



T.C.  
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



[Yüksek Lisans Tezi]

[BASİTLEŞTİRİLMİŞ FACET DEDEKTÖRÜNDE ENERJİ  
DAĞILIMI SİMÜLASYONU]

[Semina KUŞ]

[Fizik Anabilim Dalı]

[Yüksek Enerji ve Plazma Fiziği Programı]

DANIŞMAN  
[Dr. Öğr. Üyesi] [Hale SERT]

[Aralık, 2024]

İSTANBUL

Bu çalışma, [2.12.2024] tarihinde aşağıdaki jüri tarafından [Fizik Anabilim Dalı], [Yüksek Enerji ve Plazma Fiziği Programı]nda [Yüksek Lisans tezi] olarak kabul edilmiştir.

### Tez Jürisi

[Dr. Öğr. Üyesi] [Hale SERT] (Danışman)  
İstanbul Üniversitesi  
[Fen Fakültesi]

[Prof. Dr.] [Suat ÖZKORUCUKLU]  
[İstanbul Üniversitesi]  
[Fen Fakültesi]

[Prof. Dr.] [Bora IŞILDAK]  
[Yıldız Teknik Üniversitesi]  
[Fen Edebiyat Fakültesi]

## İntihal Programı Beyanı

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



## ÖNSÖZ

[Yüksek lisans eğitimim boyunca sabır ve özveriyle yanımda olan hiçbir yardımını esirgemeyen saygıdeğer danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Hale Sert'e çok teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım sırasında değerli bilgi ve deneyimleriyle bana destek olan saygıdeğer hocam Prof. Dr. Suat Özkorucuklu'ya teşekkür ederim. Yüksek lisans eğitimim boyunca dostluklarına ve yardımlarına minnettar olduğum Erdal Çatak ve Cansu Arman'a teşekkür ederim. Yüksek lisans eğitimimde bilgi ve tecrübeleriyle bana yardımcı olan Orhan Aydilek'e teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca yanımda olan ve beni destekleyen aileme teşekkür ederim. ]

Aralık 2024

[Semina KUŞ]

# İÇİNDEKİLER

Sayfa No

[ÖNSÖZ .....	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİL LİSTESİ .....	vii
TABLO LİSTESİ.....	viii
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ .....	ix
ÖZET .....	x
SUMMARY .....	xii
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. GENEL KISIMLAR</b> .....	<b>3</b>
2.1. TEMEL PARÇACIK FİZİĞİ.....	3
2.2. STANDART MODEL .....	3
2.3. STANDART MODEL ÖTESİ TEORİLER.....	6
2.4. YÜKLÜ PARÇACIKLARIN MADDE İLE ETKİLEŞİMLERİ .....	7
2.4.1. İyonizasyon ve Uyarılma.....	7
2.4.2. Bremsstrahlung .....	8
2.5. FOTONLARIN ETKİLEŞMELERİ .....	9
2.5.1. Fotoelektrik Olay .....	9
2.5.2. Compton Olayı .....	9
2.5.3. Çift Oluşumu .....	10
2.6. BÜYÜK HADRON ÇARPIŞTIRICISI .....	10
2.6.1. Kompakt Müon Selenoidi (CMS Dedektörü).....	11
2.6.1.1. İz sürücü.....	12
2.6.1.2. Kalorimetreler .....	13
2.6.1.3. Miknatis (Magnet) .....	14
2.6.1.4. Müon Sistemi .....	15
2.7. FACET DEDEKTÖRÜ .....	16
2.7.1. Karanlık Madde .....	17
2.7.2. Soğurucu Tasarımı.....	17
2.7.3. Hodoskop.....	18
2.7.4. Vakum Alanı (Bozunma Hacmi) ve Işın Borusu Tasarımı .....	18

2.7.5. İz Takip Dedektör Tasarımı.....	18
2.7.6. Kalorimetrelerin Tasarımı .....	19
<b>3. MALZEME VE YÖNTEM.....</b>	<b>20</b>
3.1.BASİTLEŞTİRİLMİŞ PRE-FACET VE PRE-FACET DEDEKTÖRÜ GEOMETRİSİ.....	20
3.2. FLUKA .....	21
3.3. FLAIR .....	22
3.3.1. Birincil parçacıkların tanımı.....	23
3.3.2. Geometri.....	23
3.3.3. Malzemeler .....	26
3.3.4. Tahminciler ve Dedektörler.....	27
3.4. BASİTLEŞTİRİLMİŞ PRE-FACET DEDEKTÖRÜ FLUKA SİMÜLASYONU.....	27
3.5. PRE-FACET DEDEKTÖRÜ FLUKA SİMÜLASYONU.....	28
<b>4. BULGULAR.....</b>	<b>30</b>
4.1. BASİTLEŞTİRİLMİŞ PRE-FACET DEDEKTÖRÜ FLUKA TESTLERİ .....	30
4.2. PRE-FACET DEDEKTÖRÜ FLUKA TESTLERİ .....	34
<b>5. TARTIŞMA VE SONUÇ .....</b>	<b>39</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>40</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>42</b>

]

## ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 2. 1: Standart Model [6].....	4
Şekil 2. 2: Compton saçılmasında kinematik değişkenlerin tanımı [11]. ....	10
Şekil 2. 3: Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (LHC) [12].....	11
Şekil 2. 4: CMS dedektör yapısıdır [12]. ....	12
Şekil 2. 5: Kalorimetrelere içerisinden geçen parçacıkların oluşturdukları parçacık yağmurları [14].....	12
Şekil 2. 6: İzleyici (Tracker) [12].....	13
Şekil 2. 7: Elektromanyetik kalorimetre (solda) ve hadronik kalorimetre (sağda) [15]. ....	14
Şekil 2. 8: Magnet (süperiletken mıknatıs) [15].....	15
Şekil 2. 9: CMS müon sistemi [15].....	15
Şekil 2. 10: FACET geometrisi [9]. ....	16
Şekil 3. 1: Basitleştirilmiş Pre-FACET geometrisinin iki boyutta çizimi.....	20
Şekil 3. 2: Pre-FACET geometrisinin iki boyutta çizimi. ....	20
Şekil 3. 3: Küre (SPH) (solda) ve dikdörtgen paralel yüzlü (RPP) (sağda) [17,18]. ....	24
Şekil 3. 4: Sağ dairesel silindir (RCC) [17,18]. ....	25
Şekil 3. 5: Y eksenine paralel sonsuz dairesel silindir (YCC) [17,18]. ....	25
Şekil 3. 6: Z eksenine dik bir düzlemlle sınırlanmış sonsuz yarım uzay (XYP) [17,18]. ....	26
Şekil 3. 7: Fluka programı kullanılarak elde ettiğimiz geometrinin gösterimi. ....	28
Şekil 3. 8: Fluka programıyla Pre-FACET geometrisine gönderilen ışın gösterimi.....	28
Şekil 3. 9: Fluka programı kullanılarak elde ettiğimiz Pre-FACET geometrisinin gösterimi. ....	29
Şekil 4. 1: Soğurucu (Absorber)'da 100 olay (event) sonucu oluşan XY enerji dağılım grafiği.....	30

<b>Şekil 4. 2:</b> Soğurucu (absorber) üzerinde z: 0-1 cm arasında XY iki boyutlu enerji dağılım grafiği (solda) ve z: 1-2 cm arasında (sağda). .....	30
<b>Şekil 4. 3:</b> Soğurucu (absorber) üzerinde tek boyutta X enerji dağılım grafiği (solda) ve Y enerji dağılım grafiği (sağda). .....	31
<b>Şekil 4. 4:</b> Ön hodoskop (front hodoscope) üzerinde iki boyutta XY enerji dağılım grafiği. ....	32
<b>Şekil 4. 5:</b> Tracker (iz sürücü) üzerinde iki boyutta XY enerji dağılım grafiği (solda) ve arka hodoskop (back hodoscope) üzerindeki grafiği (sağda). ....	32
<b>Şekil 4. 6:</b> HGICAL z: 24.30-25.30 iki boyutta XY enerji dağılım grafiği (solda) ve HGICAL z: 25.30-26.30 grafiği (sağda). ....	33
<b>Şekil 4. 7:</b> 10200-10300 cm de olan soğuru üzerinde ilk 10 cm için iki boyutta XY enerji dağılım grafiği (solda) ve son 10 cm için grafiği (sağda). ....	34
<b>Şekil 4. 8:</b> Ön hodoskop1 (front hodoscope) üzerinde iki boyutta XY enerji dağılım grafiği (solda) ve ön hodoskop3 üzerindeki grafiği (sağda). ....	35
<b>Şekil 4. 9:</b> İzci (tracker) 1. plaka üzerinde iki boyutta XY enerji dağılım grafiği. ....	36
<b>Şekil 4. 10:</b> İz sürücü (tracker) son plaka üzerinde iki boyutta XY enerji dağılım grafiği. ....	36
<b>Şekil 4. 11:</b> Arka hodoskop1 üzerinde iki boyutta XY enerji dağılım grafiği (solda) ve arka hodoskop3 üzerindeki grafiği (sağda). ....	37
<b>Şekil 4. 12:</b> Elektromanyetik kalorimetre üzerinde iki boyutta XY enerji dağılım grafiği (solda) ve hadronik kalorimetre üzerindeki grafiği (sağda). ....	37

## TABLO LİSTESİ

	<b>Sayfa No</b>
<b>Tablo 2. 1:</b> Özelliklerine göre kuarklar [7,8]......	5
<b>Tablo 2. 2:</b> Leptonlar; elektrik yükleri ve kütlelerine göre [7,8]......	5
<b>Tablo 2. 3:</b> Temel kuvvetler ve bu kuvvetlerin taşıyıcı bozonları [7,8]. .....	6



## SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
$c$	: Işığın vakum altında hızı
$E$	: Enerji
$e^-$	: Elektron
$H$	: Higgs bozonu
$K$	: Kaon
$P$	: Momentum
$V$	: Hız
$\pi$	: Pion
$\mu$	: Müon
$\tau$	: Tau
$\gamma$	: Foton

Kısaltmalar	Açıklama
<b>BSM</b>	: Standart Model Ötesi (Beyond the Standard Model)
<b>CERN</b>	: Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi
<b>CMS</b>	: Kompakt Müon Selenoidi (Compact Muon Solenoid)
<b>FACET</b>	: CMS için tasarlanan alt dedektör sistemi
<b>FLAIR</b>	: Fluka arayüzü
<b>FLUKA</b>	: Simülasyon programı
<b>LHC</b>	: Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (Large Hadron Collider)
<b>Pre-Facet</b>	: Ön Facet alt dedektör çalışması
<b>SM</b>	: Standart Model (Standard Model)

]

## ÖZET

### [YÜKSEK LİSANS TEZİ]

#### [BASİTLEŞTİRİLMİŞ FACET DEDEKTÖRÜNDE ENERJİ DAĞILIMI SİMÜLASYONU ]

1

[Semina KUŞ]

**İstanbul Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

[Fizik Anabilim Dalı]

**Danışman: [Dr. Öğr. Üyesi]Hale SERT ]**

İleri açıklık CMS uzantısı (Forward Aperture CMS ExTension, FACET) dedektörü, Standart Model ötesindeki uzun yaşam süresine sahip (Long Lived Particle, LLP) parçacıkların aranması için Kompakt Müon Selenoidi (Compact Muon Solenoid, CMS) dedektörünün bir uzantısı olarak kurulması önerilen bir dedektördür. FACET dedektöründe farklı yeni fizik modellerinin önerdiği uzun yaşam süresine sahip karanlık higgs, karanlık fotonlar, ağır nötr leptonlar gibi parçacıkların aranması planlanmaktadır. Ayrıca bu dedektörlerde görülen izleri geriye dönük olarak yapılandırarak keşfedilmemiş parçacıklar, yeni fizik veya hassas ölçümlerin bulunması amaçlanmaktadır. FACET, kütle ve bağlantıların parametre uzayında benzersiz bir alanı keşfedecek, diğer mevcut ve önerilen aramaları büyük ölçüde tamamlayacaktır.

FACET dedektörü; hodoskop, bozunma hacmi, silikon iz-takip dedektörleri, elektromanyetik ve hadronik kalorimetreler olmak üzere birçok alt dedektörden oluşur. CMS dedektörünün çarpışma noktasının yaklaşık 100 m ilerisine kurulması önerilen FACET dedektörü ile çok ileri

bölgede bozunan parçacıkların, yüksek hassasiyetli izleme dedektörleri, yüksek granülerli hadronik kalorimetre ve hodoskop gibi alt dedektörler tarafından ölçülmeleri amaçlanmaktadır.

Gelişim aşamasında olan FACET dedektörünün farklı geometrik yapıları çalışılmaktadır. Bu çalışmada da basitleştirilmiş geometri olan Pre-FACET dedektörü ve daha gerçekçi olan geliştirilmiş Pre-FACET dedektörü çalışılmıştır. Basitleştirilmiş Pre-FACET ve Pre-FACET dedektör geometrilerinin alt dedektörlerindeki parçacık, enerji yoğunluğu Fluka programı ile simüle edilecektir. ]

Aralık 2024, [56] sayfa.

**Anahtar kelimeler:**[FACET dedektörü, FLUKA simülasyonu, uzun ömürlü parçacıklar]

## **SUMMARY**

**[M.Sc. THESIS]**

**[SIMULATION OF ENERGY DISTRIBUTION IN A SIMPLIFIED FACET  
DETECTOR]**

**[Semina KUŞ]**

**İstanbul University**

**Institute of Graduate Studies in Sciences**

**[Department of Physics]**

**Supervisor : [Assist. Prof. Dr.] [Hale SERT]**

[The FACET (Forward Aperture CMS ExTension) detector is a detector proposed to be built as an extension of the CMS detector to search for long-lived (LLP) particles beyond the Standard Model. The FACET detector is planned to search for particles such as dark higgs, dark photons, heavy neutral leptons with long lifetimes suggested by different new physics models. In addition, by retrospectively reconstructing the tracks seen in these detectors, it is aimed to find undiscovered particles, new physics or precise measurements. FACET will explore a unique area in the parameter space of mass and connections, and will largely complement other existing and proposed searches.

The FACET detector consists of many sub-detectors, including hodoscope, decay volume, silicon track-tracking detectors, electromagnetic and hadronic calorimeters. With the FACET detector, which is recommended to be installed approximately 100 m ahead of the collision point of the CMS detector, the particles decaying in the very forward region are aimed to be

measured by sub-detectors such as high-sensitivity tracking detectors, high-granularity hadronic calorimeters and hodoscopes.

Different geometric structures of the FACET detector, which is in the development phase, are being studied. In this study, the simplified geometry Pre-FACET detector and the more realistic improved Pre-FACET detector were studied. The particle energy density in the sub-detectors of the simplified Pre-FACET and Pre-FACET detector geometries will be simulated with the Fluka program.

]

December 2024, [56] pages.

**Keywords:** [FACET detector, FLUKA simulation, long lived particle]

## 1. GİRİŞ

[Evrenin doğasını ve temel işleyişini kavramak için maddenin temel yapıtaşları olan temel parçacıkları ve bu parçacıkların birbiriyle etkileşimini anlamak gerekir. Bu doğrultuda parçacık fiziği evrenin düzenini anlamamızı sağlar. Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi (European Nuclear Research Centre, CERN)'nde yer alan Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (Large Hadron Collider, LHC) maddenin temel yapıtaşları olan temel parçacıkları ve bu parçacıkları bir arada tutan temel kuvvetlerin araştırılması için protonları yüksek enerjilere çıkarmaktadır. Parçacık fiziği araştırmalarında LHC'nin Standart Model ötesindeki yeni fizik araştırmaları ile yüksek enerji fiziği alanında çok önemli buluşlar yapması hedeflenmiştir.

Bu çalışmanın amacı basitleştirilmiş Ön İleri Açıklık CMS Uzantısı (Pre Forward Aperture CMS ExTension, Pre-FACET) dedektör geometrisini ve geliştirilmiş Pre-FACET geometrisini Fluka programı kullanarak simüle etmektir. Bu çalışma aynı zamanda Fluka programıyla, yüksek enerji fiziği için dedektör tasarlayıp, parçacık taşınmasını ve madde ile etkileşimlerini hesaplamayı hedeflemektedir. Pre-FACET dedektörlerinin alt dedektörlerdeki enerji, parçacık yoğunluğu grafikleri karşılaştırılacaktır.

Genel kısımlarda; temel parçacık fiziği anlatılmıştır. Parçacık fiziğinde temel olarak kabul edilen Standart Model ele alınmıştır. Aynı zamanda Standart Modelin yetersiz kaldığı noktada devreye giren Standart Model Ötesi yeni fiziğe değinilmiştir. Büyük Hadron Çarpıştırıcısının yapısı ve LHC'de yer alan Kompakt Müon Selenoidi (Compact Muon Solenoid, CMS) dedektörü açıklanmıştır. CMS dedektörünün alt dedektörleri ve bu dedektörlerin amaçları ayrı ayrı olarak verilmiştir. Aynı zamanda bu kısımda CMS'ye eklenmesi planlanan İleri Açıklık CMS uzantısı (Forward Aperture CMS ExTension, FACET) dedektörünün yapısı açıklanmış ve Standart Model Ötesi uzun ömürlü parçacıkların varlığı bu dedektör yardımıyla incelenmiştir. FACET dedektörünün alt dedektörleri ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

Malzeme ve yöntem başlığı altında, basitleştirilmiş Pre-FACET ve Pre-FACET dedektörlerinin simülasyonun çizmek için kullanacağımız program olan Fluka anlatılmıştır. Fluka programının arayüzü olarak kullandığımız Flair hakkında bilgiler verilmiştir.

Bulgular kısmında ise Fluka programı kullanılarak basitleştirilmiş Pre-FACET ve Pre-FACET dedektörlerinin simülasyonu ve alt dedektörlerinin geometrisi çizilmiştir. Pre-FACET geometrilerinin alt dedektörlerindeki parçacık yoğunluğu grafikleri Fluka programı kullanılarak çizilip karşılaştırılmıştır. ]



## 2. GENEL KISIMLAR

### 2.1. TEMEL PARÇACIK FİZİĞİ

Günlük yaşam klasik mekanik tarafından yönetilir. Ancak ışık hızına yakın hızlarda hareket eden nesnelere için klasik kurallar özel görelilik tarafından değiştirilir. Atom boyutlarıyla karşılaştırılabilecek kadar çok küçük nesnelere için ise klasik mekanik kuantum mekaniği tarafından değiştirilir. Sonuç olarak hem hızlı hem de küçük olan şeyler için, görelilik ve kuantum ilkelerini içeren teori 'kuantum alan teorisi'dir. Temel parçacıklar çok küçük ve çok hızlı oldukları için kuantum alan teorisinin konusudur [1].

Temel parçacıklar, bilinen hiçbir alt yapısı olmayan parçacıklardır. Evrenin temel yapıtaşları bu parçacıklardır. Parçacıklar; doğadaki dört temel kuvvet aracılığıyla etkileşime girerler. Bu kuvvetler; elektromagnetik kuvvet, şiddetli kuvvet, zayıf kuvvet ve kütle çekim kuvvetidir. Evrenin işleyişini ve doğasını anlamak için parçacık etkileşimlerini anlamak gerekir. Yapılan çarpışma deneylerinde 20. yüzyılın sonlarına doğru birçok temel parçacık keşfedildi. Temel parçacıkları açıklayan teori ise Standart Model (SM) olarak bilinir [2].

Ancak Standart Modelin yetersiz kaldığı bazı noktalar vardır. Kütle çekim kuvvetini açıklayamaması ya da serbest parametrelerin değerlerini öngörememesi gibi eksikleri vardır. Dolayısıyla bu noktaları açıklamak için Standart Model ötesi fizik arayışına girilmiştir [2,3].

### 2.2. STANDART MODEL

Standart Model teorisi, evrendeki temel parçacıkları ve bu parçacıklar arasındaki etkileşimleri açıklayan teoridir. SM, günümüzde birçok deneysel veriyle doğrulanmış olup, parçacık fiziğinde temel olarak kabul edilen bir modeldir. Doğadaki üç temel kuvveti (elektromagnetik, zayıf ve şiddetli kuvvetler) ve bunları taşıyan temel parçacıkları kapsar. SM 20.yy'ın ikinci yarısında çok sayıda bilim insanının katkılarıyla oluşturuldu. Sheldon Glashow 1961'de zayıf ve elektromagnetik etkileşimleri birleştirmek için çalışmalar yaptı [4]. 1967'de ise Abdus Salam ve Steven Weinberg tüm parçacıklara kütle kazandıran Higgs mekanizmasını Glashow'un kuramı ile birleştirerek elektrozayıf kuramı bugünkü haline getirdi [5].

	Nesiller			Ayar Bozonları	Skaler Bozonlar
	I	II	III		
Kuarklar	u Yukarı	c Tılsım	t Üst	g Gluon	H Higgs
	d Aşağı	s Garip	b Alt	$\gamma$ Foton	
Leptonlar	e Elektron	$\mu$ Müon	$\tau$ Tau	Z Z Bozonu	
	$\nu_e$ Elektron Nötrinosu	$\nu_\mu$ Müon Nötrinosu	$\nu_\tau$ Tau Nötrinosu	W W Bozonu	

Şekil 2. 1: Standart Model [6].

Standart Modele göre temel parçacıklar ikiye ayrılır. Bunlar fermiyonlar ve bozonlardır. Fermiyonlar maddeyi oluşturan parçacıklardır. Şekil 2.1' de gösterildiği gibi SM'ye göre fermiyonlar; kuarklar ve leptonlar olmak üzere iki gruba ayrılır. Kuarkların spinleri ( $I_3$ )  $1/2$  ve elektrik yükleri  $2/3$  veya  $-1/3$ 'tür. Altı farklı kuark ve bunların antileri vardır. Bunlar; yukarı kuark (u), aşağı kuark (d), tılsım kuark (c), garip kuark (s), üst kuark (t) ve alt kuark (b) olarak isimlendirilirler. Kuarklar renk yükü, elektrik yükü, spin ve kütle gibi özelliklere sahiptir. Bunlardan spin ve kütle özellikleri tablo 2.1'de verilmiştir. Aynı zamanda temel kuvvetlerden olan elektromagnetik kuvvet, şiddetli kuvvet, zayıf kuvvet ile de etkileşmeye girerler. Kuarklar, gluonlar ile bir arada tutulur. Gluonlar; şiddetli kuvvetin etkileşim parçacığıdır. Kuarklar bir araya gelerek hadronları oluştururlar. Hadronlar da içerdikleri kuark çeşnilerine göre baryonlar ve mezonlar olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Üç kuarkın bir araya gelmesiyle baryonlar oluşur. Örneğin; proton (iki yukarı kuark ve bir aşağı kuark) ve nötron (iki aşağı kuark ve bir yukarı kuark) birer baryondur. Mezonlar ise bir kuark ve bir anti kuarktan oluşurlar. Mezonlara örnek; Pionlar ( $\pi$ ) ve kaonlar (K)'dır. Pionlar, pozitif, negatif veya nötr olabilirler ve genellikle nükleonlar (proton ve nötronlar) arasındaki güçlü kuvvetin aktarımını sağlarlar. Kaonlar ise, daha ağır mezonlardır ve zayıf etkileşimde rol oynarlar. Mezonlar, kısa ömürlüdür ve genellikle diğer parçacıklara bozunurlar [2,3].

**Tablo 2. 1:** Özelliklerine göre kuarklar [7,8].

Kuarklar	Spinleri	Kütleleri
u	$+\frac{1}{2}$	2.16±0.07 MeV
d	$-\frac{1}{2}$	4.70±0.07 MeV
c	$+\frac{1}{2}$	1.2730±0.0046 GeV
s	$-\frac{1}{2}$	93.5±0.8 MeV
t	$+\frac{1}{2}$	172.57±0.29 GeV
b	$-\frac{1}{2}$	4.183±0.007 GeV

Tablo 2.2'deki leptonlar temel parçacıklardır ve spini 1/2, elektrik yükleri 0 veya -1'dir. Bilinen altı lepton türü vardır. Bunlar sırasıyla elektron, elektron nötrinosu, müon, müon nötrinosu, tau lepton ve tau lepton nötrinosudur. Leptonlar, elektromanyetik kuvvetten etkilenirler. Güçlü etkileşim haricinde diğer tüm etkileşimlere de girerler. Nötrinolar ise elektrik yüküne sahip değildir ve yalnızca zayıf etkileşimde bulunurlar.

**Tablo 2. 2:** Leptonlar; elektrik yükleri ve kütlelerine göre [7,8].

Leptonlar	Elektrik yükleri	Kütleleri
$e^-$	$- e $	0.51099895000±0.00000000015 MeV
$\mu^-$	$- e $	105.6583755±0.0000023 MeV
$\tau^-$	$- e $	1776.93±0.09 MeV
$\nu_e$	0	0
$\nu_\mu$	0	0
$\nu_\tau$	0	0

Temel parçacıklar arasındaki etkileşimler, temel kuvvetler sayesinde gerçekleşir. Evrendeki dört temel kuvvetten üçü (şiddetli kuvvet, zayıf kuvvet ve elektromanyetik kuvvet) SM çerçevesinde açıklanabilmektedir. Tablo 2.3'te görüldüğü gibi temel kuvvetler ve bu kuvvetlerin taşıyıcı bozonları verilmiştir. Temel kuvvetlerin taşıyıcı parçacıklarına ise ayar bozonları denir. Ayar bozonları; foton, gluon, W ve Z bozonları ve gravitondur. Foton, elektrik yüklü parçacıklar arasındaki elektromanyetik kuvvetin taşıyıcı parçacığdır. Gluon, kuarklar arasındaki etkileşimleri yönetir. Şiddetli kuvvetin taşıyıcı parçacığdır. Şiddetli kuvvet, atom çekirdeğindeki proton ve nötronlar arasındaki bağları oluşturur. W ve Z bozonları ise zayıf

kuvvetin taşıyıcı parçacıklarıdır. Radyoaktif bozunmayı yönetirler. Zayıf kuvvet ile bir nötron, protona dönüşebilir. Yani zayıf kuvvet; parçacık türünün değişmesine sebep olabilir. Higgs bozonu ise, parçacıklara kütle kazandıran mekanizmanın anahtarıdır [2,3].

**Tablo 2. 3:** Temel kuvvetler ve bu kuvvetlerin taşıyıcı bozonları [7,8].

Kuvvet	Etkilenen parçacıklar	Aracı bozon
Güçlü kuvvet	Kuarklar	Gluon
Elektromanyetik kuvvet	Yüklü parçacıklar	Foton
Zayıf kuvvet	Kuarklar ve leptonlar	W ve Z bozonları
Kütle çekim kuvveti	Tüm kütleli parçacıklar	Graviton

### 2.3. STANDART MODEL ÖTESİ TEORİLER

Standart Model, evrenin temel işleyişini ve düzenini anlamamıza yardımcı olur. Parçacıkları ve temel kuvvetlerin üçünü (elektromagnetik, zayıf ve şiddetli kuvvetler) açıklamada başarılı olsa da eksik kaldığı noktalar vardır. Karanlık madde, karanlık enerjinin doğası gibi konular hala gizemini korumaktadır [2]. Dolayısıyla bu noktaları açıklamak için Standart Model Ötesi (Beyond Standard Model, BSM) fizik denilen yeni fizik arayışlarına girilmiştir. Standart Model Ötesi fizik ile evrenin daha derinlemesine anlaşılması hedeflenmektedir. Bu sayede nötrino salınımları, madde-antimadde asimetrisi, evrenin büyük kısmını oluşturan karanlık madde ve karanlık enerji gibi konuları araştırarak evreni daha iyi anlamamıza yardımcı olacaktır.

Standart Model Ötesi yeni fiziğin bir diğer araştırma konusu da uzun ömürlü parçacıklardır (Long Lived Particle, LLP). Uzun ömürlü parçacıkların varlığı Standart Model ötesinde birçok fizik modelinde tahmin edilmektedir. Bu parçacıklar, Karanlık madde (Dark Matter, DM) ve Standart Model (SM) parçacıkları arasında portal görevi görmektedir. Uzun ömürlü parçacıklar; karanlık higgs, karanlık fotonlar, ağır nötr leptonlar gibi parçacıklardır [9,10]. Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi (European Nuclear Research Centre, CERN) TeV kütle aralığında, Büyük Hadron Çarpıştırıcısında (Large Hadron Collider, LHC) bu tür parçacıkları aramaktadır. Ancak, bu yeni parçacıkların nispeten daha hafif (0.50 GeV) oldukları ve Standart Modelle zayıf etkileşime girme ihtimalleri vardır. Bu nedenle uzun ömürlü parçacıkların şimdiye kadar tespit edilememiş oldukları düşünülmektedir [10]. Yeni fizik modellerini keşfetmek için önerilen deneylerden biri de İleri Açıklık CMS Uzantısı (Forward Aperture CMS ExTension, FACET)

deneyidir. FACET, uzun ömürlü parçacıkları aramak için CMS'ye eklenmesi düşünülen CMS'ye entegre yeni bir alt sistemdir [9,10]. FACET ile Standart Model Ötesindeki uzun ömürlü parçacıklar aranacaktır.

## 2.4. YÜKLÜ PARÇACIKLARIN MADDE İLE ETKİLEŞİMLERİ

Parçacıklar, madde ile farklı şekillerde etkileşebilirler. Tez kapsamında basitleştirilmiş Pre-FACET ve Pre-FACET dedektörlerine gönderilen parçacığın, alt dedektör malzemeleri ile etkileşimi sonucunda oluşturduğu enerji dağılım simülasyonu inceleneceği için tezin bu kısmında yüklü parçacıkların etkileşimlerine göz atılacaktır.

Yüklü parçacıkların maddeyle olan etkileşimleri iyonizasyon ve uyarılma'dır. Görelî parçacıklar için bremsstrahlung enerji kayıpları da dikkate alınmalıdır. Fotonlar için ise süreç fotoelektrik etki, Compton saçılması ve elektronların çift üretimidir. Foton etkileşimlerinde üretilen elektronlar, dedektörün hassas hacmindeki iyonizasyonları aracılığıyla gözlemlenebilir.

### 2.4.1. İyonizasyon ve Uyarılma

Maddeden geçen yüklü parçacıklar, maddenin bağı elektronlarının uyarılması ve iyonizasyon yoluyla kinetik enerji kaybederler [11]. Bu uyarılma süreci aşağıdaki gibidir.



Düşük enerjili pozitronlar ve elektronlar iyonizasyon, Bhabha ve Moller saçılması ve pozitron yok olması gibi olaylarla kinetik enerjilerini kaybederler. İyonizasyonla enerji kaybı logaritmik olarak azalır. Pozitronlar ve elektronların dx uzunluğu başına dE ortalama enerji kaybı aşağıdaki gibidir:

$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 Z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left( \ln \frac{2m_e c^2 \gamma^2 \beta^2}{I} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right) \quad (2.2)$$

z: Gelen parçacığın yükü,

Z ve A: Ortamın atom numarası ve atom ağırlığı

$m_e$ : Elektronun durgun kütlesi

$r_e$ : Elektronun yarıçapı

$N_A$ : Avogadro numarası

I: Ortalama uyarma enerjisi

$\gamma$ : Lorentz faktörü

$\beta$ : Parçacığın rölativistik hızı

$\delta$ : yoğunluk etkisidir.

### 2.4.2. Bremsstrahlung

Yüklü parçacıklar, iyonizasyonla kayıplara ek olarak, geçtikleri ortamın çekirdeklerinin coulomb alanıyla etkileşmeler sonucunda enerji kaybederler. Yüklü parçacıklar çekirdeğin coulomb alanında yavaşlatılırsa, kinetik enerjilerinin bir kısmı fotonlar (bremsstrahlung) şeklinde yayınlanır [11].

Yüksek enerjiler için bremsstrahlung ile enerji kaybı şu şekildedir:

$$-\frac{dE}{dx} \approx 4a \cdot N_A \cdot \frac{Z^2}{A} \cdot Z^2 \left( \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{mc^2} \right)^2 \cdot E \ln \frac{183}{Z^{1/3}} \quad (2.3)$$

Burada Z ortamın atom numarası ve A atom ağırlığıdır,

z, m, E : Gelen parçacığın yükü, kütlesi ve enerjisi,

$\alpha$ : İnce yapı sabiti,

$\epsilon_0$  : Boş uzayın geçirgenliği,

e: Temel yük,

$N_A$  : Avogadro sayısıdır.

Elektronların bremsstrahlung ile enerji kaybı şu şekildedir:

$$-\frac{dE}{dx} \approx 4a \cdot N_A \cdot \frac{Z^2}{A} \cdot r_e^2 \cdot E \ln \frac{183}{Z^{1/3}} \quad (2.4)$$

Bremsstrahlung ile enerji kaybı parçacığın enerjisiyle orantılı ve gelen parçacıkların kütlesinin karesiyle ters orantılıdır.

Elektron kütlesi çok küçük olduğu için, bremsstrahlung enerji kayıpları elektronlar için önemli bir rol oynar. Elektronlar için enerji kaybı  $z = 1$ ,  $m = m_e$  alınarak denklem (2.3) ve denklem (2.4) kullanılarak aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{E}{X_0} \quad (2.5)$$

Burada  $X_0$  radyasyon uzunluğudur [11]. Radyasyon uzunluğu, elektron enerjisinin radyasyon kayıplarından dolayı  $1/e$  faktörüyle azaldığı uzunluğa denir.

## 2.5. FOTONLARIN ETKİLEŞMELERİ

Fotonlar, dedektör ortamında gerçekleşen etkileşmeler yoluyla dolaylı olarak bulunur [11]. Fotonların madde ile etkileşmeleri, yüklü parçacıkların iyonlaşma süreçlerinden farklıdır. Çünkü her foton etkileşmesinde, foton ya tamamen soğurulur ya da nispeten geniş bir açıyla saçılır. Fotonların etkileşmeleri; fotoelektrik olay, çift oluşumu ve Compton olayıdır.

### 2.5.1. Fotoelektrik Olay

Fotoelektrik olay bir foton ile atom arasında gerçekleşir. Fotonun enerjisi elektronun bağlanma enerjisinden büyük olduğu zaman foton soğurulur ve atomdan elektron kopmuş olur. Denklem (2.6)' da fotoelektrik olayla atomdan elektron koparılma süreci verilmiştir [11].



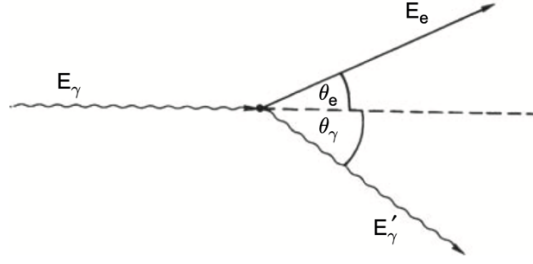
Fotoelektrik olayda elektronları yüzeyden koparabilmek için gerekli olan enerji, yüzeye çarpan fotonun enerjisine bağlıdır. Bu bağlantıyı veren denklem (2.7)'de verilmiştir [6].

$$E_k = h\nu - E_B \quad (2.7)$$

Burada  $E_B$  elektronun bağlanma enerjisi,  $h\nu$  fotonun enerjisi,  $E_k$  elektronun kinetik enerjisidir.

### 2.5.2. Compton Olayı

Compton etkisi Şekil 2.2'de gösterildiği gibi, orta enerji aralığındaki ( $E_\gamma \approx 1 \text{ MeV}$ ) fotonların, yarı serbest atomik elektronlardan saçılmasıdır. Etkileşmeden önce ve etkileşmeden sonraki toplam enerji ve toplam momentum korunur.



Şekil 2. 2: Compton saçılmasında kinematik değişkenlerin tanımı [11].

### 2.5.3. Çift Oluşumu

Çift oluşumu gama ışını gibi yüksek enerjili bir fotonun bir pozitron-elektron çiftine dönüşmesi sürecidir. Bir çekirdeğin coulomb alanında elektron-pozitron çiftlerinin üretebilmesi için foton enerjisinin belirli bir eşiği aşması gerekir [11]. Bu eşik enerjisi, iki elektronun durgun kütlesi ile çekirdeğe aktarılan geri tepme enerjilerinin toplamıdır. Enerji ve momentumun korunumu yasalarından, bu eşik enerjisi denklem (2.8)'deki gibi hesaplanabilir:

$$E_{\gamma} \geq 2m_e c^2 + 2 \frac{m_e^2}{m_{\text{çekirdek}}} c^2 \quad (2.8)$$

## 2.6. BÜYÜK HADRON ÇARPIŞTIRICISI

Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi (European Nuclear Research Centre, CERN) araştırma merkezi Dünyanın en yüksek enerjili parçacık çarpıştırıcısı olarak bilinen Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (Large Hadron Collider, LHC)'na sahiptir. LHC İsviçre-Fransa sınırında yerin 100 m altında 27 km uzunluğundadır. Protonlar, LHC'de çok yüksek hızlara çıkarılıp sonrasında dedektörlerde çarpıştırılacaktır. Bu parçacık hızlandırıcılarında, çarpışma ürünleri olarak ikincil parçacıklar oluşur. Oluşan bu ikincil parçacıkları ölçmek için de parçacık dedektörleri kullanılmaktadır. Ayrıca bu dedektörlerde görülen izleri geriye dönük olarak yapılandırarak keşfedilmemiş parçacıklar, yeni fizik veya hassas ölçümlerin bulunması amaçlanmaktadır [9,10]. Şekil 2.3'te görüldüğü gibi LHC üzerinde dört büyük dedektör yer alır. Bunlar; Kompakt Müon Selenoidi (Compact Muon Solenoid, CMS), Toroidal Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (A Toroidal LHC Apparatus, ATLAS), Büyük İyon Çarpıştırma Deneyi (A Large Ion Collider Experiment, ALICE) ve Büyük Hadron Çarpıştırıcı Güzelliği (Long Hadron Collider Beauty, LHC-b)'dir. Bunlardan CMS ve ATLAS dedektörleri yeni parçacıkları keşfetmek için yapılmış genel amaçlı dedektörlerdir.

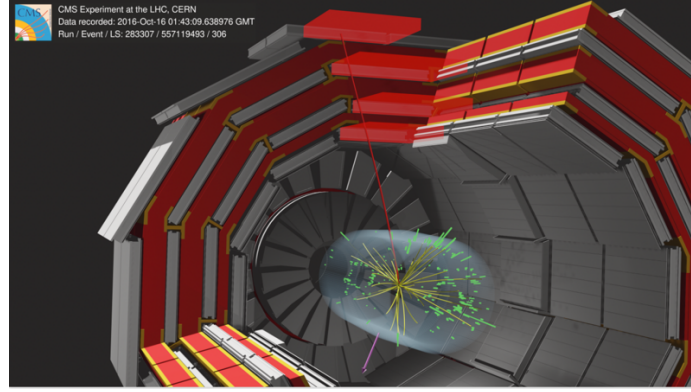


**Şekil 2. 3:** Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (LHC) [12].

LHC'de demet olarak gönderilen protonların hedef veya diğer maddelerle etkileşimi sonucunda hadronlar (proton, nötron, pionlar) oluşur. Oluşan bu parçacıklar yine ortamdaki maddelerle etkileşerek proton, nötron, elektron ve pozitron gibi ikincil parçacıkların oluşmasına neden olur. Bu süreçlerin sonucu olarak hedefin yakınında karışık bir radyasyon alanı oluşur (elektronlar, pozitronlar, fotonlar ve en önemlisi nötronlar kaynaklı radyasyon). Gönderilen birincil proton demetinin enerjisine göre oluşan ikincil parçacıkların ortalama sayısı ve enerjisi değişir. Oluşan nötronların radyasyonu yüksektir. Hızlı nötronları yavaşlatmak için demir, hidrojen gibi elementler kullanılır.

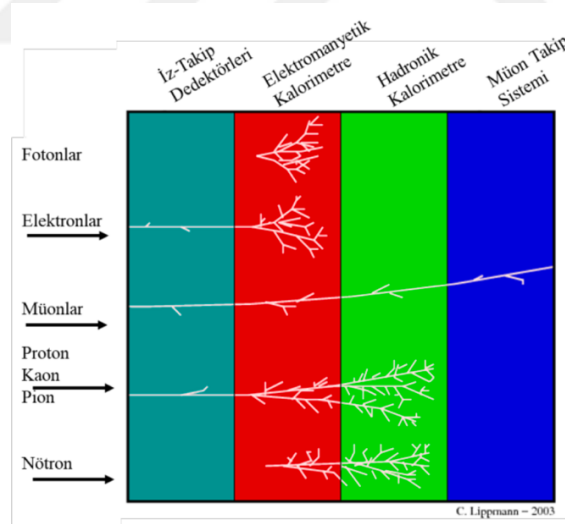
### 2.6.1. Kompakt Müon Selenoidi (CMS Dedektörü)

Kompakt Müon Selenoidi (Compact Muon Solenoid, CMS) deneyinde fizik araştırma spektrumu oldukça geniştir. Parçacıklara kütle kazandıran higgs bozununu araştırmak, madde anti madde asimetrisi, karanlık enerji ve karanlık madde problemleri ve yeni parçacıkları keşfetmek için yapılmış genel amaçlı bir dedektördür. Şekil 2.4'te gösterildiği gibi CMS yapısı silindiriktir. CMS içten dışa doğru sırasıyla, izleyici, elektromanyetik kalorimetre, hadronik kalorimetre, süper iletken halka ve en dışta geri döndürücü halkalar ile birbirinden ayrılan müon odacıklarından oluşur [13].



Şekil 2. 4: CMS dedektör yapısıdır [12].

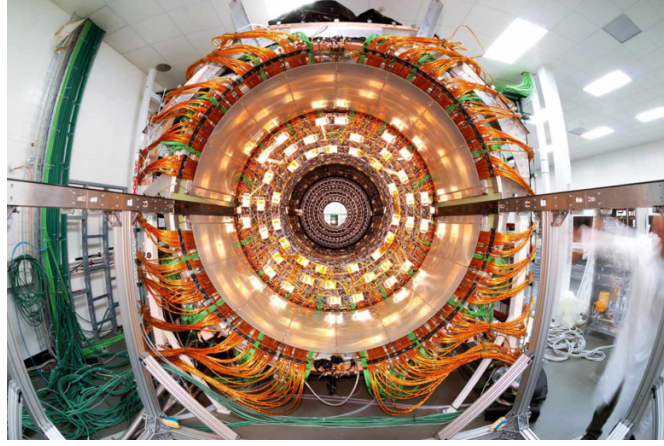
Yüksek enerji dedektörleri arasında belirli farklılıklar olsa da birçok elemanları aynıdır. Bir yüksek enerji dedektörünün genel düzeni Şekil 2.5’te görülebileceği gibi şu şekilde verilebilir: manyetik alandaki bir iz takip edici, elektromanyetik ve hadronik kalorimetre ve son olarak müon dedektörleridir. Burada parçacık soğurucu materyale çarpar ve bunun sonucunda elektromanyetik parçacık yağmuru oluşur. Buradaki parçacık enerjisini başka parçacıklara aktarır ve bu parçacıkların enerjisi de sintilatörler ya da silikon dedektörler ile tespit edilir [6].



Şekil 2. 5: Kalorimetreler içerisinde geçen parçacıkların oluşturdukları parçacık yağmurları [14].

### 2.6.1.1. İz sürücü

CMS deneyinde yüklü parçacık izlerini, momentumlarını, yükünü ve yörüngesini belirleyen sistemlerdir. Şekil 2.6’da CMS iz sürücü (tracker) gösterilmiştir. Çapı 2.6 m, uzunluğu 6 m olan silindirik bir yapıdır. İz sürücü, piksel dedektörleri ve silikon şeritten oluşmaktadır.

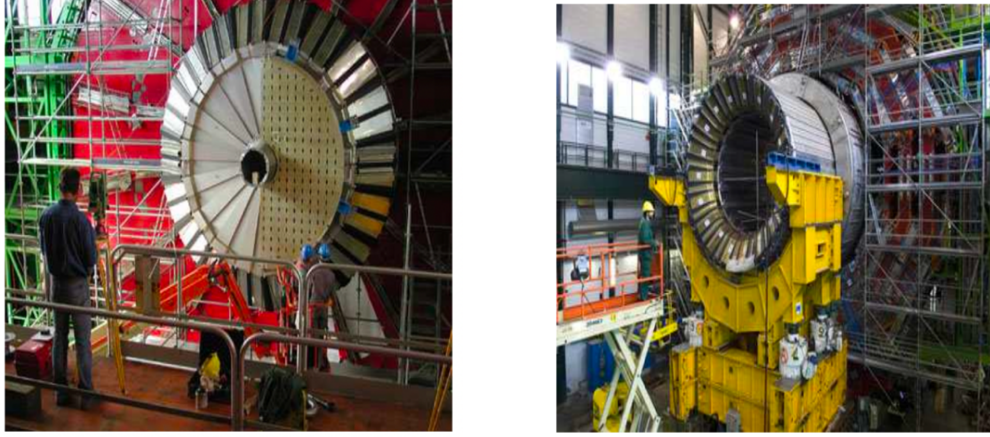


Şekil 2. 6: İzleyici (Tracker) [12].

### 2.6.1.2. Kalorimetreler

CMS dedektöründe kalorimetreler, çarpışma noktasından gelen parçacıkların (fotonlar, elektronlar ve hadronlar) enerjilerinin ölçümünü sağlayacaktır. Bu parçacıkların enerji ölçümlerinin yapılabilmesi için durdurulmaları gerekmektedir. Parçacıkların kimliğini belirledikleri için CMS dedektöründe önemli bir yapıdır. Yeni fizik parçacıklarını keşfetmek için hassas bir ölçüm yapacaktır.

HGCal, LHC'nin enerjisinin arttığı koşullarda daha fazla veri toplanıp analiz yapılmasını sağlamak için CMS deneyine özel olarak tasarlandığı dedektördür [6]. HGCal, yüksek radyasyon ortamı koşullarında bile performans gösterir. Yüksek çözünürlüğe sahip yapıdaki silisyum dedektörler ve sintilatörler kullanılmıştır. Yüksek çözünürlük özelliği sayesinde parçacık çarpışmaları sonucundaki karmaşık olayları çözümleyebilir. Böylece karanlık madde, higgs bozonu gibi yeni fiziği test etmeye olanak tanır.



**Şekil 2. 7:** Elektromanyetik kalorimetre (solda) ve hadronik kalorimetre (sağda) [15].

Gelecekte CMS’te HGCal kalorimetresi kullanılması planlanıyor. HGCal, tasarım olarak silindirik bir yapıdadır ve hüzme hattı etrafına konumlandırılmıştır. Böylece çarpışma sonrasında oluşan parçacık enerjisini ve izlerini maksimum hassasiyetle tespit edebilir. HGCal, elektromanyetik ve hadronik olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Şekil 2.7’de elektromanyetik ve hadronik kalorimetre gösterilmiştir. Elektromanyetik kalorimetre; yüksek enerji fiziğinde, LHC gibi büyük deney düzeneklerinde ve temel parçacık araştırmalarında kullanılarak evrenin temel yapı taşlarını daha iyi anlamamıza yardımcı olan dedektörlerden biridir. Bu kalorimetre; foton, elektron gibi elektromanyetik etkileşmeye giren yüklü leptonların ölçülmesinde kullanılır. Genellikle demir, bakır, kurşun, tungsten gibi yüksek atom numarasına sahip malzemelerden ve soğurucu (absorber) malzemelerden katmanlar yapılarak bu kalorimetrelere oluşturulur.

Hadronik kalorimetrelere, hadronlar gibi karmaşık parçacıkların etkileşmelerini ölçmemizi sağlarlar. Hadronlar; proton, nötronlar gibi karmaşık parçacıkları içerdiğinden, hadronların etkileşmesini ölçmek için hadronik kalorimetrelere kullanılır. Hadronik kalorimetrelere, elektromanyetik kalorimetreye göre daha kalın ve daha büyük soğurucu (absorber) katmanlarla yapılır. Katmanları demir veya bakır gibi malzemelerden oluşur. Hadronlar, soğurucu materyale çarparak karmaşık bir süreç olan hadronik yağmurları oluştururlar.

### 2.6.1.3. *Mıknatıs (Magnet)*

Şekil 2.8’de gösterildiği gibi CMS deneyinde güçlü bir alan ve yoğun bir dizayn elde etmek için selenoidal yapıda bir manyetik alan seçilmiştir. Magnetin uzunluğu 13 m ve iç çapı 5.9

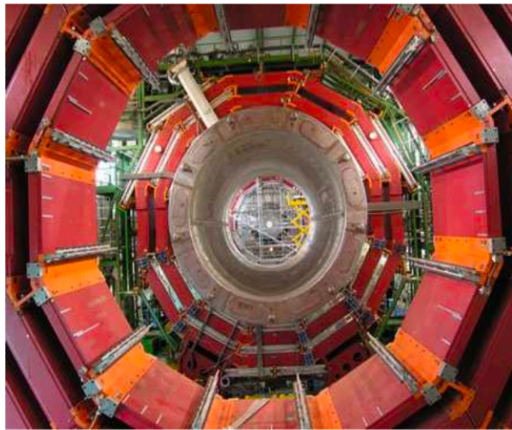
m'dir. Bu süper iletken mıknatıs tarafından 4 Tesla büyüklüğünde manyetik alan üretilir. Magnet, enine düzlemdeki parçacık yörüngelerini bükür. Dolayısıyla izleme sistemi, müon odalarının birleşimiyle enine momentumun hassas bir şekilde ölçülmesine yarar.



Şekil 2. 8: Magnet (süperiletken mıknatıs) [15].

#### **2.6.1.4. Müon Sistemi**

Müon sisteminin amacı, müonların kimliğini belirlemektir. Aynı zamanda izleyici ile beraber müonların momentumlarını hassas bir şekilde ölçmektir. Müon sisteminde üç tür dedektör vardır. Bunlar; Sürüklenme Tüpleri, Katot Şerit Odacıkları ve Dayanıklı Paralel Plakalı Odacıklar olmak üzere üç tür müon dedektörü mevcuttur. CMS müon sistemi Şekil 2.9'da gösterilmektedir.

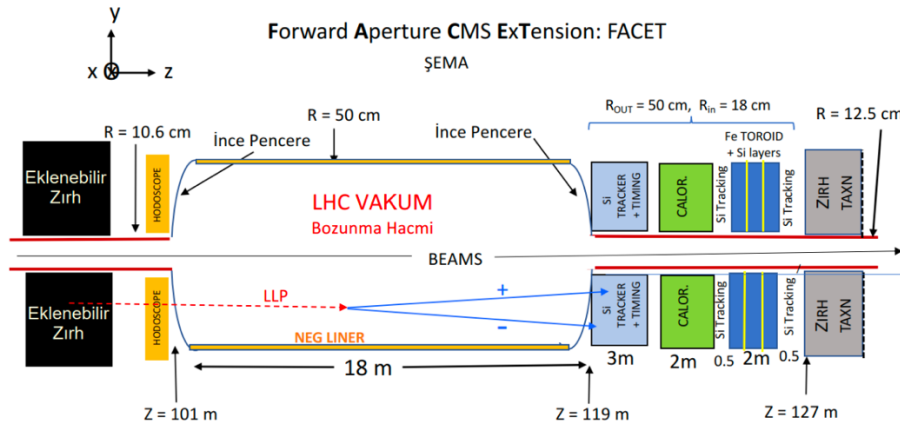


Şekil 2. 9: CMS müon sistemi [15].

## 2.7. FACET DEDEKTÖRÜ

İleri Açıklık CMS Uzantısı (Forward Aperture CMS ExTension, FACET) uzun ömürlü parçacıkları aramak için CMS'ye eklenmesi düşünülen CMS'ye entegre yeni bir alt sistemdir. FACET dedektör sisteminin CMS çarpışma noktasından yaklaşık 100 metre ilerisinde kurulması planlanmaktadır. FACET, CMS çarpışma noktasında oluşan ve en az 50 metre manyetize demire nüfuz edebilen ve vakum borusunda bozulabilen herhangi bir LLP adayını hassas bir şekilde tayin etmesi hedeflenmiştir. Standart Modelin Ötesindeki yeni fiziği keşfetmemiz için bize yeni kapılar açması düşünülmektedir [9,10].

FACET dedektörü,  $z = 101$  ve  $119$  m arasında genişletilmiş bir ışıın boru kesiti ve ardından yüksek hassasiyetli izleme ve kalorimetre modülleri gerektirir. Bunlar, yüksek radyasyon ortamı için tasarlanmıştır. Özellikle kütleleri 1 GeV olan nötr, uzun ömürlü parçacıklar için aramalar birçok kanalda arka plandan bağımsız olabilir. FACET, kütle ve bağlantıların parametre uzayında benzersiz bir alanı keşfetmesi, diğer mevcut ve önerilen aramaları büyük ölçüde tamamlaması, ancak bazı örtüşmeler sorunsuz kapsama alanı sağlaması planlanmaktadır [9,10].



Şekil 2. 10: FACET geometrisi [9].

Bu deneyde büyük bir vakum hacminde bozulan Standart Modelin ötesinde uzun ömürlü parçacıkların (LLP) varlığı araştırılacaktır. Burada aranması planlanan uzun ömürlü parçacıklar; karanlık higgs, karanlık fotonlar, ağır nötr leptonlar gibi parçacıklardır. FACET deneyi, bozunmalar için LHC kalitesinde bozunma hacmine (vakum alanı) sahiptir. Bu bölge yüksek radyasyon ortamına dayanıklıdır. Parçacık etkileşmelerinden kaynaklanan arka planı ortadan kaldırmak için kullanılacak bozunma hacmi; 18 m uzunluğunda,  $z$ : 101-119 m arasında

genişletilmiştir [9,10]. Vakum alanı 1 m çapında silindir şeklindedir. Aynı zamanda vakum alanı hüzm hattı ile bir bütün olarak tasarlanmıştır. Yani LHC borusunun bu bölümü değiştirilmelidir. Bozunma hacminin girişindeki yapıya bozunma hacmi penceresi, çıkışındaki yapıya ise dedektör penceresi denir. Bu pencereler ince alüminyum ya da berilyum malzemedendir oluşmaktadır. Bozunma hacminde arka planı azaltmak için vakum alanı kullanılmıştır. Böylece bu alanda uzun ömürlü parçacıklar hava ile temas etmeden bozunabilecektir. Bozunmalar sonucunda ortaya çıkan ürünler, dedektör penceresine ulaşarak dedektör sistemlerinde algılanacaktır [6,10].

Şekil 2.10'da gösterildiği gibi hüzm hattı dışından gelecek olan parçacıkları azaltmak amacıyla vakum alanından önce zırlama yapılacaktır. Bu zırlama demir malzemesinden oluşacak ve yüklü parçacıkları sistem dışına yönlendirmek için de manyetik alan eklenmesi düşünülmektedir [9,10]. Zırlamadan hemen sonra ve kalorimetrenin önüne bir hodoskop konulacaktır. Hodoskop, kuvars kristallerden oluşan barlar (ya da farklı tasarımda pikseller) ile oluşturulacaktır. Bozunma hacmine giren yüklü parçacıkları tespit etmeye yarayacaktır. Hodoskoptan geçen parçacıklar kristaller üzerinde fotonlar oluşturacaktır. Oluşan bu fotonlar, kristale entegre edilen foto dedektörlerle tespit edilecektir.

### **2.7.1. Karanlık Madde**

Karanlık Maddenin (Dark Matter, DM) varlığı birçok araştırmalar sonucunda kanıtlanmıştır [10]. Karanlık maddenin genellikle Standart Model ötesindeki parçacıklardan oluştuğu varsayılır. Uzun ömürlü parçacıklar, karanlık maddeyi açıklayabilmek için parçacık fiziğinin sınırlarını genişletecek önemli unsurlardır. Uzun ömürlü parçacıklar (karanlık higgs, karanlık fotonlar, ağır nötr leptonlar) Standart Model ve karanlık madde parçacıklarına zayıf bir şekilde bağlanan parçacıklardır. Aynı zamanda bu parçacıklar, SM ile DM arasında köprü görevi görürler. DM'nin varlığı, astronomik gözlemler ve kozmolojik hesaplamalardan netlik kazanmıştı [10].

### **2.7.2. Soğurucu Tasarımı**

FACET dedektöründe, manyetik alana sahip bir soğurucu (absorber) kullanılır. Bu soğurucunun amacı bozunma hacmine, hüzm hattı çevresinden gelecek olan parçacıkları soğurmak ya da manyetik alanıyla saptırmaktır. Sonuç olarak bozunma hacmine sadece hüzm

hattından parçacıklar gelecektir. Böylece bozunma hacminde bozunan parçacıkları dedektörlerde tespit edebiliriz.

Soğurucu, FACET Geant4 simülasyonunda silindirik bir yapıda ve dairesel bir manyetik alana sahip olarak tasarlanmıştır [16]. FACET tasarımında vakum alanında önde bulunan magnetin yarıçapı 30 cm, uzunluğu 2 m ve manyetik alanı 1.6 Tesladır [6].

### **2.7.3. Hodoskop**

FACET dedektöründe kullanılan hodoskop kuvars barlardan oluşur. Hodoskopun amacı, yüksek enerjili parçacıkların geçiş yollarını tespit etmek ve bunların varış zamanlarını kaydetmektir. Böylece, parçacıkların yollarını ve etkileşimlerini anlamamıza yardımcı olur. Hodoskoplar, plastik veya organik sintilatörler, gaz odaları gibi bir dizi hassas dedektörden oluşur. Parçacıklar, dedektörlerden geçtiğinde, ışık (sintilatörlerde) ya da elektrik sinyali (gaz odalarında) üretirler. Bu sinyaller elektronik sistemler tarafından işlenmektedir. Bu bilgiler, parçacıkların geçiş yollarını ve etkileşimlerini belirlemeye yaramaktadır. FACET dedektöründe hüzmeye hattı dışından gelecek olan parçacıkları ayırmak için hodoskop kullanılacaktır [6].

### **2.7.4. Vakum Alanı (Bozunma Hacmi) ve Işın Borusu Tasarımı**

Bozunma hacmi FACET dedektörü için önemli bir bölgedir. Hüzmeye hattından gelecek olan uzun ömürlü parçacıklar bozunma hacmi bölgesinde bozunabilir. Böylece vakumda bozunan uzun ömürlü parçacıkların ürünleri dedektör penceresine ulaştığında dedektörler yardımıyla tespit edilir [6].

Vakum alanı bozunma hacmi ile birlikte etkileşim noktasından başlar ve hızlandırıcı hattı boyunca devam eder. FACET simülasyonunda bozunma hacmi ilk tasarım için  $z=101$  ile 119 m arasında 18 m uzunluğunda ve 50 cm yarıçaplı silindir olarak tasarlanmıştır. Vakum alanının sonundaki dedektör penceresinin arkasına doğru ışın borusu (beam pipe) dedektör sistemini takip etmektedir [10]. Tez kapsamında incelenen geometride vakum alanı kaldırılmıştır.

### **2.7.5. İz Takip Dedektör Tasarımı**

FACET dedektöründe kullanılan İz-takip dedektörleri, bozunma hacminden dedektör penceresine gelen parçacıkların ilk karşılaştığı yerdir. Dedektör penceresinden geçen parçacıklar iz-takip dedektörleri tarafından tespit edilmektedirler. İz takip (tracker)

dedektörleri, çarpışmalardan kaynaklanan yüksek enerjili parçacıkların geçtiği yolları hassas bir şekilde belirleyerek, bu parçacık izlerini takip etmek için kullanılır. Böylece parçacıkların türlerini, momentumlarını vb özelliklerini bulmamıza yardımcı olurlar [6].

Bu dedektörler genellikle silikon gibi yarı iletken malzemedendir yapılırlar. Mikroşerit veya piksel dedektörler içerirler. İz takip dedektörlerinden geçen yüklü parçacıklar; elektronlar ve delikler oluşturarak elektriksel sinyal üretirler. Böylece parçacıkların geçiş yollarını, izlerini almamızı sağlarlar. Aynı zamanda yüksek radyasyona karşı dayanıklıdırlar. Yüksek enerji fiziği için daha karmaşık fiziksel olayları anlamamıza yardımcı olmaktadır [6].

FACET dedektöründe iz takip dedektörleri 5 ayrı plakadan oluşmaktadır. Her plaka 1.8 mm silikon ve arkasında 1.6 mm PCB materyalinden oluşmaktadır. İlk iki ve son iki plaka aralarında 10 cm mesafe vardır. Son plaka konumu ise 3 m'lik alanın ortasında yer alacaktır. Silikon iz sürücü dedektörleri iç yarıçapı 12.5 cm ve dış çapı 50 cm'dir ve boru etrafını 360 derece sarmaktadır [6].

#### **2.7.6. Kalorimetrelerin Tasarımı**

Kalorimetreler, parçacık çarpışmaları sonucu ortaya çıkan enerjiyi ölçmek için kullanılan parçacık dedektörleridir. Ortaya çıkan bu enerjinin parçacık formunda nasıl dağıldığını bulmakta önemli yeri vardır.

FACET dedektöründe kullanılacak olan kalorimetreler, CMS dedektöründe kullanılan HGCal dedektörü ile aynı teknolojiyi kullanacaktır. Ancak, FACET dedektöründeki kalorimetre ile HGCal birebir aynı yapıda değildir. FACET dedektörü kalorimetreleri sintilatör içermeyecek ve altıgen modüllerin dizilimi ile oluşacaktır. Elektromanyetik ve hadronik kalorimetreler arka arkaya dizilecektir [6]. Elektromanyetik kalorimetrenin iki plakası 6 mm kalınlığındadır ve bakır soğurucunun iki tarafına birer tane yerleştirilmiştir. Bu plakanın yapısı; 2.1 mm kurşun, 0.3 mm paslanmaz çelik, 0.1 mm bakırdan oluşan bir soğurucu üzerine, 1.6 mm kalınlığında bir baskı devre kartı (PCB), 1.5 mm hava boşluğu (kablolama için), 1.6 mm ikinci baskı devre kartı (PCB), 1.4 mm tungsten-bakır alaşım ve 0.3 mm silikon malzemedendir oluşmaktadır. Hadronik kalorimetre de iki farklı plaka yapısından oluşmaktadır [6]. ]

### 3. MALZEME VE YÖNTEM

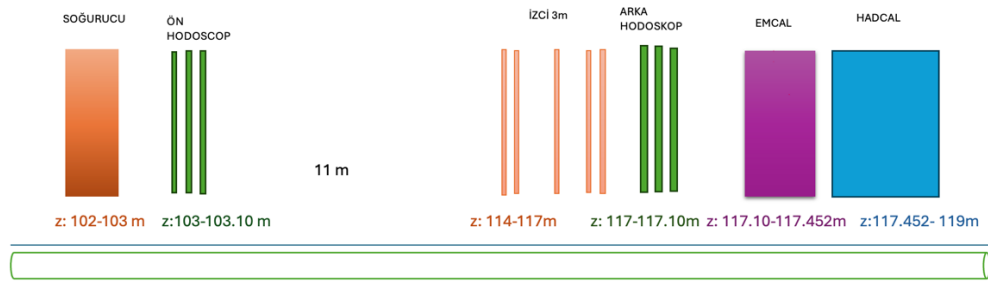
#### 3.1.BASİTLEŞTİRİLMİŞ PRE-FACET VE PRE-FACET DEDEKTÖRÜ GEOMETRİSİ

Bu tez çalışması kapsamında, basitleştirilmiş Pre-FACET ve daha gerçekçi olan geliştirilmiş Pre-FACET dedektörleri olmak üzere iki farklı geometri üzerinde çalışılmıştır.

Pre-FACET dedektöründe kullandığımız alt dedektörler vardır. Bu dedektörler şekil 3.1’de gösterildiği gibi girişten çıkışa doğru; soğurucu (absorber), ön hodoskop (front hodoskop), iz sürücü (tracker), arka hodoskop (back hodoskop) ve kalorimetre (HGCAL)’dir. Tüm hedefler, X’te (18-98 cm) 80 cm uzunluğundadır. Y ekseninde (-25,25) yerleştirilmiştir. Z ekseninde ise şekilde verilmiştir;



Şekil 3. 1: Basitleştirilmiş Pre-FACET geometrisinin iki boyutta çizimi.



Şekil 3. 2: Pre-FACET geometrisinin iki boyutta çizimi.

Şekil 3.2’de Pre-FACET geometrisi için kullanılan alt dedektör konumları;

Hüzme hattı: Işın borusu kalınlığı R: 12.2 cm,

Kalınlık (thickness) 3 mm kalınlığında R:12.5 ve uzunluk z:12000 cm,

Dedektörler: Kalınlık üzerine X ekseninde 10 cm boşlukla dedektörler konuluyor,

Soğurucu (absorber): 10200-10300 cm arasında ve 1 m kalınlığındadır,

Ön hodoskop (front hodoskope): 10300.0001-10310 cm arasına dizili 3 katmandır. Her katman 2 cm kalınlığında ve aralarında 2 cm boşluk vardır,

İz sürücü (tracker): 114-117 m arasında, 3 m'lik alana dizili 5 katman vardır. Her katman 3.4 cm kalınlığındadır. Başta ve sondaki iki katman arası 10 cm ve ortadaki plaka ortaya konulmuştur,

Arka hodoskop (back hodoscope): 11700.0001-11710 cm arasında 3 plaka 2 şer cm'dir,

Elektromanyetik kalorimetre (EMCAL): 11710.0001-11745.2 cm arasında 341.6 cm kalınlığındadır,

Hadronik kalorimetre (HADCAL): 11745.2001-11900 cm arasındadır,

Kalorimetrelere toplamları 2 m'dir.

Bütün dedektörler için ise X ve Y eksenini 80 cm alındı.

### 3.2. FLUKA

Fluka, parçacıkların taşınması ve parçacıkların madde ile etkileşimlerini hesaplamak için kullanılan bir programdır [17,18]. Fluka, proton ve elektron hızlandırıcı tasarımı, parçacık fiziği dedektör tasarımı, nötrino fiziği, radyoterapi gibi pek çok uygulama alanı sunar. Hiçbir deneysel verinin olmadığı durumlarda fluka somut tahminlere ulaşmamızı sağlar. Bu program sayesinde; nötrinolar, müonlar, elektronlar, anti parçacıklar gibi 60 farklı parçacığın madde ile etkileşmesini ve yayılmasını doğru bir şekilde simüle edebiliriz. Aynı zamanda fluka, kararsız çekirdeklerden yayılan radyasyonun takip edilebilmesine olanak verir. Ayrıca; manyetik veya elektrik alan varlığında bile yüklü parçacıkları doğru bir şekilde takip edebilir. Kombinatoryal Geometri (CG) sayesinde de çok karmaşık geometrileri işleyebilir.

Birincil parçacıklar çeşitli materyallerden geçerek etkileşimler yapar. Fluka yapılan bu etkileşimleri program boyunca tek tek hesaplayabilir. Programda istenilen sonuca göre birçok dedektör tipi vardır. “Usrbdx”, “usrbin”, “usrtrack”, “usryield” kullanılan en yaygın dedektör tipleridir. Dedektörler, belli bölgede biriken enerji, parçacık akısı, enerji spektrumları vb elde edilmesini sağlar. Giriş dosyasında istediğimiz dedektör kartlarına bağlı olarak da sonuçlar üretebilir [17,18].

### 3.3. FLAIR

Flair, çeşitli Monte Carlo kodları için geliştirilmiş bir arayüzdür [19]. Başlangıçta, Fluka için geliştirilmiştir. Hem Fluka hem de flair kodlarının başarısına katkıda bulunmuştur. Flair arayüzü için yapılan geliştirmeler; Fluka, Geant4, Penelope ve diğer simülasyon programlarını kullanarak aynı girdiyle hesaplamalar yapmak için bir arayüz haline getirmek amaçlanmıştır.

Flair programının giriş dosyası (input), belli kartlardan oluşmaktadır. Aynı zamanda giriş dosyası simüle edeceğimiz geometrinin açıklamasını da içermektedir. Giriş dosyasında; “general”, “primary”, “geometry”, “media”, “physics”, “transport”, “scoring” ve “biasing” kartları mevcuttur. Genel (general) seçeneği, varsayılanlar (defaults) gibi kartları içerir. Belirtilen sorun türleri için varsayılanları ayarlar. Birincil (primary) kartı, tüm olayları başlatacak olan birincil parçacıkları içerir. Aynı zamanda birincil parçacığın enerji, momentum gibi özellikleri burada tanımlanır. Geometri (geometry) kartında ise kullanılacak geometrinin tanımı yapılır. Medya (media) kartı, kullanılan malzeme tanımlarını yapmamızı sağlar ve aynı zamanda malzeme atamalarını (assignmat) içerir. Ayrıca parçacık kaynağının tanımını burada girebiliriz. Fizik (physics) kartı, fizik işlemlerini yapabilmek için çeşitli kartlar içerir. Taşıma (transport) kartı; enerji kesintileri (cutoffs), adım boyutu, varsayılan olarak simüle edilmeyen fiziksel etkiler, taşınmayacak parçacıklar gibi sorunlu ayarların tanımının yapılmasına olanak verir. Puanlama (scoring) kartı, istenen dedektörlerin tanımının yapılmasını sağlar. Puanlama kartlarının her biri kullanıcının doz, acıcılık, enerji vb. gibi fiziksel bir miktarın beklenti değerini hesaplayabilir. Bu kart isteğe bağlı olarak kullanılabilir ancak üretim aşamasında bir tane kullanılması yine de beklenir. Önyargı (biasing) kartı, önyargı şemalarının tanımını içerir. Girişte de rastgele sayı dizisinin başlatılması, başlangıç sinyali ve istenen olay sayısını da tanımlamak gereklidir [19].

### 3.3.1. Birincil parçacıkların tanımı

Basitleştirilmiş Pre-FACET dedektörü ve Pre-FACET dedektörü olmak üzere iki farklı geometride çalışmalarımızı gerçekleştirdik. Bu geometrilerde kullanılan flair arayüzünde tüm olaylar, birincil parçacıklar tarafından başlatılmaktadır [17,18]. Bu birincil parçacıklar; tek yönlü, uzayda tek bir noktadan (pencil beam) başlayan parçacıklardır. Işın (beam) kartıyla parçacık enerjisi veya momentumu tanımlanır. Basitleştirilmiş Pre-FACET dedektöründe enerjisi 100 GeV olan proton demeti tanımlanmıştır. Momentum dağılımı (P) olarak gauss, momentum yayılımı 10 GeV/c, açısal dağılım olarak gauss, açısal yayılım 10 mrad, Beampos kartında (0,0,-100) konumuna çarpan z eksenini boyunca yönlendirilen ışın alınmıştır.

İncelediğimiz diğer geometri olan Pre-FACET dedektöründe ise ışın tanımı özellikleri olarak;

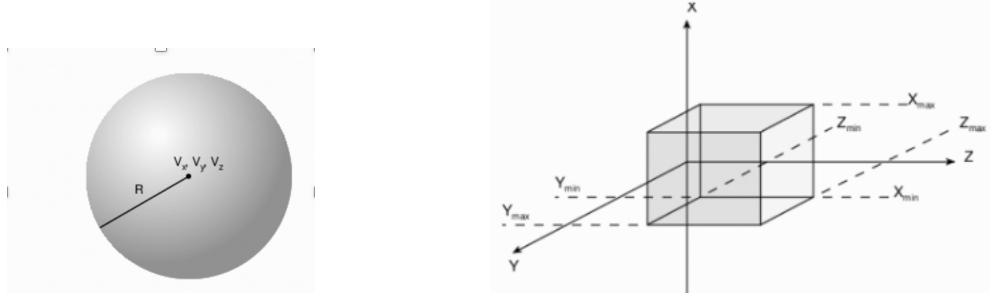
- Enerjisi 100 GeV olan proton demeti tanımlıyoruz,
- $\Delta p$  momentum dağılımı Gauss,  $\Delta p$  (FWHM), momentum yayılımı *10 GeV/c*,
- $\Delta\phi$  açısal dağılım Gauss,  $\Delta\phi$  (FWHM), açısal yayılım *10 mrad*,
- Olay sayısı 1000,
- Z eksenini boyunca 92 m'den yönlendirildi ve (62.5,0 cm) konumuna çarpan bir ışın (beam) tanımlanmıştır. Aynı zamanda Pre-FACET flukanın ürettiği ışın profili dikkate alındı. Farklı enerjilerde, momentumlarda, konumlardaki ışın profili (beamprofile) kullanılmıştır.

### 3.3.2. Geometri

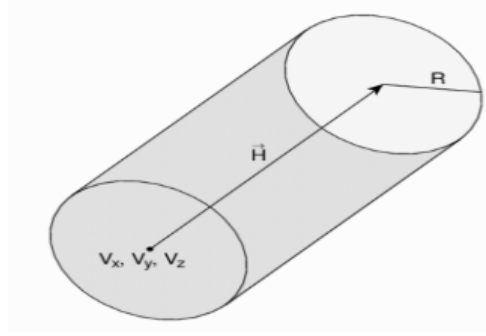
Flair arayüzü sayesinde, simülasyonda çizeceğimiz geometriyi tanımlayabiliriz. Öncelikle, bir hedef (target) tanımlanır. Sonrasında hedefimizi bir vakum bölgesi ile çevrelemek gerekir. Sonrasında da tüm geometri kapalı bir cisimle sınırlandırılmış bir kara delik (black hole) ile çevrenmelidir. Çünkü; bölgelerin sonsuz emici bir malzeme içinde bulunması gereklidir ve bir parçacık sınırda başlatılamayabilir. Böylece kaçan tüm parçacıkların kara delikte emilmesi sağlanır. Tüm parçacıklar kara deliğe ulaştığı anda kaybolur. Ayrıca kara delik bölgesinin, olası değişikliklere karşı oldukça büyük hale getirilmesi önerilmektedir. Kara delik tamamen kapalı bir cismin sınırı ile çevrenmelidir. Yarım boşluklar veya sonsuz silindirler olarak tanımlanamazlar. Vakum ve kara delik ile çevreleme sayesinde, birincil parçacıkların yörüngesi fiziksel geometrinin/dedektörün dışında da başlatılabilir.

Basitleştirilmiş Pre-FACET geometrisinde vakum olarak X, Y, Z eksenlerinde (-400,400 cm) olan dikdörtgen paralel yüzlü bir geometri kullanılmıştır. Bu vakumu çevreleyen X, Y, Z eksenlerinde (-500,500 cm) olan dikdörtgen paralel yüzlü kara delik tanımlanmıştır. Pre-FACET geometrisinde ise vakum olarak X, Y eksenlerinde (-150,150 cm) Z ekseninde (-10,15000 cm) olan dikdörtgen paralel yüzlü alınmıştır. Kara delik olarak ise X, Y eksenlerinde (-155,155) Z ekseninde (-15,15005 cm) olan dikdörtgen paralel yüzlü geometri tanımlanmıştır.

Flairde geometri sonsuz silindirleri (dairesele ve eliptik) ve düzlemleri (yarım boşluklar) kapsamaktadır. Geometri gövde (body) ve bölge (region)'den oluşur. Gövde (body), birinci veya ikinci dereceden yüzeylerle sınırlandırılmış kapalı katı cisimlerdir. Şekil 3.3'teki gibi küreler, paralel yüzlüler vb burada tanımlanabilir. Aynı zamanda uzayın yarı-sonsuz kısımları olan yarı-boşluklar, sonsuz silindirler de kullanılır. Bölge (region) kısmında ise ilgilendiğimiz bölgelere, malzeme bileşiminin hücrelerinin tam bir bölümünü yapabilmek için gövdeleri toplama, kesişme ve çıkarma işlemleriyle birleştirmelidir. Body tipleri olarak RPP (dikdörtgen paralel yüzlü), RCC (sağ dairesele silindir), SPH (küre) gibi şekiller vardır. Black hole için dikdörtgen paralel yüzlü, silindir, küre gibi kapalı geometriler kullanılmalıdır [17,18]. İncelediğimiz her iki geometride de boru ve üzerindeki kalınlık için Şekil 3.4'teki gibi sağ dairesele silindir (RCC), diğer dedektörler için ise dikdörtgen paralel yüzlüler (RPP) kullanılmıştır.

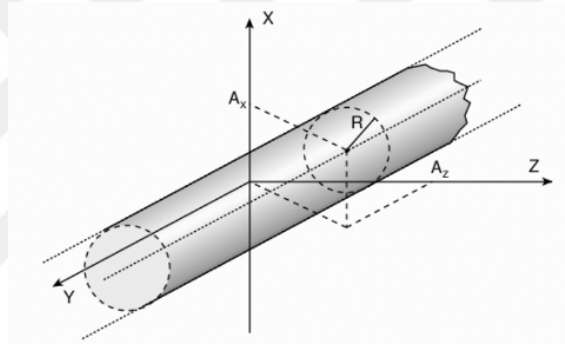


Şekil 3. 3: Küre (SPH) (solda) ve dikdörtgen paralel yüzlü (RPP) (sağda) [17,18].



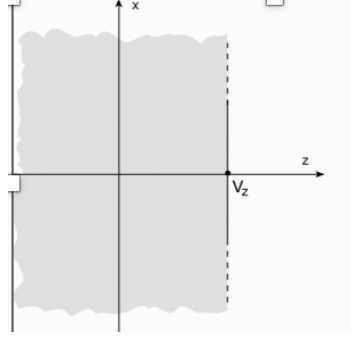
**Şekil 3. 4:** Sağ dairesel silindir (RCC) [17,18].

Ayrıca geometride;  $x$ ,  $y$ ,  $z$  koordinat eksenlerine paralel olan sırasıyla sonsuz dairesel silindirler XCC, YCC, ZCC kullanılabilir. Örneğin şekil 3.5'te gösterildiği gibi YCC;  $Y$  eksenine paralel sonsuz silindiridir.  $A_x$ ,  $A_z$ ,  $R$  olmak üzere 3 sayı ile tanımlanır.



**Şekil 3. 5:**  $Y$  eksenine paralel sonsuz dairesel silindir (YCC) [17,18].

Bir koordinat düzlemi ile sınırlandırılmış  $(x, y, z)$  sonsuz yarı uzaylar olan XYP, XZP, YZP tanımlanabilir. Örneğin şekil 3.6'daki gibi XYP  $z$  eksenine dik bir düzlem demektir.  $V_z$  olmak üzere tek bir sayıyla tanımlanır. Veriler yine son (end) kartı ile sonlandırılır [17,18].



Şekil 3. 6: Z eksenine dik bir düzlemlle sınırlandırılmış sonsuz yarım uzay (XYP) [17,18].

### 3.3.3. Malzemeler

Her geometri bölgesinin homojen bir malzemeyle doldurulması gerekmektedir [17,18]. Malzeme (material), bir elementin doğal bileşimi ya da bir bileşim alınabilir. Malzeme olarak vakum veya kara delik kullanılabilir. Flair arayüzünde tanımlanmış 25 malzeme vardır. Bunlardan herhangi birini doğrudan kullanabiliriz veya yoğunluğunu, numarasını, adını değiştirebiliriz. Aynı zamanda yeni bir malzeme de tanımlayabiliriz. Malzemeler, materyal (material) ve bileşik (compound) kartlarıyla manuel olarak ayarlanabilir. Bileşik (compound) kartı, bir bileşik oluşturmak için kullanılır. Bu bileşiği oluşturmak için önce materyal kartıyla bileşiğin adını, yoğunluğunu girmek gereklidir. Sonrasında bileşimini tanımlamak için bileşik kartı ile kullanılır. Çeşitli geometri bölgelerine atanacak tüm malzemeler tanımlandıktan sonra her bölgenin hangi malzemedan yapıldığını belirtmek gerekir. Bu işlem atama (assignmat) komutuyla yapılır. Bir malzeme, kara delik hariç geometri bölgelerinin her biriyle bu komutla ilişkilendirilmelidir. Böylece bölge (region) ve materyal (material) arasındaki yazışma tanımlanmış olur.

Basitleştirilmiş Pre-FACET geometrisi için kullandığımız malzemeler; karadelik bölgesi için blackhole, vakum bölgesi için hava, hodoskoplar için tanımladığımız bileşik olan silikon dioksit, soğurucular ve magnet için demir, iz sürücü için silikon, kalorimetre için bakır, ışın borusu için vakum ve boru üzerindeki kalınlık için demir tanımlanmıştır.

Pre-FACET geometrisi için kullandığımız malzemeler ise; karadelik bölgesi için blackhole, vakum için hava, ışın borusu için vakum, kalınlık (thickness) için paslanmaz çelik, soğurucu için demir, hodoskoplar için tanımladığımız bileşik olan silikon dioksit, iz sürücü için silikon, elektromanyetik kalorimetre için paslanmaz çelik, kurşun, bakır, silikon ve hava karışımı

bileşik, hadronik kalorimetre için ise hava, bakır, silikon, polimid karışımı olan bileşik malzemesi kullanılmıştır.

### 3.3.4. Tahminciler ve Dedektörler

Fluka, radyasyon alanı ve tanımlanan materyal geometrisi tarafından belirlenen bir veya daha fazla miktarın beklenti değerini tahmin etmek için farklı tahminci seçenekleri sunar [17,18]. Tahminciler (estimators), bir deney ölçümünün Monte Carlo eşdeğeridir. Her tahminci (dedektör tipi), bir veya daha fazla radyometrik miktarı tahmin etmek için tasarlanmıştır. Aynı zamanda elde edilen nihai puan, ortalama değer in istatistiksel bir tahminidir.

Ölçüm sonuçlarında olduğu gibi, istatistiksel bir dağılımdan örnekleme yoluyla tahminci elde edilir. Farklı tahminciler kullanılarak da aynı sonuçlar hesaplanabilir. Fluka da çok sayıda farklı tahminci mevcuttur. Bu tahmincilerden en sık kullanılanları; parçacık akıcılığı (fluence) ve akımı (current), iz uzunluğu (track length), enerji birikimi, enerji spektrumu, açısal dağılım vb tahmincilerinde değerler puanlama (score) yapılabilir.

Usrbin kartı biriken enerji, akıcılık veya yıldız yoğunluğu, parçacık iz uzunluğu yoğunluğu, nötron dengesinin yoğunluğu, momentum transferini puanlamaya yarar. Enerji birikiminin, yıldız yoğunluğunun veya entegre akıcılığın ayrıntılı alan dağılımlarını yapmaya yaramaktadır. Basitleştirilmiş Pre-FACET ve Pre-FACET dedektörlerinde enerji yoğunluğu grafikleri için usrbin dedektörü kullanılmıştır. Usrbin sonuçları renk grafikleriyle elde edilmiştir. Buradaki her renk önceden tanımlanmış bir değer aralığına karşılık gelir [17,18].

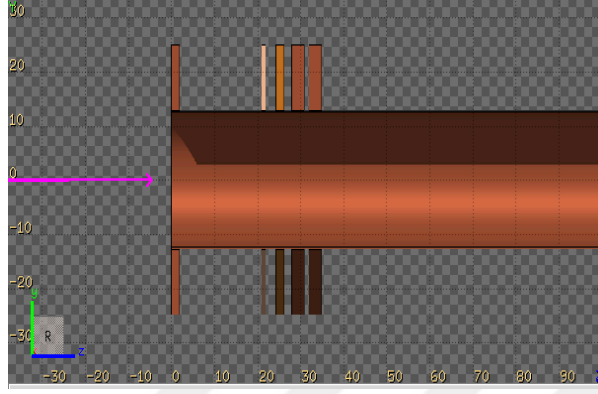
## 3.4. BASİTLEŞTİRİLMİŞ PRE-FACET DEDEKTÖRÜ FLUKA SİMÜLASYONU

Burada parçacık yoğunluğunu, enerji dağılımını simüle etmek için Fluka programı kullanılacaktır. USBRIN dedektörüyle enerji dağılımları elde edilir. Dedektörün boyutları x, y, z eksenlerinde seçilir. Böylece kullanılacak olan dedektörün birim hacim boyutları ayarlanmış olur.

Bu çalışmada Pre-FACET dedektör geometrisinin alt dedektörlerdeki enerji yoğunluğu Fluka programı ile simüle edilmiştir.

Geometride; şekil 3.7’de gösterildiği gibi 12.5 cm yarıçapa sahip 300 cm uzunluğunda vakum ışın borusu (beampipe) ve bunun da etrafına 3 mm demirden oluşan bir kalınlık (thickness)

eklenmiştir. Kalınlık üzerine yaklaşık 5 cm boşluk bırakarak hedefler sırasıyla yerleştirildi. Tüm geometriyi çevreleyen vakum ve vakumu da çevreleyen kaçan parçacıkları emen kara delik (black hole) tanımlanmıştır.

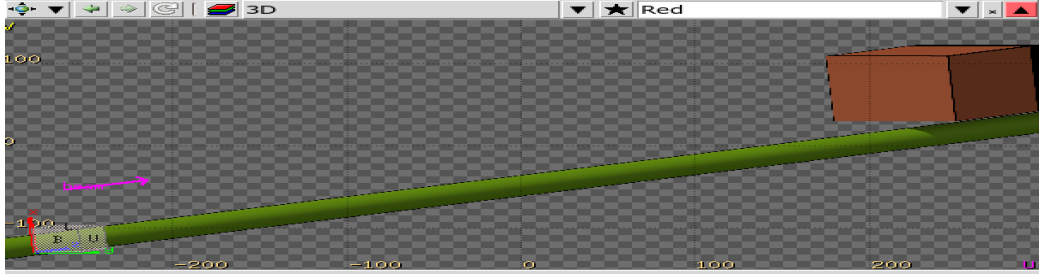


Şekil 3. 7: Fluka programı kullanılarak elde ettiğimiz geometrinin gösterimi.

### 3.5. PRE-FACET DEDEKTÖRÜ FLUKA SİMÜLASYONU

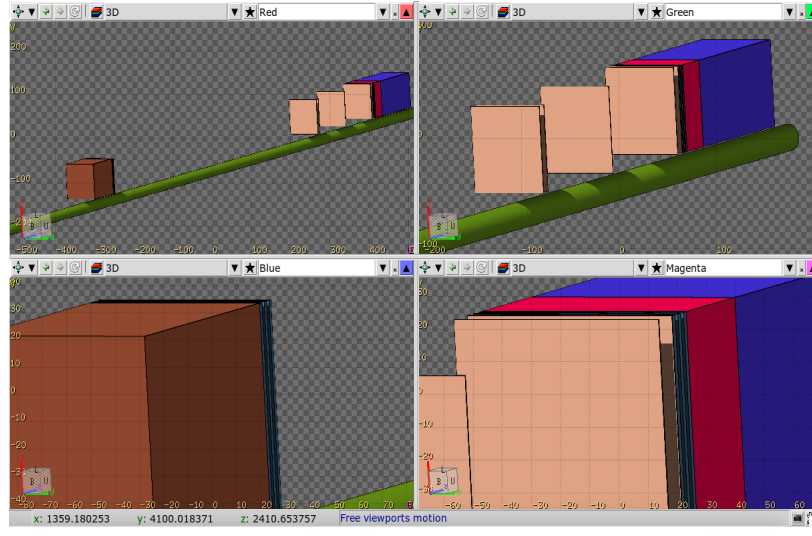
Bu tez çalışmasında bir önceki bölümde anlatılan basitleştirilmiş Pre-FACET dedektörüne ek olarak daha gerçekçi olan geliştirilmiş Pre-FACET dedektörü simülasyonu yapılmıştır. Bu geometrinin detayları aşağıda açıklanmıştır.

Şekil 3.8’de gösterildiği gibi Pre-FACET simülasyonu ışın yönelimi gösterilmiştir.



Şekil 3. 8: Fluka programıyla Pre-FACET geometrisine gönderilen ışın gösterimi.

Şekil 3.9’da fluka programı kullanarak elde edilen Pre-FACET geometrisinin arka arkaya dizilimi gösterilmiştir.



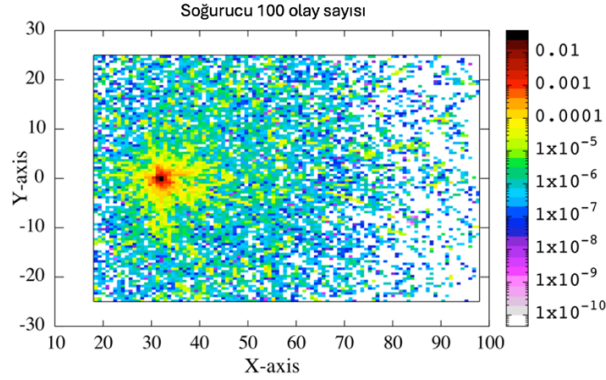
Şekil 3. 9: Fluka programı kullanılarak elde ettiğimiz Pre-FACET geometrisinin gösterimi.

]

## 4. BULGULAR

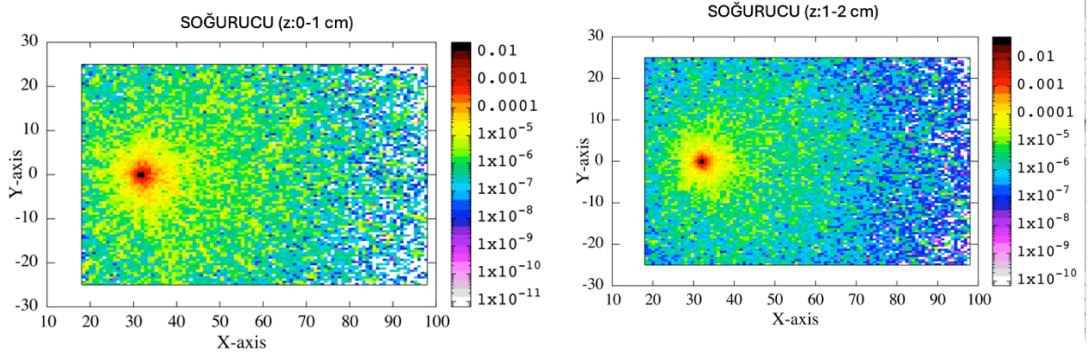
### 4.1. BASİTLEŞTİRİLMİŞ PRE-FACET DEDEKTÖRÜ FLUKA TESTLERİ

Bu tez çalışmasında basitleştirilmiş Pre-FACET ve Pre-FACET olmak üzere iki farklı geometri çalışıldı. Bu bölümde ise öncelikle basitleştirilmiş Pre-FACET dedektörünün fluka simülasyonu testleri anlatılacaktır.



**Şekil 4. 1:** Soğurucu (Absorber)'da 100 olay (event) sonucu oluşan XY enerji dağılım grafiği.

Şekil 4.1'deki grafikte gösterildiği gibi tüm soğurucu üzerinde olay sayısı 100 alındığında, parçacık, enerji yoğunluğu grafiği verilmiştir. Kırmızı bölgede parçacık, enerji yoğunluğu daha yüksek olduğu ve diğer bölgelerde ise bu yoğunluğun giderek azaldığı görülmektedir. Grafik, yoğunluğun görüldüğü noktalarda enerjinin de yüksek olduğunu göstermektedir.

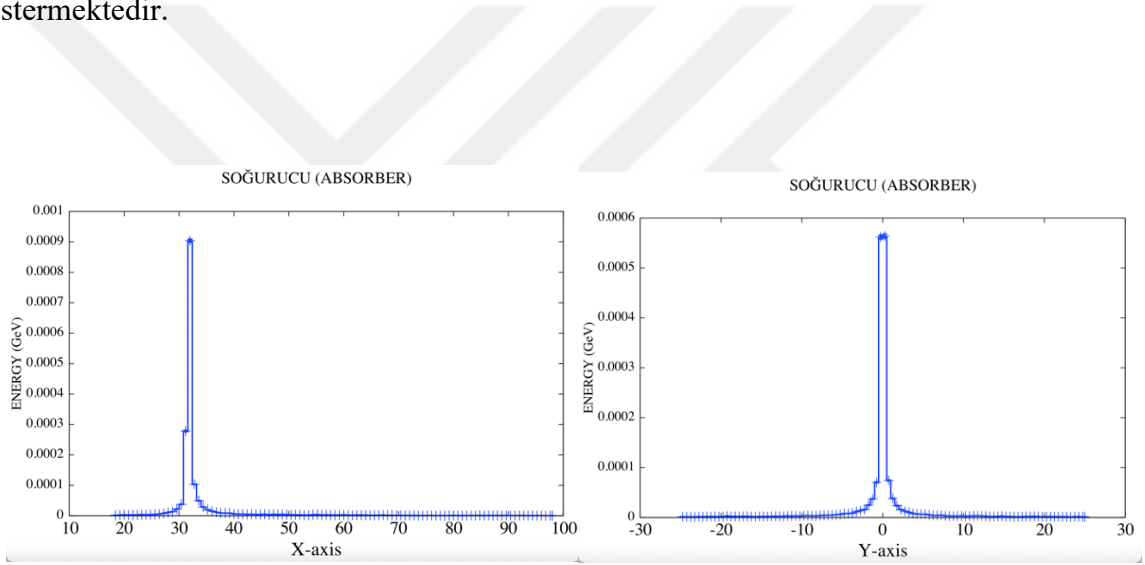


**Şekil 4. 2:** Soğurucu (absorber) üzerinde z: 0-1 cm arasında XY iki boyutlu enerji dağılım grafiği (solda) ve z: 1-2 cm arasında (sağda).

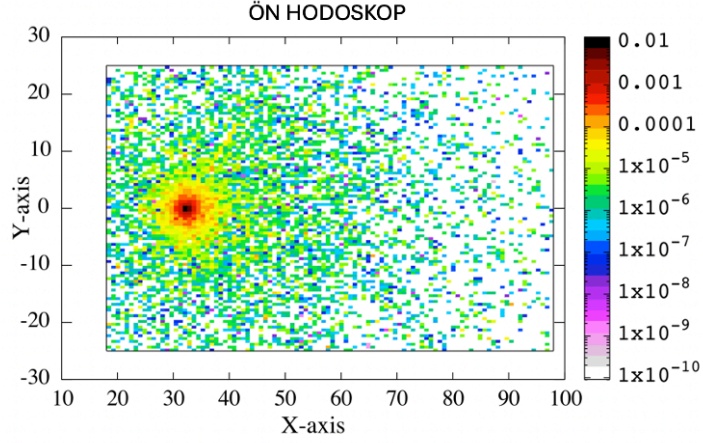
Şekil 4.2'de XY iki boyutlu enerji dağılım grafiğinde soğurucu üzerinde 1000 olay alınarak iki boyutlu parçacık yoğunluğu grafiği alınmıştır. Soğurucunun girişi olan 0-1 cm ve soğurucunun

çıkışı 1-2 cm'de parçacık yoğunluğuna baktığımızda; soğurucu çıkışındaki parçacık yoğunluğunun soğurucu girişindeki parçacık yoğunluğundan çoğu bölgede daha az olduğu görülmektedir.

Grafiği tek boyuta indirgediğimizde Y:0, X: 31-32 cm noktalarında bir pik olacağı ve bu pik öncesi ve sonrası azalan bir grafik olacağı gözlemlenmiştir. Şekil 4.3'te gösterildiği gibi tek boyutta alınan X ve Y grafiğinde beklendiği gibi aynı değerlerde yoğunluk vardır. Şekil 4.2'deki XY grafiğinde gösterildiği gibi Şekil 4.3'teki X grafiğinde de aynı yerlerde X: 31-32 cm de çok yoğun bir enerji olduğu görülmektedir. Y grafiğinde de Y:0 olan bölgede enerjinin yoğun olduğu anlaşılmaktadır. Pik yaptığı bu değerler Şekil 4.2'deki kırmızı bölgeyi göstermektedir.

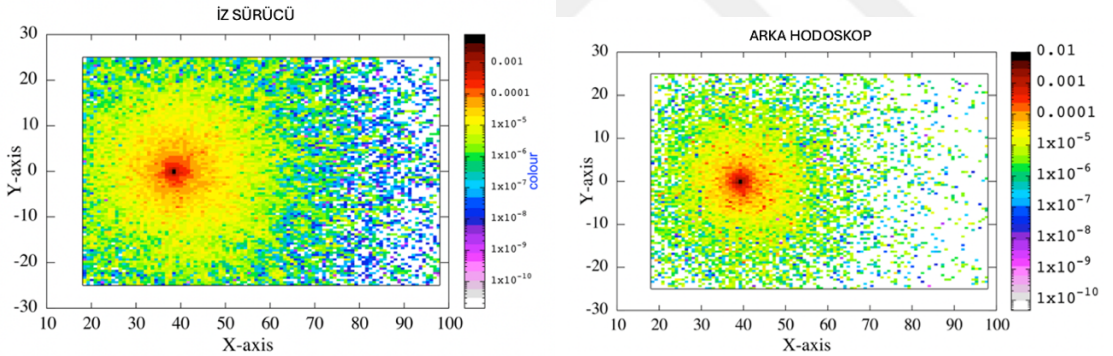


**Şekil 4. 3:** Soğurucu (absorber) üzerinde tek boyutta X enerji dağılım grafiği (solda) ve Y enerji dağılım grafiği (sağda).



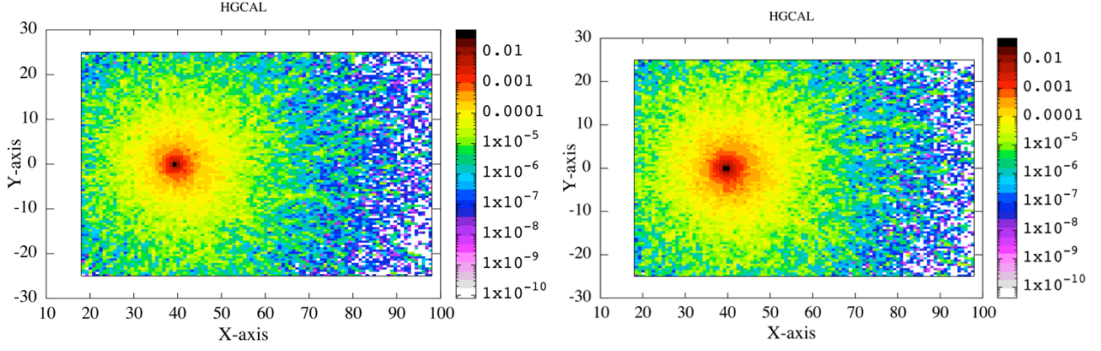
**Şekil 4. 4:** Ön hodoskop (front hodoscope) üzerinde iki boyutta XY enerji dağılım grafiği.

Şekil 4.4'te grafikte gösterildiği gibi olay sayısı 1000 alınarak, ön hodoskop üzerinde X: 31-32 cm, Y:0 cm olan kırmızı bölgede enerjinin yoğun olduğu anlaşılmaktadır. Şekil, soğurucuya giren parçacık yoğunluğuna göre hodoskopdaki parçacık yoğunluğunun azaldığını göstermektedir.



**Şekil 4. 5:** Tracker (iz sürücü) üzerinde iki boyutta XY enerji dağılım grafiği (solda) ve arka hodoskop (back hodoscope) üzerindeki grafiği (sağda).

Şekil 4.5'te iz sürücü (tracker) üzerinde olay sayısı 1000 alınarak; parçacıklar yoğunluğu değerinde azalma olduğu görülmektedir. Parçacık yoğunluğu farklı olarak X ekseninde 30 cm'den 40 cm'e kaymaktadır. Bu değişimin nedeni; parçacıklar bir noktadan çıkıp dairesel olarak yayıldıkça z ekseninde mesafe artıyor ve dolayısıyla parçacıkların dağıldığı yarıçap da artmaktadır. Şekil 4.5'te arka hodoskop üzerindeki grafikte gösterildiği gibi, yoğunluğun görüldüğü kırmızı bölgelerde enerjinin diğer bölgelere göre daha yüksek olduğu grafikteki değerlerden anlaşılmaktadır. Arka hodoskopta parçacık yoğunluğu değerleri iz sürücü dedektörüne göre artmıştır.



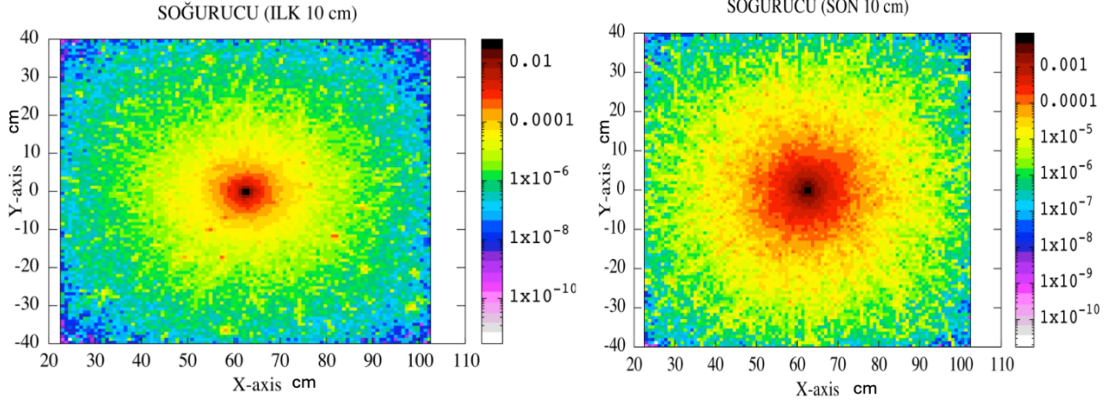
**Şekil 4. 6:** HGCAL z: 24.30-25.30 iki boyutta XY enerji dağılım grafiği (solda) ve HGCAL z: 25.30-26.30 grafiği (sağda).

Şekil 4.6'da gösterildiği gibi kalorimetreye gelen parçacıkların yoğunluğu, hodoskop üzerindeki parçacık yoğunluğuna göre daha fazladır. Bunun sebebinin de; Y:0 noktası borunun üst kısmı olduğu için borudan gelen parçacıkların daha fazla artmış olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. İki grafiği de kıyaslarsak; 2. grafikte yoğunluk ilk grafiğe göre artmaktadır. Burada proton aynı zamanda kalorimetre malzemesiyle etkileşime girerek sistemde ikincil parçacıklar üretmiş olabileceği tahmin edilmektedir.

Böylece, basitleştirilmiş Pre-FACET dedektöründe, farklı olay sayıları alınarak ve gelen parçacığın kullanılan malzemelerle de etkileşimi sonucu değişen enerji dağılımı grafikleri gösterilmiştir.

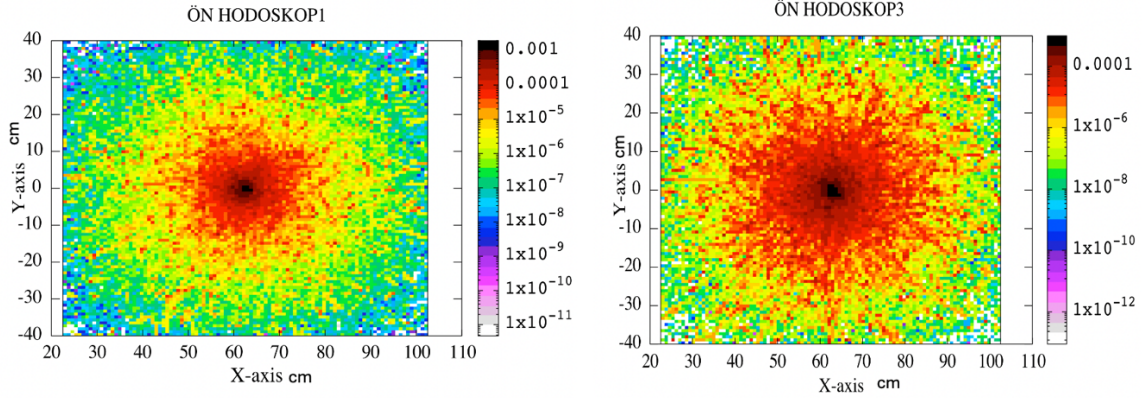
## 4.2. PRE-FACET DEDEKTÖRÜ FLUKA TESTLERİ

Bu bölümde ise tez kapsamında ikinci incelenilen geometri olan Pre-FACET dedektörünün fluka simülasyonu testleri ele alınacaktır.



**Şekil 4. 7:** 10200-10300 cm de olan soğuru üzerinde ilk 10 cm için iki boyutta XY enerji dağılım grafiği (solda) ve son 10 cm için grafiği (sağda).

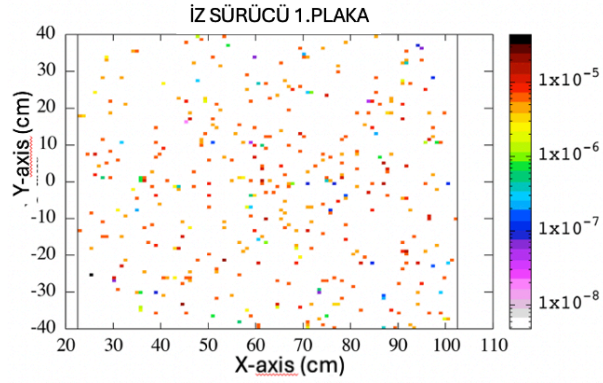
Şekil 4.7’de soğurucu üzerinde 1000 olay alınarak iki boyutlu parçacık yoğunluğu grafiği ilk 10 cm ve son 10 cm için gösterilmektedir. Şekilde gösterilen XY iki boyutlu enerji dağılım grafiğinde, her renk önceden tanımlanmış bir değer aralığına karşılık gelmektedir. Burada Z eksenini renk skalasını göstermektedir. Renk skalasına göre kırmızı bölge parçacığın yoğun olduğu bölgedir ve mor renge yaklaştıkça parçacık yoğunluğu azalmaktadır. Dedektör girişinde soğurucu kullanmamamızın amacı; bozunma hacmine hüzmeye hattı dışından gelen parçacıkları saptırması, bozunma hacmine gelen parçacıkları sistemde azaltması ve böylece yalnızca bozunma hacminde bozulan uzun ömürlü parçacıkları tespit etmemize yardım etmesidir. Şekil 4.7’de gösterildiği gibi soğurucunun giriş ve çıkışındaki parçacık yoğunluğuna baktığımızda; soğurucu çıkışındaki parçacık yoğunluğu değerlerinin soğurucu girişindeki parçacık yoğunluğu değerlerinden daha az olduğu görülmektedir. Aynı zamanda grafikte X: 63-64 cm Y: 0 cm noktalarında bir pik olacağı ve pik öncesi ve sonrasında azalan bir parçacık yoğunluğunun olacağını göstermektedir. Dolayısıyla soğurucuyu kullanma amacımıza uygun bir şekilde parçacık, enerji yoğunluğu azalmaktadır.



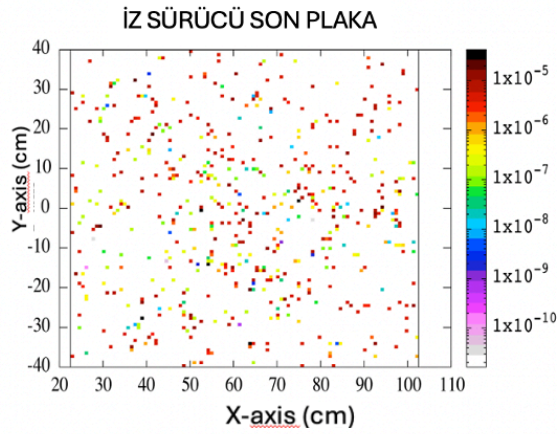
**Şekil 4. 8:** Ön hodoskop1 (front hodoscope) üzerinde iki boyutta XY enerji dağılım grafiği (solda) ve ön hodoskop3 üzerindeki grafiği (sağda).

Tasarlanan bu dedektör sisteminde amacımız sistemdeki arka planı olabildiğince azaltmaktır. Çünkü borudan gelen ya da madde ile etkileşimden kaynaklanan parçacıklar sistemde beklemediğimiz noktalarda parçacık yoğunluğu oluşturmaktadır. Şekil 4.8’de grafikte gösterildiği gibi yine ön hodoskop üzerinde X: 63-64 cm, Y:0 cm olan kırmızı bölgede enerji yoğunluğu vardır. Soğurucudaki parçacık yoğunluğuna göre hodoskopdaki parçacık yoğunluğu azalmıştır. Pozitif yönde bir etki yapmış olduğu gözlemlenmektedir. Ön hodoskop3’teki parçacık yoğunluğunun da ön hodoskop1’deki parçacık yoğunluğuna göre azaldığı görülmektedir.

İz sürücü kullanmamızın amacı, parçacık izlerini takip ederek uzun ömürlü parçacıkları ayırt etmektir. Şekil 4.9’da görüldüğü gibi iz sürücü 1. plaka üzerinde parçacık yoğunluğu azalmıştır. Parçacıkların bir kısmının aradaki 11 metrelik mesafe sebebiyle sistem dışına çıkmış olabileceği tahmin edilmektedir.

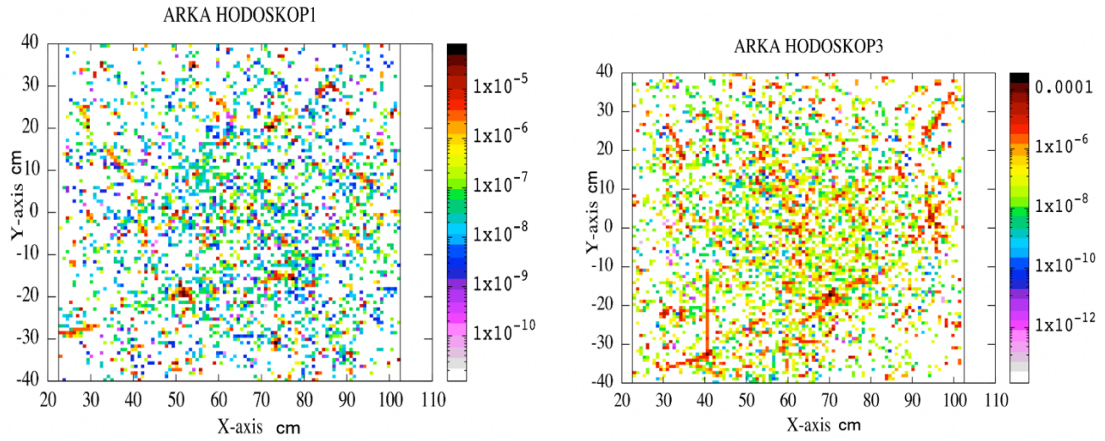


Şekil 4. 9: İzci (tracker) 1. plaka üzerinde iki boyutta XY enerji dağılım grafiği.



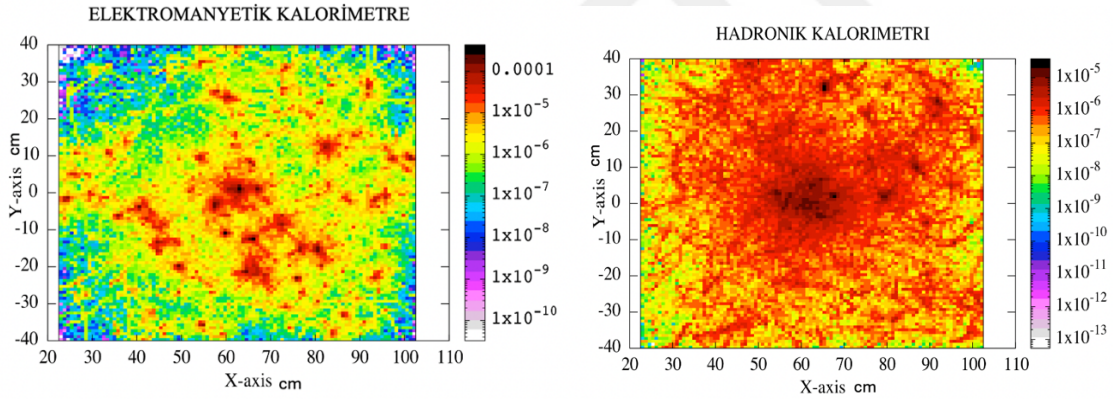
Şekil 4. 10: İz sürücü (tracker) son plaka üzerinde iki boyutta XY enerji dağılım grafiği.

Şekil 4.10'da iz sürücü son plaka üzerinde parçacık yoğunluğunda artış olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, borudan gelen parçacıkların iz sürücüye çarparak parçacık yoğunluğunu artırmış olmasıdır.



**Şekil 4. 11:** Arka hodoskop1 üzerinde iki boyutta XY enerji dağılım grafiği (solda) ve arka hodoskop3 üzerindeki grafiği (sağda).

İz sürücü son plakaya göre şekil 4.11'deki arka hodoskop1 üzerinde düşük enerjili parçacık sayısı artmıştır. Arka hodoskop3 üzerinde de parçacık yoğunluğu artmıştır. Bunların sebebinin de borudan gelen parçacıkların burada yoğunluğu artmış olabileceği tahmin edilmektedir.



**Şekil 4. 12:** Elektromanyetik kalorimetre üzerinde iki boyutta XY enerji dağılım grafiği (solda) ve hadronik kalorimetre üzerindeki grafiği (sağda).

Şekil 4.12'de elektromanyetik kalorimetreye gelen parçacık yoğunluğu gösterilmiştir. Bu şekilde parçacık yoğunluğunun arttığı gözlemleniyor. Dolayısıyla borudan gelen parçacıklarda yine artış olduğu çıkarımı yapılabilmektedir. Aynı zamanda proton ilerlerken farklı noktalarda sapmasından, farklı noktalarda pikler oluşturduğu anlaşılmaktadır. Hadronik kalorimetrede her ne kadar kırmızı yoğunluğu artmış gibi görünse de parçacık yoğunluğu azalmıştır. Bunun sebebi, hadronik kalorimetrenin elektromanyetik kalorimetreye göre daha kalın olması ve kullanılan malzemelerin de farklı olmasıdır.

Böylece Pre-FACET dedektöründe, basitleştirilmiş Pre-FACET dedektörüne göre gerçeğe yakın geometri değerleri alınarak çıkan fluka test sonuçları verilmiştir.

]



## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

[Parçacık fiziği için dedektör tasarımları ve simülasyonlarının önemli bir yeri vardır. Bir dedektör sistemi kurmadan önce simülasyonunu yapıp sonuçlarını ayrıntılı olarak test etmek, dedektörün gelişim aşaması için çok önemlidir. Yapılan bu simülasyonlar, dedektörleri geliştirmek ve test etmek için önemli aşama kaydederler. Çünkü dedektör tasarlamak ve geliştirmek yüksek maliyet gerektirir. Bu tez çalışmasında bu kapsamda Fluka programı kullanılarak gerçekleştirilen basitleştirilmiş Pre-FACET ve Pre-FACET dedektörleri simülasyonları oluşturulmuştur.

FACET, uzun yaşam süresine sahip parçacıkların aranması için gelecekte kurulması planlanan bir dedektördür. FACET dedektörü Standart Model ötesi ailesi ve bu aileden biri olan uzun ömürlü parçacıkları keşfetmek için CMS'in bir uzantısı olarak önerilmiştir. CMS'den bağımsız olmayan entegre bir sistemdir. CMS dedektörünün çarpışma noktasından yaklaşık 100 m ilerisine kurulması öneriliyor.

Sonuç olarak uzun yaşam süresine sahip parçacıkların araştırılması için öne sürülen FACET dedektörü geliştirme çalışmaları kapsamında basitleştirilmiş Pre-FACET ve Pre-FACET dedektörlerinin simülasyon çalışmaları radyasyon ortamında elde edilmiştir. Ayrıca alt dedektörlerdeki enerji yoğunluğu grafikleri çıkarılmıştır. Kullanılan alt dedektörler sayesinde arka plan azaltılarak uzun ömürlü parçacıkları bulma imkanı artırılmıştır [6].

Bu çalışmalar ile devam edecek olan daha gelişmiş çalışmalara temel oluşturarak gelişim aşamasında olan FACET geometrisi çalışmalarına katkıda bulunulmuştur.

]

## KAYNAKLAR

[

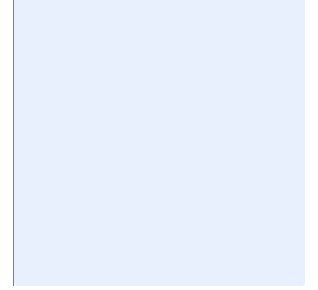
- [1]. Griffiths, D., 1963, Griffiths Particles, *The American Mathematical Monthly*, 70 (6), 689.
- [2]. Saikumar, D., 2024, Exploring the Frontiers: Challenges and Theories Beyond the Standard Model, .
- [3]. Lykken, J.D., 2010, Beyond the Standard Model, .
- [4]. Glashow, S.L., 1961, Partial-symmetries of weak interactions, *Nuclear Physics*, 22 (4), 579–588.
- [5]. Salam, A., 1994, Weak and electromagnetic interactions, 244–254.
- [6]. Aydılek, O., 2024, Kuvars fiber bazlı luminometre ve facet dedektörlerinin tasarımı ve simülasyon çalışmaları, Doktora, İstanbul Üniversitesi, 2024.
- [7]. 2024., Particle Data Group, .
- [8]. Groom, D.E., Aguilar-Benitez, M., Amsler, C., Barnett, R.M., Burchat, P.R., Carone, C.D., et al., 2000, Review of particle physics, *European Physical Journal C*, 15 (1–4), 1–878.
- [9]. Albrow, M.G., n.d., The FACET Project: Forward Aperture CMS Extension to search for new Long-Lived Particles, .
- [10]. Cerci, S., Cerci, D.S., Lazic, D., Landsberg, G., Cerutti, F., Sabaté-Gilarte, M., et al., 2022, FACET: A new long-lived particle detector in the very forward region of the CMS experiment, *JHEP*, .
- [11]. Grupen, Claus., Shwartz, B.A., Spieler, Helmuth., Eidelman, S., and Stroth, Tilo., 2011, Particle detectors, 651.
- [12]. 2024., Home | CERN, .
- [13]. Akbıyık Fizik Anabilim Dalı Yüksek Enerji ve Plazma Fiziği Danışman ProfDr KGediz Akdeniz II Danışman DoçDrKerem Cankoçak, M.I., 2012, İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ YÜKSEK LİSANS TEZİ İSTANBUL DÖRT VE TEK ANOTLU PMT'LERDE TEK FOTO ELEKTRON SPEKTRA ANALİZİ, .
- [14]. Lippmann, C., 2012, Particle identification, *Nucl.Instrum.Meth.A*, 666 148–172.

- [15]. Çerçi, S., 2009, Cms ileri hadron kalorimetresindeki jetler ile s=14 TeV'lik proton-proton çarpışmasında low-x qcd çalışmaları , Doktora, Çukurova Üniversitesi, 2009.
- [16]. Albrow, M.G., n.d., A Forward Multiparticle Spectrometer for the LHC: Hadron spectra and Long-lived particle search, .
- [17]. Battistoni, G., Boehlen, T., Cerutti, F., Chin, P.W., Esposito, L.S., Fassò, A., et al., 2015, Overview of the FLUKA code, *Annals Nucl.Energy*, 82 10–18.
- [18]. Ahdida, C., Bozzato, D., Calzolari, D., Cerutti, F., Charitonidis, N., Cimmino, A., et al., 2022, submitter : New Capabilities of the FLUKA Multi-Purpose Code, *Front. Phys.*, 9 788253.
- [19]. Cern, V. V, 2009, FLAIR: A POWERFUL BUT USER FRIENDLY GRAPHICAL INTERFACE FOR FLUKA, .

]

## ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Semina KUŞ
Doğum Yeri	
Doğum Tarihi	Tarih girmek için tıklayın veya dokununuz.
Uyruğu	<input checked="" type="checkbox"/> T.C. <input type="checkbox"/> Diğer:
E-Posta Adresi	
Web Adresi	



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Fakülte	Fen Edebiyat Fakültesi
Bölümü	Fizik
Mezuniyet Yılı	2011

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