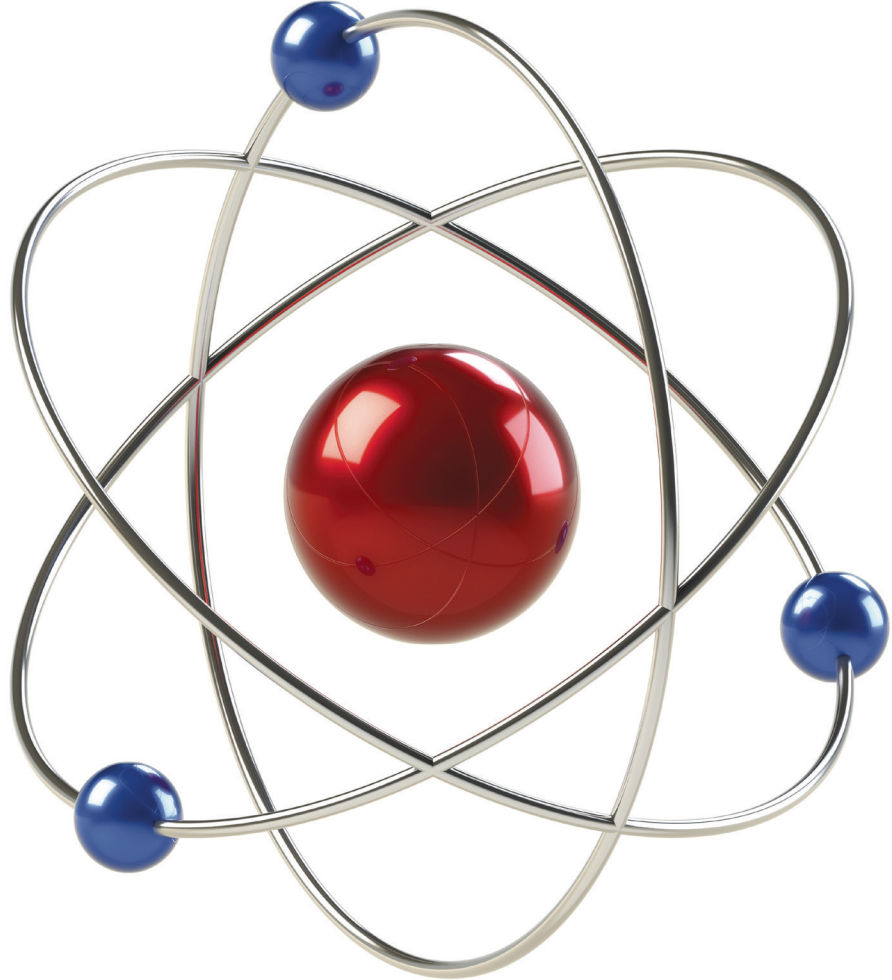


Var Olabilen Şeyler ve Var Olması Gereken Şeyler

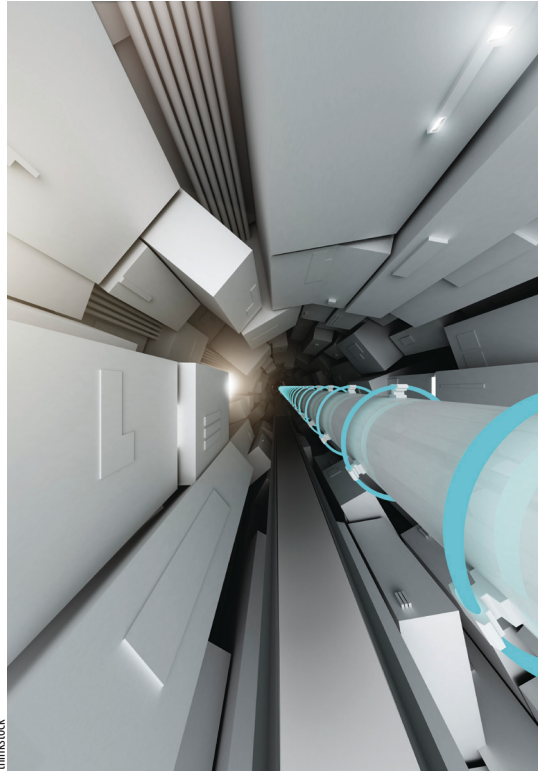
İki soru ile başlayalım: Evrende var olabilen şeyler nelerdir, var olması gereken şeyler nelerdir?
Hayli zor, biraz da kapalı olan bu soruları, daha açık ve anlamlı hale getirmeye çalışalım.



2012 yılında CERN’de Higgs parçacığının büyük bir ihtimalle bulunmuş olması, bilimle ilgili haberler arasında şüphesiz en önemli olandı. Bütün ömrü yaklaşık saniyenin trilyon çarpı trilyonda biri kadar olan, varlığını adeta sadece hissettiren, kütlesi hidrojen atomununun 130 katı kadar olan bu parçacığın niçin söylendiği kadar “değerli” olduğunu ilk başta anlamak çok da kolay olmayabilir. Anında var olup yok oluyor, yakalayıp ilaç yapmamız veya uzay gemileri için yakıt olarak kullanmamız mümkün değil! Higgs parçacığının önemini bu yazıda izah etmeye çalışacağız, fakat belki bütün bu Higgs parçacığı tartışmalarında gözden kaçan daha önemli bir nokta var: Kuramsal fizikçiler 1960’ların başından beri bu temel parçacığın var olması gerektiğini iddia ediyor. Böyle bir iddia nasıl mümkün olabilir? Şöyle düşünelim: Dört duvar arasında yaşamış, hiç dışarıya çıkmamış bir insanın kitaplarda görmediği ve hiç kimseden duymadığı halde, tamamen kendi mantıksal çıkarımlarıyla yeryüzünde balıkların var olması gerektiği sonucuna ulaşması ne kadar hayret verici olurdu? Kuramsal fizikçiler büyük ölçüde kâğıt kalem yardımıyla evrende nelerin var olabileceğini, temel parçacıklar söz konusu olunca da nelerin var olması gerektiğini söyleyebiliyor.

İlk sorumuza dönelim: Bu evrende var olabilen şeyler nelerdir? Evren atomaltı hatta çekirdekaltı mesafelerden çevremize, Güneş sistemine, galaksilere ve 15 milyar ışık yılı uzaklığa kadar her şeyi kapsadığından, böyle bir sorunun anlamlı olup olmadığını ve soruya cevap aramak için hangi bilim dallarını kullanmamız gerektiğini düşünmeliyiz. Kuramsal fizik bize çekirdekaltı mesafelerden görünür evrenin sınırlarına kadar geniş bir ölçekte düşünme ve hesap yapabilme zemini sağlıyor, dolayısıyla kuramsal fiziği kullanarak var olabilecek şeylerin sağlanması gereken asgari şartları bulabiliriz.

Şöyle basit bir örnek verebiliriz: Yeryüzünde sadece kibrit çöplerinden oluşan, içinde insanların da oturabileceği 10 katlı bir bina var olabilir mi? Olamaz! Binayı yapmaya çalışmadan bu sonuca nasıl ulaştık? Tabii ki tecrübemizle. Peki olamayacağını nasıl ispat edebiliriz? Newton’un hareket kanunları, mesela ikinci kanunu $F=ma$, kuvvet varsa hareketin nasıl olacağını gösterir. Bu yaygın olarak bilinir, ancak bu kanun en az hareket kadar önemli olan denge (hareketsizlik) durumu için de geçerlidir. Bir cismin üstüne etki eden kuvvetlerin toplamı sıfırsa, cismin ivmesi de sıfırdır. Kararlı yapılarda, mesela bir binada, bir köprüde toplam kuvvetler ve kuvvetlerin oluşturduğu toplam tork sıfır olmalıdır (denge konumundan hafif esnemeler buradaki ana tartışma-



thinkstock

mızı etkilemez). Dolayısıyla sadece Newton kanunlarını kullanarak muazzam bir çıkarımda bulunabiliriz: Üzerindeki toplam torkun ve toplam kuvvetin sıfır olmadığı hiç bir yapı uzun süre var olamaz. İnşaat mühendisleri bunu bildiklerinden var olabilecek yapıları kâğıt üzerinde planlayabilir.

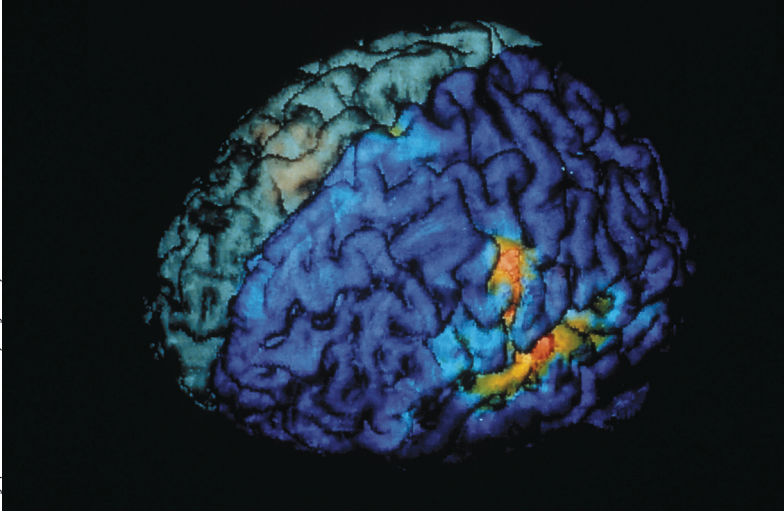
Kara delikte dağ olamaz

İkinci örneğimizi verelim: Dünya dâhil, gökyüzündeki bütün büyük cisimler neden yuvarlaktır ve üzerlerinde çok büyük dağlar ve çukurlar (mesela 1000 km’lik) yoktur? Yarıçapı yaklaşık 6500 km olan Dünya’nın üzerindeki en derin çukur ile en yüksek dağ arasındaki mesafenin 20 km kadar olduğunu hatırlarsak, Dünya’nın yüzeyinin pürüzsüz olduğunu söyleyebiliriz! Yuvarlaklığın ve pürüzsüzlüğün sebebi yerçekimi kuvvetidir. Büyük gök cisimleri kendi çekimleri altında yuvarlak bir şekil alır, gök cismi ne kadar büyüksün çukurları ve dağları da o kadar az olur. Örneğin yine kuramsal fiziği kullanarak şunu rahatlıkla söyleyebiliriz: Kütleleri Güneş’ten daha büyük yıldızlar nötron yıldızlarına, daha da büyük yıldızlar kara deliklere dönüşünce üzerlerinde en küçük bir çıkıntı ve girinti kalmaz. Yani bir kara delikte dağ olamaz. Bu iki örnekten çıkaracağımız gereken sonuç sudur: Fizik maddenin hareketinin yanı sıra çok daha ilginç bir soru ile de ilgilendirir, o da ne tür nesnelerin var olabileceği sorusudur.

Klasik fizikte atoma yer yok

Gelelim esas konumuz olan temel parçacıklar fiziğine. 20. yüzyılın başında klasik Newton fiziği çok küçük olayları ve varlıkları (mesela atomun varlığını) açıklamakta yetersiz kalınca, ilkeleri tamamen farklı olan kuantum fiziği ortaya atılmıştır. Önceki örnekler çerçevesinde düşündüğümüzde klasik fiziğe göre atom var olamaz, dolayısıyla evrende hiç bir yapı var olamaz. Etrafımızda gördüğümüz cisimlerin hareketlerini son derece doğru ve hassas bir şekilde hesaplamamıza yardımcı olan klasik fizik, bu cisimlerin varlığını açıklayamaz.

Kuantum fiziği çok önemli bir paradigma değişimi önermiştir. Mikroskobik cisimlerin hızları ve buldukları yer aynı anda bilinemez. Newton fiziğine göre ise bir cismin zaman içinde nasıl hareket edeceğini önceden bilmek için, o cismin herhangi bir andaki hızını ve yerini bilmek gerekir. Dolayısıyla Newton denklemi mikroskobik ölçekteki cisimler için geçerli değildir. Newton denkleminin yerini hız ve yer bilgilerini aynı anda kullanmayan Schrödinger'in dalga denklemi alır. Bu denklem, atom ve molekül ölçeğindeki varlıkların bulunabileceği halleri hesap etmek için kullandığımız temel denklemdir. Daha da önemlisi, bir atomun kararlı bir şekilde dağılmadan nasıl var olabildiğini kuantum fiziği ile anlıyoruz.



Steegenphoto / Peter Arnold / Getty Images Türkiye

20. yüzyılın başında fizikteki diğer büyük paradigma değişimi, klasik fiziğin yüksek hızlarda doğru sonuçlar vermediğinin anlaşılması üzerine, özel görelilik kuramının ortaya atılması oldu. Özel görelilik kuramı evrendeki aşılamayacak hız sınırının ışık hızı (yaklaşık 300 bin km/sn) olduğunu söyler. Klasik fizikteki Galileo-Newton görelilik kuramı ise böyle bir üst sınır olmadığını kabul eder. Çok yük-

sek hızlarda bir hız sınırının olması ya da olmaması “küçük” bir tartışma gibi görünse de, sonuçları çok çarpıcıdır. Örneğin klasik fizikte bütün evrende aynı hızla akan bir zamandan söz edilebilir, ama deneylerle uyumlu özel görelilik kuramına göre farklı hızlarda giden cisimler için zaman farklı akar, yani evrende tek bir saat olamaz.

Klasik fizikte gerçekleşen bu iki paradigma değişimi -biri küçük ölçekte diğeri yüksek hızda- birbirlerini nasıl etkiler? Daha açık olarak şöyle soralım: En basit atom olan hidrojen atomunu anlamak için kuantum fiziğini kullanıyoruz, ama özel göreliliğin de bu ölçekte hiç bir katkısı, etkisi yok mu? Kaba bir yaklaşımla, hidrojen atomunda elektronun sabit protonun etrafında 2000 km/sn gibi ışığa göre hayli düşük bir hızda döndüğünü düşünürsek, özel görelilik kuramının atomu anlamak için gerekli olmadığı kanısına varabiliriz. Fakat bu doğru değildir. Atomlarla ilgili bildiklerimizin önemli bir kısmı, atom spektrumlarının, yani atomun yaydığı ışık tayfının detaylı olarak incelenmesiyle elde edilmiştir. Atomlar değişik dış etkenlerden dolayı geçici olarak kararsız duruma geçer. Örneğin ince bir kitap bir masanın üstüne, ince kenarı üzerinde duracak şekilde koyulduğunda bir süre sonra masa hafifçe sallandığında devrilerek “normal” yani “kararlı” haline geri dönecektir. Atomlar da geçici kararsız hallerinden, en düşük enerjili normal hallerine geri döner ve bu esnada (gözle görülebilen ya da görülemeyen) ışık yayarlar. Sadece kuantum fiziği ile bu ışıma tam olarak açıklanamaz. Atomun herhangi bir şekilde ışınmasını açıklamak için kuantum fiziği ve özel görelilik kuramlarının birleştirilmesi ve her iki kuramı doğru olarak içeren ortak bir kuram elde edilmesi gerekiyor.

Kuantum fiziği + özel görelilik kuramı = Var olabilen temel parçacıklar

Bu konuda ilk çalışmaları 1928'de P. A. M. Dirac isimli fizikçi yapmış ve şu sonucu elde etmiştir: Özel görelilik kuramı ile kuantum fiziğinin birleşebilmesi için, elektronla aynı kütleye sahip ama elektrik yükü zıt olan başka bir parçacığın var olması gerekir. Anti-parçacık (yani zıt-parçacık) dediğimiz bu temel parçacık Dirac'ın makalelerinde kendine yer bulduktan bir kaç yıl sonra C. D. Anderson'un laboratuvarında 1932'de bulundu. Bugün pozitron (yani pozitif yüklü elektron) dediğimiz bu temel parçacık bazı hastanelerde rutin olarak “üretiliyor” ve kafatasına zarar vermeden beyinde tümör teşhisi yapabilmek için PET tarama teknolojisinin esasını oluşturuyor.

Var olması gerektiği kuramsal fizikçiler tarafından yine çok önceden bilinen anti-proton da (eksi elektrik yüklü proton) 1954'te bir parçacık hızlandırıcıda bulundu (yani hareket enerjisi maddeye dönüştürülerek üretildi). Günümüzde anti-proton ile pozitron aynı ortamda üretilip birbirleri ile etkileştiriliyor ve anti-hidrojen atomu üretiliyor. Fizik açısından anti-hidrojen atomu sadece var olabilen değil var olması gereken bir anti-madde. Anti-hidrojen atomu yeterli teknoloji olduğunda bile oluşturulamazdı, temel fizik kuramlarımızda tamiri belki de mümkün olmayan çok ciddi bir delik oluşur, özel görelilik ile kuantum fiziği üzerine inşa edilen kuantum elektrodinamik kuramını sorgulamaya başlardık.

Spin ve kütle: Temel parçacıkların etiketleri

Temel parçacıklardan hangileri bu evrende var olabilir ve hangilerinin var olması gerekli? Özel görelilik kuramı ve kuantum fiziği birlikte bir sisteme uygulandığında karşımıza gerçekten muazzam bir yapı çıkıyor. Öncelikle bu iki kuram bize var olabilecek temel parçacıkların ne tür özelliklere sahip olabileceğini söylüyor. Temel parçacıklar noktasal olmak zorunda, yani bir hacimleri olamaz. Bu gerçekten önemli bir sonuç, çünkü içyapısı olmayan bir varlıktan bahsediyoruz. Diğer bir sonuç da temel parçacıkların kimliğini belirleyen, etkileşimler sonucunda değişmeyen bazı özelliklerinin olması gerektiği. Bu özelliklerden en önemli ikisi parçacığın kütlesi ve spinidir. Kütleli bu aşamada bildiğimiz anlamda, klasik olarak anlamamız mümkün (birazdan bu konuya tekrar döneceğiz ve bu klasik anlamın çok da doğru olmadığını göreceğiz).

Spin dönme değildir!

Spin klasik bir karşılığı olmayan bir büyüklüktür. Kelime anlamı itibari ile parçacığın kendi eksenini etrafında dönmesini çağırırsa da bu doğru değildir. Çünkü parçacığın eksen yoktur, hacmi yoktur ve dönecek bir materyal yoktur. Peki spinin ne olduğunu nasıl anlayabiliriz? Spin bir parçacığın belki de en önemli özelliğidir, diğer parçacıklarla nasıl etkileşeceğini büyük ölçüde bu özelliği belirler. Özel görelilik ve kuantum fiziğinin birlikte uygulanması, parçacıkları spin ve kütle ile etiketlememiz gerektiğini söylemenin de ötesinde, bu etiketlerin alabileceği değerleri de öğretir. Örneğin parçacığın kütlesi pozitif ya da sıfır olabilir. Parçacığın

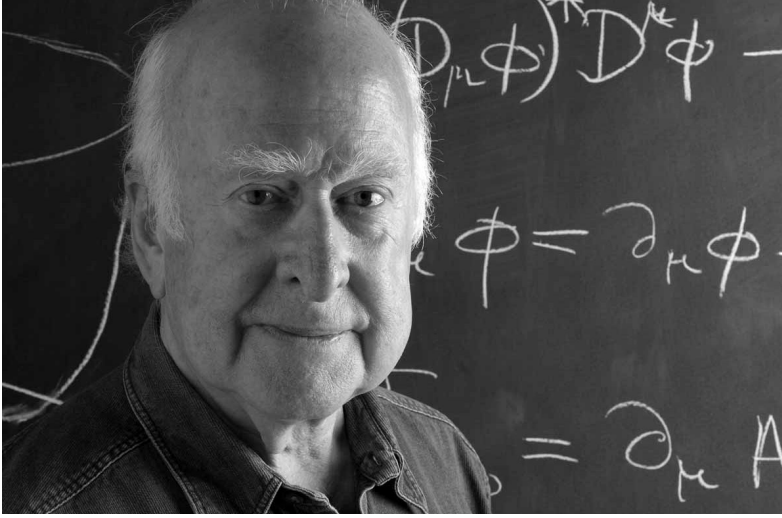


Paul A.M. Dirac

spin etiketi ise $0, \frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}, 2, \dots$ şeklinde, ya tam sayı ya da yarım sayı değerler alabilir. (Spin etiketinin bir birimi de var, ama buradaki tartışma açısından bu çok önemli değil.) Özel görelilik ve kuantum fiziğine göre kütlesi pozitif ve spin değeri de örneğin 7,1 olan bir parçacık var olamaz. Nitekim şu ana kadar bulunan bütün temel parçacıkların spin değerleri ya $\frac{1}{2}$ ya da 1'dir. Mesela elektronun ve kuarkların spinini $\frac{1}{2}$, fotonun spinini 1'dir. İlginç olan başka bir nokta da proton, nötron gibi hacmi olan dolayısıyla temel olmayan parçacıkların ve atomların temel parçacıklardan oluştukları için spinlerinin yine ya yarım ya da tam değerler olmasıdır. Nitekim atomların spektrumlarını anlarken, elektronların ve atom çekirdeğinin spinini olduğunu göz önünde bulundurmamız gerekir.

Problemin belki daha da ilginç bir yanı var: Kuantum fiziği ile özel görelilik kuramlarını birleştirerek elde ettiğimiz kuram (veya kuramlar) hayal edebileceğimiz en yüksek enerjilerde veya hayal edebileceğimiz en küçük ölçeklerde de geçerli olacaksa, evrende sadece spinini $0, \frac{1}{2}, 1$ ve $\frac{3}{2}$ olan temel parçacıklar var olabilir. Yüksek spinli başka parçacıkların anlamlı, yani her türlü enerji düzeyinde geçerli olan kuramlarını oluşturmak matematiksel olarak mümkün değil. Bu, temel parçacık fiziğinin ulaşılabildiği gerçekten etkileyici bir sonuç.

Var olabilen temel parçacıklarla ilgili elde ettiğimiz bilgiye yeniden bakalım: Evrendeki bütün temel parçacıklar sadece birkaç etiket taşıyor. Mesela evrendeki bütün elektronlar, enerjileri hariç aynı; biraz büyük ya da biraz küçük bir elektrondan bahsedilemez. Ayrıca sadece 0, $1/2$, 1, $3/2$ spin değerine sahip temel parçacıklar var olabiliyor, diğer bütün kompozit parçacıklar ve atomlar bu temel parçacıklardan oluşmak zorunda. Bu noktada bir detay var: Henüz spin değeri $3/2$ olan bir temel parçacık bulunmadı. Kuramsal olarak var olabilen bu parçacığın, gerçekten var olması gerektiğine dair çok kuvvetli bir kanıt yok. Diğer taraftan 2012 yılında Higgs parçacığı bulunana kadar spin değeri 0 olan bir temel parçacık da gözlemlenmemişti. Ancak Higgs parçacığının var olması gerektiği yönünde çok kuvvetli savlar vardı. Bunu anlamak için bir adım geriye gidelim ve parçacıkların kütle etiketini anlamaya çalışalım.



Peter W. Higgs

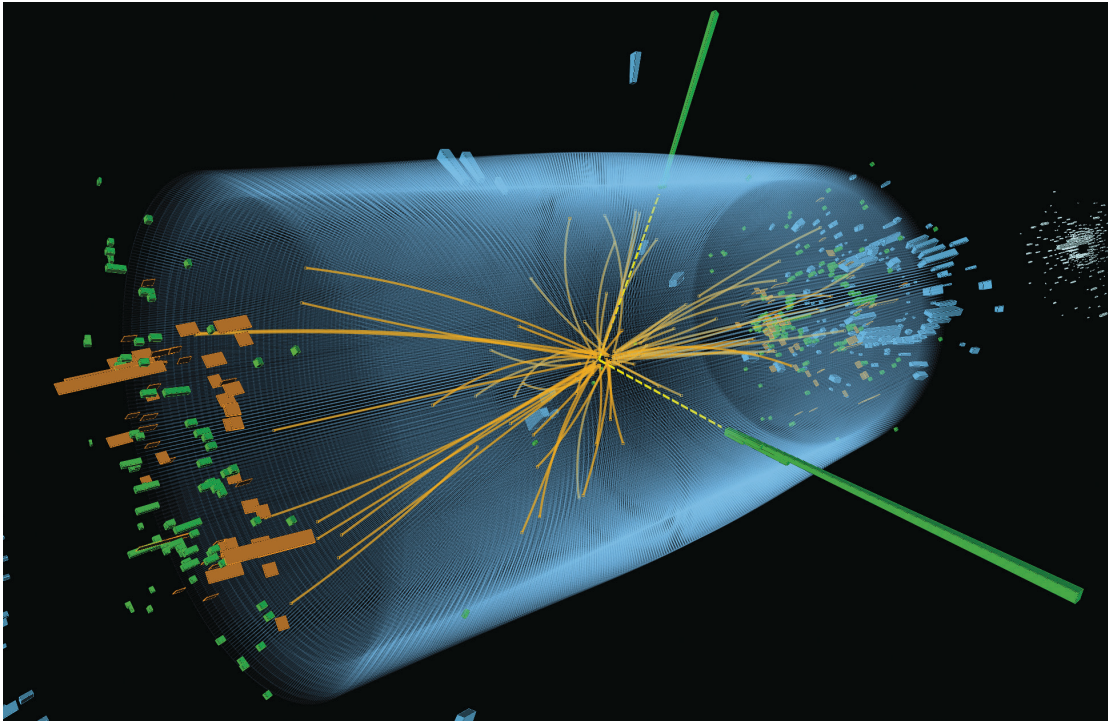
Kütle etkileşimdir!

Klasik anlamda kütle, üzerine kuvvet uygulanan bir parçacığın harekete, ivmelenmeye karşı gösterdiği direnç olarak anlaşılabilir. Aynı kuvvetin uygulandığı iki ayrı cismin zamana göre yol değişimlerine bakarak kütlelerinin birbirlerine oranını söyleyebiliriz. Mikroskobik dünyada Newton'un kuramının geçerli olmadığını bildiğimize göre, kütle kavramını nasıl anlayabiliriz? Ayrıca elektron gibi hacimsiz bir varlığın kütle özelliği tam olarak ne anlama gelir? Bu soruların cevabı, proton ile birlikte atom çekirdeğini oluşturan nötronun serbest haldeyken karsız olmasında, yani kimliğini koruyamamasında gizli. Nötron serbest haldeyken (yani çekirdeğin dışındayken) yaklaşık 14 dakikalık ortalama ömrü sonunda proton, elektron ve anti-nötrino parçacıklara

rına dönüşür. Bu dönüşümün kuantum ve görelilik fiziği ile uyumlu kuramı Glashow, Weinberg ve Abdus Salam isimli fizikçiler tarafından 1960'ların sonunda bulundu. Kuram evrende üç tane, o güne kadar hiç gözlemlenmemiş, kısa süre yaşayan parçacık var olması gerektiğini söyler. Nitekim bu parçacıklar (W^+ , W^- ve Z bozonları) 1983'te kinetik enerjinin maddeye dönüştürüldüğü CERN'deki hızlandırıcıda üretildi. Kuram neredeyse mükemmel çalışıyor, fakat çok temel bir eksiği var: Bozonlar kütleleri hidrojen atomunun kütlelerinin yaklaşık 80-90 katı kadar olan noktasal temel parçacıklar. Oysa kuramın istediğimiz kadar yüksek enerji düzeylerinde geçerli ve tutarlı olabilmesi için, bu bozonların aynı foton (ışık) gibi kütsüz olması gerekir. Kuramı sadece düşük enerjilerde geçerli olan bir kuram olmaktan kurtarmanın tek yolu 1964'te ortaya atılan ve Higgs mekanizması diye bilinen mekanizmayı kullanmak.

Higgs mekanizmasına göre bir temel parçacığın kütle diye nitelendirdiğimiz özelliği, o parçacıkla evrenin tamamını dolduran bir alanın etkileşiminin kaba bir tasviridir. Yani "kütle etkileşimdir". Daha iyi anlaşılması için şöyle bir örnek de verebiliriz: Siz bu yazıyı okurken içinde bulunduğunuz odanın sıcaklığı 25°C olsun. Bu 25°C neyi ifade ediyor? Odanın içindeki havanın moleküllerinin hızları çok farklıdır, ama ortalama hızları 500 m/sn civarındadır. Moleküller size ortalama olarak bu hızla çarpar. Bütün bu çarpmalar son derece karışıktır, dolayısıyla hava ile etkileşiminizi tek tek çarpmaların verdiği etkiyi inceleyerek anlamamız çok zor ve gereksizdir. Bu yüzden, bu çarpmaları unutup belli bir ortalama alıp odanın havası ile etkileşiminizi tek bir parametreye göre, yani sıcaklık cinsinden ifade ediyoruz. Bu anlamda, yukarıdaki ifadeye paralel olarak "sıcaklık etkileşimdir" diyebiliriz.

Sonuç olarak temel parçacıklar kütlelerini evreni dolduran Higgs alanı ile etkileşerek elde ediyor ve bu etkileşim her an devam ediyor. Proton gibi temel olmayan, parçalardan oluşan parçacıklar için durum böyle değil. Protonun içindeki kuarklar kütlelerini Higgs alanı ile etkileşerek alıyor, ancak protonu oluşturan 3 kuarkın toplam kütleleri protonun kütlelerinin sadece % 1'i kadar. Protonun kütlelerinin önemli bir kısmı bu kuarkların kinetik enerjilerinden ve bağlanma enerjilerinden geliyor. (Kuarklar arasındaki bağlanmayı gluon isimli ve kütsüz 8 temel parçacık sağlıyor) Atomun diğer önemli parçası olan elektron, kütlelerini Higgs alanı ile etkileşerek elde ediyor. Elektron kütsüz olsaydı ne atom ne de gözle görünür herhangi bir madde oluşurdu.



Prof. Dr. Bayram Tekin lisans eğitimini ODTÜ Fizik Bölümü'nde, doktora eğitimini Minnesota Üniversitesi'nde yaptı. Doktora sonrası araştırmacı olarak Oxford ve Brandeis üniversitelerinde toplam 4 yıl kütleçekimi ve kuantum alan kuramları üzerine çalıştı. Halen ODTÜ Fizik Bölümü'nde araştırmalarına ve ders vermeye devam ediyor. TÜBİTAK Teşvik ve TÜBA GEBİP ödüllerini almış olan Tekin'in 60 civarında bilimsel yayını var.

Kütle hikâyemiz neredeyse mutlu bir şekilde sonlanmak üzere, fakat hâlâ çok önemli bir eksikliğimiz var. Var olduğunu kabul ettiğimiz, evreni dolduran bu Higgs alanının gerçekten var olduğunu nasıl gösterebiliriz? Kuantum fiziği ile görelilik kuramlarını birleştiren ve Higgs alanını da içeren kuram, parçacıklar yeterince yüksek enerjilerde çarpıştırıldığında, bir anlamda Higgs alanını oluşturan Higgs parçacığının kısa süreliğine ortaya çıkacağını öngörüyor. Zıt yönlerde, neredeyse ışık hızına yakın hızlarda giden proton demetlerinin birbirlerine çarpması sonucunda kaç Higgs parçacığı oluşacağı kuantum fiziği çerçevesinde yapılan ihtimal hesapları ile bulunuyor. Nitekim yazının başında belirttiğimiz gibi, kütlesi hidrojen atomunun yaklaşık 130 katı olan Higgs parçacığı 2012'de, çok büyük bir ihtimalle bu çarpışmalar sonucunda bulundu. 1964'ten beri bilimsel makalelerde, ders kitaplarında var olan ve kurama göre var olması gereken bir parçacık sonunda ortaya çıktı! Higgs parçacığı spini 0 olan ve kendi kendisi ile etkileşerek kendisine kütle kazandıran (yani çok ekonomik) bir parçacık ve diğer tüm parçacıklardan farklı. Kendisi anlık olarak var olup yok olsa da, varlığı atomun var olabilmesi için gerekli.

Evreni anladık mı?

Higgs parçacığının bulunması ile evrende var olabilen ve var olması gereken temel parçacıkların tamamı bulunmuş oldu. Fakat yine de "her şey

anlaşıldı, artık geriye araştırmalar açısından detaylar kaldı" diyemeyiz. Evrenle ilgili bildiklerimiz henüz atom çekirdeğini doldurmuyor. Örneğin "Higgs parçacığı temel parçacıklarla niye farklı farklı etkileşip onlara farklı kütleler kazandırıyor" gibi soruları hangi çerçevede ele alıp nasıl cevaplayacağımızı bilmiyoruz. Protonun var olduğunu biliyoruz, fakat var olması gerektiğini henüz kuramdan çıkarabilmiş değiliz. Çok ilginç bir durumdayız: Elimizde bütün testleri başarı ile geçmiş bir kuram olmasına rağmen, konu ile ilgili hesap tekniklerimiz yeterince gelişmediği için kuramın öngördüğü bütün sonuçları -protonun varlığı gibi- çıkarabilmiş değiliz. Protonu bir gün tam olarak anlayabilirsek bile, evrendeki madde ve enerjinin sadece % 4'ünü anlamış olacağız, % 96'lık kısım için henüz kabul görmüş bir kuram yok. Bu problemlerin yanı sıra çok daha temel bir problem var: Henüz kuantum fiziği ve Einstein'ın genel görelilik kuramı ile uyumlu bir kuram bulabilmiş değiliz. Dolayısıyla zaman nedir, evrenin başlangıcı nasıl olmuştur, evrenin sonu ne olacaktır, kara deliklerin sonları ne olacaktır bilemiyoruz. Ama fizik açısından önümüzdeki yılların geçmiş yıllara göre daha heyecanlı olacağını düşünmek için yeterli ipucu var.

Kaynaklar

Hooft, G. t, *Maddenin Son Yapıtaşları*, TÜBİTAK Popüler Bilim Kitapları, 2000.
Greene, B., *Evrenin Zarafeti*, TÜBİTAK Popüler Bilim Kitapları, 2008.

Tekin, B., "Parçacık Fizikinde Kısa bir Gezinti" <http://www.physics.metu.edu.tr/~btekin/parcacik.pdf>