

**MRPC DETEKTÖRÜ ORTAMINDA KOZMİK MÜON
ETKİLEŞİMLERİNİN MONTE CARLO BENZETİMİ**

Furkan TOKAÇ



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MRPC DETEKTÖRÜ ORTAMINDA KOZMİK MÜON
ETKİLEŞİMLERİNİN MONTE CARLO BENZETİMİ**

Furkan TOKAÇ
0000-0002-9708-2764

Prof. Dr. Nilgün DEMİR
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

BURSA – 2022
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

MRPC DETEKTÖRÜ ORTAMINDA KOZMİK MÜON ETKİLEŞİMLERİNİN MONTE CARLO BENZETİMİ

Furkan TOKAÇ

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Nilgün DEMİR

Gazlı detektörler yüksek enerjili parçacık deteksiyonundan, çeşitli görüntüleme teknolojilerine kadar uzanan çok geniş bir yelpazede yaygın olarak kullanılmaktadır. MRPC (Multigap Resistive Plate Chamber – Çok Gaz Boşluklu Dirençli Plaka Odası) detektör yapıları, gazlı detektörler ailesinde ayrı bir yere sahiptir. MRPC detektörünün gaz hacmi içerisine giren parçacıklar, gaz karışımı ile fiziksel etkileşime girerek karakteristik bir sinyal meydana getirirler. Böylece gelen parçacık hakkında bilgi sahibi olunur. MRPC detektörlerinin diğer RPC detektörlerinden ayıran en temel özellik, sahip olduğu birden fazla gaz boşluğu sayesinde parçacıkların iz takibini kayda değer biçimde iyileştirmesidir. Ayrıca, MRPC yapılar birleştirilip büyük detektör sistemlerinde kullanılabilir. Bu yapılar örneğin CERN ALICE deneyinin önemli bir parçasını oluşturmaktadır.

Bu tez çalışmasında, %90 R134a - %5 i-C₄H₁₀ - %5 SF₆ , %97 R134a - %2,5 i-C₄H₁₀ - %0,5 SF₆ , %50 CO₂ - %45 N₂ - %5 Ar , %60 CO₂ - %35 N₂ - %5 Ar gaz karışımları için 5 gaz boşluklu, Soda-Lime Camlı MRPC detektörü tasarlanmıştır. Enerjisi 0,5 GeV – 1,0 GeV – 2,0 GeV ve 4,0 GeV olan kozmik müonlar, bir Cam MRPC detektörü üzerine dik olarak gönderilip gerçekleşen fiziksel etkileşimler FLUKA benzetim programından yararlanılarak incelenmiş ve en iyi performansı sağlayabilecek özellikler araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Cam MRPC, FLUKA, Kozmik Müon, Monte Carlo, RPC
2022, xiii + 121 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

MONTE CARLO SIMULATION OF COSMIC MUON INTERACTIONS IN MRPC DETECTOR MEDIUM

Furkan TOKAÇ

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics

Supervisor: Prof. Dr. Nilgün DEMİR

Gas detectors are widely used in various applications, ranging from high-energy particle detection to imaging technologies. MRPC (Multigap Resistive Plate Chamber) detector structures are unique among gas detectors. Particles entering the gas volume of the MRPC detector physically interact with the gas mixture, creating a characteristic signal. Thus, information about the incoming particle is obtained. The main feature that distinguishes MRPC detectors from other RPC detectors is that they significantly improve the tracking of particles thanks to their multiple gas gaps. MRPC structures can also be combined and used in large detector systems. These structures, for example, are an essential component of the CERN ALICE experiment.

In this thesis, for %90 R134a - %5 i-C₄H₁₀ - %5 SF₆ , %97 R134a - %2,5 i-C₄H₁₀ - %0,5 SF₆ , %50 CO₂ - %45 N₂ - %5 Ar , %60 CO₂ - %35 N₂ - %5 Ar gas mixtures, Soda-Lime Glass MRPC detector with 5 gas spaces is designed. Cosmic muons with energies of 0.5 GeV – 1.0 GeV – 2.0 GeV and 4.0 GeV are sent vertically on a Glass MRPC detector and the physical interactions that occur are examined using the FLUKA simulation software, as well as the properties that can provide the best performance are investigated.

Key words: Cosmic Muon, FLUKA, Glass MRPC, Monte Carlo, RPC
2022, xiii + 121 pages.

TEŞEKKÜR

İlk olarak, bu tez çalışmamda bana mentorluk yapan; bilgi birikimi ile bana ışık tutan; danışman hocam, Sayın Prof. Dr. Nilgün DEMİR'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bunun yanında Doç. Dr. Özkan Şahin'e ve Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesinde bulunan tüm değerleri hocalarıma, bana bilgi birikimi ile destekte bulunan doktora öğrencileri Sayın Gökhan ÜNSALAN ve İdris KALP'e de teşekkürlerimi borç bilirim.

Furkan TOKAÇ

14/11/2022



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
2.1. Temel Parçacıklar ve Standart Model.....	4
2.2. Deneysel Yüksek Enerji Fiziği.....	8
2.2.1. Hızlandırıcıların Çalışma Prensipleri.....	9
2.2.2. Doğrusal Hızlandırıcılar.....	10
2.2.3. Dairesel Hızlandırıcılar.....	11
2.2.4. Detektör Sistemleri.....	13
2.3. Parçacıkların Madde ile Etkileşimleri.....	15
2.3.1. Yüklü Parçacıkların Madde İle Etkileşimi	15
2.3.2. Katı Açı.....	16
2.3.3. Tesir Kesiti.....	17
2.3.4. Ortalama Serbest Yol.....	20
2.3.5. Yüklü Ağır Parçacıkların Enerji Kaybı.....	22
2.3.6. Yüklü Parçacığın Enerji Kaybı Dağılımları.....	24
2.4. Müonlar.....	25
2.4.1 Kozmik Müonlar.....	26
2.4.2. Zenit Açısı	29
2.4.3. Zenit Açısının Kozmik Müon Akısı İle İlişkisi.....	30
2.5. Kozmik Müonların Madde ile Etkileşimleri	31
2.5.1. İyonlaşma ve Uyarılma ile Enerji Kaybı.....	31
2.5.2. Işıma ile Enerji Kaybı.....	36
2.5.3. Çoklu Coulomb Saçılması.....	37
2.6. Detektörlerin Karakteristik Özellikleri.....	39
2.6.1. Detektör Hassasiyeti.....	40
2.6.2. Detektör Cevabı.....	40
2.6.3. Enerji Çözünürlüğü.....	42
2.6.4. Cevap Süresi.....	43
2.6.5. Detektör Verimliliği.....	43
2.6.6. Ölü Zaman.....	44
2.6.7. Detektör Kazancı.....	44
2.7. Gazlı Detektörlerin Genel Yapısı.....	45
2.7.1. Gazlı Detektörlerde Kullanılan Gaz Karışımları.....	46
2.7.2. Dirençli Plaka Odası (RPC) Detektörleri.....	47
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	51
3.1. Materyal.....	51
3.2. Yöntem.....	54
3.2.1. FLUKA (FLUktuarende KAskade) Programı.....	54

4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	60
4.1. USRBIN Bulguları.....	60
4.2. DETECT Bulguları.....	92
4.3. USRTRACK Bulguları.....	98
4.4. USRBDX Bulguları.....	110
5. SONUÇ.....	115
KAYNAKLAR.....	118
ÖZGEÇMİŞ.....	121



SİMGELER ve KISATLMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
Φ	Akı
N_a	Avagadro sayısı
ξ	Bethe – Bloch formülündeki ortalama enerji
a_0	Bohr yarıçapı
G	Detektör kazancı
$\vec{E}$	Elektrik alan
m_e	Elektron kütlesi
ΔE^w	En muhtemel enerji kaybı
E	Enerji
b	Etki parametresi
e	Euler sabiti
z	Gelen parçacığın temel yük cinsinden değeri
$\mathcal{E}_{geo}$	Geometrik verimlilik
ΔE	Gerçek enerji transferi
c	Işık hızı
α	İnce yapı sabiti, Townsend katsayısı
$\hbar$	İndirgenmiş Planck Sabiti
Ω	Katı açısı
r_e	Klasik elektron yarıçapı
E_c	Kritik enerji
$L(\lambda)$	Landau dağılımı
θ_0	Maddesel ortamdan çıkan parçacığın net saçılma açısı
$\vec{B}$	Manyetik alan
$\mathcal{E}_{mutlak}$	Mutlak verimlilik
τ_μ	Müon yaşam ömrü
R_0	Müonun ilk enerjisinin tamamının kaybetmesi için gerekli uzunluk
λ	Ortalama serbest yol
I	Ortalama uyarılma potansiyeli
$\mathcal{E}_{öz}$	Öz verimlilik
$\vec{v}$	Parçacığın hızı
β	Parçacığın hızı bölü ışık hızı oranı
p	Parçacığın momentumu
X_0	Radyasyon uzunluğu
γ	Rölativistik sabit
A	Soğurucu maddenin atom ağırlığı
Z	Soğurucu maddenin atom numarası
W_{maks}	Tek bir çarpışmada maksimum enerji transferi
σ	Tesir kesiti
r	Yarıçap
ρ	Yoğunluk
δ	Yoğunluk düzeltmesi
q	Yük
θ_z	Zenit açısı

Kısaltmalar	Açıklama
AC	Alternatif Akım
ALICE	Ağır İyon Çarpıştırıcı Deneyi
ATLAS	Büyük Toroidal LHC Aparatı
BEPC	Pekin Elektron Pozitron Hızlandırıcısı
BES	Pekin Spektrometresi
BESIII	Pekin Spetrometresi III
CERN	Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi
CMS	Kompakt Müon Selonoidi
CSC	Katot Şerit Odası
DESY	Alman Elektron Senkrotronu
DORIS	Çift Depolama Halkası
DT	Sürüklenme Odası
DYEF	Deneysel Yüksek Enerji Fiziği
Fermi	Fermi Ulusal Hızlandırıcı Laboratuvarı
FLUKA	FLUktuirende KAskade
FWHM	Pikin yarı yüksekliğindeki tam genişliği
LEP	Büyük Elektron Pozitron Çarpıştırıcısı
LHC	Büyük Hadron Çarpıştırıcısı
MRPC	Çok Gaz Boşluklu Dirençli Plaka Odası
PETRA	Pozitron Elektron Tandem Halka Hızlandırıcısı
RF	Radyo Frekans
RPC	Dirençli Plaka Odası
SM	Standart Model
YEF	Yüksek Enerji Fiziği
YEFE	Yüksek Enerji Fiziği Enstitüsü

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. SM'ye göre temel parçacıklar.....	6
Şekil 2.2. Hızlandırıcı sınıflandırması.....	8
Şekil 2.3. Lorentz Kuvveti'nin bileşenleri (Alesini, 2016'dan değiştirilerek alınmıştır).....	9
Şekil 2.4. Wideroe Sürüklenme tüpünün basit bir gösterimi (Alesini, 2016).....	10
Şekil 2.5. Dairesel hızlandırıcı türlerinden olan Sikrotron ve Sinkrotron; en genel çalışma prensibi itibari ile birbirine benzemektedir (Demir, 2022).....	11
Şekil 2.6. Bulut odasının örnek şeması (Connor 2019'dan değiştirilerek alınmıştır).....	13
Şekil 2.7. Bulut odasındaki β parçacığı görüntüleri (Needels, Neilsen, 1950).....	13
Şekil 2.8. Çarpışma noktası etrafına yerleştirilmiş detektör ve kalorimetreler.....	14
Şekil 2.9. Bir parçacık demetinin, atom ile etkileşim parametreleri (Demir, 2022'den değiştirilerek alınmıştır).....	15
Şekil 2.10. Yarıçapı r olan bir kürenin merkezinde, kürenin yüzeyine yansıttığı A alanı ile konik bir katı Ω açısı gösterilmektedir. Katı açı, tamamen koninin tepe açısı tarafından belirlenmesinin yanında, kürenin merkezindeki açı ise dairesel kesitinin çapı ile belirlenir (Quincey, 2020).....	17
Şekil 2.11. Tesir kesiti kavramının şematik gösterimi.....	18
Şekil 2.12. Saçılma tesir kesiti kavramının, şematik gösterimi (UC Santa Barbara Üniversitesi – Fizik 103 Ders Notları 2015'den değiştirilerek alınmıştır).....	19
Şekil 2.13. Düşük enerjide nötron-proton saçılma tesir kesiti (Krane, 2001).....	20
Şekil 2.14. Landau dağılımının bir gösterimi (Demir, 2022).....	24
Şekil 2.15. Birincil kozmik ışınların, hava molekülleri ile meydana getirdiği fiziksel etkileşimler (Georgia Devlet Üniversitesi – HyperPhysics, 2022'den değiştirilerek alınmıştır).....	27
Şekil 2.16. Işınlardan geliş açılarının gösterimi (Kıncay, 2020 – Güneş Enerjisi Ders Notları II. Bölüm'den değiştirilerek alınmıştır).....	29
Şekil 2.17. Zenit Açısı (Kıncay, 2020 – Güneş Enerjisi Ders Notları II. Bölüm'den değiştirilerek alınmıştır).....	29
Şekil 2.18. Çeşitli deneylerden elde edilmiş Zenit açısı - müon akısı değişim grafiği ve Zenit açısı 0° iken, parçacık akısı ve momentumu arasındaki ilişki (Shukla, Sankrith, 2018).....	30
Şekil 2.19. Gelen parçacık, atomu uyarma/iyonize etme veya atom çekirdeği ile etkileşmesi sonucu Bremsstrahlung olayı gerçekleştirebilir (Franklin, 2020).....	32

Şekil 2.20.	δ elektronu yayan iki müonun Zaman Yansıtma Odası (TPC – Time Projection Chamber) içerisindeki görünümü (Franklin 2020).....	33
Şekil 2.21.	Bakır içerisinde geçen müonların durdurma gücü - momentum grafiği (Bichsel, Groom, Klein, 2006'dan değiştirilerek alınmıştır).....	34
Şekil 2.22.	Çeşitli maddesel ortamlardan geçen müonların, sahip olduğu momentum değerlerinin enerji kaybı arasındaki ilişkinin gösterimi. (Minumum İyonize Edici Parçacık (MIP), β değeri 3 ~ 3,5 GeV civarındadır) (Franklin, 2020).....	35
Şekil 2.23.	Bremsstrahlung olayının bir gösterimi.....	36
Şekil 2.24.	Çoklu Coulomb saçılmasının bir gösterimi (Demir, 2022'den değiştirilerek alınmıştır).....	38
Şekil 2.25.	Şekil a'da bir sinyal pikinin FWHM'ı gösterilmektedir. Şekil b'de, FWHM değerleri görece küçük olduğundan dolayı, birbirlerinden ayrı olarak gözlemlenebilen iki sinyal piki görülmektedir bu durum detektörün enerji çözünürlüğünün yüksek olmasının bir getirisi. Şekil c'de, sinyal piklerinin FWHM değerlerini baz aldığımızda, detektörün enerji çözünürlüğü düşük olduğu durumda, birbirinden ayırt edilemeyen iki sinyal piki görülmektedir ve bu iki sinyal bir bütünmüş gibi görünür. Şekil d'de detektörün doğal gürültüsü sebebi ile karmaşıklaşmış sinyal pikleri görülmektedir ve siyah çizgi ile gösterilen tepeler, komşu üç veri noktasının ortalamasını temsil eder (Kudryashev, 2017'den değiştirilerek alınmıştır).....	42
Şekil 2.26.	Silindirik gazlı detektörün şematik gösterimi.....	46
Şekil 2.27.	Santonico ve Carderalli RPC tasarımının şematik gösterimi. (1) Bakalit elektrotlar (2mm), (2) Gaz boşluğu (2mm), (3) Yüksek Voltaj (HV) elektrotları (200 μ m grafit kaplı), (4) Mylar yalıtkan (50 μ m), (5) sinyal okuma şeritleri, (6) direnç, (7) sinyal okumaya yardımcı elektronik düzenekler (Abbrescia, Peskov, Fonte, 2018).....	48
Şekil 2.28.	RPC detektörünün gaz hacmi içerisinde gerçekleşebilecek, çığ olayının şematik görünümü. – işaretli olanlar elektronları, daire içerisindeki – işaretli şekiller elektron yakalayan elektronegatif molekülleri sembolize eder. + işaretler ise iyonize olmuş pozitif yüklü molekülleri/protonları sembolize eder. Elektron çığınının damla şekli, negatif ve pozitif yüklü moleküllerin/parçacıkların kütle farkından dolayıdır. Elektronlar detektörün sinyal okuma şeritleri tarafından algılanan sinyalin, hızlı bileşenine katkıda bulunurken, negatif iyonlar yavaş bileşenine katkıda bulunur (Abbrescia, Peskov, Fonte, 2018).....	48
Şekil 2.29.	İki gaz boşluklu, RPC detektörün şematik gösterimi (Abbrescia, Peskov, Fonte, 2018'den değiştirilerek alınmıştır).....	49
Şekil 2.30.	MRPC detektörünün şematik gösterimi (Abbrescia, Peskov, Fonte, 2018'den değiştirilerek alınmıştır).....	50
Şekil 3.1.	FLUKA içerisinde tanımlanan detektör geometrisi.....	51

Şekil 3.2.	FLUKA – Flair ile tasarlanmış bir geometri.....	55
Şekil 3.3.	FLUKA içerisinde, molekül ve gaz karışımı tanımlanması örneği.	55
Şekil 3.4.	Geometry / Body başlığı altında, çeşitli geometrik tanımlamaların gösterimi.....	56
Şekil 3.5.	Physics başlığı altındaki fiziksel etkileşimlerin görünümü.....	57
Şekil 3.6.	FLUKA içerisindeki Scoring bölümü.....	58
Şekil 3.7.	FLUKA içerisindeki Transport bölümü.....	59
Şekil 4.1.	%90 R134a - %5 i-C ₄ H ₁₀ - %5 SF ₆ gaz karışımından geçen müonların USRBIN grafikleri.....	63
Şekil 4.2.	%90 R134a - %5 i-C ₄ H ₁₀ - %5 SF ₆ gaz karışımında oluşan elektronların USRBIN grafikleri.....	64
Şekil 4.3.	%90 R134a - %5 i-C ₄ H ₁₀ - %5 SF ₆ gaz karışımında oluşan fotonların USRBIN grafikleri.....	65
Şekil 4.4.	%90 R134a - %5 i-C ₄ H ₁₀ - %5 SF ₆ gaz karışımında depolanan toplam enerjinin USRBIN grafikleri.....	66
Şekil 4.5.	%97 R134a - %2,5 i-C ₄ H ₁₀ - %0,5 SF ₆ gaz karışımından geçen müonların USRBIN grafikleri.....	69
Şekil 4.6.	%97 R134a - %2,5 i-C ₄ H ₁₀ - %0,5 SF ₆ gaz karışımında oluşan elektronların USRBIN grafikleri.....	70
Şekil 4.7.	%97 R134a - %2,5 i-C ₄ H ₁₀ - %0,5 SF ₆ gaz karışımında oluşan fotonların USRBIN grafikleri.....	71
Şekil 4.8.	%97 R134a - %2,5 i-C ₄ H ₁₀ - %0,5 SF ₆ gaz karışımında depolanan toplam enerjinin USRBIN grafikleri.	72
Şekil 4.9.	%50 CO ₂ - %45 N ₂ - %5 Ar gaz karışımından geçen müonların USRBIN grafikleri.....	75
Şekil 4.10.	%50 CO ₂ - %45 N ₂ - %5 Ar gaz karışımında oluşan elektronların USRBIN grafikleri.....	76
Şekil 4.11.	%50 CO ₂ - %45 N ₂ - %5 Ar gaz karışımında oluşan fotonların USRBIN grafikleri.....	77
Şekil 4.12.	%50 CO ₂ - %45 N ₂ - %5 Ar gaz karışımında depolanan toplam enerjinin USRBIN grafikleri.....	78
Şekil 4.13.	%60 CO ₂ - %35 N ₂ - %5 Ar karışımından geçen müonların USRBIN grafikleri.....	81
Şekil 4.14.	%60 CO ₂ - %35 N ₂ - %5 Ar gaz karışımında oluşan elektronların USRBIN grafikleri.....	82
Şekil 4.15.	%60 CO ₂ - %35 N ₂ - %5 Ar gaz karışımında oluşan fotonların USRBIN grafikleri.....	83
Şekil 4.16.	%60 CO ₂ - %35 N ₂ - %5 Ar gaz karışımında depolanan toplam enerjinin USRBIN grafikleri...	84
Şekil 4.17.	Gaz karışımlarına göre müonların toplam akılarının USRBIN sonuçları grafiği.....	85
Şekil 4.18.	Gaz karışımlarına göre oluşan elektronların toplam akılarının USRBIN sonuçları grafiği.....	86
Şekil 4.19.	Gaz karışımlarına göre oluşan fotonların toplam akılarının USRBIN sonuçları grafiği.....	87
Şekil 4.20.	Gaz karışımlarına göre ortamda depolanan toplam enerjinin USRBIN sonuçları.....	88

Şekil 4.21.	Gaz karışımlarına göre oluşan pozitronların toplam akılarının USRBIN sonuçları grafiği.....	91
Şekil 4.22.	%90 R134a - %5 i-C ₄ H ₁₀ - %5 SF ₆ gaz karışımı bulunan detektördeki depolanan enerji.....	92
Şekil 4.23.	%97 R134a - %2,5 i-C ₄ H ₁₀ - %0,5 SF ₆ gaz karışımı bulunan detektördeki depolanan enerji.....	93
Şekil 4.24.	%50 CO ₂ - %45 N ₂ - %5 Ar gaz karışımı bulunan detektördeki depolanan enerji.....	93
Şekil 4.25.	%60 CO ₂ - %35 N ₂ - %5 Ar gaz karışımı bulunan detektördeki depolanan enerji.....	94
Şekil 4.26.	Gaz hacminden 0,5 GeV müonların geçtiği detektörde depolanan enerjinin, gaz karışımlarına göre değişimi.....	95
Şekil 4.27.	Gaz hacminden 1,0 GeV müonların geçtiği detektörde depolanan enerjinin, gaz karışımlarına göre değişimi.....	96
Şekil 4.28.	Gaz hacminden 2,0 GeV müonların geçtiği detektörde depolanan enerjinin, gaz karışımlarına göre değişimi.....	96
Şekil 4.29.	Gaz hacminden 4,0 GeV müonların geçtiği detektörde depolanan enerjinin, gaz karışımlarına göre değişimi.....	97
Şekil 4.30.	%90 R134a - %5 i-C ₄ H ₁₀ - %5 SF ₆ gaz karışımı içerisinde, gönderilen müonların enerjilerine göre USRTRACK sonuç grafikleri.....	102
Şekil 4.31.	%97 R134a - %2,5 i-C ₄ H ₁₀ - %0,5 SF ₆ gaz karışımı içerisinde, gönderilen müonların enerjilerine göre USRTRACK sonuç grafikleri.....	103
Şekil 4.32.	%50 CO ₂ - %45 N ₂ - %5 Ar gaz karışımı içerisinde, gönderilen müonların enerjilerine göre USRTRACK sonuç grafikleri.....	104
Şekil 4.33.	%60 CO ₂ - %35 N ₂ - %5 Ar gaz karışımı içerisinde, gönderilen müonların enerjilerine göre USRTRACK sonuç grafikleri.....	105
Şekil 4.34.	0,5 GeV enerjili Müon'un farklı gaz karışımları ve geçtiği gap değerlerine göre iz uzunluğu grafiği.....	106
Şekil 4.35.	1,0 GeV enerjili Müon'un farklı gaz karışımları ve geçtiği gap değerlerine göre iz uzunluğu grafiği.....	107
Şekil 4.36.	2,0 GeV enerjili Müon'un farklı gaz karışımları ve geçtiği gap değerlerine göre iz uzunluğu grafiği.....	107
Şekil 4.37.	4,0 GeV enerjili Müon'un farklı gaz karışımları ve geçtiği gap değerlerine göre iz uzunluğu grafiği.....	108
Şekil 4.38.	0,5 – 4,0 GeV enerji aralığındaki müonların, iz uzunluklarının ortalaması alınarak elde edilen grafik.....	108
Şekil 4.39.	Müonların detektörden çıkışındaki USRBDX sonuçlarının grafiği.....	112
Şekil 4.40.	Oluşan elektronların beşinci gaptaki USRBDX sonuçlarının grafiği.....	113
Şekil 4.41.	Oluşan fotonların beşinci gaptaki USRBDX sonuçlarının grafiği.....	114

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. Lepton sınıflandırması.....	5
Çizelge 2.2. Kuark Sınıflandırması.....	6
Çizelge 2.3. Doğadaki dört temel kuvveti ve bunlar arasındaki şiddet farkları.....	7
Çizelge 2.4. Müonların temel özellikleri (Nagamine, 2003'den değiştirilerek alınmıştır).....	25
Çizelge 2.5. Pion mezonunun fiziksel bilgileri.....	27
Çizelge 3.1. Kullanılan elementlerin yoğunluk değerleri.....	52
Çizelge 3.2. Bileşiklerin yoğunluk değerleri.....	53
Çizelge 3.3. Benzetimde kullanılan karışımların yoğunlukları.....	53
Çizelge 3.4. Benzetimde kullanılan camın yoğunluğu.....	53
Çizelge 4.1. 90% R134a – 5% i-C ₄ H ₁₀ - 5% SF ₆ gaz karışımından geçen müonların USRBIN sonuçları.....	61
Çizelge 4.2. 90% R134a – 5% i-C ₄ H ₁₀ - 5% SF ₆ gaz karışımında oluşan elektronların USRBIN sonuçları.....	61
Çizelge 4.3. 90% R134a – 5% i-C ₄ H ₁₀ - 5% SF ₆ gaz karışımında oluşan fotonların USRBIN sonuçları.....	62
Çizelge 4.4. 90% R134a – 5% i-C ₄ H ₁₀ - 5% SF ₆ gaz karışımında depolanan toplam enerjinin USRBIN sonuçları.....	62
Çizelge 4.5. 97% R134a - 2,5% i-C ₄ H ₁₀ - 0,5% SF ₆ gaz karışımından geçen müonların USRBIN sonuçları.....	67
Çizelge 4.6. 97% R134a - 2,5% i-C ₄ H ₁₀ - 0,5% SF ₆ gaz karışımında oluşan elektronların USRBIN sonuçları.....	67
Çizelge 4.7. 97% R134a - 2,5% i-C ₄ H ₁₀ - 0,5% SF ₆ gaz karışımında oluşan fotonların USRBIN sonuçları.....	68
Çizelge 4.8. 97% R134a - 2,5% i-C ₄ H ₁₀ - 0,5% SF ₆ gaz karışımında depolanan toplam enerjinin USRBIN sonuçları.....	68
Çizelge 4.9. 50% CO ₂ - 45% N ₂ - 5% Ar gaz karışımından geçen müonların USRBIN sonuçları.....	73
Çizelge 4.10. 50% CO ₂ - 45% N ₂ - 5% Ar gaz karışımında oluşan elektronların USRBIN sonuçları.....	73
Çizelge 4.11. 50% CO ₂ - 45% N ₂ - 5% Ar gaz karışımında oluşan fotonların USRBIN sonuçları.....	74
Çizelge 4.12. 50% CO ₂ - 45% N ₂ - 5% Ar gaz karışımında depolanan toplam enerjinin USRBIN sonuçları.....	74
Çizelge 4.13. 60% CO ₂ - 35% N ₂ - 5% Ar karışımından geçen müonların USRBIN sonuçları.....	79
Çizelge 4.14. 60% CO ₂ - 35% N ₂ - 5% Ar gaz karışımında oluşan elektronların USRBIN sonuçları.....	79
Çizelge 4.15. 60% CO ₂ - 35% N ₂ - 5% Ar gaz karışımında oluşan fotonların USRBIN sonuçları.....	80
Çizelge 4.16. 60% CO ₂ - 35% N ₂ - 5% Ar gaz karışımında depolanan toplam enerjinin USRBIN sonuçları.....	80

Çizelge 4.17.	90% R134a – 5% i-C ₄ H ₁₀ - 5% SF ₆ gaz karışımında oluşan pozitronların USRBIN sonuçları.....	89
Çizelge 4.18.	97% R134a - 2,5% i-C ₄ H ₁₀ - 0,5% SF ₆ gaz karışımında oluşan pozitronların USRBIN sonuçları.....	89
Çizelge 4.19.	50% CO ₂ - 45% N ₂ - 5% Ar gaz karışımında oluşan pozitronların USRBIN sonuçları.....	90
Çizelge 4.20.	60% CO ₂ - 35% N ₂ - 5% Ar gaz karışımında oluşan pozitronların USRBIN sonuçları.....	90
Çizelge 4.21.	90% R134a – 5% i-C ₄ H ₁₀ - 5% SF ₆ gaz karışımı içerisinde, gönderilen müonların enerjilerine göre USRTRACK sonuçları.....	98
Çizelge 4.22.	97% R134a - 2,5% i-C ₄ H ₁₀ - 0,5% SF ₆ gaz karışımı içerisinde, gönderilen müonların enerjilerine göre USRTRACK sonuçları.....	99
Çizelge 4.23.	50% CO ₂ - 45% N ₂ - 5% Ar gaz karışımı içerisinde, gönderilen müonların enerjilerine göre USRTRACK sonuçları.....	100
Çizelge 4.24.	60% CO ₂ - 35% N ₂ - 5% Ar gaz karışımı içerisinde, gönderilen müonların enerjilerine göre USRTRACK sonuçları.....	101
Çizelge 4.25.	Farklı gaz karışımlarına, farklı enerji değerlerinde gönderilen müonların; Gap Numarası – Ortalama İz uzunluğu grafiğinde çizilen fitlerin eğim değerleri.....	109
Çizelge 4.26.	Müonların detektörden çıkışındaki USRBDX sonuçları.....	110
Çizelge 4.27.	Oluşan elektronların beşinci gaptaki USRBDX sonuçları.....	111
Çizelge 4.28.	Oluşan fotonların beşinci gaptaki USRBDX sonuçları.....	111

1. GİRİŞ

Parçacıklar, gözle görülemeyecek kadar küçük fiziksel olgulardır. Onların gözle görülmemesi, olmadıkları anlamına da gelmez. Antik yunan zamanında, Demokritos ile süregelen, maddelerin parçacıklardan oluştuğuna dair bu görüş; gelecek yüzyıllarda teknolojinin gelişmesi ile somut bir delil kazanmıştır. Parçacık fiziğinin geliştiği ilk dönemlerde, bir kaynaktan yayılan parçacıkları detekte etmek için görece basit detektör sistemleri geliştirildi. Detektör içerisinde geçen parçacıklar, detektör materyali (detektör içerisindeki gaz karışımı vb.) ile fiziksel etkileşimlerde bulunurlar ve detektör içerisinde bir sinyal meydana gelir. Detektörlerden alınan bu sinyaller ile, radyoaktif kaynaklardan yayılan parçacıkların miktarı hakkında fikir sahibi olunur. Ardından fizikçiler bu detektörleri geliştirip, radyoaktif kaynaklardan yayılan parçacıkların türleri hakkında fikir sahibi oldular. Yayınlanan parçacıkların türü ve enerji seviyelerine göre; bu kaynaklar sınıflandırıldı. Böylece, parçacık fiziği deneyleri daha sofistike şekilde tasarlanmaya başlandı. Parçacıkların türü ve sahip olduğu enerji seviyelerine göre sınıflandırmaları ile, 21. yy'da, Yüksek Enerji Fiziği (YEF) çerçevesinde birçok deneysel sistem tasarlanmıştır ve alınan sonuçlarla birçok keşif yapılmıştır. YEF deneyleri genellikle bir parçacık hızlandırıcısı çevresinde tasarlanır. Parçacık hızlandırıcıları, yüklü parçacıklara elektrik alan sayesinde yüksek enerji kazandırır ve parçacıkların yörüngelerinde sorunsuz bir şekilde yol alması için; yüksek manyetik alandan faydalanılır. Yeterli enerji seviyesine getirilen parçacık demetleri, ya bir etkileşim noktasında, ya da sabit bir hedef ile çarpıştırılır; açığa çıkan alt parçacıklar; etkileşim noktası çevresine yerleştirilen detektör sistemleri aracılığı ile analiz edilerek, yeni keşiflerin yapılmasına olanak sağlar. Etkileşim noktasına yerleştirilen detektörler, YEF deneyinin türüne göre çeşitlendirilir. Bu detektörler, gerekli olan enerji, zaman ve konum çözünürlüğüne bağlı olarak seçilir. Detektörler için bir diğer önemli parametre ise parçacık demetinin hangi oranda, detektör tarafından sayım yapıldığının ölçütü olan; detektör verimidir.

Her detektörde olduğu gibi, gazlı detektörler için de bu özellikler önemlidir. Gazlı detektörlerin diğer detektörlerden en önemli farkı, detektör hacmi içerisine yerleştirilen çeşitlilik taşıyan gaz karışımıdır. Parçacıklar, detektör hacmindeki gaz karışımı içerisinde geçerken fiziksel etkileşimlerde bulunurlar. Bu etkileşimlerden en önemli olanı iyonlaşma olayıdır. Birincil iyonlaşma sonucunda açığa çıkan elektronlar, detektör

içerisinde meydana getirilen elektrik alan neticesinde enerji kazanırlar ve ikincil iyonlaşmaları meydana getirirler. Bu durum devam eder ve elektron çığı adı verilen olay meydana gelir. Elektron çığı içerisindeki elektronlar, detektörün anot yüzeyine çarpıp bir sinyal oluştururlar.

RPC (Resistive Plate Chamber – Dirençli Plaka Odası) detektörler, bir çeşit gazlı detektördür. Üretiminin kolaylığı, yüksek verimliliğe ve zaman çözünürlüğüne sahip olması YEF deneylerinin birçok yerinde kullanılmasına imkan sağlar.

RPC detektörler, tek, çift veya ikiden fazla gaplı (gaz boşluklu) olacak şekilde tasarlanabilir. Birden fazla gaz hacmi oluşturularak tasarlanan RPC detektörlere ise, MRPC (Multigap Resistive Plate Chamber – ok Gaz Boşluklu Dirençli Plaka Odası) ismi verilmektedir.

RPC (ve MRPC gibi türevleri) detektörleri, CERN’de LHC (Large Hadron Collider- Büyük Hadron arpıştırıcısı) bünyesinde bulunan CMS (Compact Muon Solenoid – Kompakt Müon Solenoidi), ATLAS (A large Toroidal Lhc ApparatuS – Büyük Toroidal LHC Aparatı) detektörleri içerisinde bir alt detektör olarak kullanılmaktadır. Ayrıca ALICE (A Large Ion Collider Experiment - Ağır İyon arpıştırıcı Deneyi), 1989 yılında BEPC (Beijing Electron Positron Collider – Pekin Elektron Pozitron Hızlandırıcısı) ve BES (Beijing Spectrometer – Pekin Spektrometresi) detektörünün Yüksek Enerji Fiziğı Enstitüsü bünyesinde çalışmaya başlaması ile başlayan deneysel programın en son enkarnasyonu olan (CERN BESIII, 2014) BESIII (The Beijing Spectrometer III – Pekin Sptrometresi III) gibi detektörlerin bir parçası olarak RPC detektörler kullanılmaktadır.

Bunun yanında, DT (Drift Chamber – Sürüklenme Odası) ve CSC (Cathode Strip Chamber – Katot şerit Odası) ile bir arada, müon tetikleme sisteminin önemli bir paracısı olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada FLUKA (FLUktuierende KAskade) Monte Carlo benzetim programı kullanılarak, 5 gaz boşluklu (her bir gaz boşluğu 0.25 mm kalınlığındadır), 20x20 cm²'lik bir Cam MRPC tasarımı yapıldı. MRPC detektör tasarımında kullanılan, dış camlar 2mm, ara camlar 1mm kalınlıkta olacak şekilde tasarlanmıştır. Gaplardaki gaz karışımları, %90 R134a - %5 i-C₄H₁₀ - %5 SF₆, %97 R134a - %2,5 i-C₄H₁₀ - %0,5 SF₆, %50 CO₂ - %45 N₂ - %5 Ar, %60 CO₂ - %35 N₂ - %5 Ar olarak tanımlanmıştır. Z – ekseninde, detektöre dik olacak şekilde çeşitli enerjilerde (0,5 GeV – 1,0 GeV – 2,0 GeV ve 4,0 GeV) kozmik müonlar düzlemsel demet (Pencil Beam - 20 000 parçacık) halinde gönderilmiştir. Gönderilen müonların MRPC detektör hacmi ile yaptığı etkileşimlerin ve detektör hacminde bıraktığı enerjinin, benzetimi yapılmıştır.

Bu çalışmanın yapılma amacı, MRPC ile kozmik müon deteksiyonunun, deneysel çalışmaları için bir öngörü sağlamaktır. Hangi gaz karışımının, hangi orandaki değerinin daha avantajlı olduğuna dair bir çıkarım yapılarak; gelecek çalışmalarda bize ışık tutması amaçlanmaktadır.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Temel Parçacıklar ve Standart Model

Evren üzerindeki tüm maddesel olgular, atom altı parçacıklardan oluşmuştur. Antik dönemlerde madde kavramı, günümüzdeki anlayıştan epey farklıdır. Milattan önce yaşamış olan, Demokritos'un Atomcu¹ görüşünden bu yana, maddeye karşı bakış açısı köklü bir şekilde değişmiştir.

"Atom altı düzeydeki maddenin, aralarında devasa boşluklar bulunan çok küçük taneciklerden oluşuyor olması; dikkate değer bir gerçektir. Daha dikkat çekici olan ise, bu küçük taneciklerin az sayıdaki farklı tipten (elektronlar, protonlar, nötronlar, pi-mezonlar, nötrinolar vs.) olması ve bunların astronomik sayılarda kopyalanarak etrafımızda gördüğümüz her şeyi oluşturmasıdır (Griffiths, 2015)".

20.yy'ın başlarına kadar, atomun temel parçacık olduğuna dair genel bir kanı vardı. Maddenin en küçük yapı taşının atom olduğunu ve maddenin tamamen atomlardan meydana geldiğine dair bu kabul, ileriki dönemlerde yapılacak olan deneylerin sonucunda; yetersiz olduğu sonucunu doğurdu.

1897 yılında JJ. Thomson, katot ışın tüpü ile yaptığı deneylerin sonucunda elektronu keşfetti. 1911 yılında, E. Rutherford ve E. Marsden tarafından proton adlı parçacık keşfedildi. Atomların elektriksel olarak yüksüz olduğunu gördükleri için, nötronun keşfine kadar; atomların içinde artı yüklü proton ve eksi yüklü elektron olduğu kabul edildi. 1932 yılında J. Chadwick tarafından ise nötron keşfedildi. Fotonlar 1923 yılında, A. Compton tarafından keşfedildi. 1932 yılında C. Anderson tarafından (P. Dirac'ın katkılarıyla), sis odası fotoğrafından pozitronun (elektronun antiparçacığı) ilk kanıtı elde edildi.

¹Atomculuk: Makroskobik dünyamızın en iyi şekilde, yunanca 'a' ve 'tomos' kelimelerinin birleşmesi ile 'bölünemez' anlamına gelen, atom adı verilen yapı taşlarından oluşması koşulu ile anlaşılabilirliğini kabul eden felsefi bir görüştür. Demokritos (M.Ö. 458-368), bu görüşü savunan, en bilinen kişilerden biridir.

1937 yılında ise, C. Anderson ve S. Neddermeyer tarafından müonlar keşfedildi (Lippmann, 2003). 1934 yılında, E. Fermi tarafından keşfedilen Zayıf Etkileşim Teorisi ardından 1953 yılında; H. Yukawa tarafından Mezon Teorisi önerildi (Nagashima, 2009). Pauli tarafından ön görülen nötrinoların 1956 yılında, C. Cowan ve F. Reines tarafından kanıtlanması ardından; parçacık fiziğinde gelişmeler hız kesmeden devam etti. Bahsi geçen bu parçacıklar, dünya çapında 1960'lardan bu yana "Standart Model (SM)" olarak bilinen bir teorinin öne sürdüğü ve çoğunun keşfinin gerçekleştiği, parçacıkların ta kendileridir.

SM, yapı itibari ile maddenin temel yapı taşlarının fiziksel özelliklerinin (kütle, elektriksel yük, spin^2 vb.) hesaplanmasını sağlarken; bu yapı taşları arasındaki fiziksel kuvvetlerin de anlaşılmasını sağlar. SM'ye göre, evrendeki tüm madde üç çeşit temel parçacıktan oluşmaktadır: Bunlar, leptonlar, kuarklar ve aracı bozonlardır (Daha genel olarak, temel parçacıklar spinlerine göre Fermiyonlar kesirli spin, Bozonlar tam sayılı spine sahiptir). Temel parçacıkların temel özelliklerinden kütle, elektriksel yük ve spin'in yanında; SM çerçevesinde daha akla yatkın bir sınıflandırma yapmak için, farklı kuantum sayıları da tanımlanmıştır.

“Yüklerine (Q), elektron sayılarına (L_e), müon sayılarına (L_μ) ve tau sayılarına (L_τ) göre sınıflandırılan altı çeşit lepton vardır ve üç aile olarak toplanırlar (Griffiths, 2015).”

Çizelge 2.1. Lepton sınıflandırması

Aileler	l	Q	L_e	L_μ	L_τ
Birinci Aile	e	-1	1	0	0
	ν_e	0	1	0	0
İkinci Aile	μ	-1	0	1	0
	ν_μ	0	0	1	0
Üçüncü Aile	τ	-1	0	0	1
	ν_τ	0	0	0	1

“Ayrıca bütün işaretleri ters olan altı tane de antilepton vardır. Örneğin pozitronun yükü +1 ve elektron sayısı -1'dir. Dolayısı ile 12 tane lepton vardır (Griffiths, 2015).”

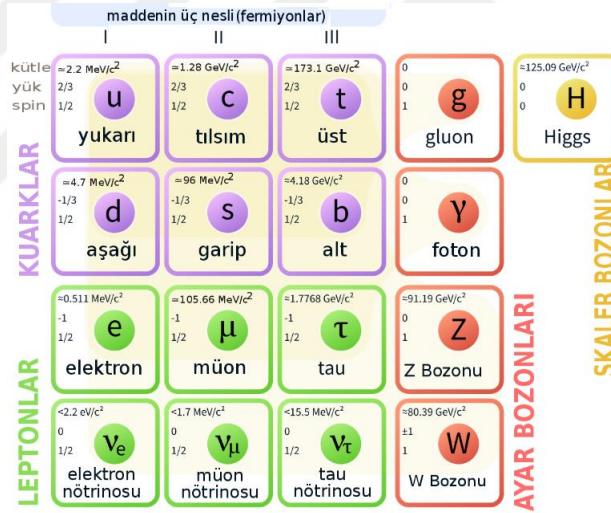
²Spin: Kavramsal olarak her ne kadar, dünyanın kendi ekseninde dönmesine benzetilmeye yatkınlık gösterilse de; bu model oldukça sakıncalıdır. Çünkü bu şekilde düşünüldüğünde, parçacıkların kendi etrafında dönüş hızı, ışık hızını aşmaktadır. Spin vektörü, parçacıkların spin kuantum sayılarına bağlı olarak, $\vec{S} = \hbar\sqrt{s(s+1)}$ ile tanımlanır.

“Benzer biçimde, altı tane Kuark Çeşnisi vardır. Bunlar, yük, acayıklık (S), tılsım (C), altlık (B) ve üstlük (T) değerlerine göre sınıflandırılırlar (Griffiths 2015)”.

Çizelge 2.2. Kuark Sınıflandırması

Aileler	q	Q	D	U	S	C	B	T
Birinci Aile	d	$-1/3$	-1	0	0	0	0	0
	u	$2/3$	0	1	0	0	0	0
İkinci Aile	s	$-1/3$	0	0	-1	0	0	0
	c	$2/3$	0	0	0	1	0	0
Üçüncü Aile	b	$-1/3$	0	0	0	0	-1	0
	t	$2/3$	0	0	0	0	0	1

“Antikuarkların tablosu için yine bütün işaretler ters çevrilmelidir. Her kuark ve antikuark için üç renk olduğundan toplam 36 çeşit kuark vardır (Griffiths, 2015)”. Bozonlar (kuvvet taşıyıcı parçacıklar) da, yeni keşfedilen Higgs Bozonu³ ile birlikte beş tanedir.



Şekil 2.1. SM’ye göre temel parçacıklar

³Higgs Bozonu: 1970 yılında fizikçiler, elektromanyetik kuvvet ve zayıf nükleer kuvvet arasında çok yakın bağlar olduğunu fark ettiler ve bu iki kuvveti SM’nin temelini oluşturan aynı teori içerisinde birleştirmişlerdir. Bu birleşik teori, foton, W ve Z bozonlarını büyük bir aksaklık dışında doğru bir şekilde tanımlamaktadır. Bu parçacıkların tümü kütsüz olarak ortaya çıkmaktadır, fakat kütsüz olan sadece foton’dur. W ve Z bozonların kütleleri, yaklaşık olarak protondan 100 kat daha büyüktür. Teorisyenler, Robert Brout, François Englert ve Peter Higgs bu sorunu çözecek bir yol bulup; Brout-Englert-Higgs mekanizması dediğimiz şey, evreni kaplayan ve şimdi "Higgs alanı" olarak adlandırılan görünmez bir alanla etkileşime girdiklerinde W ve Z’ye bir kütle verir.

Bu parçacıklar arasında, dört temel etkileşim gerçekleşir. Bunlar sırası ile, Güçlü Çekirdek Kuvveti, Elektromanyetik Kuvvet, Zayıf Çekirdek Kuvveti ve Kütleçekim kuvvetidir.

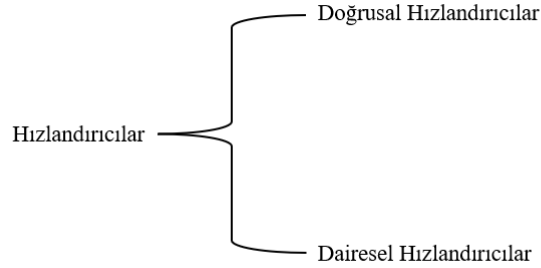
Çizelge 2.3. Doğadaki dört temel kuvveti ve bunlar arasındaki şiddet farkları

Kuvvet	Şiddeti	Kuram	Aracı Parçacık (Bozon)
Güçlü Nükleer Kuvvet	10	Renk dinamiği	Gluon
Elektromanyetik Kuvvet	10^{-2}	Elektrodinamik	Foton
Zayıf Nükleer Kuvvet	10^{-13}	Çeşni dinamiği	W ve Z
Kütleçekim Kuvveti	10^{-42}	Geometrodinamik	Graviton

Evrendeki dört temel kuvvetten en şiddetli olanı, Güçlü Nükleer Kuvvettir ve fermiyonların bir arada kalmasını sağlayan; adeta bir yapıştırıcı (Glue) görevi görür. Fakat kısa menzilli bir özelliğe sahip olup, sadece atom çekirdeği içerisinde varlığını hissettirir. Elektromanyetik Kuvvet, şiddet skalasında ikinci sıraya gelir. Uzun menzilli bir temel kuvvettir. Teorik olarak menzili sonsuzdur fakat, mesafe arttıkça etkisi yaklaşık sıfıra ulaşır. Yüklü parçacıklar arasında elektriksel etkileşimlerden sorumludur. Zayıf Nükleer Kuvvet ise şiddet skalasında üçüncü sıraya gelir, bozulma reaksiyonlarından sorumludur. O da Güçlü Nükleer Kuvvet gibi kısa menzillidir, varlığı sadece atom çekirdeği içerisinde hissedilir. Son olarak Kütle Çekim Kuvveti ise, kütleyle sahip parçacıklar arasında gerçekleşen bir temel kuvvettir. En düşük şiddet değerine sahip kuvvet olmasının yanında; etkileşim menzili teorik olarak sonsuzdur, fakat mesafe arttıkça etkisi sıfıra yaklaşır. Kütle çekim kuvveti her ne kadar mikro çerçevede etkisi neredeyse yok denecek kadar az olsa da; makro çerçevede şiddeti hatırı sayılı derecede artmaktadır. Kütle çekim kuvveti; dünya üzerindeki gelgit olayı, uyduların ve gezegenlerin hareketleri, galaksi ve galaksi kümelerinin hareketleri gibi evrenin dinamik yapısını oluşturan önemli bir fiziksel kuvvettir. Dört temel kuvvet, temel parçacıklar arasında; aracı parçacıklar ya da diğer bir deyiş ile, bozonlar sayesinde iletilir.

2.2. Deneysel Yüksek Enerji Fiziği

Deneysel Yüksek Enerji Fiziği (DYEF), temel parçacıkları ve temel parçacıklardan oluşan; görece daha kompleks seviye parçacıkları (Baryonlar⁴ ve Mezonlar⁵ gibi) inceler. Parçacıklar, normal koşullar altında gözlemlenemezler, bu sebeple bu parçacıkları gözlemlemek için çeşitli detektör ve hızlandırıcı sistemleri geliştirilmiştir. Hızlandırıcı sistemleri kurulmadan önce, detektörler aracılığı ile (Bulut Odaları vb.) ilk olarak; kozmik ışınlar, radyoaktif kaynaklardan saçılan ışınlar veya direkt foton kaynağından yayılan ışınlar ile çalışılmıştır. Ardından kurulmuş olan hızlandırıcı sistemlerinde, yüklü parçacıklar elektrik alan sayesinde yüksek bir enerji değerine ulaştırılır. Manyetik alan sayesinde parçacıkların yörüngeleri, birbirileri ile çarpıştırılacak şekilde odaklanır ve çarpışma gerçekleştirilir. Çarpışma sonrası açığa çıkacak yeni parçacıklar ve o parçacıkların izleri; çarpışma noktası etrafına yerleştirilmiş olan detektörler tarafından algılanıp insanlar tarafından incelenebilir bir veri yığınınına çevrilir. Elde edilen bu veri yığınlarından, veri bilimciler sayesinde anlamlı sonuçlar çıkarılır. Eğer her şey yolunda giderse, elde edilen bu sonuçlardan; insanlığın ufkunu genişletecek, evren hakkında yeni bilgiler elde edilmiş olunur. ‘Temel olarak’ iki çeşit hızlandırıcı sınıfı vardır.



Şekil 2.2. Hızlandırıcı sınıflandırması

⁴Baryonlar: SM’de üç adet kuarkın bir araya gelmesi ile meydana gelen parçacıklara verilen isimdir. Örnek; p (proton) : uud, $\bar{p}$ (anti – proton): $\bar{u}\bar{u}\bar{d}$, n (nötron) : udd, vb ...

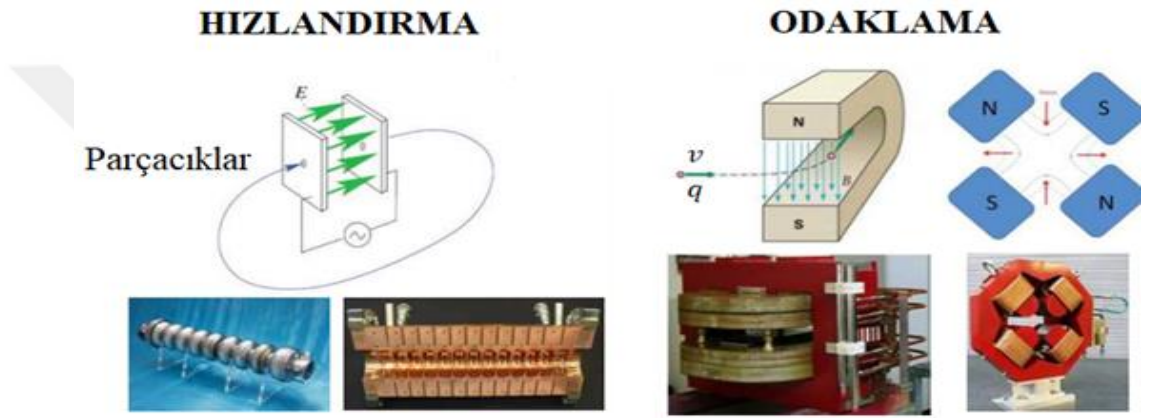
⁵Mezonlar: SM’de bir kuark – antikuark çiftinden oluşan parçacıklara verilen isimdir. -

Örnek; π^+ (Pion) : $u\bar{d}$, K^- (Kaon) : $s\bar{u}$, ρ^+ (Rho) : $u\bar{d}, vb \dots$

2.2.1. Hızlandırıcıların Çalışma Prensibi

Hızlandırıcı içerisindeki q yüklü parçacıkların, hızlandırılması ve odaklanması; Lorentz Kuvveti ile açıklanır. Lorentz Kuvveti denklemindeki elektrik alan ($\vec{E}$) parçacığın hızını arttırmayı sağlarken; manyetik alan ($\vec{B}$) ise, hızlandırıcı boyunca yerleştirilmiş mıknatıslar yardımı ile parçacığın istenilen yörünge boyunca hareket etmesini sağlar.

$$F_{Lorentz} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.1)$$



Şekil 2.3. Lorentz Kuvveti'nin bileşenleri (Alesini, 2016'den değiştirilerek alınmıştır)

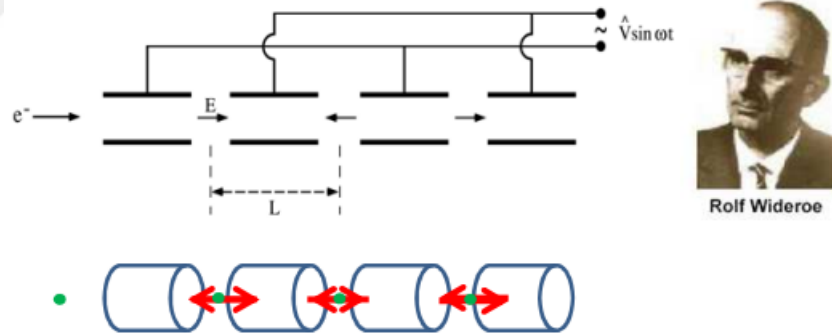
Bilim insanları tarafından, çeşitli geometride hızlandırıcı sistemleri geliştirilmiştir. Doğrusal ve dairesel hızlandırıcı olduğu gibi, bunların birlikte kullanıldığı karmaşık hızlandırıcı sistemleri de bulunmaktadır.

CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire – Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi) bünyesinde yapılan hızlandırıcı deneylerinin büyük bir kısmı, iki farklı geometrik dizaynı da kullanmaktadır.

2.2.2. Doğrusal Hızlandırıcılar

Doğrusal hızlandırıcılar, içerisine giren yüklü bir parçacığı bir doğru boyunca hareket ettirir. Elektrik alan sayesinde parçacığın hızı, dolayısı ile kinetik enerjisi gittikçe artar ve ister diğer taraftan gelen başka bir parçacık ile kafa kafaya; ister de sabit bir hedef ile çarpıştırılıp, çarpışma sonrası meydana gelen fiziksel olaylar gözlemlenir.

İlk Radyo Frekans⁶ (RF) hızlandırıcıya örnek olarak Wideroe'nin Sürüklenme Tüpü'nden söz edebiliriz. Bu tasarımda temel fikir, parçacıkları bir alternatif akım (AC) jeneratörünün kutuplarına bağlanan elektrotlar arasındaki boşlukta oluşan elektrik alan tarafından hızlandırmaktır. G. Ising 1924 yılında bu fikri ortaya atmasının ardından, 1927 yılında R. Wideroe tarafından bir dizi sürüklenme tüpüne; sinüs dalgası gerilimi uygulayarak bu fikir uygulamaya dökülmüştür. Parçacıklar sürüklenme tüplerinin içerisinde (eş potansiyel bölgeler) hareket ederken, herhangi bir kuvvete maruz kalmazlar ve boşluk boyunca hızlanırlar (Alesini, 2016).



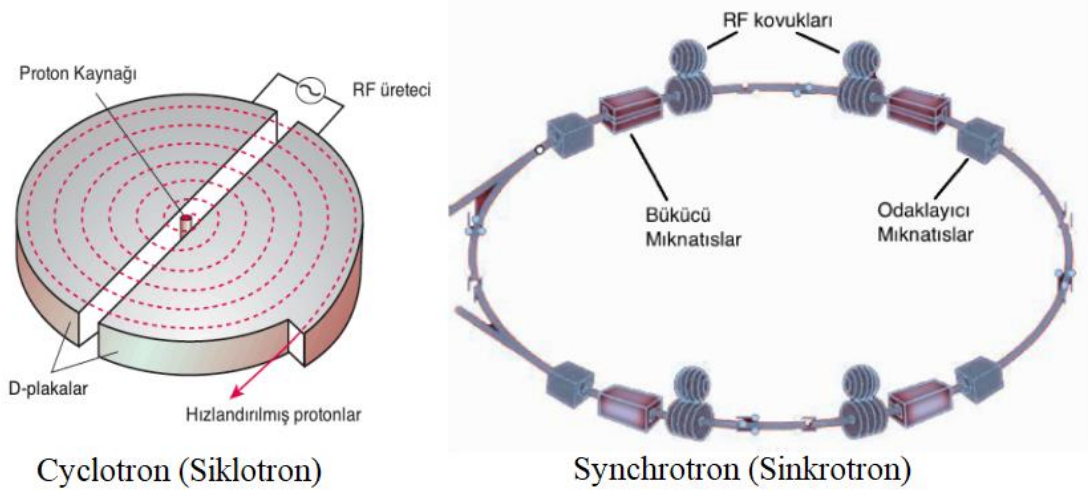
Şekil 2.4. Wideroe Sürüklenme tüpünün basit bir gösterimi (Alesini, 2016)

⁶Radyo Frekans Hızlandırıcı: Alternatif akım kullanılması ile birlikte, hızlandırıcılarda hareket eden parçacığın sahip olabileceği enerji; hızlandırıcının boyutuna bağlı olur. 3kHz ile 300GHz aralığında salınım yapan bir alternatif akım kaynağı kullanan hızlandırıcılara, RF hızlandırıcılar denir.

2.2.3. Dairesel Hızlandırıcılar

Dairesel hızlandırıcılarda genel prensip, yüklü parçacığı; odaklayıcı manyetik alanlar ile daireysel bir yörüngede uzun süre hareket ettirirken, elektrik alan sayesinde enerjisini arttırmaktır. Enerjisi yeterince artan yüklü parçacık, daireysel hızlandırıcı içerisinde bir başka yüklü parçacık ile kafa kafaya veya sabit bir hedef ile çarpıştırılması sonrası gerçekleşecek olan olaylar gözlemlenir. Çok çeşitli daireysel hızlandırıcı tasarımları vardır. Bunlar sırası ile; Cyclotron, Betatron, Microtron, Synchrocyclotron, Synchrotron ve son olarak Depolama Halka Çarpıştırıcısı örnek verilebilir.

“Günümüzde en çok kullanılan daireysel hızlandırıcı tipleri Cyclotron (Siklotron) ve Synchrotron (Sinkrotron / Eş zamanlayıcılar)’dır. İlk başarılı Siklotron, 1931 yılında E. Lawrence ve öğrencisi M. Stanley Livingston tarafından geliştirilmiştir. Bu Siklotron, 1.9 kV’luk RF üreteci kullanarak protonlara 80keV’e kadar hızlandırmıştır (Demir, 2022)”.



Şekil 2.5. Dairesel hızlandırıcı türlerinden olan Siklotron ve Sinkrotron; en genel çalışma prensibi itibari ile birbirine benzemektedir (Demir, 2022)

Siklotronların çalışma prensibinin temelinde, manyetik alanda daireysel hareket yapmakta olan yüklü bir parçacığın hızının değişmesine rağmen, dönme frekansının sabit kalması vardır (düşük hızlar için geçerlidir). Siklotron bir RF üreteci ‘D’ şeklinde içi boş metal elektrotlara bağlanmıştır. Bu sayede, iki elektrot arasında elektrik alan oluşturulur. Oluşan elektrik alan RF üretecinin frekansına eşit bir frekansta salınım yapar.

Sinkrotronların çalışma prensibi, parçacıkları manyetik alan sayesinde bir dairesel yörüngede hareket ettirmektir. Parçacıklar demet borusu olarak adlandırılan metal bir boru içerisinde hareket ederler. Üç temel bileşenleri vardır: RF kovukları, bükücü mıknatıslar ve odaklayıcı mıknatıslar.

RF kovukları, içerisine giren parçacıkları; elektrik alan sayesinde hızlandırma işlemini gerçekleştiren alanlardır. Parçacıklar, Sinkrotron sayesinde her turda RF kovuğunda tekrardan hızlandırılırlar. Böylece aynı RF kovuğu, parçacıkları birçok kez hızlandırmak için kullanılabilir.

Bükücü mıknatıslar, iki kutuplu mıknatıslar olarak da adlandırılır. Bükücü mıknatısların içerisinde parçacıkların hareket yönüne dik yönde bir manyetik alan oluşturularak parçacıkların sapması sağlanır. Bükücü mıknatıslar genelde Sinkrotron çerçevesine eşit aralıklar ile yerleştirilirler. Sinkrotron'a yerleştirilen bükücü mıknatıs sayısına göre, mıknatısların içerisinde oluşturulan manyetik alanın kuvveti ayarlanır ve Sinkrotron etrafında 360°'lik bir dönüş yapılmasını sağlar.

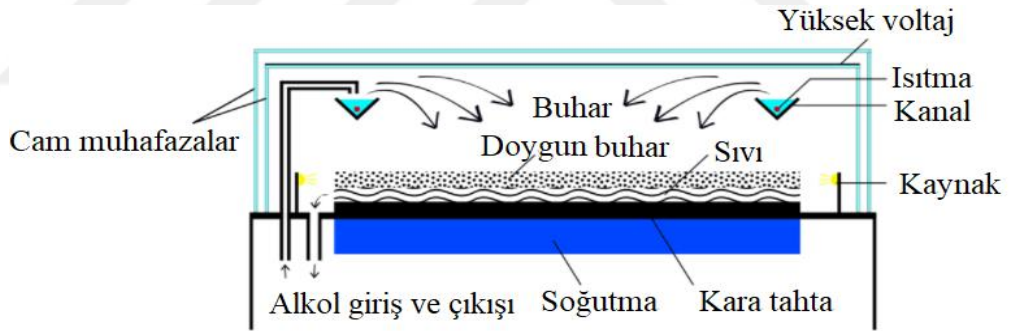
Odaklayıcı mıknatıslar, dört kutuplu bir yapıya sahiptir. Parçacıkları demet borusunun merkezinde tutmak ve demetin dikine eksenlerindeki boyutunu kontrol etmek için kullanılır. Dört kutuplu mıknatıslar, ince kenarlı bir merceğin ışığı odakladığı gibi yüklü parçacıkları odaklar veya kalın kenarlı merceğin ışığı dağıttığı gibi yüklü parçacığı dağıtırlar (Demir, 2022).

CERN'de bulunan, LEP (Large Electron-Positron Collider – Büyük Elektron Pozitron Çarpıştırıcısı), LHC (Large Hadron Collider – Büyük Hadron Çarpıştırıcısı); ayrıca, Femilab (Fermi National Accelerator Laboratory – Fermi Ulusal Hızlandırıcı Laboratuvarı)'da bulunan Tevatron, DESY (Deutsches Elektronen-Synchrotron – Alman Elektron Senkrotronu)'de bulunan DORIS (Double Storage Ring – Çift Depolama Halkası) ve PETRA (Positron Electron Tandem Ring Accelerator – Pozitron Elektron Tandem Halka Hızlandırıcısı) dairesel hızlandırıcıları örnek gösterilebilir.

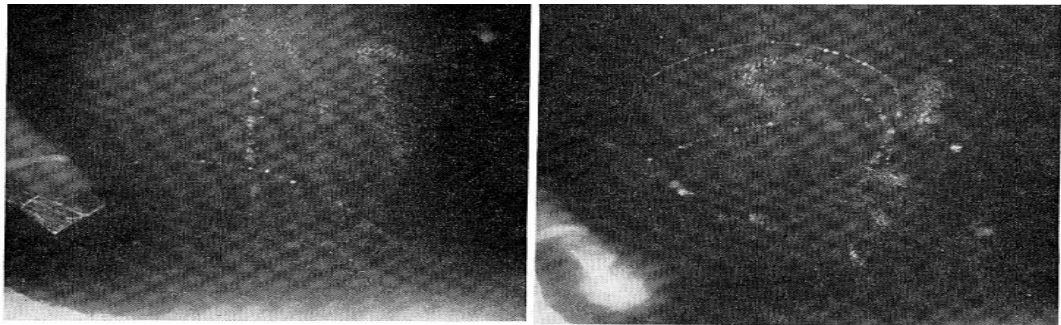
2.2.4. Detektör Sistemleri

Detektörler genel anlamda, içerisine giren parçacıkların bilgilerini öğrenmemize yarayan teknolojik araçlardır. Hızlandırıcı teknolojisi gelişmeden önce, detektörler; doğal radyoaktif kaynaklar, kozmik ışınlar veya doğrudan foton/elektron kaynaklarından çıkan parçacıkları tespit etmek için kullanılmıştır. Hızlandırıcı teknolojisinin ilerlemesi ile birlikte, çarpışma noktası etrafına yerleştirilen detektörler sayesinde; çarpışma sonrası açığa çıkan parçacıklar hakkında fiziksel bilgiler edinilmesinde baş rol oynamaktadır.

Öncül detektörlerden biri Bulut Odası (Wilson Odası)'dır. Radyoaktif bozunma sonucu oluşan parçacıkların yollarını görünür kılan bir detektördür. En genel hali ile bünyesinde aşırı doymuş, su ve alkol buharı barındıran bir ortamdır. Yüklü bir parçacık, bulut odası içerisindeki karışım ile etkileşime girdiğinde; karışımı iyonize eder. İyonlaşma olayı sonrasında parçacığın izlediği yol boyunca bir buğu oluşturur. Bulut odalarına benzer prensipte çalışan, Kabarcık Odaları da bulunmaktadır.

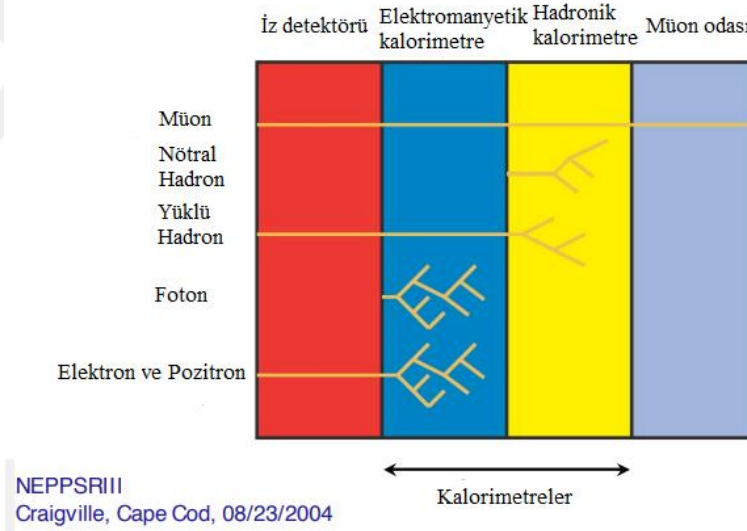


Şekil 2.6. Bulut odasının örnek şeması (Connor, 2019'den değiştirilerek alınmıştır)



Şekil 2.7. Bulut odasındaki β parçacığı görüntüleri (Needels, Neilsen, 1950)

Çarpıştırıcı sistemlerindeki parçacıkların, çarpışma anında açığa çıkarttığı parçacıklar hakkında bilgi edinebilmek için; çarpışma noktası etrafına detektörler yerleştirilir. Detektörlerin yerleştirilme biçimi, tıpkı bir soğanın katmanları gibidir. Yerleştirilen her bir detektörün farklı görevi vardır ve her bir parçacığın sahip olduğu fiziksel özelliklere göre; katmanlar sırası ile içten dışa tüm parçacıklar sırası ile içinden geçecek şekilde yerleştirilirler. Detektörler, içerisine giren parçacıkların izlediği yol, geçiş zamanı ve depo edilen enerji gibi birçok özelliğini içeren elektrik sinyalleri üretir ve bu sinyaller veri tabanlarında depolanır. Ayrıca detektörler haricinde, çarpışma sonrası oluşup etrafa saçılan yüksek enerjili parçacıkların enerjilerini ölçmek ve parçacıkları filtrelemek için kalorimetreler de kullanılmaktadır. Çarpışma noktası etrafına yerleştirilen tüm bu detektör ve kalorimetre sistemleri sayesinde, neredeyse hiçbir parçacık; detekte edilmeden, kaçıp gidemez.



Şekil 2.8. Çarpışma noktası etrafına yerleştirilmiş detektör ve kalorimetreler

İz detektöründe, çarpışma sonrası açığa çıkan parçacıkların izlediği yollar hakkında bilgi edinilir. Ardından bu parçacıklar elektromanyetik kalorimetreye girerler. Sadece fotonlar, elektronlar ve pozitronlar bu bölgede soğurulurlar. Bir sonraki kalorimetreye geçen parçacıklar fotonlar, elektronlar ve pozitronlar dışındaki daha yüksek kütleli parçacıklardır. Hadronik kalorimetreden sadece yüklü veya yüksüz hadronlar (baryon ve mezonların ortak adı) etkilenir ve bu bölgede soğurulurlar. Son olarak, kalorimetrelerden

tam anlamı ile soğurulmayan parçacıklar sadece müonlardır. Yüksek enerjili müonlar, müon odasından geçerken; izlediği yol, geçiş zamanı ve enerjileri hakkında bilgi edinilir.

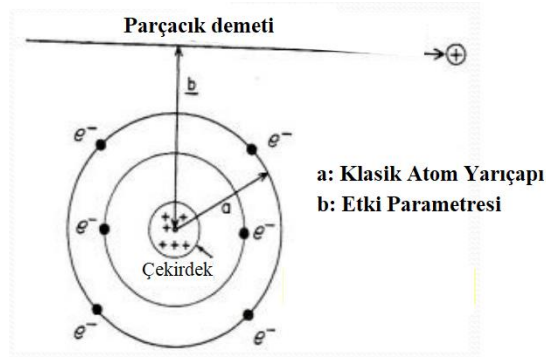
2.3. Parçacıkların Madde ile Etkileşimleri

Hedef maddenin fiziksel özelliklerine, gelen parçacığın türüne ve enerjisine göre; gelen parçacık ile hedef madde arasında çeşitli fiziksel etkileşimler gerçekleşebilir. Gelen parçacık, hedef madde tarafından soğurulup ya da esnek veya esnek olmayacak şekilde saçılmaya uğratılabilir. Gelen parçacıklar, sahip olduğu enerjiye bağlı olarak, düşük enerjilerde hedef maddenin elektronları ile, orta ve yüksek düzeyde enerjiye sahip olduğunda ise çekirdek ile etkileşime girebilir.

Hedef materyal olarak, parçacık detektörünün kendisi örnek verilebilir. Parçacıklar (foton, elektron, müon, vb.) parçacık detektörü ile etkileşime girerek, detektör içerisinde bir sinyal meydana getirirler ve bu sinyal ile, detektör hacmine giren parçacığın; enerjisi, momentumu ve uzaysal konumu tespit edilebilir.

2.3.1. Yüklü Parçacıkların Madde İle Etkileşimi

“Yüklü bir parçacık, madde içerisinde geçerken ya ortamın atomik elektronları ile; ya da çekirdek ile etkileşir. Bu etkileşme gelen parçacığın cinsine bağlı olarak, zayıf, elektromanyetik veya kuvvetli etkileşme olabilir. Bu etkileşimlerin etkileri, parçacıklar hakkında bilgi edinebilmek için kullanılır (Demir, 2022).”



Şekil 2.9. Bir parçacık demetinin, atom ile etkileşim parametreleri (Demir, 2022’den değiştirilerek alınmıştır)

Klasik Atom Yarıçapı, ya da diğer bir deyiş ile Bohr Yarıçapı; hidrojen atomunun, protonu ve elektronu arasındaki mesafeye eşittir. $\hbar$ indirgenmiş Planck sabiti, m_e elektron kütlesi ve e temel elementer yük olmak üzere, Bohr Yarıçapı; $a_0 = \frac{\hbar}{m_e e^2}$ ile gösterilir. Yaklaşık olarak değeri $a_0 \cong 0,529 \times 10^{-10} \text{ m}$ 'dir. b etki parametresi ise, parçacık demetinin etkileşme yapabileceği atomik bölge ile arasındaki mesafenin ölçüsüdür.

$b \gg a_0$ koşulu altında, Yumuşak Çarpışmalar gerçekleşir. Parçacığın Coulomb alanı bütün atomu etkiler. Atom, uyarılabilir veya valans elektronları atomdan koparılıp iyonize hale getirilebilir. Atom, eV seviyesinde çok az bir enerji alır.

$b \cong a_0$ koşulunda, Sert Çarpışmalar gerçekleşir. Parçacık demeti, bu tür çarpışmalarda, çekirdeğin atomik elektronları ile etkileşime girer ve parçacık demeti büyük bir kinetik enerji ile elektronu koparır. Etkileşme olasılıkları her parçacık için farklıdır. Karakteristik Auger veya X – ışınları üretilir.

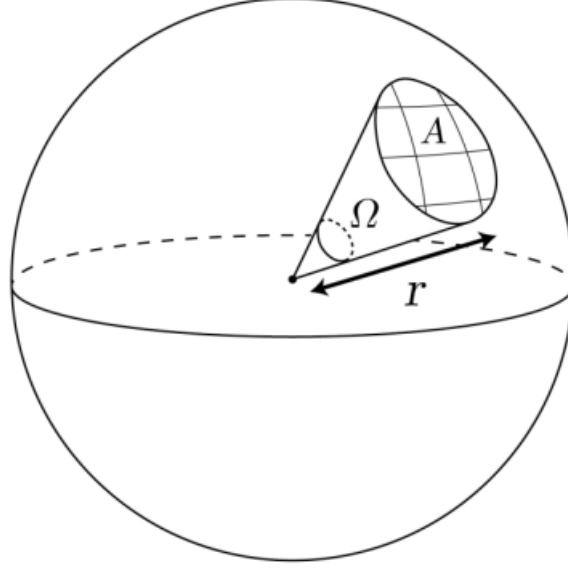
$b \ll a_0$ koşulunda ise, çekirdek alanı ile Coulomb etkileşimleri meydana gelir, Ruhterford saçılması veya Bremsstrahlung (Frenleme Işınımı), gerçekleşebilecek etkileşimlere örnek verilebilir (Demir, 2022).

Parçacık demetinin özellikleri (enerjisi, yük tipi, çekirdeğin ne kadar yakınından geçtiği ve demet genişliği), hedef madde ile gerçekleşebilecek olan etkileşim türünü belirleyeceği gibi, bu etkileşimin yine parçacığın özelliklerinden yola çıkarak; hangi olasılıkla gerçekleşeceğini, tesir kesiti kavramı belirler.

2.3.2. Katı Açı

“Katı açı genellikle Ω sembolü ile gösterilir. Katı açının fizikte küçük ama önemli bir rolü vardır. Örneğin, bir bisiklet ışığının yoğunluğunu nasıl karakterize edebilirsiniz? Optik gücünde, saniyede yayılan fotonların toplam enerjisi açıkça önemlidir; ancak bu belirli bir yönde foton yoğunluğunu belirleyecek olan ışının yayılmasını hesaba katmayacaktır. İhtiyaç duyulan şey, ışık huzmesinin açısal alanının bir ölçüsüdür. Bir yöndeki yayılma,

bir düzlem açısı olarak ölçülür. Burada ilgilendiğimiz bir alan üzerindeki yayılma, katı açı olarak ölçülür (Quincey, 2020)”



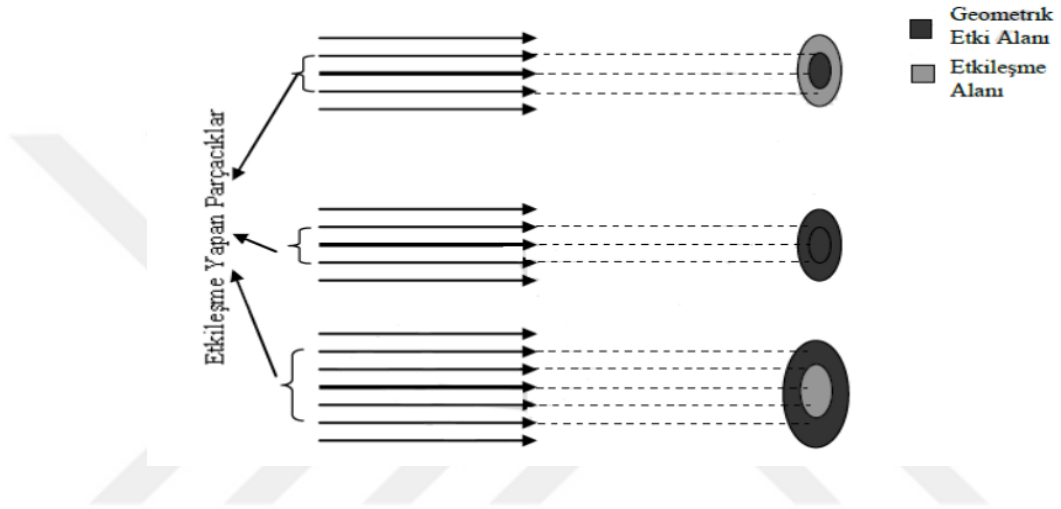
Şekil 2.10. Yarıçapı r olan bir kürenin merkezinde, kürenin yüzeyine yansıttığı A alanı ile konik bir katı Ω açısı gösterilmektedir. Katı açı, tamamen koninin tepe açısı tarafından belirlenmesinin yanında, kürenin merkezindeki açı ise dairesel kesitinin çapı ile belirlenir (Quincey, 2020)

2.3.3. Tesir Kesiti

Tesir kesiti, bir parçacık veya parçacık demetinin; hedef materyal ile istenilen etkileşimin gerçekleşme olasılığını verir. “Parçacık fiziğinin ortaya çıkışının ilk zamanlarında, parçacıkların yok edilemez küçük toplar olduğu düşünülüyordu. Bilyeler veya bılardo topları birbirlerine doğru yuvarlandıklarında, çarpışma olasılıkları tam olarak hedef alınmadıkları sürece; topların boyutları ile orantılıdır. Atom altı parçacıklar o kadar küçüktür ki, tek tek parçacıkları birbirine hedeflemek, söz konusu bile olamaz. Herkesin yapabileceği en iyi şey, genel bir çerçevede birçoğunu vurmaktır olacaktır. Bir mermi bulutu için çarpışma olasılığı, basitçe bunların kapladığı alanın, bulutun toplam alanına oranıdır. Xerxes, Termopylae Savaşı’nda gökyüzünü oklar ile kararttığında, bir ok tarafından vurulma olasılığınız oldukça yüksek olurdu (CMS – CERN I. , 2022).”

Parçacık demetinin genişliği ne kadar büyük olursa (ne kadar büyük bir kesit görürse), gözlemlenecek olan fiziksel etkileşimin gerçekleşme olasılığı o kadar büyük olur. Hedef materyalin tesir kesiti, materyalin fiziksel özelliklerine bağlı olabileceği gibi; gelen parçacık demetinin de fiziksel özelliklerine bağlıdır.

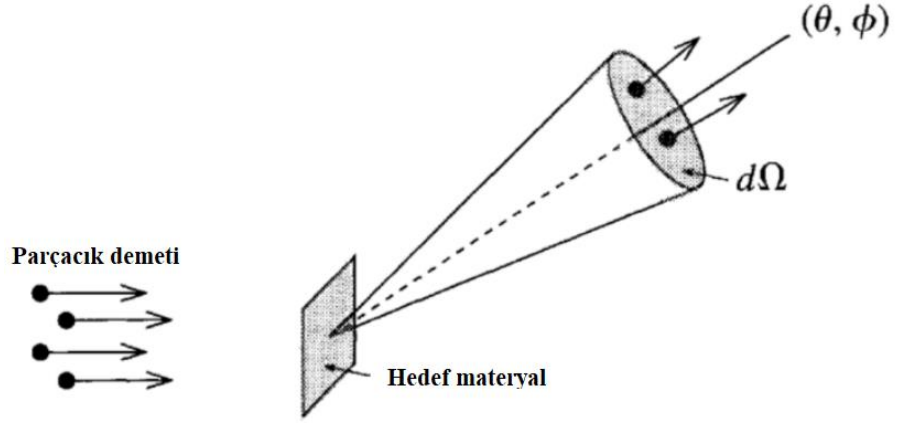
Tesir kesiti parçacığın veya parçacık demetinin geometrik kesitinden büyük, küçük veya eşit olabilir (Aydın, 2015).



Şekil 2.11. Tesir kesiti kavramının şematik gösterimi

Şekil 2.11’de görüldüğü üzere, etkileşme tesir kesiti, parçacık demetinin genişliğine bağlı olmasının yanında; detektör materyalinin yüzey alanının büyüklüğüne de bağlıdır.

Birim zamanda, birim alandan geçen parçacık sayısına; parçacık akısı denir ve Φ sembolü ile gösterilir. Standart bir saçılma deneyinde, parçacık demeti, hedef bir materyale gönderilir; sonuç olarak elde edilen parçacıkların oranı sayılır. Bu oran hedef ile etkileşime girmiş olan parçacık sayısı ve akı ile ifade edilir (Aydın, 2015).



Şekil 2.12. Saçılma tesir kesiti kavramının, şematik gösterimi (UC Santa Barbara Üniversitesi – Fizik 103 Ders Notları, 2015’den değiştirilerek alınmıştır)

Φ akısına sahip bir parçacık demeti, hedef materyal üzerine gönderildiğinde; etkileşim sonrasında parçacıkların bir kısmı saçılacaktır.

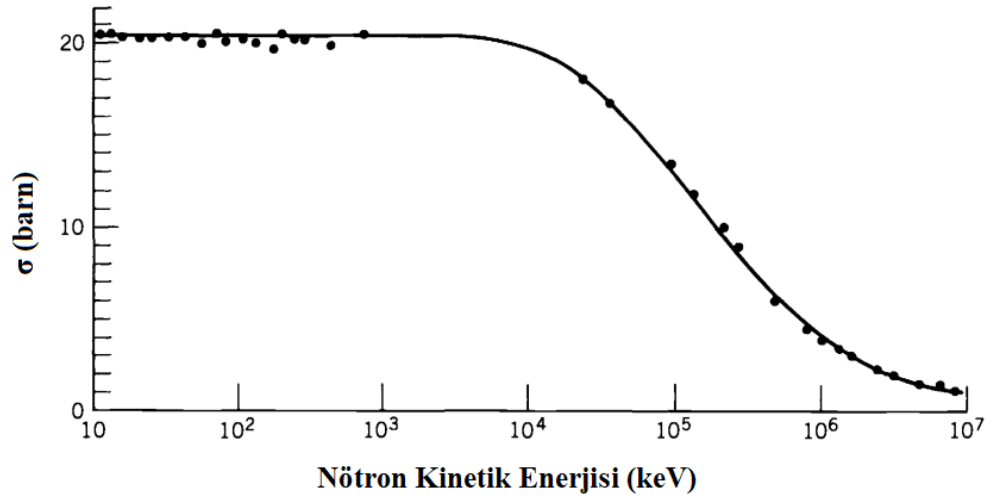
Belirli bir detektör hacminde, $d\Omega$ katı açı içerisinde saçılan parçacıkların, birim zamandaki ortalama parçacık sayısına dN dersek, gelen parçacık akısıyla bölünen bu değere; diferansiyel tesir kesiti olarak tanımlayabiliriz.

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(E, \Omega) = \frac{1}{\Phi} \frac{dN}{d\Omega} \quad (2.2)$$

Diferansiyel tesit kesiti eşitliğinden, alan boyutuna sahip; gelen parçacıkların enerjisinin bir fonksiyonu olarak, tesir kesiti yeniden hesaplanabilir (Aydın, 2015).

$$\sigma(E) = \int \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega \quad (2.3)$$

Tesir kesiti σ ile gösterilir ve birimi Barn’dır. 1 barn 10^{-24} cm^2 ’ye eşdeğerdir.



Şekil 2.13. Düşük enerjide nötron-proton saçılma tesir kesiti (Krane, 2001)

2.3.4. Ortalama Serbest Yol

Ortalama serbest yol, diğer ismi ile reaksiyon uzunluğu; parçacığın bir etkileşme yapıncaya kadar hareket ettiği mesafe veya meydana gelen iki etkileşme arasında var olan ortalama mesafe olarak tanımlanır. λ sembolü ile gösterilir. Çeşitli etkileşmeler için, farklı ortalama serbest yolları temsil eden notasyonlar kullanılabilir. Saçılma etkileşiminin ortalama serbest yolunu λ_s ile yazabileceğimiz gibi, soğurulma olayı için ise λ_a şeklinde yazabiliriz.

Bir parçacığın x mesafesi boyunca, etkileşime girmeme olasılığına; hayatta kalma olasılığı denir ve aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$P(x)$: x mesafesinin ardından, etkileşme yapmama olasılığı

$w dx$: x ile $x + dx$ arasında bir etkileşme yapma olasılığı olmak üzere;

x ile $x + dx$ arasında etkileşme yapmama olasılığını hesaplamak istersek,

$$P(x + dx) = P(x)(1 - wdx)$$

$$P(x) + \frac{dP}{dx} dx = P - Pwdx$$

$$dP = -wPdx$$

$$P = C \exp(-wx)$$

C bir sabittir ve $P(0) = 1$, ise $C = 1$ olur. Parçacığın x mesafesinde, herhangi bir yerde etkileşime maruz kalma olasılığı $P_e(x) = 1 - \exp(-wx)$ olarak tanımlanabilir.

Parçacığın, x mesafesini geçtikten sonra, x ile $x+dx$ arasında etkileşim yapma olasılığı,

$$F(x)dx = \exp(-wx) w dx$$

Son olarak ortalama serbest yolu aşağıdaki şekilde tanımlayabiliriz (Leo, 1994).

$$\lambda = \frac{\int xP(x)dx}{\int P(x)dx} = \frac{1}{w} \quad (2.4)$$

Müon momentumu p , müon yaşam ömrü $\tau_\mu = 2,197 \cdot 10^{-6} s \equiv 2,197 \mu s$ olup $\tau_\mu c \approx 0,66 km$ olmak üzere; $\mu^\pm \rightarrow e^\pm + \nu + \bar{\nu}$ bozunumu, ortalama serbest yolu

$$\lambda_b = \frac{v\tau_\mu}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = \frac{p\tau_\mu}{m_\mu} = \frac{p}{m_\mu c} \tau_\mu c \quad (2.5)$$

şeklinde tanımlanabilir (CERN – indico, 2003). Müonlar göreceli hızlarda hareket ettikleri için, kısa bir yaşam ömrüne sahip olsalar bile; dünya yüzeyine zaman genişlemesi sebebi ile ulaşabilirler.

Ortalama serbest yol, parçacığın etkileşime gireceği maddesel ortamın yoğunluğu ile ilişkilidir. Ortam ne kadar az yoğun olursa, etkileşim yapma olasılığı o kadar azalacaktır. Benzer şekilde ilgili etkileşimlerin, tesir kesitinin de ortalama serbest yol ile ilişkisi olacağından söz edilmelidir.

2.3.5. Yüklü Ağır Parçacıkların Enerji Kaybı

Yüklü ağır parçacıklar maddesel ortam içerisinde geçerken; geçtiği bölgenin sahip olduğu atomlar ile elastik veya inelastik etkileşimler yapabilir. Bu gibi olası etkileşimler ile, ağır yüklü parçacık bir enerji kaybı yaşar. Yaşanan bu enerji kaybına, durdurma gücü de denir. Bu olası etkileşimler, birim yol uzunluğu başına birçok kez meydana gelebilir ve gözlenen durum bunların kümülatif sonucudur. Bunların yanında, Cherenkov olayı, nükleer reaksiyonlar veya Bremsstrahlung (Frenleme Işınımı) olayı da meydana gelebilir.

Enerji kaybını açıklayan Klasik Bohr formülü aşağıdaki şekilde tanımlanabilir.

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2 e^4}{m_e v^2} N_e \ln \left(\frac{\gamma^2 m v^3}{ze^2 \bar{v}} \right) \quad (2.6)$$

Bu formül α parçacığı veya daha ağır birçok parçacığın enerji kaybını açıklar. Daha hafif parçacıklar için (proton vb), bu formül kuantum etkileri sebebi ile bozulur. Buna rağmen, yüklü parçacıkların elektriksel etkileşimlerinden dolayı, yaşayabileceği enerji kaybının tüm özelliklerini içerir (Leo, 1994).

Yüklü ağır parçacıkların enerji kaybı, en iyi şekilde; Bethe-Bloch Formülü ile açıklanır. Hesaplama enerji transferi, momentum aktarımı ile parametrelendirilir. $2\pi N_a r_e^2 m_e c^2 = 0,1535 \frac{MeV cm^2}{g}$ olmak üzere, Bethe-Bloch Formülü aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

$$-\frac{dE}{dx} = 2\pi N_a r_e^2 m_e c^2 \rho \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left[\ln \left(\frac{2m_e \gamma^2 v^2 W_{maks}}{I^2} \right) - 2\beta^2 - \delta - 2\frac{C}{Z} \right] \quad (2.7)$$

r_e : Klasik elektron yarıçapı $\rightarrow r_e = 2,817 \times 10^{-13} \text{ cm}$

m_e : Elektron kütlesi $\rightarrow m_e = 9,109 \times 10^{-28} \text{ g}$

N_a : Avagadro sayısı $\rightarrow N_a = 6,022 \times 10^{23}$

I : Ortalama uyarılma potansiyeli

Z : Soğurucu maddenin atom numarası

A : Soğurucu maddenin atomik ağırlığı

ρ : Soğurucu maddenin yoğunluğu

z : Gelen parçacığın, temel yük cinsinden değeri

β : Gelen parçacığın $\frac{v}{c}$ değeri

$$\gamma : \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

δ : Yoğunluk düzeltmesi

C : Kabuk düzeltmesi

W_{maks} : Tek bir çarpışmada maksimum enerji transferi

Gelen parçacığın kütlesi (M) ve $s = \frac{m_e}{M}$ ve $\eta = \beta\gamma$ olarak olmak üzere, maksimum enerji transferi, $W_{maks} = \frac{2m_e c^2 \eta^2}{1 + 2s\sqrt{1 + \eta^2 s^2}}$ olarak tanımlanabilir. Bunun yanında, eğer gelen parçacığın kütlesi elektronun kütlesinden çok büyükse; $M \gg m_e$ ise, $W_{maks} \cong 2m_e c^2 \eta^2$ olur.

Yüklü ağır parçacıklar, maddesel ortam içerisinde geçerken birçok farklı etkileşime girebileceğinden dolayı, yaşanabilecek olan enerji kayıplarından ayrı ayrı söz edilebilir. Örnek olarak, elektron ve pozitron için enerji kaybı; ısıma veya çarpışma yolu ile gerçekleşebilir. Bunun sonucunda, toplam bir enerji kaybı tanımlayabiliriz.

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{Toplam} = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{Isıma} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{Çarpışma} \quad (2.8)$$

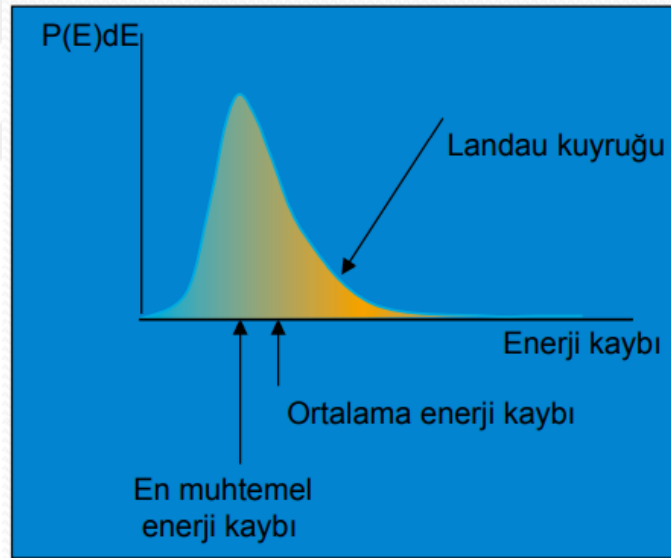
Bu iki ayrı etkileşim sonucunda meydana gelebilecek enerji kayıpları arasındaki oran ise parçacığın enerjisi (E) olmak üzere, denklem 2.9'daki gibi gösterilir.

$$\frac{\left(\frac{dE}{dx}\right)_{Işıma}}{\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{Çarpışma}}} = \frac{EZ}{1200m_e c^2} \quad (2.9)$$

Bunun yanında, daha farklı etkileşimler gerçekleştirebilecek (iyonizasyon, çift oluşumu, nükleer etkileşimler vb.) yüklü ağır bir parçacık için; toplam enerji kaybını genişletebiliriz.

2.3.6. Yüklü Parçacığın Enerji Kaybı Dağılımları

Yüklü parçacıkların madde içerisinde geçerken, kaybedebilecekleri enerjilerin büyük bir kısmı, ortalama enerji kaybından bir farklılık gösterir. İnce, soğurucu maddeler için enerji kaybı dağılımı asimetrik bir yapıya bürünür.



Şekil 2.14. Landau dağılımının bir gösterimi (Demir, 2022 ; Landau, 1965)

Bu dağılıma Landau Dağılımı denir . En muhtemel enerji kaybından sapma $\lambda = \frac{\Delta E - \Delta E^w}{\xi}$ olmak üzere Landau Dağılımı aşağıdaki şekilde tanımlanabilir;

$$L(\lambda) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}(\lambda + e^{-\lambda})} \quad (2.10)$$

ξ : Bethe – Bloch formülündeki ortalama enerji kaybıdır. ΔE : gerçek enerji kaybı, ΔE^w : en muhtemel enerji kaybını, $\rho : \left(\frac{g}{cm^3}\right)$ cinsinden yoğunluğu, x ise cm cinsinden soğurucunun kalınlığını temsil eder.

$$\xi = 2\pi N_A r_e^2 m_e c^2 \frac{Z}{A} \left(\frac{Z}{\beta}\right)^2 \rho x \quad (2.11)$$

Kalın bir maddesel ortam içerisinde geçen yüklü bir parçacığın enerji kaybı dağılımı, Gaussian dağılıma yaklaşır ve aşağıdaki şekilde tanımlanabilir.

$$\frac{dE}{dx} x \gg 2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 \quad (2.12)$$

2.4. Müonlar

Müonlar, lepton sınıfının ikinci ailesinde bulunan bir temel parçacıktır. Müonların temel özelliklerini tek bir tablo ile özetleyecek olursak:

Çizelge 2.4. Müonların temel özellikleri (Nagamine, 2003'den değiştirilerek alınmıştır)

Müonların Temel Özellikleri		
	μ^+	μ^-
Elektriksel yük	+1	-1
Kütle	206.768 277 (24) (m_e) ^a	105.659 (1) (MeV/c ²) ^b
Spin	1/2	1/2
Manyetik moment (μ_μ/μ_p)	3.183 345 13 (39) ^a	
Jiromanyetik oran	13.553 42	
($\mu_\mu/2\pi I$ in kH_z/G , $I = 1/2$)		
Jiromanyetik faktör ($g/2$)	1.001 165 920 3 (15) ^c	1.001 165 936 (12)
($\mu_\mu = g(e\hbar/2m_\mu)I$, $I = 1/2$)		
Yaşam ömrü (10^{-6} s)	2.196 95 (6) ^d	2.194 8 (10) ^f
	2.197 078 (73) ^e	(uçuşta)
Bozunum modları	$e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e$	(100%)
	$e^+ + \gamma$	(<1.7 × 10 ⁻¹⁰)
	$e^+ + e^- + e^+$	(<1.9 × 10 ⁻⁹)
	$e^+ + \gamma + \gamma$	(<1.25 × 10 ⁻⁸)

^a Liu *et al.*, 1999; ^b Beltrami *et al.*, 1986; ^c Brown *et al.*, 2001; ^d Giovanetti *et al.*, 1984;

^e Bardin *et al.*, 1984; ^f Williams and Williams, 1972.

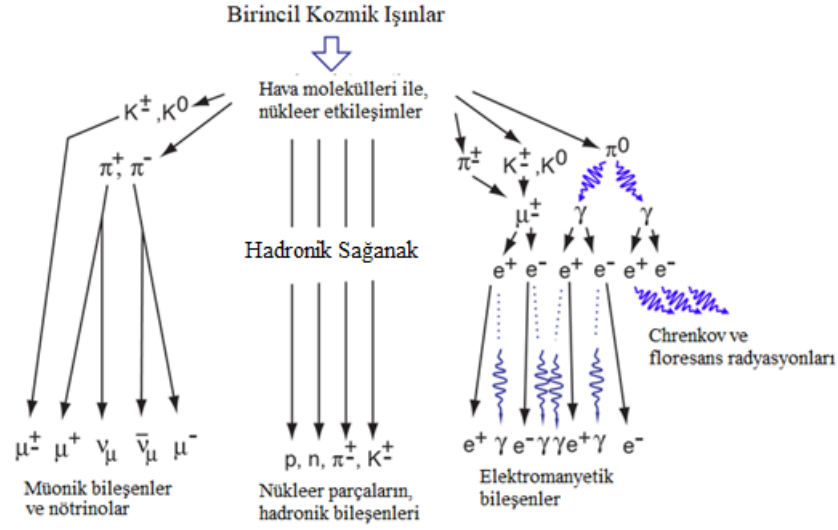
μ^+ ve μ^- parçacıklarının, arasında çok fazla fark olmadığı; birkaç keV'den yüksek enerjiye sahip müonların enerji kaybının ana mekanizması iyonlaşmadır. Bu süreç, yoğunluk düzeltmesi hariç olmak üzere; Bethe formülü aşağıdaki şekilde tanımlanabilir (Nagamine, 2003).

$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi N_a r_e^2 m_e c^2 \rho \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\ln \left(\frac{2m_e \gamma^2 v^2}{I} \right) - \beta^2 \right] \quad (2.13)$$

Bu denklem, R_0 (Müonun ilk enerjisinin tamamının kaybetmesi için gerekli uzunluk) içerisindeki müonun; enerji/momentum arasındaki ilişkiyi kurmamızı sağlar. Momentum 20 ile $80 \frac{MeV}{c}$ aralığındadır (Nagamine, 2003).

2.4.1 Kozmik Müonlar

Kozmik müonlar, kozmik radyasyon nedeni ile; dünyaya düşen müonları temsil eden genel bir ifadedir. Dünya, evren üzerindeki diğer tüm gök cisimleri gibi; başta süpernovalar olmak üzere diğer astronomik olay ve cisimlerden kaynaklı sürekli bir parçacık ve çekirdek yağmuruna maruz kalır. Bu tür yüksek enerjili bir karakteristiğe sahip parçacıklara genellikle birincil kozmik ışınlar denir. Bu kozmik ışınlar atmosfer gazları ile etkileşime girerek, bir takım sağanak oluşturan; nükleer reaksiyonlar meydana getirirler. Bu sağanak, bir yandan elektromanyetik alt sağanakların oluşmasını sağlayan hadronik bir yapıya sahiptir (Bonomi, Checchia, D'Errico, Pagano, Saracino, 2020).



Şekil 2.15. Birincil kozmik ışınların, hava molekülleri ile meydana getirdiği fiziksel etkileşimler (Georgia Devlet Üniversitesi – HyperPhysics, 2022’den değiştirilerek alınmıştır)

Özellikle π^0 ’nun bozunması ile oluşan iki adet γ ışını, sağanak içerisinde en çok elektron ve pozitron çiftinin oluşmasını sağlar (Bonomi ve diğerleri, 2020).

Çizelge 2.5. Pion mezonunun fiziksel bilgileri

Parçacık	Sembol	Anti Parçacık	Yapısı	Durgun Kütle MeV/c^2	Ömür (Saniye)
Pion	π^+	π^-	$u\bar{d}$	139,6	$2,60 \times 10^{-8}$
Pion	π^0	Kendisi	$\frac{u\bar{u} - d\bar{d}}{\sqrt{2}}$	135,0	$0,83 \times 10^{-16}$

Pionlar farklı olasılıklar ile çeşitli şekilde bozunabilmektedir. Bu bozunumları aşağıdaki şekilde gösterebiliriz (Georgia Devlet Üniversitesi – HyperPhysics, 2022).

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma ; (\%98,8) \quad (2.14)$$

$$\pi^0 \rightarrow e^- + e^+ + \gamma ; (\%1,2) \quad (2.15)$$

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (2.16)$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (2.17)$$

Pion bozunumundan oluşabilecek müonların yaşam ömrü her ne kadar yaklaşık, 2 μ s olsa bile; rölativistik hareketlerinden dolayı dünya yüzeyine ulaşabilmektedirler. Hava sağanağının ardından meydana gelen bu parçacıkların tümüne genellikle, ikincil kozmik ışınlar denir. (Bonomi ve diğerleri 2020).

Pionlara benzer olarak, Kaon bozunumu ile de müonlar meydana gelebilmektedir.

$$K^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (2.18)$$

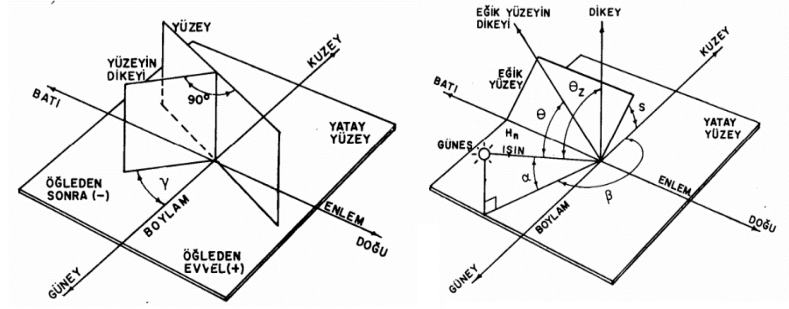
$$K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (2.19)$$

Atmosferde oluşan müonlar, deniz seviyesinde yaklaşık; cm^2 başına dakikada bir 1 müon düşecek kadar akıya sahiptir. Deniz seviyesindeki kozmik müonların ortalama enerjileri yaklaşık 4 GeV kadardır ve enerji spektrumu 1 GeV'in altındayken neredeyse düzdür.

Kozmik müonlar atmosferin üst katmalarında varlık bulup, deniz seviyesine inmek için katettiği mesafe boyunca, içinden geçtiği madde ile olan etkileşimlerinden dolayı yaklaşık 2 GeV'lik enerji kaybettiği ve sonuç olarak; yaklaşık olarak 6 GeV'lik enerji ile oluştuğunu gösterir (Georgia Devlet Üniversitesi – HyperPhysics, 2022).

Kozmik ışınlar, dünyanın eksen eğikliği ve kozmik ışın kaynaklarının (Güneş vb.) konumuna bağlı olarak, dünyanın farklı yüzeylerine geliş açıları çeşitlilik göstermektedir.

Yükseklik açısı (α), Güneş Azimut Açısı (β), Yüzey Azimut Açısı (γ) bunun yanında Deklinasyon Açısı (δ), Geliş Açısı (θ) ve Zenit Açısı (θ_z) gibi örnekler verebiliriz.

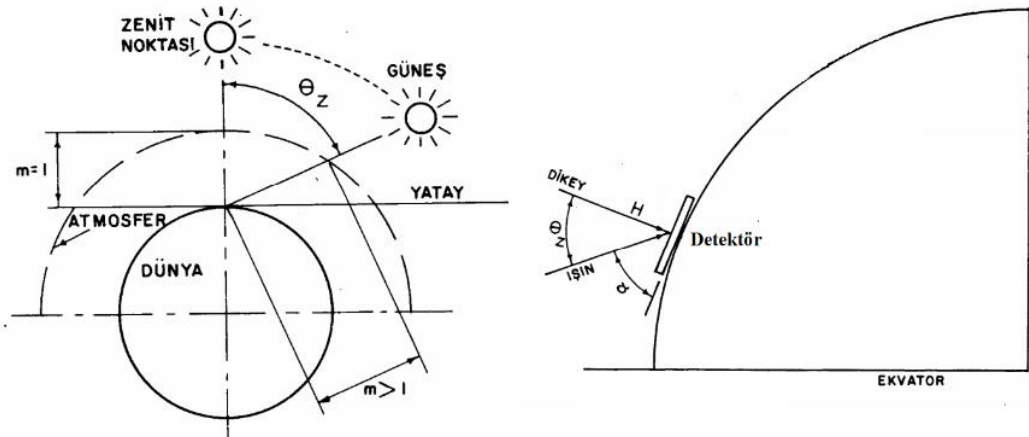


Şekil 2.16. Işınlardan geliş açılarının gösterimi (Kıncay, 2020 – Güneş Enerjisi Ders Notları II. Bölüm’den değiştirilerek alınmıştır)

2.4.2. Zenit Açısı

Kozmik ışınlar ve onlardan dolayı oluşan, kozmik müonları incelerken en çok dikkat edilen açı; Zenit açısıdır. Zenit açısı (θ_z), yatay yüzeyin normali ile gelen ışınlar arasındaki açıdır. Işının geçtiği atmosfer kütlelerinin, güneş tam tepede iken ışının içerisinden geçeceği atmosfer kütlelerinin oranına, hava kütlesi (m) olduğunu söylersek, Zenit açısı aşağıdaki şekilde tanımlanabilir.

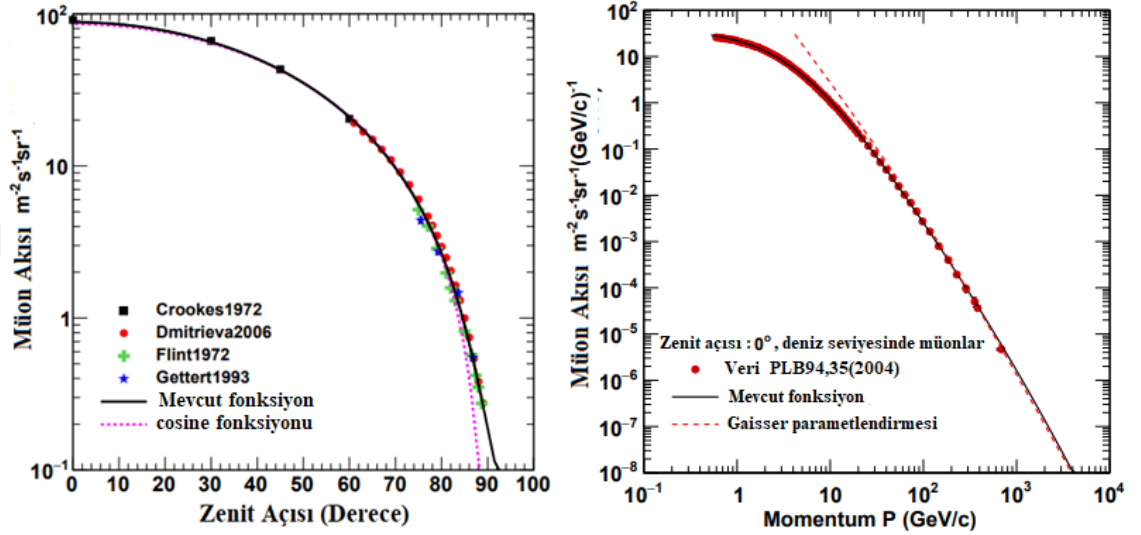
$$m = \frac{1}{\cos(\theta_z)} \quad (2.20)$$



Şekil 2.17. Zenit Açısı (Kıncay, 2020 – Güneş Enerjisi Ders Notları II. Bölüm’den değiştirilerek alınmıştır)

Zenit açısı küçüldükçe, müon akısında bir artış görülmüştür. Bu sebepten dolayı, kozmik müon deteksiyonunda; detektörün duruş açısı, Zenit açısına bağlı olarak değiştirilmesi, ölçümler için yararlıdır.

2.4.3. Zenit Açısının Kozmik Müon Akısı İle İlişkisi



Şekil 2.18. Deneylerden elde edilmiş Zenit açısı - müon akısı değişim grafiği ve Zenit açısı 0° 'iken, parçacık akısı ve momentumu arasındaki ilişki (Shukla, Sankrith, 2018)

Şekil 2.18'de (sol) görüldüğü üzere, Zenit açısı 0° 'a yaklaştıkça; ölçülen müon akısı değeri gittikçe artmaktadır. Zenit açısının 0 derece olduğu konumda, detektörün yüzey normali ve gelen müon demetinin izleyeceği yol, birbirine yaklaşık olarak paralel olduğunu söyleyebiliriz ve o pozisyonda bulunan detektörün ölçeceği müon akısının da maksimum olduğu açıkça görülmektedir. Zenit açısının 90 derece olduğu konumda ise, detektörün yüzey normali ve gelen müon demetinin izleyeceği yol birbirine neredeyse diktir ve ölçülen müon akısı, sıfıra yakındır.

Aynı şekile bakacak olursak, sağ tarafta kalan grafikte ise; Zenit açısının sıfırı gösterdiği, deniz seviyesindeki bir noktada, gelen kozmik müonların akısı ve momentumu arasındaki ilişki görülmektedir.

2.5. Kozmik Müonların Madde ile Etkileşimleri

Kozmik müonlar, madde içerisinden geçerken; yapmış olduğu etkileşimlere göre bir enerji kaybı yaşarlar ve bu enerji kaybı Bethe-Bloch formülü (Denklem 2.7 veya 2.13) ile açıklanır.

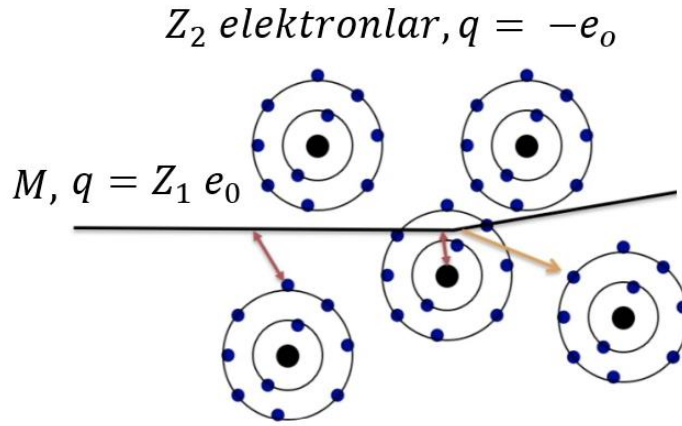
Elektronlar dışındaki orta derecede göreceli parçacıklar, daha çok iyonlaşma ve atomik uyarma yolu ile enerji kaybederler (Bichsel, Groom, Klein, 2006). Kozmik müonların madde içerisinden geçerken yapacağı olası etkileşimler, çeşitli parametrelere bağlıdır. Bunlardan ilki ve en önemli olanı, gelen müonun enerjisidir. İkincisi ve bir o kadar önemli olan ise, içerisinden geçtiği maddenin fiziksel özellikleridir. Kozmik müonlar bir ortam içerisinden geçerken, elastik ve inelastik saçılmalar; çift üretimi, Bremsstrahlung (frenleme ışınımı), δ -elektron üretimi ve nükleer etkileşimler gerçekleştirebilir.

Ayrıca kozmik müonlar, yüksek atom numaralı maddelerin içerisinden geçerken; çoklu Coulomb saçılması yaşayabilirler. Zıt yüklerin birbirini çektiği; aynı yüklerin birbirini ittiği Coulomb kuvveti sebebi ile, negatif yüklü müonlar geçtiği maddenin negatif yüklü elektronları tarafından itilir ve yön değiştirirler (CMS – CERN II. , 2022).

2.5.1. İyonlaşma ve Uyarılma ile Enerji Kaybı

Kozmik müonların madde içerisinden geçerken yaşayacağı enerji kayıplarından ilk olarak, iyonlaşma veya çarpışma ile olanı ele almalıyız. Müonların çarpışma ile kaybedeceği enerji kayıpları, içerisinden geçtiği maddenin atomik elektronları ile arasındaki enerji transferi sonucu; meydana gelecek iyonlaşma olayı ile gerçekleşir (Chatterjee, Bandyopadhyay, 1975).

Kısaca, gelen parçacık atomik elektronlar ile etkileşim yaparak; atomu uyarabilir veya iyonlaştırabilir. Bunun yanında, gelen parçacık atom çekirdeği ile etkileşime girip yolundan saparak saçılır ve bu saçılma sırasında bir foton yayınlanabilir. Yayınlanan bu fotona Bremsstrahlung (frenleme ışınımı) adı verilir (Franklin, 2020).

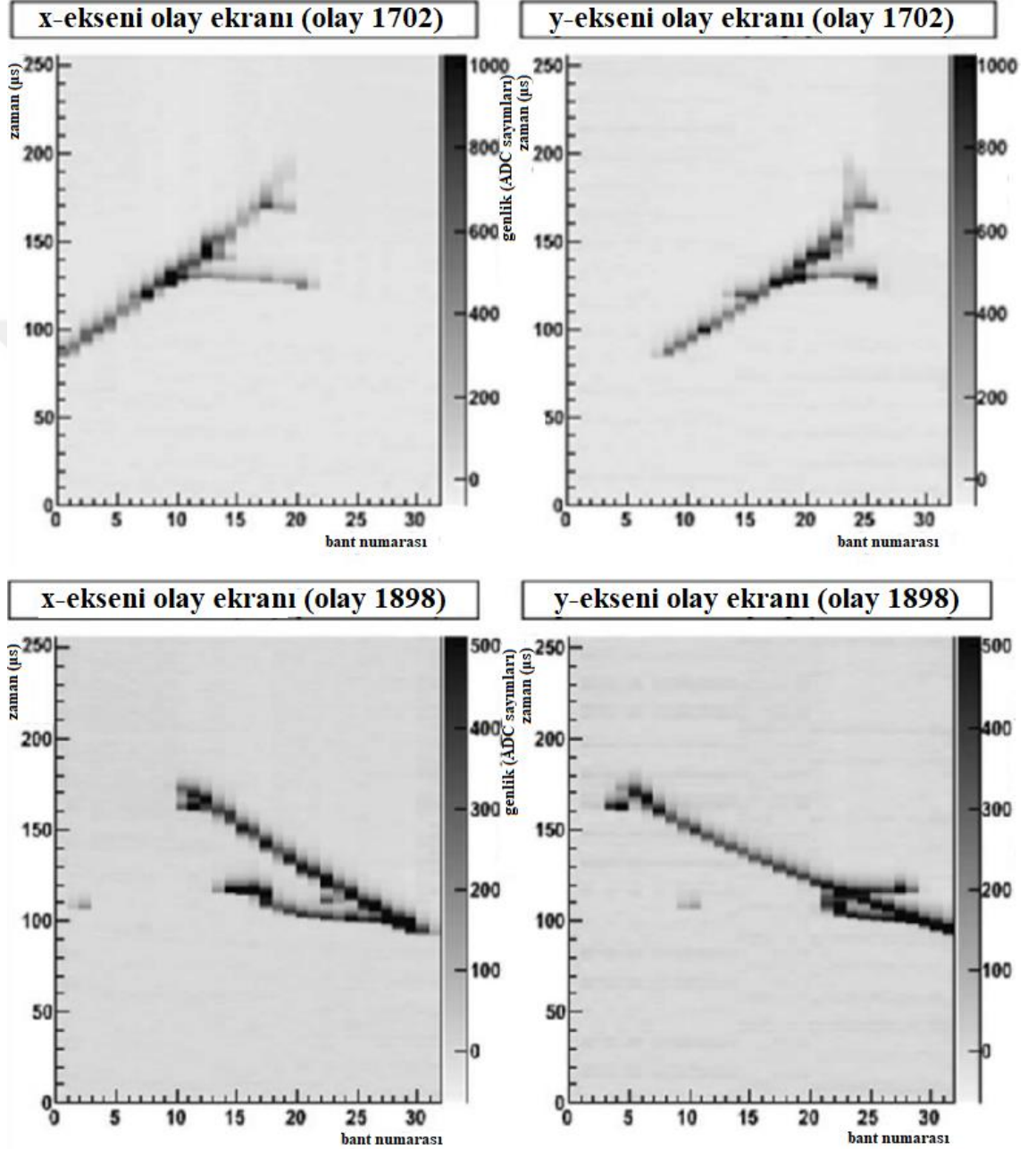


Şekil 2.19. Gelen parçacık, atomu uyarma/iyonize etme veya atom çekirdeği ile etkileşmesi sonucu Bremsstrahlung olayı gerçekleştirebilir (Franklin, 2020)

Gelen kozmik müonların, atomik elektronlara en yakın yaklaşma mesafesi, atomun boyutlarını çok aşıyor ise; o halde atom ile elektron bir bütün gibi davranarak gelen parçacığa birlikte tepki verirler ve gelen parçacık bir nokta yük gibi kabul edilebilir. Bunun sonucunda atom, gelen parçacık tarafından iyonlaştırılmış olur ve bu çarpışmalar, uzak çarpışmalar kategorisindedir. Etki parametresi atomik boyutlar düzeyinde ise, gelen parçacık atomik elektronlar ile etkileşime girerek, Çarpışma (Knock – on) Süreci⁷ meydana getirir ve elektron dışarı atılır. Eğer elektron, bağlanma enerjisinde çok daha büyük bir enerji ile fırlattırılsa, etkileşim; gelen parçacık ve serbest elektron arasındaymış gibi incelenebilir (Chatterjee, Bandyopadhyay, 1975).

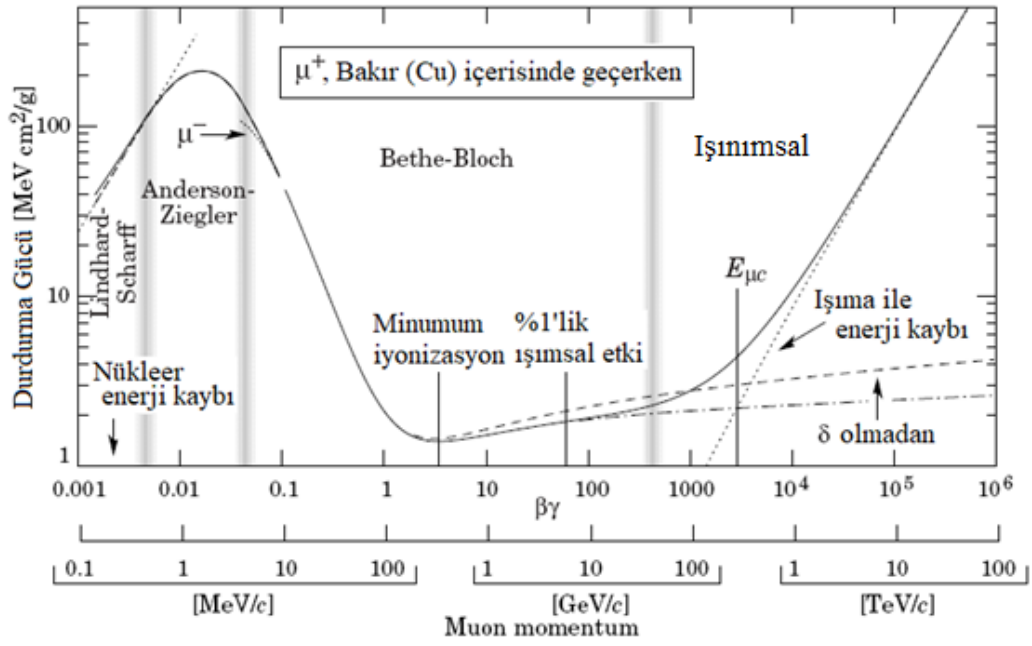
⁷Çarpışma Süreci: δ -elektronları olarak adlandırılan bir sonuca varan fiziksel etkileşimin ismidir. Gelen parçacığın, atomik elektronlar ile girdiği etkileşim sonucuna, elektronun; atomdan ayrılması olayına denir. Atomdan ayrılan bu elektronlar genellikle, ikincil iyonizasyon olayını meydana getirebilecek enerjiye sahip olurlar.

Çarpışma sürecinden dolayı oluşan δ elektronları istenmeyen olaylar meydana getirebilir. Oluşan bu elektronlar, tekrar eden olası iyonlaşmaları tetikleyecek kadar enerjiye sahip olmasından dolayı; izlerini takip etmek epey güç hale gelmektedir.



Şekil 2.20. δ elektronu yayan iki müonun Zaman Yansıtma Odası (TPC – Time Projection Chamber) içerisindeki görünümü (Franklin, 2020)

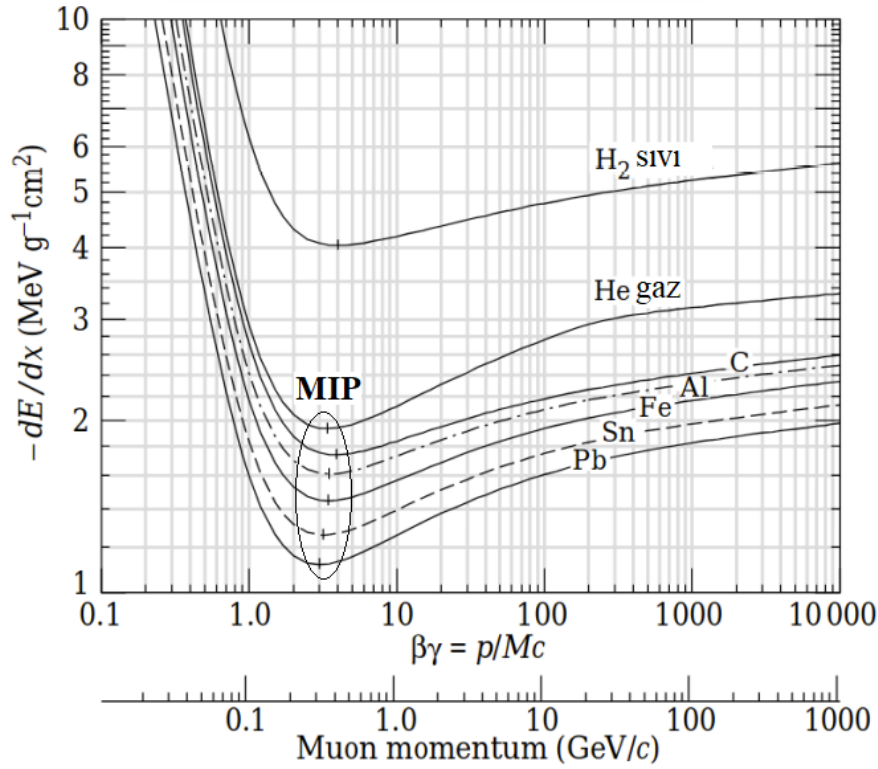
Kozmik müonların (genel olarak müonların) yoğun bir madde içerisinde geçişi sırasında, meydana gelebilecek enerji kaybına göz atmak istersek; Şekil 2.21’i örnek gösterebiliriz.



Şekil 2.21. Bakır içerisinde geçen müonların durdurma gücü - momentum grafiği (Bichsel, Groom, Klein, 2006'den değiştirilerek alınmıştır)

Şekil 2.21'de bakır içerisinde geçen müonların sahip olduğu enerji (dolayısı ile momentum) sebebi ile, gerçekleştirebileceği çeşitli fiziksel etkileşimler gösterilmiştir.

Gelen müonların enerji seviyelerine göre, ışıınımsal etkileşimler ile de belirli bir enerji kaybı yaşayacağı, Şekil 2.21'de görülmektedir.

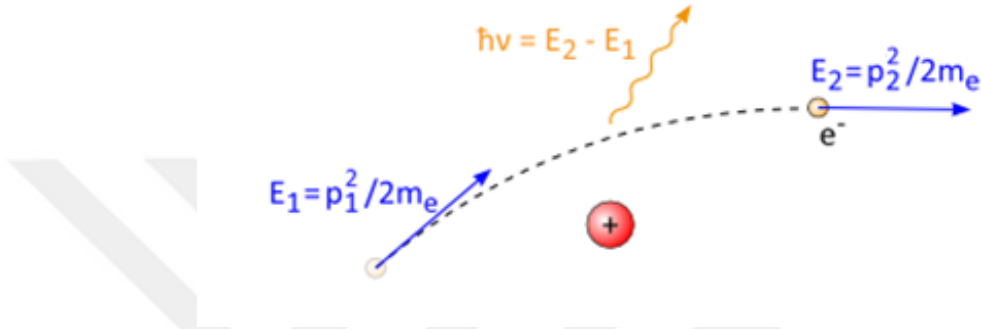


Şekil 2.22. Çeşitli maddesel ortamlardan geçen müonların, sahip olduğu momentum değerlerinin enerji kaybı arasındaki ilişkinin gösterimi. (Minumum İyonize Edici Parçacık (MIP), $\beta\gamma$ değeri 3 ~ 3,5 GeV civarındadır) (Franklin, 2020)

Şekil 2.22’de görüldüğü üzere, müonların yaşayacağı enerji kaybı; içerisinde geçtiği maddesel ortamdan ortama değişiklik göstermektedir. Sıvı Hidrojen (H_2) içerisinde geçerken yaşayabileceği enerji kaybı, gaz formundaki Helyum (He)’dan epey farklıdır. Bu durum, müonların içerisinde geçtiği maddesel ortamın fiziksel özelliklerine doğrudan bağlıdır.

2.5.2. Işıma ile Enerji Kaybı

Gelen yüklü bir parçacığın bir başka yüklü parçacık tarafından, Coulomb kuvvetlerinden dolayı yörüngesi saptırılır. Bu durum sonucunda gelen parçacığın kinetik enerjisinin azalması sebebi ile, enerji korunumu yasasına uygun olacak şekilde bir ışıma açığa çıkar; çıkan bu ışıma Bremsstrahlung (frenleme ışıması) adı verilir. Genelde yüklü bir parçacığın, bir atom çekirdeği tarafından yörüngesinden saptırılması şeklinde oluşur.



Şekil 2.23. Bremsstrahlung olayının bir gösterimi

Bremsstrahlung yolu ile ortalama kaybedilen enerji, İnce Yapı Sabiti⁸ ($\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} \cong \frac{1}{137}$), Q ve m sırası ile gelen parçacığın elektrik yükü ve kütlesi, E gelen parçacığın enerjisi olmak üzere; Bremsstrahlung yolu ile enerji kaybı denklem 2.21 ile açıklanabilir (Franklin, 2020).

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{Brems} = 4\alpha N_A \left(\frac{e^2}{mc^2}\right)^2 \ln \frac{183}{Z^{\frac{1}{3}}} \frac{Z(Z+1)}{A} Q^2 E \quad (2.21)$$

⁸İnce Yapı Sabiti(α): Diğer ismi ile Sommerfeld sabitidir. Temel yüklü parçacıklar arasında, elektromanyetik etkileşimin şiddetini belirleyen boyutsuz, fiziksel bir sabittir.

Işıma ile enerji kaybı kavramında, Kritik Enerji denilen bir kavram ortaya çıkmaktadır. Kritik enerji tanım olarak; yüklü bir parçacığın maddesel ortam içerisinde geçerken ışıma (Bremsstrahlung) yolu ile yaşayacağı enerji kaybının, iyonlaşma veya uyarılma (çarpışma ile yaşanan enerji kayıpları) yolu ile yaşayacağı enerji kaybına eşit olduğu enerji değerine, Kritik Enerji denir.

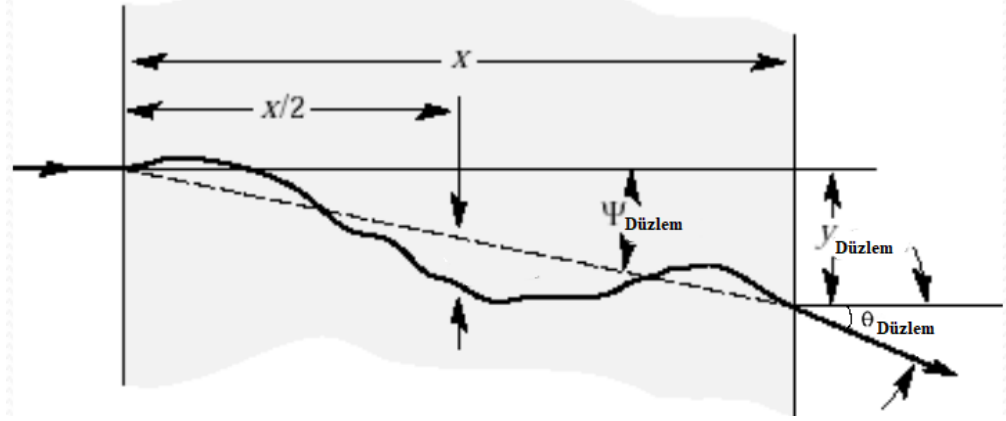
$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{Işıma} = \left(-\frac{dE}{dx}\right)_{\text{çarpışma}} \rightarrow E = E_c \quad (2.22)$$

Bakır(Cu : $Z = 29$) içerisinde geçen yüklü parçacıklardan; elektron ve müonların kritik enerjilerini karşılaştırmak gerekirse; elektron kritik enerjisi $E_c(\text{elektron}) \cong 19 \text{ MeV}$, müonların ise $E_c(\text{müon}) \cong 1 \text{ TeV}$ kadardır.

2.5.3. Çoklu Coulomb Saçılması

Maddesel ortamın atomik elektroları ile gelen parçacık arasındaki inelastik çarpışmaların yanında; daha küçük bir olasılıkla gerçekleşme imkanı olan bir diğer etkileşim ise; çekirdekten çekirdeğe tekrarlanarak gerçekleşen bir çoklu Coulomb saçılmasıdır.

Gelen parçacığın, içerisine girdiği maddesel ortamın atomik çekirdeklerinden daha hafif kütleli olduğu düşünüldüğünde gerçekleşecek enerji kaybı ihmal edilebilir ölçüde olacaktır. Fakat yaşanan her saçılma, maddesel ortama giren parçacığın yörüngesine ufak sapmalara sebebiyet verip; sonuç olarak sapmaların toplamı düşünüldüğünde hatırı sayılır ölçüde, yörüngesinde bir sapma meydana gelecektir (Meroli, 2022).



Şekil 2.24. Çoklu Coulomb saçılmasının bir gösterimi (Demir, 2022'den değiştirilerek alınmıştır)

Gelen parçacık yeterince kalın bir maddesel ortamdan geçtiğinde, açısal dağılım hemen hemen Gaussian dağılım formundadır ve bu fiziksel olayı açıklayan kavrama Moliere Teorisi denir (Demir, 2022). θ_0 , Moliere dağılımının fitinden elde edilen değer olmak üzere; dağılım aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$\frac{dP(\theta_{Düzlem})}{d\theta_{Düzlem}} = \frac{1}{\theta_0 \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\theta_{Düzlem}^2}{2\theta_0^2}\right) \quad (2.23)$$

θ_0 aynı zamanda, maddesel ortamdan çıkan parçacığın net saçılma açısıdır.

$$\theta_0 = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta pc} z \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left[1 + 0,038 \ln\left(\frac{x}{X_0}\right) \right] \quad (2.24)$$

Denklem 2.24’de, parçacığın momentumu p , X_0 ise radyasyon uzunluğudur. Bir malzemenin radyasyon uzunluğu, malzemenin içerisinde geçen yüklü bir parçacığın enerjisini $1/e$ faktörü kadar azaltmak için katedilmesi gereken uzunluğa verilen isimdir. $e = 2,71828$ olmak üzere, radyasyon uzunluğunu matematiksel olarak aşağıdaki şekilde tanımlayabiliriz (Gupta, 2010).

$$X_0 = \frac{716,4 A}{Z(Z + 1) \ln\left(\frac{287}{\sqrt{Z}}\right)} g \cdot cm^{-2} \quad (2.25)$$

Çoklu Coulomb saçılması, özellikle kozmik müonların kullanıldığı görüntüleme sistemlerinde oldukça büyük önem taşımaktadır. Materyal içerisine giren parçacığın, art arda gerçekleştireceği saçılmalarla elde edilecek sonuçlar; bize materyalin fiziksel özellikleri hakkında bilgi verecektir. Müonların, materyale giriş açıları ve materyalden çıkış açıları arasındaki farklar; materyalin iç yapısının görüntülenmesine olanak sağlayacaktır.

2.6. Detektörlerin Karakteristik Özellikleri

Nükleer ve temel parçacık fiziği bünyesinde birçok farklı detektör tipinin gelişimi gerçekleşse bile, hepsi aynı temel prensibe dayanmaktadır. Detekte etme işlemi, gelen parçacığın veya radyasyonun enerjisinin bir kısmının veya tamamının detektör kütlesine aktararak, insan algısı ile algılanabilecek bir başka forma (sinyale) dönüştürülmesi olayıdır. Günümüzdeki modern detektörler yapısı gereği elektrikseldir. Söz gelimi, detektörden elde edilen bilgiler elektriksiz atmalara (impuls) dönüştürülür ve bu elektriksiz atmalar ise gelişmiş hassasiyete sahip elektronik elemanlar ve bilgisayarlar aracılığı ile çoğunlukla ölçülebilir elektriksiz sinyallere dönüştürülür. Modern detektörlerinin yanında, olmazsa olmaz olarak kullanılan gelişmiş elektronik ve bilgisayar teknolojisi aynı zamanda, bilgilerin daha doğru ve daha hızlı işlenmesini sağlar (Leo, 1994).

Gazlı detektörler için de benzer durum geçerlidir. Detektörlerden elde edilen sinyaller mikroamper ölçeğinde olup, bu düzeyde akımları ölçmek için çok hassas ampermetrelere ve yükselticilere (amplifikatör) ihtiyaç vardır.

2.6.1. Detektör Hassasiyeti

Detektörün hassasiyeti veya diğer bir deyiş ile duyarlılığı, belirli bir parçacık türü için kullanılabilir bir sinyal üretme yeteneğidir. Hiçbir detektör, tüm enerjilerde her tür parçacığa karşı duyarlı olamaz. Bunun yerine, belirli bir enerji aralığında, belirli parçacık türlerine duyarlı olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu durumun dışında elde edilen sinyal kararsız ve verimliliği büyük ölçüde az olacaktır.

Detektör duyarlılığı, detektörün iyonizasyon tesir kesitine, detektör kütlesine ve detektörün doğal gürültüsüne bağlıdır. Bunlara ek olarak, detektörün ölçüme duyarlı hacmini saran koruyucu materyale bağlı olduğuna da söz edebiliriz (Leo, 1994).

Detektör içerisinde kullanılan elektronik devre elemanlarından kaynaklı temel bir sinyal üretimi varlık bulmaktadır. Buna detektörün doğal gürültüsü (inherent noise) denir ve bu gürültü, detektörün çıkışında akım veya gerilim dalgalanması olarak varlık bulur. Detektör hacmine giren parçacığın çıkış sinyali, doğal gürültüden büyük olmalıdır, aksi halde gürültüden ayırt edilmesi oldukça güç bir duruma gelecektir. Detektör hacmine giren ve özellikleri öğrenilmek istenen parçacık, detektörün ölçüme duyarlı hacmini kaplayan koruyucu materyal içerisinde geçebilmelidir. Dolayısı ile, bu koruyucu materyal olabildiğince ince bir yapıya sahip olmalıdır. Aksi halde, parçacık bu materyal tarafından soğurulacak ve detektör içerisinde bir ölçüm alınamayacaktır (Aydın, 2015).

2.6.2. Detektör Cevabı

Detektör hacmi içerisine giren parçacığın varlığını saptamaya ek olarak, çoğu detektör bize bu parçacığın enerjisi hakkında birtakım bilgiler verebilmektedir. Bir detektör hacmi içerisine giren parçacık tarafından üretilebilecek iyonlaşma miktarı, detektör hacmi içerisinde kaybedeceği enerji miktarı ile orantılı olacağını söyleyebiliriz. Detektör şayet, parçacığın tüm enerjisini tamamen soğurursa, elde edilecek iyonizasyon ölçümü; parçacığın sahip olduğu enerjinin bir ölçüsünün elde edilmesini sağlayacaktır. Yapıları itibari ile elektriksel detektörlerin çıkış sinyali, akım atması (current pulse) şeklinde olacağını söyleyebiliriz. Detektör hacmi içerisine giren parçacığın meydana getireceği iyonizasyon miktarı, oluşacak akım atması neticesinde meydana gelen sinyalin taşıdığı

elektrik yüküne bağılı olarak; akım atmasının zamana göre integrali şeklinde varlık bulacaktır. Bir fiziksel olaydan bir başkasına geçiş yapılmadığı varsayılarak, oluşan akım atmasından elde edilen integral, sinyalin genliği ile doğrudan orantılı olacaktır.

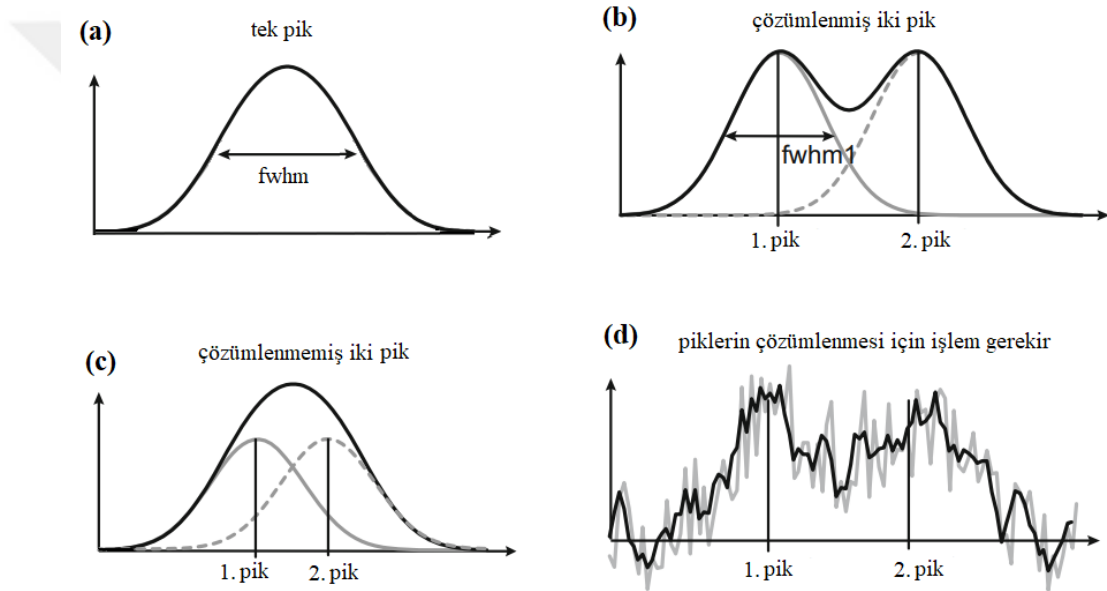
Parçacığın enerjisi ile çıkış sinyalinin toplam yükü veya sinyalin genliği arasındaki ilişki, detektör cevabı olarak isimlendirilir (Leo, 1994).



2.6.3. Enerji Çözünürlüğü

Parçacığın enerjisini ölçmeye yarayan bir detektörün, önemli özelliklerinden biri; enerji çözünürlüğüdür. Çözünürlüğün tanımı, birbirine yakın iki sinyali ayırt edebilme ölçüsüdür.

Çözünürlüğü tanımlayan terim, pikin yarı yüksekliğindeki tam genişliğidir (Full Width at Half Maximum- FWHM). Bu terim, bir sinyalin tepe noktasının yarı değerinde sahip olduğu genişliğe verilen bir isimlendirmedir.



Şekil 2.25. Şekil a’da bir sinyal pikinin FWHM’ı gösterilmektedir. Şekil b’de, FWHM değerleri görece küçük olduğundan dolayı, birbirilerinden ayrı olarak gözlemlenebilen iki sinyal piki görülmektedir bu durum detektörün enerji çözünürlüğünün yüksek olmasının bir getirisiidir. Şekil c’de, sinyal piklerinin FWHM değerlerini baz aldığımızda, detektörün enerji çözünürlüğü düşük olduğu durumda, birbirinden ayırt edilemeyen iki sinyal piki görülmektedir ve bu iki sinyal bir bütünmüş gibi görünür. Şekil d’de detektörün doğal gürültüsü sebebi ile karmaşıklaşmış sinyal pikleri görülmektedir ve siyah çizgi ile gösterilen tepeler, komşu üç veri noktasının ortalamasını temsil eder (Kudryashev, 2017’den değiştirilerek alınmıştır)

2.6.4. Cevap Süresi

Detektörün cevap süresi, detektör fiziğinde önemli bir özelliktir. Detektörün gaz hacmi içerisine giren parçacığın, detektörde meydana getireceği sinyali oluşturma süresine verilen bir addır. Sinyalin süresi de önemlidir. Çünkü bu süreç içerisinde detektör duyarsız kalacak veya ikinci sinyal, birinci sinyalin üzerine eklenecektir. Bu durum ölü zamana katkıda bulunacaktır (Leo, 1994).

2.6.5. Detektör Verimliliği

Detektör tarafından algılanan parçacıkların verimliliği söz konusu edilirse, iki tür verimlilikten söz edilmelidir. Bunlar sırası ile mutlak verimlilik ($\mathcal{E}_{mutlak}$) ikincisi ve öz verimliliği ($\mathcal{E}_{öz}$). Mutlak verimlilik, kaynaktan yayılan parçacıkların detektör tarafından ölçülebilme olasılığını verirken, öz verimlilik ise, detektöre çarpan/etkileyen parçacıkların ölçülebilme olasılığı hakkında bize bir cevap sunar.

$$\mathcal{E}_{mutlak} = \frac{\text{Detektör tarafından algılanan olaylar}}{\text{Kaynaktan yayınlanan olaylar}} \quad (2.26)$$

$$\mathcal{E}_{öz} = \frac{\text{Detektör tarafından algılanan olaylar}}{\text{Detektörü etkileyen olaylar}} \quad (2.27)$$

Öz verimlilik, detektör ortamına giren parçacığın etkileşim tesir kesitine bağlıdır ve gelen parçacığın enerjisi ile detektörün yapıldığı malzemenin özelliklerinin bir fonksiyonu şeklindedir. Detektörün kapladığı katı açığa bağlı olan geometrik verimliliği ($\mathcal{E}_{geo}$) tanımlarsak, Mutlak verimlilik ve öz verimlilik arasında $\mathcal{E}_{mutlak} = \mathcal{E}_{öz} \mathcal{E}_{geo}$ şeklinde bir ilişki vardır (Leo, 1994).

2.6.6. Ölü Zaman

Detektör hacmine giren parçacık tarafından detektörde meydana gelen sinyali işlemek için gerekli olan süreye, ölü zaman denir. Detektörler çoğu zaman bu süreç içerisinde, ardından gelecek olası bir etkileşimin meydana getireceği sinyale karşı duyarsız kalır. Eğer bu ölü zaman içerisinde detektör halen duyarlı kalırsa, ardı sıra gerçekleşebilecek olaylardan meydana gelen sinyaller birikerek; detektör tarafından elde edilen sinyal üzerinde bozulmalar meydana getirir. Ölü zamanın periyodunun, ardı sıra gerçekleşebilecek iki etkileşim süresinden daha küçük olması istenir (Leo, 1994).

2.6.7. Detektör Kazancı

Yüklü bir parçacık detektörün gaz hacmi içerisine girdiğinde, detektörün gaz hacminde bulunan gaz atomları/molekülleri ile etkileşime girerek onları iyonlaştırır bu olay sonucunda, birincil elektron-iyon çiftleri meydana gelir. Meydana gelen bu birincil elektronlar, detektör içerisindeki elektrik alan neticesinde enerjileri gittikçe artar ve enerjileri ikincil bir iyonizasyon durumu üretecek seviyeye geldiğinde, ikincil elektron-iyon çiftleri meydana getirebilir bu süregelen olaya Elektron Çıgı adı verilir. Bunun sonucunda, elektronlar anoda doğru hareket ederken, sayılarında bir artış gözlenir. Bu duruma yük kazancı (Gain) denir ve elektron çıgındaki son ve ilk elektron sayılarının oranı şeklinde tanımlanabilir. Son durumdaki elektron sayısı (n) ve ilk durumdaki elektron sayısı (n_0) olmak üzere, detektör kazancı (G) aşağıdaki şekilde gösterilebilir.

$$G = \frac{n}{n_0} \quad (2.28)$$

Birim uzunluk başına meydana gelen elektron-iyon çifti sayısı Townsend katsayısı (α) ile tanımlanır. Townsend katsayısı, kullanılan gazın türü, sıcaklık ve basınç gibi bir çok fiziksel niceliğe bağlı olduğu gibi; detektör içerisindeki elektrik alana da bağlı olmaktadır.

Silindirik yapılı, r yarı çaplı bir detektördeki elektrik alan değişken bir yapıya sahiptir ve anot tele yaklaştıkça artış gösterir. Bu durumda, silindirik yapılı bir detektördeki gaz kazancı aşağıdaki şekilde tanımlanabilir (Şahin, 2020).

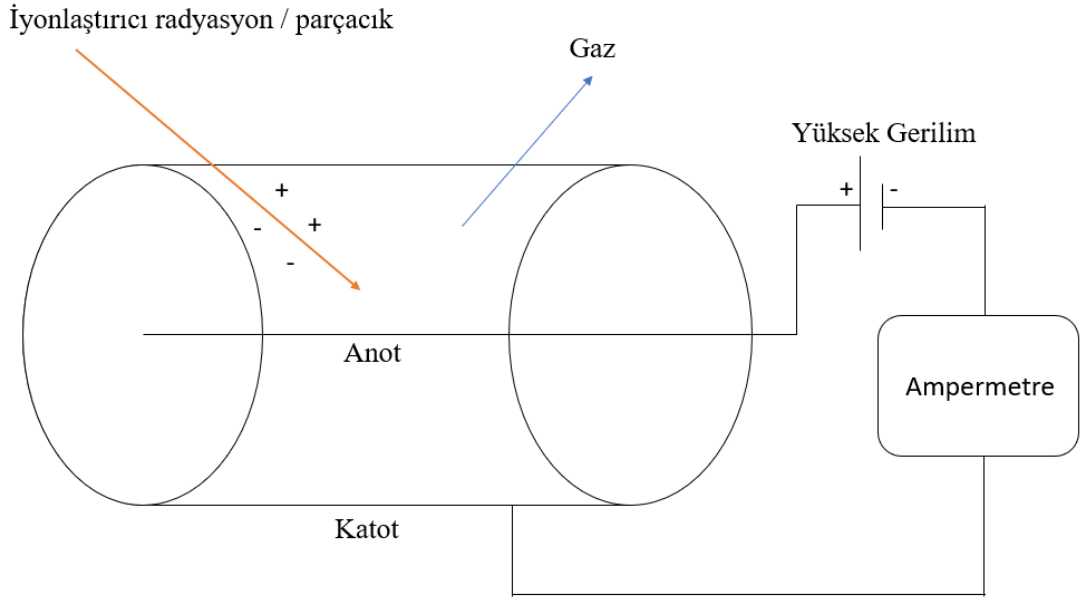
$$G = \exp\left(\int \alpha(E(r))dr\right) \quad (2.29)$$

Paralel plakalı detektör içerisindeki elektrik alan neredeyse her noktada sabit olarak kabul edilebilir. Bu durumda, detektör üzerinde meydana gelecek detektör kazancı aşağıdaki şekilde tanımlanabilir.

$$G = \exp(\alpha d) \quad (2.30)$$

2.7. Gazlı Detektörlerin Genel Yapısı

Gazlı detektörler, yüklü bir parçacığın; detektörün gaz hacmi içerisinde katettiği yol boyunca gaz atomları ile çeşitli etkileşimlere girerek enerji kaybetmesi prensibine dayanır. Gazlı detektörler yapı itibari ile, bir detektör hacmi ve bu detektör hacminin içerisine yerleştirilmiş gaz veya gaz karışımından oluşur. Silindirik bir gazlı detektör düşünelim. Detektörün uçları arasında uygulanan yüksek voltaj sebebi ile, detektörün ortasında anot bir tel ve detektörün iç yüzeyi ise katot bir yapıya sahip olsun (detektör içerisinde meydana gelen elektrik alan sebebi ile, gelen parçacığın üzerine elektriksel bir kuvvet etkir). Silindirik detektör hacmi içerisine yerleştirilmiş gaz veya gaz karışımı ile, detektör içerisine giren bir parçacık arasında fiziksel etkileşimler meydana gelir. Enerjisine bağlı olarak en çok gerçekleşecek olan fiziksel etkileşimin, iyonlaşma olacağı kabulü altında; iyonlaşma olayları sonucunda meydana gelen elektronlar, anot tele doğru hareket edecektir. Anot tele çarpan elektronlar birçok sinyal meydana getirir ve bu sinyaller analiz edilerek, detektör hacmine giren parçacık hakkında bilgi sahibi olunur.



Şekil 2.26. Silindirik gazlı detektörün şematik gösterimi

Çeşitli gazlı detektörler vardır. İyonlaşma odaları, Geiger-Müller Tüpü, Çok telli odalar, orantılı sayaçlar, çok telli orantılı sayaçlar, sürüklenme odaları ve zaman yansıtma odaları olarak örnek verilebilir. Seçilen detektöre ve diğer fiziksel parametrelere bağlı olarak, detektör hacmi içerisine giren parçacık sebebi ile detektörden elde edilen sinyalin enerji çözünürlüğü gibi özellikleri farklılık gösterebilir.

2.7.1. Gazlı Detektörlerde Kullanılan Gaz Karışımları

Gazlı detektörlerin detektör hacmi içerisine, belirli oranlarda karıştırılmış; iki ya da daha fazla sayıda gazdan oluşan, bir gaz karışımı yerleştirilmektedir. Detektör hacmi içerisinden geçen parçacık, bu gaz karışımında bulunan atom/moleküller ile etkileşime girerek iyonlaşma olayı meydana getirecek ve ortaya çıkan elektronlar sayesinde detektörden bir sinyal alınacaktır. Burada kullanılan gazların kendisi ve oranları oldukça önem arz etmektedir. Şayet istenilen hassasiyette sonuç almak buna bağlı olabilir. Gaz karışımı genel olarak soygaz ve moleküler gaz çiftinden oluşur. Soygazların kolay iyonize olması ve elektronegatiflikleri (bağ yapma yetileri) düşük olması nedeni ile, özellikle tercih edilirler. Moleküler gazlara, dindirici gaz da denir. Dindirici denilmesinin sebebi, oluşan elektronların ters yönde yayılmasını engellemesinden dolayıdır. Gaz karışımına

ek olarak, elektronegatifliği yüksek ve amacı, fazla elektron oluşmasını engellemek olan moleküler gazlar da eklenebilmektedir, bu gazlara SF₆ (Kükürt hekzaflorür) örnek gösterilebilir.

Gazlı detektörlerde kullanılan gaz karışımlarına aşağıdaki örnekler gösterilebilir.

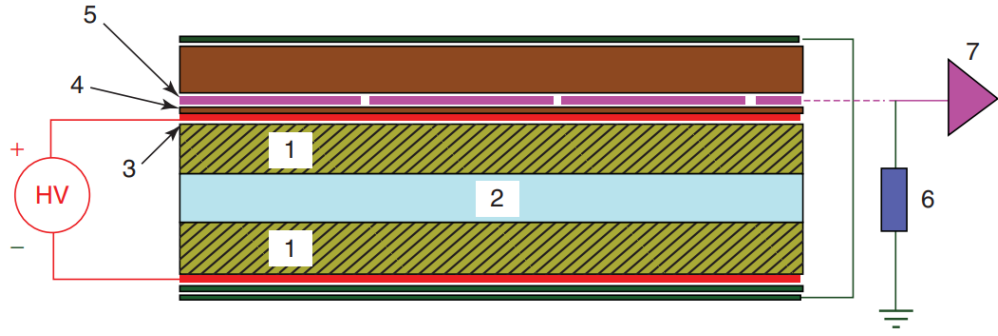
- Ar / CH₄
- Ar / i-C₄H₁₀
- Ar / CO₂
- C₂F₄H₂ / i-C₄H₁₀ / SF₆

Kullanılan gazlar aynı zamanda, şu özelliklere de sahip olması beklenir Yanıcı ve patlayıcı olmayan, ekonomik, şiddetli bir elektrik alan altında kıvılcım tehlikesi yaratmayan ve doğa dostu olmalıdır.

2.7.2. Dirençli Plaka Odası (RPC) Dedektörleri

Modern RPC'nin prototipleri ilk olarak 1980'li yılların başında, Rinaldo Santonico ve Roberto Cardarelli tarafından Roma'da yapılmıştır. Bu prototipler yüksek basınçta sıkıştırılmış fenolik laminat ile yapılmıştır (Abrescia, Peskov, Fonte, 2018). Daha sonraki yıllarda fenolik laminat yerine, bakalit veya cam kullanılmıştır.

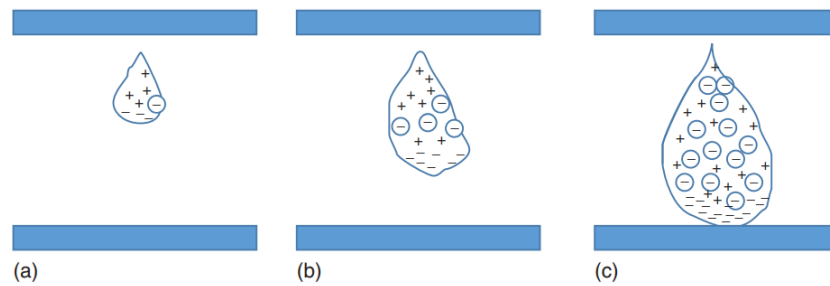
RPC detektörlerinin yapısı kabaca, yüksek dirençli iki plaka arasına (cam, bakalit vb.) yerleştirilmiş; gaz karışımından oluşur. Yüksek dirençli ($\sim 10^{10} - 10^{12} \Omega\text{cm}$) plakaların üzerinde ise, detektör hacmi içerisine girecek olan parçacık tarafından meydana getirilecek sinyali algılamaya yarayan; sinyal okuma şeritleri bulunur. Yüksek dirençli plakalar üzerinde meydana gelen yükün, sinyal okuyucu şeritlere kolay bir şekilde iletilmesi için de, bu plakalar mikrometre mertebesinde grafit ile kaplanmaktadır. RPC modern bir elektronik detektör olduğu için, sinyal okumaya yardımcı elektronik düzenekler de kurulması gereklidir. Bunların yanında, yüksek dirençli paralel plakalar arasında, yüksek voltaj verilerek, düzgün bir elektrik alan meydana getirilir. Bu elektrik alan “elektron çığı” denilen bir fiziksel olay meydana getirir ve bu olay, RPC detektörünün çalışma prensibi için oldukça önemlidir.



Şekil 2.27. Santonico ve Carderalli RPC tasarımının şematik gösterimi. (1) Bakalit elektrotlar (2mm), (2) Gaz boşluğu (2mm), (3) Yüksek Voltaj (HV) elektrotları (200 μm grafit kaplı), (4) Mylar yalıtkan (50 μm), (5) sinyal okuma şeritleri, (6) direnç, (7) sinyal okumaya yardımcı elektronik düzenekler (Abbrescia, Peskov, Fonte, 2018)

Elektron çığı adı verilen olay, gazlı detektörlerin temel çalışma prensibini oluşturmaktadır. RPC detektörün gaz hacmi içerisinde giren yüklü parçacık, ortamdaki gaz atomlarını iyonize ederek; birincil iyonizasyon olayını, ortaya çıkan elektronlar da, RPC detektörün gaz hacmi içerisinde meydana gelen elektrik alan sebebi ile yeterli enerjiyi kazanarak, ikincil iyonlaşma olayını meydana getirir.

Meydana gelecek elektron çığının fiziksel özellikleri, RPC detektör içerisinde kullanılan gazın özelliklerine bağlı olduğu gibi; gelen radyasyonun/parçacığın enerjisine de bağlı olduğu açıktır.



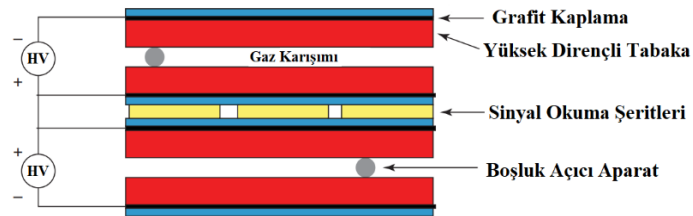
Şekil 2.28. RPC detektörünün gaz hacmi içerisinde gerçekleşebilecek, çığ olayının şematik görünümü. – işaretli olanlar elektronları, daire içerisindeki – işaretli şekiller elektron yakalayan elektronegatif molekülleri sembolize eder. + işaretler ise iyonize olmuş pozitif yüklü molekülleri/protonları sembolize eder. Elektron çığınının damla şekli, negatif ve pozitif yüklü moleküllerin/parçacıkların kütle farkından dolayıdır. Elektronlar detektörün sinyal okuma şeritleri tarafından algılanan sinyalin, hızlı bileşenine katkıda bulunurken, negatif iyonlar yavaş bileşenine katkıda bulunur (Abbrescia, Peskov, Fonte, 2018)

RPC detektörlerinin iki adet çalışma modu vardır. Bunlar sırası ile, Çığ modu (Avalanche mode) ve Flama Modu (Streamer mode)'dur. Çığ modu yapı itibari ile, iyonize edici parçacığın, detektörün gaz hacmi içerisinde meydana getirecek birincil iyonizasyon ile meydana gelen elektronların ikincil iyonizasyon olayını meydana getirmesi olarak tanımlanabilir. Ve bu durum, kullanılan gaz karışımının Townsend katsayısına bağlı olarak, detektör içerisinde belirli bir kazanç mekanizması yaratır.

Flama modu ise, aşırı iyonlaşma (dolayısı ile yük birikmesi) sonucu; oluşan elektron çığına fotonların da katkıda bulunması olayına denir. Oluşan elektron çığı, detektör plakaları arasında meydana gelen kısmen homojen elektrik alanı hatırı sayılır bir şekilde değişime uğratır ve fotonların da müdahalesi ile, elektron çığında enine bir genişleme meydana gelmesi olağandır. RPC detektörü genellikle çığ modunda çalışır ve aşırı yük birikmesinden dolayı Flama modunda RPC detektör; Çığ moduna kıyasla daha fazla materyal bazında zarar görüp yaşam ömründe kısalma (Aging Olayı) yaratır.

RPC detektörlerinin zaman çözünürlüğü⁹ iyi bir değere sahiptir bu sebep ile, detektör hacmine giren parçacıkların uçuş sürelerini hesaplamak için 0,2 – 0,3 mm gaz boşluğuna sahip (Timing RPC) kullanılmasının yanında, bazı detektör sistemleri altında tetikleyici (trigger) olarak kullanılma durumu vardır (Aydın, 2015).

RPC detektörler, tek gaz boşluklu olabileceği gibi, iki gaz boşluklu (Double Gap RPC); hatta ikiden fazla gaz boşluğu (Multigap RPC - MRPC) barındırabilir.



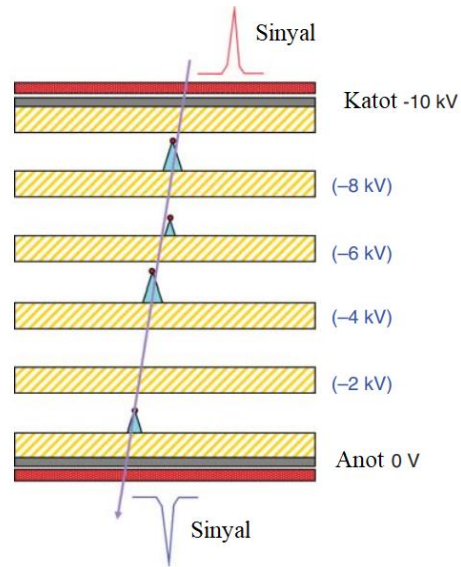
Şekil 2.29. İki gaz boşluklu, RPC detektörün şematik gösterimi (Abbrescia, Peskov, Fonte, 2018'den değiştirilerek alınmıştır)

⁹Zaman çözünürlüğü: Gazlı detektörün, gaz hacmi içerisine giren iki ayrı parçacığın detekte edilmesi arasındaki zaman aralığına verilen isimdir.

Detektör tarafından analiz edilecek iyonize edici parçacığın iz takibi veya meydana gelecek birincil ve ikincil iyonizasyonlar neticesinde, detektör kazancının artırılmak istenmesi durumunda, tek gaz boşluklu RPC yerine çok gaz boşluklu RPC dizaynı kullanılması gereklidir. Özellikle müon gibi, hem büyük kütleli hem de yüksek enerjili (rölativistik) parçacıkların, iz takibi için MRPC dizaynı kullanılmaktadır.

MRPC detektörleri, 1996 yılında M.C.S. Williams (Cerron Zeballos ve diğerleri) tarafından meydana getirildi. Amaç, iki gaz boşluklu RPC'nin avantajlarını arttırmaktı. Bunun için iki gaz boşluklu RPC dizaynının geliştirip MRPC'yi icat ettiler.

MRPC detektörlerindeki zaman çözünürlüğü, tek ve iki gaz boşluklu RPC detektörlere kıyasla daha fazladır ve iyonize edici parçacıkların iz takibi daha iyi bir şekilde yapılmaktadır. MRPC detektörleri, en dış taraftaki dirençli plaka arasında kalan gaz hacmini daha küçük gaz boşluklarına bölünür. Yüksek voltaj sadece en dış katmana uygulanır ve ara katmanlara uygulanan gerilim, gittikçe azaltılır. Sonuç olarak temiz bir sinyal elde edilir (Abbrescia, Peskov, Fonte, 2018).

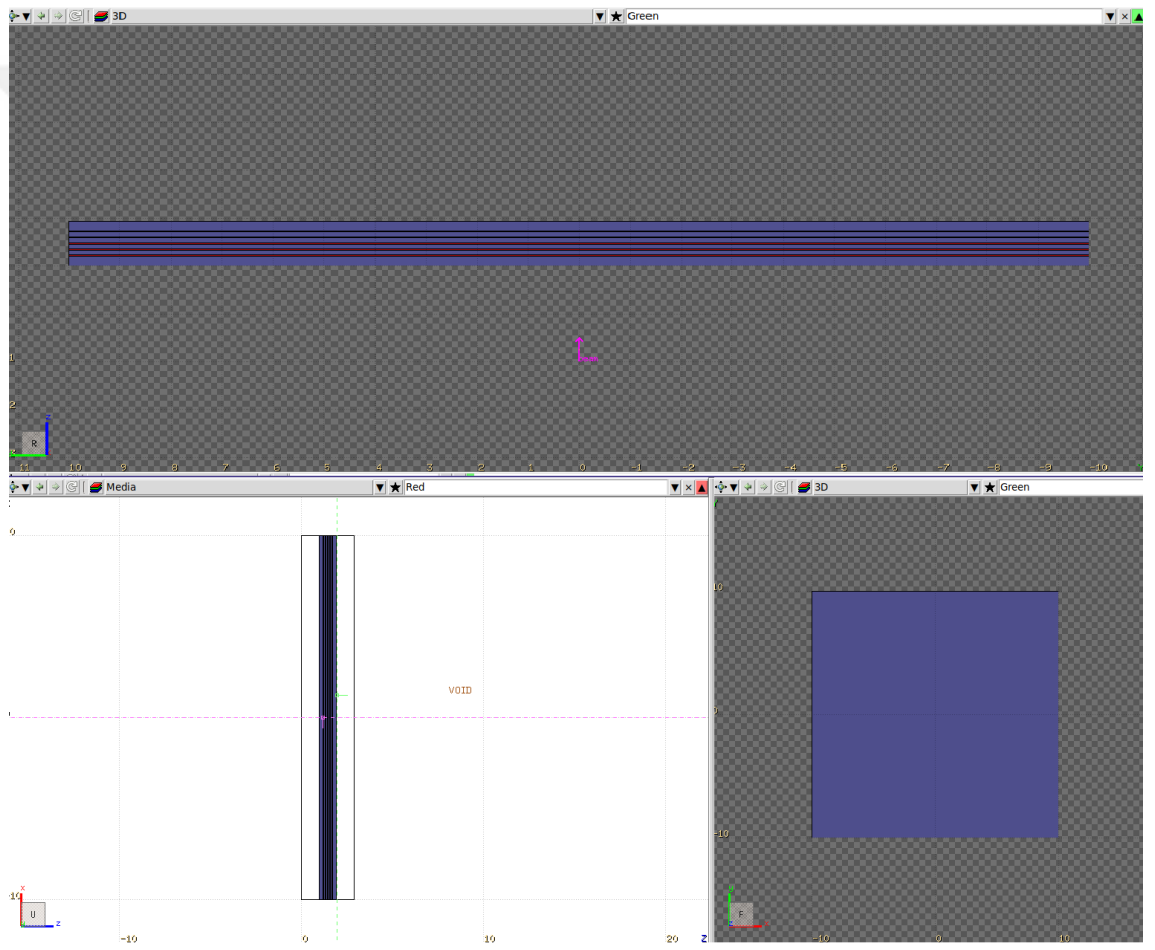


Şekil 2.30. MRPC detektörünün şematik gösterimi (Abbrescia, Peskov, Fonte, 2018'den değiştirilerek alınmıştır)

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Bu çalışmada $20 \times 20 \text{ cm}^2$ alanına sahip 5 gaz boşluklu (gap), MRPC geometrisi oluşturulmuştur. MRPC materyali düz cam (soda-lime glass)'dan oluşmaktadır. Dış camlar 2mm kalınlığında olup, iç camlar 1mm kalınlığındadır. Gaz boşlukları 0,25mm kalınlığında olup; detektörün FLUKA programı içerisinde geometrik görüntüsü aşağıda gösterilmiştir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. FLUKA içerisinde tanımlanan detektör geometrisi

Detektör üzerine z-ekseni boyunca, 0,5 GeV - 1 GeV - 2 GeV ve 4 GeV enerjiye sahip 20000 adet müon gönderilmiştir. Benzetim (simülasyon) 10 döngü altında çalıştırılmıştır.

Detektörün gaz boşluklarına 2 farklı oranda 2 farklı gaz karışımı doldurulup; yukarıda tanımlanan enerjilere sahip müoların, bu gaz karışımlarında ve cam içerisindeki etkileşimleri analiz edilmiştir.

Kullanılan gazlar, aşağıdaki şekildedir:

- %90 R134a - %5 i-C₄H₁₀ - %5 SF₆
- %97 R134a - %2,5 i-C₄H₁₀ - %0,5 SF₆
- %50 CO₂ - %45 N₂ - %5 Ar
- %60 CO₂ - %35 N₂ - %5 Ar

R134a gazı, soğutucularda kullanılan renksiz bir gazdır. Görece doğaya daha az zararlı olmasının yanında, diğer isimleri 1,1,1,2 Tetrafloroetan veya C₂F₄H₂ şeklindedir.

Detektörü tanımlamak için kullanılan materyallerin yoğunluk değerleri aşağıdaki tablolarda verilmiştir.

Çizelge 3.1. Kullanılan elementlerin yoğunluk değerleri

Elementler	Yoğunluk (g/cm^3)
Hidrojen	8,988E-5
Oksijen	0,001429
Sodyum	0,971
Magnezyum	1,738
Silisyum	2,33
Kalsiyum	1,55
Alüminyum	2,6989
Flor	0,001696
Sülfür	2,07
Karbon	1,81
Azot	0,001251
Argon	0,0017837

Çizelge 3.2. Bileşiklerin yoğunluk değerleri

Bileşikler	Yoğunluk (g/cm ³)
C ₂ F ₄ H ₂ (R134a)	0,00425
i – C ₄ H ₁₀	0,00267
SF ₆	0,00640
CO ₂	0,001842

Çizelge 3.3. Benzetimde kullanılan karışımların yoğunlukları

Karışımlar	Yoğunluk (g/cm ³)
%90 R134a - %5 i-C ₄ H ₁₀ - %5 SF ₆	0,0042785
%97 R134a - %2,5 i-C ₄ H ₁₀ - %0,5 SF ₆	0,00422125
%50 CO ₂ - %45 N ₂ - %5 Ar	0,00157314
%60 CO ₂ - %35 N ₂ - %5 Ar	0,00163224

Çizelge 3.4. Benzetimde kullanılan camın yoğunluğu

Cam Türü	Yoğunluk (g/cm ³)
Soda - Lime Cam	2,33

3.2. Yöntem

3.2.1. FLUKA (FLUktuirende KAskade) Programı

Kozmik müonların ilgili materyaller ve MRPC detektörü içerisinde geçerken; depoladığı enerji, iyonizasyon etkileşimleri ile meydana gelen β -elektronlarının depoladığı enerji ve materyal içerisindeki müonların iz takibi (USRTRACK) FLUKA programı ile benzetimi yapılmıştır.

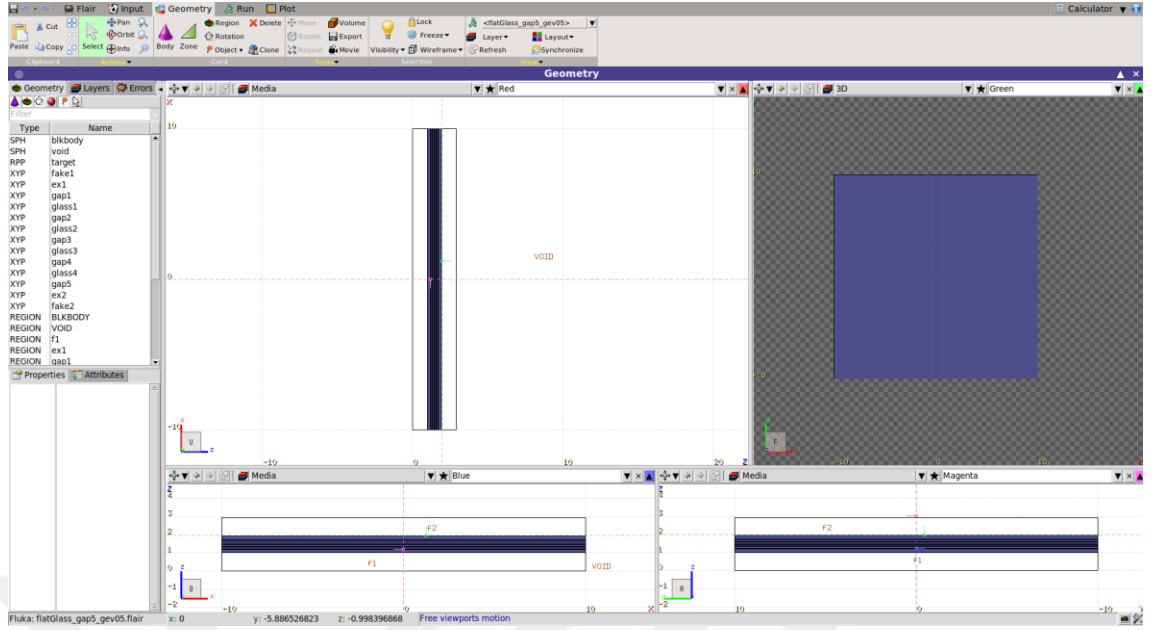
FLUKA, tam entegre bir parçacık fiziki Monte Carlo benzetim paketidir. Yüksek enerjili deneysel fizik ve mühendislik alanlarında; zırlama, detektör ve teleskop tasarımı, kozmik ışın çalışmalar, dozimetri, medikal fizik ve radyo-biyoloji alanlarında uygulanabilmektedir (FLUKA Resmi Sitesi,2022).

FLUKA, Fortran programlama dili ile yazılmıştır ve kullanıcıların Fortran 77 versiyonu ile FLUKA içerisinde çalışan, alt programlar yazılmasına izin vermektedir. FLUKA, 1 keV'den binlerce TeV enerjiye sahip; fotonlar ve elektronlar, nötrinolar, herhangi bir enerji değerine sahip müonlar ile birlikte, 20 TeV'e kadar enerjiye sahip hadronlar dahil olmak üzere yaklaşık 60 farklı parçacığın fiziksel etkileşimin, yayılmasını yüksek doğrultuda benzetim sergileyebilir. FLUKA, CG (Kombinatorial Geometri) paketinin geliştirilmiş bir versiyonunu kullanarak, çok karmaşık geometriler üzerinde bile çalıştırılabilir. Yüklü parçacıkların manyetik ve elektrik alanların varlığında bile, doğru bir şekilde takip edilmesi; FLUKA CG üzerinde mümkün olacak şekilde tasarlanmıştır. Çeşitli görselleştirme araçlarının yanında, hata yakalama (Error Handling) araçları da bünyesinde mevcuttur.

FLUKA, bünyesinde geliştirilmiş Flair adlı bir arayüz da mevcuttur. Flair ara yüzü, Python¹⁰ ve Tkinter¹¹ kullanılarak programlanmıştır (FLUKA Resmi Sitesi,2022).

¹⁰Python: Nesne yönelimli, yorumlaman, birimsel etkileşimli yüksek seviyeli bir programlama dilidir. Girintilere dayalı bir basit söz dizimine sahiptir. C++ ile yazılmış olup, çok amaçlı bir programlama dili olduğunda dolayı, bilimsel hesaplama, web programlama, gömülü işlem programlama gibi çok fazla kullanım alanı bulunmaktadır.

¹¹Tkinter: Bir Grafiksel kullanıcı arayüzü (GUI) paketidir.(<https://docs.python.org/3/library/tkinter.html>)



Şekil 3.2. FLUKA – Flair ile tasarlanmış bir geometri

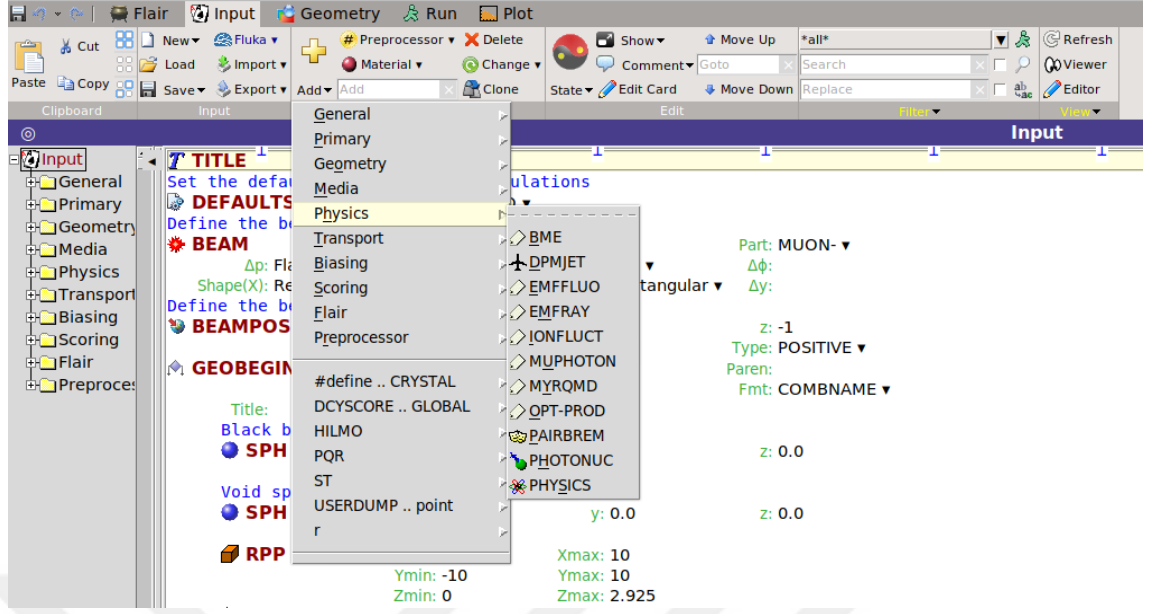
Çeşitli geometrilerde tasarlanabilen materyaller, çok geniş bir çeşitliliğe sahiptir. Saf elementler kullanılabildiği gibi, çeşitli moleküller, gaz karışımları, alaşımlar vb. COMPOUND özelliği ile tanımlanabilmektedir. FLUKA bünyesinde, hazır birçok materyal tipi mevcuttur, bu sebeple fazladan materyal tanımlamalarına gereksinim duymadan, bu materyal atamaları kolayca kullanılabilmektedir.

```

● MATERIAL C2F4H2                                     #:          ρ: 0.00425
  Z:          Am:          A:          dE/dx: ▼
Freon 134a
● COMPOUND C2F4H2 ▼                                     Mix: Atom ▼ Elements: 1..3 ▼
  f1: 2.0      M1: CARBON ▼ f2: 4.0      M2: FLUORINE ▼
  f3: 2.0      M3: HYDROGEN ▼
● MATERIAL isoC4H10                                     #:          ρ: 0.00267
  Z:          Am:          A:          dE/dx: ▼
● COMPOUND isoC4H10 ▼                                   Mix: Atom ▼ Elements: 1..3 ▼
  f1: 4.0      M1: CARBON ▼ f2: 10.0     M2: HYDROGEN ▼
  f3:          M3: ▼
● MATERIAL SF6                                           #:          ρ: 0.0064
  Z:          Am:          A:          dE/dx: ▼
● COMPOUND SF6 ▼                                         Mix: Atom ▼ Elements: 1..3 ▼
  f1: 1.0      M1: SULFUR ▼ f2: 6.0      M2: FLUORINE ▼
  f3:          M3: ▼
T TITLE ===== Mixtures =====
● MATERIAL Mixture                                       #:          ρ: 0.0042785
  Z:          Am:          A:          dE/dx: ▼
● COMPOUND Mixture ▼                                     Mix: Mass ▼ Elements: 1..3 ▼
  f1: 0.9      M1: C2F4H2 ▼ f2: 0.05     M2: isoC4H10 ▼
  f3: 0.05     M3: SF6 ▼

```

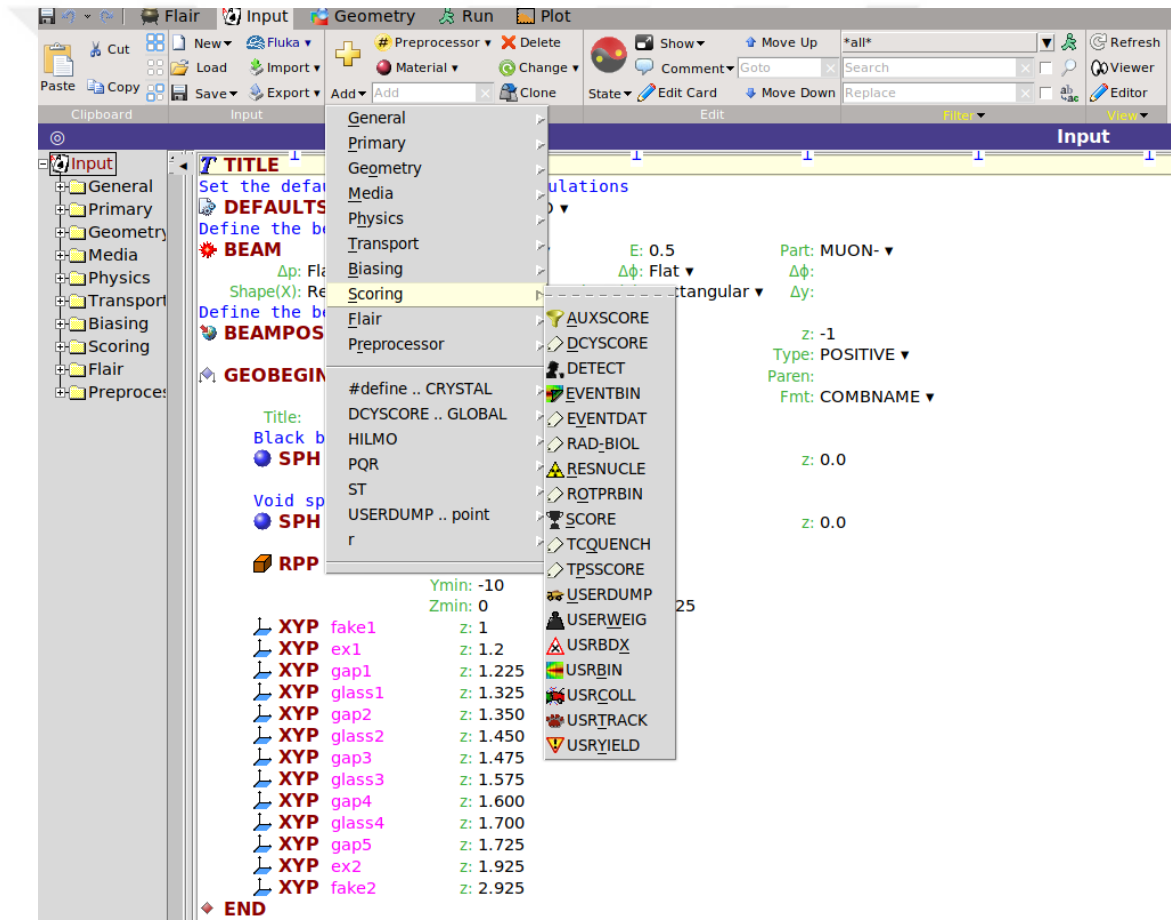
Şekil 3.3. FLUKA içerisinde, molekül ve gaz karışımı tanımlanması örneği



Şekil 3.5. Physics başlığı altındaki fiziksel etkileşimlerin görünümü

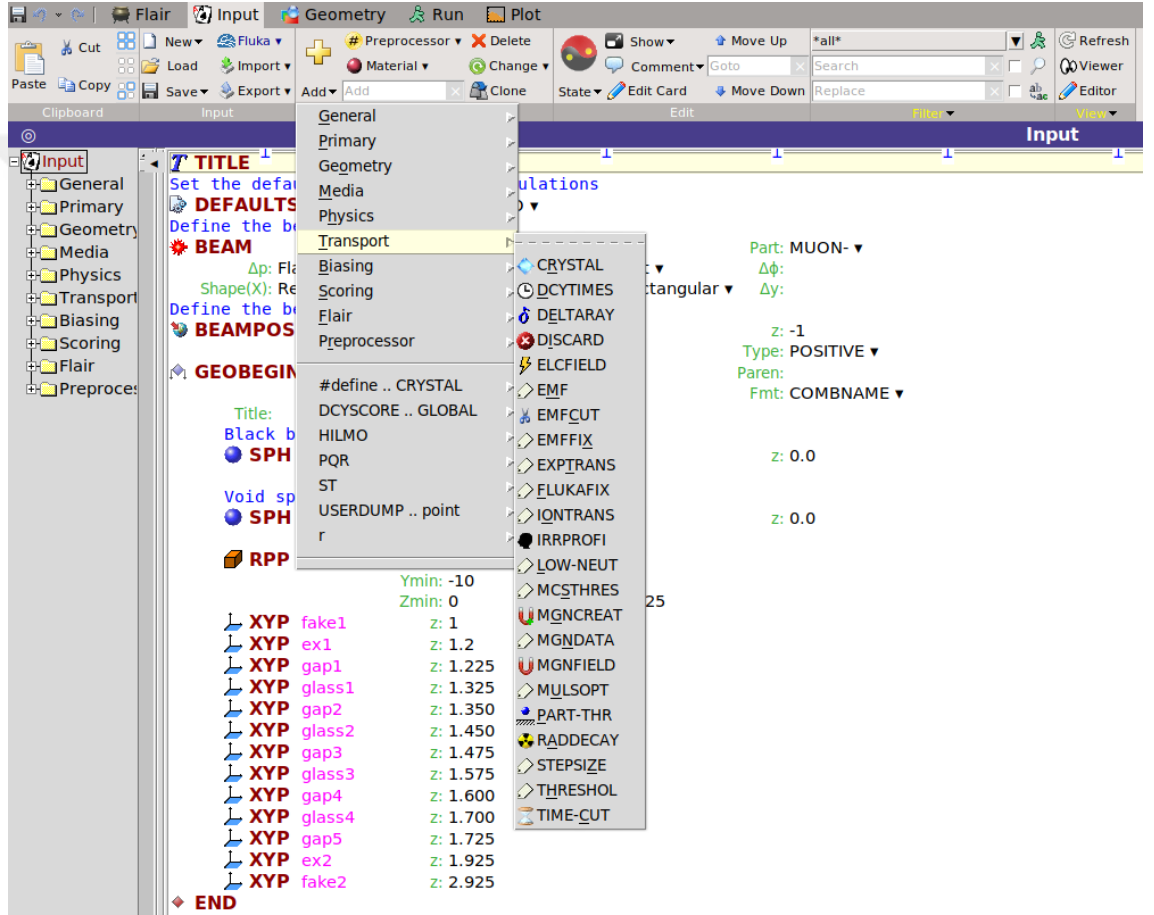
Bu ve buna benzer daha bir çok fiziksel etkileşim, istenildiği takdirde yapılacak olan benzetim içerisine rahatlıkla eklenebilmektedir. Physics başlığı altında, simülasyona eklenecek eklentiler hakkında ayrıntılı bilgiler; FLUKA resmi sitesinde bulunan dokümantasyonlardan bakılabilir.

Materyal geometrisi içerisine giren parçacık, gerçekleştirdiği fiziksel etkileşimler sonucu ortaya çıkan foton, elektron vb. parçacık akılarını, depolanan toplam enerjiyi hesaplamamızı sağlayan USRBIN, materyal içerisine giren parçacıkların iz takibini yapmaya yarayan USRTRACK, belirli bir yüzey üzerinde, belirli bir parçacık türünün veya ailesinin yüzey normaline göre istenilen aralıktaki saçılan parçacıkların ortalama çift diferansiyel akı veya akımını $\left(\frac{d^2\Phi}{dEd\Omega}\right)$ öngörmeye yarayan USRBDX ve her bir olay başına detektör hacmi içerisinde depo edilen enerjiyi hesaplayan DETECT gibi birçok skor aracı, FLUKA'nın Scoring başlığı altında kolayca benzetime dahil edilebilmektedir ve bunları birer detektör olarak düşünebiliriz.



Şekil 3.6. FLUKA içerisindeki Scoring bölümü

FLUKA içerisinde bulunan, “Transport” eklentisi ile, gelen veya etkileşimler sonucunda oluşan parçacıkların; maksimum, minimum veya kesilim enerjileri ayarlanabilir. “DELTARAY” eklentisi, müonlar veya yüklü hadronlar tarafından delta ışınlarının üretimini etkinleştirme eylemini gerçekleştirir. Elektron veya foton üretimi için gerekli olan kesilim enerjisi ayarlamalarının yapıldığı “EMFCUT” eklentisinin yanında, hadronları, müonlar ve nötrinoların enerji transferlerinin kesilim enerjisini belirlemeye yarayan “PART-THR” eklentisi de bulunmaktadır.



Şekil 3.7. FLUKA içerisindeki Transport bölümü

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. USRBIN Bulguları

Bu bölümde, sırasıyla %90 R134a - %5 i-C₄H₁₀ - %5 SF₆, %97 R134a - %2,5 i-C₄H₁₀ - %0,5 SF₆, %50 CO₂ - %45 N₂ - %5 Ar, %60 CO₂ - %35 N₂ - %5 Ar gaz karışımlarına gönderilen; 0,5 GeV - 1,0 GeV - 2,0 GeV ve 4,0 GeV enerjili müonların USRBIN sonuçlarının (müon, elektron, foton akısı ve depolanan toplam enerji) minimum, maksimum ve toplam değerleri, Çizelge 4.1 – 4.16 tabloları altında verilmiştir. Bunun yanında, Şekil 4.1 – 4.16 altında ise, parçacıkların akı ve enerji değerlerinin iki boyutlu grafikleri gösterilmiştir. Şekil 4.17 – 4.20 altında, tablolarda verilen toplam parçacık akısı ve depolanan toplam enerji değerlerinin grafikleri gösterilmiştir.

Şekil 4.17 – 4.20 bizlere, müon, elektron ve fotonların parçacık akıları ve depolanan toplam enerjileri hakkında genel bir bakış sağlayacaktır.

Çizelge 4.1. %90 R134a - %5 i-C₄H₁₀ - %5 SF₆ gaz karışımından geçen müonların USRBIN sonuçları

Enerji (GeV)	Minimum	Maksimum	Toplam
0,5	9,84351729E-08	0,437369376	0,92500735040486171
1,0	1,05647002E-08	0,509090066	0,92500272320013410
2,0	2,52930749E-06	0,593033075	0,92499768885965428
4,0	1,89029629E-06	0,647709012	0,92499601061032022

Çizelge 4.2. %90 R134a - %5 i-C₄H₁₀ - %5 SF₆ gaz karışımında oluşan elektronların USRBIN sonuçları

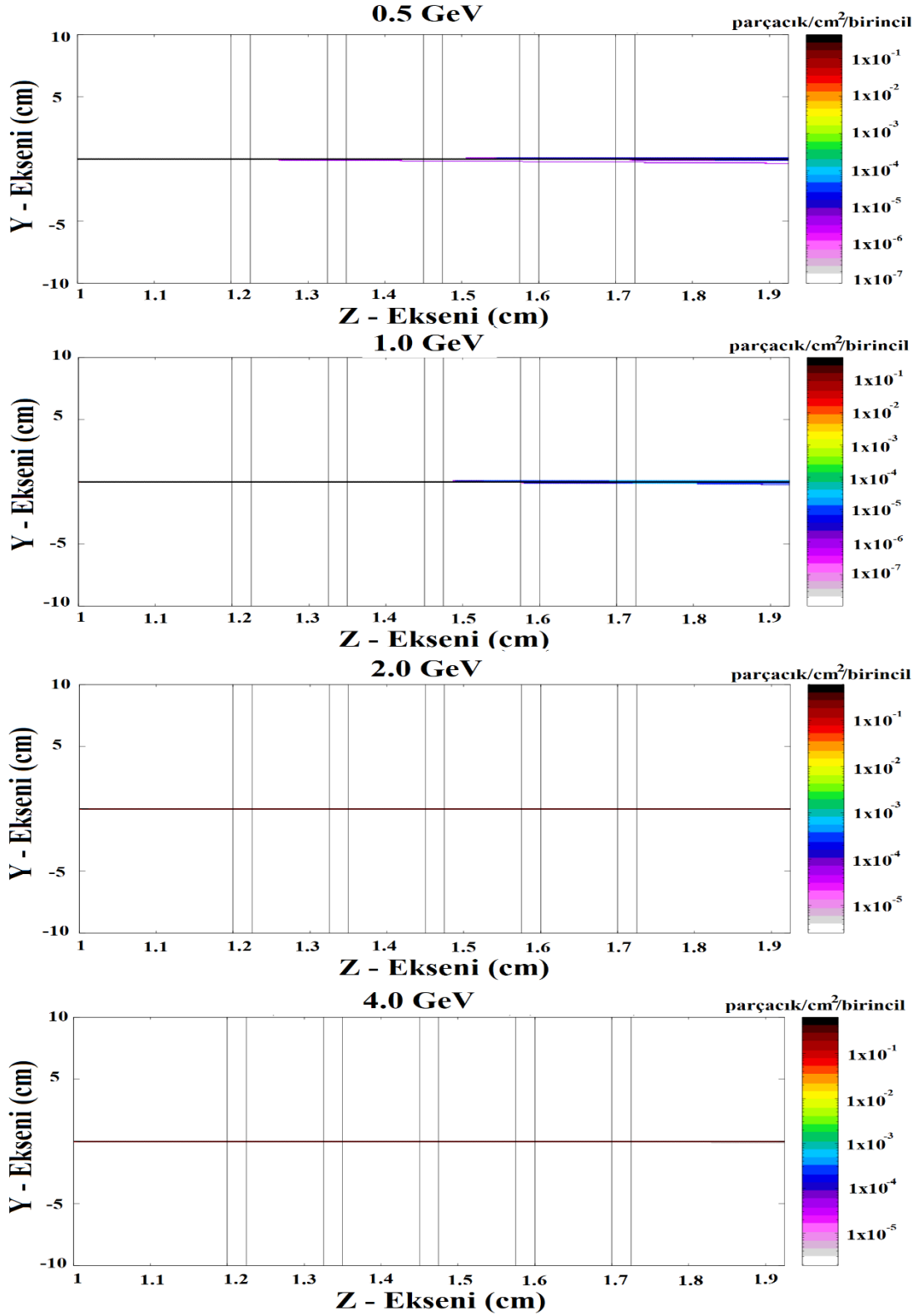
Enerji (GeV)	Minimum	Maksimum	Toplam
0,5	1,23372479E-09	4,81976420E-02	0,14005132394458092
1,0	4,19384250E-10	4,95041236E-02	0,14454439574192574
2,0	6,14587325E-10	5,00315167E-02	0,14695320311786236
4,0	2,27500963E-10	5,05662672E-02	0,14739814959437578

Çizelge 4.3. %90 R134a - %5 i-C₄H₁₀ - %5 SF₆ gaz karışımında oluşan fotonların USRBIN sonuçları

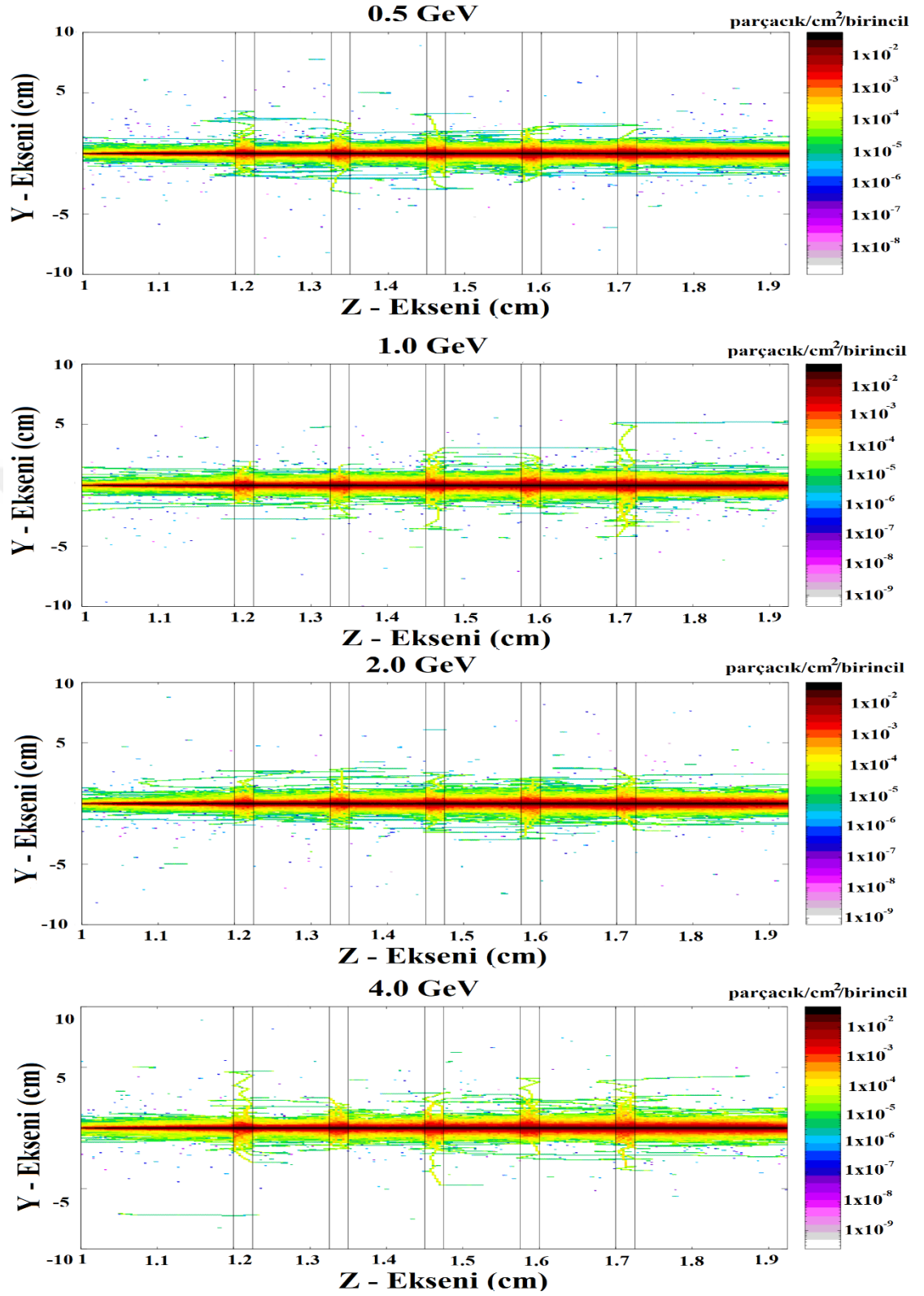
Enerji (GeV)	Minimum	Maksimum	Toplam
0,5	5,25423705E-09	3,47329071E-03	2,6934987091423647E-002
1,0	8,85476747E-10	3,69476015E-03	2,7717607628707806E-002
2,0	1,34403821E-09	3,66319041E-03	2,8659766990869230E-002
4,0	1,04982245E-09	3,83764342E-03	2,9372781362606230E-002

Çizelge 4.4. %90 R134a - %5 i-C₄H₁₀ - %5 SF₆ gaz karışımında depolanan toplam enerjinin USRBIN sonuçları

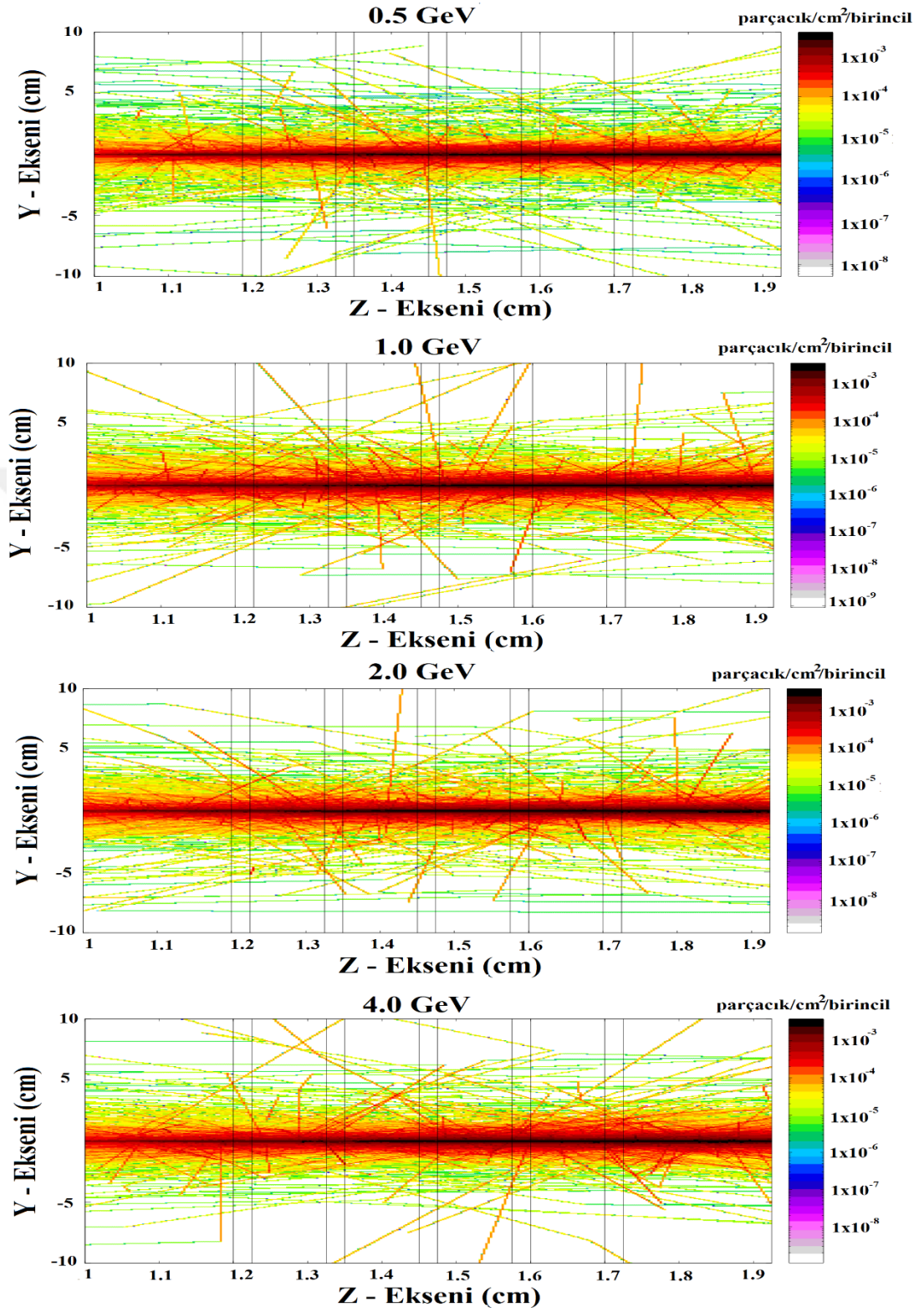
Enerji (GeV)	Minimum	Maksimum	Toplam
0,5	2,06566386E-13	1,38584408E-03	3,0040398244221920E-003
1,0	3,21520053E-14	1,51637662E-03	3,0308675650078383E-003
2,0	1,50687405E-13	1,73679134E-03	3,0787287814836354E-003
4,0	4,77569068E-14	1,90281926E-03	3,1214509519611822E-003



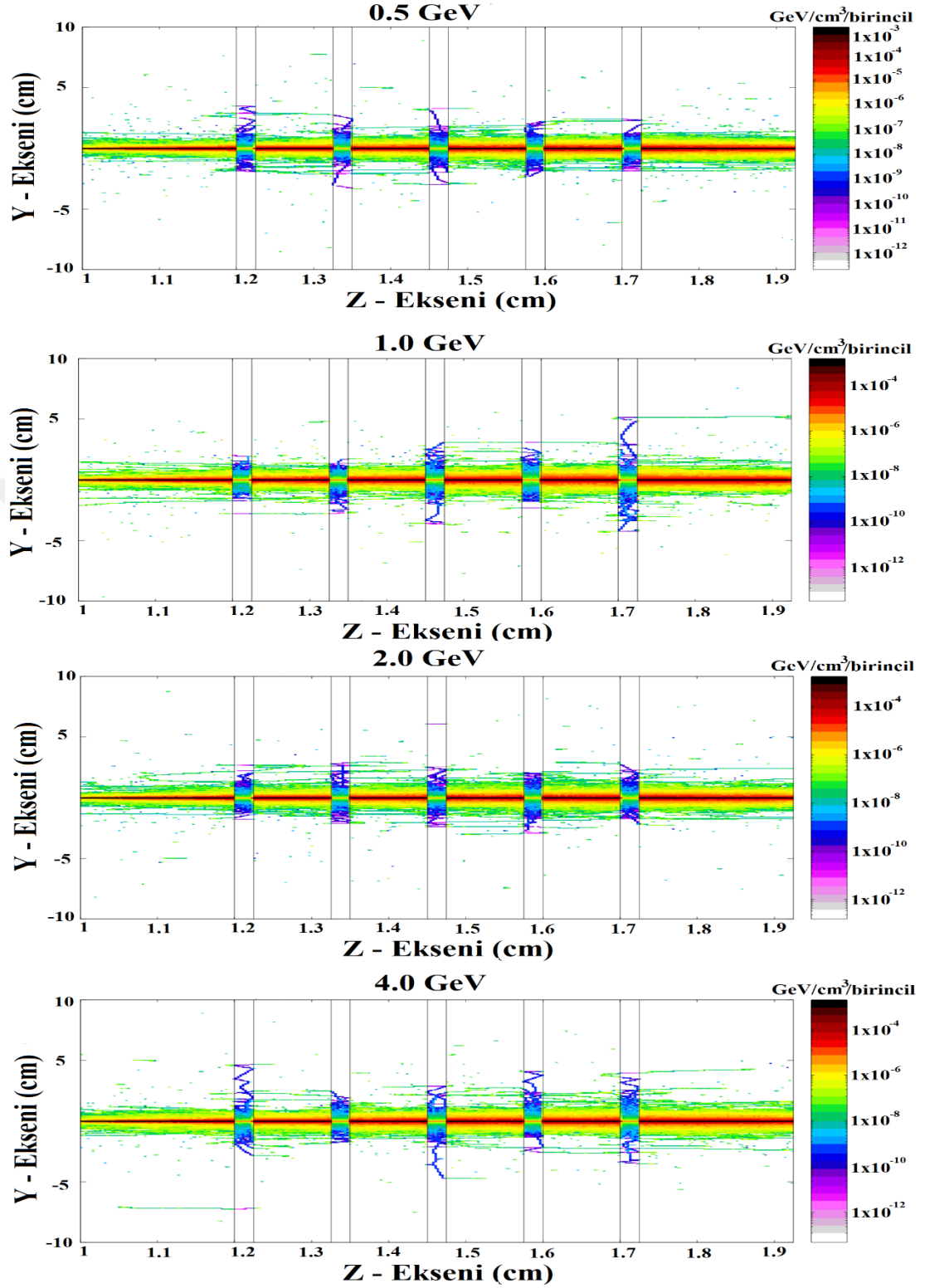
Şekil 4.1. %90 R134a - %5 i-C₄H₁₀ - %5 SF₆ gaz karışımından geçen müonların USBIN grafikleri



Şekil 4.2.%90 R134a - %5 i-C₄H₁₀ - %5 SF₆ gaz karışımında oluşan elektronların USBIN grafikleri



Şekil 4.3. %90 R134a - %5 i-C₄H₁₀ - %5 SF₆ gaz karışımında oluşan fotonların USBIN grafikleri



Şekil 4.4 %90 R134a - %5 i-C₄H₁₀ - %5 SF₆ gaz karışımında depolanan toplam enerjinin USBIN grafikleri

Çizelge 4.5. %97 R134a - %2,5 i-C₄H₁₀ - %0,5 SF₆ gaz karışımından geçen müonların USBIN sonuçları

Enerji (GeV)	Minimum	Maksimum	Toplam
0,5	1,15995135E-07	0,437759101	0,92502856955192503
1,0	1,21200435E-06	0,508252144	0,92499922065811024
2,0	5,65693142E-07	0,594292998	0,92500247976630157
4,0	3,65568872E-06	0,647655427	0,92500070142301016

Çizelge 4.6. %97 R134a - %2,5 i-C₄H₁₀ - %0,5 SF₆ gaz karışımında oluşan elektronların USBIN sonuçları

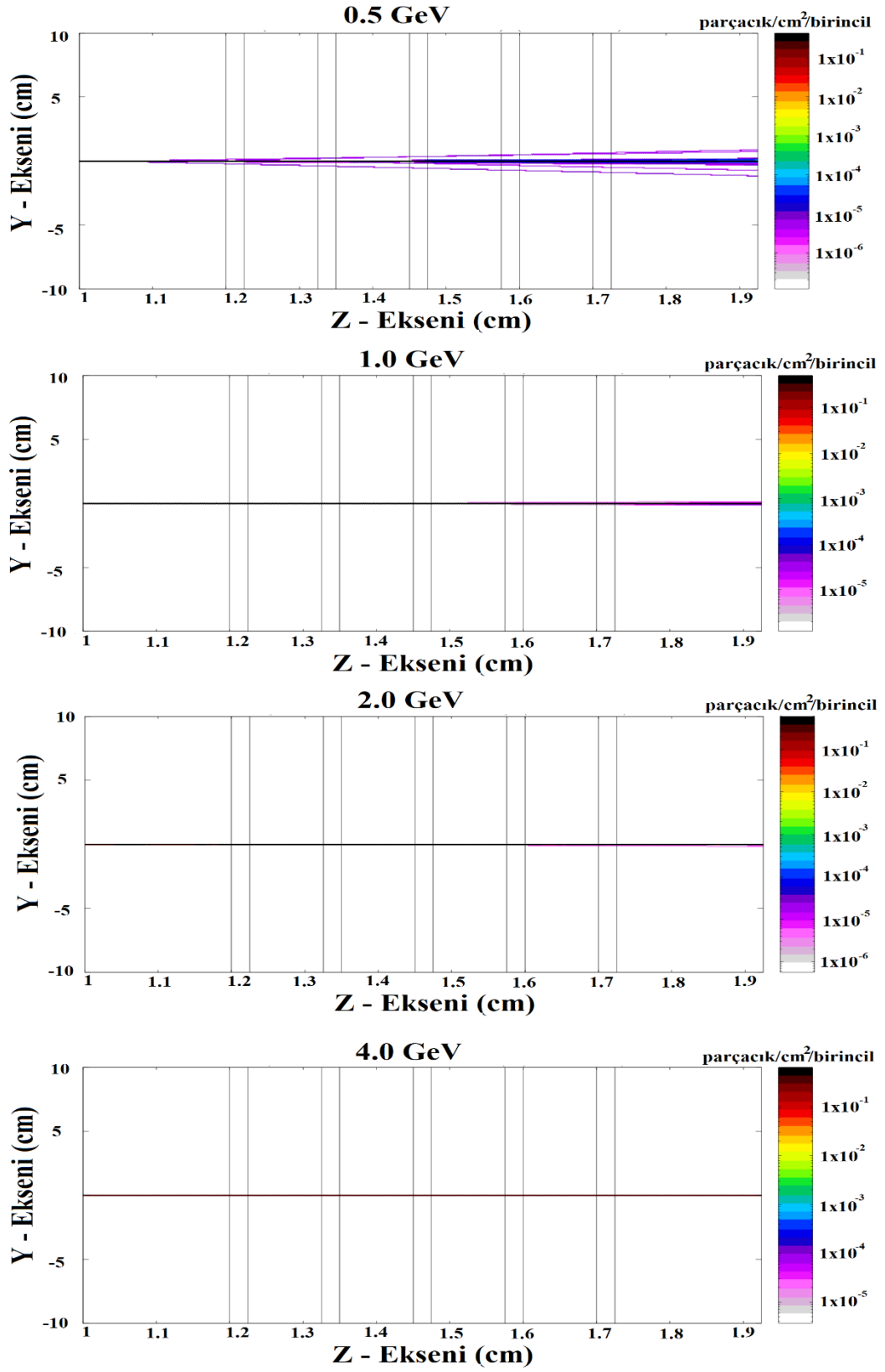
Enerji (GeV)	Minimum	Maksimum	Toplam
0,5	1,54862886E-10	4,86680716E-02	0,139873847260661736
1,0	1,13994036E-09	4,96161841E-02	0,14411194311751713
2,0	2,42311782E-10	4,98128794E-02	0,14605786058671266
4,0	1,19874818E-10	5,09521365E-02	0,14688840684786092

Çizelge 4.7. %97 R134a - %2,5 i-C₄H₁₀ - %0,5 SF₆ gaz karışımında oluşan fotonların USRBIN sonuçları

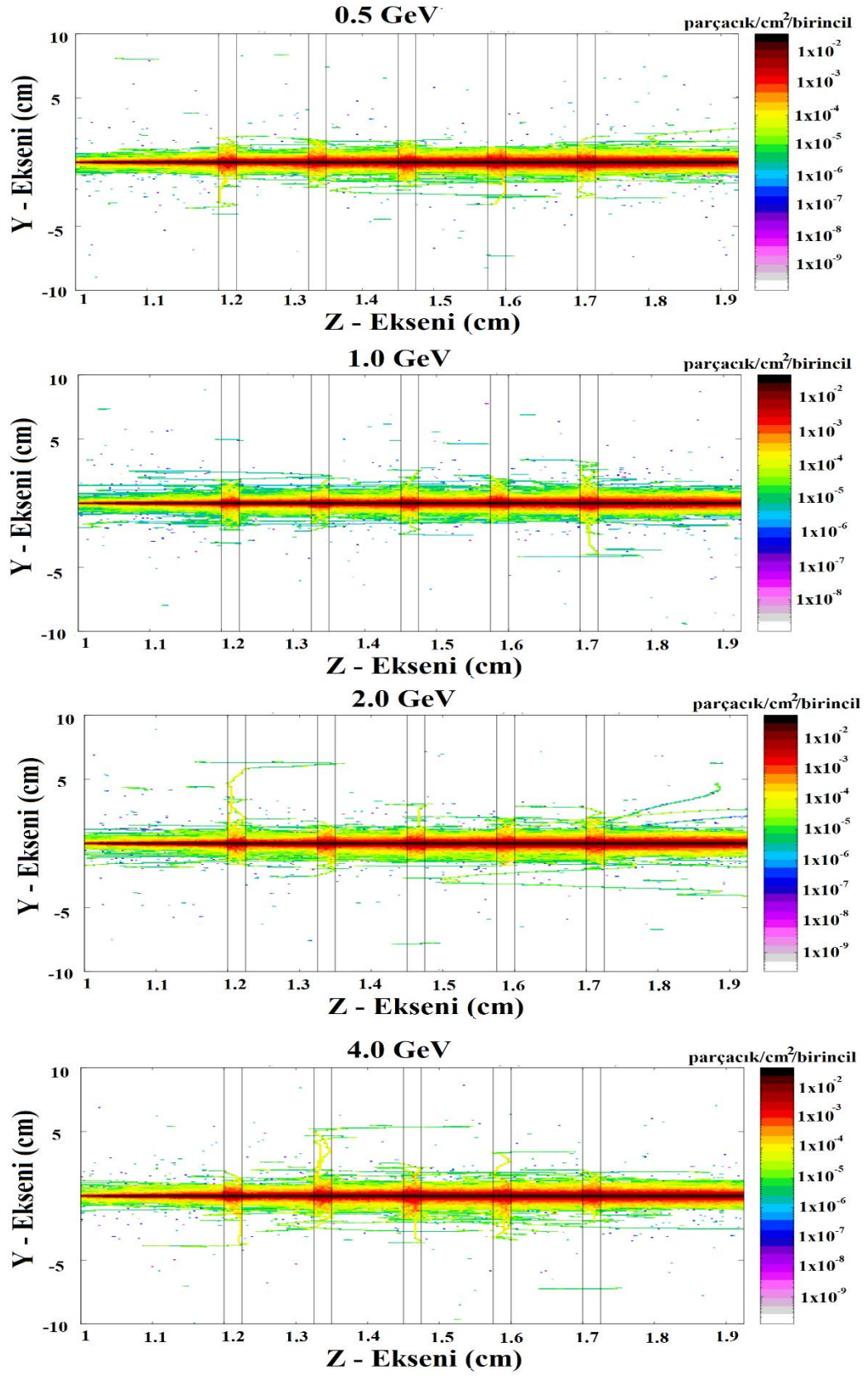
Enerji (GeV)	Minimum	Maksimum	Toplam
0,5	1,80199624E-08	3,24847642E-03	2,6775010889642882E-002
1,0	1,799975090E-09	3,62300896E-03	2,9568608551649056E-002
2,0	1,67770325E-10	3,57465819E-03	2,7567439828714433E-002
4,0	2,16936122E-11	3,85528803E-03	2,8458553601427329E-002

Çizelge 4.8. %97 R134a - %2,5 i-C₄H₁₀ - %0,5 SF₆ gaz karışımında depolanan toplam enerjinin USRBIN sonuçları

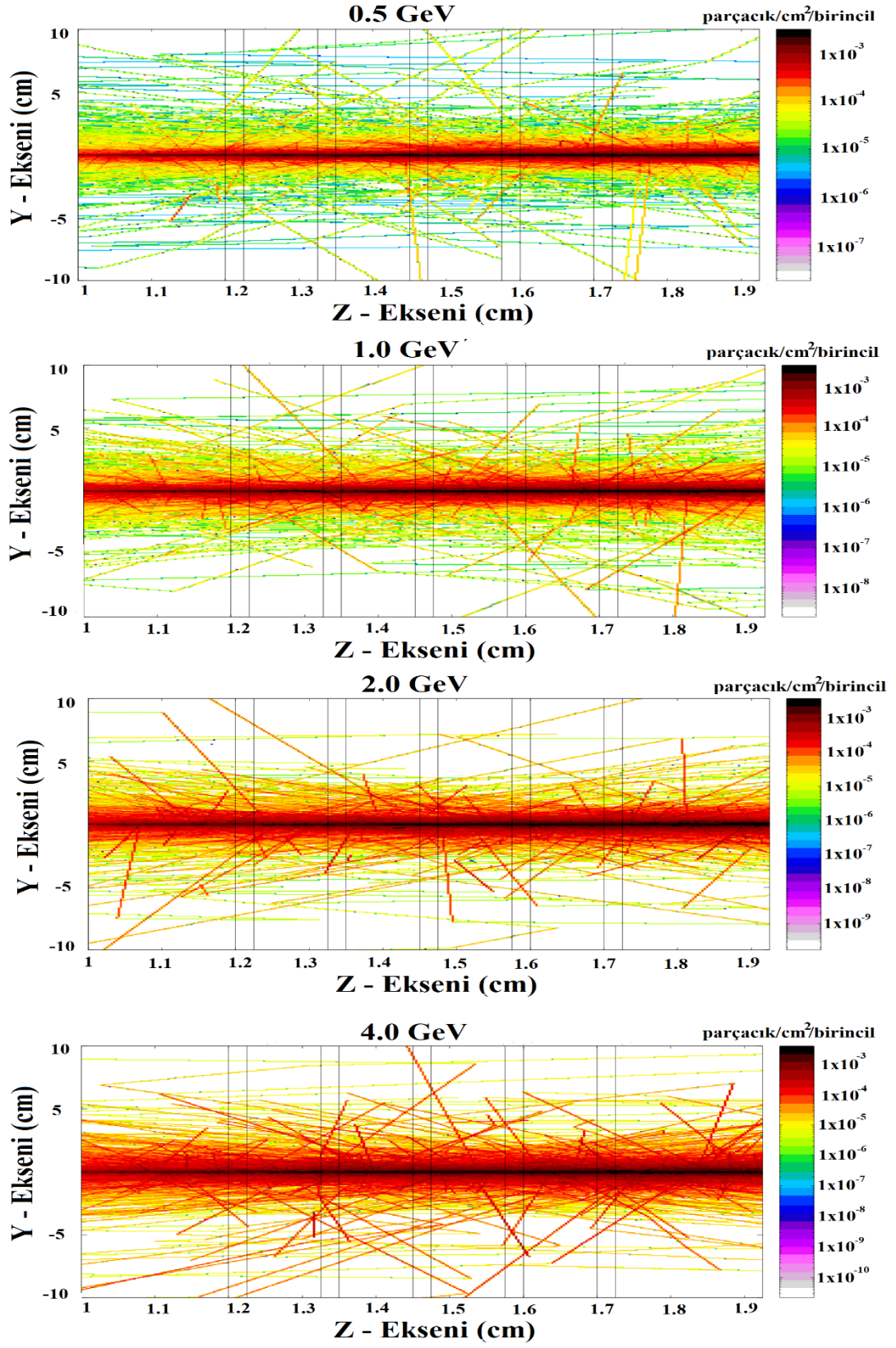
Enerji (GeV)	Minimum	Maksimum	Toplam
0,5	2,96026116E-13	1,138941268E-03	3,0041114646133737E-003
1,0	9,35202111E-13	1,50949054E-03	3,0295410053520449E-003
2,0	8,96218863E-14	1,74728921E-03	3,0780473338532844E-003
4,0	1,75538376E-13	1,89866498E-03	3,1201259878468326E-003



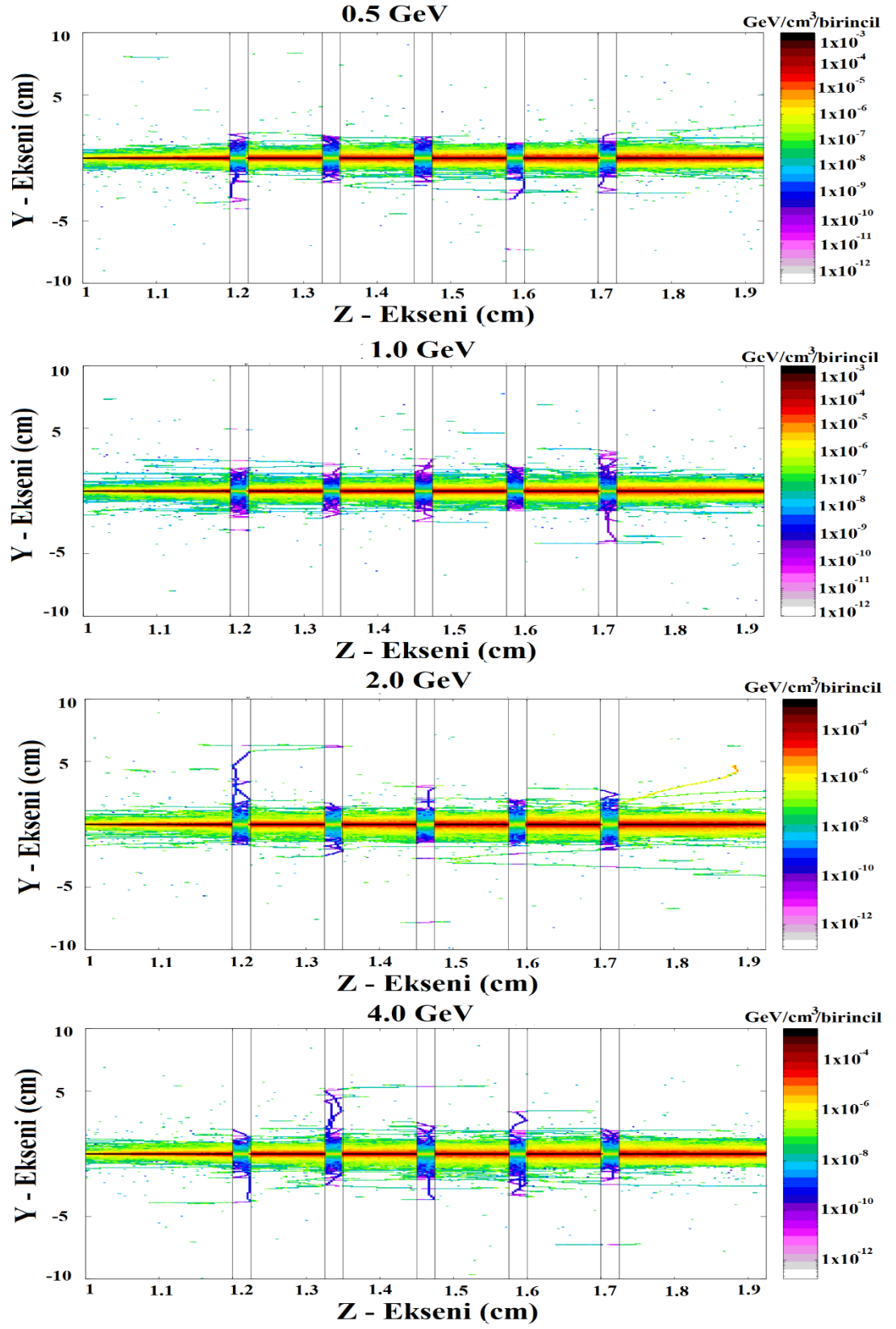
Şekil 4.5. %97 R134a - %2,5 i-C₄H₁₀ - %0,5 SF₆ gaz karışımından geçen müonların USBIN grafikleri



Şekil 4.6. %97 R134a - %2,5 i-C₄H₁₀ - %0,5 SF₆ gaz karışımında oluşan elektronların USBIN grafikleri



Şekil 4.7. %97 R134a - %2,5 i-C₄H₁₀ - %0,5 SF₆ gaz karışımında oluşan fotonların USBIN grafikleri



Şekil 4.8. %97 R134a - %2,5 i-C₄H₁₀ - %0,5 SF₆ gaz karışımında depolanan toplam enerjinin USBIN grafikleri

Çizelge 4.9. %50 CO₂ - %45 N₂ - %5 Ar gaz karışımından geçen müonların USRBIN sonuçları

Enerji (GeV)	Minimum	Maksimum	Toplam
0,5	2,43403019E-06	0,437624961	0,92502727006213981
1,0	1,12642681E-06	0,508543313	0,92500611245931053
2,0	2,40725853E-07	0,594809234	0,92499895972899138
4,0	2,08683809E-06	0,648613751	0,92500065212032301

Çizelge 4.10. %50 CO₂ - %45 N₂ - %5 Ar gaz karışımında oluşan elektronların USRBIN sonuçları

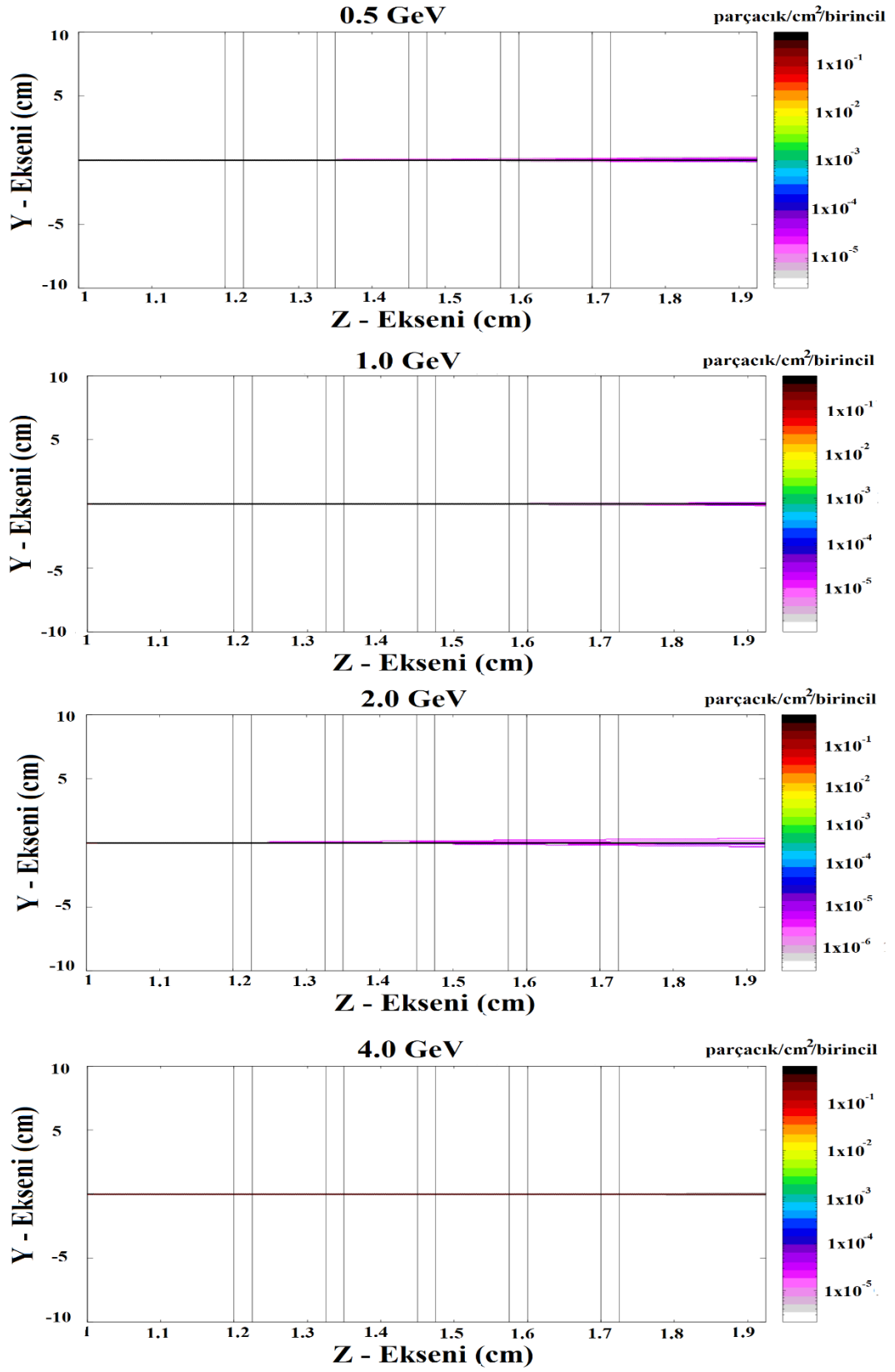
Enerji (GeV)	Minimum	Maksimum	Toplam
0,5	2,72527972E-10	4,84447256E-02	0,14012669669150518
1,0	1,80192139E-10	4,95421514E-02	0,14453087677369297
2,0	2,18791429E-10	5,01847975E-02	0,14654122600503489
4,0	2,94501451E-10	5,03140725E-02	0,14698913493597190

Çizelge 4.11. %50 CO₂ - %45 N₂ - %5 Ar gaz karışımında oluşan fotonların USRBIN sonuçları

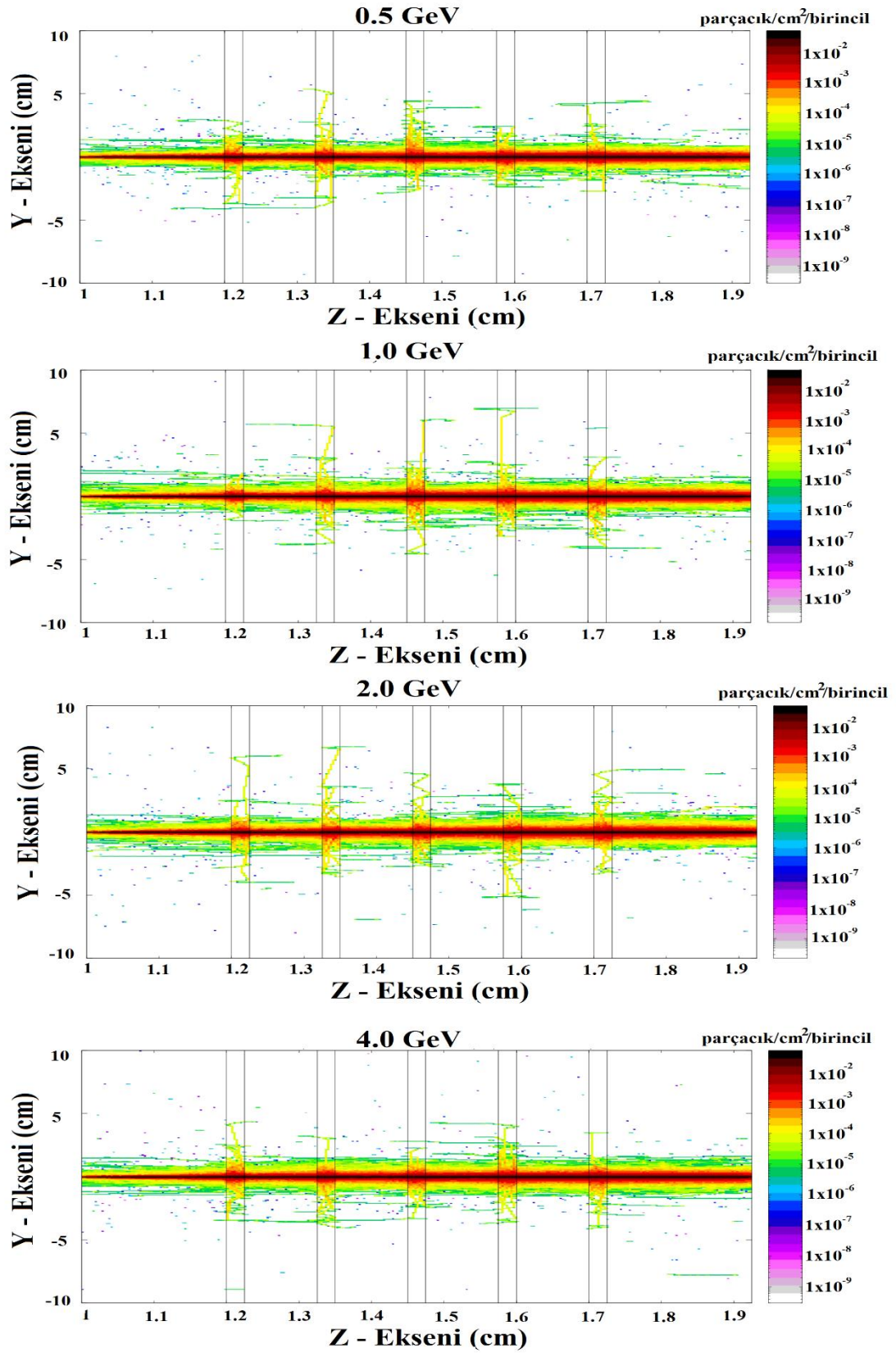
Enerji (GeV)	Minimum	Maksimum	Toplam
0,5	4,84021534E-09	3,76361096E-03	2,7525684891010937E-002
1,0	5,60951241E-09	3,97330616E-03	2,7766673415072884E-002
2,0	5,84326187E-09	3,82962660E-03	2,9390230235483865E-002
4,0	2,32332154E-10	3,67758353E-03	3,0283472419340148E-002

Çizelge 4.12. %50 CO₂ - %45 N₂ - %5 Ar gaz karışımında depolanan toplam enerjinin USRBIN sonuçları

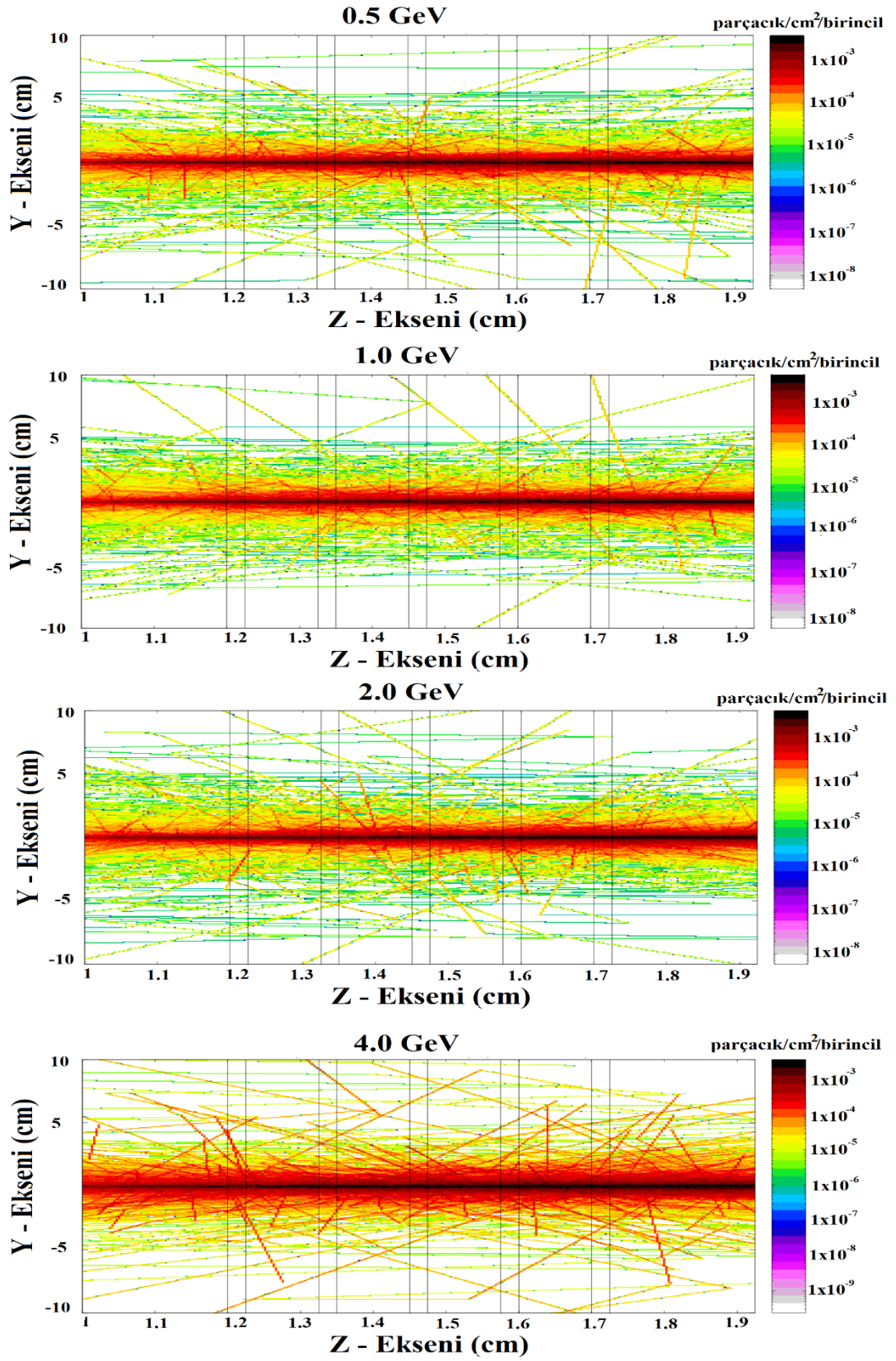
Enerji (GeV)	Minimum	Maksimum	Toplam
0,5	4,59122107E-13	1,38288853E-03	3,0043295607659307E-003
1,0	9,94607635E-14	1,50749914E-03	3,0292723838224928E-003
2,0	1,46840033E-15	1,74120523E-03	3,0769493011947448E-003
4,0	7,04261605E-15	1,90432032E-03	3,1188531800227072E-003



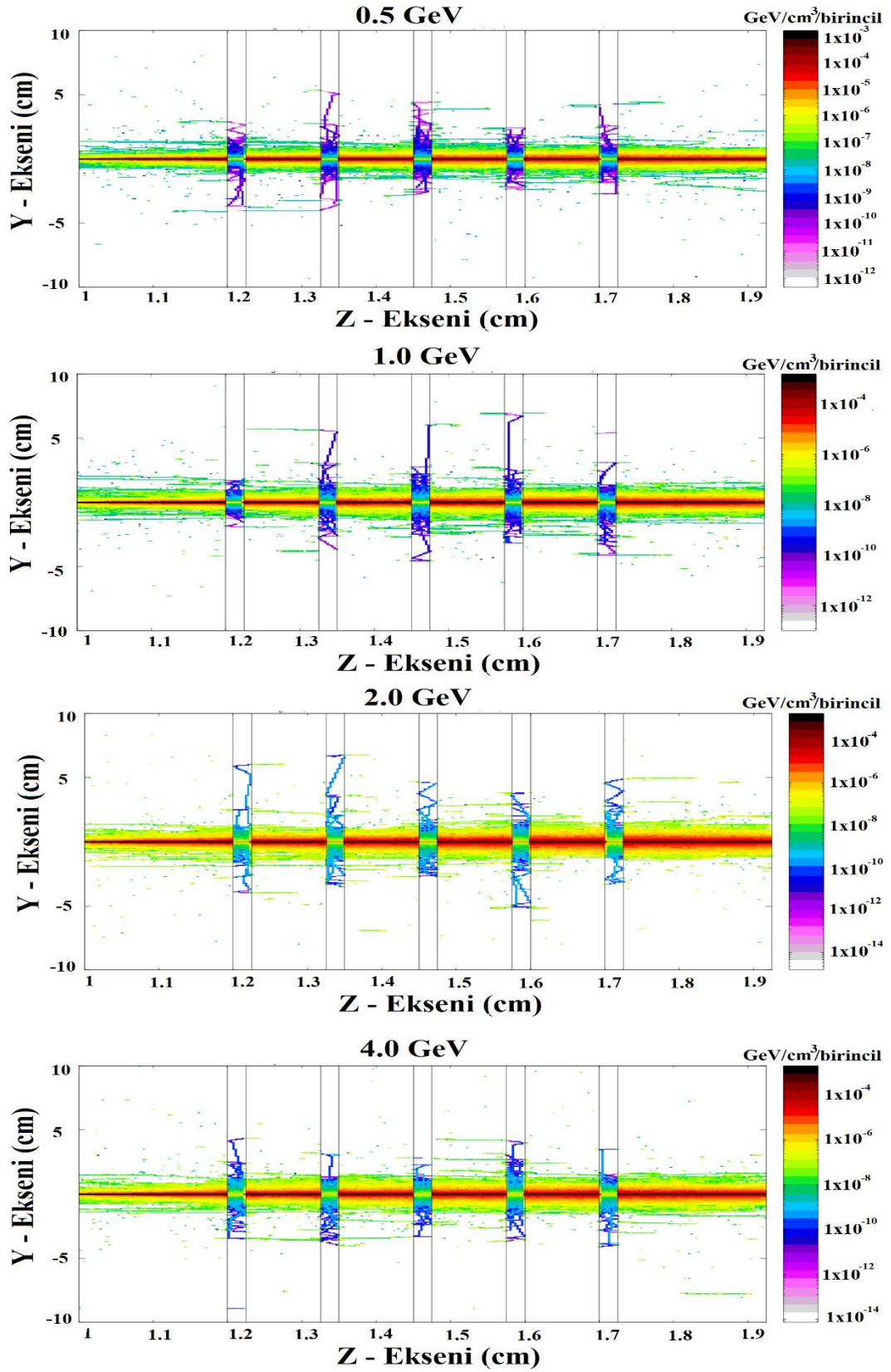
Şekil 4.9. %50 CO₂ - %45 N₂ - %5 Ar gaz karışımından geçen müonların USBIN grafikleri



Şekil 4.10. %50 CO₂ - %45 N₂ - %5 Ar gaz karışımında oluşan elektronların USBIN grafikleri



Şekil 4.11. %50 CO₂ - %45 N₂ - %5 Ar gaz karışımında oluşan fotonların USRBIN grafikleri



Şekil 4.12. %50 CO₂ - %45 N₂ - %5 Ar gaz karışımında depolanan toplam enerjinin USBIN grafikleri

Çizelge 4.13. %60 CO₂ - %35 N₂ - %5 Ar karışımından geçen müonların USRBIN sonuçları

Enerji (GeV)	Minimum	Maksimum	Toplam
0,5	4,19262420E-08	0,438581824	0,925024203371109492
1,0	1,79031053E-06	0,508968413	0,92500774681783782
2,0	5,02271575E-08	0,595136881	0,92499414906733424
4,0	7,39762811E-07	0,647495985	0,92500069799614826

Çizelge 4.14. %60 CO₂ - %35 N₂ - %5 Ar gaz karışımında oluşan elektronların USRBIN sonuçları

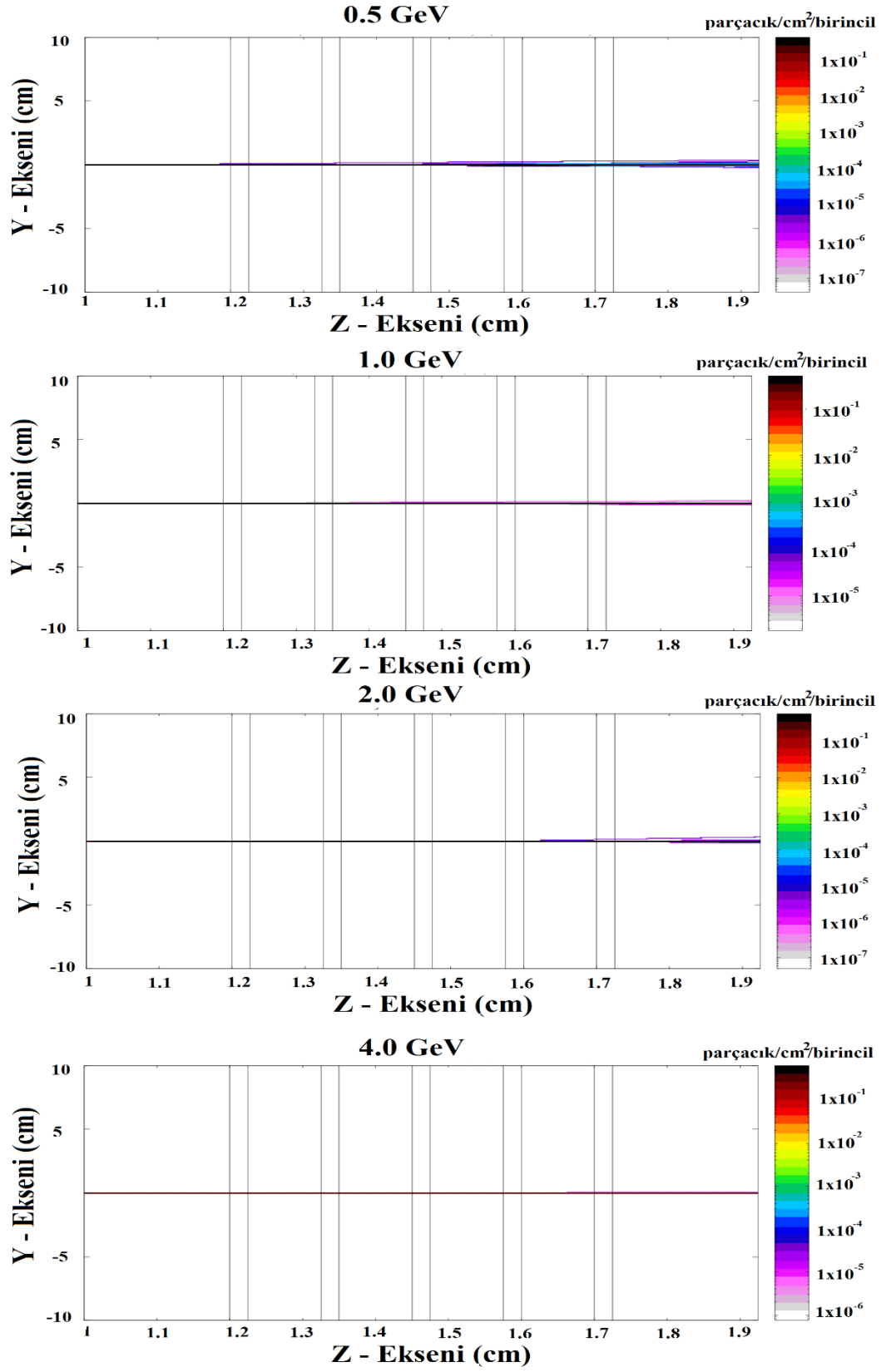
Enerji (GeV)	Minimum	Maksimum	Toplam
0,5	4,47181153E-10	4,78577390E-02	0,13982672132905846
1,0	3,62260721E-10	4,94631752E-02	0,14319756173846665
2,0	4,52884036E-10	5,07165827E-02	0,14705820898990096
4,0	9,81993931E-11	4,99736555E-02	0,14711837823068952

Çizelge 4.15. %60 CO₂ - %35 N₂ - %5 gaz karışımında oluşan fotonların USRBIN sonuçları

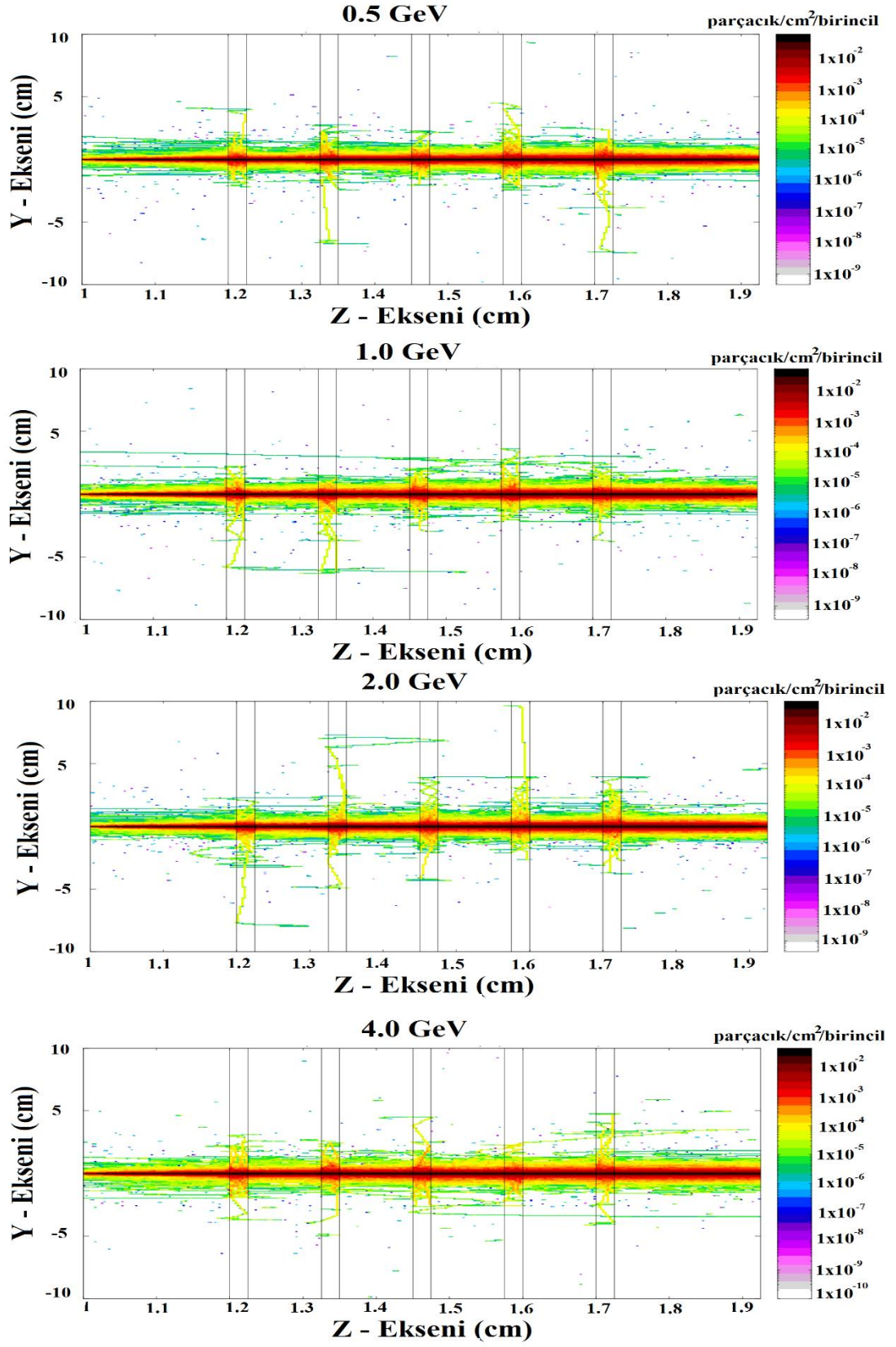
Enerji (GeV)	Minimum	Maksimum	Toplam
0,5	1,66100431E-08	3,40581220E-03	2,7228537631808675E-002
1,0	1,76412343E-08	3,70513811E-03	2,8513033997201689E-002
2,0	3,42802697E-09	4,59480379E-03	2,8167750610005222E-002
4,0	5,42551692E-09	4,27099224E-03	2,8993574792043335E-002

Çizelge 4.16. %60 CO₂ - %35 N₂ - %5 gaz karışımında depolanan toplam enerjinin USRBIN sonuçları

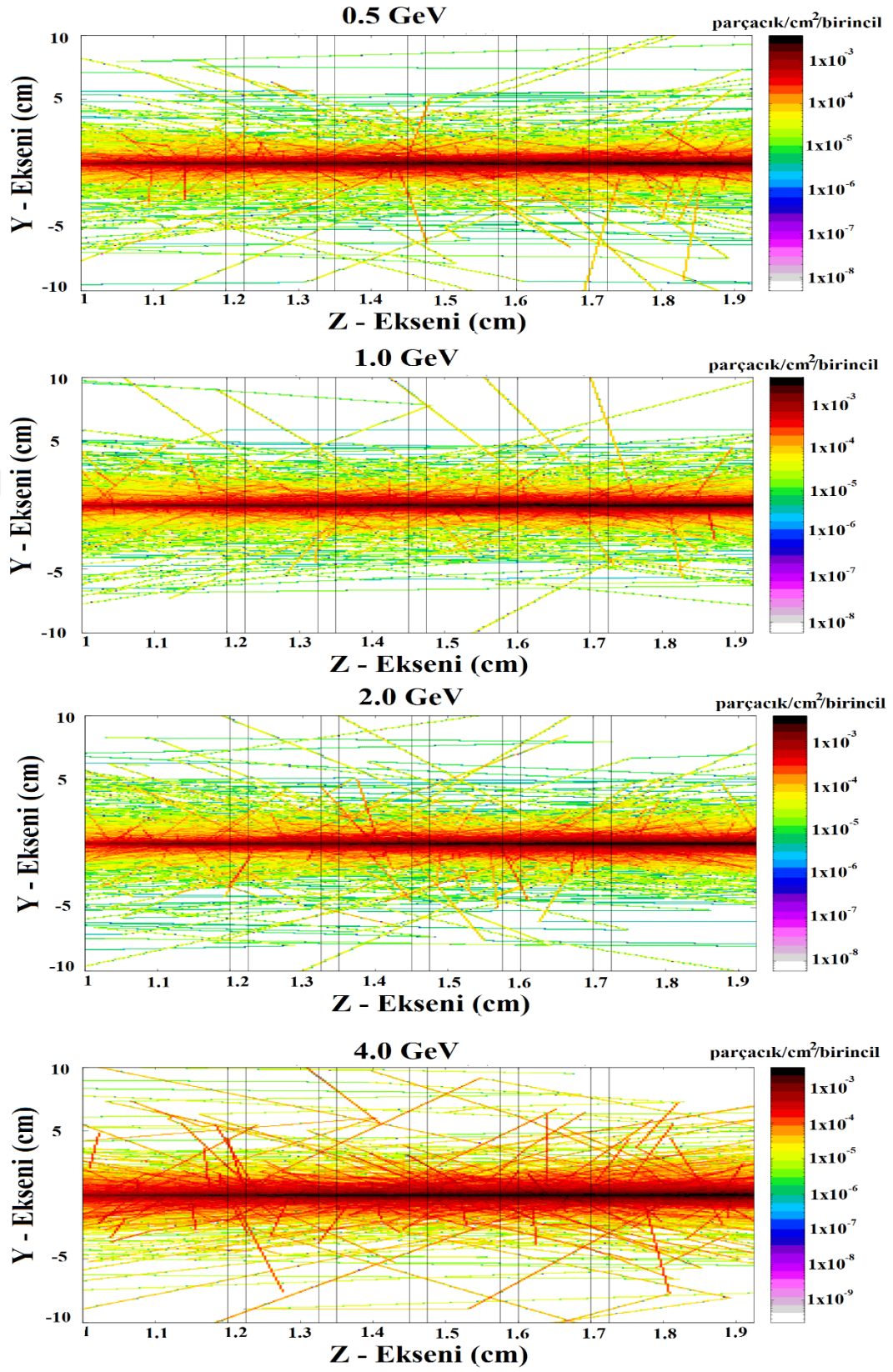
Enerji (GeV)	Minimum	Maksimum	Toplam
0,5	2,52284630E-13	1,38200249E-03	3,0023344384989803E-003
1,0	6,58528137E-14	1,51241140E-03	3,0272167733252572E-003
2,0	1,71208737E-13	1,74226810E-03	3,0788263520463545E-003
4,0	1,33030712E-13	1,90813548E-03	3,1210768691727793E-003



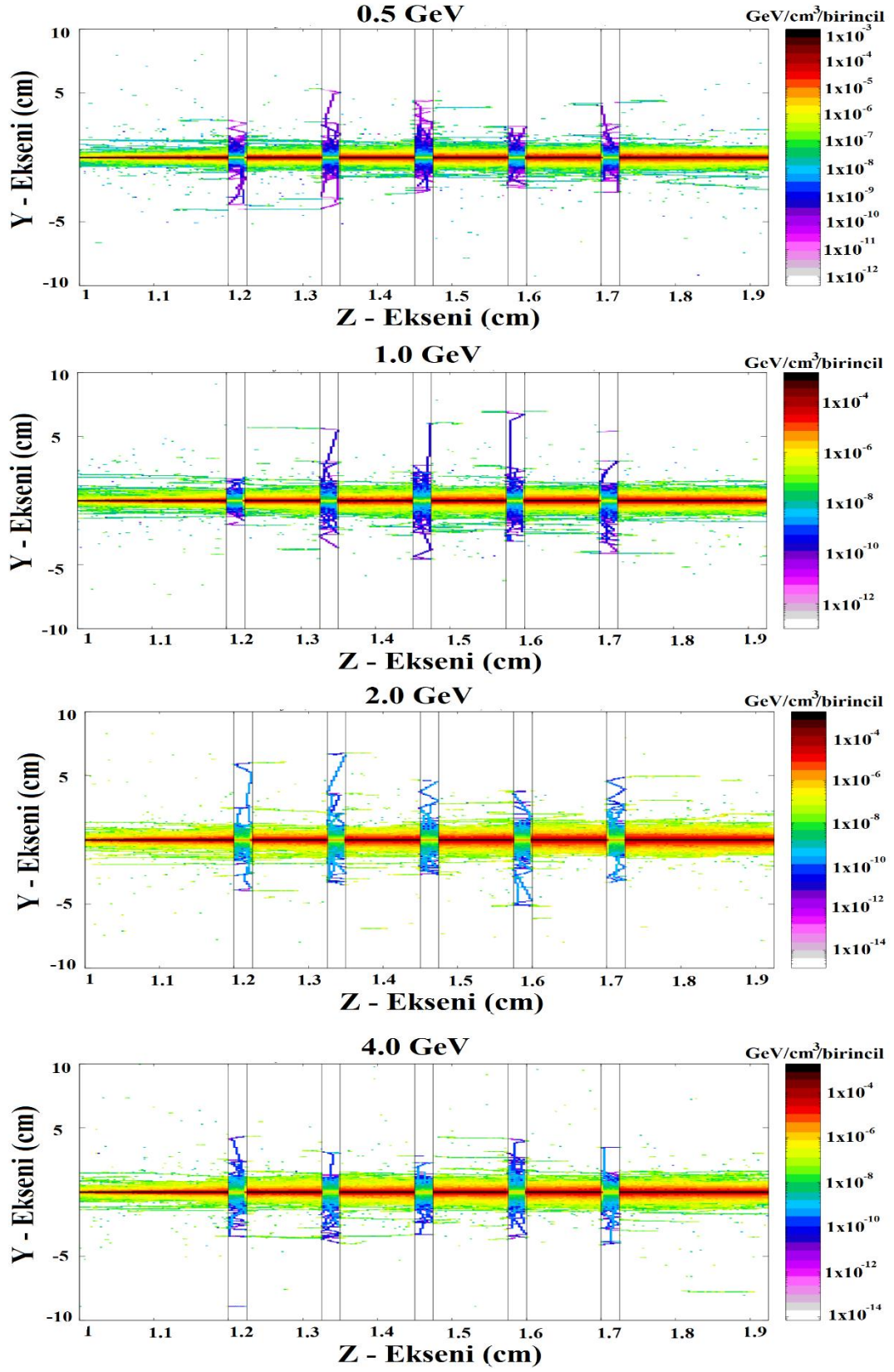
Şekil 4.13. %60 CO₂ - %35 N₂ - %5 karışımından geçen müonların USRBIN grafikleri



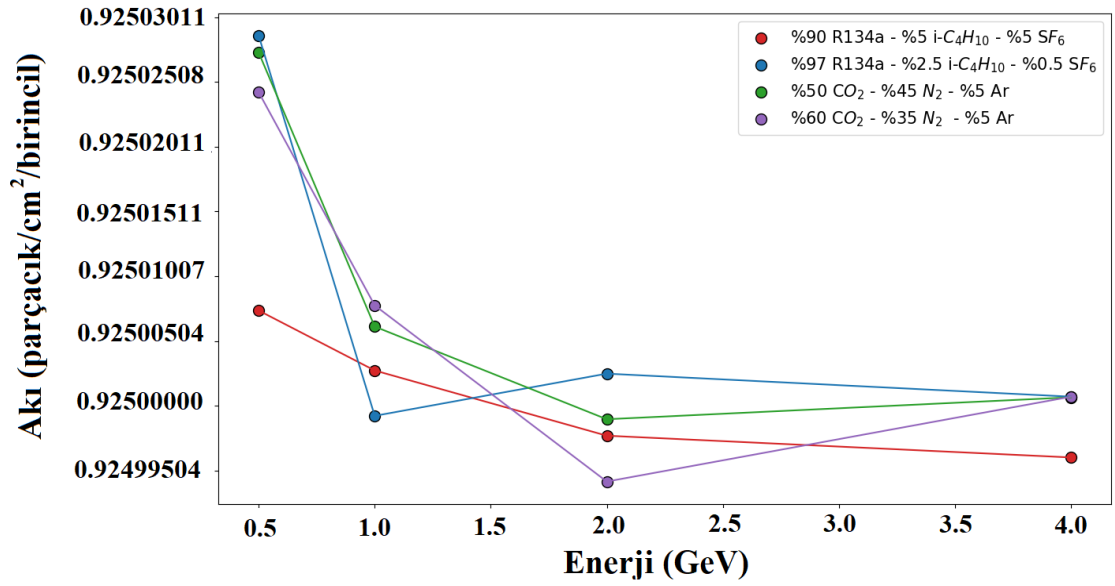
Şekil 4.14. %60 CO₂ - %35 N₂ - %5 gaz karışımında oluşan elektronların USBIN grafikleri



Şekil 4.15. %60 CO₂ - %35 N₂ - %5 gaz karışımında oluşan fotonların USRBIN grafikleri



Şekil 4.16. %60 CO₂ - %35 N₂ - %5 gaz karışımında depolanan toplam enerjinin USBIN grafikleri

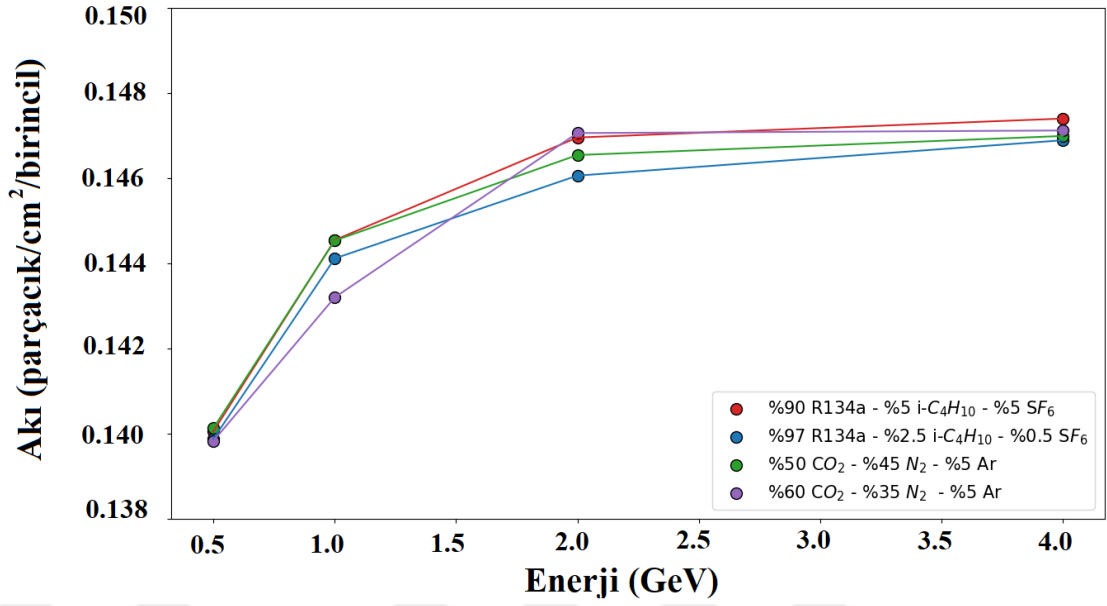


Şekil 4.17. Gaz karışımlarına göre müonların toplam akılarının USRBIN sonuçları grafiği

Çizelge 4.1 – 4.16’den elde edilen sonuçlardan yararlanarak çizilmiş olan, Şekil 4.17. grafiği bize gösteriyor ki, toplam müon akısı; müonların enerjisi arttıkça gözle görülür bir azalış göstermektedir.

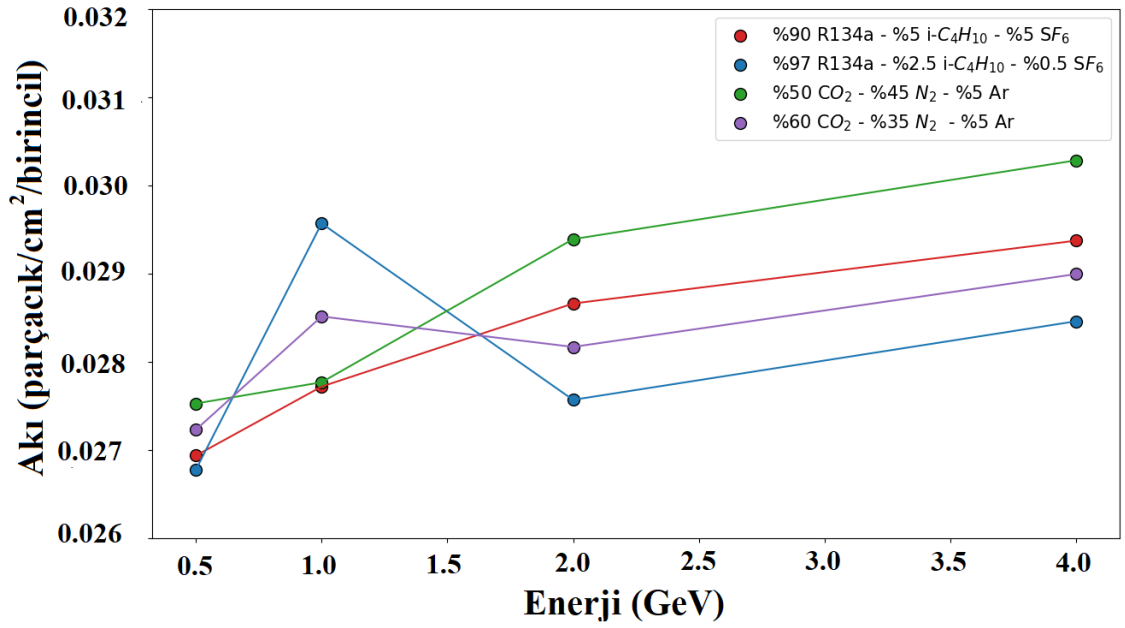
Şekil 4.17’den elde edilen bir diğer dikkat çekici sonuç ise, %97 R134a - %2,5 i-C₄H₁₀ - %0,5 SF₆ , %50 CO₂ - %45 N₂ - %5 Ar, %60 CO₂ - %35 N₂ - %5 Ar gaz karışımları içerisinde geçen 4,0 GeV enerjili müonların akısının birbirine çok yakın olmasıdır.

%90 R134a - %5 i-C₄H₁₀ - %5 SF₆ gaz karışımında 4,0 GeV enerjili müonların akısının, diğerlerinden daha farklı olması; bünyesinde barındıran SF₆ oranının fazlalığından kaynaklı olabilir. Oysa farklı gaz karışımlarından geçen 0,5 GeV – 1,0 GeV ve 2,0 GeV enerjiye sahip müonların meydana getirdiği müon akısı gözle görülür bir fark taşımaktadır. Bunun sebebinin, müonların enerjisi düşük seviyelerdeyken; gazların farklı kimyasal karakteristiklerinin daha belirgin hale gelmesinden dolayı olduğunu söyleyebiliriz. Enerji arttıkça, bu karakteristik farklar önemini yitirmekte olup; birbirine daha yakın sonuçlar elde edilmektedir.



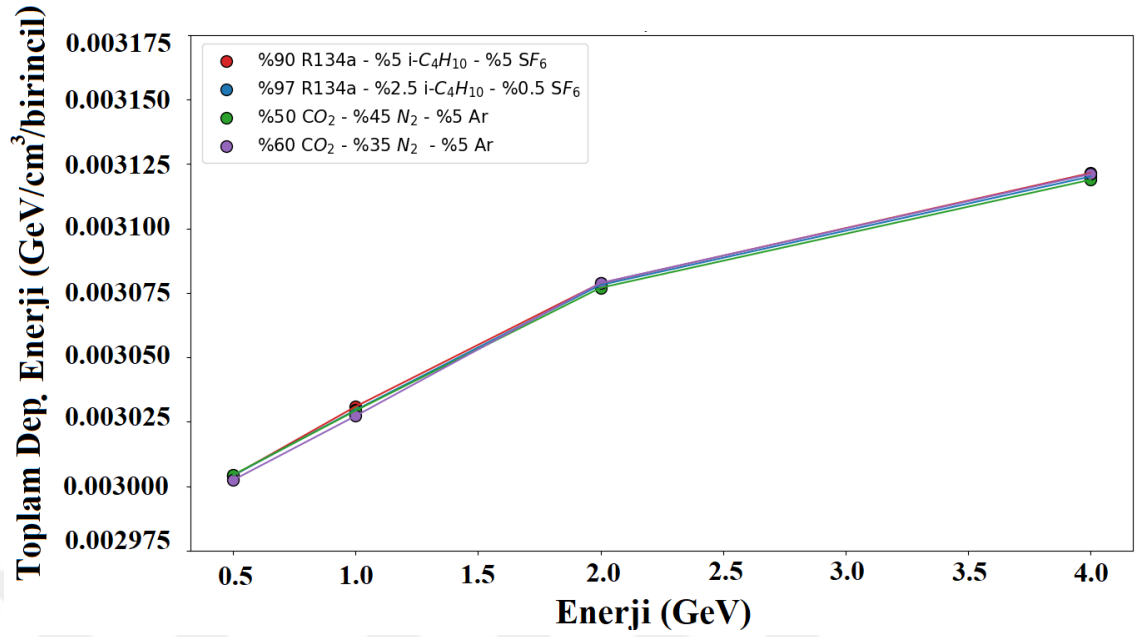
Şekil 4.18. Gaz karışımlarına göre oluşan elektronların toplam akılarının USBIN sonuçları grafiği

Şekil 4.18’de sırasıyla %90 R134a - %5 i-C₄H₁₀ - %5 SF₆, %97 R134a - %2,5 i-C₄H₁₀ - %0,5 SF₆, %50 CO₂ - %45 N₂ - %5 Ar, %60 CO₂ - %35 N₂ - %5 Ar gaz karışımları içerisinde çeşitli enerjilerde geçen müonların meydana getirdiği elektron akılarının grafiği görülmektedir. Müonların enerjisi arttıkça, oluşan elektron akısının arttığı görülür. Bu durum mantığa uygundur. Gaz karışımları içerisinde geçen müonların enerjisi arttıkça, meydana gelecek iyonlaşma miktarı da artmalıdır. Bu durum, gaz karışımlarının, iyonlaşma tesir kesiti ile de ilgilidir. Üzerinde durulması gereken bir başka sonuç ise, oluşan elektronlar akılarının; belli bir enerji seviyesinden sonra sabit bir değere doğru gitmesidir. Oluşan elektron akısı değerlerinde en büyük sıçrama, 0,5 GeV ve 1,0 GeV aralığında görülmektedir. 1,0 GeV ve 2,0 GeV enerji aralığında ise bu artış miktarı azalır ve 2,0 GeV ile 4,0 GeV aralığında ise gittikçe sabit bir değere yaklaştığı görülür.



Şekil 4.19. Gaz karışımlarına göre oluşan fotonların toplam akılarının USRBIN sonuçları grafiği

Şekil 4.19’da görülen sonuç ise, ilgili gaz karışımlarından geçen farklı enerjilerdeki müonların meydana getirdiği foton akılarıdır. 0,5 GeV enerjili müonların meydana getirdiği fotonların akıları birbirine yakın bir değere sahip olduğunu görüyoruz. 1,0 GeV enerjili müonun meydana getirdiği foton akıları ise, bir kısmının birbirinden epey farklı değerlerde meydana geldiğini söylemek gerekirken; %90 R134a - %5 i-C₄H₁₀ - %5 SF₆ ve %50 CO₂ - %45 N₂ - %5 Ar gaz karışımı içerisinde meydana gelen foton akıları değerlerinin neredeyse birbirine eşit olduğunu görüyoruz. Bu durum, yine kullanılan gaz karışımlarının kimyasal karakteristiği ve etkileşimlerin tesir kesitleri ile ilgili olduğunu söyleyebiliriz. 2,0 GeV ve 4,0 GeV enerjili müonların, gaz karışımı içerisinde meydana getirdiği foton akıları ise birbirinden fark barındırarak; sabit bir değere doğru gittiğinden söz edebiliriz.



Şekil 4.20. Gaz karışımlarına göre ortamda depolanan toplam enerjinin USBIN sonuçları

Şekil 4.20’de detektörün gaz hacmi içerisinde geçen müonların ve bu müonların meydana getirdiği etkileşimlerden açığa çıkan parçacıkların farklı gaz karışımlarında depolanan toplam enerji değerleri görülmektedir. Detektör hacmi içerisine giren müonların enerjisi arttıkça, depolanan toplam enerji miktarında da bir artış meydana geldiği net bir şekilde görülür. Fakat dikkat edilmesi gereken nokta, bu artış miktarları arasındaki farkların (grafikğin eğimi azalmasından dolayı) müonların enerjisi arttıkça azaldığıdır. Gaz karışımlarına, farklı enerjilerle gelen müonların; detektör hacmi içerisinde depolanan toplam enerji değerlerinin birbirine çok yakın olduğunu söyleyebiliriz. Bunun sebebi, farklı gaz karışımlarının yoğunluğunun birbirine çok yakın olması ve gelen parçacıkların enerjilerinin yüksek olmasıdır.

Çizelge 4.17’de farklı gaz karışımları barındıran detektör hacimlerine, farklı enerjilerle gelen müonların meydana getirdiği pozitron akıları görülmektedir. Benzetim sonuçlarının kimilerinde pozitronların oluşmadığı görülmüştür. Bu durum, gaz karışımının kimyasal özelliklerine, gönderilen parçacığın fiziksel özelliklerine ve benzetim gerçekleştirilmeden önceki ön parametre tanımlamalarından kaynaklı olabilir.

Çizelge 4.17. %90 R134a - %5 i-C₄H₁₀ - %5 SF₆ gaz karışımında oluşan pozitronların USBIN sonuçları

Enerji (GeV)	Minimum	Maksimum	Toplam
0,5	-	-	-
1,0	3,03139331E-07	2,43009999E-05	1,6397396136778328E-006
2,0	-	-	-
4,0	6,25263056E-07	3,80976053E-06	2,3559323011268548E-007

Çizelge 4.18. %97 R134a - %2,5 i-C₄H₁₀ - %0,5 SF₆ gaz karışımında oluşan pozitronların USBIN sonuçları

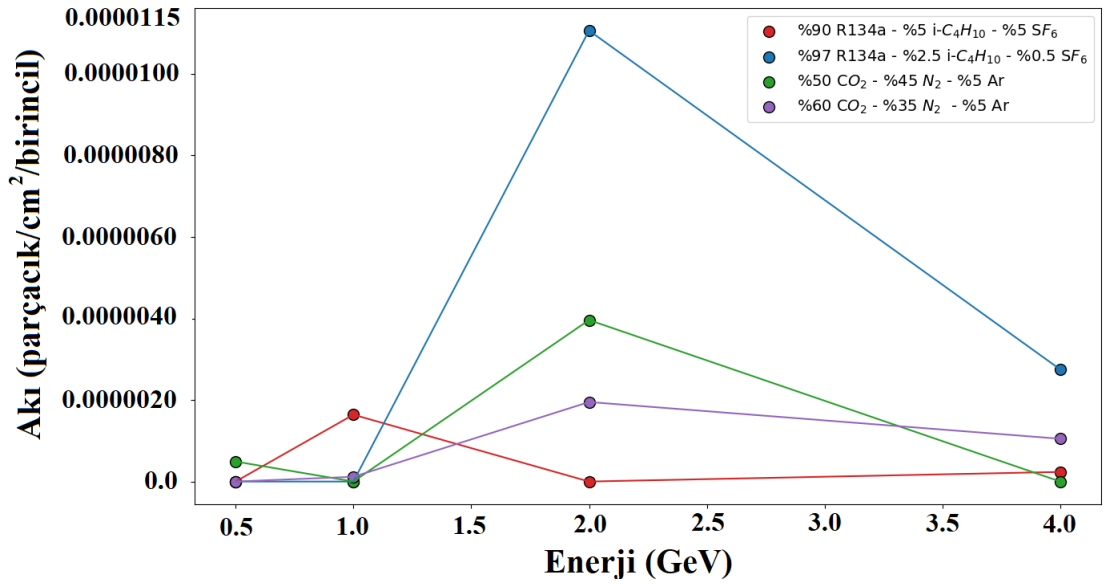
Enerji (GeV)	Minimum	Maksimum	Toplam
0,5	-	-	-
1,0	-	-	-
2,0	1,17335574E-07	1,03435501E-04	1,1062425011051941E-005
4,0	1,71728047E-07	3,96199130E-06	2,7484950185803035E-006

Çizelge 4.19. %50 CO₂ - %45 N₂ - %5 Ar gaz karışımında oluşan pozitronların USBIN sonuçları

Enerji (GeV)	Minimum	Maksimum	Toplam
0,5	8,55510010E-08	2,10906946E-05	4,9080971349246422E-007
1,0	-	-	-
2,0	4,85758733E-07	5,00868264E-05	3,9613059608704306E-006
4,0	-	-	-

Çizelge 4.20. %60 CO₂ - %35 N₂ - %5 Ar gaz karışımında oluşan pozitronların USBIN sonuçları

Enerji (GeV)	Minimum	Maksimum	Toplam
0,5	-	-	-
1,0	2,65423523E-06	9,34812579E-06	1,1653811820252988E-007
2,0	8,30845465E-07	2,42508413E-05	1,9504653884447008E-006
4,0	5,27020916E-07	4,59632565E-06	1,0487869095088661E-006

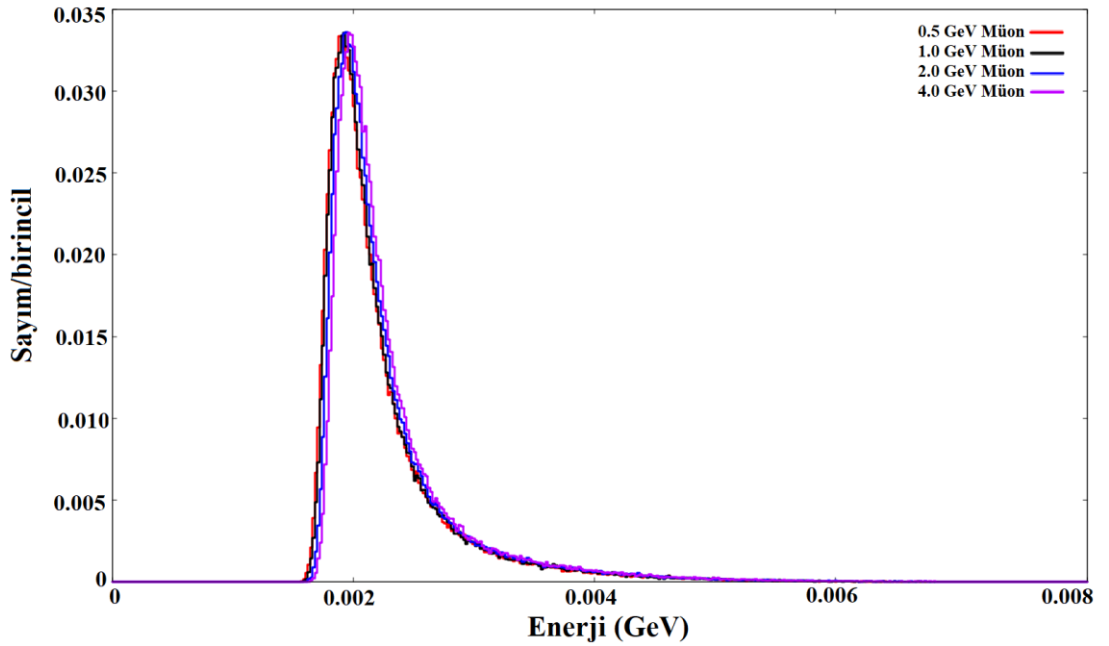


Şekil 4.21. Gaz karışımlarına göre oluşan pozitronların toplam akılarının USBIN sonuçları grafiği

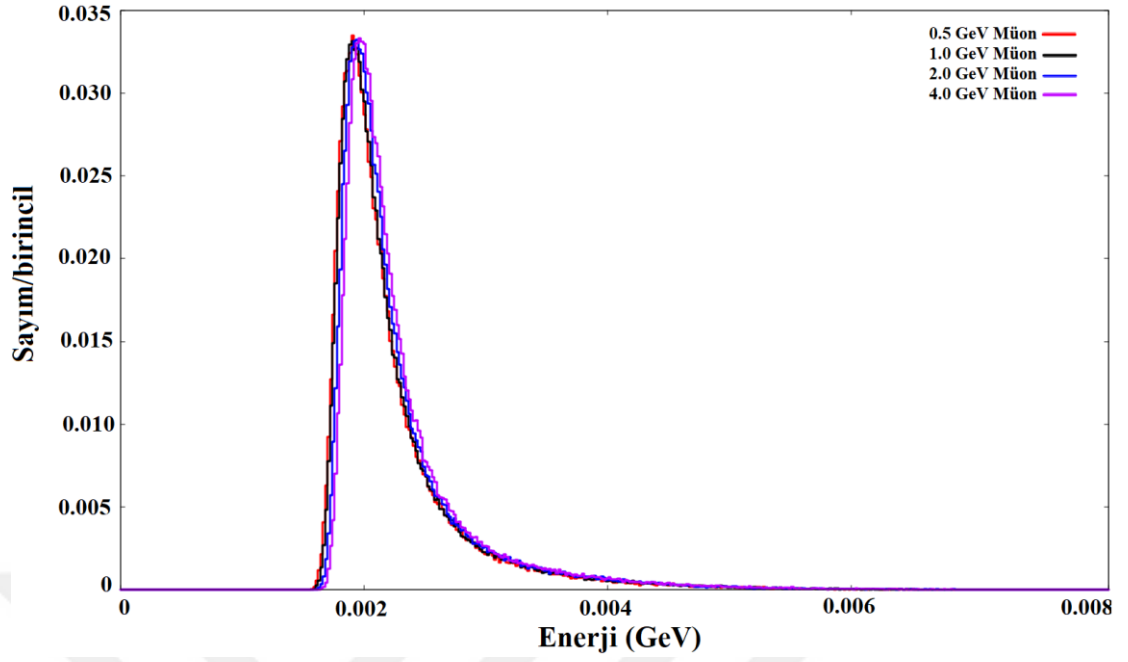
Şekil 4.21’de %90 R134a - %5 i-C₄H₁₀ - %5 SF₆, %97 R134a - %2,5 i-C₄H₁₀ - %0,5 SF₆, %50 CO₂ - %45 N₂ - %5 Ar, %60 CO₂ - %35 N₂ - %5 Ar gaz karışımları içerisinde 2,0 GeV enerjili müonlar tarafından meydana getirilen pozitron akıları; 0,5 GeV ve 1,0 GeV enerji değerlerinde meydana gelen sonuçlara kıyasla büyük bir artış göstermiştir. 4,0 GeV enerjili müonlar tarafından meydana getirilen pozitron akısındaki ani düşüşün; müonların enerjisi arttıkça, ürün parçacık olarak pozitron oluşturan etkileşimlerin daha az gerçekleştiğinden dolayı olduğunu söyleyebiliriz.

4.2. DETECT Bulguları

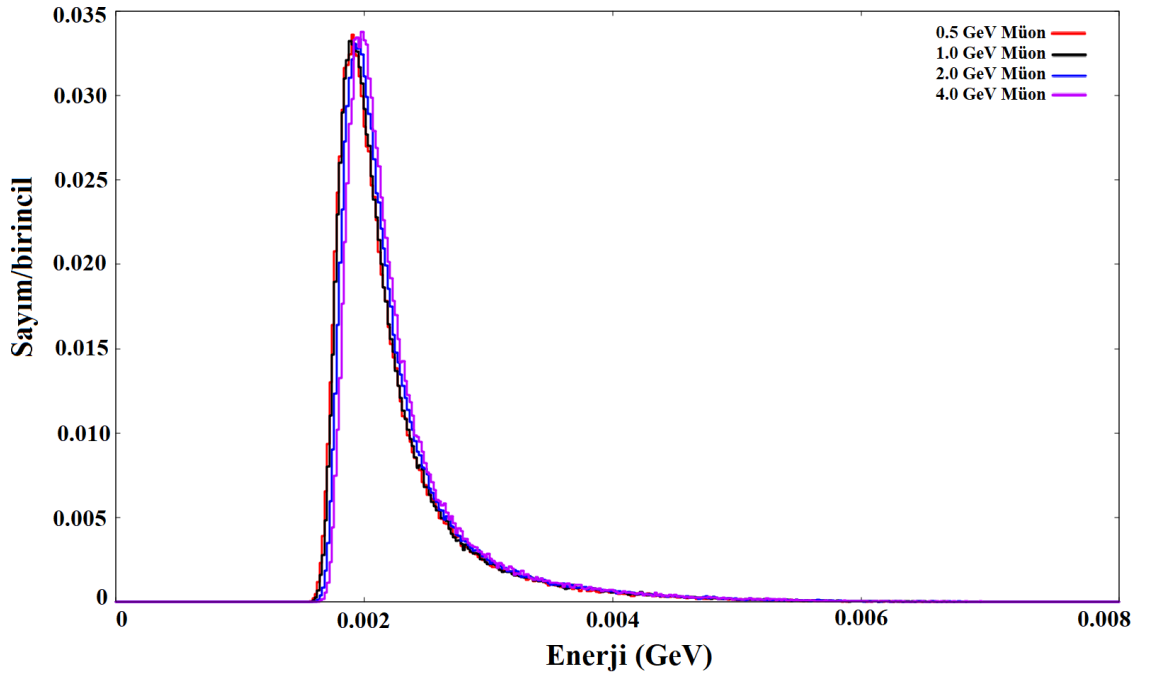
DETECT kartı, detektör hacmi içerisinde her bir olay başına depo edilen toplam enerjiyi hesaplamaya yarar. Şekil 4.22 – 4.25’de; %90 R134a - %5 i-C₄H₁₀ - %5 SF₆ , %97 R134a - %2,5 i-C₄H₁₀ - %0,5 SF₆ , %50 CO₂ - %45 N₂ - %5 Ar , %60 CO₂ - %35 N₂ - %5 Ar gaz karışımları barındıran detektör hacimlerinin içerisine giren; 0,5 GeV – 4,0 GeV enerji aralığındaki müonların sebep olduğu her bir olay başına depolanan toplam enerji değerlerinin, histogram grafikleri gösterilmiştir. Detektör hacmi içerisine giren müonların enerjisi arttıkça, söz konusu histogram grafiklerinin ortalama değerlerinin az da olsa büyüdüğü gözlemlenmiştir. Tüm söz konusu farklı gaz karışımları içeren detektör hacimlerinde her bir olay başına depo edilen enerji değerleri; aralarında çok az fark barındırsa bile, birbirine çok yakın değerlere sahip olduğu görülür. Bunun sebebinin gaz karışımlarının sahip olduğu yoğunluk değerlerinin birbirine çok yakın olmasının yanında, gaz karışımı gibi ince materyaller içerisinde geçen müonların, ortamda pek fazla enerji bırakamayacak olduğundandır. Detektör hacmi içerisinde sadece gaz karışımları olmayıp, çeşitli kalınlıktaki soda-lime camlar da bulunmaktadır. Detect kartı, hem gaz karışımları hem de camlarda, her bir olay başına depolanan enerjiyi bize göstermektedir. Sonuçların, Landau dağılımına uyması da beklenen bir durumdur.



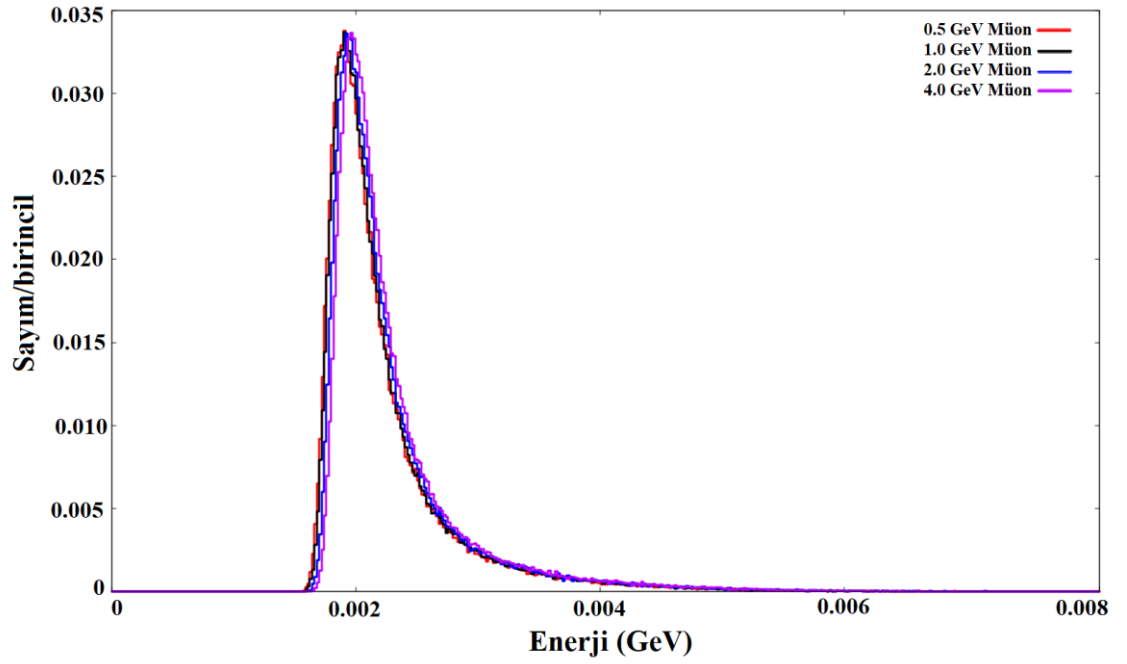
Şekil 4.22. %90 R134a - %5 i-C₄H₁₀ - %5 SF₆ gaz karışımı bulunan detektördeki depolanan enerji



Şekil 4.23. %97 R134a - %2,5 i-C₄H₁₀ - %0,5 SF₆ gaz karışımı bulunan detektördeki depolanan enerji



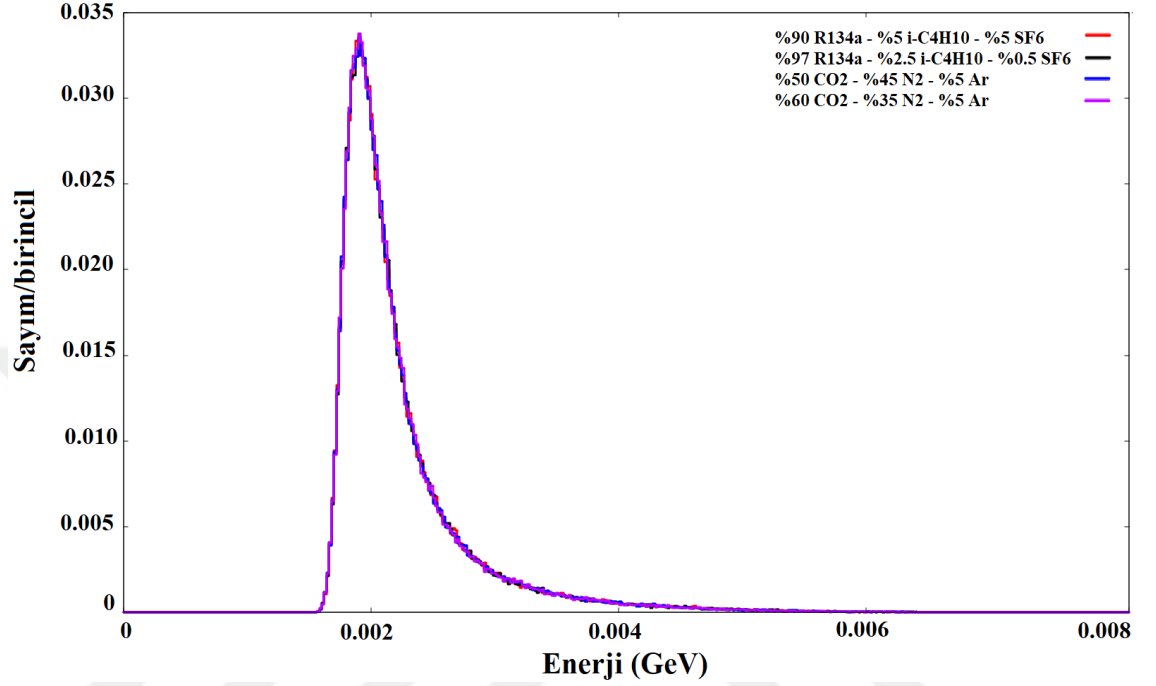
Şekil 4.24. %50 CO₂ - %45 N₂ - %5 Ar gaz karışımı bulunan detektördeki depolanan enerji



Şekil 4.25. %60 CO₂ - %35 N₂ - %5 Ar gaz karışımı bulunan detektördeki depolanan enerji

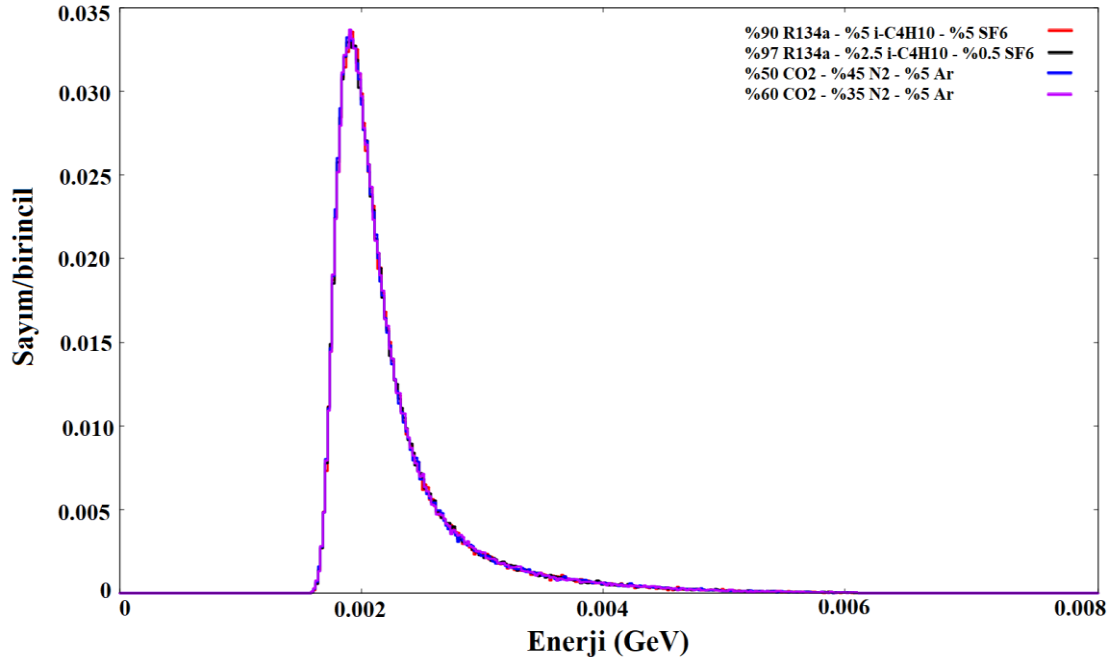
Şekil 4.22 – 4.25’den çıkarılan sonuçlar, farklı tüm gaz karışımlarına; 0,5 GeV – 1,0 GeV – 2,0 GeV ve 4,0 GeV enerjileri ile gönderilen kozmik müonların birbirine çok yakın sonuçlar gösterdiğiidir. Depo edilen enerji değerinin Landau dağılımına uyması önemlidir. Aksi bir durum ile karşılaşılması, bize benzetimde bir takım hatalar barındığına işaretler.

Şekil 4.26 – 4.29’da gönderilen müonların enerjisine göre farklı gaz karışımlarında meydana gelen; her bir olay için depo edilen enerji değerlerinin histogram grafikleri görülmektedir.

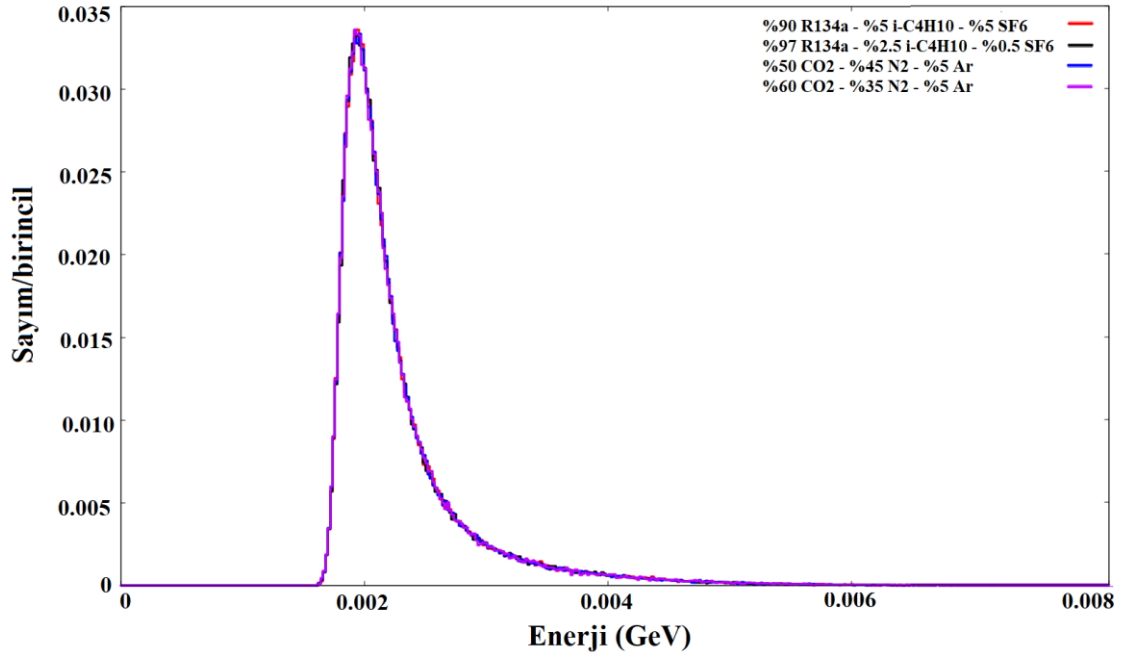


Şekil 4.26. Gaz hacminden 0,5 GeV müonların geçtiği detektörde depolanan enerjinin, gaz karışımlarına göre değişimi

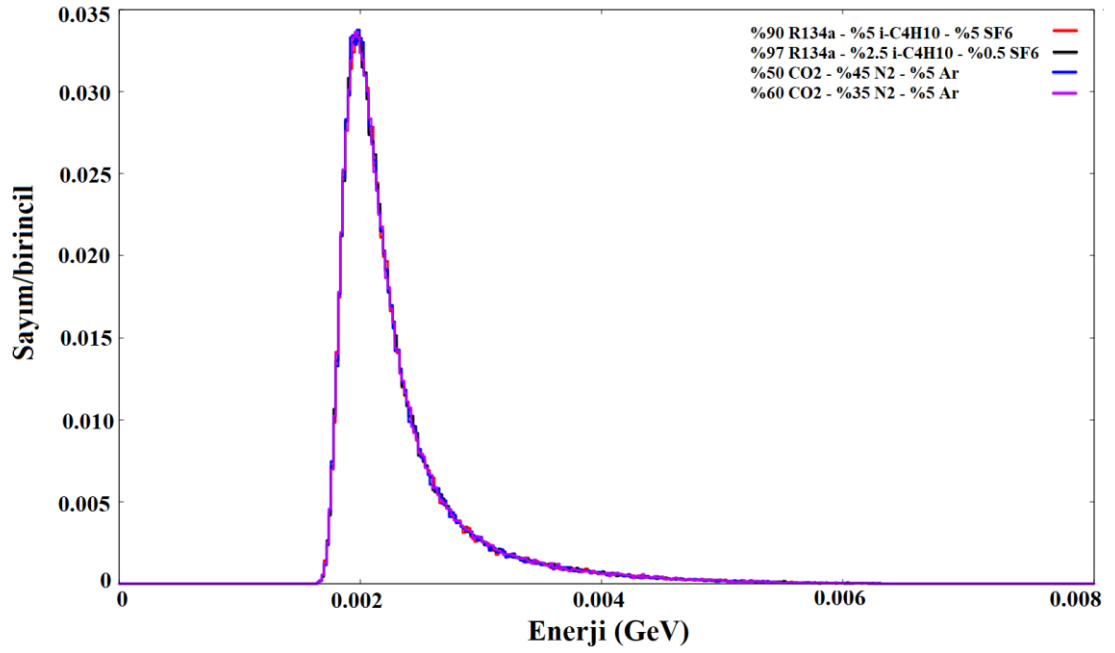
Grafikler neredeyse üst üste çakışmaktadır. Bu beklenen bir sonuçtur. Bu sonucun sebebi, gaz karışımının ince bir yapıya sahip olması ve gönderilen parçacıkların enerjisinin yüksek olmasıdır.



Şekil 4.27. Gaz hacminden 1,0 GeV müonların geçtiği detektörde depolanan enerjinin, gaz karışımlarına göre değişimi



Şekil 4.28. Gaz hacminden 2,0 GeV müonların geçtiği detektörde depolanan enerjinin, gaz karışımlarına göre değişimi



Şekil 4.29. Gaz hacminden 4,0 GeV müonların geçtiği detektörde depolanan enerjinin, gaz karışımlarına göre değişimi

Şekil 4.26 – 4.29’da görüldüğü üzere, belirtilen enerji değerlerinde; farklı gaz karışımlarında meydana gelen depo edilen enerji değerlerini barındıran histogram grafiklerinde ihmal edilecek düzeyde farklar bulunmaktadır. Bu durum, depo edilen enerji bazında gaz karışımlarının birbirine çok yakın bir karakteristiğe sahip olduğunu göstermektedir. Gaz karışımlarının yoğunluklarının küçük ve birbirine yakın olması ve bunun yanında gönderilen parçacıkların enerjisinin nispeten yüksek olmasından kaynaklı olduğu da açıktır.

4.3. USRTRACK Bulguları

Bu bölümde, parçacığın gaz hacmi içerisine giren müonların iz takibi incelemesi yapılmaktadır. Çizelge 4.21– 4.24’de 4 farklı gaz karışımının; gönderilen müonların enerjilerine göre hesaplanan akı değerlerinin ve iz uzunluklarının sonuçları gösterilmiştir.

Çizelge 4.21. %90 R134a - %5 i-C₄H₁₀ - %5 SF₆ gaz karışımı içerisinde, gönderilen müonların enerjilerine göre USRTRACK sonuçları

%90 R134a - %5 i-C ₄ H ₁₀ - %5 SF ₆		
Gap	0,5 GeV	1,0 GeV
1		
Toplam yanıt (parçacık/cm2/birincil)	2,4964663E-03 +/- 7,4637611E-03 %	2,4934590E-03 +/- 9,0056183E-03 %
İz uzunluğu (cm/birincil)	2,4964662E-02 +/- 7,4637611E-03 %	2,4934590E-02 +/- 9,0056183E-03 %
2		
Toplam yanıt (parçacık/cm2/birincil)	2,4940306E-03 +/- 1,0484337E-02 %	2,4893631E-03 +/- 1,1471268E-02 %
İz uzunluğu (cm/birincil)	2,4940304E-02 +/- 1,0484337E-02 %	2,4893630E-02 +/- 1,1471268E-02 %
3		
Toplam yanıt (parçacık/cm2/birincil)	2,4912937E-03 +/- 1,2723129E-02 %	2,4849423E-03 +/- 1,5736979E-02 %
İz uzunluğu (cm/birincil)	2,4912937E-02 +/- 1,2723129E-02 %	2,4849422E-02 +/- 1,5736979E-02 %
4		
Toplam yanıt (parçacık/cm2/birincil)	2,4879829E-03 +/- 1,5497106E-02 %	2,4796589E-03 +/- 2,1177839E-02 %
İz uzunluğu (cm/birincil)	2,4879830E-02 +/- 1,5497106E-02 %	2,4796590E-02 +/- 2,1177839E-02 %
5		
Toplam yanıt (parçacık/cm2/birincil)	2,4841346E-03 +/- 1,5430949E-02 %	2,4740435E-03 +/- 1,5596764E-02 %
İz uzunluğu (cm/birincil)	2,4841346E-02 +/- 1,5430949E-02 %	2,4740435E-02 +/- 1,5596764E-02 %
Gap	2,0 GeV	4,0 GeV
1		
Toplam yanıt (parçacık/cm2/birincil)	2,4912774E-03 +/- 1,3188753E-02 %	2,4907754E-03 +/- 1,5936945E-02 %
İz uzunluğu (cm/birincil)	2,4912775E-02 +/- 1,3188753E-02 %	2,4907755E-02 +/- 1,5936945E-02 %
2		
Toplam yanıt (parçacık/cm2/birincil)	2,4860536E-03 +/- 1,9332696E-02 %	2,4854385E-03 +/- 1,3913671E-02 %
İz uzunluğu (cm/birincil)	2,4860537E-02 +/- 1,9332696E-02 %	2,4854384E-02 +/- 1,3913671E-02 %
3		
Toplam yanıt (parçacık/cm2/birincil)	2,4806028E-03 +/- 2,0279447E-02 %	2,4792263E-03 +/- 1,4357660E-02 %
İz uzunluğu (cm/birincil)	2,4806028E-02 +/- 2,0279447E-02 %	2,4792263E-02 +/- 1,4357660E-02 %
4		
Toplam yanıt (parçacık/cm2/birincil)	2,4747821E-03 +/- 2,0861883E-02 %	2,4731890E-03 +/- 1,9375196E-02 %
İz uzunluğu (cm/birincil)	2,4747821E-02 +/- 2,0861883E-02 %	2,4731891E-02 +/- 1,9375196E-02 %
5		
Toplam yanıt (parçacık/cm2/birincil)	2,4676332E-03 +/- 2,7214674E-02 %	2,4659268E-03 +/- 1,9402176E-02 %
İz uzunluğu (cm/birincil)	2,4676330E-02 +/- 2,7214674E-02 %	2,4659269E-02 +/- 1,9402176E-02 %

Çizelge 4.22. %97 R134a - %2,5 i-C₄H₁₀ - %0,5 SF₆ gaz karışımı içerisinde, gönderilen müonların enerjilerine göre USRTRACK sonuçları

%97 R134a - %2,5 i-C ₄ H ₁₀ - %0,5 SF ₆		
Gap	0,5 GeV	1,0 GeV
1		
Toplam yanıt (parçacık/cm2/birincil)	2,4966542E-03 +/- 5,0958125E-03 %	2,4931980E-03 +/- 1,0675112E-02 %
İz uzunluğu (cm/birincil)	2,4966544E-02 +/- 5,0958125E-03 %	2,4931980E-02 +/- 1,0675112E-02 %
2		
Toplam yanıt (parçacık/cm2/birincil)	2,4947473E-03 +/- 7,3219026E-03 %	2,4892427E-03 +/- 1,3019779E-02 %
İz uzunluğu (cm/birincil)	2,4947472E-02 +/- 7,3219026E-03 %	2,4892427E-02 +/- 1,3019779E-02 %
3		
Toplam yanıt (parçacık/cm2/birincil)	2,4922360E-03 +/- 1,1294660E-02 %	2,4850597E-03 +/- 1,7443726E-02 %
İz uzunluğu (cm/birincil)	2,4922360E-02 +/- 1,1294660E-02 %	2,4850598E-02 +/- 1,7443726E-02 %
4		
Toplam yanıt (parçacık/cm2/birincil)	2,4896387E-03 +/- 1,0871935E-02 %	2,4799765E-03 +/- 2,0921528E-02 %
İz uzunluğu (cm/birincil)	2,4896389E-02 +/- 1,0871935E-02 %	2,4799766E-02 +/- 2,0921528E-02 %
5		
Toplam yanıt (parçacık/cm2/birincil)	2,4857612E-03 +/- 1,0427541E-02 %	2,4740184E-03 +/- 2,3298115E-02
İz uzunluğu (cm/birincil)	2,4857612E-02 +/- 1,0427541E-02 %	2,4740184E-02 +/- 2,3298115E-02
Gap	2,0 GeV	4,0 GeV
1		
Toplam yanıt (parçacık/cm2/birincil)	2,4913650E-03 +/- 1,6169447E-02 %	2,4906383E-03 +/- 1,2396066E-02 %
İz uzunluğu (cm/birincil)	2,4913648E-02 +/- 1,6169447E-02 %	2,4906382E-02 +/- 1,2396066E-02 %
2		
Toplam yanıt (parçacık/cm2/birincil)	2,4867659E-03 +/- 1,7833242E-02 %	2,4856136E-03 +/- 1,5735382E-02 %
İz uzunluğu (cm/birincil)	2,4867659E-02 +/- 1,7833242E-02 %	2,4856135E-02 +/- 1,5735382E-02 %
3		
Toplam yanıt (parçacık/cm2/birincil)	2,4811444E-03 +/- 2,1361768E-02 %	2,4800515E-03 +/- 1,7400708E-02 %
İz uzunluğu (cm/birincil)	2,4811445E-02 +/- 2,1361768E-02 %	2,4800515E-02 +/- 1,7400708E-02 %
4		
Toplam yanıt (parçacık/cm2/birincil)	2,4751206E-03 +/- 2,2529900E-02 %	2,4742393E-03 +/- 2,3583593E-02 %
İz uzunluğu (cm/birincil)	2,4751205E-02 +/- 2,2529900E-02 %	2,4742393E-02 +/- 2,3583593E-02 %
5		
Toplam yanıt (parçacık/cm2/birincil)	2,4680847E-03 +/- 2,0264372E-02 %	2,4676896E-03 +/- 2,4426769E-02 %
İz uzunluğu (cm/birincil)	2,4680845E-02 +/- 2,0264372E-02 %	2,4676897E-02 +/- 2,4426769E-02 %

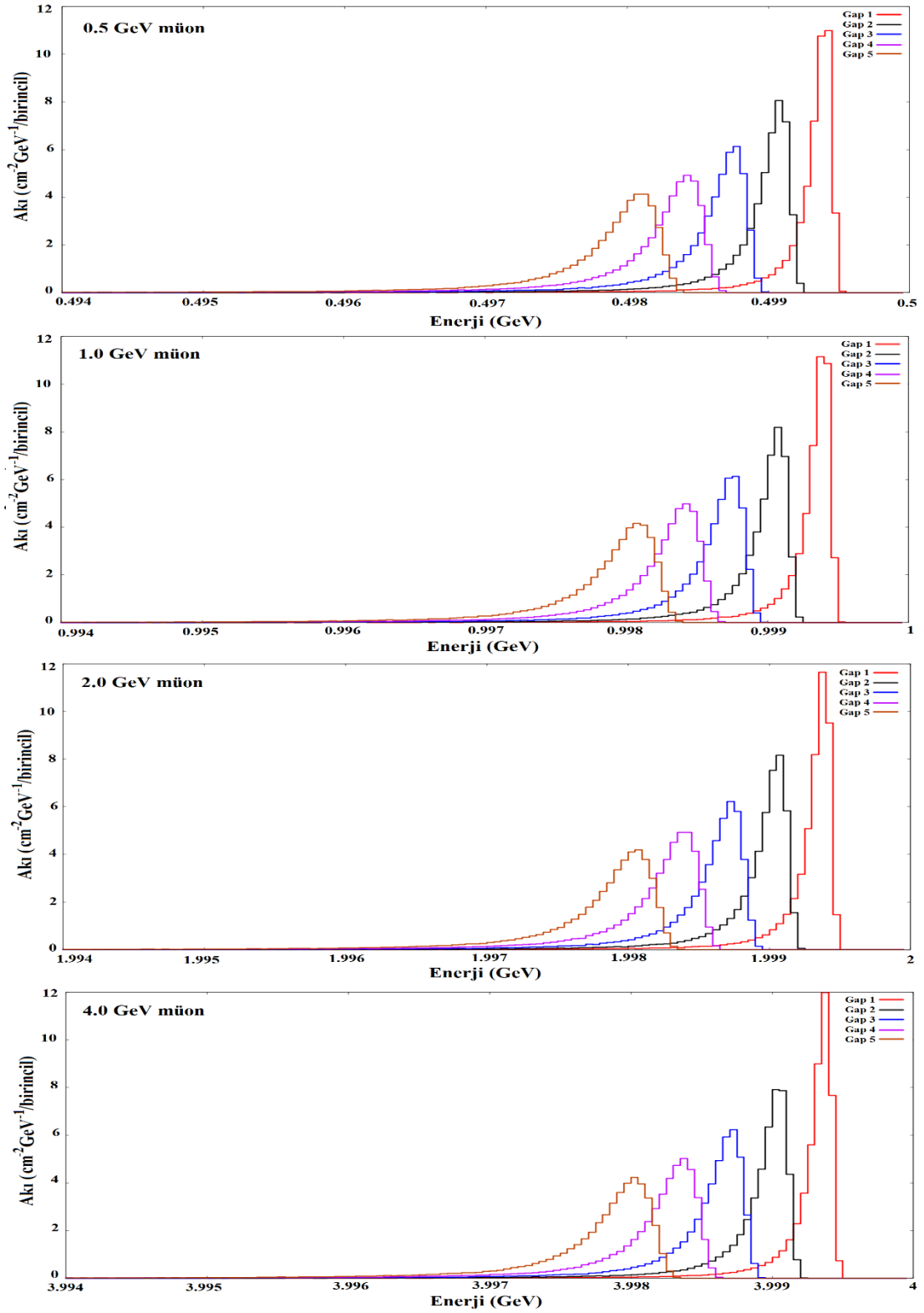
Çizelge 4.23. %50 CO₂ - %45 N₂ - %5 Ar gaz karışımı içerisinde, gönderilen müonların enerjilerine göre USRTRACK sonuçları

%50 CO ₂ - %45 N ₂ - %5 Ar		
Gap	0,5 GeV	1,0 GeV
1		
Toplam yanıt (parçacık/cm2/birincil)	2,4967301E-03 +/- 3,7324992E-03 %	2,4929589E-03 +/- 1,2351824E-02 %
İz uzunluğu (cm/birincil)	2,4967302E-02 +/- 3,7324992E-03 %	2,4929589E-02 +/- 1,2351824E-02 %
2		
Toplam yanıt (parçacık/cm2/birincil)	2,4946341E-03 +/- 6,3148616E-03 %	2,4888504E-03 +/- 1,3604318E-02 %
İz uzunluğu (cm/birincil)	2,4946341E-02 +/- 6,3148616E-03 %	2,4888504E-02 +/- 1,3604318E-02 %
3		
Toplam yanıt (parçacık/cm2/birincil)	2,4919033E-03 +/- 1,0429732E-02 %	2,4843796E-03 +/- 1,6005490E-02 %
İz uzunluğu (cm/birincil)	2,4919033E-02 +/- 1,0429732E-02 %	2,4843795E-02 +/- 1,6005490E-02 %
4		
Toplam yanıt (parçacık/cm2/birincil)	2,4887340E-03 +/- 1,1210094E-02 %	2,4794836E-03 +/- 1,9084036E-02 %
İz uzunluğu (cm/birincil)	2,4887340E-02 +/- 1,1210094E-02 %	2,4794836E-02 +/- 1,9084036E-02 %
5		
Toplam yanıt (parçacık/cm2/birincil)	2,4851479E-03 +/- 1,2635613E-02 %	2,4739259E-03 +/- 2,5919229E-02 %
İz uzunluğu (cm/birincil)	2,4851479E-02 +/- 1,2635613E-02 %	2,4739260E-02 +/- 2,5919229E-02 %
Gap	2,0 GeV	4,0 GeV
1		
Toplam yanıt (parçacık/cm2/birincil)	2,4918248E-03 +/- 1,5094718E-02 %	2,4913130E-03 +/- 9,1982670E-03 %
İz uzunluğu (cm/birincil)	2,4918249E-02 +/- 1,5094718E-02 %	2,4913130E-02 +/- 9,1982670E-03 %
2		
Toplam yanıt (parçacık/cm2/birincil)	2,4872927E-03 +/- 2,2302255E-02 %	2,4860511E-03 +/- 1,3051965E-02 %
İz uzunluğu (cm/birincil)	2,4872929E-02 +/- 2,2302255E-02 %	2,4860511E-02 +/- 1,3051965E-02 %
3		
Toplam yanıt (parçacık/cm2/birincil)	2,4819111E-03 +/- 3,1469174E-02 %	2,4801763E-03 +/- 1,4860269E-02 %
İz uzunluğu (cm/birincil)	2,4819111E-02 +/- 3,1469174E-02 %	2,4801763E-02 +/- 1,4860269E-02 %
4		
Toplam yanıt (parçacık/cm2/birincil)	2,4759127E-03 +/- 2,9973004E-02 %	2,4739141E-03 +/- 1,9145412E-02 %
İz uzunluğu (cm/birincil)	2,4759127E-02 +/- 2,9973004E-02 %	2,4739141E-02 +/- 1,9145412E-02 %
5		
Toplam yanıt (parçacık/cm2/birincil)	2,4691762E-03 +/- 3,2878809E-02 %	2,4671019E-03 +/- 1,2723272E-02 %
İz uzunluğu (cm/birincil)	2,4691762E-02 +/- 3,2878809E-02 %	2,4671020E-02 +/- 1,2723272E-02 %

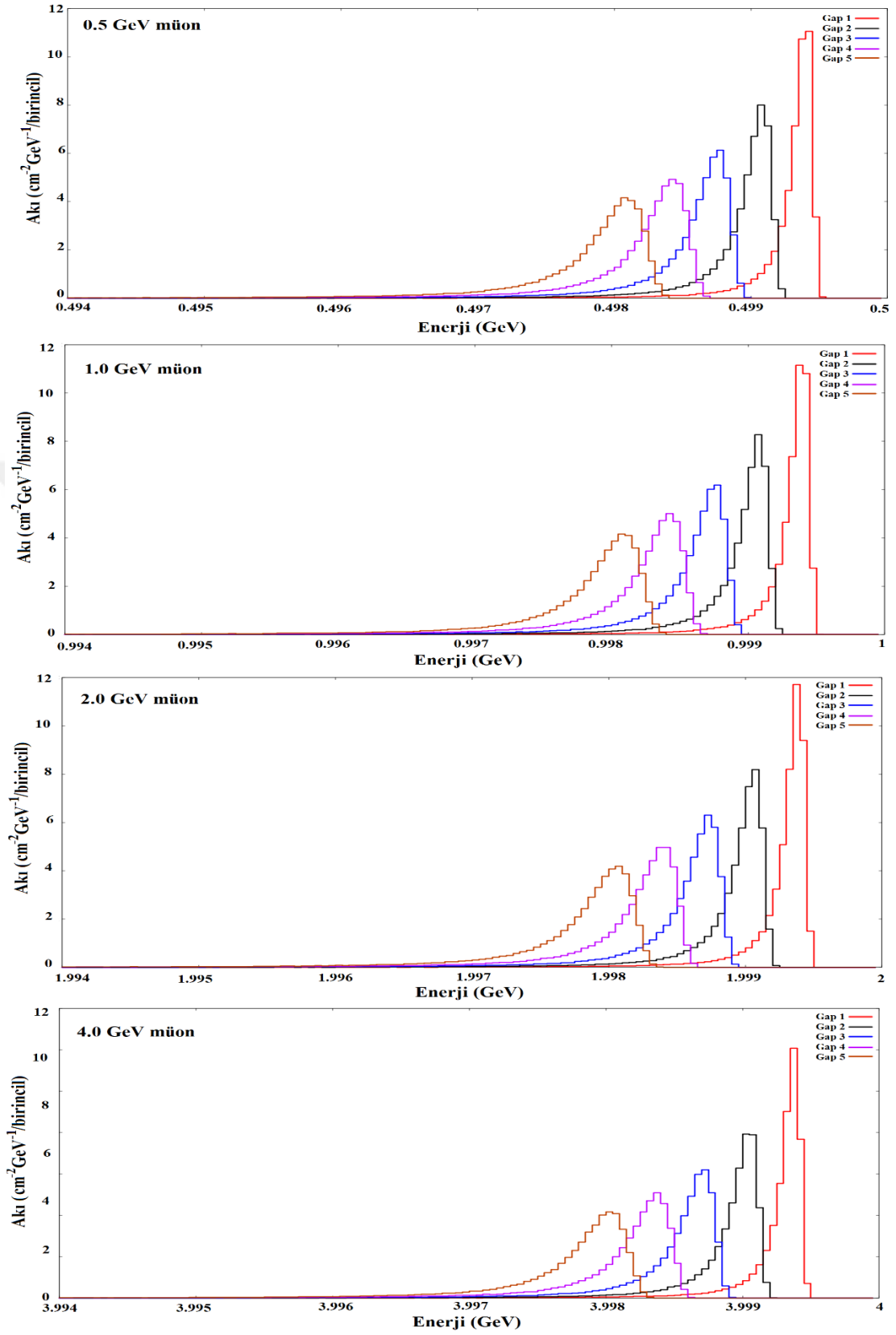
Çizelge 4.24. %60 CO₂ - %35 N₂ - %5 Ar gaz karışımı içerisinde, gönderilen müonların enerjilerine göre USRTRACK sonuçları

%60 CO ₂ - %35 N ₂ - %5 Ar		
Gap	0,5 GeV	1,0 GeV
1		
Toplam yanıt (parçacık/cm2/birincil)	2,4962435E-03 +/- 2,7189818E-03 %	2,4938232E-03 +/- 8,8323914E-03 %
İz uzunluğu (cm/birincil)	2,4962435E-02 +/- 2,7189818E-03 %	2,4938231E-02 +/- 8,8323914E-03 %
2		
Toplam yanıt (parçacık/cm2/birincil)	2,4940474E-03 +/- 6,5974481E-03 %	2,4896651E-03 +/- 1,2509496E-02 %
İz uzunluğu (cm/birincil)	2,4940474E-02 +/- 6,5974481E-03 %	2,4896652E-02 +/- 1,2509496E-02 %
3		
Toplam yanıt (parçacık/cm2/birincil)	2,4914010E-03 +/- 9,7026685E-03 %	2,4853200E-03 +/- 1,2245057E-02 %
İz uzunluğu (cm/birincil)	2,4914011E-02 +/- 9,7026685E-03 %	2,4853200E-02 +/- 1,2245057E-02 %
4		
Toplam yanıt (parçacık/cm2/birincil)	2,4887673E-03 +/- 1,0114725E-02 %	2,4806866E-03 +/- 1,3697143E-02 %
İz uzunluğu (cm/birincil)	2,4887672E-02 +/- 1,0114725E-02 %	2,4806866E-02 +/- 1,3697143E-02 %
5		
Toplam yanıt (parçacık/cm2/birincil)	2,4852089E-03 +/- 1,5096012E-02 %	2,4754412E-03 +/- 1,1616339E-02 %
İz uzunluğu (cm/birincil)	2,4852090E-02 +/- 1,5096012E-02 %	2,4754411E-02 +/- 1,1616339E-02 %
Gap	2,0 GeV	4,0 GeV
1		
Toplam yanıt (parçacık/cm2/birincil)	2,4913151E-03 +/- 1,6422195E-02 %	2,4905757E-03 +/- 1,7451007E-02 %
İz uzunluğu (cm/birincil)	2,4913151E-02 +/- 1,6422195E-02 %	2,4905756E-02 +/- 1,7451007E-02 %
2		
Toplam yanıt (parçacık/cm2/birincil)	2,4860662E-03 +/- 1,9832207E-02 %	2,4851635E-03 +/- 2,0573089E-02 %
İz uzunluğu (cm/birincil)	2,4860663E-02 +/- 1,9832207E-02 %	2,4851635E-02 +/- 2,0573089E-02 %
3		
Toplam yanıt (parçacık/cm2/birincil)	2,4805048E-03 +/- 2,3633992E-02 %	2,4792887E-03 +/- 2,0731097E-02 %
İz uzunluğu (cm/birincil)	2,4805048E-02 +/- 2,3633992E-02 %	2,4792887E-02 +/- 2,0731097E-02 %
4		
Toplam yanıt (parçacık/cm2/birincil)	2,4748400E-03 +/- 2,8912365E-02 %	2,4726642E-03 +/- 2,3062572E-02 %
İz uzunluğu (cm/birincil)	2,4748402E-02 +/- 2,8912365E-02 %	2,4726642E-02 +/- 2,3062572E-02 %
5		
Toplam yanıt (parçacık/cm2/birincil)	2,4683289E-03 +/- 2,9873237E-02 %	2,4653045E-03 +/- 2,8953891E-02 %
İz uzunluğu (cm/birincil)	2,4683289E-02 +/- 2,9873237E-02 %	2,4653045E-02 +/- 2,8953891E-02 %

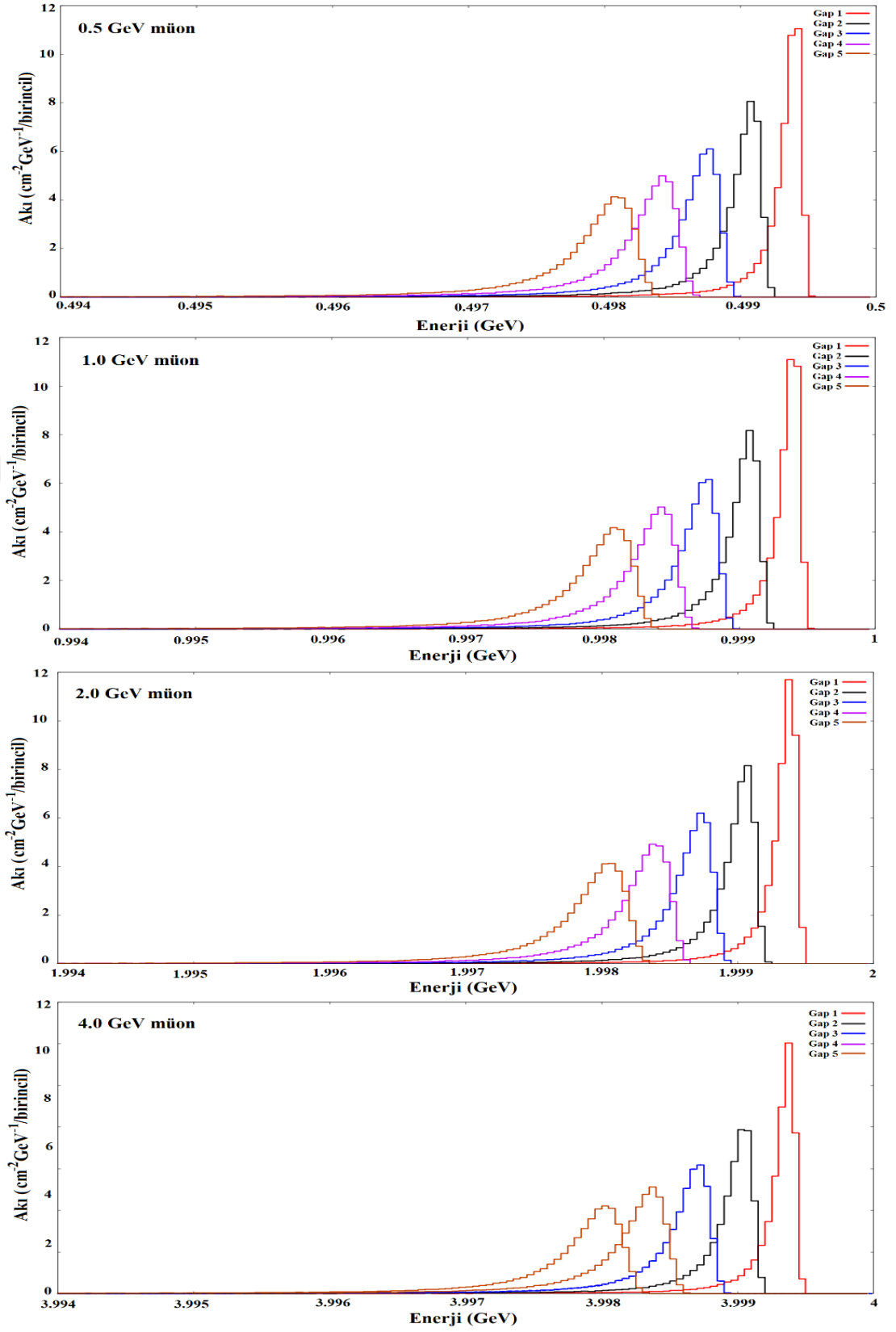
Şekil 4.30 – 4.33’de ise, detektör hacminde bulunan sıralı 5 gaz gap içerisinde geçen müonların, akı değerlerinin histogram grafikleri gösterilmiştir. Müonlar, sıralı gaz gapları içerisinde ilerlerken; müon akısı değerlerinin azalması beklenen bir sonuçtur. Çünkü, gaz gapları içerisinde ilerleyen müonlar, o süreçte çeşitli etkileşimler yapıp enerji kaybedeceklerdir. Bu sebepten dolayı, dağılımın ortalama değerinin azalması beklenir. Elde edilen sonuçlar da bunu destekler niteliktedir.



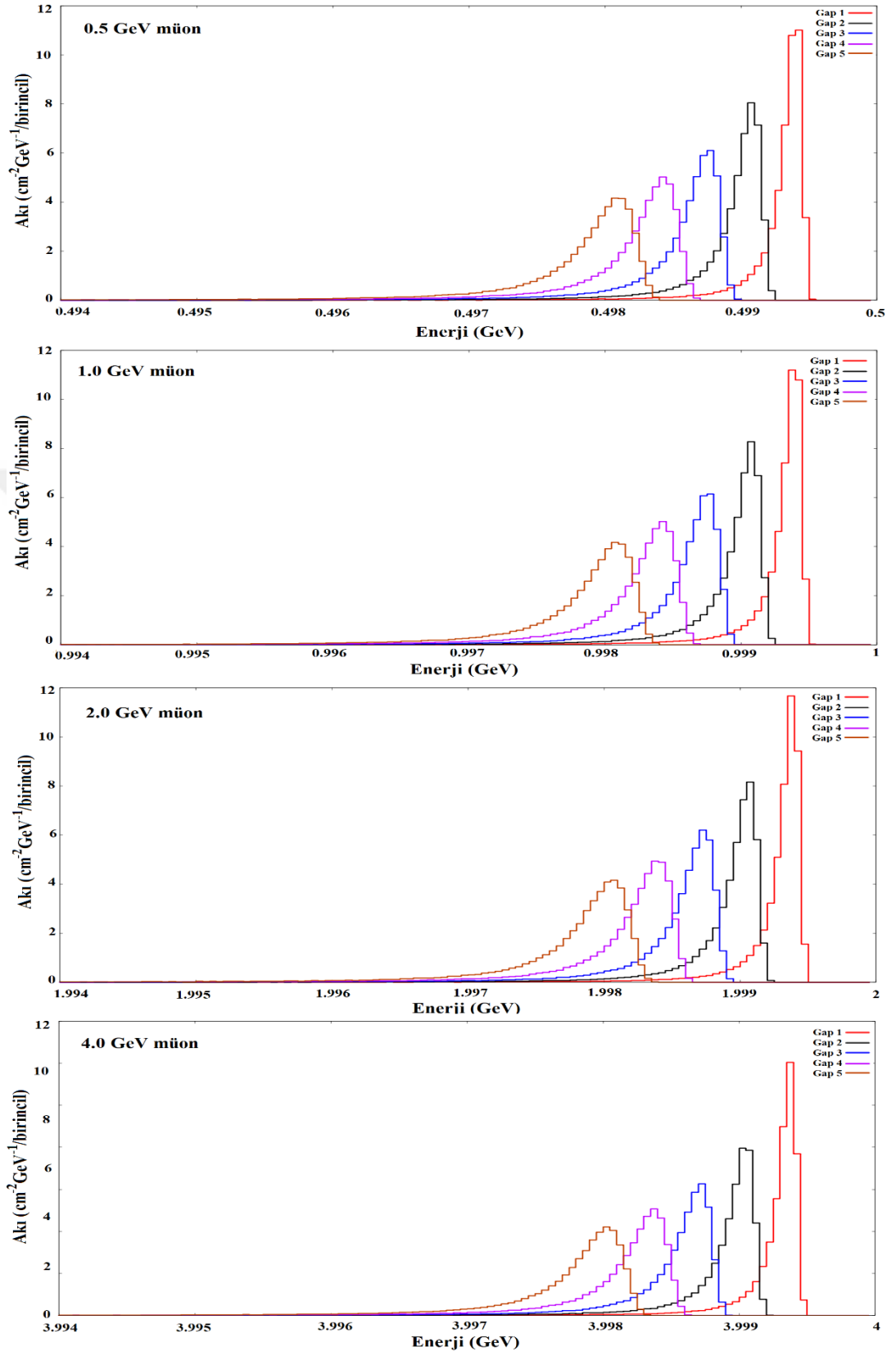
Şekil 4.30. %90 R134a - %5 i-C₄H₁₀ - %5 SF₆ gaz karışımı içerisinde, gönderilen müonların enerjilerine göre USRTRACK sonuç grafikleri



Şekil 4.31. %97 R134a - %2,5 i-C₄H₁₀ - %0,5 SF₆ gaz karışımı içerisinde, gönderilen müonların enerjilerine göre USRTRACK sonuç grafikleri

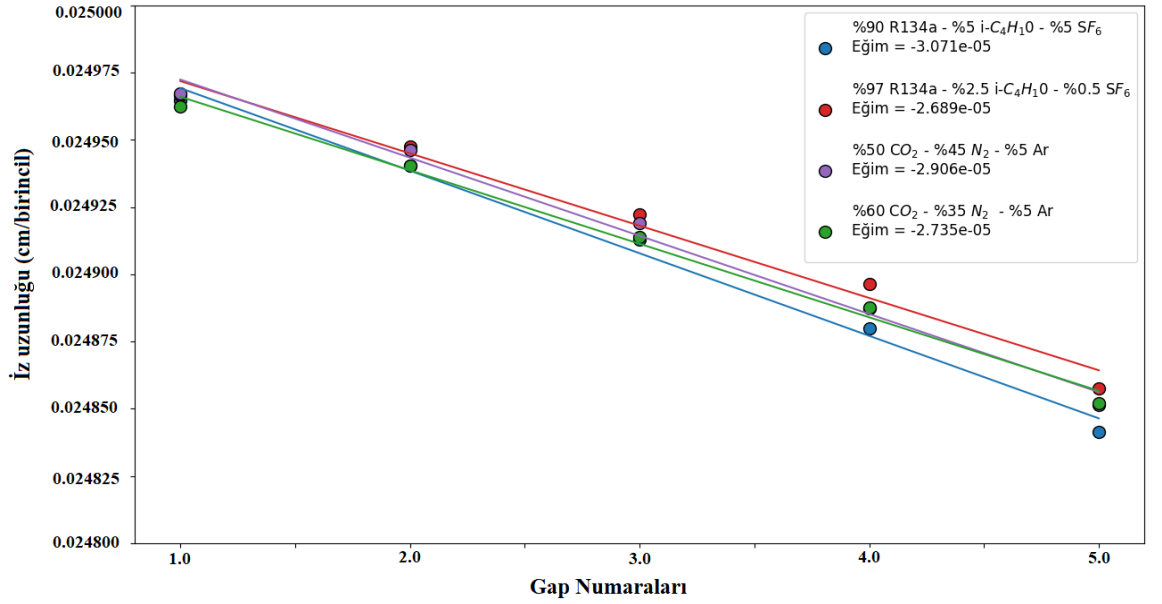


Şekil 4.32. %50 CO₂ - %45 N₂ - %5 Ar gaz karışımı içerisinde, gönderilen müonların enerjilerine göre USRTRACK sonuç grafikleri



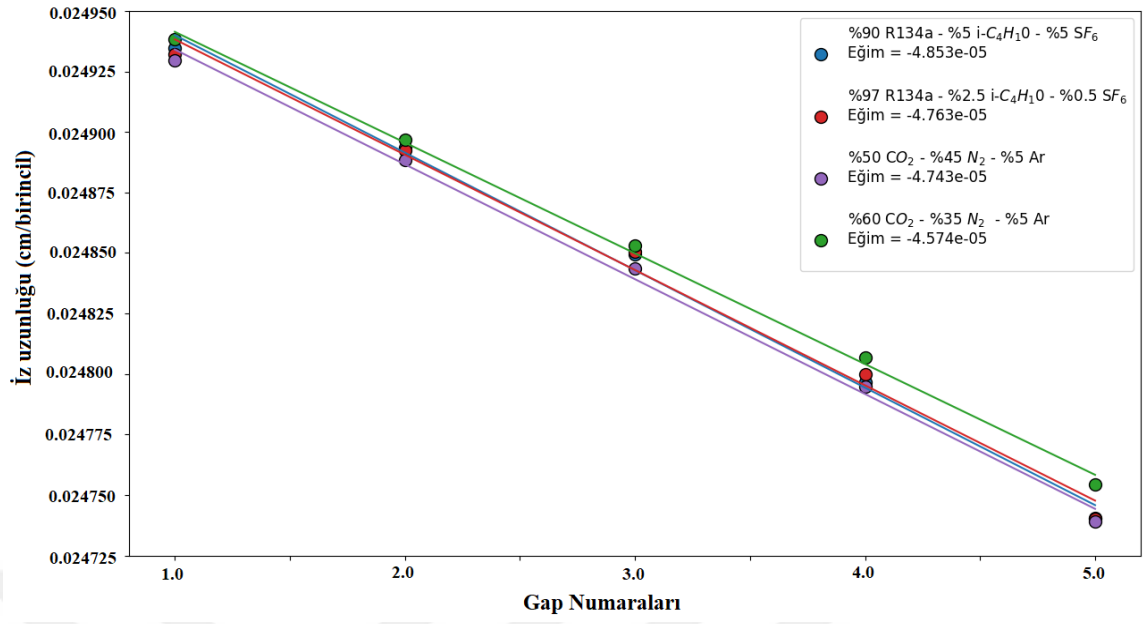
Şekil 4.33. %60 CO₂ - %35 N₂ - %5 Ar gaz karışımı içerisinde, gönderilen müonların enerjilerine göre USRTRACK sonuç grafikleri

Şekil 4.34 – 4.37 grafiklerinde detektör hacmine, 4 farklı enerji değerinde gönderilen müonların; gap numaralarına bağlı iz uzunluklarının (iz uzunluğu, iyonizasyonun elde edildiği yerdeki iz parçalarının toplam uzunluğu ile tanımlanır (Bichsel, 2006)) değişimi çizilmiştir. Bunun yanında, hesaplanan değerlere fit yapılarak, eğimleri alınmıştır. Müonlar ilerledikçe enerji kaybederler, iz uzunluğu değeri doğrusal bir azalışa uğrar.

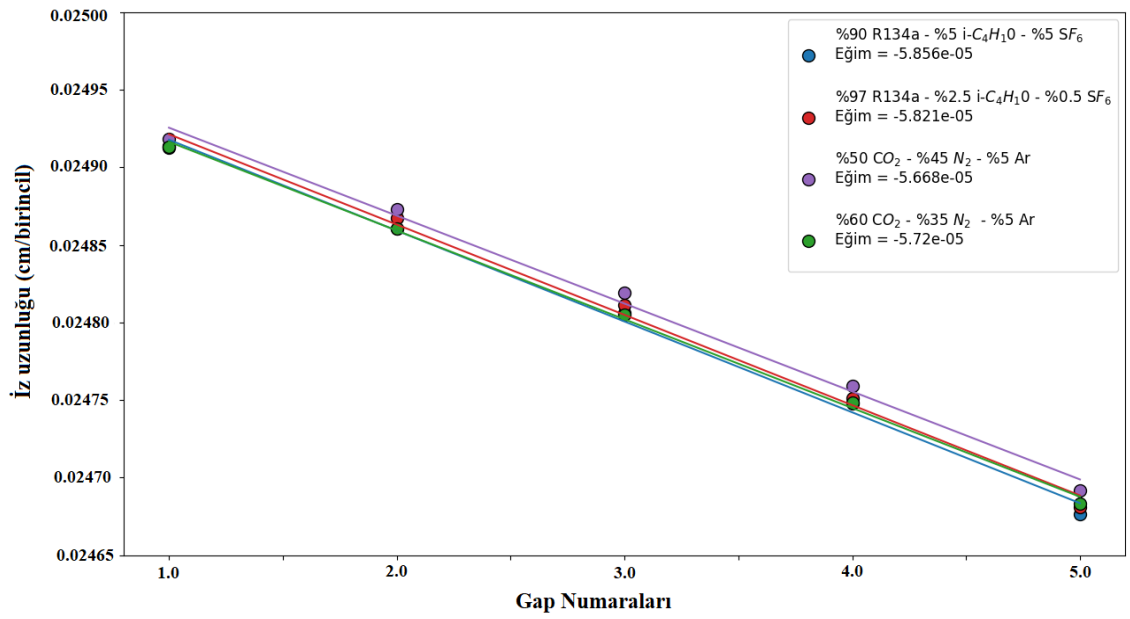


Şekil 4.34. 0,5 GeV enerjili Müon'un farklı gaz karışımları ve geçtiği gap değerlerine göre iz uzunluğu grafiği

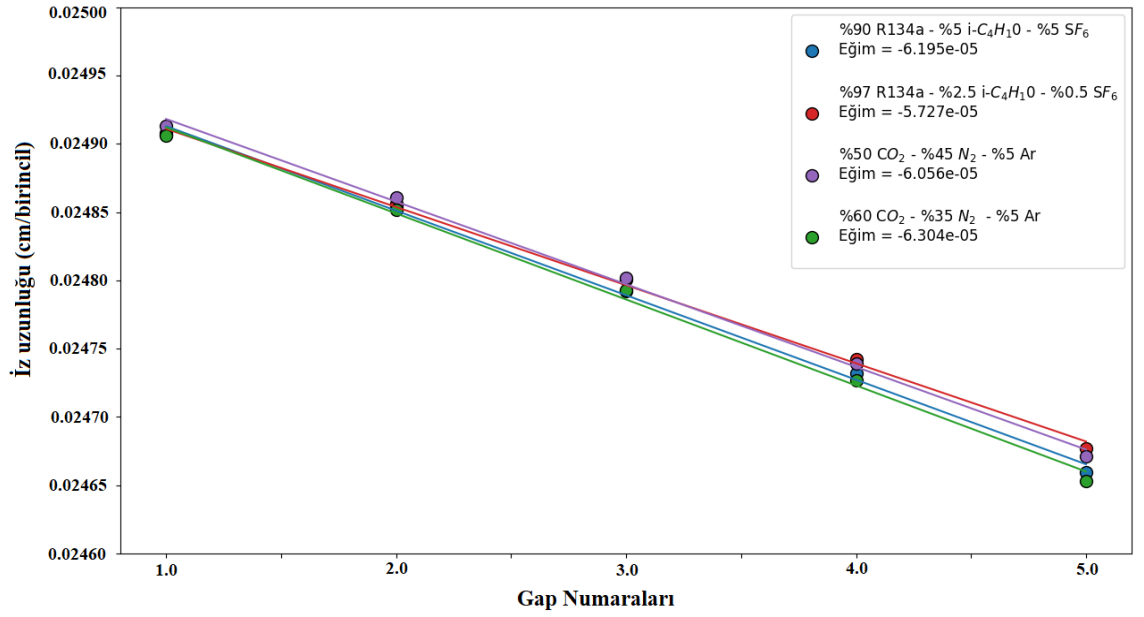
Şekil 4.34'de, gönderilen 0,5 GeV enerjili müonların, çeşitli gaz karışımları barındıran detektör hacmi içerisinde ilerlerken; son gaplarındaki iz uzunlukları daha belirgin bir fark sergiler. Enerji değerleri arttıkça, doğal olarak bu belirginliğin azalması beklenir ve elde edilen grafikler bu beklentiyi desteklemektedir. Çeşitli gaz karışımlarına bağlı olarak, en fazla negatif eğime sahip gaz karışımında; gönderilen müonların daha fazla etkileşime uğradığı söylenebilir. Negatif eğimin değeri, meydana gelen etkileşimler ile orantılıdır. Şekil 4.35 - 4.37 grafiklerinde görüldüğü gibi, iz uzunluğu hesabında; gönderilen müonların enerjisi en etkili faktördür.



Şekil 4.35. 1,0 GeV enerjili Müon'un farklı gaz karışımları ve geçtiği gap değerlerine göre iz uzunluğu grafiği

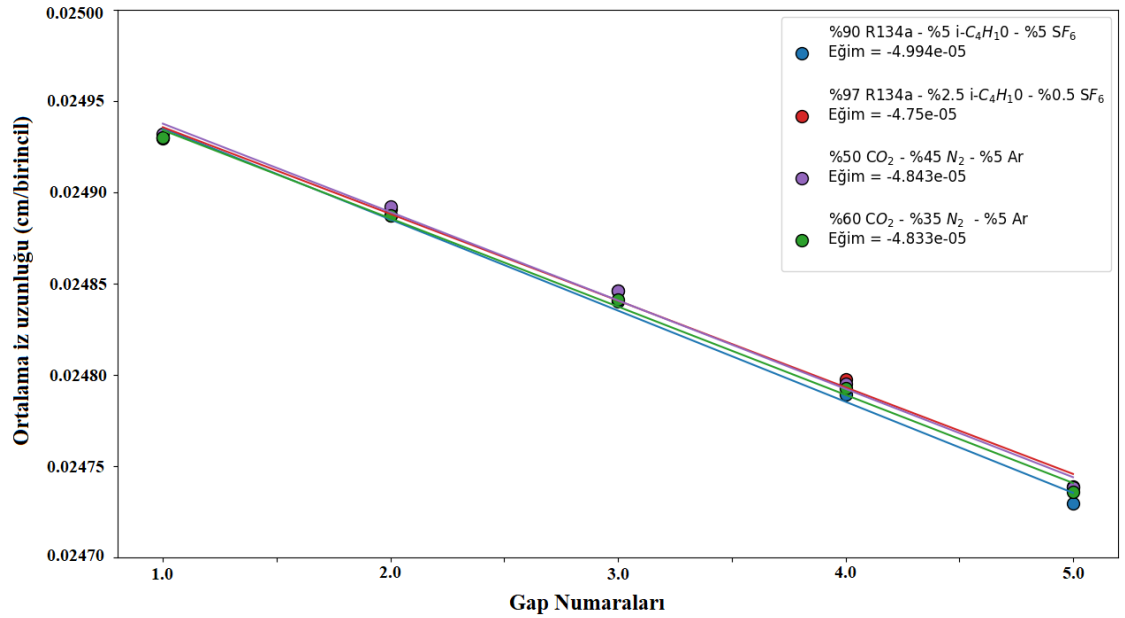


Şekil 4.36. 2,0 GeV enerjili Müon'un farklı gaz karışımları ve geçtiği gap değerlerine göre iz uzunluğu grafiği



Şekil 4.37. 4,0 GeV enerjili Müon'un farklı gaz karışımları ve geçtiği gap değerlerine göre iz uzunluğu grafiği

İstatistiksel olarak daha genel ve anlamlı bir sonuç elde etmek için; 4 farklı enerji değerlerine bağlı elde edilen, iz uzunluğu sonuçlarının ortalaması alınarak; Şekil 4.38 elde edilmiştir.



Şekil 4.38. 0,5 – 4,0 GeV enerji aralığındaki müonların, iz uzunluklarının ortalaması alınarak elde edilen grafik

Şekil 4.38’de görüldüğü gibi en fazla negatif eğime sahip olan yani en fazla etkileşimin gerçekleştiği gaz karışımı %90 R134a - %5 i-C₄H₁₀ - %5 SF₆ ‘dır.

Tüm sonuçlara çizilen fitlerin eğim değerleri Çizelge 4.25’de verilmiştir.

Çizelge 4.25. Farklı gaz karışımlarına, farklı enerji değerlerinde gönderilen müonların; Gap Numarası – Ortalama İz uzunluğu grafiğinde çizilen fitlerin eğim değerleri

Gaz Karışımları	0,5 GeV	1,0 GeV	2,0 GeV	4,0 GeV	Ortalama
%90 R134a - %5 i-C ₄ H ₁₀ - %5 SF ₆	-3,071E-05	-4,853E-05	-5,856E-05	-6,195E-05	-4,994E-05
%97 R134a - %2,5 i-C ₄ H ₁₀ - %0,5 SF ₆	-2,689E-05	-4,763E-05	-5,821E-05	-5,727-05	-4,750E-05
%50 CO ₂ - %45 N - %5 Ar	-2,906E-05	-4,743E-05	-5,668E-05	-6,056E-05	-4,843E-05
%60 CO ₂ - %35 N - %5 Ar	-2,735E-05	-4,574E-05	-5,720E-05	-6,304E-05	-4,833E-05

Buradan çıkaracağımız sonuç, %90 R134a - %5 i-C₄H₁₀ - %5 SF₆ gaz karışımı içerisinde meydana gelen etkileşim miktarının diğer gaz karışımlarından daha fazla olduğudur. Şekil 4.18 de bu düşüncüyü destekleyecek niteliktedir. Şekil 4.18 grafiğinde en yüksek elektron akısı değerine sahip gaz karışımı söz konusu, %90 R134a - %5 i-C₄H₁₀ - %5 SF₆ gaz karışımıdır.

4.4. USRBDX Bulguları

USRBDX kartı, bize söz konusu parçacığın (gönderilen müon, oluşan elektron veya foton vb.) yüzey normaline göre istenilen aralıktaki saçılan parçacıkların ortalama çift diferansiyel akı veya akım değerlerini hesaplamak için kullanılır. Detektörün son gapında, 0 ile 2π steradyan aralığında saçılan müon, oluşan elektron ve foton akılarının değerleri aşağıdaki Çizelge 4.26 – 4.28’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.26. Müonların detektörden çıkışındaki USRBDX sonuçları

%90 R134a - %5 i-C4H10- %5 SF6		
	0,5 GeV	1,0 GeV
Toplam yanıt (Parçacık/cm2/birincil)	2,4735669E-03 +/- 1,6148714E-02 %	2,4635098E-03 +/- 2,1531390E-02 %
(Parçacık/birincil)	0,9894268 +/- 1,6148714E-02 %	0,9854040 +/- 2,1531390E-02 %
	2,0 GeV	4,0 GeV
Toplam yanıt (Parçacık/cm2/birincil)	2,4491956E-03 +/- 3,0331384E-02 %	2,4495141E-03 +/- 3,5257332E-02 %
(Parçacık/birincil)	0,9796782 +/- 3,0331384E-02 %	0,9798057 +/- 3,5257332E-02 %
%97 R134a - %2,5 i-C4H10- %0,5 SF6		
	0,5 GeV	1,0 GeV
Toplam yanıt (Parçacık/cm2/birincil)	2,4752754E-03 +/- 1,5124037E-02 %	2,4631901E-03 +/- 1,9071653E-02 %
(Parçacık/birincil)	0,9901102 +/- 1,5124037E-02 %	0,9852760 +/- 1,9071653E-02 %
	2,0 GeV	4,0 GeV
Toplam yanıt (Parçacık/cm2/birincil)	2,4506904E-03 +/- 2,4964614E-02 %	2,4510303E-03 +/- 2,6647933E-02 %
(Parçacık/birincil)	0,9802762 +/- 2,4964614E-02 %	0,9804121 +/- 2,6647933E-02 %
%50 CO2 - %45 N - %5 Ar		
	0,5 GeV	1,0 GeV
Toplam yanıt (Parçacık/cm2/birincil)	2,4742826E-03 +/- 1,3440098E-02 %	2,4625072E-03 +/- 3,2242373E-02 %
(Parçacık/birincil)	0,9897130 +/- 1,3440098E-02 %	0,9850029 +/- 3,2242373E-02 %
	2,0 GeV	4,0 GeV
Toplam yanıt (Parçacık/cm2/birincil)	2,4495425E-03 +/- 3,6012787E-02 %	2,4503963E-03 +/- 1,2232692E-02 %
(Parçacık/birincil)	0,9798170 +/- 3,6012787E-02 %	0,9801586 +/- 1,2232692E-02 %
%60 CO2 - %35 N - %5 Ar		
	0,5 GeV	1,0 GeV
Toplam yanıt (Parçacık/cm2/birincil)	2,4737359E-03 +/- 2,2053970E-02 %	2,4637193E-03 +/- 2,0484746E-02 %
(Parçacık/birincil)	0,9894944 +/- 2,2053970E-02 %	0,9854878 +/- 2,0484746E-02 %
	2,0 GeV	4,0 GeV
Toplam yanıt (Parçacık/cm2/birincil)	2,4492545E-03 +/- 3,0279631E-02 %	2,4483830E-03 +/- 3,3208732E-02 %
(Parçacık/birincil)	0,9797018 +/- 3,0279631E-02 %	0,9793532 +/- 3,3208732E-02 %

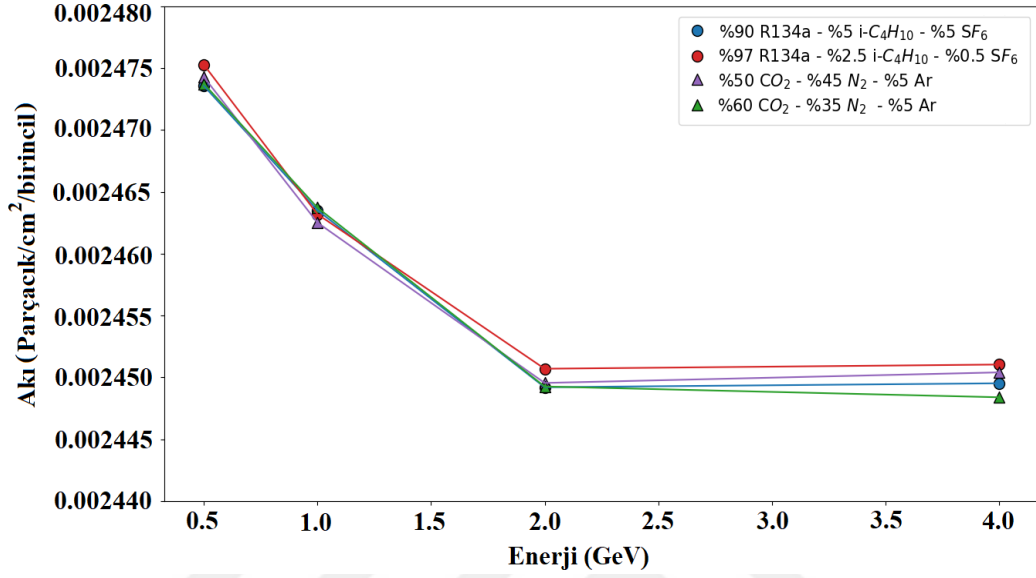
Çizelge 4.27. Oluşan elektronların beşinci gaptaki USRBDX sonuçları

%90 R134a - %5 i-C4H10- %5 SF6					
			0,5 GeV		
			1,0 GeV		
Toplam Yanıt (Parçacık/cm2/birincil)			2,4497323E-04 +/- 1,044221	%	2,6587938E-04 +/- 2,101925
(Parçacık/birincil)			9,7989291E-02 +/- 1,044221	%	0,1063518 +/- 2,101925
			2,0 GeV		
			4,0 GeV		
Toplam Yanıt (Parçacık/cm2/birincil)			2,6436712E-04 +/- 1,869164	%	2,6412084E-04 +/- 3,009012
(Parçacık/birincil)			0,1057469 +/- 1,869164	%	0,1056483 +/- 3,009012
%97 R134a - %2,5 i-C4H10- %0,5 SF6					
			0,5 GeV		
			1,0 GeV		
Toplam Yanıt (Parçacık/cm2/birincil)			2,6265549E-04 +/- 2,477295	%	2,6710212E-04 +/- 2,413222
(Parçacık/birincil)			0,1050622 +/- 2,477295	%	0,1068408 +/- 2,413222
			2,0 GeV		
			4,0 GeV		
Toplam Yanıt (Parçacık/cm2/birincil)			2,7958222E-04 +/- 4,519206	%	2,5369407E-04 +/- 1,243915
(Parçacık/birincil)			0,1118329 +/- 4,519206	%	0,1014776 +/- 1,243915
%50 CO2 - %45 N - %5 Ar					
			0,5 GeV		
			1,0 GeV		
Toplam Yanıt (Parçacık/cm2/birincil)			2,6324013E-04 +/- 3,454831	%	2,4997309E-04 +/- 1,509655
(Parçacık/birincil)			0,1052960 +/- 3,454831	%	9,9989235E-02 +/- 1,509655
			2,0 GeV		
			4,0 GeV		
Toplam Yanıt (Parçacık/cm2/birincil)			2,7182145E-04 +/- 2,369399	%	2,6154387E-04 +/- 1,743543
(Parçacık/birincil)			0,1087286 +/- 2,369399	%	0,1046175 +/- 1,743543
%60 CO2 - %35 N - %5 Ar					
			0,5 GeV		
			1,0 GeV		
Toplam Yanıt (Parçacık/cm2/birincil)			2,5891807E-04 +/- 2,026898	%	2,4862544E-04 +/- 0,9396095
(Parçacık/birincil)			0,1035672 +/- 2,026898	%	9,9450178E-02 +/- 0,9396095
			2,0 GeV		
			4,0 GeV		
Toplam Yanıt (Parçacık/cm2/birincil)			2,5435170E-04 +/- 1,511330	%	2,6205651E-04 +/- 3,450863
(Parçacık/birincil)			0,1017407 +/- 1,511330	%	0,1048226 +/- 3,450863

Çizelge 4.28. Oluşan fotonların beşinci gaptaki USRBDX sonuçları

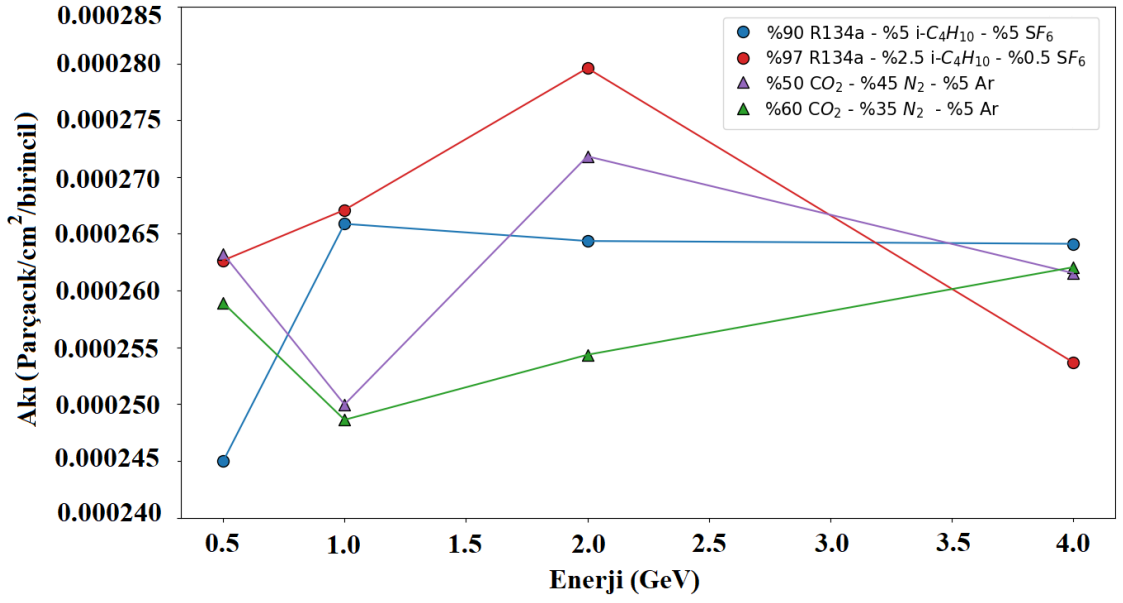
%90 R134a - %5 i-C4H10- %5 SF6					
			0,5 GeV		
			1,0 GeV		
Toplam Yanıt (Parçacık/cm2/birincil)			6,3012645E-05 +/- 4,129529		6,6640729E-05 +/- 3,435656
(Parçacık/birincil)			2,5205057E-02 +/- 4,129529		2,6656292E-02 +/- 3,435656
			2,0 GeV		
			4,0 GeV		
Toplam Yanıt (Parçacık/cm2/birincil)			6,9490154E-05 +/- 3,829518	%	7,5934586E-05 +/- 2,043358
(Parçacık/birincil)			2,7796060E-02 +/- 3,829518	%	3,0373834E-02 +/- 2,043358
%97 R134a - %2,5 i-C4H10- %0,5 SF6					
			0,5 GeV		
			1,0 GeV		
Toplam Yanıt (Parçacık/cm2/birincil)			6,4120410E-05 +/- 5,126383	%	6,8864385E-05 +/- 2,435566
(Parçacık/birincil)			2,5648164E-02 +/- 5,126383	%	2,7545756E-02 +/- 2,435566
			2,0 GeV		
			4,0 GeV		
Toplam Yanıt (Parçacık/cm2/birincil)			6,4973996E-05 +/- 3,601289	%	6,2879088E-05 +/- 2,051021
(Parçacık/birincil)			2,5989600E-02 +/- 3,601289	%	2,5151635E-02 +/- 2,051021
%50 CO2 - %45 N - %5 Ar					
			0,5 GeV		
			1,0 GeV		
Toplam Yanıt (Parçacık/cm2/birincil)			6,4049054E-05 +/- 2,104459	%	7,1129609E-05 +/- 3,541671
(Parçacık/birincil)			2,5619622E-02 +/- 2,104459	%	2,8451845E-02 +/- 3,541671
			2,0 GeV		
			4,0 GeV		
Toplam Yanıt (Parçacık/cm2/birincil)			7,0016358E-05 +/- 3,542295	%	7,4237876E-05 +/- 3,201835
(Parçacık/birincil)			2,8006544E-02 +/- 3,542295	%	2,9695151E-02 +/- 3,201835
%60 CO2 - %35 N - %5 Ar					
			0,5 GeV		
			1,0 GeV		
Toplam Yanıt (Parçacık/cm2/birincil)			6,3764281E-05 +/- 3,401291	%	6,9049733E-05 +/- 3,368546
(Parçacık/birincil)			2,5505710E-02 +/- 3,401291	%	2,7619893E-02 +/- 3,368546
			2,0 GeV		
			4,0 GeV		
Toplam Yanıt (Parçacık/cm2/birincil)			6,4783933E-05 +/- 2,399966	%	7,1035116E-05 +/- 3,256483
(Parçacık/birincil)			2,5913574E-02 +/- 2,399966	%	2,8414046E-02 +/- 3,256483

Şekil 4.39 – 4.41’de, Çizelge 4.26 – 4.28’de bulunan verilerden yola çıkarak; toplam yanıt (total response) değerlerinin, gönderilen müonların GeV cinsinden enerji değerlerine göre grafikleri çizilmiştir.



Şekil 4.39. Müonların detektörden çıkışındaki USRBDX sonuçlarının grafiği

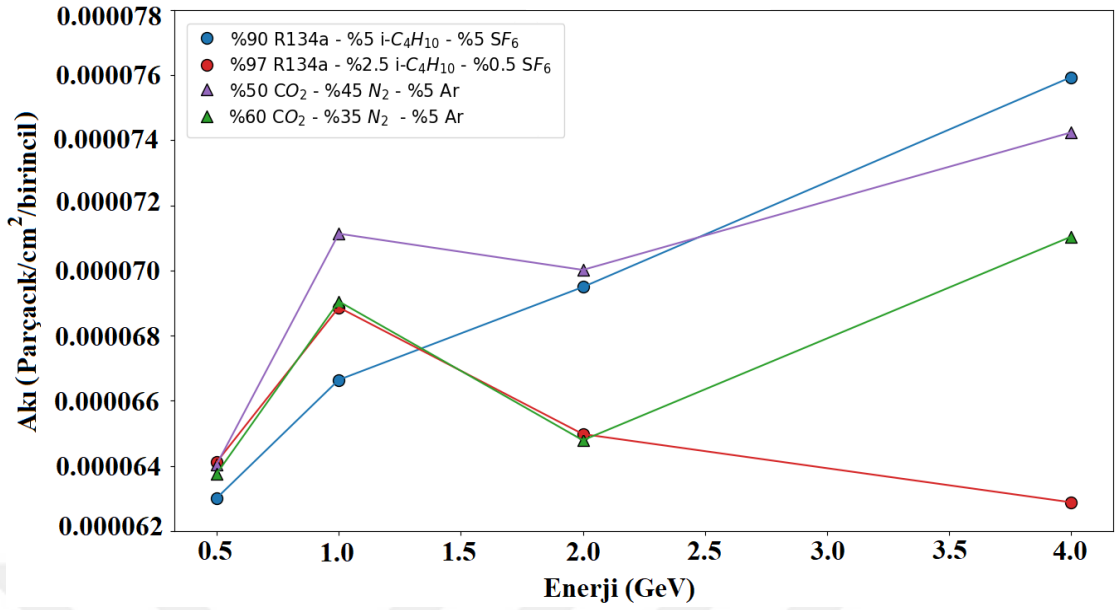
Detektörden çıkışındaki müon akılarının değerlerini gösteren Şekil 4.39 , Şekil 4.17 ile benzerlik göstermektedir. Bu beklenen bir sonuçtur, çünkü ikisi de müon akılarını göstermektedir. Aralarında küçük farkların olmasının sebebi, USRBDX grafiğinde söz konusu katı açılımlarındaki akı değerlerini vermesi; USRBIN sonucunda ise detektör içerisindeki toplam akı değerini göstermesinden dolayıdır.



Şekil 4.40. Oluşan elektronların beşinci gaptaki USRBDX sonuçlarının grafiği

Son gapta oluşan elektronların akısı, Şekil 4.40’de gösterilmiştir. Sonuçlar Şekil 4.18 ile benzerlik göstermektedir. İki grafikte de 0,5 GeV- 1,0 GeV, 2,0 GeV ve 4,0 GeV enerjili müonlar tarafından oluşturulan birincil elektron akılarının sonuçları bulunmaktadır. Detektör hacmine giren müonlardan 4,0 GeV enerjili olanlar önemlidir. Çünkü deniz seviyesine ulaşabilen müonların ortalama enerjisi 4,0 GeV’dir.

Şekil 4.40’da (4,0 GeV enerjili müonlar için) en az elektron akısına sahip olan gaz karışımı, %97 R134a - %2,5 i-C₄H₁₀ - %0,5 SF₆’dır. En fazla elektron akısına sahip olan gaz karışımı ise, %90 R134a - %5 i-C₄H₁₀ - %5 SF₆ olarak görülmektedir.



Şekil 4.41. Oluşan fotonların beşinci gaptaki USRBDX sonuçlarının grafiği

Şekil 4.41’de ise, farklı gaz karışımları barındıran detektör hacminin son gap içerisinde oluşan fotonların akı değerlerinin grafiği görülmektedir. Yapı itibari ile, Şekil 4.19 ile benzerlik gösterdiğini söyleyebiliriz.

Bizim için önemli olan fotonların değil, birincil elektronların oluşma miktarı; yani akısıdır. Gaz karışımı içerisinde, müon aracılığı ile ne kadar birincil elektron oluşursa, toplamda o kadar çok ikincil elektron oluşacağı anlamına gelmektedir. Elektronlar ne kadar çok olursa (elektronların meydana getirdiği sinyalin okunamayacak kadar karmaşık olmaması koşulu ile) o kadar net ve okunabilir sinyal üretilir ve biz de detektör içerisine giren parçacığın karakteristiği hakkında o kadar net sonuçlara varırız.

5. SONUÇ

USRBIN sonuçlarının yorumu:

- Şekil 4.17’de görüldüğü üzere 4,0 GeV enerjili müonların; %97 R134a - %2,5 i-C₄H₁₀ - %0,5 SF₆ , %50 CO₂ - %45 N₂ - %5 Ar, %60 CO₂ - %35 N₂ - %5 Ar gaz karışımlarındaki müon akıları birbirine çok yakın bir değere sahipken, %90 R134a - %5 i-C₄H₁₀ - %5 SF₆ gaz karışımındaki müon akısı diğerlerinden daha küçüktür. Bunun sebebinin, gaz karışımı içerisinde bulunan SF₆ oranının fazlalığından kaynaklı olduğu düşünülmektedir.
- Özellikle 4,0 GeV enerjili müonların (deniz seviyesine düşen kozmik müonların ortalama enerjisi olduğundan dolayı); çeşitli gaz karışımları bulan detektör hacminde meydana getirdiği elektronların akı değerleri, Şekil 4.18’de görülmektedir. En yüksek elektron akısı %90 R134a - %5 i-C₄H₁₀ - %5 SF₆ gaz karışımında meydana gelmiştir. Bu durum bize sözü edilen gaz karışımının kullanıma daha elverişli olduğunu gösterir. Elektron akısı ne kadar çok ise, elde edilen sinyal de o kadar yüksek olup; okuma şeritleri tarafından algılanabilmesini kolaylaştırır.
- En çok foton üretimi (Şekil 4.19), %50 CO₂ - %45 N₂ - %5 Ar gaz karışımı içerisinde meydana gelmiştir. Bu durum genel olarak istenmeyen bir durumdur. Çünkü detektör materyalinde fotoelektrik etkileşimleri sebebi ile yaşlanma (aging) olayı meydana getirebilir.
- Şekil 4.20’den görüldüğü üzere toplam depo edilen enerji tüm gaz karışımları için birbirine yakın değerdedir. Bunun sebebi kimyasal karakteristiklerinden ziyade, yoğunluklarının az olmasından ve gelen parçacığın enerjisinin nispeten yüksek olmasından kaynaklıdır.

- Müonlar tarafından detektörün gaz hacmi içerisinde oluşan en yüksek pozitron akısı %97 R134a - %2,5 i-C₄H₁₀ - %0,5 SF₆ gaz karışımında meydana gelmiştir. Oysa pozitron üretimi detektör içerisinde gerçekleşmesini istemediğimiz bir durumdur. Bunun sebebi, elektronlar ile etkileşime girerek elektron akısı kaybı meydana getirebileceğinden dolayıdır.

DETECT sonuçlarının yorumu:

- Gelen müonların enerjilerine göre, %90 R134a - %5 i-C₄H₁₀ - %5 SF₆ , %97 R134a - %2,5 i-C₄H₁₀ - %0,5 SF₆ , %50 CO₂ - %45 N₂ - %5 Ar, %60 CO₂ - %35 N₂ - %5 Ar gaz karışımlarında meydana gelen depolanan enerji histogram grafiklerinin ortalamalarında, beklenildiği gibi ufak artışlar görülmüştür.
- Gaz karışımlarına göre, müonların söz konusu enerji değerlerinde meydana getirdiği toplam depolanan enerjilerin histogram grafikleri ise neredeyse birebir benzerlik göstermiştir. Bu da düşük yoğunluklu gaz karışımları için beklenen bir durumdur.
- Histogram grafikleri görmeyi beklediğimiz gibi Landau dağılımına uymaktadır.

USRTRACK sonuçlarının yorumu:

- Şekil 4.38’de görüldüğü üzere, gelen müonların enerjisi arttıkça; gap numaralarına göre iz uzunluklarındaki en fazla azalış (yani en fazla etkileşim), %90 R134a - %5 i-C₄H₁₀ - %5 SF₆ gaz karışımı içerisinde gerçekleşmiştir.

USRBDX sonuçlarının yorumu:

- USRBDX ve USRBIN sonuç grafikleri, beklenildiği gibi yapısal olarak benzerlik göstermektedir.

Çıkarılan sonuç:

- Tasarladığımız detektörde yapılan benzetim sonuçlarından yola çıkarak, meydana getirdiği görece yüksek elektron akısı göz önüne alındığında, gaz karışımları arasından kullanıma en uygun olan %90 R134a - %5 i-C₄H₁₀ - %5 SF₆'dır. Aynı zamanda bu gaz karışımı, RPC ve MRPC detektörü ile yapılan çeşitli deneylerde; en çok tercih edilen gaz karışımıdır.



KAYNAKLAR

Abbrescia, M., Peskov, V., Fonte, P. (2018). Resistive Gaseous Detectors – Designs, Performance and Perspectives. Weinhem, Almanya: WILEY-VCH

Alesini, D. (2016) Linear Accelerators (INFN-LNF, Frascati, Rome, Italy). Eriřim adresi: https://indico.cern.ch/event/532397/contributions/2170633/attachments/1343755/2049275/Alesini_LINEAR_ACCELERATORS.pdf

Aydın, A. (2015). FOTON DETEKSİYONU İÇİN RPC DETEKTÖR VERİMİNİN SİMÜLASYON (Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Bursa). Eriřim adresi: <https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/689154>

Bichsel, H. (2006), A method to improve tracking and particle identification in TPCs and silicon detectors, Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research A 562 (2006) 154–197, doi: 10.1016/j.nima.2006.03.009

Bichsel, H., Groom, D.E., Klein, S. R. (2006). PASSAGE OF PARTICLES THROUGH MATTER. W.-M. Yao et al., Journal of Physics G 33, 1 (2006). Eriřim adresi: http://atlas.physics.arizona.edu/~shupe/Physics_Courses/Phys_586_S2015_S2016_S2017/Readings/07_dEdXReviewArticle.pdf

Bonomi, G. Checchia, P. D’Errico, M. Pagano, D. Saracino, G. (2020). Applications of cosmic-ray muons. Progress in Particle and Nuclear Physics 112 (2020) 103768. doi: 10.1016/j.ppnp.2020.103768

CERN BESIII (2014). Eriřim adresi: <https://home.cern/fr/node/4774>

CERN – indico (2003). Eriřim adresi: <https://indico.cern.ch/event/413977/attachments/844595/1175075/Lecture-3.pdf>

CHATTERJEE, L., BANDYOPADHYAY, B. K. A (1975). Comprehensive Study on Muon Energy Losses in the Energy Region $103 \leq E \leq 109$ MeV . Fortschritte der Physik 23, 691 -704 (1975) . doi: 10.1002/prop.19750231103

CMS – CERN I. (2022). Eriřim adresi: <https://cms.cern/news/what-do-we-mean-cross-section-particle-physics>

CMS – CERN II. (2022), Eriřim adresi: <https://cms.cern/content/muon-tomography#:~:text=In%20multiple%20Coulomb%20scattering%2C%20particles,the%20material%20and%20are%20deflected>

Connor, N. (2019). What is Cloud Chamber – Principle of Operation – Definition. Eriřim adresi: <https://www.radiation-dosimetry.org/what-is-cloud-chamber-principle-of-operation-definition/>

David Griffiths (2015). Temel Parçacıklara Giriş. Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık.

Demir, N. (2022). DYE F Ders Notları. Bursa Uludağ Üniversitesi.

FLUKA Resmi Sitesi (2022). Eriřim adresi: <http://www.fluka.org/fluka.php> (E. Tarihi: 18.05.2022)

Franklin, M. (2020). Muons, muon detectors, and muon detectors I have known. Harvard University. Eriřim adresi: https://indico.fnal.gov/event/43762/contributions/192714/attachments/133107/163982/lecture_1_muon_detectors_final.pdf

Gupta, M. (2010). PH-EP-Tech-Note-2010-013 CERN. Eriřim adresi: <https://cds.cern.ch/record/1279627/files/PH-EP-Tech-Note-2010-013.pdf>

HyperPhysics (2022). Georgia Devlet Üniversitesi. Eriřim adresi: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Particles/hadron.html>

HyperPhysics (2022). Georgia Devlet Üniversitesi. Eriřim adresi: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Astro/cosmic.html>

Krane, K.S. (2001). Introductory Nuclear Physics. Weinheim, Almanya: WILEY-VCH

Kudryashev, M. (2017). Resolution in Electron Tomography. E. Hanssen (ed.), Cellular Imaging, Biological and Medical Physics. doi:10.1007/978-3-319-68997-5_10

Kıncay, O. (2020) Güneş Enerjisi Ders Notları II. Bölüm. Eriřim adresi: <https://dokumen.tips/documents/gunes-enerjisi021720.html?page=1>

Landau, L. D. (1965), ON THE ENERGY LOSS OF FAST PARTICLES BY IONISATION, doi: 10.1016/b978-0-08-010586-4.50061-4

Leo, W.R. (1994). Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments A How-to Approach. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH. doi: 10.1007/978-3-642-57920-2

Lippmann, C. (2003). Detector Physics of Resistive Plate Chambers (Doktora Tezi, Johann Wolfgang Goethe Üniversitesi, Almanya). Eriřim adresi: <https://dnb.info/968973019/34>

Nagamine, K. (2003). Introductory Muon Science. Cambridge, İngiltere: CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS.

Nagashima, Y. (2013). Elementary Particle Physics. Weinheim, Almanya: WILEY-VCH

Needels, T. S., Nielsen, C. E. (1950). A Continuously Sensitive Cloud Chamber. Review of Scientific Instruments 21, 976 (1950). doi: 10.1063/1.1745501

Quincey, P (2020). Solid angles in perspective. Published in Physics Education 55 (2020) 055003 (7pp). Eriřim adresi: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2108/2108.05226.pdf>

Shukla, P., Sankrith, S. (2018). Energy and angular distributions of atmospheric muons at the Earth. 95.85.Rj, 98.70.Sa .Eriřim adresi: <https://arxiv.org/pdf/1606.06907.pdf>

Stefano, M. Multiple scattering for particles in matter, CERN. Eriřim adresi: https://meroli.web.cern.ch/lecture_multiple_scattering.html

şahin, Ö. (2020). Yüklü Parçacık Fiziği Ders Notları. Bursa Uludağ Üniversitesi.

UC Santa Barbara Üniversitesi – Fizik 103 Ders Notları (2015). Eriřim adresi: <http://web.physics.ucsb.edu/~fratus/phys103/LN/Scattering.pdf>

