

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YENİ TİP GAMA DEDEKTÖRLERİ VE İZ SÜRME TEKNİĞİ

Semih BAYKAL

FİZİK ANABİLİM DALI

ANKARA

2007

Her hakkı saklıdır

Prof. Dr. AYŞE ATAÇ NYBERG danışmanlığında, SEMİH BAYKAL tarafından hazırlanan “YENİ TİP GAMA DEDEKTÖRLERİ VE İZ SÜRME TEKNİĞİ” adlı tez çalışması 20/07/2007 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Ayşe ATAÇ NYBERG
Fizik Anabilim Dalı



Üye : Doç. Dr Ayşe KAŞKAŞ
Fizik Anabilim Dalı



Üye : Yrd. Doç. Dr. Niyazi MERİÇ
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı



Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Ülkü MEHMETOĞLU
Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YENİ TİP GAMA DEDEKTÖRLERİ VE İZ SÜRME TEKNİĞİ

Semih BAYKAL

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ayşe ATAÇ NYBERG

Bu tezde yapım aşaması hala sürmekte olan yeni tip gama ışıını iz sürme dedektör küresi AGATA' nın ve ideal bir Ge küresinin performansları, Geant4 simülasyon ve MGT ileri yönde gama ışıını iz sürme bilgisayar programları kullanılarak incelenmiştir. Ayrıca, AGATA dedektörlerinin kapsüllenmiş ve 2mm genişliğindeki cryostatlar içerisine 3' lü kümeler halinde yerleştirilmiş olduğu gerçekçi bir dedektör sisteminin performansı da incelenmiş ve kapsüllerin ile cryostat kabının dedektör performansına etkisi belirlenmiştir. Bu çalışmada vakum altında tutulan ve 180 tane HpGe hexagonal yapıdaki çok bölümlü (her bir dedektör 36 bölümlü) dedektörlerden oluşan, iç yarıçapı 235 mm dış yarıçapı 329 mm boyutundaki AGATA küresi ve AGATA küresiyle aynı boyutlarda olan ideal Ge kabuğu, GEANT4 simülasyon programı içinde kullanılmıştır. Kürenin merkezine, enerjisi sırasıyla 1MeV, 3MeV olan ve gelen ardışık gamma sayısı (multiplicity) m=1 ve m= 30 olan gama ışıını kaynakları konularak, dedektör ölçümleri simüle edilmiş, sonra ileri yönde iz sürme tekniği ile AGATA küresinin performansını belirleyecek olan peak to total ratio (P/T), foto pik verimi ($\mathcal{E}_{pe}$), full width at half maximum (FWHM), enerji çözünürlüğü (R) değerleri belirlenmiştir. Bulunan değerler, AGATA teknik önerisinde belirtilen değerler ile uyum içindedir.

MGT programı ile iz sürme işlemi yapılması sonucunda, iz sürme sürecinden önceki değerlere kıyasla, P/T oranında %46'lık (m=1) ve %33' lük (m=30), foto pik veriminde ise %28'lik (m=1), %10' luk (m=30) bir artış söz konusudur. Bunun yanında, FWHM (2,2keV) ve R (%0,2) değerlerinde, iz sürme öncesi ve sonrasında bir değişiklik gözlenmemiştir. AGATA dedektörleri için, iz sürme işleminden sonra 1MeV' lik gamma enerjileri ve m=1 koşulu için P/T oranı %70, $\mathcal{E}_{pe}$ değeri %50 civarında elde edilirken, m=30 koşulu için P/T %55, $\mathcal{E}_{pe}$ %32 olarak bulunmuştur. Bu değerler, bugüne kadar kullanılan dedektör küreleri, örneğin EUROBALL değerleri ile kıyaslandığında, AGATA' nın çok üstün olduğunu göstermektedir. Bu sonuç, iz sürme tekniği ve çok bölümlü dedektörlerin başarısıdır. AGATA küresine cryostat ve alüminyum kapsüllerin ilavesinden sonra P/T ve $\mathcal{E}_{pe}$ değerlerinde bir azalma gözlenmiş, 1MeV'lik gamalar için, m=1 koşulunda P/T %58, $\mathcal{E}_{pe}$ %44 olarak ölçülmüştür.

2007, 79 sayfa

Anahtar Kelimeler: Geant4, mgt, ileri yönde gama ışıını iz sürmesi, peak to total ratio (P/T), foto pik verimi ($\mathcal{E}_{pe}$), full width at half maximum (FWHM), enerji çözünürlüğü (R), multiplicity

ABSTRACT

Master Thesis

NEW TYPE OF GAMMA DETECTORS AND TRACKING TECHNIQUE

Semih BAYKAL

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Science
Department of Physics

Supervisor: Prof. Dr. Ayşe ATAÇ NYBERG

In this thesis, performances of a newly developing gamma-ray detector array AGATA and an ideal Ge shell were investigated by using the GEANT4 simulation code and the MGT gamma ray forward tracking code. Performance of AGATA detector was also investigated when detectors were encapsulated and located, three by three, in a cryostat. In this study, AGATA sphere had an inner radius of 235mm and outer radius 329mm. 180 HpGe hexagonal detectors, each 36 fold segmented, were kept in vacuum. An ideal Ge shell that had the same dimensions with AGATA was also studied by using the GEANT4 simulation program. The gamma ray source was located in the center of sphere and gamma ray measurements for energies of 1MeV, 3MeV and multiplicities of $m=1$, $m=30$ were simulated. After that, forward tracking method was applied and several values like peak to total ratio (P/T), photo peak efficiency ($\mathcal{E}_{pe}$), full width at half maximum (FWHM) and energy resolution (R), which are important in determining the performance of AGATA were measured. These values are in agreement with the previously estimated values in AGATA Technical Proposal.

The results which were obtained after the tracking procedure with the MGT code were compared to the results before tracking. An increase of %46 ($m=1$) and an increase of %33 ($m=30$) were observed in the P/T ratios for 1 MeV gamma-rays. Photo peak efficiency was increased by %28 ($m=1$) and %10 ($m=30$). FWHM (2,2 keV) and R (%0,2) values were not changed by the tracking procedure. For 1 MeV gamma-rays, AGATA detectors gave $P/T = \%70$ and $\mathcal{E}_{pe} = \%50$ for $m=1$ and $P/T = \%55$ and $\mathcal{E}_{pe} = \%32$ for $m=30$. As compared to the similar results for an earlier detector array, like EUROBALL, AGATA is found to be superior. This is the success of the tracking technique and the segmented detectors. After including the Al capsules and the cryostat, an decrease in the P/T and $\mathcal{E}_{pe}$ values were observed. For 1MeV gamma-rays, P/T was found to be %58 and $\mathcal{E}_{pe}$ was %44 ($m=1$).

2007, 79 pages

Key Words: Geant4, mgt, gamma ray forward tracking, peak to total ratio (P/T), photo peak efficiency ($\mathcal{E}_{pe}$), full width at half maximum (FWHM), energy resolution (R), multiplicity(m)

TEŞEKKÜR

Çalışmalarımda sürekli yardımcı olan değerli bilgilerini benimle paylaşan ve beni doğru araştırma yolunda yönlendiren danışmanım Sayın Prof. Dr. Ayşe ATAÇ NYBERG' e, mgt programını kullanmamızda çok büyük emeği geçen Sayın Prof. Dr. Dino BAZZACCO' ya, çalışmalarım boyunca fiziğin nasıl çalışılması ve nasıl araştırılması gerektiğini bütün içtenliğiyle paylaşan Sayın Doc. Dr. Ayşe KAŞKAŞ' a ayrıca çalışma arkadaşlarım Araş. Gör. Menekşe ŞENYİĞİT' e, Araş. Gör. Seyit Okan KARA' ya ve Agata projesi asistanı ve doktora öğrencisi Serkan AKKOYUN' a ve son olarak her zaman yanımda olan aileme çok teşekkür ederim.

Semih BAYKAL

ANKARA, TEMMUZ 2007

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. GAMA IŞINLARI VE ÖLÇÜMLERİ.....	3
2.1 Gama Işınları.....	3
2.2 Gama Işınının Maddeyle Etkileşimi.....	4
2.3 Foto Elektrik Olay.....	5
2.4 Compton Saçılması.....	6
2.5 Çift Oluşumu.....	8
2.6 Gama Işınının Ölçülmesi.....	10
2.7 Gama Spektroskopisi İle İlgili Temel Kavramlar.....	13
2.7.1 P/T oranı.....	13
2.7.2 Mutlak verim ve öz verim.....	13
2.7.3 Foto pik verimi.....	14
2.7.4 FWHM ve enerji çözünürlüğü.....	14
2.8 Gama Işınlının Ölçümünü Gösteren Bir Deney.....	15
3. GAMA IŞINI DEDEKTÖRLERİ.....	19
3.1 Sintilasyon Dedektörleri.....	19
3.2 Yarı İletken Dedektörler.....	20
3.2.1 n ve p tipi yarı iletkenler.....	21
3.2.2 Ge(Li) dedektörleri.....	24
3.2.3 Yüksek saflıktaki germanyum dedektörleri (HpGe)	25
3.2.4 HpGe coaxial dedektörler.....	26
3.3 Çok Bölümlü Gama Dedektör Toplulukları.....	27
3.4 Niçin Daha Gelişmiş Dedektör Toplulukları.....	28
4. ÇOK BÖLÜMLÜ GAMA TRACKING DEDEKTÖRLERİ.....	30
4.1 HpGe Coaxial Yapıdaki Çok Bölümlü Dedektör Toplulukları.....	30
4.1.1 GRETA.....	31
4.1.2 AGATA.....	33
4.1.3 Agata projesinin nükleer fizik açısından önemi.....	34
4.2 Elektronik Ve Data Elde Etme Sistemleri.....	36
4.3 Puls Şekil Analizi (PSA).....	37
5. GAMA IŞINI İZ SÜRME TEKNİĞİ.....	41
5.1 İleri Yönde İz Sürme Tekniği.....	41
5.2 Çift Oluşum İz Sürme Tekniği.....	49
5.3 Foto Elektrik İz Sürme Tekniği.....	49
5.4 Geri İzleme Algoritması (Back Tracking Algorithm).....	50
5.5 İleri İz Sürme İle Geri İz Sürme Tekniğinin Karşılaştırılması.....	53
6. MATERYAL VE YÖNTEMLER.....	55

6.1 Materyal.....	55
6.1.1 Geant4 simülasyon yazılım kiti ve Agata simülasyonu.....	55
6.1.2 Mgt programı.....	57
6.2 Yöntem.....	58
7. BULGULAR.....	62
8. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	74
KAYNAKLAR.....	77
ÖZGEÇMİŞ.....	79

SİMGELER DİZİNİ

AGATA	Advanced Gamma Ray Tracking Array
HpGe	High Purity Germanium
FWHM	Full width at half maximum
GRETA	Gamma Ray Energy Tracking Array
GRETINA	Gamma Ray Energy Tracking In-beam Nuclear Array
PSA	Puls Shape Analysis
GEANT4	Geometry and Tracking 4
ADC	Analogue to digital converter
FADC	Flash Analogue to digital converter
DAQ	Data Aquisition
SHE	Super heavy element
BGO	Bismuth germinate ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$)
TMR	Training and Mobility of Researchers
CERN	European Organization for Nuclear Research
KEK	High Energy Accelerator Research Organization
LHC	Large Hadron Collider

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1	Elektromanyetik spektrum.....	3
Şekil 2.2	Foto elektrik olay.....	6
Şekil 2.3	Compton saçılması.....	7
Şekil 2.4	Çift oluşum.....	9
Şekil 2.5	Şekil 2.5 Gelen gama ışınının enerjisinin atom sayısına bağlı olan grafiği.....	10
Şekil 2.6	Gama spektrumu.....	11
Şekil 2.7	^{137}Cs ve ^{60}Co ' ın bozunma şemaları.....	15
Şekil 2.8	^{137}Cs için elde edilen gama spektrumu.....	16
Şekil 2.9	^{60}Co için elde edilen gama spektrumu.....	17
Şekil 3.1	NaI sintilatör dedektörünün şekli.....	19
Şekil 3.2	İletken, yarı iletken ve yalıtkan maddelerin enerji-bandseviyeleri gösterimi.....	21
Şekil 3.3	n ve p tipi yarı iletken enerji bandları.....	22
Şekil 3.4	Sırasıyla ileri ve ters besleme sonucu p ve n eklemesinde oluşan tüketim bölgelerinin gösterimi.....	23
Şekil 3.5	HpGe n tipi dedektörün yapısı.....	25
Şekil 3.6	n ve p tipi HpGe dedektörlerinin gösterimi.....	26
Şekil 4.1	120 hexagonal HpGe coaxial tipli alüminyum kapsüllü Greta küresi.....	32
Şekil 4.2	60 kümeden oluşan 180 hexagonal ve 12 pentagonalli Agata küresi.....	33
Şekil 4.3	Agata dedektör modülü.....	34
Şekil 4.4	Nükleer fizik haritası.	36
Şekil 4.5	n tipi çok bölümlü coaxial yapıdaki dedektörün her bir segmentinde oluşan görüntü yükleri ve gerçek yüklerin gösterimi.....	39
Şekil 4.6	n tipi coaxial bir dedektör ve yük taşıyıcılarının etkileşme radyal uzunluğa bağlı olarak oluşturdukları pulsların büyüklüğünün gösterimi.....	40
Şekil 5.1	Kümeleme ve kümelemmeden önceki etkileşme noktalarının gösterimi.....	45
Şekil 5.2	Gama ışınının (1MeV) soğurulma şekli.....	46
Şekil 5.3	Compton iz sürümünün gösterimi.....	47
Şekil 5.4	İki etkileşme noktası için geri iz sürme algoritmasının gösterimi.....	51
Şekil 5.5	Üç etkileşme noktası için geri iz sürme algoritmasının gösterimi.....	52
Şekil 5.6	forward tracking ve back tracking tekniklerinin karşılaştırılması.....	53
Şekil 5.7	662 KeV'lik gama ışını spektrumunun tracking tekniği uygulanmadan ve uygulandıktan sonraki spektrumunun gösterimi.....	54
Şekil 7.1	Agata dedektörü için (1 MeV'lik ($m=1$) gama ışını kaynağı kullanılarak) tracking öncesi ve sonrası değişimin gösterimi.....	63

Şekil 7.2	1 MeV'lik ($m=1$) gama ışınının kullanılması sonucu Agata dedektörüyle farklı olay etkileşmelerinin tracking işlemine katkısı.....	63
Şekil 7.3	Agata dedektörü için (3 MeV'lik ($m=1$) gama ışını kaynağı kullanılarak) tracking öncesi ve sonrası değişimin gösterimi.....	66
Şekil 7.4	3 MeV'lik ($m=1$) gama ışınının kullanılması sonucu Agata dedektörüyle farklı olay etkileşmelerinin tracking işlemine katkısı.....	66

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1	5cm x 5cm NaI(Tl) sintilatör dedektörü için alınan değerler.....	17
Çizelge 4.1	Gammasphere ve GRETA kıyaslanması.....	32
Çizelge 5.1	Gama ışınlarına ait kümelerin etkileşme noktalarının ve enerjilerinin gösterimi.....	45
Çizelge 7.1	Agata dedektörü için 1 MeV'lik (m=1) gama ışını tracking kıyaslanması.....	62
Çizelge 7.2	1 MeV'lik (m=1) gama ışınının kullanılması sonucu Agata dedektörüyle farklı olay etkileşmelerinin tracking işlemine katkısı.....	62
Çizelge 7.3	Agata dedektörü için 1MeV'lik (m=30) gama ışını tracking kıyaslanması.....	64
Çizelge 7.4	1 MeV'lik (m=30) gama ışınının kullanılması sonucu Agata dedektörüyle farklı olay etkileşmelerinin tracking işlemine katkısı.....	64
Çizelge 7.5	Agata dedektörü için 3MeV'lik (m=1) gama ışını tracking kıyaslanması.....	65
Çizelge 7.6	3 MeV'lik (m=1) gama ışınının kullanılması sonucu Agata dedektörüyle farklı olay etkileşmelerinin tracking işlemine katkısı.....	65
Çizelge 7.7	Agata dedektörü için 3MeV'lik (m=30) gama ışını tracking kıyaslanması.....	67
Çizelge 7.8	3 MeV'lik (m=30) gama ışınının kullanılması sonucu Agata dedektörüyle farklı olay etkileşmelerinin tracking işlemine katkısı.....	67
Çizelge 7.9	Ideal Shell 1MeV için tracking kıyaslaması (m=1).....	68
Çizelge 7.10	Ideal Shell 1MeV için tracking kıyaslaması (m=30).....	68
Çizelge 7.11	Ideal Shell 3MeV için tracking kıyaslaması (m=1).....	69
Çizelge 7.12	Ideal Shell 3MeV için tracking kıyaslaması (m=30).....	69
Çizelge 7.13	Agata dedektörü (Alüminyum kapsüllü) için 1MeV'lik (m=1) gama ışını tracking kıyaslanması.....	70
Çizelge 7.14	Agata dedektörü (Alüminyum kapsüllü) için 1 MeV'lik (m=30) gama ışını tracking kıyaslanması.....	70
Çizelge 7.15	Agata dedektörü (Alüminyum kapsüllü) için 3 MeV'lik (m=1) gama ışını tracking kıyaslanması.....	71
Çizelge 7.16	Agata dedektörü (Alüminyum kapsüllü) için 3 MeV'lik (m=30) gama ışını tracking kıyaslanması.....	71
Çizelge 7.17	Agata dedektörü (Alüminyum kapsüllü + cryostat) için 1 MeV'lik (m=1) gama ışını tracking kıyaslanması.....	72
Çizelge 7.18	Agata dedektörü (Alüminyum kapsüllü + cryostat) için 1 MeV'lik (m=30) gama ışını tracking kıyaslanması.....	72
Çizelge 7.19	Agata dedektörü (Alüminyum kapsüllü + cryostat) için 3 MeV'lik (m=1) gama ışını tracking kıyaslanması.....	73
Çizelge 7.20	Agata dedektörü (Alüminyum kapsüllü + cryostat) için 3MeV'lik (m=30) gama ışını tracking kıyaslanması.....	73

1. GİRİŞ

Çekirdek güçlü etkileşme altında, nükleonların bir arada tutulduğu kuantum mekaniksel bir sistemdir. Nükleer fizik, nükleer limit çerçeveleri içinde bulunan çekirdeklerin yapılarını anlayabilmek için hem teorik hem de deneysel verilere ihtiyaç duymaktadır. Gama spektroskopisi de özellikle nükleer çekirdek yapılarının araştırılmasında önemli bir rol üstlenmektedir. Nükleer reaksiyon sonucunda oluşan bileşik çekirdek önce nükleon ve hafif parçacıklar yayımlar (proton salımı, nötron salımı, alpha bozunumu, beta bozunumu). Sonuçta, uyarılmış durumda kalan ürün çekirdek taban duruma geçerken gama ışını yayımlar. Gama ışınlarının dedeksiyonu uyarılmış durumda olan çekirdeğin nükleer yapısı hakkında bilgiler verir. Şimdiye kadar ki yapılan nükleer fizik çalışmalarında kararlı demetlerle oluşturulan nükleer reaksiyonlarla, nükleer haritada kararlılık çizgisine yakın olan çekirdekler incelenmiş fakat kararlılık çizgisinin dışına geçilememiştir. Son 30 yılda radyoaktif demetlerin üretilmesiyle, (örneğin Fransa’ da GANIL, Almanya’ da GSI laboratuvarlarında vb.) kararlılık çizgisinden, nükleer fizik açısından bilinmeyen “exotic” çekirdeklerin gözlenebileceği limit durumları olan “proton dripline” ve “nötron dripline” na ulaşma olasılığı ortaya çıkmıştır. Fakat üretilen radyoaktif demetlerin akısının şiddeti (intensity) oldukça düşük olmasından dolayı, oluşacak nükleer reaksiyonda gama ışınları salımları da az olacaktır. Yani bilinmeyen çekirdeklerin araştırılması için çok daha hassas dedektörlere ihtiyaç duyulmaktadır. Günümüzdeki dedektör sistemleri ile (EXOGAM, EUROBALL vb.) yapılan gama ışını dedeksiyonlarında, gama ışını gözlenebilir limitinin istenilen değerden düşük olmasından dolayı hassas bir şekilde ölçülememiştir.

Günümüzde yapım aşaması hâlâ devam etmekte olan gama ışını iz sürme dedektörleri AGATA (agata.pd.infn.it/documents/Agata-proposal.pdf, 2001), GRETA (Deleplanque *et al.* 1999), GRETINA (http://radware.phy.ornl.gov/greta/Gretina_prop_partial.pdf, 2003).

ile deneysel hassasiyetin 100 ile 1000 kat arasında bir artış göstermesi beklenmektedir.

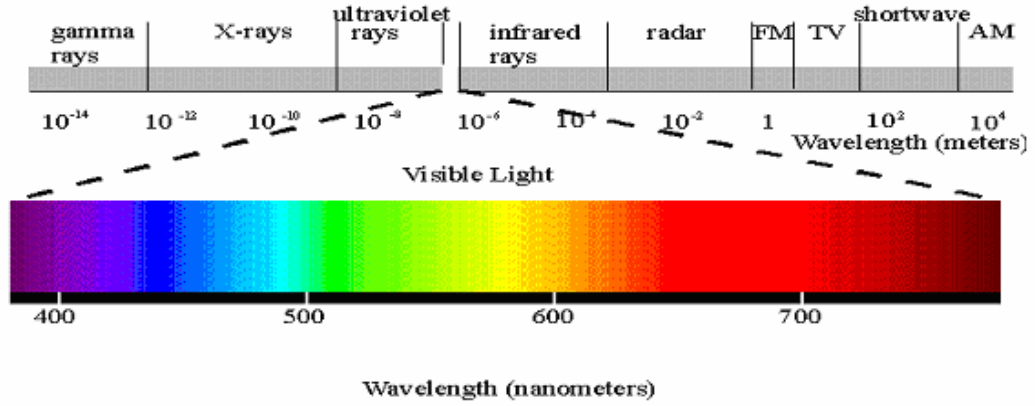
Bu yeni nesil dedektörlerle, dedektöre depolanan etkileşme noktalarının çok hassas bir şekilde ölçülmesi ve iz sürme tekniğinin kullanılmasıyla, gama ışınları oldukça yüksek foto pik verimi ile ölçülmektedir.

Tezin kapsamında ise Geant4 simülasyon programı ve mgt ileri yönde iz sürme programının kullanımı ile Agata projesi kapsamında yapılmakta olan yeni nesil iz sürme dedektörlerinin performansı ve bu performansa iz sürmenin etkileri incelenmiştir. Bu tez çalışmasında, literatür kapsamında ilk bölüm olan “gama ışınları ve ölçümleri” ile gama ışınının nasıl ölçüldüğü ve maddeyle etkileşimi hakkında bilgi verilmiştir ve Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Nükleer Fizik Laboratuvarında yapılan deneyde, NaI(Tl) dedektörü ile farklı gama ışını kaynakları kullanarak gama ışınlarının ölçümü deney yoluyla gösterilmiş ve elde edilen sonuçlar verilmiştir. İkinci bölümde günümüzdeki dedektör sistemlerini ve yapılarını, niçin daha gelişmiş dedektörlere ihtiyaç duyulduğu açıklanmaktadır. 3. bölümde çok bölümlü gama ışını iz sürme dedektörleri ve yapıları, Agata projesi ve amacı hakkında bilgiler verilmektedir. 4 bölümde ise gama ışınları için geliştirilmiş olan ileri yönde iz sürme tekniği (forward tracking) ve bu iz sürme tekniğinde beraber kullanılması düşünülen foto elektrik iz sürme tekniği, çift oluşum iz sürme tekniği hakkında bilgiler verilmiştir. Bunun yanında ileri yönde iz sürme tekniğine ilaveten geri iz sürme tekniği açıklanmış ve aralarında karşılaştırma yapılmıştır.

2. GAMA IŞINLARI VE ÖLÇÜMLERİ

2.1 Gama Işınları

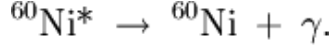
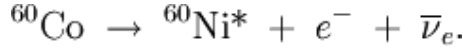
Gama ışınları, elektromanyetik spektrumda 0,1MeV' den başlayarak en yüksek enerjili ve dalga boyları en kısa olan, gözle görülmeyen, yüksüz, elektromanyetik radyasyon olarak tanımlanmaktadır (Şekil2.1).



Şekil 2.1 Elektromanyetik spektrum (www.yorku.ca/eye/spectru.htm)

Gama ışınlarının nükleer fizik açısından önemli ışınlar olmasının nedeni; çekirdeğin yapısının araştırılmasında önemli bir rol oynamalarıdır. Gama ışınları farklı şekilde oluşabilmektedir: i) nükleer reaksiyonlar sonucunda uyarılmış durumda olan çekirdeklerin taban durumlarına geçmesi sırasında, ii) radyoaktif bozunmaya uğrayan çekirdeklerde, iii) çift oluşum sonrasında meydana gelen pozitronun bir elektronla birleşip yok olması sonucunda, iv) yüklü parçacıkların (e^-) ani hızlandırılması veya durdurulması sonucunda (Bremsstrahlung).

Örnek:



^{60}Co 'ın beta bozunumu ile uyarılmış durumda olan $^{60}\text{Ni}^*$ 'a dönüşür. Uyarılmış durumdaki $^{60}\text{Ni}^*$ taban duruma geçerken gama ışını yayınlar.

2.2 Gama Işınının Maddeyle Etkileşimi

Gelen gama ışınının şiddetinin, t kalınlığında bir madde (hedef) içindeki değişimi, eksponansiyel bir dağılım göstermektedir. Bu ifade şu şekilde formalize edilebilir: I_0 kaynaktan çıkan gama ışının şiddeti iken, I ise etkileşme sonrasındaki gama ışının şiddetini göstermektedir:

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

Yukarıdaki ifade de μ değeri ise; lineer sönüm katsayısı olarak adlandırılır ve şu değere eşittir:

$$\mu = \sigma * n \quad (2.2)$$

Burada σ gama ışınının tesir kesiti yani gama ışının etkileşme olasılığını gösteren bir nicelik, n ise birim hacim başına maddedeki atom sayısını vermektedir. Farklı bir biçimde de lineer sönüm katsayısı gama ışının maddeyle farklı şekillerde etkileşme olasılıklarının toplamı cinsinden ifade edilebilmektedir.

$$\mu = \tau + \sigma + \kappa \quad (2.3)$$

Sırasıyla τ, σ, κ fotoelektrik, Compton saçılması ve çift oluşum olma olasılıklarını göstermektedir. Gama ışınlarının madde ile yaptığı etkileşimleri üç farklı olay biçiminde özetlemek mümkündür. Bu etkileşimler:

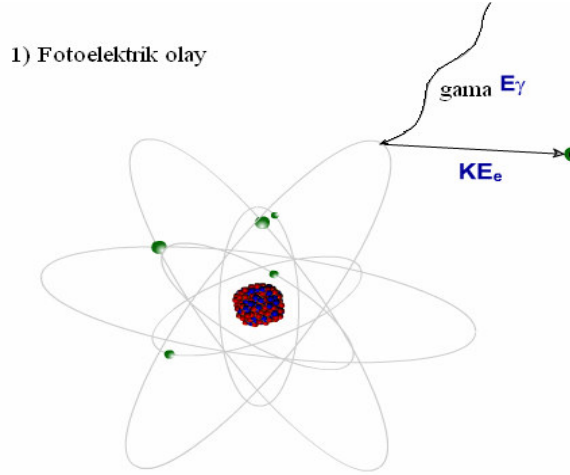
- 1) Fotoelektrik olay
- 2) Compton saçılması
- 3) Çift Oluşumu' dur.

2.3 Foto Elektrik Olay

Fotoelektrik olayda, enerjisi E_γ olan bir gama ışınının bir metal ile etkileşmesi sonucu tüm enerjisini kaybetmektedir. Bu enerji atomun yörüngelerinde dolaşan bir elektronu koparmak için gerekli olan enerji için harcanır (elektronun bağlanma enerjisi için). Arta kalan enerji ise serbest haldeki elektrona yani foto elektrona aktarılır, bu enerji de foto elektronun kinetik enerjisidir (Şekil 2.2). Bu ifade aşağıdaki formülle gösterilmektedir:

$$E_\gamma = h\nu = T_{e^-} + W \quad (2.4)$$

Burada T_{e^-} foto elektronun kinetik enerjisi, W ise elektronun bağlanma enerjisidir ve $W=h\nu_0$ değerine eşittir, yani atomun yörüngesinden bir elektron koparmak için gerekli olan fotonun frekansı o elektronun eşik frekans değerinden büyük ya da eşit olmalıdır.



Şekil 2.2 Foto elektrik olay (<http://www.eas.asu.edu/~holbert/eee460/eee460.html>)

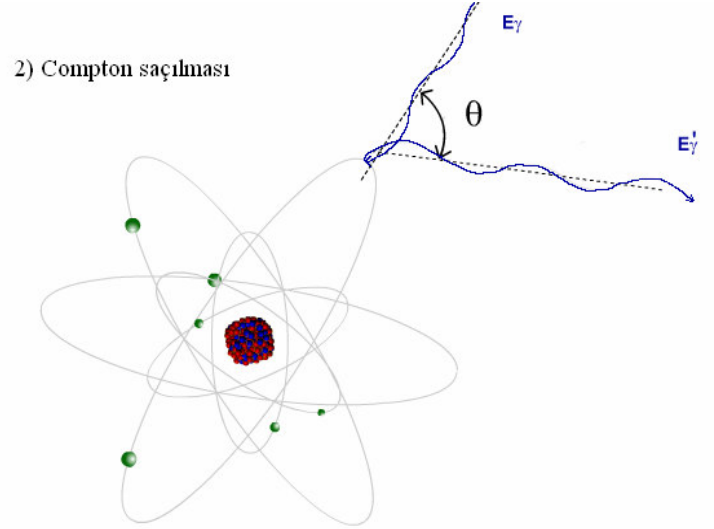
Fotoelektrik olayın olma olasılığı veya fotoelektrik tesir kesiti $\tau \propto \frac{Z^4}{E_\gamma^3}$ şeklinde verilir. Yani fotoelektrik olayın olma olasılığı gelen fotonun enerjisi arttıkça azalmakta iken, Z ' si (atom numarası) büyük olan atomlar için fotoelektrik olayın olma olasılığı artmaktadır. Radyasyon ölçümlerinde fotoelektrik olay önemli bir yer tutar çünkü gelen gama ışınının bütün enerjisinin tamamı dedektör içerisinde soğurulmaktadır, bu da gelen gama ışınlarının enerjisinin doğrulukla ölçülmesine sebep olmaktadır. Bu yüzden günümüzde kullanılan dedektör sistemlerinde Z sayısı büyük olan atomlar seçilmektedir. Ayrıca serbest bir elektrondan foton soğurulamaz yani enerji ve momentum korunumu sağlanamadığı için ağır bir atom içinde fotoelektrik olay gerçekleşir.

2.4 Compton Saçılması

Bu etkileşimde ise, gelen gama ışını enerjisinin belli bir bölümünü elektrona verdikten sonra etkileşme noktasına göre bir θ açısında saçılmaya uğramaktadır, aynı şekilde elektron da gamadan aldığı enerjiyle belirli bir açıda saçılmaktadır. Burada enerji ve momentum korunumu yasaları uygulanırsa, Compton saçılması için saçılan gama ışınının saçılma açısına ve gelen gama ışınına göre ifade edildiği formüle ulaşılır.

Burada $m_e c^2$ elektronun durgun kütle enerjisi θ saçılma açısı ve E_γ ise gelen gamanın enerjisidir.

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



Şekil 2.3 Compton saçılması (<http://www.eas.asu.edu/~holbert/eee460/eee460.html>)

Gelen gama ışının enerjisine bağlı olarak; Compton saçılmasına uğrayan gama ışını dedektör hacmi içerisinde birden çok Compton saçılması yapabilir ve en son olarak da bir fotoelektrik soğurulma ile tüm enerjisini dedektör içerisine depolayabilir.

Şekil 2.3' te gösterildiği gibi, Compton saçılmasına uğrayan gama ışının elektrona aktardığı enerji, (eğer bir dedektör içinde olsaydı depolanan enerji olarak adlandırılırdı) enerji korunumuna göre şu yazılabilir.

$$E_{\gamma} - E_{\gamma'} = E_e = E_{\gamma} \left[1 - \frac{1}{1 + \frac{E_{\gamma}}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)} \right] \quad (2.6)$$

Compton saçılmasının tesir kesiti Klein Nishina diferansiyel tesir kesiti ile verilmektedir. Bu formül bize belli bir katı açı altında gama ışınının saçılma olasılığını göstermektedir. Burada $\alpha = E_{\gamma}/m_e c^2$ ve r_e ise klasik elektronun yarıçapıdır.

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = Z r_e^2 \left(\frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos \theta)} \right)^2 \left(\frac{1 + \cos^2 \theta}{2} \right) \left(1 + \frac{\alpha^2 (1 - \cos \theta)^2}{(1 + \cos^2 \theta)(1 + \alpha(1 - \cos \theta))} \right) \quad (2.7)$$

$$r_e = \frac{e^2}{m_e c^2 4\pi\epsilon_0} = 2,818 \text{ fm ve } d\Omega = 2\pi \sin \theta d\theta \quad (2.8)$$

2.5 Çift Oluşumu

Bu etkileşme sırasında, gelen yüksek enerjili gama ışını bir elektron ve pozitron çiftinin oluşumuna sebep olmaktadır. Bu olayın gerçekleşmesi için, gelen gama ışınının enerjisinin minimum 1,022MeV olması gerekmektedir. Bunun sebebi ise enerji korunumuyla açıklanmaktadır:

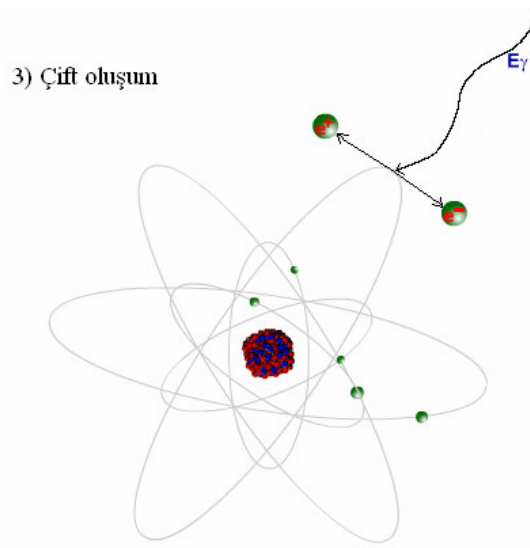
$$E_{\gamma} = m_e c^2 + m_{e^+} c^2 + T_{e^-} + T_{e^+} \quad (2.9)$$

Burada $m_{e^-} = m_{e^+} = m_e$ ' dir.

Minimum gama enerjisi, elektronun ve pozitronun kinetik enerjisinin sıfır olarak kabul edilmesiyle sağlanmaktadır.

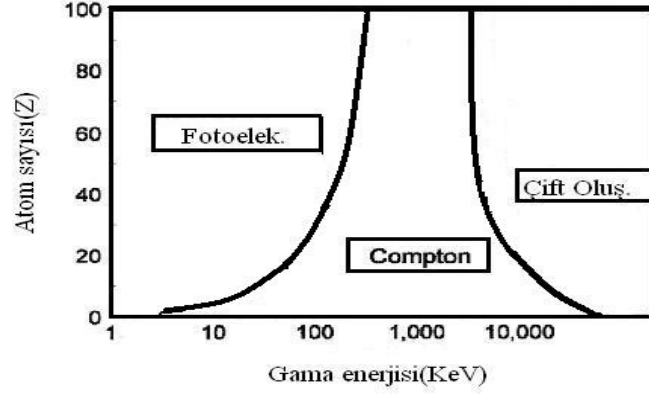
Bundan dolayı bir pozitron elektron çifti yaratmak için $E_\gamma \geq 1,022\text{MeV}$ olmalıdır. Eğer gelen gama ışınının enerjisi $1,022\text{MeV}$ ' den büyükse geriye kalan enerji elektronun ve pozitronun kinetik enerjisi olmaktadır. Burada elektron ve pozitronun tüm enerjisini dedektör hacmi içerisinde depolandığı varsayılırsa depolanan enerji:

$$E_e = E_\gamma - 2m_e c^2 \text{ olmaktadır.} \quad (2.10)$$



Şekil 2 4 Çift oluşum (<http://www.eas.asu.edu/~holbert/eee460/eee460.html>)

Pozitron enerjisini kaybetmesine yakın, bir elektronla çarpışarak iki tane $0,511\text{MeV}$ 'lik gama ışını oluşturur. Bu olayda ise pozitron ve elektron yok olmaktadır. Çift oluşum sonrasında ortaya çıkan gama ışınları Compton yapıp kaçabilir veya foto elektrik soğurma ile enerjilerini dedektöre depolayabilirler. Foto elektrik soğurmada da olduğu gibi çift oluşumun gerçekleşmesi için, yani momentum korunumunun sağlanması için olayın bir atom içerisinde gerçekleşmesi gerekmektedir. Gelen gama ışının çift oluşum tesir kesiti ise $\kappa \propto Z^2$ ile orantılı olmaktadır.



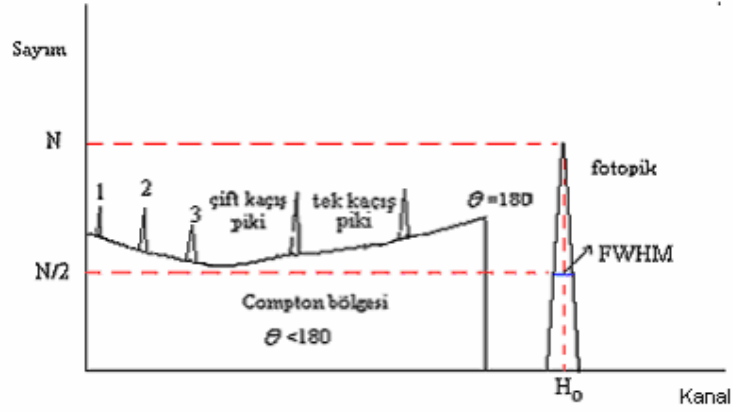
Şekil 2.5 Gelen gama ışınının enerjisinin atom sayısına bağlı olan grafiği

Bu grafikte enerjiye ve atom sayısına bağlı olarak hangi tip gama ışını etkileşmesinin baskın olduğu gösterilmektedir.

Şekil 2.5’ te kullanılan materyalin Z sayısına bağlı olarak, küçük enerjili gama ışınları için foto elektrik soğurma baskın durumda iken, ortalama olarak 100KeV-10MeV arasında Compton olayının baskın durumda olduğu, 10MeV’ den sonra çift oluşumun baskın olduğu görülmektedir.

2.6 Gama Işının Ölçülmesi

Gama ışınlarının ölçülmesinde günümüzde çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu bölümde gama ışınının spektrometresinden ve gama ışınının ölçülmesinde kullanılan yöntemlerden bahsedilmektedir: Gama ışınlarının ölçülmesinde en önemli sonuç elde edilen spektrometrenin, kaynaktan çıkan gama ışınlarının dedektörle etkileşmesi sonucu ölçülen sayım sayısının, dedektörde depolanan enerjiye göre verdiği dağılımı incelemek ve analiz etmektir. Şekil 2.6’da tek enerjili gama ışının üç farklı etkileşmesini gösteren spektrum incelenmektedir: Bu spektrumda dikey eksen dedektörün ölçtüğü sayım sayısını, yatay eksen ise her bir kanala karşılık gelen dedektörde depolanmış enerjiyi göstermektedir.



Şekil 2.6 Gama spektrumu

Tek enerjili olarak dedektöre gönderilen 2,511MeV' lik gama ışının dedektörle etkileşmesi sonucu ortaya çıkan tipik bir gama spektrumudur. Burada gelen gama ışınlarının tüm enerjisinin depoladığı pike foto pik denilir.

Bu pikin altında kalan alan, tüm enerjisini dedektör hacmi içerisinde depolamış olan gama sayısını vermektedir. Bu gamaların enerjisi foto pik enerji değeridir. Gama ışının maddeyle etkileşme türlerine bakıldığında diğer etkileşme türleri olan Compton saçılması ve çift oluşum olaylarının sonuçları da spektrumda görülmektedir. Eğer dedektörle etkileşen gama ışınları tüm enerjisini depolamadan Compton olayı sonunda gama ışını dedektörden kaçarsa spektrumda Compton bölgesi denilen bölge oluşmaktadır. Bu bölge gelen gama ışınlarının enerjilerinin doğru olarak ölçülemediği bölgedir. Compton bölgesinin başladığı kısım şekil 2.6' da $\theta=180$ olan kısım ile gösterilmiştir. Bu bölgeye Compton sırtı adı verilir (yani spektrumda foto pikten sonra Compton bölgesine doğru eğimin arttığı nokta olarak belirtilebilir). Bu kısım Compton formülünde $\theta=180$ alındığı zaman dedektörde depolanan enerjiye karşılık gelmektedir. Çünkü $\theta=180$ için depolanan enerji maksimum olmaktadır.

Gelen gama ışınının enerjisi 1,022MeV' den büyük ya da eşit olması durumunda çift oluşumun gerçekleşebildiği belirtilmişti.

Bu spektrumda çift oluşum sonrasında pozitronun yok olması sonucunda oluşan gama çiftinin dedektörde tüm enerjisini depoladığı durum (enerji foto pikte belirmektedir), ile oluşan gama ışınlarının dedektörle hiç etkileşmeden kaçma olasılıkları da görülmektedir. Oluşan gama ışınlarından bir tanesi kaçarsa bu pike tek kaçış piki (spektrumda $E_\gamma - 0,511MeV$ ' lik enerjiye karşı gelir), eğer ikisi birlikte kaçarsa çift kaçış piki adı verilmektedir ($E_\gamma - 1,022MeV$).

Eğer uyarılmış durumda olan bir atom gama bozunumu yerine enerjisini bir elektrona aktarıp bu elektronu serbest hale getirirse bir üst yörüngede bulunan elektron bu boşluğu doldururken bir X ışını yayınlanmasına sebep olur. Şekil 2.6' da 1 ile gösterilen kısım karakteristik X ışınına ait bir piktir. Kaynaktan çıkan gama ışınların dedektör dışında bir madde ile Compton etkileşmesine girmesi sonucu, maddeden geri yönde saçılan gama ışının enerjisinin yaklaşık olarak 0,2 - 0,25 MeV olarak ölçüldüğü pike ise geri saçılma piki adı verilir. Şekil 2.6' da bu pik 2. kısımda gösterilmiştir. Geri saçılma pikinin bu enerji aralığı içinde olmasını sebebi ise, denklem 2.5' de saçılma açısının 180^0 alınması sonucu ve $E_\gamma \gg \frac{m_e c^2}{2}$ limit durumu göz önünde tutulduğunda geri saçılma pikinin enerjisinin 0,256 MeV olmasıdır (Knoll 1999). Pozitron yok olması ile açığa çıkan 0,511 MeV' lik gama ışınlarını bazen dedektör, ikinci bir gama ışını kaynağı olarak da ölçebilmektedir. Bunun sonucunda Şekil 2.6 da 3. kısımda gösterildiği gibi 0,511 MeV' de bir pik meydana gelir bu pike yok olma piki adı verilir. Böyle pikin sintilatör dedektörlerinde gözlenebilmesi için kaynağın β^+ bozunumu yapması gerekmektedir. Çünkü bu bozunum sonucunda pozitron bir elektronla yok olup iki tane 0,511 MeV' lik gama ışını oluşturur.

2.7 Gama Spektroskopisi İle İlgili Temel Kavramlar

2.7.1 P/T oranı

Şekil 2.6' daki gama spektrumunda, spektrum altında kalan alana toplam sayım denilirken, foto pik altında kalan alana ise foto pik sayımı denilmektedir. P/T oranı ise toplam sayımın foto pik sayımına oranıdır.

$$\frac{P}{T} = \frac{\text{Foto pik sayımı}}{\text{Toplam sayım}} \quad (2.11)$$

2.7.2 Mutlak verim ve öz verim

Mutlak verim kaynaktan çıkan radyasyon sayısının dedekte edilen puls sayısına oranıdır ve ϵ_{abs} olarak gösterilir. Bu nicelik kaynaktan çıkan radyasyonun dedektör tarafından hangi verimle ölçüldüğünü göstermektedir.

$$\epsilon_{abs} = \frac{\text{dedekte edilen pulssayısı}}{\text{kaynaktan çıkan radyasyon sayısı}} \quad (2.12)$$

Öz verim ise dedektöre gelen radyasyon sayımının dedekte edilen puls sayısına oranıdır. Öz verim dedektörün geometrik yapısına, katı açığa (Ω) bağlıdır ve ϵ_{int} olarak tanımlanır. Mutlak verimle öz verim arasındaki bağıntı ise 2.12 denkleminde verilmiştir.

$$\epsilon_{int} = \epsilon_{abs} \left(\frac{4\pi}{\Omega} \right) \quad (2.13)$$

2.7.3 Foto pik verimi

Foto pik verimi mutlak verim ile P/T oranının çarpımına eşittir. Kaynaktan çıkan radyasyonun foto pik olarak ölçümünü gösteren bir niceliktir ve ϵ_{pe} olarak gösterilir.

$$\epsilon_{pe} = \epsilon_{abs} \frac{P}{T} \quad (2.14)$$

veya ;
$$\epsilon_{pe} = \frac{\text{Foto pik sayısı}}{\text{Kaynaktan çıkan radyasyon sayısı}} \quad (2.15)$$

2.7.4 FWHM ve enerji çözünürlüğü

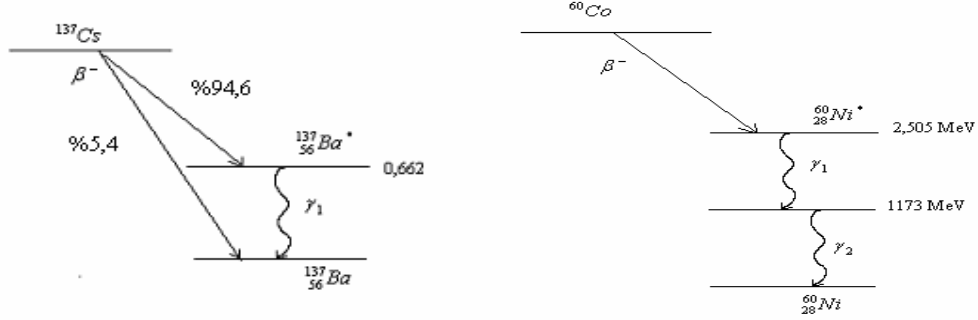
Pik sayımının yarıya indiği durumdaki genişliğe FWHM denilmektedir (Knoll 1999). FWHM değeri $2,35 K\sqrt{N}$ değerine eşittir. Burada $K\sqrt{N}$ pikin standart sapmasını yani hata payını göstermektedir. K bir orantı sabiti ve N de dedektörde puls oluşumunu sağlayan yük taşıyıcılarının sayısıdır. FWHM değeri ne kadar düşük olursa dedektörün hassaslık derecesi o kadar artacak ve kaynaktan gelen birbirine yakın enerjili iki gama ışınını ayırt edebilecektir. Bu özelliğe ise dedektörün enerji çözünürlüğü denir.

$$R = \frac{FWHM}{H_0} \quad (2.16)$$

R dedektörün enerji çözünürlüğü ve H_0 ise pikin ortalama enerjisine karşılık gelmektedir.

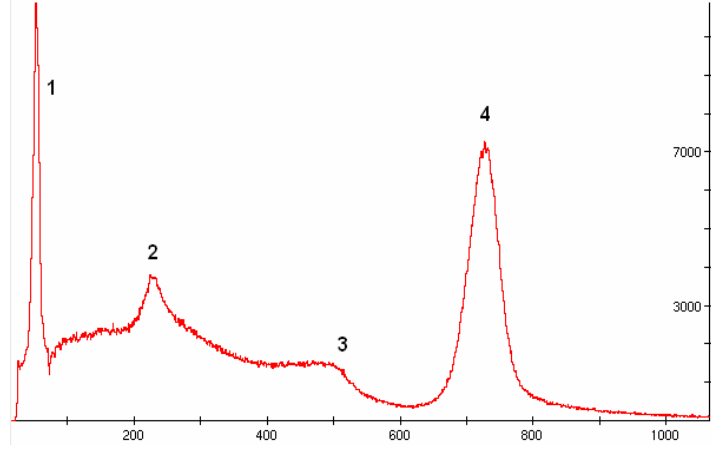
2.8 Gama Işınlarnın Ölçümünü Gösteren Bir Deney

Gama ışınlarının ölçümü bölüm 2.6’ da detaylı olarak açıklanmıştır. Bu bölümde ise sintilatör dedektörü (Bölüm 3.1) kullanılarak gama ışınlarının ölçümünün nasıl yapıldığı anlatılacaktır. Bu deney Ankara Üniversitesi Fen Fakültesine ait Nükleer Fizik Laboratuvarında yapılmıştır.



Şekil 2.7 ^{137}Cs ve ^{60}Co 'ın bozunma şemaları

Deneyde 5 cm çapında ve 5 cm uzunluğunda NaI(Tl) sintilatör dedektörü kullanılarak ^{137}Cs ve ^{60}Co kaynakları için dedektörün verimi, enerji çözünürlüğü, P/T oranı ve FWHM değerlerinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Deneyde dedektörden 10 cm uzaklığa ^{137}Cs (Aktivitesi $\approx 5 \mu\text{Ci}$) ve ^{60}Co (Aktivitesi $\approx 1 \mu\text{Ci}$) radyasyon kaynaklarını ayrı ayrı konularak 15 dakika boyunca ölçüm alınmıştır. Ayrıca 15 dakika boyunca dedektörün gürültüsü de ölçülmüştür. Böylece spektrumda gürültüden kaynaklanan background, kaynaklardan ayrı ayrı alınan spektrumlardan çıkartılarak gürültüsü etkisi giderilir. Daha sonra elde edilen spektrumlarda gözlenecek olan gama piklerin kalibrasyonu yapılarak, pikler doğru enerji aralıklarına yerleştirilir. Elde edilen spektrumlar bir analiz programı yardımıyla incelenerek gerekli hesaplamalar bölüm 2.7 gösterildiği gibi yapılır. Analiz programında 15. kanala bir eşik değeri getirilerek elektronik gürültüden kaynaklandığı düşünülen sayımın spektrumdaki etkisi ihmal edilmiştir. (http://www.detectors.saintgobain.com/Media/Documents/S00000000000000001004/SG_C_EfficiencyCalculations1005.pdf, Leaderer and Shirly 1978).

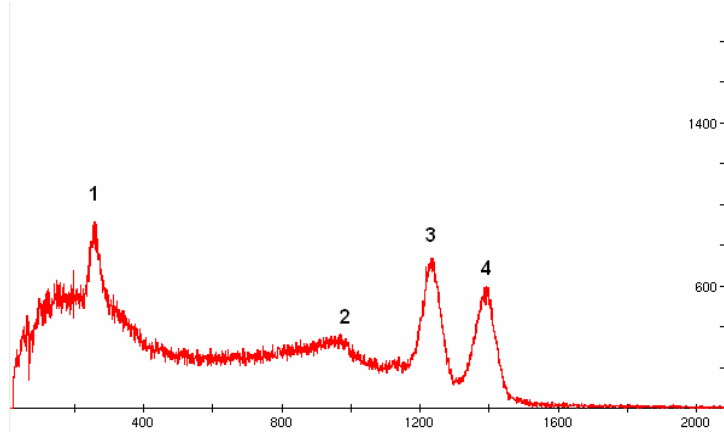


Şekil 2.8 ^{137}Cs için elde edilen gama spektrumu

Şekil 2.8' ^{137}Cs için elde edilen gama spektrumu görülmektedir. 1. kısımda 32 keV civarındaki pik $^{137}_{56}\text{Ba}$ 'ya ait karakteristik bir X ışınıdır. 2. kısımda gözlenen pik ise 200keV civarındaki geri saçılma pikidir. 3. kısımdaki pik ise Compton sırtına karşılık gelmektedir. Yapılan teorik hesaplamada bu değer 496,5 keV iken deneysel olarak 497,9 keV şeklinde elde edilmiştir. 4. kısımda gösterilen pik ise ^{137}Cs 'ye ait olan 661,66 keV' deki gama ışını pikidir. Bu pik kullanılarak P/T değeri %42,6 ($0.426 \pm 0,005$), ε_{abs} dedektör verimi %0,809 ($0,00809 \pm 0,00001$) ve enerji değerindeki foto pik verimi %0,345 ($0,00345 \pm 0,00004$) olarak elde edilmiştir. Kaynaktan çıkan gama sayılarının hesaplanmasında ise Denklem 2.16 kullanılmıştır:

$$N = TB \times T \times A \quad (2.17)$$

Burada TB değeri $^{137}_{56}\text{Ba}^*$ durumundan taban duruma geçerken 661,66 keV' lik gama ışını için toplam dallanma oranıdır ve bu değer %85' dir. T saniye cinsinden ölçüm süresi ve A ise kullanılan kaynağın aktivitesidir.



Şekil 2.9 ^{60}Co için elde edilen gama spektrumu

Şekil 2.9’ da ^{60}Co için elde edilen gama spektrumu görülmektedir. 1 ile gösterilen kısım 200 keV civarında olan geri saçılma piki iken 2 ile gösterilen kısım 1173 ve 1332 keV’ lik gama piklerine ait olan Compton sırtlarının üst üste binmesi sonucu oluşan bölgeyi göstermektedir. 3 ve 4. pikler ise sırasıyla 1173 ve 1332 keV’ lik ^{60}Co kaynağından yayınlanan gama ışınlarıdır.

Çizelge 2.1 5cm x 5cm NaI(Tl) sintilatör dedektörü için alınan değerler

NaI(Tl) sintilatör Dedektörü	^{137}Cs (1 μCi)		^{60}Co (5 μCi)	
	32 keV (karakterisitk X ışını)	661,66 keV	1173 keV	1332 keV
FWHM	11,92 keV	50.45 keV	54.88 keV	56.09 keV
R	%37	%7,6	%4,6	%4,2

Elde edilen sonuçlara bakıldığında FWHM değerinin enerjiyle orantılı olarak arttığı gözlenmektedir. Bunun sebebi ise yük taşıyıcılarının sayısının enerjiyle orantılı olmasıdır. Ayrıca enerji arttıkça dedektörün enerji çözünürlüğünün azaldığı görülmektedir. Bu durum enerji arttıkça dedektörün iki piki çözme gücünün azaldığını gösterir. Şekil 2.8' de ve Şekil 2.9' da annihilation pikin elde edilememesinin sebebi ise bu deneyde kullanılan kaynakların β^- bozunumu yapmalarıdır.

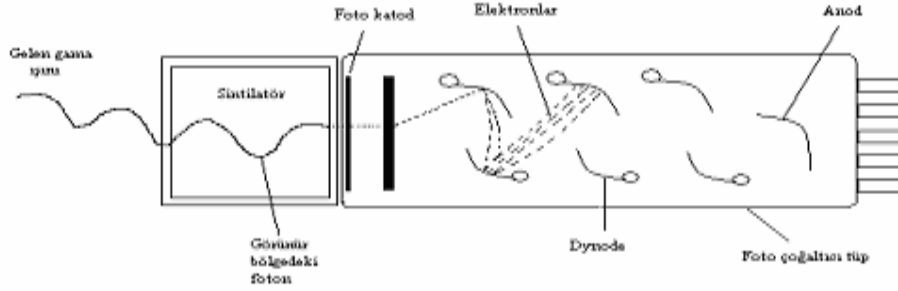
3. GAMA IŞINI DEDEKTÖRLERİ

Günümüzde gama ışınlarının ölçülmesinde çeşitli dedektör sistemleri bulunmaktadır.

Bu bölümde ise gama ışınlarının ölçülmesinde kullanılan en yaygın dedektör çeşitleri incelenecektir.

3.1 Sintilasyon Dedektörleri

Sintilatör dedektörleri gama ışınlarının ölçümünde oldukça sık kullanılan dedektör tiplerinden bir tanesidir. Bu bölümde sintilatör dedektörlerinin bir çeşidi olan inorganik NaI sintilator dedektörlerinin yapısından bahsedilmektedir: Sintilator dedektörleri sintilator ve foto çoğaltıcı tüp olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Dedektöre gelen gama ışını ilk olarak NaI sintilator maddesi ile etkileşir. Etkileşme sonucu uyarılmış durumda kalan atom, taban duruma geçerken görünür bölgede foton yayınlamasına sebep olur. Yayılan fotonların şiddeti dedektörle etkileşen gamanın enerjisiyle doğru orantılıdır. Yayımlanan foton foto çoğaltıcı tüp içerisinde elektronlara dönüştürülerek bir puls ölçümü yapılır (Şekil3.1).



Şekil 3.1 NaI sintilatör dedektörünün şekli (<http://en.wikipedia.org/wiki/Photomultiplier>)

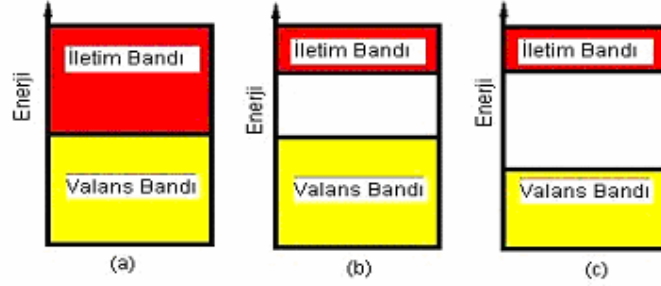
Foto çoğaltıcı tüp yüzeyinde bulunan foto katot sayesinde gelen foton, foto elektrik olay sonucu bu yüzeyden elektron koparır. Ancak bu elektronun oluşturduğu puls yeterli olamayacağı için foto çoğaltıcı tüp içerisinde elektron, belirli ve artan potansiyellerin olduğu bölgelerde hızlandırılarak “dynode” adı verilen elektrotlara çarparak buradan daha fazla elektron kopmasına sebep olur. Bunun sonucunda elektronlar foto çoğaltıcı tüpün anod kısmına doğru gelir ve foto çoğaltıcı tüpün çıkış kısmında yüksek bir puls oluşur. Gözlenen pulsun yüksekliği gama ışının enerjisiyle doğru orantılı olacaktır.

NaI sintilatörlerinde foton yayınlanma olasılığını arttırmak için aktivator olarak Talyum kullanılmaktadır. Bu tip sintilatörlere katkılı sintilatörler denir. Katı maddelerdeki elektronların enerji bant teorisine göre valans bandı ile iletim bandı arasında kalan bölgede saf atomlar için bir valans elektronu bulunmamaktadır. Aktivatör kullanıldığında iletim bandı ile valans bandı arasındaki bölgeye elektron durumları ilave edilerek, uyarılmış durumdaki elektronun iletim bandından taban duruma inerken aktivatör maddesinin uyarılmış enerji seviyesinden, taban duruma inme olasılığının ortaya çıkmasına ve bunun sonucunda katkısız sintilatörlere göre enerjisi daha düşük olan görünür bölgede fotonların yayılmasına sebep olacaktır. Ayrıca katkılı sintilatörlerin bir avantajı da daha büyük kristallerin yapılmasında kullanılmasıdır. Bu da dedektörün verimini arttıracaktır, yani bir kaynaktan çıkan gama ışınlarını gözleme olasılığı artacaktır (Krane 1988).

3.2 Yarı İletken Dedektörler

Bilindiği üzere bir atomda elektronlar belirli kuantum durumlarında bulunurlar. Enerji band teorisine göre ve fermi istatistiğine bağlı olarak atomik orbitalleri doldururlar. Atomdaki dolmamış orbitallerdeki elektronların oluşturmuş olduğu band seviyesine valans bandı denilmektedir (Şekil 3.2). Burada bağlı olan elektronlara da valans elektronu denir. Eğer elektrona valans bandından koparabilmek için gerekli olan eşik enerjisi verilirse, elektron serbest halde hareket edebildiği bir band seviyesine çıkar, bu banda iletim bandı denilmektedir. İletim bandı ile valans bandı arasında kalan enerji seviyesi ise yasak bölge olarak adlandırılır. Saf bir atomda bu seviye boştur.

Yarı iletken maddeleri diğer iletken ve yalıtkan maddelerden ayıran özellik ise aşağıdaki şekilde göstermek mümkündür: İletken bir maddede iletim bandı ile valans bandının birbirine çok yakın iken, yarı iletkenden yalıtkan maddeye doğru gidildikçe bu bantlar arasındaki enerji seviyesinin arttığı görülmektedir. Bir elektronun iletim bandına geçmesi için gerekli olan eşik enerjisi iletim bandında yok denilecek kadar az iken, yarı iletkende 1 eV, yalıtıkanda ise 10 eV seviyesindedir.



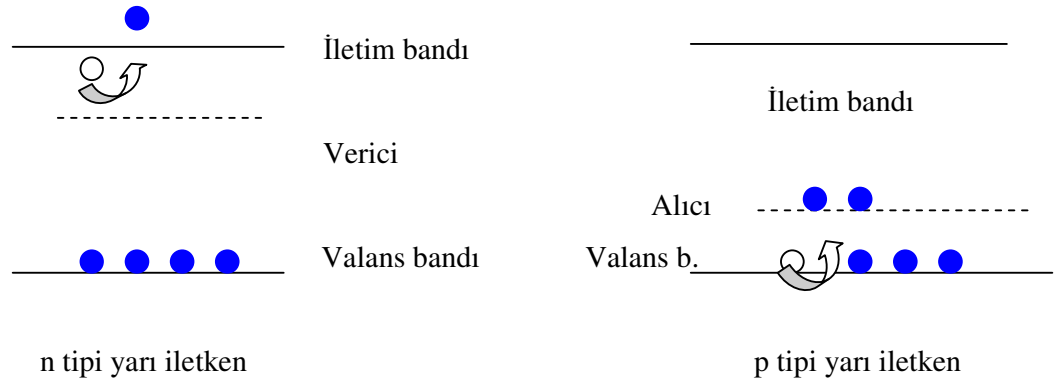
Şekil 3.2 İletken, yarı iletken ve yalıtkan maddelerin enerji-band seviyeleri gösterimi

Valans bandından elektron koparabilmek için minimum eşik enerjisine sahip bir gama ışını maddeyle etkileşirse: valans bandındaki elektron iletim bandına geçer ve valans bandında bir boşluk bırakır. Bu boşluğa ise deşik denilir. Böylece gelen bir radyasyon sonucu elektron boşluk çiftleri meydana gelir. Eğer bu enerji seviyelerine paralel bir elektrik alan uygulanırsa iletim bandındaki elektronlar alana zıt yönde hareket ederken, valans bandında bulunan deşikler ise elektronların alana zıt yönde hareket etmesinden dolayı alanla aynı yönde bir deşik hareketi oluşmasını sağlamaktadırlar. Bu da dedektör içerisinde bir akım oluşmasına sebep olacaktır, dedektör çıkışında elde edilen pulsun genliği gelen gama ışınının enerjisiyle doğru orantılıdır.

3.2.1 n ve p tipi yarı iletkenler

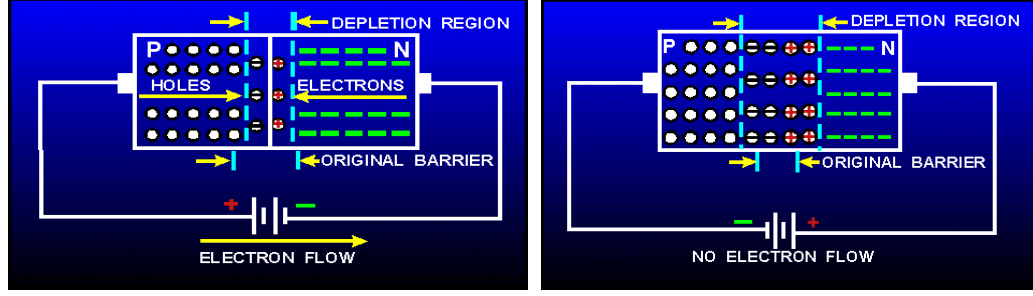
Günümüzde yarı iletken dedektör yapımında en çok kullanılan maddeler Ge, Si kristalleridir. Ge kristalleri, gama ışın ölçümleri için çok uygun özellikler göstermektedirler.

Yarı iletken kristallerin örgü yapısı içerisinde çeşitli özellikteki katkı atomlarının konulması sonucu, kristal yapıları n ve p tipi kristal yapılarına dönüştürülebilir. Ge atomu son yörüngesinde 4 valans elektronu bulunan bir atomdur. Eğer katkı maddesinin valans elektron sayısı, Ge valans elektron sayısından fazla ise örgü yapısında bağ yapmamış valans elektronlarının oluşmasına sebep olacaktır. Yani buradaki elektronlar çok küçük bir enerji ile iletim bandına geçebilecektir. Bu tip yarı iletkenlere n tipi veya verici denilmektedir. Burada elektronlar yük taşıyıcı görevini yapmaktadır. Örnek olarak Ge kristaline Li ya da As eklenmesi sonucu n tipi yarı iletken elde edilebilir. Eğer Ge kristaline eklenen katkı maddesinin valans elektron sayısı, germanyumun valans elektron sayısından az ise bu sefer katkı malzemesi komşu bir atomdan elektron alarak bağ oluşturacak duruma gelir. Buna p tipi yarı iletken denilmektedir. Burada deşik hareketi söz konusudur, bu artı yüklü iyonların hareketi gibi düşünülebilir. p tipi yarı iletkenler valans bandından elektron aldıkları için bu tipteki yarı iletkenlere alıcı denilmektedir. Aşağıda bu iki tipin enerji band seviyeleri cinsinden bir şekil ile farkı gösterilmektedir:



Şekil 3.3 n ve p tipi yarı iletken enerji bandları

Yarı iletken dedektörlerin yapısında ise hem n hem de p tipi yarı iletken kullanılmaktadır. Bu yarı iletkenleri uç kısımlarında elektrotlar bulunmaktadır ve bu elektrotlara bir gerilim uygulanır. Hem n hem de p tipinin katkı maddesinin bir arada kullanılmasının sebebi ise şu şekilde açıklanmaktadır:



Şekil 3.4 Sırasıyla ileri ve ters besleme sonucu p ve n eklemine oluşan tüketim bölgelerinin gösterimi (<http://www.tpub.com/neets/book7/24h.htm>)

n ve p tipi bir yarı iletken dedektöre, dışarıdan bir voltaj uygulandığında (+ kısım p ye, – kısım n ye bağlanır), n yük taşıyıcısı elektronlar ile p tipi yük taşıyıcıları deşikler, p ve n tipinin birleştiği ara kesite doğru hareket ederler ve elektronlar deşikleri doldurarak birbirlerini yok ederler. Bu belirli bir denge durumuna kadar devam eder. Denge durumunda n tipine yakın olan kısımda deşikler yani + yüklü iyonlar p tipine yakın olan ara kesitte ise elektronlar bulunacaktır ve bu durum ara kesit bölgesinde bir elektrik alan doğmasına sebep olacaktır. Bir gerilim uygulanmadan da dedektör yapmak mümkün olmaktadır. Fakat bu durumda gelen radyasyon sonucu oluşan elektron deşik çiftleri, elektrik alanın küçük olmasından dolayı, kolaylıkla tuzaklanabilirler. Bu durumda verimi düşük bir dedektör elde edilmiş olur.

Eğer dedektörün p ucuna negatif n ucuna pozitif gerilim uygulanırsa, bu duruma ters besleme adı verilir. Eğer geri besleme yapılırsa bu sefer elektronlar n tipi bölgedeki elektrotlara, deşikler ise p tipi elektrotlara doğru hareket ederler (Şekil 3.4). Arada kalan nötr bölgeye yarı iletken dedektörlerinde tüketim bölgesi adı verilir. Geri besleme, dedektör içindeki elektrik alanının büyümesine ve tüketim bölgesinin genişlemesine sebep olacaktır. Eğer gelen gama ışını bu tüketim bölgesiyle etkileşirse burada bir elektron deşik çifti oluşturur, böylece dedektör çıkışında bir puls oluşur.

Sonuç olarak dedektör yapımında tüketim bölgesi ne kadar geniş tutulursa, gelen gama ışınının ölçme olasılığı o kadar fazla olacaktır. Günümüzde tüketim bölgesini arttırmak için çeşitli yüksek saflıkta ve değişik geometrik yapılarda dedektörler üretilmiştir.

- 1) Ge(Li) dedektörleri
- 2) HpGe dedektörleri
- 3) HpGe Coaxial dedektörler

3.2.2 Ge(Li) dedektörleri

Yarı iletken dedektörlerde gelen radyasyon ölçümünde kullanılan hassas bölgeyi tüketim bölgesi olarak bir önceki bölümde açıklanmıştı. Tüketim bölgesini yaklaşık olarak, yarı iletken dedektörler için aşağıdaki 3.1 denklemi ile açıklanmaktadır:

$$d = \left(\frac{2 \varepsilon V}{eN} \right)^{1/2} \quad (3.1)$$

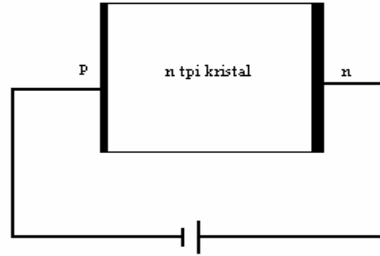
Burada d tüketim bölgesini, ε maddenin dielektrik sabiti, V uygulanan geri besleme voltajı, e birim yük ve N , yarı iletken dedektörlerin safsızlık oranı ya da katkı oranıdır.

Buradan çıkan sonuç yarı iletken dedektörlerin tüketim bölgesini artırmak için uygulanacak ters geri besleme voltajı artırılmalı ya da kristaldeki safsızlık oranı azaltılmalıdır. 1960 yıllarda p tipi germanyum yarı iletkenine Li katkısı yapılarak germanyum yarı iletkenine n tipi bir verici eklenmiştir. Bu dedektörün çalışma prensibi bölüm 3.2.1’ de anlatılan diyot dedektörlerin çalışma prensibiyle aynıdır, ancak katkı maddesi olarak kullanılan alıcı ve verici safsızlık yoğunlukları birbirine eşittir. Bu durumda verici elektronlarının alıcı tarafından yakalanmaları, dedektördeki net safsızlık oranını azaltır. Bunun sonucunda, kristal içinde geri besleme voltajı uygulandığında safsızlık oranı azaldığı için daha geniş bir tüketim bölgesi elde edilmiş olur.

Ge(Li) dedektörlerinin bir dezavantajı ise eklenen Li katkısının belirli bir sıcaklığın üzerinde bir difüzyon akımı meydana getirmesidir. Bu akım ise tüketim bölgesinin değişmesine sebep olacaktır. Bu yüzden Ge(Li) dedektörleri sürekli olarak 77⁰K tutulmalıdırlar.

3.2.3 Yüksek saflıktaki germanyum dedektörleri (HpGe)

Normal germanyum kristallerinde safsızlık oranı 10^{13} atom/cm³ iken 1986 yılında yüksek saflıktaki germanyum kristallerinde bu oran 10^{10} atom/cm³ değerine ulaşmıştır. Böylece Li katkısı ile daha az safsızlıkta elde edilen Ge(Li) yarı iletken dedektörlerinde, Li katkısı yapılmadan daha yüksek saflıkta germanyum kristalleri oluşturulmuştur. Bu durumda yüksek saflıkta germanyum kristallerinden yapılan yarı iletken dedektörlerin tüketim bölgesindeki daha büyük artışlar elde edilmiştir. Ayrıca Li katkısının kalkmasıyla da bu yarı iletken dedektörleri sürekli soğutmaya gerek kalmamaktadır, sadece kullanıldıkları süre içerisinde soğuk tutulmaları yeterlidir.



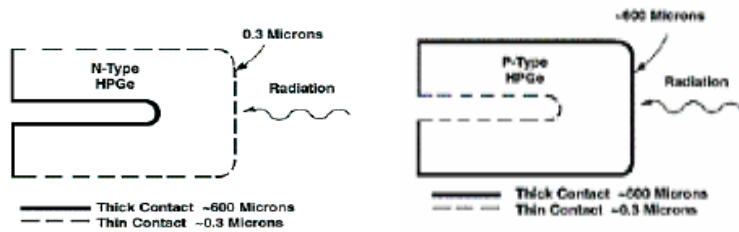
Şekil 3.5 HpGe n tipi dedektörün yapısı

Bu tip dedektörlerin yapımı şu şekildedir: n tipi ya da p tipi bir kristalin uç kısımlarına n alıcı kontak ve p verici kontakların yerleştirilmesiyle elde edilir. n alıcı kontak oluşturulurken n tipi kristalin sağ tarafına Li katkısı yapılırken, p tipi kontak oluşturmak için boron katkısı, kristalin sol tarafına yapılır. p kontak ucuna – uç ve n kontak ucuna + uç gelecek şekilde ters voltaj uygulanır, böylece n tipi kristalin tamamı tüketim bölgesinden meydana gelir.

Aynı şekilde p tipi kristalin sağı tarafına p tipi kontak ve sol tarafına n tipi kontak eklenebilmektedir. Böylece p tipi yüksek saflıkta bir dedektör elde edilmiş olur. Yüksek saflıktaki germanyum dedektörlerini en önemli özellikleri diğerk dedektörlere göre daha yüksek enerji çözünürlüğüne sahip olmalarıdır. Ayrıca normal bir germanyumda bir elektron deşik çifti oluşturabilmek için verilmesi gereken eşik voltajı, normal yarı iletken dedektörlere göre oldukça düşüktür. Bu durum daha düşük enerjili gama ışınlarının ölçülmesinin yanında, sayım kapasitesinin artmasını da sağlamaktadır.

3.2.4 HpGe Coaxial dedektörler

HpGe Coaxial dedektörler silindir şeklinde olan ve günümüzde n ve p tipi olarak üretilen dedektör tipidir. Bu tip dedektörlerin coaxial yapıda olması, tüketim bölgesini genişletmek amacıyla yapılmıştır. Çeşitli geometrik şekillerde üretilen coaxial dedektörler bulunmaktadır. Şekil 3.6’ da n ve p tipi coaxial dedektör tipleri gösterilmektedir.



Şekil 3.6 n ve p tipi HpGe dedektörlerinin gösterimi
(www.ortec-online.com/papers/lowenergyfx_inmm04.pdf)

Bu tip dedektörlerin çalışma prensibi bölüm 3.2.1’ de anlatılan diyot dedektörlerle aynıdır. Tek fark olarak n tipi veya p tipi kristal yapının tamamı tüketim bölgesinden oluşmaktadır. Bunu yapmak için iç kontak bölgesine çok yakın bir bölgede pn eklemi oluşturmak gerekmektedir. n-tipi HpGe’de bu eklem, dış kontağı p tipi katkı maddesi iç kontak bölgesine ise n tipi katkı eklenerek elde edilir (Şekil 3.6). Şekilde, n tipi kontak – ile, p tipi kontak ise ---- ile gösterilmiştir ve n tipi kontak, p tipi kontağı göre çok daha kalındır (http://majorana.pnl.gov/documents/05_06_Hull_SEG.pdf).

Eğer gelen gama ışını tüketim bölgesiyle etkileşirse, burada bir elektron – boşluk çifti meydana getirir. Ters bias voltajının uygulandığı n tipi dedektörde, elektron iç kontak bölgesine, deşikler ise p kontak bölgesine sürüklenir. Bu yüklerin sürüklenmesiyle elektrotlarda bir puls oluşur. Oluşan puls gelen gama ışının enerjisine eşdeğer olur. n tipi dedektörlerin p tipine göre kullanılmasındaki bir avantaj ise n tipi dedektörlerin nötronlara karşı daha çok dirençli olmasıdır. Yani nötronların oluşturduğu zarar n tipinde p tipine göre daha az olacaktır. Bir diğer özellik ise coaxial dedektör geometrisinin "bulletized" yani mermi şeklinde olmasıdır. Bunun amacı, kristal içinde daha "uniform" bir elektrik alan oluşturmaktır, böylece enerji çözünürlüğü artırılmış olur. Ayrıca HpGe dedektörlerin enerji band seviyesi oldukça düşük olduğu için termal iletimi engellemek amaçlı sürekli vakum altında tutulan "cryostatlar" içerisine konularak sıvı nitrojenle soğutulur. Böylece oluşabilecek sızıntı akımının önüne geçilir. (Knoll 1999).

3.3 Çok Bölümlü Gama Dedektör Toplulukları

Gama dedektör toplulukları ilk defa 1980 yılında bir ya da iki Ge(Li) ya da NaI dedektörlerini farklı açılarla bir topluluk meydana getirmesiyle kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle bu tip dedektörlerin kullanılmasında en büyük sebep, dedektör topluluğunun bir sonucu olan katı açısı artışı sonucu, daha yüksek verimle gama ışını ölçme imkanı sağlamasıdır. Günümüze kadar çok farklı tipte dedektör toplulukları kullanılmıştır: BGO Compton kalkanlı n tipi HpGe coaxial altıgen yapıdaki 110 adet dedektör ve 12 adet beşgen dedektörden oluşan Gammasphere bunlardan biridir (Deleplanque and Diamond, 1988). Gammasphere zamanında, bölümleme tekniğinin geliştirilmesiyle sonraki dedektörlerde bölümlemeye gidilmiş ve yonca şeklinde dedektörler üretilmiştir. Bölümlemeyle birlikte daha az doppler kaymasından etkilenen EUROBALL, EUROGAM, EXOGAM vb. dedektörler üretilmiştir.

Yüksek saflıktaki germanyum dedektörlerinin üretilmesi ve dedektör kristal boyutlarını büyütülebilen teknolojinin gelişmesi ile birlikte, çok daha yüksek enerji gücüne ve foto pik verimine sahip dedektörler yapılmıştır. Bu tip dedektörlerin her birinin nükleer fiziğe önemli katkıları olmuştur. Fakat gelişen nükleer fizik araştırmaları ve teorik modellerin sınanması ve çok daha yeni araştırmalar için gelişmiş dedektörlere ihtiyaç duyulmuştur. Dedektörlerde yapılan bölümle çalışmaları ardışık ve eş zamanlı yayılan gama ışınlarını daha yüksek verim ve olasılıkla, yüksek açısal çözünürlük ve yüksek konum çözünürlüğü ile ölçme imkanı sağlamıştır. Peki, neden böyle dedektörlere ihtiyaç duyulmaktadır?

3.4 Niçin Daha Gelişmiş Dedektör Toplulukları

Nükleer fizikte alışlagelmiş yöntem, demetlerin hızlandırılarak kararlı hedef çekirdeklerle çarpıştırılması sonucunda, meydana gelen çekirdeklerin bozunumlarından açığa çıkan parçacıkları (nötron, proton ya da meydana gelen çekirdekteki alpha, beta, gama bozunumlarını) farklı tipteki dedektör toplulukları ile dedeksiyonları yapılarak, oluşan çekirdekler hakkında spin, parite, nükleer yapı, deformasyon, nötron/proton oranı, açısal momentum vb. hakkında bilgiler elde etmektir. Nükleer reaksiyonlar sonucunda oluşan uyarılmış durumdaki çekirdekler gama bozunumları yaparak taban duruma inerler. Bu durumda bozunan çekirdek hakkında dolaylı olarak bilgi alınabilmesi için yayılan gamaların enerjileri, spin, parite değerleri ölçülerek bozunan çekirdeğin bu bozunma sonucunda ne kadar enerji kaybettiği, açısal momentumunda nasıl bir değişiklik olduğu, nükleer yapıdaki deformasyon hakkında çeşitli vb bilgiler elde edilebilir. Bu da gamma spektroskopisinin nükleer fizik açısından önemi göstermektedir.

Son yıllarda ise nükleer fizik açısından bir dönüm noktası başlamıştır. Bunun oluşmasında en büyük sebep radyoaktif demetlerin üretilmeye başlamasıdır. Bu tip demetlerin üretilmesiyle özellikle nükleer haritada kararlılık çizgisinden çıkıp proton/nötron değerlerinin ve çekirdeğin spin değerlerinin uç kısımlarda olduğu bölgelere ulaşılabilme imkanı doğmuştur.

Bu durum nükleer fizik açısından, yeni keşifler, yeni fenomenler, yani yeni nükleer yapıları, nükleer kuvvetin özelliklerini anlayabilme ve nükleer fiziği teorik olarak açıklayan modellerin testi ve geliştirilmesi vb.  zellikler için büyük önem taşımaktadır. Fakat elde edilen RNB' lerin yani radyoaktif demetlerdeki gözlenebilir limit değeri oldukça düşüktür; bu limit değer demet içindeki gözlenebilir minimum şiddete karşılık gelmektedir. Bu tür reaksiyonlar da gözlenebilir limit değerini arttırabilmemiz için dedektörlerin çok daha hassas bir şekilde yapılması gerekmektedir. Yani yapılacak dedektörün çözünürlük gücünün (yani enerji çözünürlüğünün ve P/T oranının) ve full enerji pik veriminin oldukça yüksek olması gerekmektedir. Ayrıca dedektörün sayım kapasitesinin ve açısal çözünürlüğünün de oldukça yüksek olması gerekmektedir. (Mihailescu 2000).

4. ÇOK BÖLÜMLÜ GAMA TRACKING DEDEKTÖRLERİ

Günümüzün nükleer fizik çalışmalarına öncü durumda olacak dedektörler, bir tanesi Amerika’da üretilmekte olan GRETA ve diğeri ise Avrupa’da üretilmekte olan AGATA yeni tip gelişmiş çok bölümlü gama ışını iz sürme “tracking” dedektörleridir. Bu tip dedektörler dört temel özellik üzerine kurulmuştur: (Lieder 2001, Valiente-Doblona 2003).

- 1) HpGe Coaxial yapıdaki çok bölümlü dedektör toplulukları
- 2) Elektronik ve data doğrulama sistemleri
- 3) Puls şekillenme analizi (PSA)
- 4) Gama ışını iz sürme tekniği

4.1 HpGe Coaxial Yapıdaki Çok Bölümlü Dedektör Toplulukları

Bölüm 3.6’ da HpGe coaxial yapıdaki dedektörler hakkında açıklama yapılmıştı. Özellikle HpGe coaxial yapıdaki dedektörlerin yapılmasıyla, boyutları normal germanyum dedektörlerine göre daha büyük dedektör topluluklarının yapılması sağlanmıştır. Yeni tip çok bölümlü gama tracking dedektörlerinde ise yüksek oranda segmentasyonun getirdiği çok önemli kazanımlar ortaya çıkmıştır. Dedektörlerde segmentasyon işlemi, yapılacak segmentasyon oranına ve tipine bağlı olacak biçimde, her bir segmente elektronik devre ile elektrotların konulmasıyla gerçekleştirilir. Böylece her bir segment, ayrı bir dedektör özelliği gösterecek biçimde olacaktır. Çok bölümlü dedektörlerin getirdiği en önemli kazanç, gama ışınları için iz sürme olanağı vermesi ve böylece daha önceden kullanılan Compton kalkanlarından kurtularak tüm katı açının büyük bir bölümünün Ge ile kaplanabilmesidir. Compton kalkanlarının kullanıldığı dönemlerde veto edilerek ihmal edilen Compton saçılarak dedektöre kaçan gamalar, iz sürme tekniğinin kullanılması ile doğru enerjileri hesaplanmış olarak dataya aktarılır. Bu da dedektör verimini artırır.

Ayrıca, segmentasyon ile dedektör topluluğunun açısal çözünürlüğü ve buna bağlı olarak da enerji çözünürlüğü de artar. Özellikle nükleer reaksiyonlar sonucunda (fragmentasyon, fisyon reaksiyonları ya da bileşik durumdaki çekirdeğin bozunumu sonucu) oluşan yeni çekirdekler yaklaşık olarak ışık hızının %50 si civarı hızla hareket ederken, gama ışınları salarak uyarılmış durumlardan taban duruma geçmektedirler. Gama ışınlarının dedeksiyonunun yapılırken hareketli kaynaktan dolayı dedektörde depolanan enerjilerde bir Doppler kayması görülmektedir. Bölümlü olmayan ve geniş bir katı açı kaplayan bir dedektörde Doppler etkisi, piklerin genişlemesine ve enerji çözünürlüğünün azalmasına yol açar. Aşağıdaki 4.1 denklemi ile Doppler genişleme formülü verilmiştir.

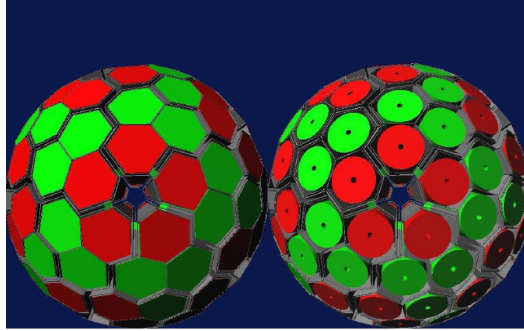
$$\Delta E_{\gamma} = E_{\gamma} \frac{v}{c} \sin(\theta \Delta \theta) \quad (4.1)$$

Burada, E_{γ} çekirdekten çıkan gama ışını enerjisi, v çekirdeğin hızı, c ışık hızı, θ gama kaynağı ile dedektörü birleştiren doğru ile gelen demetin yönü arasındaki açıyı ve $\Delta \theta$ dedektörün kapladığı katı açıyı göstermektedir. Çok bölümlü dedektörlerde her bölüm için $\Delta \theta$ değerinin küçük olması ΔE_{γ} 'nın da küçük olmasını sağlar. Ayrıca, PSA yöntemi ile ilk etkileşme noktalarının koordinatları ufak hata oranlarıyla belirlenebildiğinden, Doppler genişlemesine karşı bir düzeltme yapmak ve daha yüksek enerji çözünürlüğünde foto pikler elde etmek mümkündür. Yüksek segmentasyonun getirdiği önemli yararlarından biri de, ardışık gama sayısının çok olduğu bozunmalarda (high multiplicity) dedektörün aynı segmentine gama ışını çarpma olasılığını azaltmasıdır.

4.1.1 GRETA

Greta Amerika'da geliştirilmekte olan günümüzün çok bölümlü gama ışını iz sürme dedektörlerinden bir tanesidir. Greta 120 hexagonal ve 12 pentagonal HpGe coaxial dedektörden oluşmaktadır. Her üç hexagonal dedektör bir küme olmak üzere dedektör topluluğu 40 tane küme içermektedir.

Dedektörlerin boyutu 8 cm çapında 9 cm uzunluğundadır. Her bir hexagonal dedektör 36 segmantasyona sahiptir. Yani her bir dedektörden merkez elektrod ta dahil olmak üzere 37 tane sinyal üretilmektedir. Üçlü kümeler içerisindeki dedektör tipleri, ikisi aynı tip diğeri ise farklı tipte bir dedektördür. Her bir dedektör de alüminyum kapsüllenmesi yapılmıştır. (Deleplanque *et al.* 1999).



Şekil 4.1 120 hexagonal HpGe coaxial tipli alüminyum kapsüllü Greta küresi (Gretina 2003).

Greta' nın yine Amerika' da üretilmiş olan Gammasphere ile kıyaslanmasına bakılırsa performans yönünden şöyle bir artış söz konusu olur.

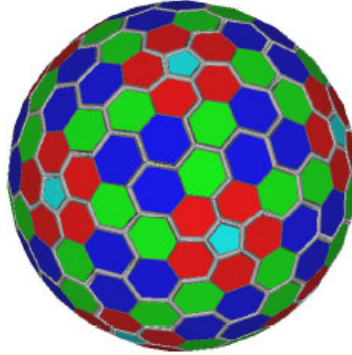
Çizelge 4.1 Gammasphere ve GRETA kıyaslanması

	Gammasphere	GRETA
Kapladığı katı açı	%45	%80
Verim(1,3MeV)	%8	%50
P/T(1,3MeV)	%66	%78
Enerji çözünürlüğü	2,3KeV	2KeV
Sayım hızı (dedektör başına)	10kHz	50kHz

(A National plan for development of gamma ray tracking detectors in nuclear science by The gamma ray tracking coordinaing committee 19 July 2002)

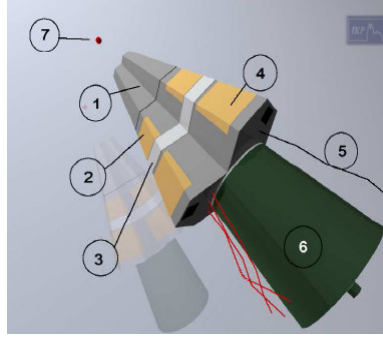
4.1.2 AGATA

Agata aralarında Türkiye'nin de bulunduğu 12 ülkeden 40 enstitünün çalışmalarını birlikte sürdürdüğü fizik açısından çok önemli sonuçlar açığa çıkarması beklenen yeni tip çok bölümlü tracking dedektör topluluğudur. Agata küresinde 4π katı açısının yaklaşık %80 lik kısmı çok bölümlü HpGe coaxial tipli dedektörlerden oluşmaktadır. 180 hexagonal ve 12 tane pentagonal n tipi HpGe dedektörü içermektedir. Hexagonal dedektörlerinin her biri boyuna (z yönünde) ve enine (açısal koordinat cinsinden) elektronik olarak segmentasyon yapılarak, 36 segmentlik bir dedektör elde edilir. Bu dedektörlerin boyutu 8cm çapına ve 9cm uzunluğa sahiptir. Agata küresinde toplam 192 dedektör ve 6780 segmentasyon bulunmaktadır. Toplam kullanılan germanyum kütlesi ise 230 kg civarında iken, Agata dedektörünün tamamı 1,5 ton civarında olacaktır. Agata' nın içinde 60 küme ve her kümede birbirinden farklı üç tane HpGe kristali bulunmaktadır. Her bir küme Al ile kapsüllenmesi yapıldıktan sonra bir "cryostat" ın içine konularak üçlü kümeler halinde oluşturulur.



Şekil 4.2 60 kümeden oluşan 180 hexagonal ve 12 pentagonalli Agata küresi
(Agata Technical proposal)

Aşağıda ise bu üçlü kümelerin bir kesiti bulunmaktadır:



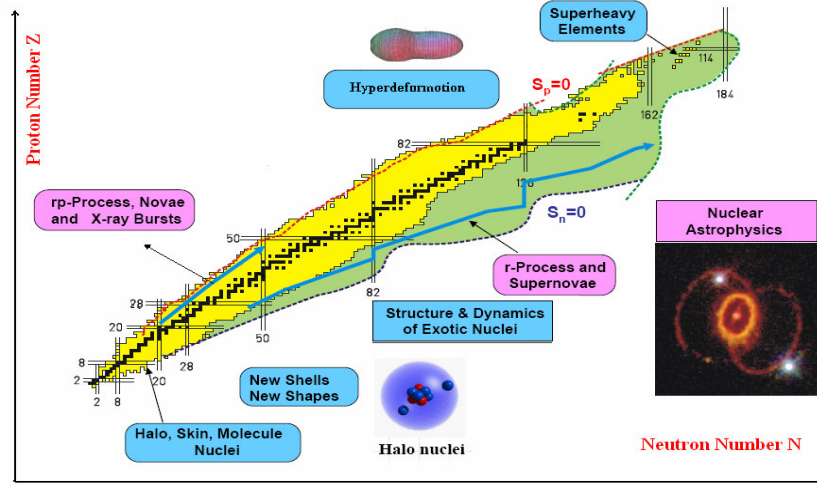
Şekil 4.3 Agata dedektör modülü(Agata Technical proposal)

Şekilde birinci bölüm her biri 36 segmentasyona sahip üçlü kümeleri içeren ve alüminyum kapsüllenmesi yapılmış kısımdır. Burada Al kapsüllenmesi ve cryostat içine konulmasıyla dedektör hem taşınabilir hem de vakum içinde tutulması sağlanmıştır. 2.bölüm de her bir segmente ait ön yükselteçler bulunmaktadır. 3. kısımda "cryostat" ın destek kısmı bulunmaktadır. 4. kısım da ise her bir dedektör için dijital puls süreçlerinin işlemini yapan elektronik devreler bulunmaktadır. 5.kısım dedektörden çıkan verileri taşıyan fiber optik kabloları göstermektedir. 6 bölüm HpGe dedektör ve elektronik devrelerin soğutulması için kullanılır. 7 ise kaynak noktasını göstermektedir. Agata'nın performansına gelince Greta performansı ile hemen hemen aynı sonuçlar görülmektedir (Gerl and Korten 2001).

4.1.3 Agata projesinin nükleer fizik açısından önemi

Yeni nesil gama ışını iz sürme dedektörlerinin geliştirilmesiyle çok daha hassas bir şekilde dedeksiyon yapabilen dedektörler elde edilmiştir. Bu dedektörlerin nükleer fizik açısından kazandırmaları ise nükleer haritada şimdiye kadar gözlenmemiş olan çekirdeklerin nükleer yapılarının incelenmesi olacaktır. Bu incelemeler için hassas gama dedektörlerinin yanısıra kararsız iyon demetleri hızlandırabilen laboratuvarlar gerekmektedir.

Böylece kararlılık çizgisinden uzaklaşarak “proton dripline” (protonların artık çekirdeğe bağlı olmadığı limit değer) ve “neutron dripline” (nötronların artık çekirdeğe bağlı olmadığı limit değer) bölgelerindeki çekirdeklere ulaşabilecek ve bu çekirdeklerin uyarılmış durumları ve yapıları, gama ışınlarının ölçülmesiyle incelenebilecektir (www.star.bnl.gov/STAR/nsac/papers/greta.pdf, 2000), (MIHAILESCU, 2000.). Ayrıca $N=Z$ çizgisinde nükleer kuvvetin özellikleri, kararlılık çizginden uzaklaştıkça yeni exotic çekirdeklerin gözlenmesi ve bunların nükleer yapılarını araştırılması, yeni sihirli sayıların belirlenmesi, halo, nötron veya proton skin çekirdeklerin incelenmesi gibi konulara da ışık tutacaktır. Nükleer teorik modellerin desteklediği çok ağır çekirdeklerin (SHE) ve “hyper” deformasyona uğramış çekirdekler gözlenerek bir çekirdekğin sahip olabileceği maksimum ağırlık ve deformasyon belirlenebilecektir. Astrofizik açısından süpernova ve nötron yıldızlarının yapılarını r process (hızlı nötron yakalama süreci) ve rp process (hızlı nötron yakalama süreci) incelenmesini sağlayarak Fe’den sonraki diğer ağır çekirdeklerin oluşumu hakkında bilgi edinmek mümkün olacaktır. Ayrıca nükleer fizik açısından yeni fenomenlerin bulunmasıyla (eğer bu fenomenler şimdiki nükleer teorilerle açıklanamıyorsa) yeni nükleer teorilerin oluşturulmasına olanak sağlayacaktır.



Şekil 4.4 Nükleer fizik haritası

Nükleer haritada yeni nesil iz sürme dedektörleri ile bulunacak olan bölgeleri ve bu bölgelerdeki araştırmaları göstermektedir. Siyah bölge kararlılık çizgisini gösterirken sarı bölge şimdiye kadar nükleer fizik deneylerinde gözlenmiş olan bölgeyi göstermektedir. Kırmızı ve koyu mavi çizgiler proton ve nötron dripline çizgilerini, yeşil bölge AGATA dedektörü ile ulaşılması beklenen bölgeyi göstermektedir. Nükleer teorilerin desteklediği sihirli sayılarda şekilde gösterilmektedir (www.oaew.ac.at/smi/flair/meetings/Mar2004/AGATA-FLAIR.pdf).

4.2 Elektronik Ve Data Elde Etme Sistemleri

Elektronik ve data elde etme sistemleri, gama ışınlarının dedektörle etkileştikleri zaman oluşturdukları pulsları, dijital puls süreçleri ve data doğrulama sistemlerinden geçirerek bilgisayarlara aktaran elektronik devre elemanlarıdır. Tipik olarak dedektörde oluşan bir pulsun bilgisayara aktarımı şu şekilde yapılmaktadır: Dedektörde meydana gelen pulsun, dedektör üzerine yerleştirilmiş olan ön yükselteç sayesinde genliği artırılır ancak ön yükselteçten çıkan puls bir tür analog puls olduğu için bu verinin dijital puls haline getirilmesi gerekmektedir, bu çevrimi ADC (Analogue to digital convertor) elektronik devreleri yapmaktadır. ADC ile elde edilen dijital pulslar, dijital puls süreçleri sonucunda her bir etkileşme noktasına karşılık gelen enerji zaman ve üç boyutlu koordinatlar cinsinden data elde etme sistemlerine aktarılmaktadır.

Dijital puls süreçleri ise sinyalden çeşitli algoritmalar sayesinde veriler almaya yarayan bir süreçtir. DAQ lar (Data Aquisition) 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 segmentasyonun ve dedektörün sayısının artışından dolayı, sinyal aktarımı için oldukça geniş bant aralığına sahip fiber optik kablolar kullanılması planlanmaktadır. Agata tipi dedektörde ise her bir segment ön ve arka elektronik devrelerinden oluşmaktadır. Her bir segmentte, pulsu analog duruma çeviren önyükselteç ve bu analog pulsu dijital pulsa çeviren FADC (Hızlı olarak analog sinyali dijital sinyale çeviren elektronik devre) sistemleri bulunması gerekmektedir. Ortalama olarak bir ön yükselteçten 12 bit lik ve 40MSPS (milyon sample per second) hızlı sinyaller çıkmaktadır. FADC ile dijital hale gelen pulslar, puls süreçlerinden geçirilerek DAQ lara aktarılacaktır. Burada puls şekillenme algoritması ve ardından tracking algoritmasının uygulanmasıyla elde edilmiş olan veriler, veri depolama bölgelerine gönderilerek spektrum analizi yapılmak üzere saklanır.

4.3 Puls Şekil Analizi (PSA)

Puls şekil analiz yöntemi, gelen radyasyonun dedektörle etkileşme noktasına karşılık, zaman, enerji ve küresel koordinatların değerlerinin sinyal analiziyle hesaplandığı bir tekniktir. PSA çok bölümlü dedektörlerde 5mm' ye yakın hata payıyla etkileşme noktalarının koordinatlarını ve enerjisini hesaplayabilmektedir. İz sürme tekniğinin yapılabilmesi için gerekli olan ön veri bilgileri bu analiz yöntemiyle elde edilir.

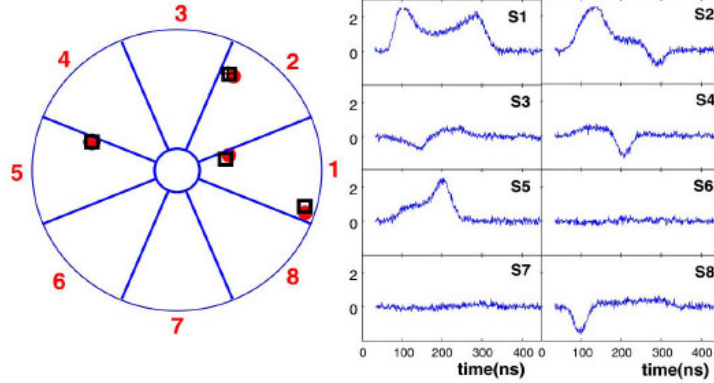
PSA yöntemi için geliştirilmiş olan çok çeşitli algoritma tipleri bulunmaktadır. Bu bölümde ise PSA' nın temel olarak nasıl çalıştığına bakılacaktır.

Bir radyasyon dedektörle etkileştiği zaman, dedektör içerisinde bir elektron boşluk çifti meydana getirmektedir. Bunlara yük taşıyıcıları denir. Dedektöre yüklerin depolandığı elektrotlara dışarıdan bir gerilim uygulandığında yük taşıyıcıları dedektörün etkin hacminde meydana gelen elektrik alandan dolayı bir birlerine zıt yönde hareket edip elektrotlarda depolanacaktır. Yani hareket eden yükler elektrotlarda bir yük meydana getirecektir. Elektrotlarda belirli bir zaman diliminde depolan yük ise bir akım meydana getirir. Akımın büyüklüğü gelen radyasyonun dedektöre bıraktığı enerjiyle orantılıdır.

Şimdi ise sinyal analiz yöntemini temel olarak açıklayalım. Çok bölümlü ve n tipi bir coaxial yapıdaki bir yarı iletken dedektör düşünelim. Radyasyonun dedektör hacmiyle etkileşmesi sonucu oluşan elektron, yani Compton saçılması veya foto elektrik olay sonucu serbest kalan elektron, merkez elektrota doğru hareket ederken geriye kalan deşik ise dış yüzeydeki elektrota doğru hareket eder. Elektron ve deşiklerin bu hareketleri, elektrotlarda görüntü yüklerinin ¹ (image charges) ve akımların oluşmasına neden olur. Uzak mesafelerde, yük taşıyıcıların meydana getirdiği görüntü yükleri, çok bölümlü bir dedektörün birkaç elektrodunda birden gözlenebilir.

¹ Görüntü yükleri Ramo' nun Weighting Field teorisiyle hesaplanmaktadır. Weighting alanı ise dedektörün geometrisine bağlı ve yük taşıyıcısının hareket ettiği elektrotta depoladığı yük miktarını veren bir teoremdir. Bu alanın teorik hesabı ise yükün biriktiği elektrotu 1V' luk potansiyel altında tutarken diğer komşu elektrotlar topraklanır. Bu sayede Laplace denklemi ve sınır koşulları yoluyla Weighting potansiyeli ve potansiyelin gradyanıyla da weighting field elde edilir (Ramo, S. 1939. Currents induced by electron motion. *Proc IRE*. Vol 27, 584-585.).

Puls şekil analiz yönteminde, etkileşme noktasının koordinatları, meydana gelen görüntü yük ve gerçek yüklerin her bir segment için yük-zaman grafiklerinin analizi ile elde edilmektedir.

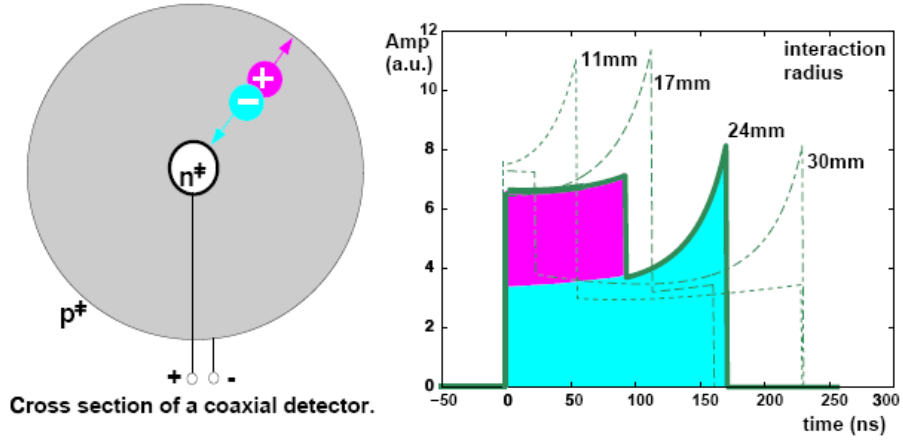


Şekil 4.5 n tipi çok bölümlü coaxial yapıdaki dedektörün her bir segmentinde oluşan görüntü yükleri ve gerçek yüklerin gösterimi

8 segmentli n tipi coaxial yapıdaki bir dedektör için her bir segmentteki pulsun büyüklüğünün zamana göre değişimi sağ taraftaki şekilde gösterilirken, simülasyonu yapılmış puls şekil analizinin hesaplanmış (kare) ve simülasyon sonucu (kırmızı nokta) etkileşme noktaları sol taraftaki şekilde gösterilmiştir (Agata Technical proposal).

Şekil 4.5' te simülasyon sonucuna göre 5. segmentte bir etkileşme meydana gelmiştir. Bu etkileşme noktası p tipi elektrota çok daha yakın olduğu için radyasyon sonucu oluşan deşik, elektrona göre çok daha kısa bir zaman içerisinde p tipi kontakta yük depolaması yapmaktadır. Bu yük depolaması sonucunda komşu segmentin elektrotlarında (4 ve 6) negatif işaretli görüntü yüklerinin meydana getirdiği ayna sinyaller (mirror signals) görülmektedir. Yük taşıyıcısı elektron, merkez elektrota ulaşana kadar bu görüntü yük oluşumu devam eder. Elektron merkez elektrota ulaştığında (yani yük depolanması bittiğinde) komşu segmentlerdeki görüntü yükü sıfır olur. Yukarıdaki şekilde S4' de ters yönde indüklenmiş bir yük meydana gelmiştir. S6' da ise bir indüklenme gözükmemektedir. Bu bilgi bize açısal koordinat bakımından (θ açısına veren) etkileşme noktasının 4. segmente çok yakın olduğu bilgisini vermektedir.

Etkileşme noktasının radyal uzunluğu ise yük taşıyıcılarının elektrotlara ulaşma zamanına bağlı olarak bulunur. Aşağıdaki şekil 4.6’ da, kristal içinde alınan mesafe, yük taşıyıcılarının elektroda ulaşma zamanına bağlı olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.6 n tipi coaxial bir dedektör ve yük taşıyıcılarının etkileşme radyal uzunluğa bağlı olarak oluşturdukları pulsların büyüklüğünün gösterimi

n tipi coaxial bir dedektör sol şekilde gösterilirken, etkileşme noktalarının radyal uzaklığa bağlılığı sağ şekilde gösterilmiştir (Mihailescu 2000).

Etkileşmenin meydana geldiği segmentteki pulsun büyüklüğü depolanan enerji ile orantılı iken rise time süreci ise zamanı(t) verecektir (Mihailescu 2000).

5. GAMA IŞINI İZ SÜRME TEKNİĞİ

Bu teknik dedektör ile etkileşen her gama ışının etkileşme noktalarını ve bu noktalarda dedektöre depolanan enerjilerin bulunması amacı ile geliştirilmiştir. Bu etkileşmeler foto soğurma, Compton saçılması ve çift oluşum şeklinde olabilir.

Bu tekniğin kullanılması için geliştirilmiş olan çeşitli algoritmalar bulunmaktadır. Bu bölümde iz sürme tekniklerinden forward ve backtracking yöntemleri anlatılmakta ve Geant4 simülasyon programı ile elde edilmiş olan verilerin, ileri yönde izleme “forward tracking” algoritma tekniği ile nasıl yapıldığı, yani bu algoritmanın nasıl çalıştığı tartışılmaktadır. Ayrıca Agata projesi kapsamında yapılması planlanan nükleer fizik deneylerinde reaksiyon sonucunda açığa çıkacak gama ışınlarının enerjilerinin ortalama olarak 1-2 MeV civarında olması beklenmektedir. Bu yüzden bu enerji aralığında, Compton saçılmasına uğrayan gama ışınlarının baskın olmasından dolayı (Şekil 2.5), öncelikle Compton saçılmasına uğrayan gama ışınlarının izlerini sürmek ve doğru enerjilerini hesaplayabilmek amaçlanmaktadır. (D.Bazzacco, mgt code developed within the TMR program Gamma-ray tracking detectors), (<http://agata.pd.infn.it/documents/glp5152003/FrancoCamera.pdf>), (<http://agata.pd.infn.it/documents/week9152003/WaelyLopezMartens.pdf>).

5.1 İleri Yönde İz Sürme Tekniği

Kullanılan algoritma iki ana işlemden oluşmaktadır. Bunlardan birincisi kümeleme “clusterisation” işlemidir. Bu işlem bir sonraki adım olan tracking işlemi için ön veri bilgileri sağlamaktadır. İkinci işlem ise tracking algoritmasıdır. Bu işlemde Compton formülü ve istatistiksel hesaplamalar yardımıyla, oluşturulan kümelerin geçerlilikleri “figure of merit” karşılaştırılmakta ve en iyi kümeler belirlenmektedir. İz sürme tekniğinin yapılabilmesi için gerek ve yeter koşullardan en önemlisi etkileşme noktalarının puls şekil analizi “Pulse shape analysis” yöntemi ile her birinin konum, zaman ve enerji ifadelerinin elde edilmesidir.

Gama etkileşme noktalarının açısal koordinatlar cinsinden (θ, φ) ifade edilmesiyle; açısal ayırım “angular separation” olarak adlandırılan matematiksel yöntemle, etkileşme noktaları birer küme “cluster” oluşturacak şekilde ayrılır. Bu işleme kümeleme “clusterisation” yöntemi denilmektedir. Bu bölümde kümeleme yönteminin daha iyi anlaşılması için açısal ayırma yönteminin nasıl yapılacağı ve kümeleme yönteminin algoritması şu şekilde açıklanabilir. Matematiksel olarak bir düzlem üzerinde iki nokta arasındaki en kısa mesafe bir doğru ile açıklanabilirken, küresel bir yüzey üzerinde iki nokta arasındaki en kısa mesafe bir yay ile ifade edilir. Bir küreyi tam olarak eşit iki parçaya ayırmak için kullanılan halkaya mükemmel halka “great circle” denir. Küresel bir yüzey üzerindeki mükemmel halkalar üzerinde bulunan iki noktanın açısal ayırımı şu şekilde ispat edilebilir: Düzlem üzerindeki cosinus teoremi

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cos \alpha \quad (5.1)$$

bir üçgenin kenar uzunluğunun komşu iki kenarı arasında kalan açı ve komşu kenarlar cinsinden ifade edilmesidir. Cosinus teoremi mükemmel halka üzerinde denklem 5.1’ de $b=r_a$ ve $c=r_b$ alınırsa

$$a^2 = r_a^2 + r_b^2 - 2 r_a r_b \cos \alpha \quad (5.2)$$

şeklinde ifade edilir.

Üç boyutlu kartezyen koordinatlarda iki nokta arasındaki uzunluk aşağıdaki biçimde ifade edilir.

$$a^2 = (x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2 \quad (5.3)$$

5.3 denklemi küresel koordinatlar cinsinden yazılırsa:

$$\begin{aligned}x &= r \sin \theta \cos \varphi \\y &= r \sin \theta \sin \varphi \\z &= r \cos \theta\end{aligned}\tag{5.4}$$

$$\begin{aligned}a^2 &= (r_a \sin \theta_j \cos \varphi_j - r_b \sin \theta_i \cos \varphi_i)^2 + (r_a \sin \theta_j \sin \varphi_j - r_b \sin \theta_i \sin \varphi_i)^2 + \\&\quad (r_a \cos \theta_j - r_b \cos \theta_i)^2\end{aligned}\tag{5.5}$$

Buradan 5.6 denklemi elde edilir:

$$a^2 = r_a^2 + r_b^2 - 2r_a r_b [\sin \theta_j \sin \theta_i (\cos \varphi_j \cos \varphi_i + \sin \varphi_j \sin \varphi_i) - \cos \theta_j \cos \theta_i]\tag{5.6}$$

5.2 denklemini 5.6 denkleminde yerine yazılırsa:

$$\cos \alpha = (\cos \theta_j \cos \theta_i + \sin \theta_j \sin \theta_i (\cos \varphi_j \cos \varphi_i + \sin \varphi_j \sin \varphi_i))\tag{5.7}$$

$$\cos \alpha = \cos \theta_j \cos \theta_i + \sin \theta_j \sin \theta_i \cos(\varphi_j - \varphi_i)\tag{5.8}$$

i ve j noktalarının açısal ayırım formülü elde edilmiş olur. Bu sonuç bize küre yüzeyindeki iki noktanın açısal ayırımını göstermektedir. Burada elde edilen formül bir açısal ayırımla :

$$\arccos[\cos \theta_j \cos \theta_i + \sin \theta_j \sin \theta_i \cos(\varphi_j - \varphi_i)] \leq a \text{ ifadesi elde edilir. (5.9)}$$

şeklinde sınırlanabilir. Tekrar kümeleme yöntemine geri dönülürse, yukarıdaki ifade şunu açıklamaktadır: Dedektör ile ilk etkileşme noktası i olmak üzere; i noktası ile diğer bir etkileşme noktası olarak seçilen j noktası arasındaki açısal uzunluk a olmaktadır.

5.9 denkleminde a değerine α değeri olan bir sınırlama getirilmiştir.

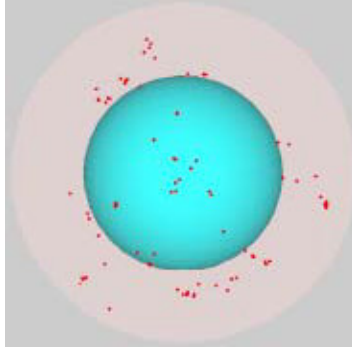
Kümeleme algoritması şu şekilde çalışmaktadır: j etkileşme noktasının i etkileşme noktasına olan açısal uzaklığı, α değerinden küçük ya da eşitse j etkileşme noktası, i noktası ile aynı küme içersindedir. Aynı şekilde i etkileşme noktasının diğer bir k etkileşme noktasına göre olan açısal uzunluğu α değerinden küçük ya da eşitse k bu küme içerisine dahil edilmektedir ve bu kümeleme işlemine bu şekilde devam edilir. i etkileşme noktasından başlanarak yapılan kümeleme işleminde bir sonraki adım olarak j etkileşme noktasından başlanarak kümeleme yapılmaya çalışılır ve bu şekilde kümeleme her bir etkileşme noktasından başlanarak yeni kümelemeler elde edilir. Burada dikkat edilmesi gereken en önemli nokta, i etkileşme noktasından başlanarak yapılmaya çalışılan kümeleme işleminde eğer, j etkileşme noktası için kümeleme şartı sağlanmazsa j etkileşme noktası bu kümeye dahil edilmez ve bir sonraki etkileşme noktası olan k için bu koşulun sağlanıp sağlanmadığına bakılır.

Diğer önemli bir nokta ise i ile diğer etkileşme noktaları arasındaki açısal uzunluk α değerinden büyükse i tek bir küme olarak belirlenir. Eğer yapılan açısal ayırımda kullanılan α değeri için birden fazla küme oluşturulamıyorsa başka bir açısal ayırım kullanılmalıdır. Burada diğer önemli bir hususta bir etkileşme noktasının birden fazla küme içinde olabilmesidir. Bu şekilde devam eden kümeleme işlemi sonunda her bir gama için kümeler “clusters” oluşturulmuş olur.

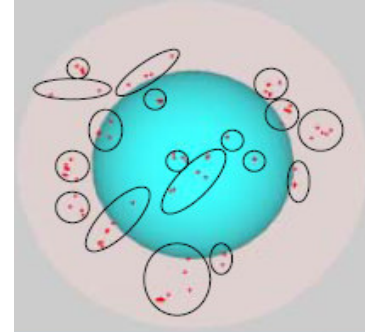
Çizelge 5.1 Gama ışınlarına ait kümelerin etkileşme noktalarının ve enerjilerinin gösterimi

Gamma1	Gamma2	Gamma3	Gamma4	.....
x1,y1,z1,E1	x1,y1,z1,E1	x1,y1,z1,E1	.....	.....
x2,y2,z2,E2	x2,y2,z2,E2	x2,y2,z2,E2	.....	.....
x3,y3,z3,E3	x3,y3,z3,E3	x3,y3,z3,E3	.....	.....
.....				
.....				
.....				

Aşağıda kümeleme yapılmadan önce ve yapıldıktan sonraki şekiller bulunmaktadır:



Kümelemeden önce



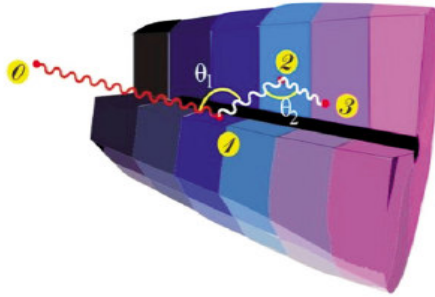
Kümelemeden sonra

Şekil 5.1 Kümeleme ve kümelemeden önceki etkileşme noktalarının gösterimi
(<http://agata.pd.infn.it/documents/glp5152003/FrancoCamera.pdf>)

Kümeleme işlemi sonunda tracking algoritmasına giriş bilgileri olan veriler elde edilmiş olur, böylece her bir kümede etkileşme noktaları bulunmuş olur.

Kümeleme işleminin ardından tracking algoritmasına geçilmektedir. Burada yapılan ise kümeler içindeki etkileşme noktalarının Compton formülünü hangi olasılıkla sağlayıp sağlamadığına bakılır.

Aşağıdaki ifade kümeleme sonunda elde edilmiş olan bir kümenin etkileşme noktalarını göstermektedir. Burada şu varsayım üzerinde durulmuştur. Dedektörle etkileşen her bir gama ışınının tüm enerjisini dedektöre depolayana kadar Compton saçılmasına uğradığını ve en son foto elektrik olayla soğurulmasıdır. Şekil 5.2' de 1 ve 2 noktasında Compton saçılması 3 noktasında ise foto elektrik olayı gerçekleşmektedir. Ayrıca şu varsayımda çok önemli olmaktadır. 1 ve 2 noktalarında Compton saçılması sonucunda saçılan elektronlar aslında gelen gamaların enerjisinin bir bölümünü içermektedir. Yani buradaki elektronlar gamaların dedektörde depoladığı enerjiyle saçılıp enerjisini hemen yitirdiğinden, aldıkları yol ihmal edilecek kadar küçüktür. Bundan dolayı saçılma noktasında enerjinin depolandığı varsayılır.



Şekil 5.2 Gama ışınının (1MeV) soğurulma şekli (Agata Technical proposal)

e_1 , E_γ enerjili gamanın 1 noktasında depoladığı enerji

e_2 , $E_{\gamma 1}$ enerjili gamanın 2 noktasında depoladığı enerji

e_3 , $E_{\gamma 2}$ enerjili gamanın 3 noktasında depoladığı enerjidir.

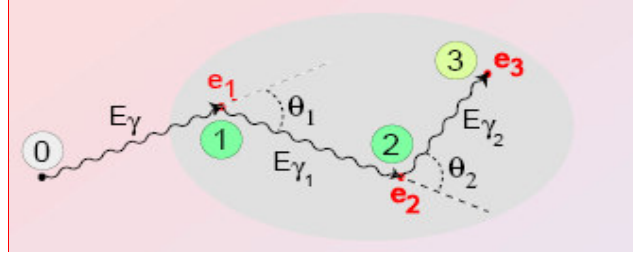
Gamma

0 x0,y0,z0

1 x1,y1,z1,e1

2 x2,y2,z2,e2

3 x3,y3,z3,e3



Şekil 5.3 Compton iz sürümünün gösterimi
(<http://agata.pd.infn.it/documents/glp5152003/FrancoCamera.pdf>)

İlketkileşme noktası olarak 1. nokta alınırsa, Compton saçılma formülüne göre

$$E_{\gamma 1} = \frac{E_{\gamma}}{1 + \frac{E_{\gamma}}{m_e c^2} (1 - \cos \theta_1)} \quad (5.10)$$

yazılabilir. Kaynak, birinci ve ikinci etkileşme noktalarının konumlarından yararlanarak $\cos \theta_1$ açısı elde edilebilir:

$$\cos \theta_{p1} = \frac{\vec{01} \cdot \vec{12}}{|\vec{01}| |\vec{12}|} \quad (5.11)$$

Denklem 5.11' un denklem 5.10' da yerine konulmasıyla $E_{\gamma p1}$ değeri elde edilir.

Enerji korunumuna göre; $E_{\gamma 1} = E_{\gamma} - e_1$ ' dir. Sonuç olarak 1. etkileşme noktasından saçılan gama enerjisinin hem teorik hem de deneysel verileri elde edilir.

Aynı şekilde ikinci etkileşme noktasından saçılan gama için iki enerji değeri bulunur:

Bu değer için $E_{\gamma 2} = E_{\gamma} - e_1 - e_2$ formülü kullanılmalıdır. Diğer teorik ifade ise

2. ve 3. etkileşme noktalarından yararlanarak elde edilen saçılma açısının Compton formülünde yerine konulmasıyla elde edilir.

Buradan çıkan sonuç bulunan teorik ve deneysel ifadelerin birbirine olan uyumunu gözlemektir. (tabi ki de N etkileşme noktası için N! tane permütasyonu hesaba katarak) bu uyum χ^2 testi adı verilen istatistiksel bir dağılım ile elde edilir.

Bu dağılım şu şekildedir:

$$\chi^2 \approx \sum_{n=1}^{N-1} W_n \left[\frac{E_m - E_{Pn}}{E_{\gamma(n-1)}} \right]^2 \quad (5.12)$$

Burada W_n ağırlık faktörü adı verilen bir faktördür ve gamanın n. etkileşme noktasında aldığı açısal yol hesaba katılarak o noktada Compton saçılması yapabilme olasılığını gösteren bir faktördür. N tane etkileşme noktası için N-1 tane Compton saçılma noktası olacaktır. Geçerliliği en yüksek olan gama ışını (en iyi olasılık değerini veren permütasyon) bu Compton saçılmasını yapabilmesi için gerekli eşik değerin altında ise gama ışını kabul edilir ve kümeler yeniden güncellenir. Sonuç olarak yapılan işlemde her bir gama ışının farklı permütasyon durumlarından elde edilmiş değerleri olacaktır. Burada önemli olan kümeleme içinde yapılan permütasyon sonuçlarına göre elde edilen en küçük χ^2 değerinin o küme içindeki en iyi permütasyon olarak seçilmesidir. Yani geçerliği en yüksek olan durum alınır ve bu değer algoritma tarafından belirlenmiş olan limit χ^2 değeriyle kıyaslanır. Eğer bu değer, limit değerden düşük ise gama ışını kabul edilir ve bu gama ışınının elde edildiği kümeye de iyi küme denir, değil ise küme reddelir. Burada seçilen limit değeri ise bir kümedeki N etkileşme noktası için N-1 serbestlik derecesinde χ^2 tablolarından bulunabilir. Örnek olarak $\chi^2=1$ değeri için serbestlik derecesi 4 olan bir durum ele alınırsa, $\chi^2<1$ için her değer daha yüksek bir olasılık verecektir. Algoritma bu şekilde programın başında oluşturulan kümeler için aynı işlemi yapar. Sonuç olarak kabul edilen gama ışınları bize dedektörle etkileşen gamaların izlerini verir.

5.2 Çift Oluşum İz Sürme Tekniği

Compton tracking algoritmasının yanında yüksek enerjili gamma değerleri için çift oluşum Compton saçılmasına göre daha baskın olur. Dedektör hacmi ile etkileşen yüksek enerjili gama ışınlarının ilk etkileşme noktasında çift oluşum yapma olasılığı Compton saçılmasına göre daha yüksektir. Bunun sebebi ise ilk etkileşme noktasında Compton saçılmasına uğrayan yüksek enerjili gama ışınlarının bu noktada, enerjisinin bir miktarını depolamasından dolayı, çift oluşum yapabilmek için gerekli olan enerjiye sahip olmayabilmesidir. Bu sebepten dolayı yüksek enerjili gama ışınları için ilk etkileşme noktaları çift oluşum noktaları olarak seçilir. Bu yüzden yüksek enerjili gamalara ait tracking algoritmasında ilk etkileşme noktasının enerjisi, çift oluşum formülüne göre belirlenir:

$$E_{ilk} = E_{\gamma} - 2m_e c^2 \quad (5.13)$$

Bu etkileşme sonucunda bir elektron ve bir pozitron meydana gelir. Pozitronun enerjisinin büyük bir bölümünü depoladıktan sonra, bir elektron ile yok olması sonucunda 0,511 MeV' lik iki tane gama ışını oluşabilir. Eğer bu gama ışınlarının dedektör ile etkileşmeleri sonucunda tüm enerjisini depoladığını varsayarsak, toplam enerjisi 0,511 MeV olan iki küme oluşacaktır. Algoritmanın ilk basamağı olarak yüksek enerji depolanmalarının olduğu bölgelere yakın çift oluşum noktalarını denklem 5.13' e göre belirlemesidir. Daha sonra yüksek enerji bölgelerine yakın 0,511 MeV' lik iki küme bulunur ve bu kümelerin çift oluşum sonucunda oluşan pozitronun meydana getirdiği gamalara ait kümeler olup olmadığı bakılır. Eğer bu iki küme çifti bu kinematiği sağlıyorsa bu küme içindeki noktalar çift oluşuma dahil edilir (Vatter, 2001).

5.3 Foto Elektrik İz Sürme Tekniği

Compton tracking ve çift oluşum iz sürme tekniğinin yanında foto elektrik iz sürme tekniğine de bakılabilir.

Bunun için kümeleme sonucunda elde edilmiş olan tek etkileşme noktasından oluşan kümeler foto elektrik iz sürme tekniği için ön veri bilgisi olarak kullanılır. Eğer küme içindeki etkileşme noktası için kaynak ile enerjinin depolandığı nokta arasındaki mesafeyi kat edebilme olasılığı program tarafından belirlenen minimum foto elektrik yapma olasılığından büyük ise, o nokta foto soğurma noktası olarak kabul edilir. (Backtracking kısmında foto soğurma noktası olarak belirlenen kısımda kaynak ile tüm enerjisini depolama noktası arasında hareket edebilme olasılığı olarak açıklanmıştır). Bu şekilde her bir tracking algoritması için geliştirilmiş olan teknikleri bir arada kullanmak mümkün olmaktadır.

5.4 Geri İzleme Algoritması (Back Tracking Algorithm)

Bu algoritma tekniğinin temel yapısı, son foto elektrik etkileşme noktasından başlanarak gama ışınının tüm etkileşme noktalarını ve bu noktalara depolanan enerjilerini bularak gama ışınının tüm enerjisini hesaplamaktır. Puls şekillenme analizi sonucunda elde edilmiş etkileşme noktalarının enerji ve konumlarındaki değerlerinden yararlanarak, etkileşme noktaları, foto elektrik olay için belirlenmiş eşik enerjisi altındaki etkileşme noktalarının enerjilerinin ihmal ve maksimum foto elektrik olay yapma enerjisinden küçük olmak üzere, etkileşme noktalarının enerjilerindeki artışına bağlı olarak sınıflandırılır. Burada eşik değeri yaklaşık olarak foto elektrik olayı için eşik “min. foto” değeri 100 KeV olarak alınmıştır. İlk etkileşme noktası belirlenirken, foto elektrik eşik değerine eşit ya da yukarıdaki herhangi bir etkileşme noktası ilk etkileşme noktası “i =1” olarak seçilir. Ardından bu etkileşme noktasına en yakın diğer bir etkileşme noktası olan i=2 noktası bulunur ve bu iki nokta arasındaki foto elektrik yapma olasılığı hesaplanır². Bu olasılık denklem 5.14 ile hesaplanır. Bu iki etkileşme noktası arasındaki uzaklık $a_{2 \rightarrow 1}$ olmak üzere; bu uzaklık arasında tüm enerjisini depolama olasılığı aşağıdaki biçimdedir:

² Farklı geri izleme algoritmalarında ilk etkileşme noktası 100Kev üzerinde depolanan bir etkileşme noktası için seçilir ve en yakın diğer etkileşme noktasıyla arasında foto elektrik yapma olasılığına bakılır. Eğer bu olasılık minimum foto elektrik yapma olasılığından düşük ise başka bir nokta seçilir. eğer yüksek enerji seviyesinde herhangi bir başlama noktası kalmamışsa algoritma 100 KeV’in altındaki noktalar için foto elektrik yapma olasılığına bakar. (Marel, 1999.).

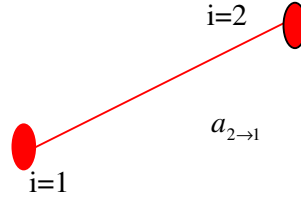
Bu iki etkileşme noktası arasındaki uzaklık $a_{2 \rightarrow 1}$ olmak üzere; bu uzaklık arasında tüm enerjisini depolama olasılığı aşağıdaki biçimdedir:

$$P(a_{2 \rightarrow 1}) = e^{-\frac{a_{2 \rightarrow 1}}{\lambda(E_{\text{depolanan}})}} \quad (5.14)$$

Burada λ ortalama serbest yol olmak üzere şu şekilde ifade edilir:

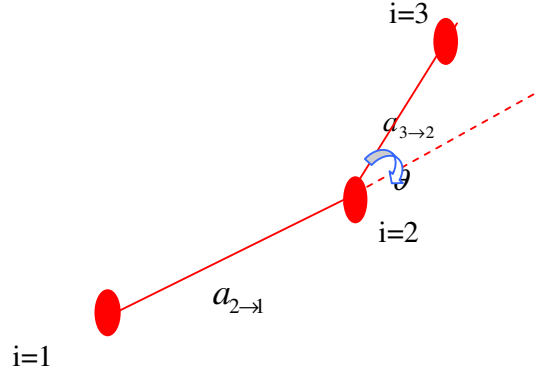
$$\lambda(E_{\text{dep.}}) = (n\sigma(E_{\text{dep.}}))^{-1}_{\text{fot-elek.}} \quad (5.15)$$

n germanyum materyalinde hacim başına atom sayısı ve σ ise enerji depolanma tesir kesitidir. Burada depolanan enerji $E_{\text{dep}} = e_1$ olmak üzere (i=1 noktasında depolanan enerji)



Şekil 5.4 İki etkileşme noktası için geri iz sürme algoritmasının gösterimi

Eğer yukarıdaki olasılık belirlenen minimum foto elektrik yapma olasılığından büyük ise i=2 noktası kabul edilir. Eğer i=2 noktası için bulunan olasılık değer minimum foto elektrik değerinden küçük ise i=2 noktası kabul edilmez ve i=1 noktasına en yakın farklı bir etkileşme nokta için bu kurala uyulup uyulmadığına bakılır. i=2 noktası kabul edilirse; Bu nokta için “figure of merit” bulunur (Lopez, 2004). Daha sonra i=2 noktasına en yakın olan i=3 etkileşme noktası seçilir. Bu noktanın seçilimi ve kabul edilmesi aşağıdaki biçimdedir.



Şekil 5.5 Üç etkileşme noktası için geri iz sürme algoritmasının gösterimi

$$\cos \theta_{denysel} = \frac{\overrightarrow{a_{21}} \cdot \overrightarrow{a_{32}}}{\left| \overrightarrow{a_{21}} \right| \left| \overrightarrow{a_{32}} \right|} \quad (5.16)$$

Buradan deneysel θ açısı bulunur ve Compton saçılma formülü yardımıyla teorik θ açısı elde edilir.

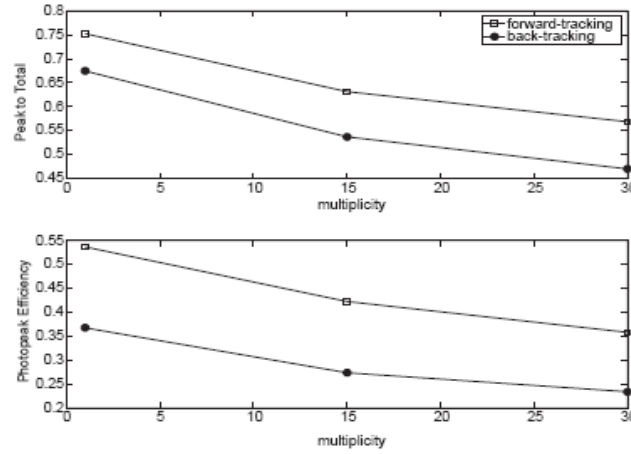
$$\cos \theta_{teorik} = 1 - m_e c^2 \left(\frac{1}{E_{saçılan}} - \frac{1}{E_{gelen}} \right) \quad (5.17)$$

Burada $E_{gelen} = E_{dep} = e_1 + e_2$ i=1 ve i=2 noktalarında depolanan enerjiler cinsinden yazılabilir. $E_{saçılan} = e_1$ ifadeleri yardımıyla θ teorik değeri hesaplanabilir. Minimum Compton saçılması yapabilme olasılığı veren maksimum uzaklığa göre i=3 noktası seçilir ve Compton formülü yardımıyla Compton saçılma açısı teorik olarak elde edilir ve deneysel olarak elde edilen Compton saçılmasıyla karşılaştırılarak uyumlu olup olmadığına bakılır. Elde edilen “figure of merit” değeri (Martin, 2004.), belirlenmiş olan minimum Compton saçılması yapabilme olasılığından büyük ise bu nokta kabul edilir değilse, başka bir nokta için bu işlem tekrarlanır. Eğer i=2 noktası için herhangi bir i=3 noktası minimum Compton saçılma olasılığını sağlamıyorsa i=3 noktası kaynak noktası olarak seçilir.

Bu da kaynağın yerini belirlenmesini sağlar. 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 değerden büyükse izleme sona erir ve sonuçlar önceden sınıflandırılan listeden çıkartılır, değilse $i=2$ için farklı bir nokta seçilir. Algoritma en son sistem içerisinde sınıflandırılmış (min foto < e_i < max foto) herhangi bir başlama noktası kalmamışsa, backtracking işlemi sona erir, varsa algoritma tekrar aynı işlemleri yapar.

5.4 İki İz Sürme Tekniğinin Karşılaştırılması

Elde edilen iki farklı iz sürme tekniği ile alınan P/T ve foto pik verim sonuçlarının karşılaştırılmasına bakıldığında ileri iz sürme tekniğinin geri iz sürme tekniğine göre çok daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir.

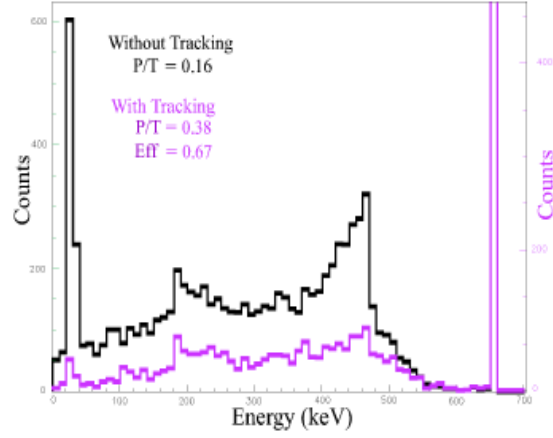


Şekil 5.6 forward tracking ve back tracking tekniklerinin karşılaştırılması

Forward tracking ve backtracking tekniklerinin gelen 1,332 MeV’ lik gama ışınının multiplicity değerindeki artışa bağlı olarak P/T ve foto pik veriminin karşılaştırılması (A. Lopez-Martens N.I.M 2004)

Şekil 5.6 da özellikle yüksek multiplicity değerlerinde forward tracking tekniğinin hem P/T hem de foto pik veriminde oldukça iyi sonuçlar verdiği görülmektedir.

Son olarak, ^{137}Cs nin beta bozunması sonucu uyarılmış durumda bırakılan Ba'un, 662 KeV lik bir gama ışını yayınlıyarak bozulması sonucu ölçülen gama ışını spektrumu aşağıdaki şekilde gösterilmiştir. Gama ışını iz sürme tekniğinin uygulanması sonucu foto pikteki artışı ve “backgrounda” ki azalış oldukça net bir şekildedir. Bu örnekte yaklaşık 4 katlık bir P/T kazanımı gözükmektedir.



Şekil 5.7 662 KeV' lik gama ışını spektrumunun tracking tekniği uygulanmadan ve uygulandıktan sonraki spektrumunun gösterimi (Proposal for Gretina, 2003)

6. MATERYAL VE YÖNTEMLER

Bu bölüm içerisinde tezde kullanılan materyallerin sunumu materyal kısmında yapılırken, tezde yapılan çalışmalar ise yöntem kısmında detaylı olarak verilmiştir.

6.1 Materyal

Bu bölümde hem Agata dedektörü hem de ideal bir Ge küresi için Geant4 programı içerisine yüklenen Agata simülasyonu, bu simülasyondan çıkacak olan spektrumların analizinin yapılması için gf3 analiz programı ve ileri iz sürme tekniğinin sonuçlarını incelemek için kullanılan mgt programı hakkında açıklamalar yapılmıştır.

6.1.1 Geant4 simülasyon yazılım kiti ve Agata simülasyonu

Geant4 simülasyon programı parçacık fiziği, nükleer fizik, nükleer tıp vb, bilim dallarında parçacıkların ya da radyasyonun maddeyle etkileşimini simüle edebilen Monte Carlo simülasyon tabanlı bir yazılım programıdır. Yazılım kitinin Monte Carlo tabanlı olmasının sebebi ise bir olayların gerçekleşme olasılıklarını göz önüne alan bir yazılım olmasıdır.. 1993 yılında CERN (European Organization for Nuclear Research) ve KEK' de (High Energy Accelerator Research Organization) bilimsel araştırmaların daha iyi bir yazılımla, nasıl yapılabilir düşüncesiyle, bir eski versiyon olan Fortran yazılım tabanlı Geant3' ün geliştirilmesi düşünülerek, yeni bir yazılım olan Geant4' ün temeli atılmıştır. Geant4 bir eski yazılım tipine göre çok daha ileri bir yazılım olan c++ nesne yönelimli bir programlama dili ile yazılmıştır. Bu programın ilk oluşturulmasında etken olarak LHC (Large Hadron Collider) içindeki dedektörlerin simülasyonu için bir çalışma başlatılmış olmasıdır. Geant4 simülasyon kiti özellikle dedektör simülasyonunda öncü rol oynamaktadır. İlk yapım aşaması yüksek enerji fiziğine yönelik olsa da nükleer fizik ve diğer bilim dalları içinde gerekli simülasyonları yapabilme imkanını sunmaktadır.

Bir eski yazılım programı olan Geant3' e göre Geant4 yazılım kiti çok daha görsel ve daha iyi performans sunmaktadır. Performansla yazılımın hızı artırılmış ve deneysel data verileriyle uyuşması eski yazılıma göre çok daha iyi sonuç vermiştir (<http://www.ge.infn.it/geant4/papers/chep2000/pap-a140.pdf>).

Geant4 Simülasyon yazılım kiti her bir farklı kullanım uygulamasını içeren bir program olmadığı için (nükleer tıp parçacık fiziği vb.) kullanıcının, bazı programları kendisinin yazması gerekmektedir. Bunun yanında Geant4 içindeki örnek uygulamalar kullanıcı seviyelerine göre ayrılmış olup, dedektör simülasyonlarının nasıl olduğu c++ programlama dili ile verilmiştir. Geant4 programı için gerekli tüm yazılım ve yükleme için gerekli kullanım bilgisi paylaşımına açıktır (Geant4 <http://geant4.web.cern.ch/geant4/>). Geant4' ün yazılım kiti örnek olarak dedektör simülasyonu için gerekli tüm dedektör geometrisi, dedektör için kullanılan materyal, element veya bileşik, dedektörün hassaslığı, parçacık oluşturma, parçacık tipi, fiziksel süreçler (elektromanyetik, hadronik, standart etkileşme vb.) tracking, dijitalasyon, görüntüleme, ara yüzler ve histogramlama vb gibi, bir dedektör simülasyonu için gerekli olan tüm c++ sınıflarını içermektedir. Geant4' ün en önemli özelliklerinden bir tanesi de bu ara yüzlerdir. Bu ara yüz tamamıyla kullanıcıya yönelik bir kolaylık sağlaması için kullanıcının yazmış olduğu ana program içerisinde G4UI yöneticisi (Geant4 User Interface) içerisinde belirtilerek simülasyon çalışma satırında makro dosyalarının kullanımını sağlamaktadır. Böylece kullanıcı kendi yazmış olduğu programın özelliğine göre program içinde değişiklik yapmadan makro dosyaları üzerinde değişiklik yaparak istediği simülasyon özelliklerini değiştirebilir. Geant4' te basit bir simülasyon yapmak için gerekli olan üç tane zorunlu sınıf bulunmaktadır. Bunlar dedektörün geometrisinin, materyalinin, hassaslığının belirlendiği G4VUserDetectorConstruction, fiziksel süreçlerin belirlendiği G4VUserPhysicsList ve parçacık oluşumu ve tipinin enerjisinin vb. özelliklerinin belirlendiği G4VUser Primary GenerationAction sınıflarıdır. Ek olarak programın seviyesine göre ilave edilen sınıfları da içermektedir. Bu sınıflar ise programın akışını, parçacık iz sürümünü, olayları, basamakların kontrol ve akışını sağlamaktadır.

Buradaki tracking olayı ise, dedektörle etkileşen parçacıkları basamak basamak dedektörün etkin hacim içerisinde hareketini birer snapshot olayı gibi çekerek kullanıcıya dedektörün farklı hacimleri içinde depolanan enerjiyi, yerini yaptığı etkileşmeyi ve momentumu gibi özellikleri veren ve bunu kullanıcıya görsel olarak, parçacıkların dedektördeki izlediği yörünge olarak gösterebilmesidir. Geant4 programının bir eksi yönü ise çıktı dosyalarını bir histogram ile görüntüleyebilmek için gerekli analiz programını içermemiş olmasıdır. Geant4' ten alınan çıktılar AIDA, JAIDA, ROOT, GF3 (<http://radware.phy.ornl.gov/gf3/gf3.html>, 2000) ve farklı analiz ve görüntüleme programları ile incelenmektedir. Sonuç olarak Geant4 programı bilimin farklı dalları için simülasyon imkanı vermesinin yanında, örnek olarak bilime ışık tutacak yeni tip parçacık dedektörlerinin bilinen fiziksel etkileşmeler çerçevesinde en iyi sonucu vermesi için tasarlanma imkanı yaratmaktadır (S.Agaostinelli *et al.*, 2003). Agata simülasyonu ise (<http://agata.pd.infn.it/documents/simulations/agataCode.html>, 2006) Geant4 destekli bir yazılım programı olup bu tezde çalışılan dedektör geometrilerini, parçacık süreçlerini, olay üretiminin yapılabildiği bir yazılımdır.

6.1.2 Mgt programı

Bu algoritma tipi ileri iz sürme algoritmasını açıklarken bahsedilmiş olan Compton iz sürme, foto elektrik iz sürme ve çift oluşum iz sürme tekniklerini birlikte yapabilen bir iz sürme algoritmasıdır ve c++ dilinde TMR (Training and Mobility of Researchers) projesi altında D.Bazzacco *et al.* tarafından geliştirilmiştir. Mgt programı, bir deney sonucu toplanan veya Geant4 simülasyon programı tarafından oluşturulan verilerden yola çıkarak dedektörlere çarpan gama ışınlarının izlerini sürmeyi ve doğru enerjilerini hesaplamayı amaçlar. Kullanılan veriler dedektörlerdeki etkileşme noktalarının konumları ve bu noktalarda depolanan enerjilerden oluşur.

İlk olarak Geant4' ten çıkan data verileri deneysel verilerle uyumlu hale getirilir. Bu işlemin yapılmasındaki sebep ise; Geant4 te ki dedektör simülasyonundan alınan veriler sonsuza yakın enerji çözünürlüğünde ve konum çözünürlüğüne sahip bir dedektörden alınan verilere eş değer olmasıdır.

Bundan dolayı dedektördeki etkileşme noktaları Geant4 programında herhangi bir belirsizlikle ölçülmez. Gerçekte ise bir dedektörün ölçtüğü değerler belirli hata payı ve enerji ve konumdaki belirsizlikle ölçülür. Bu yüzden Geant4’ ten çıkan data verileri deneysel değerlerle uyumlu hale getirilir. Örneğin enerji piklerinin belirli bir Gauss dağılımı ile temsil edilmeleri gerekir (FWHM).

AGATA dedektörü için 5 keV in altındaki gama ışınlarını ölçmemektedir. Ayrıca 0,500 cm içindeki iki etkileşme noktasını bir etkileşme noktası olarak kabul edip enerjilerini toplar ve tek etkileşme noktası olarak alır, bunun yanında Agata dedektörleri için FWHM değeri 1,9KeV’ (1332 keV’de) dır. Deney veya Geant4 simülasyonu ile belirlenen etkileşme noktaları mgt programı içinde iki farklı yöntem ile kümelenir. Bu yöntemler Leader algoritması ile Link algoritmasıdır. Mgt’ yi diğer tracking algoritmalarından ayıran yanı ise etkileşme noktalarından bir gama ışını oluştururken izlediği teknik, Compton iz sürme tekniğinde açıklandığı gibi istatistiksel olan χ^2 testine bağlı kalmasıdır. Ayrıca Mgt programı geliştirilen diğer programlara göre hem χ^2 testi hem de olasılık testini ayrı ayrı yapabilme imkanı sağlamaktadır. Burada yapılan olasılık testi ise gelen gama ışınının enerjisi ve etkileşme noktaları arasındaki uzaklığa bakılarak Compton ya da foto elektrik yapabilme olasılıklarının hesaplanmasına yöneliktir. Etkileşme noktaları arasındaki permütasyonda en iyi olasılığı veren ifade belirlenen limit olasılık değerle kıyaslanarak, etkileşme noktalarında oluşan gama ışının kabulü ya da reddi yapılmaktadır (Martin, 2004). Mgt algoritmasının en önemli özelliği diğer algoritmalara göre çift oluşum algoritmasını da içermesidir. Yapılan çift oluşum iz sürme tekniği, ileri iz sürme algoritmasında açıklandığı gibidir. Mgt algoritmasının diğer bir önemli yanı diğer algoritmalara göre spektrum çıktılarının çok daha detaylı olmasıdır. Örnek olarak “doppler correction” yapılmadan ve yapıldıktan sonraki spektrumlar, tracking yapılmadan önceki ve sonraki P/T değerleri, “reconstruction” yapılmış spektrumu görebilme ayrıca bu spektruma farklı iz sürme teknikler cinsinden inceleme imkanı vb. spektrumlar elde edilebilmektedir.

Bu program içerisinde iz sürme algoritması için yapılan kümelemede α açısal ayırım değerinin sınır aralığını belirleme ve kümeler içerisinde alınabilecek maksimum etkileşme noktası değiştirilebilmektedir. Bunun yanında χ^2 değeri için hesaplanmış olan maksimum limit χ^2 değeri de değiştirilebilmektedir ve algoritmada iz sürme tekniği yapılırken χ^2 testi Mgt' nin hızını diğer olasılık hesabı yapan algoritmalara göre arttırmaktadır. Ayrıca mgt, içerisinde farklı dedektör geometrileri için de tracking yapma imkanı da sunulmaktadır.

Mgt programının eksik yönleri ise; elektronun aldığı mesafenin ihmal edilmesiyle dedektörde depolanan enerjinin Compton saçılma noktası olarak kabul edilmesidir, bu da elektronların tracking işlemine katılmadığını göstermektedir. Bu sonuçta Bremsstrahlung sonucu oluşan gama ışınlarının ihmalini göstermektedir. Fakat bu eksikliğin giderilmesi yönünde yeni algoritma çalışmaları sürmektedir. İkinci olarak, çift oluşum iz sürme tekniğinde, dedektörle etkileşen yüksek enerjili gama ışının oluşturduğu pozitronun yok olması sonucu oluşan iki 511KeV lik gama ışını aranmaktadır. Eğer bir küme içerisinde bu iki 511 KeV' lik gama mevcutsa, etkileşme noktası çift oluşum noktası olarak kabul edilir. Burada eksik yan, oluşan 511 KeV' lik gama ışınlarının Compton saçılması yaparak küme içinde belirlenmemesi ve de bu durumda oluşacak tek kaçış ve çift kaçış piklerinin hesaba katılmamasıdır. Çift oluşum tekniği iz sürme programları dahilinde halen geliştirilmektedir.

6.2 Yöntem

Bu tezin amacı Agata projesi kapsamında yürütülmekte olan ve hala yapım aşaması devam eden her biri 36 segmentli, 180 tane HpGe hexagonal tipli dedektörlerden oluşan Agata küresinin performansının ileri iz sürme tekniğiyle birlikte araştırılması amaçlanmıştır.

İlk olarak iç yarıçapı 23,5008 cm ve dış yarıçapı 32,9202 cm olan, 180 dedektörden oluşan ve her biri 36 segmentli HpGe hexagonal dedektör topluluğu Agata küresinin simülasyonu, Geant4 yazılım kiti içerisinde Agata simülasyon kısmının eklenmesi ve derlenmesi sonucu elde edilir. Ardından vakum içinde tutulan kürenin tam merkez noktasına “multiplicity” (aynı anda kaynaktan çıkan radyasyon sayısı) değeri 1, gama sayısı 300.000 tane olan monoenerjistik 1 MeV’ lik gama ışını kaynağı konularak, her bir segmentte konum ve depolanan enerjinin bir data dosyası olarak alındığı, çıktı bilgilerine ve ayrıca ideal bir Agata küresi ve realisttik sonuç veren Agata küresine ait olan gama spektrumları elde edilir. Bu spektrumlar ascii formatıyla yazıldığından spektrumların gf3 analiz programı ile incelenebilmesi için “spe” formatına çevrilerek, gf3 programı içinde analizi yapılır. Bu analiz programında 1 MeV’ lik gama ışını için dedektörün ölçtüğü foto pik verimi, P/T oranı FWHM değeri, R değeri bölüm 2.7’ de açıklandığı gibi elde edilir. Sonraki adım olarak Agata simülasyonunda elde edilen data dosyası mgt programı içinde girdi verisi olarak kullanılır. İleri iz sürme algoritmasının sonuçlarını tracking yapılmadan önceki spektrumla karşılaştırmak ve buradan çıkan verilerin gf3 analiz programıyla incelemek için tracking yapılmadan önceki analiz programında elde edilen veriler tekrar hesaplanır. İleri iz sürme işlemi mgt programı içinde yapılmadan önce bu program içinde Geant4’ ten alınan data verilerin ideal durumdaki bir dedektöre ait olan data verileri olduğu için veriler daha realisttik hale getirilir. Bu işlem yapılırken mgt konsolundaki paketleme uzaklığı 5.00mm’ ye ve minimum enerji 5.00 keV olarak seçilir. Ayrıca ileri iz sürme işlemi için maksimum χ^2 değeri 1 olarak alınırken kümeleme açısı 6 derece ile 180 derece aralığında seçilir ve denklem 5.11 de gösterilen χ^2 denklemi bu program içinde seçilerek tracking işlemi yapılır. Ayrıca ek olarak mgt tracking işlemi sonunda 1 MeV için foto elektrik iz sürme, Compton iz sürme ve çift oluşum iz sürmenin toplam ileri iz sürme işlemine olan katkılarına bakılır. 1 MeV ve multiplicity değeri 1 olan bir kaynak için alınan tüm ölçümler multiplicity değeri 30 olan bir kaynak içinde yapılır. Böylece tracking işleminin m’ e (multiplicity) göre çalışma performansına bakılır. Ayrıca 1 MeV için yapılan tüm işlemler Agata simülasyonu içerisinde Agata dedektörü ile aynı boyutlarda fakat tek bir dedektörden oluşan ve sırasıyla $r=6$, $\theta=32$ ve $\phi=32$ segmentli HpGe ideal küresi için de yapılır, böylece Agata küresi ideal bir dedektör ile kıyaslanır.

Diğer yapılan bir işlem de Agata küresinin ve ideal kürenin 3 MeV' de $m=1$ ve $m=30$ değeri için ileri iz sürme işlemi mgt programı ile yapılır ve böylece enerji artışına bağlı olarak ileri iz sürme programının performansı ölçülür. Ayrıca bu tez de Agata simülasyonu içerisinde her bir dedektörün Al kapsüllenmesi yapılarak, kapsüllemenin tracking işlemine etkisi ve sonuçları ve ayrıca 2 mm kalınlığında cryostat içine yerleştirilmiş ve Al kapsüllü Agata küresinin ileri iz sürme işlemindeki performansı ($E=1\text{MeV}$ $m=1$ ve $m=30$), ($E=3\text{MeV}$ $m=1$ ve $m=30$) için incelenmiştir.

7. BULGULAR

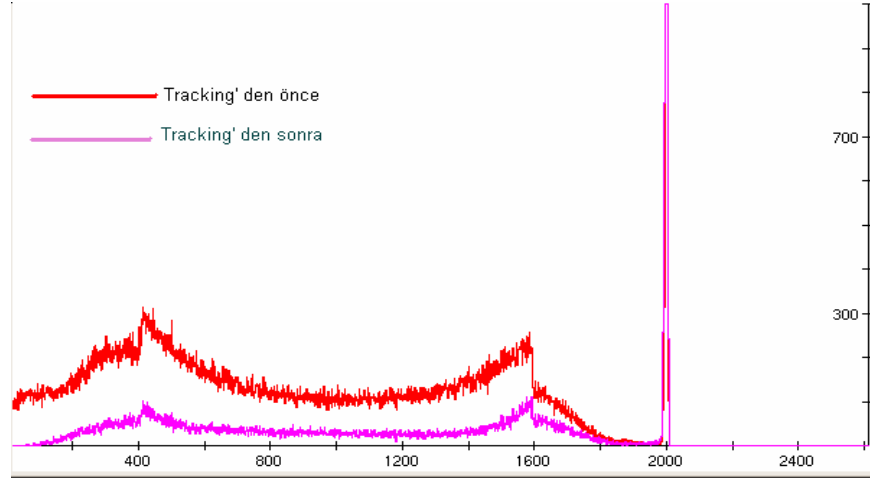
Bu bölümde Geant4 ve mgt programından alınan sonuçlarla birlikte tracking işlemi yapılmadan önce ve sonraki durumlarda, bir dedektör için gerekli olan parametrelerin değerleri verilmektedir.

Çizelge 7.1 Agata dedektörü için 1 MeV' lik ($m=1$) gama ışını tracking kıyaslanması

Tracking verimi (0.914)	Geant4	Tracking öncesi	Tracking sonrası
P/T	%74	%24	%70
ϵ_{pe}	%55	%27	%50
FWHM	.....	2,2KeV	2,2KeV
R(%)	.....	0.2	0.2
Toplam alan	220.671	335.670	213.049
Toplam foto pik alanı	163.561	81.129	149.483

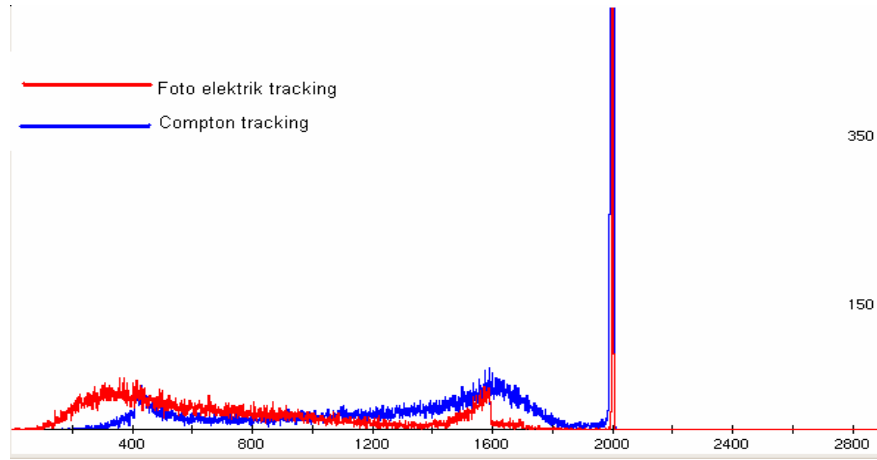
Çizelge 7.2 1 MeV' lik ($m=1$) gama ışınının kullanılması sonucu Agata dedektörüyle farklı olay etkileşmelerinin tracking işlemine katkısı

	Foto elektrik tracking	Compton tracking	Çift oluşum tracking
Toplam alan	42.461	170.588	8
Toplam foto pik alanı	11.832	137.650	0
P/T	%28	%80	0



Şekil 7.1 Agata dedektörü için (1 MeV' lik ($m=1$) gama ışını kaynağı kullanılarak) tracking öncesi ve sonrası değişimin gösterimi

İz sürme uygulamasından sonra foto pik te %23 lük bir artış gözlenir (Çizelge 7.1). Ayrıca bu spektrumda 1600. kanala karşılık gelen kısım Compton sırtıdır. Compton sırtı ile foto pik arasında kalan kısım ise çoklu saçılmalar sonucu enerjisinin büyük bir kısmını dedektöre aktarıp dedektörden kaçan gama ışınlarına ait bölgedir (Şekil 7.1).



Şekil 7.2 1 MeV' lik ($m=1$) gama ışınının kullanılması sonucu Agata dedektörüyle farklı olay etkileşmelerinin tracking işlemine katkısı (Çizelge 7.2)

Çizelge 7.3 Agata dedektörü için 1MeV'lik (m=30) gama ışını tracking kıyaslanması

Tracking verimi (0.600)	Geant4	Tracking öncesi	Tracking sonrası
P/T	%74	%22	%55
$\mathcal{E}_{pe}$	%54	%22	%32
FWHM	.....	2,2KeV	2,2KeV
R(%)	.....	0.2	0.2
Toplam alan	220.671	307.055	176.103
Toplam foto pik alanı	163.561	67.624	98.108

Çizelge 7.4 1 MeV' lik (m=30) gama ışınının kullanılması sonucu Agata dedektörüyle farklı olay etkileşmelerinin tracking işlemine katkısı

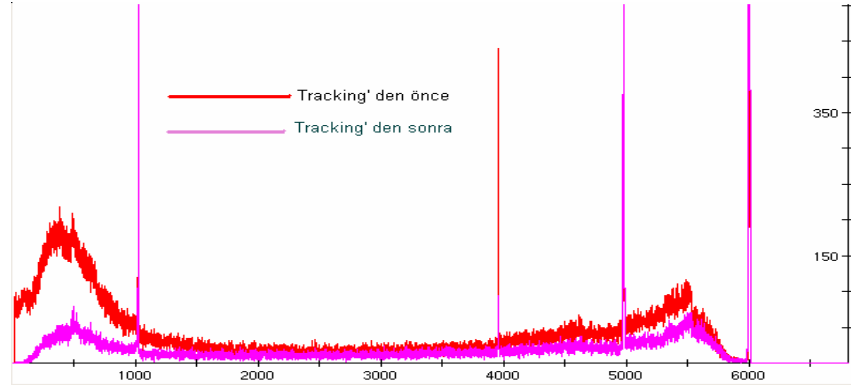
	Foto elektrik tracking	Compton tracking	Çift oluşum tracking
Toplam alan	24.264	151.831	8
Toplam foto pik alanı	1828	96.280	0
P/T	%7	%63	0

Çizelge 7.5 Agata dedektörü için 3MeV'lik (m=1) gama ışını tracking kıyaslanması

Tracking verimi (0.743)	Geant4	Tracking öncesi	Tracking sonrası
P/T	%56	%12	%38
$\mathcal{E}_{pe}$	%35	%13	%26
FWHM	.....	3,4KeV	3,4KeV
R(%)	.....	0.11	0.11
Toplam alan	190.141	321.538	204.074
Toplam foto pik alanı	106.221	38.992	78.957

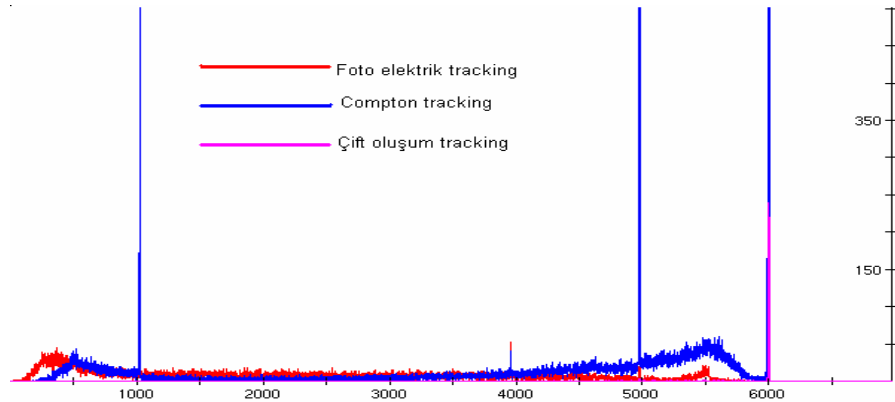
Çizelge 7.6 3 MeV' lik (m=1) gama ışınının kullanılması sonucu Agata dedektörüyle farklı olay etkileşmelerinin tracking işlemine katkısı

	Foto elektrik tracking	Compton tracking	Çift oluşum tracking
Toplam alan	48.942	153.286	1846
Toplam foto pik alanı	3150	74.008	1799
P/T	%6	%48	%98



Şekil 7.3 Agata dedektörü için (3 MeV' lik ($m=1$) gama ışını kaynağı kullanılarak) tracking öncesi ve sonrası değişimin gösterimi

İz sürme uygulamasından sonra foto pik te %13 lük bir artış gözlenir (Çizelge 7.5). Bu spektrumda 5530. kanala karşılık gelen kısım Compton sırtıdır. 1000. kanalda oluşan pik annihilation pikini göstermektedir. Sırasıyla 3956. ve 4978. kanallarında meydana gelen pikler ise çift kaçış ve tek kaçış pikini göstermektedir. Burada gözlenen spektrumda çift oluşum iz sürme tekniğinin (mgt programı içinde kullanılan) etkisi açık olarak gözlenmektedir. Bölüm 6.1.2' de de açıklandığı mgt programı çift oluşum tracking işleminde, çift oluşum sonrasında oluşan iki tane 511 keV' lik gamaların foto elektrik sonucu tüm enerjisini soğurduğu varsayıldığından, tracking sonrası annihilation pik, tek ve çift kaçış piklerinde yeterli oranda azalma söz konusu olmadığı görülmektedir (Şekil 7.3).



Şekil 7.4 3 MeV' lik ($m=1$) gama ışınının kullanılması sonucu Agata dedektörüyle farklı olay etkileşmelerinin tracking işlemine katkısı (Çizelge 7.6)

Çizelge 7.7 Agata dedektörü için 3MeV'lik (m=30) gama ışını tracking kıyaslanması

Tracking verimi (0.507)	Geant4	Tracking öncesi	Tracking sonrası
P/T	%56	%11	%33
ε_{pe}	%35	%11	%18
FWHM	.....	3,4KeV	3,4KeV
R(%)	.....	0,11	0,11
Toplam alan	190.141	295.308	163.956
Toplam foto pik alanı	106.221	32.665	106.221

Çizelge 7.8 3 MeV' lik (m=30) gama ışınının kullanılması sonucu Agata dedektörüyle farklı olay etkileşmelerinin tracking işlemine katkısı

	Foto elektrik tracking	Compton tracking	Çift oluşum tracking
Toplam alan	15.859	146.927	1170
Toplam foto pik alanı	286	52.497	1108
P/T	%1	%35	%94

Çizelge 7.9 Ideal Shell 1MeV için tracking kıyaslaması (m=1)

Tracking verimi (0.937)	Geant4	Tracking sonrası
P/T	%84	%80
$\mathcal{E}_{pe}$	%79	%74
FWHM	.....	Agata ile aynı
R(%)	.....	“
Toplam alan	282553	275227
Toplam foto pik alanı	237442	222370

Çizelge 7.10 Ideal Shell 1MeV için tracking kıyaslaması (m=30)

Tracking verimi (0.625)	Geant4	Tracking sonrası
P/T	%84	%63
$\mathcal{E}_{pe}$	%79	%50
FWHM	.....	Agata ile aynı
R(%)	.....	“
Toplam alan	282.553	235.811
Toplam foto pik alanı	237.442	148.441

Çizelge 7.11 Ideal Shell 3MeV için tracking kıyaslaması (m=1)

Tracking verimi (0.766)	Geant4	Tracking sonrası
P/T	%67	%49
$\mathcal{E}_{pe}$	%56	%43
FWHM	.....	Agata ile aynı
R(%)	.....	“
Toplam alan	248.039	263.831
Toplam foto pik alanı	167.410	128.318

Çizelge 7.12 Ideal Shell 3MeV için tracking kıyaslaması (m=30)

Tracking verimi (0.535)	Geant4	Tracking sonrası
P/T	%67	%40
$\mathcal{E}_{pe}$	%56	%30
FWHM	.....	Agata ile aynı
R(%)	.....	“
Toplam alan	248.039	222.058
Toplam foto pik alanı	167.410	89.607

Çizelge 7.13 Agata dedektörü (Alüminyum kapsüllü) için 1MeV’lik (m=1) gama ışını tracking kıyaslanması

Tracking verimi (0.924)	Geant4	Tracking öncesi	Tracking sonrası
P/T	%66	%23	%63
$\mathcal{E}_{pe}$	%51	%27	%47
FWHM	.....	2,2KeV	2,2KeV
R(%)	.....	0.2	0.2
Toplam alan	345.202	345.202	220.671
Toplam foto pik alanı	79.830	79.830	139.791

Çizelge 7.14 Agata dedektörü (Alüminyum kapsüllü) için 1 MeV’ lik (m=30) gama ışını tracking kıyaslanması

Tracking verimi (0.610)	Geant4	Tracking öncesi	Tracking sonrası
P/T	%66	%21	%51
$\mathcal{E}_{pe}$	%51	%22	%30
FWHM	.....	2,2KeV	2,2KeV
R(%)	.....	0.2	0.2
Toplam alan	345.202	315.077	228.829
Toplam foto pik alanı	79.830	66.235	151.235

Çizelge 7.15 Agata dedektörü (Alüminyum kapsüllü) için 3 MeV' lik (m=1) gama ışını tracking kıyaslanması

Tracking verimi (0.772)	Geant4	Tracking öncesi	Tracking sonrası
P/T	%49	%12	%35
$\mathcal{E}_{pe}$	%32	%13	%26
FWHM	.....	3,4KeV	3,4KeV
R(%)	.....	0.11	0.11
Toplam alan	196.795	328.567	210.304
Toplam foto pik alanı	95.632	39.406	73.790

Çizelge 7.16 Agata dedektörü (Alüminyum kapsüllü) için 3 MeV' lik (m=30) gama ışını tracking kıyaslanması

Tracking verimi (0.533)	Geant4	Tracking öncesi	Tracking sonrası
P/T	%49	%11	%30
$\mathcal{E}_{pe}$	%32	%11	%17
FWHM	.....	3,4KeV	3,4KeV
R(%)	.....	0.11	0.11
Toplam alan	196.795	301.176	167.672
Toplam foto pik alanı	95.632	33.040	51.015

Çizelge 7.17 Agata dedektörü (Alüminyum kapsüllü + cryostat) için 1 MeV' lik (m=1) gama ışını tracking kıyaslanması

Tracking verimi (0.933)	Geant4	Tracking öncesi	Tracking sonrası
P/T	%60	%22	%58
$\mathcal{E}_{pe}$	%48	%26	%44
FWHM	.....	2,2KeV	2,2KeV
R(%)	.....	0.2	0.2
Toplam alan	236.986	356.608	227.725
Toplam foto pik alanı	141.904	78.613	132.456

Çizelge 7.18 Agata dedektörü (Alüminyum kapsüllü + cryostat) için 1 MeV' lik (m=30) gama ışını tracking kıyaslanması

Tracking verimi (0.933)	Geant4	Tracking öncesi	Tracking sonrası
P/T	%60	%20	%48
$\mathcal{E}_{pe}$	%48	%21	%29
FWHM	.....	2,2KeV	2,2KeV
R(%)	.....	0.2	0.2
Toplam alan	236.986	324.481	184.327
Toplam foto pik alanı	141.904	64.927	87.826

Çizelge 7.19 Agata dedektörü (Alüminyum kapsüllü + cryostat) için 3 MeV' lik (m=1) gama ışını tracking kıyaslanması

Tracking verimi (0.933)	Geant4	Tracking öncesi	Tracking sonrası
P/T	%44	%11	%33
$\mathcal{E}_{pe}$	%30	%13	%23
FWHM	.....	3,4KeV	3,4KeV
R(%)	.....	0.11	0.11
Toplam alan	203.161	341.336	203.161
Toplam foto pik alanı	88.296	38.603	88.296

Çizelge 7.20 Agata dedektörü (Alüminyum kapsüllü + cryostat) için 3 MeV' lik (m=30) gama ışını tracking kıyaslanması

Tracking verimi (0.933)	Geant4	Tracking öncesi	Tracking sonrası
P/T	%44	%10	%28
$\mathcal{E}_{pe}$	%30	%11	%16
FWHM	.....	3,4KeV	3,4KeV
R(%)	.....	0.11	0.11
Toplam alan	203.161	311.564	171.804
Toplam foto pik alanı	88.296	32.148	48.834

8. TARTIŞMA VE SONUÇ

Agata projesi gelecekteki 20 yıl çerçevesinde nükleer fizik açısından çok önemli olan fenomenleri bulunması için önemli bir statüde yer almaktadır. Bu projeyle, nükleer fizik alanında hala keşfedilmeyen birçok sorunu çözmek için gerekli bilgiler alınmaya çalışılacaktır. Bu projenin ana ögesi olan yeni tip gama ışını iz sürme dedektörleri “forward tracking” yönteminin uygulanabileceği dedektör yapıları olacaktır. Bu yöntem hala araştırmaları devam eden ve dedektör performansını arttırmak için üzerinde çalışılması gereken bir durumdur. Bu tez çalışmasında Geant4 simülasyon programında simüle edilen Agata küresinin, mgt ileri iz sürme programı ile tracking yönteminin dedektör performansına etkisi incelenmiştir. Alınan verilere bakıldığında Agata küresinin ideal bir (1MeV’ lik mono enerjitik gama ışını kaynağı kullanılması sonucu $m=1$, $m=30$ için) Ge kabuğunun P/T değerinin ortalama olarak % 88’ lik ($m=1$ ’ de), %87’lik ($m=30$ ’ da) değerine, foto pik veriminin ise % 74’ lik ($m=1$ ’ de), %64’lik ($m=30$ ’ da) değerine ulaşılmıştır. Burada elde edilen sonuçlar Agata “proposal” daki sonuçlarla uyumludur (Gerl and Korten, 2001.). Mgt programı ile iz sürme işlemi yapılması sonucunda P/T oranında %46’lık ($m=1$) ve %33’ lük ($m=30$), foto pik veriminde ise %28’lik ($m=1$), %10’lık ($m=30$) bir artış söz konusudur. Kaynaktan çıkan gama ışını 3 MeV’ lik bir enerjiye ulaştığında ise ideal Ge kabuğunun P/T değerinin %77’lik ($m=1$), ve %83’ lük ($m=30$) foto pik veriminin ise her iki multiplicity değeri içinde %60’ lık değerine ulaşılmıştır. Bu enerji de ki, mgt programında ileri iz sürme tekniğinin kullanılmasıyla birlikte P/T değerinde %26’lık ($m=1$) ve %22’lik ($m=30$) foto pik veriminde ise %13’lük ($m=1$), ve %9’luk bir artış söz konusudur. Bu sonuçlar enerji ve multiplicity değeri arttıkça Agata küresinin performansının ideal Ge kabuğuna göre azaldığını ve mgt programının yüksek enerji ve multiplicity değerlerinde, tracking işleminde daha az verimli olduğunu göstermektedir. Alüminyum kapsüllemesi yapılmış olan Agata küresinin performansına bakıldığında ise kapsülleme yapılmamış olan Agata küresine göre (farklı enerji ve multiplicity değerlerinin ayrı ayrı düşünüldüğü bir durumda) ortalama olarak P/T değerinde % 3-7 aralığında, foto pik veriminde ise % 1-8 aralığında bir azalma görülmektedir.

Cryostatla birlikte alüminyum kapsüllemesinin bir arada yapıldığı simülasyonda ise mgt programından alınan sonuçlar, Agata küresine göre (farklı enerji ve multiplicity değerlerinin ayrı ayrı düşünüldüğü bir durumda) ortalama olarak P/T değerinde % 5- 12 arasında foto pik veriminde ise % 1-11 arasında bir azalma görülmektedir. Cryostatla birlikte alüminyum kapsüllemesi yapılmış olan Agata küresi için alınan bu değerler D. Bazzacco' nun The Advanced Gamma Ray Tracking Array AGATA makalesindeki, Agata performansı için beklenen değerlerle uyum içindedir (Bazzacco 2004). Yine aynı makalede görülebileceği gibi Euroball dedektör kümesi ile kıyaslanan Agata için 1MeV ve $m=1$ ve $m=30$ koşulu için foto pik veriminde yaklaşık olarak 5 katlık bir kazanım söz konusu olmaktadır. Ayrıca 1 MeV' de tüm Agata simülasyonlarında FWHM değeri ortalama olarak 2 keV civarında elde edilirken 3 MeV' de bu değer ortalama olarak 3 keV olarak bulunmuştur.

Sonuç olarak, bu tez çalışmasında kullanılan mgt programı ile Agata küresinin iz sürme performansı incelenmiş, enerji ve multiplicity değerlerindeki artışla birlikte Agata küresinin veriminde bir azalış gözlenmiştir. Agata' nın ve iz sürme tekniğinin, gama ışını ölçümlerindeki hassasiyeti bugün kullanılan yöntemlerin çok üzerine çıkaracağı kesindir. Gelecekte bu projeyle birlikte iz sürme tekniğinin temel sorunları düzeltilebilir (Bu sorunlar “mgt programı” altlı başlıkta anlatılmaktadır). Alınan verilerden de görüldüğü gibi, segmentasyon artışıyla gama ışınlarının etkileşme noktalarının yerlerinin tespiti yapılabilmektedir. Gelecekte çok daha fazla oranda segmentasyona sahip ve daha büyük yapıdaki HpGe dedektörlerinin üretimi veya “hyper” saflıktaki dedektörlerin kullanımı da söz konusu olabilir. Ayrıca nanoteknolojideki gelişmelerle çok daha ince yapıda kapsülleme ve cryostatlama yapmak mümkün olabilir. Ayrıca Agata projesinde yapılacak olan nükleer reaksiyonlar sonucunda oluşan çekirdeklerin nükleer yapıları hakkında verilere ulaşabilmek için bu çekirdeklerden yayınlanan parçacıkların hepsinin dedeksiyonu yapılacaktır. Önemli oranda yüksüz parçacıkların yapmış olduğu etkileşmelerin iz sürümünü incelemek olacaktır. Bunun anlaşılabilir sebebi de nötronların gama spektroskopisi üzerinde etkileri olmasıdır. Bu yüzden, elde edilen gama spektroskopisinde nötronlarla gamaların ayırımına gidilmelidir.

Bu řu anda Agata projesi kapsamında dűřűnűlen ve Agata kűresinin nűtron ve gama ayrımını, sinyal analizleriyle veya ileride geliřtirilecek nűtron tracking yűntemleri ile giderilmesi sűz konusudur.

Sonuç olarak Agata kűresi ve bunun gibi yapım aşaması hala devam eden Greta' nın da nűkleer fizik açısından çok temel olan sorunlara ışık tutacağı ve bilimin gelişmesi için bunun gibi daha birçok projenin yapılması gerektiğinin bir sonucu olarak açığa çıkmaktadır.

Agostinelli, S. 2003. Geant4-simulation tool kit Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 506; 250–303.

Allison, J., Apostolakis, J., Cosmo, G., Nieminen, P. and Pia, M.G. Web sitesi: <http://www.ge.infn.it/geant4/papers/chep2000/pap-a140.pdf>. Erişim tarihi: 07.05.2007.

Bazzacco, D. mgt code developed within the TMR program ‘Gamma-ray tracking detectors’.

Bazzacco, D. 2004. Advanced Gamma Ray Tracking Array AGATA Nuclear Physics A 746; 248c–254c.

BICRON, http://www.detectors.saintgobain.com/Media/Documents/S00000000000000001004/SGC_EfficiencyCalculations1005.pdf. Erişim tarihi: 07.05.2007.

Deleplanque, M.A. and Diamond, R.M. (Eds.), 1988, GAMMASPHERE Proposal; Lawrence Berkeley Laboratory Report 5202.

Deleplanque, M.A. , Lee, I.Y., Vetter, K. , Schmid, G.J. , Stephens, F.S. , Clark, R.M., Diamond, R.M. , Fallon, P. and Macchiavelli, A.O. 1999. GRETA: utilizing new concepts in gamma-ray detection. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 430; 292-310.

Enrico, Farnea. 2006. Web sitesi: <http://agata.pd.infn.it/documents/simulations/agataCode.html>. Erişim tarihi: 07.05.2007.

Franco, Camera. Web sitesi: <http://agata.pd.infn.it/documents/glp5152003/FrancoCamera.pdf>. Erişim tarihi: 07.05.2007.

Geant4, Web sitesi: <http://geant4.web.cern.ch/geant4/> Erişim tarihi: 07.05.2007.

Gerl, J. and Korten, W. 2001. Agata Technical proposal, 87 p, Web sitesi: <http://agata.pd.infn.it/> Erişim tarihi: 07.05.2007.

Greta, 2000. Contribution to NSAC Long-Range Plan The Gamma-Ray Energy Tracking Array, GRETA. Web sitesi: www.star.bnl.gov/STAR/nsac/papers/greta.pdf. Erişim tarihi: 07.05.2007.

Gretina, 2003. Proposal for Gretina 82 p, Web sitesi: http://radware.phy.ornl.gov/greta/Gretina_prop_partial.pdf. Erişim tarihi: 07.05.2007.

Hull, Ethan L., Pehl Richard H., Lathrop, James R., Martin, Gregory N., Mashburn, Ronnie B., Miley, Harry S., Aalseth, Craig E. and Hossbach, Todd W. Web sitesi: http://majorana.pnl.gov/documents/05_06_Hull_SEG.pdf. Erişim tarihi: 07.05.2007.

Knoll, Glenn F. 1999. Radiation Detection and Measurements, 801 p, USA.

Krane, Kenneth S. 1988. Introductory Nuclear Physics 835p, USA.

Lieder, R.M. 2001 The TMR network project “Development of γ -ray tracking detectors. Nuclear Physics A682; 279c-285c.

Leaderer, Michael C. and Shirly, Virginia S., 1978. Table of Isotopes, 1523p, USA.

Lopez-Martens, A., Hauschild, K., Korichi, A., Roccaz, J. and Thibaud, J-P. 2004. gamma ray tracking algorithms: a comparison. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 533; 454–466.

Martins, WALEY Lopez. 2003. Web sitesi: <http://agata.pd.infn.it/documents/week9152003/WaelyLopezMartens.pdf>. Erişim tarihi: 07.05.2005.

- MIHAILESCU, LUCIAN. 2000. PRINCIPLES AND METHODS FOR GAMMA – RAY TRACKING WITH LARGE VOLUME GERMANIUM DETECTORS. Ph. D. thesis, University of Bonn, 140 p, Rm. Valcea.
- Radford, D.C. 2000. Web sitesi: <http://radware.phy.ornl.gov/gf3/gf3.html> Erişim tarihi: 07.05.2007.
- Ramo, S. 1939. Currents induced by electron motion. *Proc IRE*. Vol. 27, 584-585.
- Valiente-Dobon, J.J., Pearson, C.J., Regan, P.H., Sellin, P.J., Gelletly, W., Morton, E., Boston, A., Descovich, M., Nolan, P.J, Simpson, J., Lazarus, I. and Warner, D. 2003. Performance of a 6 x 6 segmented germanium detector for g-ray tracking. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 505; 174–177.
- Van der Marel, J. and Cederwall, B., 1999. Backtracking as a way to reconstruct Compton scattered gamma-rays. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 437; 538-551.
- Vatter, K. 2001, The poof-of-principle for gamma-ray tracking. *Nuclear Physics A*; 286-294.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Semih BAYKAL

Doğum Yeri : ANKARA

Doğum Tarihi : 22.02.1983

Medeni Hali : Bekar

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Bahçelievler Deneme Lisesi (YDA) 1997 - 2001

Lisans : Gazi Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü
2001 -2005

Yüksek Lisans : Gazi Üniversitesi Eğitim Bilimleri Enstitüsü Fizik Öğretmenliği
Tezsiz Yüksek Lisans 2005 – 2006,
Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Bölümü Tezli
Yüksek Lisans 2005 - 2007