



**GELECEK DAİRESEL ELEKTRON-HADRON
ÇARPIŞTIRICI (FCC-eh) DETEKTÖRÜ İÇİN
ELEKTROMAGNETİK KALORİMETRE TASARIMI
ÇALIŞMASI**

Zakira HASHİMİ



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GELECEK DAİRESEL ELEKTRON-HADRON ÇARPIŞTIRICI (FCC-eh)
DETEKTÖRÜ İÇİN ELEKTROMAGNETİK KALORİMETRE TASARIMI
ÇALIŞMASI**

Zakira HASHİMİ
0000-0003-4691-6471

Doç. Dr. Fatma KOÇAK
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

BURSA– 2023
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GELECEK DAİRESEL ELEKTRON-HADRON ÇARPIŞTIRICI (FCC-eh) DETEKTÖRÜ İÇİN ELEKTROMAGNETİK KALORİMETRE TASARIMI ÇALIŞMASI

Zakira HASHİMİ

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Doç.Dr. Fatma KOÇAK

Gelecek Dairesel Çarpıştırıcı (FCC) projesi, Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (LHC)'ndan sonraki dönem için Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi (CERN) alanında inşa edilmesi planlanan iddialı bir hızlandırıcı projesidir. Bu projenin amacı, Cenevre bölgesinde 80-100 km'lik yeni bir halkaya yerleştirilecek olan 100 TeV'lik bir proton çarpıştırıcısı inşa etmektir. FCC projesine sadece proton çarpışmaları (FCC-hh) değil, elektron ve pozitron (FCC-ee ve FCC-eh) çarpışmaları da dâhil edilerek planlanmıştır. Bunlardan FCC-eh, 50 TeV'lik enerjiye sahip FCC-hh protonları ile bir enerji geri kazanımlı linaktan (energy recovery linac) gelen 60 GeV'lik enerjiye sahip elektronları 3,5 TeV'lik kütle merkezi enerjisinde çarpıştıracak şekilde tasarlanmıştır. Bu tez çalışmasının konusu olan FCC-eh detektörünün kalorimetre sistemi, birkaç TeV'lik enerjilerde üretilen yoğun elektromanyetik ve hadronik enerji jetleri nedeniyle yüksek hassasiyete sahip olmalıdır. Bu çalışmada detektörün elektromagnetik kalorimetresi için çeşitli tasarım çalışmaları yapılmıştır. Bu amaçla, soğurucu ortam olarak Pb malzemesi ve aktif ortam olarak sintilatör kullanılarak bir örnekleme kalorimetresi tasarlanmıştır. Çeşitli Pb kalınlıklarına ve kalorimetreye gelen parçacığın geliş açısına bağlı olarak enerji çözünürlüğünün değişimi GEANT4 simülasyon programı kullanılarak araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Örnekleme kalorimetresi, enerji çözünürlüğü, GEANT4 simülasyonu
2023, xvi+65 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

ELECTROMAGNETIC CALORIMETER DESIGN STUDY FOR THE FUTURE CIRCULAR ELECTRON-HADRON COLLIDER (FCC-eh) DETECTOR

Zakira HASHİMİ

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

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Fatma KOÇAK

The Future Circular Collider (FCC) is an ambitious project of an accelerator complex planned to be built at the site of the European Center for Nuclear Research (CERN) for the period after the Large Hadron Collider (LHC). The aim of this project is to build a 100 TeV proton collider that will be deployed in a new 80-100 km ring in the Geneva region. The FCC project is planned by including not only proton collisions (FCC-hh), but also electron and positron (FCC-ee and FCC-eh) collisions. One of these, FCC-eh is designed to collide 60 GeV electrons from an energy recovery linac with 50 TeV FCC-hh protons at a center-of-mass energy of 3.5 TeV. The calorimetry system of the FCC-eh detector, which is the subject of this thesis, must have high sensitivity due to the intense electromagnetic and hadronic energy jets produced at energies of a few TeV. In this study, various design studies have been carried out for the electromagnetic calorimeter of the detector. For this purpose, a sampling calorimeter was designed using Pb material as the absorber medium and the scintillator as the active medium. The variation of the energy resolution depending on the various Pb thicknesses and the incidence angle of the particle coming to the calorimeter was investigated using the GEANT4 simulation program.

Key words: Sampling calorimeter, energy resolution, GEANT4 simulation
2023, xvi+65 pages.

TEŞEKKÜR

Öncelikle yüksek lisans öğrenimim boyunca yol göstericiliği ve desteğini esirgemeyen Doç. Dr. Fatma KOÇAK danışman hocama sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Sorularıma cevap vermekten asla bıkmadı, Onun rehberliği, sabrı ve engin bilgisi kariyer hedeflerim için her zaman iyi bir motivasyon oldu.

Dr. Öğr. Üyesi Zerrin KIRCA ve Doç. Dr. Cem Salih ÜN hocalarıma değerli dersleri için teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, çalışmalarımın sırasında gösterdikleri teşvik ve desteklerinden dolayı Mudathir FAKHRELDİN OSMAN YAHYA ve Sultan ÖZDEMİR arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Son olarak, hayatım boyunca beni destekleyen annem, babamve kardeşlerime teşekkürlerimi sunarım. Sürekli destekleri olmasaydı bugün olduğum yerde duramazdım. Ayrıca eşim Aziz İBRAHİMİ'e yardım ve destekleri için teşekkür ederim. Israrlı yardımı olmasaydı, bu tezi yazmam mümkün olmazdı.

Zakira HASHIMI
.../02/2023

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR	v
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiv
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Yüklü Parçacıkların Madde ile Etkileşimleri.....	3
2.1.1. İyonizasyon ve uyarılma.....	3
2.1.2. Bremsstrahlung.....	4
2.2. Fotonların Etkileşmeleri.....	5
2.2.1. Fotoelektrik olay.....	7
2.2.2. Compton saçılması.....	8
2.2.3. Çift oluşumu.....	9
2.3. Yüksek Enerji Fiziki Detektörleri.....	10
2.4. Yüksek Enerji Detektörlerinin Bileşenleri.....	12
2.5. Kalorimetre.....	13
2.6. Uygulamaya Göre Kalorimetre Tipleri.....	14
2.6.1. Elektromanyetik kalorimetre.....	14
2.6.2. Hadronik kalorimetre.....	17
2.7. Yapısına Göre Kalorimetreler.....	19
2.7.1. Homojen kalorimetreler.....	19
2.7.2. Örnekleme kalorimetreleri.....	22
2.8. Enerji Çözünürlüğü.....	25
2.9. CERN FCC.....	26
2.10. Lepton Çarpıştırıcısı (FCC-ee).....	28
2.11. Hadron Çarpıştırıcısı (FCC-hh).....	29
2.12. Hadron-Lepton Çarpıştırıcısı (FCC-he).....	30
2.13. FCC-eh İçin Detektör Tasarımı.....	31
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	33
3.1. GEANT4 Programı.....	33
3.1.1. GEANT4 tasarımı.....	34
3.1.2. GEANT4 simülasyon birimleri.....	36
3.2. Türkiye Milli Bilim e-Altyapısı (TRUBA).....	37
3.3. ROOT Analiz Programı.....	40
3.3.1. Crystalball fonksiyonu.....	42
3.3.2. Novosibirsk fonksiyonu.....	43
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	44
4.1. Elektromanyetik Kalorimetre İçerisinde Elektromanyetik Sağanak Oluşumu.....	44
4.2. Elektromagnetik Kalorimetre İçinde Depolanan Enerji Oranı.....	45
4.3. Enerji Spektrumu.....	46
4.4. QGSP_BERT ve FTFP_BERT Fizik Listeleri.....	54
4.5. Elektronun Geliş Açısına Bağlı Olarak Enerji Çözünürlüğü.....	56
5. SONUÇ.....	58
KAYNAKLAR.....	60

ÖZGEÇMİŞ..... 65



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
σ_i	Atomik kesidi
N_A	Avogadro sayısı
E_0	Başlangıç enerjisi
ϵ_0	Boş uzayın elektriksel geçirgenliği
e^-	Elektron
m_e	Elektron durgun kütlesi
E_e	Elektronun enerjisi
E_γ	Gelen fotonun enerjisi
m	Gelen parçacığın kütlesi
z	Gelen parçacığın yükü
σ	Genişlik
c	Gürültü terimi
α	İnce yapı sabiti
c	Işık hızı
r_e	Klasik elektronun yarıçapı
E_c	Kritik enerji
\oplus	Kuadratik toplamı
τ	Kuyruk parametresi
μ	Kütle zayıflama katsayısı
γ	Lorentz faktörü
η	Mezon
R_M	Moliere yarıçapı
N	Normalleştirme faktörü
λ	Nükleer etkileşim uzunluğu
A	Ortamın atom ağırlığı
Z	Ortamın atom numarası
I	Ortamın iyonizasyon ve uyarma potansiyeli
β	Parçacığın göreceli hızı
π^0	pion
e^+	Pozitron
p	Proton
E_p	Proton enerjisi
X_0	Radyasyon uzunluğu
b	Sabit terimi
E'_γ	Saçılan fotonun enerjisi
a	Stokastik terimi
e	Temel yük
δ	Yoğunluk etkisi

Kısaltmalar Açıklama

Ar	Argon
ERL	Energy Recovery Linac (Enerji Geri Kazanımlı Linak)
CDF	Collider Detector at Fermilab
CEPC	Dairesel Elektron Pozitron Çarpıştırıcısı
CERN	European Organization for Nuclear Research
CLIC	Compact Linear Collider (Kompakt Doğrusal Çarpıştırıcı)
CMS	Compact Muon Solenoid (Sıkı Müon Solenoid)
CsI	Cesium Iodide(Sezyum İyodür)
DM	Dark Matter (karanlık madde)
DRDC	Detector Research and Development Committee(Detektör Araştırma ve Geliştirme Komitesine)
ECAL	Elektromanyetik kalorimetre
EM	Elektromanyetik
erf	Hata fonksiyonudur
EW	Electroweak (Elektrozayıf)
FCC	Gelecek Dairesel Çarpıştırıcı
FCC-ee	Elektron-pozitron çarpıştırıcısı
FCC-eh	Proton-elektron çarpıştırıcısı
FCC-hh	Hadron çarpıştırıcısı
GEANT4	GEometry ANd Tracking
HCAL	Hadronik kalorimetre
HEP	Yüksek Enerji Fiziği
HL-LHC	Yüksek Parlaklıklı Büyük Hadron Çarpıştırıcısı
ILC	International Linear Collider (Uluslararası Doğrusal Çarpıştırıcı)
IP	Etkileşim noktası
KEK	Japon Ulusal Hızlandırıcı Merkezi
Kr	Kripton
LAr	Sıvı argon
LEP	Large Electron-Positron Collider(Büyük Elektron-Pozitron Çarpıştırıcısı)
LHC	Large Hadron Collider (Büyük Hadron Çarpıştırıcısı)
LHeC	Large Hadron Electron Collider (Büyük Hadron Elektron Çarpıştırıcısı)
NaI(Tl)	Thallium Activated Sodium iodide (Aktif Talyum Sodyum iyodür)
NOMAD	Neutrino Oscillation Magnetic Detector (Nötrino Titreşim Manyetik Dedektör)
OPAL	Omni-Purpose Apparatus at LEP (LEP’de Çok Amaçlı Aparat)
Pb	Kurşun
PbO	Kurşun cam
PbWO ₄	Lead Tungstat (Kurşun tungstat)
Si	Silikon
SM	Standart Model
SPS	Super Proton Synchrotron (Süper Proton Sinkrotronu)
Tl	Talyum
TMP	Tetramethyl Pentane (Tetrametil Pentan)
TR-Grid	Turkish National e-Science e-Infrastructure (Türk Ulusal Bilim e-Altyapısı)
TRUBA	Turkish National Science e-Infrastructure (Türk Milli Bilim e-Altyapısı)

Kısaltmalar Açıklama

TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
ULAKBİM	Ulusal Akademik Ağ ve Bilgi Merkezi
Xe	Xenon
YED	Yüksek enerji fiziği detektörleri



ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa	
Şekil 2.1.	Kurşun içerisinde pozitron veya elektron enerjisine bağlı olarak radyasyon uzunluğu başına enerji kaybı (Fabjan ve Gianotti, 2003).....	4
Şekil 2.2.	Hedef malzemenin atom numarasına bağlı olarak, fotonların enerjilerine göre baskın olan etkileşmeler (Fabjan, 2020).....	6
Şekil 2.3.	Fotoelektrik olay.....	7
Şekil 2.4.	Compton saçılmasında kinematik değişkenlerin tanımı.....	8
Şekil 2.5.	Çift oluşumu.....	10
Şekil 2.6.	Yüksek enerji detektörlerinin bileşenleri.....	12
Şekil 2.7.	Sağanak parametrelerinin belirlenmesi için basit bir model (Gru- pen ve Schwartz, 2008).....	15
Şekil 2.8.	Bakırda 10 GeV enerjili elektron sağanağının çeşitli kalınlıklarda depoladığı enerjinin radyal dağılımları (Wigmans, 2000).....	16
Şekil 2.9.	Hadronik sağanağın oluşum mekanizması.....	18
Şekil 2.10.	Bazı örnekleme kalorimetrelerin tipleri.....	23
Şekil 2.11.	Gelecek Dairesel Çarpıştırıcı (FCC)'nin şematik gösterimi.....	27
Şekil 2.12.	FCC işbirliğine katılan enstitü ve şirketlerin coğrafik dağılımı....	28
Şekil 2.13.	FCC-eh kavram detektörünün temel özellikleri gösteren yandan görünümü (Kostka, Polini ve Yamazaki, 2022).....	31
Şekil 3.1.	Geant4 araç setinin Üst Düzey Kategori Şeması (Agostinelli ve ark 2003).....	35
Şekil 3.2.	Adım kategorinin tanımı (Sébastien, 2020).....	37
Şekil 4.1.	Elektromagnetik kalorimetrenin katmanları.....	44
Şekil 4.2.	5 GeV enerjili bir elektronun kalorimetre içerisinde oluşturduğu elektromanyetik sağanak.....	45
Şekil 4.3.	Radyasyon uzunluğuna bağlı olarak çeşitli enerjilerde elektronların oluşturduğu sağanakların kalorimetre içerisinde depolanma oran.	46
Şekil 4.4.	Elektromanyetik kalorimetreye gönderilen 50 GeV, 100 GeV, 500 GeV ve 1 TeV enerjili elektronlar için elde edilmiş enerji spektru- mları. Grafiklerdeki düz mavi çizgiler, Novosibirsk fit fonksiy- onu ile elde edilmiştir.....	47
Şekil 4.5.	Elektromanyetik kalorimetreye gönderilen 50 GeV, 100 GeV, 500 GeV ve 1 TeV enerjili elektronlar için elde edilmiş enerji spektru- mları. Grafiklerdeki düz mavi çizgiler, Crystal Ball fit fonksiyonu ile elde edilmiştir.....	48
Şekil 4.6.	Çeşitli radyasyon uzunluğunda gelen elektronun enerjisine bağlı olarak enerji çözünürlüğü.....	50
Şekil 4.7.	Aynı radyasyon uzunluğuna ($30X_0$) ama farklı Pb kalınlıklarına sahip iki kalorimetre tasarımı için gelen elektronun enerjisine bağlı olarak enerji çözünürlükleri.....	51
Şekil 4.8.	Elektromanyetik kalorimetre için Novosibirsk fit fonksiyonu kull- anarak elde edilen enerjiye bağlı enerji çözünürlükleri.....	52
Şekil 4.9.	Elektromanyetik kalorimetre için Crystal Ball fit fonksiyonu kull- anarak elde edilen enerjiye bağlı enerji çözünürlükleri.....	53

Şekil 4.10.	500 GeV ve 1 TeV' lik elektron enerjisi için, katman kalınlıklarına bağlı olarak $30X_0$ 'da enerji çözünürlükleri.....	53
Şekil 4.11.	QGSP_BERT ve FTFP_BERT fizik listeleri için, Novosibirsk fit fonksiyonu kullanılarak elde edilen enerji çözünürlükleri.....	55
Şekil 4.12.	QGSP_BERT ve FTFP_BERT fizik listeleri için, Crystal Ball fit fonksiyonu kullanılarak elde edilen enerji çözünürlükleri.....	55
Şekil 4.13.	Geliş açısına bağlı olarak 50 GeV, 100 GeV, 500 GeV ve 1 TeV enerjili elektronlar için $30X_0$ 'da enerji çözünürlüğü.....	56



ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 FCC-hh'ın bazı parametreleri.....	30
Çizelge 3.1. Ulusal gridi oluşturan küme bilgisayar merkezleri ve sahip oldukları kaynaklar.....	39
Çizelge 4.1. Elektromanyetik kalorimetrede kullanılan pb kalınlıkları ve katman sayısı.....	47
Çizelge 4.2. $30X_0$ radyasyon uzunluğunda kullanılan pb kalınlıkları ve katman sayısı.....	49
Çizelge 4.3. $32X_0$ radyasyon uzunluğunda kullanılan pb kalınlıkları ve katman sayısı.....	49
Çizelge 4.4. $34X_0$ radyasyon uzunluğunda kullanılan pb kalınlıkları ve katman sayısı.....	49
Çizelge 4.5. $30X_0$ radyasyon uzunluğunda v_2 için kullanılan pb kalınlıkları ve katman sayısı.....	50
Çizelge 4.6. Çeşitli Pb kalınlıkları kullanılarak tasarlanan bir örnekleme elektromagnetik kalorimetresi için enerji çözünürlüğünün stokastik (a) ve sabit (b) terimlerinin değişimi. Novosibirsk fit fonksiyonu sonuçları.....	54
Çizelge 4.7. Farklı Pb kalınlıkları kullanılarak tasarlanan bir örnekleme elektromagnetik kalorimetresi için enerji çözünürlüğünün stokastik (a) ve sabit (b) terimlerinin değişimi. Crystal Ball fit fonksiyonu sonuçları.....	54

1. GİRİŞ

Parçacıklar yalnızca madde ile etkileşmeleri yoluyla tespit edilebilirler. Yüklü parçacıklar ve yüksüz parçacıklar bir ortam içerisine girdiklerinde farklı etkileşmeler yaparlar. Pek çok çeşitli etkileşme olduğundan bunun sonucu olarak, parçacıklar ve radyasyon için pek çok sayıda aygıt bulunmaktadır. Ayrıca, farklı enerjilere sahip aynı parçacıklar farklı etkileşmeler de yapabilmektedir.

Yüksek enerji fiziği çarpıştırıcılarında kullanılan detektörler, demet eksenine etrafına yerleştirilmiş silindirik katmanlardan oluşmaktadır. Demet etkileşme bölgesinden başlayarak, parçacıklar önce yüklü parçacık yörüngelerinin (izlerinin) belirlendiği bir iz takip ediciye (tracker) girerler. İz takip edici detektörler, yüklü parçacıkların elektrik yüklerini ve momentumlarını ölçmek amacıyla parçacıkların yörüngelerini büken bir manyetik alan içine yerleştirilmişlerdir. İz takip edicilerin hemen üzerine yerleştirilmiş olan kalorimetreler, gelen parçacığın enerjisinin tamamını soğurarak parçacıkların belirlenmesi ve özelliklerinin ölçülmesi amacıyla kullanılırlar. İlk olarak, kozmik ışın olaylarının incelenmesi için icat edilen bu yöntem, daha sonra elektronların, fotonların ve hadronların enerjisini ölçmek için hızlandırıcı tabanlı parçacık fiziği deneyleri için kullanılmıştır. Gelen parçacıklar detektör ortamıyla etkileşerek (elektromanyetik veya güçlü etkileşmeler aracılığıyla), enerjilerini kaybederler ve ikincil bir parçacık sağanağı oluştururlar. Sağanağın yüklü parçacıkları tarafından kalorimetrenin aktif kısmında depolanan enerji, gelen parçacığın enerjisinin bir ölçüsü olarak, yük veya ışık şeklinde detekte edilebilir. Genel olarak kalorimetreler, elektromanyetik etkileşmeler (örneğin, bremsstrahlung, çift oluşumu) yoluyla elektronları ve fotonları ölçmek için kullanılan elektromanyetik kalorimetreler ve güçlü ve elektromanyetik etkileşmeler aracılığıyla hadronları ölçmek için kullanılan hadronik kalorimetreler olarak ikiye ayrılabilir. Tasarım şekillerine göre örnekleme (sampling) kalorimetreleri ve homojen kalorimetreler olarak sınıflandırılabilirler. Örnekleme kalorimetreleri, gelen parçacığın enerjisini soğurmak için kullanılan çeşitli kalınlıktaki pasif katmanlardan ve algılanabilir sinyali sağlayan aktif bir ortamdan oluşur. Öte yandan homojen kalorimetreler, her iki görevi de yerine getiren yani enerjinin soğurulması ve sinyal üretimini gerçekleştiren yalnızca bir tür malzemeden yapılmıştır.

FCC projesi, ~100 km'lik yeni inşa edilecek bir tünelde 100 TeV'lik enerjide bir hadron çarpıştırıcısının (FCC-hh) tasarımına odaklanmaktadır. Aynı zamanda, bir ara adım olarak yüksek parlaklığa sahip bir elektron-pozitron çarpıştırıcısının (FCC-ee) tasarımını ve bir enerji geri kazanım hattından gelen 60 GeV enerjili elektron demetinin FCC-hh'de dolaşan iki 50 TeV enerjili proton demetinden biriyle çarpıştığı bir proton-elektron çarpıştırıcısının (FCC-eh) tasarımını içerir.

Bu çalışmada, FCC-eh detektörünün elektromanyetik kalorimetresi için soğurucu malzeme olarak kurşun (Pb) ve aktif ortam olarak sintilatörler kullanılarak bir örnekleme kalorimetresi tasarlanmıştır. Aktif katmanlar 6 mm kalınlığında sintilatörlerden oluşmaktadır. Çeşitli Pb kalınlıkları ve kalorimetreye gelen parçacığın geliş açısının enerji çözünürlüğü üzerindeki etkileri GEANT4 simülasyon paketi kullanılarak incelenmiştir. Ayrıca, GEANT4 programı içerisinde bulunan farklı fizik listeleri (QGSP_BERT, FTFP_BERT) kullanılarak bu fizik listelerinin sonuçlara etkisi araştırılmıştır. Simülasyonlardan elde edilen verilerin analizi için ROOT analiz paketi kullanılmıştır.

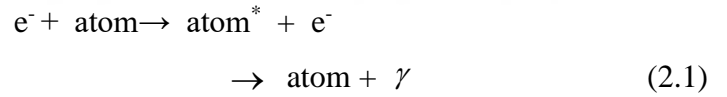
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Yüklü Parçacıkların Madde ile Etkileşimleri

Bu bölümde, ilk olarak parçacıkların madde ile temel etkileşme mekanizmaları kapsamlı bir şekilde sunulacaktır. Daha sonra yüksek enerji fiziği detektörlerinin özellikleri ve bu detektörlerde kullanılan kalorimetre tipleri hakkında detaylıca bilgi verilecektir. Yüklü parçacıkların madde ile yaptıkları temel etkileşmeler iyonizasyon ve uyarılmadır. Görelî parçacıklar için, bremsstrahlung enerji kayıpları da dikkate alınmalıdır. Fotonlar için, bu süreçler fotoelektrik olay, Compton saçılması ve çift oluşumdur. Foton etkileşmelerinde üretilen elektronlar, detektörün hassas hacminde yaptıkları iyonizasyonlar yoluyla gözlemlenebilir.

2.1.1. İyonizasyon ve uyarılma

Maddeden geçen elektronlar gibi yüklü parçacıklar, maddenin bağlı elektronlarının uyarılması ve iyonizasyon yoluyla kinetik enerjilerini kaybederler. Uyarılma süreçleri aşağıdaki gibi gösterilebilir.



Kurşun içerisinde elektronların ortalama enerji kaybı Şekil 2.1' de görülmektedir. Düşük enerjilere sahip pozitronlar ve elektronlar öncelikle iyonizasyon, Bhabha ve Møller saçılması ve pozitron yok olması gibi süreçler vasıtasıyla kinetik enerjilerini kaybederler. İyonizasyonla enerji kaybı logaritmik olarak azalırken, bremsstrahlung ile enerji kaybı ise neredeyse lineerdir. Pozitronlar ve elektronların dx uzunluğu başına dE enerji kaybı şu şekilde verilebilir:

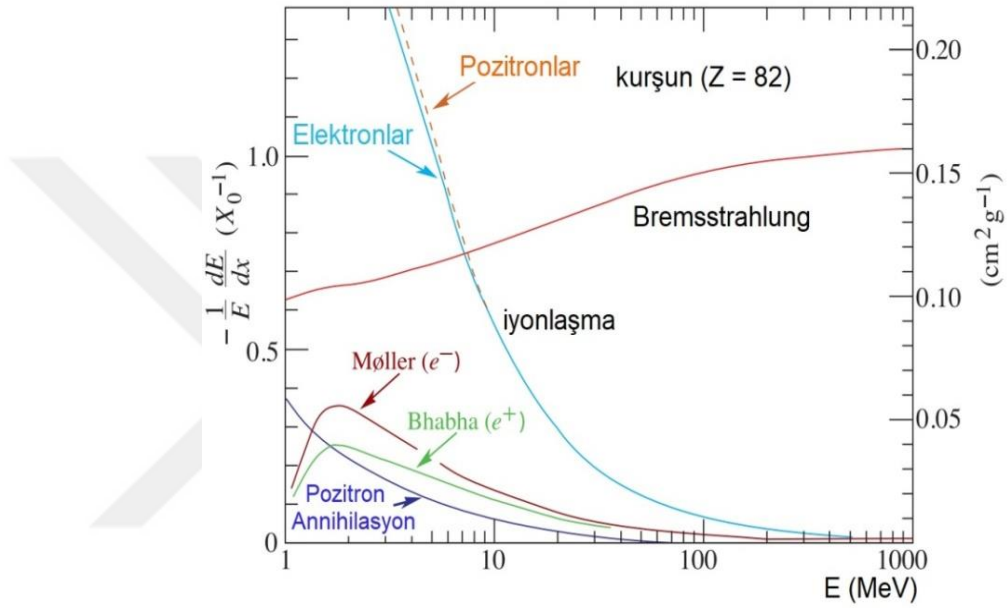
$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left(\ln \frac{2m_e c^2 \gamma^2 \beta^2}{I} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right) \quad (2.2)$$

Burada, z : gelen parçacığın yükü

Z ve A : sırasıyla ortamın atom numarası ve atom ağırlığı

m_e : Elektronun durgun kütlesi

r_e : Elektronun yarıçapı
 N_A : Avogadro numarası
 I : ortalama uyarma enerjisi
 γ : Lorentz faktörü
 β : parçacığın rölativistik hızı
 δ : yoğunluk etkisidir.



Şekil 2.1. Kurşun içerisinde pozitron veya elektron enerjisine bağlı olarak radyasyon uzunluğu başına enerji kaybı (Fabjan ve Gianotti, 2003).

İyonizasyonda çarpışma başına enerji kaybı 0,255 MeV'den daha küçüktür. Daha yüksek enerji aktarımı ile gerçekleşen çarpışmalar elektronlar için Möller, pozitronlar için Bhabha saçılmalarıdır.

2.1.2. Bremsstrahlung

Yüklü parçacıklar, iyonizasyonla kayıplara ek olarak, içerisinden geçtikleri ortamın çekirdeğinin Coulomb alanı ile etkileşmeler yaparak enerji kaybederler. Yüklü parçacıklar çekirdeğin Coulomb alanında yavaşlatılırsa, kinetik enerjilerinin bir kısmı fotonlar (bremsstrahlung) şeklinde yayınlanır.

Yüksek enerjiler için bremsstrahlung ile enerji kaybı şu şekilde açıklanabilir:

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

Burada Z ortamın atom numarası ve A atom ağırlığıdır, z , m , E sırasıyla gelen parçacığın yükü, kütlesi ve enerjisi,

α : İnce yapı sabiti,

ϵ_0 : Boş uzayın geçirgenliği,

e : Temel yük,

N_A : Avogadro sayısıdır.

Elektronların bremsstrahlung ile enerji kaybı şu şekilde verilir:

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

İyonizasyon ile enerji kaybının aksine, bremsstrahlung ile enerji kaybının parçacığın enerjisiyle orantılı ve gelen parçacıkların kütlesinin karesiyle ters orantılı olduğuna dikkat edilmelidir.

Elektron kütlesinin küçüklüğünden dolayı, bremsstrahlung enerji kayıpları elektronlar için özellikle önemli bir rol oynar. Elektronlar için enerji kaybı, $z = 1$, $m = m_e$ alınarak Denk. (2.3) ve Denk. (2.4) kullanılarak aşağıdaki şekilde yazılabilir:

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

Burada X_0 radyasyon uzunluğudur (Gruppen & Schwartz, 2008).

2.2. Fotonların Etkileşmeleri

Fotonlar, detektör ortamında gerçekleşen etkileşmeler yoluyla dolaylı olarak algılanır. Fotonların madde ile etkileşmeleri, yüklü parçacıkların iyonlaşma süreçlerinden temelde farklıdır, çünkü her foton etkileşmesinde, foton ya tamamen soğurulur (fotoelektrik olay, çift oluşumu) ya da nispeten geniş bir açıyla saçılır (Compton olayı). Absorpsiyon veya saçılma istatistiksel bir süreç olduğundan, γ ışınları için bir aralık tanımlamak imkânsızdır. Bir foton madde içinde

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.6)$$

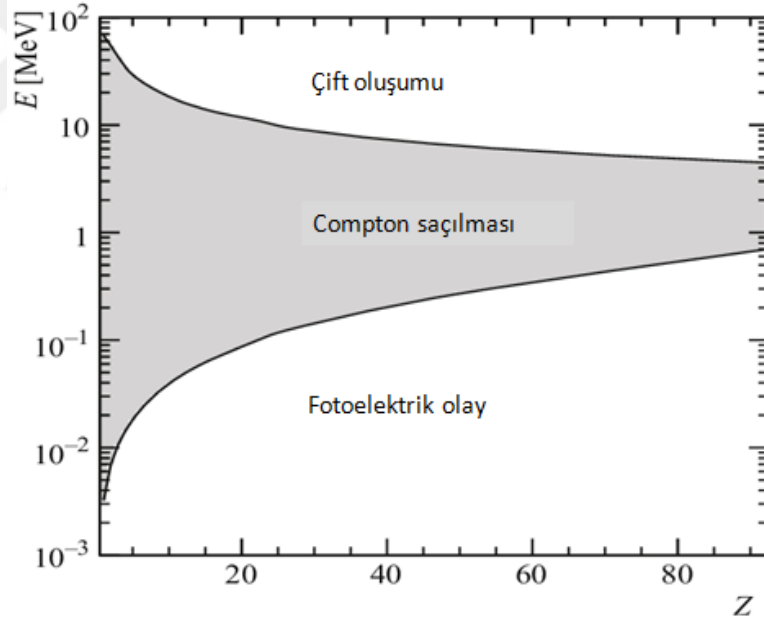
denklemine göre üstel olarak zayıflar.

Kütle zayıflama katsayısı μ , fotonların çeşitli etkileşme süreçleri için foton tesir kesitlerine bağlıdır;

$$\mu = \frac{N_A}{A} \sum_i \sigma_i \quad (2.7)$$

Burada σ_i , i tane süreç için atomik tesir kesiti, A atom ağırlığıdır ve N_A Avogadro sayısıdır.

Şekil 2.2’te gösterildiği gibi, foto-absorpsiyon düşük foton enerjilerinde daha baskındır, çift üretimi yüksek enerjilerde en sık meydana gelen etkileşmedir ve orta enerji aralığında Compton saçılması baskındır.



Şekil 2.2. Hedef malzemenin atom numarasına bağlı olarak, fotonların enerjilerine göre baskın olan etkileşmeler (Fabjan, 2020).

2.2.1. Fotoelektrik olay

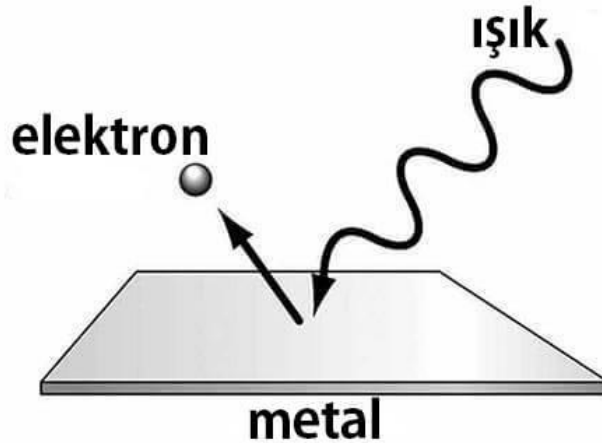
Bir foton ile atom arasında gerçekleşen bir etkileşimdir. Fotonun enerjisi elektronun bağlanma enerjisinden büyükse, foton soğurulur ve atomdan bir elektron kopar. Fotoelektrik olay düşük enerjilerde ($100 \text{ keV} \geq E_\gamma \geq \text{iyonizasyon enerjisi}$) baskındır.



Atomik elektronlar bir fotonun enerjisini tamamen soğurabilirken, momentum korunumu yasası nedeniyle bu serbest elektronlar için mümkün değildir. Bir fotonun bir atomik elektron tarafından soğurulması için, üçüncü bir çarpışma ortağı olarak atom çekirdeği gerekir. E_γ enerjili bir fotonun K-kabuğunda soğurulması için soğurulma tesir kesiti, atom çekirdeğine yakınlığı nedeniyle oldukça yüksektir ve aşağıdaki şekilde verilir:

$$\sigma_{\text{photon}}^k = 4\pi r_e^2 Z^5 \alpha^4 \frac{1}{\varepsilon} \quad (2.9)$$

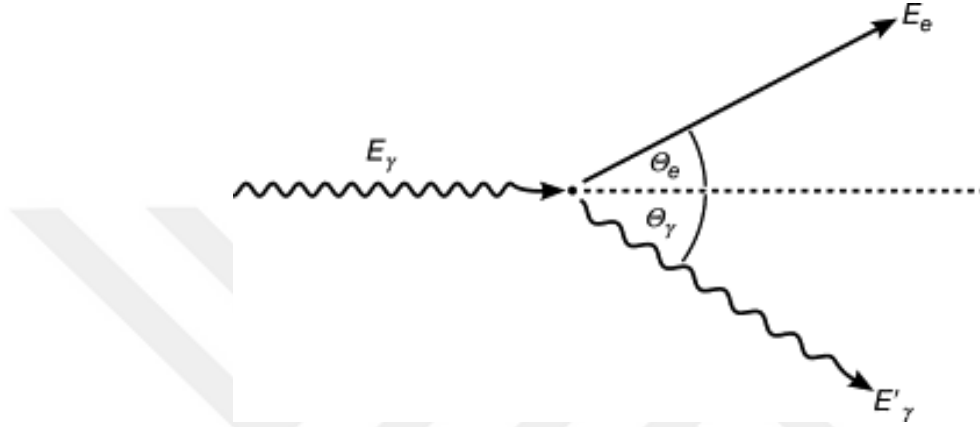
Burada $\varepsilon = E_\gamma / m_e c^2$, α ince yapı sabiti ve Z hedef atomdaki elektron sayısıdır. Denklem 2.9' dan da görülebileceği gibi tesir kesiti, Z 'ye Z^5 ile bağlıdır. Bu da atomun uzak bir elektronu ile fotonun etkileşmeye girmediğini gösterir.



Şekil 2.3. Fotoelektrik olay

2.2.2. Compton saçılması

Compton saçılması, orta enerji aralığındaki ($E_\gamma \approx 1$ MeV) fotonların, yarı serbest atomik elektronlarla etkileşerek saçılması olarak tanımlanır.



Şekil 2.4. Compton saçılmasında kinematik değişkenlerin tanımı.

Bu etkileşimde, atomik elektronların bağlanma enerjisi ihmal edilir. Compton saçılmasının diferansiyel olasılığı, Klein-Nishina formülü ile verilir.

$$\phi_c(E_\gamma, E'_\gamma) dE'_\gamma = \pi r_e^2 \frac{N_A Z m_e c^2}{Z} \frac{dE'_\gamma}{E'_\gamma} \left[1 + \left(\frac{E'_\gamma}{E_\gamma} \right)^2 - \frac{E'_\gamma}{E_\gamma} \sin^2 \theta_\gamma \right] \quad (2.11)$$

Burada θ_γ , fotonun saçılma açısıdır (bkz. Şekil 2.4) ve E_γ gelen fotonun, E'_γ saçılan fotonun enerjileridir. Elektron başına Compton saçılması için toplam tesir kesiti şu şekilde verilir:

$$\sigma_c^e = 2\pi r_e^2 \left[\left(\frac{1+\varepsilon}{\varepsilon^2} \right) \left\{ \frac{2(1+\varepsilon)}{1+2\varepsilon} - \frac{1}{\varepsilon} \ln(1+2\varepsilon) \right\} + \frac{1}{2\varepsilon} \ln(1+2\varepsilon) - \frac{1+3\varepsilon}{(1+2\varepsilon)^2} \right] \{cm^2 / electron\} \quad (2.12)$$

Yüksek enerjilerde, Compton saçılması tesir kesitinin enerjiye bağımlılığı aşağıdaki şekilde verilebilir:

$$\sigma_c^e \propto \frac{\ln \varepsilon}{\varepsilon} \quad (2.13)$$

Saçılan foton enerjisinin gelen foton enerjisine oranı şu şekilde belirtilir:

$$\frac{E'_\gamma}{E_\gamma} = \frac{1}{1 + \varepsilon(1 - \cos \theta_\gamma)} \quad (2.14)$$

Elektrona aktarılan enerji, geri saçılma durumunda en yüksek değerine ulaştığında, saçılan fotonun enerjisinin, gelen fotonun enerjisine oranı aşağıdaki şekilde verilir:

$$\frac{E'_\gamma}{E_\gamma} = \frac{1}{1 + 2\varepsilon} \quad (2.15)$$

2.2.3. Çift oluşumu

Daha yüksek enerjilerde ($E_\gamma > 1$ MeV) çift oluşumu baskındır.



Bir çekirdeğin Coulomb alanında elektron-pozitron çiftlerinin üretilmesi, ancak foton enerjisinin belirli bir eşiği aşması durumunda mümkündür. Bu eşik enerjisi, iki elektronun durgun kütleleri ve çekirdeğe aktarılan geri tepme enerjisinin toplamıdır. Enerji ve momentumun korunumu yasalarından, bu eşik enerjisi şu şekilde hesaplanabilir:

$$E_\gamma \geq 2m_e c^2 + 2 \frac{m_e^2}{m_{nucleus}} c^2. \quad (2.17)$$

$m_{nucleus} \approx m_e$ olduğundan, eşik enerjisi yaklaşık olarak şu şekilde verilebilir:

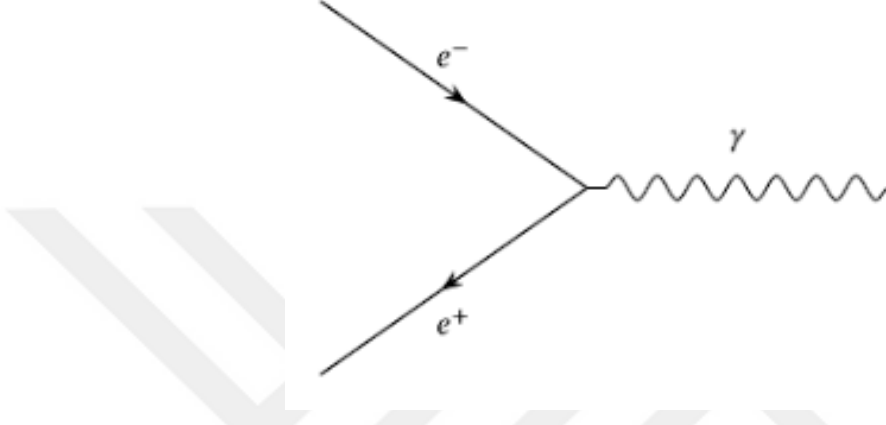
$$E_\gamma \geq 2m_e c^2 \quad (2.18)$$

Bununla birlikte, bir elektronun Coulomb alanında elektron-pozitron çifti oluşumu devam ediyorsa, eşik enerjisi:

$$E_\gamma \geq 4m_e c^2 \quad (2.19)$$

olmalıdır. Bir elektronun Coulomb alanında elektron-pozitron çifti oluşumu, çekirdeğin Coulomb alanındaki çift oluşumuna göre daha baskındır. Elektron-pozitron çifti oluşumu için etkileşme tesir kesiti şu şekilde verilir (Gruppen ve Schwartz, 2008):

$$\sigma_{pair} = 4\alpha r_e^2 Z^2 \left(\frac{7}{9} \ln 2\varepsilon - \frac{109}{54} \right) \{cm^2 / atom\} \quad (2.20)$$



Şekil 2.5. Çift oluşumu.

2.3. Yüksek Enerji Fiziki Detektörleri

Yüksek enerji fiziki detektörleri (YED) elektron (e⁻), pozitron (e⁺), proton (p) ve antiproton gibi kararlı yüklü parçacıkların, parçacık hızlandırıcıları tarafından yüksek enerjilere hızlandırılarak çarpıştırılmaları ile oluşan ürün parçacıkların belirlenmesi için inşa edilir. Parçacık detektörünün amacı, parçacığın momentumunu ölçmek ve bir etkileşimde (çarpışma veya bozunma) üretildikten sonra içinden geçen parçacıkların özelliğini belirlemektir. Etkileşme, detektör içinde kasıtlı olarak meydana gelecek şekilde tasarlanmış bir çarpışmadır ve bu da birçok parçacığın daha fazla parçacığa dönüşmesine neden olur. Etkileşme doğal olarak (örneğin üst atmosferde) meydana gelen ve daha sonra dünyada tespit edilen bir bozunma da olabilir. Etkileşmenin meydana geldiği uzaydaki tam konum, etkileşme noktası (IP) olarak bilinir. Çarpışmanın ürettiği her parçacığı tanımlamak ve izledikleri yolları belirlemek yani etkileşmeyi tamamen yeniden oluşturmak için parçacıkların kütlelerini ve momentumunu bilmek gerekir. Kütle; momentum, hız ve enerji ölçülerek bulunabilir. Çarpışma sonucunda ortaya çıkan ve ışık hızı civarında hareket eden parçacıkları takip ederek

yapılan hassas ölçümler sonucu, parçacıkların sayısı ve saçılma yönü ile birlikte parçacıkların yükü ve momentumu da belirlenmektedir.

Detektörlerin kuvvetli bir magnetik alan altında çarpışma sonucu ortaya çıkan bütün parçacıkları algılaması gerekir. Oluşan parçacıkların sayısını, saçılma yönünü, parçacıkların yükünü ve momentumunu belirlemek için detektörler etkileşme noktası etrafını çevreleyen alt detektör tabakalarından oluşur. Çarpışmadan sonra ortaya çıkan yüklü parçacıkların izlerini sürmek, momentum ve yük ölçümlerini yapabilmek için bu alt detektörlerde bir veya daha fazla magnet vardır ve bu magnetler alt detektörlerin içine yerleştirilirler.

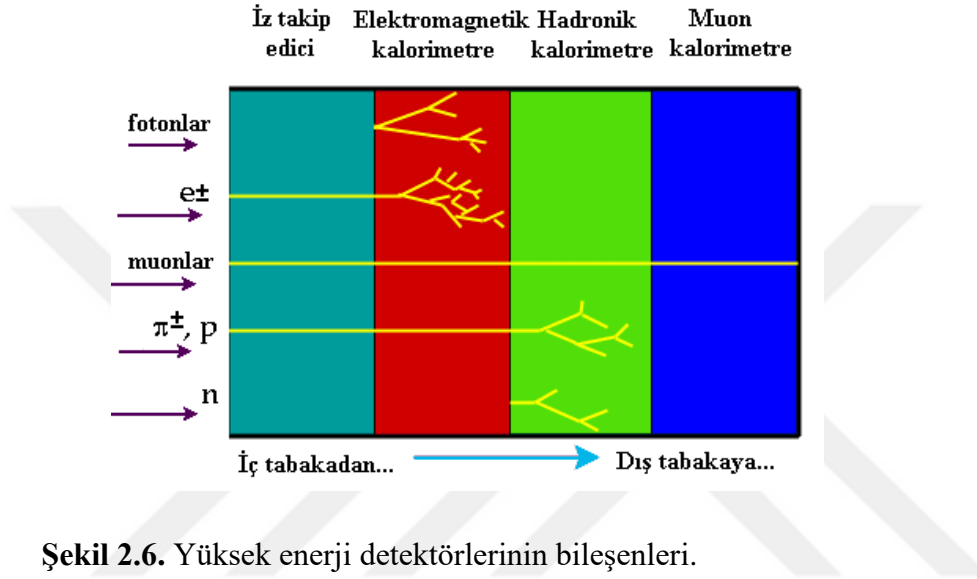
YED' ler yapılan deneylere bağlı olarak farklı şekillerde inşa edilirler. Örneğin, sabit hedef detektörü, sabit hedef deneylerinde oluşan parçacıkların ileri yönde saçılmaları nedeniyle hedefin arka kısmına inşa edilir. Çarpışan demetler detektörü ise, çarpışma deneylerinde parçacıklar bütün yönlere saçılabileceği için, çarpışma noktasını çevreleyen küresel veya daha çok silindir biçiminde inşa edilirler.

Her bir deney kendine ait gereklilikleri için özel olarak tasarlanmış detektör sistemine sahiptir. Böyle detektör sistemlerinin hepsinin ihtiyaçları benzerdir. Genel olarak bir YED şu özelliklere sahip olmalıdır;

- Parçacığın yükünü, yönünü ve momentumunu ölçmeli,
- Çarpışmada her bir yöndeki elektronların ve fotonların taşıdıkları enerjiyi ölçmeli,
- Çarpışmada her bir yöndeki hadronların (protonlar, pionlar, nötronlar vs.) taşıdıkları enerjiyi ölçmeli,
- Çarpışmada oluşan elektronları ve muonları tespit etmeli,
- Nötrinolar gibi detekte edilemeyen parçacıkların varlığını momentum korunumundan yararlanarak tespit etmeli,
- Yukarıda sayılan bilgileri yeterince hızlı yapabilecek özelliğe sahip olmalı ve ölçülen bilgileri kayıt edebilmeli,
- Radyasyon hasarlarına dayanıklı olmalıdır (Koçak, 2010).

2.4. Yüksek Enerji Detektörlerinin Bileşenleri

YED' ler arasında belirli farklılıklar olsa da birçok elemanları aynıdır. Bir yüksek enerji detektörünün içten dışa ana bileşenlerinin genel düzeni Şekil 2.6'dan da görülebileceği gibi şu şekilde verilebilir: manyetik alandaki bir iz takip edici, elektromanyetik ve hadronik kalorimetre ve son olarak muon detektörleri.



İz takip edici detektörler, herhangi bir bozunmaya neden olmadan çarpışmadan sonra oluşan yüklü parçacıkların enerjilerinin bir kısmını iyonizasyon vasıtasıyla kaybettirerek parçacıkların yükünü, yörüngesini ve momentumunu ölçerler. Bunlar çarpışma noktasının hemen yakınında bulunan vertex detektörü, daha sonra merkezi sürüklenme odası (central drift chamber), ön ve arka sürüklenme odaları (forward and backward drift chambers) ve ileri yönde yüksek enerjili elektronları belirlemek için bir geçiş radyasyonu (transition radiation) detektörü gibi alt detektörlerden oluşur.

Vertex detektörleri çarpışmadan sonra ortaya çıkan bir iz segmentini ölçmesi için çarpışma noktası etrafını çevreleyen yüksek konum çözünürlüğüne sahip detektörlere denir. Bu detektörler, silindirik ve çok ince alüminyumdan yapılmış tüplerden oluşan, çok yüksek basınç altında çalıştırılan gaz detektörlerdir.

Kalorimetreler bir parçacığı tamamen soğurur ve enerjisini ölçer. Fotonlar, nötronlar ve nötr kaonlar gibi nötr parçacıkların momentumları hakkında tek bilgi kaynağıdır.

Elektronları yüklü pionlardan ayırmak için parçacık tanımlamada kullanılırlar. Deneylede, toplam enerjii ölçmek ve elektron (e^-), pozitron (e^+) ve fotonlar gibi parçacıkları tanımlamak için elektromanyetik kalorimetreler (ECAL) kullanılır. Elektronlar ve fotonlar elektromanyetik kalorimetrede etkileşerek elektromanyetik sağanağa neden olur. Bu sağanak kalorimetrede soğurular, böylece elektronun veya fotonun enerjisinin ölçülmesine izin verir. Elektromanyetik kalorimetre yüksek atom numarası (Z) olan ve kısa radyasyon uzunluğu X_0 olan bir malzemedan yapılmalı ve bir elektromanyetik sağanağı içerecek kadar büyük olmalıdır, tipik uzunluğu 16–25 X_0 aralığındadır (Moser, 2009).

Hadronik kalorimetreler (HCAL) ise hadronların enerjisini ölçer. Hadronlar (protonlar, nötronlar, pionlar, kaonlar) elektromanyetik kalorimetreye nüfuz eder ancak hadronik kalorimetrelerde etkileşime girer. Kalorimetre yine sağanağın tamamını soğuracak şekilde tasarlanmalıdır. Bu kalorimetrelerin derinliği kullanılan malzemelerin hadronik etkileşim uzunluğu λ ile belirlenir. Hadronik kalorimetreden sonra muon deteksiyon sistemleri gelir. Elektronlar ve hadronlar genellikle kalorimetrelerde tamamen soğurulurlar. Muon deteksiyon sistemine nötrinolar ve çok fazla enerji kaybına uğramadan kalorimetreleri geçen muonlar ulaşır. Nötrinolar, buradan da herhangi bir sinyal bırakmadan geçerler. Müonlar güçlü etkileşmeler yoluyla hadronlar gibi etkileşime girmezler ve ağır kütleleri nedeniyle elektronlar kadar bremsstrahlung yapmazlar, enerjilerini sadece iyonizasyon yoluyla kaybederler ve minimum iyonlaştırıcı parçacık gibi davranırlar. Bu nedenle ana kalorimetrelerden dışarı kaçarlar ve onları detekte edebilmek için detektörün en dış tabakası olarak özel müon detektörleri monte edilir. Bir müonun momentum ölçümünü yapmak için, bu en dış detektörlerden gelen bilgiler tipik olarak iz takip edicide ölçülen bir iz ile eşleştirilir.

2.5. Kalorimetre

Kalorimetreler, belirlenmesi istenilen parçacıkların enerjisini tamamen soğurmak amacıyla yapılmış detektörlerdir. Toplam soğurma, detektörün derinliğini makul sınırlar içinde tutmak için etkileşim kesiti büyük olan bir malzemenin seçilmesi gerektiği anlamına gelir. En uygun durum, soğurucu olarak kullanılan aynı malzemenin, biriken enerjii ölçmek için de kullanılabilmesidir. Ancak bu her zaman mümkün değildir ve

bunun yerine emici plakaların enerjiye duyarlı malzemelerle birlikte kullanıldığı bir “sandviç” yapı kullanılması gerekir. Kalorimetrelerde kullanılacak malzemeler elektron ve fotonların mı yoksa hadronların mı algılanacağına göre değişir. Tipik enerjiye duyarlı malzemeler, sintilatörler ve sıvı argondur.

Kalorimetre, parçacığın enerjisini madde içinde soğurur, parçacık madde ile etkileşime girdiğinde, enerjisini elektromanyetik veya hadronik etkileşimler yoluyla kaybeder. Soğurucu malzemede parçacık etkileşir ve elektromanyetik veya hadronik bir sağanak oluşturur. Bu sürece *sağanak oluşumu süreci* denir. İdeal olarak, bir sağanağın tüm parçacıkları kalorimetrede soğurulur ve gelen parçacığın enerjisini ölçen sinyallere dönüşür, bu yüzden kalorimetrenin oluşan tüm sağanağı içerecek şekilde hem boyuna ve hem enine yeterince büyük olması gerekir.

Sağanaklar temel etkileşim türlerine göre ikiye ayrılmaktadır. Elektronlar ve fotonlar madde ile sadece elektromanyetik kuvvet aracılığıyla etkileşir ve bu nedenle bu parçacıklar elektromanyetik sağanaklar geliştirirler. Protonlar veya pionlar gibi güçlü nükleer kuvvet yoluyla etkileşen parçacıklardan kaynaklanan sağanaklara hadronik sağanaklar denir. Elektromanyetik ve hadronik sağanakların özellikleri birbirinden çok farklı olduğundan her biri elektromanyetik ve hadronik kalorimetre tiplerinden bahsedilirken ayrıntılı bir şekilde incelenecektir.

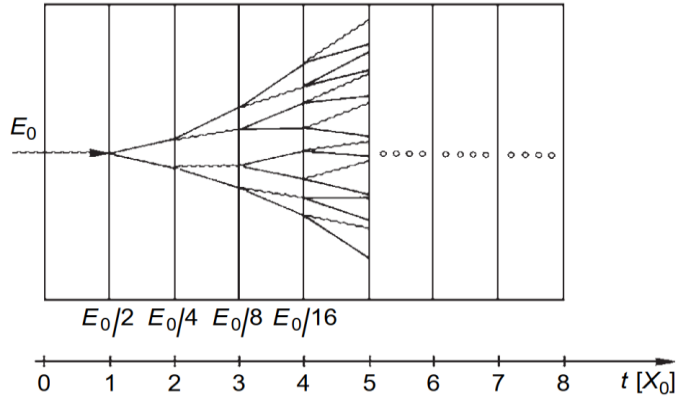
Kalorimetreler, uygulamaya göre elektromanyetik ve hadronik kalorimetreler olmak üzere ikiye ayrılırken, yapım ve bileşenlerine göre homojen ve örnekleme (sampling) kalorimetreleri olarak iki sınıfta incelenebilirler.

2.6. Uygulamaya Göre Kalorimetre Tipleri

2.6.1. Elektromanyetik kalorimetre

Elektromanyetik kalorimetre, içerisine giren elektron, pozitron ve fotonları tamamen soğurarak onların enerjilerini ölçer. Bu parçacıklar elektromanyetik olarak etkileştiği için sistem elektromanyetik kalorimetre (ECAL) adını alır. MeV mertebesindeki enerjilerde, fotonlar fotoelektrik ve Compton olayı vasıtasıyla, yüklü parçacıklar iyonizasyon ve uyarılma vasıtasıyla enerjilerini kaybederler. 100 MeV’den daha yüksek

enerjilerde kalorimetreye giren elektronlar enerjilerini bremsstrahlung, fotonlar ise çift oluşumu ile ikincil elektronlar ve pozitronlar oluşturarak kaybederler. Oluşan bu elektron ve pozitronlar da tekrar bremsstrahlung yoluyla ikincil fotonlar üretirler. Bu ikincil parçacıklar aynı etkileşmelerle başka parçacıklar yaratırlar ve böylece kademeli olarak azalan enerjilere sahip bir dizi parçacıktan oluşan bir sağanak oluştururlar (bkz. Şekil 2.7).



Şekil 2.7. Sağanak parametrelerinin belirlenmesi için basit bir model (Gruppen ve Schwartz, 2008).

E_0 başlangıç enerjisi ile kalorimetreye giren bir parçacık, enerjisi E_c kritik enerji değerine düşünceye kadar bremsstrahlung ve çift oluşumu yaparak sağanağın içerisinde giderek artan sayıda düşük enerjili parçacıklar oluşturur. Parçacığın enerjisi kritik değerinin altına düştüğünde, elektronlar için iyonizasyon, fotonlar için Compton ve fotoelektrik olay baskın olmaya başlar.

Elektronun bremsstrahlung ile enerji kaybının iyonizasyonla enerji kaybına eşit olduğu enerji değeri olarak tanımlanan kritik enerji, soğurucu ortamın Z değeri ile kabaca ters orantılıdır:

Katı veya sıvı fazdaki malzemeler için:

$$E_c = \frac{610 \text{ MeV}}{Z + 1.24} \quad (2.21)$$

Gazlar için:

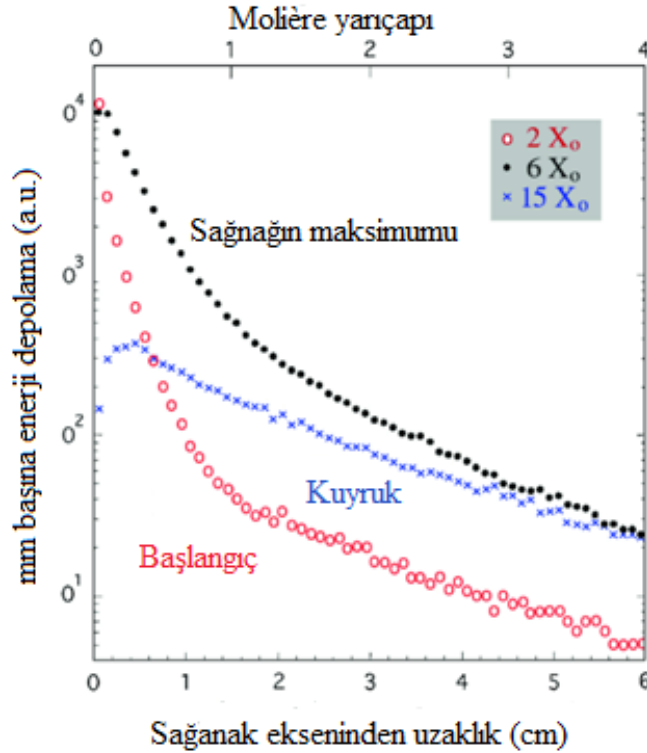
$$E_c = \frac{710 \text{ MeV}}{Z + 0.92} \quad (2.22)$$

ile verilir. Burada, Z Ortamın atom numarasıdır (Wigmans,2000).

Sağanakların yanal genişlemesinde iki tür süreç etkilidir:

1. Elektronlar ve pozitronlar, çoklu saçılma nedeniyle sağanak ekseninden uzaklaşır.
2. İzotropik süreçlerde üretilen fotonlar ve elektronlar (Compton saçılması, fotoelektrik olay) sağanak ekseninden uzaklaşır.

İlk süreç, sağanak gelişiminin erken aşamalarında baskınken, ikincisi sağanak maksimumundan sonra baskındır. Her iki sürecin de kendi özellikleri ve üstel ölçeği vardır. Bu iki bileşen, kalorimetre içinde üç farklı kalınlıkta bakırda gelişen elektron sağanakları için radyal enerji yoğunluğunu gösteren Şekil 2.8’de açıkça görülmektedir.



Şekil 2.8. Bakırda 10 GeV enerjili elektron sağanaklarının çeşitli kalınlıklarda depoladığı enerjinin radyal dağılımları (Wigmans,2000).

Sağanak gelişimini, radyasyon uzunluğu (uzunlamasına gelişim için) ve Molière yarıçapı (yanal gelişim için) cinsinden soğurucu malzemeden neredeyse bağımsız olarak tanımlayan iki ölçeklendirme faktörü vardır.

Radyasyon uzunluğu (X_0): Elektronun enerjisini bremsstrahlung vasıtası ile $1/e$ faktörü kadar azaltması için alması gereken mesafedir. Yüksek enerjili bir elektron, $1X_0$ kalınlığındaki malzemeyi geçtiğinde enerjisinin ortalama %63'ünü kaybeder.

$$X_0 = \frac{716A}{Z(Z+1)\ln(287/\sqrt{Z})} \text{ gcm}^{-2} \approx 180 \text{ gcm}^{-2} A/Z^2 \quad (2.23)$$

Radyasyon uzunluğu, sağanak derinliğini karakterize eder. Burada Z ve A sırasıyla ortamın atom numarası ve atom ağırlığıdır.

Molière yarıçapı (R_M): Kritik enerjideki bir elektronun bir radyasyon uzunluğu ($1X_0$) yol kat ettikten sonraki ortalama yanal sapmasının ölçüsüdür. Parçacık sağanağı, enerjisinin yaklaşık %90'ını $1R_M$ ' de kaybeder.

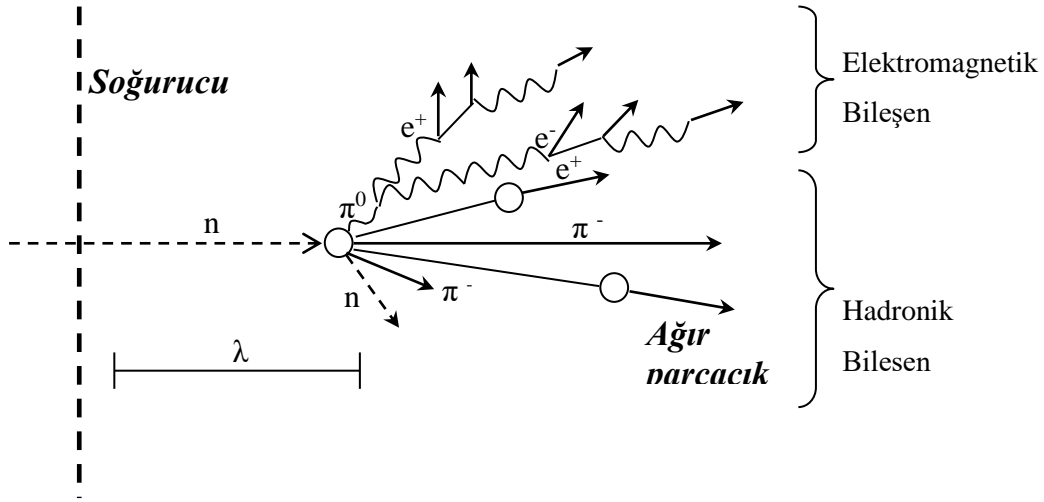
$$R_M = \frac{21 \text{ MeV}}{E_c} X_0 \{ \text{g/cm}^2 \} \quad (2.24)$$

Molière yarıçapı, sağanak genişliğini karakterize eder. X_0 , A/Z^2 biriminde ve R_M , A/Z biriminde kullanılırsa, molière yarıçapının birimi g/cm^2 olarak ifade edilir. Bu nedenle R_M , X_0 ile kıyaslandığında malzemeye daha az bağlıdır. Örneğin, bakır ve kurşunun R_M değerleri yaklaşık olarak aynıken, radyasyon uzunlukları 3 kat farklılık gösterir.

2.6.2. Hadronik kalorimetre

Hadronik kalorimetreler, elektromagnetik kalorimetrelerle kıyaslandığında enerji depolama süreçlerinde meydana gelen farklı etkileşmeler ve sağanak uzunluğuındaki farklılıklar sebebiyle daha karmaşıktırlar. Kapsadıkları enerji aralığı prensip olarak EM kalorimetrelerden daha geniştir. Hızlandırıcı temelli parçacık fiziği deneylerinde, hadron kalorimetreleri tipik olarak GeV - TeV aralığındaki enerjilere sahip protonları, pionları, kaonları ve parçalanan kuarkları ve gluonları (genellikle jetler olarak adlandırılır) tespit etmek için kullanılır.

Hadronik sağanıklar, elektromagnetik sağanıklarla kıyaslandıklarında genellikle çok daha büyüktürler ve şekilleri bir olaydan diğerine büyük ölçüde dalgalanır, dolayısıyla hadronik kalorimetreler elektromanyetik eşdeğerlerinden daha büyük olarak tasarlanmalıdır. Gerçekten de, bir hadron kalorimetresine giren hadronlar için kalorimetrenin cevabı, bir elektromanyetik kalorimetredeki aynı enerjiye sahip elektronlara kıyasla daha düşüktür ve çözünürlük daha kötüdür. Hermetik detektörlerin çoğu, her iki tür kalorimetreyi içeren bir kalorimetri sistemi kullanır. Böyle bir bileşik kalorimetrede, elektromanyetik kalorimetre her zaman parçacıkların karşılaştığı ilk katmandır çünkü ağır hadronlar bir sonraki hadronik kalorimetreye geçebilirken, eğer hadronik kalorimetre önce gelirse elektronlar ve fotonlar belirlenmiş kalorimetrelere asla ulaşamazlar. Elektromanyetik kalorimetrede hadronlar oluşmaya başlasa da, hadronlar yalnızca hadronik kalorimetre tarafından tamamen kontrol altına alınabilir. Yukarıdakilerin ışığında, bir elektromanyetik kalorimetrenin soğurucu malzemesinin hadronik etkileşim uzunluğu büyük olmalıdır (böylece mümkün olduğu kadar az etkileşimle birçok hadron kalorimetreden geçebilir) ve radyasyon uzunluğu mümkün olduğunca küçük olmalıdır (böylece elektromanyetik sağanık tamamen elektromanyetik kalorimetre içinde kalacaktır).



Şekil 2.9. Hadronik sağanağın oluşum mekanizması.

Hadronik sağanaklar, inelastik nükleer çarpışmalar sonucu meydana gelir. Yüksek enerjili hadronlar Şekil 2.9' dan da görüldüğü gibi çekirdek etkileşmeleri ile ikincil parçacıkları üretilir. Sağanak içinde bulunan ikincil parçacıklar (pionlar ve nükleonlar), çarpışma başına enerji ile logaritmik olarak artan sayıda üretilirler.

Yoğun bir maddede hadronik sağanakların gelişimi, elektromanyetik olanlardan temel olarak bazı farklılıklar içerir. Hadron sağanakları, belirgin Şekilde farklı iki bileşenden oluşur;

1. Elektromanyetik bileşen; Soğurulma sürecinde üretilen π_0 ve η mezonları, EM sağanakları oluşturan fotonlara bozunur.
2. Elektromanyetik olmayan bileşen; Soğurulma sürecinde yer alan diğer her Őeyi içerir.

Hadronik sağanak görüntüsü, nükleer etkileşme uzunluğu (λ), yani hadronların bir nükleer etkileşimi başlatmadan önce kat ettikleri ortalama mesafe tarafından yönetilir. g/cm^2 cinsinden ifade edilen etkileşme uzunluğu, $\sqrt[3]{A}$ ile orantılıdır ve

$$\lambda \approx 35 A^{1/3} g.cm^{-2} \quad (2.30)$$

olarak verilir. Hadronik sağanağın görünüşü, hadronik sağanaklar için ölçeklendirme faktörünün genellikle çok daha büyük olması dışında EM sağanıklara çok benzer. Örneğin bakır için X_0 , 1,4 cm iken, $\lambda = 15$ cm'dir.

2.7. Yapısına Göre Kalorimetreler

Bu kısımda, homojen ve örnekleme kalorimetreleri oluşturmak için uygulanan ana teknikler ve bunların avantajları ve dezavantajları tartışılacaktır. Hâlihazırda alışan veya yapım aşamasında olan detektörlerden örnekler verilmiştir.

2.7.1. Homojen kalorimetreler

Soğurucu ve aktif (sinyal üreten) ortamın aynı olduğu kalorimetrelere *Homojen kalorimetre* denir. Bu kalorimetreler, yalnızca parçacıkların ölçülebilir bir sinyal üretebildiği aktif malzemeden oluşurlar. Aktif malzemeler genellikle kristal veya soygazlardır. Kalorimetre içinde detektör hacminin tamamı parçacıklara duyarlıdır ve

biriken tüm enerji sinyale katkıda bulunabilir. Bu kalorimetrelerin en büyük avantajları çok iyi bir enerji çözünürlüğü elde edilebilmesidir. Çünkü gelen parçacığın tüm enerjisi aktif ortamda birikir. Bununla birlikte, bu tür kalorimetrelerin dezavantajı, parçacıkların tanımlaması gerektiğinde, boyuna ve enine daha az alt bölümlere ayrıldığından konum çözünürlüklerinin düşük olmasıdır. Ayrıca, bu cihazlarda kullanılan materyallerin etkileşme uzunluğu büyük olduğundan, hadron sağanaklarını içermeleri için çok büyük detektör kalınlıkları gereklidir. Bu yüzden homojen kalorimetreler hızlandırıcı deneylerinde nadiren hadronik kalorimetreler olarak kullanılırlar. Genellikle, astro-parçacık ve nötrino fiziği araştırmalarında meydana gelen nadir olayları keşfetmek için büyük hacimli detektörler gereklidir. Bu büyük hacimler için, pahalı olmayan malzemelerden (su veya hava gibi) yapılmış homojen detektörler tercih edilir.

Homojen kalorimetreler genel olarak dört gruba ayrılabilir:

Yarı iletken kalorimetreler: Yarı iletken malzemede elektron-hol çiftleri üretilir. Yarı iletkene bir elektrik alanı uygulanır ve üretilen yük taşıyıcıları toplanıp bir elektrik sinyali üretimine katkıda bulunan elektron-hol çiftleri oluşturur. Bu kalorimetreler, çeşitli nedenlerle yüksek enerji fiziği deneylerinde nadiren kullanılır. Pahalıdırlar ve bu nedenle büyük sistemler için uygun değildirler. Düşük enerjili parçacıklar için mükemmel bir iç çözünürlüğe sahipken, yüksek enerjili parçacıklar için detektörden kaçaklar ve sinyaldeki düzensizlikler gibi sebeplerle tercih edilmezler. Bu detektörlerde kullanılan en yaygın malzemeler germanyum ve silikon kristalleridir. Bununla birlikte, nükleer fizik uygulamalarında özellikle gama spektroskopisi için foton detektörleri olarak da yaygın şekilde kullanılmaktadırlar.

Çerenkov kalorimetreleri: Bu tip detektörde, yarı saydam bir malzeme ortamında hareket eden rölativistik elektronlar veya fotonlar, Çerenkov ışınımına yol açar. Bu nedenle üretilen sinyaller ışık formunda toplanır. Örneğin, Kurşun camdan (PbO) yapılmış elektromanyetik kalorimetreler, yüksek enerji fiziğinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kurşun cam kalorimetreler, ucuz ve kullanımı kolaydır. Örneğin LEP (Akrawy ve ark 1990)'deki OPAL deneyinde ve CERN SPS (Altegoer ve ark 1998)'deki NOMAD nötrino deneyinde geniş çapta kullanılmıştır. Çerenkov kalorimetreleri genellikle diğer homojen kalorimetre türlerinden daha düşük enerji çözünürlüğüne sahiptir.

Sintilatör kalorimetreler: Bu kalorimetrede ortam, iyonizasyon izlerinin ışık ürettiği bir materyaldir. Sintilatörler, organik ve inorganik olmak üzere iki sınıfa ayrılabilir. Organik sintilatörler hızlıdır ancak düşük ışık verimine sahiptirler. İnorganik sintilatörler, yüksek ışık verimi ve iyi bir sinyal doğrusallığına, ancak yavaş cevap zamanına sahiptirler.

İnorganik kristallerde ışığın yayınlanması materyalin kristal yapısına bağlıdır. Gelen yüklü parçacıklar ortamın değerlik ve iletkenlik bantlarında elektron-hol çiftleri üretir. Elektronlar değerlik bandına geri döndüğünde fotonlar yayınlanır. Kristallerde, ışık verimini artırmak için (örneğin, sinyal dalgaboyunu fotokatot spektral duyarlılığıyla eşleştirerek) ve daha hızlı bir yanıt elde edebilmek için, kristallere çok az miktarda katkı maddeleri eklenir. En sık kullanılanı talyum (Tl) olan bu katkı maddeleri, değerlik bandı ile iletkenlik bandı arasındaki boşlukta ek aktivasyon bölgeleri oluşturur. Bu alanlar, iletkenlik bandından gelen elektronlar tarafından doldurulabilir ve böylece foton yayınlanma olasılığını artırabilir ve fotonun dalga boyunu ve bozunma süresini (decay time) değiştirebilir. Enerji çözünürlüğü, Çerenkov kalorimetrelerinden daha iyidir.

Yüksek enerji fiziğinde talyum katkılı sodyum iyodür (NaI(Tl)), Sezyum İyodür (CsI), kurşun tungstat ($PbWO_4$) ve BGO gibi inorganik kristaller sıklıkla kullanılmaktadır. NaI(Tl) kristalleri geçmişte yüksek ışık verimleri ve düşük maliyetleri sebebiyle pek çok deneyde kullanılmaktaydı. Ancak bu kristaller oldukça büyük radyasyon uzunluğuna sahip olduklarından, $PbWO_4$ ve BGO gibi daha yoğun materyallerin kullanıldığı büyük deneyler için uygun değildir. Sezyum İyodür (CsI) kristalleri, CLEO (Bebek, 1988), BaBar (Boutigny ve ark 1995), KTeV (Alavi-Harati ve ark 1999) ve Belle (Abashian ve ark 2002) deneylerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Son olarak, yoğun, hızlı ve radyasyona dayanıklı olmaları sebebiyle kurşun tungstat ($PbWO_4$) kristalleri CMS (CMS Collaboration, 1997) deneyinde kullanılmaktadır.

Soygaz kalorimetreler: Argon (Ar) veya Xenon (Xe) gibi soygazlar, detektörler için aktif bir ortam görevi görür. Bu gazlar krojenik sıcaklıklarda işlev görür. Prensipinde, hem iyonizasyon hem de sintilasyon sonucu oluşan sinyalleri toplayabilmesine rağmen, yüksek enerji fiziği uygulamalarındaki büyük ölçekli kalorimetrelerde yükü ölçmek için kullanılırlar. Örneğin, CERN SPS'deki NA48 (Fanti ve ark 1999) deneyi için

elektromanyetik kalorimetrede sıvı kripton kullanılmıştır. Elde edilen sinyaller bu tip detektörlerde Çerenkov veya sintilasyon fotonları şeklinde toplanır. Bu fotonlar, çıkış fotodiyot veya foto-çoğaltıcı gibi ışığa duyarlı bir detektör tarafından foto-elektronlara dönüştürülürler.

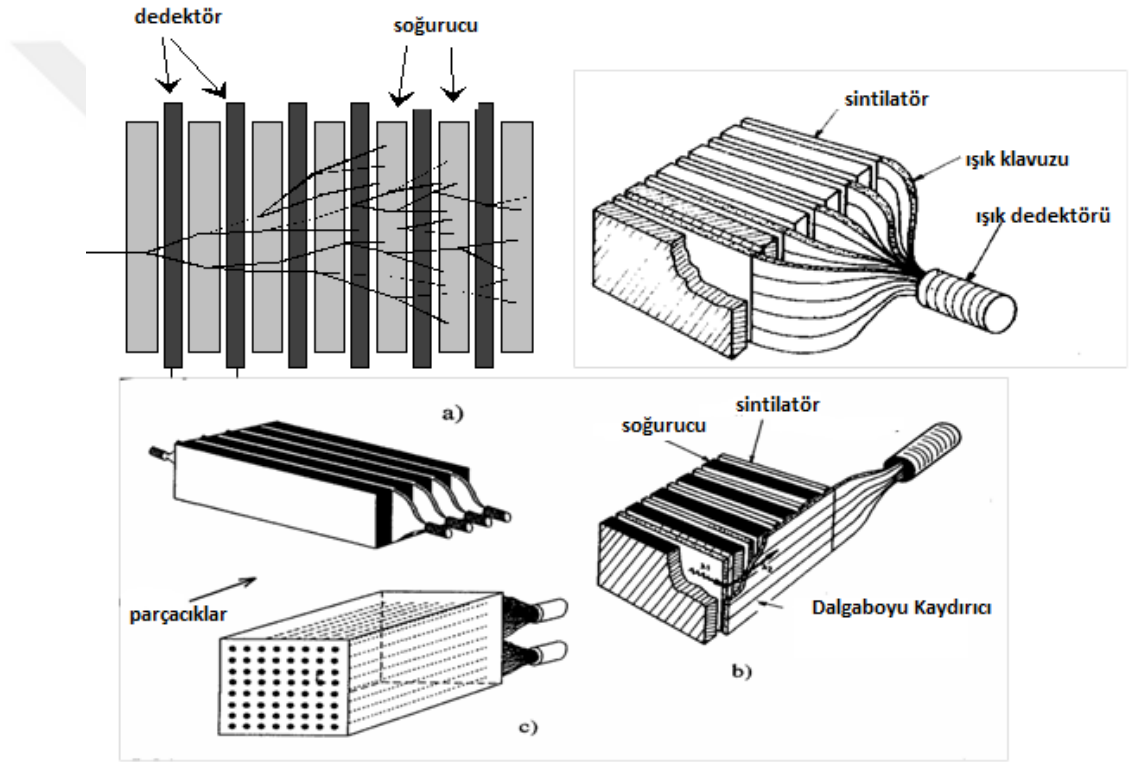
Yüklü bir parçacık bu malzemeleri (Ar, Xe ve Kr (Kripton)) geçtiğinde, kayıp enerjisinin yaklaşık yarısı iyonizasyon ve yarısı da sintilasyon ışığına dönüştürülür. Sintilasyon, elektron-iyon çiftlerinin tekrar birleşmesinden kaynaklanır ve 120–170 nm arasındaki dalgaboyu aralığında hızlı sinyallere (~10 ns) yol açar. En iyi enerji çözünürlüğü, hem yük hem de ışık sinyali toplayarak elde edilebilir. Ancak, teknik ve geometrik zorluklar nedeniyle aynı aygıt içinde ışık ve yükün toplanması için her iki okuma ilkesine dayanan büyük ölçekli bir kalorimetre henüz inşa edilmemiştir. Bununla birlikte, basit bir hesaplama ile tek başına iyonizasyon sinyali toplanarak homojen sıvı kalorimetrelerde mükemmel enerji çözünürlüğü elde edilebilir.

Sıvı argon, düşük maliyeti ve yüksek saflığı nedeniyle örnekleme kalorimetresi için en yaygın kullanılan asil (noble) sıvıdır. Öte yandan, kripton, daha kompakt detektörlere izin veren ve çok daha kısa radyasyon uzunluğuna sahip olması nedeniyle genellikle homojen kalorimetreler için tercih edilir. Xenon bu açıdan daha da iyi bir seçim olabilir; ancak doğada çok nadir bulunur ve bu nedenle pahalıdır. Genel olarak asil sıvı kalorimetrelerde sıvı, detektör homojen olarak dağıldığından, yapı gereği iyi radyasyon direnci ve iyi yanıt değişmezliği sunar. Bu tekniğin dezavantajı, krojenik ve saflaştırma ekipmanları gerektirmesidir (Fabjan ve Gianotti, 2003).

2.7.2. Örnekleme kalorimetreleri

Soğurucu ve aktif ortamların farklı olduğu kalorimetrelere örnekleme kalorimetreleri denir. Bir örnekleme kalorimetresinde, parçacık soğurulması ve sinyal üretimi işlevleri, sırasıyla pasif ve aktif ortam olarak adlandırılan farklı malzemeler tarafından gerçekleştirilir. Pasif ortam genellikle demir, bakır, kurşun veya uranyum gibi yüksek yoğunluklu bir malzemedir oluşur. Aktif ortam ise, böyle bir kalorimetreden gelen sinyallerin temelini oluşturan ışığı veya yükü üretir (Şekil 2.10).

Aktif katmanlar arasına yerleştirilmiş soğurucu katmanların ürettiği örnekleme dalgalanmaları nedeniyle, örnekleme kalorimetrelerinde enerji çözünürlüğü genel olarak homojen kalorimetrelere göre daha kötüdür. Öte yandan, örnekleme kalorimetreleri uzunlamasına ve yanal olarak bölümlere ayrılması nispeten kolaydır ve bu nedenle genellikle homojen kalorimetrelere göre daha iyi konum çözünürlüğü ve parçacık tanımlaması sunarlar. Makul bir detektör kalınlığı ile yeterli etkileşme uzunlukları sağladıklarından, hızlandırıcılarda hadronik sağanakları ölçmek için kullanılırlar. Hadronik enerji çözünürlüğü, örnekleme dalgalanmaları ile değil, güçlü etkileşmelerin doğası ile sınırlıdır.



Şekil 2.10. Bazı örnekleme kalorimetresi tipleri.

Örnekleme kalorimetreleri, aktif ortamın tipine göre sintilasyon kalorimetreleri, gaz kalorimetreleri, katıhal kalorimetreleri ve sıvı kalorimetreler olarak sınıflandırılabilir. Sintilasyon kalorimetrelerinde, sinyal ışık şeklinde, diğerlerinde elektrik yükü şeklinde toplanır.

Sintilasyon örnekleme kalorimetreleri: Örnekleme kalorimetrelerinde çok sayıda, fiberler veya plakalar halinde düzenlenmiş organik (plastik) sintilatörler kullanılır. Bu detektörler nispeten ucuzdur, çok çeşitli geometrilere inşa edilebilir, kolayca bölümlere ayrılabilir, hızlı yanıt verir ve uygun bir ışık verimine sahiptir. Sintilasyon örnekleme kalorimetreleri, ZEUS (Group ve ark 1990) ve CDF (Balka ve ark 1988; Bertolucci ve ark 1988) gibi deneylerde kullanılmıştır. Bu tekniğin temel dezavantajı, optik okumanın yaşlanma ve radyasyon hasarından muzdarip olmasıdır. Ayrıca, ışık toplama esnasındaki düzensizlikler genellikle büyük bir sabit terime sebep olur.

Gaz örnekleme kalorimetreleri: Gaz örnekleme kalorimetreleri, ince segmentasyon ihtiyacı nedeniyle özellikle yüksek enerjilerde çarpışan demet deneylerinde, yoğun parçacık izleri içinde e , γ , π ve μ tanımlamaya imkan sağladığı için son yıllarda popülerlik kazanmıştır. Temel olarak düşük maliyetleri ve segmentasyon esneklikleri nedeniyle yakın zamana kadar yaygın olarak kullanılmaktaydı. Bununla birlikte, aktif ortamdaki yol uzunluğu farklılıkları ve Landau dalgalanmalarının etkisi gibi birçok faktör nedeniyle düşük enerji çözünürlüğü sağladıkları için, mevcut ve gelecekteki detektörler için dikkate alınmamaktadırlar. En iyi performans gösteren gaz örnekleme elektromanyetik kalorimetrelerden biri LEP (Büyük Elektron-Pozitron Çarpıştırıcısı)'deki ALEPH deneyinde kullanılmıştır (Fabjan & Gianotti, 2003).

Katıhal örnekleme kalorimetreleri: Çoğu katıhal örnekleme kalorimetrelerinde, aktif ortam silikondur. Bu detektörlerin ana avantajı, aktif katmanların yoğunluğunun örnekleme gaz kalorimetrelerinden daha büyük olmasıdır, bu da daha kompakt cihazların oluşturulmasına ve daha yüksek bir sinyal-gürültü oranına izin verir. Bunun nedeni, gazdaki 30 eV (elektron volt) ile karşılaştırıldığında, Si (silikon)'da bir elektron-hol çifti üretmek için sadece 3,6 eV'a ihtiyaç duyulduğu gerçeğinden kaynaklanmaktadır. Bu tekniğin ana dezavantajları, büyük ölçekli detektörlerde kullanılmasını engelleyen yüksek maliyeti ve zayıf radyasyon direncidir. Genellikle tungsten gibi yoğun bir soğurucu kullanan küçük ve kompakt Si örnekleme kalorimetreleri, LEP detektörleri için parlaklık (luminosity) monitörleri olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır.

Sıvı örnekleme kalorimetreleri: Bu detektörler, gelecekteki deneyler için iyi uygulama perspektifleri sunmaktadır. Sıcak-sıvı (tetrametil pentan veya TMP) kalorimetreler, belirli özel uygulamalar için bir avantaj olarak, soğutmaya gerek olmadan oda sıcaklığında da çalışabilirler. Bununla birlikte, zayıf radyasyon direncine sahiptirler ve saflık problemlerinden muzdariptirler.

Yüksek enerji fiziği deneylerinde kriyojenik sıvı örnekleme kalorimetrelerinde argon daha çok aktif ortam olarak, yaygın şekilde kullanılmaktaydı ve halen kullanılmaktadır. Örneğin, Mark II, R807/ISR, Cello, Helios, NA31 ve SLD deneylerinde argon aktif katman olarak kullanılmıştır (Fabjan & Gianotti, 2003).

Bu tip kalorimetreler çeşitli avantajlara sahiptir. Oldukça kararlıdırlar ve kalibre edilmeleri kolaydır, çünkü aktif ortam hacim içinde homojen bir şekilde dağılır ve sinyal toplama, optik okumalı detektörleri karakterize eden hücreden hücreye değişimlere tabi değildir. İyi enerji çözünürlüğü ve zamanla istikrarlı bir yanıt sağlarlar. Radyasyona dayanıklıdırlar. Dezavantajları, işlemi zorlaştıran ve kalorimetrenin (kriyostat) önüne ek ölü malzeme sokan kriyojenik takımı; yüksek saflık koşullarını elde etme ve sürdürme ihtiyacı ki bu da bir saflaştırma sistemi gerektirir ve klasik sıvı kalorimetrelerin nispeten yavaş bir yük toplama özelliğine sahip olmasıdır. Bu son dezavantaj, detektörleri yüksek hızlı makinelerde çalışmaya uygunsuz hale getirmektedir. Ancak ATLAS kurşun-sıvı argon elektromanyetik kalorimetresi için seçilen “akordeon” geometrisinin (Aubert, 1990), tanıtılmasıyla son zamanlarda bu aşılmıştır (Fabjan ve Gianotti, 2003).

2.8. Enerji Çözünürlüğü

Bir kalorimetrenin enerji çözünürlüğü şu şekilde ifade edilir:

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus b \oplus \frac{c}{E} \quad (2.31)$$

Burada a stokastik terim, b sabit terim, c gürültü terimidir, E GeV cinsinden gelen parçacık enerjisidir ve \oplus kuadratik toplamı temsil eder.

a stokastik terim: Bu terim sağanağın fiziksel gelişimi ile ilgili dalgalanmalardan kaynaklanmaktadır ve sinyal dalgalanmalarını içerir (bir foto-detektördeki foto-elektron istatistikleri gibi).

b sabit terim: Bu terim, parçacığın enerjisine bağlı olmayan katkıları içerir. Kalorimetrenin yapımı aşamasındaki kusurları, sinyal oluşumu yada toplanması sırasında oluşan kararsızlıkları, kalibrasyon hatalarını, enerji ölçümü için kullanılan ortamın yanından, arkasından yada önünden kaçan enerji miktarındaki dalgalanmaları ve kalorimetre içerisinde yada önündeki ölü bölgelerde depolanan enerji miktarındaki dalgalanmaları içerir.

c gürültü terimi: Bu terime katkı, elektronik gürültüden gelir ve detektör tekniğine ve okuma devresinin özelliklerine (detektör direnci, kablolar, vb.) bağlıdır. Bu terim elektronik gürültünün enerji eşdeğerini, ölçüm ortamına giren ilgilenilen parçacık dışındaki parçacıklar tarafından taşınan enerjideki dalgalanmaları içerir.

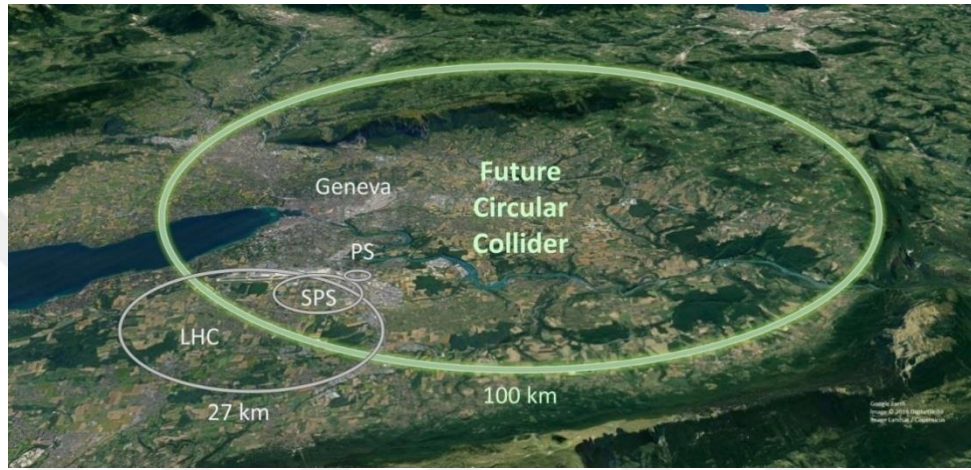
2.9. CERN FCC

İsviçre-Fransa sınırında, İsviçre'nin Cenevre kentine yakın bir konumda bulunan Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi (CERN) 1954 yılında kuruldu ve dünyadaki en büyük parçacık fiziği araştırma laboratuvarını işleten devletlerarası bir kuruluştur. CERN'ün kuruluş amacı, üye olan ülkelerin kendi bütçeleriyle yapamayacakları araştırmaları ortaklaşa yürütmektir. CERN, Nobel Ödülü de almış çok önemli bilimsel keşiflerin yapıldığı bir merkezdir.

CERN'de bulunan 2008'de tamamlanan ve 27 km'lik bir tünelde inşa edilen Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (LHC) 4 ana deney sistemi (ATLAS, CMS, ALICE ve LHCb) ile önemli araştırma ve buluşların eşiğindedir. LHC'de şu anda 7 TeV'lik bir kütle merkezi enerjisinde proton-proton çarpışmaları yapılmaktadır. LHC 30 yılı aşkın bir süre önce başlatıldı ve fizik programı 2030'ların ikinci yarısına kadar devam edecektir.

CERN'de keşfedildiği açıklanan Higgs parçacığının detaylı incelenmesi ve CERN tarafından açıklanan Standart Model dışındaki anormalliklerin açıklaması için bilim dünyasında yeni bir hızlandırıcıya ihtiyaç duyulacağı görüşünü gündeme getirmektedir.

Kurulacak yeni hızlandırıcıda Higgs parçacığının diğer temel parçacıklarla etkileşimini daha kesin olarak belirlemek, maddenin en temel yapısını araştırmak, karanlık madde hakkında bilgi sağlamak ve yeni fizik teorilerinin doğruluğunu kanıtlamak için araştırmalar yapılacaktır. FCC olarak adlandırılan proje ile CERN’de en erken 2030 yılında 100 km uzunluğunda ve 100 TeV çarpışma enerjisine sahip yeni bir dairesel hızlandırıcı ve çarpıştırıcı tesisinin kurulması planlanmaktadır (Şekil 2.11). Bu hali ile FCC’ nin LHC’den en az 7 kat daha büyük olacağı tahmin edilmektedir.



Şekil 2.11. Gelecek Dairesel Çarpıştırıcı (FCC)’nin şematik gösterimi.

CERN-FCC’nin temel amacı yine bilginin sınırlarını zorlamak, evreni ve evrenin oluşumunu anlamak olarak ifade edilmektedir. Günümüzün parçacık fiziği teorisi, keşfedilmeden önce Higgs bozonunu tahmin etmede büyük başarı elde etti. Ancak bu teori evrenimizin sadece yüzde 5’ini açıklıyor. Dünya üzerinde ve yörüngede bulunan çok güçlü teleskoplar, varlığını hesaplayamadığımız ve ne olduğunu bilmediğimiz yüzde 22 oranında karanlık madde ve yüzde 73 oranında karanlık enerji hala tartışmaya açık ve FCC’nin bu konuya açıklık getirmesi beklenmektedir.



Şekil 2.12. FCC işbirliğine katılan enstitü ve şirketlerin coğrafik dağılımı.

Bu projeye Şekil 2.13’ te görüldüğü gibi 34 ülke, 136 enstitü ve 32 şirket dâhil olmuştur. Aynı zamanda sadece proton çarpışmaları değil, elektron ve pozitron çarpışmaları da dâhil edildiğinden FCC-ee (Lepton çarpıştırıcısı), FCC-hh (Hadron çarpıştırıcısı) ve FCC-he (Hadron-Lepton çarpıştırıcısı) olarak 3 seçenek planlanmıştır. Şimdi bu çarpıştırıcılar hakkında kısaca bilgi verilecektir.

2.10. Lepton Çarpıştırıcısı (FCC-ee)

Higgs bozonu, Standart Model’in (SM) yalnızca son bulunan parçası değil, aynı zamanda son derece garip bir nesnedir. SM’deki tek skaler parçacıktır ve aynı zamanda SM’nin teorik güçlüklerinin ve kusurlarının çoğundan sorumludur. Higgs bozonu, daha derin fizik modellerine ve hatta fizik ilkelerine götüren bir portal olabilir. e^+e^- (Elektron ve pozitron) çarpıştırıcılarının hassasiyeti, temiz ortamı ve yüksek parlaklığı, onları bu tür testler için mükemmel araçlar haline getiriyor. Özellikle, dairesel e^+e^- çarpıştırıcıları, elektrozayıf ölçeğin etrafındaki tüm ilginç parçacıkları (Z, W ve Higgs bozonlarının yanı sıra üst kuark) araştırmak için yüksek parlaklık sağlayabilir.

Doğrusal ve dairesel olarak iki temel elektron-pozitron çarpıştırıcısı türü vardır. İlki için Uluslararası Doğrusal Çarpıştırıcısı (ILC) ve Kompakt Doğrusal Çarpıştırıcı (CLIC) örnek olarak verilebilir. Dairesel hızlandırıcılara örnek olarak ise FCC-ee ve Dairesel Elektron Pozitron Çarpıştırıcısı (CEPC) verilebilir. FCC-ee ve CEPC, Higgs bozonunun hassas ölçümleri için $\sqrt{s} = 240-250$ GeV olan çeşitli kütle merkezi enerjilerinde

çalıştırılacaktır. FCC-ee tasarımı ve programı ayrıca, elektrozayıf ölçümlerin yorumlanmasında temel olan üst kuark kütesinin kesin bir ölçümüne yönelik çok önemli çalışmaları da içerir. Sinkrotron radyasyonun gücü ile sınırlı olmasına rağmen, dairesel çarpıştırıcılar, büyük çarpışma oranları ve çoklu etkileşme noktaları aracılığıyla yüksek ila çok yüksek parlaklık sağlayabilirler. 240-250 GeV enerji aralığındaki Higgs run' ı için, her iki hızlandırıcının da parlaklığının $10^{-34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ mertebesinde olması beklenmektedir; FCC-ee etkileşme noktası başına $5.10^{-34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ' lik parlaklığa erişirken CEPC $2.10^{-34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 'lik etkileşme noktası başına parlaklığa ulaşır. Bu fark kısmen çarpıştırıcının çevre uzunluğundan ve CEPC tek bir depolama halkası kullanırken FCC-ee'nin çift depolama halkası kullanması gerçeğinden kaynaklanmaktadır. Mevcut temelde, FCC-ee 5 yıl 240-250 GeV'de ve ardından 5 yıl üst eşikte (340-350 GeV) çalışması hedeflenirken, CEPC 10 yıl boyunca 240-250 GeV'de çalışacaktır (Ruan, 2016).

2.11. Hadron Çarpıştırıcısı (FCC-hh)

FCC-hh, 25 yıllık bir süre içerisinde 100 km'lik bir çevre halkasında iki ana deneyin her birinde 100 TeV'lik bir kütle merkezi enerjisi ve $\approx 20 \text{ ab}^{-1}$ 'lik bir toplam parlaklık ile yeni nesil büyük bir pp (proton-proton) çarpıştırıcısı olarak tasarlanmıştır. FCC-hh'ın bazı önemli parametreleri Çizelge 2.1' de gösterilmiştir.

FCC-hh çarpıştırıcısı, ağır iyon çarpışmalarında, maddenin kolektif doğasının öncekinden daha aşırı yoğunluk ve sıcaklık koşulları altında keşfedilmesine izin verecektir (Zimmermann, Benedikt, Schulte, & Wenninger, 2014). FCC-hh, diğer tüm hızlandırıcılar arasında en yüksek parlaklığa ve kütle merkezi enerjisine sahip olacaktır. Parlaklık, belirli bir spektral alandaki parçacık yoğunluğu olarak tanımlanabilir ve karşılıklı gelen demetlerdeki proton sayısı hakkında bilgi verir. FCC-hh'nin önemli amaçlarından biri parlaklığı arttırmaktır. Çünkü daha fazla proton, daha fazla etkileşim demektir. FCC hh'de, büyük Hadron Çarpıştırıcısının beş katı parlaklık değerine ulaşılması hedeflenmektedir. FCC-hh'de ilk yıllarda maksimum $5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ parlaklığa ulaşılması hedeflenirken, ilerleyen yıllarda parlaklığın $3 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 'e çıkarılması hedeflenmektedir.

Çizelge 2.1. FCC-hh'ın bazı parametreleri.

	Birim	Temel	Nihaiyi
K.M. Enerji	TeV	100	100
Dipole Alanı	T	<16	<16
Çevresi	km	97,75	97,75
Mak. Parlaklık	$10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	5,0	<30,0

2.12. Hadron-Lepton Çarpıştırıcısı (FCC-eh)

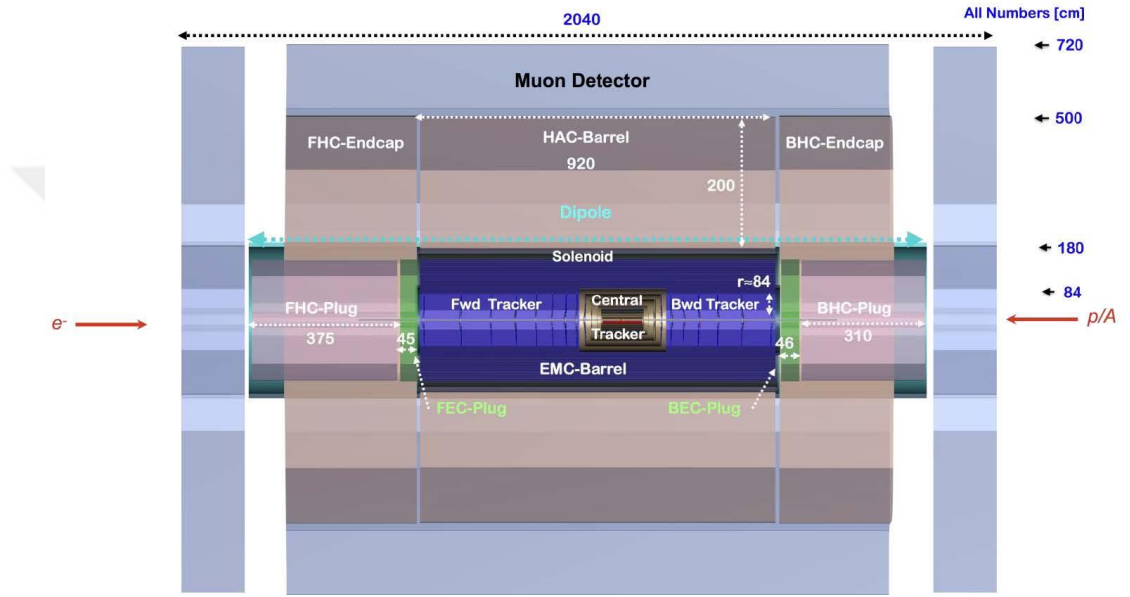
FCC-eh, FCC-hh ile eşzamanlı çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Elektron-hadron etkileşmesinin multi-TeV enerjili hadron demetleri, protonlar veya iyonlar üzerinde ihmal edilebilir bir etkisi vardır. Elektron demeti, $E_e = 60 \text{ GeV}$ enerjili bir enerji geri kazanım linağı (ERL) tarafından sağlanır. FCC-eh için jeolojik nedenlerden dolayı, ERL, FCC tünelinin içinde ve hadron demetine teğet olacak şekilde konumlandırılacaktır.

Eşzamanlı bir operasyonda, FCC-eh, FCC-hh ile birlikte 25 yıl çalışacaktır. İleri (forward) detektör multi-TeV elektron ve hadron son durum enerjileriyle başa çıkmak zorundayken, geri (backward) detektör (e demeti yönünde) yalnızca $E_e = 60 \text{ GeV}$ 'ye kadar olan enerjileri görecektir. Detektörün boyutu, LHC'de bulunan CMS detektörüne benzer olacaktır.

Ayrıca, önceki lepton-çekirdek deneylerinin kinematik aralığını 4 kat daha arttıracak önemli elektron-iyon saçılma programı da mevcuttur. Bu, Parton dinamikleri ve çekirdeklerin alt yapısı kavramında devrim yaratacak ve Quark-Gluon Plazmasının oluşumu ve gelişiminin anlaşılmasına ışık tutacaktır (Abada ve ark 2019).

2.13. FCC-eh İçin Detektör Tasarımı

FCC-eh detektörünün tasarımı kısmen LHeC detektörünün tasarımına benzerdir (André ve ark, 2022). Ancak FCC-eh detektöründe ileri (forward) ve geri (backward) iz takip edicilere ek disklerin dâhil edilmesi ve kalorimetre uzunluklarının demet enerjileriyle logaritmik olarak ölçeklenmesi koşuluyla, LHeC ile karşılaştırıldığında benzer veya iyileştirilmiş performans elde edilir.



Şekil 2.13. FCC-eh detektörünün temel özellikleri gösteren yandan görünümü (Kostka, Polini ve Yamazaki, 2022).

Mevcut detektör tasarımının yandan görünümü ve ana bileşenleri Şekil 2.13'te gösterilmektedir. İz takip edici, piksel, makro piksel ve şerit detektörleri kullanılarak tasarlanmıştır. İç silikon iz takip edici (Tracker), ileri ve geri ('Fwd Tracker' and 'Bwd Tracker', sırasıyla) yönlerde ek disklerle sahip bir merkezi bileşeni ('Tracker') içerir. Pb-Sintilatörlerden veya sıvı argondan (LAr) oluşan silindirik şeklindeki EMC kalorimetre, izleme bölgesinin hemen üzerinde bulunur. İzleme bölgesi, ileri ve geri yönlerde elektromanyetik ileri ve geri kalorimetreler (sırasıyla 'FEC Plug-Fwd' ve 'BEC-Plug-Bwd') ile çevrilidir. Solenoid kısmı, EMC'nin hemen dışındadır ve kafa kafaya çarpışmaları sağlayan zayıf dipol mıknatıs ile bir kriyostatı içinde barındırır.

Elektromanyetik kalorimetre için iki seçenek düşünülmektedir: kurşun ve sintilatör (Pb-Sintilatör) lerden oluşan bir örnekleme kalorimetresi ilk seçenektir (warm option). Kurşun ve sıvı argon (Pb-LAr)' dan oluşan ve ATLAS detektörünün elektromagnetik kalorimetresine benzer olarak akordeon şeklinde geometriye sahip kriyostata ihtiyaç duyulan tasarım ise ikinci seçenektir (cold option).

Silindir şeklindeki Hadronik kalorimetre (HCAL-Barrel), solenoid/dipolün daha üzerinde bulunurken, ileri ve geri hadronik detektörler (sırasıyla FHC-Plug-Fwd ve BHC-Plug-Bwd), elektromanyetik muadillerinin arkasında yer alır. Müon detektörü (gri) detektörün dış kabuğunu oluşturur ve ana detektörün diğer tüm parçalarının etrafında neredeyse hermetik bir zarf oluşturur. FCC-eh detektörünün boyutları, elektron demeti enerjisi $E_e = 60$ GeV olarak ve proton demeti enerjisinin $E_p = 20$ TeV'den $E_p = 50$ TeV'e yükseltilmesinden sonra da çalışmaya uygun olacak şekilde belirlenmiştir (Abada ve ark 2019, André ve ark 2022).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. GEANT4 Programı

GEANT4, “geometri ve iz sürme” (‘Ge’ometry ‘an’d ‘t’racking) adlarının kısaltımıdır ve parçacıkların madde içinden geçişini simüle etmek için kullanılan bir yazılım araç takımındır. Astrofizik ve uzay bilimi, yüksek enerji fiziği (HEP), radyasyondan korunma ve tıbbi fizik dâhil olmak üzere çeşitli uygulama alanlarında birçok deneyde kullanılmaktadır.

GEANT4 fiziği, Büyük Hadron Çarpıştırıcısındaki (LHC) yüksek enerjili etkileşmelerden ve kozmik ışın keşfinden termal nötronlara ve optik foton etkileşmelerine kadar geniş bir enerji aralığında çeşitli etkileşmeleri içerir. GEANT4 ile fotonlar, leptonlar, iyonlar ve hadronların etkileşmeleri izlenebilir. Ayrıca, bu araç seti, kullanıcıların bulgularını kaydetmelerine olanak tanıyan arayüzler, grafik arayüzleri, görüntüleme sürücülerini ve arayüzlerini de içerir.

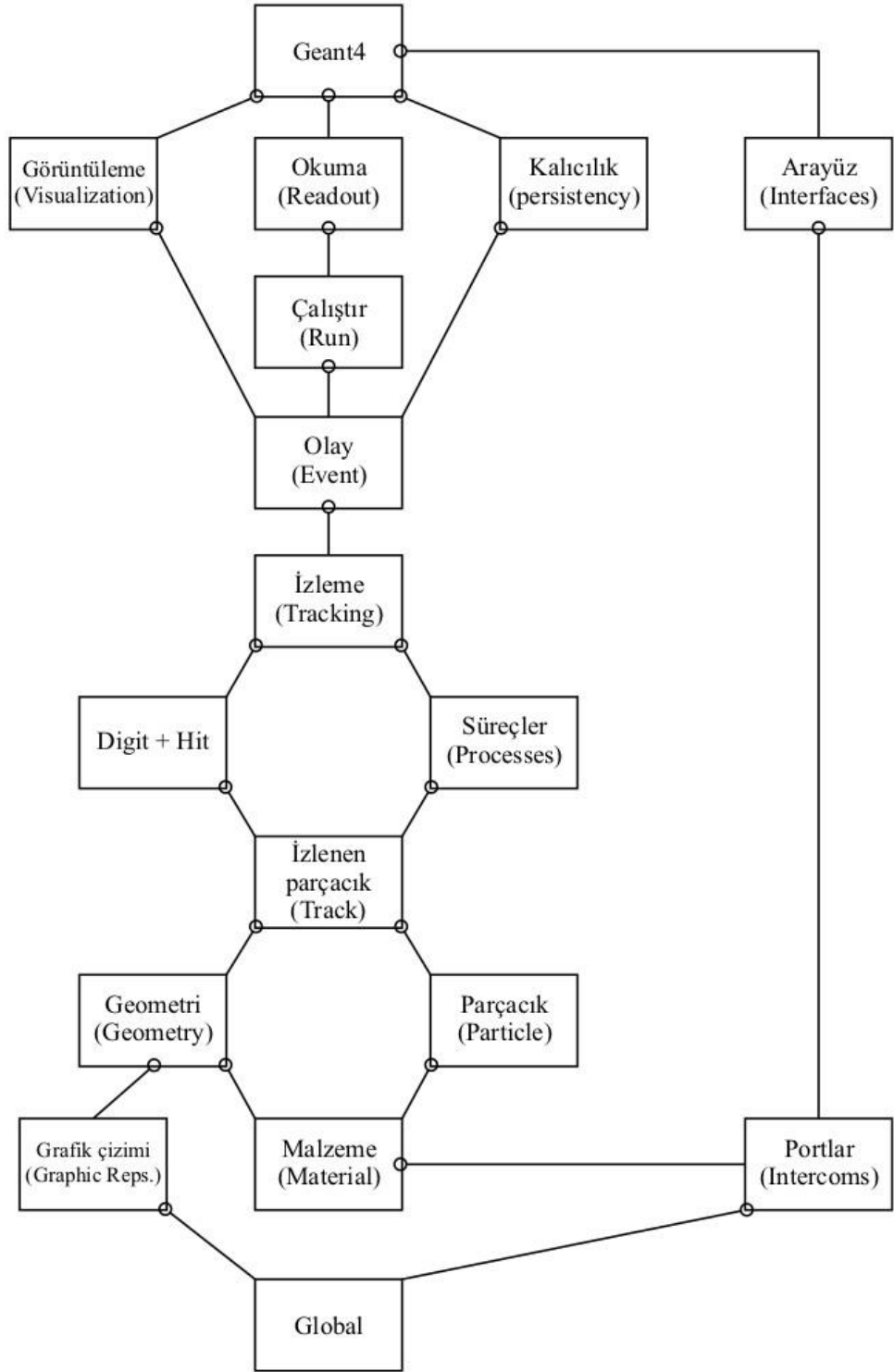
Geant4 gelişimi, 1993 yılında CERN ve KEK (Japon Ulusal Hızlandırıcı Merkezi) tarafından bağımsız olarak yapılan iki çalışmanın sonucudur. Her iki grup da bir kıyaslama, fikir ve değerli deneyim kaynağı olan mevcut GEANT3 programı tarafından sunulanları geliştirmek için modern bilgi işlem tekniklerinin nasıl uygulanabileceğini araştırmaya çalıştı. Bu iki grup birleştirilerek nesne yönelimli teknolojiye dayalı bir simülasyon programı oluşturmak için CERN Detektör Araştırma ve Geliştirme Komitesine (DRDC) sunuldu. RD44, C++ diline dayalı nesne yönelimli bir metodoloji benimseyen bir projeydi. Bu proje, Avrupa, Rusya, Japonya, Kanada ve Amerika Birleşik Devletleri’ndeki 10’den fazla deneyden alınan 100 bilim insanı ve mühendisin çabalarını içerecek şekilde büyüyen dünya çapında bir işbirliğinden oluştu. Başarısının anahtarı, nesne yönelimli metodolojiyi uyarlayan dikkatli bir tasarım ve pratik C++ dilini kullanmaya yönelik kararlarıydı. İlk araştırma ve geliştirme aşaması, Aralık 1998’de tamamlandı. Ardından, araç setinin geliştirilmesine ve iyileştirilmesine devam etmek için bakım ve kullanıcı desteği sağlamak için Ocak 1999’da Geant4 İşbirliği kuruldu.

GEANT4 programı, çağdaş deneylerin yazılım gereksinimleri için oluşturulmuştur. Tipik bir yazılım sistemi, birleşimler halinde veya ayrı bir şekilde çalıştırılabilen bir olay üretici, detektör simülasyonu, yeniden oluşturma ve analiz gibi bileşenler içerir. Yazılım bileşenlerini tanımlarken ve uygularken, simülasyon sürecinin tüm yönleri dahil edilmiştir: sistemin geometrisi, ilgili malzemeler, ilgili temel parçacıklar, olayların birincil parçacıklarının oluşturulması, parçacıkların malzemeler ve harici elektromanyetik alanlar aracılığıyla izlenmesi, parçacık etkileşmelerini yöneten fizik süreçleri, hassas detektör bileşenlerinin tepkisi, olay verilerinin oluşturulması, olayların ve izlerin depolanması, detektörün ve parçacık yörüngelerinin görselleştirilmesi ve simülasyon verilerinin sonraki analizi için farklı ayrıntı düzeylerini yakalama.

3.1.1. GEANT4 tasarımı

GEANT4, 17 sınıf kategorisini içermekte ve geliştirilmesi bir çalışma grubu tarafından devam etmektedir. Şekil 3.1 en üst düzey kategorileri ve her kategorinin diğerlerine nasıl bağlı olduğunu gösterir. Tek yönlü bir bağımlılık akışı vardır, yani gerektiği gibi döngüsel bağımlılık yoktur. Birleştirme çizgilerindeki açık daire, bir kullanım ilişkisini temsil eder; daire sonundaki kategori bitişik kategoriye kullanır.

GEANT4 çekirdeği, araç setinin merkezi işlevselliğini sunan kategorileri içerir: olayları, çalıştırmaları, adımları, izleri, yörüngeleri ve çarpmaları yönetir. GEANT4 bir durum makinesi olarak fizik süreçleri, görselleştirme sürücülerini, kalıcılık, analiz ve kullanıcı kodu için bir arka plan sunar. Diyagramın altındaki kategoriler, neredeyse tüm yüksek kategoriler tarafından kullanılır ve araç setinin temelini oluşturur. Grafikten, global kategorinin ilk çalıştırılan kategori olduğunu anlıyoruz. Bu kategori, birimler, sabitler ve rasgele sayılar sistemini düzenler. Grafik Gösterimler kategorisi ve portlar kategorisinin her ikisi de Global'den yararlanır. Portlar prensip olarak kullanıcı arabirimi aracılığıyla operatör ve GEANT4 arasında bir yönetici olarak çalışır.



Şekil 3.1. Geant4 araç setinin Üst Düzey Kategori Şeması (Agostinelli ve ark 2003).

Bilgi daha sonra Madde, Parçacık ve Geometri kategorilerine yayılır. İlk ikisi, madde ve parçacık arasındaki etkileşmelerin simülasyonu için malzemelerin ve parçacıkların fiziksel özelliklerini tanımlamak için gerekli olan imkânları kullanır. Geometri, geometrik bir yapılandırma belirleme ve parçacıkları bunun üzerinden etkili bir şekilde iletme olanağını sunar. Olayları açıklamakla yükümlü olan ve rol oynayan ilk kategori, izlerden ve adımlardan sorumlu sınıfları içeren iz kategorisidir.

Fiziksel etkileşim modellerinin uygulamalarını kapsayan Yöntem sınıflandırması fotonların, leptonların, iyonların ve hadronların elektromanyetik ve hadronik etkileşmelerini içerir. Bu noktada, şimdiye kadar belirtilen tüm kategoriler, doğrudan veya dolaylı olarak, bir izin durumunun geliştirilmesindeki rolünü kontrol eden ve çarpmalar (hits) ve dijitalleştirme için hassas boyutlarda bilgi sağlamayı üstlenen İzleme kategorisi içinde bulunur. Olay kategorisi olay izlerini kontrol eder ve Çalıştır kategorisi ise ortak bir demet ve detektör uygulaması tahsis eden olaylar koleksiyonunu yönetir. Son olarak olay, verileri Çalıştır aracılığıyla Okumaya gönderir ve verileri Görselleştirme ve Kalıcılık kategorilerine iletir.

3.1.2. GEANT4 simülasyon birimleri

Diyagramda gösterilen temel Geant4 kategorilerin bazıları aşağıda tarif edilmiştir.

Çalıştır (Run): Çalıştır GEANT4 simülasyonun ana birimidir. Run, aynı detektör koşulları altında bir olayın meydana gelme sayısıdır. Bir kullanıcı Run esnasında detektörü ve sistem geometrisini veya Fizik işlem ayarlarını değiştiremez. Yani programın çalışması sırasında detektöre müdahale edilemez. “Beamon” komutuyla bir GEANT4 çalışması başlar. Bir çalışmanın başlangıcında, geometri navigasyon için optimize edilir, enine kesitler kurulumdaki malzemelere göre hesaplanır, düşük enerjili kesilim değerleri tanımlanır.

Olay (Event): Detektöre gönderilen parçacığın oluşturacağı tüm etkileşme süreçlerini içerir. Sonuç olarak, parçacık ya detektörde kalır ya da detektörü terk eder. Olay, İşlem başlangıcındaki birincil parçacıkların sayısını kapsar. İşleme boyunca, her parçacık etkileşmeler yapar ve tek tek izlenir. Tüm parçacıklar izlenip soğurulduğunda yada ortamdan dışarı çıktığında olay işleme tamamlanır. İşlemin sonunda, aşağıdaki

nesnelere sahiptir: birincil parçacıklar ve onların oluşturdukları diğer tüm parçacıkların, sayısallaştırılmış verileri, koordinat verileri ve yörünge verileri listesi.

İz (Track): Bir parçacığın anlık durumunu temsil eder. Bu şekilde parçacığın mevcut konumu ve enerjisi gibi fiziksel büyüklükler elde edilebilir. Parçacık geçerken arka planının içindeki bir parçacığın görüntüsüdür. Anlık görüntünün ölçüleri her durumda değişir; bir izin fiziksel bir büyüklüğü ve konumu vardır, bir basamak grubu değildir. İzlenen bir nesnenin bir ömrü vardır, bozunma veya bir oluşma gibi bir fizik süreciyle şekillenir ve ana hacimden çıktığında, kaybolduğunda, sıfır enerjiye ulaştığında ve “durgun” bir aktivitede karakterize edilmediğinde silinir veya kullanıcı onu öldürür.

Adım (Step): Parçacık izlerinden elde edilir. Parçacığın adım başına enerji kaybı ve adım boyunca yol alma süresi gibi bilgileri elde etmek için kullanılır. Geçen süre ve enerji kaybı gibi parçacık verilerini içerir. Her nokta, malzeme ve hacim verilerini içerir. Adım iki hacmin tam sınırında kalıyorsa, bitiş noktası tam sınırdadır, ancak bir sonraki hacimde bir elemandır, Şekil 3.2’de görüldüğü gibi. Bu nedenle sınır süreçleri, örneğin geçiş ve kırılmaların var olduğu ışık/radyasyon simüle edilebilir (Sébastien, 2020).



Şekil 3.2. Adım kategorinin tanımı (Sébastien, 2020).

3.2. Türkiye Milli Bilim e-Altyapısı (TRUBA)

Grid, bilgisayarların bilgi işlem ve veri depolama kaynaklarını internet üzerinden paylaşmak için oluşturulan bir hizmet olarak tanımlanabilir. Ağ ve bilgisayarlar arasındaki basit iletişimin ötesine geçerek, küresel bilgisayar ağının büyük bir bilgi işlem kaynağına dönüştürülmesi amaçlanmaktadır.

Bu tez çalışmasında Geant4 programı ile yapılan hesaplamalar Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) Ulusal Akademik Ağ ve Bilgi Merkezi (ULAKBİM), Yüksek Başarım ve Grid Hesaplama Merkezi'nde (TR-Grid e-Altyapısı) gerçekleştirilmiştir. Grid, araştırmacıların dünyanın dört bir yanına dağılmış kaynaklara ayrı olarak erişmek yerine, ara katman yazılımları ile tek bir bilgisayar sistemi yapısına sahip olmalarını sağlayan bir yapıdır. Grid hesaplama teknikleri ve altyapısı, öncelikle üniversiteler ve araştırma enstitüleri tarafından akademik çalışmalar için kullanılmaktadır. Bu kapsamda başlıca çalışma alanları;

- Yüksek Enerji Fiziği
- Temel Bilimler (Fizik, Kimya, Matematik)
- Biyomedikal
- Yer Bilimleri
- Hava Tahmini Araştırması
- Uzay Bilimleri
- Beyin Dinamikleri Araştırması
- Bilgisayar Bilimi
- Malzeme Bilimi
- Genetik Araştırma

TR-Grid, İstanbul Teknik, Bilkent ve Boğaziçi üniversitelerinin ortaklığıyla 2003 yılında kurulmuş 128 işlemcili bir küme girişimidir.

TR-Grid girişiminin öncelikli amaçları:

Ulusalgridin altyapısını oluşturmak,

Gridin altyapısı, uluslararası Grid projeleri ve yüksek performanslı bilgi işlem ile ilgili bilgileri ulusal kullanıcı topluluğuna aktarmak

Uluslararası grid projelerinde aktif olarak yer almak,

Ticari üyeler ve akademik araştırmacılardan oluşan bir dernek ile yüksek performanslı bilgi işlem kaynakları geliştirmek,

Ulusal uygulamaları genişletmek (Cem, 2006).

Çizelge 3.1. Ulusal gridi oluşturan küme bilgisayar merkezleri ve sahip oldukları kaynaklar.

EGEE'ye bağlı Site Adı	Çekirdek Sayısı	Depolama Miktarı
TR-01-ULAKBİM	114	6Tbyte
TR-03-METU	312	24Tbyte
TR-04-ERCIYES	64	500Gbyte
TR-05-BOUN	64	500Gbyte
TR-07-PAMUKKALE	64	500Gbyte
TR-08-CUKUROVA	64	500Gbyte
TR-09-ITU	64	500Gbyte
TR-10-ULAKBİM	300	24Tbyte
TOPLAM	1046 çekirdek	50Tbyte

Yukarıda sayılan merkezlerde bulunan küme bilgisayarları birleştirilerek, akademisyen ve araştırmacıların projelerinde ihtiyaç duydukları yüksek performansa ulaşmaları sağlanmaktadır. Böylece kullanıcılara 1046 çekirdek ve 50 TB depolama alanlı kaynak sağlanmaktadır.

TÜBİTAK ULAKBİM Yüksek Performans ve Grid Hesaplama Merkezi, 2003 yılından bu yana ülke genelindeki araştırma gruplarına bilgi işlem ortamı sağlamayı amaçlayan bir devlet kuruluşudur. Bu merkez aynı zamanda Ulusal Grid Oluşumunun (TR-Grid UGO) kurucusu ve koordinatörü olarak faaliyetlerine devam etmiştir. 2010 yılından itibaren altyapının adı Türkiye Milli Bilim e-Altyapısı (TRUBA) olarak değiştirilmiştir. TRUBA Formasyon, ulusal yüksek performanslı grid ve bulut bilişim altyapılarının gerektirdiği servis ve araçlarla birlikte kurularak hizmet vermektedir. Deneyimli kadrosu ve sürdürülebilir altyapısı ile uluslararası, bölgesel ve ulusal projelerde partner olarak çalışmalarını sürdürmektedir.

TRUBA Oluşumunun genel amaçları şu şekilde sıralanabilir:

- Yüksek performanslı grid ve bulut bilgi işlem ve depolama altyapısını işletmek ve genişletmek.

- TRUBA bünyesinde farklı merkezler ve araştırma grupları ile oluşturulan çalışma modellerinin kapsamını genişleterek ülke çapında standartlar ve yol haritaları ile oluşturulan ulusal bir e-Altyapı oluşturmak.
- TRUBA'nın e-altyapılardaki yeni teknolojik gelişmelere entegrasyonunu sağlamak.

2003 yılında hizmete giren TÜBİTAK ULAKBİM Yüksek Performans ve Grid Bilişim Merkezi'ndeki kaynaklar TRUBA ile bütünleşmiştir. Hâlihazırda Türk akademisyenlere yaklaşık 15.000 işlemci çekirdeği, 36 grafik işlem birimi (GPU) ve toplam 2PB Luster dosya sistemi sunmaktadır

3.3. ROOT Analiz Programı

ROOT, CERN tarafından geliştirilmiş nesne yönelimli bir program ve veri analizi aracıdır. Başlangıçta parçacık fiziği veri analizi için tasarlanmıştır ve alana özgü çeşitli özellikler içerir, ancak astronomi ve veri madenciliği gibi diğer uygulamalarda da kullanılır. ROOT C++ programlama dili ile yazılmıştır. Her gün binlerce fizikçi, verilerini analiz etmek ve görselleştirmek için ROOT tabanlı uygulamaları kullanıyor.

ROOT, veri analizi için bir yazılım çerçevesi ve son teknoloji bilimsel veri analizine özgü zorlu görevlerle başa çıkmak için güçlü bir araçtır. Öne çıkan özellikleri arasında gelişmiş bir grafik kullanıcı arabirimi, mükemmel biretkileşim analizi, hızlı ve verimlilik için C++ programlama dili için bir yorumlayıcı ve her yıl Büyük Hadron Çarpıştırıcısı deneyleri tarafından kaydedilen petabaytlarca veriyi yazmak için kullanılan C++ nesnelere için bir kalıcılık mekanizması yer alır.

ROOT ile şunları yapabilirsiniz:

- **Verileri kaydetme:** Veriler (ve herhangi bir C++ nesnesi), sıkıştırılmış bir ikili biçimde bir ROOT dosyasına kaydedilebilir. Nesne formatı da aynı dosyaya kaydedilir. ROOT dosyaları kendi kendini tanımlayıcıdır. Bir ROOT dosyasındaki bilgiler, veri modelini açıklayan kaynak dosyaların yokluğunda bile her zaman okunabilir. ROOT, büyük miktarda veriye hızlı erişim için son

derece güçlü bir veri yapısı sağlar; bu, normal bir dosyaya erişmekten bile daha hızlıdır.

- **Verilere erişme:** Bir veya daha fazla ROOT dosyasında saklanan verilere bilgisayardan, internetten ve kullanılan büyük ölçekli dosya dağıtım sistemlerinden erişilebilir. Birkaç dosyaya yayılan ROOT dalları birleştirilebilir ve benzersiz bir nesne olarak erişilebilir, bu da büyük miktarda veri üzerinde döngülere izin verir.
- **Veri madeni:** Verileri işlemek için güçlü matematiksel ve istatistiksel araçlar sağlanır. Bir C++ uygulamasının ve paralel işlemenin gücü, her türlü veri işleme için kullanılabilir. İstatistiksel dağıtımdan sonra, veriler oluşturulabilir ve modellenebilir, bu da karmaşık sistemleri simüle etmeyi mümkün kılar.
- **Sonuçların yayınlanması:** Sonuçlar histogramlar, dağılım grafikleri ve fit işlevleriyle görüntülenebilir. ROOT grafikleri, yalnızca birkaç fare tıklamasıyla gerçek zamanlı olarak değiştirilebilir. Sonuçlar, PDF veya diğer formatlarda yüksek çözünürlükte kaydedilebilir.
- **İnteraktif biçimde çalışma veya kendi uygulamanızı oluşturma:** Cling C++ yorumlayıcısı, etkileşimli oturumlar ve makrolar yazmak için kullanılabilir veya program tam hızda çalışacak şekilde derlenebilir. Her iki durumda da, bir grafik kullanıcı arayüzü oluşturulabilir.
- **ROOT'u diğer dillerde de kullanma:** ROOT, Python ve Mathematica gibi mevcut dillerle sorunsuz bir şekilde kullanılabilir (Brun ve Rademakers, 1997).

ROOT programında pek çok fit fonksiyonları bulunmaktadır. Burada bu çalışmada kullanılan Crystal ball ve Novosibirsk fit fonksiyonları sırasıyla kısa bir şekilde açıklanmıştır.

3.3.1. Crystal Ball fonksiyonu

Crystal ball fonksiyonu, adını Crystal Ball işbirliği (Collaboration)'den almıştır ve yüksek enerji fiziğinde çeşitli kayıplı süreçleri modellemek için yaygın olarak kullanılan bir olasılık yoğunluk fonksiyonudur. Belirli bir eşğin altında, bir Gauss çekirdek kısmı ve kuyruk kısımdan oluşur. Fonksiyonun kendisi ve birinci türevi süreklidir.

Crystal ball fonksiyonu şu şekilde verilir:

$$f(x; \alpha, n, \bar{x}, \sigma) = N. \begin{cases} \exp\left(-\frac{(x - \bar{x})^2}{2\sigma^2}\right), & \text{for } \frac{x - \bar{x}}{\sigma} > -a \\ A \cdot \left(B - \frac{x - \bar{x}}{\sigma}\right)^{-n}, & \text{for } \frac{x - \bar{x}}{\sigma} \leq -a \end{cases} \quad (3.1)$$

Burada;

$$A = \left(\frac{n}{|a|}\right)^n \cdot \exp\left(-\frac{|a|^2}{2}\right), \quad (3.2)$$

$$B = \frac{n}{|a|} - |a|, \quad (3.3)$$

ve

$$N = \frac{1}{\sigma(C + D)}, \quad (3.4)$$

olarak verilebilir. Burada;

$$C = \frac{n}{|a|} \cdot \frac{1}{n-1} \cdot \exp\left(-\frac{|a|^2}{2}\right) \quad (3.5)$$

$$D = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \left(1 + \operatorname{erf}\left(\frac{|a|}{\sqrt{2}}\right)\right) \quad (3.6)$$

N: Bir normalleştirme faktörüdür.

a, n, \bar{x} ve σ verilere uyan parametrelerdir.

erf: hata fonksiyonudur.

Matematikte hata fonksiyonu, genellikle erf ile gösterilir, karmaşık bir değişkenin karmaşık bir işlevidir ve şu şekilde tanımlanır:

$$\operatorname{erf}z = \int_0^z e^{-t^2} dt \quad (3.7)$$

3.3.2. Novosibirsk fonksiyonu

Novosibirsk, aşağıdaki gibi tanımlanır;

$$f(E) = A_s \exp(-0.5 \ln^2 [1 + \Lambda \tau (E - E_0)] / \tau^2 + \tau^2) \quad (3.8)$$

Burada;

$$\Lambda = \sinh(\tau \sqrt{\ln 4}) / (\sigma \tau \sqrt{\ln 4}) \quad (3.9)$$

olarak tanımlanır.

E_0 : Pik pozisyonu

σ : Genişlik

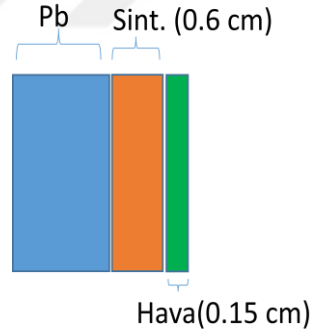
τ : Kuyruk parametresidir.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu çalışmada, FCC-eh detektörünün elektromagnetik kalorimetresi için soğurucu malzeme olarak Pb ve aktif ortam olarak sintilatörler kullanılarak bir örnekleme kalorimetresi tasarlanmıştır. Çeşitli Pb kalınlıklarının ve kalorimetreye gelen parçacığın geliş açısının enerji çözünürlüğü üzerine etkileri GEANT4 simülasyon paketi kullanılarak incelenmiştir. Ayrıca detektör içerisinde oluşan etkileşmeler, GEANT4 programı içerisinde bulunan farklı fizik listeleri (QGSP_BERT, FTFP_BERT) kullanılarak incelendi. Simülasyonlardan elde edilen verilerin analizi için ROOT analiz paketi kullanılmıştır.

4.1. Elektromanyetik Kalorimetre İçerisinde Elektromanyetik Sağanak Oluşumu

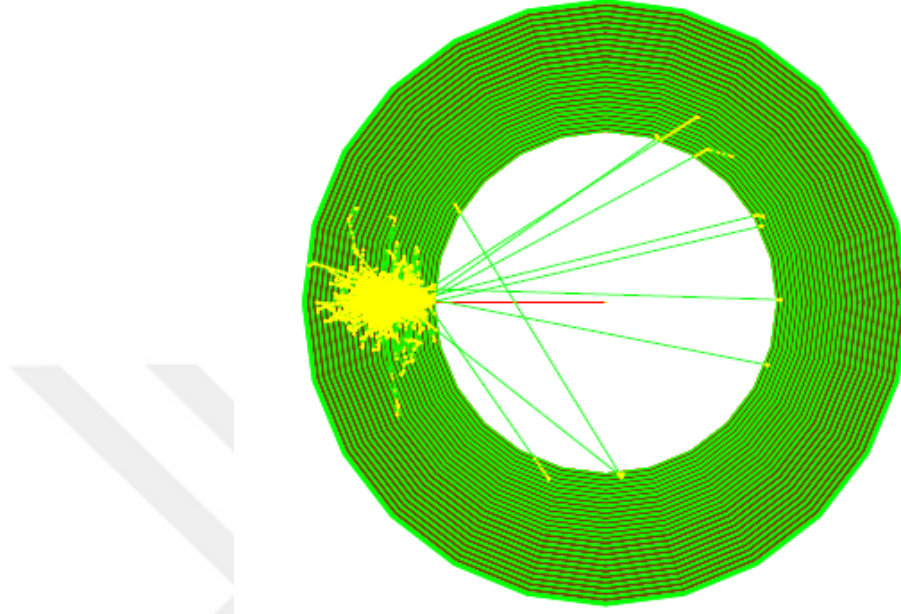
Bu çalışmada elektromagnetik kalorimetre, Pb ve plastik sintilatör (polystyren) katmanlarından oluşacak şekilde tasarlanmıştır. Tasarım Şekil 4.1' den de görüleceği gibi Pb, 6 mm' lik plastik sintilatör ve elektronik malzemeler için ayrılmış 15 mm' lik hava boşluklarının ardı ardına sıralanmasıyla oluşmaktadır.



Şekil 4.1. Elektromagnetik kalorimetrenin katmanları.

Elektron ya da foton gibi elektromagnetik bir parçacık, kalorimetreye gönderildiğinde parçacıklar detektör ortamı ile etkileşerek bir elektromagnetik sağanak oluştururlar. Şekil 4.2' de elektromagnetik kalorimetre içerisine 5 GeV'lik bir elektron gönderildiğinde oluşan elektromanyetik sağanak görülmektedir. Şekilde kırmızı çizgi elektronu, yeşil çizgiler fotonları ve sarı noktalar etkileşim noktalarını göstermektedir. Şekildeki kalorimetre 6 tane 0,5 cm, 8 tane 0,6 cm ve 11 tane 0,8 cm kalınlığında toplam 25 kurşun katmanından oluşmaktadır.

Bu elektromanyetik sağanağın kalorimetre içindeki yanal genişlemesi, enerjinin depolanması için kullanılan parçacıkların sayısı ile sınırlıdır. Elektromanyetik sağanağın genişliği, etkileşim sırasında parçacıkların çoklu saçılmasından kaynaklanmaktadır.

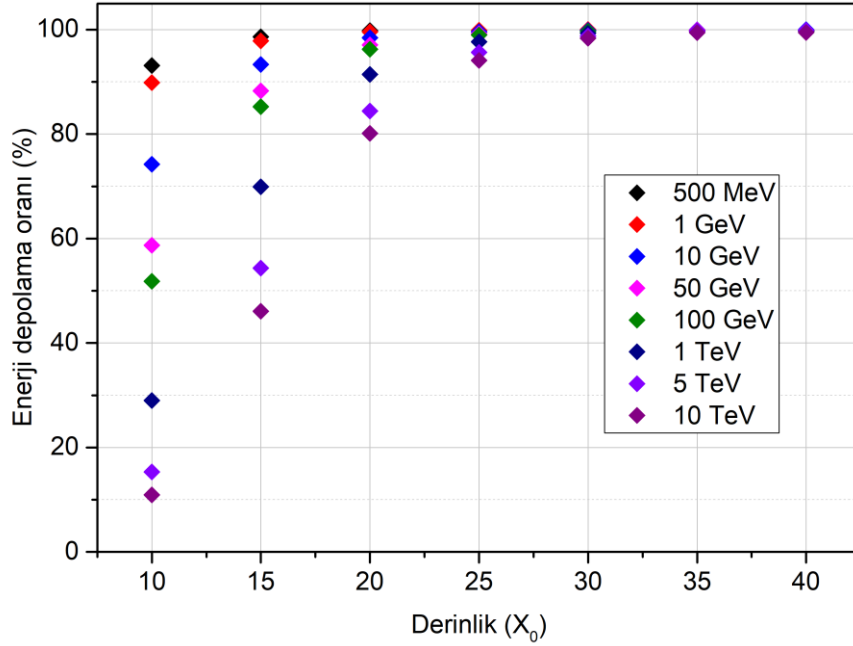


Şekil 4.2. 5 GeV enerjili bir elektronun kalorimetre içerisinde oluşturduğu elektromanyetik sağanak.

Gelen parçacığın enerjisi ne kadar küçük olursa, saçılma açısı o kadar bk olur. Sağanağın yanal genişlemesi sırasında depolanamayan enerjiler ve kalorimetrelerde depolanan enerjideki dalgalanmalar, denklem 2.31 ile verilen enerji çözünürlüğü ifadesinin stokastik terimine (*a*) katkıda bulunur (Gautheron ve Givernaud, 1997).

4.2. Elektromagnetik Kalorimetre İçinde Depolanan Enerji Oranı

Kalorimetre içinde depolanan enerjinin kalorimetrenin radyasyon uzunluğuna bağlı olarak değişimi, GEANT4 programı ve QGSP_BERT fizik listesi kullanılarak simüle edilmiştir. Şekil 4.3'te görüldüğü gibi elektromagnetik kalorimetre içerisine sırası ile 500 MeV, 1 GeV, 10 GeV, 50 GeV, 100 GeV, 1 TeV, 5 TeV ve 10 TeV enerjilerde elektronlar gönderilip 10000 tekrar yapılarak çeşitli radyasyon uzunlukları için depolanan enerjiler elde edilmiştir.



Şekil 4.3. Radyasyon uzunluğuna bağlı olarak çeşitli enerjilerde elektronların oluşturduğu şakanakların kalorimetre içerisinde depolanma oranı.

10 GeV' e kadar olan düşük enerjilerde gelen elektronlar enerjilerinin tamamını yaklaşık $20X_0$ 'da kaybetmektedirler. Ancak 1 TeV' den yüksek enerjilerle kalorimetreye giren elektronların $30X_0$ 'lık radyasyon uzunluğunda enerjilerinin yaklaşık %98' i kalorimetre içerisinde depolanırken, $30X_0$ ' dan sonra ise enerjinin yaklaşık %99' u kalorimetrede depolanmaktadır. FCC detektörünün kalorimetresine yüksek enerjili parçacıklar da gireceğinden kalorimetrenin radyasyon uzunluğunun $30X_0$ olarak belirlenmesi uygun olacaktır.

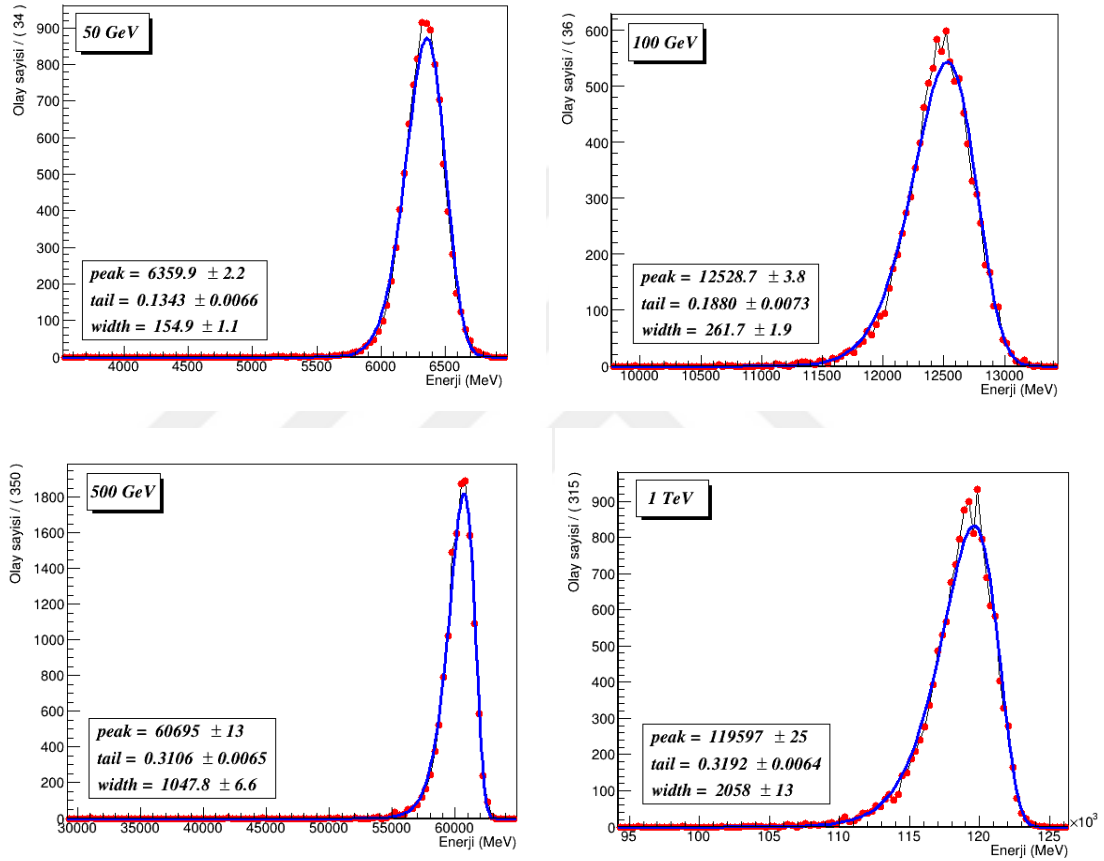
4.3. Enerji Spektrumu

Pb kalınlıkları Çizelge 4.1' de verilen bir kalorimetre tasarlanarak çeşitli enerjilerde elektronlar bu kalorimetreye gönderilerek kalorimetre içerisinde depolanan enerjinin dağılımları/spektrumları elde edildi. Her bir enerji değeri için 10000 tekrar yapıldı. Sintilatörlerde depolanan enerjilerin spektrumları düşük enerjilere doğru asimetric bir kuyruğa sahip olan bir Gauss dağılımına benzediği için, bu spektrumlar ilk olarak Novosibirsk fonksiyonu kullanılarak fit edilmiştir. Elektromanyetik kalorimetreye

gönderilen 50 GeV, 100 GeV, 500 GeV ve 1 TeV enerjili elektronlar için elde edilen enerji spektrumları Şekil 4.4' te görülmektedir.

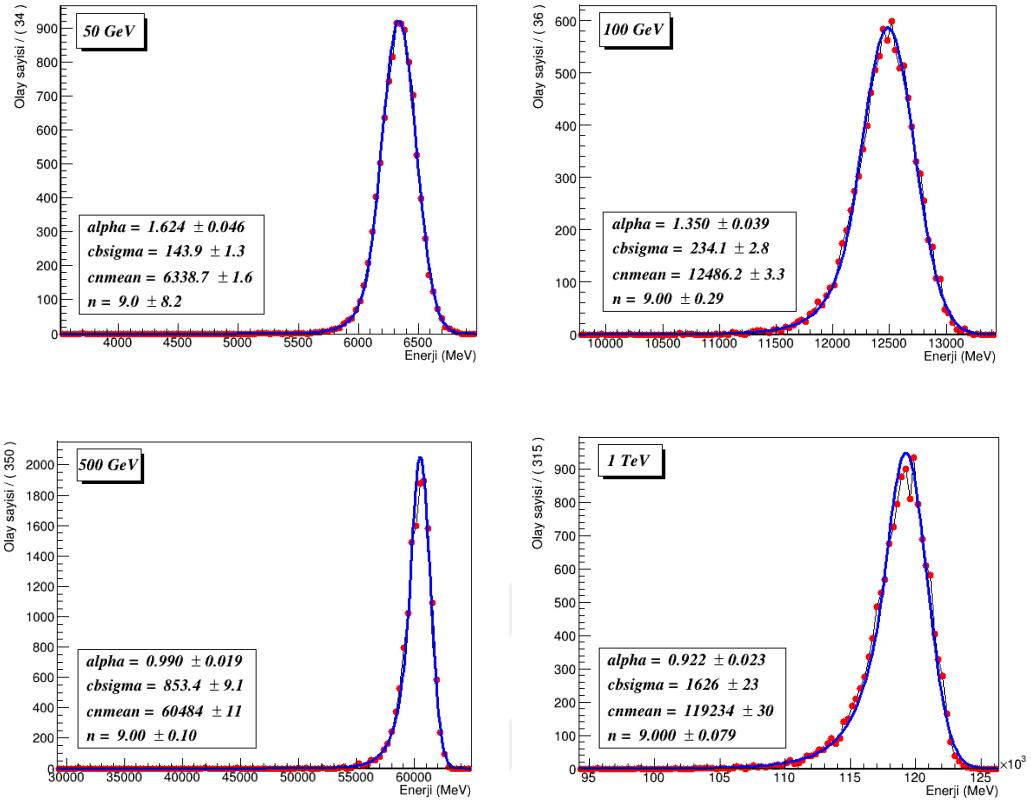
Çizelge 4.1. Elektromanyetik kalorimetrede kullanılan Pb kalınlıkları ve katman sayısı.

Katman sayısı	8	13	18
Pb kalınlıkları	0,3 cm	0,4 cm	0,5 cm



Şekil 4.4. Elektromanyetik kalorimetreye gönderilen 50 GeV, 100 GeV, 500 GeV ve 1 TeV enerjili elektronlar için elde edilmiş enerji spektrumları. Grafiklerdeki düz mavi çizgiler, Novosibirsk fit fonksiyonu ile elde edilmiştir.

Enerji spektrumları ile daha iyi uyuşan bir fit fonksiyonu arayışı sebebiyle, elde edilen enerji spektrumları Novosibirsk fit fonksiyonuna benzer şekilde düşük enerjilerde bir kuyruğa sahip olan Crystal Ball fonksiyonu kullanılarak tekrar fit edildi. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.5' te görülmektedir.



Şekil 4.5. Elektromanyetik kalorimetreye gönderilen 50 GeV, 100 GeV, 500 GeV ve 1 TeV enerjili elektronlar için elde edilmiş enerji spektrumları. Grafiklerdeki düz mavi çizgiler, Crystal Ball fit fonksiyonu ile elde edilmiştir.

Düşük enerjili parçacıklar (yaklaşık 30 GeV' den düşük) için, Novosibirsk fit fonksiyonunun enerji spektrumları ile daha uyumlu olduğu, yüksek enerjili parçacıklar (yaklaşık 30 GeV' den yüksek) içinse Crystal Ball fit fonksiyonunun spektrumları ile daha uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Bu yüzden çalışmanın devamında her iki fit fonksiyonu ile elde edilen sonuçlara da yer verilecektir.

Şekil 4.3'ten de görülebileceği gibi kalorimetreye gelen elektronun enerjisi, $35X_0$ radyasyon uzunluğunda yaklaşık %99 depolanmaktadır. 30 - $35X_0$ aralığında enerji çözünürlüklerinin değişimini incelemek amacıyla, $30X_0$, $32X_0$ ve $34X_0$ radyasyon uzunluklarında kalorimetreler tasarlandı ve enerji çözünürlükleri elde edildi. Bu tasarımlarda kullanılan Pb kalınlıkları Çizelge 4.2, 4.3 ve 4.4' ten görülebilir. Çizelgelerden de görüldüğü gibi sadece Pb kalınlıkları aynıdır ancak katman sayıları değiştirilmiştir. 3 farklı radyasyon uzunluğu için elde edilen enerji çözünürlükleri Şekil 4.6' da görülmektedir.

Çizelge 4.2. $30X_0$ radyasyon uzunluğunda kullanılan Pb kalınlıkları ve katman sayısı.

Katman sayısı	6	8	11
Pb kalınlıkları	0,5 cm	0,6 cm	0,8 cm

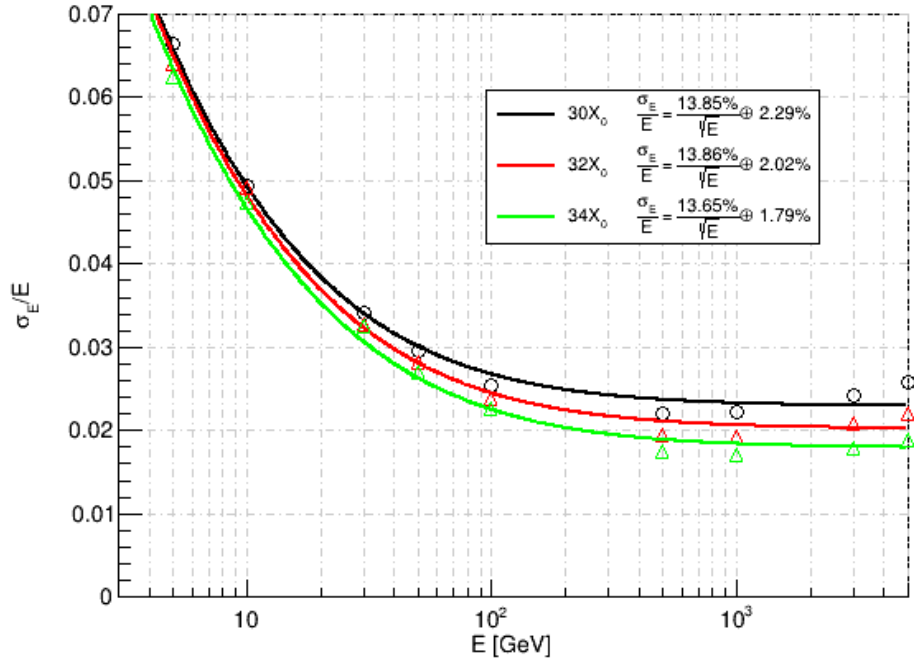
Çizelge 4.3. $32X_0$ radyasyon uzunluğunda kullanılan Pb kalınlıkları ve katman sayısı.

Katman sayısı	7	9	11
Pb kalınlıkları	0,5 cm	0,6 cm	0,8 cm

Çizelge 4.4. $34X_0$ radyasyon uzunluğunda kullanılan Pb kalınlıkları ve katman sayısı.

Katman sayısı	8	10	11
Pb kalınlıkları	0,5 cm	0,6 cm	0,8 cm

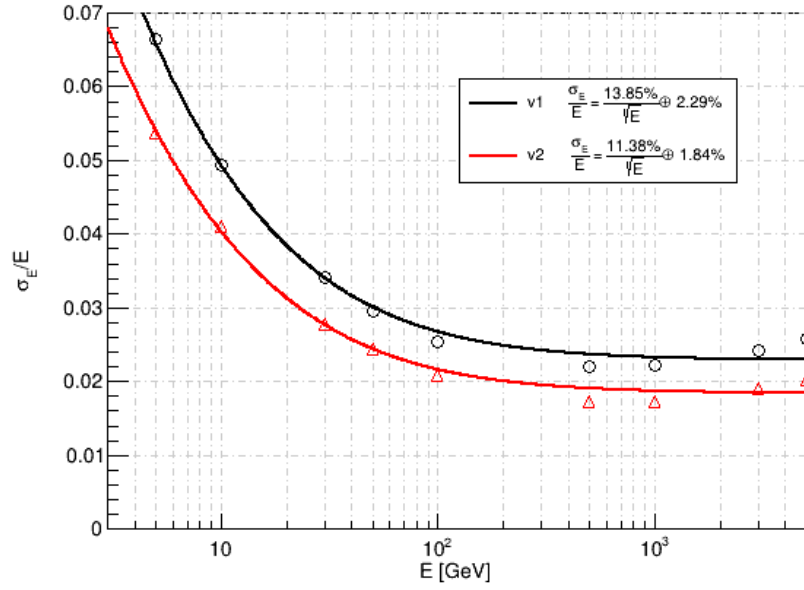
Beklenildiği gibi daha büyük radyasyon uzunluğunda kısmen daha iyi çözünürlük elde edilmiştir ancak özellikle 100 GeV' e kadar olan enerjilerde çok büyük bir farklılık gözlemlenmemiştir. Bu yüzden $30X_0$ radyasyon uzunluğunun yeterli olduğunu karar verilmiştir ve v1 olarak adlandırılmıştır. Daha sonra $30X_0$ uzunluğunda daha iyi enerji çözünürlüğü elde edilip edilemeyeceğini araştırmak amacıyla daha ince Pb kalınlıklarının kullanıldığı boyutları Çizelge 4.5' verilen ve v2 olarak adlandırılan bir tasarım yapılmıştır. Bu iki versiyon için elde edilen enerji çözünürlükleri Şekil 4.7' de görülmektedir.



Şekil 4.6. Çeşitli radyasyon uzunluklarında gelen elektronun enerjisine bağlı olarak enerji çözünürlüğü.

Çizelge 4.5. 30X₀ radyasyon uzunluğunda v2 için kullanılan Pb kalınlıkları ve katman sayısı.

Katman sayısı	8	13	18
Pb kalınlıkları	0,3 cm	0,4cm	0,5 cm



Şekil 4.7. Aynı radyasyon uzunluğuna ($30X_0$) ama farklı Pb kalınlıklarına sahip iki kalorimetre tasarımı için gelen elektronun enerjisine bağlı olarak enerji çözünürlükleri.

Elde edilen enerji çözünürlüğü değerleri,

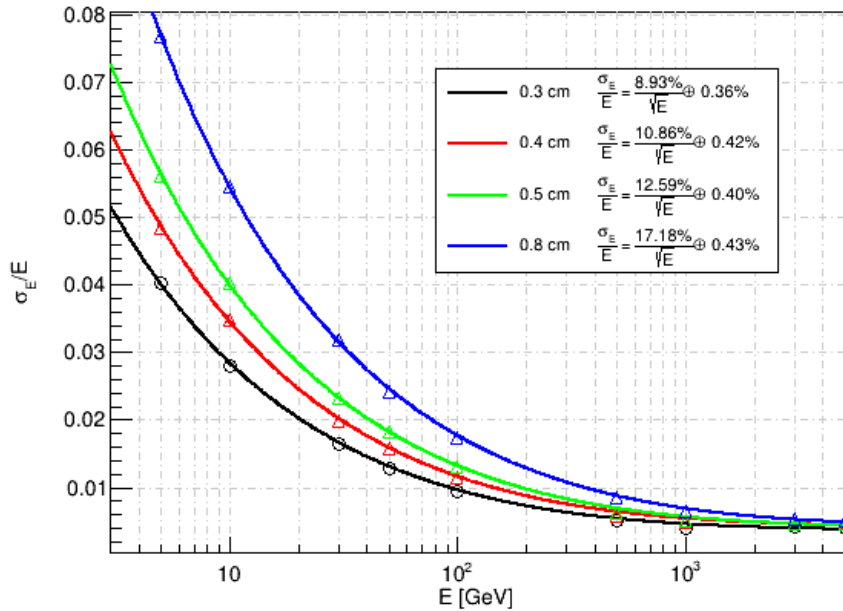
$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus b \quad (4.1)$$

fonksiyonuna fit edilerek enerji çözünürlüğünün stokastik (a) ve sabit (b) terimleri elde edilmiştir. Radyasyon uzunluğu $30X_0$ olan iki farklı tasarım için elde edilen a ve b terimleri Şekil 4.7 üzerinde görülmektedir. Pb kalınlıklarının azaltılıp, katman sayılarının artırılmasıyla; a terimi %13,85' ten %11,38' e, sabit terim ise %2,29' dan %1,84' e düşmüştür. v2 tasarımı ile elde edilen bu çözünürlük değerleri daha önce FCC-eh elektromagnetik kalorimetresi için yapılmış hesaplamalara göre daha iyi sonuçlar vermektedir (Abada ve ark 2019; Kostka, Polini ve Yamazaki, 2022).

Simülasyon ile elde edilen enerji çözünürlükleri sağanak dalgalanmalarını, enine ve boyuna sağanak kayıplarını içermektedir. Enerji çözünürlüğünün stokastik terimine katkı, kalorimetre içinde oluşan sağanaktaki dalgalanmalardan ve kalorimetrenin yanlarından depolanamadan kaçan enerjiden gelirken, sabit terime katkı, kalorimetrenin arkasından ve yanlarından kaçan enerjiden gelmektedir. Yanal boyutun artırılması, sağanak dalgalanmaları ve enine kaçakları önemli ölçüde azaltır. Sabit terim, kalorimetrenin radyasyon uzunluğu arttıkça iyileşir. Şekil 4.6'dan görüldüğü gibi

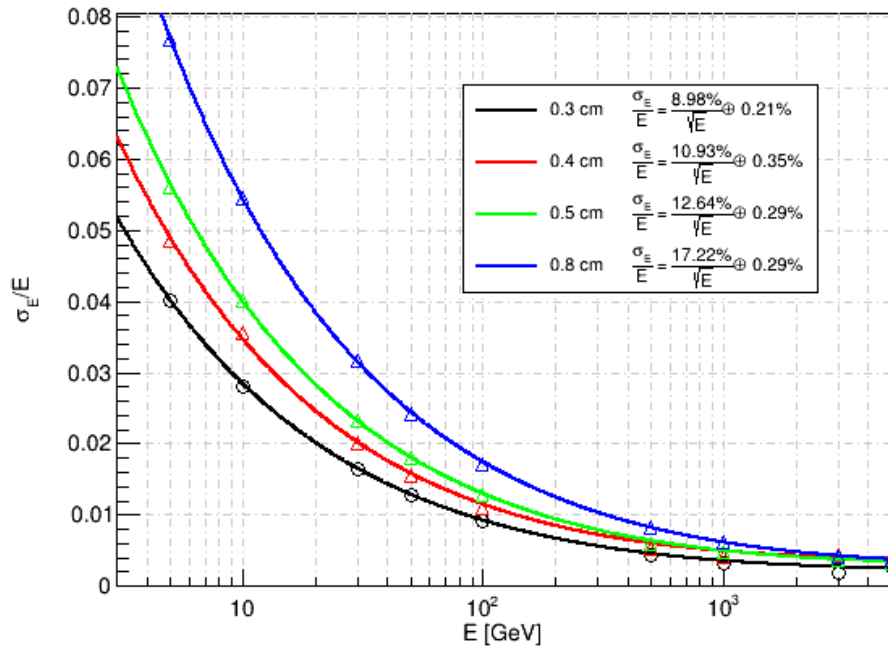
kalorimetrenin radyasyon uzunluğu arttıkça stokastik terim neredeyse sabit kalırken sabit terim azalmaktadır (Saad, Kocak ve Kırca, 2019).

30X₀ radyasyon uzunluğu için Pb uzunlukları her bir tasarımda sabit tutularak farklı tasarımlar oluşturuldu. 0,3 cm, 0,4 cm 0,5 cm ve 0,6 cm' lik Pb kalınlıkları kullanılarak oluşturulan kalorimetreler için elde edilen enerji çözünürlükleri Şekil 4.8 ve 4.9' da görülmektedir. Simülasyonlarda QGSP_BERT fizik listesi kullanılarak her enerji değeri için 10000 tekrar yapılmıştır. Elde edilen enerji spektrumları hem Novosibirsk hem de Crystal Ball fonksiyonlarına fit edilerek enerji çözünürlükleri elde edilmiştir.

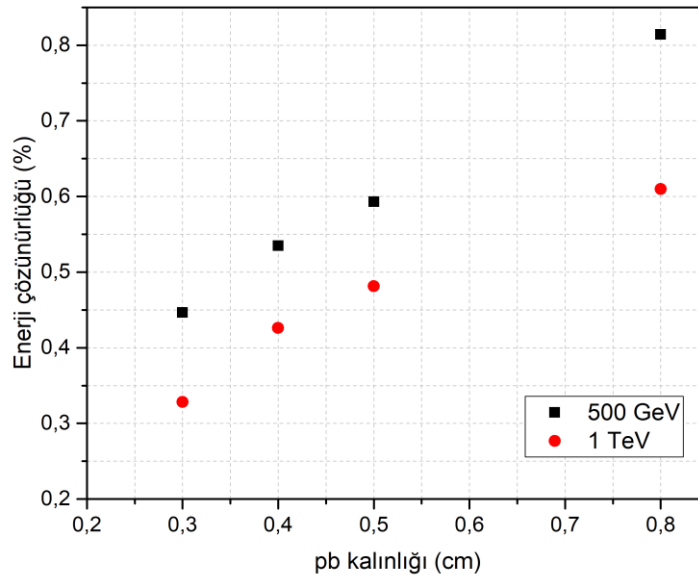


Şekil 4.8. Elektromanyetik kalorimetre için Novosibirsk fit fonksiyonu kullanarak elde edilen enerjiye bağlı enerji çözünürlükleri.

Şekil 4.8 ve 4.9' dan görüldüğü gibi aynı radyasyon uzunluğuna sahip ancak farklı Pb kalınlığına sahip tasarımlarda Pb kalınlıkları azaldıkça daha iyi enerji çözünürlükleri elde edilmiştir. Çünkü daha ince Pb kalınlığına sahip tasarımlarda sintilatörlerde depolanan enerji diğerlerine kıyasla daha fazladır. Depolanan enerji arttığından çözünürlük de iyileşmiştir. Farklı bir bakış açısıyla, iki farklı enerjide kalorimetreye gönderilen elektron için, Pb kalınlığına bağlı olarak enerji çözünürlüğünün değişimi Şekil 4.10' dan da görülebilir.



Şekil 4.9. Elektromanyetik kalorimetre için Crystal Ball fit fonksiyonu kullanarak elde edilen enerjiye bağlı enerji çözünürlükleri.



Şekil 4.10. 500 GeV ve 1 TeV' lik elektron enerjisi için, katman kalınlıklarına bağlı olarak 30X₀'da enerji çözünürlükleri (σ_E/E).

Şekil 4.8 ve 4.9’da elde edilen enerji çözünürlükleri, Denklem 4.1’ e fit edilerek a ve b terimleri elde edilmiş ve Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6’da sırasıyla verilmiştir.

Çizelge4.6. Çeşitli Pb kalınlıkları kullanılarak tasarlanan bir örnekleme elektromagnetik kalorimetresi için enerji çözünürlüğünün stokastik (a) ve sabit (b) terimlerinin değişimi. Novosibirsk fit fonksiyonu sonuçları.

Pb-Sint	0,3 cm	0,4 cm	0,5 cm	0,8 cm
a (%)	8,93	10,86	12,59	17,18
b (%)	0,36	0,42	0,40	0,43

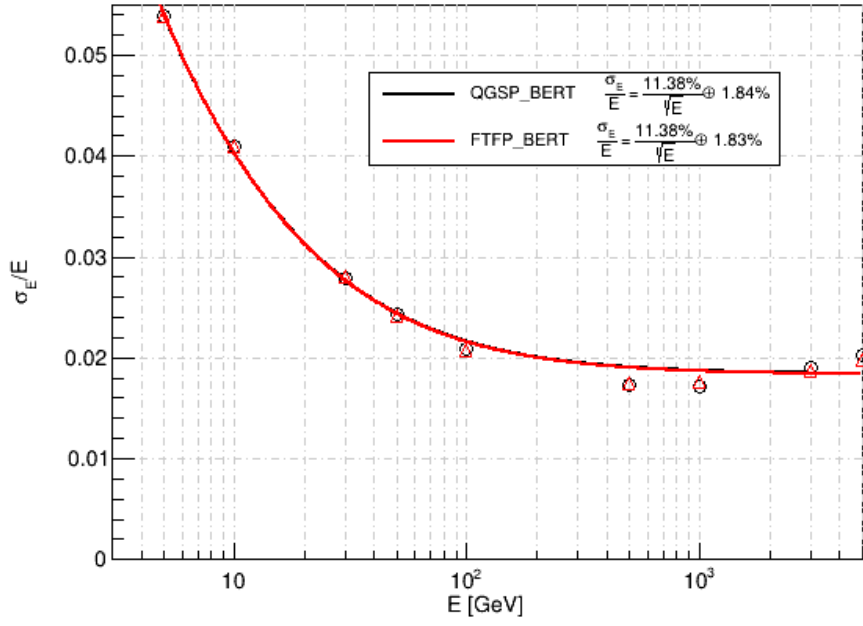
Çizelge 4.7. Farklı Pb kalınlıkları kullanılarak tasarlanan bir örnekleme elektromagnetik kalorimetresi için enerji çözünürlüğünün stokastik (a) ve sabit (b) terimlerinin değişimi. Crystal Ball fit fonksiyonu sonuçları.

Pb-Sint	0,3 cm	0,4 cm	0,5 cm	0,8 cm
a (%)	8,96	10,93	12,64	17,22
b (%)	0,26	0,36	0,29	0,29

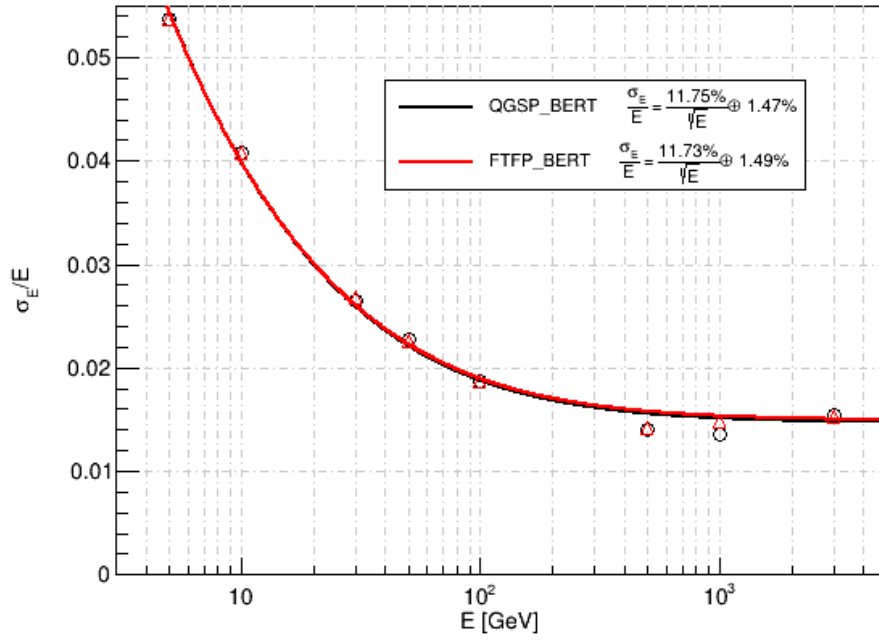
Çizelgelerde görüldüğü gibi sabit terim tüm Pb kalınlıkları için neredeyse aynı iken, stokastik terim kalınlık arttıkça artmaktadır. Stokastik terim, Crystal Ball fonksiyonu ile elde edilen enerji çözünürlüğü sonuçlarında daha büyük çıkarken, sabit terim Novosibirsk fonksiyonu ile elde edilen enerji çözünürlüğü sonuçlarında daha büyük elde edilmiştir.

4.4. QGSP_BERT ve FTFP_BERT Fizik Listeleri

30X₀ radyasyon uzunluğunda en iyi enerji çözünürlüğü v2 tasarımında elde edilmişti. Aynı tasarım kullanılarak QGSP_BERT ve FTFP_BERT fizik listelerinin enerji çözünürlükleri üzerine etkileri araştırıldı. Elde edilen enerji spektrumları Novosibirsk ve Crystal Ball fonksiyonlarına fit edildi. Çözünürlük sonuçları Şekil 4.11 ve 4.12’ de görülmektedir.



Şekil 4.11. QGSP_BERT ve FTFP_BERT fizik listeleri için, Novosibirsk fit fonksiyonu kullanılarak elde edilen enerji çözünürlükleri.

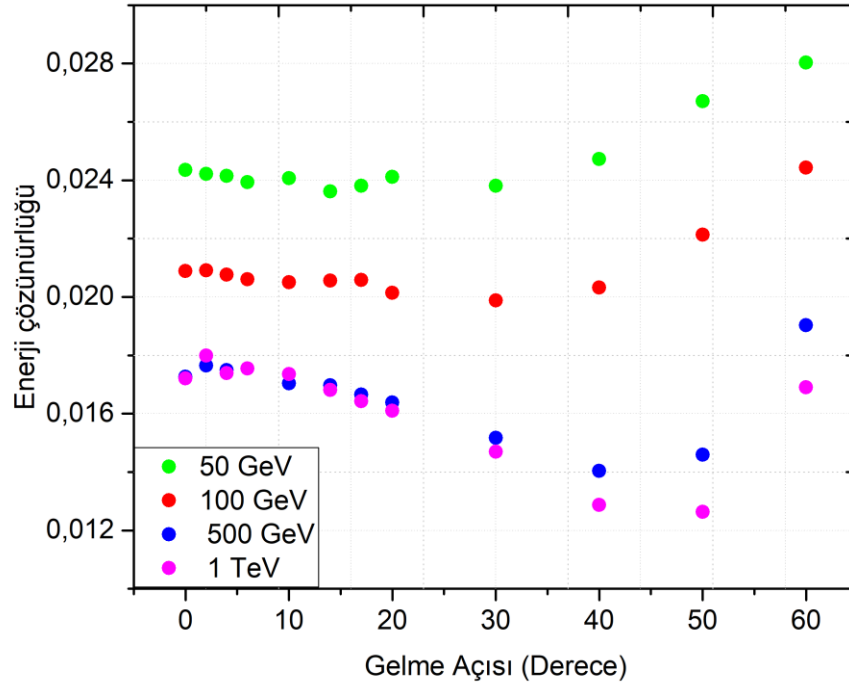


Şekil 4.12. QGSP_BERT ve FTFP_BERT fizik listeleri için, Crystal Ball fit fonksiyonu kullanılarak elde edilen enerji çözünürlükleri.

Şekil 4.11 ve 4.12’de görüldüğü gibi her iki fit fonksiyonu ile elde edilmiş enerji çözünürlükleri için de, fizik listeleri değiştirildiğinde elde edilen çözünürlük sonuçları değişmemiştir.

4.5. Elektronun Geliş Açısına Bağlı Olarak Enerji Çözünürlüğü

Kalorimetreye gelen elektronun geliş açısına bağlı olarak enerji çözünürlüğünü incelemek amacıyla v_2 olarak adlandırılan tasarım kullanıldı. Gelen elektron çeşitli açılarda (0° , 2° , 4° , 6° , 10° , 14° , 17° , 20° , 30° , 40° , 50° ve 60°) kalorimetreye gönderildi. Daha önceki hesaplamalara benzer şekilde, kalorimetrenin sintilatörlerinde depolanan enerjiler toplanarak toplam enerji spektrumları elde edildi. Elde edilen spektrumlar Novosibirsk fonksiyonuna fit edildi. Çeşitli enerjilerdeki elektronların geliş açılarına bağlı olarak enerji çözünürlüğünün değişimi Şekil 4.3’ te görülmektedir.



Şekil 4.13. Geliş açısına bağlı olarak 50 GeV, 100 GeV, 500 GeV ve 1 TeV enerjili elektronlar için $30X_0$ 'da enerji çözünürlüğü (σ_E/E).

20° ye kadar olan geliş açılarında çözünürlük neredeyse sabit kalırken, geliş açısı arttıkça ($20^{\circ} - 40^{\circ}$) elektron Pb içinde daha fazla yol aldığı için çözünürlük iyileşmektedir. Yaklaşık 40° den sonra ise kalorimetrede depolanan enerji hala artmasına rağmen, dalgalanmalar daha hızlı bir şekilde arttığı için (σ) enerji çözünürlüğü kötüleşmektedir.



5. SONUÇ

Kalorimetreler başlangıçta, nötrino etkileşmelerinin tespiti gibi parçacık fiziği deneylerindeki bazı özel uygulamalar için basit ve ucuz aygıtlar olarak geliştirildi. Ancak son yıllarda rolleri önemli ölçüde değişmiştir. Modern çarpıştırıcılarda, kalorimetreler deneylerin kalbini ve ruhunu oluşturur. Parçacıkların enerjisini, momentumunu ve türünü ölçmek için kullanılırlar. Parçacıklar kalorimetrelerde (ideal olarak) tamamen soğurular ve enerjileri ölçülebilir bir sinyale dönüştürülür.

Bu tez çalışmasında, FCC-eh detektörünün elektromagnetik kalorimetresi için örnekleme kalorimetresi tasarımı çalışmaları yapılmıştır. Bu amaçla elektromanyetik kalorimetrede, çeşitli Pb kalınlıklarının enerji çözünürlüğü üzerine etkisi GEANT4 simülasyon programı kullanılarak incelenmiştir. Bölüm 4.2’ de QGSP_BERT fizik listesi kullanılarak 1 TeV’ den yüksek enerji ile kalorimetreye giren elektronların $30X_0$ radyasyon uzunluğunda enerjilerinin yaklaşık %98’ ini kalorimetre içerisinde depoladığı gözlemlenmiştir. Bu sebeple FCC-eh elektromagnetik kalorimetresi için radyasyon uzunluğu $30X_0$ olarak seçilmiştir. Bölüm 4.3’te, 30, 32 ve $34X_0$ radyasyon uzunluğuna sahip kalorimetrelerde depolanan enerjilerin dağılımları/spektrumları Root fit içerisindeki Novosibirsk ve Crystal Ball fit fonksiyonlarına fit edilerek enerji çözünürlükleri elde edilmiştir. Düşük enerjili parçacıkların spektrumlarının Novosibirsk fit fonksiyonu ile daha uyumlu olduğu gözlenirken, yüksek enerjili parçacıklar için Crystal Ball fit fonksiyonununun spektrumlar ile daha uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca $30X_0$ uzunluğuna sahip iki farklı tasarım yapılmış ve Şekil 4.8 ve 4.9’da görüldüğü gibi daha ince Pb’ lerden oluşan tasarımdan daha iyi enerji çözünürlüğü elde edilmiştir. Bu iki yapı Denklem 4.1’ e fit edilerek enerji çözünürlüğünün stokastik ve sabit terimine simülasyondan gelen katkılar hesaplanmıştır. v2 tasarımı ile stokastik terime katkı %13,85’ ten %11,38’ e düşerken, sabit terime katkı %2,29’ dan %1,84’ e düşmüştür.

v2 için tasarımı için QGSP_BERT ve FTFP_BERT fizik listeleri kullanılarak enerji çözünürlüğündeki değişim incelenmiştir (Şekil 4.11 ve 4.12). İki fizik listesinin de yaklaşık aynı çözünürlük sonuçlarını verdiği gözlemlenmiştir.

Son olarak Bölüm 4.5'te, çeşitli açılarla (0° , 2° , 4° , 6° , 10° , 14° , 17° , 20° , 30° , 40° , 50° ve 60°) $30X_0$ uzunluğundaki kalorimetreye giren elektronlar için enerji çözünürlüklerinin değişimi hesaplanmıştır. Küçük geliş açılarında ($<20^\circ$) çözünürlüğün neredeyse sabit kaldığı gözlemlendi. Geliş açısı arttıkça kalorimetre içerisinde depolanan enerji miktarı artmakta ancak yaklaşık 40° den sonra σ' daki hızlı artış sebebiyle çözünürlük kötüleşmektedir.



KAYNAKLAR

Abada, A., Abbrescia, M., AbdusSalam, S. S., Abdyukhanov, I., Abelleira Fernandez, J., Abramov, A., ... & Biscari, C. (2019). FCC Physics Opportunities: Future Circular Collider Conceptual Design Report Volume 1. *Eur. Phys. J. C*, 79-474.

Abada, A., Abbrescia, M., AbdusSalam, S. S., Abdyukhanov, I., Abelleira Fernandez, J., Abramov, A., ... & Biscari, C. (2019). FCC-ee: the lepton collider. *The European Physical Journal Special Topics*, 228(2), 261-623.

Abada, A., Abbrescia, M., AbdusSalam, S. S., Abdyukhanov, I., Abelleira Fernandez, J., Abramov, A., ... & Biscari, C. (2019). FCC-hh: The hadron collider. *The European Physical Journal Special Topics*, 228(3), 755-1107.

Abashian, A., Gotow, K., Morgan, N., Piilonen, L., Schrenk, S., Abe, K., ... Wang, M. Z. (2002). The Belle detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 479(1): 117–232. doi: 10.1016/S0168-9002(01)02013-7.

Agostinelli, S., Allison, J., Amako, K. A., Apostolakis, J., Araujo, H., Arce, P., ... Zschesche, D. (2003). GEANT4-a simulation toolkit. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 506(3): 250–303. doi: 10.1016/S0168-9002(03)01368-8.

Agostini, P., Aksakal, H., Alekhin, S., Allport, P. P., Andari, N., Andre, K. D. J., ... & Korostelev, M. (2021). The large hadron–electron collider at the HL-LHC. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 48(11), 110501.

Akrawy, M., Arnison, G. T. J., Batley, J. R., Bell, K. W., Brown, R. M., Carter, A. A., ... Ward, C. P. (1990). Development studies for the OPAL end cap electromagnetic calorimeter using vacuum photo triode instrumented leadglass. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 290(1): 76–94. doi: 10.1016/0168-9002(90)90346-8.

Alavi-Harati, A., Albuquerque, I. F., Alexopoulos, T., Arenton, M., Arisaka, K., Averitte, S., ... KTeV Collaboration. (1999). Observation of Direct CP Violation in $K_S, L \rightarrow \pi \pi$ Decays. *Physical Review Letters*, 83(1): 22. doi: 10.1103/PhysRevLett.83.22.

Altegoer, J., Anfreville, M., Angelini, C., Astier, P., Authier, M., Autiero, D., ... Vo, M. K. (1998). The NOMAD experiment at the CERN SPS. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 404(1): 96-128. doi: 10.1016/S0168-9002(97)01079-6.

André, K. D. J., Bella, L. A., Armesto, N., Bogacz, S. A., Britzger, D., Brüning, O. S., ... & Yamazaki, Y. (2022). An experiment for electron-hadron scattering at the LHC. *The European Physical Journal C*, 82(1), 1-26.

Antcheva, I., Ballintijn, M., Bellenot, B., Biskup, M., Brun, R., Buncic, N., ... & Tadel, M. (2009). ROOT—A C++ framework for petabyte data storage, statistical analysis and visualization. *Computer Physics Communications*, 180(12), 2499-2512.

Aubert, B., Polychronakos, V., Beaugiraud, B., Ferrari, A., Gianotti, F., Fuglesang, C., ... & Iconomidou-Fayard, L. (1990). *IR&D; proposal: liquid argon calorimetry with LHC-performance specifications* (No. CERN-DRDC-90-31).

Balka, L., Coover, K., Diebold, R., Evans, W., Hill, N., Nodulman, L., ... Mikamo, S. (1988). The CDF central electromagnetic calorimeter. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 267(2-3): 272-279. doi: 10.1016/0168-9002(88)90474-3.

Bebek, C. (1988). A cesium iodide calorimeter with photodiode readout for CLEO II. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 265(1-2): 258-265. doi:10.1016/0168-9002(88)91079-0.

Benedikt, M., & Zimmermann, F. (2016). Towards future circular colliders. *Journal of the Korean Physical Society*, 69(6), 893-902.

Bertolucci, S., Cordelli, M., Esposito, B., Curatolo, M., Giromini, P., Miscetti, S., ... Kautzky, H. (1988). The CDF central and endwall hadron calorimeter. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 267(2-3): 301-314. doi: 10.1016/0168-9002(88)90476-7.

Boutigny, D., Goy, C., Karyotakis, Y., Lees, J. P., Lees Rosier, S., Evangelista, C., ... Mallik, U. (1995). BaBar technical design report. Erişim adresi: <http://www.slac.stanford.edu/cgi-wrap/getdoc/slac-r-457.pdf>

Brun, R. ve Rademakers, F. (1997). ROOT-an object oriented data analysis framework. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 389(1-2): 81-86. doi: 10.1016/S0168-9002(97)00048-X.

Cem, S. (2006). NATIONAL GRID INITIATIVE IN TURKEY TR-Grid. *EGI SEE Workshop*, Athens, Greece, 11 pp. Access address: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjWlrT28vxAhVgg_0HHf9A_EQFjAAegQIBxAD&url=https%3A%2F%2Findico.cern.ch%2Fevent%2F429895%2Fcontributions%2F1064295%2Fattachments%2F927066%2F1312393%2FTRGrid_Initiative_StatusApril_2006.pdf&usg=AOvVaw0x45fJIEsEY1E8B_gasmGGP.

CMS collaboration. (1997). The CMS electromagnetic calorimeter project. *Technical Design Report CMS*, CERN/LHCC 97-33, *CMS TDR*, 4.

CMS collaboration. (2017). Particle-flow reconstruction and global event description with the CMS detector. *arXiv preprint arXiv:1706.04965*.

Crystal Ball function. (2022, 15 Kasım). In Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Crystal_Ball_function.

Dumanoğlu, İ. (2012). Parçacık Fiziğinde Kalorimetreler [Conference presentation]. Çukurova Üniversitesi, Adana, Turkey.

Dylewsky, D. (2014). *Assessing Calorimeter Requirements for a 100 TeV Future Collider With Reference to New Physics Benchmarks* (No. Cern-Students-Note-2014-044).

ENO, S. (2020, Aug 13,14). Calorimeters for high energy colliders: Hadron Collider Physics Summer School [Conference presentation].

Fabjan, C. W., & Gianotti, F. (2003). Calorimetry for particle physics. *Reviews of Modern Physics*, 75(4): 1243. doi:10.1103/RevModPhys.75.1243.

Fabjan, C. W., & Schopper, H. (Eds.). (2020). *Particle Physics Reference Library: Volume 2: Detectors for Particles and Radiation* (Vol. 2). Springer Nature.

Fanti, V., Lai, A., Musa, L., Nappi, A., Setzu, M., Moore, R.W.,... Taurok, A. (1999). A measurement of the transverse polarization of Λ -hyperons produced in inelastic p N-reactions at 450 GeV proton energy. *The European Physical Journal C-Particles and Fields*, 6(2): 265–269. doi: 10.1007/s100529801045.

Frass, W., & Wlaczak, R. (2009). Particle detectors, *Oxford Physics*.

Gaiser, J. (1982). *Charmonium spectroscopy from radiative decays of the J/ψ and ψ* (Ph. D Thesis). SLAC-0255 (p. 88). UMI-83-14449-MC.

Gautheron, F. ve Givernaud, A. (1997). About the electromagnetic shower lateral profile in the Lead Tungstate. Technical report. CERN. Geneva. (Report number: CMS-NOTE-1997-037), erisim adresi: <https://cds.cern.ch/record/687307>.

Group, T. Z. C., Behrens, U., Crittenden, J., Dierks, K., Drews, G., Engelen, J., ... Youngman, C. (1990). Test of the ZEUS forward calorimeter prototype. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 289(1–2): 115–138. doi: 10.1016/0168-9002(90)90253-3.

Gruppen, C., & Schwartz, B. (2008). Particle detectors. Cambridge Monographs on Particle Physics, Nuclear Physics and Cosmology. 2 edn. Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511534966.

Jönsson, L. (2010). *Lectures in Particle physics*. Lunds universitet.

Koçak, F. (2010). *Kalorimetrede enerji çözünürlüğü [Energy resolution in calorimeter]*. (Ph.D. Thesis), Institute of Natural and Applied Sciences, Uludag University, Bursa, Turkey. Erişim adresi:

<https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=iTkOhwevEenJZ3onUvs52g9T858WZHDJyslBJHPTZRNNFo43NuGQFDkWAJSFtyCG>.

Kocak, F. (2015). Simulation studies of crystal-photodetector assemblies for the Turkish accelerator center particle factory electromagnetic calorimeter. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 787, 144-147.

Kocak, F. (2015). A Monte Carlo Study on Position Resolution of PWO Crystal. *Süleyman Demirel University Journal of Natural and Applied Sciences.*, 21(2): 296–298. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/en/pub/sdufenbed/issue/34634/382548>.

Kocak, F., & Tapan, I. (2017). Simulation of LYSO crystal for the TAC-PF electromagnetic calorimeter. *Acta Physica Polonica A*, 131(3): 527–529. doi:10.12693/APhysPolA.131.527.

Kostka, P. Polini, A. Yamazaki, Y. (2022, Oct 27). The LHeC and FCC-eh Detector Design: The LHeC/FCCh and PERLE Workshop at Orsay [remote presentation]. (Kobe University). IJCLab-Orsay, France.

Lee, S., Livan, M., & Wigmans, R. (2018). Dual-readout calorimetry. *Reviews of Modern Physics*, 90(2), 025002.

Moser, H. G. (2009). Silicon detector systems in high energy physics. *Progress in particle and nuclear physics*, 63(1), 186-237. doi:10.1016/j.pnpnp.2008.12.002

Oreglia, M. J., & AOL, M. (1980). A STUDY OF THE REACTIONS+’+ WI.

Poggiani, R. (2017). *High Energy Astrophysical Techniques*. UNITEXT for Physics. Springer. doi: 10.1007/978-3-319-44729-2.

ROOT, D. I. A Root Guide For Beginners. Erişim adresi: <https://root.cern.ch/root/html/doc/guides/primer/ROOTPrimerLetter.pdf>.

Ruan, M. (2016). Higgs measurement at e+ e-circular colliders. *Nuclear and particle physics proceedings*, 273, 857-862.

Saad, A., Kocak, F. ve Kırca, Z. (2019). The impact of crystal length on calorimeter energy resolution. In AIP Conference Proceedings. Vol. 2178. AIP Publishing LLC. p. 030045. doi: 10.1063/1.5135443.

Saad, A. ve Kocak, F. (2020). Evaluation of energy resolution by changing angle and position of incident photon in a LYSO calorimeter. *Acta Physica Polonica B*, 51(11): 2097. doi: 10.5506/aphyspolb.51.2097.

Schulte, D. (2017). FCC-hh design highlights. *ICFA Beam Dyn. Newsl.*, 72, 99-109.

Sébastien, L. (2020). A practical introduction to the Geant4 Monte Carlo simulation toolkit. University of Bordeaux 1, Centre of Nuclear Studies of Bordeaux-Gradignan (CENBG), Lecture Notes: Bordeaux, France, 24 p. Erişim adresi: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUK EwiUiJyd4NDyAhUBs6QKHXFBBY4QFnoECAIQAQ&url=https%3A%2F%2Findico.in2p3.fr%2Fevent%2F147%2Fcontributions%2F19459%2Fattachments%2F15853%2F19456%2FGeant4-S.Incerti.doc&usg=AOvVaw3Z6uq8MpHeMONXH_1P9jKI (visited on 4.1. 2020).

Skwarnicki, T. (1986). A study of the radiative CASCADE transitions between the Upsilon-Prime and Upsilon resonances (Ph. D Thesis). *University of Cracow*, 106.

Speckmayer, P., & Grefe, C. (2012). *Comparison of the Performance of Tungsten and Steel Hadronic Sampling Calorimeters* (No. LCD-Note-2010-001).

Türk-Çakır, İ., Sarpün, İ. H. (2019). FCC Physics, Detector and Accelerator @ Antalya. Çalıştay Sonuç Raporu (Evrak Sayısı: 24751). https://ilko.sakarya.edu.tr/dosya/kurum_disi/sau-kurum-disi-dosya-595720653.pdf.

Wigmans, R. (2000). *Calorimetry: Energy measurement in particle physics*. (Vol. 107). Oxford University Press. ISBN: 19 850296 6.

Yahya, M. F. O. (2021). *Position resolution in crystal calorimeter* (Doctoral dissertation, Bursa Uludag University (Turkey)).

Zimmermann, F., Benedikt, M., Schulte, D. ve Wenninger, J., 2014. 5th International Particle Accelerator Conference. Challenges for highest energy circular colliders. JACoW, Dresden.