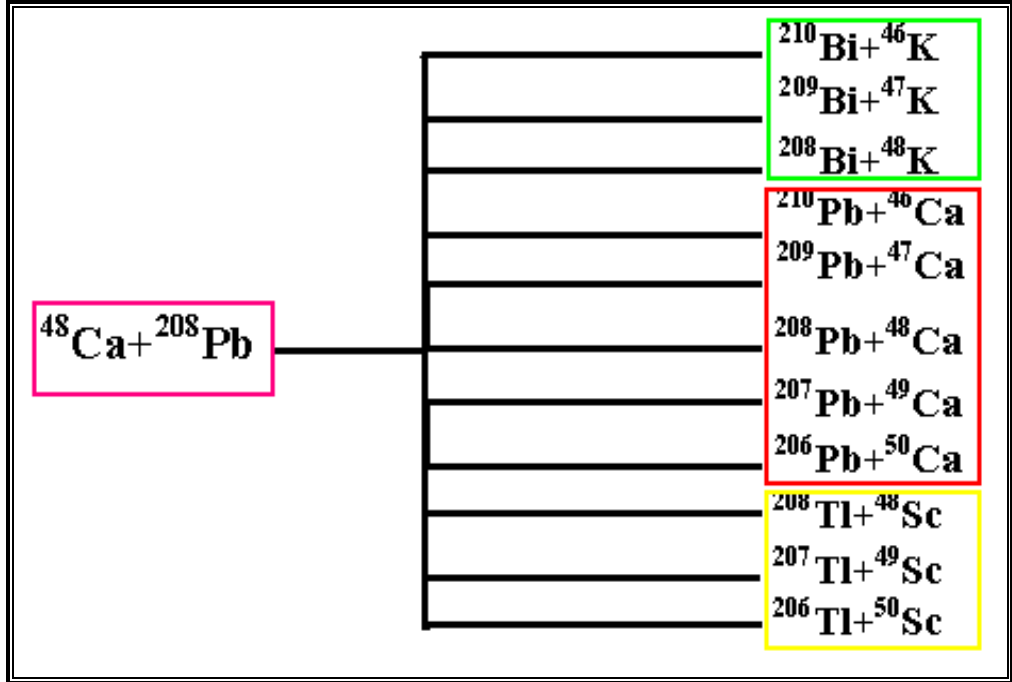


Şekil 4.12: AGATA Demonstrator+PRISMA düzeneği için gerçekleştirilen Gerçeksil Simülasyon’un oluşturulma aşamalarının gösterimi.

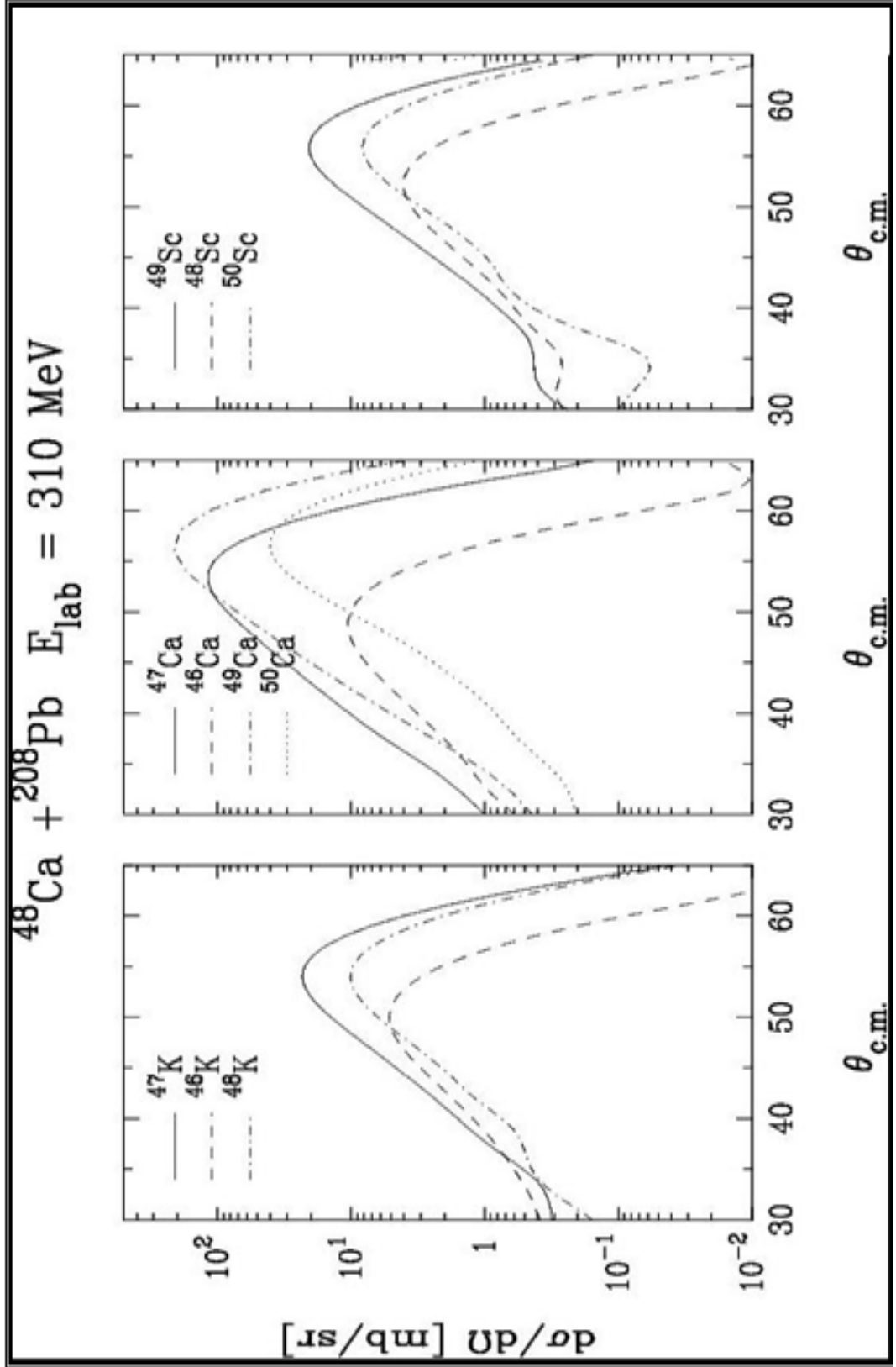
Oluşturulan *gerçeksil simülasyon* aşağıdaki aşamalarda gerçekleşmiştir:

1. Tepkime kesiti (σ), açılmal dağılım ve toplam kinetik enerji kaybı (TKEL) verileri bu reaksiyonun tüm açık kanalları için “*Grazing Kodu*” kullanılarak üretilmiş ve simülasyon programında depolanmıştır. Grazing hesaplamalarına göre reaksiyon sonrasında oluşması beklenen açık kanallar;

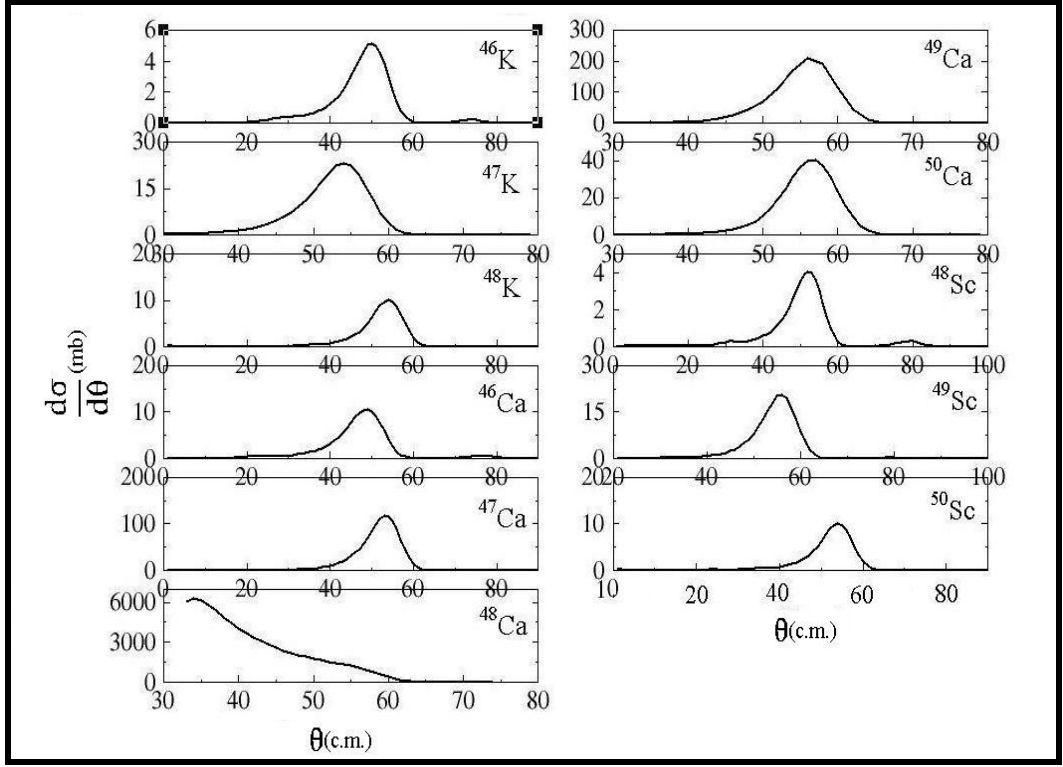
“ $^{46}\text{K}, ^{47}\text{K}, ^{48}\text{K}, ^{46}\text{Ca}, ^{47}\text{Ca}, ^{48}\text{Ca}, ^{49}\text{Ca}, ^{50}\text{Ca}, ^{48}\text{Sc}, ^{49}\text{Sc}, ^{50}\text{Sc}$ ” çekirdekleri olarak belirlenmiş ve bu kanallar Şekil 4.13 ‘te, her bir kanala ait tepkime kesiti, açılmal dağılım ve kinetik enerji kaybı ise Şekil 4.14’te gösterilmiştir.



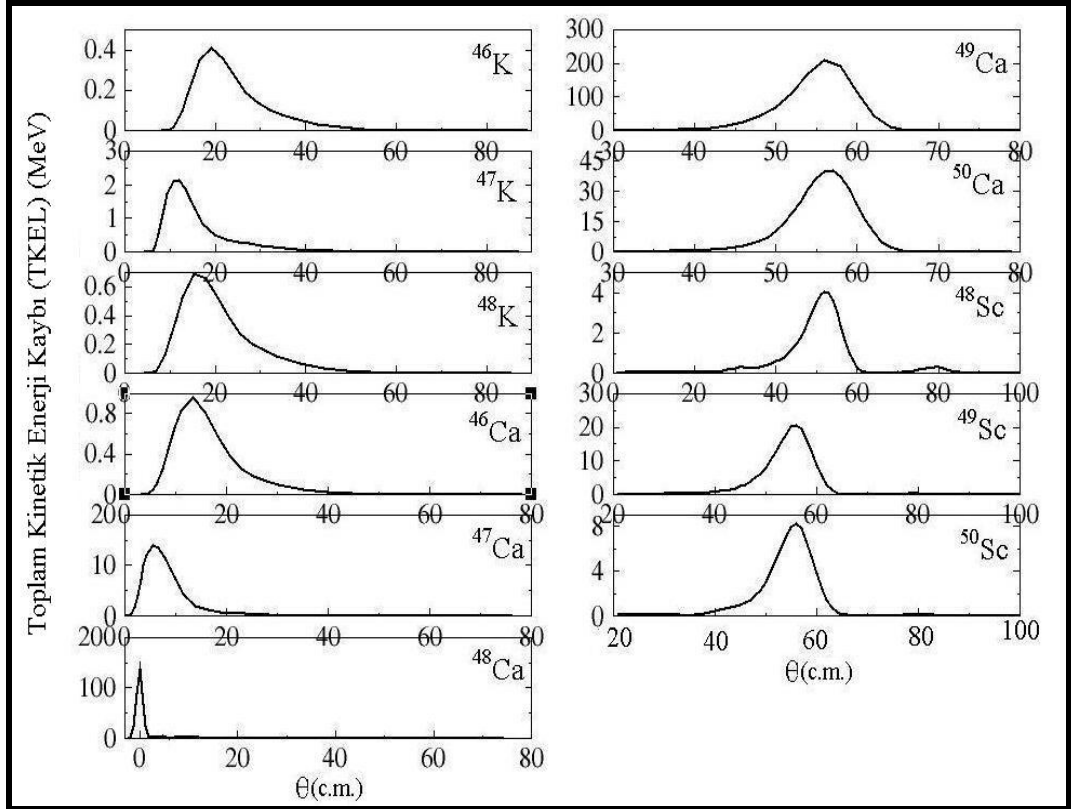
Şekil 4.13: $^{48}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb}@310\text{MeV}$ reaksiyonu sonrasında oluşan giriş-çıkış kanallarının gösterimi.



Şekil 4.14: CLARA+PRISMA deneysel düzeneği ile gerçekleştirilen $^{48}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}@310\text{MeV}$ reaksiyonu sonrasında oluşan ürün çekirdekler için Grazing Kodları kullanılarak üretilen açılal dağılım-diferansiyel tepkime kesiti değerlerinin CM sisteminde gösterimi.



Şekil 4.15: CLARA+PRISMA deneysel düzeneği ile gerçekleştirilen $^{48}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}@310\text{MeV}$ reaksiyonu sonrasında oluşan ürün çekirdeklerinin tepkime kesiti değerlerinin gösterimi.



Şekil 4.16: CLARA+PRISMA deneysel düzeneği ile gerçekleştirilen $^{48}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}@310\text{MeV}$ reaksiyonu sonrasında oluşan ürün çekirdeklerinin Kinetik Enerji Kayıp değerlerinin gösterimi.

2. Simülasyon programında reaksiyon sonrası oluşması beklenen tüm açık kanallar için bu reaksiyonların gerçekleşme olasılıkları, seçilen çekirdeklerin tepkime kesitlerinin kümülatif dağılımları göz önüne alınarak σ ;

$$\sigma_{kümülatif} == 1 = \sum_i \frac{\sigma_i}{\sigma_{tot}} \quad (4.20)$$

olacak şekilde [0,1] arasında rastgele (random) olarak belirlenmiştir. Bu durumda oluşturulan gerçekçil simülasyonda reaksiyon sonrası beklenen açık kanalların oluşma olasılıkları, tepkime kesiti değerleri ile orantılıdır.

3. Reaksiyon Kinematığı:

Simülasyon programında öncelikle oluşması beklenen her bir giriş-çıkış kanalı için; enerji ve momentum korunumu kullanılarak, enerji ve momentum değerleri CM(Center-of-Mass) ve LAB(Laboratuvar) sistemlerinde, rölativistik olarak aşağıdaki şekilde belirlenmiştir. M_1 ; iyon hüzmeye çekirdeğin kütlesi, M_2 ; hedef benzer çekirdeğin kütlesi, $E_{PROJ(lab)}$; Lab. sisteminde iyon hüzmeye çekirdeğin enerjisi, $E_{1(lab)}$; Lab. Sisteminde iyon hüzmeye çekirdeğin kütlesi $P_{4(tot)}$; sistemin toplam momentum değeri olmak üzere:

$$E_{1(lab)} = E_{PROJ(lab)} + M_1 \quad (4.21)$$

$$P_{1(lab)} = \sqrt{E_{1(lab)}^2 - M_1^2} \quad (4.22)$$

$$P_{4(tot)} = \sqrt{2 * E_{PROJ(lab)} * M_2 + (M_1 + M_2)^2} \quad (4.23)$$

$$E_{1(CM)} = \frac{(M_1^2 + M_2 * E_{1(lab)})}{P_{4(tot)}}, \quad P_{1(CM)} = \frac{M_2 * P_{1(lab)}}{P_{4(tot)}} \quad (4.24)$$

$$P_{2(CM)} = P_{1(CM)} \quad , \quad E_{2(CM)} = \sqrt{P_{2(CM)}^2 + M_2^2} \quad (4.25)$$

olarak belirlenmiştir [68].

Bu bilgiler, kullanılarak her bir ürün çekirdeğin ve partnerinin uyarılma enerjisi θ_{gg} (temel seviye θ -değeri) ve TKEL(toplam kinetik enerji kaybı) kullanılarak aşağıdaki şekilde belirlenmiştir:

$$Q_{gg} = [Mass(Z_1, A_1) + Mass(Z_2, A_2)] - [Mass(Z_3, A_3) + Mass(Z_4, A_4)] \quad (4.26)$$

$$E^* = TKEL + Q_{gg} \quad (4.27)$$

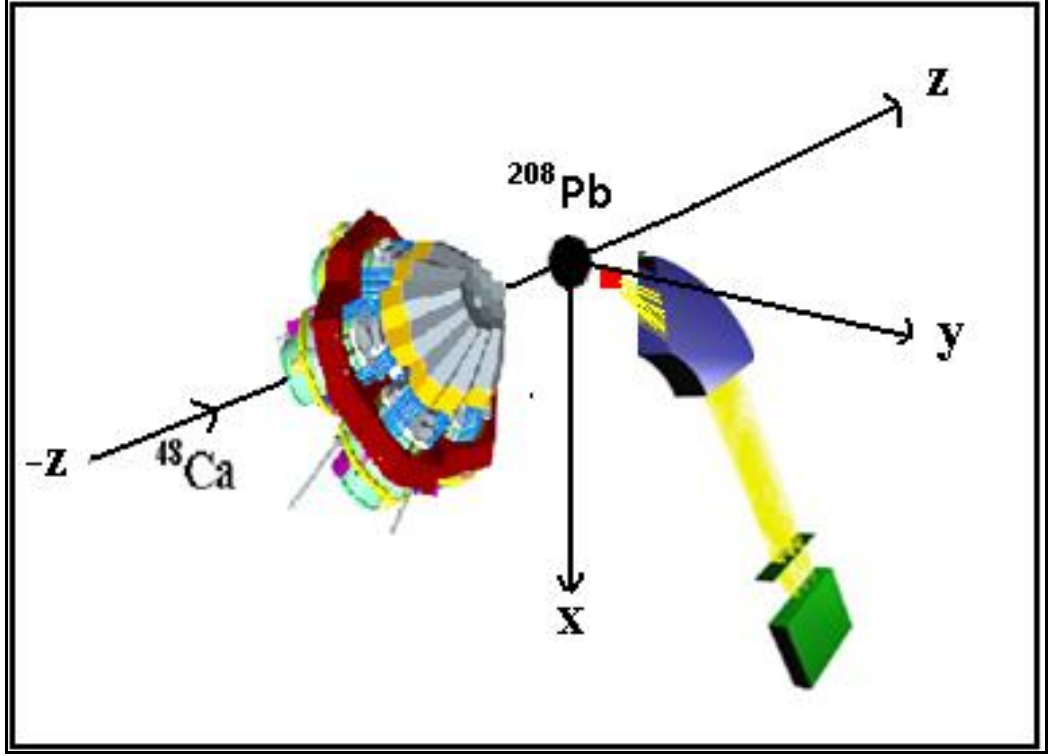
Burada E_{ex} ; bileşik çekirdeğin toplam uyarılma enerjisidir. Binary reaksiyon kinematiğine göre toplam uyarılma enerjisi, ürün çekirdekler arasında eşit olarak bölüşülür [69]. Bu sebeple reaksiyon sonrasında oluşan “iyon hüzmesi benzer” ve “hedef çekirdek benzer” çekirdeklerin uyarılma enerjileri birbirine eşittir.

$$E_3^* = E_4^* = E^* / 2.0 \quad (4.28)$$

Bu aşamada *en önemli* nokta; uyarılma enerjisinin, ürün çekirdeklerin nötron ayrılma enerjisinden küçük olması gerekliliği'dir. Bu nedenle simülasyonda, uyarılma enerjisinin nötron ayrılma enerjisinden büyük olma durumları ihmal edilmiştir.

4. Reaksiyon kinematiği hesaplamaları sonrasında, CM' den LAB sistemine geçiş yapılarak ve her bir çıkış kanalı için *grazing* kodları tarafından belirlenen açılma dağılım değerleri kullanılarak ürün çekirdeklerin dedektör materyali (MCP) ile

etkileşme pozisyonları, AGATA Demonstrator + PRISMA deneysel düzeneğinin koordinat sistemine yerleşimi ve MCP dedektörünün koordinat noktaları göz önüne alınarak belirlenmiştir.



Şekil 4.17: AGATA Demonstrator + PRISMA deneysel düzeneği için gerçekleştirilen çoklu-nükleon transfer reaksiyonunun şematik gösterimi.

5. Reaksiyon sonrasında gözlenen ürün çekirdeklerden yayınlanan γ -ışını enerjileri, seviye bozunma bilgileri kullanılarak ve oluşması muhtemel tüm rotasyonel bantların varlıkları düşünülerek seçilmişlerdir [70]. Oluşturulan *Gerçeksil Simülasyon*' da varlığı öngörülen rotasyonel bantların seçimi aynı olasılıkta olup, bantları oluşturan seviyelere ait γ -ışını enerjilerinin toplamı, toplam uyarılma enerjisine eşit ya da küçüktür. Her bir ürün çekirdeğe ait seçilen γ -ışını enerji değerleri Tablo 4.2' de sunulmuştur.

Tablo 4.2-a: ^{46}K çekirdeğine ait yayınlanan γ -ışınlarının seviye bozunma enerji değerlerinin, bozunma şiddetlerinin, geçiş seviyelerinin ve oluşan simülasyonunun analizi sonrasında gözlenen FWHM değerlerinin gösterimi.

Çıkış Kanalı	γ -Enerjisi (keV)	Geçiş	İlk Seviye	Son Seviye	Şiddet(%)	Γ =FWHM (keV)
^{46}K	1944.3	E 1	7	1	100	4.7
	679.0	M 1	5	3	100	2.5
	103.5	M 1	3	2	100	1.5
	587.3	M 1	2	1	100	2.4
	1151.0	M 1	6	2	100	3.2
	587.3	M 1	2	1	100	2.4
	194.6	M 1	4	3	100	1.8
	103.5	M 1	3	2	100	1.5
	587.3	M 1	2	1	100	2.4
	679.0	M 1	5	3	100	2.5
	691.0	E 2	3	1	38	3.0

Tablo 4.2-b: ^{47}K çekirdeğine ait yayınlanan γ -ışınlarının seviye bozunma enerji değerlerinin, bozunma şiddetlerinin, geçiş seviyelerinin ve oluşan simülasyonunun analizi sonrasında gözlenen FWHM değerlerinin gösterimi.

Çıkış Kanalı	γ -Enerjisi (keV)	Geçiş	İlk Seviye	Son Seviye	Şiddet(%)	Γ =FWHM (keV)
^{47}K	360.0	M 1	2	1	100	2.3
	3822.0	M 1	5	3	100	5.1
	1660.0	M 2	3	2	100	2.6
	360.0	M 1	2	1	100	2.3
	1742.0	M 1	8	3	100	4.3
	1660.0	M 2	3	2	100	2.6
	360.0	M 1	2	1	100	2.3

Tablo 4.2-c: ^{48}K çekirdeğine ait yayınlanan γ -ışınlarının seviye bozunma enerji değerlerinin, bozunma şiddetlerinin, geçiş seviyelerinin ve oluşan simülasyonunun analizi sonrasında gözlenen FWHM değerlerinin gösterimi.

Çıkış Kanalı	γ -Enerjisi (keV)	Geçiş	İlk Seviye	Son Seviye	Şiddet(%)	Γ =FWHM (keV)
^{48}K	1449.0	M 2	9	8	100	3.3
	449.0	M 1	8	7	100	2.5
	279.0	M 1	7	6	100	2.0

Tablo 4.2-d: ^{46}Ca çekirdeğine ait yayınlanan γ -ışınlarının seviye bozunma enerji değerlerinin, bozunma şiddetlerinin, geçiş seviyelerinin ve oluşan simülasyonunun analizi sonrasında gözlenen FWHM değerlerinin gösterimi.

Çıkış Kanalı	γ -Enerjisi (keV)	Geçiş	İlk Seviye	Son Seviye	Şiddet(%)	Γ =FWHM (keV)
^{46}Ca	3020.0	E 2	6	1	63	5.1
	1675.0	M 1	6	2	100	3.7
	1346.0	E 2	2	1	100	3.4
	399.2	E 2	5	4	100	2.4
	1228.7	E 2	4	2	100	3.1
	1346.0	E 2	2	1	100	3.4
	1077.5	E 2	3	2	100	3.2
	1346.0	E 2	2	1	100	3.6
	2274.0	E 1	7	2	100	3.5
	1346.0	E 2	2	1	100	3.4

Tablo 4.2-e: ^{47}Ca çekirdeğine ait yayınlanan γ -ışınlarının seviye bozunma enerji değerlerinin, bozunma şiddetlerinin, geçiş seviyelerinin ve oluşan simülasyonunun analizi sonrasında gözlenen FWHM değerlerinin gösterimi.

Çıkış Kanalı	γ -Enerjisi (keV)	Geçiş	İlk Seviye	Son Seviye	Şiddet(%)	Γ =FWHM (keV)
^{47}Ca	564.8	E 1	3	2	100	2.7
	2013.5	E 2	2	1	100	3.4
	586.0	E 1	4	2	100	2.8
	2013.5	E 2	2	1	100	3.4
	2044.2	-	7	2	100	3.7
	2013.5	E 2	2	1	100	3.4
	861.7	-	6	2	100	3.0
	2013.5	E 2	2	1	100	3.4

Tablo 4.2-f: ^{48}Ca çekirdeğine ait yayınlanan γ -ışınlarının seviye bozunma enerji değerlerinin, bozunma şiddetlerinin, geçiş seviyelerinin ve oluşan simülasyonunun analizi sonrasında gözlenen FWHM değerlerinin gösterimi.

Çıkış Kanalı	γ -Enerjisi (keV)	Geçiş	İlk Seviye	Son Seviye	Şiddet(%)	Γ =FWHM (keV)
^{48}Ca	2789.0	E 1	10	6	100	2.3
	780.1	M 1	6	2	100	2.8
	3831.8	E 2	2	1	100	4.4
	2389.8	-	11	7	100	4.5
	642.8	-	7	4	100	2.7
	671.5	E 2	4	2	100	2.9
	3831.8	E 2	2	1	100	4.4

	451.0	E 2	3	2	100	2.6
	3831.8	E 2	2	1	100	4.4

Tablo 4.2-g: ^{49}Ca çekirdeğine ait yayınlanan γ -ışınlarının seviye bozunma enerji değerlerinin, bozunma şiddetlerinin, geçiş seviyelerinin ve oluşan simülasyonunun analizi sonrasında gözlenen FWHM değerlerinin gösterimi.

Çıkış Kanalı	γ -Enerjisi (keV)	Geçiş	İlk Seviye	Son Seviye	Şiddet(%)	Γ =FWHM (keV)
^{49}Ca	1531.0	M 1	15	3	25	3.6
	3356.7	E 3	3	1	100	-
	875.0	-	15	7	100	3.0
	4017.5	-	7	1	100	-
	3585.0	M 1	4	1	100	4.6
	3859.7	-	5	1	100	4.9

Tablo 4.2-h: ^{50}Ca çekirdeğine ait yayınlanan γ -ışınlarının seviye bozunma enerji değerlerinin, bozunma şiddetlerinin, geçiş seviyelerinin ve oluşan simülasyonunun analizi sonrasında gözlenen FWHM değerlerinin gösterimi.

Çıkış Kanalı	γ -Enerjisi (keV)	Geçiş	İlk Seviye	Son Seviye	Şiddet(%)	Γ =FWHM (keV)
^{50}Ca	1973.0	-	3	2	100	3.6
	1027.0	E 2	2	1	100	3.0
	3005.0	-	6	2	100	5.0
	1027.0	E 2	2	1	100	3.0
	4030.0	-	6	1	100	5.4

Tablo 4.2-i: ^{48}Sc çekirdeğine ait yayınlanan γ -ışınlarının seviye bozunma enerji değerlerinin, bozunma şiddetlerinin, geçiş seviyelerinin ve oluşan simülasyonunun analizi sonrasında gözlenen FWHM değerlerinin gösterimi.

Çıkış Kanalı	γ -Enerjisi (keV)	Geçiş	İlk Seviye	Son Seviye	Şiddet(%)	Γ =FWHM (keV)
^{48}Sc	370.3	M 1	5	3	100	2.4
	121.4	M 1	3	2	100	1.6
	130.9	M 1	2	1	100	1.6
	519.9	M 1	7	5	100	2.6
	370.3	M 1	5	3	100	2.4
	121.4	M 1	3	2	100	1.6
	130.9	M 1	2	1	100	1.6
	1638.8	E 1	10	3	100	4.2
	121.4	M 1	3	2	100	1.6
	130.9	M 1	2	1	100	1.6

	779.0	E 1	8	5	100	2.8
	370.3	M 1	5	3	100	2.4
	121.4	M 1	3	2	100	1.6
	130.9	M 1	2	1	100	1.6

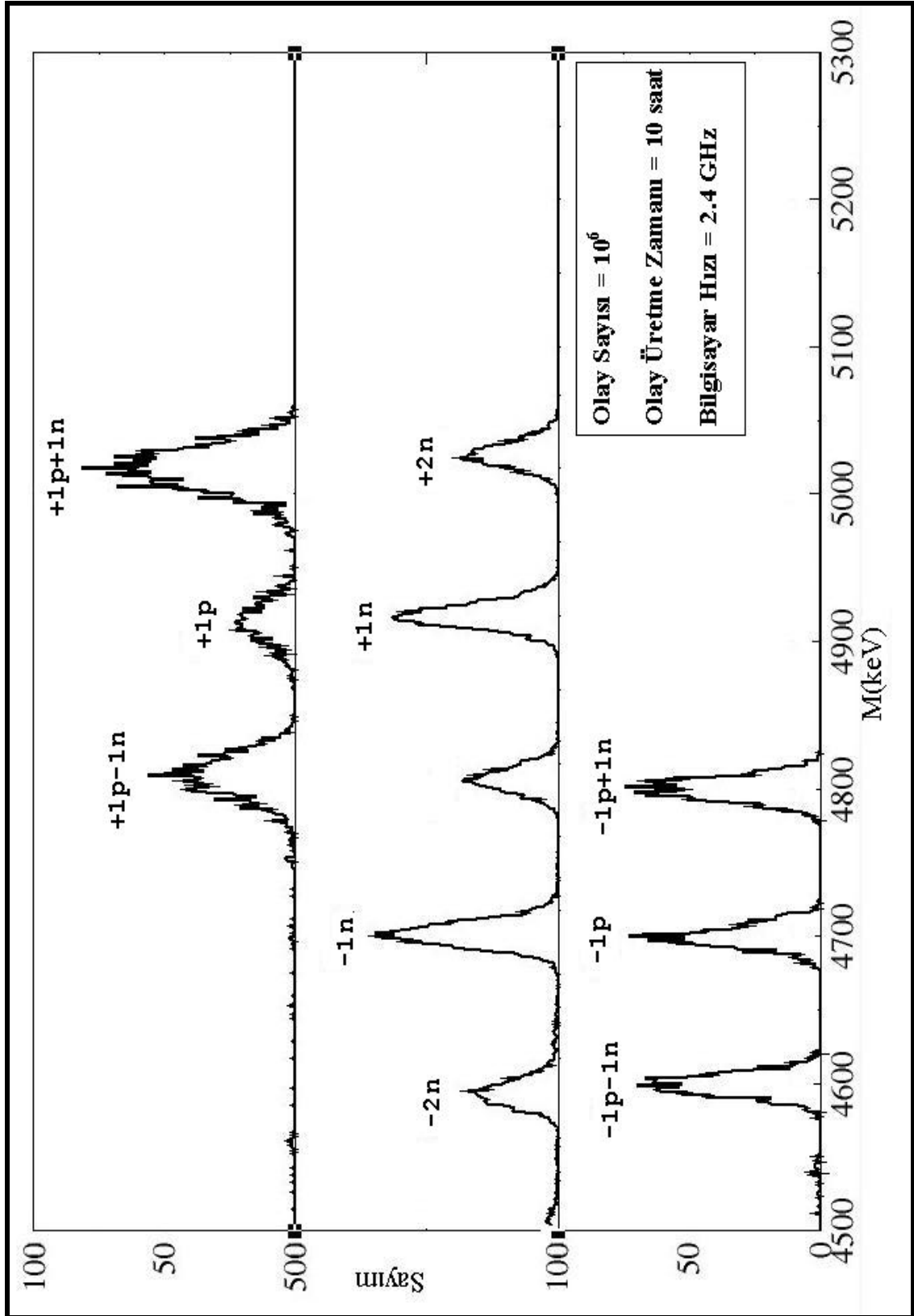
Tablo 4.2-j: ^{49}Sc çekirdeğine ait yayınlanan γ -ışınlarının seviye bozunma enerji değerlerinin, bozunma şiddetlerinin, geçiş seviyelerinin ve oluşan simülasyonunun analizi sonrasında gözlenen FWHM değerlerinin gösterimi.

Çıkış Kanalı	γ -Enerjisi (keV)	Geçiş	İlk Seviye	Son Seviye	Şiddet(%)	Γ =FWHM (keV)
^{49}Sc	1620.0	M 1	14	3	100	3.5
	2371.7	M 2	3	1	100	-
	1408.9	M 1	25	4	100	4.0
	3084.4	E 2	4	1	100	-

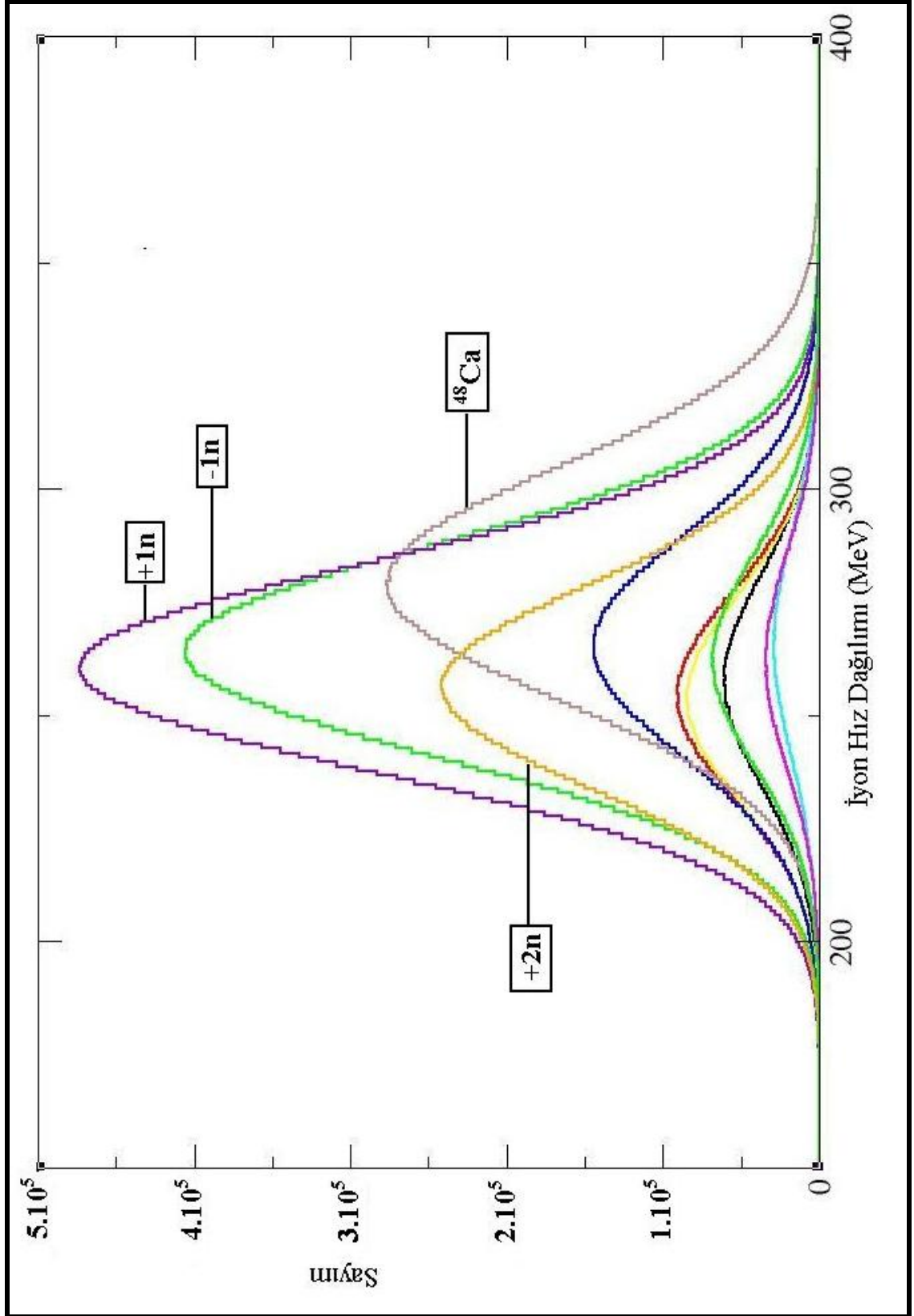
Tablo 4.2-k: ^{50}Sc çekirdeğine ait yayınlanan γ -ışınlarının seviye bozunma enerji değerlerinin, bozunma şiddetlerinin, geçiş seviyelerinin ve oluşan simülasyonunun analizi sonrasında gözlenen FWHM değerlerinin gösterimi.

Çıkış Kanalı	γ -Enerjisi (keV)	Geçiş	İlk Seviye	Son Seviye	Şiddet(%)	Γ =FWHM (keV)
^{50}Sc	1519.3	-	5	3	100	3.2
	71.6	-	3	2	100	-
	256.9	-	2	1	100	1.9
	1590.9	-	5	2	61	3.3
	256.9	-	2	1	100	1.9

Yukarıda belirtilen aşamalar gerçekleştirilerek oluşturulan *Gerçekçil Simülasyon* ile AGATA Demonstrator +PRISMA dedeksiyon sistemine ait elde edilen “iyon kimliği & γ -ışını enerjisi” eş zamanlı verisi ve bu verinin analizi ile her bir çıkış kanalına ait kütle spektrumları oluşturulmuş (Şekil 4.18) ve hız değerleri (Şekil 4.19) belirlenmiştir.



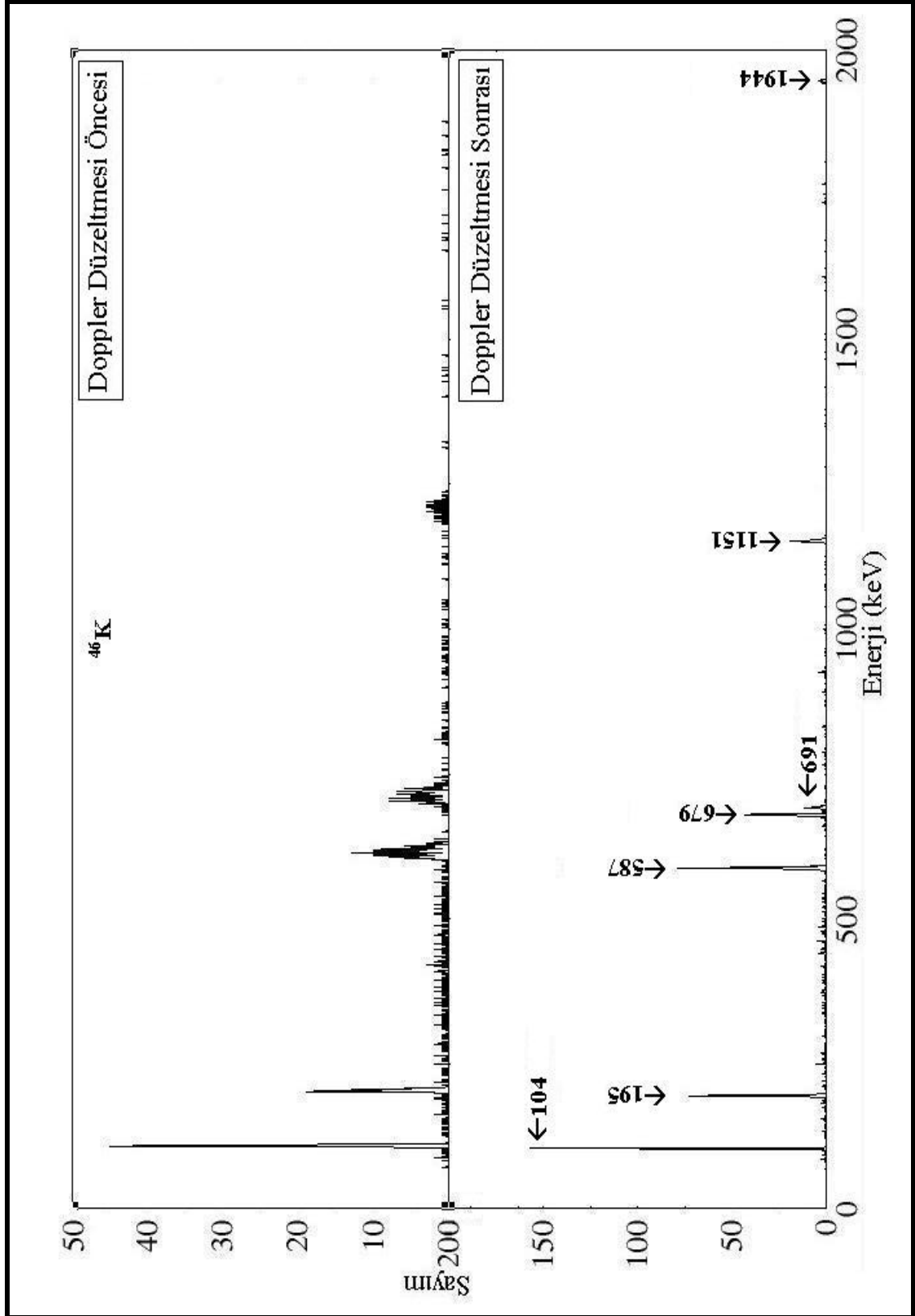
Şekil 4.18: Gerçeksil Simülasyon sonrasında elde edilen verinin analizi ile oluşturulan her bir çıkış kanalına ait kütle spekturumlarının gösterimi.



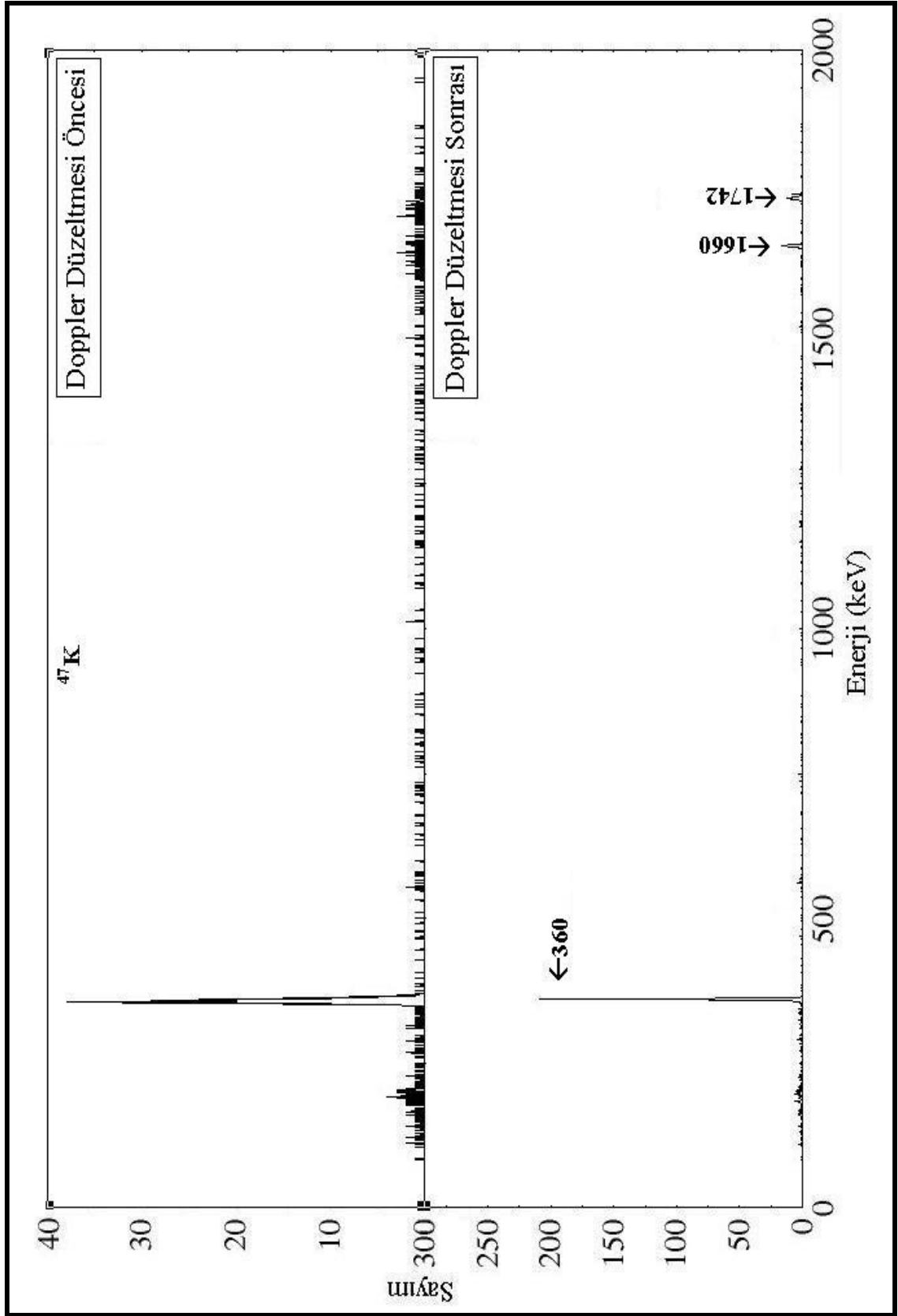
Şekil 4.19: Reaksiyon sonrasında gözlenen her bir çıkış kanalına ait hız dağılımının gösterimi.

Daha önce de belirtildiği üzere bu tez çalışmasının amacı, “ γ -ışını iz-sürme prensibi” ve “Darbe biçim analizi” uygulamaları temellerine dayanan pozisyona duyarlı dedektörler kullanılarak dedeksiyon veriminin ve dedektör çözünürlüğünün artırıldığı gösterilmesidir. İyi değerlerde “Verim” ve “Çözünürlük” elde edilebilmesi için ise, reaksiyon sonrasında dedekte edilen parçacıkların (iyon ve γ -ışınları) dedektörler ile etkileşme pozisyonlarının ve yayınlanma doğrultularının belirlenmesi gerekir. Bölüm 3’te de anlatıldığı üzere bir nükleer reaksiyonlar sonrasında “Doppler Kayması” kaçınılmazdır ve bu durum yayınlanan parçacıkların doğrultularının doğru bir şekilde belirlenmesini engeller. Bu sebeple, bu kaymalara Doppler Düzeltmesi uygulanmalıdır.

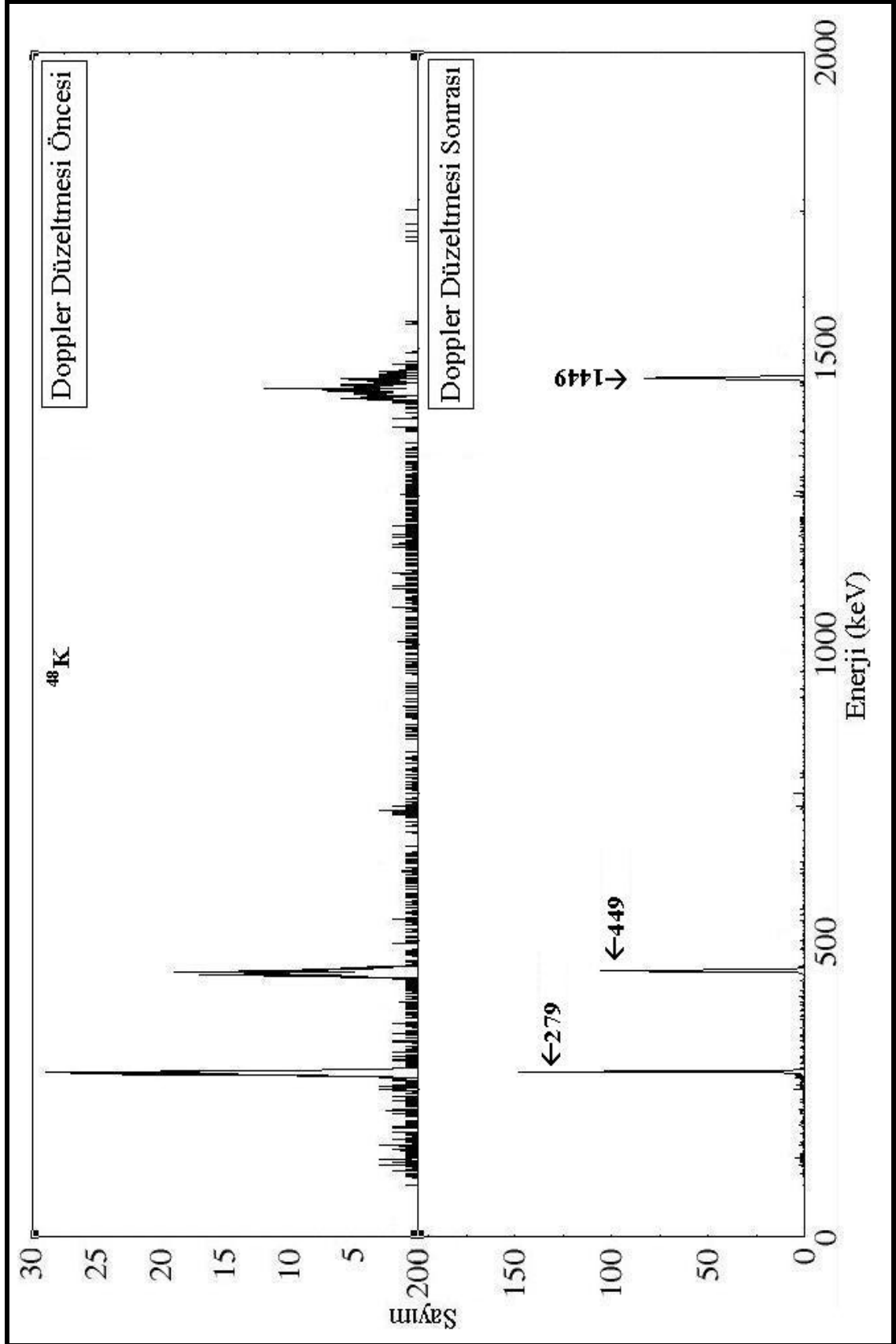
Tez çalışmasının bu aşamasında, belirlenen her bir çıkış kanalına ait enerji spektrumları “*doppler düzeltmesi öncesi*” ve “*doppler düzeltmesi sonrası*” farklılıklarını gösterir biçimde Şekil 4.20 – Şekil 4.30 aralığında sunulmuştur.



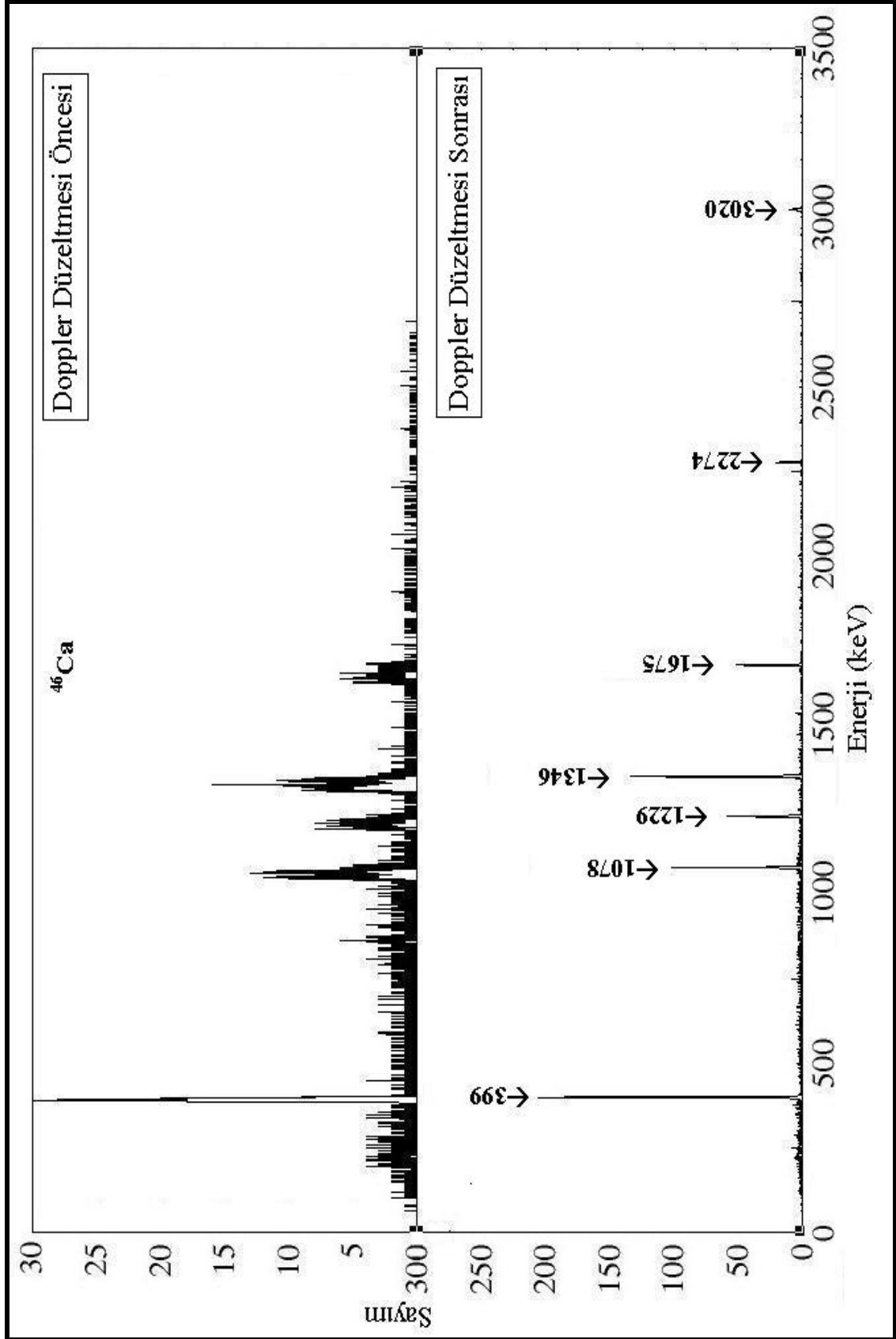
Şekil 4.20: ^{46}K kanalına ait “doppler düzeltmesi öncesi” ve “doppler düzeltmesi sonrası” enerji spektrumlarının gösterimi.



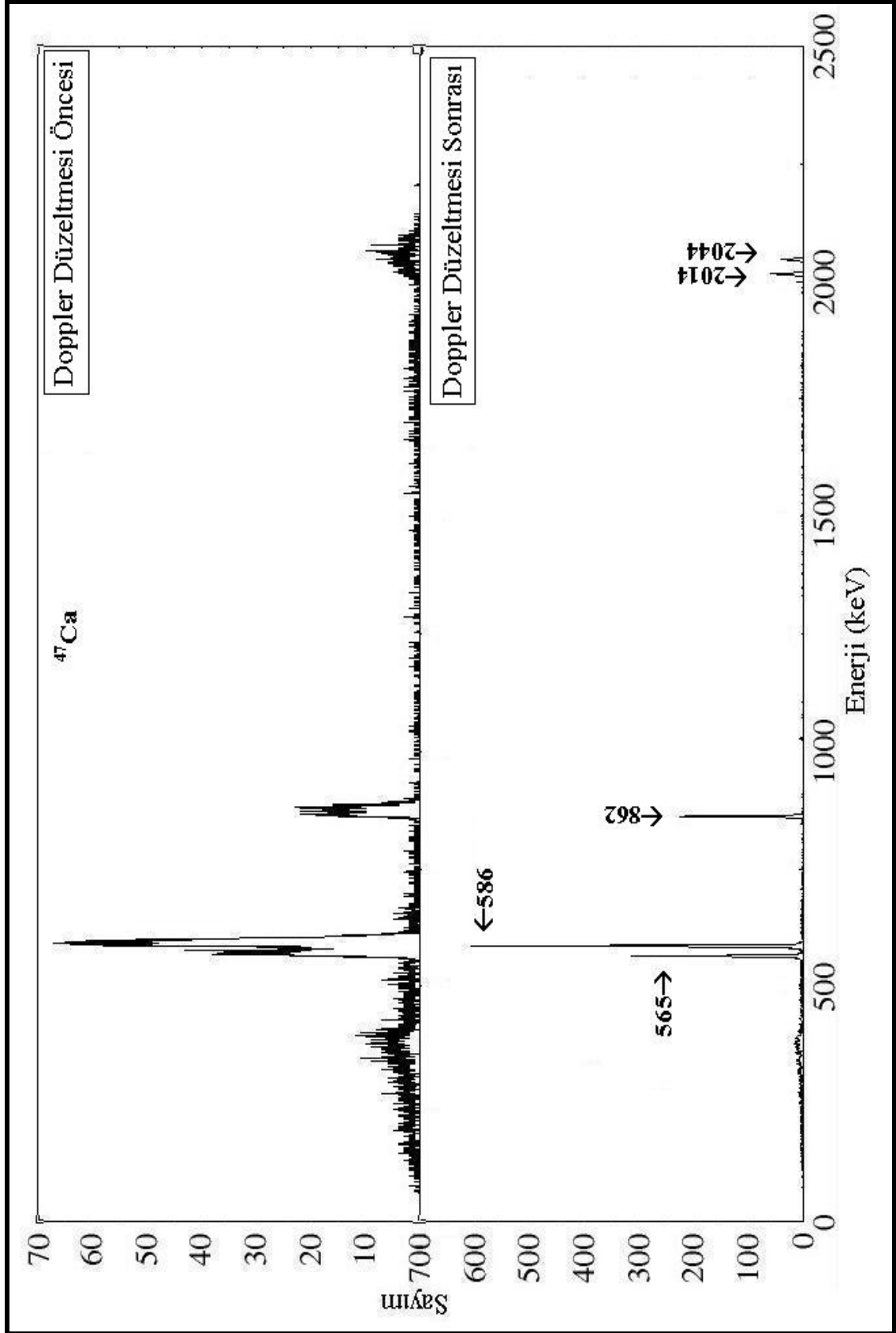
Şekil 4.21: ^{47}K kanalına ait “doppler düzeltmesi öncesi” ve “doppler düzeltmesi sonrası” enerji spektrumlarının gösterimi.



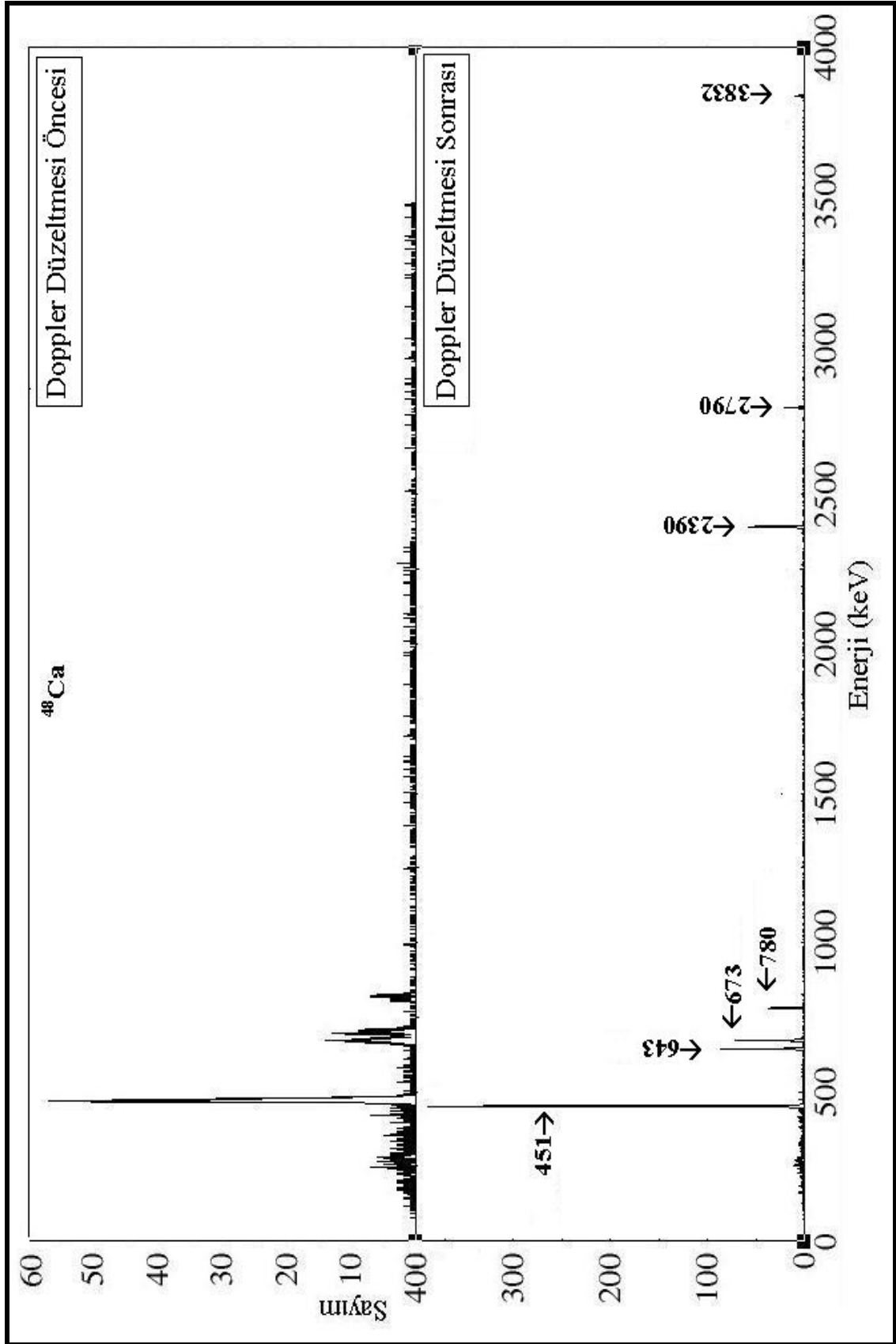
Şekil 4.22: ^{48}K kanalına ait “doppler düzeltmesi öncesi” ve “doppler düzeltmesi sonrası” enerji spektrumlarının gösterimi.



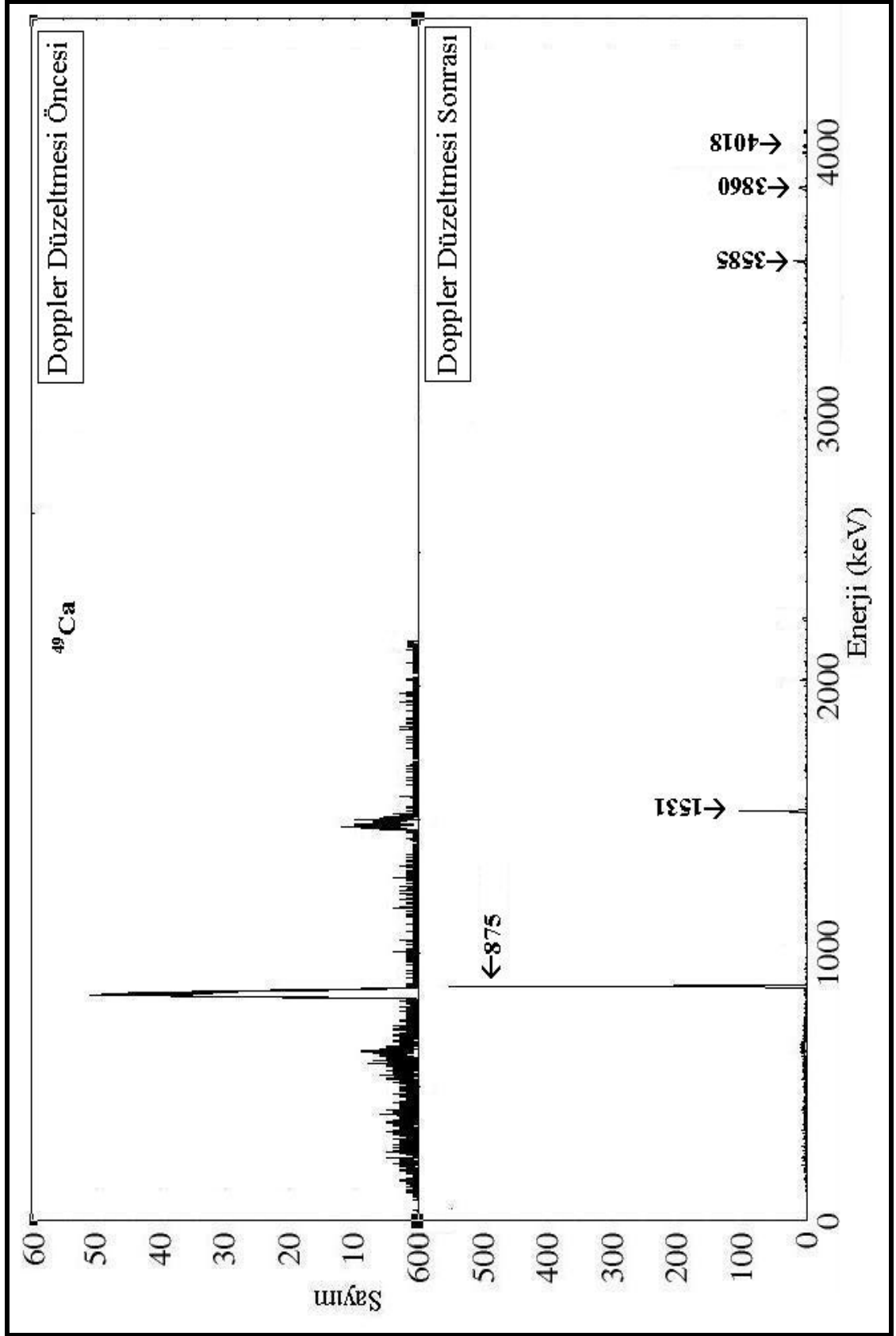
Şekil 4.23: ^{46}Ca kanalına ait “doppler düzeltmesi öncesi” ve “doppler düzeltmesi sonrası” enerji spektrumlarının gösterimi.



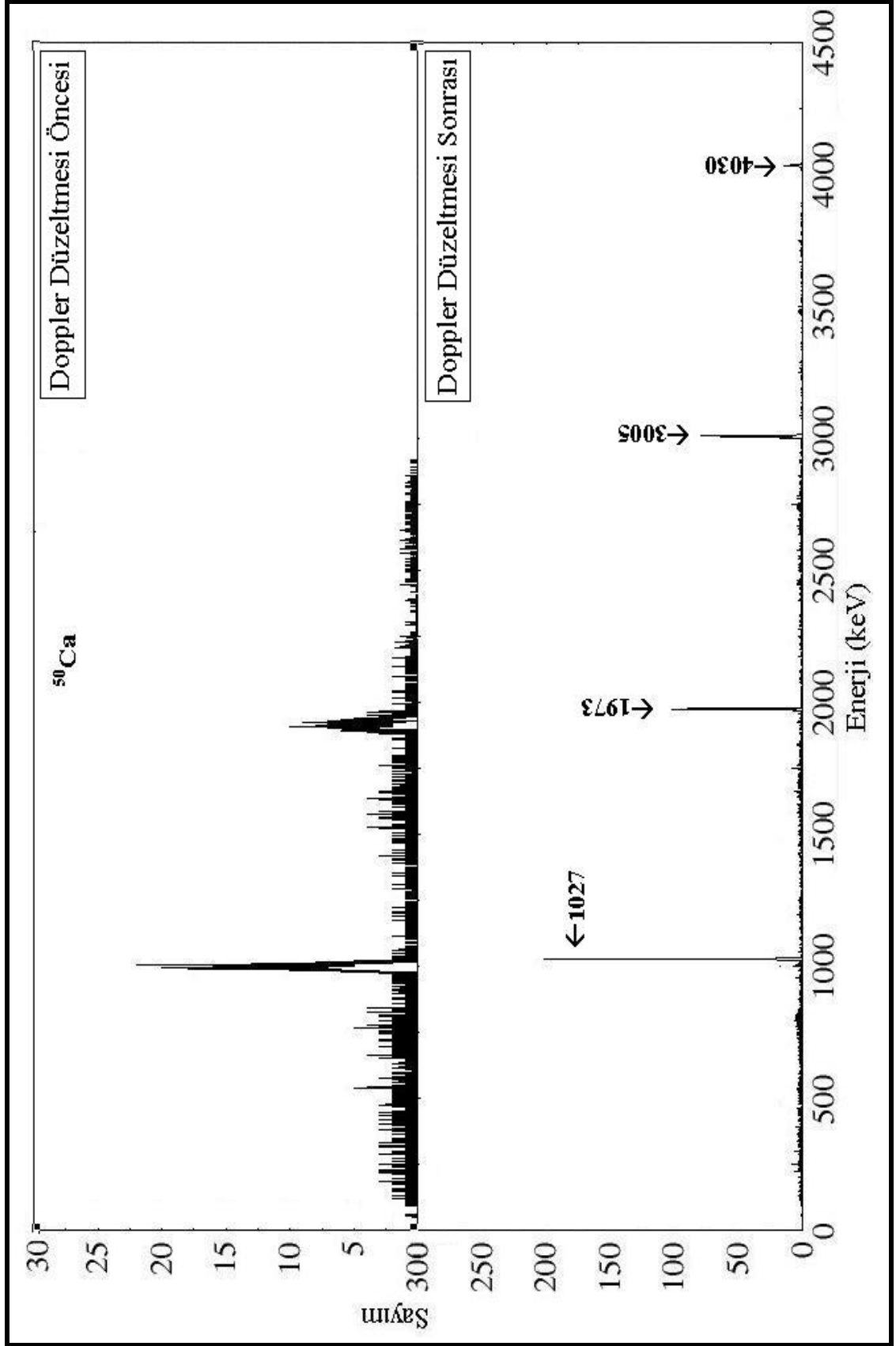
Şekil 4.24: ^{47}Ca kanalına ait “doppler düzeltmesi öncesi” ve “doppler düzeltmesi sonrası” enerji spektrumlarının gösterimi.



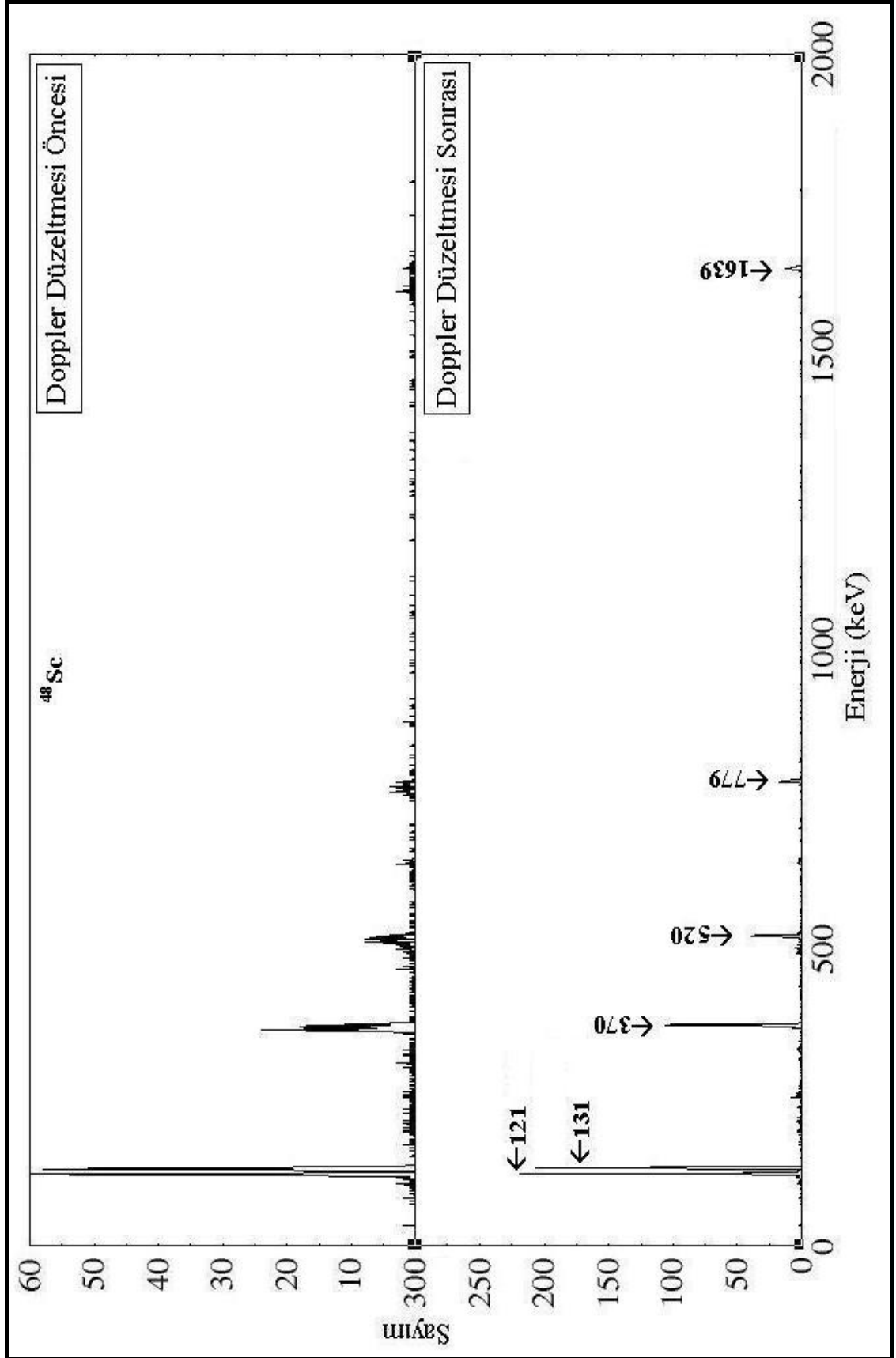
Şekil 4.25: ^{48}Ca kanalına ait “doppler düzeltmesi öncesi” ve “doppler düzeltmesi sonrası” enerji spektrumlarının gösterimi.



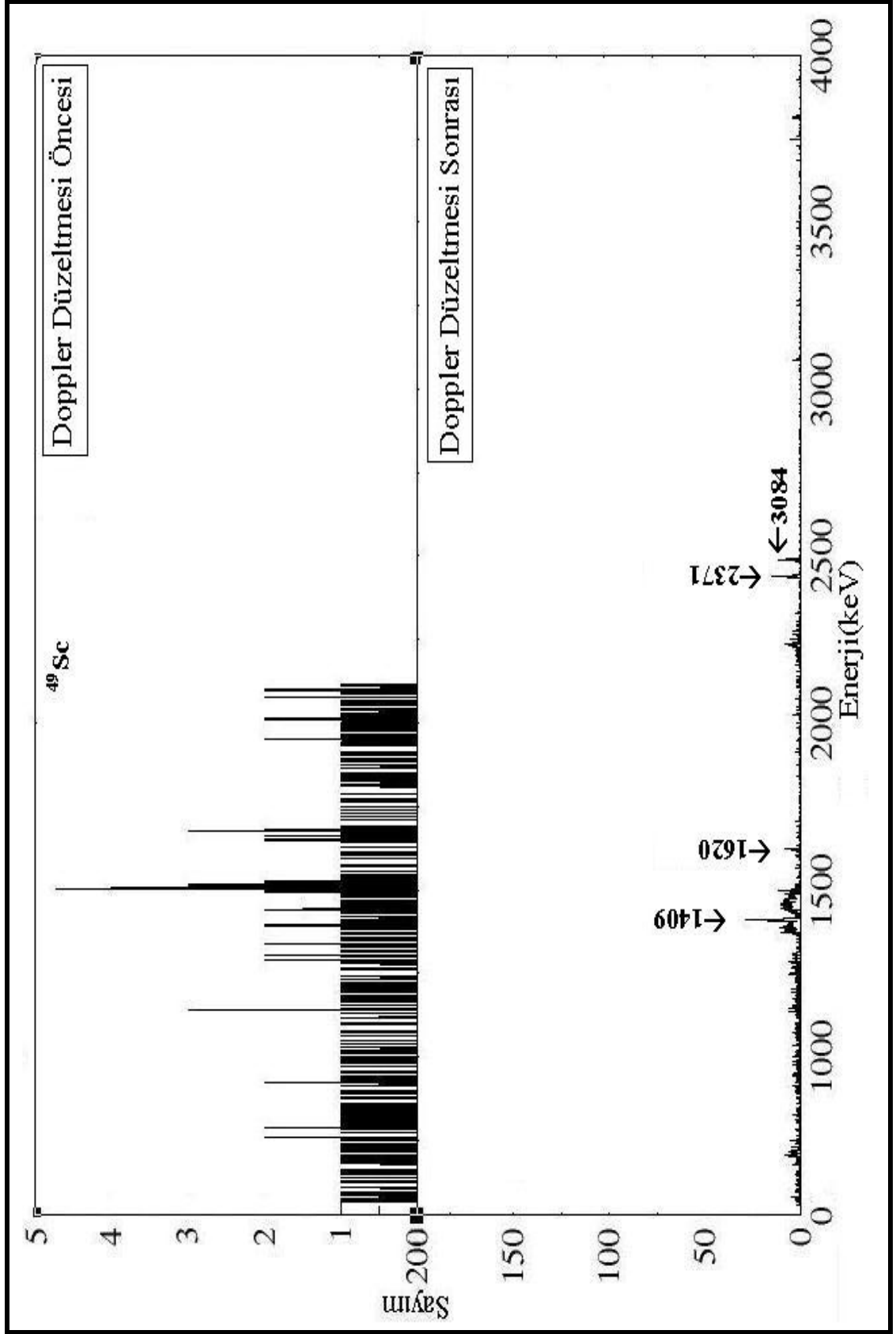
Şekil 4.26: ^{49}Ca kanalına ait “*doppler düzeltmesi öncesi*” ve “*doppler düzeltmesi sonrası*” enerji spektrumlarının gösterimi.



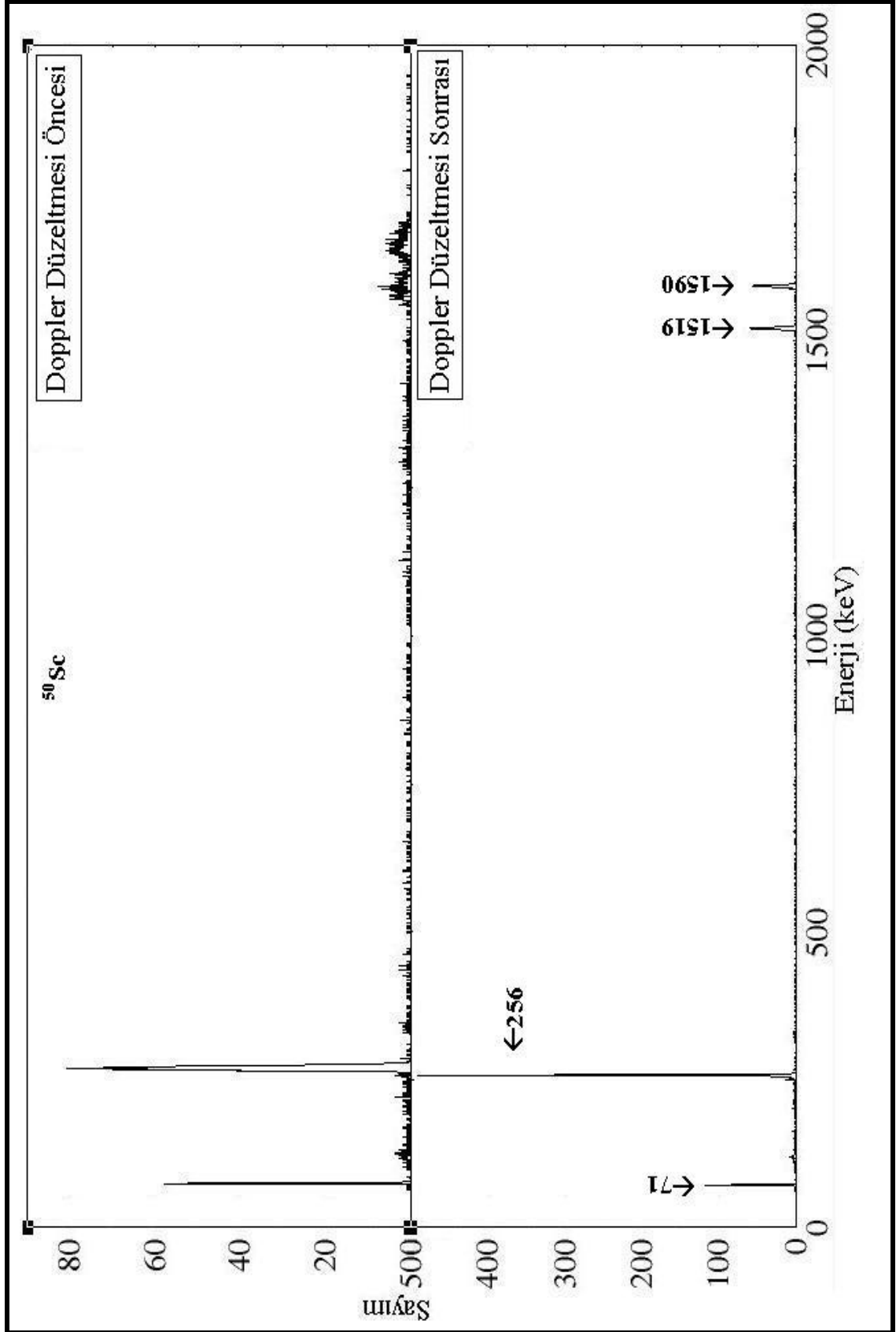
Şekil 4.27: ^{50}Ca kanalına ait “doppler düzeltmesi öncesi” ve “doppler düzeltmesi sonrası” enerji spektrumlarının gösterimi.



Şekil 4.28: ^{48}Sc kanalına ait “doppler düzeltmesi öncesi” ve “doppler düzeltmesi sonrası” enerji spektrumlarının gösterimi.



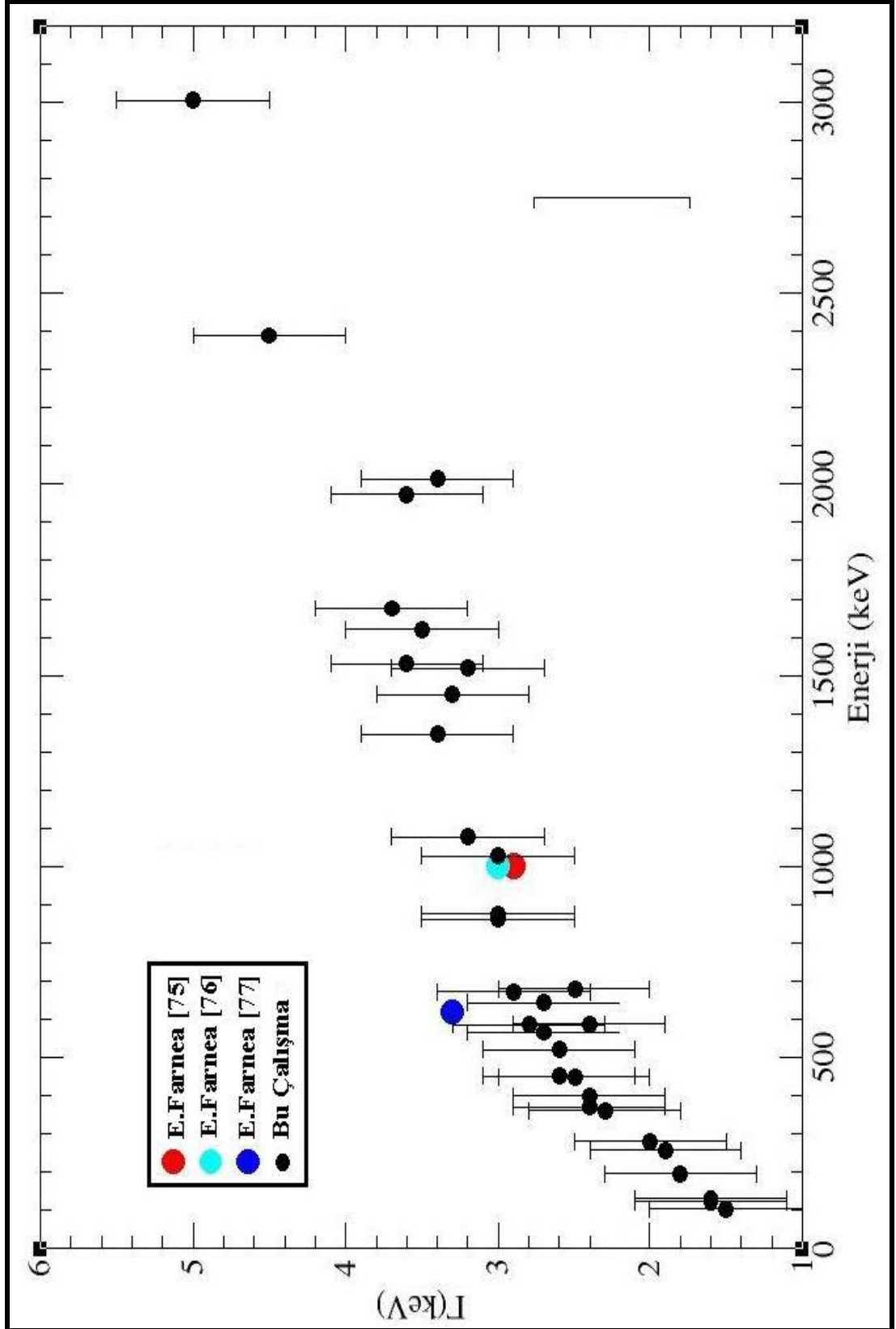
Şekil 4.29: ^{49}Sc kanalına ait “doppler düzeltmesi öncesi” ve “doppler düzeltmesi sonrası” enerji spektrumlarının gösterimi.



Şekil 4.30: ^{50}Sc kanalına ait “doppler düzeltmesi öncesi” ve “doppler düzeltmesi sonrası” enerji spektrumlarının gösterimi.

Yukarıda Şekil 4.20 - Şekil 4.30 aralığında sunulan enerji spektrumları incelendiğinde, *Gerçekçil Simülasyon*'da her bir çıkış kanalı için belirlenen γ -ışını enerjilerinin beklenen kanallarda ve beklenen enerji değerlerinde bulunduğu gözlenmiş ve sonuçlar daha önce CLARA + PRISMA düzeneği ile gerçekleştirilen $^{48}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}@310\text{ MeV}$ reaksiyonunun çıkış kanalları ve γ -ışını enerjileri [63, 71 ,72, 73, 74] ile karşılaştırılmış ve bu sonuçların birebir uyumlu olduğu belirlenmiştir. Örneğin, CLARA + PRISMA ile yapılan bu deney sonrasında ^{46}Ca için gözlenen 1229 keV ve 1346 keV enerjileri ile ^{50}Ca için gözlenen 1027 keV ve 1978 keV enerjileri, oluşturulan GERÇEKSİL SİMÜLASYON sonrasında da gözlenmiş olup, bu enerji değerlerine ait FWHM değerleri ^{46}Ca için sırası ile 3.1 keV, 3.6 keV ve ^{50}Ca için 3.0 keV ve 3.6 keV olarak belirlenmiştir.

Bu tez çalışmasında, konu olan reaksiyon sonrası oluşması öngörülen her bir çıkış kanalı için belirlenen γ -ışını enerjilerinin “*doppler düzeltmesi öncesi*” ve “*doppler düzeltmesi sonrası*” durumları karşılaştırılmış olup, doppler düzeltmesi sonrası γ -ışını doğrultularının çok yüksek hassasiyet ile belirlenebilmesi sebebi ile FWHM değerlerinin Tablo 4.2’de de gösterildiği üzere çok iyi değerlerde olacağı saptanmıştır. Bu değerler AGATA Demonstrator + PRISMA düzeneği için daha önce gerçekleştirilen Monte Carlo simülasyon sonuçları ile [75,76,77] karşılaştırılmış olup, sonuçların uyumu Şekil 4.31’ de sunulmuştur.



Şekil 4.31: Gerçeksel Simülasyon sonrasında her bir çıkış kanalına ait γ -ışını enerjilerinin FWHM değerleri ile daha önce gerçekleştirilen Monte Carlo Simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması.

Tez çalışması kapsamında öngörülen bu sonuçlar, AGATA Demonstrator + PRISMA deneysel düzeneğinin performansının belirlenmesi açısından bir kaynak niteleğindedir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışmasında AGATA Demonstrator + PRISMA deneysel düzeneğinin dedeksiyon performanslarının belirlenmesi amacı ile 3 aşamada geçekçil Monte Carlo kodları üretilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir.

- AGATA Demonstratorün fotopik verimi, hedef-dedektör uzaklığına bağılı olarak ve 5mm'lik pozisyon çözünürlüğü kullanılarak 3% - 7% aralığına değışmekte olup bu değerler mevcut arrayler ile karşılaştırılabılicek aralıktadır [76].
- Hedef-dedektör uzaklığı 14 cm (mümkün en yakın uzaklık) iken 1 MeV enerjili γ -ışınları için AGATA Demonstratorün etkin enerji çözünürlüğünün çok iyi ve FWHM değerinin 2.7 keV olduğu gösterilmiştir [78].
- AGATA Demonstrator + PRISMA deneysel düzeneğine ait doppler düzeltme performansının çok iyi olduğu gözlenmiş, gama ışını enerjilerinin FWHM değerlerinin ise enerji değerlerine bağılı olarak 1.7 keV ile 5.5 keV aralığında değıştiği gözlenmiştir [78].
- CLARA+PRISMA deneysel düzeneği ile gerçekteştirilen $^{48}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$ reaksiyonuna ait ürün çekirdek tepkime kesit değerleri kullanılarak AGATA Demonstrator + PRISMA deneysel düzeneğin için *gerçeksil simülasyon* gerçekteştirilmiştir. Bu simülasyon sonucuna göre, ürün çekirdeklere ait pozisyon bilgileri, doğrultuları ve ürün çekirdeklere ait γ -ışınlarının enerjilerinin yüksek duyarlılık ile elde edilmesi sonucu olarak adı geçen dedeksiyon sisteminin Doppler düzeltme kabiliyetinin mükemmel olacağı ispatlanmıştır.

Tez çalışmasının sonuçları, özellikle gerçekleştirilme çalışmalarına başlanan AGATA Demonstrator + PRISMA deneysel düzeneği ile yapılması planlanan çoklu-nükleon transfer reaksiyon çalışmaları için kaynak niteliğindedir.

Daha önce de açıklandığı üzere, Agata Demonstrator dizimi, AGATA dedektörünün bir alt durumu olarak geliştirilmiş ve 5 adet 3'lü kümelenmiş 15 kristalden oluşmaktadır. Agata Demonstrator dizimi, LNL-INFN'de CLARA dedektörünün yerine yerleştirilerek PRISMA spektrometresi ile birlikte kullanılacaktır. Agata Demonstrator diziminin CLARA yerine yerleştirilmesi işlemi 2009 yılının başlarında tamamlanmış olup, ilk deneyler yapılmaya başlanmıştır.

Agata Demonstrator + PRISMA deneysel düzeneği için gerçekleştirilen simülasyon sonuçları ile CLARA+PRISMA deneysel sonuçları karşılaştırması yapılması durumunda ise; CLARA dedektörü, reaksiyon ürün çekirdeklerinin hızları $\beta = 8\% - 10\%$ iken verim değeri $2.6\% - 3\%$ aralığındadır [78]. Aynı koşullar altında dedektör-hedef uzaklığı 14cm iken AGATA Demonstrator'un verim değeri $\sim 7\%$ 'dir. Bu sonuç, Agata Demonstrator + PRISMA deneysel düzeneği ile CLARA +PRISMA ile gözlenemeyen kanalların gözlenmesi öngörülmektedir. Bununla birlikte bu deneysel düzenek ile,

- Şimdiye kadar γ -ışını spektroskopisinde çoklu nükleon transfer reaksiyonları ile gerçekleştirilen iyon- γ ile γ - γ eş-zamanlı ölçümleri çalışmalarında $Z=N$ ve nötron-zengin bölgede bilinmeyen çekirdeklerin yapısı, dedeksiyon sistemlerinin sınırlılığı sebebi ile belirlenememiştir [75]. Bu bağlamda, AGATA Demonstrator + PRISMA dedeksiyon sisteminin performansının çok iyi olacağı öngörülerek, bu çalışmaların gerçekleşmesi ,
- AGATA Demonstrator + PRISMA dedeksiyon sisteminin Doppler Düzeltme kabiliyetinin çok iyi olması ve iyonların dedeksiyonunda geniş kabul edilebilirlik bulunması sebebi ile Binary reaksiyonlar (coulomb uyarılması, quasi-elastic reaksiyonlar,..)

- γ -ışınlarının Yüksek çokluk (multiplicity) değerlerinde, iz sürme tekniklerinin de etkisi ile Coulomb bariyeri civarında oluşabilecek Füzyon-Buharlaşma reaksiyonları,
- Nötron-Zengin çekirdeklerin araştırılması çalışmaları ve yarı-ömür ölçümü çalışmalarının yapılması öngörülmektedir.

KAYNAKÇA

- [1] MUELLER A., 1992, GANIL radioactive beam experiments, *Nuclear Physics A*, Vol. 538, 321-331.
- [2] WEICK H., 2004, The new Radioactive Ion Beam Facility at GSI, *AIP Conf. Proc.* Vol.704, 228-233.
- [3] OSA A., 2007, Status of JAEA KEK radioactive ion beam facility-TRIAC, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, Vol. 261,1048-1052.
- [4] GEANT 4 COLLABORATION, 2003, Geant4 - a simulation toolkit, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, Vol.506, 250–303.
- [5] http://www.ganil.fr/research/developments/spiral2/files/WB_SP2_Final.pdf
- [6] <http://www.ganil.fr/eurisol/index.html>
- [7] OSTROUMOV P.N., 2003 Heavy-Ion Beam Dynamics in the Rare Isotope Accelerator Facility, *Proceedings of the 2003 Particle Accelerator Conference*.
- [8] MORINAGA H., 1963, *Nucl. Phys.* Vol 46, 210.
- [9] JAASKELANEN M. ,1983, *Nucl. Instrum. Meth. A.*, Vol 204, 385.
- [10] JOHNSON A., 1971, *Phys. Lett. B*, Vol.34, 605.
- [11] NOLAN P.J., 1985, *Nucl. Instrum. Meth. A* , Vol 236, 95

- [12] BECK F.A., 1984, *Proc. Conf. on Instrumentation for Heavy Ion Nuclear Research*, ed. D. Shapira: Vol. 7 in the *Nucl. Sci. Research Conf. Series* (Harwood, New York), 129.
- [13] LIEDER R.M., 1984, *Nucl. Instr. Meth.* Vol 220, 363.
- [14] HERSKIND B., 1985, *Nucl. Phys. A*, Vol 447, 353c.
- [15] DIAMOND R.M. 1984, *Proc. Conf. on Instrumentation for Heavy Ion Nuclear Research*, ed. D. Shapira: in the *Nucl. Sci. Research Conf. Series*(Harwood, New York), Vol. 7 , 259.
- [16] TARAS P. ,1987, *Nucl. Instr. And Meth. A* Vol 257, 301.
- [17] BAZZACCO D. ,1992, *Proc Workshop on Large γ -ray Detector Arrays*, Chalk River, Canada, AECL-10613, 376.
- [18] BEAUSANG C.W.,1992, *Nucl. Instr. Meth. A*, Vol 313, 37.
- [19] VETTER K., 2007, *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, Vol. 57, 363-404.
- [20] DUCHENE G., 1999, The Clover: a new generation of composite Ge detectors, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, Vol.432 , 90–110.
- [21] WILHELM M., 1996, The response of the Euroball Cluster detector to γ -radiation up to 10 MeV, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, Vol.381, 462–465.
- [22] KORTEN W. ,2001, Technical proposal for the AGATA project.

- [23] KROLL T., 2001, Simulation and analysis of pulse shapes from highly segmented HPGe detectors for the γ -ray tracking array MARS, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, Vol.463, 227–249.
- [24] WARR N., 2003, MINIBALL: The first gamma-ray spectrometer using segmented, encapsulated germanium detectors for studies with radioactive beams, *European Physical Journal A*, Vol. 20 , 65–66.
- [25] MUELLER W. F., 2001, Thirty-two-fold segmented germanium detectors to identify γ -rays from intermediate energy exotic beams, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* , Vol.466, 492–498.
- [26] SHEPHERD S. L., 1999, Measurements on a prototype segmented Clover detector, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, Vol.434 , 373–386.
- [27] GRETA Steering Committee-Proposal for GRETINA, ,2003, *Lawrence Berkeley National Laboratory*.
- [28] LIEDER R.M. ,2001, *Nucl. Phys. A* , Vol.682, 279c.
- [29] KROLL Th., 2001, Proceedings Bologna2000, *World Scientific*.
- [30] SIMPSON J., 1997, The Euroball Spectrometer, *Z.Phys. A*, Vol.358, 139.
- [31] EBERTH J., 1997, *Prog.Part.Nucl.Phys.*, Vol. 38, 29.
- [32] GERL J., 1998, VEGA-Proposal, *GSI report*.
- [33] DELEPLANQUE M.A. , 1999, GRETA: utilizing new concepts in gamma-ray detection, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, Vol.430, 292-310.
- [34] <http://grfs1.lbl.gov/>

- [35] RECCHIA F., 2008, In-beam Test and Imaging Capabilities of the AGATA Prototype Detector, *Doktora Tezi*, Padova Üniversitesi.
- [36] VAN DER MAREL J., 1999, Backtracking as a way to reconstruct Compton scattered gamma-rays, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* , Vol. 437, 538-551.
- [37] SCHMID G.J., 1999, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, Vol. 430,69.
- [38] LOPEZ MARTENS A., 2004, γ - ray tracking algorithms: a comparison, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* , Vol. 533, 454–466.
- [39] FARNEA E., 2006, Reaction Mechanisms and Nuclear Structure at the Coulomb Barrier. *AIP Conference Proceedings*, Vol. 853, 473-478.
- [40] BAZZACCO D., 2004, *Nuclear Physics A.*, Vol. 746, 248c–254c.
- [41] KNOLL G. F., 2000, Radiation detection and measurement, Radiation detection and measurement. 3rd ed. New York, NY: Wiley.
- [42] WARR N., 2003, MINIBALL: The first gamma-ray spectrometer using segmented, encapsulated germanium detectors for studies with radioactive beams, *European Physical Journal A*, Vol. 20, 65–66.
- [43] <http://www.canberra.com/fr/>
- [44] GADEA A., 2004, *INFN-LNL(Rep)*, Vol. 202,141 .
- [45] STEFANINI A.M., 2003, *INFN-LNL (Rep)* , Vol.198, 147.
- [46] FARNEA E., 2004, *INFN-LNL(Rep)* , Vol. 202, 158 .

- [47] ŞAHİN E., 2008, N=50 Civarında Nötron-Zengin Çekirdeklerin Kabuk Yapısının İncelenmesi, *Doktora Tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi.
- [48] STEFANINI A.M., 2002, The heavy-ion magnetic spectrometer PRISMA , *Nuclear Physics A*, Vol.701, 217.
- [49] MONTAGNOLI G., 2005, The large-area micro-channel plate entrance detector of the heavy-ion magnetic spectrometer PRISMA, *Nucl.Instrum.MethodsA*, Vol.547, 455.
- [50] BEGHINI S., 2005, The focal plane detector of the magnetic spectrometer PRISMA, *Nucl.Instrum.MethodsA*, Vol.551, 364.
- [51] LATINA A., 2005, Study of Heavy-Ion Reactions with the Magnetic Spectrometer PRISMA:On-line and Off-line Data Analysis, Torino University, Italy.
- [52] EJIRI H., De VOIGHT M.J.A., 1989, Gamma Ray and Electron Spectroscopy in Nuclear Physics, Clarendon Press-OXFORD.
- [53] BASS R. Bass.,1980, Nuclear Reactions of Heavy Ions, Springer-Verlag, New-York.
- [54] VALIENTE DOB'ON J.J.,2003, Study of Neutron Rich Nuclei Using Deep Inelastic Collisions, *Doctor of Philosophy*, University of Surrey.
- [55] GOTTARDO A., 2007, Study of Neutron-Rich Nuclei With The CLARA+PRISMA Setup and First Tests of The Ancillary Detector Dante, Padova.
- [56] KRANE K.S., Introductory Nuclear Physics, John Wiley and Sons, New York (1998).
- [57] KAUFMANN R. , WOLFGANG R., 1961, Nucleon Transfer Reactions in Grazing Collisions of Heavy Ions, *Physical Review*, Vol.121, 192.

- [58] KAUFMANN R. , WOLFGANG R., 1961, Single-Nucleon Transfer Reactions of F^{19} , O^{16} , N^{14} , and C^{12} , *Physical Review* , Vol.121, 206.
- [59] FARNEA E., 2004, *LNL-INFN (Rep)*, Vol. 202, 158.
- [60] BAZZACCO D., 2008, private communication.
- [61] FARNEA E., 2009, private communication.
- [62] <http://agata.lnl.infn.it/>
- [63] VALIENTE DOBON J.J., 2007, *LNL An.Report*, 11.
- [64] “National Nuclear Data Center” , <http://www.nndc.bnl.gov/ensdf/>.
- [65] POLLAROLO G., 1999, Multinucleon Transfer Reactions, *Pramana Journal of Physics*, Vol.53, 473–481.
- [66] WINTHER A.,1990, Program GRAZING, *Fisika* , Vol.22, 41.
- [67] POLLAROLO G.,2009, private communication.
- [68] ERDURAN M.N., 2009, private communication.
- [69] MADANI H., 1993, Mass and Charge Distributions In Iron-Induced Reactions Q and Excitation Energy Division Between The Fragments of the 672-MeV $^{56}Fe+^{165}Ho$ Reaction, *Doktora Tezi*, Maryland.
- [70] <http://radware.phy.ornl.gov/agsdir1.html>
- [71] SZILNER S., <http://fr.arxiv.org/abs/0707.0426>.
- [72] MENGONI D., 2007, *LNL An.Report.*, 9.

[73] POKRONVSKIY I., 2006, *LNL An.Report.*, 42.

[74] BRODA R., 2001, *Acta Phys.Pol.* B32, 2577.

[75] FARNEA E., 2009, *Acta Phys.Pol.* B40, 467.

[76] FARNEA E., 2007, *LNL-INFN (Rep)*, Vol. 222, 199.

[77] FARNEA E., 2006, Monte Carlo Simulations for the AGATA Array, AIP Conference Proceedings, Vol.873, 473-478.

[78] INCE E., 2008, Realistic Simulations of the AGATA Demonstrator+PRISMA Spectrometer, *Nuclear Physics and Astrophysics: From Stable Beams to Exotic Nuclei.* AIP Conference Proceedings, Vol.1072, 273-276.

ÖZGEÇMİŞ

24.09.1979 yılında İstanbul'da doğdu. İlk ve orta tahsilini İstanbul'da tamamladı. 2001 yılı, İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Lisans Programını tamamladı. 2004 yılı, İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Anabilim Dalı Nükleer Fizik Yüksek Lisans Programını tamamladı. 2002 yılı, İstanbul Üniversitesi Hasan Ali Yücel Eğitim Fakültesi Fen Bilgisi Eğitimi Anabilim Dalında Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı ve halen görev yapmaktadır.