


## Modern Nötrino DeneYlerinde Nükleer Emülsiyon Teknolojisi

Çağın Kamışcıoğlu

Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Fizik Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye  
gunesc@ankara.edu.tr 

Makale gönderme tarihi: 17.09.2020, Makale kabul tarihi: 27.12.2020

### Öz

Nükleer emülsiyon, parçacık fiziği deneylerinde kullanılan önemli bir parçacık algıdır. Bu tekniğin kullanımı 1900'lü yıllarda başlamış ve günümüze kadar ilerleyerek gelmiştir. Nükleer emülsiyon, sahip olduğu yüksek uzaysal çözünürlüğü sayesinde yüklü parçacıkların izlerinin takip edilmesini kolaylaştırmaktadır. Ayrıca üç boyutlu etkileşimlerin görüntülerini yeniden oluşturma, hatta enerji ve momentum ölçümlerinin yapımına da olanak sağlamaktadır. Bu özellikleri nedeniyle teorik ve deneysel parçacık fiziğine önemli katkılar getirmektedir. Günümüzde nükleer emülsiyon tekniği halen çeşitli araştırmalarda geliştirilerek kullanılmaktadır. Tasarlanan yeni deneylerde nükleer emülsiyonlar hızlandırıcılarda oluşturulan parçacık demeti önüne yerleştirilerek elde edilen verilerden atom altı parçacıklar, birbirleriyle olan ilişkileri, etkileşimleri ve karakteristik özellikleri belirlenmeye çalışılmaktadır. Bu amaçla gerçekleştirilen deneyler arasında CHORUS, DONUT, PEANUT ve OPERA deneyleri bulunmaktadır. Nötrinin doğasını anlamak üzere tasarlanan bu deneylerde nükleer emülsiyon teknolojisi başarıyla kullanılmış ve henüz tasarım aşamasına olan SHIP deneyinde de yine nükleer emülsiyon teknolojisinin kullanılması planlanmaktadır. Bu çalışmada parçacık fiziğinde yaygın kullanımı ve büyük önemi olan nükleer emülsiyon teknolojisinin gelişim aşamaları, kullanılan materyal ve yöntemler modern nötrino deneyleri ışığında incelenmiştir. Önümüzdeki yıllarda nükleer emülsiyon teknolojisinin giderek gelişeceği, yeni nesil deneylere ve araştırmalara yön vererek parçacık fiziğinde önemli sonuçlara ulaşılması beklenmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** nötrino, nükleer emülsiyon, parçacık fiziği

## Nuclear Emulsion Technology in Modern Neutrino Experiments

### Abstract

Nuclear emulsion is an important particle detector, used in particle physics experiments. The use of this technique began in the 1900s and developed up to day. Because of its high spatial resolution, the nuclear emulsion makes it easy to follow the tracks of charged particles. Also allows to reconstruct images of three-dimensional interactions and even to make energy and momentum measurements. Because of these features, it brings important contributions to theoretical and experimental particle physics. Today, nuclear emulsion technique is still being developed and used. In the new designed experiments, nuclear emulsions are placed in front of the beam of particles created in accelerators, and it is aimed to clarify the relations, interactions and characteristic features of subatomic particles. For this purpose, the CHORUS, DONUT, PEANUT and OPERA experiments were carried out to understand the nature of the neutrino particle. The nuclear emulsion technology has been used successfully applied in these experiments and the SHIP experiment, which is still in the design phase, nuclear emulsion technology will be used. In this study, the development stages of nuclear emulsion technology, which are widely used in particle physics, the materials and methods used are examined in the light of modern neutrino experiments. In the coming years, it is expected that nuclear emulsion technology will gradually develop and important results will be achieved in particle physics by directing new generation experiments and researches.

**Keywords:** neutrino, nuclear emulsion, particle physics

### GİRİŞ

Bilim insanları, 20. yüzyılın başlarında maddenin en küçük yapı taşının atom olduğunu düşünüyorlardı. Daha sonraki yıllarda atom çekirdeğinin nükleer bozunumlar ile bölünebildiği anlaşılınca, çekirdeği oluşturan proton ve nötron ile atom çekirdeğinin etrafındaki elektronu incelemeye

Derleme makalesi/Review article  
 DOI: 10.29132/ijpas.796186

başladılar. Böylece yeni bir alan olan parçacık fiziği gündeme geldi. Parçacık fiziğinde maddeyi oluşturan temel parçacıklar araştırılmakta ve bu parçacıkların birbirleriyle olan ilişkileri, etkileşimleri ve karakteristik özellikleri üzerinde durulmaktadır. Bu nedenle temel bileşenlerin saptanması ve tanımlanması oldukça önemlidir.

Atom altı parçacıkların gözlemlenmesi oldukça zordur bu nedenle bilim insanları tarafından hep merak konusu olmuştur. Atom altı parçacıkların ömürleri çok kısa olduğundan normal şartlar altında doğrudan gözlemlemek mümkün değildir, bu durum parçacıkları tespit etmeyi ve doğasını anlamayı oldukça güç hale getirmektedir. Bu parçacıklardan en öne çıkan nötrinodur. Oldukça nadir etkileşim yapan nötrinin doğasını anlayabilmek için birçok deneysel ve kuramsal çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan ve hayata geçirilen deneyler sayesinde, elde edilen sonuçlar nötrino hakkında belirli bir bilgi birikimi oluşturmuştur. Evrende oldukça bol bulunan ve önemli görevleri olan nötrinolar hakkında halen bilmediğimiz birçok yön bulunmaktadır. Bu amaçla günümüzde tasarlanan özel algıçlar veya deneyler ile gerçekleştirilen doğrudan ya da dolaylı gözlemler nötrino hakkında önemli bilgiler vermektedir (Kamışcıoğlu, 2017).

Tasarlanan parçacık deneylerinde, yüklü parçacıkları gözlemek ve izlerini takip etmek üç boyutlu etkileşimlerin görüntülerini yeniden oluşturmak için, büyük oranda nükleer emülsiyon teknolojilerinden yararlanılmaktadır. Bu özellikleri sebebiyle nükleer emülsiyon, parçacık fiziğinde önemli bir yere sahiptir. Böylesine önemli bir parçacık algıç teknolojisinin nasıl geliştiği, hangi aşamalardan geçtiği, hangi materyal ve metotların uygulandığı, günümüz deneylerinde nasıl kullanıldığı ve günümüz deneylerini nasıl etkilediği merak konusu olmuştur. Bu teknolojinin giderek gelişeceği ve gelecek yıllardaki deneyleri de doğrudan etkileyeceği düşünülmektedir. Bu araştırma böyle bir ihtiyaçtan doğmuş ve alanda çalışanların konuya dikkati çekilmek istenmiştir.

1930'dan önce çekirdeğin proton ve nötronlardan oluştuğu biliniyordu. Beta bozunumunda enerji korunumunu inceleyen Wolfrang Pauli sürekli enerji spektrumunu açıklamak için çok küçük bir kütleyle sahip, yüksüz ve neredeyse hiç etkileşmeyen bir parçacığın varlığını öne sürmüş ve kendi ifadesi ile bu parçacığa umutsuz bir çare adını vermiştir. 1933'de Enrico Fermi, Pauli'nin

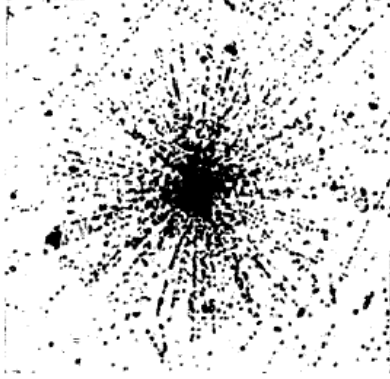
parçacığını İtalyanca küçük ve yüksüz anlamına gelen 'nötrino' olarak isimlendirmiştir. Böylece nötrino yeni bir parçacık olarak önerilmiş ve sıra deneylerle de desteklenmesine gelmişti (Kamışcıoğlu, 2017).

1954'de Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi olan CERN kurulduğunda nötrino halen gizemini korumaktaydı. Bundan 60 yıl sonra ise tüm atom altı parçacıklar arasında hala gizemini koruyan parçacık nötrino olmuştur. Nötrinoyu diğer parçacıklardan farklı kılan, kütlelerinin çok küçük olması ve salınım yapmasıdır. Bu zamana kadar tasarlanan deneylerle nötrinin kütlelerine sadece bir üst limit koyulabilmiştir. Salınım ise, zayıf etkileşimler yoluyla meydana gelen nötrinin belirli bir yol aldıktan sonra bir başka nötrino çeşidine dönüşmesidir. Salınım özelliğini ortaya koymak için gerçekleştirilen en önemli yeni nesil deneyler arasında, CHORUS (CERN Hybrid Oscillation Research Apparatus) ve OPERA (The Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus) bulunmaktadır. Türkiye'nin de yer aldığı ve büyük katkılarda bulunduğu uluslararası bu projelerde, nötrino etkileşimleri ve salınımları hakkında önemli sonuçlara ulaşılmıştır. Bu iki deney geniş çapta gerçekleştirilen iş birliği deneyleri olmalarının yanı sıra, her iki deneyde de nükleer emülsiyon teknolojisi ve benzer analiz tekniği kullanılmıştır. 2000 yılında gerçekleştirilen DONUT (Direct Observation of Nu-Tau) deneyinde yine emülsiyon teknolojisi kullanılarak tau nötrinosa keşfedilmiştir. Bu keşfin ardından DONUT deneyinde kullanılan algıçın bir kısmı yenilenerek 2005 yılında PEANUT (Petit-Exposure At NeUTrino beamline) deneyinde yeniden hayata geçirilmiştir. OPERA deneyi için bir ön hazırlık olarak tasarlanan deneyde farklı saçılma işlemlerinin toplam yüklü akım nötrino tesir kesitine olan katkısı ölçülmeye çalışılmıştır.

Nükleer emülsiyon, içinde gümüş bromür kristallerinin bulunduğu jel tabakanın bir baz üzerine dökülmesiyle oluşturulan bir parçacık algıçtır. Yüklü parçacıklar bu yapılardan geçtiklerinde görünmeyen bir iz bırakırlar, sonrasında çeşitli kimyasallardan geçirilerek iz sabitlenir ve yüksek çözünürlüklü optik mikroskoplar tarafından görünür hale getirilir. Nükleer emülsiyon, sahip olduğu yüksek uzaysal çözünürlüğü sayesinde yüklü parçacıkların izlerinin takip edilmesine ve bulut odası tekniği ile de üç boyutlu etkileşimlerin görüntülerini yeniden oluşturmasına, enerji ve momentum

Derleme makalesi/Review article  
 DOI: 10.29132/ijpas.796186

ölçümlerinin yapımına olanak sağlamaktadır (Serio ve ark., 2003). Bu nedenle, halen Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi olan CERN’de ve çeşitli ülkelerde yürütülen geniş kapsamlı parçacık fiziği deneylerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Rokujo ve ark., 2016).

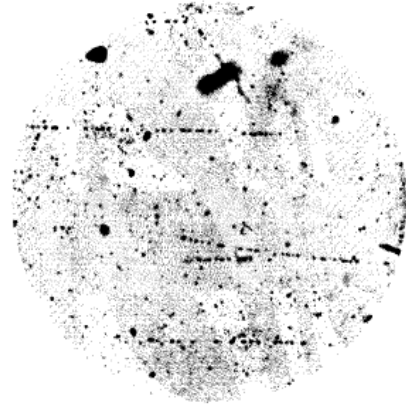


Şekil 1. Kinoshita ve Ikeuti 1915’deki çalışmasının bir görüntüsü

Nükleer emülsiyonun bir algıç olarak kullanılması, yani yüklü parçacıkların bir emülsiyon vasıtası ile tespit edilmesi 1910’larda Kinoshita tarafından yapılan çalışmalarla başlamıştır (Kinoshita, 1910). Kinoshita bir mikroskop yardımı ile alfa parçacıklarının kendi ifadesi ile “hassas fotoğraf filmler” üzerinde algılanabilir bir etki ürettiğini gözlemlemiştir. Kinoshita’nın hassas fotoğraf filmler olarak nitelendirdiği emülsiyon filmleri, aslında geleneksel fotoğrafçılık için kullanılan ile aynıdır. 1911’de Reinganum tarafından gerçekleştirilen deneyde elde edilen sonuçlar ise Kinoshita’yı doğrular niteliktedir. Bir fotoğraf filmine teğet olarak yansıtılan alfa ışınlarının mikroskopik incelemesinde her bir alfa parçacığının yolu gümüş tanelerinin oluşturduğu izler olarak görülmüştür (Herz ve ark., 1966). Daha sonra Kinoshita ve Ikeuti 1915’deki çalışmasında ise ucunda aktif radyum taşıyan bir dikiş iğnesini hassas fotoğraf filmler üzerine temas ettirmiş ve alfa parçacıklarının izlerini Şekil 1’deki gibi gözlemlemeyi başarmışlardır. Bu çalışmalar emülsiyonun ilerde bir algıç olarak kullanılabilmesinin ilk sinyallerini vermektedir (Kinoshita ve Ikeuti, 1915).

1900’lerde atom altı parçacıkların bıraktığı izlerin bir fotoğraf filmi üzerinde görülebilir hale

gelmesi, bu alandaki çalışmaların hızlanmasını sağlamıştır. 1932’lerin başlarına gelindiğinde Blau ve asistanı Wambacher hidrojen bakımından zengin emülsiyon filmlerini kullanarak protonların geri tepme izinden nötron enerjilerini belirlemeyi başarmışlardır. Ardından kozmik parçacıkları da gözleyebileceklerini düşünerek emülsiyon filmlerini 2300 m yükseklikte bir dağın tepesinde, beş ay boyunca bekletmişlerdir. Sonuçlar oldukça çarpıcıdır, çünkü emülsiyon filmlerini incelediklerinde beklenmedik şekilde normalden daha da uzun izler ile karşılaşmışlardır. Bu sonuç, daha önce bilinen her şeyden daha yüksek derecede yüksek enerjili kozmik parçacıkların var olduğunu göstermekteydi. Bazı emülsiyon filmlerinde ise, daha önce görülmeyen ve bir yıldızla benzeyen bir dizi izler kümesi gözlemlenmişti.



Şekil 2. Blau ve Wambacher yıldızı (altın etkileşim)

Şekil 2’de verildiği üzere ‘altın etkileşim’ adı verilen bu izler aslında emülsiyondaki gümüş veya brom atomlarıyla çarpışan kozmik ışınların bir sonucuydu. Atomların parçalanması sonucu emülsiyonda bu izleri gözlemlemişlerdi. Blau ve Wambacher yıldızı olarak bilinen bu sonuçlar dünya çapında beğeni toplamış ve emülsiyon filmlerinin parçacık fiziğinde daha fazla yolunu açmıştır (Rayner-Canham ve Rayner-Canham, 1997).

1940’lara gelindiğinde artık emülsiyon filmler ile alfa parçacıklarının, döteronun ve protonun izleri belirlenebilmekteydi. Ancak var olan emülsiyon teknolojisinin iyileştirilmeye ihtiyacı vardı. Oluşan izler daha da netleştirilmeli, büyük miktarlarda izlerin sayımı yapılabilmeli ve farklı deneylerde kullanabilmek üzere emülsiyon filmlerine farklı atomlar eklenebilmeliydi (Peter, 1997). Bu amaçla

Derleme makalesi/Review article  
 DOI: 10.29132/ijpas.796186

1946'da C. F. Powell ve arkadaşları yüklü ve kozmik parçacıkların tespit edilebilmesi için Ilford ve Kodak firmasının ürettiği 'elektron duyarlı' ticari emülsiyonları kullanarak çeşitli araştırmalar yürütmüşlerdir. 1947'de çalışmalar sonuç vermiş, Powell ve arkadaşları emülsiyon filmlerinde Şekil 3'deki izleri gördüklerinde pionu keşfettiklerini duyurmuşlardır. Bu keşif parçacık fiziği açısından büyük bir adımdır ve bundan üç yıl sonra Powell, emülsiyon tekniğini geliştirilmesi ve pionun keşfi nedeniyle Nobel Ödülü'ne layık görülmüştür (Latters ve ark., 1947).

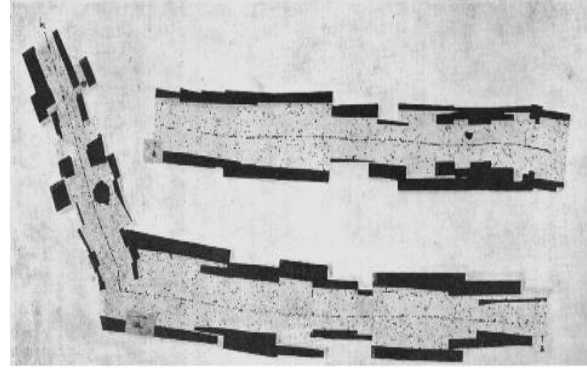
1950'lere doğru artık emülsiyon filmleri daha kalın, gümüşhalid-jelatin oranı daha yüksek ve geliştirilen gümüş taneleri daha küçük olduğundan geleneksel fotoğrafçılık için kullanılan optik filmlerden oldukça farklıydı. Artık amaca yönelik olarak üretilmeye başlanan emülsiyonlar ile nükleer etkileşimleri gözlemlemek, enerjilerini ölçmek mümkün hale gelmişti ve atom altı parçacıkların keşifleri peş peşe gerçekleşmeye başladı. 1949 da Brown ve arkadaşları (Brown ve ark., 1949), tarafından  $K^+$  ve  $K^-$  keşfini, A. Bonetti tarafından  $\Sigma^+$  parçacığının keşfi izlemiş ve sonrasında Baldo Ceolin (Prowse ve Baldo, 1958) tarafından 1958'deki  $\Lambda^0$  parçacığının keşfi takip etmiştir (Sun ve Zhang, 2008).

1951'de Kaplon kozmik ışın radyasyonunu incelemek için yeni bir teknik olan "emülsiyon bulut odası" tekniğini (BOT) tanıtmış ve kullanmıştır. Bu teknikte, bir dizi nükleer emülsiyon filminin arasına çeşitli pasif materyaller yerleştirilerek sıkı ve yoğun bir algıç oluşturulur. Böylece nükleer emülsiyonlar parçacıkların yayılma yönlerinin takibini ve yayılma açılarının mikrometrik bir uzaysal çözünürlükle ölçülmesine olanak sağlamaktadır (Kaplon ve ark., 1952). Bu teknik atom altı parçacıklar ile ilgili daha de detaylı bilgiye ulaşılmasını sağlayan önemli bir buluştur.

İlk zamanlar Ilford ve Eastman firmalarının ürettiği emülsiyonlarla oluşturulan bulut odası paketleri zamanla geliştirilmiştir. Özellikle Nishimura tekniğın gelişmesinde önemli katkılarda bulunmuş ve elektromanyetik duş tarafından indüklenen gama ışınlarının enerjilerini bulut odası tekniğini ile ölçülmesini önermiştir.

1971'e gelindiğinde ise K. Niu ve arkadaşları bir kargo uçağına yerleştirdikleri bulut odası paketleri ile kozmik ışına bağılı bir olayı gözlemleyerek X parçacıklarının keşfini gerçekleştirmişlerdir. Aynı

zamanda K. Niu günümüzde kullanılan çift taraflı nükleer emülsiyon plakalarının da mucididir (Ereditato, 2013).



Şekil 3. Powell ve arkadaşları tarafından emülsiyonda gözlenen pionun izi (Latters, Occhialini, ve Powell, 1947)

Çift taraflı nükleer emülsiyonlar, plastik bir tabakanın her iki tarafına yerleştirilmiş emülsiyon filmlerinden oluşan yapılardır. Bu yöntem sayesinde nükleer emülsiyon tabakaları plastik tarafından sabit tutularak parçacıkların bıraktığı izlerin açıları yüksek hassasiyetle ölçülebilmektedir.

1910'lardan beri geliştirilerek gelen nükleer emülsiyon tekniğı, günümüzdeki yeni nesil modern parçacık fiziğı deneylerinden CHORUS, DONUT, PEANUT ve OPERA 'da da başarıyla kullanılmıştır. Teknik halen kullanılmakta ve geliştirilmeye devam etmektedir. Son yıllarda tasarlanan yeni projelerden biri olan SHIP (Search for Hidden Particles) deneyinde de kullanılması planlanmaktadır.

### MATERYAL VE METOT

Parçacık fiziğı deneylerinde kullanılan nükleer emülsiyon teknolojisi için çeşitli materyal ve yöntemler kullanılmaktadır. Bunlar aşağıda sırasıyla verilmektedir.

#### Emülsiyon Materyalleri

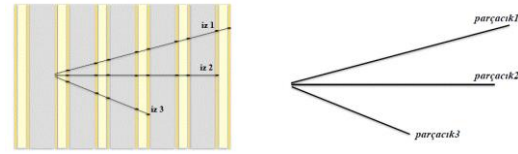
Parçacık fiziğı alanındaki çalışmalarda nükleer emülsiyonun önemli bir yeri olmasının sebebi sahip olduğu avantajlarıdır. Öncelikle nükleer emülsiyon içinden geçen yüklü parçacıkların sürekli ve kalıcı kaydını sağlamaktadır. Ayrıca emülsiyon ucuz, hafif bir malzemedir ve balonla bile taşınabildiğinden kozmik çalışmalarda için oldukça uygundur. Emülsiyonun yoğunluğu yaklaşık  $3.44 \text{ g cm}^{-3}$

Derleme makalesi/Review article  
DOI: 10.29132/ijpas.796186

değerinde olup, havadan en az 1000 kat daha fazla durdurma gücüne sahiptir. Böylece kısa ömürlü, karasız ve yüksek enerjili birçok parçacık bozunuma uğramadan önce nükleer emülsiyon içinde tespit edilebilmekte ve bozunum şemaları çalışılabilir (Arora, 2013; Asada ve ark., 2017). Nükleer emülsiyonu yüksek hassasiyetli bir algı haline getiren onu oluşturan materyaller ve teknolojisidir. Nükleer emülsiyon jelatin ve gümüş bromür kristallerinden oluşmaktadır. Kristalleri içeren jel tabakanın büyüklüğü kullanılan deneye ve amaca göre değişebilmektedir. Benzer şekilde gümüş bromür kristallerinin büyüklüğü de deneyin amacına göre değişebilmektedir. Günümüzde yaklaşık 30-40 nm çapında kristal içeren emülsiyonlar ile çalışılmaktadır (Morishima, 2015).

Yüklü parçacıklar nükleer emülsiyonun yüzeyinden geçtiğinde bir elektronu serbest bırakarak gümüş iyonunu, gümüş atomuna çevirmektedir. Oluşan bu gümüş atomları henüz görünmeyen bir iz oluşturmaktadırlar. Sonrasında nükleer emülsiyon tabakaları kimyasal bir süreçten geçirilir ve bu süreçte gümüş atomları, gümüş iyonlarından daha hızlı metalik gümüşe dönüşür. Bu dönüşüm gümüş atomlarının çapını artırır ve optik mikroskop tarafından görünür hale getirir. Böylece Şekil 4'de

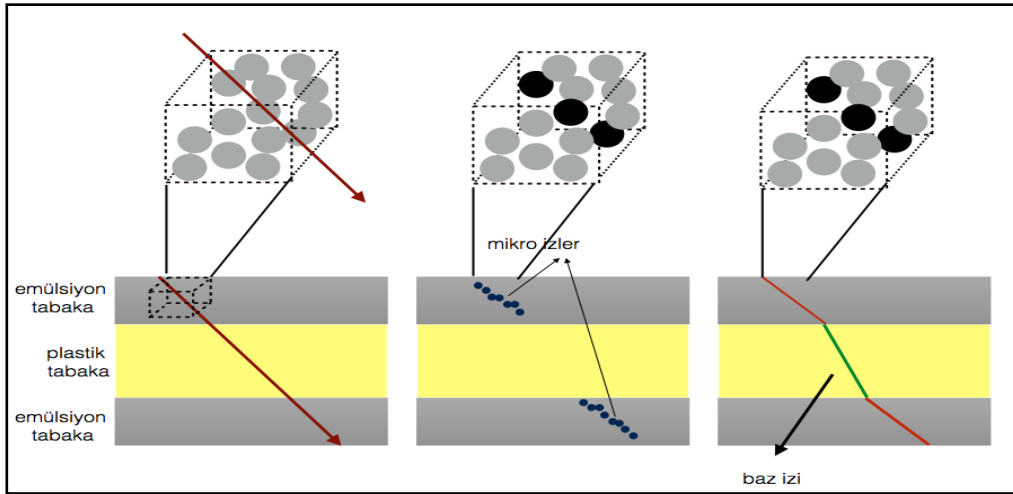
nükleer emülsiyondaki mekanik bir bozunmadan etkilenmeden izler takip edilmekte ayrıca çevresel kaynaklı birçok parçacık plastik kısma geçemediğinden, analiz yapılırken otomatik olarak elenmektedir. Ayrıca meydana gelen bu izleri görebilmek kaydedebilmek ve yeniden oluşturabilmek için çeşitli optik mikroskoplar geliştirilmiştir. Bu mikroskoplar nükleer emülsiyon yüzeylerini tabaka tabaka tarayarak etkileşimin 3 boyutlu görüntüsünü Şekil 5'de gösterildiği gibi yeniden oluşturmaktadır (Kamışcıoğlu, 2017).



Şekil 5. Etkileşimi yeniden oluşturma

#### Emülsiyon Yöntemleri

Parçacık fiziği araştırmalarında nükleer emülsiyon teknolojisi iki yöntemle uygulanmaktadır. Bunlardan ilki doğal kaynaklardan oluşan



Şekil 4. Çift taraflı emülsiyon filminden geçen yüklü parçacığın izi

verildiği gibi yüklü parçacıkların izleri oluşmaktadır. Plastik tabakanın her iki tarafında meydana gelen izlerin çakışması takip edilerek yüklü parçacığın izi sonrasında ise etkileşime ulaşmak mümkündür. Orta kısımda plastik bir tabakanın varlığı sayesinde

parçacıkların izlediği yolun üzerine nükleer emülsiyonların konumlandırılmasıdır.

Bu tekniğe örnek birer balon deneyi olan ve kozmik ışınların gözlenmesi için tasarlanan RUNJOB (Karmioka ve ark., 2000) ve JACEE (Takahashi ve

Derleme makalesi/Review article  
DOI: 10.29132/ijpas.796186

Dake, 1987) deneyleridir. Bu deneylerde hafif ve küçük boyutlu olan nükleer emülsiyonlar balonlar vasıtasıyla oldukça yüksek mesafelere taşınabilmekte böylece kozmik ışınlar ve yüksek enerjili parçacıkların etkileşimlerine ilişkin çeşitli çalışmalar yapılabilmektedir. Tarihte bu yöntem kullanılarak birçok keşif yapılmıştır.

Diğer yöntem ise, nükleer emülsiyonun hızlandırıcılarda oluşturulan parçacık demeti önüne yerleştirilerek kullanılmasıdır. Bu teknikte enerji ve geometri hesapları yapılarak etkileşimin nükleer emülsiyon içinde durması sağlanmaktadır. Böylece nükleer emülsiyon meydana gelen etkileşim ve parçacıklar hakkında gerekli bilgiyi vermektedir. Bu amaçla gerçekleştirilen deneyler arasında DONUT (Kodama ve ark., 2002), CHORUS (Eskut ve ark., 1997), PEANUT (Aoki ve ark., 2010), ve OPERA (Agafonova ve ark., 2013) bulunmaktadır.

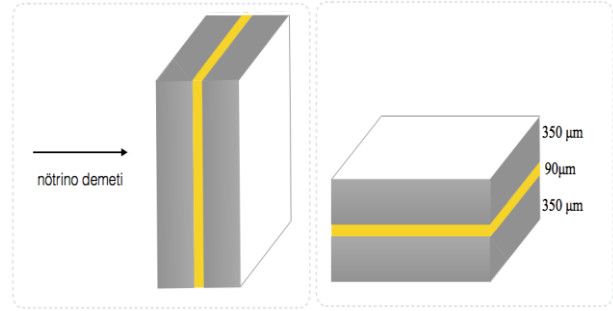
### Deneysel Çalışmalar

Son yıllarda tasarlanan ve hayata geçirilen parçacık fiziği deneylerinde nükleer emülsiyon tekniği yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu deneylerden bazıları CHORUS, DONUT, PEANUT ve OPERA olarak sıralanmaktadır. Bu deneyler etkileşimi oldukça nadir olan nötrino parçacığının doğasını anlamak üzere tasarlanmıştır. Bu deneylerdeki ortak özellikler nötrino demeti kullanmaları, nötrino parçacığının özelliklerini araştırmaları ve bu amaçla nükleer emülsiyon kullanmalarıdır. Henüz tasarım aşamasında olan SHIP deneyi de nötrino araştırmaları amaçlı nükleer emülsiyon tekniğinden yararlanacaktır. Deneylere ilişkin detaylar aşağıda verilmektedir.

### CHORUS deneyi

CHORUS deneyi  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$  salınımını gözlemlemek amacıyla tasarlanmış Türk çalışma gruplarının da aralarında bulunduğu uluslararası bir iş birliği deneyidir. Nükleer emülsiyon hedefteki yüklü akım etkileşmelerinde  $\nu_{\tau} N \rightarrow \tau^{-} X$  tau leptonun bozunumunun doğrudan gözlemlenmesi deneyin ana amacıdır. Algıç, emülsiyon filmleri ve elektronik kısmın bir arada olduğu hibrit bir yapıya sahiptir. Ortalama nötrino enerjisi 26 GeV olan CERN SPS geniş band nötrino demeti kullanılmış ve bu demet önüne dik bir şekilde yerleştirilen nükleer emülsiyon filmleri deneyde kullanılan ana hedeflerdir (Vyer, 1997).

Analizde, tau leptonun muona bozunduğu ve tek hadrona bozunduğu kanallar topolojik olarak incelenmiştir. Her iki kanal için de sahte tau bozunumu oluşturabilecek olası arka plan kaynakları incelendiğinde yaşam ömrü ve bozunum topolojisi tau parçacığı ile oldukça benzer olan tılsımlı parçacık üretimi olduğu görülmüştür. Bu olayların oranı  $\nu_{\mu}$  yüklü akım etkileşimi başına  $10^{-6}$ 'dır. Arka plan etkileri analizde çeşitli kinematik seçimler uygulanarak azaltılmıştır. Kullanılan nükleer emülsiyon filmleri çift taraflıdır ve Şekil 6'da verildiği gibi 90  $\mu\text{m}$  kalınlığındaki plastik tabanın her iki yanına 350  $\mu\text{m}$  kalınlığında nükleer emülsiyon filmlerin yerleştirilmesiyle oluşturulmuştur.



Şekil 6. CHORUS deneyi emülsiyon filmleri

Boyutları 36x72 cm olan filmler oldukça büyüktür ve CHORUS, böylesine büyük nükleer emülsiyonların kullandığı ilk deneydir (Eskut ve ark., 1997).

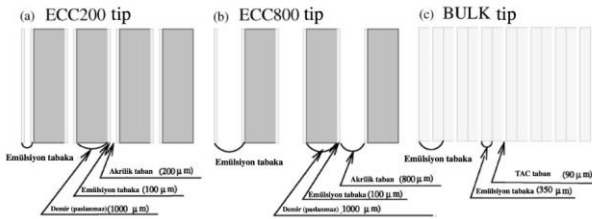
Nükleer emülsiyonlar mikrometrik çözünürlükleri sayesinde etkileşimlerin üç boyutlu görüntülerinin yeniden yapılandırılmasında,  $\tau$  parçacığı gibi kısa ömürlü parçacıkların bozunum şemalarının oluşturulmasında ve nötrino etkileşim köşe noktalarının tespitinde oldukça güçlü bir teknik olduğundan deneyde başarıyla kullanılmıştır (Eskut ve ark., 2008).

### DONUT deneyi

Aynı yıllarda paralel olarak varlığı çeşitli teorilerle ispatlanmış olan ancak doğrudan gözlemi henüz yapılmamış olan tau nötrinosa merak uyandırmaktaydı ve bu gözlemi doğrudan yapmak Fermilab DONUT deneyinin bilimsel hedefiydi. Bu amaçla DONUT deneyi parçacığını yüklü akım etkileşmelerinde direkt gözlemlemek üzere tasarlanmış uluslararası bir iş birliği deneyidir. Deney emülsiyon ve sintilasyonlu fiber

Derleme makalesi/Review article  
DOI: 10.29132/ijpas.796186

izleme istasyonlarından oluşmuş hibrit bir yapıya sahiptir. Kullanılan nötrino demeti Fermilab'ın Tevatron'unda 800 GeV'lik protonların katı tungsten alaşım bloğa çarpıtılmasıyla oluşturulmuştur (Kodama ve ark., 2008). Hedef kısım nötrino demeti yönüne dik olarak yerleştirilmiş nükleer emülsiyon tabakalarının tekrarlanan yapıları şeklindedir. Deneyde kullanılan üç farklı nükleer emülsiyon hedef tasarımı vardır.



Şekil 7. DONUT deneyi emülsiyon filmi (Kodama ve ark., 2002)

Şekil 7'de gösterildiği gibi DONUT deneyinde boyutları 50x50 cm olan 3 farklı bulut odası tekniği kullanılmıştır. ECC200 olarak isimlendirilen pakette 200 µm kalınlığındaki akrilik tabanın her iki yanına 100 µm kalınlığında nükleer emülsiyon tabakalar yapıştırılmış ve aralara 100 µm kalınlığında demir plakalar yerleştirilmiştir. ECC800 olarak isimlendirilen pakette ise akrilik taban 800 µm kalınlığa sahiptir, her iki yanına 100 µm kalınlığında nükleer emülsiyon tabakalar yapıştırılmış ve aralara 100 µm kalınlığında demir plakalar yerleştirilmiştir. BULK pakette ise sadece 350 µm kalınlığında nükleer emülsiyonlar nötrino hedefi olarak görev yapmıştır.

Asıl amacı  $\nu_\tau$  yüklü akım etkileşimlerini incelemek olan DONUT deneyinde veri alımı sırasında  $\nu_e$  yüklü akım ve yüksüz akım etkileşimlerinin de kaydedildiği anlaşıldı. Sonrasında yapılan çalışmalar gösterdi ki tılsımlı parçacık üretiminin topolojik imzası  $\nu_\tau$  etkileşimlerine çok benzemektedir. Bu nedenle  $\nu_\tau$  ve  $\nu_e$  yüklü akım etkileşimleri tau örnekleri için birincil arka plan oluşturmaktadır. Ele alınan ikinci arka plan kaynağı ise yüksüz akım etkileşimlerinde üretilen hadronların etkileşimleridir.

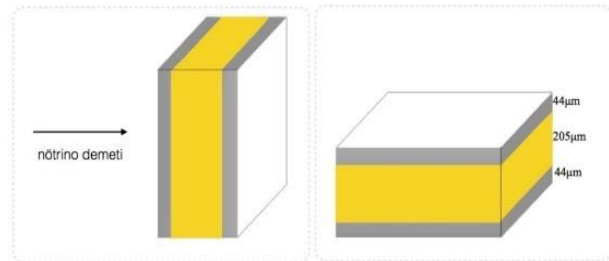
DONUT deneyi tasarımı sayesinde tau nötrinoyu 2000 yılında başarıyla tespit etmiştir ancak bu başarısının asıl sebebi nükleer emülsiyon tabakaların arasına yerleştirilen demir plakaların oluşturduğu

bulut odası tekniğinin kullanılmasıdır. Bu teknik ile yüksek enerjili nötrinoların tespiti mümkün hale gelmiştir.

### PEANUT deneyi

PEANUT deneyi, emülsiyon bulut odası tekniğini kullanarak 3-4 GeV enerji aralığında gerçekleşen nötrino etkileşimlerini incelemek için tasarlanmıştır. Deneyin asıl amacı, nötrino etkileşimlerinin topolojisini hassas bir şekilde yeniden yapılandırmak ve tesir kesitine olan katkıları ölçmektir. Bu sonuçlar, gelecek için tasarlanan düşük enerjili nötrino salınım deneylerinin performansını optimize edebilmek için oldukça önemlidir. Bu amaçla deneyde emülsiyon teknolojisi kullanılmıştır. Böylece, mikrometrik hassasiyet ile ölçüm alınabilmekte, sistematik belirsizlikler ihmal edilebilmekte ve nötrino etkileşimlerinin topolojik olarak yeniden yapılandırılması sağlanmaktadır.

PEANUT deney algıç Fermilab'da MINOS deney algıcının yanına yerleştirilmiş ve  $\nu_\mu$  NuMI demeti (Neutrinos at the Main Injector (NuMI) beam) kullanılmıştır (Kopp, 2005). Algıç kısmında emülsiyon ve elektronik algıçtan oluşan hibrit bir yapı bulunmaktadır. Elektronik kısım,  $\nu_\mu$  etkileşimlerin köşe noktalarının yerini hedef içinde tespit ederken, hedef kısmında yer alan nükleer emülsiyon mikrometrik çözünürlüğü sayesinde, müon nötrinoyu etkileşimlerinin düşük enerjideki çalışmalarını yüksek hassasiyetle gerçekleştirmek için oldukça uygundur.



Şekil 8. PEANUT deneyi emülsiyon filmleri

Kullanılan nükleer emülsiyonlar çift taraflı olup Şekil 8'de de gösterildiği gibi 205 µm kalınlığındaki plastik kısmın her iki yanına 44 µm kalınlığında nükleer emülsiyon tabakalar yapıştırılarak oluşturulmuştur. Filmler bulut odası tekniği kullanılarak paketlenmiştir. Her bir bulut odası paketi plastik bir kutu içerisine 55 adet nükleer emülsiyon 1

Derleme makalesi/Review article  
 DOI: 10.29132/ijpas.796186

mm kalınlığındaki kurşun plakalar ile sandviç oluşturacak şekilde paketlenmiş ve 2 tanesi de özel tabakalar olarak adlandırılarak en alta yerleştirilmiştir (Aoki ve ark., 2010). Bu paketler diğer deneylerde de olduğu gibi nötrino demeti önüne dik bir şekilde yerleştirilmişlerdir. Boyutları 12.5x10.0 cm olan birimlerden deneyde 48 adet kullanılmıştır.

### OPERA deneyi

CHORUS ve DONUT deneylerinde kullanılan sistemin, uygulanan yaklaşımların ve tekniklerin sonucu elde edilen veriler parçacık fiziğinde büyük yankı uyandırmıştır. Nötrinolar ile ilgili çok az bilgiye ulaşılabildiğinden dolayı hala gizemini korumaktadır. Bu nedenle de bu konu bilim insanları tarafından kapsamlı bir şekilde çalışılmakta ve bunun için de yeni nesil deneylere ihtiyaç duyulmaktadır. Böylece elde edilen sonuçlar ve kazanılan tecrübe OPERA deneyinin altyapısını oluşturmuştur. Deney  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  salınımını doğrudan gözlemlemek amacıyla tasarlanmış, Türk araştırma gruplarının da yer aldığı uluslararası bir nötrino salınım projesidir.

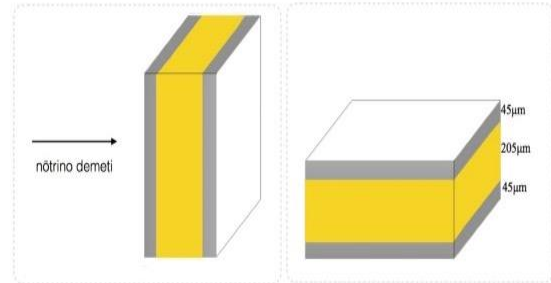
OPERA deneyi, emülsiyon ve kurşun hedefin oluşturduğu yaklaşık 1,25 kt'luk toplam kütleyle sahip olup elektronik algıçla tamamlanan hibrit bir yapıya sahiptir. Yüklü akım  $\nu_\tau$  etkileşimlerinde üretilen tau leptonunun tespiti, mikrometrik uzaysal çözünürlük sağlayan nükleer emülsiyon tekniği ile gerçekleştirilmiştir. Tau leptonun belirlenmesi ise karakteristik bozunma topolojilerinin tek kanal olan elektron, muon veya hadrona ya da üç hadron kanalına olmaktadır. Tau bozunum topolojilerini taklit eden birtakım süreçler bulunmakta ve bunlar da arka planı oluşturmaktadır. Bu süreçler;  $\nu_\mu$  yüklü akım etkileşimlerde üretilen tılsım parçacıklarının bozunması, kurşundaki  $\nu_\mu$  olaylardan çıkan hadronların yeniden etkileşimi ve  $\nu_\mu$  yüklü akım etkileşimlerde oluşan geniş açılı muonların saçılması şeklindedir. Analizde uygulanan çeşitli kinematik seçimler ile arka planların etkisi azaltılmıştır.

Deneyin hedef kısmında bulut odası tekniği kullanılmıştır. Her bir bulut odası paketi Şekil 9'de gösterildiği gibi plastik bir kutu içerisine 57 adet nükleer emülsiyon ile 56 adet kurşun plakaların sandviç gibi yerleştirilmesi ile oluşturulmuştur. Deneyde bu paketlerden 15000 tane kullanılmıştır. Bu özellikleri ile şimdiye kadarki en geniş nükleer emülsiyon algıcına sahiptir. Kurşun plakalar kısa radyasyon mesafesi ve nükleer emülsiyon filmlerine

göre yüksek yoğunluğu sebebi ile OPERA bulut odası paketlerinde kullanılmak üzere seçilmiş malzemelerdir. Bu sayede nötrino etkileşim oranının artırılması sağlanmıştır. Bu paketler diğer deneylerde de olduğu gibi nötrino demeti önüne dik bir şekilde yerleştirilmişlerdir. Boyutları 12.7x10.2 cm olan birimlerin bir tanesi 8.3 kg'dır. Kullanılan nükleer emülsiyonlar çift taraflı olup Şekil 10'da da gösterildiği gibi 205  $\mu\text{m}$  kalınlığındaki plastik tabanın her iki yanına 45  $\mu\text{m}$  kalınlığında nükleer emülsiyon tabakalar yapıştırılarak oluşturulmuştur.



Şekil 9. OPERA deneyi emülsiyon plakalar



Şekil 10. OPERA deneyi emülsiyon filmleri

### SHIP deneyi

Bilindiği üzere 1970'li yılların başında geliştirilen Standart Model'de atom altı parçacıkların ve kuvvetlerin birbiri ile olan ilişkileri açıklanmıştır. Günümüze kadar Standart Modelde öne sürülen parçacıklar gözlemlenmiştir ancak bazı olayları açıklamak için henüz bilinmeyen yeni parçacıklar veya etkileşimler öne sürülmektedir (Kamışcıoğlu, 2017). Ancak bunları test etmek ve açıklamak gereklidir.

Bu amaçla tasarlanan ve henüz gelişme aşamasında olan bir diğer günümüz deneyi ise SHIP'dir. SHIP, çok zayıf etkileşen parçacıkları Standart Model'in ötesinde araştırmayı ve tau



Derleme makalesi/Review article  
 DOI: 10.29132/ijpas.796186

nötrinoların özelliklerini incelemeyi amaçlayan bir deneydir. SHIP, Türk araştırma gruplarının da yer aldığı 18 ülkedeki 54 enstitüden bilim insanlarının katılımı ile oluşturulmuş uluslararası bir iş birliği deneyidir. Deneyi özgün kılan ise henüz bilinmeyen gözlemlemeye çalışacak olması ve bu amaçla nükleer emülsiyon teknolojisini kullanmasıdır. Tau nötrino etkileşimlerini önceki deneylere göre 400 kat daha hassas bir şekilde tespit edebilecek ve bunu nükleer emülsiyon temelli algılayıcı ile yapması planlanmaktadır.

Algılayıcı en iyi performansı sağlayacak şekilde optimize edildiğinden, deneyin hedef kısmında OPERA deneyine benzer olarak bulut odası tekniği kullanılması planlanmaktadır. Deney aktif olarak veri alınmaya henüz başlamamış ancak test aşamaları devam etmektedir (Konovalova, 2019).

## SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Nükleer emülsiyon filmleri, Kinoshita'dan beri yaklaşık 100 yıldır parçacık fiziğinde aktif olarak yer almış bu nedenle nötrino deneylerinde önemli bir yeri vardır. Geçmişten günümüze kadar nükleer emülsiyon materyalleri, yöntemleri ve teknolojisinde önemli gelişmeler olmaktadır. Bu gelişmeler parçacık fiziğine teorik ve deneysel yönden ciddi katkılar sağlamaktadır. Nükleer emülsiyon tekniğinin en önemli özelliği mikro metrik çözünürlüğü sayesinde yüklü parçacıkları izlemeye ve gözlemeye olanak sağlaması ve tekniğin sürekli geliştirilebilir olmasıdır. Böylece tau parçacığı gibi çok kısa ömürlü parçacıkların tespit edilmesinde çok kullanışlıdır. Bu sayede nötrino başta olmak üzere birçok atom altı parçacığın doğasını keşfetmemizde ve teorik çalışmaların desteklenmesinde rolü büyüktür.

Nötrino parçacığı ile ilgili soruları cevaplamaya çalışan, CHORUS, DONUT, PEANUT ve OPERA gibi uluslararası, büyük bütçeli olan günümüz modern nötrino deneylerinde nükleer emülsiyon tekniği özellikle tercih edilmekte ve başarıyla kullanılmaktadır. Bu deneylerde kullanılan bulut odası tekniğinde, emülsiyon filmleri çeşitli pasif malzemeler ile bir paket haline getirilip asıl ağır kütleli oluşturmaktadır. Bu paketler çeşitli elektronik algıçlarla desteklenerek hibrit olarak nitelendirilen bir yapıya ulaşmaktadır. Ardından yönlendirilen nötrino demetleri bulut odası paketlerinde etkileşim yapmakta ve yüklü parçacıkların izleri emülsiyon plakalarda oluşmaktadır. Sonraki süreçte emülsiyon filmleri

bulut odasından çıkarılarak aynı fotoğraf filmleri gibi karanlık odada çeşitli kimyasallardan geçirilerek yüklü parçacıkların izleri görünür hale getirilmektedir. Ardından optik mikroskoplar vasıtasıyla emülsiyon filmleri taranarak görüntüler birleştirilmekte ve nötrino etkileşimlerine ulaşarak analiz aşaması başlamaktadır. Bu aşamaları tamamlayarak, veri alınmaya 1994-1997 yılları arasında gerçekleştirmiş olan CHORUS deneyinde, 100 000'den fazla nötrino etkileşiminin nükleer emülsiyon plakalarda yeri belirlenmiştir. Ancak istenilen hedef olan salınım gözlenememiş sadece salınım olasılığına bir üst limit koyulabilmiştir. Buna göre görünüm olasılığı için %90 güven seviyesi ile üst limit  $2.2 \times 10^{-4}$  olarak verilmiştir. Bu sonuç geniş  $\Delta m^2$  için  $\sin^2 2\theta_{\mu\tau} < 4.4 \times 10^{-4}$  değerine karşılık gelmektedir. Kullanılan emülsiyon hedeflerin büyüklüğü ve teknik özellikler açısından CHORUS deneyi eşsiz bir deney olarak tarihe geçmiştir (Eskut ve ark., 2008).

1997 yılının yaz aylarında kısa bir süre içerisinde tamamlanan DONUT deneyi ise aynı yıl veri alınmaya da gerçekleştirmiş ve emülsiyon hedefte 578 nötrino etkileşiminin yeri belirlenmiştir. Tahmini 1.5 olay arka planı ile  $9 \nu_\tau$  etkileşimi gözlenmiştir. Bu sonuçlar, parametreler arasındaki ilişkileri içeren çok değişkenli bir analiz yöntemi kullanılarak elde edilmiştir ve böylece DONUT deneyi, 2000 yılında tau-nötrino'nun keşfini tüm dünyaya duyurmuştur (Kodama ve ark., 2008).

Veri alınmaya Eylül 2005'de başlayıp Mart 2006'da bitiren PEANUT deneyinde, bulut odası tekniğini sayesinde toplam 147 nötrino etkileşimi kaydedilmiştir. Nötrino etkileşim köşe noktalarının kurşun/emülsiyon hedef içindeki yeri belirlendikten sonra, köşe noktası prosedürleri uygulanarak olay topolojisi yeniden oluşturulmaya çalışılmış ve arka plan etkileri topolojik seçimler uygulanarak azaltılmıştır.

Sonuçta, toplam yüklü akım tesir kesitine katkı sağlayan kesirler  $a_j$  ile tanımlanmış, yarı elastik ( $a_{QE}$ ), derin elastik olmayan ( $a_{DIS}$ ) ve rezonans kesirleri ( $a_{RES}$ ) denklem 1'den elde edilmiş ve en iyi fit değerleri aşağıdaki eşitlik 2, 3 ve 4 ile verilmiştir.

Bu sonuçlar literatürde mevcut olan sonuçlardan elde edilen beklentilerle tutarlıdır. Bu açıdan deneyde elde edilen veriler oldukça başarılıdır. Farklı kesirleri hesaplamak için,

$$a_j = \frac{\int \sigma_j \phi(E) dE}{\sum_i \int \sigma_j \phi(E) dE} \quad \dots(1)$$

denklemini kullanılmıştır.

$$a_{QE} = 0.20_{-0.07}^{+0.06} (stat) \pm 0.02(syst) \quad \dots(2)$$

$$a_{DIS} = 0.68_{-0.11}^{+0.09} (stat) \pm 0.02(syst) \quad \dots(3)$$

$$a_{RES} = 0.12 \pm 0.04(stat) \pm 0.02(syst) \quad \dots(4)$$

Asıl amacı, farklı saçılma işlemlerinin toplam yüklü akım nötrino tesir kesitine olan katkısını ölçmek olan PEANUT deneyi amacını emülsiyon teknolojisini kullanarak başarıyla gerçekleştirmiştir. Bu sonuçlar gelecek salınım deneyleri için oldukça önemlidir (Russo, 2010).

OPERA deneyi, 2008-2012 yıllarında aktif olarak çalışarak veri alımını tamamlamış ve toplam 19505 nötrino etkileşimi kaydedilmiş bunlardan 5603 tanesi emülsiyon filmlerinde yeniden oluşturulmuştur. Sonuçta nükleer emülsiyon tekniğini kullanarak,  $5.1 \sigma$  hassasiyetle ve  $0.25 \pm 0.05$  arka plan olay ile 5 tane  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  salınımını gözlemlemeyi başarmıştır. Görünür modda gerçekleştirilen bu gözlem dünyada bir ilk olup nötrinonun salınım yaptığının bir kanıtıdır (Agafonova ve ark., 2018; Agafonova ve ark., 2019).

Elde edilen bu sonuçlarla nötrinoların çeşnilerinin olduğu, salınım yaptıkları ortaya çıkmıştır. Böylece atom altı parçacıklar, birbirleriyle olan ilişkileri, etkileşimleri ve karakteristik özellikleri giderek açıklığa kavuşmaktadır. Ancak halen cevaplanması gereken birçok soru bulunmaktadır. Tasarlanan yeni deneylerle bu soruların cevaplanması beklenmektedir.

Öte yandan emülsiyon teknolojisinin temel fizik, teknolojik ve endüstriyel olmak üzere daha birçok alanda uygulaması da bulunmaktadır. Kozmik parçacıkların incelenmesindeki GRAINE gibi balon deneylerinde yine emülsiyonlardan yararlanılmaktadır. Uydu ve uzay istasyonu gibi deneylerde, radyasyon dozimetresinde de kullanımı bulunmaktadır (Lellis ve ark., 2011). Son olarak dağların kalınlığının ölçülmesi ve piramitlerin bilinmeyen mezar boşluklarının bulunmasında muon

radyografisi tekniği kullanılmış ve deney nükleer emülsiyonlar ile gerçekleştirilmiştir (Morishima, 2017; Takashi ve ark., 2015). Günümüzde nükleer emülsiyon tekniği ile ilgili yeni deneyler ve çalışmalar planlanmaktadır. Bunlardan bir tanesi olan SHIP deneyinde de nükleer emülsiyon teknolojisi kullanılacaktır. Gelecekte yapılacak parçacık fiziği deneyleri geçmişteki tüm bilgi birikimi ve tecrübelerin üzerine kurulacağı için elde edilecek sonuçlar şimdiden heyecan verici olmaktadır. Bu alandaki çalışmaların giderek hızlanması ve parçacık fiziğinde daha kapsamlı bilgiye ulaşılmasının hedeflenmesi tüm dileğimizdir.

### ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI

Yazar bu çalışmada herhangi bir şekilde çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

### ARAŞTIRMA VE YAYIN ETİĞİ BEYANI

Yazar bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulduğunu beyan eder.

### KAYNAKLAR

- Acquafredda, R., Adam, T., Agafonova, N., Alvarez, P.S., Ambrosio, M., Anokhina, A., ve ark., 2009. The OPERA experiment in the CERN to Gran Sasso neutrino beam, *Journal of Instrumentation*, 4(P04018):1-56.
- Agafonova, N., Alexandrov, A., Anokhina, A., Aoki, S., Ariga A., Ariga T., ve ark., 2018. Final results of the OPERA Experiment on  $\nu_\tau$  Appearance in the CNGS Neutrino Beam, *Physical Review Letters*, 120(21):1-7.
- Agafonova, N., Alexandrov, A., Anokhina, A., Aoki, S., Ariga A., Ariga T., ve ark., 2019. Final results on neutrino oscillation parameters from the OPERA experiment in the CNGS beam, *Physical Review D*, 100(051301):1-8.
- Agafonova, N., Alexandrov, A., Anokhina, A., Aoki, S., Ariga, A., Ariga, T., ve ark., 2013. New results on  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  appearance with the OPERA experiment in the CNGS beam, *Journal of High Energy Physics*, 36(11):1-31.
- Aoki, S., Ariga, A., Arrabito, L., Autiero, D., Besnier, M., Bozza, C., ve ark., 2010. Measurement of low-energy neutrino cross-sections with the PEANUT experiment, *New Journal of Physics*, 113028(12):1-15.
- Arora, C.L.S., 2013. Chand'S Success Guide R/C B.Sc Physics Vol -3, S. Chand Publishing, 2013.
- Asada, T., Naka, T., Kuwabara, K., Yoshimoto, M., 2017. The development of a süper fine grained

- nuclear emulsion. *Prog. Theor. Exp. Phys.*, 063H01(6):1-10.
- Brown, R., Camerini, U., Fowler, PH., Muirhead, H., Powell, C.F., Ritson, D.M.**, 1949. Observation with electron-sensitive plates exposed to cosmic radiation, *Nature*, 163:82–87.
- Eskut, E., Kayis-Topaksu, A., Önengüt, G., Beuzekom van, M.G., Dantzig van, R., Jong de, M., ve ark.**, 2008. Final results on  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$  oscillation from the CHORUS experiment, *Nuc. Physics B* 793:326-343.
- Eskut, E., Kayis-Topaksu, A., Önengüt, G., Dantzig van, R., Konjin, J., Oldeman, R., ve ark.**, 1997. The CHORUS experiment to search for  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$  oscillation, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 401:7-44.
- Ereditato, A.**, 2013. The Study of Neutrino Oscillations with Emulsion Detectors, *Advances in High Energy Physics*, 4047:1-17.
- Herz, A.J., Lock, W.O.**, 1966. The Particle Detectors 1. Nuclear Emulsions. *CERN Courier* 6:83-87.
- Kamışcioğlu, Ç.**, 2017. OPERA Dedektöründeki Nötrino-Kurşun Yüklü Akım Etkileşmelerinde Hadron Çokluk Dağılımlarının İncelenmesi, *Doktora tezi* Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Kaplon, M., Peters, B., Ritson, D.M.**, 1952. Emulsion Cloud-Chamber Study of a High Energy Interaction in the Cosmic Radiation, *Physical Review*, 85(5):900-903.
- Kamioka, E., Apanasenko, A.V., Berezovskaya V.A., Fujii, M., Fukuda, T., Hareyama, M., ve ark.**, 2000. First Results obtained by RUNJOB campaign, *Advances in Space Research*, 26 (11):1839-1845.
- Kinoshita, S.**, 1910. The Photographic Action of the  $\alpha$ -Particles Emitted from Radio-Active Substances, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, 1910 83:432-453.
- Kinoshita, S., Ikeuti, H.**, 1915. The tracks of the  $\alpha$  particles in sensitive photographic films, *Philosophical Magazine Series*, 6, 29(171):420-425.
- Kodama, K., Ushida, N., Andreopoulos, C., Saoulidou, N., Tzanakos, G., Yager, P., ve ark.**, 2008. Final tau-neutrino results from the DONuT experiment. *Physical Review D*, 78:1-37.
- Kodama, K., Saoulidou, N., Tzanakos, G., Baller, B., Lundberg, B., Rameika, R., ve ark.**, 2002. Detection and analysis of tau-neutrino interactions in DONUT emulsion target. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 493:45–66.
- Konovalova, N.**, 2019. Emulsion detector for future experiment SHiP at CERN. *Perspectives in Science* (on behalf of SHiP Collaboration)100401 (12):1-4.
- Kopp, S.E.**, 2005. The NuMI Neutrino Beam at Fermilab, *AIP Conference Proceedings* 773, 276.
- Latters, C.M.G., Occhialini, G.P.S., Powell, C.F.**, 1947. Observation on the tracks of slow mesons in photographis- emulsions. *Nature*, 160:453-456.
- Lellis, G. De., Ereditato, A., Niwa, K.**, 2011. Nuclear Emulsions. Elementary Particles · Detectors for Particles and Radiation. Part 1: *Principles and Methods. Landolt-Börnstein - Group I Elementary Particles, Nuclei and Atoms*. 21B1.
- Morishima, K.**, 2015. Latest Developments in Nuclear Emulsion Technology. *26th International Conference on Nuclear Tracks in Solids, 26ICNTS, Physics Procedia* 80:19–24.
- Morishima, K., Kuno, M., Nishio, A., Kitagawa N., Manabe, Y., Moto, M., ve ark.**, 2017. Discovery of a big void in Khufu's Pyramid by observation of cosmic-ray muons. *Nature*, 552:386–390.
- Peter, G.**, 1997. Image and Logic, The University of Chicago Press, London.
- Prowse, D.J., Baldo-Ceolin, M.**, 1958. Anti-lambda hyperon. *Physical Review Letters*, 1:179–181.
- Rayner-Canham, M.F., Rayner-Canham, G.W.**, 1997. Devotion to Their Science: Pioneer Women of Radioactivity, *McGill-Queen's Press - MQUP*, 1997.
- Rokujo, H., Kawahara, H., Komatani, R., Morishita, M., Nakano, T., Otsuka, N., ve ark.**, 2016. Latest nuclear emulsion technology. *EPJ Web of Conferences* 145, 19020.
- Russo, A.**, 2010. The PEANUT experiment in the NuMI beam at Fermilab. *AIP Conference Proceedings* 1222(1):131-134.
- Serio, M. D., Ievaa, M., Simone, S., Giorgini, M., Sioli, M., Sirri, G., ve ark.**, 2003. Momentum measurement by the angular method in the Emulsion Cloud Chamber, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 512, 3:539–545.
- Sun, H., Zhang, D.**, 2008. Nuclear emulsion and high-energy physics, *Radiation Measurements*, 43:139–143.
- Takashi, S., Aoki, S., Kamada, K., Mizutani, S., Nakagawa R., Ozaki, K., ve ark.**, GRAINE project: The first balloon-borne, emulsion gamma-ray telescope experiment. *Progress of Theoretical Physics*, 043H01(4):1-28.
- Takahashi, Y., Dake, S.**, 1987. Cosmic ray results from the JACEE Experiments, *Nuclear Physics A*, 461:263-278.
- Vyer, B.**, 1997. Prompt  $\nu_{\tau}$  background in wide band  $\nu_{\mu}$  beams. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 385:91-99.