Fast Automatic Scanning System For Emulsion Experiments

Proje No: 108T324

Prof.Dr. Ali Murat GÜLER
Mustafa Kamışçıoğlu
Behzad Hosseini
Özgür Altınok
Kadir Öcalan
Cemali Kılınç

Aralık 2012
ANKARA

ÖNSÖZ

Fast Automatic Automatic Scanning System for Emulsion experiments başlıklı TÜBİTAK projemiz 1 Kasım 2009 yılında başlayıp ve 1 Kasım 2012 de tamamlamıştır. Bu proje kapsamında Orta Doğu Teknik Üniversitesine tam otomatik emülsiyon mikroskobu kurulmuş ve kurulan sistem OPERA deneyinde kullanılmaya başlanılmıştır. TÜBİTAK desteği ile kurulan bu laboratuvar, ülkemizde yüksek enerji fiziği alanında veri alımının ve analizinin yapıldığı ilk laboratuvar olma özelliğine sahiptir. Bu proje sonucunda etki faktörü yüksek dergilerde yayınlar yapılmış, doktora ve yüksek lisans öğrencileri yetiştirilmiştir.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....1
İÇİNDEKİLER.....2
ŞEKİL LİSTESİ.....3
TABLO LİSTESİ.....6
ÖZET.....7
ABSTRACT.....8
GİRİŞ.....10
BÖLÜM 1. PROJE SÜRECİ.....12
1.1 Proje süreci ve Genel Bilgiler.....12
1.1.1 Otomatik Tarama Sisteminin Genel Özellikleri.....12
1.1.2 ECC Emülsiyon Filmlerin Tarama ve Analiz Süreci.....13
1.1.3. Otomatik tarama sistemiyle taranan nötrino etkileşimleri.....14
BÖLÜM 2.ANALİZ ÇALIŞMALARI.....16
2.1 Analiz Çalışmaları ve Yapılan Yayınlar.....16
2.1.1. Kozmik müonların yük oranlarının ölçümü analizi.....16
2.1.2. OPERA deneyinde İlk tau nötrino etkileşiminin gözlenmesi.....16
2.1.3. OPERA detektöründe oluşan nötrino etkileşimlerinin çalışılması....17
2.1.4. OPERA deneyinde nötrino salınmlarının araştırılması.....17
2.1.5. Çoklu Coulomb saçılması ile momentum ölçümü 18
2.1.6. Nötrino-hız analizi.....20
2.1.7. 2012 CERN nötrino demeti ile nötrinonun hızının ölçülmesi.....21
2.2. Proje ekibini OPERA deneyinde yürüttüğü analiz çalışmaları.....21
2.2.1. ^{12}C etkileşimlerinin GEANT4 ile simülasyonu.....21
2.2.2. OPERA deneyinde MC simülasyon çalışmaları.....22
2.2.3. Gerçek Veri/MC karşılaştırması.....24
2.2.4. 2008-2009 verilerinin detaylı analizi 24
BÖLÜM 3. SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME..... 26
REFERANSLAR.....51
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU.....52

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1: Kurulan otomatik tarama sistemin fotoğrafı.
Şekil 2: Tarama sisteminden elde edilen ilk emülsiyon film görüntüsü.
Şekil 3: Bulunan izlerin açı dağlımları.
Şekil 4: iz oluşum verimliliği (verimliliğinin iz açısına göre dağlımı).
Şekil 5: Bern(İsviçre) mikroskobunun iz yapılandırma verimliliğinin parçacığın açısına göre dağlımı.
Şekil 6: ODTÜ'de otomatik tarama sonucunda bulunan nötrino etkileşim vörteksinin görüntüsü (XY iz düşümü).
Şekil 7: ODTÜ'de otomatik tarama sonucunda bulunan nötrino etkileşim vörteksinin görüntüsü (XZ iz düşümü).
Şekil 8: Ölçülen muon yük oranlarının müon momentumuna göre değişimi.
Şekil 9 : Ölçülen yük oranının müon'un dik yüzey enerjisine göre değişimi.
Şekil 10: Bulunan τ olayının görüntüsü. Üsteki görüntü nötrino geliş yönüne dik görüntü. Alttaki görüntü ise etkileşim yan görüntüsünü göstermektedir.
Şekil 11: Bükülme topolojisi gösteren pionların dikine momentumlarının momentumlarına göre dağlımı. Üst taralı bölgeler tau sinyalinin olduğu bölgeyi göstermektedir.
Şekil 12 : Çoklu Cuolomb Saçılmasıyla (MCS) ölçülen muon momentumlarının elektronik detektörde ölçülen değerlerle karşılaştırılması.
Şekil 13: ^{12}C iyonun emülsiyon ve Lexan'dan oluşan hedef içerisindeki görüntüsü.
Şekil 14 : ^{12}C iyonun lexan hedef içerisindeki etkileşiminden açığa çıkan iyonlar (mavi: pozitif iyonlar yeşil izler: nötral iyonlar (GEANT4'da yapılandırması).
Şekil 15: ^{12}C etkileşiminde oluşan fragment yük dağlımının gerçek veri ve model karşılaştırılması.
Şekil 16: ^{12}C etkileşiminde oluşan fragment çokluk dağlımının gerçek veri ve model karşılaştırılması.
Şekil 17: ^{12}Cetkileşiminde oluşan Helyum fragmentinin menzil dağlımının gerçek veri ve model karşılaştırması.
Şekil 18: ^{12}C etkileşiminde oluşan Hidrojen fragmentinin menzil dağlımının gerçek veri ve model karşılaştırılması.
Şekil 19: ^{12}C etkileşiminde oluşan Helyum fragmentinin açı dağlımının gerçek veri ve model karşılaştırılması.
Şekil 20: ^{12}C etkileşiminde oluşan Hidrojen fragmentinin açı dağlımının gerçek veri ve model karşılaştırılması.
Şekil 21 : Yapılandıran nötrino etkileşimlerindeki vörteks sayısının dağlımı.

Şekil 22 : Nötrino etkileşim vörteksinin doğru x pozisyonun yapılandıran x pozisyonu arasındaki arasındaki farkın dağlımı.
Şekil 23 : Nötrino etkileşim vörteksinin doğru y pozisyonun yapılandıran y pozisyonu arasındaki arasındaki farkın dağlımı.
Şekil 24 : Nötrino etkileşim vörteksinin doğru z pozisyonun yapılandıran z pozisyonu arasındaki arasındaki farkın dağlımı.
Şekil 25: Nötrino etkileşim vörteksindeki yüklü parçacıkların sayısının dağlımı.
Şekil 26 : Nötrino etkileşim vörteksinde ki yüklü parçacıkların vörteks noktasına olan uzaklıklarının dağlımı (IP).
Şekil 27 : Nötrino etkileşim vörteksinin yapılandırma verimliliğinin doğru nötrino enerjisine göre değişimi.
Şekil 28 : Nötrino etkileşim vörteksinin yapılandırma verimliliğinin doğru nötrino enerjisine göre değişimi (v_μ charm olayları).
Şekil 29: Nötrino etkileşimlerinde oluşan charm hadronlarının uçuş uzunluğunun dağlımı: yapılandırılan MC (artı) ve doğru MC (histogram).
Şekil 30 : Yüklü-akım nötrino etkileşimlerinin x-pozisyon dağlımları: gerçek veri (kırmızı histogram) ve MC (siyah histogram).
Şekil 31 : Yüklü-akım nötrino etkileşimlerinin y-pozisyon dağlımı: gerçek veri (kırmızı histogram) ve MC (siyah histogram).
Şekil 32 : Yüklü-akım nötrino etkileşimlerinde oluşan müon'un x-açı dağlımları: gerçek veri (kırmızı histogram) ve MC (siyah histogram).
Şekli 33 : Yüklü-akım nötrino etkileşimlerinde oluşan müon'un y-açı dağlımları: gerçek veri (kırmızı histogram) ve MC (siyah histogram).
Şekil 34 : Yüklü-akım nötrino etkileşimlerinde oluşan charm hadronun açı (x) dağlımı: gerçek veri (artı) ve MC (histogram).
Şekil 35: Yüklü-akım nötrino etkileşimlerinde oluşan charm hadronun açı (y) dağlımı: gerçek veri (artı) ve MC (histogram).
Şekil 36 : Yüklü-akım nötrino etkileşimlerinde oluşan charm hadronun uçuş uzunluğunun dağlımı: gerçek veri (artı) ve MC (histogram).
Şekil 37: ECC içerisinde bulunan nötrino etkileşimlerine ait cokluk dağlımları (2008 verileri ve elektron-pozitron çiftleri dahil).
Şekil 38: ECC içerisinde bulunan nötrino etkileşimlerine ait cokluk dağlımları (2009 verileri ve elektron-pozitron çiftleri dahil).
Şekil 39: ECC içerisinde bulunan nötrino etkileşimlerine ait cokluk dağlımları (2008 verileri ve elektron-pozitron çiftleri çıkarılmış hali)
Şekil 40: ECC içerisinde bulunan nötrino etkileşimlerine ait cokluk dağlımları (2009 verileri ve elektron-pozitron çiftleri çıkarılmış hali).

Şekil 41: ECC içerisinde bulunan nötrino etkileşimlerinde oluşan müon'un momentum dağlımları (çokluk değeri 1 olan olaylar için).

Şekil 42: ECC içerisinde bulunan nötrino etkileşimlerinde oluşan olayların hadronik enerji dağlımları (çokluk değeri 1 olan olaylar için).

Şekil 43: ECC içerisinde bulunan nötrino etkileşimlerinde oluşan olayların TT enerji dağlımları (çokluk değeri 1 olan olaylar için).

Şekil 44 : Çoklu değeri 1 olan etkileşimlerden ikisinin elektronik detektör görüntüsü.

Şekil 45 : ECC içerisinde bulunan nötrino etkileşimlerinde oluşan olayların vörteks x-pozisyonu.

Şekil 46: ECC içerisinde bulunan nötrino etkileşimlerinde oluşan müon'un momentum dağlımları.

Şekil 47: ECC içerisinde bulunan nötrino etkileşimlerinde oluşan olayların TT enerji dağlımları.

Şekil 48: ECC içerisinde bulunan nötrino etkileşimlerinde oluşan olayların yapılandırılan nötrino enerji dağlımları.

Şekil 49 : Otomatik tarama sistemiyle bulduğumuz bir nötrino etkileşimin yapılandırılmış görüntüleri.

TABLO LİSTESİ

Tablo 1 : Monte Carlo simülasyonuyla hesaplananan arkafon olay sayısı.

Tablo 2 : 2, 4, 6, 8 GeV/c deki pionların ölçülen momentumları ve ölçüm hatası.

Tablo 3 : Monte Carlo doğru değerleriyle, yapılandırılan Monte Carlo momentum değerlerinin karşılaştırılması.

Tablo 4: Nötrino hız ölçümünde ki sistematik hataların kaynakları ve ölçülen değerleri.

ÖZET

Hızlı emülsiyon tarama sistemi, Nükleer emülsiyon tekniğinin kullanıldığı deneylerde veri alımı ve işlenmesininde kullanılmaktadır. Nükleer emülsiyon tekniği geçmişte mikron hassasiyeti gerektiren araştırmalarda başarıyla uygulanmış bir çok keşif bu tekniğin uygulanması sonucunda yapılmıştır. Örneğin 1947 C. Powel'ın Pion'u nükleer emülsiyon tekniğini kullanarak keşfetmiştir. Günümüzde ise nükleer emülsiyon tekniğinin en büyük çapta uygulandığı proje OPERA deneyidir. OPERA detektöründe yaklaşık 12 milyon emülsiyon film kullanıldı. Emülsiyonun filmlerin kapladığı alan yaklaşık 110,000 m^2 dir. OPERA deneyi nötrino salınımlarını, tau nötrino yüklü akım etkileşimleri yoluyla gözlemlemek için tasarlandı. Bu tip etkileşimlerin bulunabilmesi için emülsiyon filmlerin taranması yani ikinci bir veri alımının yapılması gerekiyor. Dolasıyla emülsiyon tarama işlemi, OPERA deneyinde nötrino salınım araştırmalarının en önemli aşaması olarak kabül edilmektedir.

Nükleer emülsiyon tekniği son yıllarda müon spektroskopi, karbon radyoterapi alanlarında da kullanılmaya başlanılmıştır. Bu proje ile bölümümüze kurduğumuz otomatik tarama sistemi nükleer emülsiyon tekniğinin kullanıldığı çalışmalarda kullanılabilecektir. 108T324 nolu proje ile kurulan bu sistem ilk olarak OPERA deneyinde ki nükleer emülsiyon filmlerin taranmasında kullanılmaya başlanılmıştır.

Anahtar Kelimeler:

Emülsiyon Mikroskobu, Nükleer Emülsiyon, Nötrino salınımları, OPERA deneyi

ABSTRACT

Fast automatic emulsion microscope is used for data acquisition and analysis in the experiments in which nuclear emulsion technique is adopted. In past, nuclear emulsion have been successfully used in the experiments and many discoveries have been done by means of this technique. For example in 1947 C. Powel discovered pion using the nuclear emulsion. In recent years, nuclear emulsion technique has been used in the OPERA experiment. The OPERA detector contains 12 millions of nuclear emulsion films, the largest amount of emulsion ever used in high-energy physics. This amount of nuclear emulsion films covers 110,000 m^2 area. The OPERA experiment which was designed to search for muon-neutrino to tau-neutrino oscillations by means of the direct observation of tau-neutrino in an initially pure muon neutrino beam. In order to identify tau neutrino interactions, nuclear emulsion fims must be scanned and analyzed. Therefore in the OPERA experiment the emulsion scanning is considered as an important step to observe the neutrino oscillations.

In recent years, nuclear emulsion technique is also successfully applied in muon spectroscopy and carbon therapy researches. The automatic scanning laboratory established in our university can be also used in the studies that use the nuclear emulsion technique. Our scanning system is now operative and running for the OPERA experiment

Keywords:
Nuclear emulsion, microscope, neutrino oscillation, OPERA experiment

GİRİŞ

OPERA deneyi $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ salınımlarını tau nötrinonun yüklü-akım etkileşimleri yoluyla araştırmak için tasarlandı. Atmosferik nötrino deneylerinin sonuçları doğrultusunda oluşturulan nötrino hüzmesinin enerjisi *tau lepton* üretim eşik enerjisinden yüksektir. Dolasıyla OPERA deneyinde tau nötrino etkileşimleri ve tau lepton bozunumları direkt olarak gözlenebilecektir.

Nötrino salınımları her ne kadar farklı deney ve methodlarla gözlenmiş olsa da, sonuçlar nötrino salınımlarının varlığını dolaylı olarak ispat etmektedir. OPERA ise salınımın hangi nötrino çeşnileri arasında olduğunu/olmadığını direkt olarak gözlemleyebilecek özelliklerle donatılmıştır. Dolayısıyla OPERA deneyinin elde ettiği ve edeceği sonuçlar önemlidir; nötrino fiziği açısından belirleyici olacaktır. OPERA detektörü İtalya'daki Gran Sasso yeraltı laboratuvarında yani CNGS nötrino hüzmesinin üretildiği yer olan CERN' den 730km uzaklığa kuruldu. OPERA detektörü ECC (Emulsion Cloud Chamber) hedef ve elektronik detektörlerden oluşmaktadır [OPERA, 2009]. ECC, nükleer emulsiyon ile kurşun plakaların oluşturduğu sandviç yapıdır. Nükleer emülsiyon, nötrino etkileşimlerinde oluşan yüklü parçacıkların izlediği yolun üç boyutlu görüntüsünü mikrometre duyarlılığında elde edilmesini sağlar. Bu özelliğiyle nükleer emülsiyon, tau lepton gibi çok kısa ömürlü parçacıkların saptanması için çok kullanışlı bir iz detektördür. Öte yandan ECC'nin içindeki kurşun plakalar, nötrino etkileşimleri için gereken ağır kütleyi oluşturur. Aynı zamanda yüklü parçacıkların momentumlarını, elektron ve foton gibi parcacıkların oluşturduğu elektromanyetik duşların ölçülmesine olanak sağlayan ECC, cok özellikli bir iz detektörüdür. Yüzey alanı 10,2x12,7 cm^2 ve kalınlığı 7,5 cm olan ECC, 8,3 kg ağırlığındadır. Bu şekliyle ağır bir tuğlaya benzeyen ECC'den yaklaşık 150,000 adet üretilip, duvarlar oluşturulacak şekilde OPERA detektörüne yerleştirildi. Bu kadar ECC'yi bir yılda üretebilmek icin antropomorfik robotlar kullanıldı. Fakat ECC tek başına zaman bilgisini veremediği için elektronik detektörlerlede desteklenmek zorundadır. Dolasıyla her ECC duvarının arkasına fiberden yapılmış (*Target Tracker*) bir iz detektörü yerleştirilerek nötrino etkileşiminde ortaya cıkan elektrik yüklü parçacıkların izleri yapılandırılmaktadır. OPERA detektörü iki modülden oluşmaktadır. Her modülün ECC'lerden oluşan hedef bölgesi ve müon spektrometresi vardır. Nötrino etkileşmesinden oluşan müonların momentumları ve yükü müon spektrometrede ölçülebilmektedir. Detektörün toplam ağırlıgı 1.25 kilotondur.

OPERA deneyinde Haziran 2008 yılında başlanılan veri alımı Aralık 2012 tamamlandı. OPERA gibi emülsiyon tekniğini kullanılan deneylerde, elektronik veri alımı süresince ve sonrasında emülsiyon veri alımınında yapılması gerekmektedir. Yani nükleer emülsiyon filmler otomatik mikroskoplar kullanılarak taranıp nötrino etkileşimlerinin ECC içerisinde bulunması, analiz çalışmasının en önemli aşamasıdır. Çünkü Fizik sonuçları bu ikinci veri alımında toplanan veriler üzerinden yapılmaktadır.

OPERA deneyinde nötrino etkileşimlerin analizinde takip edilen aşamaları özetlemek gerekirse: tetiklenen nötrino etkileşimlerinde oluşan yüklü parçacıklar elektronik detektörler yardımıyla yapılandırılmaktadır. Yapılandırılan yüklü parçacıkların koordinat bilgileri kullanılarak nötrino etkileşiminin gerçekleştiği ECC tespit edilip bulunduğu yerden (*target wall*) BMS (*Brick Manupulator System*) yardımıyla çıkarılmaktadır. Sonra ki aşamada ECC in dış yüzeyine sabitlenen iki adet emülsiyon film(CS film) ECC ten ayrılıp otomatik taramaya hazır hale getiriliyor. CS filmlerin temel fonksiyonu elektronik detektörde tespit edilen izlerin ECC içerisinde olup olmadığının tespit edilmesidir. CS filmlerde elektronik detektörde oluşan iz/izler bulunmadığı durumda, ECC'ye yeni bir çift CS takılarak tekrar detektöre yerleştiriliyor. Diğer taraftan CS filmlerde elektronik detektörün yapılandırdığı yüklü parçacıkların izleri bulunursa ECC emülsiyon filmleri taranarak nötrino etkileşim noktasına bulunmaya çalışılıyor. CS filmler, İtalya'daki Gran Sasso laboratuarında ve Nagoya üniversitesinde ki otomatik mikroskoplarla taranıyor. ECC filmlerinin tarama işlemi ise Avrupa'da ve japonya'da bulunan 13 laboratuvarda yapılmaktadır. Proje kapsamında kurduğumuz hızlı otomatik tarama sistemi sayesinde dünyada sadece, 13 laboratuvarda yapılabilen tarama ve analiz çalışmalarını yapabilen bir grup olma özelliği kazandık.

Bu raporun 1. Bölüm'ünde proje süreci ile ilgili genel bilgiler verilmiştir. Laboratuvarımıza kurduğumuz tam otomatik emülsiyon mikroskobunun genel özellikleri sunulmuş, tarama süreci ve analiz aşaması anlatılmıştır. Ayrıca laboratuvarımızda tarama ve analizi tamamladığımız OPERA olayları sunulmuştur.

Bölüm 2'de OPERA deneyinde yürütülen analiz çalışmaları ve bu çalışmalar sonucu oluşan yayınlar anlatılmıştır. Proje ekibinin OPERA deneyinde üstlendiği çalışmalar verilmiştir.

Bölüm 3'de ise çıktıların değerlendirmesi yapılmıştır.

BÖLÜM 1. PROJE SÜRECİ

1.1 Proje süreci ve Genel Bilgiler

Mayıs 2008 döneminde sunulan projemiz ikili işbirliği anlaşması kapsamında değerlendirildiği için sonuçlandırlması 2009 yılının sonunu bulmuştur. 23.11.2009 tarihinde proje sözleşmesi taraflarca imzalanmış ve kullanılacak ödenek ancak 2010 yılı başında serbest bırakılmıştır. Buna müteakip kurulacak hızlı tarama sistemi için gerekli olan teçhizatın alımı için teklif alma ve arkasında sipariş verme işlerine geçilmiştir. Özellikle Euro bazıntaki fiyat artışınlarından dolayı proje bütçesini tutturmak problem olmuş, ilgili firmalardan indirim yapmaları istenmiştir. Uzunca bir yazışma sürecinden sonra teçhizat siparişleri Nisan ayının (2010) başında verilebildi. Teçhizatların tamamının bize ulaştırılması Haziran ayında (2010) gerçekleşmiştir. Fakat MİKOS firmasının x, y ve z yönlerinde sistemin güvenli hareket etmesini sağlayan sensörleri öpsiyonel sunması nedeniyle sipariş edilen sisteme bunlar takılmamıştır. Bu sensörlerin sisteme eklenip tekrar bize gönderilmesi ancak 11 Aralık 2010 tarihinde olabilmiştir. Bu gecikmeler proje takvimine de yansımıştır. Sonraki süreç oldukca pürüzsüz devam etmiş, karşılaşılan problemler proje ekibince başarıyla çözülmüştür. Kurunum sürecindeki en önemli zorluklardan biri farklı firmalardan alınan teçhizatların uyumlu bir şekilde çalışmasını sağlamaktı. Bu aşamada kullandığımız yazılımlarda bir takım ayarlama ve eklemeler yapılmıştır.

1.1.1 Otomatik Tarama Sisteminin Genel Özellikleri

Laboratuvarımıza kurduğumuz hızlı otomatik tarama sistemi (Şekil 1) dört ana bölümden oluşmaktadır. Bunlar, mikroskop masası, optik aksam, *CCD* kamera ve bilgisayar aksamı (“frame grabber” ve motor kontrol kartlarını içeren). Kullandığımız masa MICOS firmasının hassas optik sistemler için ürettiği ağır masa tipindedir. otomatik mikroskop sistemi, iki tane *HP* iş istasyonu vasıtasıyla kontrol edilmektedir. *HP* iş istasyonlarından birine kurduğumuz *ORACLE* veri tabanı vasıtasıyla OPERA deneyinin *Lyon* daki veri tabanına ulaşabilmekteyiz. Tarama sistemi SySal [ARMENISA,2005] diye adlandırılan ve OPERA kollaborasyonunda daki Salerno grubu tarafından geliştirilen yazılım vasıtasıyla çalışmaktadır. Bu yazılım temelde CCD kameranın 16 farklı derinlikte aldığı görüntüyü (Şekil 2 'de emülsiyon filminin görüntüsünü gösterilmektedir) sayısallaştırıp (*digitalization*) filtreleme işleminden geçirmektedir.

Emülsiyon filmdeki *fog* yoğunluğuna göre tarama parametreleri ayarlanabilmektedir. Örneğin, fog yoğunluğu yüksek (>11/1000μm^3) olan ECC'ler için parametrelerin eşik sevisini yüksetilmektedir. Eşik değerleri temelde CCD kameranın ölçtüğü sinyal yükseliğine göre filtreleme yapmaktadır. Bu ham veri yine SySal paketi içindeki yazılımlar vasıtasıyla işlenerek yüklü parçacıkların izleri ve bunların oluştuğu vörteks noktaları yapılandırılmaktadır.

Sistemin optik ayarlarının ve genel kalibrasyonun yapılmasından sonra OPERA kollaborasonunda kullanılan referans nükleer emülsiyon filmler kullanarak sistemin performans değerlerini ölçtük. Şekil 3, referans emülsiyon filmdeki pion demetinin açısal dağlımını vermektedir. Bu grafikten de anlaşılacağı gibi tarama sonucunda farklı açılardaki pion demetleri net bir şekilde bulunmuştur. Ayrıca yapılan duyarlılık ve verimlilik ölçümleri sistemin Avrupa'daki benzerleriyle aynı performası gösterdiğini tespit ettik. Örneğin Şekil 4 mikroskop sistemin iz bulma verimliğini göstermektedir. Her açı değerinde yaklaşık ~70% verimlilikte izleri bulduğu görülmektedir. Tarama ve iz bulma verimliliğini etkileyen en önemli faktör emülsiyon filmin iz oluşturma performasının zamanla azalmasıdır. Özellikle, zaman içerisinde doğal radioaktiviteden dolayı emülsiyon film içerisinde *alfa* bozunumu, ve *Compton* elektronları oluşmaktadır bunların yoğunlu MIP (Minimum Ionizing Particle) parçacıkların bulunmasını zorlaştırmaktadır. Ayrıca nükleer emülsiyonun hassasiyeti zaman içinde azalmaktadır. Laboratuvarımıza kuruduğumuz sistemin verimliliğini örneğin Bern (İsviçre) üniversitesindeki sistem ile karşılaştırınca (Şekil 5) bizim sistemin yüklü parçacıkları bulmada daha iyi bir performans gösterdiğini söyleyebiliriz. Bu performans ölçümlerinden sonra, OPERA deneyinde emülsiyon film tarama ve analiz çalışmalarına başladık. İlk tarama ve analiz çalışması için daha önce Napoli (italya) grubunca taranmış ve analiz edilmiş bir ECC emülsiyon filmlerini otomatik mikroskop sisteminde taradık. Bu taramada ki amaç Napoli tarama ve analiz sonuçlarını yeniden üretmeye çalışmaktı. Bu tarama sonucunda nötrino etkileşim noktasını başarıyla bulundu . Şekil 6 ve 7'de bulunan nötrino etkileşiminin topolojisini göstermektedir. Bu nötrino etkileşiminden iki tane yüklü parçacığın oluştuğunu tespit ettik. Bulunan nötrino olayının topolojisi, posizyon ve iz açıları Napoli analiziyle bire bir uyumlu olduğunu gözlemledik. Bu önemli aşamadan sonra laboratuvarımıza belirli periodlarla ECC emülsiyonları gönderilmeye başlanıldı. Bugüne kadar toplam 45 ECC, taranması ve analizi için laboratuvarımıza gönderildi.

1.1.2 ECC filmlerin Tarama ve Analiz Süreci

Laboratuvarımıza gönderilen ECC'lerin taranmasınında izlediğimiz metod şu şekilde özetleyebiliriz:

1- Her ECC için veri tabanından referans X-ışını izlerinin (mark) koordinatlarını okuyoruz. Bunlar tekrar ölçülüp kendi veri tabanımıza kaydedlilmekte. Bu X-ışını izleri bize emülsiyon içerisindeki bir noktanın koordinatını bulmamıza sonrasında da taranan emülsiyon filmlerin hizalanmasında (alignment) kullanılmakta. Her ECC, OPERA detektöründen çıkarınca, açılmadan önce 4 köşe noktasına X-ışını şutlanmaktadır. Dolasıyla ECC içerisindeki 57 emülsiyon film için aynı koordinatlarda 4 referans noktası oluşturulmaktayız.

2- İkinci aşamada Gran Sasso laboratuvarında taranan CS filmlerdeki bulunan izlerin posizyonları ve açıları yine ana veri tabanından indirip sistemize yüklüyoruz.

3-Sonrasında CS film içerinde bulunan yüklü parçacıkların, ECC üzerindeki iz düşüm noktasından başlayarak tarama işlemine geçiyoruz. ECC'nin en sonundaki filmden nötrino geliş yönüne doğru, emülsiyon filmler sırayla taranmaktadır. Nötrino etkileşimin bulunup analiz edilmesi için üç farklı taramanın yapılmasını gerektirmektedir. İlk tarama (CS-ECC connection) CS'de bululunan yüklü parçacıkların izlerinin ECC içerisinde arama taraması. Bu taramada ECC'inin son 10 emülsiyon filmin içerisinde 3x3 mm^2 lik alan taranmakta. Tarama verisinin analiz sonucunda şayet CS'de bulunan yüklü parçacıkların izleri ECC içerisinde de bulunursa, bu izler ikinci aşama taramaya tabi tutulmaktalar. Bu ikinci aşama taramada, ECC içerisindeki 57 emülsiyon film sırasıyla taranarak nötrino etkileşim noktası tespit edilmeye çalışılıyor. Vörteks noktası bulunan etkileşimler, üçüncü bir taramadan geçirilmektedir. Bu taramada nötrino vörteks noktasını ortalayan 1x1 cm^2 alan içerisinde ki 15 emülsiyon filmii taramaktayız (5 film nötrino vörteksin yukarısında, 10 tanesi aşağısında kalacak şekilde). Bu taramanın amacı tau leptonun bozunum vörteksinin bulunması ve bozunum sonucu oluşan yüklü parçacıkların momentumlarının ölçülmesidir.

1.1.3. Otomatik tarama sistemiyle taranan nötrino etkileşimleri

Laboratuvarımıza gönderilen 45 ECC'den 37 tanesinin tarama ve analiz çalışmalarını tamamladık ve sonuçları OPERA kollaborasyon toplantılarında sunduk.

OPERA detektöründe oluşan nötrino etkileşimleri elektronik detektör bilgilerine göre yüksüz-akım ve yüklü-akım olarak sınıflandırılmaktadır. Yüklü-akım etkileşimlerinde, son durumda detektörde yapılandırılmış müon bulunmakta; diğer taraftan yüksüz-akım etkileşimlerinde ise yapılandırılmış bir müon bulunmamaktadır. Yüksüz-akım etkileşimlerinde, yüklü-akım elektron nötrino etkileşimleride olabilir. Fakat bunların oranı oldukça küçüktür. Çünki, OPERA

nötrino demeti %97 oranla müon nötrino içermektedir. Analizini tamamladığımız olaydan 8 tanesi elektronik detektörde yüksüz-akım olarak yapılandırılmış nötrino etkileşimleriydi. Bunlardan 5 tanesinde nötrino etkileşim vörteksi ECC içerisinde tespit edilip, vörteks posizyon bilgileri ve vörteksten çıkan yüklü parçacıkların açıları ölçüldü. Dğer taraftan diğer 3 olayın birinde nötrino etkileşim noktası ECC içerisinde değil fakat CS filmlerin içindeki plastik kutuda olduğunu tespit ettik. Bu tip olaylar analiz çalışmalarına dahil edilmiyor. Diğer bir olayda ECC içerisinde bulduğumuz yüklü parçacığın ECC'yi boydan boya geçtiğini tespit ettik. Bu tip olaylar kolaborasyonda "passing through" diye adlandırılmaktadır. ECC içerisinde bulunamıyan üçüncü olayda ise CS-ECC bağlantısı yapılamamıştır. Yani CS içerisinde bulunan iz/izler ECC içerisinde tespit edilemediği için ECC içerisinde takip edilememiştir. Bu tip olaylar ise "fake prediction" diye adlandırılmaktadır. Geriye kalan 29 olayın tamamı yüklü-akım etkileşimleridir. Bu olayların 13 tanesinde ECC içersinde, nötrino etkileşim vörteksini tespit edip gerekli ölçümleri yaptık. Geriye kalan 16 olayın 11'de CS-ECC bağlantısının olmadığı, 4 olayda ise parçacıkların "passing through" olduğu tepit edilmiştir. Bir olayda ise etkileşimin ECC içerisinde gerçekleşmediği tespit edilmiştir.

Sonuç olarak 37 olaydan 25 tanesinde CS film içerisinde bulunan izler ECC'de de bulunup, analizleri tamalanmıştır. Geriye kalan 12 olayda ise CS izleri bulumadığından bu etkileşimler için ikinci ECC'ler talep edilecektir. Elektronik detektörün yapılandırma verimliliğine bağlı olarak bir nötrino etkileşimi için birden fazla ECC analiz edilmektedir. Analize nötrino etkileşiminin bulunma olasılığı en yüksek olan ECC'den başayıp 2. ve 3. ECC'lerde gerektiğinde detektörden çıkarılıp analiz edilmektedir. Bu 12 olay için 2. ECC ler talep edilecektir. Laboratuvarımızda bulduğumuz nötrino etkileşimlerinden birinin görüntüsü Şekil 49'de gösterilmektedir.

BÖLÜM 2. ANALİZ ÇALIŞMALARI

2.1. Analiz Çalışmaları ve Yapılan Yayınlar

2.1.1. Kozmik müonların yük oranlarının ölçümü analizi

Proje çalışması süresince bizimde katkılarımızla 7 adet kollaborasyon yayını oluştu. Bu yayınladan ilki "Measurement of the cosmic ray muon charge ratio with the OPERA detector" [OPERA, 2010a] çalışmasıdır. Bu çalışmada atmosferik pozitif müonların eksi negatif yüklü müonlara oranı ($R = N_+/N_-$) ölçülüp mevcüt modellerle karşılaştırılmıştır. Bu analiz çalışmasında elektronik detektörde, 2008 yılında alınan veriler üzerinden yapılmıştır. Detektöre ulaşan ve müon spektrometre ile momentumları yapılandırabilen pozitif ve negatif yüklü müonların oranı $R = 1.377 \pm 0.014$ (stat.)$+0.017 -0.015$ (syst.) olarak ölçülmüştür. Bu sonuç literatürdeki [ADAMSON, 2007], [ASHLEY, 1975] diğer ölçümlerle tutarlıdır. Şekil 8 oranın muon momentumuna göre dağlımını göstermektedir. Bu grafikte, yük oranının momentumla yavaşça arttığı görülmektedir. Ayrıca yük oranının dik yüzey enerjisine göre değişimi Şekil 9'de gösterilmiştir. Bu dağılım, farklı modellerle karşılaştırıp $R_\pi = \pi^+/\pi^- = 1.229 \pm 0.001$ ve $R_K = K^+/K^- = 2.12 \pm 0.03$ oranları pion ve Kaon'lar için elde edildi.

2.1.2. OPERA deneyinde İlk tau nötrino etkileşiminin gözlenmesi

OPERA deneyinde 2010 yılında ilk tau etkileşimi ECC içerisinde bulundu. Bu olay nötrino salınımlarının ilk kez direkt olarak gözlemesi anlamına geliyordu. Bu etkileşimle ilgili ölçümler ve sonuçlar, "Observation of a first ν_τ candidate in the OPERA experiment in the CNGS beam" [OPERA, 2010b] makalesinde yayımlandı. Atmosferik nötrino salınımları geçmişte bir çok deneyde araştırıldı. Bunların bazıları Kamiokande[KAMIOKANDEII,1988], Super Kamiokande[SUPERKAMIOKANDE,1998], MACRO[MACRO,2004] ve SOUDAN2[SOUDAN,2005] deneyleridir. Ayrıca reaktör deneylerinden CHOOZ[CHOOZ,2003] ve Palo Verde[PALOVERDE,2002] deneyleri, $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ salınımlarının olmadığını göstermeleri, atmosferik sektörde $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ salınımlarının dominant kanal olduğu sonucunu pekiştirdi. Bu ölçümlerin tamamı dolaylı sonuçlar oldukları için. Nötrino salınımlarına dair belirleyi sonuç direkt ölçümlerden beklenilmektedir. OPERA deneyi 2010 yılında $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ sanımlarına dair ilk direkt gözlemi gerçekleştirdi. 2008-2009 verilerinin yaklaşık 35 % üzerinden yapılan analiz çalışması sonucunda ilk tau etkileşimi bulundu. Bulunan bu etkileşimde tau lepton yüklü bir parçacığa bozunuyor. Şekil 10 τ olayının

topolojisini göstermektedir. Bükülme açısı (kink angle) 20 mrad büyük olan bu bozunumun uçuş uzunluğu (fligth length) 1335 mikro olarak ölçüldü. Tekli bozunum topolojisi sahip bu olay için yapılan geometrik ve kinematik analizler bunun tau bozunumu olduğunu göstermektedir. Örneğin bozunumun dikine momentumu P_T = 0.47 GeV/c ve parent parçacığın diğer hadronlarla yaptığı Φ açısı ise 3.01 rad olarak ölçüldü. Bu değerler seçim kriterlerinin üzerindedir. Diğer taraftam, Tau bozunumuna en önemli arkafon charm bozunumlarından gelmektedir. Kütlesi ve yarılanma ömrü Tau leptona çok yakın olan charm hadron, nötrino vörteksinde oluşan leptonun yapılandırılmadığı durumlarda tau sinyaline arkafon oluşturur. *Monte Carlo* simülasyonu yardımıyla charm bozunumlarından oluşan arkafon 0.007 olarak hesaplanmıştır. Hadron inelastik/elastik etkileşimleride tau sinyaline arkafon oluşturabilir. Bu arkafon FLUKA tabanlı *Monte Carlo* simülsyonu ve pion demetiyle yapılan test ölçümleriyle 0.011 olarak hesaplanmıştır. Bulunan tau olayı için hesaplanan toplam arkafon 0.018 dir. Bulunan olayın arkafon dalgalanmasından kaynaklanma olasılığı %1.8 (2.36σ) olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak bu yayında OPERA deneyinde bulunan ilk tau etkileşiminin analizi sunulmuştur.

2.1.3. OPERA detektöründe oluşan nötrino etkileşimlerinin çalışılması

2011 yılında yayınlanan "Study of neutrino interactions with the electronic detectors of the OPERA experiment" [OPERA, 2011] makalesi 2008-2009 döneminde elektronik detektörde toplanan verilerin analiz sonuçlarını sunmaktadır. Elektronik detektörde yapıladırılan nötrino enerjisi, müon momentumu kullanılarak bjorken *x, y ve* Q^2 değerleri Monte Carlo simulasyonu ile karşılaştırıldı. Monte Carlo simülasyounu ile verilerin uyumlu olduğu görüldü. Ayrıca hadron duş profilinin Monte Carlo ile tutarlı olduğu gözlemlendi.

2.1.4. OPERA deneyinde nötrino salınmlarının araştırılması

"Search for numu to nutau oscillation with the OPERA experiment in the CNGS beam" [OPERA, 2012] başlıklı makale 2008-2009 verilerinin tamamı geliştirilen yeni teknik ve methodlarla analiz edildi. Özellikle charm arkafonu geliştirilen yeni metodlarla düşürüldü. Nötrino vörteksindeki müon elektronik detektörlerce %95 verimlilikle yapılandırılabilmektedir. Dolasıyla elektronik detektörde yapılandırılmayan müonlu olaylar arkafon oluşturma potansiyeline sahiptir. Dolasıyla muon yapılandırma verimliliğinin geliştirilmesi arkafonun azaltılmasında en önemli parametredir. Kollaborasyonda geliştirdiğimiz yeni metod ile nötrino etkileşiminde oluşan yüklü parçacıkların tamamı ECC içerisinde takip edilip elektronik detektörde oluşan sinyal ile karşılaştırıldı. Bu metdola

yapılandılrılmayan muonların %30 geri kazanılmış dolasıyla charm arkafonu azaltılmıştır. Bu metod uygulandıktan sonra hesaplanan arkafon sayıları Tablo gösterilmektedir. Diğer taraftan charm hadron üretim oranları en son CHORUS deneyinde ölçülmüştür. Bu ölçülen oranlar OPERA deneyinin önerisi (proposal) yazılırken bilinen değerlerden oldukça yüksektir. Yeni oranlar dikkate alındığında hesaplanan charm arkafon sayısında önemli bir artış olduğu gözlemlendi. Müon yapılandırılma verimliliğin artırılmasından ve yeni charm üretim oranlarının kullanılmasından sonra hesaplanan arkafon sayıları Tablo 1'de gösterilmektedir. $\tau \rightarrow h$ bozunum kanalı için en önemli arkafon yüksüz/yüklü akım etkileşimlerinde oluşan hadronların inelastik etkileşimleridir. Şayet etkileşim sonucu oluşan nükleer fragmentler gözlemlenmediyse, bu etkileşimler $\tau \rightarrow h$ bozunum kanalı için arkafon oluşturmaktalar. Bu arkafon FLUKA tabanlı Monte Carlo simülasyonu kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuç ayrıca ölçümler ilede test edlmiştir. Üç farklı ölçüm yapılmıştır. İlk ölçümde, nötrino etkileşimlerinde oluşan yüklü parçacıklar ECC içinde takip edilmiştir. Toplam takip edilen uzunluk 14m dir. Bu takip sonucunda, $\tau \rightarrow h$ bozunum kanalının seçim kriterlerini (dikine momentum P_T >200 MeV/c) sağlayan bir etkileşim bulunmamıştır. İkinci analizde ise 4 Gev/c lik pion demeti ECC yönlendirilip analiz edilmiştir. Toplam 314 etkileşim bulunmuş ve bunların 140'ında 20 mrad'dan büyük bükülme (kink) gözlemlenmiştir. Benzer şekilde yapılan ikinci pion şutlama deneyinde yine 314 etkileşim bulunmuş ve bunların 126'sının 20 mrad'dan büyük bükülme olduğu tespit edilmiştir. Bu bükülmelerin dikine momentumlarının momentumlarına göre dağlımı Şekil 11'de gösterilmiştir. Bu grafiklerden de (grafikteki taralı bölge) görüleceği üzere sinyal bölgesinde hadron etkileşimlerinden kaynaklı olay görülmemektedir. Ayrıca yine yeni geliştirilen metodla, hadron etkileşimlerinde oluşan ağır fragmentlerin bulunma verimliliği artırılmıştır. Bu artış arkafonun %20 azalmasını sağlanmıştır. Yapılan yeni arkafon ve verimlilik hesapları dikkate alındığında bulunan tau olayının signifikansı %95 olarak hesaplandı.

2.1.5. Çoklu Coulomb saçılması ile momentum ölçümü

ECC mikron hassasiyetinde bir iz detektörü olma özelliğinin yanında, yüklü parçacıkların momentumlarını, elektron duşlarının enerjilerini yüksek çözünürlükte ölçülebilmektedir. Bu özellikleriyle çok fonksiyonlu bir detektör yapısıdır. "Momentum measurement by the Multiple Coulomb Scattering method in the OPERA lead emulsion target" [OPERA, 2012b] makalesinde çoklu Coulomb saçılması (MCS) kullanılarak yüklü parçacıkların momentumları ölçüldü. Momentum ölçümü, yüklü parçacıkların nükleer emülsiyon içerisinde ki açı ve poziyon bilgileri kullanılarak yapılmaktadır. Açı bilgisine dayalı ölçüme "anglular method" ve pozisyon bilgisine dayalı momentum ölçümüne ise "position method"

diye adlandırımaktadır. Hangi metodun daha iyi sonuç vereceği açı ve pozisyon ölçümündeki çözünürlüğe bağlıdır. Açısal metod emülsiyon filmlerin hizalanma (alignment) hassasiyetine bağlı olmadığı için çoğu durumlarda daha iyi sonuç verir. Emülsiyon film içerisindeki açı çözürlüğe bağlı olarak 100 MeV/c den 4-5 GeV/c kadar yüklü parçacıkların momentumları ECC'de ölçülebilmektedir. Bu çalışmada angular method kullanılarak farklı momentumlarda şutlanan pion demetinin momentumları ölçüldü. Bu metodun iyi sonuç verebilmesi için yüklü parçacığın açısının mümkün olduğunca çok sayıda emülsiyon film içerisinde ölçülmesi gerekmektedir. Bir emülsiyon film ve bir kurşun plakadan oluşan yapı hücre olarak adlandırılmaktadır. Her hücrede ölçülen açıların farkları alınarak saçılma açısı hesaplanmaktadır. Bu açı farkı ile parçacığın momentumu arasındaki bağlantıyı

$$\theta_0 = \frac{13.6}{(pc\beta)} \times \sqrt{\frac{x}{X_0}} \times \left[1 + 0.038 \ln\left(\frac{x}{X_0}\right)\right]$$

denklemi vermektedir. Bu denklemde p parçacığın momentumu, x parçacığın ECC içerisinde katettiği mesafe ve X_0 ışınım uzunluğudur (radiation length). Bu denklemde *x* yerine hücre sayısı kullanılarak

$$\theta_0 \approx \frac{13.6}{(pc\beta)} \times \sqrt{\frac{N_{\text{cell}}}{5.6}} \times \left[1 + 0.038 \ln\left(\frac{N_{\text{cell}}}{5.6}\right)\right]$$

denklemini elde edebiliriz. Bu denklemde N_{cell} parçacığın geçtiği hücre sayısını göstermektedir. Dolasıyla saçılma ve hücre sayısı kullanırak parçacığın momentumu ölçülebilmektedir. Bu metod 4GeV/c de şutlanan pionlara uyguladığımızda momentumlarını 3.97±0.01(stat.)±0.08 (sys.) GeV/c olarak ölçtük. Diğer taraftan aynı metod Monte Carlo verileri üzerinde de test edildi. Farklı momentum değerlerinde üretilen pionlar OPERA yapılandırma ve analiz programından geçirildikten sonra momentum algoritması uygulanarak momentumları ölçüldü. Doğru (true) mometum değerleriyle yapılandırılan momentum değeri Tablo 2'de verilmektedir. Elde edilen momentum çözünürlüğü %14 ile %26 arasındadır. Ayrıca Şekil 12 Monte Carlo (MC) verilerilerinin yapılandırılan momentumları ile gerçek verilerin karşılaştırırması verilmektedir. MC verileriyle gerçek verilerin tutarlı olduğu görülmektedir. Bu metod ayrıca OPERA muon spektrometresinde yapılandırılan momentum değeriylede karşılaştırılmıştır. OPERA spektrometresinde yapılandırılan düşük momentumlu müonlar, ECC içerisinde bulunup yapılandırılmış ve MCS algoritması uygulanarak momentumları ölçülmüştür. Çoklu Coulomb saçılması ile elde edilem momentum değerleri ile elektronik detektörün ölçtüğü momentum değerleri karşılaştırıldığında ölçümlerin tutarlı olduğunu görülmektedir (Tablo 3). Dolasıyla bir çok veri ile test edilen bu algortima yüklü parçacıkların momentumlarının

ölçülmede oldukça başarılı sonuçlar verdi. Bu algoritma ECC içerisinde bulunan bütün yüklü parçacıkların momentumlarının ölçülmesinde kullanılmaktadır.

2.1.6. Nötrino-hız analizi

OPERA deneyinin öncelikli amacı nötrino salınımlarını araştırmak. Diğer taraftan, OPERA detektörü (Gran Sasso) ile nötrino kaynağı (CERN) arasındaki mesafenin uzun (732 km) olmasından dolayı, nötrinonun hızını yüksek hassasiyette ölçmek mümkündür. "Measurement of the neutrino velocity with the OPERA detector in the CNGS beam" [OPERA, 2012c] başlıklı makale çalışmasında nötrino hız ölçümünü konu almaktadır. Bu tip ölçümlerin yapılabilmesi için pozisyon ve zaman bilgisinin çok hassas bir şekilde ölçülmesi gerekmektedir. Çok temel bir ölçüm olan hız ölçümü için aradaki mesafenin ve uçuş zamanın bilinmesi yeterlidir. Geçmişte bu tip ölçümler yalnızca iki hızlandırıcı deneyinde yapılmıştır. Ama en belirgin sonuç süpernova (SN1987A) patlaması sonucunda oluşan nötrinoların Kamiokande [KAMIOKANDE, 1987], Baksan[BIONTE, 1987] ve IMB[LONGO,1987] deneylerinde tespit edilmesi yoluyla elde edilmiştir. Süpernova nötrinolarının ölçümü yoluyla nötrinonun hızına $|(v-c)/c| < 2.0\times10^{-9}$ üst limiti bulunmuştur. Supernova nötrinolarının en temel özelliklerinden biri enerjilerinin düşük (E_v = 10 MeV) olmasıdır. OPERA deneyinde ise nötino demetinin ortalama enerjisi 17 GeV dir. Ayrıca, nötrinonun katettikleri mesafenin uzunluğu karşılatırıldığında süpernova nötrinoların menzili çok daha uzundur. Hızlandırıcı deneylerinde nötrinonun uçuş zamanı ve katettiği mesafe çok daha hassas ölçülebilmektedir.

OPERA deneyinde nötrino hız ölçüm analizi, 2009, 2010 ve 2011 yıllarında alınan, 15223 nötrino etkileşimi üzerinden yapıldı. Nötrino üretim noktasına ait zaman bilgisi, karbon hedefden 743 m önce bulunan "Beam-Current Transformer" (*BCT*) detektörü vasıtasıyla ölçülmektedir. BCT'de ölçülen CERN- SPS'deki her döngüye ait protonun zaman bilgileri kullanılarak (toplanarak) proton dalga-formu (*PDF*) oluşturulmaktadır. OPERA detektöründe oluşan nötrino etkileşimlerinin hangi ekstraksiyon'dan geldiği bilindiği için bu iki dalga formu *maximum likelihood* tekniği kullanarak karşılaştırıldığında nötrino uçuş zamanı bulabilmekteyiz. Bu zaman bigilerinin tamanımı Universal Time Coordinate(UTC) referans alınarak yapılmaktadır. Nötrino hız ölçümünün en önemli aşaması CERN ve Gran Sasso'da ölçülen zaman bilgilerinin senkronizasyonudur. Standart GPS sistemleri bu senkronizasyonu 100 ns mertebesinde yapabilmekteler. Bu hassasiyet, yüksek duyarlılıkta bir nötrino hız ölçümü için yeterli değildir. Dolasıyla yüksek çözünürlükte senkronizasyonu apılabilmesi için zaman ve pozisyon hassiyeti yüksek yeni atomik saatler ve GPS alıcıları CERN'e ve Gran Sasso laboratuvarına yerleştirildi. Farklı method ve sistemlerle yapılan ölçümler senkronizasyonu hassasiyetinin 2 ns mertebesinde olduğunu doğrulandı.

Nötrinonun katettiği mesafe is jeodezi tekniği kullanılarak ölçüldü. Bu ölçüm farklı zamanlarda tekrar edilerek olası kaymalar tespit edildi. Çok küçük değişimlerin bile tespit edebilen bu teknikle, 2009 yılında Gran Sasso'da gerçekleşen depremden dolayı yer kabuğunun 7 cm oynadığı tespit edilmiştir. Jeodezi tekniği le nötrino kaynağı ile OPERA detektörünün arasındaki mesafe 730534.61±0.20 m olarak ölçüldü. Nötrinonun uçuş zamanı ve katettiği mesafe kullanarak nötrinonun hızı $|(v-c)/c| = 2.7 \pm 3.1(stat)+3.4-3.3 (sys.)x10^{-6}$. Ölçülen sistematik hataların kaynakları ve ölçülen değerleri Tablo 4'de verilmiştir. Bu ölçüm, Mart 2012'de CERN'de oluşturulan kısa zaman aralıklı (demet aralığı 524 ns) ve düşük yoğunlukta daki nötrino demetiyle de tekrar edildi. Bu yeni ölçüm ilk ölçüm sonuçlarını doğruladı.

2.1.7. 2012 CERN nötrino demeti ile nötrinonun hızının ölçülmesi

CERN'de Mayıs ayında nötrino hız ölçümü çalışmaları kapsamında yeni bir nötrino demeti üretti. Bu yüksek yoğunlıkta ve kısa demet aralıklarındaki nötrinolarla hız ölçümü çalışması tekrar yapıldı. Bu analizin sonuçları "Measurement of the neutrino velocity with the OPERA detector in the CNGS beam using the 2012 dedicated data, JHEP'de yayına kabül edildi " makalesinde yayınladı. Bu analiz çalışmasında yukarıda bahsedilen teknik ve metodlar kullanıldı. Elde edilen sonuç OPERA'nın önceki sonuçlarını doğruladı. Daha yüksek hassasiyetle ölçülen bu yeni ölçümde nötrinonun hızı %95 güvenirlikle $-1.8 \times 10^{-6} < (v- c)/c < 2.3 \times 10^{-6}$ olarak ölçüldü.

2.2. Proje ekibinin OPERA deneyinde yürüttüğü analiz çalışmaları

Yayına dönüşen yayınların yanında proje ekibinin görev aldığı ve yürüttüğü çalışmalrdan önemli olanları aşağıda özetlenmiştir.

2.2.1. C12 etkileşimlerinin GEANT4 ile simülasyonu

Kanser detavisinde, radyoterapi oldukça etkin bir tedavi şeklidir. Bu tedavide proton, elektron ve ağır iyon kullanılarak tümörlü bölgenin yok edilmesine çalışılmaktadır. Özellikle, bu tedavide C12 kullanımı son yıllarda yaygınlaşmıştır. Ağır iyon radyoterapide, tümörlü bölgeye yönlendirilen C12 iyonları hücre içerisinden geçerken "inelastic" nükleer etkileşimler yaparak ikincil fragmentasyonlar oluşturuyorlar. Bu fragmentasyonlar sağlıklı hücrelere zarar verdikleri için, doz ayarlamasının hassas yapılması tedavinin başarısı için oldukca önemlidir. Bu çalışmanın temel amacı doz ayarlamasında kullanılan modellerin

gerçek veri ile hangi mertebede uyumlu olduğunu test etmektir.

Bu çalışmada nükleer emülsiyon tekniği ile ölçülen C12 fragmentasyonlarının özellikleri, GEANT4 fragmentasyon modelleriyle karşılaştırıldı. GEANT4 [AGOSTINELLI, 2003] özellikle parçacıkların/iyonların madde içerisindeki hareketlerinin ve etkileşimlerinin simülasyonunda yaygın bir şekilde kullanılan çok kapsamlı bir paket programdır.

Yüksek lisans öğrencisi Navid Hossesini tarafından yürütülen bu çalışmada G4LightIon, G4Binary, G4QMD ve G4Wilson gibi hadronik modelleri kullandık. Bu karşılaştırmayı yapabilmek için öncelikle GEANT4 kütüphanelerini kullanılarak, Lexan (hücreye yakın malzeme) ve nükleer emülsiyon filmlerden oluşan detektör yapısını modelledik (Şekil 13). Bu yapıda, Lexan C12 iyonları için hedef bölgeyi oluşturmaktadır. Nükleer emülsiyon ise etkileşim sonucu açığa çıkan fragmentasyonların tespit edilmesine olanak sağlayan hassas iz detektörü olarak tasarlanmıştır. Modellediğimiz bu detektör yapısı, gerçek veri alımında kullanılan yapıyla bire bir aynıdır [DE LELLIS, 2011]. Bu yapıya 400 MeV C12 iyonları gönderirerek oluşan fragmentasyonların özellikleri (açısal dağılımları, enerjileri, bağıl oranları) gerçek verilerle karşılaştırıldı DE LELLIS, 2011]. Yaptığımız karşılaştırmalarda(Şekil 15-16), fragmetlerin ölçülen yük ve çokluk dağılımları ile G4LightIon ve G4Binary modellerinin tutarlı olduğunu gözlemledik. Fakat çokluk dağılımında, özellikle 5'den sonra bütün modellerin veri ile tutarsız olduğunu görülmektedir. Bunun bir sebebi; çokluk ölçümündeki verimliliğin çokluğa bağlı olarak azılıyor olması, özellikle yüksek çoklukta (>5) verimliğin çok düşük olmasından dolayı modeller ile veri arasında belirgin bir fark oluştuğudur. Yaptığımız simülasyonda bütün özelliklerin aynı verimlilikle ölçüldüğünü kabül ettik. Diğer taraftan en belirgin tutarsızlık, fragmentasyonların açı dağlımında görülmektedir (Şekil 19-20). Bunun sebebi çok belirgin değildir. Diğer taraftan menzil ("range") dağlımlarına baktığımızda Hidrojen nin menzili ile modellerin oldukça tutarlı olduğunu görmekteyiz. Diğer taraftan Helyum'un menzili dağlımında veriler modellerin öngörüsünden daha uzun menzil değerine sahiptir (Şekil 17-18). Bu çalışma Navid Hosseini'nin yüksek lisans tez çalışması olarak sonuçlandı veTFD kongresinde sözlü bildiri olarak sunuldu [HOSSEINI, 2011].

2.2.2. OPERA deneyinde MC simülasyon çalışmaları

OPERA deneyinde veri analizi "OpRelease" programı kullanılarak yapılmaktadır. OPERA içerisinde bizimde katkılarımızla yazılan bu program hem MC simülasyonu hemde gerçek veri analizi için temel yapıdır. Bu çalışmada, deneyde kullandığımız yapılandırma algoritmasının performasını test etmek için doğru (truth) MC verileriyle yapılandırılan MC

verilerini karşılaştırdık. Bu çalışma kapsamında OPERA deneyinde "NGEN" olay jeneratörü ile üretilen nötrino etkileşimleri "OpRelease" programından geçirilerek yapılandırıldı. Yapılandırılan olayların kinematik ve geometrik özellikleri doğru (truth) değerlerle karşılaştırıldı. Şekil 21'de görüleceği üzere yapılandırılan nötrino etkileşimlerinin %53'de vörteks sayısı sadece birdir. Etkileşimlerin %17 'de ise nötrino vörteksi yapılandırılmamıştır. Bu olayların önemli bir kısmı "Quasi-elastic" veya "Resonance" etkileşimlerden dolayıdır. Bu etkileşimlerde emülsiyon içerisinde sadece müon izi yapılandırılmaktadır. Diğer taraftan vörteks noktasını oluşturabilmek için en az iki yüklü parçacığın izine ihtiyacımız olduğundan nötrino etkileşim vörteksini yapılandırmak bu tip etkileşimler için mümkün olamamaktadır. Geri kalan olaylarda, ise birden fazla nötrino vörteksi yapılandırılmıştır. Bu olayların bir kısmında gerçekten de birden fazla vörteks içermektedir. Charm hadronların oluşum ve bozunumlarından, hadronların ikincil etkileşimlerinden ve elektron çiftlerinin oluşumundan ("gamma conversion") dolayı. Fakat çoklu vörteks durumlarının bir kısmı da ise yapılandırılan vörteks gerçek değildir ("fake vertex"). Bu "fake" vörteksler tarama sisteminin ve yapılandırma algoritmasının verimsizliğinden kaynaklanmaktadır.

Şekil 22, 23 ve 24, yapılandırılan nötrino etkileşimlerinin pozisyonları ile doğru MC pozisyonlarının arasındaki farkı göstermektedir. Bu dağlımlar vörteks noktasını doğru bir şekilde yapılandırıdığını göstermektedir. Diğer taraftan vörteks pozisyonun z-projeksiyona bakıldığında yaklaşık 108 mikronluk bir kayma olduğu görülmektedir. Bunun temel nedeni z- projeksiyonun (nötrinonun geliş yönü) izlerin açı ve posizyon çözünürlüğüne daha duyarlı olmasıdır. Şekil 25 ve 26 nötrino etkileşim vörteksindeki yüklü parçacıkların sayısını ve bunların vörteks noktasına olan uzaklıklarını göstermektedir. Ortalama çokluk değeri 4 dür. Şekil 27 ise vörteks yapılandırma verimliliğinin gerçek nötrino enerjisine göre değişimi verilmektedir. 10 GeV ve yukarısında bir plato olduğu görülmektedir.

Yapılandırma verimliliğini ν_μ charm (son durumda charm hadron olan $\nu\mu$ yüklü-akım olayları) olayları içinde çalışıldı. Charm hadronlar nötrino salınımlarına en belirgin arkaplanı oluşturdukları için, üretim oranlarının ve yapılandırma verimliliklerinin hassas bir şekilde hesaplanması gerekmektedir. Şekil 28 ν_μ charm olaylarının yapılandırma verimliliğinin nötrino enerjisine göre değişimi göstermektedir. Bu dağlım, normal ν_μ olaylarının yapılandırma verimliliğine benzer bir davranış göstermektedir. Şekil 29'da ise yapılandırılan charm hadronlarının uçuş uzunluğu ile gerçek uçuş uzunluğunun karşılaştırılması verilmiştir. Bu grafikten görüldüğü üzere nötrino etkileşim vörteksi ve charm bozunum vörteksi doğru bir şekilde yapılandırılmaktadır. He iki dağılım bir biri ile son derece uyumludur. Bu çalışma proje elamanlarından Mustafa Kamışçıoğlu'nun

Yüksek Lisans tez çalışması kapsamında yürütülmüştür. OPERA deneyinde yapılan en kapsamlı MC simülasyon çalışmasıdır. Bu çalışmanın sonuçları OPERA kollaborasyon toplantılarıda sunulmuştur.

2.2.3. Gerçek Veri/ MC karşılaştırması

Doğru MC verileri ile yapılandırılan nötrino verilerinin oldukca tutarlı olduğunu yukarıda bahsedilen çalışmada gösterilmiştir. Sonraki aşama ise yapılandırılan MC verileriyle gerçek verinin karşılaştırma çalışmadır. Bu çalışma proje elamanlardan Behzad Hosseinin Yüksek Lisans Tez çalışması olarak sonuçlandırılmıştır. Şekil 30, 31 yapılandıran ν_μ yüklü-akım etkileşimlerinin vörteks pozisyonu ile gerçek verinin vörteks poziyonun karşılaştırılması verilmektedir. Gerçek veri ile yapılandırılan MC verileri oldukça turarlıdır. Şekil 32 ve 33 ise müon açı dağlımlarının karşılaştırılması verilmektedir. Bu dağlımlarıda görüldüğü üzere yapılandırılan MC verileri gerçek veriyi oldukça iyi bir şekilde temsil etmektedirler. Veri/MC karşılaştırması charm olayları içinde yapıldı. Şekil 34 ve 35'de ν_μ charm olaylarında müon'un açı değerlerinin karşılaştırılması verilmiştir. Şekil 36 ise uçuş uzunluğunun karşılaştırmasını göstermektedir. Charm verilerinin istatiksel büyüklüğü, kesin bir sonuca varmak için yeterli değildir. Buna rağmen gerçek veri ile MC arasında bir tutarlılık olduğunu söyleyebiliriz. Bu çalışmanın sonuçlarıda OPERA kollaborasyon toplantısında sunulmuştur.

2.2.4. 2008-2009 verilerinin detaylı analizi

2008-2009 yıllarında OPERA detektöründe kaydedilen nötrino etkileşimlerinin analizi tamamlandı. ODTÜ grubu olarak farkı laboratuvarlarda taranıp bulunan nötrino etkileşimlerinin özelliklerini karşılaştırdık. Bu çalışmanın temel amacı, farklı sistem ve metodlarla taranan ve ECC içerisinde tespit edilen nötrino etkileşimlerinin özelliklerinde bir farklılık olup olmadığını anlamaktı. Bu çalışma kapsamında ilk olarak 2008-2009 verilerine ait yüklü-akım etkileşimlerini analiz ettik. Bu karşılaştırma için 2008-2009 verilerini 3 gruba ayırdık. Bunlar Japon verisi, İtalya verisi ve İsviçre verisi şeklindeydi. Hem ECC içerisinde ölçülen parametreler hem de elektronik detektörde ölçülen parametreler karşılaştırıldı. ECC içerisinde nötrino etkileşimlerine dair ölçülebilen en önemli parametre çokluk dağlımıdır. Ayrıca vörteksteki tespit edilebilen yüklü parçacık sayısı, tarama verimliliğini yansıtan en önemli parametredir. Dolasıyla laboratuvar arasında tarama verimliliği açısında bir fark olup olmadığı çokluk dağlımlarına bakılarak anlaşılabilir. Bu çalışmada ilk olarak çokluk dağlımlarını karşılaştırdık. Şekil 37 ve 38 üç gruba ait çok dağlımları gösterilmekte. Bu dağlımlara elektron-pozitron çiftleride dahil edilmiştir. Bu grafiklerden

anlaşılacağı üzere, çokluk değeri 1 olan nötrino etkileşimlerinde, İtalya ve Japonya arasında belirgin bir fark vardır. Bu fark 2009 verilerinde daha belirgin bir şekilde görülmektedir. İsviçre'ait (Bern) veriler hem Japon hemde İtalya ile uyumlu kabül edilebilir (1 σ içinde). Benzer şekilde elektron-pozitron çiftleri çıkarıldıktan sonraki dağlımlar Şekil 39 ve 40 görülmektedir. Benzer farklılıklar bu dağlımlarda da mevcüttür. Sonuç olarak çokluk değeri 1 olan nötrino etkileşim sayılarının oranı italya verilerinde daha fazladır. Çokluk değeri 1 olan etkileşimlerin önemli bir kısmı yarı elastik (Quasi-Elastic) tipte etkileşimlerdir. Yani son durumda müon ve proton oluşmaktadır. Fakat oluşan proton çoğunlukla düşük enerjii olduğu için ECC ve elektronik detektörde sadece müon yapılandırılabilmektedir. Dolasıyla bu tip etkileşimlerde çokluk sayısı sadece 1 dir. Bu etkileşimlerin kinematik özelliklerini anlamak için elektronik detektörde yapılandırılan, enerji ve momentum değerini inceledik. Şekil 41, 42 ve 43'de verilen grafiklere bakıldığında momentum ve enerji dağlımları açısından Japonya, İtalya ve İsviçre arasında belirgin bir fark olmadığı görülmekte. Fakat TT enerji dağlımındaki uzun kuyruk (tail), bu olaylarda *deep inelastic* saçılmadan kaynaklı olaylarında olduğu ihtimalini akla getirmektedir. TT enerjisi 600 MeV den büyük olan olaylardan bazılarına (Şekil 44) baktığımızda bu olayların kesinlikle Quasi Elastic tipte bir etkileşim olmadıklarını alıyoruz. Elektronik detektördeki yoğun aktivite bu etkileşimlerde birden fazla yüklü parçacığın oluştuğunu göstermektedir. Bu tip olayların tekrar gözden geçirmesi gerektiğini OPERA kollaborasyon toplantısında rapor ettik. Diğer taraftan bütün yüklü-akım etkileşimlerin yapılandırılan müon momentum ve enerji dağlımlarına bakıldığında belirgin bir farklılığın olmadığını tespit ettik. Şekil 45,46, 47 ve 48 bu dağlımların histogramları verilmektedir. Sonuç olarak bu çalışma kollaborasyon içinde ilgiyle karşılanmış olup OPERA verilerinin anlaşılmasına yönelik önemli bir çalışma olarak kabül görmüştür. Bu analiz çalışmasını doktora öğrencilerimiz Çağın Kamışçıoğlu ve Mustafa Kamışçıoğlu yürütmektedir. 2010-2011 verileri içinde benzer çalışmayı başlattık.

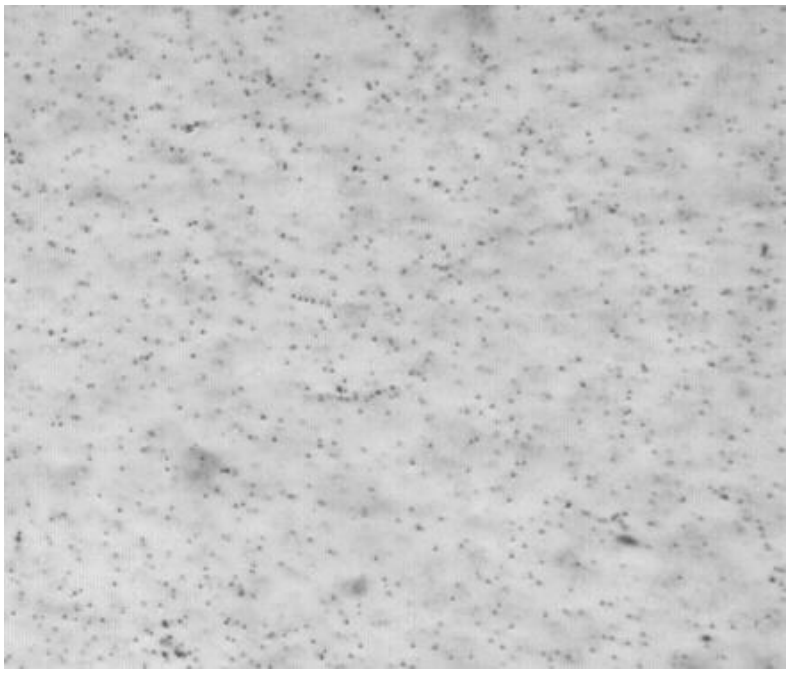
BÖLÜM 3. SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME

Türkiye’de ilk kez kurulan bu otomatik emülsiyon tarama sistemi, Türkiye’nin emülsiyon tekniğine dayalı deneylerde daha büyük sorumluluk almasını ve beraberinde önemli katkılar yapmasını sağladı. Bunun ilk örneği olarak OPERA deneyinde emülsiyon taraması ve analiz yapabilen bir grup özelliği kazanmamızı söyleyebiliriz. Bilindiği üzere, veri analizi için veriye ilk elden ulaşmak analizini de ilk yapma imkanını vermektedir. Laboratuvarımızda tarama sonucunda bulduğumuz nötrino etkileşimlerinin analizlerini öğrencilerimizle yaptık.

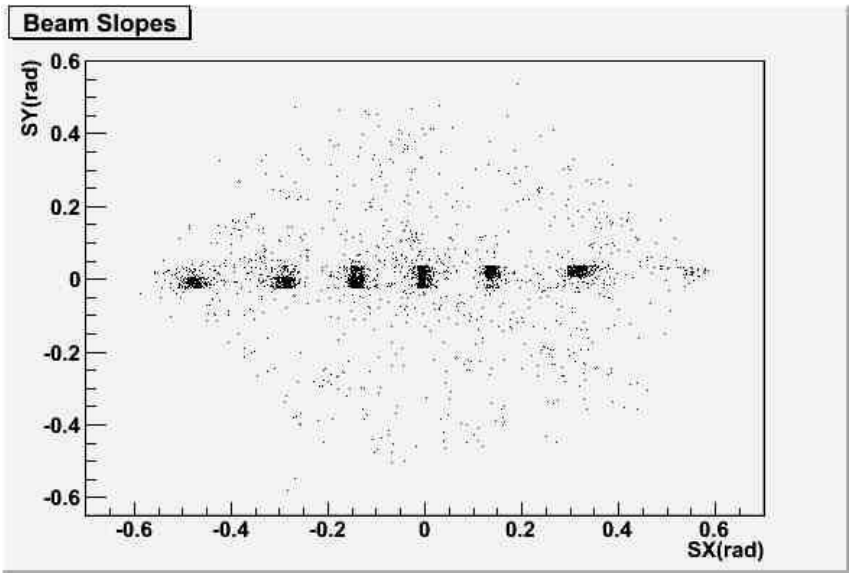
Proje sürecince yetiştirdiğimiz öğrencilerden üçü (Serhan Tufanlı, Özgür Altınok, Behzad Hosseini) doktora çalışmasını yapmak için yurt dışında ki saygın üniversitelerden kabül aldılar ve eğitimlerine yurt dışında devam ediyor. Bu öğrencilerin doktoralarını tamamlayıp Türkiye'ye dönmeleri durumunda Nötrino fiziği alanında yetişmiş insan gücüne katkıda bulunacaklar. Bu proje çalışması döneminde bizim de aktif görev ve sorumluluk aldığımız çalışmalar etki değeri yüksek dergilerde yayımlandı. Poster ve bildiri sunumları yaptık. Bu çalışmalar sonucunda beş tane yüksek lisans tezi oluştu. İki tane doktora tez çalışması (Mustafa Kamışçıoğlu ve Çağın Güneş) devam etmektedir. Çok sayıda lisans öğrencisi biterme projelerini bu proje kapsamında yaptılar.

Diğer taraftan, bu projemize paralel olarak İtalya'dan sağladığımız FAI fonlarıyla öğrencilerimiz Gran Sasso laboratuvarında ki aktivitelere katıldılar. Proje süresince sağladığımız fon miktarı yaklaşık 100,000 Euro (20 ay) dur. Sonuç olarak TÜBİTAK'dan aldığımız destek miktarına yakın yurt dışından fon sağladık. Bu fonlar, OPERA'daki çalışmalarımızın sağlıklı bir şekilde yürümesine imkan sağlamıştır. Öğrencilerimiz bu fonları kullanarak uluslararası büyük bir projenin bir parçası olmuş, Gran Sasso laboratuvarındaki çalışmalara aktif olarak katılmışlardır.

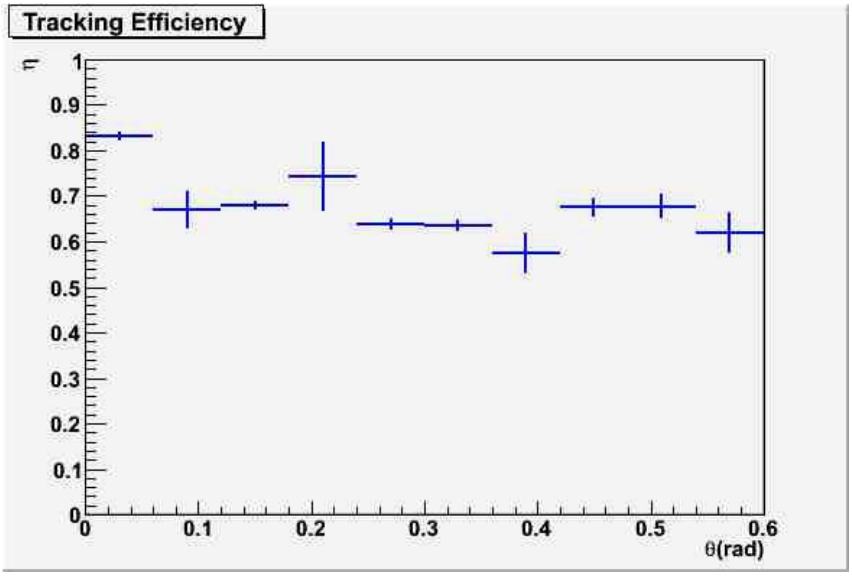
Şekil 1: Kurulan otomatik tarama sistemin fotoğrafı.



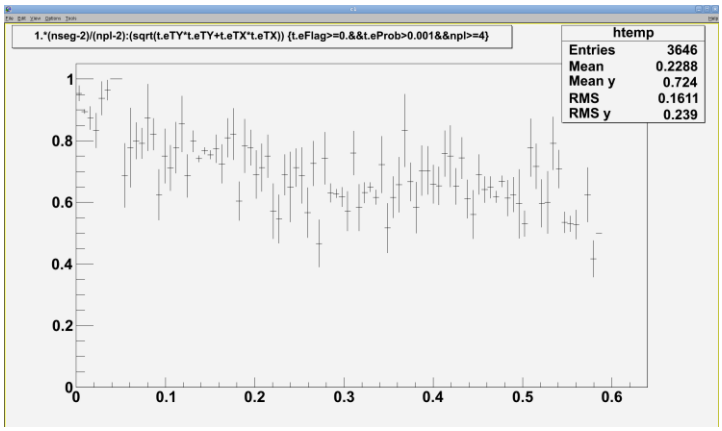
Şekil 2: Tarama sisteminden elde edilen ilk emülsiyon film görüntüsü.



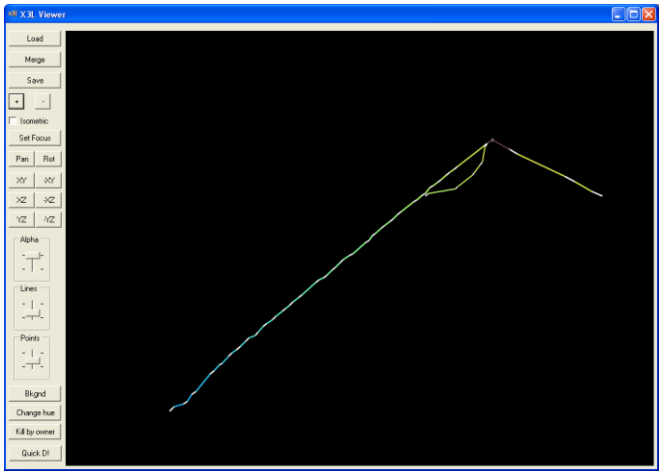
Şekil 3: Bulunan izlerin açı dağlımları.



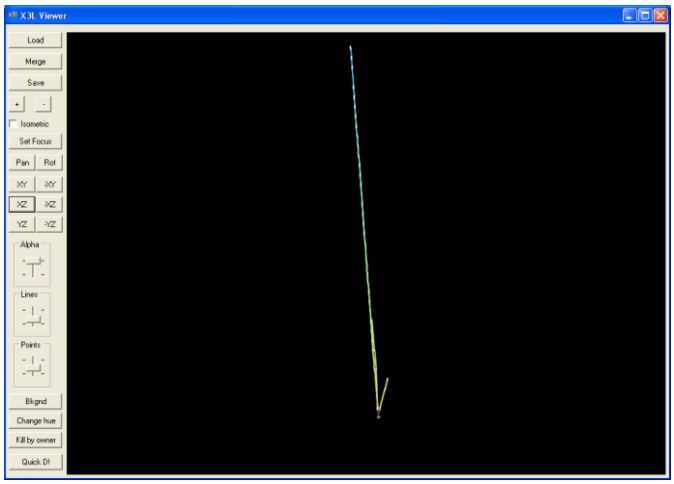
Şekil 4: iz oluşum verimliliği (verimliliğinin iz açısına göre dağlımı).



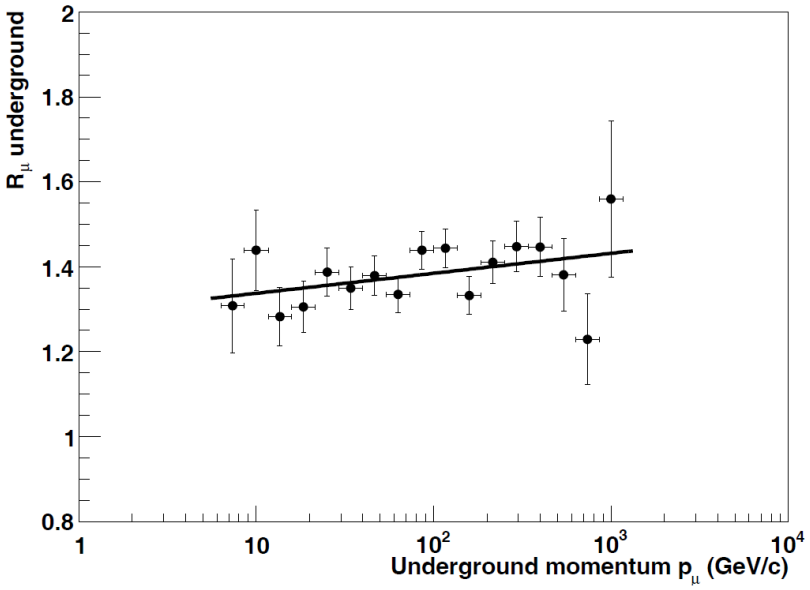
Şekil 5: Bern(İsviçre) mikroskobunun iz yapılandırma verimliliğinin parçacığın açısına göre dağlımı.



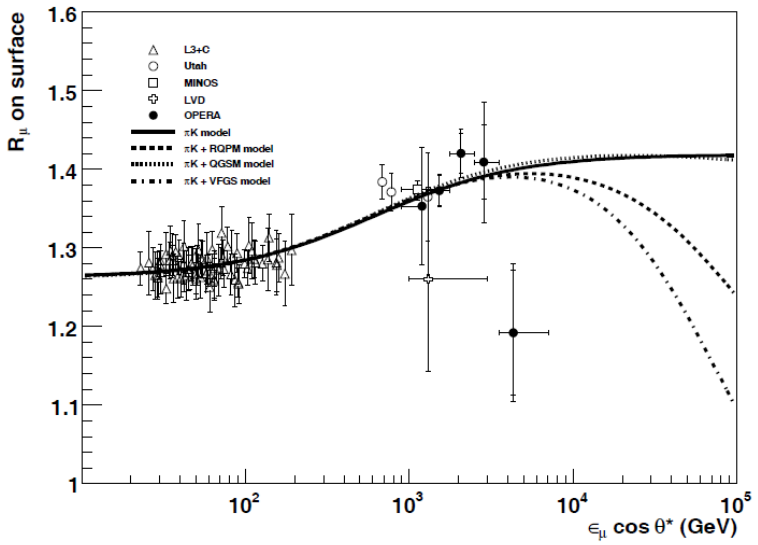
Şekil 6: ODTÜ'de otomatik tarama sonucunda bulunan nötrino etkileşim vörteksinin görüntüsü (XY iz düşümü).



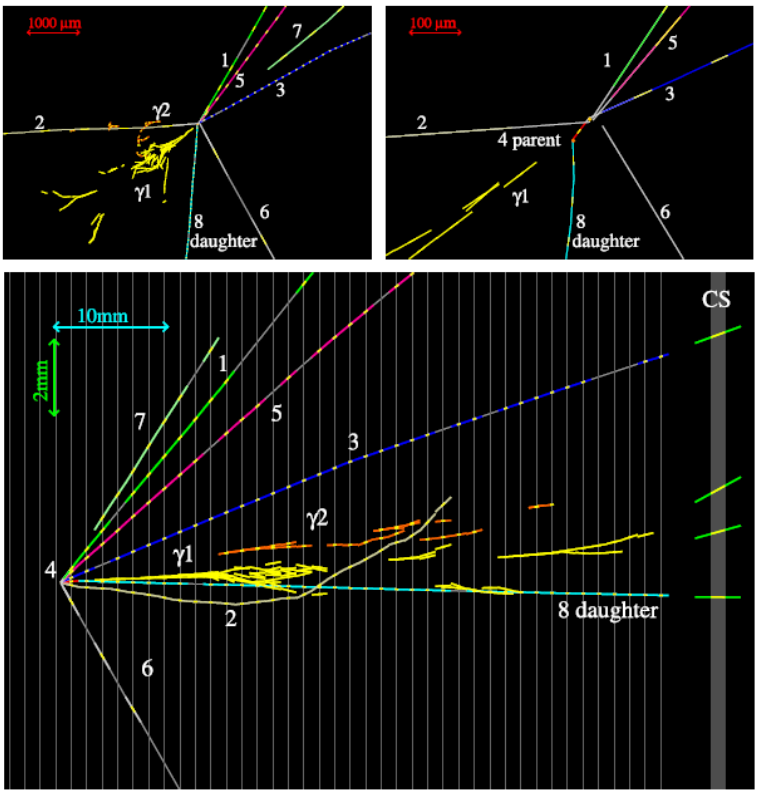
Şekil 7 : ODTÜ'de otomatik tarama sonucunda bulunan nötrino etkileşim vörteksinin görüntüsü (XZ iz düşümü).



Şekil 8 : Ölçülen muon yük oranlarının muon momentumuna göre değişimi.



Şekil 9 : Ölçülen yük oranının muon'un dik yüzey enerjisine göre değişimi.



Şekil 10: OPERA deneyinde bulunan ilk τ olayının görüntüsü. Üsteki görüntü nötrino geliş yönüne dik görüntü. Alttaki görüntü ise etkileşim yan görüntüsü.

Decay channel	Number of background events expected for							
	22.5×10^{19} p.o.t.				4.88×10^{19} p.o.t.			
	Charm	Hadron	Muon	Total	Charm	Hadron	Muon	Total
$\tau \to \mu$	0.025	0.00	0.07	0.09 ± 0.04	0.00	0.00	0.02	0.02 ± 0.01
$\tau \to e$	0.22	0.00	0.00	0.22 ± 0.05	0.05	0.00	0.00	0.05 ± 0.01
$\tau \to h$	0.14	0.11	0.00	0.24 ± 0.06	0.03	0.02	0.00	0.05 ± 0.01
$\tau \to 3h$	0.18	0.00	0.00	0.18 ± 0.04	0.04	0.00	0.00	0.04 ± 0.01
Total	0.55	0.11	0.07	0.73 ± 0.15	0.12	0.02	0.02	0.16 ± 0.03

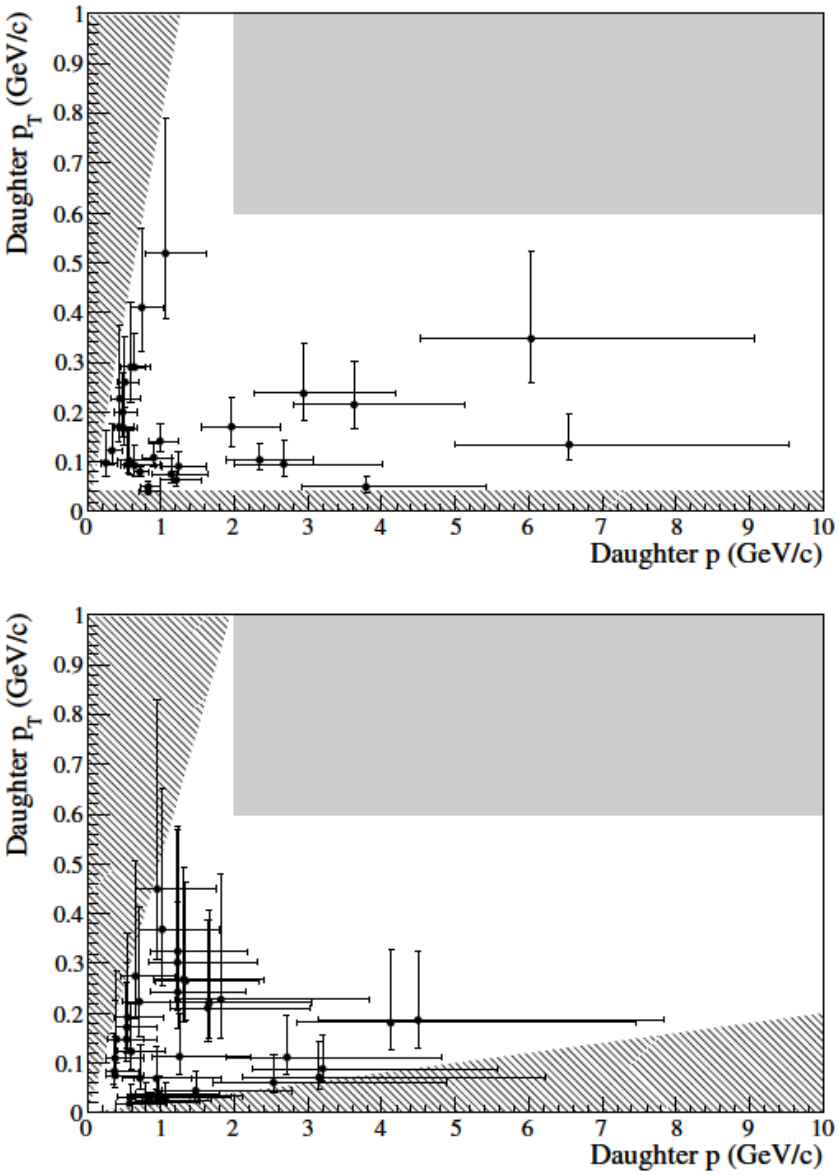
Tablo 1 : Monte Carlo simülasyonuyla hesaplananan arkafon olay sayısı.

p_π (GeV c^{-1})	$\delta\theta_s$ (mrad)	$\langle p \rangle$ (GeV c^{-1})	$\frac{\Delta(1/p)}{(1/p)}$ (%)
2	2.26 ± 0.01	2.08 ± 0.05	19.6 ± 0.4
4	1.72 ± 0.01	4.32 ± 0.08	19.4 ± 0.4
6	1.90 ± 0.01	5.9 ± 0.2	21.0 ± 3.0
8	1.48 ± 0.01	7.2 ± 0.5	32.0 ± 2.0

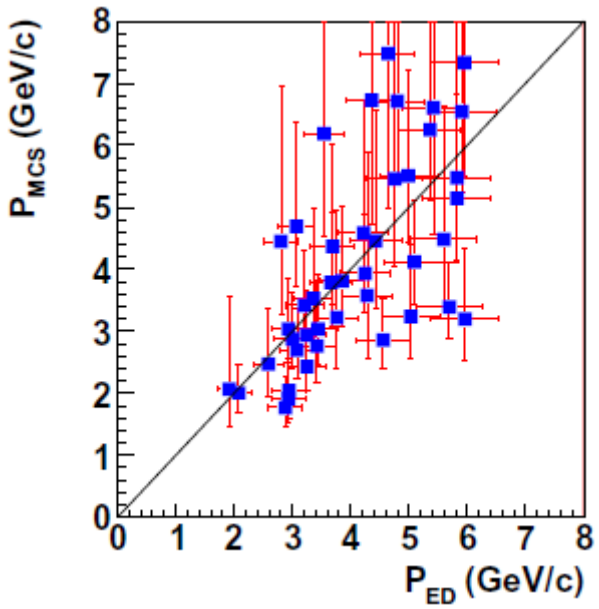
Tablo 2 : 2, 4, 6, 8 GeV/c deki pionların ölçülen momentumları ve ölçüm hatası.

p_{MC} (GeV c^{-1})	$\delta\theta_s$ (mrad)	$\langle p \rangle$ (GeV c^{-1})	$\frac{\Delta(1/p)}{(1/p)}$ (%)
1	1.80 ± 0.20	1.03 ± 0.01	14.2 ± 0.3
2	1.76 ± 0.05	2.04 ± 0.03	15.4 ± 0.3
3	1.67 ± 0.02	3.01 ± 0.05	17.6 ± 0.5
4	1.68 ± 0.01	3.97 ± 0.09	20.1 ± 0.6
6	1.66 ± 0.01	5.99 ± 0.17	22.0 ± 0.7
8	1.66 ± 0.01	8.13 ± 0.30	26.0 ± 1.0

Tablo 3 : Monte Carlo gerçek değerleriyle, yapılandırılan momentum değerlerinin karşılaştırılması.



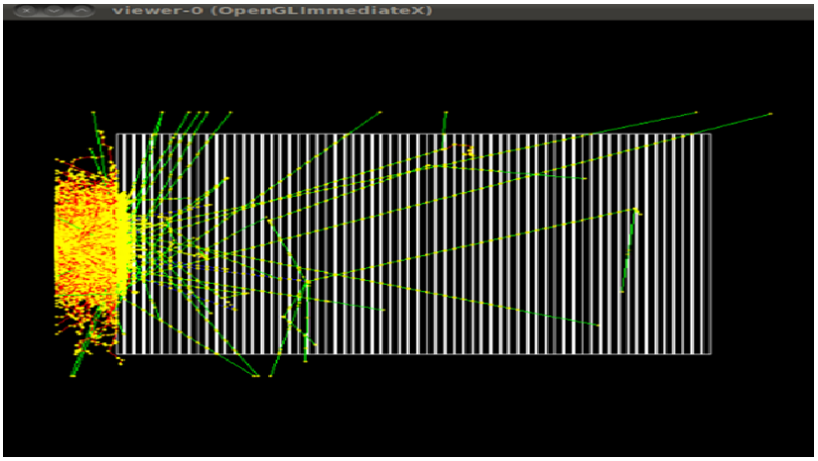
Şekil 11 : Bükülme topolojisi gösteren pionların dikine momentumlarının momentumlarına göre dağlımı. Üst taralı bölgeler tau sinyalinin olduğu bölgeyi göstermektedir.



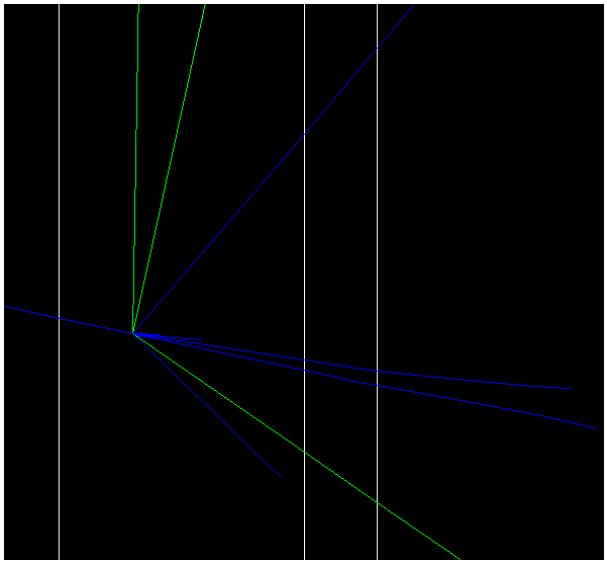
Şekil 12 : Çoklu Cuolomb Saçılmasıyla (MCS) ölçülen muon momentumlarının elektronik detektörde ölçülen değerlerle karşılaştırılması.

Error source	ns	Error distribution
Baseline (20 cm)	0.67	Gaussian
Meson decay point	0.2	Exponential (1 side)
Interaction point of external neutrino events	2.0	Flat (1 side)
CTRI signal propagation through GMT chain Δt_{UTC}	2.0	Gaussian
Kicker magnet signal to WFD $\Delta t_{trigger}$	1.0	Gaussian
BCT calibration Δt_{BCT}	5.0	Gaussian
CNGS-OPERA GPS synchronisation	1.7	Gaussian
LNGS 8.3 km fibre to OPERA Master Clock	3.7	Gaussian
Master Clock to FPGA Δt_{clock}	1.0	Gaussian
TT PMT signal to FPGA	2.3	Gaussian
TT timing simulation of ν interactions	3.0	Gaussian
FPGA latency	1.0	Gaussian
RPC signal formation	5.0	Gaussian
RPC signal propagation	1.0	Gaussian
RPC FEB delay	1.0	Gaussian
RPC DAQ clock trasmission	2.0	Gaussian
RPC FPGA calibration	1.0	Gaussian
RPC plane disuniformity	3.9	Gaussian
Total systematic uncertainty for TT based analysis	$-8.0, +8.3$	
Total systematic uncertainty for RPC based analysis	$-9.6, +9.9$	

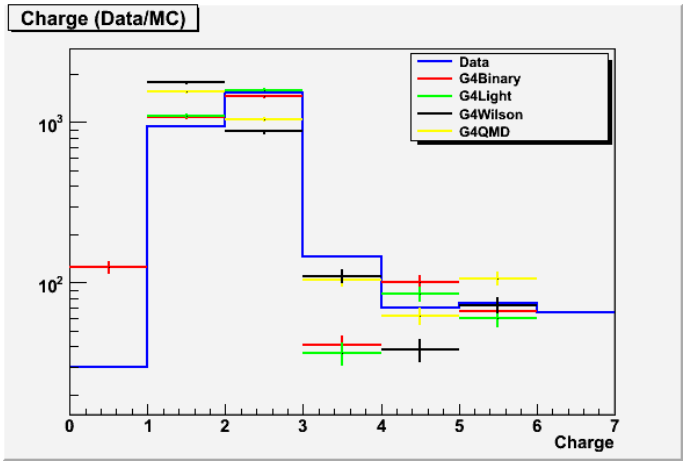
Tablo 4: Nötrino hız ölçümünde ki sistematik hataların kaynakları ve ölçülen değerleri.



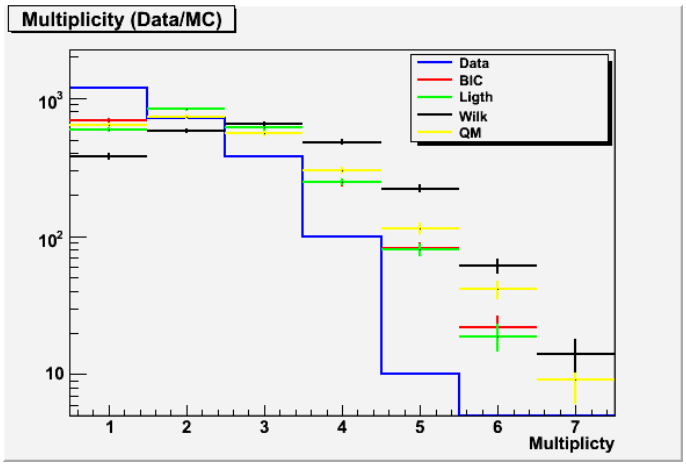
Şekil 13: ^{12}C iyonun emülsiyon ve Lexan'dan oluşan hedef içerisindeki görüntüsü.



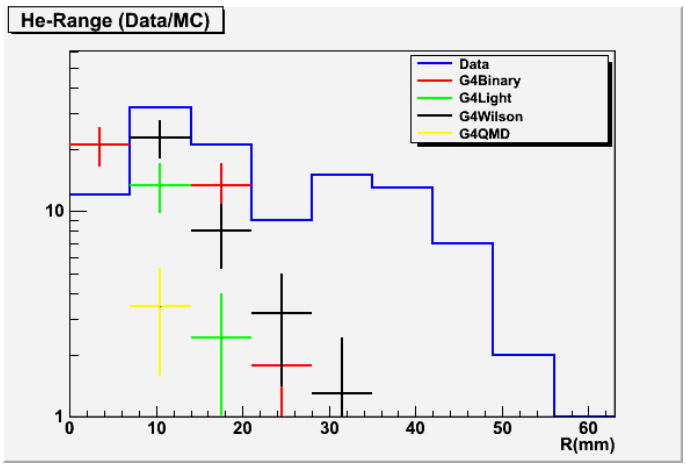
Şekil 14 : ^{12}C iyonun lexan hedef içerisindeki etkileşiminden açığa çıkan iyonlar (mavi: pozitif iyonlar yeşil izler: nötral iyonlar (GEANT4'da görüntüsü).



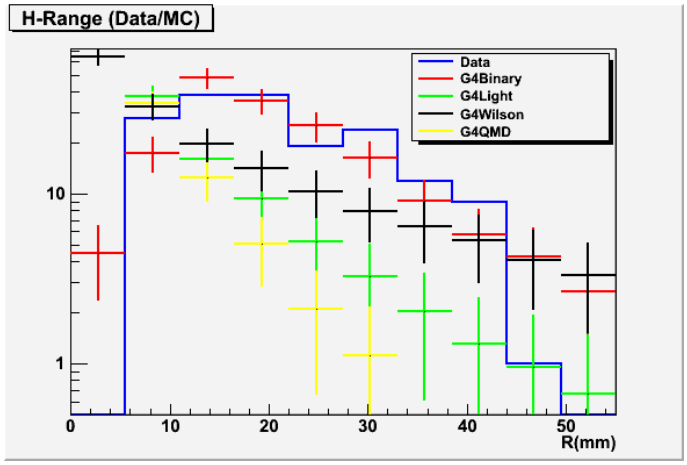
Şekil 15: C12 etkileşiminde oluşan fragment yüklerinin dağlımının gerçek veri ve model karşılaştırılması.



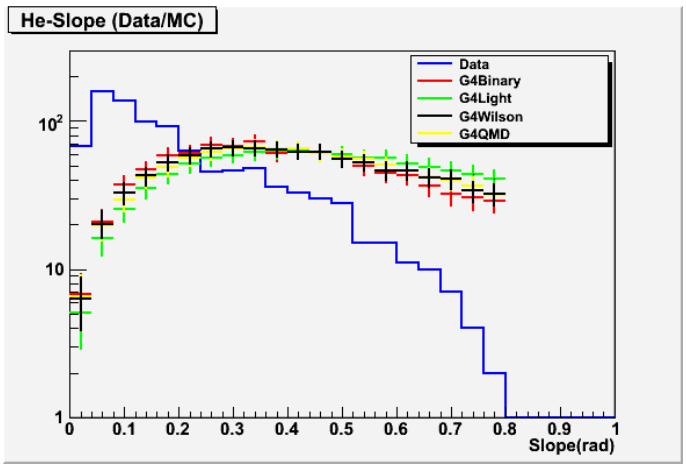
Şekil 16: C12 etkileşiminde oluşan fragment çokluk dağlımının gerçek veri ve model karşılaştırılması.



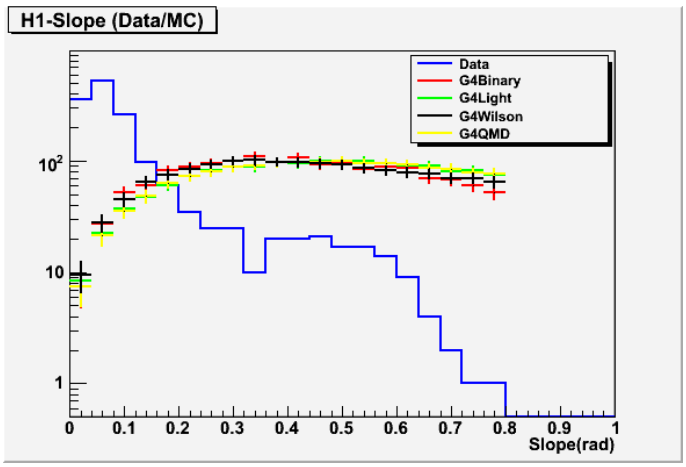
Şekil 17: C12 etkileşiminde oluşan Helyum fragmentinin menzil dağlımının gerçek veri ve model.



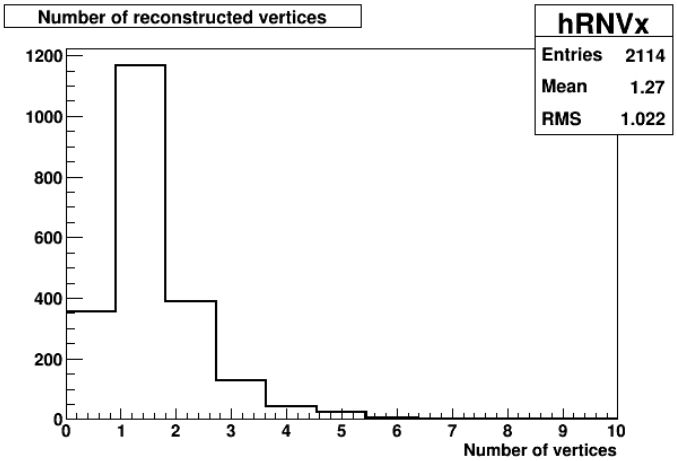
Şekil 18: C12 etkileşiminde oluşan Hidrojen fragmentinin menzil dağlımının gerçek veri ve model karşılaştırılması.



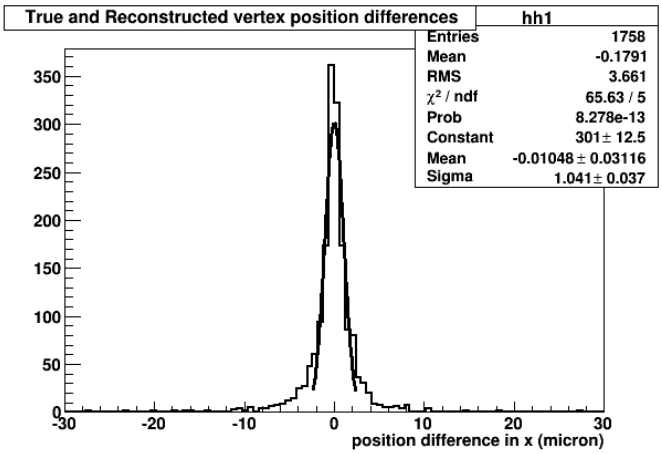
Şekil 19: C12 etkileşiminde oluşan Helyum fragmentinin açı dağlımının gerçek veri ve model karşılaştırılması.



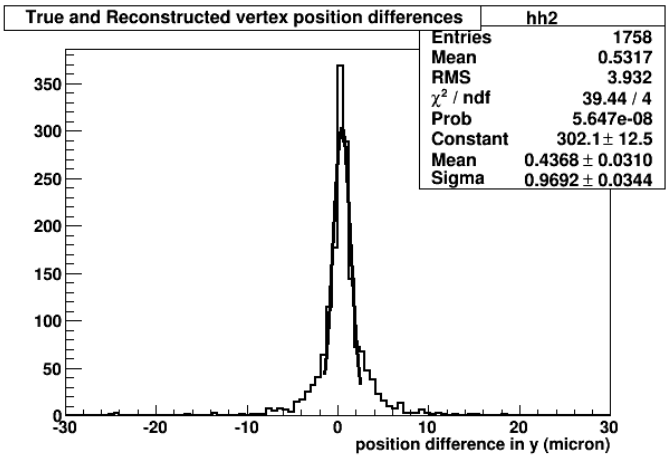
Şekil 20: C12 etkileşiminde oluşan Hidrojen fragmentinin açı dağlımının gerçek veri ve model



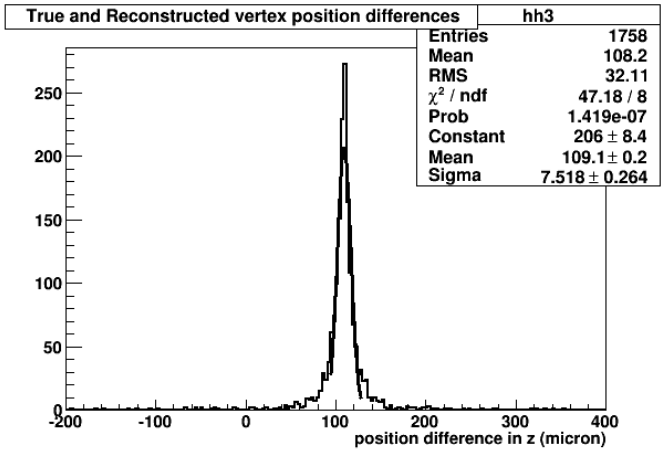
Şekil 21 : Yapılandıran nötrino etkileşimlerindeki vörteks sayısının dağlımı.



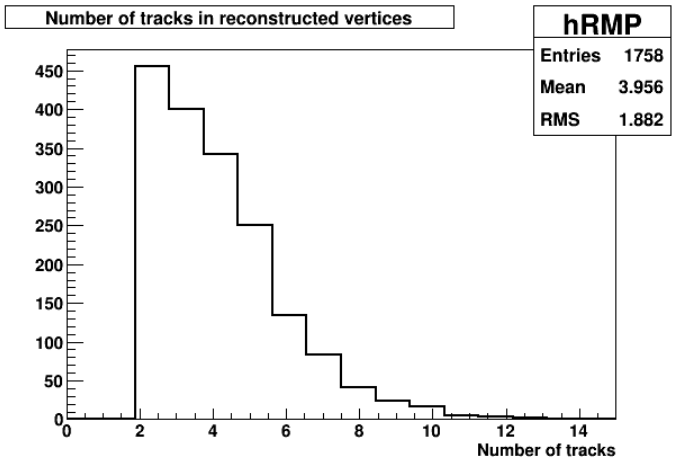
Şekil 22 : Nötrino etkileşim vörteksinin doğru x pozisyonun yapılandıran x pozisyonu arasındaki arasındaki farkın dağlımı.



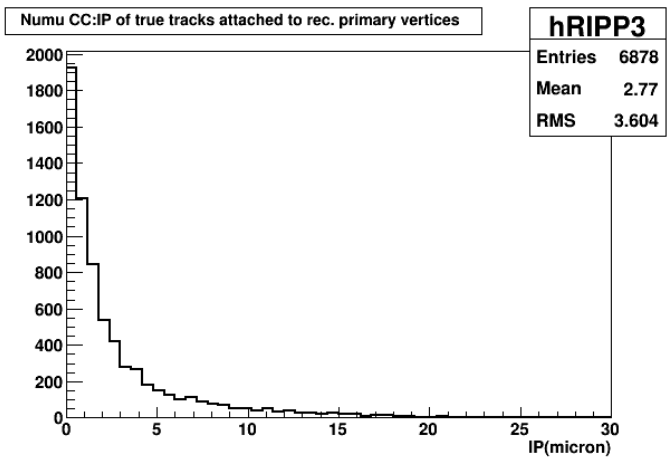
Şekil 23 : Nötrino etkileşim vörteksinin doğru y pozisyonun yapılandıran y pozisyonu arasındaki arasındaki farkın dağlımı.



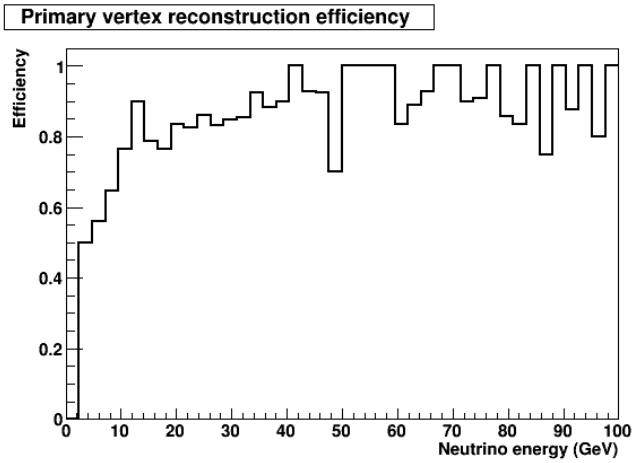
Şekil 24 : Nötrino etkileşim vörteksinin doğru z pozisyonun yapılandıran z pozisyonu arasındaki arasındaki farkın dağlımı.



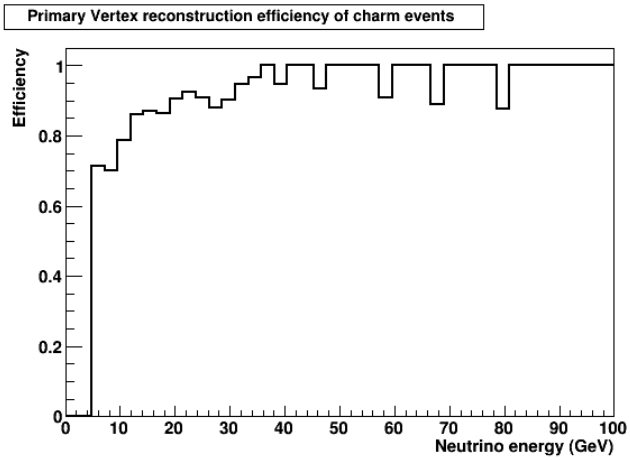
Şekil 25: Nötrino etkileşim vörteksindeki yüklü parçacıkların sayısının dağlımı.



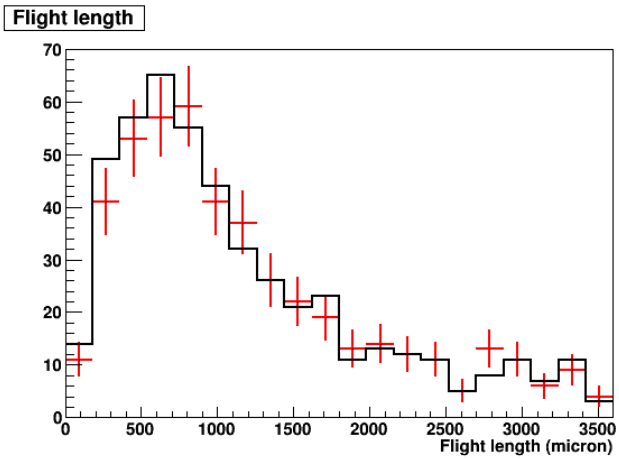
Şekil 26 : Nötrino etkileşim vörteksinde ki yüklü parçacıkların vörteks noktasına olan uzaklıklarının dağlımı (IP)



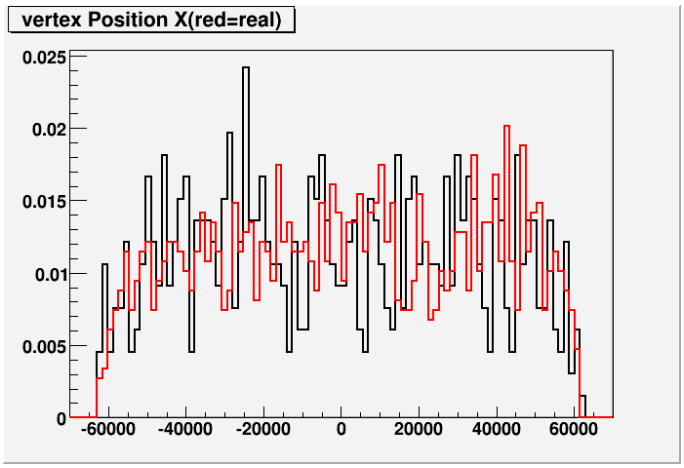
Şekil 27 : Nötrino etkileşim vörteksinin yapılandırma verimliliğinin doğru nötrino enerjisine göre değişimi.



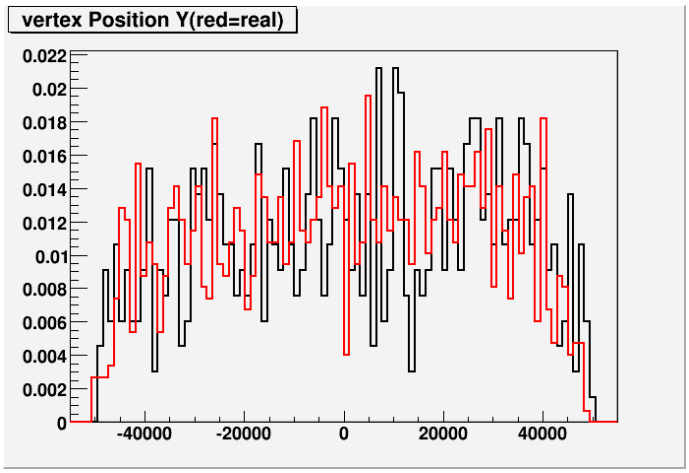
Şekil 28 : Nötrino etkileşim vörteksinin yapılandırma verimliliğinin doğru nötrino enerjisine göre değişimi (ν_μ charm olayları).



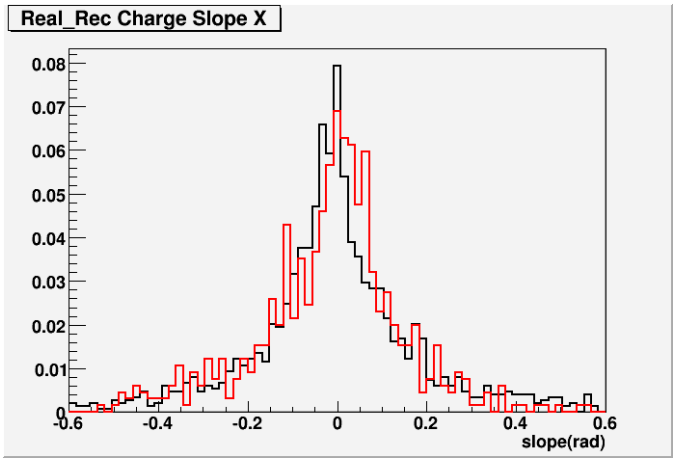
Şekil 29: Nötrino etkileşimlerinde oluşan charm hadronlarının uçuş uzunluğunun dağlımı: yapılandırılan MC (artı) ve doğru MC (histogram).



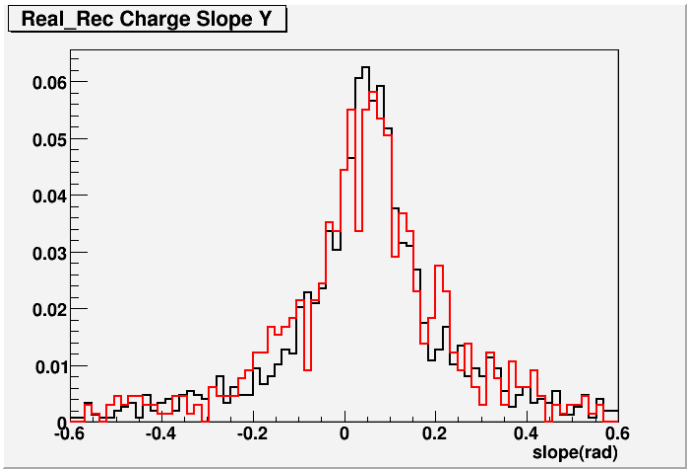
Şekil 30 : Yüklü-akım nötrino etkileşimlerinin x-pozisyon dağlımları: gerçek veri (kırmızı histogram) ve MC (siyah histogram).



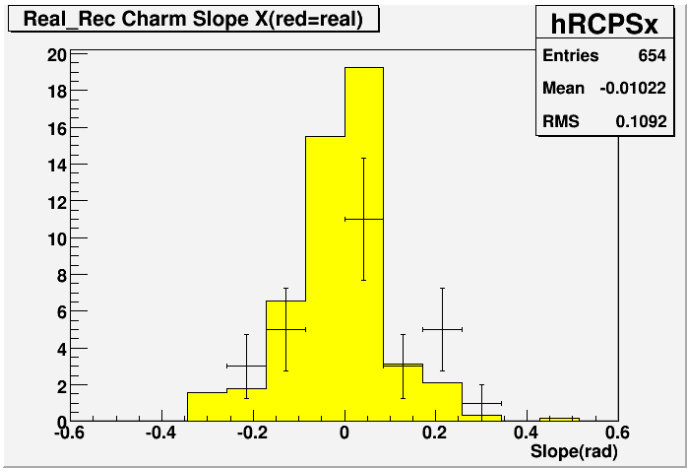
Şekil 31 : Yüklü-akım nötrino etkileşimlerinin y-pozisyon dağlımı: gerçek veri (kırmızı histogram) ve MC (siyah histogram).



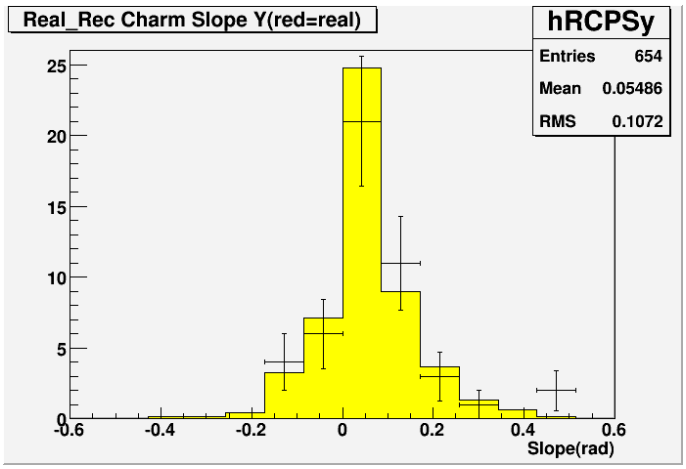
Şekil 32 : Yüklü-akım nötrino etkileşimlerinde oluşan müon'un x-açı dağılımları: gerçek veri (kırmızı histogram) ve MC (siyah histogram).



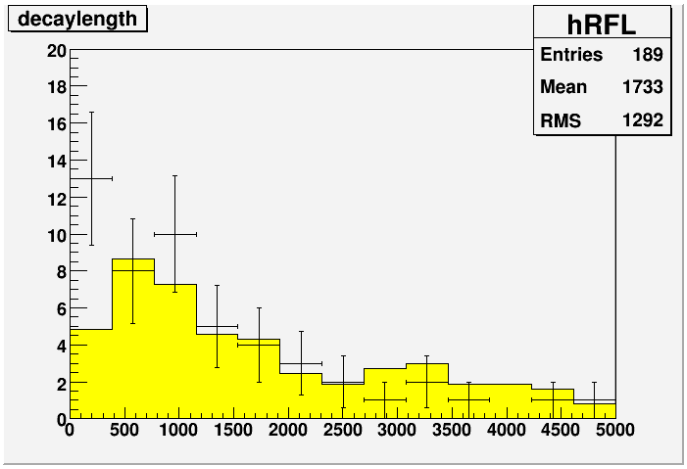
Şekli 33 : Yüklü-akım nötrino etkileşimlerinde oluşan müon'un y-açı dağılımları: gerçek veri (kırmızı histogram) ve MC (siyah histogram)



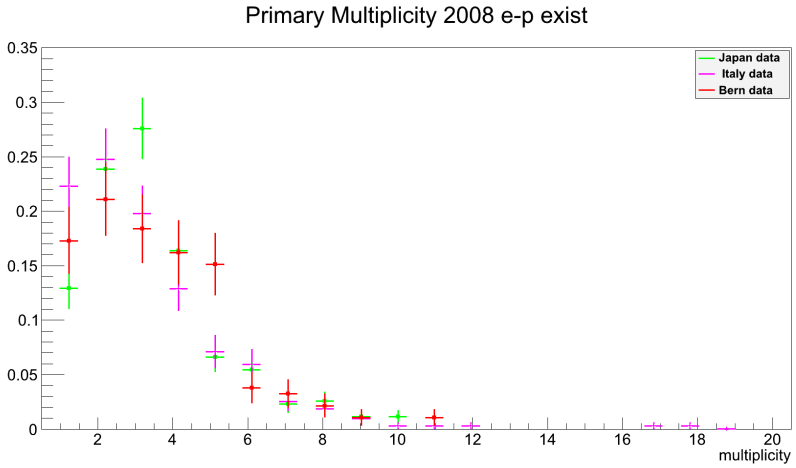
Şekil 34 : Yüklü-akım nötrino etkileşimlerinde oluşan charm hadronun açı (x) dağılımı: gerçek veri (artı) ve MC (histogram).



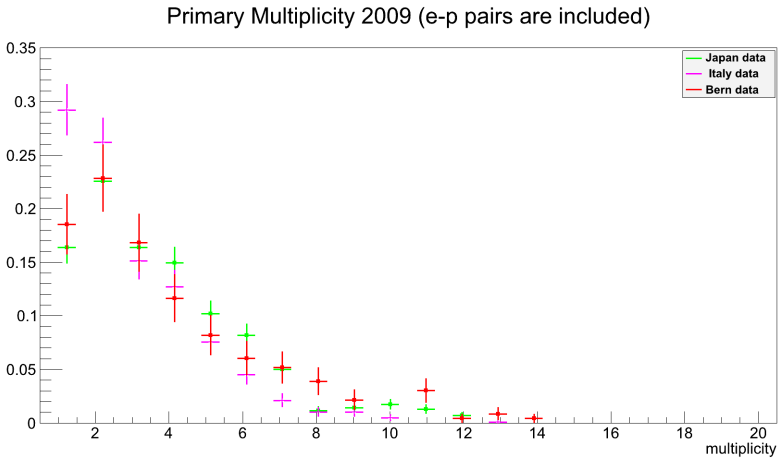
Şekil 35: Yüklü-akım nötrino etkileşimlerinde oluşan charm hadronun açı (y) dağlımı: gerçek veri (artı) ve MC (histogram).



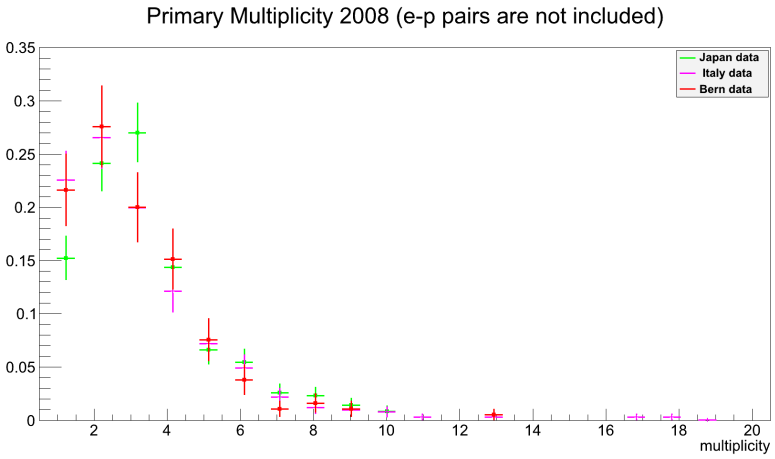
Şekil 36 : Yüklü-akım nötrino etkileşimlerinde oluşan charm hadronun uçuş uzunluğunun dağlımı: gerçek veri (artı) ve MC (histogram).



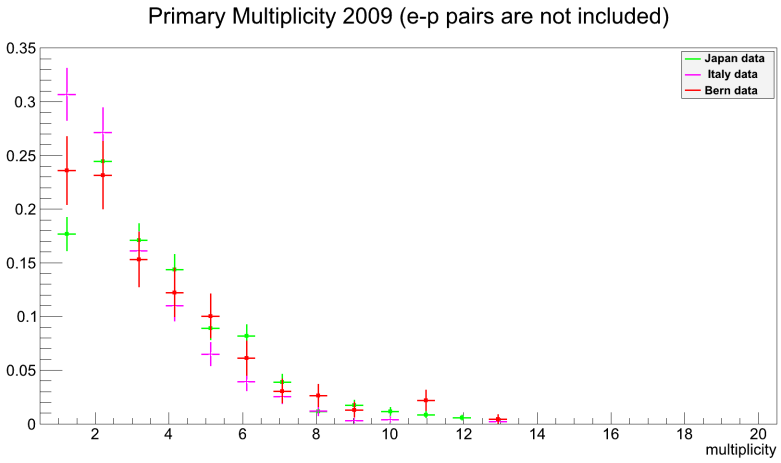
Şekil 37: ECC içerisinde bulunan nötrino etkileşimlerine ait cokluk dağlımları (2008 verileri ve elektron-pozitron çiftleri dahil)



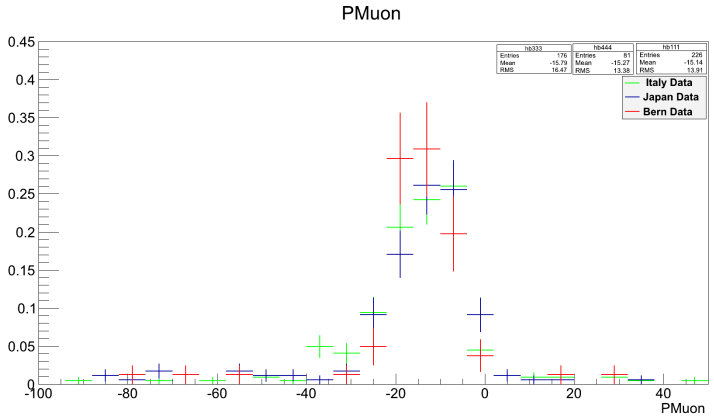
Şekil 38: ECC içerisinde bulunan nötrino etkileşimlerine ait cokluk dağlımları (2009 verileri ve elektron-pozitron çiftleri dahil)



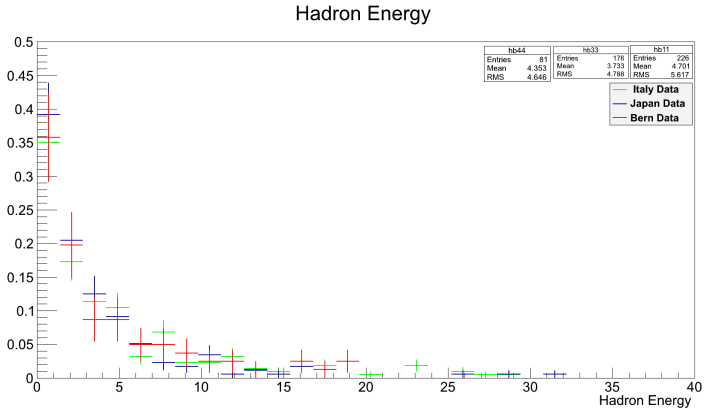
Şekil 39: ECC içerisinde bulunan nötrino etkileşimlerine ait cokluk dağlımları (2008 verileri ve elektron-pozitron çiftleri çıkarılmış hali)



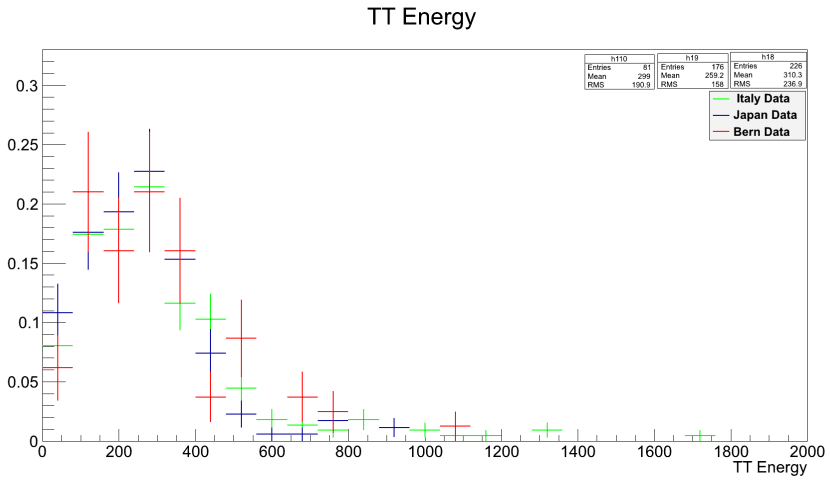
Şekil 40: ECC içerisinde bulunan nötrino etkileşimlerine ait cokluk dağlımları (2009 verileri ve elektron-pozitron çiftleri çıkarılmış hali)



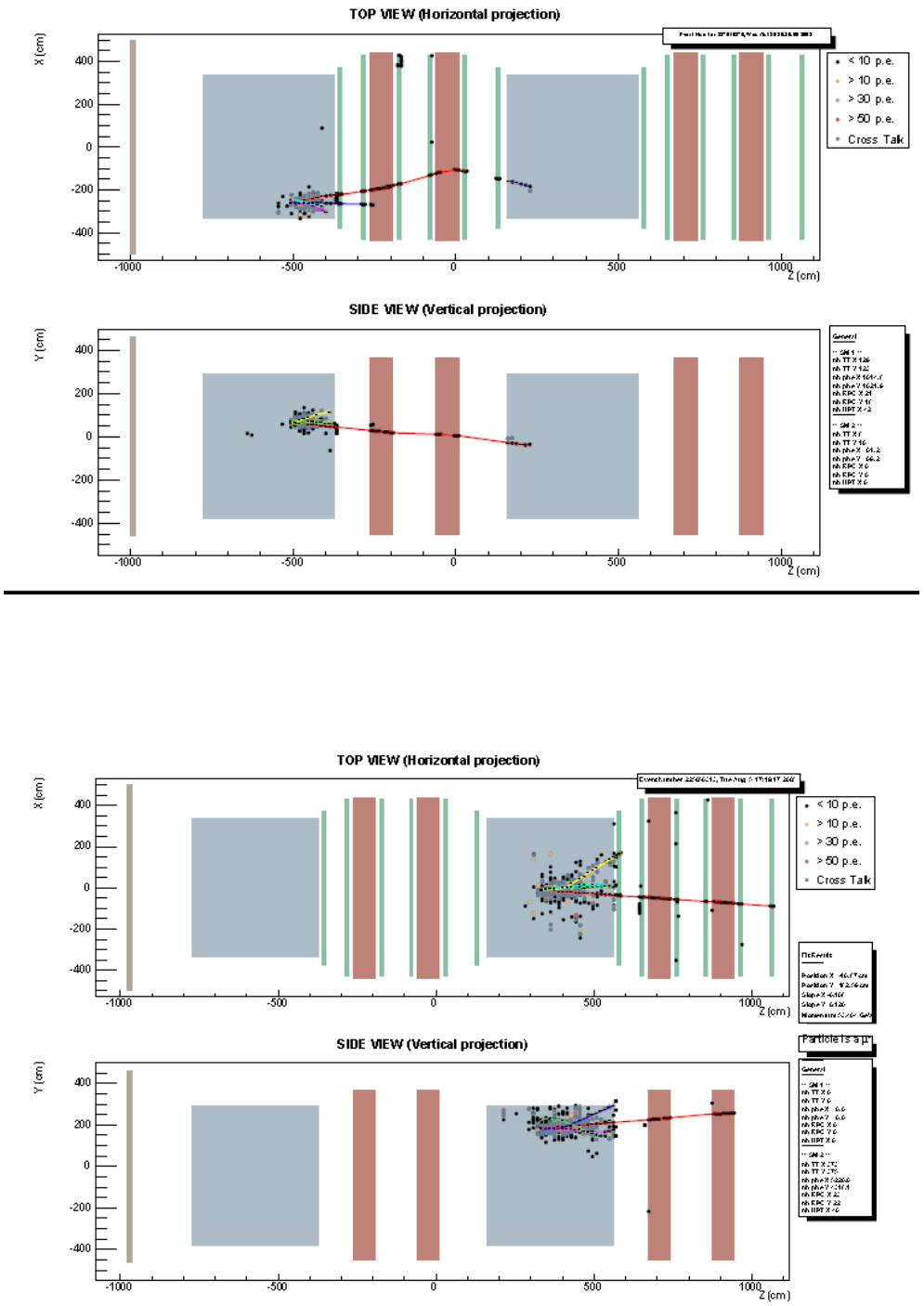
Şekil 41: ECC içerisinde bulunan nötrino etkileşimlerinde oluşan müon'un momentum dağlımları (çokluk değeri 1 olan olaylar için).



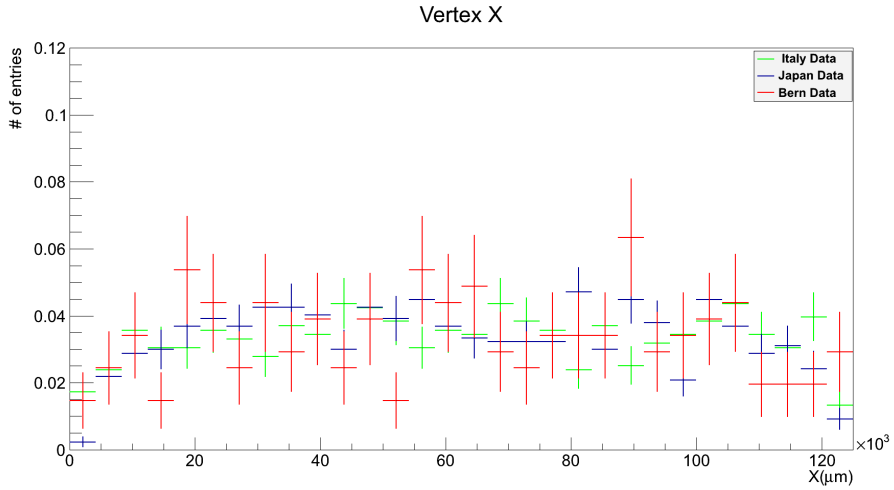
Şekil 42: ECC içerisinde bulunan nötrino etkileşimlerinde oluşan olayların hadronik enerji dağlımları (çokluk değeri 1 olan olaylar için).



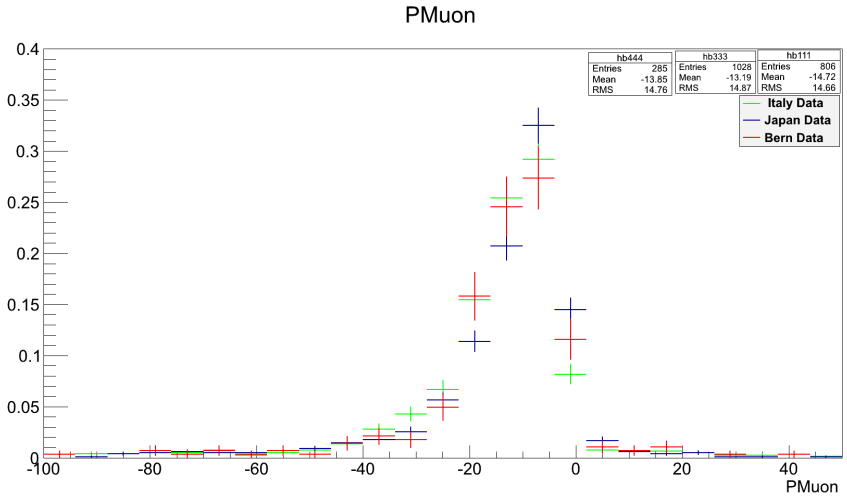
Şekil 43: ECC içerisinde bulunan nötrino etkileşimlerinde oluşan olayların TT enerji dağlımları (çokluk değeri 1 olan olaylar için).



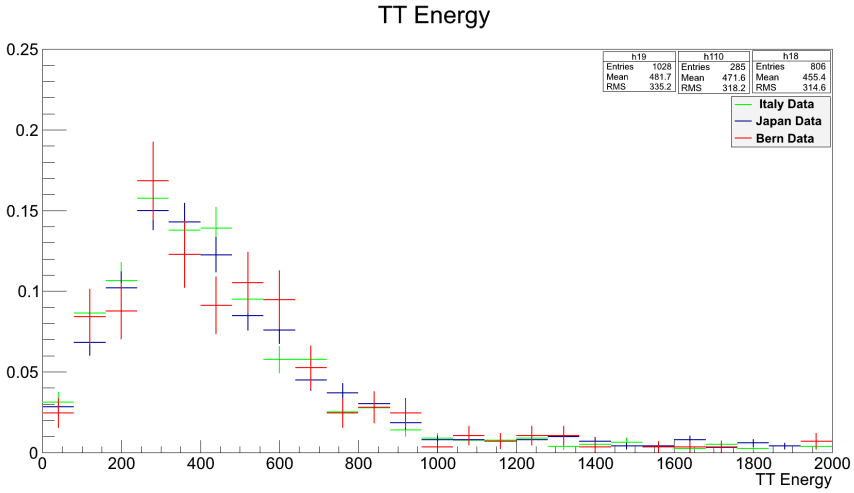
Şekil 44 : Çoklu değeri 1 olan etkileşimlerden ikisinin elektronik detektör görüntüsü.



Şekil 45 : ECC içerisinde bulunan nötrino etkileşimlerinde oluşan olayların vörteks x-pozisyonu.

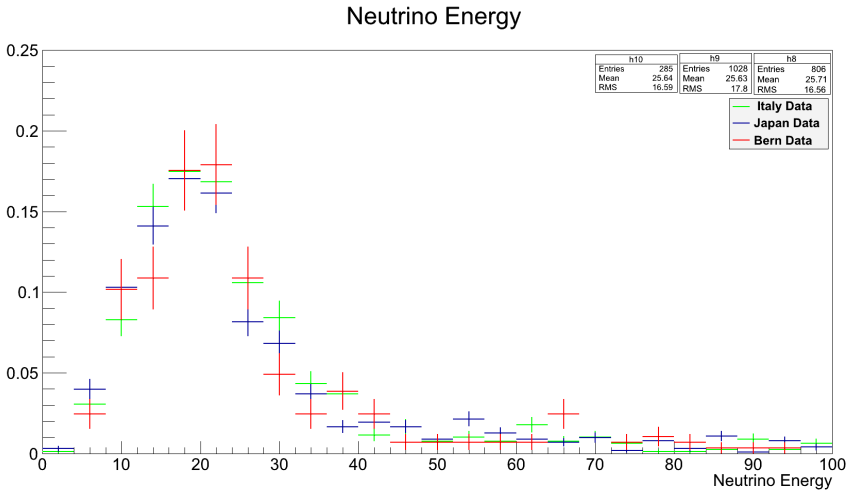


Şekil 46: ECC içerisinde bulunan nötrino etkileşimlerinde oluşan müon'un momentum dağlımları.

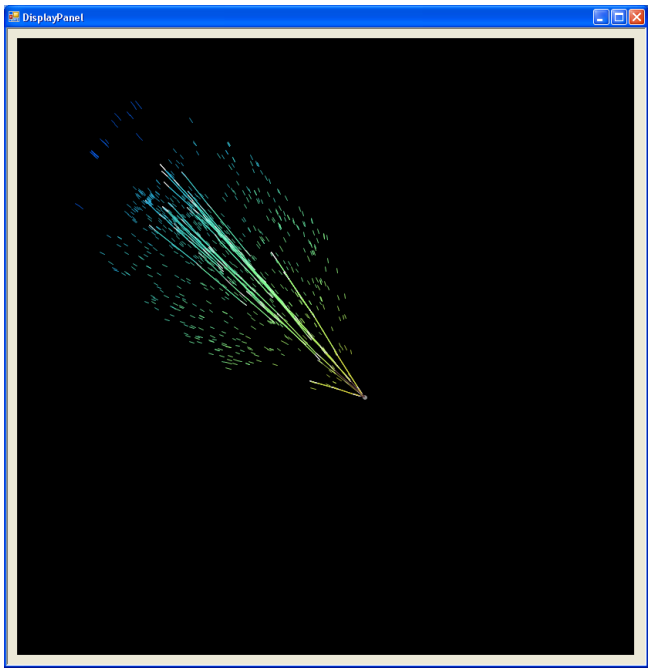


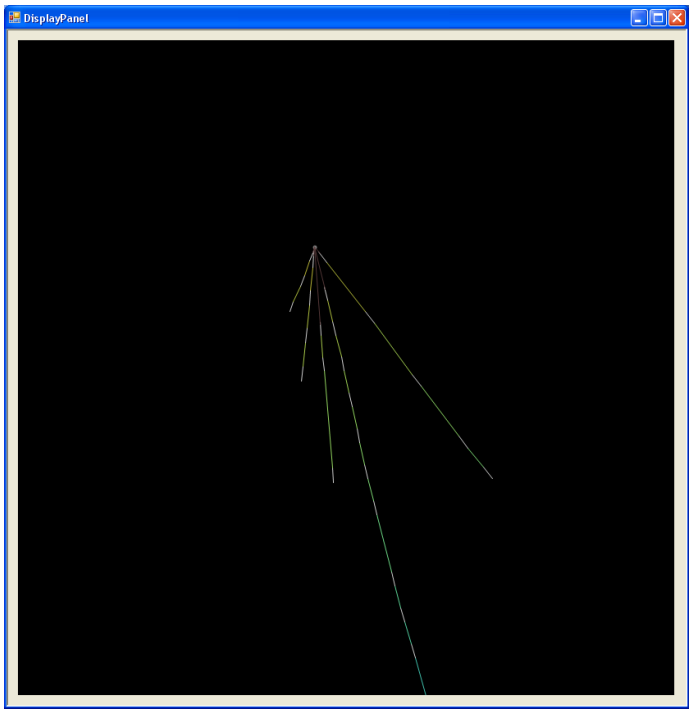
Şekil 47: ECC içerisinde bulunan nötrino etkileşimlerinde oluşan olayların TT enerji dağlımları.

.



Şekil 48: ECC içerisinde bulunan nötrino etkileşimlerinde oluşan olayların yapılandırılan nötrino enerji dağlımları.





Şekil 49 : Otomatik tarama sistemiyle bulduğumuz bir nötrino etkileşimin yapılandırılmış görüntüleri.

REFERANSLAR

ADAMSON P. et al., Phys. Rev. D76 052003 (2007).
ARMENISA N. et al., N I.M. A 551 261 (2005).
ASHLEY G. K et. all Phys. Rev. D12 20 (1975).
AGOSTINELLI S. et al. Nucl.Inst. Meth. A 506 250 (2003).
BIONTA , R. et.al. Phys. Rev. Lett. 58 1494 (1987).
CHOOZ Coll., Eur. Phys. J. C 27 331 (2003).
DE LELLIS G. et al. Nucl. Phys. A 853 (2011).
KAMIOKANDE Coll., Phys. Rev. Lett. 58 1490(1987).
KAMIOKANDE-II Coll., Phys. Lett. B 205 416 (1988).
LONGO, M.J. Phys. Rev. D 36 3276 (1987).
MACRO Coll., Eur. Phys. J. C 36 323 (2004).
HOSSEINI N, abstract book of Turkish Physical Society 28th Physics Congress 315 (2011).
OPERA Coll., JINST 4 P04018 (2009).
OPERA Coll., Eur.Phys.J. C67, 25-37 (2010).
OPERA Coll., Phys.Lett. B691:138-145 (2010).
OPERA Coll., New J. Phys. 13:053051 (2011).
OPERA Coll., New J. Phys. 14 033017 (2012).
OPERA Coll., JHEP 093 (2012).
PALO VERDE Coll. Prog. Part. Nucl. Phys. 48 113 (2002).
SUPER-KAMIOKANDE Coll., Phys. Rev. Lett. 81 1562 (1998);
SOUDAN-2 Coll., Phys. Rev. D 72 052005 (2005).

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje No: 108T324
Proje Başlığı: Fast Automatic Scanning System For Emulsion Experiments
Proje Yürütücüsü ve Araştırmacılar: Prof.Dr. Ali Murat GÜLER,Mustafa Kamışçıoğlu**,** Kadir Öcalan**,** Behzad Hosseini**,** Özgür Altınok**,** Cemali Kılınç, Serhan Tufanlı
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi: **Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fizik Bölümü 06800 Ankara**
Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi: **Orta Doğu Teknik Üniversitesi 06800 Ankara**
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri: 1.11.209-1.11.2012
Öz (en çok 70 kelime) Hızlı emülsiyon tarama sistemi, Nükleer emülsiyon tekniğinin kullanıldığı deneylerde veri alımı ve işlenmesininde kullanılmaktadır. Nükleer emülsiyon tekniği geçmişte mikron hassasiyeti gerektiren araştırmalarda başarıyla uygulanmış bir çok keşif bu tekniğin uygulanması sonucunda yapılmıştır. Örneğin 1947 C. Powel'ın Pion'u nükleer emülsiyon tekniğini kullanarak keşfetmiştir. Günümüzde ise nükleer emülsiyon tekniğinin en büyük çapta uygulandığı proje OPERA deneyidir. Deneyde kullanılan toplam emülsiyonun filmlerin kapladığı yüzey alanı yaklaşık 110,000 m^2 dir. Dolasıyla OPERA deneyinin başarıya ulaşabilmesi için nötrino etkileşimlerinin oluştuğu emülsiyon filmlerin taranıp analiz edilmesi nötrino salınım çalışmalarının en önemli aşaması olarak kabül edilmektedir. Ayrıca nükleer emülsiyon, son yıllarda müon spektroskopi, karbon radyoterapi alanlarında da kullanılmaya başlanılmıştır. Bu proje ile bölümümüze kurduğumuz otomatik tarama sistemi nükleer emülsiyon tekniğinin kullanıldığı çalışmalarda kullanılabilecektir.
Anahtar Kelimeler: **Emülsiyon Mikroskobu, Nükleer Emülsiyon, Nötrino salınımları, OPERA deneyi**
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu mu? **Evet** ☐ **Gerekli Değil** ☒

Projeden Yapılan Yayınlar:

1- A. Murat Güler, Çağın Kamışçıoğlu, Mustafa Kamışçıoğlu,....OPERA Coll., Measurement of the neutrino velocity with the OPERA detector in the CNGS beam using the 2012 dedicated data, JHEP'de yayına kabül edildi JHEP (2013).

2- A. Murat Güler, Özgür Altınok, Mustafa Kamışçıoğlu,....OPERA Coll., Measurement of the neutrino velocity with the OPERA detector in the CNGS beam. JHEP 10 1-37 (2012).

3- A. Murat Güler, Özgür Altınok, Mustafa Kamışçıoğlu,....OPERA Coll., Momentum measurement by the Multiple Coulomb Scattering method in the OPERA lead emulsion target. New J. Phys. 14:013026 (2012).

4- A. Murat Güler, Özgür Altınok, Mustafa Kamışçıoğlu,....OPERA Coll., Search for numu to nutau oscillation with the OPERA experiment in the CNGS beam. New J. Phys. 14:033017 (2012).

5- A. Murat Güler, Özgür Altınok, Mustafa Kamışçıoğlu,....OPERA Coll., Study of neutrino interactions with the electronic detectors of the OPERA experiment. New J. Phys. 13:053051 (2011).

6- A. Murat Güler, Özgür Altınok, Mustafa Kamışçıoğlu,....OPERA Coll., Observation of a first v_τ candidate in the OPERA experiment in the CNGS beam. Phys.Lett. B691, 138-145 (2010).

7- A. Murat Güler, Mustafa Kamışçıoğlu,....OPERA Coll. Measurement of the cosmic ray muon charge ratio with the OPERA detector, EPJ C67 25-37 (2010).

8- A. Murat Güler, OPERA Neutrino Oscillation Results, Les Rencontres de Physique de la Vallée d'Aoste - La Thuile 2012, will publish in Il Nuovo Cimento 35C 6 (2013) 51-55.

9-A. Murat Güler, davetli konuşmacı. Konuşma başlığı : Recent OPERA results, PM international school and workshop on Particle Physics (IPP12): Neutrino Physics and Astrophysics, Tehran (2012).

10- A. Murat Güler, Özgür Altınok, Behzad Hosseini, Mustafa Kamışçıoğlu, High-Speed Automatic Microscope for Emulsion Analysis in the OPERA experiment. Abstract book of Turkish Physical Society 28th Physics Congress (2011), 315.

11- A. Murat Güler, Özgür Altınok, Behzad Hosseini, Mustafa Kamışçıoğlu, GEANT4-Based Monte Carlo Simolation for Carbon Fragmentation in Nuclear Emulsion, abstract book of Turkish Physical Society 28th Physics Congress (2011) 315.

12- Navid Hosseini, GEANT4 Based Monte Carlo Simulation for Carbon Fragmentation in Nuclear Emulsion, M.Sc. ODTÜ Fizik Bölümü (2012).

13- Behzad Hosseini, Neutrino Interaction Analysis with an Automatic Scanning System in the OPERA Experiment, M.Sc. ODTÜ Fizik Bölümü (2012).

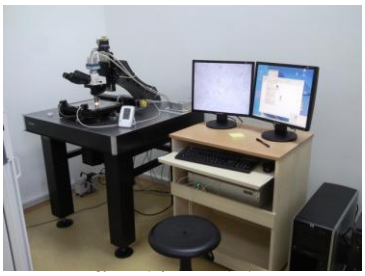
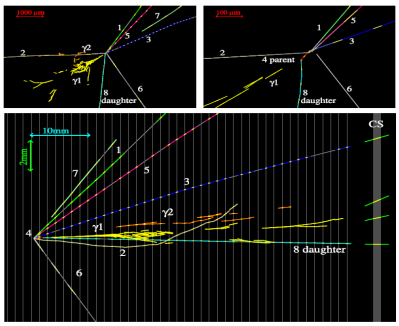
14- Mustafa Kamışçıoğlu, Analysis of Neutrino Interactions in the OPERA Experiment M.Sc. ODTÜ Fizik Bölümü (2012).

15- Özgür Altınok, High-Speed Automatic Scanning System For Emulsion Analysis in the OPERA Experiment" M.Sc. ODTÜ Fizik Bölümü (2011).

16- Serhan Tufanlı D^0 Background to Neutrino Oscillations in the OPERA Experiment" M.Sc. ODTÜ Fizik Bölümü (2009).

Ekte Bulunan "ARDEB Başarı Öyküsü Formu", "Kazanımlar" Bölümünde Belirtilen Kriterlere Göre Proje Çıktılarınızın Başarı Öyküsü Niteliği Taşıdığını Düşünüyorsanız "ARDEB Başarı Öyküsü Formu"nu doldurunuz.

ARDEB BAŞARI ÖYKÜSÜ

Fast Automatic Scanning System For Emulsion Experiments	**Ali Murat Güler**
 	**108T324** **Destek Miktarı (** 272.540,00 **TL)** **1.11.2009-1.11.2012** **ODTÜ**

Projenin Amacı ve Önemi

1- Bu proje ile üniversitemize kurduğumuz laboratuvar, Yüksek Enerji Fiziği alanında Türkiye'de veri alımı ve analizi yapabilen ilk laboratuvar özelliğini taşımaktadır.
2- Kurulan otomatik mikroskop sistemi, çok uluslu bir kollaborasyon olan OPERA deneyindeki emülsiyon tarama ve analiz çalışmalarında aktif bir şekilde kullanılmaktadır.
3- Nükleer emülsiyon taramasını ve analizini yapabilen nitelikli öğrenciler yetiştirilmiştir. Etki faktörü yüksek dergilerde yayınlar yapılmıştır.
4- Bu sistem, ileride nükleer emülsiyon tekniğinin başarıyla kullanıldığı, karbon terapi ve müon spektroskopisi alanlarında da kullanılacaktır.

Proje ile Elde Edilen veya Beklenen Bilimsel, Teknolojik, Ekonomik ve Sosyal Kazanımlar

- A. Murat Güler, Özgür Altınok, Mustafa kamışçıoğlu,....OPERA Coll., Measurement of the neutrino velocity with the OPERA detector in the CNGS beam. JHEP 10 1-37 (2012). Etki faktörü : 5.8.
- A. Murat Güler, Özgür Altınok, Mustafa kamışçıoğlu,....OPERA Coll., Momentum measurement by the Multiple Coulomb Scattering method in the OPERA lead emulsion target. New J. Phys. 14:013026 (2012). Etki faktörü : 4.2.
- A. Murat Güler, Özgür Altınok, Mustafa kamışçıoğlu,....OPERA Coll., Search for numu to nutau oscillation with the OPERA experiment in the CNGS beam. New J. Phys. 14:033017 (2012). Etki faktörü : 4.2.
- A. Murat Güler, Özgür Altınok, Mustafa kamışçıoğlu,....OPERA Coll., Observation of a first ν_τ candidate in the OPERA experiment in the CNGS beam. Phys.Lett. B691, 138-145 (2010). Etki faktörü : 3.9.
- TÜBİTAK Bilim Teşvik Ödülü (2011).
- Bu proje ülkemizin çok uluslu çalışmalarda da aktif rol ve görevler almasına olanak sağlamıştır.

Proje için TÜBİTAK Desteğinin Önemi

Ükelemizde temel bilimler araştırmalarını fonlayan en önemli kuruluş TÜBİTAK'dır. Dolasıyla bu proje desteği olmasaydı. Yukarıda bahsedilen başarıların hiçbirini elde etmek mümkün olmayacaktı. Bu proje ile Yüksek Enerji Fiziği alanında veri alımı ve analizi yapılabilen bir laboratuvar kuruldu.

Proje yürütücüsü iletişim bilgileri:
Adı – Soyadı : Ali Murat Güler
Unvanı : Prof.Dr.
Telefon : 533 7417226
E-posta adresi : amg@metu.edu.tr