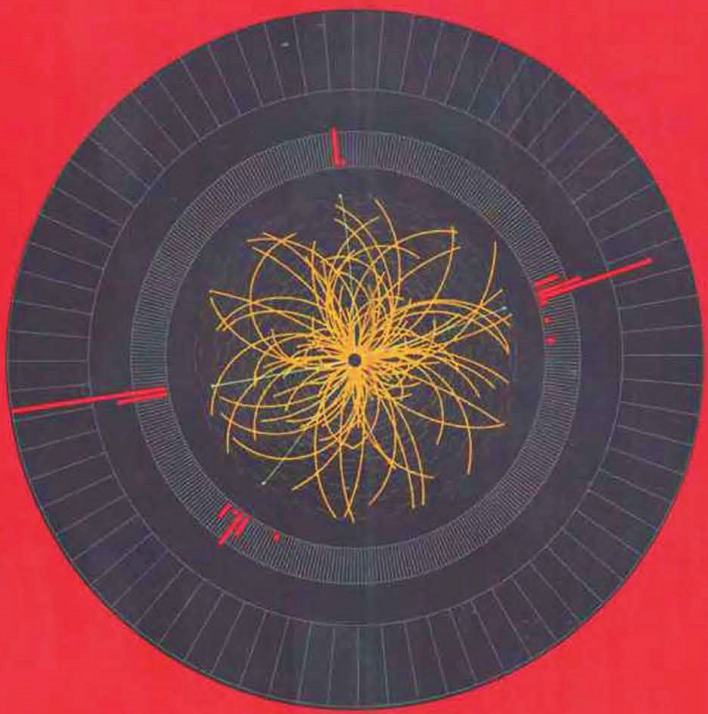
JOHN W. MOFFAT

HIGGS PARÇACIĞININ PEŞİNDE EVRENİN KODUNU KIRMAK



ALFA | BİLİM

4364 | ALFA | BİLİM | 84

Higgs Parçacığının Peşinde
EVRENİN KODUNU KIRMAK

JOHN W. MOFFAT

Danimarka doğumlu İngiliz-Kanadalı fizikçi. Toronto Üniversitesinde fahri fizik profesörüdür ve aynı zamanda Waterloo Üniversitesinde yardımcı fizik profesörü ve Perimeter Teorik Fizik Enstitüsünün kadrolu öğretim üyesidir. Moffat kütleçekim ve kozmoloji üzerine yaptığı çalışmalarla tanınır. Simetrik olmayan kütleçekim kuramı ve skaler-tensör-vektör kütleçekim (MOG) üzerine yoğunlaştığı çalışmalar 2008 yılında genel okuyucular için yazdığı *Reinventing Gravity* adlı kitabında özetlenir. Kuramı kara maddeye başvurmadan galaktik dönüş eğrilerini açıklamaktadır. Homojen olmayan kozmolojik modeller üzerindeki son çalışması, SPK verilerindeki belirli anormal etkileri açıklamayı ve evrenin genişlemesinin yakın zamanda keşfedilen ivmesini açıklamayı iddia etmektedir.

ZAFER DEVRİM

2007 yılında YTÜ Fizik Bölümünü bitirmiş ve İTÜ Fizik Mühendisliği Bölümünde yüksek lisans çalışmalarına başlamıştır. Higgs bozonunun keşfi sonrasında CERN laboratuarında CMS Hadron Kalorimetre Güncelleme çalışmalarında yer almıştır. CMS Dedektörü İleri Hadron Kalorimetresi Yenileme Çalışmalarından yayın çıkartmıştır. Hacettepe Üniversitesinde eğitim teknolojileri üzerine çalışmakta ve çeşitli kurumlarda fizik öğretmenliği yapmaktadır. Bu çeviriyi kızı Deniz'e ve bilimin ışığında aydınlanacak bütün yeni nesillere ithaf etmektedir.

Higgs Parçacığının Peşinde Evrenin Kodunu Kırmak
© 2015, ALFA Basım Yayım Dağıtım San. ve Tic. Ltd. Şti.

The Hunt for the Higgs Boson: Cracking the Particle Code of the Universe
© 2014, John W. Moff

Kitabın Türkçe yayın hakları Anatolialit Ajans aracılığıyla Alfa Basım Yayın Dağıtım Ltd. Şti.'ne aittir. Tanıtım amacıyla, kaynak göstermek şartıyla yapılacak kısa alıntılar dışında, yayıncının yazılı izni olmaksızın hiçbir elektronik veya mekanik araçla çoğaltılamaz. Eser sahiplerinin manevi ve mali hakları saklıdır.

Yayıncı ve Genel Yayın Yönetmeni M. Faruk Bayrak
Genel Müdür Vedat Bayrak
Yayın Yönetmeni Mustafa Küpüşoğlu
Dizi Editörü Kerem Cankoçak
Çeviren Zafer Devrim
Redaksiyon Gizem Gül Dinçer
Kapak Tasarımı Adnan Elmasoğlu
Sayfa Tasarımı Mürüvet Durna

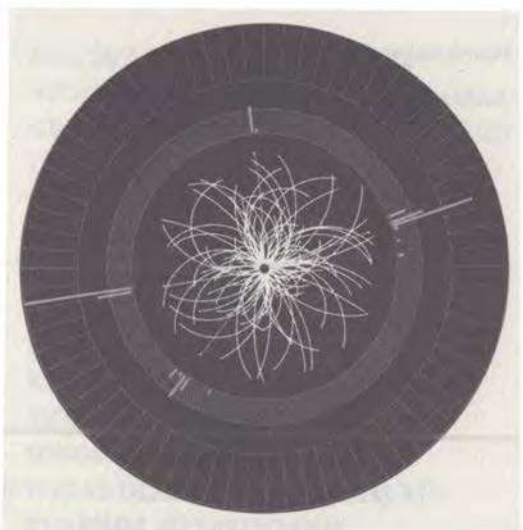
ISBN 978-625-449-660-8
1. Basım: Aralık 2022

Baskı ve Cilt
Melisa Matbaacılık
Çiftehavuzlar Yolu Acar Sanayi Sitesi No: 8 Bayrampaşa-İstanbul
Tel: 0(212) 674 97 23 Faks: 0(212) 674 97 29
Sertifika no: 45099

Alfa Basım Yayım Dağıtım San. ve Tic. Ltd. Şti.
Alemdar Mahallesi Ticarethane Sokak No: 15 34110 Cağaloğlu-İstanbul
Tel: 0(212) 511 53 03 (pbx) Faks: 0(212) 519 33 00
www.alfakitap.com - info@alfakitap.com
Sertifika no: 43949

JOHN W. MOFFAT

HIGGS PARÇACIĞININ PEŞİNDE
EVRENİN KODUNU KIRMAK



Çeviren: Zafer Devrim

ALFA

Patricia'ya Sevgilerle

İÇİNDEKİLER

Teşekkürler, 7
Giriş: Cern, Nisan 2008, 9

1 HER ŞEY NEDEN YAPILMIŞTIR? 19
2 ATOMALTI PARÇACIKLARI ALGILAMAK 62
3 GRUP KURAMI VE AYAR DEĞİŞMEZLİĞİ 91
4 LHC'DE YENİ PARÇACIKLAR ARAMAK 107
5 HIGGS PARÇACIĞI/ALANI VE ZAYIF ETKİLEŞİMLER 125
6. GECELEYİN TÜMSEK YAPAN VERİ 149
7 125-GeV TÜMSEĞİ TANIMLAMAYA ÇALIŞMAK 171
8 ELEKTRO-ZAYIF AYAR KURAMLARI 192
9 YENİ BİR BOZONUN KEŞFİ: HIGGS Mİ, DEĞİL Mİ? 221
10 DOĞAL OLARAK AYARLANMIŞ BİR EVRENDE Mİ YAŞIYORUZ? 255
11 2015'E KADAR SON SÖZ 272

Sözlük, 288
İleri Okumalar, 305
Dizin, 307

TEŞEKKÜRLER

Karım Patricia'ya kitabın düzenlenmesinde sürekli gösterdiği üstün yardım için teşekkür ederim. Müsveddeyi hazırlamak için yorulmak bilmez çabaları ve devam eden desteği, kitabı gerçeğe dönüştürdü. Anne McDermid & Associates, Toronto'daki menajerim Chris Bucci'ye desteği, teşviki ve doğru yayıncıyı bulduğu için teşekkür ederim. Çalışma arkadaşlarım Martin Green, Viktor Toth ve Vincenzo Branchina'ya taslağı erken bir aşamada okudukları ve kitabı geliştirmek için birçok değerli öneride bulundukları için minnettarım. Yararlı tartışmalar için Bob Holdom ve Alvaro de Rujula'ya teşekkür ederim. Oxford Üniversitesi Yayınlarındaki editörüm Jeremy Lewis'e parçacık fiziği konusuyla ilgilendiği ve kitabı yayınladığı için minnettarım; kitap hazırlığının son aşamalarında yardımcı olan Erik Hane, Cat Ohala ve Bharathy Surya Prakash'a da teşekkürler. John Templeton Vakfına, bu kitabın temelini oluşturan araştırmaların çoğuna cömert mali destekleri için ve de kitabın yazılması için yaptıkları desteklere teşekkür ederim. Ayrıca kendi çalıştığım enstitüm olan Perimeter Kuramsal Fizik Enstitüsüne destekleri ve kuramsal fiziğin ilerlemesinde önemli bir rol oynayan fikir alışverişi doğrultusunda fırsatlar sağladığı için teşekkür ederim.

GİRİŞ: CERN, Nisan 2008

Nisan 2008'de Cenevre'ye bir haftalık seyahatimin amacı; şimdiye kadar inşa edilmiş en büyük ve en pahalı bilimsel deney olan European Organization for Nuclear Research [Avrupa Nükleer Araştırmalar Organizasyonu], bilinen adıyla CERN'deki Large Hadron Collider (LHC) [Büyük Hadron Çarpıştırıcısı] tesislerini ziyaret etmekti. Karım Patricia'yla birlikte İsviçre sınırının hemen ardındaki Ferney-Voltaire'de konakladık. Otel penceremizden bu küçük sevimli Fransız kasabasının üzerinde yükselen Jura Dağlarının engebeli beyaz tepelerini görebiliyorduk. Her gün dar kasaba yolundan CERN 'e giderken Fransa-İsviçre sınırını iki kere geçiyor ve ovaları, çiftlikleri, kasabaları seyretmenin keyfini çıkartıyorduk.

Bu yolculuk yıllardan beri yapmayı istediğim "hac" yolculuğuydu. Muazzam parçacık hızlandırıcıyı kendi gözlerimle görmek istemiştim ki bu deneyler, parçacık fiziğinde önemli sorulara cevap bulmayı ve uzun soluklu tartışmaları sonlandırmayı vaat etmişti. Dokuz milyar dolarlık bu makine birkaç keşif için ava çıkmıştı: Bunlardan biri; fiziğin Kutsal Kasesi olan ve henüz keşfedilmeyi bekleyen, doğanın tüm kuvvetlerinin birleşik kuramının gerekli bileşenlerinden *süpersimetrik parçacıklar*dı. Bir diğer beklenen keşif ise; içinde yaşadığımız üç boyut dışında, sicim kuramı tarafından ihtiyaç duyulan *ekstra uzay boyutları*ydı. Üçüncü olarak; LHC deneycilerinin bulmayı umduğu, çoğu fizikçi için evrendeki maddenin en az yüzde 80'ini oluşturan, anlaşılmaz "kara madde"ydi. Ayrıca LHC, proton-proton çarpış-

maları sırasında belki de *mini kara delikler* oluşturacaktı, ki bu olasılık medya haberiyle şişirilerek dünya çapında bir histeriye neden oldu. Öyle ki bazı şahıslar dava açarak LHC deneyini durdurmaya kalkışmıştı.

Fakat en önemlisi LHC, parçacık fiziğinde standart modelin doğrulanması için gerekli son yapboz parçası olan ve *Higgs bozonu* adı verilen parçacığı bulma amacıyla inşa edildi. Yarım asır boyunca genel kabul gören bu kuram, atomaltı temel parçacıkları ve üç atomaltı kuvveti (kütleçekimini dışarıda bırakarak) açıklamaktadır. Bütün parçacıkların anası ise Higgs'dir. Binlerce fizikçinin 1960'ların ortalarından beri çalıştığı ve katkı koyduğu bu standart kuramda, Higgs parçacığı ya da bozonu veyahut alanı, bütün diğer temel parçacıklara neredeyse evrenin en başından beri kütlelerini kazandırmaktadır.[1]

Çoğu fizikçinin inancına göre temel parçacıkların kütleleri Higgs bozonu ve alanının boşlukla girdiği ilişki nedeniyle meydana gelmektedir. Bu fiziksel durum evrenin başlangıcı da dahil olmak üzere tüm zamanların en düşük enerjili fiziksel durumudur. Kuantum mekaniğinin bize söylediğine göre, boşluk kavramının modern anlamı; hiçbir şey içermeyen basit bir boşluk değil, aksine parçacıkların ve karşı-parçacıkların anında ortaya çıkıp, anında birbirini yok ettiği kaynayan bir kazan gibidir. Parçacık fiziğinin standart modeline göre, Higgs bozonu olmadan maddenin temel bileşenleri olan kuarklar ve leptonlar hiçbir kütleye sahip olamazdı.[2] Fizikçiler bazen Higgs alanını, akıcı bir melas [şekerli tortu, şurup] nehrine ya da uzayı içinden geçiren viskoz [yavaş akışkan] bir "esir" çeşidine benzetirler. Evrenin başlangıcında, orijinal kütlesiz parçacıklar bu ortamın için-

---

1 Temel parçacık; bir kuvvet aracılığıyla diğer parçacıkların bağlanmasından oluşmamış parçacıktır. Örneğin elektron bir temel parçacık iken proton ve nötron kuarklardan oluştukları için temel parçacık değildir.
Leptonlar zayıf etkileşimli parçacıklardır. Örneğin elektron, muon, tau ve nötrinolar gibi.

den geçerken yapışkan kütle denen bir özellik kazandılar. Bu fikir bir Higgs alanına ihtiyaç duyulmasına neden oldu. Fikrin kaynağı ise düşük sıcaklıklarda süper iletken fiziğine dayanmaktadır; anahatlarıyla Rus fizikçiler Lev Landau, Vitaly Lazarevich Ginzburg, daha sonra da Nobel Ödüllü Amerikalı bilim insanı Philip Anderson'la anılmaktadır. Higgs parçacık fiziğinin standart kuramı için o kadar önemlidir ki rumuz olarak *Tanrı Parçacığı* ismi takılmıştır.

Bu zamana kadar standart modelin bütün diğer öngörüleri deneyler tarafından doğrulandı. 1970'ler boyunca Stanford Linear Accelerator (SLAC) [Stanford Doğrusal Hızlandırıcı] deneyleri Murray Gell-Mann'ın ve George Zweig'ın kuarklarla ilgili 1960'lar dönemi tahminlerini kanıtlamıştı. Ve 1983'te radyoaktif bozunmanın zayıf çekirdek kuvvetinin tahmin edilen taşıyıcı parçacıkları, *W ve Z bozonları* CERN'de keşfedilmiştir. Zaman içerisinde kuarkların ve leptonların üç temel aileleri çarpıştırıcılar tarafından belirlendi ve yeğin nükleer kuvvetin taşıyıcısı 'gluon'un varlığı kanıtlandı. Bugün sadece Higgs bozonunun bulunması kaldı. "O"nun keşfi ise olağanüstü yüksek enerjiler üretebilen çok daha büyük hızlandırıcıları beklemek zorundaydı. Bu yüksek kütleli parçacığın belirlenmesi için zorunlu enerjiler, Büyük Patlamanın hemen sonrasında evrenin başlangıcındaki ilk saniyenin ilk anında var olan sıcaklığa eşdeğer olmalıydı.

LHC'deki dedektörler CMS (Compact Muon Solenoid)* ve ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus)† deneylerinde çalışan iki grup 4 Temmuz 2012'de yeni bir bozonun keşfini ilan etti. Kütlesi 125 GeV, yani 125 milyar elektron volt civarındaydı.[3] Bu bozon standart modeldeki Higgs bozonunun özel-

---

Kompakt Muon Solenoid dedektörü –çn.

Toroidal Büyük Hadron Çarpıştırıcısı aygıtı –çn.

Einstein'ın özel göreliliğinde enerji kütleye eşdeğerdir. Aynı ünlü formülünde olduğu gibi: $E=mc^2$. Bu nedenle biz fizikçiler parçacık kütlelerini enerji birimleriyle ifade ediyoruz; elektron volt (eV), bin elektron volt (KeV), milyon elektron volt (MeV), milyar elektron volt (GeV), trilyon elektron volt (TeV) vb. Örneğin elektronun kütlesi 0,5

liklerine sahip görünüyordu, fakat deneysel gruplar onu Higgs bozonu olarak tanımlamakta tereddüt etti. Fizikçilerin çoğu bu yeni bozonun Higgs bozonu olduğuna inansa da halen LHC deneycilerinin 2012 data veri analizlerini tamamlamasını ve 2015'te tekrar çalıştırılacak hızlandırıcının, daha çok veriyle yeni bozonun kesin kimliğini doğrulamasını bekliyoruz.

Parçacık fiziğinin standart kuramı tüm zamanların en başarılı fizik kuramlarından biridir. Bu kuram, James Clerk Maxwell'in elektromanyetizması, Isaac Newton'ın kütleçekimi, Albert Einstein'ın genel görelilik kuramı ve erken 20. yüzyıl boyunca bir düzine kadar fizikçinin ortak teşebbüsü olan kuantum mekanik kuramına eşdeğerdir. Tüm binayı ayakta tutan son mekanizma olmasına rağmen Higgs bozonu 2008 yılındaki CERN ziyaretim sırasında halen bulunamamıştı. Fizikçilerin çoğu kuramı sorgusuz kabul ederken Higgs'in keşfini kaçınılmaz, hatta formalite olarak kabul ediyorlardı. Öyle ki Nobel komitesi bile fizik alanında beş Nobel Ödülünü standart model üzerine çalışan kuramcılara ve deneycilere vermişti. Oysa Higgs bulunamadığından dolayı standart model, tamamen ispatlanamamış bir kuramdı. Higgs bozonunu bulmak o kadar kesin görülüyordu ki 2008'de, onu öngörenlerden hangisinin Nobel Ödülü alacağı tartışma konusu olmuştu; 1964'te üç aylık bir periyotta, toplamda altı fizikçi *Physical Review Letters* dergisinde kısa makaleler yayımlamıştı. Bu makaleler temel parçacıklara kütlelerini kazandırmanın yollarını öngörüyordu. Fizikçiler de François Englert, Robert Brout, Peter Higgs, Carl Hagen, Gerald Guralnik ve Tom Kibble'dı. Stockholm komitesi bir ödülü üç kişiden fazlasına veremediği için eğer Higgs keşfedilirse bu altı fizikçiden hangilerinin ödülü alacağı çelişkisi kafalarını yoracaktı. Hepsi de hevesle Nobel Ödüllerini beklerken Higgs bulunana kadar hayatta kalmaya çalışıyordu. Çünkü Nobel komitesi,

MeV, protonunki 938 MeV, W bozon 80 GeV ve üst kuarkın kütlesi ise 173 GeV'dir.

öldükten sonra kimseye ödül verilemeyeceği kuralıyla da kısıtlanıyordu.[4] Hal böyleyken işleri daha da karmaşıklaştıran yedinci bir fizikçinin varlığı oldu. Princeton Üniversitesinden Philip Anderson 1963'te yeni ufuklar açan bir makale yayımlamış, şimdilerde *Higgs mekanizması* diye anılan, parçacıklara kütle kazandıran bir sistem önermişti. Bu kadar tartışma arasında şunu da eklemek gerekir ki İngiliz fizikçi Peter Higgs makalesinde gerçek bir parçacığı açıkça öngören tek makaleyi kaleme almıştı.

Ancak ya parçacık fiziğinin standart kuramı doğru değilse ve parçacıklar kendi kütlelerini başka bir yol bulup türetmişlerse? Ya da Tanrı parçacığının müdahalesine gerek kalmadan en başından itibaren kendi kütlelerine sahiptilerse? Ya Nobel komitesi parçacık fiziğinin standart modeline ödülleri verirken erken karar verdiyse? Ya Higgs bozonunun 125 GeV'deki baştan çıkarıcı ipuçları buharlaşsa ya da tamamen değişik yeni bir parçacığa dönüşürse? Ya da muazzam LHC, Higgs bozonunu hiç bulamasa ne olurdu?

Bu sorular benim Cenevre'ye 2008'de yaptığım hac yolculuğunun ikinci nedeniydi. Kütleçekim ve kozmoloji üzerine yaptığım araştırmamın yanı sıra 1991'den beri alternatif bir parçacık fiziği kuramı üzerinde çalışıyordum. Kuramımda bir Higgs bozonu bulunmuyordu. Benim *alternative elektroweak theory* [*alternatif elektro-zayıf*] kuramımın matematiğinde bütün temel parçacıklar başlangıçta kütlesizdi. Fakat kütlesiz foton dışında, diğer parçacıkların kütleleri, tek bir parçacık ve onun ilişiğindeki boşluk özellikleri tarafından üretilmek yerine, kuantum alan kuramının olağan dinamik süreçleriyle üretiliyordu.[5] Kuark ve leptonlar ile W, Z bozonları gibi ilk gözlemlenen temel parçacıklar, kuantum

[4] Ne yazık ki Robert Brout Mayıs 2011'de öldü. Öte yandan bu durum, Nobel komitesinin kararını kolaylaştırmaktadır.

[5] Modern parçacık fiziğinde, kuantum mekaniği ve görelilik, kuantum alan kuramı adı altında birleştirilmiştir. Her temel parçacığın ilgili bir alanı vardır. Bu alan kuantumlanmış olduğu için parçacık alanı, kuantum mekaniği ve görelilikle tutarlıdır. Kuantum alan kuramı parçacık fiziğinde hesaplamaları yapmak için kullanılır.

alan dinamikleri içerisindeki kendi enerjileri aracılığıyla kütlelerini kendileri üretiyordu. Dahası benim kuramım şimdiye kadar standart modelde gözlemlenen parçacıklar dışında yeni bir parçacığa da ihtiyaç duymamaktaydı. Örneğin süpersimetri kuramında olduğu gibi yıllar boyunca geniş bir araştırma endüstrisi haline gelmiş varsayımsal parçacıklara duyulan gereksinime, benim kuramımda ihtiyaç duyulmuyordu. Bana göre kuramım, temel parçacıkların, alanların ve kuvvetlerin daha ekonomik bir tanımlaması gibiydi. Alternatif bir elektro-zayıf kuram inşa etmeye çalışan ilk ve tek fizikçi ben değildim. Standart modele dahil edilen skaler alanları ve Higgs mekanizmasını yok sayma girişimleri 1970'lerin başından beri süregelmektedir.[6] Başta Massachusetts Teknoloji Enstütüsü (MIT) bünyesinden Roman Jackiw ve Kenneth Johnson örnek gösterilebilir.

Nisan 2008'de CERN kuram bölümüne o hafta yaptığım konuşmanın ismini "Higgs Parçacığı Olmadan Elektro-Zayıf Model" koymuştum. Parçacık fiziğinin standart modelinde Higgs mekanizması üzerine yıllarca, hatta on yıllarca çalışmış ve muazzam yeni makinelerinin onu nasıl bulacağını çok uzun zaman hayal etmiş kuramcı ve deneycilere karşı kışkırtıcı bir başlık seçmiştim. Konuşmamdan iki hafta önce LHC resmi açılışını yapmıştı. Edinburgh Üniversitesinden emekli fizik profesörü Peter Higgs de açılışta bulunuyordu. Bir gazetecinin, kendi adı verilen parçacığın bulunması için 9 milyar dolar harcanması konusunda ne hissettiğini sorması üzerine Peter'ın cevabı "yüzde 96 oranında eminim ki parçacığı keşfedecekler" olmuştu.

Konuşmamı yapacağım gün Patricia'yla kiralık arabamızı CERN ziyaretçi girişi önündeki otoparka park ettik. Dört bir yana ayrılan araştırma koridorlarından geçerek kuram binasına doğru yöneldik. Cambridge Üniversitesinden üç-

[6] R. Jackiw ve K. Johnson, "Dynamical Model of Spontaneously Broken Gauge Symmetries", *Physical Review*, D8, 2386-2398 (1973).

retli izin alarak 1972'deki ziyaretimden ve ziyaretçi öğrenci olduğum 1960/1961 yıllarından binayı hatırlıyordum. İkinci kattaki idari ofise çıkan merdivenlerde aklıma bir anda buranın yarım asra yakındır pek az değiştiği geldi. Koridorlar karamsar ve soluk, ortam bezgin ve ihmal edilmiş bir hava yayıyordu. Daha sonradan erkekler tuvaletindeki kâğıt tutacağının kırık olduğunu fark ettiğimde yıllar önceki ziyaretimden beri değişmediğini anladım. Görünen o ki LHC üzerindeki 9 milyar dolarlık fiyat etiketi, kuramsal fizikçilerin çalışma alanlarının yenilenmesini kapsamıyordu.

Konuşmam, ikinci kattaki konferans salonunda saat iki olarak duyurulmuştu. Salonun önünde semineri organize eden kuramsal fizikçiyle beklediğim ilk birkaç dakika boyunca dördüncü sırada oturan eşim dışında geniş anfitiyatronun yükselen koltuklarının bomboş olduğunu görüyordum. Aklıma gelen ilk düşünce *"Aman Tanrım! Belki de cüretkâr başlığıma tepki olarak kimse gelmeyecek"* olmuştu. Neyse ki çok geçmeden 50 civarında kuramsal ve deneysel fizikçi odaya yerleşmeye başladı. Konuşmamın beşinci dakikasında daha önceden karşılaşmış olduğum New York Üniversitesinden (NYU) bir profesörün gelip arka sıralara oturduğunu fark ettim. Kısa bir zaman sonra yüksek sesiyle kuramıma teknik karşı çıkışlarını savurmaya başlamıştı. Hemen arkasından da sözlü bir düello başladı. Yıllar boyunca gelen seminer tecrübelerime şükürler olsun ki onun bu çıkışlarını seminere devam etmeme yetecek kadar bastırabilmiştim. Başka müdahaleler de olmaya başladı ve ben Higgs parçacığı olmayan bir parçacık fiziği kuramı fikrine karşı katılımcılarda giderek büyüyen bir düşmanlık olduğunu hissedebiliyordum. Konuşmamın sonlarına doğru arka sıradaki NYU profesörü heyecanla tekrar söz alarak; anladığı kadarıyla kuramımda Higgs parçacığının değişmiş bir şekilde yer aldığını açıklarken hemen yanında oturan CERN'in kıdemli kuramcılardan Alvaro de Rújula duyulabilecek bir sesle kulağına "Moffat, Higgs parçacığını kuramına *almamış*" diye fısıldadı ve profesörümüzün afallayarak bundan sonra sessiz kalmasına neden oldu.

Konuşmam bittiğinde, 'parçacık fiziğinin standart modelinde elektro-zayıf kuram' konusunda bir uzman olan kuram bölümünün kıdemli fizikçisi Guido Altarelli dramatik bir şekilde "eğer Moffat haklıysa ve hiçbir yeni parçacık keşfedilmezse bu durum parçacık fiziğinin sonu olur! Peki bundan sonra ne yaparız?" diye bir soru yöneltti.

Bunun üzerine benim "Hepiniz emekli olabilirsiniz!" şeklindeki esprili yanıtım odadaki gerilimi bir nebze olsun kırmaya yetmedi.

Ve ben de Altarelli'nin vurguladığı noktaya işaret ederek "Ne demek istiyorsun Guido, bu gerçekten de parçacık fiziğinin sonu mu demek?" diye devam ettim.

Uzun boylu, yapılı bir İtalyan olan Guido izleyicilere dönerek "Demek istediğim, hükümetlerin artık bize yeni parçacık hızlandırıcılar yapmak için para vermeyeceği ve deneylerimize devam edemeyeceğimiz, bu da parçacık fiziğinin sonu demektir" dedi.

"Fakat fiziğin işleyiş şekli bu değil" dedim, hayretler içinde; "Higgs bulunmamış olsa, hatta aslında hiçbir egzotik parçacığa daha fazla ihtiyaç duyulmasa bu durum, maddenin doğasıyla ilgili çok fazla yeni soruyu gündeme getirir ve perdesi kalkmamış yeni gizemleri ortaya çıkartır. Hatta bu tarz durumlar genellikle fizikte bir devrime öncülük eder."

Seyircilere meşhur Michelson-Morley deneyini hatırlattım. 19. yüzyıl sonlarına kadar bütün bilimcilerin doğru kabul ettiği "ether" [esir] kavramını ispatlamak için Birleşik Devletler'de yapılan bu deney başarısız olmuştu. O günün bilim insanları açısından, elektromanyetik dalgaların yayılabilmesi için bir ortam olması mutlak gereklilikti. Dalgalar mutlaka *bir şey* vasıtasıyla hareket etmeliydi. Fakat Michelson ve Morley'in marifetli deneyi sayesinde esirin olması gerektiği yerde hiçbir şeyin olmadığı görüldü. Fizik camiası şok içinde olmasına karşın kesinlikle fiziğin sonu gelmemişti. Einstein'ın bunu takip eden keşfi olan özel görelilik ve Max Planck'ın enerjinin kuantumlanması keşfi kuantum fiziğine önderlik etmiş, yeni bir dönemin başlangıcını müjdelemişti.

Benzer bir durum LHC'de Higgs bozonu bulunmadığı zaman fizik atılımına itme gücü oluşturabilir. Özellikle de parçacık fiziğini ateşleyebilir diyerek konuşmamı tamamladım.

Fakat ne Altarelli ne de diğer konuklar ikna olmuş gibi görünüyordu. Konuşmamın sonundaki sorular ve yorumlar giderek daha şüpheci, hatta düşmanca bir hal almıştı.

Alternatif elektro-zayıf kuramımın CERN kuram grubu tarafından aldığı karşılıktan hayal kırıklığına uğramış, fakat şaşırmamıştım. Biliyordum ki egemen paradigmayla ilgili şüphe ifade etmek bile çatışmaya neden olur. Fizikçiler de diğer insanların çoğu gibi inşasına yardım ettikleri kuramsal yapıların doğruluğuna ve güzelliğine duygusal bir yatırım yaparlar. Bu yapıların yanlış ya da tamamlanmamış olabileceğini tartışmaya açmak onlara inananların altlarındaki halıyı çekmek anlamına gelir. Öte yandan Higgs bozonu içeren standart modelin çok cazip özellikleri vardır. Mesela 1960'lardaki W ve Z bozonlarının Sheldon Glashow, Steven Weinberg ve onlardan bağımsız olarak Abdus Salam tarafından şık bir şekilde öngörülmesi gibi. W ve Z bozonlarının 1983'te CERN'de keşfedilmesi, bu kayda değer öngörüyü doğrulamıştır. Dahası, Higgs bozonunun birleşik elektro-zayıf kurama dahil edilmesi standart modelde fiziksel niceliklerin sonlu hesaplamalara sahip olacağını garanti altına alır.

Yakında, onyıllar yerine birkaç yıl içinde Higgs bozonu bulmacasına dair soruların cevapları bulunmuş olacaktı; LHC'nin proton ışınları birbirleriyle çarpışacak ve atomaltı enkazını şimdiye kadar yapılmış en büyük ve en karmaşık dedektörlerin içine saçacaktı, fizikçiler de uçsuz bucaksız miktardaki bu veriyi, çarpışmaların istatistiksel şablonları olarak analiz edecekti. Ve bu yapılan çok sayıda ve çok büyük deneylerin sonucunda da CERN o beklenen duyuruyu yapacaktı. Ya LHC nihayet Higgs bozonunu keşfederek parçacık fiziğinin standart modelini her yönden doğrulamış olacak ya da LHC'nin bulamadığı Higgs bozonu nedeniyle standart

model yeniden test edilip değiştirilmek zorunda kalacaktı. Eğer ikincisi gerçekleşseydi konuşmamın sonunda bu şüpheci CERN fizikçileri kalabalığına başka türlü seslenebilirdim. Onlara "Farklı Fikirler" kuyruğunun en başında olduğumu söyler, içinde Higgs bozonu olmayan alternatif elektro-zayıf kuramımı ciddi bir değerlendirme için önerebilirdim.

Haftanın sonlarına doğru Patricia ile birlikte yeni parçacık hızlandırıcı açılmadan önceki son turlardan birine katıldık. Makine bir kez çalıştırıldığında ve protonlar LHC'nin 27 km'lik çemberinde dolaşmaya başladığında radyasyon seviyesi o kadar ölümcül oluyor ki makineye girişler kesin bir şekilde yasaklanıyor. Muazzam ATLAS dedektörünün seyir balkonunda dururken o devasa boyutunun yanında ezilme hissi yaşadık. Sadece bu dedektörü yapmak için kullanılan demir miktarı Eiffel Kulesi içindeki bütün demir miktarına eşittir. Rengârenk kablolar, karmaşık elektronik parçaların içinden dolanırken, gözlerimize bir Avrupa Katedrali boyutlarında görünen bu görkemli dedektörü oluşturuyordu. Diğer üç dedektörle beraber ATLAS, protonların birbirine gireceği ve büyük miktarlarda parçacık enkazları oluşturacak bir merkezdi. Çarpışma sonuçları yıllar boyunca, dünya çapında yayılmış bilgisayar şebekesi tarafından analiz edilecekti.

Bu yazıdan beş yıl sonra LHC bakım, onarım ve 13 TeV'den 14 TeV enerjiye kadar yükseltilmek için iki yıllığına kapatıldı. Geçen iki yıl içerisinde LHC'nin bulmuş olabileceği şey için muazzam bir heyecan yaşandı. Birçok fizikçi Higgs bozonunun bulunması şerefine şampanyalar patlattı. LHC kapanmadan önce biriktirilen veri analiz edildi ve standart modeldeki Higgs bozonuyla tutarlı bulundu. Ancak bu kitapta öğreneceğimiz gibi geriye bazı kritik deneysel meseleler kaldı, ki Higgs'e benzeyen bu yeni bozonun tam olarak ne olduğunu belirlemek zorunludur. Bu da ancak 2015'te makine tekrar açıldıktan sonra çözülebilir...

1

HER ŞEY NEDEN YAPILMIŞTIR?

MÖ beşinci yüzyılda Yunan filozofu Leukippos ve öğrencisi Demokritos (MÖ 460-370) aşağı yukarı 2000 yıl önceden parçacık fiziğinin standart modelinin kehanetini görmüşlerdi. Maddenin temel bir birime kadar parçalanabileceğini iddia ettiler. Bu iddia Aristoteles'in (MÖ 384-322) felsefesiyle tezat bir duruş oluşturdu. Aristoteles'in fikirleri Platon'a dayanıyor ve o günün temel bakış açısını belirliyordu. Bu öğretide temel elementler dünyasal olan ateş, su, toprak ve havayla beraber göksel element esirdi. Leukippos ve Demokritos ise kendi temel birimlerine Yunancada "bölünemez" ya da "kesilemez" anlamına gelen *atom* adını vermişlerdi. 1964'te Murray Gell-Mann tarafından yaratılan kuark modelinin yayımlanması ve George Zweig'ın aslar [ace] için yaptığı bağımsız teklif sonucunda Antik Yunan'daki basit madde birimi fikri tekrar gündeme geldi. Bu sayede kuarklar, leptonlarla birlikte sonunda maddenin temel yapı taşları olarak kabul gördü.[1]

YAPI TAŞLARINI BULMAK

Parçacık fiziğinin uzun bir tarihi vardır. On dokuzuncu yüzyıla ve atomların keşfine kadar uzanır. Maddenin küçücük,

[1] Bazı fizikçiler kuarkların son basit ve bölünemez temel (madde birimleri) parçacıklar olduğunu sorgulamaktadır; kuarkların prekuarklardan oluştuğunu iddia etmektedirler. Büyük hadron çarpıştırıcısı [hızlandırıcısı] bu prekuarkları, preonları ve diğer muhtemel kuark bileşenlerinin doğasını araştırmaktadır, fakat henüz bunlara dair bir kanıt bulamamıştır.

bölünmez birimlerden oluştuğunu iddia eden indirgemeci bakış açısı ilk ciddi doğrulamasını, 1897'de J. J. Thomson Cambridge Üniversitesinde elektronu keşfettiğinde kazandı. Ernest Rutherford'un 1919 civarında protonu keşfi bir başka önemli madde birimini tanıttı. Ortasında pozitif yüklü parçacık bulunan hidrojen atomu etrafında Thomson'ın negatif yüklü elektronu vızıldayan bir sinek gibi geziyordu. 1932'de James Chadwick ilk parçacık hızlandırıcıda nötronu keşfedene kadar maddenin yapı taşları olarak proton ve elektronun hâkimiyeti kırılamamıştı. Bu çekirdek fiziğinin doğuşu oldu. Daha karmaşık atom ve moleküllerin çekirdeklerinin daha farklı sayıda bağlanmış protonlar ve nötronlardan oluştuğu keşfedilmişti.

Radyoaktif beta bozunumu veya 1896'da Henri Becquerel tarafından keşfedilen maddenin dönüşümlülüğü, bu çekirdeklerin bir kısmının *nötrino* denilen başka bir madde birimini serbest bıraktığını ortaya çıkardı. Kütlesiz, elektriksel olarak nötr bir parçacık. Nötrinonun keşfi esnasında, sıfır kütlesi olduğuna inanılıyordu. Bu sayede Einstein'ın özel görelilik kuramı gereği ışık hızında hareket ediyordu. Nötrino ilk kez 1931'de Wolfgang Pauli tarafından radyoaktif bozunmalarda gözlemlenen eksik enerjiyi açıklamak için önerilmişti. Pauli bu enerjinin görünmeyen nötr bir parçacık tarafından taşındığını tahmin etti. Nötrinonun varlığı 1959'da Fred Reines ve Clyde Cowan tarafından kanıtlanana kadar deneysel olarak onaylanamadı.

1928'de Paul Dirac tarafından geliştirilen ünlü Dirac denklemi, elektron için Einstein'ın özel görelilik kuramına uygun bir parçacık-dalga tanımlaması sağlamıştır. Bununla birlikte ilginç bir yan ürüne sahipti; aynı zamanda karşı-maddenin varlığını öngörmüştü. Carl Anderson'un 1932'de "pozitron"u dedektörde gözlemlemesi, yani artı yüklü elektronun varlığının kanıtlanması Dirac için bir zaferdi. Sonunda bu keşif her basit madde biriminin, bir karşı-madde eşinin olduğunun anlaşılmasına yol açtı. Örneğin protonun karşı-parçacığı karşı-protondur.

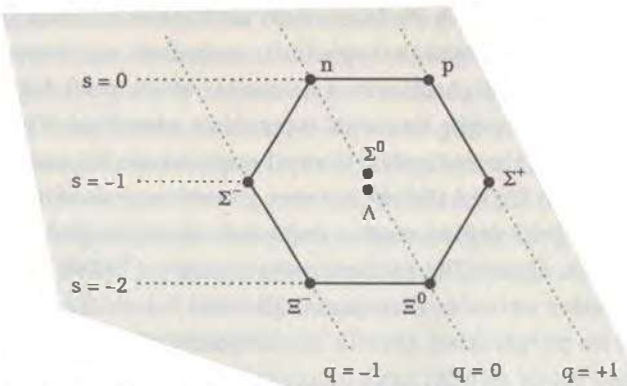
Parçacıkları daha yüksek enerjilerde çarpıştıran hızlandırıcılar geliştirildikçe daha fazla parçacık ve onların karşı-madde eşleri keşfedildi. Bir tür ağır elektron olan muon, Carl Anderson ve Seth Neddermeyer tarafından Caltech laboratuvarlarında 1936'da keşfedildi. Ardından mezonların keşfi geldi. Bu parçacıkların o zamanlar atom çekirdeğini bir arada tutan yeğin kuvvetin taşıyıcıları olarak görülmesi, fotonun elektromanyetik kuvveti taşımasına benzetildi. 1935'te Japon fizikçi Hideki Yukawa, protonların ve nötronların atom çekirdeğine mezon değiş tokuşuyla bağlandığını öngördü. İkinci Dünya Savaşından sonra 1947'de Cecil Powell, César Lattes ve Giuseppe Occhialini Bristol Üniversitesinde bu parçacıkları kozmik ışınlar içerisinde tespit etti.

YAPI TAŞLARINI GRUPLAMAK

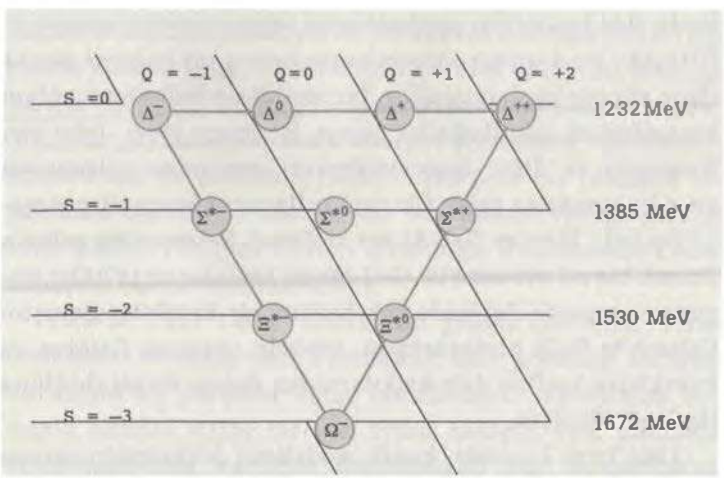
Elektron, proton, nötron, nötrino, karşı-madde, mezon, muon, . . . ! sırada ne var? 1950'lerin ortalarında hızlandırıcılarda yeni keşfedilen parçacıkların sayısı o kadar fazladır ki fizikçiler bu durumu parçacıkların *hayvanat bahçesi* olarak ifade etmeye başlamışlardır. Parçacıkların bolluğuna anlam kazandırmak için fizikçiler onları, Hermann Weyl, John von Neumann ve diğer matematikçiler tarafından geliştirilen grup kuramından gelen fikirleri kullanarak kategorize etmeye başladı. Murray Gell-Mann ve Yuval Ne'eman bu çabada önemli bir rol oynamıştır. Gell-Mann 1960'lar ve 1970'ler boyunca parçacık fiziğinde çok baskın bir karakter olmuştu. Caltech'te fizik profesörüydü, 1969'da parçacık fiziğine ve kuarkların keşfine dair katkılarından dolayı Nobel Ödülüne layık görülmüştü.

1960'ların başında, kuark modelinin hikâyesinin ortaya çıkışından önce, Gell-Mann *Budist Kutsal Sekiz katlı Doğru düşünce ve eylemlerin yol açtığı aydınlanma Yolu*'na atıfta bulunarak *Sekiz Katlı Yol* dediği şeyi geliştirdi. Önerisi; şimdi *baryonlar* olarak adlandırılan (proton, nötron ve spinleri ½ ve 3/2 olan kuzenleri) oktet (sekizliklere) (Şekil 1.1) ve de-

kuple (onlulara) (Şekil 1.2) gruplara uygun hale gelebilmesiydi. Bu gruplar aynı zamanda SU(3) adlı grup kuramındaki sekizli ve onlu simetri gruplarına uyabiliyordu.



Şekil 1.1 Gell-Mann'ın Sekiz Katlı baryon Yolu (baryonlar için sekizli yol). Burada *s* acayiplik kuantum sayısı ve *q* elektrik yükü için kullanılır. Kaynak: tikalon.com.



Şekil 1.2 Barıyonların onlu (ayrılmış, parçalanmış) Gell-Mann Sekiz Katlı Yolları. Kaynak: Wikipedia Commons.

Onlu [Dekuple] içindeki baryonlardan biri eksikti. Üçgenin tabanında olması gereken parçacığın yerinde hiçbir şey

yoktu. Kalıplı şemasından emin olan Gell-Mann eksik parçacığın var olması gerektiğini öngördü. Onu Ω^- (Omega eksi, negatif yüklü bir rezonans) olarak adlandırdı.[2] Gell-Mann'ın sınıflandırma planı 1964'te Brookhaven Üniversitesi, Rochester Üniversitesi ve Syracuse Üniversitesinden bir fizikçi ekibi Omega eksi parçacığını keşfettiğinde doğrulanmıştır.

Parçacık fiziği terminolojisine girmeden önce, bazı kısa açıklamalar yapılmalıdır. Spin, farklı parçacıkları karakterize eden birkaç parametreden biridir. 1925 yılında Samuel Goudsmit ve George Uhlenbeck tarafından kuantum mekaniğinin erken gelişimi sırasında keşfedilen esaslı, gerçek bir kuantum sayısıdır. Spin sadece kuantum mekaniğinde anlam taşıyan bir özgürlük derecesidir (serbestlik derecesi). Klasik mekanikteki karşılığı (vücudunun üstü) tepesi dönen bir cismin açısal momentumu olabilir, ancak kuantum mekaniğindeki spin kavramının tam klasik bir açıklaması yoktur. Bir parçacığın spini yukarı ya da aşağı yönlü olarak tanımlanır. Büyüklüğü; bozonlarda 0, 1, 2 gibi tamsayı değerler olabilirken, fermiyonlarda ½ ve 3/2 gibi yarımın katlarını alır. Fiziksel birimlerde parçacıkların spinleri Planck'ın sabitinin katları olarak verilir. Planck sabiti h olduğuna göre örneğin; elektronun spini ½ h'dir.

Parçacıkları karakterize eden diğer bazı özellikler elektrik yükü, kütle ve paritedir (sol-ellilik veya sağ-ellilik). Grup kuramı 3. Bölümde daha ayrıntılı olarak anlatılacaktır. Parçacık fiziğine başarıyla uygulanan birkaç matematiksel grup olduğunu söylemek buraya kadar yeterli olacaktır; örneğin SU(3) grubu, fizikçiler tarafından parçacıkları sınıflandırmak için kullanılan en önemli gruplardan biridir.

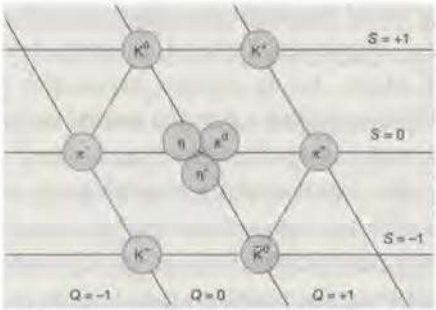
Baryon sekizli [octet] ve onlu [dekuplet] kategorilerine ek olarak, sekizli Spin 0 (Şekil 1.3) ve spin 1 (Şekil 1.4) olan me-

[2] O zamanlar parçacıklar hızlandırıcılardaki parçacık çarpışmalarının ölçülen tesir kesitlerinde görünen "tümseklerle" [bumps] tanımlandı. Bu çarpmalar, fizikçi Gregory Breit ve Eugene Wigner tarafından elde edilen bir formülle belirlenen bir kütle ve genişliğe sahipti, tesir kesitlere de rezonanslar deniyordu.

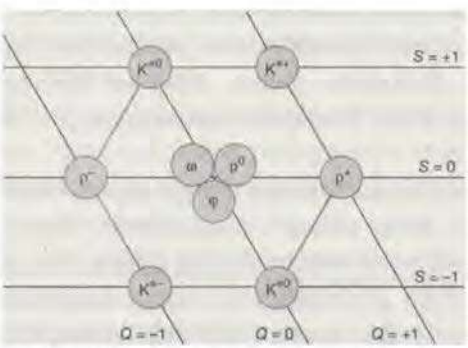
zonların sekizlileri vardır. Bu mezon onlularına uyan parçacıkların çoğu ya 1960'larda biliniyordu ya da keşfedilmek üzereydi. Eta mezon ve elektriksel olarak bu mezon sekizlikleri içine giren nötr K mezonu, zaten 1960'larda biliniyordu, bilinmiyorsa da kısa süre sonra keşfedildi. Bu parçacıklardan ikisi, o zamanlar, protonları ve nötronları birbirine bağlayan önemli kuvvet taşıyan parçacıklar olarak düşünülen spin 1'e sahip rho ve omega mezonlarıydı.

SU(3) grubunun temel bir özelliği üçlü olmasıdır. Bütün hadron gruplarının üç bileşeninin olabileceğini ima eder. Bilinen bütün hadronların üç temel unsuru olabilir; baryonları ve mezonları içerir. Hadros Yunancada "ağır" anlamına gelir. 1956'da Japon fizikçi Shoichi Sakata, üç temel parçacık olduğunu; bunların diğerlerinin temel yapı taşları olduğunu öne sürmüştü: proton, nötron ve "Lambda (Λ) parçacığı". Başlangıçta Murray Gell-Mann bir süre bu düşünceyle uyumlu gitti. Proton ve nötron adı verilen nükleonlar, kuantum sayısı açısından yorumlandı. Bu kuantum sayısına izospin dendi. Proton ve nötronun spin benzeri bir özelliği olan izospin. İzospin, çekirdek içindeki yeğin etkileşimler göz önüne alındığında, benzer kütlelere ve aynı spine sahip ancak farklı elektrik yükü taşıyan hadronların özdeş olduğu anlamına gelir.

Lambda parçacığı, 1947'de keşfedilen elektriksel olarak nötr, kısa ömürlü bir parçacıktır. Sakata, acayiplik ["strangeness"] adı verilen kuantum sayısını açıklamak için lambda'yı üçlüye dahil etti. Abraham Pais ilk olarak 1952'de lambda gibi belirli parçacıkların parçacık etkileşimlerinde bolca üretilmelerine rağmen yavaş bozunduklarını ve tipik zayıf radyoaktif bozunma ömürlerine sahip olduklarını açıklamak için bir kuantum sayısı önerdi. Bu kuantum sayısı Gell-Mann tarafından acayiplik olarak adlandırılmıştı. Proton, nötron ve Lambda üçlüsü fikri, parçacık hayvanat bahçesindeki diğer tüm hadronların birbirine bağlı bu üç parçacıktan oluşmasıydı. Bu fikir o zamanki deneylere uymadı ve terk edildi. Bununla birlikte, madde için temel kurucu parçacıkların kararlı bir üçlü olması gerektiği fikri devam etti.



Şekil 1.3 Gell-Mann'ın Sekiz Katlı Yolu spin-0 sahte-skaler (negatif parite) mezon dokuzlu (sekizli artı bir tekli). Kaynak: Wikipedia Commons.



Şekil 1.4 Gell-Mann'ın Sekiz Katlı Yolu spin-1 sahte-skaler mezon dokuzlusu (sekizli artı bir tekli). Kaynak: Wikipedia Commons.

"EFANDİ MARK İÇİN ÜÇ KUARK!"*

1963/1964 yıllarında Murray Gell-Mann, Columbia Üniversitesinde profesör olan Robert Serber'in bir önerisi üzerine, bütün maddenin üç temel bileşeni vardır düşüncesini takip etmeye karar verdi. Serber'in görüşü olan; "tüm maddenin

*"THREE QUARKS FOR MUSTER MARK!" Muster kelimesi James Joyce tarafından uydurulmuş bir kelime olarak "Master" kelimesinin yerine esprili bir şekilde kullanılmıştır. Toplanma anlamında bugünün İngiltere'sinde kullanılmaktadır –çn.

unsurları üç temel yapıtaşından oluşuyor fakat henüz gözlemlenmemiş" düşüncesi üzerine çıkarımlarda bulunmaya başladı. Gell-Mann, bu üç kurucu parçacığın protonları ve nötronları oluşturacağını, sırasıyla pozitif birim elektrik yüküne ve sıfır yüke sahip olmaları için; kurucu parçacıkların yükünün kesirli, ⅔ ve ⅓ olmak zorunluluğunu ortaya çıkardı. Artı bir veya sıfır yük oluşturmak için üç bileşenin üçte birin katlarını oluşturan yükleri olması gerekiyordu. Bu "kesirli elektrik yükleri" saçma bir fikir gibi görünüyordu. Çünkü hiç kimse böyle bir şey gözlememişti. Bununla birlikte Gell-Mann fikrinde ısrar etti ve 1964'te *Physics Letters* dergisinde bir makale yayımladı. "Baryonların ve Mezonların Şeması" başlıklı yazısında kesirli yüklü parçacıkların maddenin temel bileşenlerinde matematiksel açıdan önemli bir rol oynadığını savundu.[3] Makalesinde, parçacıkları kuark olarak adlandırdı. Makalede, James Joyce'un *Finnegan's Wake* [*Finnegan'ın Vahı*] kitabından alıntı yapmıştı; "Efandi Mark için üç kuark."

Bu arada Caltech mezunu George Zweig, CERN'i bir doktora sonrası bilim insanı olarak ziyaret ederken; aynı zamanlara denk gelen, benzer bir fikir önerdi. Bu, Gell-Mann'ın kuark modeline çok benziyordu. Temel bileşenleri üçlü aslardan oluşuyordu. Ancak CERN'deki kıdemli fizikçiler bu fikrin çok spekülatif olduğunu düşünüyorlardı. Makalesi çok tartışmalı, şaibelere açık bulunduğu için yayımlanmadı. Zweig daha sonra şu sözleri hatırlatacaktı:

> Kuramsal fizik topluluğunun as (kuark) modeline tepkisi genel anlamda iyi huylu değildi. CERN raporunun istediğim formda yayımlanması o kadar zorlayıcıydı ki sonunda denemekten vazgeçtim. Önde gelen bir üniversitenin fizik bölümü benim için bir randevu düşünürken, onların en saygın kuramcılardan biri; hatta tüm kuramsal fizikçiler içinden en önde gelenlerden biri, bir fakülte toplan-

[3] M. Gell-Mann, "A Schematic of Baryons and Mesons," *Physics Letters*, 8, 214–215 (1964).

tısında randevuyu engellemiş. [Hem de] As modelinin bir "şarlatan" işi olduğunu tutkuyla savunarak engellemiş.[4]

Gell-Mann ve Zweig, kuark modelinin temel özelliklerini kabul ettiler. Üç tür kuark vardı. "Yukarı" kuark (u) ve "aşağı" kuark (d) spin ½ ve izospin ½ değerlerine sahiptir. Üçüncü bir kuarka "acayip kuark" denir: izospin değeri 0 (*izospin teklisi*) ve "acayiplik" değeri birdir. Bu üçüncü kuark, sıfır olmayan bir acayiplik numarası taşıyan baryonların varlığını ve de K mezonu gibi mezonları açıklamak için gereklidir. Pozitif yüklü K mezonu, bir yukarı (u) kuark ve bir karşı-acayip kuarktan oluşurken, yüksüz K mezonu bir aşağı kuark ve bir karşı-acayip kuarktan oluşur. Üç kuark –yukarı, aşağı ve acayip– her biri baryon sayısı denilen şeye sahiptir. Bu sayı ⅓'e eşittir, böylece proton ya da nötron oluşturan üç kuarkın baryon sayısı bire eşit olur.

Parçacık fiziği topluluğu, proton ve nötronların üç kuarktan oluşması fikrine şüpheyle yaklaşıyordu ve kesirli elektrik yükü ihtiyacı da iyi görünmüyordu. Gell-Mann'ın kendisi de kuarkların gerçek olduğuna ikna olmamıştı. Onları maddenin nasıl üretildiğini görselleştirmenin verimli bir yolu olarak görüyordu. Sekiz Katlı yol modeline maddeyi anlamlandırmak için matematiksel bir hile olarak yaklaşıyordu.

Gell-Mann, 1974'te Toronto Üniversitesine yaptığı bir ziyarette bana, ilk olarak kuark makalesini *Physical Review Letters* dergisine gönderdiğini fakat reddedildiğini söyledi. Daha sonra Gell-Mann, CERN'de kuram departmanı müdürü olan, *Physics Letters B*'ın da editörlüğünü yürüten Leon van Hove'u aramış ve kuark makalesini kendilerine göndermeyi planladığını bildirmiş. Van Hove da ona kuark nedir diye sormuş. Gell-Mann, van Hove'a kuarkın SU üçlüsünü oluştu-

[4] George Zweig, "Origins of the Quark Model," in *Baryon '80: Proceedings of the 4th International Conference on Baryon Resonances*, ed. Nathan Isgur, July 14–16, 1980, Toronto. Quoted in Andrew Pickering, *Constructing Quarks: A Sociological History of Particle Physics* (Chicago, IL: Chicago Üniversitesi Yayınları, 1984), 89–90.

ran bir parçacık olduğunu, ayrıca kesirli elektrik yüke sahip olduğunu ve baryon sayısının ⅓ olduğunu ifade etmiş. Van Hove küçümseyici bir tavır içine girerek Gell-Mann'ın makaleyi sunmasının iyi bir fikir olduğunu düşünmediğini söylemiş. Bununla birlikte Gell-Mann vazgeçmedi; makale kabul edildi ve *Physics Letters B* tarafından yayımlandı.

Sonunda kısa süre sonra, 1968'de Stanford Doğrusal Hızlandırıcısı (SLAC) kuarkların keşfi için kullanılmaya başlandı. Atom çekirdeğini elektronlarla çarpıştırarak kuarkları algılamaya yönelik deneyler yapılmaya başlandı. Fikir, atomik çekirdekler içerisinde protonları keşfetmiş olan Rutherford deneylerini tekrarlamak için en son hızlandırıcı teknolojisini kullanmaktı. Rutherford alfa parçacıkları demetini (iki protondan ve iki nötrondan oluşan helyum çekirdekleri) altın yaprağına çarptırarak yeterli sayıda alfa parçacığının büyük açılarda geri saçıldığını bulmuştu. Bu bulgular alfa parçacıklarının sert nesneleri vurduklarını iddia etmek için yeterliydi ve bu sert nesne daha sonra altın atomunun çekirdeği olarak adlandırılacaktı. Geniş açılarla saçılmış alfa parçacıklarının sayısı sert nesnelere, yani altın atomlarının çekirdeklerine çarptıklarının kanıtıydı. Benzer şekilde, SLAC deneyinde, eğer çekirdekteki hedeflerin içine giren elektronların saçılma açısı yeterince büyükse, bu elektronların önemli ölçüde sert, büyük kütleli nesnelerden sapmasına işaret etmeliydi, bu da kuarkların en azından dolaylı kanıtını sağlardı. Deneyler gerçekten de protonların içindeki küçük nesnelere kuvvetle işaret eden saçılma açılarının dağılımını saptadı.

Doğrusal hızlandırıcıda bu sonuca katkıda bulunan iki tür deney zaten çoktan gerçekleştirilmişti. Birine *elastik proton-elektron saçılımı* deniyordu. Bu deneyler, protonun nokta benzeri bir nesne olmadığını gösterdi. Elektron gibi değildi; dağılmış bir yapıya sahipti. Fizikçi Robert Hofstadter 1950'lerin başında gerçekleştirdiği protonun yapısının deneysel araştırmaları sonucu 1961'de Nobel Fizik Ödülü kazandı. Daha sonra, takip eden yıllarda *derin esnek olmayan*

saçılma denilen bir dizi deneyde, elektronların protonlardan saçılması sonucu pek çok parçacık üretildi, ancak daha yüksek enerji seviyelerinde beklenen sonuçlar çıkmadı. Veriler, protonun içinde sert nesneler olduğunu gösteriyordu. Bu deneyler 22-GeV enerjili, yaklaşık 4 km uzunluğunda doğrusal elektron hızlandırıcı olan SLAC'de 1967'de gerçekleştirilmişti ve parçacık fiziğinin yeni "sert saçılma" çağının habercisiydi. Daha önce deneysel parçacık fiziğine hâkim olan "yumuşak saçılma" dönemiyle karşılaştırıldığında "sert" saçılmanın karşılığı elektron demetlerinin protonların içinde çarptığı sert nesneleri ifade eder. Proton-proton çarpışmalarındaki yumuşak saçılmaysa tesir kesitlerinin grafiğinin artan enerjiyle birlikte hızlı bir düşüş gösterdiği saçılmalardır, ki bu deneylerin protonların iç yapısını araştırmadığı görülmüştür.

Başlangıçta Stanford deneycileri, bu benzersiz derin esnek olmayan saçılma sonuçlarını açıklayamadılar. Önemli bir şeyin gözlemlendiğini biliyorlardı, ancak etkilerini tam olarak anlayamadılar. O zamanlar parçacık fizikçileri, kesirli yüklerin gerçek olabileceğini kabul etmemişlerdi. Protonlardaki ve nötronlardaki kuarkların kesirli yük taşıyabileceği gerçekçi gelmiyordu. SLAC'daki kuram grubunun bir üyesi olan ve meslektaşları tarafından sevilerek "BJ" olarak bilinen James Bjorken, deneysel verileri analiz etti ve protonun içinde kuarkların varlığının kanıtını oluşturabilecek bir ölçekleme ilişkisi keşfetti.[5] BJ, SLAC verilerini "akım cebiri toplama kuralları" denilen yöntemi kullanarak biraz ezoterik bir şekilde analiz etti ve protonun elektromanyetik yapısının özel bir ölçeklendirmeyle ölçeklendiğini buldu. Buna göre protonun elektromanyetik yapısı, foton yayan elektronların enerji kaybı ile derin elastik olmayan çarpışma ortamında üretilen yeni parçacıkların enerjisinin oranından oluşan bir parametreyle ölçekleniyordu.

---

[5] J.D. Bjorken, "Asymptotic Sum Rules at Infinite Momentum," *Physical Review*, 179, 1547– 1553 (1969).

Çarpışmadaki Deneyciler, Bjorken'in önemli bir keşif yaptığını kabul ettiler. Ancak deneysel sonuçların daha kapsamlı bir şekilde anlaşılması sadece Richard Feynman 1968'de SLAC'ı ziyaret edip yeğin etkileşimlerin "parton modeli" ismini verdiği şeyi önerdiğinde gerçekleşti.[6] Partonlar, proton içindeki elektronlar tarafından vurulan sert nesnelerdi ve Feynman, Bjorken'in ölçeklendirme sonucunu bu modeli kullanarak ispatlamıştı. Parton modelini daha ayrıntılı olarak bu bölümün ilerisinde tartışacağız. Sonunda Feynman'ın partonları, Gell-Mann'ın kuarklarıyla tanımlanmaya başladı. Daha sonra SLAC, Brookhaven Ulusal Laboratuvarı ve CERN'deki deneyler, kesirli elektrik yükünü açıklamak için kuarklara ihtiyaç olduğunu açıkça ortaya koydu.

Tüm bu deneysel kanıtların ışığında, parçacık fizikçileri, kuarkların hayali matematiksel kavramlar değil de gerçek parçacıklar olduğunu hızla artan bir ivmeyle kabul etmeye başladılar. Gell-Mann da sonunda bunu kabul etti: onun kuarkları gerçekti. Bununla birlikte, neden kesirli yük taşıyan bu kuarklar deneysel olarak yalnız başına gözlemlenemiyordu? Neden sadece onlardan elektronlar saçıldığında proton ve nötronların içinde dolaylı olarak tespit edilebildiler? Kuarklar, protonlar ve nötronlar içinde nasıl hapsolmuşlardı? Bu soruları cevaplamak, bizi parçacık fiziğinin gelişiminde bir dönüm noktasına götürdü, sonunda kuark modeli ile parton modeli, ayar ilkesine dayalı kuantum alan kuramına dahil edildi.

Kuantum renk dinamiğinin (QCD)[7] kuarkları, gluonları ile –protonlar, nötronlar ve elektronlar gibi– nükleer fiziğin eski parçacıkları arasındaki garip fiziksel çelişki böylece başlamış oldu. Kuark ve gluonların doğrudan tespit edilebileceği bir yöntem bulunmuyordu. Oysa diğerleri için, ya elektron üreten çekirdeklerin iyonlaşması ya da yüksek enerjili hızlandırıcıların doğrudan bir algılama imkânı vardı. Gerçek-

[6] R.P. Feynman, *Photon Hadron Interactions* (Reading, MA: W.A. Benjamin, 1972).

[7] QCD, daha sonra ayrıntılı olarak açıklanacak, kuarklar ve gluonlar içeren yeğin etkileşimlerin şu anda kabul edilen kuramıdır.

ten de kuarkları ve gluonları doğrudan (protonun dışında) serbest olarak algılanamaması, önceleri QCD kuramının başarısızlığı olarak kabul edildi. QCD'nin başlangıç ilkelerinden kuark ve gluonun hapsine dair bir kuram üretmek henüz mümkün değildi. Diğer bir deyişle, kuarkların ve gluonların neden çekirdeğin içinde kapana kısılmış göründüğüne dair ikna edici açıklama yoktu. Bir açıklama bulmak amacıyla fizikçiler, QCD'nin temel matematiksel denklemlerle uğraşmak yerine, bir şekilde sonradan eklenen geçici fenomenolojik açıklamalar bulmak zorunda kaldılar. Bununla birlikte mevcut parçacık fiziği topluluğunda, bu problem basitçe göz ardı edilir ve saklı duran kuark ve gluonlar, proton-proton veya karşı-protonlu çarpışmalardan sonra ortaya çıkan hadronize jetler olarak dolaylı olarak tespit edilir. Bu jetler, hadronların (kuark ve gluon içeren parçacıklar) akışlarından oluşur ve ancak analiz edildiğinde hangi jetin hangi kuarkla ilişkili olduğunu tespit edebiliriz. Kuark hapsinin gizemi, kuramsal ve deneysel parçacık fiziği topluluğu tarafından bir dereceye kadar bir kenara bırakılmış olsa da, hâlâ bir sorun olmaya devam etmektedir. QCD'yi ikna edici bir kuram haline getirmek için bu sorunun sonunda çözülmesi gerekir.

KUARKLARA ANLAM VERMEYE ÇALIŞIRKEN

"Kuark hapsi"nin" gizemiyle birlikte, bir başka ciddi problem; "kuarkların doğasını anlama problemi" doğmuştu. Proton ve nötron; üç yukarı ve üç aşağı kuarkın farklı kombinasyonlarından meydana gelir. Ancak spin kuantum sayısı ½ olan bu yukarı ve aşağı kuarklar özdeşti. 1920'lerde kuantum mekaniğinin gelişimi sırasında keşfedilen Pauli'nin dışarlama ilkesine göre üç fermiyon eğer spin ½ (kuarklar gibi) değerini alıyorsa aynı kuantum durumunda olamazlardı. Yani protonu oluşturmak için bir araya gelemezlerdi. Bir şeyler yanlıştı. Üç asi kanunsuzu aynı hücreye yerleştirmeye ya da her biri diğer ikisiyle aynı alanda olmayı şiddetle reddeden üçüzleri bir oyun bahçesine koymaya çalışmanız

gibiydi. Bu yukarı ve aşağı kuarklardan üçünü de proton ve nötron içindeki aynı kuantum durumu içine sokmaya çalışırsanız kuantum istatistiğini ve Pauli'nin dışarlama ilkesini ihlal edersiniz. Kuramsal fizikçi Walter Greenberg bu saçmalığı çözmenin bir yolunu önerdi. Kuarklar için kuantum istatistiğinin doğasını değiştirdi ve yeni istatistiği "paraistatistik" olarak adlandırdı. Öneriye göre kuarklar için Pauli dışarlama ilkesinin etrafından dolaşılmalıydı. Üçüzler analojisini sürdürmek istersek Greenberg onları birbirleriyle rahat edebilecekleri yeni inşa edilmiş bir oyun parkına koymayı öneriyordu. Kuantum istatistiklerini değiştirerek, aynı kuantum durumunda üç kuarkı elde etmeyi başardı. Ancak bu biraz soruna çok köktenci bir çözümdü.

Daha sonra Yoichiro Nambu ve Moo Young Han başka köktenci bir fikir önerdiler. Pauli dışarlama ilkesi sorununu aşmak için kuarklarla özel yeni bir yük değeri icat ettiler. Murray Gell-Mann ve Harald Fritzsch bu yeni yükün "renk yükü" olarak isimlendirilmesini önerdi. Buna göre yukarı ve aşağı kuarkların her biri üç "renk"ten, mavi, kırmızı ya da yeşilden birini alabilirdi. Bu renkler tabii ki gerçek renk değildir, ancak basitçe yeni yük değeri için etiketler olarak kullanılırlar. Bu öneri, doğaya parçacıkları oluştururken seçebileceği üç kat daha fazla kuark sağladı. Diğer yandan bu üç kat daha fazla kuark anlamına geliyordu, çünkü doğa parçacıkları inşa ederken daha çok yapıtaşı seçebilirdi. Gözlemlenen hadronlar (baryonlar ve mezonlar) *renksiz* veya *beyaz* olarak adlandırıldıkları için (gözlenen hadronları) nötr renk yapmak için renk yükleri birleştirilmeliydi.

İsviçreli fizikçi Heinrich Leutwyler'la işbirliği yapan Gell-Mann ve Fritzsch, renkli kuarkların altında yatan matematik kuramını keşfetti. Kütlesiz kuvvet taşıyıcıları aracılığıyla protondaki üç renkli kuarkı bağladılar ve bu taşıyıcıları kendi renklerine sahip *gluonlar* olarak adlandırdılar. Bu renkli kuarkları ve gluonları tanımlayan matematiksel simetri grubu SU(3) grubuydu, ancak bu Gell-Mann'ın orijinal Sekizli Yol SU(3) grubundan farklı bir tür SU(3) çeşidiydi.

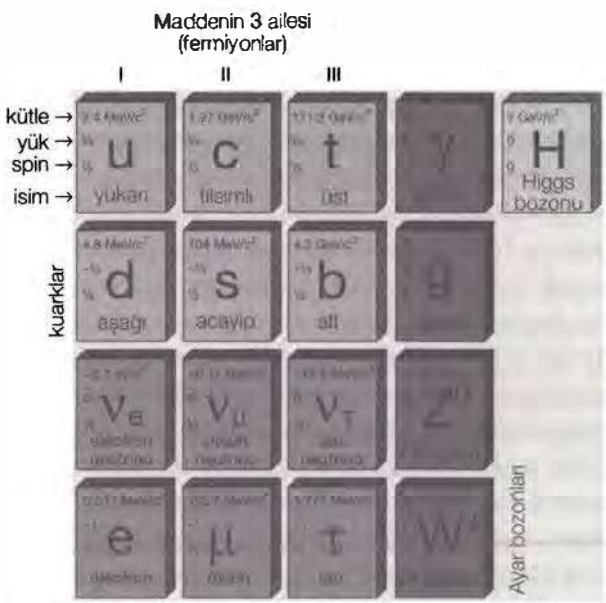
Farklı kuark ve lepton türleri çeşnilerine göre adlandırılır. 1960'ların sonlarında bilinen üç kuark çeşnisi –yukarı, aşağı ve acayip– SU(3) grubunun temel üçlüsünü oluştururken gluon kuvvet taşıyıcıları SU(3) grubunun sekizlisiyle temsil edilir. Elektromanyetizmanın renksiz fotonunun aksine, sekiz renkli gluon üretmek için, her bir gluon olası üç renkten iki rengin birleşiminden oluşur.

Parçacık fizikçileri arasında parçacıklara ve kuramlara süslü isimler verme modasına uygun olarak Gell-Mann, Yunanca 'chromo' ["renk" anlamına gelir] sözcüğünü kullanarak yeni renkli kuarklar ve gluonlar için "kuantum renk dinamiği kuramı" ismini buldu. Kuarkların her zaman hapsoldukları ve deneysel olarak yüksek enerjili çarpışmalarda hiç görülmediği gerçeğini açıklamak için, proton ve nötron gibi yeğin etkileşimlere giren parçacıklar olan hadronların renksiz olduğu ve QCD'de renk teklileri olarak betimlendikleri ifade edilir. Başka bir deyişle, renkli kuarklar daima renksiz bir hadron üretmek üzere birleştirilmelidir. Örneğin kuark ve karşı-kuarktan oluşan mezonlarda kırmızı kuark bir karşı-kırmızı kuarkla birleşerek renksiz bir mezon oluşturur, protonda kırmızı, yeşil ve mavi kuark birleşerek renksiz bir proton oluşturur. Bunun anlamı, hızlandırıcılarda gözlemlediğimiz hadronların, içlerinde hapsolmuş renki kuarkları açık etmediğidir. Bu, elbette, durumu açıklamıyor. Hapsetme dinamiklerini ve nasıl bu hale geldikleri açıklanmıyor, ancak sadece serbest kuarkları gözlemleyemeyeceğimiz gerçeğini gösteren bir durum ortaya çıkıyor. Kuark hapsi mekanizmasının durumları, parçacık fiziğinde hâlâ tartışmalı bir konudur. (Standart modelin temel parçacıklarının özeti için Şekil 1.5'e, kuark renklerinin bir açıklaması için Şekil 1.6'ya bakın.)

EFANDİ MARK İÇİN DÖRT, BEŞ VE ALTI KUARK!

James Bjorken ve Sheldon Glashow 1964 yılında, "tılsımlı" kuark adını verdikleri dördüncü kuarkın olması gerektiğini

duyurdular.[8] Bu dört kuark SU(3)'ün üçlü temsilinin yerini alan SU(4) grubunun temel dörtlü (kuartet) gösterimiyle temsil edildi. Ben de kesirli yüke ve kesirli baryon numarasına sahip dördüncü bir kuarkın mevcut olmasıyla ilgili 1965'te *Physical Review* dergisinde bir makale yayımladım.[9] Bjorken ve Glashow'un dördüncü kuarkı tamsayı yüke ve baryon numarasına sahipti, çünkü fizikçilerin bu kesirli yüklü kuark fikrini kabul etmeleri için henüz erken zamanlardı. Kesirli yüklü sonradan gelen kuarkıma "Tılsımlı" kadar gösterişli olmayan "dördüncü kuark" adını verdim.



Şekil 1.5 Parçacık fiziğinin standart modelinin temel parçacıkları; kuarklar ve leptonlar, altı kuark çeşnisi ve altı lepton çeşnisine göre adlandırılır. Skaler Higgs bozonu bir ayar bozonu değildir, bu nedenle dördüncü gruba dahil değildir. Kaynak: PBS NOVA / Fermilab / Bilim Ofisi / ABD Enerji Departmanı.

---

8 B.J. Bjorken and S.L. Glashow, "Elementary Particles and SU(4)." *Physics Letters*, 11 (3), 255–257 (1964)]
J.W. Moffat, "Higher Symmetries and the Neutron-Proton Magnetic-Moment Ratio," *Physical Review*, 140 (6B), B1681–B1685 (1965).

Üç kuark –yukarı, aşağı ve acayip– üç çeşni oluşturuyordu. Yüksek enerji deneyleri, radyoaktif bozunma yaratmak için zayıf kuvvetle ilişkili iki tür akım gösterdi. Biri, kuarkların yüklü aracı vektör bozonu W bozonuna bağlandığı elektrik yüklü bir akımdı. Diğeri ise nötr vektör bozonu Z'ye bağlanmış bir nötr akımdı. Zayıf parçacık bozunmalarında yüklü W bozonu, yüklü akım sayesinde kuarkların yükünü ve çeşnisini değiştirebilirken nötr Z bozonu, kuark yükünü ve çeşnisini değiştiremez. Bu nötr Z etkileşimleri sırasında, bozunum boyunca kuarkların çeşni değişimi gözlenmemiştir.



Şekil 1.6 Mezonların ve baryonların kuark renk kombinasyonları. Kaynak: Wikipedia.

Nötr akımda kuark çeşnilerinin değişmemesi *anomali sorunu* olarak bilinir. 1970 yılında Sheldon Glashow, John Iliopoulos ve Luciano Maiani, bu *anomali problemini* çözmek için dördüncü bir kuark fikrini kullandı. Zayıf etkileşimlerdeki

nötr akım bozunmalarında kuark çeşnilerinde değişim olmadığına ilişkin deneysel sonuçları açıklamanın bir yolunu buldular. Buna *GIM mekanizması* (Glashow, Iliopoulos ve Maiani için bir akronim) denir. Bu gözlemsel gerçek, 1964 ve 1965'te öngörülen dördüncü bir kuarkın varlığını gerektiriyordu.

Kuark devrimi, 1974 yılında doruk noktasına ulaştı. Burton Richter tarafından yönetilen bir grup Stanford'da, Samuel Ting başkanlığında bir başka grup Brookhaven'da dar bir rezonans aralığı keşfetti; bir tılsımlı ve bir karşı-tılsımlı kuarktan oluşuyor gibi duruyordu. Ting bu yeni tılsımlı rezonansını "J parçacığı" olarak adlandırırken Richter "psi parçacığı" olarak adlandırdı; sonunda *J/psi parçacığı* olarak bilinir hale geldi. Bir tılsımlı ve bir karşı-tılsımlı kuarkın sıkıca bağlı bileşiminden oluşan bu dar rezonans aralığına daha sonra *kuarkonyum* sistemi adı verildi.

Artık deneysel olarak onaylanmış dört kuarkımız vardı: yukarı, aşağı, acayip ve tılsımlı. 1977'de Leon Lederman ve Fermilab'daki çalışma arkadaşları, *alt* (veya *güzellik*) kuark olarak adlandırılan beşinci bir kuarkı keşfettiler. QCD'nin özelliklerinden kuramsal olarak çıkartılan bir altıncı kuark olması gerektiği gerçekliği vardı. Tabii ki *üst* (veya *gerçek*) kuark olarak adlandırılacaktı. Gerçekten de 1995'te Fermilab'da keşfedildi. *Üst* ve *alt* kuarkların isimleri İsrailli fizikçi Haim Harari tarafından alt kuarkın keşfinden iki yıl önce 1975'te ortaya atılmıştı. Bu girişim *yukarı* ve *aşağı* kuarkları, daha yüksek kütle seviyelerinde tekrarlamak üzere atılmış bir adımdı.

Bu son iki kuarkın veya üçüncü aile kuarkların hikâyesi ayrıntılarıyla anlatılmayı hak etmektedir. 1973'te Japon fizikçiler, Makoto Kobayashi ve Toshihide Maskawa, üçüncü bir kuşağın veya ailenin varlığını öngörmüştü. K mezonlarının bozunmasını açıklamak için yük eşleneği ve parite ihlalini açıklamak için bu aileye ihtiyaç duydular. Yük eşleneği, pozitif yüklü bir parçacığı negatif yüklüye (ve bunun tersine) çeviren matematiksel bir dönüşümüdür. Bu dönüşüm bir parçacığı karşı-parçacığına dönüştürür. Parite, parçacık fiziğinde sol-sağ simetrisidir. Bu üçüncü aile kuarklar,

GIM mekanizmasını uygulamak için gerekliydi. 1978 yılında Martin Perl tarafından SLAC'da tau leptonunun keşfi, çeşni değiştiren nötr akımların neden tespit edilmediğini açıklayan GIM mekanizmasını tam olarak uygulamak için beşinci ve altıncı bir kuarkın eklenmesi ihtiyacını güçlendirdi.

Bu beşinci ve altıncı kuarkları keşfetmek kolay olmadı. Üst kuark için erken araştırmalar SLAC'da ve Alman hızlandırıcısı Hamburg'daki Deutsches Elektronen Synchrotron'da (DESY) hiçbir şey bulamadı. 1983 yılında, CERN'deki süper proton senkrotronu (hızlandırıcısı) (SPS) W ve Z bozonlarını tespit etti. CERN'deki deneyciler (top) üst kuarkın keşfinin çok yakın olduğunu hissettiler. Kısa süre sonra Amerika Birleşik Devletleri'ndeki Tevatron hızlandırıcısı ile CERN'deki SPS çarpıştırıcısı arasında bir yarış başladı. Tevatron 2 TeV enerjiyle yarışa girerken SPS ancak 77 GeV enerji limitiyle üst kuarkı bulamadan enerji sınırına ulaştı. O sırada yaklaşık 40 GeV'lik bir kütleye sahip olması beklenirken, SPS makinesinin enerji limiti üst kuarka ulaşmasına yetmedi.

Bu aşamada, 77 GeV'den büyük olması beklenen bir kütleyle, üst kuarkı tespit etmeye sadece Fermilab'daki Tevatron hızlandırıcısı yeterli enerjiye sahip görünüyordu. Fermilab'daki Çarpıştırıcı Dedektörü (CDF) ve D0 Dedektörü aslında üst kuarkı keşfetmek için inşa edilmişti. Gerçekten de 1992'de, bu iki dedektörle ilişkili iki grup, üst kuarkın ilk ipucunu gördü. Üst kuark keşfinin yakın olduğuna dair cezbedici bir ipucuydu bu. 1995'e gelindiğinde yaklaşık 175 GeV'lik bir enerjide [enerji seviyesinde] üst kuarkın varlığını belirlemek için yeterli veri vardı.

Artık temel parçacıklar dizisinde keşfedilen altı kuark vardı. Ancak standart modelde bunlara uyması için altı lepton olması gerekiyordu. Gerçekten de sonunda yeni leptonlar keşfedildi. Elektron ve muona ek olarak, bu leptonların her biriyle ilişkili birer tau ve de birer nötrino vardı: elektron nötrinosu, muon nötrinosu ve tau nötrinosu. Bu kuarklar ve leptonlar, standart modelin temel yapı taşları olacaktı (Şekil 1.5).

DOĞADA KUVVETLER YA DA ETKİLEŞİMLER

Doğada deneysel olarak doğrulanmış dört temel kuvvet vardır: yeğin, elektromanyetik, zayıf ve kütleçekim kuvvetleri. En zayıf kuvvet kütleçekimdir. Isaac Newton, 1687'de *Principia*'da kendi mekaniğine dayanan ilk evrensel kütleçekim kuramını yayımladı. Newton, kütleçekimin ters kare yasasının evrenin her yerinde geçerli olduğunu varsaymıştı. Bu kütleçekim kuvvetinin büyüklüğü, Newton'ın kütleçekim sabitiyle orantılıydı ve hesaplamaları, ayın 28 günlük gözlemlenen periyoduyla dikkate değer bir doğrulukla uyumluydu. 1916'da Einstein, özel görelilik kuramını kütleçekimi de içerecek şekilde genelleştirme konusundaki çığır açıcı makalesini yayımladı ve buna "genel görelilik kuramı" adını verdi.[10] Kütleçekimin Newton'ın kuramındaki gibi iki kütle arasındaki bir "kuvvet" olmadığını, uzayzaman geometrisinin madde tarafından bükülmesi olduğunu öne sürdü. Yeni kuramının önemli bir öngörüsü, Merkür gezegeninin yörüngesinin olağandışı bir özelliğini açıklamaktı. Gezegenin güneşe en yakın konumu olan günberi konumu "yalpalıyor", yani bir presesyon hareketi yapıyordu. Yüzyılı aşan astronomik gözlemler, Merkür'ün yörüngesinin Newton'ın kuramına uymayan küçük bir anormal kayma yaptığını göstermişti. Einstein, astronomik verilere göre, Merkür'ün anormal devinimini yüzyılda yaklaşık 43 saniyelik ark (yay birimi) olarak doğru bir şekilde hesapladı. Güneş tutulmasında ışığın bükülmesiyle ilgili ikinci bir anahtar tahmin, 1919'da Arthur Eddington'ın da aralarında bulunduğu gökbilimciler tarafından doğrulandı. Bugün büyük kütleler arasındaki kütleçekim kuvvetini yalnızca maddenin mevcudiyetinde uzayzamanın bükülmesi olarak değil, Einstein'ın kütleçekim kuramının kuantumlanmış versiyonunda graviton adı verilen kuvvet taşıyıcısının etkileşimi olarak da yorumluyoruz. Elektromanyetik kuvvetin taşıyıcısı olan fotonun aksine,

[10] Albert Einstein, "Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie," *Annalen der Physik* (ser.4), 49, 769–822 (1916).

graviton hiçbir zaman deneysel olarak tespit edilmemiştir. Einstein'ın geometrik kütleçekim kuramı; kuvvetin taşıyıcısı olarak gravitonla birlikte, bir parçacık fiziği kuvveti olarak yorumlanır.

En zayıf ikinci kuvvet; Wilhelm Röntgen tarafından X-ışınlarının keşfinin ardından 1896'da Henri Becquerel tarafından keşfedilen, maddenin radyoaktif bozunmasından sorumlu olan kuvvettir. Becquerel ve takipçileri –Pierre ve Marie Curie de dahil olmak üzere– plütonyum benzeri diğer elementlere veya izotoplara dönüşen; ve dönüşmek için gama ışınları (fotonlar) yayan uranyum gibi radyoaktif elementlerle ilgilenmekteydiler. Parçacık fiziğinin standart modelinin dilinde, radyoaktif bozunmayı, nötronlar gibi hadronların elektron, muon ve nötrino gibi leptonlara zayıf kuvvet aracılığıyla bozunması olarak betimliyoruz. Örneğin nötron bozunarak bir proton artı bir elektron ve bir karşı-nötrinoya dönüşür. Zayıf kuvvetin taşıyıcıları, 1983'te CERN'de keşfedilen büyük kütleli W ve Z bozonları olarak tanımlandı. W ve Z'nin kütleleri olduğundan, zayıf kuvvet kısa menzilli bir kuvvettir. Uzun menzilli kuvvetler olan kütleçekimi veya elektromanyetizmaya benzememektedir.

Bir sonraki en büyük kuvvet, günlük hayatta en çok farkında olduğumuz kuvvet olan elektromanyetizmadır. Başlangıçta elektrik ve manyetizma olmak üzere iki ayrı kuvvet olduğu düşünülüyordu, ancak 1873'te James Clerk Maxwell onları ünlü elektromanyetik alan denklemlerinde birleştirdi. Elektrik, pozitif yüklü veya negatif yüklü iki elektrik yüklü parçacık arasındaki –kütleçekim gibi– ters kare yasasıyla betimlenir. Manyetizmaysa kendisini her zaman çiftler halinde gelen, kuzey ve güney çifti olan iki manyetik kutup olarak gösterir. Danimarkalı fizikçi Hans Christian Ørsted 1820'de bir telde hareket eden elektriğin, pusulanın kuzey ve güney kutuplarını saptıran bir manyetik alan oluşturduğunu keşfetti. Bunu takiben 1830'larda Michael Faraday, manyetik indüksiyonu keşfetti: elektrik alanlarının manyetik alanlar üretmesi gibi manyetik alanlar da elektrik üretiyordu. Bu ke-

şif, Maxwell'in elektromanyetik alan denklemlerinin yolunu açtı. Elektromanyetizmanın modern yorumu, yüklü parçacıklar arasındaki elektromanyetik kuvvetin foton tarafından taşındığı kuantum elektrodinamiği (QED) kuramında ifadesini bulur.

Doğadaki dördüncü kuvvet, çekirdeklerdeki protonları ve nötronları birbirine bağlayan yeğin kuvvettir. Elektromanyetik kuvvetten yaklaşık 200 kat daha şiddetlidir, bu da kütleçekimden yaklaşık 10^{38} kat daha şiddetli olduğu anlamına gelir. Parçacık fiziğinin standart modelinde, yeğin kuvvet, proton ve nötron gibi hadronlarda kuarkları birbirine bağlayan, böylece atom çekirdeğinde protonları ve nötronları birbirine bağlayan kütlesiz gluonlar tarafından taşınır.

Son kırk yıl boyunca kuramsal fizikçiler, doğanın dört kuvvetini büyük bir tasarımda birleştirmeye çalışmak için çok çaba harcadılar. Başarılı bir birleştirme, doğada, genellikle *X parçacığı* olarak adlandırılan büyük bir bozon tarafından taşınan nihayetinde tek bir kuvvet olduğu anlamına gelir. Bu X parçacığı eğer varsa kendini ancak çok yüksek enerjilerde ortaya çıkartabilecektir. Elektro-zayıf kuram, zayıf etkileşimler ile elektromanyetizmanın kısmi bir birleşimini temsil eder. Modern birleştirme girişimleri, Maxwell'in elektrik ve manyetizmayı birleştirmesi kadar başarılı olamamıştır. Özellikle, kütleçekimin bu alanda diğer üç kuvvetle başarılı bir şekilde birleşmesi henüz gerçekleşememiştir. 1970'li ve 1980'li yıllarda bütün güçleri birleştirmek için üç ana girişim vardı: büyük birleşik kuramlar [GUT: Grand Unified Theory], süper-kütleçekim ve sicim kuramı.

GÖRELİ KUANTUM ALAN KURAMI

Erken kuantum mekaniği, özel görelilik kuramıyla tutarlı değildi. Paul Dirac, Werner Heisenberg, Wolfgang Pauli, Pascual Jordan ve Victor Weisskopf gibi öncü fizikçiler 1930'lar boyunca, *göreli kuantum alan kuramı* denilen kuantum mekaniğinin göreli bir versiyonunu geliştirdiler. İlk kuramlar,

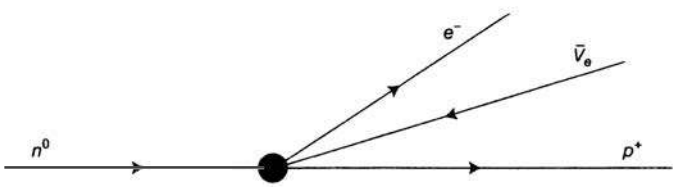
Maxwell'in klasik alan denklemlerini kuantize etti [kuantumladı] ve kuantum elektrodinamiği (QED) ismini aldı. Bu kuram, Maxwell'in klasik elektromanyetik alanlar kuramını, enerjinin Planck sabiti ile elektromanyetik dalgaların frekansının çarpımı şeklinde paketler olarak geldiğine ilişkin kuantum kuramıyla tutarlı hale getirdi.

QED kısa sürede zorluklarla karşılaştı. Çünkü kendi kendisiyle etkileşime giren elektronun enerjisinin, yani kendi öz enerjisinin hesaplanması sonsuza gidiyordu; bu da QED'deki hesaplamaları anlamsız hale getiriyordu. 1940'ların sonlarında ve 1950'lerin başlarında –ilk olarak Hendrik Kramers tarafından önerilen ve daha sonra Hans Bethe, Richard Feynman, Julian Schwinger, Sin-Itiro Tomonaga ve Freeman Dyson tarafından geliştirilen– yeniden boyutlandırma kuramı sayesinde hesaplamalarındaki sonsuzlukları ortadan kaldırmak için bir yöntem bulundu.

1934'te Enrico Fermi, zayıf kuvvet veya beta bozunumu kuramı adıyla anılan bir kuram geliştirmişti. Kuramı, çekirdeklerin radyoaktif bozunmalarını, o sıralarda var olması beklenen nötrino alanı da dahil olmak üzere lepton (örn. elektron) alanlarının proton ve nötron alanlarıyla çarpımını içeren basit bir denklemle açıklamıştı. Zayıf kuvvetin şiddetini belirleyen sabit sonunda *Fermi bağlantı sabiti* (G_F) olarak adlandırıldı. Bu sabit parçacıkların ve alanların etkileşimlerinin şiddetini tanımlıyordu. Fermi kuramı, maddenin bir nötronun bozunarak bir proton ile bir elektron ve bir karşı-nötrinoya dönüşmesi gibi düşük enerjilerdeki dönüşümlerini doğru bir şekilde açıkladı (Şekil 1.7). (Serbest nötronun ömrü yaklaşık 11 dakikadır.)

Fermi'nin beta bozunma kuramı üzerine çalışmalar devam ederken fizikçiler onun, anlamsız sonsuzluklar üretmeyen parçacıkların bozunma reaksiyonlarının hesaplanmasıyla, yeniden boyutlandırılabilir bir kuantum alan kuramı paradigmasına sığdırılamayacağını anladılar. Bunun teknik nedeni, G_F Fermi bağlantı sabitinin boyutsuz bir sayı olmaması ve bazı birim sistemlerinde ters kütle karesi boyutlarına sahip

olmasıdır. Bunun pratikteki anlamı, radyoaktif bozunma hesaplamalarının sonsuz hale gelmesidir; gerçekten de bu sonsuzluklar, daha önce başarılı bir şekilde *ince yapı sabiti* olarak adlandırılan bağlantı sabitinin boyutsuz bir sayı olduğu QED için yapıldığı gibi, yeniden boyutlandırma tekniğiyle ortadan kaldırılamaz. [Bunun pratikteki anlamı: radyoaktif bozunma hesaplamalarınm sonsuz hale gelmesi ve aslmda bu sonsuzlukların, ince yapı sabiti olarak adlandırılan bağlantı sabitinin boyutsuz bir sayı olduğu; QED için başarılı bir şekilde yapıldığı gibi, yeniden boyutlandırma tekniğiyle ortadan kaldırılamayacağıdır.] QED'nin bir bölü 137'ye eşit ve boyutsuz olan ince yapı sabiti alfa (α), saçılma tesir kesiti gibi sonlu niceliklerin hesaplanmasma izin veren yeniden boyutlandırılabilir bir kuantum alan kuramma yol açar.



Şekil 1.7 Dört fermiyon etkileşimi beta bozunumu için Feynman diyagramı (bir nötron; bir proton, bir elektron ve karşı-nötrinoya bozunmakta) Kaynak: quantumdiaries.org

Kuramcılar ayrıca, kütleçekimsel alanı kuantize ederseniz (parçacıklar arasmdaki kütleçekim kuvvetini kütlesiz graviton tarafmdan taşmıyormuş gibi yorumlarsanız), o zaman kuantum kütleçekimi kurammm yeniden boyutlandırılamayacağmı keşfettiler. Fermi'nin zayıf etkileşimler kuramı gibi bu kuram da yeniden boyutlandırılamaz çıkmaktadır. Newton'm kütleçekim kuvvetinin şiddetini ölçen eşleşme sabiti (G_N) de boyutsuz bir sayı değildir, ancak Fermi'nin sabiti (G_F) için olduğu gibi, aynı zamanda ters kütle kare boyutlarına sahiptir. Böylece herhangi bir kuantum kütleçekim hesaplamasmı anlamsız sonsuz nicelikler haline getirir.

Kuantum alan kuramının kurucularından biri olan Paul Dirac, yeniden boyutlandırma kuramından hiçbir zaman memnun olmadı. Sonsuzlukların birbirini götürmesinin veya tedirgenme kuramı hesaplamalarında matematiksel olarak küçük olduğu varsayılan sonsuz miktarların göz ardı edilmesinin, kuantum alan kuramı için nihai cevap olabileceğini hissetmiyordu. Kuramsal fizikte öncelikle kesin çözümü olmayan denklemleri çözmeye çalışmakla yüz yüze geldik. Bu nedenle problemleri; küçük, boyutsuz bir sabitin ardışık kuvvetleriyle çarpılan terimlerle matematiksel bir dizideki denklemleri genişleterek çözmeliyiz. Buradaki ana fikir, dizideki tüm sonsuz terimleri topladığınızda denklemlerin tam çözümünü elde edeceğinizdir. Tedirgenme serileri sadece boyutsuz birden (birlikten, tekillikten) küçük olan sabitler için çalışmaktadır. Aksi takdirde seriler kesin çözüme yakınsamayacaktır. Özellikle, seriyi belirli bir terimde kesersek, bu noktaya kadar gelen terimlerin toplamının daha sonra deneylerle karşılaştırılabilecek denklemlere iyi çözümler vermesi gerektiğini anladık.

Dirac, yeniden boyutlandırma kuramına güvensizliğini, –tedirgenme kuramına olan güveni, uyumluluğu üzerinden– şöyle ifade etti:

Çoğu fizikçi durumdan çok memnun. "Kuantum elektrodinamiği iyi bir kuram ve artık onun için endişelenmemize gerek yok" diyorlar. Durumdan çok memnun olmadığımı söylemeliyim, çünkü bu sözde "iyi kuram", denklemlerinde görünen sonsuzlukları ihmal etmeyi, hatta onları keyfi bir şekilde ihmal etmeyi içeriyor. Bu mantıklı ve hassas bir matematik değil. Mantıklı matematik, bir niceliği küçükken ihmal etmeyi içerir; onu sadece sonsuz büyük olduğu ve siz onu istemediğiniz için ihmal etmek mantıklı bir matematik önermesine aykırıdır![11]

[11] Paul A. M. Dirac, "The Evolution of the Physicist's Picture of Nature," *Scientific American* 53 (May 1963). Cited in Helge Kragh, *Dirac: A Scientific Biography* (Cambridge, UK: Cambridge Üniversitesi Yayınları, 1990), 184.

Parçacık fiziği etkileşimleri için Feynman diyagramlarını icat etmesi ve QED'nin geliştirilmesine katkılarından dolayı ünlü bir fizikçi olan Richard Feynman, 1985'te şunları söyledi:

> Oynadığımız kabuk oyunu. . teknik olarak "yeniden boyutlandırma" olarak adlandırılır. Ama sözcük ne kadar zekice olursa olsun, yine de "dippy" süreç [dipte yapılan iş, pis iş, kirli iş] dediğim bir şey bu! Böyle bir hokus pokusa başvurmak, kuantum elektrodinamiği kuramının matematiksel olarak kendi içinde tutarlı olduğunu kanıtlamamızı engelledi. Kuramın şu ya da bu şekilde kendi içinde tutarlı olduğunu kanıtlanmamış olması şaşırtıcıdır. Şimdi; yeniden boyutlandırmanın matematiksel olarak meşru olmadığından şüpheleniyorum.[12]

Yeniden boyutlandırma kuramını daha katı bir matematiksel temele oturtmak için girişimlerde bulunulmuştur. Nobel Ödüllü Kenneth Wilson tarafından yayınlanan çalışma, yeniden boyutlandırma kuramını anlamamıza önemli bir katkı yaptı.[13] Yoğun madde fiziği ve göreli kuantum alan kuramındaki çalışmaları, ilk olarak 1954'te *Physical Review*'de Murray Gell-Mann ve Francis Low tarafından ufuk açıcı bir makalede yayımlanan yeniden boyutlandırma grup kuramını daha da geliştirdi.[14] Wilson'un yaptığı iş; yük ve kütle gibi sonsuz sabitlerin temel sorunu hâlâ mevcut olmasına rağmen, yeniden boyutlandırma grubu kuramını matematikçiler ve fizikçiler için daha çekici hale getirmesiydi.

---

[12] Richard P. Feynman, *QED: The Strange Theory of Light and Matter* (Princeton, NJ: Princeton Üniversitesi Yayınları, 1985).]

K.G. Wilson, "The Renormalization Group: Critical Phenomena and the Kondo Problem," *Reviews of Modern Physics*, 47 (4), 773 (1975).

M. Gell-Mann and F.E. Low, "Quantum Electrodynamics at Small Distances," *Physical Review* 95 (5), 1300–1312 (1954).

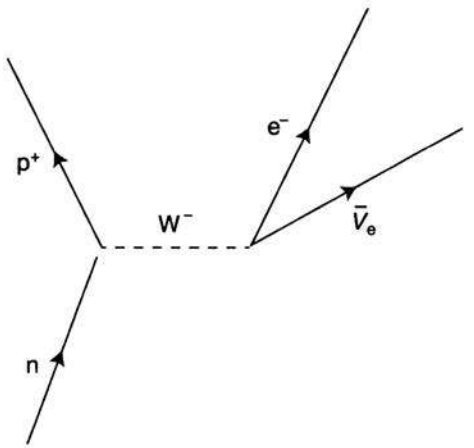
W PARÇACIĞININ SAHNEYE GİRİŞİ

İki elektron arasındaki veya bir pozitron ile bir elektron arasındaki elektromanyetik kuvvet, kütlesiz fotonları değiş tokuş eden yüklü parçacıklar tarafından üretilir. 1938'de İsveçli fizikçi Oskar Klein, zayıf kuvvet için fotonun eşdeğeri olabilecek bir parçacık önerdi. Bu bozon; taşıyıcı parçacık bozonu, yani *"aracı vektör bozonu"* olarak bilinir hale geldi. Sonunda W bozonu ismi verilen bir spin-1 parçacığı olarak betimlendi. Zayıf etkileşimlerde W, kuarklar ve leptonlarla etkileşime girer. Bu etkileşimin şiddeti, boyutsuz bir bağlanma sabiti olan g değeriyle ölçülür. Fermi'nin bağlanma sabiti (G_F) g'nin karesinin W kütlesinin karesine bölümüyle orantılıdır. W kütlesini yeterince ağır hale getirmek, aracı vektör bozonu W sayesinde zayıf etkileşim kuramını düşük seviyede enerjilere indirger. W'nun bu düşük seviyedeki enerjileri, Fermi'nin bağlantı sabitiyle Fermi'nin orijinal zayıf etkileşim kuramına katkı sağlar (Şekil 1.8).

Zayıf etkileşimin elektromanyetik etkileşimden çok daha zayıf olması nedeniyle fizikçiler W parçacığının, 50 GeV ile 130 GeV aralığında ağır bir parçacık olması gerektiğini düşündü. W'nun ağır kütlesi nedeniyle kurama göre leptonlar gibi parçacıklara bozunması ve kısa bir ömre sahip olması gerekir. Bunun anlamı; zayıf kuvveti taşıyan W parçacığının etkileşim aralığının, kütlesiz foton tarafından taşınan elektromanyetik kuvvetin sonsuz etkileşim aralığına kıyasla çok daha kısa olduğudur.

Ancak kısa süre sonra, zayıf etkileşim kuramında sonlu hesaplamalar elde etmenin zorluğunun daha fazla çözülemediği bulundu. W bozonunun, Fermi'nin kuramındakilere benzer matematiksel sonsuzluklarla ilgili sorunları olduğu ortaya çıktı. Aracı vektör bozon modeli için kuantum alan kuramı hesaplamaları da sonsuzluklar üretiyordu. Ek olarak, W içeren parçacıkların saçılması için tedirgenme kuramı hesaplamalarında, yüzde 100'e kadar toplama olasılıklarının ciddi bir başarısızlığı, yaklaşık 1,7 TeV'lik bir enerjide

meydana geldi. Bu durum parçacıkların hesaplanan saçılma olasılığının yüzde 100'ü aşacağı anlamına geliyordu, ki bu elbette imkânsızdı.



Şekil 1.8 W bozonunun aracılık ettiği proton, elektron ve karşı-nötrinoya nötron bozunumu için Feynman diyagramı. Kaynak: pfnicholls.com

1950'lerin sonlarında ve 1960'ların başlarında zayıf etkileşim kuvvetinin durumu buydu. Kuantum alan kuramında zayıf etkileşimlerle hesaplamalar nasıl anlaşılırdı? Bu bilmeceyi çözmek için birçok girişimde bulunuldu; ama bir nedenden ya da başka bir nedenden hepsi başarısız oldu.

AYAR [GAUGE] KURAMI VE W PARÇACIĞI

1918'de Hermann Weyl, Einstein'ın kütleçekim kuramının geometrisini genelleştirerek kütleçekimi ve elektromanyetizmayı birleştirmeye çalıştı. Bu geometri, 19. yüzyılda Bernhard Riemann tarafından icat edilen *Riemann geometrisi*dir ve bir balonun yüzeyi veya Einstein'ın uzayzamanı gibi Öklitçi olmayan eğri bir alanı tanımlar. Elektromanyetizmada elektromanyetik alanlar matematiksel olarak vektör alanları

olarak tanımlanır. Bu vektör alanları, uzayzamanda birbirinden keyfi olarak uzak olan farklı noktalarda yönleri ve büyüklükleri açısından karşılaştırılabilir.

Weyl, demiryolu raylarının farklı "ayar"larına benzer şekilde, uzayzamanın geometrisinde bir vektör alanının "ayarı" fikrini ortaya attı. Einstein'ın uzayzamanında, bir lokomotif herhangi bir demiryolu hattında seyahat edebilir, oysa Weyl'in daha genelleştirilmiş uzayzamanında bu doğru değildir. Kuramında Weyl, Einstein'ın kütleçekim kuramının dayandığı Riemann geometrisini genelleştirerek kütleçekimini elektromanyetizmayla birleştirmeyi başardı. Weyl, Riemann geometrisinde uzayzamanda iki nokta arasındaki sonsuz küçük mesafeyi belirlemek için kullanılan bir metrik tensör alanına sahip olmanın yanı sıra bu geometriye bir vektör alanı daha dahil etti. Birlikte bu alanlar, hem kütleçekim hem de elektromanyetizmaya yeni bir yol açtı.

Bir vektör, uzayda bir yönü olan bir alan, bir noktadan başka bir uzak noktaya aktarıldığında Weyl, Einstein'ın kütleçekimdeki durumun aksine, bütünlüğünü veya ayarını artık korumadığını iddia etti. Ancak Einstein, doğanın bu şekilde çalışmadığını iddia ederek Weyl'in fikirlerini eleştirdi ve sonunda Weyl kuramını terk etti. Kuram basitçe uzayzamanda iki nokta arasındaki mesafeyi ölçtüğünüzde elde ettiğiniz sonuç verileriyle uyumlu değildi.

Ancak Weyl, uzayzamandaki ayar fikrinden vazgeçmedi. 1929'da soruna farklı bir açıdan yeniden saldırdı. Maxwell'in elektromanyetik alan denklemleri aynı kaldı, yani *vektör potansiyel alanı* olarak bilinen şeyin matematiksel dönüşümü altında değişmez olarak varlığını sürdürdü. Bu değişmezliğe *ayar değişmezliği* [*gauge invariance*] deniyordu ve 1930'larda QED'nin gelişimi sırasında, Dirac'ın elektron için dalga denklemini keşfetmesinden kısa bir süre sonra keşfedilmişti. Weyl'in keşfettiği şey, elektromanyetik alan ile Dirac'ın elektron için dalga fonksiyonunun fazı arasında temel bir

bağlantının var olduğudur.[15] Bölüm 3'te ayar kuramı hakkında daha fazla şey söyleyeceğiz.

Hatırladığımız gibi, Oskar Klein W bozonlarının varlığını öngörmüştü. Theodor Kaluza'nın kütleçekim ve elektromanyetizmanın yüksek boyutlu uzayzaman birleşik kuramını genişlettiği bir makale[16] yayımladı. Daha sonra, 1938'de Klein, bu kurama devasa bir aracı vektör bozonunu dahil etti. Bu, bir vektör parçacığını temsil eden şimdi *abelci olmayan ayar alanı* dediğimiz şeyin parçacık fiziğinde ilk görünümüydü. Bu abelci olmayan ayar kuramının özellikleri Bölüm 3'te de tartışılmıştır. Kuramcılar bu yüzden takdir edilmelidir ki; 1930'larda deneyciler, kuramcıların öngördüğü gibi, spin 1 barındıran büyük bir bozonu hiç gözlemlememişti. Kuramcılar bu nedenle büyük bir takdiri hak ediyorlar.

MAXWELL DENKLEMLERİNİN GENELLEŞTİRİLMESİ

1954'te Chen-Ning Yang ve Robert Mills adlarında iki fizikçi, Maxwell'in elektromanyetizma denklemlerine ilişkin önemli genellemelerini yayımladı.[17] İzotopik spin uzayı fikrini ortaya attılar.[18] Parçacıklar üzerindeki elektrik yükü yerine, proton ve nötronların izotopik spin yükü üzerinde yoğunlaştılar. Bu izotopik spin yükü korunduğunda, o zaman bir proton ve bir nötron aynı spin-½ parçacığı olarak görünüyordu. Proton ve nötron, yeğin etkileşimlere maruz kaldığında sanki aynıymış gibi etkileşirler. Proton, pozitif yüklü ve nötron, sıfır yüklü olsa bile aynı parçacıkmış gibi etkileşimlere girerler. Protonların elektromanyetizmayla etkileşiminden kaynak-

---

[15] Bir dalganın fazı, genellikle bir açı olarak ölçülen bir dalga biçimi döngüsündeki belirli bir noktadır.

Oskar Klein, "Quantentheorie und Fünfdimensionale Relativitätstheorie," *Zeitschrift fur Physik A*, 37 (12), 895–906 (1926).

C.N. Yang and R. Mills, "Conservation of Isotopic Spin and Isotopic Gauge Invariance," *Physical Review*, 96, 191–195 (1954).

Buradaki "Uzay" kavramı bizim günlük üç boyutlu uzayımıza atıfta bulunmaz, izotopik dönüşü tanımlayan matematiksel bir kavramdır.

lanan kütlelerindeki küçük fark, yeğin etkileşimler yoluyla etkileşime girdiklerinde önemli değildir. Bu durum, yeğin etkileşimlerin izospin simetrisine yol açar.

İzotopik spin uzayı fikri ilk olarak 1934'te Werner Heisenberg tarafından ortaya atıldı. Yang ve Mills'in yayımladığı temel makale, izotopik spin uzayındaki izotopik spin dönmeleri altında protonların ve nötronların etkileşimlerinin ayar değişmezliği olasılığını araştırıyordu. QED ve Maxwell denklemlerinin ayar değişmezliği analojisini kullanarak tüm fiziksel süreçlerin yerel, uzayzamana bağlı, izotopik spin ayar dönüşümleri altında değişmez olduğunu belirttiler. O zamanlar yeterince takdir edilmeyen makaleleri, parçacık fiziğinin geleceği için önemli bir matematiksel yapı taşı olacaktı.

St. John's College Cambridge'ten Abdus Salam tarafından yönlendirilen Trinity College Cambridge'te bir araştırma öğrencisi olan Ronald Shaw, nükleonlarla (protonlar ve nötronlar) bağımsız olarak etkileşime giren bu matematiksel izotopik spin kuramını keşfetmişti. Hatta bu konu doktora tezinin bir parçasıydı. 1954'te Trinity College'a öğrenci olarak geldiğimde Shaw, doktora araştırmasında benden iki yıl öndeydi. Shaw'la tartışmalarım sırasında, Salam'ın doktora projesi hakkındaki fikrini öğrendim. O zamanlar, Maxwell denklemlerinin izospin genellemesinin fiziksel önemi takdir edilmediğinden Salam, Shaw'a bu matematiksel gelişmede fizik için gelecekte bir anlam göremediğini söylemişti. Ne yazık ki Shaw, Salam'ın tavsiyesine uydu ve tezinden bir makale çıkararak bu fikri yayımlamaya çalışmadı. Bir makale yayımlamış olsaydı fiziğe yaptığı bu önemli katkıyla Yang ve Mills kadar iyi bilinirdi.

1955 civarında Yang, Princeton'daki İleri Araştırma Enstitüsünde Mills ile geliştirdiği kuram hakkında bir konuşma yaptı. Wolfgang Pauli seyirciler arasındaydı ve her zamanki müthiş idrak gücüyle, kavrayışıyla, kuvvet taşıyan W parçacığının varsayılan kütlesi hakkında bir soru sordu. Çünkü, o sırada zaten, nükleer radyoaktif bozunmadan sorumlu ol-

duğu varsayılan aracı vektör parçacığının doğası hakkında sorunlar ortaya çıkmaya başlamıştı. Ayrıca Pauli, Yang-Mills genelleştirmesine benzer bir Maxwell denklemleri genellemesi üzerinde de spekülasyon yapmıştı. Ancak malum sorunları nedeniyle sonuçlarını yayımlamamıştı. Bu sonuçlar; izotopik spin yükleri arasındaki kuvveti taşıyan ayar bozonunun kütlesi sorunuyla ilgili endişeler barındırıyordu. Ayar bozonu, ayar simetrisini sağlayan bir alanla ilişkili bir bozon için kullanılan bir terimdir (bkz. Bölüm 3). Bu izotopik spin ayar bozonu, sonunda yüklü W aracı vektör bozonuyla tanımlandı.

Pauli, sunumu sırasında Yang'a daha başlarda bir soru sordu: "Ya ayar bozonunuzun kütlesi ne olacak?" Yang tatmin edici bir cevap veremedi. Konuşmanın ilerleyen saatlerinde Pauli tekrar şu soruyu sordu: "Nükleonlar arasındaki kuvveti taşımaktan sorumlu ayar bozonunun kütlesi ne olacak?" Yang yine soruyu cevaplayamadı, ancak bu soru serisinden o kadar rahatsız oldu ki konuşmasına devam etmeyi reddetti ve oturdu. Ancak seminere başkanlık eden Robert Oppenheimer, Yang'ı konuşmasına devam etmeye çağırdı, o da bu çağrıya uydu.[19]

Görünüşe göre Pauli, yüklü aracı vektör bozonuyla ilişkili zayıf etkileşimler kuramında ortaya çıkacak tüm sorunları önceden görmüştü. Çünkü elektromanyetik kuvveti taşıyan fotonun aksine bu bozonun bir kütlesi vardı. Yüklü aracı vektör bozonunun kütlesi W'nun neden olduğu zayıf etkileşimin doğasını anlamaya çalışan parçacık fizikçileri için ciddi zorluklar doğuruyordu. Yang'ın enstitüdeki konuşmasından yaklaşık 60 yıl sonra, özellikle büyük hadron çarpıştırıcısı (LHC) Higgs parçacığının varlığını doğrulayamayacaksa, ara vektör bozonunun standart parçacık fiziği modeline nasıl sığdırılacağı bir sır olarak kalacaktı. 1960'ların ortaların-

[19] Bu sahne, Robert P. Crease ve Charles C. Mann, The Second Creation (New Brunswick, NJ: Rutgers Üniversitesi Yayınları, 1996), 194'te Yang'dan alıntılarla anlatılmaktadır.

da Higgs bozonu ve alanının zayıf etkileşim kuramına, daha sonra birleşik elektromanyetizma ve zayıf etkileşim kuramına, yani elektro-zayıf kurama girmesi, W bozonu kütlesi sorununu çözmenin bir yolunu sağladı. İddia edilen *Higgs mekanizması*, W bozonuna bir kütle verdi ve bunu yaparken, sonlu, yeniden boyutlandırılabilir ve kendi kendine tutarlı bir elektro-zayıf etkileşimler kuramının önünü açtı.

QED'nin deneysel başarılarına rağmen bazı kuramcılar hâlâ kuantum alan kuramı ve QED'nin kuramsal temellerinden memnun değildi. Lev Landau, Paul Dirac ve Gunnar Källen gibi büyük fizikçiler, QED hesaplamalarını anlamsız sonsuzluklardan kurtarmak için yeniden boyutlandırma kuramının kullanımını hoş karşılamıyorlardı. Källen ve Landau 1950'lerde QED'nin temelde yanlış olduğunu iddia eden makaleler yayımladı. Çünkü kuramda kütle ve yükü sonlu yapmak için kullanılan "yeniden boyutlandırma sabitleri" özünde sonsuzdu, bu nedenle QED bir fiziksel kuram olarak temelde tutarsızdı.[20]

Yang ve Mills kuramlarında, elektromanyetizma fotonunu, biri elektriksel olarak nötr ve ikisi zıt yüklü izotopik spin kuvvetini taşıyan bir üçlü bozon sistemiyle değiştirdiler. Fotonların kendileriyle etkileşime girmediği veya bağlanmadığı Maxwell'in elektromanyetik kuramının aksine Yang-Mills ayar bozonları birbirleriyle etkileşime girer. Eğer bu parçacıklar kütlesiz hale getirilirse Yang-Mills kuramı tamamen ayar değişmezi (invaryant) halini alıyordu. Bu da sinir bozucu sonsuzluklardan kaçınarak yeniden boyutlandırılabileceği anlamına gelirdi. Makalelerinde, kuramlarında bu bozonlardan gelen kütle katkılarını açıkça içeriğe koymasalar da bu ara vektör parçacıklarının muhtemelen bir kütleye sahip olması gerektiği konusunda endişeliydiler. Ara vektör bozonlarının üçlüsüyle etkileşime giren protonları ve nöt-

[20] Bu, Tomonaga, Schwinger ve Feynman'ın 1949/1950'de QED için elektronun anormal manyetik momenti ve hidrojendeki Lamb kayması gibi tahminlerinin şaşırtıcı bir doğrulukla deneysel olarak doğrulanmasına rağmen gerçekleşti.

ronları dahil ettiğinizde bunun kurama bir kütle boyutu getireceğini ve vektör bozonlarının üçlüsünün büyük kütlede olması gerektiğini anladılar. Ancak Yang ve Mills, ayar bozon kütlelerini elle koymanın kuramdaki ayar değişmezliğini bozacağının çoktan farkındaydılar. Bu, kuramın sonsuzluklarla kuşatılmasına neden olur ve QED'den farklı olarak, yeniden boyutlandırılamaz.

KUARK MODELİ ÖNCESİNDE YEĞİN ETKİLEŞİMLER

1950'lerin sonlarında ve 1960'ların başlarında, parçacık fiziğinin temel dili olan kuantum alan kuramı, yüksek enerjili fizik camiasında gözden düşmeye başladı. Yeğin etkileşimler için kuantum alan kuramı hesaplamalarını başarılı bir şekilde yapmak mümkün değildi. Bu çok daha küçük olan ve yaklaşık olarak bir bölü 137'ye [1/137] eşit olan QED'deki eşleşme sabitinin (ince yapı sabiti) aksine, yeğin etkileşim eşleşme sabitinin birden büyük olmasının bir sonucuydu. Yeğin etkileşim bağlanma sabiti adını verdiğimiz değerin büyüklüğü nedeniyle yeğin etkileşimlerde kuantum alan kuramını kullanan herhangi bir 'tedirgenme kuramı hesaplaması' başarısız oluyordu. O sırada kuantum alan kuramında bilinen hiçbir yöntem bu engelin üstesinden gelemedi.

Kuramcılar, yeğin etkileşimler için S-matris yaklaşımına yöneldiler. İkinci Dünya Savaşından sonra Werner Heisenberg tarafından kurulan ve Amerikalı fizikçi John Wheeler tarafından da takip edilen S-matrisi yaklaşımı, yeğin etkileşen parçacıklar için bir çözüm yolu sunuyordu. Buradaki ana fikir, serbest, etkileşmeyen parçacıkların –protonlar gibi hadronların– diğer hadronları dağıtacağıydı. Hızlandırıcılardaki parçacıkların gerçek saçılımının fiziği bir "kara kutu" olarak ele alındı; yani parçacıkların tam olarak nasıl dağıldığı, kuramcılar için bilinemez bir bilgiydi. Bu, uzayzamandaki çarpışma olaylarında parçacıkların etkileşimleri hakkında her şeyin bilinmesi gereken kuantum alan kuramı yaklaşımının

aksine bir durum yaratıyordu. S-matris kuramı, Geoffrey Chew ve Stanley Mandelstam tarafından yönetilen bir grupta, esas olarak Berkeley'deki California Üniversitesinde merkezlenen gerçek bir endüstri haline geldi. Program, İtalyan kuramcı Tullio Regge tarafından kurulan yeğin etkileşimlerin fenomenolojik Regge kutup modellerine öncülük etti.

S-matris yaklaşımıyla, gerçek saçılma bölgesindeki fiziksel süreçleri bilmek gerekli değildi. Saçılma tesir kesitlerini hesaplamak için sadece saçılmadan gelen parçacıkları ve çıkan parçacıkları bilmek gerekliydi. S-matrisi, saçılma gerçekleştikten sonra gelen parçacıkları ve giden parçacıkları bağlamanın matematiksel bir yoluydu. Buradaki asıl düşünce; S matrisinin bu saçılımın matematiksel özelliklerinin, hızlandırıcılardaki yeğin etkileşim saçılımının tüm gerekli fiziğini açıklamak için yeterli olduğu ve kuantum alan kuramı ihtiyacını ortadan kaldırdığıydı. ***Analitiklik*** ve S-matrisin ***bütünselliği (üniterlik)*** olarak adlandırılan belirli matematiksel özellikler, S-matris kuramının gelişmesinde önemli roller oynamıştır. Analitiklik, karmaşık değişkenlerin matematiğiyle ilgiliydi ve üniterlik S matrisi tarafından tanımlanan saçılma süreçlerinin yüzde 100 olasılığı aşmaması talebiyle ilgiliydi.

S-matris programı, 1960'ların başlarında, kuark-parton modelinin ortaya çıkmasından önce parçacık fiziği topluluğunda baskın bir uğraş haline geldi. Bu çalışma için önemli bir motivasyon, S-matris oluşumu içindeki "önyükleme" mekanizmasıydı. Hadron fiziğini temel yapı taşları açısından açıklamaya çalışmak yerine, hadronların her birinin eşit öneme sahip, demokratik bir şekilde etkileşime girdikleri bir yolla açıklıyordu bu mekanizma. S-matris kuramının savunucuları, bazı parçacıkların diğerlerinden daha "temel" olduğu fikrinden vazgeçtiler. Bu savunucular protonlar, nötronlar ve hadron rezonansları gibi tüm hadronların eşit yaratıldığını ve yeğin etkileşim fiziğine kendi içinde tutarlı bir çözüm üretmek için kendilerini önyüklediklerini iddia ettiler. Başka bir deyişle, parçacıklar arasındaki değişimler, onları

bir arada tutan yeğin kuvvetleri üretti. Deneyciler, hadron rezonanslarının spinlerinin veya açısal momentumlarının bir grafikte çizildiğinde, artan enerjiyle sıfırdan yükselen düz çizgiler üzerinde uzandığını gözlemlediler ve kuramcılar, daha yüksek enerjilere gidildikçe bunun sonsuz sayıda parçacık spiniyle sonuçlandığını varsaydılar. Önyükleme programını destekleyenler, parçacık fiziğinin kuark gibi temel bir parçacık birimine dayandırılmaması gerektiğini, ancak hadronların (o zamanlar temel parçacıklar olarak kabul edilen) karşılıklı etkileşimlerinin kendilerini diğer hadronları üretmek için önyüklediğini iddia ettiler. Bütün bunlar S matrisi açısından ifade edildi.

Tullio Regge, 1957'de Regge kuramı fikrini ortaya attı. Hadron rezonanslarının açısal momentumunu veya spinini tamsayı ve yarım (yarı tamsayı) değerleri değil, enerjinin fonksiyonları olarak sürekli karmaşık değerleri almasıyla Regge, hadron rezonanslarını karmaşık açısal momentum düzlemindeki kutuplar olarak tanımladı. Regge kutupları 1960'larda ve 1970'lerde parçacık fizikçilerini kuantum alan kuramından daha fazla meşgul eden bir fenomenolojik aktivite haline geldi. Kuark-parton modeli sonunda parçacık fiziği camiasında daha popüler hale geldi, çünkü S-matris yaklaşımının Regge kutup kuramı da dahil olmak üzere yeğin etkileşimler, öncülerinin umduğu gibi parçacık fiziğini anlamak için umut verici bir yaklaşım değildi.

KUARK–PARTON MODELİYLE YEĞİN KUVVETİ KAVRAMAK

Fizikçiler, S-matris kuramı ve Regge kutupları programıyla birlikte, o zamana kadar keşfedilmiş hadronların birbirleriyle nasıl etkileşime girdiğini ve parçacık gruplarını nasıl sınıflandırılabileceklerini anlamaya çalışırken başka fikirlerin peşine düştü. Abdus Salam ve John Ward, Sheldon Glashow ve Jun John Sakurai gibi fizikçiler Yang ve Mills'in fikirlerini "yeğin etkileşim fiziği"ne doğru genişletti. Yang-Mills

etkileşimlerini tanımlamak için SU(3) simetri grubunu kullandılar. Bu da onları yeğin kuvveti taşıyan sekiz aracı vektör parçacığına yönlendirdi, böylece Yang-Mills'in SU(2)'de olduğu gibi bir aracı vektör bozonu üçlüsü önerisini genişletti. Bu sekiz bozon, SU(3)'teki "sekizli"dir. Londra Imperial College'da Salam'ın grubunun bir üyesi olan Yuval Ne'eman, bağımsız olarak bir makale yayımladı.[21] Burada bilinen baryonları ve mezonları SU(3)'ün sekizlilerine atadı.

Ne'eman'ın makalesinden bir ay sonra Murray Gell-Mann, Ne'eman tarafından önerilenlerle bağımsız olarak aynı fikirleri içeren "Sekiz Katlı Yol: Yeğin Etkileşim Simetrisi Kuramı" adlı makalesinin ön baskısını gönderdi. Hem Gell-Mann hem de Ne'eman'ın tartıştığı SU(3) baryonlarının sekizlileri, baryonların ve mezonların "çeşni"lerini barındırıyordu. Çeşni hatırlayacağımız kadarıyla, farklı hadronları kategorize eden bir özelliktir. Gell-Mann, deneylerin önerilerini doğrulayabileceğinden şüphe duyduğu için makalesini asla yayımlamadı. Bununla birlikte, sonunda Gell-Mann'ın kendine özgü zekice yöntemiyle, parçacıklar arasındaki yeğin etkileşimlerin olası simetrilerini ihtiyatlı bir şekilde tartıştığı bir makale yayımladı.[22] Makalenin yalnızca son bölümlerinden birinde, yeğin etkileşimlerin olası bir açıklaması olarak SU(3)'teki Sekiz Katlı Yol fikrini gerçekten tartışmayı ve değerlendirmeyi başardı.

1974'te Gell-Mann, Toronto Üniversitesini konuğum olarak ziyaret ettiğinde, bana fizik makaleleri yazarken, önerilen kuramın olası tüm çeşitlemelerini makaleye dahil etmeye çalışmamız gerektiğini tavsiye etti. "Böylece gelecekteki bazı yazarların kuramı genişletip ve seni de kredisiz bırakmasını engellemiş olursun" diye de tavsiyesini sürdürdü. Baryonların ve mezonların simetrileri üzerine, nihayet yayımlanmadan önce iki kez revize edilen makalesi, bu felsefenin iyi bir

---

[21] Y. Ne'eman, "Derivation of Strong Interactions from a Gauge Invariance," *Nuclear Physics*, 26, 222–229 (1961).
M. Gell-Mann, "Symmetries of Baryons and Mesons," *Physical Review*, 125, 1067–1084 (1962).

örneğiydi; çünkü Gell-Mann, hadronları gruplandırmanın en makul yollarını kapsamayı başardı. Makalenin ilginç yönlerinden biri, Gell-Mann'ın, hadronları sınıflandırmak için grup kuramını kullanmasına bağlı kalarak, yeğin bir şekilde etkileşime giren parçacıkları tanımlamak için kuantum alan kuramının bir ayar kuramı fikrinden vazgeçmiş görünmesidir. Bir ayar kuantum alan kuramı olasılığı ancak daha sonra QCD [kuantum renk dinamiği] önerisiyle geldi.

QED'nin mucitlerinden biri olan, olağanüstü deneysel başarılar elde eden ve bunlardan hoşnut olan Richard Feynman, 1970'lerin başında kuramsal parçacık fiziği oyununa geri dönmek istedi. Esas olarak zayıf etkileşimlerle meşguldü ve Gell-Mann'la işbirliği içinde, parite ihlalini (sol-sağ simetri) içeren V-A zayıf etkileşimler kuramını keşfetti. Robert Marshak ve George Sudarshan bağımsız olarak V-A zayıf etkileşim kuramını keşfetti. V-A; zayıf etkileşimlerin iki akımına atıfta bulunan *vektör eksi eksenel vektör* anlamına gelir.

Feynman, Stanford'da James Bjorken'i aramış, SLAC'ta proton ve nötron içindeki sert çekirdekli parçacıkların saptanmasına ilişkin kuramsal analizini öğrenmişti. Feynman, derin elastik olmayan saçılma üzerinde SLAC sonuçlarını tanımlayan Bjorken'in ölçekleme yasalarının fiziksel anlamını yeniden yorumladı. Elektronlar ve protonlar hakkında bilgi sahibi oldu ve bu çekirdek parçacıklarının kaçının proton ve nötrona gömüldüğünün olasılıklarını tanımlamanın matematiksel bir yolunu icat etti. Gell-Mann'in üç kuarkının kuark modelinin SU(3) grup kuramının temeli olduğunu bilmesine rağmen, Feynman probleme Bjorken'in deneysel veri analizine dayanarak daha genel bir bakış açısıyla yaklaşmak istedi. Feynman, Murray Gell-Mann'la işbirliği içinde zayıf etkileşim kuramında önemli araştırmalar yapmasına rağmen, bu ikili oldukça rekabetçiydi ve Feynman yeğin etkileşimler alanında kendi dehasını göstermek istedi. Parçacıklarına "parton" adını verdi, hızlandırıcıdaki proton ve elektronların saçılmasında belirli bir enerji ve momentum

aktarımı için protonun içinde kaç adet bulunacağına dair olasılıkları belirledi.

Feynman, protonun küçük, sert partonlarının çoğuyla dolu olduğunu düşündü. Bu parçacıkların birbirleriyle etkileşmediğini, yani protonun içinde serbestçe hareket eden parçacıklar olduklarını varsayıyordu. Feynman serbest partonların neden protondan kaçamadığına ve neden hızlandırıcılarda görünür hale gelmediklerine dair hiçbir açıklama getirmedi. Kaçabilselerdi hızlandırıcılarda görünür hale gelirlerdi. Protonu, ışık hızına yakın hareket etmesi nedeniyle uzunluk olarak büzülmesinden kaynaklanan düzlük etkisi altında (özel görelilikteki malzeme çubuklarının Lorentz-FitzGerald büzülmesinin etkisi) yassı bir krep olarak hayal etti.

Bir proton diğerini geçerken, ışık hızına yakın bir hızda birbirine göre hareket eden partonlar içeren iki düz krepiniz olur. Daha sonra, her iki proton çarpıştığında, bir protondaki bir partonun diğer protondaki partonlarla etkileşime girme olasılığını hesapladı. Bu etkileşim, elektrik yüklü partonlar arasındaki foton alışverişinin bir sonucu olarak elektromanyetik olabilirdi. Ayrıca bir protondaki bir parton, mezonları değiştirerek yeğin etkileşimler yoluyla diğer protondaki partonlarla da etkileşime girebilirdi. Feynman, protonlardaki partonların elektromanyetik etkileşimlerine ilişkin hesaplamalarından Bjorken'in ölçekleme yasasını elde edebildi ve SLAC'de ölçülen elektron/proton tesir kesitlerinin yüksek enerjili kırınım davranışını açıklayabildi. Açıklaması, Bjorken'in parçacık fiziğine dayalı ezoterik açıklamasından ve kuantum alan kuramı hesaplamalarından çok daha basit ve sezgiseldi. Ancak Feynman'ın bu parton modelinin, proton ve nötronların pek çok kuarktan değil de üç kuarktan oluştuğu kuark modeliyle ne ilgisi vardı? Parton, kesirli yüklü kuarklarla tanımlanabilir miydi?

Daha sonra, bir protonda kaç adet kuark veya parton olduğunu keşfetmek için SLAC ve CERN'de deneyler başlatıldı. İlk sonuçlar umut verici değildi. Kuramcılar, protonda yal-

nızca üç adet sert, noktasal nesne olduğunu belirleyemediler. Acaba Feynman'ın proton modelindeki birçok partonu açıklayabilirler miydi? Kuramcılar bu durumu açıklamanın yollarını bulmakta gecikmediler. Atomların atom fiziği modellerine bir benzetme yaparak, Gell-Mann'ın üç kuarkının veya Zweig'in aslarının değerlik kuarkları olduğunu varsaydılar. Atomlardaki protonları ve nötronları çevreleyen elektron bulutuna benzer şekilde, üç temel değerlik kuarkının etrafında vızıldayan bir kuark ve karşı-kuark "denizinin" olduğunu varsaydılar. Deneyciler yine de partonları kuarklarla tanımlayabilecek sonuçlar bulamadılar. Bir şey eksikti. Böylece, daha düşük enerjilerde protonun içindeki değerlik kuarklarını bağlayan etkileşimlerin, protonun içinde kaç adet parton veya kuark olduğunu ayırt etme zorluğuyla ilgili varsayımlarda bulundular. Daha sonra, kuarklar için renk yükü icat edildiğinde ve etkileşimi bağlayan kuarkların renkli gluonlardan kaynaklandığı anlaşıldığında, CERN'deki proton çarpışmalarının deneysel sonuçları, partonların kuarklarla özdeşleştiğinin anlaşılır bir resmini verdi.

Feynman'ın parton modeli sonunda proton-proton ve proton/karşı proton çarpışmalarını analiz etmek için önemli bir teknik yöntem haline geldi. Proton-protondan jetler olarak püsküren kuark/karşı-kuark etkileşimleri ve proton/karşı-proton çarpışmaları, Feynman'ın parton dağılım fonksiyonları kullanılarak analiz edildi. Ayrıca Bjorken'in ölçeklendirme yasaları deneysel olarak yeniden doğrulandı. Bu teknikler, hem elektron-proton saçılması için hem de zayıf etkileşimlerde nötrinoları içeren çarpışmalar için kullanıldı.

1970'lerde yüksek enerji fiziğindeki ilerlemeyle ilgili iki düşünce okulu ortaya çıktı. Birincisi, Feynman'ın parton modelinin, SLAC deneylerinin kısa mesafeli ölçekleme davranışını açıklamada başarılı olmasıydı. Çünkü esasen kuantum alan kuramını birleştirme girişimini görmezden geliyordu. Diğer düşünce okulu, Feynman ve Gell-Mann parton-kuark modelini ve ölçekleme yasalarını kuantum alan kuramına, özellikle bir Yang-Mills alan kuramına dahil etmesi gerektiği üzerineydi.

Bu araştırmalar sırasında, David Gross ve yüksek lisans öğrencileri David Politzer ve Frank Wilczek, "asimptotik özgürlük" dedikleri şeyi keşfettiler. Partonların ve kuarkların, yüksek enerjilerde esasen serbest, etkileşimsiz parçacıklar haline geldiklerini, çünkü enerji arttıkça aralarındaki bağlanma kuvvetinin azaldığını buldular. Bu, fotonların ve elektronların saf kuramının aksineydi. QED durumunda, bir elektron, elektron hedefini çevreleyen pozitronları ve elektronları yok eden buluta nüfuz ettiğinde elektromanyetik kuvvet artar. Buna *karşı perdeleme* [*antiscreening*] veya *karşı kalkanlama* [*antishielding*] etkisi denir. Buna karşılık Gross, Wilczek ve Politzer ile bağımsız olarak Gerard't Hoof, yeğin kuvvetin sanal parton bulutu (veya kuarklar/karşı-kuarklar) içinden ilerlerken perdelendiğini ve şiddetinin azaldığını keşfetti. Aynı zamanda hedef kuarka yaklaşır bir durumdaydı. Saf QED ile kuark modeli arasındaki farkın nedeni, kuarkların çeşni ve renk özellikleridir. Kuarkların bu "asimptotik özgürlüğü" deneysel olarak doğrulandı; çok yüksek enerjilerde kuarkların "serbest" parçacıklarmış gibi davrabildikleri ortaya çıktı. Bu keşif bir ihtiyacı daha da güçlendirdi. Yang-Mills ayar kuramı içindeki yeğin etkileşimleri tanımlamamız gerekmekteydi. Gross, Politzer ve Wilczek, QCD'de asimptotik özgürlüğü keşfettikleri için 2004 yılında Nobel Ödülünü kazandılar.

1970'lerin başındaki saçılma deneyleri, kuarkların renk yükünü doğruladı. Renk yükü, Pauli'nin aynı fiziksel durumda özdeş fermiyonlara sahip olamayacağımızı söyleyen dışarlama ilkesinin ihlalinden kaçınmayı başardı. Her bir kuarkla ilişkili üç "renk" (kırmızı, mavi ve yeşil) olduğunu gösteren tesir kesit hesaplamalarında meydana gelen üç sayısal faktörün gerçek olduğu bulundu. Ancak elbette kuarklarda gerçek renkler yoktu. Kuark renklerinin varsayılan karakteristiğinin gerçekliği hakkında yeterli miktarda şüphecilik vardı. QCD'ye göre, bir pi mezonunun bozunma hızı, onu oluşturan kuark ve karşı-kuarkın renk yüklerine bağlıdır. Elektriksel olarak nötr bir pi mezonunun iki fotona bo-

zunma hızı renkli kuarklarda; kuarkların renksiz olmasına göre, dokuz kat daha hızlıdır. QCD kuramının bu öngörüleri, ilk olarak İtalya'daki Adone elektron-pozitron çarpıştırıcısında deneysel olarak doğrulandı. Bu deney, parçacık fiziği topluluğu için, sonunda, kuarkların proton ve nötronun dışında hiçbir zaman gözlenememesine rağmen, gerçekte proton ve nötron içinde hapsedilmiş gerçek nesneler olarak var oldukları gerçeğini kabul etmeleri için kuvvetli bir motivasyondu.

Başlangıçta, Gell-Mann, kuarkları incelerken beyaz, renksiz baryonlar ve mezonlarla ilgilenilmesi gerektiğini vurguladı. Bunların nelerden oluştuğuyla değil, sadece ilgilenilmesi gerektiği kısımlarıyla ilgilenilmesi gerekliliğini iddia etti. Bunun nedeni, kuarkların gerçekliğine hâlâ şüpheyle yaklaşmasıydı. Fizikçiler artık bu pozisyonu terk etmiş durumdalar. Bugün, yüksek enerjili hızlandırıcılardaki deneyciler, birbirine çarpan parçacıkların enkazını incelerken kuarkların ve gluonların renk özelliklerini göz önünde bulundurmak zorundadırlar. Sadece renksiz bir gluonu düşünmek yeterli değildir. Kuarkların ve gluonların tüm bu renkli özelliklerinin rahatsız edici psikolojik yönü, onları deneysel olarak "görememiz"dir. Ancak, şu anda LHC'de elde edilebilenler gibi enerjilerde protonların saçılması yoluyla ortaya çıkan dolaylı bilgiler çok büyük bir yığın oluşturuyor. David Gross'un dediği gibi; "görmek inanmaktır ya da inanmak görmektir." İki proton LHC'de çarpıştığında çarpışma noktasından hadron jetlerinin ortaya çıktığı görülür. Deneyciler artık bu jetleri kuarklar ve gluonlar olarak yorumlayabiliyorlar. Sadece bir renksiz gluonu değil, sekiz renkli gluonu dikkate almamız gerektiğine dair deneysel kanıt artık önemli ve tartışılmaz durumdadır. Bu jetlerin kuark ve gluon içeriğini araştıran çarpışma verilerini analiz etmek için LHC tarafından kullanılan devasa bilgisayar ağı olan GRID için yeni bir yazılım geliştirilmiştir. Çarpışmalardan sonra parçacıkların püskürtülmesinden çıkan jetler, sekiz renk kombinasyonunun tümü hesaba katıldığında gluonlar olarak tanımlanabi-

lir. Kuarklar ve partonlar fikri artık sadece matematiksel bir yapı olarak düşünülemez. Bu fikir artık LHC'deki deneycilerin günlük yaşamının bir parçası haline geldi.

Kuarkların ve gluonların keşfinin olağanüstü öyküsü, fizikte ve genel olarak bilimde kuramla deney arasındaki gerekli ve verimli etkileşimi gösterir. Kuramcıların hayal gücü ve bazen çılgınca spekülasyonları, deneycilerin SLAC, Tevatron ve LHC gibi yüksek enerjili hızlandırıcılardaki olağanüstü çabalarıyla deneysel fiziğin verileri tarafından sınırlanır.

2

ATOMALTI PARÇACIKLARI ALGILAMAK

Madde anlayışımız, onu giderek daha küçük birimlere indirgeyerek gelişti. Yunanlarla başlayan bu süreç, ortaçağdan 19. yüzyıla kadar uzun bir ara dışında yüzyıllar boyunca devam etmiştir. Einstein'ın atomların varlığını gösteren Brown hareketini açıklaması ve elektronun J.J. Thomson tarafından keşfi, tüm indirgemecilik sürecini hızlandırır. Hızlandırıcının icadı, protonlar gibi parçacıkların giderek daha yüksek enerjilerde çarpışabilmesi anlamına geliyordu. Atomaltı parçacıkları gitgide daha küçük mesafe ölçeklerinde "görmemizi" sağlıyordu. Yakında maddenin yapısını 14 TeV'lik bir enerjiye denk gelen yaklaşık 10^{-18} cm mesafelere kadar inceleyebileceğiz. Bu durum, şu anda maddenin nihai birimleri olduğuna inandığımız şeylerin (yani kuarkların ve leptonların) fiziksel özelliklerini gözlemlememize izin vermelidir.

MODERN HIZLANDIRICILAR VE ÇARPIŞTIRICILARDAN ÖNCE

Modern anlamda parçacık fikri 1900'de Max Planck, beş yıl sonra da Albert Einstein'la başladı. Planck, bir kara cisim boşluğunun[1] duvarlarından üretilen ışığın enerji paketle-

[1] Kara cisim, kendisine çarpan tüm elektromanyetik radyasyonu soğuran ve tüm frekanslarda yüzde 100 verimlilikle radyasyon yayan idealleştirilmiş bir fiziksel sistemdir.

ri şeklinde geldiğini keşfetti. Bu enerji paketinin miktarı; Planck sabiti h ile ışığın frekansının (ν) çarpımına eşittir. Bu formül, o zamanlar deneysel fizikte tam bir sürprizdi. Işığın dalgalar halinde var olduğu, yaygın olarak kabul edilmişti ve 19. yüzyılın ortalarında James Clerk Maxwell tarafından kanıtlanmıştı. Aslında Planck, enerji paketlerinin köktenci keşfinin doğru olduğu fikrini asla kabul etmedi ve doğayı doğru bildiği bir şekilde, tutarlı olarak tanımlamayı tercih etti. Meslektaşlarının çoğu da benzer şekilde bu keşfin doğru olduğunu kabul edemedi. Gelenekleri yıkan Einstein, 1905'te Planck'ın keşfini bir adım öteye taşıyarak yalnızca kara cisim duvarlarının kuantum paketlerinde ışık ürettiği bilgisiyle yetinmedi. Einstein'ın iddiasına göre; ışığın kendisi de, şimdi fotonlar dediğimiz parçacıklar biçimindeki kuantum paketlerinden oluşuyordu.

Einstein bu fikri, 1900'de Philipp Lenard tarafından gerçekleştirilen deney gibi bilinen deneylerle uzlaştırmanın bir yolunu bulsa da bu fikir muhalefetle karşılaştı. Bu deneyde, negatif yüklü bir elektrot olan katottan oluşan metal bir yüzey üzerinde ışık düşürülüyordu. Işık metalden elektronları koparıyordu ve fırlatılan elektronlar, pozitif yüklü olan anot adı verilen başka bir elektrot tarafından toplanıyordu. Bu düzenek küçük ama ölçülebilir bir akım üretiyordu. Bu ölçümler önemli bir gözleme yol açmıştı: metalden salınan enerji ve buna karşılık gelen elektronların sayısı, dalgalardan bekleneceği gibi metale çarpan ışık dalgasının genliğiyle orantılı değildi. Fakat ışık dalgasının frekansıyla orantılıydı. O zamanlar Lenard ve diğer fizikçiler, ışığın dalgalardan oluştuğuna tamamen inandığı için bu sonuçların anlamını kavrayamadılar. Dahası, oluşan etki ışığın rengine bağlıydı. Işığın gökkuşağı gibi renkleri vardır, yalnızca mavi veya mor ışığın elektronları fırlatmak için yeterli enerjiye sahip olduğu görülüyordu. Spektrumun kırmızı, sarı ve yeşil renklerdeki kısımları bu işi beceremiyordu.

Einstein, ışığın elektronları fırlatabildiği deneysel olarak gözlemlenen yaklaşık 1,5 eV'lik bir foton enerji eşiği ol-

duğunu saptadı. Gerçekten de mavi ışığın enerjisi yaklaşık 3,5 eV kadardı, bu nedenle mavi ve mor ışık bu deneyde özel bir rol oynuyordu. Einstein 3,5 eV enerjiden 1,5 eV'lik eşik enerjisi çıkartıldığında kalan enerji miktarının, metalden kopan elektronlar tarafından taşındığını anlamıştı. Einstein'ın kuramsal hesaplamalarından ışığın, Planck'ın $E = h\nu$ değerine eşit enerji paketlerinden oluştuğunu varsayan bir çıkarım oluşturuldu. Bu çıkarım; elektronun enerjisinin, metal üzerinde parlayan ışığın artan frekansıyla doğrusal olarak artması gerektiğini ortaya koyuyordu. Bu çıkarım ayrıca, Einstein'ın parçacıklı ışık fikrinin önemli bir öngörüsüydü. Einstein bu fikirleri 1905'te "Işığın Üretimi ve Dönüşümüne İlişkin Sezgisel Bir Bakış Açısı Üzerine" başlıklı bir makalede yayımladı.[2]

Robert Millikan, bir dizi deney üzerinde gayretli bir çaba sarf ettikten sonra, Einstein'ın öngörüsünün doğru olduğunu ancak 1914 ve 1915 yılında kanıtlayabildi. Bu deneysel doğrulamaya rağmen Kopenhag'daki Planck ve Niels Bohr'un yanı sıra Millikan Einstein'ın ışığın parçacıklardan oluştuğu önerisine hâlâ inanmıyordu. Maxwell'den bu yana herkes ışığın dalgalardan oluştuğundan çok emindi. Ne de olsa ışık kırılır ve köşelerden döner; ışık dalgaları yapıcı ve yıkıcı olarak birbiriyle etkileşime girerler. Bütün bunlar deneysel olarak iyi biliniyordu. Yani aslında Isaac Newton'ın ışığın "parçacıklardan" oluştuğu fikrine geri dönmemiz mi gerekiyordu? Fotoelektrik etkiyi anlamak için 17. yüzyıla geri mi gitmemiz gerekiyordu?

Daha sonra 1920'lerde, fotoçoğaltıcının [*photomultiplier*] icadı ve vakumlu tüp teknolojisinin ilerlemesiyle deneysel olarak maddenin parçacık yapısını anlamaya yönelik çok ilerleme kaydedildi. Sonunda, fotoçoğaltıcı alet mükemmelleştirildikten sonra, ilk kez tekli fotonları tespit edebildi. Bu

[2] Albert Einstein, "Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betrefenden heuristischen Gesichtspunkt," *Annalen der Physik*, 17 (6), 132–148 (1905).

"tek foton sayımı"nın ilerlemesiyle, deneyler Einstein'ın fotoelektrik etki ilkesini kanıtlayabildi. Bu kanıt ışığın aslında parçacıklardan oluştuğunu gösteriyordu.

Millikan deneyine ve fotoçoğaltıcı sonuçlarına rağmen, Niels Bohr gibi önde gelen fizikçiler hâlâ ışığın bu foton parçacıklarından oluştuğu fikrine inanmayı reddediyordu. Aslında Bohr'un bu fikre çok kararlı bir şekilde karşı çıkmasının nedeni; fotoelektrik etkinin enerjinin korunumunu ihlal ettiğini düşünmesiydi. 1922 yılına kadar; yani Arthur Compton elektronlardan fotonları saçana ve deneysel sonucun kesin olduğunu kanıtlayana kadar bu inatlaşma sürdü. Bu saçılma ancak ışık foton parçacıklarından oluşuyorsa açıklanabilirdi. Einstein, fotoelektrik etkiyi dahice açıklaması nedeniyle 1921 Nobel Fizik Ödülüne layık görüldü (1922'de kendisine verildi). Sonunda Bohr, ışığın gerçekten de foton parçacıklarından oluştuğunu isteksizce kabul etti.

Rus fizikçi Pavel Cherenkov, 1934'te *Cherenkov radyasyonu* olarak adlandırılan önemli bir keşif yaptı. Bulduğu şey, yüklü parçacıkları belirli çözeltilerden geçirdiğinde, bunların maddenin molekülleriyle etkileşime girdiklerinde mavi bir ışık parlaması göründüğüydü. Bu şaşırtıcı değildi, çünkü floresans adı verilen böyle bir etki, diğerlerinin yanı sıra Marie ve Pierre Curie tarafından radyumla yaptıkları deneylerde zaten gözlemlenmişti. Yine de Cherenkov daha da ileri gitti ve yüklü elektronları bir tanktaki sudan geçirdiğinde, elektronların aslında o ortamdaki ışıktan daha hızlı hareket ettiğini keşfetti. Çünkü ışık suda boşluktan daha yavaş hareket eder.

Elektronlar aşırı hızın bir sonucu olarak, enerji boşaltmak zorunda kalıyorlardı. Bu enerji, yayılan fotonlar biçimindeydi. Elektronlar suyun içinden hızla geçerken, boyutu kaç adet foton üretildiğine bağlı olarak değişen, mavimsi bir ışık konisi üretiyordu. Cherenkov'un deneylerinin kuramsal olarak anlaşılması, Il'ia Frank ve Igor Tamm tarafından sağlandı. Bu iki kuramcı, Cherenkov'la birlikte, Cherenkov radyasyonunu keşfettikleri ve açıkladıkları için 1958'de Nobel Fizik Ödülünü kazandı.

Fotonlar başka yollarla da tespit edilebilir. Bir foton, yeterince büyük bir elektrik kuvvetine (Coulomb kuvveti) sahip bir çekirdekten geçtiğinde, kendiliğinden oluşan ve tespit edilebilen bir elektron pozitron (pozitif yüklü elektron) çifti üretebilir. Bir elektrik alanı yeterince büyükse süreci tersine çevirebilir, bir elektron ve bir pozitronu yok edip bir foton üretebilir. Bu olaya fotonların veya elektron ve pozitron çiftlerinin *kendiliğinden yaratılması* denir.

Bir elektronun bir çekirdeğin elektrik alanından geçtiği zaman oluşan diğer bir etki ise; elektronun elektrik alanıyla etkileşiminden kaynaklanan ve yine tespit edilebilen bir foton spreyi üretmesidir. Bu etkiye *bremsstrahlung* adı verilir; Almancada elektronların elektrik alanı tarafından yavaşlatılması veya "frenlenmesi" anlamına gelir. Bremsstrahlung [frenleme] etkisi farklı çekirdeklerle tekrar tekrar tekrarlanabilir, sonunda yeterince yüksek enerjiyle bir foton çığı üretilebilir. Bu çığ, yüksek enerjili fotonlar ve elektrik alanlarının neden olduğu karakteristik etkilerdir.

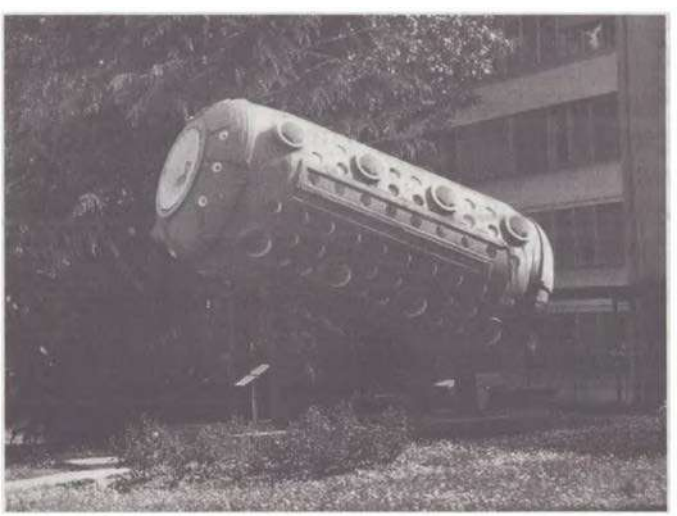
Bir elektrik alanının yakınında fotonlar tarafından üretilen elektronlar ve pozitronlar, diğer deneysel cihazlarda gözlemlenebilen "izler" oluşturur. İyonize parçacıkların bu tür hareketlerini takip etmek ve ölçmek için kullanılan en eski alet, İskoç fizikçi Charles Wilson tarafından icat edilen "sis odası"ydı. 1895'te Wilson, su buharı ortamında yüklü bir parçacık etrafında yoğunlaşmanın meydana geldiğini keşfetti. Gerçekten de, iyonların yükünü ölçmenin yolu, sis odasında iyonları çevreleyen buhar damlacıklarını saymaktır. Özenli deneysel araştırmalar yoluyla, Wilson sonunda 1911'de, yüklü parçacıkları sudan geçirerek, üzerlerinde yoğuşan buharın kabarcık izleri oluşturduğu bir sis odasını mükemmelleştirmeyi başardı. Bununla birlikte, Wilson'ın sis odası sudan oluştuğu için parçacıkların saçılımını tespit edemedi. Su etkili bir hedef olarak hizmet edecek kadar yoğun değildi.

Bulut odası teknolojisindeki bir sonraki büyük ilerleme, 40 yıl sonra geldi. 1952'de Donald Glaser, Michigan Üniversitesinde "kabarcık odasını" icat etti. Hacimce sadece 3 cm^3 olan bir dietil eter, çözücü ve anestetik ortamıyla başladı, ancak kısa sürede çok daha büyük boyutlarda hazneler üretti. Ortamın içinden, kabarcıklar şeklinde izler oluşturan yüklü parçacık demetleri gönderdi. Bir elektrik alanının yakınında bulunan fotonlar tarafından üretilen elektronlar ve pozitronlar, diğer Glaser'de de gözlemlenebilen "izler" oluşturur, ayrıca ~253 ° C gibi çok düşük bir sıcaklıkta tutulan sıvı hidrojen kullanılır. Hidrojen atomları elbette bir proton çekirdeği içeriyordu, bu nedenle proton, yüklü parçacıklar için bir hedef haline geliyordu. Artık deneyciler, yüklü parçacıklar ve protonlar kullanarak önemli saçılma olayları üretebilmeye başladılar. Kabarcık odası CERN'de Gargamelle adı verilen dev Avrupa baloncuk odasında doruğa ulaşan hızlandırıcıların geliştirilmesinde önemli bir rol oynadı (Şekil 2.1 ve 2.2).

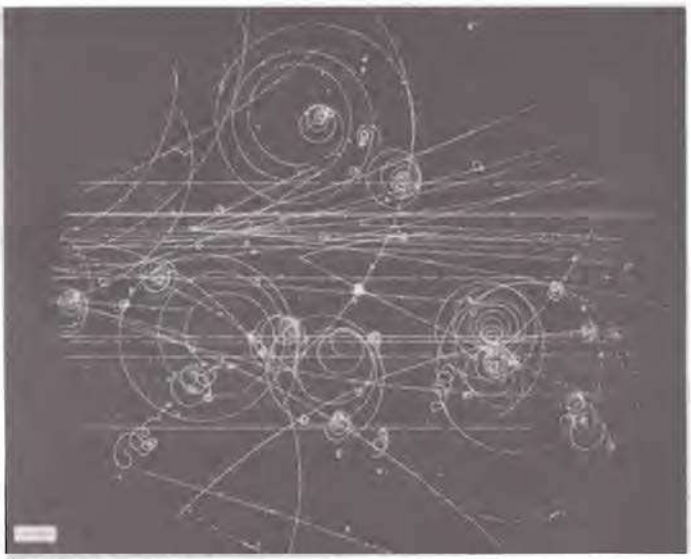
Kabarcık odaları, deneycilerin nükleer saçılma süreçlerini daha verimli bir şekilde incelemesini mümkün kılan, yüklü parçacıkların net izlerini üretti (Şekil 2.3). Kabarcık odaları, uzun yıllar fizikçilerin favori parçacık dedektörleri olarak hizmet etti. Ayrıca sıvı freon, sıvı propan ve parçacıkların saçılması için yeterince yoğun hedefler sağlayan diğer sıvılarla doldurulmuşlardı. Deneysel parçacık fiziğine yaptığı önemli katkılardan dolayı Glaser, 1960 yılında Nobel Fizik Ödülüne layık görüldü.



Şekil 2.1 Eski Fermilab kabarcık odası. Kaynak: Wikipedia Commons, Fermilab'dan.



Şekil 2.2 CERN'in Gargamelle kabarcık odası. © CERN



Şekil 2.3 En başlardaki kabarcık odası izlerinin CERN fotoğrafı. Sıvı hidrojenle dolu küçük bir kabarcık odasında üretilirlerdi. Fotoğrafta, sol üstte bir proton hedefine çarpan ve yeni parçacıklardan oluşan bir sprey oluşturan bir pion ışını görülüyor. © CERN

MODERN DEDEKTÖRLER

Kullanılan araçlarda önemli teknolojik ilerlemeler kaydedilmiştir. Bu tür en eski dedektörlerden biri, Shuji Fukui ve Sigenore Miyamoto tarafından icat edilen *kıvılcım odası*ydı. 1930'lardan 1960'lara kadar parçacık fiziği araştırmalarında önemliydi. Kıvılcım odası, helyum veya neon gibi bir gaza daldırılmış bir metal levha yığınından oluşuyordu. Yüklü bir kozmik ışın parçacığı dedektörden geçtiğinde gazı iyonize etti ve plakalar arasında kozmik ışın parçacığının yolunu gösteren kıvılcımlar oluşturuluyordu.

Başka bir dedektör türü, 1968'de CERN deneycisi Georges Charpak tarafından icat edilen ve 1992'de Nobel Ödülünü kazandığı *orantılı tel odasıydı [proportional wire chamber]*. Fikir, iyonlaştırıcı parçacıkları tespit etmek için hızlandırı-

cılarda kullanılmış mevcut tel odası dedektörüne dayanıyordu. Kendisi Geiger sayacı[3] ve *orantılı sayaç* [*proportional counter*] üzerinde önemli bir ilerleme olan iyonlaştırıcı radyasyonla aktive oluyordu. Kıvılcım odası gibi, bu dedektörlerin tamamı iyonize parçacıkların yolunu izlemek için metal, yüksek voltaj ve bir gaz ortamı kullanıyordu.

Yüksek enerjili hızlandırıcılarda, enerjisini veya kütlesini, yükünü ve diğer özelliklerini ölçmek için bir parçacığın gittiği yolu izlemek gereklidir. Bu süreç, 1960'ların başlarına kadar uzun bir süre boyunca, baloncuk odaları kullanılarak ve fotoğraf çekerek yapıldı. Bununla birlikte, elektroniğin hızlı gelişimiyle, sonuçların hızlı elektronik çıktılar olarak okunduğu bir sistem tasarlamak mümkün hale geldi. Bir manyetik alandaki bir parçacığın yolunu izleyerek, parçacık üzerindeki yükü ve kütlesini ölçebilir, ardından onu tanımlamak için parçacığın sahip olduğu diğer kuantum sayılarını çıkarabiliriz.

Orantılı tel odası ve diğer yüklü parçacık dedektörlerinin çoğunda parçacıklar, hızlı hareket eden yüklü parçacıklar üzerindeki elektromanyetik kuvvet nedeniyle yollarını spirallere çeviren düzgün bir manyetik alandan geçer. Spirallerin eğriliğini ölçerek parçacığın yükünü ve momentumunu belirleyebiliriz. Parçacık yolunun yeniden yapılandırılmasının doğruluğu, iyonların en yakın tele doğru sürüklenmek için zamana ihtiyaç duyduğunu gözlemleyerek büyük ölçüde artırılabilir. Bu sürüklenme süresinin ölçümü, parçacığın nereden geçtiğini belirleyebilir. Bu cihaza *sürüklenme odası* [*drift chamber*] denir. Birçok sürüklenme odasını birbirine dik tellerle birleştirerek ve bunları parçacıkların ışın yönüne dik olacak şekilde düzenleyerek parçacığın konumunun çok doğru bir ölçümü yapılarak parçacığın momentumu belirlenebilir. Parçacığın momentumunu biliyorsak bunun ne tür bir parçacık olduğunu söyleyebiliriz.

---

[3] Geiger sayacı: radyoaktiviteyi ölçmek için kullanılan taşınabilir bir iyon sayacıdır.

Orantılı tel odasıyla birlikte gelen büyük gelişmelerden biri, bir çarpışmadan sonra, aranan parçacığın sayısız olasılık arasından seçici olarak tanımlanmasının artık mümkün olmasıdır. Bu tanımlama, belirli bir ölçümde mümkün olan bütün olay sayısını, verileri analiz etmek için kullanılan bilgisayar sistemleri tarafından daha kolay ele alınabilecek bir dizi olaya indirger. Gerçekten de protonlar, protonlar veya karşı-protonlarla çarpıştığında milyonlarca potansiyel "olay" meydana gelir ve olası olayların sayısını yönetilebilir bir boyuta indirmek için seçici bir tetikleme mekanizması gerekir. Richard Feynman bir keresinde ünlü sözünde protonların çarpışmasının iki dolu çöp kutusunun çarpışması gibi olduğunu söylemişti; enkazı ayıklamak için bir yönteme ihtiyaç vardı.

Halihazırda CERN'de kullanılan bir diğer tespit aracı ise *kalorimetre*dir. Enerjilerini ölçmek için parçacıkları soğuran kompozit bir dedektördür. Trilyonlarca etkileşim, parçacık yağmuru oluşturur. Bu nedenle *duş sayacı* adı kalorimetre için de kullanılır. Duşlardaki parçacık enerjisinin çoğu, kalorimetre (Latincede kalori "ısı" anlamına gelir) adını açıklayan bu tür dedektörler için ısıya dönüştürülecektir, ancak pratikte bu dedektörlerde sıcaklık ölçülmez. Parçacıklar kalorimetreye girer ve bir parçacık duşu başlatır. Parçacıkların enerjisi, toplandığı ve ölçüldüğü kalorimetrede biriktirilir. Parçacık yağmurunun tamamen kapsanmasıyla enerjinin toplam bir ölçüsü elde edilebilir veya enerji örneklenebilir. Elektromanyetik kalorimetre ve hadronik kalorimetre olmak üzere iki çeşit kalorimetre vardır. İlki elektromanyetik olarak etkileşime giren parçacıkların enerjisini ölçmek için kullanılırken, ikincisi yeğin nükleer kuvvet yoluyla etkileşime giren parçacık enerjilerini ölçmek için tasarlanmıştır. Elektromanyetik kalorimetrenin önemli bir özelliği, yüksek enerjili bir çarpışmada fotonlar gibi elektriksel olarak nötr parçacıkları algılamanın ve ölçmenin tek kullanışlı yolu olmasıdır.

Bir kalorimetre, hacminin üzerinde soğurulan enerjinin ölçüldüğü birden fazla bireysel hücreden yapılır. Hücreler, tipik olarak gelen parçacıkların yönü boyunca kuleler oluş-

turmak üzere hizalanır. Elektronlar ve fotonlar gibi gelen elektromanyetik parçacıklar, bu parçacıkların enerjilerini ve konumlarını ölçmek için nispeten kısa ve yoğun elektromanyetik duştan yararlanan elektromanyetik kalorimetrede tamamen soğurulur (örneğin fotonlara bozunan nötr pi mezonları). Bir hadronik kalorimetredeyse gelen hadronlar (protonlar gibi) elektromanyetik kalorimetrede duş yapmaya başlayabilir, ancak genellikle sadece cihazın sonraki katmanlarında soğurularak, enerjilerini tamamen bırakırlar.

LHC'deki kompakt muon solenoidi (CMS) ve toroidal LHC aparatı (ATLAS) dedektörleri, parçacıkların fotonlara ve Z bozonu gibi elektriksel olarak nötr bozonlara bozunmasını ölçmek için kullanılan özel elektromanyetik kalorimetre dedektörlerine sahiptir (Şekil 2.4). Deneyciler, iki fotona bozunabilen hafif bir nötr Higgs bozonunu tespit edebiliyor. İki fotonlu bozunmanın tesir kesiti veya etkileşim alanı çok küçük olduğu için, bu özel bozunmayı ölçmek zordur. Bununla birlikte elektromanyetik dedektörler, bozunması sırasında Higgs bozonunun yaydığı ışık veya foton miktarına inanılmaz derecede duyarlıdır. Bu deney, düşük enerjideki Higgs parçacığını saptamanın önemli yollarından biridir. Çünkü yeğin bir şekilde etkileşen hadronların çok az ardalanı vardır. Bu ardalan alt ve karşı-alt kuarklar gibi parçacıklardan oluşur. Kalorimetre dedektörleri, LHC'deki CMS ve ATLAS grupları tarafından 4 Temmuz 2012'de duyurulan standart model Higgs bozonunun varsayılan tespiti için çok önemliydi.

Bir dedektörde ne tür bir parçacık gördüğümüzü nasıl bilebiliriz? Dedektörde ölçülebilen bir parçacığın enerji ve momentum miktarını belirleyerek, parçacığı tanımlayan yükü, kütlesi ve kuantum spini gibi kuantum sayılarını bulabiliriz. Örnek olarak 200 GeV enerjili ve sıfır momentumlu serbest bir parçacığı ele alalım. Proton ve elektron gibi kararlı bir parçacık dışında diğer parçacıklar, her biri ayrı ayrı daha küçük enerjiye sahip başka parçacıklara bozunabilir. Bütün bu bozunma süreci, enerjinin ve momentumun korunumunu sağlamalıdır.



Şekil 2.4 ATLAS dedektöründeki kalorimetre. © CERN, ATLAS İşbirliği yararına

Normal olarak, bir parçacığın diğer parçacıklara bozunma olasılığı, parçacık durağanken belirlenir. Bazı parçacık bozunmaları çok hızlıdır. Örneğin elektriksel olarak nötr bir Z bozonu, bozunma süresi yaklaşık 10^{-24} saniye olan bir pozitron ve bir elektrona bozunabilir. Bu parçacığın bir kabarcık odasında çok kısa bir izi vardır, ki bir muonun çok daha uzun bozunma süresiyle karşılaştırıldığında bozunması yaklaşık saniyenin milyonda biri (10^{-6} saniye) sürer. Bu nedenle muon, bir kabarcık odasında yeterli bir mesafe kateder. Bıraktığı iz kolayca bir muon olarak tanımlanabilir. Öte yandan Z bozonunun katettiği mesafe o kadar kısadır ki kabarcık odasındaki yollar Z'yi tanımlamak için kullanılamaz. Bunun yerine, belirli bozunma ürünlerini, diğer bir deyişle Z'nin bozunması sonucu üretilen parçacıkları tanımlamamız gerekir. Ayrıca bozunma ürünlerinin enerjisinin ve momentumunun ana parçacığınkine eşit olduğunu belirlemeliyiz. Bu süreç ancak toplam enerji ve momentum korunumu nedeniyle mümkündür.

Higgs bozonu gibi yeni bir parçacık keşfetmeye çalışırken bozunma ürünlerindeki parçacıkların kütlesini ve momen-

tumunu belirler, ölçülen sonuçların bilinen parçacıkların fiziksel özellikleriyle uyuşup uyuşmadığını çıkarırız. Eğer uymuyorlarsa yeni bir parçacık keşfedilmiş olabilir. Nötr Z bozonu (Z^0) gibi bir parçacık araştırılıyorsa yüklü parçacığın izini bırakmayacaktır. Bununla birlikte ya kabarcık odasında ya da modern dedektörlerden gelen veri takibinde bir V şekli görülür; bu onun bir pozitron ve bir elektrona bozunduğunu gösterir. Bu V şekli, nötr Z bozonunun imzasıdır.

İLK HIZLANDIRICILAR VE KOZMİK IŞINLAR

İlk hızlandırıcı 1897'de J. J. Thomson elektronu keşfettiğinde kullanıldı. Bu ilkel cihaz, farklı elektrik potansiyellerine sahip iki elektrot arasındaki parçacıkları hızlandırıyordu. Thomson, katot ışınları veya negatif yüklü parçacıklar biçimindeki hızlanan parçacıkların yükünün kütleye oranını belirlemek için elektromanyetik alanlar kullandı. Modern hızlandırıcılarda çalışan fizikçilerin aksine Thomson, ışınların bir hedef üzerindeki etkisini değil, parçacık demetlerinin yük oranlarını inceliyordu. Modern hızlandırıcılar boyut olarak çok büyük ve Thomson hızlandırıcısından çok daha karmaşık olsalar da, hemen hemen aynı ilkeler doğrultusunda çalışırlar. Hızlandırıcılar, 1950'ler ve 1960'ların oturma odalarında yaygın olarak bulunuyordu. Günümüzün düz ekran likit kristal ekran TV'si yerine, ilk televizyon setleri bir katot ışın tüpü kullanıyordu. Katot tüpü, elektronları hızlandırıp saptırarak ekrana çarptırır. Hızlandırıcılı TV elbette, modern zaman hızlandırıcılarının küçük bir versiyonuydu. Elektronların hızlanması sırasında en fazla 10.000 eV'luk bir enerji üretiliyordu.[4] Bunu 14 TeV [on dört bin milyar elektron volt] enerjiye sahip LHC'yle karşılaştırın bakalım.

En büyük hızlandırıcı bizim kendi evrenimizdir. Evren, 1910'da Avusturyalı fizikçi Victor Hess ve Hollandalı bir Cizvit rahip ve fizik öğretmeni olan Theodor Wulf tarafından

[4] Bir elektron, potansiyel farkı 1 V (volt) olan bir elektrik alanı tarafından hızlandırıldığında 1 eV'luk bir enerjiye sahiptir.

keşfedilen kozmik ışınlar üretir. Wulf, yüklü parçacıklara duyarlı bir alet olan bir elektroskop inşa etti. Elektroskopunun radyasyonu soğurduğu için enerji kaybettiğini keşfetti. Başlangıçta bu radyasyonun dünyadan yayıldığı varsayılıyordu. Ancak Wulf, Fransız fizikçi Paul Langevin'den Eiffel Kulesinin tepesindeki elektroskopla bir deney yaparak bu varsayımı doğrulamasını istediğinde Langevin, elektroskopun Eiffel Kulesinin yüksek irtifalarında, yerin aşağı seviyelerinden daha hızlı boşaldığını keşfetti. Radyasyon gökyüzünden geliyor gibiydi.

Daha sonra Hess, balon irtifasını artırdıkça elektroskopun daha belirgin bir şekilde boşalıp boşalmadığını görmek için bir balonun içinde yükselerek bu olguyu araştırdı. 5 km'lik bir yüksekliğin üzerinde, deşarj etkisi zemindekinden çok daha büyüktü ve bundan Hess, radyasyon kaynağının evrenin kendisi olduğu sonucuna vardı.

Amerikalı fizikçi Robert Millikan da bu olguyu araştırmaya karar verdi ve radyasyona *kozmik ışınlar* adını verdi. Belki de bu akılda kalıcı isim nedeniyle Millikan, kozmik ışınların keşfiyle Hess, Wulf veya Langevin'den daha iyi tanındı. Ancak 1936'da Stockholm, kozmik ışınları keşfettiği için Nobel Ödülünün yarısını Hess'e verdi ve diğer yarısı pozitronu keşfeden Carl Anderson'a gitti. Bilinmeyen nedenlerle, Wulf hiçbir şey alamadı.

Uzay aracı deneylerinden elde edilen güncel kanıtlar, kozmik ışınların kaynaklarının şiddetli süpernova patlamaları olduğunu göstermektedir. Kozmik ışınlar esas olarak protonlardan oluşur. Evrenden gelirken, LHC gibi insan yapımı hızlandırıcıların enerjilerinden yüz milyon kat daha yüksek olan 10^{21} eV enerjiye kadar çıkabilen çok yüksek enerjilere hızlanırlar. Bu kozmik ışınlar uzayda çok büyük mesafeler kateder, sonunda dünyaya çarpar. Bununla birlikte uzayda yollarında parçacıklarla çarpışarak ikincil ve üçüncül parçacık sağanakları üretirler. Bu parçacıklardan pozitif ve negatif yüklü pi mezonları, K mezonları ve muonlar tespit edilebilir. Anderson'ın 1932'de kozmik ışınları kullanarak

pozitronu keşfetmesi, Dirac'ın karşı-madde öngörüsünü doğrulamıştır.

Bununla birlikte parçacık fiziği deneyleri için hızlandırıcılarda proton ışınlarını kullanmak gibi kozmik ışınları kullanmanın sorunlarından biri, yanlarında devasa, bilinmeyen bir ardalan getirmeleridir. Sinyal/gürültü oranı, yeryüzündeki laboratuvarlarda yapılan deneylerle karşılaştırıldığında kozmik ışın deneylerinin uygun bir şekilde kontrol edilmesine izin vermeyecek kadar küçüktür. Yine de bugün kozmik ışınlar, nötrinolar üzerinde deneyler yapmak, nötrino çeşnilerinin birbirine salınımını belirlemek ve potansiyel olarak nötrinoların kütlelerini belirlemek için kullanılmaktadır. Kozmik ışınlarla günümüzde devam etmekte olan deneyler, ciddi ardalan sorunlarına rağmen yeni parçacıkları tanımlamaya ve de Einstein'ın özel görelilik kuramının kozmik ışınların çok yüksek enerjilerinde geçerli olup olmadığına dair deneysel bir anlayış elde etmeye çalışıyor. Şimdiye kadar hiçbir deney, özel görelilik kuramının kesin olarak ihlal edildiğini tespit edemedi.

MODERN HIZLANDIRICILAR VE ÇARPIŞTIRICILAR

Şimdi dikkatimizi ışık hızına çok yakın parçacıkları hızlandıran modern makinelere çeviriyoruz. Bu tür parçacıklar birbirleriyle çarpıştıklarında, daha önce incelediğimiz aygıtlar tarafından algılanabilen özelliklere sahip ardışık parçacıklar üretirler. Hızlandırıcı kelimesi genel olarak parçacıkları daha yüksek enerjilere hızlandırmak için bir makine anlamına gelirken *çarpıştırıcı* sözcüğü iki parçacık veya bir parçacık ile bir karşı-parçacık arasındaki kafa kafaya çarpışmayı ifade eder. Parçacıklar ayrıca hızlandırılabilir ve ardından çekirdek içeren bir malzemeden oluşan sabit bir hedefe çarptırılabilir. Uygulamada, ***hızlandırıcı*** ve ***çarpıştırıcı*** terimleri birbirinin yerine kullanılır.

Hızlandırıcılar iki temel türde bulunur: doğrusal ve dairesel. İlk doğrusal hızlandırıcı prototipi, 1928'de Norveçli mühendis Rolf Widerøe tarafından yapıldı ve tüm yüksek enerjili parçacık hızlandırıcıların atası oldu. Widerøe, elektrik alanını her geçişlerinde enerji kazanmaları için parçacıkları bir radyo frekansıyla rezonansa sokma yöntemini kullandı ve buluşunun ayrıntılarını 1928'de bir makalede yayımladı.[5]

Ernest Lawrence bu makaleyi inceledi ve içindeki bilgileri 1930'ların başlarında Berkeley'de ilk dairesel siklotron hızlandırıcısını inşa etmek için bir temel olarak kullandı. Bu siklotron, içerisinde dikey etkiyen manyetik alan bulunan iki parçaya ayrılmış silindirik bir metal bölmeden oluşuyordu. Bunun iki yarısı bir elektrik gerilimiyle bağlıydı. Protonlar odanın ortasına enjekte ediliyor ve manyetik alan sayesinde dairesel yörüngeleri kontrol edilerek kavisli yollarda tutuluyordu.

Elektrik alanını düzenli olarak değiştirmek, protonların aygıtın bir yarısından diğerine geçerken hızlanmasını sağlıyordu. Protonlar yeterince hızlandırıldıktan sonra cihazdan çıkarak bir hedefe odaklanıyordu. Bu siklotron, bugün LHC de dahil olmak üzere tüm dairesel hızlandırıcıların atasıdır. Lawrence, siklotronu geliştirdiği için 1939'da Nobel Ödülünü aldı (Şekil 2.5).

İlk modern doğrusal hızlandırıcı 1930'ların başlarında John Cockcroft ve Ernest Walton tarafından inşa edildi. Cockcroft ve Walton atom çekirdeğini parçaladıkları için 1951'de Nobel Ödülü aldılar. Makineleri, protonları yaklaşık olarak 700.000 elektron volt (700 keV) civarında hızlandırıyordu. Bu seviye, elbette, günümüz hızlandırıcılarına kıyasla düşük bir enerjidir, ancak nükleer fiziği incelemek için yeterliydi. Bugün çalışılan proton ve nötronun atom altı kuark bileşenlerinin aksine, atom çekirdeğinin proton ve nötron-

[5] R. Widerõe, "Über ein neues Prinzip zur Herstellung hoher Spannungen," *Archiv für Elektrotechnik*, 21 (4), 387–406 (1928).

larını araştırmak için sadece daha düşük enerjilere ihtiyaç vardır. Cockcroft-Walton hızlandırıcısı küçük bir doğrusal hızlandırıcıydı.

Doğrusal çarpıştırıcının en ünlü örneği 1960'ların ortalarında Stanford Üniversitesinde inşa edilendir: Stanford Doğrusal Hızlandırıcı Merkezi (veya SLAC). Dünyanın en büyük doğrusal hızlandırıcısı olan bu 3,2 km uzunluğundaki çarpıştırıcı, esas olarak, ışınları birbirine zıt yönde hızlandıran iki doğrusal hızlandırıcıdan oluşur. Işınlar, pozitronlardan ve elektronlardan oluşur. Bu parçacıklar, teknik olarak *siklotron radyasyonu* olarak adlandırılan önemli bir enerji kaybı yaşamaz. Çünkü parçacık yörüngeleri doğrusal tutulur ve bükülmez. Bununla birlikte bu ifade kesin doğrulukta değildir. Çünkü SLAC'de ışınlar, parçacıkları kafa kafaya çarpışmaya zorlamak için hafif kavisli bir şekilde bükülür.

İtalya, Sibirya ve Fransa'da başka doğrusal elektron-pozitron hızlandırıcıları inşa edildi ve CERN için uluslararası doğrusal çarpıştırıcı (ILC) [international linear collider] olarak adlandırılacak yeni bir hızlandırıcı planlandı. SLAC ve diğer doğrusal hızlandırıcıların ününe ve kullanışlılığına rağmen şu anda bu tür hızlandırıcı, esas olarak, bir ana dairesel hızlandırıcıya girerken parçacık ışınlarına bir başlangıç ivmesi sağlamak için kullanılmaktadır. Ancak gelecekte, ILC gibi planlanan çok büyük doğrusal hızlandırıcılar dairesel hızlandırıcılardan daha kesin veriler elde edebilecekler. Çünkü bunlar pozitronlar ve elektronları çarpıştıracak, LHC dahil bütün siklotronları rahatsız eden hadronik ardalan miktarını azaltacak. Elektromanyetik parçacık çarpışmalarını ölçebilecek bu hızlandırıcılar Higgs bozonu gibi yeni keşfedilen parçacıkların özelliklerini kesin olarak belirleyebilecekler.

Dünya Savaşından sonraki yıllarda, siklotron veya dairesel hızlandırıcı, protonları daha yüksek enerjilere hızlandıran bir makineye dönüştürüldü. Bu deney çalışmaları 1983'te Chicago yakınlarındaki Fermilab'da protonları ve karşı-protonları nerdeyse 2 TeV bir enerjiye hızlandıran Te-

vatron makinesiyle sonuçlandı. Siklotron makineleri ayrıca, Brookhaven Ulusal Laboratuvarında ve Chicago yakmlarındaki Argonne Ulusal Laboratuvarında inşa edildi.



Şekil 2.5 Lawrence'm orijinal 11 inçlik siklotronu. Fotoğraf; Bilim Müzesi (Londra) ve Lawrence Berkeley Ulusal Laboratuvarının izniyle.

Siklotron fikri, gelecekteki tüm hızlandırıcıların altmda yatan önemli bir kavramdır, çünkü protonları dairesel yörüngelerde düşük enerjilerden çok yüksek enerjilere hızlandırabilir ve manyetik alanlar kullanarak onları belirli yörüngelerde tutabilir. Bu dar yörüngeleri sabit tutmak, *güçlü odaklama* [*strong focusing*] denilen şeyi gerektirir ve bu da özel manyetik alan aparatları yapılmasını gerektirir. Güçlü odaklanma için tasarlanmış makinelere senkrotron denir ve hızlandırıcıların tarihinde önemli bir rol oynamışlardır. Örneğin Brookhaven'daki Alternating Gradient Senkrotron ve CERN'deki Proton Senkrotron (PS), bu bölgelerdeki hızlandırıcıların enerjilerini artırır. Dairesel senkrotronlar, çevreleri boyunca, protonları veya karşı-protonları sürekli olarak hızlandırmak

için elektrik alanlarının uygulandığı boşluklara sahiptir. Bazı noktalarda protonların hedefe odaklanabilmeleri için büyük manyetik alanlar kullanılır. Çoğu senkrotron hızlandırılmış parçacık olarak protonları kullanır, çünkü protonlar yörüngeleri manyetik alanlar tarafından büküldüğünde senkrotron radyasyonu olarak daha az enerji kaybeder. Karşılaştırıldığında, elektronlar çok fazla enerji kaybederler ve bu nedenle ilk "tetikleyici" hızlandırıcı parçacıklar olarak daha az değerlidirler. Parçacığın enerji kaybı bir yavaşlamaya neden olur, bu da olmasını önlemeye çalıştığımız şeydir.

1961'de İtalyan fizikçi Bruno Touschek, tek bir depolama halkasına sahip ilk çarpıştırıcıyı geliştirdi. Bu çarpıştırıcıda, zıt yüklü parçacıklar depolama halkası içinde zıt yönlerde hızlandırılır ve daha sonra bir noktada çarpışmaya odaklanarak bir dizi parçacık döküntüsü üretir. Üretilen enerji depolama halkasında iki parçacık demeti çarpıştığında tek bir parçacık ışınının sabit bir hedefe çarpmasıyla elde edilen enerjiden çok daha büyüktür. Bunun nedeni, bir parçacık sabit bir hedefe çarptığında, çarpışmadan sonra çok fazla kinetik enerjinin devam etmesi ve çarpışma tarafından üretilen gerçek olayları temsil eden incelenebilen enerji miktarını azaltmasıdır. Öte yandan çarpışan ışınlarda çarpışmada çok daha az enerji kaybı olur, bu da Touschek depolama halkası çarpıştırıcısını hızlandırıcıların ve çarpıştırıcıların geliştirilmesinde değerli bir ilerleme haline getirir.

Dairesel çarpıştırıcılarda, bir parçacık demeti bir yönde, diğer demet ise zıt yönde enjekte edilir. Aynı elektrik ve manyetik alanlar, örneğin zıt elektrik yüklerine sahip elektronları ve pozitronları hızlandırmak için kullanılabilir. Uygulanan elektrik alanı elektronları ve pozitronları zıt yönlerde hızlandırır ve bu hızlanma sırasında aynı manyetik alan içinde zıt yönlerde bükülürler. Dairesel çarpıştırıcılarda protonlar hem demetlerde hem de protonlarda ve karşı-protonlarda kullanılabilir. Bu parçacıkların elektronlardan ve pozitronlardan çok daha yüksek enerjilere hızlandırılabileceğini hatırlayalım.

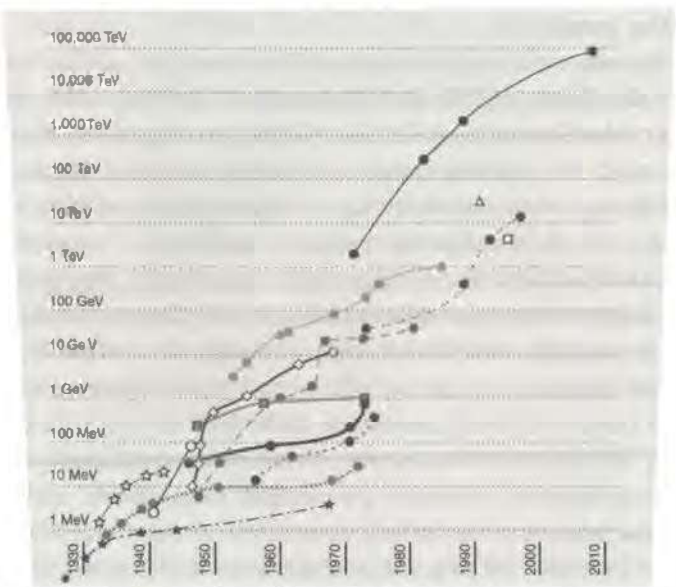
En ünlü dairesel elektron-pozitron çarpıştırıcısı 1990'larda CERN'de bulunuyordu. Basitçe *Büyük Elektron-pozitron Çarpıştırıcısı* (LEP) [*large electron–positron collider*] olarak adlandırıldı. Her biri, 104,5 GeV enerjiye sahip iki ışının çarpışmadaki birleşik enerjisi olan maksimum 209 GeV enerjisine ulaştı. LEP 2000 yılında dünyanın en büyük dairesel çarpıştırıcısı olan büyük hadron çarpıştırıcısına (veya LHC) yer açmak için kapatıldı. LEP gibi bir dairesel çarpıştırıcıda, parçacıkların ve karşı-parçacıkların ışınları, belirli kesişme noktalarında kesişene kadar ayrı tutuluyordu. CERN'deki PS çarpıştırıcısı da böyle kesişen bir dairesel çarpıştırıcıdır. Her iki makinede de, yeterince yüksek enerjilerde yeterli parlaklık veya ışın yoğunluğu üretmek için dahiyane teknolojik icatlar gerekliydi.

Kuantum mekaniğinde parçacıklar, hem parçacıklar hem de fiziksel davranışları olasılık kuramıyla belirlenebilen dalgalar olarak tanımlanabilir. Yani parçacığın uzayda ve zamanda belirli bir noktada bulunma olasılığı kuantum mekaniği kullanılarak hesaplanabilir. Kısa dalga boylu parçacıklar, son derece küçük mesafelerde parçacık özelliklerini incelemek için kullanılabilir. Ancak daha uzun dalga boylu parçacıklar için deneysel sonuçlar daha kaba hale gelir. Bu parçacıkların dalga uzunluğu, enerjileriyle ters orantılıdır. Bu durum, örneğin bir protonun enerjisine bağlı olarak kısa dalga veya daha uzun dalga olabileceği anlamına gelir. Kısa dalgalı parçacık, uzun dalgalı parçacıktan daha yüksek enerjiye sahiptir.

Kuantum mekaniğinde parçacığın dalga boyu, enerjisi veya momentumuyla ters orantılıdır. Atom fiziğinde bu enerji binlerce elektron volt aralığındadır (bir atomun ölçeği 10^{-8} cm'dir). Bir atom çekirdeği ölçeğinde, enerji milyonlarca elektron volt değerindedir. Atom çekirdeği içindeki kuarklar gibi parçacıkların fiziğini çalışmak için, milyarlarca elektron voltu aşan enerjilere ihtiyacımız var. Doğal halde kendi başlarına kararlı parçacıklar olarak var olmayan kısa ömürlü kuarklar gibi parçacıklar üretmek için hızlandırıcılar ve çarpıştırıcılar kullanıyoruz. Bununla birlikte, bildiğimiz

gibi, hızlandırıcılardaki tek tek kuarkları hâlâ "göremiyoruz", ancak yalnızca dolaylı olarak dedektörlerde hadronize edici jetler olarak "görebiliyoruz".

Amerikalı fizikçi M. Stanley Livingston 1954'te hızlandırıcılar tarafından üretilen parçacık ışınlarının laboratuvar enerjisinin zaman içinde nasıl arttığını gösteren etkileyici bir plan hazırladı (Şekil 2.6). Bu plan, modern hızlandırıcıları hesaba katacak şekilde güncellendi ve dikkat çekici bir şekilde, enerji her altı ila sekiz yılda bir 10 kat arttı. Bu şaşırtıcı enerji artışı, daha büyük makinelerin yapımına olanak sağlayan yeni teknolojiler üreten, fizikçilerin ve mühendislerin yaratıcılığının bir sonucudur.



Şekil 2.6 Zaman içinde hızlandırıcı enerjilerindeki üstel artışı gösteren güncellenmiş Livingston grafiği. Birimleri açıklarken Kar Kütlesi raporu şunları belirtti: "Çarpıştırıcıların enerjisi, aynı kütle enerjisi merkezine ulaşmak için durağan bir protonla çarpışan parçacıkların laboratuvar enerjisi cinsinden çizilir." Bu nedenle, LHC'deki çarpışma enerjisi, grafikte neredeyse 100.000 TeV gibi görünüyor. 2001 Snowmass Accelerator Ar-Ge raporundan uyarlanmıştır; *Symmetry Magazine* tarafından yayımlanan grafik.

Yine de hızlandırıcıların enerjisini artırmak, bu makinelerin yapımında tek önemli faktör değildir. Bilinen fiziğin ufkunun ötesine ulaşmak için daha yüksek enerjilere ihtiyacımız var, ancak parçacık fiziği çalışmamıza dahil olan başka önemli faktörler de var. Örneğin yüksek yoğunluklu veya parlaklığa sahip, yani saniyede çok sayıda parçacığın hızlandığı çarpışan parçacık ışınlarına ihtiyacımız var. Bir parçacık bir hedefe çarptığında tesir kesitiyle ölçülen parçacık tepkimeleri üretir. Bu tesir kesiti, kendisine çarpan parçacık demeti için hedef görevi gören çekirdeklerden oluşan bir malzemenin etkin alanıdır ve deney için veri sağlayan çarpışmalardan ortaya çıkan parçacık saçılmalarını içeren yüzey alanıdır. Fizikçiler için önemli olan sayı tepkimeleri içeren tesir kesitinin gerçek boyutudur. Bu son sayı, ışın yoğunluğunun, hedef parçacıkların yoğunluğunun, üretilen saçılmaların tesir kesitinin ve çarpışan parçacığın nüfuz edebileceği hedef malzemenin uzunluğunun ürünü olacaktır.

Diğer bir önemli sayı, hızlandırıcının bir deneysel araştırma süresi boyunca fiilen çalışabileceği süre olan makinenin *görev döngüsü* adı verilen sayıdır. Modern hızlandırıcılar, sürekli bir parçacık akışı üretmez, çünkü bir kere gereken elektrik gücü çok büyük ve sürdürülemez olacaktır. Böylece hızlandırıcılar, devam eden darbelerle sürekli açılıp kapanan deneyler olarak çalışır. Sonuç olarak; dolaşımdaki ışınlar da darbe alır, yanar ve söner. Görev döngüsü çok kısaysa tesir kesitleri veri analizi için yeterince büyük olmayacaktır.

Tesir kesit verilerinin anlamlandırılmasındaki en büyük sorun, bir çarpıştırıcıda veya sabit bir hedefte parçacıkların çarpışması tarafından üretilen ardalandır. Bu ardalan sinyal/gürültü oranını belirler, ki burada gürültü, yeni bir parçacığı tanımlamak için izole etmeye çalıştığımız sinyali engelleyen parçacık çarpışmalarının istenmeyen ardalanıdır. Bu ardalanların büyük bilgisayar simülasyonlarıyla modellenmesi ve daha sonra kullanışlı olması için yeterince büyük bir sinyal/ardalan gürültü oranı üretmek için verilerden çıkarılması gerekir. Ardalan, yeni fiziği tanımlamanın

en önemli ve en zor engellerinden biridir. Hızlandırıcılardaki parçacık ışınlarının enerjisi ve yoğunluğu arttıkça ve LHC'nin maksimum çalışma enerjisi olan 14 TeV'ye ulaştığında ardalan gürültüsü muazzam ölçüde artar. Ardalanları simüle etmek için çok karmaşık bilgisayar kodları gereklidir; böylece çarpışmaların son analizi sırasında hesaptan çıkarılabilir hale gelirler.

1950'ler ve 1960'larda, hızlandırıcıların tasarımı ve inşası, gelişmiş dünya çapında büyük bir girişimdi. Listeye birçok yeni makine eklendi, parçacıkların daha yüksek enerjili çarpışmaları üretildi ve parçacık fiziğinde büyük yeni keşifler yapıldı. 1952'de Brookhaven'da yaklaşık 1 GeV enerjiye sahip büyük bir sabit hedefli makine inşa edildi. 1957'de Ruslar, Moskova yakınlarındaki Dubna'da 7 GeV enerjili bir makine yaptılar. Bunları CERN'de 23 GeV'de PS ve ardından 400 GeV enerjide SPS izledi. DESY, 1959/1960'ta Almanya'nın Hamburg kentinde başladı. Elektronları yaklaşık 7 GeV'lik bir enerjiye kadar hızlandırdı ve QED'yi doğrulamada etkili oldu. Makine yapımındaki önemli isimler, SLAC'ın kurulmasına yardım eden Wolfgang Panofsky ve Robert Wilson ile John Adams'dı. Wilson, 1967'de Fermilab'ı kurmaya başladı ve Adams, CERN'de hem PS'yi hem de SPS'yi kurdu. Wilson birkaç yıl Fermilab'da laboratuvar direktörüydü ve Adams 1971'den 1980'e kadar CERN'in direktörlüğünü yaptı. CERN'deki SPS, 1983'te W ve Z bozonlarını keşfetti. Protonlarla ters dönüş yapmak ve çarpışmak için yapılan yoğun karşı-proton ışınlarını biriktirmek için bir yöntem icat eden Simon van der Meer ile UA1 deneyinin başkanı Carlo Rubbia, bu keşifleri için 1984'te Nobel Ödülünü kazandı. Fermilab makinesi, protonları 500 GeV'lik bir enerjiye kadar hızlandırdı. Daha sonra süper iletken mıknatıslar kullanılarak, *Tevatron* adı verilen bu makinede, ışın başına yaklaşık 1 TeV veya toplam enerjide 2 TeV olmak üzere, enerjinin iki katına çıkarılması başarıldı. Tevatron'un halkası boyunca manyetik bobinlerinden büyük akımlar akan 900 süper iletken mıknatısı vardı ve akımlar yaklaşık 5000 Ampere ulaşabiliyordu. Elektrik dirençlerini

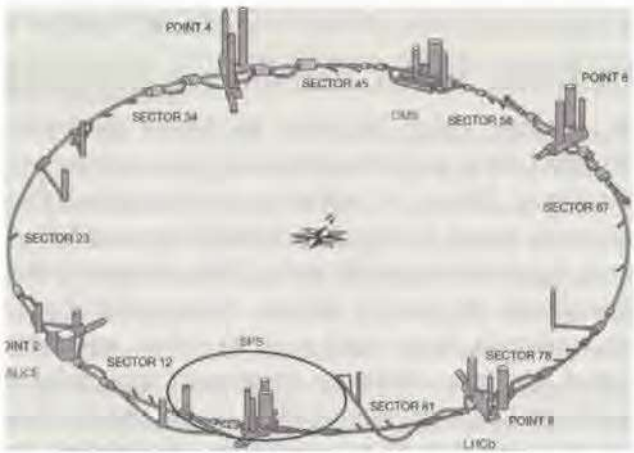
sıfıra indirmek için bu manyetik bobinleri aşırı düşük sıcaklıklarda tutmak önemliydi. Bu, 270 K'de [Kelvin] sıvı helyum kullanılarak yapıldı. Diğer şeylerin yanı sıra 1995'te üst kuarkı keşfeden Tevatron, Eylül 2011'de hizmet dışı bırakıldı.

CERN'DEKİ BÜYÜK HADRON ÇARPIŞTIRICISI

Artık, şimdiye kadar yapılmış en büyük çarpıştırıcıya, CERN'deki LHC'ye geliyoruz. Bir ülkeler konsorsiyumu tarafından parası ödenen bu hızlandırıcıyı inşa etmek 25 yıllık planlama ve inşaat gerektirdi. Çevresi 27 km olan hızlandırıcı tünel, dünya yüzeyinin 50 m ila 175 m altında, Fransa-İsviçre sınırının iki yanında yer alır. 3,8 m genişliğinde olan beton kaplamalı tünel, 1983 ve 1988 yılları arasında LEP makinesi için inşa edilmiştir. Bu tünelin içine daha sonra yerleştirilen LHC, dört noktada kesişen iki paralel ışın (demet) borusu içeren ve 27 km uzunluğundaki dairesel ışın borularının her biri bir proton ışını içeren kesişen bir dairesel çarpıştırıcıdır. Bu iki ışını halka etrafında zıt yönlerde hareket eder. Protonlar 1232 dipol (çift kutuplu) mıknatıs aracılığıyla dairesel yörüngelerde tutulur ve ek 392 dört kutuplu mıknatıs, ışın demetlerini odaklayarak dört kesişen noktada protonlar arasındaki çarpışma şansını en üst düzeye çıkarır. Mıknatısların her birinin ağırlığı 27 tondan fazladır. Bakır kaplı niyobyum-titanyum mıknatısları 1,9 K (–271,25 °C) çalışma sıcaklığında tutmak için 96 ton sıvı helyum gerekir. Bu şaşırtıcı soğutma sistemi, sıvı helyum sıcaklıklarında tutulan dünyanın en büyük kriyojenik tesisini içermektedir.

LHC maksimum enerjide çalıştığında günde bir veya iki kez protonlar, 450 GeV'den 7 TeV'ye hızlandırılır. Bu ivmeyi gerçekleştirmek için, süper iletken dipol mıknatısların manyetik alanları, manyetik alan şiddetinin ölçü birimi olan 0,54'ten 8,3 Tesla'ya çıkartılır. Tamamen hızlandırıldıklarında protonlar, ışık hızına son derece yakın (ışık hızının 0,99999999991 katında) hareket eder. Bu inanılmaz hız, ışık hızından yalnızca 3 m/s daha yavaştır. Protonlar 27 km'lik

halkayı 90 mikrosaniyeden daha kısa bir sürede dolaşarak saniyede 11.000 devri tamamlar (LHC ve dedektörlerinin şemaları için bkz. Şekil 2.7 ve 2.8).

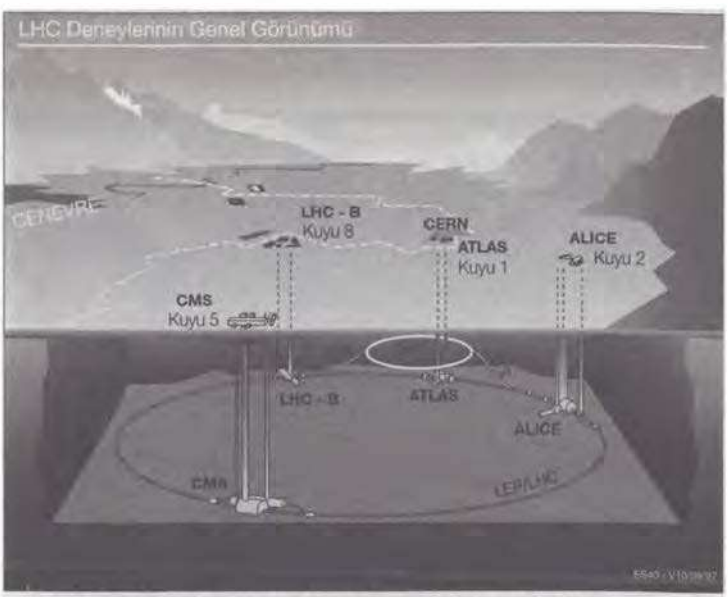


Şekil 2.7 Dört dedektörün konumlarını gösteren LHC diyagramı: ALICE (Büyük iyon çarpıştırıcı deneyi), ATLAS, LHCb (büyük hadron çarpıştırıcısı güzelliği) ve CMS. © CERN

LHC aslında bir hızlandırıcı zinciridir. Makinenin adındaki "hadronları" temsil eden protonlar, enerjilerini artıran bir dizi sistem tarafından ana hızlandırıcıya enjekte edilmeden önce hazırlanır. LHC'nin başlangıcındaki bir doğrusal hızlandırıcı olan doğrusal hızlandırıcı (LINAC 2), 50 MeV protonlar üretir ve bunları proton senkrotron güçlendiricisine aktararak onları 1.4 GeV'a kadar hızlandırır, sonra PS'ye enjekte eder. PS'de protonlar 26 GeV'a çıkana kadar hızlandırılır. Daha sonra SPS'e aktarılan protonların enerjisi 450 GeV'a çıkarılır, sonunda bu protonlar ana halkaya enjekte edilir.

Eylül 2008'de, LHC nihayet çalışmaya başladı ve halkaya 2808 demet proton gönderdi. Her demet 100 milyar proton içeriyordu ve dört dedektör içinde saniyede 40 milyon kez çarpışmaya başladılar. İki proton ışını arasındaki etkileşimler, 25 nanosaniyeden daha kısa olmayan aralıklarla gerçek-

leşir (bir nanosaniye 10^{-9} saniye, yani 0,000000001 saniyedir). Dedektörler, hızlandırıcı halkasmdaki kesişme noktalarında yer alır: ATLAS dedektörü, CMS dedektörü,[6] LHCb (Büyük Hadron Çarpıştırıcı b-kuark) dedektörü ve ALICE (Büyük İyon Çarpıştırıcı Deneyi) dedektörü. Protonların dolaşan ışın enerjileri 7 TeV'lik bir enerjiye yükselir ve çarpıştıklarında 14 TeV'lik birleşik bir enerji üretirler. Bu da LHC'yi şimdiye kadar yapılmış en büyük hızlandırıcı yapar[7] (şekil 2.9 ATLAS dedektörünü göstermektedir.).



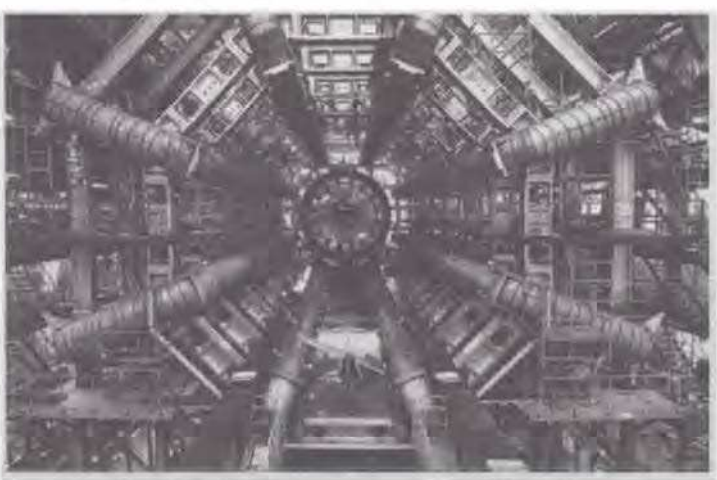
Şekil 2.8 LHC'nin yer üstünde ve altında çizimi. © CERN

Ancak, makine açıldıktan dokuz gün sonra, yüksek akım testi sırasında dengesiz bir kablo bağlantısı buharlaştığı için süper iletken mıknatıslardan biri patladı. Bu kazayla

[6] ATLAS, "Bir Toroidal LHC aygıtı" anlamına gelir ve CMS, "kompakt muon solenoidi" anlamına gelir. (Şekil 2.9, ATLAS dedektörünü göstermektedir).

Yapımı 1993 yılında iptal edilen, Texas'taki süper iletken süper çarpıştırıcı maksimum 40 TeV enerjiye sahip olacaktı.

başa çıkmadaki ciddi sorunlardan biri, 130 ton sıvı helyum kullanarak 1,9 K sıcaklıkta çalışan makineyi durdurmaktı. Mıknatısı sabitlemek uzun zaman alan hassas bir işlemdi. Hatırlayacağımız gibi, bir hızlandırıcıdaki önemli unsurlardan biri, çarpışan ışınların parlaklığı veya yoğunluğudur. LHC'de tam parlaklıkta, parçacık çarpışma hızı yaklaşık 10^{34} /cm²/saniyedir. Bu, ayıklanması için çok fazla parçacık kalıntısı oluşturur. Şu anda CERN, yeni kuvvetler ve parçacıklar bulma olasılığını artıracak çok daha yüksek parlaklık ve çarpışma oranları üretmek için LHC'yi geliştiriyor. 2015 yılında tamamlanacak LHC'nin bu yükseltmesi, yüksek parlaklıkta LHC (HL-LHC) olarak adlandırılacaktır.*



Şekil 2.9 ATLAS dedektörü. Ölçek için tabanda duran kişiye dikkat edin. © CERN, ATLAS İşbirliği yararına

LHC'deki ana deneysel program, proton-proton çarpışmalarına dayanmaktadır. Bununla birlikte, ağırlıklı olarak kurşun iyonlarıyla ağır iyon çarpışmalarını gerçekleştirmek için her yıl bir ay ayrılır. Önce LINAC 3 doğrusal hızlandırıcı tarafından hızlandırılırlar ve düşük enerjili iyon halka-

* Kitabın yazıldığı sıralarda 2015 yılında planlanan bu yükseltme günümüzde daha sonraki yıllara ötelenmiş bulunmaktadır -yn.

sı da bir iyon depolama sistemi olarak kullanılır. Bu deney, evrenin başlangıcında (erken evrende) maddenin ilk evresi olduğu düşünülen kuark-gluon plazmasını üretmeyi amaçlamaktadır. Ağır iyon çarpışmalarını incelemek için kullanılan dedektör ALICE dedektörüdür.

LHC'nin temel amacı, standart parçacık fiziği modelinin bileşenlerini araştırmak ve mini kara delikler, ekstra uzay boyutları, süpersimetrik parçacıklar ve özellikle Higgs bozonu gibi egzotik olguları aramaktır. Higgs bozonunun mevcut önerileri HL-LHC tarafından doğrulanırsa bu keşif elektro-zayıf simetri kırılmasının altında yatan mekanizmayı ortaya çıkaracaktır. Eğer bundan gerçekten Higgs tipi bir mekanizma sorumluysa temel parçacıkların kütlelerini oluşturan mekanizmayı ortaya çıkaracaktır. Ancak LHC'de keşfedilen yeni bozonun standart model Higgs bozonu olmadığı ortaya çıkarsa fizikçiler, LHC'nin elektro-zayıf kuramdaki simetri kırılmasından sorumlu başka bir mekanizmayı tanımlayabileceğini umuyorlar.



"tamam dostum, şimdi sana eğer bu benim Büyük Hadron Çarpıştırıcım olsaydı ne yapardım, onu göstereyim."

Şekil 2.10 © Edward Steed, *New Yorker Magazine*

LHC ayrıca galaksilerde, galaksi kümelerinde ve kozmolojide Einstein'ın genel görelilik kuramı tarafından tahmin edilenden daha büyük kütleçekim gösteren verileri açıklamak için evrende var olduğu varsayılan baskın ve görünmez madde olan kara maddenin doğasını araştırıyor. LHC'nin aradığı kara madde parçacıkları, standart model parçacıkların kararlı süpersimetrik ortaklarıdır. Şimdiye kadar, LHC'de kara madde olarak tanımlanabilecek olanlar da dahil olmak üzere hiçbir süpersimetrik parçacık bulunamadı.

LHC'nin inşası, projenin 9 milyar dolarlık maliyetine katkıda bulunan sıradışı bir ülkeler konsorsiyumu tarafından gerçekleştirildi. Makine bir süre çalışır durumdayken, Higgs bozonu veya süpersimetrik bir parçacığın tespiti gibi yeni ve büyük bir keşfin duyurulabileceği umuluyordu. CERN'deki deneyciler, makinenin ağır iyon çarpışmalarına ve iki yıllık bir bakım ve yükseltme dönemine dönüşeceği 2012'nin sonlarında sona eren proton-proton çarpışmalarından önce yeni bir büyük keşfin yapılmayacağından endişe duyuyorlardı. Avrupa'daki 2011/2012 mali krizi göz önüne alındığında böyle bir sıfır sonuç, makinenin finansmanının azaltılacağı, belki de parçacık fiziği için başka bir süper iletken "süper çarpıştırıcı" (SSC) benzeri gerilemeye yol açacağı anlamına gelebilir. Bununla birlikte, 4 Temmuz 2012'de açıklanan ve özellikleri bir Higgs bozonuyla tutarlı olan 125 GeV'de yeni bir bozonun keşfiyle, parçacık fiziğinde yeni dönem başladı. Artık LHC'nin gelecekteki işleyişi güvence altına alınmış görünüyor.

3

GRUP KURAMI VE AYAR DEĞİŞMEZLİĞİ

Parçacık fiziğini anlamak için, temeldeki bazı matematiksel özelliklerin açıklanması gerekir; aksi takdirde, konuya daha derin bir bakış mümkün değildir. Parçacık fiziğinin temel özelliklerinin çoğu matematiksel olarak soyuttur. Parçacık fiziği –kütleçekim veya diğer mikroskobik fiziksel olguların (olayların, görüngülerin) aksine– son derece küçük mesafe ölçeklerinde gerçekleştiğinden, parçacıkların ve alanların etkileşimlerini keşfetmek için kuantum mekaniği ve kuantum alan kuramını kullanırız.

SİMETRİ VE MATEMATİKSEL GRUPLAR

Klasik fizikte olduğu kadar kuantum mekaniğinde ve parçacık fiziğinde de baskın rol oynayan bir kavram simetridir. Nesnelerin simetrisi olarak bilinen şeyi oldukça kolay bir şekilde tanımlayabiliriz. Örneğin katı bir küp alın. Her küp aynı özelliklere sahiptir; yani altı kare yüz ve sekiz köşe. Tüm yüzler ve köşeler aynı görünüyor. Küpün ortasından bir eksen çizerseniz başladığınız yere geri dönmek için bu eksen etrafında 90 derece döndürerek aynı nesneye, yani küpün özdeş bir yüzüne geri dönersiniz. Bir küpün bu simetri *özelliğine* denir. Diğer bir deyişle *döndürme*, küp üzerindeki bir dönüşümdür. Piramit, yüzleri ve köşeleri diğer piramitlerin yüzleri ve köşeleriyle aynı olan başka bir nesnedir. Bu nesneler düzenli çokyüzlüler sınıfına aittir.

Bununla birlikte klasik fizik ve parçacık fiziğinde, simetri veya simetri eksikliği konusundaki anlayışımızı genişletmek zorundayız, çünkü fiziksel nesnelerin simetrisiyle uğraşmıyoruz. Bunun yerine, çok daha soyut bir şey düşünüyoruz: doğa yasalarının simetrisi veya simetri eksikliği. İnsanlar doğadaki simetrileri görme arzusuna sahiptir. Eski zamanlardan 17. yüzyıldaki Johannes Kepler'e kadar gökbilimciler, daire ve küre mükemmel simetrik şekiller olduğu için gezegenlerin yörüngelerinin dairesel olması konusunda ısrar etti. Ancak Kepler'in keşfettiği gibi, gezegenlerin yörüngeleri dairesel yörüngeler değildir; onlar elipstir. Yani değişmezlik (yani simetri) sergilemezler. Gezegenlerin eliptik yörüngeleri uzaydaki yönlenmeye bağlıdır: elipsin ana ekseni belirli bir yönü gösterir. Bu nedenle dönme olarak değişmez olamazlar. Isaac Newton, mekanik ve kütleçekim yasalarında yer alan hareket denklemlerinden hem dairesel hem de eliptik yörüngelerin denklemlerinin çözümleri olduğunu keşfetti. Bununla birlikte Newton'ın hareket denklemlerinin çözümleri tamamen dairesel yörüngeler olsaydı bu çözümler uzayda yönden bağımsız ve simetrik olan yörüngeleri tanımlardı.

Fizikçiler, özellikle parçacık fiziğinde, genellikle "kırılmış simetrilerden" bahsederler. Önceki örnek açısından, gezegenlerin eliptik yörüngeleri, dairesel yörüngeler kavramına kıyasla kırılmış simetriler olarak kabul edilir. Bozuk bir simetriyi anlamak için, onu bozmadan önce bir simetrinin ilk anlamını tanımlamamız gerekir. Bu tanım, *grup kuramı* denen şeyle matematiksel olarak yapılır. Bir doğa yasasının simetrisini veya değişmezliğini ortaya çıkarabilen matematiksel dönüşüm sistemine grup denir. Grup kuramı ilk olarak, sonuçlarını doğa yasalarına uygulamakla ilgilenmeyen matematikçiler tarafından geliştirildi. Fizikçiler ancak daha sonra doğadaki simetriyi anlamak için matematiksel sonuçları benimsediler.

Grupların matematiksel kavramı, öncelikle 19. yüzyıldaki kısa ömrü boyunca cebirsel denklemlerin çözümlerini araştırırken, grupların özelliklerini keşfeden genç bir Fransız

matematik dehası olan Evariste Galois tarafından icat edilmişti. Norveçli matematikçi Niels Henrik Abel, benzer şekilde kısa olan ömründe, 19 yaşındayken, beşli veya beşinci dereceden denklemlerin veya gerçekten de derecesi dörtten büyük herhangi bir polinom denkleminin kökleri için cebirsel bir çözüm olmadığı yolunda önemli bir sonuç çıkardı. Tabii sadece cebirsel işlemler kullanılıyorsa. Kuramsal fizikte, Abel'ın adından türetilen Abelci [*Abelian*] sıfatı, fizik literatüründe o kadar yaygın hale geldi ki ilk "A" artık küçük harfle yazılıyor. Galois, bağımsız olarak Abel'le aynı sonucu kanıtladı. Kanıtı gerçekleştirmek için ikisi de grup kuramının matematiğini icat etti.

1842'de doğan Norveçli matematikçi Sophus Lie ise grup kuramının matematiğini daha da geliştirdi ve Lie grupları dediğimiz şeyi ("Lii" grupları olarak telaffuz edilir) icat etti. Bir Lie grubu, ayrık veya süreksiz dönüşüm kümelerinin aksine sürekli bir dönüşüm kümesini tanımlar. Örneğin küpün 90 derece döndürülmesi: sıfırdan 90 dereceye kadar sürekli bir şekilde dönüştürülebildiği gibi, örneğin 20 derece, sonra 30 derece, daha sonra 40 derece gibi aralıklara bölerek süreksiz bir şekilde de yapılabilir. Gelin bu abelci ve abelci olmayan gruplar, grup kuramı ve Lie grupları gibi kavramları inceleyelim.

Matematiksel bir "grup", ilişkili bir işlem veya kural kullanarak bir kümedeki eleman çiftlerini birleştirir. Örneğin işlem toplama olabilir; bir tam sayı çifti seçer ve başka bir tam sayı elde etmek için bunları bir araya getirirsiniz. Ortaya çıkan sayı, daha sonra tamsayı sayıların orijinal kümesine veya grubuna aittir. Başka bir deyişle tam sayılar bir matematiksel grup oluşturur. Bir eleman çifti üzerindeki eşdeğer işlemler, elemanlar tam sayı veya kesir olsun, çıkarma, çarpma ve bölmeyi içerir. Ancak bir grubun tanımında kısıtlamalar vardır.

Bir grup, grup kuramının dört kriterini veya aksiyomunu karşılamalıdır. Birincisi, bir eleman çifti üzerinde işlem yapıldığında elemanların "kapalı" olması gerektiğidir. Diğer bir

deyişle unsurlar kendi içlerine kapanır; ait oldukları grup dışında bir değer elde edemeyiz. Örneğin 4 ve 6'yı toplarsanız 10 elde edersiniz. 10½ veya 10,7 elde etmezsiniz. On, orijinal tam sayılar kümesine ait bir tam sayıdır.

İkinci aksiyom "birleşme" özelliğidir. Eğer *a, b* ve *c* olmak üzere üç elemanınız varsa bunları, *(a + b) + c veya a + (b + c)* olarak birleştirebilirsiniz. Kural aynı cevabı vereceklerini söylüyor. Benzer şekilde, *(a × b) × c* veya *a × (b × c)*'yi birleştirebilirsiniz ve aynı cevabı alırsınız; yani işlemlerin sırasının ne olduğu önemli değildir. Önce *b + c*'yi birleştirmenin, sonra *a* eklemenin farklı bir cevap verebileceği düşünülebilir, ancak vermez. Fizikte, grup kuramının fiziksel uygulamalarının çoğu, birleşme kuralının her zaman doğru olduğunu varsaydığından, bu kuralın büyük bir önemi olduğu düşünülmemiştir.

Grup kuramının üçüncü aksiyomu, grubun belirli bir işlem için bir "özdeşlik" unsuruna sahip olmasıdır. Bu, örneğin "*I*" özdeşlik elemanının *I × a = a* olacak şekilde olduğu anlamına gelir. Bu kural, *a* ve *b* adlı iki eleman için *a × b = I* olduğunu söyler.

Bu durum, grup kuramının dördüncü aksiyomuna, yani grup özdeşlik elemanını kullanarak grubun her elemanı için bir karşı eleman var olduğuna yol açar. Diğer bir deyişle *b = I/a* ifadesinin anlamı *a × b* işleminin tersi anlamına gelir. Bu dördüncü aksiyom aslında kümedeki veya gruptaki her elemanın bir tersinin olması gerektiğini belirtir.

Grup kuramının önemli bir özelliği de şudur: *a* ve *b* adlı iki elemanı alır ve bunları birbiriyle çarparsanız o zaman *a × b, b × a*'ya eşit olabilir veya olmayabilir. Buna elemanların *komütasyon (değişme) kuralı* denir. Gerçekten de, matematikteki matrisler, birbiriyle çarpıldığında her zaman değişmeli (komütatif) değildir. Bir matris, satırlar ve sütunlardaki bir sembol bloğundan oluşan matematiksel bir soyutlamadır. Heisenberg ilk kuantum mekaniğini geliştirdiğinde, yeni kuantum kuramında deneysel spektral çizgiler türetirken değişmeli olmayan matrisler kullandığını anlamamıştı. Pro-

fesörü Max Born, Heisenberg kendisine yeni kuantum mekaniğini tarif ederken bu önemli gerçeğe dikkat çekmişti. Niels Henrik Abel'in matematik ve fizikte silinmez izini bıraktığı yer burasıdır; değişmeli özelliğin geçerli olduğu, yani $a \times b = b \times a$ olan gruplara abelci gruplar, bunu karşılamayanlara ise abelci olmayan gruplar denir.

İlerleyen bölümlerde keşfedeceğimiz gibi, standart parçacık fiziği modelini anlamamız, kritik olarak grup kuramının matematiğine ve grup kuramındaki iki temel grup türünden birine bağlıdır. Standart modelin önemli bir bölümünün, grubun elemanlarının değişmediği, abelci olmayan gruplara dayandığını göreceğiz. Bu gruplar sürekli bir eleman kümesine sahiptir ve bir tür Lie grubudur. İçlerindeki elemanlar, parçacıkların veya parçacık alanlarının temsilleri olabilir. Öte yandan sonlu veya ayrı bir elemanlar kümesi içeren gruplar, kimyada kristaller ve kristalografi çalışmalarında yaygın olarak kullanılır.

GRUPLARDA DAHA DERİNİNE İNMEK

O(2) olarak bilinen dönme grubu gibi sürekli grupların bazı özel durumlarını ele alalım. Bu, bir kâğıda yazılı bir daireyi değişmez bırakan iki boyutlu bir düzlemin dönme grubudur. Dairenin merkezinden dairenin çevresine işaret eden bir oku gözünüzde canlandırın. Bir şifreli kilit gibi, bu ok sabit merkez nokta etrafında sonsuz sayıda açıyla saat yönünde veya saat yönünün tersine döndürülebilir. Dönme işlemlerinin sırası önemli değildir; yani dönüşlerin sırası değişmelidir. Bu nedenle O(2) bir abelci gruptur.

Diğer bir sürekli grup, bir karmaşık boyutta U(1) 'dir. Bu boyut, i'nin karekökü -1'e eşit olan hayali sayı olduğu karmaşık bir $a + ib$ sayısıyla tanımlanır. U(1), iki karmaşık sayının çarpımının da bir karmaşık sayı olduğu karmaşık sayılar grubudur ve bu nedenle sıradan karmaşık çarpma işlemi altında bir grup oluştururlar. Bu iki sürekli grup, O(2) ve U(1), aslında aynıdır, çünkü $a + ib$ karmaşık sayısı aslında iki ger-

çek sayıdan, *a* ve *b*'den oluşur, öyle ki bir karmaşık boyut iki "gerçek" boyuta denktir. O(2)'nin iki "gerçek" boyutu, *a* ve *b*'dir. U(1), tek boyutta *üniter abelci grup* olarak tanımlanır.

Şimdi boyutların sayısını üçe çıkarıyoruz, böylece üç; *x*, *y* ve *z* eksenimiz var. Bu üç boyutlu Kartezyen koordinatlardan sürekli O(3) grubunu oluşturabiliriz. Öncelikle *x*, *y* ve *z* eksenleriyle hizalanmış dikdörtgen bir kutu veya bir kitap hayal edin. Bu nesneyi *x*, *y* veya *z* ekseni etrafında döndürebiliriz. Şimdi, *x* ekseni etrafında 90 derecelik bir dönüşün, kitabın genişliğinin, ardından *y* ekseni etrafında 90 derecelik bir dönüşün, kitabın yüksekliğinin, *z* ekseni (yani kitabın kalınlığı) etrafında 90 derece döndürmeyle aynı sonucu vermediği ortaya çıkar. Tekrar eden dönme işlemleri değişme özelliğine sahip değildir. Bu, O(3)'ün abelci olmayan bir grup olduğu anlamına gelir.

O(3) grubunun ilginç bir özelliği de; sonsuz sayıda sonuç elemanı üretmek için sonlu sayıda eleman kullanabilmemizdir, bu özelliği bu grubu Lie grupları sınıfına yerleştiren bir özellik olarak karşımıza çıkar. Bu nedenle bir Lie grubunda, kutunun *x*, *y* ve *z* eksenleri etrafında sonsuz sayıda dönüşünü göz önünde bulundurmak yerine, sonsuz sayıda elemanı üreten sadece sonlu sayıda "üretici"yi dikkate alıyoruz. Grup O(3)'te üç üreteç vardır: *x*, *y* ve *z* eksenleriyle ilişkili olan θ_x, θ_y ve θ_z açılarıyla ölçülen dönmeler. O(3)'ün bir Lie grubu olmasının nedeni, dönüşlerin kesikli olmamasıdır; yani dönmeler ayrık değil; süreklidir.

Öte yandan O(2) grubunun üç kopyasından oluşan O(2) × O(2) × O(2) grubunu da görselleştirebiliriz. Bu grup ayrıca, grubun sonsuz sayıda elemanını üretebilen üç üreticiye (açılara) sahiptir. Bununla birlikte, O(3)'ün aksine, bir çift açının dönüş sırası değişebilir, bu nedenle bu üç boyutlu grup, O(3)'ün aksine abelci grup oluşturur.[1]

[1] O(3), üç boyutlu Öklit uzayının merkezi etrafındaki tüm döndürmelerin üç boyutlu döndürme grubudur. O(3)'ün bir alt grubu olan SO(3) grubu, O(3)'ün yaptığı gibi yansımaları içermez, bu nedenle aynada yansıyan dönüşler aynı görünür.

Şimdi karmaşık düzlemde, SU(2) olarak isimlendirilen iki boyutlu bir gruba geçiyoruz. U(1)'i tek bir karmaşık boyutta yapılandırmamıza benzer şekilde, şimdi SU(2) grubunu iki karmaşık boyutta oluşturabiliriz. SU(2), *"iki karmaşık boyutta özel üniter Lie grubu"* olarak ifade edilir. O(2) ve U(1) durumundan farklı olarak, SU(2) ile O(3) aynı değildir. SU(2), 2 × 2 karmaşık matrislerden oluşan gruptur. Bu matrislerden ikisini bir sırayla çarparsanız üçüncü bir matris elde edersiniz, ancak bunları ters sırayla çarparsanız farklı bir matris elde edersiniz. O(3) durumunda olduğu gibi, SU(2) de abelci olmayan bir gruptur. O(3)'e benzer şekilde, Lie grubu SU(2), SU(2)'deki sonsuz sayıda elemanı üretebilen sonlu sayıda, üç üreticiye sahiptir. SU(2) ve O(3) farklı Lie grupları olmasına rağmen, dönme çiftlerinin sırasını veya dizisini tanımlayan aynı Lie grubu cebirini paylaşırlar. O(3) ve SU(2) için özdeşlik işlemleri farklıdır. O(3) için, orijinal duruma geri dönmek için yalnızca 360 derecelik bir dönüş gerekirken, karşılık gelen orijinal SU(2) durumuna geri dönmek için O(3)'te 720 derecelik bir dönüş gerekir.[2] Bu farktan dolayı, SU(2)'nin iki derece dönme derecesine sahip olduğu söylenir, öyle ki fiziksel terimlerle, SU(2) bir parçacığın kuantum yörünge açısal hareketini ve spinini tanımlayabilir. Bu spinin kuantum mekaniğindeki spin veya serbestlik derecesi olduğu anlaşılır.

Abelci olmayan Lie grubu SU(2), parçacık fiziğinde ve özellikle standart modelde özel bir rol oynar. Yang ve Mills'in proton ve nötronların ayna simetrisini tanımlamak için kullandıkları grup buydu. Proton ve nötron yeğin etkileşimlerin etkisi altında tamamen birbirine benzer ve her ikisi de *nükleon* olarak adlandırılır. Yang ve Mills, bu sonuca ulaşmak için Maxwell'in elektromanyetik denklemlerini genelleştirdiler. Maxwell'in elektromanyetizma denklemlerinin U(1) grubu değişmezliğini, denklemlerin bir SU(2) grubu

[2] Grup kuramında SU(2), teknik olarak O(3)'ün çift örtüsü olarak adlandırılır.

değişmezliğine genelleştirdiler. Yang ve Mills, nükleonların SU(2) tanımını "izotopik spin grubu" olarak adlandırdılar.

Aslında, özel üniter grupların üzerinde etkide bulunduğu karmaşık uzayın boyutlarının sayısını 2'den N'ye artırabiliriz, böylece N'nin birden büyük herhangi bir sayıya eşit olduğu özel üniter grup SU(N)'i oluşturabiliriz. Özellikle, abelci olmayan grup SU(3), 3 × 3 karmaşık matrislerin grubudur. Bu grup, *kuantum renk dinamiği* (QCD) adı verilen yeğin etkileşimler kuramının temelini oluşturur. QCD'nin geliştirilmesinden önce Murray Gell-Mann ve Yuval Ne'eman, 1960'larda keşfedilen birçok yeni parçacığı tanımlamak için SU(3)'ü kullandı. Lie grubu SU(3)'ün üretici sayısı sekizdir ve üç karmaşık boyutta sekiz bağımsız dönüş açısına karşılık gelir. (U(3) grubu için dokuz üretici olacaktır.) Bu nedenle Gell-Mann, Budist aydınlanmaya giden yolu ima ederek, parçacıklar kuramını Sekiz Katlı Yol olarak adlandırmıştır.

DEĞİŞMEZLİK: MUTLAK MI, GÖRELİ Mİ?

Doğadaki simetrinin, bir dizi dönüşüm altında doğa yasalarının aynı veya değişmez kalması anlamına geldiğini hatırlıyoruz. Bunun kökeni Galileo tarafından keşfedilen temel değişmezliktir. Eylemsiz bir referans çerçevesinde ifade edildiğinde, fizik yasalarının ve deneylerinin sonuçlarının aynı olduğunu bu değişmezlik söyler. Aynı zamanda farklı bir sabit hızda hareket eden başka bir eylemsizlik sistemiyle karşılaştırıldığında sabit hızda hareket eden bir sistem olarak tanımlanır. Bu durumu, duran bir trende otururken, pencereden dışarı bakıp yanımızdan yavaşça geçen başka bir treni izlerken deneyimleyebiliriz. Karşıdaki trenin hareket etmediğini; fakat biz hareket etmesek de hareket ettiğimiz algısını garip bir şekilde hissederiz. Galileo, bu değişmezliği düşünürken gemileri hayal etmişti.

Newton, Galileo değişmezliği adı verilen bu simetrinin çok iyi farkındaydı ve bunu hareket yasalarını oluşturmak için kullandı. Mutlak bir uzayın ve mutlak bir zamanın varlı-

ğını öne sürdü, nesnelerin mutlak uzaya göre hareket ettiğini ve bu uzaydaki olayların eşzamanlılığının mutlak olduğunu söyleyerek Galileo'nun değişmezliğini onayladı. Diğer yandan Maxwell gibi on dokuzuncu yüzyıl fizikçileri, uzayda elektromanyetik dalgalar taşıyan bir ortamın olması gerektiğine inanıyordu. Esir olarak adlandırılan bu ortam, aslında Newton'ın mutlak uzayını temsil edecekti. Çünkü bu fizikçilere göre uzaydaki cisimler esirle ilişkili mutlak referans sistemine göre hareket ediyorlardı. Bu, Newton'ın cisimlerin kendi mutlak uzayının referans sistemine göre hareket ettiği fikriyle ilgili bir benzetmeydi. O zamanlar bilim insanları, ışığın hızının, ışık kaynağının hareketinden bağımsız olmadığına inanıyordu. Yani ışık, esirin [eterin] mutlak referans sistemine göre farklı hızlarda hareket edecekti.

Michelson ve Morley'nin 1879'da (nihayet) "esir"i saptamak için yaptıkları deney, şaşırtıcı bir şekilde, dünyanın hareketinin ışık hızını etkilemediğini gösterdi. Bu, ışığın hızının kaynağından bağımsız olarak sabit olduğunu ve bu nedenle ortamla ilişkili mutlak bir referans sistemi olmadığını gösterdi. Uzayda her yere yayılan bir esir fikri 19. yüzyılın fiziğine o kadar yerleşmişti ki, Hendrik Lorentz gibi fizikçiler, elektron etkileşimlerinin elektrodinamiği yardımıyla Michelson-Morley deneyini ve ışık hızı üzerindeki etkilerini açıklamaya çalıştı. Bu kuramda Lorentz, deneyin interferometri çubuklarını oluşturan maddenin, dünyanın güneş etrafındaki hareketinin yönü boyunca büzüştüğünü, esirin ışık sinyali üzerindeki varsayılan etkisini iptal ettiğini, böylece esir fikrini kurtardığını iddia etti.

1905'te Einstein, ışığın hızının her eylemsizlik sisteminin hareketine göre sabit olduğunu ve ışık kaynağının hareketinden bağımsız olduğunu öne sürdü. Böylelikle Newton'ın mutlak uzay ve zaman varsayımına dayanan eski Galileo değişmezliğini alaşağı eden özel görelilik kuramı biçiminde doğanın yeni bir simetrisini keşfetti. Artık saatler ve ölçüm çubukları gözlemcilerin hareketlerinden etkilenmiş gibi görünüyordu. Saatler ışık hızına yaklaştıkça yavaşlıyordu ve

ışık hızına yaklaştıkça ölçü çubukları büzülüyordu. (Einstein, esir fikrini görmezden geldi.) Üstelik, Einstein'ın, ışığın hızının tüm eylemsizlik sistemlerine göre sabit olduğu varsayımı da dahil olmak üzere, özel görelilikteki varsayımları, onu, enerjinin kütle çarpı ışık hızının karesi çarpımına dönüştürülebileceğini keşfetmesine yol açtı.

Alman matematikçi Herman Minkowski, 1904'te Hendrik Lorentz tarafından keşfedilen grup dönüşüm yasalarında yer alan özel göreliliğin değişmezlik simetrisini, uzay zamanı üç uzay boyutu ve bir zaman boyutuyla dört boyutlu olarak resmederek açık dahice bir şekilde ifade etti. Lorentz dönüşümlerine göre doğa yasalarının değişmezliği SO(3,1) grubuyla tanımlanır. Bu Lie grubu, üç uzaysal boyutta ve bir zaman boyutunda özel bir ortogonal dönüşüm grubudur. Bu grup, ışık hızının sonsuz bir nicelik olarak ele alındığı Galileo dönüşümleri grubu olarak adlandırılan grupla ilişkili daha kısıtlayıcı simetri veya değişmezlik grubunun yerini aldı. SO(3,1), özel görelilikte sabit göreli hızla hareket eden iki koordinat referans sisteminin dönüşümünü tanımlar. Galileo dönüşümler grubu, o dönemin atları, arabaları veya gemileri gibi yavaş hareket eden nesneler için yaklaşık olarak doğru kabul edilebilir.

Klasik fizikte olduğu kadar parçacık fiziğinde de, denklemlerin sürekli simetri değişmezliği, bir kuramda korunum yasasının varlığını ima eder. Alman matematikçi Amalie (Emmy) Noether, herhangi bir fizik kuramının alan denklemlerinin öteleme ve dönme simetrisinden enerji ve açısal momentumun temel korunum yasalarını türetmiştir. Onun çalışmasından, Maxwell'in alan denklemlerinin ayar değişmezliğinden elektrik yükünün korunumunu türetebiliriz. Ayar değişmezliği, doğanın en temel değişmezlik simetrilerinden biridir. Maxwell denklemleri, dört uzayzaman boyutunda yönü olan potansiyel bir vektör alanı cinsinden yazılabilir. Bu vektör alanından Maxwell denklemleri için elektromanyetik alanın gücünü elde edebiliriz. Bir serbestlik derecesine sahip bir skaler alanın türevi olarak ifade edilen

bu alandaki belirli bir dönüşüm, elektromanyetik alan şiddetini değişmez bırakır. Vektör potansiyeline eklenen keyfi bir gradyan olan türev, Maxwell alanını veya denklemlerini değiştirmez. Vektör potansiyelinin bu dönüşümü ve Maxwell denklemlerinin sonuçtaki değişmezliği, Maxwell denklemlerinin ayar değişmezliğini oluşturur. Vektör potansiyel alanının mutlak değerleri yoktur. Klasik deneylerde fiziksel olarak tespit edilemese de, modern ayar kuramında derin bir fiziksel öneme sahiptir.[3]

AYAR SİMETRİSİ VE AYAR DEĞİŞMEZLİĞİ

Ayar değişmezliği [*gauge invariance*] adı verilen önemli simetri, parçacık fiziğinde temel bir rol oynar. Ünlü matematiksel fizikçi Hermann Weyl, kütleçekim ve elektromanyetizmayı birleştirmeye çalışan ilk birleşik kuramı yayımladığında bu kuvvetleri birleştirmeye çalışmak için ayar simetrisi fikrini kullandı. Bu fikri birleşik kuramında uzayzamana uyguladı. Einstein'ın 1916'daki kütleçekim kuramının uzayzaman metriğine ek olarak, Weyl, Einstein tarafından kütleçekim kuramını oluşturmak için kullanılan Riemann geometrisini genelleştiren bir vektör alanı tanıttı.

İlk olarak 1918'de yayımlanan *"Space, Time, Matter"* [Uzay, Zaman, Madde] adlı kitabında[4] Weyl, Einstein'ın noktalar arasındaki mesafelerin Pisagor teoremi kullanılarak ölçüldüğü orijinal saf *metrik* kuramını yeniden ele aldı. Weyl, sabit bir mesafe ölçeği veya ayar metrik kuramının arkasındaki örtük varsayımı sorguluyordu. Ya ölçüm çubuklarının uzunluğu kadar yönü ve saatlerin zamanını ölçmekteki saniye birimi uzayzamanın farklı yerlerinde değişseydi? Ülkeden ülkeye değişen demiryolu ölçüleri analojisini kullandı. O zamanlar yolcular, uyumsuz demiryolu hatlarındaki ayar

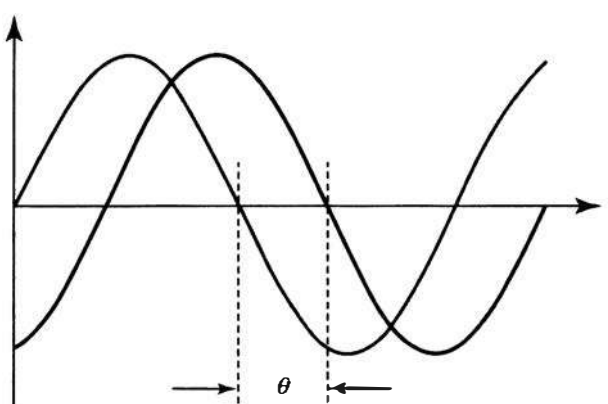
---

[3] Elektromanyetizmadaki vektör potansiyeli, Bohm-Aharanov faz reçetesi aracılığıyla kuantum kuramına göre saptanabilir.

[4] Hermann Weyl, Space, Time, Matter (Dover Books on Physics), 4. baskı (Mineola, NY: Dover Publications, 1952).

kusurları nedeniyle bazen ulusal sınırlarda tren değiştirmek zorunda kaldıklarını iyi biliyorlardı. Fizikte, elektromanyetik vektör potansiyelini uzayzaman geometrisine dahil etmesine izin veren benzer bir durum yaratmak için Weyl, Einstein'ın kütleçekim kuramının koordinat dönüşüm simetrisini elektromanyetik vektör alanıyla ilişkili bir ayar simetrisine genelleştirdi. Bu sayede birleşik kuramını oluşturabilirdi.

Einstein, Weyl'in uzayzamanın ayar simetrisi hakkındaki fikirlerini reddetti. Weyl'in kuramının, uzayzamanın farklı bölümlerinden gelen saatlerin, uzayda aynı yerde bir araya getirildiklerinde farklı zaman aralıklarında tikleyecekleri anlamına geleceğini gösterdi. Aslında bu düşünce, atomik spektral çizgilerini algılamamızla da çelişir, çünkü bunlar uzayda bir konumdan diğerine değişmiş oluyordu. Bu olgulara rağmen Weyl çok daha sonra, 1929'da, ayar simetrisi fikirlerini kuantum mekanik dalganın fazlarına uygulayan bir makale yayımlayarak bu tartışmada galip gelmiştir.[5]

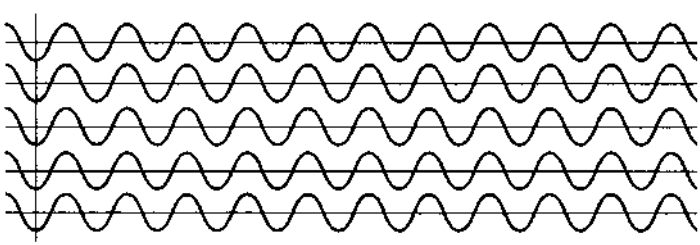


Şekil 3.1 Dalgalarda faz kayması. Yatay eksende bir açı (faz) zamanla artar. Kaynak: Wikipedia Commons

Weyl'in makalesinden önce, 1927'de başka bir kuramcı olan Fritz London, Weyl'in ayar kuramı hakkındaki ilk

[5] H. Weyl, "Electron und Gravitasyon," *I.Z. Physik*, 56, 330 (1929).

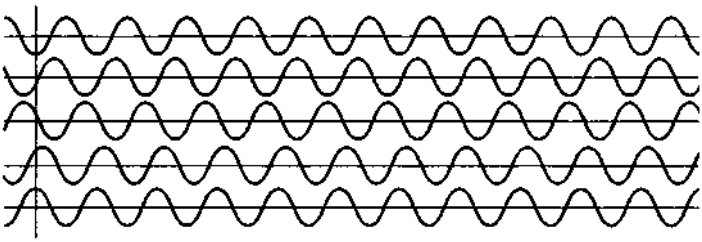
fikirlerini Schrödinger'in dalga denkleminde dalga fonksiyonunun kuantum mekanik fazına uyguladı.[6] Kuantum mekaniğinde, Bohr'un dalga ve parçacığın maddenin iki tamamlayıcı tezahürü olduğunu iddia ettiği tamamlayıcılık ilkesiyle açıklandığı gibi, dalga ve parçacık ikiliğine sahibiz. Dalga hareketinin önemli bir fiziksel özelliği fazıdır. Varsayalım ki, x(t) ve y(t) olarak tanımlanan iki salınımlı dalganın frekansı ν, genliği A ve fazı θ olsun (Şekil 3.1). Tepe ve çukur 180 dereceden farklı herhangi bir θ fazıyla farklılık gösterdiğinde dalgaların aynı fazda olduğu söylenir (Şekil 3.2). Faz θ, belirli bir sayısal miktar π veya 180 dereceyle değiştirilirse y(t) veya x(t)'nin dalga hareketi değişmez ve bir dalganın tepesi diğer dalganın çukuruyla eşleşir; birbirini götürürler ve dalgaların "faz dışı" olduğu söylenir (Şekil 3.3).



Şekil 3.2 Aynı fazda, aynı fazda dalgalar. Kaynak: Wikipedia Commons.

Kuantum mekaniği ve parçacık fiziğinde elektrik yükünün korunumu önemli bir rol oynar. Dalgalar faz değiştirdiğinde elektrik yükü elektromanyetik alanların ve dalgaların kaynağı olduğu için bu elektrik yükünün korunumu ihlaline neden olabilirler. Bununla birlikte London ve Weyl tarafından gösterildiği gibi, elektromanyetik alan, Maxwell denklemlerinin ayar değişmezliğine eşdeğer olan elektrik yükünün korunumunu koruyarak, fazdaki bu farkı her zaman ortadan kaldıracak şekilde kendisini düzenler.

[6] F. London, "Quantenmechanische Deutung der Theorie von Weyl," *Z. Physik*, 42, 375 (1927).



Şekil 3.3 Dalgaların faz dışı olması. Kaynak: Wikipedia Commons.

Böylelikle kuantum mekaniğindeki dalga denklemlerinin simetrisini bir korunum yasasıyla, yani elektrik yükünün korunumuyla ilişkilendirdik. London ve Weyl tarafından tanımlandığı gibi kuantum mekanik dalga hareketiyle ilişkili ayar değişmezliğinin, Emmy Noether'in doğadaki simetriler ve korunum yasaları arasındaki bağlantıyı keşfetmesiyle yakından bağlantılı olduğunu görüyoruz. Gerçekten de elektrik yükünün elektromanyetik alanın kaynağı olduğunu söyleyebiliriz. Kuantum mekaniği ve parçacık fiziği arasındaki bu etkileşim, QED'nin geliştirilmesinde önemli olmuştur. Elektron veya kuarklar gibi diğer spin-½ yüklü parçacık için Dirac'ın göreli dalga denklemine uygulanabilir.

Şimdi genel ayar değişmezliği veya genel simetri ile yerel ayar değişmezliği arasında ayrım yapmalıyız. Genel simetri durumunda, dalga denkleminin faz değişimleri uzayzamanın her noktasında aynıdır ve bu, elektrik yükünün genel korunumunu garanti eder. Öte yandan, yerel ayar simetrisi için, fazlar uzayzaman içinde bir noktadan diğerine değişebilir. Ancak elektromanyetik alan her zaman bu faz değişikliklerini elektrik yükünün korunduğu bir şekilde etkisiz hale getirir. Yani, dalgalar bir uzayzaman noktasından diğerine yerel olarak faz dışı olsa da, yükün korunumu, fazlardaki herhangi bir farkın iptal edilmesini garanti eder, böylece ayar değişmezliğini korur.

Yerel ayar simetrisi kavramı, parçacık fiziği kuramlarının ve standart modelin geliştirilmesinde çok önemli bir rol oynamıştır. Yang ve Mills, SU(2)'ye dayanan abelci olma-

yan ayar kuramında, elektrik yükünü izotopik spin yüküyle değiştirerek faz farklılıkları ve yükün korunumu fikrini genişletti. İzotopik spin yükünün, proton ve nötronların yeğin etkileşim kuramına uygulandığını hatırlıyoruz. İzotopik spin yükü korunumu denen kavram; izotopik spin yükünün korunmasına yol açan yeğin etkileşim kuramlarında protonların ve nötronların izotopik spini arasındaki bir simetridir. Elektromanyetizmada olduğu gibi protonlar ve nötronlar arasındaki kuvvetin taşıyıcısı olan foton yerine, Yang ve Mills bu işi yapmak için spin 1'li bir B vektör alanı icat etti. 1954'te *Physical Review*'de yayımlanan orijinal makalelerinde Yang ve Mills, QED'deki fotonu taklit etmek için B-vektör mezonunun yükü olması ve kütlesiz olması gerektiğini açıkladı. Yine de, foton da dahil olmak üzere kütlesiz olan, ve elektrik yüklü olan, bilinen hiçbir parçacık yoktur; ve bu gerçek Yang ve Mills için rahatsız ediciydi. Maxwell denklemlerinin abelci olmayan bir uzantısı için argümanlarında ciddi bir yanlış olduğu ortaya çıktı. Buna rağmen bu yerel ayar simetrisi ve izotopik spinin, B-vektör mezonunun kuvvet alanı boyunca korunması fikrinin güzel ve zarif olduğunu ve de *Physical Review*'da yayımlanmasının haklı olduğunu hissettiler. Daha sonraki bölümlerde göreceğimiz gibi, B-alanı, sonradan değişmeyen SU(3) yeğin etkileşim kuramı QCD'de renk yüklü gluon parçacığıyla değiştirildi. Gluon, atom çekirdeğindeki yeğin kuvvetin taşıyıcısıdır. Kütlesizdir ve kuramdaki elektrik yükü, renk yüküyle değiştirilir. Üstelik, zayıf etkileşimler için, Yang'ın ve Mills'in B-alanı içeren orijinal kuramı, yüklü ve büyük kütleli W bozonu haline geldi.

Bugüne kadar ayar kuramı üzerinde çalışan kuramcılar, ilk olarak Yang ve Mills tarafından SU(2) için yayımlanan abelci olmayan ayar kuramındaki vektör alanının nasıl yorumlanacağına odaklanmıştı. 1983'te, iki büyük vektör bozonunun aracılık ettiği zayıf etkileşimler modeli, büyük kütleli W ve Z parçacıklarının keşfiyle doğrulandı. 1960'ların başlarında, W ve Z parçacıklarının deneysel keşfinden önce, şu soru gündeme gelmişti: W ve Z'nin kütleleri nereden geliyor?

Foton ve gluon kütleli olmadığı için bu kuvvet taşıyıcıların kütleleri olması olağandışı görünüyordu. W ve Z kütlelerinin ve kuarkların ve leptonların kütlelerinin kökenine yönelik bu araştırma, kırık ayar simetrisi fikrine yol açtı. Fizikçiler, erken evrende W ve Z parçacıkları da dahil olmak üzere tüm temel parçacıkların başlangıçtaki kütlesiz bir simetri fazını tasarladılar. Bu tasarım daha sonra kendiliğinden kırıldı, böylece foton ve gluon dışındaki temel parçacıklar için kütleler üretti.

Grup kuramı, simetri ve ayar değişmezliği gibi matematiksel kavramlar, sonunda SU(3) × SU(2) × U(1) grubuna dayalı standart parçacık fiziği modelinin geliştirilmesine yol açtı. Yeğin etkileşimleri tanımlarken SU(3) kullanılırken SU(2) × U(1) çarpımıysa modelin elektro-zayıf [sektörüdür] kısmını oluşturur.

4

LHC'DE YENİ PARÇACIKLAR ARAMAK

LHC'nin temel amacı; standart parçacık fiziği modelinde kendi çerçevesinde temel bir rol oynayan, yani Higgs bozonu olarak adlandırılan, tespit edilmemiş son temel parçacığı aramaktır. 2012'deki deneysel çalışmalar için proton çarpışmalarının parlaklığını veya yoğunluğunu elde etmek önemliydi. Böylece yeni veriler 2011'de keşfedilen yeni parçacık rezonansının daha önemli bir istatistiksel sinyalini üretebilirdi. Bu yeni bir rezonans (Higgs bozonu) olabilir veya eski bir parçacığa ait olabilirdi.

Standart modele göre Higgs bozonu büyük kütleli, elektriksel olarak nötr bir parçacıktır. Spin 0'a sahiptir, bu da skaler bir bozon alanı olduğu anlamına gelir. Diğer bozonlarda olduğu gibi uzayda herhangi bir yöne sahip olma özelliği yoktur. Bozonlar, kuarklar ve leptonlar gibi madde parçacıkları arasındaki kuvvet alanlarının taşıyıcılarıdır. 2012'ye kadar keşfedilen bozonlar foton, gluon ile W ve Z bozonlarıdır. Higgs bozonu da keşfedildikten sonra diğerleri –graviton ve inflaton gibi– hâlâ varsayımsal parçacıklar olarak kalmıştır.

Tarihsel olarak, 1932'de inşa edilen ilk hızlandırıcıdan bu yana, hiç kimse kuantum 0 spinli skaler bir alan olan temel parçacık tespit etmemiştir. (Kuantum fiziğinde parçacık ve alan terimleri birbirinin yerine kullanılabilir.) 1947'de Cecil Powell, César Lattes ve Giuseppe Occhialini tarafından keşfedilen pi mezonu (pion) 0 spine sahiptir, ancak temel bir parçacık değildir, çünkü kuark ve karşı-kuarktan oluşur.

Higgs parçacığı, temel bir parçacık olarak LHC'de saptanırsa o zaman bu, boşlukla aynı kuantum sayılarına sahip, doğada keşfedilen ilk temel spin-0 parçacığı olacaktı.

Elbette, 0 spinli bir Higgs bozonu, temel bir parçacıktan ziyade pi mezonu gibi kuarkların ve karşı-kuarkların bir bileşimi olabilirdi. Bununla birlikte pi mezonu, diğer ışık mezonlarıyla birlikte, "sahte-skaler parçacıklardır": yani pozitif pariteli bir skaler parçacık olan temel Higgs bozonunun aksine, negatif pariteye sahiptirler. Kuark spektroskopisinde spin-0 birleşik skaler mezonlar gözlenmiştir. Bunlar bağlı kuark/karşı-kuark çiftlerinin bileşimleridir ve hidrojen benzeri sistemlerin temel durumunun üzerinde uyarılmış durumlarda bulunurlar. CMS ve ATLAS dedektörlerinde 125 GeV'de varsayılan bir Higgs bozonunun ipuçları makul bir şekilde bir kuark/ karşı-kuark durumu olarak yorumlanabilirdi. Ancak bu, yaklaşık 50 ila 60 GeV'lik bir kütleye sahip bir kuarkın varlığını gerektirecekti. Bu kütleye sahip bilinen bir kuark henüz tespit edilmedi. Gerçekten de Higgs bozonu, kütlesi yaklaşık 125 GeV olan temel bir parçacıksa bu, 0 spinli ve pozitif pariteli keşfedilen ilk temel parçacıktır.

Higgs bozonu, potansiyel olarak var olmayan bir temel parçacık olarak geleneksel deneysel statüsüne rağmen parçacık fiziği ve kozmolojisinde önemli bir rol oynamıştır. Kuramsal fizikçilerin bu konuda pek fazla seçeneği yok gibi görünüyor. Bunun yerine, hem standart parçacık fiziği modelinin hem de kozmolojinin fiziği, temel Higgs parçacığının temel spinsiz parçacık olmasını talep eder. Fizikte önemli bir rol oynayan tek spin-0 skaler temel parçacık değildir. Erken evrenin temel özelliklerini açıklamak için varsayılan popüler bilgi kuramı, deneysel olarak da tespit edilmemiş *inflaton* adı verilen etkili bir spin-0 parçacığına dayanmaktadır.

HIGGS NEDEN BU KADAR ÖNEMLİ?

Higgs bozonu parçacık fiziği tiyatrosunda önemli bir oyuncudur, çünkü standart modeldeki tüm temel bozonların, ku-

arkların ve leptonların kütlelerini ürettiği varsayılır. Hatırladığımız gibi temel parçacıklar, protonların, nötronların ve mezonların aksine, daha fazla temel bileşen içermez. Proton ve nötron, kuarklardan; pi mezon ve K mezon gibi mezonlar kuarklardan ve karşı-kuarklardan oluştuğu için temel parçacıklar değildir. Bu parçacıklar, hadron adı verilen bir bileşik parçacık ailesine aittir.

Hızlandırıcı deneylerinden, W ve Z bozonlarının kütle bakımından yaklaşık 10 GeV kadar farklı olduğunu biliyoruz ve fotonun deneysel olarak sıfır kütleye sahip olduğu biliniyor. Bu gerçekler, ilk olarak 1967/1968'de Weinberg ve Salam tarafından geliştirilen standart parçacık fiziği modelindeki elektro-zayıf kuramda açıklanmıştır. Elektro-zayıf simetri, erken evrende Higgs bozonu dışındaki tüm parçacıkların kütlelerinin sıfır olduğu bir evre olduğu anlamına gelir. Standart model kuramında, spinsiz skaler alan boşluk enerjisinin sıfıra eşit olmaması için "Higgs mekanizması"na başvurulur. Normalde, modern kuantum alan kuramında parçacıkların boşluk enerjisi sıfır olarak kabul edilir. Aslında, bildiğimiz kadarıyla, boşluk enerjisi "hiçlikten" oluşmaz; ancak sıfır enerji üretmek için birbirini yok eden parçacıklardan ve onların karşıt parçacıklarından oluşur. Varsayılan sıfır olmayan boşluk enerjisi, temel parçacıklara kütlelerini veren "kendiliğinden simetri kırılmasına" neden olur.

Higgs bozonu çok önemlidir, çünkü elektromanyetizmanın birleşik kuramını ve standart model içindeki zayıf kuvveti *–elektro-zayıf kuramı–* modern kuantum alan kuramı içinde yeniden boyutlandırılabilir hale getirir. Bu durum, imkânsız sonsuzluklarla uğraşmak yerine, örneğin sonlu ve anlamlı parçacıkların çarpışmalarının hesaplamalarını yapabildiğimiz anlamına gelir. Benzetme yaparsak, 1930'larda ve 1940'larda kuantum alan kuramının erken gelişmeleri, yeniden boyutlandırılabilir, dolayısıyla sonlu bir QED kuramı üretmişti. Bu kuram, fizikteki en dikkat çekici başarılı kuramlardan biridir. James Clerk Maxwell'in klasik elektromanyetik alan denklemlerinin göreli kuantum kuramıdır. Parçacık

fizikçileri, Higgs bozonlu standart modelin yeniden boyutlandırılabilir QED'nin başarısını tekrarlayabileceğini umuyor.

HIGGS BOZONU NEREDE?

Amerika Birleşik Devletleri'ndeki Tevatron hızlandırıcısından elde edilen nihai sonuçlar ve LHC'den Mart 2012'ye kadar alınan sonuçlar, Higgs bozonunun var olması için olası kütle-enerji aralığının büyük bir bölümünü zaten devre dışı bırakmıştı. Sadece Higgs parçacığının saklanabileceği küçük bir enerji penceresi kalmıştı. Görünüşe göre bu aralık, LHC'nin Higgs'i, yani 115 GeV ile 145 GeV arasındaki enerji aralığını tespit edebildiği en zor enerji penceresiydi. LHC, 14 TeV'e kadar çok yüksek enerjilerde parçacık çarpışmalarını araştırmak için inşa edildi. Bununla birlikte 115 GeV ile 145 GeV arası gibi daha düşük enerjilerde, istenmeyen ardalan veya istatistiksel gürültü yüksektir, bu da Higgs bozonunun bozunma ürünlerini tespit etmeyi, dolayısıyla varlığını ortaya çıkarmayı çok zorlaştırır. Geriye kalan bu küçük pencerede Higgs bozonunun varsayılan sinyali bulundu. LHC'nin bu düşük enerjilerde Higgs bozonunu keşfetmesi için önemli bir parlaklık veya proton-proton çarpışmalarının yoğunluğu gerekir. Temmuz 2012'de bu yoğunluğa kadar ulaşıldı.

2012 yılına gelindiğinde üst kuark ve W bozon kütleleri deneysel olarak doğru bir şekilde biliniyordu. Bu bilgiyle donanmış biri, Higgs bozonunun kütlesini tahmin edebilirdi. Ayrıca CERN'deki LEP, Tevatron çarpıştırıcısı ve daha yakın zamanda LHC deneyleri tarafından son on veya yirmi yılda toplanan veriler; kesin bir tutarlılıkla elektro-zayıf verilere uygunluk gösterir, ki bu veriler Higgs bozonunun olası kütlesinin sınırlandırılmasına da izin verdi. Tüm verileri birleştirmek, Higgs bozonunun kütlesinin hafif olması gerektiğini gösteriyordu; 115 GeV ile 130 GeV arasında olması bekleniyordu. Aslında, elektro-zayıf verilere en uygun olanı, Higgs kütlesini yaklaşık 97 GeV'a koyar. Ancak bu değer; olası Higgs kütlesinin büyük bir kısmı LEP hızlandırıcısında

elenirken dışarıda kalmıştır. Bununla birlikte, LEP tarafından gerçekleştirilen bu hariç tutma, yalnızca bir standart sapmanın istatistiksel önemine sahiptir; bu istatistiksel limitler, 97 GeV'den 135 GeV bir enerjiye kadar olası bir Higgs bozonunu hariç tutmak için yeterince önemli değildir.

Mart 2012'ye kadar, LHC'deki ATLAS ve CMS dedektörlerindeki sözcüler, 2012'de toplanan proton-proton çarpışma verilerinin ya Higgs bozonunu dışarıda bırakacağını ya da kalan, keşfedilmemiş düşük enerjinin dar bandında keşfedeceğini iddia ediyorlardı. Bu elde kalan enerji bandı da sadece 15 ile 20 GeV genişliğinde bir aralıktı. Bozonun bu aralıkta bulunması durumunda sözcüler, otuz yılı aşkın süredir devam eden anlaşılması zor "Tanrı parçacığı" arayışını sona erdireceğini iddia ettiler.



"her zaman en son baktığın yerde olur zaten"

Şekil 4.1 Higgs bozonu parçacığının keşfi © Farley Katz, *New Yorker* Dergisi

Higgs bozonunun keşfi doğrulanmazsa bu fizikte bir kriz yaratacaktı. Gerçekten de, son 40 yılda yayımlanan parçacık fiziği ve göreli kuantum alan kuramı üzerine pek çok ders

kitabının üç ya da dört bölümünün çıkarılması gerekecekti. Maddenin temel kökenine dair tüm anlayışımızı ve birleşik elektro-zayıf kuramı fiziksel olarak tutarlı kılan her şeyin sıfırdan yeniden düşünülmesi gerekebilirdi.

SÜPERSİMETRİK PARÇACIKLAR VAR MI?

Doğada simetri arayışı Antik Yunan'dan beri devam etmektedir. Simetri, insan zihnine o kadar hoş gelen bir kavramdır ki, doğanın temeli olması gerektiğini varsayıyoruz. Küreler veya kar taneleri gibi simetrik şekiller veya kelebeklerin ikili simetrisi veya ağaçların eksenel simetrisi gibi bariz simetrilerin birçok örneği vardır.

Fizikçilerin doğada simetri arayışı onları uzay ve zamanın *süpersimetri* adı verilen simetrik bir tanımına götürdü. *Süper*'in kullanılması, bunun parçacık fiziğinin ve uzayzamanın elde edilebilecek en simetrik tanımı olduğunu öne sürüyor. Süpersimetri fikri Hironari Miyazawa tarafından 1966'da önerildi, ve daha sonra 1970'lerin başında Y. Golfand, E. P. Likhtman, Julius Wess ve Bruno Zumino dahil olmak üzere birçok fizikçi tarafından yeniden keşfedildi. Süpersimetri fikrinin kökeni esas olarak uzay ve zamanın olası maksimum simetrileri hakkındaki matematiksel spekülasyonlarda yatmaktadır. Bununla birlikte kavram daha pratik amaçlar için parçacık fizikçileri tarafından çok geçmeden benimsendi.

Süpersimetri parçacık fiziğine çevrildiğinde parçacık hayvanat bahçesinde gözlenen parçacıkların sayısı iki katına çıkar. Bu yeni parçacıkların her biri, var olanın süper bir ortağıdır; biri bozon olarak yarım tamsayılı spinliyse diğeri tamsayılı spinli bir fermiyondur.[1] Bu süpereşlerin spini her zaman ½'lik bir spin birimiyle farklılık gösterir. Örneğin elektronun spini ½ iken, süper ortağı olan selektronun

[1] Fermiyonlar yarı tamsayılı spinlere sahiptir. Örneğin elektron ½ spinlidir. Öte yandan bozonlar, spin 1'li foton gibi tamsayı spin değerlerine sahiptir.

spini 0'dır. Süpersimetri olmadığı zaman, sadece bozonlar parçacıklar arasındaki kuvvetlerin taşıyıcılarıdır. Ancak süpersimetri kuramında fermiyonlar da bu rolü oynayabilir. Örneğin foton; bir bozon ve elektromanyetik kuvvetin taşıyıcısı, spin 1'e sahiptir, bir fermiyon olan süpereşi fotino ise ½ spinlidir ve yeni süperpartnerler arasında hareket eden taşıyıcı süpersimetrik kuvveti sağlar.

SÜPERSİMETRİNİN NASIL BİR YARARI VARDIR?

Süpersimetrinin en eski uygulamalarından biri, sözde *Higgs kütle hiyerarşisi problemi* denilen sorunu çözme girişimiydi. Parçacık fiziğinin standart modeline göre Higgs bozonunun kütlesi, bu parçacığın kendi kendisiyle etkileşiminden, muazzam bir katkı alır. Bu katkının süreci; kütleleri doğrudan Higgs bozonunun veya Higgs alanının temel parçacıklarla etkileşimleri tarafından oluşturulan kuarkların ve leptonların ve W, Z bozonlarının kütlelerinin oluşma sürecinin tam tersidir. Higgs kütlesi hiyerarşi sorununu ortaya çıkarır. Çünkü bu kütle için gerçekçi bir değer elde etmek için fizikçilerin "çıplak kütle" ile arasında muazzam bir ince ayar –çok sayıda ondalık basamak içeren çok hassas bir matematiksel işlem– gerçekleştirmeleri gerekir. Higgs bozonunun diğer parçacıklarla etkileşiminin olmadığı durumdaki serbest kütlesinin ve kendi kendine etkileşimden gelen katkının arasında bu bahsedilen ince ayarın yapılması zorunludur. Fizikte böyle bir ince ayar, kuramsal hesaplamalar için çok doğal olmayan bir sonuç üretir ve çoğu kuramsal fizikçi için kabul edilemez. Son kırk yılda parçacık fiziğindeki en büyük zorluklardan biri bu Higgs kütle hiyerarşisi problemini ortadan kaldırmak olmuştur. Bunu yapmanın en etkili yolu süpersimetriyle mümkün hale gelmiştir. Bu çözüm *doğal süpersimetri* olarak adlandırılmıştır.

Parçacık fiziğindeki bir başka kötü şöhretli ince ayar problemi, göreli kuantum alan kuramı kullanılarak boşluğun enerji yoğunluğunun hesaplanmasıdır. Yine, boşluk enerji

yoğunluğunun hesaplanması, boşluğun enerji yoğunluğunun beklenen gözlenen değeri ile arasında 10^{122} kadar şaşırtıcı bir anlaşmazlık üretebilir. Bu saçma sonuç, fizik tarihindeki en kötü öngörülerden biri olarak kabul ediliyor. Özellikle, Higgs alanından hesaplanan boşluk enerji yoğunluğu bu saçma ince ayarı kendi başına üretir gibi görünmektedir. İnce ayar kavramlarının tartışılması, Higgs bozonu kütle hiyerarşisi problemi, ayar hiyerarşisi problemi ve kozmolojik sabit problemini 10. Bölümde ayrıntılı tartışacağız.

Süpersimetriye dönersek, 1970'lerin başlarında Leonard Susskind ve diğerleri, süpereşler gerçekten var olsaydı, bunun Higgs kütle hiyerarşisi problemini çözebileceğini öne sürdü. Teknik olarak bu, süpereşlerin kütlelerinin bilinen kuark ve lepton kütlelerinden çok farklı olmamasını gerektiriyordu. Bu yorumda bazıları, sıradan elektrik yüküne ek olarak süper eşler üzerinde bir süper yükün var olduğunu öne sürdü. Bu durumu açıklayabilecek en tutarlı çıkarım, Higgs kütle hiyerarşisi problemini hafifleten, parçacıkların süper yükleri ve süpereşleri arasında etkileşimlerin birbirini yok etmesiyle sonuçlanan yorumdur. Başka bir deyişle, Higgs kütlesinin hesaplanması sırasında, pozitif parçacık katkıları, negatif süpereş katkıları tarafından yok edilir, ki bu da Higgs bozonunun kütlesinin beklenen deneysel değeriyle uyumlu olmasını sağlar. Bir süpersimetrik kuramdaki benzer birbirini yok etme, parçacıkların boşluk enerji yoğunluğunun hesaplanmasındaki ciddi ince ayar problemini çözecektir.

1970'ler ve 1980'ler boyunca, diğerleri arasında, Peter van Nieuwenhuizen, Sergio Ferrara ve Daniel Freedman, kütleçekim bozon kuvveti taşıyıcısının, spin 2 ile graviton olarak adlandırılan, 3/2 spinli gravitino adlı bir süpereşine sahip olduğu süper-kütleçekim çerçevesini tanıttı. Süper-kütleçekim kuramı, kütleçekimin diğer üç doğa kuvvetiyle nasıl birleştirileceği sorununu çözmeye yardımcı olabilir.

Süpersimetrinin çözebileceği bir diğer önemli problem ise kozmolojik sabit problemidir. Boşluk enerji yoğunluğunun hesaplanmasının, gözlemsel verilerle karşılaştırıldığın-

da saçma derecede büyük olduğunu hatırlıyoruz. Bu boşluk enerji yoğunluğu, doğrudan *kozmolojik sabit*le ilişkilendirilebilir. Einstein, kütleçekim kuramına dayanan kozmolojik modeli durağan bir evrene yönlendirmek için 1917'de kozmolojik sabiti kütleçekim alanı denklemlerine dahil etti. Bu, Einstein'ın kütleçekim kuramına dayanan modern kozmolojiyi tanıtan ilk makaleydi.[2] Sonra, 1920'lerde, Rus kozmolog Alexander Friedmann, Einstein'ın alan denklemlerini çözdü ve genel görelilik evreninin dinamik olduğunu ve bir genişlemeye uğrayacağını keşfetti. Bu daha sonra Belçikalı kozmolog Georges Lemaître tarafından, Friedmann'dan bağımsız olarak bulundu. Gökbilimci Edwin Hubble'ın 1929'da evrenin gerçekten genişlediğini keşfetmesiyle, Einstein'ın kozmolojik sabitine olan ihtiyaç ortadan kalktı. Ancak günümüzün standart kozmoloji modelinde yeniden ortaya çıktı. Gökbilimcilerin 1998'de süpernova verileriyle keşfettiği, evrenin genişlemesinin görünürdeki ivmesini açıklamak için böyle bir sabite ihtiyaç vardı. Einstein'ın kozmolojik sabiti (Yunanca Lambda, Λ harfiyle gösterilir) evrende itici bir karşı-kütleçekim kuvveti olarak düşünülebilir. Öyle ki bu da kütleleri çeken kuvveti dengeleyebilirdi. Kozmolojik sabit önceden Einstein'ın durağan evren modelinde, kütleçekim kuvvetini dengeleyen bir itici kuvvet olarak ortaya çıkmıştı. Bugün kozmologlar tarafından yorumlandığı şekliyle kozmolojik sabitle ilişkilendirilen boşluk enerji yoğunluğu, evrenin genişlemesini hızlandıran bir itici kuvvet olarak görülür. Bu kuvvetle ilişkili enerjiye *kara enerji* denir.

1960'ların ortalarında Rus fizikçi Yakov Zeldovich, kozmolojik sabiti boşluğun enerjisiyle tanımladı. Buna göre, boşluğu oluşturan görünüşte yok edici parçacıklar ve karşı-parçacıklar denizi, Newton'ın kütleçekim sabiti aracılığıyla kozmolojik sabitle tanımlanan sabit bir boşluk enerjisi

[2] Albert Einstein, "Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie," Königlich Preussische Akademie der Wissenschaffen, 142–152 (1917). [Albert Einstein, "Genel görelilik kuramı üzerine kozmolojik düşünceler", Kraliyet Prusya Bilimler Akademisi.]

üretir. Bu boşluk enerjisinin hesaplanması, kuram ve gözlem arasında 120'den fazla büyüklük derecesinde (10^{120}) muazzam bir farklılığa yol açar, hem kozmolojide hem de parçacık fiziğinde büyük bir krize işaret ederek tüm fizikteki en aşırı ince ayar problemini oluşturur.

Süpersimetride, parçacıklar ve süpereşleri arasındaki enerjilerin birbirini götürmesi nedeniyle, boşluk yoğunluğunun bu aşırı ince ayarı artık gerçekleşmez. Bununla birlikte Mart 2013 itibariyle LHC sonuçlarından deneysel olarak biliyoruz ki 600 ila 800 GeV'lik bir kütlenin altında hiçbir süpereş yoktur. Ayrıca gluonun süper ortağı olan gluino, 1,24 TeV'e kadar dışarıda bırakılmıştır. Bu nedenle kozmolojik sabit probleminin umut verici bir çözümü ciddi bir darbe almış oldu.

Süper ortak arayışı LHC'den eli boş dönmeye devam ederse bu süpersimetriyi teşvik etmek için erkenden oluşan motivasyonlardan birini ortadan kaldıracaktır. Kuram, Higgs kütle hiyerarşisi problemini ve boşluk enerji yoğunluğu hesaplamalarıyla bağlantılı ince ayar problemini çözmede başarısız olacaktır. Şimdi, eğer gerçekten süpereşler varsa, LHC tarafından tespit edilebileceklerin ötesinde kütlelere sahip olacaklar gibi görünüyor.

HAVADAKİ SÜPERKALELER

Süpersimetri, ilk günlerinde, birçok ekstra boyutuyla sicim kuramının gelişmesinde de önemli bir rol oynadı. Sicim kuramının orijinal versiyonu sadece tamsayı spinli bozon parçacıklarını içeriyordu. Göreli kuantum alan kuramı ve parçacık fiziği, parçacıkların uzayda noktalar olduğu, yani sıfır boyutları olduğu kavramı üzerine kurulmuştur, oysa sicim kuramında parçacıklar tek boyutlu sicimlerdir. Bu sicimler çok küçüktür, sadece yaklaşık 10^{-33} cm, yani Planck uzunluğu kadardır ve onları farklı parçacıklar olarak tanımlayan titreşimlerinin frekanslarıdır. Bu kuram, üç uzamsal boyut ve bir zaman boyutundan oluşan bilinen evrenimizin tam tersi olan

toplam 26 boyut gerektirir. Ekstra boyutlara duyulan ihtiyaç, sicim kuramının, Einstein'ın *Minkowski uzayzamanı*[3] denen şeyde yalnızca üç uzaysal boyuta ve bir zaman boyutuna sahip olan özel göreliliğini karşılaması gerekliliği nedeniyle ortaya çıkmıştır. Sicim kuramının matematiği, boyutları dörde sıkıştırmak veya küçültmek için 26 boyutun gerekli olmasını gerektirir. Sonunda, tüm ortak parçacıklarıyla birlikte süpersimetrinin, sicim kuramını fiziksel olarak fermiyonlarla ve bozonlarla tutarlı hale getirmek için gerekli olduğu keşfedildi, bu da, şimdi *süpersicim kuramı* olarak adlandırılan ve yaşayabilirliği LHC veya gelecekteki hızlandırıcılar tarafından süpereşlerin keşfine bağlı olan kurama yol açtı.

Süpersicim kuramının popülaritesi son birkaç yılda azaldı, çünkü sicim kuramcılarının, sicim kuramının gerektirdiği ekstra uzay boyutlarını bulmanın deneysel yolları dışında, bu kuramın birçok versiyonu için gerçekçi testler önermeleri mümkün olmadı. Süpersicim kuramının en büyük iddialarından biri, parçacık fiziğinin sonlu bir kuramına yol açmasıdır: yani standart parçacık fiziği modeli sicim kuramı denklemlerinden elde edilebilir. Ancak bu tatmin edici bir şekilde kanıtlanmamıştır. Uzayzamandaki sıfır boyutlu noktaların tek boyutlu dizilerle değiştirilmesinin sonlu kuantum hesaplamalarını mümkün kıldığı da kesin olarak kanıtlanmamıştır. Süpersicim kuramının, kütleçekim de dahil olmak üzere, doğanın tüm kuvvetlerini birleştirdiği iddia edildiğinden, kuantum kütleçekimde sonlu hesaplamalara da yol açacaktır. Bununla birlikte, LHC'den elde edilen en son deneysel sonuçlar, ekstra boyutların varlığını dışladı ve çok fazla alanı temsil eden yaklaşık 3 TeV'ye kadar süpersicim kuramının var olabilme olasılığını zayıflattı.

Ekstra boyutlarla ilgili hikâye, 1885'te Silezya'da doğan Theodor Kaluza'nın birleşik bir kuramının yayımlanmasıyla

[3] Bozon sicimleri için sicim kuramı operatörlerinin cebiri yalnızca 26 boyutta özel görelilikle tutarlıdır, bu nedenle Lorentz değişmezliğinin simetrisini sağlar.

başlar. Einstein'ın 1920'lerde bilinen tek kuvvet olan kütleçekim ve elektromanyetizmayı birleştirme girişiminden ilham alan Kaluza, bilinen üç boyuta ek olarak dördüncü bir uzaysal boyutun daha olduğunu öne sürdü ve zaman boyutunu dahil ettiğimizde uzayzamanı beş boyutlu hale getirdi. 1894 doğumlu Oskar Klein, Kaluza'nın kuramını daha da geliştirdi ve beşinci boyutu çok küçük bir boyuta sıkıştırdı; böylece beşinci boyutu neden henüz gözlemlemediğimizi açıklamış oldu.

Bu kuramı doğrulamak için, Einstein'ın alan denklemleri beş boyuta genelleştirildiğinde var olması gereken *Kaluza-Klein parçacıkları LHC deneylerinde de* araştırılmıştır. Kaluza-Klein parçacıklarının yalnızca beşinci boyutta var olduğu öne sürülmektedir. Bilinen dört boyutlu uzayzamanımızda bir caddede hareket eden bir arabayı gözünüzde canlandırın. Ancak arabanın cadde kenarlarına saptığını da hayal edebiliriz ve bu ekstra serbestlik derecesi üçten fazla uzamsal boyuta tekabül eder. Yani cadde boyunca hareket eden arabanın momentumunu bir tarafa veya diğerine sapmadan ölçtüğümüzde arabanın momentumunu uzayzaman boyutlarımızda ölçüyoruz. Arabanın caddede sola veya sağa saparken momentumunu ölçersek bu arabanın beşinci boyuttaki kütlesine veya momentumuna karşılık gelir.

Kaluza-Klein kuramına göre, elektron gibi bilinen parçacıklar, elektrona benzer fiziksel özelliklere sahip, ancak elektronun kütlesinden daha büyük (ayrıca muon ve tau'dan daha büyük olacaktır; ki onlar şimdiye kadar bilinen, gözlenen ağır elektronlar olarak tanımlanır) bir kütleye sahip ortak parçacıklara sahip olacaktır. Aynı şey kuarklar için de söylenebilir. Muon ve tau gibi daha ağır, bilinen parçacıklar daha hafif elektronun acaba Kaluza-Klein süper eşleri olabilir mi? Cevap hayır; elektron elektrik yüklüdür ve bir elektrik alanıyla çevrilidir. Foton, elektronlar arasındaki elektromanyetik kuvveti taşır ve elektronlarla aynı uzaysal boyutlarda hareket eder. Bu nedenle, elektronun Kaluza-Klein ortakları varsa, o zaman fotonun da onlara sahip olması gerekir ve

yaklaşık muon kütlesine sahip bir foton var olmalıdır. Ancak böyle bir foton hiçbir zaman tespit edilmedi. Buradan muonun elektronun Kaluza-Klein ortağı olmadığı sonucu çıkar.

Kaluza-Klein parçacıkları için, eğer gerçekten varlarsa, ekstra kütleleri veya momentumları beşinci boyutta mevcuttur. Bu ekstra kütle, Planck sabiti h bölü ışık hızı c çarpı ekstra boyutla ilişkili uzunluk L olarak ifade edilebilir. Beşinci boyutun sıkıştırılmasından kaynaklanan küçük L uzunluk değerleri için, elektronun ölçülen kütlesinden daha büyük bir karşılık gelen kütleye sahibiz ve LHC bu ekstra kütleyi tespit edebilmelidir. L uzunluğunun büyüklüğü, bir metrenin milyarda biri veya daha az olan sıkıştırılmış uzunluktur. Böylece, örneğin bir elektronun tüm özelliklerine sahip ancak daha büyük bir kütleye sahip bir Kaluza-Klein parçacığını saptamak, fazladan bir boyutun varlığını doğrulayacaktır. Şimdiye kadar, giderek küçülen kompakt uzunluklarda, LHC'de 2 TeV'den fazla enerjiye kadar böyle bir Kaluza-Klein parçacığı keşfedilmemiştir. LHC tarafından hem süpereşlerin hem de ekstra boyutların dışlanması, süpersimetri ve süpersicimlerin aslında doğada var olduğu fikrinin tamamına gölge düşürmüştür.

KARA KARANLIK ŞEYLER DE YOK MU?

Süpersimetrinin bir başka egzotik öngörüsü, galaksilerin dinamiklerini, galaksi kümelerini ve *uyum kozmolojik modeli* olarak da bilinen standart kozmoloji modelini açıklamak için gerekli olan kara maddenin varlığıdır. "Dışarda bir yerde" galaksileri ve galaksi kümelerini bir arada tutan, Einstein ve Newton'ın kütleçekim kuramları tarafından tahmin edilenden çok daha büyük bir kütleçekim vardır; ki bu da daha büyük kütleçekim yaratmak için evrende fazladan var olan bir görünmez maddeyi varsaymayı gerekli kılmıştır. Bu kara madde şimdiye kadar sadece astrofizik ve kozmolojideki kütleçekim etkilerinden çıkarsanabildi. Bu görünmez madde fikri, Einstein'ın genel göreliliğinin evrensel olarak

doğru olduğu ve herhangi bir değişikliğe ihtiyaç duymadığı varsayımına dayanır. Benimki de dahil olmak üzere yayımlanmış, MOG [*modified gravity*] olarak adlandırılan *değiştirilmiş kütleçekim* kuramları, tespit edilmemiş kara madde gerektirmeyen ve galaksiler, küme dinamikleri ve kozmoloji için mevcut gözlemsel verileri açıklayabilir kuramlar vardır. Ancak fizikçilerin ve kozmologların çoğu, kara maddenin var olduğuna ve Einstein'ın genel göreliliğinin herhangi bir değişikliğe ihtiyacı olmadığına inanmaktadır.

LHC'de, yeraltı deneylerinde ve astrofiziksel gözlemlerde kara maddeyi tespit etmek için sürekli bir çaba devam etmektedir. Kara madde parçacıkları için birkaç aday var. *Nötralino* adı verilen süpersimetrideki en hafif, kararlı süpereş, kara madde parçacığı için popüler bir adaydır. Aslında nötrinoların süpereşleri olan dört nötrino parçacığı vardır ve kara madde adayı, bu dörtlünün en hafif kararlı eşidir. Bu varsayımsal parçacık şimdiye kadar LHC'de yaklaşık 1 TeV'lik yüksek bir enerjiye kadar tespit edilmedi.

Bu nötralino, WIMP (veya zayıf etkileşimli kütleli parçacık) adı verilen bir tür kara madde parçacığı olabilir. WIMP'lerin 2 GeV ile 100 GeV arasında bir kütleye sahip olması beklenir ve standart kozmoloji veya uyum modelinde önemli bir bileşen olan, *Lambda CDM* modeli olarak da adlandırılan "soğuk kara madde" kategorisine ait olarak sınıflandırılır. Uzaydan gelen kozmik ışınların neden olduğu ardalan etkilerini ortadan kaldırmak için yeraltında kara madde algılama deneyleri yapılmakta. Ancak şimdiye kadar, birkaç büyük yeraltı deneyi ve astrofiziksel gözlemler, herhangi bir WIMP bulmayı başaramadı.

Kara madde için başka bir aday da axion parçacığıdır. WIMP'lerin aksine, axion çok hafif bir parçacıktır. Bu parçacık, Newton ve Einstein'ın kütleçekim kuramlarında bir değişiklik gerektirmeden, galaksilerdeki kara madde halelerini üretmek için gerekli rolü gerçekleştirebilerek, galaksilerin dinamiklerini açıklayabilmeye adaydır. Ancak son yirmi ya da otuz yıldır yapılan deneyler de axionları bulamadı. Tüm

bu deneysel boş sonuçlar, şimdiye kadar deneycilerin yakalanması zor kara madde parçacıklarını tanımlama konusundaki ilk umutlarını kırdı.

Coşkulu hayal gücüne sahip kuramcılar, LHC'de tespit için bir başka olası aday daha hayal ettiler: mini veya mikro kara delik. Buradaki fikir, düzenli kara delikler yıldızların kendi ağırlıkları altında çökmesiyle oluştuğu için, LHC'de hızlanan parçacıkların, kendilerinin de çökebilecekleri ve mini kara delikler oluşturabilecekleri kadar yüksek bir enerji ve kütleye ulaşmaları gerektiğidir. Stephen Hawking, bu tür mini kara deliklerin aslında Higgs bozonunu saklıyor olabileceğini öne sürecek kadar ileri gitti. Bu, birkaç yıl önce onu, Michigan Üniversitesinde kuramsal fizik profesörü olan Gordon Kane ile Higgs bozonunun kalıcı olarak gizlendiği veya var olmadığı konusunda ünlü bir iddiaya girmeye yöneltti. LHC'de mini bir kara delik üretilebilmesi durumunda, bazı kuramcılar onları incelemenin ve karadeliklerin olay ufkunda üretilen sözde ünlü "Hawking radyasyonunu" tespit etmenin mümkün olabileceğini düşünüyor.

Bazı alarmcılar, LHC'nin bu tür mini kara delikler üretmesi durumunda, yakındaki Cenevre şehrini ve İsviçre ve Fransa'nın büyük bölümlerini, hatta muhtemelen tüm gezegeni yok edeceğinden korktu. Şimdi bildiğimiz gibi, LHC'nin başarılı bir şekilde çalıştırılmasından birkaç yıl sonra, Cenevre mini kara delikler tarafından yok edilmedi. Aslında, en son LHC sonuçları, mini kara deliklerin var olma ihtimalini ortadan kaldırıyor.

LHC STANDART MODELİN ÖTESİNDE BİR ŞEY BULAMAZSA FİZİK NEREDE KONUMLANIR?

2013'ün başlarından itibaren artan kanıtlar, LHC'nin Higgs bozonunun keşfini doğrulamaktadır. Ancak standart modelin parçacıklarının ve kuvvetlerinin ötesinde yeni bir fizik keşfedilmemiştir. Bu durum devam ederse, parçacık fiziğinin geleceği hakkında ciddi soruları gündeme getirir. Dünyanın

en büyük deneyine dahil olan birçok ülkenin vergi ödeyen halkı ve hükümetleri, kuramcıların yarım yüzyıldan fazla bir süredir nasıl bu kadar yanıldıklarını merak edecekler. Küçük süpersimetrik parçacıklar ve var olmayan kara madde gibi varsayımsal fiziksel olguları aramak için nasıl bu kadar çok para harcanabilirdi? Geleneksel standart modeli doğrulayacak olan Higgs bozonunun olası keşfine rağmen bu yeni fizik eksikliği parçacık fiziğinin sonunu mu işaret ediyor?

Guido Altarelli'nin 2008'de CERN'deki konuşmamdan sonra derin düşüncelere dalmasına neden olan soru gündemde: hükümetler, yeni makinelerin geleceğinden şüphelenirlerse, LHC'den daha büyük ve daha yüksek enerji hızlandırıcılarına milyarlarca dolar tutarında büyük meblağlarda para harcamaya ikna edilebilirler mi? Yeni makinelere harcanan meblağlardan sonra "Higgs bozonunun ötesinde yeni bir şey bulamadınız mı?" sorusunun ortaya çıkacağından şüphelenmezler mi? Elbette, bunu bir perspektife oturtmak için, bir hızlandırıcıya harcanan 9 milyar doların, Afganistan savaşı gibi çağdaş bir savaşı beş haftadan fazla sürede bile yürütemeyeceği anlaşılmalıdır. İnsanları öldürmek yerine, bu büyük makineleri inşa etmek ve çalıştırmak, teknoloji ve bilim insanlarını eğitmek için pratik ve faydalı yan ürünlere olanak sağlar. Bu nedenle, hızlandırıcılar yeni parçacıklar bulamamaya devam etseler bile toplum için önemli faydalar sağlayabilirler. Sonuçta www adı verilen Dünya Çapında Ağ [The Worldwide Web] CERN'de icat edildi.

LHC'de veya gelecekteki hızlandırıcılarda Higgs bozonunun ötesinde yeni bir fizik keşfedememek, fiziğin geleceği için derin bir etki yaratacaktır. Pek çok fizikçi bu olası sonucu yaklaşan bir felaket olarak görse de, ben de dahil olmak üzere diğerleri karşıt ve olumlu bir tavır almayı tercih ediyor: LHC'de standart modelin ötesinde yeni bir fizik bulamamak heyecan verici olurdu! 1879'da (Albert Einstein'ın doğum yılı), elektromanyetik dalgaların her yerde bulunan ortamı ve taşıyıcısı olduğu varsayılan esir, deneyciler Michelson ve Morley tarafından keşfedilemedi. Bu yararsız

gibi görülen deneyi ve özgün sonuçları doğrulayan sonraki deneyler, fiziğin sonunun habercisi değildi. Gerçekten de 1905'te esir kavramından kurtulan Einstein, Henri Poincaré ve Hendrik Lorentz'in daha önceki çalışmalarını temel alarak, özel görelilik kuramıyla uzay ve zaman anlayışımızda devrim yarattı. Ayrıca Einstein, Planck, de Broglie ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen keşifler fizikteki kuantum devrimini başlattı.

Standart modelde halihazırda gözlemlenenlerin ötesinde yeni parçacıklar olmadığını gerçekten keşfedersek fizikte de benzer bir devrim bekleyebiliriz. Aslında birçok fizikçi, gözlemlenen kuarklar, leptonlar, W ve Z bozonları, gluon, foton ve şimdi belki de Higgs bozonuna dayanan mevcut standart parçacık fiziği modelinin yetersiz olduğunu düşünüyor. Neden? Niye? Çünkü bu model temel biçiminde, fiziksel kökenlerini tam olarak anlamadan verilere sığdırılması gereken 20 serbest parametreye sahiptir. Örneğin Higgs alanının kuarklar ve leptonlarla etkileşimi veya "bağlanması", kütlelerinin belirli değerlerini belirlemezse, bu nedenle Higgs alanının şiddetini bu fermiyon kütleleriyle ölçen bağlantı sabitleri, kuramla değil elle müdahale edilerek uydurulmalıdır. Bu nedenle, fermiyon kütleleri serbest parametrelerdir.

Bu nedenle ben de dahil olmak üzere birçok fizikçi, standart modelin ötesinde –bu basit parçacık ve kuvvetler listesinin ötesinde– kütleçekim de dahil olmak üzere parçacık kuvvetlerinin daha birleşik bir resmini ortaya çıkarabilecek yeni bir fizik olması gerektiğini tahmin ediyor. Böyle bir birleşik çerçeve daha sonra bilinmeyen parametrelerin sayısını çok aza, hatta muhtemelen sıfıra indirecektir. Öyleyse şu soru ortaya çıkıyor: Doğanın güçlerini birleştirebilecek ve yalnızca bilinen gözlenen parçacıkları kullanarak çok ekonomik bir biçime ulaşabilecek bir kuram tasarlayabilir miyiz? Bu soruyu cevaplamak, fizikte bir sonraki devrimi oluşturabilir.

Higgs bozonunu keşfetmek, parçacık fiziğinin standart modelini doğrulayacak, ancak standart modelin ötesinde

yeni bir fizik keşfedilmediği sürece, Higgs kütlesinin kendisinin çok doğal olmayan açıklaması gibi ciddi problemlerle bizi baş başa bırakacaktır.

5

HIGGS PARÇACIĞI/ALANI VE ZAYIF ETKİLEŞİMLER

1959'da Imperial College London'da yeni kurulan parçacık fiziği grubuna Abdus Salam'ın bana haftada 10 sterlin (£10) ödeyen Bilimsel ve Endüstriyel Araştırma Departmanı bursuna sahip ilk doktora sonrası araştırmacısı olarak katıldım. Salam yakın zamanda Imperial College London'da matematiksel fizik profesörü olarak atanmıştı. Parçacık fiziği alanında çok aktif bir grup kurarak, Imperial College'da kuramsal fiziği canlandıracak Cambridge Üniversitesinin süper yıldızı olarak bu göreve getirilmişti.

Salam danışmanlığında yeni atanan araştırma öğrencileri; araştırma projesi olarak neyi takip etmeleri gerektiğini, Salam'a sorduğunda: "Git ve Julian Schwinger'in temel parçacık etkileşimleri hakkındaki makalesini oku. Skaler sigma parçacığı, parçacıkların kütlelerini nasıl aldıklarına dair bir ipucu olabilir,"[1] tavsiyesini onlara tekrarlıyormuş. Salam, fiziksel niceliklerin sonlu hesaplamalarını üreten, yeniden boyutlandırılabilir bir kuantum alan kuramının, QED'deki kütlesiz fotonda olduğu gibi, kuvvet taşıyan parçacıkların kütlesiz olduğunu ima eden bir ayar değişmezliğine sahip olması gerektiğini akılda tutmuştu. Bununla birlikte, zayıf etkileşime büyük bir parçacık aracılık etmeliydi. Böy-

[1] J. Schwinger, "A Theory of the Fundamental Interactions", *Annals of Physics*, 2, 407-434 (1957).

lece zayıf kuvvet, kütlesiz bir fotonun aracılık ettiği klasik elektrodinamiğin sonsuz menzilli kuvvetiyle karşılaştırıldığında kısa menzilli olabilirdi. Sözde sigma parçacığı, bir skaler, spin-0 alanını temsil ediyordu ve Julian Schwinger'in 1950'lerde yayımlanan makaleleri aracılığıyla, kuramsal fiziğin her yerde bulunan skaler alanı ortaya çıkmaya başladı. Hiçbir deneyin yüksek enerjili hızlandırıcılarda temel bir spin-0 parçacığını tespit etmemiş olması, kuramcıları böyle bir parçacığın parçacık fiziğindeki sonuçları hakkında spekülasyon yapmaktan alıkoymadı. Standart modeldeki deneysel olarak doğrulanmış temel fermiyonlar ve bozonların tümü, 1959'da bilinmeyen ve muhtemelen şimdi bulunmuş olan skaler spin-0 Higgs bozonu dışında, spin ½ veya spin 1'e sahiptir.

Imperial College'a ilk geldiğimde, zemine yayılmış zengin bir İran halısı olan büyük ofisinde Salam'ı görmek için bir randevu aldım. Salam geniş ahşap bir masanın arkasına oturdu.

"Abdus, araştırmamda ne izlemem gerektiğine dair bir önerin var mı?" diye sordum.

Kahverengi gözleriyle bana yoğun bir şekilde baktı: "John, Julian Schwinger'ın sigma modeli hakkındaki makalesini oku. Belki parçacıkların kütlelerini nasıl aldıklarını açıklayabilirsin."

Masasının önündeki rahat koltuğa oturdum ve gözlerimi kaçırarak bu teklifi düşündüm.

"Parçacıklar kütlelerini nasıl alırlar?" diye sordum. "Bu neden önemli?"

Salam homurdandı ve "Tabii ki önemli. Zayıf etkileşimlerde ayar değişmezliği yoksa ve W parçacığının can sıkıcı gerekli kütlesi hakkında endişelenmemiz gerekiyorsa zayıf etkileşimleri ve beta bozunmasını nasıl açıklayacağız?"[2] dedi.

[2] 49 Parçacık fiziğinde bir kuvvetin erimi parçacığın kütlesi tarafından belirlenir. Klasik elektromanyetizma için, fotonun kütlesiz olması, elektromanyetik kuvvetin sonsuz menzile sahip olmasına neden olur. Öte yandan parçacıkların radyoaktif bozunmasını yöneten

"Demek ki deneysel olarak bulunamayan bu kütleli W'nin yeniden boyutlandırma edilebilir bir kurama yol açmadığını, dolayısıyla zayıf etkileşim hesaplamalarının sonsuz ve anlamsız hale geldiğini söylüyorsunuz. Kuram aslında yeniden boyutlandırılamaz mı?"

Salam, "Evet. Bu kadar. İşte sorun bu."

"Bu sigma parçacığının –skaler parçacığın– sonsuzluk sorununu bir şekilde çözdüğünü mü söylüyorsunuz? Bunun nasıl olabileceğini anlamıyorum."

Salam kaşlarını çattı ve "Pekâlâ ben de bunun nasıl olduğunu anlamıyorum, ama belki burada sorunun nasıl çözüleceğine dair bir ipucu vardır" dedi.

Sorun, elbette, W bozonuna bir kütlenin nasıl verileceği ve buna rağmen zayıf etkileşimler kuramında hesaplamaların sonlu tutulacağıydı.

Imperial College'a geldiğimden kısa bir süre sonra İngiliz kuramsal fizikçi Peter Higgs, doktora sonrası araştırmacı olarak gruba katıldı ve Salam'ın ofisinin yanındaki akıllıca döşenmiş ofisimi paylaştı. O sırada Salam'a bir araştırma projesi olarak ne üzerinde çalışması gerektiğini sorduğunu ve Salam'ın "Peter, git ve Julian Schwinger'ın sigma modeli hakkındaki makalesini oku" dediğini tahmin ettim. "Belki de parçacıkların kütlelerini nasıl aldıklarıyla ilgili bir şeydir."

Bu arada Schwinger'in makalesini okudum ama bundan heyecan duymadım; zayıf etkileşim hesaplamalarında sonsuzluklardan kurtulma sorununu nasıl çözebileceğini göremedim. Bu skaler sigma parçacığının kendi kendine bağlanmasının veya parçacığın kendisiyle etkileşiminin, skaler sigma alanının W bozonuyla birleşmesi yoluyla diğer parçacıklara nasıl kütle verebileceğini görebiliyordum ama bu beni şaşırtmadı. Özellikle beni, vurucu şekilde ikna edici değildi ve başka araştırmalara geçtim.

---

zayıf etkileşimlerde, kuvvet kısa menzilli olmalıdır, bu nedenle zayıf kuvveti taşıyan ara vektör bozonunun, W'nin bir kütlesi olması gerektiğini biliyoruz. "Sınırlı" kütlesiz gluon bir istisnadır.

SONSUZLUKLARI YOK ETMEK

Feynman, Tomanaga ve Schwinger tarafından 1949/1950'de elde edilen foton ve elektronların QED kuramının muazzam başarısı, onların yeniden boyutlandırılabilir kuantum alan kuramı geliştirmelerine çok şey borçludur. Bu kuramda, saçılma genliklerinin hesaplanmasında meydana gelen anlamsız matematiksel sonsuzluklar, elektronun "çıplak" kütlesi –etkileşmeyen elektronun kütlesi– ve elektronun kendi elektromanyetik alanıyla etkileşiminden kaynaklanan etkin öz kütleyle iptal edilebilir. Elektronun çıplak kütlesi ve etkileşim kütlesi hesaplamalarda sonsuzdur, ancak bu sonsuzluklar birbirini götürür ve elektronun sonlu gözlenen kütlesiyle sonuçlanır. Çelişkili olarak, saçılma genliklerinin ilk hesaplamaları sonsuz ve anlamsız olsa da, elektronların ve fotonların etkileşimlerini içeren yeniden boyutlandırılabilir kuantum alan kuramı kullanılarak elde edilen nihai saçılma genlikleri sonluydu ve bunların hesaplamalarında kullanılan enerjideki herhangi bir eşik değerinden bağımsızdı. Fizikçiler, geçici hesaplamaları sonlu yapmak için bu sonsuz enerji eşiğini keyfi olarak seçtiler. Ancak, yeniden boyutlandırma gerçekleştirildikten sonraki son hesaplama, fiziksel olarak bu tür keyfi olarak seçilmiş bir eşik enerjisine bağlı olmamalıdır. Freeman Dyson, 1949 ve 1952'de yayımlanan ünlü makalelerinde, yeniden boyutlandırılabilir bir kuramın aslında sonunda keyfi eşik enerjisinden bağımsız olduğunu gösterdi.[3] Ancak hatırlayacağımız gibi, QED'nin icadının ana kahramanlarından biri olan Paul Dirac, bu yeniden boyutlandırma yöntemini asla kabul etmedi.

Kuramcıların bugün uyguladığı şekliyle parçacık fiziği büyük ölçüde, yoğun madde fiziği araştırmalarında da kullanılan yeniden boyutlandırma kuramının daha modern ge-

[3] FJ Dyson, "The Radiation Theories of Tomonaga, Schwinger and Feynman", *Physical Review*, 75, 486-502 (1949); ve "Divergences of Perturbation Theory in Quantum Electrodynamics," *Physical Review*, 85, 631-632 (1952).

lişmelerine dayanır. Bu gelişmeler QED'nin formülasyonunda önemli bir rol oynamaktadır. QED'nin başarısı öncelikle fotonun kütlesiz olmasına bağlıdır, bu da kuramın yeniden boyutlandırılabilir olmasını sağlar. Bu gerçek, Maxwell'in klasik alan denklemlerinin kuantumlanmasına dayanan QED'nin ayar değişmez olduğunu kanıtlamaya izin verir. Ayar değişmezliği özelliği, kuramın fiziksel tutarlılığı için çok önemlidir. Örneğin doğrudan elektron ve madde alanlarının elektrik yük akımının korunmasına yol açar.

QED'nin ayar değişmezliği, 1950'lerin başlarında John Ward tarafından keşfedilen ve *Ward eşitlikleri* adı verilen bir dizi matematiksel özdeşliğe yol açar. Bu özdeşlikler, fotonların ve elektronların saçılma olasılıklarının hiçbir zaman yüzde 100'den fazla olmamasını garanti eder. Yang ve Mills'in Maxwell denklemlerinin abelci olmayan ayar kuramı uzantısının ilk versiyonunda yüklü vektör alanı kütlesizdi, bu da kuramın bir ayar değişmezliğine sahip olduğunu ve kuramın yeniden boyutlandırılabilir hale getirilebileceğini garanti ediyordu. Ayrıca, parçacıkların saçılma olasılığının asla yüzde 100'ü geçmediğini garanti eden, sözde *S-matrisi için üniterlik koşulunu* yerine getirdi. Bununla birlikte, Pauli'nin, doğada kütlesiz yüklü vektör mezonlarının var olduğu şeklindeki orijinal Yang-Mills varsayımına itirazını hatırlıyoruz. Bilindiği gibi doğada bu tür parçacıklar yoktur.

Yang-Mills kuramı ve yeniden boyutlandırılabilirlikle ilgili hemen ciddi bir sorun ortaya çıkıyor: tüm kuvvet taşıyan bozonlar kütlesiz değildir! Bu sorun, kuantum alan kuramındaki ayar değişmezliğinin temel özelliği için ne yapar? Hemen cevap verelim; ayar değişmezliğini yok etmesiyle sonuçlanır. Bu nedenle kuram artık yeniden boyutlandırılabilir değildir ve artık saçılma olasılıklarını korumaz. Bu problem Yang ve Mills tarafından zaten biliniyordu, 1950'lerden beri Schwinger ve Lee ve de Yang'la başlayan bir araştırma konusu oldu. Günümüze kadar birçok fizikçi tarafından da takip edilmeye devam ediyor. Bu problemin olası bir çözümü, kendiliğinden simetri kırılması ve bir Higgs parçacığını içeren

standart model elektro-zayıf etkileşimlerin geliştirilmesi olmuştur. En düşük enerji durumu SU(2) × U(1) temel grup simetrisini kendiliğinden kıran ve standart model elektro-zayıf kuramında W ve Z bozonlarının farklı kütlelerinin ortaya çıkmasına izin veren bir Higgs bozonu fikri ve bu sırada fotonu da kütlesiz olarak tutmak, bu problemin en popüler çözümü olmuştur.

Neyse ki, 1973'te Gell-Mann, Fritzsch ve Leutwyler tarafından sekiz renkli gluonla abelci olmayan SU(3) kuantum alan kuramı kullanılarak geliştirilen ve parçacıkların *yeğin* etkileşimleri kuramı olan, QCD, büyük kütleli kuvvet taşıyıcı bozonlara sahip olmanın sonuçlarından zarar görmez. QCD; parçacıkların *yeğin* etkileşimleri kuramı olarak betimlenir, 8 renkli gluonun kütlesiz olması sayesinde bunu başarmıştır. Bu yeğin etkileşim kuramının genişletilmiş bir ayar değişmezliği biçimine sahip olduğu ve içindeki Ward eşitliklerinin sahip olduğu genelleştirmeler gösterilebilir durumdadır. Ward eşitlikleri, Yasushi Takahashi, Andrei A. Slavnov ve John C. Taylor tarafından genelleştirilmiştir. Yeğin etkileşimler için abelci olmayan ayar kuramının yeniden boyutlandırılabilirliğini kanıtlamaya dahil olan teknik sorunlar bir şekilde zorludur. Feynman, kütleçekimin kütlesiz kuvvet taşıyıcıları olan gravitonlarla birlikte, abelci olmayan ayar kuramının bir biçimi olan kuantum kütleçekim üzerine yaptığı araştırmasında, yeniden boyutlandırılabilirliği garanti etmek için QCD hesaplamalarına bazı "hayalet" alanların dahil edilmesi gerektiğini keşfetti. Rus kuramsal fizikçiler Ludvig Faddeev ve Victor Popov, saçılma genliklerinin hesaplanmasında, aslında fiziksel parçacıklar olarak görünmeyen bu hayalet alanların matematiğini geliştirmede önemli bir rol oynadılar. Carlo Maria Becchi, Alain Rouet ve Raymond Stora tarafından ve bağımsız olarak Igor Tyutin (BRST olarak adlandırılır) tarafından yeni bir ayar simetrisi keşfedildi ve bu hayalet alanların yeniden boyutlandırılabilir olmayan hesaplamalara nasıl girdiğinin daha derin anlamını netleştirdi.

Öte yandan *zayıf* etkileşimlerin yeniden boyutlandırılabilir bir kuantum alan kuramına sahip olmasının imkânsızlığı sorunu, 1950'lerin sonlarında ve 1960'ların başlarında ciddi bir problemdi. Zayıf etkileşimi kısa menzilli bir kuvvet yapmak için gerekli olan, büyük kütleli bir ara yüklü vektör bozonu W, yeniden boyutlandırılabilir ve sonlu bir zayıf etkileşim kuramına sahip olma olasılığını ortadan kaldırıyordu. W çok büyük kütleli olduğu için, kuramın temel ayar değişmezliği kayboluyordu. 1961'de Sheldon Glashow tarafından yayımlanan,[4] zayıf etkileşimlerde elektriksel olarak nötr akımlara duyulan ihtiyacı ortaya koyduğu, Z adlı nötr bir vektör parçacığının değiş tokuşunun aracılık ettiği çığır açıcı bir makalede, W'nin ve Z'nin kütlelerini zayıf etkileşim modeline "elle" koydu. Bunun W ve Z parçacıklarını ve elektronlar ile muonlar gibi leptonları içeren sonlu saçılma genlikleri elde etme olasılığını mahvedeceğinin farkındaydı. İlk, erken evren döneminde kütlesiz parçacıklarla zayıf etkileşimlerin başladığı fikrine inanılırsa, o zaman kuramın bu ilk evresi, tıpkı kütlesiz fotonlu QED gibi; ayar değişmez, yeniden boyutlandırılabilir ve sonlu olabilirdi. Ama o zaman, W ve Z'nin kütleleri ve fermiyonlar nereden gelecekti?

KATI-HAL FİZİĞİNDEN PARÇACIK FİZİĞİNE

1960'ların başlarında, daha fazla kuramsal fizikçi, kuantum kuramındaki simetri kırılmasının doğası hakkında spekülasyon yapmaya başladı. Daha önce, Almanya'daki Werner Heisenberg, diğerlerinin yanı sıra, ferromanyetizmayı açıklamanın yeni ve ilginç bir yolunu bulmuştu. Demir gibi bir metaldeki atomları kuzey ve güney kutbu olan küçük çubuk mıknatıslar olarak gördü. Metalin sıcaklığı *Curie sıcaklığı* olarak adlandırılan kritik bir noktanın üzerinde olduğunda küçük çubuk mıknatıslar rastgele yönlendirilir ve sistem O(3) grubunun dönüşleri altında değişmezdi. Kritik Curie

[4] S.L. Glascow, "Partial-symmetries of Weak Interactions," *Nuclear Physics*, 22, 579–588 (1961).

sıcaklığının altında, küçük çubuk mıknatıslar kendilerini belirli bir yönde hizalarlar ve O(3)'ün dönme simetrisi kendiliğinden kırılır.

Bir zamanlar Cambridge Trinity College'da meslektaşım olan bir kuramcı Jeffrey Goldstone, katı hal fiziğindeki bu kendiliğinden simetri kırılması olgusunun göreli kuantum alan kuramına aktarılabileceğini kuramlaştırdı. 1961'de[5] bir makale yayımladı ve burada, Schwinger'in sigma alanı gibi skaler bir spin-0 alanını içeren belirli bir kuantum alan kuramı modeli içinde, bir matematiksel grubun kendiliğinden simetri kırılmasını başlatabileceğimizi gösterdi. Bu simetri kırılması her zaman kütlesiz, skaler bir spin-0 parçacığı öngördü. Benzer bir sonuç 1960'ta Yoichiro Nambu ve 1961'de Nambu ve Giovanni Jonah-Lasinio tarafından süperiletkenlerin doğasını araştırdıklarında elde edilmişti. Metaller o kadar düşük bir sıcaklığa soğutuldu ki, metal boyunca hareket eden elektronların elektriksel direnci sıfıra yaklaşıyordu. Yani elektronlar metal içinde serbestçe hareket eder hale gelmişti. Nambu, malzemenin süperiletken doğasına, yüksek sıcaklıklarda bir simetrinin kendiliğinden simetri kırılmasından kaynaklanıyorsa bunun kütlesiz bir spin-0 parçacığının varlığını öngördüğünü keşfetti. Bu fikirler *Goldstone* teoremi veya daha sonra *Nambu-Goldstone teoremi* olarak bilinir hale geldi.

Ancak, kuantum alan kuramındaki bu fenomene başvurur ve gerçeklikle ilişkilendirmeye çalışırsanız, o zaman hiç gözlemlenmemiş kütlesiz bir parçacığın varlığını öngörme sorunuyla karşılaşırsınız. O zamanlar bilinen tek kütlesiz parçacıklar, spini 0 değil, spini 1 olan foton ve spini ½ olan nötrinoydu. Bu durum kuramsal parçacık fiziğinde yaklaşık üç yıl süren bir açmaza yol açtı. Harvard'ı ziyaret ettiğinde Goldstone'la tanışan Salam ve Weinberg, bu sorunu araştırıp çözmeye çalıştılar, ancak başarılı olamadılar.[6] Bir başka

[5] J. Goldstone, "Field Theories with Superconductor Solutions," Nuovo Cimento,5. J. Goldstone, Nuovo Cimento, 19, 154-164 (1961).

J. Goldstone, A. Salam ve S. Weinberg, "Broken Symmetries," *Physical Review,* 127, 965-970 (1962).

kuramcı, Cambridge Trinity College'dan eski meslektaşım Walter Gilbert, parçacık fiziğinde kendiliğinden simetri kırılmasının fiziksel olarak kabul edilemeyeceğini iddia eden bir makale yayımladı.[7] Bu açmazla, zayıf etkileşimlerdeki W ve Z bozonlarının kütlelerini nasıl aldıklarını açıklamaya başlamak bile mümkün değildi. Çünkü böyle bir mekanizmaya bu var olmayan, kütlesiz skaler parçacıklar eşlik edecekti.

Bu arada, katı hal fiziğinde, Princeton'dan bir kuramcı olan Philip Anderson, malzemelerdeki süperiletkenliği açıklamak için kendiliğinden simetri kırılmasını başlattığınızda, fotonun kütleli hale geldiğini keşfetti. Kendiliğinden simetri kırılma mekanizması, Nambu-Goldstone kuramının önerdiği sinir bozucu kütlesiz skaler parçacıkları üretmeden, foton için "etkin bir kütle" oluşturmuştu. Bu nasıl ortaya çıkmıştı?

1963'te Anderson, fotonun kütle kazanmasının nedeninin, U(1) abelci simetrisinin kendiliğinden kırılmasının, kütlesiz foton Nambu-Goldstone skaler alan bozonunu "yemesi" olduğunu açıklayan bir makale[8] yayımladı. Anderson'ın makalesinde, Julian Schwinger tarafından 1962'de *Physical Review*'da yayımlanan[9] "Ayar Değişmezliği ve Kütle" isimli makalesine atıfta bulunur. Schwinger makalesinde; ayar değişmezliğinin önemini ve temel parçacıkların kütle kazanmasının kökenlerini tartışmaya açmaktadır. Anderson'ın makalesinin sonunda göreli Yang-Mills ayar bozonlarını ve Goldstone bozonlarını göreli bir bağlamda tartışması da dikkate değerdir. Makaleyi kehanet gibi bir ifadeyle bitiriyor: "O halde, Goldstone'un sıfır kütle zorluğunun ciddi bir zorluk olmadığı sonucuna varıyoruz, çünkü muhtemelen aynı bir Yang-Mills sıfır kütle problemine karşı onu iptal

---

[7] W. Gilbert, "Broken Symmetries and Massless Particles," *Physical Review Letters*, 12, 713–714 (1964). W. Gilbert, "Kırık Simetriler ve Kütlesiz Parçacıklar", *Physical Review Letters*.
P.W. Anderson, "Plasmons, Gauge Invariance and Mass," *Physical Review*, 130, 439-442 (1963).
J. Schwinger, "Gauge Invariance and Mass", *Physical Review*, 125, 397-398 (1962).]

edebiliriz." Anderson'ın göreli alan kuramının dilini kullandığını görüyoruz. Bu kullanımın anlamı bize; Anderson'ın, Higgs mekanizması adı verilen kuramın önemini, Brout ve Englert,[10] Higgs,[11] Guralnik, Hagen ve Kibble tarafından *Physical Review Letters* adlı dergide makalelerinin yayımlanmasından, bir yıl önce kavradığını gösterir.[12] Bu nedenle Higgs mekanizmasını keşfedenler arasında Philip Anderson'ın adının da yer alması belki de daha adaletli olacaktır. Bununla birlikte Anderson'ın çalışması, göreli olmayan katı hal fiziği bağlamındaydı. Parçacık fizikçileri genellikle katı hal fiziğini görmezden gelmişti. Hatta Gell-Mann'ın buna "yetersiz durum fiziği" dediği biliniyordu.

Fizikçilerin süperiletkenin içindeki fotonun aslında ağır bir fotona dönüştüğünü nasıl fark ettikleri uzun bir hikâyedir. Süperiletkenlik olgusu ilk olarak 1908'de Hollandalı fizikçi Heike Kamerlingh Onnes tarafından keşfedildi. Elektrik akımlarına karşı bir miktar direnci olan normal elektrik iletken malzemelerin aksine, "süper iletkenler" 0 Kelvine yakın derecelere soğutulduğunda (örneğin –321°F veya 77 K sıcaklıkta sıvı nitrojen) elektrik akımlarına karşı dirençleri kalmaz. Çok düşük sıcaklıklarda elektronların ısı veya enerji kaybetmeden malzemenin içinden geçebileceği, her süper iletken malzemeye göre değişen kritik bir değer vardır. Bu aşırı soğutulmuş malzemelerdeki atomlar, elektronların kafes içindeki atomlar arasında serbestçe hareket ettiği bir kafes yapısı oluşturur. Metaller ısı ve elektriği bu şekilde iletir. Metal soğudukça iki elektron arasındaki itme azalır ve aslında süperiletkenliğin kuramsal bir araştırmasını yapan kuramsal fizikçi Leon Cooper'ın adını taşıyan *Cooper çiftleri*ni oluşturmak üzere birbirlerine bağlanırlar. 1957'de John Bar-

---

[10] F. Englert and R. Brout, "Broken Symmetry and the Mass of Gauge Vector Mesons," Physical Review Letters, 13, 321–323 (1964).
P.W. Higgs, "Broken Symmetries and the Masses of Gauge Bozons," *Physical Review Letters*, 13, 508-509 (1964).
G.S. Guralnik, C.R. Hagen ve T.W.B. Kibble, "Global Conservation Laws and Massless Particles," *Physical Review Letters*, 13, 585–587 (1964).

deen, Cooper ve John Robert Schrief, Cooper elektron çiftleri aracılığıyla metallerdeki süperiletkenliğin kökenini açıkladıkları bir makale[13] yayımladı. Elektronların metal içinde direnç göstermeden serbestçe hareket etmelerini sağlayan, elektron çiftlerinin bileşik bir "yoğuşmasını" oluşturan Cooper çiftleridir.

Süperiletkenlerle ilişkili bir diğer önemli fiziksel olay, Alman fizikçiler Walther Meissner ve Robert Ochsenfeld[14] tarafından 1933'te süper iletken kalay ve kurşun örneklerinin dışındaki manyetik alanı ölçülerek keşfedilen *Meissner etkisi*dir. Süper iletken metallerin manyetik alanları dışarı attığını keşfettiler. Metaller, manyetik alanları uzayda sanki uzağa ittiriyordu. Bu deneyler süper iletkenlerin, elektrik direncini sıfıra indirmenin ötesinde benzersiz bir fiziksel özelliğe sahip olduğunu gösterdi.

Süperiletken kuramının tarihi uzun bir geçmişe sahiptir. Vitaly Ginzberg ve Lev Landau tarafından yapılan ve ilk olarak 1950'de, Bardeen, Cooper ve Schrieffer tarafından ilgili makalenin yayımlanmasından yedi yıl önce yayımlanan orijinal çalışma, süperiletkenlerin nasıl çalıştığına dair etkili bir kuram sağladı.[15] Ginzberg-Landau kuramında, metalin kritik bir eşikten geçerek *faz dönüşümü* yaptığı sıcaklığa "düzen parametresi" denir. Geçiş sıcaklığına ulaşıldığında ve sistem en düşük enerji durumundayken –temel durum– elektron (Cooper) yoğuşmaları oluşur ve bir süperakışkan ortaya çıkar. Ginzberg-Landau etkisi, bir elektromanyetik alanın varlığında bir dalga fonksiyonuyla tanımlanır. Dalga fonksiyonu, elektromanyetik alan için Maxwell denklemle-

---

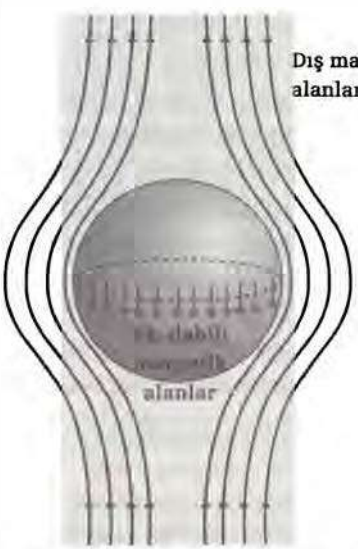
[13] J. Bardeen, L.N. Cooper ve J.R. Schrieffer, "Theory of Superconductivity", *Physical Review*, 108, 1175-1204 (1957)

W. Meissner ve R. Ochsenfeld, "Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit," Naturwissenschaffen, 21 (44), 787-788 (1933). W. Meissner and R. Ochsenfeld, "Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit,"

V.L. Ginzburg ve L.D. Landau, Zhurnal Eksperimental'noi ve Teoreticheskoi Fiziki, 20, 1064 (1950). İngilizce çeviri: L.D. Landau, *Collected Papers* (Oxford: Pergamon Yayınları, (1965).

rinin ayar değişmezliğiyle ilişkili karakteristik özelliklere sahiptir.

Şimdi Meissner etkisi devreye giriyor. Süperiletkenin yüzeyinden *"perdeleme mesafesi"* olarak adlandırılan belirli bir mesafede, harici bir manyetik alan metale nüfuz edemez ve iç manyetik alan süperiletkenin içinden makroskopik olarak dışarı atılır. Bu etki, sıfır olmayan bir foton "etkin" kütlesiyle açıklanabilir. Gerçekten de elektromanyetik kuvveti taşıyan fotonun perdeleme mesafesi ile etkin kütlesi arasında bir bağlantı vardır. Bazı fiziksel birimlerde, fotonun kütlesi perdeleme mesafesiyle ters orantılıdır; foton kütlesi arttığında mesafe küçülür. Perdeleme mesafesinin fiziksel kökeni, yüklü parçacıklardan oluşan bir alana bir manyetik alan uygulandığında ne olduğu gözlemlenerek açıklanabilir. Manyetik alan; yüklü parçacıkları hızlandırarak uygulanan manyetik alanı iptal etme veya tarama eğiliminde olan akımlara neden olur.



Şekil 5.1 Meissner etkisi. Bu çizim, Meissner etkisinin bir sonucu olarak manyetik alanın nasıl perdelendiğini gösterir. © Dwi Pranantо, Fizik Bölümü, Tohoku Üniversitesi. Kaynak: Simpliphy.wordpress.com

Bu Meissner etkisidir; süperiletkenin içinden manyetik akıyı dışarı doğru iter (Şekil 5.1). Perdeleme akımları, süperiletken içinde, malzemenin dış sınırından itibaren perdeleme mesafesi kadar bir mesafe boyunca kurulur. Bu akımlar, süperiletkenin iç kısmında uygulanan manyetik akıyı tam olarak iptal eder ve perdeleme uzunluğunun boyutu, yaklaşık olarak bir metrenin 10^{-8}'ine kadar ölçülebilir.

Meissner etkisi, bir süperiletken içinde kütleli bir fotonun üretilmesiyle ilgili temel fiziğin çoğunu gösterebilir. Elektromanyetik alana ek olarak Ginzberg-Landau dalga alanı da önemli bir rol oynar. Kütlesiz foton ile kütleli foton arasındaki "kesikli" geçişi, yani iki serbestlik derecesinden üç serbestlik derecesine geçişi açıklar. Serbestlik dereceleri, iki enine ve bir boyuna serbestlik derecesidir. Kütlesiz bir foton, yalnızca fotonun yayılma ekseni boyunca enine yönlerde yayılan elektromanyetik dalgalar tarafından tanımlanır. Kütleli bir foton, ek bir serbestlik derecesine, yani yayılma ekseni boyunca yönlendirilmiş boyuna fotona sahip olacaktır. Şimdi, kendiliğinden simetriyi bozan Higgs mekanizmasının neden süper iletkenlerin yoğun madde fiziğinden "ödünç alındığını" anlamaya yakınız.

STANDART MODEL İÇİNDE HIGGS BOZONU

1964'te altı fizikçi, katı hal fiziğindeki süperiletkenlik ve feromanyetizma olaylarının göreli parçacık fiziğine uygulanıp uygulanamayacağını düşünüyordu. Hâlâ kütlesiz Goldstone bozonu problemini ve zayıf etkileşimlerin vektör bozonlarına, W ve Z parçacıklarına nasıl kütle vereceklerini çözmeye çalışıyorlardı. Belçika'da Robert Brout ve Françoise Englert, Birleşik Krallık'ta Peter Higgs ve yine Birleşik Krallık'ta Carl Hagen, Gerald Guralnik ile ABD'de Tom Kibble, Philip Anderson tarafından süper iletken malzemelerde incelenen kütlesiz bir foton ayar alanının etkileşimini, göreli alan kuramı bağlamında bir skaler alanla beraber ele aldılar. Böylelikle, parçacık fiziğindeki ayar alanının skaler alanla etkileşimi

sayesinde, rahatsız edici kütlesiz Goldstone bozonları, vektör ayar parçacığı tarafından "yenildi" ve ayar alanı parçacığının kütleli hale gelmesine izin veren üçüncü bir serbestlik derecesi üretti. Bu durum, süperiletkenler olgusu ve kütlesiz fotonun madde alanı veya Ginzberg-Landau dalga fonksiyonuyla etkileşime girdiğinde etkili bir kütle kazandığı Meissner etkisine benzer.

Peter Higgs, Avrupa'daki bir dergiye bir makale gönderdi ve derginin CERN'deki editörü, makalenin parçacık fiziği için fiziksel bir önemi olduğunu düşünmediği için makaleyi reddetti; ona göre bu sadece matematiksel bir spekülasyondu. Higgs makalesinde, U(1) elektromanyetik ayar alanına sahip bir fotonun, skaler bir alanla etkileşime girdiği basit, zarif bir model sunmuştu. Model, bu fiziksel sistemle ilişkili boşluğun ayar simetrisini kendiliğinden kırarak, U(1) ayar alanı –foton– için bir kütle yaratıyordu.

Makalesi reddedildikten sonra Higgs makalesine, keşfettiği mekanizmanın skaler bir alanla ilişkili 0 spinli yeni bir parçacığın varlığını gerektirdiğini öne süren bir bölüm ekledi. Bu sefer, *Physics Letters* editörü, hızlandırıcılar bu tahmin edilen parçacığı saptayabilecekleri için, çalışmanın fiziksel önemini gördü.[16] Diğer beş fizikçi, Higgs'in yaptığı gibi, ayar değişmezliğinin kendiliğinden kırılmasını tartıştı; bununla birlikte, yalnızca dolaylı olarak, ayar bozonları için kütleler üretmek üzere mekanizmaya yeni bir parçacığın eşlik etmesi gerektiğini öne sürdüler. Daha sonra Higgs, Brout ve Englert ve Hagen, Guralnik ve Kibble üçlüsü birkaç hafta içinde Birleşik Devletler'de *Physical Review Letters*'da makaleler yayımladılar. Hagen, Guralnik ve Kibble'ın mektubu, Brout ve Englert'in ve Higgs'in daha önce yayımlanmış makalelerinden alıntı yaptı. Son röportajlarda Guralnik, kendisinin ve çalışma arkadaşlarının diğer makalelere atıfta bulunmalarının bir hata olduğunu, çünkü bu onların konuya

[16] P. Higgs, "Broken Symmetries, Massless Particles and Gauge Fields," *Physics Letters*, 12, 132-133 (1964).

daha sonra vardıklarını ima ettiğini, oysa aslında bu fikirleri bağımsız olarak bulduklarını ve sadece diğer makaleleri çalıştıklarını, öğrendiklerini iddia etti; tabii kendi müsvedde kağıtlarını hazırladıktan sonra. Higgs aslında ayar bozonlarına kütle sağlamaktan sorumlu bir parçacığın varlığını tahmin ettiğinden, bu tahmin edilen bozon daha sonra Higgs parçacığı (ya da Higgs bozonu) olarak bilinir hale geldi, ancak son zamanlarda Higgs mekanizması terimi, inanılmaz derecede hantal ama tarihsel olarak daha doğru bir terim olan *Brout-Englert-Higgs-Hagen-Guralnik-Kibble* (BEHHGK; "beck" olarak telaffuz edilir) *mekanizması* olarak değiştirildi. Anderson tarafından yayımlanan çığır açıcı makalenin hakkını vermek için, bu mekanizma bile bazen ABEHHGK mekanizması olarak adlandırılır!

1966'da Higgs, Amerika Birleşik Devletleri'ni ziyaret ediyordu ve kendiliğinden simetri kırılması yoluyla ayar parçacıkları için kütle üretme mekanizması hakkında bir konuşma yapmak üzere Harvard'a davet edildi. Sydney Coleman da dahil olmak üzere izleyicilerin bazılarının tümden bu fikri reddettikleri anlaşılıyordu. Ancak seyirciler arasında bulunan Steven Weinberg, o sırada elektromanyetizma ile zayıf etkileşimleri nasıl birleştireceğini ve Glashow'un 1961 modelinin W ve Z bozonlarına nasıl uyacağını anlamaya çalışmakla aktif olarak meşguldü. Görünüşe göre Harvard ofisine giderken, daha sonra açıklayacağı gibi, Higgs'in dersinde açıklanan kendiliğinden simetri kırılması mekanizmasını, leptonları içeren zayıf kuvvet ve elektromanyetizmanın bir birleşme şemasına dahil edebileceğini düşündü. Leptonlarla etkileşen bir skaler alanın sıfırdan farklı boşluk beklentisi değerine sahip, Glashow tarafından orijinal olarak önerilen ayar simetrisinin W ve Z bozonlarının kütle kazanacağı ve fotonun kütlesiz kalacağı şekilde kendiliğinden kırabildiği kütlesiz bir model buldu.

Elektro-zayıf modele yönelik bu ilk girişimde Weinberg, modelini oluşturmayı kolaylaştırmak için kuarkları yok sayarak yalnızca elektron ve muon gibi leptonları düşündü. Ay-

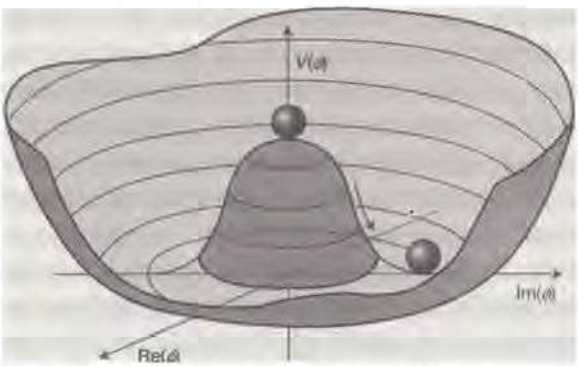
rıca şemaya, Z bozonunu fotona dönüştürmesine (ve bunun tersini yapmasına) izin veren bir sabiti de (Weinberg açısı) dahil etti. Bu, nötr bir vektör bozonunun, hem kütlesiz bir foton hem de kütleli bir Z parçacığı kılığına girdiği anlamına geliyordu. Weinberg, bu sabitin belirli bir değerinde W ve Z bozonlarının kütleleri için yaklaşık bir tahminde bulunabildi, bu da ona o zaman nötr akımın yüklü zayıf akıma oranıyla deneysel olarak kabul edilen bir sonuç elde etmesine izin verdi. Bu yüklü zayıf akım CERN'de gözlemlenmişti. Weinberg'in bu konudaki çığır açıcı makalesi[17] şimdi standart parçacık fiziği modeli dediğimiz şeyin temellerini sağladı.

Weinberg'in temel fikirlerinden biri, Higgs alanını karmaşık sayılarla ifade edilen bir izospin ikilisi yapmaktı. Bu ikili izospin uzayında alanın yüklü ve nötr bir bileşeni olduğu anlamına gelir. Bu izospin ikilisi, W ve Z gibi ayar alanları ve kuarklar ve leptonlarla etkileşime girdiğinde –kendiliğinden simetri kırılması yoluyla– temel parçacıkların kütlelerini elde etmesine izin verdi.

Standart modelin geliştirilmesindeki bir diğer önemli bileşen, Lagrange denklemine veya eylem denklemine dahil edilen skaler alan için potansiyel enerjinin seçimiydi. Bu potansiyel öyleydi ki, skaler Higgs alanı kaybolduğunda sıfırdan farklı bir değere sahipti. Potansiyelin bu değeri, kararsız bir değer olan sahte boşluk denilen şeydir. Bir Meksika şapkası hayal edin (Şekil 5.2). Bir top, şapkanın tepesinden ya da sahte boşluktan, Higgs alanının potansiyel enerjisinin sıfır olduğu, şapkanın altındaki Higgs alanının sıfırdan farklı bir değerine yuvarlanır. Bu *gerçek boşluk* olarak betimlenir. Kendinizi sahte boşlukta ya da Meksika şapkasının tepesinde otururken ve sonra şapkayı dikey eksen etrafında döndürdüğünü hayal ederseniz kendi bakış açınızdan şapka simetrik şeklini korur. Öte yandan kendinizi şapka kenarının dibinde otururken hayal ederseniz –skaler alanın sıfırdan

[17] S. Weinberg, "A Model of Leptons," ["leptonların, bir Modeli"] *Physical Review Letters*, 19, 1264 (1967).

farklı sabit bir değer olduğu enerji temel durumunda– o zaman, dönen şapkaya göre etrafınıza baktığınızda, artık bir dönme simetrisi sağlamamaktadır. Sahte boşluktan gerçek boşluğa geçerek, Meksika şapka potansiyeliyle ilişkili grubun simetrisini kendiliğinden kırılmış olur.



Şekil 5.2 Top başlangıçta sahte boşluktayken Meksika şapkası potansiyeli. Kaynak: Luis Álvarez-Gaumé ve John Ellis, "Eyes on a Prize Particle," Nature Physics (Nature Publishing Group, 21 Aralık 2010).

Fizikçiler, skaler alan için potansiyel enerjinin biçimini oldukça özel bir amaca özgü bir şekilde seçerler. Kuramın yeniden boyutlandırılabilirliğini garanti etmek için; potansiyel enerjideki skaler alanın kendisiyle bağlanması skaler alanın dördüncü kuvveti kadar olmalıdır ve bilinmeyen bir bağlanma sabiti olan lambda (λ) etkileşimin şiddetini belirler. Skaler alanın, kendi kendisiye bağlanmasının mertebesi dörtten büyükse kuram yeniden boyutlandırılamaz. Meksika şapka resmi; skaler alanın kendisiye bağlanması için potansiyel enerjinin özel bir formunun seçilmesi koşuluyla, Higgs'in kendiliğinden simetri kırılma mekanizmasını basit ve genel bir şekilde tanımlar.

Weinberg, elektro-zayıf ayar kuramına kendiliğinden simetri kırılmasını dahil etmek üzerinde çalışırken, hem Imperial College'da hem de Trieste'deki Uluslararası Kuramsal

Fizik Merkezinde Abdus Salam da aynı problem üzerinde aynı teknikleri kullanarak bağımsız olarak çalışıyordu. 1967 Sonbaharında lisansüstü öğrencilere verdiği bir dizi yayımlanmamış derste Salam, Weinberg'inkine çok benzer bir model geliştirdi. Ne yazık ki bu derslerin yazılı bir kaydı yok. Mayıs 1968'de Göteborg'da Nobel Vakfı sponsorluğunda parçacık fiziği üzerine düzenlenen bir sempozyumda Salam, önceki sonbaharda Imperial College'daki derslerine dayandığını iddia ettiği bir konuşma yaptı. Weinberg'in geçen yıl yayımlanan modeline benzer şekilde sadece leptonları içeren bir model geliştiren bu ders, Nobel Sempozyumu tarafından sınırlı tirajlı bir monografta yayımlandı.[18] Glashow'un zayıf etkileşimler üzerine 1961 tarihli makalesinde, nötrinoların ve elektronların nötr bir zayıf akım yoluyla yük değişimi olmaksızın diğer parçacıkları saçabileceklerini öngörmüştü. Bu akım, nötr vektör bozonu Z ile ilişkilendirildi. 1967'de Weinberg, nötr Z bozonunun kütlesini tahmin etmek için Glashow'un kuramını kullandı. Daha sonra 1979'da Stanford'da gözlemlenen kutuplanmış elektron saçılımının parite ihlalini öngördü. Salam'ın Nobel Sempozyumundaki konuşmasında, Weinberg tarafından tahmin edilen W ve Z kütleleri arasındaki ilişkiden bahsetmedi. Bu nedenle zayıf, yüklü ve nötr akımlar arasındaki şiddet farkını belirleyememiştir. Glashow, Weinberg ve Salam, 1979'da elektro-zayıf birleşmeyi geliştirme çalışmaları nedeniyle Nobel Ödülüne layık görüldü.

Sonunda Glashow-Weinberg-Salam modeli, şimdiki adıyla parçacık fiziğinin standart modeli olarak bildiğimiz şeyin görünümünü almaya başlayan daha eksiksiz bir kuram haline getirerek, kuarkları içerecek şekilde genişletildi. Bu elektro-zayıf kuram, Gell-Mann, Fritzsch ve Leutwyler'ın QCD kuramına, dolayısıyla QCD'nin kütlesiz renkli gluon kuvvet taşıyıcılarının yanı sıra kütleli W ve Z bozonlarını ve elekt-

[18] *Elementary Particle Theory: Relativistic Groups and Analyticity*, ed. Nils Svartholm. (Stockholm: Almqvist & Wiksell, 1968).

ro-zayıf kuramın kütlesiz fotonlarını içeren yeğin etkileşimlere dahil edildi. Hepsi tek bir şemada betimlendi.

Bu tarihsel hesaptan, parçacık fiziğindeki ayar kuramlarında boşluğun kendiliğinden simetri kırılması fikrinin doğrudan süperiletkenler kuramından geldiğini görebiliriz. 1964'te "altılı grup" tarafından yayımlanan makalelerdeki alıntılardan, süperiletken fiziğinin Ginzberg, Landau ve Anderson gibi öncülerine ne ölçüde borçlu oldukları yeterince ifade edilmediği anlaşılmaktadır. Ancak Higgs, 1966'da yayımlanan müteakip makalesinde Anderson'ın makalesine atıfta bulundu.[19] Bu bizi temel soruya götürür: Doğa, parçacık fiziği ve kuantum alanlarına ilişkin yasalarında, yoğun madde fiziğindekileri mi kopyalar? Bu sorunun cevabı, bu kitap devam ederken göreceğimiz gibi, önemli ölçüde Higgs parçacığının keşfine dayanmaktadır. Bununla birlikte, kesin olarak konuşursak, skaler Higgs parçacığını temel bir parçacık olarak tanımlarsak, sorunun cevabı hayırdır, çünkü süperiletkenler kuramında böyle bir parçacık yoktur. Süperiletkenin simetrisini kendiliğinden kırma rolünü oynayan temel varlık, temel bir parçacık olmayan Cooper çifti bağlı durumundan oluşan elektron yoğuşmasıdır. Bu nedenle, süperiletkenlerin göreli olmayan fiziğinin fikirlerini göreli parçacık fiziğine taşımanın, fiziksel bir *temel* skaler Higgs bozonunun varlığıyla sonuçlanacağı açık değildir.

Hem Weinberg hem de Salam, elektro-zayıf kuramlarının yeniden boyutlandırılabilir olduğunu öne sürdü; ancak bununla ilgili herhangi bir kanıt sağlayamadılar. Utrecht'teki Martinus Veltman'ın parlak bir yüksek lisans öğrencisi vardı: Gerard't Hoof. Veltman ona, Weinberg ve Salam'ın elektro-zayıf kuramının yeniden boyutlandırılabilir olduğunu kanıtlamaya çalışmasını önerdi. Bir gün, Gerard't Hoof Veltman'a kuramın yeniden boyutlandırılabilir olduğunu kanıt-

[19] P.W. Higgs, "Spontaneous Symmetry Breakdown without Massless Bosons," *Physical Review*, 145, 1156–1163 (1966). 19. P.W. Higgs, "Kütlesiz Bozonlar Olmadan Kendiliğinden Simetri Dağılımı", *Physical Rewiew*, 145, 1156-1163 (1966).

layabildiğini söyledi. Veltman şaşırdı ve sevindi, 1971'de bir konferansta yüksek lisans öğrencisi Gerard't Hoof'un kuramın yeniden boyutlandırılabilirliğini nasıl kanıtladığını duyurdu. Veltman, zayıf etkileşimlerin anlaşılmasına önemli ölçüde katkıda bulunmuştu ve Gerard't Hoof ile birlikte, yeniden boyutlandırılabilirlik iddiasının sağlam olduğunu kanıtlamak için gereken birçok teknik ayrıntıyı doldurmak için işbirliği yaptı. Gerçekten de Veltman, SCHOONSHIP adında, ispatı tamamlamak için gerekli olan birçok Feynman diyagramını türetebilen bir bilgisayar programı yazdı. Gerard't Hoof ve Veltman, 1999'da elektro-zayıf kuramına katkılarından dolayı Nobel Ödülüne layık görüldü.

HIGGS BOZONUNU BULMAK

1970'lerde ve 1980'lerde hızlandırıcılar, standart modelin tahminlerini doğrulayabilecek verileri toplamaya başladı. Özellikle, renkli gluonların doğrulanması gibi QCD'nin deneysel testleri, çoğu fizikçiyi standart modelin burada kalacağına ikna etti. Yüksek enerjilerde zayıf etkileşim süreçleri için daha fazla veri toplandı. Beklenen alt ve üst kuarklar, Fermilab'ın Tevatron'unda sırasıyla 1977 ve 1995'te keşfedildi ve tahmin edilen üç kuark ailesini tamamladı. 1990'ların sonunda, Higgs bozonu hariç, standart modelin tüm temel parçacıklarının var olduğu kanıtlandı, hepsinin spin ½ veya spin 1'i vardı. Standart model artık QED'yle birlikte QCD ve elektro-zayıf kuramını içeriyordu.

Hızlandırıcı sonuçlarıyla teyit edilen standart modelin başarılarına rağmen tüm yapının temel bir yapı taşı eksikti. Spin-0 Higgs parçacığı neredeydi? Ne yazık ki, W ve Z bozon kütlelerinin aksine, Higgs bozonunun kütlesi standart model tarafından tahmin edilmiyor, bu da belirli kuramsal sınırlar içinde deneycilerin onu hangi enerji seviyesinde arayacaklarını bilmedikleri anlamına geliyor. Ancak 2000 yılına gelindiğinde, CERN'deki LEP hızlandırıcısı kapandığında Higgs bozonunun varlığı 114,5 GeV'lik bir enerjiye kadar

dışlanmıştı. Ayrıca, Higgs bozonunun kütlesi 120 GeV'den az ama 114 GeV'nin üzerindeyse, o zaman kendiliğinden simetri-kırma mekanizmasıyla ilişkili boşluk durumu kararsız olacaktı. Bu, en kötü koşullarda evrenin, standart kozmoloji modelinde yerleşik olan 14 milyar yıl sürmeyeceği anlamına gelir. Ayrıca, Higgs kütlesi 800 GeV'den büyük olsaydı standart model bozulurdu. 800 GeV'den daha büyük bir kütlede, sürekli artan hesaplama sıralarının kontrol altında olduğu pertürbasyon kuramını kullanan standart modelde kesin hesaplamalar yapmak artık mümkün olmayacaktı. Ayrıca kuram birliği ihlal edecek ve saçılma deneylerinde yüzde 100'ü aşan olasılıklar almaya başlayacaktık ki bu imkânsız olurdu. 2000 yılında 120 GeV'den daha az kütlede kararsızlıkla ilgili potansiyel problemler hesaba katılsa da Higgs parçacığının deneysel tespiti için 114,5 ile 800 GeV arasına bakılması gerektiği biliniyordu.

LHC, onarımlardan sonra 2009 yılında çalışmaya başladı. Mart 2012'de, LHC'deki CMS ve ATLAS dedektörleri, 130 GeV ile 600 GeV arasındaki bir Higgs parçacığını yüzde 95'lik bir güven düzeyine çıkarmıştı. CERN, Tevatron ve diğer kuramsal gruplardaki gruplar tarafından bağımsız olarak toplanan kesin elektro-zayıf verilere uygunluk, Higgs parçacığını 97 GeV ile 135 GeV arasında bir kütleyle sınırlamıştı. Gerçekten de, Higgs kütlesi için kesin elektro-zayıf verilere en uygun olanı, 114,5 GeV'lik LEP sınırı tarafından zaten hariç tutulan yaklaşık 97 GeV'lik bir kütleydi. Bununla birlikte, istatistiksel olarak, 97 GeV'lik en iyi uyum, uyumun merkezi değerinden bir standart sapma uzaktaydı; 114,5 GeV ile 135 GeV arasında olası bir Higgs kütlesine izin veriyordu. Mart 2012'ye kadar bu, Higgs parçacığını tespit etmek için açık bırakılan küçük enerji penceresiydi ve 2012'nin sonlarında, deneyciler aradıklarını yaklaşık 125 GeV'de tespit ettiklerini açıkladılar.

19. yüzyılın kötü düşünülmüş esir fikri gibi, Higgs alanının da her zaman tüm uzayzamanı kapladığı varsayılır. Bu Higgs alanının temel kuarklar, leptonlar ve W ve Z bozonla-

rının yanı sıra kendisiyle etkileşime girdiğine, ancak foton veya gluonla etkileşmediğine inanılıyor. Bu etkileşim, foton ve gluon dışındaki tüm temel parçacıklar için kütleler üretmekte. Parçacıklar, ileriye doğru hareketlerine direnen bir su tankında yüzüyormuş gibi algılanmaktadır. Üst kuark gibi en ağır parçacıklar, direnci elektron ve daha hafif yukarı ve aşağı kuarklar gibi daha hafif olanlardan daha fazla hissedecektir. Foton ve gluon, kütlesiz oldukları için herhangi bir direnç göstermeden suda yüzer. Higgs alanı/esir, Büyük Patlamadan yaklaşık 10^{-12} saniye sonra bir faz geçişiyle ortaya çıkmış olmalıdır. Bu hipotez, standart model elektro-zayıf kuramının temelidir. Neredeyse 50 yıl sonra, Mart 2012'ye kadar kesin olarak tespit edilemeyen Higgs bozonunun gerçekten var olduğu fikri, parçacık fizikçilerinin zihnine o kadar yerleşmişti ki, neredeyse tüm topluluk yakında keşfedilmesini bekliyordu. Peki bu neden böyle?

Bunun bir nedeni, Higgs bozonunun temel parçacıkların kütlelerinin kökenini açıklayabilmesidir. Bununla birlikte leptonlar ve kuarklar gibi fermiyonların spesifik deneysel kütlelerini tahmin etmede yetersiz kalır, çünkü bu parçacık kütlelerinin her biri, parçacığın ve Higgs'in etkileşiminin gücünü belirleyen bir eşleşme alan sabitine sahiptir. Fizikçiler, parçacık kütlelerinin deneysel değerlerini elde etmek için bu birleşme sabitlerini basitçe ayarlar; kütleler kuram tarafından tahmin edilmez. Öte yandan Weinberg, fotonun nötr Z bozonuna dönmesine izin veren zayıf açının deneysel değeriyle W ve Z bozonlarının yaklaşık kütlelerini tahmin edebildi. Higgs mekanizması, parçacık fizikçilerine, temel parçacıkların kütlelerinin kökenini açıklamak için en iyi seçenek gibi görünüyordu. Higgs bozonunun varlığına inanmak için daha da güçlü bir neden, üniterliği ihlal etmeyen, yeniden boyutlandırılabilir veya sonlu zayıf etkileşimler kuramı üretme yeteneğidir.

Ancak Higgs bozonunun varlığına inanmakta ciddi sorunlar yaşanmaktadır. Weinberg ve Salam kendiliğinden simetri kırma mekanizmasını geliştirirken, senaryonun bazı

kuramcıların modelin doğru olup olmadığını sorgulamasına yol açan geçici bir yönü vardı. Öncelikle, kuarkların ve leptonların kütlelerini ve bağlantı sabitlerini kuramın onları öngörmesi yerine elle koymuşlardı. Hatırladığımız gibi, kuramın bir başka geçici özelliği, skaler Higgs alanının kendi kendine etkileşiminin çok özel bir değer olarak seçilmesiydi (skaler alan dördün kuvvetine eşittir), böylece yeniden boyutlandırılabilir bir elektro-zayıf kuram üretilmişti. Eşit derecede makul görünen diğer seçenekler, kuramın yeniden boyutlandırılmasına veya sonlu hesaplamalara yol açmasına izin vermeyecektir.

Diğer bir teknik konu, Higgs alanı gibi bir skaler spin-0 alanı için, Higgs bozon kütlesinin kuantum kuramı hesaplamasında meydana gelen sapmaların, W ve Z parçacıkları ile fermiyonlar için logaritmik sapmaların aksine enerji kesiminde ikinci dereceden olmasıdır. Bu durum, yüzleşilmesi gereken ciddi bir ince ayar sorununa yol açar. Higgs kütlesini yeniden boyutlandırdığınızda gerekli olan kuantum düzeltmeleri yapıldığında, bunların aslında "düzeltmeler" olmadığı gerçeği ortaya çıkar. Gerçekten de bu düzeltmeler o kadar büyüklerdi ki Higgs kütlesinin tahminleri için kritik bir ince ayar felaketi ürettiler. Bu sorun, Bölüm 4'te karşılaştığımız "Higgs kütle hiyerarşisi problemi" olarak bilinir hale geldi. Bu durum, Higgs kütlesinin hesaplanmasının, deneysel olarak geçerli olması beklenenle karşılaştırıldığında saçma derecede büyük sonuçlar üreteceği anlamına geliyor.

Martinus Veltman'ın yıllardır vurguladığı Higgs parçacığıyla ilgili bir diğer ciddi ince ayar sorunu, Higgs esiri varlığında boşluğun enerji yoğunluğu hesaplandığında bu boşluk yoğunluğunun kozmolojide gözlemlenenkinin 56 mertebe üstünde olabileceğidir. Kütleçekimle ilişkili Planck kütlesi hesaba katıldığındaysa 122 mertebe daha büyük olabilir. Böyle bir boşluk yoğunluğu, evrenimizin var olmasını imkânsız hale getirecektir. Bu yoğunluk, kozmolojik sabit ince ayar problemi olarak adlandırılan bir kategoriye aittir. Bu kadar büyük bir boşluk yoğunluğu sorunları parçacık fi-

ziğinin başka alanlarında da ortaya çıkar. Ancak Higgs bozonuyla ilişkili sorun, Higgs mekanizması fikrini bazı fizikçiler için oldukça itici kılmıştır.

Özetle; Higgs bozonu, elektro-zayıf kuramının çalışması için gerekli olsa da ciddi problemler yaratır. Bu nedenle, ben de dahil olmak üzere bazı fizikçiler hem Higgs mekanizmasına hem de geleneksel elektro-zayıf kuramına alternatifler keşfetmeye başladı. Elbette 125 GeV'de *yeni bir şeyin* kanıtının Higgs bozonu olduğu kesin olarak ortaya çıkarsa fizikçiler kolları sıvamak ve Higgs'in beraberinde getirdiği sorunlara çözümler bulmak zorunda kalacaklar.

6.

GECELEYİN TÜMSEK YAPAN VERİ

Parçacık Fiziği, Kozmoloji ve Astrofizik üzerine yıllık Uluslararası Konferans, birkaç yıl önce Miami'den Ft. Lauderdale, Florida'ya taşınmasına rağmen, her zaman "Miami" konferansı olarak bilinir. "Miami 2011"deki konuşmam saat 11:00'de planlanmıştı. 15 Aralık 2011 tarihinde yayımlandı. "Higgs Parçacığı Olmazsa O Zaman Ne Olur?" başlığını seçmiştim. Oturumun başında, konferans düzenleyicisi Thomas Curtwright, PowerPoint sunumumu konferans bilgisayarına yerleştirdi. Başlığım oditoryumun önündeki büyük ekranda yanıp sönerken Thomas güldü ve "Eh, salı günkü CERN'deki basın toplantısını göz önünde bulundurursak sanırım konuşmanız çöktü," dedi.

Ona kaşlarımı çattım. "Sonuçlardan bu kadar emin olmayın. Deneysel sonuçların neden hâlâ yetersiz olduğunu konuşmamda açıklayacağım."

Konferansın yapıldığı Lago Mar tatil beldesindeki oditoryum fizikçilerle dolmuştu. Seyirciler arasında şu anda Stockholm Nobel komitesindeki tek parçacık kuramcısı olan Lars Brink vardı. Seyirciler arasında ayrıca, standart Glashow-Weinberg-Salam parçacık fiziği modelinin merkezi bir parçası haline gelen kendiliğinden simetri kırılma mekanizmasını öneren Altılı Gruptan biri olan Françoise Englert de vardı.

13 Aralık Salı günü, CERN basın toplantısında tüm heyecana neden olan, simetri kırılma mekanizması içinde bir

parçacığın varlığını öngören Peter Higgs'in adını taşıyan Higgs bozonuydu, LHC'de sırasıyla ATLAS ve CMS dedektörlerini temsil eden deneyciler Fabiola Gianotti ve Guido Tonelli, Higgs parçacığını arayan yeni veriler için ön sonuçlarını sunmuştu. Grenoble'daki bir yaz konferansından bu yana, iki dedektör tarafından yaklaşık üç veya dört kat daha fazla veri toplanmıştı.

Dikkat çekici bir şekilde, CMS ve ATLAS grupları, tüm bozunma kanallarını birleştirdiklerinde Higgs bozonu kütlesinin 127-129 GeV ile 600 GeV enerji aralığında dışlandığını iddia etti. Bu aralık, Higgs parçacığının saklanabileceği yerde yalnızca yaklaşık 12 GeV enerjilik küçük bir pencere bırakmıştı. Bu enerji, Higgs kütlesi için LEP2 deneylerinde elde edilen 114,4 GeV'lik üst sınır ile LHC'nin yaklaşık 127 GeV olarak belirlediği alt sınır arasındaki farktır. Bir hafta önce düzenlenen basın toplantısında, yeni verilerin sunumundan sonra, CERN genel müdürü Rolf-Dieter Heuer, her iki dedektörden de –124 GeV'de CMS dedektöründe ve ATLAS'ta yaklaşık 126 GeV'de– bir Higgs parçacığının olası ipuçlarını gösteren umut verici yeni kanıtlar elde edildiğini söyledi. Bununla birlikte bu "tümseklerin", istatistiksel dalgalanmalar olabileceği; artan veri ve proton-proton çarpışmalarının parlaklığı veya yoğunluğuyla ortadan kalkabileceği konusunda uyardı.

BİR TÜMSEK NE ZAMAN GERÇEK BİR TÜMSEK OLUR?

Geçtiğimiz 20 yıl boyunca, Higgs bozonunu aramak için tümsekler gelip gitti. Higgs'in varsayılan sinyalleri çok fazla heyecan yaratacak ve daha sonra ek veriler, sinyallerin yalnızca verilerdeki istatistiksel dalgalanmalar olduğunu gösterdiğinde yok olacaktır. Gözlenen tümseklerin öneminin standart bir istatistiksel ölçüsü, standart sapmaların veya rezonans tümseğine ardalan verilerinin üstüne çıkarken veya altına düşerken eklenebilen ve sigma adı verilen

standart sapmaların sayısıdır. Proton-proton çarpışması gözlemleri, bilgisayar simülasyonlu ardalanla karşılaştırıldığında bir grafikte eğriler olarak temsil edilir. Verilerdeki dalgalanmalar normal ve rastgele meydana geldiğinden, gözlemsel verileri temsil eden eğri hiçbir zaman düzgün değildir. Bu dalgalanmalara, hiçbir zaman tamamen rastgele olmayan bir sinyal üretmeyen istatistiksel analizin kendisi neden olur. İki sigma (standart sapma) sonucu, verilerdeki artışın istatistiksel bir dalgalanma olmadığı, ancak gerçek bir şeyi temsil ettiği konusunda 20'de bir şansa karşılık gelir. 3 sigma tümsekliği 20.000'de bir oranında bir dalgalanma olmadığını gösterirken, 5 sigma tümsekleri sinyalin gerçek parçacık rezonansından ziyade istatistiksel bir dalgalanma olduğuna dair yaklaşık 1,7 milyonda yalnızca bir şans olduğunu gösterir. Deneyciler, yeni bir parçacığın keşfine ilişkin herhangi bir duyurunun, bunun yalnızca istatistiksel bir dalgalanmadan kaynaklanma olasılığını ortadan kaldırarak 5 sigma düzeyine ulaşmasını talep ederler. Çoğu 3-sigma "keşfi", daha doğru verilerin toplanmasıyla sonunda ortadan kalkar. ATLAS'tan bir deneyci olan Kyle Kranmer, Temmuz 2011'de Higgs aramalarında 2,8 sigmaya ulaşan fazla sayıda olay bildirdi. Bu, yaklaşık 140 ila 143 GeV'deki veri eğrisinde bir artış demektir. Ancak daha sonra, 13 Aralık 2011 tarihli basın toplantısında sunulan verilerle, bu çarpmanın istatistiksel bir dalgalanma olduğu gösterildi ve ortadan kayboldu.

Veriler analiz edilirken gözlemlenen olayları, veriler için saklama bölmeleri gibi istatistiksel "aralıklara" koymak gerekir. Bu aralıklar, trilyonlarca olayın bilgisayarlardaki azaltılmış bellek depolamasıyla analiz edilebilmesi için verileri düzenlemenin bir yoludur. Birçok veri olayını içeren aralıklar, belirli bir enerji aralığında görüntülenen dikey dikdörtgen bloklarla histogram grafikleri olarak görüntülenir. Deneyciler, her bir aralığın enerji genişliğini örneğin 1 GeV olarak seçerler, böylece bu aralığa düşen herhangi bir olay sayılır. Tipik olarak, 126 GeV'lik bir bozon enerji seviyesinde, Higgs olmayan bozunma süreçlerinden gelen ardalan olay-

ları, aralık başına yaklaşık 400 olaya katkıda bulunacaktır. 1 sigma veya daha fazla olan her istatistiksel ardalan dalgalanması, 20 olayın gerçek bir Higgs bozonu sinyali olarak yanlış tanımlanabilmesi demektir. 2 sigma dalgalanması, 40 ekstra olay olarak yanlış sayılabilir. Gerçek bir Higgs sinyali muhtemelen toplamda 40 olayı hesaba katabilir, bu da yukarı doğru istatistiksel bir dalgalanmayla desteklendiğinde, 50 veya 60 olay gibi görünüyor. Bu nedenle, bir ardalan dalgalanmasının üstünde uygun bir Higgs sinyali, 2-sigma veya 3-sigma fazlalığı olarak okunabilir. Yeni bir parçacığın varlığını doğrulamak için birkaç aralığa ihtiyaç duyulurken, az önce tarif ettiğim şey yalnızca bir aralık oluşturur.

Ardalan, diğer parçacıkların çarpışmasından kaynaklanan döküntülerden oluşur. Enkaza hadronik denir, çünkü çoğu hadronlardan oluşur. Higgs bozonunun bozunma kanallarından ikisi, diğer bozunma kanallarından daha az hadronik ardalan gürültüsüne sahip oldukları için altın kanallar olarak adlandırılır. Birincisi, standart model Higgs bozonunun iki fotona bozunmasıdır. İkinci altın kanal, iki Z bozonu aracılığıyla gerçekleşir ve Higgs'in iki lepton çiftine bozunmasıdır (H^0 nötr Higgs bozonunun, bir Z bozonuna ve bir "kütle kabuğu dışındaki[1] sanal bir Z bozonu olan Z*'ye bozunması. Z ve Z* bozonlarıyla dört leptona bozunur).

[1] Parçacık fiziğinde önemli bir konu kütle kabuğu dışındaki sanal aracı parçacıklardır. Belirli bir kütleye sahip bir parçacığın momentumu ve enerjisi arasındaki ilişkiyi göstermek için, *x* ekseni boyunca momentumun tek bileşeni (kütle çarpı hız) ve *y* ekseni ile temsil edilen parçacığın enerjisi ile bir çizim yaparsak, hareketin pozitif ve negatif değerlerine izin vermeliyiz. Momentum ile enerji bağımlılığını gösteren eğri, minimumu *x* ve *y* eksenlerinin orijininde olan bir paraboldür. Parçacığın hızıyla ilişkili enerji ikinci dereceden olduğundan, verilen bir momentum değeri için, momentumu ikiye katlarsak enerji dört kat daha fazladır. Momentumun iki bileşeni için, eğer üç boyutlu uzayda döndürürsek parabol bir kabuk şekline dönüşür. Bir parçacık, enerjisi bu kütle kabuğunun içinde değilse sanal parçacık olarak adlandırılabilir. Bu sanal parçacık, Heisenberg belirsizlik ilkesi nedeniyle enerjinin korunumunu ihlal etmez; yani enerjinin korunumu ihlali o kadar kısa bir sürede gerçekleşir ki ölçülemez.

İki altın kanalı ele alırken, 3 sigma olay fazlalığının bir keşif olduğunu iddia ederken dikkatli olmalıyız, çünkü veri analizinde birçok gereksiz aralık vardır. Aralıklardan birindeki 3 sigma artışı bir Higgs bozonunu işaret ediyor mu? Yoksa sadece tesadüfen istatistiksel bir dalgalanma mı? Herhangi bir aralığın 3 sigma kadar yukarı dalgalanma olasılığı yüzde birden azdır, ancak 25 aralıktan birinin bu miktar kadar dalgalanması veya üç aralığın her birinin üç standart sapmadan daha az dalgalanması olasılığı yüzde birden çok daha fazladır. 25 aralığı hesaba kattığınızda, şimdi yüzde 50 olasılığa ulaştığında, iki standart sapmalı bir yukarı doğru dalgalanma elde edeceğiniz anlamına gelir.

Veri analizindeki bu istatistiksel dalgalanma olgusuna *başka yere bak* etkisi (BYB) denir. Bu etki, yalnızca bir veya iki olay aralığından sonuç çıkaramayacağınız anlamına gelir; diğer enerji seviyelerindeki diğer aralıklarında sinyal olup olmadığını belirlemek için Higgs bozonunun olası kütlesi aralığında "başka bir yere bakmalısınız"; eğer öyleyse bu, orijinal tümseğinizin önemli olma şansını azaltır. Sorun şu ki, standart model Higgs bozonunun kütlesini tahmin etmiyor, bu yüzden kütle-enerjisi çok çeşitli olası değerlerde var olabilir.

İki tür olasılık vardır. Biri *yerel olasılık* (yerel p değeri), diğeri ise *genel olasılık* (genel p değeri) olarak adlandırılır. Yerel olasılık, yalnızca belirli bir enerji değerindeki olay aralıklarını hesaba katarken genel olasılık, Higgs bozonunun verilerde nerede bulunabileceğine dair tüm olası enerji değerlerini hesaba katar ve bu ikinci olasılık, BYB'nin geçerli olduğu verinin bulunduğu yerdir. Bu tür istatistiksel analizler birçok bilimsel çalışmada önemli bir rol oynamaktadır. Örneğin, 2011 yazında kuzeydoğu Amerika Birleşik Devletleri'nde aşağı yukarı aynı anda meydana gelen deprem ve kasırganın istatistiksel bir tesadüf mü olduğunu, yoksa doğal bir yakınsamadan mı kaynaklandığını anlamak için kullanıldı.

BYB'yi gösteren bazı klasik örnekler vardır. Piyangoyu kazanma olasılığınız, birinin piyangoyu kazanma olasılığından

çok farklıdır. Benzer şekilde, 100 kişilik bir odadaysanız, odadaki başka biriyle aynı doğum gününe sahip olma olasılığınız küçüktür, ancak bir çift kişinin aynı doğum gününe sahip olma olasılığı büyüktür. Belirli bir hızlandırıcı deneyi için, verilerdeki belirli bir aralığın şans eseri 3 sigma fazlalığına sahip olma olasılığı çok küçüktür, ancak 25 aralıktan birinin 3 sigma fazlalığına sahip olma olasılığı çok daha büyüktür.

CMS ve ATLAS işbirliğiyle bir Higgs bozonunu yalnızca küçük bir enerji penceresinin dışında tutabilecek yeterli veri toplanırsa BYB'nin önemi azalır ve gerçek bir keşfe bakıyor olabiliriz.

O SIRALARDA LAGO MAR'DA KONFERANS SALONU...

Konuşmamın içeriğini sunan slaytta, T.S. Eliot'ın "J. Alfred Prufrock'un Aşk Şarkısı" şiiri: "Odada 3 sigma tümsekleri gelir ve gider / Michelangelo'dan bahseder." Son 20 yıl içinde yeni parçacıklar arayan deneyler sırasında, verilerde 2 ve 3-sigma seviyelerinde tümsekler (veya rezonanslar) ortaya çıktığını, daha sonra artan veriler ve deneylerin doğruluğuyla ortadan kalktığını öne sürüyordum.

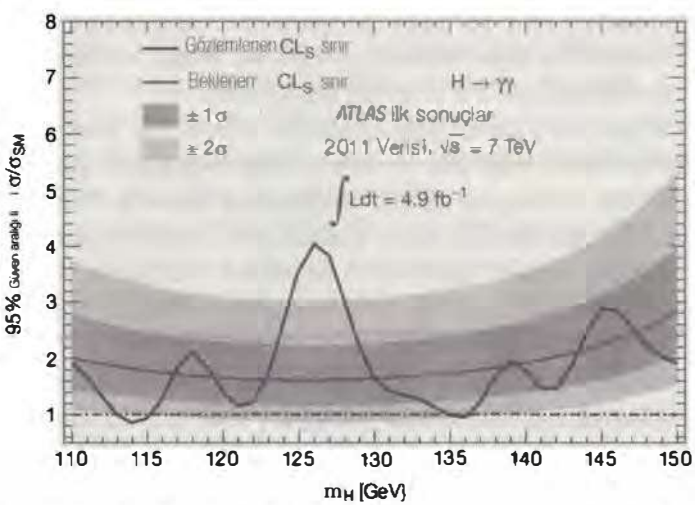
Higgs bozonu araştırmasıyla ilgili verilerin mevcut durumunu bir kuramcı gözüyle tartışarak konuşmama başladım. Hızlandırıcılardaki dedektörler, çok kısa ömrü nedeniyle bir Higgs bozonunu doğrudan gözlemleyemez, ancak iki W parçacığı, iki Z parçacığı, iki tau leptonu, iki muon, iki alt (b) kuark veya iki foton gibi standart modelin çeşitli parçacıklarında bozunma ürünlerini arayarak onun kanıtını keşfedebilirler. Higgs parçacık kütlesi biliniyorsa, tüm bu bozunma kanalları standart model tarafından Higgs için tahmin edilir; ancak sorunu karmaşıklaştıran durum bilinen diğer parçacıkların da aynı çiftlere bozunabilir olmasıdır. Az önce tartıştığımız gibi, iki Z parçacığına (ve sonra dört leptona) veya iki fotona bozunmalar; *altın kanallar* olarak adlandırılır; çünkü bu kanallar içindeki hadronik parçacıkla-

rın ardalanı neredeyse yoktur, bu da bir Higgs parçacığının tespiti için daha net bir sinyal sağlar. Öte yandan bu altın kanallar için endişelenmemiz gereken ardalanlar foton ve lepton ardalanlarıdır. Bununla birlikte iki-foton bozunması durumunda, CMS ve ATLAS elektromanyetik kalorimetre dedektörleri, Higgs bozunmalarını diğer parçacıkların bozunmasından ayırmak üzere; elektronlar ve nötrinolar gibi fotonlara ve leptonlara bozunanları seçmek ve ayıklamak için akıllıca tasarlanmıştır. Bununla birlikte, Higgs bozonunun *baskın* bir bozunma kanalı, onun alt (b kuark) ve karşı-alt kuarklara bozunmasıdır. Altın kanalların tersine, iki b kuark halindeki bu ana bozunma, hadronik bozunmaların ardalanına karşı saptanmalıdır: örneğin tespit edilecek Higgs sinyalinden milyonlarca kat daha büyük olan Z bozonunun alt ve karşı-alt kuarklara bozunması gibi. Bununla birlikte Higgs'in iki fotona bozunması, bu büyük hadronik ardalandan etkilenmese de birçok parçacık iki fotona bozunabilir, bu nedenle bu aynı zamanda gerçek bir Higgs bozunmasını gizleyebilecek zor bir ardalanı temsil eder.

Higgs bozonunun bozunmasının önemli bir yönü, "dallanma oranı", yani her bozunma kanalının göreli yüzdelik önemidir. Dallanma oranı, odaklanılan kanalın bozunma hızının, olası tüm bozunma kanallarının tüm bozunma hızlarının toplamına bölümüdür. Bozunma hızı, uygun birimlerde rezonans tümseğinin genişliğinin tersidir. Higgs'in iki fotona bozunması için dallanma oranı, yüzde 60'a daha yakın olan iki b kuark içine bozunmanın dallanma oranıyla karşılaştırıldığında sadece yaklaşık yüzde 0,26'dır. Higgs'in iki fotona bozunmasının sinyal gücü, bu dallanma oranının, belirli bir enerjide üretim kesitiyle ölçüldüğü üzere, üretilen Higgs bozonlarının sayısıyla çarpılmasından elde edilir. İki-foton bozunmasının küçük dallanma oranı nedeniyle, bu sinyal çok küçüktür ve foton ardalanı tarafından gizlenir. Bununla birlikte iki fotonlu bozunmanın yüzde önemi bb bozunmasından (Higgs'in bir alt ve karşı-alt kuark olarak bozunmasından) çok daha az olsa da, iki fotonlu bozunma-

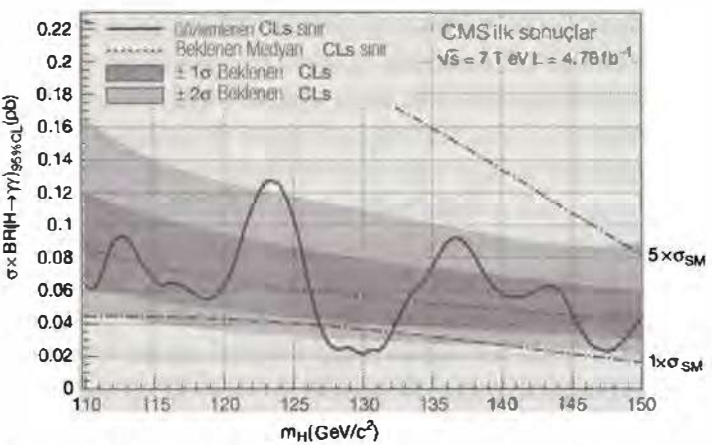
da hadronik ardalanm olmaması onu hâlâ çok önemli hale getirir. Bu durum keşif için daha kolay bir bozunma kanalı sağlar.

Konuşmamda, Higgs'in yaklaşık 126 GeV'de iki fotona olası bozunmasmda görülen tümseklerin, CMS verilerinde kuramcılar tarafmdan hesaplanan küçük tümseklerden çok daha belirgin olduğuna dikkat çektim. Başka bir deyişle, Higgs'in iki fotona bozunmasmı temsil eden olayların fazlalığı, kuramdan beklenenden daha büyüktü, bu da aslında tümseğin istatistiksel bir dalgalanma olabileceğini düşündürüyordu. Konuşmamm bu bölümünü, tümseklerin gerçekten de hakiki bir Higgs bozonunun sinyalleri olup olmadığı konusunda kesin açıklamalar yapmak için daha fazla veriye ve önemli ölçüde daha fazla parlaklığa ihtiyacımız olduğunu söyleyerek bitirdim.



Şekil 6.1 Yeni bozonun iki fotonlu kanalı için ATLAS sonucu, Aralık 2011. Dikey eksen, standart modelden tesir kesit tahminiyle bölünen gözlemlenen tesir kesitin oranmı gösterir; yatay eksen, milyarlarca elektron volt (GeV) cinsinden yeni bozon kütlesidir. Çizginin üzerindeki ilk koyu bant 1 sigmayı temsil ederken daha açık olan üst bant 2 sigmayı temsil eder. Grafik, 126 GeV'de 2 sigmanm oldukça üzerinde bir tümsek göstermektedir. © CERN, ATLAS İşbirliği.

Bahsettiğim bir diğer konu ise, CMS sonuçlarında biri 124 GeV'de ve diğeri yaklaşık 137 GeV'de olmak üzere iki tümsek tespit edilmiş olmasıdır. Bu bilgiyi, 13 Aralık duyurusu için elektronik arşivde yayımlanan ATLAS ve CMS sonuçlarından edinmiştim (Şekil 6.1 ve 6.2'yi karşılaştırın). 137 GeV'deki tümsek, neredeyse 124 GeV'deki kadar büyüktü. Ben de şu soruyu sordum: Hangisi gerçek Higgs bozonu ve hangisi verilerdeki bir dalgalanma? Gerçek Bay Higgs lütfen ayağa kalkabilir mi?



Şekil 6.2 Aralık 2011 CMS iki-foton sonuçları. Burada 1 sigmanın üzerinde iki veri tümseği var. Eksenler, CMS sonuçları için Şekil 6.1'dekiyle aynı miktarları temsil eder. © CERN, CMS İşbirliği.

CERN sonuçlarının kesin olmadığını, hiç kimsenin bu verilere dayanarak Higgs bozonunun tespit edildiğini iddia etmemesi gerektiğini söyleyerek konuşmamın bu bölümünü sonlandırdım. Buna rağmen kuvvetli delillerin gösterdiği gibi yeni bir bozon keşfedilmişti ve LHC'de elde edilen diğer veriler, bunun Higgs bozonu olup olmadığını doğrulayacaktı.

Bu açıklama üzerine, 1983 yılında W ve Z bozonlarını bulan Rubbia ekibinin üyesi olan tanınmış bir deneyci; David Cline, salonun arkasından yüksek sesle bir yorum yaptı. CMS ve ATLAS verilerinde tümseklerin konumlarının aynı

olduğunu dikkate almam gerektiğini söyleyerek yorumunu tamamladı. Aslında aynı pozisyonda olmadıklarını söyleyerek bu yoruma cevap verdim. 2 ila 3 GeV kadar ayrı olabilirlerdi. Çünkü burada dikkat edilmesi gereken asıl husus şuydu: Higgs'in iki fotona bozunmasının bir işareti olduğu iddia edilen tümseğin genişliği veya "rezonans"ı yaklaşık 1 GeV'den az olduğu için, tümseklerin enerjideki konumunun aynı olduğunu iddia ederken dikkatli olmak gerekiyordu.. Deneyciler, bir rezonansın enerji konumunu birkaç yüzdelik dilim içinde çözmeyi başardılar. Farklı dedektörlerdeki bu iki çıkıntının birbirine bu kadar yakın olması bir tesadüf olabilirdi. Gerçekten de deneycilerin gerçek bir parçacığın sinyalini gördüklerini iddia etmeleri için, iki deneydeki tümseklerin konumlarının aynı enerjide ve deneysel hatanın içinde olması –ki öyle değildiler– daha iyi olurdu.

Konuşmamın sonraki bölümünde, temel bir Higgs parçacığı içermeyen Weinberg-Salam modeline olası alternatifleri sıraladım.[2] Bunlar, spin-0 parçacığının Teknik renk parçacıklarının bağlı bir durumu olma olasılığını da içeriyordu, diğer bir deyişle varsayılan Higgs diğer parçacıkların bir bileşimi olabilirdi. Başka bir olasılık da, W ve Z gibi yeni spin-1 parçacıklarının 1 ile 2 TeV'nin üzerinde var olmasıydı, ki bu da Higgs bozonu olmadan üniterliğin ihlalini ortadan kaldırmaya yardımcı olabilirdi. Standart modelde üniterlik veya olasılık ihlalinin Higgs bozonu kullanılarak çözüldüğünü hatırlayalım. Higgs olmadan, standart model, üniterliğin ihlalini farklı bir şekilde ele almak zorunda kalacaktı.

Sicim kuramında olduğu gibi ek boyutlara dayalı olası alternatif modeller de vardı. Bir başka olasılık da, gözlemlenen kuarklardan daha ağır olan dördüncü nesil kuarkların varlığına dayanan bir modeldir. Bu öneri birkaç yıldır Toronto Üniversitesindeki meslektaşım Bob Holdom tarafından des-

[2] Weinberg-Salam modeli, bir elektro-zayıf modelin yapımında Higgs mekanizmasını ve Higgs bozonunu tanıtan ilk modeldi. Glashow onları 1961 tarihli makalesine dahil etmemişti. Sonuç olarak, fizikçiler modele "Weinberg-Salam" modeli olarak atıfta bulunmaya başladılar.

tekleniyor. Bu modelde de bir Higgs bozonunu varsaymaktan kaçınmak mümkündür.

Son olarak, Higgs bozonu içermeyen elektro-zayıf kuram modellerinin anahatlarını verdim, bunların tümü kuantum alan kuramının ciddi bir şekilde elden geçirilmesini içeriyordu. Gerçekten de 2011'de daha önce yayımladığım yerel olmayan etkileşimlere dayanan elektro-zayıf kuramım olası bir adaydı.[3] Diğer modelim yerel kuantum alan kuramına dayanıyordu. Doğrudan şu soruyu ele aldı: Elektro-zayıf kuram bir Higgs bozonu olmadan yeniden boyutlandırılabilir mi? Yeniden boyutlandırılabilirliği garanti etmek için gereken modelin mecburi ayar değişmezliğini geri yüklemek üzere Stueckelberg formalizmine başvurmuştum. Bu, yakın zamanda geliştirdiğim, yalnızca gözlemlenen 12 kuark ve lepton, W ve Z bozonları, kütlesiz foton ve gluon içeren modeldi (bu model Bölüm 8'de tartışılmaktadır).

Konuşmamdan sonraki tartışma bölümünde birkaç ilginç soru vardı. Françoise Englert, Higgs bozonunun iki W bozonuna bozunmasının zahmetli ardalanının kapladığı boyutunu sordu. Ardalanın önemli olduğunu kabul ettim ve birinin LHC'nin bu kanal için gerçek bir Higgs bozonu olayı gözlemleyip gözlemlemediğini sorgulamasına neden oldum. Englert'in Higgs bozonunun diğer iki düşük kütleli bozona bozunma şiddetinin bu bozonların kütlesiyle orantılı olduğu gerçeğine doğru bir şekilde atıfta bulunduğunu düşündüm. Bu nedenle, Higgs modeli için, W ve Z gibi ağır bozonlar için bozunmanın şiddeti daha büyük olacaktır ve standart model Higgs'in önemli bir teyidini teşkil edecektir. Belki gelecekte bu bozunma kanalında daha fazla olay gözlemlenebilir.

Daha sonra, deneysel parçacık fiziği alanında deneyimli Amerikalı Alan Krisch elini kaldırdı ve LHC'nin Higgs'i keşfettiği konusundaki şüphelerimi sorguladı. Keşfedilmiş olduğunu gerçekten ne zaman bileceğimizi nasıl tanımlı-

[3] J.W. Moffat, "Ultraviolet Complete Electroweak Model without a Higgs Particle," *European Physics Journal Plus*, 126, 53 (2011).).

yordum, bunu bilmek istiyordu. Cevabım şuydu: "Temel bir Higgs bozonunu keşfetmeye veya dışlamaya yakın olmak üzere; bu noktaya gelmek için 40 yıl bekledik. Higgs bozonunun var olup olmadığından emin olmak için elbette birkaç ay, hatta bir yıl daha bekleyebiliriz." Kafasını onaylar şekilde salladı.

KAHVE MOLALARI

Uluslararası fizik konferanslarına katılmanın önemli nedenlerinden biri, dahil olduğunuz araştırma konularına aktif olarak katılan meslektaşlarınızla tanışmaktır. Konuşmamın ardından kahve molasında David Cline'la konuştum. David'in deneysel sonuçlarla ilgili fikirlerine her zaman değer vermişimdir, çünkü onun bilimsel yargılarında her zaman bütünlük gösterdiğini hissediyordum. David, birkaç yıldır kara madde parçacıkları için büyük gruplardan oluşan araştırmalarda yer aldı. Şu anda İtalya'daki Gran Sasso Geçidinde WIMP'leri arayan yeraltı deneyi Xenon100'ün bir parçası olarak çalışıyor. Kahve molası sırasında David, yeni LHC sonuçları hakkındaki görüşlerini genişleterek bunların gerçek olduğunu iddia etti; Higgs bozonunu keşfettikleri görülüyordu. Buna neden hâlâ inanmadığıma dair gerekçelerimin üzerinden geçtim ve sonucu doğrulamak için daha fazla veri beklememiz gerektiğini vurguladım.

Ardından, otelin hemen dışındaki avluda bir masada meslektaşım Philip Mannheim'a katıldım. Sabah güneşliydi ve Kanada'nın dondurucu soğuğunun ardından karşılaştığım ılık Florida havasının tadını çıkardım. Konuşmamı kısaca tartıştık ve Philip, LHC'nin geride kalan 12 GeV'lik dar pencere içinde Higgs bozonunu nihayet keşfettiği iddiasına şüpheyle yaklaşılması gerektiği konusunda hemfikirdi.

Karşımızda dizüstü bilgisayarıyla oturan bir kadın konuşmamıza ilgi duydu. Philip'i ve kendimi onunla tanıştırdım. Adı Monika Wielers'dı. ATLAS deneyindeki analistlerden biri olduğunu ve verileri analiz eden yaklaşık 500 kişi

olduğunu söyledi. Bu haber ilgimi çekti ve ona sorular sormaya başladım. Verileri araştıran analistlerden biri olarak, önceki salı CERN'de bu sonuçları sunmaktan mutlu olmadığını, çünkü sonuçların çok erken, açıklamak için çok taze olduğunu söyledi. Siyasi nedenlerle duyuruya zorlandıklarını hissetmişti. CERN genel müdürü, Higgs bozonu meselesini politik olarak nasıl ele almaları gerektiğini tartışmak için CERN Konseyiyle bir araya geldi. Özellikle Higgs'in var olmadığı ortaya çıkarsa bu haberi halka nasıl vereceklerdi? Higgs bozonunu keşfedememiş olmalarının olumsuz haberi, LHC deneylerinin geleceğine ciddi şekilde zarar verebilirdi, çünkü makineyi yapmak için 9 milyar dolar harcamanın motivasyonunun çoğunu Higgs'i keşfetmek oluşturuyordu. Nihai bir boş sonuç olsaydı, medya var olmayan bir parçacığı aramak için çok fazla para ve zaman harcamanın bilgeliğini sorgulayabilirdi. LHC'nin Higgs bozonunu keşfedeceği konusunda, hem medyada hem de fizik camiasında büyük bir beklenti vardı.

Konuşmamda olduğu gibi, CMS sonuçlarının sadece ATLAS dedektöründe bulunan tümseğe yakın olanı değil, iki tümsek gösterdiğini belirtmiştim. Monika gülümsedi ve CMS grubunda, parçası olduğu ATLAS grubundan daha fazla veri analisti bulunduğunu ve analizlerine daha fazla zaman ayırdıklarını, bunun da verilerinde neden daha fazla yapı olduğunu açıklayabileceğini söyledi. ATLAS verilerinde, Higgs bozonunun iki fotona bozunması için olayların fazlalığının veya sinyal gücünün çok küçük olduğu ve ardalan verilerinin içinde gizleneceği gerçeği hakkında da sorguladım. Aynı kanal için CMS'deki olaylar, standart modelin öngördüğünden önemli ölçüde daha büyüktü. "Evet" dedi, bu zahmetli bir konuydu, muhtemelen olayların fazlalığı istatistiksel bir yapaylık veya dalgalanmaydı. Üçümüz dizüstü bilgisayarındaki plana baktık ve Philip başıyla onayladı; bütün bunlarda tatmin edici olmayan bir şey vardı.

Daha sonraki bir kahve molasında, David Cline'ı tekrar yakaladım ve ona ATLAS analistinin, özellikle Higgs'in iki

fotona bozunması için tahmin edilen tümseğin boyutunun, gözlemlenen CMS fazlalığının boyutuyla karşılaştırılması üzerine söylediklerini aktardım. Özellikle de yaklaşık 126 GeV'deki verilerle ilgili uyarmak istemiştim. David, Higgs bozonunun iki fotona bozunması için dallanma oranının 10 veya daha fazla bir faktörle çarpılması gerektiğini öneren bir meslektaşıyla konuştuğunu söyledi: yani standart modelde tahmin edilen sinyal şiddeti miktarı bununla birlikte yanlış olabilirdi. Bunu pek olası görmediğimi söyledim. Ayrıca, konuşmamda olduğu gibi, CMS ve ATLAS sonuçlarındaki tümseklerin aynı enerjide örtüşmediğini, 2 ile 3 GeV kadar farklılık gösterdiğine dikkat çektim. Higgs tümseğinin genişliğinin, gerçek olsaydı 1 GeV'den az olacağı düşünülürse, tümseklerin konumlarındaki bu en az 2 GeV'lik fark önemli olabilir ve bunların aynı enerjide gerçek olduğunu iddia ederken dikkatli olunmalıdır. David; sonuçların, verilerdeki istatistiksel kalıntılardan veya dalgalanmalardan kaynaklanabileceğini kabul etti. Gerçekten de deney dalgalanma olmadan sadece düzgün bir eğri sağlıyorsa sonuçlara inanılamayacağını, çünkü verilerin istatistiksel analizlerinde dalgalanmaların her zaman meydana geldiğini söyledi.

Bir keşfi duyurmak için CERN'den mali baskı olup olmadığı konusunda David, CERN'deki genç nesil fizikçilerin saf olduğunu ve durumun siyasetini anlamadığını söyledi. CERN'in, özellikle Avrupa'daki mevcut mali kriz göz önüne alındığında, makinenin finansmanının devam edeceğini garanti etmesi gerektiğini söyledi. Bu nedenle fonların önümüzdeki birkaç yıl boyunca devam etmesini garanti altına almak için basın toplantısında bu tür bir duyuru yapmak önemliydi.

Tartışmamızın bu ilginç noktasında bize Lars Brink ve Françoise Englert katıldı. Onlarla ana noktalarda hemfikir olduktan sonra, CERN makinesinin finanse edilmeye devam etmesi gerektiği konusunda David'le kesinlikle anlaştığımı söyledim. ABD'nin 1990'larda Texas'taki süper çarpıştırıcıyla yaptığı gibi finansmanı kesmeleri fizik için bir felaket

olurdu. Ancak bilimsel tutarlılığımızı da kaybetmemeliydik. Uzlaşmaya ve sonunda geçersiz olabilecek iddialarda bulunmaya istekli değildim. Brink ve Englert kayıtsızca dinlediler.

Daha sonra, başka bir kahve molasında, ATLAS analisti Monika Wielers'la tekrar konuştum ve David Cline'ın, Higgs bozonunun iki fotonlu bozunma kanalındaki tümseğin boyutunun kuramsal hesaplamasının 10 veya daha fazla bir faktörle artırılabileceğini öne sürdüğünü söyledim. Bunun doğru olamayacağını söyleyerek basitçe reddetti. "Kuramsal hesaplamadaki hata ancak yüzde 15 civarında olabilir" dedi ve bu kadar büyük bir hata kabul edilemezdi. Gelecek yıl, 2012'de, LHC proton-proton çarpışmaları için toplam parlaklığın belki 10 ters femtobarna yükseleceğinin beklendiğini ve bunun Higgs bozonunu kesinlikle doğrulayabileceğini veya yanlışlayabileceğini söyledim.[4] Buna ikna olmadığını söyledi. Bir parçacığın gerçek bir keşfini iddia etmek için gerekli olan bir tümsek için sihirli 5 sigma istatistiksel önemine ulaşmadan önce 20 veya 30 ters femtobarna gitmeleri gerekebileceğini tahmin ediyordu. Böyle bir istatistiksel betimleme, sinyalin yaklaşık iki milyonunda yalnızca bir parçanın rastgele bir dalgalanma olma şansı olduğunu söylemek anlamına gelirdi. Son LHC sonuçlarının istatistiksel önemi 2 sigma ile 3 sigma arasındaydı, bu nedenle bunun Higgs bozonunun gerçek bir sinyali olduğunu iddia etmek için herhangi bir makul istatistiksel gereksinimi karşılayamadı. Bu bir ipucuydu, başka da bir şey değildi.[5]

---

4 Tesir kesitleri "barn" (b) birimiyle ölçülür; bir barn, 10^{-28} m^2 olan uranyum çekirdeğinin tesir kesitine eşittir. "Femto" 10^{-15} veya milyonda birinin milyonda birinin binde biri anlamına gelir. Böylece bir "femtobarn" (fb) 10^{-43} m^2 'ye eşittir. "Ters femtobarn", femtobarn başına kaç tane parçacık çarpışma olayı olduğudur. Proton çarpışmalarının zamanla ölçülen "parlaklığı" [lüminozite], saniyede metrekare başına çarpışma sayısıdır. Deneyciler için, ters femtobarnlar, toplam parlaklığı ifade eder.

4 Temmuz 2012'de, 5 ters femtobarn ve 6 ters femtobarn arasında CERN, iki fotona bozunan yeni bir bozon keşfettiğini açıkladı, Yaklaşık 4 sigma istatistiksel belirginliği vardı. Bu iki foton bozunması-

DENEYCİLER SÖYLEYECEĞİNİ SÖYLEDİ.

Sonunda konferansın cumartesi günü deneycilerin verilerini sunma sırası gelmişti. CMS grubundaki deneycilerden Yaşar Önel sonuçlarını bildirdi. İlk önce süpersimetrik parçacıkları, ekstra boyutları ve mini kara delikler gibi diğer egzotik iddiaları dışlıyor gibi görünen CMS sonuçlarını tartıştı. Ardından Önel, Higgs bozonu arayışı için CMS sonuçlarını sundu. Higgs'in her bozunma kanalı için verileri gözden geçirdi, sonunda Higgs'in bozunmasını iki fotona ayırdı. Bu veriler, biri 123,5 GeV'de, diğeri 137 GeV'de olmak üzere iki tümsek üretmişti ve de 119 GeV'de olası bir üçüncü tümseğe dair ipuçları vardı. ATLAS verileri, bu enerji aralığında yalnızca bir tümsek ortaya çıkarmıştı. Monika'nın, CMS verilerini analiz eden deneycilerin sayısının ATLAS verilerini analiz edenlerin sayısından daha fazla olduğunu ve CMS analistlerinin verileri analiz etmelerinin daha uzun sürdüğünü ve de daha ayrıntılı olarak analiz ettiklerini söylediğini hatırladım. ATLAS verilerine kıyasla CMS verilerinde daha fazla yapının görülmesinin nedeninin bu olduğunu öne sürmüştü.

Önel, ATLAS ve CMS'deki tümseklerin enerjilerinin 2 sigma dahilinde çakışmadığını veya örtüşmediğini, bu nedenle her ikisinin de aynı enerjide meydana geldiğinin iddia edilemeyeceğini ve de tümseklerin yapay veya istatistiksel dalgalanmalar olma olasılığını açık bıraktığını belirtmenin önemli olduğunu sözlerine ekledi. Bir diğer önemli konu, 123 ile 124 GeV civarındaki CMS verilerindeki artışın, başka yere bakma etkisi hesaba katıldıktan sonra 1,9 sigmanın istatistiksel bir önemi olduğunu söyledi. Bu durum, CMS tümseklerinin keşfedilen bir parçacığın gerçek bir sinyali olduğunu

---

nın verilerini birleştirerek yeni bozonun ZZ * ve dört leptona bozunmasına kadar olan verilere sahip 5-sigmanın keşfi iddia edilebildi. Kasım 2012'de Kyoto'da 12 ters femtobarn parlaklık temelinde 1, CERN temsilcileri 5 sigma ötesinde yeni bozonu istatistiksel olarak doğrulamayı başardılar. Yine, bu bozunma İki foton bozunma kanalını ve ZZ * -4 lepton bozunma kanalını esas alıyordu.

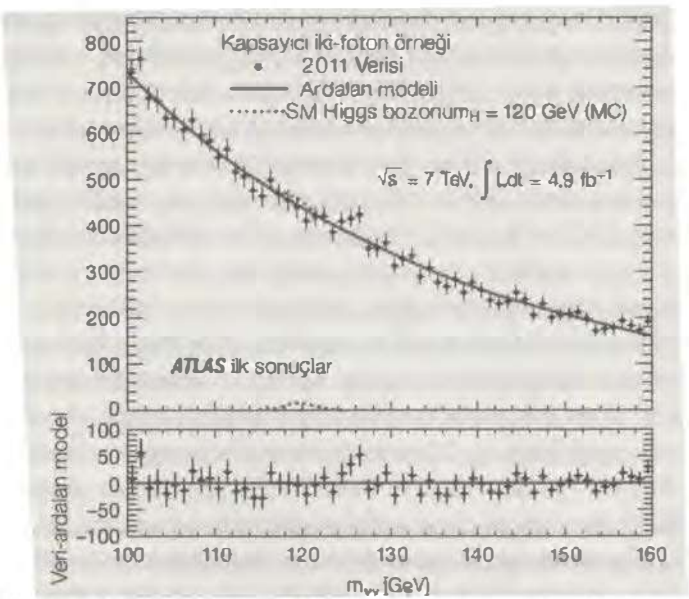
iddia etmek için çok daha doğru verilere ihtiyaç duyulduğunu bir kez daha gösterdi.

Monika Wielers daha sonra LHC'deki ATLAS dedektöründen gelen en son sonuçları sundu. Süpersimetri modellerinde süper eşlerin nasıl önemli ölçüde dışlandığını anlattı. Gerçekten de *kısıtlı minimal süpersimetrik model* olarak adlandırılan parçacık fiziğinin en basit süpersimetri modelinin parametre uzayının geniş alanları, neredeyse 1 TeV'lik bir enerjiye kadar dışarıda bırakılmıştı. Ayrıca 2 ile 3 TeV'e kadar sicim kuramı gibi çeşitli yüksek boyutlu kuramlar tarafından tahmin edilen ekstra uzay boyutlarının yeni dışarlanmaları vardı. Böylece her iki dedektör de süpersimetrik parçacıklar ya da sicim kuramının daha yüksek boyutlarını ya da mini karadelikleri bulamadıklarını söyleyerek aslında yüzlerce kuramsal fizikçinin altındaki zemini çekiyordu.

Son olarak Monika, ATLAS dedektöründe Higgs bozonunu aramanın sonuçlarını açıkladı. Önel gibi, Higgs bozonunun çeşitli olası bozunma kanalları için verileri sundu. İki altın kanal –yani Higgs'in ZZ'ye ve iki fotona bozunması– özellikle önemliydi. Çünkü Higgs'in daha baskın bir kanala, örneğin WW'ye bozunması ciddi ardalan sorunlarına sahipti ve veri olaylarının sayısı önemli değildi. En önemli veri, 126 GeV'lik bir enerjide meydana gelen yaklaşık 2,3 standart sapmanın istatistiksel bir önemi veya sigması olan iki-foton bozunma kanalındaki tümsekti. Monika; Higgs kütlesini –yani iki fotonla ilişkili kütleyi– tasvir eden yatay eksene karşı Higgs'in iki fotona bozunmasının beklenen olasılığının önemli grafiğini gösterdi. (Bkz. Şekil 6.3).

Bu olay örgüsünden iki önemli konu ortaya çıkmıştı. Gerçekten de, bir parçacığın sinyali olabilecek yaklaşık 126 GeV'de iki aralık fazla veri olayı vardı. Bununla birlikte 120 GeV'de, standart Weinberg-Salam modelinden hesaplandığı gibi, Higgs bozonunun o enerji seviyesinde ortaya çıkma olasılığını gösteren kesikli kırmızıyla çizilmiş küçük bir sivilce vardı. Monika'nın grafiklerinden, konuşmamda açıkladığım gibi, 126 GeV'de gözlemlenen iki–aralık olaylarının, 120

GeV'deki sivilcede gösterildiği gibi, standart model bir Higgs bozonundan beklenebilecek olandan çok daha fazla olduğu açıktı. Elimi kaldırdım ve sordum: "Bu, görülen fazlalığın, verilerdeki bir dalgalanma gibi istatistiksel bir yapaylık olduğunu göstermez mi?"



Şekil 6.3 Higgs bozonunun iki fotona bozunması için milyarlarca elektron volt başına olay sayısı.

Monika oditoryumun ön tarafında oturduğum yere yaklaştı, gülümsedi ve "Evet, buna katılıyorum" dedi.

Daha sonra bunun 2 sigma etkisinden biraz daha fazla olduğu ve BYB'nin istatistiksel önemini 1,9 sigmaya indireceği gerçeğinin, 126 GeV'de onaylanabilecek bir Higgs bozonunun varlığının mümkün olamayacağı anlamına geldiğini öne sürdüm. Birdenbire bıkkınlık içinde dedim ki, "Neden bu uzun zamandır aranan parçacık, 40 yıl sonra, hızlandırıcıların onu keşfetmesi için en zor yerde saklanmakta ısrar ediyor!"

Monika güldü ve "Bu sorunun cevabını bilmiyorum" dedi. Dinleyicilere hitap etmek için geri dönerken, ATLAS verilerinde Higgs bozonunu görüp görmedikleri konusunda herhangi bir sonuca varmak için henüz çok erken olduğunu belirtiyordu. Belki gelecek yıl, proton-proton çarpışmalarında daha büyük bir parlaklık ve daha fazla veriyle, 126 GeV'deki tümseğin belirginliğinin artıp artmayacağına veya sadece basitçe ortadan kalkacağına karar verebiliriz.

Monika'nın sunumundaki tartışmalarda, Grenoble'daki temmuz konferansında, ATLAS verilerini iki ters femtobarna kadar sunan deneycilerin istatistiksel olarak yaklaşık 140 GeV'de 2,8 sigma belirlenmiş bir tümsek gösterdiğine de işaret ettim. Ancak bu istatistiksel anlamlılık BYB tarafından azaltılmıştır. Gelecek yıl tüm bunların sonucunun, geçen temmuzdaki ATLAS hikâyesinin tekrarı olabileceğini iddia ettim. Öte yandan daha fazla veri, tümseğin belirginliğini artırırsa, yeni bir parçacığın keşfedildiğini kabul etmeye başlayabiliriz demekti. Bunu zaman gösterecekti.

Tevatron çarpıştırıcısı Eylül 2011'de kapanmış olmasına rağmen, deney grubu hâlâ Higgs bozonu ve diğer egzotik parçacıkların aranmasına ilişkin verilerini analiz etmekle meşguldü. İki konuşmacı Tevatron verilerini sundu. İlki, Todd Adams, yük–parite (CP) ihlalini gözlemlemek için yapılan testlerin sonuçlarına odaklandı; yani alt kuark bozunmalarındaki yük ve parite simetrilerinin ihlali. Standart model, herhangi bir yük ve parite simetri ihlali öngörmedi. Kuarkın yük kuantum sayısı, kuarkın bir karşı-kuarkla yer değiştirmesinden kaynaklanırken parite bir parçacığı tam bir ayna görüntüsü olarak görmek demektir. CP simetrisi; bir kuark üzerinde bir yük eşleniği dönüşümü (yani bir karşı-kuarkla değiştirilmesi) ve ardından bir parite dönüşümü, yapmaktan oluşur. Adams, Tevatron Higgs araştırmasının tartışmasını bir sonraki konuşmacı Florencia Canelli'ye bıraktı.

Canelli, WW, ZZ'ye bozunmalar ve iki foton gibi farklı bozunma kanallarından gelen verileri tanımlayarak Higgs araştırmasının sonuçlarını gösterdi. Şimdi, iki fotonlu bo-

zunma kanalı için CMS ve ATLAS verilerinde görüldüğü gibi, çarpma oluşturan olayların önemli bir fazlası vardı. Elimi kaldırdım ve verilere bakarak, özellikle 115 ile 145 GeV'lik kritik bölgede, bir standart sapmanın üzerinde hiçbir olay fazlalığı olmadığını söyledim. Ayrıca bu, CMS ve ATLAS tarafından bir Higgs bozonunun varsayılan sinyalinin talep edildiği 120 GeV ile 130 GeV arasındaki kritik enerji aralığı için de özellikle doğruydu. Başıyla onayladı ve CERN sonuçlarının kesin olduğuna inanmadığını söyledi. Bu durum, CMS temsilcisi Yaşar Önel'in ateşini yükseltmişti. Benden birkaç sıra mesafede oturan Önel'in hararetli yorumlarından bazılarını bana yöneltmesiyle ikisi arasında keskin bir tartışma yaşandı.

Daha sonra şu soruyu sordum: "Üç deneyi, yani ATLAS, CMS ve Tevatron sonuçlarını ne zaman birleştirmeyi bekleyebiliriz?" Bana Higgs bozonunun varlığına dair nihai bir karara varmak için bu gerekliymiş gibi geldi, çünkü bu noktada "skor" CMS iki ya da üç tümsekti; ATLAS, bir; ve Tevatron, 115 ile 145 GeV kritik enerji aralığında sıfır tümsekti. "Tevatron verilerinin devam eden analizinin daha güçlü sonuçlar üretmesini bekleyebilir miyiz?" diye sordum.

Canelli, gerçekten de analize devam ettiklerini söyledi ve nihayet tüm veriler analiz edildiğinde, iki LHC dedektöründen gelen verilerle birleştirilecek kadar güçlü bir sonuca sahip olacaklarını umduğunu ifade etti.

BAHİSLER HIGGS BOZONUNA

Dinleyicilerin bir üyesi olarak, LHC ve Tevatron verilerini sunan konuşmacıların dürüstlüğünden ve dikkatli tavırlarından etkilendim. Higgs bozonunu bulmak; ün, servet, Nobel Ödülleri ve LHC örneğinde, sürekli finansman garantisi anlamına gelmesine rağmen konuşmacılar uzun zamandır aranan Higgs'i keşfetmiş oldukları olasılığını abartmadılar.

13 Aralık'taki CERN toplantısında verilerin ön sunumunu göz önünde bulundurarak, yaklaşık 126 GeV'de bir Higgs

bozonunu öngördüğünü iddia eden bir dizi kuramsal makale olacağını tahmin etmiştim. Gerçekten de bu çeşit pek çok makalenin arasında, Michigan Üniversitesindeki fizikçilerin elektronik arşivinde yer alan bir makale, sicim kuramına ve süpersimetriye dayanan karmaşık bir modelin, yaklaşık 125 GeV'de bir Higgs bozonunu öngördüğünü iddia etti. Geçtiğimiz otuz yıl boyunca, "gözlemlenen" yeni parçacıkların tarihi oldukça olaylı olmuştur; çarpıştırıcılardaki araştırma grupları yeni bir parçacığın keşfini rapor edecek ve daha sonraki veriler sonunda bu yeni parçacıkların aslında var olmadığını gösterecekti. Çarpıcı bir örnek de CERN'den gelmişti. Carlo Rubbia 1983'te W ve Z parçacıklarını keşfettikten kısa bir süre sonra, 40 GeV'de üst kuarkı tespit ettiğini duyurdu. Bundan kısa bir süre sonra, süpersimetrik bir parçacığın keşfini de duyurdu. Daha derin veri analizi, sonunda bu iki "keşfin" de yanlış olduğunu kanıtladı ve bu parçacıkların kanıtları usulca ortadan kayboldu. Çok sonra, üst kuark, Fermilab'da 173 GeV enerjide gerçekten keşfedildi. Süpersimetrik parçacıklarsa henüz keşfedilmedi.

Başka bir örnekte; 1984'te, SLAC'daki Kristal Küre deneyiyle çalışan deney grubu, 1,5 GeV'de Higgs bozonunun keşfini duyurdu. Gerçekten de enerji seviyelerindeki fark göz ardı edildiğinde Higgs'in iki fotona bozunması için olay sayısının SLAC grafiği, 13 Aralık 2011'de CERN toplantısında sunulan CMS ve ATLAS sonuçlarının eşdeğer çizimlerine esrarengiz bir şekilde benziyordu. Daha sonraki ek veriler ve analizler, bu 1984 "Higgs keşfini" ortadan kaldırdı. Yanlış keşiflerin daha yakın tarihli ünlü bir örneği, 2000'li yılların ortalarında hızlandırıcı laboratuvarlarında yapılan deneylerde pentakuark adı verilen yeni bir parçacığın bulunmasıdır: Birlikte proton ve nötronu oluşturan üç kuarktan çok farklı bir parçacık olan; 2003 ve 2005 yılları arasında literatürde yayımlanan grafiklere baktığımızda, pentakuark için önemli neredeyse 5 sigmaya ulaşan bir olay fazlalığı görüyoruz: Yeni parçacıkların onaylanması için altın plakalı standart bir olay. Yine de, daha fazla veri ve daha ayrıntılı analiz, yeni

parçacığı tekrar ortadan kaldırdı. Pentakuark rezonansının iddia edilen keşfi, her halükârda, kuark modelleri üzerinde çalışan kuramsal fizikçiler tarafından şüpheyle karşılandı, çünkü parçacık standart, göreli olmayan kuark modeline uymuyordu.

2012'de daha fazla verinin ortaya çıkmasıyla ve 2015'te daha yüksek enerjili LHC'nin devreye girmesinden sonra, ATLAS ve CMS deneylerindeki tümsekler benzer şekilde ortadan kalkabilirdi. Eğer öyle olursa Higgs bozonu, standart Weinberg-Salam modelinin artık geçerli olmayacağı kadar yüksek bir enerjiye kadar temel bir parçacık olarak dışlanacaktı. Bu durumda, şu ya da bu modele dayanarak, yazarların bu sonucu baştan beri öngördüklerini iddia eden kuramsal makalelerde bir artış bekler ve daha sonra Higgs bozonunun neden gözlemlenemediğine dair uzun bir kuramsal açıklamalar dönemine girerdik.

Gerçekten de 13 Aralık 2011'deki CERN sunumundan önce, elektronik arşivde, Higgs bozonunun Higgs'in yalnızca kara madde parçacıklarına bozunması gibi çeşitli mekanizmalar yoluyla görünmez yapılabileceğini iddia eden bahislerini koruyan makaleler zaten ortaya çıkmıştı. Kuramsal fizikçilerin fizik tahminlerinde spekülasyon yapmalarına ve hata yapmalarına izin verildiği fizikte bilinen bir gerçektir. Bununla birlikte, deneyciler keşif iddialarında hata yapamazlar. Yanlış iddialar itibarlara ve kariyerlere ciddi şekilde zarar verebilir.

7

125-GeV TÜMSEĞİ TANIMLAMAYA ÇALIŞMAK

4 Temmuz 2012'de CERN, CMS ve ATLAS gruplarının 125 ile 126 GeV aralığında Higgs benzeri bir bozon keşfettiklerini duyurdu. Bu bozon, standart model Higgs bozonu olabilirdi ve bu durumda temel parçacıkların standart modeli tamamlanmış olacaktı.

Ancak, yeni bozonun standart model Higgs bozonu olmadığı ortaya çıkarsa standart elektro-zayıf modele bir alternatif bulunmalıdır. Halihazırda birkaç rakip model var ve fizikçilerin hangi olası alternatifin en uygun olduğuna karar vermeye çalışacakları LHC'deki deneysel programla bir aşamaya gireceğiz. Modellerden biri, benim kuarkonyum rezonans modelim, yalnızca standart modelde zaten gözlemlenmiş parçacıklara dayanır – yani 12 kuark ve lepton, iki W bozonu, Z bozonu, foton ve gluon üzerine kuruludur. Bu model, yeni bozonu bir kuark ve bir karşı kuarktan oluşan spin-0 rezonansı olarak tanımlar.

Bir başka senaryo, yeni parçacığın beklenen Higgs bozonu olmadığı ortaya çıkarsa, LHC'nin enerjisi maksimuma, 14 TeV'ye yükseltildiğinde ve proton-proton çarpışmaları yoğunluğunun önemli ölçüde artmasıdır. O zaman belki de Higgs de dahil olmak üzere yeni parçacıklar bu yüksek enerjilerde artık keşfedilecektir. Bununla birlikte Higgs kütle hiyerarşisi problemi gibi Higgs bozonuyla ilişkili temel problemler nedeniyle, Higgs bozonunun zorluklarını iyileştirmek

için standart modelin ötesinde yeni bir fiziğin bulunması gerekecektir.

BİR TÜMSEĞİN YORUMLANMASI

Higgs bozonu çok kısa ömürlü olduğu için onu LHC'de "doğrudan" tespit edemeyiz. Varlığı ancak bozunabileceği düşük enerjili parçacıkları gözlemleyerek çıkarılabilir: *bozunma ürün kanalları.* Büyük ardalanlar içinde Higgs benzeri bir sinyal tespit etmek, samanlıkta iğne aramak gibi bir şeydir.

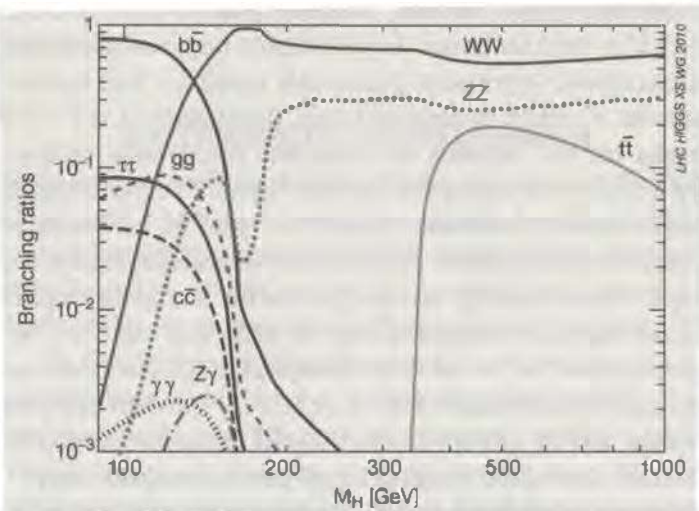
125 GeV kütleli bir Higgs bozonu için gözlemlenebilir dokuz bozunma kanalı vardır. Baskın bozunma kanalı alt ve karşı-alt kuarklardır (bb-bar); yani zamanın yaklaşık yüzde 60'ında Higgs, alt ve karşı-alt kuarklara bozunur. Bir sonraki baskın bozunma kanalı, Higgs'in iki W bozonuna ve ardından iki gluona bozunmasıdır. En küçük bozunma kanalı, Higgs'in iki fotona bozunmasıdır ve bu, zamanın yalnızca yüzde 0,3'ünde gerçekleşir. Bu bozunma kanallarının çoğunda, çok büyük hadronik, yeğin etkileşim ardalanı vardır, bu nedenle sinyal-gürültü oranı çok küçüktür, bu da Higgs bozonunu tespit etmeyi zorlaştırır. Bununla birlikte, iki foton ve ZZ bozunma kanalları bu hadronik ardalandan neredeyse tamamen bağımsızdır, bu yüzden onlara *altın kanallar* denir.

Bir bozunma kanalı için bir "dallanma oranı", bozonun daha hafif bozunma ürünlerine bozunma hızının, tüm bozunma kanalı hızlarının toplamına bölümüdür. Şekil 7.1, Higgs bozonunun olası kütleleri (x ekseni) için farklı bozunma kanalları (y ekseni) üzerinden dallanma oranlarının büyüklüklerini grafik olarak göstermektedir.

Mart 2012'ye kadar LHC deney sonuçlarından, hem CMS hem de ATLAS dedektör grupları, Higgs kanalında 125 GeV'de iki fotona bozunan bir Higgs parçacığının ipuçlarının olduğunu iddia ettiler. O zaman, parçacık fiziği topluluğu, 125-GeV Higgs bozonunun ipuçlarını güçlendirmek için Nisan 2012'de LHC'nin çalışmaya başlatılmasının sonuçlarını hevesle bekliyordu.

Ardından, 4 Temmuz 2012'de, 125 GeV'lik tümsek, CERN'in "yeni bir bozon" keşfine ilişkin duyurusuyla istatistiksel olarak doğrulandı. Deneyciler şimdi, bu yeni bozonun aslında standart modeldeki temel Higgs bozonu mu, yoksa başka bir tür parçacık mı olduğunu belirlemeye çalışıyor. Bu durum, yeni keşfedilen bozonun spinini ve paritesini deneysel olarak belirlemeyi gerektirir - yani bu bir skaler mi, yoksa bir sahte-skaler parçacık mı? Parçacığın skaler veya sahte-skaler özelliği, parçacığın parite tersinmesi altında işaret değiştirip değiştirmediğiyle belirlenir. Yani x, y ve z koordinatları –x, –y ve –z'ye dönüştürüldüğünde skaler işaret değiştirmez, sahte-skaler parçacık ise işaretini değiştirir. Ayrıca, tahmin edilen standart model dallanma oranlarının tersine, yeni bozon gerçekte hangi parçacıklara bozunur?

Higgs'-in-iki-fotona bozunma kanalıyla ilgili asıl sorun, büyük bir foton ardalanının (hadronik ardalanın aksine) olması ve standart modelin bozunmayı temsil eden 125 GeV'de öngörülen rezonansı olmasıdır. Bu rezonans hafif bir Higgs bozonunun iki fotona bozunması için sadece yaklaşık 30 keV'dir. Bu küçük sinyalin ardalandan çıkarılması gerekir. Gerçekten de şu anda yaklaşık 10^9 elektron volt veya 1 GeV olan rezonansın deneysel çözünürlüğü nedeniyle, rezonansın bu iki-foton bozunma genişliğini ölçmek asla mümkün olmayabilir. Bununla birlikte, ATLAS ve CMS'deki çok hassas elektromanyetik kalorimetre dedektörleri, sözde Higgs bozonundan olanlar da dahil olmak üzere, iki fotona bozunan tüm parçacıkların toplam olay sayısını hâlâ ölçebilir. Deneyciler daha sonra Higgs bozonu bozunma sinyalini toplam olay sayısı üzerinden incelemek için bir imkân yakalamıştır.



Şekil 7.1 Higgs bozonunun muhtemel bozunma kanalları için dallanma oranı genlikleri. Kaynak: © CERN.

Higgs parçacığının iki W bozonuna bozunması ve onun alt ve karşı alt kuarklara (bb-bar) baskın bozunması gibi daha baskın bozunma kanallarını da ölçmeliyiz. Bununla birlikte, bu bozunma kanallarıyla, büyük hadronik ardalan nedeniyle yeni problemler ortaya çıkmaktadır. Diğerlerinin çok fazla bozunması Higgs bozonunun yanı sıra WW'ye bozunan parçacıklar ve bb-bar kuarkları meydana gelir, bu da Higgs bozonunun yanlış tanımlanmasını önlemeyi zorlaştırır; bb-bar bozunma kanalı durumunda, hadronik ardalan, Higgs bozon sinyalinin olacağından bir milyon kat daha büyüktür.

Diğer altın bozunma kanalı, Higgs bozonunun her biri yaklaşık 90 GeV kütleli iki Z bozonuna bozunmasıdır, ki sonradan her ikisi de ayrı ayrı elektron-pozitron (e^+, e^-) veya mu$^+$ ve mu$^-$ lepton çiftlerine bozunmaktadır. Duyarlı dedektörler, son dört leptonu tanımlamalı ve ana Z bozonlarının kütlelerini toplamak için tek tek lepton çiftlerinin kütlelerini ölçmelidir. Higgs kütlesi 180 GeV'de iki Z bozonunun eşiğinin

altındaysa Z'lerden biri veya her ikisi, kütlesi 90 GeV'den az olan sanal bir parçacık olmalıdır. Kuantum mekaniğinde sanal bir parçacık, kütle kabuğundaki "gerçek" bir parçacık değildir (daha fazla açıklama için Bölüm 6, dipnot 1'e bakın). İki-foton bozunma kanalında olduğu gibi, iki--Z bozonu ve dört--lepton kanalı etkin bir şekilde hadronik ardalandan arındırılmıştır.

Yeni bozonun iki fotona bozunduğu gözlemlendiğinden, 1948'de Landau ve 1950'de Yang tarafından yayımlanan bir teoremden, yeni bozonun spininin 0 olması gerektiği sonucu çıkar.[1] Landau ve Yang, açısal momentumun korunumunu kullanarak, kabuk üstü spin-1 bozonunun, her biri spin 1 olan iki fotona bozunamayacağını göstermiştir. Bu nedenle, yeni bozonun graviton gibi spin 0 veya spin 2'ye sahip olması gerekir. Bu spin durumu graviton gibi bir parçacıktır, yani graviton benzeridir. Graviton benzeri bir parçacığın yeni bozon için tüm gözlemsel verilere uyması pek olası görünmüyor ve yeni bozonun ya 0 spinli skaler ya da sahte-skaler bir bozon olduğu gerçeğiyle mücadele etmeliyiz. Deneysel olarak doğrulanmış tüm parçacıklar standart modelin spin ½ veya spin 1'i vardır, bu nedenle şu soru ortaya çıkar: Yeni bozonla hangi spin-0 parçacığı tanımlanabilir? Standart modeldeki 0 spinli tek temel parçacık, skaler Higgs bozonudur. Bununla birlikte kuarklardan ve karşı-kuarklardan oluşan bileşik bozonlar 0 spinine sahip olabilir ve ayrıca; ya skaler ya da sahte-skaler rezonans durumları olabilir.

İki makalede, *zeta* (ζ)[2] dediğim kuark/karşı-kuark bağlı durumu olarak 125-GeV rezonans tümseğinin bir modelini önerdim. Bu bağlı durum, süper ağır "kuarkonium" modeline dayanmaktadır. 1970'lerde ve 1980'lerde, bu modeli göreli rölativistik olmayan kuark kullanılarak daha düşük enerjilerde

---

1 L.D. Landau, Doklady Akademii Nauk SSSR, 60, 207 (1948); C.-N. Yang, *Physical Review*, 77, 242 (1950).

J.W. Moffat, "Quarkonium Resonance Identified with the 125 GeV Boson," arXiv.org/ 1211.2746 [hep-ph]; and "Quarkonium Resonance Model of the 125 GeV Boson," arXiv.org/ 1302.5583 [hep-ph].

mezon spektroskopisi temelinde geliştirilmişti. Kuarkonyum terimi, bir elektron ve bir pozitronun bağlı durumu olan pozitronyum sözcüğünden ödünç alınmıştır. Elektriksel olarak nötr bir sahte-skaler bozon olarak tanımladığım 125 GeV zeta rezonansının kısmi bozunma oranlarını hesapladım ve iki fotona bozunan zeta rezonansı için sonucun 125 GeV'de iki fotona bozunan hafif bir Higgs bozonu için beklenenle yaklaşık olarak aynı olduğunu buldum. ZZ*'ye, ardından dört leptona bozunan kuarkonyum zeta rezonansının kanalı için benzer sonuçlar buldum. (Unutmayın; Z*, sanal bir Z bozonunu gösterir.) Ancak bb-bar kuarkları ve tau$^+$/tau$^-$ leptonları gibi fermiyon ve karşı-fermiyon çiftlerine bozunmalar, Higgs bozonunun tahmin edilen bozunmasıyla karşılaştırıldığında bastırılmıştır, ya da çok daha az hale gelmiştir, Bu durum, standart model Higgs bozonuyla benim zeta rezonans modelim arasındaki tahminlerde önemli bir fark oluşturuyordu. Aslında, bb-bar ve tau$^+$/tau$^-$ gibi fermiyon/karşı-fermiyon çiftlerine bozunan yeni bozon sinyalinin eksikliğine ilişkin tahminim şuydu: LHC'den gelen en son verilerle tutarlı.

Kuarkonyum makalemden alınması gereken mesaj; iki foton bozunma kanalında 125 GeV'de olduğu gibi bir tümseğin, daha yüksek enerjilerde yer alan, halihazırda kurulmuş QCD/kuark deneysel spektroskopisinin sonucu olmasının mümkün olduğudur. Kuark/karşı-kuark sahte-skaler parçacık, QCD/gluon etkileşimleriyle bağlıdır. Gerçekten de yeni bozonun kuarkonyum yorumunun deneysel olarak doğru olduğu ortaya çıkarsa bu durum yeni fiziği oluşturacaktır. Çünkü bu daha yüksek enerjilerde, daha düşük enerjilerde iyi kurulmuş kuarkonyum spektroskopisinin bir yinelemesini temsil edecektir; sırasıyla yaklaşık 3 GeV ve 9,5 GeV enerjilerde "charmonium" ve "bottomonium" rezonansları gözlemledi. Bu rezonansların varlığı, 125 GeV'lik tümseğin temel standart model hafif Higgs parçacığı olarak tanımlanmasını kesinlikle sorgulatacaktır. Her halükârda, makale bir uyarı veriyor: 125 GeV'lik bir rezonans tümseğinin Higgs bozonu olduğuna dair herhangi bir kesin ifade sorgulanmalıdır. Bu

konuya yalnızca daha ileri deneysel araştırmalar karar verebilecektir. LHC'deki bu tür araştırmalar, makinenin 2015'te yeniden çalıştırılmasından sonra bir veya iki yıl alabilir.

Mart 2012'ye kadar medyada ve fizik bloglarında 125 GeV kütleli bir Higgs parçacığının "ipuçları" hakkında büyük bir heyecan vardı. Yorumlar, Higgs bozonunun; açıkça gözlemlendiğini iddia edenlerden, keşfine şüpheyle bakanlara kadar uzanıyordu. O zamanlar CERN'deki ve başka yerlerdeki deneycilerin çoğunluğunun, gerçekten de Higgs bozonunu keşfettiklerine şüpheyle yaklaştıkları ortaya çıktı. Öte yandan kuramcılar, ya onun keşfi konusunda hevesli ya da neredeyse yarım yüzyıllık elektro-zayıf fiziği inşa etmiş olan Higgs lehindeki önemli kuramsal önyargı nedeniyle sadece biraz şüpheci duruyorlardı.

Higgs bozonu keşfedilmemiş olsaydı o zaman bir tür kâbus senaryosu ortaya çıkmaya başlayacaktı: Saçılma parçacıklarının tesir kesitlerinin sonlu hesaplamalarını yapmamıza izin veren tutarlı bir elektro-zayıf kuramını nasıl inşa edebiliriz? Kendiliğinden simetriyi bozan bir Higgs mekanizması mı gerekecekti? 50 yıldan fazla geriye gitmemiz ve kuramlarımızla her şeye yeniden başlamamız gerekirdi! Bu durum, tüm kariyerlerini standart Higgs mekanizma modeli ve Higgs bozonu üzerine makaleler yayımlamak için harcamamış genç kuramsal fizikçiler için büyük bir fırsat olurdu. Öte yandan kariyerlerinin çoğunu kendiliğinden simetri kırılmasına ve Higgs mekanizmasına dayanan standart elektro-zayıf kuramına adayan yaşlı fizikçiler için tehdit edici bir şey olacaktır. Bununla birlikte kuramsal fizik krizlerle gelişir ve ilerler. Bu olası kriz, Max Planck'ın 1900'de kara cisim radyasyonu formülünü keşfettiğinde karşılaştığı ve onu radyasyon paketlerinde yayılan enerjinin süreksiz olduğu köktenci fikrini düşünmeye zorlayan krizle karşılaştırılabilir.

1983 yılında CERN'de yapılan W ve Z bozonları avı ile günümüzün Higgs bozonunu araması arasında önemli bir fark vardır. Standart model, W ve Z'nin kütlelerini öngördü; deneyciler 1983'te W ve Z bozonlarını aramaya başladıklarında

bu önemli bilgiye sahiptiler. Gerçekten de Rubbia ve çalışma arkadaşları tarafından W ve Z'nin deneysel keşfi, standart modelde bu parçacıkların kütle tahminleriyle oldukça uyum içindeydi. Buna karşılık standart model Higgs bozonunun kütlesini öngörmez. Higgs bozonunun nerede aranacağına dair herhangi bir öngörü sağlamak için, yalnızca elektro-zayıf verilere gelen kütlesi hakkında dolaylı ipuçları verilmiştir.

Tevatron ve LHC'deki Higgs parçacığının kesin olarak tespit edilememesinin Mart 2012'ye kadar devam ettiğini söylemeye gerek yok, kuramcılar biraz tedirginlik göstermeye başladılar. Elektronik arşivde Higgs bozonunun olası var olmama durumunun nasıl açıklanabileceğine dair spekülasyonlar yapıldı. Kuramsal parçacık fiziğinde popüler bir kumar: Gerçekten inandığınız bir şey görmüyorsanız, onun "saklandığını" varsayın: onu görünmez yapın! Bu nasıl çalışıyor bakalım? Higgs bozonunu Tevatron veya LHC'de kolayca tespit edilemeyen parçacıklara bozundurarak gizleyebiliriz. Ya da "gizli" Higgs bozonunun bozunmasının günümüz teknolojisiyle neden tespit edilemediğine dair açıklamalar yapılabilir.

İki fotonlu bozunma kanalındaki olası 125 GeV'lik artışa ilişkin Mart 2012'deki ilgi telaşının ortasında, bir sorun vardı. Standart model ayrıca Higgs'in kuarkların yanı sıra elektronlar ve pozitronlar, muonlar ve tau leptonları gibi leptonlara bozunması gerektiğini öngördü. İki fotonlu bozunma kanalından çok daha baskın olan bu fermiyon bozunma kanalları, henüz kesin olarak gözlemlenmemiştir. Böylece kuramcılar, Higgs'in bir şekilde birinin beklediği fermiyonlara dönüşmemeyi başaracağı, bu da Higgs'i bu belirli bozunma süreçlerinde etkili bir şekilde görünmez kılacağı anlamına gelen "fermiyofobik bozon" fikrini ortaya attı.

Higgs bozunmaları için diğer olası senaryolar arasında, 2012'den önce, W ve Z vektör bozonlarına bozunan Higgs için güçlü bir sinyalin olmamasıyla motive edilen "vektörfobik" model vardı. Çünkü bunlar elektro-zayıf kuramda simetri kırılmasının standart modelin açıklamasıyla veya Higgs bo-

zonunun iki fotona bozunmasının standart model hesaplamasıyla aynı fikirde olmayacaklardı.

Hatta yakın zamanda Higgs bozonunun, muhtemelen asla gözlemlenemeyecek olan kara madde parçacıklarına bozunabileceği bile öne sürülmüştür, ki bu durum muhtemelen hiçbir zaman gözlenmeyecektir! WIMP'ler gibi kara madde parçacıklarını saptamak için yapılan birçok sıfır yeraltı deneyinde açıkça görüldüğü gibi, kara madde parçacıklarını saptamak imkânsız değilse de zordur.

Higgs'in ZZ ve WW ayar bozonlarına bozunması, standart Higgs mekanizmasını doğrulamak için önemlidir, çünkü bu bozonlarla eşleşmesi, Higgs'in W ve Z bozonlarına kütle verdiğini doğrulamak için gereklidir. Tabii ki Higgs'in leptonlar ve kuarklarla eşleşmesini gözlemlemek de önemlidir, böylece Higgs'in fermiyonlara kütlelerini vermekten sorumlu olduğu gözlemlenir. Ek olarak, Higgs bozonu doğrudan iki fotona bozunamaz, çünkü fotonlar kütlesizdir ve Higgs'in fotonlara doğrudan bağlanması onlara kütle verecektir. Dolayısıyla Higgs'in iki fotona bozunması için, bunu bir üst/karşı-üst kuark döngüsü ve bir W^+, W^- bozon döngüsü aracılığıyla dolaylı olarak yapması gerekir. Bu nedenle, iki fotona bozunan Higgs bozonunun güçlü bir sinyali gözlemlenirse bu, Higgs'in fermiyonlara ve W bozonlarına bağlanması gerektiği anlamına gelir.

STANDART MODELİN ÖTESİNE GEÇMEK

Son otuz yılda deneysel verilerin eksikliği göz önüne alındığında kuramcılar, canlı hayal güçlerinde herhangi bir deneysel kısıtlama olmaksızın parçacık fiziğinin temel sorunları hakkında çılgınca spekülasyonlar yapıyorlar. Amaçları, yeni parçacıklar ve yeni simetriler icat ederek "standart modelin ötesi"ne geçmek olmuştur: aslında, Higgs parçacığıyla standart modeli sağlam tutacak, ancak bununla ilişkili sinir bozucu ince ayar sorunlarını ortadan kaldıracak herhangi bir şey arayışı içindedirler.

Bununla birlikte, Eylül 2010'dan bu yana, LHC'den dökülen verilerden deneysel kısıtlamalar devreye girmeye başladı ve bu standart-ötesi-model (SMÖ) spekülasyonlarının çoğu ani bir ölümle karşı karşıya kaldı. Sonunda 125 GeV'deki tümseğin Higgs bozonundan farklı bir şey olduğu ortaya çıkarsa, standart modeli yeniden icat etmemiz gerekecek. Parçacıkların nasıl kütle aldığı sorusunun yeniden ele alınması gerekir. Bu, kütlenin kökenlerinin daha derinden anlaşılmasını ve kütleçekimle eylemsizliğin de bu gizemi çözmede nasıl bir rol oynayabileceğinin değerlendirilmesi gerekir.

Çok çeşitli SMÖ önerileri olmaktadır. Çoğu, standart modelin temel aldığından daha büyük bir simetri grubunu içerir. 1970'lerin büyük birleşik kuramları (GUT'ler) bu tür bir modelin öncüleriydi. GUT'lerin amacı, kütleçekim de dahil olmak üzere bilinen dört doğa kuvvetini birleştirmekti.

Bu SMÖ fikirleri, hızlandırıcılar tarafından henüz ulaşılmamış yüksek enerjilerde gizlendiği varsayılan algılanmamış parçacıkların sayısını artırmayı içerir. Parçacıkların en üretken artışı, uzayzamanın simetri grubunu genişleten süpersimetri fikri tarafından sağlanmıştır. Süpersimetrinin tanıtılmasıyla birlikte, gözlenen her temel parçacık için süpersimetrik bir eşe sahip olarak parçacıkların sayısının iki katına çıktığını hatırlıyoruz. Ayrıca bu varsayımsal süpereşlerin özelliklerini tanımlayan serbest parametrelerin sayısında yaklaşık 20'den yaklaşık 120'ye kadar büyük bir artış vardır.

Parçacıkların ve alanların varsayımsal simetrisine dayanan bazı büyük grup yapılarında doğa kuvvetlerinin nasıl birleştirileceği sorununu çözsek bile bu, parçacık fiziğinde yapılan hesaplamalarda karşılaşılan sonsuzluklar sorununu mutlaka çözmeyecektir. Bu durum, son altmış yılda parçacık fiziğinde tekrar eden bir problem olmuştur ve SMÖ önerilerini formüle etmeye çalışırken hâlâ ele alınması gerekmektedir.

Hesaplamalarda sonsuzluk sorununu çözmeye yönelik bir girişim, "etkili alan kuramı" başlığı altına girer. Etkili bir alan kuramı, tüm enerjiler için geçerli olan eksiksiz bir kuram değildir; daha ziyade, bir enerji "eşik" yoluyla kişi-

nin belirli bir yüksek enerjiye kadar çalışmasına izin verir. Herhangi bir spekülatif birleşik alan kuramını alın ve *mor ötesi enerji felaketi* olarak adlandırılan şeyle yüzleşmek zorunda kalmamak için hesaplamalardaki yüksek enerjileri keserek sonsuzluklar problemini ele almalısınız. Yaklaşık 300 GeV'nin altındaki fizik, geleneksel olarak *kızıl-altı* olarak adlandırılır ve uzun dalga boylarındadır, 1 TeV'nin üzerindeki fizik ise kısa dalga boylarıyla mor ötesi enerji aralığındadır. Bu kısa dalga boyları, hızlandırıcılardaki parçacıkların yüksek enerjilerine karşılık gelir. Kuantum alan kuramındaki hesaplamalarda mor ötesi enerjisi sonsuza uzandığında, hesaplamaların sonuçları sonsuz ve anlamsız hale gelir. Bu bir mor ötesi enerji felaketidir.

Bu morötesi enerji eşiğinin üzerinde, parçacıkların saçılmasının tesir kesitlerini hesaplamak gibi parçacık fiziğinin matematiğini nasıl yapacağımızı anlamıyoruz ve gelecekteki bazı gelişmelerin bizi kurtaracağını umuyoruz. Bizi bu çıkmazdan kurtaracak Enerji eşiğinin altındaki her şey gayet iyi görünüyor. Yeniden boyutlandırma kuramını bu aralıkta yapabilirsiniz ve tüm hesaplamalar sonlu çıkar; bu sayede parçacık fizikçileri tesir kesitlerini huzurlu bir şekilde hesaplayabilir. Bununla birlikte, zayıf etkileşim kuramında yerleşik bir tuzak vardır: yani parçacıkların yerel etkileşimlerine dayanan standart kuantum alan kuramı yöntemlerini kullanan Higgs bozonu olmadan, işler yaklaşık 1 ile 2 TeV arasında kötü gidebilir; parçacıkların saçılması artık üniter değildir. Dolayısıyla bu enerji eşiğini daha yüksek bir enerjide –örneğin 10 TeV– koysanız bile, zayıf etkileşim kuramı yine de çöker. LHC'nin Higgs bozonunun ötesinde yeni parçacıklar keşfetmemesi ve doğada böyle yeni parçacıkların bulunmaması durumunda, hafif bir Higgs bozonu için kuramın yeniden boyutlandırılabilir ve tüm enerjiler için geçerli olduğu iddia edilebilir. Bu durum, hafif bir Higgs bozonuyla böyle yeniden boyutlandırılabilir bir kuramda, eşiğin fiziksel hesaplamaları bozmadan sonsuza gitmek için; tesir kesitler gibi büyüklükler yapılabileceği anlamına gelir.

Yeni parçacıkların var olduğu iddia edilen SMÖ kuramlarıyla ilgili sorun, zayıf etkileşimlerin hastalıklarını tedavi edememesidir; yani kuramların yeniden boyutlandırılamaması eksikliği anlamına gelen hastalıklar gibi durumlar doğurmasına neden olur. Higgs'ten çıktığınızda bu ölümcül hastalıkla karşı karşıya kalabilirsiniz. 1 TeV veya 2 TeV'den başlayarak tespit edilmemiş parçacıkları eklemeye devam etmek ve bu parçacıkların yüzde 100'den fazla olan ölümcül olasılıkları ortadan kaldırmasını sağlamak için öneriler var olmuştur. İşte bu durumda karşılaşacağınız asıl sorun; enerji arttıkça üniterlik sorununun tekrarlanmasını önlemek için hesaplamalara giderek daha fazla parçacığın eklenmesi gerektiğidir. Bununla birlikte bu argümanlar, tedirgenme kuramının elektro-zayıf kuramına uygulanmasına ve elektro-zayıf kuramın tüm enerjiler için geçerli olduğuna dayanmaktadır. Durum bu olmayabilir; kuram tedirgenmiş olmayabilir ve üniterlik problemini çözmek için yeni bir yaklaşım gerektirebilir.

SMÖ araştırma yollarının çoğu, zayıf etkileşim kuramında üniterlik eksikliği ve yeniden boyutlandırılabilirlik eksikliği sorunlarıyla karşı karşıyadır. Higgs bozonunun olmadığı ortaya çıkarsa, bu sorunları çözmenin başka yolları olması gerektiği düşünülür. Zayıf etkileşim kuramındaki suçlu, yüklü W kütleli bozondur; Higgs bozonu ve Higgs mekanizması olmadan, W bozonu kuramı yok eder, çünkü ayar değişmezliğini kaybederiz. Bu sonuçların kuramda QED'den farklı olarak yeniden boyutlandırılabilir ve üniter olmadığını hatırlıyoruz. Bu nedenle, zayıf etkileşim problemini çözmenin yeni ve köktenci bir yolu olmadan, başarısız bir kuramla karşı karşıyayız. QED'de, fotonun kütlesi olmadığı ve QED'nin çok önemli ayar değişmezliğine sahip olduğu için, fotonun elektronlarla etkileşimi, kesitlerin sonlu hesaplamalarını elde etmedeki tüm sorunları ortadan kaldırır, bütünsellik ve saçılma genliklerinin olasılıklarıyla ilgili bir sorun yoktur. Bununla birlikte zayıf etkileşimlerde, kısa menzilli zayıf etkileşimleri üretmek için W bozonunun büyük olması gerektiği gerçeği, bu QED resmini bozar. Higgs bozonu olmadan,

hem yeniden boyutlandırılabilirliği hem de üniterliği kaybedebiliriz. Higgs ve beraberindeki kendiliğinden simetriyi bozan Higgs mekanizması, bizi bu W bozonu kütlesi probleminden kurtardı ve bu çözüm 40 yıldan fazla bir süredir tartışılıyor. Higgs bozonunu ve kendiliğinden simetri kırma mekanizmasını ortadan kaldırdığınızda bu kuramın tüm üst yapısı çökebilir.

Parçacık fiziğinin standart modelinin büyük bir kısmı, kuarkların gluonlarla yeğin etkileşimlerini SU(3) kullanarak açıklayan kuantum renk dinamiği QCD'dir. Gluonlar kütlesiz olduğundan, kuram tamamen ayar değişmezidir, ayrıca yeniden boyutlandırılabilir. Bu nedenle leptonları, W ve Z bozonlarını ve fotonu içeren zayıf etkileşimler, kuarkları ve gluonları içeren yeğin etkileşimlerden daha fazla SMÖ fiziğine ihtiyaç duyar. Standart bir parçacık fiziği modelini başarılı bir hedefine ulaştırmak için elektro-zayıf kuramı sonlu ve anlamlı hale getirmeyi bir şekilde başarmalıyız.

TEKNİK RENK

Katı-hal fiziğinde, süperiletkenliğin nasıl çalıştığının açıklaması, metallerde çok düşük sıcaklıklarda birbirine bağlanan ve yoğuşan elektron çiftlerine (Cooper çiftleri) sahip olmakta yatar. Weinberg ve Salam tarafından önerilen standart parçacık fiziği modelinde Higgs bozonu, diğer parçacıkların bir bileşimi değil, temel bir skaler parçacık olarak kabul edilir. Peki ya Higgs, süper iletkenlikte Cooper çifti yoğuşmaları gibi diğer parçacıkların bir bileşimiyse? 1976'da Steven Weinberg,[3] ardından 1979'da Leonard Susskind,[4] ve yine 1979'da Savas Dimopoulos ve Susskind,[5] başka bir çözüm yolu önerdi.

---

[3] S. Weinberg, "Implications of Dynamical Symmetry Breaking," *Physical Review*, D13, 974–996 (1976).
L. Susskind, "Dynamics of Spontaneous Symmetry Breaking in the Weinberg–Salam Theory," *Physical Review*, D20, 2619-2625 (1979).
S. Dimopoulos ve L. Susskind, "Mass without Scalars," *Nuclear Physics*, B155, 237–252 (1979).

Bu çözüm yeniden boyutlandırılabilirlik ve bütünlük eksikliği zayıf etkileşim sorunu için uygun bir çözümdü. Çözümlerine "Technicolor" [Teknik renk] adını verdiler. Önerdikleri şey, renk denilen kuark özelliğini taşıyacakları için *Teknik renk parçacıkları* adı verilen yeni parçacıklarla daha yüksek bir enerjide kuark kuramı QCD'yi kopyalamamızdı. (Hadronların; beyaz veya renksiz bir hadron oluşturmak üzere birleşen veya birbirini tamamlayan üç renge sahip kuarklar içeren, bileşik parçacıklar oldukları için renksiz olduklarının gözlemlendiğini hatırlayın.) Bu kurama göre Higgs bozonu bu Teknik rengin bir bileşimidir. Orijinal modellerde, bu fizikçiler yalnızca W ve Z bozonlarının kütlelerini tahmin etmekle ilgileniyorlardı.

Teknik rengin bazı versiyonlarında Higgs bozonu bulunmaz. Teknik renk modelleri, elektro-zayıf fenomeni açıklamak için temel bir Higgs bozonu önermek yerine, elektro-zayıf simetriyi "gizler" ve yeni, varsayılan ayar etkileşimlerinin dinamikleri yoluyla W ve Z bozon kütlelerini üretir. Bu yeni ayar etkileşimleri, şimdiye kadar bu etkileşimleri ortaya çıkarmayan düşük enerjilerden elde edilen deneysel verilere uyması için, daha düşük enerjilerde görünmez hale getirildi.

Teknik rengin ilk sürümleri, kuarkların ve leptonların kütlelerini tahmin edebilmek için genişletildi. Bununla birlikte bu modeller, deneysel verileri ihlal eden Teknik renk parçacıklarının bozunmalarında nötr akım çeşnisinin değişmesini öngördükleri için sorunla karşılaştı. Bob Holdom daha sonra, *yürüyen Teknik renk* adlı bir tür ince ayar getirerek bu sorunlardan kaçınmanın bir yolunu önerdi.

Teknik renk kuramının dikkate değer bir özelliği, Teknik renk parçacıklarının etkileşimlerinin zayıf değil, özünde yeğin etkileşimler olmasıdır. Teknik renk modeli, düşük enerjili QCD'nin bir kopyası olmasına rağmen Teknik renk parçacıklarını birbirine bağlamak için yeni yeğin kuvvetlerin varsayılması gerekir. Bu nedenle, standart elektro-zayıf modelde veya QED'de ve yüksek enerjili QCD'de kullanılan kuantum alan kuramının tedirgenme yöntemleri kullanılamaz. Düşük

enerjili QCD'de, kuarkların hadronlarda tutulmasını açıklamak gerektiğinde, tedirgenmiş hesaplama yöntemleri başarısız olabilir ve büyük bir QCD eşleşme sabitiyle kötü anlaşılmış tedirgenmemiş yöntemler kullanılmalıdır.

Etkileşimlerin bağlanma kuvvetinin büyük olduğu hesaplamaları nasıl yapacağımızı anlamıyoruz. QED'nin, fotonların ve elektronların bağlanma kuvveti, yaklaşık 1/137 olan, dolayısıyla birlikle karşılaştırıldığında küçük bir sayı olan ince yapı sabiti alfayla belirlenir. Fotonların ve elektronların bu küçük bağlanma kuvveti, her bir hesaplama sırası kontrol altında olacak şekilde tedirgenme hesaplamalarını yapmamızı sağlar; her sıranın büyüklüğü bir öncekinden daha küçüktür. Bununla birlikte Teknik renk modellerinde parçacıkların yeğin etkileşimleri için, birleştirme kuvveti birden büyüktür ve artık tedirgenme kuramını kullanamayız. Üniterlik sorunları ve kesit hesaplamalarının olasılıkları, bu yeğin etkileşim kuramlarında potansiyel olarak çözülebilir. Bununla birlikte, kuram ile kesin olarak hiçbir şey hesaplanamadığında, Teknik renk modelinin geçerliliği hakkında herhangi bir olumlu sonuç çıkarmak zordur.

Teknik renk kuramının son otuz yılda birçok varyasyonu geliştirildi ve Fermilab'daki elektro-zayıf deneyler için kesin veriler, bir dereceye kadar onları gözden düşürdü; bu kuramlar deneylerle pek uyuşmuyordu. Deneylerle olan uyuşmazlığı gidermek için biraz yapmacık yöntemler önerildi, bunlardan biri Holdom'un yürüyen Teknik renk modeliydi.

Elbette, Teknik renk modeliyle ilgili en büyük sorun, tüm bu yeni Teknik renk parçacıklarını keşfetmek zorunda olmamız ve LHC'nin şu ana kadar teknik pionlar ve teknik ro'lar gibi düşük enerjili Teknik renk parçacıklarını dışlamış olmasıdır. Bunlar 1 TeV'nin çok altında kütlelere sahip olması beklenen parçacıklardır. (Örneğin sıradan pi mezonun eşdeğeri olan varsayımsal teknik pion renk yükü taşırken, iyi bilinen pi mezonunun taşımadığına dikkat edin.) LHC, bu Teknik renk parçacıkların yüksek enerjilerde var olduğunu ya da var olmadığını keşfetmek zorundadır. Şimdiye kadar

hiçbiri gözlemlenmedi, bu da Teknik renk modelinin tüm fikrini baltalıyor. SMÖ uygulayıcılarına, tahmin ettikleri bir parçacığın LHC'de keşfedilmediği söylendiğinde, parçacığın kütlesini hızlandırıcının mevcut gözlem yeteneğinin ötesinde artırmanın yollarını bulurlar, böylece kuramı canlı tutarlar. Bu durum, bugün Teknik renk ve süpersimetri için de gerçekleşen bir durumdur.

Standart modeldeki temel Higgs bozonunun başlıca gerekliliklerinden biri, diğer temel parçacıkların, kuarkların ve leptonların kütlelerini üretmesidir. Bu üretim, Higgs skaler alanı kaybolmayan bir boşluk beklenen değerine sahip olduğunda gerçekleşir. Kuantum mekaniğinde ve parçacık fiziğinde, gözlemlediğimiz parçacıklar, birbirini sürekli olarak yok eden sanal parçacık/karşı-parçacık çiftleri dışında, gerçekte boşlukta var olmazlar. Boşluk beklenti değeri, boşluktaki parçacık alanının sabit, kaybolmayan potansiyel enerjisidir. Yani, diğer parçacık alanlarının aksine, Higgs skaler alan enerjisi boşlukta kaybolmaz. Teknik renk kompozit bir Higgs parçacığı içerdiğinde, kaybolmayan bir boşluk beklenen değerine de sahiptir.

Fizikçiler, kuarkların ve leptonların kütlelerini öngören "genişletilmiş Teknik renk modelinde" Teknik renk kuramındaki kuarklara ve leptonlara bağlanan ayar bozonlarının sayısını artırıyor, böylece Teknik renk modelini fiziksel olarak geçerli bir kuram yapmak için gerekli olan parçacıkların sayısını daha da çoğaltıyor. Yine LHC, daha yüksek ve daha da yüksek enerjilere ulaştığında tüm bu varsayımsal parçacıkları eninde sonunda keşfedecek veya dışlayacaktır. Tüm Teknik renk modellerindeki en ciddi kısıtlamalardan biri, kuarkların zayıf etkileşimler yoluyla bir kuarktan diğerine dönüştüklerinde "çeşnilerini" değiştirmedikleri deneysel bir gerçektir. Hatırlayacağımız gibi, kuarkların altı çeşidi, her nesilde iki çeşni olmak üzere üç nesli oluşturur. Bir kuark ancak kendi neslinde başka bir kuark haline dönüşebilir; yani çeşnisini değiştirmeden. Böylece bir alt kuarkın acayip bir kuark haline dönüşemeyeceği gözlemlenir. Bu gözlenen

durum, Teknik renk modellerinde karşılanması gereken deneysel bir kısıtlamadır, modeli kurtarmak için çok sayıda ince ayar ve oldukça yapmacık mekanizmalar gerektirir.

ALTERNATİF KOMPOZİT HIGGS MODELLERİ

Teknik renk modelinin yanı sıra bileşik Higgs modelleri oluşturmanın başka yolları var. Birincisi, Higgs parçacığını, *üst kuark Higgs yoğuşması* olarak adlandırılan üst ve karşı üst kuark bağlı durumu gibi bilinen kuarkların ve karşı-kuarkların bir bileşimi yapmaktır. Bu, süperiletkenlikteki Cooper çiftleri elektron yoğuşmasıyla karşılaştırılabilir. Üst kuarkın kütlesi 173 GeV olduğundan, üst kuarkı ve karşı-üst kuarkı bir yoğuşmada birleştirmek için yeterince büyük bir kuvvet varsayılmalıdır. Kuarklardan oluşan skaler bir Higgs yoğuşması, Higgs bozonunun temel bir parçacık olduğu fikrinin yerini alır.

Birkaç yazar, bir üst kuark yoğuşmasının standart modeldeki temel Higgs bozonunu rahatsız eden ince ayar problemlerinden kurtulacağı fikrini değerlendirdi. Bir üst/karşı-üst kuark yoğuşmasının orijinal fikri Yoichiro Nambu tarafından önerilmişti, Vladimir Miransky ile Koichi Yamawaki tarafından daha da detaylandırılmıştı.[6] Dört fermiyon etkileşimini; bir yoğuşma oluşturmak üzere üst ve karşı-üst kuarkları birbirine bağlayan kuvveti tanımlamak için kullandılar. Kuarklar ve leptonlarla olan dört-fermiyon etkileşimlerine W ve Z gibi ara ayar bozonları aracılık etmez. Böyle bir etkileşim yeniden boyutlandırılamaz, bu nedenle hesaplamalarda istenmeyen sonsuzluklar üretecektir. Bu fikirle ilgili makaleler ne yazık ki böyle bir bileşik Higgs bozonunun yaklaşık 600 GeV'lik bir kütleye sahip olacağını öngördü. Açıkça bu kütle, şu anda yaklaşık 173 GeV olarak bilinen üst kuarkın kütlesiyle aynı uyumlulukta değildir. Bu nedenle yoğuşma

[6] V. A. Miransky ve K. Yamawaki, "On Gauge Theories with Additional Four Fermion Interaction," *Modern Physics Letters*, A4, 129-135 (1989).

kabaca üst kuarkın kütlesinin iki katı veya 346 GeV olacaktır. Bu modelden Higgs bozonunun kütlesini tahmin etmedeki asıl problem: üst kuark ve karşı-üst kuarkın, hesaba katılması gereken bir bağlanma enerjisi üreten ve adı gluon olan bir ayar bozonu aracılığıyla, birbirine bağlanmasından kaynaklanır. Bu hesaplanan kütle, üst kuarkın gözlemlenen kütlesiyle ciddi uyumsuzluklar barındırmaktadır. Artık, kesin elektro-zayıf verileri uyumlu hale getirme yoluyla biliyoruz, ki bir kompozit üst/karşı-üst kuark modelinin ağır bir Higgs değil, kütlesi 115 GeV ile 135 GeV arasında olan hafif bir Higgs bozonu üretmesi gerekir. Dahası, 125 GeV'de yeni Higgs benzeri bozonun keşfi, üst/karşı-üst yoğuşma modelini, başarmakta güçlük çektiği hafif bir skaler Higgs bozonunu birleştirmeye zorlar.

Parçacık fizikçilerinin dizginlenemez hayal güçleriyle Higgs bozonunun üst kuark yoğuşma modelini genişlettiklerini söylemeye gerek yok. Örneğin modele nötrino/karşı-nötrino yoğuşmalarını ve diğer olası kuark yoğuşmalarını dahil ettiler, böylece potansiyel olarak Higgs parçacığının tahmin edilen kütlesini düşürdüler, bu da onu doğru elektro-zayıf veriler için kuramın genel özellikleriyle uyumlu hale getirdi.

Üst/karşı-üst kuark yoğuşmasıyla ilgili bir sorun, üst kuarkın o kadar hızlı bozunarak bir alt kuark ve pozitif yüklü bir W bozonuna bozunmasıdır, ki *toponyum* olarak adlandırılan bağlı durum, algılanması için bu kadar uzun süre var olamaz. (Üst kuarkın ömrü yaklaşık 5×10^{-24} saniyedir.) Toponyum tespit edilmemiş olmasına rağmen, hâlâ bir kuarkonyum durumu olarak kabul edilir. Buna karşılık alt/karşı-alt kuarkonyum durumu, bottomonium SLAC'da alt kuark kütlesinin yaklaşık iki katı, yani 9 ila 10 GeV enerjiyle tespit edilmiştir.

1976'dan beri, fiziksel olarak tutarlı bir bileşik Higgs bozon modeli yaratma konusunda gerçek anlamda yüzlerce makale yayımlandı. Son zamanlarda fizikçiler, kuarkların, W ve Z bozonlarının, *preon* adı verilen diğer parçacıkların bileşikleri olma olasılığını bile düşündüler, bu da kendi başlarına

bir bileşik Higgs bozonu üretebilirdi. Kuarkların preonlardan oluştuğu varsayımı, kütle hiyerarşisi sorununu çözmeye yardımcı olabilecek yeni ve daha yüksek enerji ölçekleri üretir. Bu modeller, temel bir Higgs bozonuyla standart modelin doğal olmayan bir özelliğini, yani kuramın kararsız bir boşluğa sahip olduğunu ortadan kaldırmaya çalışır. Ek olarak, temel bir Higgs bozonlu standart model, yaklaşık 200 ila 300 GeV'lik elektro-zayıf enerji ölçeğiyle kütleçekimin yeğin bir kuvvet haline geldiği tahmin edildiğinde 10^{19} GeV'lik Planck enerji ölçeği arasındaki doğal olmayan muazzam kütle ölçeği farkına sahiptir. Preon modelleri bu enerji hiyerarşisi sorununu çözmeye çalışır. Bununla birlikte 2011 ve 2012 yıllarında LHC'de yapılan deneyler, kuarkların bileşik yapısını araştırdı, ancak böyle bir yapı veya 1 TeV'nin ötesinde bir enerjiye kadar herhangi bir preon kanıtı keşfetmedi.

LHC'nin enerjisini maksimum 14 TeV'e kadar artırdığı için 125 GeV'deki yeni bozonun ötesinde yeni parçacıklar bulamaması durumunda, alternatif kuramlar öneren bu makaleler yığını boşa gidecek, fakat bu durum ancak maddenin doğasını anlama arayışımızda deneysel fiziğin önemini vurgular.

HIGGS OLMAYAN BİR REZONANS YORUMLAMASI

125 GeV'deki yeni bozonu bir spin-0 bozonu ile tanımlamanın sorunu şu ki, tespit edebildiğim kadarıyla, bu sadece iki olası aday olduğu anlamına gelir: ya bu gerçekten de temel skaler Higgs bozonudur ya da üst/karşı-üst kuarkların yoğuşması olarak oluşmayan bir çeşit kuark/karşı-kuark rezonansıdır; ki bu nedenle kuark/karşı-kuark rezonansı olasılığını araştırdım.

Gelin bu modele biraz daha yakından bakalım. Zeta (ζ) ve zeta üssü (ζ') olarak adlandırdığım iki yeni kuarkonyum rezonansının varlığını varsaydım. İkisinden daha hafif olan zeta, 125 GeV kütleli LHC'de keşfedilen yeni bozonla özdeşleştirilebilirdi. Hem zeta hem de zeta üssü elektriksel olarak

nötrdür ve izospin 0'a (izospin teklisi) sahiptir, bu nedenle ilk tespit edilen çok daha hafif sahte-skaler mezonlar, eta (η) ve eta üssü (η ') ile aynı kuantum sayılarına sahiptir. Bu mezonlar 1960'larda keşfedilmiştir.[7]

Yeni zeta rezonanslarım süper ağır kuarkonyum durumlarıdır, bu nedenle, charmonyum ve bottomonium benzer şekilde, bozunmalarıyla ilişkili uyarılmış kuark/karşı-kuark durumlarının daha zengin bir spektroskopisi vardır. Zeta ve zeta üssünün daha yüksek uyarılmış durumlarını saptamak, spini 0 olan ve bir sahte-skaler mezon olan en düşük S dalgası durumundan çok daha zor olacaktır; yani eta ve eta üssüyle aynı negatif pariteye sahiptir. Zeta ve zeta üssü birbiriyle etkileşir ve bu etkileşimin boyutu 36 derecelik bir karıştırma açısıyla ölçülür. Karıştırma açısı, sırasıyla alt/karşı-alt ve üst/karşı-üst kuarkların bağlı durumları olan bottomonium ve toponyum kütleleri kullanılarak hesaplanır. Zeta kütlesinin 125 GeV olmasını gerektirerek, zeta üssü rezonansının tahmini kütlesi 230 GeV'dir. Zeta ve zeta üssünün karıştırılmasına neden olan etkileşimin gücü, esas olarak üst ve alt kuarkların tedirgenmemiş gluon etkileşimlerinin bir sonucudur. Bu etkileşim ilk olarak 1970'lerde Gerard't Hoof tarafından eta ve eta üssü sahte-skaler mezonları arasındaki büyük kütle farkını açıklamak için önerilen UA(1) eksenel anomali denen duruma bağlıdır. Zeta mezon rezonansı, her biri yaklaşık 62 ile 63 GeV'lik etkili bir kurucu kuark kütlesine sahip bir kuark ve bir karşı kuarkın bağlı bir durumudur, böylece zeta, küçük bir bağlanma enerjisi hesaba katılarak yaklaşık 125 GeV'lik bir kütleye sahip olur.

Bu kuarkonyum modelinde, tahmin edilen sahte-skaler rezonansın standart model Higgs bozonu veya kuark/karşı-kuark kompozit Higgs parçacığı yoğuşması olmadığını vurgulamalıyız. Bunun yerine, bu parçacık daha düşük ener-

[7] Eta ve eta üssü, izospin teklisi sahte skaler mezonlar olup, bunlar yukarı, aşağı ve acayip kuarklar ile karşı kuarkları karıştırarak oluşturulabilir. Eta kütlesi 548 MeV'dir ve Eta üssünün kütlesiyse 958 MeV'dir.

jilerde iyi bilinen gözlenen kuarkonyum rezonanslarından daha yüksek bir enerjide sıralı bir kuark/karşı-kuark rezonansıdır. Kısmen; bu modeli, 125 GeV'lik tümseği standart model bir temel Higgs bozonu olarak tanımlamak için acele etmememiz gerektiğine dair bir uyarı mesajı olarak hizmet etmesi için kurdum.

8

ELEKTRO-ZAYIF AYAR KURAMLARI

Fizikte ilerleme, genellikle popüler standart kuramları farklı bir bakış açısından inceleyerek elde edilir. Bu yaklaşım kuramların sağlamlığını test eder. Araştırmamda, alternatif bir model oluşturarak, geçerli standart model hakkında çok daha derin bir anlayışa ulaştığımı görüyorum. Standart modelin bunlarla karşılaştırılabilmesi için alternatif kuramlara sahip olmak ve de hangi kuramın verileri en iyi açıkladığını görmek gerekir.

1990'ların başında, kozmoloji ve kütleçekimde alternatif kuramlar peşinde koşarken, aynı zamanda bir Higgs parçacığı içermeyen standart Weinberg-Salam elektro-zayıf kuramı modeline bir alternatif araştırıyordum.

STANDART MODELLERİ KAPSAYAN ALTERNATİF KURAMLAR

1992/1993'te, kozmolojideki başlangıç değer problemlerini, Büyük Patlamanın hemen ardından gerçekleşen olayları anlamamızdaki çeşitli zorlukları çözmek amacıyla *değişken ışık hızına* (VSL) başvuran iki makale yayımladım.[1,2] Bu çö-

---

[1] J.W. Moffat, "Superluminary Universe: A Possible Solution to the Initial Value Problem in Cosmology," *International Journal of Modern Physics*, D2, 351-366 (1993).]

J.W. Moffat, "Quantum Gravity, the Origin of Time and Time's Arrow," *Foundations of Physics*, 23, 411-437 (1993).

züm, 1980'lerin başında Alan Guth ve diğerleri tarafından önerilen standart şişme [enflasyon] modeline bir alternatifti. VSL; evrenin ilk zamanlarında birbirinden çok uzak olan kısımlarının, birbirleriyle "iletişim kurmadan" görünüşte aynı sıcaklığa sahip olabileceği gerçeğini, yani *ufuk problemi*ni en az bilgiyle açıklayabiliyordu. Evrenin farklı bölümleri, ışığın evreni geçmesi zaman alacağından, nedenselliği ihlal etmeden standart ölçülen ışık hızı aracılığıyla iletişim halinde olamaz. Şişme, Büyük Patlamadan sonra çok erken evrende uzayzamanın ani, üstel büyümesiyle bu sorunu ortadan kaldırırken, VSL ışık hızını birçok büyüklük mertebesinde artırır. Yayımladığım VSL modeli, gözlemlerle aynı fikirde olan şişme kuramının yaptığı gibi, madde dalgalanmalarının ölçeğe göre değişmeyen bir spektrumunu öngördü. Ayrıca VSL, evrenin geometrisinin neden uzamsal olarak düz bir şekilde gözlemlendiğini açıkladı. Bir VSL kozmolojisi, Einstein'ın kütleçekim kuramını ve özel göreliliği değiştirmemi gerektiriyordu. Özellikle, kuramım, özel göreliliğin Lorenz değişmezlik simetrisini kırdı. Şişme modelleriyle VSL arasında ayrım yapabilen kritik bir gözlem: kütleçekim dalgalarının tespitidir. Bugün VSL, şişme kuramına olası bir alternatif olarak kurulmuştur; bu gelişmeyle en yakından ilişkili fizikçilerden biri, Andreas Albrecht'la işbirliği içinde VSL üzerine bir makale yayımlayan Imperial College London'dan João Magueijo'dur.[3]

Önce 1992'de, daha sonra 1995'te öğrencim Darius Tatarski ile işbirliği içinde, şimdi *boşluk kozmolojisi* denilen şeyi önerdim.[4,5] Dünyada ve galaksimizde büyük bir kozmik boşluğun içinde oturduğumuzu hayal ettim. *Hubble balonu*

---

[3] A. Albrecht ve J. Magueijo, "A Time Varying Speed of Light as a Solution to Cosmological Puzzles," "*Physical Review*, D59, 043516 (1999).
J.W. Moffat ve D.C. Tatarski, "Redshift and Structure Formation in a Spatially Flat Inhomogeneous Universe," *Physical Review*, D45, 3512-3522 (1992).
J.W. Moffat ve D.C. Tatarski, "Cosmological Observations in a Local Void," *Astrophysical Journal*, 453, 17–24 (1995).

olarak da adlandırılan; bunu açıklamak üzere genel simetrik bir balonu tanımlamak için, Einstein'ın homojen olmayan kozmoloji alan denklemlerinin tam bir çözümünü kullandım. Galaksilerden gelen ve boşluktan geçen ışık; galaksilerde ve galaksi kümelerinde bol miktarda bulunan, dışarıya kıyasla madde eksikliğinden dolayı balonun içindeki daha zayıf bir çekim alanından etkilenecektir. Bu nedenle boşluğun içindeki uzayzaman dışarıdaki uzayzamandan daha hızlı genişliyor olacak, böylece uzak galaksiler ve süpernovalar, Friedmann-Robertson-Walker standart modelinde olduğu gibi standart homojen bir izotropik evrende beklenenden daha sönük görünecektir. Gözlemci, ışığın bu kararmasını evrenin genişlemesinin hızlanmasının kanıtı olarak yorumlayacaktır. Boş kozmolojide, boşluk balonu küresel olarak hızlanmayan çok daha büyük bir evrene gömülüdür. Buna karşılık, standart Lambda CDM modeli, evrenin genişlemesinin hızlandığını ve bunun "kara enerjinin" itici doğasının sonucu olduğunu söylüyor. Boş kozmolojide kara enerji yoktur, Einstein'ın kozmolojik sabiti sıfırdır veya boyut olarak ihmal edilebilir ve de evrenin genişlemesi hızlanmamaktadır. Boş kozmolojinin kozmolojik verilere ve standart Lambda CDM modeline uyabileceğini gösteren çok sayıda makale yayımlanmıştır, ancak bu bugün hâlâ tartışmalı bir konu olmaya devam etmektedir.[6] Yakın tarihli bir makalede, gökbilimciler Ryan Keenan, Amy Barger ve Lennox Cowie, Samanyolu galaksimizi içeren çok büyük bir boşluğun varlığı için yerel evrenin ortalama kütle yoğunluğunun belirlenmesinden elde edilen gözlemsel kanıtlara sahip olduklarını iddia ediyorlar.[7]

1990'ların başında üzerinde çalıştığım üçüncü alternatif alan; değiştirilmiş kütleçekimiydi. Modern fiziğin ve kozmo-

---

[6] C. Clarkson, "Establishing Homogeneity of the Universe in the Shadow of Dark Energy," *Comptes Rendus de L'Academie des Sciences*, Tome 13, No 6–7 (2012).

R.C. Keenan, A.J. Barger ve L.L. Cowie, "Evidence for a ~300 Megaparsec Scale Under-density in the Local Galaxy Distribution," *Astrophysical Journal* [yayınlanmak üzere].

lojinin en büyük gizemlerinden biri kara maddedir. Galaksilerdeki görünmez madde, galaksi kümeleri ve büyük ölçekli kozmolojiyle kütleçekim kuvvetini, Newton'unkinden ve Einstein'ın kütleçekim kuramlarında beklenenden çok daha yeğin kütleçekim gösteren gözlemsel verilere uydurmak için güçlendirme ihtiyacı doğmuştur. Kara madde parçacıkları şimdiye kadar tespit edilemedi, ancak standart model, evrendeki maddenin yaklaşık yüzde 25'inin görünmez kara madde biçiminde olduğunu iddia ediyor. (Neredeyse yüzde 70'i kara enerjidir; görünür madde, toplam maddenin yalnızca yüzde 5'ini oluşturur; standart modelde evrenin toplam madde-enerji bütçesi bu yüzde beşin içindedir.) Kara maddeyi gereksiz kılan sıradan gözlemlenen maddenin varlığı altında kütleçekimi güçlendirmek için Newton ve Einstein'ın kütleçekim kuramlarını değiştirmek kara maddeye olası bir alternatif sağlayacaktır. 1995'ten itibaren, MOG (değiştirilmiş kütleçekim) adını verdiğim değiştirilmiş bir kütleçekim kuramının versiyonlarını yayımladım. Bunlar tamamen göreli kütleçekim kuramlarıydı. İş arkadaşlarım Joel Brownstein, Viktor Toth ve Sohrab Rahvar ve ben, şu anda literatürde mevcut olan astrofiziksel ve kozmolojik verilerin çoğunu herhangi bir kara madde olmadan açıklamayı başardık.

YENİ BİR YEREL OLMAYAN KUANTUM ALAN KURAMI

Kuantum alan kuramındaki matematiksel sonsuzluklarla ilgili problem, yani maddenin temel göreli etkileşimlerini anlama aracımız, parçacık fiziği araştırmalarının son yetmiş yılı boyunca hiçbir zaman gerçekten ortadan kalkmadı. Yeniden boyutlandırma kuramının modern iyileştirmeleri, kuantum alan kuramını, Dirac'ın aksine, çalıların içinde hâlâ gizlenen, sonsuzlukları görmezden gelmeye hazır olan parçacık fizikçileri için daha kabul edilebilir bir araç haline getirdi. Yerel olmayan bir kuantum alan kuramı, parçacık fiziğinin mikroskobik düzeyinde nedenselliğin korunup korunmadığı

konusunu gündeme getirebilir. Kuantum alan kuramındaki katı nedensellik, parçacık fiziğinin küçük mesafeleri içinde asla bir nedenden önce bir sonuç gelemeyeceğini ısrarla talep eder. Bu gereklilik, kuantum alan kuramında *mikro nedensellik* adı verilen bir aksiyomdur. Kuantum alan kuramının diğer temel aksiyomları, kuramın Lorentz dönüşümleri (özel görelilik) altında bütünlüğü ve değişmezliğidir.

Isaac Newton, mutlak bir uzay ve zaman varsayımı yapma ihtiyacından memnun değildi. Kuramında cisimler arasında hareket eden kütleçekimin anlık olmasından da memnun değildi: sözümona "uzaktan etkileşimden," Newton da şikâyetçiydi:

> "*Astrofizik* Dergisinde yayımlanacak Kütleçekim; Madde için doğuştan, içkin ve esas olmalıdır, öyle ki bir cisim, başka hiçbir şeyin aracılığı olmaksızın, bir boşluk yoluyla, bir Mesafede, Eylem ve Kuvvetinin birinden diğerine iletilebileceği şekilde hareket edebilir, benim için o kadar büyük bir saçmalık ki, felsefi konularda yetkin bir düşünme yetisine sahip olan hiçbir insanın bu absürt düşünceye kapılmayacağına inanıyorum. Kütleçekim, sürekli olarak belirli Kanunlara göre hareket eden bir Aracıdan kaynaklanmalıdır, ancak bu aracının maddi olup olmadığını Okurlarımın Değerlendirmesine bıraktım." [8]

Deneyler, kuantum mekaniğinin yerel olmayan bir kuram olduğunu göstermiştir. Bu durum, örneğin fotonlar gibi parçacıklar arasındaki kuantum dolanıklık durumunda, Newton'ın kütleçekimsel "uzaktan etkileşimi" gibi, iki kuantum dolanık parçacık arasında anlık bir iletişim olması gerektiği anlamına gelir. Bu durum da evrendeki uzak varlıkların bizi

---

[8] Isaac Newton'dan, Doğa Felsefesi üzerine makaleler, mektuplar ve ilgili belgeler, genel bir girişle birlikte düzenlendi (Cambridge, MA: Harvard Üniversitesi Yayınları, 1958), 302. [From Isaac Newton, *Papers & Letters on Natural Philosophy and related documents*, edited, with a general introduction, by Bernard Cohen, assisted by Robert E. Schofield]

yerel olarak etkilemediği anlamına gelen "yerel" kavramı klasik fizik anlayışımızı ihlal etmektedir. Bununla birlikte, standart kuantum mekaniğinde, özel göreliliğin ihlal edilmediği anlaşılmaktadır, çünkü dolanık parçacıklar arasında ışıktan daha büyük bir hızla hiçbir gerçek "bilgi" iletilmemektedir. Açıkçası, bir çelişki var. Dolanık parçacıklar nasıl iletişim kurabilir, ancak bilgiyi iletemez? Bu çelişki, bugün hâlâ kuantum mekaniğinin karşı karşıya olduğu bir bilmecedir.

Einstein'ın kütleçekim kuramında, kütleçekim sonlu bir hızda, ışık hızında yayılır ve kütleçekim etkiyen cisimler arasında belirli bir mesafede anlık bir hareket yoktur. Einstein, Boris Podolsky ve Nathan Rosen tarafından yazılan ünlü bir makalede kuantum mekaniğinde Einstein'ın uzaktan "hayaletimsi" etkileşim dediği şeyin sonucunda, kuantum mekaniğinin tamamlanmış bir kuram olmadığı anlamına geldiği sonucuna vardılar.[9] Özetle, yerel olmama, uzayda ayrılmış temel parçacıklar gibi iki nesnenin anında etkileşimde olabileceği ve etkileşirken aracı bir ortama ihtiyaç duymayacağı anlamına gelir. Bu, Newton'un uzaktan etkileşimidir. Yerellik ise, iki nesnenin, sonlu bir hıza sahip bir kuvvet gibi aracılı etki yoluyla etkileşime girmesi anlamına gelir. Özel görelilikte bu etki hızı ışık hızını aşamaz. Klasik fizik kesinlikle yereldir, oysa kuantum mekaniğinin mikroskobik nesneleri birbirlerini yerel olmayan bir şekilde etkiler.

Yerel olmayan kuantum alan kuramının temel varoluş nedeni, kuantum alan kuramı hesaplamalarında meydana gelen zahmetli sonsuzlukları ortadan kaldıran daha doğal bir kuram yaratmaktı. Sonsuzluklar, parçacıkların ve alanların, parçacık fiziğinin mikroskobik düzeyinde yerellik ve katı nedensellik aksiyomunu karşılaması gerektiği varsayımına kadar takip edilebilirdi. Kuantum alan kuramındaki bu yerellik gerekliliği, göreli olmayan kuantum mekaniğinin

[9] A. Einstein, B. Podolsky ve N. Rosen, "Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?", *Physical Review*, 47, 777–780 (1935).

yerel olmayan bir kuram olması için iyi bilinen bir ihtiyaçla çelişiyor gibi görünüyordu. Bu durum; özel görelilik, kuantum mekaniği ve göreli kuantum alan kuramı arasındaki gerilimi açığa çıkarmaktadır. Kuantum dolanıklık olgusunun standart yorumunda, uzayzamanın hiçbir etkisi yoktur. Yeniden boyutlandırma kuramının tüm programı; parçacıkların uzayzamanın bir noktasında yerel olarak etkileşime girdiği, yani uzayın bir bölgesi üzerinde birbirlerini etkileyemeyecekleri fikrine bağlıydı.

Richard Feynman'ın, QED'ye yaklaşımını ilk geliştirdiği *Physical Review* dergisindeki 1949 tarihli ünlü makalesinde, QED hesaplamalarındaki sorunlu sonsuzlukların kökenini mikro nedensellik aksiyomuna kadar takip ettiği görülür.[10] Teknik terimlerle, Feynman döngü integralleri biçiminde ıraksak (sonsuz) kuantum yayılımsal düzeltmelerle karşılaştığında, sanal parçacıkların momentumunu sonsuza kadar entegre ederken hesaplamalara bir "geçiş faktörü" ekledi. Bu geçiş faktörü, mikro nedenselliği kuramdan etkili bir şekilde çıkardı ve kuantum alan kuramı hesaplamalarını yerel olmayan hale getirdi. Bununla birlikte fotonlar ve elektronlar arasındaki noktasal etkileşimleri ortadan kaldıran "bulaşma işlevi"ni seçmesi, üniterliği, ayar değişmezliğini ve özel göreliliğin Lorentz değişmezliğini ihlal etti!

Feynman'ın yayımlanmamış makaleleri de dahil olmak üzere, yerel olmayan bir kuantum alan kuramı geliştirmek için birkaç on yıl boyunca yapılan birçok girişimde, üniterliği, ayar değişmezliğini ve özel göreliliği yok etmenin ciddi engelleri, herhangi bir önemli ilerlemenin önünde durdu. Yerel olmayan kuantum alan kuramının bu durumu, standart yerel ve mikro nedensel kuantum alan kuramına ikna edici bir alternatif yapmanın işe yaramayacağını düşündürmeye başladı. Özellikle ayar değişmezliğinin ihlali, parçacıkların etkileşiminde fiziksel olmayan negatif enerji modları üretti.

---

[10] R.P. Feynman, "Space-time Approach to Quantum Electrodynamics," *Physical Review*, 76, 769-789 (1949).

1989/1990'da tutarlı, yerel olmayan bir kuantum alan kuramı geliştirmeye başladım. Dirac ve Feynman dahil benden önceki pek çok fizikçi gibi ben de kuantum alan kuramı hesaplamalarındaki sonsuzluklardan memnun değildim. O zaman, giderek daha popüler hale gelen sicim kuramının aslında yerel olmayan bir kuram olduğunu fark ettim. Sicim; tek boyutlu bir nesne olarak resmedilirken nokta; sıfır boyutlu bir nesnedir, böylece sicimler etkileşime girdiğinde bir noktada etkileşime girmez. Bu durum bana dört boyutlu uzayzamanda kuantum alan kuramına nasıl devam edeceğime dair bir ipucu verdi. Her nasılsa, sicim kuramı iddia edildiği gibi kendi içinde tutarlı olsaydı, parçacıkların yerel olmayan etkileşimleri yoluyla ayar değişmezliğini, tekliği veya özel göreliliği ihlal edemezdi. Bununla birlikte, özel göreliliğin ihlali ancak sicim kuramını üçten fazla uzaysal boyutta konumlandırarak önlenebilirdi.

Paris'te 1987'de ücretli izindeyken yaptığım araştırmalara dayalı olarak 1989'da yayımladığım bir makalede, doğada sonsuz bir parçacık veya alan "kulesi" olduğu varsayımında bulundum.[11] Bu kule sıfırdan sonsuza kadar spin değerlerine sahipti. *Süperspin alanları* veya *süperspin parçacıkları* olarak adlandırdığım bu sonsuz kuleler birbirleriyle etkileştiğinde, bu etkileşimin yerel olmayacağını gösterdim. Bununla birlikte, dört boyutlu uzayzamanda kuantum alan kuramının bu formülasyonu, aynı zamanda ayar değişmezliği ve üniterliğin ihlalinden kaynaklanan potansiyel fiziksel olmayan negatif enerji modlarıyla ilgili problemlerle karşılaştı. Bununla birlikte, bu kuram üzerinde gelecekteki çalışmaların, fiziksel olmayan negatif enerji modlarını ortadan kaldıracak her yüksek parçacık spini için yeni simetriler getirerek fiziksel, kendi içinde tutarlı bir parçacık fiziği ve kütleçekimle birleşme modeli üretebileceğine inanıyordum. O zaman, bu modelin ayar simetrilerini genişletmemeyi seçtim ve alan

[11] J.W. Moffat, "Finite Quantum Field Theory Based on Superspin Fields," *Physical Review*, D39, 3654–3671 (1989).

kuramına daha standart bir yaklaşıma odaklanmak için sonsuz spinli parçacıklar ve alanlar fikrini bir kenara bıraktım. 1960'larda Rus fizikçi Gary Efimov tarafından yayımlanan yerel olmayan alan kuramı üzerine çığır açan araştırmadan yararlandım.[12] 1990'da yerel olmayan kuantum alan kuramındaki ayar değişmezliği ve üniterlik problemlerini her terimde fotonlar ve elektronlar tarafından üretilen telafi edici alan katkılarını ekleyerek çözmek için bir yöntem önerdiğim bir makale yayımladım.[13] Burada yer alan her terim alanların tedirgenme genişlemesi içerisinde yer alıyordu. Bunlar, daha önceki pek çok girişimi engelleyen sorunlu ayar kıran alan katkılarını iptal etti. Bu tekniği QED ve abelci olmayan ayar kuramına uyguladım.

Bu makalede, yerel olmayan bir elektro-zayıf modelde ayar değişmezliğini korumanın bir yolunu önerdim. Elektro-zayıf simetriyi kırmak için Higgs mekanizmasına skaler bir Higgs bozonu ekledim. Yerel olmayan bir enerji ölçeğini (veya uzunluk ölçeğini) doğanın temel bir sabiti olarak öne sürerek, Higgs kütle hiyerarşisi problemini çözmenin ve bir Higgs bozonu içeren standart modeli parçacık fiziğinin "doğal" kuramı yapmanın mümkün olduğunu gösterdim. Makale, tedirgenme kuramının tüm düzenleri için sonlu ve üniter olan yerel olmayan bir kuantum kütleçekime ayrılmış bir bölümle sona erdi. Bu makalenin, neredeyse çeyrek yüzyıl sonra, LHC'de Higgs benzeri bir bozonun olası varlığının keşfedildiği zaman, olası temel öneme sahip olduğu kanıtlanacaktır.

1990'da, Florida Üniversitesinden Gainesville'den Richard Woodard'ı sicim kuramı üzerine yaptığı çalışmalar hakkında ders vermesi için Toronto'ya davet ettim. Richard, o zamanlar aktif bir sicim kuramcısıydı ve fizik camiasında

---

[12] G.V. Efimov, Fiz. Elem. Chastits At. Yadra [Soviet Journal of Particles and Nuclei, 5, 89 (1947)].[12 . G.V. Efimov, Fiz. Elem. chastits at. Yadra, D41, 1177-1184 (1990).] ["Finite Nonlocal Gauge Field Theory,"] J. W. Moffat, "Finite Nonlocal Gauge Field Theory," *Physical Review*, D41, 1177-1184 (1990).

sicim kuramına yaygın bir ilgi olduğu için, konu hakkında ondan daha fazla şey öğrenmek istedim. (Daha sonra, Richard sicim kuramını terk etti ve üzerinde çalıştığı yılların fizik kariyerinin önemli bir bölümünü boşa harcadığını iddia etti.) Toronto Üniversitesi lisansüstü okul kafeteryasında öğle yemeği sırasında Richard, şu anda hangi araştırmayı yaptığımı sordu. Ona süperspin alan kuramı fikirlerimden ve yerel olmayan bir kuantum alan kuramı ihtiyacından bahsettim. Bu ihtiyaç parçacık saçılmalarının hesaplamalarında anlamsız sonsuzluklardan kaçınmak için bir kuantum alan kuramını gerekli kılıyordu. Sinirlendi ve bana bu fikirlerin saçma olduğunu ve hiçbir yere varmayacağını söyledi. Yine de Richard'ın olumsuz tepkisine ve bununla ilgili endişelerime rağmen, yerel olmayan kuantum alan kuramı üzerine 1990'da makalemi yayımladım.

Richard'ın ziyaretinden birkaç hafta sonra, ondan yerel olmayan kuantum alan kuramı hakkındaki fikirlerim hakkında bir aydınlanma yaşadığını iddia eden bir e-posta aldım. Yerel olmayan alan kuramının QED'de sonsuzluklardan kaçınmanın bir yolu olduğunu anladığını söylüyor ve doktora sonrası asistanım Dan Evens ve onun yüksek lisans öğrencisi Gary Kleppe'yle işbirliği içinde bu fikirleri birlikte takip etmemizi öneriyordu. Buna kesinlikle razıydım çünkü Richard, kuantum alan kuramında hesaplamalar yapmakta dünyanın sayılı uzmanlarından biridir. Gerçekten de önümüzdeki birkaç hafta boyunca, Toronto ve Gainesville arasında, Lorentz'in özel göreliliğin değişmezliğini korurken yeni yerel olmayan kuantum alan kuramındaki ayar değişmezliği ve üniterlik problemlerini çözdüğümüz uzun ve ayrıntılı bir makale yazdık. Makale, alanların yerel olmayan davranışını özel bir şekilde QED'ye dahil ederek, tüm tedirgenme kuramı düzenleri için sonlu bir kuram elde edebileceğimizi ortaya koydu. Yani kuram, kuantum alan kuramlarındaki hesaplamalardaki olağan sonsuzluklardan zarar görmedi. Makalede, kuramı abelci olmayan ayar kuramlarına ve kuantum kütleçekimine genişlettik. Kuantum alan ku-

ramının yerel olmayan uzantısını, ya basitçe hesaplamaları sonlu hale getirmek için bir düzenlileştirme şeması ya da yerel olmayan alan kuramında temel bir enerjiyi sabit olarak sonlu tutmasına veya sonsuz olmasına izin vermesine bağlı olarak bir temel kuram olarak görmek mümkündü. Hesaplamaların sonunda sonlu ya da sonsuz olmasına bağlı olarak yerel olmayan uzantısını görmeyi başardık ve makaleyi 1991'de yayımladık.[14]

Tüm fonksiyon olarak adlandırılan özel bir tür matematiksel fonksiyon, yerel olmayan kuantum alan kuramı hesaplamalarına girer. Bu fonksiyon, sonlu karmaşık düzlemin hiçbir yerinde tekil noktaları olmadığı için *karmaşık değişken kuramı* denilen şeyde özel bir rol oynar. Karmaşık düzlemde yalnızca sonsuzda meydana gelen tekillikler vardır.[15] Tüm fonksiyonların kullanımı, 1990'daki makalemde ve 1991'de Woodard, Evens ve Kleppe'yle yayımlanan makalede tanımladığım yerel olmayan kuantum alan kuramımda kilit bir unsurdu.

PARÇACIK FİZİĞİNE YEREL OLMAYAN KUANTUM ALAN KURAMININ UYGULANMASI

Ortak çalışmamızdan sonra, yerel olmayan alan kuramının, normalde bir yerel alan kuramı olan zayıf ve elektromanyetik etkileşimlerin elektro-zayıf birleşimine uygulanabileceğini düşündüm. Bu formülasyon bir Higgs parçacığı olmadan olmalıydı ve hem sonlu bir elektro-zayıf kuramı hem de temel parçacıkların kütlelerini üretecekti.

---

[14] D.Evens, J.W. Mof at, G. Kleppe ve R.P. Woodard, "Ayar Kuramlarının Yerel [Lokal] Olmayan Düzenlenmesi", *Physical Review*, D43, 499–519 (1991). ["Nonlocal Regularization of Gauge Theories,"]

[15] Matematikte karmaşık bir değişken, gerçek bir f(x) işlevini [fonksiyonunu], z'nin x + iy'ye eşit olduğu, x ve y'nin gerçek değişkenler olduğu ve i'nin –1'in karekökü eşit olduğu karmaşık f(z) işlevlerine [fonksiyonuna] genişletir. Tüm karmaşık fonksiyonlar dışında, f fonksiyonu sonlu karmaşık düzlem z'de tekilliklere sahiptir. f fonksiyonunun tamamı sonsuzda bir tekilliğe sahip olmalıdır, yoksa bir sabittir.

Higgs parçacığı/alanına parçacık fiziğinin standart modelinin içinde inanmanın zorlayıcı nedenlerinden biri, evrenin, varsayılan bir kütlesiz parçacık durumundan tüm parçacıkların olduğu bir duruma nasıl geçtiğini açıklayan kendiliğinden simetri kırılmasıydı. Tüm temel parçacıklar, foton ve gluonun sıfır kütleleri de dahil olmak üzere farklı kütlelere sahiptir. Hatırlayacağımız gibi, yaygın olarak kabul edilen standart elektro-zayıf kurama göre, W ve Z bozonlarının, kuarkların ve leptonların kütlelerinin üretilmesinden Higgs mekanizması sorumluydu. Temel parçacıkların kütlelerinin bir Higgs bozonu yerine doğal kuantum alan kuramı süreçleriyle üretilebileceği fikrini ortaya attım. Teknik terimlerle, parçacık kütleleri, boşluğun kendiliğinden simetri kırılmasına veya sonuçta ortaya çıkan bir Higgs parçacığının öngörüsüne karşılık gelen herhangi bir ek skaler serbestlik derecesi olmaksızın kuantum alan kuramı öz-enerji hesaplamalarıyla üretilebilir.

Şunu anlamalısınız ki 1990'larda, yüksek enerjili hızlandırıcılarda bir Higgs bozonunun tespit edilip edilemeyeceği açık olmaktan çok uzaktı, bu yüzden bu kuramın bir Higgs bozonu olmadan nasıl geliştirilebileceğini araştıran önemli bir literatür vardı. Ayrıca, elektro-zayıf kurama bir Higgs bozonunu dahil etmenin başlıca motivasyonlarından biri, kuramın yerel bir kuantum alan kuramı olarak yeniden boyutlandırılabilir ve sonlu olduğunu garanti etmektir.

Standart elektro-zayıf kuramda, Higgs bozonunun kütlesi, onun kendi kendine etkileşimiyle üretilir. Buna karşılık Higgs bozonu, diğer standart model temel parçacıkların, yani W ve Z bozonlarıyla leptonlar ve kuarkların kütlelerinin üretilmesinden sorumludur. Benim önerim, temel parçacıkların kütlelerinin hepsinin kendi kendiyle etkileşimleri tarafından üretildiğiydi. Bu durum da Higgs bozonuna ihtiyaç olmadığı anlamına geliyordu. Kuantum alan kuramında, temel bir parçacık, parçacıkların kütlesine bir katkı sağlayan alanlar aracılığıyla kendisiyle etkileşime girebilir. Yerel olmayan bir kuantum alan kuramında, bu öz-enerji sonlu-

dur ve parçacığın toplam kütlesini oluşturacak şekilde yapılabilir. Yerel bir kuantum alan kuramında da bu durumu yaratabilirsiniz, ancak öz-enerji hesaplaması ıraksak veya sonsuzdur, yeniden boyutlandırma yöntemleriyle sonlu hale getirilmelidir.[16] Kuramımda bir Higgs bozonu olmadığından, elbette, on yıllardır standart modelin başına bela olan Higgs kütle hiyerarşisi problemim yoktu. Kuramımın bir Higgs bozonunun olmamasıyla ortadan kaldırdığı bir diğer sorun, standart modelde Higgs alanı tarafından üretilen aşırı büyük boşluk enerji yoğunluğuydu; bu yoğunluk, Einstein'ın kozmolojik sabitiyle bağlantılı olduğunda gözlemle ciddi şekilde çelişiyordu.

Standart modelde parçacıkların yerel olmayan etkileşimlerine dayanan sonlu bir kuantum alan kuramına sahip olduğum için, parçacıkların kütlelerinin ve yüklerinin sonlu bir yeniden boyutlandırılmasına uyum sağlayabileceğim açıktı. Temel bir yerel olmayan alan kuramı oluşturmak için, temel bir uzunluk veya enerji ölçeği tanıtmak gerekir. Böyle bir sabit, kuantum mekaniğinde Planck sabiti kadar temel bir rol üstlenecektir. Ancak Higgs bozonunu kuramdan çıkarmak, saçılma genliklerinin üniterlik problemini hâlâ çözülmeyi bekleyen bir sorun haline getiriyordu.

1991'de *Modern Physics Letters A* dergisinde yerel olmayan elektro-zayıf kuramım üzerine bir makale yayımladım.[17] Aynı yılın başlarında Richard Woodard'la QED üzerine yayımlanan çalışmayı genişlettim. Daha sonra, yüksek lisans öğrencim Michael Clayton'ı bu projeye dahil ettim ve bu yeni elektro-zayıf kuramı doğrulamaya çalışmak için daha fazla

---

[16] Temel parçacıkların kütlelerinin öz enerjileri tarafından üretilebileceği fikri ilk olarak 1962'de Schwinger ve Salam tarafından bağımsız olarak önerildi ve 1973'te Roman Jackiw, Kenneth Johnson ve Heinz Pagels tarafından daha da geliştirildi; yani aynı zamanda 1973'te John Cornwall ve Richard Norton; ve 1974'te Estia Eichten ve Frank Feinberg.

J. W. Moffat, "Finite Electroweak Theory without a Higgs Particle," *Modern Physics Letters A*, 6, 1011–1021 (1991).

hesaplama yaptık.[18] Henüz keşfedilmemiş üst kuarkın kütlesi için bir tahmin ekledik. Bu ikinci makaleyi aynı yıl, 1991'de aynı dergide; *Modern Physics Letters A*'da yayımladık.

Bununla birlikte, kendiliğinden simetri kırılması fikri ve buna bağlı Higgs bozonunun tahmini, 1970'lerin başından beri fizikçilerin zihnine o kadar yerleşmişti ki, Weinberg-Salam modeline bir alternatifin olanaksız olduğu düşünüldü ve yayımlanan makalelerim yerel olmayan bir elektro-zayıf kuram üzerine, parçacık fiziği topluluğu tarafından çoğunlukla göz ardı edildi. O zaman, Higgs bozonunun var olup olmadığına karar verebilecek deneylerden muhtemelen 20 ile 25 yıl uzakta olduğumuzu fark ettim, bu yüzden bu spekülasyonları sürdürmek oldukça boş görünüyordu ve Higgs bozonu içermeyen modelleri geliştirme çabalarımı bıraktım.

HIGGS BOZONU OLMADAN YENİ BİR PARÇACIK FİZİĞİ KURAMI OLUŞTURMAK

On beş yıl sonra, asıl amacı Higgs bozonunu bulmak ya da dışlamak olan LHC'nin inşası sırasında, Higgs bozonu olmadan bir elektro-zayıf kuram inşa edilip edilemeyeceğini araştırmaya geri döndüm. Açıkça, Higgs parçacığının var olup olmadığı konusuna sonunda LHC deneyleri karar verecekti. Standart model elektro-zayıf kuramının ne kadar sağlam olduğunu tekrar merak etmeye başladım. Higgs bozonunun var olduğu kesin olarak doğrulansaydı alternatif bir elektro-zayıf kuramına gerek kalmazdı. Öte yandan Higgs bozonu deneysel olarak dışlanırsa, Weinberg-Salam modelini yeniden tasarlamak gerekecekti.

Fermilab'daki Tevatron hızlandırıcısındaki deneyciler, LHC faaliyete geçmeden önce, bulunması zor Higgs parçacığını aramaya ciddi bir ilgi göstermişlerdi. Şimdiye kadar, Tevatron deneyleri bir Higgs bozonu bulmayı başaramadı.

---

[18] 18. MA Clayton ve J.W. Mofat, "Prediction of the Top Quark Mass in a Finite Electroweak Theory," *Modern Physics Letters A*, 6, 2697–2703 (1991).]

Şimdi de, bana öyle geliyordu ki, elektro-zayıf kuramını yeniden düşünmenin tam zamanıydı. O zamandan beri, veriler şaşırtıcı bir hızla birikmeye devam ettikçe artık Tevatron'da değil, LHC'de, Higgs bozonunun var olma olasılığı gerçek oluyordu. Temmuz 2012'ye gelindiğinde 125 GeV'de yeni bir bozonun duyurulmasıyla varlığının ipuçları ortaya çıktı. Ancak LHC'nin inşası sırasında işler oldukça farklı görünüyordu.

2008'de Viktor Toth ve ben, yerel olmayan bir kuantum alan kuramından parçacık kütlelerinin nasıl üretileceğine dair 1991'deki ilk fikirlerimi daha da araştırdık.[19] O zamanlar, Higgs bozonunun varlığına dair hiçbir deneysel ipucu olmadığından, bir Higgs bozonunun mevcut kanıtlarının yanlış olduğu ortaya çıkarsa, fizik camiasında Higgs olmayan modellere ilgi yeniden canlanırdı.

Bizim makalemiz, standart model gibi, erken evrende, W ve Z bozonları da dahil olmak üzere tüm temel parçacıkların kütlesiz olduğu bir evreyle başladığınız öncülüne dayanıyordu. Modelimizde, daha önceki makalelerimde olduğu gibi, parçacık kütleleri, parçacıkların Higgs alanıyla etkileşimleri tarafından üretildiği standart Higgs modelinin aksine, kuantum alan kuramı kendi kendine enerji mekanizmasından kaynaklanarak boşlukta üretildi.

Daha sonra, evrenin kuarkların, leptonların ve W ve Z bozonlarının kütlesiz olduğu kırılmamış bir simetri evresiyle başladığına dair yaygın varsayım hakkında endişelenmeye başladım. Bu neden böyle olmak zorundaydı? Standart modelde bu varsayımı yapmanın bir nedeni, kuramın temel simetrisini, bu durumda SU(2) × U(1) ile tanımlanan grup simetrisini çağırmasıdır. Buradaki fikir, kütle üreten bir mekanizmanın bu simetriyi bozduğudur, çünkü temel parçacıkların farklı kütleleri simetrinin kırılmasını talep eder. Yine de, ya bir Higgs-esir ya da karmaşık kuantum alan kuramı hesaplamalarından temel parçacıklar için kütle üretme fik-

[19] J. W. Moffat ve V.T. Toth,"The Running of Coupling Constants and Unitarity in a Finite Electroweak Model," arXiv.org/0812.1994.

rinin gereksiz olup olmadığını merak ettim. Belki de parçacık kütleleri, kütleçekim veya parçacıkların eylemsiz kütlesinin gizemli kökeni gibi başka bir temel fiziksel süreçten kaynaklanmıştır?

Elektro-zayıf kuramının tamamını farklı bir açıdan yeniden düşünmeye karar verdim. Evrende, foton ve gluon dışında, parçacıkların kütlesiz olduğu bir evre olmadığı olasılığını düşündüm. Deneysel verilerle aynı fikirde olmak için, temel olmayan simetri grubu SU(2) simetrisinin evrende her zaman özünde kırılmış olduğunu ve olası kuantum alan kuramı düzeltmelerinin yanı sıra parçacık kütlelerinin hesaplamalarda deneysel değerleriyle basitçe temsil edildiğini varsaydım. Yani leoparın beneklerini nasıl aldığını sormak belki de anlamsız bir soruydu; sadece her zaman onlara sahipti.

Parçacıkların her zaman kütlelerinin olduğu fikri, fizikçi olmayan biri için o kadar şaşırtıcı görünmeyebilir, ancak 1960'lardan beri parçacık fizikçileri, parçacık kütlelerinin kökeni için bir açıklama olduğu inancına ısrarla sarıldılar. Bu inanç, yalnızca kendiliğinden simetri kırılmasının ve bir Higgs alanının kütlelerin kökenini açıklayabileceği fikrinin yayımlanmasıyla pekiştirildi. Bu açıklama W ve Z bozonları için doğrulanabilse de, kuarklar ve leptonlar için o kadar inandırıcı değildi. Çünkü kütleleri Higgs alanıyla etkileşimleriyle tahmin edilemiyordu. Kütleleri, serbest bağlantı sabit parametreleri aracılığıyla deneysel verilere uyacak şekilde basitçe ayarlandı. Parçacık fizikçilerinin, örneğin elektrik yükünün veya kuarkların renk yükünün kökenini bile dikkate almazken, temel parçacıkların kütlelerinin kökenini keşfetmeye neden bu kadar odaklandıkları merak edilebilir veya elektromanyetik etkileşimlerin gücünü ölçen ince yapı sabitinin kökenini açıklamak için neden girişimlerde bulunulmadı? Geçmişte, Wolfgang Pauli ve Arthur Eddington gibi fizikçiler, ince yapı sabitinin kökeni hakkında spekülasyon yaptı, ancak sonraki nesil fizikçiler, kütlenin ötesindeki herhangi bir şeyin başlangıcı hakkında çok az endişe gösterdiler.

Erken evrende foton ve gluon dışında kütlesiz bir fermiyon ve bozon evresi olmadığı öncülüyle başlayan elektro-zayıf kuram üzerine yeni bir makale yazdım. Bu makale 2011 yılında yayımlandı.[20]

YEREL KUANTUM ALAN KURAMINA DÖNÜŞ

Parçacık fiziğinde son teknoloji araştırmalar yapmanın zorluklarından biri, temel bir soruna yaklaşırken olası tüm yolları araştırdığınızdan emin olmaktır. Yerel kuantum alan kuramından ve onun mikro nedenselliği muhafaza etmekten vazgeçmeyi yeterince haklı çıkaramadığıma dair dırdırcı bir duyguya kapılmaya başladım. Bu yüzden yeni bir soru sordum: Higgs parçacığı olmadan yerel kuantum alan kuramını kullanarak elektro-zayıf etkileşimlerin yeniden boyutlandırılabilir bir kuramını geliştirmek mümkün müdür? Bu, yerel olmayan kuantum alan kuramı fikirlerimden standart yerel kuantum alan kuramına tam bir zihinsel dönüş gerektiriyordu. 1960'ların başlarından beri elektro-zayıf kuramdaki zayıf etkileşimlere ilişkin araştırmalarımızda bazı kilit unsurları gözden kaçırmış mıydık? Yerel kuantum alan kuramının, saçılma genliklerini hesaplarken devasa W ve Z parçacıkları tarafından üretilen sonsuzluklardan kaçınabilecek, baştan gözden kaçan bazı önemli bir özelliği var mıydı? Fizikteki en iyi beyinlerin çoğunun yarım yüzyıldan fazla bir süredir bu sorun üzerinde kafa yorduğu düşünülürse, bu hedefe ulaşma ihtimalinin küçük olduğu gerçeğini takdir ettim. Yine de sırf kendi merakımı gidermek için bu soruyu araştırmaya koyuldum.

Başarılı bir sonlu, yerel elektro-zayıf kuram bulmanın önündeki en önemli engel, ayar değişmezliği meselesiydi. Şu soruyu sordum: Büyük W ve Z parçacıklarıyla ayar değişmezliğini yeniden ortaya koymanın bir yolu var mı? W ve Z kütlesel olduğu için, elektro-zayıf kuramın gerekli ayar

[20] J. W. Moffat, "Ultraviolet Complete Electroweak Model without a Higgs Particle," *European Physics Journal Plus*, 126, 53 (2011).

değişmezliğini kırarak, kuramı yeniden boyutlandırılamaz hale getirdiğini ve üniterliği ihlal ettiğini hatırlayın.

1938'de İsviçreli fizikçi Ernst Stuekelberg, kuramda etkileşen parçacıkların kütleleri "elle" girilmiş olsa bile, bir kuantum alanı kuramının ayar simetrisini korumanın bir yolunu önerdi.[21] Normalde, kurama parçacık kütlelerini elle koyarsanız bu kuramın ayar değişmezliğini kırar ve yeniden boyutlandırılamaz hale getirir ve de üniterliği ihlal eder. Stuekelberg, makalesini o zamanlar kuantum alan kuramcıları tarafından pek bilinmeyen bir Avrupa dergisinde Fransızca olarak yayımladı. 1938 tarihli makalesinde kütleli elektrodinamiğin gizli bir skaler alan içerdiğini fark etti ve abelci Higgs mekanizması olarak bilinecek olanın bir versiyonunu formüle etti.

Elle eklenen kütlelerle bile ayar değişmezliğini koruma yöntemi, varsayımsal bir kütleli foton veya zayıf etkileşimlerin nötr Z parçacığı gibi elektriksel olarak nötr bozon etkileşimleri için yeniden boyutlandırılabilirlik sorunları olmadan çalışır; ancak bu Stuekelberg tekniğini, pozitif veya negatif yüklü W bozonu gibi büyük yüklü vektör bozonlarına genişletmeye çalıştığımızda, yeniden boyutlandırılabilirlik konusunda yine zorluklarla karşılaşırız.

1962'de Lee ve Yang, elektromanyetizmayı zayıf etkileşimlerle birleştirmeye çalışan bir makale yayımladı.[22] Bu makale, Sheldon Glashow'un birleşik bir elektromanyetik ve zayıf etkileşimler kuramını tamamlamak için elektriksel olarak nötr Z bozonuyla ilişkili zayıf bir nötr akıma ihtiyacımız olduğu fikrini tanıtan çığır açan makalesinden bir yıl sonra yayımlandı. Lee ve Yang, kuantum alan kuramı argümanlarını yüklü bir büyük vektör bozonu, W ve elektromanyetik foton alanlarına dayandırdılar. Bunun, 1983'te CERN'de W ve Z bozonlarının keşfinden yaklaşık 20 yıl önce olduğunu

---

[21] E. C. G. Stueckelberg, *Helvetica Physica Acta*, 11, 299–312 (1938).

T. D. Lee and C.N. Yang, "Theory of Charged Vector Mesons Interacting with the Electromagnetic Field," *Physical Review*, 128, 885–898 (1962).

hatırlayalım. Lee ve Yang, akıllıca Stuekelberg'in ayar değişmezliğinin bir biçimini onun makalesine atıfta bulunmadan kullandılar ve belirli kısıtlamalar altında kuramın geçerliliğini kanıtladılar. Kuram yeniden boyutlandırılabilir hale getirildi ve olasılıkların korunumunu yok etmedi. Bu, Altılı Grubun ayar alanı kuramında kendiliğinden simetri kırılmasının önemini keşfetmesinden iki yıl önce ve Steven Weinberg'in Higgs mekanizmasına dayalı elektro-zayıf birleşme ve boşluğun kendiliğinden simetri kırılması hakkındaki makalesinin yayımlanmasından beş yıl önceydi.

W parçacığıyla yeniden boyutlandırılabilirlik sorunlarına değinen birçok yayını gözden geçirdim ve bu sorunlara rağmen, 2011'de ayar değişmezliğini ve yeniden boyutlandırılabilirliği korumak için Stuekelberg formalizmini kullanarak bir elektro-zayıf kuramı oluşturmaya çalıştım. Makalenin başlığını "Higgs Parçacığı Olmadan Elektro-zayıf Kuram Yeniden Boyutlandırılabilir mi?" koydum. Buradaki fikir, kendiliğinden simetri kırılmasını, Higgs mekanizmasını ve bir Higgs parçacığının varlığını atmak ve içsel SU(2) abelci olmayan simetri kırılmasına sahip bir kuramla başlamaktı, bu da evrenin kütlesiz bir fazla başlamadığı anlamına geliyordu. Parçacıkların kütleleri, foton ve gluon dışında asla sıfır olmayan deneysel kütleleridir. Kuram, gözlemlenen 12 kuark ve lepton ile W, Z, foton ve gluon bozonlarına dayanıyordu.

Stuekelberg formalizmi bazı sorunlarla geldi: temel parçacıklar gibi deneysel olarak tespit edilmemiş ekstra skaler spin-0 bozonları içeriyordu. Bu skaler bozonlar, skaler spin-0 Higgs bozonu gibi, Stuekelberg formalizminin önemli bir parçasıydı. Foton gibi değişmeyen bir U(1) simetrisiyle ilişkili olan nötr Z bozonunu içeren etkileşimler için bir sorun oluşturmuyorlardı, çünkü bu skaler bozonlar Z bozonu veya fotonla etkileşime girmedi. Stuekelberg'in ayar değişmez formalizmine dayanan bu kuram, potansiyel olarak yeniden boyutlandırılabilir ve üniter bir yerel alan kuramıydı.

Ancak kuramımdaki W parçacığı için işler o kadar kolay değildi. İstenmeyen skaler bozonlar, W bozonlarıyla birleşe-

rek saçılma genliklerinde yeniden boyutlandırılabilirlik ve olasılıkların üniterlik korunmasında zorluklara neden oldu. Yine de W "yayıcısı," Stueckelberg formalizmi içinde gerçekleştirilebilir ve kuramın yeniden boyutlandırılabilir olmasına izin verilirdi.[23] Olasılıkların korunumu, yüklü W bozonuyla etkileşime giren kaçınılmaz temel skaler parçacıklar nedeniyle, elektro-zayıf kuramımın Stueckelberg formalizminde tehlikedeydi. Ancak Stueckelberg'in skaler bozonlarının kütlelerinin, LHC maksimum 14 TeV enerjisinde çalışırken bile LHC tarafından algılanamayacak kadar büyük olabileceği ortaya çıktı. Bu kütle/enerji değerinin üstünde elektro-zayıf kuramım çöküyor, artık yeniden boyutlandırılamaz ve üniter olmayan bir hale geliyordu. Dolayısıyla bir skaler bozonun kütlesi için bu maksimum değerin altındaki enerjiler için, kuram tamamen yeniden boyutlandırılabilirdi ve üniterliği korudu. Bu durum, böyle bir kuramın yalnızca "etkili" bir elektro-zayıf kuram olduğu, 14 TeV'nin üzerinde bir yerde yüksek bir enerjiye kadar geçerli olduğu ve bu noktada kötü skaler bozonların W'yla etkileşime girmeye başladığı anlamına gelir.

Bana göre bu bir hayal kırıklığıydı. Çünkü fizikçiler tarafından son yetmiş yıldır vaat edildiği şekliyle standart yerel kuantum alan kuramına dayanan tamamen eksiksiz, yeniden boyutlandırılabilir bir elektro-zayıf kuram oluşturamadım. Bu, sonsuz enerji için geçerli bir morötesi tam kuantum alan kuramı oluşturabildiğim, yerel olmayan kuantum alan kuramına dayanan elektro-zayıf kuramıma zıttı. Bu aşamada, yerel olmayan elektro-zayıf kuramı etkin lokal elektro-zayıf kuramına tercih eder miydim? Bu soruyu, her iki kuramın deneysel sonuçlarını ve tahminlerini dikkatlice araştırarak yanıtlamak zorunda kaldım.

---

[23] Kuantum alan kuramında bir yayıcı, uzayzamanda A noktasında bir parçacığın yaratılmasını ve B noktasında soğurulmasını sağlar. Feynman tarafından icat edilen belirli bir yayıcı (Feynman yayıcısı) [the Feynman propagator] yerel kuantum alan kuramı hesaplamalarında önemli bir rol oynar.

Standart yerel kuantum alan kuramını kullanarak kurabildiğim türden etkili bir kuramla ilgili sorun, kuramın yüksek enerjilerde bozulduğunda nasıl "tedavi edileceği" sorununu ortaya çıkarmasıdır. Çözüm, muhtemelen bu yüksek enerjilerde yeni parçacıklar biçiminde, örneğin Stueckelberg'in skaler bozonları biçiminde yeni fizik gerektirecektir. Ancak bu enerjiler yukarıda LHC'nin elde edilebilir enerjisi (14 TeV) üzerinde olurlarsa, o zaman tüm bu kritik konu, çok daha yüksek enerjilere gidebilen yeni bir hızlandırıcı inşa edilene kadar arafta kalacaktır.

Elektro-zayıf etkileşimlerin standart Higgs bozon modeline dönelim. Bu kuram tüm enerjiler için geçerli midir? Cevabın kesin bir hayır olduğuna inanıyorum. LHC'de keşfedilen 125 GeV Higgs benzeri bozon gibi, hafif bir Higgs bozonuyla boşluğun kararsızlığı sorunları vardır. Ayrıca, Higgs alanı gibi bir skaler alan, 1950'lerde Landau tarafından QED'de keşfedilen *Landau tekilliği* veya *Moskova sıfır* olarak adlandırılan şeyin patolojisinden mustariptir. Bu tekillik, bir skaler alana içkindir ve gelecekteki hızlandırıcılar tarafından enerjide ortaya çıkacaktır. Bu tekillik, böyle yüksek enerjilerde kuramın tutarlılığını bozar.

Belki de şu anda CERN'de planlanmakta olan yüksek enerjili hızlandırıcı, ILC (uluslararası doğrusal çarpıştırıcı), kuramların çok yüksek enerjilerdeki çöküşüyle ilgili bu önemli konulara karar verebilecektir. Bu hızlandırıcı, pozitronları ve elektronları LEP2'den çok daha yüksek enerjilerde çarpıştıracak ve yeni parçacıkların keşfedilmesini kolaylaştıracak. Bu bahsedilen durum, dairesel çarpıştırıcı olan LHC'dekinden farklı bir süreçtir. Bu çeşit çarpıştırıcı protonları saçarak ve protonları birbiriyle çarpıştırarak parçalar. Bununla birlikte, LHC'de 125 GeV'deki bu yeni Higgs benzeri bozonun ötesinde yeni parçacıklar tespit edilmemesi durumunda, ILC gibi daha yüksek enerjili yeni makineler için devlet finansmanı tehlikede olabilir.

Yeni 125-GeV bozonunun hafif bir Higgs bozonu olduğu ortaya çıkarsa, ancak hiyerarşi sorunları devam ederse, par-

çacık fiziği topluluğu yine de standart yerel kuantum alan kuramından vazgeçmeye ikna edilmelidir ve yerel olmayan kuantum alan kuramım gibi alternatif kuramlar düşünülmelidir. Şu anda, bu pek olası görünmüyor. Fizikçiler, genel olarak, muhafazakâr bir topluluktur ve geliştirmek için onlarca yıl almış olan kutsal kuramlarından kolayca vazgeçemezler. LHC'nin yeni bozonun ötesinde eli boş gelmesi durumunda gerekli olan şey bir "korumanın değişmesi"dir. Kariyerlerini standart kuantum alan kuramı geliştirmeye adayan daha yaşlı fizikçiler, parçacık fiziğinin tam ve başarılı bir tanımını vermeseler de bu fikirleri feda etmek istemeyeceklerdir. Öte yandan genç fizikçiler için bu durum, yeni fikirlerin ortaya çıkması için ender bir fırsat olacaktır.

BAŞKA BİR OLASI YEREL ELEKTRO-ZAYIF KURAMI

Yerel kuantum alan kuramına dayanan bir elektro-zayıf kuram oluşturmak için başka bir girişimde bulundum. Kendime şu soruyu sordum: Dinamik alan kuramı simetri kırılmasından temel parçacıkların kütlelerini oluşturabilir miyiz? Temel parçacıkların başlangıçtan itibaren içsel kütleye sahip olduğu önceki girişimimin aksine, bu sefer erken evrende kütlesiz simetrik bir faz [eşzamanlılık] olduğunu varsayarak başladım. Bu faz, Higgs bozonlu standart modelde olduğu gibi, tam bir SU(2) × U(1) grup simetrisi içerecektir.

Cambridge'teki eski profesörüm Abdus Salam'ın ayar kuramlarının yeniden boyutlandırılabilirliği hakkında 1962 tarihli makalesini inceledim.[24] Bu makale, 1964 yılında Altılı Grubun kendiliğinden simetriyi bozan aydınlanmasından önce ortaya çıktı. Bu yazıda Salam, abelci olmayan bir ayar kuramının yeniden boyutlandırılabileceği üç koşulu zekice formüle etti. İlk koşul, tedirgenme kuramını kullanan bir for-

[24] A. Salam, "Renormalizability of Gauge Theories," *Physical Review*, 127, 331-334 (1962).

malizmdeki tüm temel parçacıkların "çıplak" kütlesinin –diğer parçacıklar ve alanlarla etkileşimi olmayan bir parçacığın kütlesinin– sıfır olmasını gerektiriyordu. Alan miktarlarının tedirgenmiş açılımlarına dayanan yeniden boyutlandırılabilir bir kuramda, bir parçacığın ölçülen kütlesinin, çıplak kütlesi artı kendi enerji kütlesine eşit olduğunu hatırlayın. Bazı karmaşık matematiksel hesapları içeren ikinci ve üçüncü koşullar, sıfırdan farklı bir çıplak kütleye sahip yüklü W ara vektör bozonları için, abelci olmayan bir ayar kuramında karşılanamadı. Bununla birlikte, abelci ayar değişmezliğine uyan kütleli nötr Z parçacığı için karşılanabilirlerdi.

Temel parçacıkların çıplak kütlelerinin, özellikle W ve Z bozonlarının kütlelerinin sıfır olduğu öncülünden başlayarak yerel elektro-zayıf kuramımı formüle ettim. Şimdi daha önce araştırmış olduğum, temel parçacıkların tüm kütlelerinin bir Higgs bozonuyla kendiliğinden bir simetri kırılması yerine kendi enerjileri tarafından üretildiği fikrine başvurdum. Salam'ın makalesini takiben, atom fiziğinden ve yoğun madde fiziğinden ödünç alınan bir tekniğe dayanan, *Hartree-Fock kendi kendine tutarlı prosedürü* olarak adlandırılan elektronik denklemlere yaklaşma yöntemini kullandım. Tedirgenme çözümünde, parçacıkların öz enerjilerini adım adım yinelemeli bir yöntemle hesaplamama izin veren yeni bir boşluk durumu seçtim. Bu şema içinde, parçacıkların öz enerjilerini ve elektromanyetizmanın ve de zayıf etkileşimlerin birleşimini içeren SU(2) × U(1) grubunun simetri kırılmasını kullanarak kuramın şu şekilde yeniden boyutlandırılabilir olduğunu gösterebildim. Ek olarak, bir öz-enerji hesaplaması, fotonu kütlesiz tutarken W ve Z bozonlarının kütlelerine uymayı başardı. Ayrıca kuramım, 1 TeV ile 2 TeV arasındaki enerjilerde W bozonlarının saçılması için üniterliği başarıyla sağladı.

Şimdi Higgs bozonu olmadan tatmin edici bir elektro-zayıf kuramına ulaştığımı hissettim. Dayandığı yerel kuantum alan kuramı formalizmi içinde, kendi içinde tutarlı olduğu ve doğru elektro-zayıf deneylerle uyumlu olduğu kanıtlanacaktı.

Bununla birlikte, LHC'de deneysel sonuçlar biriktikçe, kanıtların CMS ve ATLAS dedektörlerinde Higgs benzeri bir bozon gözlemlendiğini doğrulamaya başladığı açık hale geliyordu. Standart model Higgs bozonunun varlığının teyidi, Higgs bozonunun olmadığı bir modele olan ihtiyacı açıkça ortadan kaldıracaktır. Bununla birlikte Higgs olmayan bir bozon elektro-zayıf modeli bulmaya yönelik kuramsal girişimler, bir Higgs bozonu arayışındaki deneysel kanıtların karşılaştırılabileceği bir "boş hipotez" üretti.

Salam'ın 1962 tarihli makalesinde elektro-zayıf kuramına bir çözüm önermesinden sonra, Weinberg ve Jeffrey Goldstone'la işbirliği içinde; elektro-zayıf kuramın başarılı bir şekilde tamamlanmasını engelleyecek olan, kendiliğinden simetri kırılmasının kütlesiz Goldstone bozonları üreteceğini gösterdiklerini açıklayan bir dipnot eklemesi tarihsel açıdan ilginçtir. Doğada var olamayan kütlesiz Goldstone bozonları meselesi, elektro-zayıf kuramı arayışında bir ara verilmesine neden olmuştu. Daha sonra, 1964'te, Altılı Grup, W ve Z gibi ayar bozonlarının kütlesiz Goldstone bozonlarını "yediğini" ve devasa ayar bozonları ürettiğini öne sürdü. Bu, Higgs mekanizması olarak anlaşılmaya başlandı. Salam'ın kendiliğinden simetri kırılması furyasına kapılıp 1962'deki yaklaşımını terk etmesi ve bunun yerine Higgs bozonlu bir elektro-zayıf kuramı benimsemesi ilginçtir.

Formun Üstü
KURAMLARIN VERİLERLE ÇELİŞMESİ

Fizikteki gelişmelerin genellikle sosyolojik sonuçları vardır. İnsanlar tüm kariyerlerini belirli spekülatif paradigmalara adarlar, ancak deneysel veriler geldiğinde en baştan yanıldıklarını keşfederler. Şu anda parçacık fizikçileri, aslında bir ölüm makinesi etkisi yaratan LHC'den gelen verilerle karşı karşıya kalmışlardır. Örneğin tüm süpersimetri paradigması, LHC'den gelen yeni verilerin hücumu ile artık yaşam desteğine bağlı görünüyor.

Fizikçi meslektaşlarıma sık sık hatırlattığım gibi, spin 0 ve pozitif pariteye sahip temel bir skaler parçacık, 1930'ların başlarında ilk hızlandırıcıların yapımından bu yana deneysel olarak hiçbir zaman tespit edilmedi. Muhtemelen nedeni, standart model Higgs bozonu gibi pozitif pariteli (ve pozitif yük eşleneği olan) elektriksel olarak nötr bir spin-0 skaler parçacığın boşluk durumunun kuantum sayılarına sahip olmasıdır. Acayiplik ve tılsım gibi diğer tüm çeşni kuantum sayıları hem boşlukta hem de Higgs bozonu için sıfırdır. Gözlenen başka hiçbir temel parçacık, boşluğun tüm bu özel kuantum sayılarına sahip değildir. Bu durum, Higgs bozonunun, boşluk dalgalanmaları gibi boşluğun özellikleriyle yakından ilişkili olduğu anlamına gelir.

Parçacık rezonanslarının gözlemlenen mezon spektroskopisinde, 0 spinli ve pozitif pariteli (ve aynı şekilde negatif pariteli) rezonanslar kuark ve karşı-kuark durumlarından oluşur, bu nedenle standart model Higgs bozonunun aksine, temel parçacıklar değildirler. Temel skaler parçacıklar doğada yokmuş gibi, hatta hiç var olmamış gibi görünüyor. Pi mezonu, sahte-skaler bir parçacıktır; yani negatif pariteye sahip bir skaler spin-0 parçacığıdır. Temel bir parçacık değil, bir kuark ve bir karşı-kuarktan oluşan bir bileşiktir. Modern fiziğin bu kadar büyük bir kısmının temel bir skaler parçacık (ve alan) fikrine dayanması şaşırtıcıdır, ancak böyle bir parçacık belki de şimdiye kadar hiç görülmemiştir.

Temel bir skaler parçacığın bir başka bariz örneği, Büyük Patlama modelinde erken evrendeki başlangıç değer problemlerinin nasıl çözüleceğini açıklayan en popüler kuram olan şişme kuramında ortaya çıkar. Bu kuram 1981'den beri muazzam bir popülerlik kazanmıştır. Yine de, bu asla tespit edilemeyen skaler parçacıklardan biri olmadan başarılı bir şişme kozmolojisi senaryosu geliştirmek imkânsız değilse de zordur. Bu durumda bu parçacık inflaton olur. W ve Z bozonları ve foton gibi deneysel olarak var olan spin-1 parçacıklarını şişme modelleri geliştirmek için kullanmak için girişimlerde bulunuldu, ancak bunlar şimdiye kadar başa-

rılı olamadı. Modern fizikle ilgili en dikkat çekici şeylerden biri, kuramsal fizikçilerin, sınırlı süpersimetri modellerinin deneysel dışlanması gibi deneysel gerçeklere genellikle göz yummalarıdır. Bir anlamda, kendi mezarlarını kazmakla meşguller ve sonunda kendilerini üzerinde şu yazılı bir mezar taşıyla gömülü bulabilirler: Temel Skaler Parçacık, Huzur İçinde Yat. Öte yandan yüksek enerjili LHC, standart model Higgs bozonunun keşfini doğrularsa, o zaman böyle bir parçacığın doğada var olduğu ilk kez gösterilecek ve bu gerçekten kutlanacak bir şey olacaktır.

BİR SKALER HIGGS BOZONUNA KARŞI BİR SAHTE-SKALER MEZON

Standart model Higgs bozonunun öne çıkan özelliklerinden bazılarını ele alalım. Higgs bozonu, kütleleriyle orantılı olarak diğer temel parçacıklarla bağlanır. Bu nedenle deneyciler, yeni bozonun bozunarak en büyük spin-1 ağır bozonlarına, yani W ve Z bozonlarına dönüştüğünü göstermelidir. Aslında, Mart 2013'e kadar, LHC'deki deneyciler, W ve Z bozon çiftlerinden biri sanal bir parçacık ve diğeri gerçek bir parçacık olmasına rağmen, yeni bozonun W'lere ve Z'lere bozunmasını açıkça gösterdiler. Hemen ardından ikisi de gerçek leptonlara bozunuyordu.

Elektromanyetik kuvvetin taşıyıcı bozonu olan fotonun kütlesi sıfır olduğundan, Higgs bozonu doğrudan iki fotona bozunamaz. İki W ve bir üst ve bir karşı-üst kuark aracılığıyla bozunmalıdır. Bu bozunmanın meydana gelme olasılığı sadece yüzde 0,3'tür, ancak CMS ve ATLAS grupları, altın bozunma kanallarından biri olan bu iki fotonlu bozunmayı tespit etmiştir.

Ek olarak, yeni bozonun pozitronlar ve elektronlar gibi çok hafif fermiyonlara bozunduğu görülmemelidir. Bununla birlikte, tau leptonunun kütlesi yaklaşık 1,8 GeV olduğundan çok daha ağır leptonlara, yani tau^+/tau^- çiftine bozunduğu gözlemlenmelidir. Şimdiye kadar, tau^+/tau^- çiftine bozunma-

sı, LHC tarafından ikna edici bir şekilde kanıtlanmamıştır.

Higgs bozonunun fermiyonlara ve karşı-fermiyonlara en baskın bozunması, bir alt kuarka ve bir karşı-alt kuarka bozunmasıdır, çünkü alt kuarkın yaklaşık 4,5 GeV kütlesi vardır. Ocak 2013'e kadar olan deneysel sonuçlar, yeni bozonun alt ve karşı-alt kuarklara bozunduğunu doğrulamamaktadır. Yeni bozonun en ağır kuark ve karşı-kuark çiftine, üst ve karşı-üst kuarklara bozunması tespit edilemez, çünkü üst kuarkın kütlesi 173 GeV'dir, bu nedenle bir çift üst kuark, 125 GeV'deki yeni bozon kütlesinin çok üzerinde bir kütleye sahip olacaktır.

Kuarkonyum modelim, sahte-skaler mezon olması gereken, spin 0 ve negatif pariteyle 125 GeV'de zeta mezon adı verilen bir rezonansın varlığını tahmin ediyor. Modelimdeki ikinci ve daha ağır rezonans, kütlesi 230 GeV olan ve daha hafif zetayla 36 derecelik bir açıyla karışan zeta üssü bozonudur. Zeta ve zeta üssü bozonlarının kütleleri, bilinen bottomonium ve toponyum enerji öz durumlarının karıştırılmasıyla belirlenir. Benim zeta kuarkonyumumun hiçbir şekilde bir Higgs bozonu ya da sahte-skaler bir Higgs bozonu olmadığını vurguluyorum. Aslında bu çok değişik bir parçacık türü olmalıdır.

Şimdi benim kuarkonyum modelimin öngörülerini Higgs bozon modelinin öngörüleriyle karşılaştıralım. Kuarkların ve karşı-kuarkların bir bileşimi olan zeta rezonansının temel durum bozunumu, negatif pariteye sahip bir spin-0 bozonudur. Yani bir sahte-skaler bozondur. İki üst/karşı-üst kuark veya bir W^+/W^- döngüsüne bozunması aracılığıyla iki fotona bozunan temel Higgs bozonunun aksine, temel parçacık olmayan bağlı durum kuarkonyumu doğrudan iki fotona bozunur. Bozunma kuvvetinin hesaplanmasının en son gözlemsel verilerle tutarlı olduğunu ve Higgs bozonunun iki fotona bozunmasının öngörüsüyle karşılaştırılabilir olduğunu hatırlıyoruz. Ayrıca, zeta bozonunun, biri sanal bir Z olan bir çift Z bozonuna bozunmasının hesaplanması, Higgs bozonu tahminiyle karşılaştırılabilir bir sonuç verir. Aynısı, zeta bozonunun bir W'nin sanal bir bozon olduğu bir çift W

bozonuna bozunma kanalı için de geçerlidir. Bununla birlikte, zeta bozonunun tau⁺/tau⁻ leptonlarına, alt/karşı-alt kuarklara ve tılsımlı/karşı-tılsımlı kuarklarına hesaplanan bozunmaları bastırılır veya bunlar Higgs bozonunun bu parçacıklara bozunmasından çok daha az olasıdır. Bu nedenle modelimin önemli bir öngörüsü, deneycilerin yeni bozonun fermiyon/karşı-fermiyon çiftlerine bozunmasının güçlü bir sinyalini gözlememeleri gerektiğidir, ki şimdiye kadar durum böyle görünüyordu.

CERN deneycilerinin karşılaştığı kritik bir problem, 125 GeV'de gördükleri rezonans tümseğinin kuantum sayılarını belirlemektir. Öncelikle, parçacığın sıfır spin ve pozitif pariteye sahip olduğunu doğrulamaları gerekir. Spin için sadece iki olasılık vardır, çünkü bir spin-1 parçacığı iki fotona bozunup da spinini koruyamaz, böylece parçacık ya 0 ya da spin 2'ye sahip olmalıdır. Teknik olarak konuşursak deneyciler bozunma süreci için açısal dağılımı belirlemek zorundadır. Bozunma sürecinde iki fotonun dağılımı: H'den iki fotona veya H'den ZZ'ye ve dört lepton'a bozunması: Bu kolay bir iş değildir ve meseleye sağlıklı bir karar vermek için önemli sayıda parçacık olayı gerektirir.

Mart 2013'e kadar gerçekleştirilen veri analizi, standart Higgs bozonu skaler modelini bir sahte-skaler Higgs bozon modeliyle karşılaştırmaktadır. Vurguladığım bu son model, benim sahte-skaler zeta mezonumla aynı parçacık değil diye tahmin ediyorum; doğrudan temel standart Higgs bozonu ayar kuramından gelmiyor. Ek olarak, bu etkili sahte-skaler Higgs modeli, standart model Higgs bozonuyla karşılaştırıldığında, bir çift Z bozonu veya W bozonuna çok bastırılmış bir bozunma verir. Standart Higgs bozon modelinin aksine, bu tür etkili bir sahte-skaler bozon modeli, yeniden boyutlandırılamaz, bu nedenle genlik ve tesir kesit hesaplamalarında istenmeyen sonsuzluklara yol açar.

125 GeV'lik bir sahte-skaler rezonansın ağır, bileşik kuarkonyum modeli, yeni bozonun spin ve paritesinin deneysel olarak belirlenmesi için Higgs olmayan bir bozonun "boş"

hipotezi gibi davranır. Özellikle, 125-GeV bozonunun paritesinin doğrulanması –bunun bir skaler bozon mu, yoksa bir sahte-skaler bozon mu olduğunu belirleyen– onun standart model Higgs bozonu olduğunu doğrulamak açısından kritik öneme sahiptir.

CMS ve ATLAS işbirliklerinin karşılaştığı en zor sorunlardan biri, proton-proton çarpışmaları tarafından üretilen muazzam miktarda verinin analizidir. Verileri analiz etmek için kullanılan algoritmaların, gerçek bir sinyal ile ardalan arasında ayrım yapabilmesi gerekir. Söylentilerden, tau^+/tau^- bozunmaları gibi yeni bozonun fermiyon/karşı-fermiyon bozunmalarına ilişkin analiz sonuçlarının Temmuz 2012'den bu yana önemli değişikliklere uğradığı anlaşılmaktadır. Higgs bozon tahminlerinin gerektirdiğini verilerde "görmeye" yönelten psikolojik bir tuzak olmamasını ancak umut edebiliriz. Bununla birlikte, LHC deneysel analistleri bu tuzağa düşmemek için her türlü çabayı göstermektedir.

Sık sık söylediğim gibi, fizik acımasız bir iştir. LHC yüksek enerji hızlandırıcısı gibi deneysel aygıtlar kuramlarımıza merhamet göstermezler, ki olması gereken de budur. Doğanın nasıl çalıştığını keşfetmeye çalışıyoruz, doğa bizim fikirlerimize ve nasıl davrandığına dair hayali senaryolarımıza kayıtsız kalmaktadır. Doğanın kendi kuralları vardır ve amacımız, evrenimizi bizzat olduğu gibi yapan doğanın yasalarını anlamaya çalışmak olmalıdır.

9

YENİ BİR BOZONUN KEŞFİ: HIGGS Mİ, DEĞİL Mİ?

MART 2012 Higgs arayışı destanındaki en son gelişmeler, 3-10 Mart 2012 tarihleri arasında İtalya'nın Aosta Vadisindeki La Thuile kayak merkezindeki Rencontre de Moriond toplantısında gerçekleşti. Bu yıllık toplantılar, Fransız Ulusal Nükleer ve Parçacık Fiziği Enstitüsü tarafından 30 yıldır ya da daha uzun süredir organize ediliyor. Amaçları, önceki yıldan gelen yüksek enerji üzerine deneysel ve kuramsal araştırmaların sonuçlarını sunmaktır. Alp kasabası La Thuile, kış kayağı ve yaz yürüyüşleriyle ünlüdür. Çok sayıda turisti ve birçok farklı ülkeden Moriond toplantılarına katılmak için gelen fizikçileri çıkardıktan sonra, küçük kasabanın kalıcı nüfusu sadece 800 civarındadır. Toplantılar genellikle fizikçilerin günün erken saatlerinde kayak yapabilmeleri ve daha sonra toplantılara katılabilmeleri için öğleden sonraları organize ediliyor. Bazen akşamları saat 7:00'den sonra da devam edebilen görüşmelere öğleden sonraları katılabilirsiniz. Bu özel toplantıya katılmadım, ancak görüşmelerin slaytları kısa bir süre sonra elektronik olarak yayımlandı.

Moriond toplantısında sunulan sonuçlara göre, LHC'deki CMS ve ATLAS işbirlikleri tarafından 2011 verilerinin yeni analizleri, standart model Higgs bozon aramasını keskinleştirdi, ancak hiçbir şey, Aralık 2011'deki CERN basın toplantısındaki sunumdan önemli ölçüde farklı görünmüyordu. Yani yeni bir bozonun keşfinin "ipuçları" olduğundaki top-

lantıdan. Öte yandan Moriond'da Fermilab'daki Tevatron grubundan yeni, ilginç sonuçlar vardı. Tevatron makinesi Eylül 2011'de kapanmasına rağmen, hızlandırıcıyla çalışan deneysel fizikçiler 2011 verilerinin analizlerini tamamlamaktaydılar.

Higgs bozonunu aramak, LHC'deki proton-proton çarpışmalarında ve Tevatron'daki proton/karşı-proton çarpışmalarında Higgs parçacığının olası bozunma ürünlerinin izini sürmekten ibarettir. İki altın kanal, Higgs'in iki fotona bozunması ve iki Z bozonuna, ardından dört leptona bozunmasıdır. Ardalan gürültüsü nedeniyle yorumlanması zor olan diğer, daha kirli kanallar, Higgs'in alt/karşı-alt (bb-bar) kuarklarına, tılsım/karşı-tılsım (c-bar-c) kuarklarına ve iki tau leptonuna (tau/karşı-tau) bozunmasıdır. Pratikte tılsım/karşı-tılsım bozunmasını saptama olasılığı küçüktür, çünkü tılsım kuarkı alt kuarktan daha hafiftir. Higgs bozonunun bir fermiyona bağlanması, fermiyonun kütlesiyle orantılıdır, bu nedenle kütle ne kadar az olursa, Higgs bozonuyla fermiyon arasındaki eşleşme o kadar küçük olur, bu bozunmanın tespiti de o kadar zor olur. Bu nedenle deneyciler, bb-bar ve tau/karşı-tau bozunma kanallarını tespit etmeye odaklanırlar.

Bu Moriond toplantısında önemli bir gerçek ortaya çıktı: ATLAS ve CMS dedektörleri, zor fermiyon kanallarında Higgs bozunması için düşük enerjili kütle aralığında (115 GeV ile 140 GeV arasında) herhangi bir fazla olay görmezler. Bununla birlikte sonunda, altın kanallara kıyasla baskın bozunma kanalları oldukları için Higgs bozonunun sonunda bu kanallarda görüldüğünü doğrulamak önemlidir. Şimdiye kadar, LHC sonuçları, altın kanallarda yalnızca 125 GeV civarında, Higgs bozonunun ipuçları olarak adlandırılan olayların fazlalığını gösterdi.

Kuramsal standart model hesaplamalarından Higgs bozonunun LHC ve Tevatron dedektörlerinde araştırılan tüm kanallarda bozunması gerektiğini biliyoruz. Birçok fizikçi, Tevatron'un zor ve baskın bozunma kanalında, Higgs'in alt ve karşı-alt kuarklara bozunması için Higgs bozonunu dü-

şük kütle aralığında görme şansının LHC'den daha iyi olabileceğini düşünmüştür.[1] Sonuçlar şurada sunulmaktadır: Tevatron grupları tarafından yapılan Moriond toplantısı, iki foton bozunma kanalı için CMS ve ATLAS verileri tarafından zaten ortaya konduğu gibi, 125 GeV civarında bir Higgs bozonuyla tutarlı olarak 115 GeV ile 135 GeV arasında geniş bir olay fazlalığı gösteriyor. Bununla birlikte, Tevatron hızlandırıcısında gözlemlenen bu fazlalık, istatistiksel olarak sadece 2 sigma civarındadır ve bu, bu kütle aralığında bir Higgs bozonunun varlığını doğrulamak için yeterince güçlü değildir. Tevatron temsilcisi toplantıda özellikle, verilerin düşük kütle aralığında bir Higgs rezonansına karşılık gelecek bir "tümsek" göstermediğini söyledi. CMS ve ATLAS dedektörlerinde zorlu Higgs bozunma kanallarında olayların olmaması, düşük kütleli bir Higgs bozonunun genel kanıtını desteklemez. Özellikle, ATLAS grubu tüm kanallar için birleşik bir grafik gösterdiğinde, bir Higgs bozonunun kanıtı yaklaşık 3 sigmadan 2 sigmaya düştü. Gerçekten de ATLAS grubundan elde edilen sonuçlar biraz şok edici kalıyordu. CMS grubu, iki zor kanal (alt-karşı-alt ve tau^+/tau^-) için zaten küçük bir fazlalık bildirdi –yani bir standart sapma–, ki bu gerçekten çok küçüktü. ATLAS grubunun bu kanalların hiçbirinde esasen fazlalık görmediklerini, hatta tau^+/tau^- kanalında bir açık görmediklerini bildirmesi Higgs avcıları için iyi bir haber değildi.

Bu noktada, ATLAS grup sonuçları, 118 GeV merkezli, yaklaşık 1 GeV genişliğindeki küçük bir pencere hariç, 114,4 GeV (eski LEP sınırı) ile 122 GeV aralığında standart model bir Higgs bozonunu hariç tutar. 129 GeV'den 600 GeV'ye kadar olan kütle aralığı artık ATLAS ve CMS birleşik verileri tarafından hariç tutulmuştur. Standart model Higgs bozonunun var olması için geriye kalan tek pencere 122 GeV ile 129 GeV arasındadır ve en son Aralık 2011 verilerinde görülen

---

Bu iddia tartışmalıdır çünkü Tevatron, doğası gereği Higgs aramaları için LHC'den daha az duyarlıdır.

125 ile 126 GeV arasındaki ima edilen kütle değeri etrafında aşağı yukarı ortalanmıştır. Sonuç olarak, zor fermiyon/karşı-fermiyon bozunma kanallarının yeni veri analizinden, 125 ile 126 GeV civarında bir Higgs bozonunun aralık ayı ipuçlarının, tam bir standart sapma veya sigmayla yaklaşık 2 sigmaya düştüğüdür.

Bu, Mart 2012'ye kadar Higgs aramasının bir duraklamaya ulaştığı anlamına gelir. Hem olumlu bilgiler hem de bazı olumsuz bilgiler aldık. Ancak artık 122 GeV'nin altında bir Higgs bozonu için endişelenmemize gerek yok gibi görünüyor.

Veri analizinin endişe verici bir yönü, Aralık 2011'de bildirildiği üzere 125 GeV civarında bir Higgs bozonunun ipuçlarının, analiz edilen verilerin yalnızca yüzde 20'sine dayanmasıdır. Bir şüpheci, iki altın kanalda 125 GeV'de bir Higgs bozonunun bu ipuçlarının tamamen istatistiksel bir tesadüf olduğuna inandırılabilir. Bu Moriond toplantısında sunulan ve düşük kütleli bir Higgs bozonunun kanıtlarını bir şekilde zayıflatan yeni veri analizi, oluşan şüpheciliği yalnızca güçlendirmeye yaramaktadır.

Medyada ve popüler fizik bloglarında Higgs bozonu hakkında çok fazla tartışma oldu. Bir blog Rutgers Üniversitesinde kuramsal fizikçi olan Matt Strassler tarafından yönetiliyor. Standart model Higgs bozonunun kesin olarak var olup olmadığı konusunda sağlıklı bir şüphecilik dile getirmişti. Bloglar da dahil olmak üzere medyadaki pek çok kişi, 125 GeV Higgs bozonu keşfi hakkında herhangi bir şüpheciliğe karşı öfke ve kızgınlık gösteriyorlardı, hâlâ gösteriyorlar. Gerçekten de şimdi elektronik arşivde (arXiv.org) bulunan 125 GeV'deki Higgs bozonunu tartışan makaleler, sanki LHC verileri onun varlığını şüpheye yer bırakmayacak şekilde bulmuş gibi görünüyordu.

Bilim insanları olarak, duygusal inançlarımıza dayanarak değil, göründükleri gibi verilere dayanarak ikna edici açıklamalar yapmaya çalışmalıyız. Tabii ki Higgs bozonunun varlığının veya yokluğunun, LHC'nin çalışması sırasında ortaya çıkan yeni verilerle ortaya çıkacağını ve gerçekten de

kısa süre içinde yeterince yüksek bir parlaklıkta yeterli verinin toplanmış olacağını umuyoruz. Hatta bu konuda bile şüpheler var. Ne yazık ki, LHC'de doğrudan aramalar yoluyla Higgs bozonunun varlığını doğrulamak için çok daha fazla veri gerekebilir; ardalan sorunları ikna edici bir şekilde ortadan kaldırılmalı ve Higgs kütlesinde kesin bir zirve gösteren olayların altın kaplama 5 sigma fazlalığına ulaşılmalıdır.

La Thuile/Moriond toplantısında sunulan ilginç bir sonuç, Tevatron makinesindeki CDF ve DO dedektörleri tarafından W kütlesinin yeni bir ölçümüdür. Bu dikkate değer ölçüm, W kütlesini yüzde 0,02 doğrulukla belirler. Bu ölçüm, üst kuark kütle ölçümünün doğruluğuyla birleştiğinde potansiyel bir Higgs bozonunun kütlesini sınırlayabilir. Çünkü Higgs bozon kütlesine ışınımsal veya kuantum alan kuramı düzeltme formülü W kütlesine duyarlıdır. İlk olarak 1970'lerin başında Martinus Veltman tarafından türetilen bir formüle göre, kuantum ışınımsal düzeltmede Higgs kütlesinin W kütlesine oranına logaritmik bir bağımlılık vardır. W kütlesinin yeni, çok hassas ölçümüyle, Higgs kütlesine en uygun +29 GeV veya –24 GeV hatayla 94 GeV'dir. Bu sonuç ciddiye alınırsa, 125 ile 126 GeV'de bir Higgs bozonu hariç tutulacaktır. Bununla birlikte, bu sonucun yalnızca bir standart sapmanın istatistiksel bir önemi vardır ve 125-GeV Higgs bozonunun olası iki standart sapmasına izin verir.

3 TEMMUZ 2012

Artık LHC'de Higgs bozonunun potansiyel bir keşfinin heyecanı zirveye ulaşmıştı. Hem ATLAS hem de CMS grupları, 9 Temmuzda Avustralya'nın Melbourne kentindeki büyük yüksek enerji fizik konferansında 2012 deneylerinin en son sonuçlarını açıklayacaktı. Bu görüşmelerden önce CERN, 4 Temmuz sabahı bir basın toplantısı düzenleyerek, Amerika Birleşik Devletleri'nde Bağımsızlık Gününde, Higgs bozonunun keşfiyle ilgili herhangi bir duyurunun kendi laboratuvarında yapılmasını istiyordu.

LHC duyurusu hakkındaki spekülasyonlar çok yaygındı; blog dünyası asılsız söylentilerle çalkalanıyordu. Associated Press "Tanrı Parçacığının Varlığının Kanıtı" başlığıyla sızdırılmış bir bildiri yayımladı. Saatler sonra bu başlık "Tanrı Parçacığının Varlığının Bulgusu" olarak değiştirildi. Bu belki de bilim tarihinde ilk kez büyük bir haber ajansının bilimsel bir keşfin manşetini düzeltmesidir. Bunun nedeni, CERN'deki deneycilerin temkinli olmalarıdır.

Birkaç gün önce Peter Woit, saygın blogu "Not Even Wrong"da, ["yanlış bile değil"] CMS grubundan Higgs bozonunu keşfettiklerini söyleyen bir sızıntıdan alıntı yaptı. Bu, ATLAS grubunu, iki grup nihai sonuçlarını 4 Temmuz duyurusundan önce birbirlerine bildirmeden önce CMS sonuçları konusunda uyardı. Bu blog sızıntısı, LHC'deki fizikçiler tarafından hoş karşılanmadı, çünkü potansiyel önyargının verilerin analizini etkilemesine izin veriyordu. Gerçekten de tutulan kayıtlara göre, iki grup da 4 Temmuz duyurusundan iki veya üç gün öncesine kadar verileri hâlâ analiz ediyordu.

Deneycilerin duyurularında dikkatli olmaları için iyi bir neden vardır. Eylül 2011'de, Emülsiyon İzleme Aparatlı CERN Salınım Projesi (veya OPERA) grubu, nötrinoların ışık hızından daha hızlı hareket ettiğine dair deneysel kanıtlara sahip olduklarını açıkladı. Ancak Mayıs 2012'de bunun yanlış olduğu kanıtlandı; dramatik iddia, kısmen, GPS alıcılarına yapılan hatalı bir fiber optik kablo bağlantısının sonucuydu. Tarihte bir başka Bağımsızlık Gününe dönersek, hatırladığımız üzere 4 Temmuz 1984'te W ve Z bozonlarını deneysel olarak bir yıl önce keşfeden Carlo Rubbia, CERN'den üst kuarkı yaklaşık 40 GeV enerjide keşfettiğini söyleyen özel bir açıklama yaptı. Bu da sonunda yanlış çıktı. Çok daha sonra, 1995 yılında, üst kuark Fermilab'da yaklaşık 173 ila 175 GeV'de keşfedildi. Ayrıca, 2010 yılında, Fermilab'daki deneyciler, CDF'deki W bozonu iki jet kanalında daha sonra Fermilab'daki D0 dedektörü tarafından geçersiz kılınan yeni bir parçacığın keşfini duyurdular. Bu duyuru, tahmin edilebileceği gibi, standart dışı bazı spekülatif model tahminlerinde

yeni parçacığı tanımlayan başka bir kuramsal makale seli üretti. CERN grubu anlaşılır bir şekilde Higgs bozonuyla benzer bir utanç verici durumdan kaçınmak istiyordu.

Gazeteci Matthew Chalmers tarafından *Nature*'da 2 Temmuz 2012'de yayımlanan bir makale,[2] CERN'deki kimliği belirsiz kaynaklara dayanarak, yeni bir parçacığın gerçekten de yaklaşık 125 GeV'de, bu parçacığın iki fotona bozunması sırasında gözlendiğini iddia etti. İddia, sinyalin artık bir parçacık rezonansının keşfinin duyurusu için gerekli olan 5 sigmaya veya beş standart sapmaya yakın olduğuydu. Ancak Chalmers makalesinde, CERN deneycilerinin hâlâ gördüklerinin bir Higgs bozonu olduğunu ve başka bir şey –daha önce kimsenin düşünmediği yeni bir parçacık– olmadığını kanıtlamaları gerektiği konusunda uyardı. Chalmers şöyle yazdı: "Popüler medyada dedikodular havada uçuşurken bile, fizikçiler CERN'de sessizce tezahürat yapmaya başladılar... ATLAS deneyi üzerinde çalışan ve isminin açıklanmasını istemeyen bir ekip üyesi, "Şüphesiz bir keşfimiz var" diyor. 'Tam bir mutluluk!'" Elektronik arşivde ilgili bir makalede anlattığım gibi, bu varsayılan yeni parçacığın sadece bozunma ürünlerini değil, onun bir Higgs bozonu olduğunu ilan etmeden önce spinini ve paritesini de belirlemek gerekir.[3] Bu kolay bir iş değildir ve çözülmesi zaman alabilir. Standart model Higgs bozonu bozunma ürünlerinin tahminleri ve ATLAS ve CMS dedektörlerinde gözlemlenen sinyalin boyutu oldukça kesindir. Standart model tahminlerine göre, iki fotonlu bozunma kanalında gözlemlenen sinyalin olması gerekenden yaklaşık iki kat daha büyük olduğuna dair söylentiler yayılıyordu.

125 GeV'de rezonans tümseğinin kimliğini ilan etmeyle ilgili bazı uyarıcı açıklamalara rağmen, diğer fizik blogcuları

---

[2] M. Chalmers, "Fizikçiler Yeni Parçacık Buluyor, Ama Higgs mi?" Nature Haberleri (2 Temmuz 2012). [2. M. Chalmers, "Physicists Find New Particle, but Is It the Higgs?" *Nature News* (July 2, 2012).]

J. W. Moffat, "Has a 125-GeV Pseudoscalar Resonance Been Observed at the LHC?" arXiv. org/1204.4702 [hep-ph]

Higgs bozonunun –ya da Tanrı parçacığının– keşfedildiğini zaten duyurdular. Ancak CERN basın toplantısı yaklaştıkça Higgs bozonu için "olası" bir kanıt olduğunu söyleyerek açıklamalarını yumuşatmaya başladılar. Başka bir deyişle bahislerini yeniliyorlardı. 4 Temmuzda CERN'de mantarı açılmamış herhangi bir şampanya şişesi potansiyel olarak sirkeye dönüşebilirdi.

Peter Higgs, basın toplantısında hazır bulunmak üzere Cenevre'ye uçtu. Medya toplu halde CERN'de olacaktı. Bilim tarihinde gerçekten tarihi bir anın ne olabileceğini görmek isteyen Kuzey Amerikalı meraklılar, duyuruyu CERN'den yapılan web yayınında canlı olarak izlemek için saat 3:00'te uyanık olmalıydı. Alarmımı saat 2:30'a kurmadım ama günün ilerleyen saatlerinde tekrarını izlemeyi planladım. CMS ve ATLAS dedektörlerinin, 2011 verilerinde halihazırda görülen iki-foton sinyalinde artan kuvvete dair kanıtlara sahip olacağını tahmin ediyordum. Ancak WW, tau^+/tau^- ve bb-bar kanalları gibi diğer bozunma kanallarında önemli kanıt bulunmadığından, Higgs bozonunun gerçek keşfini duyurmayacaklarına inanıyordum, ancak sadece varlığına dair güçlü kanıtlar olduğunu söyleyeceklerdi.

Higgs bozonunun önemli tahminlerinden biri, onun W ve Z bozonları, kuarklar ve leptonlar gibi parçacıklara bağlanma gücünün kütleleriyle orantılı olmasıdır. Bu nedenle W bozonuna bağlanma gücü, yaklaşık 125 GeV'de W bozonlarına bozunan Higgs sinyalinin önemli bir artışı olarak gözlemlenmelidir. Şimdiye kadar hem Tevatron'da hem de LHC'de gözlemlenen bu bozunma kanalında beklenenden daha az olay oldu. Tanrı parçacığının keşfiyle ilgili heyecanın dışında kalmamak için, Tevatron grubu dün 2 Temmuzda çevrimiçi olarak uzun bir duyuru yayımladı ve bir Higgs bozonunun –yaklaşık 125 GeV'de– alt/karşı-alt kuarklara bozunarak yaklaşık 3 sigmalık geniş bir artışı gördüğünü iddia etti. Ancak şaşırtıcı bir şekilde, Tevatron grubu da bu aynı bozunma kanalında 135 GeV'nin üzerinde geniş bir gelişme görüyordu. Yine, enerji seviyelerindeki bu tutarsızlık, bu ge-

liştirmelerin verilerdeki istatistiksel dalgalanmaların ve geniş ardalanların kalibre edilmesiyle ilgili sorunların sonucu olabileceği endişesini artırmaktaydı. Tevatron grubu ayrıca çevrimiçi duyurusunda, WW bozunma kanalında bir Higgs sinyali için kanıt eksikliği gördüklerini belirtiyordu. Bu duyurular, makine Eylül 2011'de kapatıldıktan sonra yaklaşık 10 ters femtobarn entegre parlaklığa kadar Tevatron verilerinin daha fazla analizi temelinde yapılmıştır.

4 TEMMUZ 2012 (BAĞIMSIZLIK GÜNÜ)

Sabah saat 2:30'da çalar saatimden yardım almadan uyandım. Uykulu halime rağmen, Higgs bozonu arayışında yeni sonuçları açıklayan iki konuşmanın yer aldığı bilimsel seminerin Cenevre'den canlı videosunu izlemeye karar verdim. Cenevre'den video akışı mükemmel kalitede. Konferans başlamadan önce kameralar, CERN'deki önde gelen isimlerle dolu ana oditoryumu tarıyordu. Belli ki daha genç fizikçiler bütün gece dışarıda durmuş, sabah erkenden oraya gidip yer bulmaya çalışıyorlardı. Bir noktada, Peter Higgs oditoryuma girdi ve Françoise Englert'i selamladı. Her ikisi de yeni sonuçları tahmin ederek coşkulu görünüyordu. CERN genel müdürü Rolf-Dieter Heuer kısa bir duyuru yaptı ve ardından CMS sonuçlarını açıklayan ilk konuşmacı Joe Incandela'yı tanıttı.

Incandela oldukça heyecanlı ve gergin görünüyordu. CMS dedektörünün işleyişine ilişkin bir ön girişten sonra, 2012 çalışmalarının sonuçlarına geçti. Bu veriler, 7 TeV ve 8 TeV'lik bir ışını enerjisinden ve 2011 deneysel çalışmalarından 4,7 ters femtobarnın ışın yoğunluğuna veya parlaklığına yakın olan yaklaşık 5 ters femtobarnın entegre parlaklığından kaynaklanmaktaydı. Yeni 2012 verilerinin 2011 verileriyle birleştirilmesinin Higgs aramasının hassasiyetini yaklaşık yüzde 20 artırdığını iddia ediyordu. İki yıllık verileri birleştirmek, mevcut veri miktarını etkin bir şekilde ikiye katlamıştı. Incandela, iki fotona bozunan Higgs'in bozunma

kanalına odaklandı; bu kanal, foton ardalanı sorunu dışında, hadronik ardalanın çok az olması veya hiç olmaması nedeniyle en temiz verileri sağlar. Diğer bozunma kanallarından gelen verileri de tartıştı, özellikle Higgs'in her biri daha sonra bir lepton ve bir karşı leptona bozunan, iki Z bozonuna bozunması üzerinde yoğunlaştı. Bu kanalda aranacak sinyal, nötr Z bozonlarından gelen elektronlar ve muonlar gibi dört leptondur. Bu bozunma kanalının sinyali, önemli olaylar fazlalığı göstermez, ancak sonuç yine de bir Higgs bozonuyla tutarlıydı.

Incandela, "altın" iki-foton bozunma kanalı için rezonans tümseğinin kütlesini 125 ± 0,6 GeV olarak ölçtüklerini duyurdu. Bu kanalda verilerin istatistiksel olarak 4 sigmanın hemen üzerinde bir anlamlılığa ulaştığını, oysa iki Z'nin dört lepton'a dönüşmesi için istatistiksel anlamlılığın 3 sigmanın hemen üzerinde olduğunu ve altın standart olan 5 sigmadan daha az olduğunu söylüyordu. Incandela, bu iki altın kanaldaki bozunma olaylarını çarpıcı biçimde birleştirerek, sihirli 5 sigma istatistiksel anlamlılığına ulaştıklarını belirtti. Bu, yeni bir bozon keşfettikleri iddiasını doğruluyordu. Bu açıklama üzerine, seyirciler yüksek sesle alkışladılar.

Sıradaki konuşmacı ATLAS grubundan Fabiola Gianotti, doğrudan veri analiz tekniklerini nasıl geliştirdiklerine değindi, ardından verileri yalnızca birkaç haftadır analiz eden dünya çapındaki bilgisayar şebekesinin [Grid] yaptığı şaşırtıcı çalışma hakkında yorum yaparak son noktayı koydu. Yüzlerce analistin, duyurmak üzere olduğu dikkate değer sonucu elde etmek için devasa rakamların içinden geçmeyi başarması şaşırtıcıydı. O da konuşmasında iki altın kanal üzerinde yoğunlaştı: Higgs iki fotona bozunuyor ve iki Z parçacıklarına, (bozonlarına) ve sonra dört leptona bozunuyordu. Ardalan gürültüsünü sinyalden nasıl ayırdıklarını gösteren ayrıntılı analizleri uzun uzun anlatan Gianotti, sonunda iki altın bozunma kanalı için 2011 ve 2012'den elde edilen birleşik verilerle, 5 sigma veya beş standart sapmaya sahip olduklarını duyurdu: 126,7 GeV kütleli yeni bir parçacığı onaylıyorlardı.

Beş standart sapma; bu sonucun istatistiksel bir dalgalanma olması için yaklaşık iki milyonda bir şansın olduğu anlamına gelir. Bu da, yalnızca yaklaşık 3 sigmaya ulaşan 2011 koşularından önemli bir artıştı. Yine, bu slayt gösterildiğinde, seyirciler salonu şiddetli bir alkışla boğdular.

Slaytların bilgisayarımda birer birer görünmesini izlerken Gianotti'nin vurguladığı üç gerçeği not alıyorum. Birincisi, yeni bozonun iki fotona bozunmasının sinyal şiddetidir. Bu şiddet, yeni bozonun toplam üretim kesitinin, iki foton üreten Higgs bozunma kanalının tahmin edilen dallanma oranıyla çarpılmasıyla ölçülür. Bu sinyal, standart Higgs bozon modeli tarafından tahmin edilenden yaklaşık iki kat daha büyüktür.[4] Bu tutarsızlık devam ederse, o zaman LHC deneycileri, bu yeni parçacığın standart bir Higgs bozonu mu, Higgs bozonunun bir çeşitlemesi mi, yoksa deneylerde henüz gözlemlenmemiş yeni bir tür parçacık mı olduğunu sorgulamak zorunda kalacaklardı. Ancak Gianotti bu konuda yorum yapmaktan kaçındı, çünkü bu aşamadaki rolü kuramsal yorumlar vermek değil, sadece deneysel sonuçları ortaya koymaktı.

Dikkatimi çeken ikinci konu, yeni parçacığın CMS'de ölçülen kütlesinin ATLAS dedektöründekinden 1,5 GeV kadar farklı olmasıydı ve bu önemli bir fark olabilirdi. 2011 deneysel verilerinin sonuçlarında da bu sorun vardı ve yeni sonuçlarla bu kütle farkının ortadan kalkacağı umuluyordu. Benim düşünceme göre, bu fark sadece deneysel hatanın veya istatistiksel olasılıkların sonucu olabilirdi ve muhtemelen yeni verilerle ortadan kalkacaktı.

Dikkatimi çeken üçüncü konu ise diğer bozunma kanalları; Higgs'in iki tau leptonuna bozunmasıydı. Bu kanal 125 GeV'de verilerde bir artış değil, bir düşüş anlamına gelmekteydi. Bu sonuç da standart model Higgs bozonu tahminleriyle tutarlı değildi.

---

[4] Bu dallanma oranı, iki-foton rezonans tümseğinin öngörülen kısmi genişliğinin, tüm parçacık bozunmalarından kaynaklanan rezonansın toplam tahmini genişliğine bölünmesiyle ölçülür.

Incandela ve Gianotti'nin duyurularını dinlerken atılacak sonraki adımları düşünüyordum. Bu yeni parçacığın Higgs bozonu olduğunu belirlemek için, deneyciler şimdi parçacığın spin ve parite gibi kuantum sayılarını belirlemeli ve diğer bozunma kanalları için tüm dallanma oranlarının, altın kanallar için olanlara ek olarak, kesin bir tespitini elde etmeye çalışmalıydı. Bu deneysel sonuçlar kesinleştiğinde, ancak o zaman parçacığın bir Higgs bozonu olduğunu kesin olarak söyleyebilirdik.

Standart model Higgs bozonunun spin 0 ve pozitif pariteye sahip temel bir skaler parçacık olduğunu hatırlayalım. Şimdiye kadar, böyle bir parçacık deneysel olarak hiç gözlemlenmedi. Bununla birlikte, kuark/karşı-kuark bağlı durumu için içsel kuark spini 1 olan, kuark dönüşlerinin birbirine paralel hizalandığı ve yörünge açısal momentumu 1 olan, spin 0 ve pozitif pariteli bir rezonansa benzeyen mezonların gözlemleri olmuştur. Böyle bir skaler parçacık, bir kuark ve bir karşı-kuarktan oluşur, oysa standart model Higgs bozonu, içinde hiçbir kurucu öğe olmayan temel bir parçacıktır. Kuark/karşı-kuark mezonları için kuantum sayıları S (spin) ve L (açısal momentum) deneysel olarak belirlemek için önemlidir. Dikkat çekici olan şey, eğer LHC'den elde edilen bu yeni sonuçların, boşluk veya temel durumun kuantum sayılarına sahip bir Higgs bozonu olduğu kanıtlanırsa, o zaman bunun anlamı doğada şimdiye kadar gözlemlenen ilk bu tür parçacık olacaktı; bir ailede tek örnek olacaktı.

Heuer'in görüşmelerden sonra yaptığı son yorumlar, Higgs bozonunu kesinlikle keşfettiklerini söyleyecek kadar ileri gitmiyordu. "Raportör olarak şimdi 'Sanırım elimizde var' derdim. Katılıyor musunuz?" dedi. Bunu almaya hevesli seyirciler yine kahkahalar ve alkışlarla patladı.

Higgs bozonu varsayımıyla neredeyse 50 yıllık parçacık fiziğinden ve binlerce deneycinin bu zor parçacığı hızlandırıcılarda keşfetmeye yönelik 40 yılı aşkın çabalarından sonra, seyircinin bu rezonans tümseğinin gerçekten de bir Higgs bozonu olduğuna inanmaya aşırı derecede meyilli olduğu

açıktır. Eğer öyleyse bu, LHC ve CERN için büyük bir zafer olacak ve şimdiye kadar deney için harcanan 9 milyar doları haklı çıkaracak gibi görünüyordu.

9 TEMMUZ 2012

Televizyonda yayımlanan bilimsel seminerden sonra, CERN'de, genel direktör Rolf-Dieter Heuer'in moderatörlüğünde deneycilerden oluşan bir panel ve bir basın toplantısı yapıldı. Önde gelen tüm gazetelerden, televizyon istasyonlarından, bilim dergilerinden ve dergilerden geniş bir uluslararası gazeteci topluluğu vardı. Peter Higgs, kameralarını çakan foto muhabirleriyle çevrili basın toplantısı için oditoryuma girdi. Eğlenceli bir şekilde, kendisi Higgs bozonunun diğer parçacıklara nasıl kütle kazandırdığına dair en popüler tanımın bir karikatürüydü. Odaya girer girmez, gazetecilerden ve fizikçilerden oluşan bir kalabalığı kendine çekti ve ağır ağır ilerleyerek onlara kütle veriyor gibiydi. Kısa süre sonra seyirciler arasında Françoise Englert'e katıldı.

Keşfedilen yeni bozonun Higgs bozonu olup olmadığıyla ilgili gazetecilerden gelen birçok soruya yanıt olarak, paneldeki deneyciler durumun böyle olduğunu söylemek konusunda çekingen davrandılar. Sonunda, deneycilerin bu soruya verdiği soğukkanlı yanıtlardan sonra, Englert elini kaldırdı ve aradıkları şeyin standart modele uyan gerçekten bir skaler parçacık olduğuna karar vermelerinin ne kadar süreceğini sordu. Objektif ve sağduyulu bir deneyci izlenimiyle Fabiola Gianotti, nihai bir karara varılmasının birkaç yıl alabileceğini söyledi. Heuer, bunun Higgs bozonu olup olmadığını doğrulamanın üç ile dört yıl kadar sürebileceğini yineledi. Daha sonra, 2012'nin sonuna kadar karar verilmeyeceğini, hazırlıksız bir şekilde söyledi. Bu, LHC'nin 13 TeV'de yeniden başlayacağı 2015'e kadar beklememiz gerektiği anlamına geliyordu. Ancak, mümkün olduğu kadar fazla veri toplamak için bu çalışma sırasında makineyi planlanandan 2 ile 3 ay daha uzun süre çalıştırmaya devam edeceklerini de belirtti.

Heuer ve panel üyelerinin uyarılarına rağmen, basın toplantısında hazır bulunan diğer kişiler coşkularını ifade etmekten çekinmediler:

CERN Konseyi başkanı Michel Spiro, "Şunu söylemeliyim ki bu keşif, insanlık için başka bir dev adımdır" dedi.

Françoise Englert, "Yaptıklarınızdan olağanüstü etkilendim" dedi.

Gerald Guralnik, "Bir futbol maçındaki gibi alkışların coştuğu bir fizik etkinliğinde olmak harika" dedi.

Peter Higgs, "Ömrüm süresi içerisinde [ben yaşarken] bunun olması inanılmaz bir şey" dedi.

İşin özüne inen Heuer, "Projede yer alan herkes bugünle gurur duyabilir. Tadını çıkarın!" diyerek bu güzel sözleri tamamladı.

Blog dünyası hiç vakit kaybetmeden ve deneycilerin daha temkinli duruşunu görmezden gelerek Higgs bozonunun "keşfi" konusunda histerikleşti. Kendi enstitümde bile ana sayfamızda şu iddia yer aldı: "*On yıllardır aranan Higgs bozonu keşfedildi. Bu ne anlama geliyor ve buradan nereye gidiyoruz?*" Söylemeye gerek yok, fiziğin nesnelliğinin altüst olmasından rahatsız oldum, çünkü CERN'deki deneycilere göre, Higgs bozonunun keşfedildiğini henüz kesin olarak söyleyemiyorduk. Yine de fizik blogları şimdiden Nobel Ödülünü kimin ve ne zaman alması gerektiği konusunda spekülasyon yapıyorlardı. Gerçekten de "Not Even Wrong" da ["Yanlış Bile Değil"] Peter Woit, ödülün önce CMS ve ATLAS grupları (toplamda yaklaşık 6000 fizikçi!) arasında paylaşılarak bütün deneycilere verilmesi gerektiğini önerdi. Ciddi bir şekilde Woit'in blogunda, henüz tanımlanamayan yeni bozonun keşfinden sadece birkaç ay sonra, deneycilerin ödülü önümüzdeki ekim ayında almaları olasılığı tartışıldı. Bununla birlikte, geleneksel Nobel prosedürünü takip etmek üzere ödül için adayların önceki ocak ayında sunulması gerekiyordu.

Ayrıca bloglarda, 1964'te Higgs mekanizması fikrini ortaya atan beş ya da altı yaşayan kuramcı arasında, Englert,

Higgs ve Kibble'ın bir sonraki yıl ödülü alması gereken üç kişi olması gerektiği konusunda bir fikir birliğine varılıyordu. Hagen ve Guralnik ile aynı şekilde Anderson, belirsiz nedenlerden dolayı dışarıda bırakılıyordu. Gerry Guralnik, kendiliğinden simetri kırılmasının göreli parçacık fiziğinin temel bir parçası olduğunu düşünen ilk kişilerden biriydi. Çok sert eleştirilere göğüs germek zorunda kaldı. Efsaneye göre Guralnik, Münih'te bu araştırma hakkında bir konuşma yaptığında, ünlü Werner Heisenberg oditoryumun arkasında ayağa kalkmış ve ona aptal demişti.

Tarihsel olarak, Ocak 1983'te W ve Z bozonlarının keşfinden dolayı Nobel Ödülü, ertesi yıl her ikisi de CERN'deki deneyciler olan Carlo Rubbia ve Simon Van der Meer'e verildi. Dahası, Glashow, Weinberg ve Salam'a verilen 1979 Nobel Ödülü, W ve Z bozonlarının gerçek keşfinden dört yıl önce gerçekleşmişti ve elbette, onların elektro-zayıf kuramlarının ayrılmaz bir parçası olan Higgs bozonu henüz keşfedilmemişti.

Rubbia'nın 1984'te üst kuarkı yaklaşık 40 GeV'lik bir enerjide "keşfettiği" talihsiz duyurusu her zaman bu hikâyenin ardalanında gizlenmiştir. CERN'de bir basın toplantısı aracılığıyla yapılan bu duyuru tesadüfen 4 Temmuz 1984'te yapıldı. Bu "keşif", W bozonunun bir üst ve bir karşı-alt kuark olarak bozunmasına ilişkin 12 olaya dayanıyordu. CERN'de proton/karşı-proton çarpıştırıcısında 630 GeV enerjide bu bozunmayı tespit edebilen iki deney vardı. UA1 dedektörü, üç buçuk olayın ardalanına karşı 12 olayı gözlemledi. Ardalanın üzerindeki sekiz veya dokuz olay, 3 sigmadan biraz daha yüksek bir rezonans tümseği üretmek için yeterliydi.

Bu, W ve Z parçacıklarının keşfinden sonra çok yaklaşan CERN ve Carlo Rubbia için çift başlı bir zafer olarak kabul edildi. 12 Temmuz 1984'te *Nature*'ın editörü John Maddox, Rubbia liderliğindeki grubun üst kuarkı keşfetmesini yorumlayan "CERN Tekrar Zirveye Çıkıyor" başlıklı bir makale yayımladı.[5] Makaleye, "Matthew ilkesi –'verilmesi gereken

[5] J. Maddox, "CERN Comes Out Again on Top," *Nature*, 310, 97 (1984)).

kişiye'– CERN lehine çalışıyor," cümlesiyle başladı. Ayrıca makalede, "CERN'deki yeni gelişme, neredeyse tam olarak beklenen çizgileri takip ediyor" ifadesini kullandı. Oysa daha fazla veri toplandığında görülmüştü ki, UA1 deneyinde QCD ardalan hesaplamaları yanlıştı. Ardalanı hafife alarak asılsız iddianın duyurulmasına neden olmuşlardı. Ayrıca, 1984 yılında CERN'deki rakip UA2 dedektör grubu, UA1 grubunun gözlemlerini doğrulayamamıştı. Bu olay, parçacık fiziğinin yollarının 3-sigma olaylarının, dalgalanmaların ve açıklanamayan etkilerin mezar taşlarıyla döşeli olduğunu bir kez daha kanıtlamaktadır.

Gianotti ve Incandela'nın 4 Temmuzdaki bilimsel konuşmalarının içeriğini sindirmek için zamanım olduğunda, aşağıdaki takip eden düşünceler netleşti: Higgs bozonunun iki fotona bozunmasının sinyali şiddet olarak yaklaşık 3 sigmadan 4 sigmaya çıkmıştı. Diğer altın bozunma kanalındaki sinyal –Higgs ZZ'ye dönüşür, daha sonra dört leptona bozunur– yaklaşık 3 sigmalık bir güven aralığına ulaşmıştı. Bu iki kanalı birleştirdiklerinde CMS'de 125,5 GeV ve ATLAS'ta 126,5 GeV kütlede bir Higgs bozonu için altın kaplamalı 5 sigmanın sinyal şiddetini elde ettiler. CERN'in yaklaşık 125 GeV'de gerçekten yeni bir bozon keşfettiğini doğrulayan önemli bir gerçek, her iki grubun da; CMS ve ATLAS'ın yaklaşık aynı kütlede 5 sigma sinyali tespit etmesiydi. Ancak, 4 Temmuzdaki seminer ve basın toplantısında açıklanan ATLAS ve CMS sonuçlarının resmi bir birleşimi yoktu.

Higgs'in WW'ye dönüşmesi benzeri, bb-bar ve tau^+/tau^- gibi diğer kanallardaki sinyallerin çok daha zayıf olduğunu unutmayalım. Aslında tau^+/tau^- kanalı bozunması, çarpışmalar sırasında hiçbir örneği olmaksızın sıfır sinyaline sahipti. Ek olarak, iki fotonlu kanal bozulma sinyali, standart model tahmininden yaklaşık 2,5 sigma sapmaya tekabül eden, standart modelden tahmin edilen boyutun yaklaşık iki katıydı. Dolayısıyla deney sonucunun 2,5 ila 3 standart sapma içinde bir Higgs bozonuyla tutarlı olduğu söylenebilir. Ancak deneycilerin basın toplantısında vurguladığı gibi,

rezonansın spini ve çok önemli paritesi bilinmiyordu. Bu nedenle, Gianotti'nin dediği gibi bir "sahte" Higgs bozonunu simüle ediyor olabilirdi.

Deneycilerin aksine, kuramsal parçacık fiziği topluluğu Higgs bozonunu keşfeden LHC'ye karşı büyük ölçüde olumlu önyargı besliyordu. Bu anlaşılabilir bir durumdur, çünkü kuramcılar tarafından Higgs bozonu üzerine yaklaşık 50 yıllık yayınlar vardır ve Higgs bozonu ile kendiliğinden simetri kırılması fikrinin önemli bir rol oynadığı, üniversitelerde kullanılan birçok ders kitabında yer alır. Bununla birlikte, kuramcıların bu önyargısı, deneycileri daha fazla veri toplanana ve yeni rezonansın bir Higgs bozonu olduğu şüphe götürmez bir şekilde kanıtlanıncaya kadar duruma karşı dikkatli ve nesnel bir görüş almaktan alıkoymadı.

Tüm bu heyecanın ışığında, standart model Higgs bozonunu temel bir skaler parçacık olarak keşfetmenin parçacık fiziği için teknik ve temel sonuçları üzerinde düşünmekten kendimi alamadım. Higgs kütle hiyerarşisi problemi ve Higgs alanından kaynaklanan boşluk yoğunluğunun saçma ince ayar tahmini ortadan kalkmıyordu. Gerçekten de Higgs kütle hiyerarşisi problemini ve de ayar hiyerarşisi problemini, hatta onun aşırı ince ayarını çözebilecek minimal süpersimetrik standart model (MSSM) için LHC verilerinde kanıt eksikliği göz önüne alındığında, bir Higgs bozonunun keşfi kendi başına bir kâbus olabilirdi. 1 TeV veya daha fazla kütleyle keşfedilen ve bir SMÖ senaryosuna işaret eden herhangi bir yeni parçacık, Higgs bozonunun skaler doğası nedeniyle, standart modeli hâlâ savunulamaz hale getirebilir. Böyle yeni bir ağır parçacık kütlesi, hesaplamalardaki enerji kesintisi Planck enerjisiyse, 33 ondalık basamaklı bir ince ayar düzeltmesi gerektiren 125 GeV gözlemlenen kütle için düzeltmeler üretir. Ayrıca standart model ve Higgs bozonuyla ilgili başka bir sorun daha var: yani nötrinoların bir kütlesinin olduğu keşfi. Nötrino kütlelerinin kökeni bir sırdır ve sıradan maddeyle etkileşime girmeyen "steril nötrinolar" gibi deneysel olarak yeni ağır nötrinolar keşfedilmezse, o za-

man Higgs bozonu ile standart model yeniden boyutlandırılabilir bir kuram olmayabilir, yani bir Higgs bozonuna sahip olmanın orijinal gerekçesi o kadar güçlü değildir.

Bana hâlâ; Higgs bozonunun bu biraz yıkıcı sonuçlarına yönelik en temiz çözümden, bir Higgs bozonunun olmamasıyla en kolay şekilde kaçınılabilecekmiş gibi geliyordu! Bir süredir düşündüğüm tümseğin bir kuarkonyum rezonansı olabileceğine dair önerim, keşfin basit bir standart model Higgs bozonu değil, daha karmaşık bir canavar olduğunu düşündüren tek alternatif model değildi. Örneğin birkaç fizikçi iki Higgs parçacığının, hatta belki de üçünün, gözlemlenen verileri üretmek için etkileşime girdiğini öne sürdü. Başka bir alternatif, kuramda deneyle aynı fikirde olmak için iki fotonlu bozunma kanalı sinyalinin boyutunu artırmak üzere yeni yüklü ve nötr parçacıkların varlığının öngörülmesiydi. Ancak LHC'de oluşan gelecekteki veriler, temel bir Higgs bozonunun keşfini desteklemeye devam ederse, o zaman benimki de dahil olmak üzere Higgs bozonu sorunlarına yönelik bu olası çözümlerin terk edilmesi gerekecektir.

11 TEMMUZ 2012

Temel bir parçacık olarak Higgs bozonunun spinini ve paritesini *sahte Higgs* olarak adlandırılabilecek olandan ayırt etmek çok önemlidir. Parçacık kuramcıları, 1990'larda ve 2000'lerin başında, standart Higgs bozonunun spininin sıfır, paritesinin de pozitif olması gerektiğini kabul ettiler. Yani bir skaler bozon olmak zorunda. Skaler Higgs ile sahte Higgs, bozunma ürünlerindeki açısal bağıntıların dikkatli analizi yoluyla deneysel olarak ayırt edilebilir.[6] 125-GeV

[6] Spin-0 bozonu ya iki fotona ya da iki Z bozonuna, ardından dört leptona bozunduğunda, bozunan parçacıklar bozunmalarında birbirlerinden saptıkları açılar açısından analiz edilebilir. ZZ bozunmasındaki iki lepton çifti durumunda, verilerden beş "açı" oluşturulabilir. Bu tür analizlerin sonuçları, henüz elde edilmemiş ve 2015/2016'dan önce mevcut olmayabilecek kesin, istatistiksel olarak anlamlı veriler talep etmektedir.

bozonunun iki fotona ve bir Z ve bir sanal Z'ye bozunduğu gözlemlendiğinden bunu biliyoruz. Yeni keşfedilen bozonun spininin 0 veya spin 2 olması gerekir. Spin 1 olamaz; çünkü Landau ve Yang tarafından yıllar önce yayımlanan bir kurama göre: foton gibi bir spin-1 vektör parçacığı, iki spin-1 vektör parçacığına bozunamaz. Parçacık fizikçileri, spin 2'ye göre spin-0 bozonunu tercih ederler, çünkü bir spin-2 parçacığı bir graviton özelliklerine sahip olacaktır ve çoğu fizikçi, verilerde böyle bir spin-2 parçacığının bozunmasının görüldüğüne inanmaz.

Bir skaler spin-0 bozonuyla bir sahte-skaler spin-0 bozonu arasında ayrım yapan belirgin bir imza; yeterince yüksek enerjilerde, bir skaler bozonun bozunma ürünlerinin ağırlıklı olarak boylamasına kutuplanırken, bir sahte-skaler bozonun bozunma ürünlerinin esas olarak enine kutuplanır. Bu uzunlamasına ve enine kutuplanmalar, bir parçacığın uzayda yayılmasının serbestlik derecelerini oluşturur. Boyuna kutuplanma veya serbestlik derecesi, parçacığın hareket yolu boyunca yönlendirilmiş bir spin yönüne sahip olduğu anlamına gelirken enine kutuplanma, parçacık dalgalarının parçacığın hareket yönüne dik olduğu anlamına gelir. Deneyciler, verilerdeki bu kutuplanmaları tespit edebilmektedir.

CERN basın konferansından sonraki hafta içinde kendi sahte Higgs modelimi; yani bu kitapta birkaç kez bahsettiğim, *zeta* adlı kuarkonyum rezonansını inşa etmeyi bitirdim. Bu model, bir Higgs bozonuyla Higgs olmayan bir bozonu ayırt etmek için kullanılabilir. Bu ayrım, standart model Higgs bozonunun bozunma oranlarının ve dallanma oranlarının ve de benim sahte Higgs modelim tarafından tahmin edilenlerin dikkatli bir şekilde karşılaştırılmasıyla yapılabilir. Özellikle, sahte skaler bozon, standart model skaler Higgs bozonunun pozitif paritesine kıyasla negatif pariteye sahip bir sahte-skaler parçacıktır. Dahası, sahte Higgs, Higgs bozonu gibi spin 0'a sahiptir.

Modelimdeki ilginç bir unsur, henüz tespit edilmemiş dördüncü nesil kuarkların varlığını tahmin edebilmesidir.

125-126 GeV kütleli bozonunun *etkin* kurucu kütlesinin 63-GeV'lik bir kuarkın kütlesinin yaklaşık iki katı olması gerektiğini düşündüm. Şimdiye kadar, böyle bir dördüncü nesil kuark gözlemlenmemiş gibi görünüyor, çünkü yaklaşık 4,5 GeV kütleye sahip alt kuark ile 173 GeV kütleye sahip üst kuark arasında hiçbir kuark görülmedi. (Diğer kuarkların tümü kütle olarak 4,5 GeV'den daha düşüktür.)

Kütlesi yaklaşık 63 GeV olan bir kuark henüz tespit edilmediğinden, zeta ve zeta üssü bozon kütlelerinin, bottomonium ve toponium bağlı durumların kütlelerinin birleşimiyle belirlendiğini varsaydım. Zeta ve zeta üssü rezonanslarının karıştırılmasından, bottomonium ve toponium durumlarının kütlelerini eklediğinizde ve zeta'yı 125-GeV bozonuyla tanımladığınızda zeta üssünün kütlesi 230 GeV olacak şekilde bir formül vardır. Bu durumların "karışımı", birbirleriyle belirli bir şekilde etkileştikleri anlamına gelir, çünkü bottomonium ve toponium durumları farklı kütlelere rağmen aynı kuantum sayılarına sahiptir. Aynı durum zeta ve zeta üssü mezonları için de geçerlidir. Bozonların benzer şekilde karışımı, nötr K-mezonları ve onların karşı-K mezonları için ve de elektron nötrinosu ile muon nötrinosu gibi nötrino çeşnilerinin karıştırılması için deneysel olarak zaten doğrulanmıştır. Buna ek olarak güneşten yeterince elektron nötrinoları yayılıyor mu sorusunu gündeme getiren bir "güneş nötrino problemi"nin çözümü de mevcuttur. Ayrıca sahte-skaler mezonların alt kütle sekizlisine ait olan sahte-skaler eta ve eta üssü mezonlarının karıştığına dair güçlü kanıtlar vardır. Zeta ve zeta üssü rezonanslarının, bottomonium ve toponium durumlarının bir karışımından oluştuğu varsayımıyla ilgili bir problem, tedirgenmiş QCD'deki standart gluon kuvvetlerinin, zeta ve zeta üssünü oluşturacak karışıma neden olacak kadar yeğin olmamasıdır.

Bu fikrim, standart modelde bilinen altı kuark ve leptonun çeşnilerini karıştıran *Cabibbo* ve *Cabibbo-Kobayashi-Maskava* matrisleri tarafından belirlenen standart kuark

çeşni karışımından farklıydı. Modelimde elbette bu standart kuark çeşni karışımlarını tutuyordum.

Sahte Higgs parçacığım, zeta, elektriksel olarak yüksüzdür ve iki fotona bozunabilen iyi bilinen parapozitronyum parçacığına benzer. Aksi takdirde, modelin geri kalanı, tedirgenmiş olmayan gluon etkileşimleriyle geliştirilmiş standart QCD ve kuark-gluon etkileşimlerine dayanır.

Zeta gibi kuramsal bir sahte Higgs üretme yeteneği, yeni 125-Gev bozonun paritesini ve spinini belirlemeye yönelik kritik ihtiyacın altını çizer. Deneyciler sonunda spin 0'a ve pozitif pariteye sahip olan yeni parçacığı bulurlarsa, Higgs bozonunu bulmuş olacaklardır; aksi takdirde yeni bozonu, spin 0 ama negatif pariteye sahip olarak tanımlarlarsa bu bir sahte-skaler bozonu gösterir, onlar da muhtemelen zeta parçacığını bulmuş olurlar. Diğer sahte Higgs modelleri de önerilmiştir. Örneğin Estia Eichten, Kenneth Lane ve Adam Martin, 125-GeV bozonunun değiştirilmiş bir Teknik renk modelinde bir Teknik bozon olarak tanımlanmasını önerdiler. (Eichten ve Lane Chicago'daki Fermilab grubunun üyeleridir, Martin ise CERN'in bir üyesidir.)

Zeta ve zeta-asal bozonlarını Higgs bozonundan ayırmanın diğer bir yolu, bozunma hızlarını daha düşük kütleli parçacıklara dönüştürmektir. Zeta'nın bozunma hızları, QCD'deki kuarkonyum hesaplamalarıyla tahmin edilirken Higgs bozonu bozunma hızları, 125 GeV'lik bir Higgs kütlesi verilen standart elektro-zayıf kuramıyla belirlenir. İki bozonun, zeta ve Higgs'in, alt / karşı-alt kuarklar gibi fermiyon/karşı-fermiyon çiftlerine bozunma oranları önemli ölçüde farklı olacaktır.

7 AĞUSTOS 2012

Perimeter Enstitüsü, 2-4 Ağustos tarihleri arasında benim de katıldığım LHC Arama Stratejileri başlıklı bir konferans düzenledi. Farklı uluslararası laboratuvarlardan ve üniversitelerden, kuramcılar ve deneyciler arasında eşit olarak

paylaştırılmış 40'tan fazla katılımcı vardı. Çalıştayın amacı, yeni bozonun özelliklerini araştırmak için daha sonra hangi deneylerin yapılması gerektiğini tartışmaktı. Süpersimetrik parçacıklar ve diğer olası egzotik parçacıklar gibi standart modelin ötesinde fiziği keşfetme önerileri atölyede baskın bir rol oynadı.

İlk sabah, iki CMS grup lideri Joe Incandela ve Greg Landsberg'in giriş konuşmalarıyla başladı. Santa Barbara'daki California Üniversitesinden Incandela, CMS ve ATLAS gruplarının 125 ile 126 GeV'de yeni bir parçacık keşfettiklerini nasıl iddia ettikleri hakkında net bir sunum yaptı. 4 Temmuzda CERN'de verdiği seminerde olduğu gibi, standart model Higgs bozonunu bulduklarını iddia etme konusunda temkinli davrandı.

Ardından Brown Üniversitesinden Landsberg, CMS ve ATLAS sonuçlarının durumunu tartıştı. Yeni bozonun spinini ve paritesini belirlemenin; LHC'nin 17 Şubat 2013'te yaklaşık iki yıl boyunca kapanmasından önce, birincil hedef olduğunu belirtti. 2012'nin sonunda, 8 TeV enerjide yaklaşık 30 ters femtobarn entegre parlaklığa sahip olacaklarını ve bu durumun, yeni bozonun 3 sigma duyarlılığına kadar paritesini belirlemelerine izin vereceğini iddia etti. Ayrıca bozonun spininin 0 mı, yoksa 2 mi olduğuna ilişkin kararın pariteyi belirlemek kadar kolay olmayacağını söyledi.

Landsberg, spin-0 sahte-skaler bozonu olan bir Higgs'i temel parçacık olarak standart modele sığdırmanın zor olduğunu iddia etti. Bir olasılık; Higgs bozonunun sahte-skaler doğasının kendisini kuantum döngü düzeltmeleri yoluyla açığa vurduğu, iki Higgs bozonuna sahip olmaktır. Bana göre, bu uydurma bir modeldi ve doğru olması pek mümkün değildi. Landsberg'in tartıştığı bir başka olasılık, LHC'de süpersimetrinin keşfedilmesidir. Süpersimetri modeli MSSM'de üç nötr Higgs bozonu ve iki yüklü Higgs bozonu vardır. Nötr Higgs bozonlarından ikisi pozitif, biri negatif pariteye sahiptir ve bu nedenle bir sahte-skaler bozondur.

Kahve molasında Joe Incandela'yla konuştum ve yeni bozonun standart model bir Higgs olduğu iddia edilmeden önce onun paritesinin belirlenmesinin kritik olduğunu vurguladım, bu da onun skaler mi, yoksa sahte-skaler mi olduğunu gösterecekti. O da bunu kabul etti ve Landsberg'in yıl sonunda yeni bozonun paritesini 3 sigma veya standart sapmalar dahilinde belirlemek için yeterli veriye sahip olmayı beklediklerini tekrarladı. Zaten bir skaler bozonu tercih eden bir sonuca çoktan sahip olduklarını söyledi. Bununla birlikte, sonuç istatistiksel duyarlılıkta yalnızca 1 sigma veya daha düşük bir değerdeydi, bu nedenle açıkça yetersizdi.

Kahve molasının sonuna doğru Greg Landsberg'le konuştum. Yeni bozonun paritesinin belirlenmesinin önemini bir kez daha vurguladım. Yıl sonuna kadar 30 ters femtobarn parlaklığa ulaştıklarında pariteyi üç standart sapma içinde bilecekleri iddiasını yineledi. Yıl sonuna kadar biriken verileri kullanarak bozonun spinini belirlemenin onlar için kolay olmayacağını da sözlerine ekledi. Bozonun iki fotona bozunduğu gözlemlendiğinden, bozonun en olası spininin 0 olacağı konusunda anlaşmıştık. Alternatif; iki fotona bozunabilen pozitif pariteli bir spin-2 bozonu, yeni bozonun olası bir yorumu değildi: çünkü bunu verilerle desteklemek kolay olmayacaktı. CERN'deki deneycilerin yeni bozonun standart model Higgs olduğunu iddia etme konusunda temkinli davrandıklarını görmekten mutlu olduğumu söyledim. Bunun Higgs bozonu olduğunu, özelliklerini daha fazla deneysel olarak incelemeden karar vermiş görünen parçacık kuramcılarının çoğunluğunda durumun böyle olmadığını da ekledim. Güldü ve "Kuramcılar, biz daha bir şey keşfetmeden önce onun Higgs bozonu olduğuna karar vermişler!" dedi.

Kahve molasının ardından, Massachusetts Teknoloji Enstitüsünden (MIT) deneyci Marcus Klute tarafından bir başka tanıtım konuşması yapıldı. Konuşmasının ilk slaydı, CERN genel müdürü Rolf-Dieter Heuer'in 4 Temmuz duyurusunda yaptığı bir alıntıyı gösterdi: "O'nu bulduk!" ["O elimizde"] Klute alıntıya ekledi: "Gerçekten mi?" ["Öyle mi Acaba?"]

Marcus Klute iki-foton bozunma kanalındaki yeni bozonu keşfeden CMS grubunun bir üyesidir. İki altın kanalla ilgili deneysel bulguları ayrıntılı olarak gözden geçirdi. Klute'nin ilk slaydı, CERN deneycilerinin standart modeldeki Higgs bozonunun keşfedildiği iddiası konusunda temkinli olduklarını bir kez daha gösterdi.

Daha sonra Johns Hopkins Üniversitesinden bir kuramcı olan Raman Sundrum konuştu. O ve Harvard'dan Lisa Randall, zayıf etkileşim enerji ölçeğini ve Planck enerji ölçeği hiyerarşi problemini çözmeye çalışan Randall-Sundrum modelini icat etmeleriyle ünlüdür. Evrenin, beş boyutlu bir "yığın"la birbirine bağlanan iki dört boyutlu "zardan" oluştuğu fikrini ortaya atmışlardı. Bu zarlar, sadece iki boyutlu sicimlerin değil, daha yüksek boyutlu zarların da bulunduğu süpersicim kuramının bir parçasıdır. Varsayıma göre, parçacık fiziğinin standart modeli bu zarlardan birinde varlığını sürdürmektedir. Beş boyutlu uzayzaman; dört boyutlu uzayzamanı, yaklaşık 250 GeV'deki elektro-zayıf ölçeğin enerjisi ile 10^{19} GeV'deki Planck ölçeğinin enerjisi arasındaki gerilimi azaltacak şekilde büker.

Sundrum konuşmasına, standart model Higgs bozonuyla tutarlı olan 125 GeV'de yeni bir bozon keşfedildiği için, ciddi "doğallık" problemleriyle, yani Higgs kütle hiyerarşisi problemiyle baş başa kaldığımızı söyleyerek başladı: boşluk enerji yoğunluğunun ciddi ince ayarı ve elektro-zayıf enerji ölçeği ve Planck ölçeği ince ayar sorunlarıyla uğraşmak zorunda kalıyorduk. Bu sorunların kuramcılar için katlanılması acı verici olduğunu söyledi ve acı belirten bir jest yaparak elini karnına koydu.

Doğallık sorunu; temel parçacıkların kütlelerini üretmek ve kuramı yeniden boyutlandırılabilir kılmak için bir Higgs bozonuna ihtiyacımız olduğu fikrinin başlangıcından beri, standart model tarihinin bir parçası olmuştur. Sundrum, MSSM, Küçük Higgs çözümü ve Teknik renk gibi Higgs bozonunun bileşik modelleri dahil olmak üzere Higgs kütle hiyerarşisi sorununu çözmek için olağan bazı girişimleri gözden

geçirdi. Kuramcılar, temel kuramlarında herhangi bir ciddi ince ayardan nefret ederler ve bahsettiği ince ayar sorunları oldukça şiddetlidir ki LHC'de bir SMÖ senaryosu keşfedilmediği sürece standart modeli itici kılar. Şimdiye kadar, LHC, SMÖ fiziğinin herhangi bir ipucunu keşfetmedi (doğallık probleminin ayrıntılı bir tartışması için *bkz.* Bölüm 10).

Çalıştayın geri kalanı esas olarak Perimeter Enstitüsünde, Uzay Odası ve Kütleçekim Odası adlarındaki iki bitişik seminer odasında gerçekleşen tartışma gruplarından oluşuyordu. Tartışma gruplarından biri, LHC'nin süpersimetrik parçacıklar gibi yeni egzotik parçacıklar arayışı için deneysel stratejiler üzerinde yoğunlaşırken diğer grup, doğallık problemi ve SMÖ fiziği arayışı gibi kuramsal konularla ilgilendi.

Deneycilerin tartışma oturumlarından birkaçına katıldım ve CERN deneycisi Albert De Roeck tarafından düzenlenen bir oturumda, yeni bozonun spinini ve paritesini belirlemenin öneminden bahsettim, bunun nasıl yapılabileceğini tartıştım. Bunu belirlemenin yolu, yeni bozonun iki Z'ye bozunmasının açısal dağılımları, ardından bunların dört leptona bozunmasının dağılımları göz önüne alınarak yapılan incelemelerdir. Standart modelde gözlemlenen tüm parçacıkların spinlerinin ya 1 ya da 1/2 olduğunu vurguladım. Yeni bozonun iki fotona bozunduğu gözlemlendiğinden spin 1 olamaz, çünkü ortaya çıkan iki fotonun her biri spin 1'dir; o halde yeni bozon ya 0 ya da 2 spine sahip olmalıdır. Landsberg'in konuşmasından alıntılayarak, yeni bozonun skaler ve sahte-skaler parite atamaları arasında bir 3-sigma ayrımına LHC yeterince veri biriktiğinde ulaşılabileceğine dair açıklamasını tekrarladım. Bu veri, makineyi bu yıl içinde 8 TeV'de 30 ters femtobarn parlaklıkta çalıştırarak, elde edilebilecek veriler içerisinden çıkabilirdi. Hiçbir çarpıştırıcının, boşluğun kuantum sayılarına sahip bir temel bozon tespit etmediğini vurguladım.

De Roeck benim küçük dersimden sonra başıyla onayladı ve ATLAS ile CMS dedektörlerindeki deneycilerin yeni bozo-

nun spinini ve paritesini belirlemek için tarif ettiğime benzer yöntemler kullandığını söyledi. Yeni bozonun standart model Higgs bozonu olduğu sonucuna varmadan önce bunun çözülmesi gereken önemli bir deneysel sorun olduğunu kabul etti.

Katıldığım kuram seanslarından birinde, bir konuşmacı tahtaya küçük t'ler, s'ler, b'ler, W'ler, Z'ler yazarak tahtayı kaplamıştı ve hepsinin üzerinde tilde şapkaları vardı. Bu onların "skuark", "winos" ve "zinos", yani gözlemlenen standart model parçacıkların süpersimetrik eşlenikleri olduğunu betimliyordu. Higgs kütle hiyerarşisi problemini çözmenin popüler bir yolu her zaman bu süpersimetrik modele dayandırılmıştır. Bununla birlikte, LHC'den alınan 2011 ve 2012 verileri, daha yüksek ve daha da yüksek enerjilere kadar herhangi bir süpersimetrik parçacık tespit etmemiştir.

Bir öğle yemeği molasında, LHC'de kıdemli bir deneyci olan João Varela ile konuştum. CMS ve ATLAS dedektörlerinden dökülen verilerin bilgisayar analizinin ne kadar şaşırtıcı olduğunu açıkladı. Veriler, dünya çapındaki büyük bir bilgisayar şebekesine [Grid] gönderilir. Analiz edilen veriler daha sonra CERN'e geri gönderilir ve "park" tesislerinde saklanır. Trilyonlarca proton-proton çarpışması tarafından üretilen o kadar çok veri vardır ki, aşırı veri trafik sıkışıklığından kaçınmak için bu "park yerlerinin" kullanılması gerekir. Park edilmiş veriler, mekanik CERN robotları tarafından günlük olarak depolanır ve sıralanır. Nihai veriler analiz edildikten sonra, saçılma deneylerinin sonuçları, gerçek zamanlı olarak CERN deneycilerine anında sunulması için hazır tutulur.

Elde edilen sonuçların doğada olup bitenleri gerçekten temsil etmesini garantilemede önemli bir faktör, "kör analiz"in kullanılmasıdır. Veri analizi, istatistiksel algoritmaları içeren çok karmaşık bir yazılım sürecinden geçer. Tüm nihai analizler tamamlanana kadar kesin sonuç "açık" değildir.

João'ya devasa veri depolama ve bunun sonucunda ortaya çıkan analizin bilgisayar korsanları tarafından saldırıya uğrama tehlikesi olup olmadığını sordum. "Pentagon'a ve

büyük finans kurumlarına saldırdılar, öyleyse neden sisteminize giremesinler?" dedim.

Evet, kesinlikle, sisteme sızmak için girişimlerde bulunulduğunu ancak şu ana kadar saldırıların başarılı olmaktan çok uzak olduğunu söyledi. Bilgisayar korsanlığını önlemenin yolu, CERN'deki veri depolama tesislerini herhangi bir dış etkiden izole etmektir.

Perimeter Enstitüsü çalıştayı bana, CERN ile bağlantılı deneycilerin, standart model Higgs olduğunu ilan etmeden önce yeni bozonun önemli özelliklerini araştırmayı hedefleyerek hâlâ temkinli ilerlediklerini iyice göstermiş oldu. Bu durum, çoğu durumda insanların kategorik olarak Higgs bozonunun şüpheye yer bırakmayacak şekilde keşfedildiğini iddia ettiği medya ve fizik blogları sirkiyle tam bir tezat oluşturuyordu. Örneğin Peter Woit güncel blogu "Not Even Wrong"da LHC'de Higgs bozonunun keşfine ilişkin görüşünü sundu. İtalyan solcu gazete *Il Manifesto*'da yayımladığı bir makaleden alıntı yaparak, "Geçen ay Cenevre'den benim kuşağımdaki fizikçilerin yaklaşık kırk yıl önceki öğrencilik günlerimizden beri heyecanla beklediği bir duyuru geldi" diye yazdı. "Higgs parçacığı, aşağı yukarı tam olarak Standart Model denilen şeyin öngördüğü şekilde ortaya çıktı. . . . Ders kitaplarımızdaki denklemlerin çarpıcı biçimde doğrulandığını gördük."

Yine de belki de bazı kuramcılar, LHC'nin keşfettiği şey hakkında başlangıçtaki kesin görüşlerini değiştiriyorlardı. Matt Strassler, Peter Woit gibi "Of Particular Significance" adlı blogunda, Higgs bozonunun 4 Temmuz duyurusundan kısa bir süre sonra keşfedildiğini söylemeye yönelik güçlü bir önyargı sergiledi. Ancak Strassler, Perimeter Enstitüsündeki çalıştaya katıldı ve blogunda bununla ilgili bir makale yazdı. Şimdi artık, yeni rezonansı yorumlamak için daha temkinli bir yaklaşım geliştirdiğini gösteren "Higgs-benzeri" bozondan bahsediyordu.

10 EYLÜL 2012

Stephen Hawking, iki haftalığına Perimeter Enstitüsünü ziyarete geldi. Bu ziyaret, Stephen Hawking Center olarak adlandırılan binanın yeni kanadının açılışından sonraydı. Yöneticimiz Neil Turok tarafından Hawking'le tanışmanın ve onunla araştırma konularını tartışmanın mümkün olduğu konusunda bilgilendirildik. Öğle yemeğinde hemşiresiyle göründü, her zamanki gibi süper bilgisayar tekerlekli sandalyesinde oturuyordu. Öğle yemeğinde, Hawking'le ortak araştırma yapmak üzere California'dan davet edilen diğer Perimeter Enstitüsündeki meslektaşlarım ve Jim Hartle bana katıldı.

1972'de Cambridge'te ücretli izindeyken, Silver Street'teki Uygulamalı Matematik ve Kuramsal Fizik Bölümüne birkaç kez geldiğimi, Stephen'ı tekerlekli sandalyesinde otururken, birinin gelip ona binaya kadar yardım etmemi istediğini hatırladım. O zamanlar, 40 yıl önce, yaklaşık 30 yaşındayken, Stephen fiziksel olarak çok daha iyi durumdaydı ve bir dereceye kadar konuşabiliyordu. Sık sık motorlu koltuğunda Cambridge'te vızır vızır gezinirken görülüyordu, Cambridge trafiğini altüst ederken kendisi ve başkaları için bir tehlikeydi. Bu durum, bugün kullandığı olağanüstü elektronik tekerlekli sandalyesini edinmeden önceydi.

Stephen şimdi neredeyse tamamen felç olmuştu. Sağ yanağına metal bir mekanizma takılmıştı. Yanağındaki bir kası seğirterek bilgisayarıyla iletişim kurabiliyor, ekranındaki harfleri seçebiliyor, böylece elektronik ses sentezleyicisinin okuduğu cümleleri oluşturabiliyordu.

Stephen'a bakındım ve onu, kendisi ve hemşiresi için ayrılmış bir ofiste buldum. Jim Hartle, başka bir çalışma arkadaşıyla birlikte; her ikisi de pano ve kâğıtla donanmış olarak ofisteydi. Stephen'la çok kısıtlı diyalog araçlarıyla iletişim kurarak, böyle bir iş birliğinin nasıl ilerleyebileceğini merak ediyordum. Ben içeri girerken yüzü kapıya dönük oturuyordu. "Stephen, ben John Moffat. Geçmişte tanıştığımızı

hatırlıyorsundur." Gözlerinde bir tanıma parıltısı gördüğümü sandım. Jim Hartle'dan araya girdiğim için özür diledim ve ertesi gün Waterloo'dan ayrılacağımı açıkladım. Stephen'ı görmek için tek fırsatım buydu.

Stephen'a yaklaştım ve onunla biraz araştırmaları tartışmak istediğimi belirttim. Ona şu anda LHC'de keşfedilen yeni bozonun özelliklerini incelemekte olduğumu söyledim.

"Stephen, bence yeni bozonun standart model Higgs bozonu olduğunu söylemek için çok erken," dedim. "Örneğin bozonun spinini veya paritesini henüz bilmiyoruz ve bunlar deneysel olarak anlaşılması gereken önemli özellikler."

Şimdi, Stephen cümleme bir yanıt oluştururken beklemeliydim. Cümlesini oluşturmak için ekranındaki harfleri seçmesini izledim. Bu birkaç dakika sürdü. Sonunda, bilgisayar ekranında cümle tamamlandı ve ben okurken elektronik sesi, "Umarım Higgs bozonu değildir," dedi.

Stephen'ın, Ann Arbor'daki Michigan Üniversitesinde profesör olan Gordon Kane'le, LHC'nin standart model Higgs bozonunu keşfedemeyeceğine dair 100 dolarlık bahse girdiği iyi biliniyordu. Fikri, kara delikler üzerinde yaptığı çalışmalara dayanıyordu. "Stephen, 100 dolarlık bahsini ödemen için henüz çok erken," dedim.

Yakınlarda oturan hemşire öne eğildi ve "Stephen! O 100 doları çoktan ödedin!" dedi.

Stephen başka bir yanıt vermeye başlayınca bekledim. Omzunun üzerinden eğildim ve ekranında oluşan cümleyi izledim. Sonunda elektronik ses konuşurken okudum, "Eğer Higgs değilse paramı geri isteyeceğim."

Sonra dedim ki, "Yeni bozonun önemli özelliklerini belirlemek için daha fazla veri beklememiz gerekiyor. Umarım, bu veriler yıl sonunda veya gelecek yılın başlarında hazır olur."

Sonra Stephen son ifademe daha uzun bir yanıt verirken sabırla tekrar bekledim. Ekranda yavaş yavaş şu sözler belirdi: "Daha fazla veriye ihtiyacımız var ve Higgs hakkında bir karar vermeden önce bunların hazır olmasını beklemeliyiz."

"Teşekkür ederim Stephen. Kendine iyi bak." dedim. Hem-

şireye teşekkür ederek ayrıldım. Bu arada Jim Hartle ve iş arkadaşı odadan çıkmış ve yakınlarda çalışıyorlardı.

31 EKİM 2012

Parçacık fiziğiyle ilgili blog siteleri, yeni LHC verileri hakkındaki söylentileri ve fizik camiasının ne keşfettiğiyle ilgili genel hislerini güncel tutabilir. Özellikle CERN'in 4 Temmuzda yeni bozonun keşfini açıklamasının ardından büyük bir coşku yaşandı. Bloglar, standart Higgs bozon modelinin yaşayan beş kurucusundan Peter Higgs ve diğer iki kişinin seçilerek, hemen Nobel Ödülü almasını talep etmekten, özellikleri hakkında yeterince bilgi sahibi olmadığımız, Higgs bozonu olduğundan emin olmadığımız, yeni bozon hakkında uyarıcı açıklamalara kadar geniş bir yelpaze oluşturuyordu. Birleşik Krallık'ta bloglar Peter Higgs'in şövalye ilan edilmesi gerektiğini iddia etti. YouTube'da Peter Higgs, 4 Temmuzda yeni bozonun duyurusunu dinleyen izleyiciler arasında otururken, yutkunduğunda ve gözleri yaşarırken gösterildi.

Bu duyurudan bu yana, elektronik arşivde, yeni bozonun paritesinin kritik ölçümlerinin LHC'de nasıl gerçekleştirilebileceğini açıklayan bir dizi yeni makale yayımlandı. Yeni bozon için skaler (pozitif) parite ile sahte-skaler (negatif) parite ayrımı arasındaki verilerde üç standart sapma (3-sigma) ayrımı elde etmek için önemli bir parlaklık ve daha önce elde edilebileceğini umduğumuz yeni veriler gerekiyordu. LHC, Şubat 2013'te kapatılmadan önce bu verilere ulaşılması umuluyordu. Artık birçok makale, yeni bozona "X parçacığı" olarak atıfta bulunuldu; bu durum yazarların, standart model Higgs bozonunun keşfini iddia edecek bir konumda olmadığımız gerçeğinin farkında olduklarını gösteriyordu. Kuramcılar arasındaki fikir birliği, yeni bozonun gerçekten de standart model Higgs bozonu olduğu, deneyciler arasındaki fikir birliği ise bunun bir bekle-ve-gör oyunu olduğu yönündeydi. Yeni verilerin gelişiyle birlikte yeni bozonun kimliği daha belirgin şekilde açıklanacaktır deniyordu.

Yeni LHC verileri, yeni bozonun standart modelin gerektirdiği gibi bir skaler temel parçacık değil, bir sahte-skaler parçacık olduğunu doğrularsa, bunun standart model için ciddi sonuçları olacağı bana göre daha açık hale geliyordu. Perimeter Enstitüsündeki ve başka yerlerdeki bazı parçacık kuramcıları, yeni bozonun skaler bir parçacık olduğunu zaten bildiğimizi iddia ediyordu. Çünkü standart model böyle olmasını gerektiriyor! Parçacık fiziğinin geleceği hakkında karar vermek için deneysel fiziğe ve doğaya başvurduğumu, kuramsal önyargılara kapılmamaya çalıştığımı onlara anlattım. Parçacık kuramcılarına şunu açıkça belirttim ki, veriler bunun bir sahte-skaler bozon olduğunu belirlerse o zaman sahte-skaler Higgs bozonunun W ve Z bozonlarıyla bağlanmasının, temel skaler bozonun bozonlarla bağlanmasından önemli ölçüde farklı olacağı kesindir. Bunun bir sonucu, standart modelin artık yeniden boyutlandırılabilir bir kuram olmayacağıdır.

Yeni bozonun paritesinin mevcut analizinin modele bağlı olduğu anlaşılmalıdır. Deneyciler standart skaler Higgs bozon modelini "etkili" fenomenolojik sahte-skaler Higgs bozon modeliyle karşılaştırırlar. İkinci model, yapay olarak müdahale edilmediği sürece mevcut verilerle tutarlı olamaz. Gerçek bir parite analizi, standart Higgs bozon modelini, benim bileşik kuarkonyum rezonansı gibi alternatif bir Higgs olmayan bozon modeliyle karşılaştırmalıdır.

Sahte-skaler Higgs bozonu modeliyle ilgili bir problem de, onun iki Z bozonuyla bağlanmasının nihai dört leptona bozunma hızıdır, ki bu durum skaler Higgs bozonunun verdiği sonuçtan bir büyüklük mertebesi kadar daha küçük olacaktır. Bu durum, çok önemli altın bozunma kanalı sonuçlarından biri olan sahte skaler Higgs bozunmasını dört leptona uydurma olasılığını ortadan kaldıracaktır. Bu bozunma kanalı, CMS ve ATLAS deneylerinde kritikti ve yeni bozonun keşfinin duyurulmasına yol açtı. Yeni bozonun spinini ve paritesini belirlemek için verilerin gelecekteki analizi, sonunda bir model bağımlılığından kaçınabilmeliydi.

Parçacık fiziği topluluğu şimdi yeni verilerin "perdenin kaldırılmasını" heyecanla bekliyordu. Veriler; dünya çapındaki bilgisayar ağı tarafından CERN'e döndürüldükten sonra, yeni bir duyuru yapılmadan yaklaşık iki hafta öncesine kadar kilitlenir. Dünyanın dört bir yanındaki bilgisayar analistlerinin genel sonuçları bilmemesi, tıbbi araştırmalarda kullanılan, "körleştirilmiş" bir çalışmaya benzer.

Gerçekte, nihai sonuçları elde etmek için kullanılan algoritmaların parametrelerini ayarlamak için verilerin resmi körlüğünün kaldırılmasından bir veya iki hafta önce, veriler birkaç analist için *açılır*. Bu nedenle, kesinlikle konuşmak gerekirse, verilerin körlüğünün kaldırılmasında yerleşik bir önyargı vardır ve bu, veri analizi sonucunun nihai doğruluğuyla ilgili önemli bir soruna yol açar. Verilerin körleşmesi ve körlüğün kaldırılmasının iki sonucu olabilir: deney grupları, sonucu kendilerine istatistiksel algoritmalar aracılığıyla iletildiği gibi kabul eder veya sonucu kabul etmez ve algılanan hataları ortadan kaldırmak için sonuçlara müdahale eder. İkinci eylem, sonuçların yorumlanmasında insanın yanlılığına açabilir. Örneğin deneyciler tarafından çevrimiçi olarak paylaşılan bilgilere göre, verilerde algılanan belirli "aykırı değerler" kaldırılabilir, bu da nihai sonucu önemli ölçüde değiştirir. Birçok CMS ve ATLAS analisti, herhangi bir resmi duyuru yapılmadan önce veri analizinin sonuçlarını tartışmak için özel olarak toplantılar yapar. Bu toplantılar halka veya CERN'dekiler de dahil olmak üzere analistlerin iç çemberinin bir parçası olmayan diğer fizikçilere açık değildir. Analistlerin verileri analiz ederken ve neyin duyurulacağına karar verirken yanlılığı önlemek için her türlü girişimi yaptığına güvenmeliyiz.

OCAK 2013

4 Temmuz semineri ve basın toplantısından sonra CERN'den gelen yeni verilerin bir sonraki sunumu, 14 Kasım 2012'de Kyoto Üniversitesinde bir yüksek enerjili fizik konferansında gerçekleşti. Kyoto toplantısında bildirilen yeni sonuçlar ön-

ceki verilerden önemli ölçüde farklı değildi. Konferans web sitesinde yayımlanan konuşmaları ilgiyle takip ettim. Kyoto görüşmelerinden ortaya çıkan önemli bir gerçek, CMS grubunun yeni bozonun bozunmasıyla ilgili verilerini iki fotona güncellememiş olmasıydı. Bu durum, CMS iki foton bozunma sonuçlarının durumuyla ilgili olarak bloglarda görünen birkaç söylentinin nedeniydi. Bununla birlikte, iki altın kanaldan elde edilen en son veri kombinasyonu, yeni bozonun kütlesinin 125,8 GeV olduğunu belirlemişti. Kütlenin bu ölçümünün yüzde yarıma kadar doğru olduğu iddia edilmektedir. Buna karşılık, bu iki altın kanalı kullanarak yeni bozonun kütlesinin ATLAS tarafından belirlenmesi, yine yaklaşık yüzde yarım hatayla 126 GeV'di.

Ayrıca, fizik bloglarında ve CMS grubundaki sızıntılardan, iki fotonlu bozunma kanalı sonucunun sinyal şiddetinin, 4 Temmuz CERN seminerinde açıklanan orijinal 4 sigma değerinden daha aşağıya indiği söylendi. Ancak bunlar sadece söylentilerdi ve Kyoto'daki CERN grubu tarafından geçerliliklerinin doğrulanması gerçekleşmemişti.

Florida Üniversitesi Gainesville parçacık fiziği grubuna dahil olan ve Kyoto'daki CMS grubu adına konuşan Alexey Drozdetskiy, sonuçları bir spin-parite analizi açısından sundu. Şimdi "X bozonu" olarak adlandırdığımız şeyin, ZZ'ye, ardından dört leptona altın kanal bozunmasının analizini anlattı. Bu analiz, X bozonunun paritesini belirlemek için tasarlanmış *çok değişkenli analiz* adı verilen karmaşık istatistiksel yöntemlere dayanıyordu. Dört leptonun açısal korelasyonları için standart model Higgs bozonu tahminini, aynı bozunma için etkili sahte-skaler Higgs bozonunun tahminleriyle karşılaştırdı. Etkili sahte-skaler Higgs bozon modeli, standart Higgs bozonu modelini doğal olarak takip etmiyordu ve yeniden boyutlandırılamazdı.

Ek olarak, bu etkili sahte-skaler Higgs modelinin, etkileşim şiddetini 100 kattan fazla artırarak bağlanma güçlerini yapay olarak etkilerse ZZ bozunma verilerine uyacağını hatırlayalım. Florida grubu, skaler bir spin-0 Higgs bozonunu

destekleyen 2,5 sigma olan bir sonuç talep etti. ATLAS çalışma grubu ayrıca; yeni bozon için, skaler pozitif paritenin sahte-skaler negatif pariteye tercih edildiğini iddia etti.

Kyoto toplantısında verilen diğer görüşmeler, X bozonunun tau$^+$/tau$^-$ ve alt/karşı-alt bozunma kanalları için hem CMS hem de ATLAS grupları tarafından rapor edilen sinyal şiddetinde hâlâ bir açık olduğunu gösterdi. Bunun ışığında, X bozonunun gerçekten de çok aranan standart model Higgs bozonu olup olmadığı hâlâ çözülmemiş bir sorudur.

Yine de hem kuramcılar hem de deneyciler, LHC'de Higgs bozonunun araştırılmasında toplanan genel verilerin, standart model Higgs bozonuyla tutarlı olduğunu giderek daha fazla iddia ediyorlardı. Daha şimdiden bir enstitü oluşturuluyor ve *sanki* yeni keşif, Higgs bozonuymuş gibi ödüller veriliyordu. Higgs bozonunun CERN'de dramatik keşfiyle, Peter Higgs'in adı aniden dünya çapında evrensel olarak ünlü oldu. Peter'ın emekli bir profesör olduğu Edinburgh Üniversitesi, bu konuda hızla sermaye kazandı ve Ocak 2013'te yeni Higgs Kuramsal Fizik Merkezinin açılışı yapıldı. Bu vesileyle, üniversite birkaç tanınmış parçacık fizikçisinin katıldığı bir Higgs Sempozyumu düzenledi. Bunların arasında CMS grubunda kıdemli deneyci olan Joe Incandela da vardı. Higgs bozonunu araştırmalarında kullandıkları CMS sonuçlarının ayrıntılı bir incelemesini yaptı. Bu sonuçlar, Kyoto toplantısında açıklananların ötesinde yeni bir şey içermiyordu.

Bunlara ek olarak, girişimci ve risk sermayedarı olan Rus milyarder Yuri Borisovich Milner, Temmuz 2012'de Temel Fizik Ödülü Vakfını [Fundamental Physics Prize Foundation] kurdu ve yıllık 3 milyon dolarlık ödülün ilk dokuz kazananını seçti. Bu ödül şu anda hem Nobel hem de Templeton ödüllerini geçerek dünyanın en büyük akademik ödülü haline geldi. Dokuz kazanana ek olarak, 2012'de Stephen Hawking'e, ve de LHC'de Higgs benzeri bir parçacığı keşfetme çabalarına öncülük eden Joe Incandela ile Fabiola Gianotti de dahil olmak üzere yedi bilim adamına iki kere daha 3 milyon dolarlık özel ödül verildi.

10

DOĞAL OLARAK AYARLANMIŞ BİR EVRENDE Mİ YAŞIYORUZ?

Doğa modelleri oluştururken kuramsal fizikçiler, temel parçacıkların kütlesi ve yükü gibi temel sabitleri hesaplamanın, yalnızca birkaç ondalık basamak içerebilen iki gerçek sayının çıkarılması gibi aritmetik işlemleri içermesini bekler. 2,134 gibi sayılar, birler basamağına hiçbir şekilde yakın olmayan 21.340.000 ile karşılaştırıldığında, bir veya birim boyutunda kalmakta ya da çok yakınlarında durmaktadır. Çok daha büyük sayıdan birli basamak sayısı elde etmek için ince ayar yapmak; başka bir deyişle, bir dizi benzer basamağı çıkarmak gerekir. Parçacıkların kütlesi ve yükü gibi fiziksel parametreleri belirlerken hiçbir ince ayar gerektirmeyen bir kuram "doğal" kabul edilir. Kuramsal fizik, bu doğallık kriterini karşılayan elektromanyetizma, QED ve klasik genel görelilik gibi paradigmaları içerir. Eğer tatmin edilmezse – ve kuramdaki hesaplamalar iki sayıyı birkaç yerine birçok ondalık basamağa indirgemeyi içeriyorsa– o zaman kuramın kusurlu olduğunu bekleyebiliriz. Standart modeldeki mevcut elektro-zayıf kuram, bu doğallık eksikliğinden mustariptir. Bu ince ayar sorununa sahip bir kuram, bu başarısız kabul edilmez belki, ancak kuramın eksik olduğu ve ciddi bir değişiklik gerektirdiği vurgulanır.

İNCE AYAR VE HIGGS KÜTLE HİYERARŞİSİ PROBLEMİ

Gelecekteki veriler, 125 GeV'de LHC'de keşfedilen yeni bozonun standart model Higgs bozonu olduğunu şüphesiz doğrularsa ve de başka hiçbir yeni parçacık veya yeni fizik keşfedilmezse, o zaman parçacık fiziğinde krizli bir dönem yaşıyoruz demektir. Higgs kütlesi standart modelden hesaplandığında hesaplamanın ıraksak veya sonsuz doğasından kaynaklanan ciddi bir ince ayar meydana gelir. Buna, bu kitapta daha önce karşılaştığımız Higgs kütle hiyerarşisi problemi denir. Higgs kütlesi için kuramsal tahmin, potansiyel olarak sonsuz bir terimi diğerinden çıkarmaktan gelir.

Skaler alan Higgs modeli yeniden boyutlandırılabilir, yani bir parçacığın kütlesi ve yükünün hesaplanmasında meydana gelen sonsuzluklar, parçacığın çıplak kütlesi ve kendi kendine etkileşen kütlesi gibi gözlemlenemeyen nicelikler tarafından soğurulabilir. Bu durum, sonlu bir ölçülen kütle ve yük elde etmek için yeniden boyutlandırma sırasında meydana gelir. Yeniden boyutlandırma, artan enerjiyle önemli ölçüde büyüyen sonsuzlukları içerir, öyle ki onları yeniden boyutlandırma şemasında kontrol etmek zorlaşır. Kuramların mutlaka sonsuz yüksek enerjilere kadar geçerli olması beklenmez. Kuramın geçerli kaldığı en yüksek enerji olan yerleşik bir enerji değeriyle formüle edilmeleri gerekir. Bir sabitin hesaplanmasında sonsuz bir niceliğe sahip olamayız, bu nedenle enerjiyi "keseriz" (eşik değeri koyarız), böylece hesaplamadaki enerjinin boyutunu sınırlarız. Bir kuram böyle bir eşikle tanımlandıktan sonra potansiyel olarak farklı veya sonsuz terimler, eşiğin mertebeleri olarak görünür. Kuramsal fizikçilerin jargonunda, *logaritmik, lineer, ikinci dereceden* ve benzeri ıraksamalara sahibiz. Eşik değerine bağlı olan bu miktarlar, eşik sonsuza gittiğinde sonsuz hale gelir.

Bu tür sonsuzlukların en az zararlısı, yeniden boyutlandırma hesaplamasını anlamlandırmak için gereken enerjide

eşiğin logaritmasını içerenlerdir. Higgs bozon kütlesine yapılan kuantum düzeltmelerinin hesaplanması, enerjide çok daha yavaş bir artışa sahip olan eşiğin logaritmasına kıyasla, enerjiyi artırdıkça büyük ölçüde artan enerji eşiğinin karesiyle orantılı bir sonuç verir. Standart model, 10^{19} GeV'lik Planck kütle-enerjisine kadar geçerliyse bu, 125 GeV'lik bir Higgs kütlesi için $1/10^{17}$ hassaslığında ince ayara yol açar! Bu kuantum düzeltme boyutu için, Higgs'in çıplak kütlesinin bu boyutun mucizevi bir şekilde negatif değerine sahip olması gerekir, böylece Higgs bozonuna 125 GeV'lik bir kütle vermek için olası olmayan bir durum meydana gelir.

Gözlem bize Higgs benzeri bozon kütlesinin yaklaşık 125 GeV olduğunu söyler, ancak elektro-zayıf kuramda hesaplanan kuantum enerjisi Higgs bozonunun kütlesini büyütür. Bu kuantum enerjisi, Higgs bozonunun üst kuark ve W/Z bozonları gibi sanal parçacıklarla etkileşimlerinin sonucudur. Kuantum fiziği, Higgs bozonunun ışığını yalnızca gülünç derecede bir ince ayar yoluyla tutar. Temel parçacıkların kütlelerini hesaplamak için kullanılan tedirgenmeli şemada, parçacığın diğer parçacıklarla etkileşimi olmayan kütlesi olan formal olarak sonsuz "çıplak" kütle ile sonsuz kuantum enerji kütlesi arasında bir fark oluşur. Kuantum enerjisi, enerji eşiğinin logaritması gibi davranıyorsa bilinmeyen çıplak kütle ile kuantum enerji miktarı arasında ince ayarlı bir birbirini götürme durumu olabilir. Öte yandan kuantum enerjisi eşiğin karesi veya daha yüksek mertebesiyse, o zaman kuantum enerjisi miktarı kontrol edilemez hale gelir ve deneysel olarak gözlemleneni üretmek için birçok ondalık basamağa ince ayar yapılmasına neden olur.

Klasik elektromanyetizmada, bir elektronun Coulomb kuvveti aracılığıyla diğer elektronlarla etkileşime girmesinde benzer bir durum ortaya çıkar. Elektronun kendi elektromanyetik alanıyla etkileşimi sonucu oluşan elektronun öz enerjisi, sahip olduğu büyük yük yoğunluğu sonucunda büyük bir kütle üretir. Kendi enerjisinden gelen elektron kütlesine katkı, elektronun içsel çıplak kütlesine (etkileşim

yokluğunda elektronun sahip olacağı kütle) eklenir. Klasik elektromanyetizma kuramında, elektronun yarıçapı sıfır olduğunda elektronun öz enerjisinin sonsuz hale geldiğini görmek zor değildir. Küçük ölçülen elektron kütlesini elde etmek için, çıplak elektron kütlesi ile öz kütle arasında kesin, ince ayarlı bir birbirini götürme işlemi gerçekleşmelidir. Bununla birlikte, başka bir parçacık –pozitif yüklü elektron veya pozitron– kurtarmaya gelir. Sanal elektron ve pozitron çiftleri, negatif yüklü elektronun etrafında, yükünü dağıtan ve elektrostatik öz-enerji miktarını yönetilebilir bir boyuta indiren bir bulut oluşturur. Böylece elektronun kütlesinin hesaplanmasında kabul edilemez bir ince ayardan kaçınılır. Kuantum fiziği, elektron kütlesi için ince ayar problemini çözer.

AYAR HİYERARŞİSİ PROBLEMİ

Higgs kütle hiyerarşisi problemi, elektro-zayıf enerji ölçeği veya 250 GeV değeri ile Planck enerji ölçeği 10^{19} GeV arasındaki muazzam farkı ifade eden ayar hiyerarşisi problemiyle yakından ilişkilidir. Deneysel sonuçlara dayanarak, elektro-zayıf kuramındaki simetri kırılmasının yaklaşık 250 GeV'de gerçekleştiğini biliyoruz. Ancak elektro-zayıf kuram parçacık fiziğinde ulaşılabilen nihai enerji olarak kabul edilen Planck enerjisine kadar geçerliyse, kütleçekim doğanın diğer üç kuvveti kadar büyük hale geldiğinde, o zaman neden başka bir fiziksel belirginlikte; bu iki enerji ölçeği arasında meydana gelen bir enerji ölçeği olmadığı sorulmalıdır. Daha düşük enerjilerde, yeğin QCD kuvveti, kuarkların hapsedilmesinin meydana geldiği 150 MeV'luk bir enerji ölçeğine sahiptir.

Yeni fizik olmadan; elektro-zayıf ve Planck enerjileri arasındaki bu muazzam enerji boşluğunun hiçbir açıklaması olamaz. Bu iki enerji ölçeği arasında bir şeyin olmasını beklersiniz. Elektro-zayıf enerji ölçeği ile Planck enerji ölçeği arasında gerçekten yeni parçacıklar yoksa bu parçacık fiziğinde bir "çöl" oluşturur.

FERMİYON KÜTLELERİNİN SPEKTRUMU

Standart modeldeki üçüncü bir hiyerarşi sorunu, kuarkların ve leptonların devasa kütle spektrumuyla ilgilidir. 0,5 MeV'lik elektron kütlesinin 173 GeV'lik üst kuark kütlesine oranı 10^{-6}'dır. Durum, yaklaşık 0,2 eV olan nötrino kütlesi için daha da kötüdür; burada, üst kuark kütlesine oran yaklaşık 10^{-12}'dir. Standart model, kuarkların ve leptonların kütle spektrumunda neden bu kadar büyük bir aralığın olduğuna dair bir açıklama sağlamaz. Elektro-zayıf kuramın kendiliğinden simetri kırılmasından sonra Higgs bozonunun kuarklara ve leptonlara kütle kazandırdığı varsayılır. Ancak kütlelerinin gerçek deneysel değerleri onlara özgü bir şekilde elle ayarlanır. Kuark ve lepton kütlelerinin deneysel değerlerini öngören ve nötrino veya elektron ile üst kuark arasındaki büyük, doğal olmayan kütle farkını açıklayan kuramsal bir hesaplamaya ihtiyacımız var.

Standart modeldeki bu üç ilişkili hiyerarşi problemi – Higgs kütle hiyerarşisi problemi, ayar hiyerarşisi problemi ve fermiyon kütle hiyerarşisi problemi– kozmolojik sabit problemiyle birlikte, hepsi aşırı ince ayar sergiler ve topluca *doğallık problemi* olarak bilinirler. Doğallık sorunu standart modelde sürekli bir diken olmuştur ve parçacık fiziği camiasında onlarca yıldır tartışmalı bir şekilde ele alınmaktadır.

DOĞALLIK PROBLEMİNİ SÜPERSİMETRİYLE ÇÖZMEYE ÇALIŞMAK

Standart modelde doğallık sorununu çözmeye yönelik ilk girişimlerden biri 1970'lerde önerilen süpersimetriydi. Burada, elektron kütlesinin hesaplanması örneğimizde olduğu gibi, Higgs kütle hiyerarşisi problemini çözmek için diğer parçacıklar imdada yetişir. Bunlar, bilinen standart model parçacıklardan yarım spinle ayrılan, her bozon parçacığı için bir fermiyon ortağı üreten ve bunun tersi de geçerli olan süpereşlerdir. Süpersimetrik parçacık yüklerinin doğası ge-

reği, Higgs bozon kütlesine büyük kuantum öz-enerji katkısı düzgün bir şekilde birbirini götürür. Higgs kütle hiyerarşisi problemine yönelik bu çözüm, yalnızca kırılmış olan değil, tam bir süpersimetri ve gözlemlenen standart model parçacık kütlelerinden çok uzak olmayan süpereş kütleleri için de geçerlidir. Süpersimetride bozon kütlelerini hesaplarken bozonların elektrik yükleri fermiyon yüklerine zıt işaretlere sahiptir, bu nedenle her bozon için yaklaşık olarak aynı kütleye sahip zıt yüklü bir süperfermiyon vardır ve birbirini götürme meydana gelir. Higgs bozon kütlesinin kabul edilebilir bir düzeye ayarlanması durumunda bu birbirini götürme işlemi gerçekleşir.

Martinus Veltman 1981'de, standart modeldeki doğallık problemini araştırdığı ve özellikle Higgs kütle hiyerarşisi problemine odaklandığı bir makale yayımladı.[1] Süpersimetriyi kullanarak, standart model parçacıkların kütlelerini içeren ve tamamlandığında doğallık problemini çözecek olan matematiksel bir koşul formüle etti.

Yine de Higgs kütle hiyerarşisi probleminin bu süpersimetri çözümü, LHC'nin 1 ile 2 TeV'lik enerji sınırlarına kadar stoplar ve gluinolar gibi süpersimetrik ortaklar bulamadığı için aşağı yukarı geçersiz kılınmıştır. Veya süpersimetri konuşmasında, LHC, sırasıyla üst kuarkın ve gluonun süpersimetrik ortakları olan stoplar ve gluinolar gibi herhangi bir "süper ortak" bulamadı. 1 ile 2 TeV'un altındaki süpereşlerin kanıtlarının olmamasının bir sonucu olarak, hiyerarşi problemlerini süpersimetri modelleri kullanarak çözme girişimleri, yine kabul edilemez bir ince ayar düzeyine yol açmaktadır.

---

[1] M. Veltman, "The Infrared-Ultraviolet Connection," *Acta Physica Polonica*, B12, 437–457 (1981).

DOĞALLIK PROBLEMİNİ ÇOKLU EVRENLE ÇÖZMEYE ÇALIŞMAK

Şimdiye kadar süpersimetriye dair bir kanıt bulunmadığından fizikçiler hiyerarşi ve ince ayar problemlerine başka olası çözümler arıyorlar. Önemli parçacık fizikçilerinin yakın tarihli bir makalesi, çoklu evren modelini dikkate almamız gerektiğini iddia ediyor. Burada, varsayılan çok sayıda (ve muhtemelen sonsuz) farklı evrenler içinde, standart parçacık fiziği modelimiz, yalnızca birinde –içinde yaşadığımız evrende– ince ayarlanmış bir şekilde gerçekleşir. Başka bir deyişle, bu sadece bizim özel evrenimizin şeklidir, bu yüzden bu konuda endişelenmenin bir anlamı yoktur. Standart model hiyerarşisine ve ince ayar problemlerine yönelik bu geçici "çözüm" fizik camiasında geniş çapta eleştirildi. Birincisi, çoklu evrendeki diğer evrenlerin hiçbirine erişemediğimiz için, kendi evrenimiz dışında herhangi bir evrende neler olup bittiğini asla gözlemleyemeyiz ve bunun sonucunda çoklu evren paradigmasının herhangi bir parçasını doğrulayamaz veya yanlışlayamayız.

Çoklu evren, fizik yasalarının birçoğunun çok ince ayarlanmış sabitlere dayandığını kabul eden insancıl [antropik] ilkeyle ilgilidir. İnsancıl ilke fikri ilk olarak 1950'lerin sonlarında ve 1960'ların başlarında Princeton Üniversitesinden Robert Dicke tarafından fizik ve kozmolojiye uygulandı. Evrenin yaşının tam olarak doğru olduğunu söyledi; yani evren bir "Goldilocks" çağını seçti, bu da insanların onu gözlemlemek için evrimleşmesini mümkün kıldı. Evren 13,7 milyar yaşından 10 kat daha genç olsaydı, o zaman bugün gözlemlediğimiz astrofizik ve kozmolojinin çoğu geçerli olmazdı. Böylesine genç bir evrende, karbon ve oksijen gibi yaşam için hayati önem taşıyan elementleri nükleer sentez yoluyla oluşturmak için zaman olmayacaktı. Evren, ölçülenden 10 kat daha büyük olsaydı yıldızların çoğu söner ve beyaz cüce olurlardı. Bizimki gibi gezegen sistemleri uzun zaman önce kararsız hale gelirdi.

1973'te kozmolog ve astrofizikçi Brandon Carter, Kopernik'in 500. doğum gününü onurlandıran Kraków'daki bir sempozyumda *zayıf insancıl ilke*yi tanıttı. Kopernik'in dünyanın evrenin merkezi olmadığını keşfetmesinden yola çıkan Kopernik ilkesi, insanın evrende ayrıcalıklı bir yere sahip olmadığını belirtir. Carter, Kopernik ilkesine tepki olarak insancıl ilkeyi kullandı. Sempozyumda, "Durumumuz mutlaka merkezi olmasa da bir dereceye kadar kaçınılmaz olarak ayrıcalıklı" dedi. Carter, mükemmel kozmolojik ilkeyi haklı çıkarmak için Kopernik ilkesini kullanmaya karşı çıktı.

Bu ilke, 1948'de Fred Hoyle, Herman Bondi ve Thomas Gold tarafından önerilen kararlı durum kozmolojisi kuramının temeliydi, uzay ve zamanın tüm bölgelerinin aynı olduğunu kabul etti. Yani büyük ölçekli evren her yerde aynı görünüyor, her zaman olduğu ve her zaman olacağı gibi. Kararlı hal kuramı, 1965'te kozmik mikrodalga ardalan radyasyonunun keşfiyle sonunda çürütüldü. Bu keşif, Büyük Patlama kuramının tanımladığı gibi evrenin zaman içinde kökten değiştiğine ve ne uzayda ne de zamanda her yerde aynı olmadığına dair net kanıtlar sağladı. Bu fikrin kozmolojik ilke olarak adlandırılan daha zayıf bir biçimi vardır; bu ilke, uzayda özel bir yer işgal etmediğimizi ve evrenin madde özelliklerinin zamanla değiştirdiğini, ancak uzayda değişmediğini (evrenin zaman veya mekânda asla değişmediği mükemmel kozmolojik ilkenin aksine) belirtir. Kopernik ilkesinin daha zayıf biçimi, standart kozmoloji modelinin temelidir.

İlk olarak 1986'da John Barrow ve Frank Tipler tarafından yayınlanan bir kitap, zayıf ve güçlü insancıl ilkeler arasında ayrım yaptı.[2] *Zayıf* insancıl ilke, bildiğimiz şekliyle yaşamın var olduğunu, çünkü burada evrenimizde gözlemciler olarak bulunduğumuzu belirtir. Roger Penrose, zayıf insancıl ilkeyi şu şekilde tanımlamıştır: "Argüman, şu anda dünyadaki (akıllı) yaşamın varlığı için koşulların neden tam

[2] J. D. Barrow and F. J. Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle*, Oxford Paperbacks (New York: Oxford Üniversitesi Yayınları, 1988).

olarak doğru olduğunu açıklamak için kullanılabilir. Çünkü haklılarsa o zaman kendimizi şimdi burada değil, başka bir yerde, başka uygun bir zamanda bulmalıydık."[3]

Güçlü insancıl ilke, birçok sabit ve fizik kanunu ince ayarlı olduğu için burada evrende olduğumuzu söyler. Örneğin elektronun elektrik yükü ölçülen değerinden biraz farklı olsaydı veya proton ile nötron arasındaki kütle farkı ölçülen değerinden biraz farklı olsaydı atom ve nükleer fizik yasaları başarısız olurdu ve biz evrende bir yaşam formu olarak var olamazdık. Charles Darwin'den bağımsız olarak, evrim kuramını öneren evrim biyoloğu Alfred Russell Wallace, 1904'te insancıl ilkenin modern versiyonunu öngördü: "Çevremizde var olduğunu bildiğimiz kadar geniş ve karmaşık bir evren, muhtemelen insanda doruğa ulaşan yaşamın düzenli gelişimi için her ayrıntıya tam olarak uyarlanması gereken bir dünya yaratmak için kesinlikle gereklidir."[4]

İnsancıl ilkeyle ilişkili çoklu evren paradigmasına göre, evrenin basitçe böyle olduğunu kabul etmeliyiz ve standart modelde meydana gelen aşırı ince ayarı açıklamaya veya aşmaya çalışmamalıyız, örneğin: Higgs bozonuyla ilgili hiyerarşi problemleri var, çünkü çoklu evrendeki birçok evrende aynı problemler olacaktır. Başka bir deyişle çoklu evren, doğallık sorununu, onu bir sorun olarak görmeyerek "çözer".

400 yılı aşkın bir süre önce Johannes Kepler, kendi zamanında bilinen beş gezegenin güneşe ve birbirine olan göreli uzaklıklarını açıklamaya çalışırken, bunu bilimsel olarak yapmaya çalışıyordu. Beş Platonik cismi gezegenler arasındaki mesafelerin neden bu şekilde olduklarını göstermek için kullandı (Şekil 10.1). Aslında gezegenlerin yörüngelerinin boyutları için "doğal" bir açıklamayı hedefliyordu ve ge-

---

[3] Roger Penrose, *The Emperor's New Mind: Concerning Computers, Minds, and the Laws of Physics*, Vintage edition (New York: Oxford Üniversitesi Yayınları, 1989), 560–561.

Alfred Russell Wallace, *Man's Place in the Universe: A Study of the Results of Scientific Research in Relation to the Unity or Plurality of Worlds*, 4th ed. (London: George Bell & Sons, 1904), 256–257.

zegenlerin, yeryüzündeki insan gözlemcilerinden bağımsız olarak var olduklarını varsayıyordu. Platonik katılar modeli, yörüngelerin göreli boyutlarına yaklaşık olarak doğru yanıtı verdi. Yine de modern astronomik bir perspektiften bakıldığında, Kepler'in gezegenlerin yörünge yarıçaplarını açıklamak için Platonik katıları kullanması tuhaf görünüyor.



Şekil 10.1 Kepler'in beş Platonik katısı, bilinen gezegenlerin yörüngeleri arasındaki mesafeleri iç içe geçen oktahedron, ikosahedron, dodecahedron, tetrahedron ve küp boyutlarıyla ilişkilendiren hoş fakat yanlış bir fikir. Kaynak: Wikipedia.

Bununla birlikte, günümüzde insancıl ilkenin savunucuları "tuhaf"ın ötesine geçiyor. Gezegenlerin göreli uzaklıklarının nesnel bir fiziksel açıklamasını elde etmeye çalışmanın Kepler için bile anlamlı olmadığını söylüyorlar. Onların bakış açısına göre, Newton'ın yerçekimi kuramının gezegen yörüngelerinin yarıçaplarını belirleyememiş ve sınırlandıramamış olması hayal kırıklığı yaratıyordu, ancak bizim özel evrenimizde işler tam da böyleydi. Neden diye sormanın anlamı yoktu.

Bunun yerine, güneş sisteminin oluşumu sırasında meydana gelen tarihsel bir kaza nedeniyle gezegen yörüngelerinin yarıçaplarının basitçe oldukları gibi olduğunu iddia ediyorlar. İnsancıl ilke savunucuları, nesnel ve ilişkili gök cisimleri olarak gezegenlere odaklanmak yerine, dünyaya odaklanırlar. Dünyanın, insanoğlunun var olması için bir ortam yaratmak için güneşten tam da doğru mesafede olduğunu açıklıyorlar: çünkü bir kere, yüzey sıcaklığı sıvı suya izin veriyor. Onlar için önemli olan nokta, insanın dünya üzerinde gelişmiş olması ve bu olaya dünyanın ve diğer gezegenlerin yörüngelerinin katkıda bulunmasıdır. Gezegenimizin evrende yaşam olan tek gezegen olduğunu varsayarsak ve argümanları devam ederse o zaman Dünyanın yaşamı desteklemek için Güneşten tam olarak doğru mesafede bulunması mucizevi olurdu. Bununla birlikte, güneş sistemimizdeki diğer gezegenleri ve sayısız diğer güneş sistemi dışındaki gezegenleri hesaba katarsak, o zaman dünyanın güneşten uzaklığının "ince ayarı" o kadar da benzersiz görünmüyor. Evrendeki diğer birçok gezegen de aynı derecede elverişli bir konumda olabilir.

İnsancıl görüşte, insanın varlığı *merkezde*dir. Varlığımız, şaşırtıcı gezegen yörüngeleri veya hantal sabitler veya aritmetik ince ayar gerekliliği hakkındaki tüm endişeleri açıklıyor. Sadece evrimimize izin veren koşulları kabul etmeliyiz.

Bugün bazı tanınmış bilim insanları insancıl görüşü benimsiyorlar ve yüzyıllardır bildiğimiz bilim ve bilimsel yöntem felsefeye veya mistisizme dönüşüyor olabilir. Doğal bir evren, doğal olmayan ince ayarların olmadığı ve doğa yasalarını açıklamak için insancıl ilkeye başvurmanın gerekmediği bir evrendir. Çoklu evren "çözümünü" ele alırken temel soru şudur: Fizik yasalarının türetilmesindeki ince ayar problemlerini ortadan kaldırmaya çalışmaya devam etmeli miyiz –yani doğa hakkındaki kuramlarımızı geliştirmeye devam etmeli miyiz–, yoksa sadece bu sorunları ve bir çoklu evrenin parçası olabilecek doğal olmayan insancıl bir evrende yaşadığımızı kabul eder misiniz?

HIGGS BOZONU VE DOĞALLIK PROBLEMİ

Standart modeldeki ince ayar ve çoklu evren ve insancıl ilke aracılığıyla önerilen çözüm göz önüne alındığında temel soruyu sormamız gerekir: Doğal bir evrende mi yaşıyoruz ya da [doğal bir evrende] yaşamıyor muyuz? LHC'de keşfedilen yeni bozon aslında ince ayardan sorumlu standart model Higgs bozonuysa parçacık fiziği topluluğu bu keşfin beraberinde getirdiği sorunu görmezden gelemez. Sorun, süpersimetrik süperpartnerler gibi LHC'deki standart modelin ötesinde yeni fiziğin tespit edilememesinden kaynaklanmaktadır. Bu tür yeni fizik, ince ayar veya doğallık problemini hafifletebilir. Ancak bu, hiyerarşi sorununu ortadan kaldıracak şekilde herhangi bir yeni parçacık arasında karmaşık bir komplo gerektirir. Parçacıklar bu birbirini götürmeye izin vermek için anlaşmazsa ironik bir şekilde durum daha da kötü olabilir, çünkü yeni parçacıkların büyük kütleleri Higgs kütle hiyerarşisi probleminden sorumlu kuantum düzeltmelerinin boyutunu artıracaktır.[5]

Parçacık fiziğinin mevcut formülasyonunda, standart modelin ötesinde yeni fizik olmadan, ciddi ince ayarlara başvurmadan ve çoklu evren paradigmasını benimsemeden hiyerarşi sorunlarını çözmenin ve standart modelin doğal bir açıklamasını üretmenin bir yolu var mı?

Higgs bozonu kütlesinin ince ayarının ve ayar hiyerarşisi probleminin kaynağı, elektro-zayıf $SU(2) \times U(1)$ simetrisinin standart modelde bir Higgs bozon alanı tarafından kırılma şeklidir. Higgs alanı, skaler alanın karesiyle çarpılan bir skaler alan kütlesini içeren özel bir potansiyel aracılığıyla simetriyi kırmak için standart modele dahil edilmiştir. Buna dördüncü kuvvete yükseltilmiş skaler alan eklenir, ardından bir bağlantı sabiti olan lambdayla çarpılır. Skaler kütlenin

[5] Kuantum düzeltme terimi yanıltıcıdır, çünkü tedirgenme kuramındaki bir düzeltme katkısının, düzelttiği terimden daha küçük olduğu varsayılır. Bu her zaman böyle olmayabilir. Kuantum enerjisi "düzeltmesi" olan durumda, düzeltme aslında başlangıçtaki değerden daha büyük olabilir.

karesinin negatif olarak seçilmesi, skaler alanın bir fonksiyonu olarak potansiyelin bir maksimum ve iki minimuma sahip olmasına izin verir. Maksimum, skaler alanın kaybolması için oluşur ve minimum, skaler alanın sabit, sıfır olmayan değerleri için oluşur (Şekil 5.2'ye bakın). Temel SU(2) × U(1) simetrisini kıran ve pozitif fiziksel Higgs kütlesini (başlangıçta kuantum kütle düzeltmelerini içermez) ve de W ile Z bozon kütlelerini veren temel durumdaki minimumlardır.

Elektro-zayıf kuramda, Lagrange denkleminin ilk biçimi kütlesiz W ve Z bozonlarına, kuarklara ve leptonlara ve kütlesiz bir fotona sahip olduğundan buradaki kütleli tek sabit Higgs kütlesidir. Bu kütle, klasik Lagrange denkleminin ölçek değişmezliğini veya uyumlu simetrisini kırar. Fotonlar gibi kütlesiz parçacıklara sahip kuramlar, *uyumlu değişmezlik* adı verilen özel bir simetri değişmezliğini sağlar. Uyumlu değişmezlik simetrisini sağlayan orijinal ve en iyi bilinen kuram, kütlesiz fotonların ışık hızında hareket ettiği Maxwell'in elektromanyetizma kuramıdır.

1980'de Gerard't Hooft, elektro-zayıf hiyerarşi problemlerine Higgs kütlesinin doğal olarak hafif olmasını sağlayacak bir simetriyle korunacağı bir çözüm önerdi. 1995'te William Bardeen, Fermilab'da düzenlenen bir konferansta hiyerarşi sorunlarından kaçınmanın bir yolunu önerdi. Elektro-zayıf modelin ilk klasik, Lagrange denklemini "uyumlu değişmez" tutmak için potansiyeldeki Higgs kütlesini sıfıra ayarladı. Bu ayar, elektro-zayıf simetrinin kendiliğinden kırılmasını sağlayan mekanizmanın orijinal biçiminin kaybolduğu anlamına gelir. Bununla birlikte 1973'te Harvard'dan Sydney Coleman ve Eric Weinberg, Weinberg-Salam elektro-zayıf modelinin simetri kırılmasının Higgs bozonunun kendi kendisiyle salt kuantum etkileşimi sonucu elde edilebileceğini öne sürdüler.[6] Bu kuantum öz-enerji katkıları, elektro-zayıf

[6] S. Coleman and E. Weinberg, "Radiative Corrections as the Origin of Spontaneous Symmetry Breaking," *Physical Review*, D7, 1888–1910 (1973).

Lagrange denkleminde klasik kütle katkısı olmayan etkin bir potansiyel üretmelidir. Bu etkin potansiyelin minimizasyonu, elektro-zayıf simetriyi bozar. Standart modelde gözlemlenenlerin ötesinde yeni parçacıklar yoksa bu hiyerarşi sorunlarını çözebilir.

Özellikle, Higgs kütle kuantum katkıları, Higgs kütle hesaplamasında ince ayar yapılmadan açıklanabilecek küçük logaritmik düzeltmeler olacak şekilde evcilleştirilebilir. Varşova Üniversitesinden Krzysztof Meissner ve Hermann Nicolai ve École Polytechnique Fédérale de Lausanne; Lozan'daki Mikhail Shaposhnikov ve çalışma arkadaşları gibi diğer yazarlar bu fikirleri daha da geliştirdi.

Hiyerarşi sorunlarına yönelik bu potansiyel çözümle ilgili ciddi bir sorun var. Üst kuark kütlesi büyüktür (173 GeV) ve kuarklar ile leptonlara kütle vermek için tanıtılan standart (Steven) Weinberg–Salam modelinin bir parçası olarak varsayılan Yukawa Lagrange denklemindeki Higgs bozonuna güçlü bir şekilde bağlanır. Bu bağlantı nedeniyle, Coleman-(Eric) Weinberg efektif potansiyeline kuantum alan katkılarının son hesaplaması fiziksel olmaktan çıkar, bu da standart modelin nasıl sıkı bir şekilde sınırlandırıldığını ve istenmeyen fiziksel olmayan sonuçlara yol açmadan değiştirilmesinin kolay olmadığını gösterir.

Bir başka ince ayar kaynağı da nötrino kütleleridir. Kütleli bir fermiyon, Dirac alan operatörü için, hem sol-elli (izospin ikili) bileşenine hem de sağ-elli (izospin tekli) bileşenine sahiptir. Bununla birlikte, sağ-elli nötrino hiçbir zaman gözlemlenmedi. Kuram, bu nötrinonun varlığını gerektirdiğinden parçacık fizikçileri, LHC'de henüz tespit edilemeyecek kadar büyük bir kütleye sahip olması gerektiğini varsayıyorlar.

PARÇACIK FİZİĞİNDE KOZMOLOJİK CEVHERLER

Kozmolojik sabitin can sıkıcı sorunu; yani neden sıfır olduğunu veya standart Lambda CDM kozmolojik modelinin gözlemsel olarak gerektirdiği gibi, neden küçük ama sıfır

olmayan bir değere sahip olduğunu açıklamak zorunda olmak, parçacık fiziğinde yalnızca standart model parçacıklar kütleçekimle bağlandığında ortaya çıkar. Parçacıklar arasında kütleçekim etkileşimlerinin yokluğunda, kozmolojik sabit sorunu yoktur. Kozmolojik sabit sorunu şu anda ikna edici bir şekilde çözülmedi, parçacık fiziğinin ve kozmolojinin standart modelini son söz olarak güvenle kabul edebilmemiz için bir çözüm bulması gereken kafa karıştırıcı bir konu olmaya devam ediyor. Son zamanlarda, Planck uydu misyonu çalışması, erken evren kozmolojisindeki yeni özellikleri ortaya çıkaran dikkate değer ölçüde kesin veriler yayımladı.[7] Özellikle, bu veriler erken evrenin erken kuramsal kozmolojik modellerde beklediğimizden daha basit olduğunu göstermektedir. Yeni kesin veriler, kendine özgü serbest parametrelere sahip birkaç skaler alanı içeren melez modeller gibi daha karmaşık şişme modellerinin çoğunu ortadan kaldırır. Bu yeni veriler, uzun süredir devam eden doğallık problemini rahatlatır: Evren, başlangıç koşullarında aşırı ince ayar yapmadan Büyük Patlamayla nasıl başlayabilir?

Evrenin başlangıcındaki doğallık problemini çözmek için en ünlü model, 1981 yılında Alan Guth tarafından önerilen şişme modelidir. Planck verileri, olası şişme modellerini, *inflaton* adı verilen tek bir skaler alana dayalı en basit olanlarla sınırlandırmakta. Yakın tarihli bir makalede, Anna Ijjas, Paul Steinhardt ve Abraham Loeb, basit şişme modelinin başının belada olduğuna dair uyarılarda bulundular.[8] Basit bir skaler şişme modeli Planck kozmolojik verilerine uyabilse de veriler şişme modelini pek olası kılmıyor.

Stanford Üniversitesinden Andre Linde,[9] Tufts Üniversi-

---

[7] P. Ade vd. & Quot; Planck 2013 Results. XXII. Constraints on inflation, & quot; arXiv.org/1303.5082.

[8] A. Ijjas, P. J. Steinhardt ve A. Loeb, "Inflationary Paradigm in Trouble af er Planck 2013," *Physics Letters*, B723, 261-266 (2013).

[9] A. Linde, "Eternally Existing Self-Reproducing Chaotic Inflationary Universe," *Physics Letters*, Bl 75, 395-400 (1986).

tesinden AlexanderVilenkin[10] ve MIT'den Alan Guth[11] yayımladıkları makalelerinde şişme modellerinin "ebedi şişme"[12] sorunundan bahsediyorlar. Büyük Patlamanın hemen sonrasında şişme başladığında, Guth'un belirttiği gibi "gerçekleşebilecek her şey Gerçekleşir ve sonsuza kadar sürer."[13] Sonuç, tüm Olası kozmolojik modeller ortaya çıkabilir ve şişme paradigması herhangi bir öngörü sunamaz. Gelecekteki gözlemler Planck misyonunun sonuçlarını desteklemeye devam ederse, o zaman VSL modelleri ve periyodik döngüler gibi evrenin başlangıç değer problemlerini çözebilecek alternatif kozmolojik modelleri düşünme olasılığını açan şişme paradigması çürütülebilir.

VSL hakkında 1992/1993'te yayımladığım ilk makalelerde, en son Planck uydusu verilerinin doğruladığı şişme modellerine yönelik eleştirileri dile getirdim. VSL modelleri 1999'da Andreas Albrecht ve João Maguiejo tarafından da yayımlandı.[14] Evrenin Büyük Patlamayla yeniden doğup genişlediği ve Büyük Çöküşle öldüğü periyodik döngüsel modeller 1930'larda Richard Tolman tarafından ele alınmıştı. Daha yakın zamanda, döngüsel model 2002'de Paul Steinhardt ve Neil Turok tarafından yeniden canlandırıldı ve yayımlandı.[15]

---

[10] J. Garriga and A. Vilenkin, "Prediction and Explanation in the Multiverse," *Physical Review*, D77, 043526 (2008).

A. Guth, "Eternal Inflation and its Implications," *Journal of Physics*, A40, 6811-6826 (2007).

[Ebedi şişmenin bir sonucu, kuantum madde dalgaları...] Sonsuz şişmenin bir sonucu, yıldızların ve galaksilerin tohumları olan kuantum madde dalgalanmalarının "kaçak" ve çok büyük hale gelmesi ve evrenin genişledikçe giderek homojen olmayan hale gelmesidir, bu da gözlem ve şişme modellerini tanıtmak için orijinal motivasyonla çelişir.. [Ilk teşvikle çatışan bir hale gelmiştir.]

Guth, 23 Mart 2001'de Boston'daki bir kozmoloji konferansında United Press International'dan gazeteci Mike Martin'e bu açıklamayı yaptı.

A. Albrecht and J. Magueijo, "Time Varying Speed of Light as a Solution to Cosmological Puzzles," *Physical Review*, D59, 043518 (1999)

P. Steinhardt and N. Turok, "Cosmic Evolution in a Cyclic Universe," *Physical Review*, D65, 126003 (2002). Hem VSL hem de döngüsel

Parçacık fiziğinin ve kozmolojinin standart modelini kabul edilemez ince ayar sorunları olmadan doğal hale getirmeye çalışmak, bugün parçacık fiziğinde hayati bir çaba haline geldi. 2015'ten sonra çok daha yüksek enerjilerde olan LHC'nin herhangi bir yeni fiziği algılamaması olasıdır. Yine de standart modelde istenmeyen hiyerarşi sorunlarına bir çözüm olduğuna inanıyorum. Sadece onu bulmak son derece zorlayıcı olacaktır. Elektro-zayıf simetrinin nasıl kırıldığı ve parçacıkların kütlelerini nasıl aldıkları konusunda daha fazla araştırma yapılmalıdır. Tarihsel olarak, fizikteki bazı problemlerin çözülmesinin özellikle zor olduğu kanıtlanmıştır. Çoğu zaman, doğal olan ve çoklu evren ve de insancıl paradigmalar gibi spekülatif, doğrulanamaz ve yanlışlanamaz önerilere başvurmayan bir çözüm bulmak on yıllar alır.

alternatif modellerde, kuantum madde dalgalanmaları, çoklu evren senaryosuna yol açan kontrolsüz bir büyüme sergilemez. Dahası, kütleçekim dalgalarının Büyük Patlamanın bir kalıntısı olarak gözlemlenmeyeceğini tahmin ediyorlar. Şişme modelleri, kütleçekim dalgalarının Planck görevi gibi deneylerle tespit edileceğini tahmin ediyor.

11

2015'E KADAR SON SÖZ

Şubat 2013'te LHC, iki yıllık bakım ve daha yüksek enerji seviyelerine yükseltme nedeniyle kapatıldı. CERN'in yeni bozonun keşfiyle ilgili "son sözü" 2-16 Mart 2013 tarihlerinde Rencontres de Moriond toplantısında verildi.

Moriond çalıştayları birbirini takip eden iki oturumdan oluşuyordu: Elektro-zayıf Oturumu ve QCD Oturumu. ATLAS ve CMS çalışma gruplarından temsilciler, 2011 ve 2012 verilerinin en son analizleri hakkında güncellemeler vererek, bu iki oturumda da merakla beklenen görüşmeleri gerçekleştirdiler. 14 Martta Moriond çalıştayı sırasında, CERN basın ofisi görünüşte gayet net olan şu duyuruyu yaptı: "Yeni sonuçlar, CERN'de keşfedilen parçacığın bir Higgs bozonu olduğunu gösteriyor." 4 Temmuz 2012'de Higgs bozonunun keşfinin ipuçları, ardından Kasım 2012'deki Kyoto toplantısında daha güçlü ipuçları, şimdi deneycilerin yeni veri analizlerinde doruğa ulaştı. 2012'den beri LHC verilerini ve yeni bozonun özelliklerini tartışan artan sayıda makale, LHC'nin gerçekten de Higgs bozonunu yaklaşık 125 GeV'lik bir kütlede keşfettiğini kabul ediyor gibi görünüyordu.

Örneğin Mart 2013'te deneyimli bir CERN kuramcısı tarafından elektronik arşive gönderilen bir makale şunları söyledi: "Herhangi bir makul şüphenin ötesinde, H parçacığı bir Higgs bozonudur." (Burada "H parçacığı" LHC'de keşfedilen yeni parçacığı ifade eder; diğer fizikçiler buna X bozonu derler.) Açıkça, Higgs bozonunun keşfedildiğine yalnızca po-

püler medya değil, parçacık fiziği topluluğu da karar vermişti. Nobel Fizik Ödülünün 2013'te veya muhtemelen 2014'te Peter Higgs'e ve bir veya iki başka kuramcıya verileceği varsayılabilir. Ya da yeni bir bozon keşfetmek ve ertesi yıl kuramcılara ödül vermek onlara çok acele gelebilir.

Peki bu son veriler ve analizler ne kadar inandırıcı?

İKİ FOTONA BOZUNMA KANAL VERİLERİ

Moriond toplantısında deneyciler, yeni bozonun bozunma kanallarının çeşitli bozunma oranlarını, dallanma oranlarını ve sinyal kuvvetlerini güncelleyen yeni sonuçlar sundular. Özellikle, CMS grubu sonunda X bozonu açısından iki foton bozunma kanalı için verilerini güncelledi. Fransa, Palaiseau'daki Leprince Ringuet Laboratuvarından Christophe Ochando tarafından QCD oturumu sırasında sunulan bu güncelleme, 4 Temmuz duyurusundan bu yana heyecanla bekleniyordu; CMS ekibinin Kasım ayında bu verileri neden güncellemediğine dair söylentiler dönüyordu.

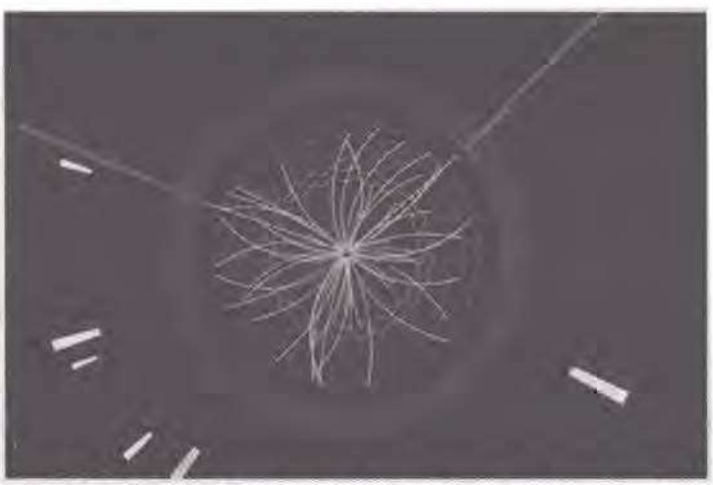
Higgs bozonunun iki fotona bozunmasının kuramsal tahminiyle karşılaştırıldığında, ekibin 2011 verilerini analiz etmede ve iki fotonlu bozunmanın sinyal gücünde beklenmedik bir fazlalığı hesaba katmada sorunları olduğu ortaya çıktı. (Bir aday olay için Şekil 11.1'e bakın.) 2011'de, hızlandırıcıdaki enerji yaklaşık 5 ters femtobarn parlaklık ile 7 TeV'du. Ochando'nun belirttiği gibi, yeni 2012 verilerine dayanarak, iki fotonlu bozulma sinyalinin istatistiksel önemi, 4 Temmuz duyurusundan bu yana azalmıştı. İki foton bozunma kanalı için CMS sonuçları, bir analiz yöntemi için yaklaşık 19 ters femtobarnlık bir parlaklık, 0,93 + 0,34 veya –0,32'lik bir sinyal gücü ile yeni 8 TeV verisi verdi. Aynı verinin başka bir analiz yöntemi, iki-foton kanalının sinyal gücünde önemli bir azalma üretti. Bu analiz için sinyal gücü 0,55 +0,29 veya –0,27 verdi. Bu, ilk olarak 4 Temmuzda açıklanan 4-sigma sonucuna kıyasla sinyal gücünde 2 sigmaya bir düşüş gerçekleştirmişti.

Sinyal gücündeki fazlalığın artık bir eksiklik haline geldiği anlaşılan bu çelişkili veriler hakkında ne yapılabilirdi? İki yıllık veri toplamanın sonuçlarını birleştirmek yardımcı olur muydu? Deneylerin sonuçlarını yorumlamanın iki yolu vardır. Bir yol, Higgs bozonlarının üretim tesir kesitini bozunmanın dallanma oranıyla iki fotona çarparak bozunma ürünlerinin sinyal gücünü belirlemektir; sinyal gücü istatistiksel olarak ne kadar anlamlıysa yeni bozonun Higgs bozonu olma olasılığı da o kadar yüksektir. Deneylerin sonuçlarını yorumlamanın diğer bir yolu: gözlemlenen tesir kesitin standart model tarafından tahmin edilen tesir kesite olan oranını belirlemektir; ideal olarak, bu oran güçlü bir istatistiksel kesinlik ile birliğe (tekilliğe, bütünlüğe, birime) eşit olmalıdır.

Ochando, CMS çalışma grubunun sırasıyla 2011 ve 2012'den 7-TeV ve 8-TeV verilerini birleştirdiğinde bunun gözlemlenen tesir kesitin öngörülen standart model kesitine oranının 0,78 + 0,28'e eşit olmasına yol açtığını ortaya koydu. Ya da 125 GeV'lik bir Higgs bozon kütlesi için -0,26 olacaktı. Bu sonuç, birliğin standart model tahminiyle istatistiksel olarak tutarlıdır. Öte yandan yine gözlenen tesir kesitinin standart modelin öngörülen tesir kesitine oranı için farklı bir analiz üretti: birleşik iki yıllık sonuç 1,11 +0,32 veya –0,30, deneysel hata içinde standart modelle de tutarlı bir sonuç oluyordu. 2011 verileriyle 2012 verilerinin birleştirilmesi, standart model tahminiyle tutarlı daha büyük istatistiksel standart sapmaya sahip bir sinyal gücü de üretecektir.

Bu sayılar ne anlama geliyor? CMS analistleri iki yılın sonuçlarını birleştirirken doğru mu yapıyorlar? Birkaç şey açık olarak görünüyor. 4 Temmuz duyurusu sadece yeni 2012 8-TeV verilerine ve 19 ters femtobarnın parlaklığına dayansaydı o zaman iki-foton bozunma kanalı için 2 veya 3 sigma gücü; CERN'in yeni bir bozonun keşfini açıklama hakkına yetmezdi! Bununla birlikte iki yıldan 7- ve 8-TeV verilerinin birleştirilmesi, standart model Higgs bozonu için durumu

güçlendiren bir sonuç verir. Aix-Marseille Üniversitesinden Fabrice Hubaut, elektro-zayıf bölgesinde iki foton kanalı için ATLAS sonuçlarını sundu. Higgs bozon kütlesini 126,8 GeV ve en uygun sinyal gücünü 1,65 +0,34 veya -0,30 olarak açıkladı. Bu veri, 2011'de 7 TeV enerjide ve 5 ters femtobarnda elde edilen ATLAS verileriyle karşılaştırıldığında sinyal gücünde küçük bir düşüştü. Bu sonucun olasılık değeri önemli bir 7,4 sigmaydı, bu da ATLAS sonuçlarının iki fotonlu bozunma kanalı için Higgs bozon modeli tarafından tahmin edilen sinyal gücünün üzerinde önemli bir fazlalık gösterdiği anlamına geliyordu. ATLAS sonuçları, CMS sonuçlarından önemli ölçüde farklıdır ve deneycilerin hangi sonucun doğru olduğunu belirlemesi gerekecektir.



Şekil 11.1 Bir Higgs bozonunun iki fotona bozunması için aday olan bir olay. ©CERN, CMS İşbirliği.

Kuramsal parçacık fizikçileri, hem 2011'in önceki CMS verilerinde hem de ATLAS verilerinde iki fotonlu bozunmadaki bu fazla olayı hararetle tartışıyor. Yeni CMS ve ATLAS verileri arasındaki bu büyük tutarsızlığın tarafsız fizikçileri Higgs bozonunun "herhangi bir makul şüphenin ötesinde" keşfedildiğine nasıl ikna etmiş olabileceği merak ediliyor.

Şahsen, iki fotonlu bozunma verilerinin etrafta dolaşmasını ve hem CMS hem de ATLAS grubu sonuçları için istatistiksel olarak anlamlı ve kesin bir değere yerleşmemesini rahatsız edici buluyorum. Tutarsızlığın nedenlerine gelince, örneğin, iki foton bozunma kanalındaki olayların fazlalığının, bozon bozunmasının hesaplanmasına yeni yüklü vektör bozon parçacıklarının ikiye dahil edilmesiyle açıklanabileceğini öne süren birçok makale yayımlandı. İki fotonlu bozunmadaki olayların fazlalığı gerçekse, bu tür yüklü parçacıkların LHC'de yeni parçacıklar olarak algılanması gerekir. CMS ve ATLAS sonuçlarındaki farkın bir başka açıklaması, belki de bir dedektörün parçacıkları tespit etme yeteneğinde diğerinden daha doğru olabileceğidir. Bazıları CMS müon-lepton dedektörünün ATLAS dedektöründen daha doğru olduğunu iddia ediyor. Öte yandan gürültülü ardalan sorunları ve verileri analiz etme yöntemlerindeki farklılıklar karmaşıktır ve sonuçlarda kesinlikle önemli farklılıklar üretebilir. Belki de Higgs bozonunun kesin keşfini ilan etmeden önce bu güçlüklerin çözülmesini beklemek akıllıca olacaktır.

DİĞER BOZUNMA KANALLARI

Moriond toplantısında hem CMS hem de ATLAS işbirlikleri tarafından rapor edilen diğer altın kanal, X veya H bozonunun iki Z bozonuna bozunması, bu bozonun da dört leptona bozunması, Kasım 2012'den bu yana sinyal gücünde bir artış gösterdi. Yukarıda gözlemlenen ardalan, yaklaşık 125 GeV enerjide yeni bir bozonun keşfedildiğini ikna edici bir şekilde kanıtlayacak bir düzeye yükseltmişti.

CMS ve ATLAS grupları ayrıca, X bozonunun bir çift W bozonuna önemli bozunması, ardından iki nötrino ve iki leptona bozunması için yeni sonuçlar bildirdi. İki dedektörün sonuçları farklıydı ve biri diğerinden daha güçlü bir sinyal olduğunu iddia ediyordu. Bu bozunma kanalıyla ilgili sorun, son dört leptondan iki nötrino leptonunun elektriksel olarak nötr olması ve varlıklarının ancak bozunma olaylarını

yeniden oluşturduğunda, enerjinin ve momentumun korunmasını talep ettiğinde bir miktar eksik enerji çıkmasıdır. Eksik nötrino enerjisini doğru bir şekilde belirleme ihtiyacı, önemli ardalan sorunlarına neden olur, çünkü birçok parçacık, iki proton akışının çarpışmaları enkazı püskürttüğü için nötrinolara bozunur. Bu kanaldaki yeni bozon bozunma olaylarının dağılımı, bir rezonans zirvesi olarak görünmek yerine düzdür. WW ve nötrino ardalanının hesaplanması çok karmaşıktır ve gerçek bozon sinyalini gizlememek için dikkatlice yapılmalıdır.

Moriond'da bildirilen kritik bir sonuç, X bozonunun leptonik tau^+/tau^- bozunma kanalı ve kuark tabanı ve karşı-alt bozunma kanalı gibi fermiyon/karşı-fermiyon çiftlerine bozunmasıydı. Şüphesiz bu bozunma kanallarının gözlemlendiğini belirlemek önemlidir, çünkü standart elektro-zayıf modelin önemli bir parçası, Higgs bozonunun Yukawa etkileşimi yoluyla fermiyonlara bozunmasıdır. Standart modeldeki Yukawa Lagrange denklemi, Higgs bozonunu fermiyon çiftleriyle birleştirir. Higgs alanının etkileşimlerinin kuvvetlerini ölçen bağlantı sabitleri ayarlandığında ve Higgs alanı için sabit boşluk beklentisi değeri değiştirildiğinde fermiyonların kütleleri üretilir. X bozonunun kuarklar ve leptonlar gibi fermiyonlarla bağlantısını sağlam bir şekilde kurmadan, yeni keşfedilen bozonun standart model Higgs bozonu olduğu iddia edilemez.

Edinburgh Üniversitesinden Victoria Martin, fermiyon/karşı-fermiyon bozunma kanalları için ATLAS çalışma grubunun sonuçlarını bildirdi. O, tau^+/tau^- bozunumu için sinyal gücünü 0,7 +0,7 veya –0,7 olarak bildirdi; bu, standart modelle tutarlı, ancak sıfırla tutarlı, yani Higgs bozonunun etkileşimi olmadığını gösteren boş bir sonuç olarak kabul edilebilir. Ayrıca, standart model Higgs bozonu için baskın bozunma kanalı olduğu için hayal kırıklığı yaratan alt-karşıt bozunma kanalı için boş sonuçlar bildirdi.

Martin'in konuşmasında belirttiği gibi, tau^+/tau^- kanalındaki büyük sorun, Z bozonlarının çok sayıda tau lepton

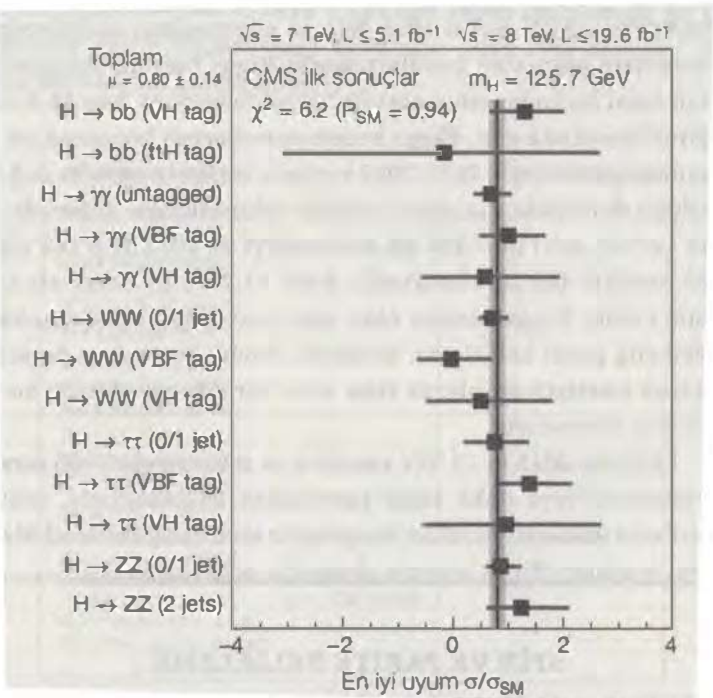
çiftine bozunmasının neden olduğu ardalandır. Higgs bozonunun tau lepton çiftlerine bozunmasından kaynaklanan olayların küçük sinyalini ortaya çıkarmak için bu geniş ardalan, tespit edilen toplam sinyalden çıkarılmalıdır. Pratikte, tau lepton bozunma kanalını yeniden yapılandırırken, tau leptonları gerçekten gözlemlenmez, çünkü 10^{-13} saniyelik kısa bir ömürleri vardır. Gözlenen, tau leptonlarının son bozunma ürünleridir: nötrinolar, elektronlar, pozitronlar ve müonlar. Yine, nötrinolar nötr olduğundan ve saçılma sürecindeki enerji ve momentumun korunumundan dolayı, nötrinoların varlığı, saçılmadaki kayıp bir enerjiden anlaşılır. Nötrinolar, kaldırılması gereken büyük, sorunlu bir ardalana katkıda bulunur.

Baskın alt/karşı-alt bozunma kanalı için, ardalan sorunu, bu bozunma için sinyal gücünün belirlenmesinde ciddi bir engeldir. Proton-proton çarpışmaları sırasında üretilen hadronların sayısı muazzamdır; gerçekten de kuark ardalanı, standart Higgs bozonunun alt ve karşı-alt kuarklara bozunmasının tahmin edilen sinyalinden bir milyon kat daha büyüktür. Martin, tüm sorunu "samanlıkta iğne aramak" olarak özetledi.

MIT'den Valentina Dutta, yeni bozonun fermiyon/karşı-fermiyon çiftlerine aynı bozunması için CMS sonuçlarını bildirdi. ATLAS çalışma grubunda olduğu gibi, CMS dedektöründeki büyük sorun, yeni bozonun bir çift tau, alt ve karşı-alt kuarklara bozunmasını görmek için ardalanı kesmektir. Ancak CMS grubu, yeniden yapılandırılmış nötrino ve lepton verilerinin ürettiği ardalanı, tau çifti bozunma kanalı için ATLAS grubundan farklı şekilde ele aldı. Bir çift tau bozunumu için rapor edilen sinyal gücü 1.11 +0,4 veya –0,4 veya 3-sigma sinyal gücünden biraz fazlaydı ve bu, ATLAS grubu tarafından bildirilen boş sonuçtan oldukça farklıdır.

Yeni bozonun bu fermiyon/karşı-fermiyon bozunması için CMS ve ATLAS sonuçlarındaki fark, iki dedektörden birindeki veya her ikisindeki cihaz problemlerinin neden olduğu sistematik hataların sonucu olabilir, ancak bence bu

olası değildir. Fark, daha çok ardalan hesaplamasının bir sonucudur. Tau çifti bozunması için sinyali ortaya çıkarmak için ardalanı çıkarırken birkaç yüzdelik analizde bir hata, iki çalışma grubu arasında bildirilen sinyal şiddetinde önemli bir farklılığa neden olabilir. Aynısı daha problemli alt ve karşı-alt bozunma kanalı için de geçerlidir.



Şekil 11.2 CMS dedektöründen alınan 7 TeV ve 8 TeV birleşik verileri için ana Higgs bozonu bozunma kanalı verileri için en uygun olanı. 7 TeV için parlaklık 5.1 ters femtobarn'dır; 8 TeV için parlaklık 19.6 ters femtobarn'dır. Gözlenen kesitin standart model öngörülen kesite oranı için en iyi uyum bir veya hiçe eşit olmalıdır. Yatay çubuklar, birliğin yatay eksen değerinden sapan hataların boyutlarını temsil eder. Bu sonuçların karşılık gelen sinyal gücü veya mu (μ), 0,80 ± 0,14'tür. Birliğin (bir) sinyal gücü, standart modele mükemmel bir şekilde uyacaktır. © CERN, CMS grubu.

Yeni bozonun bir çift fermiyon ve karşı-fermiyona dönüşmesi için hangi sonuca inanmalıyız? Ne yazık ki her iki çalışma grubu da bu bozunma kanalları için 2012 verilerini yeniden analiz ederek yeni sonuçlar bulmazsa, LHC'nin 2015'te 13 TeV enerjide ve diyelim ki 100 ila 200 ters femtobarn gibi çok daha yüksek bir parlaklıkta başlamasını beklemek zorunda kalacağız..

İki baskın bozunma kanalı (alt/karşı-alt ve tau^+/tau^-) hakkında hiçbir kesin, güncel bilgi olmadan, bu kadar çok fizikçi ve CERN basın ofisi, köşeye sıkıştırılmış olabilecek canavarın gerçekten standart model Higgs bozonu olduğundan nasıl bu kadar emin olabilir? Yine de Şekil 11.2 ve 11.3'te görebileceğimiz gibi, Higgs bozonunun önemli bozunma kanalları için birleşik 2011/2012 verileri, verilerin mevcut doğruluğu dahilinde, standart modelin tahminleriyle tutarlıdır. Bu veriler, 2011'de 7 TeV'lik bir enerjiyi ve 2012'de 8 TeV'lik bir enerjiyi temsil etmektedir. Şekil 11.2 ve 11.3'ten, standart model Higgs bozonu olan yeni bozon için bu aşamada birikmiş genel kanıtların, bozunma kanalı verilerine dayalı olarak istatistiksel olarak ikna edici bir düzeye ulaştığı sonucuna varmalıyız.

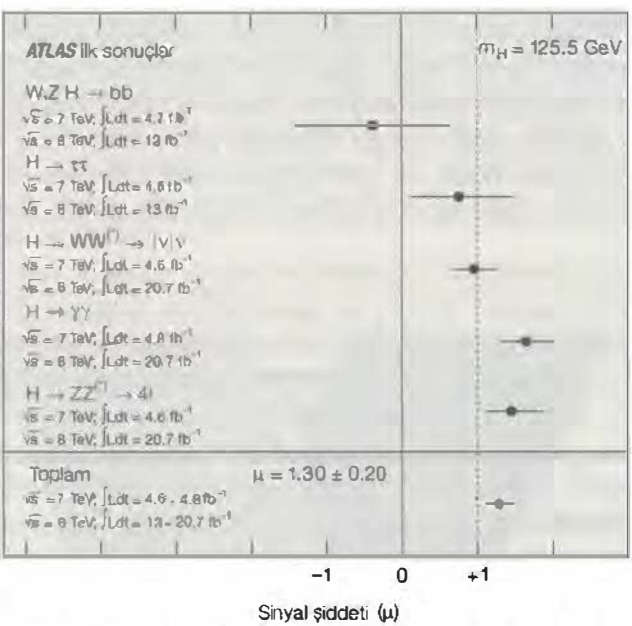
LHC'nin 2015'te 13 TeV enerjide ve muhtemelen 100 ters femtobarn veya daha fazla parlaklıkta başlamasıyla, yeni verilerin standart modelle karşılaştırılması büyük olasılıkla yeni bozonun Higgs bozonu olduğunu doğrulayacaktır.

SPİN VE PARİTE BELİRLEME

Bildiğimiz gibi, yeni bir parçacığı tanımlamak için gereken iki önemli kuantum sayısı onun spini ve paritesidir. Temel parçacıkların spini ve paritesi, parçacıkların tanımlanması için çok önemli olan kimlik bileziklerindeki öğeler gibidir. Bahsedildiği gibi, spin, temel bir parçacığın içsel açısal momentum serbestlik derecesidir; parite, uzay tersinmesinin parçacığın üzerinde yaptığı işlemdir. Yani parçacıkla ilişkili x, y ve z koordinatları –x, –y ve –z'ye dönüştürülür. Uzay

tersinmesi altında, parçacık işaret değiştirmiyorsa pozitif pariteye sahiptir ve skaler bir parçacıktır; işaret değiştirirse negatif pariteye sahiptir ve bir sahte-skaler parçacıktır. Pratikte, spin ve parite genellikle birlikte düşünülür.

Moriond oturumlarında, yeni bozonun spini ve paritesinin kritik konusuyla ilgili yeni sonuçlar sunuldu. Hatırladığımız gibi, Landau ve Yang'ın kuramına göre, yeni bozonun bozunarak iki fotona dönüştüğü gözlemi, açısal momentum ve spin korunumu nedeniyle bozonun –içine bozunduğu fotonlar gibi– sadece 0 veya 2 spinine sahip olabileceği ve 1 spinine sahip olamayacağı anlamına gelir. Peki hangisi? 0 mı, yoksa 2 mi olacak spini?

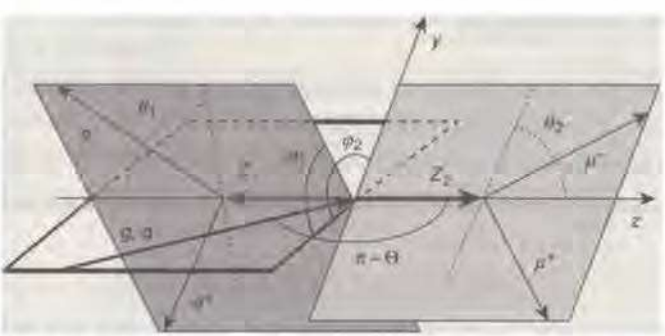


Şekil 11.3 Birleşik 2011/2012 verilerinin ATLAS özeti. CMS verilerine benzer şekilde, 2011 enerjisi 4,6 ila 4,8 ters femtobarn parlaklık ile 7 TeV iken, 2012 enerjisi 13 ila 20,7 ters femtobarn parlaklık ile 8 TeV'dir. Yatay eksen, sinyal şiddetini (μ) temsil eder ve 7-TeV ve 8-TeV verileri için birleşik uyum için μ, 1,30 ± 0,20'ye eşittir. Birlik (bir) sinyal şiddeti, standart model tahminine mükemmel uyum sağlar. © CERN, ATLAS grubu.

Açısal momentum ve spinin korunumu nedeniyle bozonun, bozunduğu fotonlar gibi spin 1'e değil, yalnızca spin 0 veya spin 2'ye sahip olabileceği anlamına gelir. Peki hangisi? Spini 0 mı, 2 mi?

Burada bilgi için diğer bozunma kanallarına dönebiliriz. X bozonunun daha sonra dört leptona (e^+, e^- ve mu^+, mu^- çiftleri) bozunan iki Z'ye bozunmasının karmaşık analizi, ideal olarak yatay eksene belirli açılar ölçülerek yapılmalıdır. Bozunan parçacığm üzerinde durduğu yer alınmalı. Şekil 11.4'te gösterilen açılardan sadece beşi parçacığın spininin ve paritesinin belirlenmesi için uygundur. Spin ve parite, ilgili açıların ölçümlerinin korelasyonlarını hesaplayan bir bilgisayar koduyla belirlenir.

CMS çalışma grubu tarafmdan yakın zamanda yayımlanan bir makale, spin-0 skaler Higgs bozonunun veriler tarafmdan tercih edildiğini iddia ediyor ve bozonun skaler doğası, pozitif pariteye sahip olduğu anlamına geliyor.[1] Moriond konferansındaki ATLAS ve CMS gruplarından konuşmacılar, X bozonunun spini (spin) ve paritesi için bu iddiayı yinelediler.



Şekil 11.4 H'den ZZ'ye olan bozunmalarda Cabibbo–Maksymowicz açıları. © Alavaro De Rujula, Joseph Lykken, Maurizio Pierini, Christopher Rogan ve Maria Spiropulu, "Higgs looks-alike at the LHC". ArXiv:1001.5300v3 (hep-ph) 5 Mart 2010.

[1] CMS Collaboration, "Study of the Mass and Spin-Parity of the Higgs Bozon Candidate via its Decay to Z Bozon Pairs," *Physical Review Letters*, 110, 081803 (2013).

TEMMUZ 2013: VERİLERİN DAHA FAZLA SPİN VE PARİTE ANALİZİ

Mart 2013 Moriond çalıştayından sonra, LHC işbirlikleri 2011 ve 2012'de toplanan verileri analiz etme çabalarına devam etti. Önemli bir yeni sonuç, ATLAS grubu tarafından gözlemlenen Higgs benzeri parçacığın spin ve paritesinin belirlenmesidir.[2] Grup, X parçacığının iki fotona, daha sonra dört yüklü leptona bozunan iki Z-bozonuna ve daha sonra iki yüklü lepton-nötrino çiftine bozunan iki W-bozonuna bozunmasını analiz etti. (Bunlardan ilk ikisinin, nötrino ve hadronik ardalan sorunlarına sahip olmadıkları için "altın" kanallar olarak kabul edildiğini hatırlayın.)

Spin ve pariteye odaklanan yeni analiz, ATLAS grubu tarafından toplanan daha büyük bir veri setini[3] kullanır. Varsayımsal spin-0, spin-1 ve spin-2 rezonanslarının standart model parçacıklarla etkileşimleri, kuramsal modele bağlı olarak açıklanmaktadır. Çalışma, spin ve parite belirleme için en uygun olan spesifik üretim ve bozunma süreçlerine odaklanmaktadır.

X parçacığının spinini ve paritesini belirlemeyi amaçlayan istatistiksel analiz, sinyal ve gürültü olayları arasında ayrım yapabilmelidir. *Olabilirlik oranı* analizi olarak adlandırılan özel istatistiksel yöntem, gerçek gözlemlerle karşılaştırarak rakip modellerin doğru olma olasılığını karşılaştırır. Test edilen modellerden biri, özellikleri standart modelin öngörülerinden bilinen standart model Higgs bozonudur. Sahte ölçekli Higgs modeli veya bileşik rezonans modeli gibi alternatif modeller, tahminlerinde daha az spesifiktir. Ancak bunların bilinmeyen özellikleri, deneysel analistlerin "rahatsız edici parametreler" dediği şeyle açıklanabilir. Bu şekil-

---

[2] ATLAS grubu, "ATLAS Verilerini Kullanarak Higgs Bozonunun Spin-0 Doğası İçin Kanıt", Physics Letters B 726, 120 (2013). 2. ATLAS Collaboration, "Evidence for the Spin-0 Nature of the Higgs Boson Using ATLAS Data," *Physics Letters* B 726, 120 (2013).

3. Entegre parlaklık, 7 TeV'de ek 4.6 fb-1 ile 8 TeV enerjide 20,7 fb-1'e ulaştı.

de, standart model Higgs bozonunu rekabet eden modellerle karşılaştırmak, herhangi bir spesifik rekabet modelinin varsayımlarından bağımsız olabilir.

Olabilirlik oranı analizi; hem standart model Higgs durumunda hem de rakip modellerde beklenen sinyal ve gürültü olaylarının istatistiksel dağılımlarının bilinmesini gerektirir. Modelleri açıklayan karmaşık matematik, bu dağılımları basit formüller kullanarak hesaplamayı imkânsız hale getirir. Bunun yerine fizikçiler, her yarışan modeldeki gerekli olasılık dağılımını elde etmek için çok sayıda olayı simüle eden Monte Carlo yöntemini kullanırlar.[4] Modellerin her biri için, gerçek gözlemleri bu simüle edilmiş istatistiksel dağılımlarla karşılaştırmak olabilirlik değerini verir. Bu olasılıklar kıyaslanabilir ve oranları hesaplanabilir. Bu tür oranlar daha sonra iki rakip modelin gözlemler ışığında nasıl bir performans sergilediğini belirler.

Gözlenen Higgs-benzeri parçacığın spinini ve paritesini belirlemek için, araştırmak için tercih edilen bir süreç, iki Z bozonuna, ardından dört leptona bozunmadır. Deneysel fizikçiler, beş farklı bozunma açısını ölçebilir (Şekil 11.4). İki W bozonunu içeren bozunma sürecinde nötrinoların varlığı, bozunma açılarının doğrudan hesaplanması imkânsız hale geldiğinden analizi karmaşık hale getirir. Ne yazık ki, hiçbir basit, geleneksel istatistiksel analiz yöntemi, halihazırda mevcut verileri kullanan rakip modellerin Monte Carlo simüle edilmiş dağılımları arasında ayrım yapamaz. Örneğin ATLAS deneyi, 18'i bir 125,5-GeV Higgs bozonu için bir sinyali temsil eden 43 aday sinyal olayı üretti.

Güçlendirilmiş karar ağacı algoritması (BDT).[5] Bu, mak-

---

[4] Monte Carlo yöntemine iyi bir örnek, çok sayıda döndürülebilen simüle edilmiş bir rulet çarkının kullanımını gerektirir. Belirli bir sayıya düşen topun kayıtlı sonuçları, nihai sonucun kuramsal olarak beklenen olasılık dağılımına eninde sonunda doğru bir şekilde yaklaşacaktır. Gerçekten de, bu istatistiksel analiz yöntemi, adını ünlü Monte Carlo kumarhanesinden almıştır.

Nispeten yeni olmasına rağmen, BDT [*boosted decision tree*] algorit-

simum duyarlılığı elde etmek için simüle edilmiş sinyal olayları kullanılarak "eğitilebilen" bir öğrenme algoritmasıdır, böylece rakip modeller için olasılık dağılımlarını belirleyebilir. BDT sonuçlarına dayalı olabilirlik analizini kullanan LHC analistleri, verilerin alternatifler üzerinde skaler, pozitif eşlikli bir Higgs bozonunun standart model tahminini desteklediğini göstermiştir.

X rezonansının iki Z-bozon aracılığıyla dört leptona bozunmasına ilişkin ATLAS verileri, yüzde 97,8 olasılıkla negatif parite (sahte-skaler) hipotezini çürütür. Bir çift W-bozon aracılığıyla iki yüklü lepton-nötrino çiftine bozunma verileri de standart modelle uyumludur. Bu veriler, yeni bozon için spin-2 hipotezini de hariç tutmak için kullanılabilir, ancak daha az istatistiksel anlamlılık ile.

ATLAS'ınkine benzer istatistiksel yöntemler kullanarak spin-parite sonuçları elde eden CMS grubunun yayımlanmış makalesi, sahte-skaler alternatif yerine skaler Higgs spin-0 bozonu hipotezinin tercih edildiğini de iddia ediyor.

ATLAS çalışma grubu, varsayımsal Higgs-benzeri parçacık ile standart modelin diğer parçacıkları arasındaki bağlantıların gücü hakkında varsayımlarda bulunmadan, üzerinde çalıştıkları alternatif modelleri hariç tuttu. 13-14 TeV enerjilerinde çok daha büyük bir parlaklık ile daha fazla veri birikimi, yeni rezonansın spin ve parite atamalarının istatistiksel olarak belirlenmesini güçlendirecektir. Hem CMS hem de ATLAS gruplarının gelecekteki spin-parite çalışmaları sırasında, skaler spin-0 Higgs bozon modelinin istatistiksel olasılığı, alternatif modellerin olasılığına kıyasla artmaya devam ederse o zaman şu sonuca varmalıyız: 125-126 GeV kütleli bozon gerçekten de Higgs-benzeri bozondur. Aslında bunun minimal, standart model, temel Higgs bozonu mu, yoksa daha karmaşık bir parçacık mı olduğunu belirlemek, hâlâ yanıtlanmamış bir soru olarak kalıyor.

---

masi, optik karakter tanıma, konuşma tanıma, sinir ağları ve kanser tespiti gibi çeşitli alanlarda son on yılda başarıyla kullanılmıştır.

İLERİYE BAKMAK

0 spinli ve pozitif pariteli, elektriksel olarak nötr bir skaler bozon olan standart model Higgs bozonu, boşluğun kuantum sayılarına sahiptir. Böyle bir temel parçacık daha önce hiç gözlemlenmedi. Kuarklar, W ve Z bozonları, gluonlar ve fotonlar gibi standart modelin temel parçacıklarının etkileşimlerinde, skaler Higgs bozonunun bir şekilde hayaletimsi etkisi olmuştur. Yeni bozonun gerçekten de standart model Higgs bozonu olduğunun hiç şüphesiz teyidi, bilim tarihinde olağanüstü bir keşif olacaktır, çünkü parçacığın şimdiye kadar deneysel olarak hiç gözlemlenmemiş benzersiz özellikleri vardır.

Tüm bozunma kanalları için LHC'deki genel sonuçların, sinyal kuvvetlerinin ve Temmuz 2013 itibariyle elde edilen spin ve paritenin, standart model Higgs bozonu ile uyumluluklarında zorlayıcı olduğunu iddia edebilsek de, hâlâ bazı bozunma kanalları ve ATLAS ve CMS sonuçları arasındaki farklar gibi sorunlu belirsizlikler var. Bilindiği gibi fizikte detaylar önemlidir. 1916'da Einstein'ın genel görelilik kuramı ile Newton'ın kütleçekimi arasındaki deneysel fark, Merkür gezegeninin günberi ilerleyişinde yüzyılda 43 ark saniyenin küçücük etkisiydi. Bu, gözlemlenen toplam günberi ilerlemesinin yalnızca yüzde biri kadardır. Ancak, bu kadar küçük bir fark, kütleçekimin ne olduğuna dair anlayışımızda büyük bir değişiklikle sonuçlandı. Küçük detayların önemine bir başka örnek de Kepler'in Danimarkalı astronom Tycho Brahe'nin astronomik verilerindeki küçücük bir etkiyi gezegenler için dairesel yörüngeler kullanarak çözemeyeceğini keşfetmesidir. Bu onu gezegenlerin yörüngelerinin eliptik olduğunu kabul etmeye zorladı ve Ptolemaios astronomisinin çöküşünü ve Kopernik güneş merkezli paradigmasının kabulünü müjdeledi.

Önümüzdeki yıllarda yükseltilmiş LHC'den gelecek veriler, yeni bozonun uzun süredir aranan standart model Higgs bozonu olduğu durumunu güçlendirmeye devam ederse bu

durum, parçacık fiziğinin uzun tarihinde muazzam bir başarıyı temsil edecektir. Aynı zamanda tarihteki en büyük teknolojik başarılardan birini temsil edecek ve LHC ve halefleri için sürekli finansmanı garanti etmelidir.

Yine de keşif, doğanın parçacık kodunu deşifre etme mücadelesinin sona erdiğini göstermeyecek. Bildiğimiz gibi, standart model Higgs bozonu, Higgs kütle hiyerarşisi problemi ve ayar hiyerarşisi problemi gibi çözülmesi zor problemleri de beraberinde getiriyor. Bunlar, uzun süredir devam eden kozmolojik sabit problemine ve Einstein'ın genel görelilik kuramının kuantum mekaniğiyle nasıl birleştirileceğine dair bilmeceye ektir. Kutlama partisinin standart model Higgs bozonunu temel parçacıklar grubuna resmen kabul etmesinin ardından fizikçiler işe geri dönmeli ve Higgs bozonunun kanatlarıyla gelen bu sorunları çözmelidir. Bunların, çoklu evren gibi bazı bilim çözümlerine başvurmak yerine, kuramsal fikirleri geliştirmenin ve daha sonra bunları deneyle doğrulamanın eskiden beri kabul görmüş yöntemiyle çözüleceğini umuyoruz. Yeni bozon, ister standart model Higgs bozonu isterse farklı bir Higgs bozonu türü olsun, maddenin kökenlerini ve yapısını daha derinden anlamaya çalışan gelecek nesil fizikçiler için yeni zorluklar sunacak.

SÖZLÜK

Abelci ve Abelci olmayan gruplar: 19. yüzyılda Norveçli matematikçi Niels Henrik Abel'den ismini alan bu gruplar yer değiştirme [komütasyon] özelliğini korurlar; bir matematiksel işlem elemanların sırasına bağlı değildir [örneğin, (A × b) = (b × a)]. Abelci olmayan gruplar bu kuralı tatmin etmez; bir işlemde elemanları yer değiştirdiğinde aynı sonucu vermez.

Alan: Kütleçekimdeki kütleli cisimler ile elektromanyetizma içindeki elektrik yükleri arasındaki kuvvetleri tanımlayan fiziksel bir terim; Michael Faraday manyetik iletkenlerle çalışırken alan kavramını keşfetti.

Anot: bir hücre, pil ya da bir elektrik akımı olan cihazda, anot pozitiftir. Yüklü elektrot, negatif yüklü iyonları, çoğunlukla elektronları çeker.

ATLAS ve CMS dedektörleri: Büyük hadron çarpışmasında (LHC) dört büyük dedektörden ikisi

ATLAS (toroidal bir LHC cihazı) ve CMS (kompakt muon solenoidi) proton demetlerinin çarpışmalarından ortaya çıkan yeni parçacıkları saptarlar.

Ayar bozonu: Parçacık fiziğinin standart modelinde elektromanyetik etkileşimin taşıyıcısı olan foton gibi bir kuvvet taşıyıcısı. W ve Z bozonları zayıf etkileşimin, gluonlar ise yeğin etkileşimin taşıyıcılarıdır.

Ayar değişmezliği: Elektromanyetizma, ayar dönüşümleri ile ilişkili, skaler ve vektör potansiyel sınıfının aynı elektrik ve manyetik alanları koruduğu özellik. Maxwell'in alan denklemleri, elektrik alanı ve manyetik alanın bir skaler alanının türevi (skalar potansiyel) ve bir vektör alanı (vektör potansiyeli) açısından ifade edilebileceği şekilde bulunur. Ayardeğişmezliği, abelci olmayan Yang-Mills alanları ve kütleçekim alanları gibi daha genel kuramlara genişletilmiştir.

Bağlanma sabiti: parçacıklar veya alanlar arasındaki etkileşimin şiddeti. Elektrik yükü ve Newton'un kütleçekim sabiti, bağlanma sabitleridir.

Bağlanma şiddeti: parçacıklar arasındaki etkileşimde uygulanan kuvvetin şiddeti.

Baryon: Proton ve nötron gibi üç kuarktan oluşan atom altı bir parçacık.

Beta bozunumu: Bir atom çekirdeğinin elektron veya pozitron yayarak, çekirdeğin optimum proton ve nötron oranını aldığı bir radyoaktif bozunma. Beta bozunmasına zayıf kuvvet aracılık eder.

Boşluk beklenti değeri: Kuantum alan kuramında, bir alan işlemcisinin boşluktaki ortalama kuantum değeri.

Boşluk kozmolojisi: Standart Lambda CDM kozmolojisine alternatif, galaksiler şeklinde maddeyle çevrili geniş bir kozmik boşluk içinde yaşadığımız bir alternatif model. Modelin basit bir versiyonunda boşluk, Einstein'ın alan denklemlerinin tam Lemaitre-Tolman-Bondi kozmolojik çözümü tarafından tanımlanan, küresel olarak simetrik bir "kabarcık" tır. Mevcut kozmolojik verilerle iyi bir görüş birliği içinde olan bu model, karanlık enerjinin varlığını veya evrenin hızlandırılmış bir genişlemesini varsaymamaktadır.

Boşluk: Kuantum mekaniğinde parçacık fiziğinin boşluk durumuna karşılık gelen en düşük enerji hali. Modern kuantum alan kuramında, parçacıkların ve karşı parçacıkların yaratılması ve yok edilmesi ile mükemmel bir denge halidir.

Bozon: Fermiyonlar arasındaki kuvvetleri taşıyan fotonlar, mezonlar ve gravitonlar gibi tamsayı spinli parçacık.

Bulut odası: Yüklü bir parçacık etkileşime girdiğinde iyonize olan aşırı doymamış su veya alkol buharıyla doldurulmuş kapalı bir kap; Bir iyon, etrafında bir sis oluştuğu yoğunlaştırma çekirdeği gibi davranır ve parçacık izinin algılanmasına izin verir.

Büyük Elektron Pozitron (LEP) çarpıştırıcısı: İsviçre ve Fransa sınırını aşan bir tünel içinde inşa edilmiş, CERN'deki çok uluslu, dairesel bir çarpıştırıcı; 1989'dan 2000 yılına kadar faaliyet gösteren LEP, şimdiye kadar inşa edilmiş en büyük lepton hızlandırıcısıydı ve 2000 yılına kadar 209 GeV kütle merkezi enerjisine ulaşmıştı.

Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (LHC): 1998 yılından 2008 yılına kadar CERN'de eski LEP dairesel tünelini kullanarak inşa edilen, dünyanın en büyük yüksek enerji hızlandırıcısı. Yaklaşık 100 ülkeden 10.000'den fazla bilim insanı ve mühendisinin işbirliğiyle, Cenevre'nin yakınındaki Fransız-İsviçre sınırının 100 metre altında inşa edilmiştir ve çevresi 27 km'dir.

Büyük Patlama Kuramı: Evrenin, enerjinin çok yoğun olduğu sonsuz küçük bir uzayzaman noktasından kaynaklandığı kuramı.

Cooper çiftleri (elektronlar için): Düşük sıcaklıkta birlikte bağlanan iki elektron. 1957'de Bardeen, Cooper ve Schiefer'in geliştirdikleri düşük sıcaklıkta süperiletkenlik kuramının (BCS) temelini oluşturur. Bu üçlü 1972 Nobel Ödülünü paylaştılar.

Coulomb kuvveti: 1785 yılında Fransız fizikçi Charles Augustin de Coulomb tarafından keşfedilen elektrik yüklü parçacıklar arasındaki elektrostatik ters kare etkileşim.

Çarpıştırıcı: Yönlendirilmiş ışını parçacıklarının durağan bir hedefe çarptığı veya parçacıkların iki ışın demeti olarak kafa kafaya çarpıştığı hızlandırıcı; Çarpıştırıcılarda, ışın demetlerindeki parçacıklar çarpışmadan önce çok yüksek kinetik enerjilere hızlanırlar.

Çıplak kütle: Diğer parçacıklarla ve alanlarıyla etkileşim olmadığında bir parçacığın kütlesi.

Çoklu Evren: İçinde yaşadığımız evren de dahil olmak üzere varsayımsal bir sonlu veya sonsuz evrenler kümesi; şu anda parçacık fiziğinde parametrelerin ve sabitlerin hesaplanmasında ince ayar yapılmasına izin veren bir paradigma olarak kabul edilmektedir ve insancıl ilke ile yakından ilişkilidir.

Dalgaların fazı: Sinüzoidal bir fonksiyonun başlangıç açısı, *faz farkı* (eş zamanlılık farkı) olarak adlandırılır; bu durum, orijinine göre ilerleyen bir dalga döngüsünün kesirli değeri anlamına gelir.

Değişken Işık Hızı (VSL) kozmolojisi: Şişme modeline alternatif olarak, evrenin başlangıcında ışığın bugünkü hızından çok daha hızlı olduğunu varsayan bir kuram. Bu kuram da standart Büyük Patlama modelindeki ufuk ve düzlük problemlerini çözer.

Dirac denklemi: 1928'de Paul Dirac tarafından formüle edilen, hem kuantum mekaniği hem de özel görelilik kuramıyla tu-

tarlı olan bir dalga denklemi. Elektronlar gibi temel spin-½ parçacıkların kuantum fiziğini tanımlar ve Einstein'ın genel göreliliğinin bükülmüş uzayzamanına uygulanması için genelleştirilebilir. Dalga denklemi aynı zamanda pozitron gibi karşı-madde parçacıklarının varlığını öngörmüştür.

Dönme değişmezliği: Fiziksel sistemin ortamda nasıl yönlendirildiğine bakılmaksızın aynı davranışı göstermesi. Bir sistemin eylemi (Lagrange denkleminin zamana bağlı integrali) dönmeler altında değişmezse, o zaman Noether'in kuramı açısal momentumun korunduğunu gösterir.

Elektro zayıf kuram: Parçacıkların elektromanyetik ve zayıf etkileşimlerinin birleşik tanımı. Düşük enerjilerde farklı kuvvetler gibi görünse de, birleştirici enerjinin (246 GeV) üzerinde birleşirler.

Elektromanyetizma: Doğanın dört temel kuvvetinden biri, diğerleri kütleçekim, zayıf etkileşim (radyoaktivite) ve yeğin etkileşimdir. Kuvvet taşıyıcısı olan foton olan elektromanyetik alan, elektron gibi temel parçacıkların elektrik yüküyle etkileşir.

Enerji eşiği: Parçacık fiziğinde hesaplamalarında, sonsuz sayıda miktarı sınırlandırmak için seçilen azami enerji, momentum veya uzunluk değeri.

Esir (ya da eter): Yüzyıllarca, enerji ve maddenin içinde yer aldığı düşünülen, boşluktan daha fazla, havadan daha az yoğun ortam. Kökeni Yunanca "cevher" kavramına dayanır. 19. yüzyılın sonlarında Michelson-Morley deneyi, esir varsayımını çürüttü.

Eylem denklemi: Lagrange denkleminin zaman içindeki integrali, ancak alanlara uygulandığında uzay değişkenleri üzerinde de entegre olabilir. Açısal momentum birimine sahiptir.

Femtobarn: Barn ölçü biriminin 10^{-28} m^2'ye eşit olduğu kesit alanının bir birimi,.Milibarn (mb), 10^{-31} m^2'ye eşittir ve bir femtobarn (fb) 10^{-43} m^2'ye eşittir.

Fermiyon: Elektronlar gibi maddeyi oluşturan yarı tam sayılı spin değerine sahip bir parçacık.

Foton: elektromanyetik dalgaların enerjisini taşıyan kuantum parçacığıdır. Fotonun spini, h Planck sabitinin 1 katıdır.

Geiger sayacı: Alfa parçacıkları, beta parçacıkları veya atom çekirdeği ile gama ışınları gibi iyonlaştırıcı radyasyonu ölçen bir parçacık detektörü.

Genel görelilik: 1916'da özel görelilik kuramının matematiksel bir genellemesinden ortaya çıkan Einstein'ın devrimci kütleçekim kuramı. Bu kuram kütleçekim kavramını Newton'un evrensel kuvvetinden, madde ve enerjinin varlığında uzay zaman geometrisinin bükülmesine dönüştürmüştür.

GeV: bir milyar elektron voltuna eşit bir enerji birimi veya bir giga elektron voltajı.

Gluon: Kukarkları hadronlara bağlayan yeğin kuvvetin taşıyıcı parçacığı. Elektromanyetik kuvveti iki elektrik yüklü parçacıklar arasında taşıyan fotonlara benzer şekilde, gluonlar kuraklar arasında yeğin kuvveti taşırlar.

Graviton: Kütleçekim enerjisinin varsayımsal en küçük paketi; elektromanyetik enerjinin fotonuyla karşılaştırılabilir. Graviton henüz deneysel olarak saptanmamıştır.

Grup (matematikte): Soyut cebirde, belirli aksiyomları karşılayan ikili bir işleme uyan bir küme. Örneğin, tam sayı toplama özelliği bir grup oluşturur. Grupları inceleyen matematik dalına grup kuramı denir.

Hadron: Yeğin kuvvetler tarafından birbirine bağlanan kuarklardan oluşan bir parçacık. İki çeşit hadron vardır: üç kuarktan oluşan proton ve nötron gibi baryonlar ve bir kuark ile bir karşı-kuarktan meydana gelen pion gibi mezonlar. Hadrós Yunanca "kabaca" veya "kalın" anlamına gelir.

Hızlandırıcı: Yüklü parçacıkları elektromanyetik alanlar kullanarak yüksek hızda hızlandıran bir makine. Aynı zamanda çarpıştırıcı olarak da bilinir.

Higgs alanı: Standart modelin bilinen temel parçacıklarına kütle kazandırmak için kuramsal olarak ortaya atılan Higgs bozonuyla ilişkili alan.

Higgs parçacığı: 1964'te Peter Higgs tarafından temel parçacık olarak kurgulanan bozon. Keşfi 4 Temmuz 2012'de ilan edildi ve 14 Mart 2013'te daha emin bir şekilde doğrulandı. Bu parçacık standart modelde kilit rol oynamaktadır.

İnce ayar: Fiziksel bir olguyu açıklamaya çalışırken, saçma sayıdaki ondalık basamak içeren iki veya daha fazla sayının doğal olmayan bir şekilde birbirini götürmesi; Bu, fiziksel olgunun tam olarak anlaşılamadığını gösterir.

İnsancıl [Antropik] ilke: Evrendeki varlığımızın evrenin özellikleri üzerinde kısıtlamalar getirdiği fikri. Bu fikrin aşırı bir versiyonu, varlığımızı bu ilkeye borçlu olduğumuzu iddia eder.

İzotopik spin veya izospin: 1932'de Werner Heisenberg tarafından yeni keşfedilen nötronun özelliklerini açıklamak için önerilmiş olan kuvvetli etkileşimle ilişkili bir kuantum sayısıdır. Buna göre farklı yükleri olan parçacıklar yeğin kuvvetle eşit şekilde etkileşebilirler ve izospin grubu içinde aynı parçacığın farklı durumları olarak ele alınabilirler. Fiziksel birim olarak, izospin boyutsuz bir niceliktir; başka bir deyişle, açısal momentum veya spin birimleri yoktur, ancak spini betimleyen matematik benzerdir.

K mezonu (K* mezonu): Acayiplik kuantum sayısına sahip sahte-skaler (K spin 0) veya sahte-vektörel mezonlar (K * spin 1) sınıfındaki temel bir parçacık. Bir acayip kuark (veya karşı-kuark) ile yukarı veya aşağı kuark (veya karşı-kuark) arasında bağlı bir durumdur.

Kabarcık odası: Sıvı hidrojen gibi aşırı ısınmış bir sıvı içeren, elektrik yüklü parçacıkların izlenmesine ve algılanmasına izin veren kabarcıklar üreten bir oda. Kabarcık odası 1952'de Donald Glaser tarafından icat edildi.

Kara cisim: Ona çarpan tüm elektromanyetik radyasyonu emen ve yüzde yüz verimlilik ile tüm frekanslarda radyasyon yayan cisim.

Kara enerji: Evrenin hızlanarak genişlemesiyle ilgili verileri açıklamak ortaya atılmış, negatif basınçlı vakum enerjisi ve Einstein'ın kozmolojik sabitesi ile ilişkilendirilmiş gizemli bir enerji türü. Kozmolojinin standart modeline göre, evrene eşit olarak yayılmış olan kara enerji, evrenin toplam kütle ve enerji içeriğinin yaklaşık yüzde 70'ini oluşturur.

Kara madde: Evrendeki toplam maddenin yaklaşık yüzde 25'ini temsil eden görünmez, henüz keşfedilmemiş, bilinmeyen madde parçacıkları. Standart modele göre; Newton ve Einstein'ın kütleçekim kuramları, galaksi kümelerinde öngörüldüğünden daha şiddetli bir kütleçekim etkisi gösteren kozmolojinin verilerini açıklayabilmek için kara maddenin varlığı gereklidir. Kara madde ve kara enerji, evrendeki maddenin ve enerjinin yüzde 96'sının görünmez olduğu anlamına gelir.

Karşı-madde parçacıkları: Zıt kuantum sayılarına sahip parçacıklar. 1928'de Paul Dirac tarafından öngörülen, 1932'de Carl Anderson tarafından keşfedilen ilk karşımadde parçacıkları pozitronlardı (pozitif yüklü elektronlar).

Katot: Bir elektrik cihazından akımın aktığı negatif yüklü bir elektrot; Bkz. Anot.

Kendiliğinden simetri kırılması: Simetrik bir durumun asimetrik bir hale gelmesi; örneğin, hareket denklemleri veya fiziksel bir sistemin Lagrange denklemi, dönme simetrisine uyarken, hareket denklemlerinin en düşük enerji veya taban durum bu simetriye sahip değildir; kendiliğinden simetri kırma, standart modeldeki elektro-zayıf kuramında önemli bir rol oynamaktadır.

Kinetik enerji: Bir parçacığın hareket enerjisidir. Kütleli bir parçacığı durgun halden belirli bir hıza kadar hızlandırmak için gereken iş olarak tanımlanmıştır.

Kozmik boşluk: Evrende, çok az sayıda galaksi içeren veya hiç galaksi içermeyen madde filamentleri arasındaki geniş, boş bir alan.

Kozmik ışınlar: Güneş sisteminin dışında ortaya çıkan ve atmosfere nüfuz eden çok yüksek enerjili parçacıklar; Bunlar çoğunlukla ikincil parçacıkların oluşturduğu protonlar ve atom çekirdeğinden oluşur; Fermi uzay teleskobundan elde edilen son veriler, kozmik ışınların öncelikle büyük yıldızların süpernovasından kaynaklandığını gösteriyor.

Kozmik mikrodalga ardalanı (CMB): Büyük Patlama kuramının ilk önemli kanıtı. Kozmik mikrodalga ardalanı başlangıçta 1964'te bulunmuş, daha sonra 1989'da ve 2000'lerin başında NASA ekipleri tarafından daha hassas olarak ölçülmüştür. CMB gökyüzünün her yerinden aynı dalga boyunda gelir ve Büyük Patlamanın ışınımını temsil eder. Büyük Patlamadan yaklaşık 400.000 yıl sonra ortaya çıkan kızıl-altı ışınım, 14 milyar yıllık genişleme süresince kırmızıya kayarak elektromanyetik spektrumun mikrodalga bölümüne yerleşir ve erken evren hakkında çok sayıda bilgiyi ortaya koyar.

Kozmolojik sabit: Einstein'ın evreni durağan ve sonsuz tutmak için 1917'de kütleçekim alanı denklemlerine eklediği matematiksel bir terim. Daha sonra pişman olmasına ve bunu "en büyük hatası" olarak adlandırmasına rağmen, bugün kozmologlar kozmolojik sabiti hala kullanıyor ve bazıları gizemli kara enerjiyle özdeş olduğunu ileri sürüyorlar.

Kuantum alan kuramı: Temel parçacıkların fiziğini tanımlamak için kullanılan kuantum mekaniğinin modern göreli

versiyonu. Aynı zamanda, yoğun madde fiziğinde göreli olmayan alan benzeri sistemlerde de kullanılabilir.

Kuantum elektrodinamiği (QED): yüklü parçacıkların fotonlarla kuantum seviyesinde nasıl etkileşime girdiğini anlatan elektromanyetik alanların göreli kuantum alan kuramı. QED, elektronun anormal manyetik momenti ve hidrojen düzeyinin Kırmızıya kayması gibi son derece doğru öngörülerde bulunur.

Kuantum mekaniği: Kuantum paketi (ışınım) ve madde arasındaki etkileşim kuramı. Kuantum mekaniğinin etkileri, atom ve parçacık fiziğinin atom-altı uzaklık ölçeklerinde gözlenebilir hale gelir, ancak makroskopik kuantum etkileri kuantum dolanıklığında da görülebilir.

Kuantum renk dinamiği (QCD): Yeğin etkileşimli renk kuvveti kuramı, hadronları oluşturan kuarklar ve gluonlar arasındaki etkileşimleri tanımlar; QCD, renkli gluon alanları ve hapsedilmiş kuarklardan oluşan, abelci olmayan SU(3) Yang-Mills ayar kuramı tarafından tanımlanmaktadır.

Kuantum spin: temel bir parçacığın içsel kuantum açısal momentumu; uzayda bir nokta etrafında dönen bir cismin klasik yörünge açısal momentumunun aksine bir durum sergiler.

Kuark hapsi: Renk yüklü kuarkların, serbest parçacıklar halinde oluşmadığı için doğrudan gözlemlenmediği olgusu. Kuarklar hadronlar içinde hapsolmuşlardır. üç kuark içeren baryonlara veya iki kuark içeren mezonlara (bir kuark ve bir karşı-kuark) hadron denir.

Kuark-gluon plazması: Evrenin başlangıcında olduğu gibi son derece yüksek sıcaklık ve yoğunlukta bulunan kuantum renk dinamik fazı.

Kuark: Yeğin nükleer kuvvetle etkileşen tüm parçacıkların temel bileşeni. Kuarklar spin-½, kesirli olarak yüklenir ve "çeşniler" denen durumlarda ortaya çıkarlar; yukarı, aşağı, tılsım, acayip, üst ve alt isimlendirmeleriyle adlandırılır. En hafif kuark yukarı kuraktır. Renk yükleri nedeniyle, protonlar ve nötronlar gibi parçacıklar içinde tutulurlar, bu yüzden serbest parçacıklar olarak algılanamazlar. Kuarklar, leptonlar gibi, üç aile oluştururlar.

Kütle ölçeği: Parçacık kuvvetinin özelliklerini aldığı parçacık fiziğindeki kütle veya enerji ölçeği. Örneğin, $1{,}22 \times 10^{19}$ GeV

(Planck kütlesi, $2{,}18 \times 10^{-8}$ kg) Planck enerjisi (kütle) ölçeğinde kütleçekiminin kuantum etkilerinin baskın olması beklenir.

Kütleçekim: İlk olarak Isaac Newton tarafından ifade edilen evrensel çekim kuvveti. Bu kuvvet, cisimlerin birbirlerini kütleleriyle orantılı aralarındaki mesafenin karesiyle ters orantılı olarak çekmelerini ifade eder. Einstein'ın genel görelilik kuramıysa kütleçekimi, uzayzamanın maddenin eğriliği olarak tanımlar. Kütleçekim bilinen dört temel kuvvetin en zayıf olanıdır.

Lagrange denklemi: Fiziksel bir sistemin dinamiklerini tanımlayan fonksiyon. Klasik mekaniği yeniden formüle eden Fransız matematikçi Joseph Louis Lagrange'ın adını almıştır.

Lepton: Yeğin etkileşime girmeyen ve Pauli dışarlama ilkesini sağlayan spin ½ olan temel bir parçacık. Başka bir deyişle hiçbir iki lepton aynı kuantum durumu işgal edemez. Elektron, muon ve tau leptonları elektrik yüküne sahipken, nötrinolar elektriksel olarak yüksüzdür. Elektron atomların kimyasal özelliklerini belirler. Üç aile kuarkların eşleştiği üç aileye sahip leptonların toplam altı çeşnisi vardır.

Lorentz değişmezliği: Bir eylemsizlik çerçevesinden diğerine Lorentz dönüşümü altında fiziksel yasaların değişmezliği.

Lorentz dönüşümleri: Bir eylemsizlik çerçevesine göre düzgün hızlanan bir hızla başka bir eylemsizlik çerçevesine geçerken fizik yasalarının aynı kalmasını sağlayan matematiksel dönüşümler. Bunları 1904 yılında geliştiren Hendrik Lorentz'in ismiyle adlandırılan bu dönüşümler, özel göreliliğin altında yatan temel matematik denklemlerini oluşturmaktadır.

Matris: Matematikte, satırlar ve sütunlar halinde düzenlenmiş sayılar gibi dikdörtgen şeklinde bir sembol dizisi.

Mezon: Atom çekirdeğinde protonları ve nötronları birbirine bağladığı düşünülen kuark ve karşı-kuarkdan oluşan kısa ömürlü bir bozon.

Michelson-Morley deneyi: 1887'de Albert Michelson ve Edward Morley tarafından yapılan bir deney, esirin [eterin] var olmadığını kanıtladı. Birbirine dik yönde giden ışık demetleri, esir olarak tanımlanan ortamda hızlarında veya varış zamanlarında farklılık göstermedi.

Minkowski ışık konisi: Tekil bir olaydan yayılan ışığın dört boyutlu uzayzaman (üç uzay boyutu ve bir zaman boyutu)

boyunca izleyeceği yol; iki boyutlu bir düzlemle sınırlandırılmış ışık, E'den bir daire içinde yayılır. Büyüyen dairenin grafiğini dikey eksen zamanı ve yatay eksen uzayı temsil edecek şekilde çizersek, yayılan ışık iki koni oluşturur, bunlardan biri geçmiş ışık konisi, diğeri gelecekteki ışık konisi olarak isimlendirilir. Konilerin kenarları c hızında hareket eden ışığı temsil eder ve kütleli parçacıklar içlerinden geçemez, çünkü özel görelilikte hiçbir parçacık ışık hızından daha hızlı hareket edemez.

MOG: Einstein'ın genel göreliliğini genelleştiren ve egzotik karanlık madde olmaksızın astronomik ve kozmolojik verilere uyabilen göreli, değiştirilmiş bir kütleçekim kuramı; MOG "modifiye kütleçekimi" anlamına gelir.

Muon: Yunanca harfi mu (μ), spin-½ elektrona benzeyen dengesiz bir temel parçacık. Nötrino ve tau ile birlikte lepton ailesine aittir

Nötralino: Popüler bir karanlık madde parçacığı adayı olan süper simetri tarafından var olacağı tahmin edilen varsayımsal bir parçacık; elektriksel olarak nötr fermiyonlar olan ve en hafifi kararlı olan dört nötralino vardır.

Noether Kuramı: Fiziksel bir sistemin eyleminin herhangi bir simetrisinin ilişkili korunum yasasına sahip olduğunu belirten bir matematik kuramı. Örneğin, hareketin dönme değişmezliği açısal momentumun korunmasına yol açar. Kuram, 1918'de Alman matematikçi Emmy Noether tarafından yayımlandı.

Nötrino: sıfır elektrik yüklü ve henüz tam olarak ölçülmemiş çok küçük kütleli bir temel parçacık; tespit etmek çok zordur, radyoaktif bozulmalar sonucunda var olur ve maddeyi neredeyse hiç etkileşime girmeden içinden geçebilir. Nötrinoların üç çeşnisi vardır: elektron, muon ve tau neutrino (ν_e, ν_μ ve ν_τ).

Nötron: atom çekirdeğinde bulunan ve protonla neredeyse aynı kütleye sahip olan elektriksel olarak nötr bir parçacık.

Özdeşlik: Matematikte, sayıları veya değişkenleri içeren A ve B'nin eşitlik ilişkisi A = B. Bu eşitlik, A ve B'yi oluşturan fonksiyonların tüm değerleri için doğru olduğunda bir özdeşlik oluşturur. Cebirde *S* kümesi içindeki *e* özdeşlik elemanı, herhangi bir başka elemanla birleştirildiğinde, *S*'deki tüm *x* için $ex = xe = x$'i verir.

Özel görelilik: Einstein'ın 1905'te yayınlanan ve fizik yasalarını, düzgün hareket eden eylemsiz bir referans çerçevesinden diğerine, dönüştürmenin "özel" durumunu araştırdığı ilk görelilik kuramı. Kütleçekimini veya hızlandırılmış referans çerçevelerini içermediği için "özel" ismini verdi. Özel görelilik denklemleri; ışığın hızının sabit olduğunu, nesnelerin ışığın hızına yaklaştığında hareket yönünde daralmış göründüğü, ve $E = mc^2$ veya enerjinin; cismin hızının karesiyle kütlesinin çarpımına eşit olduğu şeklinde ortaya çıkmaktadır.

Parçacık fiziğinin standart modeli: Bilinen kuarkların, leptonların ve ayar bozonlarının dinamiklerine ve Higgs bozonuna dayanan elektromanyetik, zayıf ve yeğin etkileşimlerin bir modeli; 20. yüzyılın ortalarından sonlarına doğru pek çok parçacık kuramcısının ve deneycisinin ortak çalışmasına dayalı bir çabayla geliştirilen kuram, çok çeşitli deneyleri açıklamakta başarılı olmuştur.

Parite: Uzayda ters çevirme (ayna simetrisi) altında parçacıkların simetri özelliği.

Parlaklık (luminozite): Astronomide, bir astronomik cisim tarafından birim zamanda yayınlanan toplam enerji miktarı. Parçacık hızlandırıcılarında, hedef tesir kesitlerdeki birim alan başına çarpışmaların zaman içindeki sayısı; Çarpışma sayısı, parlaklığın zamana bağlı integrali ile tesir kesitinin çarpımı olarak hesaplanabilir. LHC'de, belli bir zaman periyodu için ters femtobaralar olarak ölçülür.

Pi mezon (pion): en hafif, kararsız spin-0 sahte-skaler (negatif pariteli) mezondur. Pozitif yüklü pion, yukarı bir kuark ve karşı aşağı kuraktan oluşur

Planck kütlesi veya enerjisi: *G*, *c* ve *h*'den oluşan ve bir kütle veya enerji birimi olarak ifade edilen Planck sabiti.

Planck sabiti (*h*): kuantum mekaniğinde önemli bir rol oynayan, foton gibi enerji kuantum paketlerinin boyutunu belirleyen temel bir sabit. Kuantum mekaniğinin kurucularından olan Max Planck'a ithafen isimlendirilmiştir; *h*, 2 π 'ye bölünmüş olarak '*h*-bar'a eşit durumda sembolü ħ halini alır, kuantum mekaniksel hesaplamalarda kullanılır.

Planck uzunluğu: ilk defa Max Planck tarafından tanımlanan, 1,616199 (97) x 10^{-35} m'ye eşit sabit uzunluk birimi; üç temel sabit kullanılarak tanımlanır: kütleçekimi sabiti G, boşluktaki ışık hızı *c* ve Planck sabiti *h*.

Potansiyel enerji: Kütleçekiminde, bir parçacığın yüksek bir konumda tutulduğu zaman depolanan enerjisi. Elektromanyetizma gibi diğer kuvvet alanları da potansiyel enerjiye sahiptir.

Pozitron: Pozitif elektrik yük ve spin ½ ile elektronun karşı parçacığı. Elektron ile aynı kütleye sahip kararlı bir parçacıktır.

Proton: pozitif bir elektrik yükü taşıyan ve bir hidrojen atomunun çekirdeğinde olan parçacık; iki yukarı kuark ve bir aşağı kuarktan oluşan bir spin-½ hadrondur.

Renk yükü: Kuarkların ve glukonların taşıdıkları bir yük; kuarkların proton ve nötron gibi hadronlar içinde nasıl hapsedildiğini açıklar. Üç renk yükünü (kırmızı, yeşil ve mavi) birleştirerek ortaya çıkan hadronlar renk yükleri olarak beyaz gösterir. Renk yükü aynı zamanda Pauli'nin dışlama ilkesini ihlal etmeden üç spin-½ kuarkın bir proton içinde aynı kuantum durumunda olabileceğini de açıklar. Kuarkları gluon değiş tokuşuyla birbirine bağlayan yeğin bir renk kuvveti alanı oluşur ve kuarklar birbirlerinden uzaklaştıkça bu alanın şiddeti artar.

S-matrisi: Saçılma işleminin başlangıç ve son durumlarını birleştiren, teknik olarak birim matris olarak tanımlanan bir matematiksel gösterim, fiziksel durumların Hilbert uzayında asimtotik (sonsuza ıraksayan) parçacık durumları ile ilgili bir gösterimdir.

Sahte skaler: bir parçacığın uzamsal parite tersinmesi [ayna simetrisi dönüşümü] altında işaretini değiştiren özelliği; işaretini değiştirmeyen bir parçacığın skaler özelliğinin aksine bir niteliktir.

Senkrotron: Parçacıkları kapalı bir yola büken yönlendirici manyetik alanın zamana bağlı olduğu ve artan kinetik enerjili bir parçacık ışınıyla senkronize olduğu, siklotrondan geliştirilen bir tür parçacık hızlandırıcısı. Genellikle yüksek enerjili çarpıştırıcılarda ilk hızlandırıcı senkrotrondur.

Serbestlik derecesi: Fiziksel bir sistemin yapılandırılmasını tanımlayan bağımsız bir parametredir.

Sicim kuramı: Maddenin en küçük birimlerinin; noktasal parçacıklar değil, titreşen sicimler olduğu fikrine dayanan bir kuram. Birkaç on yıl boyunca fizikte popüler bir araştırma peşinde koşan bilimcilerin tuttuğu bir kuram olmuştur. Si-

cim kuramı bazı cazip matematiksel özelliklere sahiptir, ancak henüz test edilebilir bir öngörüde bulunamamıştır.

Simetri grubu: Matematiksel olarak, bir cismin değişmez olduğu tüm izometrilerin (iki geometrik şeklin eşlik ettiği) grubu.

Simetri kırılması: Doğada bir fiziksel sistemin simetrisinin kırılması. İki tür simetri kırılması vardır: İlki açıkça bir sistemin fiziksel yasalarının, bir dizi dönüşüm tarafından üretilen bir simetri altında değiştiği simetri kırılması, ikincisiyse kendiliğinden simetri kırılması. İkincisinde belirli bir dönüşüm seti altında fiziksel yasaları değişmez olduğu halde, boşluk durumunda veya en düşük enerji durumunda değişmez değildir.

Skaler alan: Uzayda bir yönü olan vektör alanının aksine sıcaklık, yoğunluk ve basınç gibi uzayda her noktaya yön tayin etmeden bir değer ilişkilendiren fiziksel bir terim. Newton fiziğinde veya elektrostatikte potansiyel enerji bir skaler alan, eğimiyse vektör kuvveti alanıdır. Kuantum alan kuramında, bir skaler alan, spin sıfırlı bir bozon parçacığını tanımlar.

Spin: bkz. Kuantum spin.

Standart sapma: İstatistikte ve olasılık kuramında sigma (σ) sembolü ile temsil edilen, deneysel sonucun ortalama veya ortalama değerinden ne kadar saptığını belirtir.

Süper Kütleçekim: Kütleçekim (genel görelilik) ile süper simetriyi birleştiren bir alan kuramı. Bir kuantum parçacığına sahip spin-2 alanı, süper simetri taleplerinin spin 3/2 olan bir süper eşleniği olan graviton, gravitino olarak adlandırılan kütleçekimi içerir.

Süper sicim kuramı: Doğanın dört temel kuvvetini süper simetrik bir çerçevede bozonları içerdiği gibi fermiyonları da içeren, sicim kuramının bir versiyonunda birleştirmeye yönelik bir girişim. İçinde parçacıklar küçük titreşimli sicimler olarak modellenmiştir.

Süperiletkenlik: Bazı malzemelerdeki kritik sıcaklığın altına soğutulma sonucu manyetik alanların uzaklaştırılması ve sıfır elektrik direncine ulaşılması. 1911'de Hollandalı fizikçi Heike Kamerlingh Onnes tarafından keşfedilen bir kuantum mekanik olgusudur. Kuramsal açıklaması 1957'de Bardeen, Cooper ve Schrieffer tarafından yapıldı.

Süpersimetri: 1970'lerde savunucularının iddia ettiği gibi, parçacık fiziğinin en temel uzayzaman simetrisini tanımlayan

bir kuram: her bozon parçacığı için bir supersimetrik fermiyon eşlenik ve her fermiyon için bir süpersimetrik bozon eşlenik vardır. Ancak bugüne kadar hiçbir süpersimetrik parçacık eşlenik tespit edilmemiştir.

Sürüklenme haznesi (tel odası): Yüklü bir parçacık gazla (örneğin, bir argon-metan karışımı) dolu bir ortamdan geçerken, kendisini çevreleyen atomları iyonlaştırır ve ortaya çıkan bu iyonlar (ya da elektronlar) elektrik alanıyla hızlandırılarak elektrik sinyali yaratırlar. Bunların sayısı geçen parçacığın enerjisiyle orantılı olduğundan bu cihazlara oransal sayaçlar da denir.

Şişme: Standart Büyük Patlama modelindeki düzlük, ufuk ve homojenlik problemlerini çözmek için Alan Guth ve diğerleri tarafından 1980'lerin başında önerilen bir kuram. Şişme kuramına göre çok erken evren, saniyenin çok küçük bir kesirinde üssel olarak hızlı şekilde genişlemiştir.

Tedirgenme Kuramı: Tam olarak çözülemeyen bir denklemin yaklaşık çözümünü bulmak için matematiksel bir yöntem; ardışık her bir terimin bir önceki terimden daha küçük olduğu bir seride genişletilmesi.

Temel parçacık: Herhangi bir alt yapıya sahip olmayan bir parçacık. Evrendeki maddenin temel yapı taşları olarak kabul edilir.

Ters femtobarn (fb^{-1}): Hedefin tesir kesitinin femtobarn başına parçacık çarpışma olaylarının ölçümü. Zamana bağlı parlaklık [lüminozite] için konvansiyonel birim olarak hizmet eder.

Tesir kesiti: Bir çarpıştırıcıda, parçacık demetinin çarptığı hedefteki malzemenin yüzey alanı.

TeV: bir trilyon elektron volta eşit bir enerji ölçüsü veya $1{,}60217657 \times 10^{-7}$ joule (J), terraelektron volt olarak adlandırılır.

Tevatron hızlandırıcısı: Illinois, Batavia'daki Fermi Ulusal Hızlandırıcı Laboratuvarında (Fermi Lab) bulunan ve CERN'deki büyük hadron çarpışmasının ardından dünyanın ikinci en büyük yüksek hızlandırıcısı olan dairesel bir parçacık hızlandırıcısı. Yaklaşık 1,6 TeV enerjiye çıkmak için 6,86 km'lik bir halkada protonları ve karşı protonları hızlandıran senkrotron, 1983'de tamamlandı ve Eylül 2011'de kapatıldı.

Ufuk problemi: 1960'ların sonlarında Büyük Patlama kozmolojisinin standart modelinde tespit edildi, çünkü erken evrenin

birbirinden ayrık geniş bölgelerinin sıcaklık ve diğer fiziksel özellikleri aynıydı; oysa bu bölgeler birbirleriyle iletişim kuramazdı, çünkü ışık hızı bunlar arasındaki büyük mesafelerde nedensellik bağlantısına yetmiyordu. Ufuk problemini çözmek için şişme kuramı ve ışık kuramının değişken hızı önerilmiştir.

Üniterlik: Bir fiziksel sürecin tüm olasılıklarının toplamının daima bire eşit olduğunu garanti eden bir kuantum sisteminin izin verilen evriminde parçacık fiziğinde bir kısıtlama. Örneğin parçacık saçılımını açıklayan S-matrisi, üniter bir operatör olmalıdır.

Vektör alanı: Kütleçekimi kuvveti alanı veya Maxwell'in alan denklemlerinde elektrik ve manyetik alanlar gibi uzayda yönü olan bir alan.

W ve Z bozonları: Elektro-zayıf kuramının ara vektörü (spin-1) bozonları; W bozonu elektriksel yüklüdür (W^+, W^-) ve 1983'te CERN'de elektriksel açıdan nötr Z bozonuyla birlikte keşfedilmiştir; Hem W hem de Z bozonları çok kısa ömürlüdür, yarı ömrü yaklaşık 3×10^{-25} saniyedir.

Ward özdeşliği: Kuantum alan kuramında ayar değişmezliği tarafından takip edilen ve kuramın yeniden boyutlandırılması sonrasında geçerli olan matematiksel bir özdeşlik. John Ward ve Yasushi Takahashi tarafından geliştirilen ve tedirgenme kuramının tüm düzenlerinde morötesi ıraksamanların birbirini götürmesi için garanti edilen Ward-Takahachi özeşliği olarak da bilinir.

Yeğin kuvvet: Dört temel kuvvetten biridir, yeğin etkileşim (veya nükleer kuvvet) elektromanyetik kuvvete göre yaklaşık 100 kat daha güçlüdür; zayıf ve kütleçekim kuvvetlerinden daha güçlüdür. Nükleer seviyede, bir atomun çekirdeğini oluşturmak üzere protonları ve nötronları birbirine bağlar. Daha küçük bir ölçekte, kuarkları birbirine bağlayarak protonlar ve nötronlar gibi hadronlar oluşturan renkli gluonların aracılık ettiği kuvvettir.

Yeniden Boyutlandırma: Kuantum alan kuramında, hesaplanmış niceliklerde ortaya çıkan sonsuzluklarla başa çıkmada kullanılan bir teknik. Bir elektronun yük ve kütlesinin hesaplanmasında oluşan sonsuzlukları gidermek için kuantum elektrodinamiğinde geliştirilmiştir.

Yerel olmayan: Uzayda birbirinden ayrılmış iki parçacık arasındaki uzaktan etkileşim. Kütleli cisimler arasındaki çekici kuvvetler anlık hareket ettiği için, Newton'un kütleçekim formülasyonu yerel değildir. Kuantum mekaniğinde, Einstein'ın "uzaktan ürkütücü etkileşim" olarak adlandırdığı iki fotonun veya elektronun kuantum dolaşımı yoluyla kayıtsız şartsız hareket etmesi de yerel değildir. Yerel olmayan kuantum alan kuramı sürekli ve sonlu bir kuram olarak formüle edilebilir; ve küçük mesafelerde nedensellik ihlal edilebilir.

Yerellik: Bir parçacığın konum ve momentumunun uzayda bir noktada lokalize edilebileceği kavramı. Standart kuantum alan kuramında yerellik aksiyomu gereği, uzayzamanda ayrılmış iki parçacık etkileşime girmez. Bu, bir parçacığın ışık hızını aşamadığı özel görelilikle uyumludur. Newton'ın kütleçekim formülasyonundaki anlık etkiyen (yerel-olmayan) kuvvetlerin aksine, yüklü parçacıklar arasındaki elektromanyetik kuvvet, etkileşimin yerel olarak gerçekleştiği sonlu bir hızdaki fotonlar tarafından gerçekleşir.

Zayıf etkileşim ya da zayıf kuvvet: doğanın dört temel kuvvetinden biri olan bu etkileşim, çekirdeğin radyoaktif bozunumu ve nükleer füzyonun nedenini oluşturmaktadır. Zayıf ve elektromanyetik etkileşimler, standart modelin elektro-zayıf kuramında birleşmiştir.

İLERİ OKUMALAR

Aczel, Amir D. *Present at the Creation: The Story of CERN and the Large Hadron Collider*. New York: Crown Yayıncılık, 2010.

Baggott, Jim. *The Quantum Story: A History in 40 Moments*. New York: Oxford Üniversitesi Yayınları, 2011.

Baggott, Jim. *Higgs: The Invention & Discovery of the "God Particle."* Oxford: Oxford Üniversitesi Yayınları, 2012.

Carroll, Sean. *The Particle at the End of the Universe: How the Hunt for the Higgs Boson Leads Us to the Edge of a New World*. New York: Dutton (Penguin Group), 2012.

Close, Frank. *Particle Physics: A Very Short Introduction*. New York: Oxford Üniversitesi Yayınları, 2004.

Close, Frank. *The New Cosmic Onion: Quarks and the Nature of the Universe*. New York: Taylor & Francis, 2007.

Close, Frank. *The Infinity Puzzle: How the Hunt to Understand the Universe Led to Extraordinary Science, High Politics, and the Large Hadron Collider*. New York: Basic Books, 2011.

Coughlan, Guy D., James E. Dodd ve Ben M. Gripaios. *The Ideas of Particle Physics: An Introduction for Scientists*, 3rd ed. New York: Cambridge Üniversitesi Yayınları, 2006.

Cox, Brian ve Jeff Forshaw. *The Quantum Universe (and Why Anything That Can Happen, Does)*. Boston, MA: Da Capo yayınları (Perseus Books Group), 2011.

Crease, Robert P. ve Charles C. Mann. *The Second Creation: Makers of the Revolution in Twentieth-Century Physics*, rev. ed. New Brunswick, NJ: Rutgers Üniversitesi Yayınları, 1996.

Fayer, Michael D. *Absolutely Small: How Quantum Theory Explains Our Everyday World*. New York: AMACOM, 2010.

Fritzsch, Harald. *Elementary Particles: Building Blocks of Matter*. Singapore: World Scientific Yayınları, 2005.

Johnson, George. *Strange Beauty: Murray Gell-Mann and the Revolution in Twentieth-Century Physics.* New York: Alfred A. Knopf, 1999.

Krauss, Lawrence M. *Quantum Man: Richard Feynman's Life in Science.* New York: W.W. Norton, 2012.

Kumar, Manjit. *Quantum: Einstein, Bohr, and the Great Debate about the Nature of Reality.* New York: W.W. Norton, 2008.

Lederman, Leon, with Dick Teresi. *The God Particle: If the Universe Is the Answer, What Is the Question?* Boston, MA: Houghton Mifflin, 2006.

Lincoln, Don. *The Quantum Frontier: The Large Hadron Collider.* Baltimore, MD: Johns Hopkins Üniversitesi Yayınları, 2009.

Pickering, Andrew. *Constructing Quarks: A Sociological History of Particle Physics.* Chicago, IL: Chicago Üniversitesi Yayınları, 1984.

Randall, Lisa. *Higgs Discovery: The Power of Empty Space.* New York: HarperCollins, 2013. Sample, Ian. *Massive: The Hunt for the God Particle.* Virgin Digital, 2010.

Schumm, Bruce A. *Deep Down Things: The Breathtaking Beauty of Particle Physics.* Baltimore, MD: Johns Hopkins Üniversitesi Yayınları, 2004.

Veltman, Martinus. *Facts and Mysteries in Elementary Particle Physics.* Singapore: World Scientific Yayınları, 2003.

Weinberg, Steven. *Dreams of a Final Theory: The Search for the Fundamental Laws of Nature.* New York: Pantheon Books, 1992.

Wouk, Herman. *A Hole in Texas.* New York: Little, Brown, 2004.

DİZİN

ABEHHGK mekanizması 139
Abel, Niels Henrik 93,95, 288
Adams, John 84
Adams, Todd 167
Albert Einstein 12, 38, 62, 64, 115, 122
Albrecht, Andreas 193, 270
Altarelli, Guido 16, 122
Anderson, Carl 20, 21, 75, 288
Anderson, Philip 11, 13, 133, 134, 137
Andre Linde 269
Aristoteles 19
Associated Press [haber ajansı] 226
aşağı kuark 27, 295
ATLAS (toroidal LHC aleti) 11, 18, 72, 73, 86, 87, 88, 108, 111, 145, 150, 151, 154, 155, 156, 157, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 215, 217, 220, 221, 222, 223, 225, 226, 227, 228, 230, 231, 234, 236, 242, 245, 246, 251, 252, 253, 254, 272, 275, 276, 277, 278, 281, 282, 283, 284, 285, 286, 288
atom 19, 20, 21, 40, 58, 77, 81, 105, 214, 263, 289, 290, 293, 297, 299

Bardeen, John 134
Bardeen, William 267
Barger, Amy 194
Barrow, John 262
Becchi, Carlo Maria 130
Becquerel, Henri 20, 39
Bethe, Hans 41
Bjorken, James 29, 33, 56
Bohr, Niels 64, 65
Bondi, Herman 262
Born, Max 95
bozonlar 107, 112, 113, 129, 159, 175, 210, 211
Brahe, Tycho 286
Breit, Gregory 23
Brink, Lars 149, 162
Brookhaven Ulusal Laboratuvarı 30
Brout, Robert 12, 13, 137
Brownstein, Joel 195
Büyük Elektron Pozitron çarpıştırıcısı (LEP) 295
Büyük Hadron Çarpıştırıcısı 9, 11, 295
Büyük Patlama 216, 262, 289, 290, 294, 303

Cabibbo–Maksymowicz açıları 282
Canelli, Florencia 167
Carter, Brandon 262
CERN (Avrupa Nükleer Araştırmalar Konseyi) 1, 9, 11, 12, 14,

15, 17, 18, 26, 27, 30, 37, 39, 57, 58, 67, 68, 69, 71, 73, 78, 79, 81, 84, 85, 86, 87, 88, 90, 110, 122, 138, 140, 144, 145, 149, 150, 156, 157, 161, 162, 163, 164, 168, 169, 170, 171, 173, 174, 177, 209, 212, 219, 221, 225, 226, 227, 228, 229, 233, 234, 235, 236, 239, 241, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 250, 252, 253, 254, 272, 274, 279, 280, 281, 295, 302, 303, 305
Chadwick, James 20
Chalmers, Matthew 227
Charpak, Georges 69
Cherenkov, Pavel 65
Cherenkov radyasyonu 65
Chew, Geoffrey 53
Clayton, Michael 204
Cline, David 157, 160, 161, 163
CMS (compact muon solenoid) dedektörü 1, 11, 72, 86, 87, 108, 111, 145, 150, 154, 155, 156, 157, 161, 162, 164, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 215, 217, 220, 221, 222, 223, 225, 226, 227, 228, 229, 231, 234, 236, 242, 244, 245, 246, 251, 252, 253, 254, 272, 273, 274, 275, 276, 278, 279, 281, 282, 285, 286, 288
Cockcroft, John 77
Coleman, Sydney 139, 267
Compton, Arthur 65
Cooper çiftleri 183, 187, 290
Cooper, Leon 134
Cornwall, John 204
Coulomb kuvveti 66, 257, 290
Cowan, Clyde 20
Cowie, Lennox 194
Curie, Pierre ve Marie 39
Curie sıcaklığı 131
Curtwright, Thomas 149
Darwin, Charles 263
de Coulomb, Charles Augustin 291
Demokritos 19
De Roeck, Albert 245
de Rújula, Alvaro 15
DESY (Alman Elektron Senkrotronu) 37, 84
Dicke, Robert 261
Dimopoulos, Savas 183
Dirac denklemi 20, 291
Dirac, Paul 20, 40, 43, 51, 128, 288, 291
Dutta, Valentina 278
Dyson, Freeman 41, 128

Eddington, Arthur 38, 207
Efimov, Gary 200
Eichten, Estia 204, 241
elektrik yükleri 26, 260, 292
elektroskop 75
elektro-zayıf enerji ölçeği 244, 258
Englert, Françoise 137, 149, 159, 162, 229, 233, 234
Evens, Dan 201

Faddeev, Ludvig 130
Faraday, Michael 39, 292
Feinberg, Frank 204
femtobarn 163, 164, 229, 242, 243, 245, 273, 279, 280, 281, 292, 294
Fermi bağlantı sabiti 41
Fermi, Enrico 41
Fermilab'daki D0 dedektörü 226
fermiyon kütleleri 123
fermiyonlar 34, 113, 126, 131, 147, 297
Ferrara, Sergio 114
Feynman, Richard 30, 41, 44, 56, 71, 198, 306
Frank, Il'ia 65
Freedman, Daniel 114

Friedmann, Alexander 115
Fritzsch, Harald 32
Fukui, Shuji 69

Galileo 98, 99, 100
Galileo değişmezliği 98
Galois, Evariste 93
Gargamelle kabarcık odası 68
Geiger sayacı 70, 293
Gell-Mann, Murray 11, 19, 21, 24, 25, 32, 44, 55, 56, 98, 306
GIM (Glashow, Iliopoulos, Maiani) 36, 37
Gianotti, Fabiola 150, 230, 233, 254
Gilbert, Walter 133
Ginzberg, Vitaly 135
Glaser, Donald 67, 289
Glashow, Sheldon 17, 33, 35, 54, 131, 209
gluino 116
gluonlar 30, 31, 32, 33, 40, 60, 61, 286, 292, 293, 299
Goldstone, Jeffrey 132, 215
Gold, Thomas 262
Golfand, Y. 112
Goudsmit, Samuel 23
gravitino 114, 302
graviton 38, 39, 42, 107, 114, 175, 239, 302
Greenberg, Walter 32
Gross, David 59, 60
Guralnik, Gerald 12, 137, 234
Guth, Alan 193, 269, 270, 294

hadronlar 32, 72, 289, 290, 301
Hagen, Carl 12, 137
Han, Moo Young 32
Harari, Haim 36
Hartle, Jim 248, 249, 250
Hawking, Stephen 121, 248, 254
Heisenberg belirsizlik ilkesi 152
Heisenberg, Werner 40, 49, 52, 131, 235, 294
Hess, Victor 74
Heuer, Rolf-Dieter 150, 229, 233, 243
Higgs benzeri bozon 212, 257
Higgs bozonu 10, 12, 13, 17, 18, 34, 51, 73, 78, 89, 90, 107, 108, 109, 111, 114, 126, 130, 139, 144, 148, 150, 152, 154, 157, 158, 159, 161, 164, 166, 167, 170, 171, 172, 173, 176, 177, 179, 181, 182, 183, 184, 188, 189, 190, 191, 200, 203, 204, 205, 210, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 219, 220, 224, 225, 227, 228, 229, 231, 232, 233, 234, 235, 236, 237, 238, 239, 241, 242, 243, 246, 249, 250, 251, 253, 254, 256, 266, 272, 274, 277, 279, 280, 284, 285, 286, 287
Higgs kütlesi 113, 145, 150, 174, 241, 256, 257
Higgs mekanizması 13, 14, 51, 109, 134, 139, 146, 148, 177, 182, 183, 203, 209, 215, 234
Higgs, Peter 12, 13, 14, 127, 137, 138, 150, 228, 229, 233, 234, 250, 254, 273, 294
Hofstadter, Robert 28
Holdom, Bob 7, 158, 184
Hoyle, Fred 262
H parçacığı 272
Hubaut, Fabrice 275
Hubble balonu 193
Hubble, Edwin 115

Ijjas, Anna 269
Iliopoulos, John 35
Incandela, Joe 229, 242, 243, 254

inflaton 107, 108, 216, 269
izotopik spin 48, 49, 50, 98, 105

Jackiw, Roman 14, 204

Johnson, Kenneth 14, 204
Jonah-Lasinio, Giovanni 132
Jordan, Pascual 40
J/psi parçacığı 36

Källen, Gunnar 51
Kane, Gordon 121, 249
karşı-madde 20, 21, 76, 291
karşı-proton 58, 84, 222, 235
Keenan, Ryan 194
Kepler, Johannes 92, 263
Kibble, Tom 12, 137
Klein, Oskar 45, 48, 118
Kleppe, Gary 201
Klute, Marcus 243, 244
Kobayashi, Makoto 36
Kopernik ilkesi 262
kozmik boşluk 303
kozmik ışınlar 21, 75, 76
kozmolojik ilke 262
kozmolojik sabit 114, 116, 147, 259, 269, 287
Kramers, Hendrik 41
Kranmer, Kyle 151
Krisch, Alan 159
kuantum alan kuramı 13, 40, 41, 43, 45, 51, 52, 53, 56, 57, 109, 111, 113, 116, 128, 130, 132, 181, 195, 197, 198, 199, 201, 202, 203, 206, 207, 208, 209, 211, 213, 214, 225, 298, 299
kütleçekim 1, 38, 39, 40, 42, 46, 47, 48, 90, 91, 92, 101, 102, 114, 115, 117, 118, 119, 120, 123, 130, 180, 193, 195, 197, 207, 258, 269, 271, 290, 291, 292, 293, 296, 297, 298, 301

Lagrange denklemi 277, 295, 301
Lagrange, Joseph Louis 295
Landau, Lev 11, 51, 135
Landsberg, Greg 242, 243
Lane, Kenneth 241
Langevin, Paul 75
Lattes, César 21, 107
Lawrence, Ernest 77
Lederman, Leon 36
Lenard, Philipp 63
Leukippos 19
Leutwyler, Heinrich 32
LINAC 86, 88
Lie grupları 93, 96, 97
Lie, Sophus 93
Likhtman, E. P. 112
Livingston, M. Stanley 82
Loeb, Abraham 269
London, Fritz 102
Lorentz, Hendrik 99, 100, 123, 296
Low, Francis 44

Maddox, John 235
Maguiejo, João 270
Maiani, Luciano 35
Mandelstam, Stanley 53
Mannheim, Philip 160
Marshak, Robert 56
Martin, Adam 241
Martin, Victoria 277
Maskawa, Toshihide 36
matematiksel grup 23, 93
Maxwell denklemleri 50, 100
Maxwell, James Clerk 12, 39, 63, 109
Meissner etkisi 136, 137
Meissner, Krzysztof 268
Meissner, Walther 135
Michelson, Albert 296
Millikan, Robert 64, 75
Mills, Robert 48
Milner, Yuri Borisovich 254
milyar elektron volt (GeV) 11, 74
Minkowski, Herman 100
Minkowski ışık konisi 296
Miransky, Vladimir 187
Miyamoto, Sigenore 69
Miyazawa, Hironari 112
Morley, Edward 296

müonlar 278

Nambu, Yoichiro 32, 132, 187
Neddermeyer, Seth 21
Ne'eman, Yuval 21, 55, 98
Newton, Isaac 12, 38, 64, 92, 196, 293
Nicolai, Hermann 268
Noether'in kuramı 300
Norton, Richard 204
nötralino 120, 297
nükleonlar 24

Occhialini, Giuseppe 21, 107
Ochando, Christophe 273
Onnes, Heike Kamerlingh 134, 301
Oppenheimer, Robert 50
Ørsted, Hans Christian 39

Önel, Yaşar 164, 168

Pagels, Heinz 204
Pais, Abraham 24
Panofsky, Wolfgang 84
Pauli, Wolfgang 20, 40, 49, 207
Penrose, Roger 262, 263
Perl, Martin 37
pi mezonu (pion) 107
Planck enerjisi 296
Planck, Max 16, 62, 177, 298
Planck sabiti 23, 41, 119, 204, 298
Planck uzunluğu 116, 298
Platon 19
Platonik katılar 264
Podolsky, Boris 197
Politzer, David 59
Popov, Victor 130
Powell, Cecil 21, 107
pozitronlar 66, 67, 78, 178, 217, 278

Rahvar, Sohrab 195
Randall, Lisa 244
Randall-Sundrum 244
Regge, Tullio 53, 54
Reines, Fred 20
Rencontre de Moriond 221
rezonanslar 23, 154, 216
Richter, Burton 36
Riemann, Bernhard 46
Rosen, Nathan 197
Rouet, Alain 130
Röntgen, Wilhelm 39
Rutherford, Ernest 20

sahte-skaler 25, 108, 173, 175, 176, 190, 216, 218, 219, 220, 239, 240, 241, 242, 243, 245, 250, 251, 253, 254, 281, 285, 295, 298
Sakata, Shoichi 24
Sakurai, Jun John 55
Salam, Abdus 17, 49, 54, 125, 142, 213
Shaposhnikov, Mikhail 268
Shaw, Ronald 49
Siklotron 79
SLAC 11, 28, 29, 30, 37, 56, 57, 58, 61, 78, 84, 169, 188
S-matrisi 52, 53, 129, 300, 303
Spiro, Michel 234
Standart Lambda CDM modeli 303
Standart Model 247
Stanford Doğrusal Hızlandırıcı Merkezi (SLAC) 78
Steinhardt, Paul 269, 270
Stora, Raymond 130
Strassler, Matt 224, 247
SU(3) 22, 23, 24, 32, 33, 34, 55, 56, 98, 105, 106, 130, 183, 299
SU(3) grubu 23
Sundrum, Raman 244
Susskind, Leonard 114, 183

Tamm, Igor 65
Tanrı parçacığı 111

Taylor, John C. 130
Teknik renk 158, 184, 185, 186, 187, 241, 244
temel skaler parçacıklar 211
Thomson, J.J., 20, 62, 74
Ting, Samuel 36
Tolman, Richard 270
Tomonaga, Sin-Itiro 41
Tonelli, Guido 150
Toth, Viktor 7, 195, 206
Touschek, Bruno 80
Turok, Neil 248, 270
Tyutin, Igor 130

Uhlenbeck, George 23

van der Meer, Simon 84
van Hove, Leon 27
Varela, João 246
Veltman, Martinus 143, 147, 225, 260
Vilenkin, Alexander 270
von Neumann, John 21

Wallace, Alfred Russell 263
Walton, Ernest 77
Ward, John 54, 129, 304
Weinberg, Eric 267
Weinberg-Salam modeli 142, 158
Weinberg, Steven 17, 139, 183, 210
Weisskopf, Victor 40
Wess, Julius 112
Weyl, Hermann 21, 46, 101
Wheeler, John 52
WIMP 120, 160, 179
Widerøe, Rolf 77
Wielers, Monika 160, 163, 165
Wigner, Eugene 23
Wilczek, Frank 59
Wilson, Charles 66
Wilson, Kenneth 44
Wilson, Robert 84
Woit, Peter 226, 234, 247
Woodard, Richard 200, 204
Wulf, Theodor 74
W ve Z bozonları 11, 39, 123, 159, 177, 206, 207, 216, 228, 286, 292, 303

X bozonu 253, 272, 273

Yamawaki, Koichi 187
Yang, Chen-Ning 48
Yang-Mills ayar bozonları 51
Yang ve Mills 49, 51, 52, 55, 97, 98, 104, 105, 129
yerel olasılık 153
Yukawa, Hideki 21
yüksüz K mezonu 27

Zeldovich, Yakov 115
Zumino, Bruno 112
Zweig, George 11, 19, 26, 27

HIGGS PARÇACIĞININ PEŞİNDE
EVRENİN KODUNU KIRMAK

CERN'deki dokuz milyar dolarlık Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (LHC) adı verilen parçacık hızlandırıcısıyla yapılan deneyler, parçacık fiziğinde önemli sorulara cevap bulmayı vaat etmekte. Bunlardan biri de, doğanın tüm kuvvetlerinin birleşik kuramının gerekli bileşenlerinden *süpersimetrik parçacıklardır*. Bir diğer beklenen keşif ise; içinde yaşadığımız üç boyut dışında, sicim kuramı tarafından ihtiyaç duyulan *ekstra uzay boyutları*. Üçüncü olarak; LHC deneycilerinin bulmayı umduğu, çoğu fizikçi için evrendeki maddenin en az yüzde 80'ini oluşturan, anlaşılmaz "kara madde."

"Moffat'ın kitabı, bilimselliğin, dedektif hikayesi ve romantizmin alışılmadık bir karışımı. Parçacık fiziğinde son birkaç on yılın en önemli keşiflerinden birinin tutkulu bir anlatımı."
–Greg Landsberg, Brown Üniversitesi, CMS Fizik Koordinatörü

"John Moffat, sadece önde gelen teoriye odaklanan çoğu popüler kitabın aksine, teorik ve deneysel fizikçilerin kütlenin kökenini anlamak ve temel kuvvetlerin basit bir birleşik teorisini geliştirmek için verdikleri uluslararası mücadelenin içeriden büyüleyici bir anlatımını aktarıyor."
–Paul Steinhardt, Albert Einstein Bilim Profesörü, Princeton Üniversitesi

"Moffat'ın yeni kitabı, parçacık fiziğinin Standart Modelinin tarihi, başarıları ve eksiklikleri hakkında kapsamlı bir araştırma."
–Physics World



ALFA
alfakitap
alfakitap
alfakitap
www.alfakitap.com
9 786254 496608
BİLİM