

AGATA Dedektörlerinde Yüksek Enerjili Gama Işın Etkileşmeleri

Serkan AKKOYUN^{1,*}

¹Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, 58140 Sivas

Department of Physics, Faculty of Sciences, Cumhuriyet University, 58140 Sivas, Turkey

Received: 30.04.2012, Accepted: 04.05.2012

Özet. Ağır iyon füzyon buharlaşma reaksiyonları sonucunda oluşan bileşik çekirdekler bozunurken, hafif parçacık yayınlanmasına göre çok daha düşük olasılıkla, yüksek enerjili gama ışınları da yayımlayabilirler. Gama ışın histogramlarının yüksek enerjili bölgesinde, düşük şiddetli tümsekler olarak ortaya çıkan bu gama ışınlarının incelenmesi ile, nükleer deformasyonlar ve nükleer yapı hakkında önemli bilgiler elde edilebilir. Bu çalışmada, Amerika ve Avrupa'da yeni geliştirilmiş olan gama ışını iz sürme tekniğinin yüksek gama ışın enerjilerindeki performansı, Monte Carlo simülasyonu ve iz sürme algoritmaları kullanılarak, AGATA iz sürme dedektörleri için incelenmiştir. Yüksek enerjili bölgede ($E > 10$ MeV) baskın olan çift oluşum mekanizmasının, iz sürme işlemi sırasında etkin bir şekilde belirlenebilmesi ve Compton mekanizmasından ayrılabilmesi için ek bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntem ile, 10 MeV enerjili gama ışınlarının ölçümünde yaklaşık % 20 oranında bir iyileşme sağlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Gama ışını iz sürme, AGATA, yüksek enerjili gama ışını, çift oluşumu.

Interactions of High-Energy Gamma Rays in AGATA Detectors

Abstract. In competition with light charged particles, high energy gamma rays may also be emitted with low probabilities following heavy-ion fusion-evaporation reactions. By investigation of these gamma rays which lie in high-energy region in the gamma ray spectra as low intensity bumps, important information concerning nuclear deformations and nuclear structure can be obtained. In this study, a new gamma-ray tracking technique which has recently been developed in Europe and in the USA was investigated for gamma-rays at high energies. This investigation was carried out by performing Monte Carlo simulations of high-energy gamma-rays for the new generation powerful AGATA gamma-ray tracking detectors and by using a gamma-ray tracking code. For the high energy region ($E > 10$ MeV) where the pair production is the dominant interaction mechanism, a complementary method was developed in order to improve the tracking algorithm for the pair production. With this method, an improvement of about 20 % was obtained for the measurement of 10 MeV gamma-rays.

Keywords: Gamma ray tracking, AGATA, high-energy gamma ray, pair production.

* Corresponding author. *Email address:* sakkoyun@cumhuriyet.edu.tr

AGATA Dedektörlerinde Yüksek Enerjili Gama Işın Etkileşmeleri

1. GİRİŞ

Nükleer haritada, β kararlılık kuşağından uzak olan ve proton veya nötron “dripline” çizgilerine yakın bölgelerde bulunan atom çekirdeklerinin araştırılması, nükleer yapı fiziği çalışmalarında güncel konular arasındadır. Daha önceden gözlenmemiş olan bu çekirdekler, “sıra dışı (egzotik)” çekirdekler olarak adlandırılırlar. Proton veya nötron zengini bu çekirdeklerin üretilmesi için, şiddetleri, kararlı iyon demetlerinininkilere göre oldukça düşük olan radyoaktif iyon demetlerinin kullanılması şarttır. Demet şiddetlerinin düşük olmasından dolayı, bu demetler yoluyla üretilen sıra dışı çekirdeklerin de üretilme oranları düşüktür.

Nükleer fizik çalışmalarında yaygın olarak kullanılan reaksiyonlardan biri de, ağır iyon füzyon buharlaşma reaksiyonudur [1]. Bu reaksiyonda, iki çekirdek birleşerek uyarılmış durumda bir bileşik çekirdek oluştururlar. Uyarılmış haldeki bileşik çekirdek, öncelikle nötron, proton ve alfa gibi hafif parçacıklar, ardından da gama ışınları yayınlayarak, fazla enerjisinden kurtularak temel hale döner. Bunun yanı sıra, yüksek uyarılma enerjilerinde bulunan bileşik çekirdek, parçacık yayınlamaya oranla 10^{-3} - 10^{-4} daha düşük olasılıkla, direkt olarak gama ışınları da yayınlayabilir. Açığa çıkan bu yüksek enerjili gama ışınları, gama ışın histogramlarında, yüksek enerjili bir tümsek olarak ortaya çıkar. Çekirdeklerin “dev dipol rezonans (GDR)” [2] durumlarının gama bozunumlarından açığa çıkan bu yüksek enerjili gama ışınları, çekirdeğin yapısı ve nükleer deformasyonlar hakkında önemli bilgiler verirler. Son yıllarda nötron zengini çekirdeklerin incelenmesi sonucu, GDR tümseğinin düşük enerjili sırtında, “cüce dipol rezonans (PDR)” olarak adlandırılan yeni bir olay gözlemlenmiştir [3]. Çekirdeklerin PDR durumlarının bozunmalarından açığa çıkan gama ışınları, gama ışın histogramlarında GDR'lere göre oldukça düşük şiddetli pikler olarak belirirler. PDR durumlarından yayınlanan gama ışınlarının incelenmesi ile, özellikle nükleer simetri enerjisi ve nötron kabukları hakkında ayrıntılı bilgilerin elde edilmesi beklenmektedir.

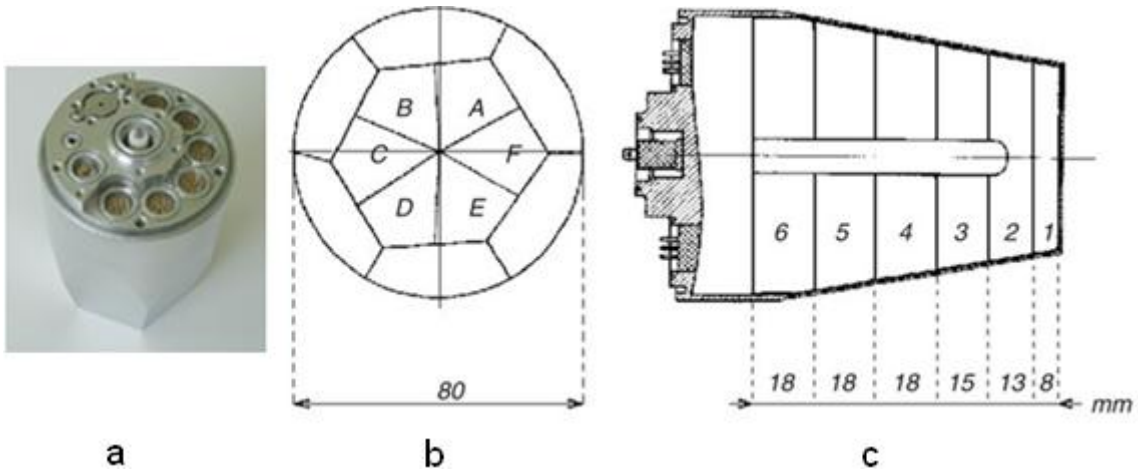
Bahsi geçen sıra dışı çekirdekleri ve düşük olasılıkla yayınlanan yüksek enerjili gama ışınlarını gözlemleyebilmenin etkili bir yolu, yüksek çözünürlüklü ve güçlü ölçüm aletleri kullanmaktır. Bu amaçla, Avrupa'da AGATA [4] (advanced gamma tracking array) ve USA'da GRETA [5] (gamma-ray tracking array) olmak üzere iki yeni dedektör sistemi geliştirilmektedir. Geleneksel dedektörlere kıyasla bu dedektörler güçlerini, gama ışını iz sürme tekniği [6-7] ve sinyal şekil analizinden [8] alır.

Bu çalışmada, bir ağır iyon füzyon buharlaşma reaksiyonundan açığa çıkan nötronlar ve yüksek enerjili gama ışınlarının AGATA dedektörlerinde etkileşmelerinin simülasyonları yapılmıştır. Gama ışın histogramlarının yüksek enerjili bölgesinde, nötronlardan kaynaklanan

arka fonun, ciddi bir problem olmadığı görülmüştür. Bu nedenle, bu enerji bölgesinde baskın gama ışını etkileşme mekanizması olan çift oluşumuna ait etkileşme noktalarının detektörlerdeki izlerinin sürülmesi iyileştirilerek, yüksek enerjili piklerin şiddetleri artırılması sağlanmıştır.

2. AGATA İZ SÜRME DEDEKTÖRLERİ

AGATA dedektör sistemi, Türkiye'nin de aktif olarak dahil olduğu büyük bir Avrupa projesi kapsamında geliştirilmektedir [4]. Bu dedektör sistemi, yüksek saflıkta germanyum materyalinden üretilmiş 180 adet n-tipli koaksiyal yarı iletken detektörden oluşmaktadır. Her bir germanyum kristali, altıgen şekilli ve elektronik olarak 36 bölüme (Şekil 2.1) ayrılmış olup, bu bölümlü yapı, yüksek konum çözünürlüğüne, sinyal şekil analizine ve etkileşme noktalarının izlerini sürmeye olanak sağlar. Kristaller, güvenlikleri nedeniyle 0,5 mm kalınlıklı alüminyum kılıf ile kapsüllenmiş ve üçlü gruplar halinde bir araya getirilerek ortak bir kriyostata bağlanmıştır.

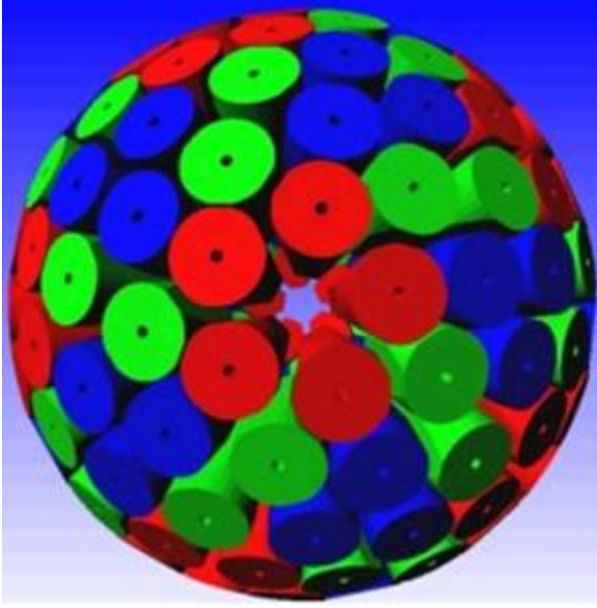


Şekil 2.1 AGATA dedektör kristali (a). 36 bölüme ayrılmış kristalin önden (b) ve yandan (c) görünümüleri [16]

Ortak kriyostatlarda bir araya getirilen bu dedektörler 4π katı açının yaklaşık %80'ini kaplayacak şekilde, iç yarıçapı 22,5 cm olan bir dedektör küresi oluşturmaktadırlar (Şekil 2.2.a). Nükleer reaksiyonlar kürenin merkezinde gerçekleşecek olup, küresel geometri sayesinde, yayınlanacak ürünlerin büyük çoğunluğunun dedektörler tarafından ölçülebilmesi sağlanmıştır. Şekil 2.2.b' de gösterildiği gibi, bu dedektör küresinin 1/12'si (şu an İtalya'nın Legnoro ulusal laboratuvarlarında (LNL) kurulu olup, yaklaşık 2 yıldır nükleer yapı fiziği çalışmalarındaki deneyler için, yüksek çözünürlüklü dedektör olarak görev yapmaktadır).

AGATA Dedektörlerinde Yüksek Enerjili Gama Işın Etkileşmeleri

AGATA dedektörlerinin ve bu dedektörlerde etkileşen gama ışınları ve nötronların simülasyonları, Geant4.9.2 [9] Monte Carlo simülasyon programı ile gerçekleştirilmektedir [10]. Bu programda kullanılan AGATA dedektör materyalindeki germanyum izotop oranları ^{70}Ge , ^{72}Ge , ^{73}Ge , ^{74}Ge ve ^{76}Ge için sırasıyla, %21, %28, %8, %36 ve %7'dir. Yapılan simülasyonlardan elde edilen sonuçlara göre, tüm dedektör küresi için 1 multiplisite ile yayınlanan 1 MeV enerjili gama ışınları için foto pik verimi %43 ve P/T oranı (pikteki saymanın tüm saymaya oranı) %59'dur.



a



b

Şekil 2.2 AGATA dedektör küresinin şematik gösterimi[17] (a) ve kürenin LNL'de kurulu olan 1/12'lik kısmı

3. GAMA IŞINI İZ SÜRME TEKNİĞİ

Yüklü parçacıkların aksine nötronlar ve gama ışınları enerjilerini, etkileştikleri madde içinde ayrık noktalarda depolarlar. Bu ayrık noktaların başarılı bir şekilde bir araya getirilebilmesi, ancak AGATA gibi çok bölümlü iz sürme dedektörlerinin kullanılması ile mümkündür. Aynı nötron ya da gama ışınına ait bu ayrık etkileşme noktalarının doğru bir şekilde bir araya getirilmesi ile, dedektör materyali ile etkileşmeye giren, dolayısıyla nükleer reaksiyondan yayınlanan nötron ya da gama ışınının doğru enerjisi elde edilebilir. İz sürme dedektörlerinde bu doğru sırayı elde etmek amacıyla geliştirilen tekniklerden yaygın olarak

Serkan AKKOYUN

kullanılanlarından ikisi, ileri yönde [6] ve geri yönde [7] iz sürme algoritmalarıdır. Bu çalışmada, ileri yönde iz sürme tekniğine dayalı olan *mgt* iz sürme programı [11] kullanılmıştır.

Ağır iyon füzyon buharlaşma reaksiyonlarından açığa çıkan nötronların enerjileri 1 ile 5 MeV aralığında yoğunluk gösterir. Bu enerjili nötronların dedektör materyalindeki baskın etkileşme mekanizmaları, *elastik* ve *inelastik* saçılmalarıdır [12]. Elastik saçılma noktalarının, iz sürme algoritmalarında belirlenerek atılmasına karşın, inelastik nötron saçılmalarında durum biraz daha karmaşıktır. Bu saçılmalarda, germanyum çekirdeklerinden saçılan nötron, çekirdeklerin uyarılmasına neden olurlar. Uyarılmış haldeki bu çekirdekler, gama ışınları yayınlamaya başlar ve temel hallerine dönerler. Bu gama ışınlarının da izlerinin sürülerek belirlenmesi, nötronlardan kaynaklanan arka fonun temizlenmesine olanak sağlar.

3.1 İleri yönde iz sürme

İleri yönde iz sürme algoritması, gama ışınlarının detektördeki doğru saçılma dizisini elde etmek için, etkileşme noktalarının uzaysal koordinatlarını ve bu koordinatlarda depolanan enerji bilgilerini kullanır. Nükleer yapı çalışmalarının yoğun olduğu 50 keV-10 MeV enerji bölgesinde, gama ışınlarının Compton saçılmasına uğrama olasılıkları baskın olduğundan dolayı bu algoritma, Compton saçılma mekanizması üzerinde yoğunlaşmıştır. Algoritma iki ana basamaktan oluşur: *kümeleme* ve *kümelerin analizi*. Kümeleme aşamasında, önceden belirlenen bir açısal mesafeye göre, etkileşme noktaları bir araya getirilir. Birbirine açısal olarak yakın olan noktaların bir araya getirilmesine, tüm etkileşme noktaları kümelene kadar devam edilir. Bu süreç sonunda, tek elemanlı kümelerin de elde edilebileceği göz ardı edilmemelidir. Oluşturulan kümelerin analizi aşamasında Denklem 3.1 kullanılır.

$$E_{S1} = \frac{E_T}{1 + E_T / m_e c^2 (1 - \cos \theta)} \quad \text{Denklem 3.1}$$

E_T toplam enerjisi ile gelen gama ışınının i numaralı bir etkileşme noktasından θ açısıyla saçılmasının ardından enerjisi, E_{S1} olarak hesaplanır. E_{S2} olarak verilen bu saçılma enerjisi elde etmenin diğer bir yolu da, Denklem 3.2'de verildiği gibi, E_T toplam enerjisinden, i numaralı etkileşme noktasında depolanmış olan enerjinin çıkarılmasıdır.

$$E_{S2} = E_T - e(i) \quad \text{Denklem 3.2}$$

Farklı yollarla hesaplanan bu saçılma enerjileri arasındaki uyum, Denklem 3.3 ile verilen ve kare analizine dayanan iyilik dereceleri (figure-of-merit, FM) ile incelenir.

AGATA Dedektörlerinde Yüksek Enerjili Gama Işın Etkileşmeleri

$$FM = \exp\left(-\frac{E_{S1} - E_{S2}}{\sigma_e^2}\right) \quad \text{Denklem 3.3}$$

Burada σ_e , etkileşme noktalarının koordinatlarındaki belirsizlikten dolayı, saçılma enerjisinde meydana gelen belirsizlik olarak tanımlanır. Bu analize, tüm kümeler için ve her kümede analiz edilmeyen hiçbir nokta kalmayınca kadar devam edilir [13]. Analizler sonunda, önceden belirlenmiş bir eşik FM değerine göre kümeler, “iyi”, “kabul edilebilir” ve “kötü” olarak işaretlenir.

3.2 Çift oluşumu iz sürme

10 MeV'den yüksek enerjili gama ışınları için çift oluşumuna uğrama olasılıkları, tüm gama ışını etkileşme mekanizmaları içinde en yüksek olanıdır. Bu nedenle bu enerjilerde, bu etkileşme mekanizmasına ait noktaların yüksek verimle belirlenmesi gerekmektedir. Dedektör materyalinde etkileşen gama ışınının her bir Compton saçılması sonrası enerjisi azalacağından dolayı, çift oluşuma uğrama olasılığı da azalır. Bu nedenle yüksek enerjili gama ışınlarının materyalde ilk etkileştikleri noktanın, çift oluşum etkileşme noktası olma olasılığı yüksektir. Bu etkileşmenin ardından açığa çıkan iki tane 511 keV enerjili gama ışını, enerjilerini dedektörde depolayabilir veya, özellikle dedektör sınırlarına yakın bölgelerde meydana gelen çift oluşum etkileşmeleri durumunda, detektörden dışarı kaçabilir.

Çift oluşum iz sürme algoritmasında, yüksek enerjili bir etkileşme noktası ve bu noktaya yakın iki tane 511 keV enerjili küme aranır. Eğer bu arama başarıyla sonuçlanırsa, tüm küme noktaları ve sözü geçen yüksek enerjili etkileşme noktası, çift oluşumuna ait noktalar olarak işaretlenir. Bunun yanında bir önceki paragrafta belirtildiği gibi, 511 keV gama ışınlarından bir veya ikisi, tamamen veya enerjisinin bir kısmını dedektörde depoladıktan sonra kısmen dedektörden dışarı saçılabilir. Bu durumu göz önüne alarak, yüksek enerjili etkileşme noktasına yakın sadece bir tane 511 keV (kısmi enerji depolayıp kaçma durumunda, daha düşük bir enerji değerinde) enerjili kümenin aranması, çift oluşum iz sürme algoritmasının verimini yükseltebilir.

4. YÜKSEK ENERJİLİ GAMA IŞINLARI BÖLGESİ

Yüksek enerjili gama ışınları bölgesinde ortaya çıkan GDR tümseği veya PDR piklerinin belirginliklerinin artırılması için uygulanması gereken metotlardan ikisi, yüksek

Serkan AKKOYUN

enerjili bu bölgedeki arka fonu temizlemek ve bu bölgede baskın gama ışını etkileşme mekanizması olan çift oluşumuna ait etkileşme noktalarını iyi belirlemektir.

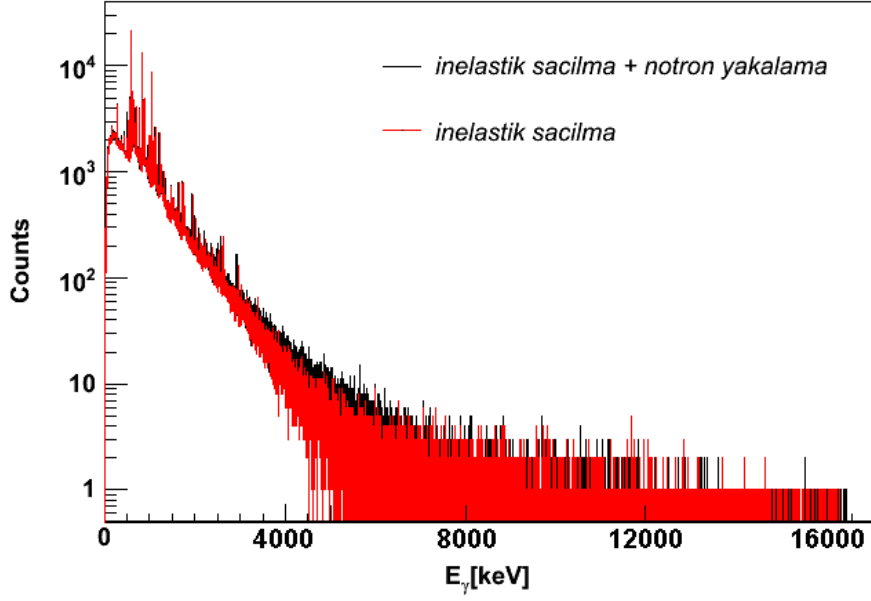
GDR ve PDR'ler için iki önemli parametre, enerji ve genişliktir. Bu bölümde, yüksek enerjili bölgede ortaya çıkan 10 MeV enerjili ve 100 keV genişlikli bir PDR piki düşünülerek simülasyonlar yapılmış ve bu pikin belirginliğini arttırmak üzere uygulanan metotlar ayrı başlıklar halinde anlatılmıştır.

4.1 Nötron arka fonu

Ağır iyon füzyon buharlaşma reaksiyonlarından açığa çıkan 1-15 MeV enerjili nötronların, AGATA dedektör materyalinde baskın etkileşme mekanizmaları, elastik ve inelastik saçılmalar ile nötron yakalama reaksiyonudur [12]. Nötron yakalama reaksiyonunun tesir kesiti, saçılmalara göre daha düşük olmakla birlikte, yüksek enerjili bölgeye arka fon olarak katkı verdiği görülmüştür.

AGATA dedektörlerinde, elastik saçılmaya ait etkileşme noktaları, iz sürme sürecinde genellikle tek elemanlı kümeler oluşturduklarından dolayı, *mgt* iz sürme programı ile belirlenmekte ve yok edilebilmektedir. Bunun yanı sıra, inelastik saçılma ve nötron yakalama mekanizmalarında, nötronların etkileştiği germanyum çekirdekleri gama ışınları da yayınlamaktadır. Bundan dolayı bu etkileşme türlerine ait noktalar, etkileşmeden açığa çıkan gama ışınlarıyla birlikte değerlendirilerek bir araya getirildiğinden dolayı, tek elemanlı küme oluşturmazlar ve dolayısıyla iz sürme programı tarafından yok edilemezler. Açığa gama ışını çıkmasına da neden olan bu iki tip etkileşmeye giren nötronların yüksek enerjili bölgeye etkisini görmek amacıyla yapılan simülasyonlarda, 1-15 MeV enerjili nötronlar AGATA dedektörlerine yollanmıştır. Şekil 4.1'de, sadece inelastik saçılan nötronlardan ve hem inelastik saçılan hem de nötron yakalaması etkileşmesine giren nötronlardan açığa çıkan gama ışınlarının histogramları verilmiştir. Görüldüğü gibi, yaklaşık 8 MeV'den büyük enerjili bölgede, nötron arka fonu ciddi problem oluşturmamaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada nötron arka fonunu temizlemeye yönelik bir iyileştirme yapılmamıştır.

AGATA Dedektörlerinde Yüksek Enerjili Gama Işın Etkileşmeleri



Şekil 4.1 AGATA dedektörleri ile etkileşmeye giren 1-15 MeV enerji dağılımlı nötronların, inelastik saçılma ve nörton yakalama etkileşmelerinden (siyah) ile sadece inelastik saçılmalarından (kırmızı) sonra açığa çıkan gama ışınlarının histogramları

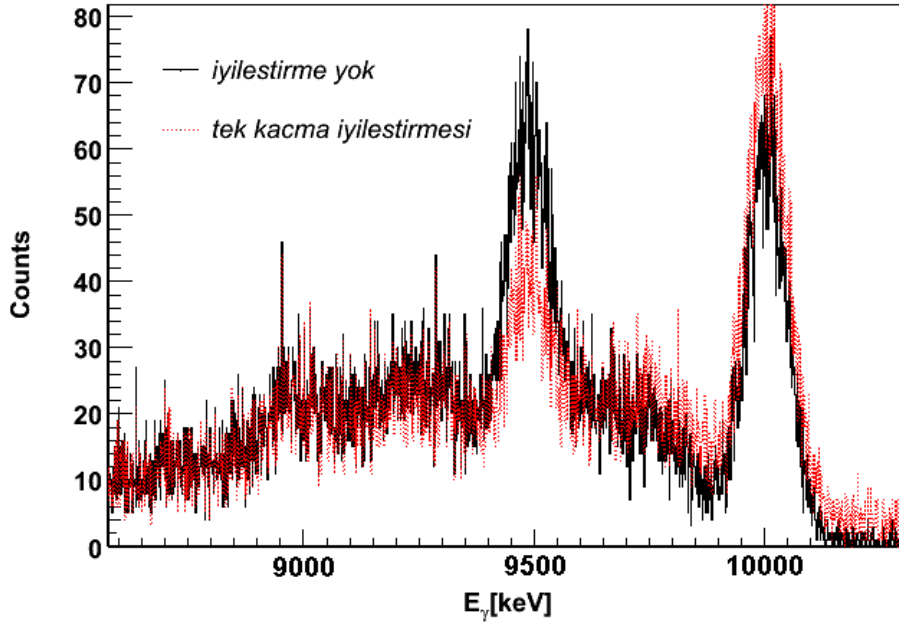
4.2 Çift oluşumu iz sürmenin iyileştirilmesi

Yüksek enerjili bölgedeki düşük şiddetli gama ışın tümsek ve piklerini belirginleştirmenin diğer ve daha etkili bir yolu, bu bölgedeki baskın etkileşme mekanizması olan çift oluşumuna ait noktaların iyi belirlenmesidir. Compton saçılmasına yoğunlaşarak hazırlanan *mgt* iz sürme programında, çift oluşumuna ait noktaların belirlenmesi için, iki tane 511 keV enerjili kümenin varlığı aranır. Bu kümelere yakın olan yüksek enerjili etkileşme noktaları, çift oluşum etkileşme noktaları olarak işaretlenir. Fakat çift oluşum etkileşmesi sonucu açığa çıkan bu iki tane 511 keV enerjili gama ışınlarından bir (tek kaçma) veya ikisinin (çift kaçma), tamamen veya kısmen dedektörden kaçma olasılığı olduğundan Bölüm 3.2’de bahsedilmişti. Bu durumda, çift oluşumuna ait yüksek enerjili etkileşme noktalarının, bu etkileşme türüne ait olduklarına dair iz ortadan kalkacak ve *mgt* programı tarafından bu noktalar, Compton saçılma noktası olarak işaretlenecektir. Bu yanlış işaretleme sonucunda gama histogramlarında, gama enerjisinin 511 keV (tek kaçma) veya 1022 keV (çift kaçma) eksiğinde kaçma pikleri meydana gelecektir. Bunun yanı sıra, çift oluşumu sonucu açığa çıkan 511 keV enerjili gama ışınlarının kısmen dedektörden kaçması durumunda, her iki kaçma piki civarında tümsekler belirecektir.

Şekil 4.2’de, 10 MeV enerjili gama ışınlarının AGATA dedektörleri ile etkileşmelerinin simülasyonundan elde edilen gama ışın histogramı görülmektedir. Bu histogramda foto pik ve

Serkan AKKOYUN

tek kaçma piki açıkça görülmektedir. Yapılan bu çalışmada, iz sürme algoritmasında yüksek enerjili gama ışını etkileşme noktaları civarında iki yerine bir tane 511 keV enerjili kümenin varlığı aranır. 511 keV enerjili böyle bir kümenin bulunması durumunda, kaçan diğer 511 keV enerjili gama ışını temsilen 511 keV enerji değeri, dışarıdan verilere dahil edilir (511 keV enerjili küme civarında, dedektörde enerjisinin bir kısmını depolayarak kısmen kaçan, 511 keV'den düşük enerjili diğer bir küme belirlenebilir. Bu durumda, verilere dışarıdan 511 keV eklemek yerine, eksik kısım kadar ekleme yapılır). Şekil 4.2'den de açıkça görülebileceği gibi, bu uygulama ile, tek kaçma pikinde olan sayımlar, eklenen 511 keV değerindeki enerji ile birlikte, bu pikten alınıp foto pike dahil edilmiş olur. Bunun sonucunda, tek kaçma piki ve çevresindeki bölgenin şiddeti düşerken, foto pikin şiddeti ise artar.



Şekil 4.2 İyileştirme öncesi (siyah) ve iyileştirme sonrası (kırmızı), yüksek enerjili (10 MeV) gama ışın piki ve buna ait tek kaçma pikini gösteren, izi sürülmüş gama ışın histogramları

Bu iyileştirme ile, foto pikteki sayımların %17, pikin toplam saymaya oranının ise (P/T) %18 oranında arttırılabildiği görülmüştür. Bunun yanında, tek kaçma pikindeki sayımlar %55, tek kaçma pikine ait P/T oranı ise %60 oranında azaltılabilmıştır (Çizelge 4.1). Ayrıca, tek kaçma piki ve çevresindeki bölgenin (8,8 – 9,8 MeV) sayımlarında ise %13 oranında azalma sağlanabilmektedir.

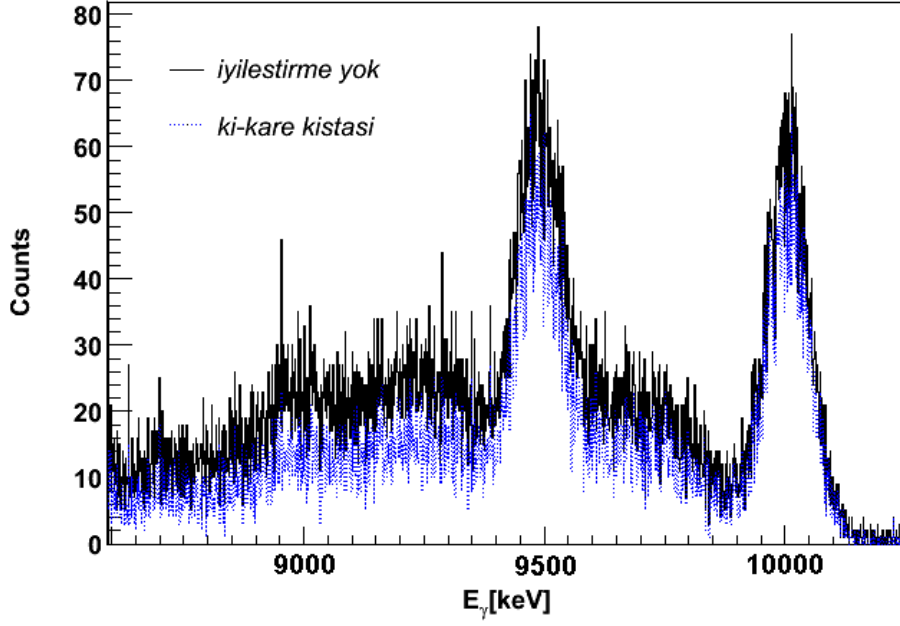
AGATA Dedektörlerinde Yüksek Enerjili Gama Işın Etkileşmeleri

Çizelge4.1 Farklı metotların uygulanmasıyla, foto pik ile kaçma pikindeki ve bu piklerin P/T oranlarındaki artma ve azalmalar

Fotopik	Toplam sayım	Pik sayımı	P/T oranı	Pikteki artma/azalma	P/T oranında artma/azalma
İşlenmemiş histogram	51.879	5.513	0,11	-	-
İyileştirilmiş histogram (A)	51.879	6.468	0,13	1,17	1,18
Kıstaslı histogram (B)	33.783	4.581	0,14	0,83	1,27
A+B	33.783	5.607	0,17	1,02	1,55
Kaçma Piki	Toplam sayım	Pik sayımı	P/T oranı	Pikteki artma/azalma	P/T oranında artma/azalma
İşlenmemiş histogram	51.879	4.930	0,10	-	-
İyileştirilmiş histogram (A)	51.879	2.219	0,04	0,45	0,40
Kıstaslı histogram (B)	33.783	3.772	0,11	0,77	1,10
A+B	33.783	1.358	0,04	0,28	0,40

4.3 FM kıstası ile arka fonun temizlenmesi

Yüksek enerjili gama ışın piklerinin belirginliğini arttırmak ve bir önceki kısımda anlatılan çift oluşumu iz sürme iyileştirmesinin performansının kıyaslanması amacıyla ek bir çalışma daha yapılmıştır. Bu çalışmanın dayanağı, iz sürme aşamasında oluşturulan kümelerin FM değerleri üzerine konulan kıstaslardır. İz sürme sürecinde, Compton saçılması veya çift oluşumu etkileşmesine girerek enerjisinin tamamını değil de bir kısmını dedektörde depolayan kümeler, genellikle iyi olmayan kümelerdir ve 0-1 arasında değer alabilen FM değerleri genellikle yüksektir. Bunun yanında, enerjisinin tamamını dedektörde depolayan gama ışınlarına ait kümeler ise, iyi kümeler olarak adlandırılır ve FM değerleri genellikle düşüktür [14]. İz sürme algoritmalarında FM değerlerinin 1'den düşük değerlerde kabul edilerek, gama ışın histogramlarında arka fonun temizlenmesi, gama spektroskopisinde kullanılan bir yöntemdir [4]. Bu çalışmada da, FM değerleri üzerine koyulan kıstas ile ($FM < 0,5$), iyi olmayan kümelerin bir kısmı elenebilmiştir. Şekil 4.3'den de görülebileceği gibi böyle bir uygulama ile, her iki pikin de şiddeti azaltılmıştır. Yapılan analizlerde, yüksek enerjili foto pikteki sayımların %17, tek kaçma pikindeki sayımların ise %23 oranlarında azaltıldığı görülmüştür. Ayrıca, tek kaçma piki ve çevresindeki sayımların ise %33 oranında azaltıldığı gözlenmiştir. Bu azalmalar ile birlikte, foto pike ait P/T oranı %27, tek kaçma pikine ait P/T oranı ise %10 oranlarında arttırılmıştır. Çizelge4.1'den de açıkça görülebileceği gibi, çift oluşumu iyileştirmesi metodu, iyi olmayan kümelerden kaynaklanan arka fonu temizlemeye göre daha etkilidir. Foto pike ait P/T oranının değişimlerine bakıldığında, FM kıstasının kullanılmasıyla, arka fonu temizleme metodunun daha etkiliymiş gibi olduğu görülebilir. Oysa bu görünüşün nedeni, pikteki sayımların artmasından değil, histogramdaki toplam sayımın azalmasından kaynaklanmaktadır. Bu azalma ise, yüksek enerjili piki direkt olarak ilgilendirmemektedir.



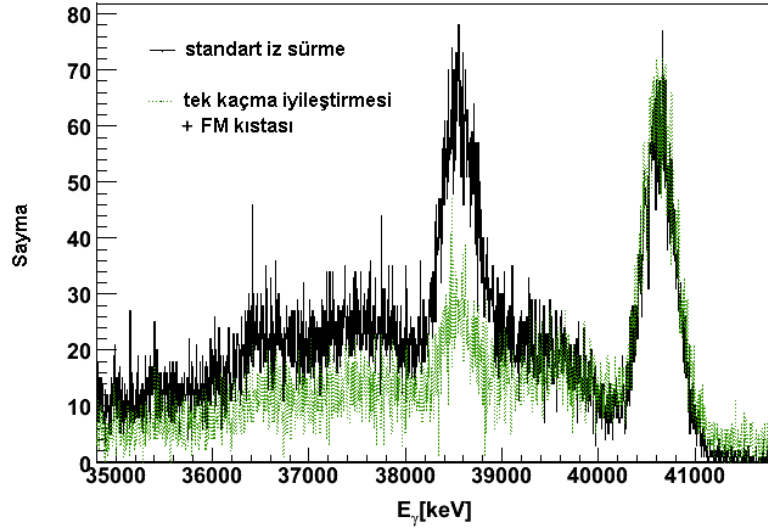
Şekil 4.3 Kıstasın uygulanmasından önce (siyah) ve sonra (mavi), yüksek enerjili (10 MeV) gama ışın piki ve buna ait tek kaçma pikini gösteren, izi sürülmüş gama ışın histogramları

4.4 Her iki metodun birlikte uygulanması

Çift oluşumu iz sürmenin iyileştirilmesi metodu ile birlikte FM kıstasının da uygulanması sonucu elde edilen gama ışın histogramı Şekil.4.4’de gösterilmiştir. Bu uygulama ile, tek kaçma pikindeki sayıların oldukça azaldığı açıkça görülmektedir. İki metodun birlikte kullanılmasıyla, foto pikteki artmanın önemsenmeyecek küçüklükte olması ve tek kaçma pikindeki azalmanın oldukça fazla olmasının nedeni, Şekil4.2 ve 4.3’ün birlikte incelenmesiyle kolaylıkla anlaşılabilir. Farklı metotların uygulanması, tek kaçma pikinde, her iki durumda da azaltma etkisi yapmakta ve bunun sonucunda tek kaçma pikinin şiddeti oldukça düşmektedir. Oysa foto pik için, çift oluşumu iyileştirme metodunun uygulanması pikin şiddetini arttırmakta, FM kıstasının uygulanması ise azaltmaktadır. Bu durum ise, foto pik şiddetinin hemen hemen değişmeden kalmasına yol açmaktadır.

Yapılan analizlerde, yüksek enerjili foto pikteki sayıların sadece %2 arttırıldığı, fakat bunun yanında tek kaçma pikindeki sayıların ise %72 oranında azaltıldığı görülmüştür. Bu azalmalar ile birlikte, foto pike ait P/T oranı %55, tek kaçma pikine ait P/T oranı ise %40 oranlarında arttırılmıştır (Çizelge 4.1).

AGATA Dedektörlerinde Yüksek Enerjili Gama Işın Etkileşmeleri



Şekil 4.4 İyileştirme ve kıstasın birlikte uygulanmasından önce (siyah) ve sonra (yeşil), yüksek enerjili (10 MeV) gama ışın piki ve buna ait tek kaçma pikini gösteren, izi sürülmüş gama ışın histogramları

5. AGATA DEDEKTÖRLERİ ile YÜKSEK ENERJİLİ GAMA IŞIN ÖLÇÜMLERİ

Yüksek enerjili gama ışınlarının, LNL laboratuvarlarında kurulu mevcut AGATA dedektörleri ile ölçümleri, 2010 yılında gerçekleştirilmiştir [15]. Bu çalışma, AGATA dedektörlerinin yüksek enerjili gama ışını ölçümleri için, ölçüm verimi, enerji çözünürlüğü ile iz sürme ve sinyal şekil analizlerinin performanslarını test etme açısından önemli olan ilk deneylerden biridir.

Yüksek enerjili gama ışınları üretmek için tasarlanan bu deneyde, demet enerjisi 19,1 MeV olan $d(^{11}B, n\gamma)^{12}C$ reaksiyonu kullanılmıştır. Reaksiyon sonunda ^{12}C 'nin, 15,11 MeV enerjili rezonans durumu oluşur. Bu durumun direk olarak temel duruma bozunması sonucu, 15,11 MeV enerjili gama ışınları açığa çıkar. Açığa çıkan bu yüksek enerjili gama ışınları, hedeften 13,5 cm uzakta yerleşmiş olan iki adet üçlü AGATA dedektörü ile ölçülmüş ve elde edilen ilk sonuçlara göre, Doppler iyileştirmesinin başarıyla gerçekleştirildiği görülmüştür. Bu çalışma kapsamında geliştirilen çift oluşumu iz sürme iyileştirmesinin, bu deneyden elde edilen veriler üzerinde test edilmesi de planlanmaktadır.

6. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

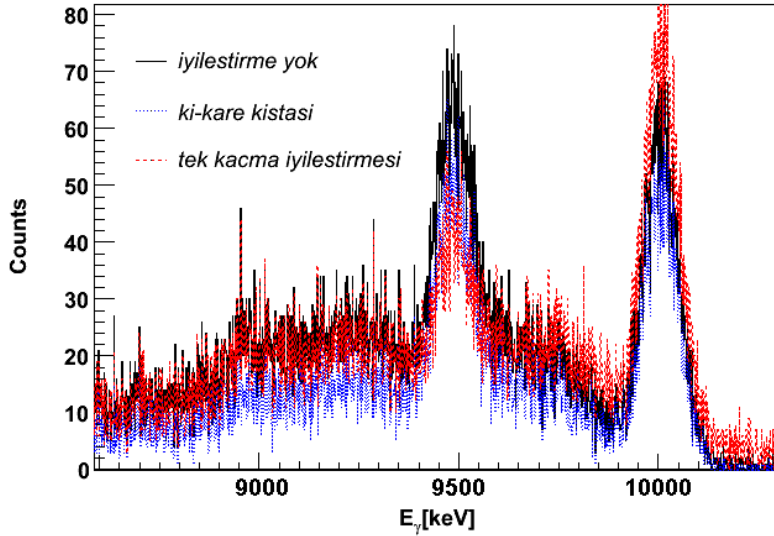
Bu çalışmada, AGATA dedektörlerinde yüksek enerjili gama ışınlarının etkileşmeleri incelenmiş, bu gama ışınlarına ait piklerin belirginliklerinin artırılması için yöntemler

Serkan AKKOYUN

geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Yüksek enerjili gama ışınları için baskın etkileşme mekanizması çift oluşum mekanizması olduğundan dolayı, iz sürme algoritması, bu etkileşme için iyileştirilmiştir. Yapılan iyileştirme, tek kaçma gama ışınlarının belirlenmesi ve tekrar verilere dahil edilmesi temeline dayanmaktadır.

Ayrıca bu çalışma kapsamında, yüksek enerjili bölgedeki arka fon incelenmiş ve bu arka fon, FM kıstası kullanılarak belirli oranda temizlenmiştir. Şekil 5.1’de de gösterildiği gibi, çift oluşum iyileştirmesinin ardından tek kaçma pikindeki sayımlar azalırken, 10 MeV enerjili foto pik sayımları artmaktadır. Buna karşın arka fonun temizlenmesi, hem tek kaçma pikinde hem de foto pikteki sayımların azalmasına neden olmaktadır. Üstelik bu temizleme ile foto pike ait P/T oranındaki artış (%27), çift oluşum iyileştirmesinin uygulanması sonucundaki artıştan (%18) daha büyüktür. Bu da, yüksek enerjili bölgede çift oluşumuna ait etkileşme noktalarının izlerinin daha hassas bir şekilde sürülmesi gerekliliğini ortaya koyar.

Bu çalışmada geliştirilen metodun ve FM kıstasının birlikte uygulanması da denenmiş ve tek kaçma pikindeki sayımların oldukça büyük bir oranda (%72) azaltıldığı görülmüştür. Tek kaçmaya ek olarak çift kaçma gama ışınlarının da belirlenerek verilere dahil edilmesi ile ilgili çalışmalar, bu çalışmanın devamı niteliğinde olacak şekilde sürmektedir.



Şekil 5.1 İyileştirme ve kıstasın uygulanmasından önce (siyah), ki-kare kıstasının uygulanmasından sonra (mavi) ve çift oluşumu iyileştirmesinden sonra (kırmızı) elde edilen yüksek enerjili (10 MeV) gama ışın piki ve buna ait tek kaçma pikini gösteren, izi sürülmüş gama histogramları

Teşekkür

Bu çalışma, Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi Daire Başkanlığının F-361 nolu projesi kapsamında desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] V.F. Weisskopf ve D.H. Ewing, 1940. Statistical Compound Nucleus Model. *Phys. Rev.* 57, 472-485.
- [2] M. Goldhaber ve E. Teller, 1948. On Nuclear Dipole Vibrations. *Phys. Rev.* 74, 1046-1048.
- [3] O. Wieland vd., 2009. Search for the Pygmy Dipole Resonance in ^{68}Ni at 600 MeV/Nucleon. *Phys. Rev. Lett.* 102, 092502.
- [4] S. Akkoyun vd., 2012. AGATA-Advanced Gamma Tracking Array. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* 668, 26-58.
- [5] K. Vetter, 2001. GRETA: The Proof-of-Principle of Gamma-ray Tracking. *Nucl. Phys. A* 682, 286c-294c.
- [6] G.J. Schmid vd., 1999. A Gamma-ray tracking algorithm for the GRETA Spectrometer. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* 430, 69-83.
- [7] J. Van der Marelve B. Cederwall, 1999. Backtracking as a Way to Reconstruct Compton Scattered Gamma-rays. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* 437, 538-551.
- [8] F.C.L. Crespi, vd., 2007. A Pulse Shape Analysis Algorithm for HPGe Detectors. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* 570, 459-466.
- [9] S. Agostinelli, vd., 2003. Geant4-A Simulation Toolkit. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* 506, 250-303.
- [10] E. Farnea ve D. Bazzacco, 2003. Agata simulation code. *LNL Annual Report 2003*, 158.
- [11] D. Bazzacco, 2004. The Advanced Gamma Ray Tracking Array. *Nucl. Phys. A* 746, 248c-254c.
- [12] J. Ljungvall ve J. Nyberg, 2005. A Study of Fast Neutron Interactions in High-Purity Germanium Detectors. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* 546, 553-573.
- [13] A. Lopez-Martens, vd., 2004. A Gamma-ray Tracking Algorithms: A Comparison. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* 533, 454-466.
- [14] A. Ataç, vd., 2009. Discrimination of Gamma-rays Due to Inelastic Neutron Scattering in AGATA. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* 607, 554-563.
- [15] F.C.L. Crespi, vd., 2010. Measurement of 15 MeV Gamma-rays with the AGATA Cluster Detectors. *LNL Annual Report*, 58-59.
- [16] F. Recchia., 2008. In-Beam Test and Imaging Capabilities of the AGATA Prototype Detector. *Universita Degli Studidi Padova PhD Thesis*, 159s.
- [17] J. Simpson, 2005. The AGATA Project. *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* 31, S1801-S1806.