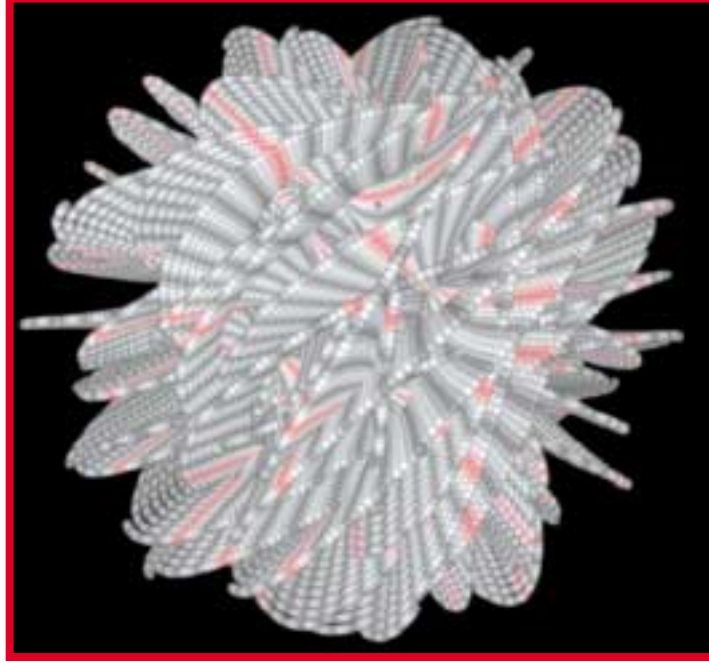


SİCİM KU

Doğada bilinen 4 temel kuvvet vardır. Bunlar ilk keşfedildiklerinde çok değişikmiş izlenimi uyandırmış ama 1970'lerin sonunda oluşturulan "Standart Model"le, kütleçekimi dışındakiler birleştirilmişti. Bu, birçok deneyle sınanmış çok başarılı bir model olsa da bazı önemli soruları cevapsız bırakmış durumda. Örneğin, elektronun yükünün mutlak değerinin neden protonunkine eşit olduğu ya da protonun kütesinin ne olması gerektiği modelde belli değil. Bu sayılar deneylerle bulunup denklemlere yerleştiriliyor. Üstelik, standart modelin kütleçekimini içermemesi parçacık hızlandırıcılarda gözlediğimiz olaylar için sorun olmasa da (çünkü bu olaylarda kütleçekimi, diğerlerinin yanında önemsenmeyecek kadar küçük) evrenimizin nasıl oluştuğunu ve karadelikleri daha iyi anlayabilmemiz için kütleçekimini de içeren bir kurama gereksinimimiz var. Standart modelle genel göreliliği birleştirmekse çok zor bir iş; çünkü, kuvvet tanımları birbirinden tümüyle farklı. İlkinde kuvvet foton, gluon gibi bozonların değişik tokuşu olarak, ikincisindeyse uzay-zamanın

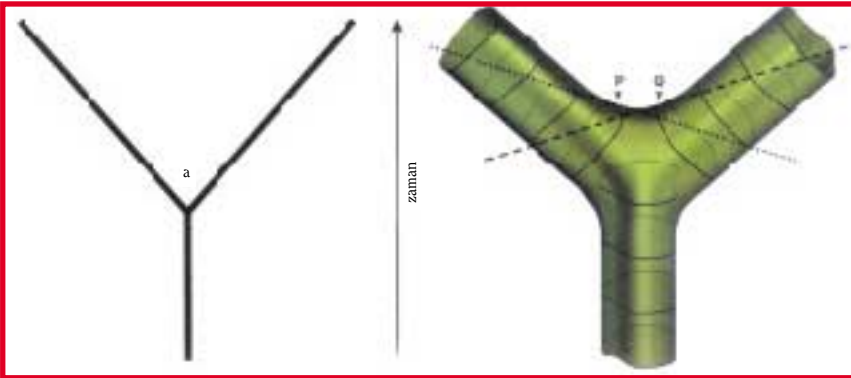


nebiliriz. Ancak kuramsal hesaplamalarda bu sayı birazdan anlatacağımız önemli farklara yol açmakta. Bir keman telinin değişik titreşimlerinin değişik sesler vermesi gibi, bir sicimin de farklı titreşim kipleri (modları) var. Her bir kip, farklı bir kütleyle ve farklı kuantum özelliklerine sahip. Böylece, doğada gördüğümüz nötron, proton gibi parçacıkları tek bir sicimin değişik titreşimleri gibi düşünebiliriz. Bu, elbette son derece güzel, bütünleştirici bir resim. Bu kiplerin sayısının sonsuz olmasına karşın bu kadar çeşitli sayıda parçacık görmüyor olmamız, ilk bakışta öyle görünse bile bir çelişki değil. Çünkü bu kiplerin büyük bölümü, parçacık hızlandırıcılarında bile karşılaşmadığımız çok yüksek enerjilerde gözlenebilirler. Noktasal bir parçacık, uzay-zamanda hareket ettiğinde 1 boyutlu bir çizgi çizerken, bir sicim 2-boyutlu bir yüzeyi tarar. Bu durum kuantum alan kuramı hesaplarında rastlanılan bazı sonsuzluklardan kurtulmamızı sağlar.

geometrisindeki çarpılmalarla açıklanıyor. (bkz. kütleçekim) İşte Sicim/M-Kuramı, bu olanaksız görünen problemi çözerek büyük bir heyecan yarattı. Sicim kuramının ana varsayımı, maddenin yapıtaşlarının nokta parçacıklar değil, 1-boyutlu sicimler olduğu. Bu sicimler ayakkabı bağı gibi açık ya da bir halka şeklinde kapalı olabilirler. Sicimler olağanüstü kısa. Tipik uzunlukları 10^{-33} cm. Bu öylesine küçük bir sayı ki, gündelik hayatımızda ve hatta standart modelde bu uzunluğu ihmal edip sicimleri bir noktaymış gibi düşü-

li sayıda parçacık görmüyor olmamız, ilk bakışta öyle görünse bile bir çelişki değil. Çünkü bu kiplerin büyük bölümü, parçacık hızlandırıcılarında bile karşılaşmadığımız çok yüksek enerjilerde gözlenebilirler. Noktasal bir parçacık, uzay-zamanda hareket ettiğinde 1 boyutlu bir çizgi çizerken, bir sicim 2-boyutlu bir yüzeyi tarar. Bu durum kuantum alan kuramı hesaplarında rastlanılan bazı sonsuzluklardan kurtulmamızı sağlar.

İlk şekilde 'a' noktası tekil bir nokta. İki parçacık belli bir konumda ve zamanda çarpışmakta. İkinci şekildeyse, sicimlerin etkileştikleri an ve konum artık bir nokta değil, bir yüzey; yani belirsiz. Böylece, o tekil noktanın hesaplamalarda yarattığı sonsuzluk probleminden kurtulunmuş olunuyor. Bu sonsuzluklar, genellikle "renormalizasyon" denen bir yöntemle zararsız hale getirilebilir; ama standart modelle genel göreliliği birleştirmeye kalkıştığımızda bu yöntem işe yaramaz. Temel parçacıklar, fermiyonlar ve bozonlar olarak ikiye ayrılırlar. Fermiyonlar (örneğin elektron) maddeyi oluşturan öğelerdir. Bozonlarsa kuvvetleri taşırlar. Wolfgang Pauli'nin keşfettiği ilke-



Tek bir temel parçacık ikiye bölünse (solda), bu olay uzay zamanda kesin bir yerde meydana gelir. Bir sicimse ikiye bölündüğünde (sağda) gözlemciler göre bunun ne zaman ve nerede gerçekleştiği tartışma konusu olabilir. Noktasal çizgiyi mutlak zamanın yüzeyi kabul eden gözlemci, bölünmenin uzay zamandaki p noktasında gerçekleştiğini görür. Kesikli çizgiyi yüzey kabul eden gözlemciye göre ise bölünme q noktasında meydana gelmiştir

RAMLARI

ye göre, aynı kuantum özelliklerini taşıyan iki fermiyon birarada bulunmazken, bozonlar için böyle bir kısıtlama söz konusu değil. İki katı cismin birbirinin içinden geçememesinin nedeni, bu prensip gereğince fermiyonların birbirini itmesi. Yukarıda da belirtildiği gibi, bir sicimin her bir titreşim kipi, değişik kuantum özelliklerine sahiptir. Yalnızca bozonik kipleri aldığımızda, sicim kuramının kuantum mekaniğiyle tutarlı olabilmesi için uzay-zamanın 26 boyutlu (1 zaman, 25 uzay) olması gerekir. Burada, bir fizik kuramının uzay-zamanın boyut sayısını belirlediğini görüyoruz. Gerçi 26, bizim algıladığımız 4 (3+1) boyuttan oldukça uzak bir sayı; ama birazdan bunun nasıl mümkün olabileceğini göreceğiz. Bir fizik kuramında her bozona (fermiyona) karşılık gelen, aynı kütleyle sahip bir fermiyon (bozon) varsa bu simetriye “süpersimetri” denir. Ancak kütlelerin aynı olması çok yüksek enerjilerde bunlar arasındaki simetrisinin kırılmamış olması durumunda geçerli. Oysa, günümüz hızlandırıcılarında oluşturulabilen enerji düzeylerinde, aradaki simetrisinin kırılmış olduğu düşünüldüğünden, bozon ve fermiyonların karşı gruptan eşlerinin daha ağır olması gerekiyor. Bu nedenle, bu kuramsal parçacıkların adlarına “süper” takısı ekleniyor. Örneğin, böyle bir kuramda kuarklarla beraber skuarklar; fotonlarla birlikte fotinolar olmalıdır. Bu, standart modeldeki parçacık sayısının 2 katına çıkması demektir ve henüz bu süpersimetrik çiftler gözlenmiş değildir. Bunun anlamı süpersimetrisinin kırılmış olması. Ancak çok yüksek enerjilere çıktığımızda bu ek parçacıkları görebileceğiz. (bkz. deneysel bölüm.) Yüksek enerjilerde kuram süpersimetrikken, düşük enerjilerde bunu gözlenmemesini suyun farklı fazlarına benzetebiliriz. Henüz gözlenmemesine karşın, kuramcılar çok büyük çoğunluğu matematiksel güzelliğinden ötürü, süpersimetrisinin varlığı konusunda ikna olmuş durumdadır. Eğer sicim kuramında süpersimetri varsayılırsa, o

Sicim Kuramı 1970: Neye Niyet, Neye Kismet

Bazen bilim tarihinin de genel tarih gibi “tekerrür ettiği” görülür. Bununla, belli bir fikrin ya da matematiksel yapının, önce özel bir fiziksel olayı betimlemek için ortaya atılıp, sonra çok farklı fiziksel olaylarda tekrar işe yaramasını kastediyoruz. Feza Gürsey, bir konuşmasında bu olguya değindiğinde, belki Doğa'nın da hayal gücünün bizimki gibi kısıtlı olduğunu ve karşımıza bu yüzden tekrar tekrar benzer yapıları çıkardığını söylemişti! Örnek olarak Maxwell'in hayal ettiği, fakat sonra meşhur Michelson-Morley deneyi sonucunda yok olduğuna karar verilen esir (ether) ortamının bütün uzayı kaplayan bir Higgs alanı şeklinde Fiziğe geri döndüğünü böyle bir ortamın süperiletkenliği açıklamak için yoğun madde fiziğinde de kullanıldığını, üstelik fizikçilerin zayıf ve elektromanyetik etkileşimleri birleştirmek için Higgs alanını ortaya atarken gene aynı süperiletkenlik kuramından esinlendiklerini belirtebiliriz. Bir başka örneğe şu: 1911'de Rutherford, altın atomlarından saçılan bazı alfa parçacıklarının 90 ya da hatta 180 derecelik açılarda sapmalarından, atomun kütesinin çekirdek adını verdiği çok daha yoğun bir bölgede toplandığını sonucunu çıkarmıştı. Aşağı yukarı 60 yıl sonra Massachusetts Teknoloji Enstitüsü ile Stanford Doğrusal Hızlandırıcı Laboratuvarı'ndan bir grup, bu kez alfa parçacıklarının yerine elektronları, atomun yerine de çekirdeğin yapıtaşları olan proton ve nötronları koydu ve böylece bir anlamda deney yüzbin defa daha küçük boyutlarda tekrarlamış oldu. Alfalar gibi elektronların da büyük sapmalar göstermesi, proton ve nötronların kuark denen çok daha küçük ve yoğun alt yapıtaşları bulunduğunu ortaya koydu. Sonuçta, SLAC-MIT grup liderleri de Rutherford gibi Nobel Fizik Ödülü'nü aldılar. Transistörlerin ana hammaddesi olan yarıiletken malzemelerdeseyse, elektrik akımına yalnızca serbest elektronların değil, hareketsiz elektron fonundaki “deliklerin” de pozitif yüklü parçacıklar gibi davranarak katkı yaptıklarını; ayrıca bu deliklerin Dirac'ın antielektronlarına, yani pozitronlarına çok benzediğini de hatırlatalım. Bugün “Herşeyin Kuramı” olmaya en kuvvetli aday olan Sicim Kuramı da, 1970 yılında Nambu tarafından çekirdekdeki protonlar, nötronlar ve bunları bir arada tutan mezonlar gibi güçlü etkileşimli parçacıkların, yani hadronların kuramı olarak ortaya atıldı. Doğadaki dört etkileşimden (kuvvet) en güçlü olan Şiddetli etkileşimin, (şiddetli çekirdek kuvvetinin uyguladığı etki) çekirdeği bir arada tutması, ayrıca nükleer ve termonükleer enerji üretme gibi etkilerinden tanyoz. Bu parçacıkları hızlandırıcılarda çarpıştırdıkça yeni, çok kısa ömürlü kütleleri ve spinleri (öz açısal momentumları) gitgide büyüyen birçok başka parçacık ortaya çıkıyordu. Bu yeni parçacıkların spinleriyle kütlelerinin karesi arasında “Regge yörüngesi” denilen basit bir çizgisel ilişki göze çarpıyordu; daha doğrusu, tamsayı spinli parçacıklar (mezonlar) ve yarım spinli parçacıklar (proton, nötron gibi baryonlar) iki ayrı fakat aynı eğime sahip, düz çizgi şeklindeki Regge yörüngesi üzerinde yer alıyorlardı. Çarpışmalarda hangi enerjide kararsız bir parçacık ele edildiği ve saçılan parçacıkların açya göre nasıl dağıldıkları gibi bilgileri içeren, ayrıca çizgisel Regge yörüngeleri veren iki değişkenli bir saçılma fonksiyonu bulmak olanaksız gibi görünürken, 1968'de Gabriele Veneziano adlı genç bir doktora öğrencisi, Euler'in ikiyüz yıl kadar önce bulduğu bir fonksiyonun, istenen bütün özellikleri taşıdığını gösteriverdi! Bu fonksiyonun bu probleme nasıl ortaya çıktığının daha temel bir düzeyde anlaşılmasıysa, ancak 1970'de Nambu'nun sicim modeliyle mümkün oldu.

Nambu'nun görüşüne göre bütün bir parçacıklar 1 femtometre, yani 10^{-15} metre (atom çapının yüzbinde biri) uzunluğunda, uçları ışık hızıyla hareket eden, ve 100 tonluk bir kütle için ağırlığına eşit bir gerilim kuvveti barındıran bir sicimdir, farklı dönme ve titreşim durumlarından ibarettir. Regge yörüngeleri ve Veneziano formülü buradan elde edildiğine göre, bu sicim modelinde bir doğruluk payı olmalıydı. Kısa zaman içinde, önce Pierre Ramond, sonra da André Neveu ve John Schwarz sicim kuramına yarım spinli parçacıkları da eklemeyi başardılar; bu da tam ve yarım spinli parçacıkları birbirleriyle ilintilendiren, yeni ve hiç alışılmadık bir simetri gerektiriyordu. Mezon ve baryon Regge yörüngelerinin aynı eğime sahip olmaları bu simetrisinin doğal bir sonucuydu. Süpersimetri denilen bu yeni konu hem fizik, hem de matematikte yeni ve derin uygulamalar bulmaya devam ediyor. Bu arada Nambu'nun sicim kuramının görelilik ve kuantum kuramıyla tam olarak bağdaştırılmasının, ancak uzay 25 boyutluya mümkün olacağı ortaya çıktı! Bu kritik boyut, süpersimetrik sicim için 9'a çıkıyordu. Bir başka problem de kuantum Nambu sicimlerinde sanal kütleli parçacıkların bulunmasıydı. Bu, tuhaf bir çelişkiye yol açtı: Bir yandan sicim kuramının kuvvetli etkileşimler için ancak başarılı bir yarı-kantitatif model sağladığı ve bu olayların gerçek temel kuramı olamayacağı anlaşıldı; diğer taraftan da kuram matematiksel yapısı ve zenginliği bakımından ilk halinden de daha görkemli ve derin gözüküyordu. 1973-74 arasında ayrıca, kuvvetli etkileşimler için elektromanyetik kurama benzer bir yapıda bir başka başarılı kuram ortaya atıldı ve hadronları sicim kuramıyla betimleme çabaları böylece sona erdi. Bu yeni kuramda parçacıklar, sicim kuramında olduğu gibi bir bütün olarak ele alınıyor, bunun yerine parçacıkların yapıtaşları olan kuarkların birbirleriyle etkileşimleri inceleniyordu. Aslında bu kuram de 1965'te Han ve Nambu tarafından önerilmişti; 1974'te yapılan bir anlamda Han-Nambu kuramının “kuantum kromodinamiği” olarak adlandırılmasıydı. Yeni olan, kuantum kromodinamiğiyle SLAC-MIT deneylerinin de başarıyla açıklanmasıydı. Scherch ve Schwarz 1974'te bir kenara atılmış neye yarayacağı belli olmayan sicim kuramı için, son derece radikal yeni bir uygulama alanı önerdiler. İki ucu birleşerek bir daire gibi kendi üzerine kapanan sicimlerin titreşimleri arasında, kütleleri 0, spinleri 2 olan parçacıklara da rastlanıyordu. Ayrıca, bunların diğer parçacıklarla etkileşimleri, tıpkı Einstein genel görelilik kuramının kuantum şeklinde, kütleçekim kuvvetini taşıdığı düşünülen 0 kütleli, 2 birim spinli graviton parçacığınıninki gibiydi. Bu durumda sicim kuramı bir anda kuramsal fiziğin çözülmemiş en derin problemi olan Einstein kuramının kuantum fizikliğiyle birleştirilmesi sorununu çözmeye en kuvvetli aday haline geliyordu. Bu birleştirme, kendini 10-34 metrede göstereceğinden, sicimlerin uzunluğu da ilk düşünülen 1 femtometrenin on milyar kere milyarda birine düşüyor, gerilimleriyse 100 tonun on milyar kere milyar katına çıkıyordu! Yazının başında belirttiğimiz “tekerrürlerin” hiç birinde böyle bir 1019 katlık ölçek değişikliği görülmediğini belirtelim. Belki bu da sicim kuramının ve çözüme çalıştığı kuantum kütleçekimi probleminin ne kadar özel olduklarının bir başka göstergesi.

Cihan Saçlıoğlu
Fizik Bölümü Boğaziçi Üniversitesi ve
Boğaziçi Üniversitesi
TÜBİTAK Feza Gürsey Enstitüsü

Pertürbasyon Kuramı

(Bir Yaklaşım Yöntemi)

Süpersicim kuramının olağanüstü matematiksel zorluğundan dolayı, kuramı tanımlayan denklemleri yazmak ve bu denklemlere çözümler bulmak için fizikçiler pertürbasyon kuramı denen bir "yaklaşım" yöntemi kullanırlar. Bu yöntemde önce sözkonusu soruya, yaklaşık bir yanıt verilmeye çalışılır ve daha sonra bu yanıt, ayrıntıların üzerinde gittikçe daha fazla durularak iyileştirilmeye çalışılır. Bu yöntem sicim kuramından daha önce alan kuramlarında çok büyük bir başarıyla kullanılmıştı. Ancak bir yaklaşım yöntemi, eninde sonunda bir yaklaşım yöntemi değildir bu şekilde analiz edilen bir kuramın tam olarak anlaşıldığı söylenemez. Yöntemin başarısı, kuramdaki bir sabitin değerine sıkı sıkıya bağlıdır. Buna çiftlenim sabiti denir. Bir ipliğin kopup kopmaması, onu çeken kuvvete ve ipliğin dayanma gücüne nasıl bağlıysa, bir süpersicimin de, sicimler arası etkileşimde bir başka süpersicime bağlanması ya da iki ayrı parçaya ayrılması, o süpersicimi tanımlayan kuramdaki çiftlenim sabitinin değerine bağlıdır. Eğer bu sabitin değeri 1'den küçükse, sicimler birbirleriyle zayıfca etkileşirler. Ama eğer bu sabit 1'den büyükse sicimler arasında güçlü etkileşim olur ve sicimin kopma olasılığı artar. Pertürbasyon tekniğinin başarısı, etkileşimin zayıf ya da şiddetli olmasına göre değişir. Bu teknikte, ilk önce kuramdaki bir denkleme çözüm olabilecek bir yanıt tahmin edilir ve daha sonra bu tahmin, kuramdaki ince ayrıntılar giderek artan oranda kullanılmasıyla düzeltilir. Bu şekilde düzeltilmiş tahminin gerçek çözüme çok yakın olması beklenir. Çiftlenim sabitinin küçük değerlerinde, kuramdaki ince ayrıntılar yanıt için verilen ilk tahmine giderek kü-

çülen katkılarda bulunurlar ve bu yöntemin birkaç kez kullanılması, beklenen yanıtı çok yakın bir sonuç verir. Ancak eğer çiftlenim sabitinin değeri 1'den büyükse, pertürbasyondan ilk tahmine yapılan katkılar ince ayrıntılar incelendikçe giderek büyür ve sonunda yanıt sonsuz büyüklükte olur. Bu nedenle kullanılan süpersicim kuramının çiftlenim sabitinin değeri çok iyi belirlenmeli ve eğer 1'den küçükse pertürbasyon yöntemi kullanılmalı; ama değilse pertürbasyon ötesi bir yöntem kullanılmalıdır.

Dualite ilişkileri bulunmadan önce, sicim kuramlarındaki en önemli sorun, tam bu noktadaydı. Kuramın karmaşıklığından dolayı çiftlenim sabitinin değerini belirleyen denklemlerin de pertürbasyon yöntemiyle yaklaşık olarak belirlenmesi gerekiyordu. Ancak bütün süpersicim kuramlarında pertürbasyon yöntemiyle bulunan bu denklemler şu şekildeydi: Süpersicim çiftlenim sabiti çarpı sıfır eşittir sıfır. Bu denklem son derece can sıkıcı bir denklemdir; çünkü her sayı bu denklemin doğal bir çözümüdür. Kısacası pertürbasyon yöntemiyle bulunan denklem, kuramı anlamamız konusunda bize hiçbir şekilde yardım etmez. 90'lı yılların başına geldiğinde birçok fizikçi pertürbasyon yönteminin, yardımcı olmak bir yana, önlerinde yatan bir engel olduğunu düşünmeye başlamıştı. Kuramda kesinliği olan denklemleri yazmak ve pertürbasyon yönteminin hangi süpersicim kuramlarında kullanılabileceğini anlamak için, kuramların önce pertürbasyon ötesi bir şekilde (yaklaşım yönteminin teknikleriyle sınırlanmamış olarak) tanımlanması gerekiyordu.

Cem sinan Deliduman
Feza Gürsey Enstitüsü Çengelköy, İstanbul

zaman kuantum mekaniğiyle tutarlılık için bu sefer uzay-zamanın boyut sayısının 10 (9+1) olması gerekir. Yani, yaşadığımız 4 boyuta ek olarak 6 boyuta daha ihtiyacımız var. Peki bu mümkün mü? Bu soruyu yanıtlamak için biraz daha geriye, 1920'lere uzanalım. O yıllarda Theodor Kaluza ve Oskar Klein, kütleçekimi ve elektromanyetizmayı birleştirmek için dahiyane bir yol buldular: bu, evrenin 3+1 değil 4+1 boyutlu olduğunu varsaymaktı! Buna göre 5 boyutlu evrende yalnızca kütleçekimi vardır; ama 5. boyuttaki graviton (kütleçekimini taşıyan bozon) 4 boyuta indiğimizde iki farklı parçacığa ayrılır. (Bu 3-boyutlu bir cismin 2-boyutlu bir yüzey üzerinde farklı gölgeler oluşturabilmesine benzer.) Bunlardan biri 4 boyuttaki graviton, diğeryse 4 boyuttaki fotondur (elektromanyetizmayı taşıyan bozon). Üstelik bu parçacıkların sağladıkları denklemler de, aynen olması gerektiği gibidir. Böylece Kaluza ve Klein, fazladan bir boyutun varsayılmasıyla, elektromanyetizma ve kütleçekiminin birleştirilebileceğini göstermiş oldular. Eğer 5. boyutu yarıçapı çok küçük bir çember

gibi düşünürsek, onu neden göremediğimizi de açıklayabiliriz:



Bir bahçe hortumuna çok uzaktan bakarsak hortumun yüzeyini 2-boyutlu değil, 1-boyutluymuş gibi algılarız. Aynı şey 4'ten fazla boyut için de geçerli; eğer bu ek boyutlar bir çember gibi kapalı ve yarıçapı küçük (örneğin 10^{-33} cm) boyutlarsa, onları gündelik hayatımızda farketmememiz normal. Tabii 3 boyuttan sonrasını kafamızda görsel olarak canlandırmak çok zor bir iş; ama matematiksel olarak bunları varsayıp buna göre işlem yapmakta bir güçlük yok. Kaluza-Klein kuramı, bu başarısının yanında ilk kez elektrik yükünün neden elektronun yükünün tamsayı katları şeklinde ($\pm e, \pm 2e, \pm 3e, \dots$) verildiğini de açıklayabiliyordu.

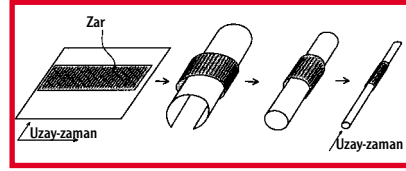
(Bu manyetik monopollerin (tek kutuplu mıknatıslar) varlığıyla da açıklanabilir; ama bu, başka bir yazının konusu.) Ne yazık ki, yayınlandıktan bir süre sonra Kaluza-Klein kuramının kuantum mekaniğiyle birleşmesinde sorunlar olduğu farkedildi. Ayrıca, o dönemde birçok fizikçi kuantum dünyasının büyümesine kapılmıştı ve ek boyut fikri fazla egzotik görünüyordu. Bu nedenlerle Kaluza-Klein kuramı gözden düştü; ta ki sicim kuramı bulunana kadar. Süpersimetrik sicim kuramı, biraz önce bahsettiğimiz gibi ancak 10 boyutta tutarlılık kazanıyor. Kendi evrenimizi anlayabilmemiz için 10-boyutlu sicim kuramını 6 boyutlu bir uzay üzerinde büzüştürmemiz gerekir. (Tabii bu ek boyutlar görülemez kadar küçük olmalıdırlar; ama sicim kuramında bu boyutların neden bu kadar küçük olduklarına ilişkin bir açıklama henüz yok. Bu, olasılıkla evrenin ilk anlarında gerçekleşen bir simetri kırılmasıyla ilgili.) Bu, örneğin 6-boyutlu bir küre olabilir ama bunun dışında şekiller seçmek de mümkün. (Örneğin Calabi-Yau uzayları.) Ne yazık ki bu seçeneklerin sayısı yüzbinlere ulaşıyor ve her bir seçenek, değişik bir 4-boyutlu evren tanımlıyor. Bunlardan bazıları bizim evrenimize benzerken, büyük kısmının hiç benzerliği yok (yani standart modeli içermiyorlar). Evrenimizi verecek 6-boyutlu uzayın nasıl seçileceği, sicim kuramının en derin problemlerinden biri ve kuram daha iyi anlaşıldığında çözüm bulunacağı umuluyor.

Kaç Sicim Kuramı var?

Bir sicimin en düşük enerjili titreşimleri, içinde belli sayıda parçacık bulunan bir kuantum alan kuramıyla tanımlanabilir. Bozonik sicim kuramı 26-boyutludur ve düşük enerjide içerdiği parçacıklardan birinin kütesinin karesi negatiftir. Böyle parçacıklara takyon denir. Takyonlar ışık hızından hızlı hareket ederler ve böyle bir kuramda boşluk kararlı olamayacağından, takyonlar kuramda olması istenmeyen parçacıklar. Bozonik sicim kuramı, fer-

	Simetri grubu	Sağ-sol Simetrisi	Süpersimetri miktarı	Sicimin şekli
Tip I	S0(32)	Yok	1	Açık ve kapalı
Tip IIA	U(1)	Var	2	Kapalı
Tip IIB	-	Yok	2	Kapalı
Melez	$E_6 \times E_6$	Yok	1	Kapalı
Melez	S0(32)	Yok	1	Kapalı

miyonları da kapsamadığından gerçekçi bir kuram değil. 10 boyutta 5 tane tutarlı sicim kuramı bulunur. Bunların hepsi süpersimetriktir ve graviton (dolayısıyla kütleçekimini) içerirler. Aralarındaki ilk fark, sicimin açık ya da kapalı olmasıdır. Sırf kapalı sicimle tutarlı bir kuram geliştirilebilirken, açık sicim kuramlarında kapalı sicimler de olur. Açık sicim içeren tek kuram, Tip I'dir. Bu 5 kuram, içerdikleri süpersimetrik parçacık sayısı bakımından da ayrılıyorlar. Tip II kuramlarında, diğerlerinden daha fazla parçacık bulunuyor. Tip IIA'yı IIB'den ayıran özellikse, sağ-sol simetrisi. Tip IIB kuramında, kütleli sıfır olan fermiyonlar yalnızca belli bir yönde dönerlerken, Tip IIA'da fermiyonlar her iki yönde de dönebilirler. İki melez sicim kuramını birbirinden ayıran şeyse simetri grupları. İlk



bakışta, bu 5 kuramdan bizim yaşadığımız evreni tanımlamaya en uygunu, Melez $E_8 \times E_8$ modeli. E_8 grubu, standart modelin simetri grubunu, yani $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ 'yi kapsar ve fazladan parçacıklar, kozmolojideki karanlık madde problemi için işe yarayabilir. Hem bu melez modelde de, tıpkı standart modeldeki gibi, sağ-sol simetrisi bulunmuyor. Sicim kuramına ilişkin çalışmalar 1984'te Michael Green ve John Schwarz'ın, bu kuramın anomalilerden arınmış olduğunu göstermesiyle büyük bir ivme kazandı. Çünkü anomalisi olmayan modeller çok en-

derdir. Anomali kısaca, bir fizik kuramında klasik olarak var olan bir simetrinin, hesaplamalara kuantum mekaniğinin girmesiyle bozulmasına deniyor. Kuramdaki yerel (yani ele alınan noktanın konumuna bağlı) bir simetrisinin anomalisi nedeniyle kırılması, tutarsızlıklara yol açar ve bu, istenmeyen bir durum. Özetlersek 1980'lerin sonuna gelindiğinde genel kanı bu 5 kuramdan yalnızca birinin (bunun büyük olasılıkla melez $E_8 \times E_8$ olacağı tahmin ediliyordu) bizim evrenimizi anlamada işe yarayacağı, diğerlerininse yalnızca hoş matematiksel modeller olduğuydu. Bu yaklaşım, o zamanlar çok az kişi tarafından itiraf edilse de, doyurucu olmaktan uzak. Sicim kuramının amacı, bilinen 4 temel kuvveti birleştirmekti ve bunu başarabilen birden fazla model olması rahatsız edici bir durumdu. Pratik açıdan bir sorun yoktu belki, ama bir kuramsal fizikçi için bu kesinlikle güzel değildi; çünkü Herşeyin Kuramı'nın kaçınılmaz, yani tek olması beklenir. Sicim kuramı bu zorlukla boğuşurken 1987'de Eric Bergshoeff, Ergin Sezgin ve Paul Townsend, 11 boyutlu süper-zar kuramını geliştirdiler. Bu kuramın temel ögesi sicim değil, 2-boyutlu bir zar. Kuram, bir çember üzerinde 10-boyuta büküldüğünde Tip IIA sicim kuramına ulaşılır. Burada zarı 11. boyut çevresinde sarar; çemberin yarıçapının da küçük olduğunu varsayarsak, bu zar 10 boyutta bir sicim gibi görünecektir.

11-boyutun önemli bir özelliği de bazı teknik varsayımlar altında, süpersimetrisinin izin verdiği en yüksek boyut olması. Hem bu, hem de süper-zar kuramının varlığı, bazı fizikçileri (örneğin Michael Duff) 11 boyuttan 10 boyuttan daha temel olduğu düşüncesine itti. Ama süperzar kuramının iki büyük problemi vardı: Birincisi; kimse bu kuramı kuantum mekaniğiyle birleştirmeyi bilmiyordu (yani klasik bir kuramdı). İkincisiyse; bu kuramda standart modelin aksine sağ-sol simetrisi vardı ve kimse bu simetrisinin olduğu bir kuramdan, olmadığı bir tanesine Kaluza-Klein yöntemiyle nasıl ulaşabileceğini bilmiyordu. Bu nedenlerle, 11 boyuttaki bu model, sicim kuramındaki ikinci devrime kadar bir-çoklarınınca gözardı edildi.

Calabi-Yau Uzayları

Sicim kuramının denklemleri, 6 bükülmüş uzay boyutunun şekli olarak çok özel geometrik yapılar gerektirmekte. Sicim kuramındaki kullanımlarından çok daha önce Eugenio Calabi ve Shing-Tung Yau tarafından geliştirilen bu yapılar bu nedenle "Calabi-Yau (CY) Uzayları" olarak adlandırılırlar. Son yıllarda yapılan çalışmalarla gösterildi ki, matematiksel olarak mümkün olan CY uzayları sayısı 30.000 kadar. CY uzaylarını tanımlayan matematiksel kuram, çok karmaşık. Yalnızca şekilde görülen CY uzayına bakmak bile, bu kuramın karmaşıklığı hakkında bir fikir verebilir. Ancak bilinmeli ki bu şekil altı boyutlu CY uzayının üç boyutlu bir kesiti ve asıl uzay çok daha karmaşık. Sicim kuramına göre evrenin her noktasında şekildedekine benzer, çok küçük ölçeklere bükülmüş bir CY uzayı bulunuyor. Bunun anlamı şudur: Siz herhangi bir hareket yaptığınızda, bu hareket sırasında birçok CY uzayı içinde de hareket etmiş olursunuz. Bir insan, bükülmüş bir CY uzayına göre çok daha büyük olduğundan, herhangi bir CY uzayında serbestçe hareket edemezsiniz, ancak yaptığımız her hareket birçok CY uzayını baştan başa kateder. Peki CY uzayları bu kadar küçüklerse, onların varlığını deneyle nasıl gözlemleyebiliriz? Eğer bu uzayların varlığını bir parçacık hızlandırıcısı kullanarak kanıtlamayı düşünürsek, yapılan hesaplar gösteriyor ki böyle bir amaç için gereken hızlandırıcı, bilinen evrenin büyüklüğünde olmalı. Bu kadar büyük bir hızlandırıcı inşa edemeyeceğimize göre, CY uzaylarının varlığını, sicim kuramından elde edilebilen dolaylı sonuçları deneyerek gösterebiliriz. Bu sonuçların kaynağı, CY uzaylarının içerdiği değişik boyutlardaki çemberler. Bu çemberlerin varlığı, sicimlerin salınım biçimlerini etkiler. Bu etkiyse, doğada neden üç (iki, dört ya da başka bir sayı değil) parçacık ailesi olduğu sorusunu yanıtlar. Bu yanıt şöyle: CY uzayındaki her bir çembere bağlı olarak, si-



cimler belli düşük enerjili salınım biçimleri gösterirler. Sicimlerin düşük enerjili salınımları temel parçacıklara karşılık gelir. Çemberlerin varlığı, sicimin salınım biçimlerinin belli gruplara, ya da ailelere, karşılık gelmelerine neden olur. Kısacası eğer CY uzayında üç çember varsa, bu durumda üç salınım ailesi ya da üç parçacık ailesi deneysel olarak gözlenmelidir. Yalnızca üç parçacık ailesi gözlendiğine göre, CY uzayları arasından yalnızca üç çember içerenleriyle ilgilenebilir ve bunların sicim kuramındaki diğer ölçütlere uyup uymadıkları araştırılmalı. Ancak, yalnızca üç çember içeren CY uzaylarının sayısı bile binlerle ifade edilebilir. Eğer sicim kuramında kullanılması gereken

CY uzayını belirleyen bir ilke bulunabilirse, bu ilkeyle yalnızca üç parçacık ailesinin varlığının uyumluluğu, sicim kuramı için önemli bir kanıt oluşturacaktır. Bir diğer dolaylı etki de CY uzaylarının biçimlerinin, gözlenen temel parçacıkların kütlelerine olan etkisi. Andrew Strominger ve Edward Witten, temel parçacıkların kütlelerinin, CY uzayları içindeki değişik çemberlerin birbiriyle nasıl kesiştiklerine doğrudan bağlı olduğunu gösterdiler. Çünkü bu parçacıklar sicimin salınım modlarına karşılık gelirler ve sicimin salınımı da CY uzayının şekline etkilenir. Aslında temel parçacıkların yalnızca kütleleri değil, başka birçok özellikleri de CY uzaylarının şekliyle doğrudan ilişkilili. Sicim kuramının denklemleri, bir yaklaşımla yöntemi olan pertürbasyon kuramıyla ancak yaklaşık olarak yazılmış durumda. Bu denklemler, sicim kuramında hangi CY uzayının kullanılması gerektiği hakkında bir ölçüt sağlamazlar. Böyle bir ölçüt ancak M-kuramında pertürbasyon ötesi bir yöntemle bulunabilir. Doğru CY uzayını seçmek, hâlâ çözümü bulunamamış en önemli problemlerden birisi.

Cem sinan Deliduman
Feza Gürsey Enstitüsü Çengelköy, İstanbul

Sadık Değer
Boğaziçi Üniversitesi Fizik Bölümü

KARADELİKLER

Bir cismin dünyanın çekim gücünü yenip uzaya çıkabilmesi için, hızının saniyede en az 11,2 km olması gerekir. Bir gezegenin yoğunluğu arttıkça (yani aynı kütle daha küçük bir hacme sıkıştırıldıkça) kaçış için gereken hız da artar. Ancak özel görelilik kuramından, ışık hızının (saniyede yaklaşık 300.000 km) evrendeki en yüksek hız olduğunu biliyoruz. Burada akla “acaba ışığın bile kaçamayacağı yoğunlukta gezegenler ya da yıldızlar olabilir mi?” sorusu geliyor. Bu, kütlesi Güneş’inin en az üç misli olan yıldızlar için mümkün. Bir yıldızın kendi çekim kuvveti, nükleer tepkimelerin yarattığı ısının uzaya atılmasıyla oluşan basınçla dengelenir. Yıldız yaşlandıkça bütün hidrojenini önce helyuma, daha sonra da demir, nikel gibi daha ağır elementlere dönüştürür ve böylece nükleer yakıtını tüketir. Eğer yıldızın kütlesi, Güneş’inin iki katından daha azsa o zaman yıldız bir beyaz cüceye (yaklaşık dünya büyüklüğünde) ya da bir nötron yıldızına (yaklaşık 30 km çapında) çöker. (Birçok beyaz cüce ve nötron yıldızı gözlemlenmiştir.) Ama daha büyük kütleli yıldızlar çökme devam eder ve en sonunda bir karadeliğe dönüşürler. “Işığın bile kaçamayacağı bir yer” fikri, ilk kez 1783’te John Mitchell tarafından irdeledi. Daha sonra karadelik fikri, bağımsız olarak 1795’te Pierre Simon Laplace tarafından da öngörüldü. 1916’da Karl Schwarzschild’in, Einstein’ın genel görelilik kuramı denklemlerine bulduğu bir çözüm, daha sonra karadelik olarak yorumlandı ve böylece bu fikir somutlaştı. Evrenin tahmini yaşı, ortalama bir yıldızın yaşından çok daha büyüktür. O yüzden evrende birçok karadelik olması beklenmekte. Karadeliklere yaklaştıkça, hissedilen çekim gücü artar ve belli bir mesafeden sonra artık ışık dahil hiçbir şey kaçamaz. Bu sınır uzaklığa “olay ufku” denir. Karadelikler ‘kara’ oldukları için (klasik olarak) doğrudan gözlenemez-

ler. Ama çekim güçleri çok büyük olduğundan çevrelerindeki gaz ve tozları çok büyük bir hızla yutarlar. Bu hız, atomların iyonlaşmasına neden olur ve olay ufkuna girmeden önce bir kısmı parlak bir ışık yayarlar. İşte bu ışık gözlenerek bir karadelik saptanabilir. Şu anda karadelik olduğu tahmin edilen gök cisimleri vardır.

Bir karadeliğin olay ufkuna giren hiçbir şey geri çıkamaz ama buradan bir karadeliğin bütün evreni yutacağı sonucunu çıkarmak yanlış olur. Karadeliğin olay ufkundan uzaklaştıkça çekim gücü azalır ve bir noktadan sonra diğer yıldızlardan farksız hale gelir. As-



lında karadelikler tümüyle kara değildirler. Stephen Hawking, 1970’lerde yaptığı yarı-klasik hesaplarla, karadeliklerin olay ufklarında termal bir ışımaya yaptıklarını gösterdi. Kuantum mekaniğindeki belirsizlik ilkesine göre, boşluk aslında tam anlamıyla boş değildir. Heisenberg’in bulduğu bu ilkeye göre, boşlukta enerji korunumu yasası çok kısa bir süre için ihlal edilip bir madde-karşımadde çifti oluşabilir. Tabii elektrik yükleri birbirinin tersi olduğundan, çok kısa bir süre içinde birbirlerini yok ederler ve böylece enerji korunumu yasası yeniden sağlanmış olur. Boşluktaki bu dalgalanma, deneylerle kanıtlanmış durumda. Eğer bu olay, bir karadeliğin olay ufkunun hemen dışında gerçekleş-

şirse madde-karşımadde çiftinden biri olay ufkunun içine girerken diğeri dışarıya kaçabilir. Ancak parçacık çifti karadeliğin güçlü çekim alanında ortaya çıktığı için, karadeliğin iki parçacık kadar enerji (=kütle) çekecek, buna karşılık (parçacıkların teki uzaya kaçtığı için) olay ufkunun içine düşen parçacık karadeliğe yarım kütle kazandırmış olacak, dolayısıyla bu alışverişten zararlı çıkan karadelik kütle yitirecektir. Dağılımı incelendiğinde, bu ısınmanın termal bir ışımaya olduğu görülür. Ancak çok büyük kütleli karadelikler için bu etki oldukça küçüktür. Dolayısıyla bugünkü evren için bu etki

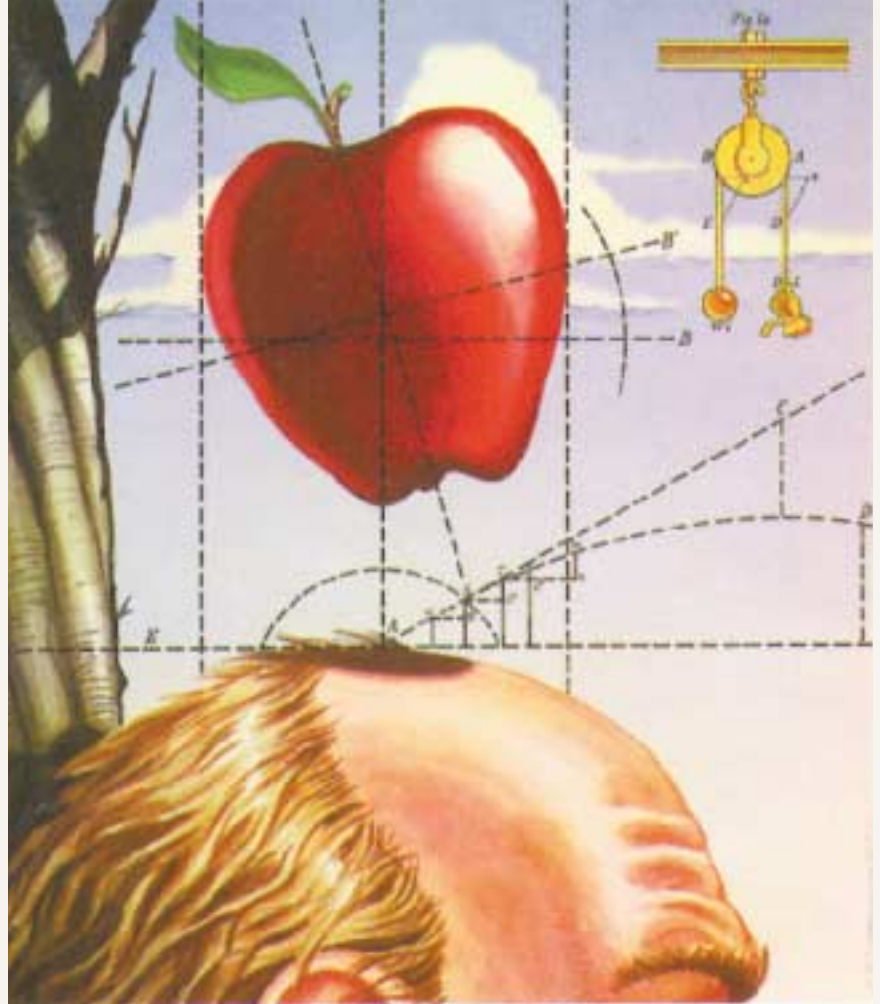
önemli değildir. Fizikte makroskopik (yani gözle görülebilen) bir sistemin termal özelliklerini incelemek için iki yaklaşım vardır: Termodinamik ve istatistiksel mekanik. İlkinde bu sistemi oluşturan atom ve moleküller gözardı edilir ve sistemin hacim, basınç sıcaklık gibi makroskopik parametreleri arasındaki ilişkiler incelenir. 19. yy’ın başında yapılan gözlem ve deneylerle termodinamik prensipleri bulunmuştu. Aynı yüzyılın ikinci yarısında geliştirilmeye başlanan istatistiksel mekanikteyse, sistemi

oluşturan parçacıkların mikroskopik özelliklerinden yararlanılarak sistem hakkında bilgi toplanır. Bu yöntemle termodinamikteki bütün sonuçlar elde edildiği gibi, fazladan bilgilere de ulaşılabilmektedir. Hawking’in gösterdiği gibi, karadelikler termal bir ışımaya yapar ve bunu mikroskopik olarak betimlemek, kuantum fiziğin önemli problemlerinden biridir. Sicim kuramı eğer gerçekten kuantum fiziğiyle kütleçekimini bağdaştırıyorsa, bu olayı açıklayabilmelidir. 1996’da Andrew Strominger ve Cumrun Vafa D-zar’ları kullanarak bazı tip karadelikler için bunu yapmayı başardılar. Bu, sicim/M-Kuramının en büyük zaferlerinden biri.

Sadık Değer
Boğaziçi Üniversitesi Fizik Bölümü

KÜTLEÇEKİMİ

Kütleçekimi, evrendeki 4 temel kuvvetin en zayıf olmasına karşın, evrenimizin büyük ölçekteki yapısını ve davranışını belirleyen kuvvet. Şiddetli ve zayıf çekirdek kuvvetlerinin etki erimleri çok kısa (yaklaşık atom çekirdeğinin çapı kadar, yani 10^{-13} cm). Elektromanyetik kuvvetse uzun erimli; ama evrendeki artı ve eksi yüklerin dengeli dağılmış olmasından dolayı, makroskopik olaylarda etkisi yok. (Aynı yüklerin birbirine uyguladığı itme kuvveti, zıt yüklerin birbirini çekmesiyle dengelenir.) 17. yüzyılda Isaac Newton, kütleçekimini matematiksel olarak ifade etmeyi başardı. Buna göre iki cisim birbirlerini, aralarındaki uzaklığın karesiyle ters, kütlelerinin çarpımıyla doğru orantılı bir kuvvetle çeker. Newton'un kuramı gündelik olayları açıklamada çok başarılıdır. Örneğin Güneş'ten uzak olan gezegenlerin hareketleri çok isabetli bir şekilde hesaplanabilir. Fakat bu kuramda iki cismin, birbirinin varlığından nasıl haberdar oldukları belli değil. Kurama göre, iki cisim arasındaki çekim kuvveti, birinin konumunda bir değişiklik yapar yapmaz, anında, yani sonsuz bir hızla değişmeli. Albert Einstein'ın 1905'te yayımladığı özel görelilik kuramına göre, ışık hızı evrende ulaşabilecek en yüksek hız. Dolayısıyla Newton'un kütleçekimi kuramıyla bir çelişki söz konusu. Einstein bu problemi 1915 yılında genel görelilik kuramıyla çözdü. Buna göre kütleçekimi aslında bir kuvvet değil, yalnızca maddenin uzay-zamanda yarattığı bükülme. Bunun nasıl olduğunu anlamak için bir yatağın üzerine ağırlıklar koyduğumuza varsayalım. Bu ağırlıklar yatak yüzeyinde çukurluklar oluşturacaktır. Ufak bir bilyeyi bu yatağın üzerinde yuvarlarsak, bilye düz bir çizgi şeklinde ilerlemeye çalışacak, ama yataktaki eğim



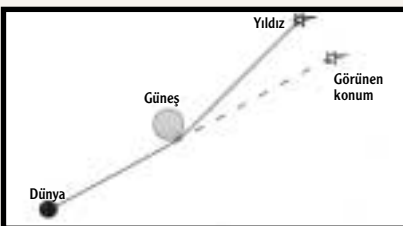
yüzünden rotası bükülecektir. İşte genel görelilik kuramında uzay-zaman bu örnekteki yatağa, gezegen ve yıldızlar da yatağın üzerindeki ağırlıklara benzetilebilir. Bilye, Einstein'a göre bir kuvvet tarafından çekildiği için değil, yatak yüzeyindeki bozukluk yüzünden yolundan sapmaktadır.

Bu kuram birçok gözlemlerle doğrulandı. Merkür'ün yörüngesinde görülen ufak bir sapmayı başarıyla açıkladı, uzak bir yıldızdan gelen ışığın güneşin yakınından geçerken büküleceğini doğru bir şekilde önceden bildirdi. (Bu, 1919'da Eddington tarafından gözlemlendi.)

Kütleçekiminin etkisi küçük olduğunda, Einstein'ın kuramından Newton'ununkine ulaşmak mümkün. İki kuram arasındaki fark ancak çekim etkisinin çok büyük olduğu durumlarda açığa çıkar. Bu nedenle günümüzde bile

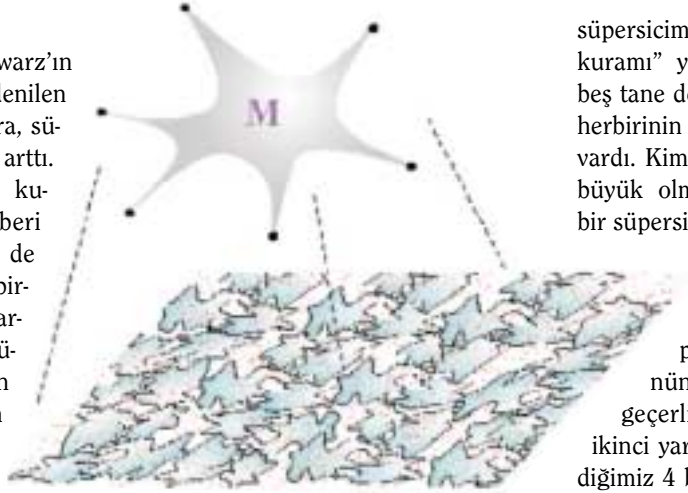
hâlâ birçok problemin çözümünde daha kolay olduğu için Newton'un kuramını kullanılmakta. Ama iki kuramın dünsünel düzeyde çok farklı olduğu unutulmamalı. Einstein'ın kuramı, aynı zamanda karadelikleri ve kütleçekimi ışınımını da öngörüyor. Bu çalışmasından sonra Einstein, hayatının son 30 yılını genel görelilik kuramıyla elektromanyetik kuramını (o zamanlar yalnızca bu iki kuvvet biliniyordu) birleştirmek için harcadı ve ne yazık ki başaramadı. Aslında bugün biliyoruz ki bu biraz erken bir denemeydi; henüz ne standart model, ne de süpersimetri ve benzeri birçok matematiksel kuram bulunmuştu. Yine de birleşik bir kuram arama fikrinin önemini vurgulaması açısından önemli bir çabaydı.

Sadık Değer
Boğaziçi Üniversitesi Fizik Bölümü



M-KURAMI

Michael Green ve John Schwarz'ın İlk süpersicim devrimi de denilen 1984'deki çalışmalarından sonra, süpersicim kuramına ilgi giderek arttı. 1970'li yıllarda süpersimetrik kuramların tanımlanmasından beri aralarında Stephen Hawking de bulunan birçok fizikçi, fiziğin birleşik kuramının bulunmasının artık çok yakın olduğunu düşünüyorlardı. 1984'ten sonra Green ve Schwarz'ın anomalilerden temizledikleri süpersicim kuramı, "herşeyin kuramı" olmaya en iyi aday olarak gösterilmeye başlandı. Ancak yıllar geçtikçe süpersicim kuramındaki di-



ğer problemlerin üstesinden gelinemedi. Herşeyden önce, çok fazla sayıda

süpersicim kuramı vardı. "Herşeyin kuramı" yalnızca bir tane olmalıydı; beş tane değil. İkincisi, bu kuramların herbirinin yalnızca yaklaşık tanımları vardı. Kimse çiftlenim sabitinin 1'den büyük olması durumunda, herhangi bir süpersicim kuramında ne tür bir fiziğin olabileceğini henüz anlamamıştı.

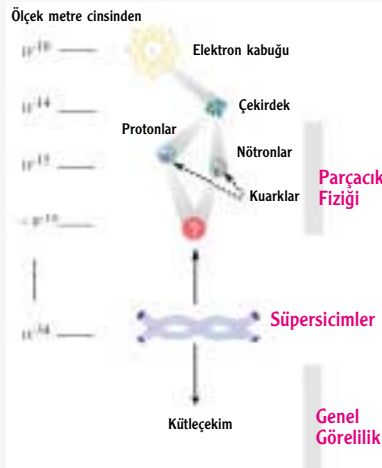
Bir diğer problemse süpersicim kuramlarının tümünün 10 uzay-zaman boyutunda geçerli olmasıydı. 80'li yılların ikinci yarısında, bu kuramlardan bildiğimiz 4 boyutlu fiziğin elde edilebilmesi için 10 boyuttan altısının kendi üzerine kapanmış, çok küçük ve -kuramın ve simetritelerin gerektirdiği-

Birleşik Fizik Kuramlarının Kısa Tarihi

Modern anlamıyla fiziğin başlangıcı olarak, Galileo'nun 400 yıl kadar önce hareketin kinematik özellikleri üzerine yaptığı çalışmaları alabiliriz. Galileo deneysel yöntemi ve doğrudan gözlem yöntemini kullanarak, yaklaşık ikibin yıldır kabul gören (ancak tümüyle yanlış olan) Aristo'ya ait fizik yasalarını değiştirmiş oldu. Kinematik yasalarıyla birlikte bu yasalar, "mekanik" in temel yasaları olarak adlandırıldılar. Tarihsel olarak ilk "birleştirme" diyebileceğimiz çalışma, yine Newton tarafından yapıldı. Kütleçekim yasasıyla Newton, yeryüzünde dalından düşen bir elmanın hareketiyle gökyüzündeki yıldızların hareketinin aynı fizik yasasıyla açıklanabildiğini gösterdi. Newton'ın yaşadığı çağda, bilinen tek bir kuvvet vardı: Kütleçekim kuvveti. Bu nedenle 19. yüzyıla değin, birçoklarınca Newton'un mekanik ve kütleçekim yasalarının evrendeki her olayı açıklayabileceği varsayıldı. Ancak 19. yüzyılın başında yeni bir kuvvetin varlığı, kuramsal ve deneysel olarak incelenmeye başlandı. Antik çağlardan beri, bir kumaşa sürülen kehribar çubuğun ufak talaş parçalarını çektiği biliniyordu. Ayrıca, pusula çok uzun zaman önce bulunduğu halde, pusulanın çalışmasını mümkün kılan kuvvetin ne olduğu kuramsal olarak bilinmiyordu. 19. yüzyılın başında Oersted, Weber, Ohm, Ampere ve Faraday, elektrik (kehribar kuvveti) ve mıknatıslarla yaptıkları çalışmalarla bu iki yeni kuvvetin doğasını bir miktar aydınlatıldılar. Elektrik ve manyetizma üzerine yaptığı çalışmalardan sonra Faraday, bir süre bu kuvvetleri tanımlayan denklemlerle mekanik yasalarının birleştirilip birleştirilemeyeceğini inceledi. Ancak bu araştırmasında başarısız oldu. Bu türden radikal bir kuram için henüz çok erkendi. Faraday'ın bu çalışmalarından kısa bir süre sonra bir başka İngiliz fizikçi, James

Clerk Maxwell, farklı gibi görünen elektrik ve manyetik kuvvetlerin aslında aynı kuvvetin farklı görünüşleri olduklarını gösterdi. Elektrik ve manyetik kuvvetleri birleştirerek elde edilen "elektromanyetizma" kuramı, modern anlamda ilk birleşik kuramdır. Ancak, henüz kimse Maxwell'in kuramıyla Newton'un kuramını nasıl birleştirebileceğini bilmiyordu. Maxwell'in kuramı, ışığın bir elektromanyetik dalga olduğunu ve hızının da elektromanyetizma kuramındaki iki sabit cinsinden ifade edilebildiğini öngörüyordu. Maxwell'in kuramından çıkarsanan bu sonuçlar 20. yüzyılın başında fizikteki en önemli problemlerden ikisine yol açtı. Bu problemlerden biri, ışığın içinde hareket ettiği ortamlarla ilgiliydi ve fizikçilerin büyük bir çoğunluğu bu ortamın "ether" adı verilen bir akışkan olması gerektiğine inanıyor. Diğer problemse, ışığın hızının gözlemcinin

hareket hızına bağlı olup olmadığıydı. Einstein, 1905 yılında "özel görelilik" kuramıyla bu her iki soruya da yanıt verdi: Işık hızı gözlemcinin hızına bağlı değildi ve ether yoktu. Einstein'ın kuramı yalnızca bu problemlere yanıt vermekle kalmadı; aynı zamanda Newton'dan beri kabul görmüş olan mekanik yasalarını da değiştirdi. Newton'un yasaları, her gün karşılaştığımız olaylardaki hızlar için doğru sonuçlar veriyor; ancak ışık hızına yakın hızlarda, ışığın evrendeki en büyük hız olma ilkesiyle çelişiyordu. Einstein özel görelilik kuramında, mekanik yasalarını yeni bir şekilde ifade etti ve klasik mekanik denklemlerini yüksek hızlar için de doğru sonuçlar verecek şekilde değiştirdi. Özel görelilik kuramını ortaya attıktan sonra Einstein dikkatini Newton'un diğer kuramına, kütleçekim kuramına yöneltti. Newton'ın kuramı özel görelilik kuramına aykırı olarak kütleçekim kuvvetinin "uzaktan etki" yoluyla cisimleri sonsuz bir hızda etkilediğini öngörüyordu. Ancak evrende sonsuz bir hız olamazdı. 1917 yılında Einstein, Newton'un bu kuramını da geliştirdi ve kütleçekim kuvvetini tanımlamak için "genel görelilik kuramı" nı ortaya attı. Bu kuramda kütleçekim bir kuvvet olarak görülüyor; ancak uzay-zamanın, içinde bulunan kütleler dolayısıyla eğilmesinin bir sonucu olarak kabul ediliyordu. Uzaydaki bu eğilmenin dolaylı sonuçları, yapılan gözlemlerle desteklendi. Böylece genel görelilik kuramı özel görelilik kuramıyla birlikte, evrendeki büyük ölçekli yapıları en başarılı şekilde açıklayan kuram olarak kabul edildi. 19. yüzyılın sonunda ve 20. yüzyılın başında, fizikteki bir diğer yenilikse evrendeki küçük ölçekli yapılar hakkındaki kuramların geliştirilmesi oldu. Atom fikri kimyaacılar arasında öteden beri vardı; ancak atomun doğası hakkında fiziksel bir kuram 19. yüzyılda oluşturulamamıştı. Atom, maddenin bölünemez en küçük yapıtaşı olarak kabul ediliyordu. Ancak 1897'de Joseph John Thompson



zı çok özel niteliklere sahip Calabi-Yau uzayları olması gerektiği ortaya atılmıştı. Ancak 6 boyutlu kaç Calabi-Yau uzayı olduğu bilinmiyordu ve denenilen hiçbir Calabi-Yau uzayı 4 boyutta beklenen cevabı vermedi. Bu nedenlerden ve bilinen fiziğe bir türlü ulaşamamasından ötürü birçok süpersicim kuramcısı 80'li yılların sonuna doğru süpersicim kuramına olan ilgisini giderek kaybetti. Ancak, hâlâ bu problemler üzerinde kafa yoran ve kurama olan inançlarını kaybetmemiş bir grup fizikçi, ilginç sonuçlar bulmaya devam ediyordu. Bu ilginç çalışmalar, tümüyle farklı gibi görünen beş süpersicim kuramı arasındaki ilişkileri araştıran çalışmalardı. Bunlar doruk noktasına Witten'in 1995'te Güney California Üniversitesi'nde yaptığı konuşmayla ulaştı. Witten, bu konuşmasında süpersicim kuramlarında kullanılan "pertürbasyon yönteminin" ötesine nasıl geçilebileceğine ilişkin bir strateji ilan etti. Bu strateji aynı za-

manda beş süpersicim kuramının, aslında farklı olmadıklarını iddia ediyordu. Bu stratejinin adı "dualite"ydi. Dualite sözcüğü, fizikçilerin başlangıçta çok farklı gibi görünen, ama gerçekte aynı fiziği anlatan iki farklı kuramın eşliğini anlatmak için kullandıkları bir terim. Dualitenin çok basit örnekleri olabilir: kuantum kuramının Japonca ya da Türkçe yazılması, o kuramı değiştirmez; ancak Japonca bilmeyen bir Türk için Japonca yazılmış bir kuantum kuramı, tümüyle anlaşılmaz. Bunların aslında aynı şey olduğunu, ancak her iki dili bilen bir fizikçi anlayabilir. Bu örneğe benzer şekilde, Witten'in 1995'teki konuşmasından önce (birçoklarıncı "İkinci Süpersicim Devrimi" olarak adlandırılmıştır) değişik süpersicim kuramları üzerinde çalışan fizikçiler, bir ölçüde değişik dillerde yazılan kuramları çalışan insanlar gibiydiler. Bu kuramlar arasındaki dualite ilişkilerini göstermek, bu diller arasında bir sözlük hazırlamak gibiy-

di. 1995'ten sonra bu çok dilli sözlükteki kelimelerin karşılıkları (dualiteler) araştırıldı ve beş süpersicim kuramıyla 11 boyutlu süperçekim kuramının, daha temel bir kuramın özel durumları olduğu gösterildi. Bu kurama Witten tarafından verilen isim "M-kuramı"ydı. "Kuramın yalnızca bir tek harften oluşan bir ismi var" demişti Witten. "Kuramı daha iyi anladıkça "M"nin ne olduğunu da anlayacağız." "M", birçoklarına göre "membrane" (=zar) demek. Çünkü M-kuramının anlamlı olduğu 11 boyuttaki temel cisim, sicim değil, zar.

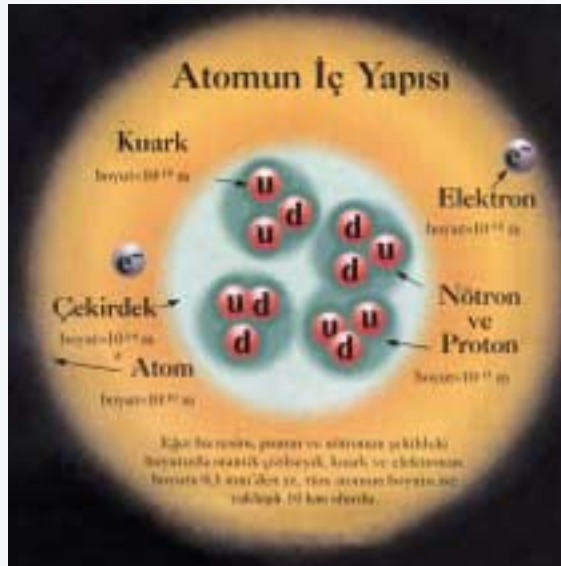
Süpersicim kuramları arasındaki en az karmaşık dualite, T-dualitesi. En basit T-dualitesi örneğinde, yarıçapı R olan bir çember içeren bir uzayda tanımlanmış IIA tipinde süpersicim kuramıyla, yarıçapı 1/R olan bir çember içeren başka bir uzaydaki IIB tipi süpersicim kuramı özdeğistir. Benzeri bir dualite de süpersicim kuramlarının zayıf ve şiddetli çiftlenim rejimleri ara-

tarafından elektron ilk kez gözlenince, atomun da parçacıklardan oluşabileceği fikri gelişmeye başladı. Elektron, gözlemi yapılan ilk temel atom-altı parçacık olduğu için, 1897 yılı "parçacık fiziği"nin başlangıç yılı olarak kabul edilir. Bu keşiften üç yıl sonra, 19. yüzyılın son yılında, Max Planck, sonradan devrim yaratacak olan çalışmasında "kuantum" fikrini ortaya attı. Planck, kuantum fikrini kullanarak, o ana kadar anlaşılabilen kara-cisim ışıması probleminin çözülebileceğini gösterdi. Planck'ın kuantum fikrinden yola çıkan Einstein, ışığın enerjisi paketler halinde taşınması gerektiğini ileri sürdü. Planck, bu fikrin fizik bilimini derinden saracağına biliyordu. Ancak ışığın paketler biçiminde yayılması düşüncesi, Maxwell'in elektromanyetizma kuramında ileri sürüldüğü gibi, ışığın dalga biçiminde yayılması fikriyle çelişiyordu. Maxwell'in kuramının doğruluğu deneylerle gösterildiğine göre, kuantum fikrinde henüz ayırına varılmamış önemli bir sorun olmalıydı. Ancak ilerleyen yıllarda Einstein, Compton ve Raman tarafından yapılan çalışmalar gösterdi ki, ışığın kuantumlarından oluşması fikri kullanılarak, ışığın dalga kuramıyla açıklanamayan bazı fiziksel olaylar açıklanabilir. Niels Bohr'un kuantum fikrini kullanarak yaptığı atom modeli, hidrojen atomunun ışınma spektrumunu çok yüksek bir kesinlikle açıkladı. Bu model yapıldıkça proton da gözlenmiş ve protonlarla elektronları içeren bir atom modelinin Rutherford saçılmasını açıklayabileceği gösterilmişti. Ancak hâlâ kuantum kuramının temel denklemleri bilinmiyordu. Louis de Broglie'nin, her bir parçacığa karşılık bir dalga olabileceği fikrinden yola çıkan Erwin Schrödinger, böyle bir denklem yazdı. Ancak kuramın Schrödinger denkleminin matematiksel ifadesi (formülasyonu) hâlâ bazı temel problemlerin çözümü için yeterli değildi. Sonunda 1927 yılında Brüksel'de toplanan konferansta "kuantum mekaniği"nin matematiksel temelleri atıldı. Bu konferansta Niels Bohr ve Werner Heisenberg "dalga-parçacık ikilemi" fikrini ve "belirsizlik ilkesi"ni

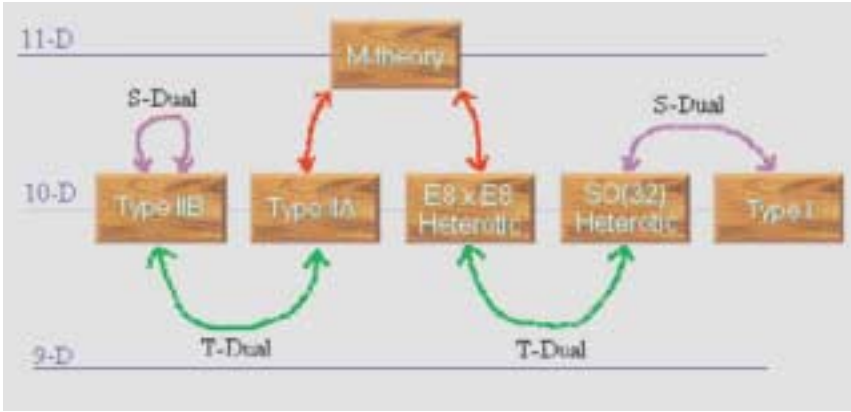
ortaya attılar. Heisenberg'in bulduğu kuantum kuramını matrislerle ifade etme yöntemi, kuantum kuramını sağlam matematiksel temellere oturttu.

Böylece 1930'lu yıllara gelindiğinde fizikte iki önemli kuram vardı: Genel görelilik kuramı evrendeki büyük ölçekli yapılarla, kuantum kuramıysa evrendeki küçük ölçekli yapılarla ilgiliydi. Bu iki kuram da birçok gözlem ve deneylerle des-

şekilde kuantum kuramı da atom ölçeğinde çok başarılı olmasına karşın, daha büyük ölçeklerde, gözlemlerle çelişen sonuçlar veriyordu. Bunlara ek olarak her iki kuramın ayrıntıları incelendiğinde, aslında bazı fiziksel durumlar için birbirleriyle çelişen sonuçlar verdikleri görüldü. Bu çelişkileri giderecek ve her iki kuramı da kapsayarak evrenin hem büyük ölçekli hem de küçük ölçekli yapılarını açıklayabilecek bir kuram gerekiyordu artık. Einstein, hayatının son yirmi yılında böyle bir kuram geliştirmeye çalıştı. Ancak böyle bir kuram için hâlâ çok erkendi ve Einstein dünyaya penceresini kapatıp bu kuramı bulmakla uğraşırken diğer fizikçiler çok önemli ilerlemeler kaydettiler. Bu ilerlemelere geçmeden, önce Theodor Kaluza tarafından ortaya atılan ve sonra Oscar Klein tarafından geliştirilen başka bir birleşik kuram fikrinden bahsetmek yerinde olur. Kaluza, Einstein'ın genel görelilik kuramını dört yerine beş boyutta tanımladı ve gösterdi ki eğer beşinci boyut bir çember şeklinde alınır ve sonra çemberin yarıçapı sıfıra gönderilerek beşinci boyut yok edilirse, geriye Einstein'ın dört boyutlu genel görelilik kuramı ve Maxwell'in elektromanyetizma kuvveti kalır. Böylece Einstein'ın ve Maxwell'in kuramları birleştirilmiş olur. Ancak bu kuramın dört boyutta istenilen kuramlara ek olarak, fiziksel olmayan birçok (sonsuz tane) parçacık da içerdiği anlaşıldı. Kaluza ve Klein bu problemin üstesinden gelemediler ve sicim kuramı ortaya çıkanı kadar bu fikir rafa kaldırıldı. Sicim kuramları dörtten yüksek boyutlarda tanımlanırlar ve bilinen dört boyutlu fiziğe ulaşmak için Kaluza ve Klein'in bu dahiyane fikirleri çok kullanışlıdır. Einstein birleştirilmiş alan kuramıyla uğraşırken, fizikteki ilerlemelerden birisi Paul Dirac tarafından yapıldı: Dirac, elektronun hareketini tanımlayan ünlü denklemini yazdı. Bu denklem aynı za-



teklennmiş olmalarına karşın hâlâ tam olarak anlaşılabilen özelliklere sahiptiler. Schwarzschild ve daha sonra birçokları, genel görelilik kuramının fiziksel olarak kabul edilemez tekil çözümler içerdiğini göstermişlerdi. Einstein, kuramdan bu tür sonuçlar elde edilmesinin, kuramın hâlâ tam anlamıyla tanımlanmadığı anlamına geldiğine işaret etti. Daha iyi tanımlanmış bir kuram bu tür fiziksel olmayan sonuçlar içermeyecekti. Benzeri



sındadır. Bu tip dualiteye S-dualitesi denir. Witten bu dualiteyi kullanarak süpersicim kuramlarındaki pertürbasyon analizinden gelen sorunların nasıl çözülebileceğini gösterdi. Örneğin IIA tipindeki kuramda, çiftlenim sabiti büyüdükçe, kuram giderek 11 boyuttaki süperçekim kuramının zayıf çiftlenimdeki durumuna yaklaşır. Burada çiftlenim sabitiyle çember şeklindeki 11. boyut arasında bir bağlantı vardır ve

çiftlenimin büyümesi çemberin yarıçapının artması şeklinde kendini gösterir. İlerleyen yıllarda birçok kuram arasında bu türden ilişkiler olduğu anlaşıldı. Bir kuramın şiddetli çiftlenimdeki durumu, bir başka kuramın zayıf çiftlenimdeki durumuyla aynıydı. Böylece S-dualitesi kullanılarak, bir kuramın daha önce hakkında hiçbir şey bilinmeyen (pertürbasyon analizinin dışında kalan) kısmı, ona “dual” olan di-

ğer bir kuramın pertürbasyonla incelenebilen kısmı yardımıyla incelendi. Bu sayede, pertürbasyon analizinden pertürbasyon analizi ötesi bilgi sağlanabildi. Peki, farklı kuramlar arasında S-dualitesi olması neden bu kuramları daha büyük bir kuramın bir parçası kılsın? Bütün bu kuramları ve aralarındaki dualite ilişkilerini kapsayan bir M-kuramının olduğu, yalnızca bir öngörüdür. Bu öngörüğü daha iyi anlamak için şu örnek verilebilir: Bilindiği gibi sıvı su, buz ve buhar, aynı maddenin (H₂O) farklı görünümleridir. Farklı sıcaklıklarda H₂O'nun farklı fiziksel durumlarını gözleriz; ancak temelde bunların herbirinin H₂O olduğunu bilim bize göstermiştir. Benzer şekilde çiftlenim sabiti değiştirildikçe (sıcaklığın artırılıp azaltılması gibi) fizikçiler farklı kuramlarla karşılaşmalar ve bunların hepsinin –henüz ne olduğunu bilmedikleri– M-kuramının (yukarıdaki örnekteki H₂O gibi) farklı görünümüleri olabileceğini öngördüler.

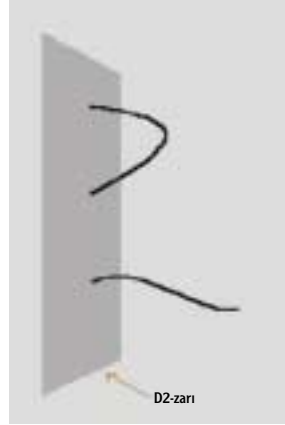
FERMİYONLAR			madde bileşenleri spin=1/2, 3/2, 5/2....		
Leptonlar spin=1/2			Kuarklar spin=1/2		
Tad	Kütle GeV/c ²	Elektrik yükü	Tad	Yaklaşık Kütle GeV/c ²	Elektrik yükü
ν_e elektron nötrinosu	$< 1 \times 10^{-4}$	0	u yukarı	0.003	2/3
e elektron	0.000511	-1	d aşağı	0.006	-1/3
ν_μ muon nötrinosu	< 0.0002	0	c çirimsiz	1.3	2/3
μ muon	0.106	-1	s şarpsız	0.1	-1/3
ν_τ tau nötrinosu	< 0.02	0	t üst	> 175	2/3
τ tau	1.7771	-1	b alt	4.3	-1/3

manda özel görelilik kuramının kuantum mekaniğinde kullanıldığı ilk örnekti. Dirac ayrıca kuantum mekaniğini Schrödinger ve Heisenberg'e göre daha sağlam matematiksel temellere oturttu. Bu arada Chadwick tarafından nötron da bulunmuş ve atomun içinde protonlar ve elektronlarla beraber nötronların da bulunduğu anlaşılmıştı. Bir diğer ilerleme de Enrico Fermi tarafından yapıldı. Fermi ve çalışma arkadaşları, atomun çekirdeğinde proton ve nötronların birbirleriyle sadece kütleçekimsel ve elektromanyetik kuvvetlerle değil, aynı zamanda “zayıf” ve “şiddetli” diye adlandırılan çekirdek kuvvetleriyle de etkileştiklerini ileri sürdüler. Bunlardan zayıf çekirdek kuvveti, daha önce Antoine Henri Becquerel ve Curie'ler tarafından gözlenen radyoaktivitenin varolmasının nedeniydi. Şiddetli çekirdek kuvveti ise çekirdek proton ve nötronları bir arada tutan kuvvetti. Fermi, zayıf çekirdek kuvvetinin bir

ölçüde başarılı bir modelini yaptı; ancak şiddetli çekirdek kuvveti, uzun süre kuramsal açıklamaya direndi. Şiddetli çekirdek kuvvetinin kuantum kuramı yapılmadan önce elektromanyetik kuvvetin kuantum kuramı, Richard Feynman, Julian Schwinger, Freeman Dyson ve Sin-Itiro Tomonaga'nın çalışmaları sonunda ortaya atıldı. Bu kuram kuantum elektrodinamiği (KEDİ) denmekte. Bu kuram, bir “kuantum alan kuramı” şeklinde ifade edilmişti ve bir simetri grubunun varlığı, kuramın en önemli özelliğiydi. Kuramın kurucuları gösterdiler ki elektromanyetik kuvvet, aynı zamanda ışığın kuantumu olan foton tarafından taşınır. Foton, kütleli olmayan; ama momentumu, de Broglie formülü uyarınca ışığın frekansı ile ilişkili olan bir parçacıktır. Şiddetli çekirdek kuvvetinin doğasıyla ilgili ilk önemli çalışma, Japon fizikçi Hideki Yukawa tarafından yapıldı. Ancak şiddetli çekirdek kuvvetinin kuantum alan

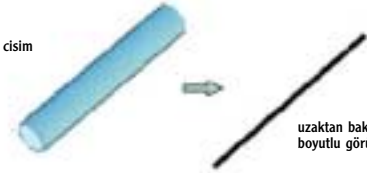
kuramı şeklinde yazılması, Murray Gell-Mann tarafından gerçekleştirildi. Gell-Mann (ve ondan bağımsız olarak Yuval Ne'eman), baryon sınıfından olan proton, nötron gibi parçacıkların belli bir simetri grubu içinde sınıflandırılabilirliklerini keşfetti. Bu simetri grubunun özelliklerini kullanarak Gell-Mann, baryonların “kuark” adını verdiği daha temel parçacıklardan oluşması gerektiğini ortaya attı. Gell-Mann'ın, o zaman bilinen parçacıkları sınıflandırmak için gerek duyduğu üç kuark “aşağı”, “yukarı” ve “garip” kuark olarak adlandırıldı. Örneğin proton, bir aşağı ve iki yukarı kuarktan oluşur. Sonraki yıllarda bulunan diğer parçacıklarla, gerek duyulan kuarkların sayısı altıya çıktı. “Tılsımlı”, “alt” ve “üst” diye adlandırılan diğer üç kuark da yeni bulunan baryonların yapı taşları olarak öngörüldüler. Gell-Mann ayrıca şiddetli çekirdek kuvveti fizikindeki diğer bazı bulguları açıklayabilmek için, kuarkların üç değişik “renk” durumuna sahip olması gerektiğini ileri sürdü (burada bahsedilen “renk”, ışığın oluşturduğu bilinen renkle yalnızca isim benzerliğine sahiptir). Varlığı öngörülen kuarkların hepsi bugüne kadar gözlemlenmiş durumda. Ancak burada unutulmaması gereken nokta şu ki, şiddetli çekirdek kuvvetinin kuantum alan kuramına göre, kuarklar ancak baryonların içinde olabilirler; yani kuarkları tek başlarına elde edemeyiz. Gell-Mann'ın kuramı sadece kuarkları değil, aynı zamanda şiddetli çekirdek kuvvetinin taşıyıcısı olarak sekiz adet “gluon”un da varlığını öngörür. (Gluonların varlığı, Gell-Mann'ın çalışmasından çok daha önce Yoishiro Nambu tarafından ileri sürülmüş, ancak bu düşünce o zaman pek ilgi görmemişti.) Gluonların hepsi elektromanyetik kuvveti taşıyan foton gibi kütlelesizdirler. Gell-Mann'ın, şiddetli çekirdek kuvvetini bir kuantum alanı olarak tanımlayan bu kuramından sonra, kuantum alan kuramı olarak yazılmamış yalnızca iki kuvvet kalmıştı: zayıf çekirdek kuvveti ve kütleçekim kuvveti. Bu kuvvetlerden zayıf çekirdek kuvvetinin kuantum alan kuramı şeklinde ifadesi, 60'lı yılların sonunda bağımsız olarak Steven Weinberg ve Abdus Salam tarafından yapıldı. Zayıf çekirdek kuvveti, elektromanyetik ve şiddetli çe-

Yukarıda anlatıldığı gibi dualite ilişkileri 11 boyutta tanımlanan süperçekim kuramının da beş süpersicim kuramı kadar önemli olduğunu ortaya koydu. M-kuramı da, bu 11 boyutlu süperçekim kuramının şiddetli çiftlenimdeki formu olarak tanımlandı. Ancak Texas A&M Üniversitesi'nden Michael Duff ve Boğaziçi Üniversitesi'nden Rahmi Güven, 11 boyutlu süperçekim kuramında 2 boyutlu zar ve 5 boyutlu "5-zar" ("P" boyut sayısı olmak üzere, yüksek boyutlu yüzeylere kısaca "p-zar" denir) gibi cisimler olduğunu gösterdiler. Çiftlenim sabiti artırıldıkça bu cisimlerin, kuramın temel cisimleri olması beklenmelidir. Kısacası M-kuramında temel cisim yalnızca sicim olamaz; kuramın tanımlanmış şekline göre 2-zar ve 5-zar da kuramın temel cisimi olarak kullanılabilirler. İkinci süpersicim devriminden hemen sonraki en önemli gelişme California Üniversitesi'nden Joseph Polchinski tarafından gerçekleştirildi.



Büzülme

3 boyutlu cisim



uzaktan bakıldığında tek boyutlu görünür.

sıkışmış 6 boyutlu manifold



Uzaktan bakıldığında 0 boyutlu görünür

Polchinski, aslında üzerlerinde çok çalılışmış beş süpersicim kuramının üçünde de (tip I, IIA, IIB), sicimlerden başka yüksek boyutlu cisimler de olduğunu gösterdi. D-zar olarak adlandırılan bu cisimler, her zaman bir açığının bittiği yerde bulunurlar. Böylece 1995 yılı biterken anlaşılıyordu ki süpersicim kuramı, ya da yeni ismiyle M-kuramı, çeşitli boyutlarda (0-zar = parçacık, 1-zar = sicim, 2-zar = zar, 3-

zar, ..., 9-zar) cisimleri içeren bir kuramdır. Birçok temel cisim içeren bir kuram, bir tek temel cisim içeren bir kuramdan daha karmaşıktır, ama aynı zamanda daha kullanışlıdır. Yeni kuramın ilk büyük başarısı, kara deliklerin D-zarlar kullanılarak modellenmesiyle elde edildi. Bu çok önemli bir başarıydı, çünkü genel görelilik kuramındaki karadeliklerle ilgili problemlerin (en ünlüsü olan "bilginin kaybol-

Etkileşimlerin Özellikleri

Özellik	Etkileşim	Etkileşim Türü			
		Gravitasyonel	Zayıf	Elektromanyetik	Şiddetli
Etki:	Kütle-Enerji	Tal	Elektrik Yükü	Renk yükü	İkincil
Etkilenen parçacıklar:	Hepsi	Kuarklar, Leptonlar	Elektriksel olarak yüklü	Kuarklar, Gluonlar	Hadronlar
Taşıyıcı parçacıklar:	Graviton	W^+ W^- Z^0	γ	Gluonlar	Mecmualar
Şiddet:	10^{-41}	0.8	1	25	Kuantum etkileşimleri
uzaklarda 10^{-39} m mesafede bulunan iki z kuark için	10^{-41}	10^{-4}	1	60	
uzaklarda 3×10^{-17} m mesafede bulunan iki z kuark için	10^{-36}	10^{-7}	1	Hadronlar	20
tekilim noktasındaki kuvvetlerin gücüne oranında çekirdekte bulunan iki proton için				Hadronlar	

kirdek kuvvetlerinden farklı olarak, kütlesi olan ve W^+ , W^- ve Z^0 olarak adlandırılan, üç parçacık tarafından taşınır. Bu parçacıkların kütleleri temel parçacık ölçeklerinde çok büyük olduğundan, zayıf çekirdek kuvveti yalnızca çok kısa uzunluklarda (atom çekirdeğinin 100^{de} biri kadar) etkilidir. Ancak zayıf kuvvetin kuantum alan kuramı oluşturulana kadar, bu tür kuramlarda kuvvet taşıyıcı parçacıkların nasıl kütleli hale getirilebileceği bilinmiyordu. Kuramdaki kuvvet taşıyıcı parçacıklara kütle kazandıran mekanizma, tam gerektiği anda Peter Higgs ve Thomas Kibble tarafından geliştirildi. Higgs ve Kibble'in önerdiği yöntemde, kuramdaki simetri "Higgs" adı verilen bir parçacık tarafından bozulur ve kuvvet taşıyıcı parçacıklar Higgs parçacığıyla etkileşerek kütle kazanırlar. Higgs mekanizması Weinberg ve Salam tarafından ustaca kullanıldı. Ortaya atıkları kuram yalnızca zayıf çekirdek kuvvetini tanımlamakla kalmıyor, aynı zamanda elektromanyetik kuvveti de içeriyordu. Diğer bir deyişle, Weinberg ve Salam elektromanyetik ve zayıf çekirdek kuvvetlerinin kuantum ifadelerini aynı kuramda birleştirdiler. Bu nedenle bu kurama "elektrozayıf kuramı" ismi verildi.

Elektrozayıf kuramı ve Gell-Mann'ın şiddetli çekirdek kuvvetini tanımlayan "kuantum renk dinamiği" kuramı beraberinde doğada gözlenen üç

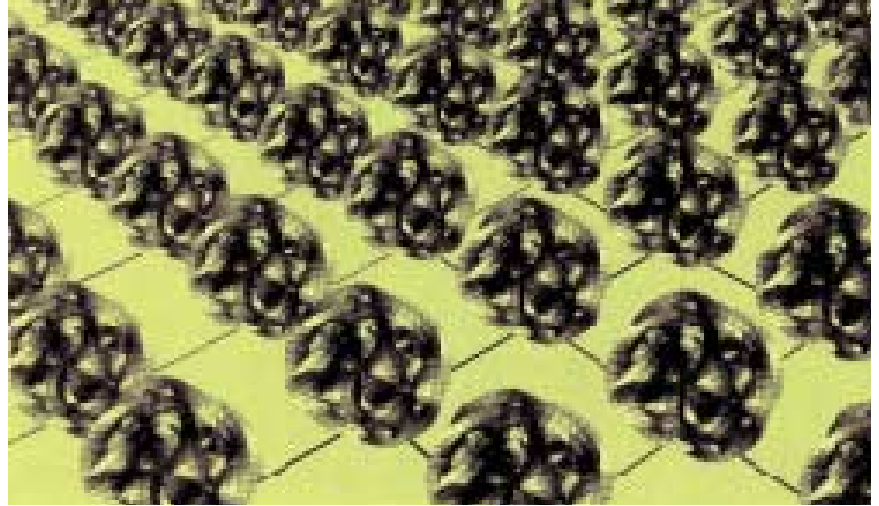
kuvveti (elektromanyetik kuvveti, zayıf ve şiddetli çekirdek kuvvetlerini) ve maddeyi oluşturan temel parçacıkları başarıyla açıklar. Bu iki kurama birlikte "standart model" deniyor. Standart modele göre madde leptonlardan (elektron, muon, tau ve bunların nötrinoları) ve kuarklardan oluşuyor. Bunlardan başka, yukarıda bahsedilen kuvvet taşıyıcı parçacıklar ve Higgs parçacığı var. Kuramda doğal olarak bulunmasa da kütleçekim kuvvetinin taşıyıcısı olarak öngörülen "graviton" parçacığı da bu listeye dahil ediliyor. Standart model deneylerle başarıyla sınanmış ve Higgs parçacığı dışında kuramın öngördüğü bütün parçacıklar gözlenmiş durumda. Bu nedenle standart model, parçacık fiziğinde ve birleşik kuramlarda geline en başarılı nokta. Ancak, standart model kütle çekimi kuramını içermiyor (graviton, standart modelin doğal bir üyesi değil). Bu nedenle birleşik kuramı oluşturma amacı açısından standart model son nokta sayılmaz. Kütleçekim kuvveti Einstein'ın genel görelilik kuramında tanımlanır. Bu kuvvetin de kuantum alan kuramı şeklinde yazılmasına çalışılmış ancak bu çabalar hep başarısızlıkla sonuçlanmıştır. Bu tür kuramlara "kuantum kütleçekim kuramları" denir. Kütleçekimini standart model içinde dahil etmenin yanı sıra, diğer bir yaklaşım da standart model içindeki değişik kuvvetlere karşılık gelen simetri grup-

larını, daha büyük bir simetri grubu içinde birleştirmek. Bu tür büyük simetri grubu içeren kuramlara "büyük birleşik kuramlar" (kütleçekimi içermedikleri halde!) denir. Standart modelden daha sonra ileri sürülen hiçbir kuantum kütleçekim kuramı ve hiçbir büyük birleşik kuram, beklenildiği kadar başarılı olmadı. Bu durum fizikçileri yeni arayışlara ve süpersimetri, süper kütleçekimi, süpersicim, süperzar ve M-kuramı gibi daha büyük simetriten içeren, bazılarında temel konuyu parçacık olmayan kuramlar geliştirmeye itti. Bu kuramlar arasında süpersicim ya da yeni ismiyle M-kuramı, her şeyin birleşik kuramı olma yolunda en ümit vereni. Çünkü süpersicim kuramları diğer kuantum kütleçekim kuramlarının aksine, kütleçekim kuvvetini taşıyan parçacığı (graviton) doğal olarak içerirler. Ayrıca süpersicim kuramlarında bilinmeyen parametreler, standart modele göre çok daha az; bu da kuramın tahmin gücünü çok yükseltir. Ünlü süpersicim kuramcısı Edward Witten'ın dediği gibi "Nasıl görelilik kuramları ve kuantum kuramı 20. yüzyılın kuramları olduysa, süpersicim kuramı da 21. yüzyılın kuramı olacaktır".

Cemsinan Deliduman
Feza Gürsey Enstitüsü Çengelköy, İstanbul

ması” paradoksu dahil) M-kuramıyla çözülebileceği ümidi doğdu. Sonraki yıllarda D-zarlar, kuramsal yüksek enerji fiziğinde diğer birçok alanda da başarıyla kullanıldı ve D-zarları kullanarak model kurmak –şaka yollu– “D-zar teknolojisi” olarak isimlendirildi. D-zarların çok sayıdaki önemli fiziksel özellikleri ve dinamik olmaları, içinde yaşadığımız evrenin de bir D-zar olup olmadığı sorusunu akla getirmekte.

Geleneksel olarak 10 boyutlu süpersicim kuramlarından ya da 11 boyutlu M-kuramından 4 boyutlu bilinen fiziğe ulaşmak için, fizikçiler 6 ya da 7 boyutlu, çok küçük ölçeklere büzüşmüş ve 4 boyutlu uzayın her noktasında bulunan çok özel nitelikli mini uzaylar olduğunu düşündüler. Bu mini uzayların fazladan nitelikleri, 4 boyutlu fizikteki birçok parametreyi de belirliyordu. Ancak anlaşıldı ki, istenen niteliklere sahip 6 ya da 7 boyut-



Sicim kuramına göre uzayın her noktası Calabi-Yau uzayları (manifoldları) biçiminde biraraya toplanmış 6 ek uzay boyutu ile doludur.

lu onbinlerce değişik mini uzay olabilir ve hangi büzüşmüş mini uzayın kullanılması gerektiğini, var olan tekniklerle kuramdan çıkarsamak mümkün değildir. Onbinlerce farklı mini

uzayı da tek tek denemek pratik ve mantıklı olmadığından fizikçiler, M-kuramından 4 boyutlu fiziği elde etmek için daha farklı yöntemler araştırdılar.

Supergravitasyon Kuramı: Keşfi ve İlk Yılları

Süpergravitasyon kuramı 26 yıl önce, 1976 Nisan ayında açıklandığında fizikçiler arasında büyük heyecan uyandıran bir olay olmuştu. O günlerde doğanın temel etkileşim kuvvetlerinden üçünü (elektromanyetik kuvvetle atom çekirdekleri içinde etkin olan zayıf ve şiddetli etkileşim kuvvetlerini) kapsayan birleşik, kuantumlu ayar alan kuramları, artık genel kabul görmeye başlamışlardı. Bugün standart model adı verilen bu birleşik alan kuramlarına, bir anlamda doğadaki en önemli etkileşimleri, yani gravitasyon ya da başka bir deyişle kütleçekim kuvvetlerini dahil etmek, çok önem kazanan bir sorun haline gelmişti. Bu sorun daha doktorami yaparken ilgimi çekmekteydi. Tezimi 1976'da ODTÜ'de verdikten sonra aynı yıl Boston'a, süpergravitasyon kuramını keşfedenlerin yanına gittim ve sonraki gelişmelerin içinde yaşadım; konuya katkılarım oldu. Bugün süpergravitasyon kuramlarının, o ilk heyecanlı günlerinde gibi temel nitelikte olmadıkları anlaşılmış bulunuyor. Ama bu kuramlar önemlerini yitirmiş değiller. Çünkü, sonraki yıllarda her şeyin kuramı olma iddiasıyla ön plana çıkarılan süpersicim modellerinin fiziksel öngörülerini, ancak birer etkin kuantumlu sicim alan kuramı gibi yorumlanan 10 boyutlu süpergravitasyon kuramları kapsamında verilebilmekte. Bu yazıda kuantumlu gravitasyon kuramlarını kapsayan daha genel bir bakış açısından ve kendi yaşadıklarımı da katarak süpergravitasyon kuramlarının keşfini ve ilk yıllarını anlatacağım.

Geçen yüzyılın son Nobel Ödülü Hollandalı iki kuramsal fizikçiye, Gerardus 't Hooft ile Martinus Vel tman'a, elektrozyayı etkileşimlerin kuantumlu alan kuramlarının matematiksel yapısını açıklığa kavuşturmuş olmaları nedeniyle verilmişti. (Bkz. T. Dereli, “Elektrozyayı Etkileşimlerin Kuantumlu Alan Yapısı”, TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi, Şubat 2000.) Ödülü kazandıran çalışmalar, aslında 1971'de 't Hooft'un Utrecht Üniversitesi'nde hocası Veltman yanında yaptığı doktora tezinde yer almaktaydı. M. Veltman yetenekli ve sıradışı, yalnız kalma pahasına bile hep kafasının doğrusuna gitmiş, bugüne hakim olan Amerikan

tarzına uymayan türde bir bilimadamıdır. Yıllarca ısrarla Higgs parçacıklarına gerek olmadığını savundu. 1999'da Nobel Ödülü'nü eski öğrencisiyle paylaşmadan birkaç ay önce Michigan Üniversitesi'nden emekli olması sonrasında da bunu hararetle savunmakta.

Higgs parçacıkları o kadar arandıkları halde hâlâ gözlemlenemediklerine göre, pekâlâ haklı da çıkabilir. 't Hooft'un tıpkı kendisi gibi kafasının doğrusuna gidiyor olmasından “Artık beni takmaz oldu” diye biraz gururla karışık şikayet ediyor. M. Veltman, daha 1960'larda kuantumlu alan kuramlarının renormalizasyonu sorununun üstüne gitmiş kuramsal fizikçilerden biri. Bu amaçla uzun ve karışık Feynman diyagramı hesaplarının üstesinden gelebilmek için, bilgisayarda sembolik hesap yapan ilk program paketini hazırladı. SCHOENSHIP adını verdiği bu program yardımıyla, öğrencileriyle birlikte ayar alan kuramlarını incelemeye aldı.

Genç ve yetenekli öğrencisi 't Hooft, elektrozyayı etkileşim modellerinin renormalizasyonu için, kendisi de önemli görüşler katarak kısa zamanda verilen hesapları tamamladı. Hocasından izin alıp kuramsal Higgs parçacıklarını da inceledi ve bulgularını ayrıca yayınladı. Yıllar sonra Nobel Ödülü'nü getirecek olan bu makaleler 1972 ve 1973 yıllarında Nuclear Physics dergisinde sırayla basıldılar. Genelde ayar alan kuramlarının asimptotik özgürlüğünün 1973'te gösterilmesine de 't Hooft öncülük etti ve bugün kuantum kromodinamiği dediğimiz quark-gluon modeli kabul görmeye başladı. Böylece 1974 yılına gelindiğinde, doğadaki elektromanyetik kuvvetlerle çekirdek altı zayıf ve şiddetli kuvvetlerin tutarlı bir birleşik kuantumlu alan kuramı yapılabilir olmuştu. (Bkz. Dereli, T., “Kuantumlu Kütleçekim Teorisi”, TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi, Aralık 1996.) Doğada bilinen ama bu kapsama girmeyen bir etkileşim kuvveti kalıyordu, ki bu, en eski ve evrensel gravitasyon (ya da kütleçekimi) kuvvetiydi. Bu konuda farklı yakla-



Tekin Dereli

şımlar önerilmekteydi. Örneğin Roger Penrose, kuantum mekaniğini yeniden gözden geçirmeliyiz derken, başka bir ünlü bilimadamı John A. Wheeler da mikroskopik ölçeklerde uzay-zaman kavramını değiştirmeliyiz diyordu. Yine de kökten farklı yaklaşımlara gitmeden önce, eldeki yöntemleri irdelemek gerektiğini düşünen fizikçiler çoğunlukta idi. 1962'de Einstein'ın eski asistanlarından Leopold Infeld, Varşova'da çok önemli bir genel görelilik toplantısı düzenledi. O sırada genel görelilik üzerinde çalışanların sayısı, henüz oldukça sınırlıydı ve bunların hemen hepsi konferansa gelmişlerdi.

Her ne kadar John L. Synge, Andre Lichnerowicz, Vladimir Fock gibi çekirdekten genel görelilik uzmanı değillerse de, ünlü Paul Dirac ile Richard Feynman da gelip kendi yaklaşımlarını anlattılar. Dirac kütleçekim alanlarının Hamilton formülasyonunu aramaktaydı. Feynman ise kütleçekim kuvvetlerini tıpkı bir kuantumlu alan kuramı gibi ele almıştı. Yapılan, Einstein'ın kütleçekim alan denklemlerini, düz Minkowski uzay-zamanını fon olarak alan bir yaklaşımla düşünmektir.

Bu yaklaşımlık da kütleçekim kuvvetlerinin kaynağı graviton adı verilen kütleless, spin-2 (fotonun spin-1) bir kuantumun alınıp verilmesindedir. Kütleçekim evrenseldir; kütlesi olan her cisim graviton alıp verebilir. Kütleçekim mutlaka çekicidir; çünkü kütle her zaman artı işaretlidir. Kütleçekim sonsuz erimlidir; çünkü gravitonun kütlesi sıfıra eşittir. Bu derslerin notları Polonya'da basıldı. Ele geçirmek hayli zor; ama bugün bile bu notları arayıp yararlanılanlar var. Kuantumlu kütleçekim fikri, sonraki yıllarda Amerikalı kuramsal fizikçilerden Bryce de Witt, Steven Weinberg, Stanley Deser ve diğerleri tarafından geliştirildi.

İlginç bir nokta bu kuramsal fizikçilerin genelde Harvard kökenli olup Feynman'ın baş rakiplerin-

Son yıllara damgasını vuran bu tür fikirlerden biri, Harvard Üniversitesi'nden Juan Maldacena'ya ait. 80'li yıllar boyunca değişik fizikçilerin çalışmaları sonucu, süpersicim kuramlarının, her noktasında büzülmüş bir küre içeren hiperbolik uzay-zaman (Anti-de Sitter (AdS) uzay-zamanı) içinde de çözümlerinin olabileceği bulundu. Maldacena D-zar teknolojisini kullanarak yaşadığımız evrenin, yukarıda bahsedilen bir hiperbolik uzay-zamanın yüzeyi olabileceğini (80'li yıllarda simetri prensipleri kullanılarak Feza Gürsey'in eski doktora öğrencilerinden, Ergin Sezgin ve Murat Günaydın tarafından da ifade edilmiş olan) bir öngörü olarak ileri sürdü. Yüzey üzerindeki kuram, bir sicim kuramı değildir. Ancak bu kuram hiperbolik uzay-zamanda tanımlanmış bir süpersicim ya da M-kuramından elde edilebilir. Bu bakış açısına göre M-kuramının 4 bo-

yutta tanımlanabiliyor olabilmesi önemli ve gerekli değildir. M-kuramı 11 boyutta olabilir ve onun 4 boyutlu AdS yüzeyi üzerindeki izdüşümü (hologram) bize 4 boyutlu birleşik fiziği verebilir. Bu, uzay-zamanla uzay-zamanın sınırında (yüzeyinde) tanımlanmış kuramlar arasında yeni bir dualitedir. Maldacena'nın bu fikri hakkındaki çalışmalar hâlâ sürmekte. Benzeri bir başka düşünce Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'nden Lisa Randall ve Boston Üniversitesi'nden Raman Sundrum'dan geldi. Bu fizikçiler evrenimizin 5 boyutlu düz ya da hiperbolik bir uzay-zamandaki 4 boyutlu bir D-zar olabileceği düşüncesini ortaya attılar. 5 boyutlu uzayın sahip olduğu temel nitelikler, 4 boyutlu fizikte halen cevabını bulamadığımız bazı temel sorulara çözüm getirebilir. Ancak bu düşüncenin ve benzeri "şişman boyutlar" (ekstra uzay boyutlarının büzülmüş

olmayabileceğini öngören) düşüncesinin M-kuramıyla ve alan kuramlarıyla uyumsuzlukları olduğu, birçok grup tarafından iddia edildi. İçinde yaşadığımız evrenin 11 ya da daha küçük boyutlu bir uzay-zamanda bir ada (bir D-zar) olabileceği ve bu uzay-zamanda benzeri daha birçok evren (diğer D-zarlar) olabileceği fikri çok etkileyicidir. Son yıllarda yüksek enerji fizikçilerinin büyük bir kısmı, bu fikrin matematiksel ve fiziksel boyutlarını incelemekte. 10 boyutta tanımlanan süpersicim kuramlarının 11 boyuttaki M-kuramı içinde birleştirilmesi, bir an için 11 boyuttan daha yüksek boyutlarda daha temel bir kuramın olup olmadığı sorusunu akla getirebilir. Ama eğer M-kuramı gerçekten herşeyi kapsıyorsa, daha büyük bir kuram tanımlamanın pratik olarak pek bir anlamı yoktur. Ancak yapılan çalışmalarda ortaya çıktı ki, M-kuramı ve tip IIB süpersicim

den Julian Schwinger'den kuantumlu alanlar kuramı öğrenmiş olmalarıydı. Avrupa yakasındaysa gravitonlarla uğraşan kuramsal fizikçilerden öne çıkanlar Abdus Salam ile Bruno Zumino ve Julius Wess oldular. Martinus Veltman da Utrecht'de konunun bir diğer önemli ismi. 't Hooft ile Veltman, doktora sonrası yollarını ayırmadan önce 1974'te birlikte kuantumlu kütleçekim üzerine son bir makale daha hazırladılar. Maddenin bağlanmadığı saf kütleçekim kuramında l-halka düzeyinde kuramının renormalizasyonunun yapılabildiğini kanıtlamaktaydılar. Bu sürpriz sonucun nedeni, yalnızca 4-boyutta geçerli bir matematik özdeşliği. Bu hesabı ilerletenler, Brandeis Üniversitesi'nde Stanley Deser ile onun yanına doktora sonrası çalışma için gitmiş bulunan, Veltman'ın diğer öğrencisi Peter van Nieuwenhuizen oldu. Madde bağlandığında ya da daha üst halka düzeylerine gidildiğinde, kuramın renormalizasyonunun yapılamadığını gösterdiler.

Geriye bakınca, 1974 yılının şimdilerde büyük önem kazanmış pek çok yeni fikrin öne sürüldüğü bir dönüm noktası olduğu anlaşılıyor. 't Hooft, 1974 Temmuzunda Nuclear Physics dergisinde yayımlanan bir makalesinde, ayar alan kuramlarında topolojik nitelikli bir çözümle tanımlanan manyetik monopolların bulunacağını kanıtladı. Aynı dergideki bir diğer makaledeyse Wess ve Zumino, 4 boyutlu uzay-zamanlarda süpersimetrik kuantumlu ayar alan kuramlarını inşa ediyor, bu amaçla süperuzay kavramını geliştirip kullanıyorlardı.

Nuclear Physics dergisinde bunu izleyen bir diğer makaledeyse Sergio Ferrara, John Iliopoulos ve Bruno Zumino, genelde süpersimetrik alan kuramlarının, süpersimetrik olmayanlarına göre, daha üstün renormalizasyon özelliklerine sahip olduklarını kanıtladılar. Süperuzay kavramı, Abdus Salam ve John Strathdee tarafından kütleli kuantumlu alanlarının temsillerinin, s spinli göstermek üzere, (s, s±1/2) süpersimetri çiftleriyle verildiğini göstermelerinde ilk adım olmuştu. Birisi bozon, diğeri fermiyon olan süpersimetri çiftlerinden, (0, 1/2) skalar süpersimetri çifti ve (1/2, 1) vektör süpersimetri çifti, madde alanlarının temsili verilir.

1974 Haziranında her iki yılda bir düzenlenen Yüksek Enerji Fiziği Konfe-

ransı Londra'da toplandı. Kalabalık katılımlı toplantıda tüm bu gelişmeler tartışıldı. Süpersimetrik bir kütleçekim kuramının bulunacağına ilk kez burada dikkat çekildi. Kütleli gravitonun spini s = 2 olduğu için böyle bir kuram (3/2, 2) ya da (2, 5/2) süpersimetri çiftlerinden birisi üzerine kurulmalıydı. Birinci seçeneğe süpergravitasyon, ikincisineyse hipergravitasyon adları önerildi. Artık iş Einstein'ın genel görelilik kuramı adıyla bilinen ünlü kütleçekim kuramının süpersimetrik genellemesini bulmaya kalmıştı.

Spin-3/2 ya da spin-5/2 gibi yüksek spinli fermiyonların alan kuramlarını inşa edebilmek için genel bir yöntem, daha 1940'larda Princeton'da Valantin Bargmann ve Eugene Wigner tarafından geliştirilmişti. Bargmann ve Wigner, spin-3/2 alanlarını birer vektör-spinor ile gösteriyorlardı. Böylece bir yarıya kütleli vektör (spin-1) alanıyla gösterilen fotonlara, diğer yarıya da kütleli iki bileşenli spinor (spin-1/2) alanıyla gösterilen nötrinolara benzeyen bir kütleli spin-3/2 alanının, düz uzay-zamanda sağladığı relativistik alan denklemleri 1941'de Schwinger ile öğrencisi Rarita tarafından yazılmıştı. Ancak Rarita-Schwinger alanının eğri uzay-zamanlara genellenerek gravitonlara bağlanması, sorunlar çıkarmış ve başarısızlamıştı. Bundan daha basit bir problem olan kompleks Rarita-Schwinger alanının bir dış elektromanyetik alana bağlanması halinde bile tutarsızlıklarla karşılaşmış; 1969'da bu kuramlarda ışıktan hızlı sinyal aktarımının söz konusu olabileceği kanıtlanmıştı. 1974 sonbaharında Stony Brook'taki New York Üniversitesi'ne geçmiş olan van Nieuwenhuizen, bu bilinen zorluklardan yılmadı. CERN'den iznilen gelen Ferrara ve Boston'daki MIT'den Daniel Freedman ile birlikte, bir kütleli spin-2 graviton alanıyla sonradan gravitino adı verilen bir kütleli spin-3/2 alanını ararak, bunları birbirlerine Nöther yöntemi dedikleri algoritmik bir yaklaşımla süpersimetrik olarak şekilde bağlamaya giriştiler. Bilgisayarda yaptıkları algoritmik hesaplarında van Nieuwenhuizen'in SCHONSCHIP ile kazandığı deneyim avantaj sağlamaktaydı. Ancak uzay-zaman geometrisini, Einstein'ı izleyerek 4 boyutlu bir Riemann uzayı olarak ele alıyorlardı; bu nedenle, gravitonla gravitino-

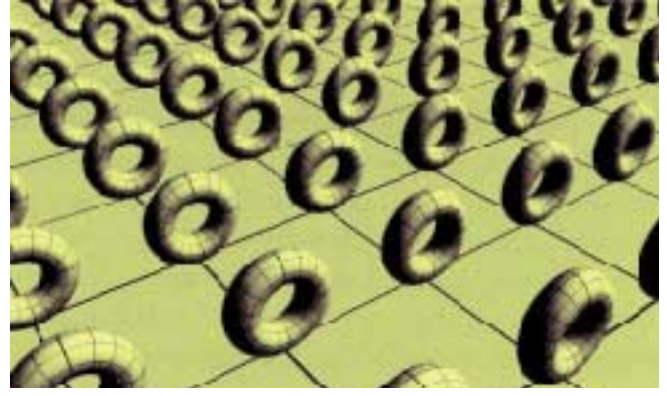
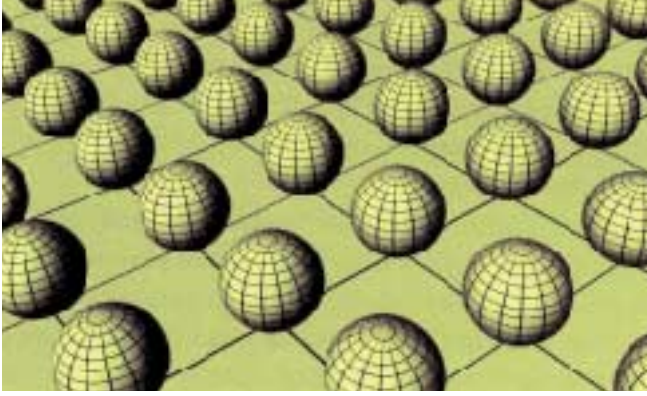
nun hem Einstein, hem de Rarita-Schwinger denklemi etkileşimleri son derece karmaşık bir görünüme giriyordu. Zorluklara karşın 1976 ilkbaharına girilirken uzun hesaplamalar artık sonuç vermişti. Tam bu sırada Stanley Deser ile, CERN'den birlikte çalıştığı Bruno Zumino, önemli bir buluş yaparak süpergravitasyon kuramına kestirmeden ulaşıverdiler. Eğer uzay-zaman geometrisinin Riemann yapısından vazgeçer ve büyük Fransız matematikçisi Elie Cartan'ın daha 1920'lerde tanımladığı uzay-zaman torsiyonuna izin verilerse, torsiyon gravitino alanı tarafından belirlendiği bir süpergravitasyon kuramı kolayca yazılabiliyordu. Işıktan hızlı dalga yayılımı gibi tutarsızlıkların bulunmama nedenini, kuramın yerel süpersimetrisinde buluyorlardı. Bunun üzerine hemen van Nieuwenhuizen, Ferrara ve Freedman her iki formülasyonun eşdeğer olduğunu; yani uzay-zaman geometrisi ister torsiyonlu, ister torsiyonsuz ele alınsın; alan denklemlerinin aynı olduklarını gösterdiler. Böylece 1976 Nisanında bir tutarlı süpergravitasyon kuramı artık biliniyordu. Çabalar bunun ötesinde şu temel soruların yanıtını araştırmak için yoğunlaştı:

- Madde alanları süpergravitasyona nasıl bağlanırlar?
- Kuramın yerel süpersimetrisi nasıl bozulmalıdır?
- Kuantumlu alanların renormalizasyonu yapılabiliyor mu?
- N = 8 ile genişletilmiş süpergravitasyon kuramını bularak, tüm etkileşimlerin bir birleşik alan kuramı yazılabiliyor mu?

Süpergravitasyon bir anda pek çok kuramsal fizikçinin ilgisini çekivermişti. Ama 1976 yazında yukarıdaki konularda ilerleme kaydedebilenler, Brandeis Üniversitesi'nde bir tarafta Stanley Deser ile doktora öğrencileri Kellogg Stelle ve John Kay; diğer tarafta van Nieuwenhuizen ve doktora öğrencileriyle beraber renormalizasyon niteliklerini bakmakta olan Marcus Grisar idler. TÜBİTAK'tan kazandığım 6 ay süreli bir doktora sonrası araştırma bursuyla 1976 Aralık ayı sonunda Brandeis Üniversitesi'ne Stanley Deser'in yanına doktora sonrası eğitim için gittim. Deser o sırada bir yandan öğrencileriyle basit süpergravitasyon kuramının renormalizasyonu üzerine, bir yandan da Zumino ile birlikte yerel süpersimetrisinin Higgs



Paul Dirac



Süpersimetri ve sicim kuramlarında öngörülen küçük, iki ek uzay boyutunun olası kıvrılma biçimleri.

kuramı arasındaki dualite ilişkisi, istenildiği ve beklenildiği kadar doğrudan değil ve tekil bir limit içermekte. Bu dualitenin doğrudan olmaması, bazı fizikçileri, daha yüksek boyutlarda tanımlanmış ve bütün süpersicim kuramlarıyla doğrudan dualite ilişkileri olan bir kuram tanımlamaya itti. Bu kuramlardan biri, California Üniversite-

si'nden Itzhak Bars (yine Feza Gürsey'in eski doktora öğrencilerinden) tarafından tanımlanan 13 boyutlu S-kuramı; bir diğeri de Harvard Üniversitesi'nden Cumrun Vafa tarafından tanımlanan, 12 boyutlu F-kuramıdır. Bu kuramlarla ilgili temel birçok şey bilinmediği için, geleneğe uyularak, – M-kuramındaki gibi– bunlar da yalnızca

tek bir harfle anılıyor. F-kuramında karşılaşılan temel sorunlar, bu kuramın temel bir kuram olabileceğine ilişkin ciddi kuşkular yaratmış durumda. Ancak S-kuramından M, F ve beşüpersicim kuramlarının, simetri prensipleri kullanılarak elde edilebileceği gösterilmiş bulunuyor. F, S ve 11'den yüksek boyutlarda tanımlanan kuramların

mekanizması yoluyla bozulması üzerine çalışıyor. Aynı zamanda genel görelilik üzerindeki çalışmalarıyla bilinen Şilili Claudio Teitelboim ile birlikte, süpergravitasyon kuramının Hamilton formülasyonunu bulmak amacıyla çalışmalar yapıyordu. Tanıştığımız ilk gün bana önerisi, 2 boyutlu uzay-zamanlarda yerel süpersimetrisinin kendiliğinden bozulmasını incelemek oldu. Böylece hem daha kolay bir model üzerinde süpergravitasyonun temel niteliklerini öğrenecek, hem de ileride ilgilenirsem 2 boyutta bilinen süpersimetrik sicim modellerini tanımlayacaktım. 1977'nin ilk yarısını süpergravitasyon kuramını öğrenerek geçirdim. Altı aylık sürem daha bitmeden problemi iki boyutta çözebilmişim. Deser, Haziran ayında Oxford'a gitti. O Avrupa'dayken ilk makalemizi tamamladım. Dönüşünde 3 boyutlu modele de bakmamı söyledi ve bu boyutun inceliklerini öğrenmem için bana Robin Tucker adlı bir İngiliz fizikçisinin makalelerini verdi. Yeni bir problem daha çözebileceğime kanaat getirince, yıl sonuna dek dayanıp Boston'da kalmama karar verdik.

1977 yaz aylarına gelindiğinde Deser'in ve Grisaru'nun grupları, birbirlerinden bağımsız olarak saf süpergravitasyon kuramının renormalizasyonunun, 3-halka düzeyine dek mümkün olduğunu kanıtlamıştı. Daha çok sayıda halka düzeyindeyse durum henüz belirsizdi. Teitelboim'un Deser'le çalışması da ilginç bir sonuca varmıştı. Nasıl Dirac denklemleri Klein-Gordon denkleminin bir anlamda karekökü alınarak bulunuyorsa, basit süpergravitasyon denklemleri de Einstein kuramının aynı anlamda karekökü alınarak çıkıyordu. Dolayısıyla basit süpergravitasyon kuramı pek çok yönden özel bir konumda bulunmaktaydı. Madde alanlarının süpergravitasyona bağlandığı bazı modeller, Nöther yöntemiyle Freedman ve van Nieuwenhuizen ile çevrelerindeki öğrencilerce birer birer bulunuyorlardı. Bunların renormalizasyonunu da, Grisaru ile öğrencilerinin konusuydu. $N = 2$ ile genişletilmiş süpergravitasyon kuramı, yaz sonunda Freedman ve van Nieuwenhuizen ile, Londra'daki Kings' College'de doktora sonrası çalışmalar yürüten Stelle ve beraber çalıştığı Peter West tarafından keşfedildi. Freedman ve öğrencisi Ashok Das'ın Nöther yöntemiyle $N = 4$ ile genişletilmiş kuramı bulmasıysa, ancak 1978 başlarında mümkün oldu. Nöther yönteminin zorluğu, çalışmaları

iyice yavaşlatıyordu; herkesin bulmaya can attığı nihai $N = 8$ kuramına henüz ulaşamıyordu. Yine yaz aylarında Wess ve Zumino basit süpergravitasyon kuramının, kendi süperuzay teknikleriyle nasıl yazılacağına buldular. Ancak bu yöntem diğerlerinden de zordu. Yeni modellerin inşasında yol gösterici olabiliyor, ama hesaplar için pratik yarar sağlamıyordu.

1977 Ağustos ayında Kanada'da Waterloo Üniversitesi'nde toplanan geleneksel GR8 Genel Görelilik ve Kütleçekim Konferansı'na Boston'dan topluca katıldık. Tüm dünyadan 1000 kadar fizikçi ve matematikçinin katıldığı bu muazzam organizasyonda süpergravitasyona büyük ilgi vardı. Bu konudaki dersleri ve seminerleri kaçırmadım. Ünlü fizikçilerle tanıştım. Orada tanıştığım ve görelilik konusundaki çalışmalarıyla bilinen Avusturyalı Peter Aichelburg, süpergravitasyon konularına girmek istediklerini söyleyerek beni Viyana'daki Kuramsal Fizik Enstitüsü'ne davet etti. Konferanstan dönerken bize katılan Mike Duff İngiltere'de Abdus Salam'ın yanında doktora yapmış; ICTP'de bir süre çalıştıktan sonra, Deser'in yanına doktora sonrası çalışma için gelmiş, ünlü bir genç kuramsal fizikçiydi. Brandeis'de beraber geçen sürede, konformal anomaliler ve kütleçekimsel instantonlar üstünde çalışmaktaydı. Bu konulara önemli katkılar getirdi. Daha sonra 1979'da ODTÜ'deyken düzenlediğim ve Ankara'daki kuramsal fizikçilerin katıldığı sürekli seminerlerde, bizler de hep birlikte bu konuları öğrendik. İlginçtir, İngiltere'ye giden Amerikalı Stelle, Londra'ya yerleşti ve dönmedi. Şimdi Imperial College'da tanınmış bir profesör. İngiliz Duff ise Amerika'dan dönmedi. Sonradan Austin'deki Texas Üniversitesi'nde profesör oldu. İki yıl önce de Michigan Üniversitesi'nde Veltman'ın emekli olmasıyla boşalan kuramsal fizik kürsüsüne getirildi.

Tanınmış Avusturyalı matematiksel fizikçi Walter Thirring'in direktörü bulunduğu Viyana Üniversitesi Kuramsal Fizik Enstitüsü'ndeki görevime 1978 Ocak ayında başlamıştım. Orada el üstünde tutulduğumu söyleyebilirim. Einstein Memorial Foundation Fellow olarak Genel Görelilik kürsüsünde araştırma yapmaktaydım. Kürsü profesörümüz Roman Sexl çok genç yaşında önemli buluşlar yaparak o makama gelmişti. Daha kırklı yaşlarındaydı ama ilgisi fizik eğitime ve felsefeye dönüştü.

On yıl kadar sonra genç denilebilecek bir yaşta beyin kanamasından ölmüş. Sexl ile yoğun bir temasımız olmadı. Ben o sırada kürsünün doçentleri, şimdininse hatırı sayılan profesörleri Peter Aichelburg, Helmut Urbantke ve Bobby Beig ile çalışmaktaydım. Bahar döneminde kürsümünün seminerlerinde, bir dizi süpergravitasyon dersi verdim. Enstitünün diğer kürsülerinden hocalar ve öğrenciler de gelip izlediler. Hepsiyile yakınlığımız fırsat oldukça devam ediyor. Viyana'dayken süpergravitasyon alan denklemlerinin yarı-klasik çözümlerini inceledik. Süpergravitasyonun düzlemsel yüzü paralel dalga çözümlerini bulduk ve yayımladık. 1982'de TÜBİTAK Bilim Teşvik Ödülü'nü bu buluşum nedeniyle kazandım.

1978 yılı bahar aylarında süpergravitasyon kuramları için yeni bir çıkış noktası bulundu ki bu buluş ilerideki yıllarda kütleçekim araştırmalarının gideceği yönü belirleyici olmuştu. Paris'te Ecole Normale'den Joel Scherk ile beraber çalışan Eugene Cremmer ve Bernard Julia, $N = 8$ ile genelleştirilmiş bir süpergravitasyon kuramını yazabildiler. Uyguladıkları yöntem 1920'lerde bulunmuş ve 1950'li yıllarda Paris'te üzerinde pek durulmuş olan boyutsal indirgeme yöntemi idi.

Yöntem uzun yıllar sonra ilk kez yine öne çıkmaktaydı. Yapılan, dörtten daha yüksek boyutlu bir uzay-zamanda kütleçekim kuramı inşa etmek; daha sonra bu kuramı fiziksel dört boyutlu uzay-zamanla kapalı ve sınırlı bir iç uzayın çarpım uzayı üstünde indirgemek fikrine dayanıyordu. Bu fikri ilk kez 1919'da Alman matematikçisi Theodore Kaluza önermişti. Beş boyutta Einstein kuramını kurar ve bunu dört boyuta indirgerse Einstein-Maxwell kuramının çıktığını fark ederek bu gözlemini Einstein'ın kendisine iletmişti. Ancak bu fikri, beşinci boyutu bir çember olarak ele alıp sağlam matematik temellerle oturtan, 1926'da Oscar Klein olmuştu. Uzun süre bir kenarda bekleyen bu yaklaşım II. Dünya Savaşı sonrasında Hamburg'da Pascual Jordan çevresindeki bir grup Alman matematikçisiyle Paris'de Lichnerowicz'in çevresindeki Fransız bilim adamları tarafından geliştirilmişti. Ancak ne Jordan, ne de Lichnerowicz beş boyutun ötesine geçemediler. İlk kez 1968'de yine Paris'te yerleşmiş bulunan bir Polonyalı fizikçi Richard Kerner 4+n boyutlu bir uzay-zamanda Einstein kütleçekim kuramını yazıp dört boyuta indirgediğinde

ilginç bir özelliği de, bunların süpersimetrik olabilmeleri için, uzay-zamanın bir değil, iki zaman boyutu içermesi gerektiği. İki zaman içeren kuramlar fizikte daha önce de denendi ve nedensellik ilkesi çiğnendiğinden terkedildiler. Ancak son yıllarda S-kuramı içinde nedensellik ilkesinin nasıl korunabileceği gösterilmiş ve iki zaman boyutu içeren bir uzay-zamanda anlamlı olan birçok fiziksel kuram tanımlanmış bulunuyor. Bu tür kuramlara kısaca "iki zaman fiziği" deniliyor.

Bugün M-kuramı (ya da F ya da S ya da ...) içinde birçok fikir içeren ve evren hakkındaki en temel sorularımıza yanıt verebilecek en uygun kuram olarak görülmekte. Ancak bir fiziksel kuramın ilginç fikirler içermesi ya da en temel matematiği çok etkileyici bir şekilde kullanması, o fiziksel kuramın bir fizik yasası olarak kabul edilebilmesi için yeterli değil. Bir fiziksel kuram,

ancak o kuramın öngörülleri deneyler tarafından doğrulandıktan sonra bir fizik yasası konumuna yükselebilir. Yüksek enerji fiziğinde son 25 yılda ortaya atılan hiçbir kuram, yapılması gereken deneylerin zorluğu ve pahalılığı nedeniyle denenebilmiş değil. Süpersicim ya da M-kuramının da uygulamada tam anlamıyla denenmesi mümkün görünmüyor. Ancak bu kuramların bazı öngörülleri denenebilir. Örneğin süpersicim ve M-kuramları için süpersimetri, olmazsa olmaz bir nitelik. Ancak eğer doğada süpersimetri yoksa, bu kuramlar ya terkedilmeli ya da değiştirilmeli. Yakın gelecekte (planlara göre 2010 yılına kadar) İsviçre'deki CERN laboratuvarında süpersimetrisinin olup olmadığı çok gelişmiş modern cihazlarla test edilecek. Süpersimetrisinin varlığı süpersimetrik parçacıkları gerektirir; bunların gözlenmesi ise süpersicim ve benzeri süper-kuramların

fizikselliği konusunda önemli bir kanıt olacak. Halen süren bir başka deneye, 4 uzay-zaman boyutundan başka metriklilikte yüksek boyutların olup olmadığıyla ilgili. Eğer böyle "şişman" boyutlar varsa (şişman, çünkü 1 mm süpersicimin boyuna göre çok büyük bir uzunluk birimidir) bunlar kendilerini 1 mm'den daha kısa uzunluklarda, Newton'ın kütle çekim yasasından bir sapma olarak göstereceklerdir. Şu anda birçok grup çok kısa uzaklıklarda bu sapmanın olup olmadığını yaptıkları deneylerle gözlemekte ve dolayısıyla ekstra boyutların varlığını test etmekte. M-kuramı insan aklının ürettiği en karmaşık ve en güzel yapılardan biridir. Ancak, onun aynı zamanda "herşeyin kuramı" olup olmadığını deneyler ve zaman gösterecek.

Cemsinan Deliduman
Feza Gürsey Enstitüsü Çengelköy, İstanbul

Einstein-Yang-Mills sisteminin çıktığını gösterebilirdi. Böylelikle n-boyutlu, kapalı ve sınırlı iç uzayın izometrilere, gözlemlenen temel parçacık simetrisiyle özdeşleştiriliyordu. Bu eski sonuçların farkında olan Cremmer, Julia ve Scherk önce basit süpergravitasyon kuramını 11 boyutlu bir uzay-zamanda inşa ettiler. Yerel süpersimetri için gravitoni alanına eşlik edecek 11 boyutlu uzay-zaman metriğiyle ilintili bir graviton alanının yanında 3. mertebeden anti-simetrik bir tensör alanının daha varlığı gerekiyordu. Daha sonra bu kuramı iç uzayı 7 boyutlu bir torus uzayı alıp dört boyuta indirgeyerek N = 8 ile genişletilmiş ilk süpergravitasyon kuramını elde ettiler. Bu çalışma sonrasında yüksek boyutlu kütleçekim kuramları tekrar gündeme yerleşti ve sonraki yıllarda çok incelendiler. Joel Scherk'in bu buluşta önderliği beklenmedik bir şey değildi. Bu genç Fransız kuramsal fizikçisinin 1970'lerin başında sicim modelleri üzerinde önemli araştırmaları vardı. Kuantumlu bir sicim kuramı tutarlı olarak 26 boyutlu bir uzay-zamanda tanımlanabilir. Ancak sicimler, yerel spin serbestlik dereceleriyle genellenir ve süpersimetrik sicim modelleri ele alınırsa bu durumda tutarlı bir kuantumlu sicim kuramı 10 boyutlu uzay-zamanlarda mümkündür. Dolayısıyla sicim modellerini araştırmış fizikçilere dörtten yüksek boyutlara gitmek o kadar aykırı gelmemişti. Fakat o sıralarda sicim modelleri, esas olarak 't Hooft ve Veltman'ın kuantumlu ayar alanlarının renormalizasyonunu göstermeleri sonrasında cazibelerini yitirmiş, bir kenarda beklemekteydiler. Bu konuyla ilgilenenler azdı. Joel Scherk ile CALTECH'den John Schwarz 1972'de tam sicim modelleri gözden düşmek üzereyken; sonradan büyük önem kazanacak, ancak o sırada pek dikkatleri çekmeyen bir gözlem yaptılar. Kapalı sicim modellerinin uyarım kipleri arasında mutlaka bulunan spin-2 kipi, önceleri bir hadron rezonansı gibi yorumlanmaktaydı. Scherk ve Schwarz bunun graviton gibi yorumlanmasını önerdiler. Böylece 10 boyutlu kapalı süpersicim modellerinde kütleçekim kuvvetlerine de yer veriliyor; doğadaki hiç bir etkileşimi dışlamayan birleşik alan kuramlarının inşası için yeni bir yol bulunmuş oluyordu. Cremmer, Julia ve Scherk'in süpergravitasyon makaleleri bu iddialı programı gerçekleştirme amacıyla atılmış en önemli adımlar oluyordu.

1978 Temmuz ayında Korkin'ın Cargese kö-

yündeki Kuramsal Fizik Enstitüsü'nde Deser ile Zupino bir NATO Yaz Okulu düzenlediler. Viyana'dan giderek katıldığım bir ay süren bu toplantıya DeWitt, Hawking, Gibbons, Scherk, Schwarz, 't Hooft ve daha pek çok ünlü fizikçi katılarak konuşular. Kendi çalışmalarını ders olarak anlattılar. Orada tanıştığım genç fizikçilerin hemen hepsi şimdilerin tanınmış profesörleri oldular. Dersler sonrasında gençlerin de seminer vererek çalışmalarını anlatmaları teşvik ediliyordu. Bir akşam üstü düzensel yüzölçümü süpergravitasyon dalgalarını anlattım. Dinleyiciler arasındaki Robin Tucker ile tanıştık. Beni Lancaster Üniversitesi'ne birlikte çalışmaya davet etti. 20 küsur yıldır devam eden işbirliğimiz böyle başladı. Viyana'dan döndükten sonra bir yıl ÖDTÜ'de ders verdim. 1979 Kasımında İngiltere'ye ulaştım. Ben Ankara'da dersler ve seminerler verirken dışarıda N = 8 süpergravitasyon kuramının 3-halka düzeyinin ötesinde renormalizasyonunun yapılamadığı artık anlaşılıyordu. Mucize gerçekleşmemiş her şeyin kuramı henüz bulunamamıştı. Ama epey yol alınmış ki bu zamanda ilginç buluşlar yapılmıştı. Bunların bir yerlere oturtulması gerekirdi. Yüksek boyutlu kütleçekim kuramları artık çok ciddiye alınıyordu. 11 boyutta basit süpergravitasyon kuramından sonra 10 boyutta N = 2 ile genişletilmiş süpergravitasyon kuramı de Ali Chamseddine ve Hermann Nicolai tarafından bulunmuş ve boyutsal indirgemesi incelenmişti.

Yıllar sonra etkin sicim alan kuramı diye yorumlanarak büyük ilgi toplayacak olan bu 10 boyutlu süpergravitasyon kuramının önemini hemen görebilecek kapasitedeki Joel Scherk, ne yazık ki Cargese'de ders verdikten kısa süre sonra şeker hastalığından çok genç yaşta ölmüştü. Hâlâ sicim modellerini çalışın neredeyse tek kuramsal fizikçi kalmış bulunan John Schwarz, CALTECH'de ünlü Murray Gell-Mann'ın ilgi ve desteği sayesinde tutunabilmekteydi. Schwarz sicim modellerine ilgi duyan başka fizikçiler aradı ve Londra'dan Michael Green'i ikna edebildi. Beraber çalışmaya giriştiler. 1980 ve 1981 yıllarında 10 boyutta açık ve kapalı süpersicim modellerini geliştirdiler bunların renormalizasyonuna ve anomalilerine baktılar. Ancak bu makaleleri o sıralar pek dikkat çekmedi. 1984'te Edward Witten'in Einstein-Yang-Mills kuramlarının anomalisi üzerine yaptığı hesaplar, bir dönüm noktası oluşturdu. Buradan ışığı gören Gre-

en ve Schwarz 1984 sonbaharında 10 boyutlu süpersicim modellerinde SO(32) ya da E8xE8 iç simetrisilerinden birinin bulunması halinde kütleçekim anomalisiyle Yang-Mills anomalisinin birbirlerini götürdüklerini; üstelik bu kuramların renormalizasyonlarının yapılabileceğini gösterdiler. Bu sonuç kuramsal fizik camiasında bomba gibi patladı. 1-2 hafta içinde pek çok araştırmacı tekrar sicim modellerine geri dönmüş durumdaydı. Bizler de Adana'da düzenlemiş olduğumuz Uluslararası Matematiksel Fizik Konferansı'na Amerika'dan gelip katılan Feza Gürsey sayesinde bu gelişmeden anında haberdar olduk. Süpergravitasyon kuramları artık sicim modelleri kapsamında farklı bir yorum kavuşmuşlardı. Renormalizasyonları yapılabilen tutarlı birer kuantumlu alanlar kuramı olmadıkları ortadaydı. Ama sicim modellerinin düşük enerji/uzun mesafe aralıkları limitini tanımlayan etkin alan kuramları olarak düşünülmeleri gerekiyordu. Buysa, örneğin kapalı sicimlerin karakteristik çaplarının sıfıra gittiği yaklaşıklıkta, birer noktasal tanecek gibi ele alınmalarına eşdeğerdi. Yani 10 boyutlu genişletilmiş süpergravitasyon kuramları, bundan böyle düşük enerji limitinde etkin süpersicim alan kuramları gözüyle inceleneceklerdi.

1974-1984 yılları arasındaki on yıllık dönemde süpergravitasyon kuramlarının inşa edilmesi ve özelliklerinin incelenmesi, kuramsal fizikçilerin büyük zaman harcadıkları problemlerden biridir. Sonuçlar tam umulduğu gibi çıkmadı. Kuramların renormalizasyonu Einstein'ın kütleçekim kuramına göre üstündü; ama yine de gerçekleştirilemiyordu. Ancak, emekler boşa gitmedi. Anlaşıldı ki süpergravitasyon kuramlarıyla, süpersicim modelleri kapsamında kapalı sicimlerin noktasal parçacık limiti tanımlanmakta; sicim modellerinin fiziksel öngörülleri ancak bu limitte tartışılabilir. Bir etkin alan kuramının renormalizasyonu gerekmediği için, artık ortada sorun yoktur. Pek çok özel nitelikleri nedeniyle önemli bulunan ve ilgi gören süpergravitasyon kuramları, süpersicim modellerinin fiziksel öngörülerini tartışabilmek açısından mutlaka gereklidir. Bu kuramların keşfine ve gelişmelerine birinci elden katılabilmek, bir kuramsal fizikçi olarak bana çok şey kazandırdı.

Tekin Dereli
Koç Üniversitesi, Fizik Bölümü