



KUARKLAR

Deneysel olarak bulunmadan önce keşfedilen kuarklar sanki bir şaka gibiler.

Hiçbir anlamı olmayan adları kadar, gariplik, güzellik ya da renk gibi özellikleri de ünlü İngiliz ozan James Joyce'un bir şiirinden alınma. Yine de, bu kimseyi yanıltmasın! Bu parçacıklar gerçekten var ve bizi çevreleyen maddenin bugün bilinen en küçük ölçekteki önemli bir kesimini oluşturuyorlar.

Kuarkları Kim Buldu?

Pek çok başka bilimsel buluş gibi, kuarklar da toplu bir çalışmanın ürünüleri, ama bu adı öneren o sıralarda California Teknoloji Enstitüsü'nde çalışmakta olan Amerikalı fizikçi Murray Gell-Mann. Bu bilimadamı sanki onları bulmadan önce James Joyce'un bulmacamsı dizesi "Three Quarks for Mr. Mark" (Bay Mark için üç kuark)'daki "kuorks" sesini düşlemiş gibidir. Ancak şiirsel konuların ötesinde, kuarklar herşeyden önce, fizikçilerin nesnelere (parçacıkları) sınıflama ve kuramları birleştirme gereksinimini karşılıyordu.

1930'lu yıllarda, temel taneciklerin tanımı oldukça yalındı. Doğada bilinen dört etkileşmeden (elektromanyetik çekim, kütleçekimi, kuvvetli etkileşme, zayıf etkileşme) biri olan kuvvetli etkileşmeye duyarlı olduklarından, proton ve nötron gibi iki parçacık "hadron"lar olarak sınıflandırılıyorlardı. Öteki iki parçacık olan elektron ile onun nötrinosu bu etkileşmeye duyarsızdılar ve onlar da "lepton"lar ailesini oluşturuyorlardı. Kütleli bulunmayan "ışık parçacığı" olan foton da bunlara ekleniyordu. Fotonun yeri 1940'lı yıllarda, kuantum mekaniğinin elektromanyetiğe girmesi sonucunda, kuantum elektrodinamiğinin İngilizce adının baş harflerinden QED'nin (Quantum Electrodynamics) doğmasıyla açıklığa kavuştu. Daha sonra, fotonun elektromanyetik kuvvetin taşıyıcısı olduğu anlaşıldı. Bununla birlikte, 1947 yılından sonra ortalık daha da karışmaya başladı. Fizikçiler gerçekten, yeni hadronları önce kozmik ışınlar, sonra da parçacık hızlandırıcılarında keşfettiler. Ayrıca, bu parçacıklar kuvvetli etkileşmeye uyduğu bilinen parçacıklar için olan kurallara göre bozunmuyorlardı. Bun-

ları açıklama yolundaki ilk deneme 1950'li yıllarda hadronların yeni bir özelliğinin, "garipliğin" bulunmasıyla geldi. Bir bakıma elektrik yüküne benzeyen büyüklük olan "gariplik sayısı" yalnızca kimi (kuvvetli etkileşimce yönetilen) tepkimelerde korunan çok ilginç bir özellik sunuyordu. Bu gariplik sayısını taşıyan parçacıklara "gariplik" (strange) adı verildi.

Hadronlar ailesi öylesine büyüyordu ki, bunları sınıflama konusu başlıbaşına bir sorun oluyordu. 1961 yılında, M. Gell-Mann, grup matematiği kuramına dayalı bir çözüm önerdi. Kuantum mekaniğinde, parçacıklar arasındaki tepkimeler aslında, matematikteki birtakım gruplarla aynı simetri özelliklerini taşıyan bir matrisle tanımlanırlar. Grupları daha yalın ve artık daha küçük bir hale indirgenemez alt gruplara ayırma yöntemini (tamsayıları bölmede asal sayıların oynadığı rol gibi) kullanarak, değişik parçacık aileleri, biraraya geldiklerinde başka aileleri oluşturmaya yarayacak indirgenemez alt gruplar aracılığıyla tanımlanabilir. Bunlar M. Gell-Mann'ın kuarklar adını verdiği "simetri taşları".

Bu düşünce yalnızca bilinen tüm hadronları doğru şekilde sınıflamakla kalmadı, aynı zamanda “gariplik” değeri 3’e eşit olan bir parçacığın da var olması gerektiğini öngördü. 1963 yılında, garipliği 3 olan (omega) parçacığının bulunuşu Gell-Mann’in kuramının ilk deneysel doğrulanışı oldu. Ama bu aşamada kuarklar daha yalnızca matematiksel birer nesne durumundaydılar.

Kuarkları Kim Keşfetti?

Farklı bir araştırma alanında, Stanford Üniversitesi fizikçileri, 1960’lı yılların başlarında yüksek enerjili yeni bir hızlandırıcı kurdular ve adına Stanford Doğrusal Hızlandırıcısı’nın (Stanford Linear Accelerator) başharflerinden SLAC dediler. Üç kilometre uzunluğundaki bu aygıt protonu incelemeye yarıyordu. Daha önce yapılmış olan deneyler, bu parçacığın ölçülebilir bir boyu olduğunu ve hacmi de sıfır olmadığından, içinin (ondan daha küçük) başka bir şeyle doldurulması gerektiğini gösteriyordu. Henry Kendall, Jerome Friedmann ve Robert Taylor hidrojen (ya da nötronu incelemek üzere döteryum) hedefler üzerinde bir elektron demetini odaklamayı ve bu elektronların dünyanın en güçlü elektronik mikroskopunu çalıştırmak üzere gerekli olan enerjiyi taşımalarını öneriyorlardı. Bu deneylerin sonuçları somuttu. Nötronda olduğu gibi, protonun da içinde üç “sert taneçik” algılanıyordu ve kısa bir zaman

sonra bunlara “parton”lar adı verildi (çünkü bunlar proton ve nötron parçalarını oluşturuyordu, kendilerine de İngilizce’deki part (bölüm) sözcüğünden yola çıkarak bu ad verilmişti). Gell-Mann’in bu partonları kuarklar olarak tanımasına değin aradan yıllar geçti.

Kuarkların Özellikleri Nelerdir?

M. Gell-Mann’in şemasında proton ile nötron “gari” olmayan hadronların bir bölümünü meydana getiriyorlardı ve her ikisi de üç kuarkın yardımıyla “oluşmuşlardı”. Bununla birlikte, M. Gell-Mann kuarklarını parçacıklar gibi ele almaya, özellikle bunların elektriksel yükleri elektron ve protonun taşıdığı birim yükün bir kesri olacakları için karşı çıkıyordu. Ancak, bugün “gari” olmayan tüm hadronlar, adına yukarı “u” (up) ve aşağı “d” (down) denen ve elektrik yükleri sırasıyla $2/3$ ve $-1/3$ olan iki tür kuark ile oluşturulabiliyor. Bu durumda, proton için 2 yukarı (u) ve 1 aşağı (d), nötron içinse 2 aşağı (d) ve 1 yukarı (u) kuark gerekiyor. Gari olan parçacıkların tümü, adına gari “s” (strange) denen ve elektrik yükü $-1/3$ olan üçüncü bir tür kuarktan oluşuyorlar.

Ancak, Ω parçacığı sorun yaratıyordu. Eğer üç tane s kuarkından oluştuğu varsayılırsa onun tüm özellikleri açıklanabiliyordu, ama böyle tam anlamıyla özdeş parçacıkların bileşimi

“Pauli’nin dışarlama ilkesi” tarafından yasaklanıyordu. Bu yüzden, bilinmeyen ve dışarıdan da görülemeyen bir özelliğin onları ayırdetmeye olanak sağlayacağını varsaymak gerekiyordu. Bu yeni tür yük elektriksel yük gibi iki değil, üç duruma izin veriyor. “Renk yükü” terimini yaratan, üç temel renkle (mavi + kırmızı + sarı = beyaz = sıfır) kurulan benzerlik kendini kısa sürede kabul ettirdi, ancak bu yalnızca bir benzerlikti. Birtakım hadronların bozunmasını ve kuarkların da protonun içinde birleşmelerini sağlayan kuvvetli etkileşim, bu renk yüklerinin etkileşmesiyle açıklanıyor. İlk kez 1973 yılında bulunan bu kuvvetli etkileşim kuramı İngilizce’deki adı olan “quantum chromodynamics” in kısaltmasıyla QCD olarak bilinir.

Kaç Tane Kuark Var?

1960’lı yılların sonlarında, üç tür kuark, yani u, d ve s gözlenmişti. Fizikçiler zamanla, bunlardan ikisinin parton, yani etkileşmelere uğrayan gerçek parçacık olduklarını kabul etmek zorunda kaldılar. Kuarklar “elektromanyetik” ve elbette “kuvvetli etkileşme”nin yanısıra, ancak parçacık düzeyinde sezilebilen “zayıf etkileşme” gibi üçüncü bir türe de duyarlıydılar. Kuramcılar otuz yıllık bir çabanın ardından, etkileşmelerin fotonlar aracılığıyla yapıldığı kuantum elektrodinamiği modelinde, bir zayıf etkileşim kuramı oluşturdu. Burada, fotonun rolünü üçlü bir grup (W^+ , W^- ve Z^0) üstleniyor. Bu kuramın en önemli sonucu, bu iki kuvvetin, yani elektromanyetik ve zayıf etkileşmelerin ikisinin de aynı temel kuvvetin, yani elektrozayıf etkileşmenin iki farklı yanından başka bir şey olmadıklarıydı. Bu kuramı gözlemlerle birleştirmenin en güzel yolu, doğrudan görülemeyecek kadar ağır, ama varlığı kimi tepkimeleleri olanaksız kılacak dördüncü bir kuarkın daha varlığını öne sürmektir. Zayıf etkileşme için doğru kuramı bulmuş olma inancı öyle büyüktü ki, yeni bir kuark için olan bu önerme (postulate) kanıtın yerini alıyordu. Eğer daha ağır olsaydı, daha sonra, bir sonraki hızlandırıcıda gözlenecekti. Gerçekten de, 1974 yılında bulundu ve (biraz da büyücülük çağrışımıyla) “çekici” (charming) (c) kuark adı verildi. Bu c



CERN’de parçacık deneylerinin yapıldığı LEP (Büyük Elektron Pozitron) hızlandırıcısı, yerini 2006 yılında devreye girecek çok daha güçlü “Büyük Hadron Çarpıştırıcısı”na (LHC) bırakmaya hazırlanıyor.

kuarkı mucizevi bir şekilde, kuram ile deneyler arasındaki tüm çelişkileri çözüyordu. Ek bir kuarkın varlığı, yeni parçacıkların, örneğin bütün kuark türlerinin kendi aralarındaki bileşimlerinin varlığına da işaret ediyordu. Bunu izleyen yıllarda, c'nin çekiciliğiyle karşılaşması olası tüm parçacıklar saptandı.

Kuramın bir başka başarısıysa, leptonlar ile kuarklar arasında derin bir bağlantının elde edilmesi oldu. Leptonlar şimdi artık dörde ulaşmıştı, çünkü müon (elektronun yeğenlerinden biri) ve onunla bağlantılı olan nötrino sırasıyla 1936 ve 1962 yıllarında bulunmuşlardı. Dört lepton olduğu gibi, dört kuark da ikişerli iki grupta toplanıyordu. Böylece, gerçekten temel denebilecek ilk parçacık ailesi belirmiş oluyordu. Bunlar elektron, elektronun nötrinosu ve u (yukarı) ile d (aşağı) kuarklarıydı. İkinci ailedeyse, müon, müonun nötrinosu ve s (garip) ile c (çekici) kuarkları vardı. 1932 yılından beri ilk kez olarak, temel taneciklerin (Mendelyef'in kimyasal elementler için hazırladığına benzeyen) akıllı bir çizelgesi, üstelik bunların etkileşmelerine ilişkin eşsiz bir kuramla birlikte ortaya çıkıyordu.

1975 yılında, yeni bir leptonun, (tau) nun bulunması yeni sıçramalara yol açtı. Eğer leptonlarla kuarkları kümeleyen çizelge doğruysa, yeni birtakım kuarkları da beklemek gerekmektedir. Bu öngörü, bir kez daha doğru çıktı. Önce 1977, sonra da 1992 yıllarında, Chicago'daki Fermilab'den Léon Ledermann, özellikle kendisi için kurulan Tevatron hızlandırıcısında, giderek daha devasa aygıtlar aracılığıyla, önce "alt" kuarkı b'yi ("bottom"), sonra da listedeki sonuncu olan "üst" kuarkı t'yi (top) göstermeyi başardı. 1995 yılında, temel tanecikler çizelgesi bir kez daha bakışlımı (simetrik) hale gelmişti ve artık altı lepton için altı kuarktan oluşan üç aileyi içermektedir.

Liste tamamlanmış mıydı? Cenevre'deki LEP (Large Electron - Positron Collider - Elektron Pozitron Çarpıştırıcısı) adlı parçacık hızlandırıcısı önce buna kısmi bir yanıt verdi: yalnızca üç tür hafif nötrino vardır. Sonra gökbilimciler buna daha sağlam bir yanıt eklediler: süpernova gözlemlerinin ve evrendeki döteryum miktarı

ölçümlerinin sonuçları, yalnız ve yalnız üç tür nötrino bulunduğunu ortaya koyuyordu. Leptonlarla kuarklar arasındaki kesin ilişki böylece, evrenimizde yalnızca altı tür kuark bulunduğunu öne sürmekte. Şimdi harıl harıl bu sayının kökeni araştırılıyor...

Kuarklar Nerede Bulunurlar?

Proton ile nötronda bulunan u ve d ile önce kozmik parçacıklarda ortaya çıkan s kuarklarından başka, ancak fizikçilerin kullandığı parçacık hızlandırıcılarında kendini gösteren üç ağır kuark daha biliniyor. Peki bunlara başka bir yerde daha rastlanabilir mi? Bu soruya verilecek yanıt



"evet", çünkü kuarklar gerçekten birden fazla yerde bulunabilirler. Daha kesin konuşmak gerekirse, kuarklar her yerdedir, hatta boşlukta bile... Aslında gerçek bir fiziksel nesne olan kuantum boşluğu bu evrende bulunan tüm alanları ve olası tüm parçacıkları içerir, ayrıca bunların sürekli yaptıkları dalgalanmalar ölçülebilir. Kullanılan hızlandırıcılar, yüksek miktarda enerjiyi çok küçük bir hacimde yoğunlaştırmaya, böylece de zamanın büyük bölümünde kararsız davranan bir "parçacık-karşı parçacık" çiftinin oluşması için yeterli bir dalgalanmayı tetiklemeye olanak veren aygıtlar. Altıncı kuarkı bu "boşluk"tan çıkarmak için gerekli enerji korkunç büyüklükte oldu. $E=mc^2$ formülü kullanılarak, bu kuarkın külesinin bir kurşun atomununkine eşit olduğu hesaplanabilir.

Kuarklar Birbirleriyle Nasıl Etkileşiyorlar?

Fizikçiler, parçacıkların daha "parton" olarak bilindikleri zamanlarda yapılan ilk gözlemlerinden, bunların proton ya da nötron içinde özgür biçimde, kolaylıkla yer değiştirdikleri sonucuna ulaştılar. Proton, içindeki kuarkların çıkarılması için parçalanabilecek miydi? Ne yazık ki, siz kuarkları birbirlerinden ayırmaya çalıştıkça, tıpkı uzatılmaya çalışılan bir yayın buna daha büyük bir kuvvetle direnmesi gibi, kuarklar arasındaki etkileşim de artar.

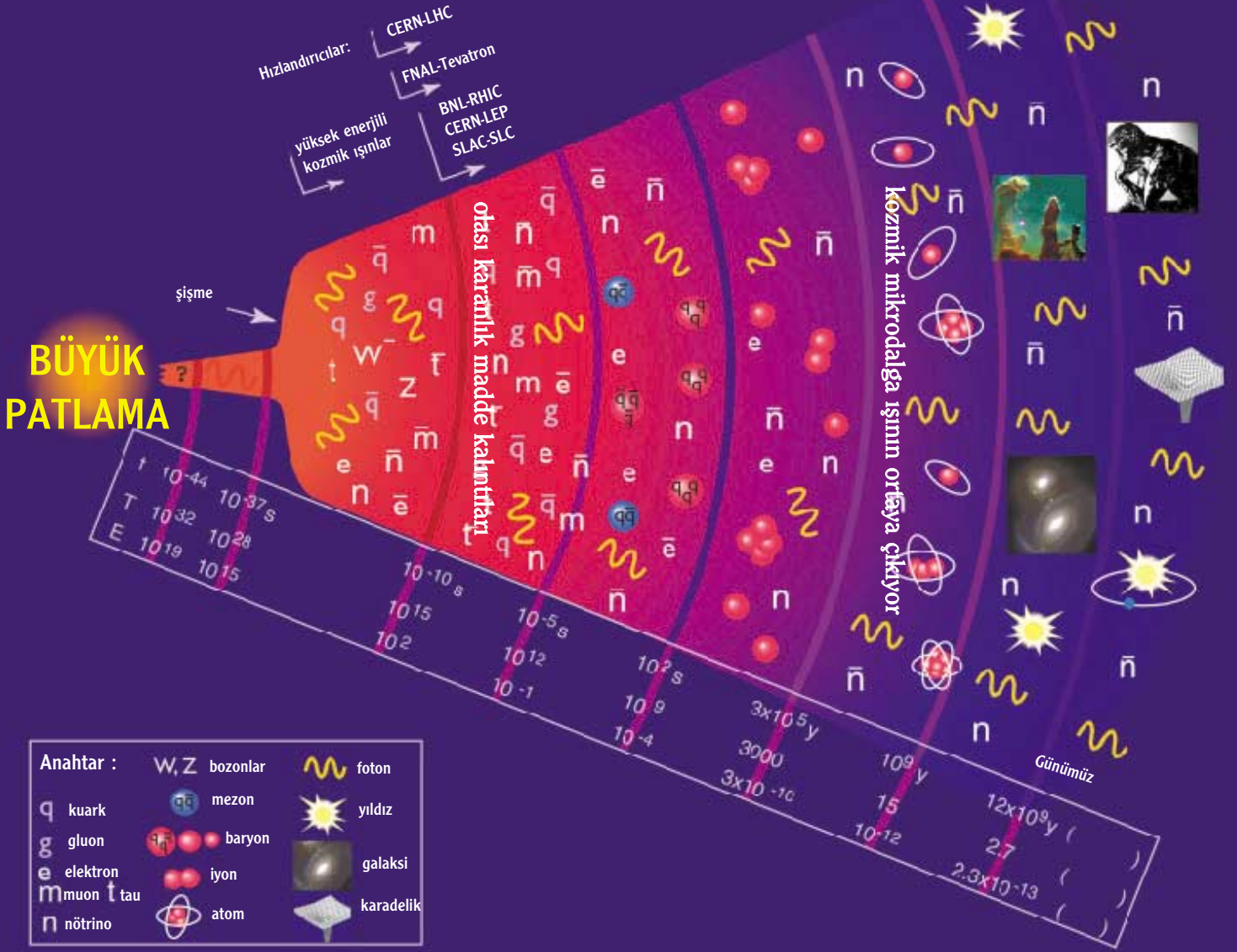
Renk yükünün etkileşmesi demek olan kuantum kromodinamiği kuramı, kuarkların adına "glüon" denen (ve elektromanyetik etkileşmedeki "foton"a karşılık gelen) parçacıkları değişik tokuş ederek etkileştiklerini açıklıyor. Ayrıca, QCD bir kuarkın kendini "çıplak" olarak göstermesini de yasaklıyor. Çünkü bu kurama göre, bir kuark çevresinden yalıtılamaz ve eğer buna zorlanırsa çevresi kuantum boşluğundan doğrudan toplanan onlarca parçacık tarafından kuşatılır. En azından bir "kuark-karşı kuark" çifti gereklidir, ama bu olgularda geçerli olan dinamikler zincir şeklinde birbirini izleyecek ve sonuçta başka çiftleri de oluşturacak olan dalgalanmaları başlatır. Stanford'da ve Hamburg'daki DESY'de 1970'li yıllarda yapılan ilk SPEAR deneylerindeki gözlemlerden beri, çok yüksek enerjili parçacıklar arasındaki çarpışmaların, sıkıca içiçe geçmiş, koni biçimli parçacık kümeleri yarattıkları biliniyor. Bu ise, en yalın durumlarda bile, sırt sırta atılan iki demet demektir. Adına uçaklardaki gibi "jet" denen bu demetler, boşluktan fırlatılan ve büyük bir hızla giden iki kuarkın bir gösterimi. Bu jetler, kuarkların dinamiğinin varlığının eşsiz birer görsel kanıtı.

Bundan başka, üç jetli olaylar da var: üçüncü jet, yalıtılmış halde tek başına gözlenemeyecek olan bir glüonun madde haline geçmesi.

Kuarklar Gerçekten Temel Tanecik mi?

Kimi kuramcılar kuarkların da birtakım alt bileşenlerden oluştuğu bir ma-

Evrenin Tarihi



Kuarklar Hep Var mıydı?

Evrenin başlangıcına ilişkin kuramlar (Büyük Patlama), astrofizikle parçacık fiziğinin yaklaşması sayesinde, giderek daha kesin bir hal almaya, hatta Büyük Patlama'nın da deneysel çalışmalara katkıda bulunduğu düşünülmeye başladı! Gerçekten de, evrenin ilk hali yalnızca tek tek parçacıklardan oluşuyordu ve hızlandırıcıda yapılan bir deney tam olarak, bu senaryonun bir bölümüne, sıcaklık (dolayısıyla da enerji) arttıkça daha gerilere

uzanan bir döneme karşılık gelir. Zamanın tersine döndürüldüğü bir filmde, evrenin enerji yoğunluğu önce molekülleri, sonra atomları, en son da atomların çekirdeklerini parçalayacak kadar artar. Yapılan hesaplar, bunun ötesinde, yani evrenin yaşı daha ancak 1 mikrosaniye (saniyenin milyonda biri) kadar, sıcaklığının, maddenin kuarkların ve gluonların kendilerini sınırlamadan, özgürce dolaşabildikleri haliyle uyumlu olduğunu gösteriyorlar. Kuarklarla gluonlardan oluşan ve adına plazma denen bu durum laboratuvarında ayrıntılı biçimde incelendi ve sonuçlar 2000 yılının ilkbaharında,

CERN'de (Centre Européen des Recherches Nucléaires) (Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi) çalışan gruplarca (belki de fazla hızlı bir şekilde) kamuoyuna duyuruldu. ABD'deki Brookhaven laboratuvarında 2000 yılı ilkbaharında çalışmaya başlayan RHIC hızlandırıcısı, kuarkların ve gluonların özgür oldukları, çok uzak geçmişte kalan bu anı yeniden canlandırmak için bayrağı devraldı. Peki, bu enerjilerin ötesinde kuarklara ne olur? Kuram bütün etkileşmelerin, hatta leptonlarla kuarkların da birleşerek, tek bir çeşit temel taneciğe izin vereceklerini öngörüyor.

tematiksel çerçeve kurmaya çalıştılar, ancak bu denemeler marjinal çabalar olmaktan öteye geçemedi. Fizikçilerin uğraşmaları daha çok, bütün kuvvetlerin tam anlamıyla birleştirilmesi üzerinde yoğunlaşmış durumda ve bu konuda en tutkulu kuramlar uzay-zaman yapısına saldırırlar. Böylece, kütleçekimini de genel yapıya katan süpersicim kuramları, temel "tanecikler" in (yaklaşık 10^{-30} metre uzunluğundaki) kuantum sicim-

ler olduğu ve incelenmiş topolojilerde gelişen çok boyutlu uzaylarda geçerli. İster leptonlar, isterse kuarklar olsun, bi-

	Leptonlar		Kuarklar	
	Elektron	Elektronun nötrinosu	Aşağı	Yukarı
Kütle	Müon	Müonun nötrinosu	Garip	Çekici
	Tau	Taunun nötrinosu	Alt	Üst
Elektrik Yükü	-1	0	-1/3	+2/3

zim gözlemediğimiz parçacıklar, yalnızca bu sicimlerin farklı titreşim kiplerinin gösterimlerinden başka bir şey değiller. Son derece soyut olan, bu "herşeyin kuramı" laboratuvarında denenmekten uzak, ama elektronun bulunuşundan yüz yıl kadar sonra, yeni girdiğimiz yüzyılda da fizikçilerin tutkularının güzel bir göstergesi durumunda.

Yrd. Doç. Dr. Ercüment Akat
Yeditepe Üniversitesi Fizik Bölümü