ANKARA ÜNİVERSİTESİ
NÜKLEER BİLİMLER ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

RADYASYON ENERJİ ARALIĞI 1 MeV – 1 GeV İÇİN GEANT4 İLE PLASTİK SİNTİLATÖR ALGICIN BENZETİMİ

Selen ÖZŞİMŞEK

NÜKLEER ARAŞTIRMALAR VE TEKNOLOJİLERİ
ANABİLİM DALI

ANKARA
2020

Her hakkı saklıdır

Selen ÖZŞİMŞEK tarafından hazırlanan " **Radyasyon Enerji Aralığı 1 MeV - 1 GeV İçin Geant4 ile Plastik Sintilatör Algıcın Benzetimi** " adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Ankara Üniversitesi Nükleer Araştırmalar ve Teknolojileri Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Orhan ÇAKIR

Jüri Üyeleri:

Prof. Dr. Hatice Duran YILDIZ
Ankara Üniversitesi, Hızlandırıcı Teknolojileri Enstitüsü

Prof. Dr. Ali Murat GÜLER
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü

Prof. Dr. Orhan ÇAKIR
Ankara Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Niyazi MERİÇ

Enstitü Müdürü

Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik davranış ilkelerine uygun olarak elde edinildiğini ve sunulduğunu beyan ederim. Ayrıca, bu kurallar ve davranışların gerektirdiği şekilde, başka kaynaklardan aldığım tüm materyalleri ve sonuçları alıntı yaparak, bunlara kaynak gösterdiğimi beyan ederim.

Adı Soyadı: Selen ÖZŞİMŞEK

İmza



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

RADYASYON ENERJİ ARALIĞI 1 MeV – 1 GeV İÇİN GEANT4 İLE PLASTİK SİNTİLATÖR ALGICIN BENZETİMİ

Selen ÖZŞİMŞEK

Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü
Nükleer Araştırmalar ve Teknolojileri Anabilim Dalı
Hızlandırıcı ve Dedektör Teknolojileri Yüksek Lisans Programı

Danışman: Prof. Dr. Orhan ÇAKIR

Parçacıkların ve radyasyonun tespitinin gerçekleşebilmesi için bunların madde ile etkileşime girmesi gerekmektedir. Etkileşimlerin algılanması ve anlamlı bir çıktıya dönüşmesi algıçlar ile sağlanmaktadır. Tepki süresinin kısa, enerjiye hassas, ucuz ve güvenilir olması gerekliliği nedeni ile sintilasyon algıçları hem hızlandırıcı hem de hızlandırıcı dışı deneylerinde oldukça geniş kullanım alanına sahiptir. Bu algıçlarda yüklü bir parçacığın plastik sintilatör üzerine düşmesi sonucu oluşan sintilasyon ışığı ile parçacık ya da radyasyon tespiti söz konusudur. Bu tez çalışmasında, parçacık madde etkileşimleri, sintilatörlerin genel özellikleri ve parçacık fiziği deneylerinde kullanımı, ayrıntılı olarak da plastik sintilatörlerin uzay araştırmalarındaki kullanım alanları gözden geçirilmiştir. Plastik sintilatörün kullanıldığı yerde algıcın diğer bileşenleri ile birlikte çalışmasının benzetimi için Geant4 programı kullanılmıştır. Benzetim için kurulumda, öncelikle plastik sintilatör ve fotoçoğaltıcının büyüklük oranı değişiminin algılamaya etkisi incelenmiştir. Sintilatörde ışık toplama verimliliğini arttırmak için yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri olan plastik etrafına yansıtıcı kaplama kullanımının etkileri de araştırılmıştır. Bununla birlikte kaplamadaki enerji kaybı, sintilatörde depolanan enerji ve sintilatörde depolanan foton sayısı gibi parametreler analiz edilmiştir. Sonuç olarak, kaplamanın plastik sintilatörlerde ışığı içeride hapsetmesi ve plastik sintilatör hacmi ne kadar büyükse içerideki yansımaların ışığı güçlendirmesi verimi büyük ölçüde etkilediği gözlenmiştir.

2020, 56 sayfa

Anahtar Kelimeler: Sintilatör, Algıç, Geant4, Benzetim, Radyasyon

ABSTRACT

Master's Thesis

SIMULATION OF PLASTIC SCINTILLATOR DEDECTOR WITH GEANT4 FOR RADIATION ENERGY RANGE 1 MeV – 1 GeV

Selen ÖZŞİMŞEK

Ankara University
Institute of Nuclear Sciences

Supervisor: Prof. Dr. Orhan ÇAKIR

In order to detect particles and radiation, it is required that they interact with the material. The detection of the interactions and their conversion to a meaningful output is provided with the detector. Because of the short response time, sensitive to energy used, cheap and reliable, the scintillation detectors have a wide range of applications in both accelerator and non-accelerator experiments. Particle or radiation can be detected with scintillation light generated by a charged particle hitting the plastic scintillator. In this thesis study, interactions of particles with matter, general properties of scintillators, use of scintillators in particle physics experiments, and particularly plastic scintillators use in space research have been reviewed. The Geant4 program has been used to simulate the interoperability of the detector with other components where plastic scintillator is used. In the setup for simulation, the effect of the change in the size ratio of the plastic scintillator and the photo-multiplier on the detection has been investigated. The effects of using a reflective coating around plastic, one of the commonly used methods to increase the light collection efficiency in the scintillator, have also been searched. Besides, the parameters such as the energy loss in the coating, the energy stored in the scintillator, number of photon stored in the scintillator have been analyzed. As a result, it was observed that as the plastic scintillator volume increased, the reflections in the interior strengthened the light and the coating trapped the light in the plastic scintillators greatly affected the light efficiency.
2020, 56 pages

Key Words: Scintillator, Detector, Geant4, Simulation, Radiation

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması boyunca her konuda derin bilgisi ile bana yol gösteren, tez aşamasında karşılaştığım zorlukları kolayca aşmamda babacan tavrı ve güler yüzü ile beni hep destekleyen danışmanım Prof. Dr. Orhan ÇAKIR'a, tez çalışmamım son döneminde paha biçilemez yardımlarından dolayı Dr. Sinan KUDAY'a, hiçbir desteğini esirgemeyen ve tüm derdimi çeken biricik arkadaşım Denizhan ERENLER'e, mesafeleri sıfırlayıp ruh halimi hep yükselten hayatın karşıma çıkardığı en önemli insanlardan biri olan kardeşim Tansu YALÇIN'a, manevi desteğini bir an olsun esirgemeyen canım arkadaşım Burcu ALTUNTAŞ BÜYÜKBAYRAM'a ve Serdar AYDIN'a, tüm özverili ve anlayışlı yaklaşımından ötürü saygıdeğer Müdürüm Orhan ULUBEY'e, Burak DURMAZ'a, Yunus Emre KAHRAMAN'a, Burak DENİZ'e ve tüm çalışma arkadaşlarıma, bu zorlu süreçte hayatın getirdiği tüm yükü omuzlarımdan alan kanatsız meleğim annem Seyhan METİNOĞLU başta olmak üzere tüm aile fertlerine ve motivasyonumu her daim hep yüksek tutmamı sağlayan, bu yolda başarılı bir şekilde ilerlemem için biran bile elimi bırakmayan sevgili eşim Özgün Mustafa ÖZŞİMŞEK'e sonsuz teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Selen ÖZŞİMŞEK
Ankara, Ocak 2020

İÇİNDEKİLER

ÖZET iii

ABSTRACT iv

TEŞEKKÜR v

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ viii

ŞEKİLLER DİZİNİ x

ÇİZELGELER DİZİNİ xii

1. GİRİŞ 1

2. KURAMSAL TEMELLER 3

2.1 Parçacık ve Radyasyonun Madde ile Etkileşimi 3

2.1.1 Yüklü Parçacıkların Madde ile Etkileşimi 3

2.1.1.1 İyonlaşma Yolu ile Enerji Kaybı 3

2.1.1.2 Frenleme Işıması 7

2.1.1.3 Cherenkov Işıması 8

2.1.1.4 Çoklu Saçılma 9

2.1.2 Foton ile Madde Etkileşimi 10

2.1.2.1 Compton Saçılması 10

2.1.2.2 Fotoelektrik Olay 12

2.1.2.3 Çift Oluşumu 13

2.2 Sintilatör Algıçların Genel Özellikleri 13

2.3 Sintilatör Çeşitleri 15

2.3.1 Organik Sintilatörler 16

2.3.1.1 Saf Organik Kristaller 19

2.3.1.2 Sıvı Organik Çözeltiler 19

2.3.1.3 Plastik Sintilatörler 20

2.3.2 İnorganik Sintilatörler 21

2.3.3 Gaz Sintilatörler 24

2.3.4 Cam Sintilatörler 24

2.4 Fotoçoğaltıcı Tüp (PMT) ve Çalışma Prensipleri 24

3. MATERYAL VE YÖNTEM 29

3.1 Plastik Sintilatör Seçimi 29

3.2 Kaplama Malzemeleri 31

3.3 Fotoçoğaltıcı Modeli 32

3.4 Geant4 Benzetimi 33

4. BULGULAR 35

4.1 Geometri 35

4.2 Kaplamada Kaybedilen Enerji 36

4.3 Sintilatörde Depolanan Enerji 41

4.4 Sintilatörde Depolanan Foton Sayısı 45

5. TARTIŞMA VE SONUÇ 49

6. KAYNAKLAR 51

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	**Kütle numarası**
AMS	**Alpha Magnetic Spectrometer**
c	**Işık hızı**
CERN	**Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire**
cm	**Santimetre**
e	**Elektron yükü**
E	**Enerji**
eV	**Elektron volt**
F	**Kuvvet**
G	**Kazanç**
g	**Gram**
GeV	**Giga elektron volt**
Geant4	**GEometry ANd Tracking 4**
h	**Planck sabiti**
Js	**Joule saniye**
keV	**Kilo elektron volt**
kg	**Kilogram**
MeV	**Mega elektron volt**
m	**Metre**
mm	**Milimetre**
m_e	**Elektron kütlesi**
m	**Kütle**
NASA	**National Aeronautic and Space Administration**
nm	**Nanometre**
ns	**Nanosaniye**
N_A	**Avagadro sayısı**
N_e	**Elektron sayısı**
p	**Momentum**
TOF	**Time of Flight**
s	**Saniye**

v	**Hız**
z	**Parçacığın elektriksel yükü**
Z	**Atom numarası**
λ	**De Broglie dalga boyu**
γ	**Lorentz faktörü**
β	**Parçacığı rölativistik hızı**
θ_0	**Elektronun saçılma açısı**
ρ	**Yoğunluk**
τ	**Karakteristik zaman**
ν	**Frekans**

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Yüklü Parçacığın Elektron ile Etkileşimi. 4
Şekil 2.2. Bakır İçerisindeki Pozitif Müonların $\beta\gamma$ Değerine Karşı Durdurma Gücü Grafiği (Olive 2014). 7
Şekil 2.3. Atom Çekirdeği Tarafından Saptırılan Yüklü Bir Parçacığın Oluşturduğu Frenleme Radyasyonu (http://physicsopenlab.org/2017/08/02/bremsstrahlung-radiation/ 2019). 8
Şekil 2.4. Bir Test Reaktörünün Çekirdeğinde Cherenkov Işıması. 9
Şekil 2.5. Çoklu Coulomb Saçılımının Etkisi. 10
Şekil 2.6. Compton Saçılması. 11
Şekil 2.7. Fotoelektrik Olay. 12
Şekil 2.8. Çift Oluşumu (Turan 2016). 13
Şekil 2.9. Fotoçoğaltıcı Tüpün Yapısı. 14
Şekil 2.10. Tipik Bir π Orbital Diyagramı Enerji Seviyeleri (Ščetinec 2017). 18
Şekil 2.11. Plastik Sintilatörler (https://eljentechnology.com/products/plastic-scintillators/ej-200-ej-204-ej-208-ej-212 2019). 20
Şekil 2.12. İnorganik Bir Sintilatörün Enerji Bantı Yapışı (Byun t.y.). 22
Şekil 2.13. Enerji bantları saf (solda) ve katkılı (sağda) kristaldir (Grupen 2008). 23
Şekil 2.14.PMT'nin Yapısı (Penttila 2015). 25
Şekil 2.15.Yarıiletken Bir Malzemenin Bant Yapısı (Penttila 2015). 26
Şekil 2.16. Kuantum Verimliği Eğrisi (Grupen 2008). 27
Şekil 2.17. PMT'nin Çalışma Prensibi. 27
Şekil 3.1.BC-412 tipin Emisyon Spektrumu (https://www.crystals.saint-gobain.com/products/bc-408-bc-412-bc-416 2019). 31
Şekil 3.2. 0.25 mm Al Kaplama İçin Geant4 Görüntüsü. 32
Şekil 3.3. F=5 için Geant4 ile Benzetim Görüntüsü. 33
Şekil 4.1. Sırasıyla F=3 ve F=10 için Algıç Görseli. 35
Şekil 4.2. Düşük Dünya Yörüngesinde Solar Maksimumda Tutulan Protonların İntegral Akısı (OMERE 1999). 36
Şekil 4.3. Elektronların Al Kalınlığına Karşı Kaybedilen Enerji Grafiği. 38
Şekil 4.4. Elektronların TiO_2 Kalınlığına Karşı Kaybedilen Enerji Grafiği. 38

Şekil 4.5. Protonların Al Kalınlığına Karşı Kaybedilen Enerji Grafiği. 40
Şekil 4.6. Protonların Al Kalınlığına Karşı Kaybedilen Enerji Grafiği. 41
Şekil 4.7. Elektronlar İçin Sintilatörde Depolanan Enerji. 43
Şekil 4.8. Protonlar İçin Sintilatörde Depolanan Enerji. 44
Şekil 4.9. Elektronlar İçin Sintilatörde Depolanan Foton Sayısı. 47
Şekil 4.10. Protonlar İçin Sintilatörde Depolanan Foton Sayısı. 47

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Bazı Organik Sintilatörler ve Karakteristik Özellikleri. 17
Çizelge 2.2. Bazı İnorganik Sintilatörlerin Karakteristik Parametreleri. 21
Çizelge 3.1. BC-412 Tip Plastik Sintilatörün Teknik Özellikleri (https://www.crystals.saint-gobain.com/products/bc-408-bc-412-bc-416 2019) 30
Çizelge 4.1. Çeşitli Enerji Değerlerinde Elektronların Farklı Alüminyum Kaplama Kalınlıklarında Kaybettikleri Enerjilerin Normalize Değerleri. 37
Çizelge 4.2. Çeşitli Enerji Değerlerinde Elektronların Farklı TiO_2 Kaplama Kalınlıklarında Kaybettikleri Enerjilerin Normalize Değerleri. 37
Çizelge 4.3. Çeşitli Enerji Değerlerinde Protonların Farklı Alüminyum Kaplama Kalınlıklarında Kaybettikleri Enerjilerin Normalize Değerleri. 39
Çizelge 4.4. Çeşitli Enerji Değerlerinde Protonların Farklı TiO_2 Kaplama Kalınlıklarında Kaybettikleri Enerjilerin Normalize Değerleri. 40
Çizelge 4.5. Elektronlar ve Protonlar İçin Sintilatörde Depolanan Enerjilerin Normalize Değerleri. 42
Çizelge 4.6. Elektronlar ve Protonlar İçin Sintilatörde Depolanan Foton Sayısı. 45

1. GİRİŞ

Son yıllarda, hızlı zaman tepkileri, yüklü parçacıklar için yüksek verim, üretim kolaylığı ve orta maliyetler plastik sintilatörlerin fazlaca tercih edilme nedenlerindendir. Plastik sintilatörler; nükleer fizik ve yüksek enerji fiziği deneylerinde, uzay araştırmalarında, tıbbi görüntülemelerde ve endüstride oldukça sık kullanılan parçacık algıçlarındandır. Kullanım alanlarına; çarpıştırıcı deneylerinde büyük algıçların elektromanyetik kalorimetreleri, radyoterapi ve dozimetre uygulamaları, uzay araştırmalarında -özellikle kozmik parçacık algılanmasında- algıç olarak kullanılması örnek olarak verilebilir.

Plastik sintilatörlerde, yüklü bir parçacığın üzerine düşmesi sonucu oluşan sintilasyon ışığı ile parçacık ya da radyasyon tespiti sağlanır. Elektron gibi yüklü bir parçacık sintilatörden geçtiğinde, enerjisinin bir kısmı veya tamamı sintilatör tarafından emilir ve fotonlar olarak yayılır. Sintilatör algıçlar genelikle, doğrudan veya bir ışık klavuzu vasıtası ile foto çoğaltıcıya optik olarak bağlanan bir sintilasyon malzemeden oluşmaktadır. Bu bağlantının olması, sintilasyon üzerinde oluşan parıldamaların elektriksel sinyale dönüşmesine yardımcı olur. Yani, zayıf bir sinyal veya düşük enerjili parçacıklar geldiğinde, bunlara bir tepki oluşturarak algılamayı kolaylaştırır (Agostinelli et al. 2003).

Bu tez kapsamında; sintilatör algıçların uzay çalışmalarındaki kullanım yerleri göz önünde bulundurulmuştur. Bu nedenle kozmik ışınlar için sıklıkla rastlanan bir durum olan 1 MeV – 1 GeV enerji aralığındaki demetlerle benzetim çalışmaları yapılmıştır. Sintilatörde verimliliğin arttırılması ve kayıpların azaltılması için sıklıkla kullanılan çeşitli kaplamaların benzetim sonuçlarına etkisi incelenmiştir. Sintilatör özelliklerine bağlı olarak yayınlama verimliliği, mevcut literatürde yapılan çalışmalar ve parametre değişiklikleri ile benzetim yapılarak hangi parametrelerin üretim aşamalarında önemli olduğu konusunda bilgi verilmiştir. Genel bir analize ulaşmak için birkaç benzetim kurulumu göz önüne alınmış ve sürecin benzetimi için Geant4 kullanılmıştır.

İkinci bölümde, çalışmanın temelini oluşturmak için parçacık ve radyasyonun madde ile etkileşiminden bahsedilmiştir. Bu başlık yüklü parçacıkların ve fotonun madde ile etkileşimleri olarak iki ayrı alt başlıkta detaylandırılmıştır. Devamında, sintilatör algıçların genel karakteristiğinden bahsedilmiş, sintilatör çeşitleri incelenerek plastik sintilatörler hakkında bilgi verilmiştir. Bu bölümde, sintilatörün üzerine düşen parçacığın oluşturduğu fotonların anlamlı sinyallere dönüşümünü sağlayan fotoçoğaltıcıların çalışma prensibinden ve özelliklerinden bahsedilmiştir.

Üçüncü bölümünde, benzetimde kullanılan plastik sintilatörün malzeme özelliklerine yer verilmiştir. Işık verimliliği için oldukça önemli olan kaplama malzemelerinin çeşitlerinden ve özelliklerinden, benzetim çalışması için modellenen fotoçoğaltıcıdan bahsedilmiştir. Ayrıca, bölüm sonunda Geant4 programından ve bununla yapılan benzetimde izlenecek işlemlerden ayrıntılı olarak verilmiştir.

Dördüncü bölümde ise, gerçekleştirilen benzetim çalışmasının bulguları yer almıştır. Elde edilen bilgiler benzer çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

Sonuç kısmında kaplamanın ve sintilatör boyutunun verimliliğe etkisinden bahsedilmiştir. Bu çalışma kapsamında uzay ortamı için incelemeler gerçekleştirilmiştir, ancak ilerideki çalışmalarda farklı ortamlar da incelenerek daha genişletilmiş bir çıktı elde edilebilir.

2. KURAMSAL TEMELLER

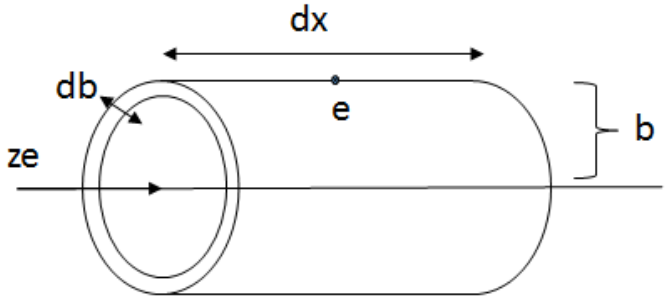
2.1 Parçacık ve Radyasyonun Madde ile Etkileşimi

Radyasyon ve parçacıklar sadece madde ile etkileşimleri yoluyla tespit edilebilirler. Yüklü parçacıklar yüksüz parçacıklardan farklı etkileşimlere sahiptir. Maddeden geçen yüklü parçacıklar, bağlı elektronların uyarılması veya iyonlaşması ile kinetik enerji kaybeder. Etkileşim ile oluşan enerji kaybı elektriksel sinyal oluşturur. Detektörlerde parçacık gözlemlemenin başlangıcında ise elektromanyetik etkileşimler yatmaktadır. Yüklü parçacıklar (p, e^- gibi), detektör ile etkileşimleri sonucunda iyonlaşmaya neden olur. İyonlaşma sonucunda oluşan elektriksel sinyal ile parçacık algılanır. Aynı yüklü parçacığın farklı enerjilerdeki etkileşim süreçleri farklılık göstermektedir. Yüksüz parçacıklarda ise etkileşimler sonucunda yüklü bir parçacığın oluşması durumunda sinyal gözlenir ve tespiti gerçekleşir (Grupen 2008).

2.1.1 Yüklü Parçacıkların Madde ile Etkileşimi

2.1.1.1 İyonlaşma Yolu ile Enerji Kaybı

Yüklü bir parçacığın elektron ile etkileşiminin şematik gösterimi Şekil 2.1'de yer almaktadır. Yüklü z_e olan parçacık v hızı ve m kütlesi ile yükü e^-, kütlesi m_e ve elektron yoğunluğu n olan bir ortamda b mesafesinde hareket ettiğini varsayalım. Elektronlar serbest ve başlangıçta durgun kabul edilir (Masciocchi 2017).



Şekil 2.1. Yüklü Parçacığın Elektron ile Etkileşimi.

z_e yüklü parçacığın b mesafesinde elektrona aktardığı momentum hesabı denklem (2.1)'de verilmiştir. Simetriden ötürü $\Delta p_{\parallel} = 0$ olarak alınmıştır.

$$\Delta p_{\perp} = \int F_{\perp} dt = \int F_{\perp} \frac{dt}{dx}\, dx = \int F_{\perp} \frac{dx}{v} \qquad (2.1)$$
$$= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{ze^2}{x^2 + b^2} \frac{b}{\sqrt{x^2 + b^2}} \frac{1}{v}\, dx = \frac{ze^2 b}{v} \left[\frac{x}{b^2 \sqrt{x^2 + b^2}} \right]_{-\infty}^{\infty} = \frac{2ze^2}{bv}$$

b mesafesinde bir tane elektrona aktarılan enerji formülü denklem (2.2) 'de yer almaktadır.

$$\Delta E(b) = \frac{\Delta p^2}{2m_e} \qquad (2.2)$$

Ortamdaki elektronların toplamını hesaplamak için Şekil 2.1'de yer alan geometriden yararlanarak silindir için elektron sayısı denklem (2.3)'deki gibi elde edilir.

$$N_e = n\,(2\pi b) db dx \qquad (2.3)$$

Yüklü parçacıklar madde içerisinden geçerken etkileşimler sonucunda iyonizasyon ve uyarma ile enerji kaybederler. b ve b + db arasındaki mesafe için elektron yoğunluğu n olan ortamda dx yol başına enerji kaybı denklem (2.4)'de gösterildiği gibidir.

$$-\mathrm{d}E(b) = \frac{\Delta p^2}{2m_e}\, n\,(2\pi b)dbdx = \frac{4z^2e^4}{2b^2v^2m_e} n\,(2\pi b)db = \frac{4\pi n z^2 e^4}{m_e v^2}\frac{db}{b}dx \tag{2.4}$$

b → 0 için integral ıraksadığından daha makul bir ifade olarak integral $b_{min} - b_{max}$ arasında alınırsa, birim uzunluk başına kaybedilen toplam enerji denklem (2.5)'de hesaplandığı gibidir.

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi n z^2 e^4}{m_e v^2}\int_{b_{min}}^{b_{max}}\frac{db}{b} = \frac{4\pi n z^2 e^4}{m_e v^2} ln\frac{b_{max}}{b_{min}} \tag{2.5}$$

İntegral aralığını hesaplamak için;

$b_{min} > \lambda$; belirsizlik ilkesi gereği elektronun dalga boyu, de Broglie dalga boyundan daha büyük olmalıdır. Bu nedenle b_{min} değeri denklem (2.6)'da yer alan de Broglie alınır.

$$b_{min} = \lambda_e = \frac{h}{p} = \frac{2\pi\hbar}{\gamma m_e v} \tag{2.6}$$

b_{max}; parçacıklar arasında enerji aktarımı olması için elektronun etkileşim zamanı periyodundan küçük olmalıdır. Bu nedenle denklem (2.7)'de yer alan eşitliksiz kullanılır.

$$b_{max} = \frac{\gamma v}{\langle \nu_e \rangle}\ ;\ \left[\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}\right] \tag{2.7}$$

Denklem (2.5)'te yer alan integral, denklem (2.6) ve denklem (2.7) göz önünde tutularak hesaplandığında;

$$-\frac{dE}{dx} = n\ \frac{4\pi z^2 e^4}{m_e c^2 \beta^2}\ ln\frac{m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{2\pi\hbar\langle \nu_e \rangle} \tag{2.8}$$

Elektronun yarıçapı $r_e = \left({e^2}/{4\pi z^2 \varepsilon_0 m_e c^2}\right)$, $\beta = {v}/{c}$ ve $N_e = Z({N_A}/{A})\rho$ olarak alınıp denklem (2.8) düzenlendiğinde yüklü parçacığın birim uzunluk başına kaybettiği enerji denklem (2.9)'da yer alan Bethe – Bloch'un durdurma gücü denklemini verir.

$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi N_A {r_e}^2 m_e c^2 \rho \frac{Z}{A}\frac{z^2}{\beta^2}\left[\frac{1}{2}\ln(\frac{2m_e\gamma^2\nu^2 W_{max}}{I^2}) - \beta^2 - \frac{\delta}{2} - \frac{C}{Z}\right] \quad (2.9)$$

Bu formülde;

dE = Parçacığın enerjisi.

dx = Parçacığın madde içerisinde aldığı yol.

A= Kütle numarası.

β = Parçacığın rölativistik hızı (ν/c).

γ = Lorentz faktörü.

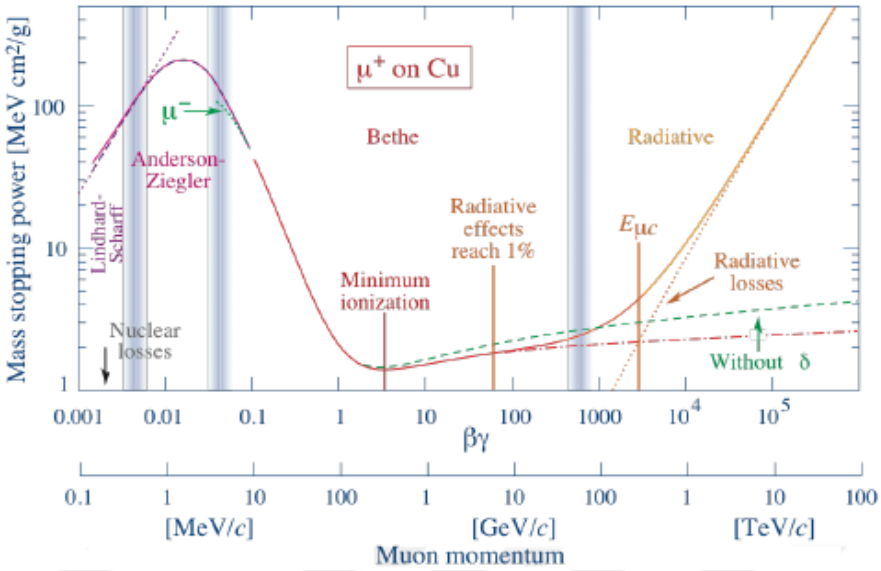
c = Işık hızı.

N_A = Avagadro sayısı.

I = Ortamın iyonizasyon ve uyarma potansiyelidir.

W_{max} = Parçacıkların çarpışmaları esnasında transfer edilen maksimum enerji.

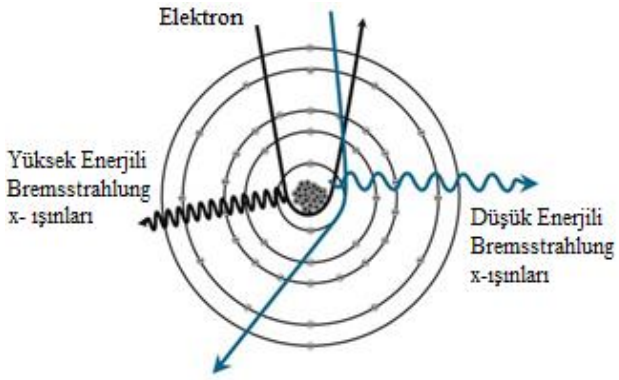
Şekil 2.2'de bakır içerisinden geçen müonlar için hesaplanan fonksiyon yer almaktadır. Düşük β bölgesinde, $^{dE}/_{dx}$'in $^{1}/_{\beta^2}$ ile orantılı olmasından dolayı, β arttıkça $^{dE}/_{dx}$ hızlı bir şekilde azalır. $\beta \approx 0{,}001\text{-}0{,}01$ aralığında, nükleer geri tepme yoluyla iyonlaştırıcı olmayan enerji kayıpları giderek daha fazla önem kazanmakta ve bu durum çok düşük enerjilerde enerji kaybına neden olmaktadır. Göreceli hızlardaki ($\beta \approx 1$) parçacıkların çoğu Bethe bölgesinde $\beta\gamma \approx 5$'te minimum değere yakın enerji kaybı oranına sahiptir ve bunlar minimum iyonize edici "Minimim Ionizing Particles" (MIP) parçacıklar olarak adlandırılır.



Şekil 2.2. Bakır İçerisindeki Pozitif Müonların $\beta\gamma$ Değerine Karşı Durdurma Gücü Grafiği (Olive 2014).

2.1.1.2 Frenleme Işıması

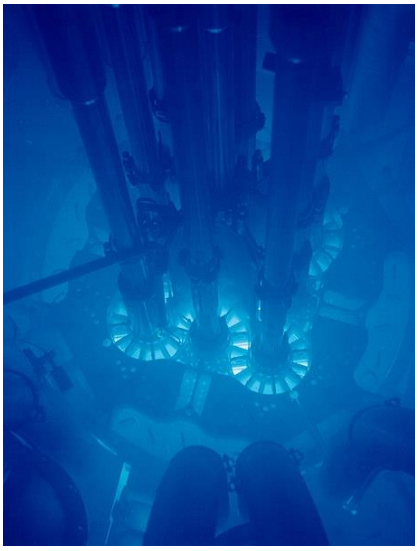
Bremsstrahlung ya da frenleme ışıması (radyasyonu), Şekil 2.3'te görüldüğü üzere genelde bir elektronun, atom çekirdeği tarafından saptırılmasıyla oluşur. Yüklü bir parçacık, çekirdeğin Coulomb alanına girmesi ile yörüngesinde bir sapma meydana gelir ve yavaşlar. Enerjinin korunumu gereği, yavaşlama sonucunda kaybettiği kinetik enerjiyi frenleme ışınım fotonları olarak yayımlar ve bu durum frenleme radyasyonu olarak adlandırılır (L'Annunziata 2012).



Şekil 2.3. Atom Çekirdeği Tarafından Saptırılan Yüklü Bir Parçacığın Oluşturduğu Frenleme Radyasyonu (http://physicsopenlab.org/2017/08/02/bremsstrahlung-radiation/ 2019).

2.1.1.3 Cherenkov Işıması

Elektron gibi yüklü bir parçacık, bir yalıtkan içerisinde ışığın o ortamdaki hızından daha hızlı giden yüklü bir parçacığın, ilerlemesi sonucu oluşur. Nükleer reaktörlerde yalıtkan olarak kullanılan suda saçılan elektron hızı, ışığın sudaki bağıl hızını geçtiğinde, uçağın ses duvarını geçmesi gibi elektronda ışık duvarını geçer ve Şekil 2.4'teki yer alan resimdeki gibi görünür bir mavi parlaklık yayımlar. Bu elektromanyetik ışıma Cherenkov ışıması ya da Cherenkov radyasyonu olarak adlandırılır (Emfietzoglou vd. 2012).



Şekil 2.4. Bir Test Reaktörünün Çekirdeğinde Cherenkov Işıması.

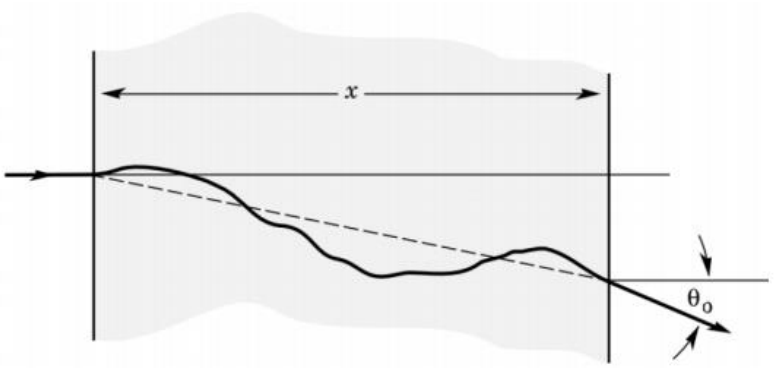
2.1.1.4 Çoklu Saçılma

Atomik elektronlarla esnek olmayan çarpışmalara ek olarak, maddeden geçen parçacıklar daha küçük bir olasılıkla da çekirdeklerden tekrarlanan elastik Coulomb saçılmasına maruz kalırlar. Genellikle çekirdeklerin gelen parçacıktan çok daha büyük bir kütleye sahip olduğu düşünüldüğünde, enerji transferi ihmal edilebilir. Ancak her saçılma merkezi, gelen parçacık yörüngesine küçük bir sapma ekler. Bu sapma küçük olsa bile, tüm katkının toplamı parçacık yörüngesine rastgele bir bileşen ekleyerek yörüngeyi Şekil 2.5'teki gibi zikzak hale getirir. Sonuç olarak, bir malzemeden geçen parçacıklar geldikleri doğrultuya göre büyük bir sapma gösterirler. Bu sapma üç durumda düşünülebilir (Meroli 2015) :

1. Tekil saçılma: Malzeme kalınlığı çok küçük olduğunda ve birden fazla etkileşime sahip olma olasılığı göz ardı edilebilir.
2. Çoğul saçılma: Coulomb saçılma sayısı arttığında, ancak onlarca etkileşim altında kaldığında u durum söz konusudur.
3. Çoklu saçılma: Malzeme kalınlığı arttıkça ve etkileşim sayısı arttığında açısal dağılım Gaussian olarak modellenebilir. Birden fazla saçılma söz konusu olduğunda, silikon detektörleri için en yaygın durum budur (Saçılma sayısı>20).

Saçılma açısı denklem (2.10)'daki gibi hesaplanır; X_0 "radyasyonun boyu" (malzemeye özgü bir sabit) ve p momentumdur.

$$\theta_0 = \frac{13.6}{\beta cp} z\sqrt{x/X_0}[1 + 0.031 \ln(x/X_0)] \qquad (2.10)$$



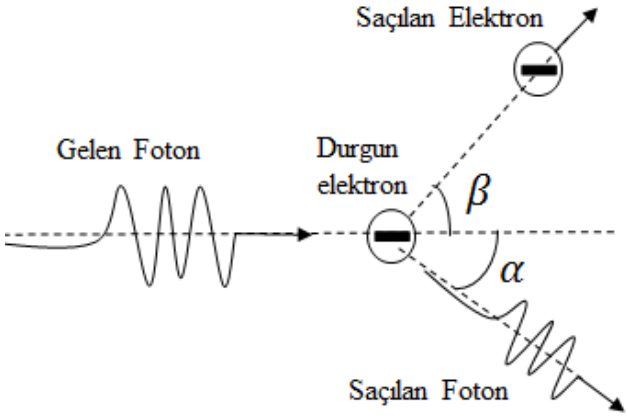
Şekil 2.5. Çoklu Coulomb Saçılımının Etkisi.

2.1.2 Foton ile Madde Etkileşimi

2.1.2.1 Compton Saçılması

Compton saçılması, malzemenin dış elektronları ile etkileşime giren X veya γ-ışını fotonunun enerjisindeki azalma yani dalga boyundaki artma anlamına gelir. Dalga boyundaki artma ise Compton kayması olarak adlandırılır. Aynı zamanda Compton deneyi; ışığın sadece bir dalga olarak açıklanamayacağını ve aynı zamanda enerjisi frekansla orantılı olan parçacıklar olarak davrandığını göstermiştir.

Şekil 2.6'daki diyagramda görüldüğü üzere, yüksek enerjili foton elektron ile etkileşime girerek enerjisinin bir kısmını elektrona aktarır ve elektronun saçılmasına yol açar. Çarpışma sonrasında foton, kalan enerjisi ile geliş doğrultusundan farklı bir doğrultuda yol izler (Emfietzoglou vd. 2012).



Şekil 2.6. Compton Saçılması.

Tüm olay momentumun ve enerjinin korunumu yasalarına uygun şekilde gerçekleşir. Korunum yasaları göz önünde bulundurularak enerjinin rölativistik tanımı ve Planck yasası ile son dalga boyu denklem (2.11)'de, dalga boyundaki değişim ise denklem (2.12)'de yer almaktadır.

$$\lambda_f = \frac{h}{m_e c}(1 - \cos\alpha) + \lambda_i \tag{2.11}$$

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_e c}(1 - \cos\alpha) \tag{2.12}$$

Denklemler de yer alan terimler:

λ_f : Saçılan fotonun dalga boyu

λ_i : Gelen fotonun dalga boyu

h : Planck sabiti (6,626068 x 10^{-34} Js)

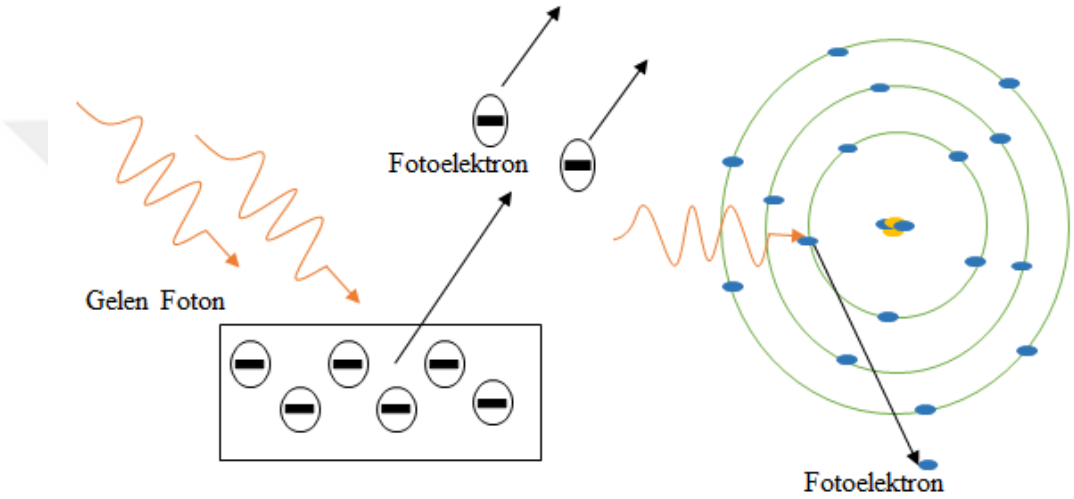
m_e : Elektronun durgun kütlesi (9,10938188 x 10^{-31} kg)

c : Işık hızı (2,99792458 x 10^{8} m/s)

α : Fotonun hareket yönündeki değişim açısı.

2.1.2.2 Fotoelektrik Olay

Şekil 2.7'de yer alan diyagramda görüldüğü üzere bir foton, metal yüzeye çarptığında malzeme yüzeyindeki kararlı elektronlar ile etkileşime girerek enerjisinin neredeyse tamamını elektronlara aktarır. Bu enerji ile elektronlar bulundukları atomun yörüngesinden çıkarak belli bir enerjide yayılır. Bu süreç fotoelektrik olay, yayılan elektronlar ise fotoelektron olarak adlandırılır.



Şekil 2.7. Fotoelektrik Olay.

Yayımlanan elektronun enerjisi denklem (2.13)'te görüldüğü üzere, gelen foton enerjisi ile elektronun bağlanma enerjisinin farkına eşit olur.

$$E_{ke} = E_f - E_{be} \tag{2.13}$$

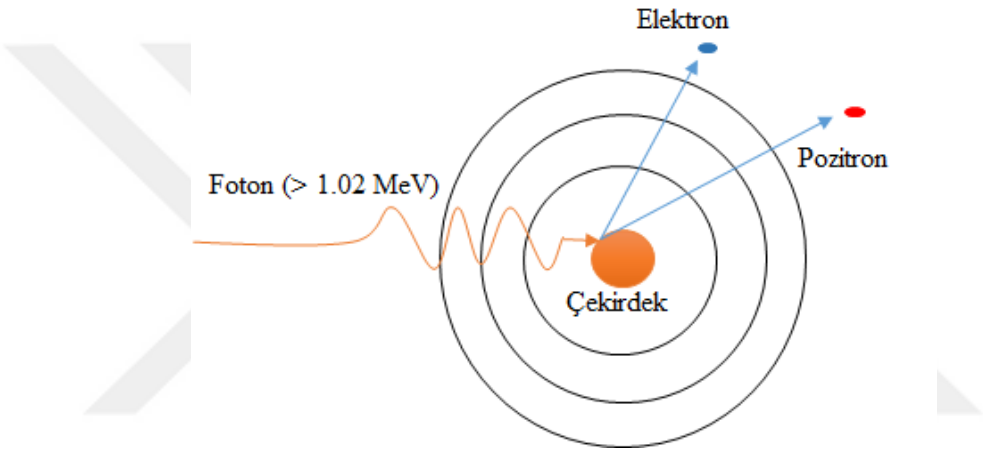
E_{ke} :Yayımlanan elektron enerjisi

E_f :Gelen fotonun enerjisi (hν)

E_{be} :Elektronun bağlanma enerjisi

2.1.2.3 Çift Oluşumu

Yüksek enerjili bir fotonun, atom çekirdeğinin yük alanı etkisi ile artı ve eksi yüklü olmak üzere enerji ve momentum korunumu ile iki elektrona dönüşmesi olayına çift oluşumu denir. Elektromanyetik dalgadan madde oluşumu olarak özetlenebilecek çift oluşum diyagramı Şekil 2.8'de yer almaktadır. Bir elektron ve pozitronun durgun kütle enerjisi 0,511 MeV olduğundan ötürü gelen fotonun enerjisi minimum 1,02 MeV olmalıdır (Emfietzoglou vd. 2012).



Şekil 2.8. Çift Oluşumu (Turan 2016).

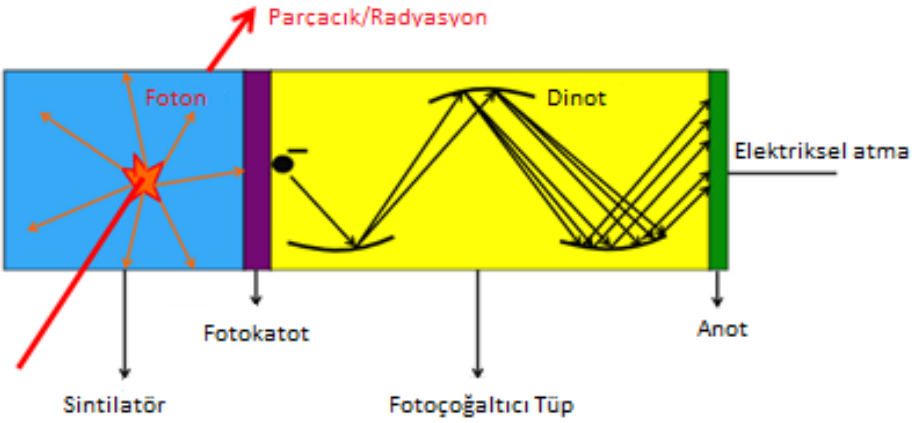
2.2 Sintilatör Algıçların Genel Özellikleri

Üzerine yüklü bir parçacık düştüğünde gözle görülebilir bir ışık parlaması, sintilasyon, oluşturan malzemeler sintilatör olarak adlandırılır. Sintilatör ilk olarak 1903 yılında Sir William Crookes tarafından üretilen bir cihazda, sintilasyon oluşumu sağlayan ZnS ekranı ile kullanılmıştır. Ekran tarafından üretilen sintilasyonlar, karanlık bir odada mikroskopla bakıldığında çıplak gözle gözlemlenmiştir. Teknik oldukça zor olsa da bu buluş birçok yeni keşfi beraberinde getirmiştir. Ardından 1944'te Curran ve Baker tarafından foto çoğaltıcı tüpün (PMT) geliştirilmesi, gözle ölçümün yerini aldığı için sintilatörler ek ilgi görmeye başlamıştır. Bu modern sintilasyon algıçların doğumu

olmuştur (Leo 1987). Günümüzde ise sintilatör algıçlar, yüksek enerji fiziği, astrofizik, radyokimya, nükleer fizik, tıbbi araştırma ve diğer bilimsel araştırmalar için sıklıkla kullanılmaktadır.

Sintilatör malzemesinin algıç olabilmesi için Şekil 2.9.'da gösterildiği gibi yükselteç olarak kullanılan fotoçoğaltıcı ile birleşmesi gerekir. Bir sintilatör ve fotoçoğaltıcıyı birleştirmek için dolaylı ya da doğrudan olmak üzere iki yolu vardır: Dolaylı bağlanma ile fotonlar bir ışık kılavuzu vasıtasıyla foto detektöre taşınır. Doğrudan bağlanma ile sintilatör direkt fotoçoğaltıcı ile birleştirilir. Bu tez kapsamındaki çalışmalar doğrudan bağlanma ile gerçekleştirilecektir.

Yüklü bir parçacık sintilatörden geçtiğinde, enerjisinin bir kısmı veya tamamı sintilatör tarafından emilir ve fotonlar yayılır. Sintilatör fotoçoğaltıcı gibi bir yükseltici cihaz ile birleştirildiğinde, bu ışık, analiz edilebilen ve üzerine düşen parçacık hakkında çeşitli bilgileri sağlayan elektriksel sinyallere dönüştürülür (Lee 2009).



Şekil 2.9. Fotoçoğaltıcı Tüpün Yapısı.

Bu sinyal ile elde edilen en önemli özellikler aşağıda sıralanmıştır:

1. Enerji Hassasiyeti; Belli bir enerji düzeyinin üzerinde, pek çok sintilatör üzerinde biriken enerjiye göre lineer bir davranış gösterir. Yani sintilatörden elde edilen ışık çıktısı doğrudan uyarılma enerjisi ile orantılıdır.

Fotoçoğaltıcıda düzgün çalıştığında doğrusal bir cihaz olduğundan elde edilen en son elektrik sinyalindeki genlikte doğrudan bu enerji ile orantılıdır.

2. Hızlı Zaman Tepkisi; Diğer algıçlara göre sintilatör algıçlar, tepki süresi ve toparlanma süresine göre oldukça hızlı aygıtlardır. Bu hızlı tepki birbirinden farklı iki olay için elde edilen bilginin çok daha hassas olmasını sağlar. Bu ve hızlı toparlanma süresi sintilasyon algıçlarına çok daha hızlı sayma oranları verir. Çünkü sintilatörlerin toparlanması için gereken zaman olarak bilinen ölü zaman bu algıçlarda oldukça düşüktür.
3. Atma Şeklinin Ayırt Edilmesi; Bazı sintlilatörlerde yayımlanan ışığın atmaların şekillerine bakılarak farklı tip parçacıkların ayırt edilmesi mümkündür. Bu farklı iyonlaştırma gücüne sahip parçacıkların farklı floresans mekanizmalarında uyarma gerçekleştirmelerinin bir sonucudur (Leo 1987).

2.3 Sintilatör Çeşitleri

Sintilatör malzemeler lüminesans özelliği gösterirler. Lüminesans malzemeler farklı enerjilere sahip parçacıklara, ısıya, radyasyona maruz kaldığında enerjiyi emer ve bu enerjiyi görünür ışık şeklinde yayar. Lüminesans fotonların emiliminin bir sonucu ise, fotolüminesanstan bahsedebiliriz. Fotolüminesans, malzemenin yüksek frekanslı şualar (morötesi, görünür) ile ışınlanmasının bir sonucudur. Floresans ve fosforesans olmak üzere iki çeşittir. Floresans, elektromanyetik radyasyonu emen bir madde tarafından görünür radyasyonun anında yayılmasıdır. Yayılan ışık genellikle emilen radyasyondan daha uzun bir dalga boyuna ve dolayısıyla daha düşük enerjiye sahiptir. Fosforesans işlemi, floresanstan daha uzun dalga boylu ışık yayılımına karşılık gelir. "Yasak" enerji durumu geçişlerinden kaynaklanan çok yavaş geçişler nedeniyle, absorbe edilen radyasyon düşük yoğunlukta yeniden yayılır. Bu gibi durumlarda, gecikme malzemeye bağlı olarak birkaç mikro saniyeden birkaç saate kadar sürebilir. İyi bir sintilatör, büyük miktarda radyasyon enerjisinin hızlı bir şekilde floresansa dönüşümünü sağlarken, aynı zamanda fosforesans ve gecikmeli floresans için genel olarak istenmeyen katkıları da azaltmalıdır.

İdeal sintilatör :

- Yüklü parçacıkların kinetik enerjisini ölçülebilir sinyale dönüştürmek için yüksek sintilasyon verimliliği,
- Enerji dönüşümü doğrusal olmalıdır, bu sayede ışık verimi mümkün olan geniş bir aralıkta aktarılan enerjiyle ilişkili,
- Yayılım dalga boyu için şeffaf,
- İndüklenen lüminesansın bozulma sabiti, hızlı sinyal darbelerinin üretilebilmesi için minimum,
- Sintilatör malzemesi iyi bir optik kalitede olmalı ve yeterince büyük boyutlarda üretilebilir,
- Yayılan ışığın dalga boyu, fotoçoğaltıcı tüplerin veya diğer ışık algıçlarının duyarlılık sınırlarında olmalıdır (Ščetinec 2017).

Sintilatörler; organik sintilatörler: *saf organik kristaller, sıvı organik çözeltiler, plastikler,* inorganik kristaller, gazlar ve camlar olmak üzere 4 başlığa ayırabiliriz.

2.3.1 Organik Sintilatörler

Bir organik sintilatör tipik olarak 3 parçadan oluşur (Belloni 2018):

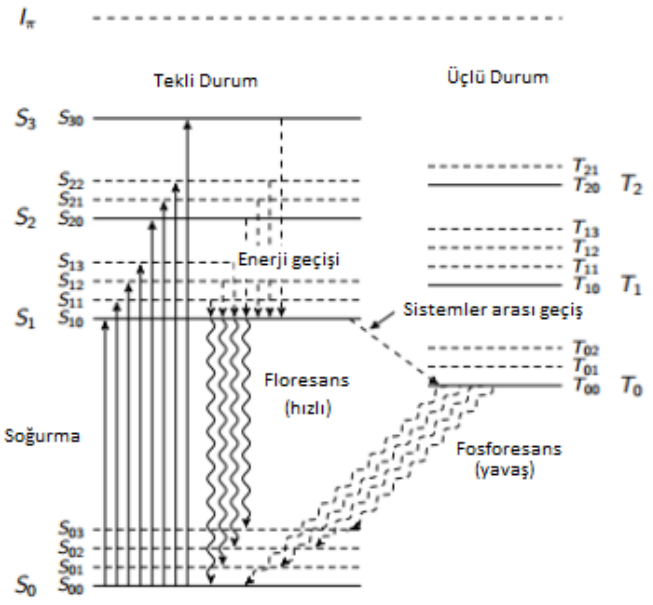
- Bir polimer taban; tipik olarak PVT, polistiren veya silikon bazlı malzemeler
- Birincil katkılama malzemesi (dopant) (~% 1)
- İkincil katkılama malzemesi (dopant) (~% 0.05)

Çizelge 2.1'de en yaygın kullanılan organik sintilatörler ve bazı karakteristik özellikleri verilmiştir. En iyi plastik sintilatörler poliviniltoluen (PVT) ve polistiren (PS) 'ni baz olarak kullananlardır (Grupen 2008).

Çizelge 2.1. Bazı Organik Sintilatörler ve Karakteristik Özellikleri.

Sintilatör	Base	Yoğunluk [g/cm^3]	τ_D [ns]	L_{ph}, N_{ph} [per MeV]	λ_{em} [nm]
Anthracene		1.25	30	16000	440
BC-408 (BICRON)	PVT	1.032	2.1	10000	425
BC-408 (BICRON)	PVT	1.032	1.5	11000	391
UPS-89 (AMCRYS-H)	PS	1.06	2.4	10000	418
UPS-91F (AMCRYS-H)	PS	1.06	0.6	6500	390

Organik malzemelerdeki sintilasyon mekanizması inorganik kristallerdeki mekanizmadan oldukça farklıdır. İnorganik sintilatörlerde, örneğin, NaI, CsI parıldama kristal örgünün yapısı nedeniyle ortaya çıkar. Organik malzemelerdeki floresans mekanizması, tek bir molekülün enerji seviyelerindeki geçişlerden kaynaklanmaktadır ve bu nedenle floresans fiziksel durumdan bağımsız olarak gözlenebilmektedir (Byun t.y.). Birçok organik sintilatör, π elektron yapısı olarak bilinen belirli simetri özelliklerine sahip organik moleküllere dayanır. Tipik bir π orbital diyagramı enerji seviyelerinin singlet (spin 0) ve triplet durumları (spin 1) Şekil 2.10'da yer almaktadır.



Şekil 2.10. Tipik Bir π Orbital Diyagramı Enerji Seviyeleri (Ščetinec 2017).

Taban elektronik durumu S_0'dir. Bu seviyenin üstünde uyarılmış tekli durumları vardır (S_1, S_2, S_3, vs.). Bir dizi üçlü elektronik enerji durumu T_0, T_1, T_2 olarak adlandırılmıştır. İki endeksli işaretler ise titreşim seviyelerini göstermektedir. Sintilatörden yüklü parçacık geçtiğinde, kinetik enerji moleküller tarafından soğurulur ve elektronlar üst seviyelere uyarılır. Organik sintilatörler için S_0 ve S_1 elektronik seviyeler arasındaki farklar 3 eV veya 4 eV, titreşim seviyeleri arasındaki farklar ise yaklaşık 0,16 eV kadardır. Oda sıcaklığındaki moleküllerin hemen hepsi, ortalama termal enerjileri titreşimden çok daha küçük olduğu için S_{00} durumundadır. Enerjinin yayılımı dikey yukarı oklarla gösterilmiştir (Ščetinec 2017).

Sintilasyon ışığı, hızlı floresans, S_{10} ve taban durumu arasındaki geçişlerde yayılır. Bu geçişler aşağı doğru dikey olarak gösterilmektedir. Uyarılmanın ardından t zamanında hızlı floresans yoğunluğu denklem (2.14)'deki gibidir.

$$I = I_0 e^{-t/\tau} \qquad (2.14)$$

Burada τ; S_{10} seviyesi için floresans bozulma süresidir. Çoğu organik sintilatörde τ, birkaç nanosaniyedir, bu nedenle organik sintilatörler oldukça hızlıdır. T_1 durumunun ömrü S_1 durumundan çok daha uzundur. T_1 durumunun ömrü ms olabilir. Bazı uyarılmış tekiller, sistemler arası geçiş adı verilen bir geçiş yoluyla üçlü durumlara dönüştürülebilir. Spin orbit etkileşimleri ile gerçekleşenler dışında, bu tip ışımalı geçişler izinli değildir. Bu nedenle T_0'dan S_0'a bozunma, fosforesans adı verilen gecikmeli bir ışık yayılımıdır. Fosforesans spektrumunun frekansı, floresansınkinden daha kısadır, çünkü T_0 enerjileri S_1'in altındadır. Fosforesan ışık, sintilasyon ışığından zamanlama ve dalga boyu temelinde ayırt edilebilir. Tüm floresans yayılımları ($S_{10} \rightarrow S_{00}$ hariç), soğurma için gerekli olandan daha düşük bir enerjiye sahiptir. Yayılma ve soğurma spektrumları arasında çok az örtüşme vardır, bu nedenle yayılan ışık çoğunlukla sintilasyon ortamından doğrudan geçer. Ayrıca S_1 durumundan titreşimsel taban durumu S_0 durumuna bozunma sırasında yayınlanan radyasyonun enerjisinin $S_0 \rightarrow S_1$ geçişi için gerekli olan enerjiden daha az olması bize sintilatörün kendi radyasyonuna olan şeffaflığını açıklamaktadır. Organik sintilatör çeşitleri; saf organik kristaller, sıvı organik çözeltiler ve plastik sintilatörlerdir.

2.3.1.1 Saf Organik Kristaller

Organik kristaller birkaç nanosaniyelik hızlı cevap verme özelliğine sahiplerdir. Fiziksel olarak çok dayanıklı olsalar da kırılgan ve sıcaklık değişimine karşı hassastırlar. En yaygın kullanılan organik kristaller anthracene ($C_{14}H_{10}$), trans-stilbene ($C_{14}H_{12}$) ve naphthalene ($C_{10}H_8$)dir.

2.3.1.2 Sıvı Organik Çözeltiler

Organik çözücü içerisinde bir veya birden fazla organik sintilatör sıvı çözeltilerinden oluşur. İyonlaşma enerjisi çözücü tarafından emilir ve sintilasyon çözeltisine aktarılır. Çözünen organik sintilatör madde olarak genellikle p-Terphnyl ($C_{18}H_{24}$), PBD ($C20H_{24}N_2O$), PPO ($C_{15}H_{11}NO$) ve POPOP ($C_{24}H_{16}N_2O_2$) kullanılmaktadır. Çözücü olarak da xylene, tolüene, benzene gibi polimerler kullanılmaktadır.

2.3.1.3 Plastik Sintilatörler



Şekil 2.11. Plastik Sintilatörler (https://eljentechnology.com/products/plastic-scintillators/ej-200-ej-204-ej-208-ej-212 2019).

Günümüzde en yaygın kullanılan plastik sintilasyon malzemeleri, genellikle moleküler yapılarında benzen halkaları olan polimerlere dayanmaktadır. En yaygın olarak kullanılan plastik sintilatörler Polyvinyltoluene, Polyphenylbenzene ve Polystyrene'dir. İnorganik sintilatörlerin aksine, plastik sintilatörler hızlı tepki verirler. Moleküllerin uyarılması sırasında sadece floresans ışık üretilmesinden dolayı bu tür hızlı tepki verirler. Bu nedenle oldukça hızlı bir çıkış sinyali oluştururlar. Bozunma sabitleri yaklaşık 2-3 ns arasındadır (Grupen 2003). Bu nedenle plastik sintilatörler, yüksek akışlı ortamlarda ve yüksek doz oranı ölçümlerinde kullanım için oldukça uygundur. Plastik sintilatörlerde sintilasyon için yükselme ve bozulma süresi çok hızlı olmasından dolayı üretilen ışığın yoğunluğu basit bir üstel bozulmayı takip etmez.

Yüksek enerji fiziğinde ve nükleer fizikte izleyici veya kalorimetre olarak hızlı zaman tepkileri, yüklü parçacıklar için yüksek verim, üretim kolaylığı, çok yönlülük ve orta maliyetler sayesinde sintilasyon algıçları yıllardır çeşitli alanlarda kullanılmaktadır (Ros, G. et al. 2018, Kharzheev 2015). Çarpıştırıcı deneylerinde büyük algıçların elektromanyetik kalorimetrelerinde sintilatörler kullanılmaktadır. Örnek olarak; SPEAR'daki Crystal Ball NaI (Tl) kalorimetresi, LEP'de L3 BGO kalorimetresi, CESR'de CLEO CsI (Tl) kalorimetresini verebiliriz (Olive 2014). Radyasyon fiziğinde de birçok kullanım alanı mevcuttur. Yüksek algılama verimleri ve ışık çıkışı ile

radyoterapi ve dozimetre uygulamaları için kullanışlıdır. Bununla birlikte, hızlandırıcı dışı deneylerde sintilatör algıçları, astrofizik çalışmalarında, tıbbi görüntülemede ve endüstri gibi alanlarda sıklıkla kullanılan çok yönlü parçacık detektörü haline gelmiştir. Örneğin; plastik sintilatörler, basitlikleri, düşük yoğunlukları ve yüksek hacimleriyle birlikte katı hal bazlı sistemlere kıyasla yüksek radyasyona maruz kalabilirler, bu da onları astrofiziksel amaçlar için de uygun hale getirmiştir. Geçmişte Phobos, Lunar Prospector veya Mars Odyssey gibi gezegen görevlerinde partikül veya nötron spektrometresi olarak ve daha yakın zamanda Dawn ve Solar Orbiter 'de (AMS, DAMPE) kullanılmıştır.

2.3.2 İnorganik Sintilatörler

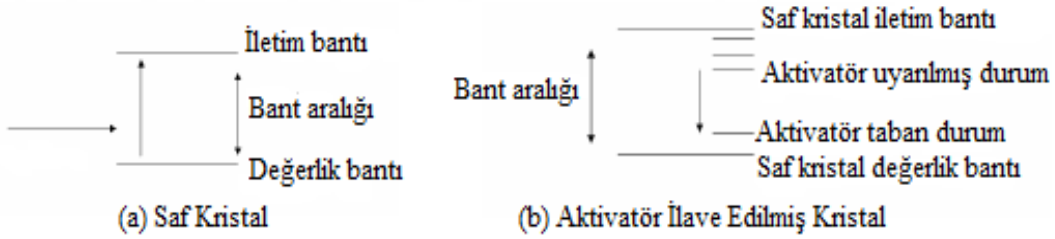
İnorganik sintilatörler çoğunlukla kristallerden oluşur. Bunlar saf kristal olan $Bi_4Ge_3O_{12}$, BaF_2, CsI, vb. veya az miktarda başka malzemelerle katkılanmış NaI (Tl), CsI (Tl), LiI (Eu) vb. gibi kristallerdir. İnorganik maddelerdeki sintilasyon mekanizması, kristal örgünün yapısına bağlıdır. Sintilatörden yayılan ışığın anlaşılması için şeffaf olması gerektiğinden, iletim bandındaki serbest elektronların sayısı az olmalıdır. Ayrıca değerlik ve iletim bantları arasındaki boşluk yeterince geniş, en az birkaç eV kadar olmalıdır. Bazı inorganik sintilatörlerin karakteristik parametreleri Çizelge 2.2'de yer almaktadır. Tablodan da anlaşılacağı gibi inorganik sintilatörler, organik sintilatörler ile karşılaştırıldığında daha geniş bir aralıkta bozunma zamanlarına ve ışık çıkışlarına sahiptir (Grupen C. 2008).

Çizelge 2.2. Bazı İnorganik Sintilatörlerin Karakteristik Parametreleri.

Sintilatör	Yoğunluk [g/cm^3]	τ_D [ns]	L_{ph}, N_{ph} [per MeV]	λ_{em} [nm]
NaI(TI)	3.67	230	3.8x10^4	415
CsI	4.51	30	2x10^3	315

BaF_2	4.88	0.7	$2.5x10^3$	220
$CdWO_4$	7.9	5000	$1.2x10^4$	540

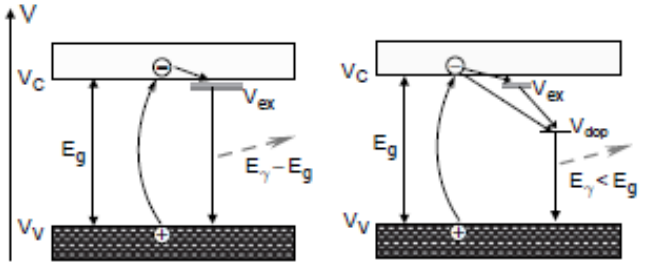
NaI gibi saf bir inorganik kristal örgüde, elektronlar yalnızca seçilen enerji bantlarını işgal edebilir. Yasaklanmış bant aralığı, elektronların saf kristalde asla bulunamadığı enerji aralığıdır. Saf kristalde, enerjinin emilimi ile elektronlar değerlik bandından bir boşluk (hole) bırakarak iletim bandına geçerler. Ek olarak, inorganik saf kristallerdeki bant aralığı genişlikleri, elde edilmiş yayılan fotonun görünür bölge içinde olmayacak kadar yüksektir. Bu nedenle küçük miktarlarda Talyum (TI) gibi safsızlıklar kristallere eklenerek uyarma işlemi sırasında görünür foton emisyon olasılığı arttırılır. Safsızlıklar aktivatörler olarak adlandırılır. Şekil 2.12. (a)'da saf bir kristalin enerji bantı yer alır. Şekil 2.12. (b)'de ise safsızlıkların eklenmesi ile yasak enerji bant aralığında oluşan yeni enerji bant yapısı yer almaktadır. Safsızlık eklenmesi ile toplam kristalin enerji yapısı değişmez, sadece aktivatör bölgelerindeki enerji yapısı değişir (Byun t.y.).



Şekil 2.12. İnorganik Bir Sintilatörün Enerji Bantı Yapışı (Byun t.y.).

Elektronlar, kristalin içinden geçen yüklü bir parçacık veya γ ışını tarafından biriken enerji ile değerlik bandından iletkenlik bandına aktarılır. İletim bandında, kristal örgü boyunca elektronlar serbestçe hareket edebilirler. Elektronun uyarılması sonucunda, değerlik bandında bir boşluk (hole) oluşur. Elektron, boşluk (hole) ile tekrar bir araya gelebilir (rekombinasyon) veya bir boşluk ile birlikte "exciton" adı verilen bağlı bir durum oluşturabilir. Şekil 2.13.'deki diyagramda görüldüğü üzere exciton seviyesi (V_{ex}),

iletim bandının (V_C) hemen altında yer alır. Exciton, kristal içerisinde belli bir süre ilerler ve ardından bir fonon ile çarpışarak ya da doğrudan uyarma enerjisi E_{ex}'e karşılık gelen foton salarak kaybolur. Yani elektron ve boşluk (hole) oluşturduğu bağlı olduğu durum kaybolur.



Şekil 2.13. Enerji bantları saf (solda) ve katkılı (sağda) kristaldir (Grupen 2008).

Oda sıcaklığında parıldama verimini arttırmak için, katkılı safsızlıklar kasıtlı olarak kristal örgü içine yerleştirilir. Bu safsızlıklar değerlik ve iletkenlik bandı arasında bulunarak V_{dop} olarak adlandırılan ilave enerji seviyeleri yaratılır. Excitonlar veya serbest elektronlar aktivatör merkezine çarptıklarında bağlanma enerjilerini aktarırlar. Aktivatör merkezinin uyarma enerjisi, örgü titreşimleri (fononlar) şeklinde kristal örgüye verilir veya ışık olarak yayılır. Kristalde biriken enerjinin belirli bir kısmı bu nedenle ışıldama radyasyonu olarak yayılır. Bu elektromanyetik dalgaya duyarlı bir algıç tarafından ölçülebilir bir sinyale dönüştürülebilir. Aktivatör uyarılmış durumlarının tipik yarı ömrü 10^{-7} saniyedir. Elektronların kristalin içinden geçişi bu süreden çok daha kısadır. Sintilatörün bozulma süresi bu nedenle uyarılmış durumun yarı ömrüne bağlıdır (Grupen 2008).

İnorganik kristaller, organik plastik sintilatörlere (genel olarak ~ 4-8 g / cm^3) nazaran daha yüksek öz kütleye sahiptir. Yüksek yoğunlukları ve yüksek etkili atom sayıları nedeniyle, elektronlar veya fotonlar için yüksek durma gücü veya yüksek dönüşüm verimliliği gerektiren uygulamalarda kullanılabilirler. Bu kristallerin birçoğu da çok yüksek ışık çıkışına sahiptir ve bu nedenle çok düşük enerjilere (~ birkaç yüz keV) kadar mükemmel enerji çözünürlüğü sağlayabilir (Tanabashi 2019).

2.3.3 Gaz Sintilatörler

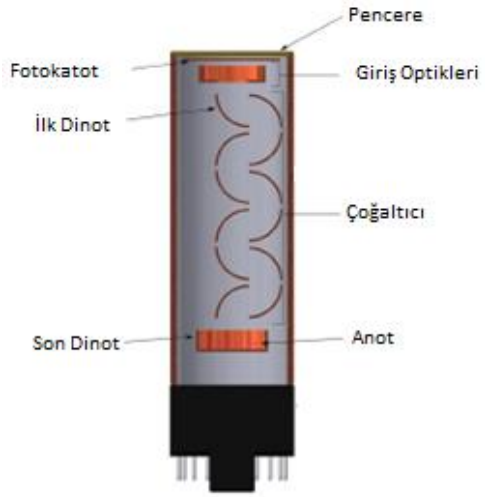
Gaz sintilatöler azot ile birlikte ksenon, kripton, argon ve helyum gibi soy gazlardan oluşur, ağır yüklü parçacıkların tespitinde kullanım için oldukça avantajlıdır. Bu sintilatörlerde, atomlar tek tek uyarılır ve 1 ns içinde taban durumlarına geri dönerler, bu nedenle oldukça hızlı tepki süreleri vardır. Bununla birlikte, yayılan ışık genellikle ultraviyole bölgesindedir, sinyalin okunabilir hale gelmesi için kullanılan çoğu foto çoğaltıcının okuma bölgesi bu kısma denk gelmez. Bu zorluğun üstesinden gelmenin bir yöntemi, gaz sintilatörün bulunduğu kabın duvarlarını bir dalga boyu kaydırıcısı ile kaplamaktır. Bu malzemeler ultraviyole ışığını kuvvetle emer ve fotoçoğaltıcı katotlarının daha verimli olduğu mavi-yeşil bölgede yayılır. Diğer bir yöntem ise fotoçoğaltıcının pencere kısımları dalga boyu kaydırıcı ince film ile kaplanabilir (Leo 1987).

2.3.4 Cam Sintilatörler

Cam sintilatörleri, seryumla aktif hale getirilmiş lityum veya bor silikatlardır. Bununla birlikte, bor camları lityumdan on kat daha düşük ışık çıkışlarına sahiptir. Tepki hızları tipik olarak birkaç ns civarındadır. Işık çıkışı ise düşüktür (Leo 1987).

2.4 Fotoçoğaltıcı Tüp (PMT) ve Çalışma Prensipleri

Hızlı ışık sinyallerinin ölçülmesinde en yaygın kullanılan araç fotoçoğaltıcılardır. Tipik bir fotoçoğaltıcı tüp Şekil 2.14.'te yer aldığı gibi giriş penceresi, foto katot, giriş optiği (odaklayıcı elektrotlar, hızlandırıcı elektrotlar), çoğaltıcı (dynotlar) ve anottan oluşur. Tüm bu bileşenler vakum altında cam bir tüp içine yerleştirilmiştir. Fotoçoğaltıcı tüpler (PMT) fotonların elektronlara ve ayrıca tespit edilebilir elektrik sinyallerine dönüştürülmesi için kullanılır.

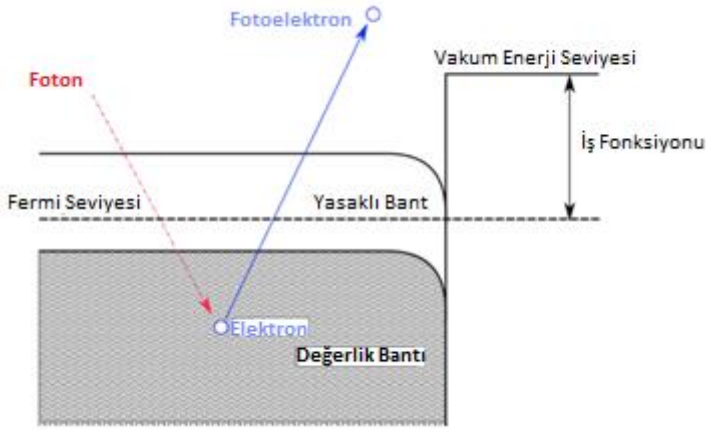


Şekil 2.14.PMT'nin Yapısı (Penttila 2015).

Fotoçoğaltıcıların temel elemanları;

- Işık akısını elektron akısına dönüştüren bir fotokatot;
- Elektron akısını odaklayan ve hızlandıran bir elektron-optik giriş sistemi;
- Bir dizi ikincil emisyon elektrotundan oluşan bir elektron çoğaltıcı;
- Çoklayıcıdan elektron akısını toplayan ve çıkış sinyalini sağlayan bir anot (Flyct 2002).

Bir fotoçoğaltıcı tüpün çalışma prensibinin arkasında yatan iki temel etkiden biri fotoelektrik etkidir. Fotoelektrik etkide ışık, katotla etkileşime girer ve enerjisini bir katodun elektronlarına aktarır. Başlangıçta yarı iletken malzemelerdeki elektronlar değerlik bandında bulunurken, gelen foton ile elektronlar uyarılır. Uyarılmış elektronlar malzemeden koparak katodun yüzeyine ulaşabilir. Elektronun yüzeydeki uyarılma enerjisi, malzeme yüzeyindeki potansiyel bariyerini (iş fonksiyonu) aşacak büyüklükte ise, elektron katot yüzeyinden vakuma doğru yayınlanır. Bu elektron yayınım süreci fotoelektrik etki olarak adlandırılır. Şekil 2.15.'te katot malzemesi olarak sıklıkla kullanılan yarıiletkenlerde fotoelektrik olay için diyagram yer almaktadır.

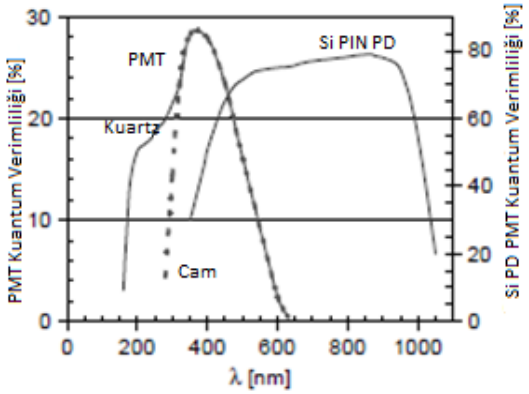


Şekil 2.15.Yarıiletken Bir Malzemenin Bant Yapısı (Penttila 2015).

Bir fotokatotun duyarlılığı, genellikle kuantum verimliliği açısından belirtilir. Fotokatodun kuantum verimliliği, ışığın elektrik sinyaline dönüştürülme olasılığı olarak şöyle tanımlanır:

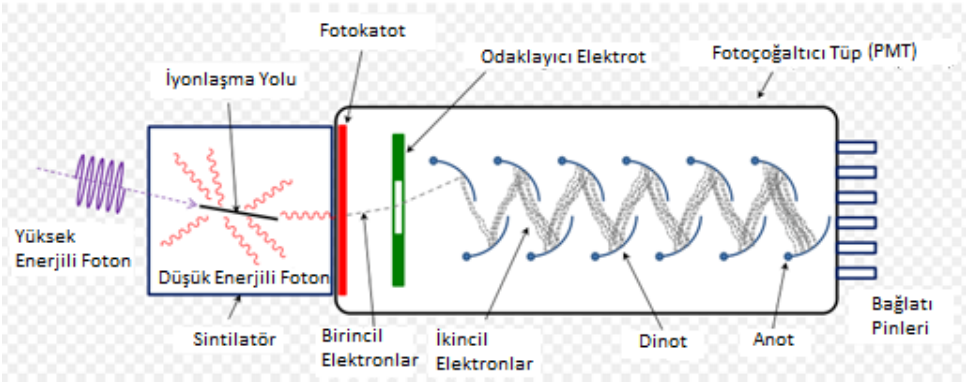
Kuantum verimi = yayılan fotoelektron sayısı / olay foton sayısı

Kuantum verimliliği, gelen ışığın dalga boyunun güçlü bir fonksiyonudur ve foto katodun spektral tepkisini kullanılan sintilatörün emisyon spektrumuyla eşleştirmeye gayret gösterir[cambridge]. Şekil 2.16.'da dalga boyunun bir fonksiyonu olarak bialkali katotları için kuantum verimliliğini göstermektedir. Kuantum verimi kısa dalga boyları için azalır, çünkü fotoçoğaltıcı penceresinin şeffaflığı artan frekansla, yani daha kısa dalga boyuyla azalır (Flyckt 2002).



Şekil 2.16. Kuantum Verimliği Eğrisi (Grupen 2008).

Diğer bir önemli etken ise dynode elektronlarından kaynaklanan ikincil yayınımlardır. Bir fotoçoğaltıcı tüpteki elektron çoğalımı bu işlemle açıklanabilir. Şekil 2.17.'de görüldüğü üzere, fotoemisyon tarafından oluşturulan elektronlar elektrik alan ile hızlandırılır ve ilk dynode'a yönlendirilir. İlk dynodun üzerine düşen fotoelektronlar burada enerjilerinin bir kısmını bırakır ve beraberinde daha fazla elektron koparır. Serbest bırakılan elektron miktarı, elektron enerjisi ile orantılıdır. Bu elektronlar diğer dynoda doğru hızlanıp yüzeye çarparak dynot sayısına bağlı olarak bu süreci tekrarlar. Böylelikle, çoğaltma sürecinin sonunda elektronlar anotta toplanır ve gelen ışık elektrik akımına çevrilmiş olur (Flyckt 2002).



Şekil 2.17. PMT'nin Çalışma Prensibi.

Çarpma işlemi, harici devreye iletilmek üzere anotta toplanan yeterli sayıda elektron üretmek için seri halinde birçok kez tekrarlanır. Bir PMT'nin toplam kazancı G = AV^kn olarak uygulanan yüksek voltaj V'ye bağlıdır, burada k ≈ 0.7–0.8 (dynode malzemesine bağlı olarak), n zincirdeki dynot sayısıdır ve A sabittir (aynı zamanda n'ye bağlıdır). Tipik olarak, G, 10^5- 10^6 aralığındadır (Nakamura 2018).

Ek olarak, birinci dynode'a çarpan bu fotoelektronların sayısı n_k ve dynode'nin kazancı g_1 ise, ortaya çıkan ikincil elektronların sayısı $n_k g_1$'dir. Ardından, ikinci dynode g_2 kazancına sahipse, $n_k g_1 g_2$ tane elektron yayar. N tane dynot var ise, toplanan elektron sayısı denklem (2.15) ile hesaplanır (Flyckt 2002).

$$n_a = n_k \prod_{i=1}^{N} g_i \tag{2.15}$$

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında, hızlandırıcı deneylerinin yanı sıra hızlandırıcı dışı deneylerde de tercih edilen plastik sintilatör algıçların, uzay çalışmalarındaki kullanımları göz önünde bulundurulmuştur. Bu kapsamda, kozmik ışınların enerji aralığına denk gelen 1 MeV-1GeV'luk enerjiye sahip farklı parçacık demetlerinin plastik sintilatör ile etkileşmesi ve fotoalgıç tarafından algılanmasının benzetimi Geant4 programı ile yapılmıştır. Bu bölümde, benzetim çalışmalarında kullanılan sintilatörün ve kaplama malzemelerinin özelliklerinden, fotoçoğaltıcı seçiminden ve Geant4 analizlerinde izlenecek yollardan bahsedilmiştir.

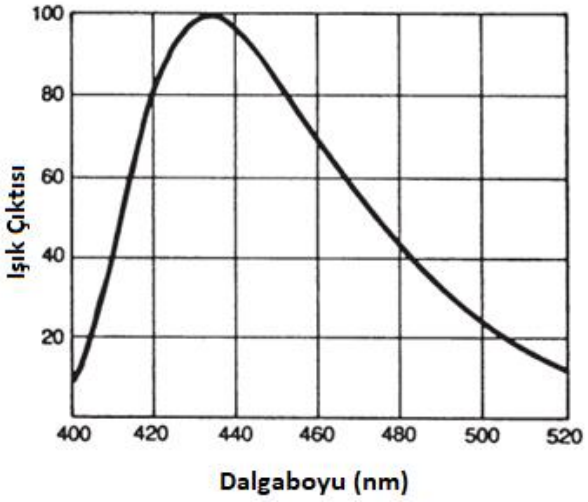
3.1 Plastik Sintilatör Seçimi

Plastik sintilatörler, katı halli sistemlere göre düşük yoğunluğu, sadeliği ve büyük hacmi ile birlikte yüksek düzeyde radyasyona maruz kalabilmeleri onları astrofiziksel amaçlar için uygun hale getirir. Bu nedenle, plastik sintilatörler, geçmişte Phobos, Lunar Prospector, Mars Odyssey gibi gezegen görevlerinde parçacık veya nötron spektrometresi olarak kullanılmıştır (Ros 2018). Günümüzde ise sintilatörler NASA ve CERN iş birliği ile gerçekleştirilen Alfa Manyetik Spektrometre (AMS-02) deneyinde elektromanyetik kalorimetresinde ya da uçuş süresi sisteminde (TOF) algıç olarak yer almaktadır. (Quadrani 2007).

Yapılan literatür ve ticari ürünlerin araştırmaları sonucunda; oldukça farklı özelliklere sahip bir çok plastik sintilatör çeşidi olduğu görülmüştür (https://www.crystals.saint-gobain.com/products/bc-408-bc-412-bc-416 2019). Benzetim çalışmasında ise uzay ortamında yer alan parçacıkları; yüklü parçacıklar, kozmik ışınlar, müonlar gibi, 100 keV – 5 MeV gama ışınlarını ve nötronları algılayabilme özelliğine sahip olması bakımından Saint-Gobain firmasına ait BC-412 plastik sintilatör özellikleri tercih edilmiştir. Bu plastik sintilatör, iyonlaştırıcı radyasyona maruz kaldığında ışıldayan organik bir polimer olan poliviniltolüenden oluşur. BC-412 tip plastik sintilatörün teknik özellikleri Çizelge 3.1'de yer almaktadır. Bu özelliklere ek olarak emisyon spektrum grafiği Şekil 3.1.'de yer almaktadır.

Çizelge 3.1. BC-412 Tip Plastik Sintilatörün Teknik Özellikleri (https://www.crystals.saint-gobain.com/products/bc-408-bc-412-bc-416 2019) .

ÖZELLİKLER	**BC-412**
Işık Çıkışı (% Anthracene)	60
Maksimum Işıma Dalga boyu (nm)	434
Işık Sönümleme Uzunluğu (cm)	210
Yükselme Süresi (ns)	1.0
Bozunma Süresi (ns)	3.3
Sinyal Genişliği, Yarı Yükseklik Pik (ns)	4.2
Birim Hacimdeki H Atomu Sayısı cm^3 ($x10^{22}$)	2.23
Birim Hacimdeki C Atomu Sayısı cm^3 ($x10^{22}$)	4.74
Birim Hacimdeki Elektron Sayısı cm^3 ($x10^{23}$)	3.37
Yoğunluk (g/cm^3)	1.023
Polimer Bazı	Polyvinyltoluene
Kırılma İndisi	1.58



Şekil 3.1.BC-412 tipin Emisyon Spektrumu (https://www.crystals.saint-gobain.com/products/bc-408-bc-412-bc-416 2019).

Benzetim çalışmasında sintilatörün bir kenarı L = 2 cm olarak tanımlanmıştır. Sintilatör ve fotoçoğaltıcının temas alanı (LxL) olacak şekilde fotoçoğaltıcı, hacmi $(FxL)^3$ olan plastik sintilatörün bir yüzüne yerleştirilmiştir. Burada F ölçek faktörüdür ve değerleri F = 1, 3, 5, 10 olarak alınmıştır.

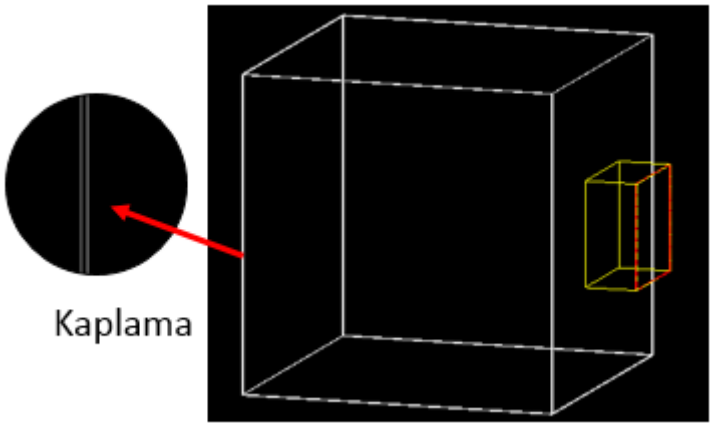
3.2 Kaplama Malzemeleri

Yansıtıcıların sintilasyon algıçlarının ışık toplama verimliliğini artırma üzerindeki etkisi göz ardı edilemez. Optik fotonların PMT'ye ulaşmadan önce uzun bir ortalama yol kat etmesi gerektiğinden, kendiliğinden emilme ve kaçma olasılığı daha yüksektir. Bu nedenlerden dolayı, sintilatörlerde verim kaybını önlemek için doğru uygulama yöntemine sahip uygun bir yansıtıcı seçmek büyük önem taşımaktadır.

Yapılan deneysel çalışmalarda ve benzetim çalışmalarında sintilasyon malzemesi yansıtıcılarla sarılarak ya da kaplanarak verimliliğin artması sağlandığı görülmüştür. Literatür araştırmaları sonucunda, bu iki farklı durumun sintilatör ve yansıtıcı arasındaki optik temas ve ilgili kırılma indekslerine bağlı olarak algıç çıkışını etkilediği gözlenmiştir

(Taheri 2017). Bu nedenle, benzetim çalışmasında plastik sintilatörün yansıtıcı malzeme ile kaplanması yöntemi kullanılmıştır.

Yapılan literatür araştırmalarında kaplama olarak genellikle Mylar, Tyvek, Alüminyum, TiO_2 gibi oldukça çeşitli malzemelerin kullanıldığı ve özellikle TiO_2'nin ve Al'nin yüksek kırılma indeksine (refractive index) sahip olmalarından dolayı daha fazla tercih edildiği görülmüştür. Bu çalışmalardan yola çıkarak benzetimde TiO_2 ve Alüminyum olmak üzere iki farklı kaplama malzemesi ve üç farklı kalınlık değeri kullanılarak karşılaştırmalar yapılmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda ışık verimliliği en yüksek tutan malzeme belirlenmiş ve analizlere bu şekilde devam edilmiştir. Şekil 3.2'de 0.25 mm'lik Al kaplama için Geant4 görüntüsü yer almaktadır.

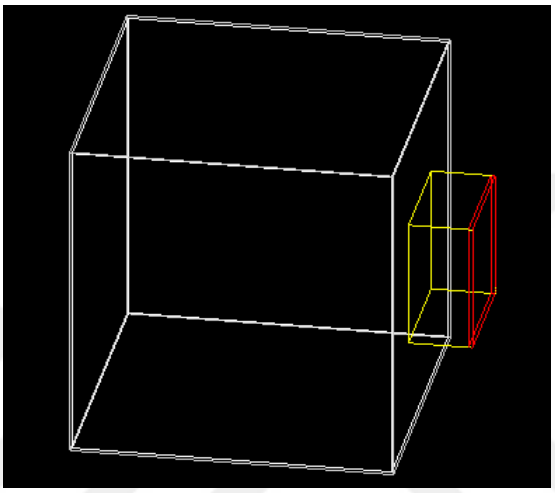


Şekil 3.2. 0.25 mm Al Kaplama İçin Geant4 Görüntüsü.

3.3 Fotoçoğaltıcı Modeli

Bölüm 2.2'de detaylı bir şekilde bahsedildiği gibi, sintilatör malzemesinin algıç özelliği gösterebilmesi için fotoçoğaltıcı gibi bir yükselteç ile birleştirilmesi gerekir. Ancak, fotoçoğaltıcının ayrıntılı benzetiminin oldukça karmaşık yapıya sahip olmasından dolayı bu çalışmanın kapsamı dışındadır. Bu nedenle benzetim çalışmasında fotoçoğaltıcı

basitçe genişliği 1 cm, kenar uzunlukları L=2 cm olan bir paralelyüzlü olarak tanımlanmıştır. Fotoçoğaltıcının sintilatöre temas alanı (LxL) olacak şekilde yerleştirilmiştir. Benzetimde oluşan sintilasyon fotonlarının algılanması için paralelyüzlünün, sintilatöre temas etmeyen yüzeyinde, Şekil 3.3.'de kırmızı şekilde gözüken, bir fotokatot yüzey tanımlanmıştır. Malzeme seçimi fotoçoğaltıcı ve fotokatot için sırasıyla cam ve Al olarak girilmiştir.



Şekil 3.3. F=5 için Geant4 ile Benzetim Görüntüsü.

3.4 Geant4 Benzetimi

Benzetim programı "GEometry ANd Tracking (Geometri ve iz sürme)" kelimelerinin kısaltması olarak Geant adını almıştır. İlk olarak yüksek enerji fiziği deneylerinden doğan ihtiyaç için geliştirilse de astrofizik, radyasyon, uzay çalışmaları, nükleer fizik, sağlık fiziği gibi birçok alanda kullanımı mevcuttur. Geant4, C++ program dilini kullanan bir benzetim programıdır. Parçacıkların madde ile etkileşimlerinin ve süreçlerin benzetimlerinin gerçekleştirildiği bu program Monte Carlo metodunu esas almaktadır. Hem nesneye hem de hesaplamaya dayalı benzetim çalışmalarının yapılabilmesi sebebi ile Geant4 günümüzde oldukça geniş kullanım alanına sahiptir.

Geant4 programında tipik bir benzetim süreci şu şekildedir:

- Sistem geometrisinin tanımlanması ve ilgili malzemelerin atanması,

- Temel parçacıkların belirlenmesi,
- Etkileşimlerdeki fizik süreçlerinin kararlaştırılması,
- Parçacıkların malzeme içerisinde izlenebilmesi için oldukça hassas algıçlar ve bölgelerin tanımlanması.

Benzetim programında yer alan hazır kütüphaneler ya da gerçekleştirilecek olan benzetim çalışması özelinde belirlenen sınıflar ile yukarıda bahsedilen süreç kolaylıkla izlenip benzetim çalışmaları gerçekleştirilebilir.

Geant4 benzetim programı, yüksek enerji fiziği deneyleri, astrofizik, medikal fizik, uzay çalışmaları gibi alanlarda oldukça geniş bir kullanıma sahiptir. Monte Carlo metodu esasına dayanarak benzetimleri gerçekleştiren bir programdır. Fiziksel ve matematiksel bazı sistemlerin benzetiminde, genelde raslantısal değişkenlerin sisteme etkisinin incelenmesi için kullanılır (Agostinelli 2003). Bu tez çalışmasında, GEANT4 programı kullanılarak sintilatör algıcın benzetim kurulumu (modelleme) gerçekleştirilmiştir.

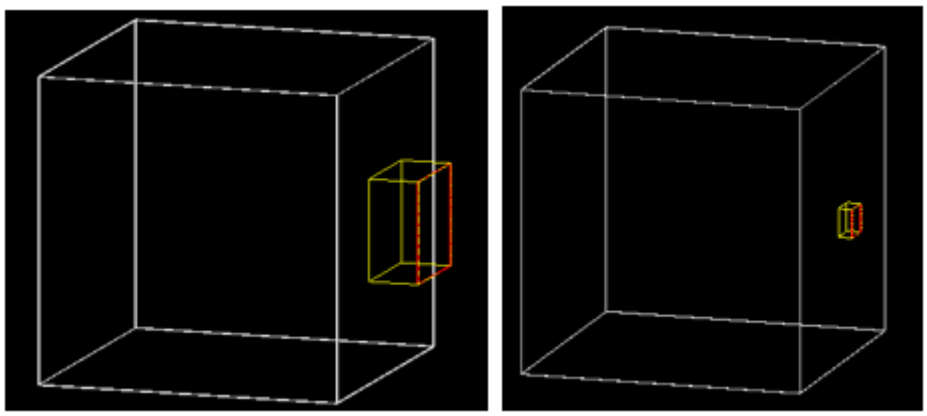
Benzetimde, plastik sintilatör ve fotoçoğaltıcı sırasıyla Bölüm 3.2 ve Bölüm 3.3'de bahsedilen şekilde tanımlanmıştır. Sisteme girdi, izotropik bir elektron ve proton akısından oluşur. Gelen parçacıklar için seçilen enerjiler 1, 10, 100, 300, 500 MeV ve 1 GeV'dir. Sintilatörden geçen parçacıklar sintilasyon fotonlarını oluşturur ve bu fotonlar sintilatör içerisinde yayılırlar. Sintilatörün iç yüzeylerine çarpan fotonlar fotoçoğaltıcıya ulaşılırlar. Ancak fotoçoğaltıcıya ulaşan foton sayısını arttırmak, dolayısıyla ışık toplam verimliliğini arttırmak için yaygın olarak kullanılan yöntemlerden plastik etrafına çeşitli yansıtıcı kaplamalar kullanılmıştır. Geant4 programında benzetim çalışmalarında kaplamadaki enerji kaybı, sintilatörde depolanan enerji, sintilatördeki toplam foton sayısı gibi parametreler analiz edilmiş ve tüm sonuçlara Bölüm 4'de yer verilmiştir.

4. BULGULAR

Plastik sintilatör algıcın, uzay ortamında maruz kalabileceği kozmik ışınların bir benzetimi olarak 1 MeV – 1 GeV enerji aralığında ki elektron ve proton akısına verdiği yanıtlar, çeşitli parametrelerle Geant4 programı aracılığı ile analiz edilmiştir. Bu benzetim çalışmasının temelini, plastik hacmi ile fotoçoğaltıcının alanı arasındaki oranın artırılmasının ve ışık toplama verimliliğini artırmak için yaygın olarak kullanılan plastik çevresinde yansıtıcı bir kaplamanın etkileri oluşturmaktadır. Bu iki etki ışığında genel bir yaklaşım elde etmek için Geant4'te çeşitli kurulumlar yapılarak; kaplamadaki enerji kaybı, sintilatörde depolanan enerji, sintilatördeki toplam foton sayısı parametreleri incelenmiştir.

4.1 Geometri

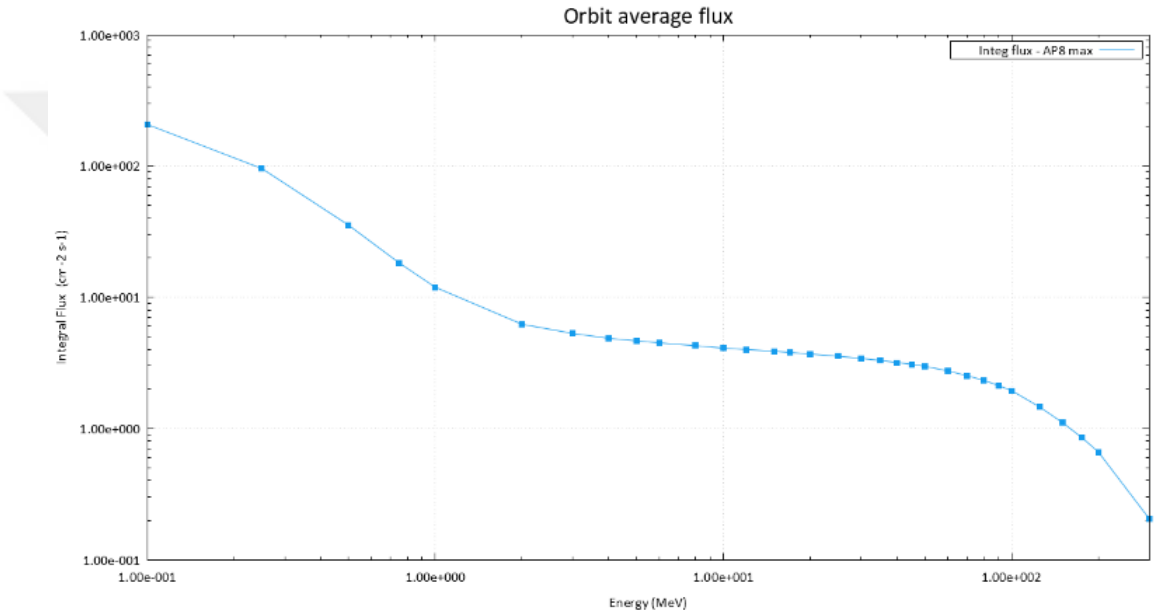
Bölüm 3.3'de bahsedildiği üzere algıç geometrisinde fotoçoğaltıcı genişliği 1 cm, kenar uzunlukları 2 cm olan bir paralel yüzlü olarak sabit bir hacme sahiptir. Plastik sintilatörün boyutu ise F ölçek faktörü sırasıyla 1,3,5,10 alınarak 4 farklı boyut için analizler yapılmıştır. Burada fotoçoğaltıcı, hacmi $(FxL)^3$ sintilatörün bir yüzeyine yerleştirilmiş ve sintilatör ile temas alanı (LxL) şeklinde alınmıştır. Şekil 4.1.'de F=3 ve 10 olması durumunda algıcın görseli yer almaktadır.



Şekil 4.1. Sırasıyla F=3 ve F=10 için Algıç Görseli.

4.2 Kaplamada Kaybedilen Enerji

Benzetim çalışmasında Al ve TiO_2 olmak üzere iki farklı yansıtıcı kaplama malzemesi tercih edilmiştir. Kaplama kalınlığının enerji kaybındaki etkisi, belirli bir enerji aralığındaki elektronlar ve protonlar için analiz edilmiştir. Benzetim çalışmasında elektronlar ve protonlar için, Şekil 4.2.'deki grafikte görüldüğü üzere tutulan (trapped) parçacık akısının daha yüksek olduğu 100 keV – 10 MeV enerji aralığı seçilmiştir.



Şekil 4.2. Düşük Dünya Yörüngesinde Solar Maksimumda Tutulan Protonların İntegral Akısı (OMERE 1999).

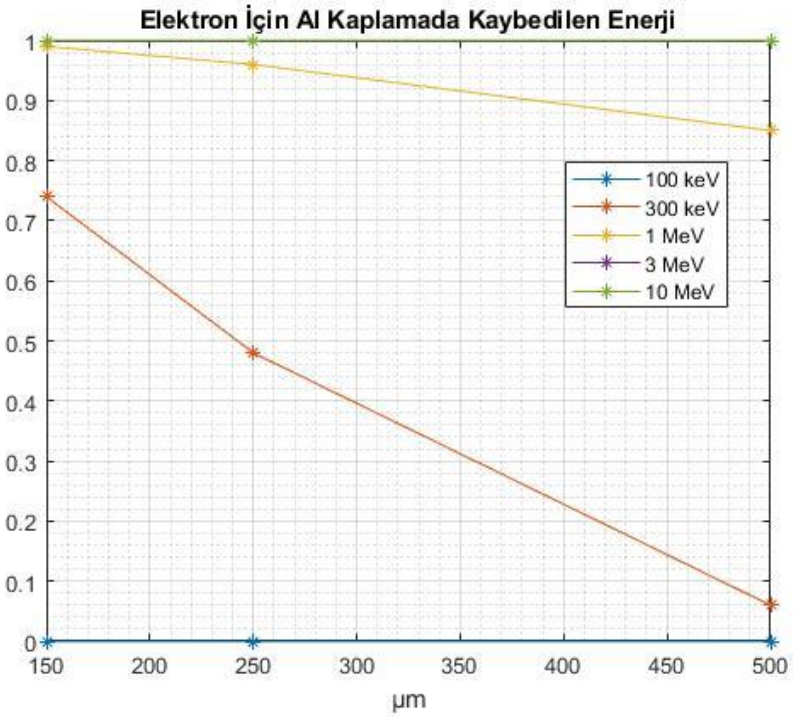
Her bir kaplama malzemesi için malzeme kalınlığına karşı sırasıyla elektronlar ve protonların kaplama malzemesinden geçtikten sonra kalan enerjiler hesaplanmıştır. 300 olay ile gerçekleştirilen analiz sonucunda, elektronlar için farklı enerji ve kaplama kalınlıklarında kaybettikleri enerjilerin normalize değerleri ve hata değerleri sırasıyla Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2'de yer almaktadır. Protonlar için 300 olay ile elde edilen değerler Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'te verilmiştir. Tablolardaki değerler için elde edilen şekiller sırasıyla Şekil 4.3, Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da yer almaktadır.

Çizelge 4.1. Çeşitli Enerji Değerlerinde Elektronların Farklı Alüminyum Kaplama Kalınlıklarında Kaybettikleri Enerjilerin Normalize Değerleri.

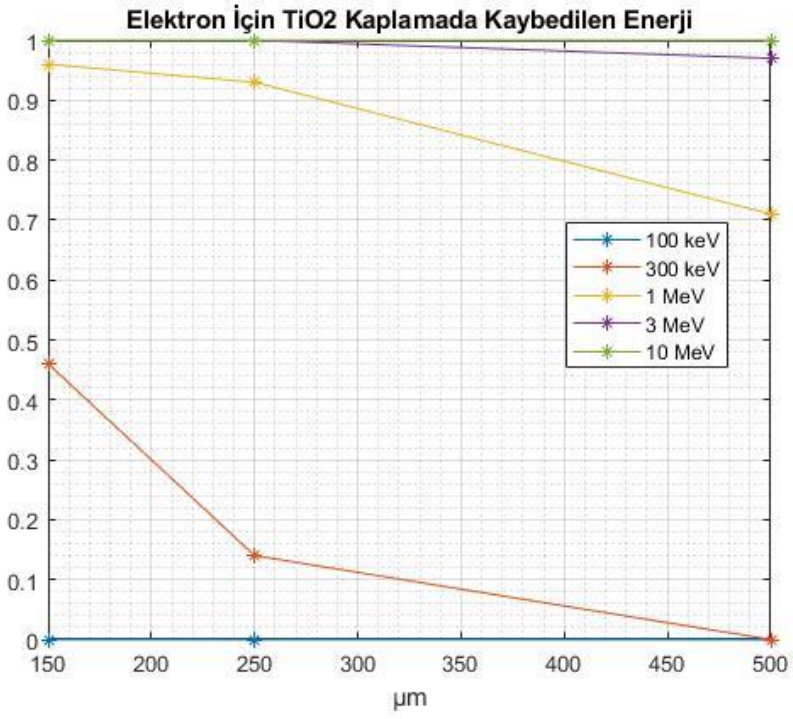
Elektron için	**Al Kalınlığı (mm)**		
Parçacık Enerjisi	**0.15**	**0.25**	**0.50**
100 keV	0	0	0
300 keV	0.74±0.08	0.48±0.09	0.06±0.04
1 MeV	0.99±0.01	0.96±0.02	0.85±0.06
3 MeV	1	1	1
10 MeV	1	1	1

Çizelge 4.2. Çeşitli Enerji Değerlerinde Elektronların Farklı TiO_2 Kaplama Kalınlıklarında Kaybettikleri Enerjilerin Normalize Değerleri.

Elektron için	**TiO_2 Kalınlığı (mm)**		
Parçacık Enerjisi	**0.15**	**0.25**	**0.50**
100 keV	0	0	0
300 keV	0.46±0.09	0.14±0.06	0
1 MeV	0.96±0.02	0.93±0.01	0.71±0.04
3 MeV	1	1	0.97±0.01
10 MeV	1	1	1



Şekil 4.3. Elektronların Al Kalınlığına Karşı Kaybedilen Enerji Grafiği.



Şekil 4.4. Elektronların TiO_2 Kalınlığına Karşı Kaybedilen Enerji Grafiği.

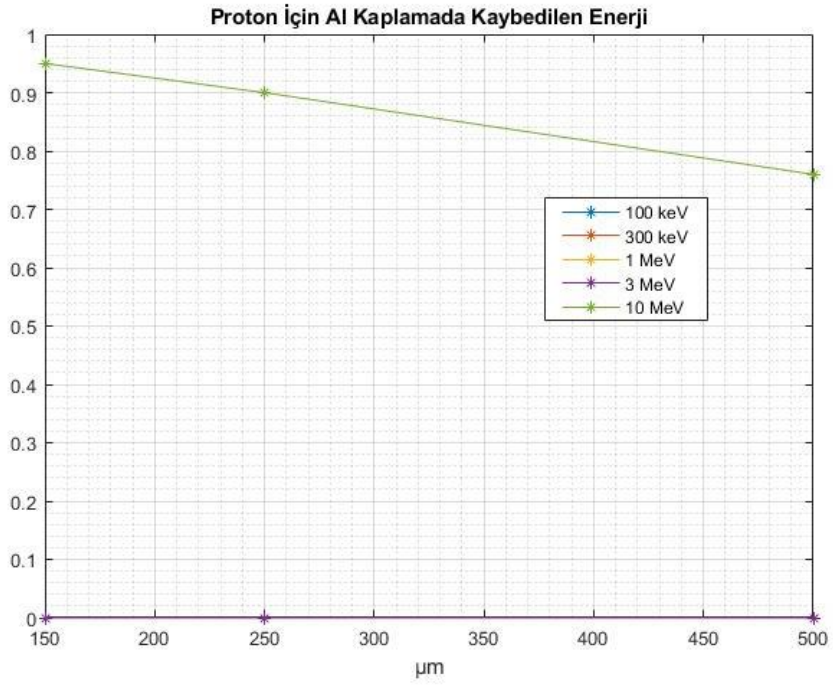
Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2 incelendiğinde, 100 keV gibi düşük enerjili elektronların tüm enerjilerini kaplamada kaybettiklerini görülmektedir. Parçacık enerjisinin artışı ile birlikte kaplamada kaybedilen enerjide azalma söz konusudur. Örneğin; 10 MeV enerjili elektronlar kaplamada enerji kaybetmeden sahip olduğu tüm enerjisi ile sintilatöre ulaşabilmektedir. Özellikle düşük enerjili elektronlarda kaplama kalınlığının etkisi oldukça açık bir şekilde tablolardan görülmektedir. Örneğin; 300 keV enerjili elektronlar hem Al hem de TiO_2 kaplamada kalınlığın artması ile enerjisini büyük çoğunluğunu kaplamada bırakmaktadır.

Çizelge 4.3. Çeşitli Enerji Değerlerinde Protonların Farklı Alüminyum Kaplama Kalınlıklarında Kaybettikleri Enerjilerin Normalize Değerleri.

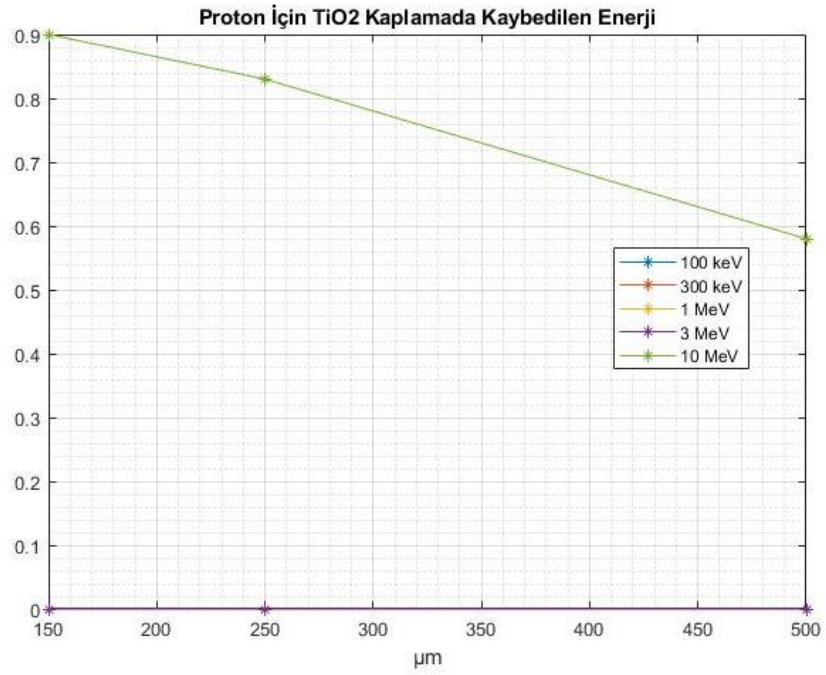
Proton için	**Al Kalınlığı (mm)**		
Parçacık Enerjisi	**0.15**	**0.25**	**0.50**
100 keV	0	0	0
300 keV	0	0	0
1 MeV	0	0	0
3 MeV	0	0	0
10 MeV	0.95 ± 0.04	0.90 ± 0.05	0.76 ± 0.07

Çizelge 4.4. Çeşitli Enerji Değerlerinde Protonların Farklı TiO_2 Kaplama Kalınlıklarında Kaybettikleri Enerjilerin Normalize Değerleri.

Proton için	**TiO2 Kalınlığı (mm)**		
Parçacık Enerjisi	**0.15**	**0.25**	**0.50**
100 keV	0	0	0
300 keV	0	0	0
1 MeV	0	0	0
3 MeV	0	0	0
10 MeV	0.91±0.02	0.83±0.07	0.58±0.09



Şekil 4.5. Protonların Al Kalınlığına Karşı Kaybedilen Enerji Grafiği.



Şekil 4.6. Protonların Al Kalınlığına Karşı Kaybedilen Enerji Grafiği.

Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4 incelendiğinde, 10 MeV altında enerjiye sahip olan protonlar tüm enerjilerini kaplamada kaybedeler. Ancak 10 MeV üzerinde enerjiye sahip protonlar sintilatöre ulaşıp fotoçoğaltıcı tarafından algılanabilir.

Elektronlar ve protonlar için elde edilen sonuçlar ışığında, kaplama malzemesi olarak Al kullanıldığında kaplamada kaybedilen enerjinin çok daha az olduğu görülmüştür. Bu nedenle, diğer analizler için kaplama malzemesi Al olarak seçilmiştir. Kaplama kalınlığı, astrofizik deneylerinde tetikleme oranını belirleyen birincil parçacıkların plastiğe girişini sınırlamak için de önemli bir faktör olduğu için analizlerde 0.25 mm olarak alınmıştır.

4.3 Sintilatörde Depolanan Enerji

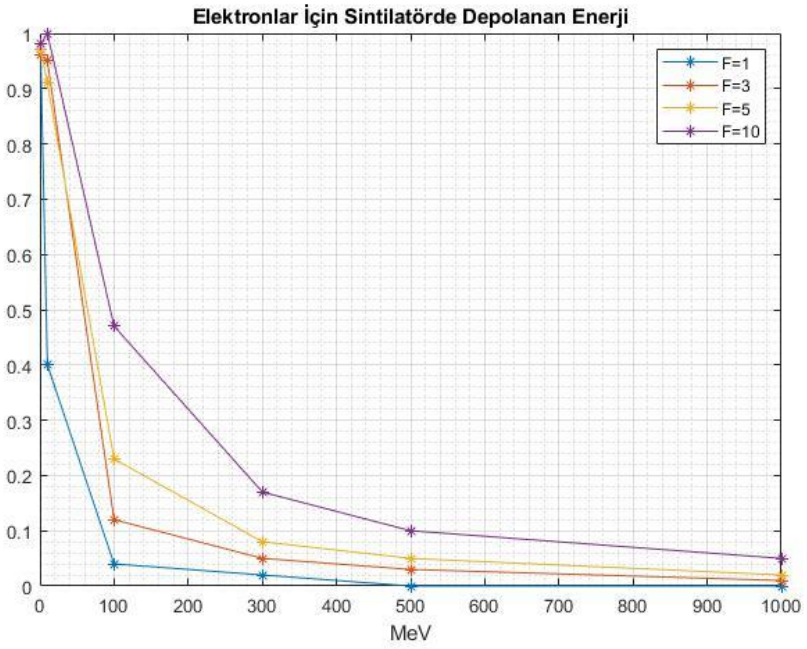
Bu başlık altında sintilatörün farklı hacim değerlerinde, 1 MeV – 1 GeV enerji aralığındaki elektron ve protonlar için sintilatörde depolanan enerji analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda elektronlar ve protonlar için elde edilen değerler

Çizelge 4.5'te verilmiştir. Çizelge 4.5'teki değerler kullanılarak çizilen grafikler elektronlar ve protonlar için sırasıyla Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de yer almaktadır.

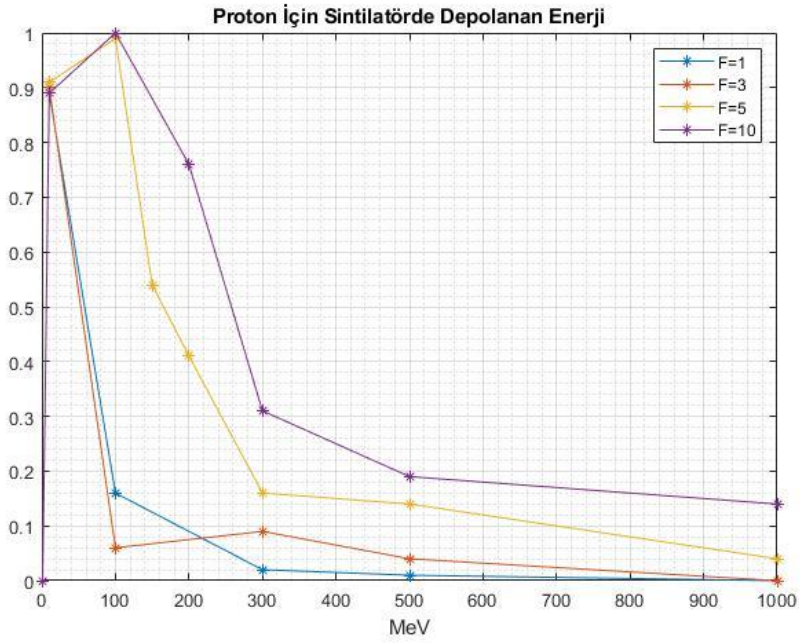
Çizelge 4.5. Elektronlar ve Protonlar İçin Sintilatörde Depolanan Enerjilerin Normalize Değerleri.

Depolanan Enerji	**Parçacık Enerjisi**	**Elektron için**	**Proton için**
F= 1	**1 MeV**	0.96±0.03	0.00
	10 MeV	0.40±0.08	0.89±0.05
	100 MeV	0.04±0.01	0.16±0.01
	300 MeV	0.02±0.01	0.02±0.01
	500 MeV	0.00	0.01±0.03
	1 GeV	0.00	0.00
F= 3	**1 MeV**	0.96±0.03	0.00
	10 MeV	0.95±0.04	0.90±0.05
	100 MeV	0.12±0.02	0.06±0.01
	300 MeV	0.05±0.02	0.09±0.03
	500 MeV	0.03±0.05	0.04±0.06
	1 GeV	0.01±0.03	0.00
F= 5	**1 MeV**	0.97±0.01	0.00
	10 MeV	0.91±0.02	0.91±0.02
	100 MeV	0.23±0.04	0.99±0.01
	300 MeV	0.08±0.03	0.16±0.04
	500 MeV	0.05±0.07	0.14±0.1

	1 GeV	0.02±0.04	0.04±0.06
F= 10	**1 MeV**	0.98±0.01	0.00
	10 MeV	1.00	0.89±0.02
	100 MeV	0.47±0.03	1.00
	300 MeV	0.17±0.04	0.31±0.05
	500 MeV	0.10±0.09	0.19±0.12
	1 GeV	0.05±0.07	0.14±0.10



Şekil 4.7. Elektronlar İçin Sintilatörde Depolanan Enerji.



Şekil 4.8. Protonlar İçin Sintilatörde Depolanan Enerji.

Analiz çıktılarıyla, düşük enerjili elektronların kaplamayı geçip plastik sintilatöre ulaştıktan sonra kalan enerjilerinin büyük bir kısmını sintilatörde bıraktıkları görülmektedir. Sahip oldukları enerji kaplamayı geçmeye yeterken sintilatörden kaçmaya yetmediğinden kalan enerjilerini sintilatörde kaybederler. Örneğin; 1 - 10 MeV enerjili elektronlar enerjilerinin neredeyse tamamını sintilatörde depolar. Ancak depolanan enerji, daha yüksek enerjili elektronlar için azalmaktadır. Bunun nedeni ise yüksek enerjili elektronların kaçma olasılığının daha büyük olmasıdır.

Öte yandan protonlar, 10 - 100 MeV enerji aralığında, kaplamayı geçtikten sonra sintilatörde sahip oldukları enerjinin tamamına yakınını bırakırlar. Daha yüksek enerjilerde ise küçük ebatlardaki sintilatörlerden etkileşime girmeden geçerken, enerjilerinin çoğunu orta ve büyük ebatlardaki sintilatörlerde bırakırlar. Yani, F arttıkça depolanan enerji de artmaktadır, çünkü küçük F değerlerinde parçacık sahip olduğu enerji ile hızlıca sintilatörden kaçar. Benzer şekilde, 1 GeV gibi yüksek enerjilerde de parçacıklar etkileşime girmeden hemen geçer ve geride bıraktığı enerji oldukça az olur.

Analiz sonuçlarında yer alan hata hesapları 300 MeV altındaki enerji değerlerinde 300 olay, 300 MeV'de 100 olay ve 500 MeV – 1 GeV için 10 olay ile geçekleştirilmiştir. Sonuçlardan da görüldüğü üzere olay sayısının fazla olması hata değerini kabul edilebilir seviyeye çekerken, yüksek enerjilerde işlemci gücünün sınırlı olduğu bir bilgisayarda sonuç alabilmek için düşük olay sayısı ile çalışılması nedeni ile istatistiksel hata yüksek çıkmıştır. Eğer analizler en az 300 olay için tekrarlanabilirse istatistiksel hata makul bir değerde olacaktır.

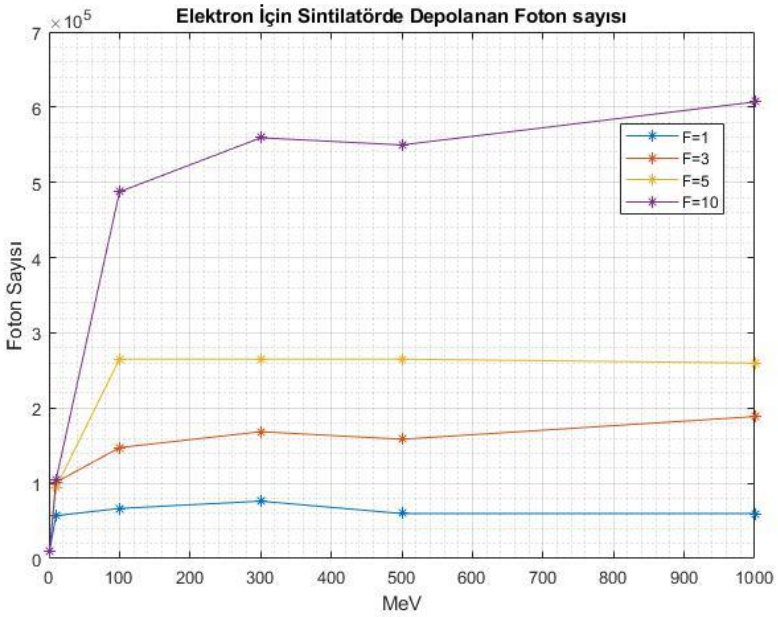
4.4 Sintilatörde Depolanan Foton Sayısı

Sintilatörün farklı hacim değerlerinde, 1 MeV – 1 GeV enerji aralığındaki elektron ve protonlar için sintilatörde depolanan fotonların sayısı için analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda elektronlar ve protonlar için elde edilen değerler Çizelge 4.6'da verilmiştir. Çizelge 4.6'daki değerler kullanılarak çizilen grafikler elektronlar ve protonlar için sırasıyla Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da yer almaktadır.

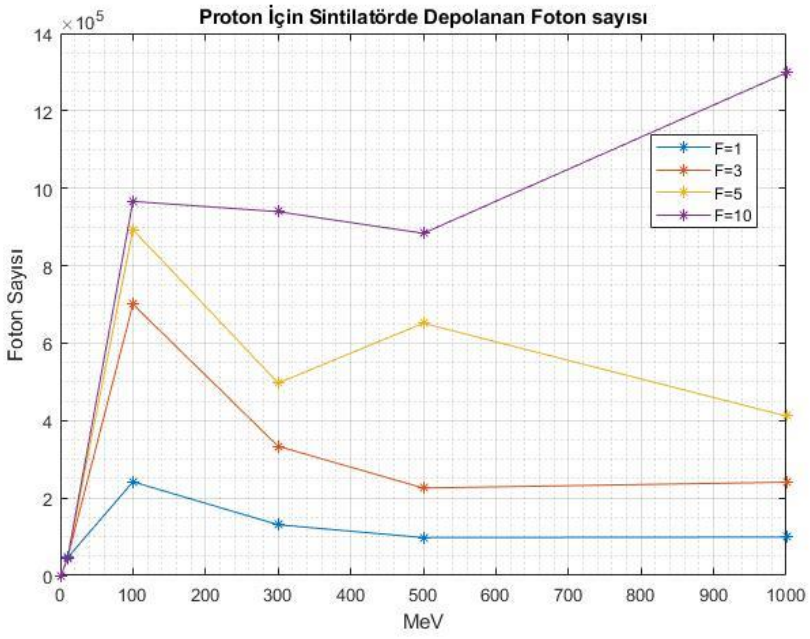
Çizelge 4.6. Elektronlar ve Protonlar İçin Sintilatörde Depolanan Foton Sayısı.

Depolanan Foton Sayısı	**Parçacık Enerjisi**	**Elektron için (x10^4)**	**Proton için (x10^4)**
F= 1	**1 MeV**	1.027	0.00
	10 MeV	5.705	4.583
	100 MeV	6.664	24.180
	300 MeV	7.632	13.095
	500 MeV	5.986	22.584
	1 GeV	5.974	9.907
F= 3	**1 MeV**	1.008	0.00

	10 MeV	10.130	4.574
	100 MeV	14.750	70.040
	300 MeV	16.862	33.361
	500 MeV	15.863	22.584
	1 GeV	18.870	24.030
F= 5	**1 MeV**	1.001	0.00
	10 MeV	9.457	4.570
	100 MeV	26.520	89.280
	300 MeV	26.510	49.693
	500 MeV	26.520	65.134
	1 GeV	25.980	41.160
F= 10	**1 MeV**	1.001	0.00
	10 MeV	10.430	4.488
	100 MeV	48.750	96.610
	300 MeV	55.932	93.951
	500 MeV	54.987	88.364
	1 GeV	60.700	129.800



Şekil 4.9. Elektronlar İçin Sintilatörde Depolanan Foton Sayısı.



Şekil 4.10. Protonlar İçin Sintilatörde Depolanan Foton Sayısı.

Analizler sonucunda, sintilasyon fotonlarının sayısının enerji ile arttığı görülmektedir. Ancak, 100 MeV'den sonra elektronlar için foton sayısı tüm hacimler için sabit bir değere ulaşırken, protonlar için F=10 durumu hariç azaldığı görülmektedir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışmasında, plastik sintilatör algıçların uzay alanında kullanımında maruz kalacağı ortamdaki kozmik parçacık enerjileri dikkate alınarak, çeşitli kaplama malzemelerinin ışık verimliliğine katkısı incelenmiş ve plastik sintilatör - fotoçoğaltıcı hacim oranının sonuçlara etkisi araştırılmıştır.

Bölüm 4.2'de kaplama malzemelerinin ve kalınlıklarının kaybedilen enerjiye etkisine yer verilmiştir. Astrofiziksel gözlemler açısından kaplama malzemesi oldukça büyük önem arz eder. 0.25 mm standart kalınlık ele alındığında, 1 MeV enerjiye sahip protonun plastiğe girmediğini ve 10 MeV protonun yaklaşık % 20'sinin girmediği gözlemlenmiştir. Elektronların yanı sıra 10 MeV'den düşük enerjili protonlar, kaplamada enerjisini önemli miktarda kaybederler. Bu süreç, birincil parçacıkların enerjileri arttıkça önemini kaybeder. Protonların durumu bize diğer ağır çekirdekler hakkında bilgi verir. Kaplama daha kalınsa (0,50 mm) elektronlar örneğin, 300 keV'de enerjilerinin tamamını kaplamada kayderken, kaplama kalınlığı inceldikçe 300 keV'lik elektronların nerdeyse tamamı algılanmaya başlar. Protonlarda ise ancak 10MeV ve üzeri enerjilerde kaplamadan geçişler söz konusudur.

Bölüm 4.3'te görüldüğü üzere, plastikte biriken enerji oranı hacim ile artmasına karşın birincil parçacıkların enerjisine ve parçacıkların cinsine önemli ölçüde bağlılık gösterir. 10 – 100 MeV enerji aralığında hacim artışı ile depolanan enerji elektronlar ve protonlar için arttığı görülmüştür. Birincil parçacık enerjisi artarken etkileşime girmeden parçacıkların doğrudan geçme olasılığının artması söz konusudur. Şu da gözden kaçırılmamalıdır ki elektronların ve protonların birincil enerji değerleri birbirinden oldukça farklıdır.

Çalışma kapsamında; uzay çalışmalarında, kaplama malzemesinin, malzeme kalınlığının ve plastik sintilatör hacminin sonuçların verimini nasıl etkilediği tartışılmıştır. Dedektörde daha iyi algılama için parçacıkların enerjilerine ve amaca uygun kaplama malzemesinin ve kalınlığının belirlenmesi gerekliliği sonucuna varılmıştır. Ayrıca,

plastik sintilatörlerin uzay koşullarında verimlilikle kullanılabileceği sonucu elde edilmiştir.

6. KAYNAKLAR

Agostinelli, S., vd. 2003. Geant4 Simulation Toolkit. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 506-3, 250–303.

Belloni, A. 2018. Radiation Effects on Plastic Scintillators for Current and Future HEP Experiments. University of Maryland, ABD.

Byun, S. Lecture Note:Scintillation Detectors. McMaster University, Canada. Erişim adresi: https://www.science.mcmaster.ca/radgrad/images/6R06CourseResources/4RA34RB3_Lecture_Note_4_Scintillation-Detectors.pdf. Erişim Tarihi: 04.10.2019.

Eljen Technology. 2008. https://eljentechnology.com/products/plastic-scintillators/ej-200-ej-204-ej-208-ej-212. Erişim Tarihi: 05.10.2019.

Emfietzoglou, D., Nikjoo, H., Uehara, S. 2012. Interaction of Radiation with Matter. CRC Press, 343, USA.

Flyct, S. O., and Marmonier, C. 2002. Photomultiplier Tubes: Principles &Applications. Photonis, Brive, France.

Gebze Teknik Üniversitesi, Web sitesi. http://www.gtu.edu.tr/Files/UserFiles/90/MF2-COMPTON_SACILMASI.pdf. Erişim Tarihi: 01.12 2019.

Grupen, C. and Shwartz, B. A., 2008. Particle Detectors. Cambridge University Press, New York.

Kharzheev, Yu.N. 2015. Scintillation Counters in Modern High Energy Physics Experiments (Review). Phys. Part. Nucl. 46 (4), 678–728.

L'Annunziata, M. 2012. Handbook of Radioactivity Analysis (Third Edition). Academic Press, 1418, USA.

Lee,A. 2009. Geant4&Scintillator Simuations. Master thesis, Northern Illinois University, Illinois.

Leo, W. 1987. Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiment. Springer-Verlag, 377, Berlin Heidelberg.

Masciocchi, S. 2017. Interaction of Particles with Matter-1. GSI and University of Heidelberg, Heidelberg.

Meroli, S. 2015. Interaction of Radiation With Matter: from The Theory to The Measurements. Erişim adresi: https://meroli.web.cern.ch/files/the_bible_of_the_interactions.pdf

Nakamura, K. vd. (Paricle Data Group). 2018. Review of Particle Physics, Journal Physics, 34 (2018), 075021.

Olive, K. vd. (Particle Data Group). 2014. Review of Particle Physics, Chin. Physics, 38, 090001 (2014).

OMERE, Outil de Modelisation de I'Environnement Radiation Externe. 1999. Erişim Sitesi: https://www.trad.fr/en/space/omere-software/.

Penttila, H. 2015. Characterization of a New Plastic Scintillation Material and Comparison with Liquad BC-501A Scintillator. Master thesis, University of Jyvaskyla, Findland.

Physics Open Lab. 2017. Web sitesi. http://physicsopenlab.org/2017/08/02/bremsstrahlung-radiation/. Erişim Tarihi: 01.12.2019.

Quadrani, L. 2007. Assembly and Space Qualification of the Scintillator Detector LTOF for the AMS-02 Spectrometer. PhD thesis, University of Bologna, Italy.

Ros, G. vd. 2018. On the Design of Experiments Based On Plastic Scintillators Using GEANT4 Simulations. Radiation Physics and Chemistry, Elsevier BV, 153,140-151.

Saint Gobain. Web sitesi. https://www.crystals.saint-gobain.com/products/bc-408-bc-412-bc-416. Erişim Tarihi: 20.11.2019.

Ščetinec M. and Golob B. 2017. Scintillators. Faculty of Mathematics and Physics, University in Ljubljana, Ljubljana.

Taheri, A. and Peyvandi, R. 2017. The Impact of Wrapping Method and Reflector Type on the Performance of Rod Plastic Scintillators. Nuclear Science and Technology Institute, Tehran, Iran.

Tanabashi, M. vd. (Particle Data Group). 2019. Review of Particle Physics, 98, 030001 (2018).

Turan, Ö. 2016. ISO S-^{137}Cs (0,662 MeV) Demet Kalitesinde Yaklaşık Doku Eşdeğeri Olan BC-408 Plastik Sintilatör Dedektörün Tepkisi ile Doz Arasındaki İlişkinin İncelenmesi. Yüksek lisans tezi, Ankara Üniversitesi, Ankara.

Web sitesi. https://slideplayer.com/slide/8180858/. Erişim Tarihi: 26.10.2019.

Wikipedia, Web sitesi. https://www.wikizeroo.org/index.php?q=aHR0cHM6Ly9lbi53aWtpcGVkaWEub3JnL3dpa2kvUGhvdG9lbGVjdHJpY19lZmZlY3Q. Erişim Tarihi: 12.12.2019.

Wikipedia, Web sitesi. https://www.wikizeroo.org/index.php?q=aHR0cHM6Ly90ci53aWtpcGVkaWEub3JnL3dpa2kvRm90b211bHRpcGVyX3TDvHA. Erişim Tarihi: 12.11.2019.

ÖZGEÇMİŞ



Adı Soyadı: Selen ÖZŞİMŞEK
Doğum Yeri: Trabzon
Doğum Tarihi: 14.01.1992
Medeni Hali: Evli
Yabancı Dili: İngilizce

Eğitim Durum

Lise: Arsin Anadolu Lisesi, Trabzon, 2010.

Lisans: Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Fizik Mühendisliği Bölümü, Ankara, 2015.

Yüksek Lisans: Ankara Üniversitesi, Nükleer Araştırmalar ve Teknolojileri Anabilim Dalı, Hızlandırıcı ve Dedektör Teknolojileri Yüksek Lisans Programı, 01/2017- 01/2020.

Çalıştığı Kurumlar ve Yıl

- ODTÜ'de Prof. Dr. Bilge Demirköz tarafından yürütülen ODTÜ Saçılmalı Demet Hattı projesinde Bilimsel Proje Uzmanı olarak Mayıs 2017 – Ağustos 2018 tarihleri arasında ODTÜ Fizik Bölümünde görev yaptım.

- TUSAŞ Uzay Sistemleri Genel Müdür Yardımcılığı'nda 03 Aralık 2019 tarihinden itibaren Uzay Ortam Mühendisi olarak görev yapmaktayım.

Yayınlar

• **S. Nigdelioglu**, B. Demirköz, M.Yigitoğlu, S.Aydın, I. Efthymiopoulos, "METU Defocusing Beamline Project for the First SEE Tests in Turkey and the Test Results from the METU-DBL Preliminary Setup" , 19 Kasım 2018, Science Direct, doi:10.1016/j.nima.2018.11.075.

• Çağrı Yazgan, M.B. Demirköz, I. Efthymiopoulos**, S. Nigdelioglu**, P. Uslu, M. Yigitoglu, "Performing the First Single Event Effect Tests Using the METU Defocuing Beam Line in Turkey: Characterization of the System and Monte Carlo Studies", 21 Şubat 2018, RAD Journal, doi:10.21175/RadJ.2018.02.21.

• **S. Ozsimsek**, M. Onal, "Radiation Analysis of HR Electro-Optical Satellite", 22 Temmuz 2019, doi: 10.1109/RAST.2019.8767442.

Uluslararası Kongre Sunum

• G. Kilicerkan Baslar, M.B. Demirköz, A. Avaroglu, M.S. Aydın, B. Bodur, D. Veske, M. Yigitoglu, S. Uzun Duran, P. Uslu, U. Kılıc, E. Özipek, S**. Nigdelioglu,** A. Yaksi, R. Uzel, İ. Şahin, "Systems Engineering of METU Defocusing BeamLine Project", 8. International Advanced Technologies Symposium , 19-21 Ekim 2017, Elazığ, Türkiye.

• **S. Nigdelioglu**, M.S. Aydın, M.B. Demirköz, I. Efthymiopoulos, M. Yigitoglu, "METU Defocusing Beamline Project for the First SEE Tests in Turkey and the Test Results from the METU-DBL Preliminary Setup" the 14th Pisa Meeting on Advanced Detector, 27 Mayıs -02 Haziran 2018, La Biodala, Isola d'Elba, Italya.

• M.S. Aydın, M.B. Demirköz, A. Avaroglu, **S. Nigdelioglu**, P. Uslu, M. Yigitoglu, K.D. Yelbası (TUBITAK), "The First SEE Test Campaign in Turkey at the METU Defocusing Beamline Preliminary Setup" 7th International Workshop on Analogue and Mixed-Signal Integrated Circuits for Space Applications, 17-20 Haziran 2018, Leuven, Belçika.

• Çağrı Yazgan, M.B. Demirköz, I. Efthymiopoulos, **S. Nigdelioglu**, P. Uslu, M. Yigitoglu, "Performing the First Single Event Effect Tests Using the METU Defocuing Beam Line in Turkey" 6th International Conference on Radiaton and Applications in Various Fields of Research, 18-22 Haziran 2018, Ohrid, Makedonya.