



T.C.

TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI

YÜKSEK ENERJİ VE PLAZMA FİZİĞİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

**FCC-HH DENEYİNDE ÇOKLU PARTON ETKİLEŞİMLERİNİN
JET ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ KATKISI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ali TOSUN

Danışman: Doç. Dr. Mustafa Numan BAKIRCI

İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İlknur HOŞ

TOKAT - 2022

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım esnasında desteğini ve bilgisini esirgemeyen danışmanım Doç. Dr. Mustafa Numan BAKIRCI ve ikinci danışanım Dr. Öğr. Üyesi İlknur HOŞ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.



JÜRİ KABUL VE ONAY

Ali TOSUN tarafından hazırlanan “**Fcc-hh Deneyinde Çoklu Parton Etkileşimlerinin Jet Özellikleri Üzerindeki Katkısı**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 07/02/2022 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen Jüri tarafından Oy Birliği ile Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Fizik Dalı/ Yüksek Enerji ve Plazma Fiziği Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmzası

Üye (Başkan) : Prof. Dr. Bahtiyar MEHMETOĞLU

.....

Üye : Prof. Dr. İbrahim YİĞİTOĞLU

.....

Üye : Doç. Dr. M. Numan BAKIRCI

.....

Üye : Doç. Dr. Fikret YILMAZ

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi İlknur HOŞ

Online Katıldı

ONAY

...../...../.....

Prof. Dr. Mehmet GÜNEŞ
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ÖZET

FCC-HH DENEYİNDE ÇOKLU PARTON ETKİLEŞİMLERİNİN JET ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ KATKISI

Tosun, Ali

Yüksek Lisans, Fizik Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. M. Numan Bakırcı

İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İlknur Hoş

Şubat 2022, viii + 43 sayfa

Evreni ve yapısını, evrenin başlangıcındaki olayları anlamak için maddenin ve onu oluşturan alt parçacıkların iyi anlaşılması gerekir. Maddenin alt parçacıklarını anlamak için de yüksek enerjilerde çarpıştırıcı deneyleri yapılmaktadır. Geleceğin Dairesel Çarpıştırıcısı (FCC), Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'nda yürütülen araştırmaları genişletmek için daha yüksek performanslı bir parçacık çarpıştırıcısı olarak tasarlanmaktadır. FCC'de proton-proton, ağır iyon, proton-elektron ve elektron-pozitron çarpışmalarının yapılması planlanmaktadır. Kuantum Renk Dinamiği'nde jet yapısının iyi anlaşılması öncelikle hadron yapısının ve parton dağılım fonksiyonlarının türetilmesinde önderlik eder. Çoklu parton etkileşmelerinin araştırılması ise saçılma ürünlerinin sebep olduğu yeni fizik arayışları ve hadron yapısının daha iyi anlaşılması için oldukça önemlidir. Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi (CERN)'ndeki deneylerde toplanan veriler ışığında jet analizleri ve jet analizleri üzerindeki etkiler araştırılmaktadır. Fakat CERN hızlandırıcıları ve dedektör yapıları gereği çok yüksek kütle merkezi enerjilerine çıkamayacağı için Geleceğin Dairesel Hızlandırıcısı (FCC) tasarlanmaktadır. Bu hızlandırıcı ile 100 TeV kütle merkezi enerjilerinde hadron-hadron çarpışmaları gerçekleştirilerek yeni fizik analizleri ile hadron yapısı incelenecektir. Bu tez çalışması ile çoklu parton etkileşmelerinin jet özellikleri üzerindeki etkileri incelenerek gelecekte yapılacak olan fizik analizlerine bir öngörü hazırlanmaya çalışılacaktır. Bu tez çalışmasında Quark ve gluonların deneysel imzaları olan jet özellikleri incelenerek ve sert saçılma dışında kalan etkileşmelerin (Çoklu Parton Etkileşmeleri -MPI) jetler üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

ANAHTAR KELİMELEER: CERN, Çoklu Parton Etkileşimleri, (FCC) Geleceğin Dairesel Çarpıştırıcısı, Parton Jetleri

ABSTRACT

Tosun, Ali

Master's Thesis, Departement of Physics

Advisor: Assoc. Prof. Dr. M. Numan Bakırcı

Second Advisor: Asst. Prof. Dr. İlknur Hoş

February 2022, xiii + 43 pages

In order to understand the universe and its structure, and the events at the beginning of the universe, it is necessary to have a good understanding of matter and its sub-particles. Collider experiments are carried out at high energies to understand the sub-particles of matter. The Future Circular Collider (FCC) is being designed as a higher-performance particle collider to extend research conducted at the Large Hadron Collider. In FCC, proton-proton, heavy ion, proton-electron and electron-positron collisions are planned.

A good understanding of the jet structure in Quantum Color Dynamics primarily leads to the derivation of the hadron structure and parton distribution functions. Investigation of multiple parton interactions is very important for new physics searches caused by scattering products and for a better understanding of hadron structure. In the light of the data collected in the experiments at CERN, jet analyzes and the effects on jet analyzes are investigated. However, since CERN accelerators and detectors cannot reach very high center of mass energies due to their structure, the Future Circular Collider (FCC) is being designed. Hadron-hadron collisions with this accelerator will be performed at 100 TeV center of mass energies, and the hadron structure will be examined with new physics analyses. In this thesis, the effects of multiple parton interactions on jet properties will be examined and a prediction will be made for future physics analyzes.

The effects of non-hard scattering interactions (Multiple Parton Interactions -MPI) on jets were investigated by examining the jet properties, which are the experimental signatures of quarks and gluons.

KEYWORDS: CERN, Future Circular Collider, Multiple Parton Interactions, Parton Jets

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmalarım süresince desteğini esirgemeyen danışman hocalarım Doç.Dr. Mustafa Numan BAKIRCI ve Dr. İlknur HOŞ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ali TOSUN

Aralık-2021



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	viii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER.....	3
2.1. Parçacık Fiziğinin Tarihçesi	3
2.2. Standart Model ve Standart Model Ötesi Teoriler	5
2.2.1. Standart model	6
2.2.2. Standart model ötesi teoriler	9
2.3. Parçacık Hızlandırıcıları	10
2.3.1. Elektrostatik hızlandırıcılar.....	10
2.3.2. Cockroft – Walton hızlandırıcısı.....	10
2.3.3. Van de Graff hızlandırıcısı	11
2.3.4. Radyo frekans hızlandırıcılar.....	12
2.4. Kuantum Renk Dinamiği (KRD).....	13
2.5. Hadronizasyon	17
2.6. Çoklu Parton Etkileşmesi (MPI).....	18
2.7. Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (BHÇ)’nda Yapılan Deneyler.....	18
2.7.1. ALICE deneyi	19
2.7.2. ATLAS deneyi.....	20
2.7.3. CMS deneyi	21
2.7.4. LHCb deneyi.....	21
3. MATERYAL ve YÖNTEM	22
3.1. Geleceğin Dairesel Çarpıştırıcısı (GDÇ)	22
3.1.1. FCC-hh detektörü	23
3.1.2. FCC-hh genel tasarımı	24
3.2. Jet Yapılandırılması	26

3.6. Monte Carlo (MC) Metodu.....	30
3.7. Pythia	32
3.8. MadGraph	32
3.9. Delphes	33
3.10. PDF Setler	34
3.11. ROOT.....	34
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	35
5. SONUÇ	39
KAYNAKLAR	40
ÖZGEÇMİŞ	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.



SİMGELER VE KISALTMALAR

Kısaltma	Açıklama
BBK	: Büyük Birleşik Kuramlar
FCC	: Future Circular Coolider
GDÇ	: Geleceğin Dairesel Çarpıştırıcısı
KRD	: Kuantum Renk Dinamiği
MC	: Monte Carlo
MPI	: Çoklu Parton Etkileşimleri
SK	: Sicim Kuramı
SM	: Standart Model
SMÖ	: Standart Model Ötesi
SUSY	: Süpersimetri

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Rutherford saçılma deneyi.....	3
Şekil 2.2. Protonun kuark yapısı.....	7
Şekil 2.3. Nötronun kuark yapısı	7
Şekil 2.4. Temel parçacık tablosu.....	8
Şekil 2.5. Cockroft-Walton hızlandırıcısının tasarımı	11
Şekil 2.6. Van de Graff hızlandırıcısı	11
Şekil 2.7. Doğrusal hızlandırıcı şeması	12
Şekil 2.8. Dairesel hızlandırıcı şeması.....	13
Şekil 2.9. α 'nin Q ile değişimi.....	17
Şekil 2.10. Büyük Hadron Çarpıştırıcısının üstten görünümü.....	19
Şekil 2.11. ALICE dedektörü	20
Şekil 2.12. ATLAS dedektörü	20
Şekil 2.13. CMS dedektörü.....	21
Şekil 3.1. GDÇ'nin üstten görünümü	22
Şekil 3.2. FCC-hh simülasyon tasarımı	24
Şekil 3.3. Çarpışma sürecindeki jet bölümleri	26
Şekil 3.4. Farklı jet kümeleme algoritmalarından oluşan jet şekilleri	30
Şekil 3.5. Infrared ve Collinear güvenliğinin jet yapısı.....	30
Şekil 3.6. MC olay üreticisi ile pp çarpışmasının simülasyonu.....	31
Şekil 4.1. Olay üretimi sırasında elde edilen alt süreçlerin bilgisi	36
Şekil 4.2. Olay üretimi sırasında elde edilen alt süreçlerin bilgisi	36
Şekil 4.3. Detektör seviyesinde jetlerin Psüdorapidite, Phi ve pT dağılım grafiği.....	37
Şekil 4.4. Üretim seviyesinde jetlerin Psüdorapidite, Phi ve pT dağılım grafiği	37
Şekil 4.5. Detektör seviyesi ve üretilmiş jet seviyelerinin pT dağılımları.....	38

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Temel kuvvetler ve kuvvet taşıyıcı parçacıkların özellikleri)	5
Çizelge 3.1. GDÇ ile BHÇ'nin bazı özelliklerinin karşılaştırılması.....	23
Çizelge 4.1. Olay üretimindeki temel nicelikler	35



1. GİRİŞ

Evreni anlama ve yorumlama serüveni milattan öncesine kadar gider. Atom kavramını ilk olarak ortaya atan Democritus'dur. Atom kelimesi Eski Yunancadan gelip bölünmez anlamına gelmektedir. Modern bilimsel yöntemlerin gelişimine ve keşiflerden öncesine kadar her şeyin en küçüğü ve bölünemez olarak kabul edilen atom; modern deneysel yöntemlerin keşfinden sonra aslında bölünebilir olduğu matematiksel ve deneysel yöntemler ile gösterilmiştir. Günümüzde atom altı parçacıkları, etkileşimlerini ve maddenin neyden meydana geldiğini incelemek için çeşitli hızlandırıcılar geliştirilmiştir. Bunların en büyüğü Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi (CERN)'dir. Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi'nde Standart Model ve Standart Model ötesi araştırmaları yapmak için deneyler geliştirilmiştir.

Parçacık fiziğinde ileri araştırmalar yapmak için daha yüksek enerjilerde çarpıştırıcılara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada gelecekte yapılması planlanan Geleceğin Dairesel Çarpıştırıcısı'nda (GDÇ-Future Circular Collider (FCC)) parton etkileşimlerinin özellikleri üzerindeki katkısına bakılarak, hızlandırıcı yapımına katkı yapılması hedeflenmektedir.

Bu tez çalışmasında simülasyon verisi; proton-proton demetlerinin FCC-hh parametreleri kullanılarak 100 TeV kütle merkezi enerjisinde çarpıştırılarak olaylar üretilip üretilen bu olayların analizi yapılmıştır. Madgraph içerisinde hadronizasyonu sağlamak için Pythia-8 ve FCC simülasyonu için Delphes kullanılmıştır. 100 TeV'de çoklu parton etkileşimlerinin katkısının olduğu ve olmadığı durumlar için olaylar üretilerek jet kinematiği üzerindeki etkilerine bakılmıştır.

Tez çalışmasının;

- 1.bölümünde parçacık fiziği ile ilgili genel bir tanıtım yapılmıştır.
- 2.bölümde parçacık fiziğinin kısa tarihçesi, SM ve SMÖ teorileri, parçacık hızlandırıcıları, CERN'de yapılan deneylerden bahsedilmiştir.
- 3.bölümde GDÇ, FCC-hh Dektörü, Çoklu Parton Etkileşimleri, jetler, Kuantum Renk Dinamiği (KRD), kullanılan programlar ve yöntemlerden bahsedilmiştir.

4. bölümde olayların üretimi ve analizlerinden bahsedilmiştir.

5. bölümde elde edilen sonuçların kapsamlı analizi yapılarak sonuçlar değerlendirilmiştir.

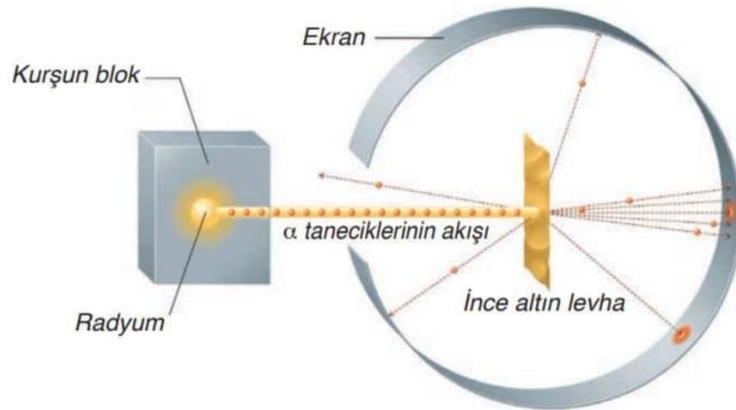


2. GENEL BİLGİLER

2.1. Parçacık Fiziğinin Tarihçesi

Bilim insanlarını en çok cezbeden sorulardan biri de şüphesiz ‘Madde nelerden meydana gelmiştir?’ sorusudur. Bu sorunun cevabı, uzun yıllardır verdikleri uğraşlara rağmen günümüzde halen tam olarak bilim insanları tarafından cevaplanabilmiş değildir. Elementlerin yapısını anlamamıza olanak sağlayan Röntgen’in 1895’de X ışınlarını, Becquerel’in 1896’da radyoaktiviteyi ve 1897’de J.J. Thompson’ın elektronu keşfetmesiyle bir serüven başlamıştır. Daha sonrasında Kuantum mekaniğinin keşfine sebep olan 1900’de Max Planck’ın siyah cisim ışımasıdır. Artık Fizik için keskin iki kavram ortaya çıkmıştır. Bu kavramlar klasik fizik ve modern fizik’tir. Klasik fizik büyük parçacıklar için bize hesaplama ve öngörü sağlarken kuantum mekaniği temelinde olan modern fizik ise küçük parçacıkları yani atom altı parçacıklarında öngörü ve hesaplama olanağı sağlamıştır.

1911’de Rutherford ve arkadaşları altın levhaya alfa parçacıklarını göndererek bunun sonucunda meydana gelen saçılmaları incelemiştir. Şekil 2.1’de deneyin bir şeması gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Rutherford saçılma deneyi

Rutherford ve arkadaşları alfa parçacıklarını altın levhaya gönderdiklerinde yollarından saptıkları ve saçılmaya uğradıklarını fark ettiler. Alfa parçacığının kütlesi elektronun kütlesinin yaklaşık olarak 7200 kat daha büyük olduğundan geri saçılma durumunun

gerçekleşebilmesi için gelen parçacık gibi çok büyük bir artı yüke sahip olması gerekiyordu. Bu durumu, atomun merkezinde büyük bir artı yüke ve kütleye sahip çekirdek, etrafında ise dönen elektronlar kuramı ile açıkladılar.

1932 yılında Chadwick'in nötronu keşfetmesiyle kabaca atomun yapısı hakkında bilinmeyen temel yapılar keşfedilmiş oldu. Temel parçacık fiziği Nükleer fizikten doğar. Parçacık fiziği için önemli bir kuram 1935'de Yukawa tarafından mezon hipotezi olarak gelmiştir. Nükleon kuvvetinin, nükleonlar arasında kütleli bir bozonun değiş-tokuşu sonucu olabileceğini keşfetmiştir (WILLIAMS W. , 2014). Yani değiş tokuş yapan bir parçacık önerdi. Bu parçacığın pek çok özelliğinin açıklanamamasıyla birlikte kütlesi, proton ve elektronun kütlesi arasında olmalıydı. Bu nedenden dolayı orta ağırlıklı (mezon) olarak isimlendirildi. Parçacık fiziği için diğer önemli bir keşif 1946'da Powel ve arkadaşları tarafından keşfedilen pi- mezonlarıydı. Yukawa, bozonu deneysel olarak gösterilmesi için yüksek enerjilerde çarpışmalar yapılmalıydı. Bu çarpışmalar o dönemde hızlandırıcılar tasarlanmadığı için sadece atmosfer dışında kozmik ışımalarda gözlemlenebilirdi. Powel ve arkadaşları fotoğrafik emülsiyonlardan geçen yüksek enerjili parçacıkları gözlemlmeleri sonucu Yukawa'nın öne sürdüğü bozonun pi-mezonu olduğunu keşfettiler.

Serbest elektronları tanımlayan denklemi 1927 yılında Dirac önermiştir. Dirac denklemine göre her pozitif enerji değerine karşılık bir negatif enerji değeri meydana gelmeliydi. Başlangıçta bir sorun gibi gözükse de Anderson'un pozitronu yani elektronun anti parçacığını keşfetmesi ile açıklığa kavuşmuştur. Daha sonraki süreçlerde anti-proton ve anti-nötron keşfedilmiştir. 1930'da Pauli tarafından nötrino parçacığı önerilmiştir. Nötrinoların çekirdek bozunumlarında ortaya çıkabileceğini öngörmüştür. Nötrinolar elektrik yükü olmayan, atom altı etkileşimleri çok zayıf olduğu için gözlemlenmesi çok zor olan parçacıklardır. Rochester ve Butler sis odasında elde ettikleri izleri analiz ettiklerinde π^+ ve π^- mezon çiftlerini keşfetmiş oldular. 1949 yılında daima çiftler halinde üretilen acayip parçacık kavramı ortaya atılmıştır. Bu ilk acayip parçacık K^0 dır. Gell-Mann 1959'da acayıplık sayısını kullanarak bir formül geliştirmiştir. Gell-Mann atom altı parçacıklarının bir arada bulunduğu sekiz katlı yolu önerdi. Gell-Mann acayıplık sayısına göre baryon ve mezonları bir geometrik desen üstüne yerleştirmiştir. Yerleştirdiği bu parçacıkların daha temel bileşenleri olabileceğini öne sürerek kuark

kavramını öne sürmüştür. Greenberg 1964’de Pauli dışarlama ilkesine uyması için kuarkların renk yükü taşıması gerektiğini önermiştir. Atom altı parçacıkları ve özelliklerini açıklamak için Standart Model (SM) kullanılmaktadır. Bölüm 2.2’de SM ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır.

2.2. Standart Model ve Standart Model Ötesi Teoriler

Doğada dört temel etkileşim bulunur. Bunlar; güçlü, elektromanyetik, zayıf ve kütle çekim etkileşimleridir. Güçlü, elektromanyetik ve zayıf etkileşim küçük parçacıklar arasında gözlemlenirken kütle çekimi büyük cisimler arasında gözlemlenir. Temel etkileşimleri etki şiddetine göre sıralayacak olursak; $10, 10^{-2}, 10^{-5}$ ve 10^{-39} mertebesinde olur (Griffiths, 1987). Çizelge 2.1’de etkileşmelerin bir karşılaştırılması verilmiştir.

Çizelge 2.1. Temel kuvvetler ve kuvvet taşıyıcı parçacıkların özellikleri (Çiçek, 2019)

Kuvvet Türü	Etki Alanı	Bağıl şiddeti	Menzil	Parçacığı	Kütlesi
Kütle çekim kuvveti	Kütle	10^{-38}	-	Graviton	0 MeV
Zayıf kuvvetler	Lepton Mezon Baryon	10^{-4} 10^{-10} 12	$<10^{-17}$ m	W-parçacığı Z- parçacığı	81 000 MeV 93 000 MeV
Elektromanyetik kuvvetler	Yüklü parçacıklar	10^{-2}	-	Foton	0 MeV
Güçlü kuvvetler	Baryon Mezon (Hadronlar)	1	10^{-15} m	Gluon	140 MeV

Kütle çekim kuvveti; kuvvetler arasında en zayıf olan kuvvettir. Kütleyle sahip cisimler arasında meydana gelir. Kütle çekimine aracılık eden parçacık gravitondur. Maddeyi gezegenler, yıldızlar ve gökadalarda toplar (Beiser, 2008).

Zayıf kuvvetler; çekirdeğin ortalama boyutlarında etkili olan kuvvettir. Kararsız atom çekirdeklerinde radyoaktifliğe sebep olur. Bu kuvvet sürekli etkin olmamakla birlikte belirli parçacık çarpması ve bozunması sırasında etkili olur. Kuark ve leptonların

dönüşümlerine yol açmaktadır. Bununla birlikte atom çekirdeklerinin bileşimlerinin belirlenmesine aracılık yapar (Beiser, 2008). Kuvvet taşıyıcı parçacığı W ve Z bozonlarıdır.

Elektromanyetik kuvvetler; yüklü parçacıkların birbirini itmesi ya da çekmesi şeklinde uyguladıkları, yüklerinden dolayı ortaya çıkan kuvvettir. Çekirdek ve elektron arasında oluşan Coulomb kuvveti elektromanyetik kuvvete örnek verilebilir. Bu kuvvet zayıf kuvvete göre küçük, kütle çekim kuvvetine göre ise büyüktür. Bu kuvvet sayesinde çekirdek etrafındaki elektronları çeker. Aksi halde molekül ve daha büyük canlı ve cansız maddeler oluşmazdı. Kuvvet taşıyıcı parçacığı fotondur.

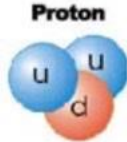
Güçlü kuvvetler; çekirdekteki tüm parçacıkları bir arada tutan kuvvettir. Yani proton ve nötronları bir arada tutarak dağılmalarını önler. Başka bir deyişle nükleonları oluşturmak üzere kuarkları bir arada tutar. Etkisi kısa mesafelidir. Kuvvet taşıyıcı parçacığı gluondur.

2.2.1. Standart model

Elementlerin periyodik tabloda sınıflandırıldığı gibi atom altı parçacıklar da sınıflandırılarak standart model oluşturulmuştur. Standart model temel parçacıkları ve arasındaki etkileşimleri açıklayan bir model olup parçacık fiziği için karmaşık durumların bir kısmını ortadan kaldırmıştır. Temel kuvvetlerin her biri bir taşıyıcı parçacık ile taşınmaktadır (Kibar, 2008). Standart model 3 temel kuvvet arasındaki ilişkiyi açıklarken bu kuvvetlerin kütle çekim kuvveti ile ilişkisini açıklayamamaktadır. Elektrozayıf kuvvet kuramı elektromanyetik ve zayıf kuvvet kuramlarının birleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Bu kuram W ve Z bozonlarının nasıl kütle kazandığını aynı zamanda fotonun nasıl kütesiz olduğunu açıklayamıyordu. Peter Higgs ve arkadaşlarına göre maddeye kütle kazandıran bir mekanizma olması gerekiyordu. 2012’de de Higgs bozonu CERN’de deneysel olarak gözlenmiştir. Higgs bozonunun yaklaşık ağırlığı $125 \text{ GeV}/c^2$ dir.

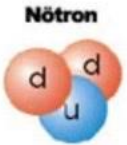
Temel parçacıklar kendisini meydana getiren alt parçacıkları olmayan parçacıklardır. Bunlar ; kuarklar, leptonlar ve bozonlardır.

Kuarklar: altı kuark ve anti-kuark vardır; yukarı (up), aşağı (down), tılsım (charm), acayip (strange), üst (top) ve alt (bottom) şeklinde sıralanabilirler. Üç tane kuarkın bir araya gelmesiyle baryonlar, bir kuark ve bir anti-kuark'ın bir araya gelmesiyle mezonlar meydana gelmektedir. Proton ve nötron üç kuarktan meydana geldiği için baryondur.



Şekil 2.2. Protonun kuark yapısı (maddeveevren.tumblr.com, 2021)

İki up kuark ve bir down kuark bir araya gelirse protonu meydana getirir. Kuarkların yükleri toplanırsa protonun elektrik yükü +1 olur.

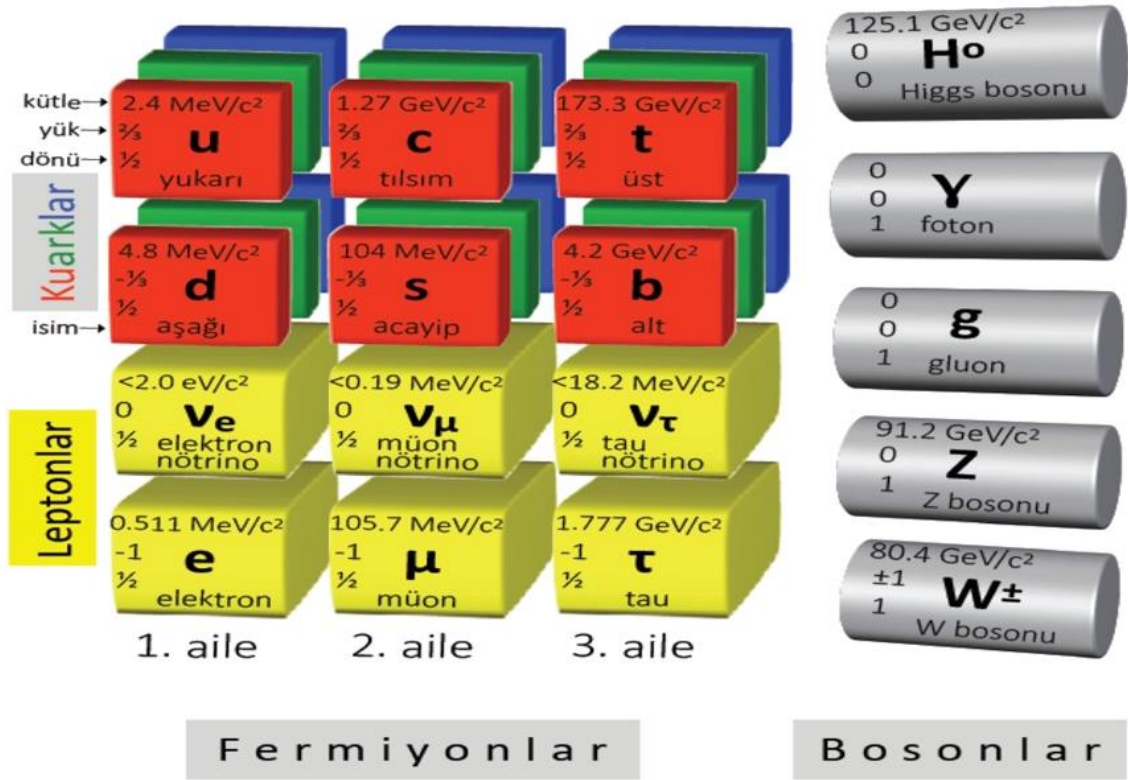


Şekil 2.3. Nötronun kuark yapısı (maddeveevren.tumblr.com, 2021)

İki down kuark ve bir tane up kuarkın biraraya gelmesi ile nötron meydana gelir. Nötronda kuarkların elektrik yükleri toplamı 0 dır.

Mezonlar kuark ve antikuarktan meydana gelir. Tamsayı spinlerine sahiptir. Kuarkları ve antikuarkları zıt renk yüküne sahip oldukları için mezon renksiz bir nesnedir. Mezonlar; rho parçacığı (ρ), eta parçacığı (η), omega parçacığı (ω), kappa parçacığı (K) ve pionlar (π) dır.

Leptonlar: elektron, müon, tau ve bunların nötrinoları olan elektron nötrinosu, müon nötrinosu ve tau nötrinosudur. Bunların içerisinde madde yapısında yer alan sadece elektrondur. Çünkü müon, tau, müon nötrinosu, tau nötrinosu kararsızdır. Leptonlar sadece fotonlar ve zayıf etkileşimlere aracılık eden bozonlarla etkileşir (Weinberg, 1967).



Şekil 2.4. Temel parçacık tablosu (Özcan, 2021)

Şekil 2.4'e göre yani standart model gösterilmiştir. Altı tane kuark ve kuarklar renk yükü taşıdıkları için renk yükleri ile beraber 18 tanedir. Her bir kuarkın antiparçacığı da olduğu için toplamda 36 tane kuark vardır. Yani 36 kuark (6 kuark+6 anti kuark) $\times 3$ dür. Leptonlar; toplamda 12 tanedir. Elektron, müon, tau ve nötrinoları ile beraber 6 tanedir. Anti-parçacıkları ile beraber de 12 tane (6lepton+6antilepton) olmaktadır. Glounlar renk kombinasyonlarından dolayı 8 tanedir. Bunun ile beraber W^+ , W^- , Z, foton ve Higgs bozonlarını da hesaba katarsak 13 tanede bozon vardır. Doğada toplam 61 tane şu ana kadar keşfedilmiş temel parçacık vardır.

Standart model parçacıkları ve etkileşimleri gibi birçok özelliği açıklasa da açıklayamadığı bazı konular bulunmaktadır.

- Lepton ve kuark ailelerinin yapısı hakkında bilgi vermemesi
- Kütle çekim kuvvetini içermemesi
- Karanlık madde ve karanlık enerjiyi açıklayamaması
- Nötrinoların kütlelerinin neden bu kadar küçük olduğunu açıklayamaması

- Evrendeki madde - anti-madde asimetrisi

Yukarıdaki sebeplerden ötürü daha fazla cevap bulmak için Standart Model Ötesi (SMÖ) teorilere ihtiyaç duyulmaktadır.

2.2.2. Standart model ötesi teoriler

Standart modelin cevap veremediği sorulara cevap bulmak için yani atom altı dünyasını daha iyi dolayısıyla evreni daha iyi analiz edebilmemize olanak tanıyan bazı Standart Model Ötesi (SMÖ) teoriler aşağıda kısaca bahsedilmiştir.

Süpersimetri (SUSY): Bozonlar ve fermiyonlar arasında yeni bir simetri kurmaktadır. Bu modelde birçok yeni parçacığın varlığı öngörülür (Adıgüzel, 2007). Bozonlar tam spinli fermiyonlar ise buçuklu değerde spinli parçacıklardır. Simetri bağıntısını süperleş kavramı ile açıklar. Bozonların süperleşleri fermiyonlar ve fermiyonların süperleşleri bozonlardır.

Büyük Birleşik Kuram: Doğada dört temel kuvvet vardır. Bu kuvvetler adım adım keşfedildikten sonra acaba bu kuvvetlerin birbiri ile ilişkisi nedir soruları bilim insanlarını düşünmeye sevk etmiştir. İlk olarak Maxwell elektrik ve manyetizmayı tek bir etkileşim olan elektromanyetizma olarak açıklamıştır. Sonraki yıllarda elektromanyetizma ve zayıf etkileşme elektrozayıf etkileşme olarak birleştirilmiştir. Büyük Birleşik Kuramda öngörülen dört temel kuvvetin tek bir kuvvet olarak açıklanmasıdır. Bu kurama göre elektrik ve manyetik kuvvetin birleşimi olan elektromanyetik kuvvet ile zayıf kuvvetin birleşimi elektrozayıf, elektrozayıf ve güçlü kuvvetin birleşimi elektronükleer kuvvet, kütle çekimi ile elektronükleer kuvvetin birleşimi de Büyük Birleşik Kuramı oluşturmaktır. Yani her şeyin teorisi; her şeyi tek bir kuvvet ile açıklamayı amaçlamaktadır.

Sicim kuramı: 1960'ların sonunda güçlü nükleer kuvveti anlamak için ortaya atılan bir kuramdır. Nokta benzeri parçacıkları sicim olarak değerlendirmiştir. Sicim teorisi henüz tam olarak formüle edilmemiş ve temel parçacıkların standart modelinin düşük enerjilerde nasıl ortaya çıkması gerektiğine veya evrenin nasıl ortaya çıktığına dair

ayrıntılı bir açıklama vermemektedir. Sicim teorisinin en önemli özelliği genel göreliliğin teoriye doğal olarak dahil edilmiş olmasıdır (Becker, Becker , & Schwarz, 2007).

2.3. Parçacık Hızlandırıcıları

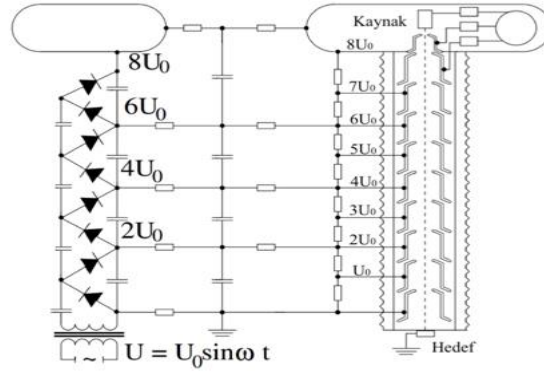
Elektrik ve manyetik alanlardan faydalanarak yüksek enerjili parçacıkları istediğimiz özelliklerde üretmemize olanak sağlayan düzeneklerdir. Ayrıca hızlandırıcı teknolojilerinin kullanımı radyoterapi, nükleer tıp, malzeme bilimi, yarı iletkenler, savunma sanayi, jeoloji gibi yaklaşık 250 alt alanda kullanılmaktadır (Yavaş, 2008).

2.3.1. Elektrostatik hızlandırıcılar

İki paralel levha arasına gerilim uygulandığında arada bir elektrik alan meydana gelir. Bu levhalar arasına yüklü bir parçacık konulduğunda hızlandırılabilir. Bu prensibe dayanan hızlandırıcılar elektrostatik hızlandırıcılardır. En basit elektrostatik hızlandırıcı örneğine akım üreticinin kutbuna bağlı bir çift paralel levhayı verebiliriz. Parçacıkları hızlandırmak için aralarında potansiyel fark olan elektrotlar kullanılır. X-ışını tüpü buna örnek verilebilir. Elektrostatik hızlandırıcı çeşitleri; Cockroft-Walton ve Van de Graaff hızlandırıcılarıdır.

2.3.2. Cockroft – Walton hızlandırıcısı

1928’de John D. Cockroft ve Ernest T.S. Walton tarafından tasarlanmıştır. 1932 yılında protonları 400 keV enerjiye kadar hızlandırmayı başardılar. Şekil 2.5’de tasarımı verilmiştir.

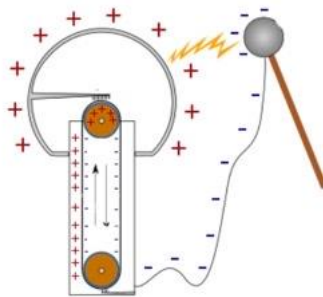


Şekil 2.5. Cockroft-Walton hızlandırıcısının tasarımı (Akgün, ve diğerleri, 2021)

Alternatif akım üreticinin gerilimi diyotlar ve kapasitörlerden oluşan bir devre yardımıyla çoğaltılır. Şekil 2.5’de görüldüğü gibi U_0 alternatif akım üreticinin gerilimi sekiz kat çoğaltılarak doğru akıma çevrilmiştir. Elde edilen yüksek gerilim ile protonlar hızlandırılmıştır.

2.3.3. Van de Graff hızlandırıcısı

1931 yılında Robert J. Van de Graff tarafından geliştirilmiştir. Hızlandırıcı, şekil 2.6’da görüldüğü gibi bir elektrik motoru yardımıyla hareket eden kayış sayesinde elektrik yüklerinin bir küre yüzeyinde biriktirilmesi prensibine dayanır. Küre üzerinde biriken yük miktarı arttıkça kürenin potansiyeli de artmaktadır. Yüksek potansiyellerde yük boşalmasını önlemek için yüksek potansiyel taşıyan kısımları gaz malzemeler kullanılarak yalıtılmak mümkündür.

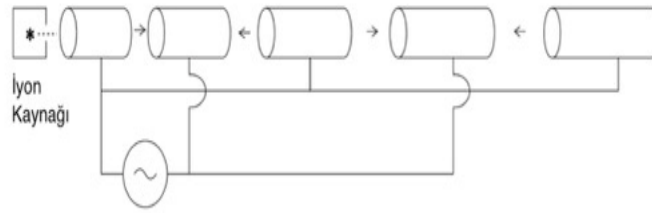


Şekil 2.6. Van de Graff hızlandırıcısı (Halimoğlu, 2018)

2.3.4. Radyo frekans hızlandırıcılar

Elektrostatik hızlandırıcılar ile üreticinin potansiyeline bağlı olarak parçacıkların ulaşabileceği hız sınırlıdır. Buna çözüm olarak hızlandırma işlemlerinde alternatif akım kullanılmaktadır. 3 kHz ile 300 GHz arasında salınım yapabilmektedir. Radyo Frekans Hızlandırıcılarını doğrusal ve dairesel hızlandırıcılar olarak ayırmak mümkündür.

Doğrusal hızlandırıcılar: Parçacıklar doğrusal yörüngede elektrostatik alanlar veya salınımlı RF alanlar ile hızlandırılır. Lineer hızlandırıcılar genellikle linac olarak da adlandırılmaktadır. Linac'da parçacıklar bir doğru boyunca hareket eder. Bu durum siklotron mıknatıslarının büyük maliyetlerini ve manyetik alan ile ilgili olan odaklanamama sorunlarını ortadan kaldırır (Krane, 2002).

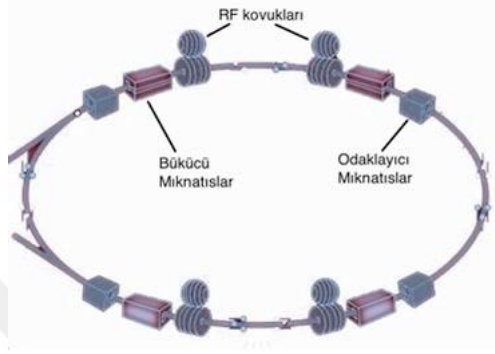


Şekil 2.7. Doğrusal hızlandırıcı şeması (Akgün, ve diğerleri, 2021)

Şekil 2.7'de gösterildiği gibi lineer hızlandırıcılar parçacığın hareket doğrultusu boyunca sıralanmış bir dizi sürüklenme tüplerinden oluşmaktadır. Bu tüpler RF kaynağına bağlıdır. RF yüksek frekansta alternatif voltaj sağlamaktadır. İlk yarım periyotluk sürede birinci sürüklenme tüpüne uygulanan voltaj iyon kaynağını terk eden parçacığı hızlandırır. Demet birinci ve ikinci tüplerin arasına geldiğinde tekrardan hızlanır. Bu şekilde her tüp için tekrarlanmaktadır. Tüp sayısı ne kadar fazla ise parçacık o kadar hızlanmaktadır.

Dairesel hızlandırıcılar: Dairesel hızlandırıcılar daire şeklinde tasarlanan hızlandırıcılardır. Yüklü parçacıkların dairesel bir yörünge üzerinde hızlanmasını sağlarlar. Dairesel hızlandırıcılar bir parçacığı aynı yörünge üzerinde istenildiği kadar hızlandırdığı için kullanımları tercih edilmektedir. Betatron, mikrotron, siklotron ve sinkrotron dairesel hızlandırıcılara örnek verilebilir. Son yıllarda en çok kullanılan

hızlandırıcı tipi döndürgeç (siklotron) ve eşzamanlayıcı (sinkrotron) dur. Burada kısaca eşzamanlayıcı (sinkrotron)'a değinilecektir. Eşzamanlayıcı; manyetik alan altında dairesel bir yörüngede hareket ettirme prensibine dayanmaktadır. Şekil 2.8'de görüldüğü gibi RF kovukları, bükücü mıknatıslar ve odaklayıcı mıknatıs bileşenlerinden oluşmaktadır.



Şekil 2.8. Dairesel hızlandırıcı şeması (Akgün, ve diğerleri, 2021)

RF kovukları; RF kovuklarında bulunan parçacıklar elektrik alan sayesinde hızlandırılır. Hızlandırma işlemi her turda RF kovuğunda tekrarlanmaktadır.

Bükücü mıknatıslar: Bükücü mıknatıslara gelen parçacık hareket yönüne dik bir yönde bir manyetik alan oluşturarak parçacıkların sapmasını sağlar.

Odaklayıcı mıknatıslar: Dairesel hızlandırıcılar da hızlandırma işlemi paketler halinde yapılmaktadır. Bu sebeple aynı yüke sahip parçacıklar birbirini iterler. Bu itme sonucunda demet hareket yönüne dik eksende açılmaya başlar. Eğer bu açılma fazla olursa demet borusuna çarpar. Bu da istenilmeyen bir durumdur. Bunu engellemek için yani parçacıkları demet borusunun merkezinde tutmak için odaklayıcı mıknatıslar kullanılmaktadır. Şekil 2.8'de bu bileşenlerin yerleşim biçimi gösterilmiştir.

2.4. Kuantum Renk Dinamiği (KRD)

Kuantum Renk Dinamiği (KRD), kuarkların ve gluonların etkileşmesini açıklayan kuramdır. Her bir kuark çeşidi için geleneksel kuantum sayıları ile belirlenen ve üç farklı değere sahip renk olarak adlandırılan yeni bir kuantum sayısı tanımlanmıştır. Buna göre

kuarklar mavi(b), yeşil(g) ve kırmızı(r) renk yükünü taşırlar. Elektrik yükünde olduğu gibi renk yükü de korunmaktadır. Karşıt-kuarklar ise karşıt- b , karşıt- g ve karşıt- r renk yüklerini taşımaktadır.

KRD’de kuarklar, glounların değiş tokuşu ile etkileşir (Krone, 2002). Gluonlar kuvvetli renk alanlarının taşıyıcılarıdır. Kuantum renk dinamiğinin dayandığı esas ilke kuarkları tanımlayan alanların değişmez olduğu şartıdır. Kuantum Renk Dinamiği (KRD), güçlü etkileşmeden sorumlu olan spini 1, kütsüz sekiz tane bozonun varlığına işaret eder. Ayar bozonları toplamda 12 tanedir. Bunlar; sekiz tane gluon, W^+ , W^- , Z^0 ve fotondan oluşur (WILLIAMS W. , 2014). Renk yükü taşıyan parçacıklar arasında bu etkileşim gluonlar tarafından yayılmaktadır. Renk yükü taşıyan parçacıklar tek başına serbest olarak bulunmamaktadır. Güçlü etkileşmeyi aracılık eden gluonların da renk yükü taşımasından dolayı Kuantum Renk Dinamiğini anlamak da zorlaşmaktadır. İkili ya da üçlü kuark yapıları, üç farklı renk veya anti-renkle birlikte renksiz hadronu meydana getirmektedir (Öztonga, 2016). Kuantum Renk Dinamiği (KRD), abelyen olmayıp $SU(3)$ ayar alan teorisidir. Kuarklar ve gluonlar arasındaki temel etkileşimleri tanımlamak için Feynman kurallarının türetilbileceği bir langranjiyen yoğunluğu ile türetilebilmektedir (Ellis & Stirling, 1990).

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\alpha\beta}^A F_A^{\alpha\beta} + \sum_{\text{çeşni(flavours)}} \bar{q}_a (i\hat{D} - m)_{ab} q_b \quad (2.1)$$

Kütleli ve spin-1/2 olan kuarklar ile kütsüz ve spini 1 olan gluonlar arasındaki etkileşmeyi tanımlamaktadır. Eşitlikte $\hat{D}$ kovaryant türev, $-\frac{1}{4}F_{\alpha\beta}^A F_A^{\alpha\beta}$ terimi ayar alanlarını içeren kinetik terim, q_a renk grubunun üçlü temsilindeki kuark alanı ve $F_{\alpha\beta}^A$ güçlü etkileşim tensörüdür. $F_{\alpha\beta}^A$ tensörü;

$$F_{\alpha\beta}^A = \partial_\alpha \mathcal{A}_\beta^A - \partial_\beta \mathcal{A}_\alpha^A - gf^{ABC} \mathcal{A}_\alpha^B \mathcal{A}_\beta^C \quad (2.2)$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada $\mathcal{A}_a^A$ gluon alanı, f^{ABC} $SU(3)$ renk grubunun yapı sabitidir ($A, B, C = 1, 2, \dots, 8$ değerlerini alır).

Gluonların etkileşmesinde renk yükünün korunmasından dolayı, her bir gluon kırmızı(k), mavi(m), yeşil(y) olmak üzere üç renk ve karşıt-kırmızı ($\bar{k}$), karşıt-mavi ($\bar{m}$), karşıt-yeşil

($\bar{y}$) olmak üzere üç karşıt-renk bileşeni olacak şekilde renk yüküne sahip olmaktadır. Üç renk ve üç karşıt renkten; $y\bar{y}$, $y\bar{m}$, $y\bar{k}$, $m\bar{y}$, $m\bar{m}$, $m\bar{k}$, $k\bar{y}$, $k\bar{m}$ ve $k\bar{k}$ olmak üzere dokuz çeşit birleşim elde edilmektedir. Ancak doğa da durum böyle değildir. $SU(3)_C$ renk simetrisi bu dokuz durumdan

$$|1\rangle = (k\bar{m} + m\bar{k})/\sqrt{2}$$

$$|2\rangle = -i(k\bar{m} - m\bar{k})/\sqrt{2}$$

$$|3\rangle = (k\bar{m} + m\bar{k})/\sqrt{2}$$

$$|4\rangle = (k\bar{y} + y\bar{k})/\sqrt{2}$$

$$|5\rangle = -i(k\bar{y} - y\bar{k})/\sqrt{2}$$

$$|6\rangle = (m\bar{y} + y\bar{m})/\sqrt{2}$$

$$|7\rangle = -i(m\bar{y} - y\bar{m})/\sqrt{2}$$

$$|8\rangle = (k\bar{k} + m\bar{m} - 2y\bar{y})/\sqrt{6}$$

renk sekizlisi ve

$$|9\rangle = (k\bar{k} + m\bar{m} + y\bar{y})/\sqrt{3}$$

olmak üzere renk teklişi oluşturmaktadır. Sekizli deki her bir durum diğer renk durumlarının oluşturulabileceği bir temel rengi oluştururken tekli durum renk durumuna hiçbir katkı sağlamamaktadır (Sarı, 2013). Bu nedenle sekizli'deki durum birbirinden farklı sekiz çeşit gluona karşılık gelirken, renksiz bir gluon doğada bulunmamaktadır (Greenberg, 2008).

Kuantum Renk Dinamiğinin temel iki özelliği hapsolme ve asimtotik serbestliktir.

Asimtotik serbestlik ve renk hapsolme

Gluonlar renk yükü taşımaktadır. Kuarklar renk yükü taşıyan gluonlar aracılığı ile etkileşmektedir. Derin elastik olmayan çarpışmalarda, kuarkların birbiri ile çok az etkileştikleri ortaya çıkmıştır. Bu durum gluonlar için bir çelişki gibi görünse de 1973

yılında Politzer, Hooft, Gross ve Wilczek, abelyan olmayan ayar teorilerinin buna uygun asimtotik özgürlük denilen bir özellik taşıdığını keşfetmişlerdir. Buna göre küçük mesafelerde kuarklar arasında etkileşme azalmaktadır. Büyük mesafelerde etkileşme kuvveti artmaktadır. Asimtotik serbestlik kuarkların hadron içerisine hapsediğini, ancak mesafe azaldıkça kuarkların serbest parçacık gibi davrandığını söylemektedir. (Yılmazkaya, 2004). Kuarklar arası etkileşme sadece kuarkların renk yüküne bağlı değildir. Aynı zamanda kuarkları çevreleyen gluon bulutunun renk yüküne de bağlıdır. Kuarklar arası mesafe arttıkça gluon bulutunun katkısından dolayı etkileşme şiddeti artmaktadır. Bu özelliğinden dolayı kuark ve gluonların hapsine sebep olmaktadır. Renksiz bir hadronu ayırmak için verilen enerji kuark-antikuark çifti oluşturmaktadır. Oluşan kuark-antikuark hadrondaki kuark ve antikuarklarla birleşerek yeni parçacıklar oluşturmaktadır. Sonuç olarak kuarkları ayırmak için verilen enerji kuark-antikuark çiftinin ayrılmasına değil yeni parçacıkların oluşumuna sebep olduğu için serbest halde gözlenmesini imkânsız hale gelmektedir.

Pertürbatif Kuantum renk dinamiği

Kuantum Renk dinamiği'ne göre, yüksek momentum veya kısa mesafelerde asimtotik serbestlik özelliği sebebiyle kuarklar yaklaşık olarak serbest halde hareket etmektedirler. Bu durumda etkin etkileşme sabiti α_s terimine göre pertürbatif açılım yapılabilmekte ve petürbasyon teorisi geçerli olmaktadır. Çarpışma deneylerinde elde edilen sonuçlara göre güçlü saçılmada, ($Q^2 \rightarrow \infty$) için asimtotik serbestlik limiti sonsuza yaklaşır ve KRD çiftlenim sabiti (α_s) sıfıra yaklaşmaktadır. Yüksek Q^2 değerlerinde meydana gelen küçük çiftlenimler, pertürbatif Kuantum Renk Dinamiği (pKRD)'ni mümkün kılmaktadır (Deniz, 2015). KRD çiftlenim sabiti (α_s)

$$\alpha_s = \frac{12\pi}{(33-2n_f) \log\left(\frac{Q^2}{\Lambda_{QCD}^2}\right)} \quad (2.3)$$

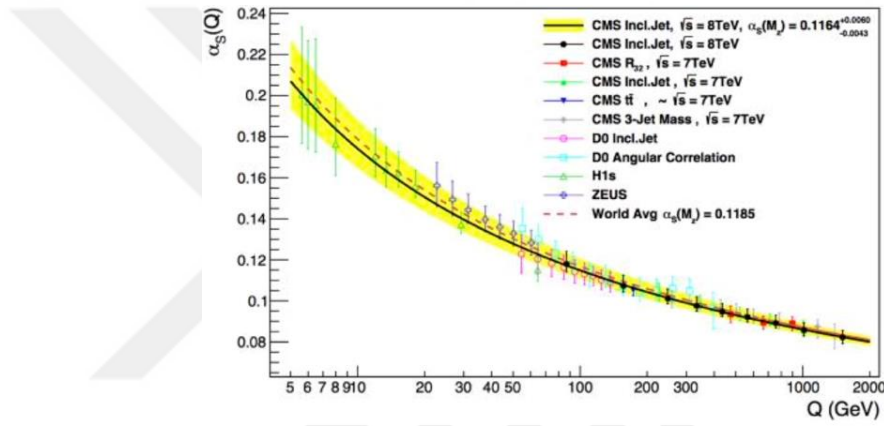
ile verilir. Bu denklemde, Λ_{QCD}^2 deneysel olarak hesaplanan KRD katsayısı, n_f kuark çeşni sayısıdır ve

$$\Lambda_{QCD}^2 = \mu^2 \exp \left(\frac{-12\pi}{(33-2n_f)\alpha_s(\mu)^2} \right) \quad (2.4)$$

ile verilmektedir.

Pertürbatif olmayan Kuantum renk dinamiği

Düşük momentum veya uzun mesafelerde kuark gluon etkileşimleri kuvvetli olmaktadır. Bu durumda α_s değeri artmakta ve pertürbatif olmayan etkiler ortaya çıkmaktadır. Şekil 2.9’da α_s ’nin Q ile değişimi verilmiştir.



Şekil 2.9. α_s ’nin Q ile değişimi (KHACHATRYAN & et, 2015)

2.5. Hadronizasyon

Kuarklar renk hapsinden dolayı tek başına görülemezler. Kuarklar bir araya gelerek renk yükü taşımayan baryon ve mezonları oluşturmaktadırlar. Baryonlar üç kuarkın veya üç atikuarkın bir araya gelmesi ile mezonlar ise bir kuark ve bir anti-kuark’ın bir araya gelmesi ile oluşur. Partonların bir araya gelerek renk yüksüz parçacıklar üretmesi süreci hadronizasyon olarak isimlendirilir.

Protonların içinde bulunan partonlar renk yükü taşımaktadır. Sert saçılmadan sonra partonlar ve protonun geri kalanı arasında renk alanının şiddeti artmaktadır. Renk yükü nötr hale gelene kadar her yeni partonun oluşmasıyla enerjisinin ve momentumun bir kısmını kaybeder. Hadronizasyon sonunda ilk partonlar jetleri oluşturan hadronlar ile sınırlanır (Hoş, 2016)

Sert saçılma sonucunda partonlar, parton sağnağı ile birçok kuark ve gluon meydana getirmektedir. Kuark ve gluonlar bir arada tutulduğu için serbest olarak gözlenmezler. Bu sebepten ötürü dedektör ile gözlemlenmesi ve kararlı durumlara geçişi hadronizasyon süreci ile gerçekleşmektedir.

Yüksek enerjilere çıkıldıkça kuark ve gluon'un bulunma olasılık yoğunluğu olan Parton Dağılım Fonksiyonu (PDF) daha iyi sonuçlar vermektedir. Ayrıca PDF daha iyi sonuçlar vereceği için protonun yapısı daha iyi anlaşılabilir.

2.6. Çoklu Parton Etkileşmesi (MPI)

İki hadron çarpıştığı zaman aslında çarpışan iki partondur (qq , qg , gg). Yüksek enerjili çarpışma deneylerinde sert saçılmaların incelenmesi amaçlanmaktadır. Fakat bunların dışında da saçılmalar meydana gelmektedir. Bu saçılmalar çoklu parton etkileşimleri olarak adlandırılmaktadır. Çoklu parton etkileşimleri doğrudan sert saçılmada rol almayan bir saçılma olarak da tanımlanabilir. Çoklu Parton Etkileşimleri çok sayıda tılsım alt kurak çifti üretmektedir (Enterria & Snigirev, 2018). Çoklu parton etkileşmelerinin temel fikirlerinin büyük bir kısmı Pythia olay üreticisi bağlamında geliştirilmiştir. Bu sayede hem sapma minimum olmakta hem de altta yatan olayların fiziği modellenmektedir. Partonların doğrudan etkileşmesi sonucu W^+ , W^- ve Z bozonlarını meydana getirdiği gibi iki gelen hadronun diğer partonları arasında çoklu parton etkileşmeleri meydana gelebilmektedir (Şen, 2007).

2.7. Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (BHÇ)'nda Yapılan Deneyler

Büyük hadron çarpıştırıcısı Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi'nde (CERN) bulunan İsviçre- Fransa sınırında, yerin 100 metre altındaki dünyanın en büyük dairesel parçacık çarpıştırıcısıdır. Büyük hadron çarpıştırıcısının (LHC) çevre uzunluğu yaklaşık 27 km'dir.

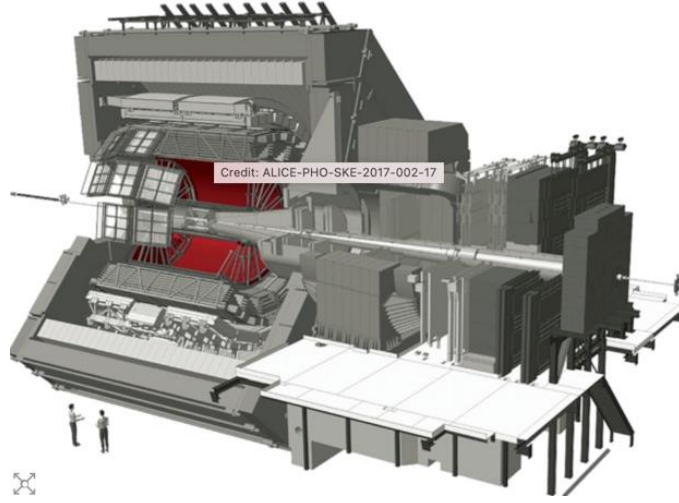


Şekil 2.10. Büyük Hadron Çarpıştırıcısının üstten görünümü (www.merdeka.com, 2021)

BHÇ’de, TeV mertebeli kütle enerjisine sahip protonlar kafa kafaya çarpıştırılmaktadır. Şekil 2.10’da görüldüğü gibi BHÇ’de 4 adet büyük algıç ve pek çok küçük deney bulunmaktadır. Dört büyük algıç CMS, ALICE, ATLAS ve LHCb algıçlarıdır. Bu algıçların merkezinde proton-proton çarpıştırıldığında veriler alınıp analiz edilmektedir. Bu veriler analiz edildikten sonra yeni fizik araştırmalar için kullanılmaktadır.

2.7.1. ALICE deneyi

ALICE deneyi, kuark-gluon plazması ve nükleer sistemlerin daha doğru ölçülmesi için tasarlanmıştır. Şu ana kadar kurşun-kurşun, proton-kurşun, ksenon- ksenon gibi ağır iyon çarpışmaları da gerçekleştirilerek veriler toplanmıştır. Dünya çapında 30 farklı ülkeden 1000’den fazla bilim insanı bu deneyde yer almaktadır. Kuark-gluon plazması ile kuantum Renk Dinamiğinde’ki hapsetme fenomenini daha iyi anlamak için çalışmalar yürütülmektedir. Şekil 2.11’de ALICE detektörünün bir şekli gösterilmiştir.



Şekil 2.11. ALICE dedektörü (cerncourier.com, 2021)

2.7.2. ATLAS deneyi

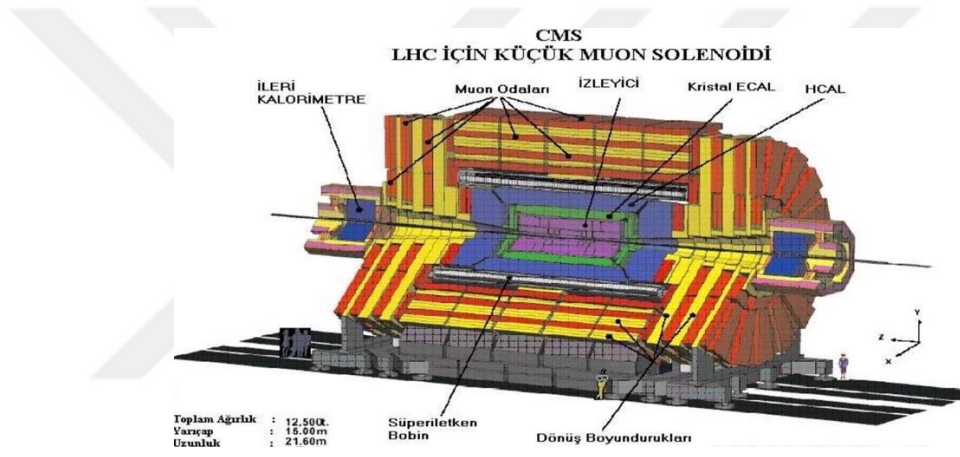
ATLAS dedektörü, Higgs bozonun araştırılması, karanlık maddeyi oluşturabilecek ekstra boyutları ve parçacıkları gibi çok çeşitli ileri fizik konularını araştırmak için tasarlanmıştır. Büyük hadron çarpıştırıcısından gelen demet ATLAS dedektörünün merkezinde çarpışır ve bu çarpışma sonucu oluşan parçacıkların yollarını, momentumlarını ve enerjilerini ölçerek kayıt altına almaktadır. ATLAS dedektörü şimdiye kadar yapılmış en büyük hacimli parçacık dedektörüdür. Dünya genelinde 3000’den fazla bilim insanı bu deneyde çalışmaktadır. Şekil 2.12’de ATLAS dedektörünün şekli verilmiştir.



Şekil 2.12. ATLAS dedektörü (cds.cern.ch, 2021)

2.7.3. CMS deneyi

CMS, Büyük Hadron Çarpıştırıcısında (BHÇ) genel amaçlı bir detektördür. SM, SMÖ, karanlık madde ve Higgs parçacığı gibi konular CMS’de araştırılmaktadır. 4 T büyüklüğünde devasa bir silindirik süper iletken mıknatısa sahiptir. Detektörün ağırlığı 14 ton boyutları ise 21 metre uzunluğunda, 15 metre genişliğinde ve 15 metre yüksekliğindedir. Eylül 2019 verilerine göre 50 ülkeden 5000 parçacık fizikçisi mühendis, teknisyen ve öğrenci işbirliğine sahiptir (CERN, 2021). Şekil 2.13’de CMS detektörünün şekli verilmiştir.



Şekil 2.13. CMS detektörü (Önengüt, 2007)

2.7.4. LHCb deneyi

LHCb dedektörü özellikle b kuarkı adı verilen bir parçacığı araştırarak madde ve anti-madde arasındaki farklılıkları araştırmak için tasarlanmış bir detektördür. 10 metre yüksekliğinde, 13 metre genişliğinde ve 21 metre uzunluğundadır. Bu deneyde 18 farklı ülkeden yaklaşık 1400 bilim insanı, mühendis ve teknisyen yer almaktadır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Geleceğin Dairesel Çarpıştırıcısı (GDÇ)

125 GeV kütleli higgs bozunun keşfi ile Standart Modeli oluşturan parçacıkları ve etkileşim matrislerini tanımlamada önemli bir model haline gelmiştir. Bunun ile birlikte deneysel veriler SM'yi genişletmeyi öngörür. Karanlık madde, nötrininonun kütlelerinin sıfır olmaması, Higgs mekanizmasının dinamik kökeni gibi teorik konular SMÖ'de fiziğin varlığına işaret etmektedir. Bu ve benzeri cevaplanmamış soruların cevabını aramak için daha yüksek kütle merkezi çarpıştırıcılar gereklidir. Yüksek enerjilerde çarpışmalar sayesinde Higgs'in kendini eşleşmesini tam olarak ölçebilecek ve elektrozayıf faz geçişlerinin doğasını aydınlatmak için TeV ölçeğinde elektrozayıf simetri kırılmasının kökenine etraflıca inilebilecektir.



Şekil 3.1. GDÇ'nin üstten görünümü (cds.cern.ch, 2021)

Şekil 3.1'de görüldüğü gibi Geleceğin Dairesel Çarpıştırıcısında (Future Circular Collider-FCC) alt hızlandırıcı olarak CERN'deki hızlandırıcılar kullanılacaktır. Bu daireseel hızlandırıcının 100 km çevre uzunluğuna sahip olması ve 100 TeV çarpışma enerjine ulaşılması beklenmektedir. FCC projesinde FCC-hh (hadron çarpıştırıcısı), FCC-ee (lepton çarpıştırıcısı) ve FCC-he (Hadron-Lepton çarpıştırıcısı) olarak 3 sistem bulunmaktadır. Önce FCC-ee'nin, sonra aynı tünel içerisinde FCC-hh ve FCC-he'nin hayata geçirilmesi planlanmaktadır. Eğer bu GDÇ yapılırsa var olan hızlandırıcıların içerisinde en yüksek ışınlılığa sahip olacak ve en yüksek kütle merkezi enerjisine sahip olacaktır. Çizelge 3.1'de GDÇ ve BHÇ nin önemli bazı parametreleri arasındaki karşılaştırma verilmiştir.

Çizelge 3.1. GDÇ ile BHÇ'nin bazı özelliklerinin karşılaştırılması (Abada, 2019)

Parametre	GDÇ	BHÇ
K.M Enerji(TeV)	100	14
Dipol Alanı(T)	16	8.3
Çevresi(km)	97.8	26.7
Işınlılık ($10^{34} cm^2 sn^{-1}$)	5	1
Çarpışma başına olay	1000	27
Demet başına parçacık (10^{11})	1	1.15

Hadronik kalorimetreler hadronlar arasındaki çarpışmaların detaylıca araştırılması için önemli bir bileşen olacaktır. Yüksek çözünürlüklü, ince tanecikli kalorimetreler ve zamanı ölçmek için yeterli kapasiteye sahip kalorimetrik sistemler gereklidir.

Yüksek enerji fiziği deneylerinde büyük detektörler kullanılmalıdır. Bu detektörlerin performansı sinyal tekdüzeliğine, çözünürlüğe ve verimliliğe bağlıdır (Machado, Panadero, Miranda, & Laranjinha, 2021).

FCC-ee: FCC projesinde, 90 ile 350 GeV arasında kütle merkezi çarpışma enerjisine sahip bir lepton çarpıştırıcı olarak hadron tesisi içerisinde olması öngörülmektedir. Yüksek parlaklıklı ışınların kullanımı, Z, W, Higgs ve üst parçacıkların etkileşimleri artırılmış doğrulukla daha hassas bir şekilde ölçülebilecektir (Ellis & You, 2016). FCC-ee, elektrozayıf simetri kırılmasının derinlemesine araştırılmasına olanak sağlayabilir ve yeni fizik için araştırma alanları açabilecektir.

FCC-eh: lepton hadron çarpıştırıcısı olup sonraki aşamalarda tasarlanacaktır.

FCC-hh: FCC projesinde yer alan en önemli detektörlerden biridir. Bölüm 3.1.1'de detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

3.1.1. FCC-hh detektörü

FCC-hh detektörü, CMS ve ATLAS detektörlerine benzetmek ile birlikte daha gelişmiş olarak tasarlanması öngörülmektedir. FCC-hh yapılacak ölçümlerin çok daha geniş ve büyük eta aralığında olması beklenmektedir.

Ağır iyon çarpışmalarında, FCC-hh çarpıştırıcısı, maddenin kolektif yapısının öncekinden daha aşırı yoğunluk ve sıcaklık koşullarında keşfedilmesine olanak sağlayacaktır (Zimmermann, Benedikt, Schulte, & Wenninger, 2014). FCC-hh diğer tüm hızlandırıcılara kıyasla en yüksek ışınlılığa ve kütle merkezi enerjisine sahip olacaktır. Hadron çarpıştırıcılarında kütle merkezi enerjisini hesaplamak için Büyük Hadron çarpıştırıcısının özelliklerini kullanarak basit bir orantı ifadesi ile elde edilebilmektedir. Kütle merkezi enerjisi Manyetik Alan (B) ve bükülme yarıçapının (ρ) çarpımı ile doğru orantılıdır (Okuyalı, 2018). Eşitlik 3.1 de

$$\frac{E_{k.m}}{14 \text{ TeV}} = \frac{100 \text{ km} \times 16 \text{ T}}{26.7 \text{ km} \times 8.3 \text{ T}} \quad (3.1)$$

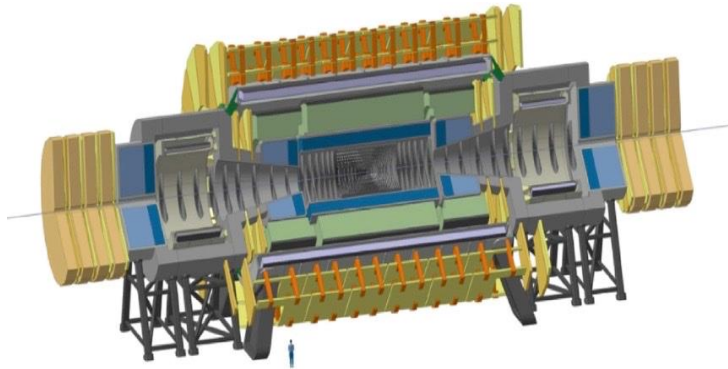
$E_{k.m}$ yaklaşık 100 TeV çıkar. FCC-hh’de parlaklık üretimi için yeterli bir güvenilirlik ve kullanılabilirlik, çalışmaların sonucunda doğrulanmıştır (Abadi et al., 2019).

3.1.2. FCC-hh genel tasarımı

FCC-hh için şu ana kadar üç tasarım öne çıkmaktadır. Bu tasarımlar;

- Demir solenoid, dönüş boyunduruğu ve dış mıknatıs sistemi
- İkiz Solenoid, demirsiz tasarım, dış ileri mıknatıs sistemi
- Solenoid, torod ve iç ileri mıknatıs

Bu tasarımların arasında ikiz selenoid tasarımı ve simülasyonu diğerlerine göre daha güçlü bir adaydır. Şekil 3.2’de FCC-hh simülasyon tasarım şekli verilmiştir.



Şekil 3.2. FCC-hh simülasyon tasarımı (Abadi et al., 2019)

Solenoid yarıçapının 6 m ve manyetik alan şiddetinin 6 T olması öngörülmektedir. Yüksek manyetik alanın kullanılmasının sebebi yüksek bükme gücünü artırmaktır. İkiz solenoidi dipoller ile birleştirilmesindeki temel sorun büyük kuvvetlerin ve büyük torkların oluşmasıdır. Bu sorunu aşmak için ana solenoidlerden kaynaklanan kuvvet ve torkun yanal dipol bobinlerle karşılandığı özel bir geometri kullanmak gerekir. Böylece hem ikiz solenoid hem de ileri dipollerin her biri üzerindeki net kuvvet ve tork sıfır olacaktır (Mentink et al., 2016) (Mentink, 2017).

Işınllık performansı: Işınllığı belirli bir spektral alanda parçacık yoğunluğu olarak tanımlayabiliriz. Işınllık karşılıklı gelen demetlerin içindeki proton sayısı ile ilgili bilgileri vermektedir. FCC-hh’de asıl amaçlardan biri de ışınllığı yükseltmektir. Çünkü daha fazla proton demek daha fazla etkileşim demektir. FCC-hh’de Büyük hadron çarpıştırıcısının beş katı değerinde bir ışınllık değeri elde edilecektir. FCC-hh’de ilk yıllarda maksimum $5 \times 10^{34} \text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ e kadar bir ışınllığa ulaşılması hedeflenmektedir. Sonraki yıllarda ışınllık artırılarak $3 \times 10^{35} \text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ ‘e çıkarılması hedeflenmektedir.

Işınllık ve tesir kesiti arasındaki matematiksel ilişki;

$$N = \sigma \int \mathcal{L}(t) dt \quad (3.2)$$

$\mathcal{L}$: çarpıştırıcının ışınllığı

N : saniye başına toplam etkileşim sayısı

σ : Tesir kesiti

Karşılıklı gelen iki demetin parçacık sayısı (n_1, n_2), $4\pi\sigma_x\sigma_y$ demetin çarpışma alanı ve

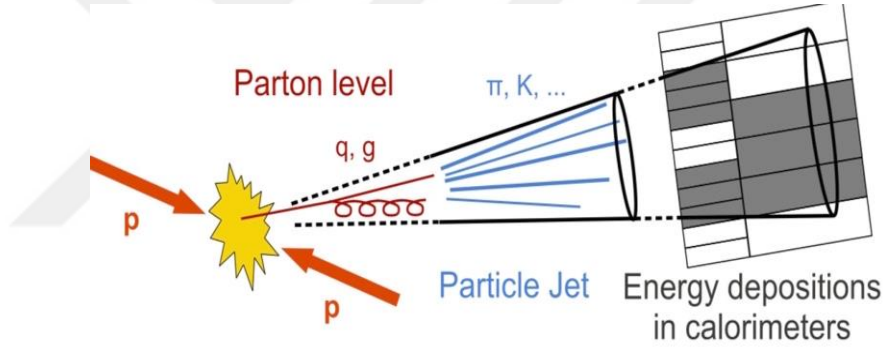
f (çarpışan demet frakansı) ise;

$$\mathcal{L} = f \frac{n_1 n_2}{4\pi\sigma_x\sigma_y} \quad (3.3)$$

olur.

3.2. Jet Yapılandırılması

Yüksek enerjili parçacık çarpışmalarında meydana gelen parçacık topluluğu veya yüksek enerjili çarpışmalarda açığa çıkan parçacık fıskiyesi olarak bilinen parçacık püskürtüleri ya da quark ve gluonların deneysel sinyalleri, jetler olarak adlandırılmaktadır. Parçacık fiziğinde jetler ayrı bir öneme sahiptir. Çünkü çarpışma sonrasında çok fazla olay meydana geldiği için bu olayların süreçlerini ve analizlerini kolaylaştırmaktadır. Jetlerin üç farklı bölümü vardır; parton jet, parçacık jeti ve detektör jeti. Parton jeti, hadronizasyon olmadan önceki saçılmalarda meydana gelen gluon ve kuarkları kapsar, parçacık jeti hadronizasyon meydana geldikten sonraki parçacıklardan meydana gelen kısmını kapsar, detektör jeti ise parçacıklar detektöre ulaştığındaki parçacıkları kapsamaktadır.



Şekil 3.3. Çarpışma sürecindeki jet bölümleri (www.gokgunce.net, 2021)

Şekil 3. 3’de kırmızı ile gösterilen kısım parton jetler, mavi olan bölgeler parçacık jetleri ve siyah beyaz olan kısımlar da ise dedektör seviyesinde jet sınıflandırılmasını kapsar. Jetler tanımlanırken temel bazı özelliklere dikkat edilmelidir. Bu özellikler; detektörden bağımsızlık (dedektör çeşidi vb gibi özelliklerden bağımsız olmalı), belirginlik (jet kinematiği değişkenleri, jet seçimi vb süreçler iyi belirlenmelidir), uygunluk ve teorik olarak iyi davranış gösterme (Öztaşcı, 2014).

Jetler GenJet ve RecoJet olarak iki kısma ayrılmaktadır.

- *Genjet (oluşturulmuş)*: Olay üreteçlerinde oluşturulmaktadır.
- *Recojet (yapılandırılmış)*: Hem gerçek algıçlarda hem de olay üreteçlerinden oluşturulur.

İki tür jet algoritması vardır. Bunlar koni ve ardışık kümeleme algoritmalarıdır.

Koni algoritmaları: Koni algoritmaları kendi arasında üç sınıfa ayrılmaktadır. Bunlar;

Aşamalı kaldırma (progressive removal) ile çalışan tekrarlamalı koni algoritmaları (IC-PR)

Aşamalı kaldırma ile çalışan tekrarlamalı koni algoritması güvenli olmayan collinear bir algoritmadır. CMS yinelemeli konisi ve Pythia konisi IC-PR'ye örnek olarak verilebilir. En büyük p_t hücresi bulunur. Bu hücre merkez alınarak R yarıçaplı bir koni oluşturulur. Daha sonra bu koni içindeki hücreleri dört vektör kullanarak topladıktan sonra deneme jet eksenini hesaplanır ve sonrasında deneme jet eksenine bakılarak oluşturulmaktadır (Atkin, 2015).

Bölme birleştirme yöntemi ile çalışan tekrarlamalı koni algoritması (IC-SM)

Bölme birleştirme yöntemi ile çalışan tekrarlamalı koni algoritması (IC-SM) infrared güvensiz bir algoritmadır. ATLAS koni, JetClue ve midpoint koni (IC-SM)' ye örnek verilebilir (Atkin, 2015).

Çekirdeksiz infrared güvenli koni algoritması (Seedless Infrared Safe Cone (SISCON))

Öncelikle kararlı bir koni bulunur. Kararlı koni bulunduktan sonra sahte bir parçacık eklenerek yeni koniler aranmaya başlanır. Bulunan yeni koniler içerisindeki parçacıkların enine momentumları ve enerjileri toplanarak en yüksek enerjili koni saptanmaya çalışılır. Bu koni bulunduktan sonra jet olarak etiketlenir ve bu süreç tüm parçacık adayları bulunana kadar tekrar edilmektedir.

Ardışık kümeleme algoritmaları: Ardışık kümeleme algoritmaları da kendi arasında üçe ayrılmaktadır (Uslan, 2019). Bunlar;

Anti- k_T kümeleme algoritması

Anti- k_T algoritması küme temelli bir algoritmadır. En yakın mesafedeki parçacıkları bularak işlemlerine devam etmektedir. Anti- K_T algoritmasında ikili parçacıklar seçilerek dik momentum değerleri kaydedilmektedir. Kaydedilen momentum değerleri algortmada tanımlı olan değerlerden küçük ise bu iki parçacık birleştirilmektedir.

$$d_{ij} = \min(p_{ti}^{2p}, p_{tj}^{2p}) \times \frac{\Delta_{ij}^2}{R} \quad (3.4)$$

$$d_{iB} = k_{ti}^{2p} \quad (3.5)$$

Burada i ve j parçacıklar, d_{ij} ve d_{iB} uzaklık parametrelerini hesaplamak için kullanılan parametrelerdir. $\Delta_{ij}^2 = (y_i - y_j)^2 + (\phi_i - \phi_j)^2$ ve ϕ sırasıyla i parçacığının dikine momentumu ve azimutal açısıdır. Anti- k_T algortmasında ilk önce parçacıkların listesi yazdırılır ve parçacıklar arasındaki uzaklık hesaplanır. Hesaplanan d_{ij} değeri en küçük ise i ve j parçacıkları birleştirilerek yeni parçacıklar oluşturulmaktadır. d_{ij} en küçük değerde değilse o zaman i parçacığı listeden çıkarılır ve listedeki tüm parçacıklar bitene kadar döngü devam ettirmektedir. (Cacciari & Salam, 2008).

Anti- k_T algoritmasında (3.4) ve (3.5) eşitliklerinde $p=-1$ alınır. Bu durumda (3.4) ve (3.5) denklemleri;

$$d_{ij} = \min(p_{ti}^{-2}, p_{tj}^{-2}) \times \frac{\Delta_{ij}^2}{R} \quad (3.6)$$

$$d_{iB} = k_{ti}^{-2} \quad (3.7)$$

şekline dönüşmektedir. Anti- k_T algoritması yüksek enerjili çarpışmalarda kullanılmaktadır. Çünkü jet biçimleri düzgün konik şeklinde olmaktadır.

k_T kümeleme algoritması

k_T algoritması benzer kümeleme yöntemine göre oluşturulmaktadır. k_T algoritmasında denklem (3.6) ve (3.7) denkleminde $p=1$ değerine karşılık gelen denklem kullanır. Bu durumda 3.2 denklemi;

$$d_{ij} = \min(p_{ti}^2, p_{tj}^2) \times \frac{\Delta_{ij}^2}{R} \quad (3.8)$$

$$d_{iB} = k_{ti}^2 \quad (3.9)$$

şekline dönüşmektedir. İlk önce düşük p_T 'li parçacıkları seçmektedir. k_T algoritması düşük enerjili parçacıkları kümeleyerek işlemlerini gerçekleştirmektedir.

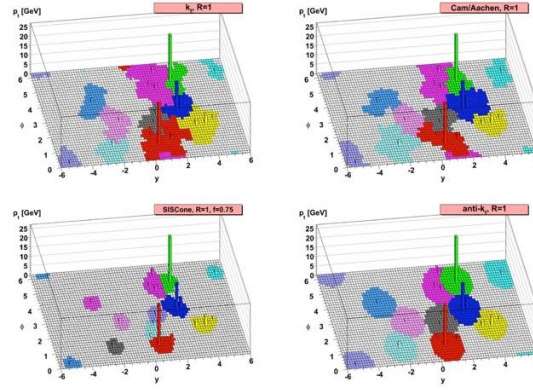
Cambridge/Aachen kümeleme Algoritması

Cambridge/Aachen algoritmasında ise p 'nin karşılık geldiği değer 0'dır. Bu durumda (3.2) ve (3.3) deklmi

$$d_{ij} = \frac{\Delta_{ij}^2}{R} \quad (3.10)$$

$$d_{iB} = 1 \quad (3.11)$$

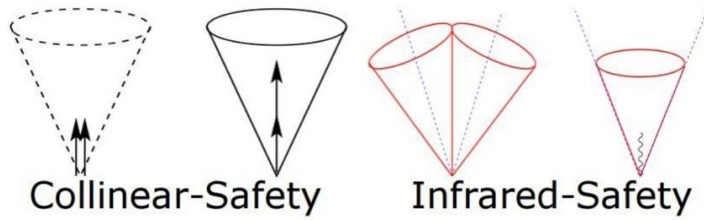
(3.10) ve (3.11)'da ki haline dönüşmektedir. Bu uzaklık değişkenleri momentumdan bağımsız olup jet konisi alanlarında dalgalanmalar çok küçüktür. Şekil 3.4'te farklı jet kümeleme algoritmalarından oluşan jet şekilleri verilmiştir.



Şekil 3.4. Farklı jet kümeleme algoritmalarından oluşan jet şekilleri (Cacciari & Salam, 2008)

Teorik ve deneysek bakış açısına göre bir jet seçilirken temel iki gereksinim vardır.

- collinear safe: collinear güvenliği bir partonun iki partona bölünmesi sonucu jet kümelemenin değişmemesidir.
- infrared safe: jet bulguları düşük enerjili parçacıkların emisyonuna karşı duyarsız olmalıdır. Teorik olarak bu özellik, perturbatif hesaplamalarda sert olmayan sapmaları önler. Deneyisel olarak ise jet bulmayı düşük enerji birikimlerinden mümkün olduğunca bağımsız kılmaktadır (Acosta, 2002). Şekil 3.5’de infrared ve collinear güvenliğinin jet yapısı gösterilmiştir.



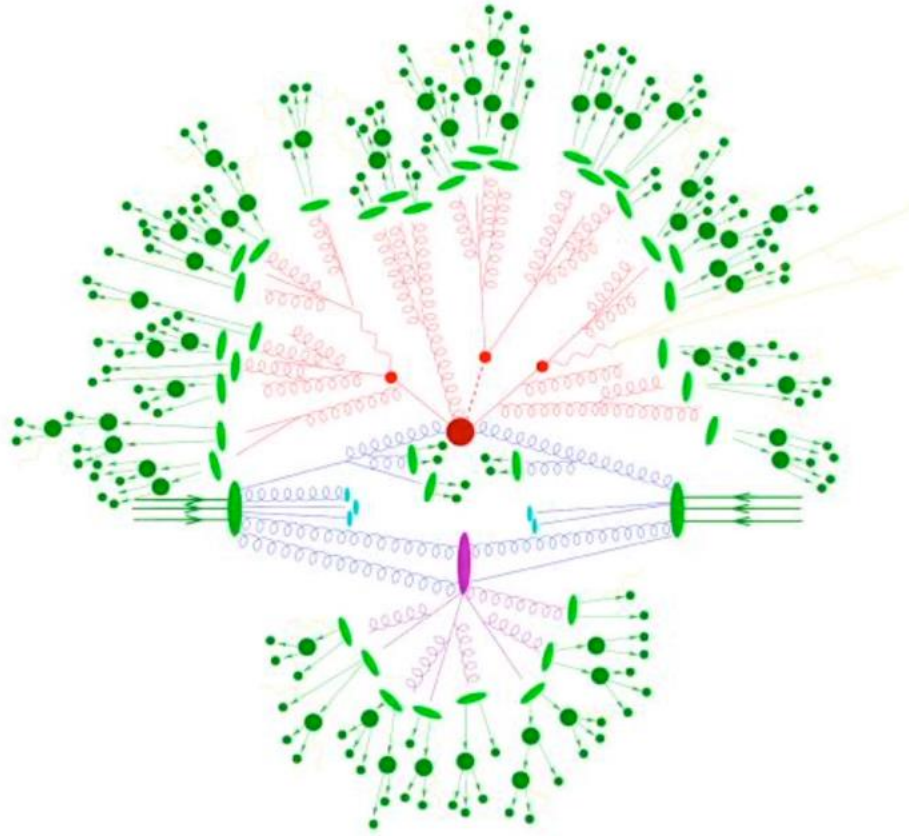
Şekil 3.5. Infrared ve Collinear güvenliğinin jet yapısı (Bonilla & Chan, 2021)

3.6. Monte Carlo (MC) Metodu

Monte Carlo (MC) ismini, slot, rulet ve zar oyunlarındaki şans ve olasılıkları modellemede kullanıldığı için Monako’daki popüler kumar destinasyonlarından almıştır. MC rastgele sayılar üreterek çalışmaktadır. MC Simülasyonu içinde bulundurduğu denklemlerin değişkenlerini rastgele değiştirerek rastgele sonuçlar üretmektedir. MC

yöntemi ilk olarak Manhattan Projesin’de nötron difüzyon problemlerini çözmek için kullanılmıştır. MC çok güçlü bir istatistik aracıdır. MC yöntemi deneyler yapılmadan önce istenilen miktarda performansı tahmin etmek için kullanılmaktadır. Bu da büyük tasarımlardan önce simülasyon yoluyla yapılacak detektör ve laboratuvar gibi argümanların nasıl tasarlanması gerektiğine dayalı güçlü bir araç olmaktadır. MC, olasılık sonuçları, grafik sonuçları, duyarlılık analizi ve girdilerin korelasyonu gibi avantajları ile günümüzde birçok alanda kullanılmaktadır. MC yöntemi yüksek enerji fiziği çalışmalarında oldukça sık kullanılmaktadır. Yüksek enerji fiziğinde, yüksek enerji çarpışmalarından üretilecek olan veriler bu metot ile üretilerek analizi yapılmaktadır. Yapılan analizler detektör tasarımlarında, çarpışmalarda meydana gelebilecek olası durumlar hakkında büyük ipucu vermektedir.

Şekil 3.6 da MC’ da ki pp çarpışmasının şematik bir görünümü şekilde gösterilmektedir.



Şekil 3.6. MC olay üreticisi ile pp çarpışmasının simülasyonu (Höche, 2015)

Şekli 3.6'da, ortadaki kırmızı damla sert çarpışmayı temsil ederken mor damla arka plandaki olayı temsil etmektedir. Açık yeşil lekeler parton-hadron geçişlerini gösterirken koyu yeşil lekeler hadron bozunmalarını göstermektedir (Hoş, 2016).

Yüksek enerji fiziğinde birçok simülasyonda MC olay üreticileri ile veriler üretilmektedir. MC ile üretilen rastgele değerlerin yaklaşıkları alınarak kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında, MC simülasyonu için Madgraph kullanılmıştır.

3.7. Pythia

Pythia8, yüksek enerjili çarpışmalar için genel amaçlı bir olay üreticisi olup c++ dilinde yazılmıştır. Pythia8; sert saçılma süreçleri, parçacık bozunumları, ilk ve son durum parton-duş modeli, hadronizasyon ve çoklu etkileşim modellerini kapsayan çok geniş bir kütüphaneye sahiptir. Pythia8 çok farklı SM ve SMÖ süreçlerin uygulamalarını içermektedir. Ayrıca birçok teorik ve deneysel konuyu ele aldığı için SM'min en iyi uzantılarından biri olarak kabul edilir (Desai & Skands, 2012).

Parçacıklar arasındaki yüksek enerjili çarpışmalar; çok sayıda hadron, lepton, foton ve nötrino içeren son durum olaylarına yol açmaktadır. Olaylar bütün olarak MC yöntemiyle oluşturulmaktadır. Son durum olaylarının karmaşıklığı daha basit ayrı görevlere bölünmesiyle, ilk ve son durum radyasyonu, ışın kalıntıları, parçalanma ve bozunma gibi olaylar simüle edilerek gelecekteki fizik çalışmaları için kullanılmaktadır (Dulat, Lazopoulos, & Mistlberger, 2018).

Pythia8, Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (BHÇ) ve Geleceğin Dairesel Çarpıştırıcısı (GDÇ) çalışmalarında aktif olarak kullanılmaktadır.

3.8. MadGraph

MadGraph programının ilk sürümleri Fortran ile günümüzdeki sürümleri ise c++ dilinde yazılarak geliştirilmiştir. MadGraph ile yüksek enerji ve parçacık fiziğinde olay üretimi, tesir kesiti hesabı ve ağaç seviyesinde matrix işlemleri yapılabilmektedir.

MadGraph'ın en önemli özelliklerinden biri olan, matrix ağaç seviyesinde matrix birleştirmenin amacı; farklı parton çoklukları ile örneklerin tutarlı bir şekilde birleştirebilmesi ve parton düşundan sonra çift sayımı engelleyebilmesidir. Böylece kapsamlı bir örneği etkili bir şekilde tanımlamasına izin vermektedir (Alwall et al., 2014).

MadGraph'ın konfigürasyon dosyasında çoklu çekirdek kullanımına izin veren ayarlar bulunduğu için diğer olay üreticilerine göre daha hızlıdır. Bu şekilde küme bilgisayarlarında aynı olay üretimi daha hızlı yapılabileceği anlamına gelmektedir. Bu tez çalışmasında hadronizasyon için bir diğer olay üreticisi olan Pythia kullanılmıştır.

3.9. Delphes

Delphes, çok amaçlı bir dedektör yanıtının simülasyonunu gerçekleştirmek için açık kaynaklı bir c++ yazılımıdır. Dedektörün verdiği tepkileri taklit ederek çalışmaktadır. Özel analizler için kullanılacak jetlerin toplanması gibi gözlemlenebilir çıktılar vermektedir. Dedektör yanıtının simülasyonu manyetik alanın etkisini, kalorimetrenin tanecikliğini ve alt dedektör çözünürlüklerini hesaba katarak işlemlerini gerçekleştirmektedir. Delphes, LHCb ve FCC gibi dedektörler için temel parametreleri içerisinde barındırmaktadır. Delphes, olayların basit gösterimini içerdiği için kullanımı oldukça avantajlıdır. Geant'a göre oldukça hızlıdır. Geant'da bir olayın benzetimi dakikalar sürerken aynı sürede on binlerce olayı simüle edebilmektedir (Mertens, 2014).

Delphes, BHÇ ve GDÇ algıç sistemlerinin sanal taklitlerini vermesinden dolayı oldukça önemlidir. Karmaşık ve büyük dedektörler yapılmadan önce verileri delphes simülasyonundan geçirmek sonradan oluşabilecek karmaşıklığı azaltmaktadır. Delphes verileri, tcl formatında olan algıç kartlarını kullanarak simüle ederek dosyalara yazdırmaktadır. Dosyalara yazdırılan veriler yüksek enerji fiziğinde kullanılan ROOT'da analiz edilmektedir.

Bu tez çalışmasında simülasyon verisi olarak; proton-proton demetlerinin FCC-hh parametreleri kullanılarak 100 TeV kütle merkezi enerjisinde çarpıştırılmasıyla olaylar üretilmiştir. Bu çarpışma sonucunda üretilen olaylar ve bu üretilen olayların analizi ROOT'da yapılmıştır.

3.10. PDF Setler

LHAPDF, ayırık veri dosyalarından PDF setleri değerlendirmek için kullanılmaktadır. Son sürümü LHAPDF6'dır. Bu sürüm, eşzamanlı PDF sayısı üzerindeki kısıtlamaları tamamen ortadan kaldırmaktadır. Ayrıca tüm setleri yüklemeye gerek kalmadan tek PDF üyesine erişime izin vermektedir (LHAPDF, 2021). MadGraph içerisine istenilen PDF seti eklenebilmekte ve istenilen PDF seti web sitesi üzerinden ücretsiz olarak indirilebilmektedir. Bu tez çalışmasında PDF seti olarak NNPDF3.0 kullanılmıştır.

3.11. ROOT

ROOT, büyük miktardaki verileri, işlemek ve analiz etmek için CERN'de tasarlanmış nesne tabanlı bir programdır. ROOT'un en büyük avantajlarından birisi çok büyük miktardaki verileri çok kısa bir zamanda işleyebilmesidir. ROOT içerisinde istatistiksel hesaplama, histogramlar, filtreleme algoritmaları, görselleştirme araçları gibi çok yönlü özellikler yer almaktadır. ROOT bir, iki veya üç boyutta histogram oluşturmaya olanak tanımaktadır. ROOT mimarisi dokuz kategoriye bölünmüş ve yaklaşık yirmi çerçeve içinde gruplandırılmış iki yüz elli sınıf ile katmanlı bir hiyerarşiye sahiptir. ROOT sınıfları TObject'de türetilmektedir. TObject karşılaştırma, grafikler, dedeksiyon ve nesneler arasında iletişimi sağlayan protokolleri içermektedir. TClass sınıfı ise TObject'in bir alt sınıfıdır. Root' u işlevsel yapan bir diğer özelliği de ağaç yapısına sahip olmasıdır. Ağaç yapıları sadece karmaşık verileri değil aynı zamanda çok sayıda dosyayı desteklemek içinde tasarlanmıştır (Brun & Rademakers, 1997). Root, Delphes, Pythia gibi birçok programın kullanıldığı kütüphaneleri içermektedir (Antcheva, Ballintijn, Bellenot, Biskup, & Brun, 2009).

Bu tez çalışmasında elde edilen veriler ROOT programı ile analiz edilmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

İlk olarak Madgraph programında "p p > j all" süreci ile inklüsif jetlerin olduğu olaylar üretilmiştir. Proton hüzmelerinin her birinin enerjileri 50.000GeV seçilmiş, 100 TeV kütle merkezi enerjisinde çarpışmalar üretilmiştir. Olaylar üretilirken FCChh.tcl, dzResolutionVsP.tcl, momentumResolutionVsP.tcl, muonMomentumResolutionVsP.tcl kartları ve NNPDF23 setleri kullanılmıştır. Çoklu parton etkileşmelerinin sürece eklenmesi (MPI-ON) için pythia8_card.dat içerisindeki 'partonlevel:mpi = off' komutu kapatılarak etkileşmeler hesaba katılmıştır. Çoklu parton etkileşmelerinin süreçten çıkarılması (MPI-OFF) için pythia8_card.dat içerisindeki 'partonlevel:mpi = off' komutu açılarak etkileşmeler devre dışı bırakılmıştır. Olay üretimlerinde AntikT jet algoritması kullanılarak ve yarıçapı R=0.4 olarak seçilmiştir. Madgraph ile olay üretimi yapılırken MPI ON ve OFF durumları için proton demetlerinin enerjileri ve olay üretimindeki tesir kesitleri, olay sayısı gibi temel özellikleri Çizelge 4.1'de listelenmiştir. Her iki durumda da süreçlerdeki jetlere aşağıdaki psüdorapidite aralığı ile p_T kısıtlaması kullanılmıştır:

- $-6 \leq \eta \leq 6$
- $p_T \geq 25$

Daha sonra üretim (generator level-GenLevel) ve detektör seviyesinde (detector level-DetLevel) jetlerin kinematikleri grafiklendirilmiştir.

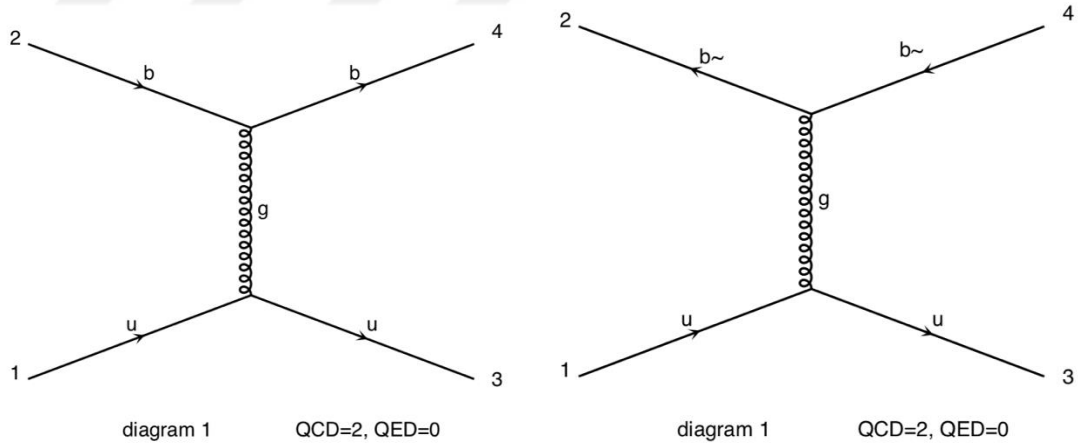
Çizelge 4.1. Olay üretimindeki temel nicelikler

	Çarpışma Enerjisi	Tesir Kesiti (Pb)	Olay Sayısı
MPI_OFF	p p 50000.0 x 50000.0 GeV	$7.851e + 09 \pm e \pm 8.1 + 06$ $\pm systematics$	100000
MPI_ON	p p 50000.0 x 50000.0 GeV	$7.851e + 09 \pm e \pm 8.1 + 06$ $\pm systematics$	100000

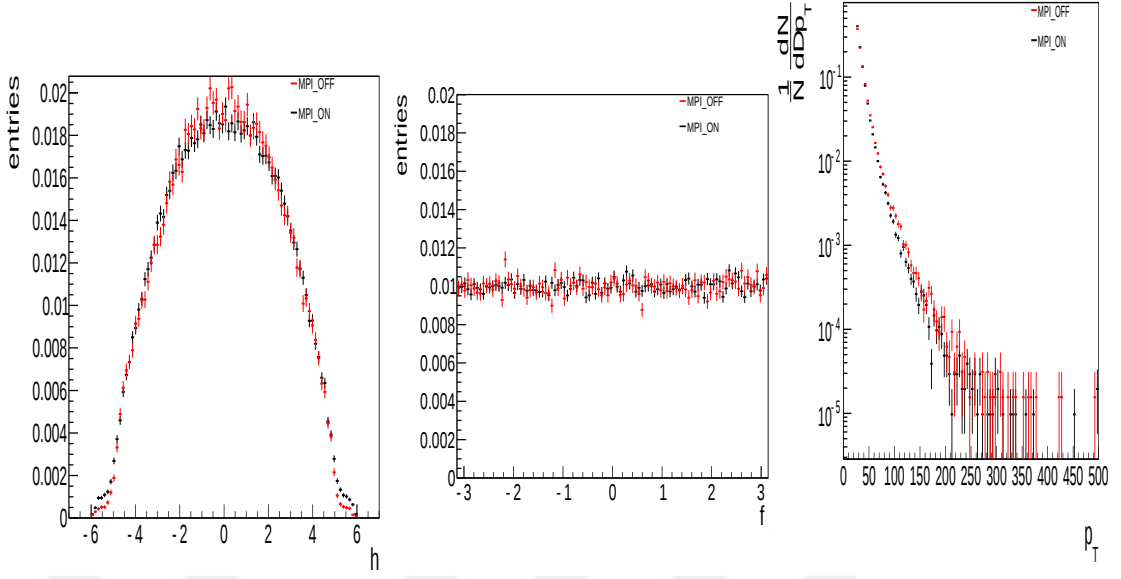
MadGraph aracılığı ile inklüsif jet süreci için olay üretimi sırasında elde edilen alt süreçler Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Şekil 4.2'de ise bu alt süreçlerden ilk iki tanesi için Feynman diyagramları gösterilmektedir.

Directory	# Diagrams	# Subprocesses	FEYNMAN DIAGRAMS	SUBPROCESS
P1_qb_qb	1	8	html	u b > u b , c b > c b , d b > d b , s b > s b , b u > u b , b c > c b , b d > d b , b s > s b
	1	8	html	u b ~ > u b ~ , c b ~ > c b ~ , d b ~ > d b ~ , s b ~ > s b ~ , b ~ u > u b ~ , b ~ c > c b ~ , b ~ d > d b ~ , b ~ s > s b ~
	1	8	html	u ~ b > u ~ b , c ~ b > c ~ b , d ~ b > d ~ b , s ~ b > s ~ b , b u ~ > u ~ b , b c ~ > c ~ b , b d ~ > d ~ b , b s ~ > s ~ b
	1	8	html	u ~ b ~ > u ~ b ~ , c ~ b ~ > c ~ b ~ , d ~ b ~ > d ~ b ~ , s ~ b ~ > s ~ b ~ , b ~ u ~ > u ~ b ~ , b ~ c ~ > c ~ b ~ , b ~ d ~ > d ~ b ~ , b ~ s ~ > s ~ b ~
P1_gg_qq	3	4	html	g g > u u ~ , g g > c c ~ , g g > d d ~ , g g > s s ~
P1_gg_gg	3	8	html	g u > g u , g c > g c , g d > g d , g s > g s , u g > g u , c g > g c , d g > g d , s g > g s
	3	8	html	g u ~ > g u ~ , g c ~ > g c ~ , g d ~ > g d ~ , g s ~ > g s ~ , u ~ g > g u ~ , c ~ g > g c ~ , d ~ g > g d ~ , s ~ g > g s ~
P1_gb_gb	3	2	html	g b > g b , b g > g b
	3	2	html	g b ~ > g b ~ , b ~ g > g b ~
P1_qq_bbx	1	8	html	u u ~ > b b ~ , c c ~ > b b ~ , d d ~ > b b ~ , s s ~ > b b ~ , u ~ u > b b ~ , c ~ c > b b ~ , d ~ d > b b ~ , s ~ s > b b ~
P1_qq_qq	2	4	html	u u > u u , c c > c c , d d > d d , s s > s s
	2	8	html	u u ~ > u u ~ , c c ~ > c c ~ , d d ~ > d d ~ , s s ~ > s s ~ , u ~ u > u u ~ , c ~ c > c c ~ , d ~ d > d d ~ , s ~ s > s s ~
	2	4	html	u ~ u ~ > u ~ u ~ , c ~ c ~ > c ~ c ~ , d ~ d ~ > d ~ d ~ , s ~ s ~ > s ~ s ~
	1	12	html	u c > u c , u d > u d , u s > u s , c d > c d , c s > c s , d s > d s , c u > u c , d u > u d , s u > u s , d c > c d , s c > c s , d s > d s
	1	24	html	u u ~ > c c ~ , u u ~ > d d ~ , u u ~ > s s ~ , c c ~ > u u ~ , c c ~ > d d ~ , c c ~ > s s ~ , d d ~ > u u ~ , d d ~ > c c ~ , d d ~ > s s ~ , s s ~ > u u ~ , s s ~ > c c ~ , s s ~ > d d ~ , u ~ u > c c ~ , u ~ u > d d ~ , u ~ u > s s ~ , c ~ c > u u ~ , c ~ c > d d ~ , c ~ c > s s ~ , d ~ d > u u ~ , d ~ d > c c ~ , d ~ d > s s ~ , s ~ s > u u ~ , s ~ s > c c ~ , s ~ s > d d ~ , c ~ u > u c ~ , u ~ d > u d ~ , u ~ s > u s ~ , c ~ c > u u ~ , c ~ c > d d ~ , c ~ c > s s ~ , d ~ d > u u ~ , d ~ d > c c ~ , d ~ d > s s ~ , s ~ s > u u ~ , s ~ s > c c ~ , s ~ s > d d ~ , c ~ u > u c ~ , d ~ u > u d ~ , s ~ u > u s ~ , u ~ c > c u ~ , d ~ c > c d ~ , c ~ s > c s ~ , d ~ u > d u ~ , d ~ c > d c ~ , d ~ s > d s ~ , s ~ u > s u ~ , s ~ c > s c ~ , s ~ d > s d ~ , u ~ c > u c ~ , u ~ d > u d ~ , u ~ s > u s ~ , c ~ d > c d ~ , c ~ s > c s ~ , d ~ u > d u ~ , c ~ d > d c ~ , s ~ d > d s ~ , u ~ s > s u ~ , c ~ s > s c ~ , d ~ s > s d ~
	1	24	html	u ~ c ~ > u ~ c ~ , u ~ d ~ > u ~ d ~ , u ~ s ~ > u ~ s ~ , c ~ c ~ > u ~ u ~ , c ~ c ~ > d ~ d ~ , c ~ c ~ > s ~ s ~ , d ~ d ~ > u ~ u ~ , d ~ d ~ > c ~ c ~ , d ~ d ~ > s ~ s ~ , s ~ s ~ > u ~ u ~ , s ~ s ~ > c ~ c ~ , s ~ s ~ > d ~ d ~ , c ~ u ~ > u ~ c ~ , d ~ u ~ > u ~ d ~ , s ~ u ~ > u ~ s ~ , u ~ c ~ > c ~ u ~ , d ~ c ~ > c ~ d ~ , c ~ s ~ > c ~ s ~ , u ~ d ~ > d ~ u ~ , d ~ c ~ > d ~ c ~ , d ~ s ~ > d ~ s ~ , s ~ u ~ > s ~ u ~ , c ~ s ~ > s ~ c ~ , d ~ s ~ > s ~ d ~
	1	12	html	u ~ c ~ > u ~ c ~ , u ~ d ~ > u ~ d ~ , u ~ s ~ > u ~ s ~ , c ~ d ~ > c ~ d ~ , c ~ s ~ > c ~ s ~ , d ~ s ~ > d ~ s ~ , c ~ u ~ > u ~ c ~ , d ~ u ~ > u ~ d ~ , s ~ u ~ > u ~ s ~ , d ~ c ~ > c ~ d ~ , s ~ c ~ > c ~ s ~ , u ~ d ~ > d ~ u ~ , c ~ d ~ > d ~ c ~ , s ~ d ~ > d ~ s ~ , u ~ s ~ > s ~ u ~ , c ~ s ~ > s ~ c ~ , d ~ s ~ > s ~ d ~
P1_bbx_gg	3	2	html	b b ~ > g g , b ~ b > g g
P1_gg_bbx	3	1	html	g g > b b ~
P1_qq_gg	3	8	html	u u ~ > g g , c c ~ > g g , d d ~ > g g , s s ~ > g g , u ~ u > g g , c ~ c > g g , d ~ d > g g , s ~ s > g g
P1_bbx_qq	1	8	html	b b ~ > u u ~ , b b ~ > c c ~ , b b ~ > d d ~ , b b ~ > s s ~ , b ~ b > u u ~ , b ~ b > c c ~ , b ~ b > d d ~ , b ~ b > s s ~
P1_gg_gg	4	1	html	g g > g g
P1_bb_bb	2	1	html	b b > b b
	2	2	html	b b ~ > b b ~ , b ~ b > b b ~
	2	1	html	b ~ b ~ > b ~ b ~

Şekil 4.1. Olay üretimi sırasında elde edilen alt süreçlerin bilgisi

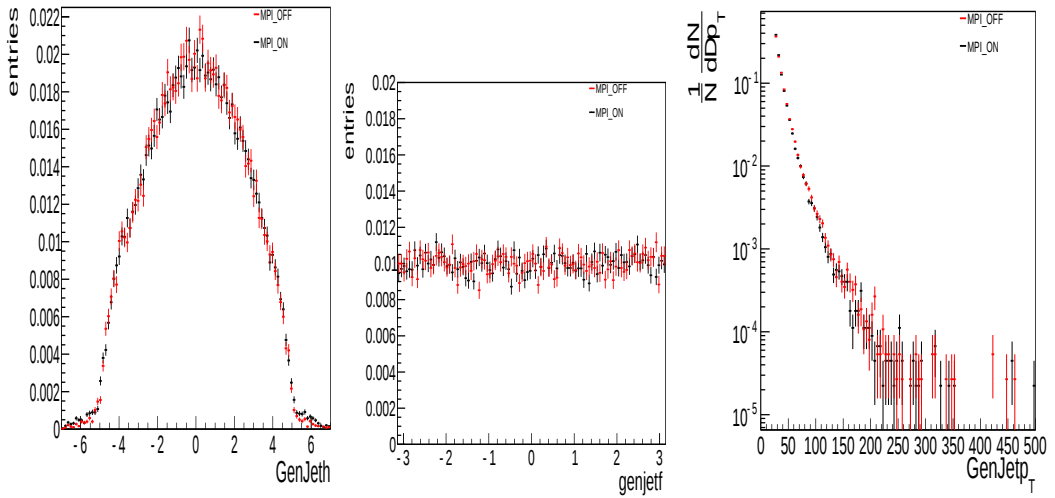


Şekil 4.2. Olay üretimi sırasında elde edilen alt süreçlerin bilgisi



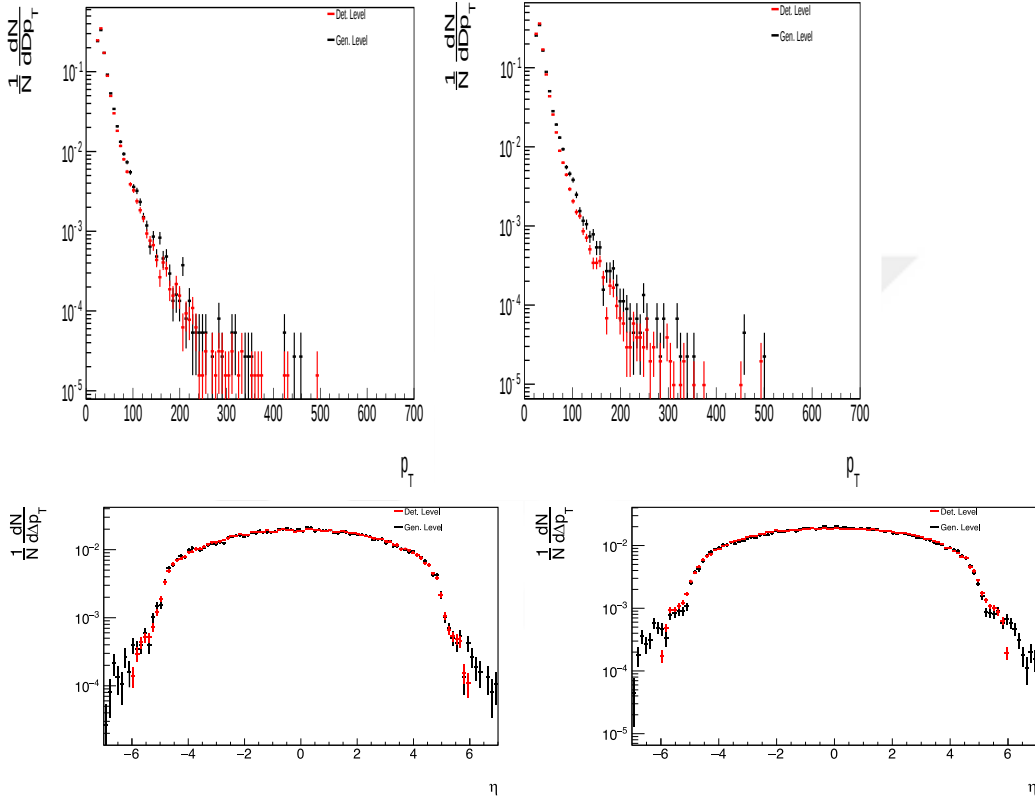
Şekil 4.3. Detektör seviyesinde jetlerin Psüdorapidite, Phi ve p_T dağılım grafiği

Şekil 4.3’de detektör seviyesindeki jetlerin psüdorapidite (sol üst), phi (sağ üst) ve p_T (alt) dağılımları gösterilmiştir. Grafiklerdeki kırmızı dağılım çoklu parton etkileşmesinin süreçlere dahil edilmediği durumları temsil ederken, siyah dağılım çoklu etkileşimlerin hesaba katıldığı durumları göstermektedir. Phi dağılımında iki durum arasında belirgin bir fark gözlenmemiştir. Psüdorapidite dağılımında merkezi bölgede hata payları içerisinde iki farklı durum benzer davranış sergilerken ileri bölgede iki dağılımın ayrımı gözlenmektedir.



Şekil 4.4. Üretim seviyesinde jetlerin Psüdorapidite, Phi ve p_T dağılım grafiği

Şekil 4.4’de ise üretim seviyesindeki jetlerin psüdorapidite (sol üst), phi (sağ üst) ve p_T (alt) dağılımları verilmiştir. Merkezi bölgede dağılımlar detektör seviyesinde olduğu gibi çok benzer iken ileri bölgede ayrışmalar gözlenmektedir. Çoklu parton etkileşmelerinin olduğu süreçler daha yüksek değerlerde dağılım vermektedir.



Şekil 4.5. Detektör seviyesi ve üretilmiş jet seviyelerinin p_T dağılımları

Şekil 4.5’te kırmızı ile gösterilen detektör seviyesi, siyah ile gösterilen üretim aşamasındaki (generated) jetleri temsil etmektedir. Bu grafiklerde sol taraftaki dağılımlar çoklu parton etkileşmelerinin sürece dahil edilmediği ve sağ taraftaki dağılımlar ise dahil edildiği durumlardaki p_T (üst) ve psüdorapidite (alt) dağılımlarını temsil etmektedir. Dağılımlardan görüleceği üzere normalize edilmiş, detektör ve üretim aşamasındaki dağılımlar, oldukça benzer bir davranış göstermektedir.

5. SONUÇ

Kuantum Renk Dinamiği'nde jet yapısının iyi anlaşılması öncelikle hadron yapısının ve parton dağılım fonksiyonlarının türetilmesinde önderlik eder. Çoklu parton etkileşmelerinin araştırılması ise saçılma ürünlerinin sebep olduğu yeni fizik arayışları ve hadron yapısının daha iyi anlaşılması için oldukça önemlidir. CERN'deki deneylerde toplanan veriler ışığında jet analizleri ve jet analizleri çalışmaları yapılmaktadır. Fakat CERN hızlandırıcıları ve hızlandırıcı yapıları gereği çok yüksek kütle merkezi enerjilerine çıkamayacağı için Geleceğin Dairesel Hızlandırıcısı (FCC) tasarlanmaktadır. Bu hızlandırıcı ile 100 TeV kütle merkezi enerjilerinde hadron/hadron çarpışmaları gerçekleştirilerek ve yeni fizik analizleri ile hadron yapısı incelenmesi amaçlanmaktadır. Bu tez çalışmasında çoklu parton etkileşmelerinin jet özellikleri üzerindeki etkileri incelenerek gelecekte yapılacak olan fizik analizlerine bir öngörü hazırlanmaya çalışılmıştır. Aynı zamanda mevcut Monte Carlo olay üreticilerinin güncellenmesi için katkıda bulunulması amaçlanmıştır. Madgraph ile olaylar üretilerek Delphes simülasyonundan geçirilmiştir. MPI etkileşimlerinin etkisi olmadan ve MPI etkileşimlerinin etkisi dikkate alınarak iki farklı durum için olaylar üretilmiş ve jetlerin temek dağılım grafikleri elde edilmiştir.

Şekil 4.3'te detektör seviyesindeki jetlerin psüdorapidite (sol üst), phi (sağ üst) ve pT (alt) dağılımları gösterilirken, Şekil 4.4'de üretim seviyesindeki jetlerin psüdorapidite (sol üst), phi (sağ üst) ve pT (alt) dağılımları verilmiştir. Bu grafiklerde görüldüğü üzere özellikle psüdorapidite dağılımında ileri bölgede $\eta > 5$ dağılımlar arasında farklılıklar gözlenmeye başlamıştır. Literatürde de bu davranışı destekleyen çalışmalar yer almaktadır. Şekil 4.5'te ise detektör seviyesi (kırmızı) ve üretim aşamasındaki (siyah) jetlerin pT (üst) ve psüdorapidite dağılımları (alt) MPI'nın sürece dahil edilmediği (sol) ve dahil edildiği (sağ) durumlarda karşılaştırılmıştır. Detektör seviyesi ile üretim seviyesi arasında belirgin bir farklılık gözlenmemiştir.

KAYNAKLAR

- Abada, A. V., 2019. FCC-hh: The hadron collider. The European Physical Journal, 755-1107.
- Abadi et al., 2019. Future circular collider conceptual design report. Eur. Phys. J. Special Topics, 3, 755-1107.
- Acosta, M., 2002. Jet Production in Charged Current Deep Inelastic Scattering at HERA. Facultad de Ciencias Departamento de Física Teórica.
- Adıgüzel, A., 2007. CMS deneyindeki süpersimetri araştırmaları. Ç.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Akgün, B., Ünel, G., Erhan, S., Samim, S., Köse, U. ve Yıldız, V., 2021. <https://indico.cern.ch/event/308126/attachments/588109/809376/ana.pdf> (12.07.2021).
- Alwall et al., 2014. <https://arxiv.org/pdf/1405.0301.pdf> (12.07.2021).
- Antcheva, I., Ballintijn, M., Bellenot, B., Biskup, M. ve Brun, R., 2009. ROOT — A C++ framework for petabyte data storage. Computer Physics Communications.
- Anonim, 2021. www.gokgunce.net: <http://www.gokgunce.net/2019/01/journal-club-ua2-deneyinin-hadronik-jet.html> (12.07.2021).
- Anonim, 2021. www.merdeka.com: <https://www.merdeka.com/teknologi/ilmuwan-cern-semakin-yakin-telah-temukan-partikel-tuhan.html> (12.07.2021).
- Ananim, 2021. <https://maddeveevren.tumblr.com/post/103205340894/kuarklar> (12.07.2021).
- Anonim, 2021. <https://cerncourier.com/a/alice-revitalised/> (05.07.2021).
- Atkin, R., 2015. Review of jet reconstruction algorithms. Journal of Physics: Conference Series.
- Becker, K., Becker, M. ve Schwarz, J. H. 2007. String Theory and M-Theory. Cambridge University.
- Beiser, A., 2008. Modern Fiziğin Kavramları. Akademi Yayıncılık.
- Bonilla, J. ve Chan, C.H., 2021. https://indico.cern.ch/event/484545/contributions/2283428/attachments/1327240/1992900/SSI_2016_JETS.pdf (11.07.2021).
- Brun, R. ve Rademakers, F., 1997. ROOT - An object oriented data analysis framework. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 81-86.
- Cacciari, M. ve Salam, G.P., 2008. The anti-kt jet clustering algorithm. LPTHE-07-03. CERN, 2021. <https://home.cern/science/experiments/cms> (12.07.2021).
- Çiçek, Ç., 2019, Ç. Çiçek İçinde, Dördüncü Aile Ağır Kuarkların Anormal Dipol Momentlerinin Yüksek Enerjili Lineer Hızlandırıcılarda İncelenmesi. (Yüksek Lisans Tezi).
- Deniz, İ., 2015. CMS Deneyinde İkili Jet Ölçümü (Yüksek Lisans Tezi). Adıyaman: Adıyaman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Desai, N.ve Skands, P.Z. 2012. Supersymmetry and generic BSM models in PYTHIA 8. The European Physical Journal C.
- Dulat, F., Lazopoulos, A. ve Mistlberger, B., 2018. iHixs2: Inclusive higgscrosssections. ComputerPhysicsCommunications, 243-260.
- Ellis, J. ve You, T. (2016). Sensitivities of prospective future e^+e^- colliders to decoupled new physics. Journal of High Energy Physics Volume.
- Ellis, R.K. ve Stirling, W.J., 1990. QCD and Collider Physics. Fermi National Accelerator Laboratory.

- Enterria, D. ve Snigirev, A.M., 2018. Triple-parton scatterings in proton–nucleus collisions at high energies. *The European Physical Journal C*, 359-366.
- Greenberg, O.W., 2008. Discovery of the colour degree of freedom in particular physics: A personal perspective. *Arxiv: Physics.Hist-ph*, 803-992.
- Griffiths, D., 1987. *Introduction to Elementary Particles*. Introduction to Elementary Particles, ed: D. Griffiths, John Wiley & sons, Inc., Canada, s. 392.
- Höche, S. (2015). <https://arxiv.org/pdf/1411.4085.pdf> (12.07.2021).
- Halimoğlu, G. (2018). Geleceğin Dairesel Çarpıştırıcısında 100 TeV'de Lepton+Jetlerin Ölçülmesi. (Yüksek Lisans Tezi).: İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Hoş, İ., 2016. Measurement of Inclusive Low-PT Jets Cross-Section and Azimuthal Angle Decorrelation of Jets with Large Rapidity Separation Using Run 1 CMS Data. (Doktora Tezi). Çukurova Üniversitesi, Adana.
- Khachatryan, V. vd., 2015. The CCFM Monte Carlo generator CASCADE 2.2.0. *Eur. Phys. J. C* 79, 1237.
- Kibar, G., 2008. Dördüncü Standart Model Ailesi Fermiyonlarının Üretimi ve Modelleme Çalışmaları. (Yüksek Lisans Tezi).
- Krane, K.S., 2002. *Nükleer Fizik*.: Palme, Ankara.
- LHAPDF, 2021. <https://lhapdf.hepforge.org> (12.07.2021).
- Machado, R., Panadero, I., Miranda, H. ve Laranjinha, F., 2021. Plastic scintillators and WLS optical fibers in particle physics - Characterization of scintillators for the future circular collider as a function of their dimensions and aging of WLS optical fibers. *Brazilian Journal of Physics*, 831–839.
- Mentink et al., M., 2016. Design of a 56 GJ twin solenoid and dipoles detector magnet system for the future circular collider. *IEEE Trans.Appl.Supercond*.
- Mentink, M., 2017. Tm forward dipoles for the FCC-hh detector magnet system,” *IEEE. IEEE Trans.Appl.Supercond*.
- Mertens, A., 2014. New features in Delphes 3. *Journal of Physics: Conference Series*.
- Okuyalı, Y.E. (2018). R-Parite'yi İhlal Eden Skaler Lepton Etkileşmelerinin Geleceğin Dairesel Çarpıştırıcısında Araştırılması. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Önengüt, G., 2007. 2. Ulusal Grid Çalıştayı. CERN'deki Büyük Hadron Çarpıştırıcısı ve LHC projesi. Tübitak.
- Özcan, M. 2021. <https://slideplayer.biz.tr/slide/16528926/> (12.07.2021).
- Öztaşcı, T. (2014). Büyük Hadron Çarpıştırıcısındaki (LHC) CMS Deneyinde Kü- x Fiziği. (Yüksek Lisans Tezi). Adıyama Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adıyaman.
- Öztonga, N.Y., 2016. KRD Toplam kuralları yöntemi ile Tensör Mezonların İncelenmesi. (Doktora Tezi). Kocaeli Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Sarı, S., 2013. Elektron-pozitron çarpışmasından Hadron üretilmesi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Şen, S., 2007. CMS Deneyinde Monte Carlo Yöntemiyle Süpersimetrik Parçacıkların Üretimi. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Uslan, E., 2019. CMS Deneyinde Farklı Jet Tetikleyicileri için Yüklü Hadronları Oranlarının Belirlenmesi. (Yüksek Lisans Tezi). Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Weinberg, S., 1967. A model of leptons. *Physical Review Letters*.

- Williams, W., 2014. Nükleer ve Parçacık Fiziği. Nobel., Ankara.
- Yılmazkaya, J., 2004. Kuark Gluon plazmanın Termodinamik Potansiyelinin Işık Koni Ayarında Hesaplanması. Kocaeli Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Yavaş, Ö., 2008. Parçacık hızlandırıcıları dünyadaki durum ve EPAC08.: IV.UPHDYO, Bodrum.
- Yavaş, Ö., tarih yok. Parçacık hızlandırıcıları. Ankara.
- Zimmermann, F., Benedikt, M., Schulte, D. ve Wenninger, J., 2014. 5th International Particle Accelerator Conference. Challenges for highest energy circular colliders. JACoW, Dresden.



