

Ödül Getiren Parçacıklar Nötrino ve Tau-Lepton

1995 Nobel Fizik Ödülü Yüksek Enerji Parçacık Fiziği dalında çalışan iki bilim adamına: nötrino (neutrino) parçacıklarının deneysel gözlemlenmesini (1974'de ölen C.L. Cowan ile birlikte) gerçekleştiren Frederick Reines ve Tau-Lepton'ları keşfeden SLAC grubunun lideri Martin L. Perl isimli fizikçilere verilmiştir.

Perihan Tolun
ODTÜ Fizik Bölümü

YÜKSEK ENERJİ PARÇACIK FİZİĞİ doğa bilimlerinin en temelinde bulunmaktadır. Maddenin yapısını ve bu yapının elemanları, temel-taşları olan parçacıkların özelliklerini ve birbirleri ile etkileşmelerini inceler.

Bilindiği gibi evrendeki maddelerin kendi özelliklerini taşıyan en küçük parçalarına molekül denir. Element denilen saf maddelerin en küçük parçaları ise atomlardır. Moleküller değişik atomların bir araya bağlanmasından oluşur ve kimyasal reaksiyonlar sonucu birbirine dönüşebilirler.

1910'lerde Rutherford deneyleri sonucunda atomların da bir iç yapısı olduğu anlaşılmıştır: Artı elektrik yüklü çekirdek (veya nükleus) ve etrafında eksi yüklü elektronlar. Çekirdek yapısının ise proton ve nötronların birbirlerine sıkıca bağlanmasıyla oluştuğu daha sonraki araştırmalarla ortaya çıkmıştır ve nükleer reaksiyonlar sonucunda çekirdeklerin dolayısıyla atomların birbirine dönüşmesinin mümkün olduğu görülmüştür.

Bu durumda en temelde üç çeşit parçacık vardır: elektron, proton ve nötron. Ancak 1940'ların ikinci yarısında muonların ve pionların keşfedilmesiyle temel parçacık sayısı birden yükselmiş ve Parçacık Fiziği, Nükleer Fizikten ayrı ve daha temel bir dal olarak ortaya çıkmıştır.

Daha sonraki yıllarda kaon'lar ve çeşitli hiperonların keşfi ile temel parçacık sayısı daha da arttı. Bütün bu yeni parçacıklar çok kısa "ömür"lüydü: 10^{-8} - 10^{-10} saniye mertebesinde belirgin bir süre içinde kendiliklerinden bozunmaya uğruyorlardı. Halbuki elektron, proton ve nötron'un kendi başlarına bırakıldıkları za-

man sonsuza kadar veya çok uzun bir süre "yaşadığı" (değişmediği) biliniyordu.

1960'lı yıllarda daha da kısa ömürlü (10^{-24} saniye mertebesinde) birçok yeni parçacık keşfedildi. Artık bütün bu yeni parçacıkları sınıflandırmak ve belki de daha temel unsurlardan oluştuklarını düşünmek gerekiyordu. Bu sınıflandırmada parçacıkların statik özellikleri ile birlikte aralarındaki etkileşmeler, birbirleri üzerindeki kuvvetler de göz önüne alındı. Çekirdek içindeki "kuvvetli etkileşmeler"e duyarlı parçacıklara Lepton (elektron, muon vb), duyarlı olan parçacıklara ise hadron (proton, neutron, pion, kaon, vb.) adı verildi. Leptonların basit parçacıklar olduğu, hadronların ise daha basit unsurlardan oluşan bir iç yapısı olduğu ortaya çıkıyordu. Hadronların özelliklerini izahta en başarılı kuramsal modele göre, kuark denilen üç temel unsur değişik kombinasyonlar halinde bütün hadronları oluşturabiliyordu. Yeni deneysel sonuçlar ve modelin daha gelişmesi ile kuark sayısı dörde, son yıllarda ise altıya çıkarıldı. Bugün en temel parçacık olarak altı lepton ve bütün hadronları oluşturabilen altı kuark biliniyor. Ayrıca etkileşmelerde aracı rolünü üstlenen bozonlar var.

Parçacık Fiziğinde kuramsal çalışmalar ileri matematiksel metodlar gerektirmiştir. Önemli gelişmeler ve bugün kabul edilen başarılı ku-



1995
NOBEL
ÖDÜLLERİ



FİZİK



ramlar grup teorisine ve kuantum alanlar teorisine dayanır.

Deneysel çalışmalar başlangıçta kozmik ışınlarla yapıyordu. Ancak bunlar yeterince kontrol edilemediği için 1950'lerden itibaren hızlandırıcı kullanımı ön plana geçmiştir. Arada zaman zaman nükleer reaktörler de bazı parçacıklar için kaynak olarak kullanılmıştır. Bugün çeşitli parçacıkların deneysel amaçlarla yüksek enerjilerde istenildiği gibi elde edilmesi sinkrotron tipi hızlandırıcılar ile mümkün olmaktadır ve bunların incelenmesi için dev boyutlarda detektör sistemleri kurulmaktadır. Çok büyük masraf gerektiren bu çalışmalar dünyada birkaç merkezde yürütülebilmektedir. Cenevre'de CERN, Hamburg'da DESY, Chicago yakınlarında FermiLab, California'da SLAC bugün için en yüksek enerjilere ulaşabilen hızlandırıcıların bulunduğu merkezlerdir. Buralarda ve diğer bazı merkezlerde yapılan Parçacık Fiziği araştırmaları çok ilginç sonuçlar vermekte ve evrenin sırlarının bulunmasında birinci derecede rol oynamaktadır.

Nötrino Parçacıkları

Nötrino parçacıkları elektrik yükü sıfır, kütlesi hemen hemen sıfır, başka parçacıklarla reaksiyona girme olasılığı çok küçük olan ve dolayısıyla gözlemlenmesinde büyük zorluklar bulunan temel parçacıklardır. Kuvvetli etkileşimlere duysuz olup, elektrik yükü de taşımadıklarından, sadece zayıf kuvvetler tarafından etkilenirler ve Lepton sınıfına girerler.

Nötrinoların varlığı ilk defa 1930 larında Pauli tarafından öne sürülmüş; ilk defa deneysel olarak gözlenmesi ise 1953'te Reines-Cowan deneyi ile gerçekleştirilmiştir.

Pauli Hipotezi

Radyoaktif maddelerin β -bozunmasında bilindiği gibi bozunan çekirdek bir elektron veya bir pozitron atarak daha kararlı başka bir çekirdek durumuna dönüşür. Aslında bu tür olayların en basit örneği, bir nötronun bir protona dönüşmesidir.

$$n \rightarrow p + e^- + ?$$

Eğer bu olayda bozunmadan sonra sadece proton ve elektron varsa, enerji ve momentum korunum kanunlarına göre, hem proton enerjisinin, hem de

elektron enerjisinin, sabit olması gerekir. Halbuki bu ve benzer β -bozunması olayları incelendiğinde elektron enerjisinin sabit olmadığı, bir dağılım gösterdiği bulunmuştur. Bu anlaşılabilir durumu izah edebilmek için, 1930'larda W. Pauli, β -bozunması olaylarında üçüncü bir parçacığın daha çıktığı hipotezini ortaya koymuştur:

$$n \rightarrow p + e^- + \nu$$

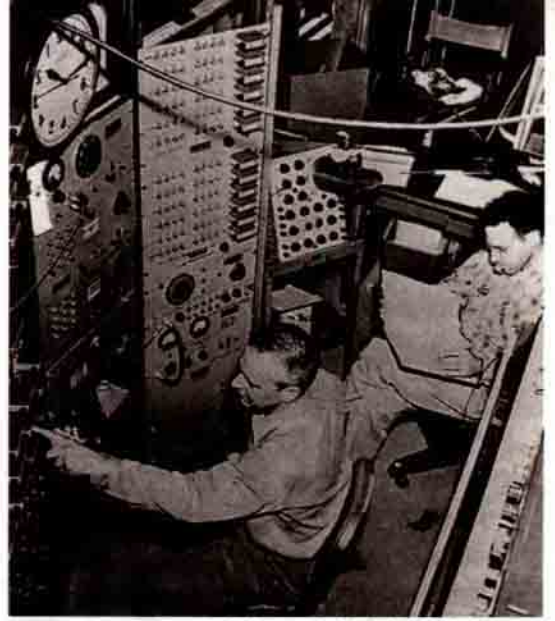
Böylece başlangıçtaki enerji üç parçacık arasında paylaşılacak ve elektron enerjisinin sabit olmayıp, bir dağılım göstermesi bozunma olayında enerji korunması ve momentum korunması ile birlikte mümkün olacaktır. Ancak mevcudiyeti varsayılan bu üçüncü parçacık hiç gözlenmemiştir; bunu izah etmek için de Pauli, bu tür parçacıkların elektrik yüklerinin sıfır, kütlelerinin sıfır, reaksiyona girme olasılıklarının da çok küçük olduğunu varsaymıştır.

Böylece Pauli, β -bozunması olaylarında enerji ve momentum korunması kanunlarının geçerliliğini kurtarabilmek için ortaya çıkardığı cesur hipotezinde, bugün nötrino dediğimiz parçacıkların varlığının gerekliliğine ilk defa işaret etmiştir. Fakat bu hipotezin o senelerde fizikçiler tarafından genellikle kabul görmediği pek söylenemez. Hatta kendisinin de tereddütleri olduğu sarfettiği şu cümleden anlaşılabilir: "Hiç yapmam gereken bir şey yaptım; anlaşılabilir bir durumu gözlenmesi mümkün olmayan bir şeyle izah ettim."

Fermi Teorisi ve İlk Kanıtlar

β -bozunması olayları genel olarak "zayıf etkileşimler" diye sınıflandırılan, elektromanyetik kuvvetlerden çok daha zayıf "zayıf kuvvetler" tarafından oluşturulan, olasılığı çok küçük etkileşme olaylarına örnek teşkil etmektedir. Bu tür etkileşimler için, çok başarılı ve o yıllarda yapılan gözlemlerle uyumlu bir teori, Fermi tarafından, 1930'ların ortalarında geliştirilmiştir. Fermi teorisinde nötrinoya da yer verilmektedir; böylece nötrininonun varlığının gerekliliği Fermi teorisinin desteği ile gene ortaya çıkmaktadır. Bu parçacığa nötrino ismini de Fermi vermiştir.

O yıllarda gerçekleştirilen diğer bazı önemli gözlemler ve keşiflerde de nötrininonun varlığına gerek duyulmuştur. Ör-



Reines ve Cowan, 1950'lerde nötrino ile ilgili ölçüler kaydederken

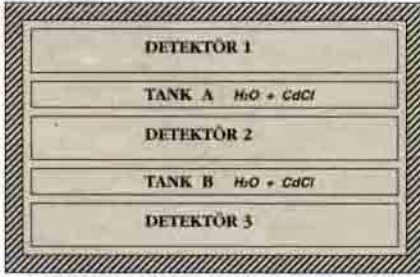
neğin, muon parçacıklarından sonra, 1947'de pion parçacıklarının keşfi, büyük oranda

$$\pi \rightarrow \mu + \nu$$

bozunma olaylarının ilk defa gözlenmesi ve incelenmesine dayanmaktadır. Burada bozunma bir parçacığın iki parçacığa dönüşmesi şeklinde olduğu için, çıkan her iki parçacığın da enerjileri (ve momentumları) sabittir, ölçülebilir ve kütleler cinsinden hesaplanabilir. Bu tür kinematik hesaplar sonucunda, muon ile birlikte çıkan diğer parçacığın kütlesinin hemen hemen sıfır olması gerektiği görülmüştür. Bu parçacığı, Pauli hipotezindeki sıfır kütleli parçacık, nötrino, ile özdeşleştirmek, (diğer özellikleri de uyduğu için) en tabii bir varsayım olarak kabul edilmiştir. Bu da nötrininonun varlığı için ilk kanıtlardan biridir.

Reines-Cowan Deneyi

Pauli hipotezi ile ortaya atılan nötrino parçacığının özelliklerinden, bu tür parçacıkların gözlenmesinin çok zor olacağı hemen anlaşılabilir. Bir kere elektrik yükü taşınamaması dolayısıyla detektörlerde iyonizasyon meydana getiremeyecek, iz bırakmayacaktır. Yüksüz parçacıkları gözleyebilmenin tek yolu, bunların meydana getirdikleri reaksiyonları bulmak ve incelemektir. Ancak nötrino parçacıkları için etkileşme oluşturma olasılığı da çok küçüktür; çünkü doğadaki temel kuvvetler arasında sadece "zayıf kuvvetler" nötrino parçacığını etkileyebilir ve bunların reaksiyon oluşturmaları sonucunu verebilir. Bu tür tipik zayıf etkileşme olaylarının gerçekleşme olasılığının ne kadar küçük olduğu şu örnekten anlaşılacaktır: Vasat enerjili bir nötrino, kurşun ortam içinden bin ışık yılı hiçbir etkileşme oluşturmadan geçebilir.

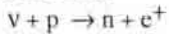


Reines-Cowan deneyinde kullanılan detektör sisteminin şeması

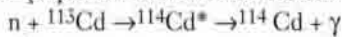
Bu zorluklar dolayısıyla nötrino parçacıklarının gözlenebilmesi için Pauli hipotezinden sonra 20 yıldan uzun bir süre geçmiştir.

1950'lerde nükleer reaktörlerin gelişmesi ve bunların içinde çok sayıda düşük enerjili nötron ve nötronların β -bozunmasından çok sayıda nötrino meydana gelmesi, nötrino parçacıklarının gözlenmesi heveslerini ön plana çıkarmıştır.

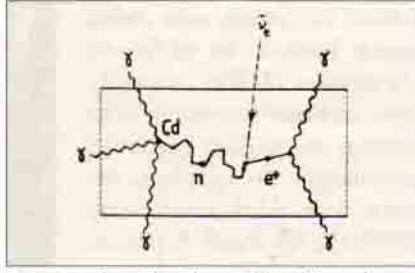
Amerika'da Savannah River reaktörünü yoğun bir nötrino kaynağı olarak kullanmayı planlayan F. Reines, L. Cowan ve grubu, deney hazırlıklarını 1950'lerin başında tamamlamışlar ve detektörlerini reaktörün yakınına kurmuşlardır. Detektör, içinde su ve suda çözülmüş kadmiyum klorür ($CdCl$) bulunan büyük su tankları ve bunların arasına ve etrafına yerleştirilmiş sintilatörler ve sayaçlardan meydana gelmişti. Detektör sistemini, dışarıdan gelebilecek (nötrino parçacıklarından başka) etkilerden korumak için, etrafına kalın bir duvar inşa edilmişti. Reaktörden gelen çok sayıda nötrino, kalın duvarı aşmış detektör tanklarına girdikten sonra, bunlardan bazıları sudaki protonlarla etkileşmeye girebilecektir:



Bu reaksiyonda ortaya çıkan düşük enerjili nötron ve pozitronun gözlenmesi ise şu şekilde mümkün olabilecektir:



Nötron, bir kadmiyum çekirdeği tarafından yakalanınca bir üst kütleli kadmiyum izotopu ve bir foton oluşacak ve bu tür fotonlar sintilatörlere bakan sayaçlar tarafından kaydedilecek; pozitron ise bir elektron ile karşılaştığı zaman, ikisinin yok-olmasıyla iki foton meydana gelecek ve bunlar ters yönde ve eşit enerjili olacaklar ve gene sintilatörlere yönelik sayaçlar tara-



Reines-Cowan deneyinde gözlenen tipik bir etkileşme olayı

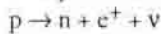
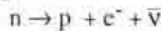
findan bu özellikleriyle kaydedileceklerdir.

Deneyde beklenen, e^+e^- yok-olmasından ters yönde ve aynı zamanda gelen eşit enerjili fotonların ve bunlardan kısa bir zaman aralığı sonra kadmiyum izotopundan gelen fotonların sayaçlar tarafından kaydedilmesi idi. Olay sayısının çok az olması ve çeşitli kalibrasyon zorlukları yenildikten sonra beklenen sonuç elde edilebildi.

Böylece senelerdir imkansız gibi görünen, nötrino parçacığının deneysel olarak gözlenmesi ilk defa gerçekleştirildi.

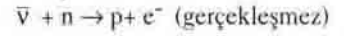
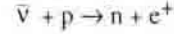
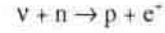
Nötrino Çeşitleri

Reines-Cowan deneyinden birkaç sene sonra nötrino (ν) ve anti-nötrino ($\bar{\nu}$) parçacıklarının birbirinden farklı parçacıklar olduğu deneysel olarak gösterildi. Aslında yukarıdaki paragraflarda bahsettiğimiz parçacık nötrino değil, anti-nötrinodur. Nötrino, protonun (çekirdek içinde) nötrona bozunmasından meydana gelir:



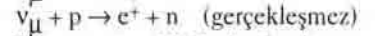
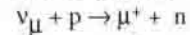
Nötrino ve anti-nötrino arasında en belirgin fark, spin (öz-dönme-moment) vektörlerinin hızlarına göre yönünün paralel veya anti-paralel (karşıt) olmasıdır.

Bu farklılık yüzünden aşağıdaki reaksiyonlardan



ilk ikisi oluşabilir ve gözlenmiştir; sonuncusu ise asla oluşamaz ve hiçbir zaman gözlenmemiştir.

Elektronlarla birlikte oluşan nötrinoların muonlarla birlikte oluşan nötrinolardan farklı olduğu da deneysel olarak gösterilmiştir. Pion bozunmasından elde edilen nötrino parçacıkları ($\pi \rightarrow \mu + \nu_\mu$) protonlarla etkileşmeye gönderildiği zaman sonuçta muonlar oluşur, elektronlar asla oluşmaz:



Bu sonuca 1962'de Lederman, Schwartz; Steinberger tarafından Brookhaven'da yapılan bir deneyde varılmıştır. 1975'te SLAC'de keşfedilen ağır lepton τ^\pm ile birlikte oluşan nötrino parçacıkları da diğerlerinden farklıdır. Tau-nötrino (ν_τ), henüz doğrudan doğruya deneysel olarak gözlenmemiştir. Bu amaçla çalışmalar, Türkiye'nin dahil olduğu Uluslararası Kollaborasyonlar tarafından devam ettirilmektedir.

Tau-Lepton

Elektron ve muondan sonra daha ağır bir lepton bulunması olasılığı fizikçiler arasında ilgi çeken bir problem olmuştur.

1973'te Stanford'da SLAC laboratuvarlarında elektron-pozitron çarpıştırıcısı SPEAR çalışmaya başladıktan sonra yaklaşık 5 GeV'e kadar yükselen enerjilerde, karmaşıklıklardan arındırılmış yöntemlerle ağır lepton arama deneyleri mümkün oldu.

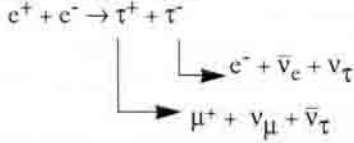
Perl Deneyi

M. Perl ve grubu SPEAR çarpıştırıcısında 1973 sonlarında, genelde yeni parçacıklar arama, özellikle ağır lepton arama amacına yönelik bir detektörler sistemi ile çalışmalara başladılar. Birinci senenin sonunda kaydedilen çok sayıda etkileşme olayı arasında 24 tanesi, bilinen bir yoldan, yani bilinen parçacıkların oluşması ve bozunması olarak izah edilemiyordu. Bu 24 etkileşme olayının herbirinde yüksek enerjili bir muon ve yüksek enerjili bir elektron

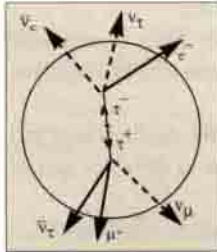


gözlenmişti. Bunlar birbirinin tersi elektrik yükü taşıyor ve enerji, momentum korunum kanunlarına göre bunlarla birlikte iz bırakmayan elektrik-yüksüz parçacıkların da ortaya çıkmış olması gerekiyordu.

Perl ve arkadaşları yaptıkları ölçüler ve kinematik simülasyon hesapları sonucunda, bu olaylarda, tau adını verdikleri yeni bir lepton, (ve bunun anti-parçacığı) oluşumunun gerekliliğini ortaya attılar. Yorumlarına göre bu etkileşme olayları (Şekil) şöyle geliyordu.



Elektron ve pozitron çarpışmasında tau-lepton ve anti-tau-lepton oluşuyor; sonra da bunların biri muon ve iki nötrino, diğeri ise elektron ve iki nötrino parçacığına bozunuyordu. Nötrinoların gözlenmesi mümkün olmadığından sadece yüksek enerjili elektron ve muon gözleniyordu. Deneyin devamında bu tür olayların sayısı arttı ve bunlara başka bir geçerli yorum getirilemedi. Böylece tau-lepton parçacığı ilk defa gözlenmiş, yani keşfedilmiş oldu.

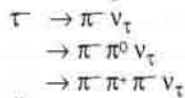


Perl deneyinde tipik bir etkileşme olayı: Tau-lepton ve anti-tau-leptonu karşıt yönlerde oluşması ve her birinin hafif leptonlara bozunması

Tau-Lepton'un Özellikleri

Tau-Lepton olaylarının ancak bir alt-limit, bir eşik-enerji üzerinde gerçekleşebildiği, bu eşik altında hiç görülmediği farkedildi. Buradaki enerji eşiği 3.56 GeV idi; ve bu değer kullanılarak tau-lepton kütlelerinin yaklaşık 1.78 GeV/c² olduğu hesaplanabiliyordu.

Daha sonraki deneylerde tau-lepton'un başka bozunma yolları olduğu görüldü; örneğin

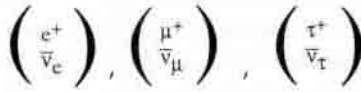


Üç pion çıkan bozunma olayları daha belirgin olup, daha kolay incelenebiliyordu. Bunlar kullanılarak tau-leptonun ortalama ömründe tayin edildi; sonuç $(2.96 \pm .03) \times 10^{-13}$ saniye olup, tau-leptonun zayıf etkileşmelerle bozunma par-

çacıklar arasında en kısa ömürlüsü olduğunu göstermektedir.

Leptonların Sınıflandırılması

Bugün fizikçilere maddenin yapısı için en geçerli teori olarak kabul edilen Standard Model'e göre her üç elektrik yüklü Lepton: e^\pm , μ^\pm , τ^\pm , kendisiyle birlikte oluşan nötrino parçacıkları ile birlikte, belli özellikler gösteren, ikililer meydana getirmektedir.

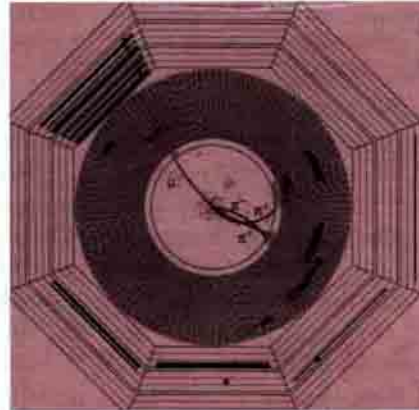


"Kuvvetli etkileşmeler" ile etkilenen proton, nötron, pion gibi parçacıkların yapıtaşları kuarklar da benzer bir şekilde üç ikili içine yerleştirilmektedir;



Bu sınıflandırma benzerliği bazı temel simetri özelliklerine dayanmaktadır. Genelde, özellikle leptonlar için, ikililerin herbiri bir önceki ikiliye benzemekte ancak kütleleri daha fazla olmaktadır. Bu ikililer sayısının üçü geçmeyeceğine dair deneysel kanıtlar bulunmuştur. Standart Model'in ötesine geçişi gerektiren problemler (nötrinoların küçük, ama sıfırdan farklı kütleleri olması olasılığı gibi) üzerinde çalışmaların getireceği çözümlerden, yeni gelişmelerden sonra da Standart Model'in temelde yararlı olmasının devam etmesi beklenmektedir.

Karşıt yönlerde meydana gelen tau-lepton ve anti-tau-leptonun birinin hafif leptonlara, diğerinin üç pion bozunması



Frederick Reines, 1918 yılında New Jersey'de doğdu. Doktora derecesini 1944 yılında New York Üniversitesi'nden fizik alanında aldı. ABD Ulusal Bilimler Akademisi ve Rusya Bilimler Akademisi üyesi olan Reines, halen Kaliforniya Üniversitesi'nde öğretim üyesidir.



Frederick Reines

Martin L. Perl, 1927'de New York'da doğdu. Doktora derecesini 1955'te Kolombiya Üniversitesi'nden fizik alanında aldı. ABD Ulusal Bilimler Akademisi üyesi olan Perl, halen Stanford Üniversitesi'nde öğretim üyesidir.



Martin L. Perl

Bugün Yüksek Enerji Parçacık Fiziği çalışmaları, çok zor, uzun süreli ve çok pahalı deneyler gerektirdiği için, dünyanın çeşitli üniversitelerinden fizikçiler, Kollaborasyonlar oluşturarak bu zorlukları gruplar halinde omuzlamakta, deneyleri birlikte planlamakta ve hızlandırıcı merkezlerinde birlikte yürütmektedir.

Türkiye'deki Yüksek Enerji Fizikçileri de sayı azlıklarına rağmen 1960'ların ortalarından beri CERN hızlandırıcılarındaki çalışmalara zaman zaman katılmışlar ve başarılı sonuçlar elde etmişlerdir. Son senelerde bu katılımın genişletilmesi ve grupların kuvvetlendirilmesi için çaba harcanmaktadır.

Yüksek Enerji Fiziği çok heyecan verici buluşlar, gelişmelerle doludur. Konularına gönül vermiş yüksek enerji fizikçileri, böyle sonuçlara erişebilmek için yeteneklerini geliştirmeyi, ilgilerini ve coşkularını taze tutmayı, çok çalışmayı ve çeşitli fedakarlıklar yapmayı göze alabilmektedirler.

Kaynaklar
Perl, M.L., Kirks, T.W., Heavy Leptons, Scientific American, Mart 1978
Perl, M.L., Leptons-What are They?, New Scientist, Şubat 1979
Reines, F., Cowan, L.C., The Neutrino, Nature, Eylül 1956
Reines, F., Cowan, L.C., Neutrino Physics, Physics Today, Ağustos 1957
Sutton, C., Spacship Neutrino, Cambridge U.P., 1992
www.nobel.se