

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TAU NÖTRİNO SU ETKİLEŞİMLERİNİN SHİP DENEYİNDE
İNCELENMESİ**

Ayşe Nilay BOZDAĞ

FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ANKARA
2021**

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TAU NÖTRİNO SU ETKİLEŞİMLERİNİN SHİP DENEYİNDE İNCELENMESİ

Ayşe Nilay BOZDAĞ

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Deniz YILMAZ

Standart Model ve Ötesi yeni parçacıkların araştırılması için planlanan SHiP deneyinin CERN-SPS tesisine kurulması önerilmiştir. SHiP deneyi Standart Modelin cevaplayamadığı soruların cevabını yüksek demet yoğunluğunda ve düşük enerji ortamında araştıracaktır. SHiP bu özelliği ile Büyük Hadron Çarpıştırıcı deneylerini tamamlayıcı bir çalışma olması yanında, nötrino fiziği alanında da ölçümler yapma potansiyeline sahiptir. Bu tez çalışmasında tau nötrinosunun manyetik momentine SHiP deneyinin getirebileceği en iyi üst limit Monte Carlo benzetim yoluyla hesaplanmıştır.

Nötrino etkileşimi, GENIE olay oluşturucu ile oluşturulmuştur. Oluşturulan olaylar, GEANT 4 kullanılarak SHiP detektöründen geçirilmiş ve arka plan olayların sayısını tahmin etmek için kullanılmıştır. Sinyal görmeme durumu için tau nötrino manyetik momentini getirebilecek en iyi üst limit %90 güvenilirlik seviyesinde hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar önceki deneylerin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Ağustos 2021, 70 sayfa

Anahtar Kelimeler: CERN, SHiP Deneyi, Tau Nötrinosu, GENIE, GEANT 4, Monte Carlo Olay Üretimi

ABSTRACT

Master Thesis

STUDY OF TAU NEUTRINO INTERACTIONS IN THE SHiP EXPERIMENT

Ayşe Nilay BOZDAĞ

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Science
Department of Physics Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Deniz YILMAZ

The SHiP experiment proposed at CERN-SPS will search for new particles beyond the Standard Model. The SHiP detector is able to detect neutrino interaction and can perform precise measurements with large statistics. The SHiP experiment will search for new particle in luminosity domain. Therefore, it will be a complementary search to LHC experiment. In this thesis, the best upper limit that the SHiP experiment can bring to the tau neutrino's magnetic moment is obtained by the Monte Carlo Simulation.

The neutrino interaction is generated with GENIE event generator. The generated events are passed through SHiP detector by using GEANT 4 and are used to estimate number of background events. In case of zero signal, we obtain an upper limit on tau neutrino magnetic moment at 90% CL. The obtained limit is compared with the previous experimental results.

August 2021, 70 pages

Key Words: CERN, SHiP Experiment, Tau Neutrinos, GENIE, GEANT 4, Monte Carlo Event Generation

TEŞEKKÜR

Çalışmalarımı yönlendiren, araştırmalarımın her aşamasında öneri ve yardımlarını esirgemeyerek akademik ortamda olduğu kadar beşeri ilişkilerde de engin fikirleriyle yetişmeye ve gelişmeye katkıda bulunan danışman hocam Doç. Dr. Deniz YILMAZ' a en içten duygularla teşekkür ederim. Tez konumda, kaynak ve yöntem açısından bana sürekli yardımda bulunarak çalışmalarımı yakından takip eden, desteğini esirgemeyen, ODTÜ Yüksek Enerji Laboratuvarında çalışmalarımı sürdürmeme olanak sağlayan kıymetli hocam Prof. Dr. Ali Murat GÜLER' e teşekkürü borç bilirim.

Ayrıca, CERN SHiP deneyine katılımımı sağlayan ve deney süresi boyunca desteklerini esirgemeyen başta değerli hocam Prof. Dr. Ali Ulvi YILMAZER' e ve Arş. Gör. Dr. Çağın KAMIŞCIOĞLU hocama teşekkür ederim.

Çalışmalarımda bilgisiyle ve tecrübesiyle katkı sunarak bana yol gösteren Antonio IULIANO' ya teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin geliştirilmesi ve gerekli düzenlemelerin sağlanabilmesi konusunda beni destekleyen ve yardımcı olan, tez jürimde yer alan Prof. Dr. Banu ŞAHİN hocama yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Bana yardımlarını esirgemeyen, tez aşamam süresince katkıda bulunan ODTÜ Yüksek enerji laboratuvarındaki çalışma arkadaşlarım Yüksek Fizikçi Atakan Tuğberk AKMETE, Yüksek Fizikçi Onur DURHAN, Yüksek Fizikçi Muhteşem Akif KORKMAZ' a ve her zaman tüm sorularımı cevaplayıp, tez aşamamda karşılaştığım tüm sorunlarda her zaman yardımcı olup tüm bilgi ve birikimini benimle paylaşan Emircan ELİKKAYA' ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Arkadaşım Ahmed GHWELL' e ve Hasan Berat YILDIZ' a tezimin son aşamalarında kodlama konusundaki bilgileriyle yardımcı oldukları için ayrıca teşekkür ederim.

Tez çalışmam süresince desteği ve tez düzenlemesindeki yardımı için Ceyda SAV KÖK' e ve Sultan Eylül Öcal' a teşekkürlerimi sunarım.

Beni yetiştiren, eğitim ve özel hayatımda her zaman destekleyip, öncülük eden, zor zamanlarımda yanımda olan yegâne aileme ve ayrıca tez yazım süresince bana yardımcı olan kardeşim Ali Gencay BOZDAĞ' a teşekkürlerimi sunarım.

Tezimi aileme ve bu çalışmadan yararlanacak olanlara ithaf ediyorum.

Ayşe Nilay BOZDAĞ
Ankara, Ağustos 2021

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
SİMGELER DİZİNİ	vi
KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	4
2.1 Standart Model.....	4
2.2 Standart Model ve Ötesi	6
2.3 Gizli Sektör	9
2.3.1 Vektör portalı	11
2.3.2 Skaler portal	11
2.3.3 Nötrino portalı.....	12
3. SHiP DENEYİ	13
3.1 SHiP Deneyinin Amacı	15
3.2 SHiP Deneyinin Genel Hattı	16
4. DEMET BLOKLAMA DENEYİNDE NÖTRİNO FİZİĞİ	22
5. NÖTRİNO ETKİLEŞİMLERİ.....	23
5.1 Nötrino – Elektron Etkileşimleri	23
5.1.1 Nötrino- elektron elastik saçılımı.....	23
5.1.2 Nötrino- elektron yarı elastik saçılımı.....	26
5.2 Nötrino- Çekirdek Etkileşimleri	27
5.2.1 Yarı elastik yüklü akım etkileşimleri	27
5.2.2 Elastik nötral akım etkileşimi	27
5.2.3 Yüklü akım derin elastik olmayan saçılım	28
6. NÖTRİNONUN MANYETİK MOMENTİ	32
6.1 CCDIS $\nu\tau$ Tesir Kesiti	35
7. MATERYAL VE YÖNTEM.....	38
7.1 SHiP Yazılım Sistemi	38

7.2 Monte Carlo Olay Simülasyonu.....	39
8. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	43
8.1 Veriler	43
8.2 Olay Sayısı Normalizasyonu ve Tau Nötrinosunun Manyetik Moment Üst Sınırının Hesaplaması.....	52
9. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	54
KAYNAKLAR	55



SİMGELER DİZİNİ

eV	Elektron Volt
MeV	Mega Elektron Volt
GeV	Giga Elektron Volt
TeV	Tera Elektron Volt
PeV	Peta Elektron Volt
m	Metre
s	Saniye
ps	Pico Saniye
dk	Dakika
μ_B	Bohr Manyetron
CP	Yük-Parite
G_F	Fermi Kuplaj Sabiti
e	Elektron
μ	Müon
τ	Tau
ν_e	Elektron Nötrinosu
ν_μ	Müon Nötrinosu
ν_τ	Tau Nötrinosu
$\mathcal{L}$	Lagranjiyen

KISALTMALAR DİZİNİ

BEBC	Big European Bubble Chamber
CC	Yüklü Akım
CPU	Central Processing Unit
CERN	The European Organization for Nuclear Research
CES	Kompakt Emülsiyon Spektrometre
DIS	Derin Elastik Olmayan Saçılım
DONUT	Direct Observation of the Nu Tau
EBA	Evrenin Baryon Asimetrisi
ECAL	Elektromanyetik Kalorimetre
ECC	Emülsiyon Bulut Odası
EL	Elastik Saçılım
GENIE	Neutrino Monte Carlo Generator
GS	Gizli Sektör
GST	GENIE Summary Event Tree
HNL	Ağır Nötral Leptonlar
KAT	Kuantum Alan Teori
KED	Kuantum Elektro-Dinamiği
KKD	Kuantum Kromo-Dinamiği
LHC	Büyük Hadron Çarpıştırıcısı
LEP	Büyük Elektron-Pozitron Çarpıştırıcısı
LDM	Light Dark Matter
LNGS	Laboratori Nazionali del Gran Sasso

MC	Monte Carlo
NC	Nötral Akım
OPERA	Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus
PNGB	Pseudo Nambu-Goldstone Bozon
PoT	Proton Hedefi
QE	Yarı-Elastik Saçılım
RES	Rezonans Saçılım
SHiP	Search for Hidden Particles
SM	Standart Model
SND	Saçılım ve Nötrino Detektörü
SMÖ	Standart Model ve Ötesi
SPS	Super Proton Synchrotron
SUSY	Süper Simetri
TD	Zamanlama Detektörü
TT	Hedef İzleyici
TZM	Titanium-Zirconium Doped Molybdeum

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Standart Model' deki temel parçacıklar	5
Şekil 2.2 Üç sınırdaki olası araştırma bölgeleri	8
Şekil 2.3 Yüksek enerji fiziğindeki enerji ve yoğunluk sınırları	8
Şekil 2.4 Karanlık foton değişiminden kaynaklı müon anormal manyetik momenti için bir döngü düzeltilmesi	11
Şekil 2.5 Hafif karanlık madde etkileşimleri için Feynman diagramları; a) Çekirdek veya elektronlarla elastik saçılma, b) Tek pion üretimi için yarı-elastik saçılma, c) Derin esnek olmayan saçılma.....	12
Şekil 2.6 MSM'deki sağ elli nötrinolar.....	12
Şekil 3.1 SHiP deneyi yerleşiminin şeması	13
Şekil 3.2 Tau nötrinosu ve tau anti-nötrinosu üreten $Ds +$ bozunma zinciri örneği	15
Şekil 3.3 SHiP tesisinin genel şeması	17
Şekil 3.4 Müon kalkanı	18
Şekil 3.5 SND ve müon tanımlayıcı sisteminin şematik gösterimi.....	19
Şekil 3.6 ECC ve CES' nin şematik gösterimi.....	20
Şekil 3.7 Gizli sektör bozunum bölgesi	20
Şekil 3.8 Mıknatısla çevrili GS spektrometresinin vakum yüzeyi.....	21
Şekil 5.1 SM' de nötrino ve Lepton Saçılımı	24
Şekil 5.2 Elektron nötrinosu ve elektronun elastik saçılım Feynman diagramı: a) Yüklü akımı b) Nötral akım	25
Şekil 5.3 Elektron anti-nötrinosu ve elektronun Feynman diagramı a) Yüklü akım b) Nötral akım	26
Şekil 5.4 a) $\nu\mu, \tau + e \rightarrow \nu\mu, \tau + e$ – elastik saçılım süreci Feynman diagramı b) $\nu\mu + e \rightarrow \nu e + \mu$ – yüklü akım Feynman diagramı.....	26
Şekil 5.5 CCDIS Feynman digramı	28
Şekil 5.6 NCDIS Feynman digramı	30
Şekil 6.1 a) Bir elektronun manyetik moment köşe noktası b) Bir nötrinonun manyetik moment köşe noktası.....	34
Şekil 6.2 Nötrino-elektron manyetik moment etkileşiminin Feynman diagramı.....	35
Şekil 6.3 CCDIS için ağaç düzeyinde Feynman diagramı	36
Şekil 8.1 CCDIS için elektron saçılım açısı ve elektron enerji grafiği	43
Şekil 8.2 CCQE için elektron saçılım açısı ve elektron enerji grafiği	44
Şekil 8.3 NCDIS için elektron saçılım açısı ve elektron enerji grafiği	44
Şekil 8.4 NCEL için elektron saçılım açısı ve elektron enerji grafiği	45
Şekil 8.5 NCRES için elektron saçılım açısı ve elektron enerji grafiği	45
Şekil 8.6 NCRES saçılımı için Bjorken-x ve esnek olmama	47
Şekil 8.7 NCEL saçılımı için Bjorken-x ve esnek olmama	48
Şekil 8.8 CCQE saçılımı için Bjorken-x ve esnek olmama	49
Şekil 8.9 CCDIS saçılımı için Bjorken-x ve esnek olmama	50
Şekil 8.10 NCDIS saçılımı için Bjorken-x ve esnek olmama.....	51
Şekil 8.11 Elektron ötrinosunun nötrino hedefindeki momentum dağılımı.....	52

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Standart Model' de temel parçacıkların etkileşim türleri ve özellikleri	6
Çizelge 2.2 Olası portal etkileşimleri	10
Çizelge 5.1 Fermiyon bağlaşım sabitleri.....	25
Çizelge 6.1 Nötrino özellikleri için mevcut limitler (Schwienhorst, 2000)	33
Çizelge 8.1 MC olay sayıları.....	46
Çizelge 8.2 Tau nötrino manyetik moment üst sınırının karşılaştırılması	53



1. GİRİŞ

Parçacık fiziğinin Standart Modeli (SM) 2012 yılında Higgs bozonunun keşfedilmesiyle tamamlanmıştır. Yapılan sayısız testlerden, başarılı ölçümler çıkmasına rağmen SM' nin açıklayamadığı birçok önemli problem vardır. Örneğin, SM karanlık madde, madde ve anti-madde asimetrisini açıklayamamaktadır. Ayrıca nötrino SM' de kütesiz olarak tanımlanmıştır. Ancak, nötrino salınımlarının gözlemlenmesi nötrininonun kütleli bir parçacık olduğunun ispatıdır. Bu kapsamda değerlendirildiğinde SM eksik bir model olarak tanımlanmaktadır. Standart Model ve Ötesi (SMÖ) fizik çalışmaları bu soruların cevaplarını araştırmaktadır. Bu çalışmalar temel olarak iki ayrı kanaldan yürütülmektedir. İlk kanal SM' nin cevaplayamadığı soruların cevabının yüksek enerjilerde, çarpıştırıcı deneylerinde aranmasıdır. Aranan yeni parçacıkların yüksek enerjili proton-proton çarpıştırıcılarında oluşması beklenmektedir. CERN' deki Büyük Hadron Çarpıştırıcısında proton enerjisinin 100 TeV' e (FCC deneyi) kadar çıkarılması bunun sonucunda da daha yüksek enerji bölgelerinde yeni parçacıkların aranması planlanmaktadır. İkinci kanal ise düşük enerjilerde ancak yüksek demet yoğunluğunun olduğu deneylerde gizli parçacıkların aranmasıdır. Çok zayıf etkileşim yapan bu parçacıklar ancak çok yüksek yoğunlukta etkileşirler.

Gizli parçacıkların araştırılması için enerji ve yoğunluk sınırlarına geçişin sağlanması gerekmektedir. Gizli Sektör (GS) araştırmaları ve sınırlara geçişin sağlanabilmesi için portallara ihtiyaç vardır. Portallar, SM' deki parçacıklarla Gizli Sektördeki parçacıkların etkileşimleri, nötrino fiziği etkileşimleri ve çeşni fiziği gibi araştırmaların yapılabilmesi için önemli bir araçtır.

Hafif gizli parçacıkları sıfır arka planla keşfetmeyi amaçlayan SHiP (Search for Hidden Particles) deneyi, CERN' de SPS (Super Proton Synchrotron) hızlandırıcısında, sabit hedefli demet bloklama tesisi (beam dump facility) olarak önerilmiştir. Deney tau nötrinoları ile ölçüm yapmak için eşsiz bir tesistir. SHiP deneyinin genel araştırma programında ayrıca uzun ömürlü egzotik parçacıkları içeren çeşitli modellerin

araştırılması da planlanmıştır. Tesis gelecekte karanlık madde ve lepton çeşni ihlali için doğrudan araştırma yapılmasına izin verecek şekilde genişletilebilir olarak tasarlanmıştır.

SPS hattından gelen yüksek yoğunluklu 400 GeV enerjiye sahip demet, çok zayıf etkileşimli düşük enerjili SUSY (Süper Simetri) durumları da dahil olmak üzere, kütleleri $10 \text{ GeV}/c^2$ ' nin altında olan yeni zayıf etkileşimli parçacıkların araştırılmasını sağlamaktadır. CERN-SPS, beş yıllık veri alımı süresince demet bloklama tesisinde hedefte 2×10^{20} proton akısı sağlayacaktır.

Tezin genel yapısına bakıldığında, kuramsal kısımda Standart Modeldeki parçacıklar ve aralarındaki etkileşim türlerinden bahsedilmiştir. SM' nin cevap veremediği soruların araştırılması için Standart Model ve Ötesinde bahsi geçen enerji sınırı, yoğunluk sınırı, kozmolojik sınırdan ve sınırların katkı sunduğu araştırma konularından bahsedilmiştir. Gizli sektördeki, gizli parçacıklara ulaşabilmek için SM sektörüne bağlanan küçük boyutsuz bağlantı sabitleri olan vektörel portal, skaler portal ve nötrino portalı kısaca açıklanmıştır. CERN' de SPS hattında kurulması planlanan SHiP deneyi hakkında bilgi verilmiştir. SHiP' in genel şeması verilerek, tesisin tüm bileşenleri ve kullanılan detektör, gizli sektör bozunum bölgesi ve spektrometresinden bahsedilmiştir. Ek olarak, SPS' de demet bloklama tesisi olarak kurulması planlanan SHiP deneyindeki nötrino fiziğinden bahsedilmiştir. Nötrino-elektron ve nötrino-çekirdek etkileşimlerinden bahsedilerek süreçlerin Feynman diagramları verilmiştir. Tau nötrinosunun manyetik moment hesabının anlaşılabilmesi için nötrinin manyetik momentinden ve yüklü akım derin elastik olmayan saçılımdaki (CCDIS) tau nötrinosunun (ν_τ) tesir kesitinin hesabından bahsedilmiştir.

Tezin materyal ve yöntem kısmında, tez çalışmasının deneysel hesaplarının yapılmasında kullanılan SHiP' in yazılım sistemi FairShip' ten ve onun içerisinde kullanılan diğer yazılım paketlerinden bahsedilmiştir. Monte Carlo (MC) arka plan olay üretimleri için GENIE Monte Carlo üretici kullanılmıştır. GEANT 4' te, üretilen MC

olayları SHiP geometrisinden geçirilmiştir. Süreç boyunca yapılan benzetim işlemleri ve kullanılan yazılım örnekleri paylaşılmıştır.

Araştırma bulgularında, elde edilen MC arka plan olay sayılarına uygulanan seçim kriterleri sonucunda elde edilen enerji-saçılım açısı histogramları verilerek, tüm saçılım türleri için ayrı ayrı veriler çizelgede gösterilmiştir. Elektron nötrinosu için hesaplanan Bjorken-x ve elastik olmama histogramları verilmiştir. Üretilen MC arka plan olay sayısının normalizasyonu yapılarak tau nötrinosunun manyetik moment üst sınır hesabı yapılmıştır. Çıkan sonuç DONUT ve BEBC deneyleriyle karşılaştırılmıştır ve şimdiye kadar yapılan deneylere kıyasla en iyi tau nötrinosunun manyetik moment üst sınır hesabı elde edilmiştir. Genel değerlendirme ve sonuçların yorumlanmasına tartışma ve sonuç kısmında yer verilmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 Standart Model

Standart Model (SM), temel parçacık etkileşimleri olan zayıf, güçlü ve elektromanyetik etkileşimi $SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ ayar simetrisi altında açıklayan kuantum alan teorisidir. Burada, C indisi “renk”, L indisi “sol eli kiralite” ve Y indisi “hiperyük” şeklinde tanımlanmaktadır. SM ayar bozonları, güçlü etkileşimler için sekiz tane yüksüz gluon, elektromanyetik etkileşimler için γ ve zayıf etkileşimler için $W^\pm$ ve Z' dir (Giunti ve Kim, 2007).

SM’ de doğada parçacıklar spin durumuna göre fermiyonlar ve bozonlar olmak üzere iki farklı gruba ayrılırlar. Fermiyonlar; Fermi-Dirac istatistiğine uyarlar, tüm temel fermiyonlar $\frac{1}{2}$ spinlidirler. Fermiyonlar; leptonlar ve kuarklar olmak üzere ikiye ayrılırlar. Leptonlar; elektron (e), elektron nötrinosu (ν_e), müon (μ), müon nötrinosu (ν_μ), tau (τ), tau nötrinosu (ν_τ) ve bu parçacıkların anti parçacıklarından oluşurlar, kuarklar ise; yukarı (u), aşağı (d), tılsım (t), garip (s), üst (t), alt (b) ve bunların karışık yüklü anti kuarklarından oluşmaktadır. Bozonlar ise; Bose-Einstein istatistiğine uyarlar ve tam sayılı spine sahiptirler. SM’ nin kuvvet taşıyan bozonları (gluonlar, fotonlar, W ve Z) vektör alanlarına eşlik etikleri için 1 spinine sahiptirler. Higgs bozonu bir skaler alana karşı gelir; bu nedenle 0 spine sahiptir. Gravitasyonel alan parçacığı graviton tensör alanına karşılık geldiğinden 2 spinine sahiptir.

Doğada kuarklar tek başına bulunamazlar, hadronların içerisine hapsolmuş bir şekilde bulunurlar. Hadronları mezonlar ve baryonlar olarak iki grupta incelemekteyiz. Üç kuark içeren hadronlar baryon, bir kuark ve bir anti-kuarktan oluşan hadronlara da mezon denilmektedir. Bir baryon olan proton (uud) iki tane yukarı bir tane aşağı kuarktan oluşmaktadır ve protonlar kendisinden daha hafif bir baryon olmadığı için bozunamazlar. Şekil 2.1’ de SM’ deki temel parçacıklar gösterilmiştir.

	I	II	III		
kütle	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 125.09 \text{ GeV}/c^2$
yük	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0	0
spin	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	0
	u yukarı	c tılsım	t üst	g gluon	H Higgs
KUARKLAR					SKALER BOZONLAR
	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	d aşağı	s garip	b alt	γ foton	
LEPTONLAR	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	e elektron	μ müon	τ tau	Z Z Bozonu	
	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 1.7 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	ν_e elektron nötrinosu	ν_μ müon nötrinosu	ν_τ tau nötrinosu	W W Bozonu	
					AYAR BOZONLARI

Şekil 2.1 Standart Model' deki temel parçacıklar

Elektromanyetik alanın yüklü parçacık etkileşimi kuantum elektro-dinamiği (KED) altında formüle edilir. Güçlü etkileşimler ise kuantum kromo-dinamiği (KKD) yani renk teorisi ile formüle edilir. KKD' de elektrik yükü yerine renk dinamiği vardır. Hadronların içine hapsedilmiş 8 tane renkli gluon vardır. Doğada serbest halde bulunan renkli gluon yoktur. Aşağıdaki Çizelge 2.1'de SM' de temel parçacıkların etkileşim türleri ve özellikleri listelenmiştir (Griffiths, 1987), (Bilenky, 2017), (Nagashima, 2013).

Çizelge 2.1 Standart Model' de temel parçacıkların etkileşim türleri ve özellikleri

	Güçlü Etkileşim	Elektromanyetik Etkileşim	Zayıf Etkileşim
Dinamiği	Kromodinamik (KCD)	Elektrodinamik	Çeşni Dinamiği (KED)
Menzili	$\sim 10^{-15}m$	∞	10^{-18}
Gücü	$10^{-15} - 10^{-18}$	1/137	10^{-5}
Etkileşim Ömrü	$10^{-23}s$	$10^{-16}s$	$10^{-12}s$ den 15 dk kadar
Kuvvet taşıyıcıları	g (gluon)	γ (foton)	$W^{\pm}, Z^0$

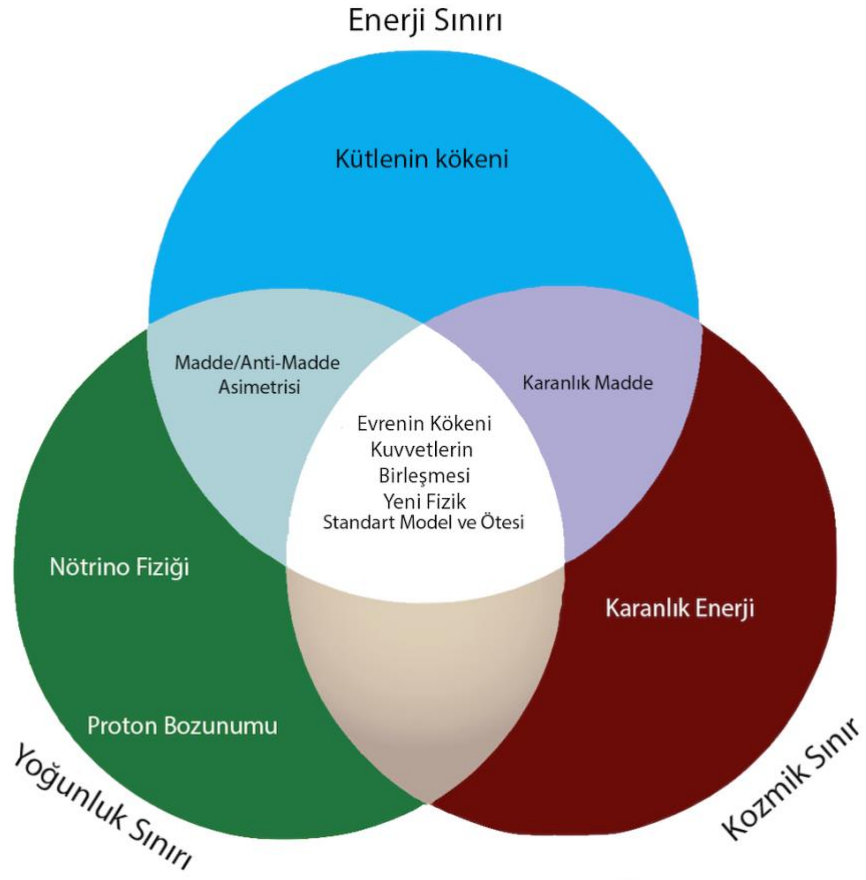
2.2 Standart Model ve Ötesi

Standart Model, günümüzde yapılan deneylerle uyumlu olmasına rağmen halen cevaplayamadığı birçok soru vardır. Teorinin başarılı olabilmesi için standart modelin ötesine geçilmesi gerekmektedir. Aşağıda belirtildiği gibi çözümlenmemiş bazı ana sorular Standart Model ve Ötesi (SMÖ) olarak adlandırılmaktadır:

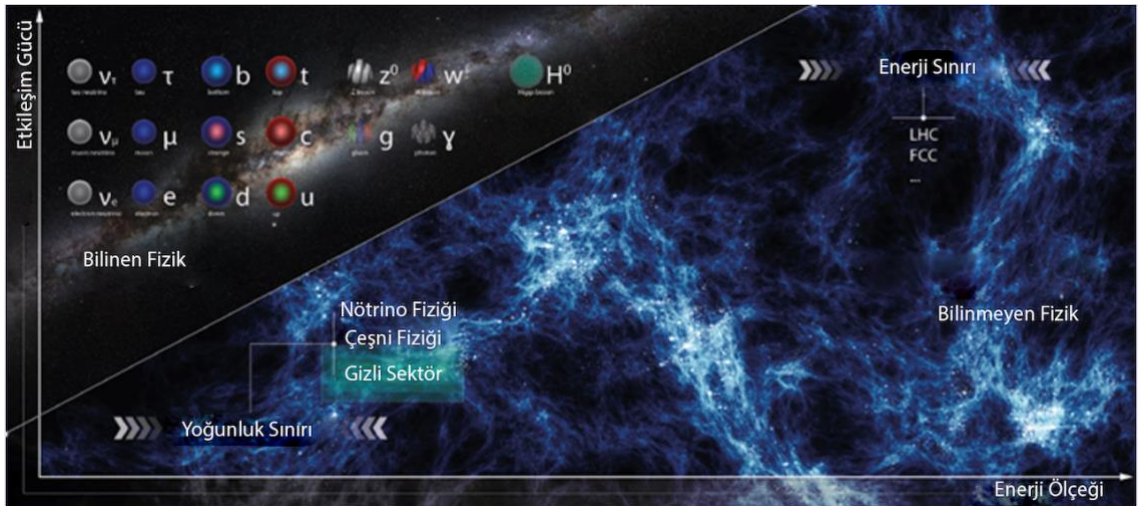
- **Evrenin baryon asimetrisi (EBA):** Evrendeki madde ve anti maddedeki dengesizlik
- **Karanlık Madde:** Evrende en çok rastlanan madde nedir?
- **Karanlık Enerji:** Evrenin hızlı bir şekilde genişlemesini sağlayan şey nedir?
- **Kozmik Enflasyon:** Evrenin ilk oluşum aşamasındaki hızlandırılmış genişlemesini sağlayan şey nedir?

Yukarıdaki soruların cevabını verebilmek için şimdiye kadar henüz keşfedilmemiş parçacıklar ve onların etkileşim türlerinin belirlenmesine ihtiyaç vardır. SMÖ' yü

özümlemeden sorumlu bazı parçacıklar çok ağır olabilir ve SM’ deki parçacıklarla doğrudan etkileşimde olmayabilirler. Ek olarak, yüksek çarpışma enerjisi için gerekli teknolojik altyapının sağlanamamış olması bu parçacıkları gözlememizi zorlaştırmaktadır. Bu durum “enerji sınırı” olarak adlandırılmıştır. CERN’ deki Büyük Hadron arpıştırıcısı (LHC), Büyük Elektron-Pozitron arpıştırıcısı (LEP) ve ABD’ deki Tevatron gibi hızlandırıcılar büyük parçacık fiziği laboratuvarları bu yolu izlemişlerdir. Bir diğer sebep ise, parçacıkların ağırlığından değil de zayıf etkileşimlerinden kaynaklanıyor olabileceğidir. Böyle bir durumda parçacıklar “enerji sınırını” değil gözlemlenen “yoğunluk sınırını” geçmesi gerekmektedir. Benzer şekilde; “ kozmik sınır” deneyleri, zayıf etkileşimde bulunan yeni ağır parçacıkları inceleyebilmektedir. Enerji sınırının gözlenmesiyle birlikte yüksek kütleli parçacıkların araştırılması mümkün olacaktır. Yoğunluk sınırının keşfedilmesiyle de zayıf etkileşimlerin test edilmesi uygun olacaktır. Kozmik sınırın keşfiyle de karanlık enerji ve karanlık maddeyi anlamak mümkün olacaktır. Şekil 2.2’ de enerji, yoğunluk ve kozmik sınırların katkıda bulunacağı araştırma konuları verilmiştir. Şekil 2.3’ de ise yüksek enerji fiziğindeki enerji ve yoğunluk sınırları gösterilmiştir (The SHİP Collaboration, Physics Case, 2015).



Şekil 2.2 Üç sınırdaki olası araştırma bölgeleri



Şekil 2.3 Yüksek enerji fiziğindeki enerji ve yoğunluk sınırları

2.3 Gizli Sektör

Gizli Sektör (GS) parçacıkları, SM parçacıklarıyla doğrudan etkileşime girmediği için şimdiye kadar keşfedilememiştir. GS parçacıkları, Standart Model ve Ötesinin anlaşılabilmesi için önemlidir. Bundan dolayı Gizli Sektöre, yoğunluk sınırı deneylerindeki etkileşimler yoluyla yeterince hafif parçacıklar aracılığıyla SM sektörüne bağlanan küçük boyutsuz bağlantı sabitleri olan “portallar” ile yeniden normalleştirilerek ulaşılabilir veya gizli sektörün yeni bir enerji ölçeğine karşılık gelen, boyutlu kuplajlar, Λ^{-n} , tarafından bastırılan daha yüksek boyutlu operatörlerle erişilebilir. GS parçacıkları;

- İlk çarpışmada üretilen mezon ve baryon bozunumlarıyla,
- Frenleme ışıınımı sürecinde ve protonların nükleon hedefte yarı-elastik saçılma olayıyla,
- $q\bar{q}$ Füzyon yoluyla,

demet bloklama deneylerinde (beam dump experiment) üretilebilir. Parçacıklar farklı yollarla SM’ de birleştirilebilir. Bunları analiz etmenin iki yolu şöyledir:

- ❖ Gizli portal adı verilen, küçük boyutsuz kuplaj sabitiyle etkileşimler tekrardan normalize edilebilir.
- ❖ Yüksek boyutlu operatörler tarafından bastırılan boyutlu kuplaj operatörü Λ^{-n} GS’ de yeni enerji ölçeğinin yerini tutar (Dario, 2017/2018).

SM tekli operatörünün kütle boyutuna bağlı olarak, SM’ de yeniden normalleştirilen portallar üç tiptedir.

Vektör Portalı: Tekli operatörü GeV^2 boyutuna sahiptir. Yeni parçacıklar, aşırı yüklü alanlarla ϵ boyutsuz kuplajla birleşmiş olan Z bozonu ve foton ile yeni vektör alanı arasındaki karma nitelendirmeyi sağlayan Abelyen alanlardır.

Skaler Portal: Tekli operatör GeV^2 boyutuna sahiptir. Yeni parçacıklar, Higgs alanının karesiyle kuplaj yapan skaler alanlardır.

Nötrino Portalı: $GeV^{5/2}$ boyutuna sahip $(\tilde{\mathcal{L}}_\alpha \cdot \tilde{\phi})$ operatörleriyle kuplaj yapan yeni

nötral tekli fermiyonlarla açıklanmaktadır.

$\mathcal{L}_\alpha$; SU(2) lepton ikililerinden biridir ve $\widetilde{\phi}_a = \epsilon_{ab}\phi_b$ ve $F_{\alpha l}$ boyutsuz Yukawa kuplajlarıdır. Çizelge 2.2’ de portallar ve onların etkileşim terimleri gösterilmektedir.

Çizelge 2.2 Olası portal etkileşimleri

Portallar	Etkileşim Terimleri
Vektör (Karanlık Foton)	$\epsilon F^{\mu\nu} F'_{\mu\nu}$
Skaler (Karanlık Skaler, Karanlık Higgs)	$(H^\dagger H)\phi$
Nötrino (HNL)	$H^\dagger \bar{N} L$

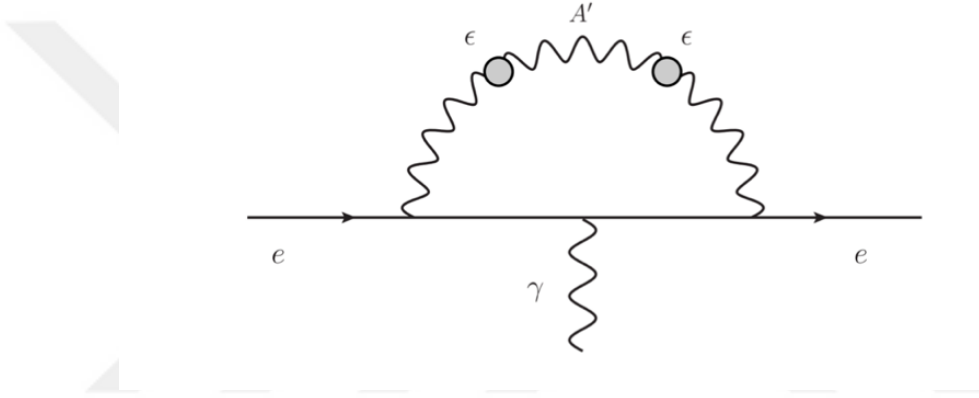
SM alanı içinde tanımlanan portal terimleri ayar değişmez Lagranjiyen terimleri ile verilmektedir (Lantwin, 2019):

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{SM} + \mathcal{L}_{Portal} + \mathcal{L}_{GS}$$

Nispeten hafif yeni parçacıkları keşfetmek için yüksek yoğunluklu proton sabit hedef deneyleri kullanılmaktadır. Özellikle bu tip deneylerde yukarıda bahsi geçen portalları temsil eden bir dizi SMÖ için bir takım parametre uzayları kullanılmaktadır. Bu parametreler; evrenin madde, anti-madde asimetrisinin mekanizmaları, nötrino kütlelerinin kökeni ve karanlık maddenin parçacık fiziği doğasının doğrudan deneysel izahına izin verecektir. Bunlara ek olarak SHiP tesisinde, SM’ deki parçacıkların arasındaki etkileşimler ile tau nötrinosu sektörünün fiziksel çalışmaları araştırılacaktır. Tau anti-nötrinosu ($\bar{\nu}_\tau$) saptanacak ve ayrıca, tau nötrinosu (ν_τ) ile tau anti-nötrinosunun ($\bar{\nu}_\tau$) tesir kesitleri ölçülecektir (Buonaura, 2017).

2.3.1 Vektör portalı

Vektör portalı çoğunlukla KED teorisindeki $U(1)_Y$ grubuyla verilen karanlık foton A' ve güç tensör alanı F' ile anılır. Müon anormal manyetik momenti ile araştırılmaktadır. Karanlık foton özellikle hafif karanlık maddenin karanlık madde aracısı üzerinde büyük rol oynar. Karanlık foton, A' , protondan gelen ışıyım ve güçlü proton-çekirdek etkileşiminin yol açtığı proton frenleme ışıyımı tarafından üretilebilir. Şekil 2.4'de karanlık foton değişiminden kaynaklı müon anormal manyetik moment için bir döngü düzeltmesi verilmiştir (Iuliano, 2016).

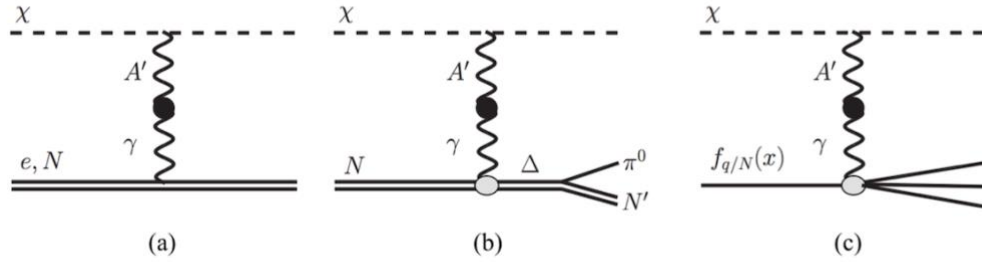


Şekil 2.4 Karanlık foton değişiminden kaynaklı müon anormal manyetik momenti için bir döngü düzeltmesi

2.3.2 Skaler portal

Higgs bozonunun keşfiyle beraber skaler bozonun doğadaki varlığı kanıtlanmış oldu. Genişletilmiş SM Higgs sektöründe SM ayar grubu altında tekli olan ve SM parçacıklarına yüksek oranda bastırılmış bağlantılara sahip olan hafif skaler ve pseudoskaler parçacıklar öngörülmektedir. Skaler portal aracılığıyla SM ile nötr sektör arasındaki geçiş sağlanabilir. Yani bu skaler birleşimi Higgs portalı üzerinden karanlık fizik sektörü üzerinde büyük rol oynar veya onları evrendeki karanlık madde üzerinde rol oynamaya teşvik edebilir. Bu hipoteze göre B mezonundan ve alt hadronlardan hafif olan skaler bir kabuk üzerinde bozunabilir, daha sonrasında ise SM fermiyonlarına bozunacaktır. Pseudoskaler bozonlar, kendiliğinden bozulan simetrisinin pseudo Nambu-Goldstone bozonları (PNGB) olarak da ortaya çıkabilir. Örneğin bir PNGB aksı, KKD'

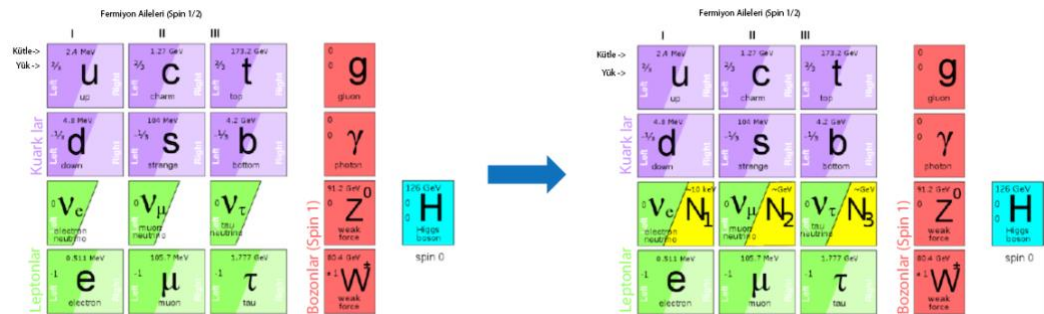
deki güçlü CP probleminin çözümü olarak verilebilir. Hafif karanlık maddedeki farklı etkileşimler için Feynman diyagramları Şekil 2.5’ te verilmiştir.



Şekil 2.5 Hafif karanlık madde etkileşimleri için Feynman diagramları; a) Çekirdek veya elektronlarla elastik saçılma, b) Tek pion üretimi için yarı-elastik saçılma, c) Derin esnek olmayan saçılma

2.3.3 Nötrino portalı

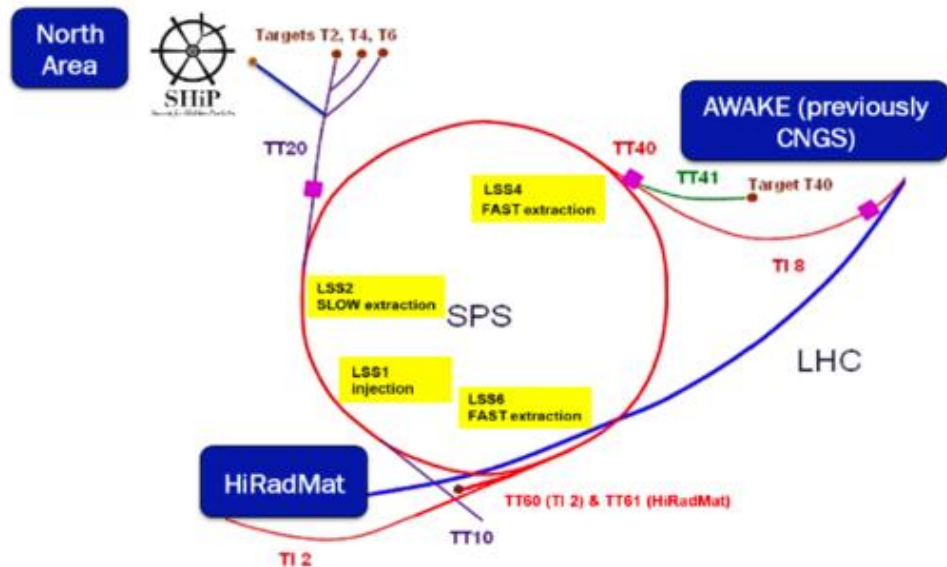
Nötrino Minimal Standart Model (***vMSM***), sol eli SM nötrinolarının birleşimine üç ağır sağ eli nötrinoyu ekleyerek SM’deki yapbozu tamamlamaya çözüm getiren minimalist bir yöntemdir. Ağır nötral parçacıklar verimsizdirler, örneğin kütle çekimi dışında temel SM etkileşimlerinden herhangi biriyle birleşmezler ve bunlar ayrıca Ağır Nötral Leptonlar (HNL) olarak adlandırılırlar. HNL Higgs bozonuyla birleşen $SU(2)_L \times U(1)_Y$ gruplarına karşılık gelen teklilerdir. SM nötrinolarındaki sağ eli eşlerin minimal uzantında (***vMSM***) eklenmiş hali Şekil 2.6’da gösterilmiştir.



Şekil 2.6 *vMSM*’deki sağ eli nötrinolar

3. SHiP DENEYİ

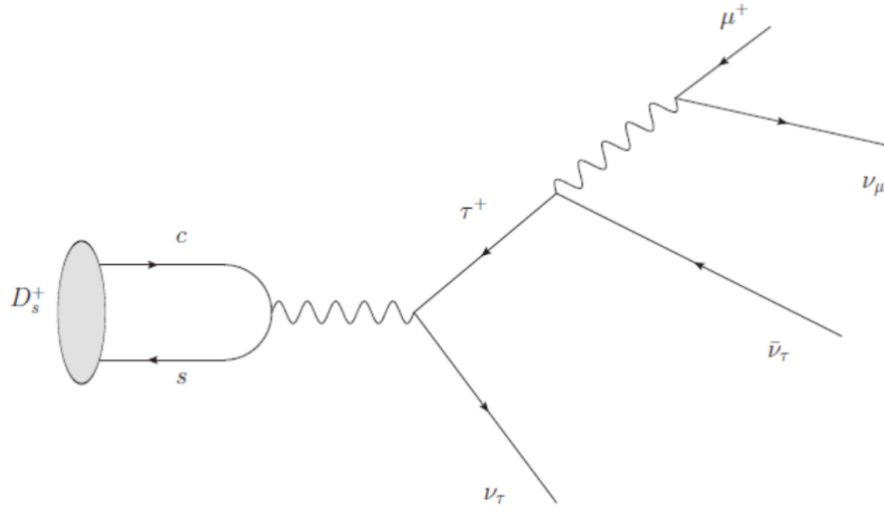
Higgs bozonunun bulunmasının ardından SM' nin tamamlanmasıyla birlikte tahmin edilen fizik tüm bileşenleriyle gözlemlenmiştir ve SM' nin cevap veremediği soruların çözümü için yeni bir fizik anlayışının gerekliliği vurgulanmıştır. Aynı zamanda ne teori ne de deney bu yeni fiziğin boyutu, doğası ve ölçeği hakkında net bir ipucu sağlamamaktadır. SMÖ' nün anlaşılabilmesi için gizli parçacıkların araştırılmasına ihtiyaç vardır. Böylelikle, SM' nin eksikliklerini giderebilecek birçok teorik model geliştirilebilir. SMÖ' nün geniş kısımda erişilebilir parametre alanı henüz keşfedilmediğinden, yeni genel bir amaçla CERN' deki SPS hızlandırıcısının kuzeyindeki TT20 hattında (Super Proton Synchrotron) kurulması planlanan SHiP (Search for Hidden Particles) deneyi gizli parçacıkları keşfetmeyi amaçlamaktadır. Örneğin; Ağır Nötral Leptonlar (HNL), karanlık foton, hafif skaler, süper simetrik parçacıklar ve aksiyonlar vb. Buna ek olarak, SHiP tesisinde, önceki deney bileşenlerinin toplamından istatistiksel olarak 1000 kat daha fazla tau nötrinoları ile ölçüm yapılacaktır. SHiP tesisi, gereken büyük verimleri üretebilmek için benzersiz bir yoğunluk ve enerji kombinasyonu sağlamaktadır. DeneySEL koşullar, bu kütle aralığındaki gizli parçacıklar için optimize edilecektir. Şekil 3.1' de SPS halkası üzerindeki SHiP deneyi için kullanılacak olan TT20 hattının şematik gösterimi mevcuttur.



Şekil 3.1 SHiP deneyi yerleşiminin şeması

SM' nin en az bilinen parçacığı olan tau nötrinosu (ν_τ) için benzersiz bir potansiyele sahip olan SHiP deneyi tau nötrino özellikleri ve etkileşimlerinin hassas ölçümlerine olanak sağlamaktadır. Böylelikle, SM' nin henüz gözlemlenememiş olan tau anti-nötrino ($\bar{\nu}_\tau$) parçacığı ilk kez gözlemlenebilecektir. Fermilab' taki DONUT (Direct Observation of the Nu Tau) deneyinde 9 tau nötrino adayı gözlemlenirken, LNGS'deki (Laboratori Nazionali del Gran Sasso) OPERA (Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus) deneyindeki salınımlarda 10 tau nötrinosu gözlemlenmiştir. SHiP deneyi çalışması sırasında yaklaşık 10^4 tau nötrino etkileşimi toplanacaktır. Yapılan diğer deneylerden bağımsız olarak ilk defa tau nötrinosu ve tau anti-nötrinosunun etkileşim tesir kesiti (σ) ölçülecektir. Aynı zamanda bu gözlem, elektron ve müon nötrino etkileşimlerinde ihmal edilen F_4 ve F_5 yapı fonksiyonlarının çıkarılmasına izin verir. Buna ek olarak, elektron nötrinosunun (ν_e) etkileşim tesir kesiti yüksek enerjilerde çalışılacak ve üretiminde tılsım hadron bozunmaları baskın olduğundan bu ölçüm aynı zamanda gizli parçacıkların aranması için normalize edilmesini sağlayacaktır.

SPS hızlandırıcısındaki SHiP deneyi sabit hedefli demet bloklama tesisidir. SPS' den gelen 400 GeV' lik proton demet enerjisiyle proton hedefinde (PoT), deneyin fiziki hassasiyeti uyarınca, toplamda 2×10^{20} proton akısı elde edilecektir. Bu enerji alanında, D_s mezon bozunumu tau nötrinosunun ana kaynağıdır. Tılsım bozunumları elektron ve müon nötrinolarının kaynağıdır. Tau nötrinosunun tesir kesit ölçümü nötrino akısının tahmini ile kesinleştirilir. Yüksek enerjilerde, $\nu_\tau + \bar{\nu}_\tau$ akısı $D_s \rightarrow \tau \nu_\tau$ leptonik bozunumuyla elde edilir. Şekil 3.2' de gösterilen D_s^+ bozunum zinciri örneğinde, her bir bozunumda iki tau nötrinosu üretilmektedir. Proton etkileşimlerinde D_s^+ ve D_s^- üretimi simetrik olduğundan, pozitif ve negatif mezonların eşit katkısı beklenmektedir (Iuliano, 2016).



Şekil 3.2 Tau nötrinosu ve tau anti-nötrinosu üreten D_s^+ bozunma zinciri örneği

3.1 SHiP Deneyinin Amacı

SHiP projesi yoğunluk sınırındaki benzersiz keşif çalışmaları sebebiyle geniş bir ilgi ve çalışmaya ayrılan süreyle motive edilmektedir. Proje CERN hızlandırıcı programına ve bütçesine uyacak şekilde tasarlanmıştır. 2025 yılında, LHC 4. çalışma yüksek parlaklık fazıyla beraber SHiP tesisinde veri almaya başlayacaktır. CERN hızlandırıcı programına göre SPS demetinin kuzeyinde kurulan deney 2035 yılına kadar devam edecektir. Bu on yıllık çalışma süresi boyunca fiziki verilerin alınması planlanmaktadır (The SHiP Collaboration, Technical Proposal, 2015).

Tau nötrinosunu gözlemleyebilmek için düşük enerjili elektronlara ihtiyaç vardır. Nötrino-elektron saçılımı ile tau nötrinolarını gözlemlemek mümkündür. Nötrino etkileşimini simüle edilmesinin amacı tau nötrinosunun (ν_τ) fiziği ve diğer nötrinoların çeşnilerinin fiziğini çalışmaktır. SHiP deneyiyle aşağıda bahsi geçen konularda nötrino fiziği üzerine gözlem yapılacaktır:

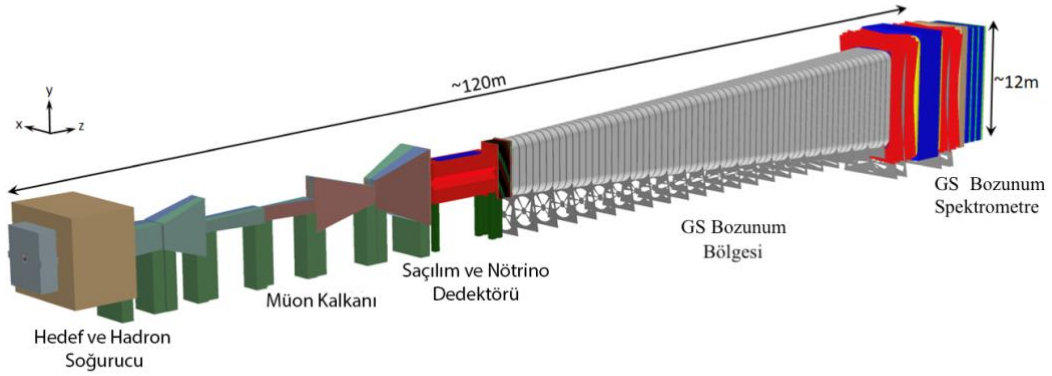
- Tau nötrinosunun (ν_τ) fiziği;
 - İlk kez tau anti-nötrinosu ($\bar{\nu}_\tau$) gözlemlenecektir,

- Tau nötrinosunun (ν_τ) ve tau anti-nötrinosunun ($\bar{\nu}_\tau$) önemli istatistiksel hesabı yapılacaktır ve ilk kez tesir kesitleri hesaplanacaktır.
- İlk kez derin elastik olmayan saçılma (DIS) nötrino-çekirdek etkileşiminde F_4 ve F_5 yapı faktörleri hesaplanacaktır.
- Tau nötrinosunun (ν_τ) manyetik momenti tahmin edilecektir.
- Diğer nötrino çeşnilerinin fiziği ile;
 - Nötrininin indüklenen tılsım veriminin çalışılması gerçekleştirilecektir.
 - Anti-nötrino etkileşimlerinde tılsımlı hadron üretimi çekirdekteki anti-garip kuarkı ayırt ederek. Çekirdek içindeki s-kuark hakkındaki belirsizliği indirgeme olasılığı vardır.

Bu tez kapsamında tau nötrinosunun (ν_τ) fiziği ve MC simülasyonu sonucu elde edilen verilerle tau nötrinosunun manyetik moment üst sınırının tahmini yapılmıştır. Bu çalışma boyunca izlenen süreç kesim 7.2. Monte Carlo (MC) Olay Simülasyonu kısmında değinilmektedir (Buonaura, 2019).

3.2 SHİP Deneyinin Genel Hattı

SHİP demet hattı esas olarak ~ 120 m sürüklenme alanı ile ~ 50 m uzunluğundaki bir GS bozunum bölgesine sahiptir. SHİP deneyi, SHİP hedefinde manyetik spektrometre, kalorimetre, müon ve nötrino dedektörleri ile çok uzun ömürlü parçacıklar sağlamak için hadron durdurucu bulunmaktadır. Tesis SMÖ yeni parçacık arama gereksinimiyle optimize edildiğinden dolayı, nötrino salınım çalışmaları için uygun değildir ve deney düzeneği nötrinoların tüm çeşnileriyle tılsımlı hadron üretimleri içeren nötrino etkileşimlerini çalışmak için idealdir. Bu nedenle, deney gizli parçacık detektörünün bozunma bölgesinin yukarı akışına yerleştirilmiş bir nötrino detektörüyle nötrino fiziği araştırmaları yapacaktır. Şekil 3.3' de SHİP tesisinin proton hedefinden gizli sektör spektrometre detektörünün sonuna kadar genel bir şematik görünümü gösterilmektedir (The SHİP Collaboration, Technical Proposal, 2015).

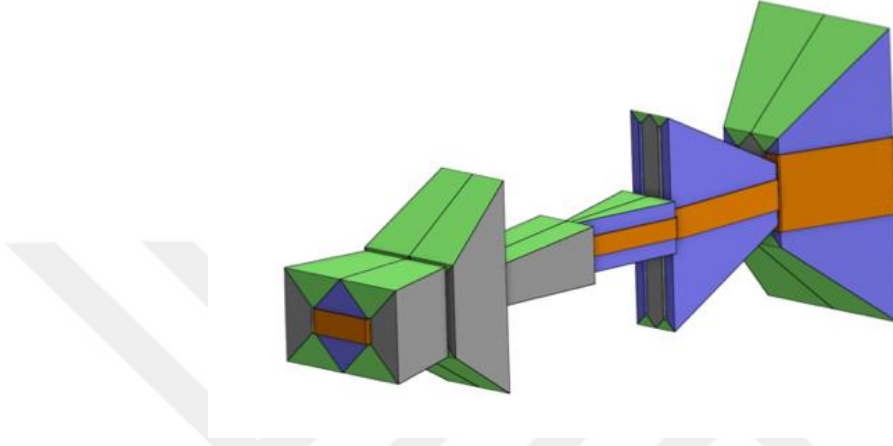


Şekil 3.3 SHiP tesisinin genel şeması

Gizli parçacıklar ağırlıklı olarak hadronların bozunumundan özellikle de tılsımlı hadron bozunumlarında ve proton frenleme ışınımından üretilmektedir. Hadron durdurucusuyla hedefte hadronlar, elektronlar ve fotonlar durdurularak, hafif hadron bozunumlarından nötrino üretimi en aza indirilecektir ve böylelikle detektör müon akısından korunacaktır. Hedefteki proton etkileşimi, pionlar ve kaonların bozunmadan önce durdurulması gerektiğinden en kısa etkileşim uzunluğuna sahip bir malzemeden yapılmıştır. Böylelikle hedefin, müon ve nötrino üretiminin nükleer etkileşimden etkilenmemesi için mümkün olan en kısa uzunlukta olması ve proton duşu (shower) için tasarlanan soğutma sisteminin minimum aralıkta olması planlanmıştır. Hedefin malzemesi Titanyum-Zirkonyum katkılı Molibdenden (TZM) ve ardından saf tungsten bloklarından yapılmıştır.

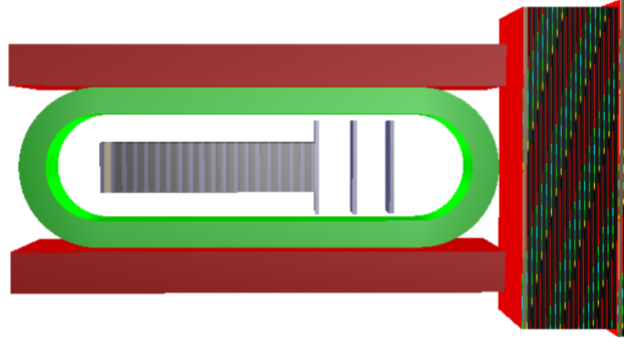
Müon kalkanı ve SHiP detektör sistemleri yaklaşık 15 m derinlikte, ~ 120 m uzunluğunda bir yeraltı deney istasyonuna kurulmuştur. Şekil 3.4’ de müon kalkanının CAD çizimi verilmiştir. Müon kalkanı alanındaki müon arka plan akısından temizlenecek şekilde 35 m uzunluğunda, 1300 tonluk manyetik kütleyle sahiptir. Müon kalkanını tau nötrino detektörü takip eder. Tau nötrino detektörünün uzunluğu, müon akısının durdurulmasından, nötrino detektörünün gereksiz yer kaplamasından ve gizli sektörün arka planının indüklenmesine sebep olmasından kaçınılmıştır. Tau nötrino detektörünün asıl amacı ilk etkileşimdeki tau anti-nötrinosunu ($\bar{\nu}_\tau$) gözlemlemek ve tau nötrinosunun (ν_τ) ve tau anti-nötrinosunun ($\bar{\nu}_\tau$) tesir kesitini ölçmektir. Hedefteki 2×10^{20}

duyarlılıkta proton akısı ile beş yıllık bir çalışma itibariyle toplamda eşit miktarda 5.7×10^{15} tau ve tau anti-nötrinolarının üretilmesi beklenmekle beraber tahmini rakam müon ve elektron nötrinoları için 0.5 GeV' in üzerinde sırasıyla 7.2×10^{18} ve 3.7×10^{17} üretim beklenmektedir.



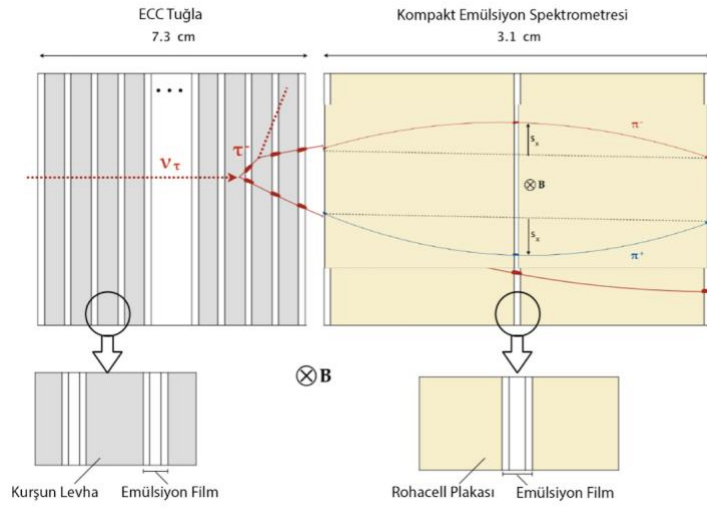
Şekil 3.4 Müon kalkanı

SHiP detektörü, Saçılım ve Nötrino Detektörü (SND) ve GS bozunma spektrometresi olmak üzere iki tamamlayıcı aygıttan oluşur. Gizli parçacıkların doğrudan tespiti için özel bozunumları yeniden düzenlemek için tasarlanmış olan SND hafif karanlık madde (LDM) saçılımı ve nötrino fiziğinin uygulamasını araştıracaktır. Ayrıca gizli parçacık aramak için gerekli verimi normalize edecektir. Detektör mümkün olduğunca çok bozunuma duyarlı olmalıdır. Demet hattının arka plan kaynaklarını en aza indirecek şekilde tasarlanması önemlidir (Ahdida, 2020). Şekil 3.5' de SND detektörüyle birlikte müon tanımlayıcının şematik gösterimi verilmiştir. OPERA deneyindeki konseptle çok benzer olan SND detektörü parçacığın izini gözlemleyebilmek için emülsiyon tuğla duvarları, hedef izleyici ve akış izleyiciyle birlikte müon tanımlayıcı sisteminden oluşmaktadır.



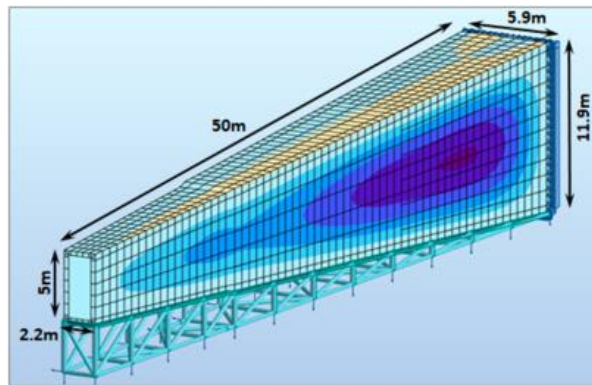
Şekil 3.5 SND ve müon tanımlayıcı sisteminin şematik gösterimi

Hedef tuğla, Emülsiyon Bulut Odasından (ECC) ve Kompakt Emülsiyon Spektrometresinden (CES) oluşmaktadır. Elektronlar tamamen leptonik tau bozunumlarından ve elektron nötrinosunun yüklü akım etkileşimlerinden üretilmektedir. Bu nedenle elektronların tanımlanması zorunludur ve elektron hedefinin yoğun yapısındaki ECC elektromanyetik duşun algılanmasıyla elektronlar tanımlanabilir. ECC sayesinde DONUT ve OPERA deneylerinde başarılı bir şekilde tau nötrinoları etkileşimleri gözlemlenmiştir. ECC detektörü 3 farklı çeşni nötrinosunu da ayrı ayrı tanımlayabilmeye olanak sağlamaktadır. CES, hadronların elektrik yükünün ölçülmesini sağlayacaktır. Bu sayede tau nötrino etkileşimi ile tau anti-nötrinosunun etkileşimini birbirinden ayırmak mümkündür. Şekil 3.6' da ECC ve CES' nin şematik gösterimi mevcuttur (Komatsu, 2017).



Şekil 3.6 ECC ve CES' nin şematik gösterimi

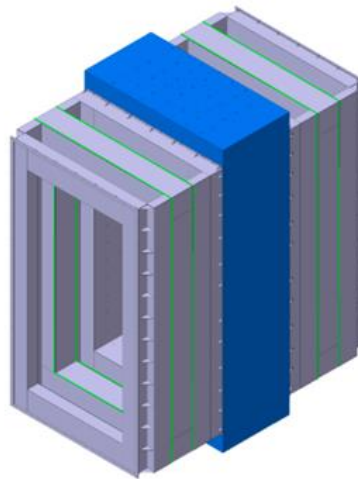
SND detektörünü GS bozunum detektörü takip eder. GS bozunum bölgesi piramidal bir kesit olarak tasarlanmıştır. Şekil 3.7' de GS bozunum detektörünün şematik gösterimi verilmiştir. Bozunum bölgesi arka alan etiketçilerle (taggers) çevrilidir ve SND yukarı yönde arka plan etiketçisi (UBT- the Upstream Background Tagger) ve kuşatılmış arka plan etiketçisiyle (SBT- the Surround Background Tagger) bozunum bölgesi duvarını çevreler. Etiketçiler, bozunum bölgesi duvarlarında ve SND detektörünün malzemesinde, GS sinyal olaylarını taklit eden ve bozunma bölgesinde bozunan uzun ömürlü V_s^0 nötr parçacıkları üretebilen nötrino ve müon kaynaklı elastik olmayan etkileşimleri tanımlar.



Şekil 3.7 Gizli sektör bozunum bölgesi

Gizli parçacık bozunumlarının tam olarak yeniden yapılandırılması için manyetik bir spektrometre ve bozunum detektörünün sonunda parçacık tanımlama için bir detektör gereklidir. Parçacık tanımlayıcı sistemi için elektromanyetik kalorimetre kullanılarak e/γ ayrımı yapılacaktır, π/μ ayrımı için myon detektörüyle hadron kalorimetre kombinasyonu kullanılacaktır.

Bozunum bölgesini, 5 m genişliğinde ve 10 m yüksekliğindeki geniş dikdörtgen şeklindeki GS bozunum spektrometresi takip ediyor. Yüksek verimle GS bozunma bölgesinden gelen yüklü parçacıkların takibini sağlayan GS bozunum spektrometresinin bileşimi Şekil 3.8’ de verilmiştir. GS Spektrometresi, bozunum bölgesindeki nötrino etkileşiminden kaynaklı arka planın elimine edilmesi amacıyla GS bozunum hacminden gelen parçacıkların görünür bozunumlarının ölçülmesini sağlar. GS bozunum spektrometresinin tasarımındaki önemli bir özellik ise arka plandan kaynaklı etkilerin bastırılmasını sağlamasıdır. Yaklaşık 100 ps çözünürlüğe sahip özel bir zamanlama detektörü (TD) arka plan zaman çakışmasını önler. Hassas spektrometre, alternatif emici katmanları, nükleer emülsiyon filmleri ve hızlı elektronik hedef izleyicileri (TT) içeren modüllerden oluşan bir hibrit detektördür. Soğurucu kütlesi toplam ~ 8 tondur (Lantwin, 2019).



Şekil 3.8 Mıknatısla çevrili GS spektrometresinin vakum yüzeyi

4. DEMET BLOKLAMA DENEYİNDE NÖTRİNO FİZİĞİ

Pauli' nin nötrinoları öngörüsünden bu yana küçük parçacıklar hakkındaki çalışmalar önemli bir artış kazandı. Günümüzde nötrino salınımları 1988' de Super Kamiokande iş birliği ile ilk kez, atmosferik nötrino akısındaki hesaplamalara dayanarak verilmiştir. Nötrino salınım deneyleri nötrinoların kütleli olduklarını göstermiştir. Derin yeraltı deneylerinde nötrino çekirdeklerinin (ν/ν_e) akı oranı yüklü akım etkileşimleri yoluyla üretilen son durum leptonları gözlemlenerek ölçülmüştür (Fukuda, 1998). Tau nötrinosu (ν_τ) yüklü akım etkileşimlerinde üretilen tau (τ) leptonlarını tespit etmek için müon nötrino- tau nötrino $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ salınımlarını araştırmak amacıyla kurulan OPERA Deneyinde, saf bir müon nötrinosu (ν_μ), tau nötrinosu (ν_τ) ve elektron nötrinosunun (ν_e) demetinin ortaya çıktığının gözlemlenmesiyle nötrino salınımı doğrulanmıştır (Abe, 2014). Fermilab' daki DONUT deneyinde sadece 3 tane nötrino ve anti-nötrino üretiminden 9 (ν_τ) olay gözlemlenmiştir (Kodama, 2001). Tau anti-nötrinosu halen gözlemlenememiş olan SM' nin kayıp kısmındadır. Elektron nötrino etkileşimleriyle ilgili çalışmaların çoğu nötrino salınımları kaynaklı gerçekleşmiştir. Birkaç GeV enerji aralığındaki nötrino saçılımına yarı elastik saçılım süreçleri hakimdir. Bu düşük enerji aralığındaki sonuç en son MINERvA'da gözlemlenmiştir.

Bir sabit hedef tesisinde, bir hedefe çarpan yüksek yoğunluklu ve yüksek enerjili proton demeti ile tüm çeşnilerden yüksek bir nötrino akısı beklenebilir. Bu nedenle sabit hedef tesisleri nötrino ve anti-nötrino fiziği üzerine çalışmalar yapmak için idealdir (Buonaura, 2017).

5. NÖTRİNO ETKİLEŞİMLERİ

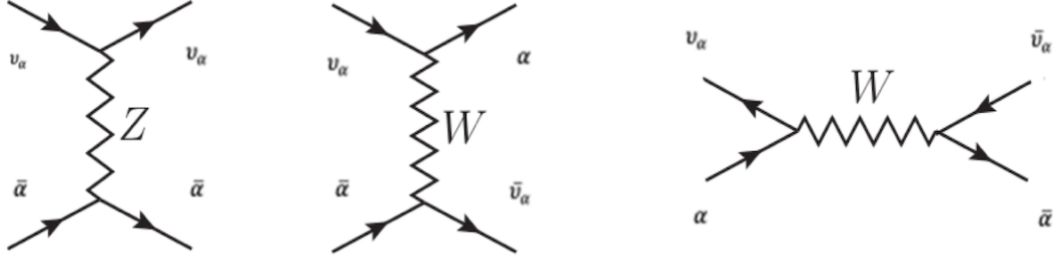
Nötrino etkileşimleri şimdiye kadar herhangi bir sapma olmadan etkileyici bir doğrulukla tanımlanabilmiştir. Glashow-Weinberg-Salam teorisi ile zayıf ve elektromanyetik etkileşimler de; leptonların zayıf etkileşimi, ayar vektör bozonları ($W^{\mp}$), yüklü leptonların fotonlarla elektromanyetik etkileşimleri, nötr ayar bozonu (Z^0) ve ayrıca tüm çeşni nötrinoların Yüklü Akım (CC), Nötrale Akım (NC) zayıf etkileşimlerinin varlığı tahmin edilebilir. Nötrino etkileşimleri; nötrino-elektron saçılımı ve nötrino-çekirdek saçılımından kaynaklanan etkileşimlerdir. Bu tez çalışması kapsamında nötrino-elektron ve nötrino-çekirdek etkileşimleri incelenmiştir. Nötrino-çekirdek etkileşmesi birkaç GeV enerji aralığında CC ve NC aracılığıyla gerçekleştirilmektedir (Kikawa, 2016).

5.1 Nötrino – Elektron Etkileşimleri

Nötrino-elektron etkileşimleri, nötrinoların evrendeki maddenin bileşenleriyle olan en basit etkileşimleridir. Zayıf etkileşim pertürbasyon teorisinde en düşük sırada yer alan nötrino-elektron etkileşimleri yalnızca serbest leptonları içerir ve etkileşim genliği, SM’ de listelenen Feynman kuralları kullanılarak tam olarak hesaplanabilir. CERN, SPS deneyinde 1980 yılında gerçekleştirilen ters müon saçılımı olarak da bilinen nötrino elektron yarı-elastik saçılımı ($\nu_{\mu} + e^{-} \rightarrow \nu_e + \mu^{-}$) 1990’ lı yılların sonlarına doğru CHARM-II iş birliğinde nötrino ve anti-nötrino geniş bant aralığında çalışılmış ve saçılımın tesir kesiti $(18.16 \pm 1.36) \times 10^{-42} \text{cm}^2 \text{GeV}^{-1}$ olarak bulunmuştur. Tesir kesiti daha sonra benzer bir deneyde Tevatron Fermilab’ da ise $[16.93 \pm 0.85(\text{ist}) \pm 0.52(\text{sys})] \times E \times 10^{-42} \text{cm}^2 \text{GeV}^{-1}$ olarak bulunmuştur (Sajjad Athar ve Singh, 2020).

5.1.1 Nötrino- elektron elastik saçılımı

SM’ de nötrino ve lepton saçılımının Feynman diagramı Şekil 5.1’ de verilmiştir (Tomalak, 2020).



Şekil 5.1 SM' de nötrino ve Lepton Saçılımı

Düşük enerjili nötrinolar ve anti-nötrinolar $\alpha = e, \mu, \tau$ çeşnileriyle elektronlarla elastik saçılım süreci boyunca etkileşir.

$$\bar{\nu}_\alpha + e^- \rightarrow \bar{\nu}_\alpha + e^-$$

Bu süreçte son durum ilk durumla aynı olduğu için elastik saçılma işleminin bir eşiği yoktur. Elastik saçılma işleminin tek etkisi, katılan iki parçacık arasında toplam enerji ve momentumun yeniden dağılımı şeklindedir.

$W^\pm$ ve Z^0 aracılarının etkileri düşük enerjili nötrinolar için ihmal edildiğinde yüklü akım ve nötr akımın elastik saçılımı için Lagranjiyen denklemi

$$\mathcal{L}_{eff} \left(\bar{\nu}_e^{(-)} e^- \rightarrow \bar{\nu}_e^{(-)} e^- \right) = -\frac{G_F}{\sqrt{2}} \{ [\bar{\nu}_e \gamma^\rho (1 - \gamma^5) e] [\bar{e} \gamma_\rho (1 - \gamma^5) \nu_e] + [\bar{\nu}_e \gamma^\rho (1 - \gamma^5) \nu_e] [\bar{e} \gamma_\rho (g_V^\alpha - g_A^\alpha \gamma^5) e] \} \quad (5.1)$$

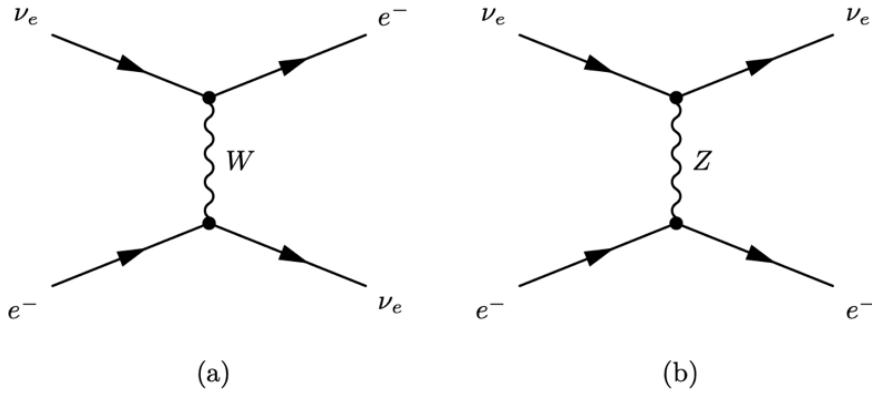
Burada G_F Fermi kuplaj sabiti, $\gamma^5 = -i\gamma^0\gamma^1\gamma^2\gamma^3$, g_V^α ve g_A^α Fermiyon bağlaşım sabitleri. Elektro-zayıf ölçeğin altındaki enerjilerde, etkin Lagranjiyen denklemi nötrinoların ve yüklü leptonların etkileşimleri tarafından belirlenir.

İlk terim sağ elli Yüklü Akım (CC) katkısı ikinci terim de Nötr Akım (NC) katkısıdır. Çizelge 5.1' de formül (5.1) içerisinde yer alan Fermiyon bağlaşım sabitleri g_L , g_R , g_V , g_A verilmiştir. Üst simgeler ν , α , U, D, sırasıyla genel bir nötrino, yüklü lepton, yukarı tip kuark ve aşağı tip kuark şeklinde gösterilmiştir. Weinberg açısı (zayıf karışım açısı) $s_W \equiv \sin \vartheta_W$ olarak tanımlanmıştır.

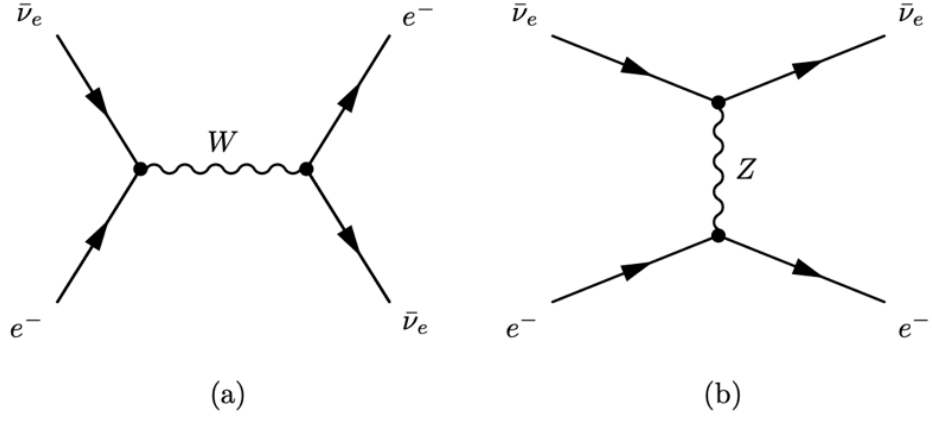
Çizelge 5.1 Fermiyon bağlaşım sabitleri

Fermiyonlar	g_L	g_R	g_V	g_A
ν_e, ν_μ, ν_τ	$g_L^v = \frac{1}{2}$	$g_R^v = 0$	$g_V^v = \frac{1}{2}$	$g_A^v = \frac{1}{2}$
e, μ, τ	$g_L^\alpha = -\frac{1}{2} + s_W^2$	$g_R^\alpha = s_W^2$	$g_V^\alpha = -\frac{1}{2} + 2s_W^2$	$g_A^\alpha = -\frac{1}{2}$
u, c, t	$g_L^U = \frac{1}{2} - \frac{2}{3}s_W^2$	$g_R^U = -\frac{2}{3}s_W^2$	$g_V^U = \frac{1}{2} - \frac{4}{3}s_W^2$	$g_A^U = \frac{1}{2}$
d, s, b	$g_L^D = -\frac{1}{2} + \frac{1}{3}s_W^2$	$g_R^D = \frac{1}{3}s_W^2$	$g_V^D = -\frac{1}{2} + \frac{2}{3}s_W^2$	$g_A^D = -\frac{1}{2}$

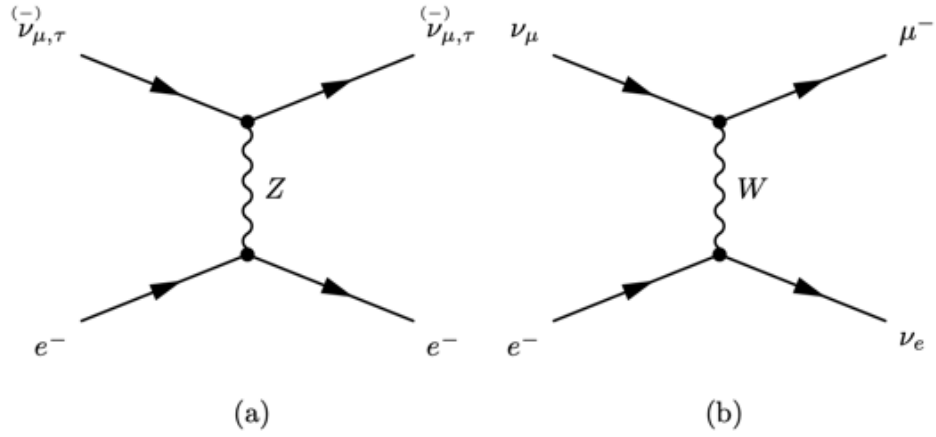
Elastik saçılım süreci ($\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$) için W vektör bozonu aracılığıyla gerçekleşen yüklü akım ve Z vektör bozonu aracılığıyla gerçekleşen nötral akım Feynman diagramları Şekil 5.2’ de verilmiştir. Elektron anti-nötrinosunun elastik saçılım Feynman diagramı Şekil 5.3’ te verilmiştir. Müon ve tau için elastik saçılım diagramı ise Şekil 5.4’ de verilmiştir.



Şekil 5.2 Elektron nötrinosu ve elektronun elastik saçılım Feynman diagramı: a) Yüklü akımı b) Nötral akım



Şekil 5.3 Elektron anti-nötrinosu ve elektronun Feynman diagramı a) Yüklü akım b) Nötral akım



Şekil 5.4 a) $\bar{\nu}_{\mu,\tau} + e^- \rightarrow \bar{\nu}_{\mu,\tau} + e^-$ elastik saçılım süreci Feynman diagramı b) $\nu_\mu + e^- \rightarrow \nu_e + \mu^-$ yüklü akım Feynman diagramı

5.1.2 Nötrino- elektron yarı elastik saçılımı

Müon (μ) üretim eşiğinin üzerindeki enerjiye sahip müon nötrinoları, yarı elastik yüklü akım süreci yoluyla elektronlarla etkileşime girerler.

$$\nu_\mu + e^- \rightarrow \mu^- + \nu_e$$

Bu süreç bazen ters müon bozunumu olarak da adlandırılır. Yüklü akım sürecine katkıda bulunan Feynman diagramının etkin Lagranjiyen ifadesi:

$$\mathcal{L}_{eff}^{(v_\mu + e^- \rightarrow \mu^- + \nu_e)} = -\frac{G_F}{\sqrt{2}} [\bar{\mu} \gamma^\rho (1 - \gamma^5) v_\mu] [\bar{\nu}_e \gamma_\rho (1 - \gamma^5) e] \quad (5.2)$$

olarak verilir.

5.2 Nötrino- Çekirdek Etkileşimleri

Uzun mesafeli nötrino salınımı deneylerinde, nötrinolar, nötrino-çekirdek etkileşmesiyle tespit edilir, çünkü bu etkileşimler birkaç GeV' lik nötrino enerji bölgesinde baskındırlar. Böyle bir enerji aralığında, bir nötrino, çekirdekle Yüklü Akım (CC) ve Nötral Akım (NC) etkileşimlerine girer (Kikawa, 2016). Nötrino çekirdek etkileşimlerinde; yarı elastik yüklü akım etkileşimi, elastik nötral akım etkileşmesi, yüklü akım derin elastik olmayan saçılım, nötral akım derin elastik olmayan saçılımı yer almaktadır.

5.2.1 Yarı elastik yüklü akım etkileşimleri

Nötrino ve anti-nötrinolardaki çekirdeklerle ile yarı elastik yüklü akım etkileşimleri

$$\nu_\alpha + n \rightarrow p + \alpha^-$$

$$\bar{\nu}_\alpha + p \rightarrow n + \alpha^+$$

şeklindedir. Burada $\alpha = e, \mu, \tau$.

Pratikte, elektron, müon nötrino ve anti-nötrino demetleri laboratuvar ortamında mevcuttur. Tau nötrino demeti, gezegenin atmosferindeki ve astro fiziksel çerçevede üretilen yüksek enerjili kozmik ışın etkileşimleri KamLAND' da olduğu gibi tersine nötron bozunumu olarak adlandırılan süreçte ortaya çıkar.

5.2.2 Elastik nötral akım etkileşimi

Nötrinolar ve anti-nötrinolar, $N = p, n$ olan nötral akım süreçleri yoluyla çekirdekte elastik olarak etkileşime girer.

$$\nu_\alpha + N \rightarrow \nu_\alpha + N$$

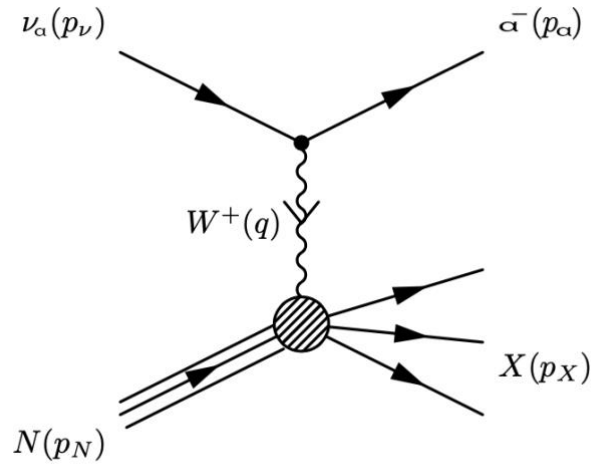
5.2.3 Yüklü akım derin elastik olmayan saçılım

Yüksek enerjilerde ($E_\nu \gg m_N$) laboratuvar çerçevesinde, yüklü akım nötrino-çekirdek etkileşimleri derin elastik olmayan saçılım (DIS) süreçleri ile gözlenmektedir.

$$\nu_\alpha + N \rightarrow \alpha^- + \mathcal{X}$$

$$\bar{\nu}_\alpha + N \rightarrow \alpha^+ + \mathcal{X}$$

Burada $N = p, n$, $\mathcal{X}$ herhangi bir son hadron kümesini belirtir. Dörtlü momentumlar sırasıyla $p_\nu, p_\alpha, p_N, p_X$ nötrino, yüklü lepton, çekirdek ve son hadronun momentumlarıdır.



Şekil 5.5 CCDIS Feynman digramı

Şekil 5.5' de gösterilen yüklü akım derin elastik olmayan saçılım (CCDIS) $\nu_\alpha(p_\nu) + N(p_N) \rightarrow \alpha^-(p_\alpha) + \mathcal{X}(p_X)$ süreci zayıf etkileşim pertürbasyon genişlemesinde en düşük mertebe ile belirtilmektedir. Dörtlü-momentum transferi q şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$q \equiv p_\nu - p_\alpha = p_X - p_N$$

Süreç üç kinematik değişken ile tanımlanır. İçlerinden biri kütle merkezi enerjisinin karesidir. Bir tanesi kütle merkez enerjisinin karesi Lorentz değişmezidir.

$$s = (p_v + p_N)^2 = m_N^2 + 2p_v \cdot p_N$$

Diğer ikisi de (5.3)' de verilmiştir.

$$Q^2 \equiv -q^2 = 2p_v p_\alpha \geq 0, \quad x \equiv \frac{Q^2}{2p_N \cdot q}, \quad y \equiv \frac{p_N \cdot q}{p_N \cdot p_v} \quad (5.3)$$

Bu dört değişmez Lorentz kinematik değişkeni

$$xy = \frac{Q^2}{s - m_N^2}$$

ile bağlantılıdır.

Kinematik değişkendeki derin elastik olmayan saçılım bölgesi (DIS);

$$\begin{aligned} Q^2 &\gg m_N^2, & p_N \cdot q &\gg m_N^2 \\ s &\gg m_N^2, & xy &\cong Q^2/s \end{aligned}$$

ile tanımlanır. x ve y değişkenlerinin değer aralıkları;

$$0 < x \leq 1, \quad 0 < y \leq 1$$

olarak alınır. Nötrino ve anti-nötrino için DIS diferansiyel tesir kesiti formülü (5.4), (5.5) ile verilmiştir:

$$\frac{d^2 \sigma_{CC}^{\bar{\nu}_N}}{dx dy} = \sigma_{CC}^0 \left[xy^2 F_1^{W^{\pm N}} + (1 - y) F_2^{W^{\pm N}} \pm xy \left(1 - \frac{y}{2} \right) F_3^{W^{\pm N}} \right] \quad (5.4)$$

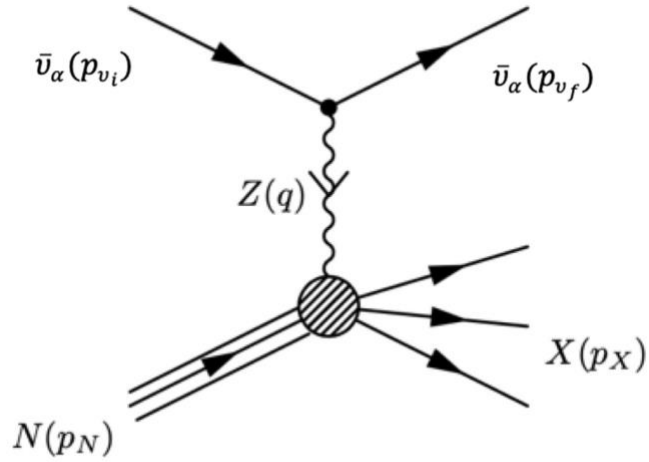
$$\sigma_{CC}^0 = \frac{G_F^2}{2\pi} s \left(1 + \frac{Q^2}{m_N^2}\right)^{-2} \quad (5.5)$$

5.2.4 Nötral akım derin elastik olmayan saçılım

Yüksek enerjili nötrinolar ve anti-nötrinolar, nötral akım derin elastik olmayan saçılım (NCDIS) yoluyla da çekirdek ile etkileşime girerler.

$$\bar{\nu}_\alpha + N \rightarrow \bar{\nu}_\alpha + X$$

Buradaki $N = p, n$ ve X nihai hadron kümesini belirtmektedir. Fermilab' daki deneyde ve CERN' deki Gargamelle deneyinde 1973 yılında $\alpha = \mu$ nötral akım süreci ile gözlenmiştir. Gargamelle deneyinde $\bar{\nu}_\mu + e^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu + e^-$ etkileşiminin gözlemlenmesiyle birlikte, SM tarafından tahmin edilen nötral akım etkileşimlerinin varlığı deneysel olarak doğrulanmış oldu. Buradaki kinematik değişkenler başlangıç ve bitiş dörtlü momentumuna denk gelen $p_\nu \rightarrow p_{\nu i}$, $p_\alpha \rightarrow p_{\nu f}$ bariz yer değiştirmesiyle CCDIS sürecinde bahsedilenlerle aynıdır. NCDIS süreçlerine, Şekil 5.6' da gösterildiği gibi, bir Z-bozon değişimi aracılık eder.



Şekil 5.6 NCDIS Feynman digramı

$$\frac{d^2 \sigma_{NC}^{\bar{\nu}_N}}{dx dy} = \sigma_{NC}^0 \left[xy^2 F_1^{ZN} + (1-y) F_2^{ZN} \pm xy \left(1 - \frac{y}{2}\right) F_3^{ZN} \right] \quad (5.6)$$

$$\sigma_{NC}^0 = \frac{G_F^2}{2\pi} s \left(1 + \frac{Q^2}{m_N^2}\right)^{-2} \quad (5.7)$$

(5.7)' de verilen σ_{NC} tesir kesiti (5.3)' deki formülde verilen x, y ve Q Lorentz değişmezlerdir. $F_{1,2,3}$ yapı fonksiyonlarıdır. (5.7)' deki G_F Fermi kuplaj sabitidir. $Q^2 \ll m_Z^2$ için $\sigma_{NC}^0 \cong \sigma_{CC}^0$ olur (Giunti ve Kim, 2007).

6. NÖTRİNONUN MANYETİK MOMENTİ

SM' de güçlü etkileşimler gluon (g) aracılığıyla sadece kuarklar arasında, elektromanyetik etkileşimler fotonlar aracılığıyla sadece yüklü parçacıklar arasında ve zayıf etkileşimlerde $W^\pm$ ve Z bozonları aracılığıyla tüm parçacıklar arasında etkileşim meydana gelir. Kompozit parçacıklarda, bu etkileşimler bileşenler arasında meydana gelir. Örneğin, nötr kompozit parçacıklar dipol momentleri sayesinde elektromanyetik olarak etkileşime girebilir. Yüklü bir parçacığın manyetik dipol moment μ spini ile orantılıdır. Tüm SM model etkileşimleri dahil edildiğinde yüklü parçacıkların manyetik dipol moment (μ) denklemi

$$\mu_e = g \frac{e}{m} \quad (6.1)$$

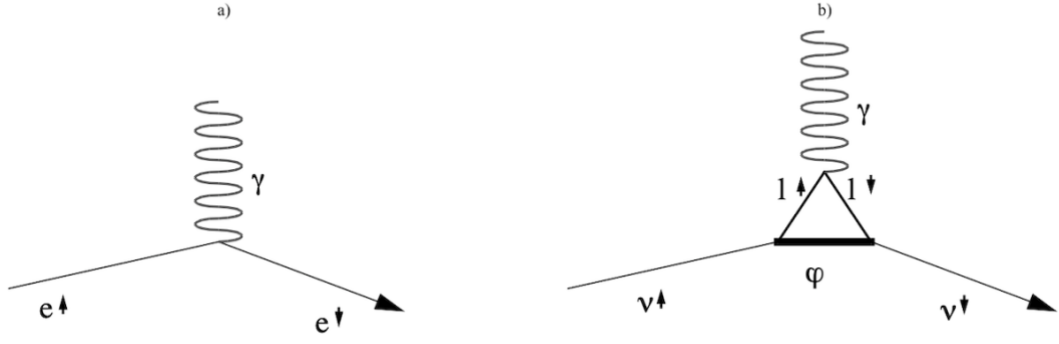
ile verilir. Burada e elektrik yükü, m parçacığın kütlesi, g anormal manyetik moment faktörünü açıklar. SM' de nötrino kütlesiz olduğundan, spini yörüngesel açısal momentumundan ayırt edilemez. Örneğin nötr bileşik parçacıklar, dipol momentleri aracılığıyla elektromanyetik olarak etkileşime girebilir. Standart Modelde nötrinoların, iki bileşeni de dalga fonksiyonundaki momentum vektörüne paralel olduğundan dolayı manyetik dipol moment μ yoktur.

Nötrino-elektron saçılımlarında elde edilen nötrinin manyetik momentum üst limit verileri Çizelge 6.1' de verilmiştir. Buradaki elektron nötrinosu için verilen sınır nükleer reaktörden gelen nötrino deneylerinden elde edilmiştir. Müon nötrinosunun sınırı pion bozunumundan elde edilen nötrinolarla yapılmıştır.

Çizelge 6.1 Nötrino özellikleri için mevcut limitler (Schwienhorst, 2000)

Nötrino	Kütle	Ortalama Ömür	Manyetik Moment
ν_e	$<15\text{eV}$	$> 7 \times 10^9 \text{ s}/eV$	$< 1.8 \times 10^{-10} \mu_B$
ν_μ	$<0.17\text{MeV}$	$> 15.4 \text{ s}/eV$	$< 7.4 \times 10^{-10} \mu_B$
ν_τ	$<18.2\text{MeV}$	(limit yok)	$< 5.4 \times 10^{-7} \mu_B$

Eğer nötrinoların manyetik bir momenti varsa, o zaman sağ-elli kiralite durumu da mevcut olmalıdır. Eğer iki spin durumu basitçe birleştirilirse (ν_R ve $\bar{\nu}_L$), nötrinolar dört durumlu Dirac parçacıkları haline gelirler. Nötrinoların Majorana tanımı, gözlemlenmemiş iki nötrino durumunu içermemesidir ve Majorana nötrinolarının zıt spin partneri onların anti-nötrinolarıdır. Bir Majorana nötrinosunun sadece iki durumu vardır; sol elli nötrino (ν_L) ve sağ elli anti-nötrino ($\bar{\nu}_R$). Standart Modelden farkı, bu nötrinonun kütlelerinin olmasıdır; bu, nötrinodan daha hızlı hareket eden bir referans çerçevesine Lorentz dönüşümünün ν_L ' den $\bar{\nu}_R$ ' ye dönüştüreceği anlamına gelir. Standart Model, sağ-elli nötrinolar ve sol-elli anti-nötrinolar eklenerek basit bir şekilde genişletilebilir (Deniz, 2005). Bu modeldeki nötrino manyetik momenti, sanal yüklü bozonlar ve fermiyonlardır. Şekil 6.1' de gösterildiği gibi foton alanı ile etkileşime girdiğinde üretilir. Bir elektron ve bir nötrinonun manyetik moment etkileşim köşesi, nötrino döngüsüne katılan parçacıkların modeline bağlıdır. Şekil 6.1' deki bu örnekte leptonlar ve ayar bozonları ϕ döngüsünü oluşturmaktadır. Bir fermiyonun manyetik moment etkileşimine en düşük dereceli katkısı, Şekil 61.a' da gösterilen basit bir ağaç diyagramıdır. Yüklü fermiyon, foton alanıyla etkileşir ve dönüşünü değiştirir. Bir nötrinonun manyetik moment etkileşimine en düşük dereceli katkısı, Şekil 6.1.b' de gösterilen bir döngü diyagramıdır. Sol elli nötrino, sağ eliliğini kullanan nötrinoya da bağlanabilen bir çift sanal parçacık üretir. Sanal parçacıklardan biri daha sonra foton alanıyla etkileşime girer ve daha önce olduğu gibi dönüşünü değiştirir. Daha sonra iki parçacık bir sağ elli nötrinoya yeniden birleşir.



Şekil 6.1 a) Bir elektronun manyetik moment köşe noktası b) Bir nötrinin manyetik moment köşe noktası

En düşük seviyedeki nötrino manyetik momentinin hesaplanması, iç hatlarda kuarklar ve leptonlar ile Şekil 6.1' de gösterildiği gibi döngü diyagramlarını içerir. Hesaplama, nötrino kütlesiyle orantılı bir manyetik moment μ_ν verir:

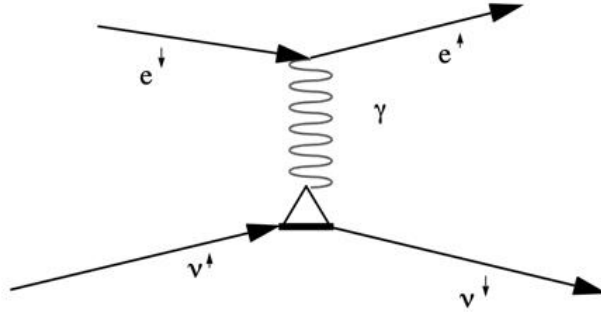
$$\mu_\nu = \frac{3eG_F}{8\sqrt{2}\pi} m_\nu \quad (6.2)$$

Burada e , elektronun yükü, G_F Fermi kuplaj sabiti, m_ν nötrinin kütlesidir. Nötrinin manyetik moment değeri aşağıdaki sayısal değer ile verilmektedir.

$$\mu_\nu = 3.1 \times 10^{-19} \mu_B \left(\frac{m_\nu}{1\text{eV}} \right) \quad (6.3)$$

Bir tau nötrinosunun şu anki 18.2 MeV' lik kütle limiti, $\mu_\nu = 6 \times 10^{-12} \mu_B$ manyetik momentini verir. Burada $\mu_B = e/2m_e$ Bohr manyetonudur (Güler, 1997).

Şekil 6.2' de gösterilen nötrino manyetik moment süreci $\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$ saçılımı için nötrino manyetik moment etkisi denklem (6.4) gösterildiği gibi diferansiyel tesir kesitiyle artar.



Şekil 6.2 Nötrino-elektron manyetik moment etkileşiminin Feynman diagramı

$$\frac{d\sigma^\mu}{dy} = f_\mu^2 \frac{\pi\alpha^2}{m_e^2} \left(\frac{1}{y} - 1 \right) \quad (6.4)$$

$\alpha \cong 1/137$ ince yapı sabiti, $f_\mu = \mu_\nu/\mu_B$ bir Bohr manyetonuna göre nötrino manyetik momentinin boyutudur. (6.4) denklemi $y \gg (m_\nu/E_\nu)$ yaklaşımı için geçerlidir. $y \rightarrow 0$ ıraksamasında kullanılmamalıdır. Küçük deneysel tau nötrino akısından dolayı diferansiyel tesir kesitini ölçebilmek genellikle mümkün değildir. Bunun yerine, sadece (6.4) denklemi entegre edilerek elde edilen toplam tesir kesiti ölçülür:

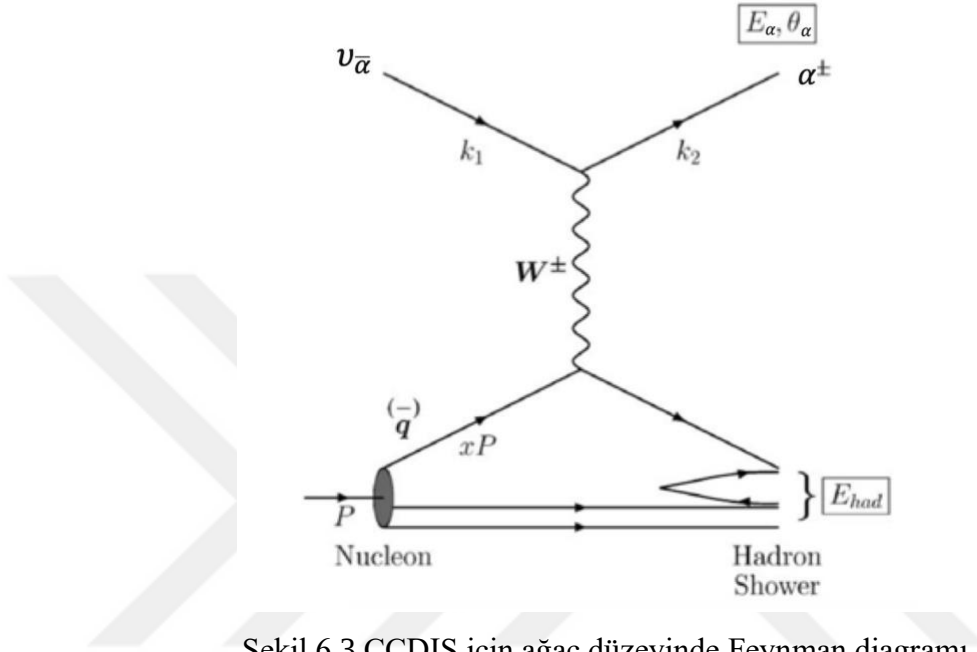
$$\sigma_{toplaml}^\mu = \int_{y_{min}}^1 \frac{d\sigma^\mu}{dy} dy = f_\mu^2 \frac{\pi\alpha^2}{m_e^2} [y_{min} - \ln y_{min} - 1] \quad (6.5)$$

İntegralin alt sınırı, düşük enerji için $y_{min} = T_{min}/E_\nu$ ile verilir. Bu düşük enerji deneyinin limit ölçümü elektron için yapılır. y birden küçük olduğundan, toplam kesit logaritmik olarak y_{min} 'e bağlıdır. Ayrıca sadece gelen nötrino enerjisi ile logaritmik olarak artmaktadır (Güler, 1997), (Schwienhorst, 2000).

6.1 CCDIS ν_τ Tesir Kesiti

Tau nötrinosunun yüklü akım derin elastik olmayan saçılım süreci ile doğrudan ölçülmesi yeni bir olgudur. DONUT deneyinde Fermilab' daki 800 GeV' lik Tevatron demetinden elde edilen nötrino demetiyle, tau nötrinosu ve tau anti-nötrinosu arasında ayırım yapılamamış olsa da arka planda 1.5 olmak üzere 9 tane olay gözlemlendiği raporlanmıştır. OPERA deneyinde ise bildirilen 10 tau nötrino olayı, görünüm modunda

$5\sigma'$ dan $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ salınımlarının keşfedilmesine yol açmıştır (Dario, 2017/2018). Aynı şekilde, OPERA deneyinde de tau nötrinosu ile tau anti-nötrinosunun tesir kesitini kesin olarak tahmin etmek mümkün olmamıştır.



Şekil 6.3 CCDIS için ağaç düzeyinde Feynman diagramı

Şekil 6.3' te gösterilen CCDIS ağaç düzeyindeki Feynman diagramında yüklü akım derin elastik olmayan saçılımı gösterilmiştir. Gelen k_1 dörtlü momentumlu nötrino, çekirdekteki bir kuarktan (anti-kuark) saçılır ve dörtlü momentumu q olan bir $W^\pm$ bozonu aracılık eder.

$$\nu_\alpha(k_1) + N(p) \rightarrow \alpha(k_2) + X(p_1)$$

Laboratuvar çerçevesinde, son durum lepton ve hadronların yönü ve enerjisi $E_\alpha, \theta_\alpha, E_{had}, \theta_{had}$ ile gösterilir.

Bir nötrino etkileşimini tanımlamak için kullanılan Lorentz değişmezleri:

$$v = \frac{p \cdot q}{M} = E_{had} \quad (6.6)$$

$$Q^2 = -q^2 = -(p - p_1)^2 = -(k_1 - k_2)^2 \quad (6.7)$$

$$x = \frac{Q^2}{2p \cdot q} \quad (6.8)$$

$$y = \frac{p \cdot q}{p \cdot k_1} \quad (6.9)$$

$$W^2 = (p + q)^2 \quad (6.10)$$

ve sırasıyla dörtlü momentumlar;

k_1 : gelen nötrino,

k_2 : giden lepton,

p : çekirdek,

p_1 : son hadron duşu,

q : bozon değişimi (Buonaura,2017).

olmak üzere verilen dörtlü momentum değişkenleriyle tau nötrino ve anti-nötrino DIS tesir kesiti (7.6)'daki gibi yazılır:

$$\frac{d^2\sigma^{v(\bar{v})}}{dx dy} = \frac{G_F^2 M E_v}{\pi(1+Q^2/M_W^2)^2} \left(\left(y^2 x + \frac{m_\tau^2 y}{2E_v M} \right) F_1 + \left[\left(1 - \frac{m_\tau^2}{4E_v^2} \right) - \left(1 + \frac{M_x}{2E_v} \right) y \right] F_2 \pm \left[xy \left(1 - \frac{y}{2} \right) - \frac{m_\tau^2 y}{4E_v M} \right] F_3 + \frac{m_\tau^2 (m_\tau^2 + Q^2)}{4E_v^2 M^2 x} F_4 - \frac{m_\tau^2}{E_v M} F_5 \right) \quad (6.11)$$

Burada E_v başlangıç nötrininin enerjisi, G_F Fermi kuplaj sabiti, M çekirdeğin kütlesi ve m_τ ortalama τ leptonun kütlesidir. $F_i (i = 1 \rightarrow 5)$ yapı fonksiyonu hem x hem de Q^2 bağlıdır. F_3 pozitif kısmı nötrino saçılması için negatif kısmı da anti-nötrino saçılımı için geçerlidir. F_4 ve F_5 yapı fonksiyonları elektron ve müon nötrinosu etkileşimlerinde $m_\alpha^2/(E_v M)$ faktörü düşük kütle nedeniyle ihmal edilebilir. Bu faktör (ν_τ) ve ($\bar{\nu}_\tau$) ilgili olduğundan yalnızca (ν_τ) etkileşimlerinde ölçülebilir. Bu nedenle F_4 ve F_5 kesin ölçümü (ν_τ) ve ($\bar{\nu}_\tau$)' nun kesin olarak tahmin edilmesi sayesinde mümkündür (Iuliano, 2016), (Buonaura, 2017), (Dario, 2017/2018).

7. MATERYAL VE YÖNTEM

7.1 SHiP Yazılım Sistemi

SHiP' in analiz ve simülasyon sistemi FairShip olarak adlandırılan FairRoot ve ROOT tabanlı bir yazılımdır. FairRoot projesine 2003/2004 yıllarında CBM-Compress Baryonic Matter deneyi için yazılım sistemiyle başlanmıştır. 2005/2006 yıllarındaysa FairRoot olarak kullanılmasına karar verilmiştir. FairRoot, ROOT tabanlı simülasyona yönelik, yeniden yapılandırma ve data analizinde kullanılan bir yazılımdır. Proton-çekirdek etkileşim süreçleri PYTHIA olay üretici kullanılarak benzetim çalışmaları yürütülmüştür (Al-Turany, 2012). PYTHIA yüksek enerji hızlandırıcılarına odaklanmış fizik modeliyle şekillendirilmiştir. PYTHIA 6 ve PYTHIA 8 olarak iki farklı versiyonu vardır. Bunlardan PYTHIA 8 temel proton-proton ve proton-çekirdek etkileşimlerinde kullanılır (Sjöstrand, 2015). PYTHIA 6 ise elastik olmayan etkileşimler ve ağır çeşni üretimlerinde kullanılmaktadır (Sjöstrand, Mrenna ve Skands, 2006). GENIE nötrino olay üretiminde, nükleer hedef kullanımı ile nötrino çeşnilerinde 1 MeV' den 1 PeV' e kadar geniş enerji spektrometresiyle kullanım olanağı sağlamaktadır. GENIE, ROOT tabanlı Monte Carlo (MC) nötrino üreticisidir. GENIE Nötral Akım (NC) ve Yüklü Akım (CC) etkileşim benzetiminde kullanılmaktadır. Bu etkileşim türleri bozunum hacmi içerisinde gerçekleşmektedir (The GENIE User Manual, 2015). MC kullanılarak GEANT 4' te SHiP' in geometri yapısındaki yapılacak değişimler haricinde doğrudan simülasyon uygulamasına olanak sağlamaktadır. GEANT 4 izleme sistemi, geometri, darbe ve fizik modelleri içeren geniş kompleks fonksiyonel yapı içermektedir. Genel kullanım alanı iyi tanımlanmış ara yüz ile diğer bileşenlerle uyumlu bir kullanım sağlar. Parçacığın madde içindeki hareketinde; madde içerisindeki parçacık etkileşimleri, olay ve izleme yönetimi, sayısallaştırma ve darbe yönetimi ve görselleştirme sistemi ve ara yüz kullanımı simülasyon alanında önemli rol oynamaktadır (Agostinelli, 2003). Bu tez çalışması kapsamında MC olay üretimleri ve SHiP geometrisinden geçirilerek simülasyonun gerçekleştirilme aşaması için sırasıyla GENIE ve GEANT 4 yazılımları kullanılmıştır. Verilerin analizinde ise Python ve ROOT yazılımlarının birlikte kullanılmasına kolaylık sağlayan PyROOT yazılımından yararlanılmıştır. Detektördeki toplam olay sayısının normalizasyonu aşamasında da C++' dan yararlanılmıştır. Tau nötrinusunun manyetik moment üst sınır hesabı içinde yine Python kullanılmıştır.

7.2 Monte Carlo Olay Simülasyonu

Karanlık fotondan gelen, elastik saçılım (EL), yarı elastik saçılım (QE), derin elastik olmayan saçılım (DIS) ve rezonans saçılım (RES) etkileşimlerini Saçılım ve Nötrino Dedektörü (SND) sayesinde gözlemlemek mümkündür. Burada gerekli hesapların elde edilebilmesi için kurulumu 2025 yılında tamamlanması beklenen SHiP deneyinin tahmini MC arka plan olaylarına ulaşabilmek için FairShip yazılımı kullanılmaktadır. Bu tezde, nötrino etkileşimlerini FairShip yazılımı kullanılarak benzetim çalışması yapılmıştır. Nötrino MC olay üretimi için Pythia 8 ve GENIE kullanılmıştır. Nötrino etkileşimleri için GENIE yazılımı kullanılmıştır. Üretilen MC arka plan olaylarının SHiP geometrisinden geçirilmesi için GEANT 4 yazılımı kullanılmıştır.

GENIE, ROOT tabanlı nesnel yönelimli metodolojik MC olay üreticisi ve geliştirilmiş C++ tabanlı yazılımdır. Nötrino etkileşimleri için gereken ilk adımda kullanılmak istenilen hedef bilgileri ile etkileşim tesir kesitinin kullanılmasıdır. Tesir kesiti üretimi için FairShip belleğine ve zamana ihtiyaç vardır. Yapılacak üretime bağlı olmakla beraber yirmi dakikadan bir haftaya kadar üretim sürebilmektedir. Bu sebeple HTCondor' a iş göndermek gerekir ve HTCondor' a iş göndermek CPU (Central Processing Unit) açısından da kolaylık sağlamaktadır. Nötrino tesir kesitini oluşturmak için “*gmkspl*” yardımcı yazılımı kullanılır. Bu işlem sonucunda üretilen tesir kesitleri GENIE “*xml*” formatında kaydedilir:

```
$ gmkspl -p neutrino_code <-t target_codes, -f geometry> [-n nknots] [-e max_energy]
[<--output-cross-sections | -o> xml_file] [--input-cross-sections xml_file] [--seed
rnd_seed_num] [--event-generator-list list_name] [--message-thresholds xml_file] (The
GENIE User Manual, 2015)
```

Aşağıdaki örnek bu tez çalışmasında kullanılan yazılımdır.

- `gmkspl -p 12 -t 1000822040[0.014], 1000822060[0.241], 1000822070[0.221], 1000822080[0.524] -n 500 -e 400 -o /outputpath /"$ClusterId"_"$ProcId".xml --seed $RandNo &&`

Nötrino kodu (p); $\pm 12, \pm 14, \pm 16$ ’ dan biri yazılırken, hedef koduna (t); 10LZZZAAAI olarak yazılır. Bunlar:

- L = s kuark sayısı,
- ZZZ = toplam yük,
- AAA = toplam baryon sayısı,
- I = izomer sayısı (0 = temel durum)

Geometri (f); ROOT dosyasındaki GEANT detektör geometrisi, nknots (n); oluk başına düşen düğüm sayısını belirtir. Maksimum enerji (e) ile gösterilir. Tesir kesitinin çıktılarının olduğu dosya (o), olay üretim liste adı için saçılım türleri belirtilir. Tesir kesiti 10^{-38}cm^2 ve enerji değeri GeV’ dir.

GENIE’ de olay sayısı üretimi için “*gevgen*” komutu kullanılmaktadır. Tesir kesiti üretiminden elde edilen çıktılar burada girdi olarak verilir:

\$ gevgen [-h] [-r run#] -n nev -p neutrino_pdg -t target_pdg -e energy [-f flux] [-w] [-seed random_number_seed] [--cross-section xml_file] [--event-generator-list list_name] [--message-thresholds xml_file] [--unphysical-event-mask mask] [--event-record-print-level level] [--mc-job-status-refresh-rate rate] [--cache-file root_file] (The GENIE User Manual, 2015)

Aşağıdaki örnekte GENIE’ de üretilen tesir kesiti, yazılımda girdi olarak verilmiştir ve nötrino etkileşimleri yazılıma burada eklenmektedir. Yapılan işlem 10 GeV ve altı için ayrı, 10-350 GeV arası için ayrı olarak hesaplanmıştır:

```
➤ $          gevgen          -n          7339          -p          12          -t
1000822040[0.014],1000822060[0.241],1000822070[0.221],1000822080[0.524
] -e 0.0,10.0 --run 1012 -f /eos/experiment/ship/data/Mbias/background-prod-
2018/pythia8_Geant4_10.0_withCharm_nu.root,1012 --cross-sections path
/"$ClusterId"_"$ProcId".xml --event-generator-list CCDIS --message-thresholds
$GENIE/config/Messenger_laonic.xml --seed $RandNo &&
```

```
➤ gevgen -n 2661 -p 12 -t
1000822040[0.014],1000822060[0.241],1000822070[0.221],1000822080[0.524
] -e 0.0,350.0 --run 1012 -f $INPUTPATH/
pythia8_Geant4_1.0_withCharm_nu.root,1012 --cross-sections $RandIn --
event-generator-list CCDIS --message-thresholds
$GENIE/config/Messenger_laconic.xml--seed $RandNo &&
```

Burada bir öncekine ek olarak; (n) olay sayısıdır, (f) nötrino akı spektrumudur. Yazılımda “*event generator list*” kısmına üretim sürecinde kullanılmak istenen saçılım türleri girilir. Örneğin; CCDIS, CCQE, NCDIS, vb. Yapılan üretim sonunda “*ghep*” formatında ROOT dosyaları oluşmaktadır. Üretilen dosyalar ntuple uyumlu olmadığından dolayı dosyayı uyumlu hale getirebilmek için Python kodu kullanılarak dosya “*ghep*” formatından “*gst*” (GENIE Summary Event Tree) formatına çevrilmiştir. Bu işlem için kullanılan yazılım aşağıda verilmektedir:

```
➤ gntpc -i gntp.0.ghep.root -f gst -o outputfile.root --message-thresholds
$GENIE/config/Messenger_laconic.xml
fn = ROOT.TFile("gntp.0.gst.root", "update")
```

İşlem sonunda içerisinde nötrino akısı bulunan “*gst*” formatına çevrilen ROOT dosyaları GEANT 4’ te girdi olarak kullanılır. Bu sayede, üretilen MC olay sayıları SHiP’ in geometrisinden yani detektörden geçirilmiş olacaktır. Aşağıdaki örnekte GEANT 4’ te kullanılan yazılım mevcuttur:

```
➤ python /afs/cern.ch/user/your user name /sw/slc7_x86-64/FairShip/master-
1/macro/run_simScript.py --Genie -f $RandIn -n 7339 -o /directory
path/"$ClusterId"."$ProcId"&&
```

Yukarıda bahsi geçen tüm üretim süreçlerinde özellikle tesir kesiti üretimi ve GEANT 4’ te CPU gerektirmektedir ve SHiP geometrisi kullanılarak MC metodu ile CCDIS, CCQE, NCDIS, NCEL, NCRES saçılım türlerinin ayrı ayrı benzetimleri yapılmıştır. Bu sebeple

süreç boyunca HTCondor kullanılmıştır. GEANT 4’ ten geçirilen MC olay sayıları sonunda elimizde aşağıda verilen üç ROOT dosyası bulunmaktadır:

- ship.conical.Genie-TGeant4.root
- ship.params.conical.Genie-TGeant4.root
- geofile_full.conical.Genie-TGeant4.root

“*ship.conical.Genie-TGeant4.root*” dosyasında üretilen MC olaylarının ağaç ve dalları hakkında bilgi alınabilir. “*ship.params.conical.Genie-TGeant4.root*” dosyasında da süreç tanımlama, FairShip parametreleri ve geometrisi hakkında bilgi sahibi olunabilirken, “*geofile_full.conical.Genie-TGeant4.root*” dosyasında ise FairShip’ in içerisinde bulunan SHiP’ in geometrisi tanımlanmaktadır. Bu dosyalar yazılan Python kodu içerisinde girdi olarak verilmiştir. Kesim 8.1’de anlatılacak olan MC toplam arka plan olay sayısının seçim kriterleri sonucu elde edilecek bir dizi hesabın gerçekleştirilebilmesi için kullanılmaktadır.

8. ARAŞTIRMA BULGULARI

8.1 Veriler

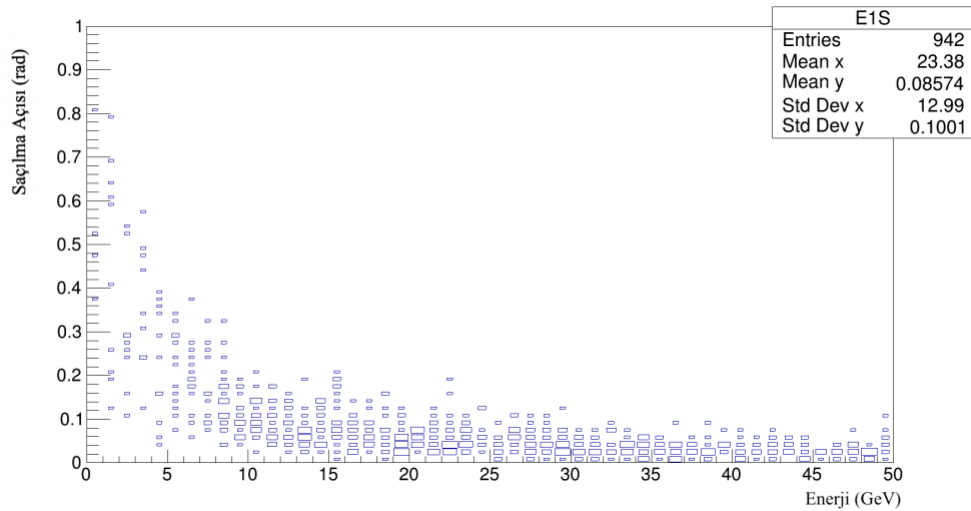
Bir önceki bölümde GEANT 4' ten çıkan ROOT dosyaları yazılan python kodunda girdi olarak verilerek aşağıdaki kriterler uygulanmıştır. CCDIS, CCQE, NCDIS, NCEL, NCRES saçılımları için ayrı ayrı hazırlanmış olan Python koduyla enerji ve saçılım açısı grafikleri oluşturulmuştur. Kullanılan seçim kriterleri:

- Son durumda yeniden yapılandırılmış parçacık olarak sadece elektron bulunması,
- 1 GeV üzerinde bir elektron enerjisi ($E_e > 1\text{GeV}$)
- 1 GeV üzerinde bir momentum ($P > 1\text{GeV}$)
- 30 mrad' ın altında bir elektron saçılma açısı θ_{v-e}

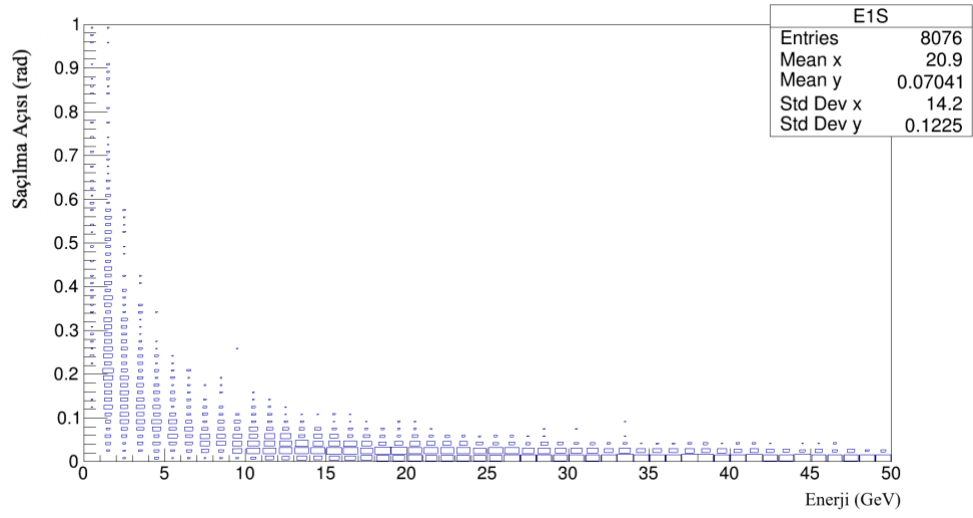
$$\theta_{v-e} < \frac{2m_e}{E_e} \quad (8.1)$$

- Çok katlılık (multiplicity) 1 olarak alınmıştır.

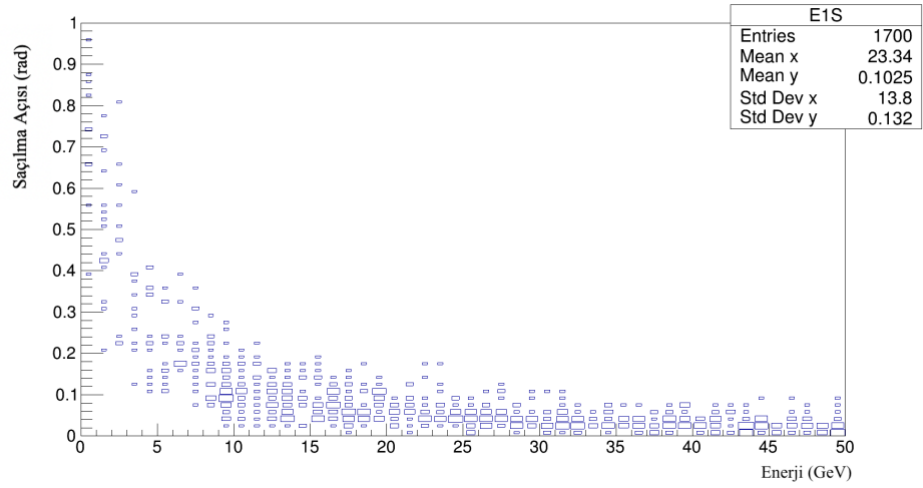
Seçilen kesimler sonucunda elde edilen saçılım açısı ve enerji grafikleri nötrinolar için sırasıyla CCDIS, CCQE, NCDIS, NCEL ve NCRES için Şekil 8.1-8.5' de verilmiştir.



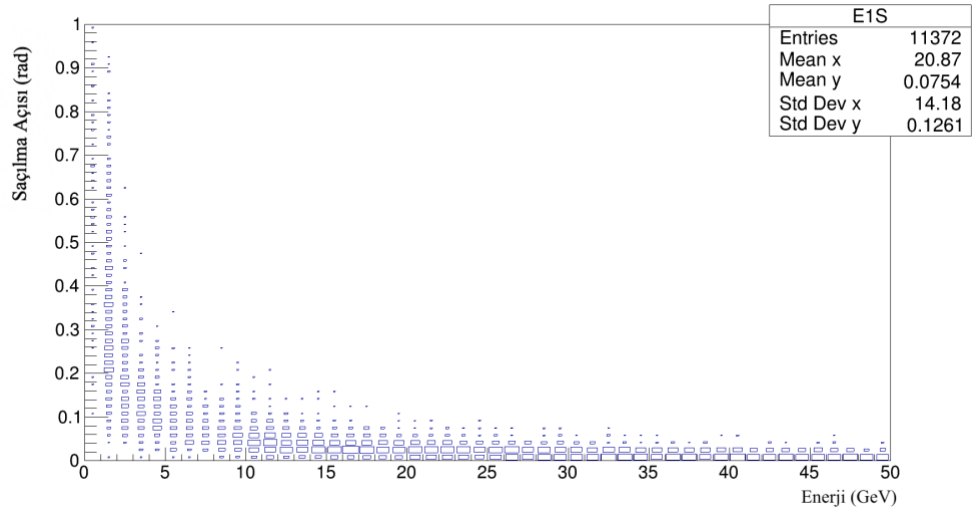
Şekil 8.1 CCDIS için elektron saçılım açısı ve elektron enerji grafiği



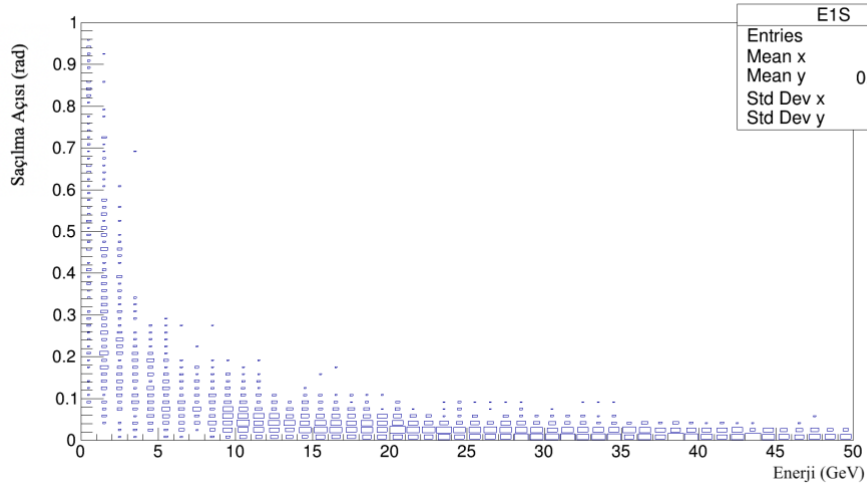
Şekil 8.2 CCQE için elektron saçılım açısı ve elektron enerji grafiği



Şekil 8.3 NCDIS için elektron saçılım açısı ve elektron enerji grafiği



Şekil 8.4 NCEL için elektron saçılım açısı ve elektron enerji grafiği



Şekil 8.5 NCRES için elektron saçılım açısı ve elektron enerji grafiği

Yukarıda verilen Şekil 8.1-8.5’ deki dağılım eğrilerinde gözlemlenen durum formül 8.1’ den anlaşılacağı üzere enerji artışının gerçekleştiği bölgede saçılım açısının düşmesidir. Burada nötrino bir elektronun üzerinde elastik olarak saçıldığında elektron saçılım açısını laboratuvar çerçevesinde kısıtlamaktadır. 1 GeV’ in üzerindeki elektron enerjisi için saçılım açısı 30 mrad altında olmalıdır. Buradaki enerji ve saçılım açısı korelasyon dağılımından görüldüğü üzere en yüksek korelasyon CCQE, NCRES ve NCEL

saçılımlarından gelmektedir. Bu da tau nötrinosunun manyetik moment üst limiti için bu saçılımlardan daha fazla katkı geleceğini göstermektedir.

Toplam MC arka plan olay sayısı ve uygulanan seçim kriterleri sonucunda manyetik moment etkileşimine arka plan kaynağı olarak katkı sunabilecek olan MC arka plan olay sayısı ve MC arka plan olay sayısı verimi her bir saçılım için Çizelge 8.1’ de verilmiştir.

Çizelge 8.1 MC olay sayıları

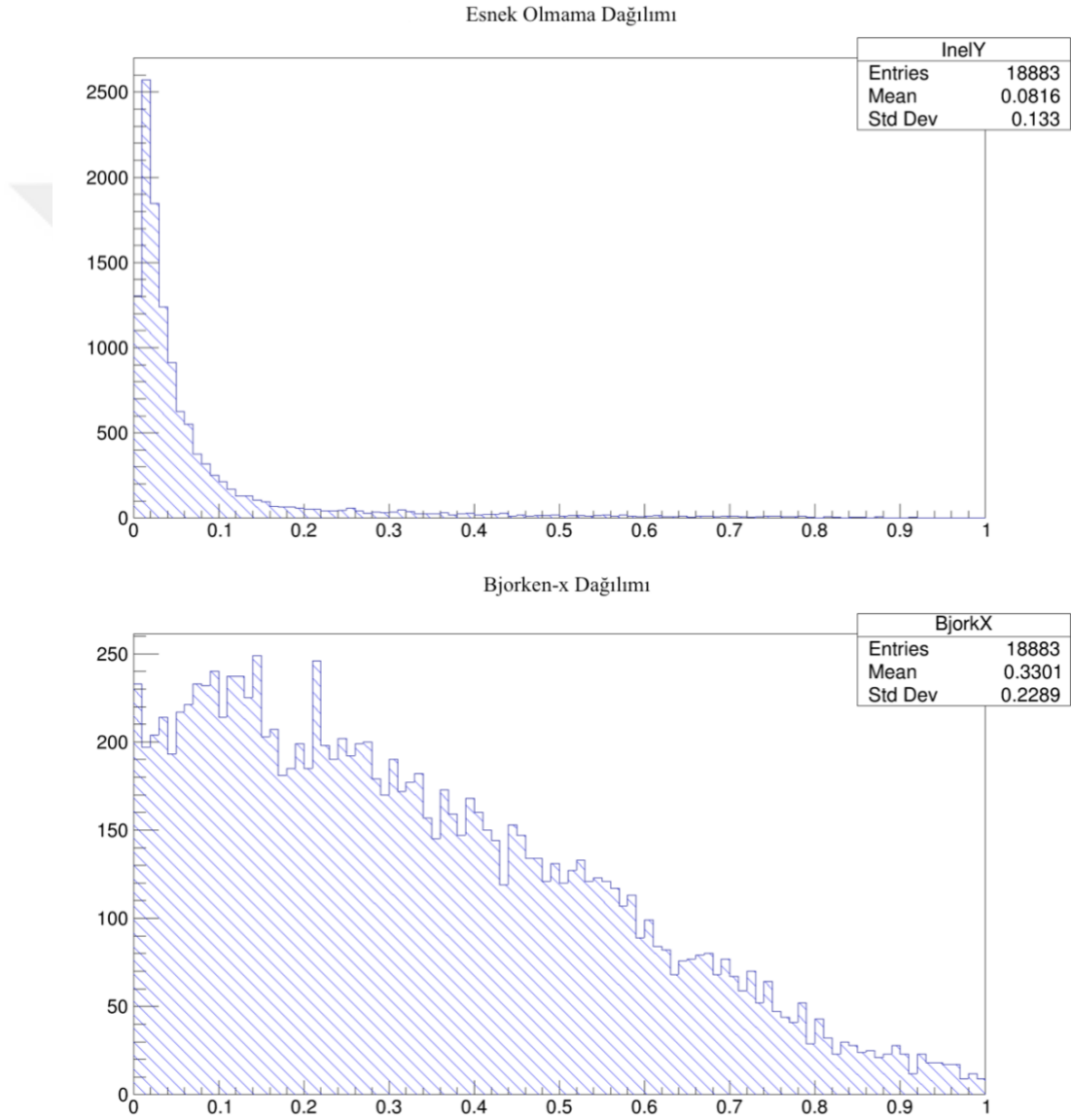
Saçılımlar	Toplam MC Arka Plan Olay Sayısı	Seçilen MC Arka Plan Olay Sayısı	Verim (%)
CCDIS	1349948	22	0.3
CCQE	1395784	756	4.7
NCEL	1349730	468	3.1
NCRES	1399720	685	3.6
NCDIS	1392412	37	1.4×10^{-3}

Nötrino-çekirdek etkileşimlerini incelediğimizde manyetik moment üst sınır hesabı için elde edeceğimiz MC arka plan olay sayısında CC ve NC etkileşimlerinden esnek ve yarı esnek saçılımlardan katkı geleceğini biliyoruz. Çizelge 8.1’ deki MC arka plan olay seçim verimine ve elde edilen MC arka plan olay sayısına bakıldığında manyetik moment hesabı için gerekli katkının en fazla CCQE etkileşiminden sağlandığı sonucuna varılmaktadır.

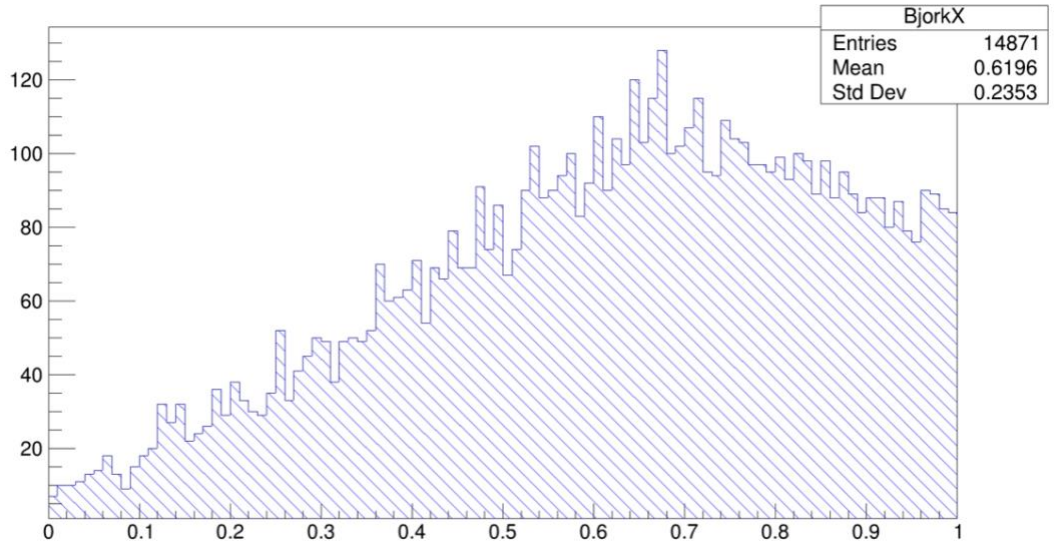
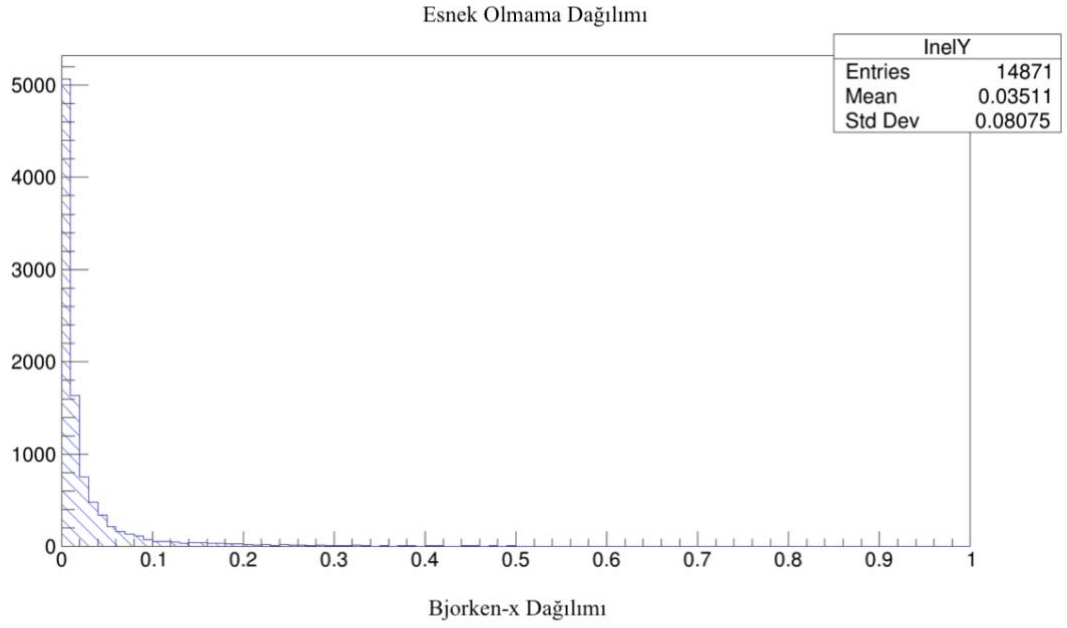
Nötrino-çekirdek etkileşimlerinde tesir kesiti çalışılması ve yüklü leptonun kütlesinin karesi bölü çekirdeğin kütlesinin nötrino enerjisiyle çarpımıyla orantılı olan faktör yalnızca (ν_τ) etkileşimlerinde erişilebilir durumdaki F_4 ve F_5 yapı fonksiyonlarının katkısıyla ölçüme olanak sağlar. F_4 ve F_5 yapı fonksiyonları elektron ve müon nötrinoları için düşük kütle değeri nedeniyle ihmal edilebilir. Hedef hadronlarda ve kütsesiz kuark

sınırında Bjorken-x değişkeni; $F_4 = 0$ ve $2xF_5 = F_2$ deki x değişkenidir (Buonaura, 2017).

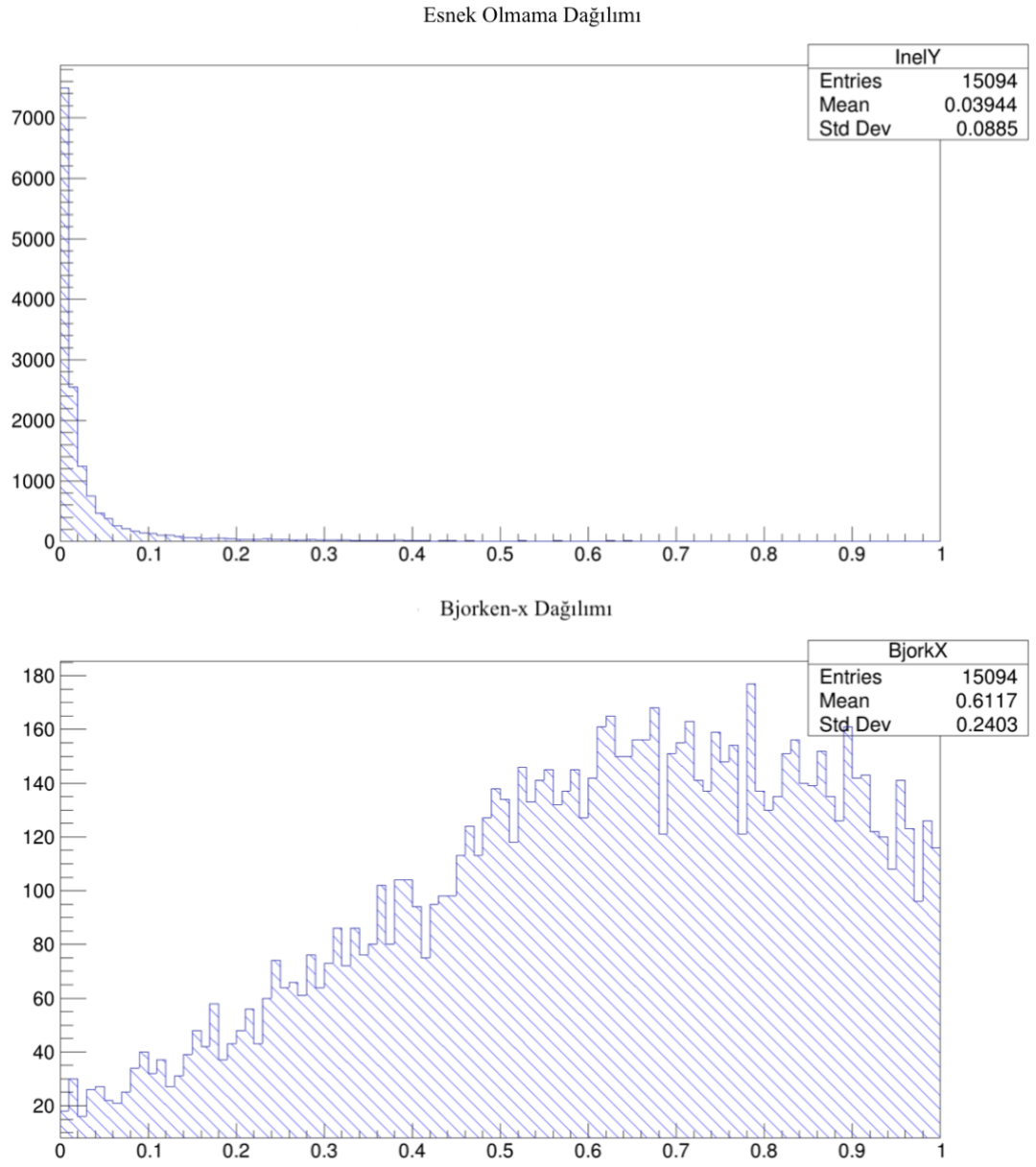
Manyetik moment etkileşimine yüksek oranda katkı sunacak olan NCRES, NCEL, CCQE ve düşük oranda katkı sunacak olan CCDIS, NCDIS saçılımların sırasıyla elastik olmama ve Bjorken-x grafikleri aşağıdaki Şekil 8.6-8.10' da verilmiştir.



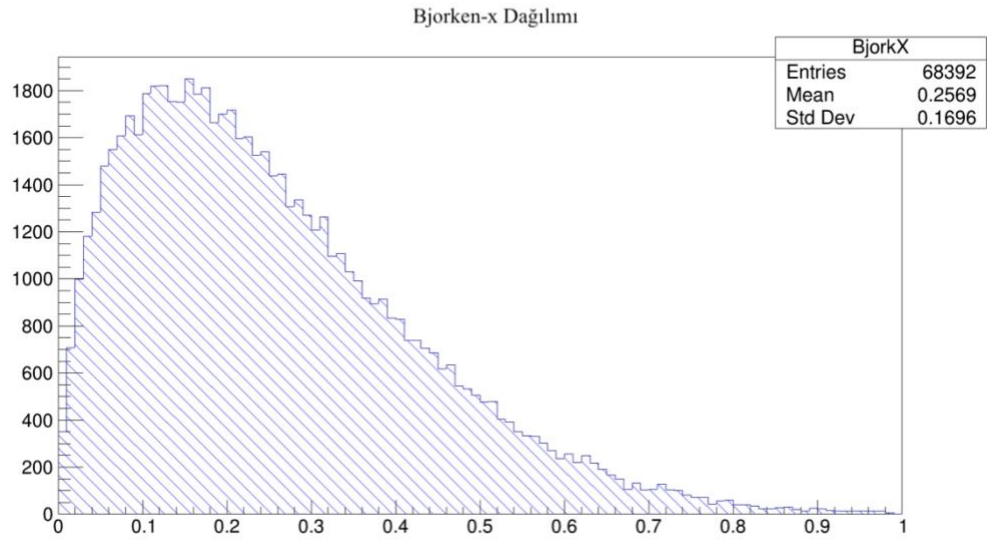
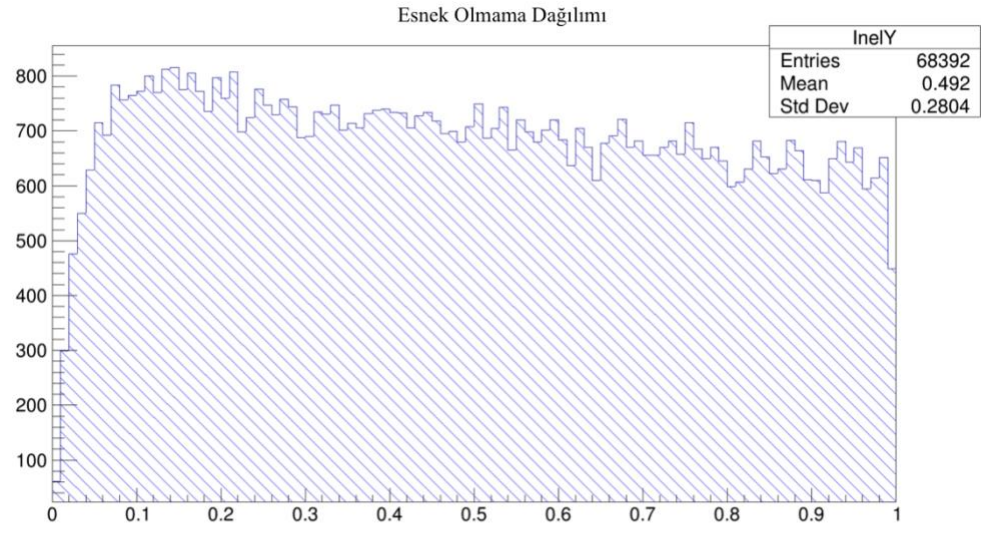
Şekil 8.6 NCRES saçılımı için Bjorken-x ve esnek olmama



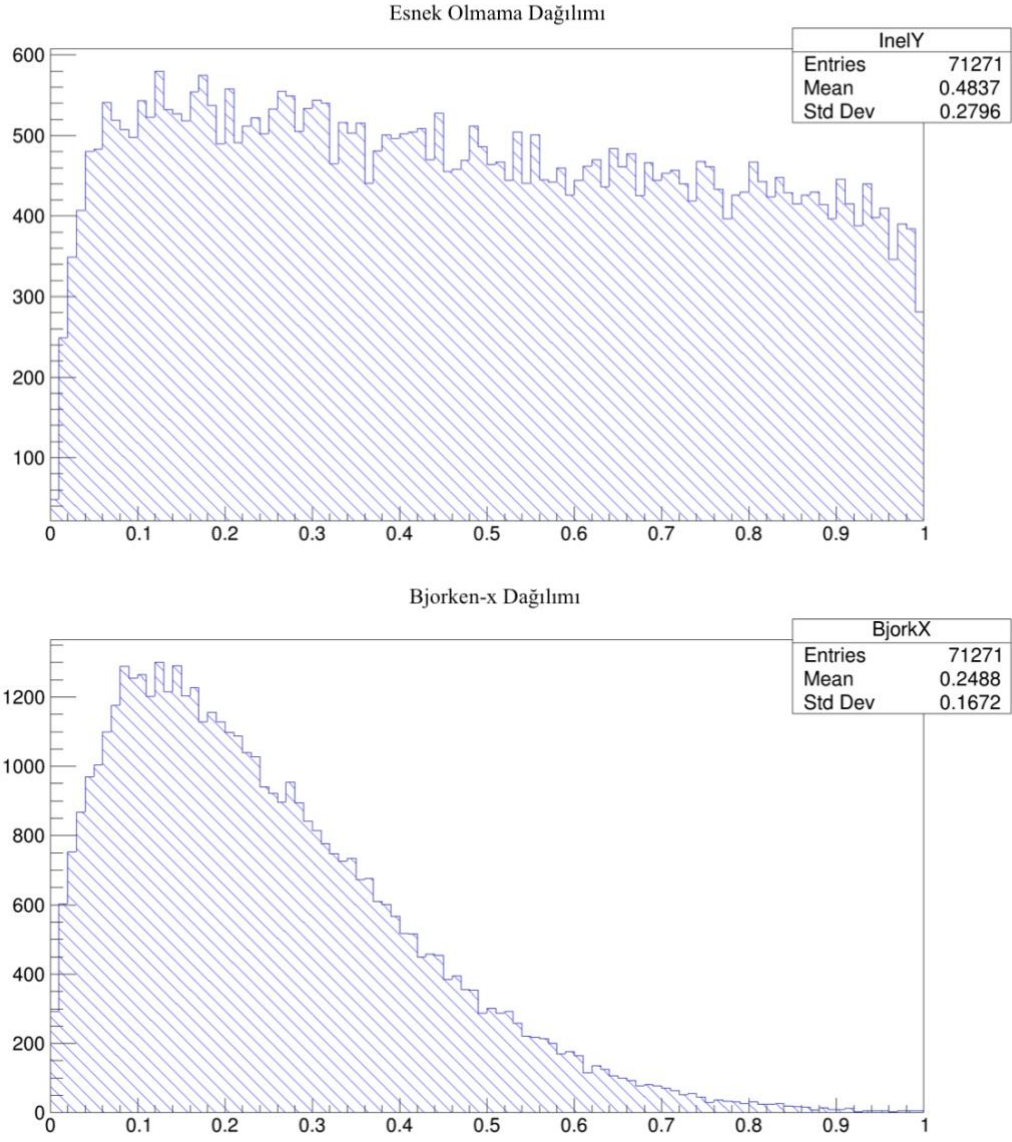
Şekil 8.7 NCEL saçılımı için Bjorken-x ve esnek olmama



Şekil 8.8 CCQE saçılımı için Bjorken-x ve esnek olmama



Şekil 8.9 CCDIS saçılımı için Bjorken-x ve esnek olmama



Şekil 8.10 NCDIS saçılımı için Bjorken-x ve esnek olmama

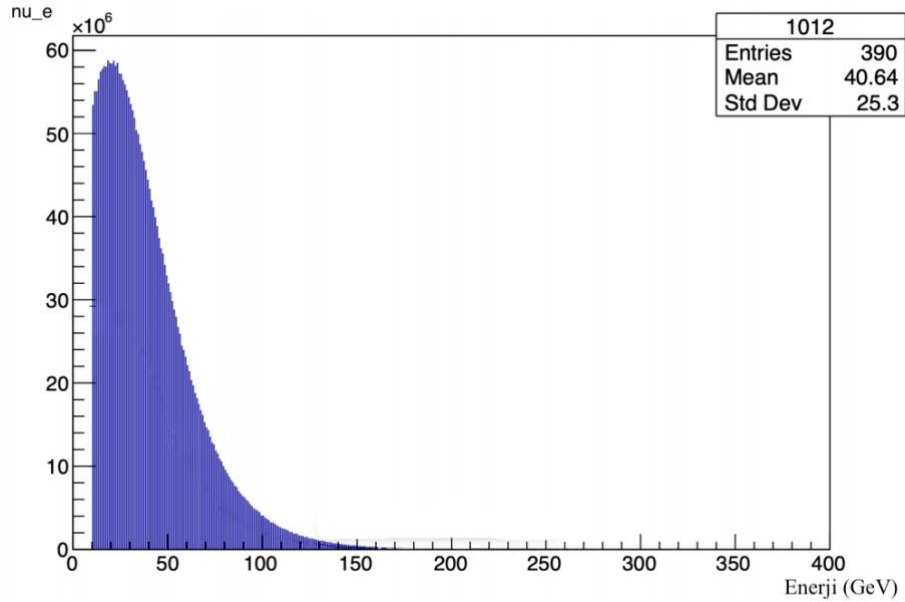
Bölüm 6.1. CCDIS (ν_τ) tesir kesiti başlığında bahsedilen Bjorken-x ve esnek olmama Lorentz değişmezleri sırasıyla (6.8) ve (6.9)' de verilmiştir.

Burada esnek saçılımlarda $x=1$ ve esnek olmayan saçılımlarda ise $0 < x < 1$ aralığındadır ve y , ($0 < y < 1$) gelen parçacığın kesirli enerji kaybıdır. Bjorken-x dağılımına bakıldığında elastik saçılımlarda x dağılımı 1'e yaklaşırken, elastik olmayan saçılımlarda x sıfırla bir arasında dağılım gösterirken sıfıra daha yakın bir dağılım gözlenmektedir.

Esnek olmamada, y gelen parçacığın kesirli enerji kaybını göstermektedir. Esnek olmama histogramlarına bakıldığında gözlemlenen en yüksek enerji kaybının NCDIS ve CCDIS olduğu sonucuna varılmaktadır.

8.2 Olay Sayısı Normalizasyonu ve Tau Nötrinosunun Manyetik Moment Üst Sınırının Hesaplaması

Proton demeti, SHiP deneyindeki hedefe çarptığında üretilen nötrinolar SND' ye kadar saçılarak devam eder. Burada tüm nötrinolar detektöre kadar ulaşamadığı için haritalama yapılmaktadır. Bunun için proton hedefindeki tüm nötrino olaylarını içeren “*pythia8_Geant4_withCharm_onlyNeutrinos.root*” dosya kullanılarak nötrinolar haritalandırılmaktadır. Yapılan hesaplar sonucunda parçacıkların saçılım ve nötrino detektörünün geometrisi içerisinde kalma oranı %87,36 olarak bulunmuştur. Bulunan bu değer “*pythia8_Geant4_withCharm_onlyNeutrinos.root*” içerisindeki olaylara uygulanır. Bunun sonucunda elde edilen nötrino hedefinde kalan nötrinoların momentum dağılımı Şekil 8.11' deki histogramda verilmektedir.



Şekil 8.11 Elektron ötrinosunun nötrino hedefindeki momentum dağılımı

Demet bloklamadaki elektron nötrinosunun toplam olay sayısı 1.3×10^{17} olarak bulunmuştur. Burada elde edilen ortalama enerji ise 62 GeV' dir. MC üretimleri sonucunda elde edilen CCDIS toplam olay sayısı ise 1.349.948 olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar önceki çalışmalar ile kıyaslandığında, demet bloklamadaki elektron nötrinosu için $2,8 \times 10^{17}$ toplam olay sayısı ve $1,1 \times 10^6$ CCDIS etkileşimi sonuçlarıyla uyumlu olduğu gözlemlenmiştir (Iuliano, 2019).

MC yöntemi uygulanarak elde edilen toplam olay sayısına uygulanan seçim kriterleri sonucunda elde edilen sayıların normalizasyonu yapılarak tau nötrinosunun manyetik momentine katkıda bulunacak bahsi geçen tüm saçılımlardan elde edilen olay sayısı hesaplanmıştır:

$$n_{evt} = \frac{\mu_v^2}{\mu_B^2} \times \int \phi_{\nu_\tau}^{Hedef} \sigma^\mu N_{\text{çekirdek}} dE$$

Tau nötrinosunun manyetik momentine getirilen üst sınır: $\mu_{\nu_\tau} = 4,68 \times 10^{-8} \mu_B$ olarak bulunmuştur. SHiP deneyinde hesaplanan tau nötrinosunun manyetik moment üst sınırı ile DONUT ve BEBC (Big European Buble Chamber) deneyindeki sonuçlar karşılaştırıldığında bulunan manyetik momentin en iyi üst limit olduğu görülmektedir. Deneylerin tau nötrinosunun manyetik moment üst sınır limiti Çizelge 8.2' de gösterilmiştir (Cooper-Sarkar ve Sarkar, 1992), (DONUT Collaboration, 2001).

Çizelge 8.2 Tau nötrino manyetik moment üst sınırının karşılaştırılması

Deneyler	Manyetik Moment Üst Sınırı
SHiP	$\mu_{\nu_\tau} < 4,68 \times 10^{-8} \mu_B$
DONUT	$\mu_{\nu_\tau} < 3,5 \times 10^{-7} \mu_B$
BEBC	$\mu_{\nu_\tau} < 5,4 \times 10^{-7} \mu_B$

9. TARTIŞMA VE SONUÇ

CERN’ de kurulması önerilen SHiP deneyi SMÖ fizik araştırması için bir keşif gemisi olabilecektir. Böylelikle, SMÖ’ nün birçok model öngörülleri test edilecek, önemli fizik sorularının cevapları araştırılacaktır. SHiP deneyinde, GS araştırmalarının yanında nötrino fiziğine dair önemli ölçümler yapılabilecektir. Örneğin tau nötrino ve karşıt tau nötrino etkileşimlerine dair birçok araştırma ilk kez yapılabilecektir.

Bu tez çalışmasında tau nötrinosunun manyetik momentine SHiP deneyinin getirebileceği en iyi üst limit hesaplanmıştır. Bu kapsamda SHiP deneyinin FairShip altyapısından yararlanılmıştır. GENIE yazılımı kullanılarak tesir kesiti oluşturulan elektron nötrinoları tungsten hedeften geçirilmiştir. Burada elde edilen dosyalara saçılım türleri, nötrino akısı eklenerek MC arka plan olayları elde edilmiştir. Elde edilen MC arka plan olayları SHiP geometrisinden geçirilirken GEANT 4 kullanılmıştır.

Tau nötrino manyetik moment etkileşimlerine arka plan oluşturan olayların sayısı hesaplanmıştır. Hesaplanan arka plan olay sayısı kullanılarak manyetik moment üst sınırı %90 güvenilirlik seviyesinde hesaplanmıştır. Sonuç $4,68 \times 10^{-8} \mu_B$ olarak bulunmuştur. Bulunan değer şimdiye kadar yapılan diğer deneylerin verisinden daha iyi bir verim sağlamaktadır. Sonuç olarak, SHiP deneyi veri almaya başladığında tau nötrinosu ve tau anti-nötrinosunun ölçümünde diğer deneylere göre benzersiz bir sonuç sağlayacağı öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- Abe K. et al.,^{[1][SEP]}“Observation of Electron Neutrino Appearance in a Muon Neutrino Beam”, Phys. Rev. Lett. Vol. 112, p. 061802, (2014), arXiv: 1311.4750 [hep-ex].
- Agostinelli S. et al., “Geant4—a simulation toolkit,” Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, vol. 506, no. 3, pp. 250 – 303, (2003)^{[1][SEP]}
- Al-Turany M. et al., “The FairRoot Framework,” Journal of Physics: Conference Series, vol. 396, no. 2, p. 022001, (2012)^{[1][SEP]}
- Bilenky S., Introduction to the Physics of Massive and Mixed Neutrinos, Springer, Canada (2017)^{[1][SEP]}
- Buonaura A. (2014/2017) “Study of ν_τ Properties with the SHiP Experiment”, Napoli University, Italy.
- Buonaura A. “Neutrino Interaction Simulations in FairShip”, SHiP Starter Kit III, (23 October 2019)
- Cooper-Sarkar A.M., Sarkar S. “Bound on the tau neutrino magnetic moment from the BEBC beam dump”, Physics Letters B 280 (1992) 153-158 North-Holland (22 January 1992)
- Dario D.S, “Study of Neutrino Interactions with the SHiP Experiment”, Napoli University, Italy (2017/2018)
- DONUT Collaboration, “A New Upper Limit for the Tau-Neutrino Magnetic Moment”, PACS numbers 14.60.Lm, 14.60.St, 13.40.Em, arXiv:hep-ex/0102026v1 (11 Feb 2001)
- Fukuda Y. et al.,^{[1][SEP]}“Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos”, Phys. Rev. Lett. Vol. 81, pp. 1562–1567, 1998, arXiv: hep-ex/9807003 [hep-ex].
- Giunti C. and Kim C. W., Fundamentals of Neutrino Physics and Astrophysics, Oxford (2007)^{[1][SEP]}[9] C. Ahdida et al., “Measurement of the muon flux for the SHiP experiment,” Tech. Rep. CERN-EP-2020-006, CERN, Geneva, (2020)
- Griffiths D., Introduction to Elementary Particles, WILEY-VCH, USA (1987)
- Güler A.M., “On Dipole Moments of Neutrinos”, The Middle East Technical University, Turkey (1997)
- Iuliano A., “Desing of a Detector to Study associated Charm Production in the SHiP Beam Dump Facility”, CERN-THESIS-2016-232, Napoli University, Italy (2016)

- Iuliano A., “The SHiP experiment at CERN”, XXVII International Workshop on Deep- Inelastic Scattering and Related Subjects –DIS2019, (8-12 April, 2019), Torino, Italy
- Kikawa T. “Measurement of Neutrino Interactions and Three Flavor Neutrino Oscillations in the T2K Experiment”, Springer Theses, (2016)
- Kodama K. et al.,^[1]^[SEP]“Observation of tau neutrino interactions”, Phys. Lett. Vol. B504, pp. 218–224, 2001, arXiv: hep-ex/0012035 [hep-ex].
- Komatsu M. on behalf of the SHiP Collaboration, SHiP: A New Facility with a Dedicated Detector for Studying Tau Neutrino Properties, Nuclear and Particle Physics Proceedings, Elsevier (2017)
- Lantwin O.J.I., “Optimisation the SHiP Experimental Design”, CERN-THESIS- 2019-157, Imperial College London, UK (2019)^[1]^[SEP]
- Nagashima Y., Elementary Particle Physics, WILEY-VCH, Japan (2013)
- Sajjad Athar M., Singh S. K. “The Pyhsics of Neutrino Interactions”, Cambridge University Press, (2020)
- Schwienhorst R. H., A New Upper Limit for the Tau-Neutrino Magnetic Moment, For the Degree of Doctor, Minnesota (2000)
- Sjöstrand T., Mrenna S., and P. Z. Skands, “Pythia 6.4 physics and manual,” Journal of High Energy Physics, vol. 2006, no. 05, p. 026, (2006)^[1]^[SEP]
- Sjöstrand T. et al., “An Introduction to PYTHIA 8.2,” Comput. Phys. Commun., vol. 191, pp. 159–177, (2015)
- The GENIE Neutrino Monte Carlo Generator Physics & User Manual, Version 2.10.0 (October 20, 2015)
- The SHiP Collaboration, A Facility to Search for Hidden Particles at the CERN SPS: the SHiP Physics Case, CERN (2015)
- The Ship Collaboration, Technical Proposal A Facility to Search for Hidden Particles (SHiP) at the CERN SPS (2015)
- Tomalak O. “Theory of Elastic Neutrino-Electron Scattering”, Mainz Germany, (21 February 2020)
- Yılmaz D., “Kütleli Nötrino Fiziği”, Ankara Üniversitesi, Türkiye (2005)