

T.C.  
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



SÜRÜKLEMELİ ŞERİT CdZnTe DEDEKTÖRLERİ İÇİN COMPTON  
KAMERA SİMÜLASYONU

Ezgi Gökçe DİK

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
UZAY BİLİMLERİ VE TEKNOLOJİLERİ  
ANABİLİM DALI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEMMUZ 2019

ANTALYA

T.C.  
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



SÜRÜKLEMELİ ŞERİT CdZnTe DEDEKTÖRLERİ İÇİN COMPTON  
KAMERA SİMÜLASYONU

Ezgi Gökçe DİK

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
UZAY BİLİMLERİ VE TEKNOLOJİLERİ  
ANABİLİM DALI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEMMUZ 2019

ANTALYA

T.C.  
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SÜRÜKLEMELİ ŞERİT CdZnTe DEDEKTÖRLERİ İÇİN COMPTON  
KAMERA SİMÜLASYONU

Ezgi Gökçe DİK

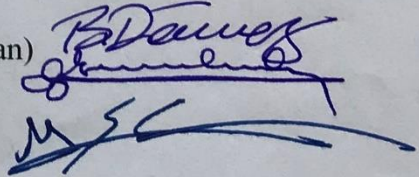
UZAY BİLİMLERİ VE TEKNOLOJİLERİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 25.07/2019 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / ~~Çıkarılışı~~ ile kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Burçin DÖNMEZ (Danışman)  
Doç. Dr. Hasan Hüseyin ESENOĞLU  
Dr. Öğr. Üyesi Murat KAPLAN



## ÖZET

### SÜRÜKLEMELİ ŞERİT CdZnTe DEDEKTÖRLERİ İÇİN COMPTON KAMERA SİMÜLASYONU

Ezgi Gökçe DİK

Yüksek Lisans Tezi, Uzay Bilimleri ve Teknolojileri Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Burçin DÖNMEZ

Temmuz 2019; 35 Sayfa

Bu tezde sürüklemeli şerit CdZnTe dedektör kullanılarak Compton kamera simülasyonu yapılmıştır. Compton kamera simülasyonları ve veri analizi için MEGALib analiz ve görüntüleme programı kullanılmıştır. Simülasyonlar MEGALib içinde GEANT4 ile gerçekleştirilmiştir.

Optimum görüntü kalitesine sahip olması hedeflenen Compton kamera için başlangıçta üç kütle modeli geliştirilmiştir. Bu modeller üzerinde gama ışın kaynakları kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiş ve alınan sonuçlar Compton kamera performans parametreleri üzerinden değerlendirilmiştir. Değerlendirmeler sonucunda, geliştirilmek üzere kütle modeli 1 tercih edilmiştir ve bu doğrultuda kütle modeli 4 oluşturulmuştur. Kütle modeli 4, dokuzar silikon dedektör içeren 4 katman ve dokuzar CZT dedektör içeren 2 katman içermektedir. 300, 356, 662, 1000 ve 1333 keV enerjili gama ışın kaynakları ile kütle modeli 4 için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Kütle modeli 4'ün 662 keV'de 4.46° ARM dağılımı FWHM değerine sahip olduğu görülmüştür.

Son olarak 300, 356, 662, 1000 ve 1333 keV enerjili gama ışın kaynakları için kütle modeli 4'e ait etkin alanlar hesaplanmış ve kütle modeli 1 etkin alan değerleri ile karşılaştırılmıştır. Değerlendirme sonucunda kütle modeli 4'e ait etkin alanların, kütle modeli 1'e ait etkin alanlara kıyasla beklenen artışı gösterdiği gözlenmiştir. Tam enerji değeri üzerinden elde edilen ARM dağılımı FWHM değerlerinde de kütle modeli 1'e göre iyileşme olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar ile kütle modeli 4, olası bir uzay görevi için avantajlı bir Compton kamera prototipi olarak kendini göstermiştir.

**ANAHTAR KELİMELER:** Compton Kamera, CZT Sürüklemeli Şerit Dedektör, GEANT4, MEGALib, Yarı İletken Dedektör

**JÜRİ:** Dr. Öğr. Üyesi Burçin DÖNMEZ

Doç. Dr. Hasan Hüseyin ESENOĞLU

Dr. Öğr. Üyesi Murat KAPLAN

## ABSTRACT

### COMPTON CAMERA SIMULATION FOR DRIFT STRIP CdZnTe DETECTORS

Ezgi Gökçe DİK

MSc Thesis in Space Sciences and Technologies

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Burçin DÖNMEZ

July 2019; 35 Pages

In this study, Compton camera simulation was performed using CdZnTe drift strip detector. MEGALib data analysis and imaging program was used for the Compton camera simulations and data analysis. Simulations were performed with GEANT4 in MEGALib.

Initially, three mass models have been developed for the Compton camera, which is intended for optimum image quality. Simulations were performed by using gamma ray sources on these mass models. The results from simulations were evaluated by Compton camera performance parameters. As a result of the evaluations, mass model 1 was chosen for development and accordingly mass model 4 was formed. Mass model 4 consists of 4 silicon layers each containing 9 silicon detectors and 2 CZT layers each containing 9 CZT detectors. Simulations were performed for mass model 4 with gamma ray sources with the energy of 300, 356, 662, 1000 and 1333 keV. The mass model 4 was found to have 4.46° FWHM value for its ARM distribution at 662 keV.

Finally, effective areas of mass model 4 were calculated for gamma ray sources with the energy of 300, 356, 662, 1000 and 1333 keV. The results were compared with mass model 1 effective area values. As a result of the evaluation, it was observed that the effective areas of mass model 4 show the expected increase compared to effective areas of mass model 1. It was also observed that the FWHM values of ARM distribution for photopeak energies improved compared to mass model 1. Consequently, these results showed that mass model 4 is an advantageous Compton camera prototype for a possible space mission.

**KEYWORDS:** Compton Camera, CZT Drift Strip Detector, GEANT4, MEGALib, Semiconductor Detector

**COMMITTEE:** Asst. Prof. Dr. Burçin DÖNMEZ

Assoc. Prof. Dr. Hasan Hüseyin ESENOĞLU

Asst. Prof. Dr. Murat KAPLAN

## ÖNSÖZ

İnsanlık toplu olarak yaşamaya başladığı zamandan günümüze dek daima uzayı merak etmiştir. Zaman ilerledikçe ve bilim geliştikçe uzayın gizemlerini keşfetme çalışmaları da devam etmektedir. Uzay bilimi çalışmalarının insanlık var oldukça da devam edeceği açıktır. Ben de çocukluğumdan bu yana ilgi duyduğum bu dalda öğrenim görmeyi, bilerek, isteyerek ve severek seçtim. Daha yolun başında olduğumun bilincinde olarak daima sorgulayıcı yöntemlerle kendimi geliştirme, bilime ve insanlığa katkı sunabilme hedefinde olacağım. Bu çalışma sürecinde hiçbir sorumu cevapsız bırakmayan, bilgi birikimiyle bana daima yardımcı olan değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Burçin DÖNMEZ'e ve yanımda yer almış tüm dostlarıma çok teşekkür ederim.

Her zaman sevgi ve destekleriyle beni sarmalamış canım annem Zahide DİK ve canım babam Ramazan DİK'e ve üzerimdeki emekleri ölçsüz olan sevgili teyzem Fevziye TEMEL ile rahmetli eniştem Ali TEMEL'e ve sevgili anneannem Kamile YILMAZ ile rahmetli dedem Hasan YILMAZ'a sonsuz teşekkürler...

## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
ÖNSÖZ .....	iii
AKADEMİK BEYAN .....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xii
1. GİRİŞ .....	1
2. KAYNAK TARAMASI.....	3
2.1. Gama Işını ve Madde Etkileşimleri.....	3
2.1.1. Fotoelektrik soğurma.....	3
2.1.2. Çift oluşumu.....	4
2.1.3. Rayleigh saçılması.....	4
2.1.4. Compton saçılması .....	5
2.1.4.1. Compton saçılması için Klein-Nishina tesir kesiti .....	6
2.1.4.2. Doppler genişlemesi .....	7
2.2. Compton Kamera ve Çalışma Prensipleri .....	8
2.2.1. Compton kamera parametreleri .....	9
2.2.1.1. ARM dağılımı.....	9
2.3. Compton Kamera için Yarı İletken Dedektörler.....	10
2.3.1. CZT sürüklemeli şerit dedektör.....	12
2.4. Compton Kamera Görevleri.....	13
2.4.1. COMPTTEL .....	13
2.4.2. COSI/NCT .....	15
2.4.3. INTEGRAL.....	15
3. MATERYAL VE METOT.....	16
3.1. MEGALib .....	16
3.1.1. Geomega .....	16
3.1.2. Cosima .....	16
3.1.3. Revan .....	18
3.1.3.1. Olay Yeniden Oluşturma.....	18

3.1.4. Mimrec .....	19
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	20
4.1. Compton Kamera Modelleri için Tercihler .....	20
4.2. Compton Kamera Modelleri için Simülasyonlar .....	22
4.2.1. Kütle modeli 1 ve 4 için etkin alan.....	31
5. SONUÇLAR.....	33
6. KAYNAKLAR.....	34
ÖZGEÇMİŞ	



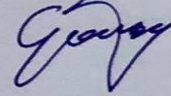


## AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Sürüklemeli Şerit CdZnTe Dedektörleri için Compton Kamera Simülasyonu” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

25/07/2019

Ezgi Gökçe Dik



## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

$E_i$	: Gama ışınının başlangıç enerjisi
$E_e$	: Fotoelektronun kinetik enerjisi
$E_b$	: Elektron bağlanma enerjisi
$\tau$	: Fotoelektrik soğurma tesir kesiti
$Z$	: Saçıcı malzemenin atom numarası
$E_\gamma$	: Gama ışınının başlangıç enerjisi
$\kappa$	: Çift oluşumu tesir kesiti
$E_{i,e}$	: Saçılma öncesi elektrona ait başlangıç enerjisi
$E_g$	: Saçılan gama ışınının enerjisi
$E_e$	: Saçılan elektronun enerjisi
$\vec{p}_i$	: Fotonun başlangıç momentumu
$\vec{p}_{(i,e)}$	: Elektronun başlangıç momentumu
$\vec{p}_g$	: Saçılma sonrası fotona ait momentum
$\vec{p}_e$	: Saçılma sonrası elektrona ait momentum
$E_0$	: Durağan elektron enerjisi
$\varphi$	: Gama ışınının saçılma açısı
$\varepsilon$	: Saçılan elektronun saçılma açısı
$\vartheta$	: Toplam saçılma açısı
$\vec{e}_i$	: Başlangıçtaki gama ışınının doğrultusu
$\vec{e}_e$	: Saçılan elektronun doğrultusu
$\vec{e}_g$	: Saçılan gama ışınının doğrultusu
$r_e$	: Klasik elektron yarıçapı

$S_i^I$	: Momentum yaklaşımında i. kabuk elektronlarının inkoherent saçılma fonksiyonu
$\Delta\phi_{ARM}$	: Açısal çözünürlük ölçüsü
$\theta$	: Küresel koordinatlarda zenit açısı
$\Phi$	: Küresel koordinatlarda azimut açısı
$A_{etkinAlan}$	: Etkin alan
$A_{başlangıç}$	: Fotonların gönderildiği başlangıç alanı
$N_{başlangıç}$	: Tetiklenmiş olay sayısına ulaşmak için dedektöre gönderilen foton sayısı
$N_{tespit}$	: Yeniden oluşturma işlemi ve uygulanan özelleşmiş olay tercihleri sonunda geriye kalan olay sayısı

### **Kısaltmalar**

ARM	: Angular Resolution Measure (Açısal Çözünürlük Ölçüsü)
BATSE	: Burst and Transient Source Experiment (Patlama ve Geçici Kaynak Deneyi)
CERN	: The European Organization for Nuclear Research (Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi)
CGRO	: The Compton Gamma-Ray Observatory (Compton Gama-Işın Gözlemevi)
COMPTEL	: COMPTon TELEscope (Compton Teleskobu)
COSI	: The Compton Spectro-Imager (Compton Spektro-Görüntüleyici)
Cosima	: Cosmic Simulator for MEGAlib (MEGAlib İçin Simülatör)
CZT	: CdZnTe
DNSC	: Danish National Space Center (Danimarka Ulusal Uzay Merkezi)
DTU	: Denmark Technical University (Danimarka Teknik Üniversitesi)
EGRET	: Energetic Gamma-Ray Telescope (Enerjik Gama-Işın Teleskobu)
FWHM	: Full Width at Half Maximum (Yarı Yükseklikte Tam Genişlik)

GEANT3	: Geometry and Tracking 3 (Geometry ve Takip 3. İterasyon)
GEANT4	: Geometry and Tracking 4 (Geometry ve Takip 4. İterasyon)
Geomega	: Geometry for MEGALib (MEGALib İçin Geometri)
IBIS	: Imager on-Board the INTEGRAL (INTEGRAL Görüntüleyicisi)
INTEGRAL	: International Gamma-Ray Astrophysics Laboratory (Uluslararası Gama-Işın Astrofizik Laboratuvarı)
JEM-X	: X-ray Monitor on INTEGRAL (INTEGRAL X-Işın Görüntüleyicisi)
LM-ML-EM	: List Mode - Maximum Likelihood - Expectation Maximization (Liste Modu - Maksimum Olasılık - Beklenti Maksimizasyonu)
MEGALib	: The Medium Energy Gamma-ray Astronomy Library (Orta Enerjili Gama-Işın Astronomisi Kütüphanesi)
Mimrec	: MEGALib Image Reconstruction (MEGALib İçin Görüntü Yeniden Oluşturma)
NCT	: Nuclear Compton Telescope (Nükleer Compton Teleskobu)
OMC	: The Optical Monitoring Camera (Optik Görüntüleme Kamerası)
OSSE	: Oriented Scintillation Spectrometer (Yönlendirilmiş Sintilasyon Spektrometresi)
Revan	: The Real Event Analyzer for MEGALib (MEGALib İçin Olay Analiz Programı)
SPECT	: Single Photon Emission Computed Tomography (Tek Foton Salmalı Bilgisayarlı Tomografi)
SPI	: Spectrometer on INTEGRAL (INTEGRAL Spektrometresi)

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<b>Şekil 2.1.</b> Üç ana gama ışın etkileşiminin birbirleriyle ilişkisi (Knoll 2009) .....	3
<b>Şekil 2.2.</b> Compton saçılması süreci ve ilgili notasyonlar (Zoglauer 2005).....	6
<b>Şekil 2.3.</b> Farklı enerjilerde $\phi$ Compton saçılma açısı için Klein-Nishina tesir kesiti (Zoglauer 2005).....	6
<b>Şekil 2.4.</b> Açısal çözünürlüğün malzeme atom numarasına bağlı değişiminin üç enerji değeri üzerinden gösterimi (Zoglauer 2005) .....	7
<b>Şekil 2.5. a)</b> Örnek bir Compton kamera; <b>b)</b> Oluşturulan Compton konilerinin üst üste bindirilmesi ile kaynağın elde edilmesi (Uche 2011) .....	8
<b>Şekil 2.6.</b> Compton konileri ve ARM (Zoglauer 2005) .....	10
<b>Şekil 2.7.</b> 3D CZT dedektör ve elektrot geometrisi (Budtz-Jørgensen ve Kuvvetli 2017) .....	11
<b>Şekil 2.8.</b> Sürüklemeli şerit metodunun kullanıldığı dedektöre ait enine kesit (Kuvvetli vd. 1999) .....	12
<b>Şekil 2.9.</b> COMPTEL enstrüman diyagramı (Schönfelder vd. 1993) .....	14
<b>Şekil 2.10. a)</b> Kullanılan Compton kamera prensibi; <b>b)</b> COSI germanium dedektör dizisi (Chiu vd. 2017) .....	14
<b>Şekil 2.11.</b> INTEGRAL uzay teleskobu illüstrasyonu (Winkler vd. 2011) .....	15
<b>Şekil 3.1.</b> MEGALib programları ve işlem akışı (Zoglauer vd. 2006) .....	17
<b>Şekil 4.1.</b> Kütle modeli 1 .....	21
<b>Şekil 4.2.</b> Kütle modeli 2 .....	21
<b>Şekil 4.3.</b> Kütle modeli 3 .....	22
<b>Şekil 4.4.</b> Kütle modeli 1'e ait ARM dağılımı .....	24
<b>Şekil 4.5.</b> Kütle modeli 2'ye ait ARM dağılımı .....	24
<b>Şekil 4.6.</b> Kütle modeli 3'e ait ARM dağılımı .....	25
<b>Şekil 4.7. a)</b> Kütle modeli 1'e; <b>b)</b> Kütle modeli 2'ye; <b>c)</b> Kütle modeli 3'e ait enerji spektrumları .....	26
<b>Şekil 4.8. a)</b> Kütle modeli 1'e; <b>b)</b> Kütle modeli 2'ye; <b>c)</b> Kütle modeli 3'e ait kaynak görüntüleri .....	27

<b>Şekil 4.9.</b> Kütlev modeli 4 .....	28
<b>Şekil 4.10.</b> a) 300; b) 356; c) 662; d) 1000; e) 1333 keV enerjili kaynaklar için kütlev modeli 4'e ait ARM dağılımları .....	29
<b>Şekil 4.11.</b> a) 300; b) 356; c) 662; d) 1000; e) 1333 keV enerjili kaynaklar için kütlev modeli 4'e ait enerji spektrumları .....	30
<b>Şekil 4.12.</b> Çevreleyen küre ve fotonların yayınlandığı disk (Cosima kılavuzu 2015) .....	31



## ÇİZELGELER DİZİNİ

- Çizelge 4.1.** Kütle modeli 1 için kaynak enerjileri ve karşılık gelen Compton kamera tam enerji değerleri için ARM FWHM ve etkin alan değerleri ..... 32
- Çizelge 4.2.** Kütle modeli 4 için kaynak enerjileri ve karşılık gelen Compton kamera tam enerji değerleri için ARM FWHM ve etkin alan değerleri ..... 32



## 1. GİRİŞ

Orta enerjili ( $\sim 0.1$  MeV – 10 MeV) gama ışın aralığı evrendeki şiddetli birçok olay için önemli bir inceleme kaynağıdır. Bu nedenle bu enerji aralığına ait kaynakların doğru tespit ve gözlemi büyük önem taşımaktadır. Gama ışını enerji bölgesinde gerçekleşen olayları gözlemleyebilme yeteneğine sahip teknolojiler hızla geliştirilmeye devam etmektedir. Bu enerji aralığında yer alan kaynakları tespit ve gözlem için geliştirilmiş teknolojilerden biri Compton kamera teknolojisidir. Compton kinematiğine dayanan bu teknoloji, yüksek enerjili ışın kaynaklarının tespit ve görüntülemesini yapabilmektedir.

Yüksek enerjili ışın kaynakları için görüntüleme ve tespit yapılmak istenen her alanda kullanıma uygun olan Compton kamera teknolojisi, yüksek enerji astrofiziği, güvenlik, nükleer güç santrali kontrolleri, medikal görüntüleme gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Radyoaktif malzemelerin uzaktan tespit ve pozisyon belirlenmesinin yapılmasının hedeflendiği Ryan vd. (2008) tarafından gerçekleştirilen çalışma güvenlik alanında; SPECT (single photon emission computed tomography) metodunun görüntüleme hassasiyetinin artırılmasının hedeflendiği Harkness vd. (2009) tarafından gerçekleştirilen çalışma medikal görüntüleme alanında; 2011 yılında meydana gelen deprem ve buna bağlı tsunami sonrası zarar gören Fukushima Daiichi Nükleer Güç Santralinden yayılmış olan radyoaktif malzemenin, santral binalarındaki tespit ve görüntülemesinin yapılması amacıyla Sato vd. (2017) tarafından gerçekleştirilen çalışma nükleer güç santral kontrolleri alanında Compton kamera teknolojisi kullanımlarına örnek teşkil etmektedir. Astronomik gama ışın kaynaklarından olan süpernovalar, gama ışın patlamaları, aktif galaksi çekirdekleri gibi yapıların tespit ve incelemelerinin yapılması da Compton kamera teknolojisi ile mümkündür. Compton kamera teknolojisi gama ışını astronomisi alanında ilk kez Schönfelder vd. (1973) tarafından kullanılmıştır. Bu çalışmanın devamında geliştirilen ve CGRO (The Compton Gamma-Ray Observatory) uydusuna eklenmiş COMPTEL (COMPton TELEscope) (Schönfelder vd. 1993) evrenin MeV mertebesinde ilk gama ışını haritasını çıkarmıştır. Astrofizik alanında Compton kamera teknolojisinin kullanımı günümüzde de artarak devam etmektedir.

Elektromanyetik spektrumun yüksek enerji bölgesini gözleme hedefi taşıyan Compton kameralarda, sistemi oluşturan dedektörün veya dedektörlerin hangi malzemedен tercih edileceği önem taşımaktadır. İyi enerji ve pozisyon çözünürlükleri veren yarı-iletken dedektörler, Compton kamera dedektörlerinden beklenen özellikleri karşıladıkları için Compton kamera sistemlerinde kullanılmak üzere ideal bir tercih haline gelmektedir. Bu doğrultuda, oluşturulup test edilecek Compton kamera modellerinin, geçmiş çalışmalarla iyi performansı ortaya konmuş olan sürüklemeli şerit elektrot geometrisinde CdZnTe dedektörlerle yapılması da bu tezin amacını oluşturmaktadır. Sonuçta, optimum performans değerleri ve görüntü kalitesinin elde edilebileceği Compton kamera modellerinin geliştirilmesi ve incelenmesi hedeflenmiştir.

Compton kamera teknolojisini tüm hatlarıyla anlayabilmek için öncelikle gama ışını ve madde etkileşimlerinin, özellikle de bu teknolojinin temelini oluşturan Compton saçılması fiziksel sürecinin detaylarıyla anlaşılması gerekmektedir. Bu nedenle Kaynak



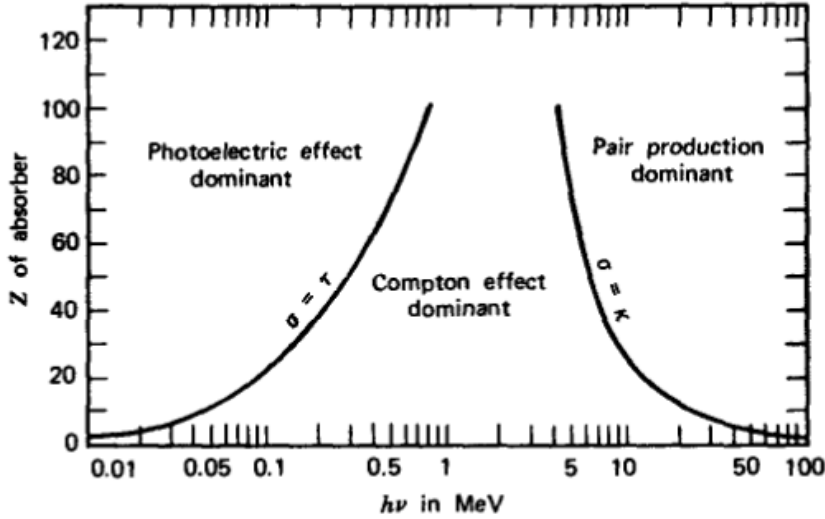
Taraması bölümü gama ışını ve madde etkileşimleri incelemesiyle başlamakta, Compton kamera çalışma prensibinin ve Compton kamera performans parametrelerinin tanımlanması ile devam etmekte, Compton kamera için yarı iletken dedektörler ile sürüklemeli şerit CZT dedektörün açıklanması ve yüksek enerji astrofiziği alanındaki geçmiş Compton kamera görevlerinin özetlenmesiyle sona ermektedir.



## 2. KAYNAK TARAMASI

### 2.1. Gama Işını ve Madde Etkileşimleri

Gama ışını ve madde etkileşimleri incelendiğinde, gama ışınının enerjisinin tamamını veya bir kısmını kaybetmesi ile sonuçlanan üç etkileşim çeşidi ile karşılaşmaktadır. Bu etkileşimler fotoelektrik soğurma, Compton saçılması ve çift oluşumu şeklinde sıralanmaktadır. Foton enerjisinde değişimin yaşandığı bu etkileşimler haricinde, foton enerjisinde değişimin yaşanmadığı Rayleigh saçılması da gama ışını ve madde etkileşimlerindedir. Gama ışınının madde ile bu etkileşimlerden hangisini gerçekleştireceği temel olarak maddenin atom numarası  $Z$  ile gama fotonuna ait enerjiye bağlılık göstermektedir. Bu bağlantıyı ve etkileşen fotonun enerjisinde değişim meydana getiren üç temel etkileşimin birbiriyle ilişkisini gösterir grafik aşağıda görülmektedir.



Şekil 2.1. Üç ana gama ışın etkileşiminin birbirleriyle ilişkisi (Evans 1955)

Madde ile etkileşen fotonun başlangıç enerjisi  $h\nu$  ve madde atom numarası  $Z$ 'ye bağlı olarak üç etkileşimin baskın olduğu bölgeler şekilde görülmektedir. Bölgeleri birbirinden ayıran çizgiler fotoelektrik soğurma ve Compton saçılması ile Compton saçılması ve çift oluşumu olaylarının oluşma olasılıklarının birbirine eşit olduğu değerleri temsil etmektedir. Şekilde  $\tau$  fotoelektrik soğurmaya ait,  $\sigma$  Compton saçılmasına ait,  $\kappa$  çift oluşumuna ait tesir kesitini temsil etmektedir.

Takip eden başlıklarda Compton kamera çalışma prensibinin özünü oluşturan fotoelektrik soğurma ile Compton saçılması ve çalışılan enerji bölgesine bağlı olarak önem arz edebilen çift oluşumu ile Rayleigh saçılması etkileşimleri açıklanacaktır.

#### 2.1.1. Fotoelektrik soğurma

Foton ile atomun etkileşimi sonucunda fotonun tüm enerjisini atoma kaybederek yok olması sürecidir. Etkileşim sonunda fotonun aktardığı enerji ile atoma ait bağlı elektronlardan biri bağlanma enerjisini aşarak atomdan ayrılır ve bu elektron

fotoelektron olarak adlandırılır. Fotoelektrona aktarılan kinetik enerji, fotonun aktardığı enerji ile elektronun bağlanma enerjisi arasındaki farka eşittir.

$$E_e = E_i - E_b \quad (2.1)$$

Eşitlik 2.1'de görülen  $E_i$  fotonun etkileşim öncesi enerjisini,  $E_b$  elektronun bağlanma enerjisini ve  $E_e$  fotoelektronun kinetik enerjisini temsil etmektedir.

Fotoelektrik soğurma, gama ışınlarının düşük enerji bölgesinde baskın olan etkileşimdir. Tesir kesiti,  $\tau$  ile temsil edilmekte olup eşitlik 2.2'de görüldüğü şekilde madde atom numarası  $Z$  ve foton başlangıç enerjisi  $E_\gamma$  'ya bağlı olarak değişmektedir. Eşitlik 2.2'de  $n$ , 4 ile 5 arasında değerler alabilen bir parametredir. Tesir kesiti ifadesinden de görüldüğü gibi madde atom numarası yükseldikçe, foton için fotoelektrik soğurma olasılığı artmaktadır.

$$\tau = \text{sabit} \left( \frac{Z^n}{E_\gamma^{3.5}} \right) \quad (2.2)$$

### 2.1.2. Çift oluşumu

Gama ışın yüksek enerji bölgesine gidildikçe meydana gelme olasılığı artan çift oluşumu, gama ışını enerjisinin, elektron durağan kütle enerjisinin iki katı değeri olan 1,022 MeV'yi aşması durumunda mümkün hale gelen etkileşimdir. Çift oluşumunda, gerekli enerji sınırını aşan foton madde ile etkileşimi sonunda kaybolmakta ve bir elektron-pozitron çifti açığa çıkarmaktadır.

Foton başlangıç enerjisinin 1,022 MeV değerini aştığı durumlarda geriye kalan enerji, oluşan elektron-pozitron çiftine kinetik enerji olarak aktarılmaktadır. Çift oluşumu sonrasında, oluşan pozitron madde içerisinde hareketinin giderek yavaşlaması sonunda yok olmakta ve sonuçta iki yok olma fotonu açığa çıkmaktadır.

Çift oluşumuna ait tesir kesiti  $\kappa$  ile temsil edilmekte olup basit bir olasılık ifadesine sahip olmamakla birlikte etkileşim olasılığı atom numarasının karesi ile değişmekte ve artan foton enerjisi ile artmaktadır.

### 2.1.3. Rayleigh saçılması

Koherent saçılma olarak da bilinen Rayleigh saçılması, gama ışını fotonunun atom elektronu ile elastik saçılması olayı olup, foton enerjisinde bir değişim gözlenmeden sonuçlanan gama ışını ve madde etkileşimidir. Gama ışını fotonunun madde atomunun bağlı bir elektronu ile etkileşmesinin ardından enerjisini kaybetmeden belli bir açıda saçılması şeklinde gerçekleşmektedir.

Rayleigh saçılması, etkileşimde enerji aktarımı söz konusu olmadığı için, detaylı olmayan gama ışını ve madde etkileşimi incelemelerinde çoğunlukla göz ardı edilmektedir.

#### 2.1.4. Compton saçılması

Compton saçılması, fotonun bağlı veya serbest bir elektron ile etkileşimi sonucunda saçılması olayı olup, saçılma sonucu foton enerjisinin bir kısmını etkileştiği elektrona aktarmaktadır. Compton saçılması olayı, foton ve elektronun enerji ve momentum korunumu ile ifade edilebilir:

$$E_i + E_{i,e} = E_g + E_e \quad (2.3)$$

$$\vec{p}_i + \vec{p}_{(i,e)} = \vec{p}_g + \vec{p}_e \quad (2.4)$$

Burada  $E_i$  saçılma öncesi fotona ait başlangıç enerjisini,  $E_{i,e}$  saçılma öncesi elektrona ait başlangıç enerjisini,  $E_g$  saçılma sonrası foton enerjisini,  $E_e$  saçılma sonrası elektronun enerjisini;  $\vec{p}_i$  fotonun başlangıç momentumunu,  $\vec{p}_{(i,e)}$  elektronun başlangıç momentumunu,  $\vec{p}_g$  saçılma sonrası fotona ait momentumu,  $\vec{p}_e$  saçılma sonrası elektrona ait momentumu temsil etmektedir.

Bağlı elektronun saçılma öncesine ait enerji ve momentum değerleri bilinemediğinden, elektronun durağan durumda olduğu kabulü yapılarak,  $E_0 = m_e c^2$  olmak üzere, 2.3 ve 2.4 eşitlikleri şu hale dönüştürülür:

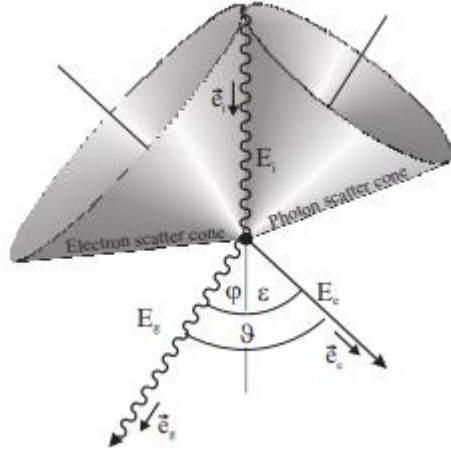
$$E_i + E_0 = E_g + E_e \quad (2.5)$$

$$\vec{p}_i = \vec{p}_g + \vec{p}_e \quad (2.6)$$

Bu formüllerden yola çıkılarak eşitlik 2.7'de görülen "Compton eşitliği" elde edilmektedir.  $\varphi$  fotonun saçılma açısını temsil etmektedir. Burada foton saçılma açısının foton saçılma öncesi ve sonrası enerji değerleri ile bulunduğu görülmektedir.

$$\cos\varphi = 1 - E_0 \left( \frac{1}{E_g} - \frac{1}{E_g + E_e} \right) \quad (2.7)$$

Aşağıda Compton saçılması sürecini ve kullanılan notasyonu gösterir şekil görülmektedir. Dalgalı çizgi fotona ait saçılma öncesi ve sonrası foton hareketini, düz çizgi elektron hareketini temsil etmektedir. Foton saçılma konisi (Photon scatter cone) fotona ait tüm olası kaynak noktalarını temsil etmektedir.



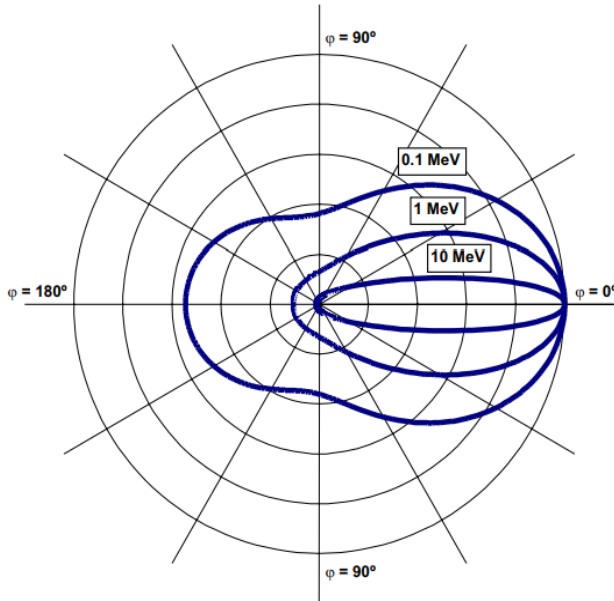
- $E_i$  Gama ışınının başlangıç enerjisi
- $E_e$  Saçılan elektronun enerjisi
- $E_g$  Saçılan gama ışınının enerjisi
- $\phi$  Gama ışınının saçılma açısı
- $\varepsilon$  Saçılan elektronun saçılma açısı
- $\vartheta$  Toplam saçılma açısı
- $\vec{e}_i$  Başlangıçtaki gama ışınının doğrultusu
- $\vec{e}_e$  Saçılan elektronun doğrultusu
- $\vec{e}_g$  Saçılan gama ışınının doğrultusu

Şekil 2.2. Compton saçılması süreci ve ilgili notasyonlar (Zoglauer 2005)

#### 2.1.4.1. Compton saçılması için Klein-Nishina tesir kesiti

Klein-Nishina diferansiyel tesir kesiti  $d\sigma/d\Omega$ , polarize olmayan fotonun serbest ve durağan bir elektronla saçılması sürecini ifade etmekte ve saçılan fotonun açisal dağılımını haber vermektedir. Eşitlik 2.8'de görülmekte olan  $d\sigma/d\Omega$  ifadesinde  $r_e$  klasik elektron yarıçapıdır. Foton enerjisinin artması ile birlikte ortalama Compton saçılma açısı küçüldüğünden, ileri doğrultuda saçılma olasılığı da artmaktadır.

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{(C, serbest, pololmayan)} = \left(\frac{r_e^2}{2}\right) \left(\frac{E_g}{E_i}\right)^2 \left(\frac{E_g}{E_i} + \frac{E_i}{E_g} - \sin^2\phi\right) \quad (2.8)$$



Şekil 2.3. Farklı enerjilerde  $\phi$  Compton saçılma açısı için Klein-Nishina tesir kesiti (Zoglauer 2005)

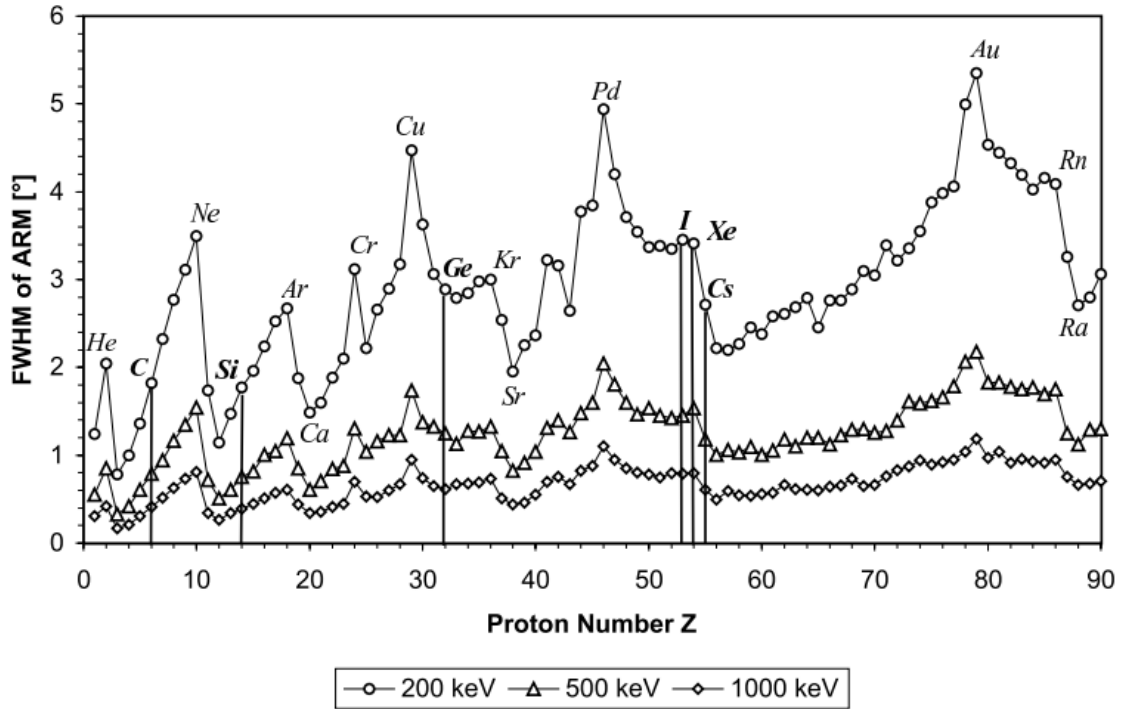
Şekil 2.3, 0.1, 1 ve 10 MeV enerjili fotonlar için Compton tesir kesitlerinin, foton saçılma açısına bağlı değişimini göstermektedir. Şekilde de görüldüğü gibi enerji değeri yükseldikçe Compton saçılma açısı küçülmekte ve ileri doğrultuda saçılma olasılığı artmaktadır.

#### 2.1.4.2. Doppler genişlemesi

Klein-Nishina tesir kesiti ifadesi elektronun serbest ve durağan olduğu varsayımı ile oluşturulmuştur. Gerçekte ise böyle bir durum söz konusu olmayıp, elektron bir atoma bağlıdır ve momentuma sahiptir. Bu durum, elektronun Compton saçılması etkileşimi sırasında hareketli halde olduğu anlamına gelmekte ve elde edilen enerji spektrumunda Doppler genişlemesi olarak adlandırılan bir genişlemeye neden olmaktadır. Bu durum, Klein-Nishina tesir kesitinden farklı bir tesir kesitinin hesaplanmasını gerektirmektedir. Bu doğrultuda Ribberfors (1975) tarafından geliştirilmiş “bağlı Compton tesir kesiti” olarak adlandırılan ve bağlı elektronlara ait momentum dağılımını içeren bu ifade eşitlik 2.9’da görülmektedir.

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{(C,bağlı,i)} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{(C,serbest)} S_i^I(E_i, \phi, Z) \quad (2.9)$$

Burada  $S_i^I$  momentum yaklaşımında  $i$ . kabuk elektronlarının inkoherent saçılma fonksiyonunu,  $E_i$  fotona ait saçılma öncesi başlangıç enerjisini,  $\phi$  fotona ait Compton saçılma açısını,  $Z$  malzemenin atom numarasını temsil etmektedir.



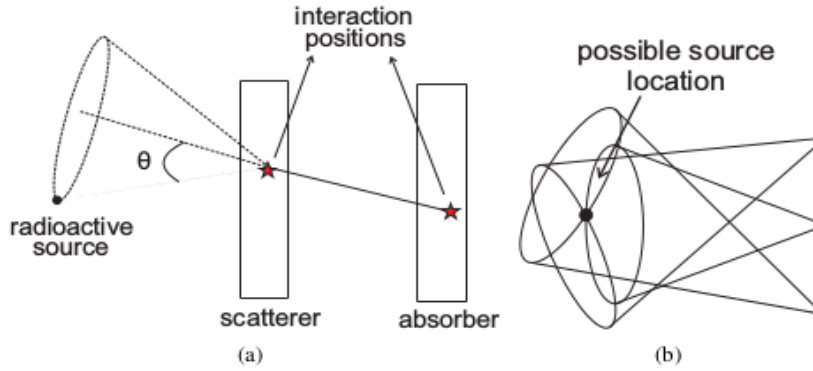
Şekil 2.4. Açısal çözünürlüğün malzeme atom numarasına bağlı değişiminin üç enerji değeri üzerinden gösterimi (Zoglauer 2005)

Doppler genişlemesi enerji dağılımları üzerine olan etkisi nedeniyle açılal çözünürlüğe de etki etmektedir. Bu etki, 2.2.1.1. ARM Dağılımı başlığında tanımlanan ve açılal çözünürlüğün bir ifadesi olan ARM dağılımında bir genişleme olarak kendini göstermektedir. Doppler genişlemesi, düşük enerjilere doğru elektron enerji seviyelerinin tespitinde gözlenmeye başlayan belirsizlik nedeniyle ARM dağılımı için bir alt sınır oluşturmaktadır (Zoglauer ve Kanbach 2003). Bağlı Compton tesir kesiti ifadesinde yer alan inkoherent Compton saçılma fonksiyonu  $S_1^I$ 'da da görüldüğü gibi, Doppler genişlemesi ve buna bağlı olarak açılal çözünürlük  $E_i$ ,  $\phi$  ve  $Z$  parametrelerine göre değişmektedir.

Şekil 2.4'te açılal çözünürlüğün 200, 500 ve 1000 keV şeklinde üç enerji değeri üzerinden atom numarası  $Z$ 'ye bağlı değişimi görülmektedir. Artan atom numarası ile birlikte açılal çözünürlüğün kötüleştiği görülmektedir. Aynı şekilde, enerji değerindeki azalma da açılal çözünürlüğü kötüleştirir.

## 2.2. Compton Kamera ve Çalışma Prensibi

Compton kamera, Compton saçılması kinematığını baz alarak yüksek enerjili parçacık kaynaklarının tespit ve görüntülemesinin yapıldığı teknolojidir. Compton saçılması olayının kinematik temelde yeniden oluşturulması sürecini içermektedir. En temel versiyonu saçıcı ve soğurucu şeklinde iki düzlemsel dedektör içermekte olup Şekil 2.5'te görülmektedir.



**Şekil 2.5.** a) Örnek bir Compton kamera; b) Oluşturulan Compton konilerinin üst üste bindirilmesi ile kaynağın elde edilmesi (Uche 2011)

Kaynağa göre konumlandırışlarına göre ilk dedektör saçıcı, ikinci dedektör soğurucu olarak adlandırılmaktadır. Saçıcı dedektörde Compton saçılması meydana gelmekte ve ardından saçılarak soğurucu dedektöre gelen foton, soğurucu dedektörde soğrulmaktadır. Dedektörlerde, fotonun etkileşimlerine ait pozisyon ve enerji bilgileri ölçülmektedir.

Saçıcı dedektör içerisinde saçılma olayının meydana geldiği nokta ile soğurucu dedektör içerisinde fotonun soğrulduğu noktalar kullanılarak oluşturulan doğru Compton konisinin eksenini belirlemekte, bu koninin açıklığını ise ilk dedektör içindeki fotonun Compton saçılma açısı belirlemektedir. Fotonun kaynağı bu Compton konisi üzerinde bulunan konumlarla sınırlanmaktadır. Compton konisi, olay çemberi olarak da

adlandırılmaktadır. Birçok kez meydana gelen bu olay dizisi sonunda oluşturulan çok sayıdaki Compton konileri üst üste bindirilerek kaynağa ait konum veya görüntü tespit edilebilmektedir.

### 2.2.1. Compton kamera parametreleri

Compton kameraya ait özellik ve performans değerlendirmeleri Compton kamera parametreleri üzerinden gerçekleştirilmektedir. Bu parametreler enerji çözünürlüğü, pozisyon çözünürlüğü, Doppler genişlemesi, açısal çözünürlük, etkinlik (Studen 2005) ile etkin alan şeklinde sıralanabilmektedir. Tüm bu parametreler ise gelen fotonun enerjisi, malzemenin atom numarası ve Compton kamera dedektör veya dedektörlerinin geometrik konumlandırılışları şeklinde üç ana parametreye dayanmaktadır.

Compton kamera dedektörleri için tercih edilen malzemenin atom numarası ve yoğunluğu ile kaynaktan gelen fotonların enerjisi, fotonların dedektör içinde yaşayacağı etkileşim çeşidini ve sayısını belirlemeleri nedeniyle direkt olarak Compton kamera performansını etkilemektedir.

Compton kamera için etkinlik, kaynak tespit ve kaynağa ait görüntü oluşturma sürecinde yüksek enerjili ışın kaynağından yayınlanan fotonların yüzde kaçının Compton kamera tarafından tespit edilebildiğinin bir ölçüsüdür. Saçıcı dedektör katı açısı içinde kalan bir alandan fotonun yayınlanması, bu fotonun saçıcı dedektörde Compton saçılması yaşaması, ardından saçıcı dedektörü terkederek soğurucu dedektör katı açısı içinde ilerlemesi ve en sonunda soğurucu dedektörle etkileşerek soğurulması adımlarının gerçekleşmesi etkinliği direkt olarak etkilemektedir.

Compton kamera için etkin alan, 4.2.1. Kütle Modeli 1 ve 4 için Etkin Alan başlığında detaylı şekilde tanımlanmış olup, dedektörlere ulaşan tüm fotonların tespit edilebildiği ve tam enerjilerinin ölçülebildiği yüzey alanı olarak tanımlanmaktadır.

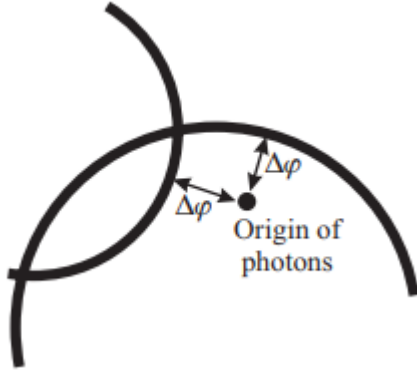
Compton kamera dedektörlerine ait enerji çözünürlüğü, pozisyon çözünürlüğü ve Doppler genişleme katkıları bir bütün olarak sistemin açısal çözünürlüğünü oluşturmaktadır. Açısal çözünürlük, ARM dağılımı üzerinden tanımlanmakta ve sıradaki başlık altında açıklanmaktadır.

#### 2.2.1.1. ARM dağılımı

Compton kamera performansı, kullanılan dedektörün enerji çözünürlüğü, pozisyon çözünürlüğü ve Doppler genişlemesi etkisinden direkt olarak etkilenmektedir. Bu parametrelerden gelen ölçüm belirsizlikleri bir bütün olarak, fotonların kaynağına ait belirlenebilecek doğruluğu yani açısal çözünürlüğü sınırlamaktadır. Compton kameralarda açısal çözünürlük, açısal çözünürlük ölçüsü ARM (Angular resolution measure) üzerinden tanımlanmaktadır.

Compton kamera dedektörlerinde fotonun gerçekleştirdiği etkileşim doğrultusunda oluşturulan Compton konisi ile gerçek kaynak pozisyonu arasındaki en küçük açısal mesafe, açısal çözünürlük ölçüsü, ARM, olarak adlandırılmaktadır.





**Şekil 2.6.** Compton konileri ve ARM (Zoglauer 2005)

Şekil 2.6'da oluşturulmuş iki Compton konisi kesiti görülmektedir. Kaynak pozisyonu (Origin of photons) ile oluşturulan Compton konileri arasındaki en kısa açısal mesafe  $\Delta\phi$  görülmektedir.

Oluşturulmuş bir Compton olayı için ARM, bilinen başlangıç foton doğrultusu  $\vec{e}_i$  ile saçılan fotonun hesaplanan doğrultusu üzerinden tanımlanan foton saçılma konisi arasındaki en kısa mesafe ile tanımlanmaktadır. Bu en kısa mesafe aynı zamanda, Compton kinematiklerinden faydalanılarak hesaplanan enerjilerden elde edilen Compton saçılma açısı  $\phi$  ile saçılma geometrisinden faydalanılarak tespit edilen bilinen başlangıç foton doğrultusu  $\vec{e}_i$  ile saçılan fotonun hesaplanan doğrultusu  $\vec{e}_g$  arasında kalan açı arasındaki farka eşittir. Bu bilgi doğrultusunda eşitlik 2.10 yazılabilmektedir.

$$\Delta\phi_{ARM} = \arccos(\vec{e}_i \circ \vec{e}_g) - \phi \quad (2.10)$$

Compton kamera dedektörlerinde etkileşim yaşayan her bir foton etkileşim dizisi için oluşturulan Compton konileri farklı ARM değerlerine sahip olmakta ve her bir olaya ait ARM değerleri birleştirilerek ARM dağılım histogramı oluşturulmaktadır. Oluşturulan ARM dağılımına ait FWHM (yarı yükseklikte tam genişlik) değeri Compton kameraya ait açısal çözünürlüğü ifade etmektedir.

Compton kamera dedektörlerinde yaşanan Compton saçılması olaylarından sonra ARM dağılımı, saçılan elektronların tamamen soğurulmadığı durumda pozitif  $\Delta\phi_{ARM}$  değerlerine, saçılan fotonların tamamen soğurulmadığı durumda negatif  $\Delta\phi_{ARM}$  değerlerine doğru kaymaktadır.

### 2.3. Compton Kamera için Yarı İletken Dedektörler

Yarı iletken dedektörler, sahip oldukları yüksek etkinlik, yoğun atomik yapıları ile kazandıkları iyi enerji ve pozisyon çözünürlük değerleri ile Compton kamera uygulamalarında kullanılmaya en uygun adaylar arasında yer almaktadır.

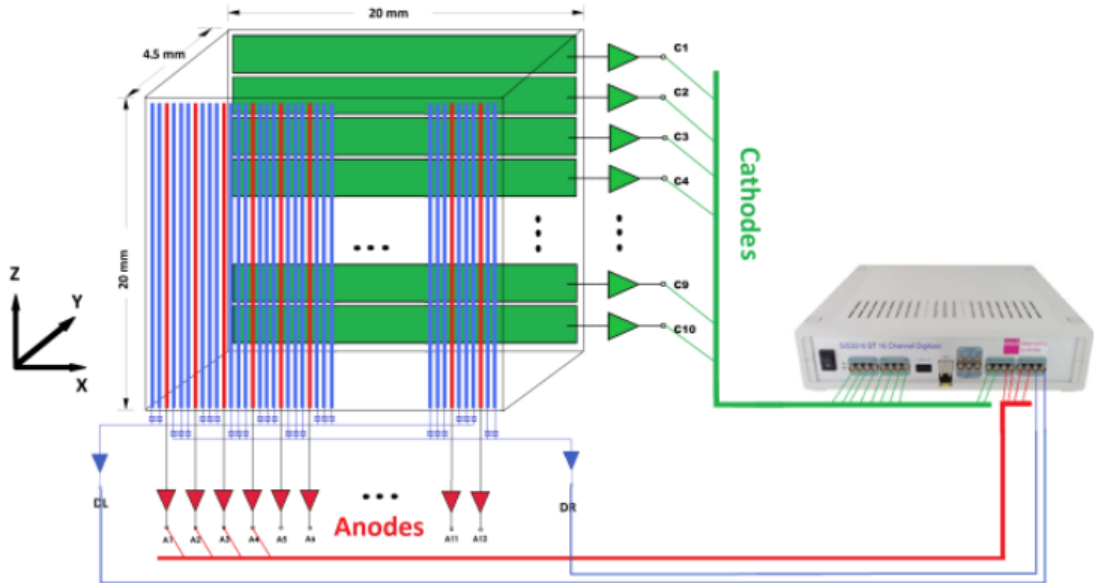
Bir yarı iletken dedektörde tespit süreci fotonun dedektör malzemesi ile etkileşime geçmesi ve dedektör içinde serbest elektronlar oluşturmasıyla başlamaktadır. Oluşan serbest elektronlarla, yarı iletken dedektörlerin atomik yapısındaki valans bandında eşit

sayıda hol oluşmaktadır. Oluşan bu elektron ve hol çiftleri yük taşıyıcıları olarak adlandırılmaktadır. Dedektöre uygulanan potansiyel fark ile oluşan elektrik alan sonucu hareketlenen yük taşıyıcıları, uygun elektrotlara doğru hareket etmekte; ideal durumda, yük taşıyıcıların tamamı kendi elektrotlarında toplanmakta ve elektriksel pulslar halinde kaydedilmektedir. Bu süreç ile de anlaşılabilceği gibi oluşan elektron-hol çiftlerinin sayısı, dedektör malzemesiyle etkileşime giren fotonun aktardığı enerji ile orantılıdır. Dolayısı ile oluşan elektron-hol çiftlerinin sayısının ölçülmesi ile dedektör ile etkileşen radyasyonun enerjisi bulunabilmektedir.

Compton kameralarda, saçıcı dedektör ve soğurucu dedektör tercihleri malzemenin Compton saçılması tesir kesiti ve fotoelektrik soğurma tesir kesitlerine bağlıdır. Saçıcı dedektör Compton saçılmasının gerçekleşme olasılığını artırmak için Compton saçılması tesir kesiti yüksek; soğurucu dedektör de fotoelektrik soğurma olasılığını artırmak için fotoelektrik soğurma tesir kesiti yüksek malzemelerden tercih edilmektedir.

Düşük bir atom numarasına sahip olan silikon, yüksek Compton saçılma tesir kesiti, iyi enerji ve pozisyon çözünürlükleri ve düşük Doppler genişleme katkısı ile Compton kamera saçıcı dedektörü için ideal tercihlerden biri olup bu tez kapsamında da saçıcı dedektör malzemesi olarak kabul edilmiştir.

Dedektörde iyi bir tespit etkinliği için yüksek atom numaralı dedektör malzeme seçimi gerekmektedir. Bu durum göz önünde bulundurulduğunda yüksek atom numaralı elementlerden oluşan bir bileşik olan CdZnTe (CZT) iyi bir tercih olarak kendini göstermektedir. CZT, CdTe bileşiminde Te atomlarının %10 – 20 arasında bir kısmının Zn atomlarıyla değiştirilmesi ile oluşturulmaktadır. Oda sıcaklığında çalışabilir olması en büyük avantajlarından biridir.



Şekil 2.7. 3D CZT dedektör ve elektrot geometrisi (Budtz-Jørgensen ve Kuvvetli 2017)

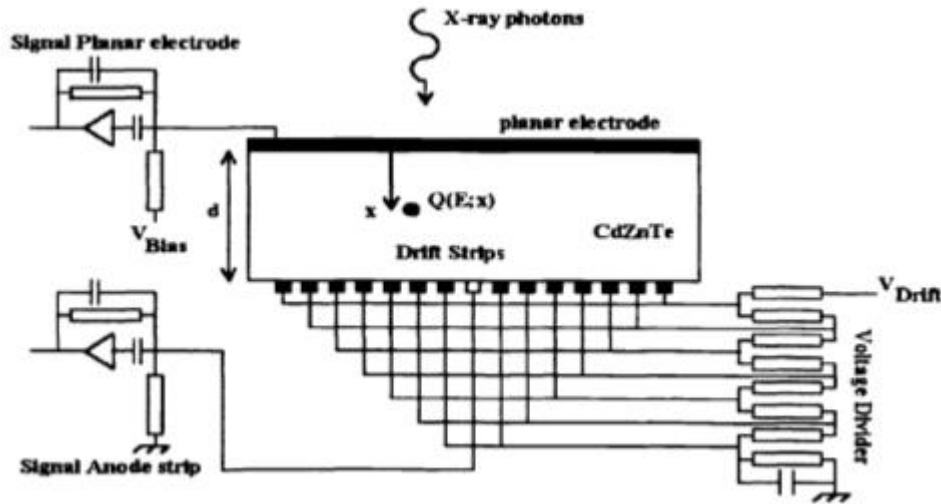
Bu tez kapsamında tercih edilen ve özelliklerinden faydalanılan soğurucu dedektör,

Danimarka Teknik Üniversitesi (DTU) ve Danimarka Ulusal Uzay Merkezi (DNSC) tarafından yüksek enerji astronomisi için geliştirilen CZT sürüklemeli şerit dedektörünün (Van Pamelan ve Budtz-Jørgensen 1998) güncel versiyonudur (Budtz-Jørgensen ve Kuvvetli 2017). Sayısallaştırıcı okuma sistemi kullanılan en son versiyonda 3 boyutlu pozisyon hassasiyetine sahip dedektör, 20 mm x 20 mm x 4.5 mm boyutlarında REDLEN CdZnTe kristalinden üretilmiştir. Dedektör, her biri bir anot şerit içeren 4 sürüklemeli şeritten oluşan, 12 sürüklenme hücresi ve 10 katot şerit elektrota sahiptir. Dedektör, 662 keV enerjili  $^{137}\text{Cs}$  kaynağı ile karakterize edilmiştir. Dedektör için 662 keV enerjide 7,2 keV FWHM'luk enerji çözünürlüğüne; x, y ve z yönlerinde 0,4 mm FWHM'luk pozisyon çözünürlüğüne ulaşılmıştır. Şekil 2.7'de 3D CZT dedektör ve elektrot geometrisinin güncel versiyonu görülmektedir.

### 2.3.1. CZT sürüklemeli şerit dedektör

CZT, yüksek etkinlik, iyi enerji çözünürlüğü ve oda sıcaklığında çalışabilme gibi özellikleri ile elektromanyetik spektrumun yüksek enerji bölgesi için yapılacak çalışmalarda avantajlı bir tercih olmakla birlikte çeşitli olumsuz özelliklere de sahiptir. CZT'deki yapısal kusurlar nedeniyle meydana gelen hol tuzaklanması, bu olumsuz yönlerden biridir. Tuzaklanma sebebiyle yük taşıyıcı sayısındaki azalma, oluşturulacak sinyali olumsuz yönde etkilemekte ve enerji çözünürlüğünü kötüleştirmektedir. Bu etkinin ortadan kaldırılması adına geliştirilen metodlardan biri “sürüklemeli şerit metodu”dur.

CZT dedektör için sürüklemeli şerit metodu, CZT dedektörleri geliştirme adına 1996 yılında Danimarka Uzay Araştırma Enstitüsü tarafından başlatılan bir programın sonucu olarak geliştirilmiş özel bir elektrot geometrisidir (Van Pamelan ve Budtz-Jørgensen 1998).



**Şekil 2.8.** Sürüklemeli şerit metodunun kullanıldığı dedektöre ait enine kesit (Kuvvetli vd. 1999)

Holler oluşumlarından sonra, sahip oldukları düşük hareketlilik sebebiyle elektrota olan hareketleri sırasında büyük oranda tuzaklanmaktadır. Gelen radyasyonun

dedektörün derin katmanlarında etkileşmesi durumunda bu tuzaklanma, oluşan hollerin tamamının uygun elektrotta toplanmasını engellemektedir. Sonuçta tamamlanmamış yük toplanması, radyasyona ait enerji spektrumunda fotopikin düşük enerji tarafında bir kuyruğa neden olmaktadır. Öte yandan elektronlar, hollere oranla sahip oldukları yüksek hareketlilikleri ile elektrotlarda etkin şekilde toplanabilmektedir. Bu durum göz önüne alındığında tek bir yük hareketine duyarlı bir elektrot geometrisinin bu sorunun çözümü olabileceği fikrini temel alan sürüklemeli şerit metodu ile sinyal kaybına neden olan hol tuzaklanmasına olan hassasiyet ortadan kaldırılmakta, elektrotların büyük oranda elektron hareketine duyarlı olması sağlanmakta ve bu sayede enerji çözünürlüğü artırılmaktadır.

Şekil 2.8'de sürüklemeli şerit metodunun temel çalışma prensibi görülmektedir. Şekilde CdZnTe dedektöre gelen X ışını fotonlarının dedektör içinde x noktasında etkileşmesi ve E enerjisini bırakması temsil edilmiştir. Burada dedektör, 14 sürüklemeli şerit (drift strip) ile 1 anot okuma şeridi ve 1 düzlemsel elektrotta (planar electrode) sahiptir. Sürüklemeli şeritler, anot okuma şeridini düşük hol hareketliliğinin yarattığı etkiye karşı korumakta, elektrostatik bir kalkan görevi görmektedir. Elektronların anot okuma elektrotunda toplanmasını, sürüklemeli şeritler ile anot okuma elektrotu arasına uygulanan bias voltajı sağlamaktadır.

Sürüklemeli şerit metoduna ait güncel versiyon, 2.3. Compton Kamera için Yarı İletken Dedektörler başlığı altında Şekil 2.7'de görülmektedir.

## 2.4. Compton Kamera Görevleri

Bu tez kapsamında, yüksek enerji astrofizikinde gama ışını enerji bölgesi için kullanım hedefi doğrultusunda geliştirilen Compton kamera modellerinin incelemesine geçmeden önce, günümüze kadar bu enerji bölgesi için geliştirilmiş ve önemli belli başlı görevlerden bahsedilecektir.

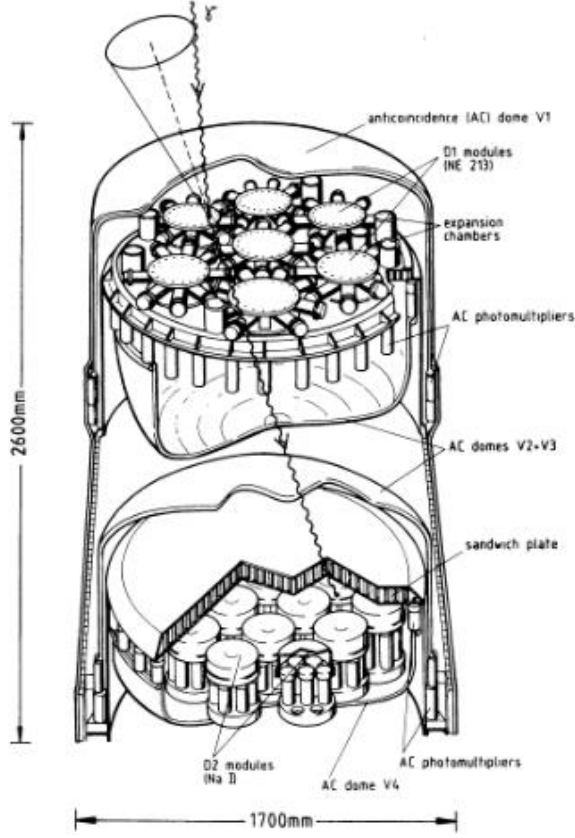
### 2.4.1. COMPTEL

Compton kameranın kullanımı ilk olarak, gama ışını astronomisi alanında, Schönfelder vd. tarafından gerçekleştirilmiştir (Schönfelder vd. 1973). Bu versiyona yapılan geliştirmeler sonucu elde edilen COMPTEL (COMPton TELEscope) (Schönfelder vd. 1993), dahil edildiği uluslararası proje doğrultusunda CGRO (The Compton Gamma-Ray Observatory) uydusuna eklenmiş ve bu enstrüman uzayın 1-30 MeV mertebesinde ilk gama ışını haritasını çıkarmıştır (Schönfelder vd. 1995).

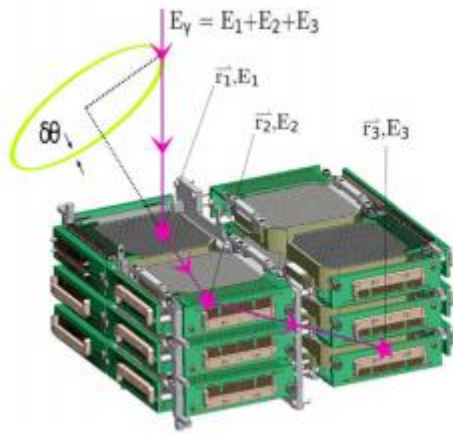
CGRO'da COMPTEL haricinde EGRET (Energetic Gamma-Ray Telescope), OSSE (Oriented Scintillation Spectrometer) ve BATSE (Burst and Transient Source Experiment) isimlerinde üç enstrüman daha yer almıştır. EGRET 20 MeV – 30 GeV enerji aralığının görüntülenmesi; OSSE 0.1 – 10 MeV enerji aralığında nükleer spektroskopi görevlerini gerçekleştirmiştir.

COMPTEL enstrümanı Şekil 2.9'da görülmektedir. COMPTEL, aralarında 1.58 m mesafe ile D1 ve D2 dedektörlerini içermektedir. D1 dedektörü silindirik yedi adet NE 213A organik sıvı sintilatör; D2 dedektörü, silindirik on dört adet NaI(Tl) kristali

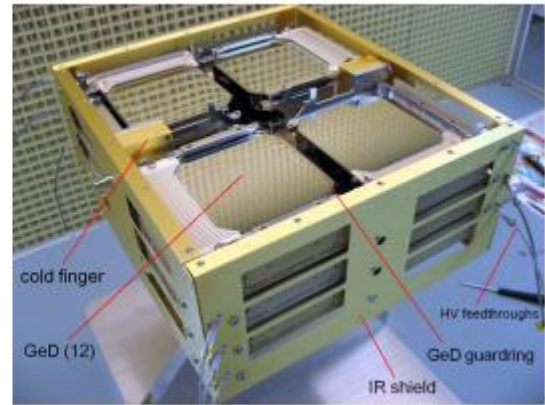
içermektedir. Bir COMPTEL olayı, uygun bir uçuş-zamanı penceresi aralığında D1 ve D2 dedektörlerinden alınan sinyal ile tanımlanmaktadır.



Şekil 2.9. COMPTEL enstrüman diyagramı (Schönfelder vd. 1993)



(a)



(b)

Şekil 2.10. a) Kullanılan Compton kamera prensibi; b) COSI germanyum dedektör dizisi (Chiu vd. 2017)

### 2.4.2. COSI/NCT

COSI (the Compton Spectro-Imager) 0.2 - 5 MeV enerji aralığı için nükleer çizgi emisyonları ve gama ışın polarizasyonunu araştırmak için tasarlanmış gama ışın teleskobudur (Chiu vd. 2017). NCT (Nuclear Compton Telescope)'dan edinilen bilgilerle geliştirilmiştir.

Temel olarak bir karyostat içine yerleştirilmiş 12 çapraz-şerit germanyum dedektörün (GeDs) oluşturduğu bir diziden oluşmaktadır. Şekil 2.10'da kullandığı Compton görüntüleme prensibiyle birlikte verilmiş geometrik yerleşimi görülmektedir.

### 2.4.3. INTEGRAL

INTEGRAL (International Gamma-Ray Astrophysics Laboratory) 2002 yılında fırlatılmış, ~15 keV – 10 MeV enerji aralığını gözlemleyen detaylı spektroskopik ve görüntüleme sonuçlarının hedeflenmiş olduğu bir uzay teleskobudur (Winkler vd. 2003). 511 keV yok olma (annihilation) salımı üzerinden ilk gökyüzü haritasının oluşturulması, yeni bir yüksek kütleli X-ışın çift sistemler sınıfının keşfi, kozmik yüksek enerji radyasyonunda polarizasyon tespiti gibi oldukça önemli sonuçlara ulaşmıştır (Winkler vd. 2011). Şekil 2.11'de INTEGRAL uydusuna ait bir illüstrasyon görülmektedir.



**Şekil 2.11.** INTEGRAL uzay teleskobu illüstrasyonu (Winkler vd. 2011)

Gama ışın aralığı için iki enstrüman içermektedir. Spektrometre SPI (Spectrometer on INTEGRAL), yüksek çözünürlüklü gama ışın çizgi spektrometresi için, görüntüleme enstrümanı olan IBIS (Imager on-Board the INTEGRAL), yüksek açısal çözünürlüklü görüntüleme için kullanılmaktadır. Bunlar haricinde, X-ışın gözlemi yapan JEM-X (X-ray monitor on INTEGRAL), optik bölge gözlemi yapan OMC (The Optical Monitoring Camera) adlı iki gözlem enstrümanı içermektedir.

### 3. MATERYAL VE METOT

#### 3.1. MEGAlib

Oldukça maliyetli olabilen Compton kamera prototiplerinin hayata geçirilmelerinden önce, Compton kamera sisteminin parçacık ile etkileşimlerinin detaylarının öğrenilebilmesi, performans özelliklerinin belirlenebilmesi ve geliştirilebilmesi adına simülasyonlar gereklidir. MEGAlib, bu doğrultuda başlangıçta MEGA Compton ve çift oluşum teleskop prototipi ve bu prototipin performans tahmini için geliştirilmiş bir simülasyon ve veri analiz programıdır (Zoglauer vd. 2006).

MEGAlib, the Medium Energy Gamma-ray Astronomy library, gama ışın dedektörleri ile parçacık etkileşimlerini modelleyen ve gelen sonuç verisini analiz edebilen yazılım paketidir. Özellikle Compton ve çift oluşum dedektörlerinin simülasyonu ve analizi için geliştirilmiştir. C++ programlama diline sahip olup nesne tabanlı bir yazılımdır. GEANT3 üzerine temellendirilmiş olup, veri görüntülemesi ve grafik kullanıcı arayüzü için ROOT programını, simülasyonlar için GEANT4 programını kullanmaktadır. GEANT3 ve GEANT4, CERN tarafından geliştirilmiş, parçacık ile madde etkileşimlerini simüle eden Monte Carlo yazılım paketleridir (Agostinelli vd. 2003). GEANT4 günümüzde, yüksek enerjili parçacık ve madde etkileşimleri simülasyonları için en yaygın şekilde kullanılan programdır. ROOT, CERN tarafından geliştirilmiş, C++ programlama diline sahip nesne tabanlı, gelişmiş istatistiksel analiz programıdır (Brun ve Rademakers 1997).

MEGAlib, gama ışın dedektörleri için, simülasyon veya gerçek dedektörlerden alınan ölçümlerle veri eldesi, veri kalibrasyonu veya veriye çeşitli belirsizliklerin uygulanması, olay yeniden oluşturma, görüntü yeniden oluşturma gibi gerekli olabilecek tüm veri analiz zinciri adımlarını içermektedir.

Bu tez çalışmasında Compton kamera prototiplerinin geliştirilmesi, simülasyonların gerçekleştirilmesi ve simülasyonlardan elde edilen verilerin analiz edilmesi MEGAlib ile gerçekleştirilmiştir. Bahsedilen adımlar MEGAlib'i oluşturan paketlerden sırasıyla; Geomega, Cosima, Revan ve Mimrec aracılığıyla uygulanmıştır. MEGAlib'e ait programları ve işlem akışını gösterir şekil, Şekil 3.1'de görülmektedir.

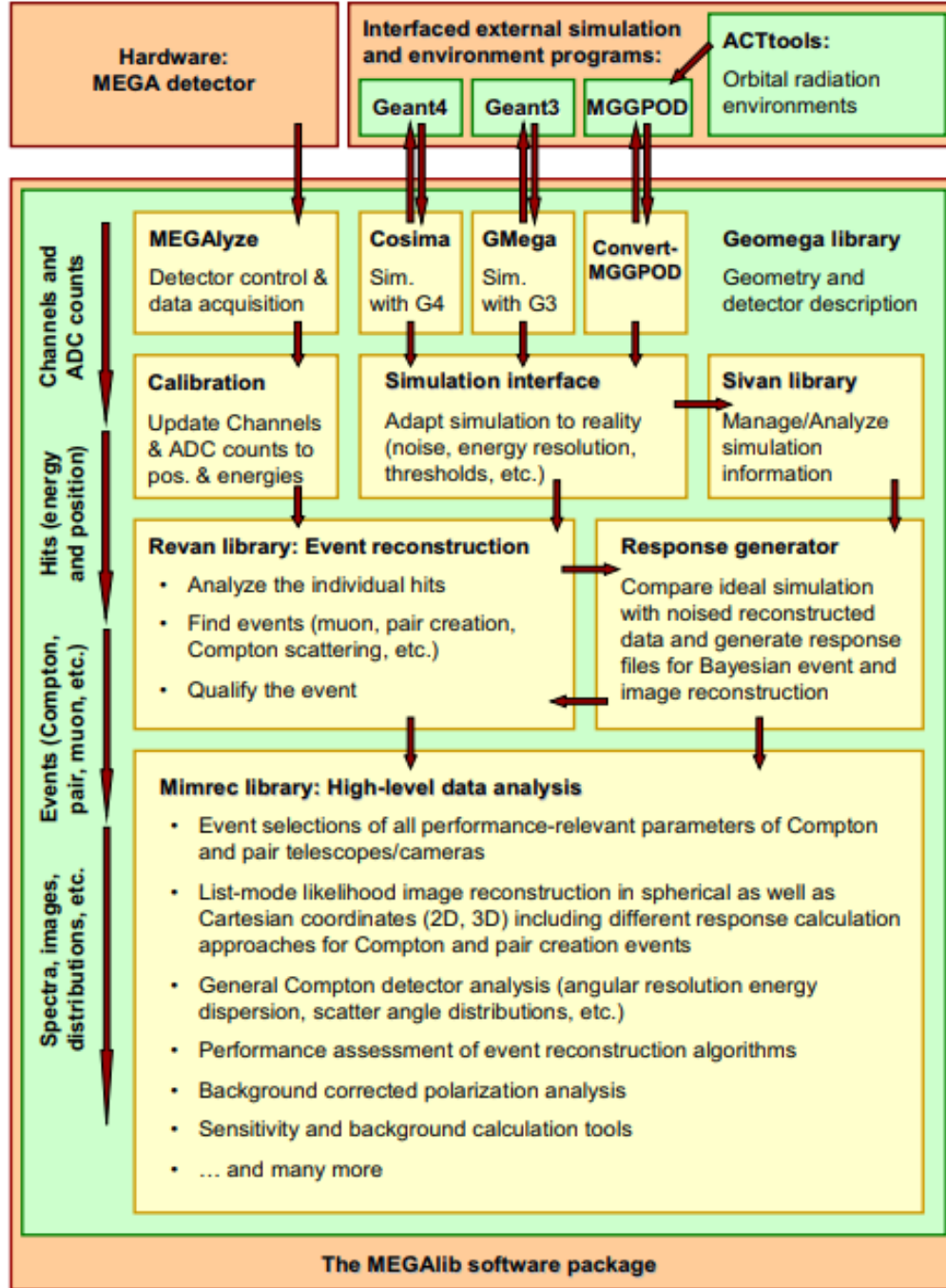
##### 3.1.1. Geomega

Geomega (Geometry for MEGAlib) MEGAlib'in geometri ve dedektör tanımlamalarının yapıldığı kütüphanesidir (Zoglauer vd. 2009). Dedektörün şekli, boyutları, oluşturulacağı malzeme ve buna ait yoğunluk gibi özellikler; dedektör tipleri (2D, 3D şerit dedektörler; kalorimetreler vb.); dedektöre ait enerji çözünürlükleri, gürültü özellikleri, tetikleme kriterleri; geometri içindeki hassas (sensitive) ve pasif bölgeler tanımlanabilen bilgiler arasındadır.

##### 3.1.2. Cosima

Cosima (Cosmic simulator for MEGAlib) MEGAlib'in simülasyon paketidir (Zoglauer vd. 2009). Cosima, GEANT4'e dayanmakta olup, parçacık oluşumu ve

dedektör ile etkileşimlerini simüle ederek sonuçlarına ait veriyi oluşturmaktadır. Kullanılacak geometri ve fizik listesi, çıktı formatı, simülasyonun çalıştırılma koşulları ve geometriyle etkileşime geçecek kaynak gibi simülasyonla ilgili gerekli bilgiler Cosima içerisinde tanımlanmaktadır.



Şekil 3.1. MEGAlib programları ve işlem akışı (Zoglauer vd. 2006)

Simülasyonlarda tercih edilen fizik listesi GEANT4 fizik kütüphanelerinden olan, Doppler genişlemesi etkisini barındıran Livermore'dur. Livermore, elektron ve fotonların maddeyle etkileşimlerini tanımlayan düşük enerjili elektromanyetik etkileşim



modellerini içeren bir fizik kütüphanesidir. Alt sınır olarak 250 eV enerjiye kadar olan etkileşimleri modelleyebilmektedir. Fotoelektrik soğurma, Compton saçılması, Rayleigh saçılması gibi fiziksel etkileşimler Livermore içinde, düşük enerjili elektromanyetik etkileşim modelleri olarak tanımlanmaktadır.

Cosima simülasyon başlamadan önce, Geomega ile oluşturulmuş geometriyi GEANT4 geometri formatına çevirmektedir. Simülasyon GEANT4 tarafından gerçekleştirilmekte olup simülasyon çıktısı, parçacık etkileşimlerine ait enerji ve pozisyon bilgilerini içerir haldedir.

### 3.1.3. Revan

Revan (The real event analyzer for MEGAlib) MEGAlib'in, olay yeniden oluşturma için oluşturulmuş kütüphanesidir (Zoglauer 2005). Olay yeniden oluşturma sürecinde, simülasyon sırasında kaydedilmiş dedektör içindeki parçacık etkileşim noktalarına ait pozisyon ve enerji değerlerini içeren hit bilgileri ve dedektör özellikleri kullanılarak, gerçekleşen olay yeniden oluşturulmaktadır. Bu adımda asıl amaç gerçekleşen tüm etkileşimlerin yapısını inceleyerek, orijinal etkileşim sürecini (Compton saçılması, fotoelektrik soğurma gibi) belirleyebilmektir.

#### 3.1.3.1. Olay yeniden oluşturma

Simülasyon sonucunda, dedektör içinde meydana gelmiş etkileşimlerin her biri kare testine dayanan algoritmalarla incelenerek, dedektör içinde aslında ne tür bir fiziksel etkileşimin meydana geldiği anlaşılmaya çalışılmaktadır. Bu incelemeler “olay yeniden oluşturma” olarak adlandırılmaktadır.

Simülasyon sonucunda dedektör içerisinde parçacıkların yaşadığı etkileşimler, bu etkileşimlere ait pozisyon ve enerji bilgileri ile “hit” olarak kaydedilmektedir. Olay yeniden oluşturma ile bu hitler sırayla düzenlenerek parçacık veya parçacıkların dedektör içerisinde gerçekleştirdiği Compton saçılması, çift oluşumu gibi etkileşim türleri tespit edilmektedir. Olay yeniden oluşturma sonunda, dedektör içinde gerçekleşmiş fiziksel etkileşimler artık “hit”ler ile değil, “olay”lar ile (Compton saçılması, çift oluşumu gibi) temsil edilmektedir. Olaylar pozisyon, enerji, doğrultu gibi parametrelerle verilmektedir.

Olay yeniden oluşturmada, olayları oluşturan hitlerin doğru sıralama ile düzenlenmesi en büyük öneme sahip işlemdir. Olay yeniden oluşturma algoritmaları ile sıralanarak düzenlenen hit dizileri arasından en olası seçeneğe karar verilmektedir. Bu süreç, MEGAlib'in olay yeniden oluşturma ve analizi programı olan Revan çerçevesinde, ilk olarak parçacık etkileşimlerinin geride bıraktığı izler incelendiğinde en kolay ayırt edilebilen çift oluşumu ve yüksek enerjili parçacık olaylarının tespit edilmesiyle başlamaktadır. Dedektör içinde çift oluşumu kendini “V” şeklinde bir etkileşim dizisi ile; yüksek enerjili parçacıklar, düz çizgi şeklinde bir etkileşim dizisi ile göstermektedir. Görece basit etkileşim yapılarına sahip bu olayların tespitinin ardından, daha karmaşık bir yapı sergileyen Compton saçılması etkileşim dizisinin tespiti ile olay yeniden geliştirme sonlanmaktadır. Compton saçılması etkileşim dizisi için kaydedilen tüm dedektör etkileşimlerinin olası permütasyonları analiz edilerek, başlangıç

fotonunun gerçekte dedektör içinde takip ettiği yol tespit edilmeye çalışılmaktadır. Bu işlem sırasında her bir permütasyona, olayın gerçekte öyle oluşma olasılığına dayanan bir Compton kalite faktörü atanmakta ve en iyi kalite faktörüne sahip permütasyon doğru etkileşim dizisi olarak seçilmektedir.

### 3.1.4. Mimrec

Mimrec (MEGAlib image reconstruction) MEGAlib'in gelişmiş veri analiz kütüphanesidir (Zoglauer 2005). Çeşitli özelleşmiş olay tercihlerinin (event cut) uygulanarak, iyi olayların seçilmesi bu adımda uygulanmaktadır. Uygulanan özelleşmiş olay tercihlerinin ardından dedektöre ait enerji çözünürlüğü, ARM dağılımı, saçılma açıları dağılımları gibi dedektör performans parametreleri Mimrec ile oluşturulmakta ve görüntülenmektedir. Kaynağa ait görüntü oluşturma da Mimrec aracılığı ile gerçekleşmekte ve kaynak küresel, galaktik veya kartezyen koordinat sistemlerinde görüntülenebilmektedir. Tez kapsamında, Mimrec aracılığı ile tercih edilen görüntü oluşturma algoritması LM-ML-EM (List mode - Maximum Likelihood - Expectation Maximization) (Wilderman vd. 1998) olmuştur.

Görüntü oluşturma algoritmalarında amaç, kaynağa ait dağılımı elde etmektir. Görüntü oluşturmada kaynağa ait dağılım, dedektörden alınan veri üzerinden elde edilmektedir. Görüntü oluşturma algoritmalarında, Compton kamera dedektörlerinden gelen ve Compton saçılması sonrası saçılan gama ışınının doğrultusu, gama ışınının saçılma açısı gibi parametreleri içeren veri, "görüntüleme veri uzayı"nı oluşturmaktadır. Mimrec içinde kullanımı tercih edilen ML-EM (Maksimum Olasılık – Beklenti Maksimizasyonu) görüntü yeniden oluşturma algoritması veri uzayında veriler, liste modundadır (LM). Liste modunda veri, olaylar listesi şeklinde temsil edilmektedir.

Görüntü oluşturmada ML-EM algoritmasının temel amacı, elde edilen veriyi oluşturabilecek en yüksek olasılığa sahip olan kaynak dağılımını yani görüntüyü elde etmektir. Algoritma bu doğrultuda, oluşturulan olasılık fonksiyonundan beklentinin maksimize edilmesi işlemini içermektedir.

ML-EM, eksik veya kayıp veri içeren bir veri seti için maksimum olasılık parametrelerini bulmayı amaçlayan bir algoritmadır. Bu doğrultuda bir başlangıç parametreleri setine sahip olduğu varsayılan EM algoritması, beklenti adımı ve maksimizasyon adımı olarak temel iki adım içermektedir. Beklenti adımında, elde edilmiş veri setindeki veriler kullanılarak, kayıp veya eksik olan veriler bulunmaya çalışılmaktadır. Maksimizasyon adımında ise beklenti adımının sonunda elde edilen verileri de içeren veri seti kullanılarak başlangıç parametreleri güncellenmektedir. Veri setini tamamlamada istenilen yakınsama sağlanana kadar bu iki adımlı süreç devam etmektedir. Bu nedenle EM, iteratif bir algoritmadır.

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1. Compton Kamera Modelleri için Tercihler

Elektromanyetik spektrumun yüksek enerji bölgesini içerir çalışmalarda kullanılmak üzere geliştirilen ve günümüzde de özellikleri iyileştirilmeye devam edilen sürüklemeli şerit CZT dedektör temelli Compton kamera modellemesi bu tezin temelini oluşturmaktadır. Compton kameraya ait kütle modellerinin oluşturulması, simülasyonların gerçekleştirilmesi, simülasyon sonuç verilerinin analiz ve görüntülemeleri MEGALib ile yapılmıştır. Sürüklemeli şerit CZT dedektör, oluşturulan Compton kamera modellerinde soğurucu dedektör olarak tercih edilmiştir ve özellikleri sürüklemeli şerit CZT dedektör için güncel versiyon olan Budtz-Jørgensen ve Kuvvetli (2017) çalışmasından alınmıştır. Compton kamera modellerinde saçıcı dedektör olarak gama ışını enerji bölgesi için iyi Compton saçılması özelliği gösteren silikon tercih edilmiştir.

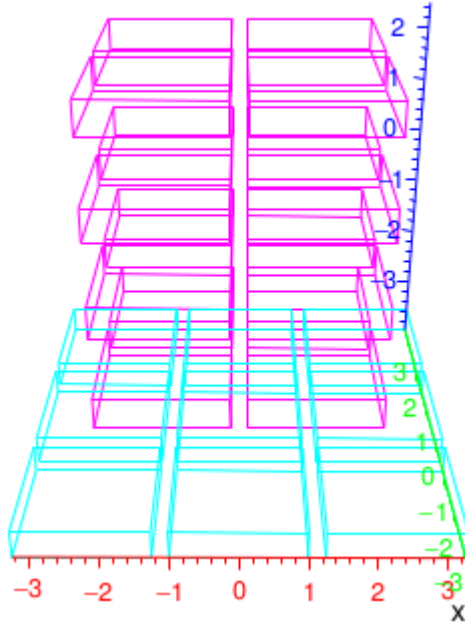
Modellenen sürüklemeli şerit CZT dedektör, 662 keV'de 7,2 keV'lik enerji çözünürlüğü ve x, y, z doğrultularında 0,04 cm'lik pozisyon çözünürlüğüne sahiptir (Budtz-Jørgensen ve Kuvvetli 2017). 12 anot, 10 katot şerit içermektedir. Silikon dedektör için ~ %1,5'lük enerji çözünürlüğünde karar kılınmıştır. Silikon dedektörler 64 anot ve 64 katot şerit içermektedir.

CZT dedektör derinlik çözünürlüğüne sahip şerit 3D dedektör olarak, silikon dedektör şerit 2D dedektör olarak tanımlanmıştır. Kullanılan silikon şerit 2D dedektörlerin boyutları  $2 \times 2 \times 0,5$  cm<sup>3</sup> ve CZT şerit 3D dedektörlerin boyutları  $2 \times 2 \times 0,45$  cm<sup>3</sup> şeklindedir. Oluşturulmuş tüm Compton kamera modelleri vakum ortam içine konumlandırılmıştır.

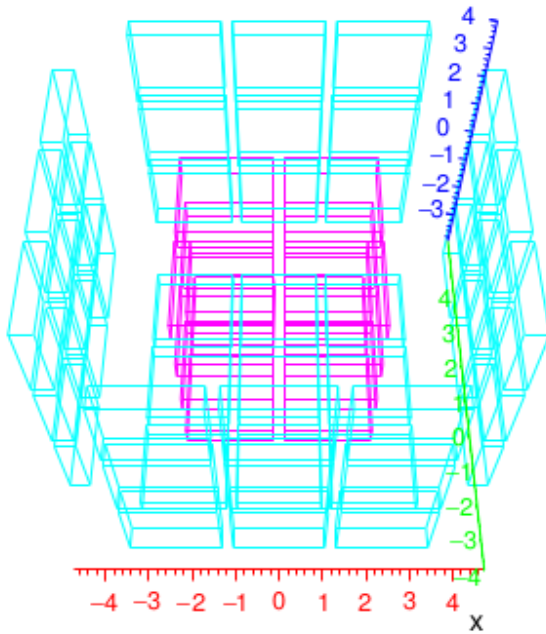
Tez kapsamında başlangıç incelemeleri için, silikon şerit 2D ve CZT şerit 3D dedektörlerden oluşan, farklı geometrik konumlandırılışlarda 3 Compton kamera kütle modeli oluşturulmuş ve simülasyonlar bu kütle modelleri üzerinde gerçekleştirilip değerlendirilmiştir. ARM dağılımı temelindeki başlangıç seviyesi performans değerlendirmeleri sonucunda, gösterdiği iyi performans ile geliştirilmek üzere kütle modeli 1 tercih edilmiştir ve bu doğrultuda kütle modeli 4 oluşturulmuştur. Geliştirilmiş kütle modeli olan kütle modeli 4 ile ilgili ayrıntılı bilgi, 4.2. Compton Kamera Modelleri için Simülasyonlar başlığında yer almaktadır. Kütle modellerinde silikon dedektörler pembe renk, CZT dedektörler mavi renk ile gösterilmiştir. Kütle modeli 1, 2, 3 ve 4, Şekil 4.1, 4.2, 4.3. ve 4.9'da görülmektedir.

Tüm kütle modellerinde, xy düzlemine yerleştirilen dörder silikon dedektör içeren 4 katman z ekseninde aralarında 1 cm olacak şekilde konumlandırılmıştır. Silikon dedektörler xy düzleminde birbirleri aralarında 0,25 cm kalacak şekilde konumlandırılmıştır.

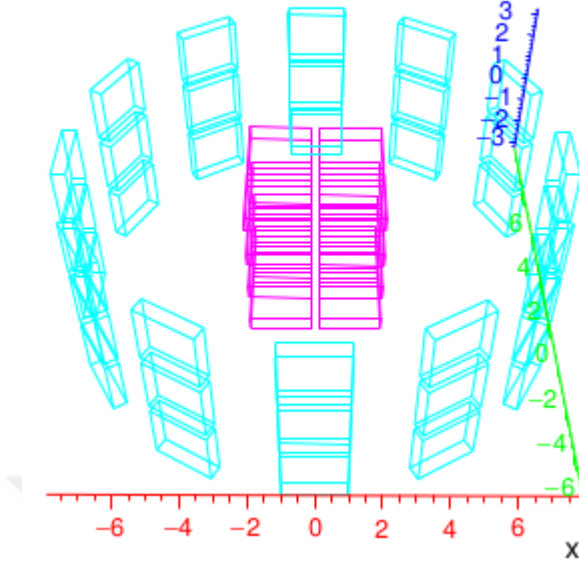
xy düzleminde aralarında 0,25 cm olacak şekilde yerleştirilen 9 CZT dedektör en alt silikon dedektör katmanından 1 cm aşağıda olacak şekilde yerleştirilerek kütle modeli 1 oluşturulmuştur. Kütle modeli 1 baz alınarak, xy düzlemindeki CZT dedektör



Şekil 4.1. Kütle modeli 1



Şekil 4.2. Kütle modeli 2



**Şekil 4.3.** Kütle modeli 3

katmanının xz düzlemine 90 ve yz düzlemine 90 derece döndürülmüş hallerinin silikon dedektörlerin etrafına konumlandırılmasıyla kütle modeli 2 oluşturulmuştur. Kütle modeli 2, 45 CZT şerit 3D dedektör içermektedir. Kütle modeli 3, silikon dedektör katmanlarının etrafına silindirik formda 3'er CZT dedektör içeren 12 katman yerleştirilmesi ile oluşturulmuştur.

#### 4.2. Compton Kamera Modelleri için Simülasyonlar

Kütle modellerini oluşturan bileşenlerde (dedektörler, pasif materyaller vb.) üst üste binme durumu söz konusu olması halinde çalıştırılan simülasyonlar doğru olmayan değerlerde veri üretecektir. Bu nedenle simülasyonlar çalıştırılmadan önce bütün kütle modelleri için Geomega aracılığı ile geometrilerde üst üste binme olup olmadığına dair kontrol yapılmıştır.

Simülasyon sonucunda ideal etkileşimlerden oluşan veri elde edilmektedir. Bu veriye dedektörlerin sahip olduğu elektronik gürültü uygulanmıştır. Gürültü değeri 10 keV olarak tüm simülasyonlarda uygulanmış ve dedektör içinde bu değer altında gerçekleşen etkileşimler reddedilmiştir.

Dedektör içinde gerçekleşen etkileşim, dedektör okuma sistemi tarafından okunabilecek değerde bir tetikleme (trigger) sinyali üretebilmeli, bunun için de belli bir miktarda enerji bırakmış olmalıdır. Bu doğrultuda Compton kamera modelleri için tetikleme eşiği 30 keV olarak belirlenerek tüm simülasyonlarda uygulanmıştır.

Simülasyonun ne zaman sonlanacağı tercih edilen tetikleme koşulu ile belirlenmektedir. Cosima içinde tercih edilebilecek üç tetikleme koşulu mevcuttur.

Atanan belli bir zaman sonunda, belli bir olay sayısına ulaşınca veya belli bir “tetiklenmiş olay” sayısına ulaşınca simülasyon sonlanmaktadır. Bu çalışmada tetiklenmiş olay sayısı ile simülasyonların çalıştırılması tercih edilmiştir. Buna göre tetikleme koşulu, her iki dedektör türünde de (şerit 2D dedektör olarak tanımlanmış Si ve şerit 3D dedektör olarak tanımlanmış CZT) en az bir etkileşimin gözleendiği olayların kaydedilmesi şeklinde belirlenmiştir. Kütle modeli 1, 2 ve 3 için simülasyonlar bu tetikleme koşulunu sağlayan 10000 tetiklenmiş olay üretmesi için çalıştırılmıştır.

Kütle modeli 1, 2 ve 3 için simülasyonlarda 662 keV enerjili nokta gama ışın kaynağı kullanılmıştır. Kaynak, kartezyen koordinatlarda z eksenini üzerinde (0,0,30) noktasına yerleştirilmiştir.

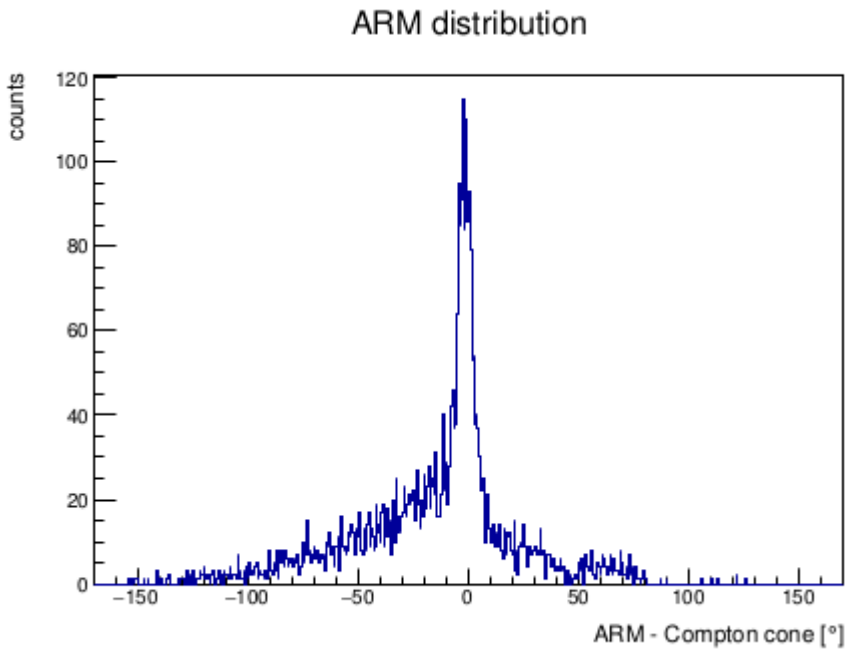
Simülasyon ve ardından uygulanan olay yeniden oluşturma işleminden gelen sonuçlara ait kütle modelleri performans değerlendirmeleri, Compton kameranın içinde enerji çözünürlüğü, pozisyon çözünürlüğü ve Doppler genişlemesi etkilerini barındıran ve açısız çözünürlüğü veren ARM dağılımına ve enerji spektrumuna göre yapılmıştır.

Oluşturulan kütle modelleri, simülasyonlardan gelen sonuçlara göre istenen tetikleme koşuluna (silikon şerit 2D dedektör ve CZT şerit 3D dedektörlerde birer etkileşim) ulaşana kadar geçen gözlem zamanı açısından sıralandığında en kısa gözlem zamanının kütle modeli 2'ye, en uzun gözlem zamanının ise kütle modeli 1 ile yakın sonuçlara sahip kütle modeli 3'e ait olduğu görülmüştür. Saçıcı (silikon şerit 2D) ve soğurucu (CZT şerit 3D) dedektörleri arası mesafenin diğer modellere göre daha fazla olması nedeniyle kütle modeli 3'ün en uzun gözlem zamanına sahip olması ve en fazla etkileşim yüzey alanına sahip olan kütle modeli 2'nin en kısa gözlem zamanına sahip olması beklenen bir durumdur.

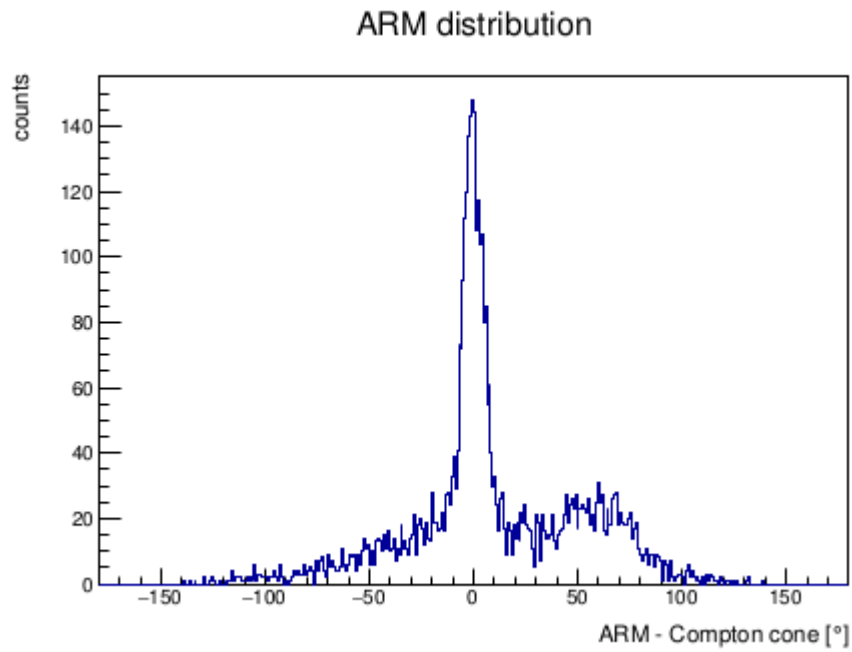
Simülasyon sonucunda büyük bir “hit” seti olarak gelen verinin, “olay”lara dönüştürülebilmesi için simülasyon çıktısına Revan programı ile olay yeniden oluşturma işlemi uygulanmıştır. Bu işlem için Compton dizisi yeniden oluşturma algoritması tercih edilmiştir. “Olay”lar haline getirilen veri seti artık analiz için hazır olup veri analizi için Mimrec programından faydalanılmıştır.

Yeniden oluşturulmuş olayların analizi kısmında veriyi daha da iyileştirip, kötü olayların ortadan kaldırılabilmesi adına özelleşmiş olay tercihleri (event cut) veriye uygulanabilmektedir. Bu doğrultuda, veride incelenen etkileşimlerin silikon dedektör içinde başladıklarından emin olmak için, ilk etkileşimin CZT dedektör içinde yaşandığı olayların reddedilmesi şeklinde bir özelleşmiş olay tercihi uygulanmıştır. Kütle modeli 1, 2 ve 3 için yapılan performans değerlendirmesinin başlangıç seviyesinde olması sebebiyle bu özelleşmiş olay tercihi haricinde bir tercih uygulanmamıştır.

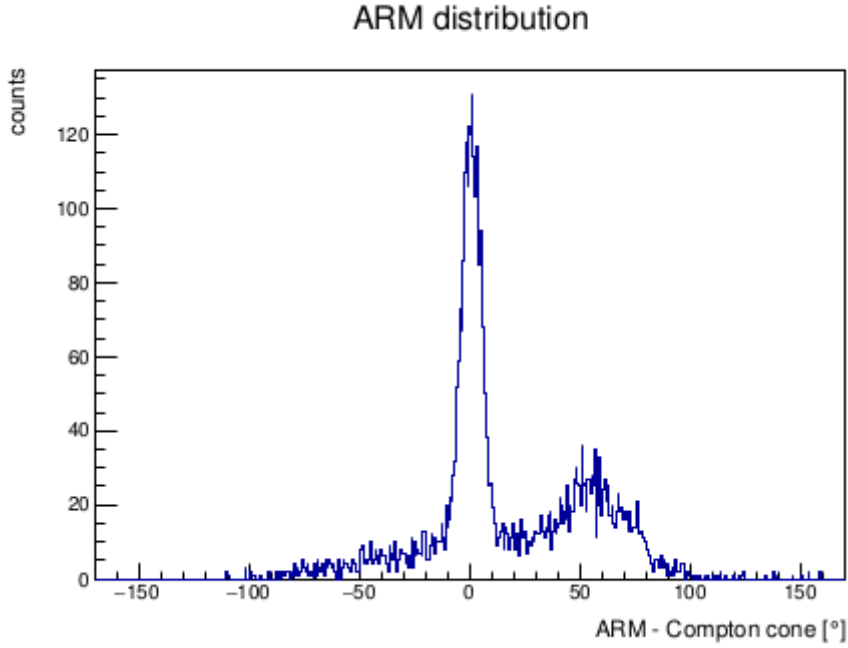
Özelleşmiş olay tercihlerinin uygulanmasından sonra son halini alan veriler ile kütle modellerinin performans değerlendirmelerinin yapılması için ARM dağılımları oluşturulmuştur. Şekil 4.4, 4.5. ve 4.6'da görülen kütle modellerine ait ARM dağılımları, olay yeniden oluşturma işlemi sonunda oluşturulan tüm Compton olaylarını içerir haldedir.



Şekil 4.4. Kütle modeli 1'e ait ARM dağılımı



Şekil 4.5. Kütle modeli 2'ye ait ARM dağılımı



**Şekil 4.6.** Kütle modeli 3'e ait ARM dağılımı

ARM dağılımı FWHM değerleri, kütle modeli 1 için  $7,14^\circ$  , kütle modeli 2 için  $8,59^\circ$  ve kütle modeli 3 için  $6,97^\circ$  olarak bulunmuştur. En iyi ARM dağılımı FWHM değerinin kütle modeli 3'e ait olduğu görülmekle birlikte, modeller için elde edilen değerler birbirine yakındır.

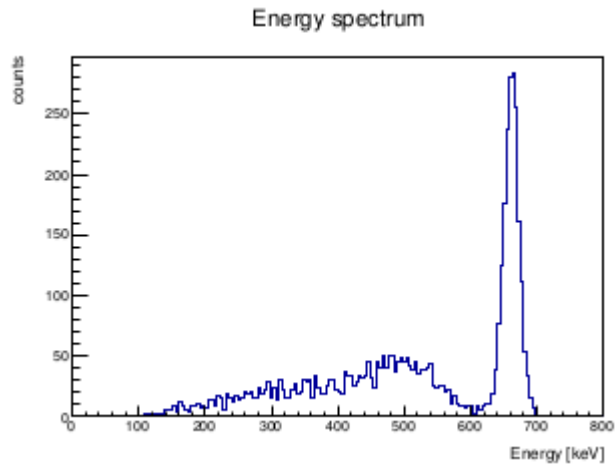
Kütle modeli 1'e ait ARM dağılımında pikin sol yanında oluşan kuyruk, Compton saçılması sonrası saçılan gama fotonlarının tamamen soğrulmadığını ifade etmektedir. Bu kütle modelinde CZT dedektör sayısının artırılması veya CZT dedektörlerden oluşan katmanlı yapıya geçilmesi bu sorunun çözümünde ilk adım olacaktır.

Kütle modeli 2 ve 3'e ait ARM dağılımlarında pikin sağ yanında kendini gösteren kuyruk, Compton saçılması sonrası saçılan elektronların tamamen soğrulmadığını göstermektedir. Silikon dedektör katmanlarında artış, silikon dedektörlerin xy düzleminde sayısının artırılması veya kütle modeli 3 için silikon ve CZT dedektörler arası mesafenin azaltılması çözüm için atılabilecek adımlar olup, son sırada bahsedilen değişimin gerçekleşmesi durumunda ARM dağılımı FWHM değerinde yaşanacak olası kötüleşme göz önünde bulundurulması gereken bir durumdur.

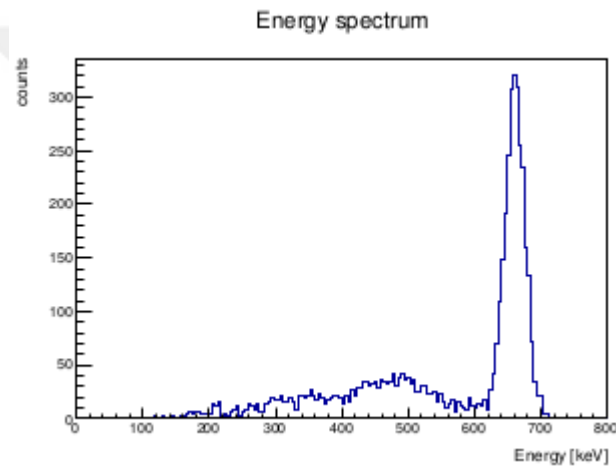
Kütle modeli 1, 2 ve 3'e ait enerji spektrumları Şekil 4.7'de görülmektedir. Üç model spektrumunda da düşük enerjilere gidildikçe gözlenen kuyruk, gama fotonu ve elektronların tamamen soğrulmama durumundan kaynaklanmaktadır.

Kütle modellerine gönderilen gama foton kaynağına ait görüntü oluşturma için LM-ML-EM algoritması kullanılmış olup, kaynağına ait görüntü oluşturma için 10 iterasyon uygulanmıştır.

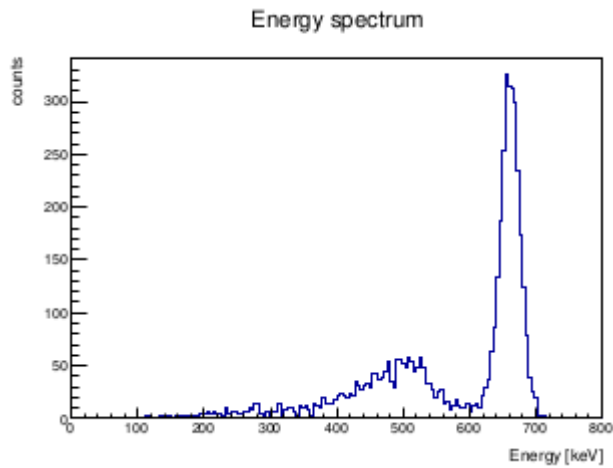




(a)

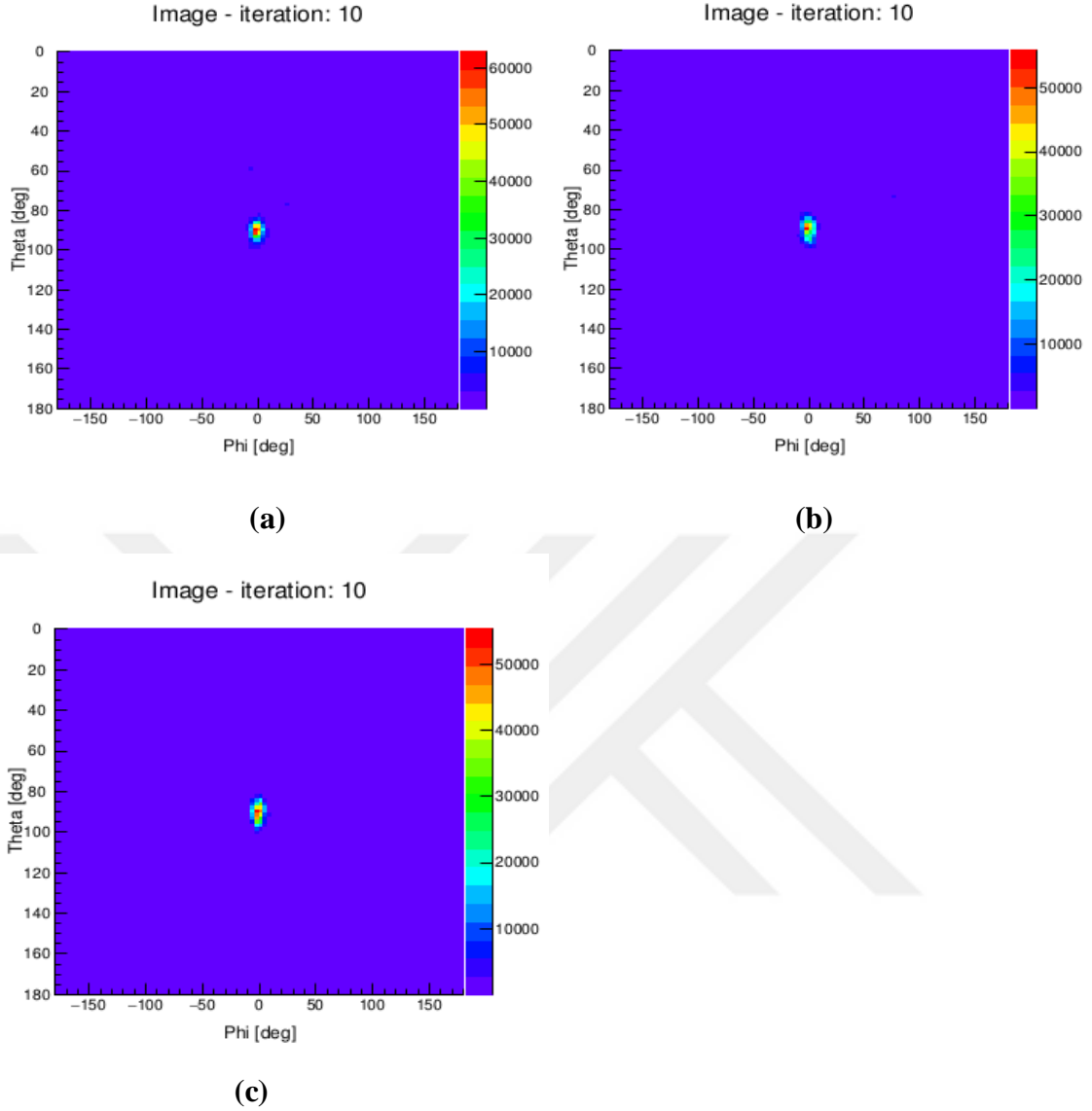


(b)



(c)

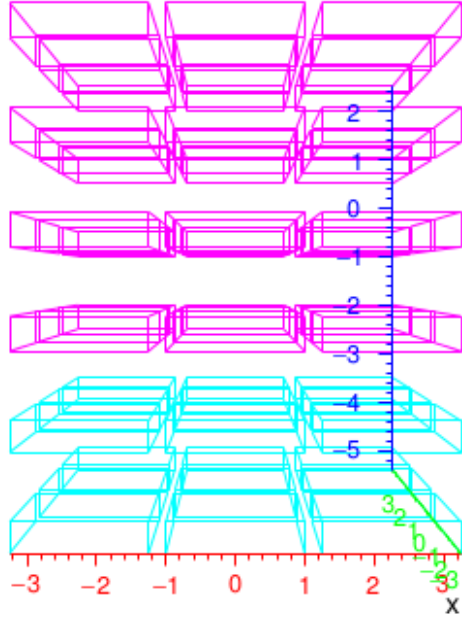
Şekil 4.7. a) Kütle modeli 1'e; b) Kütle modeli 2'ye; c) Kütle modeli 3'e ait enerji spektrumları



**Şekil 4.8.** a) Kütle modeli 1'e; b) Kütle modeli 2'ye; c) Kütle modeli 3'e ait kaynak görüntüleri

Şekil 4.8'de kütle modellerine ait kaynak görüntüleri görülmektedir. Kütle modellerinin ARM dağılımı FWHM değerleri arasındaki yakınlıktan nedeniyle, kütle modellerine ait kaynak görüntüleri büyük benzerlik taşımaktadır.

Oluşturulan üç kütle modeline ait performans değerlendirmesi ARM dağılımı FWHM değerleri üzerinden yapıldığında en iyi sonucun kütle modeli 3'e ait olduğundan bahsedilmiştir. Ancak, gerçek hayatta olası bir uzay görevine geometrik yerleşim ve alan kullanımı açısından daha uygulanabilir olacağı düşüncesiyle, ileriki çalışmalarda geliştirilmek ve performans özellikleri iyileştirilmek üzere kütle modeli 1 üzerinde durulmaktadır. Bu doğrultuda kütle modeli 1 temel alınarak oluşturulan kütle modeli 4, Şekil 4.9'da görülmektedir. Şekilde pembe renk silikon dedektörleri, mavi renk CZT dedektörleri temsil etmektedir.



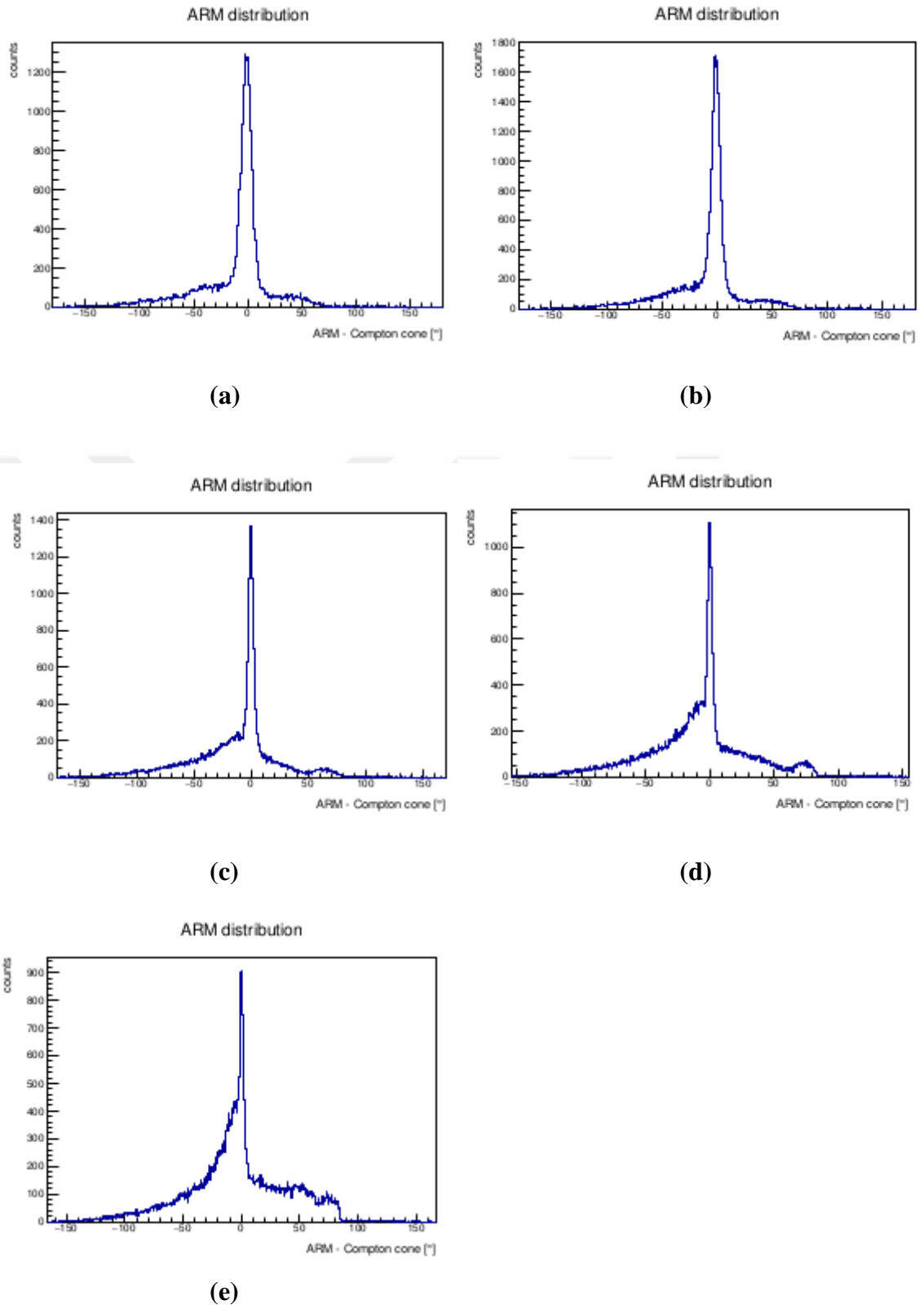
**Şekil 4.9.** Kütte modeli 4

Kütte modeli 4'te, silikon dedektör katmanlarındaki dedektör sayısı 9'a, CZT dedektörlerden oluşan katman sayısı, aralarında 1 cm olacak şekilde 2'ye çıkarılmıştır. Geliştirilmiş bu kütte modeline ait performans değerlendirmesinin yapılabilmesi adına simülasyonlar yenilenmiştir.

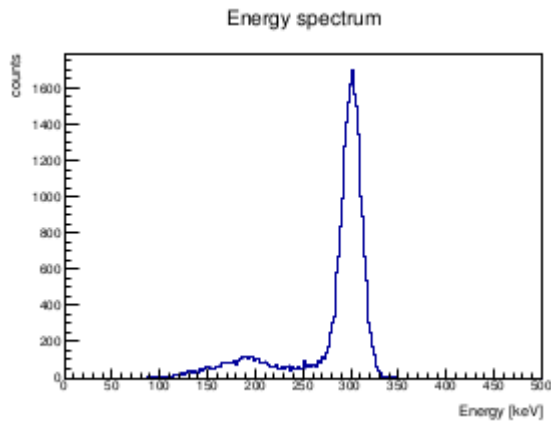
Yeni simülasyonlarda kaynak uzak bölge nokta kaynak olarak değiştirilmiş ve fotonlar küresel koordinatlarda  $(0, 0)$   $(\theta, \Phi)$  noktasından gönderilmiştir. Simülasyonlar 100000 tetiklenmiş olay için çalıştırılmış olup 300, 356, 662, 1000 ve 1333 keV enerjili gama ışın kaynakları için tekrarlanmıştır. Simülasyon sonrası veri analizinde veriye, geometrik tercih harici bir özelleşmiş olay tercihi uygulanmamıştır.

300, 356, 662, 1000 ve 1333 keV enerjili kaynaklar için kütte modeli 4'e ait ARM dağılımları Şekil 4.10'da, enerji spektrumları Şekil 4.11'de görülmektedir. ARM dağılımına ait FWHM değeri 300 keV'de  $7.84^\circ$ , 356 keV'de  $7.33^\circ$ , 662 keV'de  $4.46^\circ$ , 1000 keV'de  $4.07^\circ$  ve 1333 keV'de  $5.06^\circ$  olarak bulunmuştur.

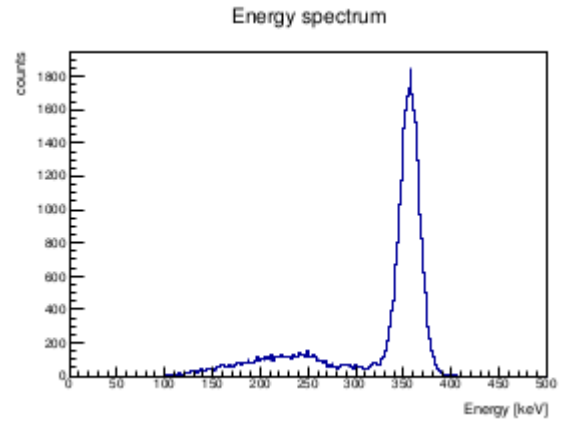
Enerji değerindeki artışla ARM dağılımı FWHM değerlerinde ve enerji spektrumu tam enerji pikinde iyileşme olmakla birlikte, parçacıkların tamamen soğrulmama durumunda da giderek yükselen bir artış gözlenmektedir. Şekil 4.10.e'de 1333 keV enerjili kaynağa ait ARM dağılımında da görüldüğü üzere ARM dağılımı FWHM değerindeki kötüleşmenin temel olarak, bu enerji değerinde artmış olan parçacık soğrulmama durumundan kaynaklandığı düşünülmektedir.



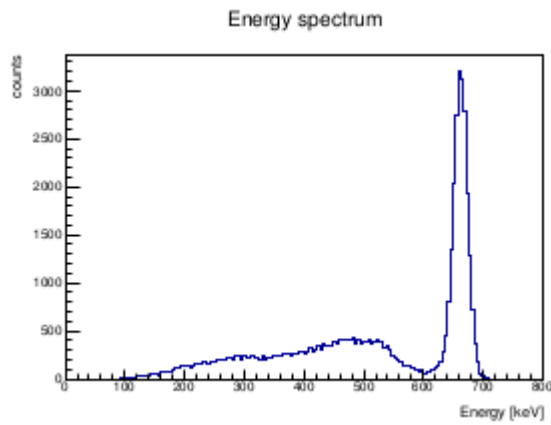
**Şekil 4.10.** a) 300; b) 356; c) 662; d) 1000; e) 1333 keV enerjili kaynaklar için kütle modeli 4'e ait ARM dağılımları



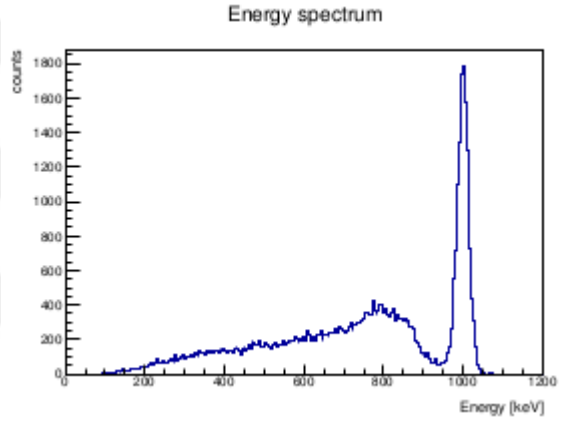
(a)



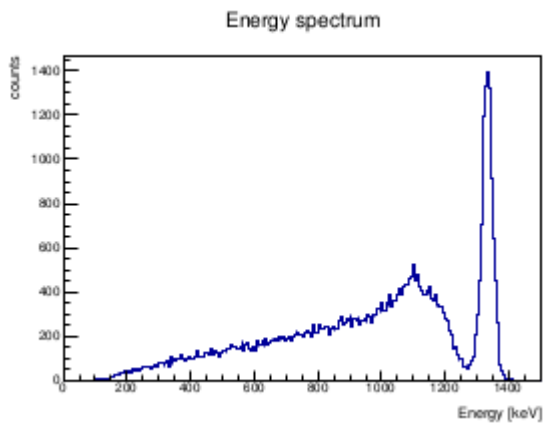
(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 4.11. a) 300; b) 356; c) 662; d) 1000; e) 1333 keV enerjili kaynaklar için kütle modeli 4'e ait enerji spektrumları

#### 4.2.1. Kütle modeli 1 ve 4 için etkin alan

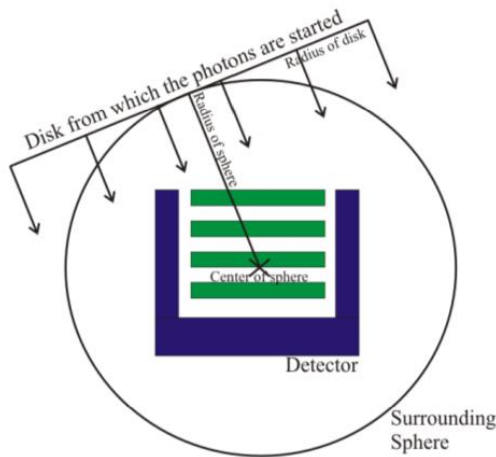
Kütle modeli 1 ve 4'e ait 300, 356, 662, 1000 ve 1333 keV enerjili gama ışın kaynakları için etkin alan değerleri hesaplanmış ve tam enerji (photopeak) değerleri için ARM dağılımı FWHM değerleri elde edilmiştir. Bu doğrultuda, kütle modeli 1 için simülasyonlar bu kaynak enerji değerlerinde 100000 tetiklenmiş parçacık için tekrarlanmıştır.

Dedektör yüzeyine ulaşan fotonların tamamının dedektörle etkileşmesi ve bir olay üretebilmesi mümkün olmadığından Compton kamera modelleri için etkin alanın bilinmesi iyi bir performans değerlendirmesine katkı sağlamaktadır. Etkin alan basitçe, dedektöre ulaşan tüm fotonların tespit edilebildiği ve tam enerjilerinin ölçülebildiği yüzey alanı olarak tanımlanabilmekte ve eşitlik 4.1 ile hesaplanmaktadır.

$$A_{etkinAlan} = A_{başlangıç} \left( \frac{N_{tespit}}{N_{başlangıç}} \right) \quad (4.1)$$

Eşitlik 4.1'de  $A_{başlangıç}$ , fotonların gönderildiği başlangıç alanını;  $N_{başlangıç}$ , tetiklenmiş olay sayısına ulaşmak için dedektöre gönderilen foton sayısını;  $N_{tespit}$ , yeniden oluşturma işlemi ve uygulanan özelleşmiş olay tercihleri sonunda geriye kalan olay sayısını temsil etmektedir.

$A_{başlangıç}$ , uzak bölge nokta kaynakların simülasyon çıktısında verilmektedir. Simülasyon öncesinde oluşturulan geometri dosyası içinde, tüm Compton kamera modelini içine alan “çevreleyen küre” tanımlanmaktadır. Uzak bölge kaynaklarının simülasyonunda kütle modellerine gönderilecek fotonlar, çevreleyen küreye teğet olan ve aynı yarıçaptaki bir disk üzerinden gönderilmekte olup  $A_{başlangıç}$ , bu diskin yüzey alanına eşittir. Fotonlar, çevreleyen kürenin merkezi doğrultusunda yayınlanmaktadır. Şekil 4.12'de çevreleyen küre (surrounding sphere) ve fotonların yayınlandığı disk (Disk from which the photons are started) görülmektedir.



Şekil 4.12. Çevreleyen küre ve fotonların yayınlandığı disk (Cosima kılavuzu 2015)

$N_{başlangıç}$ , simülasyon çıktısından elde edilmektedir. Tetiklenmiş olaylara uygulanan

olay yeniden oluşturma ve ardından Mimrec ile yapılan özelleşmiş olay tercihlerinden sonra istenen koşulları sağlamayan olaylar elenmektedir.  $N_{\text{tespit}}$ , bu işlem sonrası geriye kalan olay sayısıdır. Burada olaylar üzerine uygulanmış özelleşmiş olay tercihleri, geometrik tercih (ilk etkileşimin CZT dedektör içinde gerçekleşmesinin tespiti durumunda olayı reddetme) ve enerji ile ARM penceresidir. Enerji penceresi için tam enerji değerinin  $\pm 1.4 \sigma$  aralığında kalan olaylar tercih edilmiştir. Buna göre 300, 356, 662, 1000 ve 1333 keV kaynak enerjileri için kütle modeli 1 ve 4'e ait elde edilen tam enerji değerleri için ARM dağılımı FWHM değerleri ve hesaplanan etkin alanlar Çizelge 4.1 ve 4.2'de görülmektedir.

**Çizelge 4.1.** Kütle modeli 1 için kaynak enerjileri ve karşılık gelen Compton kamera tam enerji değerleri için ARM FWHM ve etkin alan değerleri

Enerji [keV]	$A_{\text{etkinAlan}} [\text{cm}^2]$	ARM FWHM [°]
300	0,13	11,03
356	0,12	9,77
662	0,05	5,54
1000	0,03	3,42
1333	0,01	2,43

**Çizelge 4.2.** Kütle modeli 4 için kaynak enerjileri ve karşılık gelen Compton kamera tam enerji değerleri için ARM FWHM ve etkin alan değerleri

Enerji [keV]	$A_{\text{etkinAlan}} [\text{cm}^2]$	ARM FWHM [°]
300	0,33	11,01
356	0,31	9,16
662	0,17	5,07
1000	0,09	3,4
1333	0,05	2,34

Kütle modeli 1 ve 4'e ait etkin alan değerleri karşılaştırıldığında, kütle modeli 4 etkin alanlarının beş kaynak enerjisinde de kütle modeli 1'e göre  $\sim 3$  katlık bir artış gösterdiği görülmektedir. Artırılmış yüzey alanına sahip kütle modeli 4 için etkin alandaki bu artış olağandır. Buna karşın artan enerjiyle her iki kütle modeli için de etkin alanların azaldığı görülmektedir. Bu durumun temel nedeni, artan enerji ile beraber Compton tesir kesitinin giderek azalması ve buna bağlı olarak da meydana gelen olay sayısındaki azalmadır.

Kütle modeli 1 ve 4'e ait tam enerji değerleri için ARM dağılımı FWHM değerleri karşılaştırıldığında beş kaynak enerjisinde de kütle modeli 4'ün daha iyi çözünürlük değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Çözünürlük değerleri her iki kütle modelinde de artan enerjiyle birlikte iyileşmektedir. Artan enerjiyle birlikte iyileşen enerji çözünürlüğü, açısal çözünürlük değerlerindeki bu iyileşmede temel etkidir.

## 5. SONUÇLAR

Bu tez kapsamında, iyi performans özellikleri geçmiş çalışmalarla kanıtlanmış bir yarı iletken dedektör olan sürüklemeli şerit 3D CZT dedektörün, soğurucu olarak kullanıldığı bir Compton kamera simülasyonu değerlendirilmiştir. Compton kameranın saçıcı bileşeni olarak radyasyon dedektörleri alanında sıklıkla kullanılan ve Compton saçılması tesir kesiti yüksek olan şerit 2D silikon dedektör seçilmiştir. Simülasyon ve detaylı veri analiz ile görüntülemesi için MEGAlib programı kullanılmıştır. Simülasyonlar MEGAlib içinde GEANT4 ile gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan kütle modelleri ve simülasyonlar için yapılan tercihler, geliştirilen Compton kameranın gama ışını enerji bölgesinde çalışacağı kabulü üzerinedir.

Başlangıçta, optimum görüntü kalitesine ulaşması hedeflenen, silikon ve CZT dedektörlerden oluşan üç Compton kamera kütle modeli oluşturulmuştur. Kütle modelleri simüle edilerek sonuçlar enerji spektrumları ve ARM dağılımları üzerinden değerlendirilmiştir. ARM dağılımı FWHM değerleri, kütle modeli 1 için  $7,14^\circ$ , kütle modeli 2 için  $8,59^\circ$  ve kütle modeli 3 için  $6,97^\circ$  olarak bulunmuştur. Gelecek çalışmalar için gerçek hayatta olası bir uzay görevine uygulanabilirlik anlamında  $7,14^\circ$ lik açısız çözünürlük değerine sahip olan kütle modeli 1 üzerinde durulmasına karar verilmiş ve bu doğrultuda kütle modeli 4 geliştirilmiştir.

Kütle modeli 4'te saçıcı dedektör katmanlarındaki silikon dedektör sayısı 9'a çıkarılmış ve 9 CZT içeren soğurucu dedektör katman sayısı 2'ye yükseltilmiştir. Kütle modeli 4 için 300, 356, 662, 1000 ve 1333 keV enerjili gama ışın kaynakları ile simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar 100000 tetiklenmiş olay için çalıştırılmıştır. Kütle modeli 4 için 662 keV'de  $4.46^\circ$ lik ARM dağılımı FWHM değeri elde edilmiştir. Kütle modeli 1'e ait açısız çözünürlük değeri ile karşılaştırıldığında, kütle modeli 4'ten beklenen gelişmenin elde edildiği görülmektedir.

300, 356, 662, 1000 ve 1333 keV enerjili gama ışın kaynakları için kütle modeli 1 ve 4'e ait etkin alanlar hesaplanmıştır. Bu doğrultuda kütle modeli 1 için simülasyonlar bu kaynak enerji değerlerinde 100000 tetiklenmiş parçacık için tekrarlanmıştır. Sonuçta kütle modeli 4'ün etkin alan değerlerinin her enerji değerinde kütle modeli 1'e göre daha iyi olduğu görülmüştür. Tam enerji değeri için elde edilen ARM dağılımı FWHM değerlerinde de beklendiği üzere artan enerji ile her iki kütle modelinde de iyileşme gözlenmiştir. İki model için ARM dağılımı FWHM değerleri karşılaştırıldığında ise kütle modeli 4'e ait açısız çözünürlük değerlerinin daha iyi olduğu gözlenmiş ve geliştirilen kütle modeli 4'ün beklenen performans iyileşmesini sağladığı görülmüştür.

Gelecek çalışmalarda, sonuçları geliştirebilmek adına olay yeniden oluşturma ve sonrasında gerçekleşen veri analizi adımlarında daha detaylı özelleşmiş olay tercihlerine gidilip, yanlış şekilde yeniden oluşturulan olayların sayısı azaltılabilir ve performans parametre değerleri iyileştirilebilir. Dedektörlere ait pasif materyaller ve tüm Compton kamerayı kapsayacak şekilde bir ACS (anti-coincidence shield) eklenerek performans değerlendirmeleri pasif malzeme varlığında geliştirilebilir. Yapılabilecek bu ek geliştirmeler, modellenmiş sürüklemeli şerit 3D CZT dedektör temelli Compton kamerayı gerçek bir uzay görevine hazır hale getirmede büyük katkı sağlayacaktır.



## 6. KAYNAKLAR

- Agostinelli, S. et al. 2003. GEANT4—a simulation toolkit. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Volume 506, Issue 3, Pages 250-303.
- Brun, A. and Rademakers, F. 1997. ROOT - An Object Oriented Data Analysis Framework. Proceedings AIHENP'96 Workshop, Lausanne, Sep. 1996, *Nucl. Inst. & Meth. in Phys. Res. A* 389, 81-86.
- Budtz-Jørgensen, C. and Kuvvetli, I. 2017. New Position Algorithms for the 3D CZT Drift Detector. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 64, Issue 6, Pages 1611-1618.
- Chiu, J. L., Boggs, S. E., Kierans, C. A., Lowell, A., Sleator, C., Tomsick, J.A. and Zoglauer, A. 2017. The Compton Spectrometer and Imager (COSI). 35<sup>th</sup> International Cosmic Ray Conference - ICRC2017 Session Gamma-Ray Astronomy, GA-instrumentation, Volume 301.
- Evans, R.D. 1955. *The Atomic Nucleus*. McGraw-Hill Book Company, 1<sup>st</sup> Edition.
- Harkness, L. J. et al. 2009. Prospectus: Development of a Compton Camera for medical imaging. In: Dössel O., Schlegel W.C. (eds) *World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering, IFMBE Proceedings*, vol 25/2.
- Kuvvetli, I., Budtz-Jørgensen, C., Westergaard, N. J., Jonasson, P., van Pamelén, M. A. J., Reglero, V., Eyles, C. and Neubert, T. 1999. Development of large area CZT detector systems. Part of the SPIE Conference on EUV, X-Ray, and Gamma-Ray Instrumentation for Astronomy X, SPIE Vol. 3765.
- Ribberfors, R. 1975. Relationship of the relativistic Compton cross section to the momentum distribution of bound electron states. II. Effects of anisotropy and polarization. *Physical Review B*, 12: 3136–3141.
- Ryan, J. M., Baker, J., Macri, J. R., McConnell, M. L., Carende, R. 2008. A Compton telescope for remote location and identification of radioactive material. *Sensors, and Command, Control, Communications, and Intelligence (C3I) Technologies for Homeland Security and Homeland Defense VII*, Proc. SPIE 6943.
- Sato, Y., Terasaka, Y., Ozawa, S., Nakamura Miyamura, H., Kaburagi, M., Tanifuji, Y., Kawabata, K. and Torii T. 2017. Development of compact Compton camera for 3D image reconstruction of radioactive contamination. 19<sup>th</sup> International Workshop on Radiation Imaging Detectors (IWORID2017), *Journal of Instrumentation*, Volume 12.
- Schönfelder, V., Hirner, A. and Schneider, K. 1973. *A telescope for soft gamma ray astronomy*. *Nuclear Instruments and Methods*, Vol. 107, Issue 2, Pages 385-394.
- Schönfelder, V. et al. 1993. Instrument Description and Performance of the Imaging Gamma-Ray Telescope COMPTEL Aboard the Compton Gamma-Ray Observatory. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, Vol. 86, No. 2, Pages 657-692.
- Schönfelder, V. et al. 1995. Highlights from the COMPTEL 1 to 30 MeV Sky Survey. *Annals of the New York Academy of Sciences*, Vol. 759, Pages 226-231.

- Studen, A. 2005. Compton camera with position-sensitive silicon detectors. Ph.D Thesis, University of Ljubljana.
- Ubertini, P., Wilms, J., Winkler, C. and Diehl, R. 2011. INTEGRAL: science highlights and future prospects. *Space Science Reviews*, Volume 161, Issue 1-4, pp. 149-177.
- Uche, C. 2011. Optimizing Compton Camera Performance. Ph.D Thesis, University of Waikato, Department of Physics.
- van Pamelan, M. A. J. and Budtz-Jørgensen, C. 1998. Novel electrode geometry to improve performance of CdZnTe detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment*, 403(2): 390-398.
- Wilderman, S. J., Clinthorne, N. H., Fessler, J. A., Les Rogers, W. 1998. List-mode Maximum Likelihood Reconstruction of Compton Scatter Camera Images in Nuclear Medicine. IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, vol.3, pp. 1716-1720.
- Winkler, C. et al. 2003. The INTEGRAL mission. *Astron. Astrophys*, 411, L1–L6.
- Zoglauer, A. and Kanbach, G. 2003. Doppler broadening as a lower limit to the angular resolution of next-generation Compton telescopes. Society of PhotoOptical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series (J. E. Truemper & H. D. Tananbaum, ed.), vol. 4851, pp. 1302–1309.
- Zoglauer, A. 2005. First Light for the Next Generation of Compton and Pair Telescopes. Ph.D Thesis, Technische Universität München.
- Zoglauer, A., Andritschke, R. and Schopper, F. 2006. MEGALib – the Medium Energy Gamma-ray Astronomy Library. *New Astronomy Reviews*, vol. 50, no. 7-8, pp. 629-632.
- Zoglauer, A., Weidenspointner, G., Galloway, M., Boggs S. E. and Wunderer, C. B. 2009. Cosima – the Cosmic Simulator of MEGALib. NSS Conference record.
- Zoglauer, A., 2015. Cosima Manual.

## ÖZGEÇMİŞ

**EZGİ GÖKÇE DİK**  
**ezgigokcedik@gmail.com**



### ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans 2016-2019	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Uzay Bilimleri ve Teknolojileri Anabilim Dalı, Antalya
Lisans 2012-2016	Akdeniz Üniversitesi Fen Fakültesi, Uzay Bilimleri ve Teknolojileri Bölümü, Antalya