

SİCİM KURAMI

Nihat Sadık Deęer

Bölümler:

- Kütleçekimi
- Karadelikler
- Sicim Kuramı
- Kac tane Sicim Kuramı var?
- T-dönüşümü

Bu yazı TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisinin Ağustos 2002 sayısında Yeni Ufuklara ekinde yayınlanmıştır.

Kütleçekimi

Kütleçekimi evrendeki 4 temel kuvvetin en zayıf olmasına rağmen, evrenimizin büyük ölçekteki yapısını ve davranışını belirleyen kuvvettir. Şiddetli ve zayıf çekirdek kuvvetlerinin etki menzilleri çok kısadır (yaklaşık atom çekirdeğinin çapı kadar, yani 10^{-13} cm). Elektromanyetik kuvvetse uzun menzillidir ama evrendeki artı ve eksi yüklerin dengeli dağılmış olmasından ötürü makroskopik olaylarda etkisi yoktur. (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, kütlerinin çarpımıyla doğru orantılı bir kuvvetle çeker. Newton'un kuramı gündelik olayları açıklamakta çok başarılıdır. Örneğin gezegenlerin hareketleri çok isabetli bir şekilde hesaplanabilir. Fakat bu kuramda iki cismin birbirinin varlığından nasıl haberdar olduğu belli değildir. Kurama göre iki cisim arasındaki çekim kuvveti, birinin konumunda bir değişiklik yapar yapmaz anında, yani sonsuz bir hızla değişmelidir. Albert Einstein'ın 1905'te yayınladığı Özel Görecelilik kuramına göre ise ışık hızı evrende ulaşılabilecek en yüksek hızdır. Dolayısıyla Newton'un kütleçekimi kuramıyla bir çelişki söz konusudur.

Einstein bu problemi 1915 yılında Genel Görecelilik kuramı ile çözdü. Buna göre kütleçekimi aslında bir kuvvet değil, sadece maddenin uzay-zamanda yarattığı eğilmedir. Bunun nasıl olduğunu anlamak için bir yatağın üzerine ağırlıklar koyduğumuzu 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 Görecelilik 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 doğrulanmıştır. Merkür'ün yörüngesinde görülen ufak bir sapmayı başarı ile açıklamış, uzak bir yıldızdan gelen ışığın güneşin yakınından geçerken büküleceğini doğru bir şekilde önceden bildirmiştir. (Bu

1919'da Eddington tarafından gözlenmiştir.)

Kütleçekiminin etkisi küçük olduğunda Einstein'ın kuramından Newton'un-
kine ulaşmak mümkündür. İki kuram arasındaki fark ancak çekim etkisinin
çok büyük olduğu durumlarda açığa çıkar. Bu sebeple günümüzde bile hala
birçok problemin çözümünde daha kolay olduğu için Newton'un kuramı kul-
lanılmaktadır. Ama iki kuramın düşünsel düzeyde çok farklı olduğu unutul-
mamalıdır. Einstein'ın kuramı aynı zamanda karadelikleri ve kütleçekimi
ışınımını da öngörmektedir.

Bu çalışmasından sonra Einstein hayatının son 30 yılını Genel Görecelik
kuramı ile elektromanyetik kuramını (o zamanlar sadece bu iki kuvvet biliniyor-
du) birleştirmek için harcamış ve ne yazık ki başaramamıştır. 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
çabadır.

Karadelikler

Bir cismin dünyanın çekim gücünü yenip uzaya çıkabilmesi için hızının en az saniyede 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 Görecelilik 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 güneşinkinin en az iki misli olan yıldızlar için mümkündür.

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 bitirir. Eğer yıldızın kütlesi güneşinkinin iki katından daha azsa o zaman yıldız bir beyaz cüceye (yaklaşık dünya büyüklüğünde) veya bir nötron yıldızına (yaklaşık 30km çapında) çöker. (Birçok beyaz cüce ve nötron yıldızı gözlemlenmiştir.) Ama daha büyük yıldızlar çökmeye devam eder ve en sonunda bir karadeliğe dönüşürler.

Işığın bile kaçamayacağı bir yer fikri ilk kez 1798'de Peter Simon Laplace tarafından irdelenmiştir. 1916'da Karl Schwarzschild Einstein'ın Genel Görecelilik kuramı denklemlerine bir karadelik çözümü bulmuş ve böylece bu fikir somutluk kazanmıştır. Evrenin tahmini yaşı ortalama bir yıldızın yaşından çok daha büyüktür. O yüzden evrende birçok karadelik olması beklenmektedir.

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 gözlenemezler. Ama çekim güçleri çok büyük olduğundan çevrelerindeki gaz ve tozları inanılmaz 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 çıkartmak yanlış olur. Ka-

radeliğin olay ufkundan uzaklaştıkça çekim gücü azalır ve bir noktadan sonra diğer yıldızlardan farksız hale gelir.

Aslında karadelikler tamamen kara değildirler. Stephen Hawking 1970'lerde yaptığı yarı-klasik hesaplarla karadeliklerin olay ufuklarında termal bir ışıma yaptıklarını göstermiştir. 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-karşıtmadde çifti oluşabilir. Tabii bunlar elektrik yükleri birbirinin tersi olduğundan çok kısa bir süre içinde birbirini yok ederler ve böylece enerji korunumu yasası yeniden sağlanmış olur. Boşluktaki bu dalgalanma deneylerle ispatlanmıştır. Eğer bu olay bir karadeliğin olay ufkunun hemen dışında gerçekleşirse madde-karşıtmadde çiftinden biri olay ufkunun içine girerken diğeri dışarıya kaçabilir. Uzaktaki bir gözlemciye bu parçacık sanki karadelik tarafından dışarıya atılmış gibi görünecek ve bu gözlemci karadeliğin kütesinin azalmış olduğu sonucuna varacaktır. Bu ışımanın dağılımı incelendiğinde termal bir ışıma olduğu görülür.

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 bulunmuştur. 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 ulaşabilmektedir.

Hawking'in gösterdiği gibi karadelikler termal bir ışıma yapmaktadır ve bunu mikroskopik olarak betimlemek kuramsal fiziğin önemli problemlerinden biridir. Sicim kuramı eğer gerçekten kuantum fiziği ile 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 biridir.

Sicim Kuramı

Doğada bilinen 4 temel kuvvet vardır. Bunlar ilk keşfedildiklerinde çok değişikmiş izlenimi uyandırmış ama 1970'lerin sonunda oluşturulan Standart Modelle kütleçekimi dışındakiler birleştirilmiştir. Bu birçok deneyle test edilmiş çok başarılı bir modeldir ancak bazı önemli soruları cevapsız bırakmıştır. Örneğin elektronun yükünün mutlak değerinin niye protonunkine eşit olduğu veya protonun kütlelerinin ne olması gerektiği belli değildir. Bu sayılar deneylerle bulunup denklemlere konulmaktadır. Üstelik Standart Modelin kütleçekimini içermemesi parçacık hızlandırıcılarda gözlediğimiz olaylar için sorun olmasa da (çünkü bu olaylarda kütleçekimi diğerlerinin yanında ihmal edilecek kadar küçüktür) evrenimizin nasıl oluştuğunu ve karadelikleri daha iyi anlayabilmemiz için kütleçekimini de içeren bir kurama ihtiyacımız vardır.

Standart Modelle Genel Göreceliliği birleştirmek çok zor bir iştir çünkü kuvvet tanımları birbirinden tamamen farklıdır. İlkinde kuvvet foton, gluon gibi bozonların değiş tokuşu olarak, ikincisindeyse uzay-zamanın geometrisindeki çarpılmalarla açıklanmaktadır.(bkz. kütleçekimi) İşte Sicim/M-Kuramı bu imkansız görünen problemi çözerek büyük bir heyecan yaratmıştır.

Sicim kuramının ana varsayımı maddenin yapıtaşlarının nokta parçacıklar değil 1-boyutlu sicimler olduğudur. Bu sicimler ayakkabı bağı gibi **açık** ya da bir halka şeklinde **kapalı** olabilirler. Sicimler olağanüstü kısadır. Tipik uzunlukları 10^{-33} cm'dir. Bu öylesine küçük bir sayıdır ki gündelik hayatımızda ve hatta Standart Modelde bu uzunluğu ihmal edip sicimleri bir noktaymış gibi düşünebiliriz. Ancak kuramsal hesaplamalarda bu sayı birazdan anlatacağımız önemli farklara yol açmaktadır.

Bir keman telinin değişik titreşimlerinin değişik sesler vermesi gibi, bir sicimin de farklı titreşim kipleri(modları) vardır. Her bir kip farklı bir kütle ve farklı kuantum özelliklerine sahiptir. Böylece doğada gördüğümüz nötron, proton gibi parçacıkları tek bir sicimin değişik titreşimleri gibi düşünebiliriz. Bu elbette son derece güzel, bütünleştirici bir resim. Bu kiplerin sayısı sonsuzdur ve bu kadar çeşitli sayıda parçacık görmüyor olmamız ilk bakışta öyle görünse bile bir çelişki değildir. Çünkü bu kiplerin büyük bölümü parçacık hızlandırıcılarda 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. Noktasal iki parçacık belli bir konumda ve zamanda çarpışır. Buna karşılık sicimlerin etkileştikleri an ve konum artık bir nokta değil bir yüzeydir, yani belirsizdir. Böylece o tekil noktanın hesaplamalarda yarattığı sonsuzluk probleminden kurtulunmuş olunur. Bu sonsuzluklar genellikle **renormalizasyon** denilen bir yöntemle zararsız hale getirilebilir ama Standart Modelle Genel Göreceliliği birleştirmeye kalkıştığımızda bu yöntem işe yaramamaktadır.

Temel parçacıklar fermiyonlar ve bozonlar olarak ikiye ayrılırlar. Fermiyonlar (örneğin elektron) maddeyi oluşturan ögelerdir. Bozonlarsa kuvvetleri taşırlar. Wolfgang Pauli'nin keşfettiği prensibe göre aynı kuantum özelliklerini taşıyan iki fermiyon birarada bulunamazken bozonlar için böyle bir kısıtlama söz konusu değildir. İki katı cismin birbirinin içinden geçememesinin sebebi bu prensip gereğince fermiyonların birbirini itmesidir.

Yukarıda da belirtildiği gibi bir sicimin her bir titreşim kipi değişik kuantum özelliklerine sahiptir. Sadece bozonik kipleri aldığımızda sicim kuramının kuantum mekaniğiyle tutarlı olabilmesi için uzay-zamanın 26 boyutlu (1 zaman, 25 uzay) olması gerekmektedir. Burada ilk defa bir fizik kuramının uzay-zamanın boyut sayısını belirlediğini görüyoruz. Gerçi 26 bizim algıladığımız 4 (3+1) boyuttan oldukça uzak bir sayıdır 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. Örneğin böyle bir kuramda quarklarla beraber squarklar, fotonlarla birlikte fotinolar olmalıdır. Bu Standart modeldeki parçacık sayısının 2 katına çıkması demektir ve henüz bu süpersimetrik çiftler gözlenmiş değildir. Bunun anlamı süpersimetrinin kırılmış olmasıdır. Ancak çok yüksek enerjilere çıktığımızda bu ilave parçacıkları görebileceğiz. (bkz. deneysel bölüm.) Yüksek enerjilerde kuram süpersimetrikken düşük enerjilerde bunu gözlenmemesini suyun farklı fazlarına benzetebiliriz. Henüz gözlenmemesine rağmen kuramcılar çok büyük çoğunluğu matematiksel güzelliğinden ötürü süpersimetrinin varlığı

konusunda ikna olmuş durumdadır.

Eğer sicim kuramında süpersimetri varsayılırsa o zaman kuantum mekaniği ile tutarlılık için bu sefer uzay-zamanın boyut sayısının $10(9+1)$ olması gerekmektedir. Yani yaşadığımız 4 boyuta ilave 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 sadece kütleçekimi vardır ama 5. boyuttaki graviton (kütleçekimini taşıyan bozon) 4 boyuta indiğimizde iki farklı parçacığa ayrılmaktadır. (Bu 3-boyutlu bir cismin 2-boyutlu bir yüzey üzerinde farklı gölgeler oluşturabilmesine benzetilmektedir.) 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 boyut varsayılarak elektromanyetizma ve kütleçekiminin birleştirilebileceğini göstermiş oldular. Eğer 5. boyutu yarıçapı çok küçük bir çember gibi düşünersek neden göremediğimizi de açıklayabiliriz:

Bir bahçe hortumuna çok uzaktan bakarsak hortumun yüzeyini 2-boyutlu değil 1-boyutluymuş gibi algularız. Aynı şey 4'ten fazla boyut için de geçerlidir; eğer bu ek boyutlar bir çember gibi kapalı ve yarıçapı küçük (mesela 10^{-33} cm) boyutlarsa onları gündelik hayatımızda farketmememiz normaldir. Tabii 3 boyuttan sonrasını kafamızda görsel olarak canlandırmak çok zor bir iştir ama matematiksel olarak bunları varsayıp buna göre işlem yapmakta bir güçlük yoktur. Kaluza-Klein kuramı bu başarısının yanında ilk defa elektrik yükünün neden elekronun yükünün tamsayı katları şeklinde ($\pm e, \pm 2e, \pm 3e, \dots$) verildiğini de açıklayabiliyordu. (Bu manyetik-tekkutupluların varlığı ile de açıklanabilir ama o başka bir yazının konusu.) Ne yazık ki yayımlandıktan bir süre sonra Kaluza-Klein kuramının kuantum mekaniğiyle birleşmesinde sorunlar olduğu farkedildi. Ayrıca o dönemde birçok fizikçi kuantum dünyasının büyüüne kapılmıştı ve ek boyut fikri fazla egzotik görünüyordu. Bu sebeplerle Kaluza-Klein kuramı gözden düştü, ta ki sicim kuramı bulunana kadar.

Süpersimetrik sicim kuramı biraz önce bahsettiğimiz gibi ancak 10 boyutta tutarlıdır. Kendi evrenimizi anlayabilmemiz için 10-boyutlu sicim kuramını 6 boyutlu bir uzay üzerinde büzüştürmemiz gerekmektedir. (Tabii bu ek

boyutlar görülemeyecek kadar küçük olmalıdırlar ama sicim kuramında bu boyutların niye bu kadar küçük olduklarına dair henüz bir açıklama yoktur. Bu muhtemelen evrenin ilk anlarında gerçekleşen bir simetri kırılmasıyla ilgilidir.) Bu örneğin 6-boyutlu bir küre olabilir ama bunun dışında şekiller seçmek de mümkündür. (Örneğin Calabi-Yau uzayları). Ne yazık ki bu seçeneklerin sayısı yüzbinlercedir ve herbir seçenek değişik bir 4-boyutlu evren tarif etmektedir. Bunlardan bazıları bizim evrenimize benzerken büyük kısmının hiç ilgisi yoktur (yani Standart Modeli içermezler). Evrenimizi verecek 6-boyutlu uzayın nasıl seçileceği sicim kuramının en derin problemlerinden biridir ve kuram daha iyi anlaşıldığında çözüm bulunacağı umulmaktadır.

Kaç tane Sicim Kuramı var?

	Simetri grubu	Sağ-sol Simetrisi	Süpersimetri miktarı	Sicimin şekli
Tip I	SO(32)	Yok	1	Açık ve kapalı
Tip IIA	U(1)	Var	2	Kapalı
Tip IIB	-	Yok	2	Kapalı
Melez	$E_8 \times E_8$	Yok	1	Kapalı
Melez	SO(32)	Yok	1	Kapalı

Tablo I

Bir sicimin en düşük enerjili titreşimleri, içinde belli sayıda parçacık bulunan bir kuantum alan kuramıyla tarif edilebilir. 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 parçacıklardır. Bozonik sicim kuramı üstelik fermiyonları da kapsamadığından gerçekçi bir kuram değildir.

10 boyutta 5 tane tutarlı sicim kuramı vardır. Bunların hepsi süpersimetriktir ve graviton (dolayısıyla kütleçekimini) içerirler. Aralarındaki ilk fark sicimin açık ya da kapalı olmasıdır. Sırf kapalı sicimle tutarlı bir kuram yapılabilirken, açık sicim kuramlarında kapalı sicimler de vardır. Açık sicim içeren tek kuram Tip I'dir. Bu 5 kuram içerdikleri süpersimetrik parçacık sayısı bakımından da farklıdır. Tip II kuramlarında diğerlerinden daha fazla parçacık vardır. Tip IIA'yı IIB'den ayıran özellikse **sağ-sol simetrisidir**. Tip IIB kuramında kütesi sıfır olan fermiyonlar sadece belli bir yönde dönerlerken Tip IIA'da fermiyonlar her iki yönde de dönebilirler. İki melez sicim kuramını birbirinden ayıran şeyse simetri gruplarıdır.

İlk bakışta bu 5 kuramdan bizim yaşadığımız evreni tarif etmeye en uygunu Melez $E_8 \times E_8$ modelidir. E_8 grubu Standart Modelin simetri grubunu, yani $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ 'i kapsar ve fazladan parçacıklar kozmolojideki karanlık-madde problemi için işe yarayabilir. Hem bu melez modelde de aynen Standart modeldeki gibi sağ-sol simetrisi yoktur.

Sicim kuramı üzerine olan çalışmalar 1984'te Michael Green ve John Schwarz'ın bu kuramın anomalilerden arınmış olduğunu göstermesiyle büyük bir ivme kazandı. Çünkü anomalisi olmayan modeller çok nadirdir. **Anomali** kısaca bir fizik kuramında klasik olarak var olan bir simetrinin, hesaplamalara kuantum mekaniği girdiğinde bozulmasıdır. Kuramdaki yerel(yani ele alınan noktanın konumuna bağlı) bir simetrininin anomali sebebiyle kırılması tutarsızlıklara yol açar ve bu istenmeyen bir durumdur. Özetlersek 1980'lerin sonuna gelindiğinde genel kamı bu 5 kuramdan sadece birinin(bunun büyük olasılıkla Melez $E_8 \times E_8$ olacağı tahmin ediliyordu) bizim evrenimizi anlamakta işe yarayacağı, diğerlerininse yalnızca hoş matematiksel modeller olduğuydu. Bu yaklaşım, o zamanlar çok az kişi tarafından itiraf edilse de, doyurucu olmaktan uzaktır. Sicim kuramının amacı bilinen 4 temel kuvveti birleştirmektir ve bunu başarabilen birden fazla model olması rahatsız edici bir durumdur. Pratik açıdan bir sorun yoktu belki ama bir kuramsal fizikçi için kesinlikle güzel değildi çünkü, **Herşeyin En Temel Kuramı**'nin kaçınılmaz, yani tek olması beklenir.

Sicim kuramı bu zorlukla boğuşurken 1987'de Eric Bergshoeff, Ergin Sezgin ve Paul Townsend 11 boyutlu süper-zar kuramını keşfettiler. Bu kuramın temel ögesi sicim değil 2-boyutlu zardır. Bu kuram bir çember üzerinde 10-boyuta büzülürdüğünde Tip IIA sicim kuramına ulaşılır. Burada zar'ı 11. boyut çevresinde sarar, çemberin yarıçapını da küçük varsayarsak, bu zar 10 boyutta bir sicim gibi görünecektir.

11-boyutun önemli bir özelliği de bazı teknik varsayımlar altında süpersimetrinin izin verdiği en yüksek boyut olmasıdır. Hem bu hem de süper-zar kuramının varlığı sebebiyle bazı fizikçiler(örneğin Michael Duff) 11 boyutun 10'dan daha temel olduğu düşünmeye başladılar. Ama süper-zar kuramının iki büyük problemi vardı: Birincisi kimse bu kuramın kuantum mekaniğiyle birleştirmeyi bilmiyordu(yani klasik bir teoriydi). İkincisiyse bu kuramda Standart Modelin aksine sağ-sol simetrisi vardı ve kimse bu simetrinin olduğu bir kuramdan olmayan birine Kaluza-Klein yöntemiyle nasıl ulaşılabileceğini bilmiyordu. Bu sebeplerden ötürü 11 boyuttaki bu model sicim kuramındaki ikinci devrime kadar birçoklarınınca gözardı edildi.

T-dönüşümü

Anlattığımız 5 sicim kuramı çok farklı görünmektedirler ama aslında bu görünüş aldatıcıdır ve uygulanan yöntemden kaynaklanmaktadır. Fizikte hesaplamalar genellikle modeldeki küçük bir parametre kullanılarak yapılır. Denklemlerdeki fonksiyonlar bu parametrenin farklı pozitif üstleri cinsinden bir seri toplamı olarak ifade edilir ve belli bir sayıdaki terimden sonraki terimler çok küçük oldukları için ihmal edilirler. Buna **pertürbasyon yöntemi** denir ve bu 5 sicim kuramı da bu yöntemle elde edilmiştir. Ancak bu yöntem yaklaşıktır ve bu parametrenin büyük olduğu durumlarda geçerli değildir.

1990'lı yıllarda bu 5 kuramın aslında birbirinden bağımsız olmadığı anlaşıl-maya başlandı. Bu gözleri bağlı olarak bir fili anlatmaya çalışan 5 kişinin durumuna benzemektedir. Filin hortumunu tutanla kuyruğunu, kulağını, dişini ya da bacağı tutan çok farklı tarifler verecektir. Aynı şekilde 5 sicim kuramı da tek bir ana kuramın farklı limitlerdeki görüntüleridir ve bu ku-ramlar birbirlerine bazı matematiksel dönüşümlerle bağlıdırlar. Bunlardan ilk keşfedileni T-dönüşümüdür.

Tip IIA ve IIB sicim kuramları 9+1 boyutludurlar. Şimdi bunları R yarıçaplı bir çember üzerinde 8+1 boyuta büzüştürelim. Kuantum mekaniğinden biliyoruz ki bir çember etrafında dönen bir parçacığın enerjisi ancak belli değerler alabilir ve bu enerji seviyeleri $E_n = n/R, n = 0, 1, 2, 3, \dots$ biçiminde ifade edilebilir. Bir sicimin çemberin çevresinde hareket etmeye ilave olarak o çembere dolanması da mümkündür ve 'm' kere dolanmış bir sicimin enerjisi $E_m = mR, m = 0, 1, 2, 3, \dots$ şeklindedir. Böylece 9 boyuta R yarıçaplı bir çember üzerinde büzüştürülen bir sicimin toplam enerjisi $E = n/R + mR$ olur. Burada hemen görüleceği gibi $n \leftrightarrow m$ ve $R \leftrightarrow 1/R$ dönüşümü altında toplam enerji değişmemektedir ve buna T-dönüşümü denir. Bu dönüşüm altında Tip IIA kuramı IIB kuramına özdeştir. Benzer şekilde iki Melez sicim kuramı da birbirlerine T-dönüşümü ile bağlıdırlar.