

Meraklısına Parçacık ve Hızlandırıcı Fiziği

Bora Akgün,* Gökhan Ünel†, Samim Erhan‡, Sezen Sekmen§, Umut Köse¶, Veli Yıldız||

06/03/14

Bu kısa kitapçık yazımı bitirilirken meydana gelen Soma felaketinde yaşamını kaybeden maden işçilerine ve verecekleri eğitim ve yetiştirecekleri aydın nesiller sayesinde yersiz ölümlerin "kaza ve kader" olmaktan çıkıp "tarih" olmasını sağlayacak olan öğretmenlere adanmıştır.

Özet

Yakın zamanda, özellikle Higgs parçacığının keşfi sayesinde CERN laboratuvarına ve orada gerçekleşen hızlandırıcı ve parçacık fiziğine karşı yoğun bir ilgi ve merak oluştu. Bu merak yersiz değildir, çünkü parçacık ve hızlandırıcı fiziği, bilimin ve teknolojinin sınırlarını zorlayan, her an yenilikçi buluşlarla beslenen çok hareketli ve renkli bir bilim dalıdır. İşte tam bu sebepten öğrencilerin, gençlerin ve içinde keşif heyecanı taşıyan herkesin evrenin en temel yapıtaşlarını bulmayı amaçlayan bu dalı yakından tanımalarının yararlı olacağını düşünüyoruz.

Bu amaçla CERN deneylerinde görevli Türk fizikçiler olarak 23-27 Şubat 2014 tarihleri arasında CERN Türk Öğretmenler Programı'nın birincisini düzenledik. Türkiye'nin çok farklı yerlerinden gelen ortaöğretim ve lise öğretmenlerine CERN'i, hızlandırıcıları, algıçları ve tüm bu teknolojiyi kullanarak anlamaya ve keşfetmeye çalıştığımız parçacık fiziğini tanıttık. Etkinliğe katılan öğretmen arkadaşlarımızın ilgisi ve edindikleri bilgileri öğrencilerine, meslektaşlarına ve tüm meraklılara yaygınlaştırma heyecanları bizlerde de bu konuda somut katkıda bulunma isteği uyandırdı. Etkinlik sırasında yaptığımız sunumlardan ve gelen sorulardan yola çıkarak bu küçük kitapçığı hazırladık. Kitapçıkta CERN araştırma merkezi, parçacık fiziğine giriş, hızlandırıcı fiziği, algıç fiziği, Higgs buluşu, nötrino fiziği ve CERN araştırmalarının temel bilim dışı uygulamaları ana başlıklarında bilgileri, fazla matematiksel olmayan, basit bir dille derleyip sunmaya çalıştık. İyi okumalar...



Bu kitapçık, çoğaltılabilir veya yeniden dağıtılabilir veya her türlü biçimde yayımlanabilir veya lisansa ve yazarlara Yaratıcı Kamu (Creative Commons) lisansında belirtilen biçimde atıf yapılması koşuluyla işbu özgün çalışmaya dayanan yeni çalışmalar türetilebilir.

*Rice Univ. Fizik Bölümü, Houston, ABD

†Kalforniya Univ. Fizik Bölümü, Irvine, ABD

‡Kalforniya Univ. Fizik Bölümü, Los Angeles, ABD

§CERN, Fizik Bölümü, İsviçre

¶INFN. Fizik Bölümü, Padova, İtalya

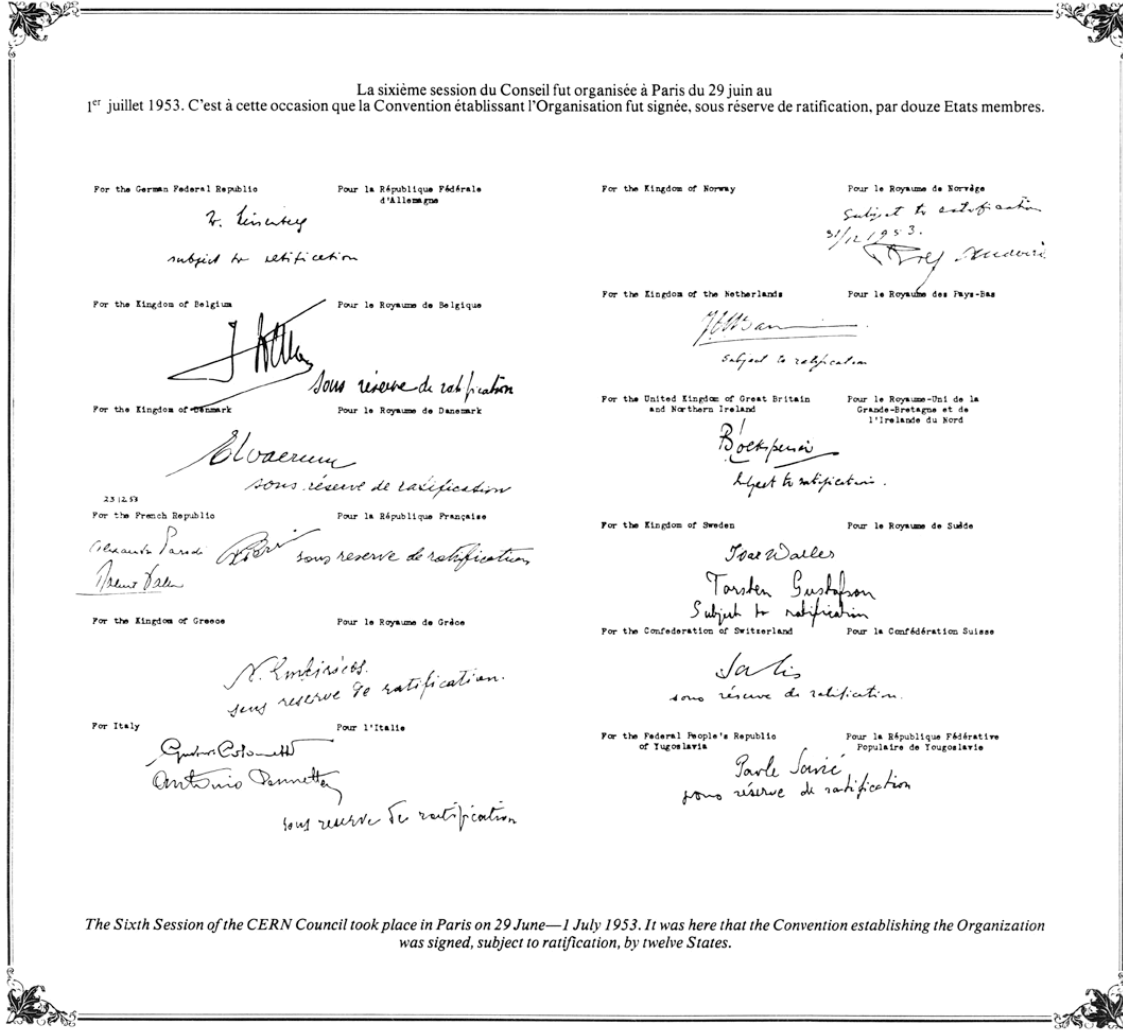
||CERN, Hızlandırıcı Bölümü, İsviçre



İçindekiler

1 Bilimi ve Yeniliği Hızlandıran CERN	4
2 Parçacık Fiziği	10
3 Hızlandırıcı Fiziği	14
3.1 Elektrostatik Hızlandırıcılar	14
3.1.1 Cockroft–Walton Hızlandırıcısı	14
3.1.2 Van de Graaff Hızlandırıcısı	15
3.2 Radyo Frekansı Hızlandırıcılar	15
3.2.1 Doğrusal Hızlandırıcılar	16
3.2.2 Dairesel Hızlandırıcılar	17
4 Algıç Fiziği	20
4.1 Bulut Odası	21
4.2 Köpük Odası	21
4.3 Dünden bugüne	21
4.4 Pırlıdak ve Enerji Ölçümü	22
4.5 İz sürme ve Momentum Ölçümü	23
4.6 ATLAS Algıcı	23

5	Ve CERN Higgs'i Buldu	26
5.1	Kütle sorunu ve Higgs işleyişi	26
5.2	BHÇ'de Higgs gözlemi	27
5.2.1	Higgs üretimi	27
5.2.2	Higgs bozunma kanalları	28
5.2.3	Sinyali ardalardan ayırmak	28
5.3	Higgs'ten ne öğrendik? Şimdi ne yapacağız?	32
6	Nötrinoların Dünyasına Kısa Bir Yolculuk	34
6.1	X ışınlarından radyoaktivite	34
6.2	Enerji korunumu krizi	34
6.3	Nötrino varsayımı	35
6.4	Kuramsal temellerin oluşturulması	36
6.5	Nötrinoların keşfi	38
6.6	Zayıf kuvvetlerde Parite (sağ-sol) simetrisi çığneniyor mu?	39
6.7	Nötrino sayısı ve hızlandırıcılarda nötrinoların üretilmesi:	41
6.8	Elektron ve müon dışında daha ağır bir lepton var mı?	42
6.9	Elektron ve müona birer nötrino eşlik ediyorsa tau leptonuna neden eşlik etmesin?	43
6.10	Standard modelin oluşturulması:	43
6.11	Nötrinoların kaynağı nedir?	45
6.11.1	Büyük patlama	45
6.11.2	Süpernovalar	45
6.11.3	Güneş	47
6.11.4	Havaküre	48
6.11.5	Nükleer reaktörler	48
6.11.6	Hızlandırıcılar	49
6.11.7	Dünya	49
6.11.8	İnsan	50
6.12	Standard modelin ötesinde yeni fiziğin ayak sesleri	50
6.13	Nötrino Salınımı	51
6.14	Nötrinoların kütleleri	54
6.14.1	Nötrinolar nasıl kütle kazanır?	54
6.15	Sonsöz	54
7	Temel Bilim Dışı Uygulamalar	58
7.1	Bilişim dünyasından	59
7.2	Elektronik dünyasından	59
7.3	Tıp dünyasından	60
7.4	Eğitim dünyasından	62
7.5	Tarih, dilbilim ve fiziğin kesişme noktası	63



Şekil 1: Kurulus

1 Bilimi ve Yeniliği Hızlandıran CERN

Samim Erhan

Cenevre  hri yakınında, İsviçre-Fransa sınırında kurulu dünyanın en büyük parçacık hızlandırıcısına ev sahipliği yapan Avrupa Nükleer Araştırma Laboratuvarında yapılan bilimsel araştırmalarda sadece bilimin sınırları zorlanmakla kalmıyor, bu çalışmalar için gerekli teknoloji ve bunların sonucu yenilikler de hız kazanıyor.

İkinci Dünya Savaşı'ndan parçalanmış olarak çıkan Avrupa'da, bilimsel çalışmalar da eski parlak günlerinin çok gerisinde kalmıştı. Zamanın ileri görüşlü tanınmış bilim insanları bu gidişin geri döndürülmesini sağlamak için uluslararası bir atom fiziği laboratuvarı hayal etmeye başladılar. Böyle bir laboratuvar sadece parçalanmış Avrupa'yı birleştirme konusunda öncülük etmekle kalmayacak, aynı zamanda ülkelerin kendi olanakları ile ger ekleştirmeyecekleri büyük bir tesise olanaklarını birleştirerek ulaşabilmelerini sağlayacaktı. 9 Aralık 1949'da Lozan  hrinde toplanan "Avrupa Kültür Konferansı"nda Louis de Broglie bu d şunceyi resmi olarak dile getirdi.

Bir kaç ay sonra Floransa'da toplanan 5. UNESCO konferansında Isidor Rabi uluslararası işbirliğini geliştirmenin bölgesel laboratuvarlar kurulması ile gerçekleşmesini önerdi ve sonuç bildirgesine girmesini sağladı. İki ay sonra 1951'de Paris'te 11  lke Avrupa Nükleer Araştırma Konseyi kurulmasına karar verdi. Adı İngilizcede "European Council for Nuclear Research", Fransızcada "Conseil Europ en pour la Recherche Nucl aire" olan bu kuruluşun Fransızca isminin baş harfleri, kurumun kısa adı olarak kullanılmaya başlandı (CERN).

1952'de geçici Konseyin 3. toplantısında merkezin Cenevre'de kurulmasına karar verildi ve ilk kazma 1954'de vuruldu. Kuruluş anlaşması ise 12 ülke tarafından 1953'de imzalandı. Danimarka, Fransa, Batı Almanya, Yunanistan,



Şekil 2: İlk toplantı ve sağda 1954 yılında ilk kazma vurulmadan hemen önce

İtalya, Hollanda, Norveç, İsveç, İsviçre, İngiltere ve Yugoslavya parlamentoları onamaları 29 Eylül 1954 tarihinde tamamlanarak 1952’de kurulan geçici “Avrupa Nükleer Araştırmalar Konseyi” yerine Avrupa Nükleer Araştırmalar Organizasyonu kurulmuş oldu. İsmi değişse de, yeni yapılanma CERN kısaltmasını kullanmaya devam etti. En son İsrail’in katılımı ile üye ülke sayısı 21 olan CERN Laboratuvarında bütün dünyadan 10 binin üzerinde bilim insanı bilimin sınırlarını genişletmeye devam etmektedir.

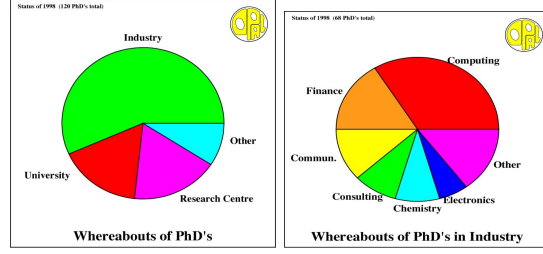
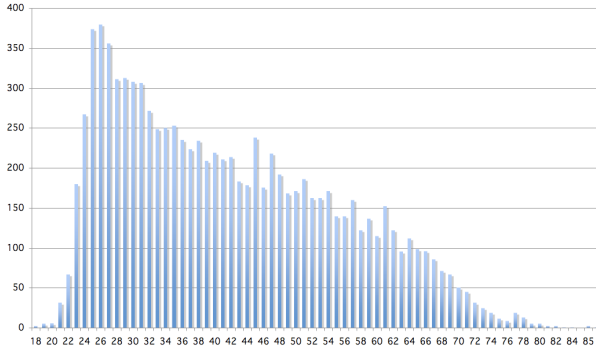
İsmindeki “nükleer” kelimesi kuruluş tarihlerde maddeyi anlamaya çalışan fizikçilerin, çoğunlukla atomun ve atom çekirdeğinin yapısı ile ilgileniyor olmasından kaynaklanıyor. Burada yapılan araştırmaların sivil veya askeri enerji üretimi ile hiç bir ilgisi olmamasına rağmen, CERN, kuruluş aşamasında aldığı ismi kullanmaya devam ediyor. Bugün ise maddenin temel yapı taşlarını ve aralarındaki etkileşimleri inceleyen bilim dalına “parçacık fiziği” diyoruz. Maddenin çok küçük boyutlardaki yapısını incelemek için de maddeyi çok yüksek enerjilerde çarpıştırmak gerekiyor. Çarpışma enerjisi ne kadar büyük olursa o kadar küçük boyutlarda inceleme olanağı veriyor. Bunun için de parçacık hızlandırıcıları kullanılıyor. CERN’de birbirini tamamlayarak en yüksek enerjilere ulaşılmasını sağlayan bir takım hızlandırıcıların yanında kendi enerji sınırlarında yapılan deneylere de ev sahipliği yapabilen çeşitli hızlandırıcılar bulunmaktadır.

CERN’in temel işlevi maddenin yapı taşlarını ve bunların birbiri ile etkileşmelerini incelemek ve bu konuda yapılan deneysel çalışmalara ev sahipliği yapmak olsa da, bir taraftan geleceğin bilim insanı, mühendis ve kalifiye işgücünü yetiştirerek, bir taraftan da araştırmalarda gerekli teknolojilerin geliştirilmesini sağlayarak, üye ülkelere yetişmiş insan gücü ve bilgi birikimi sağlamaktadır. Bütün dünyadan bilim insanları için bir çekim merkezi oluşturarak da, değişik ülke ve kültürlerden insanları birleştirmektedir.

İsviçre – Fransa sınırında bulunan CERN’in ana yerleşkesine bu iki ülke ortak ev sahipliği yapmaktadır. İsviçre – Fransa sınırı ana yerleşkenin ortasından geçse de, iki ülke arasında varılan anlaşma gereği yerleşke İsviçre gümrük sınırları içinde sayılmaktadır. Daha sonra kurulan ikinci yerleşke Fransa sınırları içinde kaldığından CERN’un biri İsviçre’de diğeri Fransa’da iki adresi vardır. Her gün 4000 üzerinde kadrolu veya diğer sözleşmeli personeli ve başka kurumlardan binlerce araştırmacı tarafından kullanılan, bankaları, postaneleri, kafeteryaları, heykel ve havuzları ile orta boy bir kasaba görünümündedir. CERN’de çalışanlara genel olarak bakıldığında (Şekil 3 sol yan) ise en çok 26 yaşındaki genç araştırmacıların bulunduğu görülebilir: bunlar çeşitli üniversitelerdeki doktora öğrencileridir. Mezun olduktan sonra ne yaptıkları ise aynı şekilde orta ve sol yanda verilmiştir. Görüleceği gibi, çokluk endüstride çalışmakta, bunların da büyük çoğunluğu bilişim alanında yer almaktadır.

Bölgede yoğun bir yerleşim olması ve buna bağlı olarak arazi fiyatlarının yüksek olması sonucu, CERN’deki büyük hızlandırıcılar için gerekli alanlar kamulaştırılıp yerleşkelerin sınırları genişletilmek yerine yer altındaki tüneller içine kurulmuş sadece deney bölgelerinde yer üstünde olması gereken destek binalarının bulunduğu bölgeler CERN yerleşkesine katılmıştır. Örneğin 26 km uzunluktaki Büyük Hadron Çarpıştırıcısının (bkz. Şekil 4) çok az bir kısmı CERN yerleşkeleri içinde kalmaktadır. Tünellerin yerin yaklaşık 100m altında olmasının ana nedeni ise yer altı sularının ana akış yollarını engellemek ve hızlandırıcıyı sağlam kaya tabanına oturtmak içindir.

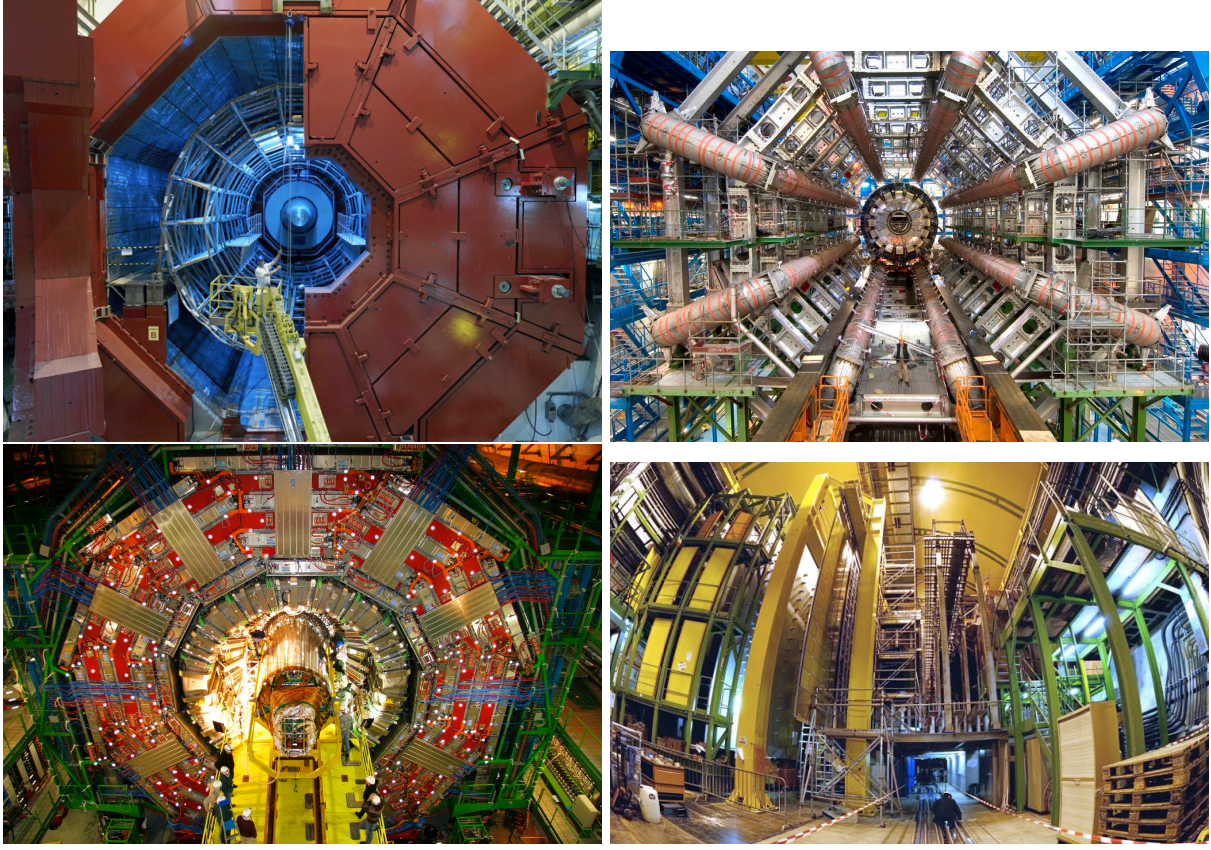
Avrupa Nükleer Araştırma Organizasyonu’nun en yetkili kurumu üye ülkelerden, biri siyasi idareyi temsilen biri de bilimi temsilen ikişer kişinin katılımı ile oluşturulan konseydir. Konseyde her ülke iki kişi tarafından temsil edilmesine rağmen her ülkenin tek oy hakkı vardır. Alman kararların çoğu için oy çokluğu yeterli olsa da kararların oy birliği ile alınmasına özen gösterilir. Konseye bilimsel programlar için danışma görevi üstlenen Bilim Kurulu bilimsel yeterlilikleri dünyaca kabul görmüş bilim adamlarından oluşur. Süresi dolan üyeler yerine yenileri kurul



Şekil 3: CERN'de çalışanların yaş dağılımı ve doktoralarını aldıktan sonra seçtikleri dallar (Bu konuda en son çalışma 1998 yılında yapılmış olup, yenilenmesi 2014 itibariyle devam etmektedir.)



Şekil 4: Büyük Hadron Çarpıştırıcısı tüneline bir görünüm: mavi borular vakum altında tutulan demet boruları ve bükücü mıknatısları, onların sağındaki beyazımsı borular ise sıvı helyum taşıyan soğutma düzeneğini içerir.



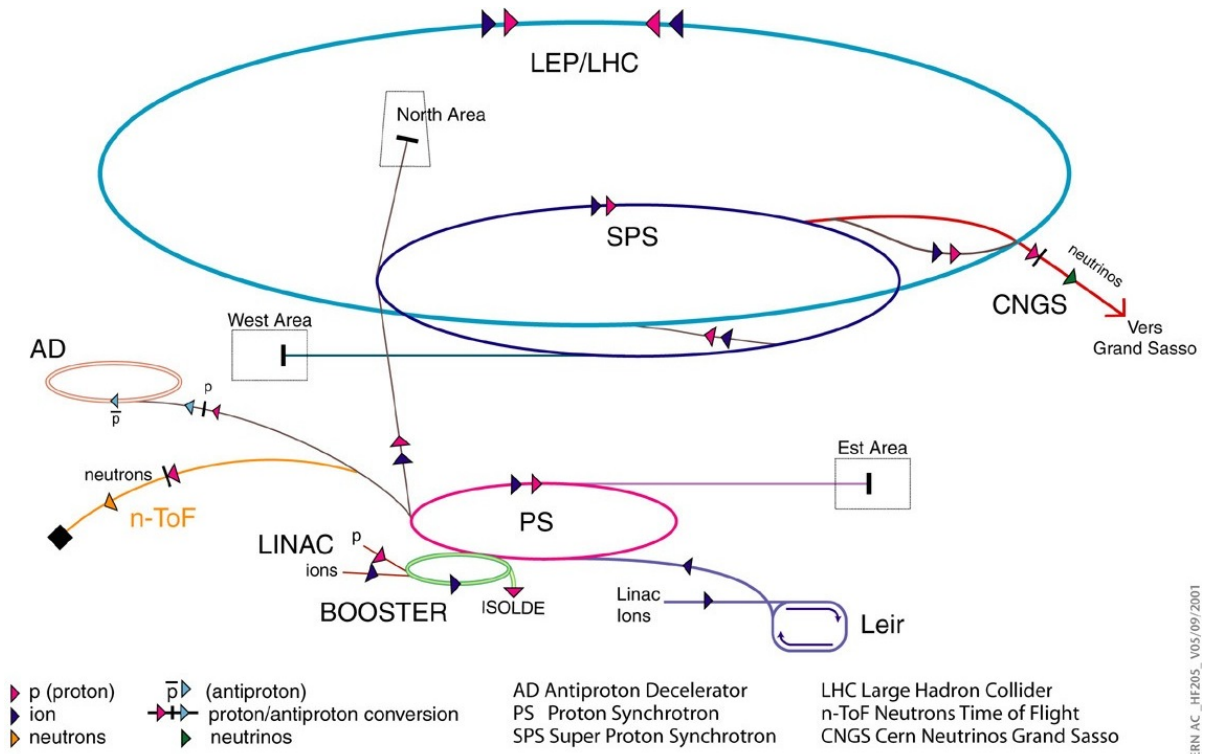
Şekil 5: BHÇ deneyleri: üst solda Alice, sağda ATLAS, alt solda CMS ve sağda LHCb.

üyelerince seçilir ve Konsey tarafından atanırlar. Bilim Komitesi üyeliğinde üye ülke vatandaşı olma şartı aranmaz. Üye ülkelerin konsey'deki idari temsilcilerinden oluşan Finans kurulu CERN'e üye ülkelerin katkıları ve bunların bütçelenmesi ve harcamaların denetlenmesi konuları ile ilgilenir. CERN araştırma merkezi Konsey tarafından 5 yıl süre ile atanan Genel Yönetici tarafından yönetilir. Genel Yönetici tarafından önerilen ve gene Konsey tarafından atanan değişik Yöneticiler merkezin yönetiminde Genel Yöneticiye yardımcı olurlar.

CERN'un amiral gemisi Büyük Hadron Çarpıştırıcısı ve bu çarpışmaların incelendiği ikisi genel amaçlı ATLAS ve CMS deneyleridir. BHÇ'de ayrıca belli özel konuları incelemek için özel olarak tasarlanmış LHCb, ALICE, TOTEM deneyleri de vardır. Şekil 5 4 büyük BHÇ deneyinin resimlerini içerir. Deney adları ya deney aletinin özelliklerini tanımlayan ya da araştırmayı amaçladıkları fiziği açıklayan kelimelerden akılda kolay kalması ve deneyi belirlemesi amacı ile üretilmiştir. CERN araştırma programı BHÇ deneyleri dışında "Proton Synchrotron" ve "Super Proton Synchrotron" hızlandırıcılarından alınan demetler ile yapılan sabit hedef deneyleri, İtalya'da "Grand Sasso" laboratuvarı ile ortak nötrino programı, karşı-proton, karşı-madde araştırmaları, düşük enerjili radyoaktif atom için ile yapılan çalışmalar, hızlandırıcıya gerek duymayan deneyler ve hatta başka yerlerdeki deneylere ev sahipliği yapmak gibi çok geniş bir yelpazeyi kapsamaktadır. Mevcut hızlandırıcıların işletilmesi, iyileştirilmesi ve geleceğin hızlandırıcı teknolojisinin geliştirilmesi CERN'in bilimsel programı içindedir.

CERN laboratuvarında yapılan deneylerde değişik enerjiler gerçekleştirilen çarpışmalar incelenmektedir. Bu deneyler için gerekli parçacıkların hızlandırılması Şekil 6'de çizimsel olarak gösterilen ve birbiri ile uyumlu çalışan bir dizi parçacık hızlandırıcısında gerçekleştirilmektedir. Tümlleşik yapıda bulunan hızlandırıcılar kendi enerji aralıklarındaki deneylere parçacık demeti sağlamanın dışında, parçacıkları bir üst enerji düzeyine çıkaracak şekilde hızlandırarak, daha büyük hızlandırıcıların ön kademesi olarak da çalışmaktadır. CERN laboratuvarı tüm bu çalışmalara ev sahibi olarak yer ve altyapı sunmaktadır. Bu çalışmalarda kullanılan parçacıkları hızlandıracak aletleri geliştirip kurmak CERN'in bütçesinden karşılanır. Deney aletlerinin üretimi, kurulması ve bakımı ise, içinde CERN'in de olduğu, deneye katılan kurumlar ve onların bilimsel çalışmalarını destekleyen ulusal destekleyici yapılar tarafından üstlenilir¹. Dolayısı ile CERN'e üye olan ülkeler bir taraftan CERN bütçesini desteklerken, bir taraftan da kendi kurumlarındaki bilim insanlarının CERN'de çalışmalar yapması için onlara da benzer seviyelerde destek sağlamak-

¹Türkiye için bu destekleyici kurum, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu - TAEK'dir.



Şekil 6: CERN hızlandırıcı yapısının bütünü

tadır.

Türkiye-CERN ilişkileri, 1961 yılında ülkemizin CERN'e gözlemci olarak katılmak üzere başvurmasından günümüze kadar inşili-çıkışlı bir yol izlemiştir. İlk 30 yıldaki ilişkiler, doktoralarını yurt dışında tamamladıktan sonra ülkemiz kurumlarına dönmüş olan deneysel fizikçilerin kişisel ilişkileri ile girdikleri deneylere bireysel katılımlar olarak devam etmiştir. Sonraki yıllarda ulusal bütçeden sağlanan desteklerle Türk grupları çeşitli deneylere, grup olarak katılmaya başlamış, bu süreç zaman içinde büyüyerek günümüzde Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'ndaki dört ana deney başta olmak üzere birçok deneysel çalışmaya ve hızlandırıcı AR-GE çalışmalarına etkin katılım düzeyine ulaşmıştır. Ulusal grupların dışında yabancı ülkelerde çalışan birçok bilim insanı ve doktora öğrencileri ile CERN'de çalışan Türk bilim insanı sayısı 200'ü geçmiştir. Bunun dışında Türk şirketleri BHÇ deneylerinin inşasına da katkıda bulunmuş, CMS deneyinin parçalarının üretiminde gösterdikleri başarı altın madalya ile ödüllendirilmiştir. Bu başarı belgeleri Şekil 7'de görülebilir.

Bunun doğal sonucu olarak 2010 yılında Türkiye tam üyelik için CERN'e başvurmuş ve CERN konseyi tarafından yapılan incelemeler sonucu, ülkemizin CERN'den faydalanabilecek ve CERN'de yapılan çalışmalara katkı sağlayabilecek düzeyde olduğu saptanmıştır. Üyelik görüşmeleri sürerken, Türkiye tam üyelikten vazgeçip, yarı üyelik diyebileceğimiz, üyelik haklarından katkı oranında faydalanabildiği ama oy hakkı olmayan "assosiyeye üye"² olmak kararı vermiş bu yöndeki antlaşma 12 Mayıs 2014 tarihinde CERN'de yapılan bir tören ile imzalanmıştır. Bu törende çekilen bir resim, Şekil 8'de görülebilir. Türkiye Büyük Millet Meclisinde onandıktan sonra yürürlüğe girecek bu antlaşma sonucu Türk bilim insanları, mühendis ve öğretmenleri CERN tarafından finanse edilen programlardan faydalanmaya başlayacaklardır. Yine bu antlaşma çerçevesinde Türk şirketleri CERN ihalelerine Türkiye'nin ödediği katkı payı oranında katılabilecekler, CERN'un ihtiyaç duyacağı teknolojilerin geliştirilmesine katkı yapabileceklerdir.

CERN Türkiye ilişkilerinin canlanmasıyla etkinleşen çalışmalardan biri de Türkçe olarak yapılan öğretmen eğitim programıdır. Şekil 9'da görüleceği gibi, 1998'den bu yana programa sadece 3 kişi katılmışken, 2014 yılı şubat ayında bu sayı 36'ya çıkmış ve artmaktadır.

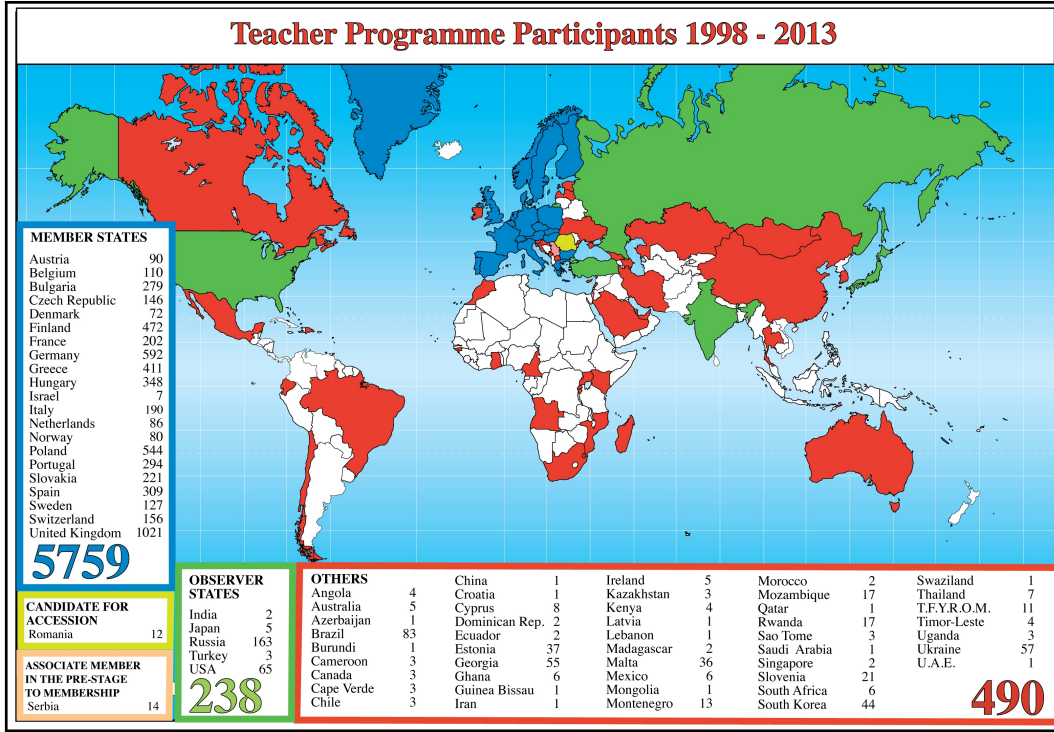
²Basında "Ortak Üye" deyimine yer almıştır.



Şekil 7: CMS inşasında 2 Türk şirket altın madalya ile ödüllendirildiler.



Şekil 8: CERN genel yöneticisi ile TC enerji bakanı arasında yapılan armağan değiş-tokuşundan bir an.



Şekil 9: 1998-2013 yılları arasında öğretmen programında yer alanlar.

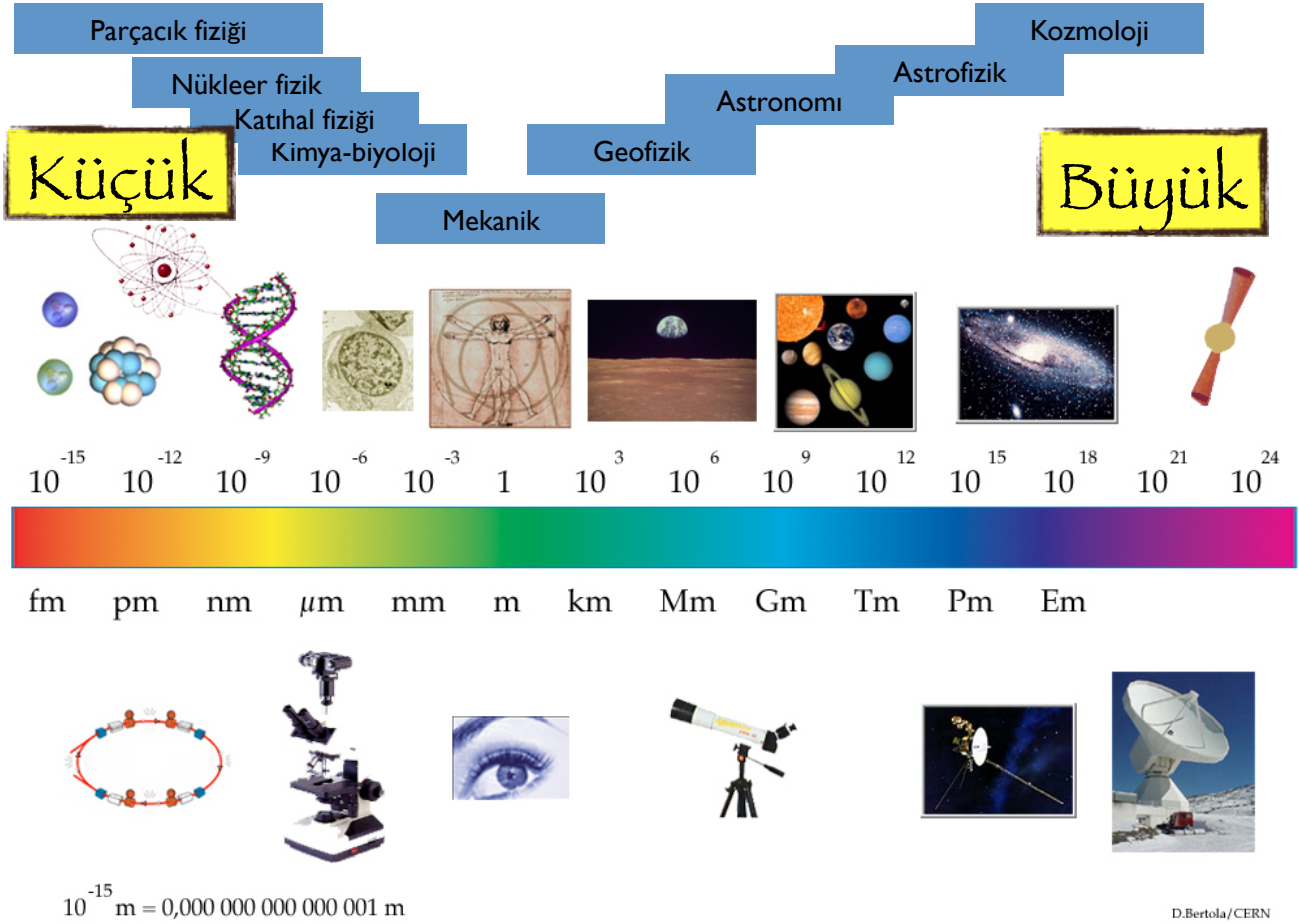
2 Parçacık Fiziği

Bora Akgün

Parçacık fiziği, maddenin ve etkileşimlerinin altyapısını inceleyen bilim dalıdır. Bir anlamda en küçüğün bilimidir. En küçükler, atomaltı parçacıklar, bir araya gelerek üzerinde yaşayanlarla birlikte dünyamızı, başka gezegenleri, yıldızları, yani evrenimizin içindeki her şeyi oluştururlar. Farklı boyutları farklı bilim dalları inceler. Metre seviyesinde inceleyen dala mekanik diyoruz. Bu seviyede gördüklerimiz; insan boyutunda nesnelere ve gözlemlerimizi gözlerimizle yapıyoruz. Boyut büyüdükçe önce güneş sistemimizdeki diğer gezegenleri sonra başka yıldız sistemlerini daha sonra da başka galaksileri ve evrenin en uzak köşelerini gözlemleriz. Bu boyutlarla ilgilenen dallara da sırasıyla astronomi, astrofizik ve kozmoloji diyoruz. Kozmoloji bilimi $10^{21} - 10^{22}$ metre seviyesini açıklar. Bizden bu kadar uzakta olan gök cisimlerini çıplak gözle görmek mümkün değildir. Çok gelişmiş teleskoplar ve uydular kullanılır. Peki, ters yöne gitsek neler görürüz? Önce hücreyi sonra DNA'yı daha sonra elektron bulutunu ve atomun çekirdeğini. Elektron kadar olan kısmı mikroskoplarla incelemek mümkündür. Çekirdeğe kadar olan kısmı inceleyen bilim dalları sırasıyla kimya, biyoloji, katıhal fiziği ve nükleer fiziktir. Küçüğe olan yolculuğumuz atom çekirdeğinde durmaz, çekirdeğin de bir iç yapısı vardır. Çekirdekler artı yüklü protonlar ve yüksüz nötronlardan oluşur. Eğer $10^{-14} - 10^{-15}$ metre seviyesine inerek göreceğiz ki bu protonlar ve nötronlar da ismine kuark dediğimiz parçacıklardan meydana gelir. İşte bu seviyede gözlem yapabilmek için kullanmamız gereken aletler parçacık hızlandırıcıları ve algıçlarıdır. Atomaltı seviyeyi açıklayan bilim dalına ise parçacık fiziği denir.

Atomaltı parçacıklar yüzyıllık aşan bir süre içinde teker teker bulunmuştur. Bu keşiflerin ilki 1897 yılında gerçekleşen elektron isimli eksi yüklü parçacıktır. Atom merkezinde artı yüklü bir çekirdeğin olduğunun keşfedilmesi için 1911 yılına kadar beklemek gerekmiş süreç içinde çekirdeğin tek parça olmadığı, artı yüklü protonlardan ve yüksüz nötronlardan bir araya geldiği anlaşılmıştır. İlerleyen zamanda proton ve nötronların da içlerinde kuark adı verilen parçacıklar olduğu keşfedilmiştir. Hem proton hem de nötron üçer kuarktan meydana gelir. İki tane yukarı bir tane aşağı kuark bir araya gelince proton, bir tane yukarı iki tane aşağı kuark bir araya gelince nötron oluşur. Kuarklar kesirli elektrik yüküne sahiptir, yukarı kuarkların elektrik yükünün büyüklüğü elektronun elektrik yükünün büyüklüğünün $2/3$ ü kadar, elektronun aksine yukarı kuark artı yüklüdür. Aşağı kuark ise eksi yüklü, yükünün büyüklüğü ise elektronun elektrik yükünün $1/3$ ü kadardır. Elektrik yükü kesirli olan kuarkların bir araya gelmesi ile oluşan protonlar ve nötronlar ise tam sayı yüklüdür.

Bütün elementler çekirdekte ve çekirdeği çevreleyen elektron(lar)dan meydana gelir. Elementleri birbirlerinden ayıran çekirdeklerindeki proton sayısıdır. Hidrojen hariç bütün elementler çekirdeklerinde hem protonlar hem



Şekil 10: Birimler, konular ve ölçen gereçler

de nötronlar barındırır, nötronsuz tek element hidrojendir, hidrojen aynı zamanda tek elektronlu tek elementtir. Periyodik cetvel(Yinelemeli dizin), benzer özellikler gösteren elementlerin gruplanmasıyla(bir araya getirilmesiyle) oluşturulmuştur. Yukarıda tartıştığımız gibi bütün çekirdekler protonlar ve nötronlardan, proton ve nötronlar da yukarı ve aşağı kuarklardan oluşuyorsa atomaltı seviyede, kuark seviyesinde, farklı bir gruplama yapmak mümkündür.

Yukarı ve aşağı kuarklar bütün elementleri oluşturmalarına rağmen bugüne kadar keşfedilmiş tek kuark çifti değildir. Elektrik yükü olarak aynı ama kütlesi ilk kuark çiftinden daha büyük iki kuark çiftinin daha olduğunu biliyoruz. Bu çiftler tılsım-garip ve üst-alt diye adlandırılır. Eğer bütün elementlerin çekirdekleri yukarı ve aşağı kuarklardan meydana geldiyse diğer kuark çiftleri neredeler ve onların var olduklarını nereden biliyoruz?

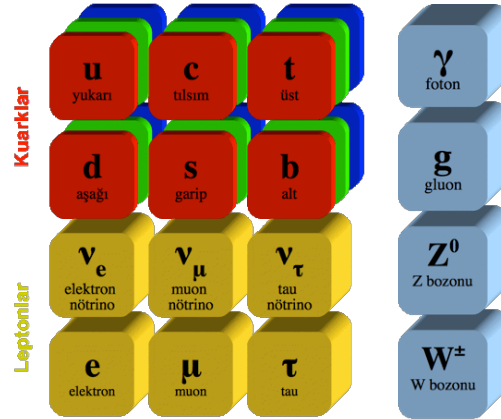
İlk sorunun cevabı evrenin ilk zamanlarında gizlidir. Evren oluşuktan kısa bir süre sonra ortamın sıcaklığı çok yüksek olduğu için kuarklar birbirlerine bağlanmadan serbestçe hareket ediyordu. İşte bu ilk zamanlarda 6 kuark da hareket halindeydi ama zaman geçtikçe ve evren genişleyip soğudukça daha büyük kütleli kuarklar daha düşük kütleli diğer kuarklara bozunmaya başlamıştır. Üst ve alt kuarklar tılsım ve garip kuarklara, tılsım ve garip kuarklar yukarı ve aşağı kuarklara bozunmuştur. En düşük kütleli kuarkların bozunacağı daha düşük kütleli parçacıklar olmadığı için yukarı ve aşağı kuarklar bir araya gelip protonları, nötronları ve çekirdekleri oluşturmuştur. Evrenin başlangıcını sıfır kabul edersek üç dakika içinde bütün bu süreç gerçekleşmiş ve helyum gibi küçük atom numaralı çekirdekler oluşmuştu bile [1]. Evrenin az sayıda büyük yerine çok sayıda küçüğü yani, en düşük enerji durumunu tercih etmesini entropinin (düzensizliğin) artması ile açıklarız. Evren genişleyip soğudukça ilk üç dakikada oluşan çekirdeklere elektronlar takılmış ve elementler oluşmuştur. Süreç içinde yıldız sistemleri ve galaksiler meydana gelmiştir. Dünyamızın yaşı yaklaşık 4 milyar, evrenin yaşı ise yaklaşık 13.7 milyar yıldır.

İkinci sorunun cevabı ise parçacık hızlandırıcıları ve algıçlarında gizlidir. CERN'deki Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (BHÇ) gibi hızlandırıcılarda hızlandırdığımız protonları veya kurşun çekirdeklerini CMS, ATLAS ve ALICE gibi

algıçların merkezlerinde ve LHCb gibi algıçların önünde çarpıştırarak çok kısa bir süre için gözle görülemeyecek kadar küçük bir hacimde enerji yoğunluğunu artırmaktayız. Artan enerji yoğunluğu Albert Einstein'ın $E = mc^2$ formülünün sol tarafındaki enerjiyi sağlar. Bu "enerji balonu"ndan denklemin sağ tarafındaki "m" ler, yani m kütesine sahip yeni yeni parçacıklar çıkar. Bunlar bugüne değil, evrenin ilk zamanlarına ait parçacıklardır ve çok kısa bir süre yaşarlar, yaklaşık 10^{-12} saniye. Bu parçacıkların içinde sadece yukarı ve aşağı kuarklar yoktur, yukarıdaki paragrafta sözü geçen kuarkların hepsi vardır. BHC çarpışmalarından sonra oluşan parçacıklar ve o parçacıkların bozunduğu diğer parçacıklar algıçlarımızda sayısal sinyaller bırakırlar, bu sinyaller sayesinde bizler de evrenin ilk dönemlerini daha iyi anlarız.

Kuarkların üçerli gruplar halinde bir araya gelip oluşturduğu parçacıklara baryon denir. Proton ve nötron birer baryondur. Ancak kuarklar sadece üçerli gruplar halinde bir araya gelmezler. Kuark-antikuark çiftleri şeklinde bir araya gelip oluşturdukları parçacıklara da meson adını veririz. Hem baryonları hem de mesonları içeren parçacık ailesine hadron denir. Zaten bu yüzden bir hadron olan protonları hızlandırıp çarpıstıran makinenin adı 'Büyük Hadron Çarpıstırıcısı'dır. Farklı farklı kombinasyonlarla bir araya gelen kuarklar çok sayıda hadron oluştururlar ancak bu hadronların büyük bir çoğunluğu kararlı değildir ve kısa sürede başka parçacıklara bozunur.

Nasıl ki yukarı-aşağı kuark çifti tek kuark çifti değilse ve tılsım-garip ve üst-alt gibi iki çift daha varsa, elektron da tek değildir. Elektronu benzer özellik gösteren ama daha büyük kütlelere sahip iki parçacık daha vardır. Onlara muon ve tau denir. Esasında nötrino adını verdiğimiz ve üç çeşni (elektron, muon ve tau) olan çok özel başka tip bir parçacık da var ama onunla ilgili detayları ilerleyen bölümlerde tartışacağımız için şimdilik sadece var olduğunu söylemekle yeteniyoruz. Elektron, muon, tau ve bunların nötrinolarının herbirinin genel adı leptonudur. Hem leptonların hem de kuarkların genel adı ise fermiyondur. Adına dönü (spin) dediğimiz bir parçacık özelliği bütün fermiyonlarda yarım-sayı değeri alır. Fermiyonların ortak özelliği işte bu yarım-sayıdeğerli dönüdür. Bir de tam-sayı değeri, boson adını verdiğimiz parçacıklar var, ama onları anlatmadan önce kuvvetlerden söz etmek gerekir.



Şekil 11: Temel Parçacıklar

İçinde yaşadığımız evreni dört temel kuvvetle açıklayabiliriz; kütle çekimi, elektromanyetizma, zayıf kuvvet ve güçlü kuvvet. Kütle çekimi adından da anlaşılacağı gibi iki kütleli birbirlerine uyguladığı çekme kuvvetidir. Kütle çekimi gök cisimlerinin hareketlerini açıklamada kullanılan etkin bir kuvettir. Kütleler küçüldükçe etkinliği azalır. Güneş etrafında dönen gezegenler ve gezegenler etrafında dönen uydular varken karpuzlar etrafında dönen elmalar yoktur. Yani metre seviyesine gelindiğinde kütle çekiminin etkisi hissedilmez olur. Gözle görülmeyecek kadar küçük parçacıkları etkileyen kuvvetlerden söz ederken kütle çekimi hepten ihmal edilebilir. Elektromanyetizma ise; elektrik yükü taşıyan parçacıklar arasındaki etkileşimi sağlayan kuvettir. Elektrik yükü taşıyan her parçacık veya cisim elektrik alan yaratır eğer bu cisim hareket halindeyse buna elektrik alana ve hareket yönüne dik bir manyetik alan da eklenir. Tabi ki manyetik alan oluşturmanın tek yöntemi yüklü cisimlerin hareket etmesi değildir, eğik eksenli etrafında dönen dünyamızın da yarattığı bir manyetik alan vardır. Örneğin buzdolabı mıknatısları (ferromagnetler) dönülerinin yönü sebebiyle bir manyetik alan yaratır ve bu alanın sağladığı kuvvet kendi ağırlıklarını dengeleyecek kadar büyüktür. Burada unutulmaması gereken şey, elektromanyetik kuvvetin sadece elektrik yükü taşıyan parçacıklara etki ettigidir. Yüklü parçacıklar elektromanyetik alanlarla bir taşıyıcı parçacık olan foton

(ışık) aracılığıyla etkileşirler. Aslında taşıyıcı parçacıklar bütün kuvvetler için söz konusudur. Yarım-dönü özelliğine sahip olan fermiyonlardan farklı olarak tam-dönü özelliği gösteren bu taşıyıcı parçacıklara boson denir. Söz konusu elektromanyetizma olunca bosonu gözlemlemek çok kolaydır, gözlerimiz çok gelişmiş birer algıç gibi farklı dalga boylarındaki fotonları gözlemleyen birer makine gibidir. Yüksüz parçacıklar birer hayalet gibi bu kuvvetin etki alanından sıyrılıp giderler.

Evreni açıklamamızı sağlayan bir diğer kuvvet olan güçlü kuvvet ise kuarklar arasındaki etkileşimi sağlayan kuvettir. Adından da anlaşılacağı gibi atomaltı seviyede güçlü kuvvetin etkinliği diğer bütün kuvvetlerden daha fazladır. Güçlü kuvvet sayesinde önce protonlar ve nötronlar, daha sonra da çekirdekler oluşur ve yine güçlü kuvvet sayesinde bir arada durmaya devam ederler. Diğer kuvvetler gibi güçlü kuvvetin de bir taşıyıcı parçacığı vardır, İngilizce “yapıştırıcı” kelimesinden türetilen bu bosonun adı gluondur. Gluon gerçekten çok güçlü bir yapıştırıcı gibi, proton ve nötronları çekirdeklerde bir arada tutar. Aynı elektrik yükü taşıyan parçacıklar birbirlerini iterler, sadece elektromanyetik kuvveti hesaba katarsak içinde pek çok artı yüklü proton barındıran çekirdeklerin nasıl bir arada kaldığına cevap vermemiz mümkün değildir, sorunun cevabı güçlü kuvvet ve onun taşıyıcısı gluonlarda saklıdır. Evrendeki dördüncü kuvvet ise zayıf kuvettir. Zayıf kuvvet içinde kuark barındıran hadronların leptonlara veya leptonların hadronlara bozunması süreçlerini düzenler. Bu etkileşimler de Z , W^- , W^+ bosonları aracılığıyla gerçekleşir. Bu bosonlar 1980’lerin başında CERN’de keşfedilmiştir, bu keşifler 1984 yılında o dönem CERN’de yürütülen deneylerin liderlerine Nobel ödülü kazandırmıştır. Neredeyse 30 yıl sonra CERN’de keşfedilen başka bir parçacık 2013 yılında Nobel ödülünün kimlere gideceğini belirlemiştir. Higgs bosonunun hikayesini ileriki bölümlerde anlatacağız ancak burada şunu vurgulamak yerinde olur; eğer neredeyse 30 yıl önce yapılan bu keşifler ve bu keşifler sayesinde öğrendiklerimiz olmasaydı bugün Higgs’i keşfetmek mümkün olmayacaktı. Otuz yıl önce olduğu gibi bugün yaptıklarımız ve öğrendiklerimiz de ileride gerçekleştireceğimiz yeni keşiflere giden yolu açacaktır. Her keşif cevapladığından daha fazla soru sorulmasına sebep olur, bu nedenle keşfedilen bir parçacık hiçbir şeyin sonu değil tersine yeni araştırmaların başlangıcıdır. Kütle çekimi hariç her kuvvetin taşıyıcı parçacığından bahsettik, adına graviton dediğimiz kütle çekimini ileten bosonla ilgili birşey söylememiş olmamızın sebebi henüz gravitonu keşfedememiş olmamızdır. Kuvvetin etkisi ne kadar azalırsa kuvvetin taşıyıcı parçacığını keşfetmek de o kadar zorlaşır. Dünyanın farklı farklı yerlerinde yürütülmekte olan deneyler kütle çekimi dalgalarını gözlemlemeye çalışmaktadır. Gravitonun keşfi için biraz daha beklemek gerekmektedir.

Elimizde yüzyılı aşan bir hikayenin sonunda şimdiye kadar keşfedilmiş parçacıkları ve bu parçacıkların etkileşimini açıklayan kütle çekimi dışında bütün kuvvetleri içeren bir kuram var. Standart Model dediğimiz bu kuram bugüne kadar farklı farklı deneylerle defalarca sınanmasına karşın doğruluğunu yitirmiş değildir. Ancak bu Standart Model’in eksikleri olduğu gerçeğini de değiştirmez. Evrenimizi anlamak için çıkmış olduğumuz yolculuk daha uzun bir süre devam edecek gibi gözükmektedir.

Kaynaklar

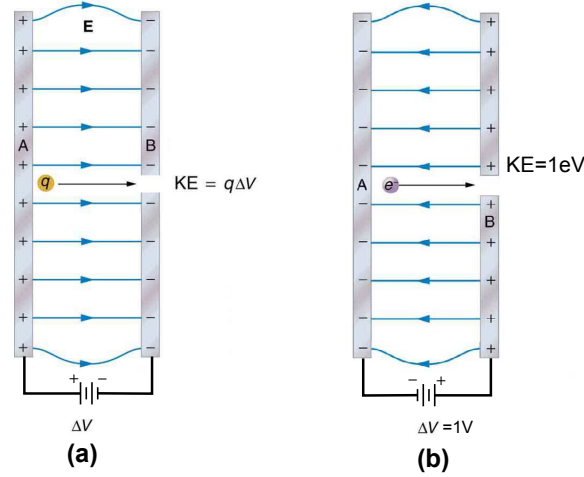
- [1] İlk Üç dakika - Steven Weinberg (Tübitak Yayınları)
- [2] Cockcroft, J.D., E.T.S. Walton, Disintegration of Lithium by Swift Protons, Nature 129 (1932) 649.

3 Hızlandırıcı Fiziği

Veli Yıldız

3.1 Elektrostatik Hızlandırıcılar

Elektrostatik hızlandırıcıların çalışma prensibi, yüklü parçacıkların sabit bir potansiyel farkından geçirilerek hızlandırılmasına dayanır. En basit elektrostatik hızlandırıcı, bir doğru akım üreticinin iki kutbuna bağlanmış bir çift paralel levhadır. İki levha arasına bir gerilim uygulandığında levhalar arasında şekil 12 deki gibi elektrik alan oluşur. Yüklü parçacıklar oluşturulan bu elektrik alanında hızlandırılabilir.



Şekil 12: Paralel levhalardan oluşturulmuş basit bir parçacık hızlandırıcısı.

Yüklü bir parçacık aralarında belirli bir gerilim bulunan iki paralel levha arasında hızlandırıldığında kazandığı kinetik enerji, parçacığın yükü ve levhalar arasında bulunan potansiyel farkının çarpımı kadardır. Parçacığın kazandığı kinetik enerji, levhalar arasındaki uzaklıktan ve parçacığın kütlesinden bağımsızdır. Elektrik alan içerisinde bulunan pozitif yüklü parçacıklara elektrik alan yönünde, negatif yüklü parçacıklara ise elektrik alana zıt yönde bir kuvvet uygulanır. Bu sebeple şekil 12(a) daki gibi elektrik alana bırakılan pozitif q yüklü bir parçacık elektrik alan yönünde hızlanırken, elektrik alana bırakılan bir elektron yükünün negatif olmasından dolayı, şekil 12(b) deki gibi elektrik alana zıt yönde hızlanır.

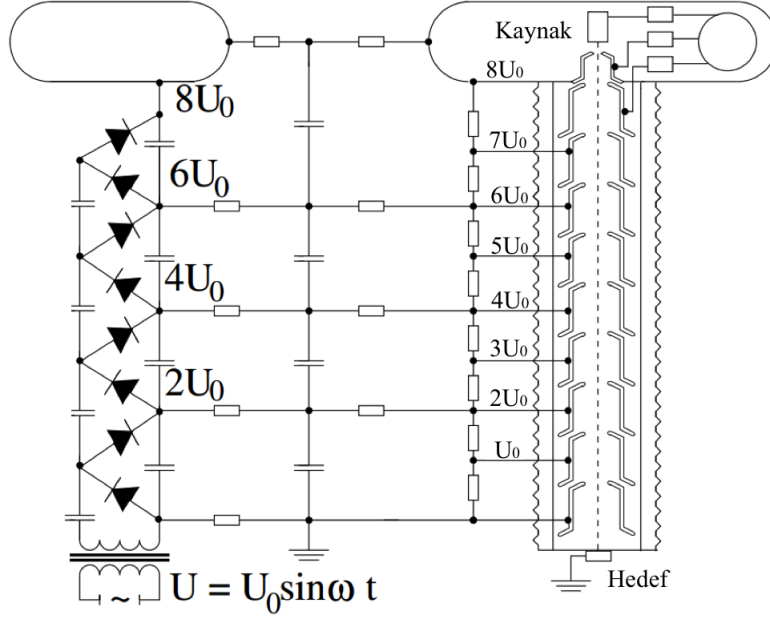
Hızlandırıcı fiziğinde enerji birimi olarak elektron-volt (eV) kullanılmaktadır. eV, bir elektronun bir voltluk potansiyel farkında hızlandırıldığında kazandığı kinetik enerjidir. Şekil 12(b) deki elektron A levhasından B levhasına kadar hızlandığında iki levha arasında kazandığı kinetik enerji 1eV'tur.

Şekil 12'deki gibi bir sistemle parçacıkları yüksek enerjilere çıkarabilmek için yüksek gerilim verebilen bir üreteç kullanılmalıdır. Fakat, bu iki levha (elektrotlar) arasında yüksek gerilim oluşturulduğunda, levhalar etrafında elektrik alan değeri yüksek olacağından elektrik boşalması riski artmaktadır. Örneğin, açık havada bir iletken etrafında elektrik alan 3MV/m (Milyon Volt/Metre) değerini geçmemelidir. Parçacıkları yüksek enerjilere çıkarabilmek ve elektrik boşalması riskini azaltmak için üreticinin geriliminin paylaştırıldığı bir dizi elektrot kullanılabilir.

Cockroft–Walton ve Van de Graaff hızlandırıcıları yaygın olarak kullanılan elektrostatik hızlandırıcı çeşitleridir.

3.1.1 Cockroft–Walton Hızlandırıcısı

1911 yılında atom çekirdeğinin keşfinden sonra, Ernest Rutherford, hızlandırılmış parçacıklar ile atom çekirdeğinin parçalanabileceğini düşünüyordu. 1928 yılında Rutherford'un iki öğrencisi John D. Cockroft ve Ernest T. S. Walton, Rutherford'un desteği ile, proton hızlandırmada kullanılmak üzere 800kV'luk bir üreteç tasarlamaya başladılar. John Cockroft ve Ernest Walton, ürettikleri elektrostatik hızlandırıcı ile 1932 yılında protonları 400keV enerjiye kadar hızlandırıp bir lityum tabakasına vurdurdular. Hızlandırılmış protonlar lityum atomunun çekirdeğini parçalayarak iki helyum atomu çekirdeği meydana getirdi[2] (${}^7\text{Li} + p \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$). Bu deney, yapay olarak, bir atom çekirdeğinin parçalandığı ilk deneydir.



Şekil 13: Cockcroft–Walton hızlandırıcısının şeması.

Cockcroft–Walton üretici ve hızlandırıcısının şematik görünümü Şekil 13’deki gibidir. Yüksek gerilim üreticinin çalışması, bir alternatif akım üreticinin geriliminin diyot ve kapasitörlerden oluşan bir devre aracılığı ile çoğaltılması prensibine dayanır. Şekil 13’nin sol tarafında gösterildiği gibi maksimum gerilimi U_0 olan bir alternatif akım üreticinin gerilimi sekiz kat çoğaltılarak doğru akıma çevrilebilir. Elde edilen bu yüksek gerilim, şeklin sağ tarafında şematik olarak gösterilen hızlandırıcı sisteminde protonları hızlandırmak için kullanılabilir.

Şekil 13’nin sağ tarafında gösterilen hızlandırıcı sistemi bir dizi elektrottan meydana gelmiştir. Cockcroft–Walton üreticinde elde edilen yüksek gerilim, dirençler yardımı ile elektrotlara paylaştırılmıştır. Protonlar şeklin üst tarafında bulunan kaynaktan çıkarak elektrotlar arasında hızlandırılıp şeklin altında bulunan hedefe çarptırılırlar. İki elektrot arasında potansiyel farkı U_0 olduğundan protonların kinetik enerjisi her iki elektrot arasında eU_0 kadar artar.

Cockcroft–Walton üreticinin verebileceği maksimum voltaj 1.5MV civarındadır.

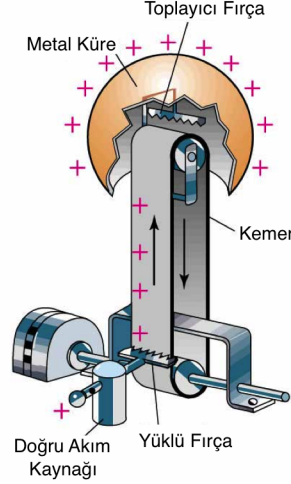
3.1.2 Van de Graaff Hızlandırıcısı

1931 yılında Amerikalı fizikçi Robert J. Van de Graaff yüksek potansiyel üretebilecek bir sistem geliştirdi. Şekil 14’te görülen bu sistem, bir elektrik motoru tarafından hareket ettirilen kayış sayesinde elektrik yüklerinin bir küre üzerinde biriktirilmesi prensibine dayanmaktadır. Elektrik yükleri, doğru akım kaynağına bağlanarak yüklenen bir fırça sayesinde hareket eden kemerin üzerine bırakılır ve kemer üzerinde küreye taşır. Toplayıcı fırça sayesinde bu yükler iletken küre üzerine aktarılır. Küre üzerinde biriktirilen yüklerin çeşidi (pozitif veya negatif) yüklü fırçanın akım kaynağının hangi kutbuna bağlandığına göre değişir. Küre üzerine biriken yük miktarı arttıkça kürenin potansiyeli de artmış olur. Van de Graaff jeneratörü ile 20MV’tan daha yüksek potansiyel değerlerine çıkılmıştır. Yüksek potansiyel değerlerinde, elektriksel boşalmayı engellemek için, Van de Graaff jeneratörünün yüksek potansiyel taşıyan metal kısımları gaz malzemeler kullanılarak yalıtılmaktadır.

Van de Graaff jeneratörü, Cockcroft–Walton (şekil 13) hızlandırıcısında olduğu gibi, bir dizi elektrottan oluşmuş bir hızlandırma tüpüne bağlanarak yüklü parçacıkları hızlandırmada kullanılabilir.

3.2 Radyo Frekanslı Hızlandırıcılar

Elektrostatik hızlandırıcılar ile parçacıkların ulaşabileceği en yüksek enerji, üreticinin potansiyeli ile sınırlıdır. Bu kısıtlama hızlandırma işlemi için alternatif akım kullanılarak aşılabılır. Alternatif akım kullanan hızlandırıcılarda parçacıkların ulaşabileceği en yüksek enerji kullanılan alternatif akım kaynağının potansiyelinden çok hızlandırıcının boyutlarına bağlıdır. Yaklaşık olarak, 3kHz ile 300GHz arasında kalan salınım frekansı Radyo Frekanslı (RF) olarak



Şekil 14: Van de Graff üreticisi.

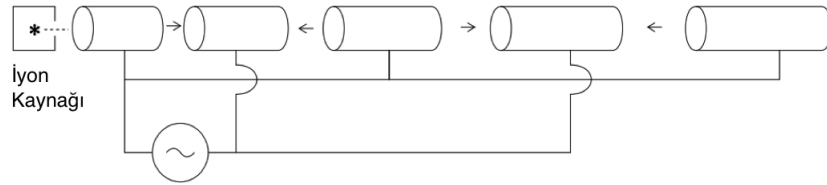
adlandırılır. Bu aralıkta sanımm yapan bir alternatif akım üretici kullanan hızlandırıcılara da RF hızlandırıcılar olarak adlandırılır.

Hızlandırıcılarda alternatif akım kullanma fikri ilk defa 1924 yılında İsveç’li fizikçi Gustaf Ising tarafından ortaya sürdü. 1927’de, Norveç’li fizikçi Rolf Wideroe bu fikri geliştirdi ve 1928 yılında bir hızlandırıcı üretti. Wideroe, ürettiği bu doğrusal hızlandırıcıyla 25kV’luk güç kaynağı kullanarak pozitif iyonları 50keV’a kadar hızlandırdı. Günümüze kadar birçok çeşit RF hızlandırıcısı geliştirilmiş ve üretilmiştir. RF hızlandırıcılarını doğrusal hızlandırıcılar ve dairesel hızlandırıcılar olarak iki grupta inceleyebiliriz.

3.2.1 Doğrusal Hızlandırıcılar

Doğrusal hızlandırıcılar, İngilizce’de kısaca linac (linear accelerator kelimelerinden türetilmiştir) olarak adlandırılır ve bu terim sadece alternatif akım ile çalışan doğrusal hızlandırıcılar için kullanılır.

Wideroe doğrusal hızlandırıcısı, şekil 15’te görüldüğü gibi, hızlandırılacak parçacıkların oluşturulduğu bir iyon kaynağı ve alternatif akım kaynağına bağlanmış bir dizi metal sürüklenme tüpünden oluşmaktadır. Metal sürüklenme tüpleri alternatif akım kaynağının kutuplarına kablolar ile bağlanmıştır ve bu bağlantılar sayesinde tüplerin üzerlerine elektrik yükleri taşınmaktadır. İki ardışık sürüklenme tüpü alternatif akım kaynağının farklı kutuplarına bağlandığından iki ardışık sürüklenme tüpü zıt elektrik yükleri ile yüklenir ve iki sürüklenme tüpü arasında kalan boşlukta (hızlanma boşluğu) elektrik alan oluşur. Sürüklenme tüplerinin içinde elektrik alan oluşmaz bu sebeple parçacıklar sürüklenme tüplerinin içinden geçerken sabit hızda hareket ederler. Alternatif akım kaynağı kullanıldığından her tüpün üzerindeki elektrik yükü kaynağın periyodunun (T) yarısı kadar bir zamanda işaret değiştirir. Bu sebeple bir hızlanma boşluğundaki elektrik alan da her $T/2$ sürede yön değiştirir.



Şekil 15: Wideroe doğrusal hızlandırıcısının şematik gösterimi.

Elektrik alan iki ardışık hızlanma boşluğunda farklı yönde oluşur bu sebeple, belirli bir anda (t_0), bir hızlanma boşluğunda elektrik alan parçacıkları hızlandıracak özellikte ise bir sonraki hızlanma boşluğunda elektrik alan parçacıkları yavaşlatacak özelliktedir. Fakat, $T/2$ süre sonra elektrik alanlar yön değiştireceğinden $t_0 + T/2$ süresinde hızlanma boşluklarında parçacıklara yapılan etki t_0 anındakine göre zıt olur.

Parçacıkların her hızlanma boşluğunda hızlanabilmesi için, parçacıkların bir hızlanma boşluğundan diğer hızlanma boşluğuna gidiş süresi $T/2$ olmalıdır. Parçacıklar her hızlanma boşluğunda hızlandıklarından, elektrik alan

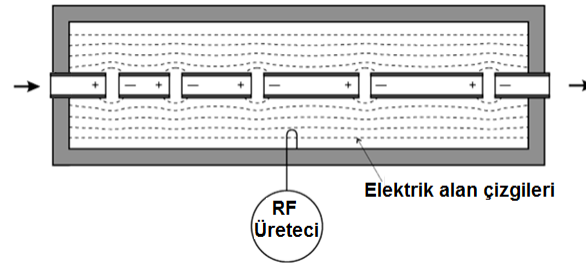
ile parçacıklar arasında eşzamanlılığı sağlamak için parçacıklar hızlandıkça sürüklenme tüplerinin boylarının artırılması gerekmektedir. Bir hızlanma boşluğundan sonra parçacığın hızı V_n ise ondan sonra gelecek sürüklenme tüpünün uzunluğu $L = V_n * T/2$ olmalıdır.

Elektron gibi hafif parçacıkların hızları ağır iyonlara göre çok çabuk artar. Wideroe'nin hızlandırıcısında hafif parçacıklar hızlandırılırsa eş zamanlılığı sağlamak için çok uzun sürüklenme tüplerine ihtiyaç duyulacağından, Wideroe'nin hızlandırıcısı hafif parçacıkları hızlandırmak için pratik değildir.

Wideroe doğrusal hızlandırıcısının sürüklenme tüplerinin boyunu dolayısıyla hızlandırıcının boyunu kısaltmak için yüksek frekanslı (düşük periyotlu) üreteçler kullanmak gerekmektedir. 1930'lu yıllarda radarlarda kullanılmak üzere yüksek frekanslı RF üreteçleri geliştirildi. Fakat, Wideroe doğrusal hızlandırıcısında RF üretici kablo ile sürüklenme tüplerine bağlı olduğundan yüksek frekanslarda (10MHz den büyük frekanslarda) bu yapı anten özelliği göstermektedir. Böyle bir yapı RF üreticiden aldığı gücü elektromanyetik dalga olarak etrafa yayacağından parçacıkları yüksek enerjilere çıkarmak için verimli değildir.

1947 yılında Amerikalı fizikçi **Luis Alvarez** yüksek frekanslarda parçacıkları hızlandırabilecek bir sistem geliştirdi ve **Alvarez sürüklenme tüplü doğrusal hızlandırıcı** (DTL:Drift Tube Linac) olarak adlandırılan yapıyı üretti. Alvarez'in ürettiği doğrusal hızlandırıcı 200MHz frekansta çalışan bir proton hızlandırıcısıydı. Bu yapı günümüzde de proton hızlandırıcılarında yaklaşık 3-100MeV enerji aralığında kullanılmaktadır.

DTL'in çalışma prensibi iletken silindirik bir kovuk içerisine gönderilen elektromanyetik dalganın kovuk içerisinde elektrik alan oluşturması ve bu elektrik alanın belirli bir frekansta salınım yapması prensibine dayanmaktadır. Şekil16' te görülebileceği gibi DTL içerisine sürüklenme tüpleri yerleştirilmiş iletken bir silindirik kovuktan meydana gelmektedir. Kovuk içerisine RF üreticiden gelen elektromanyetik dalga gönderildiğinde, silindir eksenine paralel yönde elektrik alan oluşmaktadır.



Şekil 16: Alvarez DTL'in şematik görünümü.

Silindir kovuk içerisinde sürüklenme tüpleri olmasa bile elektrik alan oluşmaktadır. Kovuk içerisinde her noktada elektrik alan çizgileri belirli bir anda (t_0) aynı yönü göstermektedir. Elektrik alan kovuk içerisinde salınım yaptığından yarım RF periyotu kadar süre geçtiğinde ($t_0 + T/2$ anında) elektrik alan çizgileri t_0 anına göre zıt yönü gösterecektir. İçinde elektromanyetik alan indüklenmiş boş bir silindirik kovuğun içine silindir ekseninde parçacıklar gönderildiğinde kovuk içerisinde bulunan elektrik alan sayesinde parçacıklar hızlandırılabilir. Fakat, boş ve uzun bir kovuk içerisinde parçacıklar ilerlerken elektrik alan yön değiştireceğinden parçacıklar kovuğu terk edene kadar arka arkaya bazen hareket yönlerinde, bazen de hareket yönlerine zıt yönde elektrikselsel kuvvet hissederler. Bu işlem sırasında kovuk içerisinde net ivmelenme sıfır olur.

Kovuk içerisine, uygun uzunlukta metal sürüklenme tüpleri, uygun yerlere yerleştirildiğinde, kovuk içerisinde hareket eden parçacıklar yavaşlatıcı etki yapan elektrik alandan korunabilirler. Böylece parçacıklar iki sürüklenme tüpü arasında hızlanırlar, sürüklenme tüpleri içinde sabit hızda hareket ederler. Parçacıkların her hızlanma boşluğunda hızlanabilmesi için, sürüklenme tüplerinin boylarının elektrik alan ile parçacıkların eşzamanlılığını koruyacak şekilde ayarlanması büyük önem taşımaktadır. DTL'de bir hızlanma boşluğundan sonra parçacığın hızı V_n ise ondan sonra gelecek sürüklenme tüpünün uzunluğu $L = V_n * T$ olmalıdır.

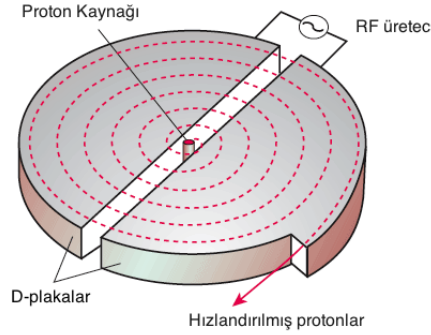
Günümüze kadar, Wideroe'nin parçacıklar ve elektrik alan arasındaki eşzamanlılık prensibi çerçevesinde birçok normal iletken ve süperiletken RF kovuğu geliştirilmiştir. Günümüzde inşa edilen doğrusal hızlandırıcılarda, tek bir hızlandırma yapısı kullanmak yerine değişik hızlarda değişik hızlandırıcı yapıları kullanılmaktadır. Bu yapıların seçilmesinde en önemli kriterlerden biri, parçacık hızlandırma sırasında elektrik güç tüketimini en aza indirmektir.

3.2.2 Dairesel Hızlandırıcılar

Dairesel hızlandırıcılar isimlerinden de anlaşılabilir gibi daire şeklindedirler. Günümüzde en çok kullanılan dairesele hızlandırıcı tipleri döndürgeç (cyclotron) ve eşzamanlayıcıdır(synchrotron).

İlk başarılı **döndürgeç** 1931 yılında Ernest Lawrence ve öğrencisi M. Stanley Livingston tarafından geliştirildi. Bu döndürgeç 1.8kV luk RF üretici kullanarak protonları 80keV e kadar hızlandırdı.

Şekil 17’de döndürgeç şematik olarak gösterilmiştir. Döndürgeçin çalışma prensibinin temelinde, manyetik alanda dairesel hareket yapmakta olan yüklü bir parçacığın hızının değişmesine rağmen dönme frekansının sabit kalması vardır (düşük hızlar için geçerlidir). Döndürgeçte bir RF üretici 'D' şeklinde içi boş metal elektrotlara bağlanmıştır. Bu sayede iki elektrot arasında elektrik alan oluşturulur. Oluşan elektrik alan RF üreticinin frekansına eşit bir frekansta salınım yapar. D-plakalar iki kutuplu bir elektromıknatısın içine yerleştirilir ve bu sayede parçacıkların hareket yönüne dik yönde bir manyetik alan elde edilir.



Şekil 17: Proton döndürgeci.

Parçacıklar döndürgecin merkezinde bulunan kaynaktan üretilir ve manyetik alan sayesinde dairesel hareket yapmaya başlarlar. Parçacıklar D-plakalar arasından geçerken elektrik alan sayesinde hızlandırılırlar. Sabit hızlı bir parçacık sabit manyetik alanda hareket ederken dairesel bir yörünge izler. Eğer parçacığın hızı arttırılırsa izlediği yörüngenin yarı çapı da artar. Döndürgeçte parçacıkların hızı, parçacıklar D-plakaların arasından her geçtiklerinde arttığından, parçacıklar, dairesel bir yörüngede hareket etmek yerine spiral bir yörünge izlerler.

Düşük hızlarda parçacıkların hızı artsa bile dönme frekansı değişmeyeceğinden parçacıklar ve elektrik alan arasındaki eşzamanlılık korunur. Fakat, parçacıklar ışık hızına yakın hızlara çıktığında hız arttıkça dönme frekansı azalır. Bu sebeple yüksek hızlara çıktığında, parçacıklar ve elektrik alan arasındaki eşzamanlılığın korunması için, RF üreticinin frekansı da azaltılmalıdır.

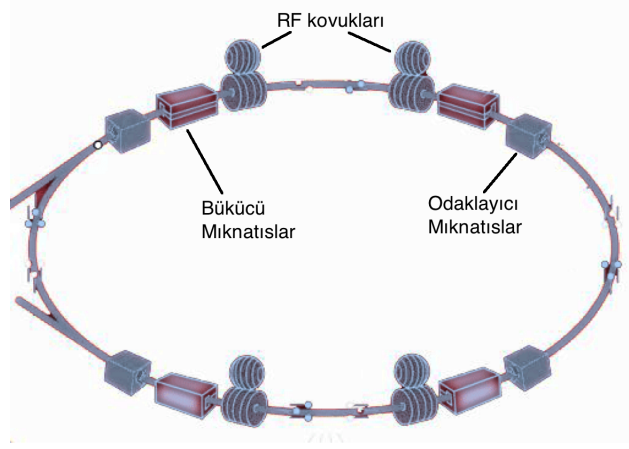
Eşzamanlayıcı, parçacıkları manyetik alan sayesinde bir dairesel yörüngede hareket ettirme prensibine dayanır. Parçacıklar demet borusu olarak adlandırılan metal bir boru içerisinde hareket ederler. Şekil 18’ de görülebileceği gibi eşzamanlayıcının üç temel bileşeni vardır.

RF kovukları içerisinde parçacıklar elektrik alan sayesinde hızlandırılırlar. Parçacıklar eşzamanlayıcı etrafında her turda RF kovuğunda tekrar hızlandırılırlar. Böylece aynı RF kovuğu parçacıkları birçok kez hızlandırmak için kullanılabilir. Parçacıklar RF kovuğuna ulaştıklarında RF kovuğu içerisindeki elektrik alan parçacıkları hızlandıracak yönde olmalıdır, bu sebeple eşzamanlayıcılarda RF elektrik alanı ve parçacıklar arasındaki eşzamanlılık çok büyük önem taşır. Eşzamanlılığın korunabilmesi için RF kovuklarında kullanılan RF frekansı (f_{RF}), parçacıkların eşzamanlılığın çerçevesinde dönme frekansının (f_d) tam katı olması gerekmektedir. Bu ifade $f_{RF} = h * f_d$ olarak ifade edilebilir. h , harmonik sayı olarak adlandırılır ve bir tam sayıdır.

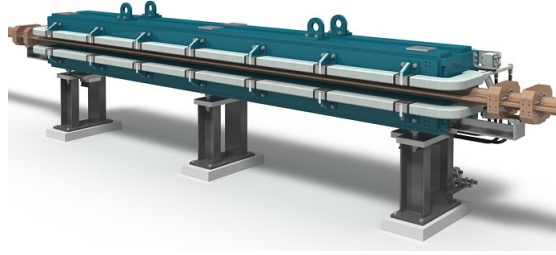
Bükücü mıknatıslar, iki kutuplu mıknatıslar olarak da adlandırılırlar. Bükücü mıknatısların içerisinde parçacıkların hareket yönüne dik yönde bir manyetik alan oluşturularak parçacıkların sapması sağlanır. Bükücü mıknatıslar genelde eşzamanlayıcının çevresine eşit aralıklarla yerleştirilirler. Eşzamanlayıcıda kullanılan bükücü mıknatıs sayısına göre, mıknatısların içerisinde oluşturulan manyetik alanın kuvveti ayarlanır ve parçacıkların eşzamanlayıcı etrafında 360°'lik bir dönüş yapması sağlanır.

Parçacıklar her turda RF kovuklarında hızlandırıldıklarından parçacıkları aynı yarıçaplı yörüngede hareket ettirmek için bükücü mıknatısların manyetik alanlarının da arttırılması gerekmektedir. Bu sebeple parçacık hızlandırıcılarında kullanılan bükücü mıknatıslar elektromıknatıstır. Şekil 19’de bir bükücü mıknatıs ve içinden geçen demet borusu gösterilmiştir.

Parçacık hızlandırıcılarında demet, hızlandırma işlemi için paketler haline getirilir. Bu paketler *bohça* olarak adlandırılırlar. Bir bohça içerisinde aynı yüke sahip birçok parçacık olduğu için parçacıklar birbirlerine iterler ve demet hareket yönüne dik eksenlerde açılmaya başlar. Bu büyüme devam ederse parçacıklar bir süre sonra demet borusuna çarpmaya başlarlar. Parçacıkları demet borusunun merkezinde tutmak ve demetin dikine eksenlerdeki boyutunu kontrol etmek için *odaklayıcı mıknatıslar* (dört kutuplu mıknatıslar) kullanılır. Dört kutuplu mıknatıslar,

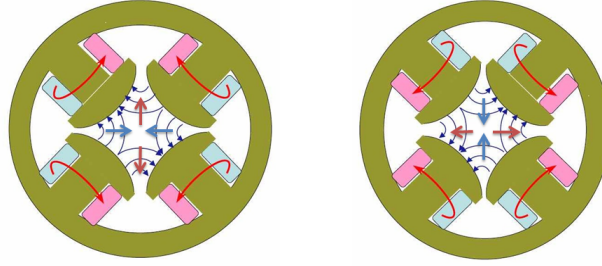


Şekil 18: Eşzamanlayıcı.



Şekil 19: Bükücü mıknatıs ve demet borusu.

ince kenarlı bir merceğin ışığı odakladığı gibi yüklü parçacıkları odaklarlar veya kalın kenarlı bir merceğin ışığı dağıttığı gibi yüklü parçacıkları dağıtırlar.



Şekil 20: Odaklayıcı mıknatıslar ve parçacıklara uygulanan kuvvetin yönü.

Şekil 20'da, iki farklı odaklayıcı mıknatıs, mıknatısların sarımlarından geçen elektrik akımının yönü ve bu akımın oluşturduğu manyetik alan çizgileri gösterilmiştir. Sayfa düzlemine doğru hareket eden pozitif yüke sahip parçacıklardan oluşan bir demet, bu mıknatısların içerisinde geçerken parçacıklara uygulanacak manyetik kuvveti mavi ve kırmızı oklarla gösterilmiştir. Solda bulunan odaklayıcı mıknatıstan geçen ve merkezden uzakta bulunan parçacıklara, yatay ekseninde merkeze doğru (odaklayıcı) bir kuvvet uygulanırken dikey ekseninde merkezden dışarıya doğru (dağıtıcı) bir kuvvet uygulanır. Bu mıknatıs demeti yatay ekseninde odaklarırken dikey ekseninde dağıtır. Sağda bulunan mıknatıs ise demeti dikey ekseninde odaklarırken yatay ekseninde dağıtır. Bu mıknatısların tek farkı birinin diğerine göre demet borusu etrafında 90° döndürülmüş olmasıdır. Bir odaklayıcı mıknatıs demeti aynı anda hem dikey hem de yatay ekseninde odaklayamaz. Fakat, bu iki mıknatıs arka arkaya konulduklarında, aralarındaki mesafe mıknatısın odak uzaklığından kısa olduğunda, bir dört kutuplu mıknatıs çiftinin demete yaptığı etki hem dikey ekseninde hem de yatay ekseninde odaklayıcıdır. Bu durum, optikte, bir ince kenarlı mercekle ve bir kalın kenarlı mercekle için de geçerlidir.

Günümüze kadar inşa edilmiş en büyük ve en güçlü eşzamanlayıcı ve hızlandırıcı CERN'de bulunan Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'dır.

4 Algıç Fiziği

Gökhan Ünel

Bu konuya önce birkaç genel soru ile başlayalım: Bir nesneyi veya olayı algılamak sadece görmek midir? Görmek algılamak için gerekli ve yeterli midir? Aslında bu sorular bizi bilimsel düşüncenin ne olduğuna ve nasıl kurgulandığına götürür. Bilimsel düşünce kesin kanıtlara dayanır. Kesin kanıtların elde edildiği gözlem veya deney de tekrarlanabilir olmalıdır. Yani aynı şartlarda yapıldığında aynı sonuçları vermelidir. Bu yaklaşıma göre deney doğaya soru sormaktır; deney sonucu da alınan yanittir. Aslında *fizik* sözü de, adının eski Yunanca kökeni göz önüne alındığında, doğa bilgisi veya bilimi anlamına gelir.

Yukarıda tartışılan genel soruların ilkinde mantık yürüterek yanıt bulabiliriz. Bir olayı algılamak için ‘görmek’ en basit tanımıyla gerekli değildir. Bu mantık zincirine verilen en bilinen örnek rüzgardır. Esintiyi görmüyoruz ancak varlığını yaprakları oynattığı için ‘algılıyoruz’. İkinci sorunun yanıtı da ölçümlerin güvenilirliği ile ilgilidir. Bilimsel yöntemde görmek yeterli değildir. Deney sonuçlarını kaydetmek ve başka insanlarla paylaşmak gereklidir. Bu noktada insanın aklına gelen en kolay kayıt yöntemi fotoğraf çekmek olabilir. Ancak fotoğraf çekmek tam olarak ne demektir, bunu anlamaya çalışalım. Örneğin Şekil 21’de 1838 yılında Paris’te çekilmiş ve içinde insan olan ilk fotoğraf görülebilir. Fotoğraf çekmek de bakılan nesneden gelen fotonları algılamak ve kaydetmek olarak düşünülebilir. Ancak dikkat edilmesi gereken nokta, görülenlerin 1838 yılında Paris’te olan fotonlar değil onların bıraktığı izler olması. Yani fotoğraf gördüğümüzde bile, aslında cisimleri değil, onların izlerini görüyoruz. Bu bağlamda atom altı parçacıkları “görmek” de aslında izlerini görmek anlamına geliyor. Tüm bu tartışmanın ışığında, algılama kavramının görme kavramından çok daha geniş kapsamlı olduğu açıktır. Genel olarak parçacık veya onun etkileşimini algılamak, enerji (E), momentum (p), yük (q), dönü (spin, s) ve benzeri özellikleri ölçüp kaydetmek anlamına gelir.



Şekil 21: İçinde insan olan ilk fotoğraf, Daguerre, 1838, Paris.

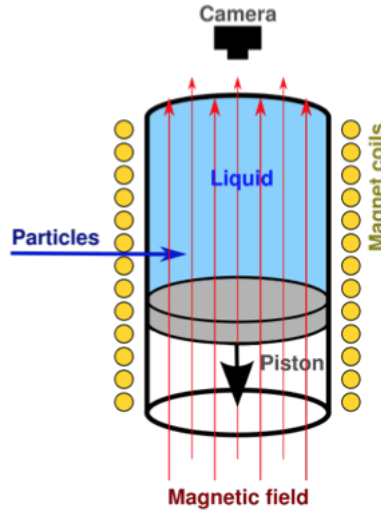
Bu bağlamda doğa(fizik) olaylarını algılamamızı sağlayan gereçlere algıç adı verilir. Parçacıkları algılamamızı sağlayan bu düzeneklerin tarihteki gelişiminin kısa bir özetini ve modern algıçlardan birinin tanıtımını ilerideki sayfalarda bulabilirsiniz.

4.1 Bulut Odası

1911 yılında Wilson tarafından icat edilen bu gereç kendisine 1927 Nobel ödülünü kazandı. Özellikle 1920-1950 arasında yapılan deney ve gözlemlerde kullanıldı. Temelde aşırı doymuş alkol buharı içeren kapalı bir ortamdır; bu yüzden benzer gereçler gibi oda adıyla anılır. Odadan içeri giren yüklü parçacıklar, izledikleri yol boyunca enerji bırakarak alkol buharını yoğunlaştırır ve bulut gibi izler bırakır. Oluşan izlerin fotoğrafları çekilerek daha sonra incelemek üzere kaydedilir. Eğer parçacık demetinin odaya giriş yönüne dik olarak bir manyetik alan uygulanırsa, ortaya çıkan Lorentz kuvveti, parçacıkların yönünün değişmesine neden olur. Bu sayede de yay şeklinde iz bırakan parçacıkların yükü ve momentumu ölçülebilir. Bu algıç sayesinde 1932 yılında pozitron, 1936 yılında müon ve 1947 yılında kaon bulunmuştur.

4.2 Köpük Odası

1950'lerin başında Glaser tarafından keşfedildi ve bu çalışma kendisine 1960 Nobel ödülünü kazandı. Genel yapısı içi sıvı dolu bir silindir veya küre şeklindedir. Kullanılan sıvı belli bir basınçtaki kaynama sıcaklığının hemen altında tutulur, örnek olarak 27 K sıcaklık ve 5 atmosfer basınçta sıvı hidrojen düşünülebilir. İzine bakılacak parçacık demeti odaya ulaştığında basınç birden düşürülür (aynı örnekle düşünersek, 3 atmosfere indirilir), böylece sıvı üstünüştürülmüş olur. Parçacık demetindeki yüklü parçacıklar iyonlaşma yolu ile enerji kaybeder. Bu da dengesiz durumdaki sıvıyı buharlaştırıp baloncuk çekirdekleri yaratır. 1 veya 2 ms içinde fotoğraflar çekilir. Birden fazla kamera farklı açılardan çekim yapmayı sağlar. Bu sayede konum çözünürlüğü $\approx 10 \mu\text{m}$ düzeyine indirilebilir. Bulut odasından daha büyük hacimli(sıyıklı) yapılabilir ve daha yoğun sıvı içerdiğinden daha yüksek enerjili parçacıkları algılayabilir. Bu ilke ile çalışan en bilinen algıçlar BEBC ve Gargamelle olarak düşünülebilir. CERN'de Gargamelle algıç ile yapılan ölçümler zayıf yüksüz akımların keşfine olanak sağlamıştır.

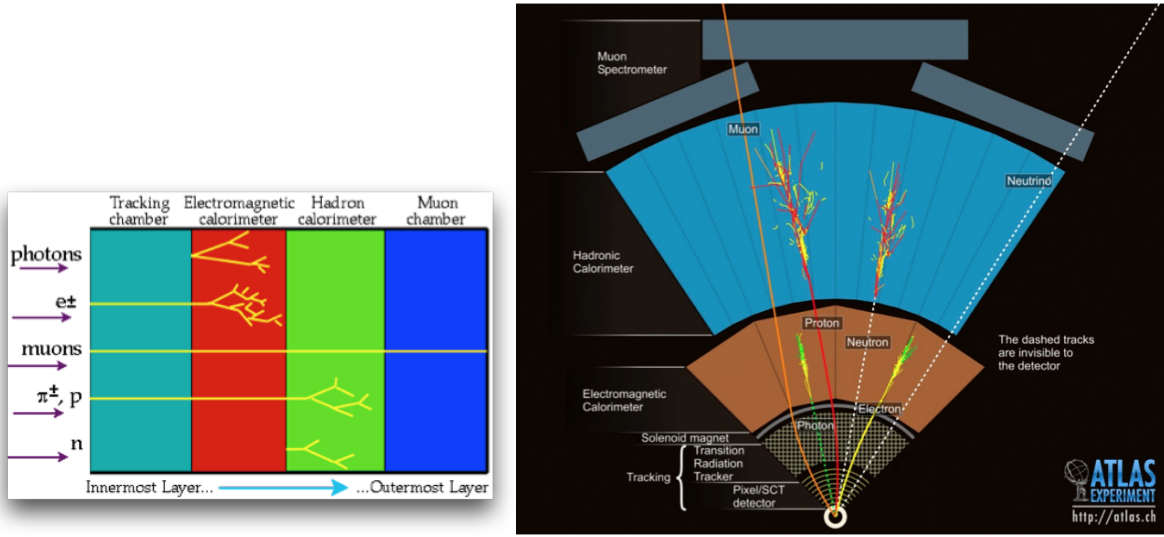


Şekil 22: Köpük odası

4.3 Dünden bugüne

Demet etkileşimlerinin fotoğraflarının çekilmesi hem kayıt için hem de istatistik(sayımlama) çalışmaları için gereklidir. Aynı demet boğçasının ortamla etkileşmesiyle oluşan ve sıradan olan diğer etkileşimlerin incelenmesine gerek yoktur. Zaten bilinen bu etkileşmelerin yeniden incelenmesi, yeni bilgi getirmeyeceği gibi zaman kaybına da neden olacaktır. Bu nedenle bazı resimler veya resimlerin bazı kısımları ön incelemeden sonra açıklanır. Bu kavram büyük ve modern algıçlarda da aynen vardır, tetikleme ve süzme kavramlarının temelini oluşturur. Ancak eskiden insan eliyle yapılan pek çok seçim ve değerlendirmeyi bugün bilgisayar yardımı ile gerçekleştirmek olasıdır.

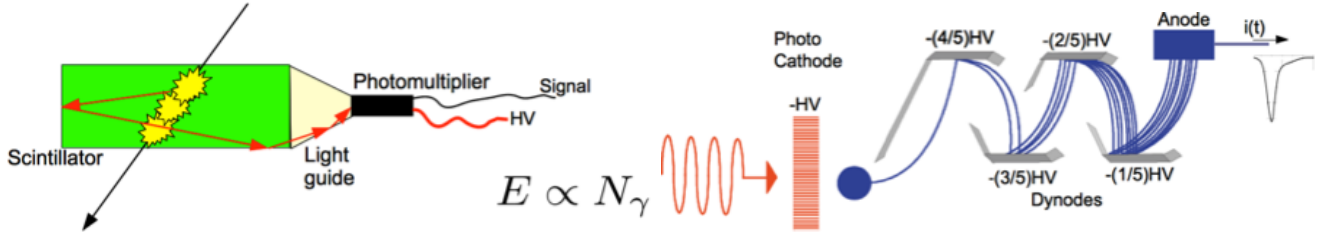
Günümüzde geçerli olan bir başka yöntem de, bulut veya köpük odası gibi, tek parça bir algıç ile tüm parçacıkları ve bütün özelliklerini gözlemlemek yerine, farklı malzemeden yapılmış, amaca özel algıçları birleştirerek tümleşik algıçlar kullanmaktır. Değişik parçacıkların bazı malzemelerde farklı izler bıraktığını bildiğimize göre, her malzemeyi en etkin olduğu işte kullanmak, karmaşık ama yüksek duyarlılıkta algıçlar yapılmasına olanak verir. Bu kavram Şekil 23’de özetlenerek gösterilmiştir. Örneğin yüksüz olan fotonlar iz sürme odasında iz bırakmazken, tüm enerjilerini EM kalorimetreye bırakır, fotonun yolu üzerindeki diğer algıçlarda işaret gözlenmez. Elektron veya pozitron, yüklü oldukları için, iz sürme odasında da iz bırakarak algılanan parçacığın fotondan farklı olduğunu ortaya koyar. Kuarklardan oluşan piyon, kaon, proton, nötron gibi parçacıklar ise yüklerine göre iz sürme odasında işaret verirken, enerjilerini hadron kalorimetresinde bırakır. Kalorimetreleri geçebilen iki parçacıktan biri olan müon, yüklü olduğu için müon odasında işaret bırakır. Nötrino ise hiçbir algıçta iz bırakmaz, varlığı ancak demete dik yönde momentum korunumu yasaları kullanılarak gösterilir. Müon odalarına ve iz sürme odasına uygulanan bir manyetik alan, yüklü parçacıkların yay gibi eğri yollar izlemesini sağlayarak, hem momentum ölçümü yapılmasına hem de kıvrılma yönüne bakarak parçacıkların yüklerinin tanınmasına olanak verir.



Şekil 23: Modern bir algıçın parçaları

4.4 Pırıldak ve Enerji Ölçümü

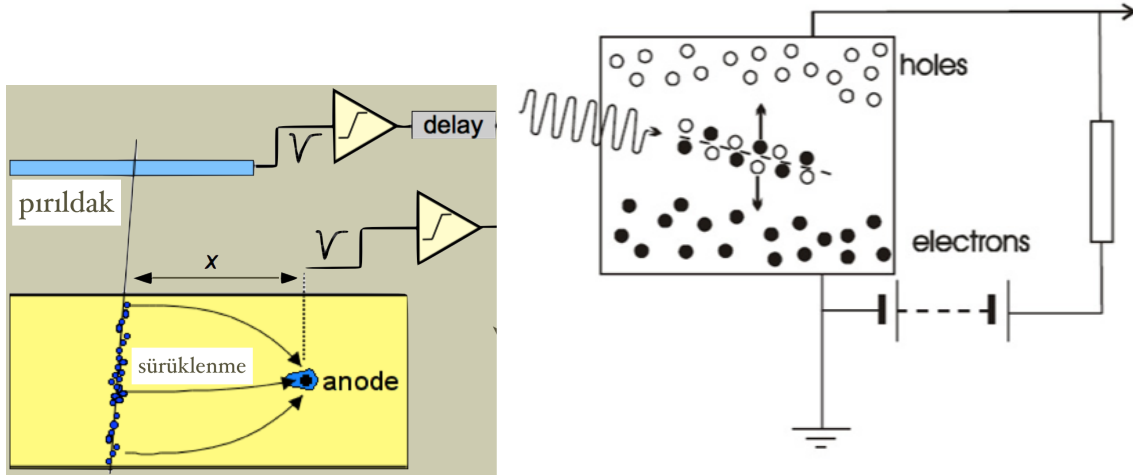
W. Crookes, 1903 yılında ZnS (Çinko-Sülfür) ekranın, içinden geçen parçacıkların bıraktığı enerjiyi ışığa çevirdiğini keşfetti. Parçacıkların geçtiği yerde ışık oluşturma özelliğine sahip malzemelere pırıldak adı verilir. Pırıldaklar plastik veya kristal yapıda olabilir. Ürettikleri pırlıltı miktarı soğurdukları enerji başına ürettikleri foton sayısı ile orantılıdır. Örneğin NaI(Tl) (talyum katkılı sodyum iyodür) soğurduğu her keV enerji için yaklaşık 40 pırlıltı fotonu üretir. Bu sayı plastik pırıldak için yaklaşık 10 foton/keV’dir. Pırıldakların doğru çalışmasını sağlayan bir başka özellikleri de kendi ürettikleri ışık için saydam olmalarıdır. Genelde bir ucu açık bırakılacak şekilde ayna görevini görececek bir malzeme ile kaplanan pırıldakların açık ucuna eklenen ışık kılavuzu, pırlıltı fotonlarının bir yere toplanmasını sağlar. Toplanan ışığın ölçülebilmesinin en kolay yolu ise, bunun elektrik yüke dönüştürülmesidir. Bu da fotoelektrik etki sayesinde olur. Yüksek gerilim ile beslenerek ışığı elektrik işaretine çeviren gerece fotoçoğaltıcı tüp adı verilir. Bu düzeniğin tamamı Şekil 24’in sol tarafında görülebilir. Aynı şeklin sağ tarafında ise, fotoçoğaltıcı tüpün çalışma ilkesi bulunabilir. Yüksek gerilimde tutulan ekrana çarpan pırlıltı fotonları fotoelektrik etki ile buradan bir veya birkaç elektron söker. Daha düşük gerilimde tutulan bir başka metal katman ise bu ekranın hemen arkasında bulunur. Gerilim farkından dolayı hızlanarak plakaya çarpan elektronlar çarpmanın etkisiyle, metal yüzeyden daha çok elektron çıkmasına neden olur. Onlar da, daha da düşük gerilimdeki başka bir plakaya aynı şekilde hızlanarak gider ve daha da çok elektron çıkartır. Böylece ekrana önden gelen foton sayısı ile orantılı bir miktarda elektron elde edilmiş olur. Çıkışta elektronlardan oluşan işaretin sayısallaştırılması ise Analog-Sayısal Çevirici (Analog Digital Converter - ADC) ile yapılır. Bu şekilde üretilen basit bir algıç ile örneğin “buradan parçacık geçti mi?” sorusuna yanıt alınabilir.



Şekil 24: Solda Pırıldak içinden geçen bir parçacığın ürettiği ışık ve sağda Işık Çoğaltıcı

4.5 İz sürme ve Momentum Ölçümü

Parçacıkların izini sürerek momentum ölçümü yapmaya olanak sağlayan algıçlara genel olarak spectrometre(izgeölçer) adı verilir. Temel fikir algıçtan geçen parçacığın konumunu bulmak ve ardından manyetik alan içinde bıraktığı izin ne kadar kıvrık olduğundan yararlanarak momentumunu ölçmek olarak özetlenebilir. Konum bilgisi elde etme yöntemi ise Şekil 25 sol tarafta basitçe özetlenmiştir. Gazlı odanın hemen önünde duran bir pırıldaktan geçen yüklü parçacık “gelıyorum” işaretini verir. Ardından kolay iyonize edilebilir bir gazla dolu olan odacığın içinden geçerken gaz molekülleriyle etkileşerek onları iyonize eder, yani elektronlarla iyonların ayrışmasına neden olur. Gazlı odanın içindeki bir tele yüksek gerilim verildiğinde, kopan elektronlar bu tele doğru sürüklenirler. Eğer parçacık tele yakın geçmişse sürüklenme aralığı kısa, eğer uzaktan geçmişse uzun olur. Sürüklenme sonunda telde biriken elektronların oluşturduğu işaret okunduğunda parçacığın gazlı odadan geçmiş olduğu anlaşılmış olur. Pırıldaktan gelen işaret ile gazlı odanın telinden gelen işaret arasındaki zaman farkı Zaman-Sayısal Çevirici (Time Digital Converter - TDC) ile ölçülür, bu zaman farkı, sürüklenme mesafesinden dolayı, parçacık tele yakınsa az, uzaksa çoktur. Böylece geçen parçacığın konumu belirlenebilir.



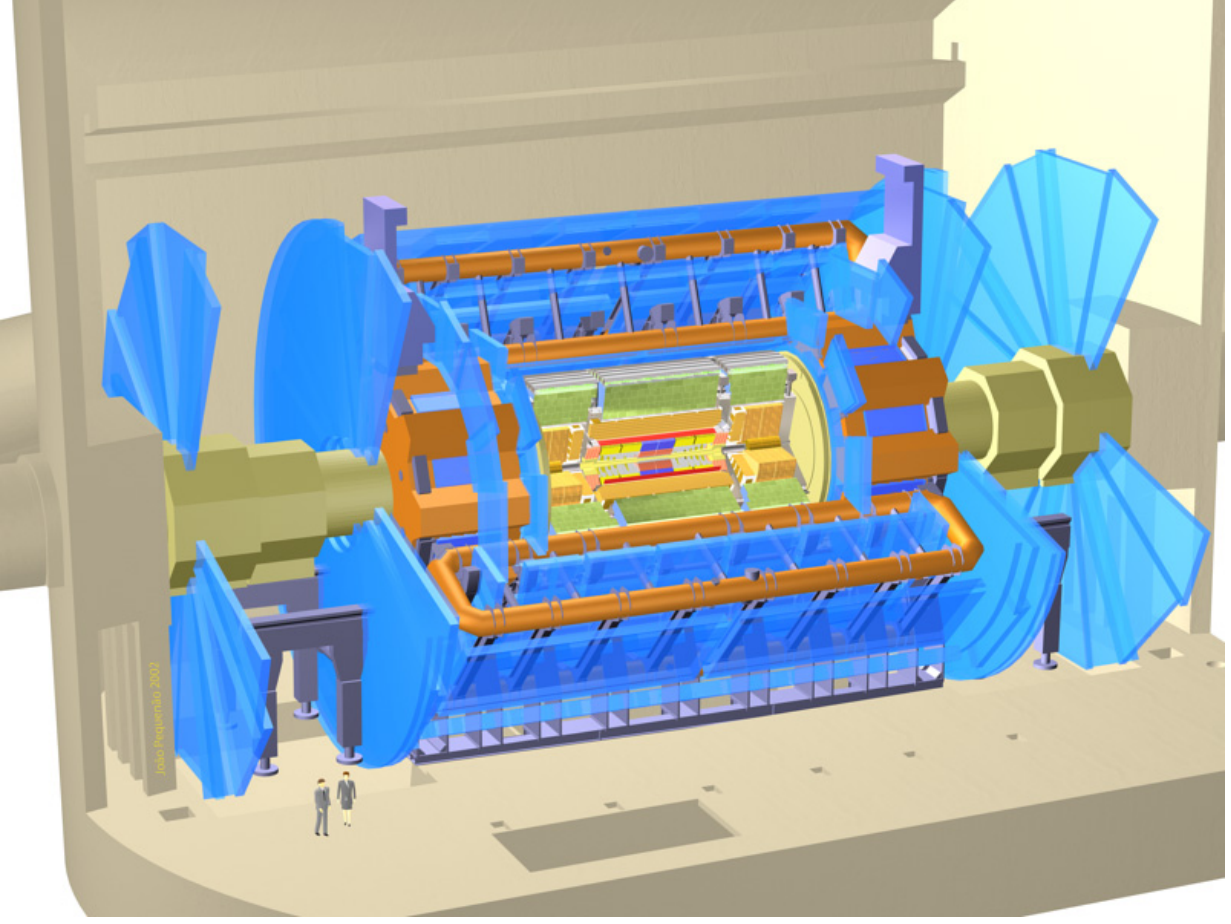
Şekil 25: İz sürücü algıçlar, solda gazlı yöntem ve sağda silikonlu yöntem

Silikon tabanlı algıçların çalışma ilkesi gazlı oda ile hemen hemen aynıdır. Yarı iletken olan silikona uygulanan volt seviyesindeki gerilim elektronların bir yana, onların ayrılması ile oluşan deliklerin ise başka bir yana toplanmasına neden olur. Algıçın içinden geçen bir parçacık yine iyonlaşmaya neden olduğunda ortaya çıkan elektron-delik çiftlerinin ürettiği işaret okunarak parçacığın oradan geçmiş olduğu bilgisi edinilir. Silikonlu algıçların olumlu yönleri daha küçük yüzeylerde kullanılabilmeleri, daha az gerilim gerektirmeleri ve gazlı algıçların en az iki katı duyarlılıkta olmaları olarak sayılabilir. Bunun yanında ısıl etkilerden dolayı işaret bozulması ve bunu düzeltmek için gereken soğutma zorunluluğu, ekonomik değer yüksekliği ve kanal sayısının çokluğundan dolayı gereken yüksek okuma elektroniği miktarı, silikonlu algıçların eksi yönleri olarak düşünülebilir.

4.6 ATLAS Algıcı

Şimdiye kadar anlatılan yöntem ve gereçlerle nasıl çağdaş bir algıç tasarlanabildiği ATLAS deneyinin algıcı (Şekil 26) örnek verilerek anlatılacaktır. Özellikle çarpışma deneyi algıçları soğan gibi farklı katmanların bir araya gelmesinden

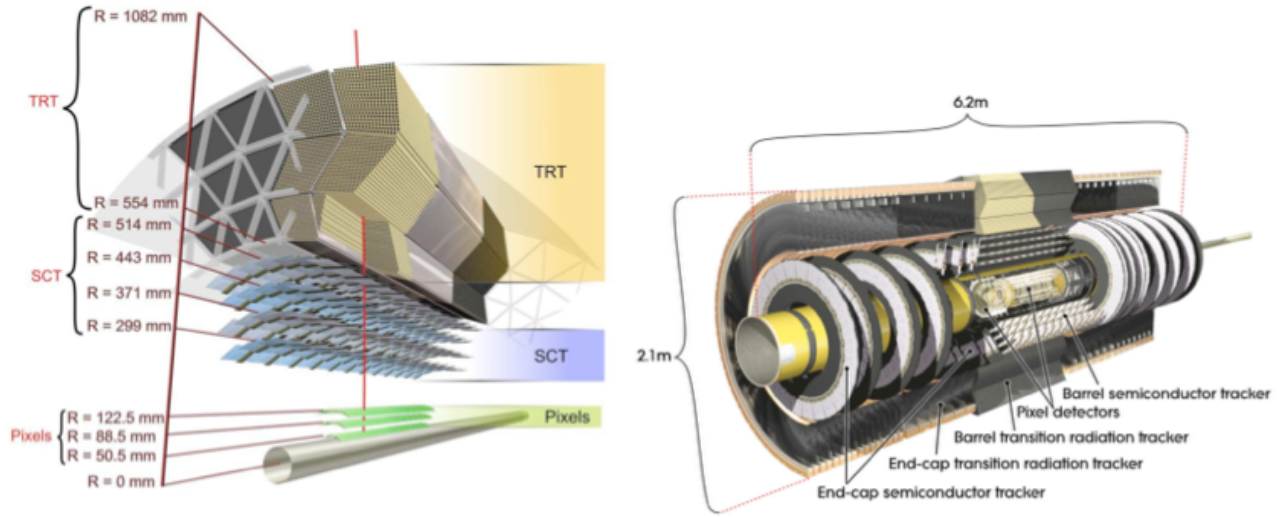
oluşur. En duyarlı ölçümler parçacıkların oluştuğu yere en yakına yani algıcın merkezine konur. Genel çizgileriyle ATLAS algıcı 3 ana kısımda incelenebilir: İz sürme (iç algıç), enerji ölçümü (kalorimetreler) ve müon ölçümü.



Şekil 26: ATLAS algıcı

Bunların ilki olan iç algıç ise farklı yöntemlerin kullanıldığı 3 alt birim içerir. İç algıç 2 Tesla gücünde bir sarmal (solenoid) mıknatısın içinde yer alır ve yüklü parçacıkların momentumları bu manyetik alan sayesinde ölçülür. Bunlar silikon tabanlı nokta (piksel) ve şeritlerin yanı sıra, gaz tabanlı geçiş ışınması algıçlarıdır. Nokta silikon algıcı, adından da anlaşılacağı gibi fotoğraf makinesinde olduğu gibi noktalar yardımı ile demet borusuna en yakın yerde, en duyarlı şekilde hem x hem de y boyutlarında bilgi alınmasını 3 farklı katman ile sağlar. Şekil 27'nin sol tarafında, en altta, bu katmanlar görülebilir. Nokta algıcının hemen dışında bulunan silikon algıçlar şerit yapılarından ötürü tek yönde bilgi verir gibi düşünülse de, bunların birbirlerine göre açılı olarak yerleştirilmelerinden ötürü her iki yönde de bilgi verebilir. Silikon şeritlerinin konumu aynı çizimde orta kısımda gösterilmiştir. En dışta ise geçiş ışınması algıcı bulunur. Geçiş ışınımı izsürücüsü (Transition Radiation Tracker, TRT) iz ölçümünün yanı sıra, elektron - pion ayrışımı yapılmasını da sağlar. Çalışma ilkesi yüksek enerjili bir yüklü parçacığın bir malzemeden dielektrik sabiti farklı başka bir malzemeye geçerken küçük bir ihtimalle ışınma yapmasına dayalıdır. Bu ışınma ile salınan enerji parçacığın yükünün karesiyle ve parçacığın katsayısıyla ($\gamma = 1/\sqrt{1-v^2/c^2}$) doğru orantılıdır. Örneğin $\gamma=1000$ olursa, 2-40 keV enerjili X-ışınları çıkar. TRT, yapı olarak basittir: Ortasından ince bir tel geçen gaz dolu kamaşlardan oluşmuştur. ATLAS TRT kamaşları 4mm kalınlıkta olup içinde kullanılan gaz ise %70 Xe, %27 CO₂ ve %3 O₂ karışımıdır. Yaklaşık 350bin kanaldan veri okunan bu algıç yine yaklaşık 100m duyarlılık sağlar.

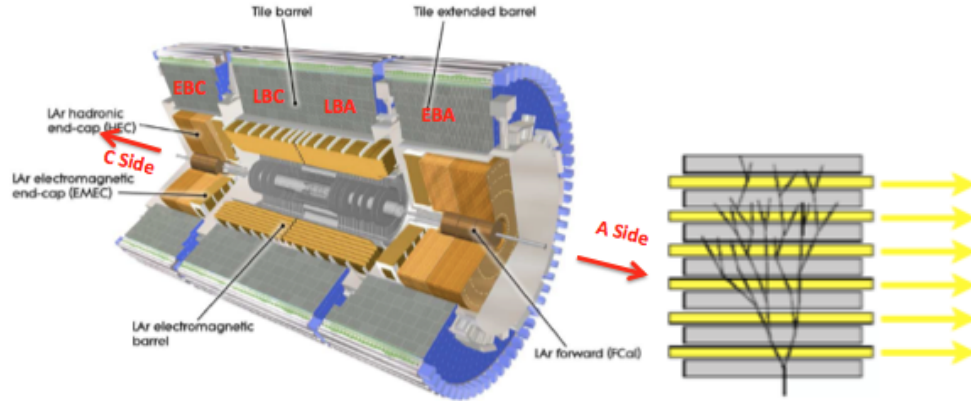
Enerji Ölçümü daha önce de tartışıldığı gibi iki ayrı alt birimde ve farklı etkileşimler amaçlanarak gerçekleşir. Bunların ilki elektron, foton gibi parçacıkların enerjisini soğurarak ölçmek amacıyla kurulmuş olan Elektromanyetik kalorimetre, ikincisi de hadronların enerjisini ölçmek için kurulmuş olan hadron kalorimetredir. Daha önce tartışılan pırdak algıcı aynı zamanda enerji ölçümünün de temel taşıdır. Çelik, pirinç, kurşun, vb gibi ağır malzemeye çarparak geçen birincil parçacığın daha düşük enerjili ikincil, üçüncül parçacıklara bölünmesi sağlanır. Bu etkiye sağanak denir, Şekil 28 sağ tarafta dikey çizgilerle gösterilmiştir. Ağır malzeme (Şekil 28 sağ taraf, gri kutular) arasına yerleştirilen pırdaklar (aynı şekil sarı kutular) ile sağanak enerjisi örneklenerek ölçülür. Yeterince ağır malzeme



Şekil 27: İç algıcın merkezdeki kesiti (sol) ve genel bakışla nasıl görüldüğü (sağ)

ve pırıldak katmanı konursa, parçacığın bütün enerjisi soğurulur ve ölçülür. Bu düzeneğe örnekleme kalorimetresi denir.

Akordeon şeklinde bir yapısı olan EM kalorimetrede etkileşen ağır malzeme olarak kurşun ve bakır, işaret veren malzeme olarak da sıvı argon kullanılır. Enerji bırakan parçacıkların yönünü de belirlemek üzere küçük odalara bölünmüştür. EM kalorimetre Şekil 28 sol tarafta kırmızı renkle gösterilmiştir. Hadron kalorimetrede ise merkeze yakın kısımda çelik-pırıldak karışımı kullanılırken, uçlarda (kapak bölgesi) bakır tungsten ve sıvı argon kullanılır. Bu algıç da odalara bölünmüştür ancak EM kalorimetreye oranda daha kaba bir bölünme yapılmıştır, aynı şekilde gri-mavi renkle gösterilmiştir.



Şekil 28: ATLAS kalorimetreleri (sol) ve Örnekleme kalorimetresi çalışma ilkesi (sağ)

Kalorimetreleri geçebilen tek ölçülebilir parçacık olarak düşünülen müonların yük ve momentum ölçümü her deney için çok önemlidir. ATLAS bu ölçümü gerçekleştirebilmek için 4 Tesla gücünde ayrı bir mıknatıs sistemi ve ayrı yöntemlere dayanan dört ayrı müon algıcı kullanmaktadır. Bunlardan merkeze yakın olan MDT (monitored drift tube) ve kapaklarda olan CSC (cathode strip chamber) yüksek duyarlılıkta olup iz sürmek için, merkeze yakın RPC (resistive plate chamber) ve kapaklarda olan TGC (thin gap chamber) hızlı tetikleme yapmak için kullanılır.

5 Ve CERN Higgs'i Buldu

Sezen Sekmen

2012 yılının Temmuz ayında CERN Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (BHÇ) deneyinde Higgs bosonu adlı bir parçacığın gözlemlendiği büyük bir törenle bütün dünyaya duyuruldu. Peki neydi bu Higgs bosonu? Nasıl bulunmuştu, ve neden varlığının kanıtlanması binlerce fizikçiye bu kadar büyük bir heyecan yaratmıştı? Ve Higgs bosonunun varlığını öngören fikir neden 2013 Kasım ayında Nobel ödülüne layık görülmüştü?

Higgs ile ilgili yaşanan bu heyecanın sırrı Standart Model'in (SM) önemli bir eksiğinde saklıdır. Temel parçacıklar ve etkileşimler hakkındaki tüm bilgilerimizi içeren kuramlar bütünü olan SM şu ana kadarki deneylerin ışığında doğrudur, ancak *eksiktir*. Iş evreni bütünüyle açıklamaya gelince SM'in yeterince cevaplayamadığı bazı sorular vardır. Bu sorulardan önemli bir tanesi kütle sorunudur. Bilinen temel parçacıkların bir kısmı kütleyle sahiptir, ancak diğer bir kısmı ise kütesizdir. Ve bazı parçacıklar ağırken diğer bazı parçacıklar hafiftir. Peki parçacıklara kütesini veren o şey nedir? Ve neden farklı parçacıklar farklı kütlelere sahiptir?

5.1 Kütle sorunu ve Higgs işleyişi

Kütle sorununu anlamak için 1960lı yıllarda ve sonrasında hayli uğraş verildi. Bugün BHÇ sayesinde doğru olduğunu düşündüğümüz fikrin temelinde yatan *kendiliğinden simetri (bakışım) kırılması işleyişi* 1963 yılında Philip W. Anderson tarafından ortaya atıldı. Anderson bu fikri süperiletkenleri anlamaya çalışırken keşfetmişti. 1963-64 yıllarında fikir üç ayrı grup tarafından geliştirildi ve bugün bilinen halini aldı. Robert Brout ve François Englert bir yandan, Peter Higgs bir yandan, Gerald Guralnik, C. R. Hagen ve Tom Kibble da diğer bir yandan birbirlerinden habersiz olarak kütle sorununu çözümlenecek kuramı oluşturdular. Ortaya çıkarılmasında emeği geçen birçok kişiyi hatırlamak için bu kuram gerçekte *ABEGHHK'tH* (*Anderson, Brout, Englert, Guralnik, Hagen, Higgs, Kibble, 't Hooft*) işleyişi olarak adlandırılır, ancak kısaca **Higgs işleyişi** olarak bilinir. Bunun sebebi Peter Higgs'in diğer meslektaşlarından bir adım daha ileri giderek kütle kazanım işleyişini anlatan kuramın yanısıra kuramın varlığına işaret edecek bir de temel parçacığın var olduğunu öngörmesidir. Higgs'in önerdiği bu parçacık BHÇ'nin keşfettiği Higgs bosonudur.

Ancak Higgs kuramını tanıtmadan önce kütle demekle ne demek istediğimizi açıklayalım. Gerçekte kütle kavramının birden fazla tanımı vardır. Newton kütleyle *madde miktarı* olarak tanımlar. Bu tanıma göre kütle, maddenin ivmeye olan direncinin miktarıdır, ya da diğer maddelerle arasındaki kütleçekimin miktarını belirleyen bir öz niceliğidir. Einstein'a göre ise kütle durağan haldeki maddenin karşılık geleceği enerji miktarını verir. Ancak her nasıl tanımlanırsa tanımlansın, aslında etrafımızdaki maddenin kütesinin büyük çoğunluğu bilindik bir şekilde oluşur. Örneğin proton kütesi 938.3 MeV'dir. Protonun içindeki $u + u + d$ kuarkların toplam kütesi ise 9.4 MeV eder, ki bu proton kütesinin çok küçük bir kısmıdır. Geriye kalan asıl kısım olan 928.9 MeV'lik kütle protonun içindeki kuarkların ve gluonların kinetik enerjisi oluşturur. Bizim burada odaklanacağımız kütle 9.4 MeV'i oluşturan ve kuarkların içsel özelliği olan kütlelerdir, yani temel parçacıkların Higgs işleyişi sayesinde kazandıkları kütleler.

Şimdi Higgs işleyişini açıklamaya çalışalım. Bu kurama göre evrenin her noktasında bir *Higgs alanı* bulunur. Alan, uzay-zamanın her noktasında bir değere sahip olan bir olgudur. Bu alanı tıpkı mıknatısların birbirini itmesini çekmesini sağlayan, ya da bir mıknatısın etrafında demir tozlarını şekillendiren bir manyetik alan gibi düşünebiliriz, ya da alanı daha da basit olarak durgun bir göl gibi hayal edebiliriz. Higgs işleyişinin önerisine göre

- temel parçacıklar bu Higgs alanı ile etkileşerek kütle kazanırlar,
- ve temel parçacıklar bu Higgs alanı ile ne kadar fazla etkileşirlerse o kadar fazla kütle kazanırlar.

Bu fikrin altında yatan mantığı insanlara biraz olsun hissettirebilmek için 1993 yılında İngiltere bilim bakanı Waldegrave'in isteği üzerine David Miller tarafından şöyle bir örnek bulunmuştu.

Boş bir oda düşünelim. Bu odaya giren herhangi bir kimse oda içinde hiçbir engelle karşılaşmadan kolayca ilerleyebilir. Bu durumu evrende Higgs alanının yokluğunda tüm parçacıkların kütesiz olduğu bir durumla özdeşleştirebiliriz. Higgs alanının yokluğunda tüm parçacıklar kütesizdir ve evrende ışık hızı ile hareket ederler. Şimdi, aynı odada birsürü fizikçinin katıldığı bir kokteyl parti olduğunu hayal edelim. Odadaki bu fizikçi grubunu ise Higgs alanı ile özdeşleştirebiliriz. İlk önce odaya hiçkimsenin tanımadığı birisi girmiş olsun. Bu kişi, kimse ile tanışmadığı için oda içinde kimse tarafından engellenmeden rahatlıkla hareket edebilecektir. Bu durum, kütesiz ya da hafif bir parçacığın Higgs alanı içerisindeki hareketine eşdeğerdir. Ve şimdi, farzedelim ki odaya Einstein girsin. Elbette Einstein'ın orada olması odadaki fizikçileri çok heyecanlandıracak, ve hepsi onunla konuşabilmek için etrafına toplanacaklardır. Böylece soruları cevaplamak için sürekli durmak zorunda kalan Einstein'ın odadaki hareketi zorlaşacaktır. İşte bu durum da bir parçacığın Higgs alanı içerisinde kütle kazanmasına ve kazandığı kütle yüzünden hareketinin yavaşlamasına

eşdeğerdir. Bir parçacığın ne kadar kütle kazanacağı, az önce de söylediğimiz gibi, parçacığın Higgs alanı ile ne kadar etkileştğine bağlıdır, ve bu etkileşimin miktarı da parçacığın kimliği ile ilişkilidir.

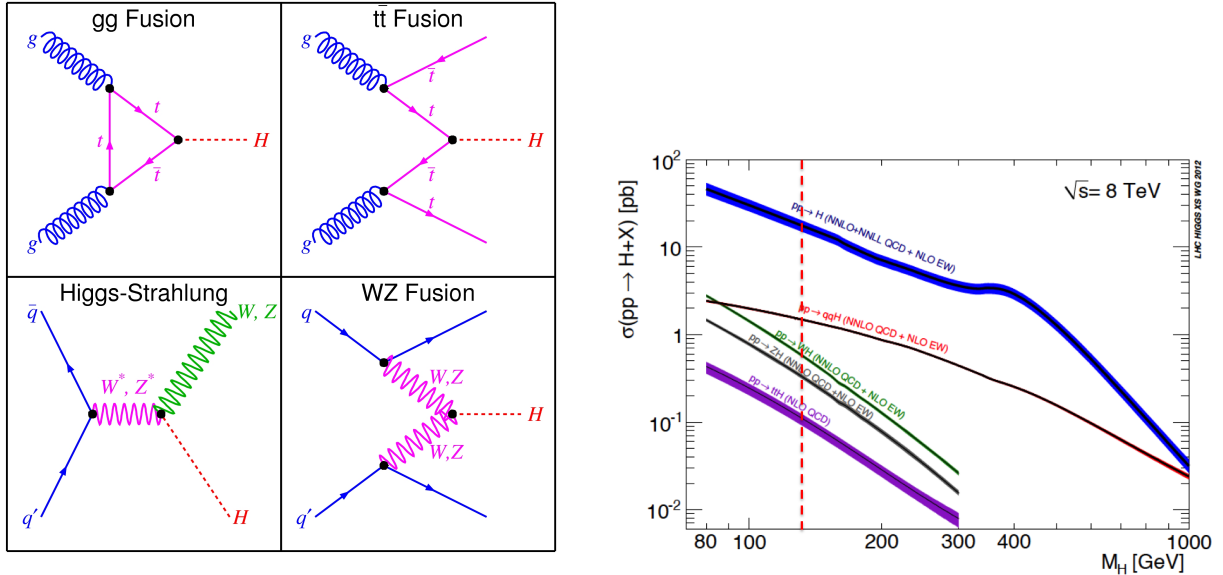
Peki Peter Higgs'in önerdiği ve BHC'de gözlemlenen boson bu resmin neresindedir? şöyle ki, farzedelim odaya Einstein'ın kendisi girmesin, ancak kapıdaki birisi Einstein'ın geleceğini fısıldasın. Oda içindeki fizikçiler bu sefer çeşitli noktalarda kendi aralarında toplanarak Einstein ile ilgili dedikoduya başlayacaklardır. Bu şekilde odanın çeşitli noktalarında oluşan insan yoğunluğu Higgs alanından doğan Higgs parçacığı ile özdeşleştirilebilir. Tıpkı durgun bir göle atılan taşın ortaya su damlacıkları çıkarması gibi, Higgs alanına verilen enerji de alandan Higgs parçacıklarının doğmasını sağlayacaktır. İşte Higgs parçacığının BHC'deki keşfi de tam bu şekilde gerçekleşmiştir: BHC'deki yüksek enerjili proton-proton (pp) çarpışmaları, Higgs alanından Higgs bosonunu doğuracak enerjiyi sağlarlar.

5.2 BHC'de Higgs gözlemi

Şimdi Higgs bosonunun BHC'de nasıl oluştuğundan ve gözlemlendiğinden bahsedeceğiz. Bunun için bilmemiz gereken anahtar bir nokta vardır. Higgs işleyişi tek bilinmeyenli bir kuramdır, ve bu tek bilinmeyen, Higgs bosonunun kütlesidir. Kuramın diğer bütün öngörülleri Higgs kütlesine bağlıdır, ve bu bağlılık BHC araştırmalarını doğrudan etkiler.

5.2.1 Higgs üretimi

BHC'de çarpışan parçacıklar protonlar olsa da, gerçekte etkileşenler protonların içindeki kuarklar (q) ve gluonlardır (g). şekil 5.2.1'de, soldaki çerçevede gluon-gluon (gg) ve kuark-karşıkuark (qq') etkileşimlerinde Higgs'in nasıl oluştuğunu görüyoruz. Etkileşimleri bu şekilde gösteren şemalara Feynman çizimleri deriz. Bu şemalarda zaman soldan sağa akar, ve sağa doğru olan oklar parçacıkları gösterirken sola doğru olan oklar da karşıparçacıkları gösterir. Diagramlarda görüldüğü üzere Higgs BHC'de tek başına, top kuarklarla birlikte, W/Z bosonlarıyla birlikte, ve u/d kuarkları ile birlikte oluşabilir. şekil 5.2.1'de, sağda ise bu oluşum yollarından her biri ile 8 TeV proton-proton çarpışmalarında ne kadar Higgs üretilebileceğinin Higgs kütlesine göre değişimini görüyoruz. Grafiğin y ekseninde gördüğümüz nicelik belli bir parçacık etkileşiminin hangi olasılıkla meydana geleceğini gösterir ve tesir kesiti (σ) diye adlandırılır. Tesir kesiti barn ($10^{-28}m^2$), pikobarn (pb), femtobarn (fb) gibi alan birimleri ile ölçülür, ve etkileşimde yer alan parçacıkların cinsine, özelliklerine ve etkileşim enerjisine bağlıdır. Grafikte, BHC'de 125 GeV Higgs'in en çok gluon füzyonu yöntemi ile oluştuğunu görüyoruz.



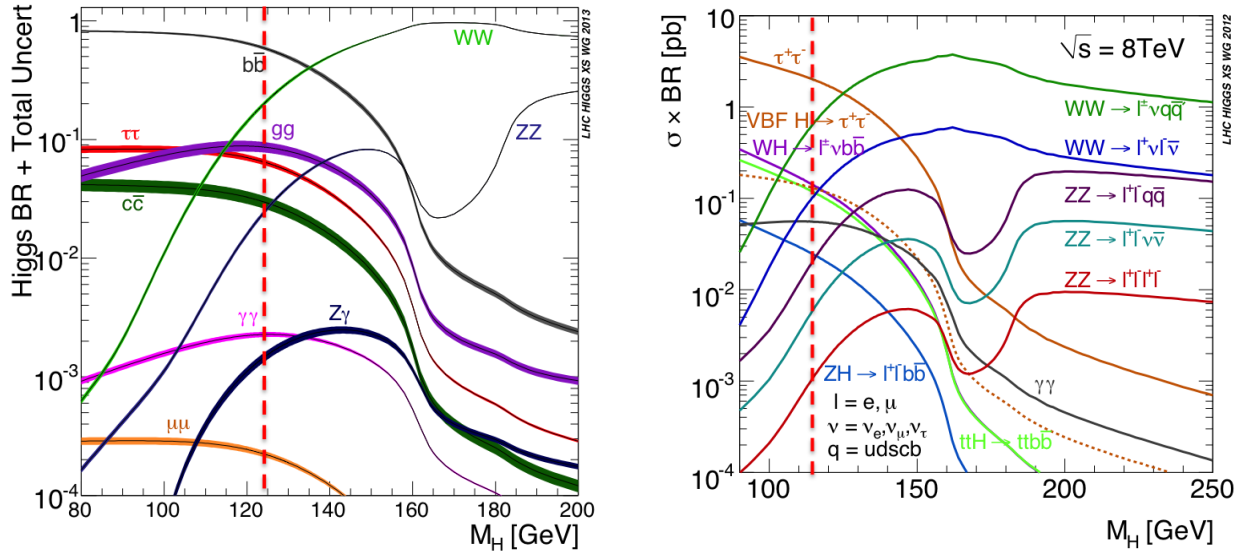
Şekil 29: Solda: BHC'de çarpışan protonların içindeki kuark ve gluonların etkileşmeleri ile gerçekleşen Higgs üretim işleyişlerini gösteren Feynman çizimleri. Sağda: Çeşitli Higgs oluşum yollarının her biri ile 8 TeV enerjili proton-proton çarpışmalarında ne kadar Higgs üretilebileceğini gösteren tesir kesiti niceliğinin Higgs kütlesine göre değişimi.

Ancak tesir kesiti bize sayısal olarak kaç Higgs olayı göreceğimizi söylemez. Bu değere ulaşmak için tesir kesitini BHC ışınlığı ile çarpmamız gerekir. BHC'de *ışınlık* (luminosity, L), 1 saniyede $1 cm^2$ 'de kaç proton-proton çarpışması

olduğunun ölçümüdür. Işınlık alan $^{-1} s^{-1}$ birimi ile ölçülür. BHC'nin ışıklığı 2012 yılında $10^{33} \text{ cm}^{-2} s^{-1}$ 'ye ulaşmıştır. Toplam ışıklık ise belli bir zaman sürecinde birim alanda kaç proton-proton çarpışması olduğunun ölçümüdür. fb^{-1} , pb^{-1} gibi birimlerle ölçülür. BHC'de oluşan etkileşim sayısı da tesir kesiti ile ışıklığı çarpılarak elde edilir. ATLAS ve CMS deneyleri yaklaşık 5'er fb^{-1} 7 TeV veri ve 20şer fb^{-1} 8 TeV veri toplamışlardır.

5.2.2 Higgs bozunma kanalları

Ancak Higgs kısa ömürlü bir parçacıktır, ve oluşmasından 10^{-22} saniye sonra kendinden hafif parçacıklara bozunur. Bu bozunma çeşitli yollarla gerçekleşir ve sonuçta farklı parçacıklar, ya da farklı son durumlar ortaya çıkar. Higgs'in belli bir son duruma bozunma olasılığına *dallanma oranı* (BR) denir. şekil 5.2.2'de, solda Higgs'in çeşitli son durumlara dallanma oranlarının Higgs kütesine bağlı değişimini görüyoruz. 125 GeV'lik Higgs için bozunma en çok b -kuark çiftlerine, daha sonra gluon çiftlerine, ve daha sonra da τ çiftlerine gerçekleşiyor. Öngörülen bu son durumlar, BHC'de yapılacak olan Higgs araştırmalarının tasarımını doğrudan belirlemiştir. Tasarımda asıl belirleyici olan ise tesir kesiti ile dallanma oranı çarpımının verdiği değerdir. şekil 5.2.1'den hatırlayacağımız gibi Higgs oluşurken yanında başka parçacıklar da oluşabilir, ve bu eşlikçi parçacıklar da BHC'de gördüğümüz son durumu belirlerler. şekil 5.2.2'de, sağ çerçevede çeşitli kanallarda Higgs tesir kesiti ile dallanma oranının çarpımının ($\sigma \times \text{BR}$) 8 TeV'de Higgs kütesine göre değişimini görüyoruz. y -eksenindeki $\sigma \times \text{BR}$ değerlerini 8 TeV'deki toplam BHC ışıklığı olan 20 fb^{-1} ile çarpılarak her kanalda kaç olay gerçekleştiğini bulabiliriz.



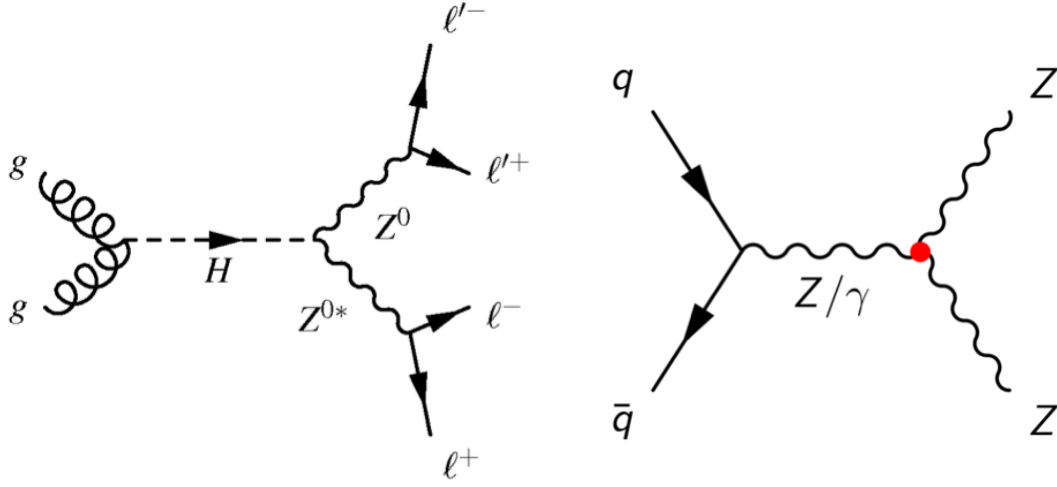
Şekil 30: Solda: Higgs'in çeşitli son durumlara dallanma oranlarının Higgs kütesine bağlı değişimi. Sağda: Çeşitli kanallarda Higgs tesir kesiti ile dallanma oranının çarpımının Higgs kütesine göre değişimi.

şekil 5.2.2'deki kanallar arasında 125 GeV Higgs'i en fazla $\text{VBF} \rightarrow H \rightarrow \tau\tau$ kanalında (yani Higgs'in W/Z bosonları ile birlikte oluştuğu ve $\tau\tau$ çiftine bozunduğu kanalda) bekliyoruz. Ancak Higgs araştıran çözümlenmeleri tasarlarlarken Higgs'in oluşma ve bozunma miktarlarından başka noktalara da dikkat etmemiz gerekiyor. Bu noktalardan ilki, son durumda çıkan parçacıkları algıçımızın ve hassalıkla algılayabildiğidir. Örneğin, ATLAS ve CMS algıçları elektronları, muonları ve fotonları τ 'lara göre daha büyük kesinlikle algılayabilirler ve ölçekbilirler. Bu durum, içinde elektron, muon ya da foton bulunan Higgs kanallarının çözümlenmesini içinde τ bulunan kanalların çözümlenmesine göre daha kolay ve hassas hale getirir.

5.2.3 Sinyali ardalandan ayırmak

Dikkat etmemiz gereken ikinci nokta ise ardalanlardır. BHC'de bizim aradığımız etkileşimler haricinde aradıklarımıza benzer son durumları veren birçok farklı etkileşim gerçekleşir. Ve *ardalan* diye adlandırdığımız bu aramadığımız etkileşimler çoğu zaman *sinyal* diye adlandırdığımız aradıklarımızdan çok daha sık gerçekleşir. şekil 5.2.3'de aynı son durumu veren sinyal ve ardalan iki sürecin Feynman diagramını görüyoruz. Soldaki süreç sinyal olan $H \rightarrow ZZ(\rightarrow 4\ell)$ sürecidir, ve 8 TeV'deki tesir kesiti 0.001 pb 'dir. Sağdaki süreç ise kuark etkileşiminden doğrudan ZZ oluşumu ardalanını gösterir, ve ZZ 'nin 4 leptona gidişini de hesaba katarsak tesir kesiti 8.26 pb 'dir. Higgs ve diğer yeni parçacık

araştırmalarındaki en büyük görevlerden biri sinyal olaylarını ardalın olaylarından ayırd edici özellikler bularak ardalın fazlasından kurtulmaktır.



Şekil 31: Solda: $H \rightarrow ZZ(\rightarrow 4\ell)$ sürecinin Feynman diagramı. Tesir kesiti 0.001 pb'dir. Sağda: Kuark etkileşiminden doğrudan ZZ oluşumu ardalınının Feynman diagramı. ZZ 'nin 4 leptonu gidişini de hesaba katarsak tesir kesiti 8.26 pb'dir.

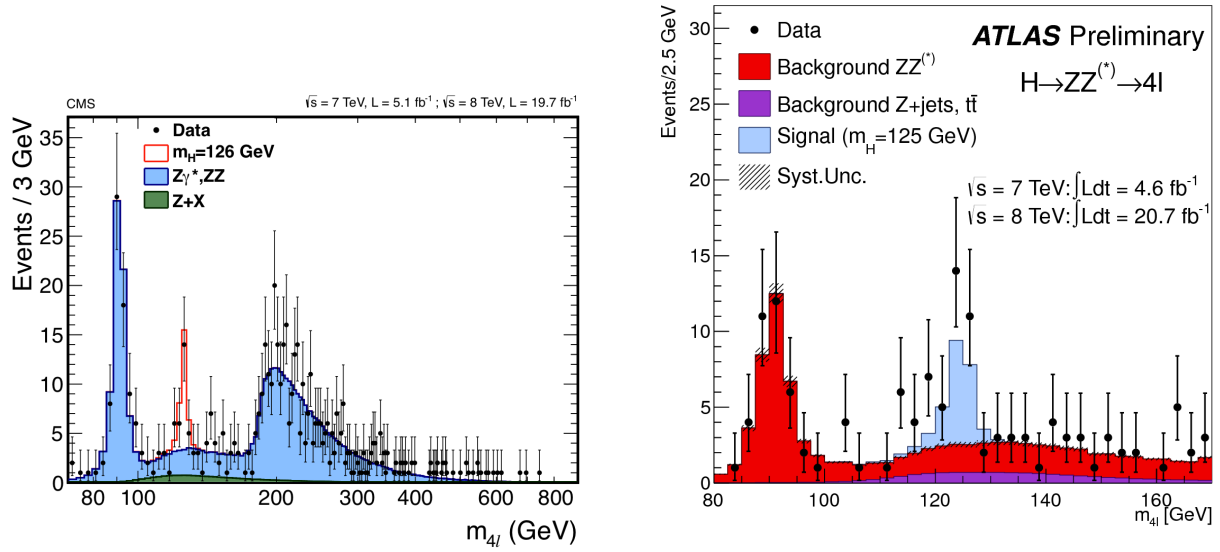
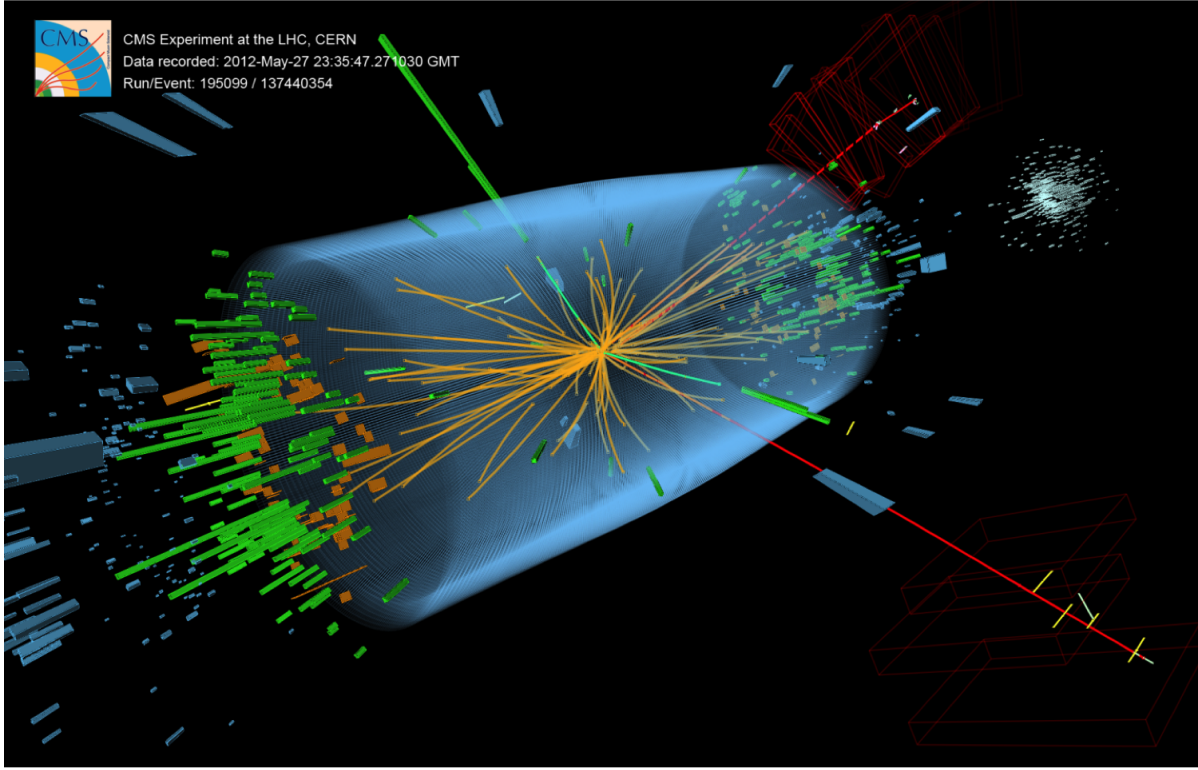
Higgs'li son durumları Higgs'siz son durumlardan ayırt etmeye yarayan bir özellik Higgs'in *değişmez kütle*sidir. Değişmez kütle Higgs'in bozunmasıyla ortaya çıkan tüm parçacıklar kullanılarak aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$m^2 = \left(\sum_{i=0}^n E_i \right)^2 - \left| \sum_{i=0}^n \vec{p}_i \right|^2 \quad (1)$$

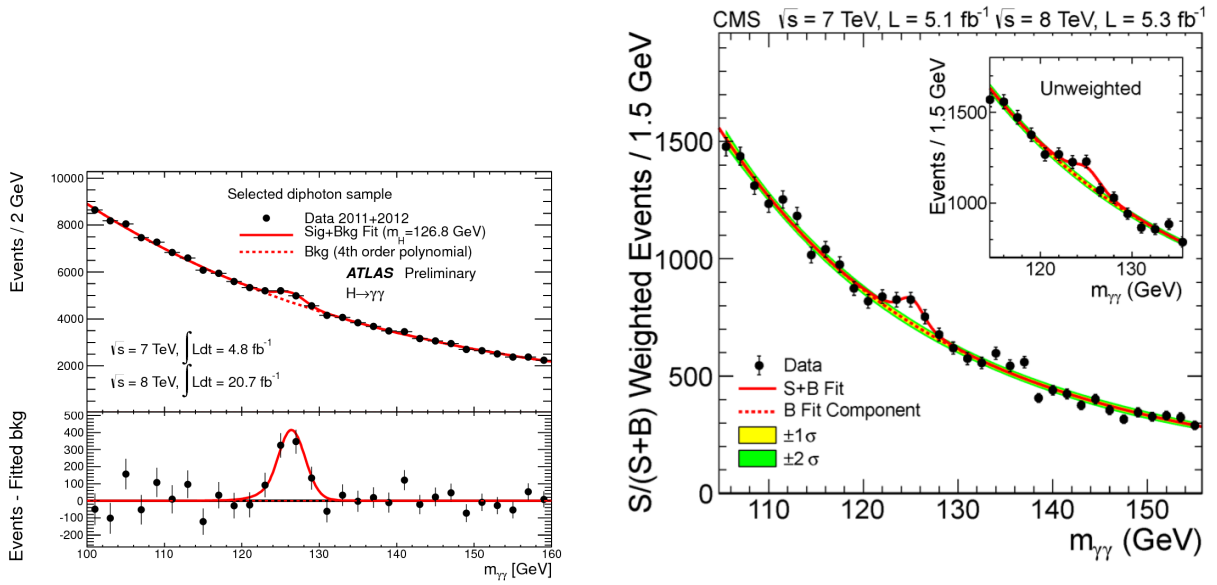
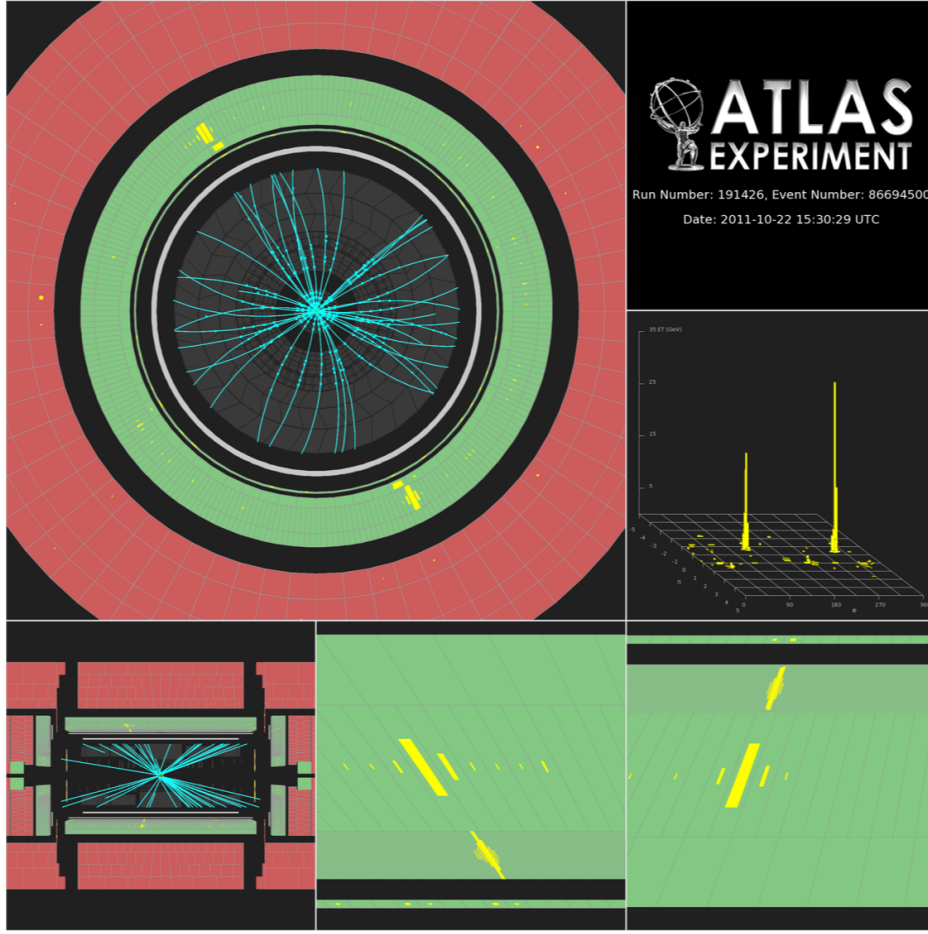
Burada n çıkan parçacıkların sayısını, E_i ve \vec{p}_i de parçacık i 'nin enerjisini ve momentumunu verir. Değişmez kütle her referans çerçevesinde aynıdır ve ana parçacığın (yani Higgs'in) kütlesine eşittir. $pp \rightarrow H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell$ örneğinde değişmez kütle 4 leptonun enerjileri ve momentumları kullanılarak hesaplanır ve ideal olarak her Higgs olayında değişmez kütle aynıdır. Ancak algıç çözünürlüğü mükemmel olmadığı için gerçekte kütle aldığımız değerlerde sapmalar görürüz. Diğer taraftan, $pp \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell$ gibi ardalın olaylarda ZZ 'ye bozunan bir ana parçacık yoktur. Bu yüzden 4lepton değişmez kütle herhangi bir değer alabilir. Özetlersek, Higgs'li olaylardaki değişmez kütle hep Higgs kütlesi etrafında çıkarken ardalın olaylarda kütle rastgele dağılacaktır. Bu da Higgs'i ardalından ayırt etmemize yarar.

Şekil 5.2.3'de, üstte CMS algıcı tarafından gözlemlenmiş verideki bir $pp \rightarrow ee\mu\mu$ olayını görüyoruz. Resimdeki kırmızı çizgiler muonları, yeşil tek çizgiler de elektronları temsil ediyor. Elbette bu olaya bakarak onun Higgs sinyalinin mi geldiğini, yoksa ardalından mı geldiğini bilemeyiz. Ancak bu olayların hepsini toplayıp, elektron ve muonları kullanarak değişmez kütle hesaplayabiliriz, ve değişmez kütle dağılımına bakabiliriz. Şekil 5.2.3'de altta CMS (solda) ve ATLAS'taki 4 leptonlu olayların değişmez kütle dağılımlarını görüyoruz. İki grafikte de noktalar BHC verilerini, CMS grafiğindeki içi dolu mavi histogram, ve ATLAS grafiğindeki içi dolu kırmızı histogram ise SM ardalın beklentisini gösteriyor. 125 GeV civarında veri ile SM ardalın beklentisi arasında bir tutarsızlık olduğunu kolayca farkedebiliriz. İşte, veride gözlemlediğimiz bu fazlalık, 125 GeV kütleli yeni bir parçacığın varlığına işaret etmektedir. Üstelik bu farklılık, CMS grafiğinde kırmızı çizgi histogramla, ATLAS grafiğinde de içi dolu mavi histogramla gösterilen Higgs sinyalinin bilgisayar ile üretilmiş benzetimi ile de birebir uyuşmaktadır, ve bu da bize fazlalığın Higgs'ten gelmiş olabileceğini söyler. Fazlalığın hem CMS, hem de ATLAS deneylerinde gözlemlenmesi de keşif doğruluğuna güçlü bir kanıttır.

Şekil 5.2.2'deki bozunma kanalları arasında Higgs'in iki fotonu bozunduğu $H \rightarrow \gamma\gamma$ kanalını da görüyoruz. İki fotonlu kanaldaki Higgs oluşumu diğer kanallara göre hayli az olmasına rağmen, gerek algıçlardaki foton çözünürlüğü, gerek sinyal-ardalın ayırımının kolay olması nedeniyle bu kanal da verimli Higgs çözümlemesi için uygundur. Şekil 5.2.3'de, üstte ATLAS'ta bulunmuş iki fotonlu bir olayı görüyoruz. Burada sarı izler fotonları temsil ediyor. Altta ise ATLAS (solda) ve CMS'teki (sağda) iki fotonlu olayların değişmez kütle dağılımlarını görebiliriz. 4 lepton kanalında olduğu gibi iki foton kanalında da veri ile ardalın arasında gözlenebilir belirginlikte farklılık vardır. Bu kanalda beklenen ardalın dağılımı yüksek dereceli polinomla ifade edilir. Veriler polinoma oturtulur (fit edilir) ve ardalın beklentisi ile veriler arasındaki fark hesaplanır. Gözlenen fazlalık yine iki deneyde de Higgs sinyali ile uyumludur.



Şekil 32: Üstte: CMS algıcı tarafından gözlemlenmiş verideki bir $pp \rightarrow ee\mu\mu$ olayı. Kırmızı çizgiler muonları, yeşil tek çizgiler de elektronları temsil ediyor. Altta: CMS (solda) ve ATLAS'taki 4 leptonlu olayların değişmez kütle dağılımları.

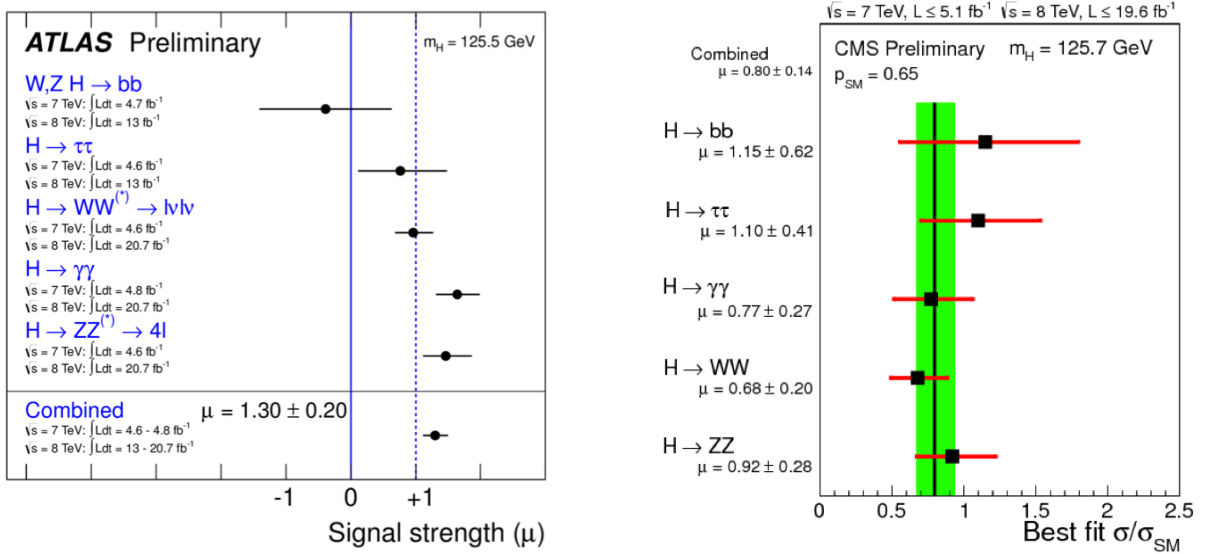


Şekil 33: Üstte: ATLAS algıcı tarafından gözlemlenmiş verideki bir $pp \rightarrow \gamma\gamma$ olayı. Sarı izler fotonları temsil ediyor. Altta: ATLAS (solda) ve CMS'teki 2 fotonlu olayların değişmez kütle dağılımları.

Higgs bosonunun varlığı, 4 lepton ve iki foton haricinde $bb, \tau\tau, WW \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ gibi farklı kanallarda da ATLAS ve CMS tarafından doğrulandı. Bundan sonra cevabı aranacak soru ise gözlenen parçacığın SM Higgs öngörüsüne uyup uymadığıdır. Şöyle ki, eğer doğada SM ötesi bir kuram ve o kurama ait yeni parçacıklar varsa, Higgs bosonunun oluşma ve bozunma yolları ve miktarları bu yeni parçacıkların katkıları ile değişecektir. Gözlenen Higgs'in SM öngörüsünü ölçmek için *sinyal gücü* adı verilen ve her kanal için

$$\mu = \frac{\text{Gözlenen Higgs olayı sayısý}}{\text{SMde beklenen Higgs olayı sayısý}} \quad (2)$$

şeklinde tanımlanan bir nicelik kullanırız. Burada $\mu = 0$ olması, deneyde Higgs sinyali gözlenmediğine, $\mu = 1$ olması da deneyde gözlenen Higgs'in SM öngörüsüne uygun olduğuna işaret eder. Şekil 5.2.3'de ATLAS (solda) ve CMS'de (sağda) çeşitli kanallarda yapılan Higgs ölçümlerinde elde edilen sinyal gücü değerlerini görüyoruz. Grafiklerdeki noktalar ölçümlerin merkezi değerlerini, noktaları çevreleyen çizgiler de belirsizliği (hata payını) temsil ediyor. Bu grafikler bize gözlediğimiz parçacığın büyük kesinlikle SM'in önerdiği Higgs bosonu olduğunu söylüyor.



Şekil 34: ATLAS (solda) ve CMS (sağda) deneylerinde çeşitli kanallarda yapılan Higgs ölçümlerinde elde edilen sinyal gücü değerleri. Grafiklerdeki noktalar ölçümlerin merkezi değerlerini, noktaları çevreleyen çizgiler de belirsizliği (hata payını) temsil ediyor.

5.3 Higgs'ten ne öğrendik? Şimdi ne yapacağız?

Higgs bosonunun BHÇ'de gözlenmesi sayesinde temel parçacıkların nasıl kütle kazandıklarını öğrenmiş olduk. Ve 48 yıllık bir fikrin binlerce kişinin katıldığı büyük bir deneyde doğrulanmış olması elbette bilim dünyasında büyük bir heyecan yarattı. Kütle kazanım işleyişi fikrini oluşturan altı fizikçiden ikisi olan François Englert ve Peter Higgs 2013 Kasım ayında "Atomaltı parçacıkların kütlelerinin kökenine dair anlayışımıza katkıda bulunan ve yakın zamanda CERN'in Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'nda ATLAS ve CMS deneyleri ile tahmin edilen temel parçacığın keşfedilmesiyle onaylanan işleyişin kuramsal keşfinden dolayı" Nobel fizik ödülüne layık görüldüler. Peki ama parçacıkların kütle kazanıyor olması bizim için neden bu kadar önemlidir?

Higgs alanı farklı parçacıklara farklı kütleler vererek, tıpkı beyaz güneş ışığını kırarak rengarenk gökkuşağını yaratan yağmur damlalarının yaptığı gibi evrenin *simetrisini kırar* . Eğer Higgs alanı olmasaydı bütün temel parçacıklar kütlelessiz olacaktı. Böyle bir durum bizim için hayli sevimsiz olurdu. Çünkü kütlelessiz parçacıklar Einstein'ın Görelilik Kuramı gereğince evrende ışık hızıyla hareket edeceklerdi, ve tüm parçacıkların ışık hızıyla hareket ettiği tekdüze bir evrende atomların, moleküllerin, ve haliyle dünyamızın ve bizlerin oluşumuz mümkün olamayacaktı. Kısacası eğer Higgs alanı olmasaydı bildiğimiz anlamda yaşam varolamayacaktı.

BHÇ'de Higgs çözümlenmeleri hala devam ediyor. Eldeki veriye daha verimli bakabilmenin yollarını arıyoruz, ve sürekli ölçüm hassaşlığını arttıracak yeni yöntemler geliştiriyoruz. Öte yandan BHÇ'de süregelen hızlandırıcı ve algıç yenileme işlemleri hızla devam ediyor, ve tasarım enerjisi olan 14 TeV ile yüksek ışıklıkta veri almak için hazırlıklar yapılıyor. Bahsettiğimiz gibi, Higgs şu ana kadarki gözlemlere göre SM beklentileri ile uyumludur, ancak

yeni yöntemler ve yeni veriler kullanarak yapılacak ölçümler ile bu uyumluluk doğrulamaya çalışacağız. Özellikle 2015'te toplanmaya başlayacak olan 14 TeV veri, şimdiye kadar ulaşamadığımız bazı kanalları yeterli hassaslıkta ölçmemizi sağlayacak. Böylece elimizde Higgs'in SM'e uygunluğunu sınavacak daha fazla gözlem olacak. Bu sınama bizler için çok önemli, çünkü Higgs bosonu ile ilgili SM ile uyuşmayan herhangi bir gözlem bize SM ötesi fiziğin varlığını işaret edecek, ve belki de bu fiziğin doğası ile ilgili ipuçları verecektir.

Başlangıçta bahsettiğimiz gibi SM doğrudur, ancak eksiktir. Ve kütle sorunu SM'in eksiklerinden sadece bir tanesidir. Parçacık fiziğinin cevaplaması gereken daha pekçok soru bulunmaktadır. Örneğin neden SM'de sadece üç parçacık ailesi vardır? Neden kütleçekim kuvvetinin doğası elektromanyetik, zayıf ve güçlü kuvvetlerin doğasından farklıdır? Evrende görülen madde-karşımadde asimetrisinin kaynağı nedir? Karanlık maddeyi ne oluşturur? Karanlık enerji nedir? İşte henüz cevaplanmamış olan bütün bu sorular bize SM ötesi daha temel bir fizik kuramının olması gerektiğini işaret ediyor. Ve bu yeni kuram her ne ise yeni temel parçacıkların varlığını öngördüğünü, hatta kuramların bazılarının birden fazla Higgs parçacığına evsahipliği yapabileceğini düşünüyoruz. BHÇ'nin bütün gözlem gücü ve BHÇ fizikçilerinin bütün heyecanı şimdi olası yeni parçacıkları bulmaya ve onları öngören kuramın doğasını anlamaya odaklanmış durumda. Gözleyip göreceğiz.

6 Nötrinoların Dünyasına Kısa Bir Yolculuk

Umut Köse

Nötrino evrende fotondan sonra en yüksek miktarda bulunmasının yanısıra parçacık dünyasının en gizemli, asosyal ve sızofren parçacıklarından biridir. Bu yazıda nötrino tarihsel süreç içerisinde incelenip, nötrinin Standart Model'in oluşum ve gelişimine yapmış olduğu katkıları Standart Model'in ötesinde yeni fizik olasılıklarını tartışacağız.

6.1 X ışınlarından radyoaktivite

Fiziğe yön veren devrimsel çalışmaların çoğu tesadüfen yapılan gözlem ve keşifleri anlama çabasının bir ürünü olarak ortaya çıkmıştır. Hikayemiz 8 Kasım 1895 akşamı, Wilhelm Conrad Röntgen'in katot ışın tüpleriyle çalışırken kazara X-ışınlarını keşfetmesiyle başlamıştır. W. C. Röntgen, gazların içinden geçen elektrik yolunu araştırmak için, havası vakum pompasıyla boşaltılmış ve içine metal elektrotlar yerleştirilmiş katot ışın tüpüyle (Crooks tüpü) deney yaparken katod ışınlarının tüpün dışına çıktığını gözlemlemiştir. Tüpten uzakta durmakta olan cam bir kavanoz içerisinde bulunan "*Baryum Platin Süyanür*" kristallerinde kuvvetli bir floresans olayının meydana geldiğini farketmiştir. Deneyini defalarca tekrarlayıp, deney düzeneğini farklı ve kalın nesnelere örtmesine rağmen katod ışınlarının dışarıya kaçabildiğini gözlemlemiştir. Bu ışınlar daha önce bilinmediğinden ve ne olduğuna dair herhangi bir fikri olmadığından "*X-ışınları*" adını vermiştir. W. C. Röntgen'in bu önemli keşfi, 1901 yılında ilk kez verilmeye başlanan Nobel Fizik Ödülüyle onurlandırılmıştır. X-ışınlarının keşfi bilim dünyasında büyük yankılar uyandırıp, yeni keşiflere önayak olmuştur. Günümüz görüntüleme yöntemlerinin temelini oluşturup, tıp bilminde de büyük çığır açmıştır.

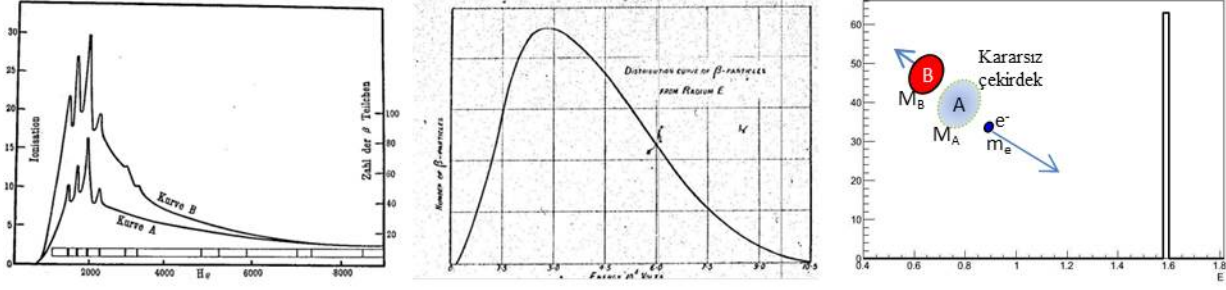
Antoine Henri Becquerel, W. C. Röntgen'in X-ışınlarından çok etkilenmiş, bu gizemli ışınların kaynağını ve özelliklerini anlamak için fosforesans özellik gösteren mineraller üzerinde çalışmalar yapmıştır[1]. A. H. Becquerel, karanlıkta parlayan uranyum tuzunun da X-ışını üretebileceğini düşünmüş, fosforesans etkisi çok güçlü olan potasyum uranyum sülfat tuzlarını ışık geçirmeyen siyah kağıda sarmalanmış fotoğrafik filmlerin üzerine yerleştirerek birkaç saatliğine güneş ışığına maruz bırakmıştır. Deneylerinin ilk aşamasında fotoğrafik filmlerde oluşan izlerin, uranyumdan yayılan X-ışınlarının neden olduğunu düşünmüştür. Deneylerine devam ederken, havanın bulutlu olduğu birkaç gün uranyum tuzlarını fotoğrafik filmlerle birarada çekmesinde unutmamıştır. Çekmesinde bulunan filmleri banyo edip inceledikten sonra güneşe maruz kalan örneklerde olduğu gibi bu filmlerde de izlerle karşılaşmıştır. Deneylerini tekrarlayarak uranyum tuzlarının güneş ışığına gerek kalmadan da kendiliğinden ışın yaydığını keşfetmiştir. A. H. Becquerel X-ışınlarını ararken 1896 yılında radyoaktiviteyi bulmuştur. Marie Curie, 1898 yılında toryumun da uranyuma benzer ışınlar yaydığını göstermiş, ayrıca Pierre Curie ile birlikte radyoaktif element olan polonyum ve radyumu bulmuşlardır. Yapmış oldukları bu katkılardan dolayı 1903 Nobel Fizik Ödülü, A. H. Becquerel, M. Curie ve P. Curie'ye verilmiştir. Ernest Rutherford 1898 yılında uranyumdan çıkan ışınların alfa (α) ve beta (β) ışınları olduğunu keşfetmiştir. Üçüncü çeşit radyoaktivite olan gamma (γ) ışınları da Paul Villard tarafından 1900 yılında bulunmuştur.

Yukarıda bahsedildiği gibi alfa, beta ve gamma olmak üzere üç çeşit radyoaktif ışın vardır. Kararsız çekirdekler, üzerindeki enerji fazlalığından kurtulup kararlı duruma geçiş yaparken bozunuma uğrarlar:

- Alfa bozunumu, radyoaktif kararsız bir çekirdeğin alfa parçacığı (aslında yüksek enerjili helyum çekirdeği) salınması ile kararlı bir çekirdeğe geçişle gerçekleşir. Bu geçişte atomun atom numarasında iki birim ve kütle numarasında da dört birim azalma meydana gelir. Bu duruma radyumun polonyuma geçişi örnek olarak verilebilir: $Ra^{222} \rightarrow Po^{218} + \alpha$.
- Gamma bozunumunda ise; bazı radyoaktif çekirdekler alfa ve beta bozunumu sırasında tüm enerjisini dışarıya veremez ve yüksek enerjili durumda kalır. Kararlı duruma geçiş yapmak için gamma ışınları yapar. Bu durumda atomun atom numarası ve kütle numarasında herhangi bir değişiklik meydana gelmez.
- Beta bozunumu, kararsız çekirdeklerin beta parçacığı yani elektron yayılmasıyla kararlı duruma geçiş yaptığı duruma denir. Bu geçiş sırasında atomun atom numarasında bir değişiklik olmaz ve kütle numarasında 1 birimlik azalma olur. 1900'lerin başında, bilinen bozunum şekline örnek olarak karbon çekirdeğinin azota geçişi verilebilir: $C^{14} \rightarrow N^{14} + \beta$.

6.2 Enerji korunumu krizi

1900'lerin başında beta bozunumunu anlamak için gerçekleştirilen deneylerde açığa çıkan elektronun kinetik enerjisi ölçülmüş ve bu ölçümler sonucunda birbirinden farklı sonuçlar elde edilmiştir. Deney sonuçlarının bir kısmı



Şekil 35: Beta bozunumundan çıkan elektronun enerji dağılımı. Sol: J. Chadwick'in elde ettiği sonuç; orta: C. D. Ellis ve W. Wooster'm elde ettiği deneysel sonuç; sağ: elektronun beklenen enerji dağılımı.

elektronun kesikli enerji dağılımı gösterdiğini açıklarken diğer bir kısmı sürekli bir dağılıma işaret ediyordu. Şayet beta bozunumuna uğrayan çekirdek iki cisme bozunuyorsa elektronun tek değerli bir enerjiye sahip olması gerekir. Otto von Baeyer, Otto Hanh ve Lise Meitner, 1911-1912 yılları arasında radyum ve toryum örneklerini fotoğrafik film kullanarak gerçekleştirdikleri deney sonuçlarında kesikli bir dağılım bulmuşlardı[2]. James Chadwick, 1914 yılında kurşun çekirdeğinde beta bozunumunu manyetik spektrometre kullanarak incelemiş ve (Şekil35 sol tarafta görüldüğü gibi) elektronların tek enerjili olmadığını iddia etmiştir[3]. L. Meitner, elektronun sürekli bir dağılım gösterdiği iddialarına karşın, elektronun çekirdekten çıkarken saçılmalara uğradığı, bundan dolayı elektronun kinetik enerjisinin değişime uğrayacağını ve sürekliymiş gibi görüneceğini ileri sürüyordu. Charles Drummond Ellis ve William Wooster, 1927 yılında bismüt çekirdeği örneğinde beta bozunumu sırasında ortaya çıkan toplam ısı enerjisini kalorimetre tekniğiyle ölçüp, (Şekil 35 ortada görüldüğü gibi) elektronların sürekli bir dağılıma sahip olduğunu göstermişlerdir[4]. L. Meitner ve Wilhelm Orthmann tarafından 1929 yılında bu sonuçların doğrulanmasıyla, beta bozunumunda ortaya çıkan elektronların sürekli bir enerji dağılımına sahip olduğu kabul görmeye başlamıştır.

Radyoaktivitenin keşfinden beta bozunumunda ortaya çıkan elektronun enerjisinin sürekli olduğunun anlaşılmasına kadar yaklaşık 30 yıllık bir zaman geçmesi gerekmiştir. Bu sonuçlar beraberinde çok önemli bir problemi ortaya çıkarmıştır: Enerji ve momentum korunum yasasının ihlali! Şayet bir cisim iki cisme bozunursa, $A \rightarrow B + e^-$, enerji ve momentum korunum yasalarından dolayı elektronun tek değerli bir enerji değerine sahip olması gerekiyordu (Şekil 35 sağ tarafta gösterildiği gibi):

$$E_e = \frac{M_A^2 - M_B^2 - m_e^2}{2M_A} c^2. \quad (3)$$

Enerji dağılımının sürekli olabilmesi için elektronun yanısıra bir başka parçacığın ortaya çıkması ve toplam enerjinin üç parçacık arasında paylaşılması gerekir. O dönemde bilinen parçacıklar proton, elektron ve fotondan ibaretti. Beta bozunum deneylerinde fotona benzer bir parçacığa rastlanmamıştı. Hiç kimse elektronun neden sürekli bir dağılım gösterdiğini açıklayamıyordu. Öyle ki; Niels Bohr enerji korunum yasasının beta bozunumlarında geçersiz olabileceğini öne sürmüştür. Bu konuda kaleme aldığı makaleyi Wolfgang Pauli'ye gönderip fikrini istemiş, W. Pauli'nin enerji korunumunun gözardı edilmesinin yanlış olduğunu dile getirmesi üzerine, Bohr makalesini yayınlamaktan vazgeçmiştir.

Beta bozunumunda enerji korunumu ihlalinin yanısıra fizikçilerin uğraştığı bir diğer konu da: Spin istatistik problemiydi. O dönemde atom çekirdeğinin proton ve elektronlardan meydana geldiği düşünülüyordu. Buna göre lityum çekirdeğinin 6 proton ve 3 elektrondan oluştuğu, azotun da 14 proton ve 7 elektrondan oluştuğu düşünüldüğünde, her iki örneğin de Fermi-Dirac istatistiğine uyması beklenirken deneysel sonuçlar, Bose-Einstein istatistiğinin geçerli olduğunu göstermiştir.

6.3 Nötrino varsayımı

W. Pauli, 4 Aralık 1930'da Tübingen'deki toplantıda bulunan L. Meitner ve diğer fizikçilere hitaben kaleme aldığı, "Sevgili radyoaktif bayanlar ve baylar" diye başladığı, fizik dünyasının en önemli mektuplarından birinde, her iki problemi çözmek için umutsuz çare "desperate remedy" olarak spini 1/2, yüksüz ve kütlesi protonun kütlesinin 0,01 katı küçük olan bir parçacık önermiştir. Buna göre karbonun azota beta bozunum sürecindeki geçişi şu şekilde

gösterilebilir³:

$$C^{14} \rightarrow N^{14} + e^{-} + \nu. \quad (4)$$

Bu parçacığa “nötron” adını vermiştir. Enrico Fermi daha sonra W. Pauli’nin önermiş olduğu nötron isminin “nötrino” olarak değiştirilmesini önermiştir. Mektubunda problem çözümü için önerdiği bu parçacığın belki de hiç keşfedilemeyeceğini dile getirmiştir. Günümüzden o dönemde yaşanan tartışmalara baktığımız zaman, beta bozunumunda enerji ve momentum korunumunu sağlamak için yüksüz, spini 1/2 olan bir parçacığın olması gerektiğini çok kısa bir zamanda ve kuşkuya yer bırakmayacak şekilde dile getirebiliriz. Oysa ki o dönemde böyle bir parçacığı önermek çok büyük bir cesaret gerektirmektedir. Öyle ki W. Pauli bu konuda herhangi bir makaleyi kaleme almamakla birlikte konu ile ilgili sunumunu ilk defa Temmuz 1931’de İtalya’nın Pasedena şehrinde gerçekleştirilen toplantıda yapmıştır. Bu sunumu takip edenlerden biri olan E. Fermi konu üzerinde düşünmeye başlamıştır.

James Chadwick, 1932’de kütlesi protonun kütlesine yakın, $M_p = 938.3$ MeV, $M_n = 939.6$ MeV, spini 1/2 ve yüksüz bir parçacık olan nötronu keşfetmiştir⁴. Chadwick’in keşfetmiş olduğu parçacık kütleli olduğu için Pauli’nin önermiş olduğu parçacık olmadığı anlaşılmıştır. 1935 yılında bu başarısından dolayı Nobel Fizik ödülüne layık görülmüştür. Daha sonra Ettore Majorana, Werner Heisenberg ve Dimitri İvanenko, 1932’de birbirlerinden bağımsız olarak atom çekirdeğinin “nötron-proton” modelini önerdiler. Ekim 1933’de, atom çekirdeği üzerine gerçekleştirilen VII. Solvay toplantısında beta bozunumunun tüm oyuncularını bir araya gelerek, genel durum tartışılmıştır.

6.4 Kuramsal temellerin oluşturulması

Enrico Fermi, 1934 yılında W. Pauli’nin nötrino varsayımını ve W. Heisenberg, D. İvanenko ve E. Majorana’nın proton-nötron çekirdek modelini temel alarak, beta bozunum dinamiğini açıklayan kuramını ortaya atmıştır [6]⁵. Elektron ve nötrinin bozunmadan önce çekirdekte bulunmadığını, nötronun protona geçişi sırasında ortaya çıktıklarını varsaymıştır. E. Fermi, atomlarda eletromanyetik ışınım yayımını arasında bir ilişki (anoloji) kurarak, sistemi tanımlayan hamiltoniyeni tek noktada dört fermiyonun etkileşimi (vektör-vektör akımı) şeklinde tanımlamıştır:

$$H_{Fermi} = G_F \bar{p}(x) \gamma_\alpha n(x) \bar{e}(x) \gamma^\alpha \nu(x) + h.c. \quad (5)$$

Burada $G_F \sim 1.1710^{-5} \text{GeV}^{-2}$ Fermi bağlaşım katsayısı olarak tanımlanır ve etkileşimin kuvvetini gösterir, “*h.c.*”de hermitian conjugate anlamına gelmektedir. Yukarıda verilen denklemle E. Fermi, beta bozunumunda deneysel olarak gözlemlenen elektronun enerji dağılımını açıklamakla birlikte kütleli bir nötrinin bu dağılıma olan etkisinin sonuçlarını irdelemiştir. Böylece nötrinin varlığının gerekliliği W. Pauli’den sonra E. Fermi tarafından da sağlam temellerle ortaya çıkarılmıştır.

Hans Albrecht Bethe ve Rudolf Peierls 1934 yılında, E. Fermi’nin kuramını ve tersinir beta bozunumunu, $\nu + p \rightarrow e^+ + n$, temel alarak 2.3 MeV enerjili nötrinoların etkileşime girme olasılığını yani etki kesitinin üst sınırını $\sigma < 10^{-44} \text{cm}^2$ olarak hesaplamışlardır[7]⁶. Bir hedefe bombardıman edilen parçacık hedefte belli bir kesit yüzeyi görür, bu kesite yönelen her parçacık hedef madde ile etkileşime girer. Dolayısıyla gelen parçacık ne kadar büyük bir kesit görürse etkileşime girme olasılığı da o kadar büyük olur. Buna göre vasat enerjili bir nötrino kurşun ortam içinden bin ışık yılı hiçbir etkileşime olmadan geçebilir. H. A. Bethe ve R. Peierls nötrinin gözlemlenebilmesinin herhangi bir yolu olmadığı sonucuna ulaşmışlardır. Sir Arthur Eddington⁷, nötrino kuramından etkilenmemekle birlikte nötrinoların varlığına da inanmıyordu. Nötrinolar varolsa bile bunları oluşturacak ve gözlemleyebilecek yetenek ve dahilikte bir fizikçinin olmadığını ileri sürmüştür.

³Burada dikkatli bir okuyucu denklem ?? de gösterilen bozunum sürecinde açığa çıkan nötrinin karşıt nötrino olması gerektiğini dile getirebilir. Hatırlamamız gereken önemli noktalardan biri “Lepton korunum yasası” o dönem bilinen bir nicelik değildir. Tarihsel süreç içerisinde zamanı geldiğinde bahsedilecektir.

⁴1920’lerin sonunda temel parçacık olarak foton, elektron ve proton biliniyordu. Atom çekirdeğinin içinde birçok protonun nasıl bir arada kaldığını kimse bilmiyordu. Frederick Joliot ve İrene Curie bir deney sırasında yüksüz bir parçacığın maddenin içine geçip bir protonu dışarı attığını gördüler. O zaman için bilinen tek yüksüz parçacık foton olduğu için, protonu dışarı fırlatan parçacığın da foton olduğunu düşündüler. Haberi duyan Ettore Majorana hiç tereddüt etmeden Joliot ve Curie’nin gördükleri yüksüz parçacığın protonu hareket ettirebilmesi için protonun kütlesine yakın bir kütleyle sahip olması gerektiğini bundan dolayı bu parçacığın protonun yüksüz hali olduğunu ayrıca atom çekirdeğinin proton ve protonun yüksüz halinden oluşan bir yapı olduğunu Enrico Fermi’ye ispatlamıştır. Fermi Majorana’ya açıklamasını yayınlamasını veya yapılacak olan Paris yaz konferansına giderek rapor etmesini istemiştir. Ancak Majorana herseyin çok basit bir şekilde anlaşılabilir ve sıradan olduğunu söyleyip kabul etmemiştir.

⁵Fermi kaleme aldığı makaleyi ilk önce “Nature” dergisine göndermiş, gerçeklerden uzak spekülasyona açık olduğu gerekçesiyle yayınlanması dergi tarafından kabul edilmemiştir. Bunun üzerine fizik dünyasında çığır açacak makalesini ilk önce İtalyanca basılan bir dergi olan “La Ricerca Scientifica”da 31 Aralık 1933 yılında yayınlamıştır. Bu makale Fermi’nin beta bozunumu üzerine kaleme aldığı ilk ve son makaledir.

⁶Proton proton etkileşimlerinin etki kesiti $\sigma < 10^{-26} \text{cm}^2$.

⁷Sir Arthur Eddington, 29 Mayıs 1919’da Batı Afrika sahilinde, Albert Einstein’ın genel görelilik kuramını ispatlayan bir tam güneş tutulmasını gözlemlemiştir. Einstein, bir yıldızın ışığının Güneş’in kütleçekimi etkisiyle büküleceğini öngörmüştür.

Fermi'nin beta bozunum kuramı belli geçişlere (Fermi geçişleri) izin veriyordu. Çekirdeğin içinde bulunan nötronun protona geçişini düşünürken, nötron ve protonun çekirdekdeki yeri ve spinlerinin değişmediğini yani açısız momentum değişiminin $\Delta J = 0$ olduğunu kabul etmiştir. Ayrıca “Parite” korunumludur. Fermi geçişine örnek olarak $O^{14} \rightarrow N^{14*} + e^+ + \nu$ ($0^+ \rightarrow 0^+$ geçişi) verilebilir. $He^6 \rightarrow Li^6 + e^- + \nu$ ($0^+ \rightarrow 1^+$ geçişi) gibi bazı beta bozunum örneklerinde açısız momentum değişimi gerçekleşmektedir. George Gamow ve Edward Teller, 1936 yılında tüm deneysel sonuçların açıklanabilmesi için Fermi'nin kuramını genişlettiler. Buna göre denklem 5'te gösterilen H_{Fermi} hamiltoniyenini

$$H_{G-T} = \Sigma_i G_i \bar{p}(x) O_i n(x) \bar{e}(x) O^i \nu(x) + h.c. \quad (6)$$

şeklinde tanımlamışlardır. Burada “ i ” indisi “Skaler (S), Vektör (V), Tensör (T), Axialvektör (A , Pseudoskaler)” ve “Pseudovektör (P)”, “ O ” operatörü ise bunlara karşılık gelen operatörleri “ $1, \gamma_\alpha, \sigma_{\alpha\beta}, \gamma_\alpha \gamma_5$ ” ve “ γ_5 ” Dirac matris yapısında göstermektedir⁸. Gamow-Teller hamiltoniyeninde de parite korunumu geçerlidir ve $\Delta J = 0, 1$ geçişlerine izin verir. Yukarıda verilen terimlerden hangisinin daha baskın olduğu (S, V mi yoksa T, A mı?) fizik dünyasının çözüme kavuşturması gereken bir diğer problem olarak ortaya çıkmıştır.

Ettore Majorana⁹, 1937 yılında, “elektron ve pozitronların simetrik kuramı” adlı makalesinde[8], spini 1/2 olan parçacıkların kendi karşıt parçacıkları da olabileceğini görelilik ve kuantum kuramıyla uyumlu kuramsal bir temele oturarak ispatlamıştır. Buna göre nötrinoların karşıt parçacıklarıyla aynı olabileceğini ($\nu = \bar{\nu}$) ileri sürmüştür. Nötrinoların E. Majorana'nın dile getirdiği gibi davranması olasılığına “Majorana nötrino” ismi verilmiştir ve günümüzün önemli sorunlarından biridir¹⁰.

Hideki Yukawa, 1935'de atom çekirdekleri içinde bulunan proton ve nötronların kendi aralarındaki etkileşimini açıklamak için orta kütleli bir parçacık alışverişinde bulduklarını ileri sürmüştür. H. Yukawa, bunun kütesinin elektronun kütesinin yaklaşık 300 katı yada protonun kütesinin 6 katı kadar olması gerektiğini hesaplamıştır. 1937 yılında iki ayrı grup, Carl D. Anderson, Seth H. Neddermeyer ve Jabez C. Street, Edward C. Stevenson, kozmik ışınlarla yaptıkları çalışmalarda[9] H. Yukawa'nın tanımına uyan orta ağırlıkta parçacıklar gözlemlemişlerdir. Yapılan detaylı çalışmalar sonucunda birçok problem ortaya çıkmaya başlamıştır. Bu parçacıkların yaşama süreleri ve kütleleri H. Yukawa'nın önerdiğinden farklı bulunmuştur. Ayrıca yapılan ölçümler birbiriyle uyumlu değildi. Bu durum 1947 yılında Cecil Frank Powell ve grubu tarafından çözüme kavuşturulmuştur[10]. C. F. Powell fotoğrafik filmleri kullanarak elde edilen izlerden, kozmik ışınlarda iki parçacığın olduğunu göstermiştir. Bu parçacıklardan spini 0, kütleli $M_\pi = 140$ MeV ve ortalama ömrü $2.6 \cdot 10^{-8}$ s olan pion (π^\pm) ve spini 1/2, kütleli $M_\mu = 105.6$ MeV ve ortalama ömrü $2.2 \cdot 10^{-6}$ s olan müon (μ^\pm) olarak adlandırılmıştır. Pionun H. Yukawa'nın önerdiği parçacık olduğu anlaşılmıştır. Yukawa, 1949'da çekirdek kuvvetleri üzerine yaptığı kuramsal çalışmalar sonucunda pionun varlığını öngörmesi nedeniyle; C. F. Powell da 1950'de nükleer süreçleri incelemek için geliştirdiği fotoğrafıma yöntemi ve bu yöntemle pionu keşfettiği için Nobel Fizik ödülüne layık görülmüştür. Uzun yıllar süren araştırmalar sonucunda elektronun ağır kardeşi müonun keşfi bilim insanları arasında büyük bir tepki yaratmış ve İsidore Rabi bu durumu “*Bunu kim ısmarladı?*” vecizesiyle dile getirmiştir.

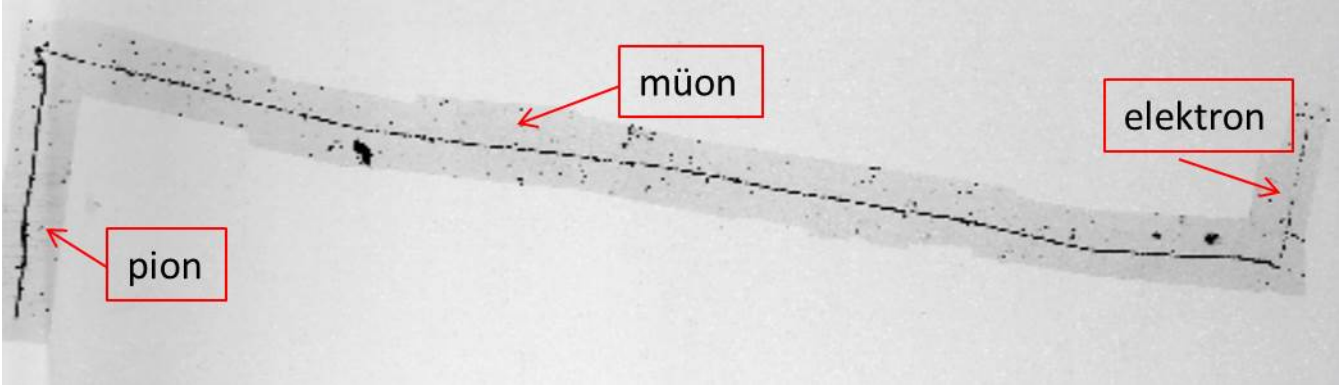
Pionun keşfi Şekil-36'de gösterilen bozunma olayının incelenmesine dayanmaktadır. Burada bozunma bir parçacığın iki parçacığa dönüşmesi şeklinde olduğu için çıkan her iki parçacığın da enerjileri ve momentumları sabittir, ölçülebilir ve kütleler cinsinden hesaplanabilir. Bu hesaplamalar sonucunda müon ile birlikte çıkan diğer parçacığın kütesinin hemen hemen sıfır olması gerektiği görülmüştür. Böylece bu parçacığın Pauli'nin nötrinusu

8

- Skaler, büyüklüğü olan ancak yönü olmayan bir niceliktir. Kütle, zaman ve sıcaklık örnek olarak verilebilir.
- Vektör (γ_α), uzayda yönelmiş bir niceliktir. Elektrik alan, manyetik akım, kuvvet ve momentum örnek olarak verilebilir.
- Tensör ($\sigma_{\alpha\beta}$), alanın ölçülebilir niceliği yalnızca skaler yada vektörel niceliklerle ifade edilemiyorsa ve böyle bir niceliğin bir arada ele alınması gerekiyorsa bir tensor kurulması gerekir. Hidrodinamik sistemdeki basınç alanı buna örnek olarak gösterilebilir.
- Axial (Pseudoskaler, $\gamma_\alpha \gamma_5$), yalnızca skaler niceliklerdir. Manyetik akı örnek olarak verilebilir.
- Pseudovektör (γ_5), yalnızca vektör niceliklerdir. Manyetik alan, manyetik moment ve açısız momentum örnek olarak verilebilir.

⁹Majorana Fermi'nin öğrencisiydi. Daha önce belirttiğimiz gibi Majorana makale yazmaya pek hevesli bir fizikçi değildir. 1937'de Napoli Fizik bölümünde açılan kadro için bir bilimsel makale kaleme alması gerekiyordu. Fermi, Majorana'nın “elektron ve pozitronların simetrik kuramı” üzerine çalışmasını kaleme alıp Majorana'nın ismini de yazarak *Il Nuovo Cimento* adlı bilimsel dergide yayınlamıştır. Fermi'nin inisiyatifi olmasaydı Majorana spinörleri ve Majorana fermiyonları hakkında bilgi sahibi olamazdık. Yaşamış olduğu depresyonların artması sonucunda 26 Mart 1938'de gizemli bir şekilde ortadan kaybolmuştur. Ortadan kaybolmasının ardından intihar ettiği, Arjantine kaçtığı veya bir manastırda saklandığı yönünde birçok spekülasyona neden olmuştur. Fermi, Majorana için “*Dünyada birkaç kategoride bilim insanı vardır; ikinci ve üçüncü derecede olanlar ellerinden geleni yapar ama daha fazla ileri gidemezler. Bilimsel gelişmelere temel olan önemli keşifler yapan birinci derecede olanlar da vardır. Fakat bunun yanında Galilei ve Newton gibi dahiler de vardır. Majorana bu dahilerden biriydi.*” demiştir.

¹⁰Nötrinoların Majorana nötrino olup olmadığı deneysel olarak “nötrinossuz çift beta bozunumu (neutrinoless double beta decay)” çalışılarak tayin edilebilir. İlerleyen bölümlerde deneysel çalışmalardan bahsedilecektir.



Şekil 36: Fotoğrafik film içerisinde gerçekleşen pion-müon-elektron bozunum zinciri.

olabileceği varsayımı kabul edilmiştir. Pionun müona bozunumu $\pi^- \rightarrow \mu^- + \nu$ şeklinde gösterilebilir. Jack Steinberger 1948'de E. Fermi öncülüğünde müon bozunumu üzerine yaptığı tez çalışmasında, müon bozunumunda ortaya çıkan elektronun enerji dağılımının sabit olmadığını yani beta bozunumunda olduğu gibi sürekli bir dağılım sergilediğini göstermiştir[11]. Bu durumda müon elektronun yanısıra iki tane nötrinoya bozunur: $\mu^- \rightarrow e^- + \nu + \bar{\nu}$. Bu da nötrinonun varlığına ilişkin bir diğer kanıttır.

6.5 Nötrinoların keşfi

Nötrinoların varlığına dair çok güçlü kuramsal kanıtlar vardı, ancak deneysel doğrulaması hala yapılabilmemiş değildi. Nötrino parçacığı elektrik yükü taşımasından dolayı detektörlerde iyonizasyon meydana getirmeyeceğinden herhangi bir iz bırakmayacaktır. Yüksüz parçacıkları gözlemleyebilmenin yolu, bunların etkileşimi sonucunda meydana gelen olayları incelemektir. Bruno Pontecorvo, 1946'da nötrino etkileşimlerinin gözlemlenebilmesi için radyokimyasal bir tepkime olan $\nu + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow e^- + {}^{37}\text{Ar}$ yöntemini önermiştir[12]. Bu yönteme göre nötrino etkileşimi sonucunda klorun bir izotopu olan ${}^{37}\text{Cl}$ (doğada %24.47 oranında bulunur) radyoaktif argona, ${}^{37}\text{Ar}$, dönüşürken bir elektron yayınlar. Yarılanma ömrü yaklaşık 34 gün olan ${}^{37}\text{Ar}$ düşük enerjili elektron yayarak tekrar ${}^{37}\text{Cl}$ 'e dönüşür. Argon asal gaz ailesinden olduğu için kendi aralarında veya başka atomlarla bileşik yapmaz, böylece chlorinden ayırılması daha kolay olacaktır. Algıçta ortaya çıkan argon miktarından nötrinoların varlığının yanı sıra etkileşime giren nötrino sayısı da belirlenebilir.

1953'de Emil John Konopinski ve Hormoz Massou Mahmoud parçacık etkileşimlerinde lepton korunumunun sağlanması gerektiğini ileri sürdüler[13]. Buna göre proton ve nötronun lepton numaraları $L = 0$ iken, lepton parçacıklar olan elektron, müon ve nötrinonun $L = 1$ ve bunların karşıt parçacıkları $L = -1$ değerini alır. Bu durumda beta ve pion bozunumundan karşıt nötrino ($\bar{\nu}$) yayılırken, müon bozunumundan da nötrino ve karşıt nötrino ($\nu, \bar{\nu}$) yayılır:

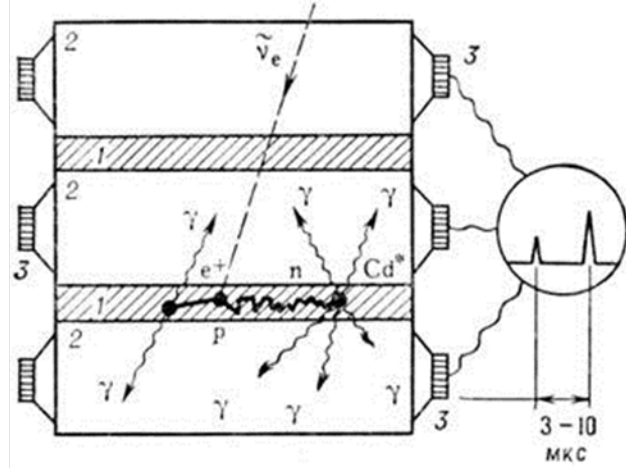
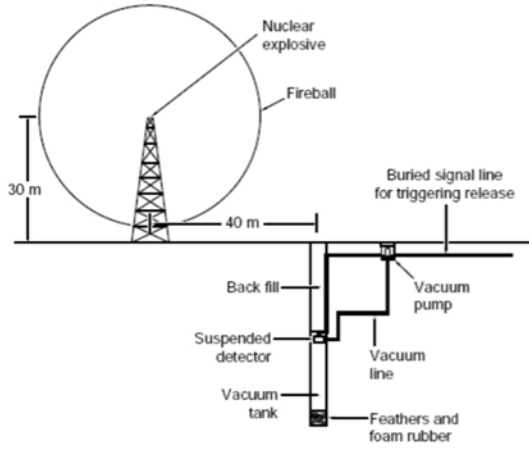
$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu} \quad (7)$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu} \quad (8)$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu + \bar{\nu} \quad (9)$$

1950'lerde nükleer reaktörlerin gelişmesi ve bunların içinde çok sayıda düşük enerjili nötron, nötronların beta bozunumundan da çok sayıda nötrino meydana gelmesi, nötrino parçacıklarının gözlenmesi üzerine daha çok araştırma hevesini ön plana çıkarmıştır. Ray Davis 1954 yılında, B. Pontecorvo'nun önerdiği $\text{Cl} - \text{Ar}$ yöntemini kullanılarak nötrinonun gözlemlenmesinin yanısıra nötrino ve karşıt nötrinonun benzer veya farklı parçacıklar olup olmadığını sınamak için, Brookhaven Ulusal Laboratuvarı'ndaki (BNL) Brookhaven Grafit Araştırma reaktöründen yayılan nötrinoları gözlemlemek için uzun uğraşlar vermiştir [14]. Eğer $\nu = \bar{\nu}$ ise nötrino algıcında nötrinonun etkileşimi sonucunda oluşan Ar atomlarının görülmesi, $\nu \neq \bar{\nu}$ durumunda ise herhangi bir etkileşimin gerçekleşmeyeceği beklenir. Çalışmalar sonucunda herhangi bir nötrino etkileşimi gözlemlenmemiştir¹¹. Deneysel sonuç "*Lepton Korunumu*"nın

¹¹Rivayete göre, R. Davis'in yürütmüş olduğu deneyin sonucunda birkaç nötrino etkileşimiyle karşılaştığına ilişkin söylentiler Moskova'da bulunan B. Pontecorvo'ya ulaşır. Bu haberin etkisi ve M. Gell-Mann ve A. Pais'in 1955'te $K^0 \rightleftharpoons \bar{K}^0$ salınımını tartıştıkları makaleden de esinlenerek, 1957'de benzer karışımın nötrinolar için de geçerli olabileceğini, dolayısıyla $\nu \rightleftharpoons \bar{\nu}$ salınımının olasılığı ilk defa tartışmaya açmıştır[23].



Şekil 37: Sol: Atom bombası kullanılarak yapılması düşünülen ilk proje. Sağ: Nötrinin keşfi için kullanılan detektör ve yöntem.

geçerliliğinin yanısıra nötrinoların karşıt nötrinolardan farklı $\nu \neq \bar{\nu}$ olduğunu göstermiştir.

Amerika'nın ikinci dünya savaşı sırasında başlattığı Los Alamos'taki Manhattan projesinde görev alan Fred Reines, 1951'de atom bombası kullanarak yüksek akıda oluşacak nötrino parçacıklarını gözlemenin mümkün olabileceği fikrini E. Fermi ve H. A. Bethe ile paylaşmıştır. Clyde Cowan'ın işbirliğiyle nötrino fiziğinde gerçekleştirilen ilk proje olan "Project Poltergeist"i önerdiler. Bu projeye göre Şekil37'de gösterildiği gibi, nötrino algıcına yakın bir mesafede (40 m uzakta yerden 30 m yükseklikte) patlatılacak 20 kilotonluk bir atom bombasından yayılan nötrinoların etkileşimini, $\bar{\nu} + p \rightarrow n + e^+$ tersine beta bozunumu yoluyla yakalayacaklarını ve bu şekilde nötrinoyu keşfedeceklerini düşündüler.

1952'de nükleer reaktörlerden saniyede 1 santimetrekare başına 10^{13} nötrino yayılacağını ve atom bombası kullanımından daha avantajlı olacağını düşünerek, tasarlamış oldukları nötrino algıcını, 1953'te Hanford nükleer reaktörü sonra da 1956'te yeni ve daha güçlü bir reaktör olan Savannah River nükleer reaktörünün yakınlarına yerleştirdiler. Algıç, içinde su ve suda çözülmüş kadmiyum klorür ($CdCl$) bulunan büyük su tankları, aralarına yerleştirilmiş sıvı pırladıklar (liquid scintillator) ve fotoçoğaltıcı tüplerden meydana gelmişti. Algıç nükleer reaktörün merkezinden 11 m uzakta, kozmik ışınların etkileşimini azaltmak için de yerin 12 m altına yerleştirilmişti. Reaktörden gelen nötrinolar algıç tanklarına girdikten sonra, bazıları sudaki protonla etkileşime girerek düşük enerjili nötron ve pozitron oluşturacaktır, $\bar{\nu} + p \rightarrow n + e^+$. Nötron, bir kadmiyum çekirdeği tarafından yakalanınca uyarılan kadmiyum çekirdeği bir üst kütleli kadmiyum izotopu ve bir fotona bozunur, $n + {}^{113}Cd \rightarrow {}^{114}Cd^* \rightarrow {}^{114}Cd + \gamma$. Pozitron ise bir elektron ile karşılaştığı zaman, ikisinin yok olmasıyla birbirine ters yönde ve eşit enerjili iki foton meydana getirir, $e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$. Bu fotonlar sıvı pırladağa bakan fotoçoğaltıcı tüpler tarafından kaydedilecektir. Deneyde beklenen, e^+e^- yok olmasından ortaya çıkan fotonlar ile nötronun yakalanmasından çıkan fotonun 15 mikrosaniye zaman aralığında bulunmasıdır. Deney süresince saatte iki yada üç nötrino etkileşimi gözlemlenildi. Nötrinonun (daha doğrusu karşıt nötrinonun) etki kesitini $6 \times 10^{-44} \text{ cm}^2$ olarak hesaplamış, $6.3 \times 10^{-44} \text{ cm}^2$ değerini ölçmüşlerdir. Nature dergisinde yayınladıkları makalelerinde[15] ayrıca R. Davis'in nükleer reaktörlerde yapmış olduğu çalışmalara atıfta bulunarak, nötrino ve karşıt nötrinonun birbirinden farklı olduğunu, nükleer reaktörlerde gerçekleşen fizyon tepkimelerinden sadece karşıt nötrinoların yayındığını altını çizdiler. 14 Haziran 1956'da F. Reines ve C. Cowan, W. Pauli'ye bir telgraf çekerek nükleer reaktörlerde gerçekleşen fizyon tepkimeleri sonucunda çıkan nötrinoların, protonun tersinir beta bozunumu tepkimesiyle gözlemlediklerini haber verdiler. Böylece uzun zamandır imkansız gibi görünen etrafta hayalet gibi dolanan nötrino parçacığının deneysel olarak gözlenmesi ilk defa gerçekleştirilmiş ve varlığı ispatlanmış oldu. Bu başarıdan dolayı F. Reines, 1995'te Nobel Fizik ödülüne layık görüldü¹².

6.6 Zayıf kuvvetlerde Parite (sağ-sol) simetrisi çiğneniyor mu?

1950'lerde nötrino deneyleri devam ederken kuramsal anlamda yaşanan gelişmelerin yanı sıra çok önemli sorunlar da ortaya çıkmıştır. 1950'lere kadar güçlü, elektromanyetik ve zayıf etkileşimlerinde "Parite simetrisi (bakışımı)" yani "uzayda sağ-sol bakışımı" altında değişmez olduğu varsayıyordu. Tsung Dao Lee ve Chen Ning Yang, $\tau - \theta$

¹²Cowan hayatta olmadığı için Nobel Fizik ödülünü alamamıştır.

problemi ¹³ üzerinde düşünürken, bu mezonların bozunumlarının beta bozunumu gibi zayıf etkileşime maruz kaldığı gerçeğinden yola çıkarak, o zamana kadar gerçekleştirilmiş bütün beta bozunum deneylerini incelediler. Yaptıkları incelemeler sonucunda zayıf etkileşimlerde paritenin korunduğuna ilişkin bir kanıt bulamamaları sonucunda büyük bir şaşkınlık yaşayarak, Nisan 1956'da deneysel testler yapılmasını önermişler[16]. Önerdikleri testlerden biri kutuplanmış ⁶⁰Co çekirdeğinin bozunumundan yayımlanan beta parçacıkların (elektronların) uzaysal dağılımının, bir diğeri ise pion parçacığının durgun sistemde müon parçacığına (denklem 8), müonun da elektrona bozunum (denklem 9) süreçleri kullanılarak müon ve elektronun açılal dağılımının incelenmesidir. Chien-Shiung Wu ve ekibi 1957'de radyoaktif ⁶⁰Co çekirdeğinde beta bozunumunu, ⁶⁰Co → ⁶⁰Ni* + e⁻ + $\bar{\nu}$, çalışarak paritenin zayıf etkileşimlerde çığnendiğini ispatlamıştır[17]¹⁴. C. S. Wu deneyinde radyoaktif kobalt çekirdeğinden yayılan elektronlar, kobalt çekirdeğinin doğal mıknatıslanmasına göre yalnızca bir yönü tercih ediyordu. Oysa parite yani sağ-sol simetrisi olsaydı, elektronlar her iki yönde de aynı oranda yayılacaktı. C. S. Wu'nun deneysel olarak kanıtladığı bu olgu, en azından zayıf etkileşimlerde paritenin korunumu yasasının geçersizliğini ortaya koyduğu gibi nötrino kuramına yeni bir yorum getirerek parçacık fiziğinde bir dönüm noktası olmuştur. C. S. Wu ve ekibinin elde ettiği sonuçlardan haberdar olan Leon Lederman, öğrencileri Richard Garwin ve Marcel Weinrich ile birlikte pionun müona ve müonun elektrona bozunum süreçlerinde paritenin korunumunu sınadılar. Elde ettikleri sonuçlarla C. S. Wu ve ekibinin sonuçlarını teyit ettiler[18]. T. D. Lee ve C. N. Yang, zayıf etkileşimlerde paritenin korunmadığını ortaya koyan çalışmalarından dolayı bir yıl sonra, 1957'de, Nobel Fizik ödülüyle onurlandırıldılar.

Beta bozunumunun dinamiğini açıklamak için geliştirilen kuramlarda, denklem 5 ve 6 parite korunumu geçerliydi. Paritenin ihlalini gözönünde bulundurarak kuramın tekrar elden geçirilmesi gerekiyordu. 1957'de T. D. Lee & C. N. Yang, Lev Landau ve Abdus Salam¹⁵ birbirlerinden bağımsız olarak yapmış oldukları çalışmalarda “iki bileşenli nötrino kuramı (two component neutrino theory)”¹⁶’nı önerdiler[21]¹⁶. Bu kuramın iki önemli sonucu vardır: (1) nötrinolar kütsesiz, (2) nötrinolar sol-elli ve karşıt nötrinolar sağ-elli olmalıdır¹⁷. İki bileşenli nötrino kuramında parite korunumu ihlal ediyordu. Kısaca açıklayacak olursak; üç boyutlu uzayda momentum vektörünün yansıması alındığı takdirde momentum vektöre tersinir fakat spin vektörü değişmez kalır. Sistemin yansıması ilk halinden farklı olur, böylece parite korunumu ihlal edilir.

Maurice Goldhaber, Lee Grodzins ve Andrew W. Sunyar'ın 1957'de tasarlamış oldukları deney düzeninde, Şekil-38, nötrininin olası davranışına yanıt aranmıştır[22]. Deneyde spini 0, paritesi -1 olan ^{152m}Eu çekirdeği elektron yakaladığı zaman spini 1, paritesi -1 olan ¹⁵²Sm* çekirdeği ve nötrinoya bozunur, ^{152m}Eu + e⁻ → ¹⁵²Sm* + ν . Uyarılmış durumda olan ¹⁵²Sm* temel enerji düzeyine geçerken 960 keV enerjili bir foton yayar, ¹⁵²Sm* → ¹⁵²Sm + γ . Yayılan fotonun polarizasyonu ölçüldüğü zaman dolaylı olarak nötrininin da sağ veya sol-elli olduğu (helisitesi) belirlenmiş olur.

Deney sonuçları iki bileşenli nötrino kuramının doğruluğunu kanıtlamış, nötrinoların sol-elli ve negatif helisiteye sahip olduğunu göstermiştir. A. Salam nötrininin bu davranışını “Nötrininin ayna yansıması alınrsa hiç birşey göremezsiniz” sözüyle dile getirmiştir. Bu da bize nötrininin “vampir” özelliğini gösteriyor.

Beta bozunumunda paritenin ihlali, nötrininin sol elli olması ve elde edilen birçok deneysel sonuç, beta bozunum hamiltoniyeninde V-A karışımın baskın olacağını gösteriyordu. 1958 yılında R. P. Feynman&M. Gell-Mann, E. C.

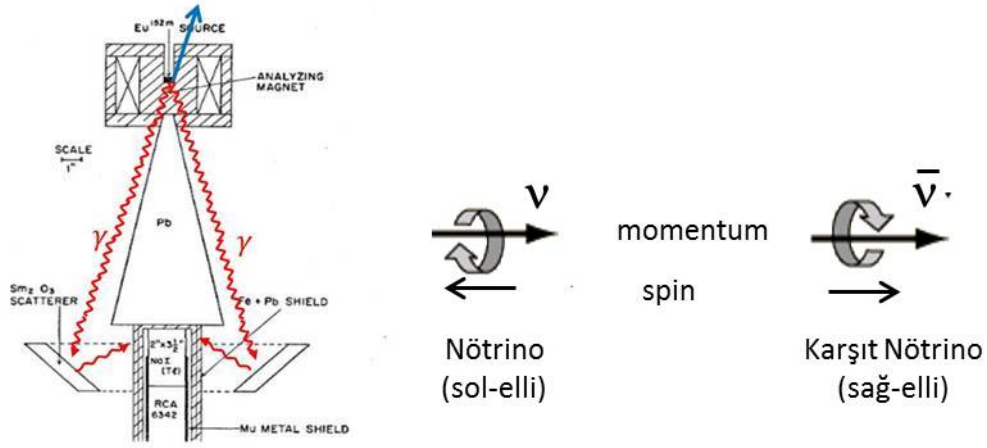
¹³ $\tau - \theta$ probleminden kısaca bahsedecek olursak; π parçacığının paritesi -1 olduğundan, $\tau^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$ bozunumunun paritesi -1, $\theta^+ \rightarrow \pi^0 \pi^+$ paritesi +1 olarak karşımıza çıkar. Her iki parçacığın paritesi dışında kütsesi, yaşam süresi gibi özellikleri aynıydı. Dönemin en önemli sorunlarından biri bu iki parçacık (τ, θ) tek bir parçacık mıdır? Paritenin beta bozunumunda ihlali ispatlandığında bu parçacık “Kaon” olarak adlandırılmaya başlanmıştır.

¹⁴Fizik dünyası paritenin ihlal edileceği fikrine hazır değildi. Öyle ki; W. Pauli, Viktor Frederick Weisskopf'a gönderdiği mektupta C. S. Wu'nun deney sonucunda herhangi bir asimetriyle karşılaşmayacağına ve paritenin korunumlu olduğuna dair büyük miktarda paraya iddiaya girmeye niyetlendiğini dile getirmiştir. Deney sonucu ilan edildikten sonra gönderdiği bir diğer mektupta, yaşamış olduğu şoku ve iddiaya girmemiş olmanın mutluluğundan bahsetmiştir[19]. Richard Feynman da 50\$'a girmiş olduğu bahsi kaybetmiştir[20].

¹⁵İngiltere'nin Cavendish laboratuvarında çalışan A. Salam, Eylül 1956'da Seattle Uluslararası Kuramsal Fizik Konferansına katılmış, burada C. N. Yang'ın parite üzerine verdiği dersi takip etmişti. Dönüş yolunda elektron için yazılan Dirac denklemini kütsesiz parçacıklar için yazıldığında paritenin yani sağ sol simetrisinin ihlal edildiğini gördü. Yaptığı hesaplamaları ve sonuçlarını R. Peierls'e göstermiş. R. Peierls zayıf etkileşimlerde sağ sol simetrisinin ihlal edildiğine hiçbir şekilde inanmadığını ve bu tür konulara hiç bulaşmayacağını söylemiş. Bunun üzerine A. Salam, W. Pauli'ye mektup göndererek onun da fikrini duymak istemiş. W. Pauli'de paritenin korunumlu olduğunu düşündüğünden daha iyi bir konu üzerinde çalışmasını salık vermiştir. C. S. Wu'nun deneysel sonuçları açıklandıktan sonra 01 Ocak 1957'de W. Pauli, A. Salam'a bir özür mektubu göndermiştir.

¹⁶Bunu açıklamak için m_ν kütsesiz nötrino için Dirac denklemini yazacak olursak $i\gamma^\alpha \delta_\alpha \nu(x) - m_\nu \nu(x) = 0$, burada nötrino alanını sağ ve sol bileşenler cinsinden yazarsak, $\nu(x) = \nu_L(x) + \nu_R(x)$, buradan iki bağıl denklem elde edilir: $i\gamma^\alpha \delta_\alpha \nu_L(x) - m_\nu \nu_L(x) = 0$ ve $i\gamma^\alpha \delta_\alpha \nu_R(x) - m_\nu \nu_R(x) = 0$ elde edilir. Nötrino kütsesiz ise ($m_\nu = 0$) nötrino alanı ya sol elli yada sağ elli olacaktır: $\nu_L(x) = (\frac{1-\gamma_5}{2})\nu(x)$, $\nu_R(x) = (\frac{1+\gamma_5}{2})\nu(x)$.

¹⁷Spin yönü ile parçacığın yönün aynı olduğu duruma sağ-ellilik, zıt yönde olma durumuna ise sol-ellilik denir.



Şekil 38: Sol: Nötrinonun helisitesini ölçmek için kullanılan deney düzeneği. Sağ: Nötrinolar sol-elli iken karşıt nötrinolar sağ-ellidir. Burada sağ-sol elin şematik olarak gösterilmiştir.

G. Sudarhan ve J. Schwinger birbirlerinden bağımsız olarak Fermi kuramını ele alarak, denklem-6'nin V-A formunu öneren zayıf etkileşimlerde V-A kuramını önerdiler[27]. Genelleştirilmiş halini yazarsak:

$$H_{V-A} = \frac{G_F}{\sqrt{2}} J^\alpha J_\alpha^\dagger + h.c. \quad (10)$$

şeklinde gösterilir, burada $J^\alpha = J_{had}^\alpha + J_{lep}^\alpha$ olarak tanımlanırken $J_{lep}^\alpha = \bar{e}(x)\gamma^\alpha(1 - \gamma_5)\nu(x) + \bar{\mu}(x)\gamma^\alpha(1 - \gamma_5)\nu(x)$ ve $J_{had}^\alpha = \bar{p}(x)\gamma^\alpha(g_v + g_a\gamma_5)n(x)$ şeklinde ifade edilir. V-A kuramı, leptonik, yarı-leptonik ve leptonik olmayan zayıf etkileşimleri de kapsayan tüm deney sonuçlarını açıklama ve ayrıntılı bir biçimde inceleme şansı vermesinin yanında daha önce gözlemlenmemiş olan $\nu + e^- \rightarrow \nu + e^-$ ve $e^- + e^+ \rightarrow \nu + \bar{\nu}$ türde yüksüz akım etkileşimlerini öngörmüştür.

6.7 Nötrino sayısı ve hızlandırıcılarda nötrinoların üretilmesi:

1957 yılında fizik dünyasında yaşanan şaşkınlıkların yanısıra nötrino parçacığının gizemi de giderek artmaktaydı. Aynı yıl içinde K. Nishijima ve Schwinger birbirlerinden bağımsız olarak elektron ve müonların kuantum sayılarının birbirinden farklı olması gerektiğini düşündüler. B. Pontecorvo, 1959 yılında bu görüşlerini bir adım ileriye taşıyarak, her iki parçacığın yanısıra nötrinoların da lepton numaralarının farklı olması gerektiğini dile getirmiştir. Buna göre; e^- ve elektron-nötrino (ν_e)'nun lepton numaraları, $L_e = 1$ iken, e^+ ve karşıt elektron-nötrino ($\bar{\nu}_e$)'nun ise $L_e = -1$, μ^- ve müon nötrino (ν_μ)'nun $L_\mu = 1$ iken, μ^+ ve karşıt müon nötrino ($\bar{\nu}_\mu$)'nun ise $L_\mu = -1$ olarak tanımlamıştır. Bu koşullar altında denklem-7, 8 ve 9'de gösterilen bozunumlar şu şekilde yeniden yazılabilir:

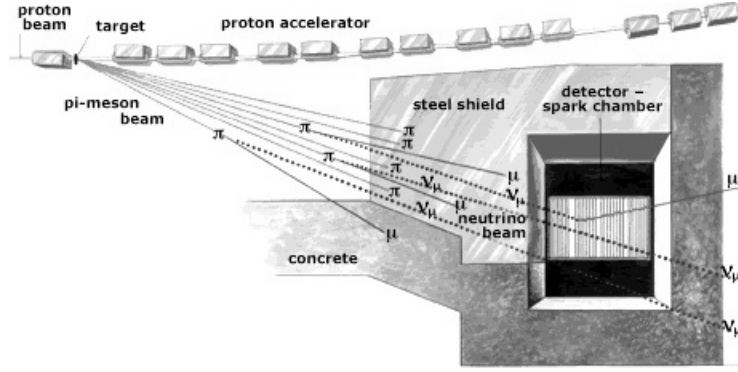
$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e \quad (11)$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (12)$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e \quad (13)$$

Bu noktada cevaplanması gereken en can alıcı soru, denklem-11 ve 12'de açığa çıkan nötrinolar aynı parçacıklar mıdır, Referans-[24]? Sorunun yanıtını bulmak için B. Pontecorvo'nun önermiş olduğu sınama yöntemi kısaca şu şekildedir:

1. Pionun müona bozunumundan elde edilen nötrinolar, denklem-12, yeterince kütleli bir nötrino algıcına yönlendirilir. Algıçta etkileşime giren nötrinolardan ya elektron ya da müon oluşacak: $\bar{\nu}_\mu + p \rightarrow \mu^+ + n$ veya $\bar{\nu}_\mu + p \rightarrow e^+ + n$.
2. Eşit sayıda elektron ve müon gözlemlenmesi durumunda sadece tek tip nötrino vardır, $\nu_\mu = \nu_e$.
3. Sadece müon oluşuyorsa o zaman her iki nötrino birbirinden farklıdır, $\nu_\mu \neq \nu_e$.



Şekil 39: İki nötrino deneyi.

O dönemde parçacık hızlandırıcılarından elektron, proton ve nötron demetleri oluşturulabiliyordu. B. Pontecorvo'nun önerdiği yöntemle benzer bir yöntemi M. Schwartz 1960'ta [25] düşünüp yapmış olduğu hesaplamalarda; yüksek enerjili protonları metal bir hedefe bombardıman ederek oluşacak pion parçacıklarının belli bir yönde (ortalama 50 m) hareket edeceği, bunların bozunumundan da oluşacak nötrinoların pionun yönü doğrultusunda (yaklaşık 10° açıyla) gideceğini, hedeften 10 m uzaklığa, 10 m kalınlığında koruyucu duvar bulundurulması durumunda nötrino demetinin daha fazla dağılmasının engelleneyeceği (bu mesafede pionların %10'u bozunacaktır) ve müonların söğrülacağını göstermiştir. H. A. Bethe ve R. Peierls, 2.3 MeV enerjili nötrinoların etki kesitini $\sigma < 10^{-44} \text{cm}^2$ olarak hesapladıklarından bahsetmişlerdir. Sin-itiro Tomonaga ve Hidehiko Tamaki etki kesitinin nötrinonun enerjisiyle yükseldiğini göstermişlerdir, birkaç yüz MeV'lik nötrinoların etki kesiti $\sigma < 10^{-38} \text{cm}^2$ civarındadır. M. Schwartz 10 ton ağırlığındaki bir algıçta saatte bir nötrino etkileşimi gözlemleyebilmek için saniyede yaklaşık 5×10^{12} protonun hızlandırılması gerektiği sonucuna ulaştı.

M. Schwartz, Leon Lederman ve Jack Steinberger ile birlikte 1962'de BNL'de ilk defa "yüksek enerji nötrino deneyi" projesini hayata geçirmiştir[26]. Yaklaşık 10 ton ağırlığında olan algıç için yüksek potansiyel farkı uygulanmış 9 adet Alüminyum plakının arasına Neon gazı doldurularak elde edilen "Spark Chamber" (Kıvılcım Odası) teknolojisi kullanılmıştır. Nötrinoların etkileşimi sonucu oluşan yüklü parçacıklar Neon gazını iyonize ederek arkasında iyonlaşma izi bırakır. İyonlaşma yolu boyunca meydana gelen kıvılcımlar izin görünmesine olanak sağlar ve elektronik olarak algımarak parçacığın koordinatları kaydedilir. BNL'de inşası tamamlanan Alternate Gradient Synchrotron (AGS) kullanılarak, Şekil39, 15 GeV enerjili 3.48×10^{17} protonun Berilyum hedefine bombardıman edilmesi sonucunda pion ve kaon parçacıklarının bozunumundan yayılan nötrinoların etkileşimlerinden toplam 56 adet müona ait izler gözlemlenirken herhangi bir elektron görülmemiştir. Böylece elektronlarla birlikte oluşan nötrinolarla, müonlarla birlikte oluşan nötrinoların birbirinden farklı birer parçacık olduğu deneysel olarak kanıtlanmış oldu. M. Schwartz, L. Lederman ve J. Steinberger bu önemli başarılarından ötürü 1988'de Nobel Fizik ödülüyle ödüllendirildiler. Bu çalışmayla birlikte hızlandırıcılarda yüksek enerji nötrino fiziğinin temelleri atılmıştır.

6.8 Elektron ve müon dışında daha ağır bir lepton var mı?

Elektron ve müon dışında daha ağır bir leptonun varolmasını engelleyen herhangi kuramsal bir neden yoktu, bu yüzden deneysel açıdan ilgi çekici bir problem. 1960'ların ortalarında İtalya'nın Frascati araştırma laboratuvarında bulunan ADONE e-e+ çarpıştırıcısında yapılan deneyler sonucunda, ağır leptonların olası kütlesi için 1 GeV'lik bir alt limit verilmiştir. 1973'te Stanford'da SLAC laboratuvarında bulunan SPEAR e-e+ çarpıştırıcısında 5 GeV'lik enerji düzeyine ulaşılabildiğinden, ağır leptonları arama yüksek enerji aralığında arama şansı vermiştir. Martin Perl ve grubu bu enerji aralığında yeni parçacıklar, özellikle ağır lepton arama amacına yönelik çalışmalara başladılar[34]. Daha önceki deneysel sonuçlar, ağır lepton varsa kütlesinin 1 GeV'nin üzerinde olması gerektiğini gösteriyordu. M. Perl, ağır leptonun müon veya elektrona ayrıca lepton korunumu gereği iki nötrinoya bozunacağını öngörüyordu¹⁸. Elektron ve pozitron çarpışmasında ağır leptonun çiftler halinde oluşacağını düşünerek, $e^+ + e^- \rightarrow \tau^+ + \tau^-$, ilk olarak $e\mu$ olaylarını incelediler. Burada beklenen bir ağır lepton müona (elektrona) bozunurken diğerinin pozitrona (karşıt müon) bozunmasıdır: $\tau^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_\tau$ ($\tau^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\tau$) ve $\tau^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\tau + \nu_e$ ($\tau^+ \rightarrow \mu^+ + \bar{\nu}_\tau + \nu_\mu$). Deney sonucunda toplamda 24 tane $e\mu$ olayı gözlemlenmiştir. Yapılan kinematik hesaplamalar sonucunda yeni leptonun kütlesi 1780 MeV olarak ölçülmüştür. 1975 yılında elde edilen bu sonuç, lepton ailesine yeni bir

¹⁸M. Perl, Rothe ve Wolsky 1968'de düşük kütle sınırında bu yeni leptonun, $L \rightarrow e\nu_e\nu_L$, $L \rightarrow \mu\nu_\mu\nu_L$ ve $L \rightarrow \pi\nu_L$ kanallarına bozunacağını tartıştıkları makalelerinden esinlenmiştir.

üye kazandırmıştır. Yeni leptona tau lepton adı verilmiştir. Daha sonraki deneylerde başka bozunum kanalları bulunmuştur. Tau leptonun ortalama ömrünü 2.90×10^{-13} s olarak ölçülmüştür. M. Perl bu başarısından dolayı 1995 yılında Nobel fizik ödülünü kazanmıştır.

6.9 Elektron ve müona birer nötrino eşlik ediyorsa tau leptonuna neden eşlik etmesin?

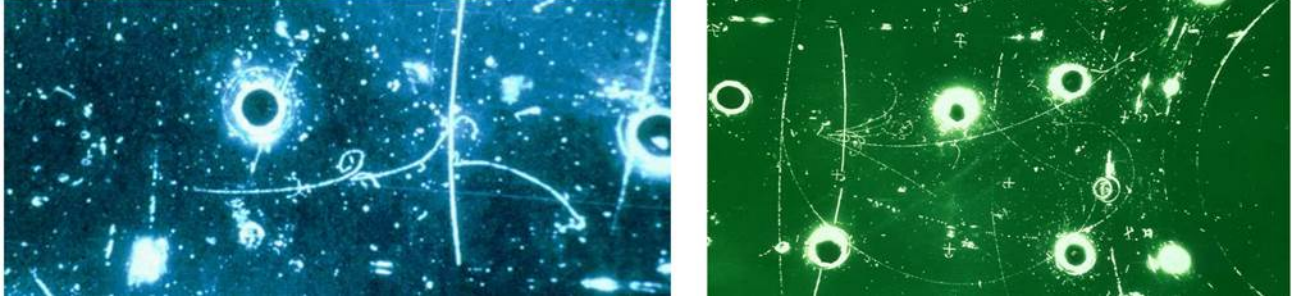
Fizikçiler üçüncü nötrinin varlığından hiç şüpheye kapılmadılar. Tau parçacığı leptonlar arasında en kısa ömürlü ve kararsız olanı olduğu için tau nötrinoyu gözlemlemek o kadar kolay değildir. Yüksek enerji fiziğinde gerçekleştirilen deneyler, parçacık dünyasına ait bilgilerimizi arttırmakla birlikte deneysel yöntem ve analiz tekniklerini de geliştirmiştir. 1990'ların sonuna doğru DONUT grubu bir deney tasarlayarak tau nötrino izini sürdürdü[35]. 800 GeV enerjili protonlar tungsten bir hedefe bombardıman edildiği zaman pion ve kaonun yanısıra kısa ömürlü charm mezonları oluşur. Bu charm mezonlarından D_s mezonu tau leptonuna ve tau nötrinoya bozunur. Nötrino demetinde tau nötrino dışında elektron nötrino ve müon nötrino bulunmaktadır. Emulsiyon teknolojisi kullanılarak tasarlanmış olan nötrino detektörüne yönlendirilmiş olan tau nötrininin yüklü akım etkileşimi, $\nu_\tau(\bar{\nu}_\tau) + N \rightarrow \tau^-(\tau^+) + X$, sonucunda oluşacak tau leptonun gözlemlenmesiyle varlığı ispatlanır. 1997'de gerçekleştirilen veri almında 3.54×10^{17} proton hedefe bombardıman edilmiş ve 2000 yılında, tau leptonun keşfinden 25 yıl sonra, dört tau nötrino etkileşimi görülmüştür. Tamamlanan analiz sonucunda 578 nötrino etkileşimi gözlemlenmiş, bunların 9 tanesi tau nötrino etkileşimi olarak tanımlanmıştır.

6.10 Standard modelin oluşturulması:

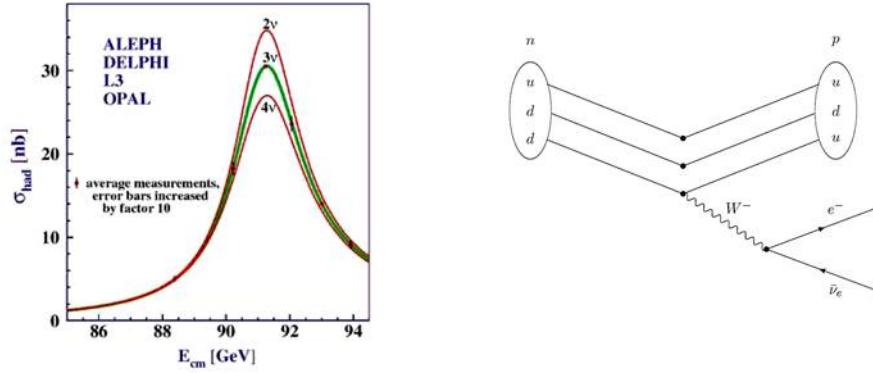
Fermi'nin 1934'te önermiş olduğu kuram felsefesinde (tek bir noktada dört fermiyon etkileşimi) hiçbir değişiklik olmadan Gamov ve Teller'in önerdiği bazı değişiklikler ve en son olarak V-A kuramıyla son halini almıştır. Kuram düşük enerjili zayıf etkileşimleri sorunsuz bir şekilde açıklarken, yüksek enerjilerde bir takım problemlerle karşı karşıya kalmıştır. Problemlere kısaca değinecek olursak, kuram nötrino etkileşiminin etki kesiti nötrininin enerjisiyle doğru orantılı olarak arttığını ileri sürer ki bu birimsellik ilkesini (Unitarity Principle) ihlal eder. Yaklaşık 300 GeV enerji düzeyinde etki kesiti birimsellik ilkesince sınırlandırılan maksimum değer üzerine çıkar. Yüksek enerjilerdeki etki kesiti hesapları kozmik ışın deney sonuçlarıyla gelişmektedir. Fermi'nin beta bozunum kuramı renormalize edilebilir değildir. Herhangi bir nedenle renormalize edilemeyen kuramlarda, fiziksel olasılık genlikleri hesaplamak olası değildir, sonuç olarak bu kuramlarla laboratuvarlarda ölçülebilecek sayılar hesaplanamaz. Renormalizasyonu yapılabilen kuantum elektrodinamiğine benzer bir kuram oluşturmak için büyük çabalar harcanmıştır.

C. N. Yang ve R. Mills 1954'te kütleli parçacıkların etkileşimi üzerine bir kuram (Abelyen olmayan ayar kuramı) geliştirdiler[28]. Bu kuram *foton*, W^- ve W^+ parçacıkları kütleli olmaları koşuluyla kendi aralarında etkileşime olanak sağlıyordu. Ayar kuramı bu çalışmayla birlikte uygulanabilir tüm olaylarda çalışılmaya başlanmıştır. Birimsellik ilkesine göre kütleli aracı parçacıkların değiş-tokuşunun yer aldığı kuvvetler uzun erimli olmalıdır. Bilinen tek uzun erimli kuvvet, elektromanyetik kuvvet etkileşimleri ve Kuantum Elektrodinamiği tarafından kusursuz bir şekilde açıklanmaktadır. Elektromanyetik etkileşimler spini 1, kütleli, vektörel bir parçacık olan fotonun değiş-tokuşu yoluyla gerçekleşir. Bir benzetim kuracak olursak, zayıf etkileşimler çok daha kısa erimli olduğu için aracı parçacığın ağır, beta bozunumunda çekirdeğin yükü değiştiğinden dolayı yüklü olması beklenir. Yang-Mills kuramı renormalize olduğu gösterilmediği için zayıf etkileşimleri açıklamak için kullanılmıyordu.

1957 yılında Julian Schwinger, "*A theory of a fundamental interactions*", temel etkileşimlerin kuramı adlı makalesinde[27] *foton* ve W^- ve W^+ aracı vektör bozonlarının π^+ , π^- ve π^0 gibi tek bir aileden olabileceğini ileri sürmüştür. Bu yaklaşım sonucunda zayıf ve elektromanyetik etkileşimlerin birleştirilebileceği fikrine ulaşmıştır. Ama aşılması gereken sorunlar vardı: elektromanyetik etkileşimler zayıf etkileşimlerden daha güçlü, uzun erimli ve parite korunumu geçerlidir, oysa ki zayıf etkileşimler kısa erimli olmakla birlikte (10^{-15} cm civarında) parite korunumu da geçerli değildir. Sheldon Lee Glashow 1961'de oluşturmuş olduğu modellemeye ($SU(2) \times U(1)$) kütleli foton elektromanyetik etkileşimde ve kütleli W^- , W^+ ve Z^0 zayıf etkileşimlerde aracı vektör bozonları olarak ele alındığında parite problemi çözüme kavuşmuş ve zayıf etkileşimlerde kısa erimli kılınmıştır[30]. 1964 yılında Abdus Salam ve J.C. Ward birleştirme çabalarında S. L. Glashow'un ayar kuramına benzer bir model geliştirdiler. Geliştirilen tüm kuramlarda aracı vektör bozonlarının kütleleri direkt olarak elde konulmuştur. Bu durum oluşturulan modellerin renormalize olmadığı için matematiksel açıdan tutarsızdır. Aracı vektör bozonlarına kütle kazandıracak yöntem, 1964 yılında Peter Higgs ve Francois Englert ve Robert Brout tarafından bulunmuştur[29]. Bu yöntem "*Brout-Englert-Higgs (BEH) mekanizması*" olarak adlandırılmıştır. Bu mekanizmaya göre her yerde bulunan skaler bir alan, Higgs alanı, var ve parçacıklar bu alanla etkileşebildikleri oranda kütle kazanıyorlar. 1967 yılında Stewen Weinberg[32] ve A. Salam[31] birbirlerinden bağımsız olarak, Glashow'un 1961 yılında zayıf ve elektromanyetik



Şekil 40: Gargamelle deneyinde gözlemlenen yüksüz akım etkileşimlerine iki örnek: (sol) $\bar{\nu}_\mu + e^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu + e^-$ ve (sağ) $\nu_\mu + p(n) \rightarrow \nu_\mu + \text{hadrons}$.



Şekil 41: Sol panel: Z bozonun bozunum genliği, kendisiyle bağlaşımı olan 3 nötrinonun varlığına işaret eder. Sağ panel: Beat bozunumunun kuark yapısında gösterimi.

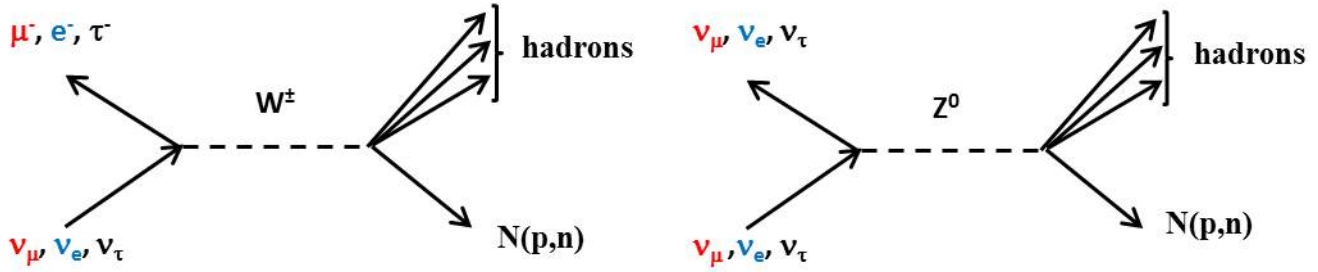
etkileşimlerinin birleştirilmesi için önerdiği kuramı ve Higgs mekanizmasını gözönünde bulundurarak elektrozayıf etkileşim kuramını geliştirdiler.

1973 yılında CERN Proton Synchrotron'da 28 GeV enerjiye hızlandırılan protonların berilyum hedefe çarpıştırılması sonucunda elde edilen nötrino demetinin kullanıldığı, kabarcık odası (Bubble Chamber) algıç teknolojisinin kullanıldığı Gargamelle deneyinde, Şekil40'te ki olaylara benzer nötrinonun yüksüz akım etkileşimleri gözlemlenmiştir[33]. Bu gözlem Glashow-Weinberg-Salam elektrozayıf etkileşim modelinin geçerliliğini ispatlamıştır. 1979 yılında S. L. Glashow, S. Weinberg ve A. Salam Nobel Fizik ödülünü aldılar. 1973 yılında Gerard 't Hooft ve Martin Veltman kuramın renormalize edilebilir olduğunu göstermiş ve elektrozayıf etkileşimlerin Glashow-Weinberg-Salam kuramının, Kuantum Elektrodinamiği kadar iyi çalışan bir kuram olarak görülmeye başlanmıştır. G. 't Hooft ve M. Veltman bu başarılarından dolayı 1999 yılında Nobel fizik ödülünü almıştır.

Zayıf ve elektromagnetik etkileşmelerin birleştirildiği Glashow-Weinberg-Salam modeli olarak bilenen kuramın kuvvetli etkileşmeleri de içerecek şekilde genişletilmesine "*Standart Model*" denir. Standart modelin doğrulanması için yaklaşık protonun kütesinin 100 katı ağırlığında olması beklenen W^+ , W^- ve Z^0 bozonlarının varlığı ispatlanmalıydı. Beklenen kütle değerlerine sahip olarak CERN *SPPS*'te gerçekleştirilen UA1 ve UA2 deneylerinde gözlemlendiler[36]. Gözlemi ilk defa gerçekleştiren deney grubunun lideri Carlo Rubbia ve karşı-proton demetinin oluşturulmasına olanak sağlayan hızlandırıcı fizikçisi Simon van der Meer bu başarılarından dolayı 1984 yılında Nobel Fizik ödülünü paylaştılar.

Elektrozayıf etkileşmelerin Standart Model'ine ilişkin pek çok parametre CERN e^+e^- çarpıştırıcısı LEP'de (Large Electron Positron) yüksek bir duyarlılıkla test edilmiştir. Nötrinoların Z bozonuyla bağlaşmaları, Z bozonun görünmez bozunum (Z bozonun dedekte edilemeyen parçacıklara bozunumu) genişliğinin ölçülmesi ile gerçekleştirilmiştir. Bu sonuçlar ışığında Z bozonuna bağlaşabilen toplam nötrino sayısı $N_\nu = 2.984 \pm 0.008$ olarak bulunmuştur, bakınız Şekil 6.10, sol yan. Standart model'de nötrinolar yüksüz, kütleli ve spini 1/2 fermiyonlar olarak kabul tanımlanır. Standard modelin ayrıntılı tartışılmasını daha önceki bölümlerde bulabilirsiniz. Şekil'nın sağ panelinde beta bozunumu kuark yapısında gösterilmektedir: nötronun içinde bulunan aşağı (down) kuark zayıf etkileşim yoluyla yukarı (up) kuarka geçerken elektron ve elektron nötrino açığa çıkar.

Standart modelin son eksik parçası olan Higgs bozonun kütesi kuramsal olarak öngörülemediğinden, parçacık



Şekil 42: Nötrino yüklü ve yüksüz akım etkileşimlerinin Feynman şeması.

hızlandırıcılarının ulaşabildiği enerji seviyelerinde sınırlı kütle aralığında aranmış ama uzun zaman bulunamamıştır. 1989-2000 yılları arasında, CERN’de 100-200 GeV enerji aralığında çalışmış olan elektron-pozitron çarpıştırıcısında (LEP) gerçekleştirilen deneylerde, Higgs bozonu kütle değerinin alt sınırı $114 \text{ GeV}/c^2$ olarak elde edilmiştir. Daha sonra LEP yerini Higgs bozonu daha yüksek kütle değerlerinde aranmasına fırsat tanımak için Büyük Hadron Çarpıştırıcısına (LHC) devretmiştir. 2008’de tamamlanan LHC’de 7 TeV enerjide proton-proton çarpışmaları gerçekleştirilmiş, Temmuz 2012’de Higgs bozonu $125 \text{ GeV}/c^2$ kütle değerinde ATLAS ve CMS deneylerinde gözlemlenmiştir[37]. Bu önemli gözlem üzerine P. Higgs ve F. Englert, 2013’te Nobel Fizik ödülüyle onurlandırıldılar.

Kendi içindeki tutarlılığı, renormalize edilebilirliği ve de deneysel sonuçlardaki başarılarına karşın, Standart Model özellikle nötrinoların anlaşılmasında yetersiz kalmaktadır. Gizemli parçacık nötrinin bize anlatmak istediği daha çok şey var. Peki bize daha başka ne tür bilgiler getirebilir, üretim kaynakları nedir? Bilimsel araştırmalarda nötrinoyu bu kadar gizemli ve cazip kılan nedir? İlerleyen bölümlerde bu sorulara cevap vermeye çalışacağız.

6.11 Nötrinoların kaynağı nedir?

6.11.1 Büyük patlama

George Gamow 1940’lı yıllarda büyük patlamadan arta kalan belirli oranda bir ışımanın evrenin her noktasında eşit olarak var olması gerektiğini ortaya attı[38]. 1965 yılında Arno Penzias ve Robert Wilson, Bell laboratuvarında uzaydan gelen radyo dalgaları üzerinde ölçümler yaparken rastlantısal olarak bir kozmik ardalın ışıması keşfettiler. Bu keşifle evreni dolduran, her yönden dünya üzerine gelen, bilinen kaynak türleri ile açıklanamayan bir elektromanyetik dalga yayılımının varlığını kanıtladılar. Gözlemler bu ışımanın 2.725 Kelvin (yaklaşık $270 \text{ }^\circ\text{C}$) sıcaklığında, 1.9 mm dalga boyuna ulaşan bir kara cisim ışıması olduğunu göstermiştir. Bu dalga boyundaki elektromanyetik ışıma yelpazede “mikrodalga” bölgesine karşılık geldiğinden bu keşfe “kozmetik mikrodalga ardalın ışıması” adı verilmiştir. Bu keşif büyük patlama kuramını doğrulayan gözlemlerden biridir. A. Penzias ve R. Wilson bu başarılarından dolayı 1978 yılında Nobel Fizik Ödülünü aldılar. Bugüne kadar yapılan deneysel gözlemler ve kuramsal çalışmalar büyük patlamadan günümüze kadar geçen zamanın yani evrenimizin yaşının 13.7 milyar olduğunu göstermiştir.

Fotonların yanı sıra nötrinoların da büyük patlama anında üretildikleri ve kozmik ardalın ışımasının özelliklerine benzer özellikler gösterdiği nükleosentezin sonuçlarından dolayı olarak elde edilmiştir. Kozmolojik hesaplamalar, evrenin her santimetreküpünde büyük patlamadan arta kalan bu relic (kalıt) nötrinolarından 330 tane bulunduğunu ileri sürmektedir. Kalıt nötrinoların ışıma sıcaklığı 1.945 Kelvin iken enerjileri $1.697 \times 10^{-4} \text{ eV}$ ve dalga boyları 2 mm civarındadır. Kalıt nötrinoların enerjisi yüklü akım etkileşiminin eşik enerjisinin katbekat altında olduğundan ve bu enerji düzeyinde daha çok göreceli olmayan parçacıklar gibi davranacağından gözlemlenebilmeleri için yeni deneysel tekniklere ihtiyaç vardır. Kalıt nötrinoların doğrudan saptanması şimdiki teknolojik imkanlarla son derece güç olmakla birlikte varlıkları konusunda herkes hemfikirdir.

6.11.2 Süpernovalar

Yıldızlar yaşamları süresince sıcaklığa bağlı olarak termonükleer reaksiyonlarla hidrojenen başlayarak, helyum, karbon, azot, oksijen ve demir gibi daha ağır elementlere dönüşerek çevrelerine ısı, ışık ve nötrinolar yayarlar. Yıldızın kararlı bir yapıya sahip olmasında termonükleer reaksiyonların önemi büyüktür. Nükleer yakıt tükendiğinde, kütlelerine bağlı olarak yıldız kaçınılmaz son olan yıldız evriminin son basamağına doğru yol alırlar. Yıldızın merkezindeki sıcaklık ve basınç ne olursa olsun termonükleer reaksiyonlar demir aşamasına ulaştığında devam etmez. Bu nedenle yıldız, yaşamının sonuna doğru büyük kütleli, demirce zengin bir çekirdek ve çevresinde çeşitli tepkimelerin devam ettiği katmanlardan oluşur. Demir çekirdeğin kütlesi 1.5 Güneş kütlesine ulaştığında oluşan iç



Şekil 43: Büyük patlama.



Şekil 44: SN1987A süpernova, (sol panel) Şubat 1984 patlamadan önceki görüntü durumu, (orta panel) 8 Mart 1987 patlama esnasındaki görüntü, (sağ panel) patlamadan sonraki durum.

basınç sonucunda elektronlar demir atomunu çekirdeklerinin içine itilir. Protonlar elektronları yakalayıp, $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$, nötronlara ve nötrinolarla dönüşürler. Yıldız şiddetli bir şekilde çökerken çekirdekten yayılan şok dalgası ve nötrinolar dışarı doğru yayılırken yıldız tümüyle parçalanır. Yıldızın deneyimlediği bu patlamaya süpernova adı verilir. Patlama sonucunda demir, oksijen gibi ağır elementler de uzaya yayılır.

Yakov Borisovich Zeldovich ve Oktay Hüseyin Guseinov 1965'te [41] yıldızların yerçekimsel çöküşü sonucunda $\sim 10^{53}$ erg civarındaki enerjinin %99'u kısa bir zamanda çok güçlü nötrinolar biçiminde yayılacağını göstermiş ve nötrino algıçlarının olası yıldız çöküşlerini gözlemlemesini önermişlerdir.

23 Şubat 1987'de Şekil44de görülen, Dünya'dan yaklaşık 168 bin ışık yılı uzakta Samanyolu galaksimizde Büyük Macellan Bulutu içerisinde Tarantula Nebulasının eteklerinde gerçekleşen süpernova patlaması bilim tarihinde çok önemli bir yer tutmaktadır¹⁹. Bu süpernovayı çok önemli kılan durum patlamanın ışığı Dünya'ya ulaşmadan iki veya üç saat önce 24 nötrino parçacığının şans eseri Dünya'nın farklı yerlerinde bulunan nötrino algıçları sayesinde gözlemlenmesiydi. 13 saniyelik bir süre içerisinde Japonya'daki Kamiokande deneyi 11 nötrino etkileşimi[42] kaydederken, Amerika'daki IMB deneyi 8[43], Rusya'daki Baksan deneyi de 5 [44] etkileşim gözlemlemiştir. Şubat'ta gerçekleşen patlama, Dünya üzerinde Güney Yarımküreden rahatlıkla çıplak gözle görülebilir bir ışığa gücüne ulaşmış ve Mayıs ayı sonuna kadar ışığa gücü en üst düzeye ulaşmıştır. Kamiokande deneyini yürüten M. Koshiba süpernova nötrinolarının keşfinden dolayı 2002 yılında Nobel Fizik Ödülüne layık görülmüştür. Bu keşif nötrino astronomisinin başlangıcı olarak kabul edilir.

Çöken yıldızın merkezindeki yoğunluk çok yüksek olduğundan, ışık hemen merkezden kaçamıyor, bu en azından birkaç saat alıyor. Ama çökme esnasında ortaya çıkan nötrinolar, maddeyle çok az etkileştiklerinden dolayı hemen süpernovanın merkezinden kaçabiliyorlar, böylece patlamanın ışığından önce dünyada gözlemlenebiliyor. Süpernovalardan gelen nötrino ve ışığın zaman farkı patlamanın mekanizması hakkında daha fazla bilgi edinmemizi sağlarken,

¹⁹ Bu süpernova SN1987a olarak adlandırılmıştır.

nötrinoların hızı ve kütlesi hakkında da cevaplar sunar.

6.11.3 Güneş

Dünyadan yaklaşık 149.5 milyon km uzaklıkta, 1.39 milyon km çapında olan Güneş'in kütlesinin yaklaşık %73.5'i hidrojen, %24'ü helyum ve geriye kalan %1.5'i de karbon, azot oksijen gibi elementlerden oluşur. H. A. Bethe 1939 yılında, güneş ve yıldızlardan yayılan enerjinin nükleer füzyondan (çekirdek kaynaşması) kaynaklandığını ortaya koymuştur [45]. Bu çalışmasından dolayı 1967 Nobel Fizik ödülünü almıştır. Füzyon yani çekirdek kaynaşması, iki hafif çekirdeğin uygun koşullarda birleşerek daha ağır ve kararlı bir çekirdeğin oluşmasını sağlayan ekzotermik bir tepkimedir. Füzyon tepkimesinden açığa çıkan enerji miktarı füzyon tepkimesinden açığa çıkan enerjiden daha fazladır. Güneşte meydana gelen temel füzyon tepkimeleri *pp* zinciri ve *CNO* döngüsüdür. Güneş'te enerjinin %99'u dört hidrojen (proton) çekirdeğinin helyum çekirdeğine dönüşmesi sonucunda elde edilir:



Denklem 14, 15 ve 16 tepkimelerinin net etkisi



şeklinde ve bu füzyon zincirine “*pp-I*” döngüsü adı verilir. İlk aşamada iki hidrojen çekirdeği (proton) birleşerek döteryum, pozitron ve nötrino oluşur. Açığa çıkan pozitron ortamdaki çekirdeğin elektronlarından biriyle birleşerek gamma ışını yayar. İkinci aşamada döteryum bir hidrojenle birleşerek hafif helyum çekirdeği olan 3_2He oluşturur ve gamma ışınımında bulunur. Bu hafif helyum çekirdeğinden iki tanesi birleşerek, normal helyum çekirdeğini oluşturup ortama iki tane hidrojen çekirdeği salar. Güneşte meydana gelen bu tür füzyon tepkimelerinin %85'i bu şekilde gerçekleşir. Geriye kalan %15'i ise *Be* ve *Li* kanallarıdır:



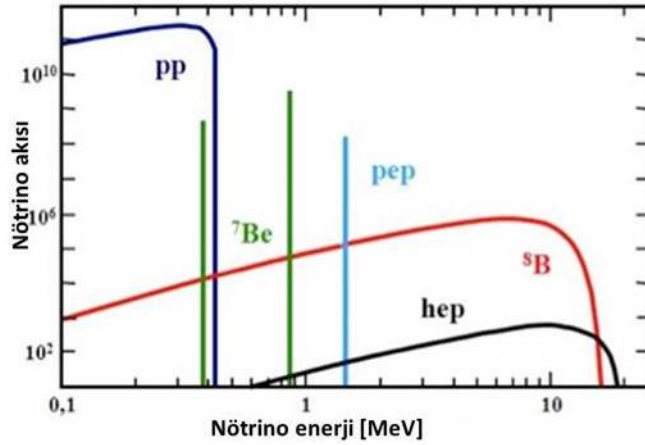
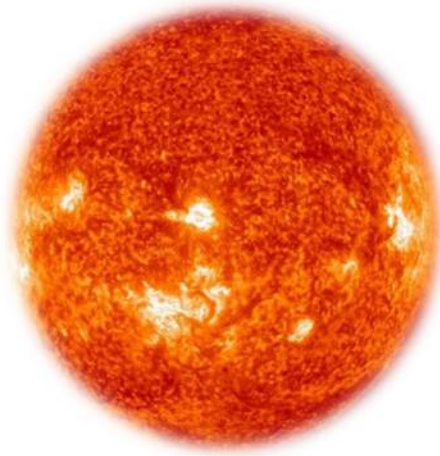
Bu aşamada denklem18'da görüldüğü gibi hafif helyum çekirdeği normal helyum ile birleşerek berilyum çekirdeği oluşturup ve gamma ışınımında bulunur. Berilyum çekirdeği oluştuktan sonra %99.8'lik bir oranda ortamda bulunan çekirdeklerden bir elektron yakalayarak Li çekirdeğine dönüşür ve bir nötrino salar, denklem 19 ve 20'da ki gibi, bu geçiş zinciri “*pp-II*” döngüsü olarak adlandırılır.



Berilyum çekirdeği %0.02'lik bir oranda da bir hidrojen çekirdeği ile birleşerek, denklem 21, bor çekirdeği oluşmasının yanısıra gamma ışınımında bulunur. Oluşan bor çekirdeği, uyarılmış berilyum çekirdeğiyle birlikte pozitron ve nötrinoya bozunur. Daha sonra uyarılmış berilyum çekirdeği de iki adet helyum çekirdeğine bozunur. Bu füzyon zinciri “*pp-III*” döngüsü olarak adlandırılır.

Güneşte gerçekleşen füzyon tepkimelerinde oluşan nötrinoların üretildikleri kanala bağlı olarak enerjileri farklıdır. Deneysel gözlemlerde kullanılacak detektör teknolojisi çalışılacak kanala göre tasarlanır. Şekil45'te güneşte üretilen nötrinoların enerji dağılımı verilmiştir.

Yukarıda sözü geçen füzyon tepkimelerinden açığa çıkan gamma ışınımaları, güneş çekirdeği çok yoğun olduğu için ortamdaki parçacıklarla sürekli etkileşerek enerjilerini kaybederler. Güneşin merkezinde oluşan gamma ışınımaları güneşten yaklaşık olarak 200,000 yıl kadar süren bir yolculuktan sonra görünür dalgaboyu seviyesinde yani görülebilir ışık olarak kaçarlar. Nötrino ise zayıf etkileşen parçacık olduğundan füzyonda oluştuktan kısa bir süre sonra, üretim noktaları ile ilgili bilgiyi taşıyarak güneşi terk eder. Bu nedenle güneşten gelen nötrinoların ayrıntılı bir



Şekil 45: Bir nötrino kaynağı olarak Güneş ve üretilen nötrinoların enerji dağılımı.

şekilde incelenmesi güneş fiziği ve nötrinoların özelliklerinin anlaşılması açısından çok önemlidir. Güneşte üretilen nötrinoların sayısı yaklaşık olarak 10^{38} kadardır. Dünya yüzeyine yaklaşık olarak 6.4×10^{10} nötrino/(cm^2s)²⁰

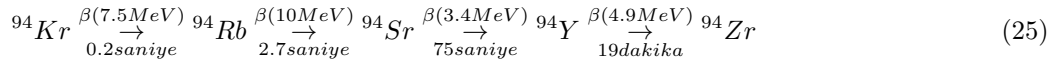
Güneşten gelen nötrinolar ilk defa 1968 yılında gözlemlenmiştir. Güneş için oluşturulan modeller test edilmiş ve fiziğin gelişiminde çok önemli sonuçların ortaya çıkmasını sağlamıştır.

6.11.4 Havaküre

Dünyamız sürekli olarak dış uzaydan gelen kozmik ışınların (%90'ı proton, %9'u helyum ve %1'i ise genelde daha ağır çekirdeklerden oluşur) bombardımanı altındadır. Bu parçacıkların havakürenin (atmosferin) üst tabakalarında bulunan hava molekülleriyle çarpışması sonucunda daha hafif ikincil parçacık yağmuru (nötron, pion ve kaon gibi parçacıklar) oluşur. Bu ikincil parçacıklarda ortalama yaşam süreleri kısa olduğundan daha da hafif parçacıklara bozunarak deniz seviyesinde daha çok müon, elektron ve nötrino bileşenlerine sahip bir kozmik yağmura neden olur. Havakürede oluşan nötrino akısı daha çok pionun müon ve müon nötrinosa, müonun da elektron, müon nötrino ve karşıt elektron nötrinosa bozunmasından meydana gelir. Böylece toplam müon nötrino akısının elektron nötrino akısına oranı 2 ye 1 dir. Havaküresel nötrino yağmuru altında duran bir insan, hayatı boyunca sadece 1 nötrino ile etkileşime girer²¹. Havakürede üretilen nötrinolar birçok deney grubu tarafından incelenmeye devam edilmektedir.

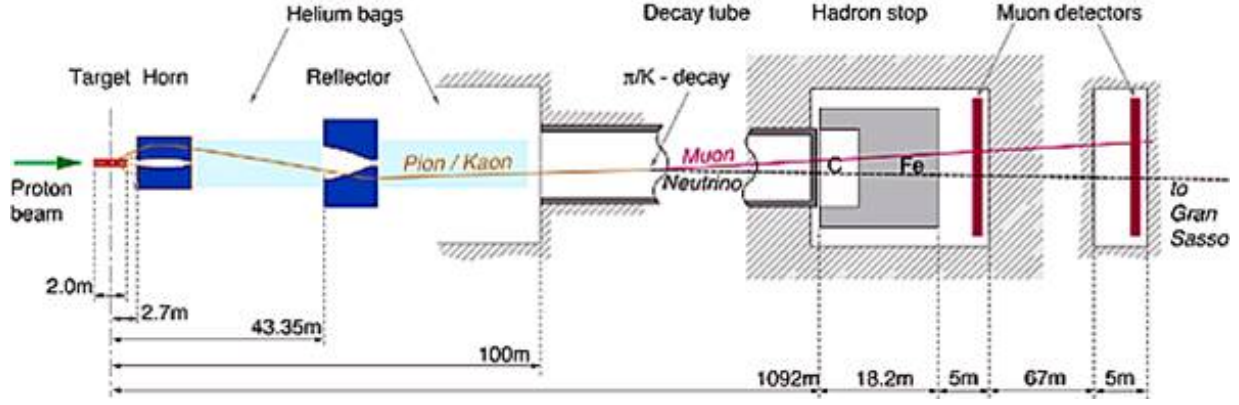
6.11.5 Nükleer reaktörler

Nükleer reaktörlerde çekirdek bölünmesi yani fizyon tepkimelerine uygun olduğu için, yakıt olarak genelde uranyum (^{235}U başta olmak üzere ^{233}U ve ^{238}U) ve plütonyum (^{239}Pu ve ^{241}Pu) kullanılır. Denklem 23,24 ve 25'de gösterildiği gibi bir nötron tarafından parçalanarak uranyum çekirdeği kararsız duruma geçmesi sonucunda büyük bir enerji açığa çıkaran fizyon tepkimesine neden olur. İlk tetikleyici fizyon sonucunda 200 MeV'lik enerjinin yanısıra ortama nötronlarla birlikte nötrinolar da (her zincir başına 6 $\bar{\nu}_e$) yayılır.



²⁰pp-I döngüsünü gözönüne alırsak: Güneşten yaklaşık olarak 3.86×10^{37} erg/s enerji yayılmaktadır. Her bir helyum atomu oluşumunda $24.7 \text{ MeV} = 4.2 \times 10^{-5} \text{ erg}$ 'lik enerji ortaya çıkar. Bu da saniyede yaklaşık olarak 9.2×10^{37} fizyon tepkimesi gerçekleştiğini gösterir. Herbir fizyon tepkimesi sonucunda 2 elektron nötrino üretilir. Güneşten yayılan toplam elektron nötrino sayısı 1.8×10^{38} olarak bulunur. Dünyanın yüzey alanına düşen nötrino akısı, $1.8 \times 10^{38} / 4\pi / (1.5 \times 10^{13})^2 = 6.4 \times 10^{10}$ nötrino/(cm^2s) elde edilir.

²¹Havakürede üretilen nötrino akısı santimetrekare başına saniyede 1 nötrinodur. Havaküresel nötrino yağmuru altında bulunan 80 kg ağırlığında ve 80 yıl yaşadığı düşünülen bir insana hayatı boyunca sadece 1 nötrino etkileşime girer. $N_{\text{etkileşim}} = \Phi_{\nu} \times \sigma^{\nu N} \times N_{\text{insan}} \times T_{\text{yaşam}}$ formülünde; $N_{\text{insan}} = 80\text{kg} \times N_{\text{avogadro}} = 5 \times 10^{28}$ çekirdek, $T_{\text{yaşam}} = 80\text{yıl} = 2 \times 10^9$ saniyedir. Buradan $N_{\text{etkileşim}} = 1 \times 10^{-38} \times (5 \times 10^{28}) \times (2 \times 10^9) \sim 1$ nötrino etkileşimi.



Şekil 46: CNGS nötrino beam line

	$\langle E_p \rangle$ (GeV)	Hedef	Pot/yıl	$L_{bozunum}$ (m)	$\langle E_\nu \rangle$ (GeV)
CERN	400	Karbon	$4.5 \cdot 10^{19}$	1000	25
JPARC	30	Grafit	10^{21}	130	0.77
FNAL-NuMI	120	Grafit	$3.0 \cdot 10^{20}$	675	3.0-17
FNAL-Booster	8	Berilyum	$5.0 \cdot 10^{20}$	50	0.76

Tablo 1: Nötrino üreten hızlandırıcılar

Bu nötronlar ortamda bulunan diğer uranyum çekirdeklerine çarparak zincirleme tepkime oluşturur. Bir Gigawatt'lık bir nükleer reaktörden saniyede yaklaşık olarak 2×10^{20} $\bar{\nu}_e$ yayılır²². Nötrinolar ilk defa nükleer reaktörlerde yapılan deneyler sonucunda gözlenmiştir. Gelişmiş algıç teknolojilerinin kullanımıyla reaktörlerden gelen nötrinolarla deneyler sürdürülmekte ve daha sonra tartışacağımız gibi nötrinonun doğası üzerine çok önemli sonuçlar elde edilmiştir.

6.11.6 Hızlandırıcılar

Hızlandırıcı teknolojisi kontrol edilebilir bir nötrino kaynağıdır. havakürede gerçekleşen etkileşimlerin bir benzeri laboratuvar ortamında gerçekleştirilerek gerekli çeşni ve enerjide bir parçacık demeti oluşturulabilir. Elde edilecek nötrinonun enerjisine bağlı olarak protonlar belli bir enerji düzeyine kadar doğrusal ve dairesel hızlandırıcılar yardımıyla hızlandırılır. Hızlandırılmış protonlar sabit bir hedef (genelde berilyum, karbon gibi) üzerine gönderilerek kısa yaşam süreli π^\pm , K^\pm , K^0 gibi ikincil parçacıklar üretilir. Çok güçlü odaklayıcı boynuzlar (horns) kullanılarak artı yüklü ikincil parçacıklar müon nötrino demeti, eksi yüklü parçacıklar ise karşıt müon nötrino demeti elde etmek için bozunum tüneline doğru yönlendirilir. Elde edilen nötrino demetinin büyük bir oranda ν_μ veya $\bar{\nu}_\mu$ olmakla beraber, K^0 ve pion, kaon parçacıkların elektrona bozunum kanallarından dolayı bir miktar ν_e ve $\bar{\nu}_e$ bileşeni olacaktır.

Kullanılan nötrino demetinin saflığının yansıya tüm bileşenlerinin yüksek duyarlılıkla anlaşılması gerekmektedir. Ne kadar çok kontrol altında tutulabilirse veri analizine eklenecek sistematik hatalar o kadar küçük olacaktır. Bu da yapılan analizin güvenilirliğini ve duyarlılığını artıracaktır.

Tablo1'de dünyada bulunan geleneksel yöntemle nötrino üretilen hızlandırıcı merkezleri verilmiştir.

Nükleer reaktör ve güneşten yayılan nötrinolar gibi istenilen enerji aralığında saf ν_e veya $\bar{\nu}_e$ demeti oluşturabilmek için Beta Beam gibi farklı hızlandırıcı teknikleri önerilmiştir. Ayrıca saf müon nötrino demeti oluşturabilmek için müon parçacıklarının biriktirme halkalarında hızlandırılarak bozunuma uğraması yönteminin önerildiği NuSTORM gibi yeni nesil hızlandırıcılarda mümkün olabilecektir.

6.11.7 Dünya

Dünyamız yaklaşık olarak 40 TW'lık bir enerji yaymaktadır. Bu enerjinin yaklaşık %40'ı radyoaktif çekirdeklerin (^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K gibi) bozunumundan oluşmaktadır. Bu radyoaktif bozunum zincirlerinin %90'ı Uranyum ve Toryum bozunumlarıdır ve yaklaşık 15 TW'lık bir enerjiye karşılık gelir.

$$^{238}U \rightarrow ^{206}Pb + 8^4He + 6e^- + 6\bar{\nu}_e \quad (26)$$

²²Bir fizyon tepkimesi başına $200[\text{MeV}] \cdot 10^6[\text{eV/MeV}] \cdot 1.6 \times 10^{-19}[\text{Joule/eV}] = 3.2 \times 10^{-11}$ Joule'lık enerji ve 6 adet $\bar{\nu}_e$ salınır. 1 GW (10^9 Joule/s) gücünde bir nükleer santralden $6[\bar{\nu}_e] \cdot 10^9[\text{Joule/s}] \cdot 3.2 \times 10^{-11}[\text{Joule}] = \sim 2 \times 10^{20} [\bar{\nu}_e/\text{s}]$ salınır.

$$^{232}\text{Th} \rightarrow ^{208}\text{Pb} + 6^4\text{He} + 4e^- + 4\bar{\nu}_e \quad (27)$$

$$^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ca} + e^- + \bar{\nu}_e \quad (28)$$

Dünyanın yer kabuğundan dünya yüzeyine yaklaşık olarak $5 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}\text{m}^{-2}$ nötrino ulaşmaktadır. Güneş elektron nötrino yayarken dünya karşıt elektron nötrino yaymaktadır. Potasyumun beta bozunumundan oluşan nötrinoların enerjisi ($E_{\text{max}} \sim 1.31 \text{ MeV}$) tersinir beta bozunumunun gözlemlenebilmesi için gerekli olan eşik enerjisinin (1.8 MeV) altında olduğundan Uranyum ve Toryumdan gelen nötrinoların yakalanması daha kolaydır. Japonya'da bulunan KamLAND deneyi[46] 2005 yılında ilk defa dünyanın merkezinden gelen nötrinoları gözlemlediler. Bu keşif bize yer kabuğunun bileşenlerini, bunların merkezde konveksiyona neden olarak yeryüzünü ısıtmada ki rolleri, radyoaktif bozunmaların etkisi, levhaların tektoniği ve kıtaların hareket etmesi gibi birçok konuda bilgilerimizi gözden geçirmemize ve ufkumuzu açmamıza yardımcı olacaktır.

6.11.8 İnsan

İnsan bedeni yaklaşık olarak 150–200 gram potasyum içermektedir, bunun 20 miligramı beta bozunumu yapan ^{40}K izotopudur. Dolayısıyla ortalama ağırlıkta bir insandan yaklaşık olarak günde 340 milyon karşıt elektron nötrinosu yayılarak, almış olduğu bilgiyi evrenin en uzak noktasına doğru taşır.

Potasyum açısından en zengin meyvelerden biri de Muzdur. Muz'lar da insan bedeni, güneş, süpernova, nükleer reaktörlere benzer nötrino yayımında bulunur. 150 gram muzda yaklaşık olarak 454 miligram potasyum bulunur, bunun 53.1 mikrogramı ^{40}K izotopudur. Böylece muzdan da günde milyonlarca nötrino salınacaktır.

Yukarıda sıralanan nötrino kaynakları dışında, Samanyolu Galaksisi'nin dışından geldiği saptanan TeV ve PeV enerji düzeyinde nötrinolar, Kasım 2013 yılında İceCube grubu tarafından keşfedilmiştir[47]. Toplamda 37 nötrino etkileşimi (3 tanesi PeV düzeyinde) gözlemlenmiştir. İceCube detektörü, Antartika'daki Amundsen-Scott Güney Kutbu İstasyonu'nda buzların yaklaşık olarak 2500 metre derininde 81 istasyonda 324 foto toplayıcı tüpler yerleştirilerek inşa edilmiştir. Veri almına devam eden İceCube, gözlemlenecek yeni TeV ve PeV seviyesindeki nötrino etkileşimleriyle, bu kadar yüksek enerjide nötrinoların nasıl oluştuğunu ortaya çıkarmamızı sağlayacak modellere yardımcı olacaktır. Bu keşif, Astronomi biliminde yeni bir dönemin başlangıcı olarak düşünülmektedir.

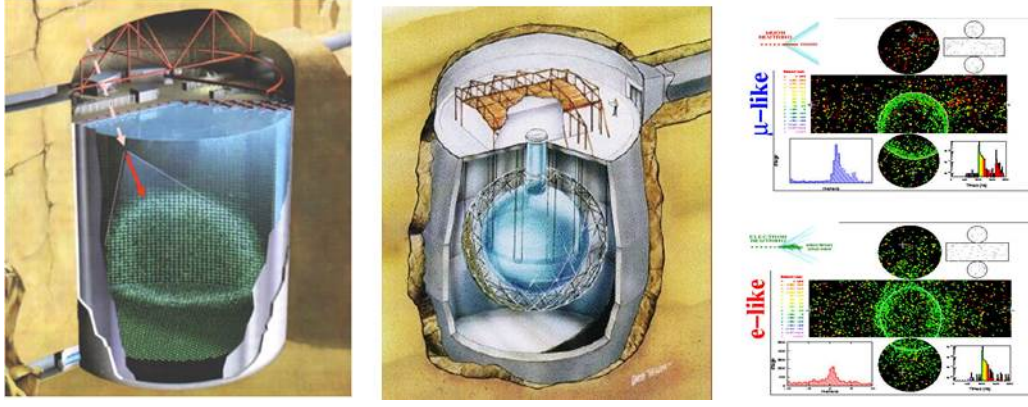
6.12 Standard modelin ötesinde yeni fiziğin ayak sesleri

Ray Davis ve John Bahcall 1964 yılında güneşten gelen nötrinoları gözlemlemek için B. Pontecorvo'nun önerdiği Cl-Ar metodunu kullanarak bir deney tasarladılar[48]. R. Davis detektörün tasarlanması üzerinde çalışırken, J. Bahcall nükleer fizik ve güneşin standart modelini birleştirerek güneşte farklı tepkimelerden üretilen nötrinoların enerji dağılımı ve akı miktarlarını hesaplamıştır. Detektör 615 ton (100.000 galon) perchloroethylene (CCl_4) formunda klor atomu içeren büyük bir tanktan meydana gelmiştir. Bu yöntem $\nu_e + ^{37}\text{Cl} \rightarrow e^- + ^{37}\text{Ar}$ tepkimesinin eşik enerjisi 0,814 MeV olduğundan, güneşteki pp -I döngüsü ($E_\nu \sim 0.4 \text{ MeV}$ eşik enerjinin altında) dışındaki diğer döngülerden üretilen nötrinolarla hassas olacaktır. R. Davis bu etkileşim sonucunda oluşacak argon atomunu toplayıp sayabilecek bir yöntem geliştirmiştir. Detektör, kozmik ışınlardan kaynaklanacak etkileşimleri minimize etmek için 1965 yılında South Dakota'da bulunan yaklaşık 1.5 km (4850 feet) derinliğinde olan Homestake altın madenine yerleştirilmiştir. 1967 yılında veri almına başlanmış ve ilk sonuçları 1968 yılında elde edilmiştir. J. Bahcall'ın hesaplamaları sonucunda tahmin edilen nötrino etkileşim oranı $\Phi_{\text{teori}} = 7.9 \pm 3.4 \text{ SNU}^{23}$ olarak verilirken, deneysel sonuçlar $\Phi_{\text{deney}} = 2.56 \pm 0.16 \pm 0.16 \text{ SNU}$ olarak ölçülmüştür[49]. Kuramsal hesaplamalardan yaklaşık olarak %30 daha az miktarda nötrino etkileşimi gözlemlenmiştir: *Güneş nötrino sorunu mu vardır?*

Bu tutarsızlığın deneysel bir hatadan mı yoksa kuramsal hesaplamalardan mı kaynaklandığı ve eğer kuramsal ise, sorunun Güneş modellerinde mi yoksa temel parçacık modellerinde mi olduğu uzun süre tartışılan konulardan biri olmuştur. R. Davis tekrarlamış olduğu gözlemlerde hep aynı sonuçları elde etmiştir. Deneysel ve kuramsal fizikçiler arasında huzursuzluk yaratan bu sorun, 20 yıl sonra 1998'de SüperKamiokande deneyi tarafından kısmen açıklığa kavuşturmuş ve 2001'de SNO deneyi son noktayı koymuştur.

Süper Kamiokande deneyi[50] 1996 yılında Japonya'nın Kamioka Mozumi madeninde yerin yaklaşık 1 km altında faaliyetine başlamıştır. Detektör Cherenkov teknolojisini kullanan, toplamda 13.000 PMT (foto çoğaltıcı tüp) ile sarılı 39 m çapında ve 40 m yüksekliğinde silindir geometriye sahip, 50.000 ton yüksek saflıkta sudan oluşmaktadır. Bu deneyde havaküreden gelen nötrinolar, $\nu_l + N \rightarrow l + X$ ($l = e, \mu, \tau$) etkileşimi yoluyla incelenmiştir.

²³Burada 1 SNU (Solar Neutrino Unit) atom başına saniyede 10^{-36} nötrino yakalama anlamına gelmektedir.



Şekil 47: SüperKamiokande ve SNO algıçlarında müon ve elektronun kendine özgü Cherenkov ışına çizelgesi.

Yüklü parçacıklar Cherenkov ışınması²⁴ yapar ve bu ışınlar foto çoğaltıcı tüpler tarafından kaydedilir. Elektron ve müon parçacıkları Şekil 47’de görüldüğü gibi kendilerine özgü bir iz bırakırlar. Dünya havaküresine giren kozmik ışınların etkileşimi sonucunda ortalama her elektron nötrinosa karşılık iki adet müon nötrinonun oluşacağından bahsetmiştik. Süper Kamiokande deneyinin elde ettiği sonuçlar detektörün üst tarafından gelen müon nötrinoların sayısı alt tarafından yani dünyanın öteki ucundan uzun mesafeler katederek ulaşan nötrinolardan daha fazladır. Kozmik ışınların akısı izotropik olduğu için, aşağıdan ve yukarıdan gelen nötrino akısının da aynı olması beklenir. Yapılan analizler B. Pontecorvo’nun uzun zaman önce dile getirdiği nötrino salınımindan dolayı müon nötrino salınımları yaparak başka bir çeşniye dönüşmüştür. Süper Kamiokande detektörü hangi çeşniye geçiş yaptığını doğrudan göstermez. Algıcın altından gelen nötrinolar daha çok yol katettiği için salınım olasılığı artar. Nötrinoların salınımları için kütleli olmaları gerekmektedir ki standart model nötrinoları kütleli kabul eder.

Kanada’da Creighton madeninde yerin yaklaşık 2 km altında bulunan Sudbury Neutrino Observatory (SNO) nötrino algıcısı Süper Kamiokande’ye benzer Cherenkov teknolojisini kullanmıştır[51]. Algıç, 12 m çapında, 1000 ton ağır su içeren ve 9456 foto çoğaltıcı tüplerle çevrili bir küreyi andırır. Ayrıca kürenin çevresini saran 7000 tonluk ultra hafif su, küreye destek ve dışarıdan gelebilecek nötron ve fotonlara karşı kalkan sağlamış olur. SNO algıcının diğer nötrino algıçlarına göre artışı sadece elektron nötrinoya değil diğer nötrino çeşnilerine de duyarlı olmasıdır. Algıcın içerdiği ağır suda (D_2O) döteryum çekirdeğinde (D) bir proton ve iki nötron bulunur. Elektron nötrino ağır su tankındaki yüklü ve yüksüz akım etkileşimleri gerçekleştirirken diğer müon ve tau nötrino çeşnileri ise yüksüz akım etkileşiminde bulunur: $\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$, $\nu_x + d \rightarrow \nu_x + p + n$ ve $\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$ şeklinde gerçekleşecektir. SNO deneyinin eşik enerjisi 5.0 MeV olduğundan güneşteki pp -III döngüsünden yayılan elektron nötrinolarına duyarlıdır. Yüklü ve yüksüz etkileşimlerin analizleri sonucunda güneşten gelen nötrinoların üçte ikisinin algıca ulaşmaya kadar salınma uğrayıp başka bir nötrino çeşnisine dönüştüğünü göstermiştir. Böylece SNO deneyinin 2001’de elde ettiği sonuçlar uzun yıllar süren güneş nötrino problemini tamamen çözüme kavuşturmuş, ne R. Davis’in deneysel sonuçlarının ne de J. H. Bahcall’ın kuramsal hesaplamalarının hatalı olmadığını göstermiştir. Süper Kamiokande’nin sonuçlarıyla birlikte nötrinonun şizofrenik kişiliği ortaya çıkmış ve nötrino salınımları fizikinde önemli adımlar atılmıştır.

6.13 Nötrino Salınımları

B. Pontecorvo nötrino salınımları fikrini 1957’de ortaya atmış, kaonun karşıt kaon parçacığına salınımindan esinlenerek nötrinonun karşıt nötrinoya salınımları önermiştir. 1962’de elektron nötrinonun yanısıra müon nötrinonun da varlığı ispatlanınca, Ziro Maki, Masami Nakagawa ve Shoichi Sakata nötrino çeşnilerinin karışımı ve $\nu_e \rightleftharpoons \nu_\mu$ salınımları önerdiler[52]²⁵. B. Pontecorvo, 1967’de Homestake deneyi sonucunda ortaya çıkan Güneş Nötrino Probleminin $\nu_e \rightarrow$

²⁴Işık hızına yakın bir hızla hareket eden yüklü parçacıklar, kırılma indisi farklı bir ortama girdiklerinde yeni ortamdaki parçacık hızı ışık hızını geçer ve bu durumda

²⁵Nagoya Üniversitesi’nde bulunan kuramsal parçacık fizik grubu, Shoichi Sakata liderliğinde parçacık fiziği dünyasına çok önemli katkılarda bulunmuştur. 1950’lerde gözlemlenen hadronların o dönem üç temel parçacık olarak düşünülen proton, nötron ve lambdanın biraraya gelerek oluşabileceğini düşünerek, Sakata diğer adıyla Nagoya Model’ini önerdiler[54]. Bu model uzun süre fizikçiler arasında ilgi görmüş ancak M. Gell-Mann’ın hadronların quark modelinde üç acayip (strange) kuarktan oluştuğu düşünülen Omega parçacığının 1964’te keşfi ile Quark modeli kabul görmüştür. Nagoya grubu Sakata modelini kullanarak hadronların yapısıyla birlikte zayıf etkileşimlerini ve beta bozunumunu ve Baryon-Lepton simetrisi üzerinde çalıştılar. Bu simetri altında p , n ve λ ’nın farazi B-maddesi (B^+) ve nötrino, elektron, müondan oluştuğunu varsaydılar: $p = \langle B^+ \nu \rangle$, $n = \langle B^+ e \rangle$ ve $\lambda = \langle B^+ \mu \rangle$. 1962’de müon nötrinonun keşfiyle, iki nötrinonun varlığı sonucunda Sakata modelinde problemler (Baryon-Lepton simetrisi kaybolmuştur) ortaya çıkmıştır. Bu problemlerin aşılması için Z. Maki, M. Nakagawa ve S. Sakata her iki nötrino çeşnisinin karışımını önerdiler: $\nu_e = \nu_1 \cos \delta - \nu_2 \sin \delta$ ve

ν_μ veya $\nu_e \rightarrow \nu_{sterile}$ salınımlarından kaynaklanmış olabileceğini ve 1969 yılında Gribov ile birlikte Z. Maki, M. Nakahawa ve S. Sakata'nın nötrino karışım durumlarını ele alarak nötrino salınım olasılıklarını tartışmıştır[53].

Günümüzde nötrinolar ν_e , ν_μ ve ν_τ olmak üzere üç çeşnide bulunurlar. Deneysel sonuçlar nötrinoların kütleli ve birbirleriyle karıştığını göstermektedir. Nötrinoların karışımı Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata (PMNS) matrisi ile verilir.

Nötrinoların çok küçük de olsa kütlelerinin olması, kuantumlu alanlar kuramına göre, nötrino çeşni öz durumu (ν_e veya ν_μ veya ν_τ) kütle öz durumlarının (ν_1, ν_2, ν_3) karışımı cinsinden ifade edilebilirler. Örneğin elektron nötrino belli oranlarda m_1 , m_2 ve m_3 kütleli öz durumlardan oluşacaktır: $\nu_e = U_{e1}\nu_1 + U_{e2}\nu_2 + U_{e3}\nu_3$, burada U_{ei} PMNS matris elemanlarıdır ve deneysel olarak bulunur. Benzer şekilde diğer nötrino çeşnileri için farklı katsayılarla yazılabilir. Hızlandırıcıda veyahut güneşte üretilen nötrinoyu gözönüne alırsak ve kütle öz durumları arasındaki girişimlerden oluşmuş bir dalga paketi olarak düşünürsek, belirli bir zaman ve mesafe geçtikten sonra bu dalga paketi değişime uğrayacaktır. Böylece nötrinonun yeni bir nötrinoya dönüşüm olasılığı dalga paketinin genliğinin karesine eşit olacaktır. Burada salınım olasılığı nötrinonun enerjisiyle ters ve katedilen mesafe, karışım açısı ve kütle kare farkıyla doğru orantılı olacaktır. Nötrino salınımı çok çok küçük kütle kare farkı bölgesinde çalışılacaksa, uzun erime ihtiyaç olacaktır. Ters durumda kısa erimli deneyler tasarlanır. Her iki durumda da nötrinonun enerjisini düşük olması gerekmektedir.

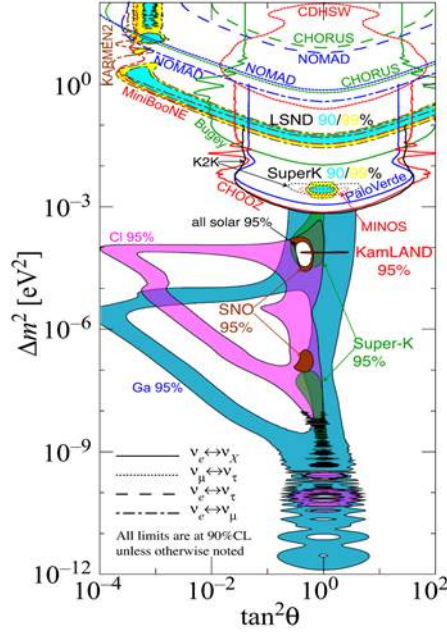
Nötrino salınımları iki farklı yöntemle gözlemlenebilir: görünme (appearance) ve yokolma (disappearance) deneyleri.

- Görünme deneylerinde, hızlandırıcılarda oluşturulan saf nötrino çeşnisi (ν_μ çeşnisi olduğunu düşünelim) algıca ulaşmadan önce salınımına uğrayarak farklı bir nötrino çeşnisine (ν_τ çeşnisine döndüğünü düşünelim) dönecektir. Dolayısıyla algıçta ν_μ yanısıra ν_τ etkileşimleri gözlemlenecektir. Görünme deneylerinde yeni nötrino çeşnisinin (ν_τ) etkileşimi sonucunda oluşacak olan leptonun (τ) gözlemlenmesi gerekmektedir. Dolayısıyla hızlandırıcıda üretilen nötrino demetinin (ν_μ) bu leptonu (τ) oluşturabilecek enerjiye sahip olması gerekir. Ayrıca salınımına uğrayacağı yeni nötrinonun üretilen nötrino demetinde bulunmaması veya ihmal edilebilir düzeyde olması gerekmektedir. Nötrino algıcında leptonu tanımlayabilecek duyarlılıkta olması gerekmektedir.
- Yokolma deneylerinde ise saf nötrino çeşnisinde salınımdan kaynaklı azalmanın görülmesi gerekmektedir. Bu gibi deneylerde iki farklı şekilde yapılmaktadır. Tek detektörle gerçekleştirilen ve iki detektör kullanılarak gerçekleştirilen deneyler. Burada kilit noktalardan biri, kullanılan nötrino çeşnisinin akısını yüksek duyarlılıkla bilmektir. Genelde hızlandırıcılarda üretilen nötrino demetinin akısı %15 ile %30 sistematik hata payıyla bilinmektedir. Bu da yapılan deneysel analizlere yansımaktadır. Hassas ölçümlerde bulunmak ve bu problemi aşmak için iki detektör sistemi kullanılmaktadır. Kısaca açıklayacak olursak; üretilen nötrino çeşnisinin yüklü akım etkileşimleri salınım oluşmadan ve salınım oluşuktan sonra ölçülmesi gerekir. Bunu gerçekleştirmek için benzer sisteme ve teknolojiye sahip algıçlardan biri salınım başlamadan, nötrino kaynağına yakın bir mesafede, diğeri de salınımın oluşu bir mesafede konumlandırılır. Bu durumda yakın detektör kullanılarak nötrinonun etki kesiti ve üretilen nötrino akısı detaylı bir şekilde çalışılır ve buna bağlı olarak sistematik hatalar minimize edilir. Her iki detektör benzer materyallerden yapıldığı için etki kesitinden ve detektörden kaynaklı sistematik hatalar birbirini yok eder. Her iki algıçta ölçülecek nötrino enerji dağılımı karşılaştırılır. Nötrino salınımı gerçekleşirse uzak noktada konumlanan algıca ulaşan nötrino akısında azalma dolayısıyla karşılaştırılan nötrino enerji dağılımlarında bir bozukluk (distortion) gözlemlenecektir.

Yokolma deneylerinde nötrinonun hangi nötrino çeşnisine geçiş yaptığı dolaylı yollarla gözlemlenirken, OPERA deneyi gibi görünme deneylerinde hangi tip nötrinoya dönüştüğü doğrudan gözlemlenir. Tau nötrinonun gözlemlendiği DONUT deneyine benzer emülsiyon teknolojisinin kullanıldığı OPERA detektörü İtalya'nın Gran Sasso laboratuvarında kurulmuştur[56]. CERN SPS'te 400 GeV/c'ye kadar hızlandırılan protonların karbon bir hedefe bombardıman edilmesi sonucunda ortalama 27 GeV enerjili müon nötrino 730 km uzaklıkta bulunan Gran Sasso'ya doğru yönlendirilmiştir. Eğer müon nötrinoların bir kısmı salınım yaparak tau nötrinoya dönüşürse, OPERA algıcında tau nötrino etkileşimi gerçekleşecektir. Tau nötrinonun yüklü akım etkileşiminden sonra ortaya çıkacak olan tau leptonun saptanması gerekmektedir. Bugüne kadar OPERA deneyinde toplamda 4 ν_τ etkileşimi bulunmasıyla, $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ salınımı direkt olarak gözlemlenmiştir.

Nötrino salınımı güneş, reaktör ve hızlandırıcılarda üretilen nötrinolar kullanılarak, kısa ve uzun erimli, görünme ve yokolma deneylerinde detaylı bir şekilde incelenmiş ve gerçekliği ispatlanmıştır. Deneysel sonuçlar üç nötrino çeşnisinin kütleli ve birbiriyle karıştığını göstermiş, veriler fit edilerek nötrino salınım parametreleri (karışım açıları

$\nu_\mu = \nu_1 \sin\delta + \nu_2 \cos\delta$. Nagoya kuramsal parçacık grubunda çalışmalar yapan Makoto Kobayashi ve Toshihide Maskawa, 1973 yılında maddenin karşıt maddeye üstünlüğünü açıklayabilecek bir simetri kırılması olan CP bozunumunun, en az üç kuark ailesinin ve bunların birbirleriyle karışımı sonucunda olacağını gösterdiler[55]. M. Kobayashi ve T. Maskawa bu önemli öngörülerinden dolayı 2008 yılında Nobel Fizik ödülünü aldılar.



Şekil 48: Nötrino salınım deney sonuçları.

ve kütle kare farkları) elde edilmiştir. Nötrino karışım açılarının (θ_{13} , θ_{23} , θ_{12}) sıfırdan farklı olduğu bulunmuştur. Bu durum leptonlar arasında CP bozunumu üzerinde çalışmamıza olanak sağlar. Nötrino kütle kare farkları $\Delta m_{21}^2 = 7.54 \times 10^{-5} \text{eV}^2$, $\Delta m_{32}^2 = 2.44 \times 10^{-2} \text{eV}^2$ olarak ölçülmüştür. Şekil48'te bugüne kadar gerçekleştirilen nötrino salınım deneylerinin kütle kare farkı ve karışım açısı uzayından taramış olduğu bölgeler görülmektedir[57]. Bu değerler bize nötrinoların durgun kütlelerini vermez. Nötrino salınım deneyleri bu konuda cevap vermekte yetersizdir.

Nötrino salınım deneylerinde bazı sonuçların açıklanabilmesi için kütle kare farkının birkaç eV^2 olan, Z bozonu ile bağlaşımı olmayan dördüncü bir nötrinoya, steril nötrinoya, ihtiyaç duyulmaktadır. Bu anomaliler genelde kısa erimli nötrino salınım deneylerinde karşımıza çıkmaktadır.

- Bunların en bilineni LSND deneyidir[58]. 1993-1998 yılları arasından Los Alamos'ta $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ salınımını incelemiştir. Los Alamos'daki LAMPF lineer hızlandırıcısında, 798 MeV enerjili protonlar 30 cm uzunluğunda su hedefine gönderilmesinden elde edilen pionlar, durgun çerçevede (decay at rest) müon ve karşıt müon nötrinoya bozunur. Ortalama 30 MeV enerjili ν_μ demeti, 30 m mesafede konumlandırılmış 167 ton sıvı pırıldak ve 1220 foto çoğaltıcı tüplerden meydana gelen algıya yönlendirilir. Yapılan çözümlenmeler sonucunda beklenenin üzerinde nötrino etkileşimiyle karşılaşmıştır. Deneysel sonuç standart üç nötrino salınımı ile açıklanamaz. Yapılan fenomenolojik çalışmalar sterile nötrinonun gerekliliğine dikkat çekmiştir.
- MiniBooNE deneyi[59], LSND deneyini test etmek için 2002-2012 yılları arasında Fermilab'ta $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ ve $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ salınımını incelemiştir. Fermilab Booster'da 8 GeV enerjili protonlar berilyum hedefine bombardman edilmesi sonucunda ortaya çıkan pion ve kaonların bozunumundan elde edilen 0.79 (0.66) GeV enerjili nötrino (antinötrino) demeti, kaynaktan 541 metre mesafede 806 ton mineral yağ (CH_2) ve 1520 foto çoğaltıcı tüpten meydana gelen algıya yönlendirilmiştir. Toplam nötrino etkileşimi, özellikle düşük enerjilerde beklenenden fazla gözlemlenmiştir. Sonuç olarak LSND sorununu çözmekten uzak, bilim dünyasına yeni bir sıradışılık kazandırmıştır. MiniBooNE deneyinde de Cherenkov teknolojisi kullanıldığından foton ve elektronun sınıflandırılması yapılamaz. Düşük enerjilerde gözlemlenen sapma elektron kaynaklı ise MiniBooNE LSND deneyini kanıtlamış olacak, foton ise bu fotonun kaynağının bulunması ve anlaşılması gerekmektedir. Düşük enerjilerde karşılaşılan bu sapma, Liquid Argon teknolojisi kullanacak olan MicroBooNE tarafından test edilecektir. MicroBooNE deneyi MiniBooNE deneyinde olduğu gibi, Fermilab Booster'da üretilen nötrino demeti kullanılacak. MiniBooNE ile aynı nötrino ekseninde fakat 450 metre mesafede konumlandırılacaktır. Veri alımı Haziran 2014'te başlayacaktır.
- Nükleer tepkimelerin kuramsal modellerindeki gelişmeler ışığında, nükleer reaktörlerden çıkan nötrinoların akışı yeniden hesaplanmış ve yaklaşık olarak %3.5'lik bir artış meydana gelmiştir[60]. Dolayısıyla daha önce

gerçekleştirilen reaktör nötrino salınım deneylerinde veriler yeniden gözden geçirilmiştir. Ortaya çıkan yeni resmi açıklamak için sterile nötrinoya ihtiyaç vardır.

- Güneş nötrino etkileşimleri Galyum (Gallium) deneylerinde de incelenmiştir. Detektörler kalibrasyon edilmek için içine radyoaktif kaynaklar yerleştirilmiş ve elektron nötrino akısı ölçülmüştür. Yapılan ölçümlerin beklenen akı değerine oranı yaklaşık olarak 0.86 ± 0.06 olarak ölçülmüştür. Elde edilen sonuç nötrino salınımı hipotezi ile açıklanmak istenildiğinde, standart üç nötrino çerçevesinde açıklanamamıştır. LSND ve MiniBooNE deneylerinde olduğu gibi dördüncü nötrinoya ihtiyaç vardır[61].
- Kozmolojide gerçekleştirilen veri çözümlenmelerinde olası steril nötrinonun varlığını kısıtlayacak her hangi bir kanıt bulunmamaktadır[62]. Ayrıca belli bir kütleyle sahip nötrino, karanlık maddeyi açıklamada yardımcı olacaktır.

6.14 Nötrinoların kütleleri

Nötrino salınım deneyleri sadece nötrinoların kütle farkının karesini verir. Nötrinoların kütlelerini direkt ölçmek için kullanılan yöntemleri kısaca sıralayacak olursak:

1) Elektron nötrinonun kütlesi trityum çekirdeğinin beta bozunumunda, ${}^3H \rightarrow {}^3He + \nu_e + e^-$, elektronun enerji dağılımında bitiş bölgesi hassas olarak ölçülerek elde edilebilir. Günümüze kadar gerçekleştirilen deneylerde elektron nötrino için üst limit $m(\nu_e) < 2.2$ eV (%95 C.L.) olarak bulunmuştur. Daha hassas bir şekilde ölçüm yapmak için KATRİN deneyi tasarlanmış ve veri almına başlamıştır.

2) Müon nötrinonun kütlesi pionun müona bozunum kanalı, $\pi^- \rightarrow \mu^- + \nu_\mu$, çalışılarak elde edilir. Burada müonun momentumunun çok hassas bir şekilde ölçülmesi gerekmektedir. Elde edilen sonuçlar müon nötrino kütlesi için üst limiti $m(\nu_\mu) < 170$ keV (%90 C.L.) olarak verilmiştir.

3) Tau nötrinonun kütlesi tau leptonun piona bozunum kanalı, $\tau^- \rightarrow n\pi + \nu_\tau$, çalışılarak elde edilir. Burada $n\pi$ sisteminin toplam kütlelerini çok hassas bir şekilde ölçmek gerekmektedir. ALEPH deneyi $\tau^- \rightarrow 2\pi^- + \pi^+ + \nu_\tau$ ve $\tau^- \rightarrow 3\pi^- + 2\pi^+ + \nu_\tau$ bozunum kanallarını çalışarak, tau nötrino kütlesi için üst limiti $m(\nu_\mu) < 18.2$ MeV (%95 C.L.) olarak ölçmüştür.

6.14.1 Nötrinolar nasıl kütle kazanır?

Standart modelde parçacıkların kütle kazanımı kendiliğinden simetri kırılımı mekanizmasıyla açıklanır. Fermiyonların kütleleri, sol-elli fermiyon ile sağ-elli fermiyonun skaler Higgs alanıyla etkileşmesinden, Yukawa bağlaşımı (coupling) ve vakum beklenen değerinden elde edilir²⁶.

Standart modelde sağ-elli nötrinolar yoktur! Sağ-elli nötrinolar (ν_R) eklenirse Higgs mekanizmasına göre nötrinoların kütlesi $m_\nu^i = \frac{\lambda_\psi^i v}{\sqrt{2}}$ olması gerekir. Nötrinonun yaklaşık 1 eV'lik bir kütle değeri alabilmesi için bilinen vakum beklenen değerine göre nötrinoların Yukawa bağlaşımı $\sim 10^{-11}$ gibi bir değere sahip olmak zorundadır. Standart model nötrinoların çok küçük kütle sahibi olmasını açıklamakta yetersizdir. Standart modelin ötesine geçmek gereklidir. Bu durum Dirac nötrinolar için geçerlidir ve toplam lepton korunumu sağlanır.

Majorana nötrino için düşündüğümüzde toplam lepton korunumu iki birimle kırılır, kütlesi Standart Model Higgs alanı ve Yukawa bağlaşımından elde edilemez. Bu durumda Standart modelin ötesinde yeni fizik çözümleri gereklidir.

6.15 Sonsöz

Nötrino fikri ortaya atıldığı ilk günden bu yana büyük sürprizlere neden olmuştur. İçinde barındırdığı gizemi anlamaya yönelik çalışmalar, evrenin ilk zamandan bu güne geçen zamanda evrimleşme basamaklarını, standart modelin ötesinde yeni fizik arayışlarında rehber olarak yanımızda bulunacaktır.

Kaynaklar

[1] A. H. Becquerel, *Nobel Lecture*, http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1903/.

[2] O. von Baeyer, O. Hahn, L. Meitner, *Z. Physik* 12 (1911) 273.

²⁶Higgs mekanizmasında fermiyonlar kütle kazanması için sol-elli ve sağ-elli bileşenlerine ihtiyaç vardır: $\frac{\lambda_\psi v}{\sqrt{2}} \bar{\psi} \psi + \frac{\lambda_\psi}{\sqrt{2}} H \bar{\psi} \psi$. Burada λ_ψ Yukawa bağlaşım terimi, v vakum beklenen değeri ve H skaler higgs alanıdır. Kütle terimi $\frac{\lambda_\psi v}{\sqrt{2}}$ 'dir.

- [3] J. Chadwick, Distribution in Intensity in the Magnetic Spectrum of the β -rays of Radium, *Verh. Deutsch. Phys. Ges.* 16 (1914) 383.
- [4] C. D. Ellis, W. Wooster, The Average Energy of Disintegration of Radium E, *Proc. R. Soc. London. Ser. A* 117 (1927) 109.
- [5] “*Beta-ray spectra and Energy Conservation, 1929 unpublished manuscript*”: N. Bohr collected works, Vol. 9, Nuclear Physics (1929-1952).
- [6] E. Fermi, *Attemp a Theory of Beta Rays*, *Il Nuovo Cimento*, volume 11, issue 1 (1933) 1.
- [7] H. A. Bethe, R. Peierls, *The Neutrino*, *Nature* 133 (1934) 532.
- [8] E. Majorana, *A Symmetric Theory of electrons and Positrons*, *Nuovo Cimento* 14 (1937) 171.
- [9] C. D. Anderson, S. H. Neddermeyer, *Phys. Rev.* 51 (1937) 884; J. C. Street, E. C. Stevenson, *Phys. Rev.* 52 (1937) 1003.
- [10] G. P. S. Occhialini, and C. F. Powell, *Nuclear Disintegrations Produced by Slow Charged Particles of Small Mass*, *Nature*, 159 (1947) 186.
- [11] J. Steinberger, *On the Range of the Electrons in Meson Decay*, *Phys. Rev.* 74 (1948) 500.
- [12] B. Pontecorvo, *Inverse Beta Process*, Report PD-205, Chalk River, Canada.
- [13] E. J. Konopinski, H. M. Mahmoud, *The Universal Fermi Interaction*, *Phys. Rev.* 92 (1953) 1045.
- [14] R. Davis, Attempt to Detect the Antineutrinos from a Nuclear Reactor by the $\text{Cl}^{37} (\bar{\nu}, e^-)\text{Ar}^{37}$ Reaction, *Phys. Rev.* 97 (1955) 766.
- [15] F. Reines, C. L. Cowan, *The Neutrino*, *Nature* 178 (1956) 446.
- [16] T. D. Lee, C. N. Yang, *Question of Parity Conservation in Weak Interactions*, *Phys. Rev.* 104 (1956) 254.
- [17] C. S. Wu, E. Ambler, R. W. Hayward, D. D. Hoppes, R. P. Hudson, *Experimental Test of Parity Conservation in Beta Decay*, *Phys. Rev.* 105 (1957) 1413.
- [18] R. L. Garwin, L. M. Lederman, M. Weinrich, *Observations of the Failure of Conservation of Parity and Charge Conjugation in Meson Decays: the Magnetic Moment of the Free Muon*, *Phys. Rev.* 105 (1957) 1415.
- [19] Collected Scientific Papers by Wolfgang Pauli, Vol 1, R. Kronig, V. F. Weisskopf
- [20] “*Surely You’re Joking Mr. Feynman*”, R. Feynman.
- [21] T. D. Lee, C. N. Yang, *Parity Nonconservation and a Two-Component Theory*, *Phys. Rev.* 105 (1957) 1671; A. Salam, *On Parity Conservation and Neutrino Mass*, *Nuovo Cimento* 5 (1957) 299; L. Landau, *On the Conservation Laws for Weak Interactions*, *Nuclear Physics* 3 (1957) 127.
- [22] M. Goldhaber, L. Grodzins, A. W. Sunyar, *Helicity of Neutrinos*, *Phys. Rev.* 109 (1958) 1015.
- [23] B. Pontecorvo, *Mesonium and anti-mesonium*, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 34 (1957) 247.
- [24] B. Pontecorvo, *Electron and Muon Neutrinos*, *Sov. Phys. JETP* 10 (1960) 1236.
- [25] M. Schwartz, *Feasibility of using high-energy neutrinos to study the weak interactions*, *Phys. Rev. Lett.* 4 (1960) 306.
- [26] G. Danby, J-M. Gaillard, K. Goulianos, L. M. Lederman, N. Mistry, M. Schwartz, J. Steinberger, *Observation of High-Energy Neutrino Reactions and the Existence of Two Kinds of Neutrinos*, *Phys. Rev. Lett.* 9 (1962) 36.
- [27] R. P. Feynman, M. Gell-Mann, *Theory of the Fermi Interaction*, *Phys. Rev.* 109 (1958) 193; E. C. G. Sudarshan, R. E. Marshak, *Chirality Invariance and the Universal Fermi Interaction*, *Phys. Rev.* 109 (1958) 1860; J. Schwinger, *A Theory of the Fundamental Interactions*, *Annals of Physics*, Volume 2 (1957) 407.

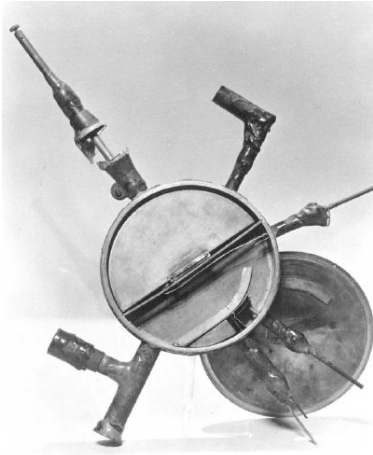
- [28] C. N. Yang, R. L. Mills, *Conservation of Isotopic Spin and Isotopic Gauge Invariance*, Phys. Rev. 96 (1954) 191.
- [29] P. W. Higgs, *Broken Symmetries and the Masses of Gauge Bosons*, Phys. Rev. Lett. 13 (1964) 508; F. Englert, R. Brout, *Broken Symmetry and the Mass of Gauge Vector Mesons*, Phys. Rev. Lett. 13 (1964) 321.
- [30] S. L. Glashow, *Partial Symmetries of Weak Interactions*, Nucl. Phys. 22 (1961) 579.
- [31] A. Salam, *Renormalizability of Gauge Theories*, Phys. Rev. 127 (1962) 331.
- [32] S. Weinberg, *A Model of Leptons*, Phys. Rev. Lett. 19 (1967) 1264.
- [33] Gargamelle Grubu, F. J. Hasert et al., *Observation of Neutrino-like Interactions without Muon or Electron in the Gargamelle Neutrino Experiment*, Phys. Lett. B 46 (1973) 138.
- [34] M. L. Perl et al., *Evidence for Anomalous Lepton Production in e^+e^- Annihilation*, Phys. Rev. Lett. 35 (1975) 1489.
- [35] DONUT Grubu, K. Kodama et al., *Observation of tau neutrino interactions*, Phys. Lett. B 504 (2001) 218.
- [36] C. Rubbia, S. van der Meer, *Nobel Lecture*, http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1984/.
- [37] ATLAS Grubu, *Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC*, Phys. Lett. B 716 (2012) 1; CMS Grubu, *Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC*, Phys. Lett. B 716 (2012) 30.
- [38] R. Alpher, H. A. Bethe, G. Gamov, *The Origin of the chemical Elements*, Phys. Rev. 73 (1948) 803; G. Gamov, *Evolution of the Universe*, Nature 162 (1948) 680.
- [39] A. A. Penzias, R. W. Wilson, *A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s*, Astrophysical Journal, vol. 142 (1965) 419.
- [40] S. Pastor, *Relic Neutrinos: Neutrino Properties from Cosmology*, arXiv:hep-ph/0306233.
- [41] Ya. B. Zeldovich ve O. H. Guseinov, *Neutronization of Matter during Collapse and the Neutrino Spectrum*, Dokl. Akad. Nauk SSSR, v.162, No.4 (1965) 791.
- [42] Kamiokande Grubu, K. S. Hirata et al., *Observation in the Kamiokande-II Detector of the Neutrino Burst from Supernova SN1987A*, Phys. Rev. D 38 (1988) 448.
- [43] R. Bionta et al., *Observation of a Neutrino Burst in Coincidence with Supernova 1987A in the Large Magellanic Cloud*, Phys Rev. Lett. 58 (1987) 1494.
- [44] M. Aglietta et al., *On the Event Observed in the Mont Blanc Underground Neutrino Observatory during the Occurrence of Supernova 1987a*, Europhys. Lett. 3 (1987) 1315.
- [45] H. A. Bethe, *Energy Production in Stars*, Phys. Rev. 55 (1939) 103.
- [46] KamLAND Grubu, *Geoneutrinos*, Nature 436 (2005) 499.
- [47] IceCube Grubu, M.G. Aartsen et al., *Evidence for High-Energy Extraterrestrial Neutrinos at the IceCube Detector*, <http://www.sciencemag.org/content/342/6161/1242856> (22 Kasim 2013).
- [48] J. N. Bahcall, *Solar Neutrinos. I. Theoretical*, Phys. Rev. Lett. 13 (1964) 302; R. Davis, *Solar Neutrinos. II Experimental*, Phys. Rev. Lett. 13 (1964) 303.
- [49] R. Davis, D. S. Harmer, K. C. Hoffman, *Search for Neutrinos from the Sun*, Phys. Rev. Lett. 20 (1968) 1205.
- [50] Super-Kamiokande Grubu, Y. Fukuda et al., *Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos*, Phys. Rev. Lett. 81 (1998) 1562.
- [51] SNO Grubu, Q. R. Ahmad et al., *Measurement of Charged Current Interactions Produced by 8B Solar Neutrinos at the Sudbury Neutrino Observatory*, Phys. Rev. Lett. 87 (2001) 071301; *Direct Evidence for Neutrino Flavor Transformation from Neutral-Current Interactions in the Sudbury Neutrino Observatory*, Phys. Rev. Lett. 89 (2002) 011301.

- [52] Z. Maki, M. Nakagawa, S. Sakata, *Remarks on the Unified Model of Elementary Particles*, Prog. Theor. Phys. 28 (1962) 870.
- [53] V. Gribov, B. Pontecorvo, *Neutrino Astronomy and Lepton Charge*, Phys. Lett. B 28 (1969) 493.
- [54] S. Sakata, *On a Composite Model for the New Particles*, Prog. Theor. Phys. 16 (1956) 686.
- [55] M. Kobayashi, T. Maskawa, *CP-Violation in the Renormalizable Theory of Weak Interaction*, Prog. Theor. Phys. 49 (1973) 652.
- [56] OPERA Grubu, N. Agafonova et al., *New results on $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ appearance with the OPERA experiment in the CNGS beam*, JHEP 1311 (2013) 036.
- [57] Particle data Group (PDG), J. Beringer et al., *Review of Particle Physics*, Phys. Rev. D 86 (2012) 010001.
- [58] LSND Grubu, Aguilar-Arevalo, A. et al., *Evidence for Neutrino Oscillations from the Observation of $\bar{\nu}_e$ Appearance in a $\bar{\nu}_\mu$ Beam*, Phys.Rev. D64 (2001) 112007.
- [59] MiniBooNE Grubu, A. Aguilar-Arevalo et al., *A Search for Electron Neutrino Appearance at the $\Delta m^2 \sim 1\text{eV}^2$ Scale*, Phys. Rev. Lett. 98 (2007) 231801.
- [60] G. Mention et al., *The Reactor Antineutrino Anomaly*, Phys. Rev. D 83 (2011) 073006.
- [61] GALLEX Grubu, W. Hampel et al., *Final results of the Cr-51 neutrino source experiments in GALLEX*, Phys. Lett. B 420 (1998) 114; SAGE Grubu, J. N. Abdurashitov et al., *Measurement of the Response of a Gallium Metal Solar Neutrino Experiment to Neutrinos from a ^{51}Cr Source*, Phys. Rev. C 59 (1999) 2246;
- [62] WMAP Grubu, E. Komatsu et al., *Seven-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Sky Maps, Systematic Errors, and Basic Results*, Astrophys. J. Suppl. 192 (2011) 18; G. Mangano, P. D. Serpico, *A Robust Upper Limit on from BBN, circa 2011*, Phys. Lett. B 701 (2011) 296; Planck Grubu, P. A. R. Ade et al., *Planck 2013 results. XVI*, arXiv:1303.5076.

7 Temel Bilim Dışı Uygulamalar

Gökhan Ünel

Parçacık fiziğinde kullanılan verilerin çoğu parçacık hızlandırıcılarından gelir. Başarı ile çalıştırılan ilk dairesel hızlandırıcı olan döndürgeç, 1930 yılında Ernest Lawrence tarafından yapılmıştır. Şekil 49 sol tarafta görülen bu makine protonları 80 keV enerjiye çıkartıyordu. Günümüzdeki en yüksek enerjili hızlandırıcı olan BHÇ, (aynı şekil sağ taraf), protonları 4000 GeV'e hızlandırmaktadır. BHÇ 8.6 km çapı olan kocaman bir makinedir, sol taraftaki atasına göre 50 milyon kat daha fazla enerji sağlar. Bir ürünü veya onun bir özelliğini 50 milyon kat büyütmek kolay bir iş değildir: Büyük bir takım, buluşlar, yenilikler vb gereklidir. Zorlukları aşarak bu amacı gerçekleştirmek için elektronik, bilişim, malzeme bilimi gibi konularda elde var olan bilgiyi aşmak zorunluluk olmuş ve bunun sonucunda proje yönetiminden tıba kadar pek çok başka alanda da yenilikler ortaya çıkmıştır. Bu nedenle hızlandırıcı ve parçacık fiziğinin (HPF) yol açtığı yenilikler insanlığın günlük yaşamına büyük etki yapmıştır.



Şekil 49: Parçacık hızlandırıcılarında gerçekleşen başdöndürücü ilerleme: 11.4 cm çaplı 1930 model (solda), ilk döndürgeç ve 8.6 km çaplı 2008 model BHÇ eşzamanlayıcısı (sağda). İki makine arasında enerji artışı 80 keV'den 4'000'000'000 keV'e dir.

Temel bilim araştırmaları ve uygulamalar (mühendislik, tıp vs) birbirini besler. Biri olmadan ötekisi düşünülemez. CERN'de yapılan ayrıntılı Z bosonu araştırmaları bu birlikteliğe çarpıcı bir örnektir. İnsanlar yüksüz yöney boson Z'nin özelliklerinin araştırılmasının günlük hayatın gerçeklerinden tamamen kopuk, sadece bilim insanlarını ilgilendiren bir konu olduğunu düşünebilirler. Oysa günümüz toplumunun yaşam tarzını baştan aşağı şekillendiren sonuçlara yol açmıştır. Sözü geçen bilimsel araştırmaların yapılması için gereken büyük hızlandırıcı ve devasa parçacık fiziği algıçları hiçbir ülkenin tek başına sırtlayabileceği kadar ucuz ve basit değildi. Bu da çok uluslu, çok dilli işbirliklerinin kurulmasına neden oldu. Bu tür büyük işbirliklerine ev sahipliği yapan en büyük deneyevi olarak CERN öne çıkmaktadır. Dolayısıyla CERN'de çözülmeye çalışılan sorunlardan biri de işbirliklerinde yer alan binlerce insanın en etkin şekilde nasıl bilgi paylaşabileceği idi. Bu yüzden açılımı "hypertext transfer protocol" olan http'nin, yani WWW'nin CERN'de icat edilmesi hiç de şaşırtıcı olmamalıdır. CERN'in amaçlarından biri de eğitim olduğu için, WWW'yi icat edenler ilk fırsatta ilgilenen kimselere bu yeniliği tanıttı ve öğrettiler. Bunun sonucunda hiç beklenmedik bir olgu ortaya çıktı: Kişisel ağ sayfaları. Kişisel ağ sayfalarında bir çok bilgi paylaşıldı, insanlar uzmanlık alanlarında bildiklerini herkese öğretmek için çabaladılar. Geniş kitlelerin WWW üzerinden kolayca internete girebilmesinin eğitim ve araştırma için ne kadar önemli olduğunun ve bu kolaylığın özellikle iletişim kavramını tamamen değiştirdiğinin de altını ayrıca çizmek gerekir.

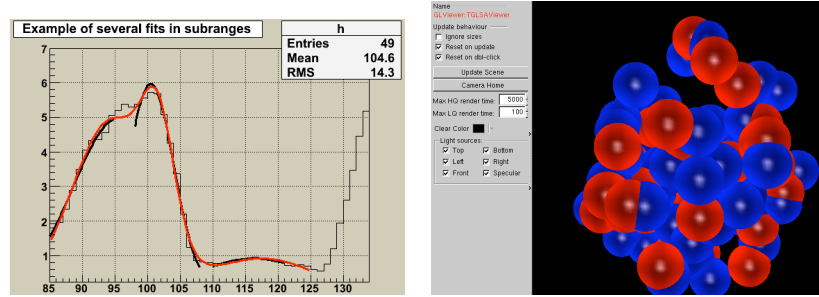
Bilimsel hedefe ulaşıldıktan epey sonra dahi, bu icadın etkileri hala hissedilmektedir. Bugün herkesin ulaşabildiği bilgi kaynağı olan Vikipedi veya internet üzerinden alışveriş günlük yaşamın ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Benzer şekilde, devletler de bu yeni buluşu benimsemiş ve e-devlet kavramı hayatımıza girmiştir. Burada açıklanan sürecin çizimsel bir gösterimi Şekil 50'de bulunabilir. Bu bölümün kalanında HPF'nin çeşitli alanlara etkisi bilişim, elektronik ve tıp alanlarında örneklerle açıklanacaktır.



Şekil 50: Bilim ve uygulamalar

7.1 Bilişim dünyasından

HPF çalışmaları bir çok ulustan bir çok kurumun katılımıyla yapılır, dolayısıyla kalabalıktır. Bu kültürler arası takımlarda iletişimi daha iyi hale getirmek için sürekli gereç geliştirme çalışmaları yapılır. Bu nedenle internetin en çok kullanılan protokolü olan http'nin, yani WWW'nin CERN'de ortaya çıkarılmış olması şartırcı olmamalıdır. Tartışıldığı üzere bu buluş, e-devlet ve e-ticaret gibi daha önce hayallerde bile olmayan kavramlara yol açtı. HPF çalışmalarının bir başka özelliği de bol bol veri üretmeleridir. Bu kadar çok verinin çözülmesi duruma özel geliştirilen veri aktarım ve çözümleme gereçlerini gerektirmiştir. ÖRGÜ (GRID) kavramı bu gereksinimleri karşılamak üzere icat edildi. ÖRGÜ ile bağlanan bilgisayarlarda sadece veri değil, işlem gücü de kullanıcılara açıktır.

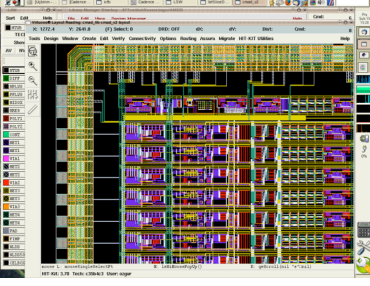


Şekil 51: ROOT kullanılarak yapılan 2 örnek çalışma: Veriye eğri oturtmak ve 3 Boyutlu molekül görselleştirmesi.

HPF laboratuvarları karmaşık donanımları bilgisayar ortamında tasarlayabilmek için benzetim yazılımları geliştirdiler. Demet ve algıç benzetim yazılımlarına örnek olarak FLUKA ve GEANT [1] verilebilir. Bunların ilkinin bazı özel şirketler de kullanır: Havayolu şirketleri uçuş takımının ve yolcuların aldıkları toplam kozmik radyasyon miktarını tahmin etmek için FLUKA kullanmak zorundadır. İkincisi ise tıp, biyoloji, uzaybilim gibi bir çok dalda kullanım alanı bulmuştur. Veri çözümlemesi için geliştirilen gereçlerden biri de ROOT'tur [2]. Bu yazılım veri çözümlemesi, algıç benzetimi, olay üretimi ve görselleştirme gibi bir çok konuda kullanılabilir. Şekil 51'de ROOT kullanılarak yapılan 2 örnek gösterilmektedir: Bir veriye eğri oturtmak ve 3 boyutlu molekül görselleştirmesi.

7.2 Elektronik dünyasından

Parçacık fiziği deneyleri yüksek radyasyonlu ortamlarda yapılmak zorundadır. Bu nedenle deneysel düzenekler en iyi radyasyon dayanıklılığı sağlayan malzemelerin ve elektronik devrelerin araştırıldığı ve kullanıldığı yerlerdir. HPF düzenekleri kurulurken elde edilen bilgi, malzeme bilimi veya ticari uygulamalar gibi farklı alanlara geri döner. Bir örnek vermek gerekirse silikon algıçlar üzerinde yapılan araştırma geliştirme çalışmaları IBM tarafından da desteklenmektedir. Bu şirket algıç yapımında öğrendiklerini Katı Hal Sürücüler (SSD) gibi ticari uygulamalarda kullanmayı amaçlamaktadır.



Şekil 52: Sol: Radyasyona Dayanıklı Amaca Odaklı Tümleşik Devre tasarımı Sağ: Tasarlanıp üretilen devrelerin denenmesi.

Parçacık fiziğindeki etkileşmeler ve dolayısıyla bunların verilerini toplama süreçleri çok hızlı gerçekleşir. Bu nedenle tüm deneysel düzenekler okuma elektroniklerinden çok hızlı yanıt almaya gereksinim duyar. Bu gereksinim de mikro elektronikte yeniliklere yol açar. Bu gelişime bir örnek olarak hızlı sıklık kilitlenmesinde kullanılan Amaca Odaklı Tümleşik Devreler (ASIC) verilebilir. Bu devreler aynı zamanda radyasyona da dayanıklı olmak zorundadır, çünkü çarpışma noktasına çok yakın yerlerde kurulup zamanlama sinyali vermeleri gerekmektedir. Şekil 52 bu işlev için tasarlanan bir ASIC ve bu devrenin yeteneklerini sınamak için yapılan düzeneği gösterir.

7.3 Tıp dünyasından

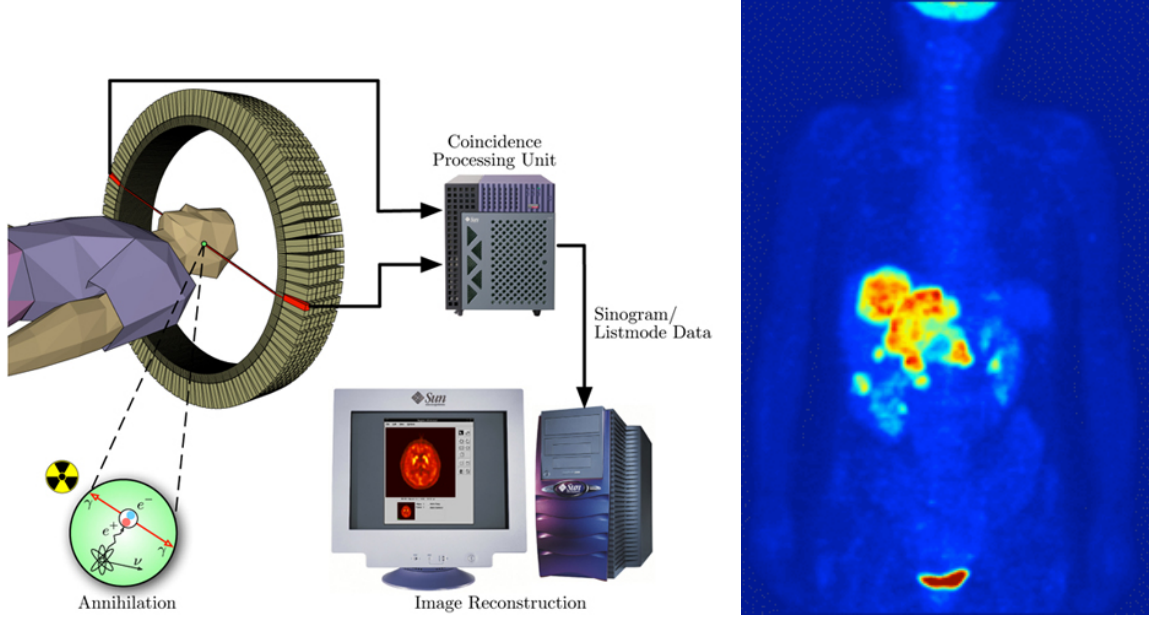
Geçmişe bakıldığında tıp alanının fiziğin yol açtığı yeniliklerden yararlandığı görülebilir. Örneğin Röntgen'in çalışmalarından yola çıkılarak yapılan tanı aletlerini hepimiz biliriz. Parçacık fiziğinin ihtiyaçlarından doğan daha hızlı algılama ve takip etme yöntemleri tıpta daha da iyi tanı gereçlerini ortaya çıkardı; bunlara örnek olarak NMR ve PET verilebilir. Bunlar önceliklere göre vücuda daha az zararlı ve daha ayrıntılı tanı yöntemleridir. Bu gereçlerin temel çalışma ilkeleri, CERN araştırmacısı Georges Charpak'ın kendisine Nobel ödülü kazandıran çalışmalarında ortaya konulmuştur.



Şekil 53: NMR yöntemi ile insan gövdesinin kesitleri görülebilir.

NMR yani “nükleer manyetik rezonans”, veya günlük dildeki şekliyle “emar”, vücudun iç yapısının ayrıntılarıyla görülmesini sağlar. Nükleer sözünün toplumda uyandırdığı rahatsızlıktan kaçınmak için bazen de kısaca MR denilen bu yöntem, insan vücudunda büyük oranda su barındırmasına, ve suyun da hidrojen atomu içermesine dayanır. En basit atom olan hidrojen atomunun çekirdeği yüksek bir manyetik alan sayesinde uyarıldığında, çekirdeğin buluna-bileceği enerji seviyesi ikiye ayrılır. Bu ayrılma kuantum fiziğinin doğrudan bir öngörüsü ve uygulamasıdır. Hidrojen çekirdeklerine uygun sıklıkta, yani titreşim(rezonans) sıklığında(frekansında) elektromanyetik dalga verilirse, çekirdekler bir üst enerji seviyesine geçer. Manyetik alanın kapatılmasından kısa bir süre sonra ise, çekirdekler daha

düşük seviyeli ilk hallerine geri düşerken, daha önce aldıkları ek enerjiyi bir foton olarak dışarı verir. Yine parçacık fiziğinin gereksinimleri doğrultusunda geliştirilen algıçlar, dışarı çıkan fotonların, geliş yönlerini ve zamanlarını ölçer. Toplanan bilgiler daha sonra bilgisayar yardımı ile 3 boyutlu bir resme dönüştürülür. Ölçümlerdeki zaman bilgisi özellikle önemlidir: Algıçlar fotonları ilk aşamada yüzeydeki dokudan, daha sonra derindeki dokudan algılar. Aradaki bu fark derinlik bilgisine erişilmesini sağlar. Bu sayede ilgili bölgenin görüntüsü kesitler halinde alınır. Zaten tomografi sözündeki tomo kesit, grafi ise resim anlamındadır.

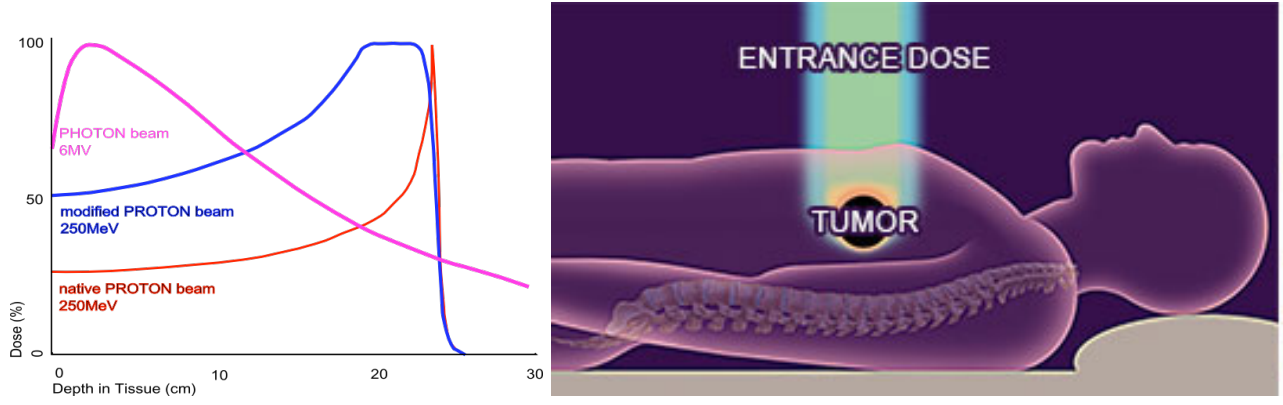


Şekil 54: PET Yöntemi ile 3 boyutlu görüntüleme mümkündür.

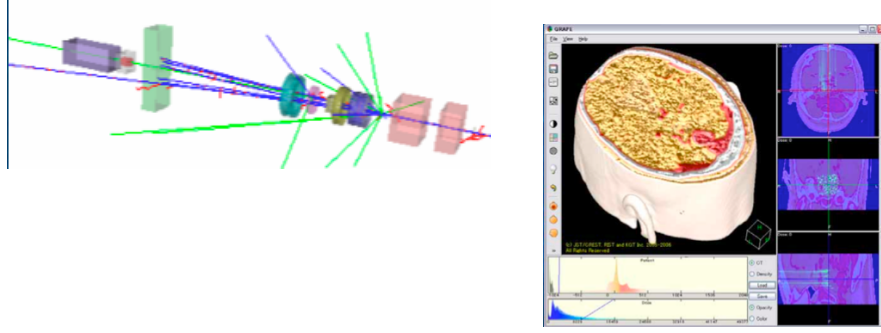
Hızlandırıcı ve parçacık fiziğinde, yüksek enerjili hızlandırıcıların yanı sıra, düşük enerjili hızlandırıcılar da kullanılır. Kullanım alanları temel bilim araştırmalarının yanı sıra yapay atomlar üretmek veya algıç geliştirmek gibi uygulamaya yönelik konular da içerir. Düşük enerjili hızlandırıcılar tıp alanına da önemli katkılar sağlamıştır. Örneğin nükleer tıbbi PET veya kanserli hücrelerin yok edilmesi olan hadron terapisi alanında kullanılırlar. PET, pozitron yayını tomografisi sözlerinin İngilizce karşılıklarının baş harflerinden oluşan bir kısaltmadır. Pozitronlar ise karşı maddeye en basit örnek olup, elektron ile neredeyse aynı özellikleri taşıyan ancak elektrik yükü eksi değil artı olan parçacıklardır. Pozitron kaynağı olarak kullanılabilen çok kısa ömürlü yapay atomlardan oluşan bir madde insan vücuduna verildiğinde, bu atomlardan yayılan her bir pozitron ulaştıkları yerdeki elektronlarla etkileşip birbirini yok ederek, ters yöne giden iki fotona dönüşür. Dışarı çıkan bu fotonları algılayabilecek bir düzenek ve fotonların ölçülen özelliklerinden yola çıkarak pozitronu yayan atomun yerini bulabilecek bilgisayar programı da kurulduğunda bir PET gereci elde edilmiş olur. Şekil 54’de bir PET düzeniği (sol taraf) ve bununla elde edilen görüntü (sağ) bulunabilir.

Sadece tanı koyma aşamasında değil, tedavi sürecinde de hızlandırıcı ve parçacık fiziği çok önemli bir yer tutar. Yüklü parçacıklar elektrik alanlar ile hızlandırılır ve manyetik alanlarla yönleri değiştirilir veya bir noktaya odaklanır. Bu sayede istenmeyen hücreler parçalanıp yok edilir. Karbon iyonu veya proton gibi ağır parçacıkların enerjilerinin en büyük kısmını girişte değil, hesaplanabilen bir derinlikte bıraktıklarını Avustralyalı fizikçi Bragg göstermiştir. Kendi adıyla anılan eğri Şekil 55 sol tarafta görülebilir. Hızlandırılmış protonlarla derindeki tümörlerin üst dokuya çok zarar vermeden yok edilebilmesi mümkün olmaktadır, bkz Şekil 55 sağ taraf. Bu yöntem Yunanca ağır anlamına gelen hadros sözünden türetilen hadron terapi adı verilir.

Hızlandırıcıların yanı sıra parçacık fiziğinde kullanılan benzetim gereçleri de tıp alanında kullanım alanı bulmuştur. Örneğin, CERN’de algıç tasarlamak için geliştirilmiş bir yazılım olan GEANT, hadron terapisi tasarlamak ve hastaya uygulanmadan önce düzenek değişkenlerini belirlemek için kullanılmaktadır [3]. Ek olarak GEANT temelli gereçler tanı bilgisinin görselleştirilmesi için de kullanılmaktadır, bkz Şekil 56.



Şekil 55: Hadron Terapisi Bragg eğrisinin tepe yaptığı yerde en çok enerji bırakmasından yararlanır.



Şekil 56: Parçacıkları algıç içinde izlemek için yazılan GEANT (sol) daha sonra PET verisinin görselleştirilmesi gibi (sağ) tıp uygulamalarına uyarlandı.

7.4 Eğitim dünyasından

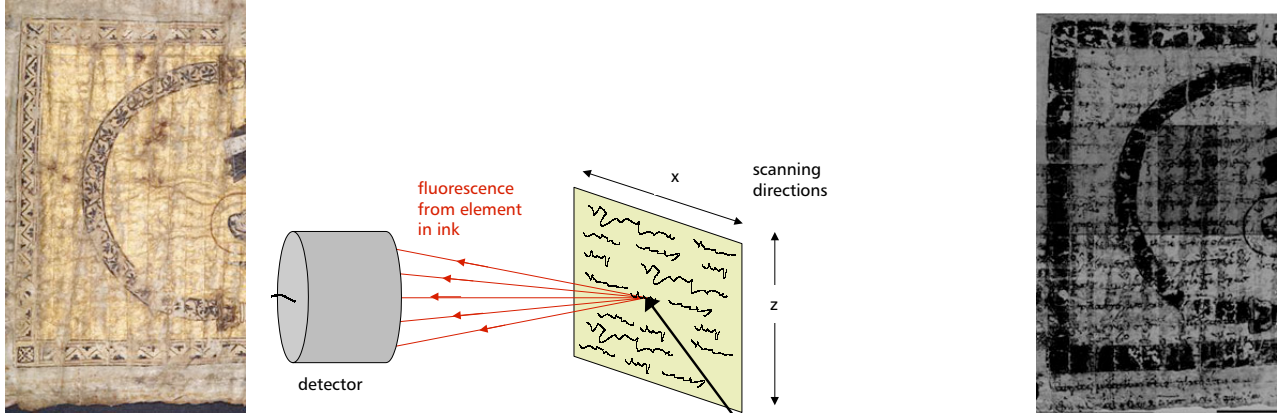
HPF çalışmalarının yüksek eğitilmiş çalışan gereksinimini karşılamak için üzerinde en çok durulan alanlardan biridir. CERN'deki kalfalık ve yaz öğrenciliği programları genç araştırmacılara 8 ile 13 hafta boyunca bilimsel araştırmaların içinde olmak ve dünyaca tanınmış bilim insanlarından dersler dinlemek olanağını sağlamaktadır [4]. Ayrıca lise öğretmenleri için düzenlenen çalıştaylar yeni ve etkin öğretme yöntemlerinin gözden geçirilmesini sağlar. Örnek olarak 2004 yılında düzenlenen lise öğretmenleri çalıştayına üye ülkelerin yanı sıra Malta, Lüksemburg, İrlanda, Kanada gibi üye olmayan ülkeler de katılmıştır. Şekil 57 genç öğrencilerin bilime olan ilgisini arttırmak için düşünülen uygulamalardan ikisinin fotoğrafını içermektedir.



Şekil 57: Lise öğretmenleri için 2004 yılında yapılan eğitim çalıştay ve sergisinden iki fotoğraf

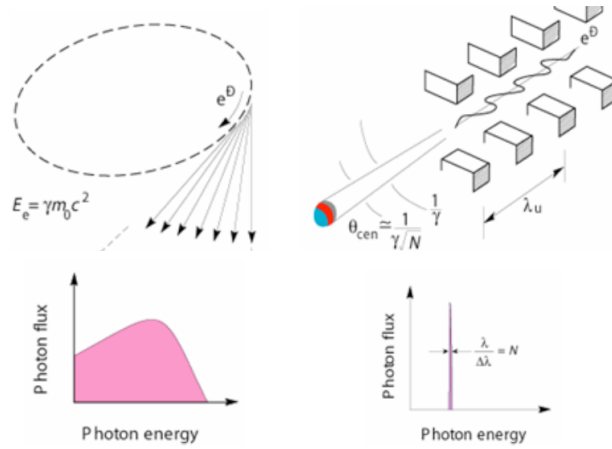
7.5 Tarih, dilbilim ve fiziğin kesişme noktası

Eski zamanlarda yaşamış en bilinen bilim adamlarından biri M.Ö. 287 ile M.Ö. 212 arasında yaşamış olan Arşimet'tir. Çalışmalarını papirüs rulolarının üstüne Eski Yunanca olarak yazmıştır. Hesaplamalar ve çizimlerden oluşan çalışmaların bir el yazması kopyası yaklaşık M.S. 1000 yılında birleştirilerek kitap haline getirildi. 200 yıl sonra ise beyaz kağıt gereksinimini karşılamak isteyen bir rahip kitabın parşömenini ayırıp, üstündeki yazıları kazıyıp yan çevirerek üzerine istediği başka yazıları (duaları) yazdı. Bu yöntem "palimpsest" yapmak olarak bilinir. M.S. 1906 yılında Danimarkalı bir filolog olan Johan Ludwig Heiberg dua kitabına dönüşmüş olan bu esere İstanbul'da rastladı ve bir çok sayfasının fotoğrafını çekerek yayınladı. Bir çok satın alınma ve kaybolma olayından sonra 1998 yılında 2 milyon amerikan dolarına kimliğini gizli tutan biri tarafından satın alınan el yazması, Arşimet'in yazdıklarını okumak isteyen bilim adamlarının eline ulaştı. Bu çalışma tarihçiler, eski yunan dilbilimcileri, kimyacılar, hızlandırıcı ve parçacık fizikçileri arasında ortaklıkla yürütülmektedir [5, ?]. HPF çalışanları konuya X ışını çözümüleme bilgileriyle katıldılar. Bu yöntem dua kitabının yazı ve resimleri altında kalmış olan asıl yazıyı (bkz Şekil. 58) ortaya çıkartmak için kesinlikle gereklidir .



Şekil 58: Arşimet'in palimpsest'inin okunma yöntemi

Altta kalan asıl yazıyı okuyabilmenin anahtarı bunu yazarken kullanılan mürekkebin(yazı boyasının) demir içermesidir. Demir atomları X ışınları ile uyarıldıktan sonra, kazandıkları enerjiyi bir foton salarak verir ve ilk durumlarına geri düşer. Salınan fotonun özellikleri bilindik HPF algıçları ile ölçülebilir. Bu yöntemle izgeölçümü(spektroskopi) adı verilir. Eğer geleneksel X ışını kaynakları kullanılırsa bulanık çıkan görüntü ancak çok dar bir enerji aralığında çalışan bir X ışını kaynağı sayesinde netleşir. Bu şekilde dar enerjili bir X ışını kaynağı yapmak için hızlandırıcı biliminin bulduğu iki yöntem Şekil. 59 de gösterilmiştir.



Şekil 59: Dar enerji aralıklı X ışını üretmek için hızlandırıcı biliminin geliştirdiği iki yöntem: Solda "eşzamanlayıcı ışınımı" yöntemi ve sağda da serbest elektron lazeri yöntemi görülebilir.

Kaynaklar

- [1] <http://www.fluka.org/fluka.php>; <http://geant4.web.cern.ch/geant4>
- [2] <http://root.cern.ch>
- [3] L. Archambault et al., "Overview of Geant4 Applications in Medical Physics", Nuclear Science Symposium Conference Record, 2003 IEEE, Vol.3, 19–25, pp.1743–1745, 2003; A. Kimura, et al., IEEE NSS record, "A visualization tool for Geant4" (2006); Med. Phys. **V32**, 6, pp1696 (2005).
- [4] <http://indico.cern.ch/tools/SSLPdisplay.py?stdate=2008-06-30&nbweeks=6>
- [5] M.E.Wright, "X-rays illuminate ancient writings", Nature, news050516-8, 2005, <http://www.archimedespalimpsest.org> .

Sonsöz

Bu kitapçığım içindeki bilgilerin açık ve anlaşılır olması için uğraşmış olsak da, bu amaca ne kadar yaklaştığımız tartışılır. Bu nedenle, sizden hatalı, eksik veya açık olmayan yerleri bize iletmenizi bekliyoruz. Hızlandırıcı ve parçacık fiziğinden çıkan teknolojiler sayesinde artık yazar ve okur arasındaki uzaklığı aşmak bir *facebook*²⁷ sayfasındaki bir yorum kadar kolay. Yaşayan ve gelişen bir eseri birlikte oluşturabilmek dilekleriyle.

Bu kitapçıkta kullanılan resimler ya CERN ya da Creative Commons lisansı altında eğitim amaçlı olarak sunulmuştur.

Teşekkür

Bu kitapçığım hazırlanması sırasında yorumlarını ve düzeltmelerini esirgemeyen Umut Erbaş Köse ve Ekin Nur Cangir'e teşekkür ederiz.

²⁷ <https://www.facebook.com/groups/318492218301483/>