



**T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



YÜKSEK LİSANS TEZİ

**PLASTİK SİNTİLATÖRLER ile RADYASYON ÖLÇÜMÜ ve
GEANT ile BENZETİM ÇALIŞMALARI**

Berkan KAYNAK

Fizik Anabilim Dalı

Yüksek Enerji ve Plazma Fiziği Programı

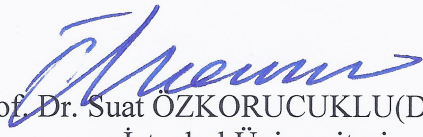
**DANIŞMAN
Prof. Dr. Suat ÖZKORUCUKLU**

Haziran, 2018

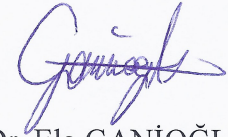
İSTANBUL

Bu çalışma, 19.06.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı
, Yüksek Enerji ve Plazma Fiziği Programında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

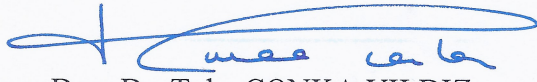
Tez Jürisi


Prof. Dr. Suat ÖZKORUCUKLU(Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi


Prof. Dr. Bayram DEMİR
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi


Prof. Dr. Ela GANİOĞLU
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi


Doç. Dr. Alper DİZDAR
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi


Doç. Dr. Tuba ÇONKA YILDIZ
Türk Alman Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi’nin aboneli olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

Bu tez, İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliğinin 51392 numaralı ÖNAP projesi ile desteklenmiştir.

Bu tez, 51303 numaralı IRP projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Engin bilgi birikimi ve tecrübesiyle yardımlarını hiçbir zaman eksik etmeyen, ayrıca sadece bilim anlamında değil her anlamda her zaman yanımda olan ve üzerimde büyük emeği geçen sevgili danışmanım Prof. Dr. Suat ÖZKORUCUKLU'ya sonsuz teşekkürlerimi sunar saygılarımı iletirim.

Hiçbir zaman yardım ve desteklerini eksik etmeyen değerli arkadaşlarım Çağdaş ŞİMŞEK, Gökçe AYDOĞDU, Şahin AYDOĞDU, Mahmutjang LİTİFU, Akın ÖĞRETİCİ ve Ömer Göksel ERBAŞ'a en içten teşekkürlerimi iletirim.

Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi (CERN)'de yürüttüğüm çalışmalar sırasında benden yardımlarını esirgemeyen başta Aldo PENZO olmak üzere Vladimir SAMOYLENKO, Michael J. WAGNER, Mohsen KHAKZAD ve Joachim BAECHLER'e çok teşekkür ederim.

Haziran 2018

Berkan KAYNAK

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİL LİSTESİ	vii
TABLO LİSTESİ.....	ix
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	x
ÖZET	xi
SUMMARY.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL KISIMLAR	3
2.1. KOZMİK IŞINLAR.....	3
2.2. PARÇACIK MADDE ETKİLEŞMESİ.....	4
2.3. SİNTİLASYON DETEKTÖRLERİ.....	6
2.3.1. Sintilasyon Detektörlerinin Genel Karakteristikleri.....	7
2.3.2. Organik Sintilatörler.....	9
2.3.2.1. Organik Kristaller.....	11
2.3.2.2. Organik Sıvılar	11
2.3.2.3. Plastik Sintilatörler.....	12
2.3.3. İnorganik Kristaller	13
2.3.4. Gaz Sintilatörler	13
2.3.5. Cam Sintilatörler.....	14
2.4. FOTO ÇOĞALTICILAR.....	14
2.4.1. PMT’lerin Spektral Cevap Karakteristikleri.....	16
2.4.2. Foton Sayımı.....	16
2.5. GEANT4.....	19
2.5.1. Geant4 Kullanımı.....	20
2.5.1.1. Zorunlu Kullanıcı Sınıfları.....	21
2.5.1.2. Opsiyonel Kullanıcı Sınıfları.....	21
2.5.2. GEANT4 kullanıcı Ara Yüzü	22
2.5.3. Görselleştirme ve Analiz Araçları.....	22
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	24

3.1. PLASTİK FSC SİNTİLATÖRLERİ	24
3.1.1. Sintilatör Sayaçların Okuma Sistemleri	29
3.2. GEANT4 BENZETİM ÇALIŞMALARI.....	31
4. BULGULAR.....	34
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	48
KAYNAKLAR.....	51
EKLER.....	53
EK 1. Tezde kullanılmış olan FSC detektörü Sintilatörünün Geant4 tanımlaması.	53
EK 2. Dairesel Kesikli Sintilatör Geometrisinin GEANT4 Kodu.....	54
EK 3. Işık Klavuzunun GEANT4 Materyal Tanımlaması Kodu.....	55
EK 4. Işık klavuzunun GEANT4 geometrisinin tanımlaması	56
EK 5. Python data analiz kodu.	57
ÖZGEÇMİŞ	58

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Kozmik radyasyon duşu.....	3
Şekil 2.2: Yüksekliğe göre atmosferdeki kozmik ışınların dağılımı [1].	4
Şekil 2.3: Pozitif müonların bakır içerisindeki $\beta\gamma=p/Mc$ fonksiyonuna bağlı durdurma gücü. Katı eğriler toplam durdurma gücünü gösterir [1].	6
Şekil 2.4: Bir sintilasyon detektörünün temel elemanlarını gösteren basit çizim [3].	7
Şekil 2.5: Floresans radyasyonun üstel bozunma eğrisi. Genellikle çıkış zamanı bozunma zamanından daha hızlıdır [3].	8
Şekil 2.6: Sintilasyon ışığının hızlı ve yavaş bileşenlerini göstermektedir. Kesiksiz çizgi toplam ışık bozunma eğrisini temsil etmektedir [3].	9
Şekil 2.7: Bir organik sintilatörün enerji seviyeleri diyagramı [3].	10
Şekil 2.8: Foto çoğaltıcı tüpün şematik gösterimi [7].	15
Şekil 2.9: R7600M4 PMT için voltaj devre örneği.....	15
Şekil 2.10: PMT çıkış sinyali ve onun sinyal yükseklik dağılımı [9].	18
Şekil 2.11: sinyal yüksekliği dağılımının diferansiyel ve integral gösterimi [9].	19
Şekil 2.12: GEANT4 en üst düzey kategori şeması [10].	20
Şekil 2.13: GEANT4 kodunda kullanılan OpenGL görüntüleştirme aygıtı (üstte), ROOT analiz programı (altta) örnekleri.	23
Şekil 3.1: FSC istasyon pozisyonlarının şematik gösterimleri (üste), üç FSC istasyonunun ışın demeti üzerindeki yerleşimleri (altta) [20].	25
Şekil 3.2: Işık klavuzu ve sintilatörün boyutları.	26
Şekil 3.3: a) EJ-212'nin emisyon spektrumu [21] b) PMMA'nın optik geçirgenliği c) XP2008 PMT'nin fotokatodunun hassasiyet spektrumu [21].	27
Şekil 3.4: Eliptik ve dairesel kesik bulunan detektörler ve boyutları.....	28
Şekil 3.5: Müon teleskop sistemi ve data alım noktalarının şematik gösterimi.	28
Şekil 3.6: a) Dairesel kesikli detektör için kurulan teleskop sisteminin şematik görüntüsü. b) Detektör üzerinde incelenen noktaların şematik görüntüsü.....	29

Şekil 3.7: Kozmik ışın teleskobu kurulum resmi.....	29
Şekil 3.8: Solda CAEN N472 HV ünitesi [23]. Sağda Agilent Technologies DSO9254A osiloskop.....	30
Şekil 3.9: PMT sinyal görüntüleri.....	30
Şekil 3.10: Simülasyon sonucunda elde edilen EJ-212 emisyon spektrumu.....	32
Şekil 3.11: Simülasyonda oluşturulmuş üzerinde dairesel (solda) ve eliptik (sağda) kesik bulunan FSC detektörleri.	32
Şekil 4.1: Üzerinde eliptik kesik bulunan FSC detektöründen pozisyonlara göre alınan datanın yük dağılımları.	35
Şekil 4.2: Üzerinde eliptik kesik bulunan FSC detektörü için yapılan GEANT4 simülasyonu sonucunda elde edilen yük dağılımları.	36
Şekil 4.3: Eliptik kesik bulunan FSC detektörünün üzerinde data alınan pozisyonlara göre yapılan simülasyon ile karşılaştırılması.	38
Şekil 4.4: 4.778 GeV enerjili kozmik müonun üzerinde eliptik kesik bulunan FSC detektörünün 3. pozisyonundan geçerken oluşturduğu optik fotonlar.....	39
Şekil 4.5: Dairesel kesikli FSC detektörünün pozisyonlara göre yük dağılımları.....	40
Şekil 4.6: Dairesel kesikli FSC detektörünün yapılan simülasyonu sonucunda oluşturulan pozisyonlara göre yük dağılımları.....	41
Şekil 4.7: Dairesel kesikli FSC detektörünün pozisyonlara göre data ve simülasyon yük dağılımlarının karşılaştırılması.....	42
Şekil 4.8: Üzerinde kesik bulunmayan FSC detektörünün eliptik kesikli FSC detektörünün data alma pozisyonlarına göre yük dağılımları.....	43
Şekil 4.9: Üzerinde kesik bulunmayan FSC detektörü ile eliptik kesikli detektörün pozisyonlara göre yük dağılımlarının karşılaştırılması.....	44
Şekil 4.10: Üzerinde kesik bulunmayan FSC detektörünün dairesel kesikli FSC detektörünün data alma pozisyonlarına göre yük dağılımları.....	45
Şekil 4.11: Üzerinde kesik bulunmayan FSC detektörü ile dairesel kesikli detektörün pozisyonlara göre yük dağılımlarının karşılaştırılması.....	47
Şekil 5.1: Eliptik kesikli FSC detektörünün data sonuçlarının üzerinde kesik bulunan ve kesik bulunmayan simülasyonları ile karşılaştırılması.....	48
Şekil 5.2: Dairesel kesikli FSC detektörünün data sonuçlarının üzerinde kesik bulunan ve kesik bulunmayan simülasyonları ile karşılaştırılması.....	49

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1: Eljen EJ-212 sintilatörün teknik özellikleri [21].....	26
--	----



SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
A	: Atomik Kütle
C₁₀H₈	: Naphthalene
C₁₄H₁₀	: Anthracene
C₁₄H₁₂	: Trans-Stilbene
C₁₅H₁₁NO	: PPO
C₁₈H₂₄	: p-Terphenyl
C₂₀H₂₄N₂O	: PBD
C₂₄H₁₆N₂O₂	: POPOP
Z	: Atom Numarası
μ	: Micro

Kısaltmalar	Açıklama
CMS	: Kompakt Müon Selenoid
CSV	: Virgülle Ayrılmış Data
DAQ	: Data Toplama
FSC	: İleri Bölge Duş Sayacı
GEANT	: Geometri ve İz Takibi Simülasyon Programı
LHC	: Büyük Hadron Çarpıştırıcısı
MC	: Monte Carlo
MIP	: Minimum İyonize Parçacık
PMT	: Foto Çoğaltıcı Tüp
PYTHON	: Nesne Yönelimli Modüler Programlama Dili
QE	: Kuantum Etkinliği
ROOT	: İstatistiksel Grafik Paketi

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

PLASTİK SİNTİLATÖRLER ile RADYASYON ÖLÇÜMÜ ve GEANT ile BENZETİM ÇALIŞMALARI

Berkan KAYNAK

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. Suat ÖZKORUCUKLU

Radyasyon madde ile etkileşime girdiğinde (yükü parçacıklar direkt olarak, nötr parçacıklar ürettiği ikincil parçacıklar), enerjisinin bir kısmını, malzemenin moleküllerinin iyonlaşması veya uyarımında kaybeder. Birçok radyasyon deteksiyon veya ölçüm enstrümanının temeli bu iyonlaşma veya uyarılma miktarının ölçülmesine dayanır. Bu radyasyon tespit cihazlarını dozimetreler, iz detektörleri ve sayaçlar olmak üzere üç temel gruba ayırabiliriz. Özellikle sintilasyon sayaçları, spektrometre, parçacık ayırıcı, zamanlama cihazı ve parçacık seçici olarak çok yönlü ve sıklıkla kullanılan detektörlerdir.

Bu tez çalışmasında, CMS-HCAL detektöründe ileriye bölge duş sayaçları (FSC) olarak kullanılan plastik sintilatörlerin, ölçüm ve simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Bu sayıcılar foto çoğaltıcı tüpleri (PMT) tarafından okunmaktadır ve farklı geometrilere sahiptir. Bu nedenle, plastik sintilatörlerdeki geometrik kesimlerin etkisini kozmik müonları kullanarak araştırdık ve ölçüm sonuçlarını GEANT simülasyonu ile karşılaştırdık.

Haziran 2018, 71 sayfa.

Anahtar kelimeler: Sintilatör, Foto Çoğaltıcı, FSC, GEANT4, Kozmik Müonlar

SUMMARY

M.Sc. THESIS

RADIATION MEASUREMENT with PLASTIC SCINTILLATORS and SIMULATION STUDIES with GEANT

Berkan KAYNAK

İstanbul University

Institute of Graduate Studies in Science and Engineering

Department of Physics

Supervisor : Prof. Dr. Suat ÖZKORUCUKLU

When radiation interacts with matter (a charged particles directly, a neutral particle through secondary particles it produces), it dissipates some of its energy in the ionization or excitation of molecules of the material. Measurement of amount of the ionization or the excitation is the basis of most of the major radiation detection and measurement instruments. We can classify these radiation detection instruments into three basic groups; dosimeters, tracking instruments and counters. Especially the scintillator counters are the most versatile and used detectors as spectrometer, particle discriminator, timing device and particle selector. For this reason, we studied the plastic scintillator counters as a particle detector.

In this thesis, both measurement and simulation studies carried out for plastic scintillators used for particle detection in CMS-HCAL detector called as forward shower counters (FSC). There are three FSC counters installed with different geometries in the beam line in CMS-HCAL detector. These counters are read out by photomultiplier tubes (PMT) and have different geometries. Therefore we had studied the effect of geometrical cuts on the plastic scintillators using cosmic muons as a source and compared the measurement results with GEANT simulations.

June 2018, 71 pages.

Keywords: Scintillators, Photo Multiplier Tubes (PMT), FSC, GEANT4, Cosmic Muons



1. GİRİŞ

Bu tez çalışmasında, farklı geometrik kesitlere sahip plastik sintilatörler ile radyasyon ölçümü yapılmış ve GEANT simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Plastik sintilatörler, nükleer fizik ve yüksek enerji fiziği deneylerinde, tıbbi görüntülemede ve endüstride sıklıkla kullanılan çok yönlü parçacık detektörlerinden biridir. Yüklü bir parçacık sintilatör malzemeleri içerisinde geçerken, malzemenin atomlarında veya moleküllerinde iyonizasyon ve uyarılma oluşturlar. Bunun sonucu olarak bir ışın meydana gelir ve buna sintilasyon denir. Sintilasyon ışınının algılanması için genellikle fotoçoğaltıcılar kullanılır ve bunlar sintilasyon ışınını çoğaltarak elektronik sinyallere çevirirler. Sintilatörler katı, sıvı veya gaz halindeki sintilasyon malzemelerinden üretilirler ve özellikle plastik sintilatörler sağlamlıkları, kolay şekillendirilebilir olmaları ve görece uygun fiyatlarından dolayı tercih edilmektedirler.

Bu tez çalışmalarına öncelikle İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Yüksek Enerji ve Plazma Fiziği Anabilim dalı bünyesinde kurulmuş bulunan laboratuvarında sintilatörler ve fotoçoğaltıcılar üzerine ön çalışmalar ile başlanmıştır. Bu laboratuvarında bulunan farklı boyutlardaki sintilatörler, fotoçoğaltıcılar ile birleştirilerek sintilatör sayıcılar hazırlanmıştır. Fotoçoğaltıcılar için voltaj bölücüler tasarlanmış ve analog sinyallerin okunması için bilgisayar destekli Data Acquisition (DAQ) kartlar kullanılmıştır ve bunlar için LabView ile yazılım hazırlanmıştır. Data analizi için Python ve ROOT kullanılmıştır. Ayrıca, hazırlanan sintilatör sayaçlarının GEANT ile simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Ön çalışmalar tamamlandıktan sonra, Büyük Hadron Çarpıştırıcısı “Large Hadron Collider” (LHC)’nin genel amaçlı büyük detektörlerinden biri olan Kompakt Müon Selenoid “Compact Muon Solenoid” (CMS) detektörünün ışın hattı üzerine yerleştirilmiş İleri Bölge Duş Sayaçları “Forward Shower Counters” (FSC)’in plastik sintilatörleri üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Bu plastik sintilatör sayaçlardan kozmik müonlar ile deneyler yapılmış, veri alınarak yapılan GEANT simülasyonları ile karşılaştırılmıştır.

Genel kısımlar olan ikinci bölümde öncelikle deneysel çalışmalarda radyasyon kaynağı olarak kullanılan kozmik ışınlar ve özellikleri, enerji dağılımları ve madde ile etkileşmesinden bahsedilmiştir. Devamında, genel olarak sintilatörlerden bahsedilmiş, sintilatör çeşitleri ve çalışma prensipleri incelenerek, plastik sintilatörler hakkında detaylar verilmiştir. Bu bölümde

sintilatör sayıcıların okunmasında kullanılan foto çoğaltıcılar ve tipleri, çalışma prensipleri ve voltaj bölücüler üzerine bilgiler verilmiştir.

Bölümün sonunda ise benzetim çalışmalarının yapıldığı GEANT'ın tanıtımı yapılmış, genel yapısı ve kullanılan sınıflardan bahsedilmiştir.

Malzeme ve Yöntem bölümünde FSC sayaçlarında kullanılan plastik sintilatörlerin geometri ve malzeme bilgileri, kullanılan PMT bilgileri detaylı olarak verilmiştir. Bunun yanı sıra FSC sayaçlarının okunması için kullanılan cihazlar ve hazırlanan deneysel düzenek tasarlanmıştır. Bu bölümde son olarak ise FSC sintilatörleri için yapılan GEANT simülasyon çalışmalarından bahsedilmiştir.

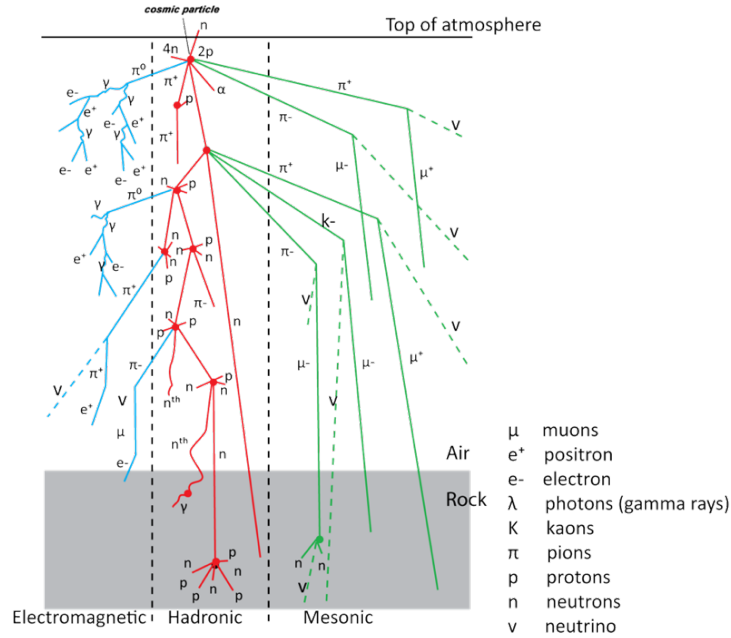
Bulguların yer aldığı dördüncü bölümde kozmik müonlar ile yapılan deneysel çalışmalar detaylı olarak verilmiştir. İlk önce, üzerinde eliptik kesitler bulunan FSC sintilatör sayaçları kullanarak hazırlanan müon teleskop sistemi tanıtılmış ve yapılan ölçümler verilmiştir. Daha sonra üzerinde dairesel kesitler bulunan FSC sintilatör sayaçlar kullanılarak hazırlanan deneysel düzenek tanıtılmış ve ölçüm sonuçları verilmiştir. Son olarak ise üzerinde hiç kesik bulunmayan FSC sintilatörleri için aynı ölçümler yapılarak sonuçlar verilmiştir. Bu bölümde son olarak üç farklı geometriye sahip FSC sintilatörleri için simülasyon çalışmalarından elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Tartışma ve sonuçlar kısmında ise elde edilen veriler karşılaştırılmış, kesiksiz ve farklı kesiklere sahip sintilatörlerde elde edilen sonuçlar tablolar verilerek karşılaştırılmıştır.

2. GENEL KISIMLAR

2.1. KOZMİK IŞINLAR

Dünya sürekli güneş sistemi ve dışından gelen yüksek enerjili parçacıklarla bombardıman edilmektedir. Bu parçacıklar (birincil) genelde stabildir ancak dünya atmosferine girdiklerinde, atmosferdeki atom veya moleküller ile etkileşime girerler ve ikincil parçacıklar üretirler. Genelde yüksek enerjili protonlardan oluşan birincil parçacıklar atmosfere girdiğinde atmosferdeki etkileşimler sonucunda çoğunlukla pilyonlardan oluşan ikincil parçacıklar üretirler. Oluşan bu radyasyona, kozmik (radyasyon) duş adı verilir ve Şekil 2.1 de şematik olarak gösterimi verilmiştir. Pilyonlar kısa ömürlü parçacıklardır ve genellikle dünyaya ulaşmadan bozunurlar. Yüklü olan pilyonlar yüklü müonlara, nötr olanlar ise gamalara bozunurlar. Bu oluşan parçacıkların çoğu enerjilerini atmosfer içerisindeki etkileşimlerde kaybederler. Bununla birlikte, oluşan müonlardan bazıları dünyaya ulaşmak için yeterli enerjiye sahiptir ve bu duşlarda üretilen diğer parçacıklardan daha uzun bir ömre (2.2 μ s) sahip olduklarından deniz seviyesine kadar ulaşabilirler. Bu sebepten dolayı müonlar deniz seviyesinde en yaygın olarak görülen kozmik parçacıklardır.

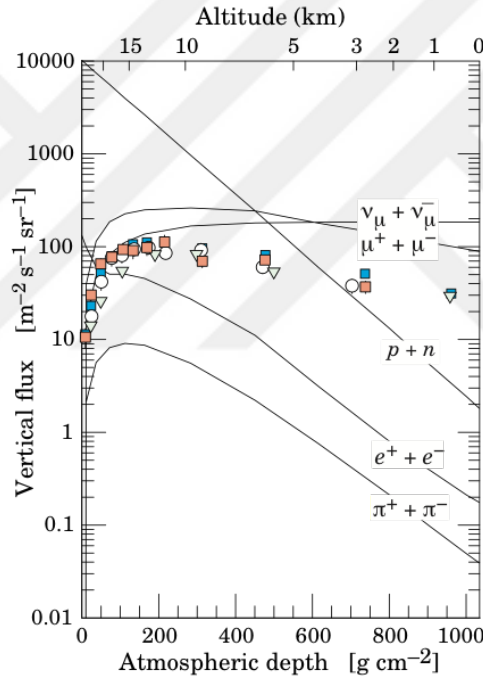


Şekil 2.1: Kozmik radyasyon duşu.

Müonlar dünyanın yüzeyine geniş bir açıda ve enerjide ulaşırlar. Bu geniş spektrum parçacığının nasıl üretildiği, atmosferden geçerken enerji kaybının nasıl olduğu gibi birçok faktöre bağlıdır.

Ayrıca yeryüzü üzerindeki fiziksel konum (dünyanın manyetik alanından dolayı) ve kozmik ışın spektrumunu değiştirebilen güneş aktivitelerine de bağlıdır. Kozmik ışınların yüksekliğe göre dağılımı Şekil 2.2 de verilmiştir.

Müonların enerji ve açı dağılımlarını ölçmek adına birçok deney yapılmıştır. Bu deneyler sonucunda edinilen bilgiler, 1 GeV enerjinin altında gelen kozmik müonların dağılımı neredeyse düz olmasına rağmen 10 GeV üzerinde gelen müonlar için keskin bir düşüşün olduğunu ve yer yüzüne ulaşan müonların ortalama enerjilerinin yaklaşık 4 GeV olduğunu göstermiştir. Ayrıca deniz seviyesinde yatay olarak konumlandırılmış detektörler için müon akısı dakikada cm^2 başına 1 olduğu tespit edilmiştir [1].



Şekil 2.2: Yüksekliğe göre atmosferdeki kozmik ışınların dağılımı [1].

Kozmik müonların ölçümlerinde birçok farklı detektör kullanılmaktadır, ancak en yaygın olarak kullanılanlar ise sintilatör tabanlı sintilasyon detektörlerdir.

2.2. PARÇACIK MADDE ETKİLEŞMESİ

Yüklü parçacıklar madde içerisinde yol alırken maddenin bileşenleri ile etkileşime girerler. Bu etkileşimler sırasında madde içerisinde yol alan parçacık enerji kaybedeceği gibi madde de uyarılır veya iyonize olur. Yüklü parçacıklar madde içinde geçerken atomik elektronlar ile

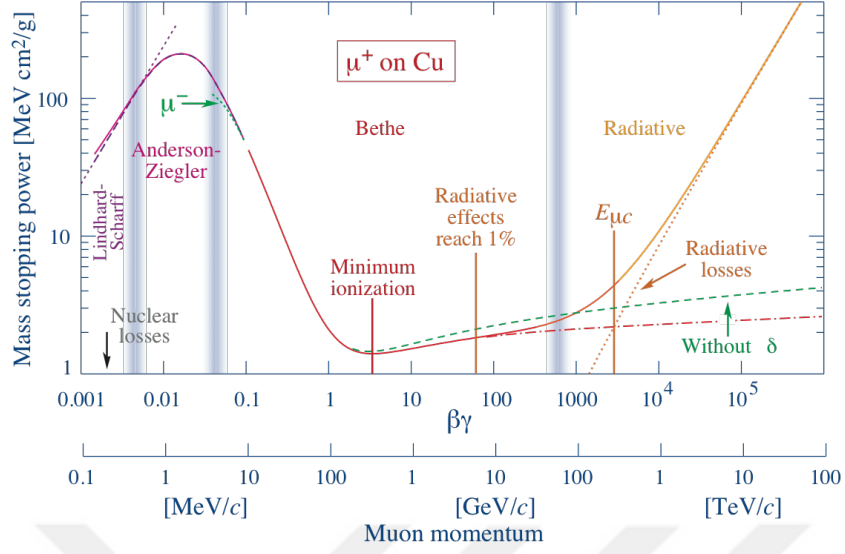
etkileşerek enerji kaybederken bir yandan da atom çekirdeği ile elastik çarpışmalar yaparak yönleri değiştirirler. Atomik elektronlarla elastik olmayan etkileşimle iki gruba ayrılabilir. Bunlar sadece uyarılmanın meydana geldiği yumuşak çarpışmalar ve iyonizasyon meydana getirebilecek kadar enerjinin aktarıldığı sert çarpışmalardır. Bazı sert çarpışmalarda aktarılan enerji, birincil iyonlaşmanın ardından atomdan çıkarılan elektronun tekrar ikincil iyonlaşmaya sebep olacak kadar fazla olabilmektedir. Belirli bir aralıkta enerji kaybının oranı veya durdurma gücü, $\text{MeVg}^{-1}\text{cm}^2$ cinsinden Bethe-Bloch denklemi ile verilir (2.1).

$$-\frac{dE}{dx} = KZ^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left(\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right) \quad (2.1)$$

Bu denklemde:

- $K=4\pi N_A r_e^2 m_e c^2$,
- z gelen parçacığın yükü,
- Z absorbe edici malzemenin atom numarası,
- A absorbe edici malzemenin atomik kütlesi,
- $\beta=v/c$ ışık hızı c 'nin katı olarak parçacığın hızı,
- m_e elektronun durgun kütlesi,
- c ışık hızı,
- $\gamma=1/\sqrt{1-\beta^2}$ Lorentz faktörü,
- $\delta(\beta\gamma)$ iyonizasyon enerji kaybına yoğunluk etkisi düzeltmesidir.

Bethe-Bloch formülü elektron hariç, proton, alfa parçacıkları ve atomik iyonlar gibi yüklü parçacıkların madde içerisinde katettiği mesafe başına enerji kaybını veya alternatif olarak belirli bir enerji aralığında malzemenin durdurma gücünü ifade etmektedir. Bakır içerisinde geçen müonlar için hesaplanan fonksiyon şekil 2.3'te Bethe bölgesi olarak verilmiştir. Sadece Bethe bölgesi β fonksiyonunun yalnız olduğu bölgedir. Kütle bağımlılığı diğer bölgelerde daha karmaşıktır. Göreceli parçacıkların çoğu bu bölgede minimum değere yakın enerji kaybı oranına sahiptir ve bunlar minimum iyonize edici “Minimum Ionizing Particles” (MIP) parçacıklar olarak adlandırılır [2].



Şekil 2.3: Pozitif müonların bakır içerisindeki $\beta\gamma=p/Mc$ fonksiyonuna bağlı durdurma gücü. Katı eğriler toplam durdurma gücünü gösterir [1].

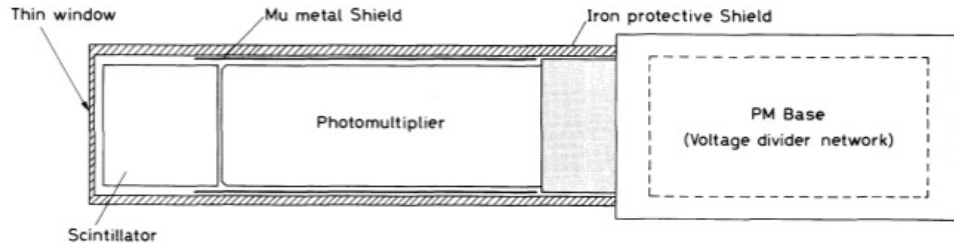
2.3. SİNTİLYASYON DETEKTÖRLERİ

Sintilyasyon detektörleri günümüzde parçacık ve nükleer fizik uygulamalarında en çok kullanılan detektörlerden biridir. Yüklü bir parçacığın bazı malzemelere çapması sonucu küçük bir ışık parlaması oluşur, bu parıldamaya sintilyasyon denir. Sintilyasyon oluşturan malzemeler ise sintilatör olarak adlandırılır. Oluşan bu sintilyasyon ışınımı çeşitli yükselteç cihazlar ile çoğaltılarak, bir analog elektronik sinyale dönüştürülürler. Bu cihazlardan biride Foto Çoğaltıcılar “Photo Multiplier Tube” (PMT) ve tek bir sintilyasyon fotonu yaklaşık milyon kez çoğaltarak ölçülebilir bir analog sinyale dönüştürürler. Bu analog sinyaller sintilatör içinden geçen parçacık ile ilgili bilgiler taşımaktadır ve direkt olarak kullanılırlar veya çeşitli elektronik devreler kullanılarak dijital sinyallere dönüştürülerek sonradan analiz etmek üzere kayıt altına alınırlar. Radyasyon tespiti için sintilatörlerin kullanımının ilk örneği 1903’te Crookes tarafından icat edilen “Spinthariscopes”tur. Bu cihaz, yüklü bir parçacık çarptığında zayıf sintilyasyon oluşturan ZnS ekranına, karanlık bir odada mikroskop ile bakılarak parçacıkların tespitini sağlamıştır. Gaiger ve Marsden’in ünlü saçılma deneyinde kullanılmasına rağmen pek bilinmemektedir ve gazlı iyonizasyon cihazlarının icadı ile, optik sintilyasyon cihazı hızlı bir şekilde kullanım dışı bırakılmıştır. Ancak, 1944 yılında Curran ve Baker insan gözüyle bakmak yerine yeni geliştirilen fotoçoğaltıcı tüpleri kullanmaya başlamıştır ve zayıf sintilyasyon detektörleri bu geliştirmeden sonra verimlilik ve güvenilirlik bakımından en az gaz iyonizasyon

araçları ile yarışabilir hale gelmiştir ve elektronik sintilasyon detektörü bu şekilde doğmuştur. Yeni gelişmeler ve geliştirmeler hızla devam etmiş ve böylece 1950'lerin ortalarında sintilasyon detektörleri en güvenilir ve kullanışlı detektörler haline gelmişlerdir ve günümüzde de hala geçerlidir. Bu bölümde, mevcut malzemelerin, teknikleri ve yanı sıra prensipleri incelenecektir [3].

2.3.1. Sintilasyon Detektörlerinin Genel Karakteristikleri

Bir sintilasyon detektörünün temel elemanları Şekil 2.4 de verilmiştir. Genel olarak, doğrudan veya bir ışık klavuzu vasıtası ile foto çoğaltıcıya optik olarak bağlanan bir sintilasyon malzemedir oluşmaktadır. Radyasyon sintilatörden geçtikçe, sintilatörün atom ve molekülleri uyarılır dolayısıyla da sintilatörden ışık yayınlanır. Bu ışık, elektron çoğaltıcı bir sistem olan ve zayıf bir foto elektron akımı üreten fotoçoğaltıcı tüpe iletilir. Elde edilen akım daha sonra bir elektronik sistem tarafından analog sinyale dönüştürülür.



Şekil 2.4: Bir sintilasyon detektörünün temel elemanlarını gösteren basit çizim [3].

Genel olarak, sintilatör sinyali çeşitli bilgiler sağlayabilmektedir. Bunlar:

Enerji Hassasiyeti. Belli bir enerjinin üzerinde çoğu sintilatör lineer bir davranış göstermektedir. Yani bir sintilatörün ışık çıkışı uyarılma enerjisiyle doğru orantılıdır. Aynı zamanda foto çoğaltıcı da lineer bir cihaz olduğundan çıkış elektrik sinyalinin genliği de bu enerji ile orantılıdır. Bu da sintilatörü ideal bir enerji spektrometresi olarak kullanmamıza olanak vermektedir.

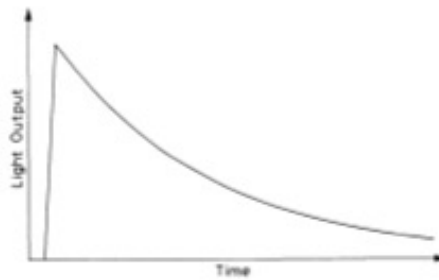
Hızlı Zaman Cevabı. Sintilasyon detektörleri, tepki ve geri kazanım sürelerinin diğer detektör tiplerine göre kısa olmaları bakımından hızlı cihazlar olarak sayılmaktadırlar. Bu hızlı yanıt özelliği zamanlama bilgisinin yani iki olay arasındaki zaman farkının daha hassas bir biçimde ölçülmesine olanak vermektedir.

Sinyal Şekli Ayırt Etme. Bazı sintilatörlerde, yayılan ışık sinyallerini analiz ederek farklı tipte parçacıklar arasında ayırım yapmak mümkündür. Farklı iyonlaştırma gücüne sahip olan farklı parçacıklar tarafından sintilatördeki atomların uyarılmasının floresans mekanizmasının farklılığından kaynaklanır [3].

Sintilatör malzemeler lüminesans özelliği sergilerler. Lüminesans malzemeler, ışık, ısı ve radyasyon gibi belli enerji formlarına maruz kaldıklarında bu enerjiyi emer ve yeniden görünür ışık olarak yayınlarlar. Eğer bu yeniden yayınlama maruz kaldığı enerjinin emiliminden hemen sonra veya daha kesinlikle 10^{-8} s (10^{-8} s atomik geçişlerin yaklaşık olarak süresi) içerisinde gerçekleşirse bu süreç floresans olarak adlandırılır. Bununla birlikte, eğer uyarılmış durumun yarı dengeliliğinden (metastable) dolayı yeniden yayınlanma ertelenirse bu süreç fosforesans olarak adlandırılır. Bu gibi durumlarda, emilim ve yeniden yayınlanma arasındaki gecikme süresi malzemeye bağlı olarak birkaç mikro saniyeden birkaç saate kadar uzayabilir. [3]

İlk yaklaşım olarak, yeniden yayınlanma sürecinin zaman evrimi N , t zamanda yayınlanan fotonların sayısı, N_0 yayınlanan fotonların toplam sayısı ve τ_d bozunma sabiti olmak üzere denklem 2.2 de verildiği gibi üstel bozunma olarak yazılabilir. Şekil 2.5 de ise bozunma eğrisi görülmektedir.

$$N = \frac{N_0}{\tau_d} e^{-t/\tau_d} \quad (2.2)$$

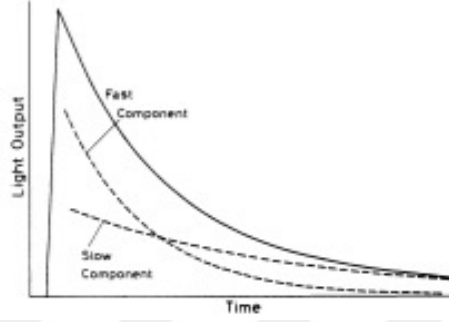


Şekil 2.5: Floresans radyasyonun üstel bozunma eğrisi. Genellikle çıkış zamanı bozunma zamanından daha hızlıdır [3].

Çoğu malzemede, oluşan sinyalin sıfırdan maksimum değere ulaşmasına kadar geçen yükselme zamanı (rise time), bozunma süresine göre çok daha kısadır. Bu basit temsil çoğu amaç için yeterli olmakla birlikte bazı malzemeler aslında daha karmaşık bir bozunma sergilemektedir. Bu durumlarda daha doğru bir tanımlama iki bileşenli üstel (exponential) olarak verilebilir.

$$N = A e^{-t/\tau_f} + B e^{-t/\tau_s} \quad (2.3)$$

Burada τ_f ve τ_s bozunma sabitleridir. Çoğu sintilatör için, bir bozunma bileşeni diğerinden daha hızlıdır ve böylece hızlı τ_f ve yavaş τ_s bileşenler olarak adlandırılırlar. Bunların bağıl büyüklükleri, A ve B, genellikle baskın olan hızlı bileşen olsa da malzemeden malzemeye değişir. Şekil 2.6 bu bileşenler arasındaki ilişki görülmektedir.



Şekil 2.6: Sintilasyon ışığının hızlı ve yavaş bileşenlerini göstermektedir. Kesiksiz çizgi toplam ışık bozunma eğrisini temsil etmektedir [3].

Birçok sintilasyon yapan malzeme vardır. Fakat, hepsi detektör olarak uygun değildir W. Leo'ya göre iyi bir sintilatör aşağıdaki gereksinimleri karşılamalıdır:

- Uyarılma enerjisini floresans radyasyona çevirmede yüksek verimlilik
- Oluşturduğu floresans ışığın iletimi için şeffaflık
- Mevcut foto çoğaltıcıların spektral cevabı ile tutarlı bir spektral aralıktaki emisyon
- Kısa bir bozunma sabiti, τ .

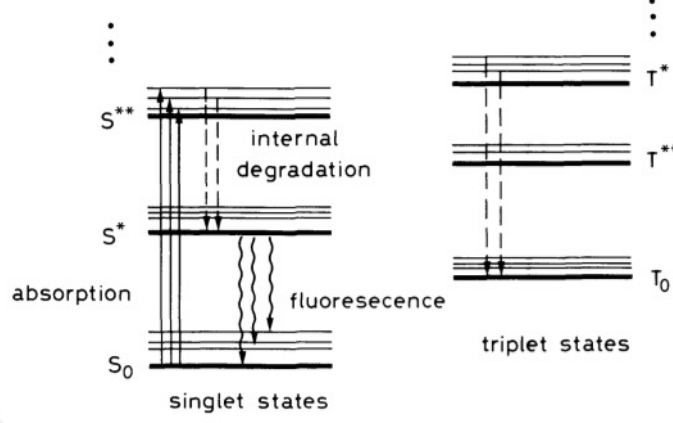
Günümüzde genelde altı tip sintilatör malzeme kullanılmaktadır. Bunlar organik kristaller, organik sıvılar, plastikler, inorganik kristaller, gazlar ve camlardır [3].

2.3.2. Organik Sintilatörler

Organik sintilatörler, bağlı veya yoğunlaşmış benzen halka yapıları içeren aromatik hidrokarbon bileşiklerdir. En ayırt edici özellikleri birkaç nano saniye veya daha kısa sürede çok hızlı bir bozunma süreleri olmasıdır.

Bu bileşiklerdeki sintilasyon ışığı, moleküllerin serbest valans elektronları tarafından yapılan geçişlerden ortaya çıkmaktadır. Bu yer değiştirmiş elektronlar, moleküldeki herhangi bir atomla ilişkili değildir ve π moleküler orbitaller olarak bilinen orbitalleri işgal ederler. Bu orbitaller

için tipik enerji diyagramı şekil 2.7’te verilmiştir ve burada spin tekli durumları ve spin üçlü durumları ayrı gösterilmektedir. S_0 ile gösterilen taban durumu bir tekli durumdur.



Şekil 2.7: Bir organik sintilatörün enerji seviyeleri diyagramı [3].

Bu seviyenin üstünde uyarılmış tekli durumları (S^* , S^{**} , ...) ve en düşük üçlü durum (T_0) ve onun uyarılmış durumları (T^* , T^{**} , ...) gösterilmektedir. Ayrıca her bir elektron seviyesi ile ilişkili ve molekülde uyarılmış titreşim modlarına karşılık olan ince yapılar vardır. Elektron seviyeleri arasındaki enerji aralığı birkaç eV mertebesinde iken, titreşim seviyeleri arasındaki enerji aralığı 10-100 eV mertebesinde dir.

Geçen parçacıktan dolayı kaynaklanan iyonlaşma enerjisi, hem elektroni hem de titreşim seviyelerini uyarır (kesiksiz çizgiler). Tekli uyarılmalar genellikle radyasyon emisyonu olmaksızın hemen S^* durumuna bozunur ($\leq 10\text{ps}$). Bu süreç genellikle içsel bozunma olarak bilinmektedir. Genellikle S^* seviyesinden taban durumunun titreşimsel durumlarından birine bir bozunma yapma olasılığı yüksektir. Bu bozunmalar Şekil 2.7’te gösterilen dalgalı çizgilerdir ve birkaç nanosaniye içerisinde gerçekleşirler. Bu olay (2.3) denkleminin hızlı bozunma bileşenine karşılık gelen normal floresans olayıdır. S^* durumundan titreşimsel taban durumu S_0 durumuna bozunma sırasında yayınlanan radyasyonun enerjisinin $S_0 \rightarrow S^*$ geçişi için gerekli olan enerjiden daha az olması bize sintilatörün kendi radyasyonuna olan şeffaflığını açıklamaktadır [3].

Üçlü uyarılmış durumlar için, sistemi en düşük üçlü duruma getiren benzer bir iç bozunma mekanizması mevcuttur. T_0 seviyesinden S_0 seviyesine geçişler mümkün olsa da multipol seçim kuralları tarafından büyük ölçüde yasaklanmıştır. Bunun yerine, genellikle T_0 durumu başka bir uyarılmış T_0 molekülü ile etkileşerek ve moleküllerinden birini S^* durumuna bırakmak sureti

ile bozunur. Daha sonra radyasyon aşağıda gösterildiği gibi S^* durumu tarafından yayınlanır. [3]



Bu ışık uyarılan moleküller arasındaki etkileşmenin gecikme süresi karakteristiğini takip etmektedir ve sintilasyon ışığının yavaş veya gecikmeli bileşeni olarak adlandırılır. Bu yavaş bileşenin toplam ışık çıktısına katkısı sadece bazı organik malzemeler için önemlidir.

Bu malzemelerdeki lüminesansın molekül doğası gereği organikler sintilasyon özelliklerini kaybetmeden birçok fiziksel formda kullanılabilirler. Detektör olarak, saf kristaller şeklinde ve bir veya daha fazla bileşiğin sıvı ve katı çözeltilerdeki karışımları olarak kullanılmaktadırlar. Bu türlerin kısa açıklamaları aşağıda verilecektir [3].

2.3.2.1. Organik Kristaller

Kullanılan en yaygın organik kristaller anthracene ($C_{14}H_{10}$), trans-stilbene ($C_{14}H_{12}$) ve naphthalene ($C_{10}H_8$) dir. Yaklaşık 30ns'lik bozunma süresine sahip olan anthracene haricinde bu kristaller birkaç nanosaniye mertebesinde hızlı bir zaman cevabına sahiptir. Bununla birlikte, kristal örgüsünün kanallaşma etkisi (Channelling Effect) nedeniyle bunların genlik cevapları yön bağımlıdır. Yani sabit bir radyasyon kaynağı için cevap kristalin yönüne göre değişir. Bu durum düşünüldüğünde kolime edilmemiş bir kaynak ile enerji çözünürlüğü elde etmek zor bir sorun haline gelebilir.

Organik kristaller fiziksel olarak çok dayanıklıdırlar ancak stilbene, anthracene'e göre daha kırılğan ve sıcaklık değişimine göre daha hassastırlar. Anthracene tüm organik sintilatörler arasında en yüksek ışık çıktısına sahiptir ve bu sebeple diğer sintilatörlerin ışık çıktılarının karşılaştırıldığı referans olarak seçilmiştir. Yani diğer sintilatörlerin ışık çıktıları anthracene ışığının yüzdesi olarak verilir [3].

2.3.2.2. Organik Sıvılar

Bu malzemeler, bir organik çözücü içinde bir veya daha fazla organik sintilatörün sıvı çözeltilerinden oluşur. Buradaki ısıldama süreci yukarıda organik sintilatörler için anlatılan mekanizma ile aynı, fakat enerji emilim mekanizmaları farklıdır. Bu çözeltilerde iyonizasyon enerjisi esas olarak çözücü tarafından emilmekte ve daha sonra sintilasyon çözeltilisine

aktarılmaktadır. Çözünen organik sintilatör madde olarak genellikle p-Terphenyl ($C_{18}H_{14}$), PBD ($C_{20}H_{14}N_2O$), PPO ($C_{15}H_{11}NO$) ve POPOP ($C_{24}H_{16}N_2O_2$) kullanılmaktadır. Çözücüler arasında ise en başarılıları xylene, toluene, benzene, phenylcyclohexane, triethylbenzene ve decaline görülmektedir. Yapılan araştırmalar sıvı sintilatörlerin veriminin çözelti neredeyse doygunluğa ulaşmasına rağmen çözünen konsantrasyonunun artmasıyla arttığını göstermektedir. Genelde kullanılan tipik konsantrasyon, çözücü madde litresi başına yaklaşık olarak 3g çözünen organik sintilatör kadardır. Sıvı organik sintilatörlerin tepkisi genellikle 3 ile 4ns arasındaki bozunma süresiyle oldukça hızlıdır. Belirli uygulamalar için verimi arttırmak adına diğer malzemeler ile doldurulabilmeleri bakımından özel avantajları vardır [3].

2.3.2.3. Plastik Sintilatörler

Nükleer ve parçacık fiziğinde, plastik sintilatörler muhtemelen günümüzde kullanılan en yaygın organik sintilatörlerdir. En yaygın olarak kullanılan plastikler Polyvinyltoluene, Polyphenylbenzene ve Polystyrene'dir. Çözünen madde olarak genellikle PBD, p-Terphenyl ve PBO kullanılmaktadır. Çözeltideki konsantrasyonları ise yaklaşık 10g/l civarındadır.

Plastik sintilatörler, yaklaşık 2-3ns arasında bir bozunma sabiti ve yüksek ışık çıkışı sağlamalarıyla son derece hızlı bir sinyal verirler. Bu hızlı bozunmadan dolayı (2.2) denkleminde yapıldığı gibi ışık sinyalinin yükselme zamanı (rise time) göz ardı edilemez. Bengston ve Moszynski'nin makalelerinde [4] gösterildiği gibi en iyi matematiksel açıklama (2.5) denkleminde verildiği gibidir ve bir Gausiyan'ın exponansiyel ile birleşmesi olarak tarif edilebilir.

$$N(t) = N_0 f(\sigma, t) e^{-t/\tau} \quad (2.5)$$

Burada $f(\sigma, t)$, standart sapması σ olan gauss fonksiyonudur.

Plastik sintilatörlerin diğer bir avantajı ise normal yollarla istenilen şeklin verilebilmesidir. Bu özelliği sayesinde büyük tabakalar, bloklar ve silindirlere kadar çok çeşitli boyutlarda ve biçimlerde üretilebilirler. Ayrıca, ışık geçirgenliği ve hız gibi farklı özellikler sunan çeşitli plastik sintilatörler üretilebilmektedir ve nispeten diğer tip sintilatörlere göre ucuzdurlar. Oldukça sağlam olmalarına rağmen plastik sintilatörler aseton ve bazı organik çözücülere karşı hassastırlar. Bununla birlikte saf su ve düşük alkollere göre dayanıklıdır. Ayrıca, plastik

sintilatörlerin genelde çıplak el ile tutulması sakıncalıdır tutan kişinin vücut asitleri sayesinde sintilatör zarar görebilir bu nedenle eldiven ile tutmak önerilmektedir. [3]

2.3.3. İnorganik Kristaller

İnorganik sintilatörler, esas olarak küçük bir aktivatör kirliliğine sahip alkali halindelerdir. Şu ana kadar en çok kullanılan inorganik sintilatör malzeme NaI(Tl) dir. Bu sintilatörde kristalin örgü yapısındaki kirliliği sağlayan Talyumdur. Diğer inorganik sintilatörlere örnek olarak CsI(Tl), CsF₂ ve LiI(Eu) verilebilir.

Genel olarak, inorganik sintilatörler fosforesanstan dolayı organik sintilatörlere göre 2-3 kat daha yavaşlardır. Bu gecikme yaklaşık olarak 500ns kadardır. Bazı inorganik sintilatörlerin neme duyarlı olduğu bilinmektedir. Örneğin en çok kullanılan inorganik sintilatör NaI(Tl), havadaki nemden bile etkilenebilmektedir. Bu yüzden, genelde havası boşaltılmış bir muhafaza içerisinde kullanılmak zorundadırlar.

İnorganik sintilatörlerin en önemli avantajlarından bir tanesi ise bu kristallerin durdurma güçlerinin yüksek olmasıdır. Durdurma güçlerinin fazla olması yoğunluklarının ve atom numaralarının yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Tüm sintilatörler arasında bazı inorganik sintilatörler en yüksek ışık çıkışına sahiptirler bu da iyi bir enerji çözünürlüğü yakalanmasını sağlamaktadır. Bu özellikleri gama ışını ve yüksek enerjili elektron ve pozitronların tespitlerinde kullanılmalarına olanak sağlamaktadır [3].

2.3.4. Gaz Sintilatörler

Gaz sintilatörleri genellikle xenon, helyum gibi soy gazlardan oluşmaktadırlar. Yüksek saflıkta soy gaz içeren ortamlar sintilasyon ölçümü yapmak için kullanışlı ortamlardır. Bu sintilatörlerde ortamdan geçen parçacık veya radyasyon, atomları tek tek uyarır ve 1ns içerisinde uyarılan atomlar taban durumlarına geri dönerler. Bu yüzden sintilasyon tepkileri bir hayli hızlıdır ancak yayınlanan ışığın dalga boyu genellikle ultraviyole bölgesinde olduğundan çoğu foto çoğaltıcının okuma bölgesinde değildir. Gaz sintilatörler kullanılmak isteniyorsa PMT'nin veya diğer foto çoğaltıcıların ultraviyole ışık bölgesine duyarlı olanları seçilmelidir. Diğer bir çözüm ise gaz sintilatörün doldurulduğu muhafazanın çeperlerinin dalga boyu dönüştürücü bir madde ile kaplanmasıyla gaz sintilatörün oluşturduğu ultraviyole ışığı görünür bölgedeki ışığa dönüştürülmesidir [5].

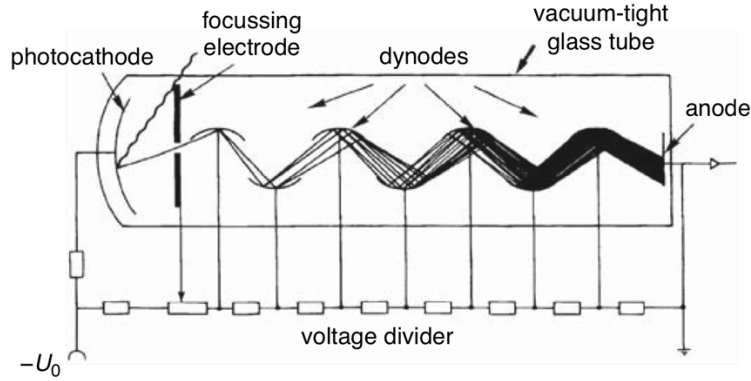
2.3.5. Cam Sintilatörler

Cam sintilatörler olarak genelde seryum ile aktive edilmiş talyum ve bor silikat kullanılmaktadır. Cam detektörler genelde nötron deteksiyonunda kullanılmalarına rağmen gama ve beta radyasyonuna da duyarlıdırlar. Bu sintilatörlerin en önemli özelliklerinden biri hidroflorik asit haricinde tüm organik ve inorganik maddelere karşı dirençli olmalarıdır. Ayrıca bu sintilatörlerin yüksek erime noktalarına sahip olması zorlu çevre koşullarında kullanılmalarına olanak sağlamaktadır. Bu sintilatörlerin cevap zamanı çok yavaş olmamasına karşın ışık verimlilikleri gayet düşüktür [6].

2.4. FOTO ÇOĞALTICILAR

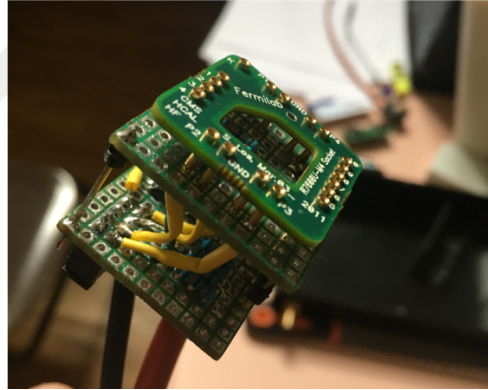
Hızlı ışık sinyallerinin ölçümü için kullanılan en yaygın cihazlardan biri Foto Çoğaltıcı Tüpler “Photomultiplier Tubes” (PMT) dir. PMT’ler ışığı ölçülebilir bir elektrik akımına çeviren cihazlardır. Işık spektrumunda görünür bölge veya ultraviyole bölgeye denk gelen ışık, PMT’nin katoduna çarptığında, buradan foto elektrik etki yoluyla bir elektron serbest bırakır. Fotokatot genelde yarı saydam bir malzemedir ve PMT’nin giriş penceresinin iç yüzeyine çok ince bir yarı iletken konmasıyla oluşturulur. Bu fotokatot malzemelere örnek olarak SbCs, SbKCs verilebilir. Bu tezde çalışılmış olan PMT’nin fotokatot malzemesi SbCs dir.

Çoğu detektörde kullanılan PMT’lerde fotokatoda negatif yüksek voltaj uygulanır. Fotokatottan serbest kalan fotoelektronlar elektrik alan sayesinde ilk dynodun üzerine odaklanılır. PMT’nin anodu genelde toprak potansiyelindedir. Fotokatot ve anot arasındaki voltaj bir sıra direnç kullanılarak arada kalan dynotlara bölüştürülür. Bu genelde voltaj bölücü devre olarak bilinir ve potansiyelin dynotlar üzerine lineer veya belirli oranlarda dağılmasını sağlar. İstanbul Üniversitesi Yüksek Enerji ve Plazma Fiziği Laboratuvarı’nda üretilmiş olan voltaj bölücü devre örneği şekil 2.9’de verilmektedir.



Şekil 2.8: Foto çoğaltıcı tüpün şematik gösterimi [7].

İlk dynodun üzerine düşen fotoelektronlar burada enerjilerinin bir kısmını bırakır ve daha fazla elektron koparırlar uygulanan voltaj farkının sağladığı elektrik alanın etkisiyle hızlanırlar ve diğer dynota çarpıp bu süreci tekrarlarlar. Böylelikle, çoğaltma sürecinin sonunda elektronlar anotta toplanır ve gelen ışık elektrik akımına çevrilmiş olur.



Şekil 2.9: R7600M4 PMT için voltaj devre örneği.

Dynotlar yüksek ikincil elektron emisyonuna sahiptirler. İki dynot arasındaki gerilime göre yaklaşık olarak 3 ile 5 arasında fotoelektron yayınlarlar [8]. Dynot sayısı n ve ikincil emisyon katsayısı g olan bir PMT için çoğaltma katsayısı denklem (2.6) verildiği gibidir.

$$A = g^n \quad (2.6)$$

Çoğaltma katsayısı bulunduktan sonra, bir fotoelektron için anoda ulaşan yük denklem (2.7)'de verildiği gibi hesaplanabilir.

$$Q = q_e \cdot A \quad (2.7)$$

İkincil emisyon katsayısı $g=4$ ve dynot sayısı $n=12$ olan bir PMT için yük yaklaşık olarak 2.7×10^{-12} C olarak hesaplanır. Eğer yük yaklaşık 5 ns içerisinde toplanıyorsa anottaki akım yaklaşık olarak 0.5 mA olarak hesaplanır [7].

PMT'ler sabit modda veya sintilasyon sayımında olduğu gibi belirli aralıklarla gelen ışık altında çalıştırılabilir. Her iki şekilde de katot dynot sisteminin lineer olduğu var sayılırsa, PMT'nin çıkışındaki akım doğrudan gelen fotonların sayısı ile orantılı olacaktır. Ayrıca, PMT yi sintilatöre bağlayarak oluşturulan detektörde, sintilatörden geçen parçacığın bıraktığı enerji, foton sayısı ile orantılı olacağından sadece parçacığın varlığı ile ilgili değil aynı zamanda enerjisi ile ilgili de bilgi elde edilebilmektedir [3].

2.4.1. PMT'lerin Spektral Cevap Karakteristikleri

PMT'nin fotokatodu üzerine gelen fotonun enerjisini fotoelektrona çevirir. Bu dönüşüm yani fotokatoda duyarlılığı gelen fotonun dalga boyu ile değişmektedir. Gelen fotonun dalga boyu ile fotokatot arasındaki bu ilişki spektral cevap karakteristiği olarak adlandırılır ve genellikle radyan duyarlılık ve kuantum verimliliği ile ifade edilir.

Radyan duyarlılık belirli bir dalga boyunda fotokatodun ürettiği foto elektrik akımının, ışınım akısına bölünmesi olarak tanımlanır ve genellikle watt başına mili amper olarak (A/W) ifade edilir. Kuantum verimliliği ise fotokatottan yayılan fotoelektronların sayısının gelen fotonların sayısına bölünmesiyle ifade edilmektedir. Fotokatodun üzerine gelen fotonlar valans bandındaki elektronlara enerji aktarır. Fakat, bu elektronların hepsi fotoelektron olarak yayılamazlar. Bu foto emisyon belirli bir olasılık sürecine göre gerçekleşir. Daha kısa dalga boylu fotonlar daha uzun dalga boylu fotonlara göre daha yüksek enerji taşırlar ve foto emisyon olasılığındaki artışa katkıda bulunurlar. Bu nedenle, belirli bir dalga boyunda hesaplanan kuantum verimliliği radyan duyarlılığın hesaplandığı dalga boyuna göre biraz daha kısadır. Kuantum verimliliği ve radyan duyarlılık arasındaki ilişki denklem (2.8)' de verildiği gibidir [9].

$$QE(\%) \frac{124}{\lambda(\text{nm})} \times \text{radyan duyarlılık (mA/W)} \quad (2.8)$$

2.4.2. Foton Sayımı

Bir PMT'nin üzerine gelen ışık çok düşük hale geldiğinde ve PMT'nin zaman çözünürlüğü (sinyal genişliği) içinde ikiden fazla fotoelektronun yayılmadığı bir duruma ulaştığında, bu ışık

seviyesi tek fotoelektron bölgesi olarak adlandırılır ve foton sayımı bu bölgede gerçekleştirilir. Foton sayımı için önemli bir parametre olan kuantum verimliliği, tek bir fotonun fotokatoda çarpması durumunda fotoelektron emisyonunun olasılığını ifade eder.

Bu tek fotoelektron bölgesinde, foton başına salınan elektron sayısı bir veya sıfırdır ve kuantum verimi, fotokatottan yayılan fotoelektron sayısının, birim zamandaki foton sayısının oranı olarak verilir. Fotokatottan yayılan fotoelektronların ilk dynoda çarpması ve kazanca katkıda bulunma olasılığı, yığın verimliliği olarak adlandırılır. Bazı fotoelektronlar, izlemeleri gereken yörüngeden saptıklarından ve ilk dynode tarafından toplanamadıklarından kazanca katkıda bulunamazlar. Ek olarak, foton sayımı modunda sayılmış PMT çıkış sinyallerinin sayısının gelen fotonların sayısına oranı algılama (detection) verimliliği veya PMT sayma verimliliği olarak adlandırılır ve Foton Sayım Bölgelerindeki Algılama Verimliliği (FSBA) aşağıdaki ilişki ile ifade edilir [9].

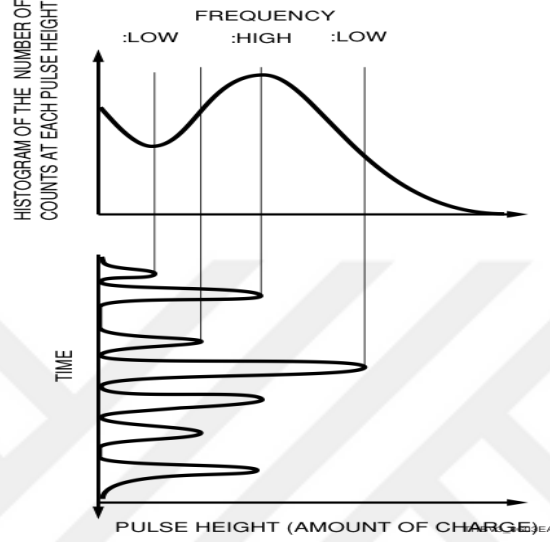
$$\text{FSBA(counting efficiency)} = \left(\frac{N_d}{N_p} \right) = \eta \times \alpha \quad (2.9)$$

Burada N_d sayılmış değer, N_p gelen fotonların sayısı, η fotokatodun kuantum verimliliği ve α dynode'un yığın verimliliğidir.

İlk dynode'dan salınan ikincil elektronların sayısı sabit değildir. Birincil elektronlar başına birkaç ikincil elektron civarındadır ve geniş bir olasılıkla Poisson dağılımı olarak görülür. Birincil elektron başına ortalama elektron sayısı dynode'un ikincil elektron çarpım faktörüne δ karşılık gelir. Benzer şekilde, bu işlem ikinci ve sonraki dynot'larda son elektron demetin anoda ulaşana kadar tekrarlanır. Bu şekilde fotokatotta oluşan fotoelektronların sayısına göre çoğaltılan çıkış sinyali, anotta görülür. Eğer PMT n kademeli dynot yapısına sahipse, fotokatottan yayılan fotoelektronlar, δ^n kata kadar kademeli olarak çoğaltılır ve anotta yeterli miktarda elektron üretilir. Bu işlemde, anotta elde edilen her bir çıkış sinyali, her bir dynode'daki ikincil çoğaltma faktöründeki dalgalanmalar nedeniyle sinyal yüksekliğinde belli bir dağılım gösterir (kademeli çoğaltmaya bağlı istatistiksel dalgalanma). Bu dağılımın nedeni ise dynot pozisyonuna ve uygun yörüngelerinden sapan elektronlara bağlı olarak çoğaltmanın birbirine benzememezliğinden kaynaklanmaktadır [9].

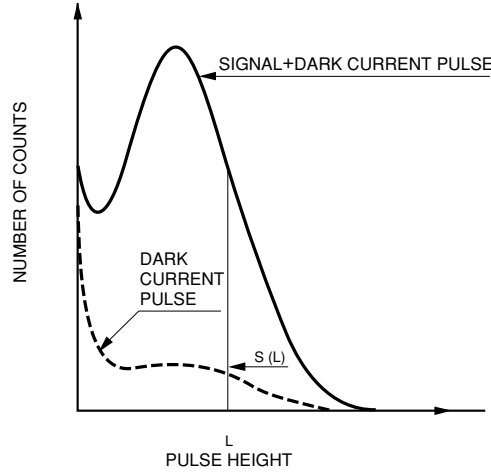
Şekil 2.10, PMT çıkış sinyalinin histogramını göstermektedir. Yatay eksen sinyal yüksekliğini gösterir ve anot çıkış sinyalleri zamanla entegredir. Bu grafik sinyal yüksekliği dağılımı olarak

bilinir. Şekil 2.10 ayrıca bir PMT ile elde edilen sinyal yüksekliği dağılımı ve gerçek çıkış sinyalleri arasındaki ilişkiyi de göstermektedir. Sinyal yüksekliği dağılımı genellikle sintilasyon sayaçlarıyla oluşturulmuş uygulamalarda sıklıkla kullanılan çok kanallı analiz cihazı (MCA) ile alınır [9].



Şekil 2.10: PMT çıkış sinyali ve onun sinyal yükseklik dağılımı [9].

Şekil 2.11 bir PMT ile elde edilen sinyal yüksekliği dağılımı örneğini göstermektedir. PMT'ye hiç ışık düşmese bile çıkış sinyali oluşmaktadır ve bunlar karanlık akım veya gürültü olarak adlandırılır. Kesikli çizgi, gürültü sinyallerinin dağılımını göstermektedir ve düşük sinyal yüksekliği bölgesinde (sol taraf) büyüme eğilimi gösterir. Bu gürültü sinyalleri çoğunlukla fotokatoda ve aynı zamanda dynod'lardaki termal elektron emisyonundan kaynaklanmaktadır. Fotokatottan gelen termal elektronlar dynodlardan gelen termal elektronlara göre daha az çoğaltıldığından buradan gelen sinyaller düşük sinyal yüksekliği bölgesinde dağılırlar [9].



Şekil 2.11: sinyal yüksekliği dağılımının diferansiyel ve integral gösterimi [9].

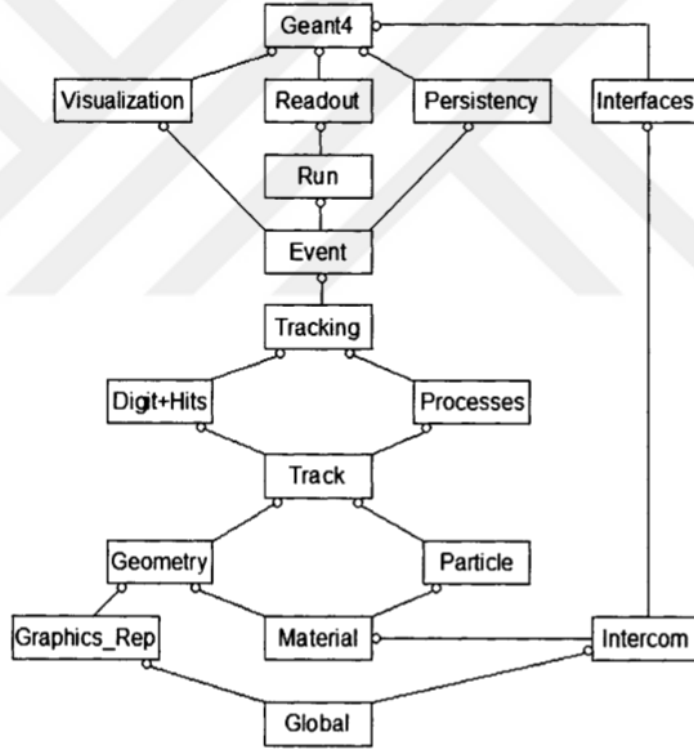
2.5. GEANT4

GEANT4, parçacıkların madde ile etkileşimini simüle etmek için kullanılan bir Monte Carlo (MC) benzetim aracıdır. Parçacık fiziği, nükleer fizik, hızlandırıcı fiziği, uzay mühendisliği ve medikal fizik gibi birçok araştırma alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. GEANT4 asıl olarak modern parçacık ve nükleer fizikte kullanılan parçacık detektörlerinin geniş ölçekli, doğru ve kapsamlı simülasyon yapılabilmesi adına sürekli artan talebi karşılamak için tasarlanmış ve geliştirilmiştir. GEANT4, C++ programlama dilini kullanan nesne yönetimli bir simülasyon aracıdır [10]. Yaklaşık 250 eV ‘den TeV’e kadar geniş bir enerji aralığında, parçacık ve madde arasındaki etkileşimleri ele almak adına çok sayıda fizik modeline dayanmaktadır. Bir GEANT benzetim süreci genel olarak şu adımlardan oluşur:

- Sistemin geometrisi ve ilgili malzemeleri tanımlanması
- İlgilenilen temel parçacıkların belirlenmesi
- Parçacık etkileşimlerinin fizik süreçlerine karar verilmesi
- Parçacıkların madde içerisinde hareketinin izlenmesi için hassas detektörler ve bölgeler tanımlanması

Bu süreçleri ele almak için GEANT4’te 17 sınıf kategorisi mevcuttur [10]. Burada bahsedilen kategori Grady Booch’un nesne yönetimli analiz ve tasarım metodolojisinde mantıksal birimler oluşturmak için kullanılan sınıf kategorileridir [11]. Kategorilerin aralarındaki ilişkiler Şekil 2.12’de verilmiştir.

Şekil 2.12'deki her kutu bir sınıf kategorisini temsil etmektedir. Ucunda daire olan çizgiler kullanıma ilişkisini gösterir. GEANT4 kaynak kodlarının düzenlenmesi temel olarak bu kategori yapısını takip eder. Bu kategorilerin bazılarını ele alacak olursak, Run kategorisi, GEANT4'ün en büyük birimidir. RUN kavramsal olarak, aynı detektör koşullarını paylaşan olaylar topluluğudur. Run boyunca kullanıcı detektör koşullarını değiştiremez. Bir olay, parçacık kaynağında oluşturulan bir parçacığın detektör içinde absorbe oluncaya veya detektör dışına çıkıncaya kadar yaptığı tüm etkileşimleri ifade eder. İz, bir parçacığın detektör içindeki anlık görüntüsüdür ve parçacığın mevcut konumu ve durumu hakkında bilgi verir. Bir olay birçok izden oluşabilmektedir. Step, bir iz'in belirli miktardaki uzunluğudur, bu steplerde parçacığın her step başına enerji kaybı gibi bilgiler tutulur.



Şekil 2.12: GEANT4 en üst düzey kategori şeması [10].

2.5.1. Geant4 Kullanımı

Kullanıcı GEANT4 simülasyonu yaparken yukarıdaki özelliklerin hepsini sağlamak zorunda değildir. Programa zorunlu sınıfların bilgisi verildiğinde diğer özellikleri kendisi ayarlayabilmektedir.

2.5.1.1. Zorunlu Kullanıcı Sınıfları

Bir uygulama içerisinde, kullanıcı GEANT4 tarafından zorunlu kılınan 3 temel sınıfı türetmelidir. Bunlar G4VUserDetectorConstruction, G4VUserPhysicsList ve G4VUserPrimaryGeneratorAction sınıflarıdır.

G4VUserDetectorConstruction sınıfı içerisinde kullanıcı yapacağı uygulama ile ilgili materyaller, detektör geometrisinin hacimleri bu sınıf içerisinde tanımlar. İsteğe bağlı olarak, hassas detektör sınıfları oluşturup G4VUserDetectorConstruction sınıfı içerisinde oluşturulan detektör hacimlerine atanabilir. Ek olarak, oluşturulan detektörlerin görselleştirme özelliklerini tanımlayabilir.

GEANT4 herhangi bir fizik süreci veya parçacıkları kullanıcıya hazır olarak vermez kullanıcı kendi uygulaması için kullanacağı fizik süreçlerini ve parçacıkları seçip G4VUserPhysicsList sınıfı içerisinde tanımlamalıdır.

Her olay için kullanıcı detektörünün üzerine göndereceği parçacıkların detaylarını G4VUserPrimaryGeneratorAction sınıfı içerisinde tanımlar. Bu detaylar gönderilecek ilk parçacıkların tipi, enerjileri, yönleri ve uzay düzlemi üzerinde nerede yaratılacakları gibi özelliklerdir.

2.5.1.2. Opsiyonel Kullanıcı Sınıfları

GEANT4, kullanıcı kontrolü için beş temel sınıf sağlar. Aşağıda maddeler halinde verilen bu sınıflar simülasyon sürecinin çeşitli aşamalarında çağırılabilir.

- G4UserRunAction
- G4UserEventAction
- G4UserStackingAction
- G4UserTrackingAction
- G4UserSteppingAction

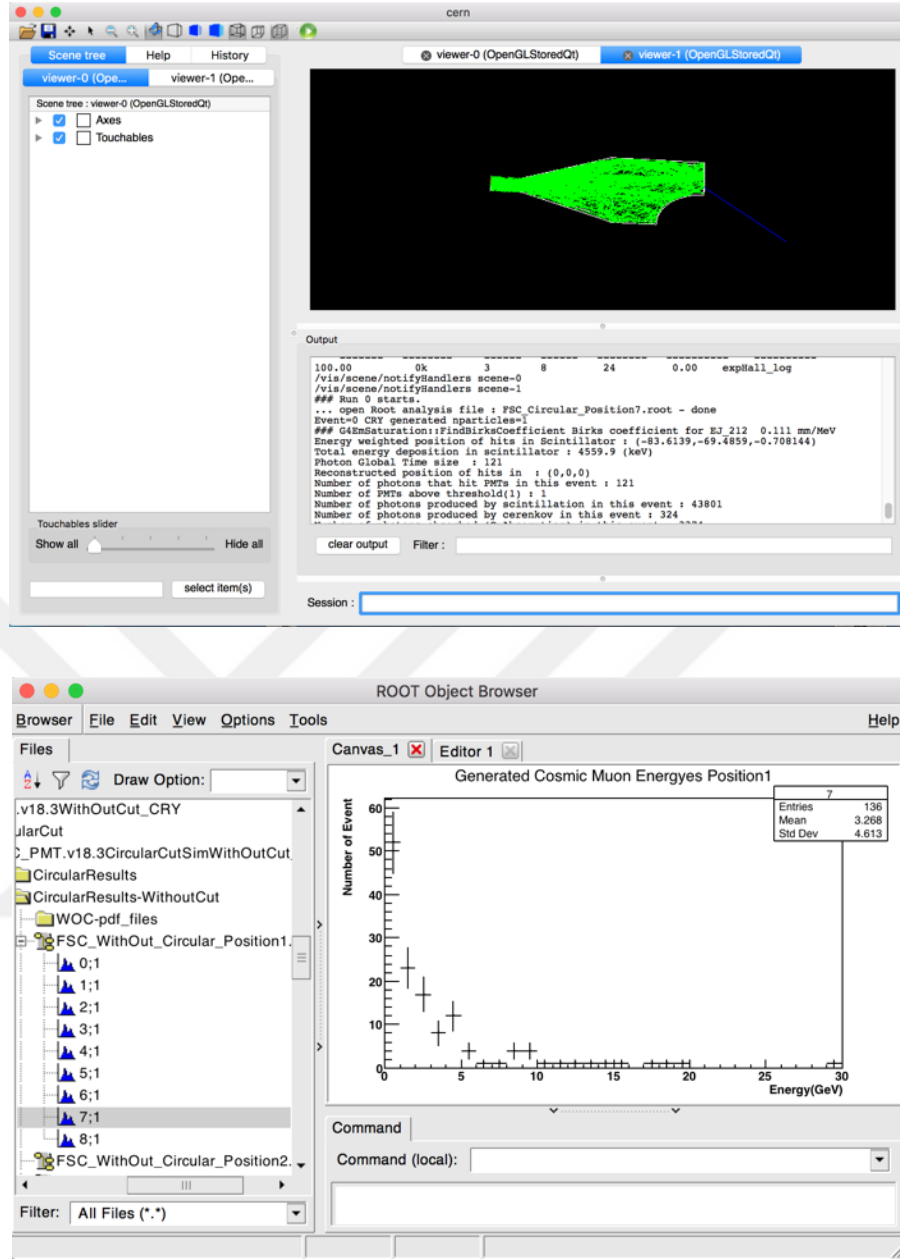
Kullanıcı, histogram tanımlamak, bir parçacığın öncelikli kontrolünü sağlamak, sonuçları analiz etmek, parçacığın izlerini depolamak ve bir izi sonlandırmak gibi çeşitli eylemleri gerçekleştirmek gibi uygulamalarını yazabilecekleri sınıflardır.

2.5.2. GEANT4 kullanıcı Ara Yüzü

GEANT4, bir dizi kullanıcı ara yüzü “User Interface” (UI) seçeneği sunar. Ara yüzü bilgisayarın terminal ekranından yönetileceği gibi Qt, Java veya Motif grafik tabanlı kullanıcı ara yüzüne çevrilebilir. Programın ayrıca interaktif modda veya bir makro dosyası kullanarak toplu iş modunda kullanılmasına olanak sağlanmıştır. Tasarım gereği kullanıcılar UI komutlarını kullanarak program ile iletişim kurarlar. Simülasyon sürecinin çeşitli yönlerini kontrol etmek amacıyla önceden tanımlanmış birçok UI komutu oluşturulmuştur. Buna ek olarak; kullanıcı tarafından G4UImessenger sınıfı tanımlanarak yeni komutlar oluşturulabilir.

2.5.3. Görselleştirme ve Analiz Araçları

Geometrik hacimleri ve parçacık yönlerini görüntülemek için birçok görselleştirme sürücüsü vardır. GEANT4’te genellikle kullanılan sürücüler OpenGL [12], DAWN [13] ve HepRep’tir [14]. Bu Sürücülerden en yaygın kullanılanı OpenGL’dir. GEANT4, ROOT [15], AIDA [16], Anaphe [17] ve Java Analysis Studio (JAS) [18] gibi analiz sistemleriyle de kullanılabilir. Şekil 2.13’da görüntüleştirme ve analiz programlarına birer örnek verilmiştir.



Şekil 2.13: GEANT4 kodunda kullanılan OpenGL görüntüleme aygıtı (üstte), ROOT analiz programı (altta) örnekleri.

3. MALZEME VE YÖNTEM

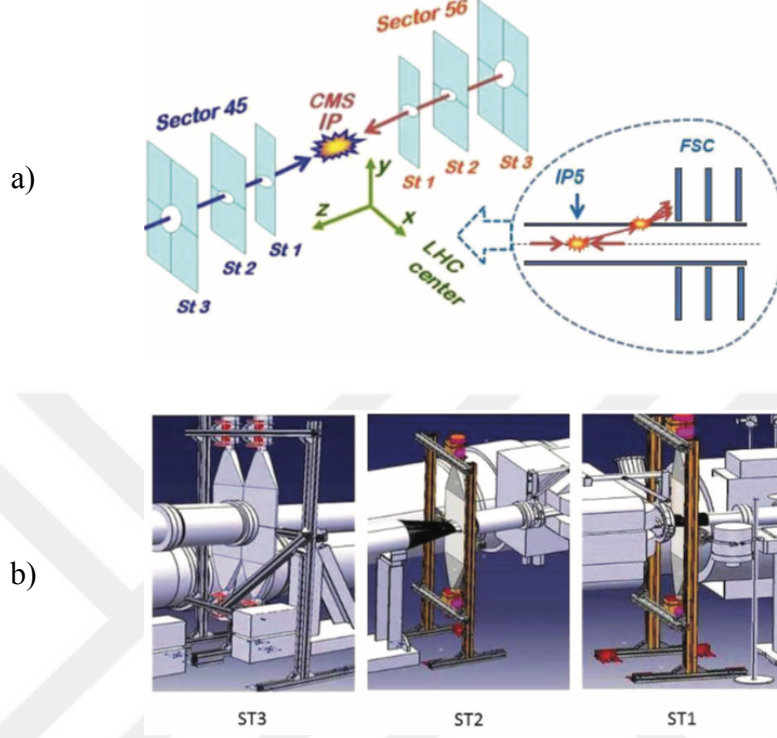
Bu tez çalışmasında amaçlanan plastik sintilatörler ile radyasyon ölçümü ve benzetim çalışmaları, Büyük Hadron Çarpıştırıcısı “Large Hadron Collider” (LHC)’nin genel amaçlı büyük detektörlerinden biri olan Kompakt Müon Selenoid “Compact Muon Solenoid” (CMS) detektörünün ışın hattı üzerine yerleştirilmiş plastik sintillatör kullanıldığı İleri Bölge Duş Sayaçları “Forward Shower Counters” (FSC) ile yapılmıştır. Bu bölümde, çalışmada kullanılan detektörler ve bunların benzetim çalışmalarının gerçekleştirme süreçlerinden bahsedilmiştir.

3.1. PLASTİK FSC SİNTİLATÖRLERİ

LHC, dünyanın en büyük ve en güçlü parçacık hızlandırıcısıdır. İsviçre ve Fransa sınırında yer alan Cenevre şehrinde, yerin ortalama yüz metre altındaki 27 km’lik bir tünel içinde, süper iletken mıknatısların kullanıldığı bu hızlandırıcıda proton ve karşıt protonlar 14TeV enerjiye kadar çıkarılarak, dört etkileşim bölgesinde “Interaction Point” (IP) çarpıştırılarak deneyler gerçekleştirilmektedir. Bu etkileşim noktalarından beşincisinde ise 4T manyetik alan oluşturabilen süper iletken bir mıknatıs etrafına yerleştirilmiş genel amaçlı CMS detektörü bulunmaktadır. CMS detektörü çarpışmalar sonucunda ortaya çıkan yüklü parçacıkların momentumlarını ölçmek için yüksek çözünürlüklü silikon iz detektörünün yanı sıra, parçacıkların enerjilerini ölçmek için bir Hadron Kalorimetresine “Hadron Calorimeter” (HCAL) sahiptir. HCAL, bir örnekleme kalorimetresidir ve içerisinden geçen parçacığın konumunu ve enerjisini, hızlı bir ışık darbesi üreten alternatif “emici” ve floresan “sintilatör” tabakaları kullanarak tespit edebilmektedir. Çarpışmayı tamamen sarmak ve parçacıkların detektörden etkileşmeden yani ölçülmeden kaçmasını önlemek amacı ile CMS ışın demeti üzerinde, z eksenini boyunca 59 ve 140 m uzaklıklarına yerleştirilmiş sintilasyon sayaçlardan oluşan İleri Bölge Duş Sayaçları “Forward Shower Counters” (FSC) istasyonları mevcuttur. Bu detektörler, ışın demeti borusu ve etrafındaki malzemeler ile etkileşen yani psüdorapiditesi $7 \leq \eta \leq 11$ aralığında olan parçacıkları gözlemlemek için kullanılmaktadır [19].

Bu çalışmada ele alınan FSC istasyonlarından birinci ve ikinci demet hattı boyunca eliptik ışın demeti borusunun üzerinde ve altında olmak üzere IP5 noktasından $z=56\text{m}$ ve 88m ’ye yerleştirilmiştir. Üçüncü istasyon ise $z=125\text{m}$ ’de silindirik ışın demeti borusunu saracak şekilde

iki tane üstte ve iki tane altta olmak üzere 4 tane sayaçtan olmuştur. Şekil 3.1’de FSC istasyonları ve sayaçlar görülmektedir.



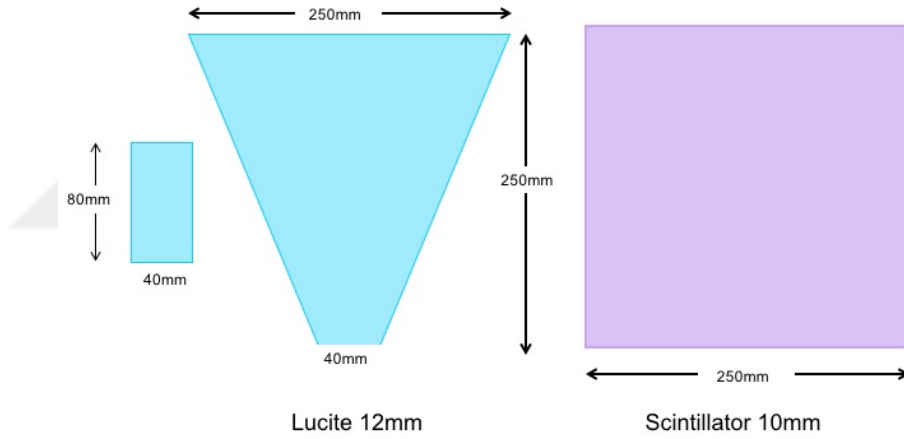
Şekil 3.1: FSC istasyon pozisyonlarının şematik gösterimleri (üste), üç FSC istasyonunun ışın demeti üzerindeki yerleşimleri (altta) [20].

FSC istasyonlarında, özellikleri Tablo 3.1 ‘de verilen Eljen marka EJ-212 model sintilatörler kullanılmıştır. Işın hattına maksimum yakınlığı sağlamak amacıyla farklı geometrik kesiklere sahip FSC sintilatörleri 10mm kalınlığında ve $250 \times 250\text{mm}^2$ yüzey alanına sahip levhalardan hazırlanmıştır.

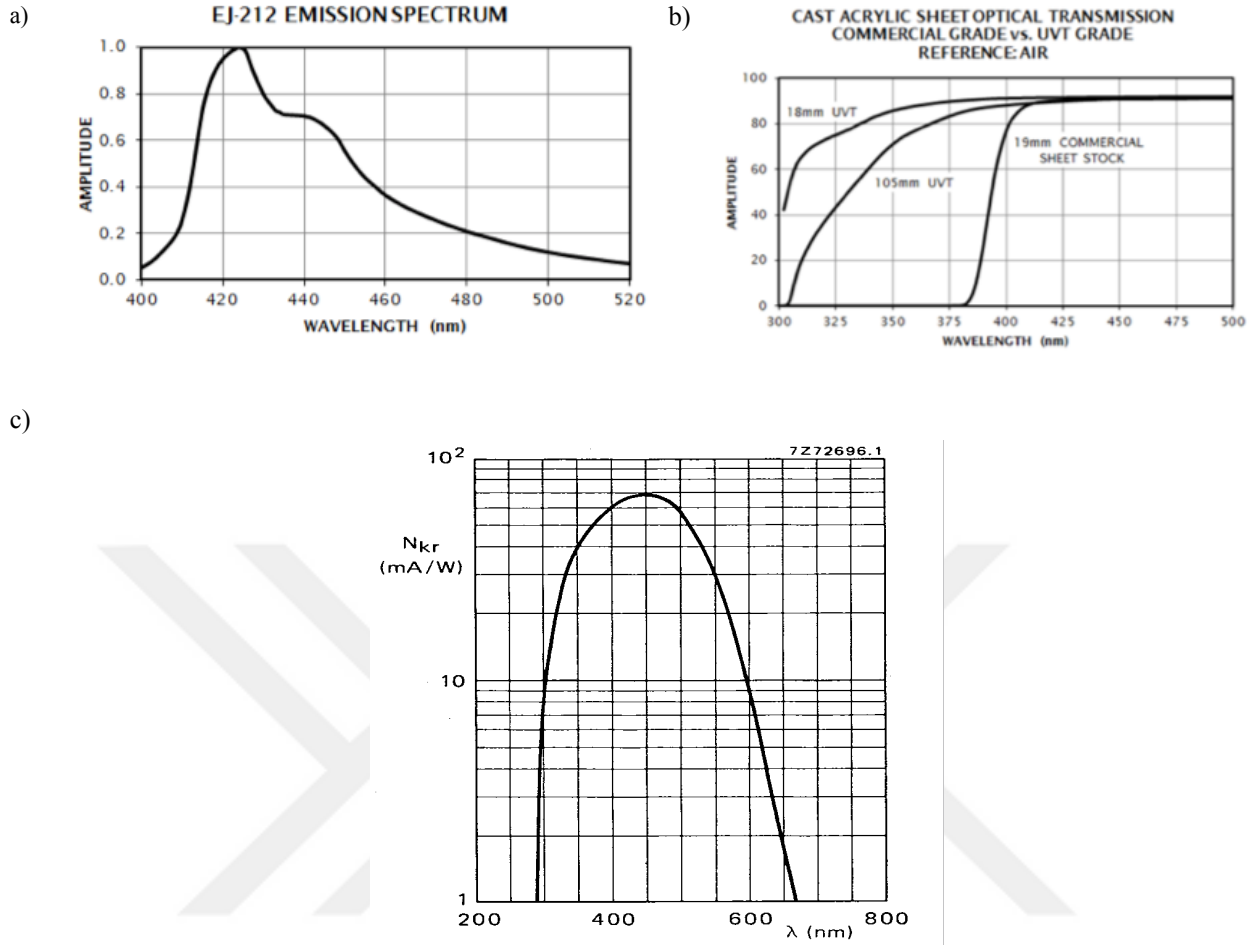
FSC istasyonlarında, Foto Çoğaltıcı olarak spektral hassasiyet bölgesi 280nm ve 630nm aralığında olan 32mm çaplı Philips XP2008 kullanılmıştır ve bu PMT’lerin kuantum verimliliği 420nm’de yaklaşık olarak %20 dir. Sintilatörde oluşan ışığı fotokatoda iletmek için Eljen firmasının ürünü olan 2 tane EJ-UVT model ışık kılavuzu “Light Guide” (LG) kullanılmıştır. Işık klavuzlarından balık kuyruğu şeklinde olan, sintilatörün $25\text{cm} \times 1.0\text{ cm}$ ’lik yüzeyinden gelen fotonları iletmek, silindirik olan ise PMT’nin fotokatot ile geometrik olarak uyuşmasını sağlamak için kullanılmıştır. Şekil 3.2’de ışık kılavuzlarının ve sintilatörün boyutları verilmiştir.

Tablo 3.1: Eljen EJ-212 sintilatörün teknik özellikleri [21].

ÖZELLİKLER	EJ - 212
Işık Çıkışı (% Anthracene)	65
Sintilasyon Verimi (Foton / 1 MeV e ⁻)	10,000
Maksimum Işıma Dalga-boyu (nm)	423
Işık Sönümlenme Uzunluğu (cm)	250
Yükselme Süresi (ns)	0.9
Bozunma Süresi (ns)	2.4
Sinyal Genişliği, Yarı Yükseklikteki Pik (ns)	2.7
Birim Hacimdeki H Atomu Sayısı cm ³ (x10 ²²)	5.17
Birim Hacimdeki C Atomu Sayısı cm ³ (x10 ²²)	4.69
Birim Hacimdeki Elektron Sayısı	3.33
Yoğunluk (g/cm ³)	1.023
Polimer Bazı	Polyvinyltoluene
Kırılma İndisi	1.58

**Şekil 3.2:** Işık klavuzu ve sintilatörün boyutları.

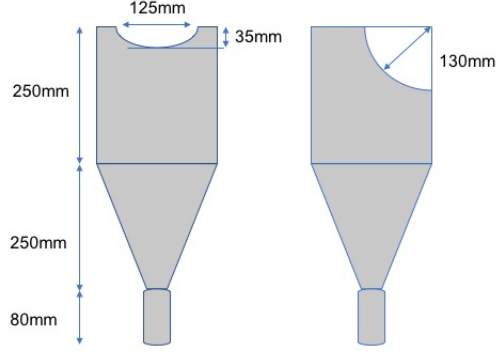
Işık kılavuzu üretiminde yaygın olarak kullanılan şeffaf ve renksiz plastikler genel olarak iyi optik ve mekanik özelliklere sahiptir. PMMA (polimetilmetakrilat) olarak da bilinen bu ışık klavuzların iyonlaştırıcı radyasyona karşı sintilasyon tepkisi çok azdır. Detektörde ışık kılavuzu olarak kullanılan PMMA'lar UV bölgedeki ışığı da iletmektedir ve EJ-UVT olarak adlandırılmıştır. Bu bölge ışık kılavuzunun optik iletim aralığı ve EJ-212 sintilatörünün foton emisyon aralığı ile uyushmaktadır. Şekil 3.3'de EJ-212, EJ-UVT ve XP2008'in spektrumları verilmiştir.



Şekil 3.3: a) EJ-212'nin emisyon spektrumu [21] b) PMMA'nın optik geçirgenliği c) XP2008 PMT'nin fotokatodunun hassasiyet spektrumu [21].

Son olarak sintilatör, ışık kılavuzları ve PMT birleştirilip dışarıdaki ışıktan detektörü korumak ve aynı zamanda detektörde oluşan optik fotonları yansıtmak amacıyla detektörün etrafı alüminyum folyo ile sarılmıştır.

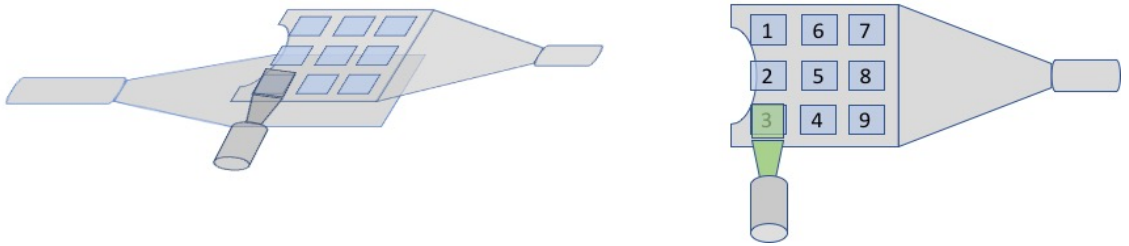
FSC istasyonlarının bulundukları konumlarda ışın borularının geometrinin farklı olmasından dolayı sayaçlarda iki farklı tipte kesik bulunmaktadır. İstasyon 1 ve 2'ye konulan sintilatörler eliptik olarak, istasyon 3'e konulan sintilatörler ise yarım daire şeklinde kesilmiştir. Şekil 3.4'te görüldüğü gibi istasyon 1 ve 2'deki sintilatörler ana eksen 125mm ve yan eksen 35mm olan yarı eliptik kesik ve istasyon 3'de ise yarı çapı 130 mm olan dairesel kesik bulunmaktadır.



Şekil 3.4: Eliptik ve dairesel kesik bulunan detektörler ve boyutları.

Eliptik veya dairesel kesiklerin sayaçların optik verimliliğini nasıl değiştirdiğini incelemek amacıyla, bir başka deyişle plastik sintilatörlerin sahip olduğu farklı geometrik kesiklerin radyasyon ölçümü üzerine etkisinin olup olmadığını yani detektör çıkış sinyallerinin, detektörün herhangi bir noktasından ölçüm alındığında değişip değişmediğini görmek amacı ile bir kozmik müon teleskobu sistemi hazırlanmıştır.

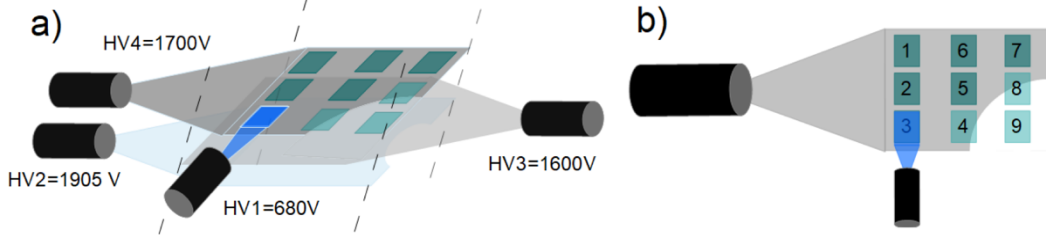
Eliptik kesik bulunan sintilatörler için kurulan kozmik ışın teleskop sisteminde, en üstte $40 \times 40 \text{ mm}^2$ boyutlara sahip küçük tetikleme sintilasyon sayacı, ortada eliptik kesik bulunan FSC sintilatörü ve en altta da üzerinde kesik bulunmayan genel amaçlı bir sintilatör sayacı bulunmaktadır. Şekil 3.5’de hazırlanan müon teleskop sisteminin şematik gösterimi verilmiştir. Şekil 3.5’te sağ taraftaki görüntü eliptik kesik bulunan detektörde incelenen 9 noktayı temsil etmektedir sol taraftaki görüntü ise kurulan teleskop sisteminin şematik görüntüsüdür. Ölçümler bu teleskoptaki 9 farklı noktadan alınmıştır ve haritalandırma çalışması yapılmıştır.



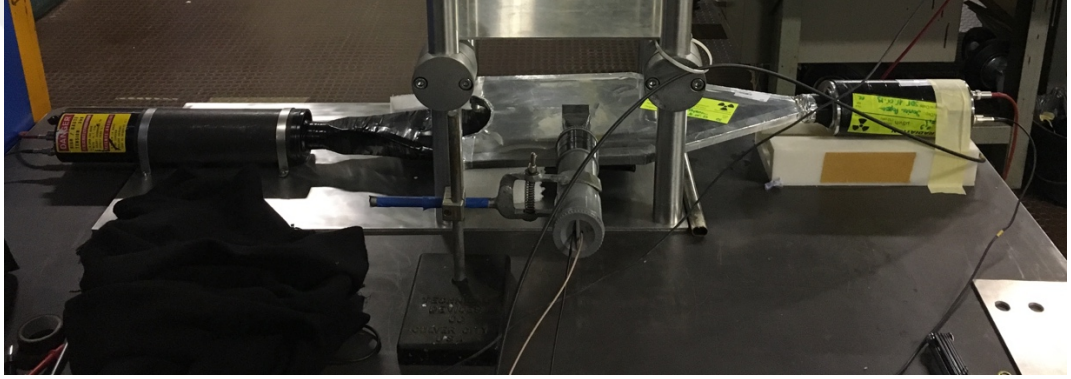
Şekil 3.5: Müon teleskop sistemi ve data alım noktalarının şematik gösterimi.

Benzer şekilde dairesel kesikli FSC sintilatörünün radyasyon ölçümleri için hazırlanan kozmik ışın teleskobu sisteminde ise en üstte küçük tetikleme sintilatörü, altında dairesel kesik bulunan FSC sintilatörü, hemen altında kesik bulunmayan genel amaçlı sintilatör ve en altta ise eliptik kesik bulunan FSC sintilatörü kullanılmıştır. Şekil 3.6’da dairesel kesik bulunan teleskop

sistemi ve detektörlerin üst üste sıralanışı verilmiştir. Yine bu teleskop sisteminde 9 şekilde gösterilen 9 farklı noktadan ölçümler alınmıştır.



Şekil 3.6: a) Dairesel kesikli detektör için kurulan teleskop sisteminin şematik görüntüsü. b) Detektör üzerinde incelenen noktaların şematik görüntüsü.



Şekil 3.7: Kozmik ışın teleskobu kurulum resmi.

3.1.1. Sintilatör Sayaçların Okuma Sistemleri

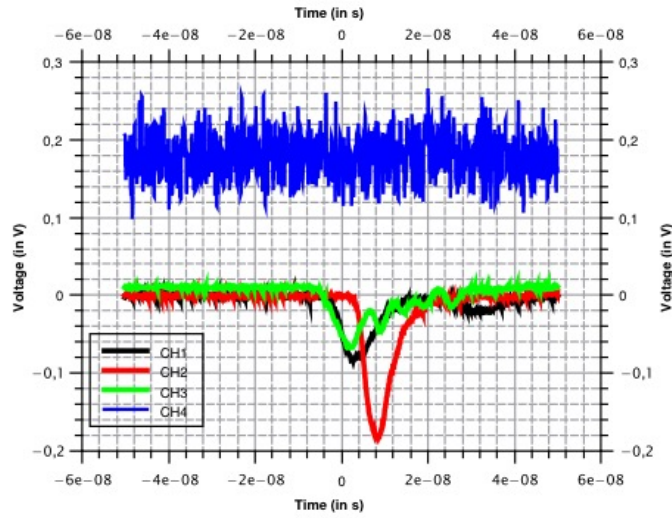
Bu detektörlerin hepsinde kullanılan PMT'ler ayrı değerlerde yüksek voltaj ile çalışmaktadır. Detektörlere güç sağlayabilmek için NIM şase tipi 4 kanallı CAEN marka N472 model Yüksek Voltaj (HV) güç kaynağı modülü kullanılmıştır. Bu modül, iki farklı tip yüksek voltaj çıkışına sahiptir: İki kanalı ± 3 kV / 3 mA ve diğer iki kanalı ise ± 6 kV / 1 mA voltaj sağlayabilmektedir ve çıkış voltajı ve polaritesi ayarlanabilmektedir.

PMT çıkış sinyallerinin okunması için Agilent Technologies marka DSO9254A model osiloskop kullanılmıştır. Bu osiloskobun analog bant aralığı 2.5 GHz olup analog örnekleme oranı 4 kanal için 20GSa/s'dir [22]. PMT çıkış sinyalleri Lemo00 Coaxial kablolar ile Osiloskobun kanallarına bağlanmış ve voltaj sinyalleri zamanın fonksiyonu olarak okunmuştur. Şekil 3.8' de kullanılan güç kaynağı ve Osiloskobun görüntüleri verilmiştir.



Şekil 3.8: Solda CAEN N472 HV ünitesi [23]. Sağda Agilent Technologies DSO9254A osiloskop.

Şekil 3.9’de Osiloskopta elde edilen PMT sinyalleri görülmektedir. Bu örnek görüntüde, CH1 tetikleme, CH2 üzerinde kesik bulunmayan, CH3 ise FSC sintilatöründen gelen sinyalleri göstermektedir.



Şekil 3.9: PMT sinyal görüntüleri.

Her iki teleskop sisteminden, $40 \times 40 \text{ mm}^2$ sintilatörden gelen sinyal tetikleme sinyali olarak kullanılarak, her bir 9 nokta için 1000’er olay kaydedilmiştir. Kaydedilen CSV data dosyaları Ek5’te verilen PYTHON [24] programlama dilinde yazılan ROOT kodu ile analiz edilmiş ve eliptik kesik bulunan detektör için üç detektörden de müon geçtiğinde oluşan datalar diğerlerinden ayrılmıştır yani raslantı tekniği kullanılmıştır. PMT sinyalleri voltaja karşılık zaman olarak alındığından, her bir CSV dosyasındaki voltaj sinyalin zamana göre integrali sintilatörde oluşan yükü vermektedir. Bu yüzden hazırlanan analiz kodu ile her bir 9 nokta için kaydedilen CSV datalarının zamana göre integrali hesaplanarak yeni bir histogramı

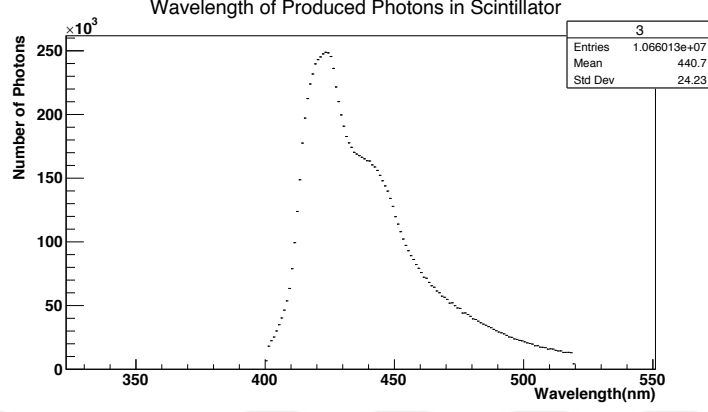
oluşturulmuş ve her bir FSC sintillatör üzerinde bulunan her 9 pozisyon için ayrı ayrı dağılımları elde edilmiştir. Bu yük değerlerine bakarak ve PMT'nin çalıştırılma voltajı kullanılarak, PMT'nin katoduna kaç adet foto-elektron oluştuğu hesaplanmıştır.

3.2. GEANT4 BENZETİM ÇALIŞMALARI

FSC sintillatör detektörünün benzetim çalışmaları GEANT4 ile gerçekleştirilmiştir. Simülasyonun ilk adımı, detektörün bileşenlerine karşılık gelen nesneler yaratılır, bunlar katı hacim olarak adlandırılanlar ve nesnelerin geometrisi hakkında bilgi içerirler. Daha sonra, katı maddelerin yapıldığı malzeme hakkında bilgi saklamak için mantıksal hacimler oluşturulur. Mantıksal hacimler parçacıkların madde içinden geçişi sırasında bıraktığı enerji ve pozisyon bilgilerini saklamak için hassas detektör olarak tanımlanırlar. En sonunda Fiziksel Hacimler oluşturulur ve bir dünya içine yerleştirilir. Benzetim çalışmaları için 1m^3 hava dolu bir WORD (Experimental Hall) tanımlanmıştır. Deneysel ölçümlerin gerçekleştirildiği kozmik ışınları simüle etmek amacı ile Kozmik-Işın Duş Kütüphanesi, “Cosmic-Ray Shower Library” (CRY) [25] kullanılmış ve sistemin bulunduğu enlem, yükseklik ve tarihe göre farklı enerjilerde kozmik ışınlar üretilmiştir.

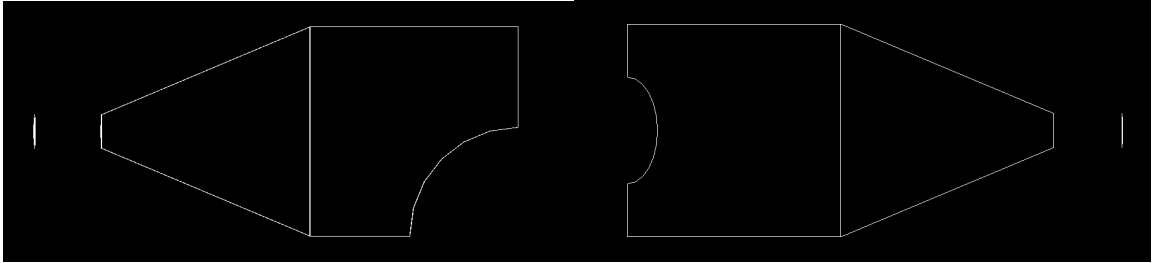
Sintilatörden geçen kozmik ışınlar sintilasyon fotonları oluşturur ve bunlar sintilatör içinde yayılırlar. Yayılan bu fotonlar sintilatör iç yüzeyine çarptığında toplam iç yansıma nedeniyle yansır ancak PMT'ye çarpan sintilasyon fotonlarının sayısını arttırmak için sintilatörler yansıtıcı materyalle kaplanır. Sintilatörlerin en dış yüzeyi ise dışarıdan gelecek etkileri azaltmak amacıyla koyu renk keçe ile kaplanır. Simülasyonda sintilatör, ışık kılavuzu ve PMT nin şekil ve boyutları oluşturulduktan sonra bu objelerin özellikleri deneyde kullanıldığı şekilde oluşturulmuştur. Sintilatör için materyal Polyviniltoluene bazlı EJ-212 seçilmiş ve Tablo 3.1’de verilen özellikler tanımlanmıştır. Sintilatör için kırılma indisi 1.58 alınmış ve ışık sönümlenme uzunluğu 250 cm olarak ayarlanmıştır. Sintilatörün ışık verimliği 10.000 foton/1MeV e^- olarak tanımlanmış olup 400-520 nm dalga boyu aralığına göre ışık emisyon spektrumu eklenmiştir. Ek1 ve Ek2’de sintilatörün materyal ve geometri tanımlamasını içeren GEANT4 kodu verilmiştir. Simülasyon çalıştırıldığında ELJEN firmasının EJ-212 sintilatörü için verdiği Şekil 3.3a’da gösterilen emisyon grafiği ile gayet uyumlu olduğu görülmüştür. Simülasyon sonucu çıkan EJ-212 emisyon grafiği Şekil 3.10 elde edilmiştir. Benzetim çalışmalarında bu kozmik

ışınların sintilatörden geçmesi sonucunda sintilatör içerisinde oluşan optik fotonlar ve PMT ye çarpan optik fotonlar olmak üzere iki şekilde kayıt edilmiştir.



Şekil 3.10: Simülasyon sonucunda elde edilen EJ-212 emisyon spektrumu.

Sintilatör detektörünün parçalarının parametreleri, fizik süreçleri oluşturulduktan sonra FSC detektörü geometrik olarak bir araya getirilmiştir. Sintilatörlerden, FSC detektörlerinde olduğu gibi eliptik ve dairesel parçalar kesilip çıkarılmıştır. Simülasyonda oluşturulan eliptik ve dairesel kesikli sintilatörlerin görüntüleri Şekil 3.11’de verilmektedir.



Şekil 3.11: Simülasyonda oluşturulmuş üzerinde dairesel (solda) ve eliptik (sağda) kesik bulunan FSC detektörleri.

Işık kılavuzunun parametreleri üzerine gelen fotonların dalga boylarına göre ışık geçirgenliği, kırılma indisi ve ışın soğurma uzunluğu tanımlanmıştır. Işık kılavuzu için tanımlanan GEANT4 materyal ve geometri kodları Ek3 ve Ek4’te verilmektedir. PMT’nin tanımlanmasında XP2008 PMT’nin geometrik özellikleri kullanılmıştır. PMT’nin materyal kırılma indisi tanımlamasının yanı sıra fotokatodun dalga boylarına göre spektral hassasiyet karakteristiği de PMT’ye atanmıştır. PMT’nin fotokatodu yaklaşık olarak 300-650 nm’ de gelen ışığa hassastır ve bu aralıkta 437 nm %20 kuantum verimiyle tepe noktasıdır.

Deneysel sistemin yanıtını simüle etmek için Compton Saçılması, Foto Elektrik Etki, İyonizasyon, Bremsstrahlung, Çoklu Saçılma ve Optik Rayleigh saçılmaları ve Sınır süreçleri gibi fiziksel süreçler hesaba alınmıştır.

Deney yapılırken kozmik ışınlar kullanıldığından simülasyona kozmik ışın üretici programı olan CRY entegre edilmiştir. CRY verilen enlem ve tarih bilgisine göre dünyanın manyetik alanını da hesaba katarak verilen yere uygun enerjilerde ve doğrultuda kozmik ışınlar üretmiştir. Deneyde kozmik ışın teleskobu sisteminde her bir pozisyon için 3 detektörden de geçen rastlantısal olayların oranı dikkate alınarak CRY programıyla üretilen kozmik ışınlar FSC detektörlerinin üzerinde tanımlanan pozisyonlara gönderilmiştir. Modellenen fizik süreçleri sonucunda oluşan sintilasyon fotonları oluşmasından PMT'ye ulaşmasına veya tamamen enerjilerini kaybedene kadar takip edilmiştir. PMT'ye ulaşan, yansımalar sonucunda ve detektörün kaplandığı alüminyum folyo ile sınırında absorbe olan fotonlar olarak kayıt edilmiştir. PMT'ye ulaşan fotonlar daha önceden tanımlanmış olan dalga boyuna göre kuantum verimliliği spektrumu sayesinde dalga boylarına göre ve yüzde kuantum verimliliklerine göre sayılmıştır. Bu sayılmış olan fotonlar aslında PMT'nin fotokatodunda fotoelektron oluşturan fotonlardır. Deneyde PMT'nin çalıştırıldığı yüksek voltaj değeri bilindiğinde bu elektronlar rahatlıkla PMT'nin kullanılan voltaj değerindeki çoğaltma katsayısı ve elektronların yükü ile çarpılıp detektörden her bir kozmik ışın geçtiğinde PMT'nin çıkışında oluşacak sinyalin yük miktarına çevrilebilmektedir. Bu metot ve yöntem kullanılarak üzerinde kesik bulunan FSC detektörlerinde tanımlanan farklı noktalarda ölçümler alınıp simülasyon sonuçları ile karşılaştırarak haritalandırma çalışması yapılmıştır.

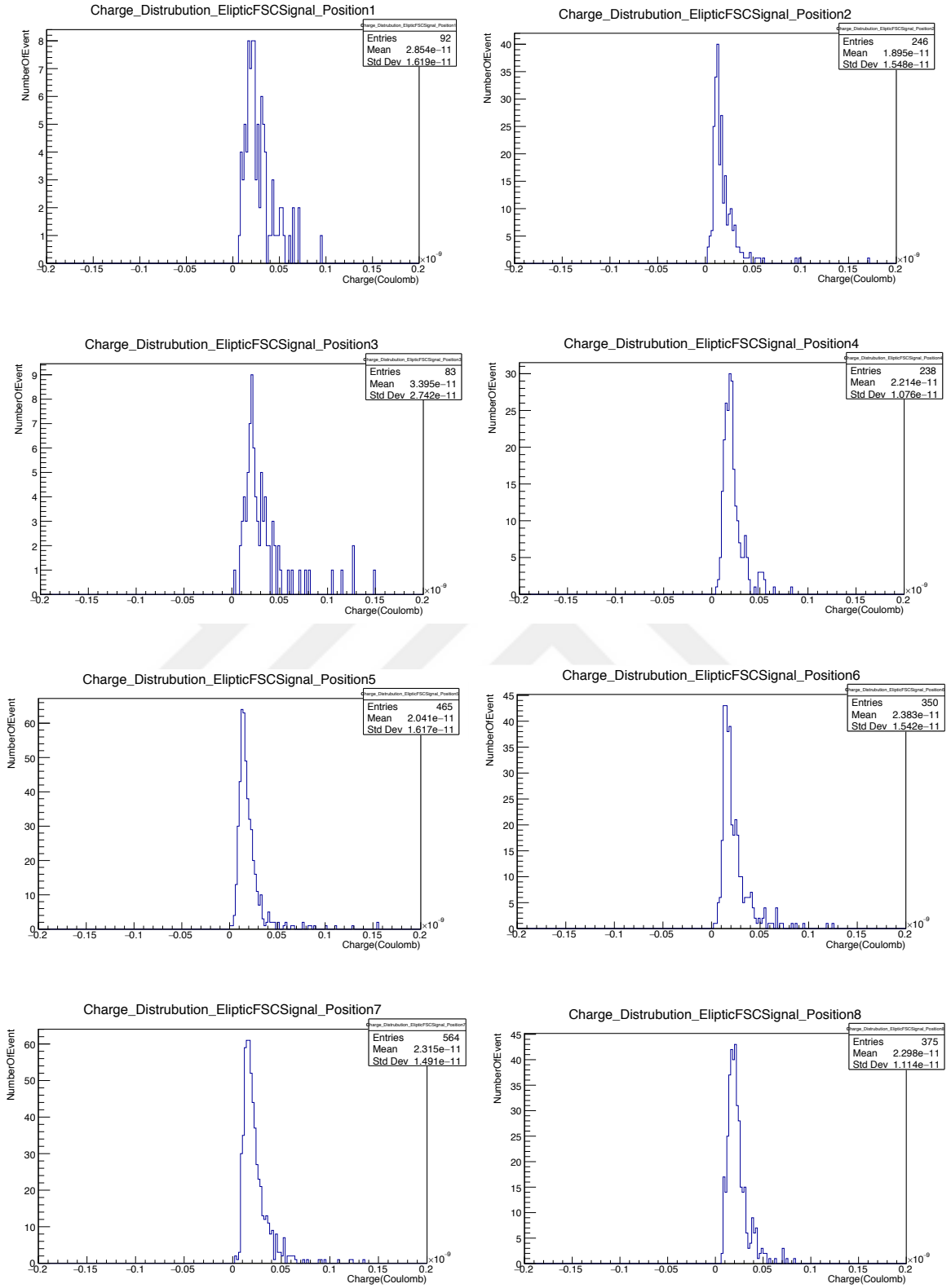
4. BULGULAR

Bu bölümde FSC detektöründen alınan datalar ve GEANT4 simülasyon programı ile elde edilen simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır. İki FSC detektöründen de kurulan kozmik ışın teleskopu sistemi yardımıyla kozmik parçacıkların detektör üzerinde farklı dokuz noktadan geçmesi sonucu, önceki bölümde bahsedildiği gibi detektörlerin PMT çıkış sinyalleri osiloskop ile alınarak kaydedilmiş ve bu sinyaller Python programlama dilinde yazılan data analiz programı yardımıyla yük dağılımına çevrilmiştir. Detektörlerin üzerinde tanımlanan 9 ayrı noktanın yük dağılımlarına bakılarak üzerinde farklı kesik bulunan her bir detektörün haritalandırılma çalışması yapılmıştır. Buna ek olarak, detektörün her bir parçası ve her bir özelliği GEANT4 simülasyon programı ile simüle edilmiş ve gerçek detektörün datası ile karşılaştırılmıştır.

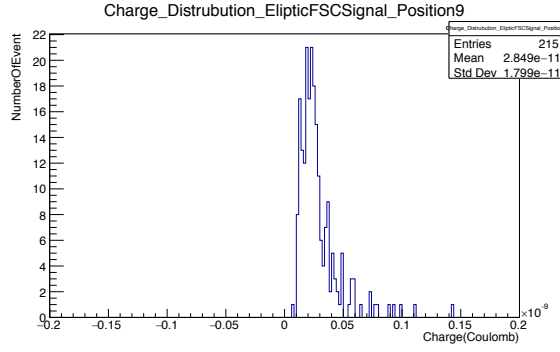
Aşağıda sırasıyla üzerinde kesik bulunan FSC detektörleri, bunların GEANT4 simülasyon çalışmaları ve üzerinde kesik olmadığı durumda GEANT4 yardımıyla programlanmış olan FSC detektörlerinin kesik bulunan detektörlerin simülasyonlarıyla karşılaştırılması verilecektir.

İlk olarak üzerinde eliptik kesik bulunan FSC detektörünün Şekil 3.5'te verilen dokuz ayrı noktada alınan ölçümlerle PMT çıkış sinyallerinden elde edilmiş olan yük dağılımları karşılaştırılmıştır. Şekil 4.1'de veri alınan 9 noktadaki yük dağılımları verilmektedir.

Şekil 4.1'deki histogramların yatay ekseni zamana göre olan PMT sinyal voltajının osiloskobun birim sürede veri alma dilimlerine göre integralinin sinyalin osiloskopta bağlandığı kanalın empedansına bölünmesiyle elde edilen detektörden geçen her bir parçacık başına yük miktarını ifade etmektedir. Düşey ekseni ise olay sayısını vermektedir. Deneyde olay sayısı her bir nokta için 1000 olay olarak alınmıştır fakat FSC detektörlerinin ve onun altında ve üstünde bulunan sintilasyon detektörlerinin hepsinden birlikte geçen kozmik parçacığın oluşturduğu rastlantısal olaylar sonucu tayin edilmiştir. Bu üç detektörden aynı anda geçmeyen parçacıkların detektörde oluşturdukları yük miktarı histogramlara eklenmemiştir. Detektörün her bir noktası için rastlantısal olayların olma oranı farklıdır. 1000 olay içerisinde her bir nokta için rastlantısal olayların oranları histogramların sağ üst köşesindeki entries kısmında verilmektedir. Örneğin 9. pozisyonda bu oran 1000 olay içerisinde sadece 215 parçacığın teleskop sistemindeki en üstte bulunan küçük tetikleme, ortadaki FSC detektörü ve en altta bulunan sintilasyon detektörden aynı anda geçen (izi takip edilen) kozmik parçacıkları ifade etmektedir.

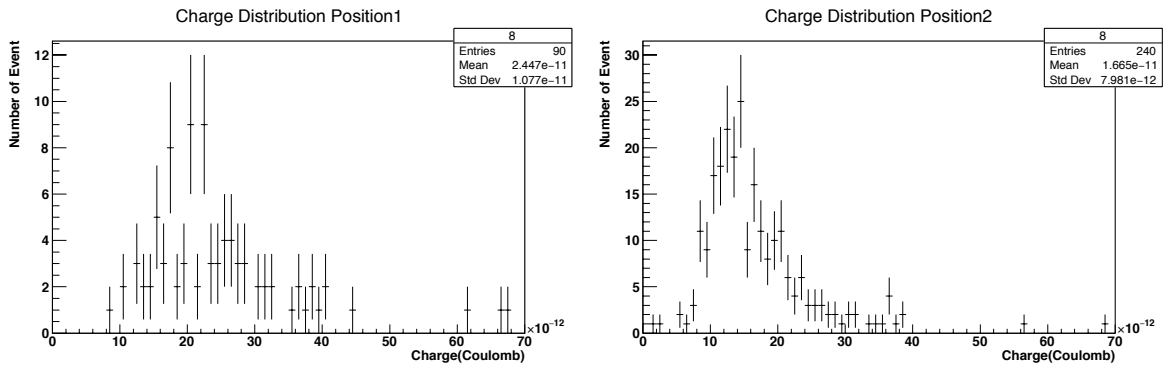


Şekil 4.1: Üzerinde eliptik kesik bulunan FSC detektöründen pozisyonlara göre alınan datanın yük dağılımları.

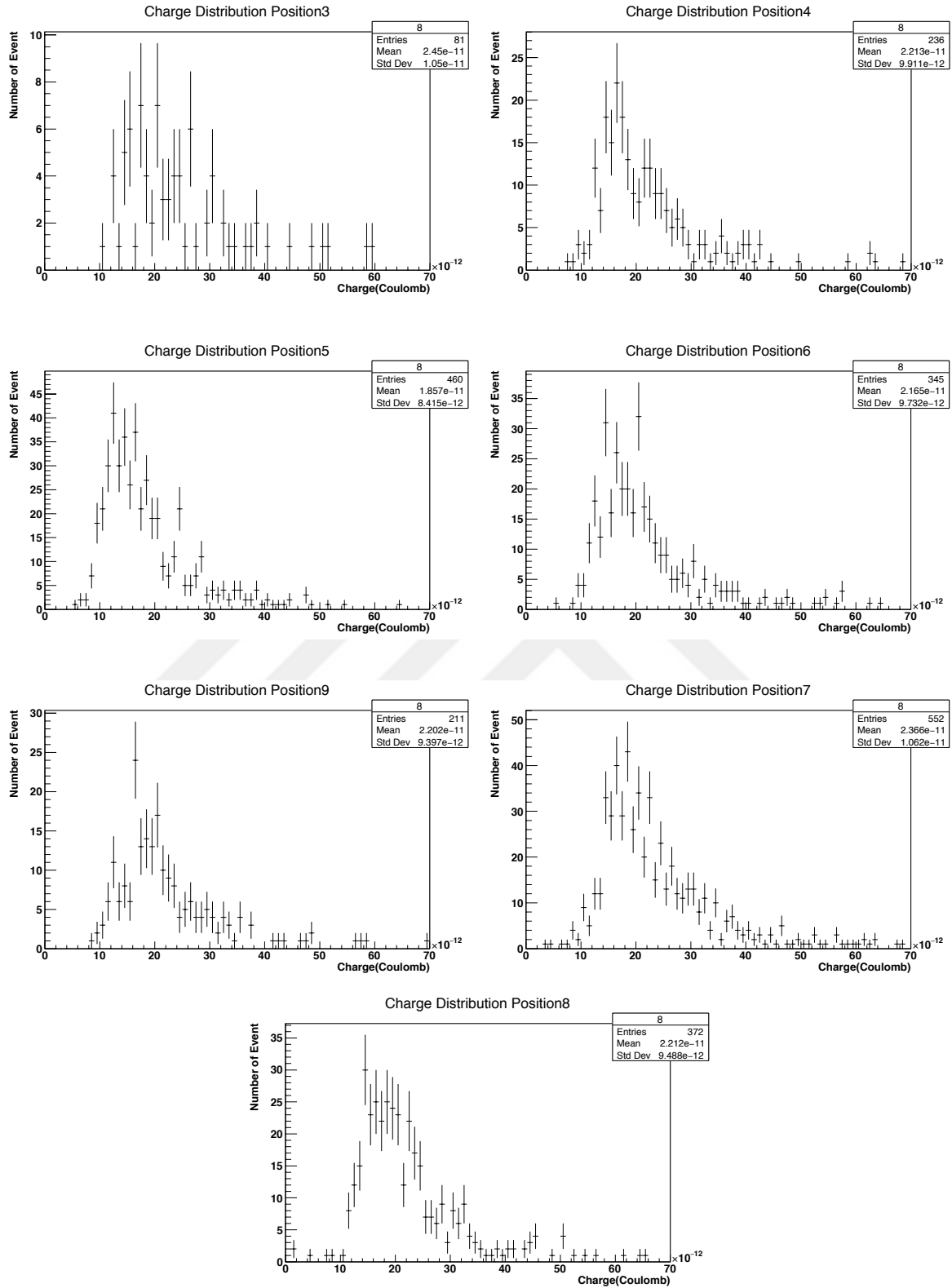


Şekil 4.1 (devam): Üzerinde eliptik kesik bulunan FSC detektöründen pozisyonlara göre alınan verinin yük dağılımları.

Deneyin Geant4 simülasyonunun daha gerçekçi olabilmesi için her bir pozisyonadaki farklı oranlar baz alınarak detektörün üzerine kozmik parçacıklar gönderilmiştir. Simulasyonda, FSC sintilatöründen bu kozmik müonların geçmesi sonucu oluşan optik fotonlar takip edilmiş ışık kılavuzu yardımıyla PMT'nin fotokatoduna düşen fotonlar dikkate alınmıştır. PMT'nin fotokatoduna düşen optik fotonların, daha önceden simülasyonda tanımlanan fotokatoda gelen ışığın dalga boyuna göre fotoelektron oluşturma duyarlılığı spektrumunun tanımlanması suretiyle, bu prensibe uyan fotonlardan fotoelektron üretilmiştir. Daha sonra eliptik kesik bulunan FSC detektörünün PMT'sinin çalıştırıldığı HV değerinin kazancına bakılmış ve bulunan değerle fotoelektron sayısının çarpılması suretiyle FSC detektörlerinin simülasyonlarının yük dağılımları çıkarılmıştır. Üzerinde eliptik kesik bulunan FSC detektörü için yapılmış olan simülasyonun her bir pozisyon için yük dağılımları Şekil 4.2 de verilmiştir.

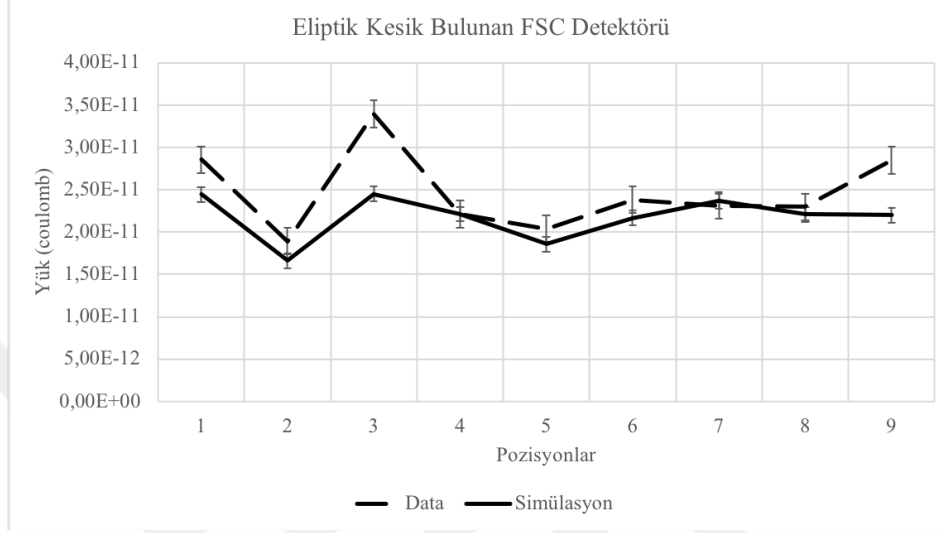


Şekil 4.2: Üzerinde eliptik kesik bulunan FSC detektörü için yapılan GEANT4 simülasyonu sonucunda elde edilen yük dağılımları.



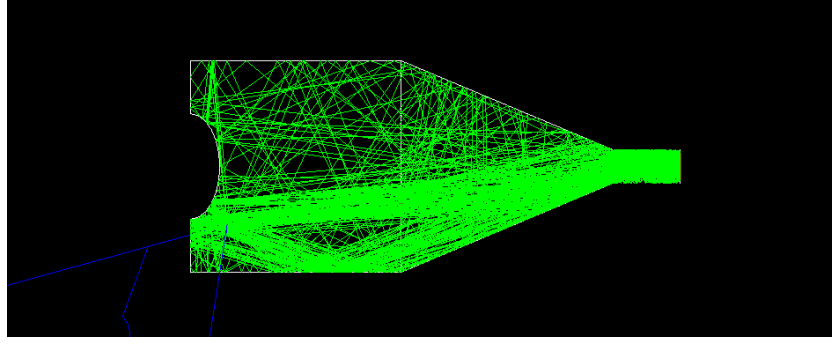
Şekil 4.2 (devam): Üzerinde eliptik kesik bulunan FSC detektörü için yapılan GEANT4 simülasyonu sonucunda elde edilen yük dağılımları.

Karşılaştırmanın daha rahat görülebilmesi için simülasyon ve data histogramlarının ortalama değerleri alınıp pozisyonlara göre grafiği Şekil 4.3'te verilmektedir.



Şekil 4.3: Eliptik kesik bulunan FSC detektörünün üzerinde data alınan pozisyonlara göre yapılan simülasyon ile karşılaştırılması.

Şekil 4.3'te görüldüğü gibi detektör üzerinde data alınan pozisyonların yük dağılımları ve simülasyon yük dağılımları uyum içerisindedir. Bazı noktalarda oluşan farklılıklar detektöre gelen kozmik ışınların enerjilerinin çok farklı değerler alabilmesinden ve bazı noktalarda olay oranının çok düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Örneğin simülasyonda kullanılan kozmik ışın üreten CRY programı MeV- GeV bandında çok geniş aralıkta kozmik ışınlar üretmektedir. Deneyin yapıldığı tarih ve yerin koordinatları CRY programına girilmiş olsa da deney esnasında detektörden geçen parçacıkların enerjilerini daha iyi tutturabilmek için daha yüksek sayıda olaylar yakalanmalıdır. Bu oranların düşük olması örneğin pozisyon 3'te görüldüğü gibi farklılıklar yaratabilir. Bazı noktalarda değer olarak küçük farklılıklar olsa da eliptik kesiğin çevresinde bulunan 1. ve 3. noktalarda optik fotonları eliptik kesiğin şeklinden dolayı PMT nin fotokatoduna optik olarak odaklanıldığı değerlendirilmiştir. Şekil 4.4'te pozisyon 3 için simülasyonla elde edilen görüntü verilmiştir.

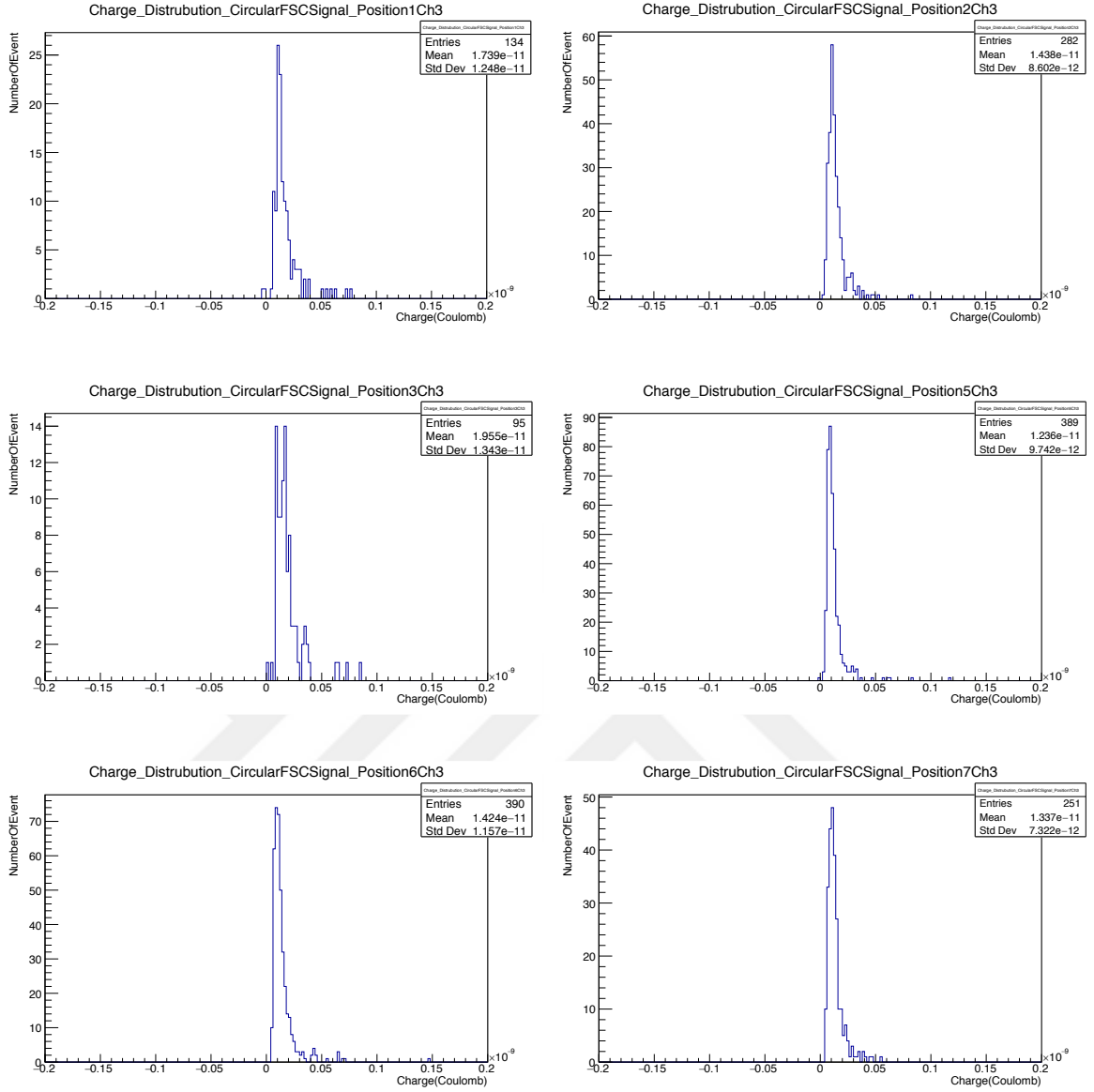


Şekil 4.4: 4.778 GeV enerjili kozmik müonun üzerinde eliptik kesik bulunan FSC detektörünün 3. pozisyonundan geçerken oluşturduğu optik fotonlar.

Şekil 4.4' de FSC detektöründen geçen müonun sintilatör içerisinde oluşturduğu optik fotonlar gösterilmektedir. Şekilde yeşil renkte görünen fotonlar sadece PMT ye ulaşan optik fotonları göstermektedir. Şekil 4.4'te görüldüğü gibi bazı optik fotonlar eliptik kesğin bulunduğu yerden yansıyıp doğrudan PMT'ye ulaşabilmektedir. Kesğin böyle katkıları olsa da Eliptik FSC detektörü simülasyon ve datadan görüldüğü üzere uniform bir detektördür.

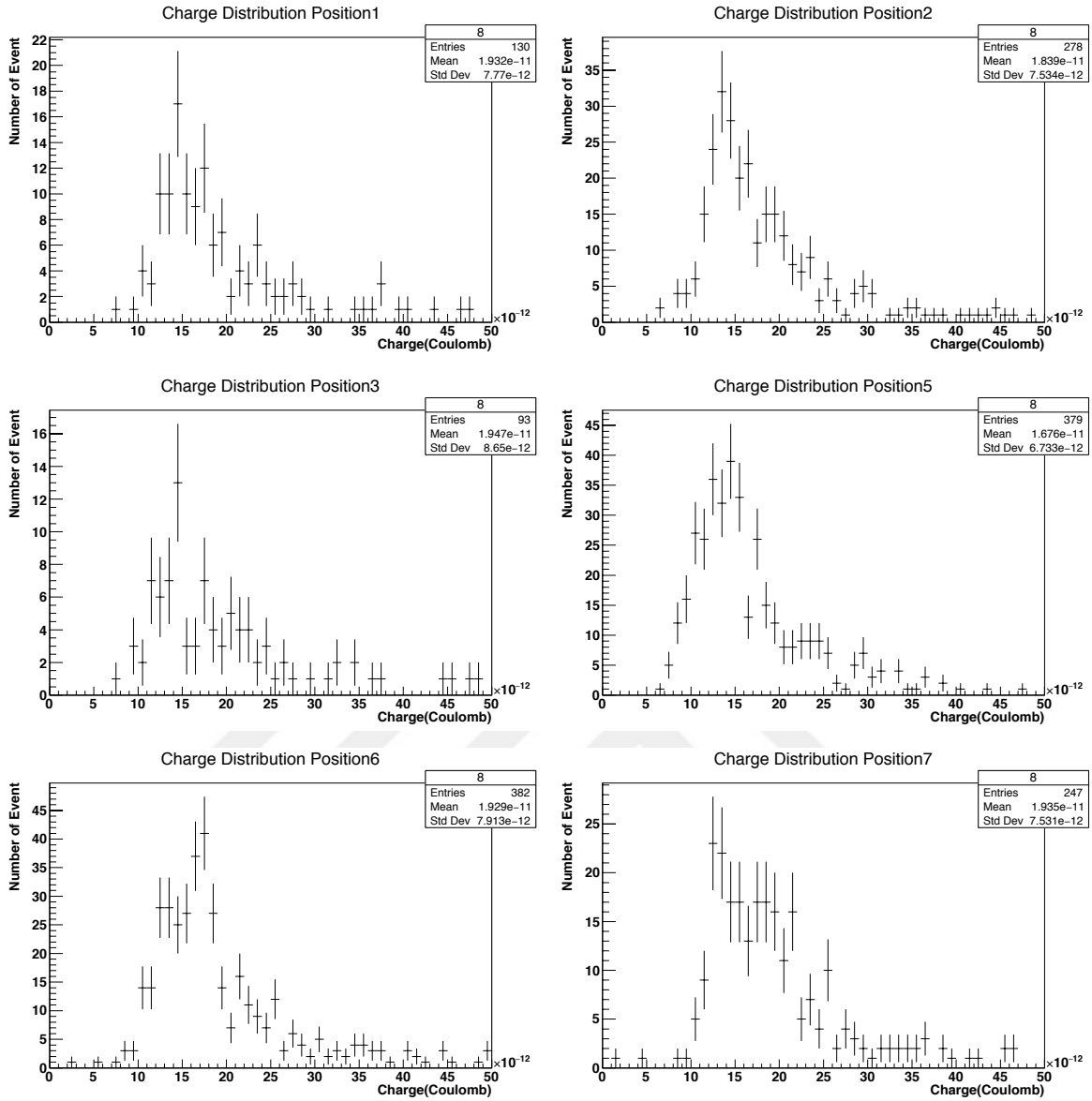
Benzer şekilde üzerinde dairesel kesik bulunan FSC detektörü de 9 pozisyona bölünerek incelenmiştir. Fakat dairesel FSC detektöründeki kesğin eliptik kesğe göre çok büyük olması data sırasında sadece 6 pozisyonu kullanabilmemize olanak sağlamıştır. Bu 6 noktanın yük dağılımı histogramları Şekil 4.5'te verilmektedir.

Şekil 4.5'te gösterilen yük dağılımları 1, 2, 3, 5, 6 ve 7 pozisyonları için simüle edilmiştir. Pozisyon 4, 8 ve 9 sintilatörün kesildiği yere denk geldiğinden ölçüm almak mümkün değildir. Şekil 3.5 ve 3.6 da gösterildiği gibi eliptik FSC detektörü ile dairesel kesikli FSC detektörü kozmik müon teleskop sisteminde ölçüm alınırken birbirlerine ters koyulmuşlardır. Bu yüzden eliptik FSC detektörünün 1, 2 ve 3 pozisyonları dairesel kesikli FSC detektörünün 7, 8 ve 9. pozisyonlarına denk gelmektedir. Ölçümler sonucunda elde edilen Şekil 4.5'te verilen yük dağılımlarına karşılık gelen üzerinde dairesel kesik bulunan FSC detektörünün GEANT4 simülasyonu sonucu elde edilmiş olan yük dağılımı grafikleri Şekil 4.6'da verilmiştir.



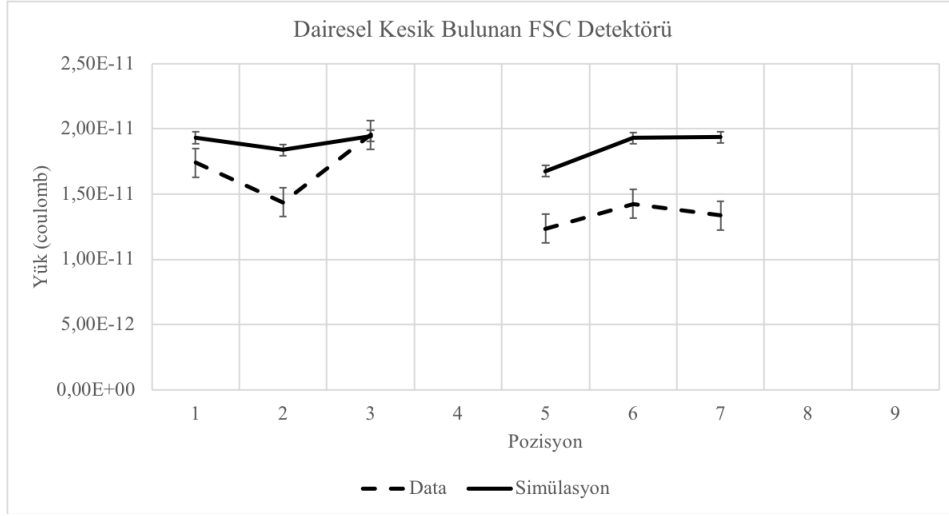
Şekil 4.5: Dairesel kesikli FSC detektörünün pozisyonlara göre yük dağılımları.

Şekil 4.6’da gösterilen yük dağılımları oluşturulurken simülasyon, detektörün datası sonucunda elde edilen kozmik teleskop sistemindeki 3 detektörden de geçen parçacıklar dikkate alınarak koşturulmuştur. Böylelikle, daha gerçekçi bir simülasyon elde etmek amaçlanmıştır.



Şekil 4.6: Dairesel kesikli FSC detektörünün yapılan simülasyonu sonucunda oluşturulan pozisyonlara göre yük dağılımları.

Deney ve simülasyonun çıktılarının daha rahat görülebilmesi adına pozisyonlara göre simülasyon ve deneyden alınmış data sonucunda elde edilen yük dağılımlarının ortalama değerleri Şekil 4.7 de verildiği gibidir.

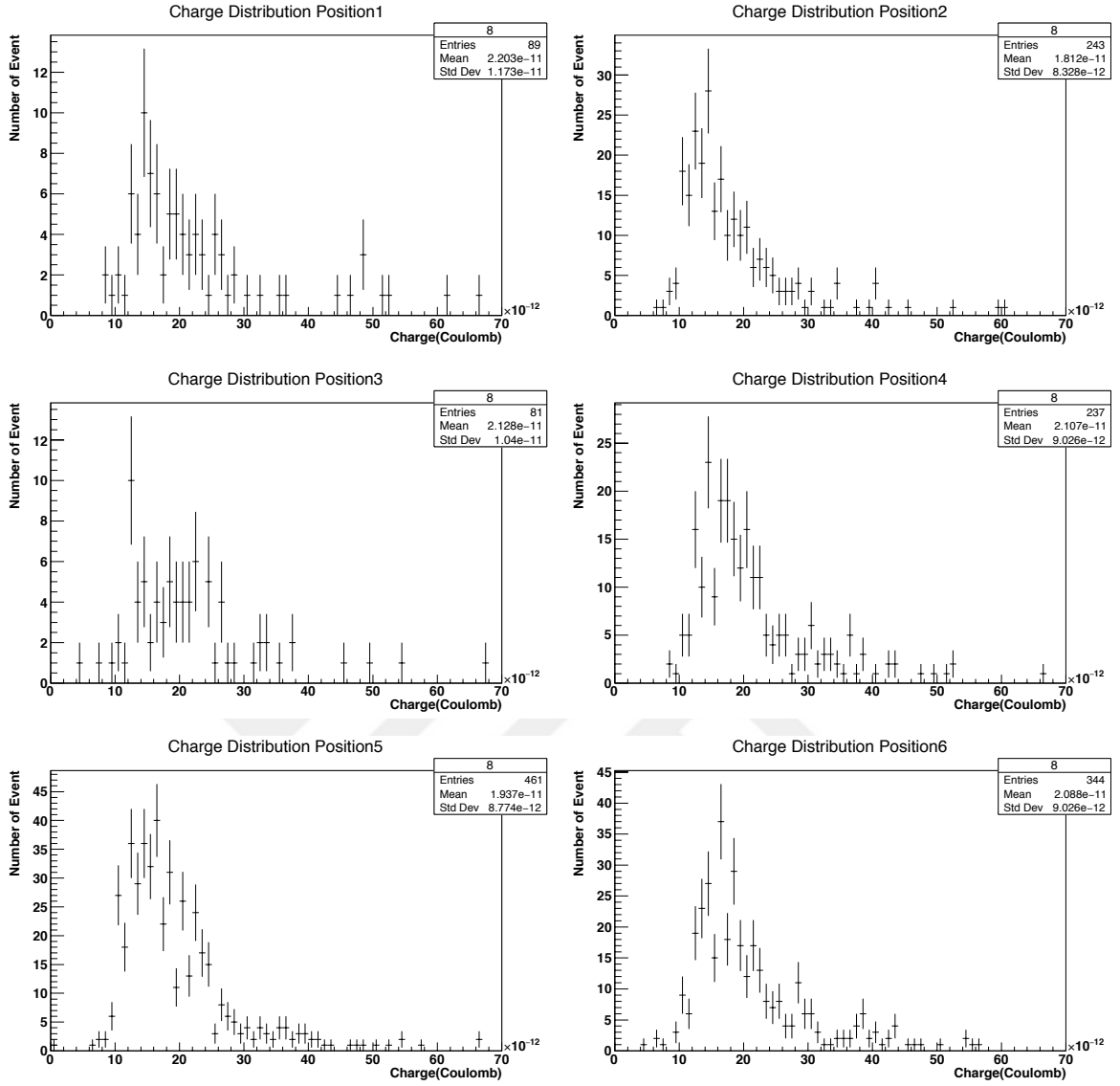


Şekil 4.7: Dairesel kesikli FSC detektörünün pozisyonlara göre data ve simülasyon yük dağılımlarının karşılaştırılması.

Şekil 4.7’ de verilen grafiğe bakıldığında 4, 8 ve 9 pozisyonlarında data alınamayıp simülasyon da koşturulamadığından bu pozisyonlarda yük dağılımları 0 olarak gözükmemektedir. Diğer pozisyonlarda sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu görülmektedir.

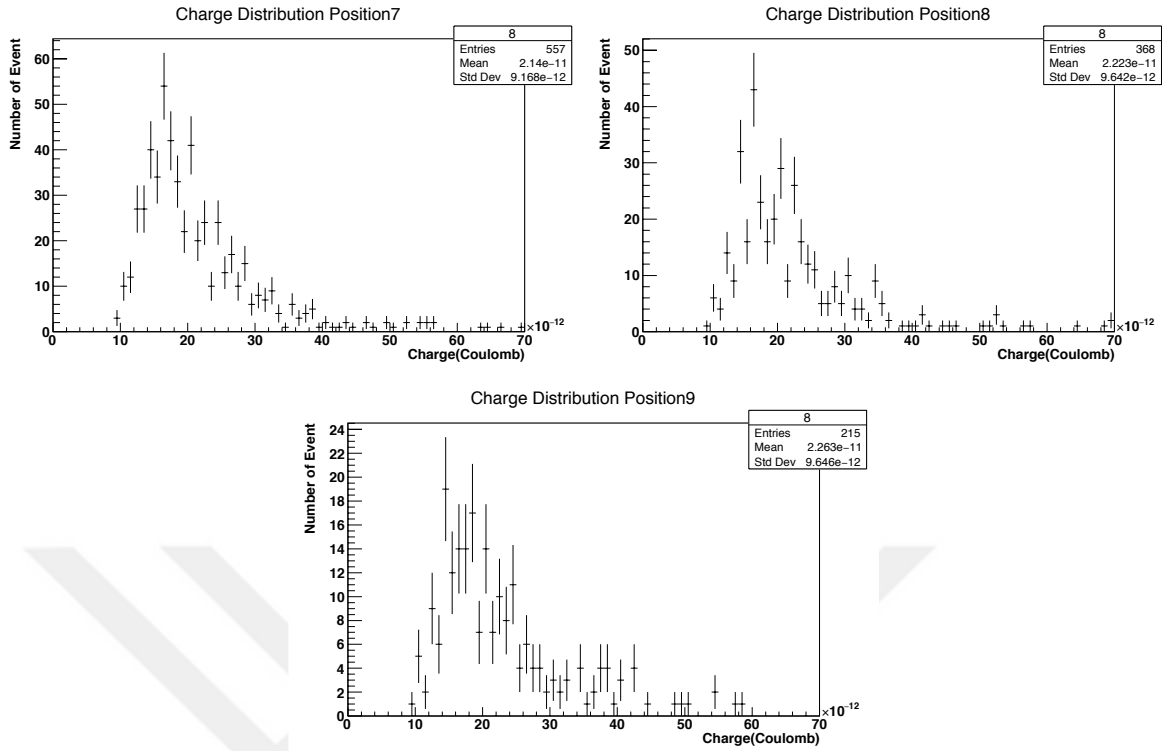
Bir de bu karşılaştırmalara ek olarak üzerinde kesik bulunmayan detektör simülasyonu yapılmış ve kesik bulunan detektörlerin simülasyonları ile karşılaştırılmıştır. Üzerinde kesik bulunan detektörlerin data alma noktaları birbirinden farklı olduğundan kesik bulunmayan detektör simülasyonları eliptik ve dairesel kesikli detektöre uygun şekilde yapılmıştır.

Şekil 4.8’de eliptik kesik bulunan detektörün data noktalarına uygun ve üzerinde kesik bulunmayan detektör için yapılmış olan GEANT4 simülasyonu yük dağılımı sonuçları verilmiştir.

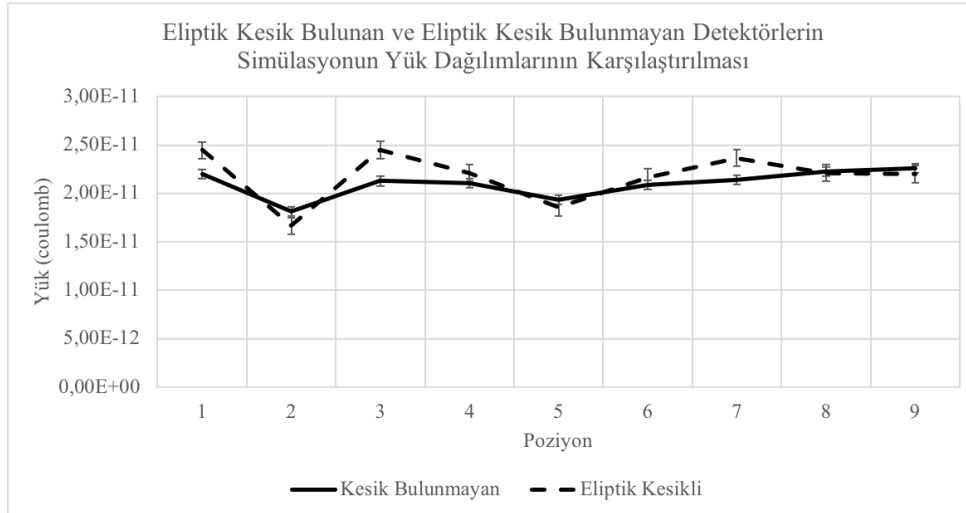


Şekil 4.8: Üzerinde kesik bulunmayan FSC detektörünün eliptik kesikli FSC detektörünün data alma pozisyonlarına göre yük dağılımları.

Şekil 4.8’de verilen 9 pozisyon için yük dağılımları daha önce Şekil 4.2’de verilen, üzerinde eliptik kesik bulunan FSC detektörü simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunun daha iyi görülebilmesi amacıyla her bir nokta için histogramların yük dağılımlarının ortalama değerleri alınıp grafik haline getirilmiştir. İki simülasyonun yük dağılımı ortalamalarını veren grafik Şekil 4.9’da görülmektedir.

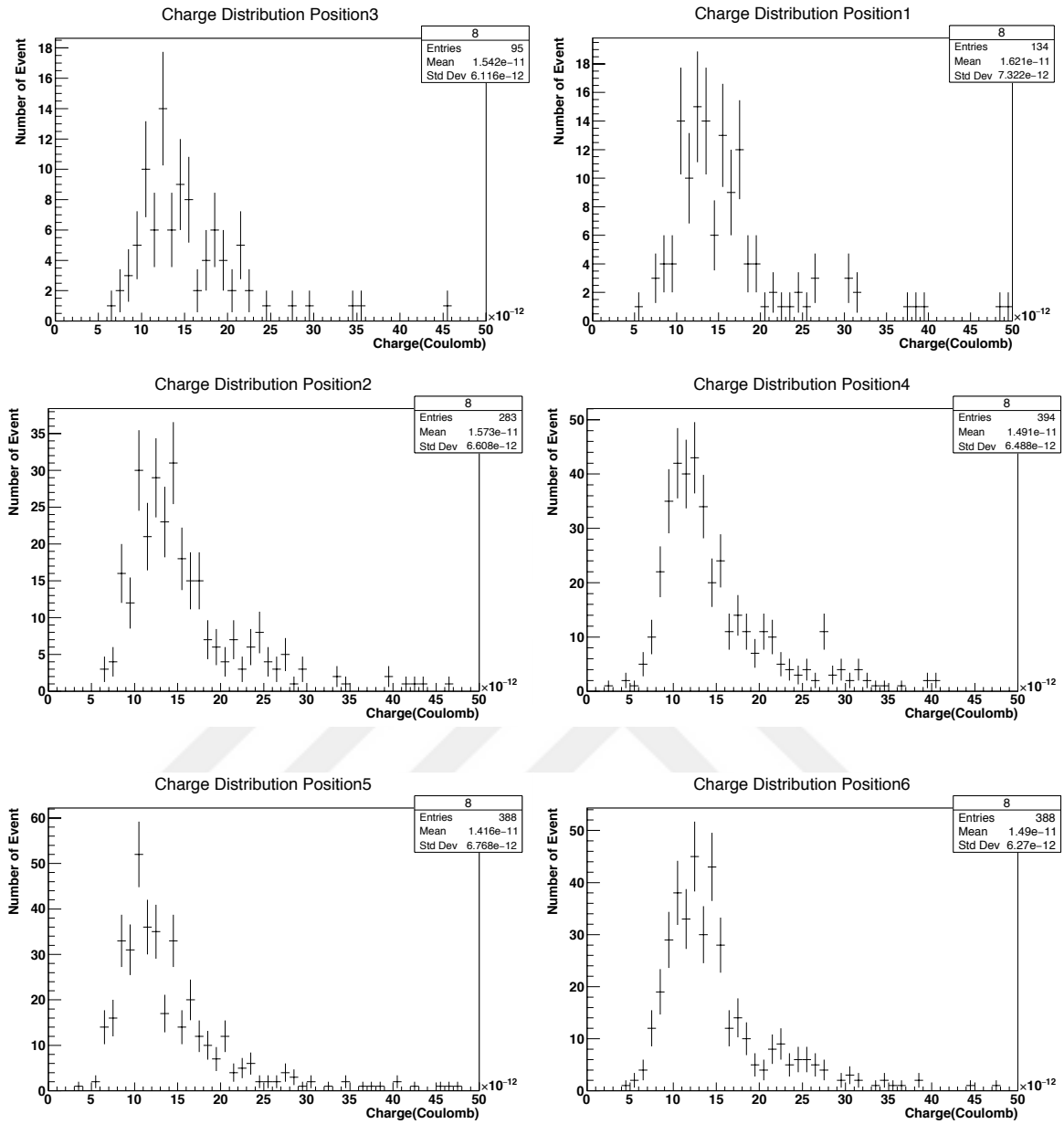


Şekil 4.8 (devam): Üzerinde kesik bulunmayan FSC detektörünün eliptik kesikli FSC detektörünün data alma pozisyonlarına göre yük dağılımları.

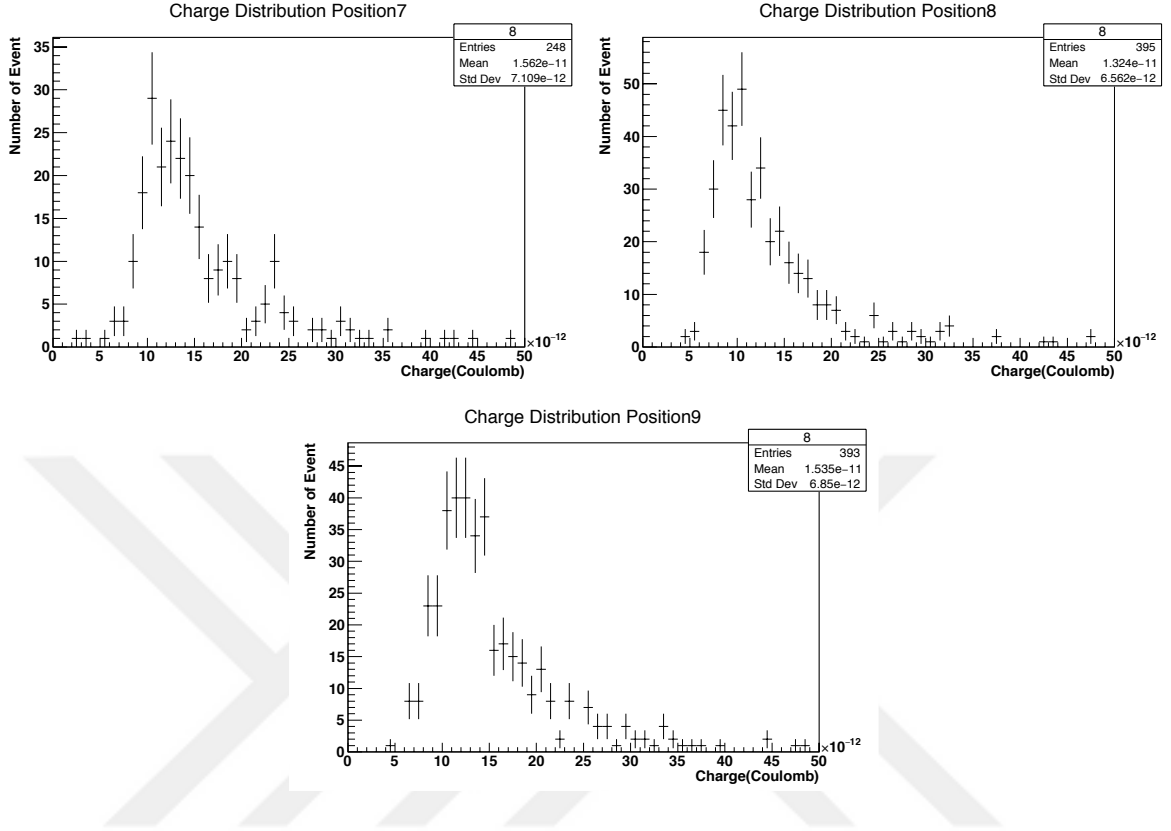


Şekil 4.9: Üzerinde kesik bulunmayan FSC detektörü ile eliptik kesikli detektörün pozisyonlara göre yük dağılımlarının karşılaştırılması.

Son olarak üzerinde kesik bulunmayan detektör simülasyonu ve dairesel kesik bulunan FSC detektörü simülasyonu karşılaştırılmıştır. Dairesel kesikli detektör pozisyonlarına göre oluşturulan kesiksiz simülasyonun yük dağılımları Şekil 4.10'da verilmektedir.



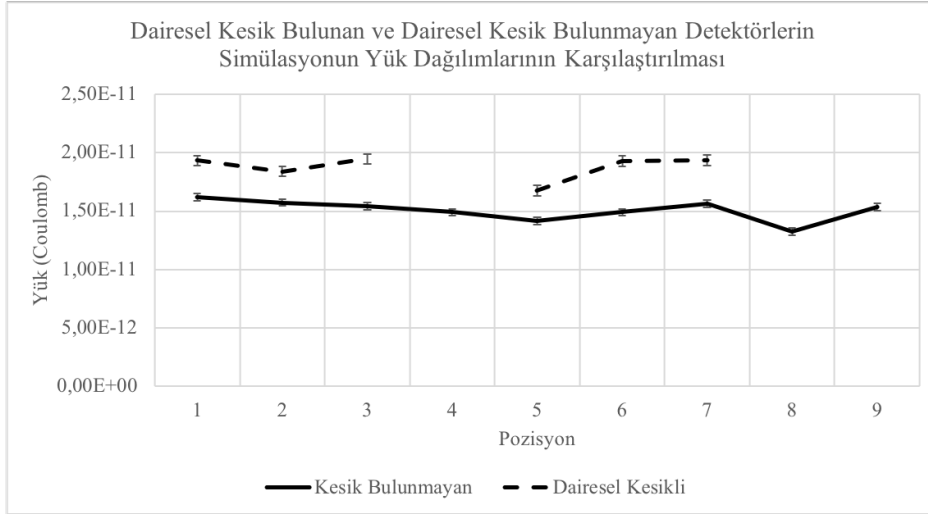
Şekil 4.10: Üzerinde kesik bulunmayan FSC detektörünün dairesel kesikli FSC detektörünün data alma pozisyonlarına göre yük dağılımları.



Şekil 4.10 (devam): Üzerinde kesik bulunmayan FSC detektörünün dairesel kesikli FSC detektörünün data alma pozisyonlarına göre yük dağılımları.

Normalde dairesel kesikli detektörde 6 pozisyona bakılmasına karşın kesiksiz detektör için oluşturulan simülasyonda 9 pozisyona da bakılmıştır. Şekil 4.10’da verilen dağılımlar, daha önce dairesel kesikli simülasyon için Şekil 4.6’da verilen dağılımlarla karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmanın sonucunu daha iyi görebilmek için pozisyonlara göre yük dağılımlarını gösteren grafik Şekil 4.11’de verilmiştir.

Şekil 4.11’de verilen grafikte görülen kesikli çizgilerin 4, 8 ve 9 pozisyonlarında 0’a düşmesini, dairesel kesikli FSC detektörü için yapılan simülasyonda detektörün sintilatörünün kesilmiş olduğu yerlere denk gelmesinden kaynaklanmaktadır. Bu karşılaştırmanın sonucunda anlaşılmıştır ki detektör kesikli de kesiksiz de olsa çıkış sinyalleri her pozisyon için aynı değerlerde seyretmektedir. Fakat, kesiksiz detektör simülasyonu ve dairesel kesikli detektörün simülasyon sonuçları göstermektedir ki detektörün üzerinde kesik olduğunda PMT’ye ulaşan optik fotonların sayısı biraz daha fazladır.



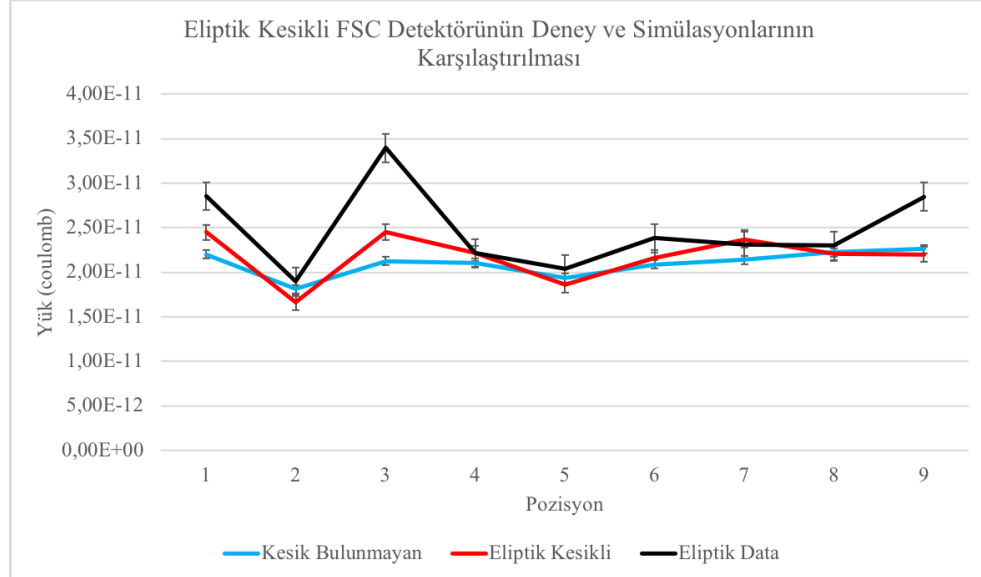
Şekil 4.11: Üzerinde kesik bulunmayan FSC detektörü ile dairesel kesikli detektörün pozisyonlara göre yük dağılımlarının karşılaştırılması.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tezde, CMS-HCAL detektörünün çok ileri bölgelerinde yer alan ve LHC ışın hattı üzerinde farklı noktalara yerleştirilmiş plastik sintilatör bazlı FSC detektörlerinin üzerinde çalışılmış ve farklı geometrilere sahip sintilatörlerin haritalandırma çalışması yapılmıştır. Bu haritalandırma çalışmasındaki amaç, sintilatörlerin farklı geometrik kesiklerden dolayı iç yansımalarından nasıl etkilendiğini deneysel ve simülasyon ile belirlemektir.

Önceki bölümde, FSC detektörleri ile kozmik müonlar kullanılarak yapılan ölçümlerden eliptik, dairesel ve kesiksiz sintilatörlerden elde edilen yük dağılımları verilmiştir. Bu üç farklı geometriye sahip sintilatörün GEANT simülasyonlarından elde edilen yük dağılımları da yine bir önceki bölümde verilmiştir.

Eliptik kesik bulunan sintillatör için yapılan simülasyonlardan elde edilen yük dağılımları ile kozmik müonlar ile yapılan deneysel ölçümler, kesiksiz sintillatör için yapılan simülasyonlardan elde edilen yük dağılımları ile karşılaştırmalı olarak Şekil 5.1’de verilmiştir.

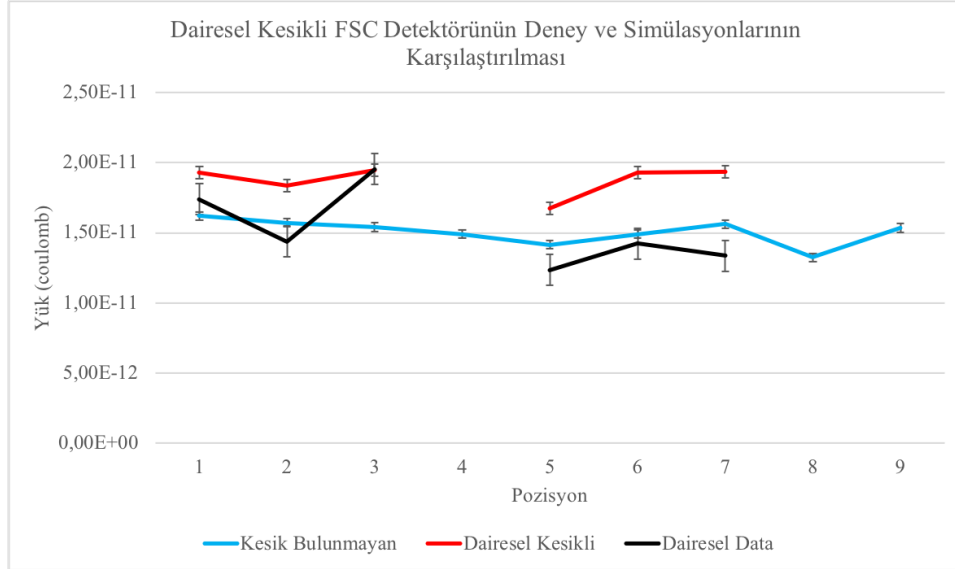


Şekil 5.1: Eliptik kesikli FSC detektörünün data sonuçlarının üzerinde kesik bulunan ve kesik bulunmayan simülasyonları ile karşılaştırılması.

Şekil 5.1’ de görüldüğü üzere yapılan simülasyonlar ve data birbiriyle büyük ölçüde uyuşmaktadır. Bazı noktalarda, örneğin 3. noktada FSC sintilatöründe ölçülen yük dağılımının simülasyon ile elde edilen yük dağılımlarında fazla olduğu görülmektedir. Bu pozisyonda gözlemlenen farkın, sintilatörden geçen kozmik müonların enerjilerinden 4GeV den çok az

olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Diğer bir yandan, eliptik kesikli sintilatörlerin simülasyonlarından elde edilen yük değerlerinin 1, 3 ve 7. pozisyonlarda kesiksiz sintilatör için yapılan simülasyondan elde edilen yük değerlerinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Aslında bu fark çok fazla değildir ancak, bu noktalardan katoda ulaşan optik foton sayıları bazında bakıldığında 3. Pozisyonda eliptik kesik bulunan sintilatörden 64, kesiksiz sintilatörden 56 olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra, 2. ve 5. pozisyonlarında yük dağılımlarının azaldığı gözlemlenmiştir, çünkü bu pozisyonlar detektörün orta noktasına denk gelmektedir. 2 ve 5 noktalarında sintilatörün eliptik kesiği üzerine doğru giden fotonların kesiğe çarpıp geri yansırken PMT üzerine değil de diğer taraflara doğru yayılacağı aşıkardır. Bu sebeple bu pozisyonlarda yük yoğunluklarının diğer pozisyonlara göre azaldığı düşünülmektedir. Sonuçlar arasında çok büyük farklılıklar olmaması dolayısıyla eliptik kesikli sintilatörün doğrusal (uniform) olduğu söylenebilir.

Bu çalışmada incelenen diğer FSC sintilatör dairesel kesiğe sahiptir. Dairesel kesik bulunan sintilatör için yapılan simülasyonlardan edilen yük dağılımları ile kozmik müonlar ile yapılan deneysel ölçümler, kesiksiz sintilatör için yapılan simülasyonlardan elde edilen yük dağılımları ile karşılaştırmalı olarak Şekil 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5.2: Dairesel kesikli FSC detektörünün data sonuçlarının üzerinde kesik bulunan ve kesik bulunmayan simülasyonları ile karşılaştırılması.

Şekil 5.2’de görüldüğü gibi, 4, 8 ve 9 pozisyonları dairesel kesiğin olduğu yerlere denk geldiğinden, bu noktalardan yük dağılımı elde edilmemiştir. Dairesel kesikli ve kesiksiz

sintilatörlerin simülasyonlarından elde edilen yük dağılımlarına bakıldığında, kesikli sintilatörde daha fazla optik fotonun PMT katoduna ulaştığı gözlemlenmiştir. Aynı şartlar altında dairesel kesikli ve kesiksiz sintilatör için yapılan simülasyon sonuçları, detektör üzerinde kesik olduğunda PMT'ye yaklaşık 10-15 fazladan optik fotonun ulaştığını göstermektedir. Fakat, her iki sintilatörün simülasyonlarından diğer pozisyonlar için elde edilen yük dağılımlarının yaklaşık aynı değerlerde seyrettiği gözlemlendiğinden sintilatörlerin doğrusal (uniform) olduğu söylenebilir. Dairesel kesikli sintilatörler ile kozmik müon deneylerinden elde edilen yük dağılımlarının, simülasyon sonucunda elde edilen yük dağılımlarından daha az olduğu görülmektedir. Bunun sebebinin, sintilatör üzerindeki dairesel kesitlerin yeterince parlatılmadığı, yansıtma katsayısının simülasyonda kullanılanıdan çok az farklı olduğu düşünülmüştür, çünkü yük dağılımları ortalamaları data ve simülasyonda benzerdir.

Bu tez çalışmasında, yapılan deneyler ve gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları, FSC detektöründe elde edilen yük dağılımlarının sintilatör üzerinde bulunan kesikler sebebiyle anlamlı miktarda değişmediğini ve kesikli sintilatörlerin doğrusal (uniform) olduğunu göstermiştir.

KAYNAKLAR

- [1]. Patrignani, C. et al. (Particle Data Group), 2016, Review of Particle Physics, *Chinese Physics C*, 40 (10), 100001.
- [2]. Nakamura, K. et al. (Particle Data Group), 2010, Review of Particle Physics, *Journal Physics*, 37 (2010), 075021.
- [3]. Leo, W. R., 1994, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments A How-to Approach*, Springer-Verlag, Berlin.
- [4]. Bengtson, B., and Moszyński, M., 1974, Energy transfer and light collection characteristics for different types of plastic scintillators, *Nuclear Instruments and Methods* 117 (1): 227-232.
- [5]. Birks, J. D., 1967, *The Theory and Practice of Scintillation Counting*, Pergamon Press, Edinburgh.
- [6]. Knoll, G. F., 2000, *Radiation Detection and Measurement*, John Wiley & Sons, Michigan.
- [7]. Grupen, C., and Schwartz, B. A., 2008, *Particle Detectors*, Cambridge University Press, New York.
- [8]. Flyct, S. O., and Marmonier, C., 2002, *Photomultiplier Tubes: Principles & Applications*, Photonis, Brive.
- [9]. Hamamatsu Photonics K.K., 2006, *Photomultiplier Tubes Basics and Applications*, Hamamatsu Photonics K.K., Tokyo.
- [10]. Geant4 Collaboration, Agostinelli, S., Allison, J., and et al., 2003, Geant4—a simulation toolkit, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A* 506, 250–303.
- [11]. Booch, G., 1994, *Object-Oriented Analysis and Design with Applications*, The Benjamin/Cummings Publishing Co. Inc., Berlin.
- [12]. OpenGL Architecture Review Board, 1996, *OpenGL Reference Manual: The Official Reference Document for OpenGL*, Addison-Wesley, Reading.
- [13]. Tanaka, S., and Kawaguchi, M., 1997, DAWN for GEANT4 visualization, *Proceedings of the CHEP '97 Conference*, Berlin.

- [14]. Perl, j., 2000, HepRep: a generic interface definition for HEP event display representables, *Proceedings of the CHEP 2000 Conference*, Padova.
- [15]. Root Data Analysis, 2012, *ROOT Data Analysis Framework*, <https://root.cern.ch/root/html/doc/guides/users-guide/ROOTUsersGuide.html>, [Ziyaret tarihi: Mayıs 29, 2018].
- [16]. Bernard, G., 2001, Abstract interfaces for data analysis; component architecture for data analysis tools, *Proceedings of the CHEP 2001 Conference*, Beijing.
- [17]. Couet, O., 2001, ANAPHE - 00 Libraries and tools for data analysis, *Proceedings of the CHEP 2001 Conference*, Beijing.
- [18]. Johnson, T., 2001, Java Analysis Studio (JAS) 3.0, *Proceedings of the CHEP 2001 Conference*, Beijing.
- [19]. CMS collaboration, 2010, Physics and beam monitoring with forward shower counters (FSC) in CMS, *CMS Technical Note*, Geneva.
- [20]. Albrow, M., Collins, p., and Penzo, A., 2014, Forward shower counters for diffractive physics at the LHC, *International Journal of Modern Physics A*, (World Scientific Publishing Company), Geneva.
- [21]. Eljen Technology, 2008; *Eljen Technology*, <https://eljentechnology.com/products/plastic-scintillators/ej-200-ej-204-ej-208-ej-212>, [Ziyaret tarihi: 13 Mayıs 2018].
- [22]. Agilent Technologies, 2000, *Infiniium 900A Series Oscilloscope User's Guide*, Agilent Technologies, Chicago.
- [23]. Caen Electronic Instrumentation, 2000, *Caen Electronic Instrumentation*, <http://www.caen.it>. [Ziyaret Tarihi: 1 Haziran 2018].
- [24]. Python Software Foundation, 2012, *Python*, Python Software Foundation, <https://docs.python.org/2/tutorial/index.html>, [Ziyaret tarihi: 1 Haziran 2018].
- [25]. Hagmann, C., Lange, D., Verbeke, J. , and Wright, D., 2012, Cosmic-ray Shower Library (CRY), *Lawrence Livermore National Laboratory*, Padova.

EKLER

EK 1. Tezde kullanılmış olan FSC detektörü Sintilatörünün Geant4 tanımlaması.

[illegible]

EK 2. Dairesel Kesikli Sintilatör Geometrisinin GEANT4 Kodu.

EK 3. Işık Klavuzunun GEANT4 Materyal Tanımlaması Kodu.

```

346 // PMMA LightGuide Material Properties Table
347
348 G4double PMMA_Energy[] = {4.101118425eV,4.097588863eV,4.090497026eV,4.08342419eV,4.076375771eV,
    4.069365eV,4.058867366eV,4.050169443eV,4.041508718eV,4.024258728eV,4.010564397eV,4.00034175eV,
    3.990183926eV,3.973342905eV,3.958310863eV,3.938431669eV,3.92366213eV,3.904116282eV,3.883182486eV,
    3.851397614eV,3.834127841eV,3.81393593eV,3.792412129eV,3.769616423eV,3.747104449eV,3.726326306eV,
    3.704326907eV,3.685464695eV,3.655399094eV,3.638439497eV,3.62024066eV,3.600842007eV,3.581660485eV,
    3.561321189eV,3.53722093eV,3.512120968eV,3.488679817eV,3.465539813eV,3.443976634eV,3.427657312eV,
    3.412740835eV,3.390594059eV,3.360314826eV,3.330562668eV,3.303655054eV,3.274902123eV,
    3.239925995eV,3.214457362eV,3.189386016eV,3.164702735eV,3.143543682eV,3.120598627eV,
    3.105147488eV,3.080735296eV,3.055709533eV,3.03037216eV,3.010706173eV,2.98585852eV,2.960477175eV,
    2.932780891eV,2.90738998eV,2.885984246eV,2.862265726eV,2.836362039eV,2.806735938eV,2.781005821eV,
    2.758981005eV,2.730141567eV,2.704238387eV,2.673484749eV,2.642684628eV,2.616947996eV,
    2.591707819eV,2.569753707eV,2.546096214eV,2.522870334eV,2.500069406eV,2.483563166eV};
349 const G4int PMMA_nu = sizeof(PMMA_Energy)/sizeof(G4double);
350
351 G4double PMMA_Efficiency[] =
    {0.41998,0.44098,0.46067,0.47905,0.50268,0.52368,0.54994,0.56963,0.59589,0.62347,0.63923,0.65367,0.66418,
    0.6747,0.68521,0.69573,0.70493,0.7102,0.72597,0.7352,0.73784,0.7523,0.75757,0.76285,0.77337,0.78258,0.7
    9048,0.80232,0.81285,0.82206,0.82733,0.83391,0.84313,0.84971,0.85631,0.86159,0.86687,0.87084,0.87874,0.8
    8008,0.88272,0.88669,0.89067,0.89465,0.89731,0.89867,0.90528,0.90401,0.9093,0.90803,0.91069,0.91466,0.91
    338,0.91342,0.91346,0.9135,0.91223,0.91621,0.91626,0.91631,0.91636,0.92034,0.91776,0.91781,0.91918,0.917
    92,0.91928,0.91803,0.92071,0.9221,0.92217,0.92354,0.9236,0.92365,0.9224,0.92246,0.92252,0.92256};
352 assert(sizeof(PMMA_Efficiency) == sizeof(PMMA_Energy));
353
354 G4double RefrIndexPMMA_Energy[]={1.02651eV,1.0483eV,1.0846eV,1.1209eV,1.15961eV,1.19107eV,1.22737eV,
    1.26124eV,1.29754eV,1.3411eV,1.37981eV,1.41611eV,1.45725eV,1.49112eV,1.52983eV,1.56854eV,
    1.59999eV,1.63387eV,1.675eV,1.71857eV,1.76695eV,1.80808eV,1.8492eV,1.88791eV,1.91452eV,
    1.95565eV,2.00161eV,2.04516eV,2.0766eV,2.11048eV,2.14434eV,2.18062eV,2.21933eV,2.25561eV,
    2.29915eV,2.34995eV,2.37897eV,2.41767eV,2.45636eV,2.50232eV,2.55069eV,2.59421eV,2.63533eV,
    2.67644eV,2.72482eV,2.75866eV,2.7901eV,2.82638eV,2.86024eV,2.89409eV,2.93036eV,2.95696eV,
    2.98597eV,3.01498eV,3.04884eV,3.0657eV};
355 const G4int PMMA_RInu = sizeof(RefrIndexPMMA_Energy)/sizeof(G4double);
356
357 G4double
    RefractiveIndexPMMA[]={1.4814832,1.4816215,1.4818635,1.4821055,1.4824165,1.4826585,1.4829005,1.4832114,1
    .4834879,1.48373,1.48411,1.484421,1.484732,1.4850774,1.4854229,1.4857339,1.4861138,1.4863902,1.4867358,1
    .4869779,1.4875305,1.487876,1.4884284,1.4887739,1.4891192,1.4894992,1.4900518,1.4905008,1.4908806,1.4911
    916,1.4916404,1.4920893,1.4925383,1.4929872,1.4935741,1.4940578,1.49461,1.4951279,1.4956803,1.4962673,1.
    4969923,1.4976827,1.4982351,1.498891,1.4995125,1.5001683,1.5006171,1.5011349,1.5016872,1.5022396,1.50279
    19,1.5033096,1.5037929,1.5043796,1.5048284,1.505208};
358 assert(sizeof(RefractiveIndexPMMA) == sizeof(RefrIndexPMMA_Energy));

```

EK 4. Işık klavuzunun GEANT4 geometrisinin tanımlaması.

```

38
39 //....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....
40
41 LightGuide::LightGuide(G4RotationMatrix *pRot,
42                        const G4ThreeVector &tlate,
43                        G4LogicalVolume *pMotherLogical,
44                        G4bool pMany,
45                        G4int pCopyNo,
46                        DetectorConstruction* c)
47 //Pass info to the G4PVPlacement constructor
48 :G4PVPlacement(pRot,tlate,
49               //Temp logical volume must be created here
50               new G4LogicalVolume(new G4Trd("temp",1,1,1,1),
51                                   G4Material::GetMaterial("Vacuum"),
52                                   "temp",0,0,0),
53               "lightguide",pMotherLogical,pMany,pCopyNo,fConstructor(c)
54 {
55     CopyValues();
56
57     //Light Guide
58     fLightGuideS = new G4Trd ( "LightGuide", fLightGuideThickness/2, fLightGuideThickness/2, fLightGuideY1/2,
59                               fLightGuideY2/2, fLightGuideZ/2 );
59     fLightGuideLV = new G4LogicalVolume ( fLightGuideS, G4Material::GetMaterial("PMMA"), "LightGuideLV",0,0,0);
60
61
62
63     VisAttributes();
64     SurfaceProperties();
65
66     SetLogicalVolume(fLightGuideLV);
67 }
68
69 //....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....ooo00000ooo.....
70

```

EK 5. Python data analiz kodu.

```

1  import ROOT
2  from ROOT import*
3  #from rootutils import*
4  from numpy import genfromtxt
5  import glob, os
6  import ast
7
8  path = glob.glob('/Users/BerkanKaynak/DataAnalyze/Telescope/CircularCut/Position*')
9  OutFile = TFile("RIOutFile.root", "RECREATE")
10
11  RUNvsCHARGE = TH2F("RUNvsCHARGE", "RUNvsCHARGE", 200, 0., 2e-09, 300, 0., 300 )
12  RUNvsCHARGE.SetYTitle("RunNumbers")
13  RUNvsCHARGE.SetXTitle("SumOfCharge")
14
15  CHR = TH1F("CHR", "CHR", len(path), 0, len(path))
16  CHR.SetXTitle("RunNumbers")
17  CHR.SetYTitle("SumOfCharge")
18
19  for f in range(len(path)):
20
21      command1 = "cd " + path[f]
22      os.system(command1)
23      files = glob.glob(path[f]+"*/Run*.csv") or glob.glob(path[f]+"*/measurement*.csv")
24      P = path[f].replace("/Users/BerkanKaynak/DataAnalyze/Telescope/CircularCut/", "")
25
26      charge_Channel_1 = TH1F("Charge_Distribution_PMTSignal_"+ P+"Ch1", "Charge_Distribution_PMTSignal_"+ P+"Ch1", 200, -0.2e-09, 0.2e-09)
27      charge_Channel_2 = TH1F("Charge_Distribution_PMTSignal_"+ P+"Ch2", "Charge_Distribution_PMTSignal_"+ P+"Ch2", 200, -0.2e-09, 0.2e-09)
28      charge_Channel_3 = TH1F("Charge_Distribution_PMTSignal_"+ P+"Ch3", "Charge_Distribution_PMTSignal_"+ P+"Ch3", 200, -0.2e-09, 0.2e-09)
29      charge_Channel_4 = TH1F("Charge_Distribution_PMTSignal_"+ P+"Ch4", "Charge_Distribution_PMTSignal_"+ P+"Ch4", 200, -0.2e-09, 0.2e-09)
30      charge_Channel_1.SetXTitle("Charge(Coulomb)")
31      charge_Channel_1.SetYTitle("NumberOfEvent")
32      charge_Channel_2.SetXTitle("Charge(Coulomb)")
33      charge_Channel_2.SetYTitle("NumberOfEvent")
34      charge_Channel_3.SetXTitle("Charge(Coulomb)")
35      charge_Channel_3.SetYTitle("NumberOfEvent")
36      charge_Channel_4.SetXTitle("Charge(Coulomb)")
37      charge_Channel_4.SetYTitle("NumberOfEvent")
38
39      print f
40
41
42  for i in range(len(files)):
43      my_data = genfromtxt(files[i], delimiter=',', skip_header=0)
44      Channel_1 = TH1F("histo_PMT_Ch1"+ files[i].replace(".csv", ""), "histo_PMT_Ch1" + files[i].replace(".csv", ""), len(my_data), my_data[0][0], my_data[-1][0])
45      Channel_2 = TH1F("histo_PMT_Ch2"+ files[i].replace(".csv", ""), "histo_PMT_Ch2" + files[i].replace(".csv", ""), len(my_data), my_data[0][0], my_data[-1][0])
46      Channel_3 = TH1F("histo_PMT_Ch3"+ files[i].replace(".csv", ""), "histo_PMT_Ch3" + files[i].replace(".csv", ""), len(my_data), my_data[0][0], my_data[-1][0])
47      Channel_4 = TH1F("histo_PMT_Ch4"+ files[i].replace(".csv", ""), "histo_PMT_Ch4" + files[i].replace(".csv", ""), len(my_data), my_data[0][0], my_data[-1][0])
48      Channel_1.SetXTitle("Time(second)")
49      Channel_1.SetYTitle("Volt(V)")
50      Channel_2.SetXTitle("Time(second)")
51      Channel_2.SetYTitle("Volt(V)")
52      Channel_3.SetXTitle("Time(second)")
53      Channel_3.SetYTitle("Volt(V)")
54      Channel_4.SetXTitle("Time(second)")
55      Channel_4.SetYTitle("Volt(V)")
56      for j in range(len(my_data)):
57          Channel_1.Fill(my_data[j][0], -my_data[j][1])
58          Channel_2.Fill(my_data[j][0], -my_data[j][2])
59          Channel_3.Fill(my_data[j][0], -(my_data[j][3]-0.01))
60      Max1 = Channel_1.GetMaximum()
61      Max2 = Channel_2.GetMaximum()
62      Max3 = Channel_3.GetMaximum()
63      Max4 = Channel_4.GetMaximum()
64      if Max1>0.02 and Max2>0.02 and Max3>0.02:
65          charge_Channel_1.Fill(Channel_1.Integral()*6.3e-12/50)
66          charge_Channel_2.Fill(Channel_2.Integral()*6.3e-12/50)
67          charge_Channel_3.Fill(Channel_3.Integral()*6.3e-12/50)
68      Channel_1.Write("Charge_HISTC1_"+P)
69      Channel_2.Write("Charge_HISTC2_"+P)
70      Channel_3.Write("Charge_HISTC3_"+P)
71      Channel_4.Write("Charge_HISTC4_"+P)
72      std = charge_Channel_3.GetStdDev()
73      mean = charge_Channel_3.GetMean()
74      a = mean + std
75      b = mean - std
76      c = a - b
77      SumCharge = c*100
78      r = path[f].replace("/Users/BerkanKaynak/DataAnalyze/Telescope/CircularCut/Position", "")
79      ast.literal_eval(r)
80      x=int(r)
81      y=x+1
82      RUNvsCHARGE.Fill(SumCharge, y)
83      CHR.Fill(y, SumCharge)
84      file = open("CircularCut_MeanOfChargesForAllPoints","a")
85      file.write("\n%s" % (r))
86      file.write("\n%10.4e" % (mean))
87      RUNvsCHARGE.Write("HISTRvsC")
88      CHR.Write("CHR")
89      file.close()
90
91  file.close()
92  def keepGUIalive():
93      rep = ''
94      while not rep in ['q', 'Q']:
95          rep = raw_input('enter "q" to quit: ')
96          if 1 < len(rep):
97              rep = rep[0]
98  keepGUIalive()

```

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Berkan KAYNAK
Doğum Yeri	Bursa
Doğum Tarihi	02.09.1990
Uyruğu	☒ T.C. ☐ Diğer:
Telefon	
E-Posta Adresi	berkankaynak1@gmail.com
Web Adresi	



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	Balıkesir Üniversitesi
Fakülte	Fen Edebiyat Fakültesi
Bölümü	Fizik Bölümü
Mezuniyet Yılı	27.06.2012

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Fakültesi
Anabilim Dalı	Fizik
Programı	Yüksek Enerji ve Plazma Fiziği

Makale ve Bildiriler	
B. Kaynak, S.Özkorucuklu, High Energy Cosmic Muons Interaction With Matter and GEANT4 Simulation, BPU9, 24-27 August 2015, İstanbul, (Poster Sunumu).	