

# DENİZİN ALTINDAKİ GÖKYÜZÜ GÖZLEMİ

Dr. Mahir E. Ocak [ TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi

**Uzaydan gelen nötrinoları tespit etmeye çalışan araştırmacılar,  
deniz tabanlarına teleskoplar kuruyorlar.  
Üstelik bu teleskoplar üzerlerindeki gökyüzüne değil  
Dünya'nın diğer tarafındaki gökyüzüne bakıyor.**

## Nötrinolar

Leptonlar olarak adlandırılan parçacıklar, üç nesil altında sınıflandırılır. Bu nesillerin her birinde elektrik yüklü ve kütlesi görece büyük bir parçacık vardır: elektron, müon ve tau. Ayrıca her bir nesilde birer nötrino vardır: elektron nötrinosu, müon nötrinosu ve tau nötrinosu. Bu parçacıklara nötrino ismi verilmesi, elektrik yüklerinin nötr olması ve kütlelerinin çok küçük olmasından (-ino son eki) dolaydır.

Nötrinolar, tüm lepton grubu parçacıklar gibi güçlü kuvvetten etkilenmezler. Ayrıca elektrik yükleri sıfır olduğu için elektromanyetik kuvvet aracılığıyla da etkileşmezler. Dolayısıyla nötrinolar sadece kütleçekiminden ve zayıf kuvvetten etkilenir. Hem kütleçekiminin atomaltı ölçekte çok zayıf olması hem de zayıf kuvvetin sadece çok kısa mesafelerde etkin olması, nötrinoların sıradan madde içinden neredeyse hiçbir engelle karşılaşmadan geçmelerine sebep olur. Bu yüzden nötrinoları tespit etmek ve incelemek çok zordur. Bir nötrinonun bir atom çekirdeğiyle etkileşme ihtimali, çekirdekteki protonların ve nötronların sayısı arttıkça artar.

Dört temel etkileşim arasında sadece zayıf etkileşim parçacıkların türünü değiştirebilir. Nötrinolar da zayıf kuvvet ara-

cılığıyla etkileştikleri için parçacıkların birbirine dönüştüğü süreçlerde yer alırlar. Zaten nötrinoların varlığı ilk olarak 1930 yılında Wolfgang Pauli tarafından beta ışımasıyla ilgili deneysel verileri açıklamak için öne sürülmüştü. Yıldızlarda ve süpernova patlamaları sırasında meydana gelen çeşitli nükleer tepkimeleri de nötrinolar tetikler. Her ne kadar ağır çekirdeklerin kaynaştığı tepkimeler bugüne kadar laboratuvar ortamında gerçeğe dönüştürülememiş olsa da Sudbury Nötrino Gözlemevi'ndeki dedektörlerde döteryum çekirdeklerinin (içerisinde bir nötron olan hidrojen atomu çekirdeklerinin) kaynaşması gözlemlendi.

Zayıf etkileşim sonucunda ortaya çıkan bir nötrino, uzayda yol alırken farklı nötrino türleri arasında salınım halindedir. Örneğin beta ışıması sırasında ortaya çıkan bir elektron nötrinosu, daha sonra bir dedektörle müon nötrinosu ya da tau nötrinosu olarak da etkileşebilir. Nötrinoların farklı çeşniler (türler) arasında salındığı hipotezi, ilk olarak Güneş'ten Dünya'ya ulaşan nötrinolarla ilgili verileri açıklamak için öne sürülmüştü. Daha sonraları bu hipotez deneylerle de doğrulandı. Deneyleri yöneten araştırmacılar, Raymond Davis Jr. ve Art McDonald Nobel Ödülü'yle onurlandırıldı.

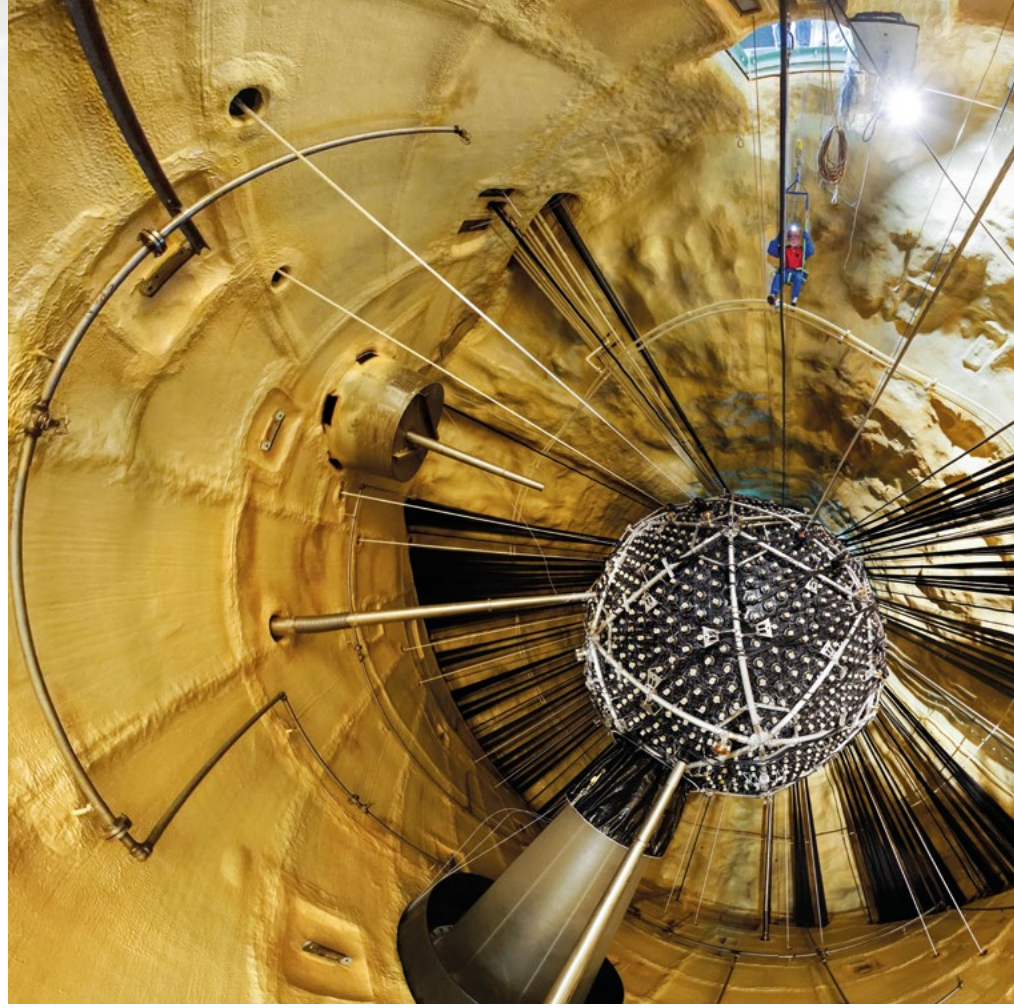
## Nötrino Kaynakları

Nötrinoların ortaya çıkmasıyla sonuçlanan süreçler, doğal ve insan kaynaklı olarak ikiye ayrılabilir.

Nötrino üretilen insan etkinliklerinin başında nükleer reaktörlerde enerji elde edilmesi gelir. Bu reaktörlerde ortaya çıkan enerjinin kaynağı, radyoaktif atomların parçalanarak diğer atomlara dönüştüğü fisyon tepkimeleridir. Bu tepkimeler sonucunda ortaya çıkan atomların (nötron sayısı)/(proton sayısı) oranı aşırı yüksektir. Kararlı hale gelmek için beta ışınması yaparlar. Böylece çekirdekteki nötronların sayısı bir azalırken protonların sayısı bir artar. Süreç sonunda bir elektron ve bir antinötrino çekirdekten atılır. Fisyon tepkimeleri sonucunda ortaya çıkan enerjinin önemli bir kısmı nötrinolar tarafından ortamdaki uzaklaştırılır. Örneğin ortalama bir fisyon tepkimesinde ortaya çıkan 200 MeV enerjinin yaklaşık %95,5'i ısı enerjisi olarak ortamda kalırken %4,5'i antinötrinolar tarafından ortamdaki uzaklaştırılır.

Günümüzde bazı parçacık hızlandırıcıları da nötrino demetleri üretmek için kullanılıyor. İnsan faaliyetleri sonucunda nötrinoların ortaya çıktığı bir diğer süreçse atom bombası denemeleridir.

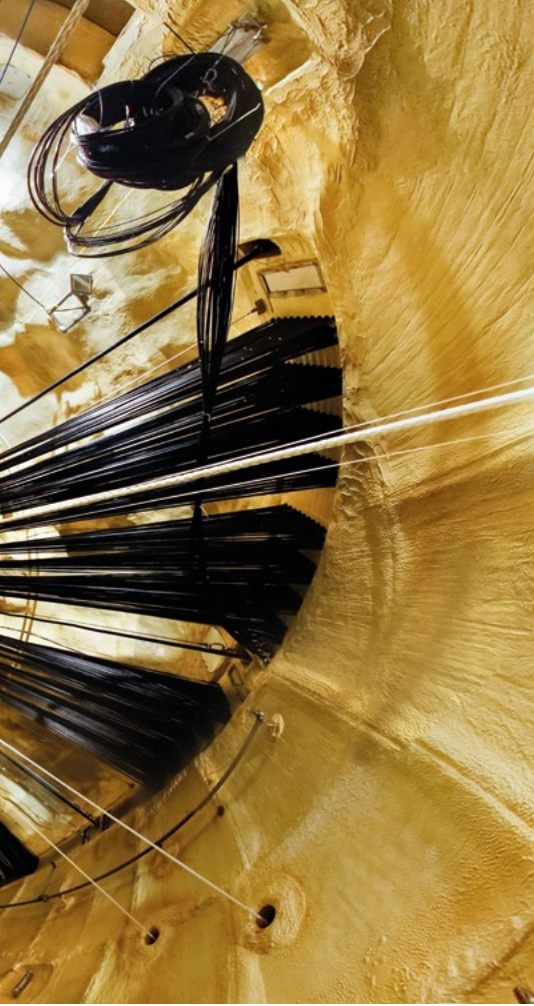
Nötrinoların doğal kaynaklarından biri yer kürenin kendisidir. Dünya'nın merkezinin sıcak kalması, süregiden radyoaktif bozunmaların sonucudur. Hatta Dünya'nın devasa bir nükleer reaktör olduğu da söylenebilir. Yerkürede uranyum-238, toryum-232 ve potasyum-40 izotoplarıyla başlayan bozunma zincirle-



rinde nötrinolar ortaya çıkar. Jeo-nötrinolar olarak adlandırılan bu parçacıklar, Dünya'nın iç yapısı hakkında önemli bilgiler verebilir. Kaynağının Dünya'nın merkezi olduğu düşünülen nötrinolar ilk olarak 2005 yılında KamLAND deneyleri sırasında tespit edilmişti.

Nötrinoların bir diğer doğal kaynağı atmosferdir. Uzaydan gelen kozmik ışınlar atmosferdeki atom çekirdeklerine çarptığında çok çeşitli parçacıklar ortaya çıkar. Pek çoğu kararsız olan bu parçacıklar bozunurken etrafa nötrinolar yayılır.

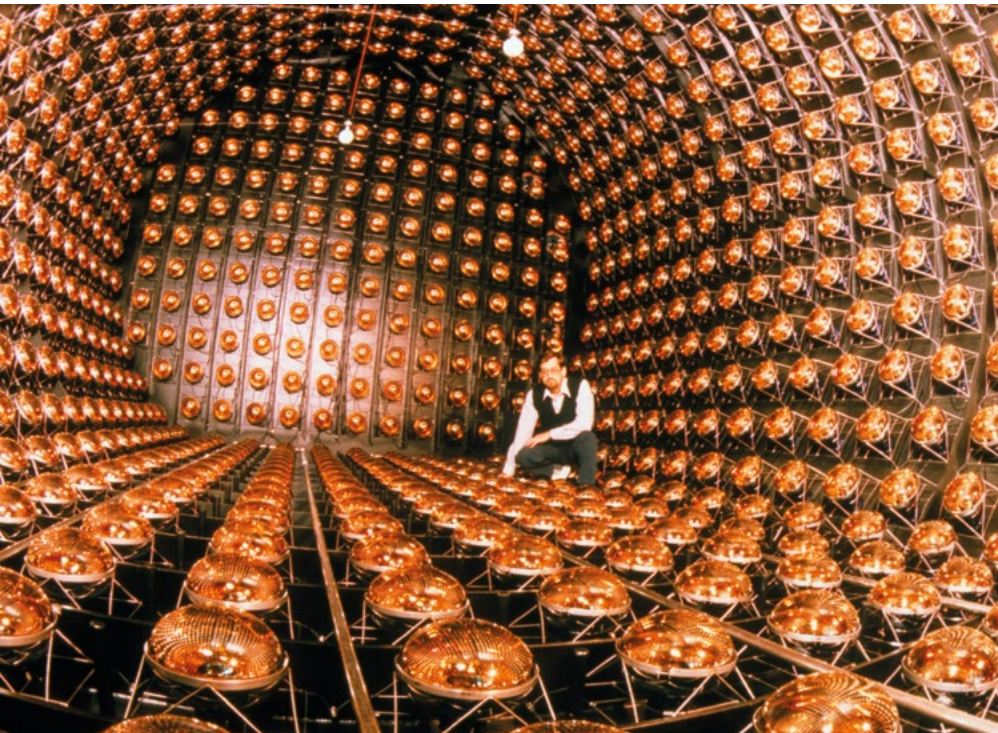
Dünya civarındaki nötrinoların büyük çoğunluğu Güneş'ten gelir. Güneş enerjisinin temelinde dört protonun kaynaşarak helyum atomunu oluşturduğu füzyon tepkimeleri vardır. Bu süreçte iki proton iki nötrona ve iki pozitrona (elektronun antiparçacığına) dönüşürken elektron nötrinoları ortaya çıkar ve her yöne yayılırlar. Dünya'nın Güneş'e bakan tarafındaki her bir santimetre kareden her saniyede geçen yaklaşık  $6,5 \times 10^{10}$  nötrinonun kaynağı Güneş'tir.



Nötrinoların bir diğer önemli kaynağı süpernova patlamalarıdır. Büyük kütleli yıldızların ömürlerinin sonunda meydana gelen bu patlamalar sırasında yayılan nötrinolar Dünya'ya patlamanın ışığından daha önce ulaşır. Bu durumun nedeni, nötrinolar patlama ortamından neredeyse hiç bir engelle karşılaşmadan çıkarken, yoğun patlama ortamındaki parçacıkların ışığı geciktirmesidir. Nötrinoların ve ışığın Dünya'ya varış zamanları arasındaki fark, patlayan yıldızın dış katmanının kalınlığına bağlı olarak değişir. Nötrinolar maddeyle çok az etkileştiği için süpernova nötrinolarının patlamanın iç kısımları hakkında bilgi taşıdığı düşünülüyor. Süpernova patlamaları sırasında yayılan enerjinin yaklaşık %99'unu nötrinolar taşır.

Sudbury Nötrino Gözlemevi'nin kurulum aşaması (solda)

Los Alamos Ulusal Laboratuvarı'ndaki (ABD) nötrino dedektörü kurulum amasındayken (altta)



Büyük Patlama'dan arta kalan kozmik artalan ışmasına benzer biçimde, evrende düşük enerjili bir nötrino artalanı da olduğu düşünülüyor. Hatta 1980'lerde karanlık maddenin, esasen nötrinolar olabileceği de öne sürüldü. Üstelik bu açıklamanın karanlık maddenin doğasıyla ilgili ortaya atılmış diğer düşünceler karşısında önemli bir avantajı var. Nötrinoların varlığı deneylerle doğrulanmış durumda. Karanlık maddenin oluşturduğu öne sürülen diğer parçacıkların ve gök cisimlerinin varlığıysa sadece birer hipotez.

Bugüne kadar yapılan çalışmalar sonucunda sadece iki kozmik nötrino kaynağı tespit edilebildi. Bu kaynakların birincisi Güneş, ikincisiyse 1987 yılında meydana gelen SN1987A süpernova patlamasıdır.

## Nötrino Araştırmaları

Nötrinolar, kütleleri çok düşük ve elektrik yükleri nötr olduğu için diğer parçacıklarla çok az etkileşir. Bu durum nötrinoların görünür ışık, radyo dalgaları ya da kızılötesi ışıkla incelenemeyecek ortamlar hakkında bilgi edinmek için kullanılabilirleri anlamına gelir. Örneğin Güneş'in çekirdeği doğrudan görüntülenemez. Çünkü ortamın madde yoğunluğu çok yüksektir. Çekirdekten yayılan ışık ortamdaki parçacıklardan saçılarak dağılır. Öyle ki Güneş'in çekirdeğinde meydana gelen nükleer tepkimeler sonucunda ortaya çıkan bir fotonun Güneş'in dış katmanlarına ulaşması binlerce yıl sürer.

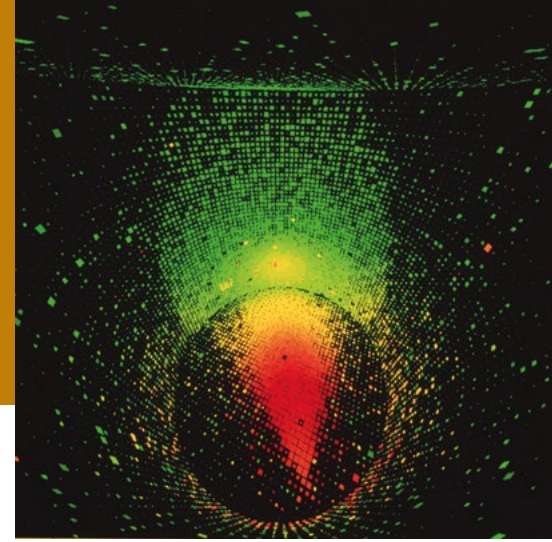
## Cherenkov Işıması

**E**lektromanyetik kuram, ışığın boşluktaki hızının ( $c$ ) evrensel bir sabit olduğunu söyler. Özel görelilik kuramına göre hiçbir parçacığın bu hızı aşması mümkün değildir. Sadece kütleli parçacıklar bu hızla hareket edebilir, kütleli bir parçacığın hızını  $c$ 'ye çıkarmaksa sonsuz miktarda enerji gerektirdiği için mümkün değildir. Ancak bu durum kütleli bir parçacığın belirli bir ortamda ışıktan daha hızlı hareket edemeyeceği anlamına gelmez. Çünkü ışık yoğun ortamların içine girdiğinde boşlukta olduğundan daha yavaş hareket etmeye başlar. Örneğin ışığın suyun içindeki hızı sadece  $0,75c$ 'dir. Dolayısıyla elektronların, protonların ya da diğer kütleli parçacıkların yoğun ortamlarda ışıktan daha hızlı hareket etmesi mümkündür.

Cherenkov ışması, elektrik yüklü bir parçacığın dielektrik (elektriksel olarak kutuplanabilen) bir ortamda ışığın o ortamdaki hızından daha hızlı hareket etmesi durumunda ortaya çıkan ışıktır. Bu durumu açıklamak için kullanılan yaygın bir benzetme süpersonik uçaklarla ilgilidir. Bir uçağın süpersonik (ses hızından daha büyük) hızlarla hareket ederken sebep olduğu gürültü (ses dalgası) uçağın kendisinden daha yavaş yol alır. Benzer biçimde ışıktan daha hızlı hareket eden elektrik yüklü bir parçacığın sebep olduğu Cherenkov ışması da parçacığın kendisinden daha yavaş yol alır.

Cherenkov ışması İngiliz bilim insanı Oliver Heaviside tarafından 1800'lerin sonlarında kuramsal olarak

tahmin edilmişti. Işımanın bu isimle anılmasının nedeniyse ilk olarak Sovyet bilim insanı Pavel Cherenkov tarafından deneysel olarak tespit edilmesidir. Cherenkov ışmasının kuramsal açıklaması sonraları Igor Tamm ve Ilya Frank tarafından yapıldı. Cherenkov, Tamm ve Frank 1958 yılında Nobel Fizik Ödülü'nü kazandılar.



Süper Kamiokande dedektöründe gözlemlenmiş bir Cherenkov ışması

Aynı fiziksel süreçler sırasında oluşan bir nötrinoysa neredeyse hiçbir engelle karşılaşmadan ışık hızına çok yakın hızlarla ortamdan uzaklaşır. Dolayısıyla Güneş'ten gelen nötrinoları tespit ederek Güneş'in çekirdeği hakkında bilgi edinmek mümkündür.

Nötrinolar Güneş sisteminin dışındaki gökcisimlerini gözlemlemek için de yararlı olabilir. Çünkü kozmik artalan ışımından ve yıldızlararası ortamdaki gaz ve tozdan en az etkilenen parçacıklar nötrinolardır. Örneğin yüksek enerjili kozmik ışınlar yaklaşık 325 ışık yılından daha uzun mesafe yol alamaz. Nötrinolarınsa çok daha uzun mesafe-

leri katetmesi mümkündür. Örneğin Samanyolu'nun merkezi hem yoğun gaz bulutuyla hem de parlak gökcisimleriyle çevrelediği için optik teleskoplarla doğrudan gözlemlenmiyor. Ancak nötrino teleskoplarıyla gökadanın merkezi hakkında bilgi edinmek mümkün olabilir.

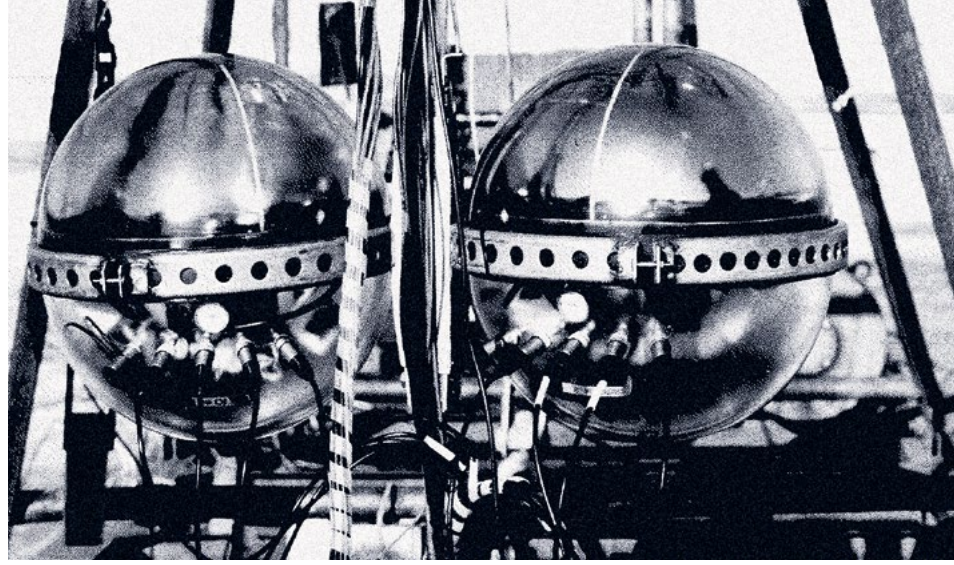
Nötrinoların kendileri de araştırma konusudur. Nötrinoların durgun kütlelerinin hassas bir biçimde belirlenmesi çeşitli kozmoloji kuramlarının sınanması için çok önemlidir. Ayrıca nötrinoların özellikleri parçacık fiziğinin standart modelini geliştirmek için öne sürülmüş çeşitli kuramlar için de çok önemlidir.

Bir grup araştırmacı, 2012'nin Aralık ayında bir parçacık hızlandırıcıda üretilmiş nötrinoları 200 metreden daha kalın bir kayanın içinden geçirerek bir mesajı iletmeyi başardı. Gelecekte, bilginin dijital bir biçimde nötrinolarda kodlandığı mesajları, çok daha yoğun nesnelere içinden geçirerek göndermenin de mümkün olacağı düşünülüyor.

Yüksek enerjili bir kozmik ışın atmosfere çarptığında bir elektron- pozitron çiftinin oluşmasına sebep olabilir. Bu parçacıkların sebep olduğu Cherenkov ışımalarını gözlemleyerek kozmik ışının enerjisi ve yönü belirlenebilir. Gökbilimde çok yüksek enerjili ışık yayan gök cisimlerinin özelliklerini belirlemek için Cherenkov tekniği kullanılır. Süper Kamiokande, Sudbury ve IceCube gibi nötrino dedektörlerinde de Cherenkov ışımaları gözlemlenerek süreci başlatan nötrinolar hakkında bilgi edinilir. Parçacık fiziği deneylerinde parçacıkların türünü belirlemek için de Cherenkov ışımından yararlanır.



**Pavel Alekseyeviç Cherenkov**  
1934 yılında Cherenkov ışımalarını deneysel olarak tespit etti. İlya Frank ve İgor Tamm ile birlikte 1958 yılında Nobel Fizik Ödülü'nü kazandı.



## Nötrino Dedektörleri

Nötrinolar doğrudan gözlemlenemiyor. Ancak içinden geçtikleri ortamdaki parçacıklarla etkileşimleri durumunda dolaylı olarak varlıkları anlaşılabilir. Nötrinoların varlığını doğrulayan ilk gözlem 1950'lerde yapılmıştı.

Nötrinoların varlığına işaret eden iki tür etkileşimden bahsedilebilir. Birincisinde nötrinolar sahip oldukları enerjinin bir kısmını içinden geçtikleri ortamdaki bir parçacığa aktarır. Eğer enerjiyi yüklenen parçacık elektrik yüküne sahipse ve kütlesi düşükse (örneğin elektronsa) ışık hızına çok yakın hızlara kadar ivmelenebilir ve bu durumda Cherenkov ışımaları gözlemlenir. Her üç nötrino türü de böyle bir etkileşimde yer alabilir. Ancak Cherenkov ışımalarını gözlemleyerek etkileşime giren nötrinin türünü belirlemek mümkün değildir. İkinci etkileşimdeyse nötrinolar bir bozunma tepkimesini tetikler. Örneğin bir elektron nötrinosu bir nötronla etkileştiğinde nötron ve nötrino yok olurken proton ve elektron oluşur.

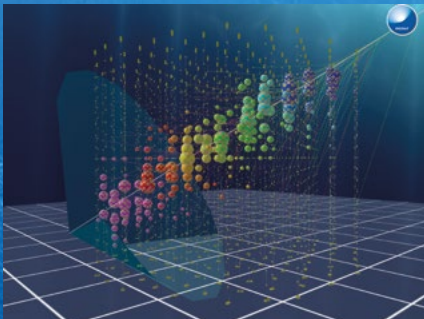
Benzer bir biçimde bir müon nötrinosunun tetiklediği bozunma tepkimesiyle müon, tau nötrinosunun tetiklediği bir bozunma tepkimesiyle tau ortaya çıkabilir. Bu etkileşimlerin gerçekleşebilmesi için nötrinoların sahip olduğu enerjinin belirli bir eşik değerinde olması gerekir. Eğer nötrinin enerjisi ortaya çıkacak leptonun (elektron, müon ya da tau) durgun kütle enerjisinden azsa etkileşim gerçekleşemez. Güneş'ten gelen nötrinoların enerjisi elektron oluşturmak için yeterlidir. Parçacık hızlandırıcılarda üretilen nötrinolar ise müon ve tau parçacıklarını da oluşturabilir.

Nötrinolar diğer parçacıklarla çok az etkileştiği için nötrino dedektörlerinin çok sayıda nötrinoyu tespit edebilecek biçimde çok büyük olması gerekiyor. Ayrıca kozmik ışınların ve yeryüzündeki artalan ışımalarının (yer küredeki radyoaktif atomların yaptığı ışımanın) etkilerini bertaraf etmek için nötrino dedektörleri genellikle yeraltında kuruluyor.

Bugüne kadar kurulan dedektörlerde nötrinoları tespit etmek için çeşitli yöntemler kullanıldı. Japonya'daki Süper Kamiokande dedektörü, fotoçoğaltıcılarla (algıladığı ışığı kuvvetlendiren) cihazlarla çevrelenmiş devasa hacimde sıvı sudan oluşuyor. Ortamdan geçen nötrinolar su moleküllerindeki nötronlarla etkileşerek elektron ya da müon ortaya çıkmasına sebep olduğunda Cherenkov ışması gözlemleniyor. Fotoçoğaltıcılar da ışmanın gözlemlenmesine yardımcı oluyorlar. Sudbury Nötrino Gözlemevi'nde de benzer bir yöntem izleniyor. Ancak sıradan su yerine ağır su (hidrojen yerine döteryum atomları içeren su) kullanılıyor. Bu dedektörde de Süper Kamiokande dedektöründe olduğu gibi elektronların sebep olduğu Cherenkov ışmaları gözlemleniyor. Ayrıca nötrinolar ağır su moleküllerindeki döteryumları parçalayarak serbest nötronların ortaya çıkmasına sebep olabilir. Süreç sonunda ortaya çıkan gamma ışınları gözlemlenerek nötronların ve dolaylı olarak nötrinoların varlığı anlaşılabilir.

Nötrinoları tespit etmek için kullanılan yöntemlerin tamamı nötrinoların enerjisinin belirli bir eşik değeri üzerinde olmasını gerektiriyor.

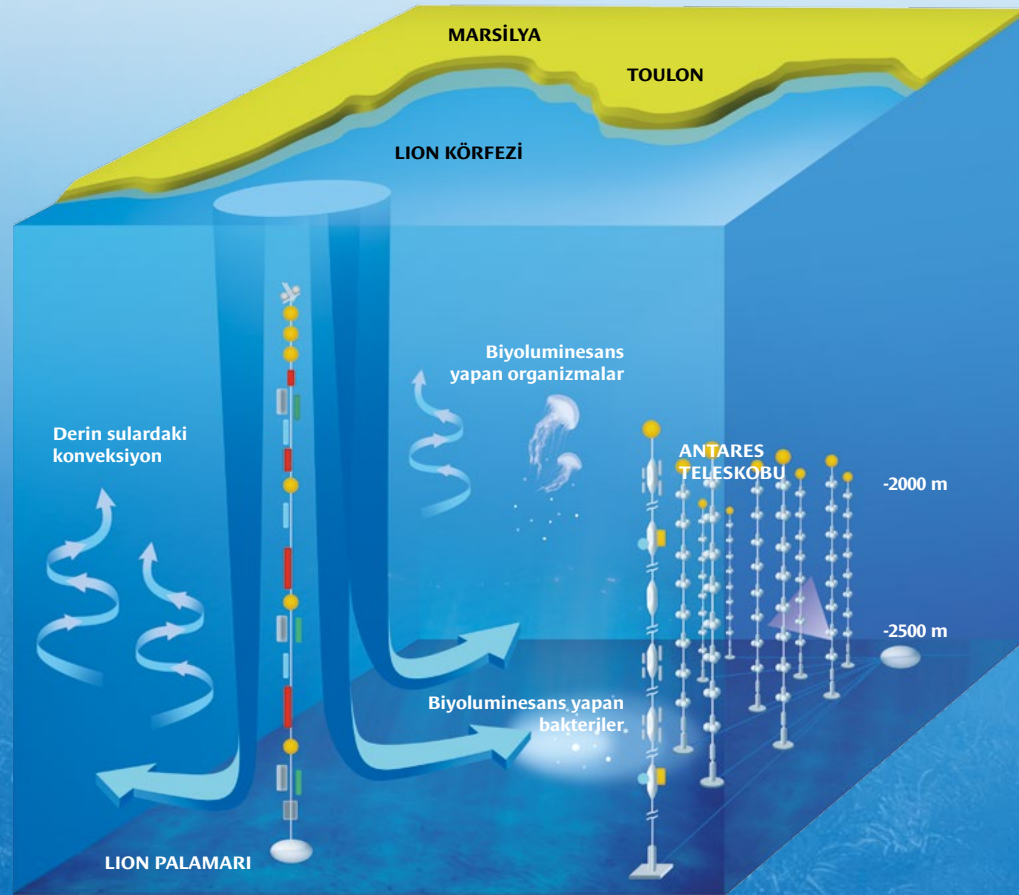
Deniz altında nötrino gözlemi



## Deniz Altındaki Dedektörler

Geçmişte bazı nötrino dedektörleri deniz tabanlarına kuruldu ve bugün de kurulma aşamasında olan bazı dedektörler var. Bilim insanlarını nötrino dedektörlerini deniz altında kurmaya yönelten iki temel etken olduğu söylenebilir. Birincisi, bu dedektörler deniz sularını devasa bir detektöre dönüştürüyor. Süper Kamiokande ya da Sudbury gözlemevlerinde olduğu gibi yeraltına büyük çukurlar kazmaya gerek kalmıyor. İkincisi, deniz suları istenmeyen radyasyona karşı doğal kalkan görevi görüyor. Örneğin kozmik ışınların atmosferde ürettiği müon-

ların deniz tabanına ulaşmasını engelliyorlar. Araştırmacılar istenmeyen radyasyonun etkilerini en aza indirmek için deniz tabanına doğru değil deniz yüzeyine doğru yol alan nötrinoları odaklanıyorlar. Başka bir deyişle bu dedektörler üzerlerindeki gökyüzünden gelen nötrinoları değil Dünya'nın diğer tarafındaki gökyüzünden gelen nötrinoları bakıyor. Böylece sadece deniz suları değil yerkürenin kendisi de istenmeyen parçacıkları engelleyen bir filtre görevi görüyor. Bu dedektörlerde de Cherenkov ışması inceleniyor. Fotoçoğaltıcılar tarafından tespit edilen ışmadan süreci tetikleyen nötrininonun geliş yönü ve sahip olduğu enerji hesaplanabiliyor.



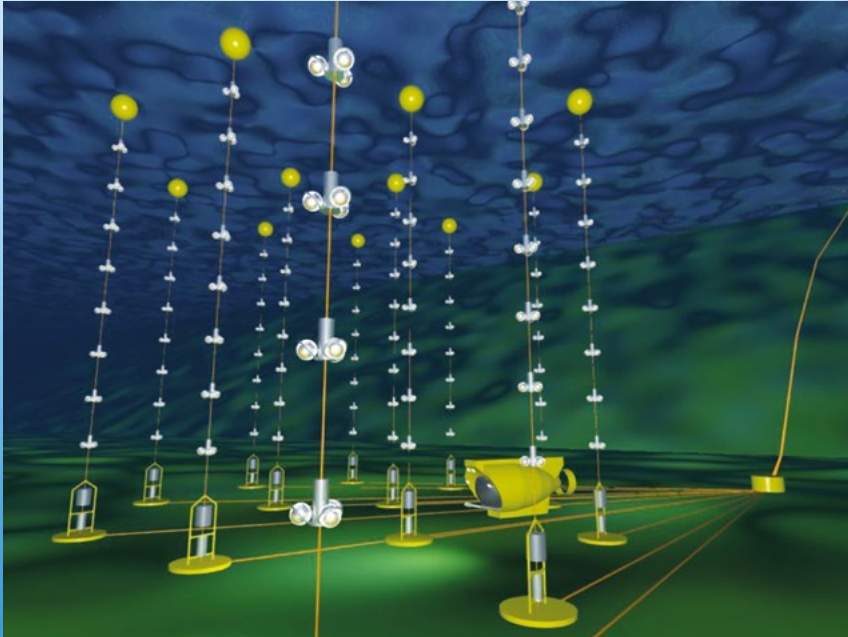
Deniz tabanına nötrino dedektörü kurma fikri ilk olarak 1960 yılında SSCB’li fizikçi Moisey Markov tarafından ortaya atılmıştı. İlk çalışmalara başlayansa 1970’li yıllarda ABD’li araştırmacılar oldu. Ancak Hawaii açıklarında kurulması planlanan Derin Sualtı Müon ve Nötrino Dedektörü (DUMAND), teknolojik zorluklar sebebiyle hiçbir zaman tamamlanmadı. Eğer tamamlansaydı kuzey yarıkürede olduğu için güney yarıküreden gelen nötrinoları gözlemleyecekti. Samanyolu Gökadası’nın iç kısmı da bu yöndedir.

DUMAND’ın planlanan kurulumunda, 4800 metre derinlikteki deniz tabanına sabitlenmiş birkaç yüz metre uzunluğundaki kablolar yer

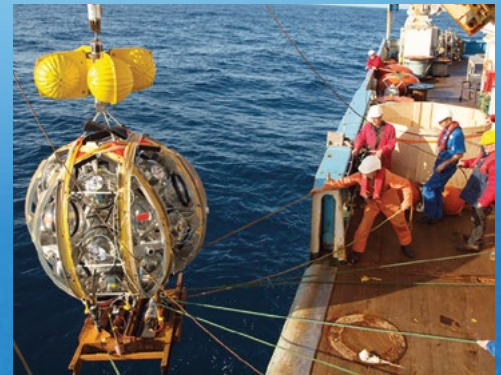
alıyordu. Şamandıralarla dik durması sağlanan ve “çizgiler” olarak adlandırılan bu kablolar, yarım metre çapında, bir santimetre kalınlığında cam kürelerle yüksek basınçtan korunan fotoçoğaltıcıları destekleyecekti. Sistemin elektro-optik kablolarla kıyıya bağlanması, böylece hem elektrik ihtiyacının karşılanması hem de veri alışverişinin yapılması planlanıyordu. DUMAND’ın ilk çizgisi 1993 yılında deniz tabanına sabitlendi. Ancak sadece birkaç saat sonra fotoçoğaltıcıları koruyan cam tüplerden biri yüksek basınca dayanamadı ve sızıntı başladı. Bir süre sonra kısa devre meydana geldi ve sistemle bağlantı koptu. 4800 metre derinlikteki zorlu ortam koşulları

sebebiyle bu tarz arızaları onarmak çok zordur. DUMAND projesi 1995 yılında rafa kaldırıldı.

Bilim insanları 1993 yılında dünyanın en derin gölü ve en büyük tatlı su kaynağı olan Baykal Gölü’nün tabanına nötrino dedektörü kurmaya başladı. Derinliği yer yer 1600 metreye varan gölün kış aylarında kalın bir buz katmanıyla kaplı olması kurulumu hayli kolaylaştırdı. Sekiz çizgi ve 192 fotoçoğaltıcıdan oluşan sistem, ağır cihazları kurulmadan taşıyabilen buz katmanı sayesinde kolayca su altına indirilerek kuruldu. Ancak Baykal Gölü’nün sularının nötrinoları tespit etmek için çok da uygun olmadığı görüldü. Işığı, deniz suyuna ve buza göre daha fazla soğuruyorlardı.



KM3NeT’in çizgilerinden biri (üstte) ve ANTARES çizgilerinin (altta) deniz altına indirilmesi sırasında çekilmiş fotoğraflar



Deniz altında nötrino gözlemi

ANTARES’in çizgilerinden biri





Dolayısıyla çizgilerin birbirine çok yakın konumlandırılması gerekiyor ve bu da dedektörün hacmini küçültüyordu.

ABD, DUMAND projesini durdurduğu 1995 yılında Antarktika'da başka bir nötrino dedektörü kurmaya başladı. Antarktika Müon ve Nötrino Dedektör Dizisi (AMANDA) adı verilen dedektör, Baykal Gölü'ndeki gibi, kalın buz katmanları sayesinde kolayca kuruldu. Ancak dedektör güney yarımkürede olduğu için kuzeydeki gökyüzünü gözlemliyor ve dolayısıyla Samanyolu'nun iç kısımları görüş alanının dışında kalıyordu.

AMANDA 2004 yılında durduruldu ve geliştirilerek IceCube Nötrino Gözlemevi'ne dönüştürüldü. IceCube, 2013 yılında uzayın derinliklerinden geldiği anlaşılan nötrinolar tespit etti. Ancak 1 km<sup>3</sup> hacmindeki dedektörün elde ettiği veriler parçacıkların kaynağını belirlemek için yeterli değildi. Işığın buz içinde dağılması, IceCube'ün açılal çözünürlüğünün düşük olmasına neden oluyordu.

DUMAND projesinin başarısız olmasından sonra Avrupa'da sualtı nötrino dedektörleri kurulması çabaları başladı. Birkaç sene süren ön çalışmalardan sonra Fransa'daki Toulon şehrinin açıklarında bir nötrino dedektörü kurulmasına karar verildi. Kısaca ANTARES olarak adlandırılan dedektörün verimli bir biçimde çalışabilmesi için akıntıların çizgileri nasıl büktüğünden, tuzluluğun sesin sudaki hızını nasıl etkilediğine ve biyoluminesansın fotoçoğaltıcıları nasıl etkileyeceğinden mikroorganizmaların sebep olduğu kirliliğin dedektörün çalışmasını engelleyip engellemeyeceğine kadar

pek çok şeyin detaylı bir biçimde incelenmesi gerekiyordu. 2500 metre derinlikteki dedektörün ilk çizgileri 2006 yılında sabitlendi ve kurulum süreci 2008'e kadar devam etti. 450 metre uzunluğundaki 12 kabloya sabitlenmiş fotoçoğaltıcıdan oluşan sistemle bugüne kadar 10.000'in üzerinde olay gözlemlendi. Bu olaylara sebep olan nötrinoların büyük çoğunluğunun atmosfere çarpan kozmik ışınlar tarafından üretildiği düşünülüyor. Ancak bir kısmının kaynağı dünya dışında da olabilir.

Kuzey yarımkürede yer aldığı için görüş alanı, Samanyolu'nun büyük bir kısmını kapsayan ANTARES aynı zamanda daha büyük bir projenin de parçası. Bilim insanları ANTARES'in topladığı verileri, ışığı ve kütleçekimsel dalgaları algılayarak uzayı gözlemleyen diğer teleskopların topladığı verilerle ilişkilendirerek kozmik olaylar hakkında bilgi edinmeye çalışıyorlar. Ancak tüm bu çabalara rağmen henüz ANTARES'in topladığı verilerle tespit edilmiş bir nötrino kaynağı yok. Bunun başarılabilmesi için ANTARES'ten daha büyük bir nötrino dedektörünün gerekli olduğu düşünülüyor.

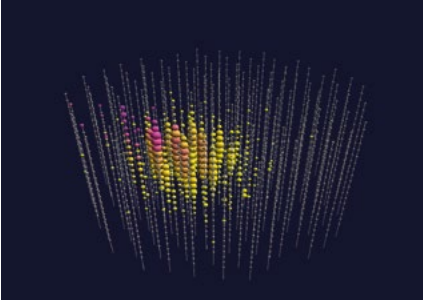
Şu an kurulum aşamasında olan bir diğer nötrino teleskobu kısaca KM3NeT olarak adlandırılan Kübik Kilometre Nötrino Teleskobu. 15 ülkeden 240 bilim insanının katıldığı bu projenin 2015'ten beri devam eden kurulum sürecinin 2020'de tamamlanması ve teleskobun çalışmaya başlaması planlanıyor. Toplamda 1 km<sup>3</sup>'ten fazla hacmi kapsayacak dev teleskobu oluşturan 345 çizginin bir kısmı Toulon açıklarında ANTARES'e yakın konumda, bir kısmı da

Sicilya Adası'ndaki Capo Passero'nun açıklarında olacak. Hatta aynı proje kapsamında gelecekte Yunanistan'daki Pylos açıklarındaki üçüncü bir bölgeye de nötrino dedektörleri kurulması ihtimal dahilinde.

KM3NeT'te de Cherenkov ışması gözlemlenmeye çalışılacak. Ancak daha önce kurulan teleskoplara göre çeşitli teknolojik yenilikler olacak. ANTARES ve diğer teleskoplarda her bir cam kürenin içine sadece bir fotoçoğaltıcı konuluyordu. KM3NeT'teyse her bir cam kürenin içine 31 fotoçoğaltıcı konulacak. Böylece hem dedektörün verimliliği artırılabilecek hem de nötrinoların geliş yönü daha hassas bir biçimde belirlenebilecek.

Her ne kadar teleskobun kurulduğu her iki bölgede de aynı teknoloji kullanılacak olsa da farklı bölgelerde farklı amaçlar için çalışmalar yapılması planlanıyor. Toulon'daki dedektörde atmosferik nötrinolar tespit edilmeye çalışılacak. Sicilya'daki daha büyük dedektördeyse kozmik nötrino kaynaklarına odaklanılacak.





Deniz altında çalışacak herhangi bir dedektörün verimli olması için ortam koşullarının (örneğin suyun optik özelliklerinin, akıntılarının, biyoluminesansın, akustik gürültünün) takip edilmesi ve dedektörün ortam koşullarına göre kalibre edilmesi gerekir. Bu yüzden ANTARES ve KM3NeT gibi dedektörler sadece evreni gözlemlemekle kalmıyor aynı zamanda yer bilimleri, deniz bilimleri ve biyoloji ile ilgili de çok önemli bilgiler veriyor. Derin denizlerdeki ortam koşullarının (sıcaklığın, basıncın, tuzluluğun, oksijen ve karbondioksit miktarının) takip edilmesiyle jeosfer, biosfer ve hidrosfer arasındaki karmaşık ilişkinin, denizlerdeki ortam koşullarının, iklim değişikliğinin ok-



Laboratuvar ortamında fotoçoğaltıcı tüpler

yanuslara etkisinin ve daha pek çok şeyin çok daha iyi anlaşılacağı düşünülüyor. Yerkürenin içinden geçerek gelen ve dedektörlerde kaydedilen nötrinolar Dünya'nın çekirdeği hakkında da çok önemli bilgiler verebilir.

Teleskoplardaki fotoçoğaltıcılar sadece Cherenkov ışımaya değil ortamdaki mikroorganizmaların yaydığı ışıklara (biyoluminesansa) da duyarlı. Her ne kadar fizikçiler biyoluminesansı kaydedilen sinyalleri bozan gürültü olarak görse de mikroorganizmaların yaydığı bu ışık deniz biyologlarına çok önemli veriler sağlıyor. Örneğin geçmişte ANTARES'in topladığı verilerle biyoluminesans ile derin sulardaki koşullar arasındaki ilişki daha iyi anlaşıldı.

Kışın soğuk havalarda yoğunlaşarak dibe batan yüzey suları beraberinde yüksek miktarda oksijen getiriyor ve bu durum mikroorganizmaların daha fazla biyoluminesans yapmasına neden oluyor.

Nötrino teleskoplarında yüksek enerjili nötrinoların sebep olacağı ses dalgalarını dinlemek için de cihazlar bulunuyor. Bu cihazlar sadece nötrinoların sebep olduğu sesleri değil ortamdaki diğer sesleri de kaydediyor. Bu kayıtlar yunuslar, balinalar ve diğer deniz canlılarının hareketleri, beslenmeleri, avlanmaları, iletişim kurmaları ve üremeleri hakkında deniz biyologlarına çok önemli bilgiler veriyor. ■

#### Kaynak

Kouchner, A. ve Elewycck, V. V., "Looking at the sky from under water", *Physics World*, Kasım 2017.

IceCube dedektörüyle ilgili bir çizim

