

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**OPERA DEDEKTÖRÜNDEKİ NÖTRİNO-KURŞUN YÜKLÜ AKIM
ETKİLEŞMELERİNDE HADRON ÇOKLUK DAĞILIMLARININ
İNCELENMESİ**

Çağm KAMIŞCIOĞLU

FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ANKARA
2017**

Her hakkı saklıdır

TEZ ONAYI

Çağın KAMIŞCIOĞLU tarafından hazırlanan “OPERA Dedektöründeki Nötrino-Kurşun Yüklü Akım Etkileşmelerinde Hadron Çokluk Dağılımlarının İncelenmesi” adlı tez çalışması 30/10/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Ali Ulvi YILMAZER
Ankara Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı



Jüri Üyeleri:

Başkan: Prof. Dr. Yiğit GÜNDÜÇ
Hacettepe Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı



Üye : Doç. Dr. İsmail TURAN
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fizik Anabilim Dalı



Üye : Prof. Dr. Ali Ulvi YILMAZER
Ankara Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı



Üye : Prof. Dr. Orhan ÇAKIR
Ankara Üniversitesi, Fizik Anabilim Dalı



Üye : Yrd. Doç. Dr. Deniz YILMAZ
Ankara Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı



Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Atila YETİŞEMİYEN
Enstitü Müdürü

ETİK

Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

30.10.2017



Çağın KAMIŞCIOĞLU

ÖZET

Doktora Tezi

OPERA DEDEKTÖRÜNDEKİ NÖTRİNO-KURŞUN YÜKLÜ AKIM ETKİLEŞMELERİNDE HADRON ÇOKLUK DAĞILIMLARININ İNCELENMESİ

Çağın KAMIŞCIOĞLU

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ali Ulvi YILMAZER

OPERA deneyi, CNGS nötrino demetindeki müon nötrinosunun tau nötrinoya salınımını görünür modda gözlemlemek amacıyla tasarlanmıştır. Bu çalışmada, yüklü akım nötrino-kurşun etkileşimlerinde üretilen yüklü parçacıkların çokluk dağılımları ve davranışmaları araştırılmıştır. Yüklü hadronların çokluk dağılımları, dağınım davranışı ve farklı kinematik bölgelerdeki KNO ölçeklemesi araştırılmıştır. Sonuçlar nötrino-kurşun etkileşimlerinin Monte Carlo jeneratörlerinin doğrulamasında kullanılabileceğinden detaylı bir şekilde tablolarla sunulmuştur.

Ekim 2017, 79 sayfa

Anahtar Kelimeler : OPERA, Nötrino, Salınım, ECC, müon, emülsiyon

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

STUDY OF CHARGED HADRON MULTIPLICITIES IN CHARGED-CURRENT NEUTRINO-LEAD INTERACTIONS IN THE OPERA DETECTOR

Çağın KAMIŞCIOĞLU

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

Supervisor: Prof. Dr. Ali Ulvi YILMAZER

The OPERA experiment was designed to search for $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$ oscillations in appearance mode through the direct observation of tau neutrinos in the CNGS neutrino beam. In this paper, we report a study of the multiplicity of charged particles produced in charged-current neutrino interactions in lead. We present charged hadron average multiplicities, their dispersion and investigate the KNO scaling in different kinematical regions. The results are presented in detail in the form of tables that can be used in the validation of Monte Carlo generators of neutrino-lead interactions.

October 2017, 79 pages

Key Words : OPERA, Neutrino, Oscillation, ECC, muon, emulsion

TEŞEKKÜR

Bu doktora tez çalışmamın gerçekleştirilmesinde; bilgi, birikim ve tecrübeleriyle çalışmaya yön veren, yardımlarını esirgemeyen ve destek olan değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ali Ulvi YILMAZER (Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı) ile Doktora Tezi Eş Danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ali Murat GÜLER'e (Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı) sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Aynı zamanda tez çalışmamda büyük emek ve katkıları olan kıymetli hocam Sayın Doç. Dr. Korkut Okan OZANSOY'a en içten teşekkürlerimi sunarım...

Bana ve tezime tüm katkılarından dolayı ODTU-OPERA Emülsiyon grubuna teşekkür ederim.

Tüm OPERA grubuna bu tezin gerçekleşmesinde buldukları katkılarından dolayı ve özellikle Nagoya grubuna, destek ve yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca, maddi ve manevi açıdan her türlü desteklerini esirgemeyen anne ve babama, tüm anlayış ve desteği için sevgili eşim Mustafa'ya ve sevgili oğlum Ömer Faruk'a tüm kalbimle teşekkür ediyorum.

Çağın KAMIŞCIOĞLU

Ankara, Ekim 2017

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI

ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
SİMGELER DİZİNİ.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. STANDART MODELDE NÖTRİNO.....	5
3. NÖTRİNO SALINIMLARININ FİZİĞİ.....	8
4. SALINIM DENEYLERİNİN TARİHÇESİ.....	13
4.1 Doğal Kaynaklı Nötrino Salınım Deneyleri.....	14
4.2 İnsan yapımı nötrino kaynaklı salınım deneyleri.....	16
5. OPERA DENEYİ.....	19
5.1 CNGS Nötrino Demeti.....	19
5.2 OPERA Algılayıcısı.....	21
5.2.1 Hedef Bölümü.....	22
5.2.2 Müon Spektrometre.....	23
5.2.3 Veto.....	24
5.3 OPERA ECC Birimleri.....	25
5.3.1 Nükleer Emülsiyon Filmleri.....	26
5.3.2 Kurşun Plakalar.....	29
5.3.3 Nükleer Emülsiyon Tarama Sistemleri.....	29
5.4 Nötrino Etkileşimlerinin Araştırılması.....	33
5.4.1 Elektronik Algılayıcı.....	33
5.4.2 Etkileşim Sınıflandırma.....	34
5.4.3 ECC Birimin Yerini Belirleme.....	35
5.4.4 Değişebilen Filmlerin Analizi.....	35
5.4.5 İz Takibi.....	36

5.5 OPERA Deneyi'nde v_T Etkileşimleri'nin Araştırılması.....	37
5.5.1 Beklenen Sinyal ve Arka Plan.....	39
5.5.2 İlk v_T Adayı.....	40
5.5.3 İkinci v_T Adayı.....	40
5.5.4 Üçüncü v_T Adayı.....	41
5.5.5 Dördüncü v_T Adayı.....	42
5.5.6 Beşinci v_T Adayı.....	42
6. VERİ ALIMI VE ANALİZ.....	44
6.1 Etkileşimi Yeniden Oluşturma	44
6.1.1 Hizalama.....	44
6.1.1.1 TT ve değişebilen fimler arası hizalama	45
6.1.1.2 Değişebilen fimler arası hizalama	46
6.1.1.3 Değişebilen fimler ve ECC birim arası hizalama	46
6.1.1.4 ECC birim fimler arası hizalama	47
6.1.2 Geri Tarama	47
6.1.3 Köşe Noktası	48
6.1.4 BozunumArama	48
6.2 Veri Alımı.....	50
6.3 Analiz.....	51
6.3.1 Çokluk Dağılımları.....	54
6.3.2 Verim Hesabı.....	57
6.3.3 Dağınım.....	63
6.3.4 KNO Ölçeklemesi.....	66
7. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	69
KAYNAKLAR.....	71
ÖZGEÇMİŞ.....	76

SİMGELER DİZİNİ

b	Alt kuark
d	Aşağı kuark
s	Garip kuark
c	Tılsımlı kuark
t	Üst kuark
u	Yukarı kuark
μ	Müon
τ	Tau
ν	Nötrino
ν_τ	Tau Nötrinosu
ν_μ	Müon Nötrinosu
ν_e	Elektron Nötrinosu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Standart Model’de parçacıkların gösterim.....	5
Sekil 2.2 Gama ışınları ve nötrininonun sırt sırta yayılması(Martin, B. 2006.).....	7
Sekil 4.1 Standart Güneş Modeli’nden (en yüksek çubuk) beklenen toplam nötrino akı ile çeşitli deneylerin sonuçları karşılaştırılması (Bahcall vd. 199.6).....	15
Şekil 4.2 SNO üç nötrino reaksiyon sonucu (Ahmadvd. 2002).....	15
Şekil 4.3 Dışlanan bölgeler.....	16
Sekil 4.4 2004 K2K sonuçları.....	17
Şekil 5.1 Nötrino Demeti.....	20
Şekil 5.2 Gran Sasso.....	21
Şekil 5.3 OPERA Algılayıcısı.....	22
Şekil 5.4 Fotoçoğaltıcı tüpler ve birim yerleşimi.....	23
Şekil 5.5 Müon spektrometresi mıknatıs gösterimi.....	24
Şekil 5.6 VETO gösterimi.....	25
Şekil 5.7 ECC birim ve alüminyum folya içerisinde değişebilen filmler.....	26
Şekil 5.8 Emülsiyon filmleri.....	28
Şekil 5.9 Emülsiyon filmlerinin yapısı.....	28
Şekil 5.10 Emülsiyon filmlerinde etkileşim.....	28
Şekil 5.11 ODTU-Ankara Emülsiyon Tarama Laboratuvarı	30
Şekil 5.12 Nagoya Üniversitesi Emülsiyon Tarama Laboratuvarı.....	30
Şekil 5.13 LNGS Emülsiyon Tarama Laboratuvarı.....	31
Şekil 5.14 Bern Üniversitesi Emülsiyon Tarama Laboratuvarı.....	31
Şekil 5.15 Emülsiyon filmlerindeki mikro izler.....	32
Şekil 5.16 OPERA elektronik algılayıcısında görülen yüklü akım (üstte) ve yüksüz akım (altta) etkileşmeleri (Agafonova 2011).....	34
Şekil 5.17 Etkileşimin gösterimi. Aday birim pembe renkte gösterilmiştir. (Agafonova 2011).....	35
Şekil 5.18 Etkileşimde iz takibi.....	37
Şekil 5.19 Yüklü akım (soldaki), ve yüksüz akım (sağdaki) nötrino etkileşimleri Feynmann diagramlar.....	38
Şekil 5.20 ECC birim içerisinde kısa ve uzun bozunum gösterimleri (ölçeksiz).....	39
Şekil 5.21 İlk tau etkileşim adayı.....	40

Şekil 5.22 İkinci tau etkileşim adayı, soldaki şekil tarama sonucu, sağdaki şekil yeniden yapılandırma sonucu.....	41
Şekil 5.23 Üçüncü tau etkileşim adayı soldaki şekil tarama sonucu, sağdaki şekil yeniden yapılandırma sonucu.....	41
Şekil 5.24 Dördüncü tau etkileşim adayı soldaki şekil tarama sonucu, sağdaki şekil yeniden yapılandırma sonucu.....	42
Şekil 5.25 Beşinci tau etkileşim adayı soldaki şekil tarama sonucu, sağdaki şekil yeniden yapılandırma sonucu.....	43
Şekil 6.1 Değişebilen filmlerde müon için ölçülen iz arasındaki pozisyon (sol) ve açisal (sağ) dağılım.....	45
Şekil 6.2 Emülsiyon filmlerindeki X-ışını baskısı ($\sim 100 \mu m$).....	46
Şekil 6.3 Hacim tarama.....	48
Şekil 6.4 Yüklü akım etkileşmelerinde birincil köşe noktasına ait izlerin etkileşim parametresi dağılımı (Crescenzo A.D. 2013).....	49
Şekil 6.5 Ana parçacık araması.....	50
Şekil 6.6 Taranan 16 tabaka görüntülerin tomografik izlemi (Toshito vd. 2006).....	52
Şekil 6.7 Müon izlerin PHV dağılımı.....	53
Şekil 6.8 Mip izlerin çokluk dağılımı.....	54
Şekil 6.9 Gri iz çokluk dağılımı.....	56
Şekil 6.10 Siyah iz çokluk dağılımı.....	56
Şekil 6.11 Veri-MC dağılımı.....	59
Şekil 6.12 $\ln W^2$ 'nin bir fonksiyonu olarak ortalama yüklü hadronların çokluğu.....	64
Şekil 6.13 Dağılımın yüklü hadron sayısına göre dağılımı.....	65
Şekil 6.14 KNO gösterimi.....	66
Şekil 6.15 OPERA verileri için KNO dağılımı.....	68

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1 Salınım deneylerinin 2017 itibari ile elde ettiği parametre bilgileri.....	18
Çizelge 5.1 Nötrino demetinin özellikleri.....	21
Çizelge 5.2 Emülsiyon teknolojisinin yıllara göre kullanımı.....	27
Çizelge 5.3 Tau leptonunun başat bozunum modları	38
Çizelge 5.4 Beklenen sinyal ve arka plan oranları.....	39
Çizelge 6.1 Etkileşim istatistiği.....	51
Çizelge 6.2 Veri ayıklaması.....	52
Çizelge 6.3 Müonlar ve yüklü hadronlar için demet eksenine göre yayılım açısının bir fonksiyonu olarak mip parçacıkların dağılımı.....	55
Çizelge 6.4 OPERA analiz zinciri.....	57
Çizelge 6.5 Kinematik Değişkenler.....	58
Çizelge 6.6 Etkileşimin yerini W^2 'nin bir fonksiyonu olarak MC ile bulma verimi.....	61
Çizelge 6.7 Verideki W^2 'nin bir fonksiyonu olarak yüklü hadron çokluk dağılımları.....	62
Çizelge 6.8 Fit parametrelerinin diğer deney sonuçlarıyla karşılaştırılması.....	64
Çizelge 6.9 Fit parametrelerinin diğer deney sonuçlarıyla karşılaştırması.....	65
Çizelge 6.10 Fit parametreleri.....	68

1. GİRİŞ

Nötrinolar elementer parçacık fiziğinin standart modelinin inşasından beri tarihsel olarak hayati bir oynamiş ve günümüzde nötrino fiziği kozmoloji, astrofizik ve yüksek enerji fiziğın kavşak noktasında önemli bir yer tutmaktadır. Evrenin derinliklerine baktığımızda farklı şekil ve boyutlarda gezegenleri, yıldızları ve galaksileri nispeten kolayca görebiliriz, ancak hemen göremediğimiz esas önemli öğelerden birisi evrende ‘nötrino’ adı verilen parçacıkların bolluğudur. Büyük Patlama’ dan sonra bir saniyeden daha az bir süre içerisinde oluşturulmuş olan bu parçacıklar yüksüzdürler, madde ile zayıf etkileşim yapmaktadırlar ve zayıf nükleer tepkimelerde açığa çıkarlar; mesela her saniye vücudumuzun içinden geçen yaklaşık 300 milyar nötrino Güneş’deki füzyon tepkimelerinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca büyük yıldızlar öldüklerinde de süpernova patlamalarıyla enerjilerini nötrino olarak bırakmaktadır. Evrende oldukça bol miktarda bulunan nötrino, içinden geçtiği cisimlerle neredeyse hiç etkileşime girmediği için gözlemlenmesi oldukça zor olmuş ve bu nedenle her zaman merak uyandırmıştır.

1930’dan önce parçacık fiziğinde enerjinin korunumu ile çekirdeğın proton ve nötronlardan oluştuğu biliniyordu. 1930’da beta bozunmasında enerjinin korunumunu inceleyen Wolfgang Pauli sürekli enerji spektrumunu açıklamak için çok küçük bir kütleyle sahip, yüksüz ve neredeyse madde ile hiç etkileşmeyen bir parçacığın varlığını öne sürmüş ve kendi ifadesi ile ‘umutsuz bir çare’ olan bu parçacığa ‘nötron’ adını vermiştir. İki yıl sonra James Chadwick günümüzde nötron olarak adlandırılan parçacığı keşfetmiş ancak Pauli’nin öne sürdüğü parçacık olamayacak kadar ağır olduğunu farketmiştir. Bunun üzerine Enrico Fermi 1933’de Pauli’nin parçacığını İtalyanca küçük ve yüksüz anlamına gelen ‘nötrino’ olarak isimlendirmiştir. Böylece nötrino yeni bir parçacık olarak önerilmiş ve fizikçiler bu yeni parçacığı tespit edebilmek için çeşitli yollar düşünmeye başlamıştır. Ancak bu oldukça zor bir görevdir çünkü Bethe and Peierls (Bethe ve Peierls 1934) tarafından öngörülen nötrino tesir kesiti $\leq 10^{-44} \text{ cm}^2$ ’dir. Buna göre nötrinolar tespit edilmesi neredeyse imkansız parçacıklar olarak düşünülmüştür. Sonraki yıllarda yürütölen deneysel ve kuramsal alandaki detaylı çalışmalar, nötrinoyu gözlemlenmemizi ve özelliklerini anlamamızı sağlamıştır ancak

nötrinolar hala en az anlaşılan temel parçacıklardan birisidir ve nötrino fiziği, temel parçacık fiziği, astrofizik ve kozmolojinin kavşağında önemli bir yer tutmaktadır.

Nötrino çeşnilerinden birisi olan elektron nötrinosu(ν_e) Pauli'nin 1930 yılında nötrino önerisinden tam 26 yıl sonra keşfedilmiştir. 1956'da Clyde Cowan ve Frederick Reines nükleer reaktördeki nötrino akısını kullanarak elektron nötrinosunu keşfettiklerini duyuran bir yayın yapmışlardır ve bu sonuçlar 1958'de Nobel Ödülü ile onurlandırılmıştır (Cleveland vd. 1998).

1962'de L.M. Lederman, M. Schwartz, J. Steinberger vd. Brookhaven Ulusal Laboratuvarı'nda gerçekleştirilen bir deneyle hızlandırıcı sonuçlarını kullanarak müon nötrinosunu(ν_μ) keşfetmeyi başarmışlardır. 1962'de L.M. Lederman, M. Schwartz, J. Steinberger vd. bu keşifleri nedeniyle Nobel Ödülü ile onurlandırılmıştır (Schwartz, M. 1962).

Böylece ikinci nötrino tipinin keşfiyle en az iki lepton ailesinin varlığı kanıtlanmış oldu. Bunun üzerine bilim adamları müondan daha ağır leptonların varolabileceği hipotezini öne sürmüş ve bu leptonun da nötrino ile bağlantılı olabileceğini öngörmüştür. 2001 yılında tau lepton ile ilişkili nötrino varlığı yani tau nötrinosu(ν_τ) ise Fermilab'daki DONUT deneyi ile doğrulanmıştır (Lundberg, 2001, Saoulidou 2008).

Nötrinoyu diğer yüklü leptonlardan göre farklı kılan kütesinin çok küçük olması, madde ile aşırı zayıf etkileşimi ve salınım yapmasıdır. Bu zamana kadar nötrininin kütesini ölçmek için bir çok deney tasarlanmış ve bu deneyler de nötrininin kütesine sadece bir üst limit koyabilmiştir. Çeşni salınımları ise ilk kez 1962'de Japon fizikçi Jiro Maki tarafından öngörülmüştür. Nötrino çeşni salınım sürecinin belirlenmesi ile Güneş, atmosferik, reaktör ve hızlandırıcı nötrinolar ile yapılan deneyler nötrino salınımlarını anlamamıza katkıda bulunmuştur. 1968'de Homestake (Davis 1994.) Deneyi ile Ray Davis ve grubu Güneş'ten gelen nötrinoları gözlemeyi başarmıştır. Klor-nötrino etkileşmesi üzerine oluşturulan deneyde gözlenen elektron nötrino akısının, Güneş'te üretilenden daha az olduğunu gösteren sonuçlar elde etmişlerdir.

1998'de ise Japonya'daki Kamioka Mozumi madeninde kurulmuş olan Süper Kamiokande deneyi ile atmosferik sektörde müon nötrinolarının salınım yaptığı bulunmuştur (Fukuda vd. 1998). Bu sonuç, 1999'da yine Japonya'da yapılan K2K (KEK to Kamioka) deneyinde de test edilmiştir (Ahn vd. 2001). Her ne kadar ν_μ den ν_τ 'ya salınım kanalı baskın görünse de tau nötrinosa ilişkin açık bir gözlem yapılamamıştır.

Nötrino salınımlarını daha detaylı araştırmak üzere yeni nesil deneyler tasarlanmış bunlardan bir tanesi de OPERA (**O**scillation **P**roject with **E**mulsion **T**racking **A**pparatus) deneyidir. Deney müon nötrininin tau nötrinoya salınımlarını doğrudan gözlemlenmesi amacıyla tasarlanmış Avrupa'daki tek nötrino salınım projesidir. CERN'deki hızlandırıcılarda oluşturulan müon nötrino demeti yer kabuğu içerisinde 732km kadar bir yolculuktan sonra Gran Sasso'da yer alan OPERA algılayıcısına ulaşmaktadır. Standart nötrino salınım modeline göre müon nötrinoların bir bölümü yolculuğu sırasında salınım yaparak tau nötrinoya dönüştüğünde, OPERA algılayıcısında tau nötrininin etkileşimleri gözlemlenebilmektedir. Tau nötrino etkileşimlerini doğrudan gözlemleyebilmesi OPERA'yı diğer salınım deneylerinden farklı kılmaktadır.

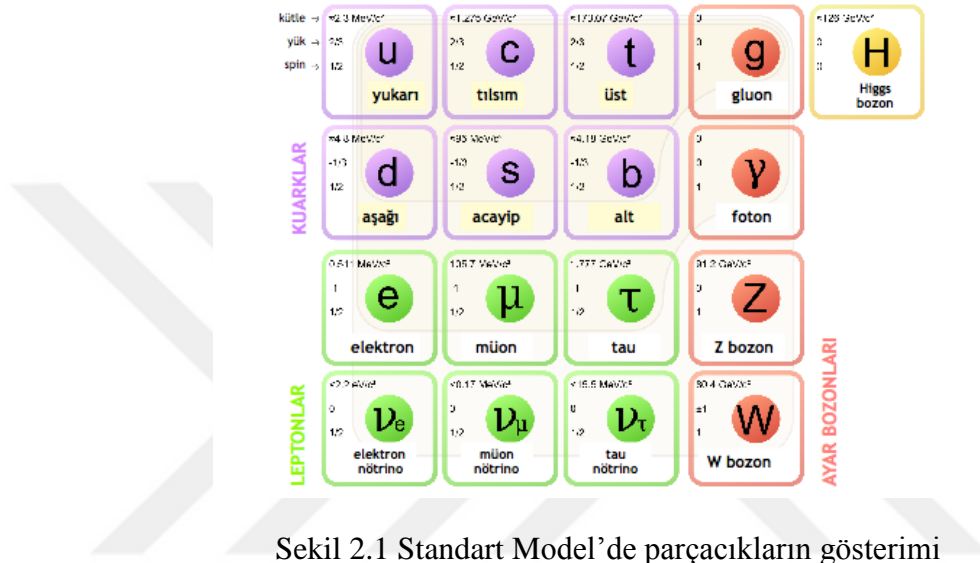
Bu çalışmada 2008-2012 yıllarında aktif olarak çalışarak veri alımını tamamlamış olan OPERA Deneyi'nde kurşun-nötrino etkileşimleri çalışılmıştır. Mikron altı uzaysal çözünürlüğe sahip emülsiyon filmlerinde meydana gelen etkileşimlerin topolojileri ve oluşan hadron parçacıklarının çokluk dağılımları detaylı olarak analiz edilmiştir. Bu nedenle elde edilen sonuçlar Monte Carlo olay üreteçlerini ayarlamakta kullanılabilir. Bu amaçla tezin ilk kısmında genel bir giriş yapılmış nötrinoların genel özellikleri kısa bir tarihçe ile beraber verilmiştir. İkinci kısımda ise Standart Model'de nötrinolar anlatılmıştır. Üçüncü bölümde nötrino salınımlarının fiziğine yer verilmiştir. Nötrino çeşni özdurumlarından başlanarak çeşniler arası salınım ifadelerine ulaşılmıştır. Dördüncü bölümde nötrino salınım deneylerinin tarihçesi ve çeşitleri anlatılmıştır. Doğal kaynaklı ve insan yapımı kaynaklı deneylerden bazı örnekler verilmiş ve sonuçlarının nötrino fiziğine katkıları ifade edilmiştir. Beşinci bölüm OPERA Deneyi'ne ayrılmıştır. Algılayıcı sistem, hızlandırıcıda oluşturulan demet hedef

bölümü, emülsiyon filmlerinin yapısı ve işleyişi ile tarama sistemleri açıklanmıştır. Altıncı bölümde veri alımı ve analizden bahsedilmiştir. Veride yapılan ayıklamalar, hadron parçacıklarının çokluk dağılımı, Monte Carlo simülasyonunu kullanarak yapılan verim hesabı, dağılım ve KNO ölçeklemesi detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Son bölümde ise elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.



2. STANDART MODEL'DE NÖTRİNO

İnsanoğlu çok eski çağlardan beri “ne”, “nasıl”, “ne zaman”, “neden” gibi sorularla yaşadığı evreni hep sorgulamakta ve bu merakı hep elinde tutmaktadır. Fizikçiler ise bu soruları sormayı asla bırakmayan ve en uç noktalara taşıyan bilim insanlarıdır.



Şekil 2.1 Standart Model'de parçacıkların gösterimi

İlk üç sütunda maddenin üç nesli verilmiştir. Dördüncü sütunda ayar bozonları ve beşinci sütunda ise Higgs bozonu

Filozoflar ve fizikçiler için bir bulmaca haline gelen “madde nedir?” sorusuna, maddenin "atomlar" olarak adlandırdığı küçük "bölünmezlikler" den oluştuğunu öne süren ilk kişi Yunan filozof Democritus'tur.

Bugün maddenin en küçük yapı taşının atomlar olmadığını biliyoruz. Binlerce fizikçinin uzun yıllar çalışmaları sonucu elde ettikleri kuramları, buluşları ve yapılan deneyler maddenin temel yapısına dikkat çekici sonuçlar getirmiştir. Buna göre evrendeki her şeyin, dört temel kuvvet tarafından yönetilen ve temel parçacıklar denilen az sayıda temel yapı taşından oluştuğu bulunmuştur.

Bu parçacıkların ve kuvvetlerin birbiri ile nasıl ilişkili olduğuna dair en iyi açıklama ise parçacık fiziğinin Standart Modeli'nde verilmiştir. 1970'li yılların başında geliştirilen

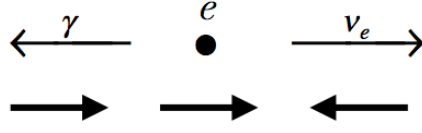
bu model ile parçacık fizikçileri, bir dizi teori, yeni kavram ve ilkeleri kullanarak maddenin temel yapısını tanımlamışlardır. Yıllar geçtikçe, bu model birçok deneysel sonucu başarılı bir şekilde açıklamış ve tahmin etmiştir. Bugün ise iyi test edilmiş bir fizik teorisi olarak kabul edilmektedir. (Weinberg 1995, Altarelli 2005)

Standart Model'de ifade edilen parçacıklar, ayar bozonları ve özellikleri şekil 2.1'de verilmiştir. Parçacıklar sınıflandırılırken spini tamsayı olanlar bozon ve spini kesirli olarak ifade edilen parçacıklar ise fermiyon olarak adlandırılmaktadır. Tüm fermiyonların lepton sayısı ve yük bakımından karşıt parçacığı bulunmaktadır. Temel olarak üç renk kuantum sayısı nedeniyle toplamda 12 kuark/anti-kuark ve 12 lepton/anti-lepton bilinmektedir. Bu parçacıklar Fermi-Dirac istatistiğine ve onu izleyen Pauli dışarlama ilkesine uymaktadırlar. Nötron, proton, piyon gibi parçacıkların oluşmasında görev alan kuarklar, zayıf, güçlü ve elektromanyetik etkileşimler yapmaktadır. Yüklü leptonlar ise elektromanyetik ve zayıf etkileşim yaparken ve yüksüz leptonlar sadece zayıf etkileşim yapmaktadır. Güçlü etkileşimler için sekiz kütsüz gluon, elektromanyetik etkileşimler için bir kütsüz foton ve zayıf etkileşimler için ağır W^{\pm} ve Z^0 bozonları vardır. Standart Model'in öngörülleri günümüzde hala çeşitli deneylerle test edilmektedir. En son eksik parça olan Higgs bozonu CERN'deki ATLAS (Ammosov, V.V. ve Arik, E. 2012) ve CMS (Chatrchyan vd. 2012) deneyleriyle 04.07.2012 yılında gözlenmiştir.

Nötrinolar leptonlar içinde önemli bir alt gruptur. Üç çeşni ile karşımıza çıkmaktadır. Elektron nötrino, müon nötrino ve tau nötrino şeklindedir, anti-parçacıkları ise anti-elektron nötrino, anti-müon nötrino ve anti-tau nötrino'dur. Nötrinolar Standart Model'de kütsüz, elektriksel olarak nütür zayıf etkileşen spin 1/2 parçacıklar olarak tanımlanmaktadır. Bu zamana kadar yapılan deneylerde nötrinolar sol elli olarak tespit edilmiştir.

1958'de Maurice Goldhaber, Lee Grodzins ve Andrew Sunyar, Europium-152 çekirdeği bir atomik elektronu yakalarsa ne olur sorusuna cevap ararken nötrinin helisitesi hakkında yorum yapmışlardır. Her durumda açısal momentumu korumak için gama ışınları ve nötrininin sırt sırta yayılması sonucu nötrininin sol elli olduğu

ispatlanmıştır şekil 2.2. Sağ elli nötrinolar bulunamadığından alışılmış Dirac kütle terimi yazılamayacağı için, parçacık fizikçileri önceleri nötrinoların kütesiz olması gerektiği sonucuna varmıştır (Martin 2006).



Şekil 2.2 Gama ışınları ve nötrinonun sırt sırta yayılması (Martin 2006).

Ancak 1998'de gerçekleştirilen SuperKamiokande Deneyi nötrinonun kütesinin varlığına ilişkin ilk kanıtları ortaya koyan deneydi (Halverson 1998). Komioka yakınlarındaki Takayama'da sunulan bu konferansta her mücadeleden sağ kurtulan Standart Model bu sefer başarısız olmuş ve en azından sonuçlara göre teorinin eksik olduğu ortaya çıkmıştı.

3. NÖTRİNO SALINIMLARININ FİZİĞİ

Nötrinolar 1930'da Wolfgang Pauli tarafından, sürekli olduğu görülen beta bozunmundaki enerji korunumu ilkesine dayanarak önerilmişti. Bu nedenle nötrinin varlığı henüz herhangi bir şekilde gözlenmemişken yüksüz, kütesiz ve spin 1/2 olan bir parçacık olarak tanımlanmıştır. Pauli tarafından yüksüz olduğu için nötron olarak isimlendirildi ancak 1934'de James Chadwick nötronu keşfederek Pauli'nin yanıldığını düşündü. Sonraları bu ikililiği ortadan kaldırmak için Enrico Fermi Pauli'nin parçacığına İtalyanca küçük nötr parçacık anlamına gelen *nötrino* ismini verdi. Bu kadar küçük ve algılanması zor olan bu parçacık yine de bilim adamlarını yıldırmadı ve elektron nötrinosunun, müon nötrinosunun ve tau nötrinosunun keşfi ile Standart Model tarafından öngörülen nötrinolar doğrulanmış oldu.

Standart Model'de nötrinoların kütesiz olması öngörülmüştür. Bununla birlikte, altmış yıl boyunca uzanan bir dizi deney nihayetinde nötrinoların çok küçük olmasına rağmen bir kütleyle sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Nötrino salınımlarına ilişkin ilk öngörü 1957'de Pontecorvo tarafından ortaya atılmıştır (Pontecorvo 1957, Pontecorvo 1958). Kendisi lepton sektöründeki salınımı düşünmüş ve nötrino ile antinötrino arasında bir salınım olabileceğini ispatlamaya çalışmıştır. Ancak bu salınım hiç gözlenememiştir. Müon nötrinosunu (ν_μ) keşfinin ardından 1962'de Maki, Nakagawa ve Sakata tarafından çeşni salınımları fikri ispatlanmıştır ki 1967'de Pontecorvo tarafından detaylı olarak ifade edilmiştir (Pontecorvo 1967).

Nötrino karışım hipotezine göre, nötrinin kütleli sınırdan farklıdır ve bu kütleli nötrinoların (ν_α) alanları CC ve NC lagranjiyene girmektedir.

$$L^{CC} = -\frac{g}{2\sqrt{2}} j_\rho^{CC} W^\rho + h.c. \quad j_\rho^{CC} = 2 \sum_{\alpha=e,\mu,\tau} \bar{\nu}_{\alpha L} \gamma_\rho \alpha_L \quad (3.1)$$

$$L^{NC} = -\frac{g}{2\cos\theta_w} j_\rho^{NC} Z^\rho + h.c. \quad j_\rho^{NC} = \sum_{\alpha=e,\mu,\tau} \bar{\nu}_{\alpha l} \gamma_\rho \nu_{\alpha l}. \quad (3.2)$$

Nötrino salınımlarını şöyle ifade edebiliriz; Zayıf etkileşimlere eşlik eden nötrino çeşni durumları kütle özdeğerlerinin doğrusal bir kombinasyonudur.

$$| \nu_\alpha \rangle = \sum_{i=1}^3 U_{\alpha i} | \nu_i \rangle \quad (3.3)$$

Özdurumları birbirine çevirebilen 3x3 üniter bir matris olan Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata (PMNS) ile bu dönüşüm açık olarak yazılabilir.

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_{23} & \sin\theta_{23} \\ 0 & \sin\theta_{23} & \cos\theta_{23} \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

$$x \begin{pmatrix} \cos\theta_{13} & 0 & \sin\theta_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_{13}e^{-i\delta} & 0 & \cos\theta_{13} \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

$$x \begin{pmatrix} \cos\theta_{12} & \sin\theta_{12} & 0 \\ -\sin\theta_{12} & \cos\theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

Olarak ifade edilir ve θ_{12} , θ_{13} ve θ_{23} karışım açıları ile δ CP-bozulum fazı deneysel olarak sınırlandırılabilen dört adet matris parametresidir. Alt matrisler kabaca nötrino salınımlarında deneysel araştırmaların farklı alanlarını temsil etmektedir.

- θ_{23} Atmosferik ve uzun menzilli hızlandırıcı deneylerinde ölçülmektedir.

- θ_{13} Reaktör ve hızlandırıcı deneylerinde ölçülmektedir.

- θ_{12} Güneş deneylerinde ölçülmektedir.

- δ ile ilgili henüz bir ölçüm yapılmamıştır.

Tüm bu parametreler ile birlikte Δm_{12}^2 ve Δm_{23}^2 nötrino salınım parametreleridir.

Salınımlar L mesafesi boyunca bir nötrino çeşni ν_α 'nın bir diğeri ν_β ya dönüşmesidir. Bu mesafe boyunca ilerleyen nötrinoların kütle özdeğerleri Schrödinger denkleminde göre zaman faktörü $e^{-iE_i t}$ ile gelişir.

$$|\nu_\alpha\rangle_t = \sum_{i=1} U_{\alpha i}^* e^{-iE_i t} |\nu_i\rangle \quad (3.8)$$

Algılama noktasında geçiş genliğı;

$$\begin{aligned} A_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta} &= \langle \nu_\beta | \nu_\alpha \rangle_t \\ &= \sum_j U_{\beta j} \langle \nu_j | e^{-i(E_j - p_j x)} | \nu_i \rangle U_{\alpha i}^* \\ &= \sum_j U_{\beta j} U_{\alpha i}^* e^{-i(E_j - p_j x)} \delta_{ij} \\ &= \sum_i U_{\beta i} U_{\alpha i}^* e^{-i(E_i - p_i x)} \end{aligned} \quad (3.9)$$

Buradan;

$$\begin{aligned}
P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) &= |A_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}|^2 = A_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta} A_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}^* \\
&= \sum_i U_{\beta i} U_{\alpha i}^* e^{-i(E_i t - p_i x)} \sum_j U_{\alpha j} U_{\beta j}^* e^{-i(E_j t - p_j x)} \\
&= \sum_{ij} U_{\beta i} U_{\alpha i}^* U_{\alpha j} U_{\beta j}^* e^{-i[(E_i - E_j)t - (p_i - p_j)x]}
\end{aligned} \tag{3.10}$$

Rölativistik nötrinolar için;

$$E_i = \sqrt{p^2 + m_i^2} = p + \frac{m_i^2}{2p} = E + \frac{m_i^2}{2E} \tag{3.11}$$

Denklemin üssel kısmını basitleştirmek için nötrinolar ışık hızına yaklaştıklarından, $L=ct$ olarak gösterilebilir. Buna göre t zaman sonra L mesafesi kadar giden nötrinoların salınım olasılığı;

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sum_{ij} U_{\beta i} U_{\alpha i}^* U_{\alpha j} U_{\beta j}^* e^{-i \frac{\Delta m_{ij}^2}{2E} L} \tag{3.12}$$

şeklinde bulunur.

Eğer 1.1 eşitliği 1.12' yerine koyulursa

$$\begin{aligned}
P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) &= \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} \text{Re}(U_{\beta i} U_{\alpha i}^* U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin^2(\Delta m_{ij}^2 \frac{L}{4E}) \\
&\quad + 2 \sum_{i>j} \text{Im}(U_{\beta i} U_{\alpha i}^* U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin^2(\Delta m_{ij}^2 \frac{L}{2E})
\end{aligned} \tag{3.13}$$

Deneysel sonuçlara göre θ_{13} ve $\Delta m_{12}^2 \ll \Delta m_{23}^2$ oldukça küçük değerlere sahiptir.

Dolayısıyla salınım formülleri;

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) = \sin^2(2\theta_{23})\cos^4(\theta_{13})\sin^2\left(\frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E}\right) \quad (3.14)$$

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = \sin^2(2\theta_{13})\sin^2(\theta_{23})\sin^2\left(\frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E}\right)$$

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\tau) = \sin^2(2\theta_{13})\cos^2(\theta_{23})\sin^2\left(\frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E}\right)$$

şeklinde yazılabilmektedir.

4. SALINIM DENEYLERİNİN TARİHÇESİ

Nötrino deneyleri nükleer rektörlerden ve Güneş'ten kaynaklı olanlar için MeV, hızlandırıcı kaynaklı olanlar için GeV mertebesinde olmak üzere geniş bir enerji yelpazesini kapsamaktadır. Bu nedenle üç nötrinonun kütlesi ve PMNS matrisinin parametrelerini ölçmek için farklı şekillerde ve özelliklerde deneyler tasarlanmıştır.

Deneysel açıdan salınım modellerinin olası tüm kombinasyonlarını aynı anda ölçebilen bir deney şu an fiziksel ve teknolojik açıdan mümkün değildir. Bu nedenle salınımı gözleyebilmek için tipik bir algılayıcı nötrino kaynağına göre uzak veya yakın olacak şekilde yerleştirilir. İki farklı bölgeden elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında salınım olasılığı hakkında yorum yapılabilir.

Nötrino salınımları iki farklı yöntemle gözlemlenebilmektedir. Başlangıçta bulunmayan bir nötrino çeşnisinin gözlemlenmesiyle salınımın tespit edilmesine 'görünme' tipi deney denilmektedir. Burada saf nötrino çeşnisinin bir bölümü daha algılayıcıya ulaşmadan önce salınım yaparak başka bir nötrino çeşnisine dönüşür. Böylece algılayıcıda her iki nötrino çeşnisinin de etkileşimleri gözlenir. Öte yandan algılayıcıda başlangıçtaki nötrino akısı ile tespit edilen akı karşılaştırılarak kaybolan akının bulunmaya çalışıldığı deneyler de 'kaybolma' tipi deneyler olarak ifade edilmektedir.

OPERA görünme tipi deney özelliği taşımaktadır. Müon nötrinoların bir bölümü yolculuğu sırasında salınım yaparak tau nötrinoya dönüşmekte ve tau nötrino etkileşimlerinin OPERA algılayıcısından doğrudan gözlemlenmesi diğer salınım deneylerinden farklı oluşunu ortaya koymaktadır.

Günümüze kadar bir çok deneyde nötrino salınımları gözlenmeye çalışılmıştır. Kullanılan nötrino kaynakları açısından incelendiğinde deneyleri iki grup altında toplamak mümkündür.

*Doğal kaynaklı nötrino salınım deneyleri (atmosferik veya güneş)

*İnsan yapımı nötrino kaynaklı salınım deneyleri (hızlandırıcılar veya nükleer reaktörler)

Tüm bu deneylerde kullanılan nötrinolar kaydedilen mesafeler ve enerjileri açısından farklı olduğundan deneyler birbirini tamamlayıcı niteliktedir.

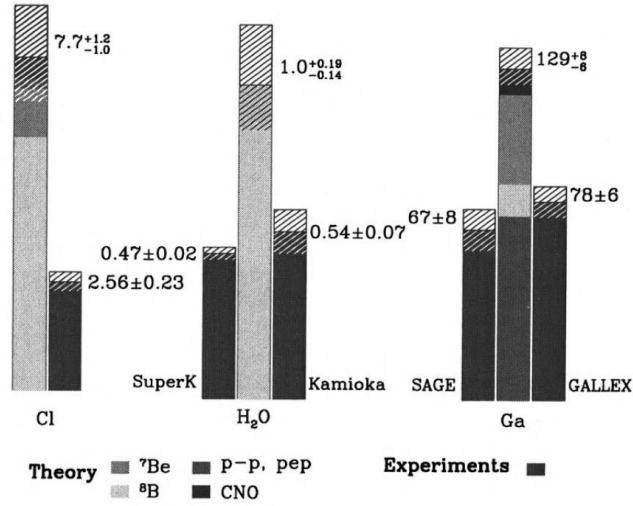
4.1 Doğal Kaynaklı Nötrino Salınım Deneyleri (güneş veya atmosferik)

Güneş nötrinoları, Güneş'in iç tabakalarında meydana gelen nükleer füzyon sonrası oluşmaktadır. Oluşan bu nötrinolar farklı enerjilerde olduğundan algılayıcılar farklı şekilde tasarlanmıştır. Bilindiği üzere salınım parametrelerinden Δm^2_{12} Güneş nötrino akısındaki azlığı nötrino salınımları ile açıklamakta kullanılan bir parametredir ve doğal kaynaklı nötrino salınım deneylerinde ölçülmektedir. Bu amaçla Güneş nötrinolarına ait ilk çalışmalar 1968'de Homestake (Davis 1994) deneyi ile başlar. Algılayıcı yerin 1478 m altına kurulmuş ve 1970 - 1994 yılları arası ara vermeden çalışmıştır. Deney ^8B bozunumundan kaynaklanan güneş nötrinolarına karşı hassastır. Etkileşimlerin varlığı radyoaktif ^{37}Ar 'un bozunumlarının tespit edilmesiyle yapılmıştır. Sonuçta deneyde 30 yıl boyunca güneş nötrino akısı ölçülmüş ve Standart Güneş Modeli'nde hesaplanan akının üçe biri gözlenmiştir.

Bu sonuç elektron nötrino açığı olarak rapor edilmiştir. Benzer sonuçlar daha sonraki yıllarda SAGE (Cleveland vd. 2005), GALLEX (Hempel vd. 1999, Kirsten 2005), Kamiokande (Fukuda vd. 1996), SuperKamiokande (Halverson 1998), deneyleri tarafından da rapor edilmiştir.

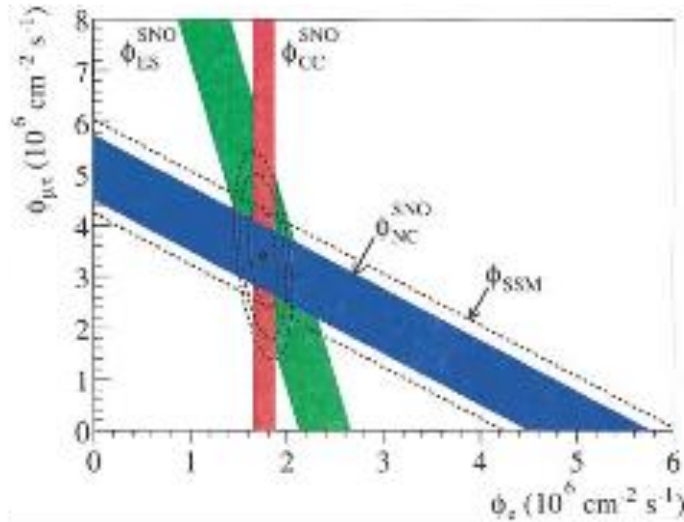
Güneş nötrino bulmacasına önerilen çözüm nötrino salınıımıydı. Buna göre Güneş'ten Dünya'ya yayılan nötrinolar yolda tür değiştiriyorlardı. Bu hipotezi destekleyen ilk bulgular 2002 yılında Sudbury Nötrino Gözlemevi'nden geldi (Barton 2002). Sudbury Nötrino Gözlemevi Kanada yakınlarındaki INCO's Creighton Madeni'nde kurulmuş

1000 ton ağır su içeren Çerenkov algılayıcısıdır. Ağır su hedefi üç nötrino türüne de hassas olduğundan Güneş nötrinolarını inceleyebilmek için gerekli etkileşimlerin



oluşmasını sağlar.

Şekil 4.1 Standart Güneş Modeli'nden (en yüksek çubuk) beklenen toplam nötrino akı ile çeşitli deneylerin sonuçları karşılaştırılması (Bahcall vd. 1996)



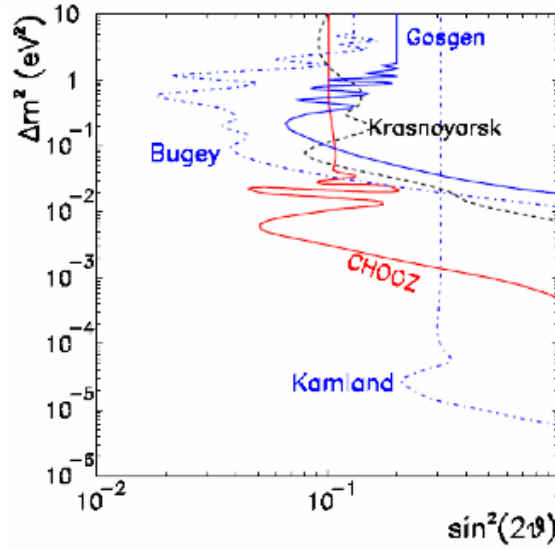
Şekil 4.2 SNO üç nötrino reaksiyon sonucu (Barton 2002)

Deneyde yüklü akım etkileşimleri ile elektron nötrino akısı ve yüksüz akım etkileşimleri ile de üç nötrino türünün toplam akısı ölçülmüştür. SNO'nun bu verilerine göre Standart Güneş Modeli doğru ve elektron nötrino açığının sebebi elektron nötrinolarının ν_μ ve ν_τ 'ya salınımıdır.

$$\begin{aligned}
 \nu_x + e^- &\rightarrow \nu_x + e^- \\
 \nu_e + d &\rightarrow p + p + e^- \\
 \nu_x + d &\rightarrow p + n + \nu_x
 \end{aligned}
 \quad x = e, \mu, \tau \quad (4.1)$$

4.2 İnsan yapımı nötrino kaynaklı salınım deneyleri (hızlandırıcılar veya nükleer reaktörler)

Laboratuvar deneyleri, nötrino salınımlarını araştırmak için, hızlandırıcılardan veya nükleer reaktörlerden üretilen nötrinolar ile gerçekleştirilmiştir. Bu tip deneylerde iki

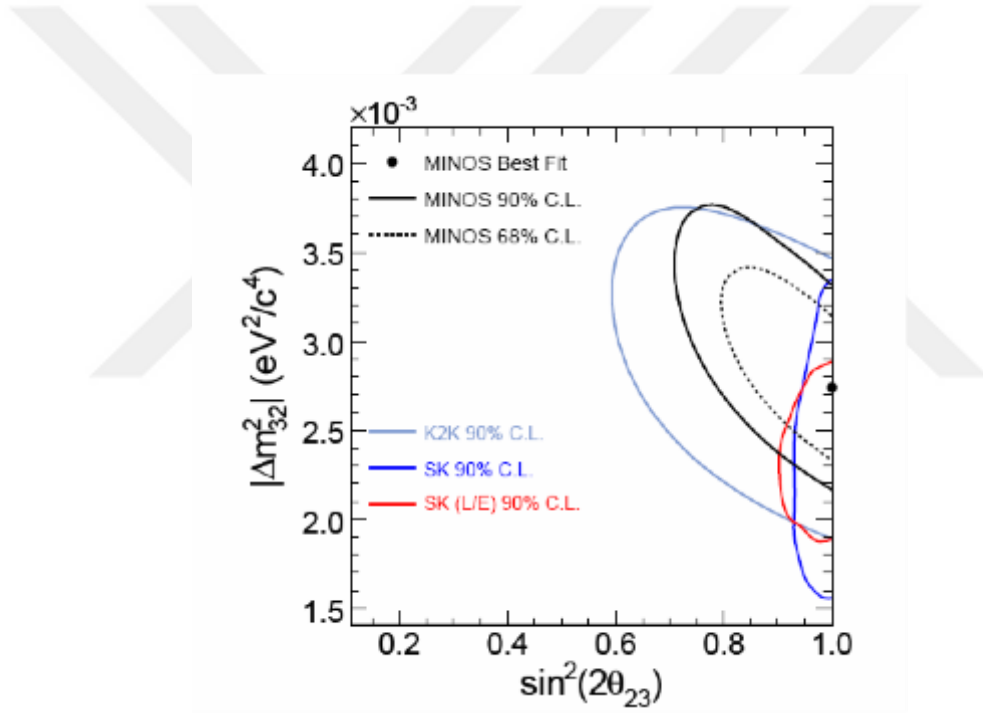


Şekil 4.3 Dışlanan bölgeler

parametre salınımı gözlemek için oldukça önemlidir ve deneyi karakterize etmektedir; nötrino enerjisi E ve kaynak detektör mesafesi L (genellikle "menzil" olarak adlandırılır). Deney hassasiyetinin en iyi olduğu Δm^2 değeri, L/E değerlerini doğru

seçerek ayarlanmaktadır. Bu tarz deneyler, güneş ve atmosferik nötrinolar deneylerinin sonuçlarını test etmek için yapılmış ve genellikle kaybolma veya görünme tipi deneylerden oluşmaktadır.

Nükleer reaktör deneylerinde oluşturulan nötrino demetleri bir kaç MeV değerinde olduğundan çoğunlukla kaybolma tipi deneyler tasarlanmış ve salınım gözlenmeye çalışılmıştır. Özellikle CHOOZ uzun menzil özelliğine sahip ilk deneydir. 1km lik bir menzile sahip ve yaklaşık 3MeV ortalama enerjiye sahip olan deney Δm^2 'nin en küçük değerine karşı hassas olduğundan atmosferik ve güneş nötrinolarının salınım sonuçlarını test edebilmekteydi. Ancak tatmin edici bir sonuca ulaşamamıştır.



Sekil 4.4 2004 K2K sonuçları.

Nötrino salınımını test etmek için tasarlanan hızlandırıcı deneyleri ise kısa menzilli veya uzun menzilli olabilmektedir. Aynı zamanda atmosferik nötrino akısındaki azlığı nötrino salınımları ile açıklamakta kullanılan Δm^2_{23} parametresi hakkında da bilgi sahibi olunabilmektedir. Kısa menzilli deneylerden birisi CERN deneylerinden CHORUS'dur (Kayis-Topaksu vd. 2011). Deneyde müon nötrinosundan tau nötrinosuna salınımları gözlemleyebilmek için ν_τ 'nin yüklü akım etkileşimlerinde tau

parçacığı araştırılmıştır. Yaklaşık bir mikron çözünürlüğe sahip algılayıcı emülsiyon hedefi, τ 'nın bozunum topolojisinin saptanmasını sağlamıştır. 126.000 etkileşim analiz edilmiş ancak hiçbir ν_τ adayı bulunamamıştır. Bu sonuç % 90 C.L'da karışım açısına büyük Δm^2 için bir limit getirmiştir, $\sin^2 2\theta_{\mu\tau} < 8 \times 10^{-4}$ (Lavina 2008).

Δm^2 'nin daha küçük değerine uzun menzilli deneyler ile erişilebilmektedir. Bu deneylerde, bir hızlandırıcıdan gelen yoğun bir nötrino ışını, birkaç yüz kilometre uzaktaki yeraltında bulunan algılayıcıya yöneliktir. Bu deneylerin asgari amacı, ν_μ ' nün yok oluşu veya ν_τ ' nün ortaya çıkışını aramak suretiyle, atmosferik nötrino problemi için verilen çözümü test etmektir.

Bu amaçla ilk uzun menzilli deney, K2K (Ahn vd. 2006) (KEK'den Kamiokande'ye)'dir. Ortalama enerjisi yaklaşık 1.3 GeV olan saf bir ν_μ demeti, KEK'den $L = 250$ km uzaklıkta Kamioka madeninde yer alan SK (SuperKamiokande) algılayıcısına gönderildi. Şekil 4.4'de gösterilen 2004 K2K sonuçları, SK atmosferik verilere dayanan beklentilerle uyumludur ve 4σ aralığında sınımlar içermektedir.

Bu sonuçlara göre nötrino salınım deneylerinin 2017 itibari ile elde ettiği parametre bilgileri çizelge 4.1'de verilmiştir (Lisi 2016).

Çizelge 4.1 Salınım deneylerinin 2017 itibari ile elde ettiği parametre bilgileri

Parametre	En iyi fit	1 σ aralık	2 σ aralık	3 σ aralık
$\Delta m_{12}^2 / 10^{-5} \text{ eV}^2$	7.37	7.21-7.24	7.07-7.73	6.93-7.97
$\Delta m_{23}^2 / 10^{-3} \text{ eV}^2$	2.50	2.46-2.54	2.41-2.58	2.37-2.63
$\sin^2 \theta_{12} / 10^{-1}$	2.97	2.81-3.14	2.65-3.34	2.50-3.54
$\sin^2 \theta_{23} / 10^{-1}$	4.37	4.17-4.70	3.97-5.63	3.79-6.16
$\sin^2 \theta_{13} / 10^{-2}$	2.14	2.05-2.25	1.95-2.36	1.85-2.46

5. OPERA DENEYİ

OPERA (Oscillation Project with Emulsion tRacking Apparatus) deneyi müon nötrininin tau nötrinoya salınımını görünür modda gözlemlemek amacıyla tasarlanmıştır. Görünür modda gözlemi; yüklü ν_τ etkileşimindeki τ leptonunun belirlenmesi ilkesine dayanmaktadır. Kısa yaşam ömrüne sahip tau leptonun belirlenebilmesi için, yüksek uzaysal çözünürlüğe sahip nükleer fotografik filmler kurşun ile beraber hedefi ve ana algılayıcıyı oluşturmaktadır.

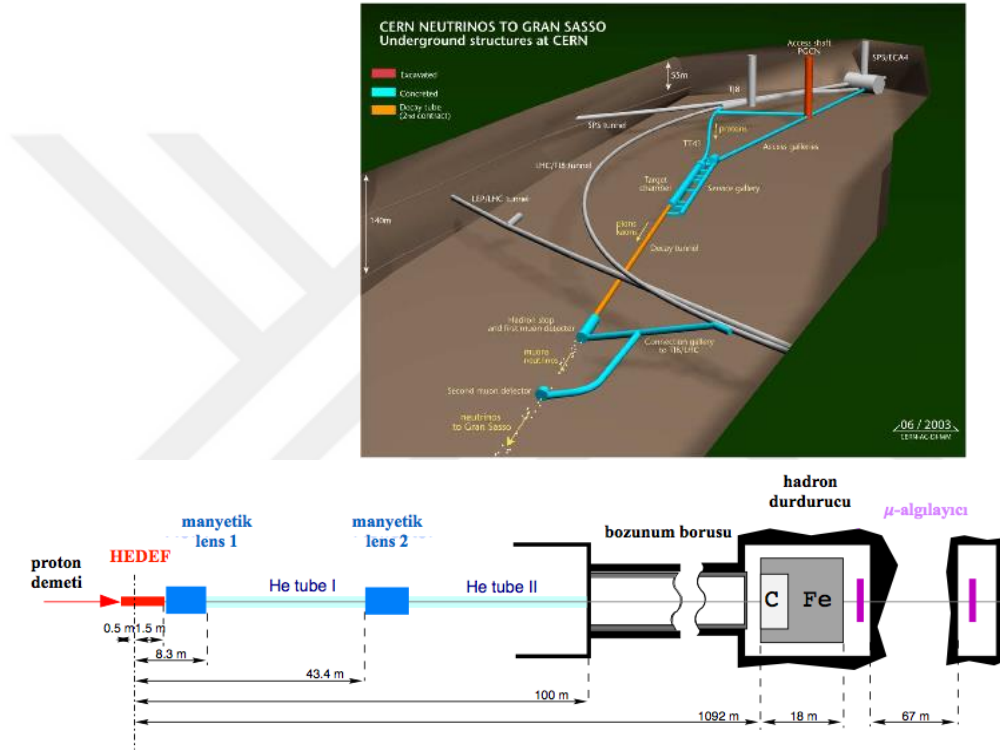
OPERA Deneyi İtalya' da bulunan Gran Sasso dağının altına bir yeraltı laboratuvarında kurulmuştur. Deneyde kullanılan nötrino demeti ise Avrupa Nükleer Arastırma Merkezi'nde üretilmektedir. Üretilen bu demet 17 GeV ortalama enerjiye sahip olacak şekilde algılayıcının bulunduğu Gran Sasso bölgesine yönlendirilmektedir. Yüksüz olduğu için elektromanyetik etkileşim yapmayan müon nötrinosu, doğrultusunda herhangi bir sapma olmadan 732 km'lik bu yolculuğu 2.4 ms'de tamamlamaktadır.

Bu projede 13 ülkeden yaklaşık 200 kadar bilim insanı görev almıştır. Türkiye'yi ise ODTÜ nötrino grubu temsil etmiştir. OPERA algılayıcının yapımı 2008 yılında tamamlanmıştır. Algılayıcı 2008-2012 yılları arasında aktif olarak çalışmış ve veri alması tamamlanmıştır.

5.1 CNGS Nötrino Demeti

Nötrino demeti ν_μ 'den ν_τ 'ya salınımları gözlemleyebilmek için oluşturulmuştur. Kısaca CNGS (Cern Neutrino to Gran Sasso) olarak adlandırılan nötrino demeti 732 km uzaklıktan 17 GeV'lik bir enerji ile gönderilmektedir. Demetin üretildiği sistemin şematik gösterimi şekil 5.1'de görülmektedir. Demet üretilirken önce 400 GeV enerjideki protonlar SPS hızlandırıcısından çıkmakta ve karbon hedefe çarpıtılmaktadır. Bu aşamada yüklü kaonlar ve pionlar oluşmaktadır. "Horn" ve "Reflector" sistemi oluşan yüklü pion ve kaonları yönlendirmek ve odaklamakla görevlidir. Ardından 1000 m uzunluğunda vakum boru içinde yoluna devam eden

parçacıklar burada ν_{μ} and μ^{+} 'a bozunmaktadır. Bozunum tünelinin sonunda "hadron durdurucu" ile hadron parçacıkları durdurulmaktadır. Geriye kalan müonlar ise iki adet müon istasyonu tarafından görüntülenmekte ve bu bilgiler nötrino demetinin yoğunluğu ve profil ölçümleri hakkında bilgi vermektedir. En son aşamada ise müonlar kayalar tarafından soğrulmakta ve nötrino demeti yoluna devam etmektedir (Elsener vd. 1998, Bailey vd. 1999). Çizelge 5.1'de demet özellikleri verilmiştir.



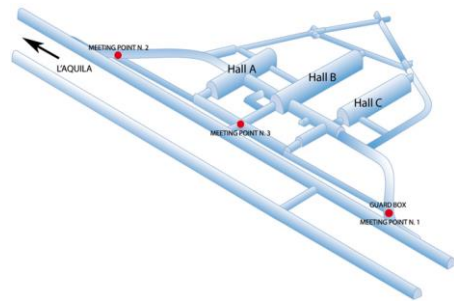
Şekil 5.1 Nötrino Demeti

Çizelge 5.1 Nötrino demetinin özellikleri

ν_{μ} (m^{-2}/pot)	7.45×10^{-9}
ν_{τ} CC etkileşim/pot/kton	5.44×10^{-17}
$\langle E \rangle_{\nu_{\mu}}$	17GeV
ν_{τ} / ν_{μ}	%0.8
$\bar{\nu}_{\mu} / \nu_{\mu}$	%2.0
$\bar{\nu}_{\tau} / \nu_{\mu}$	%0.05

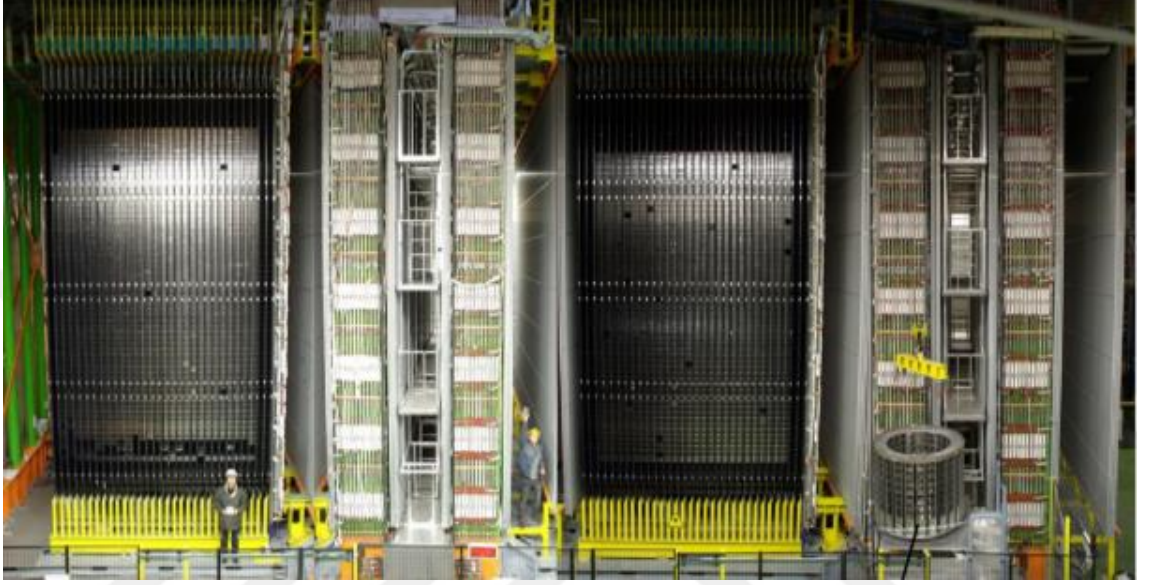
5.2 OPERA Algılayıcısı

OPERA algılayıcısı şekil 5.2’de gösterildiği gibi Gran Sasso yeraltı laboratuvarındaki C koridorunda kurulmuştur. 1.5 km’ lik bir kayanın altında bulunan laboratuvar kozmik vb. parçacıklar açısından da korunduğu için nadir gerçekleşen etkileşimleri gözlemlemek için oldukça uygun bir yerdir. Bu yeraltı laboratuvarı 1987’den beri varolan nötrino deneylerini de kapsayacak şekilde genişletilmiştir. Bu sayede OPERA (Terranova 2009), LVD (Large Volume Detector) (LVD-collaboration), Borexino (BORon EXperiment) (Borexino-collaboration), ICARUS (Imaging Cosmic And Rare Underground Signal) (ICARUS, 2017) gibi deneylere de ev sahipliği yapmıştır.



Şekil 5.2 Gran Sasso yeraltı laboratuvarının şematik görüntüsü

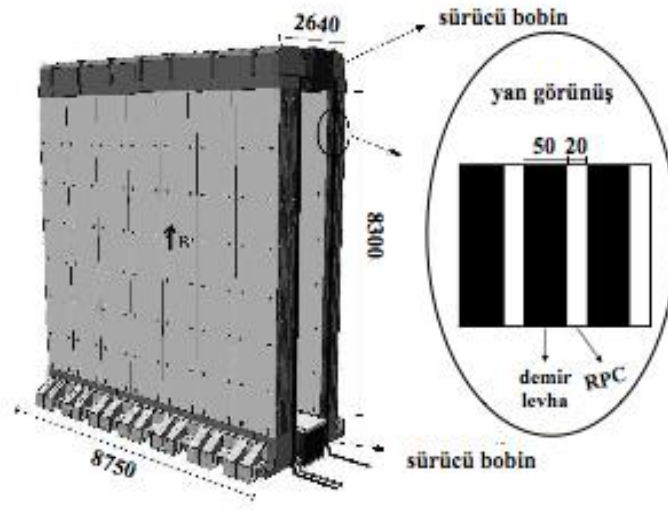
OPERA Algılayıcısı birbirinin aynısı olan iki adet Süper Modül'den oluşmaktadır. Süper Modüller ise hedef bölümü ve müon spektrometreden oluşur. Birinci Süper Modül önünde bir Veto kalkanı bulunur. Şekil 5.3'de algılayıcının önden görünüşü verilmiştir.



Şekil 5.3 OPERA Algılayıcısı

5.2.1 Hedef bölümü

Her bir süper modüldeki hedef bölümü 31 tane ECC birim duvarı ve onu takip eden iz detektörlerinden oluşmaktadır. ECC (Emulsion Cloud Chamber) birimler nükleer emülsiyon ile kurşun plakaların oluşturduğu sandviç yapıdadır. Her ECC duvarının arkasına fiberden oluşturulmuş bir iz detektörü yerleştirilerek nötrino etkileşiminde ortaya çıkan elektrik yüklü parçacıkların izleri oluşturulur. Bu izler kullanılarak etkileşimin gerçekleştiği ECC birim saptanabilmektedir (Terranova 2009).



Şekil 5.5 Müon spektrometresi mıknatıs gösterimi

5.2.3 Veto

Şekil 5.6'da OPERA algılayıcısının demet yönünden fotoğrafı görülmektedir. Veto bölümü algılayıcının en başında yer alan düzlemdir. Nötrinolar algılayıcıya ulaşmadan önce kayada veya BOREXINO Deneyi'ne bir yerlerde etkileşimde bulunabilirler. Bu nedenle Veto'nun görevi bu tür etkileşimlerinden gelen müonları işaretlemek ve bu sayede gerçek etkileşimlerden ayrılmasını sağlamaktır.



Şekil 5.6 VETO gösterimi

5.3 OPERA ECC Birimleri

OPERA ECC (Emulsion Cloud Chamber) birimleri OPERA algılayıcısının temel parçasıdır. Boyutları 128 mm x 102 mm x 79 mm olan birimlerin bir tanesi 8.3 kg'dır. Her bir birim şekilde de gösterildiği gibi plastik bir kutu içerisine 57 adet nükleer emülsiyon ile 56 adet kurşun plakaların sandviç gibi yerleştirilmesi ile oluşturulur. Daha sonra alüminyum folyo ile birimler kaplanır ve bu sayede ışık geçirgenliğinin azalması amaçlanır. Ek olarak 2 adet emülsiyon filmi alüminyum folyo içerisinde koyularak paketlenen birimin uç tarafına eklenir. Bu filmlere CS (Changeable Sheets) değişebilen filmler denmektedir. Bu filmler zamandan, enerjiden ve paradan tasarruf yapmak için iyi bir yöntemdir. Birim içerisinde meydana gelen bir etkileşim CS filmleri üzerinde iz bırakacaktır. Her durumda tüm birimi açıp tek tek emülsiyon filmlerini analiz etmek çok uzun zaman alacağından değişebilen filmleri ilk aşamada hızlıca analiz etmek daha kolaydır.

Kurşun plakalar 1mm kalınlığında hedef materyallerdir ve nötrino etkileşimleri için gereken ağır kütleyi oluşturmaktadır. Nötrino etkileşimlerinde oluşan yüklü parçacıklar, nükleer emülsiyon filmleri üzerinde iz bırakmakta ve bu izler emülsiyon filmlerinde toplanarak etkileşimlerin üç boyutlu görüntüsü mikrometre duyarlılığında elde edilebilmektedir. Bu nedenle tau lepton gibi çok kısa ömürlü parçacıkların saptanması

için çok kullanışlı bir yöntemdir. ECC birimler aynı zamanda yüklü parçacıkların momentumlarını, elektron ve foton gibi parçacıkların oluşturduğu elektromanyetik duşların ölçülmesine de olanak sağlayan algılayıcılardır.



Şekil 5.7 ECC birim ve alüminyum folyo içerisinde değişebilen filmler

5.3.1 Nükleer emülsiyon filmleri

Emülsiyon uzun bir geçmişe sahiptir. Kinoshita (Kinoshita 1910) ve Powell (Powell vd.1946) tarafından algılayıcı olarak kullanımına ilişkin ilk çalışmaları 1950'lerde gerçekleştirmiş ve zamanla emülsiyon jel teknolojisi gelişmeye devam etmiştir. Yakın zamanda bu teknoloji CHORUS deneyinde de başarıyla kullanılmıştır. Şekil 5.8'de OPERA deneyi'nde kullanılan emülsiyon filmleri, çizelge 5.2'de ise emülsiyon teknolojisinin kullanım amaçları tarih sıralamasına göre gösterilmektedir (Ereditato 2013).

OPERA deneyinde kullanılan emülsiyon tabakalarının araştırma ve geliştirmesi Nagoya Üniversitesi tarafından yapılmış Fuji Film Şirketi tarafından da proje için seri üretimi gerçekleştirilmiştir.

OPERA emülsiyon filmleri şekil 5.9’da gösterildiği gibi 205 μm kalınlığındaki transparan plastik tabakanın her iki tarafına yapıştırılmış 44 μm kalınlığında yüzeylerdir. Emülsiyon tabakalar 0.2 μm çapında AgBr kristalleri içermektedir.

Yüklü parçacıklar emülsiyon yüzeyinden geçtiğinde bir elektronu serbest bırakarak gümüş iyonunu gümüş atomuna çevirir. Bu gümüş atomları henüz görünmeyen bir iz oluştururlar. Ardından emülsiyon tabakaları kimyasal bir süreçten geçirilir. Bu süreçte gümüş atomları, gümüş iyonlarından daha hızlı metalik gümüşe dönüşür. Böylece gümüş atomlarının çapı 0.6 μm ’ye ulaşır ve optik mikroskop tarafından görünür hale gelmektedir. Böylece yüklü parçacıkları izleri oluşmakta ve bu izler takip edilebilmektedir. ECC birim içerisindeki emülsiyon tabakaları sırasıyla tarandığında etkileşimin 3 boyutlu görüntüsü elde edilebilmektedir (Şekil 5.10).

Çizelge 5.2 Emülsiyon teknolojisinin yıllara göre kullanımı

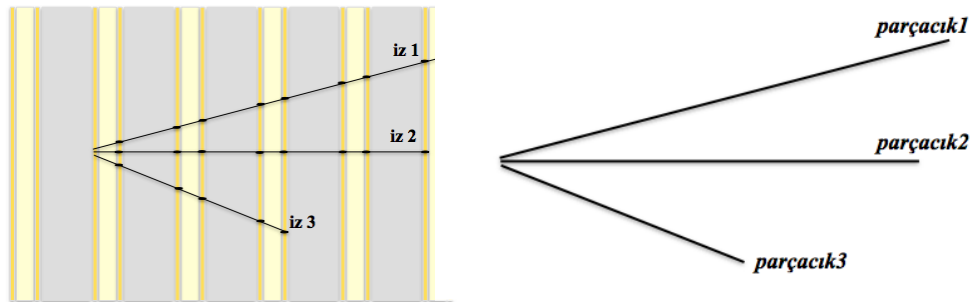
Deney	Yıl	Referans
Radyoaktif maddelerden çıkan α -parçacıklarının fotoğrafik hareketi,	1910	Kinoshita S. 1910
Yüklü parçacıkları tespit etmek için yeni bir fotoğrafik emülsiyon,	1946	Powell C. F. vd. 1946.
Birincil kozmik radyasyonun enerji spektrumu	1952	Kaplon M. F. vd. 1952
CHACALTAYA emülsiyon odası deneyi	1971	Lattes C. M. G. vd. 1971.
Kozmik ışını gözlemleyerek x-parçacığının keşfi	1971	Niu K., Mikumo E. ve Maeda Y. 1971.
Mt.Fuji emülsiyon odası deneyi	1973	Ohta I. vd. 1973
E531 Deneyi	1984	Ushida N. vd. 1984
CERN WA75 Deneyi	1989	Aoki S. vd. 1989
CHORUS Deneyi	2000	Aoki S vd. 2000.
RUNJOB (Japon-Rus ortak balon deneyi)	2001	Shibata 2001
OPERA Deneyi	2008	Terranova 2009



Şekil 5.8 Emülsiyon filmleri



Şekil 5.9 Emülsiyon filmlerinin yapısı



Şekil 5.10 Emülsiyon filmlerinde etkileşim

5.3.2 Kurşun plakalar

Kurşun plakalar kısa radyasyon mesafesi sebebi ile OPERA ECC birimlerinde kullanılmak üzere seçilmiş malzemelerdir. Bu sayede v-etkileşim oranının artırılması sağlanmıştır. Bir dezavantaj olarak, kurşun, arka planda kirlilik yaratan bazı radyoaktif izotoplara sahiptir. Bu nedenle emülsiyon tabakalarında izler bırakabilmektedir. Bu izler analiz için arka plan izleri olarak kabul edilir. Bu nedenle detaylı bir araştırma yapılmış ve Amerika'da, Japonya'da ve İsveç'de yapılan çalışmalar incelenmiş ve emülsiyon tabakalar üzerinde arka plan izlerinin yoğunluğu yaklaşık $1/\text{mm}^2$ olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlar analiz için kabul edilebilir sınırlar içerisinde. OPERA Deneyi için Almanya'daki JL Goslar firması günlük 30000-45000 arası kurşun plaka üretmiş ve üç haftalık aralıklarla Gran Sasso'ya teslim etmiştir (Güler vd. 2000).

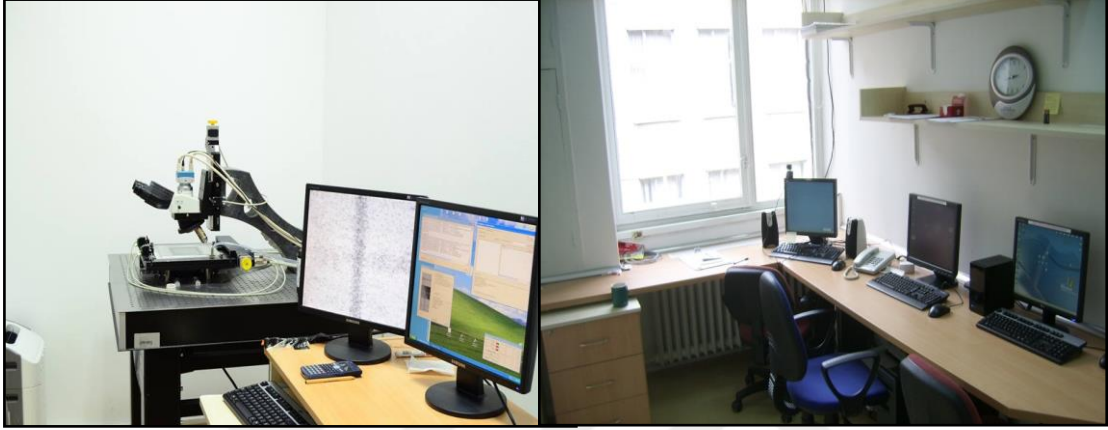
Kurşun plakaların kullanımı öncesinde demir ve paslanmaz çelik de OPERA deneyi için aday olan malzemelerdendi. Üstelik demir radyoaktivite içeriğinin olmayışı, kurşuna göre daha iyi mekanik özellikleri ve düşük maliyeti ile oldukça iyi bir adaydı. Ancak nötrino etkileşimlerinin olasılığını arttırmak için hedef materyalin yüksek yoğunlukta olması önemlidir. Bu nedenle kurşun plakalardaki yoğunluğun aynısını demirle yakalayabilmek için % 30 oranında emülsiyon tabakaların miktarını artırmak gerekmekte ancak bu da maliyeti artırmaktadır. Aynı şekilde iyi bir aday olan paslanmaz çelik de maliyetini çok yüksek olması sebebiyle kullanılamamıştır.(Güler vd. 2000)

5.3.3 Nükleer emülsiyon tarama sistemleri

Emülsiyon filmlerindeki verilerin okunması ve toplanması otomatik tarama sistemleri tarafından yapılmıştır. OPERA için iki farklı emülsiyon tarama sistemi geliştirilmiştir. İlk CHORUS Deneyi'nde de kullanılan UTS sisteminin daha gelişmiş olanı S-UTS yani Japon Tarama Sistemidir (Bozza 2001). Bu sistem Japonya'daki Nagoya Üniversitesi tarafından tasarlanmış ve geliştirilmiştir. Sistemin tarama hızı $72 \text{ cm}^2/\text{h}$ 'dir (Morishima K. ve Nakano T. 2010). İtalya'dan gönderilen ECC birimler şekil

5.10'da gösterilen laboratuvarda taranmakta ve ortak veri toplama alanına veriler yüklenmektedir.

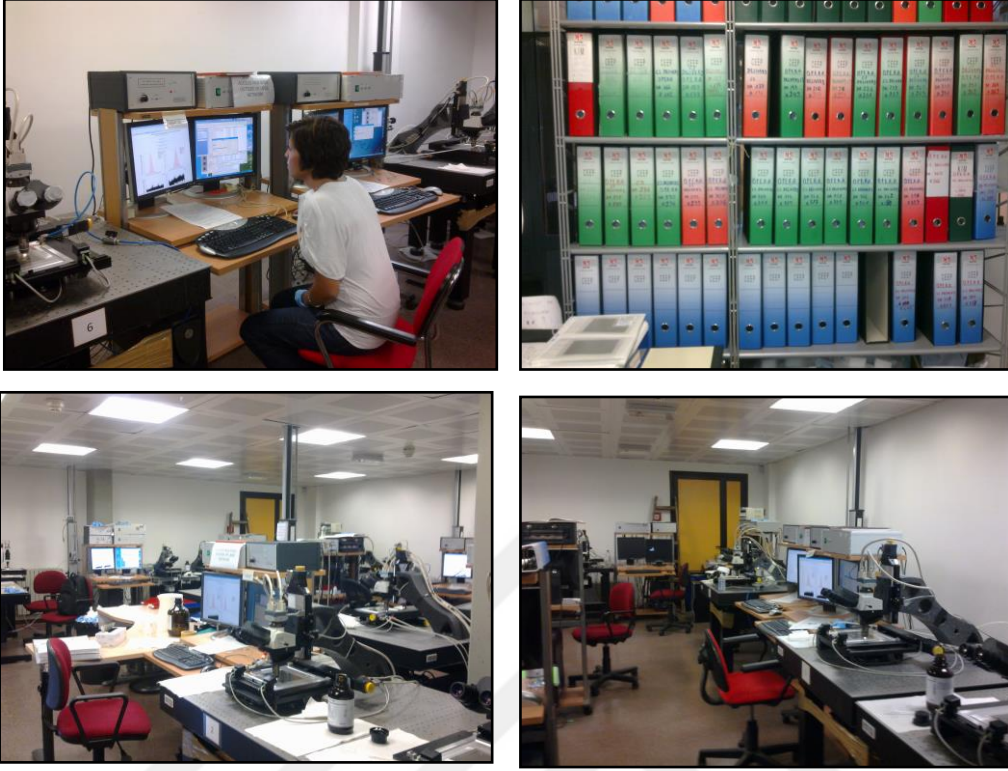
Bir diğeri ise ESS olarak bilinen Avrupa Tarama Sistemidir. Bu sistem de Avrupa'daki laboratuvarlarda tasarlanmış ve geliştirilmiştir. (Bozza 2005, Sirri 2006, Serio 2007).



Şekil 5.11 ODTU-Ankara Emülsiyon Tarama Laboratuvarı



Şekil 5.12 Nagoya Üniversitesi Emülsiyon Tarama Laboratuvarı



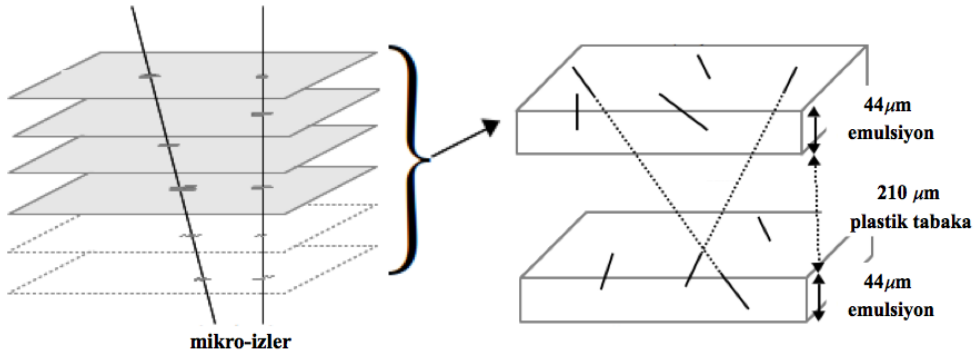
Şekil 5.13 LNGS Emülsiyon Tarama Laboratuvarı



Şekil 5.14 Bern Üniversitesi Emülsiyon Tarama Laboratuvarı

LNGS, Bern, Salerno, Roma, Bari, Napoli, Bologna, Padova ve Ankara gibi farklı laboratuvarlarda yaklaşık 30 tane tarama mikroskobu kullanılmıştır. ECC birimler şekil 5.11 - 5.14'de gösterilen laboratuvarlarda taranmış ve veriler sisteme yüklenmiştir.

Tarama sistemi, bir CMOS kamera, görüntü işlemcisi, hareketli bir tarama yüzeyi, bir optik sistem, bir aydınlatma sistemi, bir hareket kontrol birimi, çevrimiçi ve online çalışabilen bir iş istasyonu ile donatılmıştır.



Şekil 5.15 Emülsiyon filmerindeki mikro izler

Bu yapılandırmada, Avrupa sistemi için tüm tarama işlemlerini gerçekleştiren yazılım, SySal (System Salerno) olarak adlandırılır (Barbuto vd. 2006). Tarama işlemi, her emülsiyon tabakası için bir mikroskop kullanılarak 16 tomografik görüntü alınarak başlar. Ardından, her kat filtrelenir ve online hizalanır.

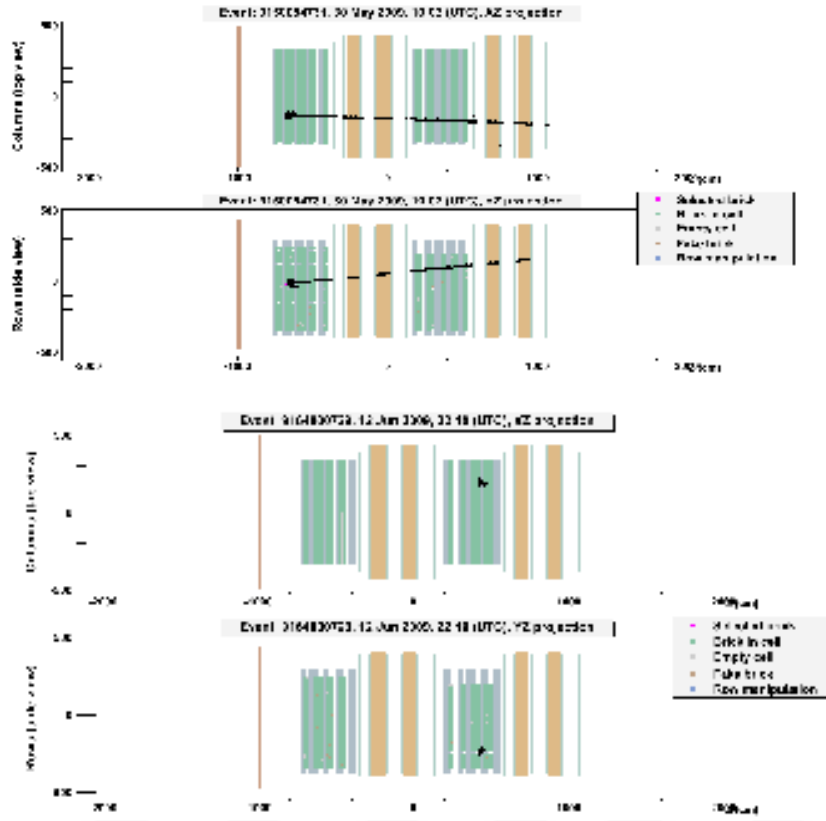
Yüklü parçacıkların emülsiyon tabakasında bıraktığı izler sistem tarafından bir piksel kümesi olarak tanınır. Bir yüzeydeki bu piksel kümesinin kombinasyonu mikro-iz olarak adlandırılır. Emülsiyon yüzeylerindeki mikro-izler birleştirilerek temel-iz oluşturulur. Son olarak şekil 5.15'de gösterilen bağlantılı emülsiyon filemlerindeki temel-izler birleştirilerek ECC birim içerisindeki etkileşimin 3 boyutlu görüntüsü oluşturulur.

5.4 Nötrino Etkileşimlerinin Araştırılması

OPERA algılayıcısında kaydedilen nötrino etkileşimleri, hedefin algılama parçası olan emülsiyon tabakalarına kaydedilmektedir. Olay topolojileri ve kinematik hakkında bilgi edinmek için nükleer emülsiyon filmleri algılayıcıdan çıkarılıp okunmaktadır. Amaç tau lepton gibi çok kısa ömürlü parçacıkların saptanması için etkileşimlerin üç boyutlu görüntüsünü mikrometre duyarlılığında elde edilmeye çalışılması olduğu için emülsiyon filmlerini taranması ve analiz edilmesi hassas ve ciddi bir prosedürdür. Bu kısımda etkileşimlerin saptanmasında takip edilen aşamalar sırasıyla anlatılacaktır.

5.4.1 Elektronik algılayıcı

CNGS demeti 50 ms aralıklarla algılayıcıya gönderilmektedir. Demetle eş zamanlı olarak meydana etkileşimleri elektronik algılayıcı sistem kaydeder. Algılayıcıda meydana gelen en az 10 vuruş veya fotoçoğaltıcı tüplerde 1500 ADC sayımından fazla sinyal var ise etkileşim vardır ve x ve y yöneliminde yeri kaydedilmektedir.



Şekil 5.16 OPERA elektronik algılayıcısında görülen yüklü akım (üstte) ve yüksüz akım (altta) etkileşimleri (Bertolin 2011)

5.4.2 Etkileşim sınıflandırma

Daha sonra, kaydedilen etkileşimler, elektronik algılayıcının tepkisine göre 1μ veya 0μ olarak sınıflandırılır. Aşağıdaki koşullardan biri yerine getirildiğinde olay 1μ olarak sınıflandırılır:

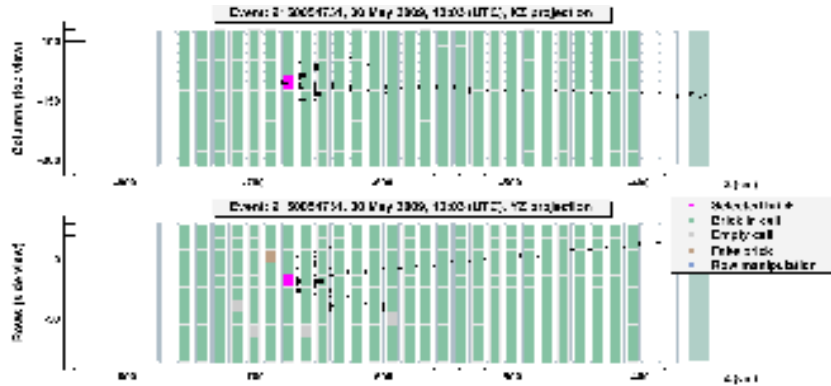
- Üç boyutlu olarak oluşturulan parçacık izi eğer $\text{uzunluk} \times \text{yoğunluk}$ değeri 660 g/cm^2 den daha büyük ise.
- Algılayıcıda meydana getirdiği vuruş sayısı 20'den büyükse.

Bu özellikleri yerine getiremeyen etkileşimler ise 0μ olarak tanımlanır. Hedef bölgesi içerisinde meydana gelen etkileşimler *contained* olarak nitelendirilirken, hedef

bölgesinin sınırına yakın yerde meydana gelen etkileşimler *bordersoftnc* olarak sınıflandırılır. OPERA elektronik algılayıcısındaki 1μ ve 0μ etkileşim görüntüleri şekil 5.16'da verilmiştir.

5.4.3 ECC Birimin Yerini Belirleme

Elektronik algılayıcı tetikleyicisi algılayıcıda bir nötrino etkileşimi ile uyumlu olduğunda, bir yeniden yapılandırma algoritması muhtemelen nötrino etkileşiminin gerçekleştiği ECC birimin yerini belirlemek amaçlı elektronik algılayıcı verilerini analiz eder ve olasılık haritasını oluşturur. ECC birim azalan olasılıkla (olası en yüksek ECC birim için P0, ikinci muhtemel ECC birim için P1) derecelendirilir. Son durumda müon içeren etkileşimler için (1μ), müonun eğimi ve değiştirilebilir fimler içindeki konumu (CS) bilgisi de verilir; müon içermeyen etkileşimler için (0μ), TT vuruşlarının ortalama merkezi, değiştirilebilir fimler üzerinde hadron duşunun etki noktası gösterir. OPERA elektronik algılayıcısında etkileşim görüntüleri şekil 5.17'de verilmiştir.



Şekil 5.17 Etkileşimin gösterimi. Aday birim pembe renkte gösterilmiştir. (Bertolin 2011)

5.4.4 Değişebilen fimlerin analizi

Etkileşimlerin analizi ilk olarak, değişebilen fimlerin hedef izleyici tarafından sağlanan pozisyon ve eğim değerlerine göre taranması ile başlar. Tarama alanı etkileşim

sınıflamasına göre tanımlanır: 1 μ etkileşimlerde, elektronik algılayıcı tarafından sağlanan öngörüler etrafında 4 \times 3 cm²'lik dikdörtgen alan taranır; 0 μ etkileşimlerde taranan alan 8 \times 6 cm²'dir.

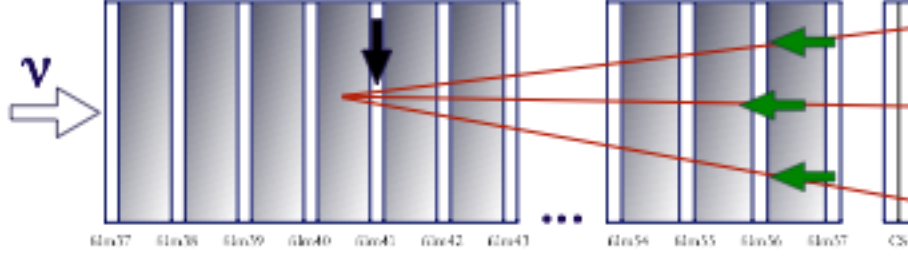
Değişebilen filmler de olumlu bir sonuç elde edebilmek için müon izi elektronik algılayıcıyla veya izole edilmiş 3D iz ile tutarlı olmalıdır ya da TT vuruşlarla uyumlu en az 2 yakınsayan izler değişebilen filmde bulunmalıdır. Sonuca göre ya ECC birim tarama laboratuvarına gönderilir veya yeni CS film eklenen ECC birim tekrar algılayıcıya yerleştirilir.

5.4.5 İz takibi

Değişebilen filmlerdeki izler ECC birim içerisinde de takip edilir. Her bir emülsiyon filmi sırasıyla taranır ve iz takibi yapılır. Takip edilen iz veya izler emülsiyon filmleri arasında uyumluluk göstermelidir. Bu aşmada pozisyon için ~80 μ m ve eğim için ~40 mrad tolerans uygulanabilmektedir. Tarama sonrasında izlerin yeri gözle de kontrol edilmektedir (manual check). Kontroller sırasında değişebilen filmlerde iz bırakmamış ancak gözle kontrollerde etkileşime ait yeni parçacıklar bulunabilmektedir. Tarama ve gözle kontrol prosedürü aşağıdaki koşullar yerine gelen kadar devam etmektedir. Etkileşimdeki iz takibi şekil 5.18'de gösterilmiştir.

-Tarama ve gözle kontrol edilen emülsiyon filmlerinin son 5 tanesinde hiçbir iz bulunmadığı durumda,

-Takip edilen iz veya izler emülsiyon filminden dışarı çıkarsa,



Şekil 5.18 Etkileşimde iz takibi

5.5 OPERA Deneyi'nde ν_τ Etkileşimleri'nin Araştırılması

OPERA Deneyi'nin amacı müon nötrinosunun tau nötrinosuna salınımını ν_τ etkileşimlerini gözleyerek ispatlamaktır. 2008-2012 yılları arası aktif olarak çalışan deneyde 19505 etkileşim toplanmıştır. OPERA Deneyi'nde ν_τ sinyalinin saflığını artırmak için analiz aşamasında çeşitli kinematik seçimler uygulanmıştır. Yapılan analizler sonucunda bu kinematik seçimleri geçen 5 tane ν_τ adayı 5.1σ hassasiyetle bulunmuştur (Pessard, H. ve Wilquet, G. 2010, Longhin, A. 2013, Agafonova vd. 2014, Serio, M. D. ve Pastore, A. 2014, Sato, O. 2015).

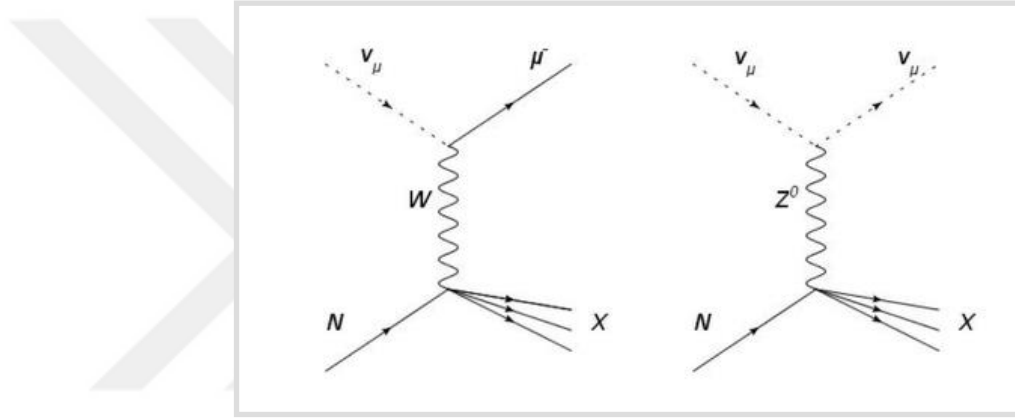
Tau nötrino etkileşimleri;

$$\nu_\tau N \rightarrow \tau^- X \quad (5.1)$$

şeklindedir ve X hadronları temsil eder. Kısa ömürlü olan tau leptonu ($c\tau = 87\mu\text{m}$) bir süre sonra müonik, hadronik ve elektronik kanallara bozunmaktadır. Tau leptonun bozunum kanalları ve oranları çizelge 5.2'de verilmektedir. Yüklü akım ve yüksüz akım etkileşimlerini Feynmann diagramları şekil 5.19'da gösterilmiştir.

Çizelge 5.3 Tau leptonunun bozunum modları

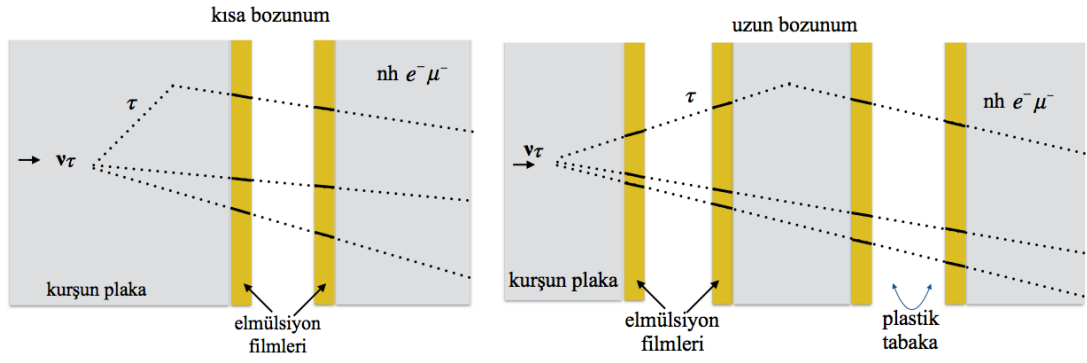
Bozunum Modları	Oran
$\tau^- \rightarrow e^- \nu_e \bar{\nu}_e$	%17.8
$\tau^- \rightarrow \mu^- \nu_\tau \bar{\nu}_\mu$	%17.7
$\tau^- \rightarrow h^- \nu_\tau (n\pi^0)$	%49.5
$\tau^- \rightarrow h^- h^- h^+ \nu_\tau (n\pi^0)$	%15



Şekil 5.19 Yüklü akım (soldaki), ve yüksüz akım (sağdaki) nötrino etkileşimleri Feynmann diagramları

Tau parçacığının ECC birim içerisindeki bozunması ‘kısa’ ve ‘uzun’ olarak sınıflandırılmaktadır. Kısa bozunmalarda tau parçacığının üretimi ve köşe noktası aynı kurşun plaka içerisinde yer almaktadır.

Uzun bozunmalarda ise tau bozunumu sonraki emülsiyon plakalarda olmaktadır. Bu nedenle uzun bozunumlarda ana parçacık gözlenebilirken kısa bozunumlarda gözlenememektedir. Kısa ve uzun bozunum topolojileri şekil 5.20’de gösterilmiştir.



Şekil 5.20 ECC birim içerisinde kısa ve uzun bozunum gösterimleri (Ölçeksiz)

5.5.1 Beklenen sinyal ve arka plan

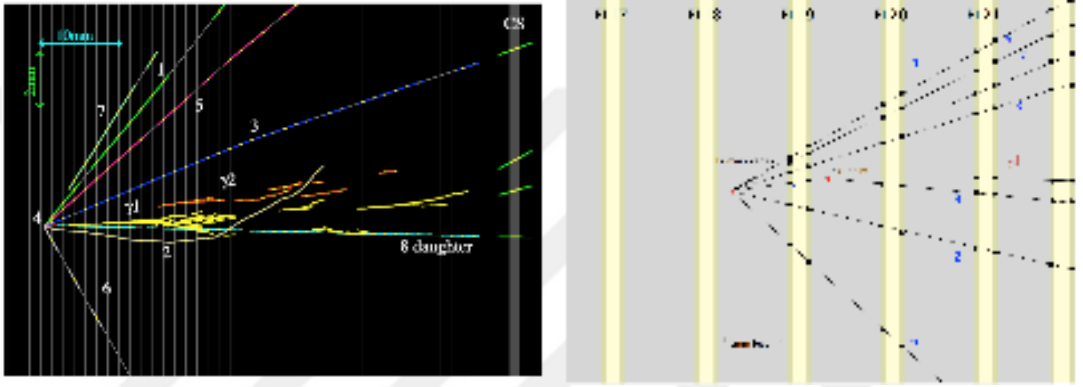
OPERA Deneyi'nin başından beri ν_τ adaylarını bulabilmek için çeşitli stratejiler uygulanmıştır. 2008-2009 yıllarında algılayıcının performansına güvenilmiş ve bu yıllar arası kaydedilen etkileşimlerin tamamı analiz edilmiştir. 2010 yılından itibaren salınım analiz çalışmalarını hızlandırmak için 1mu etkileşimlerine $p_\mu < 15 \text{ GeV}/c^2$ seçimi uygulanmıştır. Aynı zamanda analizin hızını artırmak için yüksüz akım etkileşimleri daha ön planda tutulmuş ve etkileşim olasılığı yüksek olan birimler analiz edilmiştir. Buna göre OPERA Deneyi'nde tau leptonun bozunum modlarına göre beklenen sinyal ve arka plan oranları çizelge 5.3'de verilmiştir (Galati 2017). 2008-2012 yılları arası veri alımı tamamlanan OPERA deneyinde 5 tane ν_τ adayı gözlenmiştir. Bulunan aday etkileşimler sırasıyla verilmiştir.

Çizelge 5.4 Beklenen sinyal ve arka plan oranları

Kanal	Beklenen Arka Plan			Beklenen Sinyal	
	Tılsım	Hadronik yeniden etkileşim	Geniş açı müon saçılma		
$\tau \rightarrow 1H$	0.017 ± 0.003	0.022 ± 0.006	-	0.04 ± 0.01	0.52 ± 0.10
$\tau \rightarrow 3H$	0.17 ± 0.03	0.003 ± 0.001	-	0.17 ± 0.03	0.73 ± 0.14
$\tau \rightarrow \mu$	0.004 ± 0.001	-	0.0002 ± 0.0001	0.004 ± 0.001	0.61 ± 0.12
$\tau \rightarrow e$	0.03 ± 0.01	-	-	0.03 ± 0.01	0.78 ± 0.16
Toplam	0.22 ± 0.04	0.02 ± 0.01	0.0002 ± 0.0001	0.25 ± 0.05	2.64 ± 0.53

5.5.2 İlk ν_τ adayı

OPERA Deneyi'nde ilk ν_τ adayı 22 Ağustos 2009'da gerçekleşmiştir. Nötrino etkileşimi kurşun plakada gerçekleşmiş ve elektronik algılayıcıda müon tespit edilememiştir. Topolojik ve kinematik analizleri yapılan etkileşim tau'dan bir hadrona bozunum modu için gerekli olan tüm şartları sağlamıştır (Pessard, H. ve Wilquet, G., 2010).

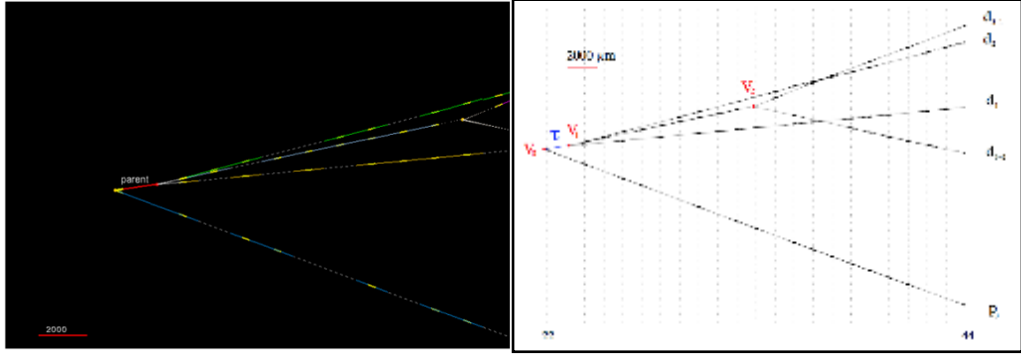


Şekil 5.21 İlk tau etkileşim adayı

Soldaki şekil tarama sonucu, sağdaki şekil yeniden yapılandırma sonucu

5.5.3 İkinci ν_τ adayı

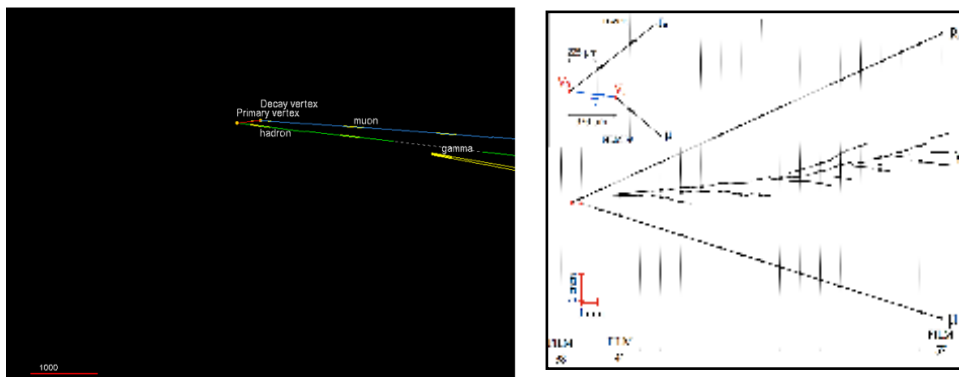
OPERA Deneyi'nde ikinci ν_τ adayı 23 Nisan 2011'de gerçekleşmiştir. Etkileşim yüksüz akım etkileşimi olarak belirtilmiştir. Nötrino etkileşimi kurşun plakada gerçekleşmiştir. Topolojik ve kinematik analizleri yapılan etkileşim tau'dan üç hadrona bozunum modu için gerekli olan tüm şartları sağlamıştır (Longhin 2013). Etkileşimin tarama sonucu ve yeniden yapılandırılan görüntüsü şekil 5.22'de verilmiştir.



Şekil 5.22 İkinci tau etkileşim adayı
soldaki şekil tarama sonucu, sağdaki şekil yeniden yapılandırma sonucu

5.5.4 Üçüncü ν_τ adayı

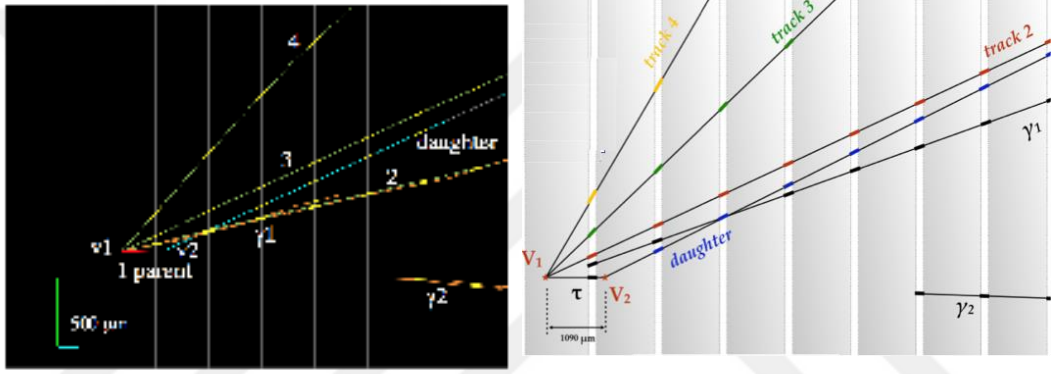
OPERA Deneyi'nde üçüncü ν_τ adayı 2 Mayıs 2012'de gerçekleşmiştir. Elektronik algılayıcı tarafından müon tespit edilmiştir. Nötrino etkileşimi ECC birim içinde gerçekleşmiştir. Topolojik ve kinematik analizleri yapılan etkileşim tau'dan müona bozunum modu için gerekli olan gerekli tüm şartları sağlamıştır (Ariga, T. 2014). Etkileşimin tarama sonucu ve yeniden yapılandırılan görüntüsü şekil 5.23'de verilmiştir.



Şekil 5.23 Üçüncü tau etkileşim adayı
Soldaki şekil tarama sonucu, sağdaki şekil yeniden yapılandırma sonucu

5.5.5 Dördüncü ν_τ adayı

OPERA Deneyi'nde dördüncü ν_τ adayı 9 Eylül 2012 'de gerçekleşmiştir. Elektronik algılayıcı tarafından müon tespit edilmemiş ve etkileşim yüksüz akım etkileşimi olarak belirtilmiştir. Topolojik ve kinematik analizleri yapılan etkileşim tau 'dan bir hadrona bozunum modu için gerekli olan gerekli tüm şartları sağlamıştır (Ariga, T. 2014). Etkileşimin tarama sonucu ve yeniden yapılandırılan görüntüsü şekil 5.24'de verilmiştir.

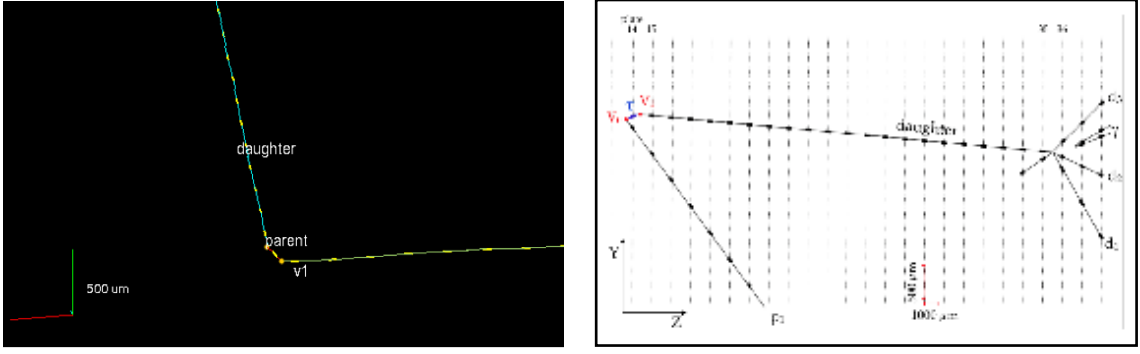


Şekil 5.24 Dördüncü tau etkileşim adayı

Soldaki şekil tarama sonucu, sağdaki şekil yeniden yapılandırma sonucu

5.5.5 Beşinci ν_τ adayı

OPERA Deneyi'nde beşinci ν_τ adayı 14 Ağustos 2012'de gerçekleşmiştir. Elektronik algılayıcı tarafından müon tespit edilmemiş ve etkileşim yüksüz akım etkileşimi olarak belirtilmiştir. Topolojik ve kinematik analizleri yapılan etkileşim tau 'dan bir hadrona bozunum modu için gerekli olan gerekli tüm şartları sağlamıştır (Sato, O. 2015). Etkileşimin tarama sonucu ve yeniden yapılandırılan görüntüsü şekil 5.25'de verilmiştir.



Şekil 5.25 Beşinci tau etkileşim adayı

Soldaki şekil tarama sonucu, sağdaki şekil yeniden yapılandırma sonucu



6. VERİ ALIMI VE ANALİZ

OPERA Deneyi 13 ülkeden 200 kadar fizikçinin oluşturduğu uluslararası bir çalışmadır. Algılayıcının yapımına 2002 yılında başlanmış ve 2008 yılının yazında algılayıcı tamamlanmıştır. 2008 ve 2012 yılları arasında veri alımı tamamlanmış ve sonrasında verilere ilişkin analiz çalışmaları devam etmiştir.

6.1 Etkileşimi Yeniden Oluşturma

Deneyde veri alımı öncelikle etkileşimin olduğu ECC birimlerin algılayıcıdan çıkarılmasıyla başlar sonrasında değişebilen filmlerin taranması ve ECC birimlerin çeşitli tarama laboratuvarlarına gönderilmesi ile devam eder ve taranan ve analizi biten birimlerin veritabanına kaydedilmesi ile tamamlanmaktadır. Her aşaması oldukça fazla dikkat ve özen gösteren bu süreç bir birim için bile oldukça uzun bir zaman almaktadır.

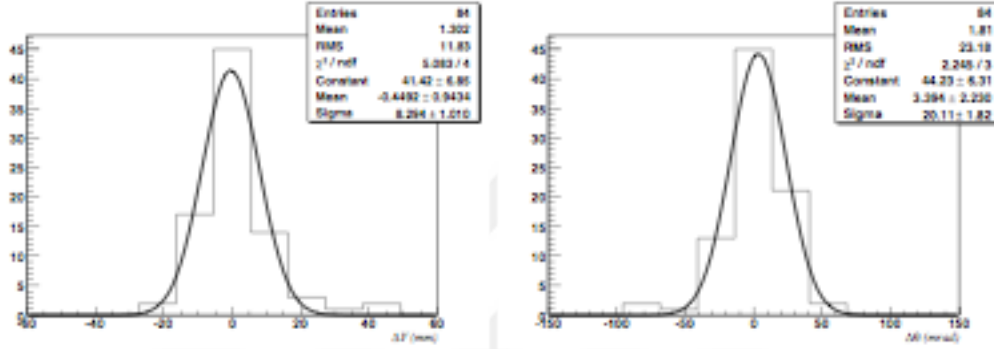
6.1.1 Hizalama

Öncelikle etkileşimin olduğu ECC birimler algılayıcıdan otomatik kol yardımıyla çıkarılır. Bundan sonraki süreçte emülsiyon filmlerinin taranması gerçekleştirilir. OPERA’da meydana gelen etkileşiminin üç boyutlu görüntüsü mikrometre duyarlılığında elde edildiği için emülsiyon filmlerinin hizalaması büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla dört bağlantı takip edilir;

- * TT ve değişebilen fimler arası hizalama
- * Değişebilen fimler arası hizalama
- * Değişebilen fimler ve ECC birim arası hizalama
- * ECC birim fimler arası hizalama

6.1.1.1 TT ve değişebilen fimler arası hizalama

Genel olarak hizalama etkileşim sonucu meydana gelen yüklü parçacığın sahip olduğu enerjiye bağlıdır ($\geq 1\text{GeV}$). Parçacıklar saçılırken ECC birimin en sonunda yer alan değişebilen filmler üzerinde iz bırakırlar ve spektrometreler tarafından tespit edilirler. Algılayıcıda yer alan tüm ECC birimlerin birer barkodu vardır bu şekilde etkileşimin olduğu ECC birim işaretilenir.



Şekil 6.1 Değişebilen filmlerde mün için ölçülen iz arasındaki pozisyon (sol) ve açısıl (sağ) dağılım

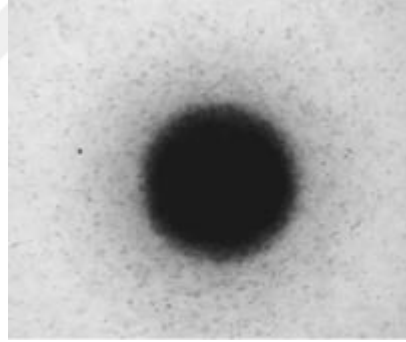
Şekil 6.1’de de görüldüğü gibi yüklü akım etkileşmeleri için son durumda münun X ve Y yönündeki eğim bilgileride verilir. Ardından değişebilen filmler ayrı ayrı taranır ve her bir filmdeki mikro izler bulunmaya ve taranamaya çalışılır. Değişebilen filmler algılayıcıdan çıkarıldıktan sonra İtalya’da bulunanan LNGS Tarama Laboratuvarı’na getirilir ve ilk taramaları burada yapılır. Bu süre içerisinde birimleri kozmik ışınlardan korumak için yeraltındaki zırlı alanda bekletilir.

Etkileşim olduğu yapılan taramalar sonrası doğrulandığında ilgili ECC birim çeşitli tarama laboratuvarlarına gönderilir. LNGS Tarama Laboratuvarı 24 saat boyunca tarama yapmaktadır ve vardiya sistemi ile çalışmaktadır.

6.1.1.2 Değişebilen fimler arası hizalama

Sırasıyla taranan değişebilen filmler arası hizalama yapılmaktadır. Yöntem olarak x-ışını noktaları kullanılmaktadır. ECC birim algılayıcıdan çıkarıldıktan sonra değişebilen fimler ve ECC birimin en alt emülsiyon filminin üzerine toplam üç emülsiyon filminin 4 köşesine birim açılmadan x-ray işaretleme yapılır. Yaklaşık 100 μm çaplı olan bu noktalar hem emülsiyon filmlerinin taranmasında hem de tarama sistemine tanıtılmasında iyi bir referans çervesi sağlamaktadır. Değişebilen fimlerde ilgili tarama bölgeleri taranır ve iz araştırması yapılır.

Eğer yüklü parçacıklar yeterli enerjiye sahip ise her iki emülsiyon filminde de iz bırakmaktadır. Bu şekilde her iki taramada da iz takibi doğrulanır ve ilgili tarama alanlarının ECC birim içerisinde de devam etmesi için tarama laboratuvarına gönderilir.



Şekil 6.2 Emülsiyon filmlerindeki X-ışını baskısı ($\sim 100 \mu\text{m}$).

6.1.1.3 Değişebilen fimler ve ECC birim arası hizalama

Değişebilen fimler ve ECC birim arası hizalama oldukça önemlidir. Birim içerisindeki tarama bu bilgiler kullanılarak yapılmaktadır. X-ray işaretleme ECC birimin en alttaki emülsiyon filmi ile değişebilen fimler arasındaki hizalamayı sağlamaktadır.

6.1.1.4 ECC birim fimler arası hizalama

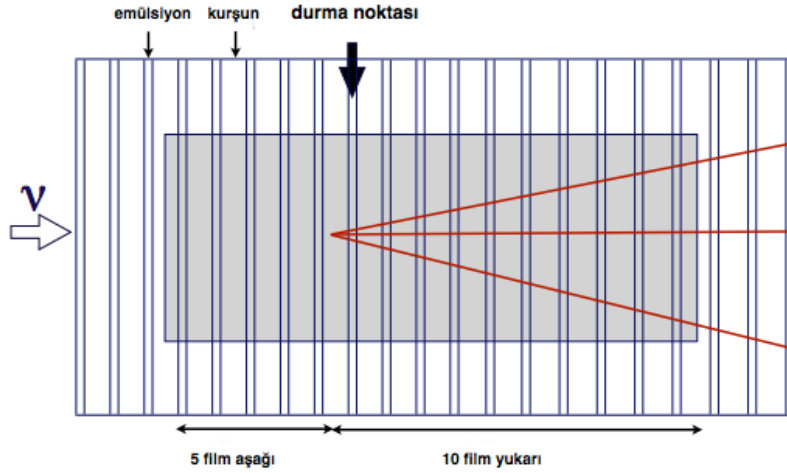
ECC birimler, değişebilen fimler ve ECC birim arası hizalama yapıldıktan sonra taranabilmektedir. Birimlerdeki fimler arası hizalamayı hassas bir şekilde yapabilmek için birimler LNGS laboratuvarı'nda yüzeye çıkarılmakta ve yüksek enerjili kozmik ışınlarla maruz bırakılmaktadır. Birimler uygulanan prosedüre göre kozmik ışınlarla dik bir şekilde yerleştirilmekte ve 12 saat boyunca ışınlanması sağlanmaktadır. Ardından ECC birimlerindeki emülsiyon filmleri çeşitli kimyasal işlemlerden geçirilmekte ve Avrupa'daki çeşitli laboratuvarlarda taranmak üzere gönderilmektedir. OPERA kapsamında İtalya, İsviçre, Türkiye, Rusya, Japonya gibi ülkelerde ECC birim tarama laboratuvarları bulunmaktadır. Posta yoluyla gönderilen birimler tüm laboratuvarlarda ortak olarak uygulanan tarama prosedürüne göre taranır ve tüm tarama bilgileri ortak veritabanına kaydedilir (Barbuto vd. 2004).

6.1.2 Geri Tarama

Geri tarama işlemi ECC birim içindeki etkileşim noktasını konumlandırmak ve köşe noktasına ait olan başka izlerin olup olmadığını bulabilmek için kullanılan bir prosedürdür. Tarama birimdeki en aşağıda yer alan iz konumlarından ve eğimlerinden başlar ve daha sonra bir sonraki emülsiyon filmindeki iz koordinatları öngörülür. Otomatik sistem beklenen konuma merkezlenmiş tek bir mikroskop görüntüsünü tarayarak öngörülerle uyumlu iz takibi yapar. Bu işlem, en az beş ardışık emülsiyon filminde hiçbir iz bulunmayana veya iz ECC birimden çıkarılincaya kadar tekrarlanır. İzin ECC birim içersinde görüldüğü en son yer durma noktası olarak adlandırılır ve tarama başlama noktası burası olarak kabul edilmektedir. Geri tarama işleminde eğer uyumlu iz koordinatları ile uyumlu başka izlere raslanırsa gözle kontrol yapılır. Bu tarama sonrası takip edilen iz veya izler ECC birim içersinde yoluna ECC birim boyunca devam eder ve birimden dışarı çıkabilir, bur tür durumlar "birim içiden geçmek" olarak işaretlenir veya iz saçılarak ilerlerken en yakın emülsiyon filminden dışarı çıkabilir, bur tür durumlar da "birim köşe çıkışı" olarak işaretlenir. Sonrasında ise algılayıcıdaki yerien göre bir öndeki ECC birim laboratuvar tarafından talep edilir ve etkileşimi net olarak görmek için bu işlemler bu ECC birime uygulanır.

6.1.3 Köşe noktası

Geri tarama yapıldıktan sonra incelenen etkileşimin durma noktası bulunursa, etkileşimin topolojisini incelemek için toplam tarama denilen bir başka prosedür uygulanır. Bu prosedür, şekil 6.3’de gösterildiği gibi durma noktasına göre 5 yukarı ve 10 aşağı olacak şekilde emülsiyon filmlerinde $1 \times 1\text{cm}^2$ alan üzerinde gerçekleştirilen bir hacim taramasından oluşur. Böylece belirlenen bu hacim içerisinde etkileşim, etkileşim köşe noktası ve ait olan izler yeniden oluşturulur. Varsa olası eksik taramalar veya eksik olan izler tamamlanır. Etkileşimin topolojisinin detaylı incelemesi ve ikincil köşe noktalarının araştırılması ise bir sonraki başlıkta anlatılmıştır.



Şekil 6.3 Hacim tarama

6.1.4 Bozunum arama

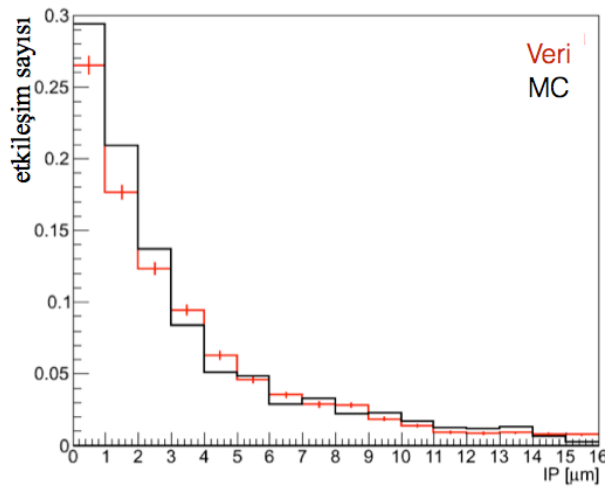
ECC birim içerisindeki etkileşime uygulanan geri tarama, köşe noktası prosedürlerinden sonra nötrino etkileşim noktasını daha iyi tanımlamak ve ikincil köşe noktalarının araştırılması için son olarak bozunum arama prosedürü uygulanmaktadır. Kısa ömürlü parçacık bozunumlarını araştırmak için bozunum arama prosedürü oldukça önemlidir. ECC birim içerisinde etkileşimin yeri belirlendikten ve köşe noktası bulunduktan sonra bu nokta etrafından $10\mu\text{m}$ 'den daha büyük etkileşim parametresine sahip olan izler detaylı olarak incelenmektedir. Bu izlerin saçılma sebepleri belirlenmeli ve çoğu zaman aynı kurşun plaka içerisinde olası kısa bozunum göstergeleri olabilmektedir. Kısa

bozumuna ait izleri bulabilmek için ekstra-iz araması yapılmaktadır. Ekstra-izler aşağıdaki kriterleri sağlamalıdır.

- Uzunlamasına olarak köşe noktası ile izin en uç iz arasındaki mesafe (Δz) 3.6 mm'den az olmalıdır.
- Eğer $\Delta z < 1\text{mm}$ ise köşe noktasına göre etkileşim parametresi $300\mu\text{m}$ 'den daha küçük değilse $500\mu\text{m}$ 'den daha küçük olmalıdır.
- Yeniden yapılandırılan izler en az üç segmente sahip olmalıdır.

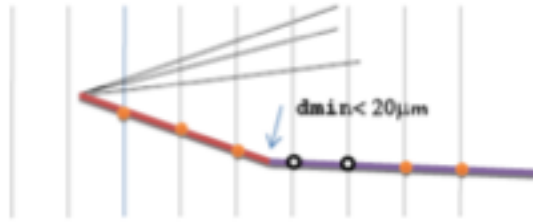
Ekstra-iz arama prosedürü ile çoklu Coulomb saçılmasından dolayı meydana gelen düşük momentumlu izler ve yeniden yapılandırma programının başarısızlığının bir sonucu oluşan sahte izler filtrelenmektedir.

Yüklü akım nötrino etkileşmelerinde birincil köşe noktasına ait izlerin etkileşim parametresi dağılımı veri ve Monte Carlo simülasyonu için şekil 6.4'de verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere izlerin %95'den daha fazlasının etkileşim parametresi $10\mu\text{m}$ 'den daha küçüktür şekil 6.5. Etkileşim parametresi $10\mu\text{m}$ 'den daha büyük olanlar ise düşük enerjili parçacıklardan kaynaklanmaktadır (Crescenzo 2013).



Şekil 6.4 Yüklü akım etkileşmelerinde birincil köşe noktasına ait izlerin etkileşim parametresi dağılımı (Crescenzo 2013)

Uzun bozunumları tespit etmek için köşe noktasından aşağı doğru ekstra-izler üzerinden ana parçacık araması yapılmaktadır. Seçilen ekstra-izler köşe noktasına göre etkileşim parametresi $10\mu\text{m}$ 'den daha küçük ve kız parçacık ile de $20\mu\text{m}$ 'den daha küçük bir mesafeye sahip olmalıdır. Kız ve ana parçacıkların eğim farkı olarak tanımlanan bükülme açısı 20 mrad 'dan büyük olan her aday iz gözle kontrol edilmektedir. Aynı prosedür yüksüz akım etkileşimi sonucu ortaya çıkan iz takiplerinde de geçerlidir.



Şekil 6.5 Ana parçacık araması

Otomatik tarama prosedürü, önceki prosedürler sırasında küçük bükülme açılarını yeniden yapılandıramamaktadır. Bu nedenle, yeniden yapılandırılan köşe noktası etrafındaki dört emülsiyon tabakasında küçük bükülme açılarının yakalabilmek için daha fazla araştırma yapılır (Agafonova vd. 2014).

6.2 Veri Alımı

OPERA algılayıcısı veri alımını 2008-2012 yılları arasında yapmıştır. 2012 yılı 3 Aralık tarihinde CNGS görevini tamamlamıştır. Aşağıdaki tabloda da belirtildiği gibi yaklaşık 1.8×10^{20} p.o.t'a karşılık gelen veri toplanmıştır. Algılayıcı 19505 etkileşim kaydetmiş bunlardan 5603 tanesinde etkileşim doğrulanmış ve 4406 tanesinde müon tespit edilmiştir (Longhin, 2013).

Çizelge 6.1 Etkileşim istatistiği

Yıl	Işınlama günü	Hedef üzerine düşen proton sayısı(10^{19})	Etkileşim sayısı
2008	123	1.74	1931
2009	155	3.53	4005
2010	187	4.09	4515
2011	243	4.75	5131
2012	257	3.86	3923
Toplam	965	17.97	19505

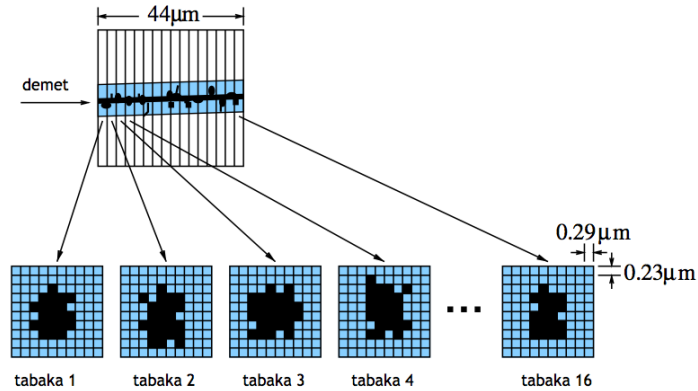
6.3 Analiz

Bu çalışmada 818 adet yüklü akım etkileşimine ait sonuçlar verilmiştir. Bu veriler Eylül 2015 - Eylül 2016 süresince Japonya'da bulunan Nagoya Üniversitesi Tarama Laboratuvar'nda yapılan çalışmalar sonucu elde edilen verilerden seçilmiştir. Bu laboratuvarın veritabanında 2008 yılından bu yana yapılan taramalara ait veriler bulunmaktadır. OPERA grubunun ECC birim tarama kapasitesi ve hızı en yüksek olan bu laboratuvardır. Bu nedenle veritabanında diğer ECC birim tarama laboratuvarlarına göre oldukça fazla veri bulunmaktadır. Ancak zaman zaman tarama verimlerini daha da artırmak için uygulanan prosedürde değişiklikler yapmışlardır. Bu uygulamalar sonucu kaydedilen tarama sonuçları birbiri ile küçük farklılıklar içermektedir. Bu nedenle kullanılacak veri grubunu belirlemek ve kendi içindeki uyumu sağlamak için bazı ayıklamalar yapılmıştır. Bu ayıklamalar aşağıdaki tabloda belirtilmiştir.

Çizelge 6.2 Veri ayıklaması

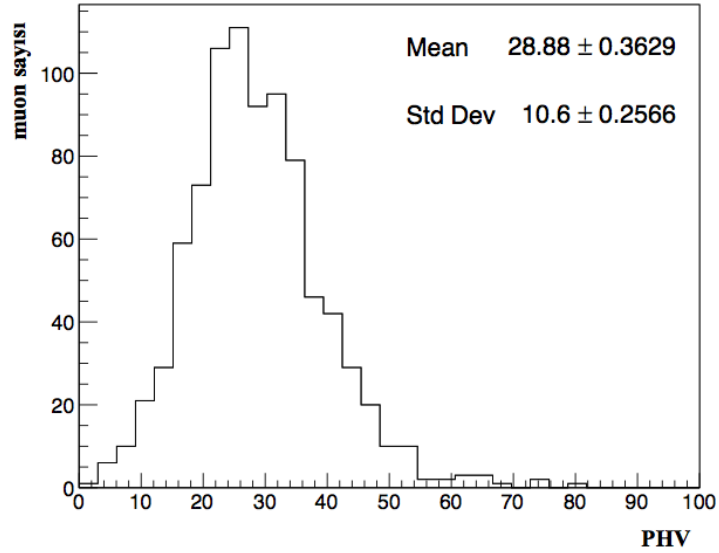
Uygulanan Seçimler	Veri Grubu
Verinin yılı	2010-2012
Parçacık bilgisi içeriği	Evet
Decay search prosedürü	Uygulanmış
Müon içeren	Evet
Hadron parçacıkları	Birinci etkileşime ait
Müon momentum	$<15\text{GeV}/c^2$
Toplam	818 etkileşim

Seçilen $\nu_{\mu}CC$ etkileşimler öncelikle dikkatlice analiz edilmiş ve etkileşim noktası ile bu noktaya ait parçacıklar iyonlaştırma özelliklerine göre mip (minimum ionised particle) izler, gri izler ve siyah izler olarak sınıflandırılmıştır. Mip izler müonlar veya yüklü rölativistik hadronlar tarafından emülsiyon tabakalarında bırakılan izlerdir. Gri izler ve nükleer etkileşim sırasında geri tepen nükleonlar olarak yorumlanan yavaş parçacıklar tarafından bırakılır. Siyah izler yayılım yönüne göre *ileri* veya *geri* olarak isimlendirilir. Siyah izler, uyarılmış hedef çekirdeğinden yayılan düşük enerjili fragmanlar (protonlar, döteryanlar, alfa parçacıkları ve ağır fragmanlar) tarafından bırakılır.



Şekil 6.6 Taranan 16 tabaka görüntülerin tomografik izlemi (Toshito vd. 2006)

Siyah izlerin görsel olarak anlaşılması kolaydır, çünkü bunlar çok miktarda iyonlaştırıcıdır, kısa yol uzunluklarına sahiptirler ve iki kurşun plaka arasında dururlar. Gri izler de siyah izlere benzer ancak görsel olarak gri izler ile mip izleri ayırmak kolay değildir.



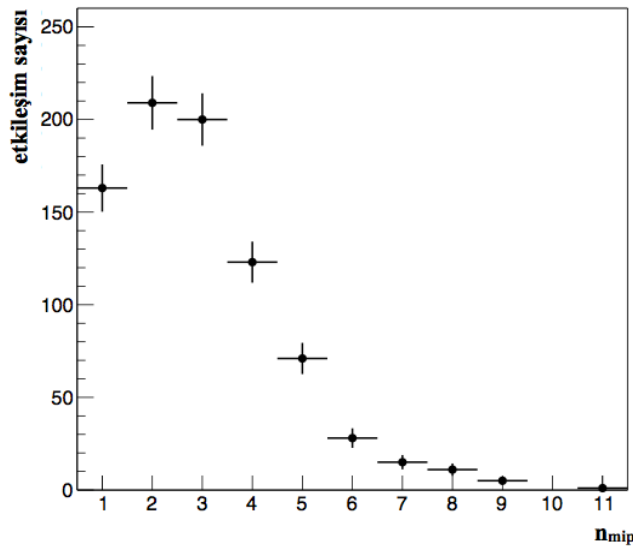
Şekil 6.7 Müon izlerin PHV dağılımı

Ayırım her onaltı katman görüntüsü ile ilişkili piksel sayısının toplamı olarak tanımlanan Darbe Yükseklik Hacimine (PHV) (Toshito vd. 2006) dayanmaktadır. Şekil 6.6 'da görüldüğü gibi her bir iz tabakalarda belirli pikseller oluşturmakta ve bu toplam da PHV'yi tanımlamaktadır. Bu nedenle PHV bir parçacığın emülsiyon filmine depoladığı enerjiyi yani izlerin genişliğini yansıtır. Mevcut çalışmadaki müon parçacıklarının PHV dağılımı şekil de verilmiştir. Tüm müon parçacıkları yani mip izlerin PHV değeri 85'in altında yer almaktadır. İlgili bilgiler şekil 6.4'de gösterilmektedir. Buna göre bu değerlerin üzerindeki izlere ait PHV değerleri gri olarak değerlendirilmelidir (Güler, M. ve Kamışcıoğlu, Ç. 2017).

6.3.1 Çokluk dağılımları

Bir etkileşim sonucu ortaya bir çok parçacık çıkabilmekte ve etkileşimin türüne göre bu parçacıklar aynı veya farklı türden olabilmektedir. Bir çok etkileşimin incelendiği deneylerde her etkileşim tek başına analiz edilir ve çıkan parçacık sayıları *çokluk* olarak ifade edilmektedir. Özellikle çok parçacıklı sistemlerde yüklü parçacıkların çokluğu etkileşimin dinamiklerini yansıtan önemli bir global parametredir. Bu nedenle bu zamana kadar kozmik ışınlar, sabit hedef ve çarpıştırıcı gibi bir çok deneyde çalışılmıştır. Bu veriler Monte Carlo (MC) etkileşim üreticilerinde kullanılan parçacık üretim modellerini geliştirmek için oldukça yararlıdır.

Mevcut çalışmada mip, gri ve siyah izlerin çokluk dağılımları aşağıdaki şekilde verilmektedir. Çalışmada kullanılan $\nu_{\mu}CC$ etkileşimlerindeki ortalama mip parçacık sayısı $\langle n_{mip} \rangle = 2.94 \pm 0.05$ olarak bulunmuş ve etkileşimlerdeki ortalama gri parçacık sayısı $\langle n_{gri} \rangle = 0.22 \pm 0.01$ olarak bulunmuştur. Ortalama *ileri* ve *geri* siyah parçacık sayısı ise $\langle n_{siyah} \rangle_{ileri} = 0.38 \pm 0.02$ ve $\langle n_{siyah} \rangle_{geri} = 0.15 \pm 0.01$ şeklinde hesaplanmıştır.



Şekil 6.8 Mip izlerin çokluk dağılımı

Yüklü hadron çokluğu n_y şeklinde ifade edilmiş ve mip parçacıklardan müonların çıkarılmasıyla hesaplanmıştır. Ortalama yüklü hadron çokluğu $\langle n_y \rangle = \langle n_{mip} \rangle - 1 = 1.94 \pm 0.05$ olarak bulunmuştur. Demet eksenine göre yayılım açısı θ ile ifade edilmektedir ve

bu açının bir fonksiyonu olarak mip parçacıkların dağılımı müonlar ve yüklü hadronlar için çizelge 6.3'de verilmiştir.

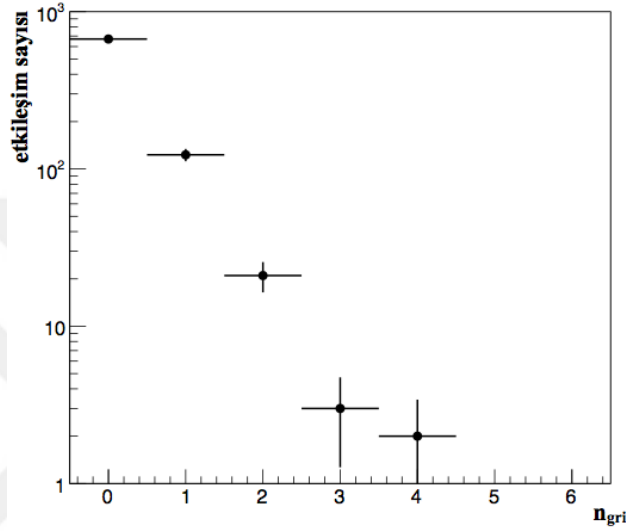
Çizelge 6.3 Müonlar ve yüklü hadronlar için demet eksenine göre yayılım açısının bir fonksiyonu olarak mip parçacıkların dağılımı

θ (rad)	$\langle \theta \rangle$	$n_y/\text{etkileşim}$	$n_{\text{müon}}/\text{etkileşim}$
0.00 ÷ 0.050	0.031 ± 0.001	0,134	0,070
0.50 ÷ 0.100	0.076 ± 0.001	0,258	0,195
0.100 ÷ 0.150	0.126 ± 0.001	0,280	0,231
0.150 ÷ 0.200	0.174 ± 0.001	0,237	0,177
0.200 ÷ 0.300	0.246 ± 0.002	0,383	0,195
0.300 ÷ 0.400	0.347 ± 0.003	0,298	0,079
0.400 ÷ 0.500	0.450 ± 0.004	0,179	0,029
0.500 ÷ 0.600	0.549 ± 0.006	0,113	0,017
≥ 0.600	0.661 ± 0.03	0,058	0,002
Toplam		1,94	1,0

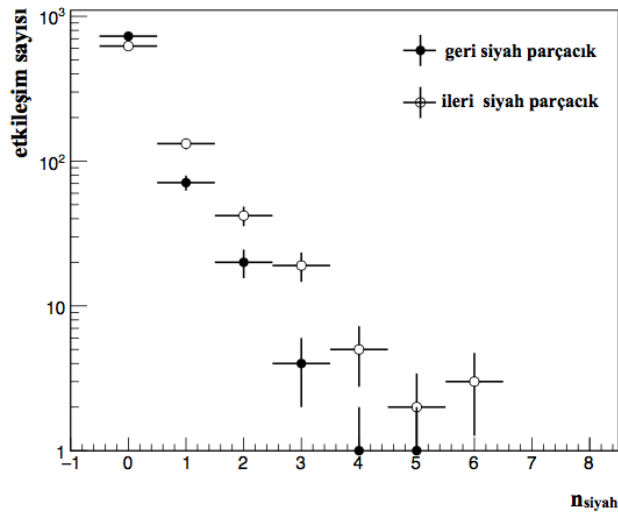
Mip izler için elde edilen çokluk dağılımı siyah ve gri izler için de elde edilmiştir. Gri izler referans alınan PHV = 85 değerinin üstünde kalanlar olarak alınmış ve izler toplanmıştır.

Şekil 6.6'de gri izler için çokluk dağılımı verilmiştir. Dağılımı daha net görebilmek için y eksenindeki verilere logaritmik hesap uygulanmıştır. Kullanılan veri grubunun içerisinde aynı zamanda siyah izler de mevcuttur. Siyah izler emülsiyon tabakalarında oldukça kalın izler bıraktıkları için gözle ve tarama yolu ile ayırt etmesi kolaydır. Bu nedenle tarama sonrası PHV değer ortalamaları gri ve mip izlere oranla oldukça yüksektir. Şekil 6.7'de siyah izler için çokluk dağılımları görülmektedir. Şekilde ileri

siyah iz ve geri siyah iz şeklinde iki dağılım üst üste çizilmiştir. İleri siyah iz olarak adlandırılan izler ECC birim içerisinde etkileşim meydana geldiğinde oluşan parçacıklar gönderilen nötrino demeti ile aynı yönde izler oluşturmaktadır. Bazı durumlarda ise ters yönde saçılan izler bulunur. Bu nedenle demetle aynı yönde oluşan siyah izle ileri, ters yönde oluşanlar ise geri olarak adlandırılmıştır.



Şekil 6.9 Gri iz çokluk dağılımı



Şekil 6.10 Siyah iz çokluk dağılımı

6.3.2 Verim hesabı

OPERA’da analiz için oluşturulan resmi yazılımın adı OpRelease’dir . C++ tabanlı olan bu yazılım ROOT sınıflarına dayanmaktadır (Brun R.vd. 2000, ROOT). Monte Carlo veri üretimi, Veri/MC karşılaştırması ve simülasyonu yapılan verilerin analizini gerçekleştirmektedir. OpRelease algılayıcıda parçacık üretim süreçlerini taklit eden farklı yazılım paketlerinden oluşmaktadır. Elektronik algılayıcı kısmın simülasyonu OpRec tarafından yapılırken ECCbirim/emülsiyon simülasyonu OpEmuRec tarafından yapılır ve bu ikisinin birleşimi algılayıcının simülasyonunu sağlar.

Simülasyon analiz zincirini oluşturmak için birçok farklı aşamadan oluşur. Çizelge 6.4’de zincirin şeması verilmiştir (Tufanlı 2015) .

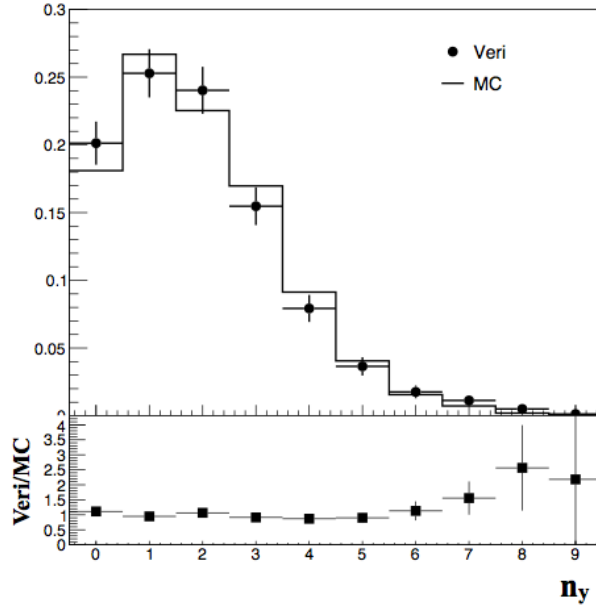
Çizelge 6.4 OPERA analiz zinciri

Paketler	İşlevleri
OpNEGN	Simülasyon zincirini başladığı ilk yer OpNEGN’dir. Nötrino olay üretici olarak kullanılmaktadır. NOMAD deneyinde oluşturulmuş ve ve daha sonra OPERA koşullarına uyarlanmıştır. Bu sayede binlerce etkileşim üretilmiştir.
OpGeom	Hedeflerin boyutlarını, konumlarını ve malzeme özelliklerini tanımlayan geometri paketidir.
OpSim	Hedeflerin boyutlarını, konumlarını ve malzeme özelliklerini tanımlayan geometri paketidir.
OpDigit	Parçacıkların yayılımını tanımlayan pakettir. OpSim paketinin çıktısını, algılayıcı ve emülsiyon filminin tepkisini hesaba katarak veri formatını ayarlar.

Çizelge 6.4 OPERA analiz zinciri (devam)

OpRec	Elektronik algılayıcının farklı bileşenleri tarafından toplanan bilgileri kullanarak, etkileşimin seçimi, parça yeniden yapılandırma, müon tanımlama, momentum, yük ve enerji ölçümleri bu paket tarafından gerçekleştirilir.
OpCarac	Etkileşim sınıflandırma paketidir. Etkileşimin algılayıcı içerisinde veya OpCarac olarak adlandırılan spektrometrede oluşup oluşmadığına karar veren sınıflandırma paketidir. Algılayıcı içerisinde oluşan olaylar "CONTAINED" olarak işaretlenir.
OpBrickFinding	Nötrino etkileşiminin gerçekleştiği ECC birim için olasılık haritası oluşturan paket aynı zamanda etkileşimi içerebilecek ECC birimi öngörebilmektedir.
OpEmuIO	Tarama mikroskoplarının simülasyonunun yapıldığı pakettir. Mikro-izlerin üretimi yapılmaktadır.
OpEmuRec	ECC birim içindeki analiz aşamaları OpEmuRec paketi içerisinde simüle edilir. Farklı alt paketler veri edinimi, CSD taraması, sıralanması, hizalanması, izlenmesi, birincil etkileşim, bozunum araştırması gibi işlerden sorumludur. Alt paketler, emülsiyon bilgisini işlemek için OPERA'da kullanılan işleme/analiz yazılımı FEDRA veya SySal'ın arayüzünü oluşturmaktadır.

Çalışmada etkileşimlerin yeniden oluşturulması, yerinin tespit edilmesi ve verimlerinin hesaplanması OPERA simülasyon yazılımı ile yapılmıştır. Nötrino akısı ve spektrumu CNGS demetinin FLUKA simülasyonu temel alınarak oluşturulmuştur (Pessard, H. ve Wilquet, G. 2012).



Şekil 6.11 Veri-MC dağılımı

Algılayıcıdaki nötrino etkileşimleri OpNEGN (Autiero 2005) üretici kullanılarak elde edilmiştir. MC üreteçli $\nu_{\mu}CC$ etkileşimleri OPERA simülasyon zincirinden başta etkileşim sınıflama, etkileşimin olduğu ECC birim tespiti, değişebilen filmlerin analizi, etkileşimin yerinin ECC birim içinde bulunması ve analizi aşamalarından geçirilmiştir.

Etkileşimlerinin yeri ECC birim içerisinde bulunurken mip izler takip edildi bu nedenle verim gri ve siyah parçacıkların çokluklarına bağlı değildir. Simülasyonda elde edilen yüklü hadron çoklukları OPERA verisinden elde edilen çoklukla karşılaştırılmıştır. Şekil 6.8’de Veri/MC karşılaştırması verilmiştir. İki dağılım da birbiri ile uyum içerisindedir.

$\nu_{\mu}CC$ etkileşimlerinde, Fermi hareketi ihmal edilerek, olayın tam kinematiği, müon momentum p_{μ} 'inin ölçümü, demet eksenine göre θ_{μ} açısı ve E_{had} , hadronik sisteme enerji transferi, TT'deki enerji birikiminin ölçülmesi yoluyla elde edilebilir. Analizde hadronik sistemin değişmez kütlesi aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$\begin{aligned}
E_\nu &= E_\mu + E_{had} \\
Q_\nu^2 &= 2E_\nu(E_\mu - p_\mu \cos\theta_\mu) - m_\mu^2 \\
W^2 &= 2m_N E_{had} + m_N^2 - Q_\nu^2
\end{aligned}
\tag{6.1}$$

Çizelge 6.5 Kinematik değişkenler

E_ν	nötrino enerjisi
E_μ	müon enerjisi
E_{had}	hadronik enerji
Q_ν^2	dörtlü momentum aktarımının karesi
W^2	hadronik sistemin değişmez kütesinin karesi
m_N	nükleon kütlesi
m_μ	müon kütlesi

Veri grubunun ortalama nötrino enerjisi $\langle E_\nu \rangle = (19.6 \pm 0.3)$ GeV, hadronik sisteme aktarılan dörtlü momentum aktarımının karesinin ortalama değeri $\langle Q_\nu^2 \rangle = (5.7 \pm 0.3)$ GeV²/c² ve hadronik sistemin değişmez kütesinin karesinin ortalama değeri ise $\langle W^2 \rangle = (16.9 \pm 0.6)$ GeV²/c⁴.

Çizelge 6.6 Etkileşimin Yerini W^2 'nin bir fonksiyonu olarak m_c ile bulma verimi

	n_y						Toplam
	0	1	2	3	4	≈5	
1-3	0.32 ± 0.03	0.48 ± 0.02	0.53 ± 0.04	0.55 ± 0.06	0.56 ± 0.09	0.62 ± 0.17	0.46 ± 0.01
3-6	0.34 ± 0.02	0.47 ± 0.02	0.54 ± 0.03	0.56 ± 0.04	0.65 ± 0.07	0.66 ± 0.11	0.47 ± 0.01
6-9	0.33 ± 0.02	0.46 ± 0.02	0.56 ± 0.02	0.63 ± 0.03	0.67 ± 0.06	0.68 ± 0.08	0.48 ± 0.01
9-12	0.34 ± 0.02	0.49 ± 0.02	0.57 ± 0.02	0.62 ± 0.03	0.69 ± 0.05	0.66 ± 0.07	0.50 ± 0.01
12-15	0.36 ± 0.02	0.50 ± 0.02	0.58 ± 0.02	0.63 ± 0.03	0.70 ± 0.04	0.70 ± 0.06	0.52 ± 0.01
15-19	0.37 ± 0.02	0.49 ± 0.02	0.60 ± 0.02	0.62 ± 0.02	0.66 ± 0.03	0.74 ± 0.05	0.53 ± 0.01
19-25	0.40 ± 0.02	0.52 ± 0.02	0.56 ± 0.02	0.64 ± 0.02	0.66 ± 0.03	0.68 ± 0.04	0.54 ± 0.01
25-35	0.41 ± 0.02	0.56 ± 0.02	0.56 ± 0.02	0.60 ± 0.02	0.62 ± 0.02	0.69 ± 0.03	0.55 ± 0.01
≈35	0.39 ± 0.02	0.39 ± 0.02	0.42 ± 0.01	0.43 ± 0.01	0.54 ± 0.02	0.57 ± 0.02	0.45 ± 0.01
Toplam	0.37 ± 0.007	0.48 ± 0.007	0.54 ± 0.008	0.57 ± 0.009	0.62 ± 0.01	0.62 ± 0.01	0.50 ± 0.01

Çizelge 6.7 Verideki w^2 'nin bir fonksiyonu olarak yüklü hadron çokluk dağılımları

$W^2(\text{GeV}^2/c^4)$	$\ln\langle W^2(\text{GeV}^2/c^4) \rangle$	n_y											Toplam					
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		≥ 11	$\langle n_y \rangle$			
1-3	0.68 ± 0.03	59	21	7	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.48 ± 0.11	89
3-6	1.48 ± 0.01	29	37	24	4	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1.14 ± 0.10	97
6-9	2.01 ± 0.01	28	37	16	12	5	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1.36 ± 0.12	100
9-12	2.33 ± 0.01	10	26	25	13	6	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1.86 ± 0.13	83
12-15	2.61 ± 0.01	10	24	29	27	3	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	2.07 ± 0.13	98
15-19	2.83 ± 0.01	12	17	35	14	8	4	1	1	0	0	0	0	0	0	0	2.10 ± 0.15	92
19-25	3.08 ± 0.01	5	18	22	19	12	3	1	3	0	0	0	0	0	0	0	2.51 ± 0.16	83
25-35	3.36 ± 0.01	4	15	17	19	12	8	2	1	1	0	0	0	0	0	0	2.79 ± 0.18	79
≥ 35	4.04 ± 0.03	3	6	16	14	15	8	4	4	3	0	1	0	0	0	0	3.59 ± 0.24	74
Toplam	2.83 ± 0.03	160	201	191	123	63	29	14	9	4	0	1	0	0	0	0	1.98 ± 0.05	795

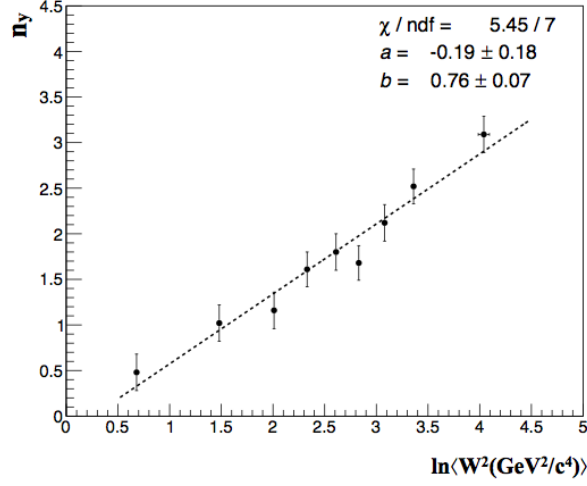
Çizelge 6.6'da etkileşimin yerini hadronik sistemin değişmez kütlelerinin hesabı Monte Carlo ile yapılmıştır. Yüklü akım etkileşimleri seçilmiş ve OPERA analiz zinciri kullanılarak etkileşimler yeniden oluşturulmuştur. Yeri tanımlanmış olan etkileşimler üzerinden veri grubunda uygulanan seçimlerin aynısı uygulanmıştır. Ardından yüklü hadronlar için veri grubunda hesaplanan hadronik sistemin değişmez kütlelerinin karesi hesaplanmıştır. Çizelgede enerji aralıklarına karşılık her bir yüklü hadron çokluğu hata hesabı ile verilmiştir. Çizelge 6.7'de ise veri grubu için hadronik sistemin değişmez kütlelerinin karesi yüklü hadronların çokluk dağılımına göre verilmiştir. Çizelgede yüklü hadronların çokluk değerleri sırasıyla sütunlara yazılmış ve her bir hadronik sistemin enerji aralığı için ortalama çokluk dağılımları en son sütunda verilmiştir. Bu enerji aralıklarının seçilmesinin sebebi bu aralıklarda aynı sayıda verinin bulunmasıdır. Bu iki çizelge verim hesabını yapmak için kullanılmaktadır.

6.3.3 Dağınım

Yüklü parçacıkların genel karakteristiklerini anlamak için ortalama çokluk dağılımları veya dağınım kullanılmaktadır. Dağınım çokluk dağılımlarının genişliğinin ortalama çokluğa olan bağlılığını gösteren karakteristik bir özelliktir. Bu bölümde bu özellik incelenmiştir.

W^2 'nin logaritmik bir fonksiyonu olarak ortalama yüklü hadronların çokluğu şekil 6.9'da sunulmaktadır. Veriler, $\ln W^2$ 'deki doğrusal bir fonksiyonla oldukça uyumludur. Şekilde de görüldüğü üzere veri noktalarına bir fit fonksiyonu uygulanmıştır ve uygun fit parametreleri $a = -0.19 \pm 0.18$ ve $b = 0.76 \pm 0.07$ şeklinde bulunmuştur. Benzer çalışma farklı deneylerde de yapılmıştır. Aşağıdaki tabloda fit parametrelerinin bir karşılaştırması yapılmıştır.

$$\langle n_s \rangle = a + b \ln W^2 \quad (6.2)$$



Şekil 6.12 $\ln W^2$ 'nin bir fonksiyonu olarak ortalama yüklü hadronların çokluğu

Çizelge 6.8 Fit parametrelerinin diğer deney sonuçlarıyla karşılaştırılması

Etkileşim	$\langle E_\nu \rangle$ GeV	a	b	Referans
ν_μ -emülsiyon	38	0.45 ± 0.24	0.94 ± 0.08	Kayis-Topaksu, A. 2007
ν_μ -emülsiyon	50	1.92 ± 0.68	1.19 ± 0.23	Voyvodik L. 1986
ν_μ -emülsiyon	8.7	1.07 ± 0.05	1.32 ± 0.11	Aleshinetal Y.D. 1996
ν_μ -kurşun	20	-0.19 ± 0.18	0.76 ± 0.07	Güler, M. ve Kamışcıoğlu, Ç. 2017

Yüklü hadronlar için dağılım D_y olarak;

$$D_y = \sqrt{\langle n_y^2 \rangle - \langle n_y \rangle^2} \quad (6.3)$$

şeklinde ifade edilmiştir. Bağımsız parçacık üretiminde dağılım Poisson dağılımını izlemektedir.

$$D_y = \sqrt{\langle n_y \rangle} \quad (6.4)$$

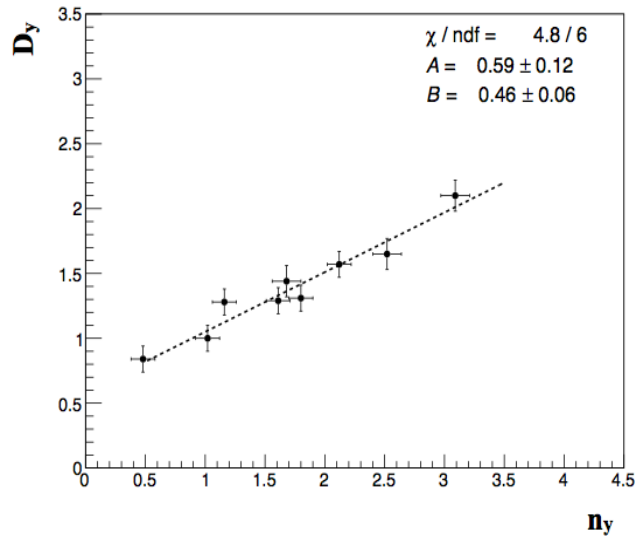
Bununla birlikte, yüklü parçacıkların hadronik etkileşimlerde üretilmesinin aşağıda verilen ampirik ifadeyi karşıladığı gözlemlenmiştir.

$$D_y = A + B\langle n_y \rangle \quad (6.5)$$

Bu ifade dikkate alınarak şekil 6.10'da dağılımın yüklü hadronların ortalama çokluk dağılımı üzerine bağılılığı verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere veri noktaları üzerinde doğrusal bir fit uygulanmıştır. Fit parametrelerin değerleri ise $A = 0.59 \pm 0.12$ ve $B = 0.46 \pm 0.06$ 'dır. Diğer deneylerde elde edilen sonuçlar karşılaştırma amaçlı çizelge 6.5'te gösterilmektedir.

Çizelge 6.9 Fit parametrelerinin diğer deney sonuçlarıyla karşılaştırması

Etkileşim	$\langle E_\nu \rangle$ GeV	A	B	Referans
$\nu\mu$ -emülsiyon	38	1.18 ± 0.17	0.20 ± 0.05	Kayis-Topaksu, A. vd. 2007
$\nu\mu$ -proton	> 5	0.36 ± 0.03	0.36 ± 0.03	Allen P. vd. 1981
$\nu\mu$ -kurşun	20	0.59 ± 0.12	0.46 ± 0.06	Güler, M. ve Kamışcıoğlu, Ç. 2017

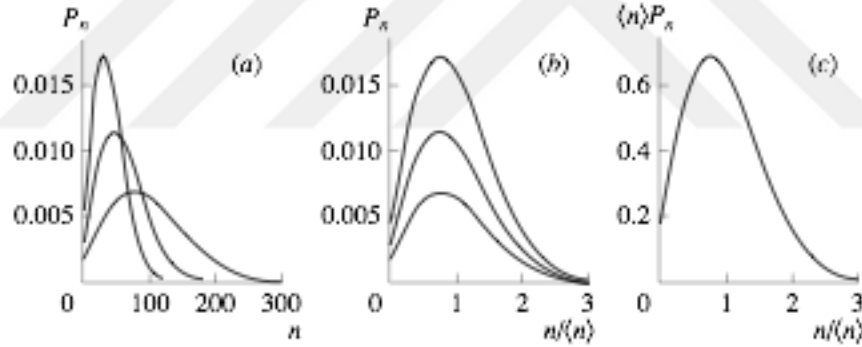


Şekil 6.13 Dağılımın yüklü hadron sayısına göre dağılımı

6.3.4 KNO ölçeklemesi

Son zamanlarda deneysel ve teorik çalışmalarda çokluk dağılımlarının davranışını belirlemede önemli bir yere sahip olan Kobe-Nielsen-Olesen Ölçeklemesi kısaca KNO Ölçeklemesi olarak da bilinmektedir. 1971 yılında Kobe, Nielsen ve Olesen çokluk dağılımlarının şeklinin birincil enerjiden bağımsız olduğunu öngörmüşlerdir. Öncesinde 1970 yılında Polyakov, Kobe, Nielsen ve Olesen'den farklı yaklaşımlar kullanarak aynı sonuca ulaşmıştır.

Yüksek enerjiler için formüle edilen bu ifadeyi çok yüksek enerjili etkileşim deneylerinde beklenen etkileşim sonrası oluşan parçacık sayısının çok fazla oluşudur ki bu da sürekli bir çokluk dağılımı demektir.



Şekil 6.14 KNO gösterimi

Şekil 6.13 'da görüldüğü gibi farklı yüksek ilk enerjiler için farklı çokluk dağılımları sürekli bir yapıdadır. Her bir eğrinin altındaki alan 1'e eşittir çünkü tüm olasılıkların toplamına karşılık gelmektedir.

$$\int P_n dn = \sum P_n = 1 \quad (6.6)$$

Ortalama çokluk dağılımı ise artan enerji ile artmaktadır.

$$\langle n \rangle = \sum n P_n = \int n P_n dn \quad (6.6)$$

Şekil 1b’de her bir eğri kendisinin ortalama çokluk dağılımı ile oranlanarak yatay ekseninde sınırlandırılmıştır. Eğer her bir eğri için dikey ekseninde bir genişleme yapılırsa tüm eğriler aynı noktada buluşur yani her bir eğrinin değişmeden altında kalan alan aynıdır demektir KNO ölçeklemesi Şekil 1c. Bu ifade

$$\langle n \rangle P_n = \Psi\left(\frac{n}{\langle n \rangle}\right) \quad (6.7)$$

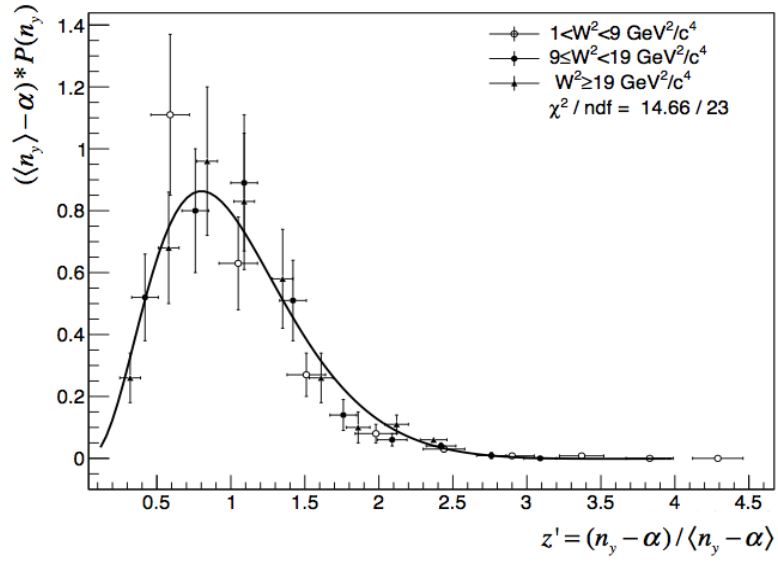
şeklinde formüle edilmiş ve $z = n/\langle n \rangle$ olmak üzere $\Psi(z)$ fonksiyonu enerjiden bağımsızdır.

$$z = \frac{n}{\langle n \rangle} \quad \int_0^{\infty} \Psi(z) dz = 1 \quad (6.8)$$

Bu kısımdaki ifadeler yüksek enerjili durumlarda geçerli iken düşük ve orta enerjili etkileşimlerde uygulanamamaktaydı. Bu sorun 1973’de Buras et.al tarafından çözümlenmiştir. Yayınlanan çalışmada yukarıda belirtilen ‘z’ değerine yeni bir α parametresi eklenmiştir. Bu parametre etkileşime bağlı ancak enerjiden bağımsızdır bu sayede düşük enerjili sistemlerde de KNO ölçeklemesinin uygulanmasına olanak sağlamıştır (Buras 1973).

$$z' = \frac{n - \alpha}{\langle n - \alpha \rangle} \quad (6.9)$$

Mevcut çalışmada OPERA verileri kullanılarak farklı enerji aralıklarında KNO ölçeklemesi incelenmiştir. Yüklü hadron parçacıklarının çokluk dağılımları, olasılık değerleri ve alfa parametresi hesaplanarak şekil 6.15’deki KNO dağılımı elde edilmiştir. İlgili çalışmadaki alfa değeri $\alpha=A/B=-1.28$ olarak hesaplanmıştır. A ve B parametreleri 6.5’de ifade edilen dağılım bağıntısıdır.



Şekil 6.15 OPERA verileri için KNO dağılımı

Şekilde $\nu_{\mu}CC$ etkileşimleri, W^2 'nin üç farklı enerji aralığı için z' 'nin bir fonksiyonu olarak Ψ için elde edilen dağılımını göstermektedir. OPERA verileri KNO ölçeklendirmesi ile uyum içerisindedir. Bu tarz sonuçlar başta CHORUS olmak üzere çeşitli deneylerde elde edilmiştir (Kays-Topaksu, A 2007).

Şekilden de görüleceği üzere KNO dağılımına $\Psi(z')$ 'nin parametrisasyonundan elde edilmiş bir fit fonksiyonu uygulanmıştır.

$$\Psi(z') = (A(z')^3 + B(z')^4)e^{-Cz'}$$

En iyi fit için fonksiyonun parametreleri aşağıdaki çizelge 6.10 verilmiştir.

Çizelge 6.10 Fit parametreleri

A	32.16 ± 5.35
B	-10.18 ± 1.68
C	3.31 ± 0.11

7. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışmasında 2008-2012 yılları arasında aktif çalışmış olan OPERA Deneyi'nin verileri kullanılmıştır. Veriler analiz edilmiş çeşitli seçimlerden geçirilerek öncelikle saf bir alt grup oluşturulmuştur. Bu veri grubunda mikron altı uzaysal çözünürlüğe sahip emülsiyon filmlerinde meydana gelen etkileşimlerin topolojileri ve oluşan hadron parçacıklarının çokluk dağılımları detaylı olarak analiz edilmiştir. OPERA simülasyon yazılımı ile etkileşimlerin yeniden oluşturulması, yerinin tespit edilmesi ve verimlerinin hesaplanması gerçekleştirilmiştir. Simülasyonda elde edilen yüklü hadron çoklukları OPERA verisinden elde edilen çoklukla karşılaştırılmış ve sonuçlar çeşitli tablolar ve grafikler ile sunulmuştur.

Bu amaçla Eylül 2015- Eylül 2016 tarihleri arası Japonya'da bulunan OPERA üyesi Nagoya Üniversitesi Tarama Laboratuvarı'nda veri alımı ve analiz üzerine çalışılmıştır. Laboratuvarın veritabanındaki verilerin büyük bir kısmı incelenmiş ancak bazı kayıplar veya tarama prosedür değişiklikleri nedeniyle veri grubunda bazı ayıklamalar yapılmıştır. Buna göre 2010-2012 yıllarına ait parçacık bilgisi içeren, yeri belirlenmiş, hadron parçacıkları içeren 818 adet ν_μ yüklü akım etkileşimleri seçilmiş analiz edilmiştir. Emülsiyon filmlerindeki parçacık izleri siyah, gri, mip olarak belirlenmiştir. Analizde siyah izlerin gözlenmesi ve belirlenmesi yapılabilirken mip ve gri izlerin birbirinden ayrımını kolaylaştırmak amaçlı çeşitli seçimler üzerinde çalışılmıştır. Emülsiyon filmlerindeki piksel sayısı ile ilişkili olan darbe yükseklik hacmine bağlı olarak ayırım yapılmıştır. Ardından etkileşimlerdeki mip, siyah ve gri izler ayrıştırılarak çokluk dağılımları oluşturulmuştur. Verim hesabını yapabilmek için OPERA analizi için oluşturulan resmi yazılım OpRelease kullanılmıştır. Veri için gerçekleştirilen analiz zinciri simülasyonda da uygulanmıştır. Ardından veri-MC karşılaştırması yapılmış ve uyum gözlenmiştir. Yüklü parçacıkların genel karakteristiklerini anlamak için oluşturulan hadronik sistemin değişmez kütlelerinin logaritmik eksenindeki dağılımına karşılık yüklü hadron çokluğu, doğrusal bir özellik göstermektedir. Aynı şekilde yüklü hadronların ortalama çokluk dağılımlarının dağılıma olan bağımlılığı doğrusal bir davranış göstermekte ve yaklaşık KNO ölçeklemesi ise yüklü hadron çokluk dağılımı açısından geçerli bulunmuştur. KNO ölçeklemesinde veri grubu 3 farklı enerji

aralığında incelenmiştir. Veri grubunun dağılımı bir eşitliğe dayalı olarak fit edilmiştir. Fit parametreleri Çizelge 6.10'da verilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar Monte Carlo olay üreticilerini ayarlamakta kullanılabilir.

OPERA Deneyi 2008-2012 yılları arası 17.97×10^{19} p.o.t'a karşılık gelen 19505 nötrino etkileşimi kaydetmiştir. Yeri belirlenen 7000 etkileşim içerisinde, 0.25 beklenen arka plan etkileşimi ve 5.1σ hassasiyetle müon nötrinolarından tau nötrinolarına görünür moda 5 adet tau etkileşimi kaydedilmiştir (Sato 2015).

OPERA deneyi için yürütülen güçlü araştırma ve geliştirme ve bunun sonucunda modern emülsiyon tekniğinin yaygınlaştırılması ve geliştirilmesi, deneyde yer alan bazı grupların gelecekteki uygulamalar için bu faaliyeti sürdürmesine yol açmıştır. Böylece çeşitli nötrino deneyleri planlanmış ve hayata geçirilmiştir. Bunlardan ilki Fermilab'da nötrino salınımlarını incelemek üzere tasarlanmış bir deney olan MINOS (Main Injector Neutrino Oscillation Search)'dur. 1993-2004 yılları arası plan, dizayn ve kurulumu tamamlanan deney 2014 yılına kadar veri alımı devam eden uzun menzilli bir deneydir. Bir diğer deney; müon nötrinoların, elektron nötrinolarına salınımlarını araştıran NOvA deneyidir. İki büyük basketbol sahası kadar bir alan kaplayan Minnesota'daki NOvA algılayıcısı 2014'de tamamlanmış ve 6 yıl veri alması planlanmıştır. Geniş çapta katılımcısı bulunan ve halen dizayn, kurulum aşamasında olan SHIP (Search for Hidden Particles) Deneyi ise karanlık madde ve nötrino salınımlarını araştırmak üzere tasarlanmıştır.

Emülsiyon teknolojisinin hayati rolü ve tarama sistemlerinin geliştirilmesi nötrino fiziği alanındaki deneylere hız kazandırmış böylece gerçekleştirilen ve planlanan bu deneyler ile nötrino fiziği alanındaki birikim ve gelişmeler artmaktadır. Bu sayede nötrino etkileşimlerinin doğasına ilişkin önemli sonuçlar elde edilmektedir.

KAYNAKLAR

- Anonymous.2017. ICARUS-collaboration, URL <http://www.aquila.infn.it/icarus/>.2017
- Agafonova, N. 2014. Evidence for $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$ appearance in the CNGS neutrino beam with the OPERA experiment. *Phys. Rev.*, D89(5):051102, 2014.
- Ahn, S.H. 2001. [K2K Collaboration], Detection of accelerator produced neutrinos at a distance of 250-km, *Phys. Lett. B* 511 (2001) 178.
- Ahn, M. H. 2006. Measurement of Neutrino Oscillation by the K2K Experiment, *Phys. Rev. D* 74 (2006) 072003.
- Aleshinetal, Y.D. 1996. *Zh.Eksp.Teor.Fiz.*110,391(1996).
- Allen, P. 1981. *Nucl. Phys. B*181, 385 (1981).
- Altarelli, G. 2005. *The Standard Model of Particle Physics. High Energy Physics.*
- Ammosov, V.V. ve Arik, E. 2012. Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC, *Phys.Lett. B* 716 (2012) 1-29: CERN-PH-EP-2012-218.
- Ariga, T. 2014. Observation of tau neutrino appearance in the CNGS beam with the OPERA experiment. *PTEP*, 2014(10):101C01, 2014.
- Aoki, S. 1989. "A hybrid experiment to search for beauty particles," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, vol. 274, no. 1-2, pp. 64–78, 1989.
- Aoki, S. 2000. "Nuclear emulsions in a large, hybrid experiment (CHORUS) to search for $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$ oscillations," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, vol. 447, no. 3, pp. 361–376, 2000.
- Autiero, D. 2005. The OPERA event generator and the data tuning of nuclear re-interactions, *Nucl. Phys. B - Proceedings Supplements*, 139 (2005) 253.
- Bahcall, J. N., Calaprice, F., McDonald, A. B., Totsuka, Y. 1996. Solar Neutrino Experiments: The Next Generation. *Physics Today*, 49(7):30–36.
- Bailey, R. 1999. The CERN Neutrino beam to Gran Sasso (CNGS) (Addendum to report CERN 98-02, INFN/AE-98/05), CERN-SL/99-034(DI), INFN/AE-99/05.
- Barbuto, E. 2004. Atmospheric muon flux measurements at the external site of the Gran Sasso Lab. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 525.3, pp. 485–495.
- Barbuto E., Bozza C., ve Sirignano C. 2006. Vertex Reconstruction in SySal.NET: the "global vertexing" algorithm. OPERA note 78 4-06-2006, 2006.

- Barton, J. C. 2002. Direct Evidence for Neutrino Flavor Transformation from Neutral-Current Interactions in the Sudbury Neutrino Observatory. *Phys. Rev. Lett.*, 89(1):011301.
- Bethe, H. ve Peierls, R. 1934. The 'neutrino'. *Nature*, 133:532.
- Bertolin, A. 2011. Study of neutrino interactions with the electronic detectors of the OPERA experiment. *New Journal of Physics* 13 (2011) 053051.
- BOREXIONO-collaboration ,URL <http://borex.lngs.infn.it/>.
- Bozza, C. 2001. (CHORUS Collaboration), *Nucl. Inst. Meth. Phys. Res.*, A478, 411-414(2001)
- Bozza, C. 2005. High-speed particle tracking in nuclear emulsion by last-generation automatic microscopes. *Nucl. Inst. and Meth.*, A551:261–270, 2005.
- Brun R. et al. 2000. ROOT, an object oriented data analysis framework. *Conf. Proc.*, C000917:11–42, 2000.
- Buras, A.J. 1973. *Phys. Lett.* B47, 251.
- Chatrchyan, S. 2012. Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC, *Phys. Lett. B* 716 (2012) 30-61: CERN- PH-EP-2012-220.
- Cleveland, B.T. 1998. Measurement of the Solar Electron Neutrino Flux with the Homestake Chlorine Detector, *Astrophys. J.* 496 (1998) 505.
- Cleveland, B.T. 2005. [SAGE collaboration], Measurement of the solar neutrino capture rate with gallium metal, *Phys. Rev. C* 60 (2005) 055801.
- Crescenzo, A. D. 2013. Search for $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$ oscillations with the OPERA experiment. Doktora Tezi. Università degli Studi di Napoli "Federico II".
- Davis, R. 1994. A review of the homestake solar neutrino experiment. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 32:13–32
- Elsener, K. 1998. The CERN Neutrino Beam To GRAN SASSO, Conceptual Technical Design, CERN-98- 02, INFN/AE-98/05.
- Ereditato, A. 2013. The Study of Neutrino Oscillations with the Emulsion Detectors. *Advances in High Energy Physics*. Volume 2013. 17 Pages
- Fukuda, Y. 1996. [Kamiokande Collaboration], Solar Neutrino Data Covering Solar Cycle 22, *Phys. Rev. Lett.* 77 (1996) 1683.
- Fukuda, Y. 1998. [Super-Kamiokande Collaboration], Measurements of the Solar Neutrino Flux from Super-Kamiokande's First 300 Days, *Phys. Rev. Lett.* 81 (1998) 1158-1162.
- Galati, G. 2017. $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$ oscillations with the OPERA experiment. Doktora Tezi. Università degli studi di Napoli "Federico II".
- Güler, M. 2000. OPERA: An appearance experiment to search for $\nu_{\mu} - \nu_{\tau}$ oscillations in the CNGS beam. Experimental proposal. CERN-SPSC-2000-028, CERN-SPSC-P-318, LNGS-P25-00, page 265, July 2000. CERN-SPSC-2000-028.

- Güler, M. ve Kamişcioğlu, Ç. 2017. Study of charged hadron multiplicities in charged-current neutrino-lead interactions in the OPERA detector, Eur. Phys. J. C, (basım aşamasında)
- Halverson, P. G. 1998. [SuperKamiokande Collaboration], Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos, Phys. Rev. Lett. 81 (1998) 1562.
- Hampel, W. 1999. [Gallex collaboration], GALLEX solar neutrino observations: results for GALLEX IV, Phys. Lett. B 447 (1999) 127.
- Kaplun, M. F. 1952. “The energy spectrum of primary cosmic radiation,” *Physical Review*, vol. 85, no. 2, pp. 295–309, 1952.
- Kayis-Topaksu, A. 2011. [CHORUS Collaboration], Measurement of charm production in neutrino charged-current interactions, New J. Phys. 13 (2011) 093002.
- Kayis-Topaksu, A. 2007. [CHORUS Collaboration], Charged-particle multiplicities in charged-current neutrino and anti-neutrino nucleus interactions. *European Physical Journal C. Particles & Fields*. Aug2007, Vol. 51 Issue 4, p775-785. 11p.
- Kinoshita, S. 1910. The photographic action of the α -particles emitted from radio-active substances, *Proceedings of the Royal Society A*, vol. 83, pp. 432–453, 1910
- Kirsten, A. 2005. [GNO collaboration], Complete results for five years of GNO solar neutrino observations, Phys. Lett. B 616 (2005) 174, [hep-ex/0504037].
- Kodama, K. et al. 2001. [DONUT Collaboration], Observation of tau neutrino interaction, Phys. Lett. B 504 (2001) 218.
- Lattes, C. M. G. 1971. “CHACALTAYA emulsion chamber experiment,” *Progress of eoretical Physics*, vol. 47, pp. 1–125, 1971.
- Lavina, L. S. 2008. [CHORUS Collaboration], Final results on $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ oscillation from the CHORUS experiment, *Nuclear Physics B* 793 (2008) 326–343 *Advances in High Energy Physics*, Volume 2013 (2013), Article ID 382172.
- Lisi, E. 2016. Neutrino masses and mixings: Status of known and unknown 3 ν parameters. *Nucl. Phys.*, B908:218–234, 2016.
- Longhin, A. 2013. New results on $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ appearance with the OPERA experiment in the CNGS beam. *JHEP*, 11:036, 2013. [Erratum: *JHEP*04,014(2014)].
- Lundberg, B. 2001. [DONUT Collaboration], Observation of tau neutrino interaction, Phys. Lett. B 504 (2001) 218.
- LVD-collaboration, URL <http://www.bo.infn.it/lvd/>.
- Pessard, H. ve Wilquet, G. 2010. Observation of a first ν_τ candidate in the OPERA experiment in the CNGS beam. *Phys.Lett.*, B691:138–145, 2010.
- Pessard, H. ve Wilquet, G. 2012. [OPERA collaboration], Search for $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ oscillation with the OPERA experiment in the CNGS beam, *New J. Phys.* 14 (2012) 033017.

- Martin, B. 2006. Nuclear and Particle Physics: An Introduction, John Wiley & Sons, 411p.
- Morishima K. and Nakano T. 2010. Development of a new automatic nuclear emulsion scanning system, S-UTS, with continuous 3D tomographic image read-out. JINST, 5(04):P04011, 2010.
- Niu, K., Mikumo E., and Maeda Y. 1971. "A possible decay in light of a new type particle," *Progress of Theoretical Physics*, vol. 46, no. 5, p. 1644, 1971.
- Ohta, I. 1973. Proceedings of the International Cosmic Ray Conference, vol. 3., p 2250, 1973.
- Pontecorvo, B. 1957. Mesonium and anti-mesonium, *Zh. Eksp. Teor. Fiz. (JETP)* 33, (1957) 549.
- Pontecorvo, B. 1958. Inverse beta processes and nonconservation of lepton charge, *Zh. Eksp. Teor. Fiz. (JETP)* 34, (1958) 247.
- Pontecorvo, B. 1967. Neutrino experiments and the problem of conservation of leptonic charge, *Zh. Eksp. Teor. Fiz. (JETP)* 53, (1967) 1717.
- Powell, C. F., Occhialini, G. P. S., D. L. Livesey, and L. V. Chilton, 1946. A new photographic emulsion for the detection of fast charged particles, *Journal of Scientific Instruments*, vol. 23, no. 5, article 304, pp. 102–106, 1946.
- ROOT website: <http://root.cern.ch>.
- Saoulidou, N. 2008. [DONUT Collaboration], Final tau-neutrino results from the DONuT experiment, *Phys. Rev. D* 78 (2008) 052002.
- Sato, O. 2015. Discovery of τ Neutrino Appearance in the CNGS Neutrino Beam with the OPERA Experiment. *Phys. Rev. Lett.*, 115(12):121802, 2015.
- Schwartz, M. 1962. Observation of High-Energy Neutrino Reactions and the Existence of Two Kinds of Neutrinos, *Phys. Rev. Lett.* 9 (1962) 36.
- Serio, M. D. and Pastore, A. 2014. "Procedure for short-lived particle detection in the OPERA experiment and its application to charm decays". In: *Eur. Phys. J. C* 74.8 (2014), p. 2986.
- Serio, M. D. 2007. Track reconstruction in the emulsion-lead target of the OPERA experiment using the ESS microscope. JINST, 2:P05004, 2007.
- Sirri, G. 2006. Hardware performance of a scanning system for high speed analysis of nuclear emulsions. *Nucl. Inst. and Meth.*, A568:578–587, 2006.
- Shibata, T. 2001. "Composition and energy spectra of cosmic-ray primaries in the energy range 10^{13} - 10^{15} eV/particle observed by Japanese-Russian joint balloon experiment," *Astroparticle Physics*, vol. 16, no. 1, pp. 13–46, 2001.
- Schwartz, M. 1962. Observation of High-Energy Neutrino Reactions and the Existence of Two Kinds of Neutrinos, *Phys. Rev. Lett.* 9 (1962) 36.

- Terranova, F. 2009. The OPERA experiment in the CERN to Gran Sasso neutrino beam. JINST, 4(04):P04018, 2009.
- Toshito T. 2006. Charge identification of highly ionizing particles in desensitized nuclear emulsion using high speed read-out system. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 556 (2006) 482–489.
- Tufanlı S. 2015. Observation of $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$ appearance with the OPERA experiment. Doktora Tezi. der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern.
- Ushida N. 1984. “Experimental details on lifetime measurements of neutrino-produced charmed particles in a tagged emulsion spectrometer,” *Nuclear and Methods in Physics Research*, vol. 224, no. 1-2, pp. 50–64, 1984.
- Voyvodik L. 1986. ITEP-86-91, Moscow (1986).
- Weinberg, S. 1995. The Quantum Theory of Fields, Volume I Foundations, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Çağın KAMIŞCIOĞLU

Doğum Yeri : Ankara

Doğum Tarihi : 16.01.1984

Medeni Hali : Evli

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Ankara Kurtuluş Yabancı Dil Ağırlıklı Lise (2002)

Lisans : Hacettepe Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Bölümü (2007)

Yüksek Lisans : Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Mühendisliği
Anabilim Dalı (Aralık 2010)

SCI Yayınlar

Kamiscioglu, Ç. vd. (2017). Study of charged hadron multiplicities in charged-current neutrino-lead interactions in the OPERA detector, arXiv:1706.07930 [hep-ex]. basım aşamasında

Kamiscioglu, Ç. vd. (2017). The active muon shield in the SHiP experiment, JINST 12 (2017) no.05, P05011, SHIP

Kamiscioglu, Ç. vd. (2016). Determination of the muon charge sign with the dipolar spectrometers of the OPERA experiment, Journal of Instrumentation, 11(07), 7022-7022

Kamiscioglu, Ç. vd. (2016). NEWS: Nuclear Emulsions for WIMP Search, arXiv:1604.04199 [astro-ph.IM]

Kamiscioglu, Ç. vd. (2015). Discovery of τ Neutrino Appearance in the CNGS Neutrino Beam with the OPERA Experiment, PRL

Kamiscioglu, Ç. vd. (2015). Limits on muon-neutrino to tau-neutrino oscillations induced by a sterile neutrino state obtained by OPERA at the CNGS beam, JHEP

Kamiscioglu, Ç. vd. (2015). Technical Proposal A Facility to Search for Hidden Particles (SHiP) at the CERN SPS, arXiv:1504.04956v1 [physics.ins-det] 20 Apr 2015

Kamıscioglu,Ç. vd. (2014). Observation of ν_{τ} appearance in the CNGS beam with the OPERA experiment OPERA Collaboration (N. Agafonova (Moscow, INR) vd.). Jul 13, 2014.

Kamıscioglu,Ç. vd. (2014).The Angular Matching Method for the Muon Charge Sign Measurement in the OPERA Experiment OPERA Collaboration (N. Agafonova vd.). Apr 23, 2014. 10 pp.

Kamıscioglu,Ç. vd. (2014). Procedure for short-lived particle detection in the OPERA experiment and its application to charm decays OPERA Collaboration (N. Agafonova (Moscow, INR) vd.). Apr 16, 2014.

Kamıscioglu,Ç. vd. (2014).Measurement of TeV atmospheric muon charge ratio with the full OPERA data OPERA Collaboration (N. Agafonova (Moscow, INR) vd.). Mar 2, 2014. 8 pp

Kamıscioglu,Ç. vd. (2013). “New results on $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$ appearance with the OPERA experiment in the CNGS beam”, JHEP, 2013.

Kamıscioglu,Ç. vd. (2013). “Search for $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}$ oscillations with the OPERA experiment in the CNGS beam”, JHEP, 2013.

Kamıscioglu,Ç. vd. (2012). “Measurement of the neutrino velocity with the OPERA detector in the CNGS beam using the 2012 dedicated data” JHEP, 2012.

Güneş, Ç., Meriç, N. (2011). Comparison Of Sample Preparation Techniques Used In Luminescence Dating Methods, 2010 Cankaya University Journal of Science and Engineering Volume 8 (2011), No. 1, 15-25.

Çolak,Ş. Korkmaz, M. Güneş,Ç. Dölek,S.(2009). Investigation Of Spectroscopic And Kinetic Features Of The Radicals Produced In Gamma Irradiated Butylated Hydroxyanisole, Radiation Effects & Defects in Solids, Vol. 164, No.2, 101–112.

Uluslararası bilimsel toplantılarda yapılan sözlü sunumlar

Hosseini,B. **Kamıscioglu,Ç.** Kamıscioglu, M. (2012). *Study of MC Event Reconstruction with OpEmuRec*, 4/05/2012 , OPERA Video Conference

Hosseini,B. **Kamıscioglu,Ç.** Kamıscioglu,M. (2012). *Study of MC Event Reconstruction with OpEmuRec*, 16/05/2012 , OPERA Video Conference

Güneş,Ç. Kamıscioglu,M. (2012). *Data/MC comparison for located CC events*, 5/9/2012, OPERA Video Conference

Tufanlı,S .**Güneş, Ç.** (2012). *A Study on “Exclusive Phi” Angle for Tau and Charm Channels*, 5/9/2012, OPERA Video Conference

Güneş, Ç. Kamıscıoğlu,M.(2012). “*Vertex.txt/ FastFeedbackDS.txt*”, 09/09/2012, OPERA Video Conference

Güneş, Ç. Kamıscıoğlu,M.(2012). *Data/MC comparison of located events*, 4/10/2012, OPERA Video Conference

Güneş, Ç. (2012). *2008-2009 Data Comparisons*, 8/11/2012, OPERA Video Conference

Güneş, Ç. (2012). *2008-2009 Data Multiplicity Distributions* , 14/11/2012, OPERA Video Conference

Kamıscıoğlu, Ç. (2013). “*Comparisons of Location Efficiency and Multiplicity for CC events*”, MG, 22/01/2013, OPERA Video Conference

Kamıscıoğlu, Ç. (2013). “*Comparisons of Location Efficiency and Multiplicity for CC events*”,31/01/2013, OPERA Video Conference

Kamıscıoğlu, Ç. (2013). “OPERA, Emulsion Scanning, Analysis and Recent Results on Muon-Neutrino to Electron-Neutrino Oscillations” On behalf of the OPERA Collaboration, The XXI International Workshop High Energy Physics and Quantum Field Theory, June 23 – June 30, 2013 Saint Petersburg Area, Russia

Kamıscıoğlu, Ç. (2015).” *Data-MC Comparison for Multiplicity Distributions*”, PC Meeting 26/02/2015, OPERA Video Conference

Kamıscıoğlu, Ç. (2015).” *The multiplicity comparison 2010-2012 and 2008-2009*, OPERA Collaboration Meeting - Nagoya - March 2015,

Kamıscıoğlu, Ç. (2016).”MULTIPLICITY DISTRIBUTIONS IN CHARGE - CURRENT NEUTRINO INTERACTIONS" OPERA Collaboration Meeting - Nagoya -March 30-April 1, 2016

Kamıscıoğlu, Ç. (2016).”Multiplicity Distributions in Charge Current Neutrino Interactions" OPERA PC Meeting - Nagoya -May 12- 2016

Kamıscıoğlu, Ç., Katsuragawa T., Naka T. (2016). "First Results of Fading Test for NIT", Directional Detection of Dark with Nuclear Emulsion NEWS meeting LNGS 25, 26- July 2016, Italy

Kamıscıoğlu, Ç. (2016).”Multiplicity Distributions in Charge Current Neutrino Interactions" ,International Workshop on Nuclear Emulsions for Neutrino Studies and WIMP Search, 25-28 October 2016.

Yurtiçi bilimsel toplantılarda yapılan sözlü sunumlar

Güneş,Ç. (2010). *Lüminesans Yöntemlerle Tarihlendirme*, Pop Fizik Seminerleri, 16 Aralık 2010, Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Bölümü,Ankara

Güneş,Ç. Meriç,N.(2010). *Laboratuvar Çalışmaları ve Tarihlendirme*, Luminesans Yöntemlerle Arkeolojik ve Jeolojik Örneklerin Tarihlendirilmesi Paneli,30 Nisan 2010,Gaziantep Fizik Mühendisliği Bölümü,Gaziantep

Güneş,Ç. Meriç,N.(2010). *Laboratuvar Çalışmaları ve Tarihlendirme*, Antropolojik ve Arkeolojik Materyalde Lüminesans Yöntemlerle Tarihlendirme Paneli,18 Mart 2010, Ankara Üniversitesi Dil Tarih ve Coğrafya Fakültesi,Ankara.

Güneş,Ç. Meriç,N.(2010).*Tarihlendirme Çalışmalarında Kullanılan Örnek Hazırlama Teknikleri*,Antropolojik ve Arkeolojik Materyalde Lüminesans Yöntemlerle Tarihlendirme Paneli,2 Mart 2010,Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi,Burdur.

Karagöz,A. **Güneş, Ç. Meriç,N.**(2009). “*Eleme İşleminin TL ve OSL Sinyallerine Etkisi*” Lümidoz III Kongresi, 28-30 Eylül 2009 Bodrum.

Güneş, Ç. Meriç,N.(2009). *Lüminesans Teknikler Kullanılarak Yapılan Tarihlendirme Çalışmalarında Farklı Numune Hazırlama Yöntemlerinin Karşılaştırılması*, Lümidoz III Kongresi ,28-30 Eylül 2009,Bodrum.

Kamışçioğlu C. (2015). “OPERA Deneyine Ait Nötrino Etkileşimlerindeki Çokluk Dağılımları,” *Ankara YEF Günleri 2015, Ulusal Fizik ve Fizik Mühendisliği Çalıştayı*

Poster Sunumları

Güneş, Ç. Dölek,S. Çolak,Ş.(2007). *Butylated Hydroxyanisole (BHA) Örneğinin Radyasyon Duyarlılığının Elektron Spin Rezonans (ESR) Tekniği İle İncelenmesi*. Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi 4. Proje Yarışması, 17-18 Mayıs 2007,Poster Sunumu,

Güneş,Ç. Dölek,S. Çolak,Ş.(2007). *Butylated Hydroxyanisole (BHA) Örneğinin Radyasyon Duyarlılığının Elektron Spin Rezonans (ESR) Yöntemi İle İncelenmesi*, Manyetik Rezonans Spektroskopisindeki Son Gelişmeler,Sempozyum, 16-18 Ekim 2007, Poster Sunumu,

Kamışçioğlu,Ç.(2016). "Multiplicity Distributions of OPERA Experiment ", International Symposium on EcoTopia Science 2015, November 27-29, 2015, Nagoya University, Nagoya, Japan.